



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาลักษณะเฉพาะของชั้นน้ำบาดาลเพื่อทำนายค่าการทรุดตัวในอนาคตของ
กรุงเทพฯและปริมณฑลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

A Study of Characteristic of Aquifer for Prediction of Subsidence on Bangkok
and Vicinity by Mathematical Model

نامผู้วิจัย นายสุธรรม โรจนเมฆา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์วรากร ไม้เรียง, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสีทิจิ มทวืทยาลัยเกษตรศาสตรั

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาลักษณะเฉพาะของชั้นน้ำบาดาลเพื่อทำนายค่าการทรุดตัวในอนาคตของ
กรุงเทพฯและปริมณฑลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

A Study of Characteristic of Aquifer for Prediction of Subsidence on
Bangkok and Vicinity by Mathematical Model

โดย

นายสุธรรม โรจนเมฆา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
พ.ศ. 2557

สุธรรม โรจนเมฆา 2557: การศึกษาลักษณะเฉพาะของชั้นน้ำบาดาลเพื่อทำนายค่าการทรุดตัวใน
อนาคตของกรุงเทพฯและปริมณฑลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎี
บัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ปรธานกรรมการที่ปรึกษา:
รองศาสตราจารย์วรากร ไผ่เรียง, Ph.D. 210 หน้า

การทรุดตัวของชั้นดินเป็นพื้นที่บริเวณกว้างในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล สาเหตุหลักเกิดจากการ
สูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้เป็นจำนวนมากเนื่องด้วยความต้องการใช้น้ำเพิ่มสูงขึ้นตามการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ
และการขยายตัวของชุมชน ทำให้เกิดผลกระทบทั้งทางด้านเศรษฐกิจ ทางด้านวิศวกรรมปฐพีและโครงสร้างใต้
ดินทางด้านสิ่งแวดล้อม และอื่น ๆ เช่น เกิดน้ำท่วมขังเป็นบริเวณกว้าง เกิดภาวะน้ำทะเลแทรกซึมเข้ามาในแหล่ง
น้ำจืด เกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้างอาคาร เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยแรงกระทำต่อโครงสร้างใต้ดิน เป็น
ต้น การศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลนี้ เพื่อควบคุม
วิกฤติการณ์การทรุดตัวของชั้นดินและลดผลกระทบต่าง ๆ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ค่า
การทรุดตัวของชั้นดินด้วยวิธี Finite Difference โดยมีพื้นที่ศึกษาครอบคลุม 7 จังหวัดประกอบด้วย กรุงเทพฯ
นนทบุรี ปทุมธานี สมุทรสาคร สมุทรปราการ นครปฐม และอยุธยา มีจำนวนสถานีบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา
ทั้งหมด 110 สถานี

การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ได้จากการคำนวณและจากการตรวจวัดให้ผลที่มีความสอดคล้องกัน
มากโดยมีค่า R^2 ของความสัมพันธ์ของค่าการทรุดตัวจากการคำนวณและจากการตรวจวัดเท่ากับ 0.998 และยัง
พบว่าพฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลโดยในงานวิจัยนี้เรียก
ความสัมพันธ์นี้ว่า“CADS” ซึ่งสามารถนำไปใช้พยากรณ์พฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินที่จะเกิดขึ้นต่อไปใน
อนาคตของพื้นที่ต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ส่วนกลับของค่าความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ CADS สามารถใช้
เป็นค่าความไวต่อการทรุดตัวของชั้นดินเมื่อระดับน้ำบาดาลลดลง 1 m ของแต่ละพื้นที่และแต่ละชั้นน้ำโดย
งานวิจัยนี้จะแทนด้วย i_s จากผลการวิจัยพบว่า บริเวณพื้นที่ อ.บางพลี จะมีค่า i_s สูงสุดประมาณ 0.5 cm/m/year
เมื่อระดับน้ำในชั้นน้ำพระประแดงลดลงซึ่งจะเท่ากับค่า i_s ของบริเวณพื้นที่ อ.เมืองสมุทรสาคร เมื่อระดับน้ำใน
ชั้นน้ำนครหลวงลดลง ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการบริหารจัดการและควบคุมปริมาณการใช้น้ำบาดาลของแต่ละ
พื้นที่ได้ ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในอนาคตเป็นระยะเวลา 20 ปี จากการสมมติสถานการณ์ของการสูบน้ำ
บาดาล 5 กรณี พบว่า กรณีที่ 1 และกรณีที่ 2.5 ในปีพ.ศ. 2570 จะมีค่าการทรุดตัวสะสมสูงสุดเท่ากับ 37 cm ที่
บริเวณพื้นที่ทางตอนเหนือของ อ.บางพลี และกรณีที่ 4 ในปีพ.ศ. 2570 แสดงค่าการพองตัวสะสมสูงสุดเท่ากับ
74 cm ที่บริเวณพื้นที่เขตมีนบุรี การหาปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่ยอมได้โดยไม่ทำให้เกิดการทรุดตัวเกินค่าที่
กำหนด 1 cm/ปี พบว่า หากยอมให้มีการสูบน้ำบาดาลในกรณีที่ 2.3 ผลการทรุดตัวของพื้นที่ส่วนใหญ่จะไม่เกิน
ค่าที่กำหนดยกเว้นบริเวณพื้นที่เขตดอนเมืองซึ่งควรมีการควบคุมปริมาณการสูบน้ำบาดาลให้ไม่เกินกรณีที่ 2.2
และบริเวณพื้นที่ทางตอนเหนือของ อ.บางพลีติดกับเขตลาดกระบังและเขตประเวศควรมีมาตรการควบคุมห้าม
ไม่ให้มีการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่เหล่านี้และจะต้องมีมาตรการอื่น ๆ ช่วยเสริม เช่น ให้มีการเติมน้ำลงในชั้นน้ำ
บาดาลเพื่อเพิ่มระดับน้ำบาดาลให้สูงขึ้นจึงจะทำให้พื้นที่บริเวณนี้มีอัตราการทรุดตัวน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

Sutham Rotchanameka 2014: A Study of Characteristic of Aquifer for Prediction of Subsidence on Bangkok and Vicinity by Mathematical Model. Doctor of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Warakorn Mairaing, Ph.D. 210 pages.

Land subsidence problems in Bangkok and its vicinity have been occurred mostly by extensive of groundwater withdrawal. The increasing in water demand was a consequence of rapid economic development and the expansion of domestic purposes. The problems caused extensive damage to the economic and environment as a whole such as flooding areas, intrusion of salt water, cracking of structures, stress changing in underground structures etc. The behavior of soil settlement due to groundwater changing is studied in this study for verification of land subsidence crisis and minimize those impacts. By using finite difference method to analyses the settlement, the mathematical model is produced. The study area cover in 7 provinces: Bangkok, Nonthaburi, PathumThani, SamutSakhon, SamutPrakan, NakhonPathom and Ayutthaya which have all 110 well stations.

The comparison of calculated and measured settlement showed very good agreement which had least square regression coefficient of 0.998. The plotting of soil settlement related to the groundwater changing which was called “CADS”. This parameter can also be used to predict the behavior of soil settlement in any areas as well. The inverse slope of CADS can be used as the settlement sensitivity index (i_s) which is the settlement in any area per 1 m. of groundwater decrease in each aquifer. It was found that the maximum i_s of PD and NL aquifers are 0.5 cm/m/year at Amphoe Bang Pli, Samut Prakan and Amphoe Mueang Samut Sakhon respectively. This is useful for controlling of groundwater pumping in each area. The prediction of land subsidence for 5 water pumping scenarios was done for the next 20 years. It showed that Case 1 and Case 2.5 have the maximum cumulative settlement in 2027 about 37 cm. at the northern part area of Amphoe Bang Pli. And Case 4 showed the maximum cumulative swelling in 2027 about 74 cm at Min Buri, Bangkok. The result of finding the permissible yield of groundwater pumping which produce the settlement not exceed 1 cm/year, found that Case 2.3 show that settlement rate in most of the area. But some areas have the settlement rate more than 1 cm/year. It is Don Mueang district, which should has the pumping rate not more than the Case 2.2. And Lat Krabang, Prawet districts and the northern part area of Bang Pli have more serious the settlement thus some mitigation such as stop pumping and recharge water for raising the groundwater level should be considered. These will give the settlement rate less than 1 cm/year.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ไผ่เรียง ประธานกรรมการที่ให้ความกรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวคิดในการทำวิจัย และอบรมสั่งสอนวิชาความรู้ทางด้านวิชาการ อีกทั้งได้เสียสละเวลาในการตรวจแก้วิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ กรรมการ รองศาสตราจารย์ ประทีป ดวงเดือน กรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒนา จิตตลดากร ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ตรวจสอบ แนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องในขั้นสุดท้าย เพื่อให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กรมแผนที่ทหาร บริษัทปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลระดับน้ำบาดาล และข้อมูลการทรุดตัวของชั้นดินในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล สำหรับใช้ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุกท่าน โดยเฉพาะ คุณศิริลักษณ์ คุณมนันยา คุณบรรพต คุณรัฐธรรม คุณชินโรส คุณเชิดพันธุ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือ สนับสนุน อำนวยความสะดวก และให้กำลังใจในการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โกสินทร์ ที่สนับสนุนเงินทุนในการศึกษาระดับปริญญาเอก

และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ มารดา บิดา ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอมา จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงในที่สุด

ขอไว้อาลัยแด่ ดร.ตัณชัย มิตรเอม ผู้มีพระคุณต่อข้าพเจ้าที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้และเขียนโปรแกรม Mathematica สำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ บุญกุศลใดที่ข้าพเจ้าได้เคยกระทำความดีทั้งหมดทั้งปวง ขอผลบุญเหล่านั้นจงถึงแด่อาจารย์ให้ไปสู่สุคติภพ ด้วยเทอญ.

สุธรรม โรจนเมฆา

กรกฎาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการทำวิจัย	121
อุปกรณ์	121
วิธีการทำวิจัย	121
ผลและวิจารณ์	131
สรุปและข้อเสนอแนะ	180
สรุป	180
ข้อเสนอแนะ	183
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	184
ภาคผนวก	191
ภาคผนวก ก โปรแกรม Mathematica สำหรับวิเคราะห์อัตราการผลิตตัวของ ชั้นดิน	192
ภาคผนวก ข ภาพความแตกต่างของค่าการผลิตตัวแต่ละปีตั้งแต่ปีพ.ศ. 2522-2550	200
ภาคผนวก ค การเปรียบเทียบค่าการผลิตตัวของชั้นทรายกับค่าการผลิตตัวของชั้น ดินเหนียว	206
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	210

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 การใช้ น้ำบาดาลในเขตมาตรการควบคุมบริเวณ กรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ	16
2 ปริมาณการใช้น้ำบาดาลทุกประเภทในพื้นที่ 7 จังหวัดปี พ.ศ. 2545	20
3 ปริมาณการสูบน้ำบาดาลในกรุงโตเกียวตั้งแต่ปี 1964–1975	42
4 ปริมาณการสูบน้ำบาดาลในโอซากา	45
5 ค่า U_{av} และ T_v ตามลักษณะของค่า u_i และการไหลของน้ำในดินสามารถไหลได้ทั้งขึ้นข้างบนและลงข้างล่าง	95
6 การเก็บตัวอย่างดินชั้นน้ำบาดาล	107
7 วิธีการทดสอบที่เกี่ยวข้องในห้องทดลอง	108
8 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยุบอัดตัวของชั้นดินเหนียวสถานะ KD	112
9 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยุบอัดตัวของชั้นดินเหนียวสถานะ KE	113
10 การกำหนดค่าหน่วยน้ำหนักทั้งหมดที่ใช้ในแบบจำลองตามความลึกของชั้นดิน	130
11 เปรียบเทียบจำนวนสถานีบ่อน้ำบาดาลที่มีระดับความแตกต่างสัมบูรณ์ในระดับที่ 1 ถึงระดับที่ 4 จากการพิจารณาค่าการทรุดตัวสูงสุด 1 ปี, ค่าเฉลี่ย 3 ปี และค่าเฉลี่ย 5 ปี	141
12 สรุปผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวแต่ละปีในลักษณะภาพรวมของพื้นที่ทั้งหมด และในลักษณะของพื้นที่เฉพาะจุด	149
13 สรุปผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในอนาคตตามการสมมติสถานการณ์ของการสูบน้ำบาดาลต่าง ๆ	177

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค1 ค่า Elastic Modulus ของดินชนิดต่าง ๆ	208
ค2 ตัวอย่างการคำนวณค่าการทรุดตัวของชั้นทรายเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวของ Sta57 อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ	209

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขอบเขตพื้นที่ศึกษาของงานวิจัย และสถานีบ่อน้ำบาดาล	4
2	สภาพธรณีวิทยาของพื้นที่ราบลุ่มเจ้าพระยาตอนล่าง	7
3	ภาพตัดทางอุทกธรณีวิทยาแสดงชั้นน้ำบาดาลในลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนใต้	10
4	พื้นที่วิกฤตน้ำบาดาลตามมติคณะรัฐมนตรี พ.ศ. 2526	15
5	การใช้น้ำบาดาลบริเวณกรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ	17
6	อัตราการใช้น้ำบาดาลในแต่ละปีบริเวณกรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ	18
7	ระดับพิโซมิเตอร์ในชั้นน้ำ	21
8	ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนครหลวงปี พ.ศ. 2525	23
9	ระดับน้ำบาดาลในบ่อสังเกตการณ์ชั้นน้ำนครหลวง (a) บ่อ NL17 ที่ท้องฟ้าจำลอง เขตพระโขนง และ (b) บ่อ NL25 ที่วัดกุนนที เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร	25
10	ระดับน้ำบาดาลในบ่อสังเกตการณ์บริเวณสนามกอล์ฟหัวหมาก เขตบางกะปิ	26
11	ระดับน้ำบาดาลในบ่อสังเกตการณ์ NL24 ชั้นน้ำนครหลวง บริเวณวัดบางปิung อ.เมือง จ.สมุทรสาคร	27
12	ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำพระประแดงปี พ.ศ. 2539	29
13	ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนครหลวงปี พ.ศ. 2539	30
14	ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนนทบุรีปี พ.ศ. 2539	31
15	ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำกรุงเทพปี พ.ศ. 2550	32
16	ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำพระประแดงปี พ.ศ. 2550	33
17	ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนครหลวงปี พ.ศ. 2550	34
18	ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนนทบุรีปี พ.ศ. 2550	35
19	ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำสามโคกปี พ.ศ. 2546	36
20	ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำพญาไทปี พ.ศ. 2546	37
21	ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำธนบุรีปี พ.ศ. 2546	38
22	ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำปากน้ำปี พ.ศ. 2546	39
23	พื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวเนื่องจากการลดลงของน้ำบาดาลในญี่ปุ่น	40
24	พื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวเนื่องจากการลดลงของน้ำบาดาลในสหรัฐอเมริกา	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาในโตเกียว	42
26	การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลและการทรุดตัวในโตเกียว	43
27	ค่าการทรุดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นในโตเกียวตั้งแต่ปี 1938-1975	44
28	รูปลักษณะทางธรณีวิทยาของที่ราบแอ่งโอซากา	45
29	การทรุดตัวและการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในโอซากา	46
30	การทรุดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นในโอซากาช่วงระหว่างปี 1935-1968	47
31	ลักษณะทางธรณีวิทยาตามแนวตะวันตก-ตะวันออกของที่ราบโนบิ	48
32	ปริมาณการทรุดตัวและการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล	49
33	ปริมาณการทรุดตัวในช่วงระยะเวลา 15 ปีตั้งแต่ปี 1961-1975	49
34	การทรุดตัวและการพองตัวของชั้นดินในปี 1974-1975	50
35	ลักษณะทางธรณีวิทยาของที่ราบนิกากะ	51
36	ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี 1959-1974	52
37	การแบ่งเขตพื้นที่ควบคุมการสูบน้ำบาดาลในที่ราบนิกากะ	53
38	การทรุดตัวและการพองตัวของชั้นดินในช่วงระหว่างปี 1973-1974	53
39	ลักษณะภูมิประเทศทั่วไปของพื้นที่ราบ San Joaquin Valley	54
40	พื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวในหุบเขาช่วงระยะเวลาตั้งแต่ปี 1926-1970	56
41	ค่าการทรุดตัวและการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลพื้นที่ทางใต้ของเมือง Mendota	57
42	การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในบ่อสังเกตการณ์ 16/15-34N4 และ การทรุดตัวของบ่อสังเกตการณ์ 16/15-34N1 ใกล้กับ Cantua Creek	58
43	แนวชั้นถ่านหินในพื้นที่ราบหุบเขา Latrobe	59
44	เส้นแสดงระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำ M1	60
45	การเคลื่อนตัวในแนวราบบริเวณรอบ ๆ บ่อชุด Morwell	61
46	ค่าการทรุดตัวบริเวณพื้นที่รอบ ๆ บ่อชุด Morwell และ Yallourn	62
47	ลักษณะธรณีวิทยาของเมือง Shanghai	63
48	ลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเมือง Shanghai	64
49	การทรุดตัวและการพองตัวของชั้นดินในเมือง Shanghai	65
50	ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2476-2521	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
51 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2521	69
52 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2522	69
53 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2524	70
54 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2527	70
55 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2528	71
56 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2529	72
57 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2530	73
58 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2521-2530	74
59 อัตราการทรุดตัวในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2533-2534	75
60 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2537-2540	76
61 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2539-2540	78
62 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2521-2540	79
63 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2539-2546	80
64 การลดลงของระดับน้ำบาดาลเนื่องจากการสูบน้ำในชั้นน้ำต่าง ๆ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปี พ.ศ. 2546	83
65 กลไกการทรุดตัวเนื่องจากการลดลงของระดับน้ำบาดาล	83
66 การไหลของน้ำผ่านก้อนมวลดินขนาด $dx \ dy \ dz$	85
67 แสดงแรงดันน้ำส่วนเกินที่ยังเหลืออยู่และที่ถูกระบายออกไปแล้ว	91
68 ความสัมพันธ์ระหว่าง U_z กับ $\frac{Z}{H_d}$ ที่ T_v ต่างกันในกรณีที่กำลัง u_i มีค่าคงที่กับ ความลึกและน้ำสามารถไหลซึมได้ทั้งขึ้นข้างบนและลงข้างล่าง	93
69 ลักษณะการกระจายของ u_i ในรูปแบบต่าง ๆ	94
70 ลักษณะการกระจายของ u_i ในรูปแบบที่สมมาตรและการระบายน้ำแบบ 2 ทิศทาง	95
71 ความสัมพันธ์ระหว่าง U_{av} กับ T_v เมื่อการกระจายของ u_i อยู่ในลักษณะต่าง ๆ กัน และน้ำสามารถไหลซึมไปยังชั้นทรายที่อยู่ชั้นบนและชั้นล่างได้	96

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
72 ความสัมพันธ์ระหว่าง U_z กับ $\frac{z}{H_d}$ ที่ T_v ต่างกันในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า u_i กับความลึกเป็นรูปสามเหลี่ยม โดย $u_i = 0$ เมื่อ $\frac{z}{H_d} = 0$	97
73 ความสัมพันธ์ระหว่าง U_{av} กับ T_v กรณีที่ u_i เปลี่ยนแปลงตามความลึกแบบเป็นเส้นตรง	97
74 การหาค่า U_{av} ด้วยวิธี Superposition	98
75 กราฟพื้นผิวแสดงการกระจายตัวของแรงดันน้ำส่วนเกิน	99
76 การประมาณค่า partial derivative ของแรงดันน้ำส่วนเกินเทียบกับความลึก z ที่เวลา t_j	100
77 การประมาณค่า partial derivative ของแรงดันน้ำส่วนเกินเทียบกับเวลาที่ความลึก z_i	101
78 แบบจำลองการหาค่าแรงดันน้ำส่วนเกินด้วยวิธี Finite Difference	103
79 แท่นเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินในระดับลึก	106
80 แท่นเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินในระดับลึก	106
81 Plasticity Chart ของตัวอย่างดินชั้นน้ำบาดาล	109
82 สรุปผล Atterberg's Limit และ Natural Water Content ของตัวอย่างดินตามความลึก	110
83 หน่วยน้ำหนักรวมของตัวอย่างดินตามความลึก	111
84 ความสัมพันธ์ของดัชนีการยุบอัดตัว การพองตัว และอัตราส่วนช่องว่างตามความลึก	114
85 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำโดยวิธี Log Time	115
86 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำของดินโดยวิธี Root Time	116
87 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำของดินโดยวิธี Hyperbola	116
88 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำโดยวิธีของ Asaoka	117
89 ค่า Over Consolidation Ratio ตามความลึก	116
90 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย	122
91 ลักษณะของชั้นดินจากการสำรวจด้วยวิธี Wire Line Logging	124

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
92	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักทั้งหมดกับความลึกของชั้นดิน	125
93	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักทั้งหมดกับอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น	126
94	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นกับดัชนีการยุบอัดตัว (C_c)	126
95	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นกับดัชนีการยุบอัดตัวใหม่ (C_r)	127
96	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า OCR กับความลึกของชั้นดิน	127
97	ตำแหน่งหมุดหลักฐานสำรวจระดับการทรุดตัวของพื้นดินในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล	131
98	ค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (R^2) ของค่าการทรุดตัวแต่ละปีที่ได้จากการวิเคราะห์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการตรวจวัด	133
99	ค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (R^2) ของค่าการทรุดตัวสะสมพิจารณาข้อมูลช่วงละ 5 ปี	134
100	ค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (R^2) ของค่าการทรุดตัวสะสมพิจารณาข้อมูลช่วงละ 10 ปี	135
101	ค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (R^2) ของค่าการทรุดตัวสะสมตั้งแต่ พ.ศ. 2522 - 2550 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการตรวจวัด	135
102	ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมในระดับที่ 1 ของ Sta7	138
103	ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมในระดับที่ 2 ของ Sta49	138
104	ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมในระดับที่ 3 ของ Sta27	139
105	ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมในระดับที่ 4 ของ Sta34	139
106	การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมในระดับที่ 1-4	140

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
107	จำนวนเปอร์เซ็นต์ของสถานีบ่อน้ำบาดาลที่มีระดับความแตกต่างสัมบูรณ์ระดับที่ 1 ถึงระดับที่ 4 จากการพิจารณาค่าการทรุดตัวสูงสุด 1 ปี, และค่าเฉลี่ย 3 ปี และ 5 ปี
108	แสดงพื้นที่ที่มีระดับความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดของค่าการทรุดตัวสะสมในระดับ 1-4
109	แสดงภาพรวมของพื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวแต่ละปีอยู่ในช่วง 0-1 cm มากกว่า 20% ของพื้นที่ทั้งหมด
110	แสดงภาพรวมของพื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวแต่ละปีอยู่ในช่วง 1-2 cm มากกว่า 20% ของพื้นที่ทั้งหมด
111	แสดงพื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวแต่ละปีมากกว่า 3 cm
112	ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดของสถานีบ่อน้ำบาดาล Sta57
113	ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดของสถานีบ่อน้ำบาดาล Sta63
114	การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2522-2550
115	เปรียบเทียบพื้นที่การทรุดตัวสะสมจากการคำนวณซึ่งสอดคล้องกับระดับความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก
116	รูปแบบทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดิน
117	ภาพจำลองการเกิดขบวนการยุบอัดตัวคายนํ้าภายในชั้นดินเหนียวเมื่อระดับน้ำบาดาลลดลง
118	ภาพจำลองขบวนการยุบอัดตัวคายนํ้าและการพองตัวภายในชั้นดินเหนียวเมื่อระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้นในช่วงที่ 2 ของ CADS
119	ภาพจำลองขบวนการยุบอัดตัวคายนํ้าและการพองตัวภายในชั้นดินเหนียวเมื่อระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้นในช่วงที่ 3 ของ CADS
120	ภาพจำลองขบวนการยุบอัดตัวคายนํ้าและการพองตัวภายในชั้นดินเหนียวเมื่อระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้นในช่วงที่ 4 ของ CADS

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
121	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินซึ่งแสดงความสัมพันธ์ช่วงที่ 1 Increase Settlement	159
122	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินซึ่งแสดงความสัมพันธ์ช่วงที่ 1-2 Delay Settlement	159
123	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินซึ่งแสดงความสัมพันธ์ช่วงที่ 1-3 Zero Settlement	160
124	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินซึ่งแสดงความสัมพันธ์ช่วงที่ 1-4 Recovery	160
125	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินซึ่งแสดงความสัมพันธ์แบบย้อนกลับ	161
126	พื้นที่ที่แสดงช่วงของการทรุดตัวสุดท้ายในปี พ.ศ. 2550	162
127	ส่วนกลับของค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์ CADS ช่วงที่ 1	164
128	ค่า $\square_s$ ของชั้นน้ำประแดง ชั้นน้ำนครหลวง และชั้นน้ำนนทบุรี	165
129	พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณีที่ 1	167
130	พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณี 2.1 50%	168
131	พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณี 2.2 80%	169
132	พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณี 2.3 100%	170
133	พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณี 2.4 120%	171
134	พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณี 2.5 140%	172
135	พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำ	

บาดาลของกรณีที่ 3

173

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
136	พื้นที่การทูลดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551–2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำ บาดาลของกรณีที่ 4	174
137	พื้นที่การทูลดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551–2560 ตามสถานการณ์การสูบน้ำ บาดาลของกรณีที่ 5	175
138	พื้นที่การทูลดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551–2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำ บาดาลของกรณีที่ 5	176

การศึกษาลักษณะเฉพาะของชั้นน้ำบาดาลเพื่อทำนายค่าการทรุดตัวในอนาคต
ของกรุงเทพฯและปริมณฑลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

A Study of Characteristic of Aquifer for Prediction of Subsidence on
Bangkok and Vicinity By Mathematical Model

คำนำ

การทรุดตัวของชั้นดินเป็นพื้นที่บริเวณกว้างในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑลสาเหตุหลักเกิดขึ้นเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้เพื่ออุปโภคและบริโภคเป็นจำนวนมาก เนื่องด้วยการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและการขยายตัวของชุมชนเป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้ความต้องการใช้น้ำเพิ่มสูงขึ้น ขณะเดียวกันการบริการของการประปาไม่สามารถที่จะขยายพื้นที่การบริการได้ทันด้วยเหตุความจำเป็นในเรื่องงบประมาณและการใช้ระยะเวลาในการก่อสร้าง ในขณะที่ชั้นดินใต้กรุงเทพฯและปริมณฑลมีแหล่งน้ำบาดาลขนาดใหญ่และมีปริมาณมากจึงได้มีการเจาะบ่อน้ำบาดาลเพื่อสูบน้ำขึ้นมาใช้ โดยเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2450 ได้มีการเจาะน้ำบาดาลครั้งแรกที่บริเวณหน้าวัดสุทัศน์ฯ และบริเวณตลาดมิ่งเมือง จากนั้นได้มีการเจาะบ่อน้ำบาดาลเพิ่มมากขึ้นทั้งในหน่วยงานของรัฐและเอกชนซึ่งขณะนั้นสามารถกระทำได้อย่างเสรีโดยไม่ได้มีการควบคุมแต่อย่างใด ทำให้ปริมาณการใช้น้ำบาดาลเพิ่มมากขึ้นทุกปีและระดับน้ำบาดาลลดลงเรื่อย ๆ มากกว่า 1 เมตร/ปี ในช่วงระหว่าง พ.ศ. 2502-2525 และระดับน้ำลดลงสูงสุดมากกว่า 3 เมตร/ปี ในช่วงระหว่าง พ.ศ. 2513-2522 ในบริเวณย่านชานเมืองที่น้ำประปายังเข้าไปไม่ถึงซึ่งจำเป็นต้องใช้น้ำบาดาลเพียงอย่างเดียว

แต่หลังจากการออกพ.ร.บ.น้ำบาดาล พ.ศ. 2520 และการใช้มาตรการควบคุมการสูบน้ำบาดาลในปี พ.ศ. 2526 เพื่อควบคุมการประกอบกิจการน้ำบาดาลในเขตพื้นที่ 6 จังหวัด ประกอบด้วย กรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี สมุทรปราการ สมุทรสาคร และอยุธยา ทำให้ระดับน้ำบาดาลในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2525-2529 บริเวณใจกลางกรุงเทพฯเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วประมาณ 8-18 เมตร หรือเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 2-4 เมตร/ปี ยกเว้นในบริเวณชานเมืองด้านตะวันออกซึ่งน้ำประปายังไม่ถึงจำเป็นต้องใช้น้ำบาดาลเป็นส่วนใหญ่ แต่จากมาตรการเก็บค่าใช้น้ำบาดาลทำให้การใช้น้ำในภาคเอกชนประหยัดขึ้น และอิทธิพลจากการลดปริมาณการใช้น้ำบาดาลในบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ เป็นผลให้ระดับน้ำในบริเวณนี้เพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยปีละ 1-3 เมตร ส่วนบริเวณชาน

อุตสาหกรรมในจังหวัดสมุทรปราการและจังหวัดสมุทรสาครการใช้น้ำบาดาลยังคงอยู่ในอัตราที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ระดับน้ำลดลงมากติดต่อกันทุกปี โดยเฉพาะในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2528-2535 มีอัตราการลดลงของระดับน้ำ 3 เมตร/ปี และบางแห่งจะมากกว่า 3 เมตร/ปี

ผลจากการใช้น้ำบาดาลในปริมาณมากติดต่อกันเป็นเวลานานนับสิบปี ทำให้เกิดผลกระทบต่าง ๆ ตามมามากมาย แต่ผลกระทบที่สำคัญและทำให้เกิดความเสียหายทางด้านเศรษฐกิจมากที่สุด คือ การทรุดตัวของชั้นดินเป็นพื้นที่บริเวณกว้าง โดยพบว่าก่อนการใช้น้ำบาดาลควบคุมการสูบน้ำบาดาลในปี พ.ศ. 2526 อัตราการทรุดตัวของชั้นดินในปี พ.ศ. 2521-2524 มากกว่า 10 ซม./ปี ในบริเวณย่านชานเมืองด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ และ 5-10 ซม./ปี ในบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ แต่หลังจากได้มีมาตรการควบคุมการสูบน้ำบาดาลเป็นต้นมา ทำให้อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินลดลง โดยอัตราการทรุดตัวระหว่างปี พ.ศ. 2531-2532 บริเวณด้านตะวันออกและบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ประมาณ 3-5 ซม. และ 2-3 ซม. ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2532-2533 อัตราการทรุดตัวของพื้นที่ดังกล่าวได้ลดลงเหลือ 2-3 ซม. และ 1-2 ซม. ตามลำดับ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการทรุดตัวของชั้นดินจะสัมพันธ์กับระดับน้ำบาดาลที่เปลี่ยนแปลง ช่วงระยะเวลาที่มีการสูบน้ำบาดาลจนทำให้ระดับน้ำลดลงจนถึงช่วงระยะเวลาที่ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้น เมื่อมีการหยุดสูบน้ำบาดาล การทรุดตัวของชั้นดินจะเกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงไปตามขั้นตอนของกระบวนการยุบอัดตัวคาน้ำภายในชั้นดินเหนียว ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนของกระบวนการยุบอัดตัวคาน้ำนี้ได้เป็น 4 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 การทรุดตัวเพิ่มขึ้นขณะที่ระดับน้ำลดลงเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล , ช่วงที่ 2 การทรุดตัวเพิ่มขึ้นแต่ด้วยอัตราที่ลดลงหรือชะลอตัวขณะที่ระดับน้ำบาดาลมีระดับคงที่หรือเพิ่มขึ้นเนื่องจากการหยุดสูบน้ำบาดาล , ช่วงที่ 3 การทรุดตัวหยุดนิ่งขณะที่ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้น และ ช่วงที่ 4 มีการพองตัวของชั้นดินเกิดขึ้นถ้าระดับน้ำบาดาลมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ในการศึกษานี้ได้พิจารณาความสัมพันธ์ของระดับน้ำบาดาลกับการทรุดตัวของชั้นดินในแต่ละขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ซึ่งผลของการศึกษานี้หน่วยงานภาครัฐ เช่น กรมทรัพยากรน้ำบาดาลสามารถนำมาใช้บริหารจัดการและควบคุมปริมาณการสูบน้ำบาดาลให้มีความเหมาะสมในแต่ละพื้นที่ และสามารถป้องกันปัญหาการทรุดตัวของชั้นดินเป็นบริเวณกว้างในพื้นที่ต่าง ๆ ได้

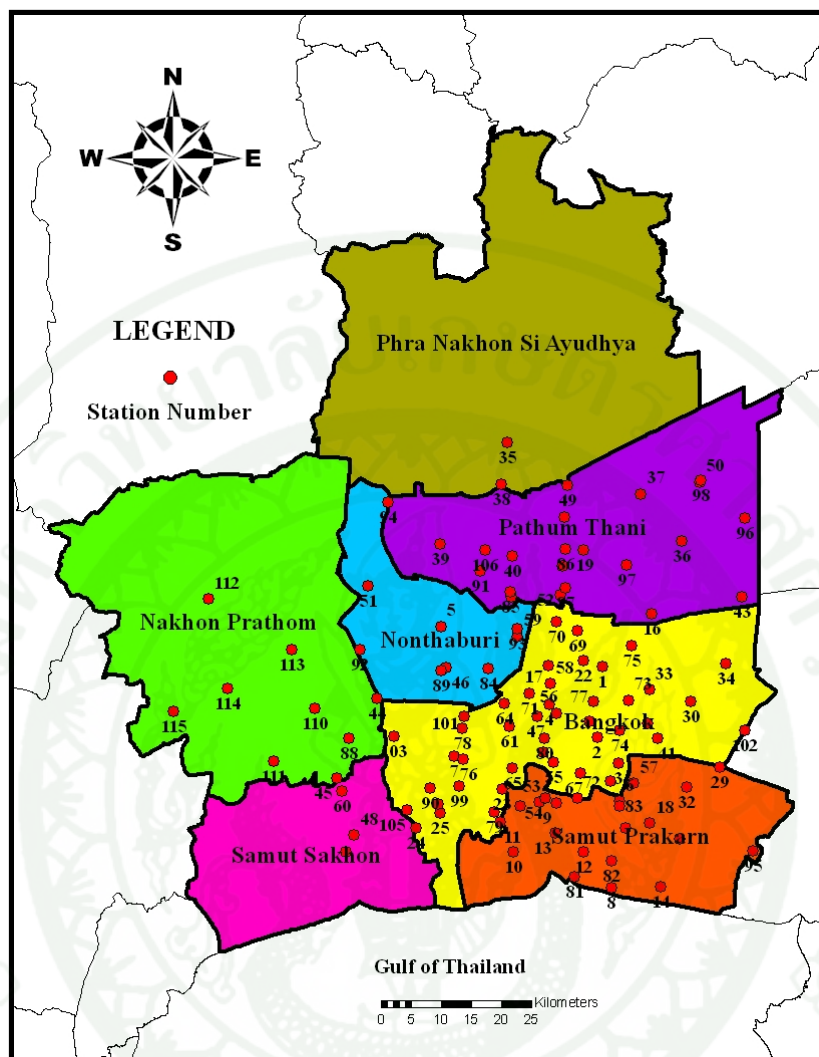
วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย Finite Different Method (FDM) สำหรับวิเคราะห์การทรุดตัวของชั้นดินที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล
2. เพื่อศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของชั้นน้ำบาดาลที่สัมพันธ์กับการทรุดตัวของชั้นดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติความไวต่อการทรุดตัวของชั้นดินเมื่อระดับน้ำบาดาลลดลง
4. เพื่อหาค่าการทรุดตัวของชั้นดินในอนาคต เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลตามสมมติฐานการณ์ของการสูบน้ำบาดาลต่าง ๆ
5. เพื่อหาปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่ยอมรับได้ โดยไม่ทำให้เกิดการทรุดตัวของชั้นดินเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ขอบเขตของงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้วางขอบเขตของการศึกษาไว้ดังนี้

1. พื้นที่ของการศึกษาจะครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลเพียงบางส่วน ซึ่งประกอบด้วยจังหวัดนนทบุรี ปทุมธานี สมุทรสาคร สมุทรปราการ นครปฐม และอยุธยา ดังแสดงในภาพที่ 1
2. ลักษณะของชั้นดินและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวได้จากการรวบรวมข้อมูลจากการศึกษาที่ผ่านมา
3. ข้อมูลระดับน้ำบาดาลที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของชั้นดินเป็นข้อมูลที่ได้จากการจดบันทึกของบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาจำนวน 110 สถานี โดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ดังแสดงในภาพที่ 1
4. ข้อมูลระดับน้ำบาดาลที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวในอนาคตเป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของน้ำบาดาลในแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MODFLOW ในโครงการศึกษาผลกระทบการแก้ไขปัญหาการใช้น้ำบาดาลเกินปริมาณสมดุลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล
5. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์การยุบตัวของชั้นดินในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเป็นแบบ 1 มิติ



ภาพที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาของงานวิจัย และสถานีบ่อน้ำบาดาล

6. การวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในอนาคตจะเป็นการวิเคราะห์ในช่วงระยะเวลา 20 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2551–2570 ตามการสมมติสถานการณ์ของการสูบน้ำในชั้นน้ำบาดาลต่าง ๆ

7. ในการศึกษาจะวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของชั้นดินเฉพาะที่เกิดจากการลดลงของน้ำบาดาลเท่านั้น ไม่รวมค่าการทรุดตัวเนื่องจากสาเหตุอื่น

การตรวจเอกสาร

ธรณีสัณฐานของพื้นที่ราบลุ่มเจ้าพระยาตอนล่าง

กรุงเทพฯ และปริมณฑลตั้งอยู่บริเวณด้านทิศใต้ของพื้นที่ราบลุ่มเจ้าพระยาตอนล่างซึ่งมีรูปร่างคล้ายสามเหลี่ยม โดยมียอดของสามเหลี่ยมอยู่ที่จังหวัดชัยนาทแล้วแผ่กว้างลงมาทางใต้ถึงปากอ่าวไทยตรงบริเวณดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยาในปัจจุบัน มีจังหวัดลพบุรี สระบุรี นครนายก ปราจีนบุรี และฉะเชิงเทรา เป็นขอบของสามเหลี่ยมด้านตะวันออก และจังหวัดอุทัยธานี กาญจนบุรี และราชบุรี เป็นขอบของสามเหลี่ยมด้านตะวันตก ส่วนที่เป็นฐานและใจกลางของดินดอนสามเหลี่ยมได้แก่ พื้นที่ของจังหวัดอยุธยา สุพรรณบุรี นครนายก ต่อลงมาทางใต้จนถึงจังหวัดปทุมธานี นนทบุรี กรุงเทพฯ สมุทรสาคร และสมุทรปราการ ธรณีสัณฐานและภูมิลักษณะ (Landforms) ของพื้นที่ภาคกลางตอนล่างได้มีการอธิบายไว้ในรายงานการศึกษาหลายโครงการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การศึกษาภูมิลักษณะของพื้นที่โดย Alexseev and Takaya (1967), Takaya (1968), Takaya and Thiramongkol (1982), Jarupongsakul (1990) ซึ่งได้จำแนกภูมิลักษณะในกลุ่มน้ำภาคกลางตอนล่างโดยพิจารณาจากตำแหน่งของพื้นที่ องค์ประกอบ ระดับ และอัตราของการผุพังของชั้นตะกอนเป็นหลัก

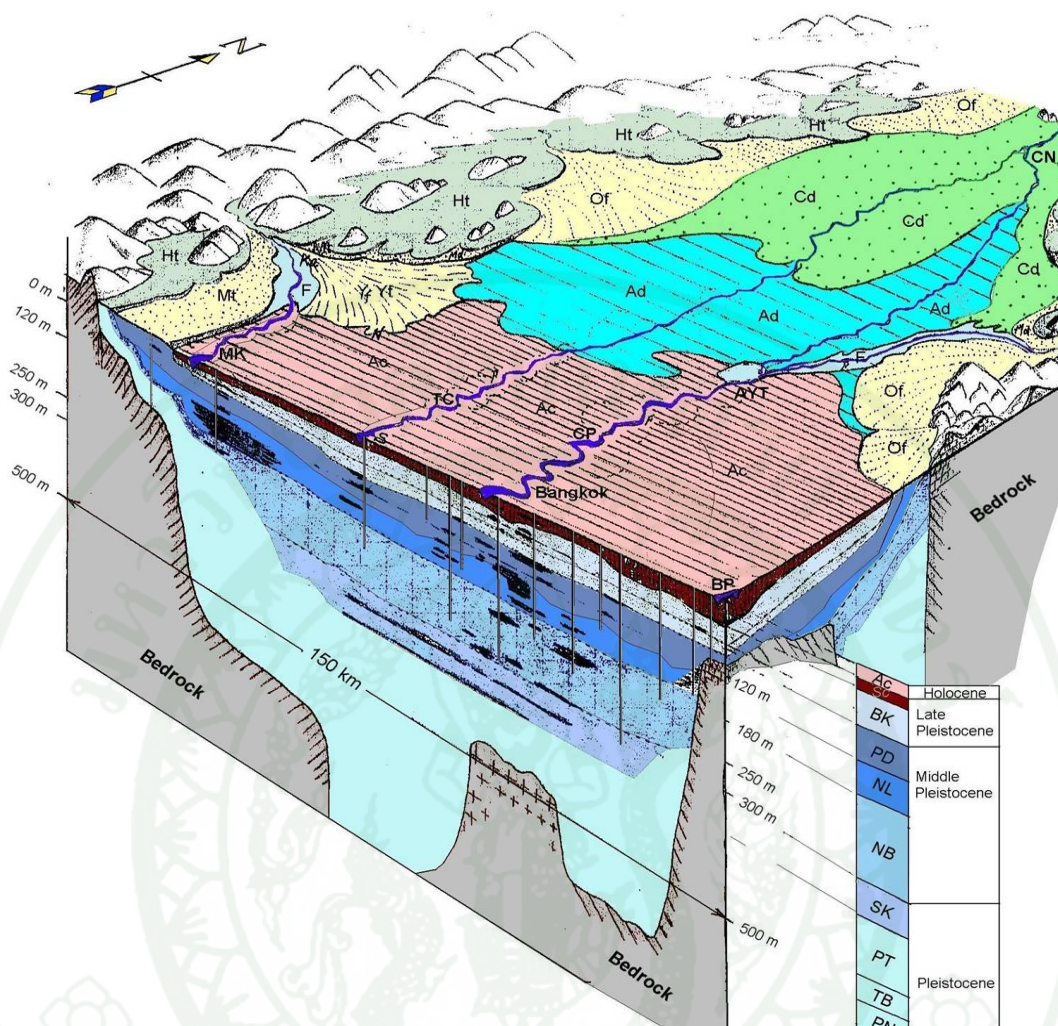
จากการศึกษาของ Takaya (1968) พบหลักฐานการเกิดดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยาในอดีต โดยพบร่องรอยการเคลื่อนที่และการแกว่งตัวของแม่น้ำสายหลักและสาขา เช่น แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำน้อย แม่น้ำสุพรรณ แม่น้ำป่าสัก แม่น้ำนครนายก และแม่น้ำบางปะกง ซึ่งไหลคดเคี้ยวไปมาแล้วบรรจบกับแม่น้ำข้างเคียงจนมีลักษณะเป็นร่างแห

ถิรมงคล (1984) และจารุพงษ์สกุล (1990) ได้จำแนกภูมิลักษณะและธรณีสัณฐานของที่ราบลุ่มเจ้าพระยาตอนล่างซึ่งเป็นแหล่งสะสมตะกอนในยุค Quaternary ภายใต้สภาพแวดล้อมทางน้ำพาและสภาพแวดล้อมชายฝั่ง (fluvial and marine sediments) โดยรอบๆ พื้นที่ราบทางด้านตะวันออกและตะวันตกพบลักษณะธรณีสัณฐานเป็นตะกอนรูปพัดและตะกอนเนินตะพักลำน้ำทางด้านตะวันออกบริเวณจังหวัดลพบุรีและสระบุรีพบหินปูนและชั้นมาร์ลของเนินตะพักโครงสร้าง (Structural terrace) ทางด้านตะวันออกเฉียงใต้บริเวณจังหวัดปราจีนบุรีและฉะเชิงเทรา พบเศษหินและหินผุนพื้นที่เกือบราบ (Peneplain)

ในส่วนของพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลเป็นพื้นที่ที่เกิดจากการทับถมของตะกอนจากแม่น้ำมีระดับพื้นดินโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0-4 เมตร เหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง (รทก.) ด้านทิศเหนือของพื้นที่ซึ่งอยู่ในเขตจังหวัดอ่างทอง สิงห์บุรี และชัยนาท มีระดับความสูงเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5-20 เมตร รทก. สภาพธรณีสัณฐานจัดเป็นพื้นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง (Floodplain) ถัดออกไปทางด้านตะวันออกและตะวันตกแบ่งเป็นบริเวณที่มีระดับความสูงระหว่าง 5-45 เมตร รทก. จะมีสภาพธรณีสัณฐานอยู่ในประเภทลาดลอนคลื่นตะพักต่ำ (Low terraces) และบริเวณที่มีระดับความสูงระหว่าง 45-150 เมตร รทก. จะอยู่ในประเภทลาดลอนคลื่นตะพักสูง (High terraces) ส่วนพื้นที่ที่มีระดับความสูงมากกว่า 150 เมตร รทก. จะเป็นภูเขาหินแข็ง (Hard rocks) ซึ่งถือว่าเป็นขอบของที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง

สภาพธรณีวิทยาของพื้นที่ราบลุ่มเจ้าพระยาตอนล่าง

สภาพธรณีวิทยาทั่วไปของพื้นที่ราบลุ่มเจ้าพระยาตอนล่างจะประกอบด้วยชั้นหินแข็งและชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในยุค Quaternary โดยชั้นหินแข็งที่พบจะมีหลายชนิดซึ่งมีอายุต่าง ๆ กันตั้งแต่มากที่สุดคือก่อนยุค Cambrian (Precambrian Era) หรือมากกว่า 600 ล้านปีมาแล้วจนถึงอายุน้อยที่สุดคืออยู่ในยุค Jurassic หรือประมาณ 136-190 ล้านปีมาแล้วพบตามบริเวณขอบแอ่งที่ราบลุ่มเจ้าพระยาตอนล่างทั้งทางด้านตะวันออกและด้านตะวันตกซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของตะกอนที่ถูกแม่น้ำพัดพาไปสะสมในแอ่ง ส่วนชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในยุค Quaternary ประกอบด้วยตะกอนร่วนถึงตะกอนที่เกาะตัวแข็งจำพวกกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ซึ่งเกิดจากกระบวนการธรรมชาติ ได้แก่ การสึกกร่อน การพัดพา และการสะสมตัวตามขอบแอ่งและบริเวณที่ราบลุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 2 ประกอบด้วยตะกอนดังต่อไปนี้



LEGEND

- Ht = ตะกอนตะพักลำนํ้าระดับสูง (High Terrace Deposits)
 Mt = ตะกอนตะพักลำนํ้าระดับกลาง (Middle Terrace Deposits)
 Of = ตะกอนน้ำพารูปพัดเก่า (Old Alluvial Fan)
 Yf = ตะกอนน้ำพารูปพัดใหม่ (Young Alluvial Fan)
 Cd = ดินดอนสามเหลี่ยมธารน้ำ (Delta of Fluvial Sediment)
 Ad = ดินดอนสามเหลี่ยมน้ำกร่อย (Delta of Brackish Sediment)
 Ac = หาดสันดอนและดินโคลนทะเล (Barrier Beach and Tidal Flat Marine Clay)
 F = ตะกอนที่ราบน้ำท่วมถึง (Floodplain Deposits)

ภาพที่ 2 สภาพธรณีวิทยาของพื้นที่ราบลุ่มเจ้าพระยาตอนล่าง

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2547)

- ตะกอนเศษหินเชิงเขา เกิดขึ้นในปลายยุค Tertiary ถึงต้นสมัย Pleistocene เป็นตะกอนประเภทหินปูนและดินมาร์ล ชั้นสีลาแสง เศษหินเชิงเขา และโชนหินผุของหินแกรนิตและหินแปร พบทางด้านตะวันออกของที่ราบลุ่มบริเวณจังหวัดลพบุรี สระบุรี ปราจีนบุรี และละหานทราย และทางด้านตะวันตกของที่ราบลุ่มซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นตะกอนเศษหินเชิงเขาพบแผ่เป็นบริเวณกว้างตั้งแต่จังหวัดสุพรรณบุรี กาญจนบุรี ถึงราชบุรี

- ตะกอนตะพักลำนํ้าระดับสูง (High Terrace Deposits) เป็นตะกอนที่เกิดขึ้นสมัย Pliocene ถึงต้นสมัย Pleistocene ประกอบด้วยกรวด ทราย และดินเหนียว ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแนวการไหลของทางน้ำและการลดระดับลงของทางน้ำ ทำให้เกิดแนวตะพักเป็นชั้น ๆ ตามระดับความสูง พบบริเวณด้านตะวันออกของจังหวัดนครนายก ปราจีนบุรี และละหานทราย และบริเวณด้านตะวันตกของจังหวัดชัยนาทและสุพรรณบุรี

- ตะกอนตะพักลำนํ้าระดับกลางและตะกอนน้ำพารูปพัดเก่า (Middle Terrace Deposits and Old Alluvial Fan) ตะกอนตะพักลำนํ้าระดับกลางประกอบด้วย ชั้นกรวด ทราย และดินเหนียว ส่วนตะกอนน้ำพารูปพัดเก่าประกอบด้วย ทรายหยาบปนกรวดสลับกับชั้นทรายหนาแทรกด้วยชั้นดินเหนียวสลับกับทรายแป้ง โดยแสดงลักษณะการเรียงตัวของขนาดตะกอนจากเล็กไปใหญ่ ด้านตะวันออกพบตะกอนตะพักลำนํ้าระดับกลาง (Middle terraces) บริเวณจังหวัดลพบุรี สระบุรี และละหานทราย และพบตะกอนน้ำพารูปพัดเก่าที่ให้อธิบายว่าตะกอนรูปพัดป่าสัก (Pasak fan) (อิริมงคล, 1984) อันเกิดจากการพัดพาและสะสมตะกอนจากแม่น้ำป่าสักและลำนํ้าสาขา ด้านตะวันตกพบตะกอนตะพักลำนํ้าระดับกลางบริเวณตะวันตกของจังหวัดชัยนาทและสุพรรณบุรี และพบตะกอนน้ำพารูปพัดเก่าที่ให้อธิบายว่าตะกอนรูปพัดดอนเจดีย์ (Don Chedi fan) อันเกิดจากการพัดพาและสะสมตะกอนของลำห้วยต่าง ๆ ซึ่งเป็นสาขาของแม่น้ำสุพรรณบุรีในสมัย Pleistocene แต่ปัจจุบันเหลือลำนํ้าให้เห็นเพียงลำห้วยกระเสียวและลำห้วยจะร้า อายุการเกิดของตะกอนตะพักลำนํ้าระดับกลางและตะกอนน้ำพารูปพัดเก่า คือ สมัย Middle Pleistocene

- ตะกอนน้ำพารูปพัดใหม่ (Young Alluvial Fan) เกิดขึ้นในสมัย Middle-Late Pleistocene ส่วนใหญ่ประกอบด้วยชั้นกรวดสลับกับชั้นทราย ชั้นทรายแป้งและดินเหนียว มีดินลูกรังปิดทับอยู่ ผิวบนเสมอ หนามากกว่า 80 เมตร วางตัวทับอยู่บนตะกอนรูปพัดยุคเก่า ตะกอนชุดนี้ให้อธิบายว่าเนินตะกอนน้ำพารูปพัดกำแพงแสนหรือตะกอนรูปพัดแม่กลอง (อิริมงคล, 1984) ครอบคลุมพื้นที่ด้านตะวันตกของอำเภอสองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรี บริเวณตะวันตกของอำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม และบริเวณด้านตะวันออกของอำเภอมือง และอำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี

- ดินดอนสามเหลี่ยมธารน้ำและดินดอนสามเหลี่ยมน้ำกร่อย (Delta of Fluvial Sediment and Delta of Brackish Sediment) เกิดขึ้นในสมัย Late Pleistocene โดยดินดอนสามเหลี่ยมธารน้ำประกอบด้วยชั้นทรายแป้งปนดินเหนียว บางแห่งเป็นดินร่วนมีความหนาแน่นประมาณ 2-4 เมตร และรองรับไว้ด้วยชั้นดานหินปูนซึ่งหนาประมาณ 2 เมตร ครอบคลุมเป็นบริเวณกว้างตั้งแต่ทางตอนเหนือของเมืองชัยนาทลงมาถึงได้จรดพื้นที่ของจังหวัดอ่างทอง ส่วนดินดอนสามเหลี่ยมน้ำกร่อยตะกอนส่วนใหญ่ประกอบด้วย ดินเหนียวสีเทา-ดำ-สีน้ำตาล พบแร่ Jarosite ที่เกิดในน้ำกร่อย ภายใต้ภูมิอากาศร้อนชื้นสมัย Late Pleistocene (Hattori, 1972) พบแพร่เป็นบริเวณกว้างมากตั้งแต่ตอนเหนือของจังหวัดอยุธยา กรุงเทพฯ และปริมณฑลทั้งหมด และรวมขอบเขตทางด้านตะวันออกได้แก่ บางส่วนของจังหวัดนครนายก ปราจีนบุรี และฉะเชิงเทรา ทางด้านตะวันตก ได้แก่ บางส่วนของจังหวัดสุพรรณบุรี นครปฐม และราชบุรี

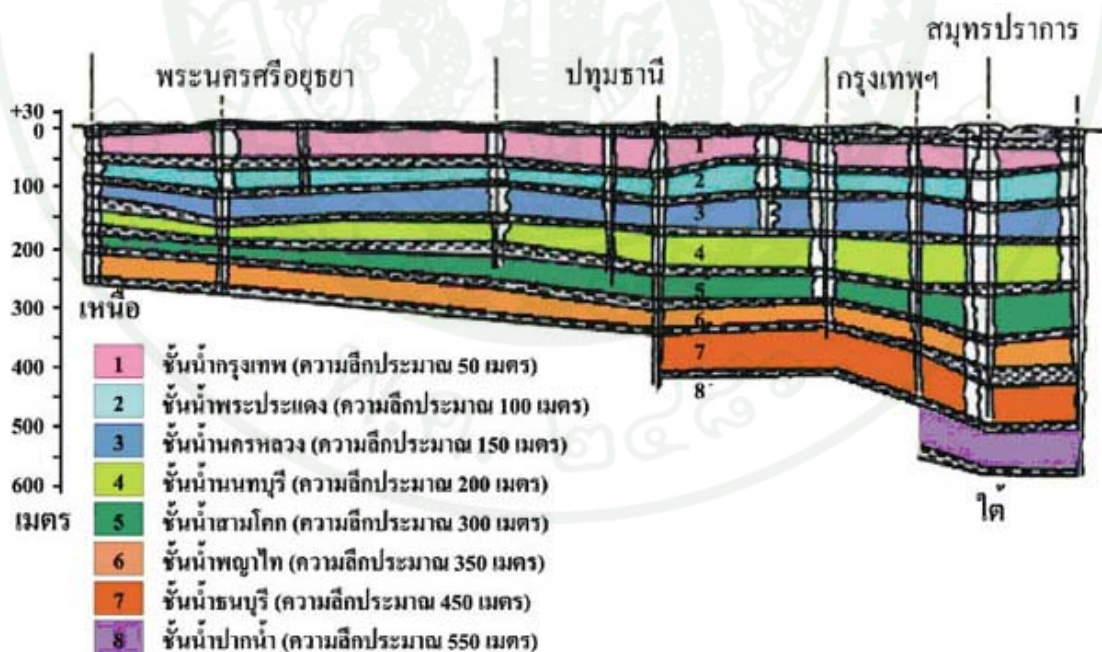
- ตะกอนที่ราบน้ำท่วมถึง หาดสันดอนและดินโคลนทะเล (Floodplain Deposits Barrier Beach and Tidal Flat Marine Clay) ตะกอนทั้ง 3 ชุดนี้เป็นตะกอนที่เกิดในสมัย Holocene โดยตะกอนที่ราบน้ำท่วมถึง ได้แก่ ตะกอนของคันดินธรรมชาติและตะกอนหลังคันดินซึ่งประกอบด้วยชั้นทรายและชั้นทรายละเอียด ส่วนใหญ่ไม่พบสนิมเหล็กและสนิมดำแมงกานีส ความหนาแน่นระหว่าง 1-3 เมตร พบแพร่เป็นบริเวณกว้างขนานไปกับลำน้ำสายหลักที่ไหลผ่านที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง หาดสันดอน ประกอบด้วยชั้นทรายและทรายแป้ง มีจุดประสนิมเหล็กและแร่ Jarosite เปลือกหอยและเศษไม้ บางแห่งมีชั้นดินเหนียวสลับสีขาว-น้ำตาลแดง ดินโคลนทะเล ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวเนื้อทรายแป้ง มีจุดประสนิมเหล็ก เม็ดแร่แมงกานีส แร่ Jarosite สีเทา-ดำ

ชั้นน้ำบาดาลในแอ่งลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่าง

แอ่งลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลการยกตัวของแผ่นดินและการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก เมื่อประมาณ 40-50 ล้านปีที่ผ่านมา กลายเป็นแอ่งหินขนาดใหญ่มีความลึกประมาณ 2000 เมตร โดยขอบแอ่งด้านเหนือสุดอยู่ที่จังหวัดชัยนาทและแผ่กว้างลงมาถึงปากแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณขอบแอ่งทางด้านตะวันตกคลุมพื้นที่ตั้งแต่จังหวัดอุทัยธานี สุพรรณบุรี ด้านตะวันตกจนถึงนครปฐม ส่วนขอบแอ่งทางด้านตะวันออกคลุมพื้นที่ตั้งแต่จังหวัดลพบุรี สระบุรี นครนายก ปราจีนบุรี จนถึงฉะเชิงเทรา สภาพธรณีวิทยาทั่วไปประกอบด้วยชั้นหินแข็งและชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในยุค Quaternary โดยชั้นหินแข็งที่พบจะมีหลายชนิดซึ่งมีอายุต่าง ๆ กันตั้งแต่อายุมากที่สุดคือก่อนยุค Cambrian (Precambrian Era) หรือมากกว่า 600 ล้านปีมาแล้วจนถึงอายุน้อยที่สุดคืออยู่ในยุค Jurassic หรือประมาณ 136-190 ล้านปีมาแล้ว พบตามบริเวณขอบแอ่งทั้ง

ทางด้านตะวันออกและด้านตะวันตกซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของตะกอนที่ถูกแม่น้ำพัดพาไปสะสมในแอ่ง ส่วนชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในยุค Quaternary ประกอบด้วยตะกอนร่วนถึงตะกอนที่เกาะตัวกึ่งแข็งจำพวกกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ซึ่งเกิดจากกระบวนการธรรมชาติ ได้แก่ การสึกกร่อน การพัดพา และการสะสมตัวตามขอบแอ่งและบริเวณที่ราบลุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 2

วชิ วัฒนรงค์และคณะ (2532) ได้ศึกษาลักษณะของชั้นน้ำบาดาลในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลโดยได้รายงานผลการศึกษาว่า ชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลเป็นชั้นน้ำชนิดแบบมีแรงดันซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแหล่งน้ำบาดาลขนาดใหญ่ในพื้นที่ราบลุ่มเจ้าพระยา มีอาณาเขตตั้งแต่ทางตอนเหนือบริเวณจังหวัดชัยนาทแผ่ขยายไปทางด้านตะวันตกและตะวันออกของกรุงเทพฯ จรดขอบแอ่งเจ้าพระยาและทางใต้จรดอ่าวไทยมีโครงสร้างของชั้นน้ำบาดาลประกอบด้วยชั้นกรวดทรายและดินเหนียววางตัวสลับกันไปจนถึงความลึกประมาณ 1,000-1,800 เมตร ซึ่งได้มีการแบ่งชั้นน้ำบาดาลตั้งแต่ระดับผิวดินจนถึงความลึกประมาณ 600 เมตรออกเป็น 8 ชั้นน้ำ โดยอาศัยข้อมูลทางธรณีวิทยา ข้อมูลทางธรณีฟิสิกส์ ข้อมูลการลำดับชั้นตะกอน และข้อมูลทางอุทกธรณีวิทยา ดังแสดงในภาพที่ 3 และจากรายงานการศึกษาของ JICA (1995) ได้สรุปลักษณะของชั้นน้ำบาดาลทั้ง 8 ชั้นไว้ ดังนี้



ภาพที่ 3 ภาพตัดทางอุทกธรณีวิทยาแสดงชั้นน้ำบาดาลในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนใต้

ที่มา: <http://www.dgr.go.th/newproject/52/bgstr/home.htm>

ชั้นน้ำกรุงเทพ เป็นชั้นน้ำชั้นบนสุดและส่วนบนของชั้นน้ำนี้ปกคลุมด้วยดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) ซึ่งมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 22 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยกรวดทรายมีชั้นดินเหนียวบาง ๆ แทรกอยู่บ้าง ความหนาของชั้นน้ำประมาณ 20-30 เมตร ชั้นน้ำกรุงเทพมีปริมาณน้ำมากแต่คุณภาพไม่เหมาะสมที่จะใช้บริโภค ส่วนใหญ่เป็นน้ำเค็ม ยกเว้นบริเวณด้านใต้และตะวันตกเฉียงใต้ของกรุงเทพมหานครที่จะมีน้ำกร่อยพอใช้ได้แทรกอยู่ในระดับ 50-60 เมตร

ชั้นน้ำพระประแดง เป็นชั้นน้ำที่อยู่ถัดจากชั้นน้ำกรุงเทพลงไปโดยถูกคั่นด้วยชั้นดินเหนียวเนื้อแน่นสีน้ำตาลอมเทา ความหนาไม่น้อยกว่า 10 เมตร (ซึ่งในชั้นดินเหนียวหนามักมีชั้นทรายบาง ๆ แทรกอยู่ด้วย) ระดับบนสุดของชั้นน้ำอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 60-80 เมตร ความหนาของชั้นน้ำประมาณ 20-50 เมตร ประกอบไปด้วยกรวดทรายเม็ดเล็กและใหญ่คลุกกันสีขาวอมเทาหรือสีน้ำตาลอ่อน และมีชั้นดินเหนียวบาง ๆ แทรกอยู่ ปริมาณน้ำในชั้นน้ำนี้มีปริมาณมากแต่มีคุณภาพกร่อยหรือค่อนข้างเค็มเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นบริเวณอำเภอพระประแดง อำเภอเมืองสมุทรปราการ และบริเวณฝั่งธนบุรีตอนใต้ที่แต่เดิมให้น้ำจืดได้เปลี่ยนคุณภาพเป็นน้ำกร่อย และบางแห่งเป็นน้ำเค็ม เนื่องจากได้มีการสูบน้ำขึ้นมาใช้จำนวนมาก และเกิดผลกระทบโดยเฉพาะบริเวณย่านถนนสุขสวัสดิ์ อำเภอพระประแดง

ชั้นน้ำนครหลวง เป็นชั้นน้ำที่อยู่ถัดจากชั้นน้ำพระประแดงลงไป โดยมีชั้นดินเหนียวเนื้อแน่นสีน้ำตาลหนา 3-10 เมตรกันอยู่ ระดับบนสุดของชั้นน้ำอยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 100-140 เมตร แต่ทางด้านตะวันออกมีระดับความลึกไม่ถึง 90 เมตร ชั้นน้ำหนา 50-70 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยกรวดทรายแผ่ขยายออกไปในแนวเหนือ-ใต้ จนถึงจังหวัดชัยนาทและแผ่ขยายไปทางตะวันออก-ตะวันตก ชั้นน้ำนครหลวงเป็นชั้นน้ำที่มีการสูบน้ำขึ้นมาใช้มากที่สุดเนื่องจากเป็นชั้นน้ำที่ให้น้ำดีทั้งปริมาณและคุณภาพ ยกเว้นบริเวณทางฝั่งธนบุรีและบริเวณตอนใต้กรุงเทพฯ ที่ได้น้ำกร่อยถึงเค็ม บ่อที่เจาะลึกถึงชั้นน้ำนครหลวงสามารถสูบน้ำได้ในอัตรา 100-300 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

ชั้นน้ำนนทบุรี เป็นชั้นน้ำที่วางตัวขนานกับชั้นน้ำนครหลวงและ มีคุณสมบัติทางอุทกธรณีวิทยาคล้ายคลึงกัน ชั้นน้ำประกอบไปด้วยกรวด ทราย และมีชั้นดินเหนียวบาง ๆ แทรกอยู่ ชั้นดินเหนียวที่ค่อนข้างตอนจะยอมให้น้ำไหลซึมผ่านไปได้ ระดับความลึกของชั้นน้ำจากผิวดินประมาณ 170-200 เมตร ทางด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ อาจลึกประมาณ 150 เมตร ความหนาของชั้นน้ำประมาณ 30-70 เมตร คุณภาพน้ำบาดาลในชั้นน้ำนนทบุรีคล้ายคลึงกับชั้นน้ำนครหลวง ปริมาณน้ำสามารถสูบได้ถึง 150-300 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ในระยะก่อนปี พ.ศ. 2518 ไม่ค่อยมีการเจาะบ่อดึงลงไปถึง เนื่องจากชั้นน้ำอยู่ลึกทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง แต่เมื่อชั้นน้ำนครหลวงได้เกิด

วิกฤตการณ์น้ำบาดาลขึ้น ทำให้คุณภาพน้ำเปลี่ยนแปลงและสูบน้ำได้น้อยลง จึงได้มีการเจาะบ่อลึกลงไปเพื่อให้ได้น้ำคุณภาพดีและปริมาณน้ำมากขึ้น ในปัจจุบันบ่อน้ำบาดาลขนาดใหญ่ ๆ ของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะเจาะลึกถึงชั้นน้ำนันทบุรีจึงทำให้เกิดวิกฤตการณ์น้ำบาดาลในบางบริเวณเช่นเดียวกับชั้นน้ำนครหลวง

ชั้นน้ำสามโลก เป็นชั้นน้ำที่วางตัวอยู่ใต้ชั้นน้ำนันทบุรี ระดับบนสุดของชั้นน้ำพบที่ประมาณ 240 – 250 เมตร ความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 40-80 เมตร ลักษณะชั้นน้ำประกอบไปด้วยชั้นทรายบางๆ หลายชั้นวางตัวเรียงสลับกันลงไป โดยมีชั้นดินเหนียวแทรกสลับอยู่กลาง บ่อน้ำบาดาลส่วนใหญ่ที่เจาะในชั้นน้ำนี้จะอยู่บริเวณเหนือจังหวัดนนทบุรี จนถึงตัวจังหวัดปทุมธานี คุณภาพน้ำใกล้เคียงกับชั้นน้ำนันทบุรี แต่ปริมาณน้ำจะน้อยกว่า

ชั้นน้ำพญาไท เป็นชั้นน้ำที่มีลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาเหมือนกับชั้นน้ำสามโลก คือประกอบด้วยชั้นทรายบาง ๆ หลาย ๆ ชั้น และมีชั้นดินเหนียวแทรกอยู่ โดยแยกจากกันด้วยชั้นดินเหนียวแข็งเนื้อแน่นหนาประมาณ 5-10 เมตร ระดับบนสุดของชั้นน้ำอยู่ลึกประมาณ 275-350 เมตร ชั้นน้ำหนาประมาณ 40-60 เมตร สภาพน้ำบาดาลคล้ายคลึงกับชั้นน้ำสามโลก โดยมีแหล่งน้ำจืดเฉพาะด้านเหนือ ตะวันออกและตะวันตกเฉียงใต้ของกรุงเทพมหานคร และน้ำเค็มทางด้านใต้และเขตรธนบุรี

ชั้นน้ำธนบุรี เป็นชั้นน้ำที่วางตัวอยู่ใต้ชั้นน้ำพญาไท โดยมีชั้นดินเหนียวคั่นอยู่ ชั้นดินเหนียวดังกล่าวบางแห่งหนาถึง 30 เมตร แต่มีบางแห่งหนาประมาณ 1 เมตร เท่านั้น ระดับบนสุดของชั้นน้ำอยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 350-400 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยทรายหนา ๆ อย่างน้อย 3 ชั้น แต่ละชั้นมีดินเหนียวแทรกอยู่ ความหนาของชั้นน้ำรวมกันประมาณ 50-100 เมตร น้ำบาดาลในชั้นธนบุรีส่วนใหญ่เป็นน้ำจืดหรือค่อนข้างจืด เว้นแต่บริเวณด้านตะวันตกหรือตะวันตกเฉียงใต้ของฝั่งธนบุรีซึ่งจะได้น้ำกร่อยถึงเค็ม

ชั้นน้ำปากน้ำ เป็นชั้นน้ำที่ลึกที่สุด ให้น้ำจืดอยู่ทุกบริเวณเป็นชั้นน้ำที่ประกอบไปด้วยชั้นทรายหนาๆ ไม่น้อยกว่า 3 ชั้น ทรายชั้นล่างสุด (ประมาณ 550 เมตรลงไป) จะให้คุณภาพน้ำดีที่สุด ระดับบนสุดของชั้นน้ำอยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 420-500 เมตร ในปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เจาะบ่อและสูบน้ำจากชั้นน้ำนี้โดยเฉพาะในบริเวณที่ชั้นน้ำระดับตื้นกว่าให้น้ำเค็ม เช่น บริเวณอำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ บ่อสามารถสูบน้ำได้มากกว่า 45 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และเป็นชั้นน้ำที่ให้น้ำร้อนอุณหภูมิสูงถึง 48° C

ประวัติการใช้น้ำบาดาลและมาตรการควบคุมการสูบน้ำบาดาล

การใช้น้ำบาดาลในอดีตถึงปี พ.ศ. 2525

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการใช้น้ำบาดาลได้เริ่มมีมาตั้งแต่ประมาณปี พ.ศ. 2450 โดยเริ่มมีการเจาะบ่อน้ำบาดาลที่บริเวณหน้าวัดสุทัศน์ฯ และบริเวณตลาดมิ่งเมือง จากนั้นในปี พ.ศ. 2497 ได้เริ่มมีการใช้น้ำบาดาลเพื่อการประปาประมาณวันละ 8,360 ลบ.ม. และเพิ่มขึ้นเป็นประมาณวันละ 370,000 ลบ.ม. และ 446,000 ลบ.ม. ในปี พ.ศ. 2517 และ 2525 ตามลำดับ หรือเฉลี่ยเพิ่มขึ้นในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2517-2525 ประมาณวันละ 21%

สำหรับการใช้น้ำบาดาลของภาคเอกชนได้มีการเริ่มใช้ในระยะเวลาใกล้เคียงกัน โดยมีการเจาะบ่อเล็ก ๆ แล้วสูบน้ำขึ้นมาใช้เอง ต่อมาในปี พ.ศ. 2517 ได้เริ่มมีการใช้น้ำบาดาลในโรงแรม สถานอาบอบนวดที่อยู่ใจกลางกรุงเทพฯ และบ้านจัดสรร โรงงานอุตสาหกรรมที่อยู่ย่านชานเมืองที่การประปายังไม่ถึงประมาณวันละ 350,000 ลบ.ม. และเพิ่มขึ้นเป็นวันละ 944,000 ลบ.ม. ในปี พ.ศ. 2525 หรือเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณวันละ 170% ซึ่งจะเห็นว่าภาคเอกชนมีอัตราการใช้น้ำบาดาลเพิ่มขึ้นมากกว่าการประปานครหลวงถึง 8 เท่า และเมื่อรวมปริมาณน้ำบาดาลที่สูบน้ำขึ้นมาใช้ทั้งของการประปานครหลวงและของภาคเอกชนในปี พ.ศ. 2525 จำนวน 446,000 ลบ.ม. จะเป็นปริมาณน้ำบาดาลที่สูบน้ำขึ้นมาใช้สิ้นประมาณวันละ 1.4 ล้านลบ.ม.

การสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้เป็นปริมาณมาก ๆ นี้ทำให้ระดับน้ำบาดาลลดต่ำลงอย่างรวดเร็วและไม่มีการคืนตัว เนื่องจากปริมาณน้ำตามธรรมชาติที่ไหลซึมลงไปมีจำนวนน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ถูกสูบน้ำขึ้นมา โดยในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2502-2525 อัตราการลดลงของระดับน้ำบาดาลจะมากกว่า 1 เมตร/ปี โดยเฉพาะในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2513-2522 จะเป็นช่วงที่มีการใช้น้ำบาดาลมากที่สุดมีอัตราการลดลงของระดับน้ำมากกว่า 3 เมตร/ปี ในบริเวณย่านชานเมืองที่น้ำประปายังไม่ถึงซึ่งจำเป็นต้องใช้น้ำบาดาลเพียงอย่างเดียว การลดลงของระดับน้ำบาดาลดังกล่าวเป็นสิ่งบ่งชี้การเกิดวิกฤตการณ์น้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณีได้สังเกตเห็นถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในอนาคตจึงได้ดำเนินการให้มีพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 เพื่อควบคุมการประกอบกิจการน้ำบาดาล โดยมีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2521

พ.ร.บ.น้ำบาดาล พ.ศ. 2520 นี้ได้ควบคุมการประกอบกิจการน้ำบาดาลในภาคเอกชนทั้งการเจาะบ่อน้ำบาดาล การใช้น้ำบาดาล และการระบายน้ำลงบ่อน้ำบาดาล โดยการประกาศเขตน้

บาดาลกรุงเทพมหานครเป็นเขตควบคุมซึ่งครอบคลุมพื้นที่ 6 จังหวัด คือ กรุงเทพฯ สมุทรปราการ สมุทรสาคร นนทบุรี ปทุมธานี และพระนครศรีอยุธยา สำหรับในภาคภูมิตั้งนั้นได้กำหนดให้ กระทรวง ทบวง กรม หรือองค์กรของรัฐ ที่มีหน้าที่เกี่ยวกับการจัดหาน้ำเพื่ออุปโภค บริโภค หรือเพื่อการเกษตรกรรม ในส่วนที่เกี่ยวกับการเจาะบ่อน้ำบาดาลและการใช้น้ำบาดาลไม่อยู่ในเกณฑ์ควบคุม แต่ส่วนราชการหรือองค์กรของรัฐดังกล่าวจะต้องปฏิบัติตามประกาศที่ออกตามมาตรา 6 และมาตรา 23 ซึ่งมาตรา 6 เป็นเรื่องเกี่ยวกับหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการเจาะบ่อน้ำบาดาล การเลิกใช้บ่อน้ำบาดาล การใช้น้ำบาดาลแบบอนุรักษ์ การระบายน้ำลงบ่อน้ำบาดาล การป้องกันด้านสาธารณสุข การป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ กำหนดวิธีการให้ ความคุ้มครองแก่คนงาน และความปลอดภัยแก่บุคคลภายนอก ส่วนมาตรา 23 เป็นเรื่องเกี่ยวกับการเจาะพบโบราณวัตถุ ศิลปวัตถุ ซากดึกดำบรรพ์ หรือแร่ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจหรือทางการศึกษาในด้านธรณีวิทยา จะต้องรายงานให้พนักงานน้ำบาดาลประจำท้องที่ หรือกรมทรัพยากรธรณีทราบภายใน 7 วัน นับแต่วันที่พบ ผลจากการใช้พ.ร.บ. น้ำบาดาล พ.ศ. 2520 นี้ ในระยะแรกปรากฏว่าในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2522-2523 มีการใช้น้ำบาดาลเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 20% แต่ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2523-2524 ซึ่งได้มีการควบคุมกันอย่างจริงจังทำให้ปริมาณน้ำบาดาลที่สูบขึ้นมาใช้เพิ่มขึ้นเพียง 7% เท่านั้น

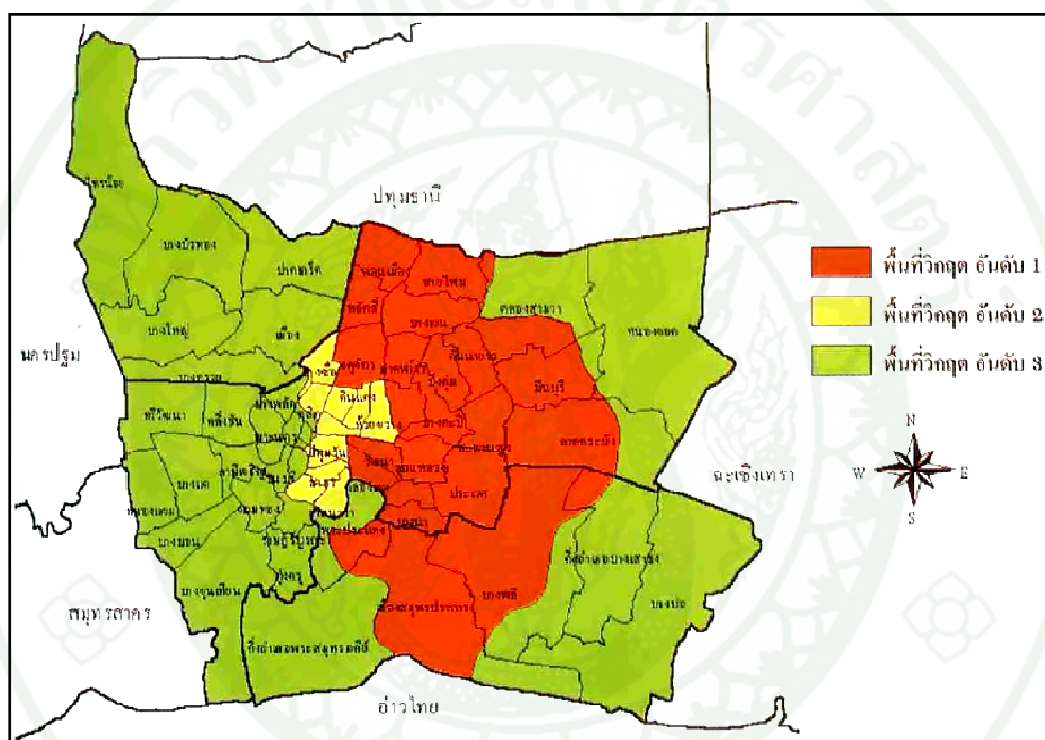
การใช้น้ำบาดาลในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2526-2530

ในปี พ.ศ. 2526 คณะรัฐมนตรีได้มีมติเห็นชอบมาตรการป้องกันและแก้ไขวิกฤตการณ์น้ำบาดาลและแผ่นดินทรุดในบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล โดยได้กำหนดเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาลและแผ่นดินทรุดออกเป็น 3 ระดับ ตามความรุนแรงการทรุดตัวของแผ่นดินและอัตราการลดของระดับน้ำบาดาลใน 4 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยเขตวิกฤตอันดับ 1 เป็นพื้นที่ที่มีการทรุดตัวมากกว่า 10 ซม./ปี และหรือระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างรวดเร็ว เขตวิกฤตอันดับ 2 เป็นพื้นที่ที่มีการทรุดตัว 5-10 ซม./ปี และหรือระดับน้ำบาดาลลดลงมาก และเขตวิกฤตอันดับ 3 เป็นพื้นที่ที่มีการทรุดตัวน้อยกว่า 5 ซม./ปี และระดับน้ำบาดาลลดลงไม่มาก

เป้าหมายของมาตรการฯ นี้ คือ ให้สามารถรักษาระดับพื้นดินของกรุงเทพฯ และจังหวัดสมุทรปราการไม่ให้ทรุดลงต่ำกว่า 50 ซม. จากระดับปี พ.ศ. 2526 ให้สามารถรักษาระดับน้ำบาดาลในเขตวิกฤตอันดับ 1 ให้อยู่คงที่ได้ในปี พ.ศ. 2530 และให้สามารถรักษาระดับน้ำบาดาลในเขตวิกฤตทั้ง 3 ให้สูงขึ้นในปี พ.ศ. 2531 เป็นต้นไป โดยกำหนดให้การประปานครหลวงลดและเลิกการใช้น้ำ

บาดาลในเขตวิกฤตอันดับ 1 และ 2 ภายในปี พ.ศ. 2530 ให้กรมทรัพยากรธรณีควบคุมการใช้น้ำบาดาลของภาคเอกชนตาม พ.ร.บ. น้ำบาดาล พ.ศ. 2520 โดยกำหนดให้ดำเนินการตามนี้

- ให้มีการใช้น้ำบาดาลเพิ่มขึ้นไม่เกินปีละ 5% ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526 ถึงปี พ.ศ. 2530
- ให้ลดการใช้น้ำบาดาลปีละ 5% ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531-2535
- ให้ลดการใช้น้ำบาดาลลงปีละ 10% ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536-2540
- ควบคุมไม่ให้มีการใช้น้ำบาดาลเพิ่มขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 เป็นต้นไป



ภาพที่ 4 พื้นที่วิกฤตน้ำบาดาลตามมติคณะรัฐมนตรี พ.ศ. 2526

ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี (2545)

รวมทั้งไม่อนุญาตให้มีการเจาะบ่อน้ำบาดาลในบริเวณที่มีน้ำประปาถึงและเพียงพอ และพิจารณาอนุญาตให้ใช้น้ำบาดาลในปริมาณเท่าที่จำเป็นและเหมาะสมเท่านั้น นอกจากนี้ในปี พ.ศ. 2528 กรมทรัพยากรธรณีได้เพิ่มมาตรการเก็บค่าใช้น้ำบาดาลในอัตราลูกบาศก์เมตรละ 1 บาท และเพิ่มขึ้นเป็นลูกบาศก์เมตรละ 3.50 บาท ในปี พ.ศ. 2537 หลังจากมาตรการฯ นี้มีผลบังคับใช้ การใช้น้ำบาดาลในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2526-2530 ในเขตพื้นที่วิกฤตซึ่งมี 4 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพฯ

นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน คือ การใช้น้ำบาดาลเพื่อการประปาของการประปานครหลวง และการใช้น้ำบาดาลของภาคเอกชน ดังแสดงในตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าปริมาณการใช้น้ำบาดาลเพื่อการประปามีปริมาณที่ลดลงเรื่อย ๆ โดยคิดเป็นอัตราการลดลงเฉลี่ยประมาณ 13% ต่อปี เนื่องจากการประปานครหลวงได้ลดปริมาณการสูบน้ำบาดาลและอุดกลบบ่อในพื้นที่บางส่วน แต่อย่างไรก็ตามในปี พ.ศ. 2530 ปริมาณการใช้น้ำบาดาลได้เพิ่มสูงขึ้นทั้งนี้เนื่องจากบ่อบางบ่อที่มีการปิดไว้ชั่วคราวจากปีก่อน ๆ ได้นำกลับมาใช้อีกจึงทำให้ปริมาณการใช้น้ำบาดาลเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามก็ดีขึ้นเห็นได้ว่าปริมาณน้ำบาดาลที่การประปานครหลวงใช้ในปี พ.ศ. 2525 จำนวน 446,343 ลบ.ม./วัน และในปี พ.ศ. 2530 ใช้ 207,470 ลบ.ม./วัน แตกต่างกันถึง 238,873 ลบ.ม./วัน จึงเท่ากับว่าในระหว่างปี พ.ศ. 2526-2530 การประปานครหลวงลดการใช้น้ำบาดาลได้ถึง 53.5%

ตารางที่ 1 การใช้น้ำบาดาลในเขตมาตรการควบคุมบริเวณ กรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ

(ลบ.ม./วัน)

พ.ศ.	ปริมาณน้ำบาดาล ที่ กปน. ใช้	% ลด เพิ่ม	ปริมาณน้ำบาดาล ที่เอกชนใช้	% ลด เพิ่ม	ปริมาณน้ำบาดาล ที่ใช้รวมทั้งสิ้น	% ลด เพิ่ม
2525	446,343		944,305		1,390,648	
2526	391,311	-12.3	993,842	+5.2	1,385,153	-0.4
2527	356,765	-8.8	1,066,029	+7.2	1,422,794	+2.7
2528	299,721	-16.0	1,014,433	-4.8	1,314,154	-7.6
2529	193,642	-35.4	1,005,192	-0.9	1,198,834	-8.7
2530	207,470	+7.1	1,052,496	+4.7	1,259,966	+5.1
เฉลี่ยระหว่าง 2525-2530		-13.1	-	+2.3	-	-1.8

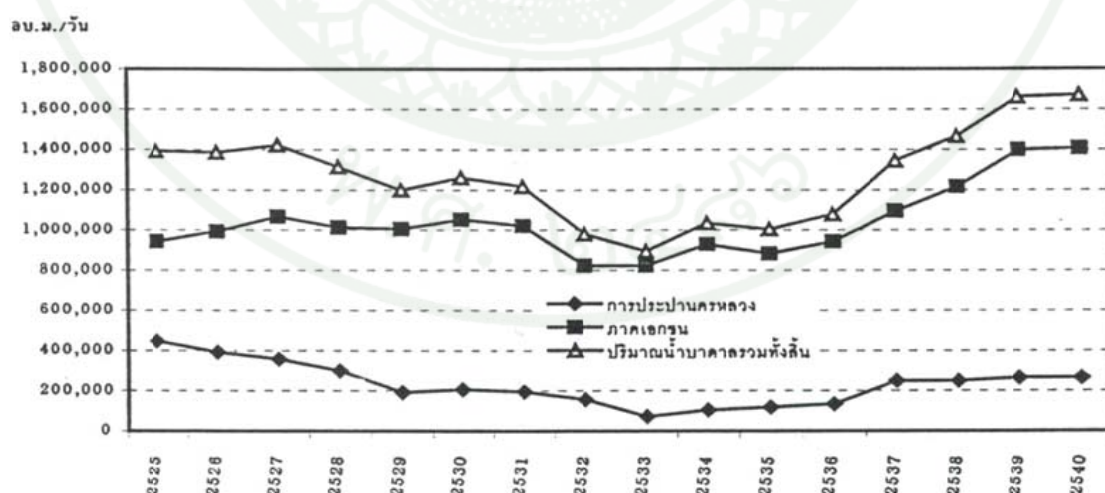
ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี (2532)

สำหรับการใช้น้ำบาดาลของภาคเอกชนนั้นมาตรการควบคุมฯ ได้กำหนดให้ในช่วงระหว่างปีพ.ศ. 2526-2530 ให้มีการใช้น้ำบาดาลเพิ่มขึ้นได้ไม่เกินปีละ 5% แต่จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าในปี พ.ศ. 2526 เอกชนใช้น้ำบาดาลเพิ่มขึ้น 5.2% และปี พ.ศ. 2527 ใช้เพิ่มขึ้น 7.2% เกินอัตราที่มาตรการควบคุมฯ ได้กำหนดไว้ ดังนั้นในปี พ.ศ. 2528 กรมทรัพยากรธรณีซึ่งเป็นผู้บังคับใช้

มาตรการควบคุมฯ ดังกล่าวได้เริ่มเก็บค่าใช้น้ำบาดาลทำให้การใช้น้ำเป็นไปอย่างประหยัดขึ้น มีการแจ้งปริมาณการใช้ตามที่ได้ใช้จริง และได้มีการแจ้งยกเลิกบ่อที่ไม่มีการใช้มากขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ปริมาณการใช้น้ำบาดาลของภาคเอกชนลดลงถึง 4.8% และ 0.9% ในปี พ.ศ. 2528 และ 2529 ตามลำดับ และกลับมาใช้เพิ่มขึ้นอีกในปี พ.ศ. 2530 อย่างไรก็ตามเมื่อเฉลี่ยการใช้น้ำบาดาลของภาคเอกชนแต่ละปีในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2525-2530 จะเห็นได้ว่าเพิ่มขึ้นปีละ 2.3% ซึ่งต่ำกว่าที่มาตรการควบคุมฯ ได้กำหนดให้ไม่เกิน 5% ต่อปี และเมื่อรวมปริมาณการใช้น้ำบาดาลทั้งของการประปาฯ และของภาคเอกชนในเขตพื้นที่วิกฤติทั้ง 4 จังหวัด พบว่า ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2525-2530 มีอัตราการลดลงเฉลี่ยปีละ 1.8% ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการประปาฯ มีบทบาทสำคัญในการเป็นผู้ใช้น้ำบาดาล

การใช้น้ำบาดาลในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2531-2540

ตามมาตรการควบคุมการใช้น้ำบาดาลปี พ.ศ. 2526 ได้กำหนดให้การประปาฯ ลดการใช้น้ำบาดาลในปี พ.ศ. 2530 แต่ได้มีการขอขยายเวลาการเลิกใช้น้ำบาดาลออกไปจนถึง พ.ศ. 2531 และในปี พ.ศ. 2532-2540 ก็ยังคงมีการใช้อยู่ ดังแสดงในภาพที่ 5 โดยในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2534-2540 การใช้น้ำบาดาลเพื่อการประปาได้เพิ่มสูงขึ้นตลอด ทั้งนี้เนื่องจากการขยายบริการของการประปาฯ โดยใช้แหล่งน้ำดิบผิวดินเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอความต้องการของภาคธุรกิจเอกชนที่ขยายตัวอย่างมากตามการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศไทย

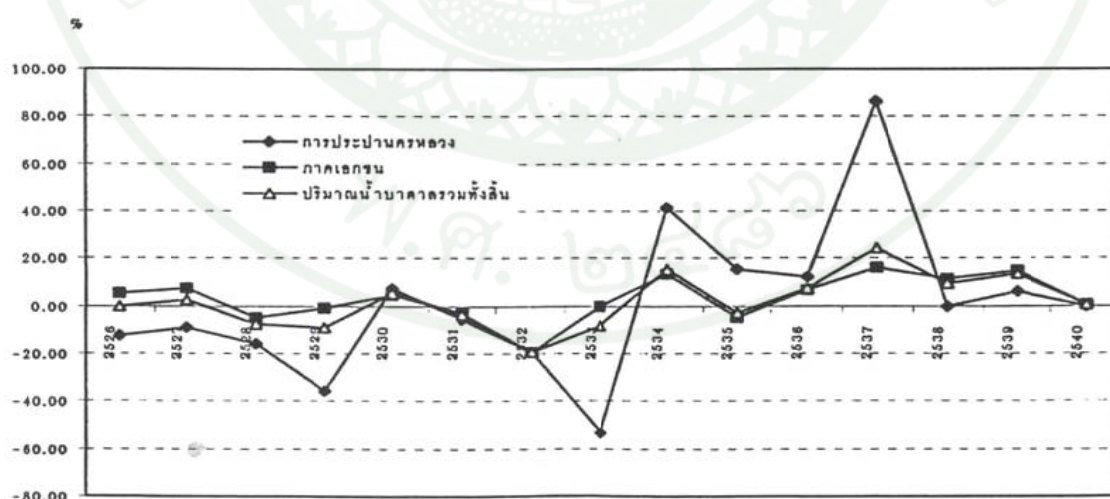


ภาพที่ 5 การใช้น้ำบาดาลบริเวณกรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2543)

สำหรับการใช้น้ำบาดาลของภาคเอกชนมาตรการควบคุมฯ ได้กำหนดให้ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2531-2535 ลดการใช้น้ำบาดาลลงปีละ 5% โดยได้พิจารณาว่าการประปานครหลวงจะสามารถบริการน้ำประปาได้เพิ่มมากขึ้น และสามารถขยายพื้นที่ส่งน้ำไปได้ไกลขึ้นโดยเฉพาะย่านชานเมือง แต่จากสถิติการใช้น้ำบาดาลในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2531-2535 พบว่าอัตราการใช้น้ำมีทั้งลดลงและเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยในปี พ.ศ. 2531 อัตราการใช้น้ำบาดาลของภาคเอกชนลดลงประมาณ 3% และในปี พ.ศ. 2532 ลดลงประมาณ 20% ทั้งนี้เนื่องจากมีบ่อน้ำบาดาลจำนวนมากที่ใบอนุญาตการใช้น้ำหมดอายุและได้มีการเลิกใช้ แต่ในปี พ.ศ. 2534 อัตราการใช้น้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 13% และในปี พ.ศ. 2535 อัตราการใช้น้ำก็กลับลดลงมาอีกประมาณ 5% เมื่อเฉลี่ยการใช้น้ำบาดาลของภาคเอกชนในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2531-2535 พบว่ามีอัตราการใช้น้ำเฉลี่ยลดลงปีละประมาณ 3% ซึ่งต่ำกว่าเป้าหมายที่มาตรการควบคุมฯ ได้กำหนดไว้

ในช่วงปีพ.ศ. 2536-2540 นั้นมาตรการควบคุมฯ ได้กำหนดให้การใช้น้ำบาดาลของภาคเอกชนลดลงปีละ 10% แต่จากข้อมูลพบว่าการใช้น้ำบาดาลของภาคเอกชนแทนที่จะลดลงกลับเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5 และภาพที่ 6 โดยอัตราการเติบโตการใช้น้ำบาดาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536-2540 เพิ่มขึ้นตลอดหรือเฉลี่ยแล้วเพิ่มขึ้นประมาณปีละ 10% สวนทางกับเป้าหมายของมาตรการควบคุมฯ ที่กำหนดไว้ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการขยายตัวทั้งด้านเศรษฐกิจและสังคมเพิ่มสูงขึ้นในช่วงระยะเวลาดังกล่าว ทำให้ความต้องการใช้น้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้นน้ำประปาที่ผลิตจากน้ำผิวดินจึงไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงต้องมีการใช้น้ำบาดาลเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 6 อัตราการใช้น้ำบาดาลในแต่ละปีบริเวณกรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2543)

การใช้น้ำบาดาลในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2541-2550

จากข้อมูลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลพบว่า ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2541-2550 มีการขออนุญาตใช้น้ำบาดาลในพื้นที่ 7 จังหวัดลดลงเรื่อย ๆ โดยในปี พ.ศ. 2541 มีการขออนุญาตใช้น้ำบาดาลประมาณ 2.2 ล้านลบ.ม./วัน ลดลงเหลือประมาณ 1.7 ล้านลบ.ม./วัน และ 1.2 ล้านลบ.ม./วัน ในปี พ.ศ. 2545 และพ.ศ. 2550 ตามลำดับ โดยในเขตกรุงเทพฯ ปทุมธานี และสมุทรปราการ มีการขออนุญาตใช้น้ำบาดาลน้อยลง ส่วนจังหวัดนนทบุรี สมุทรสาคร นครปฐม และพระนครศรีอยุธยา ยังมีการขออนุญาตใช้น้ำเพิ่มขึ้น แต่จากข้อมูลที่บ้านทีกได้ตามมาตราวัดที่สำนักงานในแต่ละจังหวัดพบว่า ปริมาณการใช้น้ำจริงจะน้อยกว่าปริมาณที่ขออนุญาตไว้ โดยในปี พ.ศ. 2545 ปริมาณการใช้น้ำจริงในพื้นที่ 7 จังหวัดมีประมาณ 1 ล้านลบ.ม./วัน หรือคิดเป็นประมาณ 59% ของปริมาณน้ำบาดาลที่ขออนุญาตใช้ ส่วนในปี พ.ศ. 2550 ปริมาณการใช้น้ำจริงประมาณ 0.4 ล้านลบ.ม./วัน หรือประมาณ 33% ของปริมาณน้ำที่ขออนุญาตใช้

จากการรวบรวมข้อมูลบ่อน้ำบาดาลของเอกชนและของหน่วยราชการที่ได้มาจากการขออนุญาตใช้น้ำบาดาลจากฝ่ายควบคุมกิจการน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ในปี พ.ศ. 2546 มีจำนวนรวมกันทั้งสิ้น 17,927 บ่อ ในจำนวนนี้เป็นบ่อน้ำบาดาลของหน่วยงานราชการต่าง ๆ 6,323 บ่อ ข้อมูลจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาลและฝ่ายทรัพยากรน้ำบาดาลจังหวัด ในช่วงปี พ.ศ. 2540-2546 พบว่าการขออนุญาตใช้น้ำบาดาลค่อยๆ ลดลง

โดยในปี พ.ศ. 2546 มีปริมาณการขออนุญาตใช้น้ำบาดาลรวม 2,230,340 ลบ.ม./วัน และลดลงเหลือ 1,696,763 ลบ.ม./วัน ในปี พ.ศ. 2546 โดยในเขตกรุงเทพมหานคร ปทุมธานี และสมุทรปราการ มีการขออนุญาตใช้น้ำน้อยลง ส่วนจังหวัดนนทบุรี สมุทรสาคร นครปฐม และพระนครศรีอยุธยา ยังมีการขออนุญาตใช้น้ำเพิ่มขึ้น แต่จากข้อมูลการใช้น้ำตามมาตราวัดที่สำนักงานในแต่ละจังหวัดพบว่า ในปี พ.ศ. 2545 อัตราการใช้น้ำจริงมีปริมาณรวม 1,023,471 ลบ.ม./วัน หรือประมาณ 47% ของอัตราการใช้น้ำที่ขออนุญาต (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ปริมาณการใช้น้ำบาดาลทุกประเภทในพื้นที่ 7 จังหวัดปี พ.ศ. 2545

(ลบ.ม./วัน)

	กรุงเทพฯ	สมุทร ปราการ	สมุทร สาคร	นนทบุรี	ปทุมธานี	นครปฐม	อยุธยา	รวม
ปริมาณน้ำบาดาล ที่ขออนุญาตใช้	221,609	336,156	311,655	97,080	415,437	160,115	201,127	1,743,179
ปริมาณใช้จริง ตามบัญชีเก็บเงิน	113,378	101,485	127,343	12,641	73,048	63,847	87,183	578,925
ปริมาณการใช้ที่ ได้รับการยกเว้น	23,442	70,305	57,024	55,519	187,612	21,459	29,185	444,546
ปริมาณใช้จริง รวมทั้งหมด	136,820	171,790	184,367	68,160	260,660	85,306	116,368	1,023,471

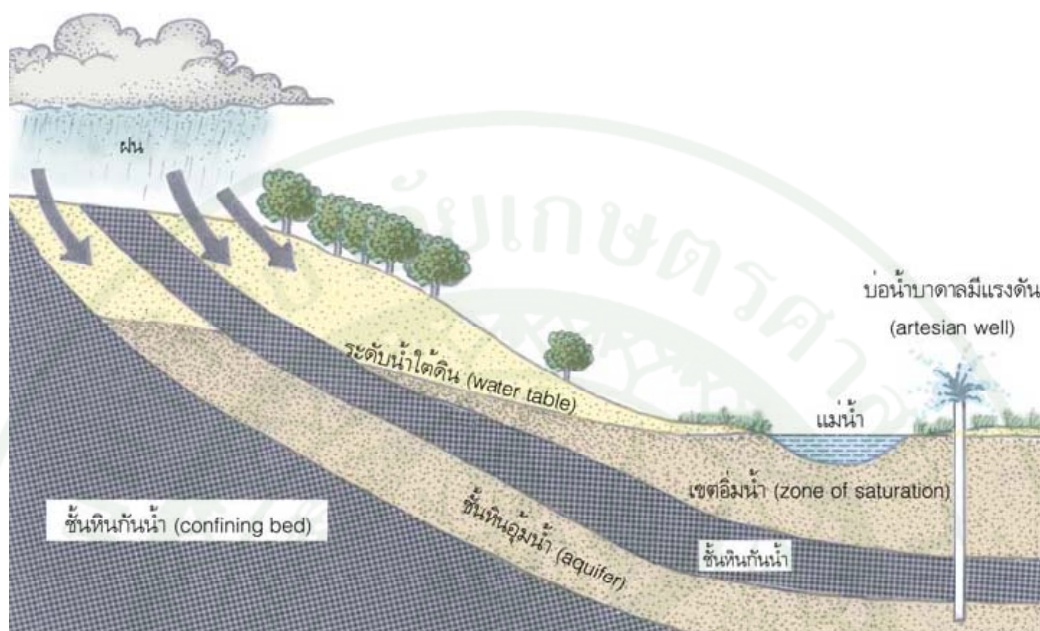
ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2547)

ระดับน้ำบาดาลในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล

ชั้นน้ำบาดาลบริเวณพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลที่ระดับลึกประมาณ 600 เมตร สามารถแบ่งได้เป็น 8 ชั้นน้ำ ซึ่งแต่ละชั้นน้ำจะมีระดับน้ำไม่เท่ากันโดยระดับน้ำของแต่ละชั้นน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณการสูบน้ำบาดาล ปริมาณการไหลซึมของน้ำตามธรรมชาติลงสู่ชั้นน้ำบาดาลต่าง ๆ และปริมาณการไหลซึมของน้ำบาดาลระหว่างชั้นน้ำด้วยกัน ระดับน้ำบาดาลของแต่ละชั้นน้ำจะวัดเทียบกับระดับพื้นดินลงไปถึงผิวหน้าภายในท่อที่เจาะลึกลงไปถึงชั้นน้ำนั้น ๆ ซึ่งเรียกว่า ระดับพิโซมิเตอร์ (Piezometer Level) ดังแสดงในภาพที่ 7

ระดับน้ำภายในท่อหรือระดับพิโซมิเตอร์จะอยู่คั่นหรือลึกลงไปจากระดับพื้นดินเล็กน้อย แต่ไหนขึ้นอยู่กับแรงดันน้ำภายในชั้นน้ำนั้น ๆ ถ้าชั้นน้ำมีแรงดันน้ำมากก็จะสามารถดันให้น้ำขึ้นมาในระดับใกล้เคียงกับระดับพื้นดินหรืออาจจะสูงกว่าระดับพื้นดินก็ได้ถ้ามีแรงดันมากพอ การสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้จำนวนมากและติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้แรงดันน้ำภายในชั้นน้ำลดลงเรื่อย ๆ

และทำให้ระดับน้ำลดต่ำลงไปจากระดับพื้นดินมากขึ้นถ้าอัตราการไหลซึมลงสู่ชั้นน้ำของน้ำตามธรรมชาติน้อยกว่าอัตราการสูบออก



ภาพที่ 7 ระดับพิโซมิเตอร์ในชั้นน้ำ

ที่มา: Graham *et al.* (1991) ปรับปรุงโดย ทวีศักดิ์ (2546)

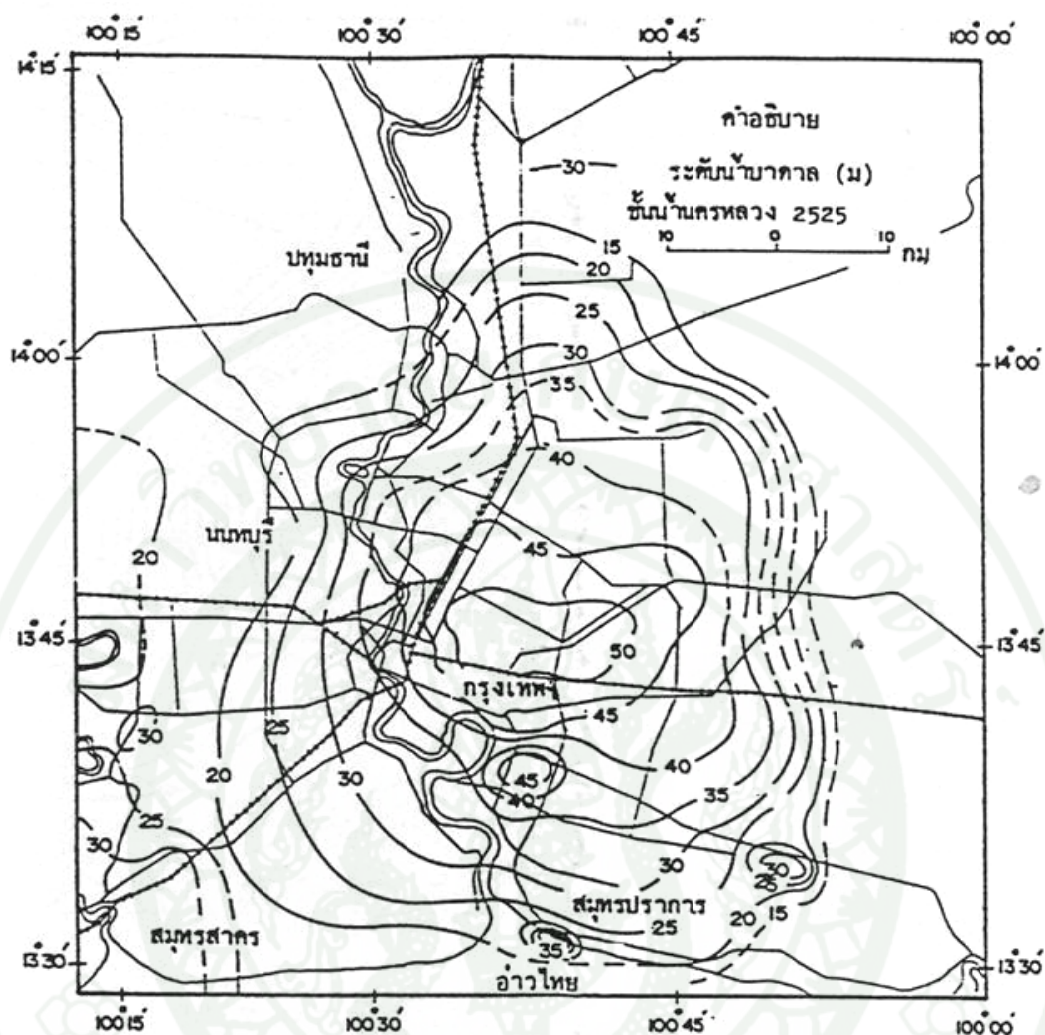
ระดับน้ำบาดาลในอดีตถึงปี พ.ศ. 2525

ข้อมูลเกี่ยวกับระดับน้ำบาดาลบริเวณกรุงเทพฯ ในระยะเริ่มแรกก่อนที่จะมีการสูบน้ำขึ้นมาใช้นั้นไม่มีรายละเอียดแน่ชัด แต่เชื่อกันว่าแรงดันของชั้นน้ำทำให้ระดับน้ำบาดาลอยู่ใกล้พื้นดินและบางแห่งอยู่ในระดับเดียวกับพื้นดิน จากรายงานสถานการณ์น้ำบาดาลของกรมทรัพยากรธรณีในโครงการป้องกันและแก้ไขวิกฤตการณ์น้ำบาดาลและแผ่นดินทรุดบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล โดยวชิระและคณะ (2532) ได้รายงานระดับน้ำบาดาลของชั้นน้ำนครหลวงบริเวณพื้นที่ใจกลางกรุงเทพฯ ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2501-2502 มีระดับความลึกประมาณ 5-12 เมตร จากระดับพื้นดิน และระดับน้ำก็จะยิ่งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อยิ่งห่างออกไปทางตะวันออกของกรุงเทพฯ เช่น บริเวณซอยชัยพฤกษ์ ระดับน้ำบาดาลอยู่ลึกเพียง 4 เมตร เท่านั้น

หลังจากปี พ.ศ. 2502 ได้มีการใช้น้ำบาดาลเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้ระดับน้ำยิ่งลดลง โดยในปี พ.ศ. 2512 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนครหลวงที่บริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ลดลงมาอยู่ที่ระดับ 24 เมตร จากระดับพื้นดิน และบริเวณพื้นที่ด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ ระดับน้ำอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 9-12 เมตร จากระดับพื้นดิน และนับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2512 เป็นต้นมา การใช้น้ำบาดาลก็ยิ่งเพิ่มมากขึ้นทำให้ระดับน้ำในปี พ.ศ. 2517 ลดลงไปที่ความลึกประมาณ 27-30 เมตร เท่ากันทั้งที่บริเวณใจกลางและย่านชานเมืองด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ อัตราการลดลงของระดับน้ำในชั้นนครหลวงระหว่างปี พ.ศ. 2513-2517 บริเวณชานเมืองด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ มีอัตราการลดลงถึงปีละ 3.6 เมตร แต่บริเวณใจกลางกรุงเทพฯ จะมีอัตราการลดลงน้อยกว่าปีละ 1.2 เมตร ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ มีน้ำประปาใช้ แต่ย่านชานเมืองน้ำประปายังไปไม่ถึงจึงต้องใช้น้ำบาดาลอย่างเดียว

หลังจากปี พ.ศ. 2517 ระดับน้ำบาดาลยังคงลดลงเพิ่มมากขึ้น ๆ บางแห่งปีละ 2-3 เมตร บางแห่งจะมากกว่า 3 เมตร โดยในระหว่างปี พ.ศ. 2518-2522 จะเป็นช่วงที่มีอัตราการลดลงของระดับน้ำมากที่สุดเฉลี่ยถึงปีละ 3.8 เมตร เท่ากันทั้งในบริเวณใจกลางและด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ ระดับน้ำบาดาลในปี พ.ศ. 2522 บริเวณด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ ย่านพระโขนง ห้วยขวาง ตลาดพร้าว หัวหมาก สำโรง ระดับน้ำอยู่ลึกถึง 40 เมตร จากระดับผิวดิน

ในปี พ.ศ. 2523-2525 อัตราการลดของระดับน้ำจะน้อยลงโดยเฉพาะบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ระดับน้ำเกือบจะคงที่ ทั้งนี้เพราะการประปานครหลวงได้ขยายบริการประปาเพิ่มขึ้นและการเจาะบ่อใหม่ซึ่งแต่เดิมทำได้เสรี แต่หลังจากพ.ร.บ. น้ำบาดาล พ.ศ. 2520 มีผลบังคับใช้สมบูรณ์ในปี พ.ศ. 2521 ผู้ประสงค์จะขอเจาะบ่อใหม่หรือประสงค์จะใช้น้ำบาดาลจะต้องขออนุญาต ดังนั้นการเจาะและการใช้น้ำบาดาลจึงไม่อาจทำได้อย่างเสรีเหมือนแต่ก่อน สาเหตุเหล่านี้จึงมีผลทำให้อัตราเพิ่มของการใช้น้ำบาดาลลดลง และเป็นผลให้อัตราการลดของระดับน้ำลดน้อยลงด้วย โดยในช่วงระหว่างเวลาดังกล่าวระดับน้ำลดลงเฉลี่ยปีละ 0.3 เมตร ในบริเวณพื้นที่ใจกลางกรุงเทพฯ และ 1.3 เมตร บริเวณพื้นที่ทางด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ โดยในปี พ.ศ. 2525 ระดับน้ำบาดาลบริเวณซอยโชคชัย 4 ถนนตลาดพร้าว และบริเวณหัวหมากอยู่ที่ระดับความลึก 53 เมตร จากระดับพื้นดิน ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนกรหลวงปี พ.ศ. 2525

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2543)

ระดับน้ำบาดาลในปี พ.ศ. 2526-2540

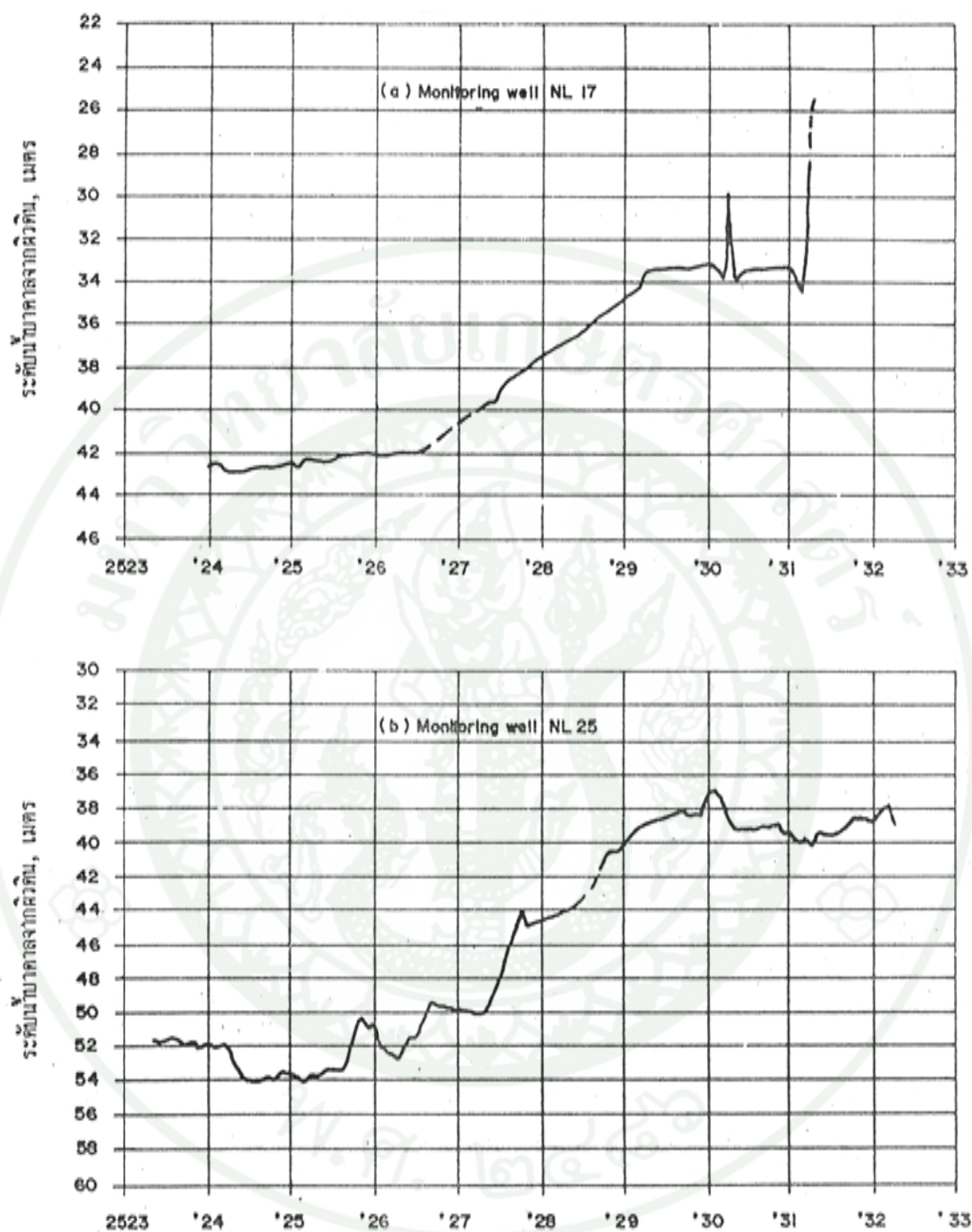
ในปี พ.ศ. 2526-2529 ผลจากการควบคุมการใช้น้ำบาดาลตามมาตรการป้องกันและแก้ไขวิกฤตการณ์น้ำบาดาลและแผ่นดินทรุด รวมทั้งผลจากมาตรการเก็บค่าใช้น้ำบาดาล ทำให้ปริมาณการใช้น้ำบาดาลรวมทั้งหมดทั้งของการประปานครหลวงและของเอกชนในกรุงเทพฯ มีปริมาณลดลงถึง 13.8% ส่งผลให้ระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้นซึ่งบ่อน้ำบาดาลส่วนใหญ่ที่การประปานครหลวงยกเลิกการใช้ตั้งอยู่บริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ทำให้ระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ใจกลางกรุงเทพฯ ได้แก่ บริเวณเขตดุสิต ญาไท ปทุมวัน บางรัก ยานนาวา และบางส่วนของเขตบางกะปิ พระโขนง สูงขึ้น

อย่างรวดเร็วประมาณ 8-18 เมตร หรือเฉลี่ยปีละ 2-4 เมตร โดยมีระดับน้ำอยู่ลึกจากพื้นดินประมาณ 30-38 เมตร

ส่วนในบริเวณพื้นที่ชานเมืองด้านตะวันออกระดับน้ำเริ่มสูงขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2527 ทั้งนี้เนื่องจากในปี พ.ศ. 2526 พื้นที่ดังกล่าวยังไม่มีน้ำประปาใช้ ทำให้ชุมชนและหมู่บ้านจัดสรรหลายแห่งจำเป็นต้องใช้น้ำบาดาลเป็นส่วนใหญ่ แต่ในปี พ.ศ. 2527 การประปานครหลวงได้ขยายพื้นที่บริการไปถึงชานเมืองด้านตะวันออกทำให้บ้านจัดสรรหลายแห่งเลิกสูบน้ำบาดาลเปลี่ยนมาใช้น้ำประปาแทน รวมทั้งอิทธิพลจากการลดปริมาณการใช้น้ำบาดาลในพื้นที่ใจกลางกรุงเทพฯ ได้ขยายขอบเขตไปในรัศมีรอบ ๆ ด้วย จึงเป็นผลให้ระดับน้ำในบริเวณชานเมืองตะวันออกเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยปีละ 1-5 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 9 และ 10

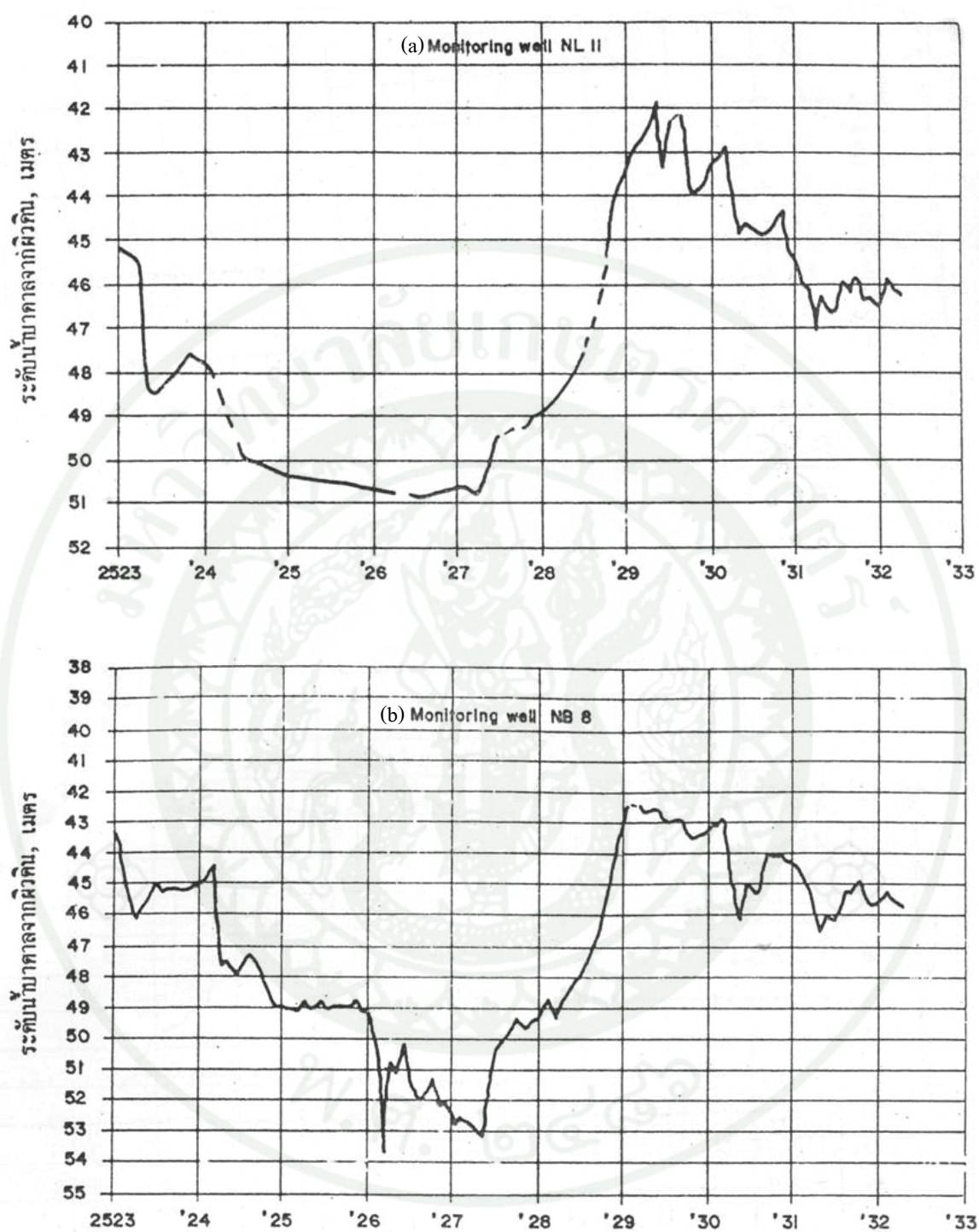
โดยในภาพที่ 9 ได้แสดงระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ NL17 ของกรมทรัพยากรธรณีที่บริเวณท้องฟ้าจำลอง เขตพระโขนง ระดับน้ำสูงขึ้นจาก 42 เมตร ในปี พ.ศ. 2526 มาอยู่ที่ 33 เมตร ในปี พ.ศ. 2529 หรือระดับน้ำสูงขึ้น 9 เมตร ในช่วงระยะเวลา 3 ปีครึ่ง และที่บ่อ NL25 บริเวณวัดกุณนทีรุทธาราม เขตห้วยขวาง ระดับน้ำในปีพ.ศ. 2525 อยู่ที่ 54 เมตร แต่ในปี พ.ศ. 2530 อยู่ที่ 37 เมตร สูงขึ้น 17 เมตรในระยะเวลา 5 ปี ส่วนในภาพที่ 10 แสดงระดับน้ำในชั้นน้ำนครหลวงของบ่อสังเกตการณ์ NL11 และชั้นน้ำนันทบุรีของบ่อสังเกตการณ์ NB8 ที่บริเวณสนามกอล์ฟหัวหมาก บางกะปิ โดยระดับน้ำในชั้นน้ำนครหลวงของบ่อสังเกตการณ์ NL11 สูงขึ้นจาก 51 เมตรในปี พ.ศ. 2527 มาอยู่ที่ระดับประมาณ 43 เมตรในปี พ.ศ. 2529 ระดับน้ำสูงขึ้น 9 เมตรในระยะเวลา 2 ปี และในชั้นน้ำนันทบุรีในบ่อสังเกตการณ์ NB8 ในช่วงระยะเวลาเดียวกันสูงขึ้น 10 เมตร

ระดับน้ำบาดาลที่เคยเพิ่มสูงขึ้นในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2526-2529 ในอัตรารวดเร็วเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ปลายปี พ.ศ. 2529 เป็นต้นมา โดยในปี พ.ศ. 2530 และ 2531 ระดับน้ำบาดาลบางท้องที่ก็เพิ่มสูงขึ้นบ้างเล็กน้อยแต่ในบางท้องที่ก็ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการใช้น้ำบาดาลรวมทั้ง 4 จังหวัดเพิ่มขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2530 อัตราการใช้น้ำบาดาลรวมทั้งหมดทั้งของการประปานครหลวงและของเอกชนมีอัตราเพิ่มขึ้น 5.1% และในปี พ.ศ. 2531 เพิ่มขึ้น 2.2% จึงเป็นผลให้ระดับน้ำบาดาลบางแห่งลดลงบ้าง แต่บางแห่งที่อิทธิพลการเพิ่มการสูบน้ำบาดาลยังขยายไปไม่ถึงระดับน้ำบาดาลที่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 9 และ 10



ภาพที่ 9 ระดับน้ำบาดาลในบ่อสังเกตการณ์ชั้นน้ำนกรหลวง (a) บ่อ NL17 ที่ท้องฟ้าจำลอง เขต พระโขนง และ (b) บ่อ NL25 ที่วัดกุณนที เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร

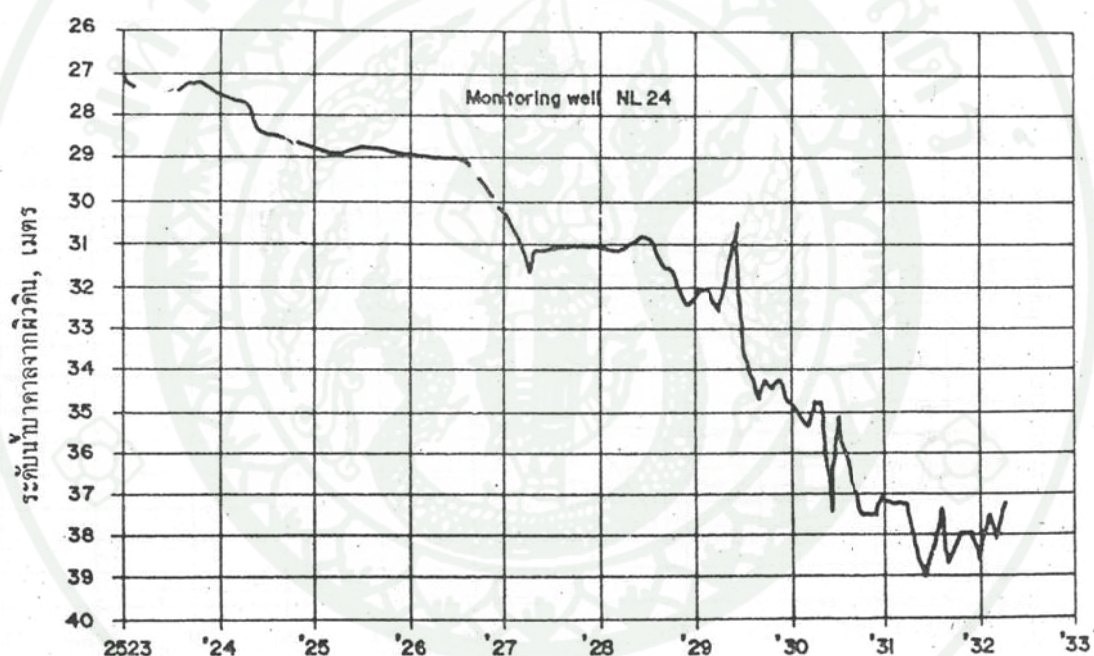
ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี (2532)



ภาพที่ 10 ระดับน้ำบาดาลในบ่อสังเกตการณ์บริเวณสนามกอล์ฟหัวหมาก เขตบางกะปิ
 (a) บ่อสังเกตการณ์ NL11 ชั้นน้ำนกรหลวง และ (b) บ่อสังเกตการณ์ NB8 ชั้นน้ำ
 นนทบุรี

ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี (2532)

ส่วนระดับน้ำบาดาลในพื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่จังหวัดสมุทรสาครและจังหวัดสมุทรปราการ ได้แก่ บริเวณอำเภอเมืองและอำเภอกะทู้แบนในจังหวัดสมุทรสาคร และบริเวณอำเภอบางพลีและปู้เจ้าสมิงพรายในจังหวัดสมุทรปราการ โดยในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2528-2531 การใช้น้ำบาดาลของโรงงานอุตสาหกรรมในพื้นที่อำเภอเมืองสมุทรสาคร อำเภอกะทู้แบน และอำเภอบางพลี ยังอยู่ในอัตราที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ระดับน้ำในบริเวณนี้ลดลงมากติดต่อกันทุกปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณอำเภอเมืองสมุทรสาคร ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนกรหลวงลดลงด้วยอัตราเฉลี่ยประมาณ 3 เมตร/ปี ดังแสดงในภาพที่ 11 โดยระดับน้ำในปี พ.ศ. 2528 อยู่ที่ระดับความลึก 31 เมตร แต่ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2531-2532 ระดับน้ำลดลงมาอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 39 เมตร



ภาพที่ 11 ระดับน้ำบาดาลในบ่อสังเกตการณ์ NL24 ชั้นน้ำนกรหลวง บริเวณวัดบางปิ้ง อ.เมือง จ.สมุทรสาคร

ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี (2532)

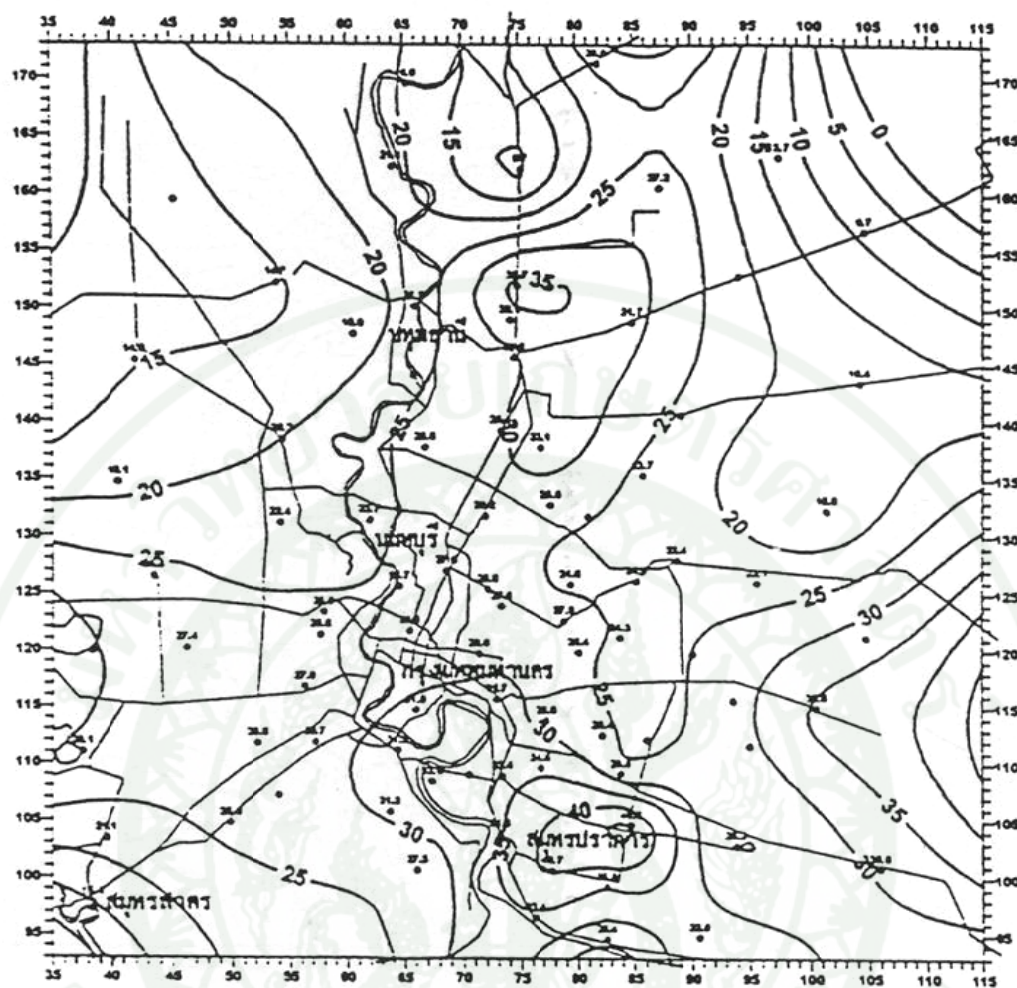
สำหรับในย่านอุตสาหกรรมปู้เจ้าสมิงพรายก่อนมีการใช้มาตรการควบคุมฯ ระดับน้ำบาดาลลดต่ำลงในอัตราที่สูงมาก แต่ปี พ.ศ. 2526 เป็นต้นมาระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นในอัตราที่น่าพอใจ โดยในปี พ.ศ. 2525 ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ลึก 46 เมตรจากผิวดิน ในปี พ.ศ. 2529 ระดับน้ำอยู่ลึก 37 เมตร สูงขึ้น 9 เมตร แต่ในปี พ.ศ. 2530 และ 2531 ระดับน้ำกลับลดลงอีกครั้ง คือในปี พ.ศ. 2530

ระดับน้ำอยู่ลึก 39 เมตร และในปี พ.ศ. 2531 อยู่ลึก 40 เมตร อย่างไรก็ตามการผันน้ำบาดาลในบริเวณย่านอุตสาหกรรมปทุมธานีเข้าสู่เมืองยังอยู่ในเกณฑ์ที่ดีขึ้น

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 ระดับน้ำบาดาลได้ลดลงอย่างรวดเร็วทุกชั้นน้ำเนื่องจากการใช้น้ำบาดาลเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นน้ำพระประแดงบริเวณ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ ระดับน้ำอยู่ที่ระดับ 40 เมตร จากระดับพื้นดิน ส่วนในชั้นน้ำนครหลวงที่บริเวณเขตลาดกระบัง และมีนบุรี ระดับน้ำอยู่ลึก 55 เมตร อัตราการลดระดับน้ำในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2533-2535 ปีละ 3 เมตร บางแห่งสูงกว่า 3 เมตร และตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536-2540 ระดับน้ำบาดาลยิ่งลดลงเพิ่มขึ้นในทุกชั้นน้ำ โดยเฉพาะ 3 ชั้นน้ำ ได้แก่ ชั้นน้ำพระประแดง ชั้นน้ำนครหลวง และชั้นน้ำนนทบุรี ซึ่งมีระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วทั้งบริเวณชานเมืองกรุงเทพฯ และจังหวัดใกล้เคียง เนื่องจากช่วงระยะเวลาดังกล่าวการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก มีการก่อสร้างหมู่บ้านจัดสรรหลายแห่งในบริเวณชานเมืองกรุงเทพฯ และปริมณฑล ทั้งที่ในหลายพื้นที่การประปา นครหลวงยังไม่สามารถให้บริการน้ำประปาได้ ทำให้หมู่บ้านจัดสรรหลายแห่งมีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้อุปโภคบริโภค นอกจากนี้โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้เพิ่มปริมาณการผลิตสูงขึ้นตามการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ ทำให้มีการใช้น้ำบาดาลในภาคอุตสาหกรรมสูงขึ้น

โดยเฉพาะอำเภอเมืองสมุทรสาคร อำเภอกะทู้มaben อำเภอบางพลี เขตลาดกระบัง ลำลูกกา คลองหลวง ดังแสดงในภาพที่ 12, 13 และ 14 ซึ่งแสดงระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำพระประแดง ชั้นน้ำนครหลวง และชั้นน้ำนนทบุรี ในปี พ.ศ. 2539 ตามลำดับ

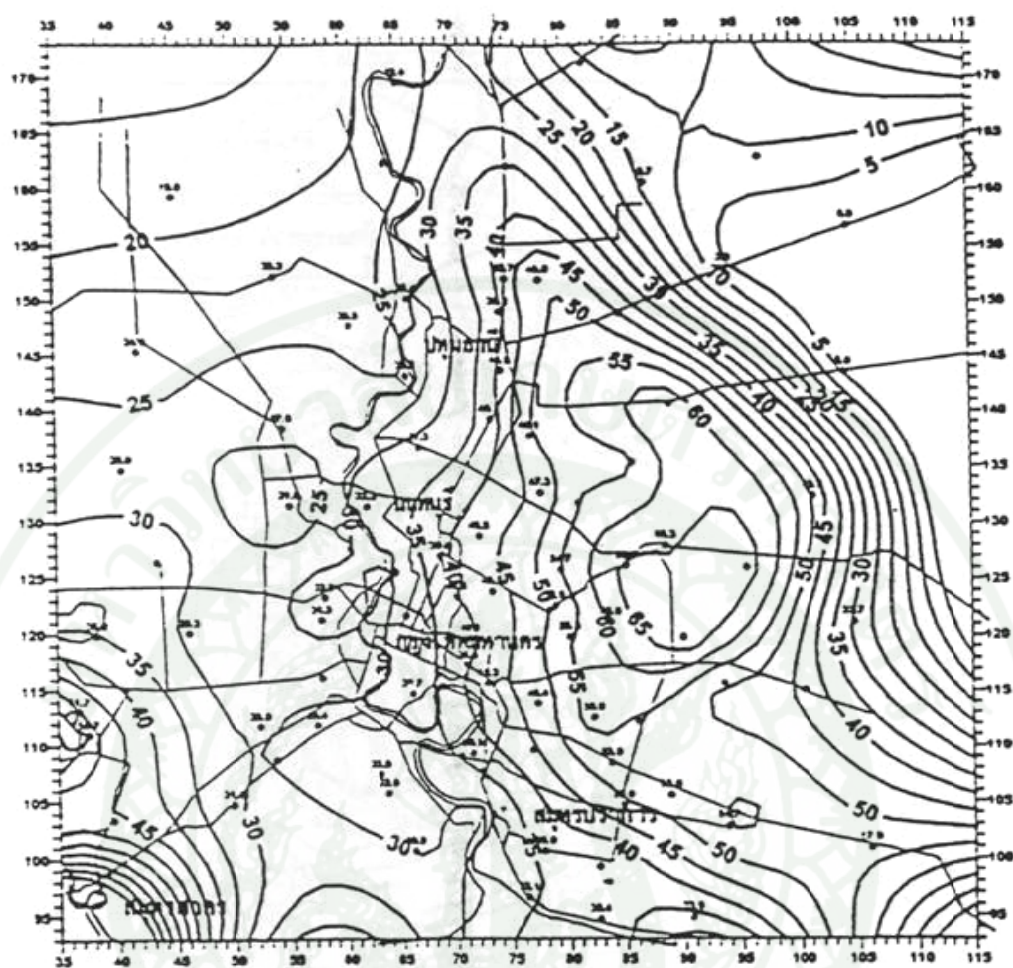
ในภาพที่ 12 แสดงระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำพระประแดงปี พ.ศ. 2539 มีพื้นที่ที่มีการลดลงของระดับน้ำเป็นรูปกรวยขอบอย่างชัดเจนจำนวน 3 พื้นที่ โดยพื้นที่ที่มีการลดลงของระดับน้ำสุดอยู่ที่ 45 เมตร ที่บริเวณ อ.เมือง และ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ และรองลงมาคือ ที่ อ.เมือง จ.ปทุมธานี มีระดับน้ำอยู่ที่ 35 เมตร



ภาพที่ 12 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำพระประแดงปี พ.ศ. 2539

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2543)

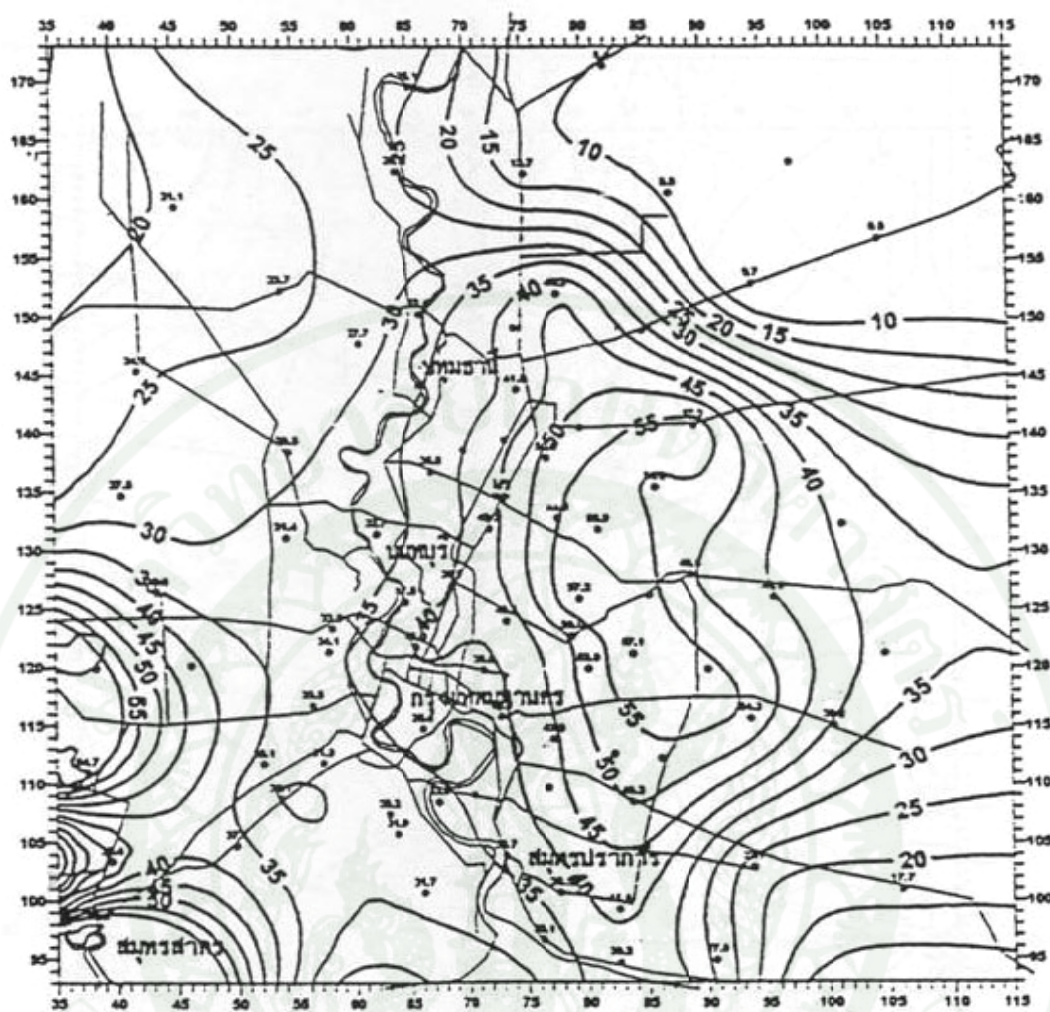
ในภาพที่ 13 แสดงระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนครหลวงปี พ.ศ. 2539 มีพื้นที่ที่มีการลดลงของระดับน้ำเป็นรูปกรวยจำนวน 2 พื้นที่ โดยพื้นที่ที่มีการลดลงของระดับต่ำสุดอยู่ที่ 75 เมตร ที่บริเวณ จ.สมุทรสาคร และรองลงมาคือ ที่บริเวณเขตมีนบุรีและลาดกระบัง กรุงเทพฯ มีระดับน้ำอยู่ที่ 65 เมตร



ภาพที่ 13 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนครหลวงปี พ.ศ. 2539

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2543)

ในภาพที่ 14 แสดงระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนนทบุรีปี พ.ศ. 2539 พื้นที่ที่มีการลดลงของระดับน้ำเป็นรูปกรวยมี 3 พื้นที่ โดยมีระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ 55-60 เมตร ที่บริเวณพื้นที่ จ.สมุทรสาคร จ.นครปฐม และบริเวณเขตมีนบุรี ลาดกระบัง บึงกลุ่ม และประเวศ กรุงเทพฯ



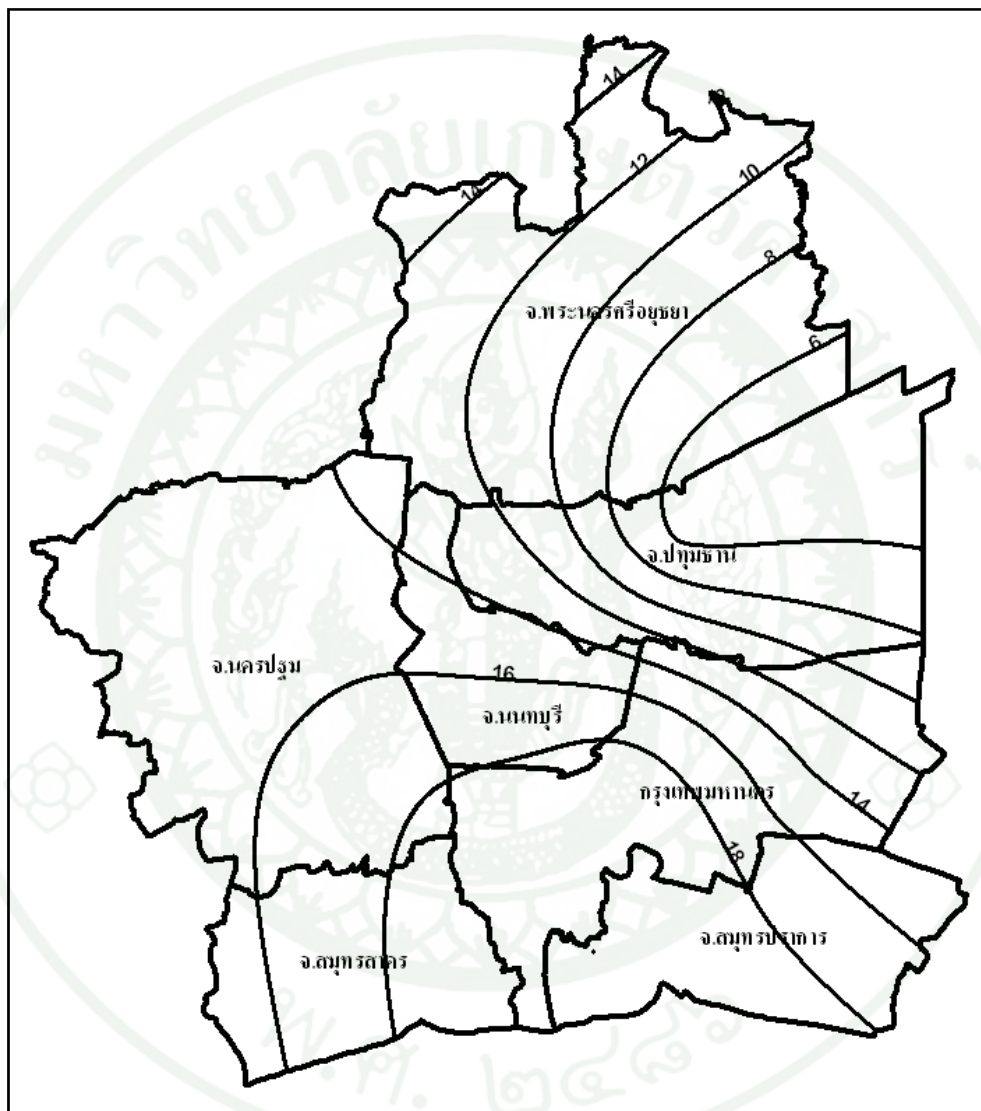
ภาพที่ 14 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนันทบุรีปี พ.ศ. 2539

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2543)

ข้อมูลระดับน้ำบาดาลในปี พ.ศ. 2540-2550

ระดับน้ำบาดาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540-2550 ได้จากการจดบันทึกโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาลของบ่อสังเกตการณ์ตามสถานีต่าง ๆ ทำให้ทราบพื้นที่ที่มีการลดระดับน้ำบาดาลมากที่สุดคือ มีการลดระดับน้ำเป็นรูปกรวยขยุบตัวอย่างชัดเจนในแต่ละชั้นน้ำ ซึ่งแต่ละชั้นน้ำจะมีพื้นที่ที่มีการลดระดับน้ำเป็นรูปกรวยขยุบนี้มากน้อยต่างกันขึ้นกับปริมาณการสูบน้ำบาดาลในแต่ละพื้นที่ ชั้นน้ำบาดาลที่มีพื้นที่การลดระดับน้ำเป็นรูปกรวยมากที่สุด คือ ชั้นน้ำพระประแดงมีจำนวน 5 พื้นที่ รองลงมาคือ ชั้นน้ำนันทบุรีมี 3 พื้นที่ ชั้นน้ำนครหลวงและชั้นน้ำสามโคกมี 2 พื้นที่ และชั้นน้ำกรุงเทพ ชั้นน้ำพญาไท ชั้นน้ำธนบุรี และชั้นน้ำปากน้ำ มี 1 พื้นที่ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

ชั้นน้ำกรุงเทพ พื้นที่ที่มีการลดระดับน้ำบาดาลเป็นรูปกรวยมี 1 พื้นที่ ตรงบริเวณเขต คลองเตย พระโขนง และจอมทอง กรุงเทพมหานคร และอำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ ระดับน้ำลึกสุดจะอยู่ที่ประมาณ 18 ถึง 20 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 15

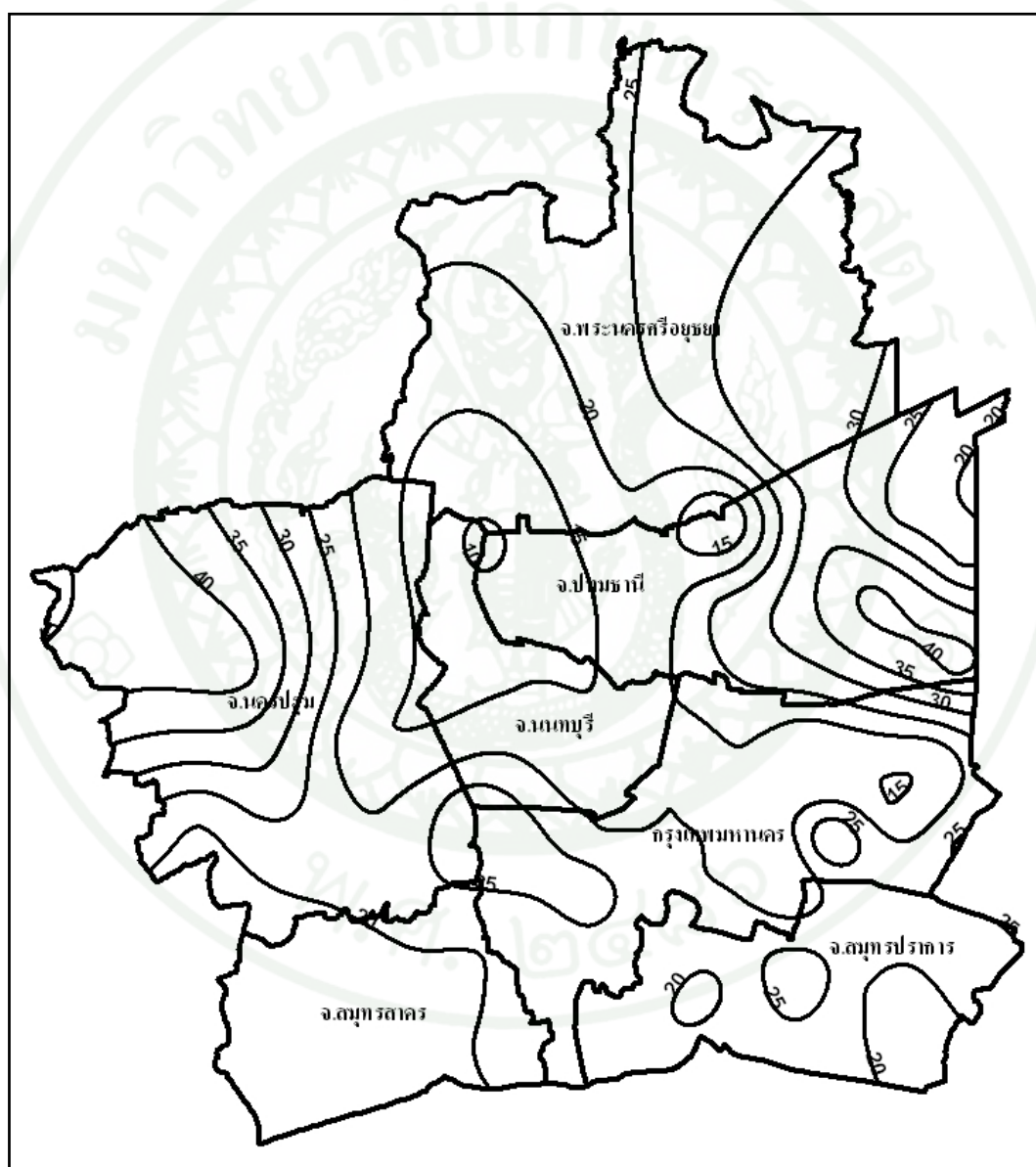


ภาพที่ 15 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำกรุงเทพปี พ.ศ. 2550

ชั้นน้ำพระประแดง พื้นที่ที่มีการลดระดับน้ำบาดาลเป็นรูปกรวยจะมี 2 พื้นที่ ระดับน้ำ โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 20 ถึง 25 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 16 ประกอบด้วยพื้นที่โดยเรียงลำดับจากการ ลดระดับน้ำบาดาลจากมากไปหาน้อย ดังนี้

- เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ -45 เมตร
- อำเภอลำลูกกา คลองสามวา ปทุมธานี ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ 40 เมตร

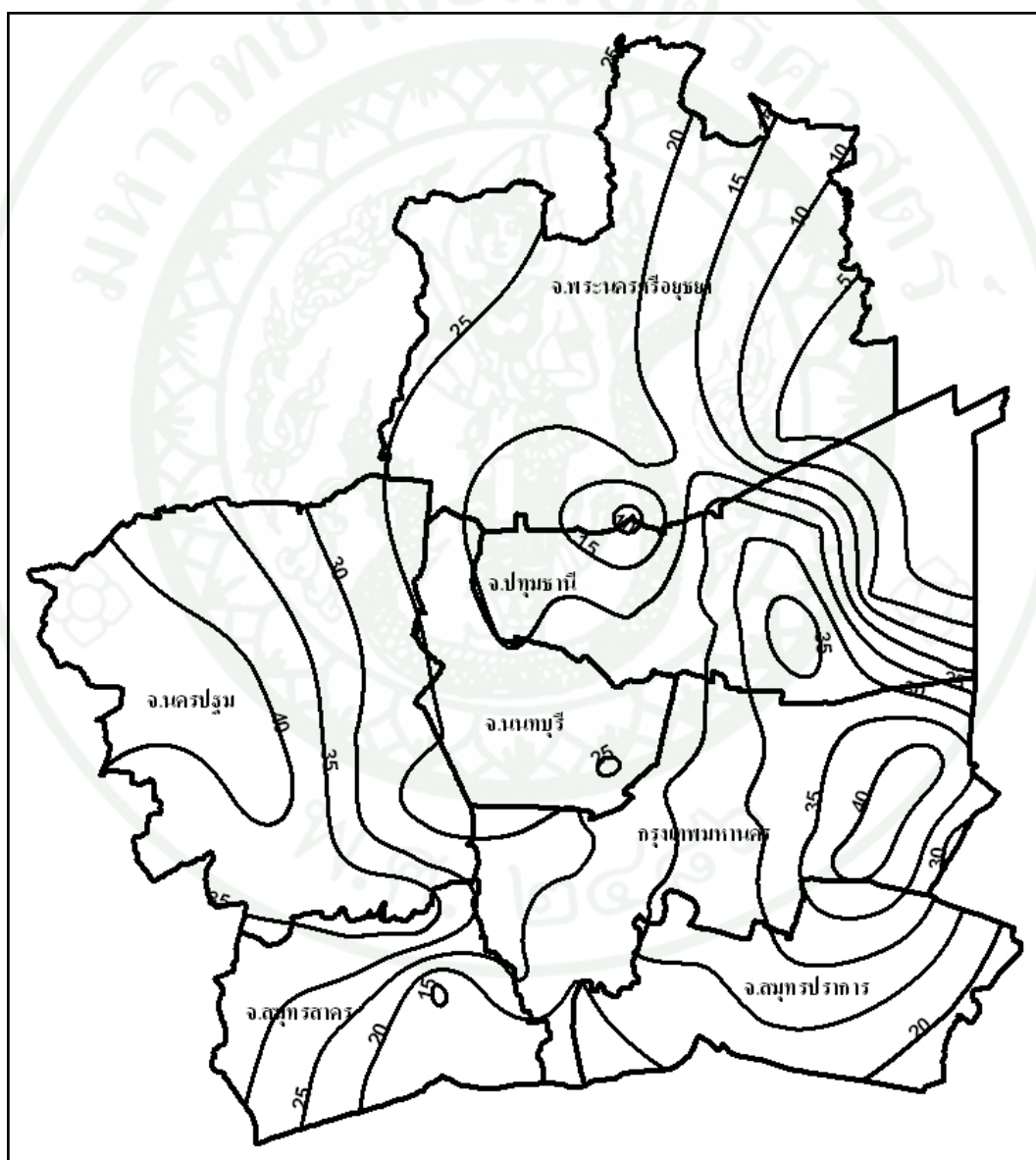
- อำเภอคอนตูม จังหวัดนครปฐม ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ 40 เมตร
- เขตคลองเตย พระโขนง ยานนาวา จอมทอง และราษฎร์บูรณะ กรุงเทพฯ ติดต่อกับอำเภอเมือง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ -25 เมตร
- เขตติดต่ออำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม อำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร และเขตหนองแขม กรุงเทพฯ ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ -25 เมตร



ภาพที่ 16 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำพระประแดงปี พ.ศ. 2550

ชั้นน้ำนกรหลวง พื้นที่ที่มีการลดระดับน้ำบาดาลเป็นรูปกรวยมี 2 พื้นที่ ระดับน้ำโดยทั่วไปจะอยู่ที่ -10 ถึง -25 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 17 ประกอบด้วยพื้นที่โดยเรียงลำดับจากการลดระดับน้ำบาดาลจากมากไปหาน้อย ดังนี้

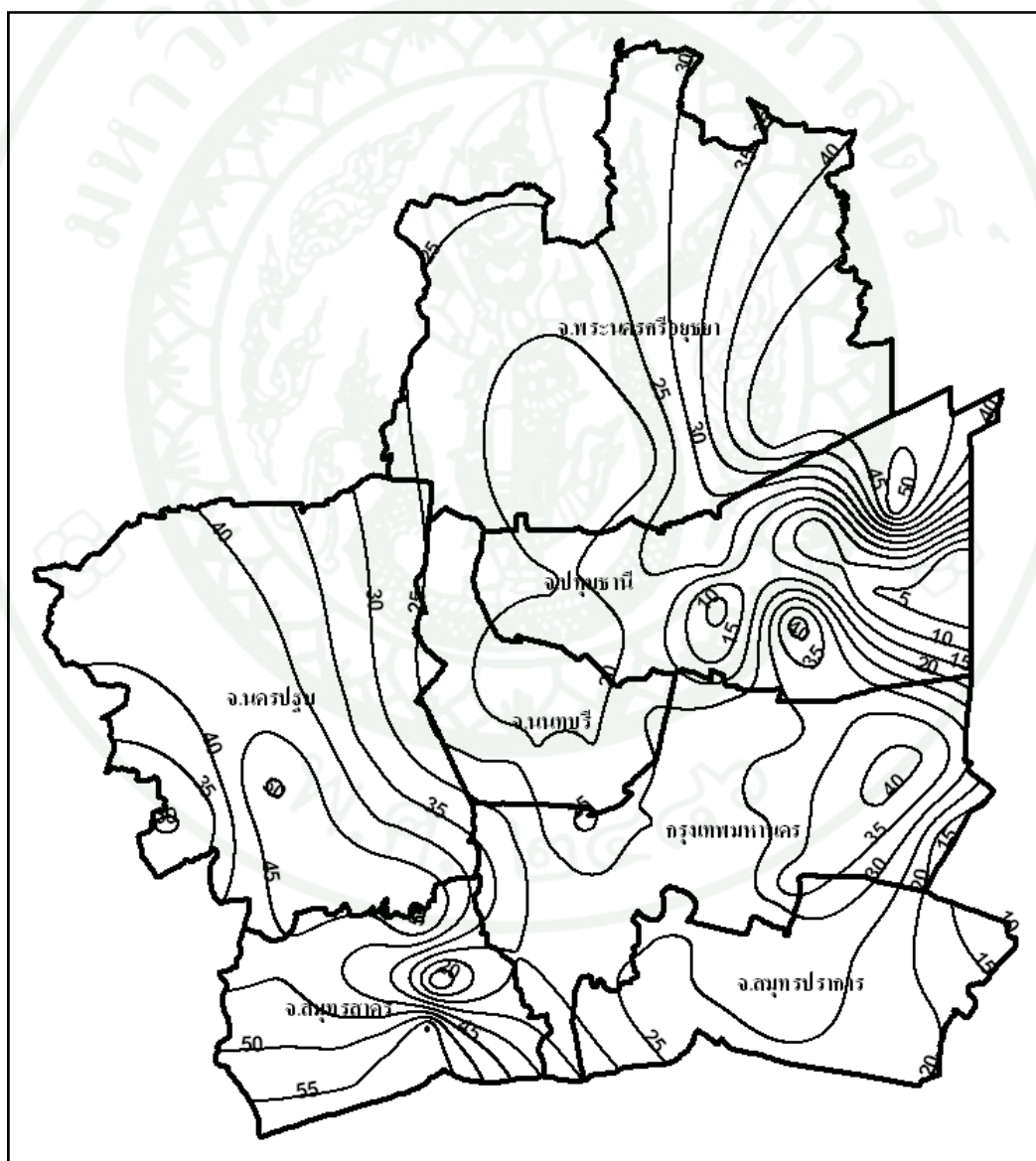
- เขตติดต่อเขตลาดกระบังและมีนบุรี กรุงเทพฯ ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ -55 เมตร
- เขตติดต่ออำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม อำเภอบ้านแพ้วและอำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ -45 เมตร



ภาพที่ 17 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนกรหลวงปี พ.ศ. 2550

ชั้นน้ำนันทบุรี พื้นที่ที่มีการลดระดับน้ำบาดาลเป็นรูปกรวยมี 3 พื้นที่ ระดับน้ำโดยทั่วไปจะอยู่ที่ 0 ถึง -35 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 18 ประกอบด้วยพื้นที่โดยเรียงลำดับจากการลดระดับน้ำบาดาลจากมากไปหาน้อย ดังนี้

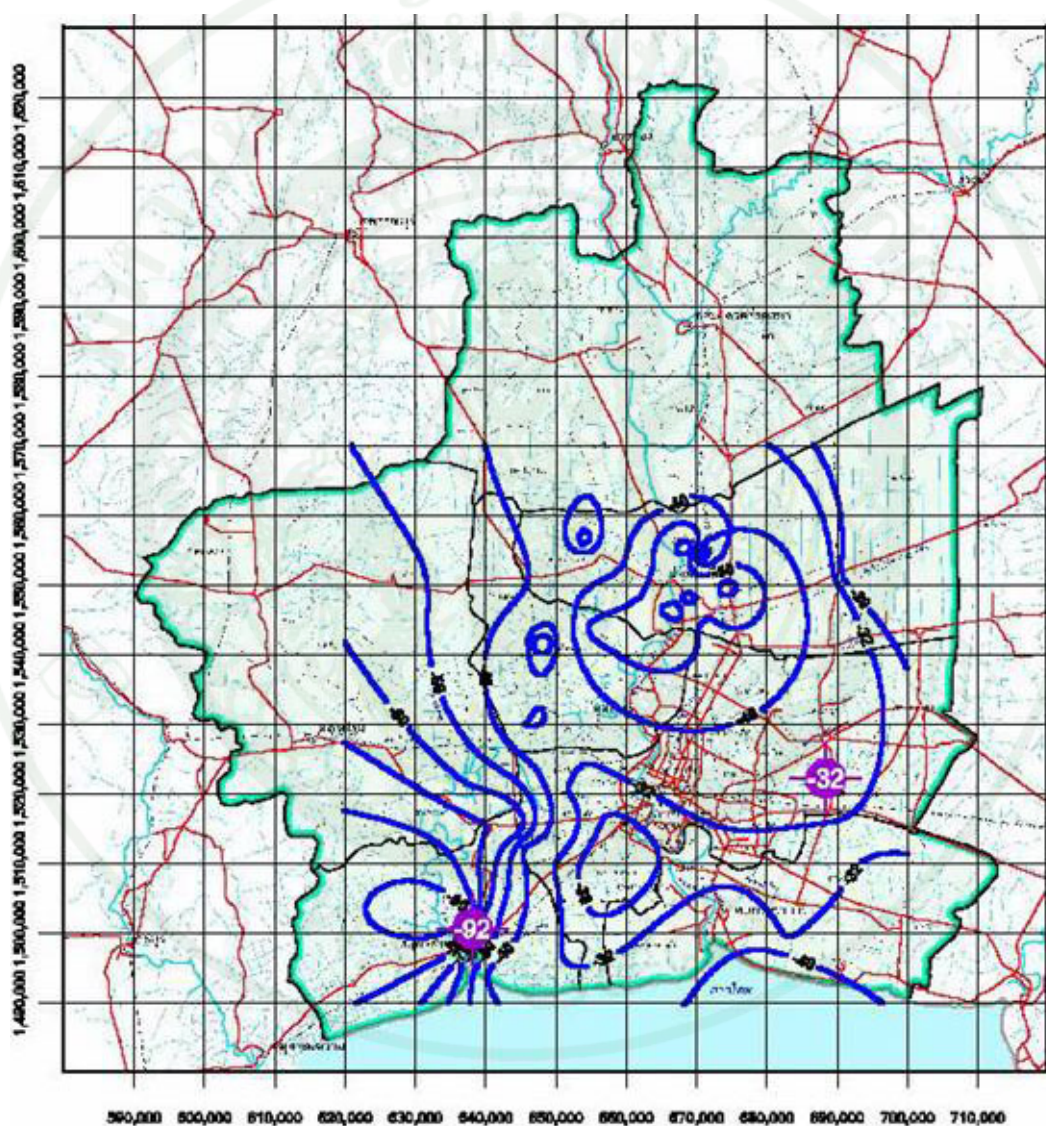
- อำเภอเมือง อำเภอบ้านแพ้ว และอำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร และอำเภอสามปราชญ์ จังหวัดนครปฐม ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ -75 เมตร
- เขตติดต่อเขตลาดกระบังและมีนบุรี กรุงเทพฯ ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ -45 เมตร
- อำเภอธัญบุรี และอำเภอสองโคก จังหวัดปทุมธานี ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ -45 เมตร



ภาพที่ 18 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนันทบุรีปี พ.ศ. 2550

ชั้นน้ำสามโลก พื้นที่ที่มีการลดระดับน้ำบาดาลเป็นรูปกรวยมี 2 พื้นที่ ระดับน้ำโดยทั่วไปจะอยู่ที่ -30 ถึง -40 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 19 ประกอบด้วยพื้นที่โดยเรียงลำดับจากการลดระดับน้ำบาดาลจากมากไปหาน้อย ดังนี้

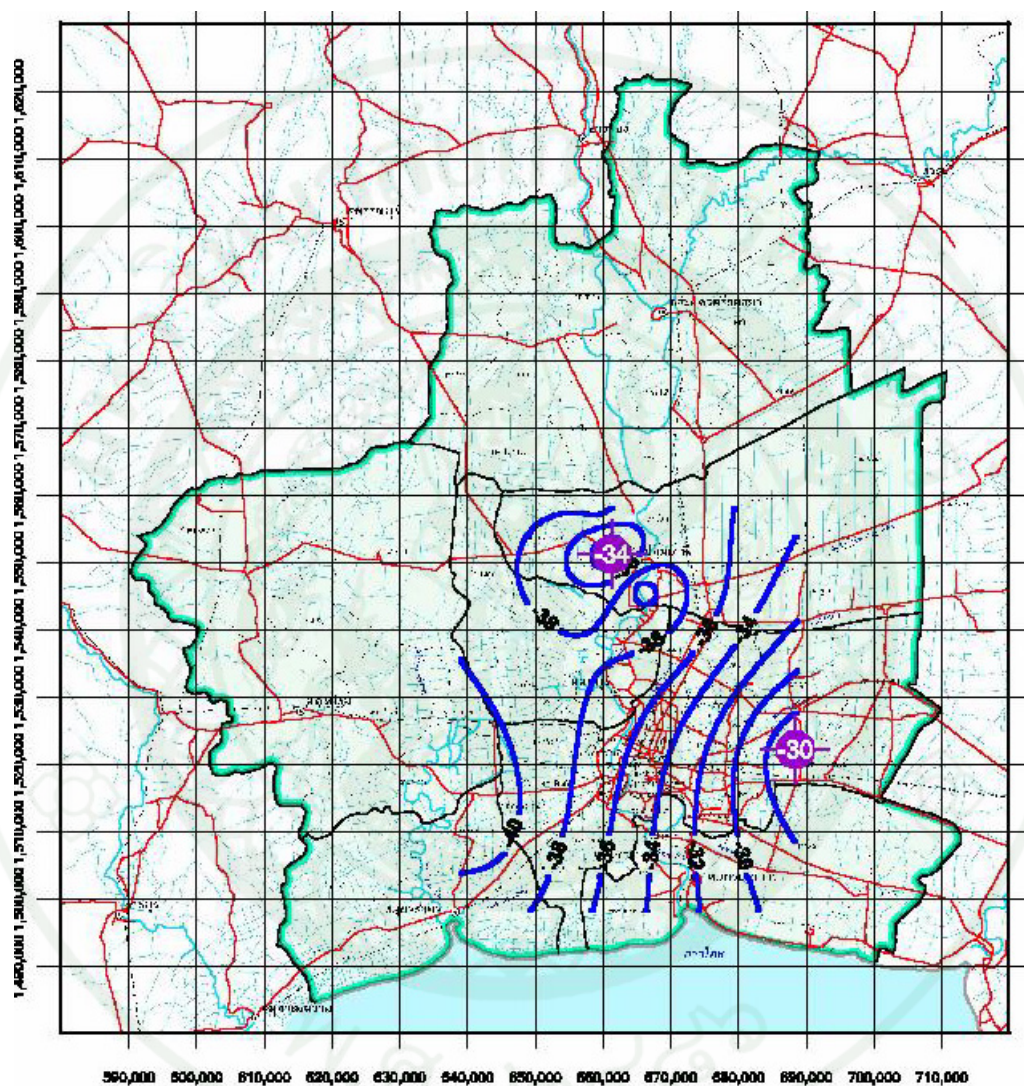
- อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ -90 เมตร
- อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ -55 เมตร



ภาพที่ 19 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำสามโลกปี พ.ศ. 2546

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2547)

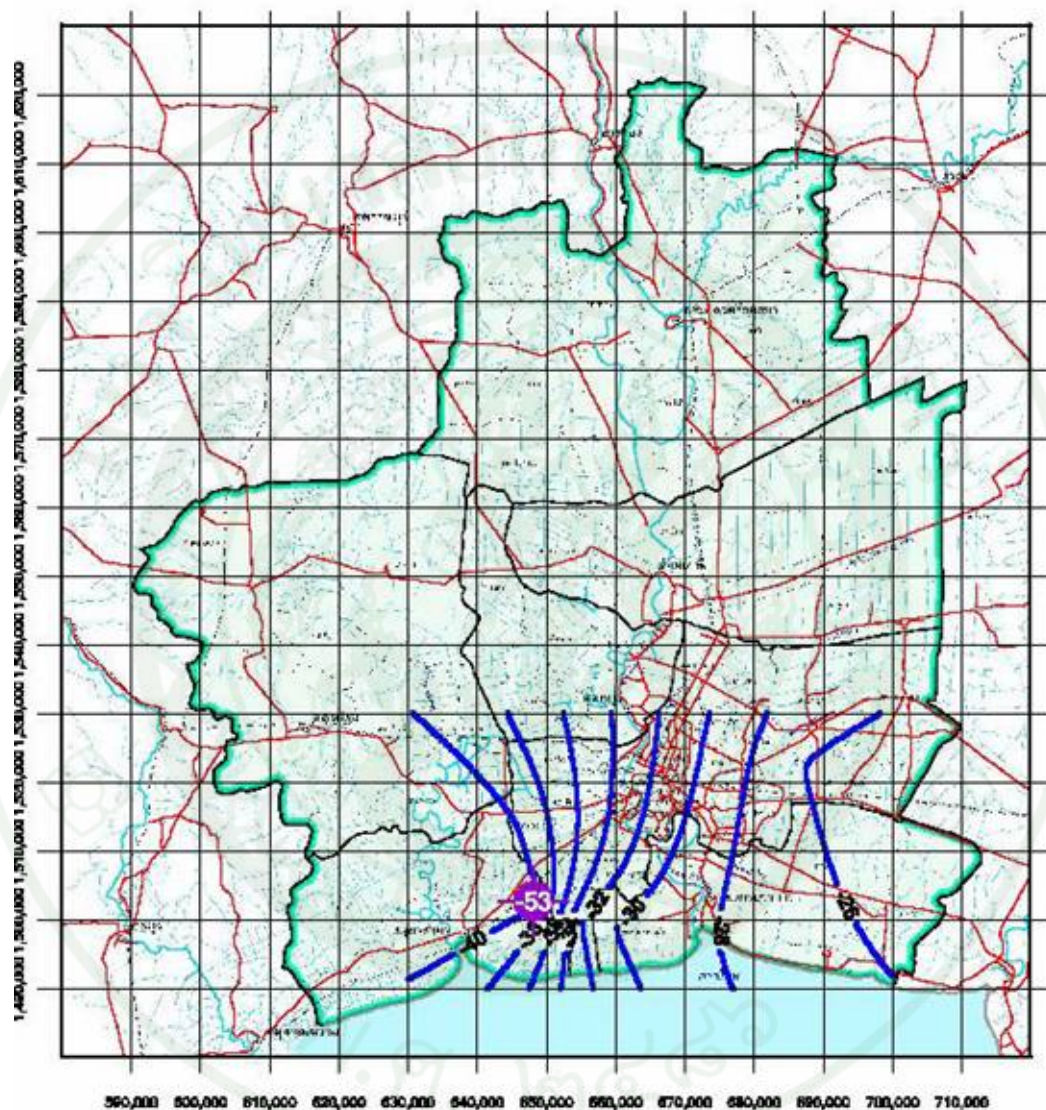
ชั้นน้ำพญาไท พื้นที่ที่มีการลดระดับน้ำบาดาลเป็นรูปกรวยมี 1 พื้นที่ บริเวณเขตติดต่อ อำเภอบ้านแพ้ว และอำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร กับอำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ -40 เมตร ระดับน้ำโดยทั่วไปจะอยู่ที่ -30 ถึง -36 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำพญาไทปี พ.ศ. 2546

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2547)

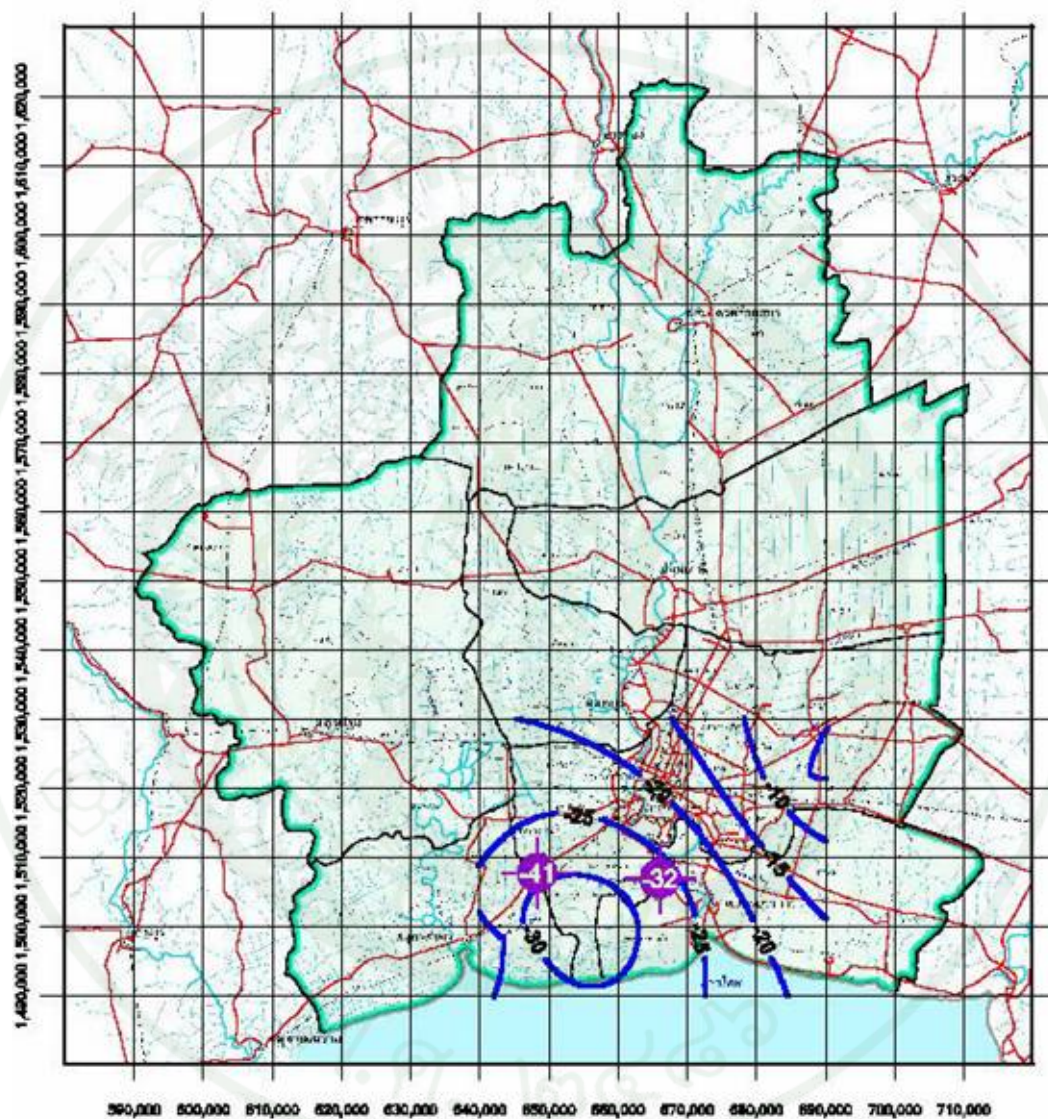
ชั้นน้ำธนบุรี พื้นที่ที่มีการลดระดับน้ำบาดาลเป็นรูปกรวยมี 1 พื้นที่ บริเวณเขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ -53 เมตร ระดับน้ำโดยทั่วไปจะอยู่ที่ -32 ถึง -42 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำธนบุรีปี พ.ศ. 2546

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2547)

ชั้นน้ำปากน้ำ พื้นที่ที่มีการลดระดับน้ำบาดาลเป็นรูปกรวยมี 1 พื้นที่ บริเวณเขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ และอำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร ระดับน้ำต่ำสุดอยู่ที่ -41 เมตร ระดับน้ำโดยทั่วไปจะอยู่ที่ -30 ถึง -36 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 22

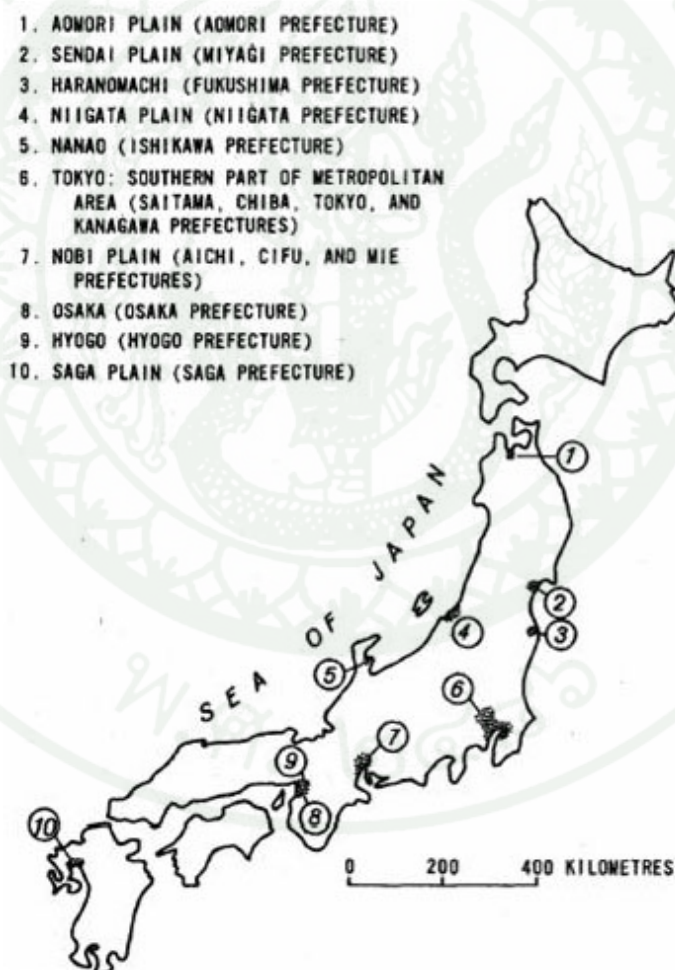


ภาพที่ 22 ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำปากน้ำปี พ.ศ. 2546

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2547)

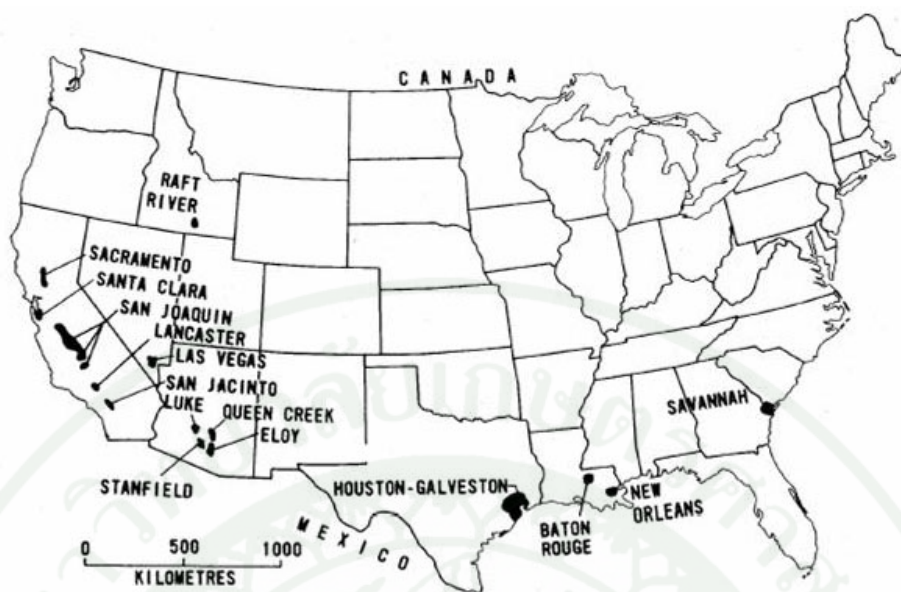
ผลกระทบจากการสูบน้ำบาดาลเกินปริมาณสมดุล

องค์การศึกษา วิทยาศาสตร์และวัฒนธรรมแห่งสหประชาชาติ [United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Unesco (1984)] ได้ทำการรวบรวมปัญหาการทรุดตัวของแผ่นดินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลในที่ต่าง ๆ ทั่วโลกจำนวน 42 แห่งใน 12 ประเทศประกอบด้วย ออสเตรเลีย จีน ไต้หวัน อังกฤษ ฮังการี อิตาลี ญี่ปุ่น เม็กซิโก นิวซีแลนด์ แอฟริกาใต้ สหรัฐอเมริกา และไทย โดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศที่มีปัญหาในเรื่องการทรุดตัวของแผ่นดินมากที่สุด ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ที่มีประชากรหนาแน่นแถบชายฝั่งทะเล ดังแสดงในภาพที่ 23 และ 24



ภาพที่ 23 พื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวเนื่องจากการลดลงของน้ำบาดาลในญี่ปุ่น

ที่มา: Unesco (1984)



ภาพที่ 24 พื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวเนื่องจากการลดลงของน้ำบาดาลในสหรัฐอเมริกา

ที่มา: Unesco (1984)

กรณีศึกษาการทรุดตัวที่โตเกียว โอซากา ที่ราบโนบิ และนิกาทะ ในญี่ปุ่น

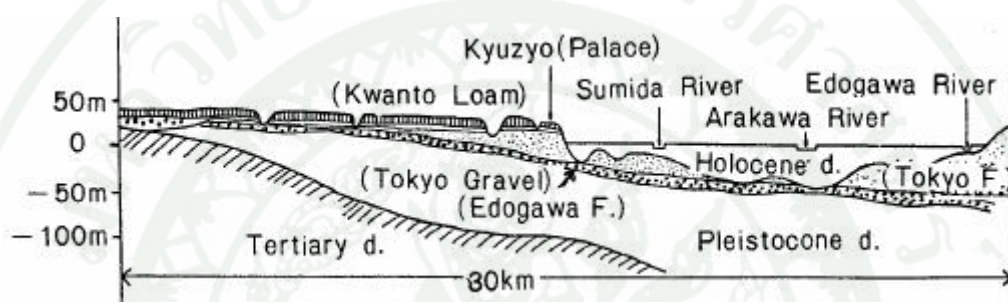
Soki Yamamoto (1977) ได้ทำการศึกษาปัญหาการทรุดตัวของแผ่นดินที่เกิดขึ้นในโตเกียว โอซากา ที่ราบโนบิ และนิกาทะ ในประเทศญี่ปุ่น รวมทั้งการแก้ไขปัญหาดังกล่าวซึ่งมีรายละเอียดพอที่จะสรุปได้ ดังนี้

การทรุดตัวที่โตเกียว

โตเกียวตั้งอยู่ทางตอนล่างของแอ่งที่ราบ Kanto ซึ่งเป็นที่ราบขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศญี่ปุ่น โดยมีลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหินฐานรากที่เกิดขึ้นในยุค Tertiary และของชั้นดินที่ตกตะกอนทับถมกันในยุค Quaternary ดังแสดงในภาพที่ 25

การสูบน้ำบาดาลในโตเกียวเริ่มมีมาตั้งแต่ปี 1914 หลังจากนั้นการขุดเจาะบ่อบาดาลขนาดใหญ่ในระดับลึกได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยในช่วงครึ่งปีหลังของปี 1920 ระดับน้ำบาดาลในตำบล Koto ลดต่ำลงมาอยู่ที่ประมาณ 10 เมตร จากระดับผิวดินและยังคงลดต่ำลงเรื่อย ๆ ทุกปี แต่ช่วงปลายของสงครามโลกครั้งที่ 2 ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นมาชั่วระยะเวลาหนึ่งและลดลงอีกครั้ง

หลังจากสิ้นสุดสงครามแล้ว จนกระทั่งถึงเดือนสิงหาคมปี 1971 ระดับน้ำบาดาลอยู่ที่ -63 ถึง -94 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลางของอ่าวโตเกียว ปริมาณน้ำบาดาลในกรุงโตเกียวที่ถูกสูบขึ้นมาใช้ในแต่ละปี ตั้งแต่ปี 1964–1975 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งปริมาณน้ำบาดาลที่ถูกสูบขึ้นมาในพื้นที่ 23 ตำบลของปี 1964 เท่ากับ 1,162,000 ลบ.ม./วัน จากนั้นปริมาณการสูบน้ำบาดาลจะลดลง จนกระทั่งถึงปี 1975 ปริมาณการสูบจะลดลงเหลือ 128,000 ลบ.ม./วัน หรือประมาณ 1/10 ของปี 1964 การลดปริมาณการสูบเนื่องจากการใช้มาตรการควบคุมการใช้น้ำบาดาลเพื่อลดปัญหาการทรุดตัวของชั้นดิน



ภาพที่ 25 ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาในโตเกียว

ที่มา: Yamamoto (1977)

ตารางที่ 3 ปริมาณการสูบน้ำบาดาลในกรุงโตเกียวตั้งแต่ปี 1964–1975

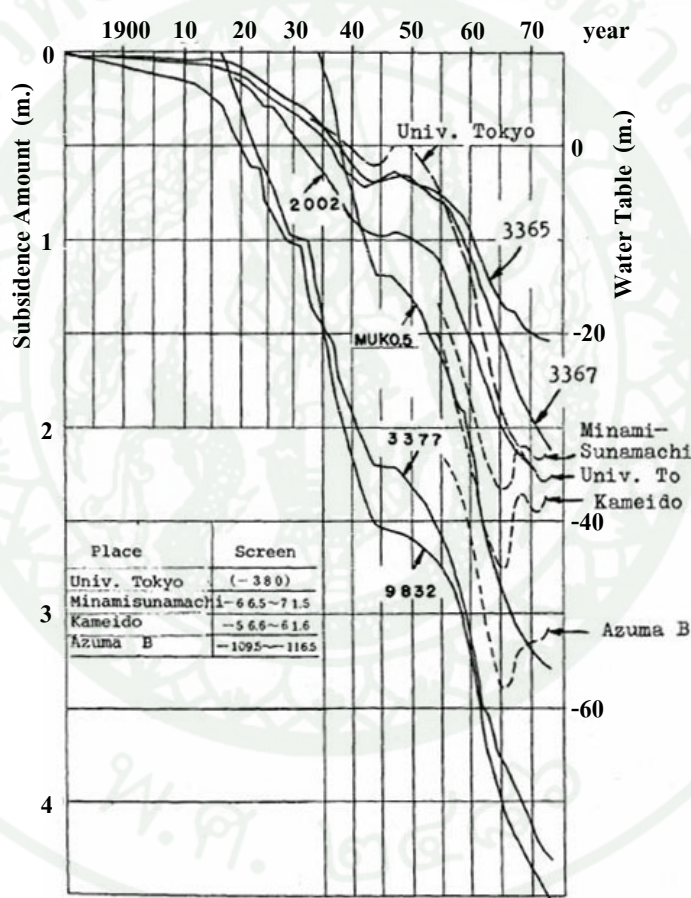
(1000 m³/day)

Year Area	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975
23 wards	1162	1017	805	732	679	674	747	550	324	283	195	128
Tama	353	480	536	594	626	765	953	891	853	861	818	790
Total	1515	1497	1341	1326	1305	1439	1700	1441	1177	1144	1013	918

ที่มา: Yamamoto (1977)

จากการสูบน้ำบาดาลในปริมาณมากนี้ทำให้ระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างรวดเร็วและเกิดการทรุดตัวของแผ่นดินตามมา ดังแสดงในภาพที่ 26 โดยการทรุดตัวเริ่มเกิดขึ้นประมาณปี 1900 ในพื้นที่ตำบล Koto ส่วนในพื้นที่ตำบล Edogawa เริ่มเกิดขึ้นประมาณปี 1920 (ระดับน้ำบาดาลแสดง

เป็นเส้นประ) ค่าการทรุดตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นประมาณ 4.6 เมตร และมีอัตราการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 27 ซม./ปี มีพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวทั้งหมดประมาณ 2420 ตร.กม. และพื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวมากกว่า 10 ซม./ปี ประมาณ 100 ตร.กม. ดังแสดงในภาพที่ 27 การทดสอบตัวอย่างดินเพื่อหาคุณสมบัติการยุบอัดตัวพบว่า ค่าดัชนีการยุบอัดตัวของดิน (Compression Index, C_c) อยู่ในช่วง 0.2-1.2 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำในมวลดิน, ค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of Volume Change, m_v) อยู่ในช่วง 4×10^{-4} - 3×10^{-2} ตร.ซม./กก. และมีค่าความซึมน้ำ (Hydraulic Conductivity, k) อยู่ในช่วง 1.3×10^{-2} - 2.1×10^{-2} ตร.ซม./วินาที

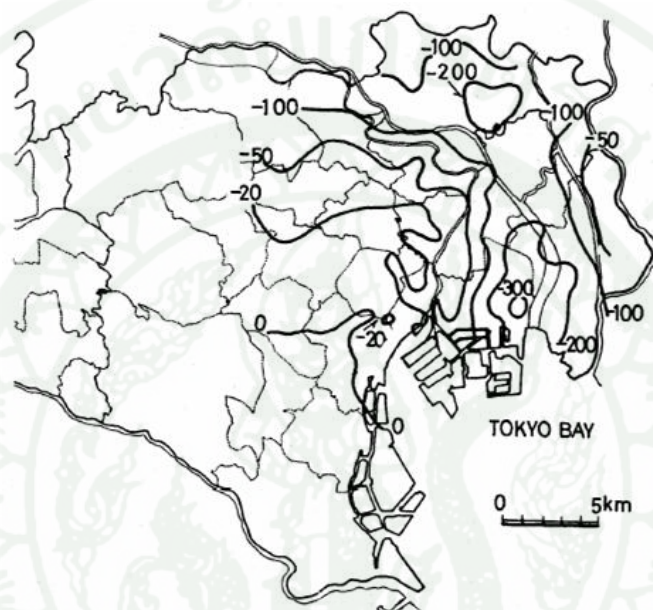


ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลและการทรุดตัวในโตเกียว (Unesco, 1984)

ที่มา: Yamamoto (1977)

เพื่อป้องกันและหยุดการทรุดตัวดังกล่าวจึงได้มีมาตรการควบคุมการใช้น้ำบาดาล ทำให้อัตราการทรุดตัวลดลงเรื่อย ๆ ตั้งแต่ปี 1972 โดยกำหนดให้พื้นที่ทางภาคเหนือของโตเกียวห้ามมี

การขุดเจาะบ่อน้ำบาดาลที่มีระดับความลึกน้อยกว่า 160 เมตร ในปี 1971 และในปี 1974 ห้ามมีการขุดเจาะบ่อน้ำบาดาลที่มีระดับความลึกมากกว่า 160 เมตรเช่นเดียวกัน ทำให้ปริมาณน้ำบาดาลที่ถูกสูบขึ้นมาลดลงจาก 80,000-90,000 ลบ.ม./วันในช่วงระหว่างปี 1972-1973 เหลือ 7,000-8,000 ลบ.ม./วันในปี 1974 และทำให้ระดับน้ำบาดาลซึ่งเคยลดลงต่ำสุดอยู่ที่ระดับ -48.9 เมตร (Tokyo Bay Datum) ในเดือนกรกฎาคม 1971 เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ



ภาพที่ 27 ค่าการทรุดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นในโตเกียวตั้งแต่ปี 1938-1975

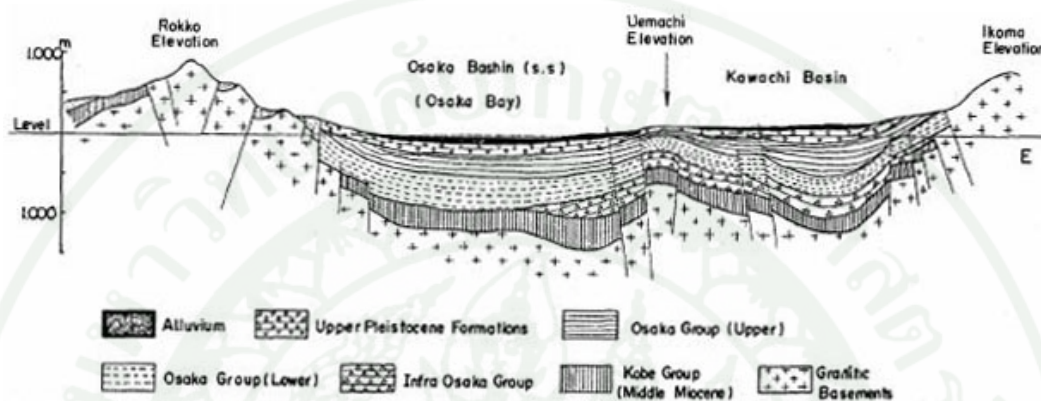
ที่มา: Yamamoto (1977)

การทรุดตัวของโอซากา

ที่ราบแอ่งโอซากาเป็นที่ราบที่เกิดขึ้นในยุค Quaternary โดยมีลักษณะธรณีวิทยา ดังแสดงในภาพที่ 28 ชั้นดินตะกอนชั้นบนสุดจะเป็นพวกตะกอนน้ำพา (Alluvial) มีชั้นดินเหนียวหนาประมาณ 15 เมตร และจะมีความหนาเพิ่มมากขึ้นเมื่อเข้าใกล้พื้นที่ชายฝั่งทะเล ได้ชั้นดินเหนียวลงไปจะเป็นชั้นทรายซึ่งมีความหนามากและเป็นชั้นน้ำบาดาลที่ดีที่สุดในพื้นที่นี้

ก่อนที่จะมีการสูบน้ำบาดาลระดับน้ำในโอซากาจะมีระดับที่สูงมาก แต่จากการเจริญเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมทำให้มีการสูบน้ำบาดาลเพิ่มมากขึ้นและการทรุดตัวของแผ่นดิน

เนื่องจากการลดลงของน้ำบาดาลเริ่มปรากฏให้เห็น ก่อนปี 1928 การทรุดตัวของแผ่นดินในโอซากะมีน้อยมากโดยมีอัตราการทรุดตัว 6-13 มม./ปี ซึ่งถูกพิจารณาว่าเป็นการทรุดตัวเนื่องจากการเคลื่อนตัวของชั้นดินและการยุบอัดตัวจากการกดทับของชั้นดินตามธรรมชาติ ตารางที่ 4 ได้แสดงปริมาณการสูบน้ำบาดาลในโอซากะตั้งแต่ปี 1920-1974



ภาพที่ 28 รูปลักษณะทางธรณีวิทยาของที่ราบแอ่งโอซากะ

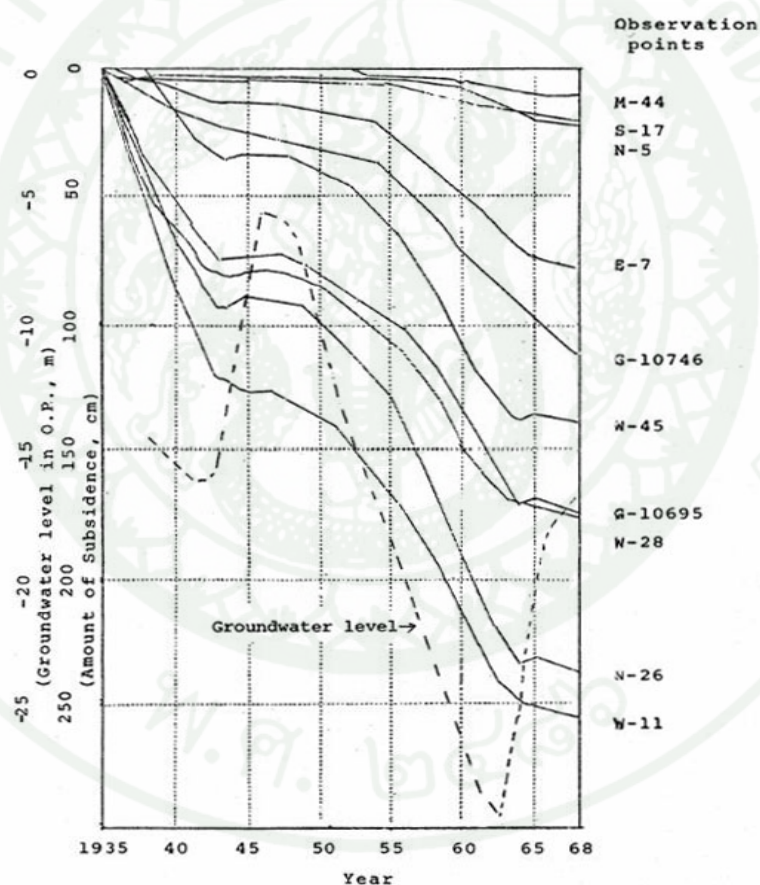
ที่มา: Yamamoto (1977)

ตารางที่ 4 ปริมาณการสูบน้ำบาดาลในโอซากะ

ปี	จำนวน ($\square 10^3 \text{ m}^3/\text{year}$)	ปี	จำนวน ($\square 10^3 \text{ m}^3/\text{year}$)	ปี	จำนวน ($\square 10^3 \text{ m}^3/\text{year}$)
1920	956	1956	65060	1963	94780
1930	6386	1957	93120	1964	79190
1940	18997	1958	110720	1965	56120
1945	19309	1959	130420	1966	34410
1953	30000	1960	144100	1967	15400
1954	37440	1961	130420	1968	4660
1955	57440	1962	123680	1974	42

ที่มา: Yamamoto (1977)

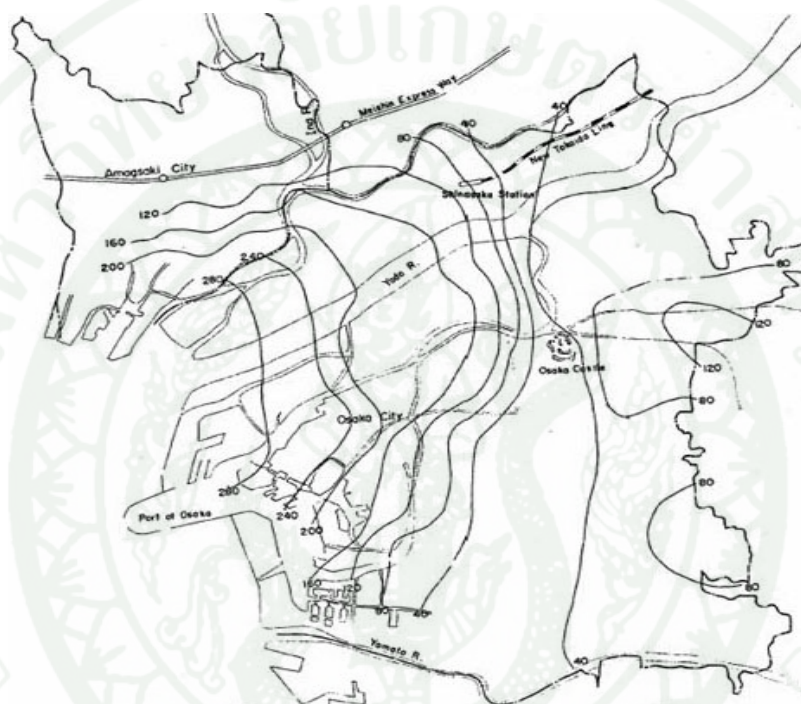
จากการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้จำนวนมากทำให้เกิดการทรุดตัวในโอซากาเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 29 จะเห็นว่าช่วงที่การทรุดตัวหยุดนิ่งจะตรงกับช่วงที่ระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้น โดยสามารถแบ่งอัตราการทรุดตัวของชั้นดินได้เป็น 4 ช่วง ช่วงแรกตั้งแต่ปี 1935-1943 อัตราการทรุดตัวจะเร็วมากตามการเพิ่มขึ้นของโรงงานอุตสาหกรรมในเมืองโอซากาช่วงที่ 2 ตั้งแต่ปี 1944-1951 อัตราการทรุดตัวจะน้อยมากหรือบางจุดแทบจะไม่มีทรุดตัวเกิดขึ้นเลยซึ่งในช่วงเวลานี้ อุตสาหกรรมต่าง ๆ กำลังอยู่ในช่วงตกต่ำอย่างมากเนื่องจากเกิดผลกระทบจากสงครามจึงมีการใช้น้ำบาดาลลดลง ช่วงที่ 3 ตั้งแต่ปี 1952-1964 อัตราการทรุดตัวเพิ่มขึ้นอีกครั้งเนื่องจากมีการใช้น้ำบาดาลในโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น และช่วงที่ 4 ตั้งแต่ปี 1964 ถึงปัจจุบันการใช้น้ำบาดาลเริ่มลดลงเนื่องจากมีมาตรการควบคุมการใช้น้ำบาดาลออกมาบังคับใช้



ภาพที่ 29 การทรุดตัวและการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในโอซากา

ที่มา: Yamamoto (1977)

การทรุดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นในโอซากะจะมีพื้นที่ประมาณ 570 ตร.กม. ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ใกล้ชายฝั่งทะเล ดังแสดงในภาพที่ 30 ปัจจุบันพื้นที่การทรุดตัวจะลดลงเนื่องจากการใช้มาตรการควบคุมการใช้น้ำบาดาลประสบความสำเร็จ แต่อย่างไรก็ตามบริเวณพื้นที่ทางด้านทิศเหนือและตะวันตกของเมืองโอซากะจะมีการทรุดตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องใช้น้ำบาดาลในการผลิตยังคงมีอยู่ในปัจจุบัน



ภาพที่ 30 การทรุดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นในโอซากะช่วงระหว่างปี 1935-1968

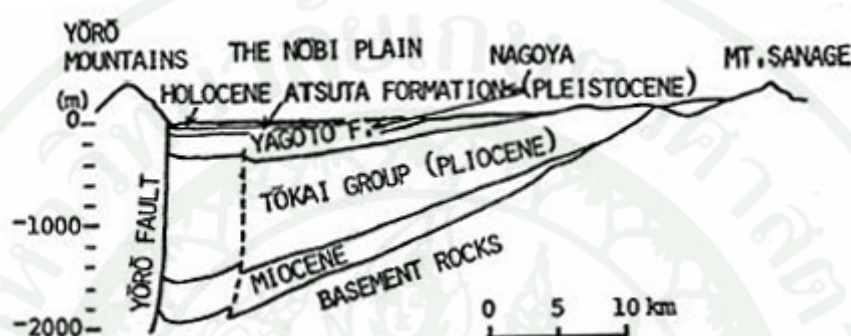
ที่มา: Yamamoto (1977)

ผลของการทดสอบตัวอย่างดินพบว่า ค่า C_c อยู่ในช่วง 0.2-1.8 และเป็นฟังก์ชันกับค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ตามสมการ (1) มีค่าแรงดันก่อนการยุบอัดตัว (Preconsolidation Pressure) อยู่ในช่วง 2-50 กก./ตร.ซม.และจะเพิ่มขึ้นตามความลึก และมีค่ามากกว่าแรงดันประสิทธิผลปัจจุบัน (Present Effective Overburden Pressure)

$$C_c = 0.017(LL - 37) \quad (1)$$

การทรุดตัวในที่ราบโนบิ

ที่ราบโนบิเป็นที่ราบที่อยู่บริเวณตอนกลางของประเทศญี่ปุ่นมีพื้นที่ประมาณ 1800 ตร.กม. ความหนาของชั้นดินตะกอนถึงชั้นหินฐานรากประมาณ 2000 เมตร ลักษณะธรณีวิทยาตามแนวตะวันตก-ตะวันออกด้านล่างของพื้นที่ราบแสดงในภาพที่ 31



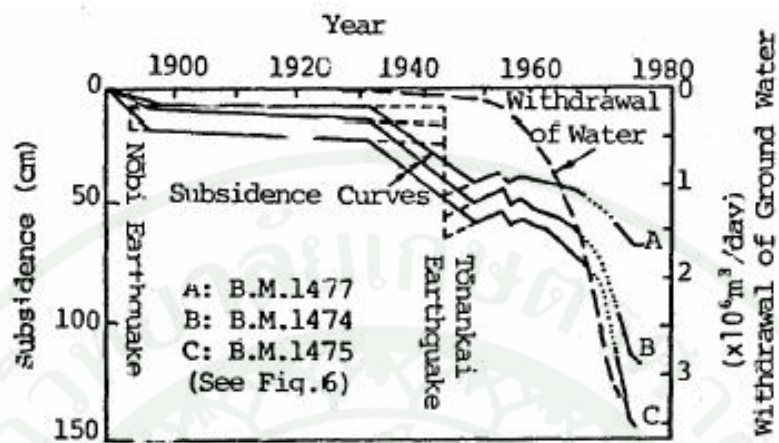
ภาพที่ 31 ลักษณะทางธรณีวิทยาตามแนวตะวันตก-ตะวันออกของที่ราบโนบิ

ที่มา: Yamamoto (1977)

อัตราการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่นี้ได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากในช่วงระยะเวลา 48 ปี ตั้งแต่ปี 1925-1973 โดยในปี 1925 อัตราการสูบน้ำบาดาลจะอยู่ที่ 1,638 ลบ.ม./วัน, ปี 1945 อยู่ที่ 129,088 ลบ.ม./วัน, ปี 1965 อยู่ที่ 1,552,764 ลบ.ม./วัน และในปี 1973 อยู่ที่ 3,514,195 ลบ.ม./วัน โดยประมาณ 60% ของปริมาณน้ำบาดาลที่สูบขึ้นมาทั้งหมดถูกใช้ในภาคอุตสาหกรรม จากการบันทึกการระดับของหลุมวัดจำนวน 3 หลุมในพื้นที่นี้แสดงให้เห็นถึงการทรุดตัวของแผ่นดินที่เพิ่มมากขึ้นในช่วงระหว่างปี 1950-1973 ดังแสดงในภาพที่ 32

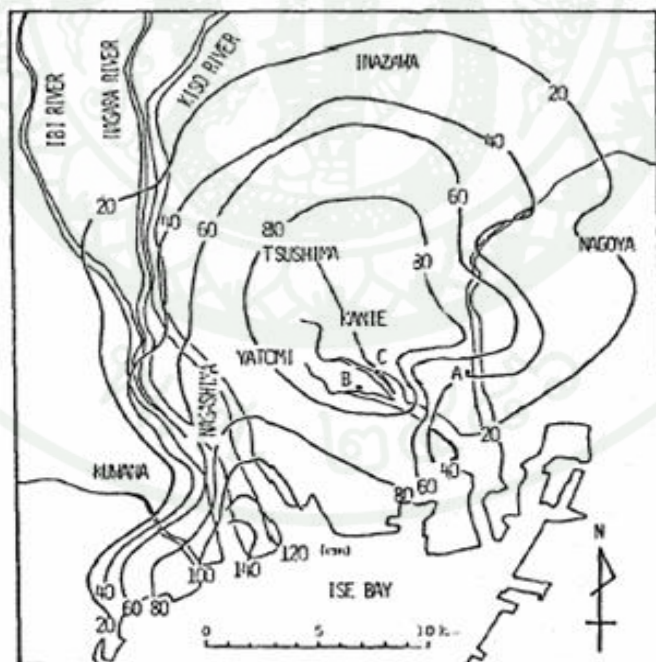
ปริมาณการทรุดตัวสูงสุดที่บันทึกได้เกิดขึ้นในปี 1973 มีค่ามากกว่า 20 ซม. และการทรุดตัวรวมทั้งหมดในช่วงระยะเวลา 15 ปี ตั้งแต่ปี 1961-1975 มีค่าเท่ากับ 147 ซม. ที่บริเวณทางตอนใต้ของ Nagashima มีพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวประมาณ 1140 ตร.กม. ดังแสดงในภาพที่ 33 โดยมีพื้นที่ที่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลปานกลางเพิ่มขึ้นจาก 186 ตร.กม. ในปี 1961 เป็น 248 ตร.กม. ในปี 1973 จากการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวในพื้นที่นี้พบว่าค่า C_c อยู่ในช่วง 0.3-0.8 และมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (Initial Void Ratio, e_0) ตามสมการ (2)

$$C_c = 0.5(e_0 - 0.5) \quad (2)$$



ภาพที่ 32 ปริมาณการทรุดตัวและการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล

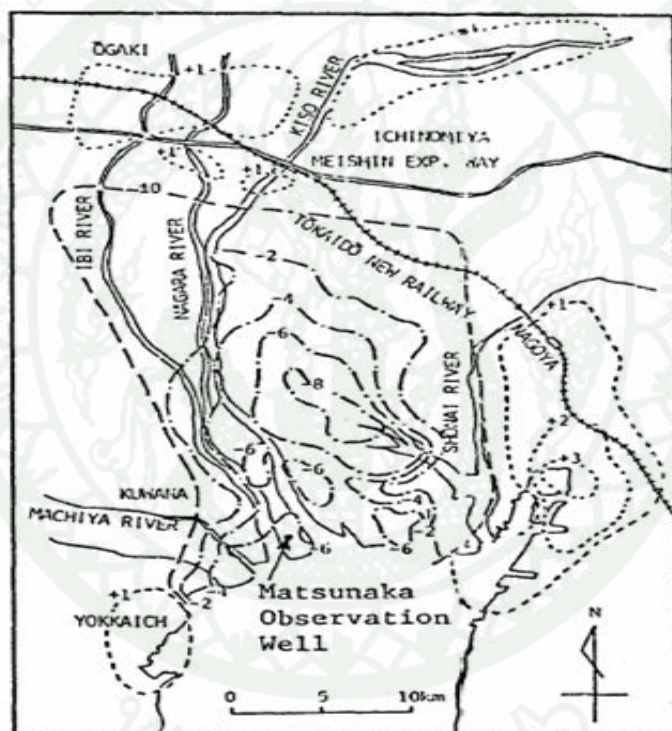
ที่มา: Yamamoto (1977)



ภาพที่ 33 ปริมาณการทรุดตัวในช่วงระยะเวลา 15 ปี ตั้งแต่ปี 1961-1975

ที่มา: Yamamoto (1977)

จากการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจำนวนมากและมีพื้นที่เป็นบริเวณกว้างนี้จึงได้มีการออกมาตรการต่าง ๆ เพื่อควบคุมปริมาณการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมการใช้น้ำบาดาลของภาคอุตสาหกรรมโดยการเปลี่ยนให้มาใช้จากแหล่งน้ำผิวดินแทน กำหนดขนาดของท่อสูบน้ำและความลึกของบ่อบาดาล กำหนดเขตพื้นที่ควบคุมการสูบน้ำบาดาลและการขุดเจาะบ่อน้ำบาดาลใหม่ โดยแบ่งเป็นเขตพื้นที่ตามความรุนแรงของการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ผลจากการใช้มาตรการต่าง ๆ ในการควบคุมการสูบน้ำบาดาลทำให้ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ปี 1974 เป็นต้นมา พื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวลดลงและอัตราการทรุดตัวในพื้นที่ต่าง ๆ ก็ลดลงเช่นเดียวกัน โดยในบางพื้นที่มีฟองตัวของชั้นดินปรากฏให้เห็นดังแสดงในภาพที่ 34



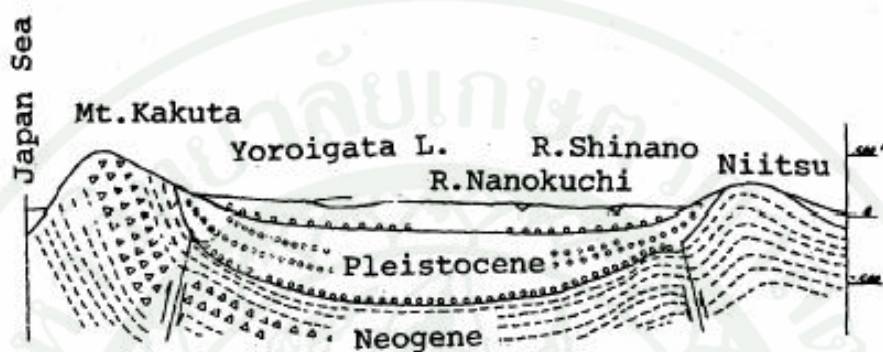
ภาพที่ 34 การทรุดตัวและการฟองตัวของชั้นดินในปี 1974-1975

ที่มา: Yamamoto (1977)

การทรุดตัวในที่ราบนิอากะ

ที่ราบนิอากะเป็นที่ราบชายฝั่งทะเลขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศญี่ปุ่นล้อมรอบด้วยภูเขาทางทิศตะวันออก, ตะวันตก และได้ ส่วนทางด้านทิศเหนือติดทะเล มีแม่น้ำ Shinano แม่น้ำ Agano

และสาขาไหลผ่านพื้นที่ลุ่มทะเลญี่ปุ่น ตามเส้นทางของแม่น้ำเหล่านี้จะเต็มไปด้วยหนอง บึง และ ทะเลสาบจำนวนมาก มีชั้นดินตะกอนที่ทับถมกันเป็นแอ่งโค้งเกิดขึ้นในยุค Cenozoic โดยมี ลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นดินที่ตกตะกอนในสมัย Holocene, Pleistocene และ Neocene ดัง แสดงในภาพที่ 35

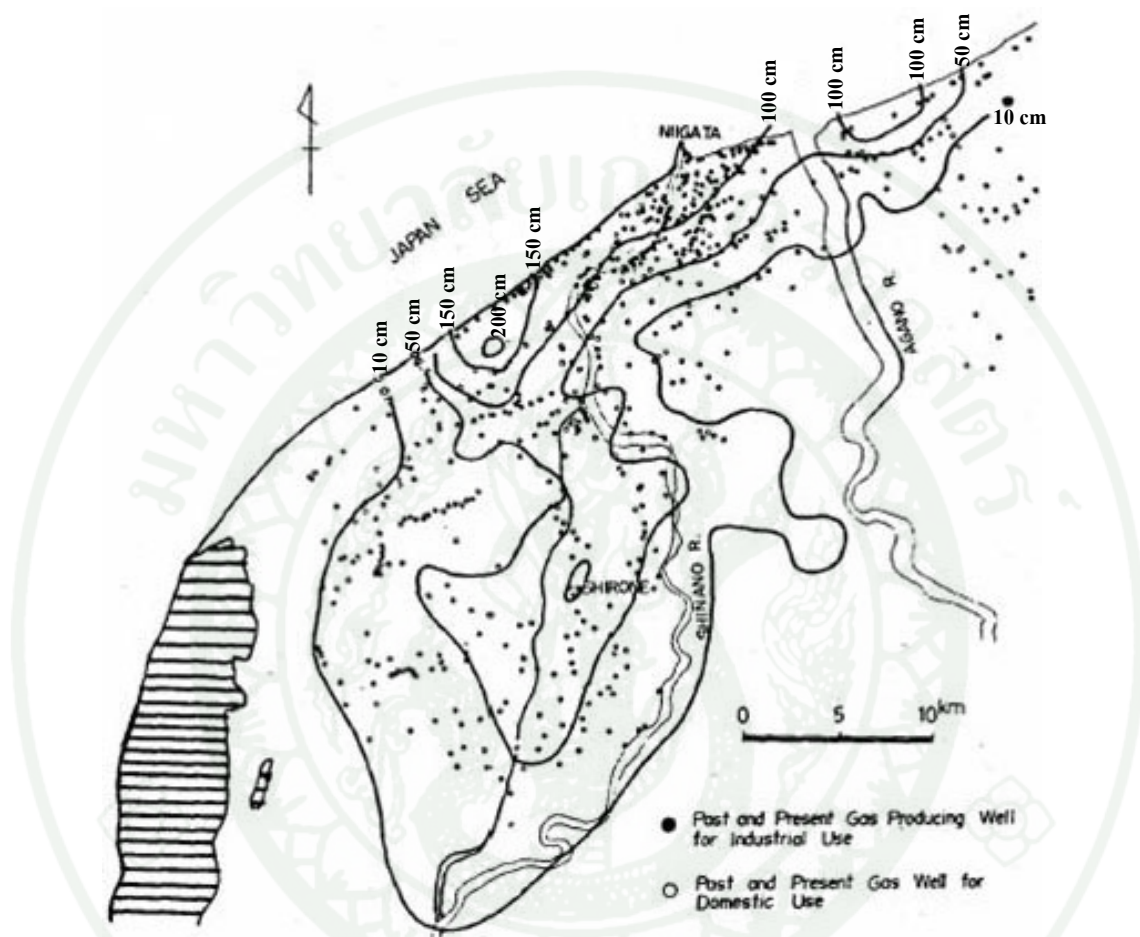


ภาพที่ 35 ลักษณะทางธรณีวิทยาของที่ราบนิอิกาคะ

ที่มา: Yamamoto (1977)

บริเวณพื้นที่ราบนี้จะมีแหล่งก๊าซธรรมชาติมีเทน (methane) อยู่จำนวนมากซึ่งเป็นก๊าซที่ ละลายอยู่ในน้ำบาดาลที่มีรสเค็ม ดังนั้นจึงได้มีการสูบน้ำบาดาลเพื่อนำมาแยกก๊าซธรรมชาติไปใช้ ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมและครัวเรือน โดยมีอัตราการสูบเฉลี่ยในช่วงระหว่างปี 1950-1955 ประมาณ 12 ล้านลบ.ม./ปี และในปี 1956-1965 อัตราการสูบน้ำได้เพิ่มขึ้นเป็น 33 ล้านลบ.ม./ปี โดยในปี 1959 จะเป็นปีที่มีการสูบน้ำบาดาลสูงสุดด้วยอัตราการสูบ 42 ล้านลบ.ม./ปี ทำให้ระดับ น้ำบาดาลในบริเวณพื้นที่นี้ลดลงอย่างรวดเร็วและเกิดการทรุดตัวของแผ่นดินทั่วทั้งพื้นที่ราบนิอิกา ตะการทรุดตัวเริ่มปรากฏให้เห็นประมาณปี 1930 จนกระทั่งในปี 1955 การทรุดตัวของพื้นที่เริ่ม มากขึ้นโดยเฉพาะในบริเวณพื้นที่ตามชายฝั่งทะเลและตอนใต้ของเมืองนิอิกาคะ ในปี 1959 พบจุด ศูนย์กลางของการทรุดตัวเพิ่มขึ้นอีกจุดหนึ่งใกล้กับเมือง Shirone ดังแสดงในภาพที่ 36 โดยมีอัตรา การทรุดตัวประมาณ 14 ซม.ในระยะเวลา 10 เดือน และที่บริเวณชายฝั่งทะเลมีอัตราการทรุดตัว เท่ากับ 54 ซม./ปี เพิ่มขึ้นจากปี 1957 ที่มีอัตราการทรุดตัว 40 ซม./ปี และมีพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัว ทั้งหมดประมาณ 430 ตร.กม.

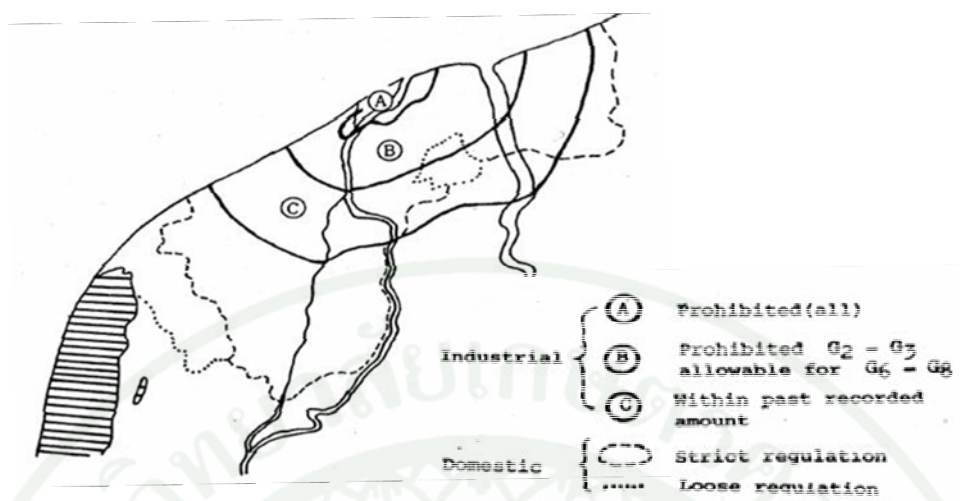
จากการทดสอบหาคุณสมบัติการยุบอัดตัวของชั้นดินในพื้นที่นี้พบว่ามีค่า m_v อยู่ในช่วง 0.01-0.05 ตร.ซม./กก. มีค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัว (Coefficient of Consolidation, C_v) อยู่ในช่วง 0.1-1 ตร.ซม./นาที



ภาพที่ 36 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี 1959-1974

ที่มา: Yamamoto (1977)

ในปี 1960 ได้มีการออกกฎหมายควบคุมการสูบน้ำบาดาลเพื่อลดการทรุดตัวของแผ่นดิน โดยการแบ่งเขตพื้นที่ควบคุมการสูบน้ำบาดาลเพื่อผลิตก๊าซธรรมชาติสำหรับใช้ในภาคอุตสาหกรรมและในครัวเรือนดังแสดงในภาพที่ 37 และไม่อนุญาตให้มีการขุดเจาะบ่อบาดาลใหม่เพิ่มขึ้นในพื้นที่ทั้งหมด ในปี 1966 ได้มีการทดลองอัดน้ำลงไปชั้นน้ำบาดาล 4 ชั้นคือ G_{4-1} , G_5 , G_{5-1} และ G_6 ผลที่ได้คือ ระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้น การทรุดตัวของชั้นดินลดลง และมีการพองตัวของชั้นดินเกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 37 การแบ่งเขตพื้นที่ควบคุมการสูบน้ำบาดาลในที่ราบนิอิกะตะ

ที่มา: Yamamoto (1977)

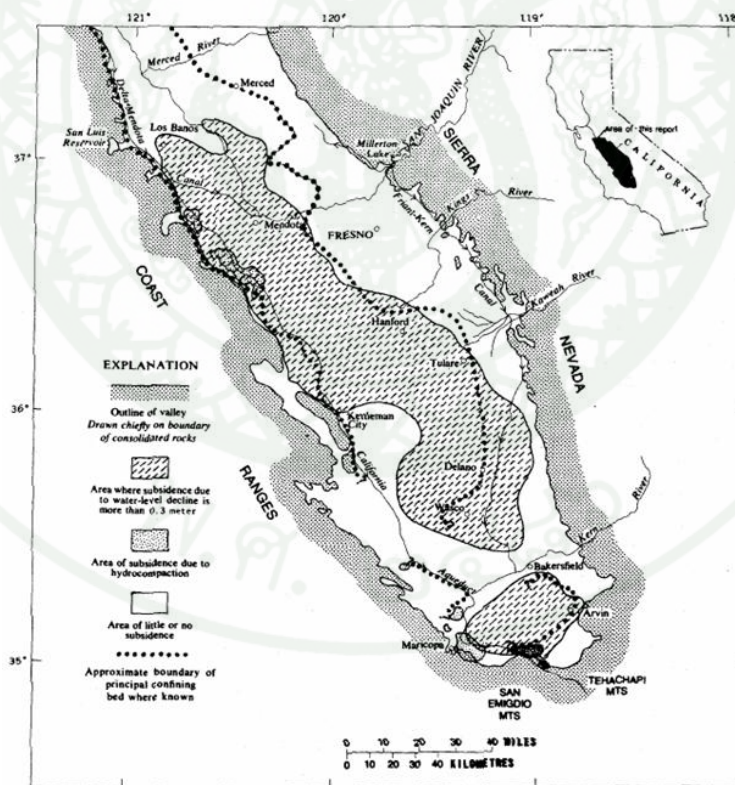


ภาพที่ 38 การทรุดตัวและการฟองตัวของชั้นดินในช่วงระหว่างปี 1973-1974

ที่มา: Yamamoto (1977)

กรณีศึกษาการทรุดตัวที่ San Joaquin Valley ในสหรัฐอเมริกา

Poland et al. (1975) ได้ศึกษาปัญหาการทรุดตัวในพื้นที่ราบหุบเขา San Joaquin, California, U.S.A. ซึ่งมีพื้นที่ประมาณ 26,000 ตร.กม. ลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นดินตะกอนเกิดขึ้นในยุค Cenozoic สมัย Pleistocene และ Pliocene มีความหนามากที่สุดประมาณ 5,000 เมตร ประกอบด้วยชั้นกรวด ทราย ตะกอนทราย และดินเหนียววางทับถมกัน ชั้นน้ำบาดาลจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่อยู่ชั้นบนเป็นชั้นน้ำบาดาลชนิดกึ่งปิดมีระยะตั้งแต่ผิวดินถึงระดับบนสุดของชั้นดินเหนียว Corcoran Clay หรือมีความลึกตั้งแต่ 0-275 เมตร อีกกลุ่มหนึ่งเป็นกลุ่มที่อยู่ชั้นล่างซึ่งเป็นระบบชั้นน้ำบาดาลแบบปิดมีความหนาตั้งแต่ระดับล่างสุดของ Corcoran Clay ลงไปถึงชั้นน้ำบาดาลที่มีน้ำเค็ม ความหนาของชั้นน้ำนี้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 60 เมตร ถึงมากกว่า 600 เมตร ส่วนชั้นดินเหนียว Corcoran Clay มีความหนาอยู่ในช่วง 0-40 เมตร ซึ่งเป็นชั้นปิดกั้นน้ำที่มีพื้นที่อย่างน้อย 13,000 ตร.กม. ดังแสดงในภาพที่ 39 โดยเส้นประแสดงขอบเขตของชั้นปิดกั้นน้ำในพื้นที่หุบเขา

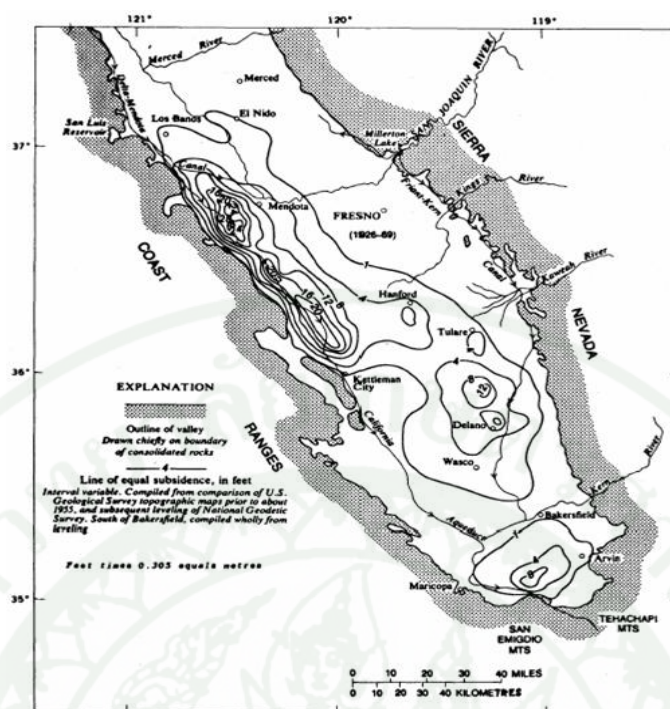


ภาพที่ 39 ลักษณะภูมิประเทศทั่วไปของพื้นที่ราบ San Joaquin Valley

ที่มา: Poland et al. (1975)

ตั้งแต่ปี 1920-1940 การสูบน้ำบาดาลเพื่อใช้ในการชลประทานภายในพื้นที่หุบเขาเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จาก 250,000 เป็น 370,000 ลบ.ม./ปี จากนั้นในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 อัตราการสูบน้ำบาดาลได้เพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่า เนื่องจากการขยายตัวของเกษตรกรรมที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยในปี 1966 อัตราการสูบจะอยู่ที่ 1.2 ล้านลบ.ม./ปี ทำให้เกิดการทรุดตัวในพื้นที่ตอนกลางด้านตะวันตกและด้านใต้ของหุบเขา ดังแสดงในพื้นที่แรงเงาของภาพที่ 39 ปริมาณการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวในช่วงทศวรรษ 1950 และต้นทศวรรษ 1960 มีปริมาณอย่างน้อย 500,000 ลบ.ม./ปี ทำให้ระดับน้ำในชั้นน้ำบาดาลแบบปิดในพื้นที่ระหว่าง Los Banos และ Wasco ลดลง 60-180 เมตร และในพื้นที่ทางตอนใต้ของ Bakersfield ระดับน้ำบาดาลลดลงมากกว่า 100 เมตร สาเหตุของการทรุดตัวภายในพื้นที่หุบเขา San Joaquin จะมีอยู่ 3 สาเหตุ คือ เกิดจากการสูบน้ำบาดาล เกิดจากขบวนการ hydrocompaction และเกิดจากการขุดเจาะบ่อน้ำมัน

สาเหตุของการทรุดตัวเนื่องจากการขุดเจาะน้ำมันจะเป็นสาเหตุเดียวกันกับการทรุดตัวเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล ซึ่งเป็นการทำให้ของเหลวในระบบลดลงและเกิดการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผลภายในชั้นดินและต่อเนื่องไปยังชั้นที่ใกล้เคียง แต่อย่างไรก็ตามการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในพื้นที่ขุดเจาะน้ำมันมีค่าน้อยกว่า 0.6 เมตร ซึ่งไม่ได้สร้างปัญหาใด ๆ กับพื้นที่ภายในหุบเขา แต่การทรุดตัวที่ทำให้เกิดผลกระทบมากที่สุด คือการทรุดตัวเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล โดยมีพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวทั้งหมดในปี 1970 ประมาณ 13,500 ตร.กม. ดังแสดงในภาพที่ 40 โดยบริเวณที่มีค่าการทรุดตัวสูงสุดจะเกิดขึ้นทางด้านตะวันตกของเมือง Fresno มีพื้นที่การทรุดตัวเป็นแนวยาวถึง 140 กม. จากเมือง Los Banos ไปถึงเมือง Kettleman ค่าการทรุดตัวสะสมสูงสุดในปี 1977 วัดได้เท่ากับ 9.0 เมตร ห่างจากเมือง Mendota ไปทางตะวันตก 16 กม.

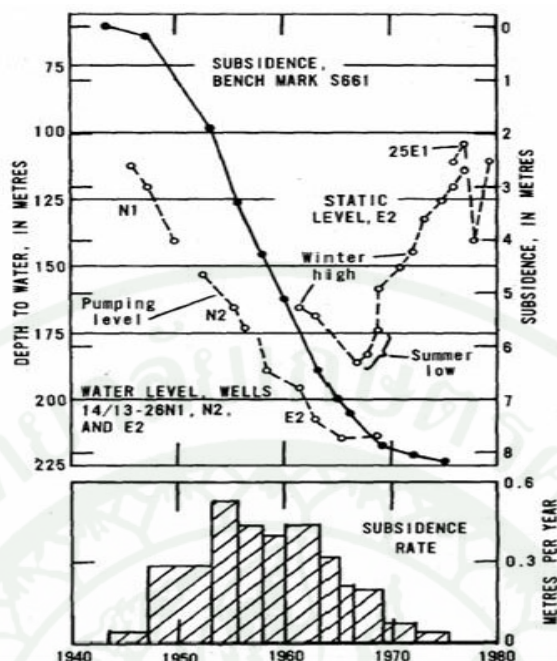


ภาพที่ 40 พื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวในหุบเขาช่วงระยะเวลาดังแต่ปี 1926-1970

ที่มา: Poland *et al.*, (1975)

ในช่วงระหว่างปี 1943-1969 ค่าการทรุดตัวที่วัดได้ของหมุดวัด S661 ซึ่งอยู่ห่างจากทางใต้ของเมือง Mendota ประมาณ 16 กม. เปรียบเทียบกับระดับน้ำบาดาลในบ่อ 14/13-26N1, N2 และ E2 มีการทรุดตัวเกิดขึ้นเท่ากับ 8 เมตร ระดับน้ำบาดาลลดลงประมาณ 125 เมตร อัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมากที่สุดจะอยู่ในช่วงระหว่างปี 1953-1955 เท่ากับ 0.54 เมตร/ปี และลดลงเรื่อย ๆ จนเหลือต่ำสุดในช่วงระหว่างปี 1972-1975 อยู่ที่ 0.04 เมตร/ปี เนื่องจากการลดปริมาณการสูบน้ำบาดาลตั้งแต่ปี 1969-1977 ทำให้ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้น 73 เมตร จากระดับน้ำต่ำสุดของช่วงฤดูร้อนในปี 1968 ดังแสดงในภาพที่ 41

ผลการทดสอบการยุบอัดตัวของตัวอย่างดินจำนวน 60 ตัวอย่างจากหลุมเจาะ 4 หลุมในพื้นที่ทางด้านฝั่งตะวันตกของเมือง Los Banos ถึงเมือง Kettleman โดยมีความลึกของหลุมตั้งแต่ 305-607 เมตร และจำนวน 22 ตัวอย่างจากหลุมเจาะ 2 หลุมในพื้นที่ของเมือง Tulare-Wasco ที่มีความลึกของหลุมเจาะ 232 และ 670 เมตรผลการทดสอบได้ค่า C_c อยู่ในช่วง 0.09-1.13 สำหรับตัวอย่างดินในพื้นที่ Los Banos-Kettleman และ 0.25-1.53 สำหรับตัวอย่างดินในพื้นที่ Tulare-Wasco

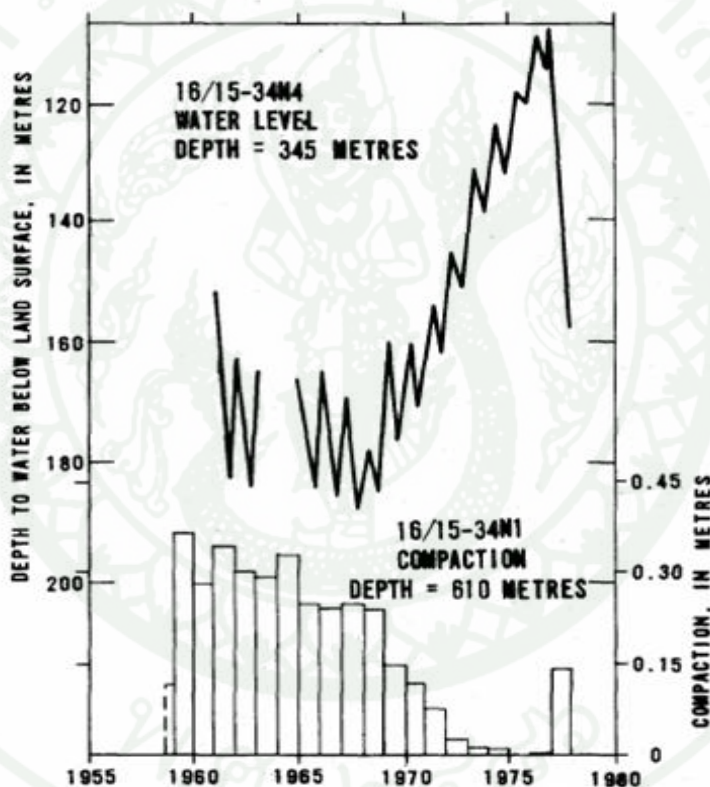


ภาพที่ 41 ค่าการทรุดตัวและการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลพื้นที่ทางใต้ของเมือง Mendota

ที่มา: Poland *et al.* (1975)

การแก้ไขปัญหาการทรุดตัวภายในพื้นที่หุบเขา San Joaquin นี้ใช้วิธีการเติมน้ำเข้าไปในระบบน้ำบาดาลและลดปริมาณการสูบน้ำ ส่วนของพื้นที่ Tulare-Wasco ได้มีการเติมน้ำจากแม่น้ำ San Joaquin และจากคลอง Friant-Kern ตั้งแต่ปี 1950-1972 ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่เติมเข้ามาในพื้นที่นี้ประมาณ 83,000 ลบ.ม./ปี ในช่วง 13 ปีแรก (1950-1962) ปริมาณการสูบน้ำเฉลี่ยประมาณ 123,000 ลบ.ม./ปี และได้สูบน้ำต่อเนื่องด้วยอัตราการสูบน้ำนี้ไปจนถึงทศวรรษที่ 1970 ดังนั้นปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปในพื้นที่นี้จากแม่น้ำ San Joaquin ในช่วงระยะเวลา 23 ปี (1950-1972) จะประมาณ 2/3 ของปริมาณน้ำที่สูบน้ำขึ้นมา และจากการเติมน้ำเป็นระยะเวลา 21 ปี ตั้งแต่ปี 1950-1970 ทำให้ระดับน้ำในบ่อที่อยู่ทางด้านตะวันออกของพื้นที่ Tulare-Wasco เพิ่มขึ้น 60 เมตร ผลที่ตามมาคือ การทรุดตัวในช่วงระหว่างปี 1962-1970 ลดน้อยลงคือมีค่าน้อยกว่า 3 ซม./ปี ส่วนพื้นที่ทางด้านตะวันตกของ Tulare-Wasco ระดับน้ำลดลงอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่ในช่วงทศวรรษ 1950 เนื่องจากการส่งน้ำเพื่อการชลประทานจากคลอง Friant-Kern ไปยังพื้นที่ทางด้านตะวันตกไม่เพียงพอทำให้มีการสูบน้ำเพิ่มมากขึ้นและทำให้เกิดการทรุดตัวมากกว่า 9 ซม./ปี

ในพื้นที่ด้านชายฝั่งตะวันตกการเติมน้ำโดยผ่านทาง California Aqueduct ได้เริ่มมาตั้งแต่ปี 1968 สามารถแทนที่ปริมาณน้ำที่สูบขึ้นมาได้จำนวนมาก โดยก่อนที่จะมีการเติมน้ำปริมาณการสูบน้ำบาดาลเฉลี่ยในพื้นที่นี้ตั้งแต่ปี 1960-1967 ประมาณ 130,000 ลบ.ม./ปี และในปี 1974 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปในพื้นที่นี้ประมาณ 140,000 ลบ.ม./ปี และลดปริมาณการสูบลงเหลือ 25,000 ลบ.ม./ปี ซึ่งการลดปริมาณการสูบจำนวนมากนี้ช่วยให้ระดับน้ำในชั้นน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้น และช่วยขจัดปัญหาเรื่องการทรุดตัวในปัจจุบันได้เกือบหมด อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปก็ยังไม่เพียงพอที่จะไปทดแทนปริมาณน้ำที่สูบขึ้นมาใหม่ในช่วงฤดูแล้งในปี 1977 ทำให้ระดับน้ำบาดาลลดลงอีกครั้งและเกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้นอีก ดังแสดงในภาพที่ 42

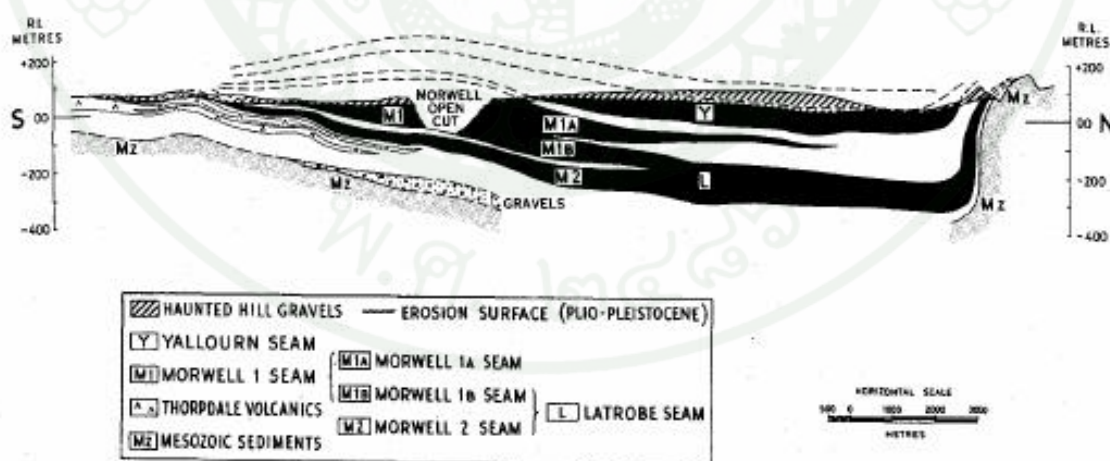


ภาพที่ 42 การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในบ่อสังเกตการณ์ 16/15-34N4 และการทรุดตัวของบ่อสังเกตการณ์ 16/15-34N1 ใกล้กับ Cantua Creek

ที่มา: Poland *et al.* (1975)

กรณีศึกษาการทรุดตัวที่ Latrobe Valley ในออสเตรเลีย

C. S. Gloe (1977) ได้ศึกษาการทรุดตัวในพื้นที่หุบเขา Latrobe ซึ่งมีพื้นที่ประมาณ 800 ตร.กม. และอยู่ภายในแอ่งที่ราบ Gippsland ทางตะวันออกเฉียงใต้ของรัฐ Victoria ภายในพื้นที่หุบเขา Latrobe จะมีลักษณะของชั้นดินตะกอนที่เกิดในยุค Tertiary ประกอบด้วยชั้นดินเหนียว ทราย และ ถ่านหินสีน้ำตาลจำนวนมากจึงได้มีการขุดเปิดบ่อเพื่อนำถ่านหินขึ้นมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า และก๊อถ่านหิน โดยมี 2 บ่อหลัก คือ Yallourn และ Morwell ความลึกของบ่อขุดเปิดประมาณ 150 และ 300 เมตร ตามลำดับ ความหนาของชั้นถ่านหินในบ่อขุดเปิด Yallourn มีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 60 เมตร ได้ชั้นถ่านหินนี้จะเป็นชั้นทรายและดินเหนียวสลับกันมีความหนาประมาณ 120-150 เมตร และอยู่บนชั้นถ่านหินหนาอีกชั้นหนึ่ง ส่วนบ่อขุดเปิด Morwell จะมีชั้นถ่านหิน M1 และ M2 มีความหนาประมาณ 90-135 และ มากกว่า 50 เมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 43 คุณสมบัติของ ถ่านหินสีน้ำตาลซึ่งเป็นวัสดุอินทรีย์ที่มี highly preconsolidated มีหน่วยน้ำหนักต่ำ (1.13 กรัม/ลบ. ซม.) และมีปริมาณความชื้นสูงมากกว่า 200% ค่าเฉลี่ยของแรงดันก่อนการยุบอัดตัวในชั้นถ่านหิน M1 และ M2 ใกล้เคียง ๆ บ่อขุดเปิด Morwell โดยใช้วิธีของ Casagrande ประมาณได้เท่ากับ 2300 และ 2900 กิโลนิวตัน/ตร.ม. ตามลำดับ ค่า m_v ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการยุบอัดตัว (consolidation pressure) และปริมาณความชื้นในมวลดินแต่สำหรับการคำนวณหาค่าการทรุดตัว โดยมีค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการยุบอัดตัวน้อยกว่า 1300 กิโลนิวตัน/ตร.ม. ค่า m_v จะมีค่าดังนี้



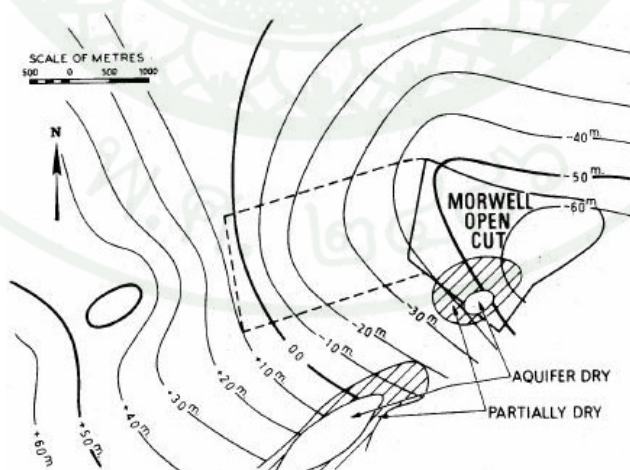
ภาพที่ 43 แนวชั้นถ่านหินในพื้นที่ราบหุบเขา Latrobe

ที่มา: Gloe (1984)

สำหรับชั้นถ่านหิน M1 = 0.2 ที่ผิวบนถึง 0.1 ตร.ซม./กิโลนิวตัน ที่ฐานของชั้นถ่านหิน
สำหรับชั้นถ่านหิน M2 = 0.1 ตร.ซม./กิโลนิวตัน

สำหรับชั้นดินเหนียวใต้ชั้นถ่านหิน M1 ซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวแข็งสีเทาหนา 3-13 เมตร มีค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity Index, PI) อยู่ในช่วง 20-25% และมีค่า LL ประมาณ 60% ส่วนคุณสมบัติอื่น ๆ ของชั้นดินเหนียวมีดังนี้ สัดส่วนของดินเหนียว (clay fraction) 44%, หน่วยน้ำหนักรวม (bulk density) 1.8 กรัม/ลบ.ซม., C_u 0.5, m_v 0.2 ตร.ซม./กิโลนิวตัน, แรงดันที่ทำให้เกิดการยุบอัดตัว 1300 กิโลนิวตัน/ตร.ม. ส่วนชั้นดินใต้ชั้นถ่านหิน M2 จะเป็นพวกดินเหนียวถึงดินตะกอน (silt) มีคุณสมบัติต่าง ๆ เหมือนกับชั้นดินเหนียวใต้ชั้นถ่านหิน M1

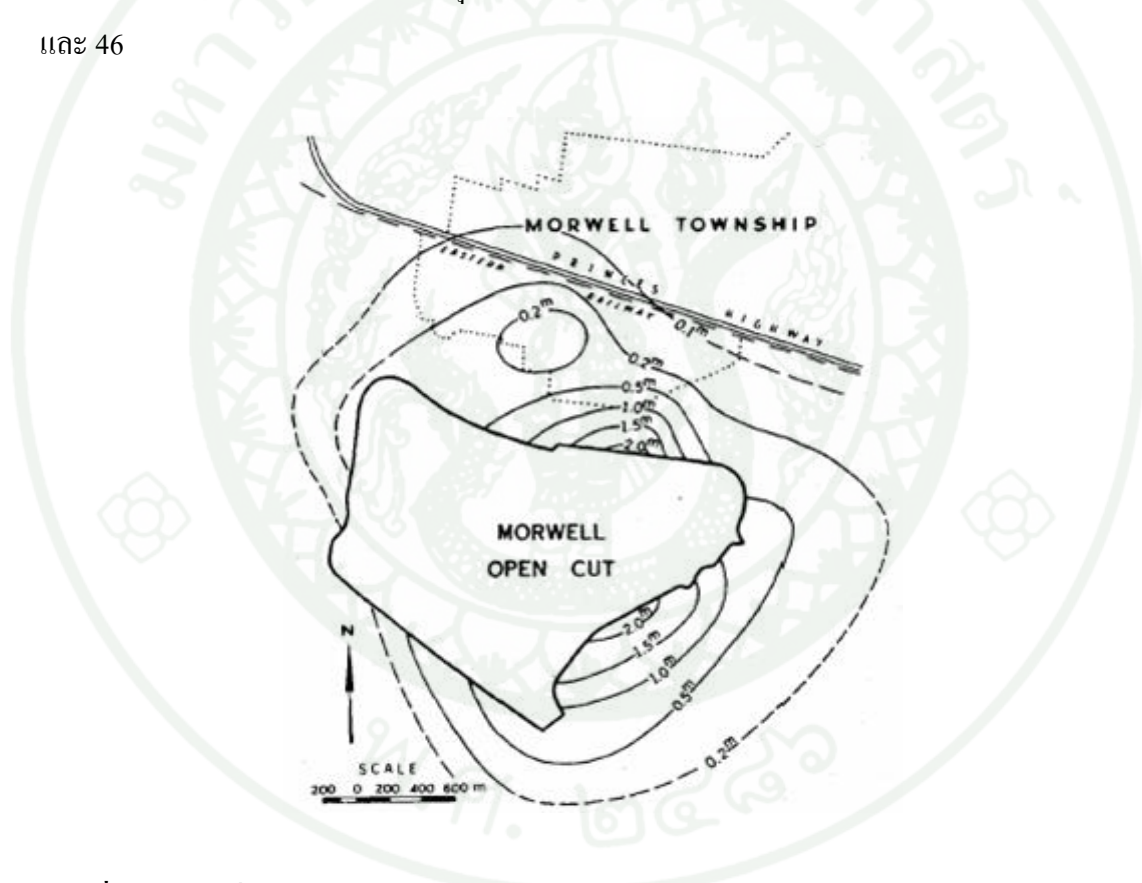
ในการขุดเปิด Yallourn น้ำหนักของชั้นดินเหนียวที่อยู่ใต้ชั้นถ่านหิน Yallourn Seam สามารถต้านแรงดันน้ำที่อยู่ข้างล่างได้ แต่ในบ่อขุดเปิด Morwell น้ำหนักของชั้นดินเหนียวไม่สามารถต้านแรงดันน้ำที่ระดับพื้นที่ทำงานลึก 65 เมตรจากผิวดินได้ และที่ระดับนี้ยังมีชั้นถ่านหินที่จะต้องขุดขึ้นมาอีกหนาประมาณ 50 เมตร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดแรงดันน้ำในชั้นน้ำบาดาลที่อยู่ใต้ชั้นถ่านหินลงไป โดยการสูบน้ำออกจากชั้นน้ำบาดาลให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับการขุดเปิดบ่อ ปริมาณน้ำบาดาลที่ถูกสูบน้ำออกไปทั้งหมดในช่วงระหว่างปี 1960-1977 เท่ากับ 250 ล้านลบ.ม. ทำให้ระดับน้ำบาดาลลดลงประมาณ 120 เมตรจากที่เคยอยู่ที่ระดับ +60 เมตรมาอยู่ที่ระดับต่ำสุด -60 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 44



ภาพที่ 44 เส้นแสดงระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำ M1

ที่มา: Gloe (1984)

การเคลื่อนตัวของชั้นดินทั้งด้านในและด้านนอกของบ่อขุดเปิดเกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มมีการขุดเปิดบ่อ โดยการเคลื่อนตัวของบ่อ Morwell จะมากกว่าบ่อ Yallourn ทั้งนี้เนื่องจากการลดระดับน้ำในชั้นน้ำบาดาลและการขุดบ่อที่มีความลึกมากกว่า โดยในปี 1977 การเคลื่อนตัวในแนวราบเกิดขึ้น 2.25 เมตร และในแนวดิ่ง 1.68 เมตร การเคลื่อนตัวนี้จะลดลงเมื่อมีระยะห่างจากขอบบ่อมากขึ้น ลักษณะการเคลื่อนตัวในแนวราบส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในบริเวณ 400 เมตรรอบบ่อขุด ส่วนการทรุดตัวเกิดขึ้นทั่วพื้นที่ของบ่อขุดเปิด Yallourn และ Morwell และมีแนวโน้มที่จะขยายไปทางด้านตะวันออกเพิ่มมากขึ้น โดยในปี 1977 เส้นแสดงค่าการทรุดตัว 20 ซม. และ 50 ซม. อยู่ที่ประมาณ 7.2 และ 4.5 กม. ทางด้านเหนือของบ่อขุดเปิดตามลำดับ และพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัว 50 ซม. จะมีพื้นที่ประมาณ 47 ตร.กม. ซึ่งครอบคลุมพื้นที่เกือบทั้งหมดของเมือง Morwell ดังแสดงในภาพที่ 45 และ 46

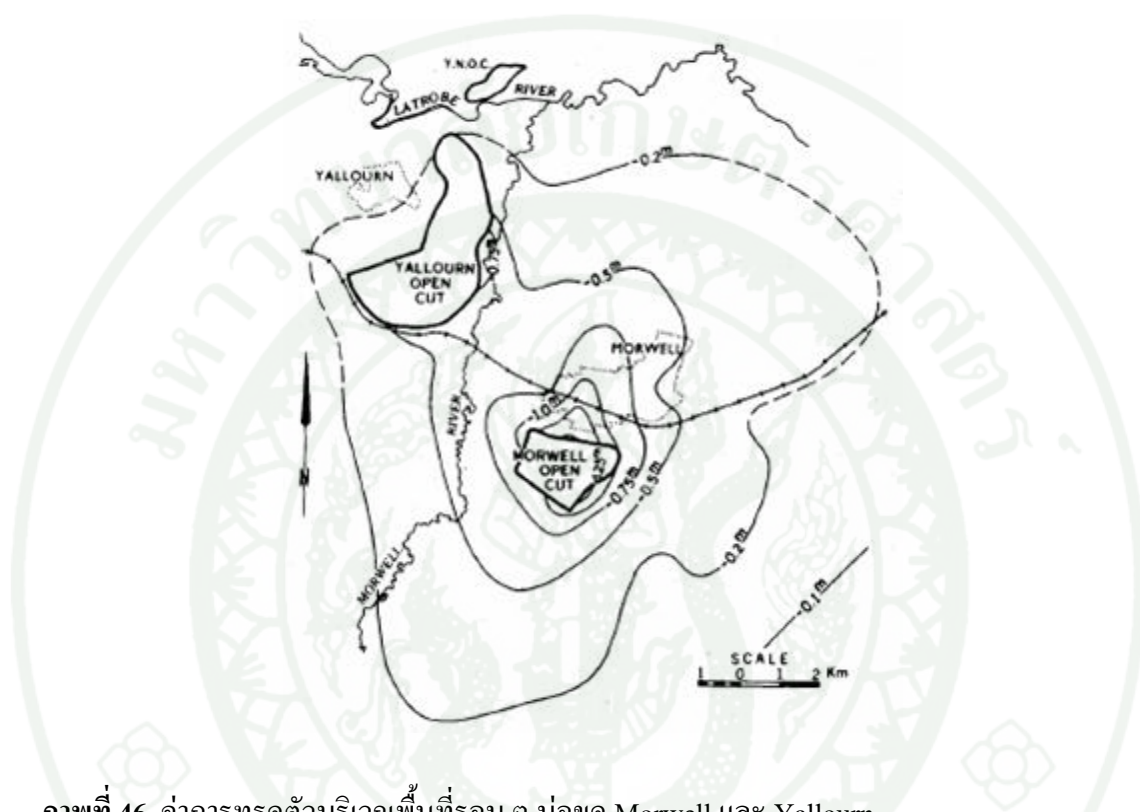


ภาพที่ 45 การเคลื่อนตัวในแนวราบบริเวณรอบ ๆ บ่อขุด Morwell

ที่มา: Gloe (1984)

จากการประมาณค่าการทรุดตัวในอนาคตบริเวณพื้นที่รอบ ๆ บ่อขุดเปิด Morwell เมื่อถึงระดับความลึกสุดท้ายของการขุดเปิดบ่อค่าการทรุดตัวสูงสุดที่ประเมินได้เท่ากับ 1 และ 3 เมตร ที่บริเวณทางเหนือและใต้ของเมือง Morwell ตามลำดับ พื้นที่การทรุดตัวจะเพิ่มมากขึ้นเข้าไปในแอ่ง

ที่ราบ Moe ซึ่งอยู่ทางด้านตะวันตกของที่ราบหุบเขา Latrobe นอกจากนี้การเปิดบ่อขุดใหม่ที่ Loy Yang ซึ่งมีความลึกของบ่อขุดที่ออกแบบไว้ 200 เมตร จำเป็นต้องลดระดับน้ำบาดาลลงเช่นเดียวกันจากการประมาณค่าการทรุดตัวในอนาคตพบว่าการทรุดตัวจะเกิดขึ้นมากกว่าที่ Morwell และในที่สุดพื้นที่การทรุดตัวของทั้งสองแห่งคือที่บ่อขุด Morwell และ Loy Yang จะมาบรรจบรวมกัน

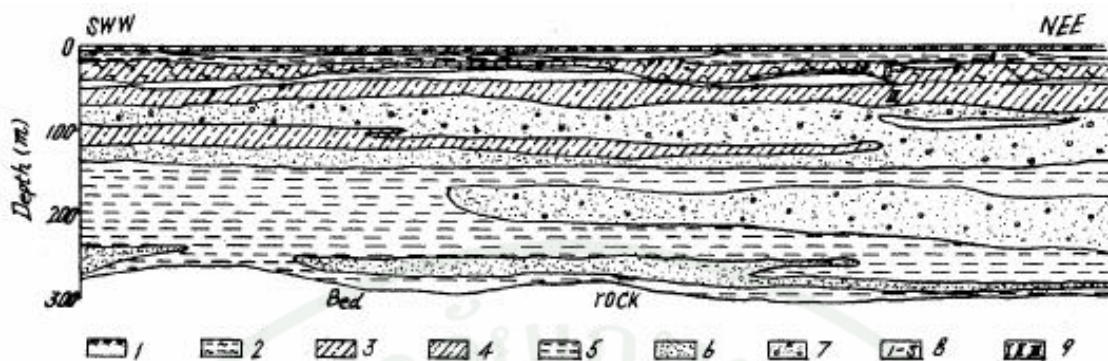


ภาพที่ 46 ค่าการทรุดตัวบริเวณพื้นที่รอบ ๆ บ่อขุด Morwell และ Yallourn

ที่มา: Gloe (1984)

กรณีศึกษาการทรุดตัวที่ Shanghai ในประเทศจีน

Shi Luxiang และ Bao Manfang (1977) ได้ศึกษาการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในเมือง Shanghai ซึ่งเป็นเมืองอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ตั้งอยู่แถบชายฝั่งทะเลด้านทิศตะวันออก โดยมีค่าระดับของพื้นที่ในเมืองประมาณ 3-4 เมตร เหนือระดับน้ำทะเล ลักษณะของชั้นดินตะกอนที่ทับถมกันจะเป็นดินตะกอน marine สลับกับชั้นดิน continental facies ที่เกิดขึ้นในยุค Quaternary หนาประมาณ 300 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 47 ตามลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาสามารถแบ่งชั้นน้ำบาดาลได้ 5 ชั้นน้ำ โดยลักษณะทั่วไปจะมีเม็ดดินละเอียด ความแตกต่างของแรงดันน้ำน้อย และมีความเร็วในการไหลซึมต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นน้ำที่ 1, 2 และ 3 มีความต่อเนื่องกัน

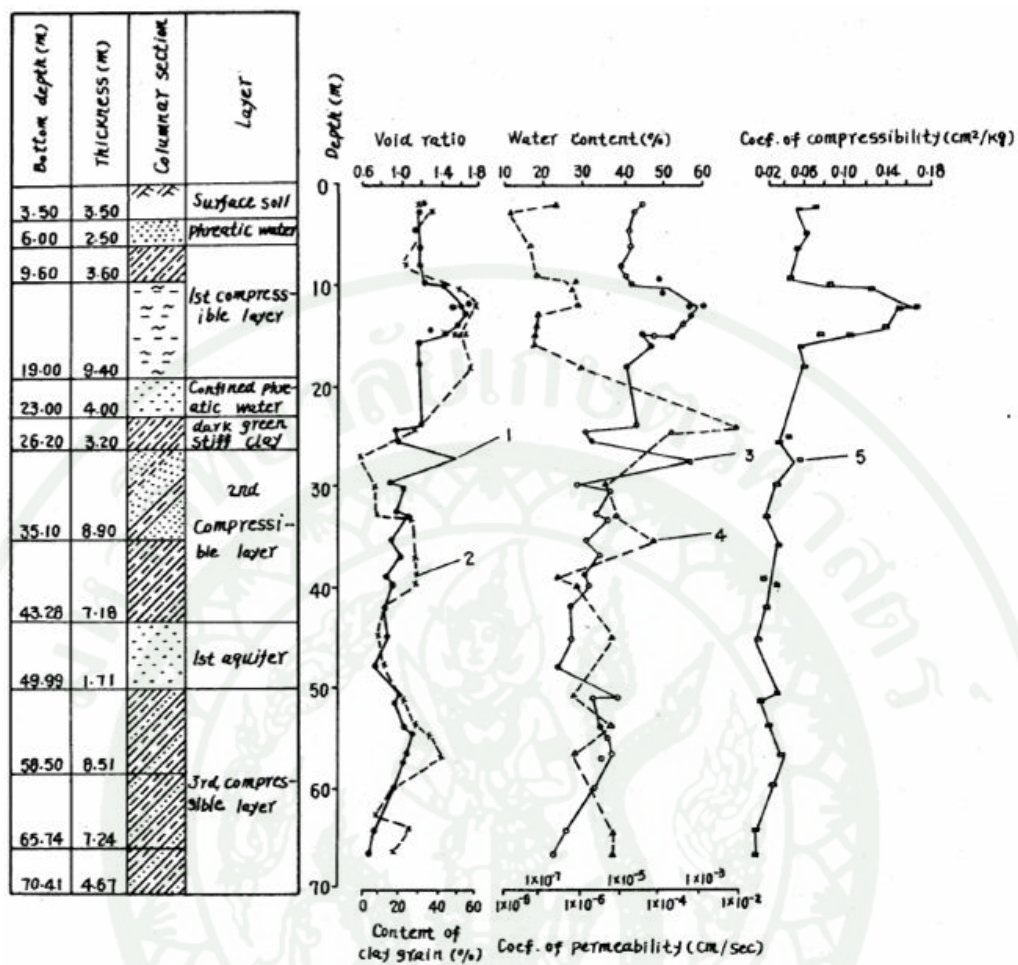


ภาพที่ 47 ลักษณะธรณีวิทยาของเมือง Shanghai : 1. surface soil ; 2. muddy clay ; 3. muddy clayey loam ; 4. clayey loam with sand ; 5. stiff clay ; 6. sand ; 7. sand with gravel ; 8. confined aquifer ; 9. compressible layer.

ที่มา: Luxiang and Manfang (1977)

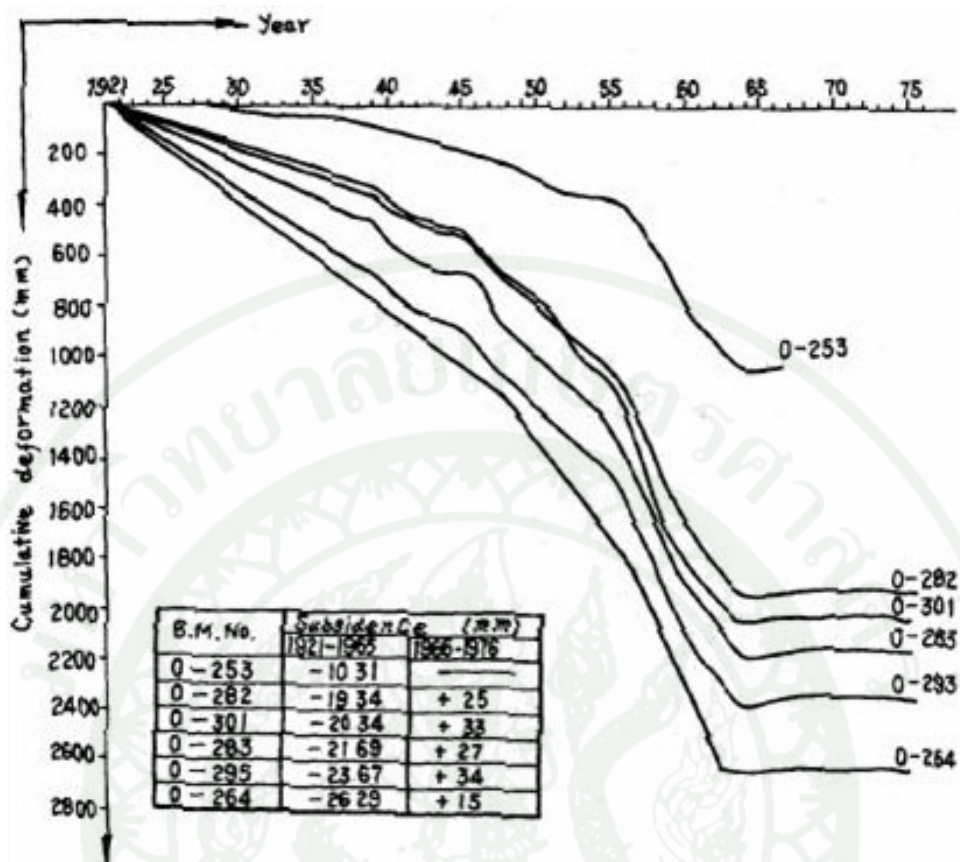
ตามลักษณะทางวิศวกรรมสามารถแบ่งชั้นดินได้ 13 ชั้น ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวแข็ง 3 ชั้น ซึ่งอยู่ใต้ชั้นน้ำที่ 2 มีค่าความแข็งแรงกดอัด (compressive strength) สูงพอสมควร มีค่าอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio, e) น้อยกว่า 0.7 และค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัว (coefficient of compressibility, a_v) น้อยกว่า 0.025 ตร.ซม./กก. ปริมาณการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวแข็งนี้มีค่าน้อยมาก เหนือชั้นน้ำที่ 2 ขึ้นไปจะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน 3 ชั้น มีค่าความแข็งแรงกดอัดต่ำและมีชั้นดินเหนียวแข็งสีดำนี้อีก 1 ชั้น มีค่าความแข็งแรงกดอัดสูงพอสมควร ปริมาณน้ำในมวลดิน ค่า e , a_v และคุณสมบัติทางด้านกายภาพอื่น ๆ ของชั้นดินเหล่านี้จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความลึกเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 48

จากการเจริญเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและได้มีการนำน้ำบาดาลขึ้นมาใช้เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการทรุดตัวของแผ่นดินจำนวนมาก โดยการทรุดตัวของแผ่นดินถูกพบครั้งแรกในปี 1921 และเกิดขึ้นสูงสุดในช่วงระหว่างปี 1956-1959 ด้วยอัตราการทรุดตัวเท่ากับ 98 มม./ปี ในปี 1965 ค่าการทรุดตัวสะสมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 2.63 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 49 มีพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวสะสมมากกว่า 500 มม. ประมาณ 121 ตร.กม. หลังจากปี 1963 ได้มีมาตรการควบคุมการใช้น้ำบาดาลเพื่อลดการทรุดตัวของแผ่นดินทำให้อัตราการทรุดตัวในเมือง Shanghai ลดลงเหลือ 23 มม./ปี ในปี 1965 และมีการพองตัวของชั้นดินเท่ากับ 6.3 มม. ในปี 1966



ภาพที่ 48 ลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเมือง Shanghai : 1. void ratio ;
2. content of clay partical ; 3. water content ; 4. coefficient of permeability ;
5. coefficient of compressibility.

ที่มา: Luxiang and Manfang (1977)



ภาพที่ 49 การทรุดตัวและการพองตัวของชั้นดินในเมือง Shanghai

ที่มา: Luxiang and Manfang (1977)

จากการสำรวจทางธรณีวิทยาและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ตรวจวัดได้พบว่า การทรุดตัวส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นดินที่อยู่เหนือชั้นน้ำที่ 2 ขึ้นไป ซึ่งสามารถสรุปปัจจัยที่ทำให้เกิดการทรุดตัวของชั้นดินได้ดังนี้

1. พื้นที่ที่มีลักษณะทางธรณีวิทยาคล้ายกัน ค่าการทรุดตัวจะเปลี่ยนแปลงตามความหนาและความสามารถในการยุบอัดตัวของชั้นดินเหนียว ซึ่งโดยทั่วไปชั้นดินเหนียวที่มีความหนาและมีความสามารถยุบอัดตัวได้มากจะมีค่าการทรุดตัวที่สูงกว่า
2. ปริมาณการยุบอัดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนชั้นที่ 1 จะขึ้นอยู่กับว่าบริเวณพื้นที่นั้นมีชั้นดินเหนียวแข็งอยู่ข้างใต้หรือไม่ โดยพื้นที่ที่ไม่มีชั้นดินเหนียวแข็งจะมีการทรุดตัวมากกว่าพื้นที่ที่มีชั้นดินเหนียวแข็งอยู่ข้างใต้

3. อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนชั้นที่ 1 และ 2 ขึ้นอยู่กับว่าพื้นที่นั้นมีความต่อเนื่องของชั้นน้ำบาดาลที่ 1 และ 2 หรือไม่ โดยพื้นที่ที่ชั้นน้ำบาดาล 1 และ 2 มีความต่อเนื่องกัน จะมีอัตราการทรุดตัวมากกว่าพื้นที่ที่ชั้นน้ำบาดาล 1 และ 2 ไม่ต่อเนื่องกัน

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อต้องการแก้ไขปัญหาการทรุดตัวของแผ่นดินในเมือง Shanghai โดยมีสาเหตุมาจากการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้งานมากทำให้ระดับน้ำบาดาลลดลง เพื่อที่จะควบคุมการทรุดตัวและการใช้น้ำบาดาลให้เกิดประโยชน์สูงสุด มาตรการในการเพิ่มระดับน้ำบาดาลจึงถูกนำมาใช้ซึ่งประกอบด้วย

1. การจำกัดการใช้น้ำบาดาลภายในเมือง Shanghai ซึ่งเริ่มตั้งแต่ปี 1963 โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ใช้น้ำบาดาลเพื่อเป็นน้ำหล่อเย็นสำหรับลดอุณหภูมิของเครื่องจักรต้องเปลี่ยนมาใช้น้ำในแหล่งผิวดินแทน

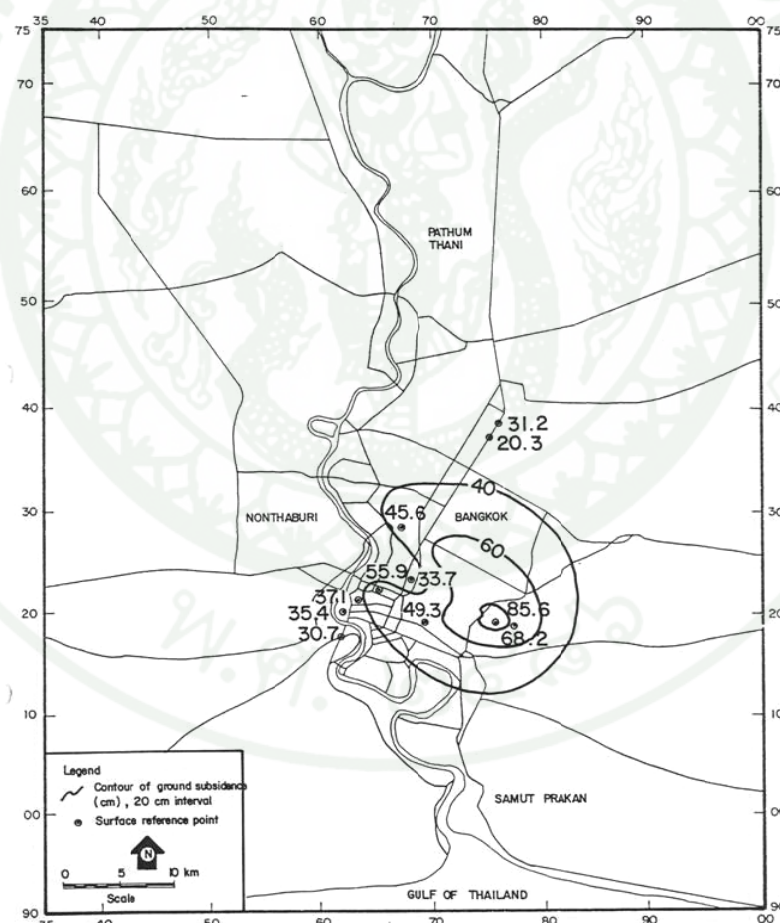
2. การเติมน้ำลงในชั้นน้ำบาดาลในช่วงฤดูหนาวเพื่อนำมาใช้ในฤดูร้อนและการเติมน้ำในฤดูร้อนเพื่อนำมาใช้ในฤดูหนาวได้ถูกนำมาใช้ตั้งแต่ปี 1965 จากการดำเนินมาเป็นเวลาหลายปีสามารถพิสูจน์ได้ว่าหลังจากเติมน้ำลงในชั้นน้ำบาดาลทำให้อุณหภูมิของน้ำบาดาลในชั้นน้ำที่ 2 และ 3 ลดลง $6-10^{\circ}\text{C}$ ชั้นน้ำที่ 4 และ 5 ลดลง $9-10^{\circ}\text{C}$ เทียบกับอุณหภูมิเริ่มต้น และการเติมน้ำลงในชั้นน้ำบาดาลทำให้ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นช่วยลดการทรุดตัวของแผ่นดินได้อีกด้วย

3. เปลี่ยนการใช้น้ำบาดาลในชั้นน้ำอื่น ๆ โดยก่อนที่จะมีมาตรการควบคุมการใช้น้ำบาดาล น้ำบาดาลในชั้นที่ 2 และ 3 จะถูกสูบขึ้นมาใช้มากที่สุดถึงแม้ว่าคุณภาพน้ำบาดาลในชั้นน้ำที่ 4 จะมีคุณภาพดีกว่าแต่มีอุณหภูมิของน้ำสูงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับหล่อเย็นเครื่องจักร ดังนั้นการสูบน้ำบาดาลในชั้นน้ำที่ 4 และ 5 จึงมีน้อย อย่างไรก็ตามหลังจากมีการเติมน้ำเย็นในช่วงฤดูหนาวลงไปทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลงสามารถที่จะสูบขึ้นมาใช้ได้ ปริมาณการสูบน้ำบาดาลในชั้นน้ำที่ 2 และ 3 จะลดลงและมีการใช้น้ำบาดาลในชั้นที่ 4 และ 5 เพิ่มขึ้น โดยชั้นดินเหนียวใต้ชั้นน้ำบาดาลชั้นที่ 3 ซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวแข็งการทรุดตัวจึงเกิดขึ้นน้อยช่วยลดอัตราการทรุดตัวของชั้นดินได้

การทรุดตัวในเขตพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑล

การทรุดตัวในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2476-2521

การสำรวจรังวัดระดับของพื้นดินในกรุงเทพฯ และปริมณฑล ได้เริ่มดำเนินการครั้งแรกในปี พ.ศ. 2473 โดยกรมแผนที่ทหารซึ่งครั้งนั้นได้มีการก่อสร้างหมุดหลักฐานจำนวน 80 แห่ง และต่อมาได้มีการสำรวจอีกครั้งหนึ่งในปี พ.ศ. 2521 พบว่าหมุดหลักฐานได้ถูกทำลายไปเป็นจำนวนมากในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 เหลือที่ใช้การได้เพียง 11 แห่งเท่านั้น ซึ่งทั้งหมดแสดงค่าการทรุดตัวของชั้นดินในช่วงระยะเวลา 45 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2476-2521 อยู่ในช่วง 20-85 ซม. โดยมีค่าการทรุดตัวสูงสุดที่บริเวณหัวหมาก เขตบางกะปิ วัดได้เท่ากับ 85.6 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 50



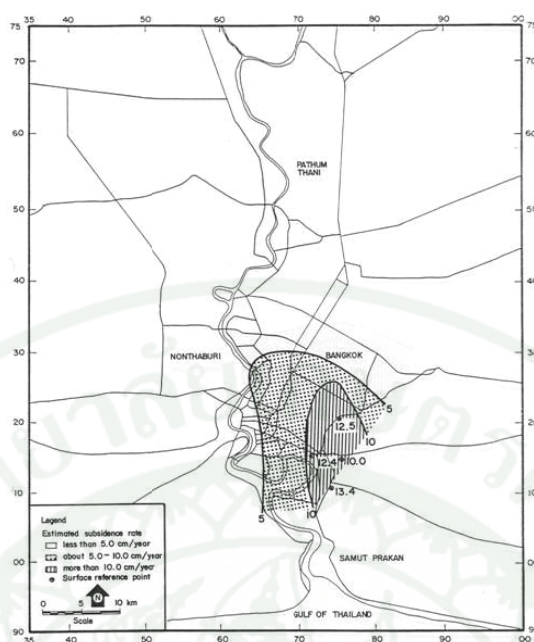
ภาพที่ 50 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2476-2521

ที่มา: Nutalaya et al. (1989)

การทรุดตัวในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2521-2540

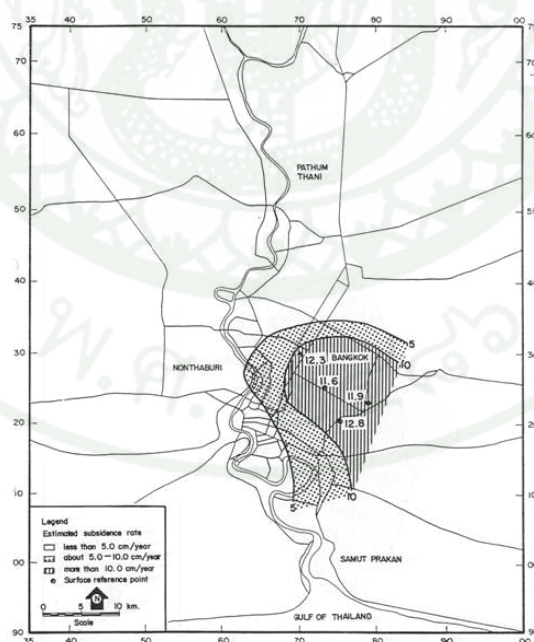
หลังจากปี พ.ศ. 2521 เป็นต้นมา สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติและกรมแผนที่ทหารได้ร่วมกันก่อสร้างหมุดหลักฐานเพิ่มขึ้นมากกว่า 100 แห่ง และนอกจากนั้นกรมทรัพยากรธรณีได้ก่อสร้างหมุดหลักฐานเพิ่มขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2533-2534 อีกจำนวน 86 แห่ง โดยหมุดหลักฐานของกรมทรัพยากรธรณีตั้งอยู่บริเวณใกล้เคียงกับสถานีติดตามตรวจวัดระดับน้ำบาดาล ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2521-2532 กรมแผนที่ทหารได้มีโครงการสำรวจระดับเพื่อวัดการทรุดตัวของพื้นดินในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล ซึ่งโครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการป้องกันและแก้ไขวิกฤตการณ์น้ำบาดาลและแผ่นดินทรุด มีสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติเป็นเจ้าของโครงการ โดยมีขอบเขตพื้นที่ของการสำรวจอยู่ในเขตจังหวัดราชบุรี สมุทรสงคราม สมุทรสาคร นครปฐม นนทบุรี ปทุมธานี อุทัยธานี สมุทรปราการ และกรุงเทพฯ ในช่วงแรกของโครงการเป็นการสำรวจระดับเพื่อหาข้อมูลการทรุดตัวของแผ่นดินตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521-2524 และช่วงที่ 2 เป็นการสำรวจระดับเพื่อติดตามผลการทรุดตัวของแผ่นดินทุกปีโดยเริ่มดำเนินการสำรวจตั้งแต่ปี พ.ศ. 2527-2532

ผลการสำรวจในช่วงแรกพบว่า พื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินสามารถแบ่งได้เป็น 3 เขตพื้นที่ คือ พื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวมากกว่า 10 ซม./ปี 5-10 ซม./ปี และน้อยกว่า 5 ซม./ปี โดยการทรุดตัวจะเกิดขึ้นที่บริเวณใจกลางกรุงเทพฯ และขยายเพิ่มมากขึ้นไปทางด้านเหนือ ได้ และตะวันออกของกรุงเทพฯ ดังแสดงในภาพที่ 51-53 พื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวมากกว่า 10 ซม./ปี ส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณชานเมืองย่านตะวันออกของกรุงเทพฯ ได้แก่ เขตบางเขน พระโขนง บางกะปิ ห้วยขวาง อำเภอพระประแดงทางฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา อำเภอเมืองสมุทรปราการ และบริเวณย่านชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมระหว่างเขตมีนบุรี-ลาดกระบัง-บางพลี ส่วนพื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวระหว่าง 5-10 ซม./ปี จะอยู่ในบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ได้แก่ เขตดุสิต พญาไท ปทุมวัน บางรัก และยานนาวา และพื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวน้อยกว่า 5 ซม./ปี จะเป็นพื้นที่ที่อยู่รอบนอกเขตที่มีอัตราการทรุดตัวมากกว่า 10 ซม./ปี และ 5-10 ซม./ปี ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่ กรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ



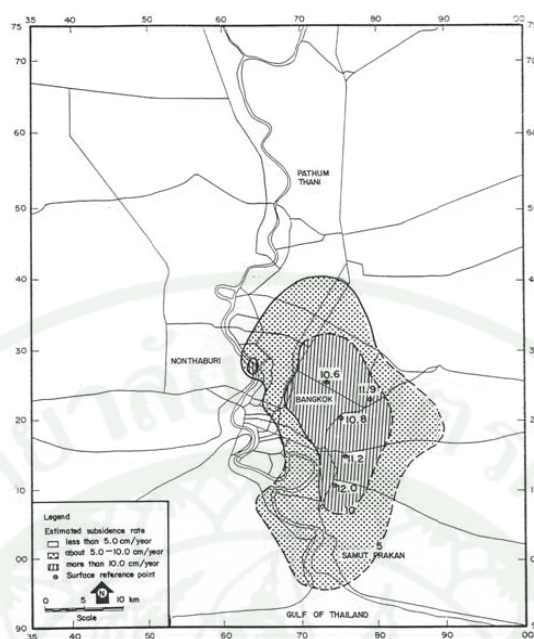
ภาพที่ 51 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2521

ที่มา: Nutalaya *et al.* (1989)



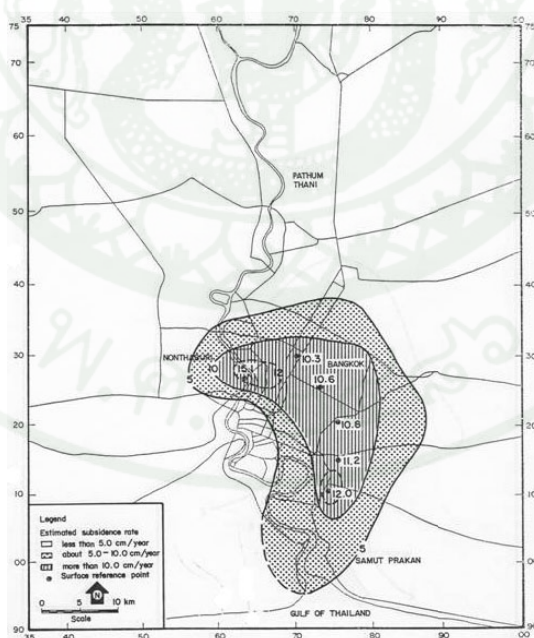
ภาพที่ 52 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2522

ที่มา: Nutalaya *et al.* (1989)



ภาพที่ 53 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2524

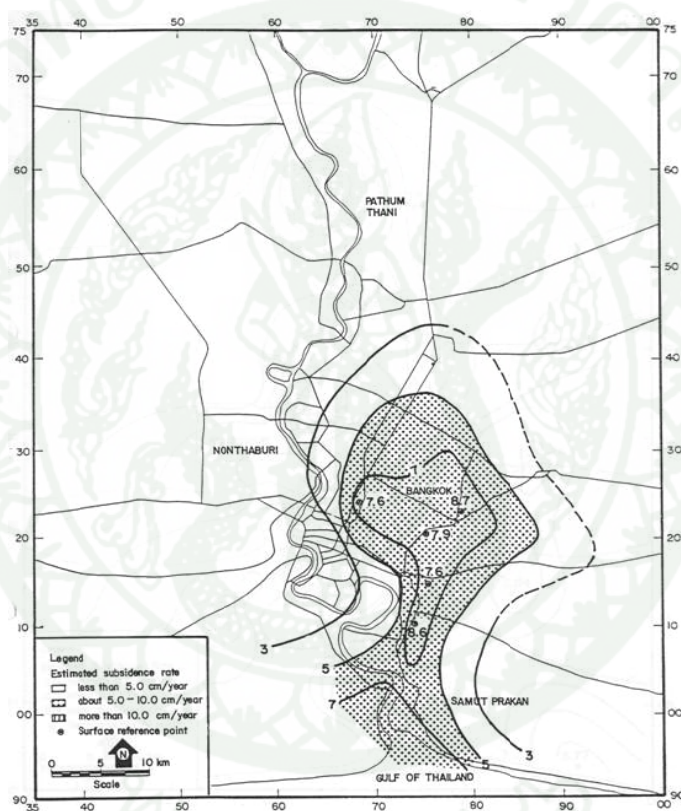
ที่มา: Nutalaya *et al.* (1989)



ภาพที่ 54 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2527

ที่มา: Nutalaya *et al.* (1989)

จากผลการสำรวจในช่วงที่ 2 ของกรมแผนที่ทหารในปี พ.ศ. 2527 พบว่าพื้นที่การทรุดตัวได้ขยายเพิ่มมากขึ้นไปทางด้านตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยาเข้าไปในเขตจังหวัดนนทบุรี ดังแสดงในภาพที่ 54 แต่บริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ด้านตะวันออกและด้านใต้ของกรุงเทพฯ อัตราการทรุดตัวจะคงที่เท่ากับปี พ.ศ. 2524 ทั้งนี้เนื่องจากผลของการใช้มาตรการควบคุมการสูบน้ำปี พ.ศ. 2526 ทำให้ระดับน้ำบาดาลในบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ และบางบริเวณแถบชานเมืองด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ เพิ่มขึ้นเป็นผลให้อัตราการทรุดตัวของพื้นดินในบริเวณดังกล่าวลดลงอย่างชัดเจนในปี พ.ศ. 2528-2530 ดังแสดงในภาพที่ 55-57

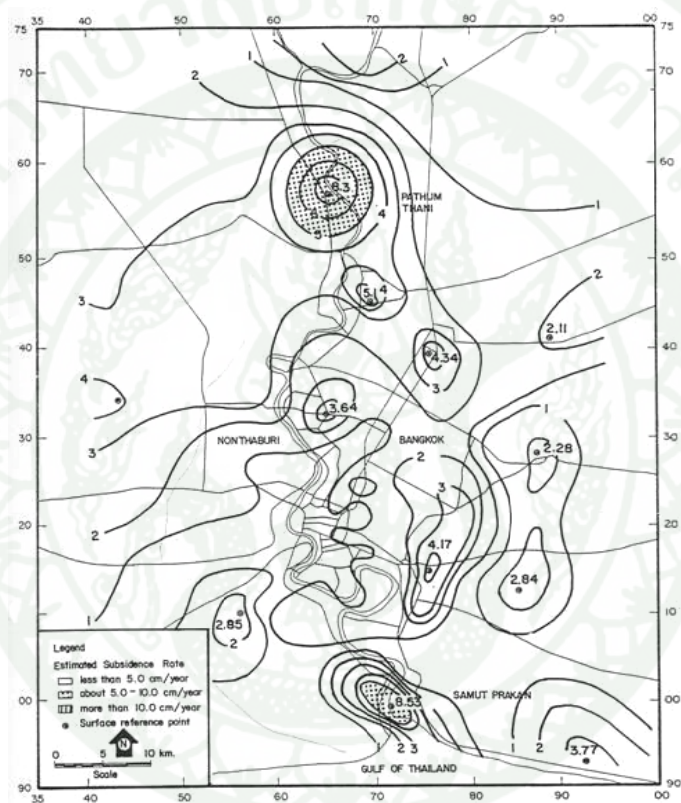


ภาพที่ 55 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2528

ที่มา: Nutalaya *et al.* (1989)

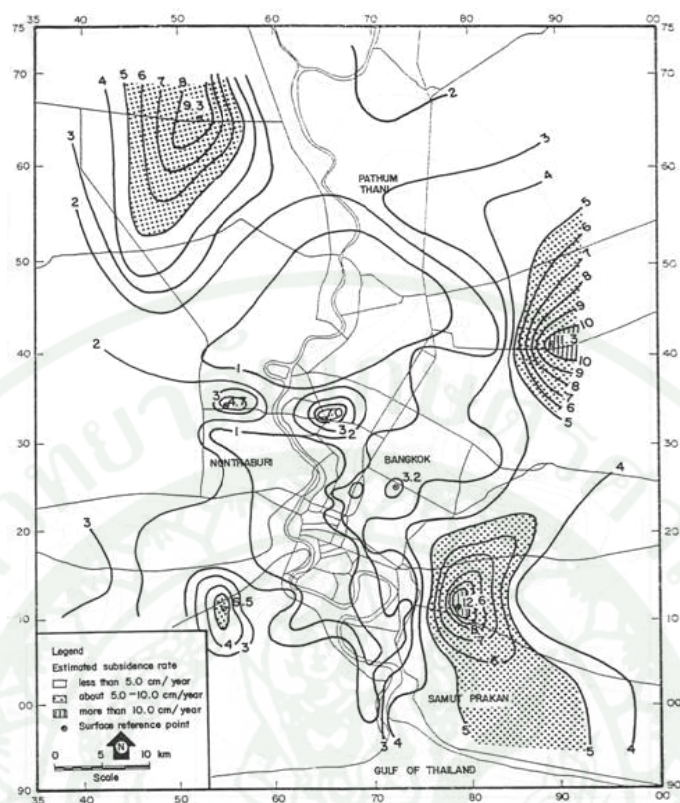
โดยพื้นที่ทางด้านตะวันออกและใจกลางกรุงเทพฯ ซึ่งเคยมีอัตราการทรุดตัวมากกว่า 10 ซม./ปี และ 5-10 ซม./ปี ตามลำดับในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2521-2527 ลดลงเหลือ 3-8 ซม./ปี ในปี พ.ศ. 2528 และ 1-4 ซม./ปี ในปี พ.ศ. 2529-2530 และลดลงต่อเนื่องในปี พ.ศ. 2531-2533 โดยอัตราการทรุดตัวระหว่างปี พ.ศ. 2531-2532 บริเวณด้านตะวันออกและบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ลดลง

เหลือประมาณ 3-5 ซม. และ 2-3 ซม. ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2532-2533 อัตราการทรุดตัวของพื้นที่ดังกล่าวได้ลดลงเหลือ 2-3 ซม. และ 1-2 ซม. ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามในพื้นที่ทางด้านตะวันออกเฉียงใต้ ตะวันออกเฉียงเหนือ และตะวันตกเฉียงเหนือของกรุงเทพฯ อัตราการทรุดตัวได้เพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530 ดังแสดงในภาพที่ 58 ทั้งนี้เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีโรงงานอุตสาหกรรมตั้งอยู่จำนวนมาก และการประปายังเข้าไปไม่ถึงจำเป็นต้องใช้น้ำบาดาลในขบวนการผลิตเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 56 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2529

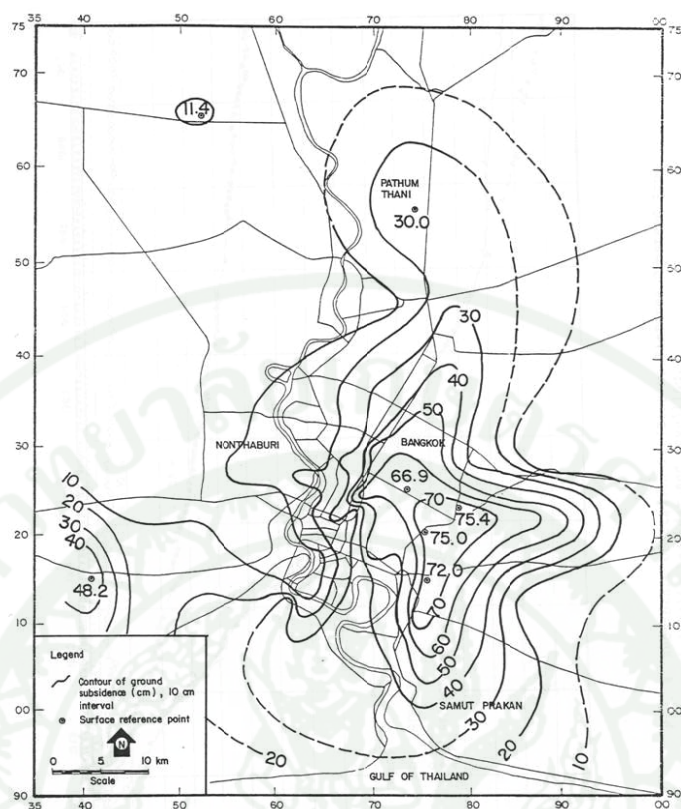
ที่มา: Nutalaya *et al.* (1989)



ภาพที่ 57 อัตราการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2530

ที่มา: Nutalaya *et al.* (1989)

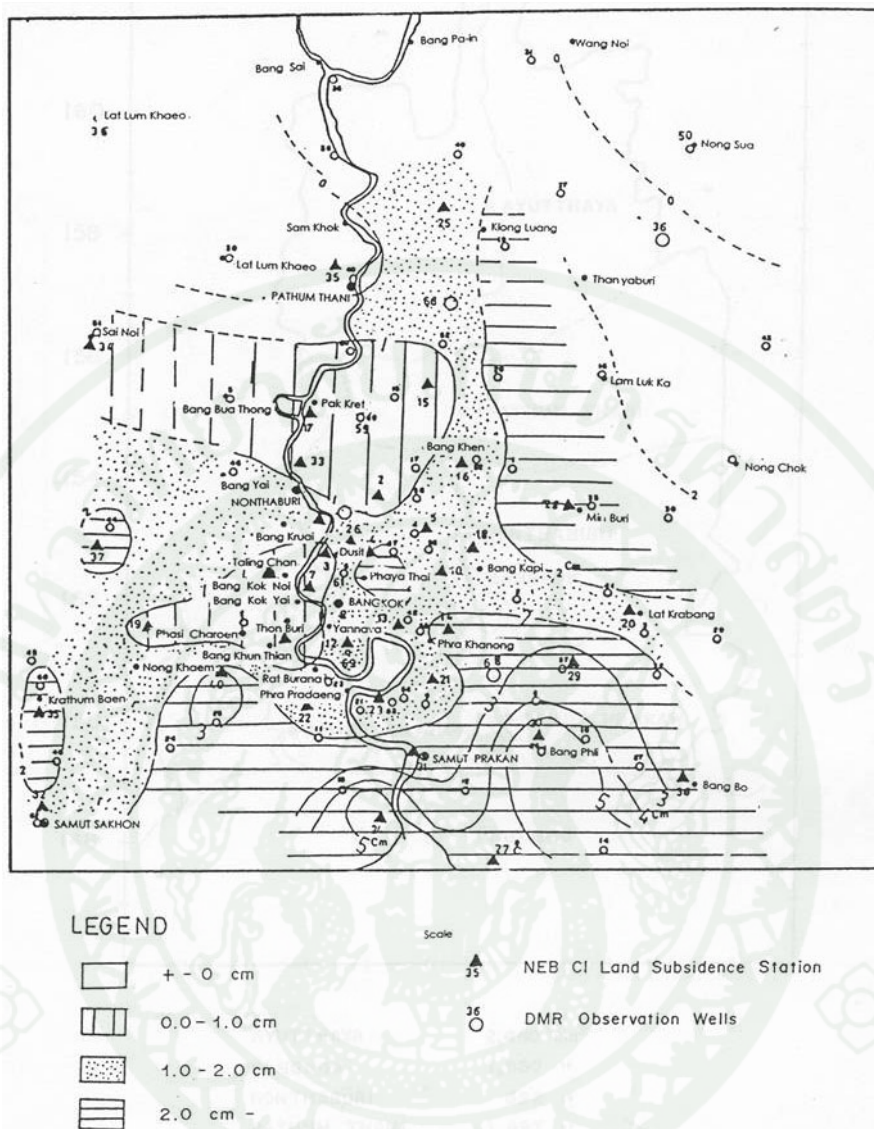
จากผลการสำรวจทั้ง 2 ช่วงของกรมแผนที่ทหารทำให้ทราบปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2521-2530 ดังแสดงในภาพที่ 58 โดยพื้นที่ที่มีปริมาณการทรุดตัวมากที่สุดจะเป็นพื้นที่ที่อยู่ในเขตบางกะปิและพระโขนง มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 75.4 ซม. ดังนั้นเมื่อรวมผลการทรุดตัวที่เกิดจากการใช้น้ำบาดาลจำนวนมากตั้งแต่ปี พ.ศ. 2476-2521 พบว่ามีการทรุดตัวของแผ่นดินไปแล้วมากกว่า 160 ซม. และมีพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวทั้งหมดประมาณ 4550 ตร.กม. โดยพื้นที่การทรุดตัวได้ขยายเพิ่มมากขึ้นไปทางด้านตะวันออก และด้านเหนือของกรุงเทพฯ และปริมาณการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์กับปริมาณการลดลงของน้ำบาดาลโดยในขณะที่มีการสูบน้ำบาดาลเพิ่มมากขึ้นตามการเจริญเติบโตของชุมชนเมืองการทรุดตัวของพื้นที่ก็เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 58 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2521-2530

ที่มา: Nutalaya *et al.* (1989)

และจากการศึกษาของ JICA (1995) ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2534-2536 ของหมวดวัดที่ระดับความลึก 1 เมตร โดยกรมแผนที่ทหารเป็นผู้ดำเนินการสำรวจพบว่า ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2533-2534 พื้นที่ส่วนใหญ่จะมีการทรุดตัวน้อยกว่า 2 ซม. และในบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ยังคงมีพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวมากกว่า 2 ซม. ที่บริเวณเขตคูสิตและพญาไท พื้นที่ที่มีการทรุดตัวอยู่ในช่วง 2-5 ซม. ส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่ทางด้านตะวันออกเฉียงเหนือ ตะวันออกเฉียงใต้ และตะวันตกเฉียงใต้ของกรุงเทพฯ ดังแสดงในภาพที่ 59 พื้นที่การทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะตรงกับพื้นที่ที่มีการสูบน้ำบาดาลจำนวนมาก และถึงแม้ว่าระดับน้ำบาดาลในกรุงเทพฯ จะเพิ่มขึ้นแต่การทรุดตัวก็ยังคงมีอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่รอบ ๆ กรุงเทพฯ

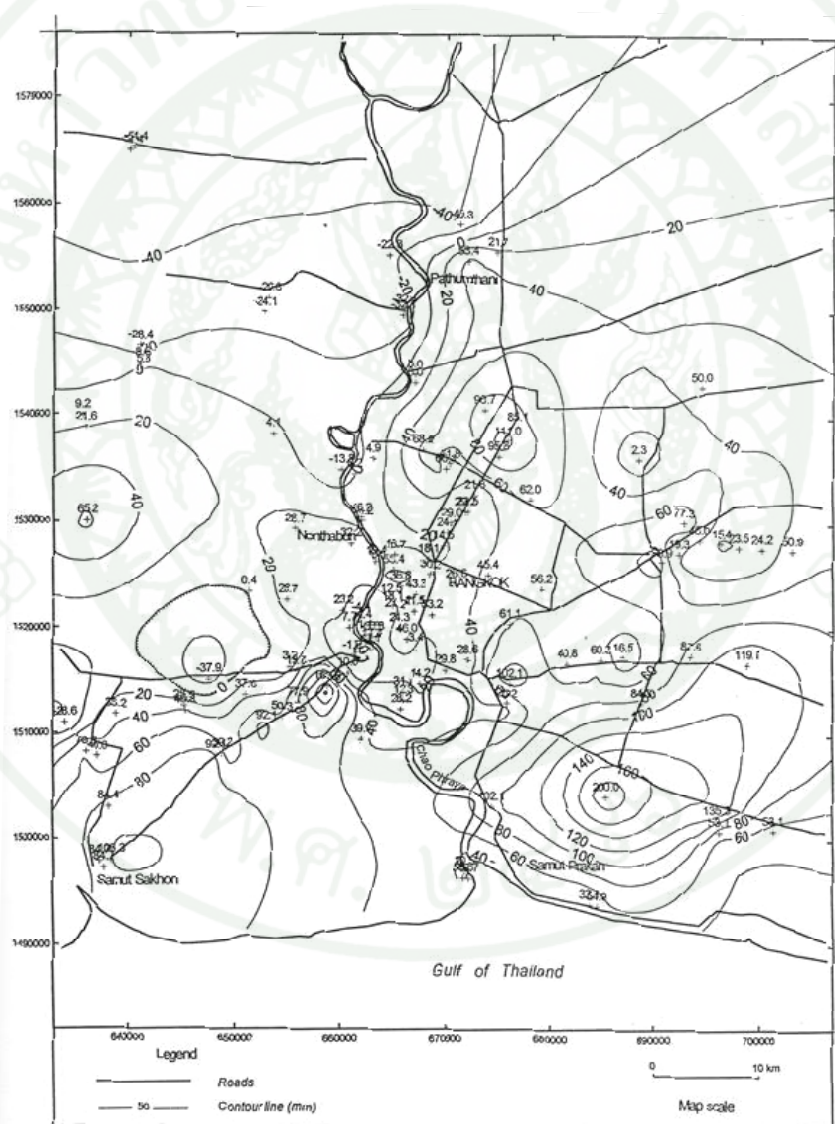


ภาพที่ 59 อัตราการทรุดตัวในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2533-2534

ที่มา: JICA (1995)

ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2534-2535 พื้นที่บริเวณใจกลางกรุงเทพฯ นนทบุรี สมุทรปราการ สมุทรสาคร และปทุมธานี ยังคงเป็นพื้นที่ที่มีการทรุดตัวมากกว่า 2 ซม. โดยเฉพาะในพื้นที่อำเภอ บางพลีและบางปู จังหวัดสมุทรปราการมีการทรุดตัวเกิดขึ้น 5-6 ซม. ส่วนพื้นที่ในเขตมีนบุรีและ ลาดกระบังซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการทรุดตัวมากที่สุดในกรุงเทพฯ วัดการทรุดได้ 4-5.5 ซม. และใน จังหวัดปทุมธานีตั้งแต่ในเขตอำเภอเมืองถึงอำเภอสามโคกและคลองหลวงวัดการทรุดได้ 3-4 ซม. เช่นเดียวกับในจังหวัดสมุทรสาคร

ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2535-2536 พื้นที่การทรุดตัวยังคงเกิดขึ้นในบริเวณด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ จังหวัดสมุทรปราการ สมุทรสาคร และปทุมธานี โดยมีค่าการทรุดตัวใกล้เคียงกับปี พ.ศ. 2535 และในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2537-2540 พื้นที่การทรุดตัวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในจังหวัดสมุทรปราการบริเวณพื้นที่อำเภอบางพลีและบางปู โดยมีปริมาณการทรุดตัวเกิดขึ้นทั้งหมดในช่วงระยะเวลา 3 ปีเท่ากับ 8-20 ซม. ส่วนพื้นที่ในกรุงเทพฯ บริเวณเขตดอนเมือง มีนบุรี และพื้นที่ในจังหวัดสมุทรสาครมีปริมาณการทรุดตัวเกิดขึ้นประมาณ 8-10 ซม. พื้นที่บริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ยังคงมีการทรุดตัวเกิดขึ้นด้วยอัตราการทรุดตัวเท่ากับ 1-1.5 ซม./ปี ดังแสดงในภาพที่ 60



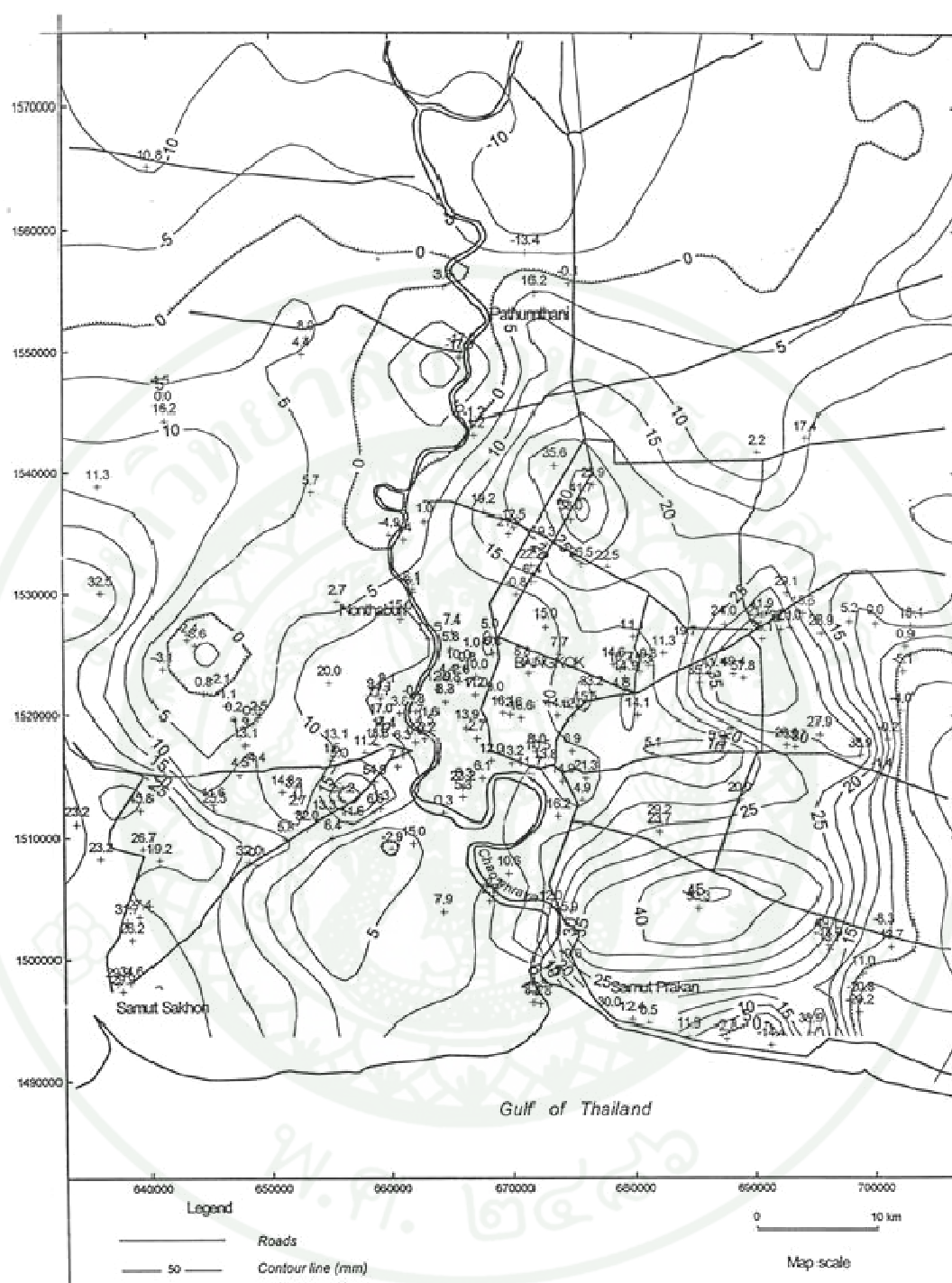
ภาพที่ 60 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2537-2540

ที่มา: Nguyen (1999)

นอกจากนี้ยังพบการพองตัวของชั้นดินในพื้นที่ทางตอนเหนือบริเวณอำเภอวังน้อย บางไช ลาดบัวหลวง ลาดหลุมแก้ว และในบริเวณพื้นที่ทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือของอำเภอกระทุ่มแบน และบางขุนเทียน โดยมีการพองตัวของชั้นดินประมาณ 2-4 ซม. และปริมาณการพองตัวของชั้นดินที่วัดได้มากที่สุดในช่วงระยะเวลา 3 ปีเท่ากับ 5.4 ซม. อยู่ในอำเภอลาดบัวหลวง สาเหตุของการพองตัวของชั้นดินในพื้นที่เหล่านี้ทั้ง ๆ ที่ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำประปาแดงและชั้นน้ำนันทบุรีมีระดับลดลงแต่ระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนครหลวงจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากพื้นที่บริเวณนี้ได้เกิดน้ำท่วมขนาดใหญ่ในปี พ.ศ. 2538 และการพองตัวของชั้นดินก็พบเฉพาะในช่วงเวลานี้เท่านั้น

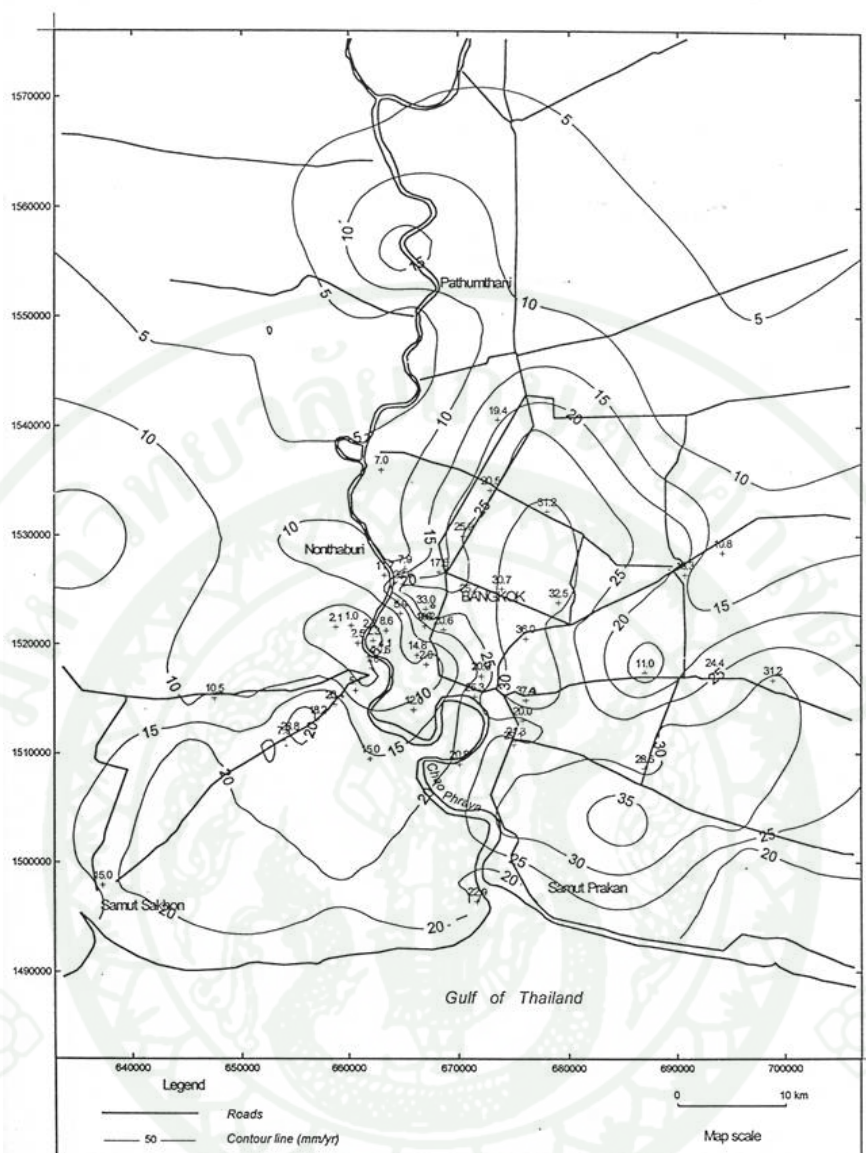
ในปี พ.ศ. 2540 พื้นที่ในกรุงเทพฯ บริเวณเขตมีนบุรี ดอนเมือง จังหวัดสมุทรปราการ และสมุทรสาคร ยังคงมีการทรุดตัวต่อเนื่องประมาณ 3-4 ซม. โดยปริมาณการทรุดตัวมากที่สุดที่วัดได้มากกว่า 5 ซม. ในบริเวณพื้นที่เขตมีนบุรีและบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ส่วนพื้นที่บริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ยังคงมีการทรุดตัวด้วยอัตรา 1-2 ซม./ปี และพบการพองตัวของชั้นดินในเขตพื้นที่อำเภอบางปะใหญ่ มากกว่า 2 ซม. และในพื้นที่ทางด้านตะวันตกและทางเหนือของจังหวัดปทุมธานี ทางด้านตะวันออกของเขตลาดกระบัง และด้านตะวันออกของอำเภอพุทธมณฑล ประมาณ 1 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 61

ในช่วงระยะเวลา 19 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521-2540 มีพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวจำนวนมากและเป็นบริเวณกว้างอยู่ 2 พื้นที่ ดังแสดงในภาพที่ 62 โดยพื้นที่แรกจะครอบคลุมพื้นที่บริเวณอำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐมและบริเวณพื้นที่ทางด้านตะวันออกเฉียงเหนือของจังหวัดสมุทรสาคร มีปริมาณการทรุดตัวเกิดขึ้นทั้งหมดประมาณ 30-50 ซม. หรือมีอัตราการทรุดตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 1.5-2.5 ซม./ปี และพื้นที่ที่ 2 จะเป็นพื้นที่บริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ในเขตดอนเมือง บางเขน บางกะปิ พระโขนง บางนา บางพลีในจังหวัดสมุทรปราการ และขยายไปทางด้านตะวันออกในพื้นที่เขตมีนบุรีและลาดกระบัง โดยมีปริมาณการทรุดตัวเกิดขึ้นทั้งหมดประมาณ 30-70 ซม. หรือมีอัตราการทรุดตัว 2-3.5 ซม./ปี และนอกจาก 2 พื้นที่นี้แล้วยังมีพื้นที่ในจังหวัดปทุมธานีที่มีการทรุดตัวด้วยอัตราการทรุดตัว 1-1.5 ซม./ปี โดยมีปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 10-30 ซม. ส่วนพื้นที่ในอำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานีและพื้นที่ในจังหวัดอยุธยาปริมาณการทรุดตัวจะเกิดขึ้นน้อยกว่า 10 ซม. หรือมีอัตราการทรุดตัวน้อยกว่า 0.5 ซม./ปี



ภาพที่ 61 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2539-2540

ที่มา: Nguyen (1999)

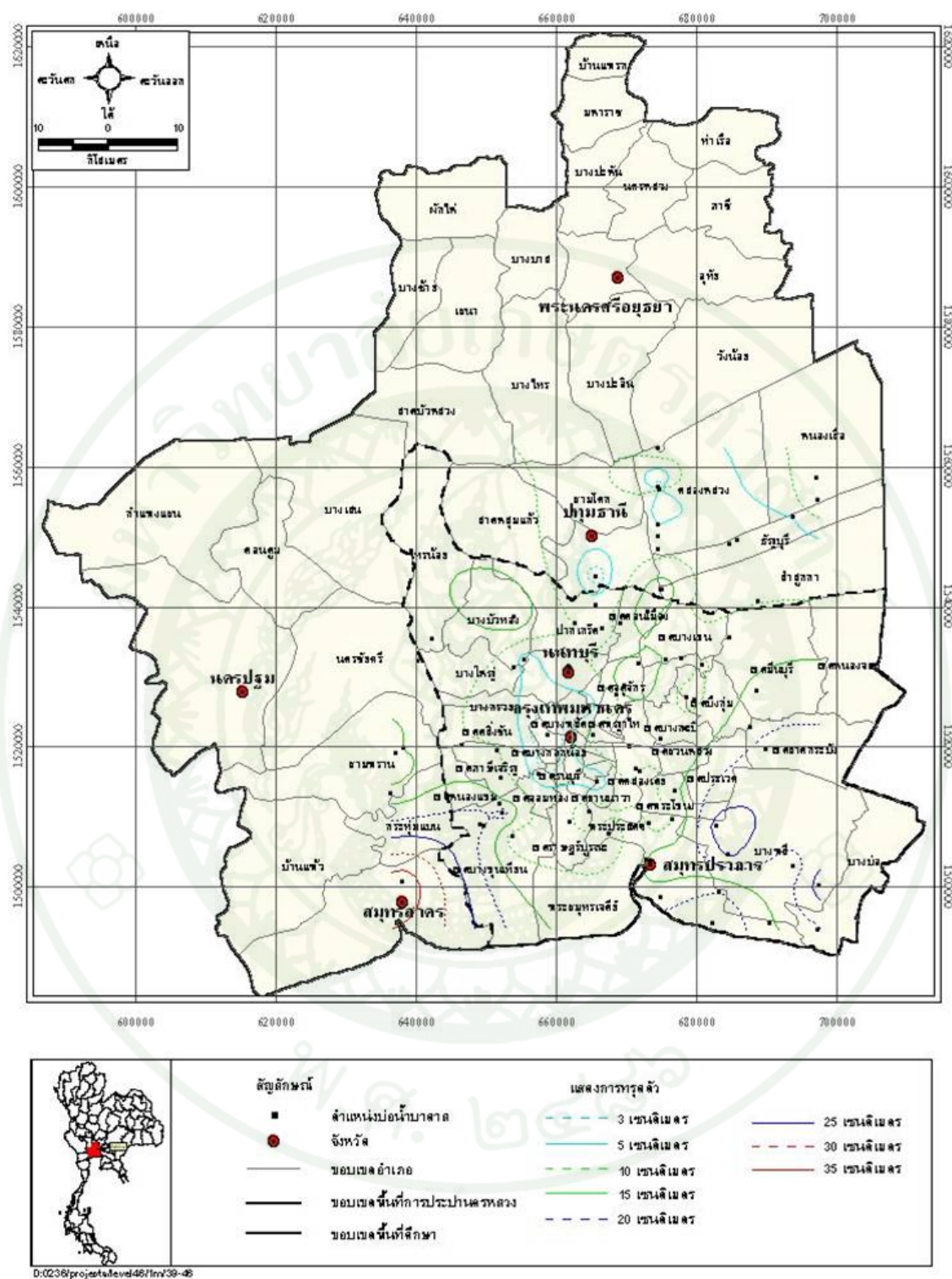


ภาพที่ 62 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2521-2540

ที่มา: Nguyen (1999)

การทรุดตัวในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2540-2546

การทรุดตัวในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2540-2546 ได้พิจารณาจากข้อมูลรายงานการสำรวจการทรุดตัวของแผ่นดินในรอบ 7 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539-2546 ซึ่งดำเนินการสำรวจโดยกรมแผนที่ทหารและกองรังวัด กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ดังแสดงในภาพที่ 63 โดยสามารถแบ่งพื้นที่ตามปริมาณการทรุดตัวได้เป็น 4 พื้นที่ เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ดังนี้



ภาพที่ 63 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2539-2546

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2547)

1. พื้นที่ที่มีการทรุดตัวมากกว่า 35 เซนติเมตร มี 1 พื้นที่เป็นพื้นที่ในจังหวัดสมุทรสาคร บริเวณอำเภอเมืองรอบใน

2. พื้นที่ที่มีการทรุดตัวระหว่าง 25-35 เซนติเมตร มี 2 พื้นที่ประกอบด้วย

- พื้นที่ทางฝั่งตะวันตกในจังหวัดสมุทรสาคร บริเวณอำเภอเมืองรอบนอก กระทุ่มแบน บางส่วน พื้นที่ในกรุงเทพฯ บริเวณเขตบางขุนเทียน บางส่วน
- พื้นที่ทางฝั่งตะวันออก บริเวณเขตอำเภอบางพลีในจังหวัดสมุทรปราการ และบางส่วนของเขตพระโขนง กรุงเทพฯ

3. พื้นที่ที่มีการทรุดตัวระหว่าง 20-25 เซนติเมตร มี 2 พื้นที่ประกอบด้วย

- พื้นที่ทางฝั่งตะวันตกในเขตบางขุนเทียน เขตหนองแขม กรุงเทพฯ อำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร และบางส่วนของอำเภอสสามพราน จังหวัดนครปฐม
- พื้นที่ทางฝั่งตะวันออกบริเวณอำเภอบางพลี บางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ และพื้นที่ต่อเนื่องกับกรุงเทพฯ ในเขตลาดกระบัง หนองจอก และบางส่วนของเขตประเวศ และพระโขนง

4. พื้นที่ที่มีการทรุดตัวระหว่าง 15-20 เซนติเมตร มี 4 พื้นที่ประกอบด้วย

- พื้นที่ทางฝั่งตะวันตกบริเวณเขตบางขุนเทียน เขตหนองแขม กรุงเทพฯ อำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร และส่วนใหญ่ของอำเภอสสามพราน จังหวัดนครปฐม
- พื้นที่ทางฝั่งตะวันออกของกรุงเทพฯ บริเวณเขตหนองจอก เขตมีนบุรี เขตประเวศ และบางส่วนของเขตลาดกระบัง เขตพระโขนง อำเภอเมือง อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ
- พื้นที่ต่อเนื่องกับกรุงเทพฯ ระหว่างเขตจตุจักรและเขตลาดพร้าวไปถึงเขตบางเขน และดอนเมือง
- พื้นที่อำเภอบางบัวทองและอำเภอไทรน้อย

โดยสรุป พื้นที่ที่มีการทรุดตัวสะสมเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยมีดังนี้

1. พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร ทรุดตัวมากกว่า 0.35 เมตร
2. พื้นที่อำเภอบางพลี และอำเภอบางบ่อ ทรุดตัวระหว่าง 0.25-0.35 เมตร
3. พื้นที่กรุงเทพมหานครบริเวณเขตดอนเมืองและบริเวณรอยต่อเขตลาดพร้าว จตุจักร และบางเขน ทรุดตัวมากกว่า 0.15 เมตร
4. พื้นที่อำเภอบางบัวทอง ทรุดตัวมากกว่า 0.15 เมตร

กลไกการทรุดตัวของชั้นดินและทฤษฎีการยุบอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ

กลไกการทรุดตัวของชั้นดิน

การทรุดตัวของชั้นดินสามารถแบ่งได้แบ่ง 2 ลักษณะใหญ่ ๆ คือ

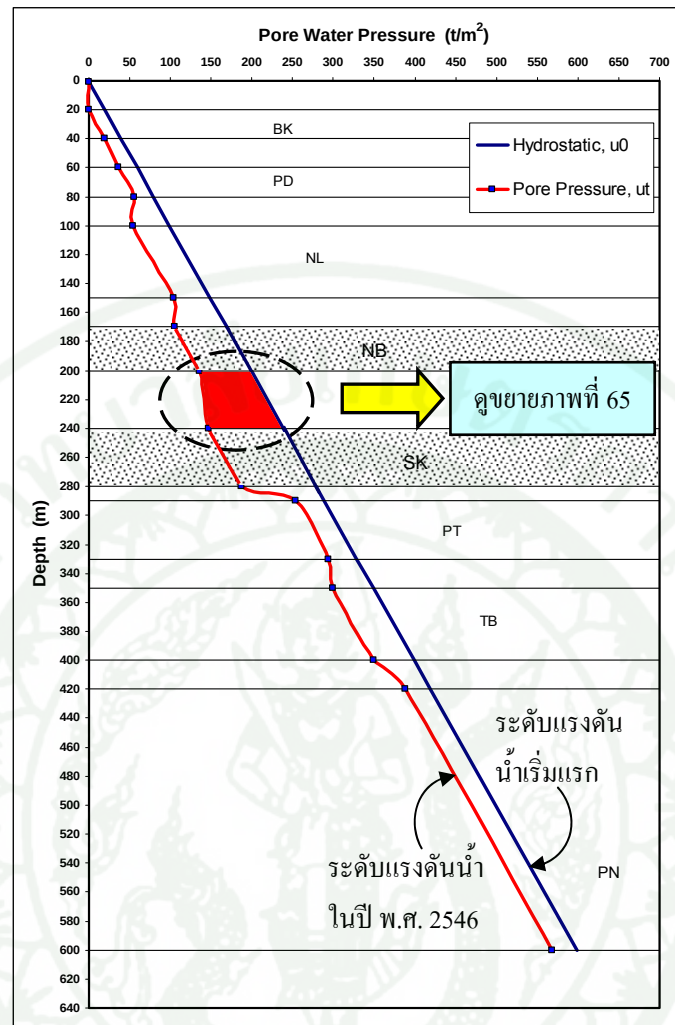
1. การทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันที (Immediate Settlement)
2. การทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการยุบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Settlement)

ในกรณีของการทรุดตัวเนื่องจากการยุบอัดตัวคายน้ำจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นโดยที่อัตราการทรุดตัวจะลดลงไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดอัตราการทรุดตัวจะช้ามากซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าการทรุดตัวนี้ได้หยุดลงแล้ว และหน่วยแรงรวมที่เกิดขึ้นในมวลดินไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา (สุรจักร, 2540) สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการทรุดตัวลักษณะนี้จะมีด้วยกัน 2 สาเหตุ คือ

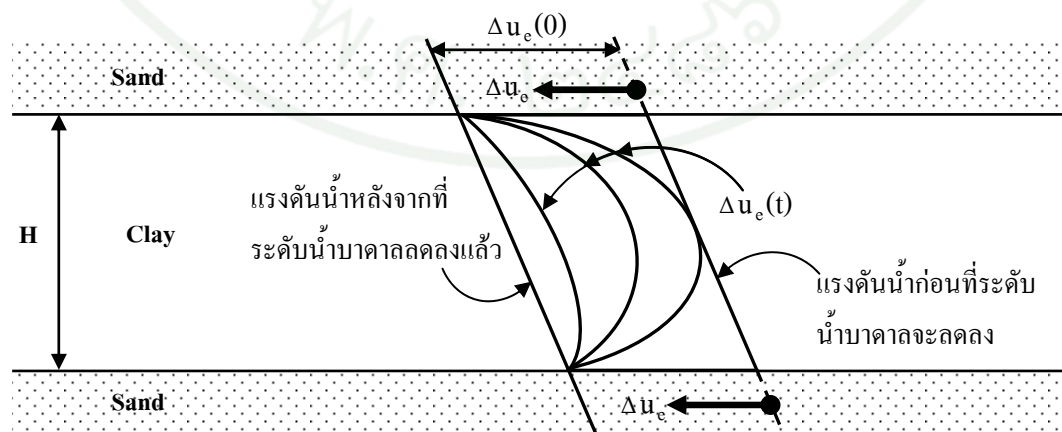
1. มีหน่วยแรงภายนอกมากระทำ
2. มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้จำนวนมากทำให้ระดับน้ำบาดาลลดลง

สำหรับในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการทรุดตัวของชั้นดินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดลงของระดับน้ำบาดาลเท่านั้น ซึ่งกลไกของการทรุดตัวนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการหาหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress, σ') ของ Terzaghi (1925) ดังแสดงในสมการที่ (3) โดยหน่วยแรงรวมทั้งหมด (Total Stress, σ) ที่เกิดขึ้นภายในมวลดินจะเท่ากับผลรวมของหน่วยแรงประสิทธิผลและแรงดันน้ำภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore Water Pressure, u)

$$\sigma = \sigma' + u \quad (3)$$



ภาพที่ 64 การลดลงของระดับน้ำบาดาลเนื่องจากการสูบน้ำในชั้นน้ำต่าง ๆ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปี พ.ศ. 2546



ภาพที่ 65 กลไกการทรุดตัวเนื่องจากการลดลงของระดับน้ำบาดาล

พิจารณาภาพที่ 64 และ 65 เมื่อระดับน้ำบาดาลลดลงจะทำให้แรงดันน้ำภายในชั้นดินลดลงด้วย (u ลดลง) โดยที่แรงดันน้ำในชั้นทรายจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีคุณสมบัติด้านความซึมน้ำสูง แต่แรงดันน้ำในชั้นดินเหนียวจะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านความซึมน้ำต่ำ ทำให้เกิดเป็นแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure, Δu_e) ภายในชั้นดินเหนียว ซึ่งแรงดันน้ำส่วนเกินนี้จะถูกระบายออกไปอย่างช้า ๆ โดยจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติด้านความซึมน้ำ ในขณะที่หน่วยแรงรวมทั้งหมดจะมีค่าที่ ดังนั้นหน่วยแรงประสิทธิผลจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการที่ (4) เกิดเป็นขบวนการยุบอัดตัวคาน้ำทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลงและเกิดการทรุดตัวของชั้นดินตามมา

$$\sigma - u = \sigma' \quad (4)$$

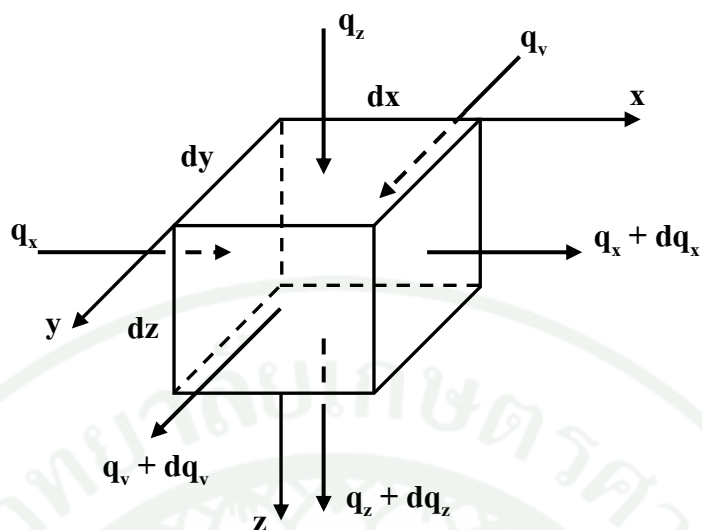
แรงที่
ลดลง
➡
เพิ่มขึ้น

ในกรณีที่มีการทรุดตัวเกิดขึ้นเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลนั้น การลดลงของแรงดันน้ำจะเท่ากับการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยแรงประสิทธิผล โดยที่ไม่มีน้ำหนักจากภายนอกมากระทำ การลดลงของแรงดันน้ำไม่ได้เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากสัมประสิทธิ์การไหลซึมของดินเหนียวต่ำมาก แต่จะลดลงไปเรื่อย ๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นพร้อมกับการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งแรงดันน้ำอยู่ในสภาพสมดุล (ไม่มีการทรุดตัวเพิ่ม) และการไหลซึมอยู่ในสภาพ Steady State ถ้าอัตราและปริมาณการสูบน้ำบาดาลมีมากขึ้นเรื่อย ๆ นั่นคือ ระดับน้ำบาดาลลดลงอยู่ตลอดเวลา สภาพ Steady State ก็จะไม่เกิดขึ้นและการทรุดตัวก็จะไม่หยุดลง (สุรจักร, 2540)

การไหลของน้ำในมวลดิน

ในกรณีทั่ว ๆ ไปการไหลของน้ำผ่านมวลดินจะมีความเร็วของการไหลและระดับความลาดชันทางชลศาสตร์ (gradient) เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของมวลดินที่ไหลผ่าน การคำนวณหาค่าต่าง ๆ เหล่านี้โดยทั่วไปจะใช้วิธีการเขียนตาข่ายการไหล (Flow Net) ซึ่งมีหลักการพื้นฐานมาจากสมการการไหลต่อเนื่องของลาปลาซ (Laplace's Equation of Continuity) ที่อธิบายการไหลของน้ำผ่านมวลดินในสภาวะคงตัว (Steady State)

สมการการไหลต่อเนื่องของลาปลาซได้จากการพิจารณาการไหลของน้ำผ่านมวลดินก่อนหนึ่งในลักษณะ 3 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 66 โดยพิจารณาถึงการไม่สูญหายของน้ำในมวลดิน ดังนั้นปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลเข้าและไหลออกจากมวลดินก่อนนี้ต้องเท่ากัน ซึ่งสามารถหาได้จากกฎของดาร์ซี (Darcy's Law)



ภาพที่ 66 การไหลของน้ำผ่านก้อนมวลดินขนาด $dx \, dy \, dz$

ที่มา: Das (1983)

ปริมาณน้ำที่ไหลเข้ามวลดินในทิศทาง x , y และ z คือ

$$q_x = k_x i_x A_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x} dy dz \quad (5)$$

$$q_y = k_y i_y A_y = k_y \frac{\partial h}{\partial y} dx dz \quad (6)$$

$$q_z = k_z i_z A_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z} dx dy \quad (7)$$

โดยที่ q_x, q_y, q_z = ปริมาณน้ำที่ไหลเข้ามวลดินในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ
 k_x, k_y, k_z = สัมประสิทธิ์ของไหลซึมผ่านในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ
 i_x, i_y, i_z = ความลาดชันทางชลศาสตร์ในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ
 h = ระดับแรงดันน้ำภายในมวลดิน (Hydraulic Head)

ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากมวลดินในทิศทาง x, y และ z คือ

$$q_x + dq_x = k_x (i_x + d i_x) A_x = k_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} dx \right) dy dz \quad (8)$$

$$q_y + dq_y = k_y (i_y + d i_y) A_y = k_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} dy \right) dx dz \quad (9)$$

$$q_z + dq_z = k_z (i_z + d i_z) A_z = k_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} dz \right) dx dy \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณน้ำที่ไหลเข้า} &= \text{ปริมาณน้ำที่ไหลออก} \\
 q_x + q_y + q_z &= (q_x + dq_x) + (q_y + dq_y) + (q_z + dq_z) \\
 \text{หรือ} \quad dq_x + dq_y + dq_z &= 0
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{12}$$

ในกรณีที่มวลดินมีคุณสมบัติทางด้านการไหลซึมเท่ากันทุกทิศทาง ($k_x = k_y = k_z$) จะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{13}$$

และถ้าการไหลอยู่ในสภาพ 1 หรือ 2 มิติ ซึ่งมักจะเป็นสภาพที่เกิดขึ้นกับปัญหาทางด้านวิศวกรรมปฐพี สมการที่ (13) จะลดรูปเป็น

$$\text{กรณี 2 มิติ} \quad \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{14}$$

$$\text{กรณี 1 มิติ} \quad \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{15}$$

สมการที่ (13), (14) และ (15) เป็นสมการที่อยู่ในรูปแบบของสมการลาปลาซ ซึ่งเป็นสมการที่ควบคุมพฤติกรรมของการไหลซึมของน้ำ ใช้ในการหาค่าระดับแรงดันน้ำภายในมวลดิน (h) สมการในรูปแบบนี้สามารถหาคำตอบได้ซึ่งจะให้ค่า h ทุกจุดในมวลดินเมื่อทราบค่า h บริเวณขอบรอบนอกของมวลดิน ดังนั้นเมื่อทราบค่า h ทุกจุดในมวลดินทำให้สามารถหาค่าแรงดันน้ำภายในช่องว่าง ความลาดชันทางชลศาสตร์ที่จุดต่าง ๆ และปริมาณการไหลซึมของน้ำภายในมวลดินได้

วิธีการหาค่า h โดยการแก้สมการจะทำให้ลำบากในกรณีที่บริเวณขอบรอบนอกของมวลดินมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนไม่สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ และเนื่องจากปัญหาทางด้านวิศวกรรมปฐพีเป็นปัญหาที่ค่อนข้างยากในการแก้สมการด้วยคณิตศาสตร์ การหาค่า h ใน

มวลดินจึงมักจะทำได้โดยวิธีอื่น แต่ยังคงยึดหลักของสมการลาปลาซซึ่งเป็นสมการที่ควบคุมพฤติกรรมของการไหลซึมผ่านดิน โดยวิธีการเหล่านี้ คือ

1. การใช้ตาข่ายการไหล
2. การใช้ Numerical Analysis เช่น วิธี Finite Different และ Finite Element
3. การใช้แบบจำลองชลศาสตร์ (Hydraulic Model)
4. การใช้ Electric Analogy Model ควบคู่ไปกับการเขียนตาข่ายการไหล

ทฤษฎีการยุบอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ

ทฤษฎีการยุบอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ถูกเสนอขึ้นครั้งแรกโดย Terzaghi (1925) โดยมีสมมติฐานของการได้มาของสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

1. ชั้นดินเหนียวเป็นเนื้อเดียวกันตลอด
2. ชั้นดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ
3. การยุบอัดตัวของชั้นดินเหนียวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากน้ำถูกบีบออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพียงอย่างเดียวเท่านั้น
4. การทรุดตัวเกิดขึ้นได้เพียง 1 มิติ ในแนวดิ่งเท่านั้น
5. กฎของ Darcy สามารถนำมาใช้ได้
6. สัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวคายน้ำ (C_v) มีค่าคงที่ในช่วงการยุบอัดตัว

ในกรณีของการยุบอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ การไหลของน้ำในมวลดินจะเกิดขึ้น 1 ทิศทางเท่านั้น ดังนั้น จากภาพที่ 66 ถ้าให้การไหลของน้ำในมวลดินเกิดขึ้นเฉพาะในทิศทางแนวดิ่ง (z direction) ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าออกในมวลดินในทิศทาง x และ y จะเท่ากับศูนย์ นั่นคือ q_x, q_y, dq_x, dq_y จะเท่ากับศูนย์ และปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและออกในทิศทาง z จะเท่ากับ

$$(q_z + dq_z) - q_z = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดิน}$$

$$dq_z = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (V = dx dy dz) \quad (16)$$

จากกฎของ Darcy :- $q = k i A \quad (17)$

ดังนั้น $q_z = k_z i_z A = k_z \frac{\partial h}{\partial z} dx dy \quad (18)$

$$\frac{dq_z}{dz} = k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} dx dy \quad (19)$$

$$dq_z = k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} dx dy dz \quad (20)$$

$$h = \frac{u}{\gamma_w} \quad (21)$$

โดยที่ $u = u_e =$ แรงดันน้ำส่วนเกิน

จากสมการที่ (16) และ (20) จะได้ว่า

$$k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} dx dy dz = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (22)$$

แทนค่าสมการ (21) ใน (22) ได้

$$\frac{k_z}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{1}{dx dy dz} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (23)$$

ขณะที่มวลดินยุบอัดตัวการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดินจะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของช่องว่างภายในมวลดิน ดังนั้น

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V_v}{\partial t} = \frac{\partial e V_s}{\partial t} = \frac{V}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{dx dy dz}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (24)$$

แทนค่าสมการ (24) ใน (23) ได้

$$\frac{k_z}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (25)$$

การเปลี่ยนแปลงช่องว่างภายในมวลดิน, Δe , เป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของค่า effective stress ($\Delta \sigma'$) ถ้าสมมติให้ความสัมพันธ์ของ ∂e และ $\Delta \sigma'$ เป็นแบบเส้นตรง จะได้ว่า

$$\partial e = -a_v \partial(\Delta \sigma') \quad (26)$$

โดยที่ $a_v =$ coefficient of compressibility

แต่การเพิ่มขึ้นของค่า effective stress เป็นผลเนื่องมาจากการลดลงของ excess pore water pressure (u_e) ดังนั้น

$$\partial e = a_v \partial u_e \quad (27)$$

แทนสมการที่ (27) ใน (25) ได้ว่า

$$\frac{k_z}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{a_v}{1+e_0} \frac{\partial u_e}{\partial t} = m_v \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (28)$$

โดยที่ m_v = coefficient of volume change = $\frac{a_v}{1+e_0}$

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = \frac{k_z}{m_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (29)$$

โดยที่ C_v = coefficient of consolidation = $\frac{k_z}{m_v \gamma_w}$

u_e = เป็นฟังก์ชันของ z และ $t = f(z,t)$

คำตอบของสมการที่ (29) สามารถหาได้โดยใช้ boundary condition ดังนี้

1. ที่เวลา $t = 0$; $u_e = u_i$ = initial excess pore water pressure at any depth
2. ที่ระยะ $z = 0$; $u_e = 0$ ตลอดเวลา
3. ที่ระยะ $z = H = 2H_d$; $u_e = 0$ (H_d is the length of the longest drainage path)

จาก boundary condition ทั้ง 3 ข้อ สามารถหาคำตอบของสมการที่ (29) ได้ ดังนี้

$$u_e = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(\frac{n\pi z}{2H_d}\right) \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 T_v}{4}\right) \quad (30)$$

$$\text{โดยที่ } A_n = \text{ค่าคงที่} = \frac{1}{H_d} \int_0^{2H_d} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H_d} dz \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
 n &= \text{ตัวเลขจำนวนเต็ม} \\
 T_v &= \text{Time Factor} = \frac{C_v t}{H^2}
 \end{aligned} \tag{32}$$

แทนค่า A_n ในสมการที่ (30) ได้

$$u_e = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{H_d} \int_0^{2H_d} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H_d} dz \right) \sin \left(\frac{n\pi z}{2H_d} \right) \exp \left(\frac{-n^2 \pi^2 T_v}{4} \right) \tag{33}$$

u_i จะมีหลายรูปแบบด้วยกัน แต่ในกรณีที่ u_i มีค่าคงที่ตลอดความลึกของชั้นดิน ($u_i = u_0$) จะได้ว่า

$$\frac{1}{H_d} \int_0^{2H_d} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H_d} dz = \frac{2u_0}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \tag{34}$$

$$\therefore u_e = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2u_0}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \sin \left(\frac{n\pi z}{2H_d} \right) \exp \left(\frac{-n^2 \pi^2 T_v}{4} \right) \tag{35}$$

จากสมการที่ (35) จะเห็นว่า $(1 - \cos n\pi)$ เท่ากับศูนย์เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มเลขคู่ ดังนั้น ค่า u_e จะมีค่า เมื่อ n เป็นเลขคี่ หรือสามารถแทนค่า n เท่ากับ $2m+1$ เมื่อ m เป็นเลขจำนวนเต็ม ดังนั้น

$$u_e = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_0}{(2m+1)\pi} \{1 - \cos (2m+1)\pi\} \sin \left(\frac{(2m+1)\pi z}{2H_d} \right) \exp \left(\frac{-(2m+1)^2 \pi^2 T_v}{4} \right) \tag{36}$$

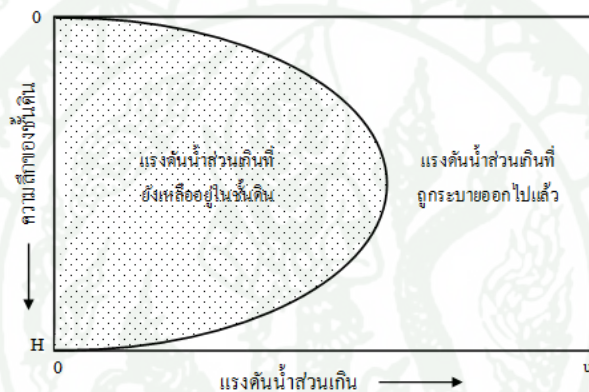
$$\text{หรือ} \quad u_e = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_0}{M} \sin \frac{Mz}{H_d} \exp(-M^2 T_v) \tag{37}$$

$$\text{โดยที่} \quad M = \frac{(2m+1)\pi}{2} \tag{38}$$

สมการที่ (33) เป็นสมการทั่วไปที่ใช้สำหรับหาค่า u_e ที่ความลึกต่าง ๆ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง โดยที่ u_i อาจจะมีค่าคงที่ตลอดความหนาของชั้นดิน (H) หรือเปลี่ยนแปลงตามความลึก z ก็ได้ ส่วนสมการที่ (35) หรือ (37) ใช้ได้เฉพาะในกรณีที่ $u_i (= u_0)$ มีค่าคงที่กับความลึกเท่านั้น

อัตราการยุบอัดตัวคายน้ำ

จากสมการที่ (33) และ (37) เราสามารถหาค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (u_e) ที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวที่ระดับความลึกต่าง ๆ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งได้ ดังแสดงในภาพที่ 67 แรงดันน้ำส่วนเกินนี้จะถูกระบายออกเมื่อเวลาผ่านไปทำให้ชั้นดินเกิดการยุบอัดตัวมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้น ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและจุดใดจุดหนึ่งภายในชั้นดิน เราสามารถหาค่าระดับการยุบอัดตัวหรืออัตราการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดิน (Degree of Consolidation, U_z) ได้ ซึ่งจะแสดงสถานะของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ยังเหลืออยู่และที่ได้ถูกระบายออกไปแล้วที่ระดับความลึกและเวลาต่าง ๆ โดยสามารถหาได้ ดังนี้



ภาพที่ 67 แสดงแรงดันน้ำส่วนเกินที่ยังเหลืออยู่และที่ถูกระบายออกไปแล้ว

ที่มา: Perloff and Baron (1976)

$$\begin{aligned}
 U_z(t) &= \frac{\text{แรงดันน้ำส่วนเกินที่ถูกระบายออกไปที่ความลึก } z \text{ และที่เวลา } t}{\text{แรงดันน้ำส่วนเกินที่เวลาเริ่มต้น}} \\
 &= \frac{u_0 - u_t}{u_0} = 1 - \frac{u_t}{u_0} \quad (39)
 \end{aligned}$$

โดยที่ $U_z(t)$ = อัตราการยุบอัดตัวคายน้ำที่ระดับความลึก z ณ เวลา t
 u_0 = แรงดันน้ำส่วนเกินที่ระดับความลึก z ณ เวลาเริ่มต้น ($t = 0$)
 u_t = แรงดันน้ำส่วนเกินที่ระดับความลึก z ณ เวลา t

ในกรณีที่ค่า u_0 มีค่าคงที่กับความลึกจะได้ว่า

$$u_0 - u_t = \Delta\sigma' \quad (40)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad U_z(t) = \frac{\Delta\sigma'}{u_0} \quad (41)$$

โดยที่ $\Delta\sigma'$ = หน่วยแรงประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นจากการลดลงของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ระดับความลึก z ณ เวลา t

ในกรณีที่ค่า u_0 มีค่าคงที่กับความลึก แทนสมการที่ (37) ในสมการที่ (39) ได้

$$U_z(t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H_d} \exp(-M^2 T_v) \quad (42)$$

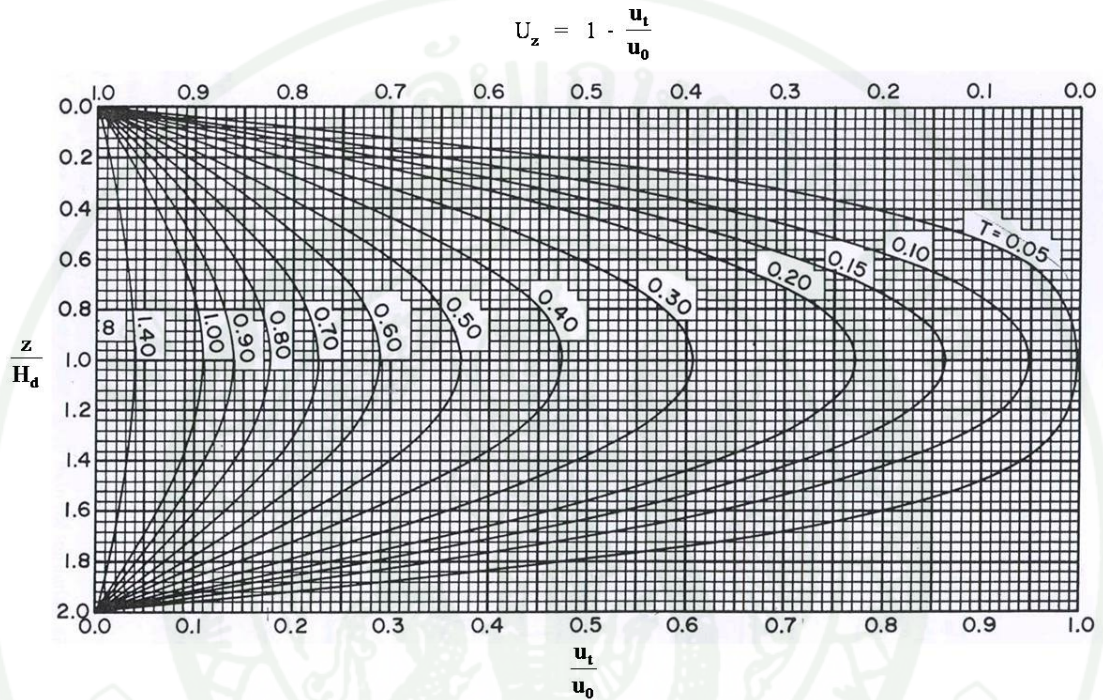
จากสมการที่ (42) ทำให้สามารถเขียนกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง U_z กับ z/H_d ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ T_v ได้ ดังแสดงในภาพที่ 68 เราเรียกกราฟนี้ว่า Isocrones ซึ่งมีไว้สำหรับคาดคะเน u_t และ $\Delta\sigma'$ ที่เวลาใดเวลาหนึ่งตามตำแหน่งที่ต้องการ โดยที่ค่า U_z คือ สมการที่ (39) และ (41) การจะใช้ภาพที่ 68 ได้จำเป็นต้องทราบค่า C_v และ H_d (ความยาวของการไหลซึมที่ยาวที่สุด) และ u_0 มีค่าคงที่กับความลึก ในกรณีที่น้ำสามารถไหลซึมได้ทั้งขึ้นข้างบนและลงข้างล่าง (Double Drained) $H_d = H/2$

ค่า U_z จะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับตำแหน่งในมวลดิน แต่ตามปกติแล้วเราจะสนใจเฉพาะค่าเฉลี่ยของอัตราการยุบอัดตัวคายน้ำตลอดทั้งชั้นดิน (Average Degree of Consolidation, U_{av}) มากกว่าค่า U_z ที่จุดใดจุดหนึ่ง โดยค่า U_{av} สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของ u_0 และ u_t ตลอดความหนาของชั้นดินทั้งหมด ดังนี้

$$U_{av}(t) = \frac{\frac{1}{H} \int_0^H u_i dz - \frac{1}{H} \int_0^H u_t dz}{\frac{1}{H} \int_0^H u_i dz} \quad (43)$$

$$U_{av}(t) = 1 - \frac{\int_0^H u_t dz}{\int_0^H u_i dz} \quad (44)$$

ถ้าพิจารณาสมการที่ (43) ให้ดีแล้วจะเห็นว่า $U_{av}(t)$ คือ ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาใดเวลาหนึ่งหารด้วยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นทั้งหมดหลังจากขบวนการอัดตัวคายน้ำเสร็จสิ้นลงแล้ว ดังนั้น ค่า $U_{av}(t)$ ก็คือ อัตราส่วนระหว่างค่าการทรุดตัวที่เวลาใดเวลาหนึ่ง $[\rho_c(t)]$ ต่อค่าการทรุดตัวทั้งหมด (ρ_c) ของชั้นดินนั่นเอง



ภาพที่ 68 ความสัมพันธ์ระหว่าง U_z กับ $\frac{z}{H_d}$ ที่ T_v ต่างกันในกรณีที่ค่า u_i มีค่าคงที่กับความลึกและน้ำสามารถไหลซึมได้ทั้งขึ้นข้างบนและลงข้างล่าง

ที่มา: Perloff and Baron (1976)

$$U_{av}(t) = \frac{\rho_c(t)}{\rho_c} \quad (45)$$

ในกรณีที่ $H = 2H_d$ และ $u_i = u_0$ ค่าคงที่ตลอดความหนาของชั้นดินจะได้ว่า $u_i = u_c$ ในสมการที่ (37) ดังนั้น เมื่อแทนค่า u_i ลงในสมการที่ (43) จะได้

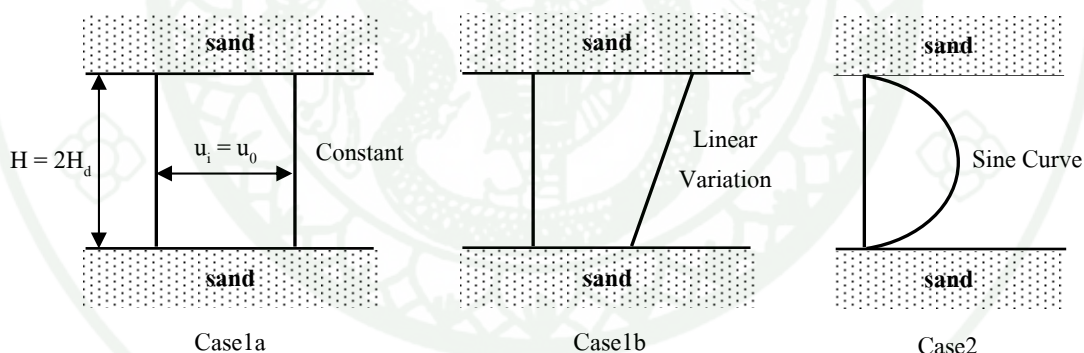
$$U_{av}(t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v) \quad (46)$$

นอกจากนี้ Terzaghi (1925) ยังได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง U_{av} กับ T_v ให้อยู่ในรูปของสมการที่ง่ายขึ้นซึ่งได้มาจากการประมาณค่าในสมการที่ (46) ดังนี้

$$\text{เมื่อ } 0 < U_{av} < 53\% ; \quad T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U_{av}}{100} \right)^2 \quad (47)$$

$$53\% \leq U_{av} \leq 100\% ; \quad T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U_{av}) \quad (48)$$

สมการที่ (46) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง U_{av} และ T_v โดยมีค่า u_i คงที่ตลอดความหนาของชั้นดินและน้ำสามารถไหลซึมออกจากดินได้ทั้งขึ้นข้างบนและลงข้างล่าง (Case1a ในภาพที่ 69) แต่ถ้าในกรณีที่ u_i เปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะแบบอื่นความสัมพันธ์ระหว่าง U_{av} และ T_v จะไม่เป็นไปตามสมการที่ (46) แต่จะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับลักษณะรูปแบบของค่า u_i ดังแสดงในตารางที่ 5 และ ภาพที่ 71 ในกรณีที่ u_i เปลี่ยนแปลงตามความลึกในลักษณะเป็นเส้นตรง (Case1b ในภาพที่ 69) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง U_z กับ z/H_d และ U_{av} กับ T_v ยังคงเป็นเส้นเดียวกับในกรณีที่ u_i มีค่าคงที่ตามความลึก (Case1a ในภาพที่ 69)

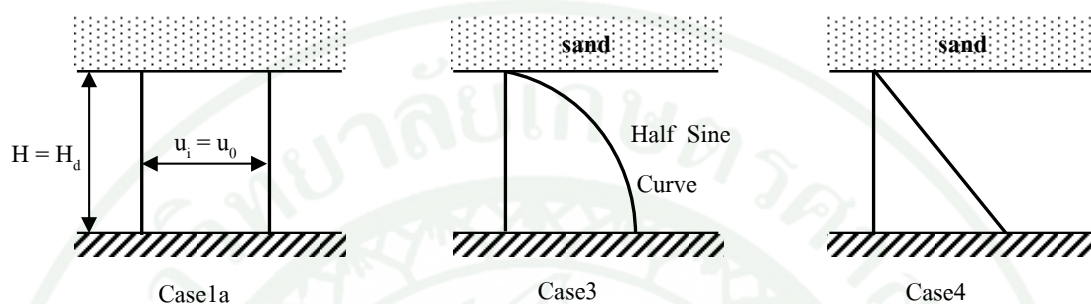


ภาพที่ 69 ลักษณะการกระจายของ u_i ในรูปแบบต่าง ๆ

ที่มา: Perloff and Baron (1976)

ในกรณีที่น้ำสามารถไหลซึมออกได้เฉพาะในทิศทางเดียวเท่านั้นคือ ขึ้นข้างบนหรือลงข้างล่าง (Single Drained) รูปแบบของสมการทั้งหมดจะไม่เปลี่ยนแปลงยังคงสามารถใช้ได้เพียงแต่ค่า H_d จะมีค่าเท่ากับ H และความสัมพันธ์ระหว่าง U_{av} กับ T_v ในตารางที่ 5 และในภาพที่ 71 ยังคงสามารถใช้ได้เฉพาะในกรณีที่ u_i มีรูปแบบที่สมมาตรรอบแกนในแนวนอนที่แบ่งครึ่งชั้นดิน เช่น Case1a และ Case2 ในภาพที่ 69 เท่านั้น เนื่องจากเมื่อ u_i ที่มีลักษณะรูปแบบที่สมมาตรการกระจาย

ตัวของแรงดันน้ำส่วนเกินก็จะมีลักษณะสมมาตรตลอดเวลา ดังนั้นการหาค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เวลาใด ๆ สามารถหาเพียงครั้งเดียวได้ ซึ่งเปรียบเสมือนว่าชั้นดินสามารถระบายน้ำได้เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 70 และความสัมพันธ์ระหว่าง U_{av} กับ T_v ในตารางที่ 5 และภาพที่ 71 จึงยังคงสามารถใช้ได้เฉพาะในกรณีนี้



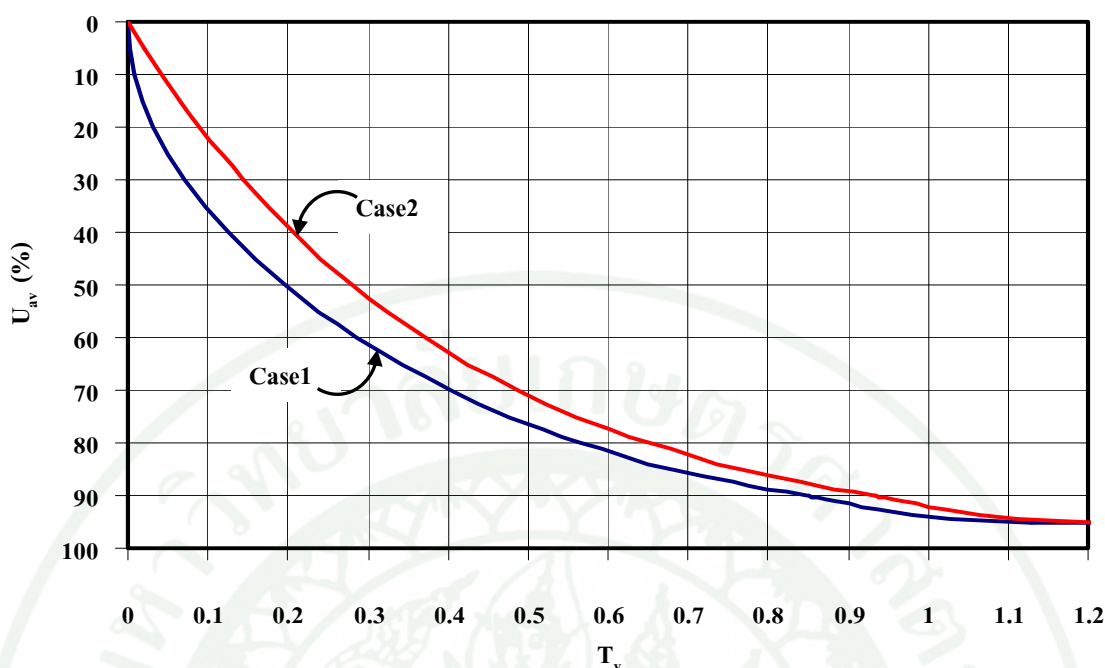
ภาพที่ 70 ลักษณะการกระจายของ u_i ในรูปแบบที่สมมาตรและการระบายน้ำแบบ 2 ทิศทาง

ที่มา: Perloff and Baron (1976)

ตารางที่ 5 ค่า U_{av} และ T_v ตามลักษณะของค่า u_i และการไหลของน้ำในดินสามารถไหลได้ทั้งขึ้นข้างบนและลงข้างล่าง

U_{av} (%)	T_v	
	Case1a	Case2
0	0	0
5	0.002	0.021
10	0.008	0.043
15	0.018	0.066
20	0.031	0.090
25	0.049	0.117
30	0.071	0.145
35	0.096	0.175
40	0.126	0.207
45	0.159	0.242
50	0.197	0.281

U_{av} (%)	T_v	
	Case1a	Case2
50	0.197	0.281
55	0.239	0.324
60	0.286	0.371
65	0.342	0.425
70	0.403	0.488
75	0.477	0.562
80	0.567	0.652
85	0.684	0.769
90	0.848	0.933
95	1.129	1.214
100	∞	∞

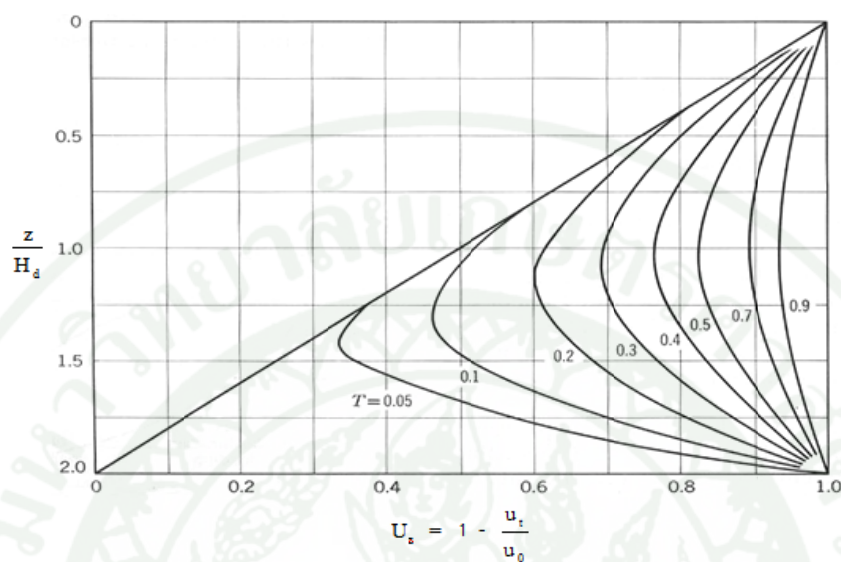


ภาพที่ 71 ความสัมพันธ์ระหว่าง U_{av} กับ T_v เมื่อการกระจายของ u_i อยู่ในลักษณะต่าง ๆ กันและน้ำสามารถไหลซึมไปยังชั้นทรายที่อยู่ชั้นบนและชั้นล่างได้

ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง U_z กับ z/H_d ในภาพที่ 68 ซึ่งเป็นกรณีที่ u_i มีค่าคงที่และชั้นดินสามารถระบายน้ำได้ 2 ทิศทาง คือ ขึ้นข้างบนและลงข้างล่าง ถ้าเป็นกรณีที่ชั้นดินสามารถระบายน้ำได้เพียงทิศทางเดียวกราฟก็จะเหลือเพียงครึ่งเดียว คือ ค่า z/H_d จะมีค่าตั้งแต่ 0 - 1.0 เท่านั้น แต่ในกรณีที่ u_i มีค่าไม่คงที่ความสัมพันธ์ระหว่าง U_z กับ z/H_d จะเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในภาพที่ 72 ซึ่งเป็นกรณีที่ค่า u_i เปลี่ยนแปลงตามความลึกเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยมีค่า $u_i = 0$ เมื่อ $z/H_d = 0$ กรณีเช่นนี้มักเกิดกับปัญหาการลดระดับน้ำบาดาลเมื่อมีการสูบน้ำออก ซึ่งค่า U_z สามารถหาได้จากสมการที่ (39) และ (41) โดยที่ u_i คือ แรงดันน้ำส่วนเกินในดินที่เหลืออยู่และยังไม่ได้ถูกระบายออกไป ณ เวลา t และ u_0 คือ แรงดันน้ำส่วนเกินสูงสุดในดินที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ซึ่งถ้าเป็นในภาพที่ 72 จะอยู่ที่ $z/H_d = 2.0$ ส่วนค่า $\frac{\Delta \sigma'}{u_0}$ จะเท่ากับผลต่างของค่า U_z ที่ z/H_d ที่ต้องการ ณ เวลา $t = 0$ กับค่า U_z ที่เวลา t และที่ z/H_d ค่าเดียวกัน (สุรจักร, 2540)

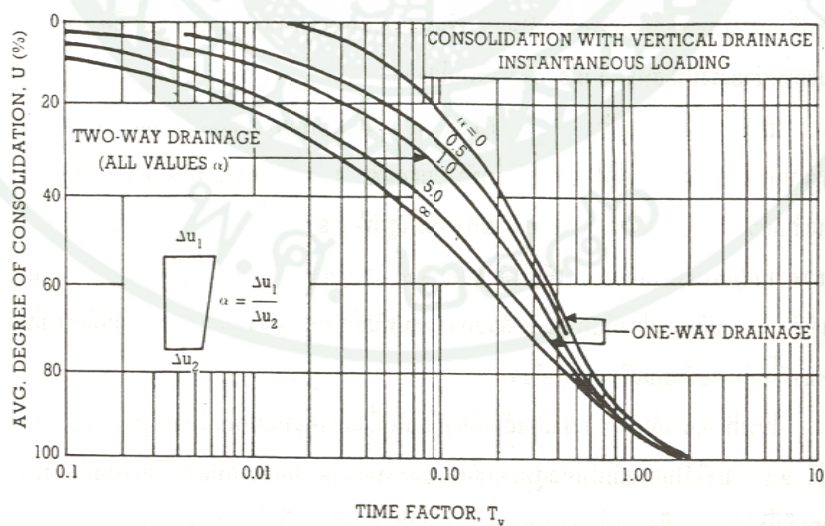
ในกรณีที่ u_i เปลี่ยนแปลงตามความลึกของชั้นดินในลักษณะเป็นเส้นตรงและน้ำสามารถไหลซึมออกได้เฉพาะในทิศทางเดียวเท่านั้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง U_z กับ z/H_d และ U_{av} กับ T_v จะเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในภาพที่ 73 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง U_{av} กับ T_v

ในกรณีที่ u_i เปลี่ยนแปลงตามความลึกของชั้นดินในลักษณะเป็นเส้นตรง และน้ำสามารถไหลซึมได้เพียงทิศทางเดียว



ภาพที่ 72 ความสัมพันธ์ระหว่าง U_z กับ $\frac{z}{H_d}$ ที่ T_v ต่างกันในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงของค่า u_i กับความลึกเป็นรูปสามเหลี่ยมโดย $u_i = 0$ เมื่อ $\frac{z}{H_d} = 0$

ที่มา: Lambe and Whitman (1979)

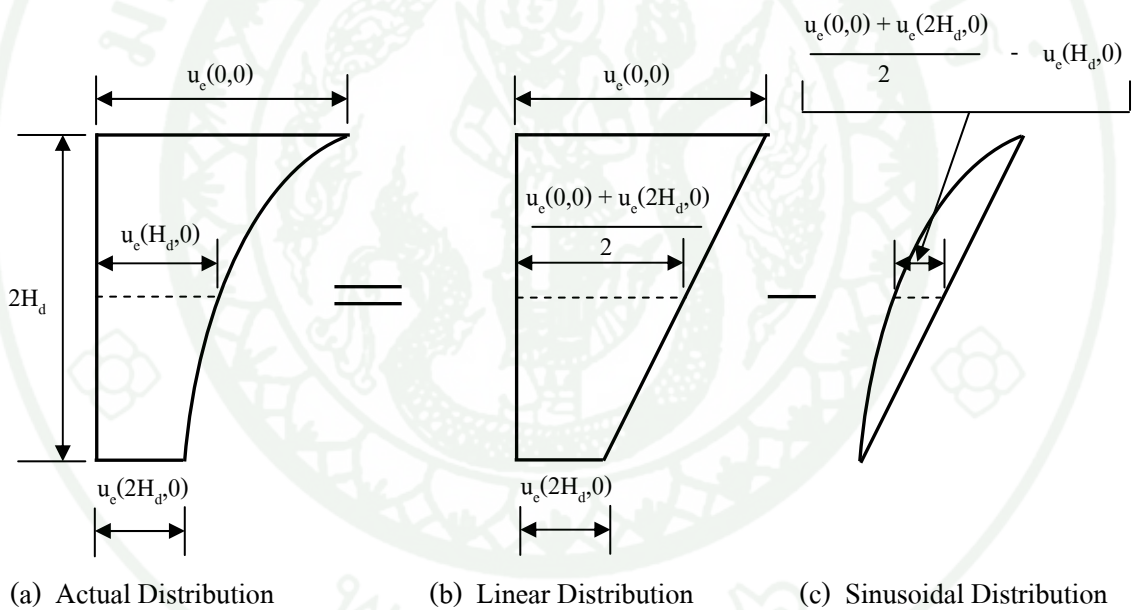


ภาพที่ 73 ความสัมพันธ์ระหว่าง U_{av} กับ T_v กรณีที่ u_i เปลี่ยนแปลงตามความลึกแบบเป็นเส้นตรง

ที่มา: สุรฉัตร (2540)

จากภาพที่ 73 ในกรณีที่ $\infty = 1.0$ ซึ่งเป็นกรณีที่ u_i มีค่าคงที่และเป็นกราฟเส้นเดียวกับในภาพที่ 71 (Case1a) ดังนั้น แสดงว่าไม่ว่าการไหลของน้ำจะเป็นแบบ Double Drained หรือ Single Drained ในกรณีที่ u_i มีค่าคงที่ เส้นกราฟจะเป็นเส้นเดียวกัน และนอกจากนี้สำหรับการไหลของน้ำแบบ Double Drained ไม่ว่าค่า ∞ จะมีค่าเท่าใดเส้นกราฟจะเป็นเส้นเดิม นั่นคือ เส้น $\infty = 1.0$ (สุรจิตร, 2540)

นอกจากการหาค่า U_{av} ที่ u_i มีลักษณะรูปแบบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมดในตอนต้น ยังมีวิธีการหาค่า U_{av} อีกวิธีหนึ่ง คือ วิธี Superposition ซึ่งใช้ในการหาค่า U_{av} ในกรณีที่รูปแบบการกระจายตัวของ u_i สามารถแยกออกได้เป็นหลายรูปแบบที่มีลักษณะเหมือนกับในภาพที่ 69 ดังนั้น ค่า U_{av} ของ u_i รูปใหญ่ คือ ผลรวมของค่า U_{av} ของ u_i แต่ละรูปที่มีลักษณะเหมือนในภาพที่ 69 ตามสัดส่วนของพื้นที่ u_i ในแต่ละรูป ดังแสดงในภาพที่ 74



ภาพที่ 74 การหาค่า U_{av} ด้วยวิธี Superposition

ที่มา: Perloff and Baron (1976)

$$\text{พื้นที่ของรูป (a)} = \text{พื้นที่ของรูป (b)} - \text{พื้นที่ของรูป (c)} \quad (49)$$

$$U_{av}(a) = \frac{U_{av}(b) \times \text{พื้นที่ของรูป(b)} - U_{av}(c) \times \text{พื้นที่ของรูป(c)}}{\text{พื้นที่ของรูป(a)}} \quad (50)$$

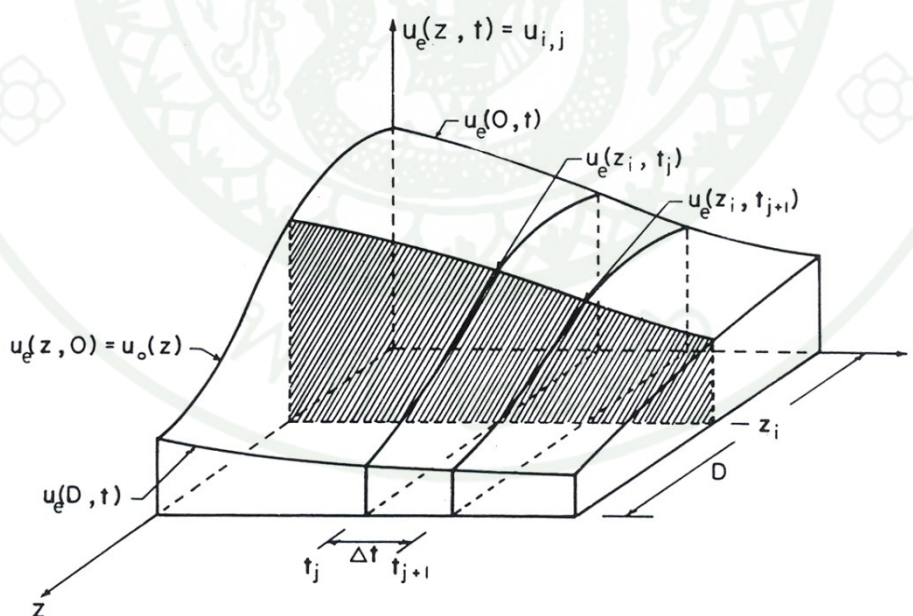
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการยุบอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ

คำตอบเชิงตัวเลขสำหรับการยุบอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ

จากสมการที่ (29) ซึ่งเป็นสมการ differential ของแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียว

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (29)$$

คำตอบของสมการนี้สามารถหาได้หลายวิธีนอกจากวิธีที่ได้แสดงไว้ในตอนต้นยังมีอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กัน คือ วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลข (Numerical Solution) โดยใช้ Finite Difference โดยสมมติให้การกระจายตัวของแรงดันน้ำส่วนเกินในชั้นดินเหนียวเป็นลักษณะดังแสดงในภาพที่ 75 ซึ่งเป็นกราฟพื้นผิว 3 มิติ โดยมีแกนในระนาบราบแสดงค่าเวลา (t) และระดับความลึก (z) จากผิวบนของชั้นดินเหนียวและมีค่าเป็นบวกจากบนลงล่าง ส่วนแกนในระนาบตั้งแสดงค่าแรงดันน้ำส่วนเกินซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามความลึกและเวลา [$u_e(z, t)$] และระยะ D คือ ความหนาของชั้นดินเหนียว



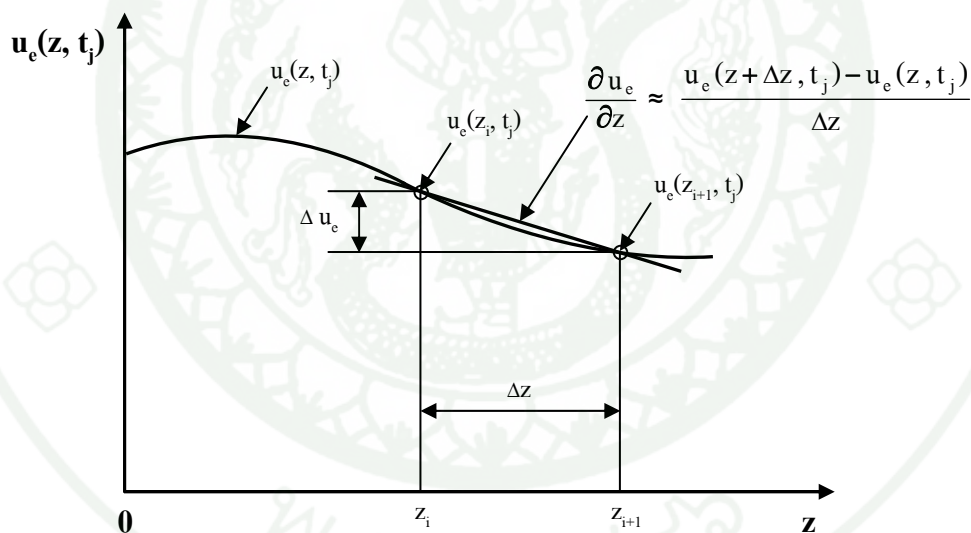
ภาพที่ 75 กราฟพื้นผิวแสดงการกระจายตัวของแรงดันน้ำส่วนเกิน

ที่มา: Perloff and Baron (1976)

พิจารณาระนาบในแนวดิ่งซึ่งขนานกับแกน z โดยทุก ๆ จุดบนเส้นกราฟของระนาบนี้ แสดงค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ระดับความลึกต่าง ๆ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง $[u_e(z, t_j)]$ เรียกเส้นกราฟนี้ว่า Isochrone ซึ่งมาจากภาษากรีก โดย isos แปลว่า เท่ากัน และ chronos แปลว่า เวลา ดังนั้น ทุก ๆ จุดบนเส้นกราฟ isochrone นี้จะเป็น partial derivative ของแรงดันน้ำส่วนเกินเทียบกับระยะความลึก z สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้

$$\frac{\partial u_e}{\partial z} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{u_e(z + \Delta z, t_j) - u_e(z, t_j)}{\Delta z} \quad (51)$$

โดยค่าของ partial derivative ($\frac{\partial u_e}{\partial z}$) สามารถประมาณค่าได้เท่ากับ ผลต่างของค่าที่จุดตัด 2 จุดของเส้นตรงกับเส้นกราฟ isochrone หาด้วยระยะห่างระหว่างจุดตัดตามแนวแกน z (Δz) โดยที่ Δz มีค่าน้อยมากเกือบเข้าใกล้ศูนย์ ($\Delta z \rightarrow 0$) ดังแสดงในภาพที่ 76



ภาพที่ 76 การประมาณค่า partial derivative ของแรงดันน้ำส่วนเกินเทียบกับความลึก z ที่เวลา t_j

ที่มา: Perloff and Baron (1976)

$$\frac{\partial u_e}{\partial z} \approx \frac{u_e(z + \Delta z, t_j) - u_e(z, t_j)}{\Delta z} \quad (52)$$

$$= \frac{u_e(z_{i+1}, t_j) - u_e(z_i, t_j)}{\Delta z} \quad (53)$$

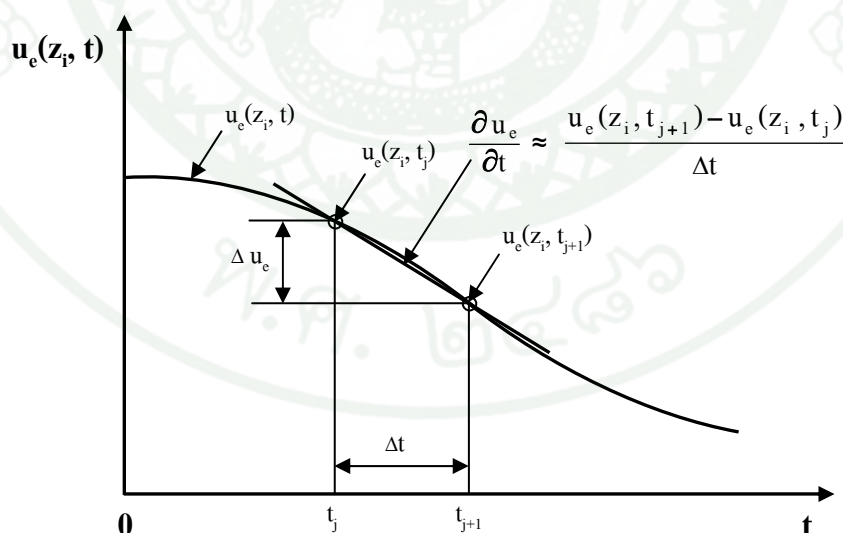
$$\text{โดยที่ } z_{i+1} - z_i = \Delta z$$

การประมาณค่าด้วยวิธีนี้ เรียกว่า Finite Difference Method ซึ่งมี 3 วิธี คือ Forward Difference, Backward Difference และ Central Difference โดยในที่นี้จะใช้วิธี Forward Difference และในกรณีของ second partial derivative สามารถประมาณค่าได้โดยใช้วิธี Forward และ Backward Difference ดังนี้

$$\frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_e}{\partial z} \right) \approx \frac{\frac{u_e(z_{i+1}, t_j) - u_e(z_i, t_j)}{\Delta z} - \frac{u_e(z_i, t_j) - u_e(z_{i-1}, t_j)}{\Delta z}}{\Delta z} \quad (54)$$

$$\frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \approx \frac{u_e(z_{i+1}, t_j) - 2u_e(z_i, t_j) + u_e(z_{i-1}, t_j)}{\Delta z^2} \quad (55)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาขนาดในแนวดิ่งซึ่งขนานกับแกน t โดยทุก ๆ จุดบนเส้นกราฟของขนาดนี้จะแสดงค่า แรงดันน้ำส่วนเกินที่ระดับความลึกจุดใดจุดหนึ่งในชั้นดินเหนียว (z_i) ณ เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 77 เส้นสัมผัสที่จุดใดจุดหนึ่งบนเส้นกราฟนี้ คือ ค่า partial derivative ของแรงดันน้ำส่วนเกินเทียบกับเวลา ($\frac{\partial u_e}{\partial t}$) ที่ระดับความลึก z_i ซึ่งสามารถประมาณค่าได้ดังนี้



ภาพที่ 77 การประมาณค่า partial derivative ของแรงดันน้ำส่วนเกินเทียบกับเวลาที่ความลึก z_i

ที่มา: Perloff and Baron (1976)

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} \approx \frac{u_e(z_i, t_{j+1}) - u_e(z_i, t_j)}{\Delta t} \quad (56)$$

$$\text{โดยที่ } t_{j+1} = t_j + \Delta t ; (\Delta t \rightarrow 0)$$

เพื่อความสะดวกในการเขียนสัญลักษณ์ของแรงดันน้ำส่วนเกินซึ่งเป็นฟังก์ชันกับค่า z และ t ดังนั้น จึงเขียนสมการที่ (55) และ (56) ใหม่ได้ดังแสดง

$$\frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \approx \frac{u_{e_{i+1,j}} - 2u_{e_{i,j}} + u_{e_{i-1,j}}}{\Delta z^2} \quad (57)$$

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} \approx \frac{u_{e_{i,j+1}} - u_{e_{i,j}}}{\Delta t} \quad (58)$$

แทนค่าสมการที่ (57) และ (58) ในสมการที่ (29) ได้

$$\frac{u_{e_{i,j+1}} - u_{e_{i,j}}}{\Delta t} = C_v \frac{u_{e_{i+1,j}} - 2u_{e_{i,j}} + u_{e_{i-1,j}}}{\Delta z^2} \quad (59)$$

$$u_{e_{i,j+1}} = \frac{C_v \Delta t}{\Delta z^2} (u_{e_{i+1,j}} - 2u_{e_{i,j}} + u_{e_{i-1,j}}) + u_{e_{i,j}} \quad (60)$$

$$u_{e_{i,j+1}} = \alpha u_{e_{i+1,j}} + (1-2\alpha) u_{e_{i,j}} + \alpha u_{e_{i-1,j}} \quad (61)$$

$$\text{โดยที่ } \alpha = \frac{C_v \Delta t}{\Delta z^2} \quad (62)$$

$$C_v = \text{สัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวคายน้ำ}$$

$$\Delta t = \text{ช่วงระยะเวลาระหว่าง } t_j \text{ กับ } t_{j+1}$$

$$\Delta z = \text{ช่วงระยะความลึกระหว่าง } z_i \text{ กับ } z_{i+1}$$

ดังนั้นด้วยวิธีการ Finite Difference การหาค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ระยะความลึก z_i และที่เวลา t_{j+1} ($u_{e_{i,j+1}}$) จำเป็นต้องรู้ในสิ่งต่อไปนี้ คือ

1. ช่วงระยะเวลาและความลึกที่เพิ่มขึ้น (Δt และ Δz)
2. แรงดันน้ำส่วนเกินก่อน, หลัง และที่ระดับความลึก z_i ณ เวลา t_j ($u_{e_{i+1,j}}$, $u_{e_{i,j}}$ และ $u_{e_{i-1,j}}$)
3. ค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวคายน้ำ (C_v)

นอกจากนี้เราจำเป็นต้องรู้ค่าเริ่มต้น (Initial Condition) และค่าที่ขอบเขตของชั้นดิน (Boundary Condition) ด้วย ดังนี้

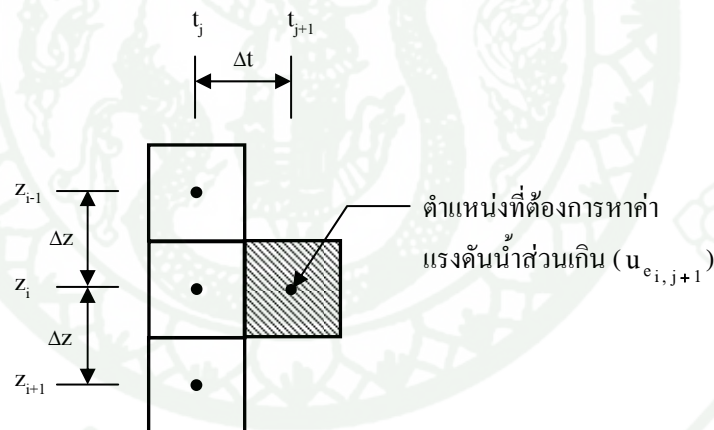
1. ที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ; $u_e(z, 0) = \Delta \sigma(z)$
2. ในกรณีที่ผิวบนและผิวล่างของชั้นดินเหนียวสามารถระบายน้ำได้อย่างอิสระ

$$u_e(0, t) = u_e(D, t) = 0 \quad (t > 0)$$

3. ในกรณีที่ผิวบนหรือผิวล่างของชั้นดินเหนียวไม่สามารถระบายน้ำได้

$$\frac{\partial u_e}{\partial z} = 0 \quad (t > 0)$$

เนื่องจากการหาค่าแรงดันน้ำส่วนเกินด้วยวิธี Finite Difference นี้เป็นการประมาณค่าจากผลต่างของแรงดันน้ำส่วนเกินระหว่างจุดที่อยู่ใกล้เคียงกัน ณ เวลาก่อนหน้าที่ต้องการ (t_{j+1}) โดยสามารถจำลองตำแหน่งที่ต้องการหาค่าแรงดันน้ำส่วนเกินได้ดังแสดงในภาพที่ 78 ดังนั้น ความถูกต้องแม่นยำของคำตอบที่ได้จึงขึ้นอยู่กับขนาดของ Δz และ Δt ยิ่งค่า Δz และ Δt มีค่าน้อยคำตอบที่ได้ก็จะมีความถูกต้องใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริงมากขึ้น



ภาพที่ 78 แบบจำลองการหาค่าแรงดันน้ำส่วนเกินด้วยวิธี Finite Difference

อย่างไรก็ตาม Forsythe และ Wasow (1960) ได้แนะนำให้ใช้ค่า α ไม่เกิน $\frac{1}{2}$ เนื่องจากถ้า α มีค่ามากกว่า $\frac{1}{2}$ จะทำให้เทอมที่ 2 ของสมการที่ (61) มีค่าติดลบซึ่งไม่ตรงกับหลักความเป็นจริง ดังนั้น ถ้าค่า α มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}$ สมการที่ (61) จะลดรูปเหลือ

$$u_{e,i,j+1} = \frac{1}{2} (u_{e,i+1,j} + u_{e,i-1,j}) \quad (63)$$

สมการที่ (63) เป็นสมการที่ง่ายต่อการคำนวณหาค่าแรงดันน้ำส่วนเกินเหมาะสำหรับปัญหาที่ไม่ต้องการความถูกต้องและแม่นยำของคำตอบมากนักและไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ แต่ในกรณีที่ต้องการความถูกต้องและแม่นยำของคำตอบมากขึ้น Forsythe และ Wasow (1960) ได้แนะนำให้ใช้ค่า $\alpha = \frac{1}{6}$ ดังนั้น สมการที่ (61) จะเปลี่ยนเป็น

$$u_{e,i,j+1} = \frac{1}{6}(u_{e,i+1,j} + u_{e,i-1,j}) + \frac{2}{3}u_{e,i,j} \quad (64)$$

คำตอบเชิงตัวเลขสำหรับอัตราการยุบอัดตัวคายน้ำ

พิจารณาภาพที่ 67 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงการกระจายตัวของแรงดันน้ำส่วนเกิน พื้นที่แรเงาทางด้านซ้ายของเส้นกราฟ คือ ปริมาณแรงดันน้ำส่วนเกินที่ยังเหลืออยู่หลังจากเวลาผ่านไป t [Area (u_t)] ส่วนพื้นที่ทางด้านขวาของเส้นกราฟ คือ ปริมาณแรงดันน้ำส่วนเกินที่ถูกระบายออกไปหมดแล้วหลังจากเวลาผ่านไป t (Excess Pore Water Pressure Dissipated) ดังนั้น ปริมาณแรงดันน้ำส่วนเกินทั้งหมดที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ก็คือ ผลบวกของพื้นที่ทางด้านซ้ายและด้านขวาของเส้นกราฟทั้งหมด ซึ่งก็คือพื้นที่ทั้งหมดของรูปกราฟ [Area (u_0)] นั่นเอง โดยที่

$$\text{Area } (u_0) = \int_0^H u_0 dz \quad (65)$$

$$\text{Area } (u_t) = \int_0^H u_t dz \quad (66)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (44) จะได้ว่า

$$U_{av}(t) = 1 - \frac{\text{Area } (u_t)}{\text{Area } (u_0)} \quad (67)$$

การหาคำตอบของสมการที่ (65) และ (66) ด้วยวิธี Finite Differences โดยการใช้ Trapezoidal rule ผลของการอินทิเกรตจะได้ ดังนี้

$$\int_0^H u_e dz \approx \Delta z \left(\frac{1}{2} u_{e_0} + u_{e_1} + u_{e_2} + \dots + u_{e_{n-1}} + \frac{1}{2} u_{e_n} \right) \quad (68)$$

ดังนั้น

$$\text{Area}(u_0) = \Delta z \left[\frac{1}{2} u_c(z_0, 0) + u_c(z_1, 0) + u_c(z_2, 0) + \dots + u_c(z_{n-1}, 0) + \frac{1}{2} u_c(z_n, 0) \right] \quad (69)$$

$$\text{Area}(u_{t_j}) = \Delta z \left[\frac{1}{2} u_c(z_0, t_j) + u_c(z_1, t_j) + u_c(z_2, t_j) + \dots + u_c(z_{n-1}, t_j) + \frac{1}{2} u_c(z_n, t_j) \right] \quad (70)$$

โดยที่ $u_c(z_i, 0)$ = แรงดันน้ำส่วนเกินที่ตำแหน่ง z_i ณ เวลา $t = 0$

$u_c(z_i, t_j)$ = แรงดันน้ำส่วนเกินที่ตำแหน่ง z_i ณ เวลา t_j

คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของตัวอย่างดินชั้นน้ำบาดาล

การเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดิน

การวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดระดับของน้ำบาดาล จำเป็นต้องมีข้อมูลลักษณะการวางตัวของชั้นดินในชั้นน้ำบาดาล ตลอดจนคุณสมบัติทางด้านกายภาพและด้านวิศวกรรมของชั้นดินที่เกี่ยวข้องทุกชั้น ดังนั้น ในโครงการศึกษาผลกระทบการแก้ไขปัญหาการใช้ น้ำบาดาลเกินปริมาณสมดุลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้มีการเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดิน โดยเครื่องมือที่ใช้จะเป็นเครื่องมือสำหรับการเจาะสำรวจบ่อน้ำที่มีความสามารถในการเจาะชั้นดินระดับลึก ดังแสดงในภาพที่ 79 และ 80 ตำแหน่งของหลุมเจาะจะอยู่ในพื้นที่ที่ได้เลือกไว้ 2 แห่ง คือ พื้นที่ด้านเหนือบริเวณ อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี (สถานี KD) และพื้นที่ด้านใต้บริเวณ เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร (สถานี KE) โดยในแต่ละพื้นที่จะมีจำนวนหลุมเจาะ 4 หลุม ความลึกประมาณ 300-600 เมตร เพื่อให้แต่ละหลุมเจาะอยู่ในชั้นน้ำสามโคก พญาไท ธนบุรี และปากน้ำ แล้วทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับน้ำและการทรุดตัวในสนาม ในการเก็บตัวอย่างดินจะเก็บเฉพาะหลุมเจาะที่มีความลึก 600 เมตร ด้วยวิธี Wired Line และใช้หัวเจาะแบบหัวเพชร โดยจะเน้นเก็บตัวอย่างดินเหนียวที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทรุดตัว ความยาวในการเก็บตัวอย่างแต่ละครั้ง คือ 4 เมตร จากนั้นจะนำขึ้นมาแบ่งออกเป็น 8 ส่วน ยาวส่วนละ 50 เซนติเมตร ตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed sample) จะถูกเก็บรักษาไว้อย่างดีโดยไม่ให้มีการกระทบกระเทือนและการควบคุมความชื้นไม่ให้สูญหายก่อนที่จะมีการทดสอบในห้องทดลองต่อไป จำนวนตัวอย่างดินทั้งหมดได้แสดงไว้ในตารางที่ 6



ภาพที่ 79 แท่นเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินในระดับลึก



ภาพที่ 80 แท่นเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินในระดับลึก

ตารางที่ 6 การเก็บตัวอย่างดินชั้นน้ำบาดาล

สถานี	ชุดตัวอย่าง	ชื่อชั้นน้ำบาดาล	ระดับที่เก็บตัวอย่าง (m)	จำนวนตัวอย่าง
สถานีลาดหลุมแก้ว	1	KD-BK	48.5 – 50	1
	2	KD-PD	88 – 92	2
	3	KD-NL	185 – 189	10
	4	KD-NB	281 – 285	8
	5	KD-SK	325 – 329	12
	6	KD-PT	404 – 408	2
	7	KD-TB	471 – 473	10
	8	KD-PN	473 – 475	4
		รวม		48
สถานีบางขุนเทียน	1	KE-PD	96 – 100	2
	2	KE-NL	179 – 183	10
	3	KE-NB	264 – 267	10
	4	KE-SK	365 – 369	4
	5	KE-PT	441 – 442	6
	6	KE-TB	442 – 445	6
	7	KE-PN	567 – 571	8
		รวม		46

หมายเหตุ ความยาวแท่งตัวอย่างดินประมาณ 50 ซม.

ที่มา: พรสวรรค์ (2548)

การทดสอบคุณสมบัติดินในห้องทดลอง

การทดสอบตัวอย่างดินจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทรุดตัว โดยวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM (American Standard of Testing of Materials) และ BS (British Standard) ดังแสดงตารางที่ 7

ตารางที่ 7 วิธีการทดสอบที่เกี่ยวข้องในห้องทดลอง

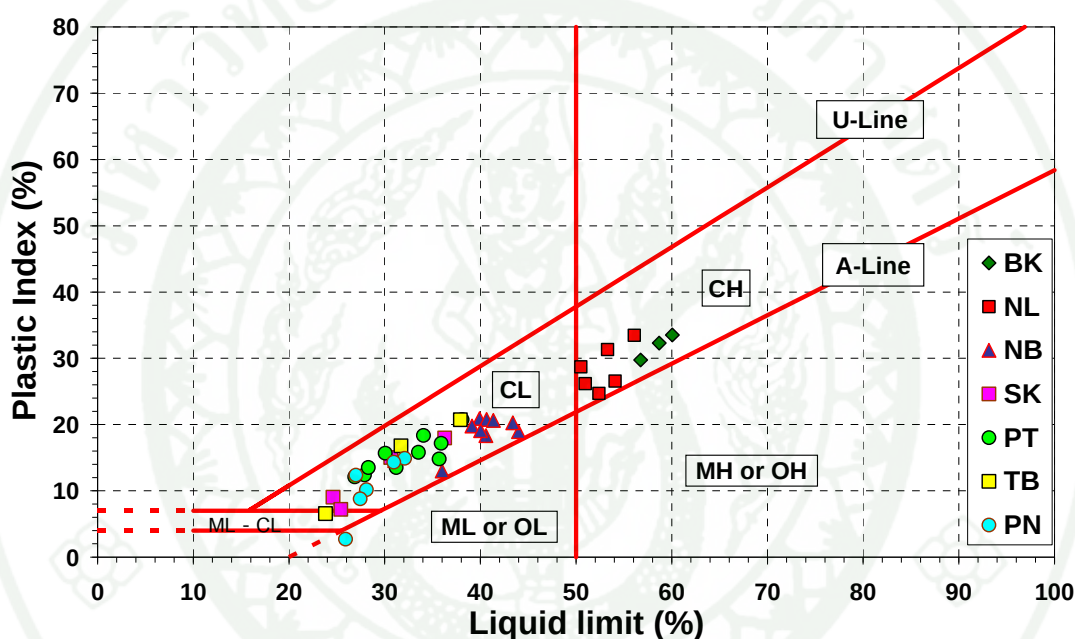
การทดสอบที่	การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ	
	ชื่อการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง
1	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดิน	ASTM D421-63, ASTM D422-63
2	ความชื้นของมวลดิน	ASTM D2216-98
3	ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน	ASTM D854-58
4	พิกัดความชื้นเหลวโดยวิธี Atterberg's Limits	ASTM D423-66, ASTM D424-59, ASTM D427-61
5	หน่วยน้ำหนักรวมต่อปริมาตร	BS 1377
การทดสอบคุณสมบัติการทรุดตัว		
1	การทรุดตัวคายน้ำ	ASTM D4186-97

ที่มา: พรสวรรค์ (2548)

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติการทรุดตัวของตัวอย่างดินในระดับลึกมากขึ้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือทดสอบที่ให้แรงดันสูงกว่าเครื่องมือปกติทั่วไป จึงต้องมีการออกแบบเครื่องมือทดสอบเฉพาะโดยใช้แรงดันจากลมเพื่อให้ได้แรงกดลงบนตัวอย่างดินมากถึง 1800 ตัน/ตร.ม. นอกจากนี้เครื่องมือนี้ยังได้ออกแบบให้สามารถกำหนดการเปลี่ยนแปลงแรงดันและอ่านค่าได้อัตโนมัติโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม ซึ่งสามารถศึกษารายละเอียดได้ในงานศึกษาวิจัยของพรสวรรค์ (2548)

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน (พรสวรรค์, 2548) พบว่า ดินเหนียวในชั้นน้ำกรุงเทพ (BK) และชั้นน้ำนครหลวง (NL) มีค่า Liquid Limit อยู่ในช่วง 50-60% และอยู่เหนือเส้น A-Line จัดเป็นดินจำพวก High Liquid Limit Clay (CH) ส่วนดินเหนียวตั้งแต่ชั้นน้ำนนทบุรี (NB) ลงไปจนถึงชั้นน้ำปากน้ำ (PN) จะมีค่า Liquid Limit ต่ำอยู่ในช่วง 20-45% และอยู่เหนือเส้น A-Line จัดเป็นดินจำพวก Low Liquid Limit Clay (CL) ดังแสดงในภาพที่ 81

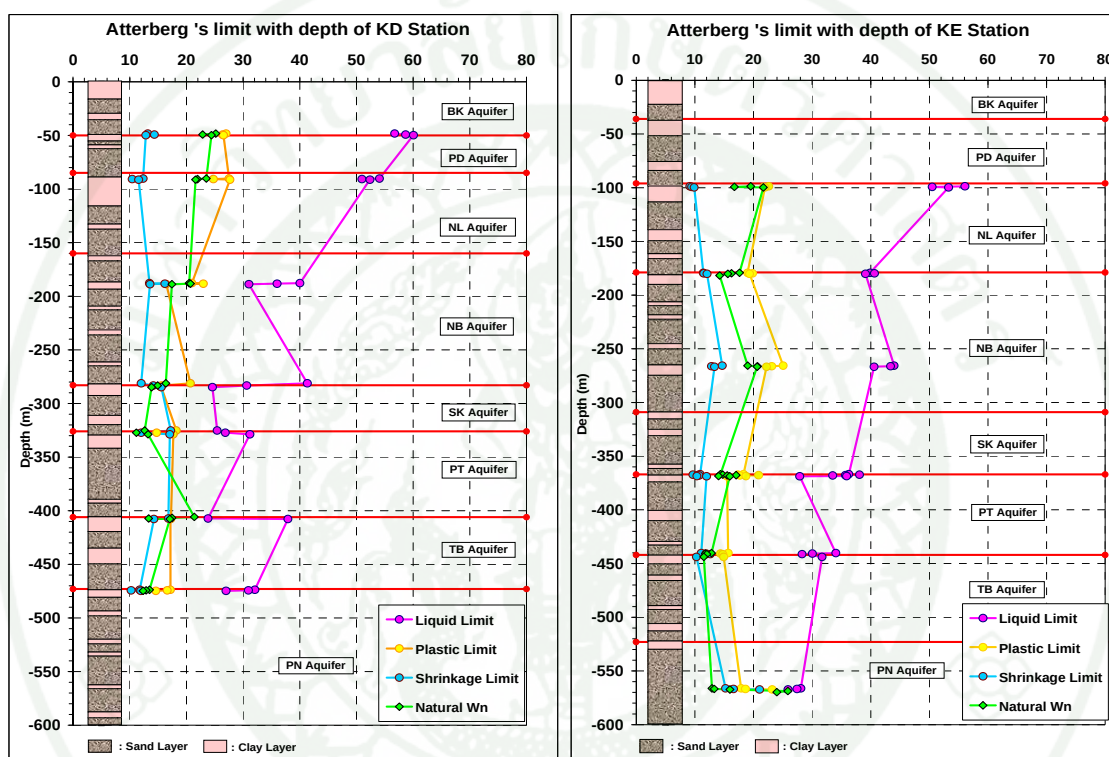


ภาพที่ 81 Plasticity Chart ของตัวอย่างดินชั้นน้ำบาดาล

ที่มา: พรสวรรค์ (2548)

คุณสมบัติด้านความเหนียวและสถานะของตัวอย่างดินสรุปตามความลึกแสดงดังภาพที่ 82 ซึ่งพบว่า ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติจะมีค่าอยู่ในช่วง 10-25% และมีค่าต่ำกว่า Plastic Limits แสดงว่าตัวอย่างดินอยู่ในสถานะภาพกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Material) สำหรับคุณสมบัติด้านความเหนียวพบว่า Liquid Limit จะมีค่าอยู่ในช่วง 25-60% และมีค่าลดลงตามความลึก ค่า Plastic Limit จะอยู่ในช่วง 15-27% ค่า Shrinkage Limit จะอยู่ในช่วง 9-17% และค่า Plastic Index จะอยู่ในช่วง 10-33% และมีค่าลดลงตามความลึกเช่นกันแสดงว่าตัวอย่างดินระดับลึกจะมีค่าความเหนียวลดลง ส่วนค่า Specific Gravity ของดินเนื้อละเอียดพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 2.60-2.70

ความหนาแน่นของตัวอย่างดินหาได้จากการวัดปริมาตรและชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินในการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำภายใต้สภาวะแรงดันสูง ซึ่งผลที่ได้นำมาพล็อตเปรียบเทียบตามความลึกดังแสดงในภาพที่ 83 สามารถสรุปได้ว่า ความหนาแน่นของตัวอย่างดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก โดยจะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 2.0-2.4 ตัน/ลบ.ม.

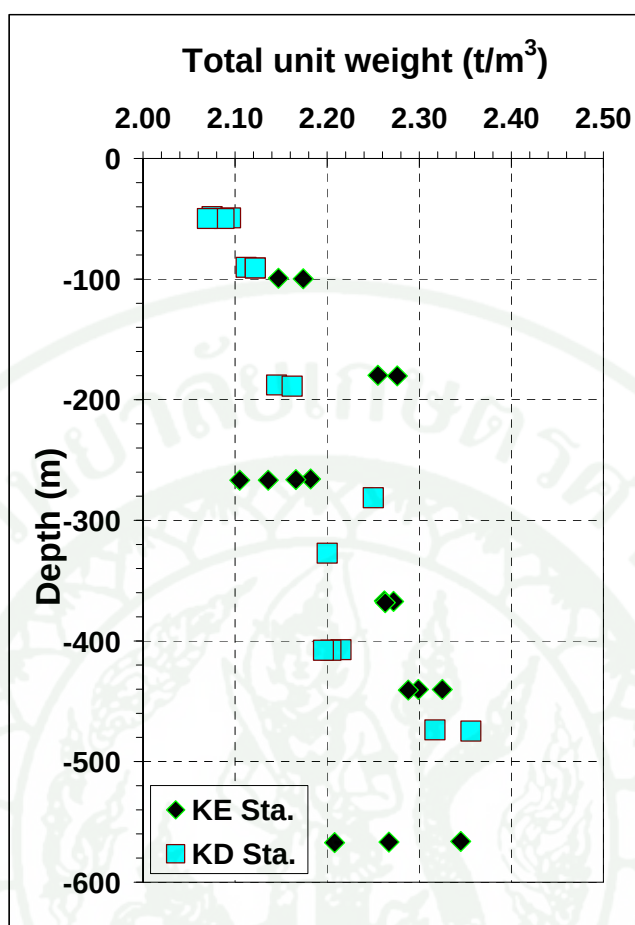


(ก) สถานีหลุมเจาะ KD

(ข) สถานีหลุมเจาะ KE

ภาพที่ 82 สรุปผล Atterberg's Limit และ Natural Water Content ของตัวอย่างดินตามความลึก

ที่มา: พรสวรรค์ (2548)



ภาพที่ 83 หน่วยน้ำหนักรวมของตัวอย่างดินตามความลึก

ที่มา: พรสวรรค์ (2548)

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการทรุดตัว

คุณสมบัติด้านการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ส่วนหลัก โดยส่วนแรกเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณปริมาณการทรุดตัวและการคืนตัวของดินเมื่อรับแรงดัน คือ ดัชนีการยุบอัดตัวและดัชนีการพองตัว [Compression Index (C_c), Recompression Index (C_r) และ Swelling Index (C_s)] และส่วนที่สองเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณอัตราการทรุดตัว คือ สัมประสิทธิ์ของการยุบอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation, C_v) จากผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำยังทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการรับแรงในอดีตของตัวอย่างดินระดับลึกอีกด้วย ซึ่งได้แสดงรายละเอียดตามตารางที่ 8 และ 9 (พรสวรรค์, 2548)

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยุบอัดตัวภายใต้น้ำของชั้นดินเหนียวสถานี KD

Depth (m)	Type	Aquifer	Void Ratio	C_c	C_s	C_r	P'_c t/m ²	C_v (NCC) 10 ⁻⁴ cm ² /s
49.0-49.5	CH	BK	0.548	0.152	0.061	0.056	150	2.00-2.50
49.5-50.0	CH		0.582	0.181	0.057	0.059	180	2.00-3.00
49.5-50.0	CH		0.595	0.152	0.071	0.044	185	1.25-2.50
90.0-90.5	CH	NL	0.553	0.384	0.131	0.074	360	0.20-0.50
90.5-91.0	CH		0.532	0.337	0.123	0.046	320	0.20-1.00
90.5-91.0	CH		0.522	0.255	0.096	0.054	320	0.50-1.50
188.5-189.0	CL	NB	0.411	0.158	0.035	0.060	310	2.00-4.00
281.0-281.5	CL		0.365	0.148	0.046	0.051	520	1.00-5.00
283.0-283.5	SC	SK	0.343	0.298	0.072	0.099	480	1.00-14.00
327.0-327.5	SC	PT	0.323	0.261	0.051	0.144	340	0.25-2.00
407.0-407.5	SM-	TB	0.344	0.337	0.063	0.233	720	-
407.5-408.0	SC		0.406	0.187	0.051	0.113	400	0.75-2.00
407.5-408.0	CL		0.415	0.217	0.074	0.109	460	1.00-2.00
	CL							
473.5-474.0	CL	PN	0.292	0.269	0.076	0.069	580	0.25-1.00
474.5-475.0	CL		0.256	0.255	0.073	0.051	625	0.75-3.00

ที่มา: พรสวรรค์ (2548)

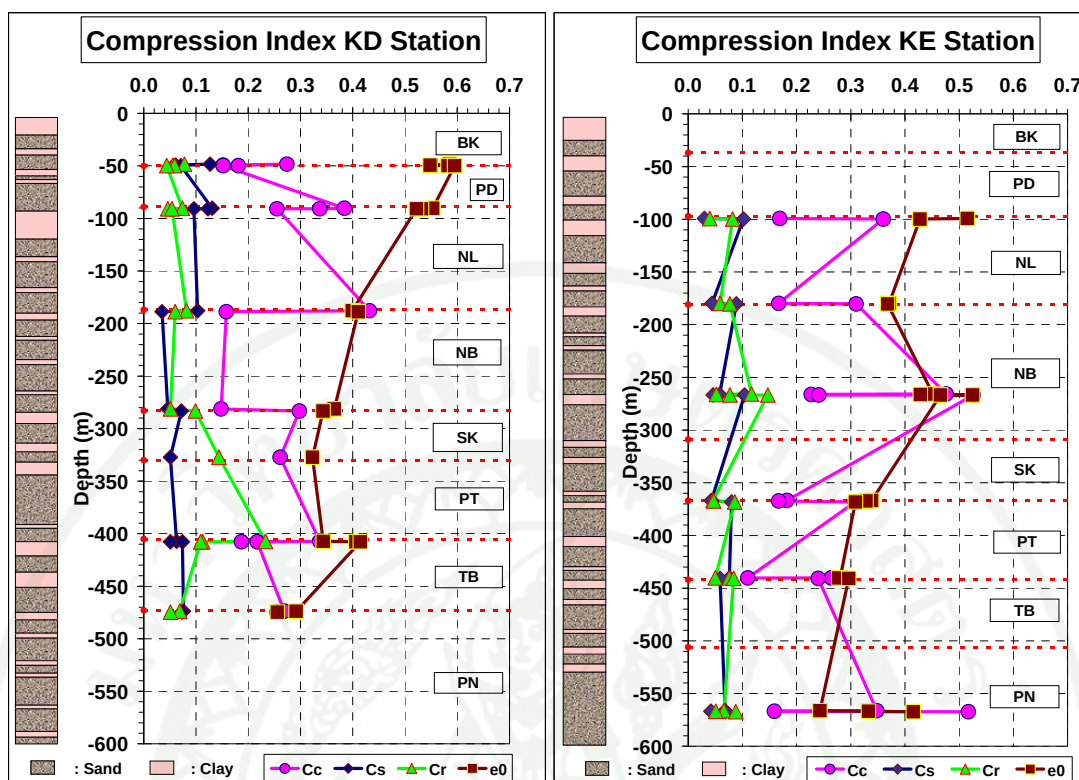
ตารางที่ 9 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยุบอัดตัวของชั้นดินเหนียวสถานี KE

Depth (m)	Type	Aquifer	Void Ratio	C_c	C_s	C_r	P'_c t/m ²	C_v (NCC) 10 ⁻⁴ cm ² /s
99.0-99.5	CH	NL	0.515	0.169	0.030	0.040	270	0.50-1.00
99.5-100.0	CH		0.428	0.360	0.102	0.082	260	0.20-0.50
179.5-180.0	CL	NB	0.371	0.167	0.044	0.059	400	1.00-4.00
180.0-180.5	CL		0.368	0.310	0.089	0.077	470	1.00-3.00
266.0-266.5	CL		0.428	0.227	0.058	0.052	460	0.50-0.75
266.5-267.0	CL		0.525	0.241	0.046	0.077	300	1.75-4.00
366.5-367.0	CL	SK	0.339	0.182	0.043	0.046	670	0.75-2.50
367.0-367.5	CL	PT	0.328	0.167	0.043	0.047	670	1.00-2.00
368.0-368.5	CL		0.309	0.308	0.080	0.086	580	0.50-1.75
440.0-440.5	CL		0.278	0.264	0.076	0.076	730	0.75-1.50
440.5-441.0	SC		0.296	0.240	0.059	0.084	660	2.00-4.00
566.0-566.5	CL	PN	0.243	0.348	0.068	0.066	1250	-
566.5-567.0	CL		0.333	0.159	0.042	0.051	1200	0.75-3.50
567.0-567.5	ML		0.415	0.517	0.069	0.088	1200	0.75-1.50

ที่มา: พรสวรรค์ (2548)

ดัชนีการยุบอัดตัวและดัชนีการพองตัว

เมื่อนำค่าดัชนีการยุบอัดตัวและการพองตัวของตัวอย่างดินมาพล็อตหาความสัมพันธ์ตามความลึกได้ดังแสดงในภาพที่ 84 พบว่าค่า C_c มีค่ากระจายและมีค่าค่อนข้างสูงมาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.150-0.517 ส่วนค่า C_r และ C_s จะมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงระหว่าง 0.040-0.144 และ 0.030-0.131 ตามลำดับ จากภาพที่ 84 ยังพบอีกว่าค่า e_0 มีแนวโน้มลดลงตามความลึกโดยมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.25-0.60 (พรสวรรค์, 2548)



สถานี KD

สถานี KE

ภาพที่ 84 ความสัมพันธ์ของดัชนีการยุบอัดตัว การพองตัว และอัตราส่วนช่องว่างตามความลึก

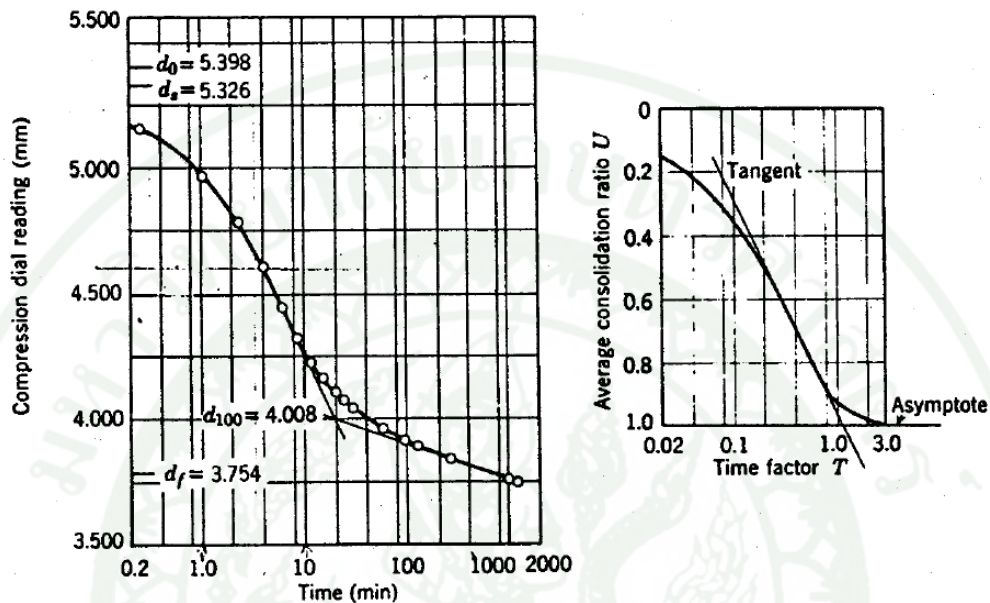
ที่มา: พรสวรรค์ (2548)

สัมประสิทธิ์ของการยุบอัดตัวคาน้ำ

สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคาน้ำ (Coefficient of Consolidation, C_v) เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการคำนวณค่าการทรุดตัวของดิน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคาน้ำสามารถหาได้จากหลายวิธี เช่น

Casagrande and Fadum (1940) เป็นผู้เสนอวิธี Log Time การหาค่า C_v หาได้จากการเขียนกราฟการอัดตัวคาน้ำเทียบกับ ค่าเวลา ซึ่งเวลาที่เขียนในกราฟจะต้องเขียนในสัดส่วน Log Time ค่าเวลาที่มีการอัดตัวคาน้ำที่สำคัญต่าง ๆ สามารถหาได้จากกราฟ เช่น ที่ 50% และ 100% ดังแสดงในภาพที่ 85 เมื่อรู้ค่า จากกราฟสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัวคาน้ำจากสมการ (71)

$$C_v = \frac{T_{50} \times H_{dr_{50}}^2}{t_{50}} \quad (71)$$



ภาพที่ 85 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำโดยวิธี Log Time

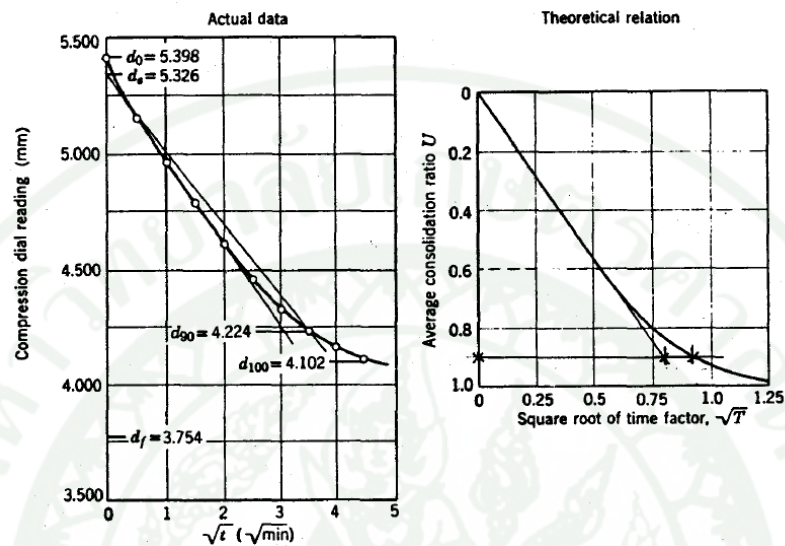
ที่มา: Bowles (1996)

Taylor (1948) เป็นผู้เสนอวิธีในการหาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินจากการตรวจวัดค่ายุบตัวของดินและเขียนกราฟเทียบกับรากที่ 2 ของเวลา Root Time เพื่อใช้หาค่า t_{90} ดังแสดงในภาพที่ 86 ซึ่งค่า t_{90} เป็นเวลาที่มีการระบายความดันน้ำออกจากดิน 90% ของความดันน้ำที่จุดเริ่มต้น เมื่อทราบค่า t_{90} จะสามารถหาค่า C_v ได้จากสมการที่ (72)

$$C_v = \frac{T_{90} \times H_d^2}{t_{90}} \quad (72)$$

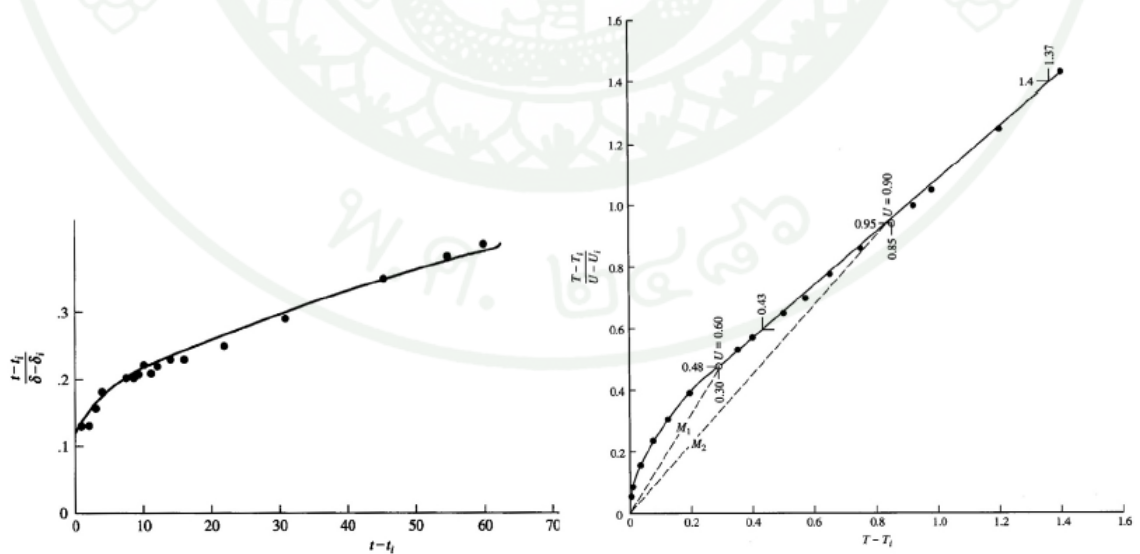
Sridharan and Rao (1981) and Sridharan and Prakash (1985) ได้เสนอวิธี Hyperbola เพื่อใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ ซึ่งวิธีนี้จะต้องเขียนกราฟของเวลาต่อการทรุดตัว $(t - t_i)/(p - p_i)$ กับเวลา $(t - t_i)$ ดังแสดงในภาพที่ 87 และสามารถหาค่า C_v ได้จากสมการที่ (73)

$$C_v = \frac{BmH^2}{c} \quad (73)$$



ภาพที่ 86 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำของดิน โดยวิธี Root Time

ที่มา: Bowles (1996)

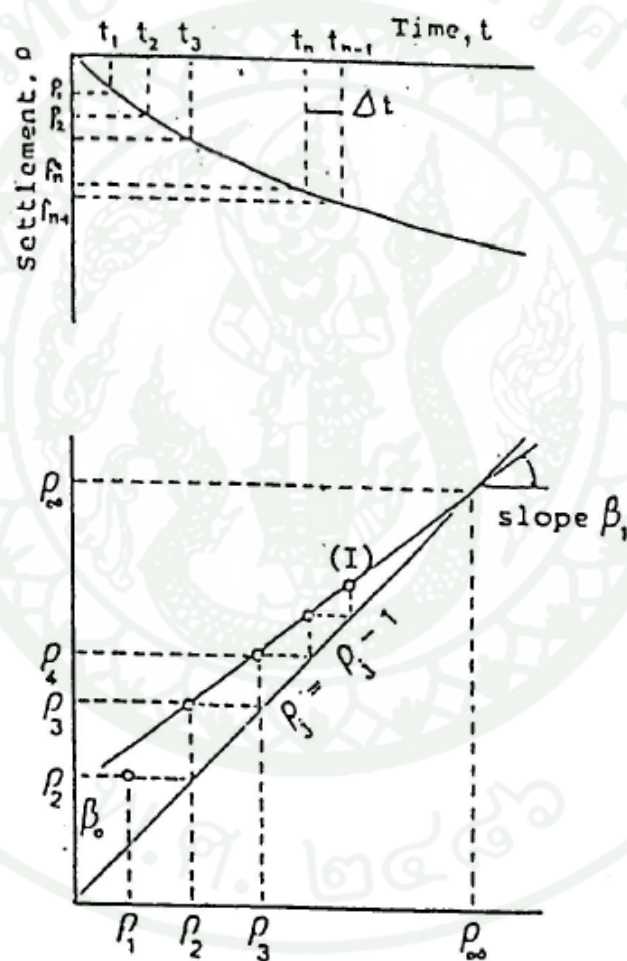


ภาพที่ 87 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำของดิน โดยวิธี Hyperbola

ที่มา: Bowles (1996)

Asaoka (1978) เป็นผู้คิดค้นวิธีการกราฟฟิกจากการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่า C_v โดยมีการตรวจวัดค่าการยุบอัดตัวคายน้ำที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งเวลาในการตรวจวัดจะมีระยะห่างเท่า ๆ กันในแต่ละครั้ง เช่น ตรวจวัดทุก ๆ 1 วัน แล้วนำค่าการยุบอัดตัวคายน้ำมาเขียนในกราฟ ทำให้ทราบค่ามุม β_1 จากกราฟ แล้วนำค่ามุมที่ได้นี้ไปคำนวณหาค่า C_v จากสมการที่ (74)

$$c_v = -\frac{5}{12} H^2 \frac{\ln \beta_1}{\Delta t} \quad (74)$$

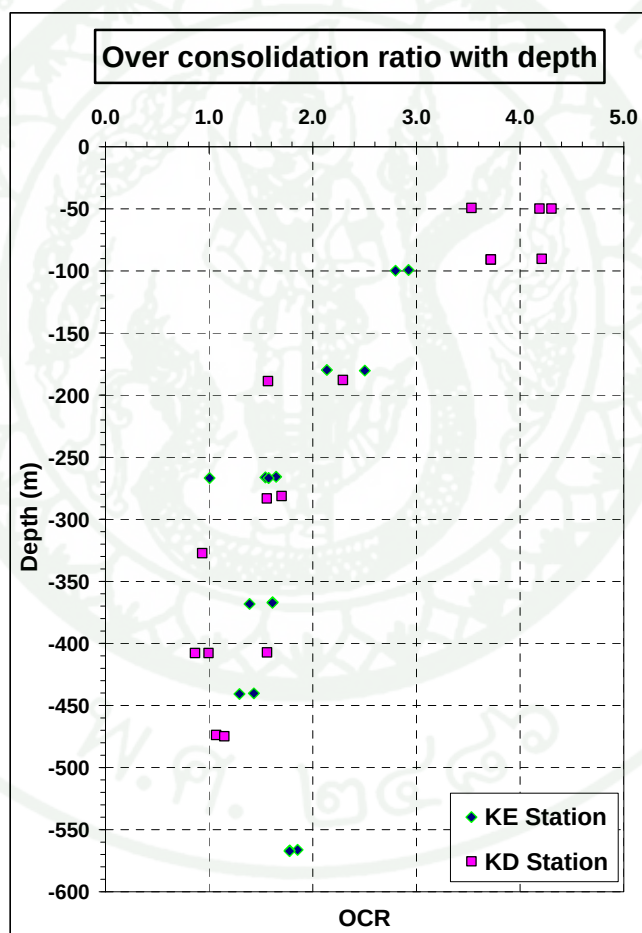


ภาพที่ 88 การหาสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำโดยวิธีของ Asaoka

ที่มา: Asaoka (1978)

พฤติกรรมการรับแรงในอึด

พฤติกรรมการรับแรงในอึดสามารถศึกษาได้จากการเปรียบเทียบค่าแรงดันสูงสุดในอึด ซึ่งหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง e - $\log \sigma'_v$ ด้วยวิธีของ Casagrande (1936) เปรียบเทียบกับ แรงดันที่ดินรับอยู่ในปัจจุบัน (Effective Overburden Pressure, σ'_{v0}) จากผลการทดสอบสำหรับ ตัวอย่างกลุ่มดิน CH, CL และ SC พบว่าค่า Over Consolidation Ratio (OCR) จะมีค่าอยู่ในช่วง ระหว่าง 1 ถึง 2 ดังแสดงในภาพที่ 89 ซึ่งหมายความว่า ดินเหนียวระดับลึกจัดเป็นดินเหนียวที่มี พฤติกรรมการรับแรงในแบบ Normally Consolidated Clay (NCC) (พรสวรรค์, 2548)



ภาพที่ 89 แสดงค่า Over Consolidation Ratio ตามความลึก

ที่มา: พรสวรรค์ (2548)

การเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรมกับผลงานวิจัยในอดีต

พรสวัสดิ์ (2548) ได้นำผลการทดสอบทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติการยุบอัดตัวของน้ำที่ได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างดินจากหลุมเจาะทั้ง 2 แห่ง คือ ที่สถานี KD และ KE มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีตซึ่งประกอบด้วยผลงานวิจัยของ Vichit ในปี ค.ศ. 1980 และผลงานวิจัยของ AIT ในปี ค.ศ. 1978, 1981 ที่ความลึกสูงสุดประมาณ 400 เมตร เพื่อให้สามารถต่อเชื่อมคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของตัวอย่างดินชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่แอ่งลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนใต้ ตั้งแต่ใต้พื้นผิวดินลงไปจนถึงความลึกสูงสุดประมาณ 600 เมตร โดยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และผลการทดสอบคุณสมบัติการยุบอัดตัวของน้ำ ซึ่งผลการเปรียบเทียบสามารถสรุปได้ ดังนี้

การเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งประกอบด้วย ความชื้นตามธรรมชาติ ความถ่วงจำเพาะ จีดจำกัดความชื้นเหลว และความหนาแน่น พรสวัสดิ์ (2548) พบว่า ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (w_n) ค่าจีดจำกัดเหลว (LL) จีดจำกัดพลาสติก (PL) และดัชนีพลาสติก (PI) มีแนวโน้มลดลงตามความลึก โดยในช่วงระยะความลึกประมาณ 0-40 เมตร มีอัตราการลดลงที่สูงมาก และอัตราการลดลงจะมีค่าน้อยลงมากที่ความลึกมากกว่า 40 เมตร พรสวัสดิ์ (2548) ได้สรุปว่า ที่ระยะความลึกมากกว่า 40 เมตรลงไป w_n จะมีค่าอยู่ในช่วง 10-25%, LL อยู่ในช่วง 20-60%, PL อยู่ในช่วง 15-30% และ PI อยู่ในช่วง 5-40%

สำหรับความหนาแน่นของดินพรสวัสดิ์ (2548) พบว่า จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความลึกโดยมีอัตราการเพิ่มสูงมากในช่วงความลึกประมาณ 0-40 เมตรใต้ผิวดิน และอัตราการเพิ่มจะลดลงมากที่ความลึกมากกว่า 40 เมตร โดยดินที่ระดับลึกมากกว่า 40 เมตรลงไปจะมีหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง 2.0-2.4 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และค่าความถ่วงจำเพาะจะมีค่าอยู่ในช่วงแคบๆ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.60-2.70

การเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติการยุบอัดตัวของน้ำ

การเปรียบเทียบคุณสมบัติการยุบอัดตัวของน้ำซึ่งประกอบด้วย ค่า C_c , C_r , C_s และ C_v พรสวัสดิ์ (2548) ได้แบ่งกลุ่มกราฟตามช่วงความลึกของดินโดยแบ่งเป็น 3 ช่วงความลึกด้วยกันคือ

ช่วงบนสุดความลึก 50-100 เมตร ช่วงกลางความลึก 100-300 เมตร และช่วงล่างสุดความลึก 300-600 เมตร พบว่า ในช่วงต้นของการรับแรงดันในทุกช่วงของความลึก ดินจะอยู่ในสภาวะการรับแรงดันแบบ Over consolidated จะมีค่า C_r ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.04 – 0.08 เมื่อมีการเพิ่มแรงดันให้สูงมากขึ้นจนกระทั่งตัวอย่างดินเข้าสู่สภาวะการรับแรงดันแบบ Normally consolidated พบว่า ดินจะมีค่า C_c ที่เพิ่มสูงขึ้นมาก และมีค่าแตกต่างกันในแต่ละช่วงของความลึก โดยที่ความลึก 50-100 เมตร จะมีค่า C_c สูงกว่าดินในช่วงความลึก 100-300 เมตรและ 300-600 เมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยในอดีต (งานวิจัยของ AIT ในปี ค.ศ. 1978, 1981) พบว่าค่า C_r มีค่าใกล้เคียงกันในทุกช่วงของความลึก แต่ C_c จะมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมากโดยค่าที่ได้จากผลการทดสอบของพรสวรรค์มีค่าสูงกว่าทุกช่วงของความลึก (พรสวรรค์, 2548)

สำหรับค่า C_u พรสวรรค์ (2548) พบว่า เส้นกราฟมีความชันที่ใกล้เคียงกันมากจนเกือบจะขนานกันในทุกช่วงความลึก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยในอดีต ก็พบว่ามีความใกล้เคียงกันโดยจะมีค่า C_u อยู่ในช่วง 0.03-0.09

ส่วนค่า C_v พรสวรรค์ (2548) พบว่า จะมีลักษณะพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกันทุกช่วงความลึก กล่าวคือในช่วงต้นของการรับแรงดันดินจะมีอัตราการยุบอัดตัวคายน้ำที่เร็วมาก เมื่อมีการเพิ่มแรงดันให้สูงมากขึ้นจนกระทั่งดินเข้าสู่สภาวะการรับแรงดันแบบ Normally consolidated อัตราการยุบอัดตัวคายน้ำจะมีค่าลดลงและค่อนข้างคงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยในอดีตค่า C_v จะมีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน โดยพรสวรรค์ (2548) ได้สรุปค่า C_v ในสภาพการรับแรงแบบ Normally consolidated สำหรับตัวอย่างดินในระดับลึกจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.25×10^{-4} - 4.0×10^{-4} ตร.ซม./วินาที

อุปกรณ์และวิธีการทำวิจัย

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลอง
2. โปรแกรมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวในแบบจำลองประกอบด้วยโปรแกรม Microsoft Excel, Mathematica และ ArcGIS

วิธีการทำวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้แบ่งรายละเอียดวิธีการทำวิจัยออกเป็น 9 ขั้นตอน ซึ่งได้แสดงเป็นแผนผังเรียงลำดับตามขั้นตอนต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 90 โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

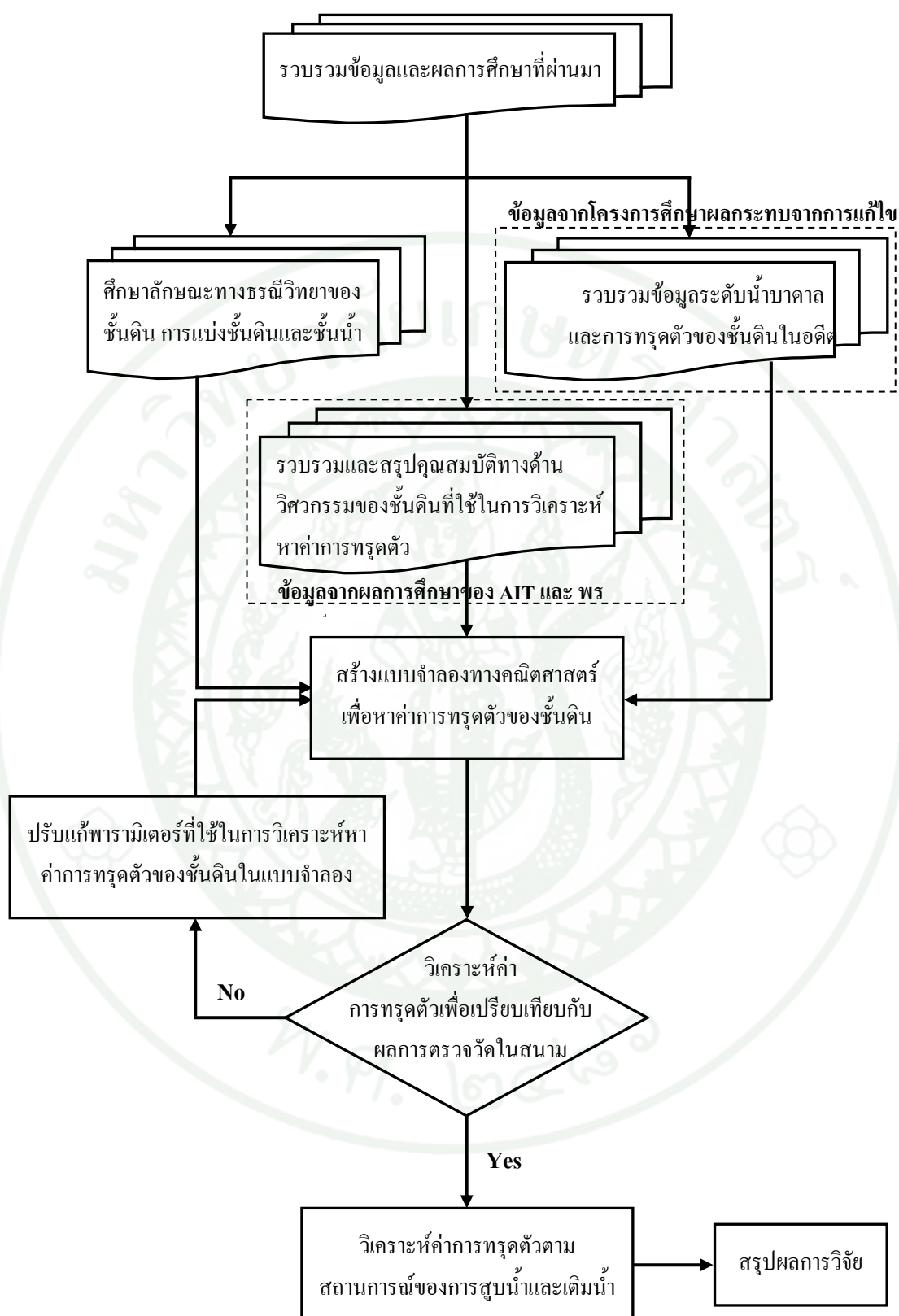
การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้เป็นสำหรับการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวประกอบด้วย

- ระดับน้ำบาดาล
- ลักษณะของชั้นดิน
- คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของชั้นดินเหนียว

ระดับน้ำบาดาล

ข้อมูลระดับน้ำบาดาลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นข้อมูลระดับน้ำบาดาลที่ได้มีการจดบันทึกโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาลตั้งแต่ในอดีตจนถึงปีพ.ศ. 2550 โดยมีจำนวนบ่อสังเกตการณ์จำนวน 110 บ่อ ซึ่งกระจายอยู่ในพื้นที่ศึกษา ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 90 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย

ส่วนที่ 2 จะเป็นข้อมูลระดับน้ำบาดาลในอนาคตตั้งแต่ปีพ.ศ. 2551-2570 ซึ่งได้จากการวิเคราะห์การไหลด้วยโปรแกรม MODFLOW จากการสมมติสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลต่าง ๆ ในโครงการศึกษาผลกระทบการแก้ไขปัญหาการใช้ น้ำบาดาลเกินปริมาณสมดุลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้ว่าจ้างให้บริษัทปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด เป็นผู้ดำเนินการวิเคราะห์ดังกล่าว โดยในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลระดับน้ำบาดาลส่วนนี้มาใช้ในการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในอนาคตตามการสมมติสถานการณ์ของการสูบน้ำ 5 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 สมมติให้มีการสูบน้ำบาดาลในปริมาณที่ไม่ทำให้ระดับน้ำบาดาลเกิดการเปลี่ยนแปลง หรือรักษาระดับน้ำบาดาลให้มีระดับคงที่เท่ากับระดับน้ำของปี พ.ศ. 2550

กรณีที่ 2 สมมติให้มีการสูบน้ำบาดาลในอัตราคงที่ 50%, 80%, 100%, 120% และ 140% ของอัตราการสูบในปี พ.ศ. 2550

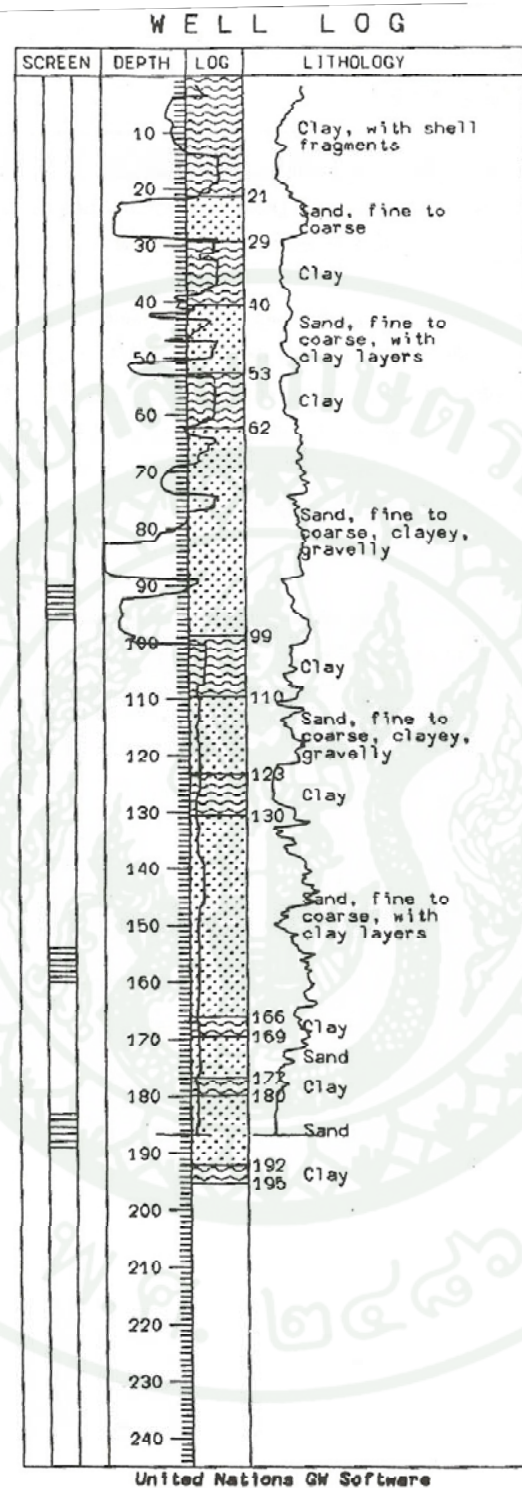
กรณีที่ 3 สมมติให้มีการลดปริมาณการสูบน้ำบาดาลตามการขยายพื้นที่ให้บริการของการประปานครหลวงและการประปาส่วนภูมิภาค

กรณีที่ 4 สมมติให้มีการหยุดสูบน้ำบาดาลและให้ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นตามธรรมชาติ

กรณีที่ 5 สมมติให้มีการเติมน้ำในชั้นน้ำประแดง ชั้นน้ำนครหลวง ชั้นน้ำนนทบุรี และชั้นน้ำสามโคก เป็นระยะเวลา 10 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551-2560

ลักษณะของชั้นดิน

ลักษณะของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวได้มาจากรายงานผลการศึกษาโครงการผลกระทบวิกฤติน้ำบาดาลและการทรุดตัวของแผ่นดินในเขตกรุงเทพฯ (Mitigation of Groundwater Crisis and Land Subsidence in Bangkok Project) โดยกรมทรัพยากรธรณี (1992) ซึ่งได้สำรวจลักษณะชั้นดินของสถานีบ่อน้ำบาดาลด้วยวิธีทางเทคนิคที่เรียกว่า Wire Line Logging ซึ่งเป็นเทคนิคที่อาศัยการตรวจวัดแบบไฟฟ้า (Electric Logging) ร่วมกับการตรวจวัดแบบกัมมันตภาพรังสี (Radioactive Logging) ผลการตรวจวัดจากทั้ง 2 แบบจะถูกบันทึกเป็นกราฟ ดังแสดงในภาพที่ 91 โดยมีหลักการสำคัญคือ ดินหรือหินต่างชนิดกันหรือมีคุณสมบัติต่างกัน จะให้เส้นกราฟออกมามีขนาดหรือ Amplitude ของเส้นกราฟที่ขีดเข้าหรือออกจากแนวตั้งแนวใดแนวหนึ่งไปทางขวาหรือซ้ายความกว้างยาวต่างกัน ซึ่งการแปลผลและจำแนกดินออกเป็นชนิดต่าง ๆ ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญที่มีความชำนาญโดยเฉพาะ (พรสวัสดิ์ 2548)

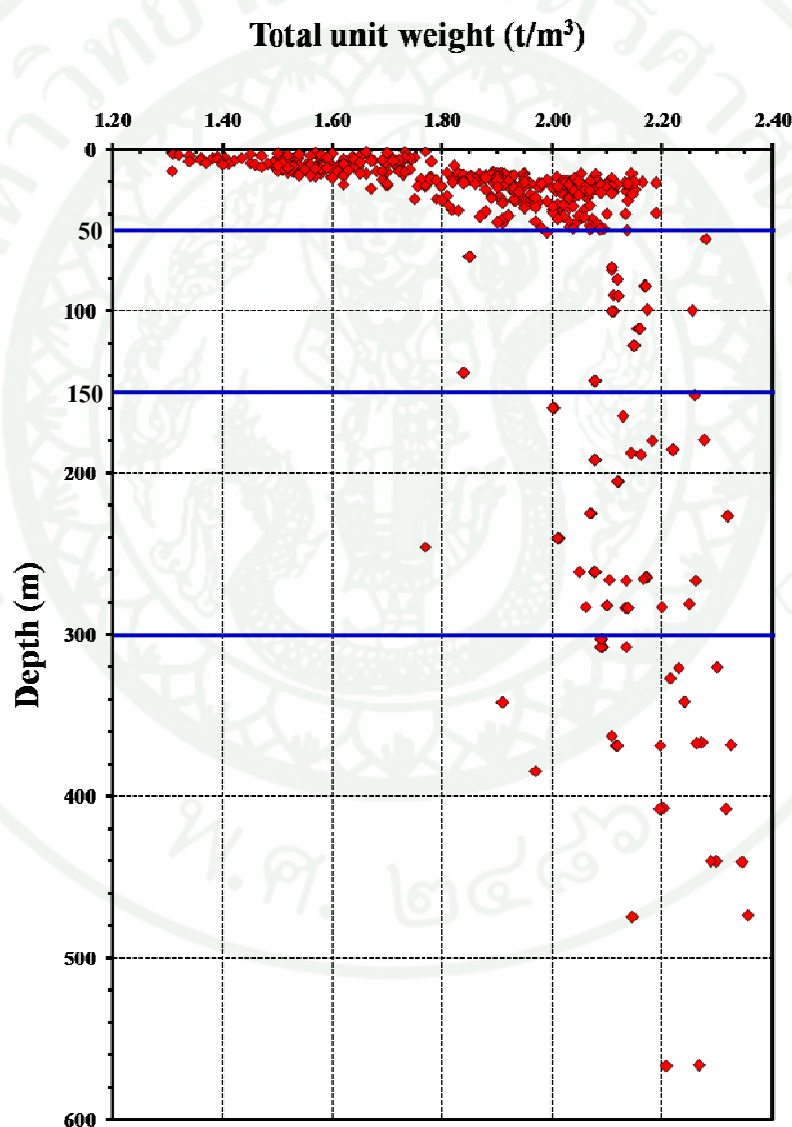


ภาพที่ 91 ลักษณะของชั้นดินจากการสำรวจด้วยวิธี Wire Line Logging

ที่มา: Department of Mineral Resources (1992)

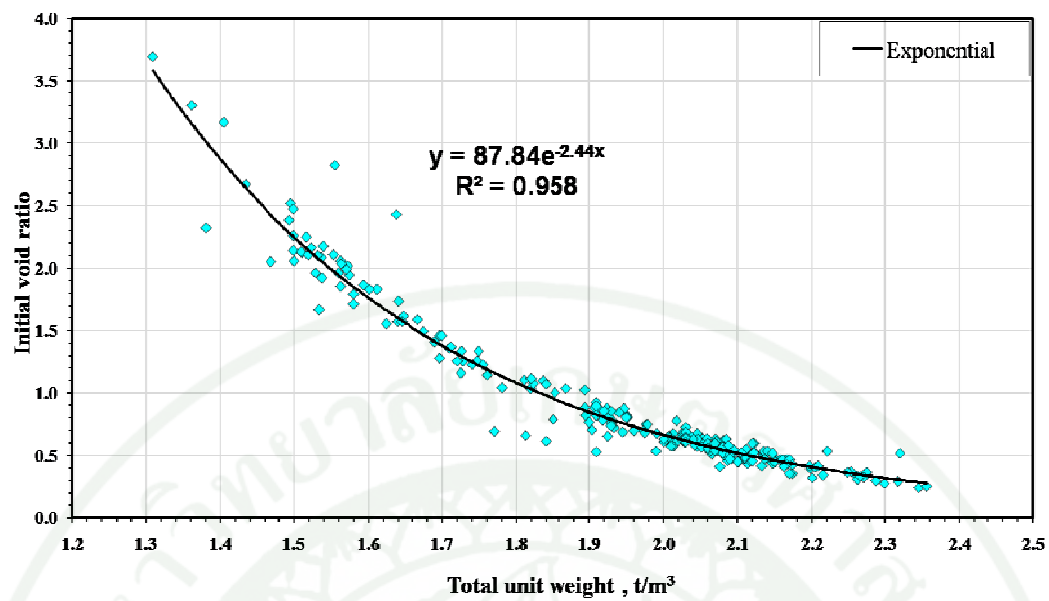
คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของชั้นดินเหนียว

คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของชั้นดินเหนียวได้จากการรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบของ AIT และข้อมูลผลการทดสอบจากการศึกษาของพรสวัสดิ์ (2548) ซึ่งข้อมูลทั้งหมดประกอบด้วย หน่วยน้ำหนักทั้งหมด, อัตราส่วนช่องว่าง, ดัชนีการยุบอัดตัว และค่า OCR จะถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกัน และความสัมพันธ์ตามความลึกของชั้นดิน ดังแสดงในภาพที่ 92-ภาพที่ 96



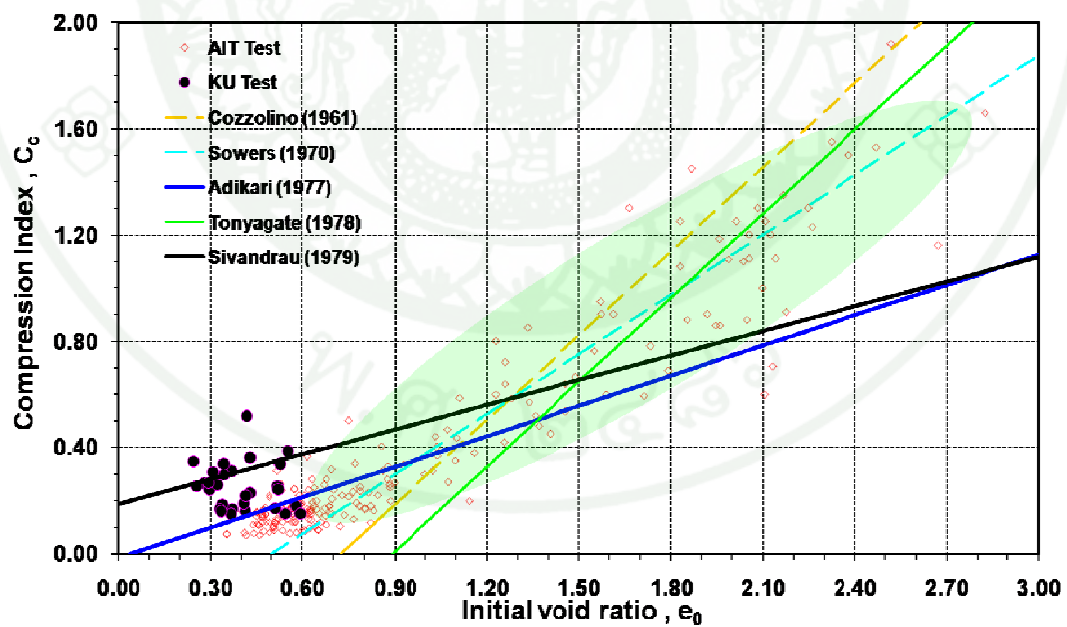
ภาพที่ 92 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักทั้งหมดกับความลึกของชั้นดิน

ที่มา: พรสวัสดิ์ (2548)



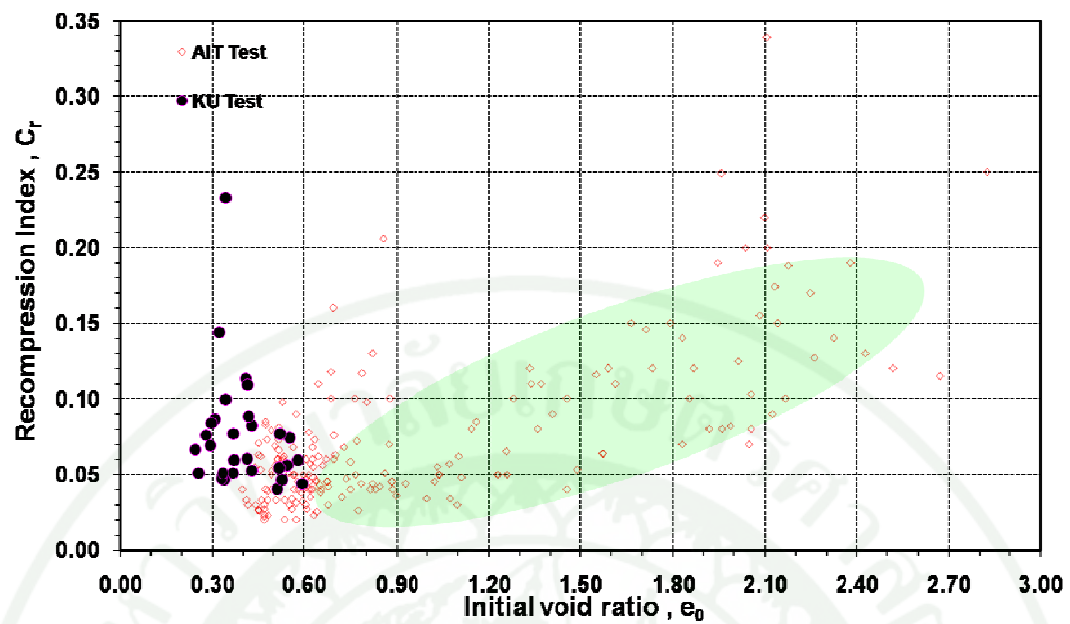
ภาพที่ 93 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักทั้งหมดกับอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น

ที่มา: พรสวรรค์ (2548)



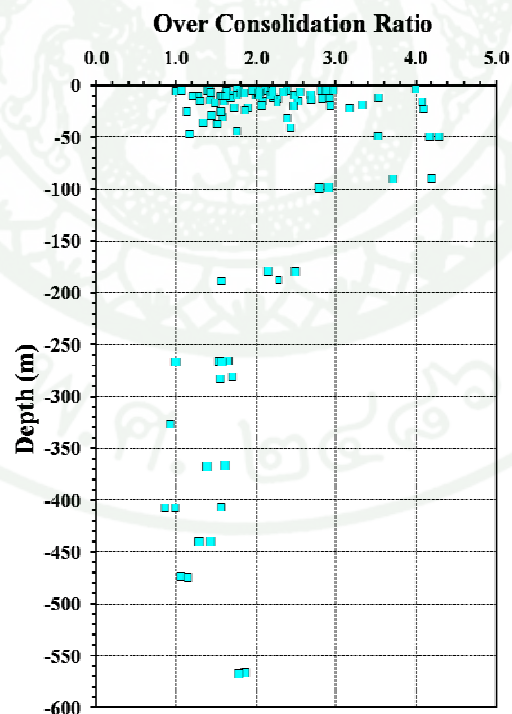
ภาพที่ 94 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นกับดัชนีการยุบอัดตัว (C_c)

ที่มา: พรสวรรค์ (2548)



ภาพที่ 95 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นกับดัชนีการยุบอัดตัว (C_r)

ที่มา: พรสวรรค์ (2548)



ภาพที่ 96 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า OCR กับความลึกของชั้นดิน

ที่มา: พรสวรรค์ (2548)

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์การทรุดตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์การทรุดตัวเป็นผลลัพธ์ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ Finite Difference ของสมการการยุบอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติของ Terzaghi ตามสมการที่ (29) และสมการที่ (44)

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (29)$$

โดยที่ C_v = Coefficient of Consolidation = $\frac{k_z}{m_v \gamma_w}$

u_e = เป็นฟังก์ชันของ z และ $t = f(z, t)$

$$U_{av}(t) = 1 - \frac{\int_0^H u_i dz}{\int_0^H u_i dz} \quad (44)$$

โดยผลลัพธ์จะอยู่ในรูปของสมการแรงดันน้ำส่วนเกิน (u_e) และอัตราการยุบอัดตัวคายน้ำเฉลี่ย (U_{av}) ดังแสดงในสมการที่ (61) และสมการที่ (67)-(70) ตามลำดับ

$$u_{e_{i,j+1}} = \alpha u_{e_{i+1,j}} + (1-2\alpha) u_{e_{i,j}} + \alpha u_{e_{i-1,j}} \quad (61)$$

$$U_{av}(t) = 1 - \frac{\text{Area}(u_t)}{\text{Area}(u_0)} \quad (67)$$

$$\int_0^H u_e dz \approx \Delta z \left(\frac{1}{2} u_{e_0} + u_{e_1} + u_{e_2} + \dots + u_{e_{n-1}} + \frac{1}{2} u_{e_n} \right) \quad (68)$$

$$\text{Area}(u_0) = \Delta z \left[\frac{1}{2} u_e(z_0, 0) + u_e(z_1, 0) + u_e(z_2, 0) + \dots + u_e(z_{n-1}, 0) + \frac{1}{2} u_e(z_n, 0) \right] \quad (69)$$

$$\text{Area}(u_{t_j}) = \Delta z \left[\frac{1}{2} u_e(z_0, t_j) + u_e(z_1, t_j) + u_e(z_2, t_j) + \dots + u_e(z_{n-1}, t_j) + \frac{1}{2} u_e(z_n, t_j) \right] \quad (70)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } u_c(z_i, 0) &= \text{แรงดันน้ำส่วนเกินที่ตำแหน่ง } z_i \text{ ณ เวลา } t = 0 \\ u_c(z_i, t_j) &= \text{แรงดันน้ำส่วนเกินที่ตำแหน่ง } z_i \text{ ณ เวลา } t_j \end{aligned}$$

จากสมการที่ (61) สามารถคำนวณหาค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในชั้นดินเหนียวที่เวลาใด ๆ ได้ และจากสมการที่ (67)-(70) สามารถคำนวณหาอัตราการยุบอัดตัวคายน้ำเฉลี่ย (U_{av}) ที่เวลาใด ๆ ได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นเพื่อความสะดวกและรวดเร็วของการคำนวณจึงได้ใช้โปรแกรม Mathematica 5.0 ช่วยในการวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดของโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ก

หลังจากคำนวณอัตราการยุบอัดตัวคายน้ำเฉลี่ย (U_{av}) ที่เวลาใด ๆ ได้แล้ว จะสามารถหาค่าการทรุดตัวที่เวลาใด ๆ ได้โดยใช้สมการที่ (75) และสมการที่ (76)

$$U_{av}(t) = \frac{S_c(t)}{S_c} \quad (75)$$

$$S_c = RR H_0 \text{Log} \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} \right) + CR H_0 \text{Log} \left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p} \right) \quad (76)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } S_c(t) &= \text{ค่าการทรุดตัวที่เวลา } t \\ S_c &= \text{ค่าการทรุดตัวทั้งหมด} \\ RR &= \text{Recompression Ratio} \\ CR &= \text{Compression Ratio} \\ H_0 &= \text{ความหนาของชั้นดินเหนียว} \\ \sigma'_p &= \text{Maximum Past Pressure} \\ \sigma'_{vo} &= \text{Overburden Pressure} \\ \sigma'_{vf} &= \text{Final Pressure} \end{aligned}$$

การปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ค่าการทรุดตัวจากการคำนวณสอดคล้องกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดจะกระทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย หน่วยน้ำหนักทั้งหมด (Total Unit Weight, γ_t), อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (Initial Void Ratio, e_0), ดัชนีการยุบอัดตัว (Compression Index, C_c), ดัชนีการยุบอัดตัวซ้ำ (Recompression Index, C_r),

อัตราส่วนการยุบอัดตัวเกิน (Over Consolidation Ratio, OCR) และสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation, C_v)

เนื่องจากมีตัวแปรหลายตัวการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ จะเริ่มปรับค่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าการทรุดตัวสะสมมากที่สุดเป็นอันดับแรก ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ค่าการทรุดตัวเปลี่ยนแปลงมาก ประกอบด้วยค่า OCR, C_c และ C_r ตามลำดับ โดยค่าที่ปรับแก้จะต้องอยู่ในช่วงของข้อมูลที่ได้มีการศึกษาและรวบรวมมาแล้วในอดีต ส่วนค่า γ_c และ e_0 จะเป็นไปตามสัมพันธภาพที่แสดงในภาพที่ 92 และภาพที่ 93 โดยจะกำหนดให้ค่า γ_c คงที่ในแต่ละช่วงลึกของชั้นดิน ซึ่งเกณฑ์การแบ่งค่า γ_c ตามตารางที่ 10 พิจารณาจากจำนวนข้อมูลที่ได้มีการรวบรวม ดังนี้

ตารางที่ 10 การกำหนดค่าหน่วยน้ำหนักทั้งหมดที่ใช้ในแบบจำลองตามความลึกของชั้นดิน

ความลึกของชั้นดิน (m)	หน่วยน้ำหนักทั้งหมด (t/m^3)
0 – 50	1.8
50 – 150	2.1
150 – 300	2.2
300 – 600	2.3

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวคายน้ำ (C_v) ได้ใช้ทฤษฎีของ Asaoka (1978) ประมาณค่า C_v ในสนาม โดยใช้ค่าความชันของเส้นแนวโน้มของค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดระหว่างค่าการทรุดตัว ณ เวลา j (S_j) และ $j+1$ (S_{j+1}) ตามสมการที่ (74)

$$C_v = -\frac{5}{12} \frac{H_d^2 \ln \beta_1}{\Delta t} \quad (74)$$

โดยที่ C_v = Coefficient of Consolidation

H_d = ระยะทางไกลสุดของการระบายน้ำออกจากชั้นดิน (Drainage Path)

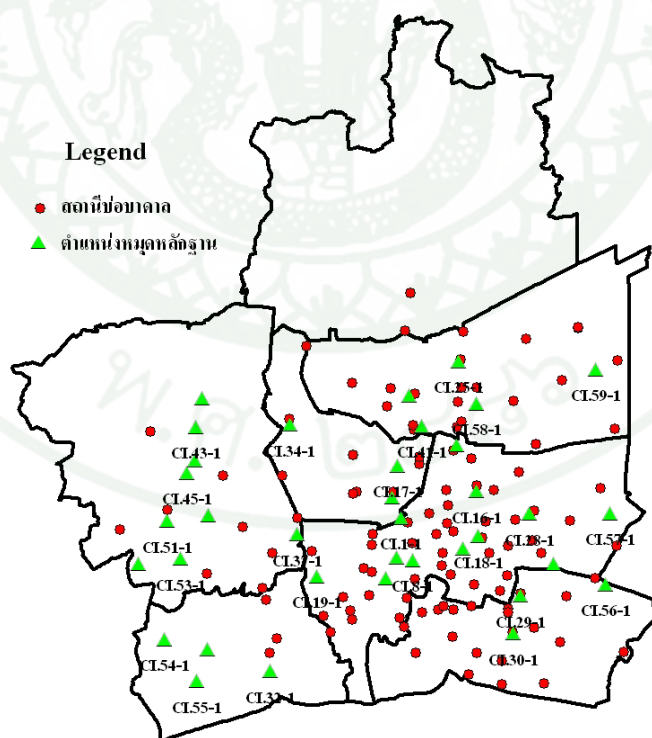
β_1 = ความชันของเส้นแนวโน้มของค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัด

Δt = ช่วงระยะเวลาที่แบ่งเท่า ๆ กัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เท่ากับ 1 ปี

ผลและวิจารณ์

ความสอดคล้องของค่าการทรุดตัวจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการตรวจวัด

การวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ต้องอาศัยข้อมูลระดับน้ำบาดาลในแต่ละบ่อสังเกตการณ์ ผลที่คำนวณได้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวที่ตรวจวัดได้ของหมวดหลักฐานที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับสถานีบ่อน้ำบาดาล ค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดเป็นข้อมูลที่ได้จากการสำรวจระดับการทรุดตัวของพื้นดินในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล โดยกรมแผนที่ทหารซึ่งมีตำแหน่งของหมวดหลักฐาน ดังแสดงในภาพที่ 97 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวจะเริ่มตั้งแต่ปีที่เริ่มมีการจดบันทึกข้อมูลของระดับน้ำบาดาลของแต่ละบ่อสังเกตการณ์จนถึงปี พ.ศ. 2550 ซึ่งแต่ละบ่อสังเกตการณ์จะเริ่มมีการจดบันทึกข้อมูลระดับน้ำบาดาลไม่ตรงกัน โดยปีที่แรกที่เริ่มมีการจดบันทึกข้อมูลระดับน้ำบาดาล คือ พ.ศ. 2521 และข้อมูลการทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดเริ่มที่ปี พ.ศ. 2522 ดังนั้น การเปรียบเทียบผลการทรุดตัวจะเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2522-2550



ภาพที่ 97 ตำแหน่งหมวดหลักฐานสำรวจระดับการทรุดตัวของพื้นดินในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล

วัตถุประสงค์ของการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถใช้วิเคราะห์ค่าการทรุดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยได้มีการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าการทรุดตัวใกล้เคียงกับค่าการตรวจวัดมากที่สุดซึ่งประกอบด้วย Total Unit Weight (γ), Initial Void Ratio (e_0), Compression Index (C_c), Recompression Index (C_r) และ Over Consolidation Ratio (OCR) วิธีการตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลองจะใช้วิธีการตรวจสอบ 4 วิธี คือ

1. การหาค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (Least Square Regression, R^2) ของค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองและจากการตรวจวัด
2. เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมของแต่ละสถานีบ่อน้ำบาดาล (Cumulative Settlement of the Observation Well)
3. เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวแต่ละปี (Annual Settlement) ตั้งแต่ พ.ศ. 2522-2550 ในลักษณะเชิงพื้นที่
4. เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมทั้งหมด (Total Cumulative Settlement) ในปีพ.ศ. 2550 ในลักษณะเชิงพื้นที่

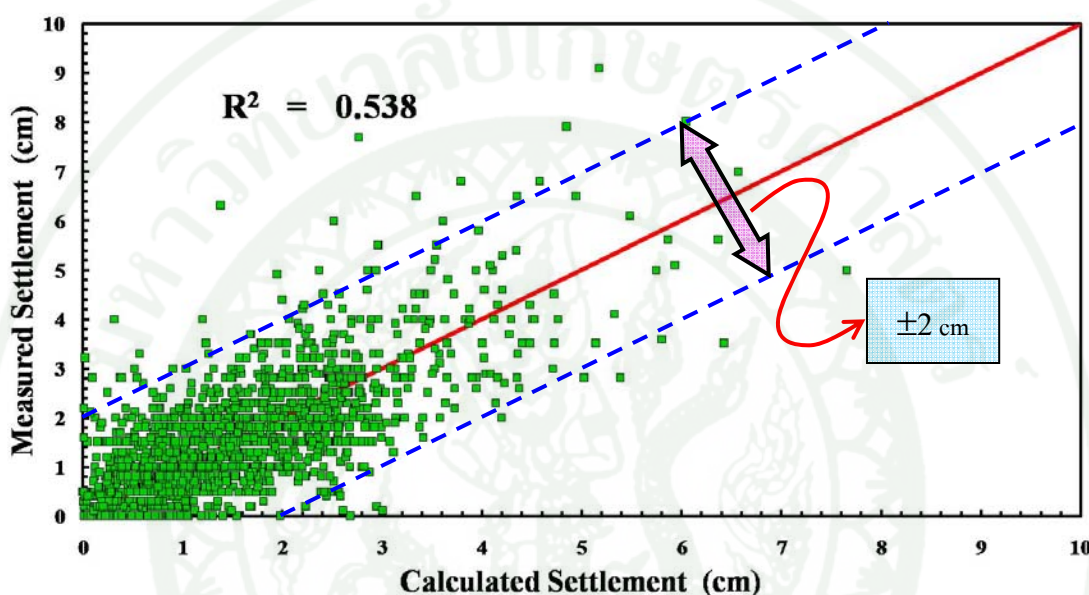
การหาค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุดของค่าการทรุดตัวจากแบบจำลองและจากการตรวจวัด

ความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลองสามารถแสดงได้ด้วยค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (Least Square Regression, R^2) ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัด ถ้าค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุดมีค่าเข้าใกล้หนึ่งมากเท่าไรก็แสดงว่าค่าการทรุดตัวจากแบบจำลองและจากการตรวจวัดมีค่าใกล้เคียงกันมาก

การหาค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (R^2) ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดจะพิจารณาใน 3 ลักษณะ เพื่อดูช่วงระยะเวลาที่ยังมีความสอดคล้องกันของความสัมพันธ์ค่าการทรุดตัว คือ

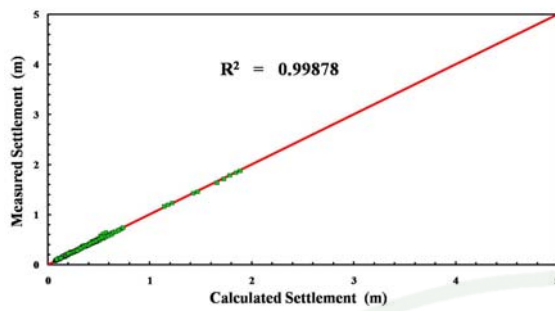
1. พิจารณาความสัมพันธ์ของค่าการทรุดตัวแต่ละปี (Annual Settlement)
2. พิจารณาความสัมพันธ์ของค่าการทรุดตัวสะสม (Cumulative Settlement) ในแต่ละช่วง 5 ปี และ 10 ปี
3. พิจารณาความสัมพันธ์ของค่าการทรุดตัวสะสมตลอดช่วงระยะเวลา 29 ปี ตั้งแต่พ.ศ. 2522-2550

ผลการพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าการทรุดแต่ละปี (Annual Settlement) ได้ลักษณะความสัมพันธ์ของค่าการทรุดตัวที่มีการกระจายตัวค่อนข้างสูงโดยมีค่ากำลังสองน้อยสุด (R^2) เท่ากับ 0.538 ซึ่งแสดงว่า ค่าการทรุดตัวแต่ละปีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดในระดับปานกลาง โดยมีค่าความแตกต่างของค่าการทรุดตัวส่วนใหญ่ไม่เกิน ± 2 cm ดังแสดงในภาพที่ 98

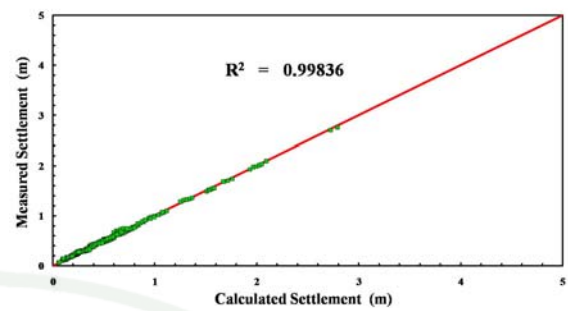


ภาพที่ 98 ค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (R^2) ของค่าการทรุดตัวแต่ละปีที่ได้จากการวิเคราะห์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการตรวจวัด

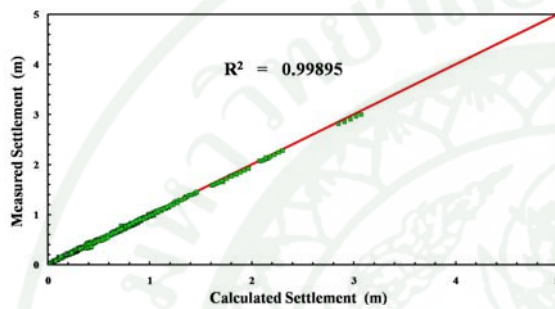
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าการทรุดตัวสะสมจากแบบจำลองและจากการตรวจวัดช่วงละ 5 ปี, 10 ปี และตลอดระยะเวลาทั้งหมด 29 ปี พบว่า ค่าการทรุดตัวสะสมจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับค่าการทรุดตัวสะสมจากการตรวจวัดมากโดยมีค่ากำลังสองน้อยสุด (R^2) เท่ากับ 0.998–0.999 ดังแสดงในภาพที่ 99, ภาพที่ 100 และภาพที่ 101 แสดงว่า ในกรณีที่มีข้อมูลของระดับน้ำเพียงแค่ 5 ปี หรือ 10 ปี แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ค่าการทรุดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลได้ผลสอดคล้องใกล้เคียงกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัด



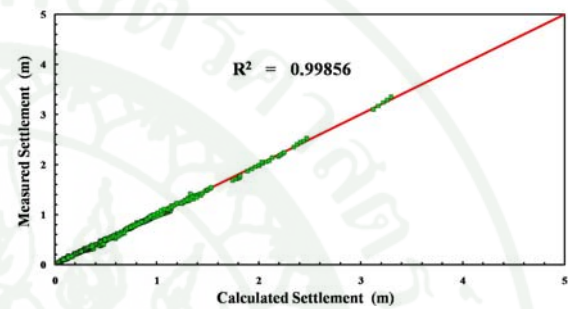
ก. พ.ศ. 2522-2526



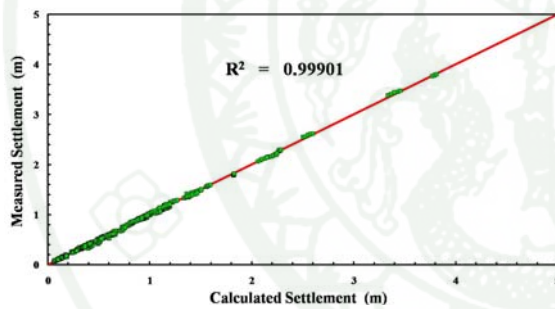
ข. พ.ศ. 2527-2531



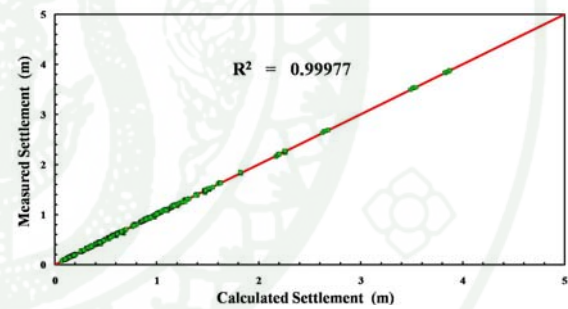
ค. พ.ศ. 2532-2536



ง. พ.ศ. 2537-2541

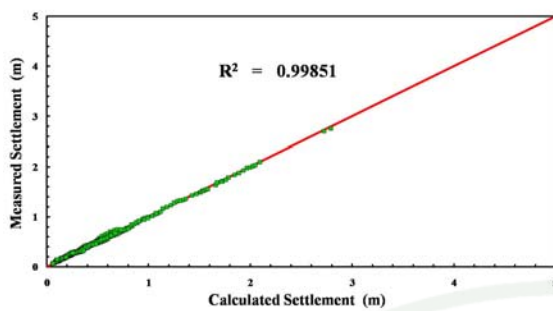


จ. พ.ศ. 2542-2546

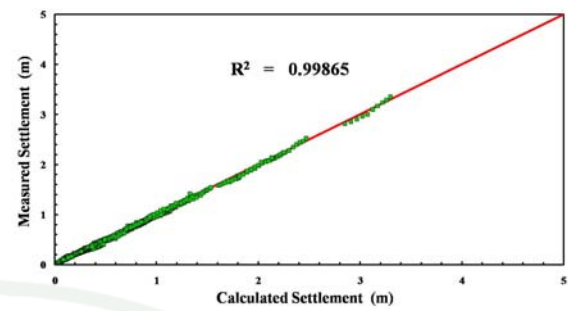


ฉ. พ.ศ. 2547-2550

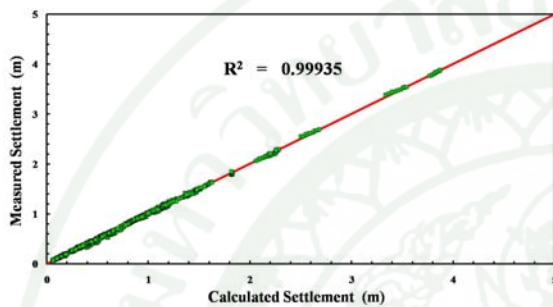
ภาพที่ 99 ค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (R^2) ของค่าการทรุดตัวสะสมพิจารณาข้อมูลช่วงละ 5 ปี



ก. พ.ศ. 2522-2531

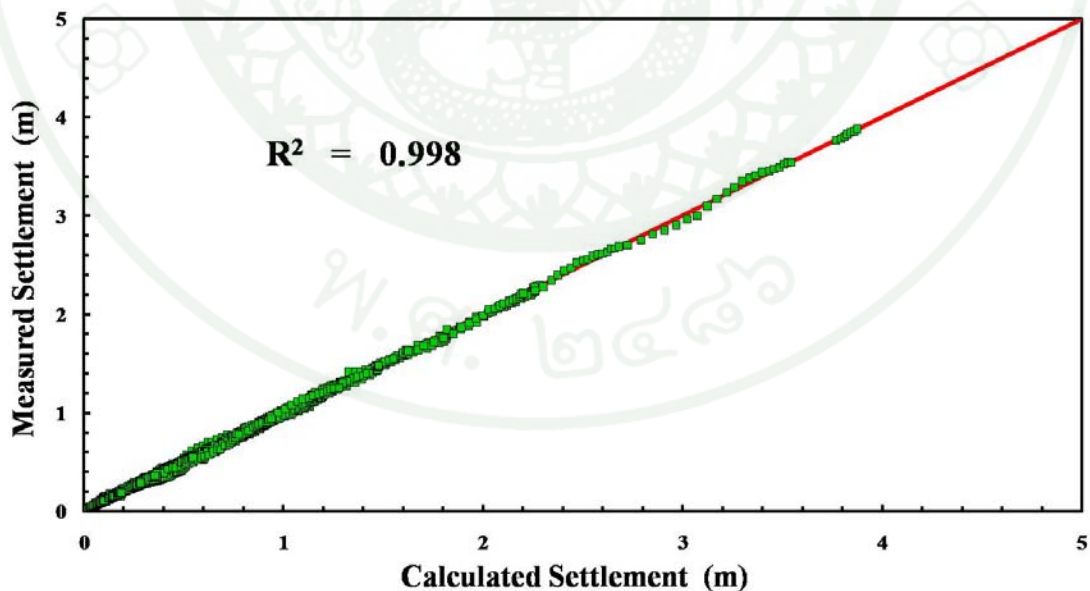


ข. พ.ศ. 2532-2541



ค. พ.ศ. 2542-2550

ภาพที่ 100 ค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (R^2) ของค่าการทรุดตัวสะสมพิจารณาข้อมูลช่วงละ 10 ปี



ภาพที่ 101 ค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (R^2) ของค่าการทรุดตัวสะสมตั้งแต่พ.ศ. 2522-2550 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการตรวจวัด

สาเหตุที่ค่า R^2 ของความสัมพันธ์ของค่าการทรุดแต่ละปีมีค่าน้อยและค่า R^2 ของความสัมพันธ์ของค่าการทรุดสะสมมีค่ามาก เนื่องมาจากค่าการทรุดตัวแต่ละปีที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองเป็นค่าการทรุดตัวที่คำนวณจากการลดลงของระดับน้ำ ณ เวลาที่ระดับน้ำลดลงทันที โดยไม่ได้คิดผลของความล่าช้าของการทรุดตัวเนื่องจากขบวนการยุบอัดตัวคายน้ำ ซึ่งตามทฤษฎีการยุบอัดตัวคายน้ำการทรุดตัวของชั้นดินจะเกิดขึ้นหลังจากที่ระดับน้ำลดลงเป็นระยะเวลาหนึ่ง อาจจะ 1–3 ปี ยังไม่เคยมีใครศึกษาระยะเวลาที่แน่นอนซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการระบายน้ำของชั้นดิน แต่ค่าการทรุดตัวแต่ละปีที่ได้จากการตรวจวัดเป็นค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นหลังจากขบวนการยุบอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดแล้ว ดังนั้นจึงมีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวแต่ละปีที่ได้จากการคำนวณและจากการตรวจวัดค่อนข้างสูงทำให้ค่า R^2 มีค่าน้อย

ส่วนสาเหตุที่ค่า R^2 ของความสัมพันธ์ของค่าการทรุดสะสมมีค่ามาก อาจเนื่องมาจากเป็นความสัมพันธ์ของค่าการทรุดตัวสะสมของทุก ๆ ปีต่อเนื่องกัน ทำให้ผลต่างของค่าการทรุดตัวเนื่องจากความล่าช้าของขบวนการยุบอัดตัวคายน้ำถูกหักลบซึ่งกันและกัน โดยจะเห็นได้จากภาพที่ 98 ซึ่งมีลักษณะการกระจายของข้อมูลที่เกือบจะสมมาตรกันทั้งสองข้างระหว่าง -2 cm และ +2 cm ดังนั้น ผลของค่าการทรุดตัวสะสมทำให้ผลต่างของค่าการทรุดตัวหักลบซึ่งกันและกันทำให้ค่าความแตกต่างของค่าการทรุดตัวสะสมจากการคำนวณและจากการตรวจวัดเป็นศูนย์หรือเหลืออยู่น้อยมาก จึงทำให้ได้ค่า R^2 ของความสัมพันธ์ของค่าการทรุดสะสมมีค่ามาก

การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมของแต่ละสถานีบ่อน้ำบาดาลตามเวลา

การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมของแต่ละสถานีบ่อน้ำบาดาลตั้งแต่ปีพ.ศ. 2522–2550 รวมทั้งหมด 29 ปี จะใช้ค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของการทรุดตัว (Absolute Differential Settlement) ระหว่างค่าการทรุดตัวสะสมที่ได้จากแบบจำลองกับค่าการทรุดตัวสะสมที่ได้จากการตรวจวัด โดยมีสูตรการคำนวณ ดังนี้

$$\text{ค่าความแตกต่างสัมบูรณ์} = \left| \text{ค่าการทรุดตัวจากการคำนวณ} - \text{ค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัด} \right|$$

การพิจารณาค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวระหว่างค่าการทรุดตัวสะสมที่ได้จากแบบจำลองกับค่าการทรุดตัวสะสมที่ได้จากการตรวจวัดจะพิจารณาใน 3 ลักษณะ ดังนี้

1. พิจารณาค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมในปีที่มีค่าสูงสุดเพียง 1 ปี
2. พิจารณาค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสม โดยนำผลบวกของค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดของค่าการทรุดตัวสะสมและค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ข้างเคียงที่อยู่ติดกัน (ข้างหน้าและข้างหลัง) มาหาค่าเฉลี่ย 3 ปี
3. พิจารณาค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสม โดยนำผลบวกของค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดของค่าการทรุดตัวสะสมและค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ข้างเคียง 2 ปีที่อยู่ติดกัน (2 ปีข้างหน้าและ 2 ปีข้างหลัง) มาหาค่าเฉลี่ย 5 ปี

โดยเกณฑ์การพิจารณาจะแบ่งระดับของค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมเป็น 4 ระดับ ดังนี้

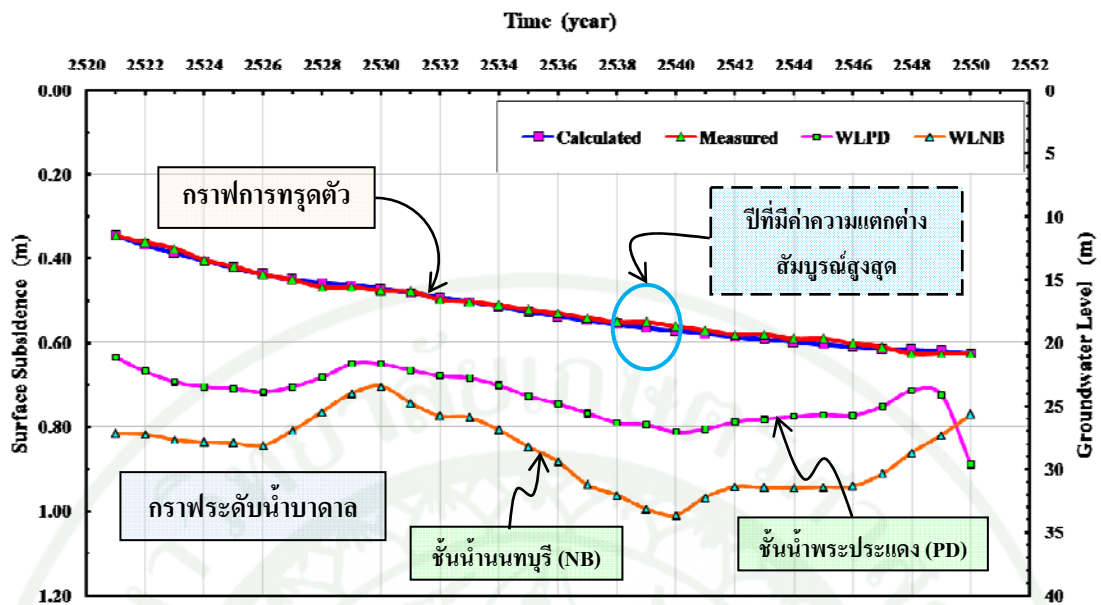
ระดับที่ 1 การทรุดตัวสะสมที่ได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดมีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดอยู่ในช่วง 0–2 cm

ระดับที่ 2 การทรุดตัวสะสมที่ได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดมีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดอยู่ในช่วง 2–4 cm

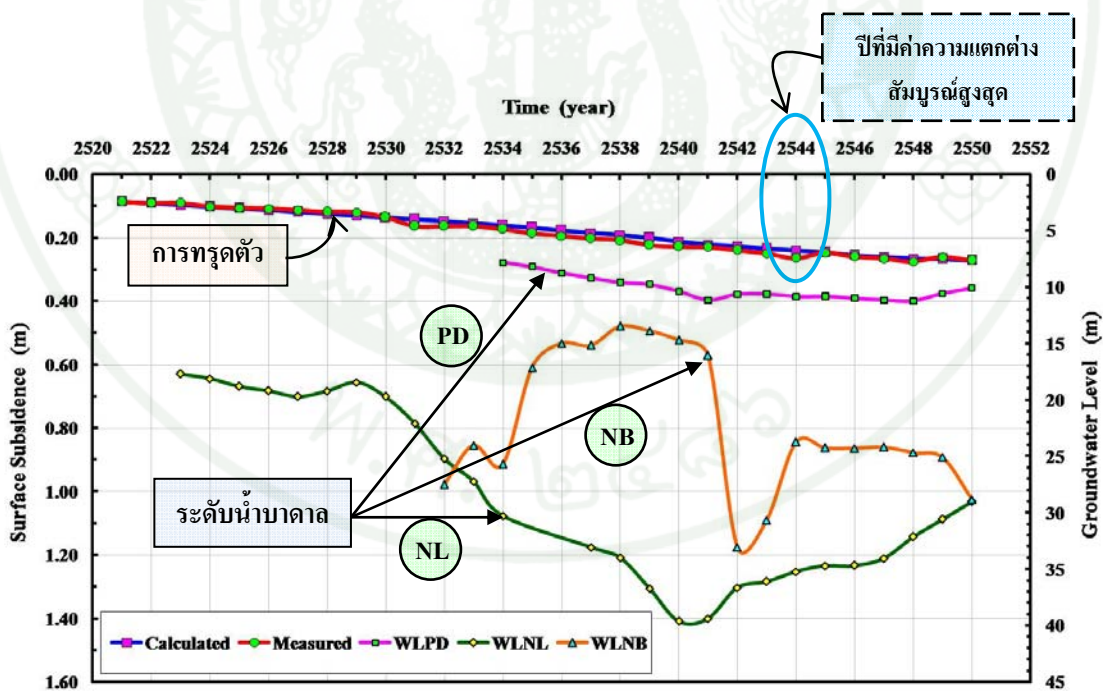
ระดับที่ 3 การทรุดตัวสะสมที่ได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดมีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดอยู่ในช่วง 4–6 cm

ระดับที่ 4 การทรุดตัวสะสมที่ได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดมีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดอยู่ในช่วง 6–8 cm

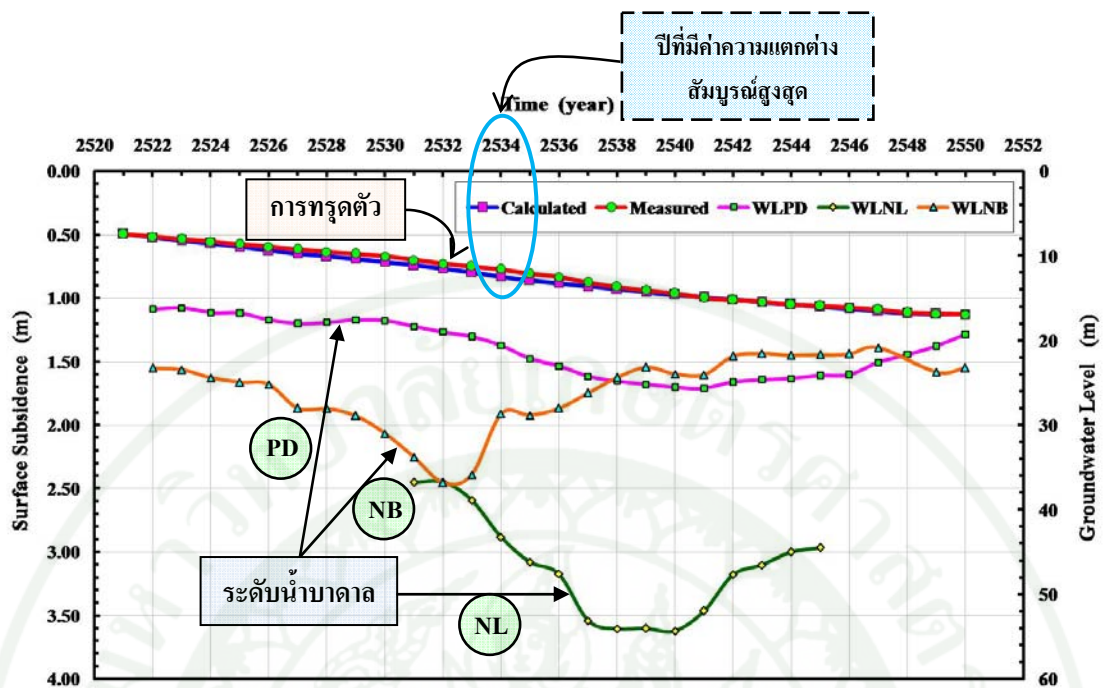
ผลการพิจารณาค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมในปีที่มีค่าสูงสุดเพียง 1 ปี พบว่า จำนวนสถานีที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดอยู่ในระดับที่ 1 และระดับที่ 2 มีจำนวนใกล้เคียงกันคือ 44 สถานี และ 43 สถานี ตามลำดับ คิดเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์รวมกันได้ 79% ของจำนวนสถานีบ่อน้ำบาดาลทั้งหมด และสถานีที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดในระดับที่ 3 และระดับที่ 4 มีจำนวน 14 สถานี และ 9 สถานี ตามลำดับ หรือมีจำนวนเปอร์เซ็นต์รวมกันเท่ากับ 21% ดังแสดงในตารางที่ 11 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะเห็นว่า จำนวนเปอร์เซ็นต์รวมของสถานีที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดในระดับที่ 3 และระดับที่ 4 มีค่าน้อยกว่าจำนวนเปอร์เซ็นต์รวมของสถานีที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดในระดับที่ 1 และระดับที่ 2 มาก แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวนี้สามารถใช้ได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างสถานีที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดในระดับที่ 1 ถึง ระดับที่ 4 แสดงในภาพที่ 102-105



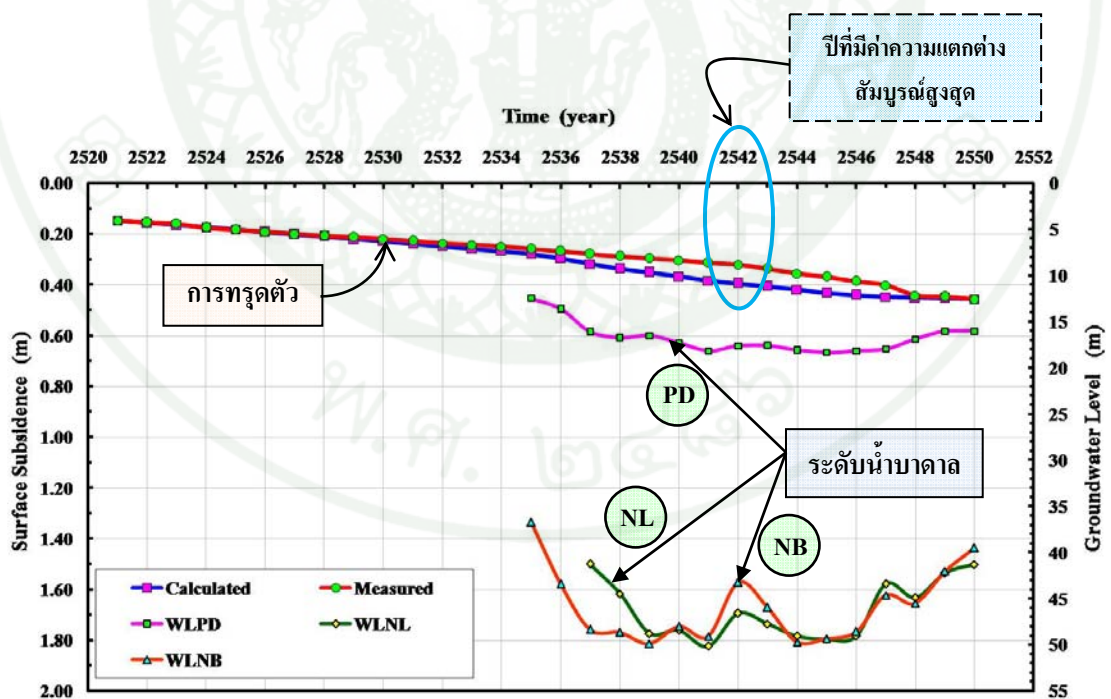
ภาพที่ 102 ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสม ในระดับที่ 1 ของ Sta7



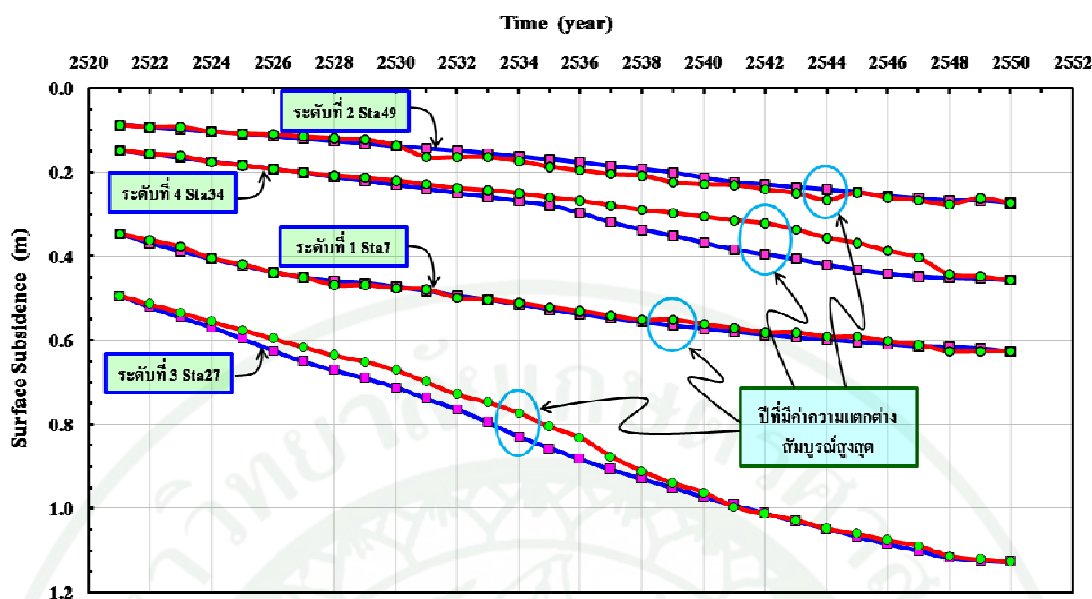
ภาพที่ 103 ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสม ในระดับที่ 2 ของ Sta49



ภาพที่ 104 ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสม ในระดับที่ 3 ของ Sta27



ภาพที่ 105 ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสม ในระดับที่ 4 ของ Sta34



ภาพที่ 106 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมในระดับที่ 1-4

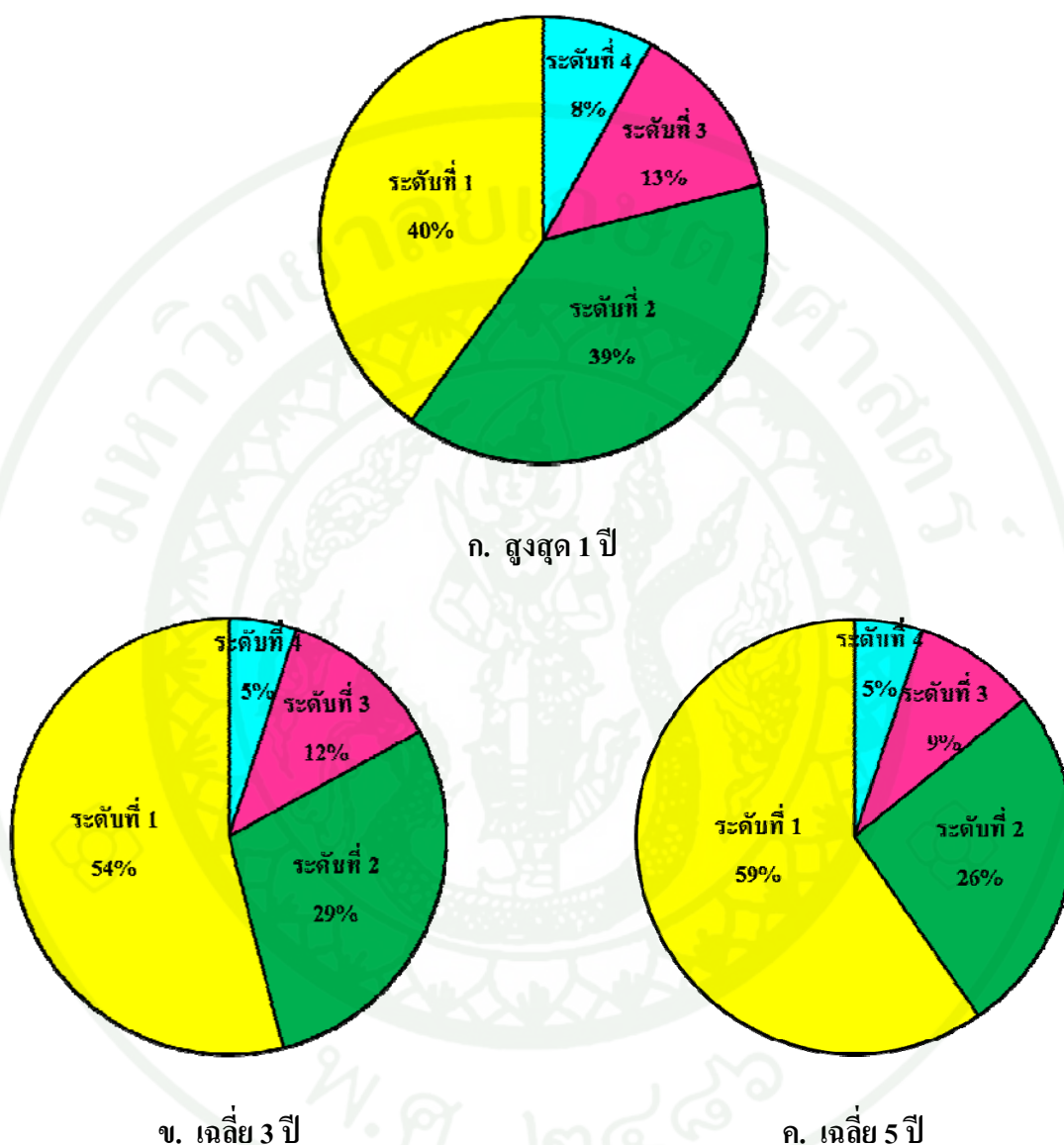
การจำแนกระดับค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดของค่าการทรุดตัวสะสมข้างต้นได้ใช้ค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมสูงสุดเพียงค่าเดียว ซึ่งบางสถานีมีการทรุดตัวจากการตรวจวัดสูงผิดปกติเพียงค่าเดียวหรือปีเดียว สาเหตุเนื่องจากเหตุผลพื้นฐานซ้ำชุดและมีการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนเหตุผลพื้นฐานใหม่ทำให้ค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดสูงผิดปกติมีผลทำให้มีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์มีค่ามาก ดังนั้นการแบ่งระดับของค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของสถานีดังกล่าวจึงไม่ใช่ค่าที่เกิดจากความผิดพลาดของแบบจำลองแต่เป็นความคลาดเคลื่อนของค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัด ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้จึงได้ใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสม โดยนำผลบวกของค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดของค่าการทรุดตัวและค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวข้างเคียงที่อยู่ติดกัน (ข้างหน้าและข้างหลัง) มาหาค่าเฉลี่ย 3 ปี และ 5 ปี ติดต่อกัน จากนั้นจำแนกเป็นระดับค่าความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยแบบ 3 ปี และ 5 ปี ผลการจำแนกระดับค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของแต่ละสถานีบนน้ำบาดาลทั้ง 3 กรณี ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11 และภาพที่ 107

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบจำนวนสถานีบ่อน้ำบาดาลที่มีระดับความแตกต่างสัมบูรณ์ในระดับที่ 1 ถึง ระดับที่ 4 จากการพิจารณาค่าการทรุดตัวสูงสุด 1 ปี, ค่าเฉลี่ย 3 ปี และค่าเฉลี่ย 5 ปี

ระดับค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ ของค่าการทรุดตัว	จำนวนสถานีบ่อน้ำบาดาล		
	เฉพาะปีสูงสุด	เฉลี่ย 3 ปีระหว่าง ปีสูงสุด	เฉลี่ย 5 ปีระหว่าง ปีสูงสุด
ระดับที่ 1 (0–2 cm)	44 (40%)	59 (54%)	65 (59%)
ระดับที่ 2 (2–4 cm)	43 (39%)	32 (29%)	29 (26%)
ระดับที่ 3 (4–6 cm)	14 (13%)	13 (12%)	10 (9%)
ระดับที่ 4 (6–8 cm)	9 (8%)	6 (5%)	6 (5%)
Total	110	110	110

จากผลของการจำแนกค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมโดยใช้ค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวเฉลี่ย 3 ปี และ 5 ปี ได้จำนวนสถานีที่มีระดับความแตกต่างสัมบูรณ์อยู่ในช่วง 0–2 cm หรือระดับที่ 1 เพิ่มขึ้นจาก 40% เป็น 54% และ 59% ตามลำดับ และจำนวนสถานีที่มีระดับความแตกต่างสัมบูรณ์อยู่ในช่วง 6–8 cm หรือระดับที่ 4 ลดลงเหลือ 5% เท่านั้น และเมื่อรวมจำนวนสถานีที่มีระดับความแตกต่างระดับที่ 1 และระดับที่ 2 รวมกันจะมีจำนวนมากกว่า 80% (เฉลี่ย 3 ปี 83% และเฉลี่ย 5 ปี 85%) ของจำนวนสถานีบ่อน้ำบาดาลทั้งหมด ดังนั้นผลของการนำค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวมาเฉลี่ย 3 ปี และ 5 ปี จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดได้ และทำให้การแบ่งระดับค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ถูกต้องตามความเป็นจริงมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าเปรียบเทียบจำนวนเปอร์เซ็นต์ของสถานีบ่อน้ำบาดาลแต่ละระดับค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมจากการพิจารณาค่าเฉลี่ย 3 ปี และ 5 ปี จะเห็นว่ามีความไม่ต่างกันมากนัก โดยเฉพาะค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ในระดับที่ 4 มีจำนวนเปอร์เซ็นต์ของสถานีบ่อน้ำบาดาล 5% เท่ากัน ดังนั้นการแบ่งระดับค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมโดยใช้ค่าเฉลี่ย 3 ปี จึงเหมาะสมที่สุด ส่วนสาเหตุที่ทำให้แบบจำลองทาง

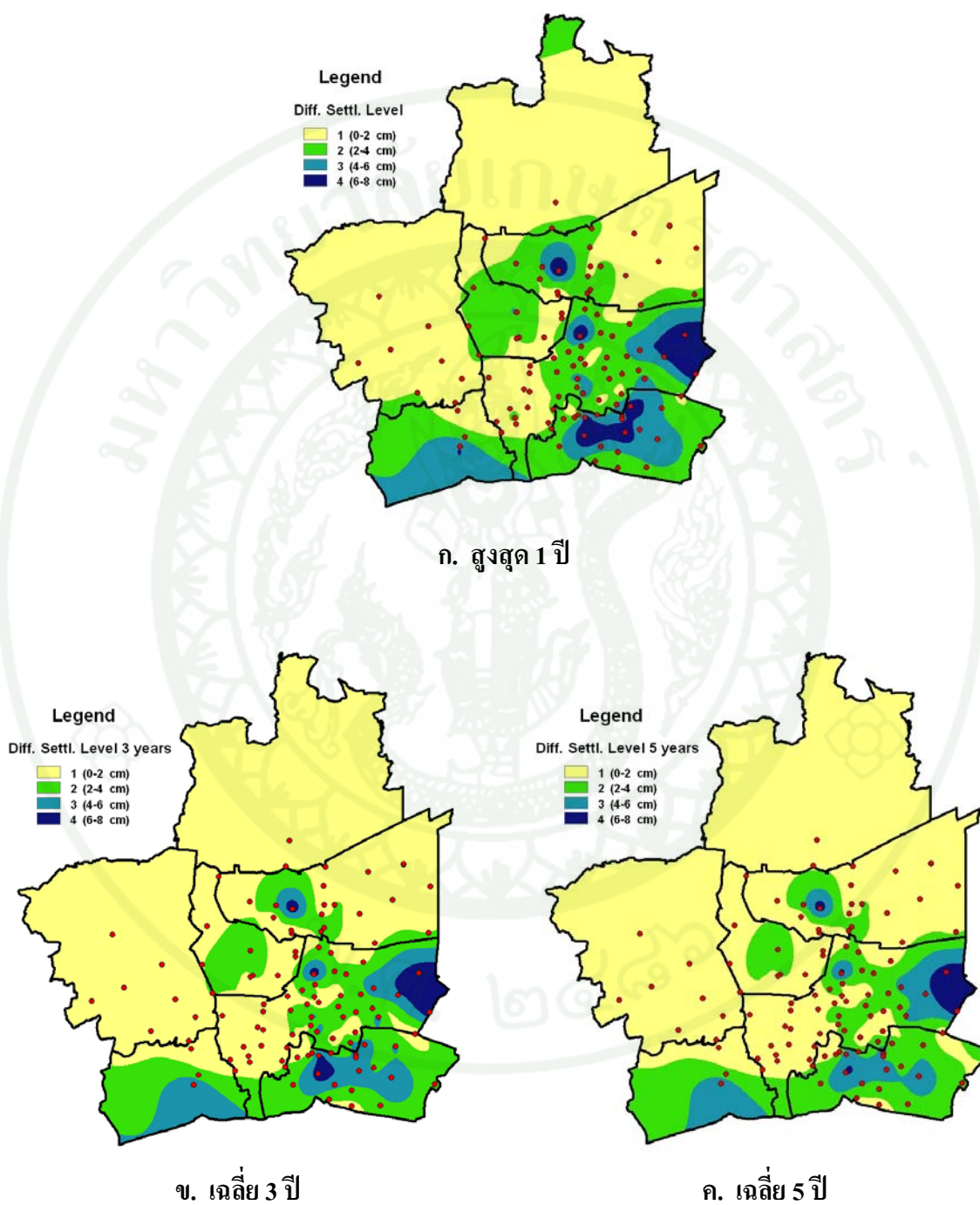
คณิตศาสตร์ยังคงมีเปอร์เซ็นต์ของสถานีนีบ่อน้ำบาดาลในระดับที่ 3 และระดับที่ 4 รวมกันมากกว่า 10% จะกล่าวต่อไปในตอนท้ายของหัวข้อนี้



ภาพที่ 107 จำนวนเปอร์เซ็นต์ของสถานีนีบ่อน้ำบาดาลที่มีระดับความแตกต่างสัมบูรณ์ระดับที่ 1 ถึง ระดับที่ 4 จากการพิจารณาค่าการทรุดตัวสูงสุด 1 ปี, และค่าเฉลี่ย 3 ปี และ 5 ปี

การจำแนกระดับค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมของแต่ละสถานีนีบ่อน้ำบาดาลในตารางที่ 11 สามารถนำมาประมวลผลในรูปของพื้นที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 108 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ที่มีระดับค่าความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดของค่าการทรุดตัวสะสมในระดับที่ 3 และระดับที่ 4 ส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณพื้นที่ทางด้านตะวันออกและด้านใต้ของพื้นที่ศึกษา ได้แก่ เขต

บางเขน พระโขนง ห้วยขวาง มีนบุรี หนองจอก ลาดกระบัง กรุงเทพฯ, บริเวณอ.เมือง อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ, อ.เมือง อ.สามโคก อ.ลาดหลุมแก้ว จ.ปทุมธานี, และ อ.เมือง จ.สมุทรสาคร



ภาพที่ 108 แสดงพื้นที่ที่มีระดับความแตกต่างสัมบูรณ์สูงสุดของค่าการทรุดตัวสะสมในระดับ 1-4

การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวแต่ละปีทั้งพื้นที่

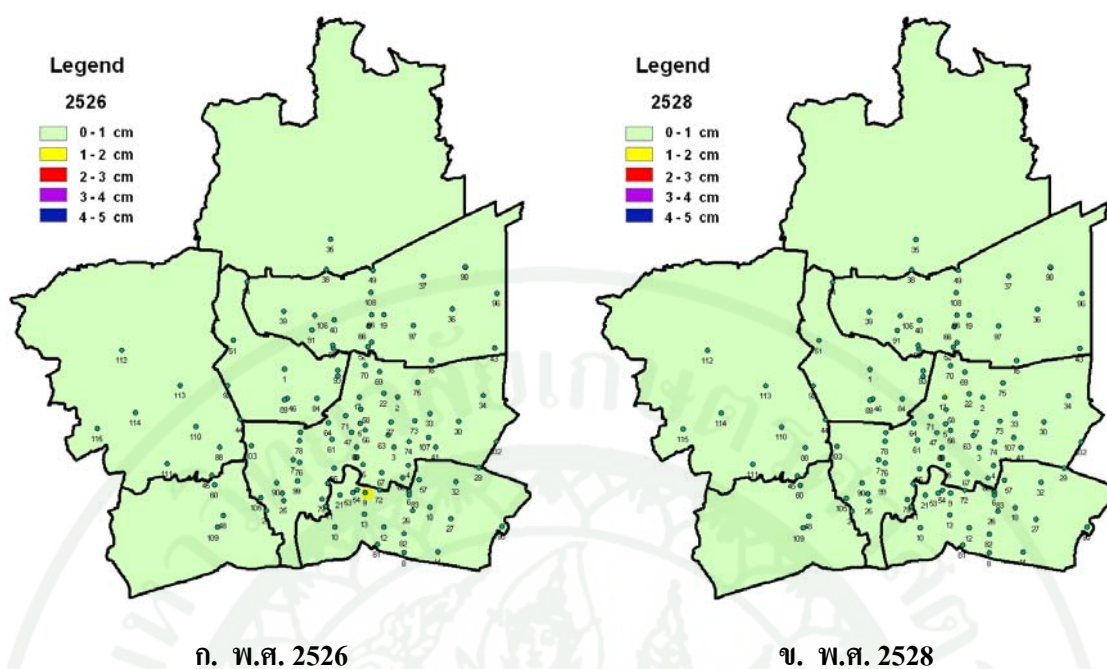
การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวแต่ละปีที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการตรวจวัดนี้จะเปรียบเทียบในลักษณะของพื้นที่การทรุดตัวของแต่ละปี โดยเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2522-2550 รวมทั้งหมด 29 ปี โดยจะพิจารณาความแตกต่างของค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองและจากการตรวจวัดในลักษณะภาพรวมของพื้นที่ทั้งหมด (Global Area) และในลักษณะของพื้นที่เฉพาะ (Spot Area)

การเปรียบเทียบพื้นที่การทรุดตัวแต่ละปีในลักษณะภาพรวมของพื้นที่ทั้งหมด

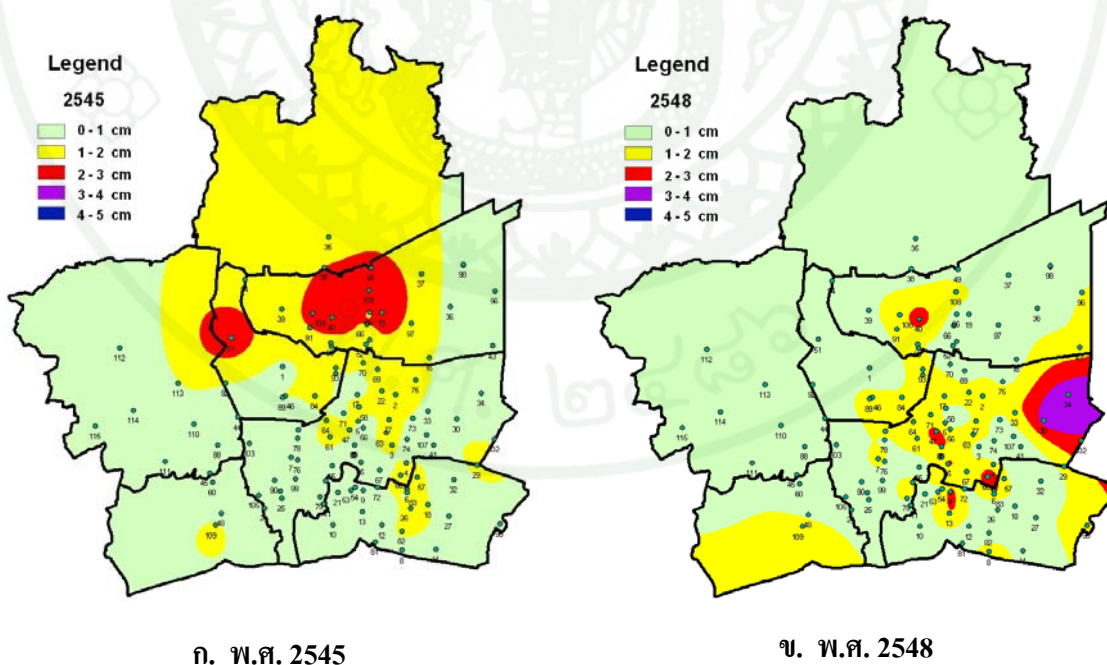
เกณฑ์การพิจารณาความแตกต่างของค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองและจากการตรวจวัดในลักษณะภาพรวมของพื้นที่ทั้งหมดจะพิจารณาค่าความแตกต่างของค่าการทรุดตัว 2 ระดับ คือ พื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวในช่วง 0-1 cm และ 1-2 cm มากกว่า 20% ของพื้นที่ศึกษาทั้งหมด เนื่องจากพื้นที่ที่แสดงความแตกต่างของค่าการทรุดตัวที่มีพื้นที่ขนาดกว้างใหญ่จะมีค่าการทรุดตัวน้อยประมาณ 0-2 cm เท่านั้น ส่วนพื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวที่มีค่ามากกว่า 2 cm ขึ้นไปจะมีลักษณะของพื้นที่เป็นจุดเฉพาะซึ่งมีขนาดของพื้นที่ไม่ใหญ่มาก โดยจะนำไปพิจารณาเป็นความแตกต่างของค่าการทรุดตัวในลักษณะของพื้นที่เฉพาะ

ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวแต่ละปีที่ได้จากแบบจำลองและจากการตรวจวัดในลักษณะภาพรวมของพื้นที่พบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ (มากกว่า 80% ของพื้นที่ศึกษาทั้งหมด) มีค่าความแตกต่างของค่าการทรุดตัวอยู่ในช่วง 0-1 cm โดยมีจำนวนปีที่มีค่าความแตกต่างของค่าการทรุดตัวอยู่ในช่วง 0-1 cm จำนวน 25 ปี จากจำนวนทั้งหมด 29 ปี (2522-2550) หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 86% ดังแสดงตัวอย่างปี พ.ศ. 2526 และพ.ศ. 2528 ในภาพที่ 109

ส่วนปีที่มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวที่อยู่ในช่วง 1-2 cm ในภาพรวมของพื้นที่มากกว่า 20% ของพื้นที่ทั้งหมดมีจำนวน 4 ปี ได้แก่ พ.ศ. 2543, พ.ศ. 2544, พ.ศ. 2545 และพ.ศ. 2548 ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 110



ภาพที่ 109 แสดงภาพรวมของพื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวแต่ละปีอยู่ในช่วง 0-1 cm มากกว่า 20% ของพื้นที่ทั้งหมด



ภาพที่ 110 แสดงภาพรวมของพื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวแต่ละปีอยู่ในช่วง 1-2 cm มากกว่า 20% ของพื้นที่ทั้งหมด

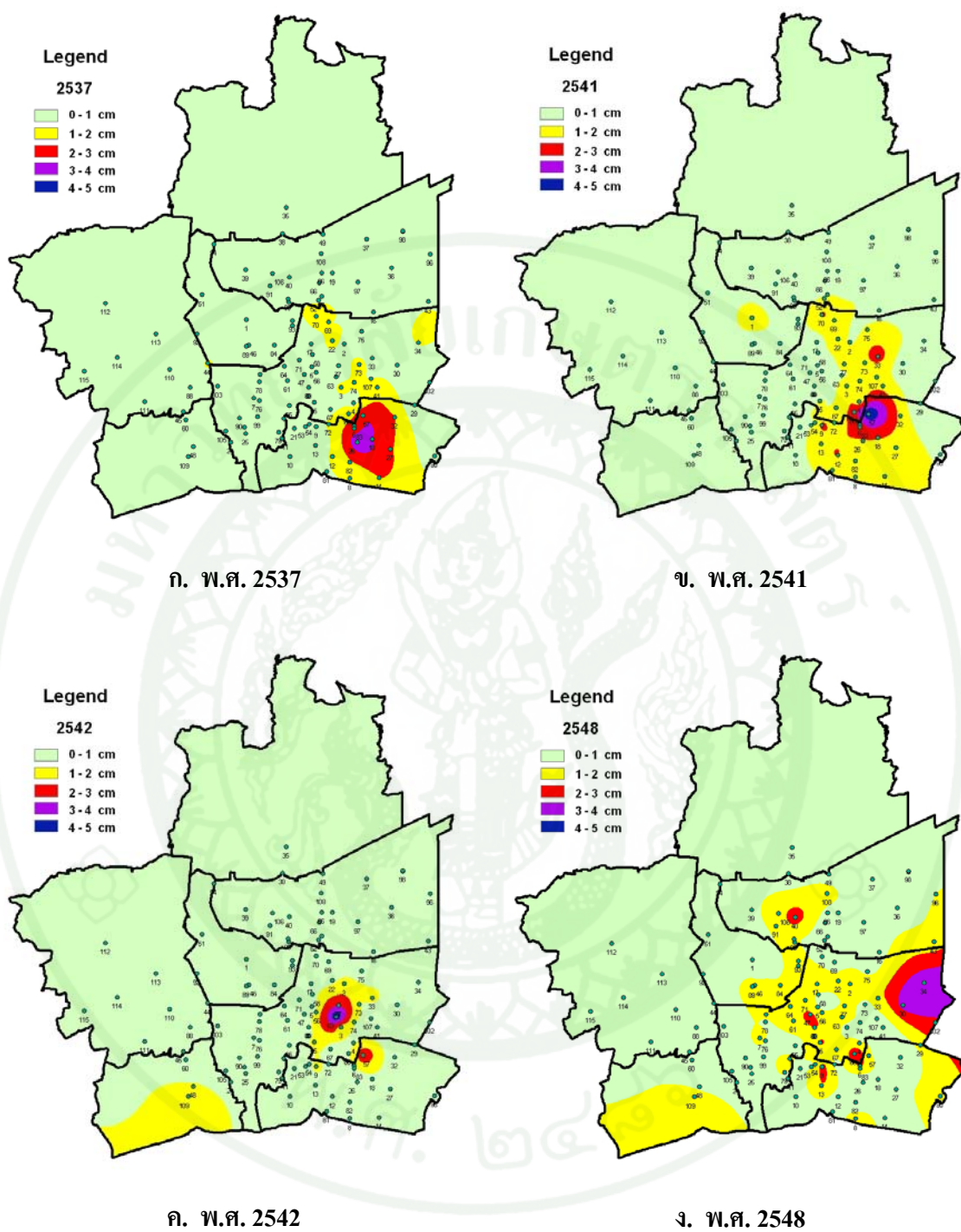
ภาพรวมของพื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าทรุดตัวอยู่ในช่วง 1–2 cm จะกระจายอยู่ทั่วไปในแต่ละปี เช่น ปี พ.ศ. 2543 และพ.ศ. 2544 จะอยู่บริเวณทางด้านตะวันตกและตรงกลางของพื้นที่ศึกษาใน จ.นครปฐม, จ.สมุทรสาคร จ.นนทบุรี จ.ปทุมธานี และพื้นที่บางส่วนของถนนของกรุงเทพฯ บริเวณเขตดอนเมือง เขตหลักสี่ เขตสายไหม เขตบางเขน และ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ

การเปรียบเทียบพื้นที่การทรุดตัวแต่ละปีในลักษณะของพื้นที่เฉพาะ

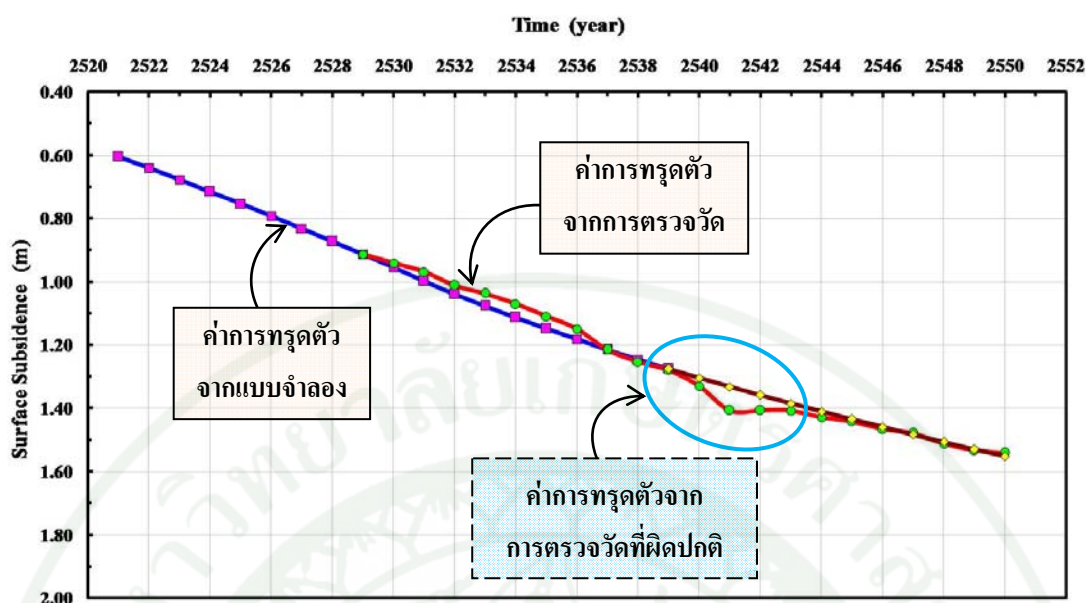
เกณฑ์การพิจารณาความแตกต่างของค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองและจากการตรวจวัดในลักษณะของพื้นที่เฉพาะจะพิจารณาค่าความแตกต่างของค่าการทรุดตัว 3 ระดับ คือ พื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวในช่วง 2–3 cm, 3–4 cm และ 4–5 cm

ผลการเปรียบเทียบพื้นที่การทรุดตัวแต่ละปีในลักษณะของพื้นที่เฉพาะพบว่า จำนวนปีที่มีพื้นที่แสดงความแตกต่างของค่าการทรุดตัวอยู่ในช่วง 2–3 cm มีจำนวน 19 ปี และจำนวนปีที่มีพื้นที่แสดงความแตกต่างของค่าการทรุดตัวมากกว่า 3 cm มีจำนวน 4 ปี ได้แก่ พ.ศ. 2537, พ.ศ. 2541, พ.ศ. 2542 และ พ.ศ. 2548 โดยในจำนวนนี้มีปีที่แสดงความแตกต่างของค่าการทรุดตัวมากกว่า 4 cm จำนวน 2 ปี คือ พ.ศ. 2541 และพ.ศ. 2542 ดังแสดงในภาพที่ 111 โดยในปี พ.ศ. 2541 มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวเท่ากับ 4.94 cm เกิดขึ้นที่สถานีบ่อน้ำบาดาล Sta57 ในพื้นที่ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ และในปีพ.ศ. 2542 มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวเท่ากับ 4.92 cm เกิดขึ้นที่สถานีบ่อน้ำบาดาล Sta63 ที่บริเวณการเคหะคลองจั่น เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ

จากการตรวจสอบผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองของ Sta57 พบว่าเกิดจากความคลาดเคลื่อนของการตรวจวัดค่าการทรุดตัวในสนาม โดยสามารถสังเกตได้จากข้อมูลการทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในปี พ.ศ. 2541 และ 2542 จะมีค่าแตกต่างกันมากอย่างผิดปกติ โดยในปี พ.ศ. 2541 วัดค่าการทรุดตัวได้ 7.7 cm และปี พ.ศ. 2542 วัดได้ 0 cm ดังแสดงผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองในภาพที่ 112 ซึ่งจากเอกสารรายงานผลการสำรวจระดับการทรุดตัวของพื้นดินในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล ประจำปีงบประมาณ 2550 ของกรมแผนที่ทหารได้รายงานว่า ในปี พ.ศ. 2540 มีการเปลี่ยนหมุดหลักฐานใหม่ ทำให้การตรวจวัดค่าการทรุดตัวในช่วงปี พ.ศ. 2541 และ 2542 เกิดการคลาดเคลื่อน โดยในปี พ.ศ. 2541 ซึ่งเป็นปีแรกหลังจากสร้างหมุดหลักฐานตัวใหม่เสร็จอาจทำให้เกิดการทรุดตัวของชั้นดินมาก และในปี พ.ศ. 2542 ทำให้วัดค่าการทรุดตัวของชั้นดินไม่ได้หรือได้น้อยมาก แต่หลังจากปี พ.ศ. 2542 ค่าการทรุดตัวของชั้นดินก็เป็นปกติ



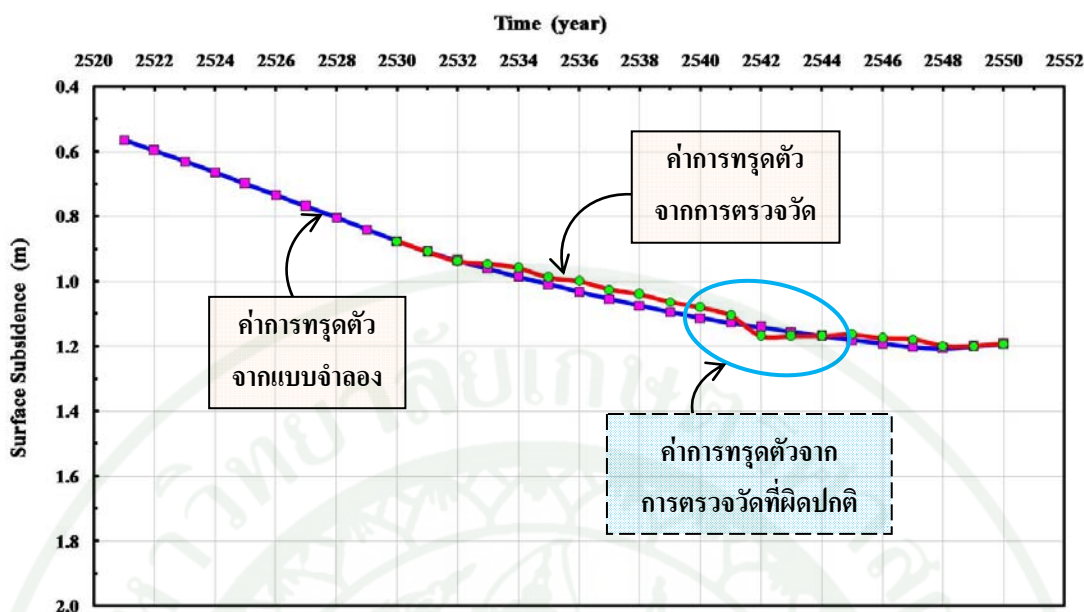
ภาพที่ 111 แสดงพื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าการหาค่าเฉลี่ยแต่ละปีมากกว่า 3 cm



ภาพที่ 112 ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดของสถานีบ่อน้ำบาดาล Sta57

ในกรณีของความแตกต่างของค่าการทรุดตัวที่ Sta63 จากการตรวจสอบผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองพบว่า ลักษณะของค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดจะมีลักษณะที่คล้ายกันกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดของ Sta57 คือ ค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดในปี พ.ศ. 2542 จะมีค่ามากกว่าปี พ.ศ. 2541 และพ.ศ. 2543 อย่างผิดปกติ กล่าวคือในปี พ.ศ. 2541 วัดค่าการทรุดตัวได้ 2.4 cm ปี พ.ศ. 2542 วัดค่าการทรุดตัวได้ 6.3 cm และปี พ.ศ. 2543 วัดค่าการทรุดตัวได้ 0 cm ดังแสดงผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองในภาพที่ 113 ถึงแม้ว่าในเอกสารรายงานผลการสำรวจระดับการทรุดตัวของพื้นดินในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล ประจำปีงบประมาณ 2550 ของกรมแผนที่ทหารจะไม่มีรายงานการเปลี่ยนหมวดหลักฐานใหม่ แต่จากลักษณะของค่าการทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดทำให้สันนิษฐานได้ว่า มีความผิดปกติเกิดขึ้นกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดในปี พ.ศ. 2542 ดังนั้น ความแตกต่างของค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจึงไม่ได้เกิดจากการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางสรุปผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวแต่ละปีในลักษณะภาพรวมของพื้นที่ทั้งหมด และในลักษณะของพื้นที่เฉพาะ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 12 และภาพแสดงพื้นที่ความแตกต่างของค่าการทรุดตัวแต่ละปีทั้งหมด 29 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2522-พ.ศ. 2550 ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก



ภาพที่ 113 ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดของสถานีบ่อน้ำบาดาล Sta63

ตารางที่ 12 สรุปผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวแต่ละปีในลักษณะภาพรวมของพื้นที่ทั้งหมด และในลักษณะของพื้นที่เฉพาะจุด

ลักษณะของการ เปรียบเทียบค่าการทรุดตัว	ภาพรวมของพื้นที่ทั้งหมด ¹ (Global Area)		พื้นที่เฉพาะ ² (Spot Area)		
ความแตกต่างของค่า การทรุดตัว (cm)	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5
จำนวนปี (ปี)	25	4	19	4	2

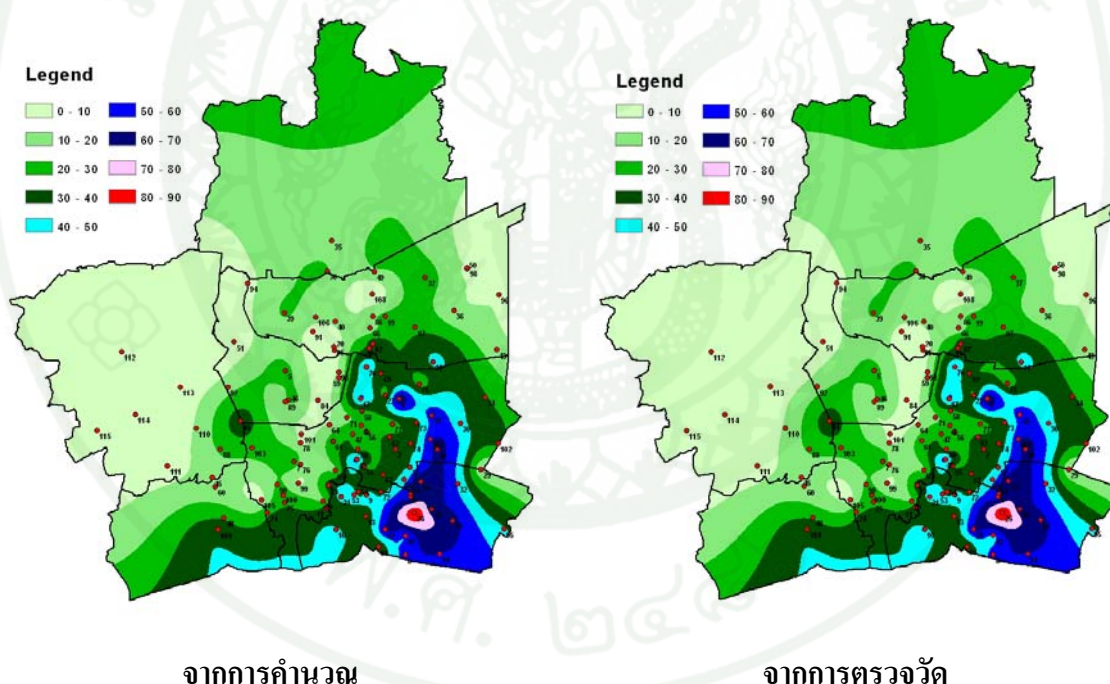
หมายเหตุ ¹พิจารณาพื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวมากกว่า 20% ของพื้นที่ทั้งหมด

²พิจารณาค่าความแตกต่างของค่าการทรุดตัวที่มากกว่า 2 cm ขึ้นไป

การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2522-2550

การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมทั้งหมดจะเปรียบเทียบกันในลักษณะเชิงพื้นที่ โดยเปรียบเทียบพื้นที่การทรุดตัวสะสมทั้งหมด 29 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2522-2550 ระหว่างค่าการทรุดตัวสะสมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าการทรุดตัวสะสมจากการตรวจวัด

ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2522-2550 จะเห็นว่า มีพื้นที่การทรุดตัวที่สอดคล้องกันมากแทบจะไม่มี ความแตกต่างกันเลย ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองได้เลือกใช้ตัวแปรที่ทำให้ได้ผลการทรุดตัวสะสมเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมากที่สุดจึงทำให้ค่าการทรุดตัวสะสมจากการคำนวณและจากการตรวจวัดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2522-2550 สอดคล้องกัน ดังแสดงในภาพที่ 114



ภาพที่ 114 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2522-2550

จากการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัด เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำของแบบจำลองทั้ง 4 วิธี สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถใช้วิเคราะห์ค่าการทรุดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลได้ผลใกล้เคียงกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดเป็นอย่างดี โดยมี

ผลของการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองและจากการตรวจวัดทั้ง 4 วิธี เป็นเครื่องมือพิสูจน์ถึงความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ ผลการเปรียบเทียบทั้ง 4 วิธี สามารถสรุปได้ ดังนี้

วิธีที่ 1 การหาค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (R^2) ของความสัมพันธ์ของค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองและจากการตรวจวัด ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.998

วิธีที่ 2 เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมของแต่ละสถานีบ่อน้ำบาดาลตามเวลา ผลการเปรียบเทียบมีจำนวนสถานีบ่อน้ำบาดาลที่มีระดับความแตกต่างล้มบูรณ์เฉลี่ย 3 ปี ของค่าการทรุดตัวสะสมในระดับที่ 1 (0–2 cm) และระดับที่ 2 (2–4 cm) รวมกันจำนวน 91 สถานีหรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 83% ของจำนวนสถานีบ่อน้ำบาดาลทั้งหมด 110 สถานี

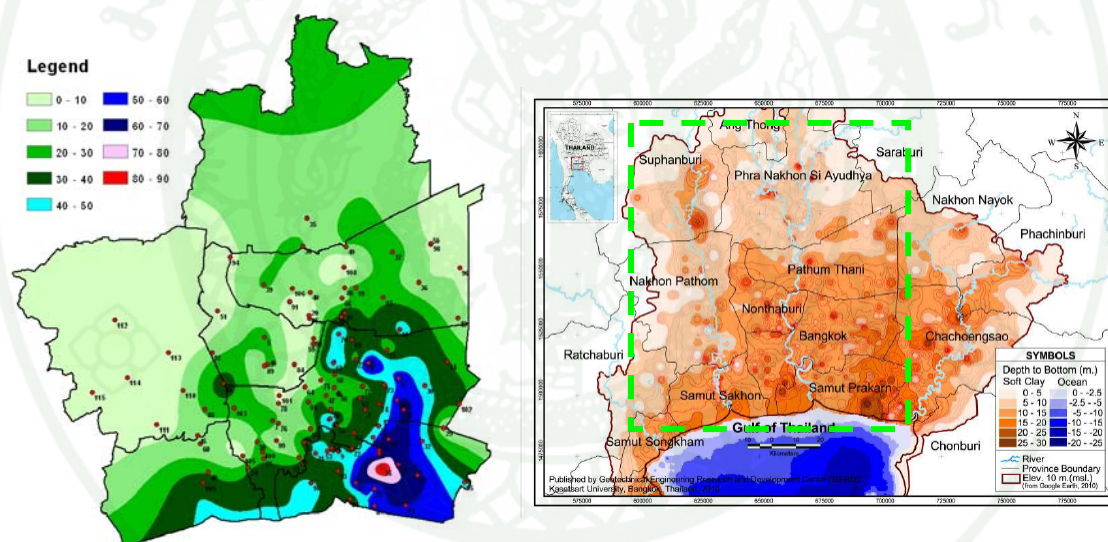
วิธีที่ 3 เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวแต่ละปีในลักษณะเชิงพื้นที่ ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวแต่ละปีในลักษณะของภาพรวมของพื้นที่ทั้งหมดพบว่า จำนวนปีที่มีค่าความแตกต่างของการทรุดตัวอยู่ในช่วง 0–1 cm จำนวน 25 ปี จากจำนวนทั้งหมด 29 ปี (2522–2550) หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 86%

ส่วนผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวแต่ละปีในลักษณะของพื้นที่เฉพาะพบว่า จำนวนปีที่มีพื้นที่แสดงความแตกต่างของค่าการทรุดตัวมากกว่า 3 cm มีจำนวน 4 ปี เท่านั้น โดยในจำนวนนี้มีปีที่แสดงความแตกต่างของค่าการทรุดตัวมากกว่า 4 cm รวมอยู่ด้วยจำนวน 2 ปี

วิธีที่ 4 เปรียบเทียบการทรุดตัวสะสมทั้งหมดตั้งแต่ พ.ศ. 2522-2550 ในลักษณะของพื้นที่ ผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมทั้งหมดตั้งแต่ พ.ศ. 2522-2550 ในลักษณะของพื้นที่พบว่า ค่าการทรุดตัวสะสมทั้งหมดตั้งแต่ พ.ศ. 2522-2550 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกับค่าการทรุดตัวสะสมที่ได้จากการตรวจวัดมากดังจะเห็นได้ในภาพที่ 114

ดังนั้น จากผลของการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองและจากการตรวจวัดทั้ง 4 วิธีสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของชั้นดินเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลได้เป็นอย่างดี

แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวจากแบบจำลองและจากการตรวจวัดส่วนใหญ่จะให้ผลที่สอดคล้องกันดี แต่ยังมีบางจุดหรือบางพื้นที่ที่มีความแตกต่างของค่าการทรุดตัวค่อนข้างสูงดังจะเห็นได้จากผลการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมของแต่ละสถานีบ่อน้ำบาดาลในวิธีที่ 2 โดยผลการเปรียบเทียบมีจำนวนสถานีบ่อน้ำบาดาลที่มีระดับความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวในระดับที่ 3 (4–6 cm) และระดับที่ 4 (6–8 cm) ประมาณ 15–20% ของจำนวนสถานีบ่อน้ำบาดาลทั้งหมด 110 สถานี ส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณพื้นที่ทางด้านตะวันออกและด้านใต้ของพื้นที่ศึกษา ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของเชิดพันธุ์ (2553) ที่พบว่า พื้นที่บริเวณนี้เป็นพื้นที่ที่มีชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก (Soft to Very Soft Clay) หนาประมาณ 14–18 m โดยเฉพาะพื้นที่ทางด้านตะวันออกชั้นดินเหนียวอ่อนจะมีความหนามากกว่า 18 m ดังแสดงในภาพที่ 115 ซึ่งอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดมีความสอดคล้องกันค่อนข้างน้อย



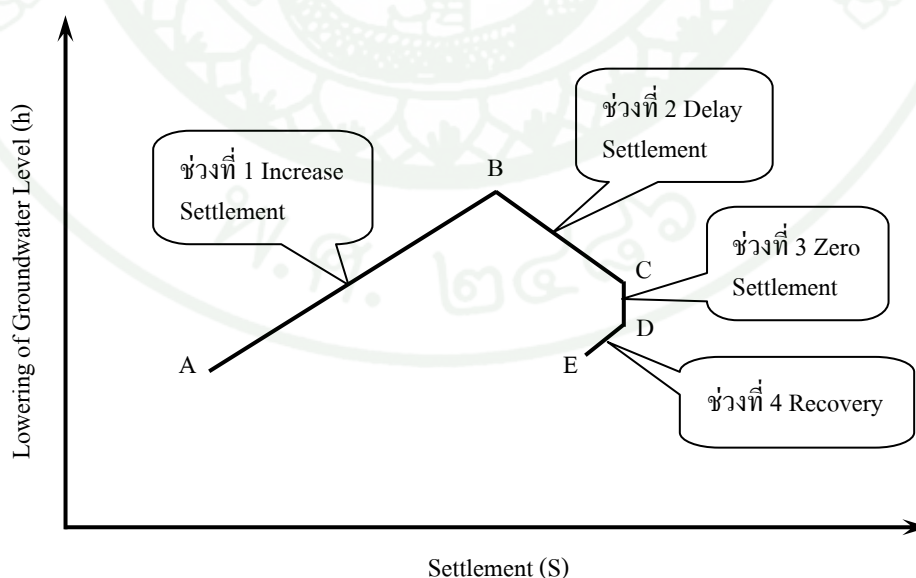
ภาพที่ 115 เปรียบเทียบพื้นที่การทรุดตัวซึ่งสอดคล้องกับระดับความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก

ที่มา: เชิดพันธุ์ (2553)

ลักษณะเฉพาะของการทรุดตัวของชั้นดินเมื่อระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลง

ผลการวิจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลจะสัมพันธ์กับพฤติกรรมการทรุดตัวของชั้นดิน โดยมีความสัมพันธ์ในลักษณะเฉพาะที่มีรูปแบบเหมือนกันในทุกชั้นน้ำ ซึ่งสามารถเรียกได้ว่าเป็นอัตลักษณ์ของแต่ละชั้นน้ำบาดาลในตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ กัน โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อมีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้อุปโภคบริโภคมากจนทำให้ระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของชั้นดินในเวลาต่อมา และเมื่อมีการหยุดสูบน้ำทำให้ระดับน้ำบาดาลหยุดลดลงหรือมีระดับคงที่และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ช่วงระยะเวลาที่มีการหยุดสูบน้ำบาดาล และระดับน้ำเริ่มคงที่การทรุดตัวของชั้นดินจะยังคงเกิดขึ้นต่อไปอีกระยะเวลาหนึ่ง และการทรุดตัวของชั้นดินจะหยุดหรือมีค่าการทรุดตัวเป็นศูนย์ถ้าระดับน้ำบาดาลยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และสุดท้ายชั้นดินจะเกิดการพองตัว

การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการทรุดตัวของชั้นดินเมื่อระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงนี้ สามารถเห็นรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนเมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินตั้งแต่ระดับน้ำบาดาลเริ่มลดลงจนถึงระดับน้ำเพิ่มขึ้น โดยสามารถเขียนรูปแบบทั่วไปของความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ ดังแสดงในภาพที่ 116 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า **The Characteristic of Aquifer Drawdown and Settlement หรือ CADS**



ภาพที่ 116 รูปแบบทั่วไปของความสัมพันธระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดิน

รูปแบบทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดิน (CADS) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วง โดยแต่ละช่วงจะมีพฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาล ดังนี้

ช่วงที่ 1 Increase Settlement เป็นช่วงที่ระดับน้ำบาดาลลดลงและค่าการทรุดตัวเพิ่มขึ้น

ช่วงที่ 2 Delay Settlement เป็นช่วงที่ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นและค่าการทรุดตัวเพิ่มขึ้น

ช่วงที่ 3 Zero Settlement เป็นช่วงที่ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นและค่าการทรุดตัวหยุดนิ่ง

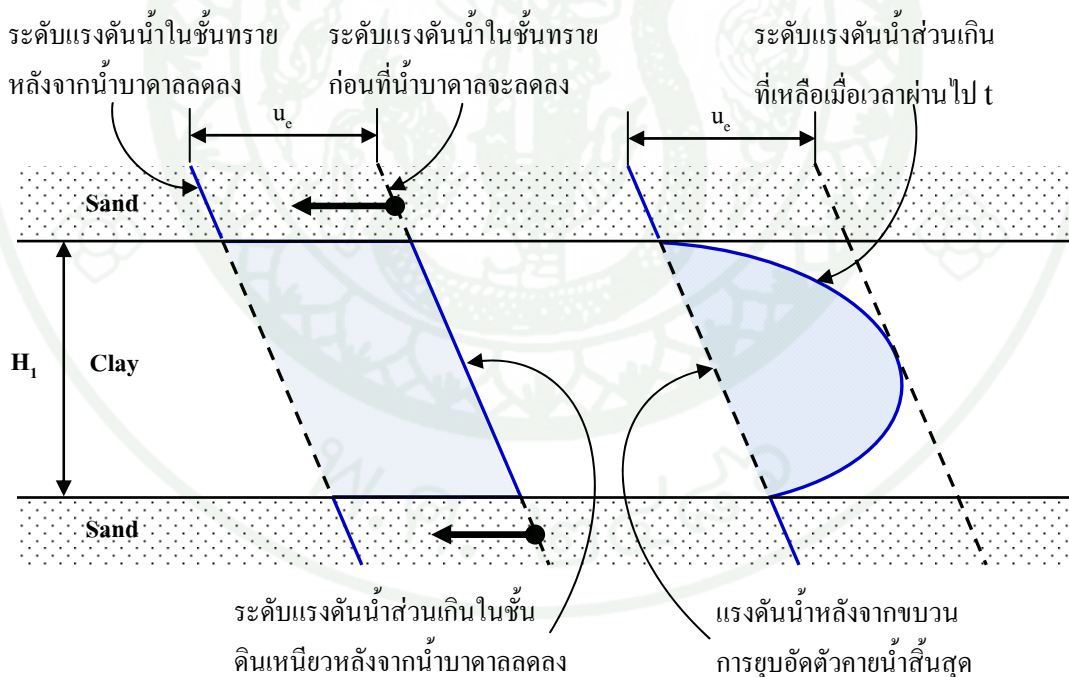
ช่วงที่ 4 Recovery เป็นช่วงที่ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นและมีการพองตัวของชั้นดินเหนียว

จะเห็นว่าช่วงระยะเวลาที่มีการสูบน้ำบาดาลจนทำให้ระดับน้ำลดลง และมีการหยุดสูบน้ำ ระดับน้ำเริ่มคงที่ จนถึงช่วงระยะเวลาที่ระดับน้ำเพิ่มขึ้นจะเกิดกระบวนการทรุดตัวของชั้นดิน โดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 การทรุดตัวเพิ่มขึ้น (Increase Settlement), ช่วงที่ 2 การทรุดตัวเพิ่มขึ้นแต่ด้วยอัตราที่ลดลงหรือชะลอ (Delay Settlement), ช่วงที่ 3 การทรุดตัวหยุดนิ่ง (Zero Settlement) และช่วงที่ 4 ชั้นดินพองตัว (Recovery) ซึ่งกระบวนการทรุดตัวของชั้นดินทั้ง 4 ช่วงนี้จะเกิดขึ้นเสมอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลตั้งแต่เริ่มลดลงจนกระทั่งมีระดับน้ำเพิ่มขึ้นจะด้วยสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งก็ตาม และไม่จำเป็นต้องเรียงลำดับจากช่วงที่ 1 ถึงช่วงที่ 4 โดยแต่ละช่วงของพฤติกรรมทรุดตัวสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในแต่ละช่วง เช่น เมื่อมีการสูบน้ำบาดาลจนระดับน้ำลดลงพฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินจะอยู่ในช่วงที่ 1 การทรุดตัวเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการหยุดสูบน้ำระดับน้ำเริ่มคงที่และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ การทรุดตัวของชั้นดินจะอยู่ในช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 นั่นคือ ชั้นดินยังคงทรุดตัวแต่จะชะลอการทรุดตัวลงจนกระทั่งหยุดนิ่ง ณ จุดนี้ถ้าเริ่มมีการสูบน้ำบาดาลใหม่จนทำให้ระดับน้ำบาดาลลดลงอีกครั้ง พฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินจะกลับมาอยู่ในช่วงที่ 1 ใหม่อีกครั้งหรือมีการทรุดตัวเพิ่มขึ้น

พฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินเมื่อระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลง

การค้นพบลักษณะเฉพาะของพฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินเมื่อระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงซึ่งได้แบ่งพฤติกรรมออกเป็น 4 ช่วง ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น สามารถอธิบายการเกิดพฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินเนื่องจากระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงของ CADS โดยละเอียดได้ ดังนี้

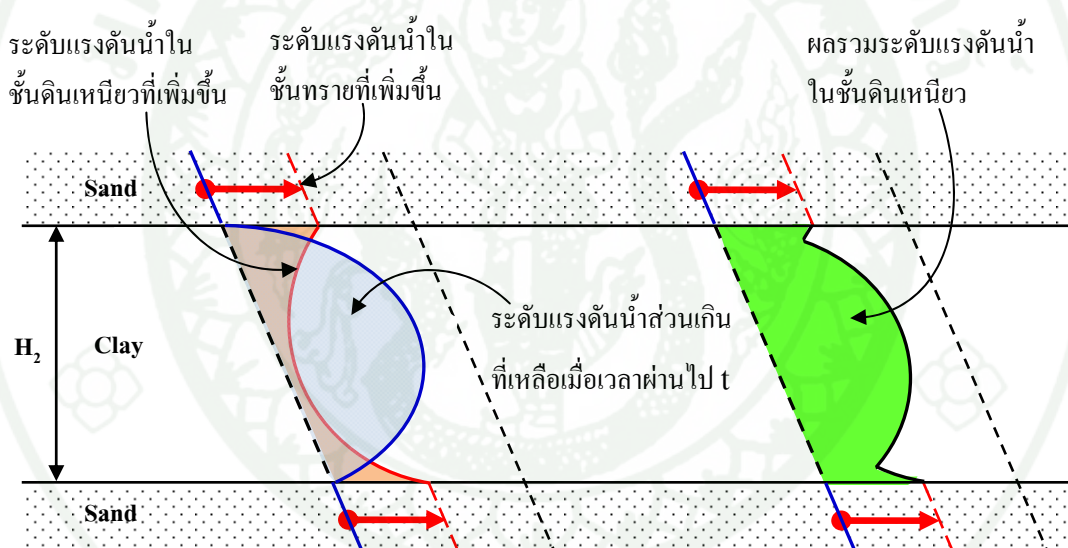
ช่วงที่ 1 Increase Settlement ซึ่งเป็นช่วงที่มีการสูบน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนทำให้ระดับน้ำลดลง (หรือ h เพิ่มขึ้น, โดย h หมายถึง ระยะจากผิวดินถึงระดับน้ำในบ่อบาดาล) และชั้นดินมีการทรุดตัวเพิ่มขึ้น ลักษณะของ CADS ช่วงนี้ค่าการทรุดตัว (S) จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับระดับน้ำบาดาลที่ลดลง (h) จากจุด A ไปจุด B การทรุดตัวของชั้นดินในช่วงนี้เกิดจากขบวนการยุบอัดตัวคายน้ำโดยขณะที่ระดับน้ำบาดาลลดลงแรงดันน้ำในชั้นทรายซึ่งเป็นชั้นน้ำบาดาล (Aquifer) จะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่แรงดันน้ำในชั้นดินเหนียวจะลดลงอย่างช้า ๆ เนื่องจากมีความสามารถในการระบายน้ำน้อยกว่า ทำให้เกิดเป็นแรงดันน้ำส่วนเกินภายในชั้นดินเหนียว ดังแสดงในภาพที่ 117 แรงดันน้ำส่วนเกินนี้จะถูกระบายออกไปอย่างช้า ๆ พร้อมกับการยุบตัวของชั้นดินเหนียว และการยุบตัวนี้จะสิ้นสุดเมื่อแรงดันน้ำส่วนเกินถูกระบายออกไปหมด ค่าความชันของ CADS ($\frac{\Delta h}{\Delta S}$) จะมีค่าเป็นบวก และส่วนกลับของค่าความชัน ($\frac{\Delta S}{\Delta h}$) หมายถึง อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเป็นเซนติเมตรต่อการลดลงของระดับน้ำบาดาล 1 เมตร ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละชั้นน้ำ โดยจะได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 117 ภาพจำลองการเกิดขบวนการยุบอัดตัวคายน้ำภายในชั้นดินเหนียวเมื่อระดับน้ำบาดาลลดลง

ช่วงที่ 2 Delay Settlement เป็นช่วงที่ระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้น (h ลดลง) อาจเนื่องจากการหยุดสูบน้ำบาดาลหรือมีอัตราการสูบลดลงทำให้ปริมาณน้ำที่ถูกสูบออกไปน้อยกว่าปริมาณน้ำ

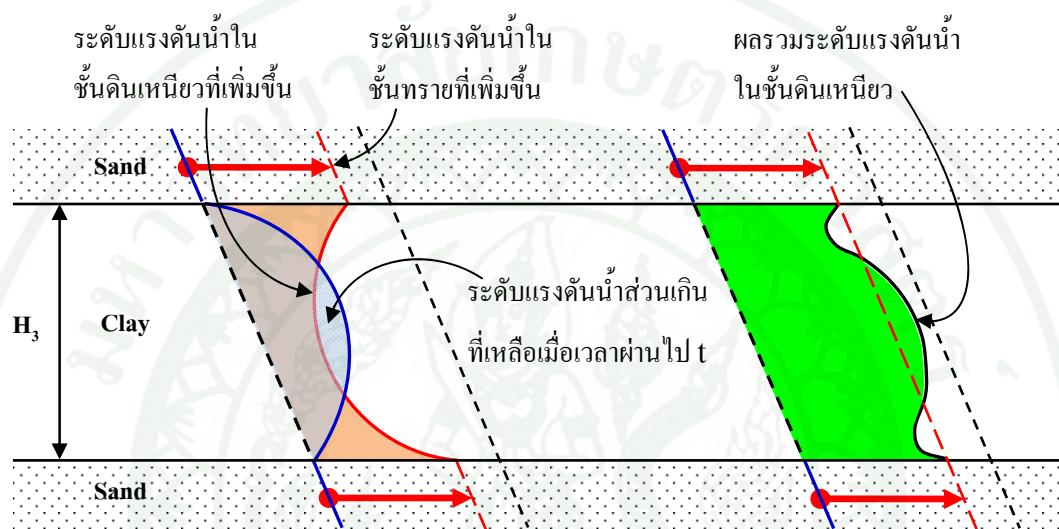
ที่ไหลเข้ามาซดเซย แต่การทรุดตัวของชั้นดินจะยังไม่หยุดนิ่งทันที ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกขบวนการยุบอัดตัวคายนํ้าภายในชั้นดินเหนียวจากผลของการสูบน้ำในช่วงที่ 1 ยังไม่สิ้นสุด ถึงแม้การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำในชั้นน้ำบาดาลจะทำให้ระดับแรงดันน้ำในชั้นทรายเพิ่มขึ้น แต่ระดับแรงดันน้ำในชั้นดินเหนียวที่เพิ่มขึ้นยังไม่มากพอที่จะทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินในชั้นดินเหนียวหมดไปเนื่องจากมีความสามารถในการไหลซึมได้น้อยกว่า ดังนั้นขบวนการยุบอัดตัวคายนํ้าจึงยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ชั้นดินเหนียวยังคงมีการทรุดตัวเกิดขึ้น แต่อัตราการทรุดตัวจะเริ่มลดลง ดังแสดงในภาพที่ 118 ลักษณะของ CADs ช่วงนี้จะเป็นเส้นตรงจากจุด B ไปจุด C ในภาพที่ 116 และมีค่าความชันเป็นลบ โดยค่าการทรุดตัว (S) จะเป็นปฏิภาคผกผันกับระดับน้ำบาดาล (h) ส่วนกลับของค่าความชัน ($\frac{\Delta S}{\Delta h}$) หมายถึง อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเป็นเซนติเมตรต่อการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำบาดาล 1 เมตร ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 118 ภาพจำลองขบวนการยุบอัดตัวคายนํ้าและการพองตัวภายในชั้นดินเหนียวเมื่อระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้นในช่วงที่ 2 ของ CADs

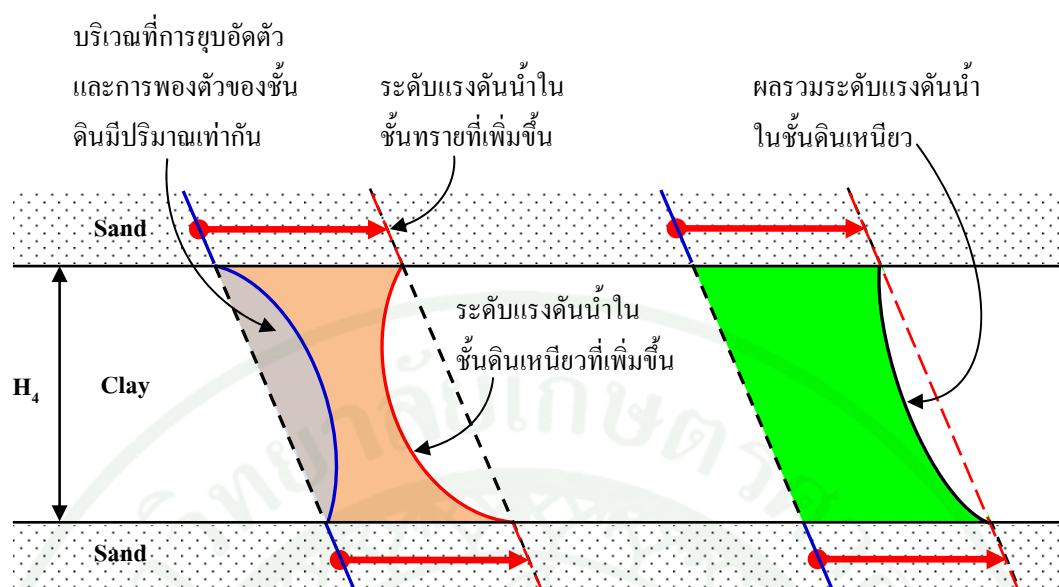
ช่วงที่ 3 Zero Settlement เป็นช่วงที่ระดับน้ำบาดาลยังคงเพิ่มสูงขึ้นต่อจากช่วงที่ 2 แต่ค่าการทรุดตัวสะสมจะเริ่มคงที่หรือหยุดนิ่ง ลักษณะของ CADs จะเป็นเส้นตรงในแนวดิ่งจากจุด C ถึงจุด D ในภาพที่ 116 ลักษณะเช่นนี้เกิดจากระดับน้ำในชั้นน้ำบาดาลที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเริ่มทำให้ระดับแรงดันน้ำในชั้นดินเหนียวมากพอที่จะหยุดขบวนการยุบอัดตัวคายนํ้าภายในชั้นดินเหนียวได้บางส่วน ทำให้การยุบอัดตัวในชั้นดินเหนียวบางจุดเริ่มหยุดลงและบางจุดมีการพองตัวเกิดขึ้น ขณะที่บางจุดภายในชั้นดินเหนียวก็ยังคงมีการยุบอัดตัวเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 119

โดยปริมาณการยุบตัวและการพองตัวจะเกิดขึ้นเท่า ๆ กัน หรือมีค่าใกล้เคียงกันทำให้ค่าการทรุดตัวตลอดทั้งชั้นดินเหนียวมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งในบางสถานีสังเกตการณ์จะปรากฏเพียงช่วงสั้น ๆ และบางสถานีฯ อาจไม่ปรากฏชัดเจน เนื่องจากช่วงระยะเวลาที่ชั้นดินเกิดการทรุดตัวและพองตัวในปริมาณที่เท่า ๆ กันนั้นอาจเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาเพียงสั้น ๆ หรือไม่ตรงกับช่วงระยะเวลาของการบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 119 ภาพจำลองขบวนการยุบอัดตัวคายน้ำและการพองตัวภายในชั้นดินเหนียวเมื่อระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้นในช่วงที่ 3 ของ CADS

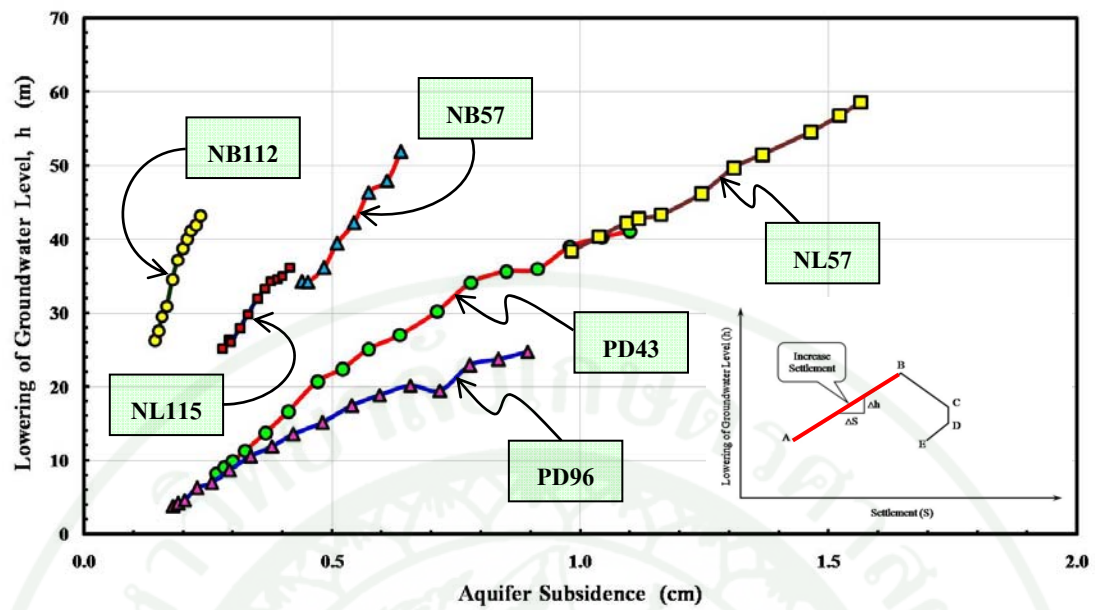
ช่วงที่ 4 Settlement Recovery เป็นช่วงที่ระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้น (h ลดลง) และชั้นดินจะมีการคืนตัวเนื่องจากผลของการเพิ่มระดับน้ำบาดาลอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 ทำให้ระดับแรงดันน้ำภายในชั้นดินเหนียวเพิ่มมากขึ้นตลอดทั้งชั้นดินจนสามารถหยุดขบวนการอัดตัวคายน้ำภายในชั้นดินเหนียวได้ตลอดทั้งชั้น ส่งผลให้ชั้นดินมีการคืนตัวในปริมาณที่มากกว่าการยุบอัดตัว ดังแสดงในภาพที่ 120 ลักษณะของ CADS จะเป็นเส้นตรงจากจุด D ไปจุด E ในภาพที่ 116



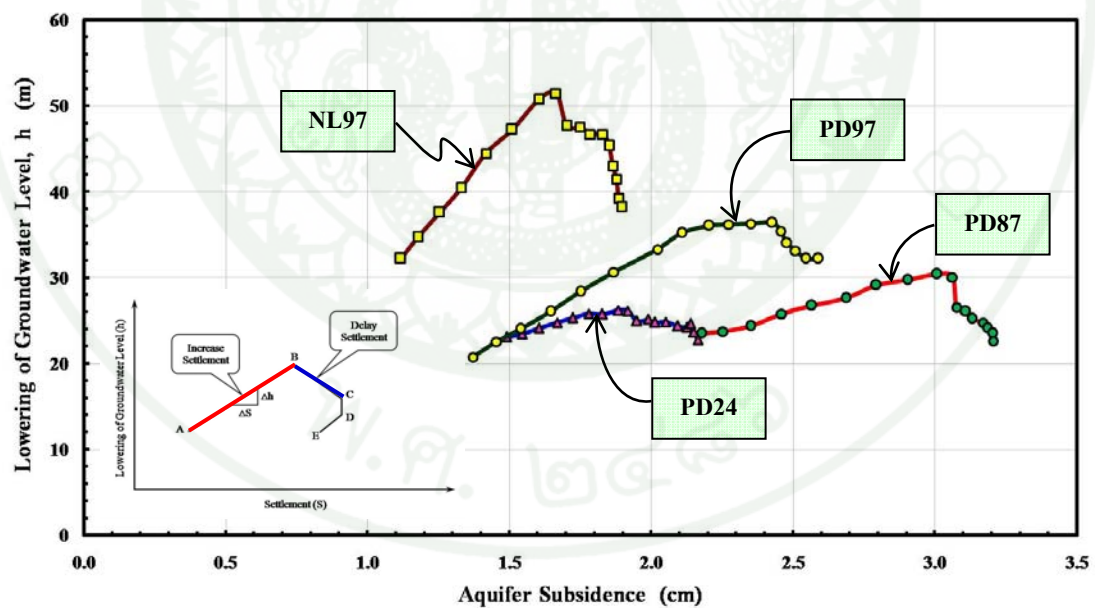
ภาพที่ 120 ภาพจำลองขบวนการยุบตัวคายน้ำและการคืนตัวภายในชั้นดินเหนียวเมื่อระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้นในช่วงที่ 4 ของ CADS

การทำนายพฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินโดยใช้ CADS

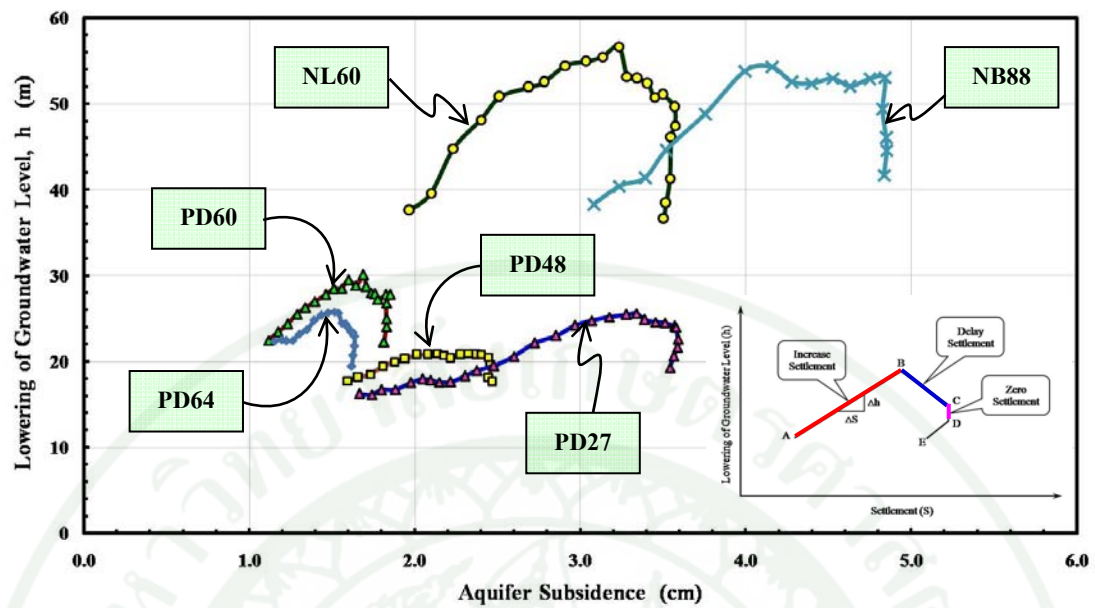
CADS ของแต่ละชั้นน้ำบาดาลอาจจะแสดงช่วงของความสัมพันธ์ไม่ครบทั้ง 4 ช่วง ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลในชั้นน้ำนั้น ๆ โดยชั้นน้ำหนึ่งอาจแสดงรูปแบบของ CADS ในช่วงที่ 1 Increase Settlement เพียงช่วงเดียว ถ้าชั้นน้ำนั้นกำลังอยู่ในช่วงของการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นและทำให้ระดับน้ำลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพที่ 121 และเมื่อไรที่มีการลดปริมาณการสูบลงหรือมีการหยุดสูบจนกระทั่งระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องลักษณะของ CADS ก็จะแสดงรูปแบบในช่วงที่ 2 Delay Settlement, ช่วงที่ 3 Zero Settlement และช่วงที่ 4 Settlement Recovery ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 122 - 124 และในกรณีที่มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ใหม่จนทำให้ระดับน้ำลดลงอีกครั้งหนึ่ง ลักษณะของ CADS ก็จะแสดงรูปแบบช่วงที่ 1 ถึงช่วงที่ 4 ใหม่อีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 125



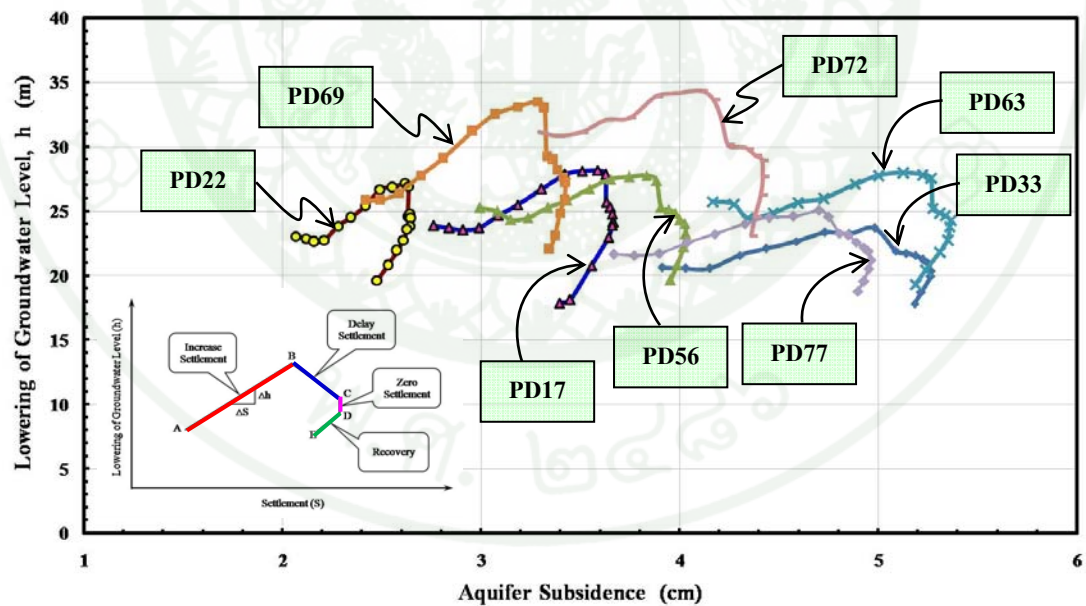
ภาพที่ 121 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินซึ่งแสดง
ความสัมพันธ์ช่วงที่ 1 Increase Settlement



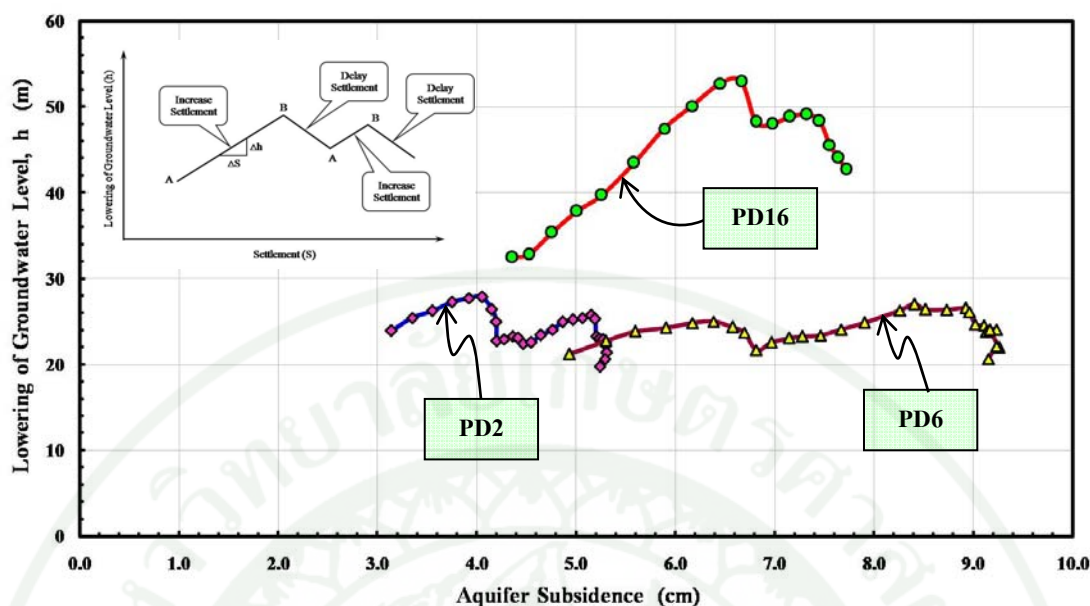
ภาพที่ 122 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินซึ่งแสดง
ความสัมพันธ์ช่วงที่ 1-2 Delay Settlement



ภาพที่ 123 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินซึ่งแสดง
ความสัมพันธ์ช่วงที่ 1-3 Zero Settlement



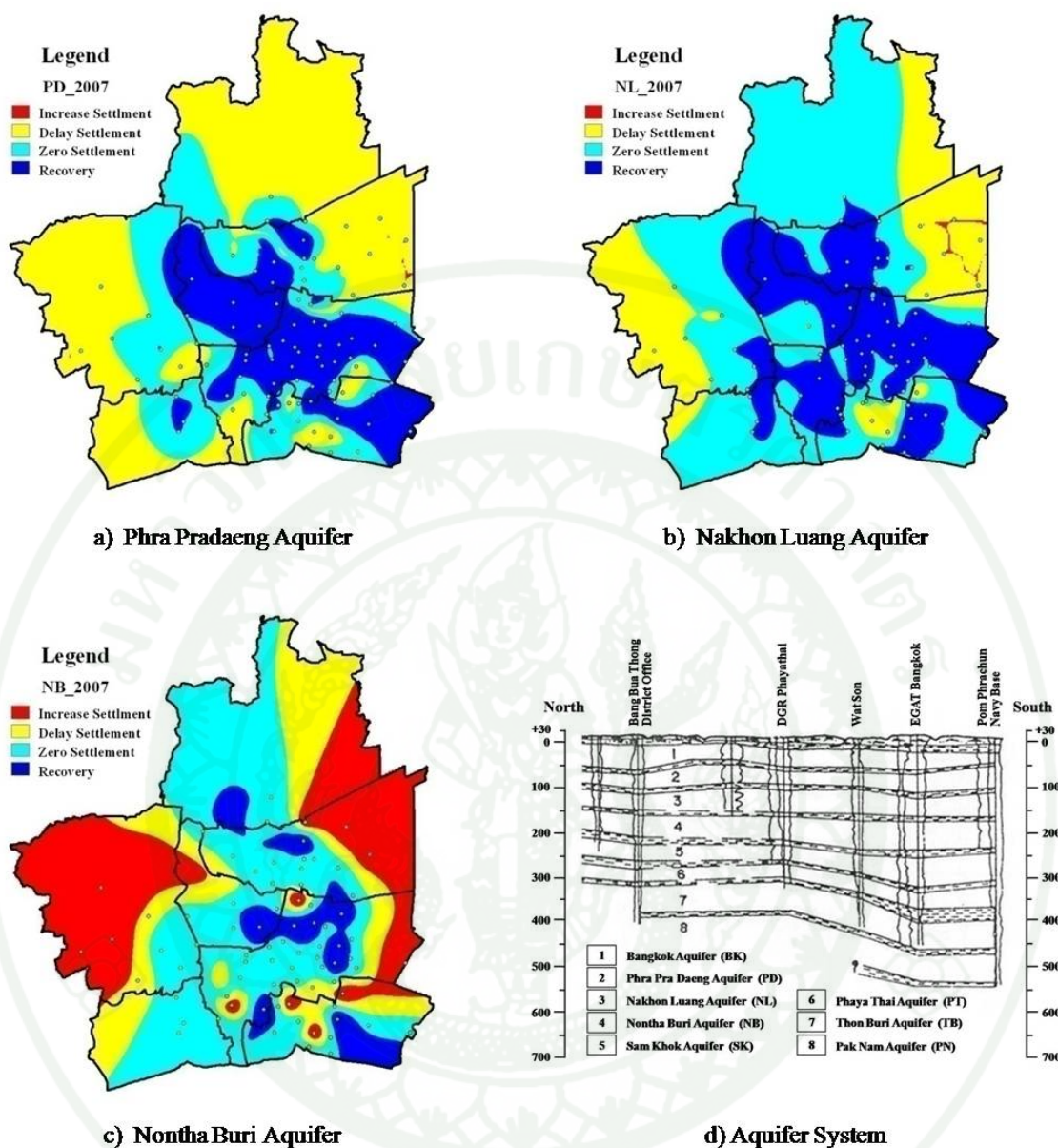
ภาพที่ 124 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินซึ่งแสดง
ความสัมพันธ์ช่วงที่ 1-4 Recovery



ภาพที่ 125 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินซึ่งแสดง
ความสัมพันธ์แบบย้อนกลับ

ดังนั้น CADS สามารถใช้พยากรณ์พฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินที่จะเกิดขึ้นต่อไปในอนาคตของพื้นที่ต่าง ๆ ได้ถ้าหากมีการจดบันทึกการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในพื้นที่นั้น ๆ อย่างต่อเนื่อง เช่น ในภาพที่ 121 แสดงลักษณะของ CADS ช่วงที่ 1 เพียงช่วงเดียว แสดงว่าบริเวณพื้นที่นั้นในช่วงเวลาที่บันทึกข้อมูล (พ.ศ. 2529-2539) ปริมาณการใช้น้ำบาดาลยังคงเพิ่มขึ้น ทำให้ระดับน้ำในชั้นน้ำบาดาลลดลงอย่างต่อเนื่องและชั้นดินมีการทรุดตัวเพิ่มขึ้น ถ้าไม่มีการควบคุมการใช้น้ำบาดาลและระดับน้ำบาดาลยังคงลดลงต่อไปเรื่อย ๆ ค่าการทรุดตัวของชั้นดินก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ถ้าสามารถควบคุมระดับน้ำบาดาลให้มีระดับคงที่หรือเพิ่มขึ้นค่าการทรุดตัวของชั้นดินบริเวณนี้ก็จะยังคงเพิ่มขึ้นอีกชั่วระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นค่าการทรุดตัวของชั้นดินก็จะคงที่หรือหยุดนิ่งและชั้นดินมีการพองตัวตามลำดับ

จากข้อมูลระดับน้ำบาดาลและค่าการทรุดตัวตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปี พ.ศ. 2550 เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ CADS ของแต่ละสถานีก็จะทราบว่าในปี พ.ศ. 2550 แต่ละสถานีมีช่วงการทรุดตัวสุดท้ายอยู่ในช่วงไหน และเมื่อนำมาประมวลผลในรูปของพื้นที่จะทำให้ทราบสถานการณ์ของการทรุดตัวของพื้นที่ต่าง ๆ ในปี พ.ศ. 2550 ว่าอยู่ในช่วงไหนของการทรุดตัว และสามารถพยากรณ์ช่วงของการทรุดตัวต่อไปในอนาคตของแต่ละพื้นที่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 126



ภาพที่ 126 พื้นที่ที่แสดงช่วงของการทรุดตัวสุดท้ายในปี พ.ศ. 2550

จากภาพที่ 126 จะเห็นว่า ในปี พ.ศ. 2550 พื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่จะมีช่วงการทรุดตัวสุดท้ายอยู่ในช่วงที่ 3 Zero Settlement การทรุดตัวคงที่หรือหยุดนิ่ง และช่วงที่ 4 Recovery ชั้นดินมีการคืนตัว ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่กรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ปัจจุบันมีการควบคุมและบริหารจัดการน้ำบาดาล แสดงให้เห็นว่ามาตรการที่ใช้ในการบริหารจัดการน้ำบาดาลช่วยให้อัตราการฟื้นคืนดินทรุดในพื้นที่ศึกษาเริ่มเห็นผลไปในทางที่ดีขึ้น

ส่วนพื้นที่ที่ควรเฝ้าระวังคือ พื้นที่บริเวณด้านตะวันออกและตะวันตกของพื้นที่ศึกษาซึ่งมีการทรุดตัวอยู่ในช่วงที่ 1 Increase Settlement และช่วงที่ 2 Delay Settlement ของ CADS โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีการทรุดตัวอยู่ในช่วงที่ 2 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ระดับน้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้นและการทรุดตัวอยู่ในช่วงของการชะลอตัว ถ้ามีการบริหารจัดการและควบคุมการสูบน้ำบาดาลให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมการทรุดตัวของพื้นที่นี้ก็จะเข้าสู่ช่วงที่ 3 และช่วงที่ 4 ของ CADS ต่อไป ซึ่งจะทำให้สถานการณ์การทรุดตัวของพื้นที่นี้ดีขึ้น แต่ถ้ามีการอนุญาตให้สูบน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยไม่มีการควบคุมและทำให้ระดับน้ำลดลงการทรุดตัวของพื้นที่นี้จะกลับไปอยู่ในช่วงที่ 1 หรือมีการทรุดตัวเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง

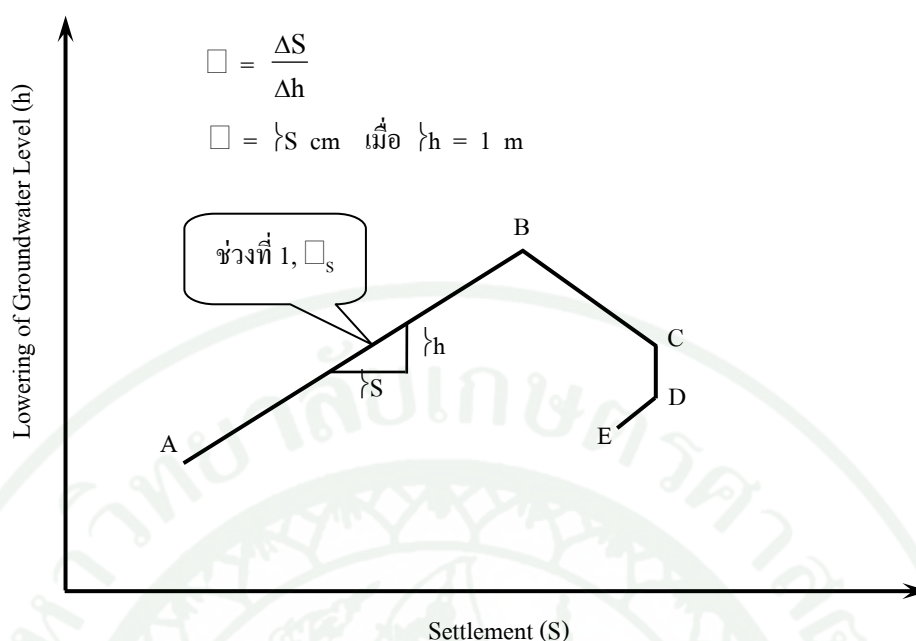
อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเมื่อระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลง

รูปแบบทั่วไปของ CADS ในภาพที่ 116 จะเห็นว่ารูปแบบลักษณะของช่วงที่ 1 Increase Settlement ค่าการทรุดตัว (S) จะเพิ่มขึ้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่าระดับน้ำบาดาลที่ลดลง (h) โดยลักษณะของเส้นความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงเฉียงขึ้นจากจุด A ไปจุด B ซึ่งมีค่าความชันเป็นบวก ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังแสดงในสมการที่ (77)

$$\text{ความชันของช่วงที่ 1 Increase Settlement} = \frac{\Delta h}{\Delta S} \quad (77)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } \Delta h &= \text{การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาล หน่วยเป็น เมตร} \\ \Delta S &= \text{การเปลี่ยนแปลงของค่าการทรุดตัว หน่วยเป็น เซนติเมตร} \end{aligned}$$

ดังนั้น ส่วนกลับของค่าความชันหรือ Inverse Slope ($\frac{\Delta S}{\Delta h}$) หมายถึง อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเป็นเซนติเมตรต่อการลดลงของระดับน้ำบาดาล 1 เมตร ซึ่งค่า Inverse Slope นี้สามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดปริมาณการทรุดตัวของชั้นดินในแต่ละพื้นที่เมื่อระดับน้ำบาดาลลดลง 1 เมตร หรือค่าความไวต่อการทรุดตัวของชั้นดินเมื่อระดับน้ำบาดาลลดลง 1 เมตร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะให้ชื่อว่า Settlement Sensitivity Index, $\square_s$ ดังแสดงในภาพที่ 127

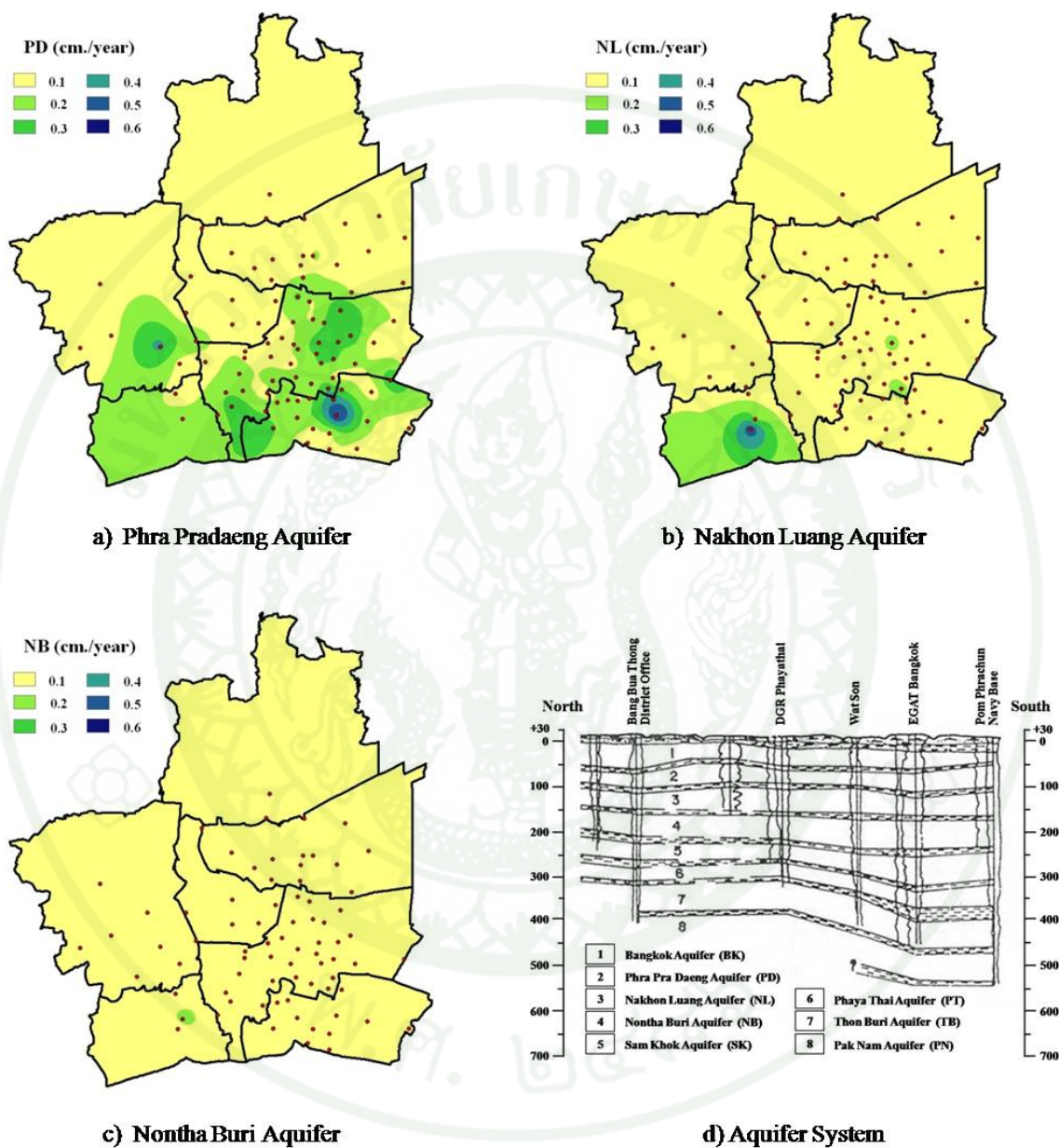


ภาพที่ 127 ส่วนกลับของค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์ CADS ช่วงที่ 1

จากผลการวิจัยสามารถหาค่า $\square_s$ ของแต่ละชั้นน้ำได้ และเมื่อนำมาประมวลผลเชิงพื้นที่ในขอบเขตของพื้นที่ที่ศึกษาพบว่า ชั้นน้ำพระประแดงและชั้นน้ำนครหลวงแสดงพื้นที่ที่มีค่า $\square_s$ สูงที่บริเวณตอนล่างของพื้นที่ศึกษา โดยมีค่า $\square_s$ สูงสุดประมาณ 0.5 cm/m/y ที่บริเวณ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ ในชั้นน้ำพระประแดง และบริเวณ อ.เมือง จ.สมุทรสาคร ในชั้นน้ำนครหลวง ส่วนในชั้นน้ำนนทบุรีแสดงค่า $\square_s$ น้อยมากประมาณ 0.1 cm/m/y ดังแสดงในภาพที่ 128 สาเหตุที่ชั้นน้ำพระประแดงและชั้นน้ำนครหลวงแสดงค่า $\square_s$ สูงที่บริเวณตอนล่างของพื้นที่ศึกษาอาจเนื่องจากบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีชั้นดินเหนียวอ่อนหนามากซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของเชิดพันธุ์ (2553) ดังแสดงในภาพที่ 116 ส่วนสาเหตุที่ชั้นน้ำนนทบุรีแสดงค่า $\square_s$ น้อยมากอาจเนื่องจากชั้นน้ำนนทบุรีเป็นชั้นน้ำที่อยู่ในระดับลึกชั้นดินเหนียวมีความแข็งมากกว่าจึงมีอัตราการทรุดตัวน้อยกว่า

การทราบค่า $\square_s$ ของแต่ละพื้นที่และแต่ละชั้นน้ำสามารถนำมาบริหารจัดการน้ำบาดาลเพื่อควบคุมปริมาณการทรุดตัวของชั้นดินในแต่ละพื้นที่ได้ เช่น การสูบน้ำบาดาลในชั้นน้ำพระประแดงในพื้นที่ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ จะทำให้เกิดการทรุดตัวของชั้นดินสูงกว่าในพื้นที่อื่น ๆ เนื่องจากมีค่า $\square_s$ สูงสุดประมาณ 0.5 cm/m ดังนั้น ควรมีการควบคุมหรือจำกัดปริมาณการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่บริเวณนี้ เพื่อรักษาระดับการทรุดตัวของชั้นดินให้เกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ เช่นเดียวกับการสูบน้ำในชั้นน้ำนครหลวง พื้นที่ที่ควรมีการควบคุมหรือจำกัดปริมาณการสูบน้ำบาดาลคือ บริเวณ อ.เมือง จ.สมุทรสาคร เนื่องจากมีค่า $\square_s$ สูงสุดประมาณ 0.5-0.6 cm/m หรือใน

กรณีที่มีความจำเป็นไม่สามารถหลีกเลี่ยงการสูบน้ำในพื้นที่ที่มีค่า $\square_s$ สูงได้ ก็ควรอนุญาตให้มีการสูบน้ำในชั้นน้ำที่อยู่ลึกถัดลงไปจากชั้นน้ำพระประแดงและชั้นน้ำนครหลวงเนื่องจากมีค่า $\square_s$ ต่ำ



ภาพที่ 128 แสดงค่า $\square_s$ ของชั้นน้ำพระประแดง ชั้นน้ำนครหลวง และชั้นน้ำนนทบุรี

ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในอนาคต

การวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในอนาคตเป็นระยะเวลา 20 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551–2570 มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่ยอมรับได้โดยมีค่าการทรุดตัวของชั้นดินไม่เกินค่าที่กำหนด และสามารถนำผลการวิเคราะห์ไปพิจารณาเพื่อการบริหารจัดการและควบคุมการใช้น้ำบาดาลได้ ข้อมูลระดับน้ำบาดาลที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวเป็นข้อมูลที่ได้จากโครงการศึกษาผลกระทบการแก้ไขปัญหาค่าการใช้น้ำบาดาลเกินปริมาณสมมูลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการวิเคราะห์การไหลของน้ำในแบบจำลองตามการสมมติสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม MODFLOW ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลระดับน้ำบาดาลส่วนนี้มาใช้ในการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในอนาคตตามการสมมติสถานการณ์ของการสูบน้ำ 5 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 สมมติให้มีการสูบน้ำบาดาลในปริมาณที่ไม่ทำให้ระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงหรือรักษาระดับน้ำบาดาลให้มีระดับคงที่เท่ากับระดับน้ำของปี พ.ศ. 2550

กรณีที่ 2 สมมติให้มีการสูบน้ำบาดาลในอัตราคงที่ ตามอัตราการสูบของปี พ.ศ. 2550 โดยแบ่งเป็น 5 ระดับ ดังนี้

- 2.1 ให้มีอัตราการสูบน้ำบาดาล 50% ของอัตราการสูบในปี พ.ศ. 2550
- 2.2 ให้มีอัตราการสูบน้ำบาดาล 80% ของอัตราการสูบในปี พ.ศ. 2550
- 2.3 ให้มีอัตราการสูบน้ำบาดาล 100% ของอัตราการสูบในปี พ.ศ. 2550
- 2.4 ให้มีอัตราการสูบน้ำบาดาล 120% ของอัตราการสูบในปี พ.ศ. 2550
- 2.5 ให้มีอัตราการสูบน้ำบาดาล 140% ของอัตราการสูบในปี พ.ศ. 2550

กรณีที่ 3 สมมติให้มีการลดปริมาณการสูบน้ำบาดาลตามการขยายพื้นที่ให้บริการของการประปานครหลวงและการประปาส่วนภูมิภาค

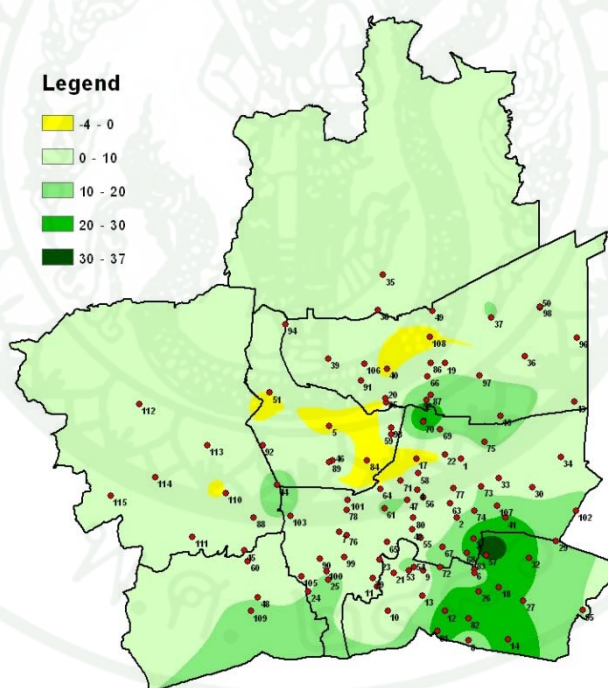
กรณีที่ 4 สมมติให้มีการหยุดสูบน้ำบาดาลและให้ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นตามธรรมชาติ

กรณีที่ 5 สมมติให้มีการเติมน้ำในชั้นน้ำประแดง ชั้นน้ำนครหลวง ชั้นน้ำนทบุรี และชั้นน้ำสามโคก เป็นระยะเวลา 10 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551-2560

กรณีที่ 1 สมมติให้ระดับน้ำบาดาลมีระดับคงที่เท่ากับระดับน้ำของปี พ.ศ. 2550

จากผลการวิเคราะห์การทรุดตัวในแบบจำลองพบว่า พื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่จะมีการทรุดตัวสะสมในช่วง 0-10 cm และบางพื้นที่จะมีการพองตัวของชั้นดินเกิดขึ้นประมาณ 0-4 cm ในจังหวัดนนทบุรี ปทุมธานี นครปฐม และกรุงเทพฯ ได้แก่ บริเวณพื้นที่ อ.เมืองนนทบุรี, ไทรน้อย, บางบัวทอง, ปากเกร็ด, สามโคก, คลองหลวง, นครชัยศรี, เขตจตุจักร และเขตบางเขน

พื้นที่ที่มีการทรุดตัวสะสมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551-2570 มากกว่า 30 cm เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ ติดกับพื้นที่เขตลาดกระบังและเขตประเวศ กรุงเทพฯ โดยมีค่าการทรุดตัวสูงสุดประมาณ 37 cm ส่วนพื้นที่ที่มีการทรุดตัวสะสม 20-30 cm ส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตพื้นที่ อ.บางพลี อ.เมืองสมุทรปราการ เขตลาดกระบัง เขตประเวศ และเขตดอนเมือง ดังแสดงในภาพที่ 129

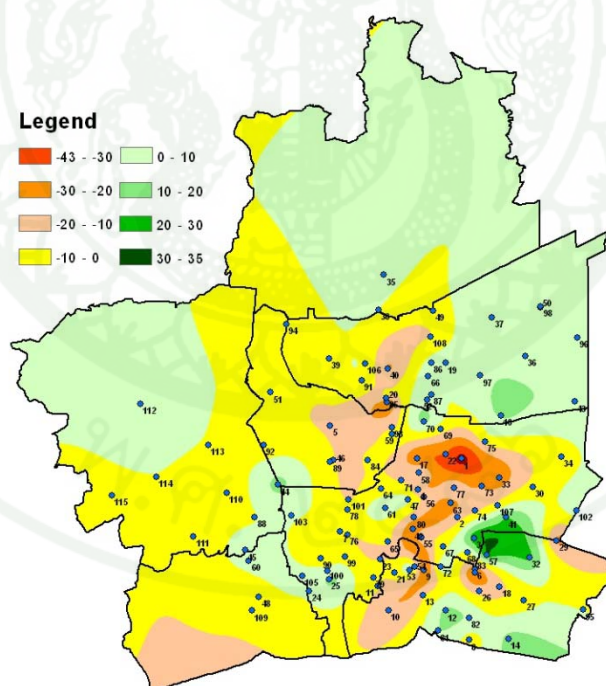


ภาพที่ 129 พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณีที่ 1

กรณีศึกษาที่ 2.1 สมมติให้มีการสูบน้ำบาดาลในอัตรา 50% ของอัตราการสูบของปี พ.ศ. 2550

จากผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของดินแบบจำลองพบว่า ในปี พ.ศ. 2570 พื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่จะมีการพองตัวของชั้นดินเกิดขึ้นทุกจังหวัด โดยเฉพาะจังหวัดนนทบุรี สมุทรสาคร และกรุงเทพฯ พื้นที่การพองตัวของชั้นดินเกิดขึ้นเกือบทั้งจังหวัด โดยในจังหวัดนนทบุรีและสมุทรสาครจะมีการพองตัวในช่วงประมาณ 0-20 cm ส่วนในกรุงเทพฯ จะมีพื้นที่ที่มีค่าการพองตัวสะสมสูงสุดโดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 40-43 cm ที่บริเวณรอยต่อของเขตบางเขน, คลองสามวา และคันนายาว กรุงเทพฯ ดังแสดงในภาพที่ 130

แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีพื้นที่ที่มีการทรุดตัวของชั้นดินเกิดขึ้น โดยส่วนใหญ่จะมีการทรุดตัวในช่วง 0-10 cm ได้แก่ บริเวณพื้นที่ด้านตะวันตก ตะวันออก และเหนือของพื้นที่ศึกษาซึ่งอยู่ในจังหวัดนครปฐม ปทุมธานี และพระนครศรีอยุธยา ตามลำดับ แต่พื้นที่ที่มีการทรุดตัวสะสมสูงสุดโดยมีค่าประมาณ 30-35 cm เกิดขึ้นที่บริเวณทางตอนเหนือของ อ.บางพลี ดังแสดงในภาพที่ 130

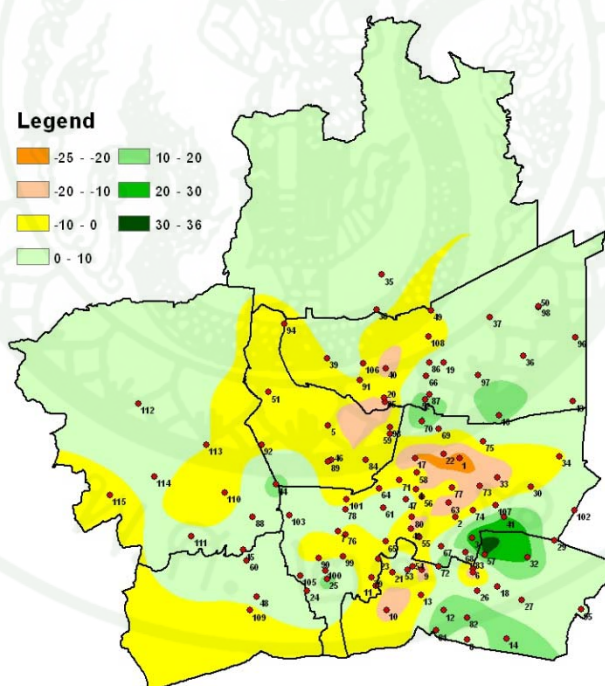


ภาพที่ 130 พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณีศึกษาที่ 2.1 50%

กรณีศึกษา 2.2 สมมติให้มีการสูบน้ำบาดาลในอัตรา 80% ของอัตราการสูบของปี พ.ศ. 2550

ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวในแบบจำลองพบว่า ในปี พ.ศ. 2570 พื้นที่และขนาดการพองตัวของชั้นดินลดน้อยลง และพื้นที่การทรุดตัวของชั้นดินจะขยายเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 2.1 50% เช่น เดิมพื้นที่ที่มีการพองตัวสะสมมากกว่า 40 cm ก็จะมีการพองตัว 20-25 cm และพื้นที่ที่มีการพองตัวสะสมในช่วง 10-20 cm ก็จะมีการพองตัวเหลือ 0-10 cm เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 131

แต่พื้นที่ที่มีการพองตัวสะสมสูงสุดและพื้นที่ที่มีการทรุดตัวสะสมสูงสุดยังคงเกิดขึ้นที่บริเวณเดียวกับในกรณีที่ 2.1 50% คือ ที่บริเวณรอยต่อของเขตบางเขน ลาดพร้าว บึงกุ่ม คันนายาว และคลองสามวา โดยมีค่าการพองตัวสะสมสูงสุดประมาณ 20-25 cm และที่บริเวณ อ.บางพลี โดยมีค่าการทรุดตัวสะสมสูงสุดประมาณ 30-36 cm ดังแสดงในภาพที่ 131

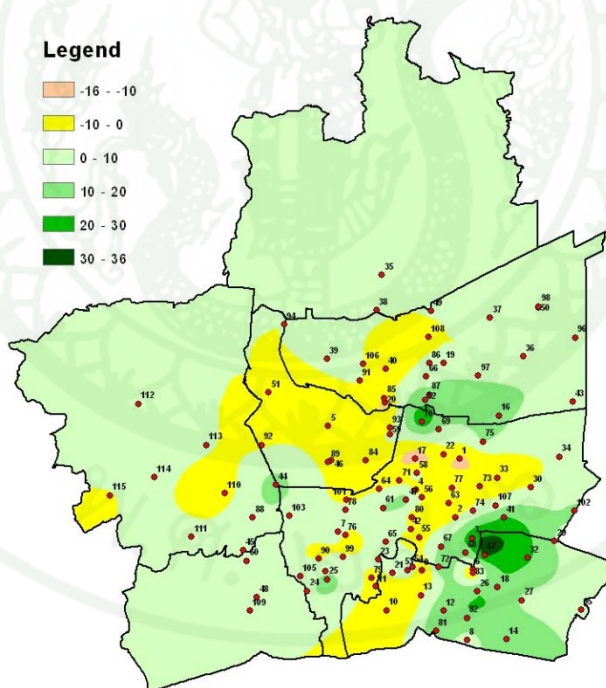


ภาพที่ 131 พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณีที่ 2.2 80%

กรณีที่ 2.3 สมมติให้มีการสูบน้ำบาดาลในอัตรา 100% ของอัตราการสูบของปี พ.ศ. 2550

จากผลการวิเคราะห์การทรุดตัวในแบบจำลองพบว่า ในปี พ.ศ. 2570 พื้นที่การทรุดตัวของชั้นดินจะขยายเพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีพื้นที่การพองตัวของชั้นดินเหลืออยู่บ้างส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่จังหวัดนนทบุรีและกรุงเทพฯ โดยมีค่าการพองตัวสะสมสูงสุดประมาณ 10-16 cm บริเวณรอยต่อของเขตหลักสี่ บางเขน จตุจักร ลาดพร้าว และบริเวณรอยต่อของเขตคันนายาว คลองสามวา ดังแสดงในภาพที่ 132

ส่วนพื้นที่ที่มีการทรุดตัวของชั้นดินส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ในช่วง 0-10 cm ได้แก่ บริเวณพื้นที่ของจังหวัดสมุทรสาคร นครปฐม พระนครศรีอยุธยา และบริเวณพื้นที่ด้านตะวันออกของจังหวัดปทุมธานี เป็นต้น และพื้นที่ที่มีการทรุดตัวสะสมสูงสุดซึ่งมีค่าประมาณ 30-36 cm จะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่ตอนเหนือของ อ.บางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ดังแสดงในภาพที่ 132

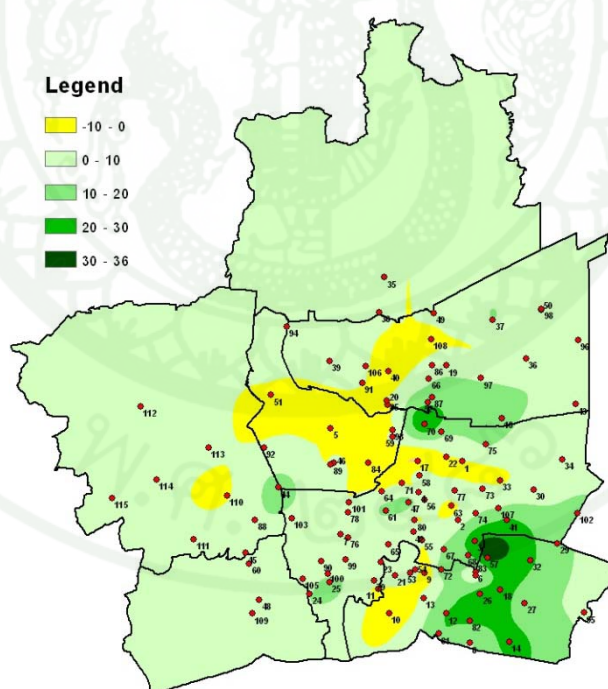


ภาพที่ 132 พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณีที่ 2.3 100%

กรณีศึกษา 2.4 สมมติให้มีการสูบน้ำบาดาลในอัตรา 120% ของอัตราการสูบของปี พ.ศ. 2550

จากผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของดินแบบจำลองพบว่า ในปี พ.ศ. 2570 พื้นที่การพังทลายของชั้นดินจะลดน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 2.3 ที่ปริมาณการสูบน้ำบาดาล 100% ของอัตราการสูบปี พ.ศ. 2550 โดยมีค่าการพังทลายสะสมอยู่ในช่วง 0-10 cm ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ อ.บางบัวทอง อ.ปากเกร็ด อ.เมือง จ.นนทบุรี, อ.สามโคก อ.เมือง จ.ปทุมธานี และบางส่วนของ อ.พระสมุทรเจดีย์ จ.สมุทรปราการ, อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม และพื้นที่ทางตอนเหนือของกรุงเทพฯ

ส่วนพื้นที่ที่มีการทรุดตัวของชั้นดินยังคงอยู่ในช่วง 0-10 cm เป็นส่วนใหญ่ และพื้นที่ที่มีการทรุดตัวสูงสุดยังคงเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่เดิมคือ บริเวณทางตอนเหนือของ อ.บางพลี โดยมีค่าการทรุดตัวสะสมสูงสุดอยู่ในช่วง 30-36 cm เท่ากับของกรณีก่อนหน้านี้ เพียงแต่มีพื้นที่ขยายเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนพื้นที่ที่มีการทรุดตัว 20-30 cm ในกรณีก่อนหน้านี้จะอยู่เฉพาะบริเวณตอนเหนือของ อ.บางพลี ได้ขยายพื้นที่ลงมาทางใต้เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 133

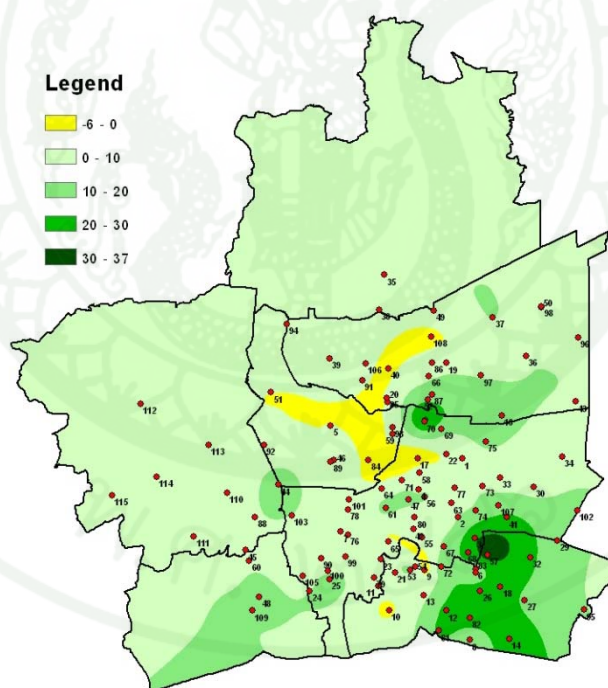


ภาพที่ 133 พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณีที่ 2.4 120%

กรณีศึกษาที่ 2.5 สมมติให้มีการสูบน้ำบาดาลในอัตรา 140% ของอัตราการสูบของปี พ.ศ. 2550

จากผลการวิเคราะห์การทรุดตัวในแบบจำลองพบว่า ในปี พ.ศ. 2570 พื้นที่ส่วนใหญ่จะเกิดการทรุดตัวสะสมประมาณ 0-10 cm ได้แก่ พื้นที่ในจังหวัดนครปฐม พระนครศรีอยุธยา นนทบุรี ปทุมธานี และกรุงเทพฯ โดยมีค่าการทรุดตัวสะสมสูงสุดประมาณ 30-37 cm ที่บริเวณตอนเหนือของ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ ส่วนพื้นที่ที่มีการพองตัวของชั้นดินยังคงมีอยู่เล็กน้อย ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในพื้นที่จังหวัดนนทบุรี และปทุมธานี โดยมีค่าการพองตัวสะสมสูงสุดประมาณ 0-6 cm ดังแสดงในภาพที่ 134

และจากการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของกรณีศึกษาที่ 1 กับกรณีศึกษาที่ 2.5 140% พบว่า พื้นที่การทรุดตัวสะสมของทั้ง 2 กรณีมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน นั่นแสดงว่า อัตราการสูบน้ำบาดาลที่ 140% ของอัตราการสูบของปี พ.ศ. 2550 จะไม่ทำให้ระดับน้ำบาดาลเกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก

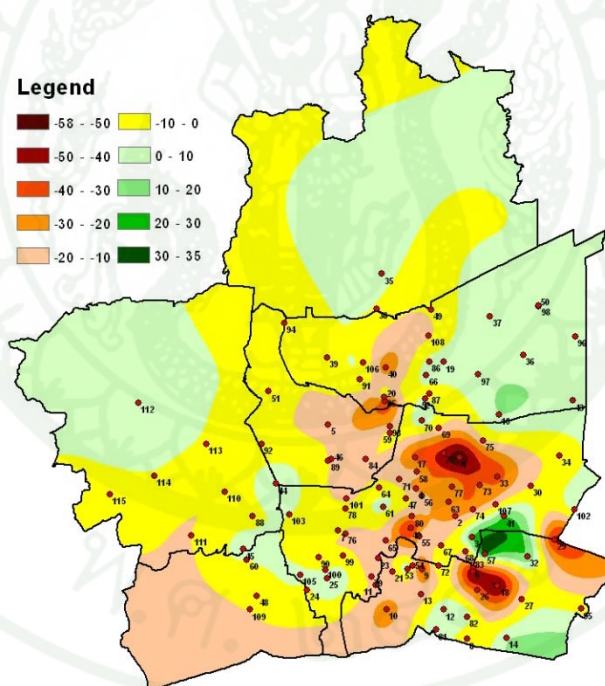


ภาพที่ 134 พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณีศึกษาที่ 2.5 140%

กรณีที่ 3 สมมติให้มีการลดปริมาณการสูบน้ำบาดาลตามการขยายพื้นที่ให้บริการของการประปา นครหลวงและการประปาส่วนภูมิภาค

จากผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองพบว่า ในปี พ.ศ. 2570 มีการพองตัวของชั้นดินเกิดขึ้นเกือบทั่วทุกพื้นที่ยกเว้นบริเวณพื้นที่ด้านตะวันตกของจังหวัดนครปฐม ด้านตะวันออกของจังหวัดปทุมธานี และพระนครศรีอยุธยา โดยมีค่าการพองตัวสะสมสูงสุดที่บริเวณเขตบางเขน กรุงเทพฯ ประมาณ 50-58 cm หรือเฉลี่ยปีละประมาณ 2-3 cm ดังแสดงในภาพที่ 135

ส่วนพื้นที่ที่มีการทรุดตัวของชั้นดินยังคงมีอยู่แต่ไม่มากนักส่วนใหญ่จะมีขนาดการทรุดตัวสะสมในช่วง 0-10 cm พื้นที่ที่มีการทรุดตัวสะสมสูงสุดยังอยู่ที่บริเวณทางตอนเหนือของ อ.บางพลี โดยมีค่าประมาณ 30-35 cm หรือเฉลี่ยมีค่าการทรุดตัวปีละประมาณ 1-2 cm ดังแสดงในภาพที่ 135

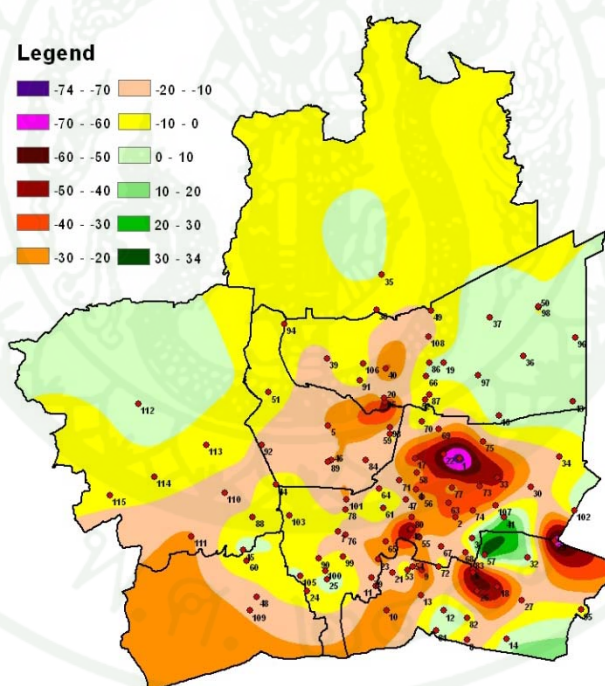


ภาพที่ 135 พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณีที่ 3

กรณีที่ 4 สมมติให้มีการหยุดสูบน้ำบาดาลและให้ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นตามธรรมชาติ

จากผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองพบว่า ในปี พ.ศ. 2570 พื้นที่ที่การพองตัวของชั้นดินจะเพิ่มขึ้นและมีขนาดการพองตัวสะสมเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าการพองตัวสะสมสูงสุดประมาณ 70-74 cm หรือเฉลี่ยชั้นดินมีการพองตัวปีละประมาณ 3-4 cm ที่บริเวณเขตบางเขน กรุงเทพฯ นอกจากนี้ยังมีพื้นที่ในจังหวัดสมุทรปราการบริเวณด้านตะวันตกของ อ.บางพลี และบริเวณพื้นที่กึ่งอำเภอบางเสาธง และเขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ มีการพองตัวสะสมของชั้นดินในช่วง 50-70 cm ดังแสดงในภาพที่ 136

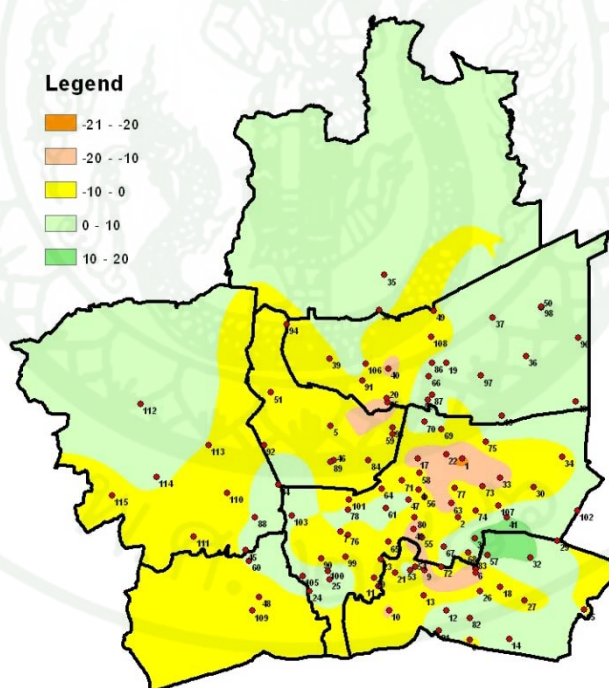
ส่วนพื้นที่ที่มีการทรุดตัวของชั้นดินยังคงเกิดขึ้นที่บริเวณตอนเหนือของ อ.บางพลี โดยมีขนาดการทรุดตัวสะสมสูงสุดประมาณ 30-34 cm ดังแสดงในภาพที่ 136



ภาพที่ 136 พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณีที่ 4

**กรณีที่ 5 สมมติให้มีการเติมน้ำในชั้นน้ำพระประแดง ชั้นน้ำนครหลวง ชั้นน้ำนนทบุรี และชั้นน้ำ
สามโคก เป็นระยะเวลา 10 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551-2560**

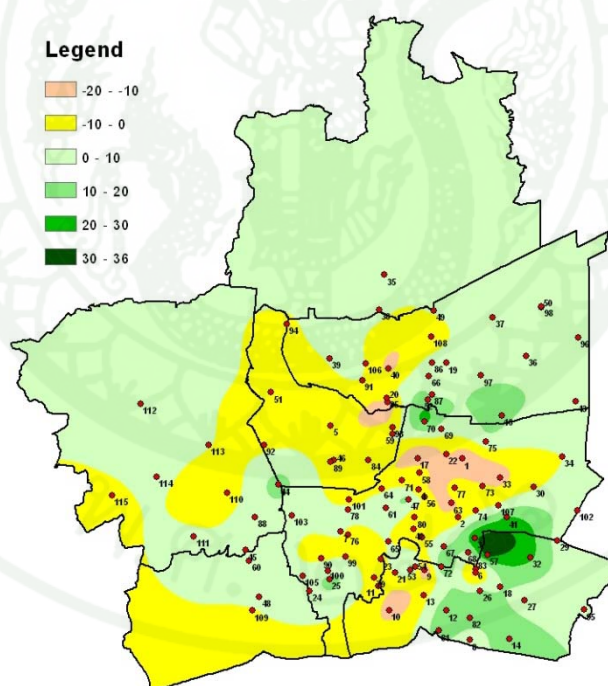
จากผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองพบว่า ในปี พ.ศ. 2560 พื้นที่ที่มีการพองตัวของชั้นดินเกิดขึ้นทุกจังหวัดในพื้นที่ศึกษา โดยส่วนใหญ่จะมีขนาดการพองตัวสะสมในช่วง 10 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551-2560 อยู่ในช่วง 0-10 cm ได้แก่ จังหวัดนนทบุรี สมุทรสาคร สมุทรปราการ และกรุงเทพฯ และมีขนาดการพองตัวสะสมสูงสุดในช่วง 10 ปี ประมาณ 21 cm ในเขตคันนายาว บริเวณรอยต่อระหว่างเขตบางเขน และคลองสามวา กรุงเทพฯ ส่วนพื้นที่ที่มีการพองตัวสะสมในช่วง 10 ปี ระหว่าง 10-20 cm ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในพื้นที่กรุงเทพฯ ได้แก่ บริเวณเขตบางเขน ลาดพร้าว บางกะปิ บึงกุ่ม คันนายาว คลองสามวา พระโขนง คลองเตย เป็นต้น นอกจากนี้ยังเกิดขึ้นที่บริเวณ อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี, อ.เมือง และ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ, อ.เมือง และ อ.สามโคก จ.ปทุมธานี ดังแสดงในภาพที่ 137



ภาพที่ 137 พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2560 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาล
ของกรณีที่ 5

ส่วนพื้นที่ที่มีการทรุดตัวของชั้นดินโดยส่วนใหญ่จะมีขนาดการทรุดตัวสะสมในช่วง 10 ปี ประมาณ 0-10 cm ได้แก่ พื้นที่ใน จ.พระนครศรีอยุธยาเกือบทั้งหมด, พื้นที่ด้านตะวันตกเฉียงเหนือของ จ.นครปฐม และพื้นที่ด้านตะวันออกของ จ.ปทุมธานี เป็นต้น ขนาดการทรุดตัวสะสมสูงสุดในช่วง 10 ปี ประมาณ 20 cm เกิดขึ้นที่บริเวณตอนเหนือของ อ.บางพลี ดังแสดงในภาพที่ 137

หลังจากปี พ.ศ. 2560 ได้มีการหยุดเติมน้ำบาดาลและปล่อยให้มีการใช้น้ำบาดาลตามปกติ โดยมีอัตราการสูบน้ำเท่ากับอัตราการสูบของปี พ.ศ. 2550 จากผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองพบว่า ในปี พ.ศ. 2570 พื้นที่การพองตัวของชั้นดินลดน้อยลงแต่ไม่มากนัก และมีพื้นที่การทรุดตัวของชั้นดินเพิ่มขึ้นและมีขนาดการทรุดตัวเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีค่าการทรุดตัวสะสมสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ 30-36 cm ที่บริเวณตอนเหนือของ อ.บางพลี เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2560 ประมาณ 10-16 cm หรือเฉลี่ยมีค่าการทรุดตัวเพิ่มขึ้นประมาณปีละ 1-2 cm แต่พื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่ยังคงมีค่าการทรุดตัวของชั้นดินอยู่ในช่วงประมาณ 0-10 cm ดังแสดงในภาพที่ 138



ภาพที่ 138 พื้นที่การทรุดตัวสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2551-2570 ตามสถานการณ์การสูบน้ำบาดาลของกรณีที่ 5

ตารางที่ 13 สรุปผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในอนาคตตามการสมมติสถานการณ์ของการสูบน้ำบาดาลต่าง ๆ

กรณี	เงื่อนไข	ค่าการพองตัวสูงสุด	พื้นที่
		ค่าการทรุดตัวสูงสุด	
1	สมมติให้ระดับน้ำบาดาลมีระดับคงที่เท่ากับระดับปี พ.ศ. 2550	-4.2	เขตบางเขน กรุงเทพฯ
		37.0	อ.บางพลี สมุทรปราการ
2.1	สมมติให้มีการสูบน้ำในอัตราเท่ากับ 50% ของอัตราการสูบน้ำในปี พ.ศ. 2550	-43.2	เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ
		35.2	อ.บางพลี สมุทรปราการ
2.2	สมมติให้มีการสูบน้ำในอัตราเท่ากับ 80% ของอัตราการสูบน้ำในปี พ.ศ. 2550	-24.6	เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ
		35.8	อ.บางพลี สมุทรปราการ
2.3	สมมติให้มีการสูบน้ำในอัตราเท่ากับ 100% ของอัตราการสูบน้ำในปี พ.ศ. 2550	-15.7	เขตบางเขน กรุงเทพฯ
		36.2	อ.บางพลี สมุทรปราการ
2.4	สมมติให้มีการสูบน้ำในอัตราเท่ากับ 120% ของอัตราการสูบน้ำในปี พ.ศ. 2550	-10.8	เขตบางเขน กรุงเทพฯ
		36.4	อ.บางพลี สมุทรปราการ
2.5	สมมติให้มีการสูบน้ำในอัตราเท่ากับ 140% ของอัตราการสูบน้ำในปี พ.ศ. 2550	-5.8	เขตบางเขน กรุงเทพฯ
		36.7	อ.บางพลี สมุทรปราการ
3	สมมติให้มีการลดปริมาณการสูบน้ำบาดาลตามการขยายพื้นที่ให้บริการของการประปา	-57.5	เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ
		34.7	อ.บางพลี สมุทรปราการ
4	สมมติให้มีการหยุดสูบน้ำบาดาลและให้ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นตามธรรมชาติ	-74.1	เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ
		34.2	อ.บางพลี สมุทรปราการ
5	สมมติให้มีการเติมน้ำในชั้นน้ำประแดง ชั้นน้ำนครหลวง ชั้นน้ำนนทบุรี และชั้นน้ำสามโคก เป็นระยะเวลา 10 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551-2560	-19.5	เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ
		36.5	อ.บางพลี สมุทรปราการ

การหาปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่ยอมได้

การสูบน้ำบาดาลในปริมาณที่มากเกินไปทำให้เกิดผลกระทบในหลาย ๆ ด้าน เช่น ผลกระทบด้านการทรุดตัวของแผ่นดิน, ผลกระทบด้านคุณภาพของน้ำบาดาล, ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น แต่ผลกระทบที่สำคัญและเป็นจุดเริ่มต้นทำให้เกิดปัญหาอื่น ๆ ตามมามากมาย คือ การทรุดตัวของแผ่นดินเป็นพื้นที่บริเวณกว้าง ทำให้เกิดปัญหาการแตกร้าวของอาคารและสิ่งปลูกสร้าง ทำให้เกิดปัญหาน้ำท่วมและปัญหาลิงแวดล้อม เกิดการสูญเสียทางด้านเศรษฐกิจ การแก้ไขและป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาเหล่านี้สามารถทำได้โดยการห้ามไม่ให้มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ทั้งหมด ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่อาจเป็นไปได้ในทางปฏิบัติและไม่ใช่วิธีการแก้ปัญหาก็ถูกต้อง เนื่องจากน้ำบาดาลเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีค่าสมควรนำมาใช้ได้อย่างเหมาะสมและให้เกิดประโยชน์มากที่สุด ดังนั้นการยอมให้มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ได้ปริมาณที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของแผ่นดินมากเกินไปและทำให้เกิดปัญหาอื่น ๆ ตามมาน่าจะเป็นวิธีการแก้ปัญหาก็ดีที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถนำทรัพยากรที่มีค่าเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้อย่างยั่งยืนตลอดไปอีกด้วยถ้าหากมีการบริหารจัดการที่ดีในอนาคต

เนื่องจากปัญหาด้านการทรุดตัวของแผ่นดินเป็นพื้นที่บริเวณกว้างเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาอื่น ๆ ตามมา ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะสมมติอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินให้ไม่เกิน 1 cm/ปี เป็นเกณฑ์กำหนดปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่ยอมรับได้ โดยให้ความหมายของปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่ยอมรับได้ (Permissible Yield) คือ อัตราการสูบน้ำบาดาลที่สามารถสูบขึ้นมาใช้ได้โดยไม่ทำให้เกิดการทรุดตัวของแผ่นดินเป็นพื้นที่บริเวณกว้างมากเกินไป 1 cm/ปี ซึ่งการกำหนดเกณฑ์การทรุดตัวนี้ได้พิจารณาจากอัตราการทรุดตัวที่ตรวจวัดได้ในอดีตของพื้นที่ศึกษาย้อนหลังไป 5 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546-2550 ซึ่งมีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 0.75 cm/ปี

จากผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในอนาคตตามสมมติสถานการณ์ของการสูบน้ำบาดาลพบว่า กรณีที่ 2.3 ปริมาณการสูบน้ำบาดาลในอัตราไม่เกิน 100% ของปริมาณการสูบปี พ.ศ. 2550 เป็นปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดการทรุดตัวของแผ่นดินมากกว่า 1 cm/ปี ดังนั้น อัตราการสูบน้ำบาดาลที่ 100% ของปริมาณการสูบปี พ.ศ. 2550 จึงเป็นอัตราการสูบที่สามารถยอมรับได้ โดยมีพื้นที่การทรุดตัวสะสมตั้งแต่ปีพ.ศ. 2551-2570 มีขนาดการทรุดตัวอยู่ในช่วง 0-10 cm หรือมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 0-0.5 cm/ปี นอกจากนี้ยังมีพื้นที่การพองตัวของชั้นดินเกิดขึ้นในหลายจังหวัด ได้แก่ นนทบุรี ปทุมธานี นครปฐม สมุทรปราการ และกรุงเทพฯ โดยมีขนาดการพองตัวสะสมอยู่ในช่วง 0-10 cm หรือมีอัตราการพองตัวประมาณ 0-0.5 cm/ปี เช่นกัน โดยเฉพาะพื้นที่ในกรุงเทพฯ จะมีค่า

การพองตัวสะสมสูงสุดอยู่ในช่วง 10-16 cm หรือมีอัตราการพองตัวประมาณ 0.5-0.8 cm/ปี ดังแสดงในภาพที่ 132

แต่ยังมีพื้นที่บางจุดที่มีอัตราการทรุดตัวมากกว่า 1 cm/ปี คือ บริเวณพื้นที่ทางตอนเหนือของ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ และบริเวณเขตลาดกระบัง เขตประเวศ และเขตดอนเมือง กรุงเทพฯ มีค่าการทรุดตัวสะสมเกิน 20 cm โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ทางตอนเหนือของ อ.บางพลี มีค่าการทรุดตัวสะสมสูงสุดอยู่ในช่วง 30-36 cm หรือมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 1.5-1.8 cm/ปี ในกรณีของพื้นที่เขตดอนเมือง กรุงเทพฯ ถ้ามีการควบคุมปริมาณการสูบน้ำบาดาลให้มีอัตราการสูบ 50% หรือ 80% ของอัตราการสูบปี พ.ศ. 2550 จะทำให้อัตราการทรุดตัวน้อยกว่า 1 cm/ปี ดังแสดงในภาพที่ 130-131

แต่ในกรณีของพื้นที่บริเวณทางตอนเหนือของ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ และบริเวณเขตลาดกระบัง เขตประเวศ กรุงเทพฯ ซึ่งมีค่าการทรุดตัวสะสมสูงสุดอยู่ในช่วง 30-36 cm ถึงแม้จะมีการลดปริมาณการสูบน้ำบาดาลให้มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณการสูบของปี พ.ศ. 2550 แล้วก็ตาม ค่าการทรุดตัวสะสมก็ยังคงมากกว่า 1 cm/ปี สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบริเวณพื้นที่นี้มีระดับน้ำบาดาลในปี พ.ศ. 2550 ต่ำกว่าระดับความลึกของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ คือ ต่ำกว่า 20 m จากผิวดิน ซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวที่มีอัตราการทรุดตัวสูงกว่าชั้นดินเหนียวชั้นล่าง ๆ ถัดลงไป โดยมีอัตราการทรุดตัวอยู่ในช่วง 50-80% ของปริมาณการทรุดตัวทั้งหมด การลดปริมาณการสูบน้ำบาดาลหรือการหยุดสูบก็ไม่สามารถทำให้อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ลดลงได้ ดังแสดงในภาพที่ 129-136 เนื่องจากอัตราการไหลเดิมของน้ำตามธรรมชาติลงสู่ชั้นน้ำบาดาลต่าง ๆ เป็นไปอย่างช้ามาก วิธีการที่จะช่วยให้อัตราการทรุดตัวบริเวณพื้นที่นี้ลดลงได้จะต้องใช้วิธีการเติมน้ำลงไปในพื้นที่น้ำบาดาลร่วมด้วยเพื่อเพิ่มระดับน้ำบาดาลให้สูงขึ้นจึงจะทำให้อัตราการทรุดตัวของพื้นที่บริเวณนี้ลดลงได้ ดังแสดงในภาพที่ 137

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. จากผลการวิเคราะห์การทรุดตัวในแบบจำลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลของชั้นน้ำกรวดจะมีผลต่อการทรุดตัวของชั้นดินมากกว่าชั้นน้ำอื่น ๆ โดยมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 80-95% ของค่าการทรุดตัวทั้งหมด

2. การหาค่าการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (Least Square Regression, R^2) ระหว่างค่าการทรุดตัวสะสมที่ได้จากแบบจำลองและจากการตรวจวัด ได้ค่า R^2 ของค่าการทรุดตัวสะสมเท่ากับ 0.998 ซึ่งแสดงว่า ค่าการทรุดตัวสะสมที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัดมาก นอกจากนี้กรณีที่ที่มีข้อมูลของค่าการทรุดตัวสะสมเพียง 5 ปี หรือ 10 ปี ยังคงได้ค่า R^2 ของค่าการทรุดตัวสะสมไม่เปลี่ยนแปลง คือ มีค่าเท่ากับ 0.998–0.999 แสดงว่า กรณีที่มีข้อมูลจำนวนน้อยเพียง 5 ปี แบบจำลองนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ค่าการทรุดตัวได้อย่างแม่นยำและใกล้เคียงกับค่าการทรุดตัวจากการตรวจวัด

3. การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมของแต่ละสถานี (Cumulative Settlement of the Observation Well) ได้ผลการเปรียบเทียบโดยมีจำนวนสถานีที่มีระดับความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวสะสมเฉลี่ย 3 ปี ในระดับที่ 1 (0–2 cm) และระดับที่ 2 (2–4 cm) รวมกันเท่ากับ 91 สถานี หรือคิดเป็น 83% ของจำนวนสถานีทั้งหมด 110 สถานี แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีความน่าเชื่อถือ สามารถวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวได้ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้จริง

4. การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวแต่ละปี (Annual Settlement) ในลักษณะเชิงพื้นที่ พบว่าจำนวนปีที่มีภาพรวมของพื้นที่ที่แสดงความแตกต่างของค่าการทรุดตัว (Global Area Differential Settlement) อยู่ในช่วง 0–1 cm มากกว่า 20% ของพื้นที่ทั้งหมดมีจำนวน 25 ปี จากจำนวนทั้งหมด 29 ปี (2522–2550) และจำนวนปีที่มีพื้นที่เฉพาะจุดที่แสดงความแตกต่างของค่าการทรุดตัว (Spot Area Differential Settlement) มากกว่า 3 cm มีเพียง 4 ปี เท่านั้น และในจำนวนนี้มี 2 ปีที่แสดงค่าการทรุดตัวมากกว่า 4 cm แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีความน่าเชื่อถือ สามารถวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวได้ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้จริง

5. การเปรียบเทียบการทรุดตัวสะสมทั้งหมด (Total Cumulative Settlement) ในลักษณะเชิงพื้นที่ ตั้งแต่ พ.ศ. 2522–2550 รวม 29 ปี พบว่า ค่าการทรุดตัวสะสมทั้งหมดที่ได้จากแบบจำลองและจากการตรวจวัดมีพื้นที่แสดงค่าการทรุดตัวที่เหมือนกันมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถใช้วิเคราะห์ค่าการทรุดตัวได้ถูกต้องและแม่นยำ

6. จากผลการวิจัยพบว่าพฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาล โดยมีรูปแบบของความสัมพันธ์ที่เหมือนกันในทุกชั้นน้ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า The Characteristic of Aquifer Drawdown and Settlement หรือ CADS โดยสามารถแบ่งความสัมพันธ์ออกเป็น 4 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 Increase Settlement เป็นช่วงที่ระดับน้ำบาดาลลดลงและค่าการทรุดตัวเพิ่มขึ้น, ช่วงที่ 2 Delay Settlement เป็นช่วงที่ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นแต่ยังมีการทรุดตัวเพิ่มขึ้น, ช่วงที่ 3 Zero Settlement เป็นช่วงที่ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นและค่าการทรุดตัวเริ่มหยุดนิ่ง และช่วงที่ 4 Recovery เป็นช่วงที่ระดับน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นและมีการคืนตัวของชั้นดิน

7. CADS สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบริหารจัดการและควบคุมการใช้น้ำบาดาลในแต่ละพื้นที่ได้ โดยสามารถนำไปใช้ทำนายช่วงของพฤติกรรมทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นต่อไปในอนาคตของพื้นที่ต่าง ๆ ได้ ถ้ามีการจัดบันทึกการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในพื้นที่นั้น ๆ อย่างต่อเนื่อง

8. ความไวต่อการทรุดตัวของชั้นดิน (Settlement Sensitivity Index, $\square_s$) คือ อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเป็นเซนติเมตรต่อการลดลงของระดับน้ำบาดาล 1 เมตร ซึ่งสามารถหาได้จาก ส่วนกลับของค่าความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ช่วงที่ 1 หรือ Inverse Slope ($\frac{\Delta S}{\Delta h}$)

9. จากผลการวิจัยพบว่า พื้นที่ที่มีความไวต่อการทรุดตัวสูง เมื่อระดับน้ำในชั้นน้ำประประแดงลดลง คือ พื้นที่บริเวณตอนล่างของพื้นที่ศึกษา โดยมีค่า $\square_s$ ประมาณ 0.3–0.5 cm/m/y โดยเฉพาะที่บริเวณ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ มีค่า $\square_s$ สูงสุดประมาณ 0.5 cm/m/y

10. พื้นที่ที่มีความไวต่อการทรุดตัวสูง เมื่อระดับน้ำในชั้นน้ำนกรหลวงลดลง คือ พื้นที่ในจังหวัดสมุทรสาครเกือบทั้งจังหวัด โดยมีค่า $\square_s$ ประมาณ 0.2–0.5 cm/m/y โดยเฉพาะที่บริเวณ อ.

เมือง มีค่า $\square_s$ สูงสุดประมาณ 0.5 cm/m/y ส่วนพื้นที่ในจังหวัดอื่น ๆ จะมีค่า $\square_s$ ประมาณ 0.1 cm/m/y

11. ในกรณีของชั้นน้ำบาดาลที่ขุดเจาะจะมีค่า $\square_s$ เฉลี่ยประมาณ 0.1 cm/m/y ในพื้นที่ศึกษาทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากชั้นน้ำบาดาลเป็นชั้นน้ำที่อยู่ในระดับลึกประมาณ 150–200 m. จึงมีอัตราการทรุดตัวต่ำเมื่อเทียบกับชั้นน้ำบาดาลและชั้นน้ำประปาประแดง

12. พื้นที่ที่ควรมีการควบคุมหรือจำกัดปริมาณการสูบน้ำบาดาลในชั้นน้ำประปาประแดงและชั้นน้ำบาดาล ได้แก่ พื้นที่บริเวณ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ และ อ.เมือง จ.สมุทรสาคร เนื่องจากมีค่า $\square_s$ สูงสุดประมาณ 0.5 cm/m/y หรือกรณีที่มีความจำเป็นไม่สามารถหลีกเลี่ยงการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่ที่มีค่า $\square_s$ สูงได้ ก็ควรอนุญาตให้มีการสูบน้ำบาดาลในชั้นน้ำที่อยู่ลึกถัดลงไปจากชั้นน้ำประปาประแดงและชั้นน้ำบาดาลเนื่องจากมีค่า $\square_s$ ต่ำ

13. ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในอนาคตเพื่อหาปริมาณการสูบน้ำบาดาลที่ยอมรับได้ พบว่า การสูบน้ำบาดาลของกรณี 2.3 ที่มีอัตราการสูบน้ำบาดาล 100% ของอัตราการสูบในปี พ.ศ. 2550 จะไม่ทำให้พื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่มีอัตราการทรุดตัวเกิน 1 cm/ปี โดยมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 0–0.5 cm/ปี

14. ส่วนพื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวเกิน 1 cm/ปี ได้แก่ บริเวณพื้นที่เขตดอนเมือง เขตลาดกระบัง และเขตประเวศ กรุงเทพฯ และทางตอนเหนือของ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ โดยในกรณีพื้นที่เขตดอนเมืองถ้ามีการควบคุมปริมาณการสูบน้ำบาดาลให้มีอัตราการสูบไม่เกิน 80% จะทำให้อัตราการทรุดตัวไม่เกิน 1 cm/ปี ส่วนบริเวณเขตลาดกระบัง เขตประเวศ และ อ.บางพลี ควรมีมาตรการห้ามสูบน้ำบาดาลในพื้นที่บริเวณนี้และจะต้องมีมาตรการอื่น ๆ ช่วยเสริม เช่น ให้มีการเติมน้ำลงไปชั้นน้ำบาดาล จึงจะทำให้พื้นที่บริเวณนี้มีอัตราการทรุดตัวน้อยกว่า 1 cm/ปี

ข้อเสนอแนะ

1. หากมีความจำเป็นต้องมีการใช้น้ำบาดาลควรมีการเจาะบ่อน้ำบาดาลในระดับลึกที่สุดเท่าที่จะทำได้ และควรมีมาตรการสนับสนุนให้มีการใช้น้ำบาดาลในชั้นน้ำลึก ๆ เช่น ลดค่าการใช้น้ำบาดาลตามระดับความลึก ผู้ประกอบการใดที่เจาะบ่อน้ำบาดาลระดับตื้นจะต้องเสียค่าน้ำมากกว่าผู้ประกอบการที่เจาะบ่อน้ำบาดาลในระดับที่ลึกกว่า และไม่ควรอนุญาตให้มีการใช้น้ำบาดาลในชั้นน้ำกรุงเทพ และชั้นน้ำพระประแดง และควบคุมปริมาณการใช้น้ำบาดาลอย่างจริงจังในชั้นน้ำนครหลวง และชั้นน้ำนนทบุรีให้มีปริมาณการสูบน้ำน้อยที่สุด
2. ในกรณีของผู้ประกอบการรายย่อยที่ไม่มีความสามารถในการเจาะบ่อน้ำบาดาลในระดับลึกได้เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง รัฐบาลควรให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับเจาะบ่อน้ำบาดาลในระดับลึก โดยการให้กู้ยืมแบบคิดดอกเบี้ยต่ำ
3. ควรมีการจดบันทึกค่าระดับน้ำบาดาลทุกบ่อที่ได้มีการอนุญาตให้ใช้อย่างต่อเนื่อง
4. ควรมีการศึกษาปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาล ให้มีความสะดวกและง่ายต่อการนำไปใช้
5. ควรหาความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้วิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
6. ในการศึกษาครั้งต่อไปควรพิจารณาผลของช่วงเวลาการทรุดตัวที่ล่าช้าเนื่องจากขบวนการชดเชยตัวคายน้ำ (Delay Settlement) ร่วมด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2547. รายงานฉบับสุดท้ายโครงการศึกษาผลกระทบจากการแก้ปัญหาการใช้น้ำบาดาลเกินปริมาณสมดุลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. 2552. <http://www.dgr.go.th/newproject/52/bgsr/home.htm>

เจริญ เพียรเจริญ. 2540. ปัญหาการใช้น้ำบาดาลและแผ่นดินทรุดในเขต กทม, น. 41-56. เอกสารรายงานน้ำบาดาล-บ่อบาดาล. กองน้ำบาดาล, กรมทรัพยากรธรณี.

ไตรภพ คนชม. 2546. พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำและความชื้นน้ำที่แปรตามทิศทางของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทวีศักดิ์ รมิ่งคังค์. 2546. น้ำบาดาล. เอกสารประกอบการสอน, ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

นพดล เพียรเวช. 2542. การทรุดตัวของแผ่นดินกรุงเทพฯ และปัญหาต่องานวิศวกรรมฐานราก. โยธาสาร ฉบับที่ 3 เดือนตุลาคม-ธันวาคม: หน้า 29-35.

นพรัตน์ ท้วมประดิษฐ์ และ คมกริช เวชสัตถ์. 2551. การปรับปรุงคันดินถมเร่งการทรุดตัวในการก่อสร้างโครงสร้างระบายน้ำออกของบ่อดักตะกอนโรงผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ระยะที่ 3. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13.

วชิ วัฒนรงค์, สมคิด บัวเพ็ง และ สัมฤทธิ์ ชูชนะทัศน์. 2532. เอกสารโครงการป้องกันและแก้ไขวิกฤตการณ์น้ำบาดาลและแผ่นดินทรุดในบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล ฉบับที่ 2. กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

วชิ วัฒนรงค์, สมคิด บัวเพ็ง, สัมฤทธิ์ ชูชนะทัศน์ และ อรุณ หล่อเพ็ญศรี. 2541. วิกฤตน้ำบาดาลและแผ่นดินทรุดในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล รายงานวิชาการ ฉบับที่ 3.

- พันโทอุซุงค์ วงษ์เกิด. 2532. รายงานผลการสำรวจระดับวัดการทรุดตัวของพื้นดินในเขต กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ประจำปีงบประมาณ 2538-2544 ในเอกสารรายงาน โครงการป้องกันและแก้ไขวิกฤตการณ์น้ำบาดาลและแผ่นดินทรุด. กองขี้อเคซีและ ขี้อฟิสิกส์ กรมแผนที่ทหาร. 23.
- พรสวัสดิ์ วงศ์วัฒน์. 2548. การศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวของชั้นดินระดับลึกเพื่อ การวิเคราะห์การทรุดตัวของพื้นดินกรุงเทพฯ เนื่องจากการสูบน้ำบาดาล. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการสำรวจ ศึกษาเพื่อการวางแผนหลักและกำหนดแนวความคิดการออกแบบเบื้องต้นโครงการเติมน้ำลงชั้น น้ำบาดาลเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรนต์ สัมพันธ์รักษ์. 2540. วิศวกรรมปฐพี. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรม ราชูปถัมภ์.
- AIT. 1980. **Properties of Deep Subsoils Observations from Shallow and Deep Field Instrumentation, Subsidence Simulation by Mathematical Model, Phase II, Final Report.** Research Report No.89.
- AIT. 1981. **Investigation of Land Subsidence Caused by Deep Well Pumping in the Bangkok Area, Comprehensive Report 1978-1981.** Research Report No. 91.
- Alexseev, M.N. and Y. Takaya. 1967. **An Outline of the Upper Cenozoic Deposits in the Chao Phraya Basin, Central Thailand.** Southeast Asia Studies, 5(2): p106-124.
- Asaoka, A. 1978. **Observation Procedure of Settlement Prediction.** Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineer: Vol.18, No.4.
- Bowles, J.E. 1996. **Foundation Analysis and Design.** 5th ed. McGraw-Hill, North America.

Casagrande, A. 1936. **The Determination of the Preconsolidation Load and Its Practical Significance.** Proc. 1st ICSMFE 3: 60–64.

Chumthaisong, C. 1980. **Lithology of Aquifers and Water-bearing Properties in the Lower Central Plain, Thailand, Department of Mineral Resources.**

Das, B.M. 1983. **Advanced Soil Mechanics.** McGraw-Hill, Singapore.

Desai, C.S. and J.T. Christian. 1977. **Numerical Methods in Geotechnical Engineering.** McGraw-Hill, U.S.A.

Department of Mineral Resources. 1992. **Mitigation of Groundwater Crisis and Land Subsidence in Bangkok Project, Report No.1, Records of Groundwater Monitoring Wells in Bangkok and Adjacent Provinces. MGL Project.**

Department of Mineral Resources. 1994. **Mitigation of Groundwater Crisis and Land Subsidence in Bangkok Project, Report No.2, Hydrographs of Piezometric Levels of Groundwater in Bangkok and Adjacent Provinces. MGL Project.**

Department of Mineral Resources. 1999. **Mitigation of Groundwater Crisis and Land Subsidence in Bangkok Project, Technical Report No.1/2542, Records of Groundwater and Land Subsidence Monitoring Stations in Bangkok and Adjacent Provinces. MGL Project.**

Dheeradilok, P. and W. Kaewyana. 1983. **On the Quaternary Deposits of Thailand. Third Meeting of the Working Group on Geomorphology of River and Coastal Plains: P26-40.**

Forsythe, G.E. and W.R. Wasow. 1960. **Finite-Difference Methods for Partial Differential Equations.** John Wiley & Sons, U.S.A.

Giao, P.H. 1997. **Artificial Recharge of the Bangkok Aquifer System for the Mitigation of Land Subsidence.** Dissertation, No. GE-96-2, AIT.

Gloe, C.S. 1977. **Land Subsidence Related to Brown Coal Open Cut Operations, Latrobe Valley, Victoria, Australia. Second International Symposium on Land Subsidence. Proceeding, Anaheim Symp. 1976. IAHS-Unesco: p399-407.**

Graham, R., Thompson and Jonathan Turk. 1991. **Modern Physical Geology.** Saunders College Publishing. USA. 608 p.

Hattori, T. 1972. **Some properties of recent sediments in the Bangkok plain of Thailand.** Journal of Southeast Asian Studies 10, 321-334.

Japan International Cooperation Agency, 1995. **The Study on Management of Groundwater and Land Subsidence in The Bangkok Metropolitan Area and Its Vicinity Final Report.** Department of Mineral Resources Ministry of Industry and Public Works Department Ministry of Interior the Kingdom of Thailand.

Jarupongsakul, T. 1990. **Geomorphology of Chao Phraya Delta, Thailand.** Kyoto University. Japan.

Lambe, T.W. and R.V. Whitman. 1979. **Soil Mechanics.** John Wiley & Sons, U.S.A.

Luxiang, S. and B. Manfang. 1976. **Preliminary Studies on Land Subsidence of the Urban Area of Shanghai, China.** UNESCO Not published.

NGUYEN, A.D. 1999. **Updating and Analysis of Bangkok Land Subsidence Caused by Deep Well Pumping with Emphasis on Shallow Soil Settlement.** M.Eng. Thesis, AIT.

- Perloff, W.H., W. Baron and J.K. Perloff. 1976. **Soil Mechanics: Principle and Application.** John Wiley & Sons, U.S.A.
- Poland, J.F., B.E. Lofgren, R.L. Ireland and R.G. Pugh. 1975. **Land Subsidence in the San Joaquin Valley as of 1972.** U.S. Geological Survey Prof. Paper 437-H. 78.
- Poland, J.F. 1984. **Guidebook to Studies of Land Subsidence due to Ground-water Withdrawal.** Unesco, U.S.A.
- Premchitt, J. 1978. **Analysis and Simulation of Land Subsidence with Special Reference to Bangkok.** Dissertation, AIT.
- Sridharan A., and K. Prakash. 1985. **Improved Rectangular Hyperbola Method for the Determination of Coefficient of Consolidation.** Journal of Geotechnical Engineering 8: 37–40.
- Sridharan A., and S. Rao. 1981. **Rectangular Hyperbola Fitting Method for One Dimensional Consolidation.** Journal of Geotechnical Engineering 4: 161–168.
- Sutham R. and Warakorn M. 2009. **Mathematical Model for Prediction Land Subsidence Due To Groundwater Withdrawal.** The Regional Symposium on Infrastructure Development (RSID6). GEO12.
- Sutham R. and Warakorn M. 2013. **The Characteristic of Aquifer Drawdown and Settlement of Bangkok and Vicinity Area.** Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 18/X. pp. 5573-5584.
- Takaya, Y. 1968. **Quaternary Outcrops in the Central Plain of Thailand, Report on Research in Southeast Asia, Natural Science Series 3, The Center for Southeast Asian Studies, Kyoto University: p7-68.**

Takaya, Y. 1971. **Two Brackish Clay Beds Along the Chao Phraya River of Thailand.**
Southeast Asian Studies, 9(1): p46-57.

_____. and N. Thiramongkol. 1982. **Chao Phraya Delta of Thailand, Asian Rice-Land Investigation. A Description Atlas 1, The Center for Southeast Asian Studies, Kyoto University. p138.**

Taylor, D.W. 1948. **Fundamentals of Soil Mechanics.** John Wiley & Sons, U.S.A.

Terzaghi, K. 1943. **Theoreical Soil Mechanics.** John Wiley & Sons, U.S.A.

Thepparak, S. 2001. **Analysis of Settlement and Compression of Shallow Soil Strata due to Drawdown of Groundwater in an Underlying Aquifer from Well Pumping in the Bangkok Area.** M.Eng. Thesis, AIT.

Thiramongkol, N. 1984. **Geomorphology of the lower central plain, Thailand.** In: proceeding of 3rd meeting of the working group on Geomorphology of rivers and coastal plain, 113-117p. Department of Geology, Chulalongkorn University, Bangkok

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Unesco). 1984. **Guidebook to Studies of Land Subsidence due to Ground-water Withdrawal. Part I and II.**

Yamamoto, S. 1977. **Land Subsidence in Tokyo, Japan.** Guidebook to Studies of Land Subsidence due to Ground-water Withdrawal. Unesco: p175-184.

_____. 1977. **Land Subsidence in Osaka, Japan.** Guidebook to Studies of Land Subsidence due to Ground-water Withdrawal. Unesco: p185-194.

_____. 1977. **Land Subsidence in Nobi Plain, Japan.** Guidebook to Studies of Land Subsidence due to Ground-water Withdrawal. Unesco: p195-204.

Yamamoto, S. 1977. **Land Subsidence in Niigata, Japan.** Guidebook to Studies of Land Subsidence due to Ground-water Withdrawal. Unesco: p205-216.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

โปรแกรม Mathematica สำหรับวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของชั้นดิน

Stratum properties and data file

Stratum data

$L=21.0$; (* Thickness of doubly-drained clay stratum, m *)

$C_v = 0.3434$; (* $m^2/month$ *)

$\alpha = 0.3434$;

$NL = 21$;

$\Delta z = L/NL$

$\Delta t = \alpha \Delta z^2 / C_v$

$z = \text{Table}[i \Delta z, \{i, 0, NL\}]$;

$\text{time} = \text{Table}[i \Delta t, \{i, 0, 596/\Delta t\}]$;

$Nt = \text{Dimensions}[\text{time}][[1]]$

Load the data file

$\text{data} = \text{Import}["D:\text{Dissertation}\text{Data for Model}\text{Sta1}\text{Case0-Settlement50}\text{BK1.txt}","Table"]$;

$Nd = \text{Dimensions}[\text{data}][[1]]$;

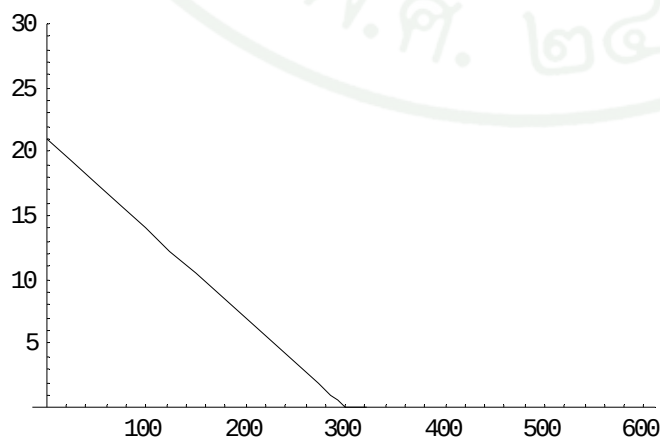
$ut1 = \text{Table}[\{\text{data}[[i,1]], \text{data}[[i,2]]\}, \{i, 1, Nd\}]$;

$ub1 = \text{Table}[\{\text{data}[[i,1]], \text{data}[[i,3]]\}, \{i, 1, Nd\}]$;

$ut = \text{Interpolation}[ut1, \text{InterpolationOrder} \rightarrow 1]$;

$ub = \text{Interpolation}[ub1, \text{InterpolationOrder} \rightarrow 1]$;

$\text{Plot}[\{ut[t], ub[t]\}, \{t, 0, 596\}, \text{PlotRange} \rightarrow \{0, 30\}]$;



Problem solution

Initial and boundary conditions

```
u = Table[0, {j, 1, Nt}, {i, 1, NL + 1}];
Dimensions[u];
uo = Interpolation[{{0., ut1[[1,2]]}, {L, ub1[[1,2]]}}, InterpolationOrder -> 1];
```

Initial condition

```
u[[1]] = Table[uo[z[[i]]], {i, 1, NL + 1}];
```

Boundary conditions at $z = 0$ and $z = L$

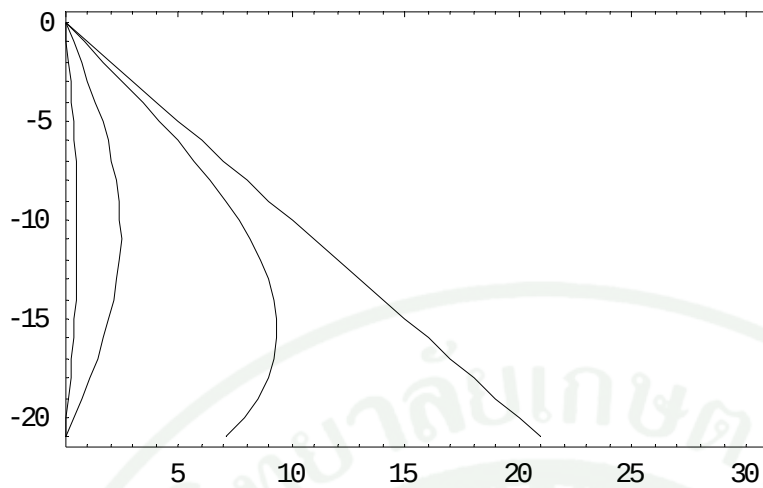
```
Do[u[[i,1]] = ut[time[[i]]]; u[[i,NL + 1]] = ub[time[[i]]]; , {i, 1, Nt}]
TableForm[u];
```

Finite Difference Solution

```
Do[u[[j,i]] =  $\alpha$ *u[[j - 1,i + 1]] + (1 - 2* $\alpha$ )*u[[j - 1,i]] +  $\alpha$ *u[[j - 1,i - 1]], {j, 2, Nt}, {i, 2, NL}];
TableForm[u, TableHeadings -> {time, z}];
```

Graphical solution

```
np = 4;
pick = Join[Table[Round[i], {i, 1, Nt, Nt/(np - 1)}], {Nt}]
pick1 = time[[pick]]
{1, 200, 399, 597}
{0, 199., 398., 596.}
Do[p[i] = ListPlot[Table[{u[[pick[[i]],j]], -z[[j]]}, {j, 1, NL + 1}],
  PlotJoined -> True, PlotRange -> {{0, ub[0] + 10}, Automatic},
  DisplayFunction -> Identity, Frame -> True], {i, 1, np}]
Show[Table[p[i], {i, 1, np}], DisplayFunction -> $DisplayFunction];
```



Degree of consolidation year 2521

$$A_o = \Delta z \cdot (u[[1,1]]/2 + \text{Sum}[u[[1,i]], \{i, 2, NL\}] + u[[1,NL + 1]]/2)$$

220.5

$$A_{25} = \Delta z \cdot (u[[301,1]]/2 + \text{Sum}[u[[301,i]], \{i, 2, NL\}] + u[[301,NL + 1]]/2)$$

70.8008

$$DOC = 1 - A_{25}/A_o$$

0.678908

Degree of consolidation year 2522

$$A_{26} = \Delta z \cdot (u[[313,1]]/2 + \text{Sum}[u[[313,i]], \{i, 2, NL\}] + u[[313,NL + 1]]/2)$$

63.9593

$$DOC = 1 - A_{26}/A_o$$

0.709935

Degree of consolidation year 2523

$$A_{27} = \Delta z \cdot (u[[325,1]]/2 + \text{Sum}[u[[325,i]], \{i, 2, NL\}] + u[[325,NL + 1]]/2)$$

58.1103

$$DOC = 1 - A_{27}/A_o$$

0.736461

Degree of consolidation year 2524

$$A_{28} = \Delta z \cdot (u[[337,1]]/2 + \text{Sum}[u[[337,i]], \{i, 2, NL\}] + u[[337,NL + 1]]/2)$$

52.8967

$$DOC = 1 - A_{28}/A_o$$

0.760106

Degree of consolidation year 2525

$$A29 = \Delta z * (u[[349,1]]/2 + \text{Sum}[u[[349,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[349,\text{NL} + 1]]/2)$$

48.1917

$$\text{DOC} = 1 - A29/A_o$$

0.781443

Degree of consolidation year 2526

$$A30 = \Delta z * (u[[361,1]]/2 + \text{Sum}[u[[361,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[361,\text{NL} + 1]]/2)$$

43.9226

$$\text{DOC} = 1 - A30/A_o$$

0.800804

Degree of consolidation year 2527

$$A31 = \Delta z * (u[[373,1]]/2 + \text{Sum}[u[[373,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[373,\text{NL} + 1]]/2)$$

40.0391

$$\text{DOC} = 1 - A31/A_o$$

0.818417

Degree of consolidation year 2528

$$A32 = \Delta z * (u[[385,1]]/2 + \text{Sum}[u[[385,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[385,\text{NL} + 1]]/2)$$

36.5022

$$\text{DOC} = 1 - A32/A_o$$

0.834457

Degree of consolidation year 2529

$$A33 = \Delta z * (u[[397,1]]/2 + \text{Sum}[u[[397,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[397,\text{NL} + 1]]/2)$$

33.2791

$$\text{DOC} = 1 - A33/A_o$$

0.849074

Degree of consolidation year 2530

$$A34 = \Delta z * (u[[409,1]]/2 + \text{Sum}[u[[409,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[409,\text{NL} + 1]]/2)$$

30.3412

$$\text{DOC} = 1 - A34/A_o$$

0.862398

Degree of consolidation year 2531

$$A35 = \Delta z * (u[[421,1]]/2 + \text{Sum}[u[[421,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[421,\text{NL} + 1]]/2)$$

27.6628

$$\text{DOC} = 1 - A35/A_o$$

0.874545

Degree of consolidation year 2532

$$A36 = \Delta z * (u[[433,1]]/2 + \text{Sum}[u[[433,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[433,\text{NL} + 1]]/2)$$

25.2211

$$\text{DOC} = 1 - A36/A_o$$

0.885619

Degree of consolidation year 2533

$$A37 = \Delta z * (u[[445,1]]/2 + \text{Sum}[u[[445,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[445,\text{NL} + 1]]/2)$$

22.9949

$$\text{DOC} = 1 - A37/A_o$$

0.895715

Degree of consolidation year 2534

$$A38 = \Delta z * (u[[457,1]]/2 + \text{Sum}[u[[457,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[457,\text{NL} + 1]]/2)$$

20.9652

$$\text{DOC} = 1 - A38/A_o$$

0.90492

Degree of consolidation year 2535

$$A39 = \Delta z * (u[[469,1]]/2 + \text{Sum}[u[[469,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[469,\text{NL} + 1]]/2)$$

19.1147

$$\text{DOC} = 1 - A39/A_o$$

0.913312

Degree of consolidation year 2536

$$A40 = \Delta z * (u[[481,1]]/2 + \text{Sum}[u[[481,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[481,\text{NL} + 1]]/2)$$

17.4275

$$\text{DOC} = 1 - A40/A_o$$

0.920964

Degree of consolidation year 2537

$$A41 = \Delta z * (u[[493,1]]/2 + \text{Sum}[u[[493,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[493,\text{NL} + 1]]/2)$$

$$15.8892$$

$$\text{DOC} = 1 - A41/A_o$$

$$0.92794$$

Degree of consolidation year 2538

$$A42 = \Delta z * (u[[505,1]]/2 + \text{Sum}[u[[505,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[505,\text{NL} + 1]]/2)$$

$$14.4868$$

$$\text{DOC} = 1 - A42/A_o$$

$$0.9343$$

Degree of consolidation year 2539

$$A43 = \Delta z * (u[[517,1]]/2 + \text{Sum}[u[[517,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[517,\text{NL} + 1]]/2)$$

$$13.2081$$

$$\text{DOC} = 1 - A43/A_o$$

$$0.940099$$

Degree of consolidation year 2540

$$A44 = \Delta z * (u[[529,1]]/2 + \text{Sum}[u[[529,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[529,\text{NL} + 1]]/2)$$

$$12.0423$$

$$\text{DOC} = 1 - A44/A_o$$

$$0.945387$$

Degree of consolidation year 2541

$$A45 = \Delta z * (u[[541,1]]/2 + \text{Sum}[u[[541,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[541,\text{NL} + 1]]/2)$$

$$10.9793$$

$$\text{DOC} = 1 - A45/A_o$$

$$0.950207$$

Degree of consolidation year 2542

$$A46 = \Delta z * (u[[553,1]]/2 + \text{Sum}[u[[553,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[553,\text{NL} + 1]]/2)$$

$$10.0102$$

$$\text{DOC} = 1 - A46/A_o$$

$$0.954602$$

Degree of consolidation year 2543

$$A47 = \Delta z * (u[[565,1]]/2 + \text{Sum}[u[[565,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[565,\text{NL} + 1]]/2)$$

9.12668

$$\text{DOC} = 1 - A47/A_o$$

0.958609

Degree of consolidation year 2544

$$A48 = \Delta z * (u[[577,1]]/2 + \text{Sum}[u[[577,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[577,\text{NL} + 1]]/2)$$

8.32111

$$\text{DOC} = 1 - A48/A_o$$

0.962263

Degree of consolidation year 2545

$$A49 = \Delta z * (u[[589,1]]/2 + \text{Sum}[u[[589,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[589,\text{NL} + 1]]/2)$$

7.58664

$$\text{DOC} = 1 - A49/A_o$$

0.965593

Degree of consolidation year 2546

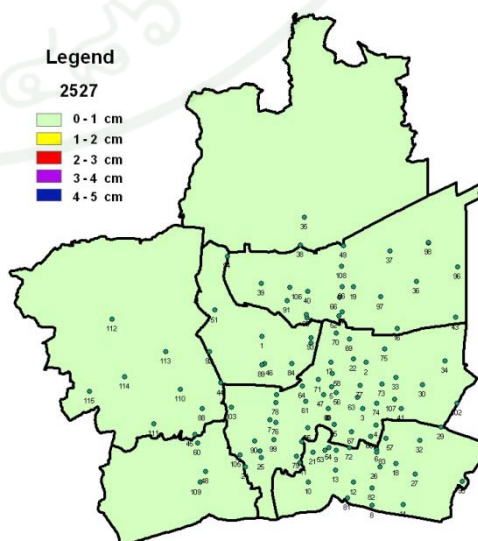
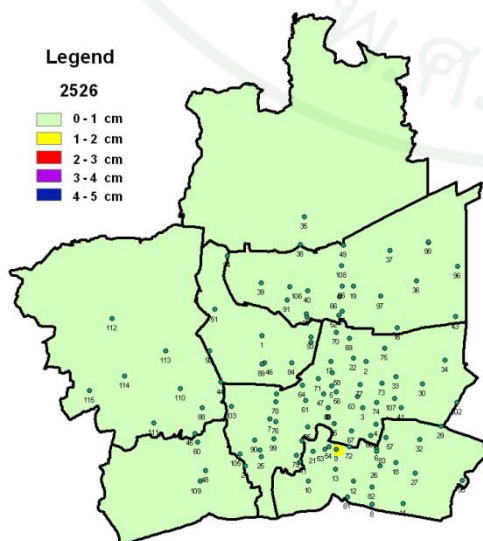
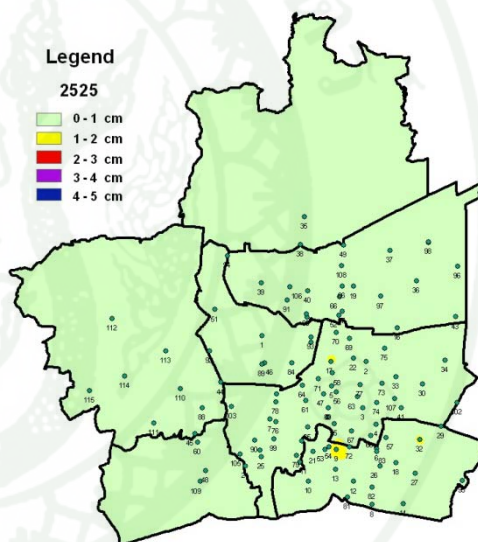
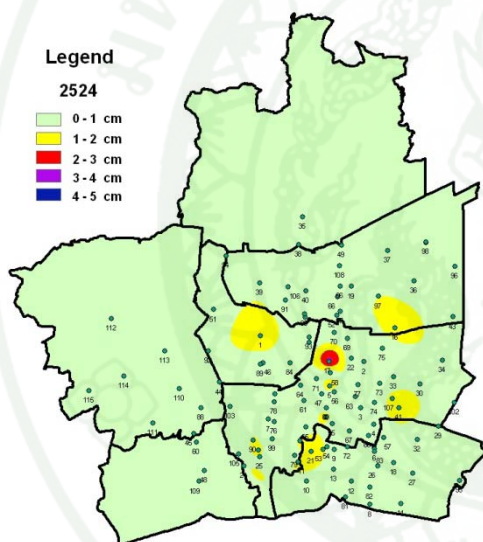
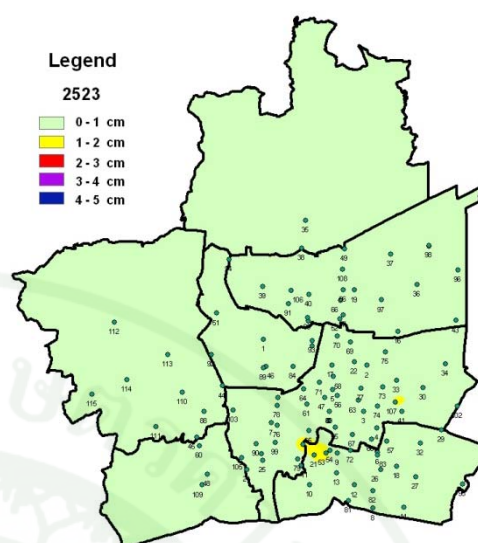
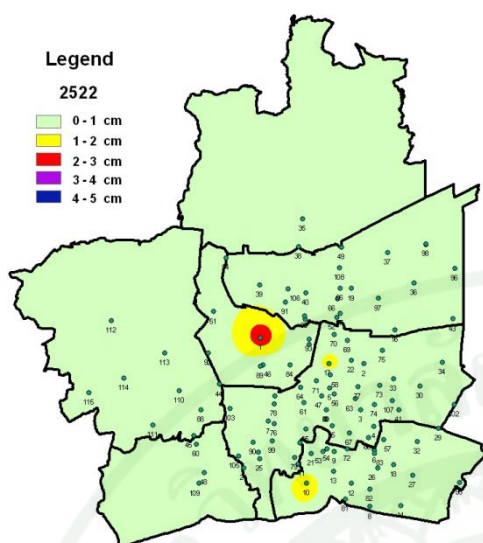
$$A50 = \Delta z * (u[[596,1]]/2 + \text{Sum}[u[[596,i]], \{i, 2, \text{NL}\}] + u[[596,\text{NL} + 1]]/2)$$

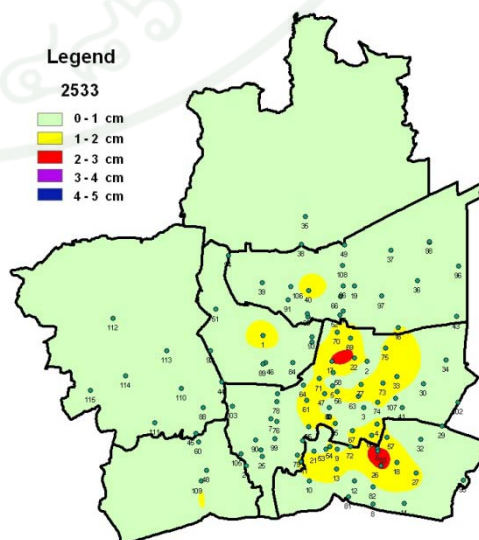
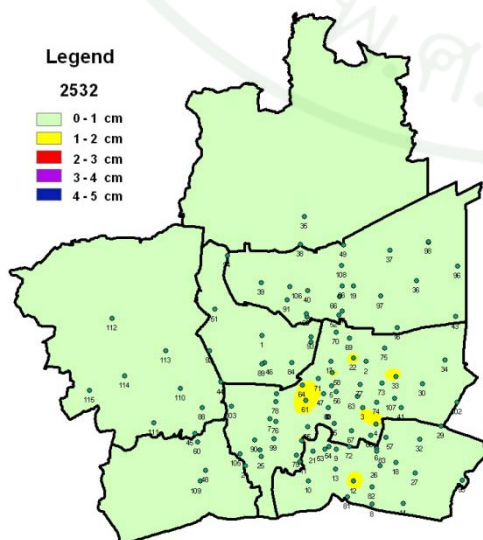
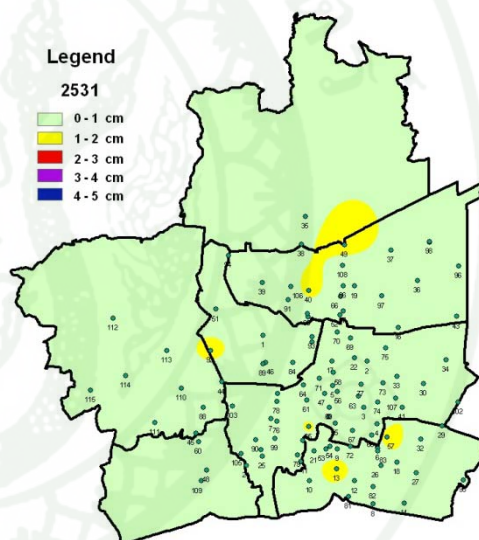
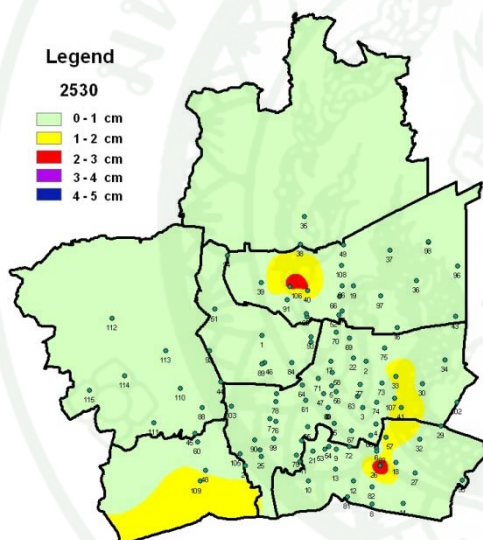
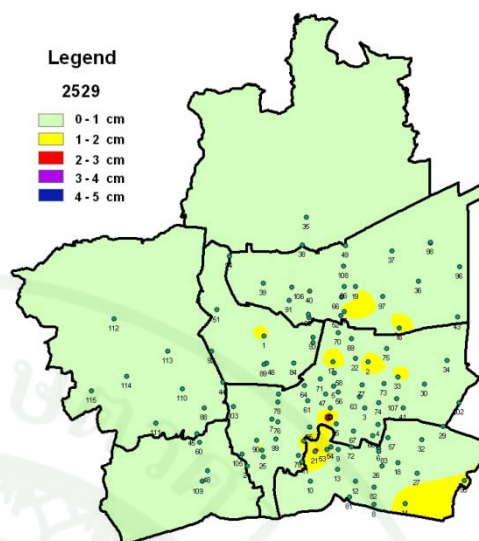
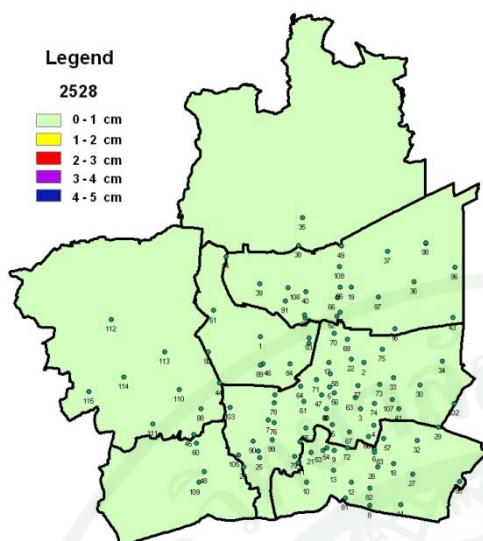
7.18852

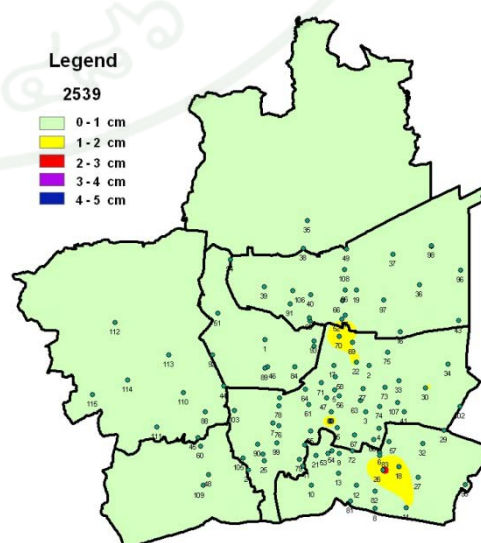
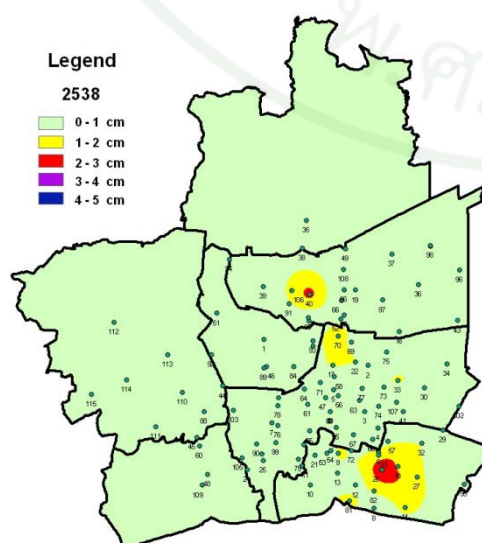
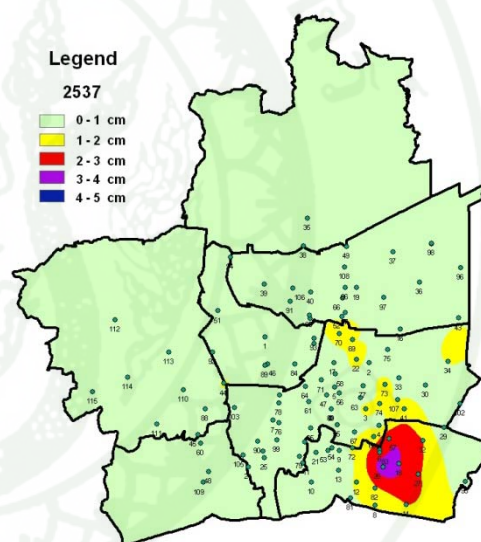
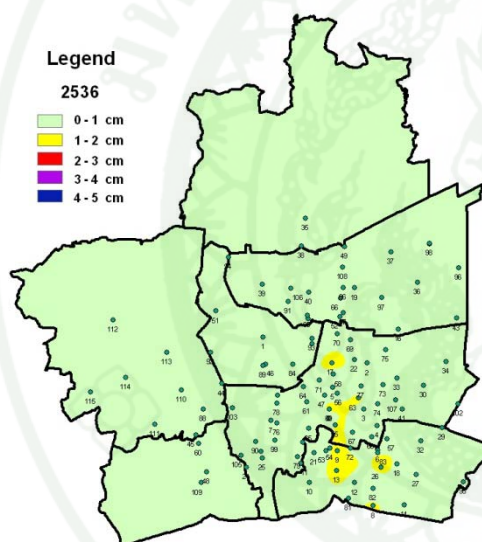
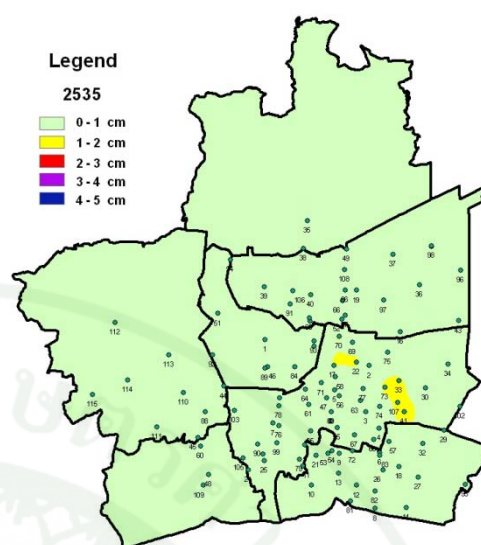
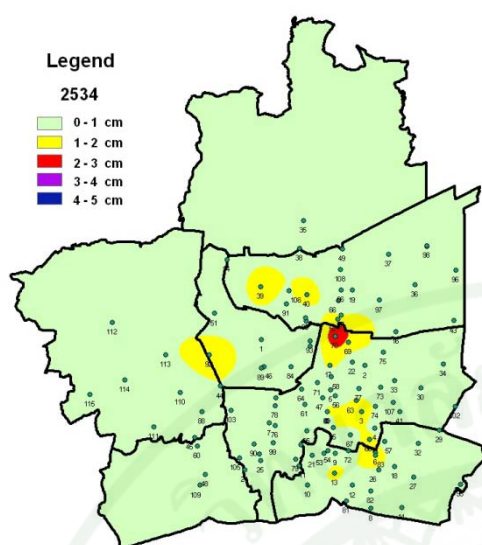
$$\text{DOC} = 1 - A50/A_o$$

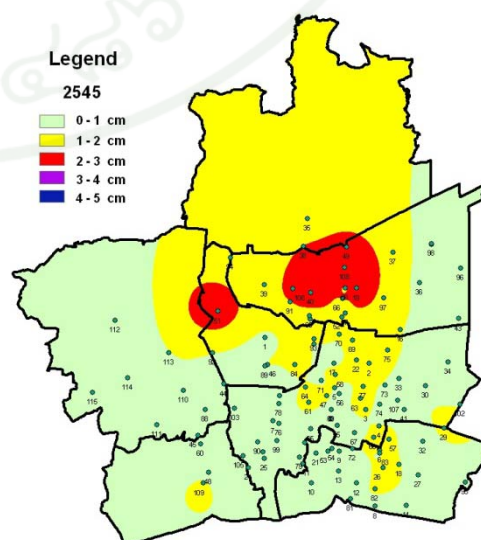
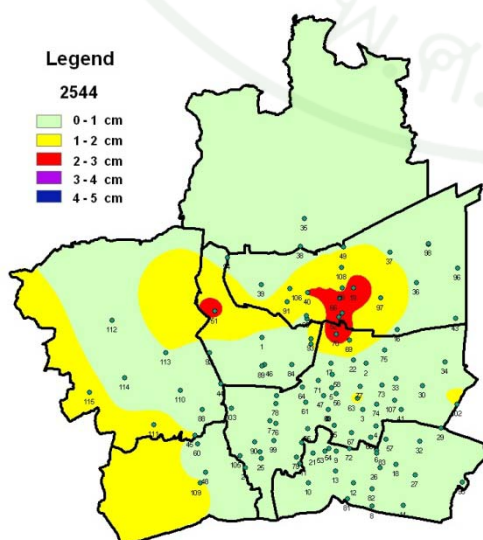
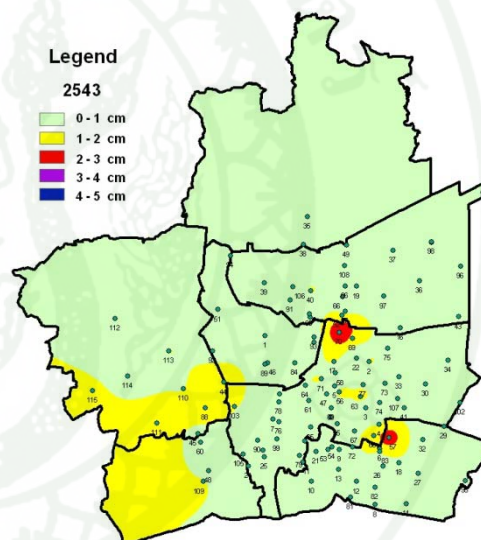
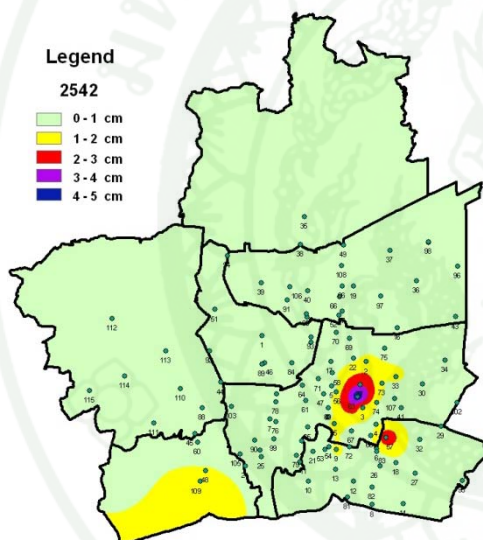
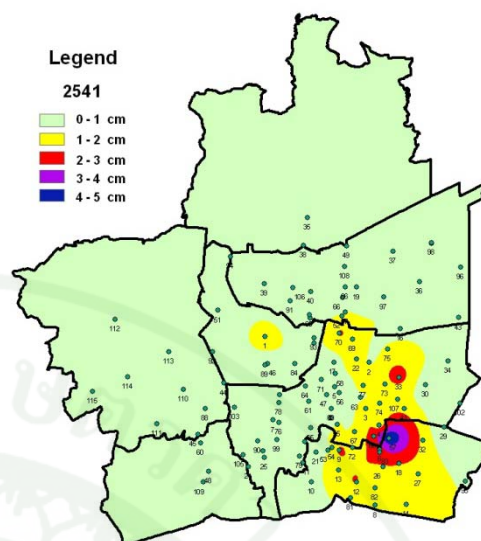
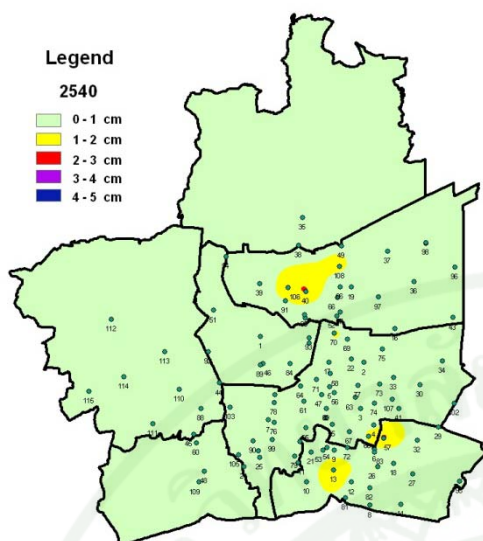
0.967399

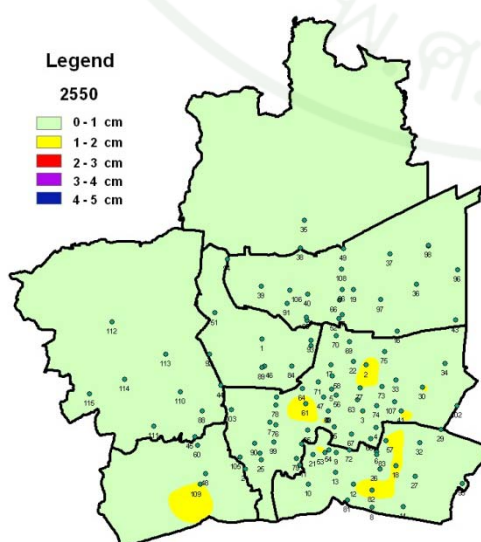
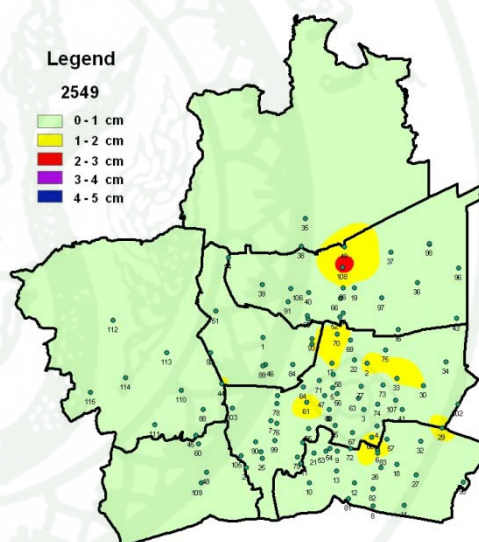
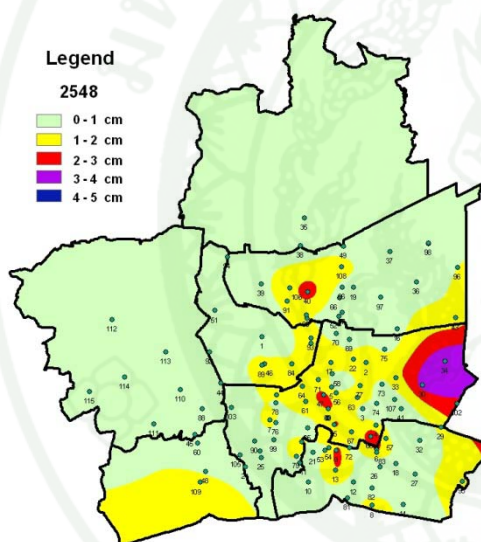
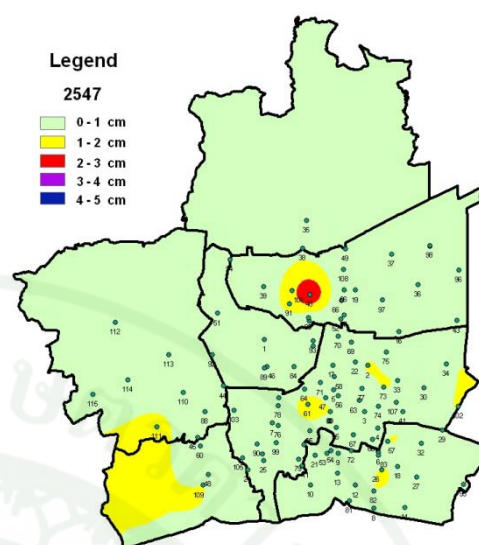
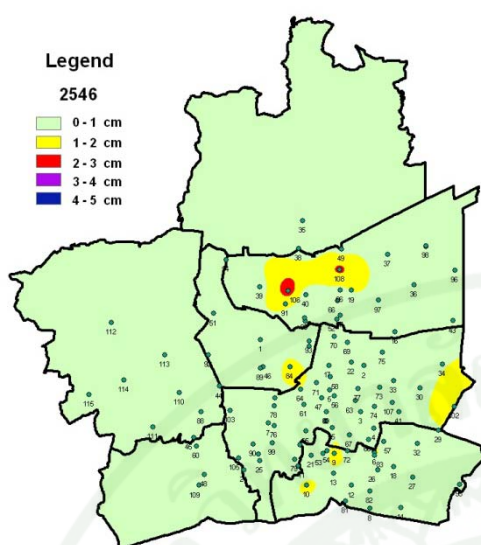














ภาคผนวก ค

การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของชั้นทรายกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียว

การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของชั้นทรายกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียว

ในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาผลการทรุดตัวของชั้นทรายในแบบจำลอง เนื่องจากมีขนาดของค่าการทรุดตัวน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของค่าการทรุดตัวในชั้นดินเหนียว โดยในที่นี้จะแสดงวิธีการคำนวณค่าการทรุดตัวของชั้นทรายเนื่องจากการลดระดับของน้ำบาดาลเพื่อเปรียบเทียบผลต่างของการทรุดตัวของชั้นดินทั้งสองชนิด

การวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของชั้นทรายส่วนใหญ่จะใช้วิธีทฤษฎีอีลาสติกในการคำนวณ โดยมีสมการ ดังนี้

$$S_i = \frac{\Delta q B I (1 - \nu^2)}{E_s} \quad (75)$$

S_i	=	การทรุดตัวทันทีที่จุดศูนย์กลางของน้ำหนัก
q	=	น้ำหนักที่กระทำต่อชั้นดิน ($\Delta \sigma'$)
B	=	ความกว้างที่น้อยที่สุดของน้ำหนัก
I	=	Influence factor
ν	=	Poisson's ratio
E_s	=	Elastic Modulus of Soil (ตารางที่ 13)

แต่เนื่องจากการทรุดตัวของชั้นทรายที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลจะเป็นการทรุดตัวที่เป็นพื้นที่บริเวณกว้างและเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่น้ำบาดาลถูกสูบออกไปโดยมีน้ำหนักของดินชั้นบนเป็นตัวกระทำให้เกิดความเค้นโดยไม่มีขอบเขตจำกัด (Unconfined) และการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีนี้จะเป็นการทรุดตัวเกือบทั้งหมดเนื่องจากชั้นทรายมีค่าความชื้นน้ำสูงน้ำจึงสามารถไหลออกได้ง่ายเป็นผลให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและเกิดการทรุดตัวได้ทันที ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้สมการที่ (75) ได้ซึ่งใช้สำหรับการหาค่าการทรุดตัวแบบทันทีทันใดในกรณีของหน่วยแรงที่มีขอบเขตจำกัด (Confined) เช่น หน่วยแรงเนื่องจากฐานรากของอาคาร เป็นต้น

การพิจารณาเลือกใช้ค่า E_s สำหรับคำนวณค่าการทรุดตัวของชั้นทรายจะพิจารณาระดับความลึกของชั้นทราย ซึ่งชั้นทรายหรือชั้นน้ำบาดาลที่อยู่ระดับลึกมากก็จะมีค่าความแน่นมาก (Very

Dense) ถ้า E_s ก็จะสูงโดยอาจใช้ค่าหน่วยน้ำหนักหรืออัตราส่วนช่องว่างมาพิจารณาหรือสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นก็สามารถประมาณค่า E_s ได้

ตารางผนวกที่ ก1 ค่า Elastic Modulus ของดินชนิดต่าง ๆ

Materials	Elastic Modulus, E (Mpa)	
	Mpa	t/m ²
Rock	2,000 – 20,000	$2.04 \times 10^5 - 2.04 \times 10^6$
Weathered Rock	500 – 5,000	$5.10 \times 10^4 - 5.10 \times 10^5$
Dense Sand and Gravel	50 – 1,000	$5.10 \times 10^3 - 1.02 \times 10^5$
Firm Clay	5 – 50	$5.10 \times 10^2 - 5.10 \times 10^3$
Soft Clay	0.5 – 5	$5.10 \times 10^1 - 5.10 \times 10^2$

ที่มา: http://www.piople.eng.unimelb.edu.au/stsy/geomechanics_text/Ch9_settlement.pdf

ดังนั้น การหาค่าการทรุดตัวของชั้นทรายเนื่องจากการลดระดับของน้ำบาดาลนี้จะใช้สูตรความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain ดังมีรายละเอียด ดังนี้

$$E = \frac{\text{Stress}(\sigma)}{\text{Strain}(\varepsilon)}$$

$$= \frac{\Delta q}{S_i / D}$$

$$S_i = \frac{\Delta q D}{E}$$

โดยที่ S_i = การทรุดตัวทันทีของชั้นทราย

Δq = หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดระดับน้ำบาดาล

D = ความหนาของชั้นทราย

E = Elastic Modulus of Soil

ตารางผนวกที่ ค2 ตัวอย่างการคำนวณค่าการทรุดตัวของชั้นทรายเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวของ Sta57 อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ

Sta57	Thickness, D (m)	q (t/m ²)	γ_t (t/m ³)	e_0	E_s (t/m ²)	S_i (cm)	S_c (cm)
BK	25	57	1.8	1.1	5.10×10^4	2.79	245.82
PD1	2	57	2.1	0.5	5.10×10^4	0.22	41.18
PD2	9	57	2.1	0.5	5.10×10^4	1.01	
PD3	26	57	2.1	0.5	5.10×10^4	2.91	
NL1	19	59	2.1	0.5	1.02×10^5	1.10	8.97
NL2	19	59	2.2	0.4	1.02×10^5	1.10	
NB	52	54	2.2	0.4	1.02×10^5	2.75	5.87
Total						11.88	301.84

$$\frac{S_i}{S_c} = \frac{11.88}{301.84} \times 100 = \underline{\underline{3.9\%}}$$

จากผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียว (Aquitard) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในแบบจำลองได้ค่าการทรุดตัวทั้งหมด (S_c) เท่ากับ 301.84 cm เมื่อเทียบกับค่าการทรุดตัวของชั้นทรายแล้วจะได้ว่า ค่าการทรุดตัวของชั้นทราย (S_i) จะมีขนาดประมาณ 3.9% ของค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียว

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายสุธรรม โรจนเมฆา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	18 กรกฎาคม 2507
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตำแหน่งปัจจุบัน	อาจารย์
สถานที่ทำงาน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์