



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสสะพาน

A Study of Behaviors of Bridge Approach Structures

นามผู้วิจัย นายกฤษณ์ เสาวเวียง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รongศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์บารเมศ วรรณะภูติ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รongศาสตราจารย์จรัสพัฒน์ โชติกร, M.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รongศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รongศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพาน

A Study of Behaviors of Bridge Approach Structures

โดย

นายกฤษณ์ เสาเวียง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2552

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กฤษณ์ เสาเวียง 2552: การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพาน
ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชา
วิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D. 134 หน้า

ปัญหาการทรุดตัวต่างระดับบริเวณคอสะพาน ส่งผลให้ความสะดวกและความปลอดภัย
ในการขับขี่ลดลง โดยเฉพาะพื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลซึ่งสภาพทางธรณีวิทยา
เป็นดินเหนียวอ่อนและมีคุณสมบัติการยุบอัดตัวสูงทำให้เกิดการทรุดตัวต่างกันระหว่างสะพานกับ
คันทางมากถึงแม้ว่าในปัจจุบันมีการใช้โครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพานแต่ปัญหายังไม่
หมดไป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของโครงสร้างบริเวณคอสะพานชนิด Approach
Slab on Ground และ Approach Slab on Pile โดยมีการตรวจวัดค่าระดับหลังทาง วิเคราะห์การทรุด
ตัวโดยใช้ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำ และวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวด้วยทฤษฎี
Beam on Elastic Material ร่วมกับวิธี Finite Element เพื่อศึกษาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นใน
แผ่นพื้นคอนกรีต โดยหาค่าสถิติเฟนสของสปริงได้จากการประยุกต์ใช้หลักการ Tangent Modulus
ร่วมกับผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำจากห้องปฏิบัติการ

จากผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground ให้ค่า
การทรุดตัวต่างระดับระหว่างสะพานกับคันทางสูงมาก โดยมีความลาดชันสูงสุดถึง 9 % ส่งผลให้
เกิดความเสียหายแก่แผ่นพื้นคอนกรีต โดยเกิดรอยแตกที่ตำแหน่งค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด คือระยะ
ประมาณ 4 เมตรห่างจากตอม่อสะพาน สำหรับโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile ให้ค่าการ
ทรุดตัวต่างระดับน้อยกว่าโดยมีความลาดชันสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณที่แผ่นพื้นคอนกรีตวางอยู่บนเสาเข็ม
ซึ่งปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับรอยต่อระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อนกับชั้นดินเหนียวแข็ง ค่าโมเมนต์ดัดที่
เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าค่าโมเมนต์ดัดที่ยอมรับให้ ส่งผลให้แผ่นพื้นคอนกรีตของโครงสร้างปรับการทรุด
ตัวเกิดการแตกร้าวที่ระยะทางประมาณ 16 - 24 เมตร ห่างจากตำแหน่งตอม่อสะพานซึ่งให้ผลที่
สอดคล้องกับผลการตรวจวัดในสนาม ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการจัด
เรียงความยาวเสาเข็มให้สอดคล้องกับสภาพชั้นดินที่มีหลายชั้นและมีคุณสมบัติด้านการทรุดตัว
ของแต่ละชั้นแตกต่างกัน

Krit Soawiang 2009: A Study of Behaviors of Bridge Approach Structures.
Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering,
Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor
Korchoke Chantawarangul, Ph.D. 134 pages.

An excessive differential settlement at a bridge approach causes driver discomfort and reduces driver safety. This problem generally occurs in the central part of Thailand, especially, on the Bangkok subsoil, which has high compressibility. The structure of the bridge approach has continually developed to reduce the differential settlement but this problem still occurs.

The purpose of this research was to study behaviors of 2 types of bridge approach structure, which are approach slab on ground and approach slab on pile. The data used in this research were obtained from bridge structures, including settlement observation, subsoil data and as-built drawing. The settlement analysis was carried out using 1-D Terzaghi consolidation theory, and the behaviors of concrete slab were analysed by the beam on elastic material concept, combined with finite element method to determine shear and moment in the structure. The value of spring stiffness is determined from tangent modulus concept and the oedometer test data.

The results of the settlement calculation show that the maximum differential settlement of the approach slab on ground induces 9% of slope, which causes concrete slab damage. Cracking occurs at the maximum bending moment of the concrete slab about 4 m from the abutment. In the case of the approach slab on pile, the differential settlement is less than the previous one. The maximum differential settlement occurs at the piles tips laid between soft clay and medium stiff clay layer. The maximum bending moment is higher than the allowable bending moment. The cracking of the concrete slab occurs at a distance about 14 – 16 m from abutment which corresponds to the field observation. The results of this study can be used for the design of bridge approach structure and the arrangement of pile lengths in the different subsoil layers.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.วิโรจน์ ฐโงปการ ประธานการสอบ รศ.ดร.ก่อโชค จันทรวงกูร อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ อ.ดร.บารเมศ วรรณนะภูติ รศ.จิรพัฒน์ โชติกไกร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.วิชาญ ภูพัฒน์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ชี้ทางและให้ กระบวนการคิดในการแก้ปัญหาต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุทธศักดิ์ สรลัมพ์ หัวหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี และฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดร.จุฑา สุนิตย์สกุล ดร.อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง แขวงการทางนทบุรี คุณชัยพร บัวสรวง สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร คุณประเทือง อินคุ่ม บริษัทอินเตอร์เนชั่นแนล เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูลและกรณีศึกษาในการทำวิทยานิพนธ์

กราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สถาพร โภคา คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุดรราชธานี ครูผู้ให้โอกาสและเป็นแบบอย่าง ทั้งด้านการศึกษา การประกอบอาชีพเป็นวิศวกรและ แนวทางในการดำเนินชีวิตที่ดี

ขอขอบคุณ คุณชูศักดิ์ ศิริรัตน์ คุณวัลลพ จิวหลง คุณสรศักดิ์ เชื้อวศิริกุล และนิติติ วิศวกรรมปฐพีทุกท่าน ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและคอยเป็นกำลังใจ

กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ยอมลำบากเพื่อการศึกษาของลูก ขอขอบคุณ น้องสาว ที่คอยเป็นกำลังใจตลอดมา ทำให้การศึกษาครั้งนี้สำเร็จด้วยดี

หากงานวิจัยนี้มีความดีและเป็นประโยชน์ ข้าพเจ้าขออุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กฤษณ์ เสาเวียง

ตุลาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	38
อุปกรณ์	38
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	62
สรุปและข้อเสนอแนะ	87
สรุป	87
ข้อเสนอแนะ	88
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	89
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก การคำนวณค่าการทรุดตัวด้วยทฤษฎีของ Terzahi (1943)	95
ภาคผนวก ข กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus และค่า Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number ตามทฤษฎีของ Janbu (1963)	105
ภาคผนวก ค การคำนวณหาค่า Modulus of Subgrad Reaction	112
ภาคผนวก ง รายการคำนวณออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile	125
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	134

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าตอบสนองการ (Close-Form) ในการรับแรงของ โครงสร้างที่มีความยาวมาก วางบนฐานรองรับแบบยึดหยุ่น	21
2	แสดงค่า Stress Exponent และ Modulus Number ของหินและดินชนิดต่างๆ	25
3	สรุปลักษณะชั้นดินบริเวณคอสะพานข้ามคลองสอง บนถนนกรุงเทพกรีฑา – ร่วมเกล้า	45
4	ค่าการทรุดตัวสูงสุดของ โครงการปรับการทรุดตัวประเภท Approach Slab on Ground และถนนบนคันดินถม	49
5	ความลาดชันของผิวทางแบบแปลนก่อสร้าง (As-Built Drawing) และผล ตรวจวัดในสนาม ของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	49
6	สรุปลักษณะชั้นดินบริเวณคอสะพานข้ามคลองบางตะไนย	53
7	ค่าสูงสุดของการทรุดตัวในช่วง โครงสร้างปรับการทรุดตัวประเภท Approach Slab on Pile และถนนบนคันดินถม	59
8	ความลาดชันสูงสุดของผิวทางจากผลการตรวจวัดในสนาม ของ โครงสร้าง แบบ Approach Slab on Pile	59
9	น้ำหนักบรรทุกทุกของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	62
10	การคำนวณ Elastic Settlement (s) ของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	64
11	น้ำหนักบรรทุกทุกของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	72
12	การคำนวณ Elastic Settlement (s) ของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
13	สรุปค่าการทรุดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	74
14	แสดงค่า Modulus of Subgrade reaction และ Spring Constant ของเสาเข็มทั้งหมดภายใต้น้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	78
15	แสดงค่าสปริงสปีนเนสที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของพื้นคอนกรีตและค่าการทรุดตัวโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile หลังการใช้งาน 2 ปี	79
16	แสดงค่าความยาวเสาเข็มและสตีพเนสของสปริงที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile	84
ตารางผนวกที่		
ง1	ระดับควบคุมการทรุดตัวและการเปลี่ยนแปลงความชันทุกๆ 2 เมตร	127
ง2	เปรียบเทียบค่าจากการคำนวณทาง Geometric Design กับการวิเคราะห์	129
ง3	แสดงค่าความยาวเสาเข็มและสตีพเนสของสปริงที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile	130
ง4	แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความสูงดินถมคันทางกับความยาวเสาเข็มและค่าสตีพเนสของสปริง	131
ง5	เปรียบเทียบค่าจากการคำนวณทาง Geometric Design กับการออกแบบ	133

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การทรุดตัวของคอสะพานบนพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ทางหลวงหมายเลข 34 (บางนา-บางปะกง)	2
2	การทรุดตัวของคอสะพานลอยกลับรถทำให้โครงสร้างสะพานชำรุดทางหลวงหมายเลข 35 (ธนบุรี-ปากท่อ)	2
3	การทรุดตัวบริเวณคอสะพานข้ามคลองสอง ถนนกรุงเทพกรีฑา – ร่มเกล้า ช่วงที่ 3	3
4	การทรุดตัวเกินพิสัยของบริเวณคอสะพานถนนบางขุนเทียน – ชายทะเล	3
5	การกระจายของหน่วยแรงกรณีฐานรากเสาเข็ม	10
6	ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Consolidation และ Time Factor ค่า Time Factor แสดง ใน (ก) Arithmetic Scale และ (ข) Logarithmic Scale เส้น C_1 , C_2 และ C_3 ขึ้นกับ Loading Condition และ Drainage Condition	11
7	Isochrones แสดงกระบวนการ Consolidation ของชั้นดินเหนียวในกรณี Excess porewater Pressure และ Drainage Boundary Condition ต่างๆ	12
8	ชั้นดินอ่อนมากกว่า 1 ชั้นประกอบด้วยชั้นดินที่สามารถระบายน้ำได้ดี (Free Drainage Boundary Layer)	14
9	ความสัมพันธ์ U-T สำหรับชั้นดินอ่อนประกอบด้วยชั้นดินที่สามารถระบายน้ำได้บางส่วน (Partially Drainage Boundary Layer)	14
10	โครงสร้างที่วางตัวบนฐานรองรับแบบยึดหยุ่น (ก) และ สมดุลของแรง (ข)	17
11	โครงสร้างมีความยาวอนันต์วางบนฐานรองรับแบบยึดหยุ่น โดย (ก) รับน้ำหนักกระทำ แบบจุดและ (ข) รับโมเมนต์กระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลาง	21
12	โครงสร้างมีความยาวอนันต์วางบนฐานรองรับแบบยึดหยุ่น (ก) แสดงจุดรองรับเป็นสปริงที่มีช่วงความกว้างเท่ากัน (ข) แสดงแรงกระจายสม่ำเสมอของสปริงรองรับ	22
13	โครงสร้างมีความยาวจำกัดวางบนฐานรองรับแบบยึดหยุ่นโดยมีจุดรองรับเป็นสปริงที่มีช่วงความกว้างเท่ากัน	22

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	ความสัมพันธ์ระหว่าง σ' - ϵ (ก) และ(ข) Tangent Modulus - σ'	26
15	ความสัมพันธ์ระหว่าง σ' - ϵ และ M - ϵ จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ	
16	σ'_c คือ Critical Stress หรือเท่ากับ Preconsolidation Pressure (σ'_p)	26
16	ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m)	28
17	แบบจำลองการวิเคราะห์กรณี Approach Slab on Ground (ก) รูปแบบจริง (ข) การใช้ Spring เป็นชิ้นส่วนเชื่อมต่อ	30
18	แบบจำลองการวิเคราะห์กรณี Approach Slab on Pile (ก) รูปแบบจริง (ข) การใช้ Spring เป็นชิ้นส่วนเชื่อมต่อ	31
19	ชิ้นส่วนโครงสร้างคานวางบนจตุรรองรับแบบยึดหยุ่น (Spring Action at Nodes)	34
20	แสดงระยะที่ใช้ในการคำนวณค่า Vertical Alignment บริเวณคอสะพาน	36
21	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	39
22	ตำแหน่งที่ตั้งโครงการกรณีศึกษา 2 โครงการ คือ (1) โครงการสะพานข้ามคลองสองบน ถนนกรุงเทพกรีฑา-ร่วมเกล้าช่วงที่ 3, (2) โครงการสะพานข้ามคลองบางตะไนย บนทาง หลวงพิเศษหมายเลข 345	43
23	ลักษณะโครงสร้างปรับการทรุดตัว โครงการสะพานข้ามคลองสองบนถนนกรุงเทพ กรีฑา – ร่วมเกล้า ช่วงที่ 3	44
24	คุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดิน โครงการสะพานข้ามคลองสองบนถนนกรุงเทพกรีฑา – ร่วมเกล้า	46
25	ภาพตัดตามยาวโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground	47
26	แปลนแสดงตำแหน่งจุดสำรวจค่าระดับของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	รูปตัดแสดงตำแหน่งจุดสำรวจค่าระดับของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	48
28	เปรียบเทียบค่าระดับจาก As-Built Drawing และผลการตรวจวัดระดับผิวทางภายหลังการก่อสร้าง ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground ฝั่งขาลงสะพาน	50
29	เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงความชันตาม ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground ฝั่งขาลงสะพาน	50
30	เปรียบเทียบค่าระดับจาก As-Built Drawing และผลการตรวจวัดระดับผิวทางภายหลังการก่อสร้าง ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground ฝั่งขาขึ้นสะพาน	51
31	เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงความชันตาม ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground ฝั่งขาขึ้นสะพาน	51
32	ลักษณะโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน ข้ามคลองบางตะไนย	52
33	สรุปลักษณะชั้นดินบริเวณคอสะพานข้ามคลองบางตะไนย	54
34	แปลนโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile	56
35	ภาพตัดตามยาวของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile	57
36	ภาพตัดตามขวางของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile	57
37	แปลนแสดงตำแหน่งสำรวจค่าระดับ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	58
38	รูปตัดแสดงตำแหน่งสำรวจค่าระดับ ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	58
39	เปรียบเทียบค่าระดับจาก As-Built Drawing และผลการตรวจวัดระดับผิวทางภายหลังการก่อสร้างตามแนว L1 ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงความชันตามแนว L1 ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile	60
41	เปรียบเทียบค่าระดับจาก As-Built Drawing และผลการตรวจวัดระดับผิวทางภายหลังการก่อสร้างตามแนว L2 ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile	61
42	เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงความชันตามแนว L2 ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile	61
43	แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	63
44	แรงกระทำต่อฐานรากเสาเข็มบริเวณคอสสะพานของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	63
45	ชั้นดินและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวคั่นทางของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	64
46	ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวโดยวิธี Terzaghi Consolidation Theory ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	65
47	การปรับแก้ความหนาของชั้นดินและ Boundary Drainage Layer สำหรับวิเคราะห์อัตราทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	66
48	เปรียบเทียบค่าทรุดตัวของผลการวิเคราะห์และผลตรวจวัดในสนามของของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	67
49	แสดงชั้นดินและสมการหาค่า Tangent Modulus ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	68
50	แบบจำลองการวิเคราะห์การทรุดตัว และแรงภายในของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	69
51	แสดงปริมาณการทรุดตัว จากภาพถ่ายค่าสถิติเฟนสของสปริงเพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground	70

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
52	แสดงแรงเฉือน และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นใน Concrete Pavement ที่ ระดับการ ทรุดตัวปัจจุบัน ของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	71
53	ตำแหน่งการวิเคราะห์การทรุดตัวของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	73
54	ชั้นดินและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวคันทางของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	73
55	การปรับแก้ความหนาของชั้นดินและ Boundary Drainage Layer สำหรับ วิเคราะห์ห้อัตรา การทรุดตัวของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	75
56	เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวจากผลการวิเคราะห์และค่าตรวจวัดในสนามของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	76
57	แสดงชั้นดินและสมการหาค่า Tangent Modulus ของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	77
58	แบบจำลองวิเคราะห์การทรุดตัวของ Concrete Pavement (ก) และ (ข) แบบจำลองวิเคราะห์แรงภายใน Concrete Slab ของของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	80
59	แสดงรูปแบบ โครงสร้าง ลักษณะชั้นดิน ค่าการทรุดตัวทั้งหมดและค่าการ ทรุดตัวจากการ ทายค่าสถิติเฟนสของสปริงเพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	81
60	แสดงรูปแบบ โครงสร้าง ลักษณะชั้นดิน แรงเฉือน และ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นใน Concrete Slab ของ Approach Slab on Pile ณ เวลา 2 ปี หลังการใช้งาน	82
61	ตำแหน่งรอยแตกที่เกิดขึ้นในสนาม (ก) และ (ข) รอยแตกที่ตำแหน่ง 15 เมตรและ 17 เมตร จากตอม่อสะพาน	83
62	รูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มและความยาวเสาเข็มของ โครงสร้างปรับการทรุด ตัวแบบ Approach Slab on Pile	85
63	เปรียบเทียบรูปแบบการทรุดตัวควบคุม ทายค่าสถิติเฟนสของสปริงที่ เหมาะสมและค่าสถิติเฟนสของสปริงที่ใช้ในการออกแบบ	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	การคำนวณค่าการทรุดตัวของคันทางของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	96
ก2	การคำนวณค่าการทรุดตัวของคันทางของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	97
ก3	การคำนวณค่าการทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile เสาเข็มยาว 4 เมตร	98
ก4	การคำนวณค่าการทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile เสาเข็มยาว 6 เมตร	99
ก5	การคำนวณค่าการทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile เสาเข็มยาว 8 เมตร	100
ก6	การคำนวณค่าการทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile เสาเข็มยาว 10 เมตร	101
ก7	การคำนวณค่าการทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile เสาเข็มยาว 12 เมตร	102
ก8	การคำนวณค่าการทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile เสาเข็มยาว 14 เมตร	103
ก9	การคำนวณค่าการทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile เสาเข็มยาว 16 เมตร	104
ข1	ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m) ที่ความลึก 6.00-6.50 ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	106
ข2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m) ที่ความลึก 12.00-12.45 ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	107

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข3	ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m) ที่ความลึก 15.00-16.95 ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	108
ข4	ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m) ที่ความลึก 4.00-4.50 ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	109
ข5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m) ที่ความลึก 7.50-8.00 ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	110
ข6	ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m) ที่ความลึก 12.00-12.50 ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	111
ค1	รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีคั่นทาง ของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground	113
ค2	รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีคั่นทาง ของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	114
ค3	รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 4.00 เมตรของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	115
ค4	รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 6.00 เมตรของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	116
ค5	รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 8.00 เมตรของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	117
ค6	รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 10.00 เมตรของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	118
ค7	รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 12.00 เมตรของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	119

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ค8	รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 14.00 เมตรของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	120
ค9	รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 16.00 เมตรของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	121
ค10	รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 18.00 เมตรของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	122
ค11	รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 20.00 เมตรของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	123
ค12	รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 22.00 เมตรของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	124
ง1	ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างปรับการทรุดตัวและคั่นทางของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile	126
ง2	แสดงระดับควบคุมการทรุดตัวของคั่นทางบริเวณคอสะพาน	128
ง3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่วงปรับการทรุดตัวกับการเปลี่ยนแปลงความชันสูงสุด (ค่าการทรุดตัวของคั่นทางเท่ากับ 1.54 เมตร)	128
ง4	เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวควบคุมกับค่าการทรุดตัวจากการหาค่าสถิติฟเนสของสปริง	130
ง5	การออกแบบความยาวเสาเข็มของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile	132

การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน

A Study of Behaviors of Bridge Approach Structures

คำนำ

โครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานคือส่วนเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างสะพานกับคันทาง เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณการจราจรเพิ่มมากขึ้นรวมถึงน้ำหนักของโครงสร้างส่งผลให้เกิดปัญหาการทรุดตัวต่างระดับขึ้น ปัญหาการทรุดตัวต่างระดับ (Differential Settlement) บริเวณคอสะพานเป็นปัญหาที่พบมากซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจรและทำให้ความปลอดภัยของผู้ใช้ถนนลดลงเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ และ ยานพาหนะเกิดการชำรุดเสียหาย ตัวอย่างปัญหาการทรุดตัวบริเวณคอสะพานแสดงในภาพที่ 1 ถึง ภาพที่ 4

สาเหตุการทรุดตัวต่างระดับบริเวณคอสะพานมีสาเหตุหลายประการเช่น การทรุดตัวของดินฐานราก การกัดเซาะของดินถมบริเวณคอสะพานเนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงแม่น้ำลำคลอง การยุบตัวของดินถมบริเวณคอสะพานเนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุถมไม่เหมาะสม การบดอัดไม่มีประสิทธิภาพ และการทรุดตัวทั้งพื้นที่เนื่องจากการสูบน้ำบาดาล เป็นต้น

ถึงแม้ว่าหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเช่น กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท สำนักการโยธา กรุงเทพฯ จะมีแบบมาตรฐานในการก่อสร้างโครงสร้างปรับการทรุดตัวและนำรูปแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวชนิดต่างๆมาใช้เช่น Approach Slab on Ground และ Approach Slab on Pile ปัญหาการทรุดตัวต่างระดับบริเวณคอสะพานในระยะยาวยังคงเกิดขึ้น ส่งผลให้ต้องมีการปรับปรุงและยกระดับหลังทางอยู่เสมอ ส่งผลให้เสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูง จึงควรมีการศึกษาแนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบเพื่อปรับปรุงรูปแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวและลดปัญหาการทรุดตัวต่างระดับบริเวณคอสะพาน เพิ่มความปลอดภัย และความสะดวกในการสัญจรของประชาชน

วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว



ภาพที่ 1 การหลุดตัวของคอนกรีตบนพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทางหลวงหมายเลข 34 (บางนา-บางปะกง)



ภาพที่ 2 การหลุดตัวของคอนกรีตลอกกลับรถทำให้โครงสร้างสะพานชำรุด ทางหลวงหมายเลข 35 (ธนบุรี-ปากท่อ)



ภาพที่ 3 การท่รุดตัวบริเวณคอสะพานข้ามคลองสอง ถนนกรุงเทพฯกรรททา – ร่มเกล้า ช่วงที่ 3



ภาพที่ 4 การท่รุดตัวเกนพีกัดของบริเวณคอสะพานถนนบางขุนเทียน – ชายทะเล

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก เพื่อความสะดวกและมีประสิทธิภาพในงานออกแบบ

ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาค้างนี้จะทำการศึกษาเฉพาะพฤติกรรมโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน อันเนื่องมาจากพฤติกรรมการทรุดตัวของชั้นดินตามธรรมชาติและรูปแบบของโครงสร้างตามมาตรฐานของหน่วยงานนั้นๆ โดยวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี 1-D Consolidation ของ Terzaghi และทฤษฎี Beam on Elastic Material

การตรวจเอกสาร

ปัญหาการทรุดตัวของคันทางบริเวณคอสะพาน

การทรุดตัวของบริเวณคอสะพานบนดินอ่อนจะเกิดจากการผสมผสานกันระหว่างการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเพราะการบิดเบี้ยว (Shear Deformation) และการทรุดตัวเนื่องจากขบวนการยุบอัดตัวของดิน (Consolidation Deformation) ของดิน (วิชาญ ภูพัฒน์, 2523) ทั้งนี้การทรุดตัวดังกล่าวเกิดจากเมื่อดินฐานรากได้รับแรงภายนอกทั้งจากน้ำหนักดินถมเองและน้ำหนักจากการจราจร นอกจากนี้ในบางพื้นที่ที่มีปัญหาเรื่องการสูบน้ำบาดาล การทรุดตัวของแผ่นดินเนื่องจากการลดระดับแรงดันน้ำในโพรงดินก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้มีการทรุดตัวของคันทาง

นอกจากนี้การทรุดตัวดังกล่าวยังส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพและความมั่นคงของตอม่อสะพานเนื่องจากเมื่อเกิดการทรุดตัวของบริเวณคอสะพานทำให้ดินถมคันทางและดินฐานรากใต้คันทางเกิดการเคลื่อนตัวส่งผลกระทบต่อให้เกิดแรงกระทำต่อตอม่อและเสาเข็มสะพานในรูปของ Negative Skin Friction และ Lateral Load อีกด้วย

การแก้ไขปัญหาคารก่อสร้างโครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพาน

สำหรับรูปแบบของการปรับปรุงดินอ่อนบริเวณคอสะพานที่เคยใช้มีหลายวิธีด้วยกันเช่น การใช้เสาเข็มผ่อนความยาว (Relief Piles), การใช้เสาเข็มทรายร่วมกับการให้น้ำหนักกดทับล่วงหน้า (Sand Drain and Surcharge Loading) และการใช้ดินถมวัสดุเบา (Light Weight Embankment) เป็นต้น

Holmberg (1978) ได้กล่าวถึงประสิทธิภาพของการใช้เสาเข็มผ่อนความยาว (Relief Pile) ร่วมกับ Approach Slab เพื่อช่วยลดการเกิดการทรุดตัวแตกต่างระหว่างสะพานกับดินถมบริเวณที่อยู่ติดกัน โดยจากการติดตามขนาดการทรุดตัวของผิวทางบริเวณคอสะพานของถนนบางประอิน-นครสวรรค์ เป็นเวลา 6 ปี หลังเปิดใช้งานถนน พบว่าการใช้เสาเข็มรับน้ำหนักคันทางบริเวณคอสะพานบนชั้นดินอ่อนมีความเหมาะสมเพียงพอในการแก้ปัญหาการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างคันดินถมคอสะพานกับตัวสะพานเอง

วิชาญ (2523), ทินกร (2528), ยงยุทธ และ ทินกร (2529) และ Wongsopit (2000) รวบรวมข้อมูลการทรุดตัวในสนามของโครงสร้างปรับการทรุดตัวชนิด Approach Slab on Pile Foundation ที่ก่อสร้างบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และวิเคราะห์การทรุดตัวจากกระบวนการ Consolidation โดยทฤษฎี Terzaghi (1943) สรุปว่าทฤษฎีดังกล่าวสามารถให้ค่าการทรุดตัวใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้ในสนาม

วิชาญ (2530) กล่าวถึงการลดการทรุดตัวแตกต่างกันในแนวยาว (Differential Settlement in Longitudinal Direction) สามารถกระทำได้โดยเปลี่ยนขนาดความยาวเสาเข็มให้ขึ้นไปตามความสูงของถนนและตามสภาพของชั้นดิน ดังนั้นถนนบริเวณคอสะพานต้องควบคุมการทรุดตัวที่หัวและท้ายของช่วงปรับการทรุดตัว หรือที่เรียกว่า Transition Zone กล่าวคือบริเวณที่ติดกับคอสะพานมากที่สุดนั้น การทรุดตัวของถนนต้องใกล้เคียงกับการทรุดตัวของสะพานซึ่งจะมีการทรุดตัวน้อยมาก เพราะสะพานส่วนใหญ่จะตอกเสาเข็มหยั่งลงถึงชั้นดินแข็งหรือชั้นทราย ส่วนปลายของ Transition Zone ซึ่งเป็นช่วงปลายของการปรับการทรุดตัว ต้องการให้มีการทรุดตัวใกล้เคียงกับการทรุดตัวของถนนธรรมดาที่ไม่มีเสาเข็มรองรับ ที่จะต้องมีการทรุดตัวตามปกติของถนนทั่วไป

Ried and Buchanan (1984) กล่าวว่า การก่อสร้างคันทางบริเวณคอสะพานบนดินอ่อนด้วยการใช้ Sand Drain ร่วมกับการทำ Preloading ในบางพื้นที่อาจประสบปัญหาเรื่องของเวลาและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และกล่าวถึงระบบเสาเข็มรองรับคันทางบริเวณคอสะพานที่เรียกว่า ระบบ BASP (Bridge Approach Support Piling System) ที่จะให้ผลดีทั้งทางด้านเสถียรภาพและการทรุดตัว คุ่มค่าต่อการก่อสร้าง

สมเจตน์ (2536) ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ BADS (Bridge Approach Design on Soft Soil Layer) เพื่อใช้ในการออกแบบคอสะพานบนดินอ่อนด้วยวิธีการต่างๆ 3 วิธีด้วยกัน คือ การใช้เสาเข็มผ่อนความยาว (Relief Piles), การใช้เสาเข็มทรายร่วมกับการให้น้ำหนักกดทับถ่วงหน้า (Sand Drain and Surcharge Loading) และการใช้ดินถมวัสดุเบา (Light Weight Embankment) โดยในส่วนของ การปรับปรุงด้วยเสาเข็มผ่อนความยาวได้ใช้การวิเคราะห์ขนาดการทรุดตัวแบบดั้งเดิม (Conventional Method) ด้วยวิธีของ Terzaghi ซึ่งพิจารณากลุ่มฐานรากย่อยที่มีเสาเข็มจำนวน 4 ต้น ต่อ ฐานราก ในการคำนวณหารูปแบบของเสาเข็มที่ใช้

Bergado *et al.* (2005) ได้ศึกษาโดยใช้วิธี Deep Mixing Method (DMM) ในการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนและนำมาประยุกต์แก้ไขปัญหา Differential Settlement บริเวณเชิงลาดสะพานพบว่าเสาเข็ม DMM ช่วยให้การทรุดตัวต่างระดับบริเวณเชิงลาดกับถนนเดิมเกิดขึ้นน้อย การทรุดตัวต่างระดับนี้มีผลทำให้เกิดแรงจลุดรอบๆเสาเข็ม DMM นอกจากนี้ยังพบว่าการจัดเรียงเสาเข็ม DMM ตาม Profile ของเชิงลาดและให้ปลายของเสาเข็มอ่อนความยาวแบบ Parabolic Curve จะช่วยลดการทรุดตัวระหว่างเชิงลาดและผิวจราจรเดิมให้เกิดขึ้นน้อย

Long *et al.* (2003) สรุปว่าค่าการทรุดตัวบริเวณคอสะพานตั้งแต่ 50 ถึง 75 มิลลิเมตร มีผลทำให้ความปลอดภัยในการขับขี่น้อยลงและเป็นอันตรายต่อผู้ขับขี่ ควรมีการปรับปรุงซ่อมแซมและความลาดชันบริเวณคอสะพานที่ไม่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 1/100 ถึง 1/125 โดยประมาณในช่วงความยาวไม่น้อยกว่า 60 เมตร จากโครงสร้างสะพาน

Briaud *et al.* (2003) ศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของดินถมบริเวณคอสะพานมีสาเหตุจาก การทรุดตัวของดินฐานราก คุณภาพการก่อสร้าง ระบบระบายน้ำไม่มีประสิทธิภาพและการกัดเซาะดินคันทางบริเวณคอสะพาน

การวิเคราะห์โครงสร้างปรับการทรุดตัวของบริเวณคอสะพานด้วยวิธีทางตัวเลข

Cai *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของดินถมบริเวณคอสะพานและพฤติกรรมการแอ่นตัวของแผ่นพื้นปรับการทรุดตัวด้วยแบบจำลองทางไฟไนต์อิเลเมนต์ เมื่อดินถมได้แผ่นพื้นมีการทรุดตัวทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีที่รองรับบริเวณช่วงกลางแผ่นพื้น ทำให้พฤติกรรมของแผ่นพื้นคล้ายกับเป็น Simple Beam กล่าวคือมีฐานรองรับที่ปลายของแผ่นพื้นที่เชื่อมต่อกับถนนและส่วนที่เชื่อมต่อกับโครงสร้างสะพาน ส่งผลให้น้ำหนักที่กระทำต่อแผ่นพื้นส่วนใหญ่ถูกถ่ายลงที่ปลายทั้งสองด้านของแผ่นพื้น ทำให้เกิดรอยแตกที่ปลายของแผ่นพื้น จากการวิจัยพบว่า เมื่อค่าการทรุดตัวของคันทางมีค่ามากขึ้น ค่าการแอ่นตัวของแผ่นพื้นและค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในแผ่นพื้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยและนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวของแผ่นพื้น (Slab Deflection) กับค่าการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างสะพานกับคันทาง (Differential Settlement) เป็นข้อมูลในการหาวิธีการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตที่เหมาะสมต่อไป

Nassif *et al.* (2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัญหาการแตกของแผ่นพื้นคอนกรีตบริเวณคอสะพานและหาวิธีการออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้หลักการทางไฟไนต์อิเลเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

(Non-Linear Finite Element) ช่วยในการวิเคราะห์พฤติกรรมของดินถมคันทางกับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่าปัญหาที่มักเกิดขึ้นบริเวณเชิงลาดสะพาน (Approach Slab) และช่วงปรับการทรุดตัว (Transition Slab) มีดังนี้ การทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างคันทางและโครงสร้างสะพาน(Differential Settlement) การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินถมคันทาง (Lateral movement of Embankment) การออกแบบโครงสร้างแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เหมาะสม

วรวิทย์ (2546) ได้พัฒนาวิธีวิเคราะห์ขนาดการทรุดตัวของหน่วยแบร์ริง โดยพิจารณาหน่วยแบร์ริงเป็นระบบฐานรากแบบ Piled Raft Foundation แบบ 2 มิติ และหาผลเฉลยด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) ผ่านโปรแกรม FLAC ซึ่งจากการตรวจสอบความถูกต้อง โดยเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม (Conventional Method) และการทรุดตัวจริงในสนามของหน่วยแบร์ริงจาก 2 สถานที่ด้วยกัน พบว่า โปรแกรม FLAC ให้ขนาดการทรุดตัวสูงกว่าผลวิเคราะห์จากวิธีการของ Terzaghi และ สูงกว่าผลวิเคราะห์จากวิธีการของ Tomlinson เป็นอย่างมาก แต่ทั้งนี้ Settlement Profile ที่ได้จากโปรแกรม FLAC มีลักษณะใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

การวิเคราะห์ปริมาณการทรุดตัวโดยใช้ทฤษฎี Terzaghi

การเพิ่มน้ำหนักกระทำแก่มวลดิน หรือการสูบน้ำบาดาล ทำให้น้ำระบายออกจากมวลดิน ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายโดย Terzaghi Consolidation Theory (1943) ค่าปริมาณการทรุดตัวเนื่องจากการระบายน้ำออกจากมวลดินหรือ Primary Settlement สามารถคำนวณจากสมการที่ 1 และ สมการที่ 2 สำหรับดินประเภท Normally Consolidated และ Overconsolidated ตามลำดับ

$$S_p = \frac{C_c}{1+e_o} L_o \log \left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p} \right) \quad (1)$$

$$S_p = \frac{L_o}{1+e_o} \left[C_r \log \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} \right) + C_c \log \left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p} \right) \right] \quad (2)$$

โดยที่	S_p	คือ ปริมาณการทรุดตัวของชั้นดินในช่วง Primary Consolidation
	C_c	คือ ค่า Compression Index
	C_r	คือ ค่า Recompression Index
	e_o	คือ ค่า Initial Void Ratio
	L_o	คือ ความหนาของชั้นดินที่พิจารณา
	σ'_{vo}	คือ ค่า Initial Effective Vertical Stress
	σ'_p	คือ ค่า Preconsolidation Pressure
	σ'_{vf}	คือ ค่า Final Effective Vertical Stress

สำหรับการกระจายของหน่วยแรงในดินนั้น นิยมใช้หลักการ Stress Distribution in Semi-Infinite Soil Mass โดยสมมติให้ดินมีสมบัติเป็น Elastic Material (Bousiness, 1885) ในกรณีโครงสร้างปรับการทรุดตัวประเภท Approach Slab on Pile ซึ่งมีฐานรากเสาเข็มและมีปลายเข็มอยู่ในชั้นดินอ่อนนั้น Terzaghi and Peck (1948) เสนอให้สมมุติน้ำหนักกระทำบนฐานรากสมมูลย์ (Equivalent Mat) ที่ระดับความลึก 2 ใน 3 ของความยาวเข็ม และสมมติให้ชั้นดินอ่อนที่อยู่ระหว่างหัวเสาเข็มถึงฐานรากสมมูลย์ไม่มีการทรุดตัวเลย และการทรุดตัวเกิดขึ้นในดินใต้ฐานรากสมมูลย์เท่านั้น การกระจายของหน่วยแรงใต้ฐานรากสมมูลย์สามารถใช้หลักการ Stress Distribution in

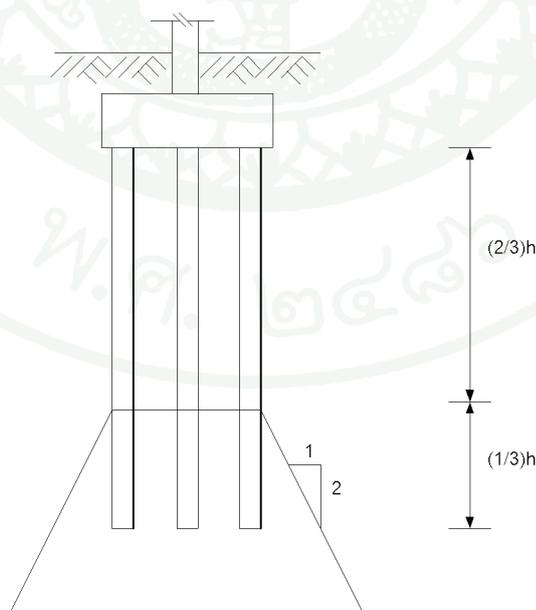
Semi-Infinite Soil Mass ได้ หรือประมาณการกระจายหน่วยแรงเป็นมุม 30 องศาในแนวตั้งดังภาพที่ 5

การวิเคราะห์อัตราทรุดตัวของดินเนื่องจากกระบวนการ Primary Consolidation ใช้สมการที่ 3

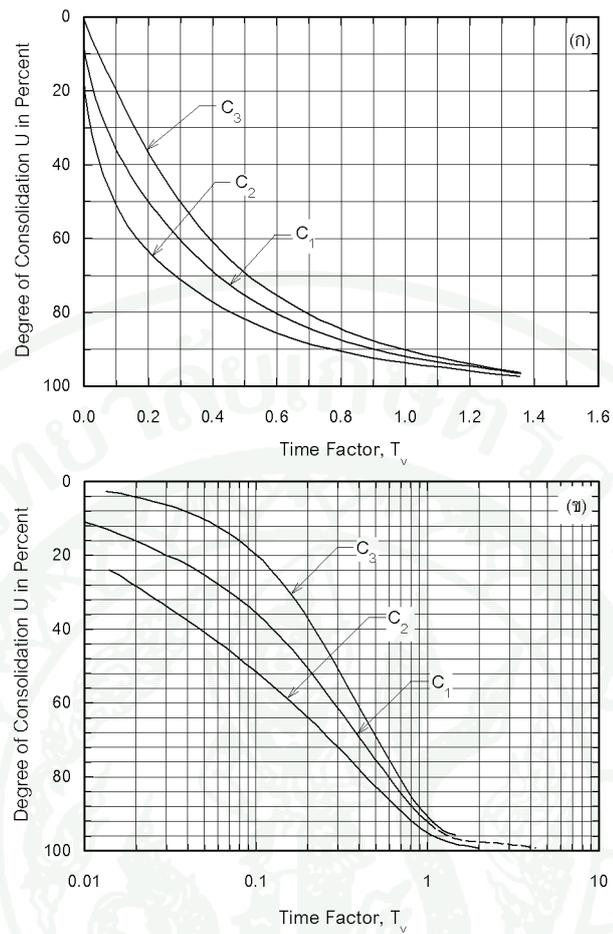
$$t = \frac{TH^2}{c_v} \quad (3)$$

โดยที่ t	คือ ระยะเวลาการทรุดตัว
T	คือ ค่า Time Factor (ค่าองค์ประกอบเวลา)
c_v	คือ ค่า Coefficient of Consolidation (สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ)
H	คือ ค่า Maximum Drainage Distance (ระยะทางยาวที่สุดที่น้ำระบายออก)

ค่า T นั้นขึ้นกับ Degree of Consolidation (U) และ Drainage Condition ดังแสดงภาพที่ 6 และ ภาพที่ 7 ตามลำดับ

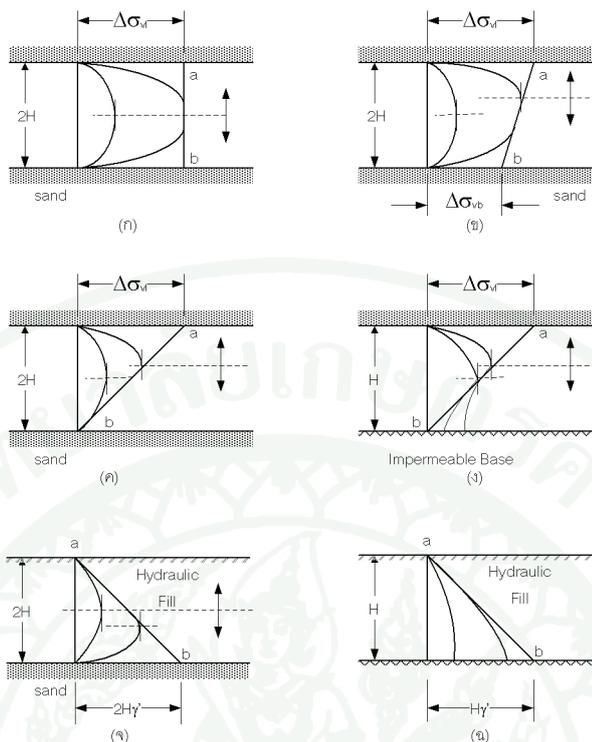


ภาพที่ 5 การกระจายของหน่วยแรงกรณีฐานรากเสาเข็ม



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Consolidation และ Time Factor ค่า Time Factor แสดง
 ใน (ก) Arithmetic Scale และ (ข) Logarithmic Scale เส้น C_1 , C_2 และ C_3 ขึ้นกับ Loading
 Condition และ Drainage Condition

ที่มา: Terzaghi and Fröhlich (1936)



ภาพที่ 7 Isochrones แสดงกระบวนการ Consolidation ของชั้นดินเหนียวในกรณี Excess porewater Pressure และ Drainage Boundary Condition ต่างๆ

ที่มา: Terzaghi and Fröhlich (1936)

สำหรับ ค่า c_v นั้น ซีรชาติ รื่น และ จอม (2545) ได้ทำการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวของถนนหมายเลข 34 และพบว่า ค่า c_v ในสนาม, $c_{v(\text{field})}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 10-16 เท่า ของค่า c_v จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ, $c_{v(\text{lab})}$

ชัยพร (2551) วิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้าง Approach Slab on Pile, Transition Bridge, และ Approach Slab on Ground บนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยทฤษฎี Terzaghi (1943) และใช้ค่า Coefficient of Consolidation (c_v) เท่ากับ 1, 3 และ 6 เท่าของค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ [$c_{v(\text{lab})}$] และพบว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณการทรุดตัว [$S_{(\text{calculated})}$] โดยใช้ค่า $6c_{v(\text{lab})}$ ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าการทรุดตัวที่ตรวจวัดในสนาม [$S_{(\text{observed})}$] โดย $S_{(\text{calculated})} = 0.65 S_{(\text{observed})}$

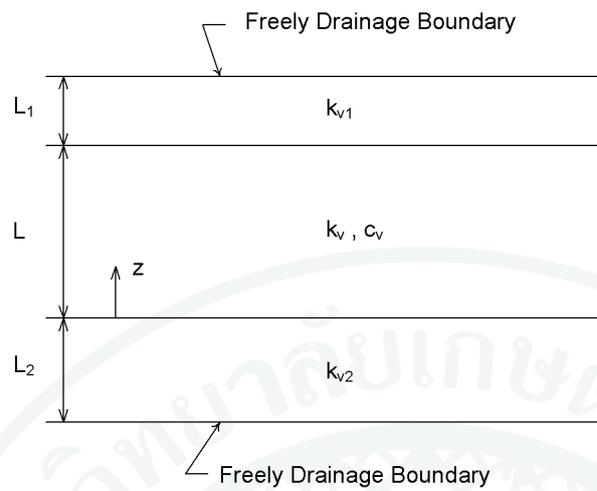
ยงยุทธ และคณะ (2540) พบว่า ค่า c_v ในการคำนวณ โดยทฤษฎี Terzaghi (1943) ควรใช้ค่าสูงกว่าค่า $c_{v(\text{lab})}$ และแนะนำให้ใช้ค่าเท่ากับ 10 ถึง 16 เท่า ของ $c_{v(\text{lab})}$, Bergado et al. (1990) ศึกษาการทรุดตัวของถนนสายบางนา-บางปะกงและหาความสัมพันธ์ของ $c_{v(\text{field})}$ ต่อ $c_{v(\text{lab})}$ พบว่า $c_{v(\text{field})}$ มีค่าเท่ากับ 26 เท่าของ $c_{v(\text{lab})}$

กฤษณ์ และคณะ(2552) วิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้าง Approach Slab on Ground บนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยทฤษฎี Terzaghi (1943) และใช้ค่า Coefficient of Consolidation (c_v) เท่ากับ 1, 3, 6, 9 และ 12 เท่าของค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ [$c_{v(\text{lab})}$] และพบว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณการทรุดตัว [$S_{(\text{calculated})}$] โดยใช้ค่า $3 c_{v(\text{lab})} - 6 c_{v(\text{lab})}$ ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าการทรุดที่ตรวจวัดได้ในสนาม

สำหรับในกรณีที่ชั้นดินเหนียว อยู่ระหว่างชั้นดินที่ไม่ยุบตัว (Incompressible Layer) และไม่สามารถจำแนกได้ชัดเจนว่าเป็น Free Drainage Layer หรือ Impermeable Layer ดังแสดงในภาพที่ 9 อัตราการทรุดตัวสามารถวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ระหว่าง Average Degree of Consolidation (U) และ Time Factor (T) ของกรณี Partially Drainage Boundary ดังแสดงในภาพที่ 9 (Mesri, 1973) โดยที่

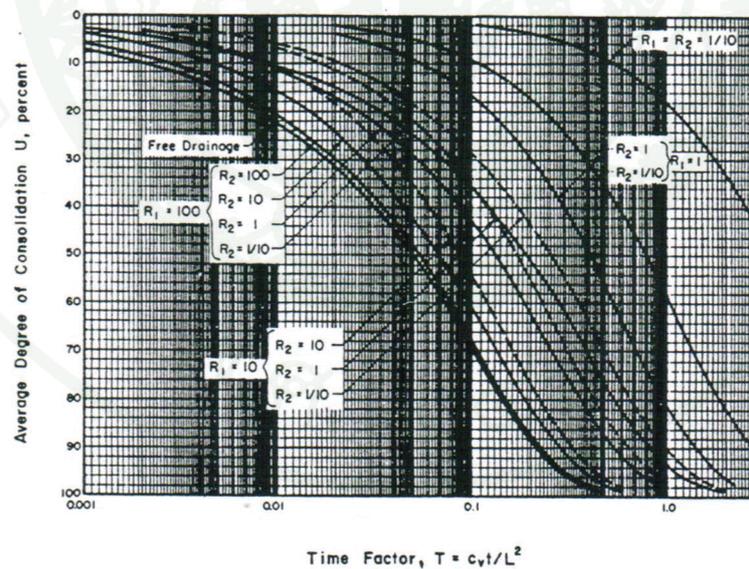
$$R_1 = \frac{k_{v1}L}{k_{vL1}} \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{k_{v2}L}{k_{vL2}} \quad (5)$$



ภาพที่ 8 ชั้นดินอ่อนมากกว่า 1 ชั้นประกบด้วยชั้นดินที่สามารถระบายน้ำได้ดี
(Free Drainage Boundary Layer)

ที่มา: Mesri (1973)



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ U-T สำหรับชั้นดินอ่อนประกบด้วยชั้นดินที่สามารถระบายน้ำได้บางส่วน
(Partially Drainage Boundary Layer)

ที่มา: Mesri (1973)

ค่าพารามิเตอร์ R_1 และ R_2 แสดงถึงความสามารถในการระบายน้ำของชั้นดินซึ่งประกบด้านบนและด้านล่างของชั้นดินเหนียว ค่าพารามิเตอร์ R เท่ากับ 0 แสดงถึงชั้นดังกล่าวมีสมบัติเป็น Impervious Boundary และมีค่าเท่ากับ ∞ แสดงถึง Free Drainage Boundary Mesri (1973) สรุปว่าสำหรับการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวในงานวิศวกรรมปฐพีทั่วไปนั้น ชั้นดินซึ่งประกบชั้นดินเหนียวสามารถกำหนดให้เป็น Incompressible Drainage Layer เมื่อ R มีค่าน้อยกว่า 0.1 และสามารถพิจารณาให้เป็น Incompressible Free Drainage Layer เมื่อ R มีค่ามากกว่า 100

Barden and Younan (1969) เสนอวิธีการประมาณอัตราการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวมากกว่า 1 ชั้น ซึ่งมีค่า c_v ต่างๆ 3 วิธี ดังนี้

1. Crude Approximations

ถ้ามีชั้นดินอ่อนมากกว่าหรือเท่ากับ 2 ชั้นซึ่งประกบด้วย Free Drainage Boundary Layer แล้วนั้น ให้สมมติให้ชั้นดินที่มีค่า Permeability สูงสามารถระบายน้ำออกได้ทันที และชั้นดินที่มีค่า Permeability ที่ต่ำจะเป็นตัวกำหนดอัตราการทรุดตัวของชั้นดินอ่อนทั้งหมด (หรือใช้ค่า c_v ที่ต่ำที่สุด และความหนาของชั้นดินนั้น ในการคำนวณอัตราการทรุดตัว)

สมมติให้ชั้นดินอ่อนทั้งหมดมีค่า c_v เท่ากับชั้นดินที่มี Permeability ต่ำที่สุด และความหนาของชั้นดินเท่ากับผลรวมของความหนาของแต่ละชั้น

ถ้ามีชั้นดินอ่อนเท่ากับ 2 ชั้นซึ่งประกบด้วย Free Drainage Boundary ให้พิจารณาอัตราการทรุดตัวของดินแต่ละชั้นแยกกัน และมี Drainage Boundary ประเภท Single Drainage

2. Average Soil Properties

คำนวณค่าเฉลี่ยของค่า $[c_v]_{avg}$ ดังนี้

$$[c_v]_{avg} = \frac{[k_v]_{avg}}{\gamma_w m_{avg}} \quad (6)$$

โดยที่

$$m_{\text{avg}} = \sum_{j=1}^n \frac{H_j}{H} m_j$$

$$H = \sum_{j=1}^n H_j$$

$$k_{\text{avg}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{H_j}{H} \frac{1}{k_j}}$$

3. Transforming Soil Properties

วิธีนี้เป็นการกำหนดให้ชั้นดินหนึ่งชั้นมีค่า c_v และ ความหนา H ไม่เปลี่ยนแปลง และ เปลี่ยนความหนาของชั้นดินอื่นๆ ตามสมการที่ 7 และกำหนดให้ใช้ชั้นดินอื่นๆมีค่า c_v เท่ากับ ค่า c_v ของชั้นดินที่ไม่ได้เปลี่ยนความหนา

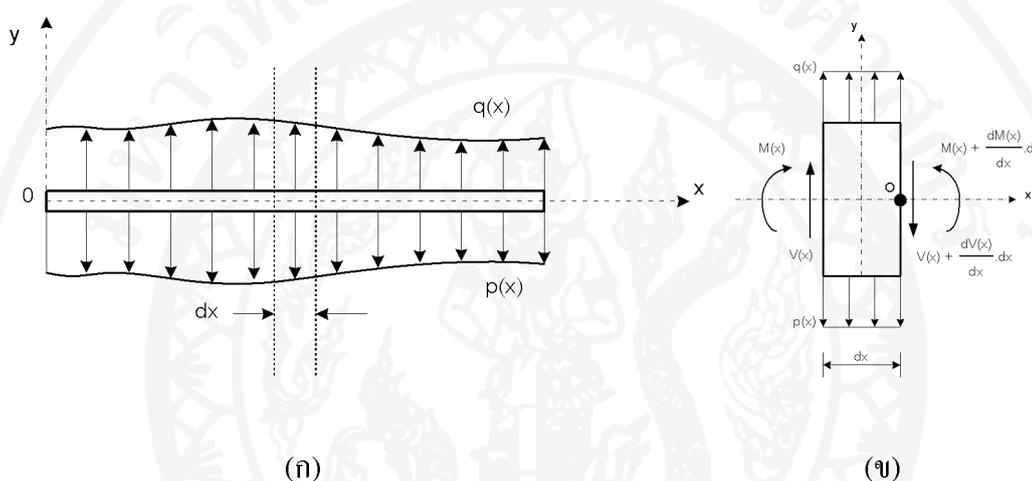
$$H' = \sqrt{c_{v1}} \sum_{j=1}^n \frac{H_j}{\sqrt{c_{vj}}} \quad (7)$$

หรือคำนวณอัตราการทรุดตัวจากค่า $[c_v]_{\text{apparent}}$ ดังสมการที่ 8 และใช้ความหนาเท่ากับ ผลรวมของความหนาของดินทุกชั้น

$$[c_v]_{\text{apparent}} = \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{H_j}{H} \frac{1}{\sqrt{c_{vj}}}} \right) \quad (8)$$

การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างรับการทรุดตัวโดยใช้หลักการ Beam on Elastic Material

โครงสร้างที่วางตัวบนฐานรองรับแบบยืดหยุ่น (Elastic Foundation) มีหน่วยแรงภายในที่ได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนตัวของฐานรองรับภายใต้แรงกระทำ ซึ่งการเคลื่อนตัวของฐานรากขึ้นอยู่กับค่า Stiffness ของโครงสร้างและ ฐานรองรับแบบยืดหยุ่น การวิเคราะห์พฤติกรรมของฐานรากภายใต้หลักการ Beam on Elastic Material โดยอ้างอิงสมมุติฐานของ Winkler (1876) ซึ่งมีนิยามดังนี้



ภาพที่ 10 โครงสร้างที่วางตัวบนฐานรองรับแบบยืดหยุ่น (ก) และ สมดุลของแรง (ข)

ที่มา: Zhaohua and Cook (1983)

1. แรงปฏิกิริยาต้านทานของฐานรองรับ $p(x)$ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง $y(x)$ และแรงแต่ละจุดต่อหน้าหนึ่งกับบรรทุกที่กระทำเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งหมายถึงนิยามของ Linear Springs Model ดังสมการที่ 9 โดยที่ k คือ Winkler Foundation Modulus เป็นค่าคงที่มีหน่วยเป็น แรงต่อความยาวต่อการแ่นตัวของความกว้างของคาน (F/L^3)

$$p(x) = k \cdot y(x) \quad (9)$$

2. ฐานรองรับแบบยืดหยุ่นติดกับโครงสร้าง (ดินเกาะติดกับคาน) ซึ่งดินและคานจะไม่แยกกัน หมายความว่าระหว่างดินกับคานสามารถเกิดแรงดึงได้ และแรงดึงมีค่าน้อยกว่าแรงยึดเกาะของคานกับดินและแรงยึดเหนี่ยวของคุณสมบัติของดิน (หากแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าแรงยึด

เกาะของคานกับดินและแรงยึดเหนี่ยวของคุณสมบัติของดิน อาจทำให้เกิดช่องว่างระหว่างคานกับดินได้)

3. โครงสร้างที่วางบนฐานรองรับแบบยึดหยุ่นมีความยาวไม่จำกัด
4. ไม่พิจารณาการโก่งตัวภายใต้แรงเฉือน
5. โครงสร้างไม่รับแรงตามแนวแกน

การวิเคราะห์ฐานรองรับแบบ One-Dimension Linear Element โดยสมมติให้โครงสร้างของคานวางอยู่บนฐานรองรับแบบยึดหยุ่น ดังภาพที่ 10ก แสดงคานรองรับน้ำหนัก $q(x)$ และฐานรองรับแบบยึดหยุ่นที่มีค่า Modulus of Subgrade Reaction (k_s) ซึ่งมีหน่วยเป็น (F/L^3) ในการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ แรงปฏิกิริยาที่กระทำตามแนวยาวของคานมีค่าเท่ากับ Winkler Foundation Modulus (k) คูณกับค่าการแอ่นตัว: $y(x)$ ซึ่งค่า Winkler Foundation Modulus ได้จาก Modulus of Subgrade Reaction: (k_s) คูณความกว้างของคาน (b) สำหรับในสถานะสมดุลแรงกระทำและแรงปฏิกิริยาด้านทานจะทำให้เกิดการตัดของคานในระนาบเดียวกัน ภาพที่ 10ข แสดงถึงสมดุลของแรงภายในและภายนอก เมื่อตัดชิ้นส่วนของโครงสร้างขนาดเท่ากับ dx โดยกำหนดให้ทิศทางของโมเมนต์ $M(x)$ และแรงเฉือน $V(x)$ ที่ตำแหน่ง x (ด้านซ้ายของชิ้นส่วน) มีทิศทางบวก ดังนั้นเมื่อมีแรงภายนอก $q(x)$ และ $p(x)$ มากระทำต่อชิ้นส่วนโครงสร้าง ชิ้นส่วนโครงสร้างจะอยู่ในสถานะสมดุลได้เมื่อมีแรงภายใน $dM(x)$ และ $dV(x)$ เพิ่มขึ้น นั่นก็คือผลต่างของโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้น เมื่อสมดุลของแรงในแนวตั้ง แสดงดังสมการที่ 10 และ สมการที่ 11

$$V(x) - [(V(x) + dV(x)) - p(x) \cdot dx + q(x) \cdot dx] = 0 \quad (10)$$

ดังนั้น

$$\frac{dV(x)}{dx} = q(x) - p(x) \quad (11)$$

และสมมูลของโมเมนต์รอบจุด O แสดงดังสมการที่ 12 เมื่อ dx มีค่าน้อยมาก ดังนั้น $dx \cdot dx$ จึงมีค่าใกล้ศูนย์จึงไม่นำพิจารณาทำให้สมการที่ 12 คงเหลือเป็น สมการที่ 13

$$M(x) - V(x) \cdot dx + [q(x)] - p(x)dx \cdot \frac{dx}{2} - [M(x) + dM(x)] = 0 \quad (12)$$

เมื่อ $dx \cdot dx \rightarrow 0$

$$\frac{dM(x)}{dx} = V(x) \quad (13)$$

ความสัมพันธ์ของโมเมนต์และการแอ่นตัวของคานแสดงดังสมการที่ 14

$$\frac{EI \cdot d^2 y(x)}{dx^2} = M(x) \quad (14)$$

โดยที่ E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคาน
I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน

เมื่อพิจารณาสมการที่ 14 ร่วมกับสมการที่ 9, 11 และ 13 และกำหนดให้ค่า EI คงที่ (คานที่มีความสม่ำเสมอของหน้าตัด และวัสดุเนื้อเดียวกัน) จะได้ดังสมการที่ 15

$$\frac{EI \cdot d^4 y(x)}{dx^4} + k \cdot y(x) = q(x) \quad (15)$$

คำตอบของสมการที่ 15 (Closed-Form) ของโครงสร้างแบบ Infinite Beam เมื่อมีน้ำหนักกระทำ ดังแสดงในภาพที่ 12 โดยมีสัมประสิทธิ์สำหรับการคำนวณค่าในตารางที่ 1 ดังสมการที่ 16 ถึง สมการที่ 20

$$\lambda = \sqrt[4]{k/4EI} \quad (16)$$

$$A_{\lambda x} = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (17)$$

$$B_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \sin \lambda x \quad (18)$$

$$C_{\lambda x} = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) \quad (19)$$

$$D_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \cos \lambda x \quad (20)$$

Hetenyi (1946) ได้พัฒนาสมการสำหรับน้ำหนักบรรทุกกระทำจุดใดๆบนคาน และใช้หลักการ Superposition ในการพิจารณารวมแรงกระทำหลายๆแรง และได้เสนอค่า λl แบ่งกลุ่ม Stiffness ของคานเป็น 3 กลุ่ม ได้ดังนี้

1. Short Beam: $\lambda l < \pi / 4$ เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแกร่ง (Rigid) แรงปฏิกิริยาของฐานรองรับมีผลเล็กน้อยต่อการตัดของโครงสร้าง
2. Long Beam: $\lambda l > \pi$ เป็นโครงสร้างที่มีความดัดตัวได้ (Flexible) โมเมนต์ตัดจะมีค่าสูงบางตำแหน่ง
3. Beam of Medium Length: $\pi / 4 < \lambda l < \pi$ เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งปานกลางอยู่ระหว่าง Short Beam กับ Long Beam

สำหรับการประมาณค่าโดยพิจารณาจุดรองรับให้เป็นสปริงที่มีช่วงความกว้าง (l) เท่ากันตลอดความยาวของคาน ดังแสดงในภาพที่ 12ก และสปริงหนึ่งตัวมีแรงต้านสมำเสมอในช่วงครึ่งหนึ่งของความกว้างระหว่างสปริง (l/2) ทั้งสองทาง ดังแสดงในภาพที่ 12ข โดยเส้นประแสดงแรงต้านกระจายเฉลี่ย ซึ่งคำตอบโดยประมาณจะเข้าใกล้ค่าที่เป็นจริงเมื่อจำนวนของสปริงมากๆ หรือช่วงความกว้างของสปริงแต่ละอันน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของช่วงห่างระหว่างสปริงแสดงดังสมการที่ 21

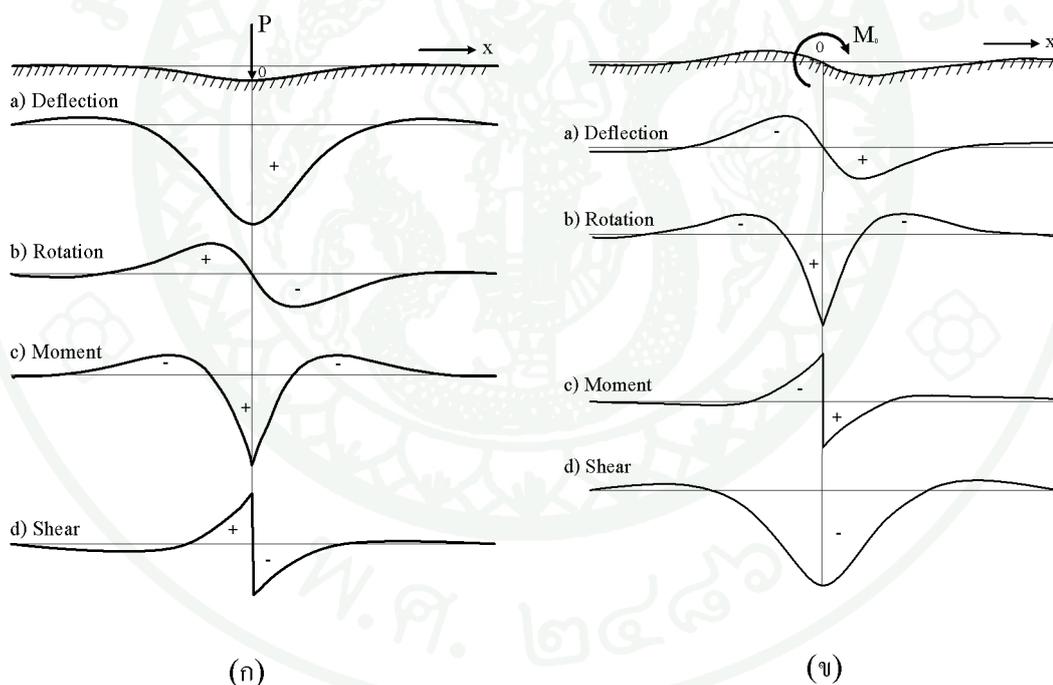
$$l \leq \pi / 4\lambda \quad (21)$$

Boresi et al.(1993) ได้เสนอกฎที่คานที่มีความยาวจำกัด (L) ดังภาพที่ 13 สามารถใช้คำตอบ (Close-Form) ของโครงสร้างแบบ Infinite Beam ได้ ถ้าค่า $L \geq 3\pi / 2\lambda$

ตารางที่ 1 คำตอบสมการ (Close-Form) ในการรับแรงของโครงสร้างที่มีความยาวมาก วางบน
ฐานรองรับแบบยึดหยุ่น

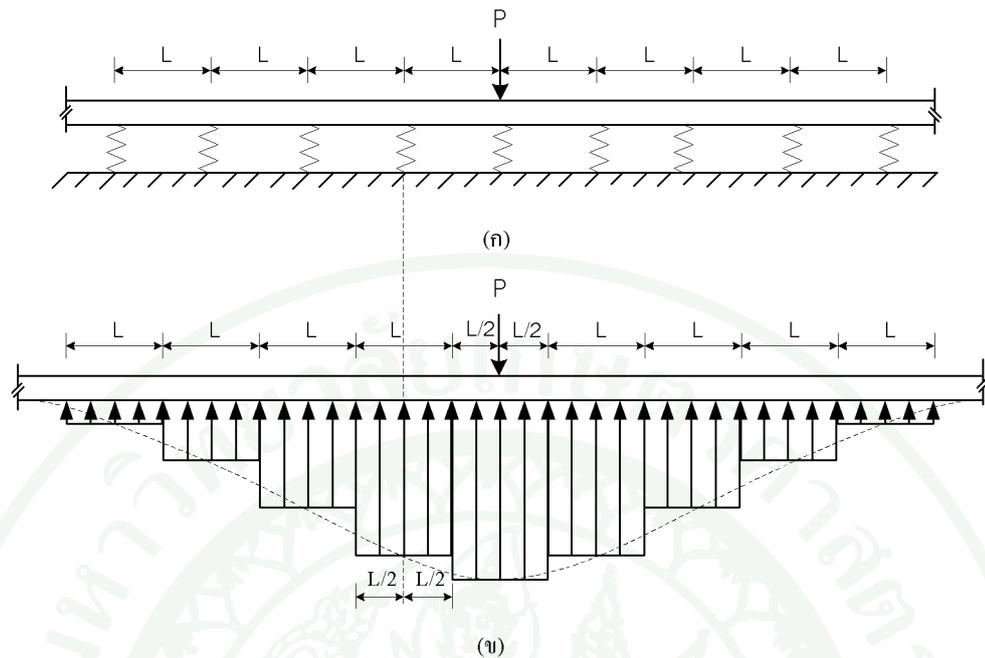
Concentrated Load at Center	Moment at Center
$y = \frac{P\lambda}{2k} A \lambda_x$	$y = \frac{M_0 \lambda^2}{k} B \lambda_x$
$\theta = \frac{-P\lambda^2}{k} B \lambda_x$	$\theta = \frac{M_0 \lambda^3}{k} C \lambda_x$
$M = \frac{P}{4\lambda} C \lambda_x$	$M = \frac{M_0}{2} D \lambda_x$
$V = \frac{-P}{2} D \lambda_x$	$V = \frac{-M_0}{2} A \lambda_x$

ที่มา: Boresi *et al* (1993)



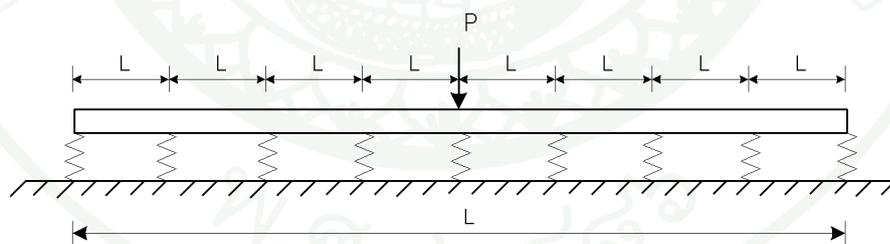
ภาพที่ 11 โครงสร้างมีความยาวอนันต์วางบนฐานรองรับแบบยึดหยุ่น โดย (ก) รับน้ำหนักกระทำแบบจุดและ (ข) รับโมเมนต์กระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลาง

ที่มา: Hetenyi (1946)



ภาพที่ 12 โครงสร้างมีความยาวอนันต์วางบนฐานรองรับแบบยืดหยุ่น (ก) แสดงจุดรองรับเป็นสปริงที่มีช่วงความกว้างเท่ากัน (ข) แสดงแรงกระจายสม่ำเสมอของสปริงรองรับ

ที่มา: Boresi et al (1993)



ภาพที่ 13 โครงสร้างมีความยาวจำกัดวางบนฐานรองรับแบบยืดหยุ่น โดยมีจุดรองรับเป็นสปริงที่มีช่วงความกว้างเท่ากัน

ที่มา: Boresi et al (1993)

การหาค่าสตีฟเนสของสปริงโดยหลักการ Tangent Modulus

การจำลองโครงสร้างที่สัมผัสกับดินและโครงสร้างที่รองรับด้วยฐานรากเสาเข็ม เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างนิยมนำมาจำลองฐานรองรับเป็นแบบสปริงโดยค่าสตีฟเนสของสปริงเป็นตัวแปรที่สำคัญอันหนึ่งที่มีผลต่อการกระจายของแรงในโครงสร้างรวมถึงค่าการทรุดตัวของโครงสร้างที่เกิดขึ้นด้วย

ค่าสตีฟเนสของสปริงที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างในกรณีที่โครงสร้างวางบนดินและรองรับด้วยฐานรากเสาเข็ม นิยมหาค่าสตีฟเนสของสปริงจากค่า Modulus of Subgrade Reaction ซึ่งหาได้จาก Plate Bearing Test และ Pile Load Test ตามลำดับ โดยค่า Modulus of Subgrade Reaction หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและค่าการทรุดตัวและแปลงเป็นค่าสตีฟเนสของสปริง

เนื่องจากระยะเวลาทำการทดสอบในสนามของทั้ง 2 วิธีนั้นถือว่าสั้นมากและอาจสมมติฐานได้ว่าดินบริเวณที่ทำการทดสอบยังไม่เกิดกระบวนการอัดตัวคายน้ำ ดังนั้นค่า Modulus of Subgrade Reaction ที่ได้จากการทดสอบจึงเป็นค่าที่ไม่มีพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินมาเกี่ยวข้องทำให้ผลที่ได้จากวิเคราะห์โครงสร้างด้วยค่าสตีฟเนสของสปริงที่ได้สอดคล้องกับพฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงเริ่มต้นเท่านั้น และหากเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงการใช้งานผลที่ได้จากการวิเคราะห์จึงแตกต่างจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการหาค่าสตีฟเนสของสปริงโดยใช้หลักการ Tangent Modulus (Janbu, 1963) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ทำให้สามารถหาค่าสตีฟเนสของสปริงที่มีพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดิน

Janbu (1963) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress, σ') กับความเครียด (Strain, ϵ) ของดินหลายชนิดตามความพรุนของวัสดุตั้งแต่ 0 % (หิน) ถึงประมาณ 90 % ในรูปแบบของ Tangent Modulus ดังภาพที่ 14ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress, σ') กับความเครียด (Strain, ϵ) จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) และสามารถหาค่า Tangent Modulus (M) ได้ดังสมการที่ 22 ดังนี้

$$M = d\sigma' / d\varepsilon \quad (22)$$

โดย M คือ Tangent Modulus หรือ Deformation Modulus
 $d\sigma'$ คือ Increment of Effective Stress
 $d\varepsilon$ คือ Increment of Strain

เมื่อนำค่า Tangent Modulus มาแสดงเทียบกับหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress, σ') ในกรณีการอัดตัว (Compression, C), การบวมตัว (Swelling, S) และการอัดตัวซ้ำ (Recompression, R) ดังภาพที่ 14 พบว่าค่า Tangent Modulus แปรผันกับค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress, σ') และค่า OCR ของดิน Janbu (1963) ได้เสนอสมการที่ 23 เพื่อหาค่า Tangent Modulus ของหินและดินชนิดต่างๆ ดังนี้

$$M = m\sigma_a (\sigma'_v / \sigma_a)^{1-a} \quad (23)$$

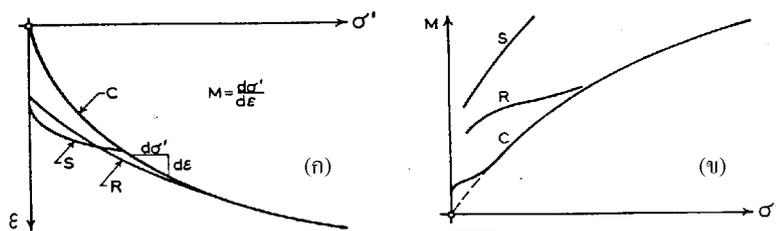
โดย m คือ ค่า Modulus Number
 a คือ Stress Exponent ($0 \leq a \leq 1$)
 σ'_v คือ Effective Vertical Stress ($\Delta\sigma + \sigma'_{vo}$)
 σ_a คือ Reference Stress มีค่าเท่ากับ 1 Atmospheric Pressure (100 kPa)

ค่า Reference Stress เป็นค่าปรับแก้ให้สมการมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น และค่า Stress Exponent ขึ้นกับชนิดของหินและดินดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus และ Stress Exponent ของหินและดินชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2 แสดงค่า Stress Exponent และ Modulus Number ของหินและดินชนิดต่างๆ

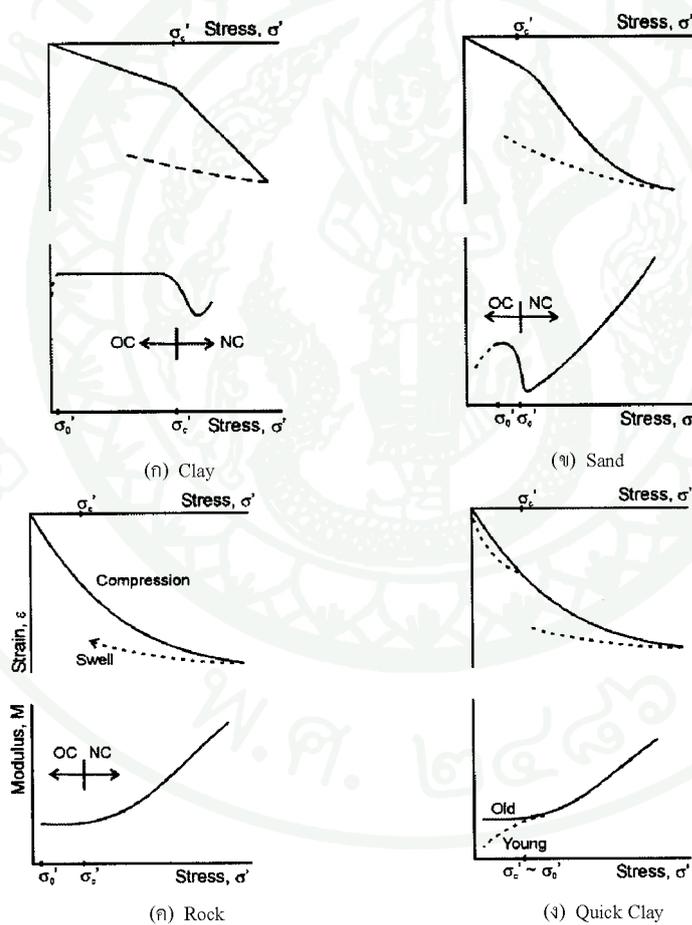
Soil or Rock Type	Stress Exponent: a	Modulus Number: m
Rock		
High strength	1	1,000,000 – 1,000
Low strength	1	1,000 – 300
Till : Very dense to dense	1	1,000 – 300
Gravel	0.5	400 – 40
Sand		
Dense	0.5	400 – 250
Compact	0.5	250 – 150
Loose	0.5	150 – 100
Silt		
Dense	0.5	200 – 80
Compact	0.5	80 – 60
Loose	0.5	60 – 40
Clay :		
Silty clay and clayey silt		
Hard	0	60 – 20
Stiff	0	20 – 10
Soft	0	10 – 5
Soft marine clay and Organic clay	0	20 – 5
Peat	0	5 – 1

ที่มา: Janbu (1963)



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ' - ϵ (ก) และ (ข) Tangent Modulus(M) - σ'

ที่มา: Janbu (1963)



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ' - ϵ และ M - ϵ จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ σ'_c คือ Critical Stress หรือเท่ากับ Preconsolidation Pressure (σ'_p)

ที่มา: Janbu (1963)

ขั้นตอนการหาค่าสตีฟเนสของสปริง (Spring Stiffness)

กฤษณ์ และก่อโชค (2552) ได้เสนอการประยุกต์ใช้หลักการ Tangent Modulus (Janbu, 1963) ร่วมกับผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) เพื่อหาค่าสตีฟเนสของสปริง และได้อธิบายขั้นตอนการหาค่าสตีฟเนสของสปริงดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับชั้นดินที่ความลึกต่างๆ

จากสมการที่ 23 พบว่าค่า Tangent Modulus ขึ้นกับค่า Modulus Number (m) ค่าหน่วยแรงประสิทธิผล และค่า Stress Exponent (a) ซึ่งค่าหน่วยแรงประสิทธิผล และค่า Stress Exponent (a) สามารถหาค่าได้จากหลักการ Stress in Soil Mass และตารางที่ 2 ตามลำดับ สำหรับค่า Modulus Number (m) สามารถหาค่าได้จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ดังนี้

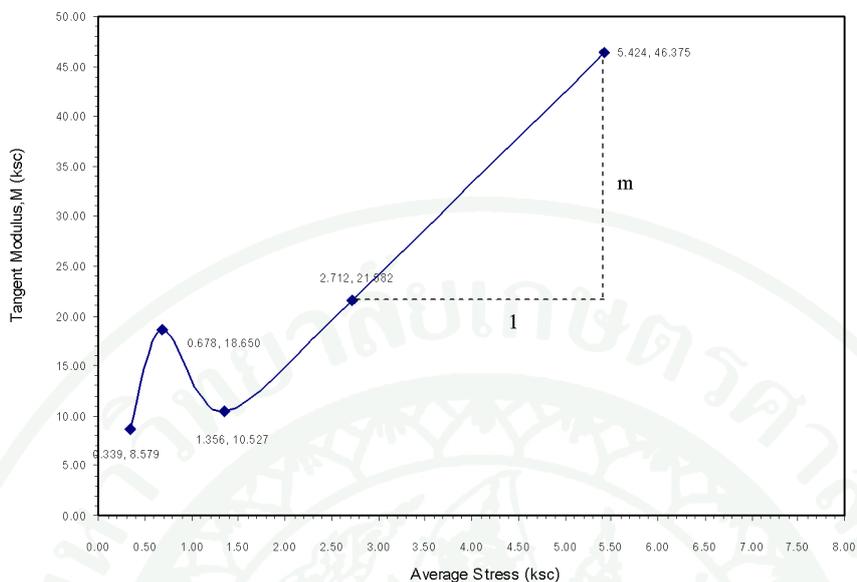
1. จากข้อมูลผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) หาค่า Average Vertical Effective Stress ที่ใช้ในการทดสอบและหาค่า Axial Strain จากผลการทรุดตัวของตัวดินตัวอย่างเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ Primary Consolidation

2. หาค่า Tangent Modulus (M) ซึ่งมีค่าเท่ากับ Average Stress หาด้วย Axial Strain (ϵ)

3. นำค่า Tangent Modulus (M) และค่า Average Stress มาพล็อตกราฟเพื่อหาค่า Modulus Number (m) จากความชันของกราฟในช่วงที่เป็นเส้นตรงดังภาพที่ 16

4. นำค่า Modulus Number (m) แทนในสมการที่ 23 จะได้สมการความสัมพันธ์ของค่า Tangent Modulus ที่ความลึกต่างๆของชั้นดิน

ในกรณีที่ชั้นดินชนิดเดียวกันมีผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ที่ความลึกต่างๆมากกว่า 1 ตัวอย่างสามารถหาค่า Modulus Number (m) ด้วยการหาค่าเฉลี่ยและกรณีที่ไม่มีผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) สามารถใช้ค่าที่กำหนดให้ดังแสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m)

ขั้นตอนที่ 2 การแปลงค่า Tangent Modulus เป็นค่า Modulus of Subgrade Reaction

ค่า Modulus of Subgrade Reaction ที่ได้จาก Plate Bearing Test และ Pile Load Test นั้น หมายถึงอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงต่อค่าการทรุดตัว ดังสมการ

$$k_s = \frac{P/A}{\delta} \quad (24)$$

- เมื่อ k_s คือ Modulus of Subgrade Reaction (F/L^3)
 P คือ แรงที่กระทำ (F)
 A คือ พื้นที่รับแรงที่สัมผัสกับผิวดิน (L^2)
 δ คือ ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น (L)

จากสมการที่ 24 สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปของ Tangent Modulus และความหนาของชั้นดินได้ดังสมการที่ 25

$$k_s = \frac{M}{h} \quad (25)$$

โดย k_s คือ Modulus of Subgrade Reaction (F/L^3)
 M คือ Tangent Modulus (F/L^2)
 h คือ ความหนาของชั้นดินที่พิจารณา (L)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่า Modulus of Subgrade Reaction มีค่าเท่ากับค่า Tangent Modulus (M) โดยหารด้วยความหนาของชั้นดิน (h) ที่พิจารณา

ขั้นตอนที่ 3 การเลือกใช้ค่า Modulus of Subgrade Reaction

1. กรณีฐานรากตื้น

เนื่องจากค่า Modulus of Subgrade Reaction ขึ้นกับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลที่เกิดขึ้นเป็นสำคัญ ดังนั้นการเลือกใช้ค่า Modulus of Subgrade Reaction จึงพิจารณาถึงความลึกที่หน่วยแรงประสิทธิผลมีค่าประมาณ 10 % ($0.1q_0$) ของหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นหรือ 2 เท่าของความกว้างฐานราก (2B) และใช้ค่าเฉลี่ยในกรณีที่ชั้นดินที่พิจารณาคือดินชนิดเดียวกัน หากชั้นดินที่พิจารณาคือดินต่างชนิดกันให้นำค่าเฉลี่ยของดินแต่ละชั้นแล้วหาค่า Equivalent ซึ่ง Mikhelson แนะนำดังนี้

$$k_{s1,2} = \frac{k_{s1} \cdot k_{s2}}{k_{s1} + k_{s2}} \quad (26)$$

เมื่อ $k_{s1} = \frac{M_1}{h_1}$ และ $k_{s2} = \frac{M_2}{h_2}$

โดย k_{s1}, k_{s2} คือ Modulus of Subgrade Reaction ของดินชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
 M_1, M_2 คือ Tangent Modulus ของดินชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
 h_1, h_2 คือ ความหนาของดินชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

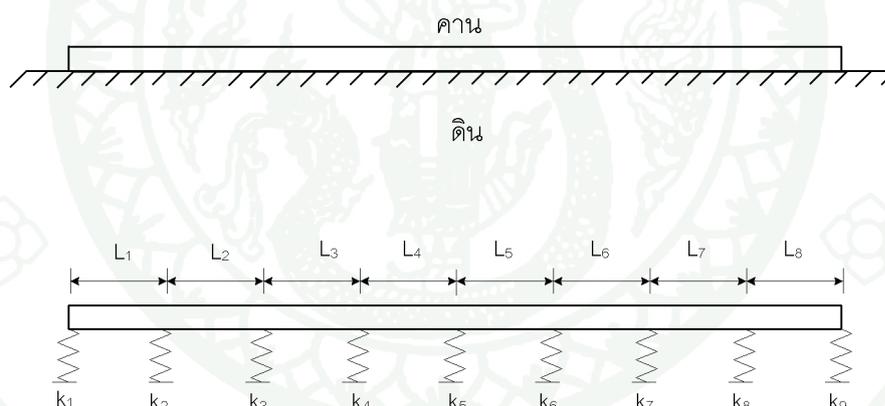
2. กรณีฐานรากลึก (ฐานรากเสาเข็ม)

ในกรณีฐานรากเสาเข็ม พิจารณาการกระจายของหน่วยแรงประสิทธิผลที่ 1 ใน 3 จากปลายเสาเข็มถึงความลึกที่ 2 เท่าของความกว้างของฐานรากสมมูลย์นับจากปลายเสาเข็ม $[(1/3)L+2B]$ แล้วใช้หลักการหาค่า Modulus of Subgrade Reaction เช่นเดียวกับกรณีฐานรากตื้น

ขั้นตอนที่ 4 การแปลงค่า Modulus of Subgrade Reaction เป็นค่าสติเฟนของสปริง

1. กรณีฐานรากตื้น

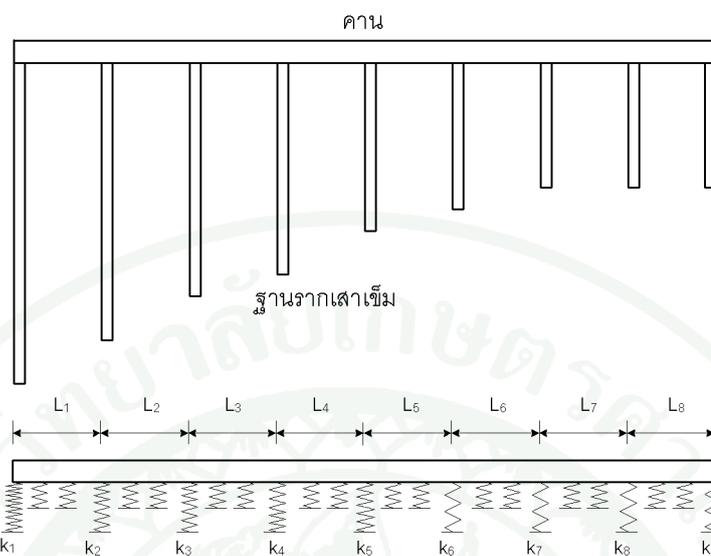
กรณีฐานรากตื้นเปรียบเสมือนแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนดินและสามารถสร้างแบบจำลองโครงสร้างตามหลักการ Beam on Elastic Material โดยแทนจุดรองรับที่เป็นพื้นดินด้วยสปริงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 แบบจำลองการวิเคราะห์กรณี Approach Slab on Ground (ก) รูปแบบจริง (ข) การใช้ Spring เป็นชิ้นส่วนเชื่อมต่อ

2. กรณีฐานรากลึก (ฐานรากเสาเข็ม)

กรณีฐานรากลึกสามารถสร้างแบบจำลองโครงสร้างตามหลักการ Beam on Elastic Material โดยแทนจุดรองรับที่เป็นเสาเข็มด้วยสปริงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แบบจำลองการวิเคราะห์กรณี Approach Slab on Pile (ก) รูปแบบจริง (ข) การใช้ Spring เป็นชิ้นส่วนเชื่อมต่อ

การแปลงค่า Modulus of Subgrade Reaction เป็นค่าสติเฟนของสปริงคำนวณโดยวิธีแบ่งพื้นที่รับน้ำหนักและสามารถหาค่าสติเฟนของสปริง (K) ได้ดังนี้

$$K_1 = \frac{B \cdot L_1 \cdot k_s}{2}$$

·

$$K_2 = \frac{B \cdot (L_1 + L_2) \cdot k_s}{2}$$

·

$$K_n = \frac{B \cdot L_{n-1} \cdot k_s}{2}$$

โดยที่ k_s คือ Modulus of Subgrade Reaction

B คือ ความกว้างของคานที่พิจารณา

โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัว

การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวด้วยทฤษฎี Beam on Elastic Material โดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ ถือเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและมีการทำซ้ำหลายครั้ง ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ BFEAP (Beam on Elastic Finite Element Analysis Program) ช่วยในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัว

โปรแกรม BEFEAP ได้รับการพัฒนาโดย อ. สรศักดิ์ เชี่ยวศิริกุล แห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น พัฒนาขึ้นบนระบบปฏิบัติการ Window XP โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel และ VBA (Visual Basic Application) สามารถรองรับแบบจำลองได้ 100 จุดต่อ (Node) 99 ชิ้นส่วน (Element) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบต่างๆ เหมาะสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างแบบ Beam on Elastic Foundation และใช้ในการวิเคราะห์โครงการปรับปรุงการออกแบบและมาตรฐานโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน โดยได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.) หลักการวิเคราะห์ปัญหาแยกพิจารณาตามพฤติกรรมของโครงสร้างดังนี้

1. พฤติกรรมชิ้นส่วนโครงสร้างคาน
2. พฤติกรรมของโครงสร้างตามสมมติฐานของ Winkler ในกรณีฐานรากคาน
3. พฤติกรรมของโครงสร้างในกรณีที่มีเสาเข็มรองรับ

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้หลักการ Displacement Method ซึ่งหมายถึงการกำหนดให้ปริมาณการเคลื่อนตัวของ Node เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าเมื่อสร้างสมการทุกเอลิเมนต์เสร็จแล้วจึงทำการแก้สมการเพื่อหาผลเฉลยของปริมาณการเคลื่อนตัวของจุดต่อ (Node) นั้นๆ และสามารถคำนวณหาตัวแปรอื่นๆ ได้โดยตรงจากปริมาณการเคลื่อนตัวดังนี้

$$\{F\} = [K]\{D\} \quad (27)$$

$$\{D\} = [K]^{-1}\{F\} \quad (28)$$

- โดยที่ $\{F\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงภายในชิ้นส่วน
 $[K]$ คือ เมทริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนในระบบแกนรวม
 $\{D\}$ คือ เวกเตอร์การเคลื่อนตัว

สำหรับการหาค่าเมทริกซ์สติฟเนสจะใช้หลักการพลังงานความเครียด (Strain energy) และพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างนั้นๆ เป็นเงื่อนไขในการพิจารณาหาค่าเมทริกซ์สติฟเนส กรณีชิ้นส่วนคานและฐานยึดหยุ่น Zhaohua และ Cook (1983) ได้แนะนำดังนี้

เมทริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนคาน (Conventional Uniform-Beam Stiffness Matrix: $[K_b]$)

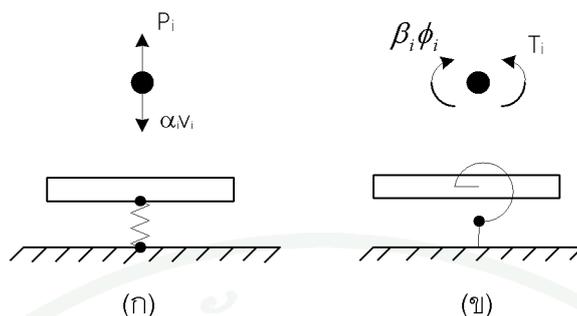
$$[k_b] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ \text{SYMMETRIC} & & 12 & -6L \\ & & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

เมทริกซ์สติฟเนสของ Winkler (Winkler Foundation Stiffness Matrix: $[K_w]$)

$$[k_w] = \frac{k_s L}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ & 4L^2 & 13L & 3L^2 \\ \text{SYMMETRIC} & & 156 & -22L \\ & & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

เมทริกซ์สติฟเนสกรณีที่มีเสาเข็มรองรับ (Pile Foundation Stiffness Matrix)

กรณีที่ชิ้นส่วนโครงสร้างคานมีเสาเข็มรองรับ จะพิจารณาเสมือนวางบนจุดรองรับยึดหยุ่นแบบสปริง (Spring Action at Nodes) ดังภาพที่ 19 (ก) แสดงการเสีชรูปเมื่อสปริงรับแรงในแนวแกน (Linear Spring) และภาพที่ 19 (ข) การเสีชรูปเมื่อสปริงรับแรงดัด (Rotational Spring) จากหลักการสมดุลซึ่ง Doyle (1991) ได้แนะนำดังนี้



ภาพที่ 19 ชิ้นส่วนโครงสร้างคานวางบนจุดรองรับแบบยืดหยุ่น (Spring Action at Nodes)

ที่มา: Doyle (1991)

$$P = -\alpha v \quad (31)$$

$$T = -\beta \phi \quad (32)$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์ของสปริงเมื่อรับแรงในแนวแกน
(Linear spring constant)

β คือ สัมประสิทธิ์ของสปริงเมื่อรับแรงคัต (Rotational spring constant)

เมื่อพิจารณาที่จุดต่อ i (Node i) ดังภาพที่ 19 (ก) แรงในแนวแกนกระทำกับสปริงทำให้เกิดแรงลัพธ์มีค่าเท่ากับ $(P - \alpha_1 v_1)$ และภาพที่ 19 (ข) เมื่อมีแรงคัตมากระทำที่สปริงทำให้เกิดโมเมนต์คัตมีค่าเท่ากับ $(T - \beta_1 \phi_1)$ จะได้สมการสมดุลดังนี้

$$[K] \{u\} = \begin{bmatrix} P_1 - \alpha_1 v_1 \\ T_1 - \beta_1 \phi_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ P_n - \alpha_n v_n \\ T_n - \beta_n \phi_n \end{bmatrix} \quad (33)$$

สามารถเขียนเมทริกซ์สติเฟนของจตุรรองรับสปริง ($[K_s]$) ในกรณีที่มีทั้งแรงในแนวแกน และแรงตัดกระทำต่อสปริง ได้ดังนี้

$$[K_s] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \beta_1 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \beta_n \end{bmatrix} \quad (34)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะแรงในแนวแกนเมทริกซ์สติเฟนของจตุรรองรับสปริง ($[K_s]$) มีค่าเท่ากับ

$$[K_s] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

เมื่อพิจารณาปัญหา รวมทั้งระบบของโครงสร้าง สามารถรวมเมทริกซ์สติเฟน ($[K]$) ได้ดังนี้

$$[K] = [K_b] + [K_w] + [K_s] \quad (36)$$

กรณีที่ขึ้นส่วนโครงสร้างคานวางบนดินและเสาเข็มเมทริกซ์สติเฟน ($[K]$) มีค่าเท่ากับ

$$[K] = [K_b] + [K_w] + [K_s] \quad (37)$$

กรณีที่ขึ้นส่วนโครงสร้างคานวางบนดินเมทริกซ์สติเฟนของระบบโครงสร้าง ($[K]$) มีค่าเท่ากับ

$$[K] = [K_b] + [K_w] \quad (38)$$

$$L' = \frac{L}{2} \frac{1}{\cos(\theta/2)}$$

$$\%g_2 = \frac{\Delta}{(L/2) \times 100} \times 100$$

เมื่อ	Y_i	คือ ค่าการทรุดตัวที่ควบคุมที่ตำแหน่งต่างๆ (X_i)
	e	คือ ระยะห่างระหว่างจุด PVI มายังจุดยอดของโค้ง
	g_1, g_2	คือ % ความลาดชันของสะพานและ % ความลาดชันของช่วงปรับการทรุดตัว (ลาดขึ้นมีเครื่องหมายเป็น +; ลาดลงมีเครื่องหมายเป็น -)
	Δ	คือ ค่าการทรุดตัวที่แตกต่างระหว่างสะพานกับถนน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

การดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็นขั้นตอนการทดสอบในสนาม การวิเคราะห์ผล และสรุปการวิจัย โดยมีสถานที่ดำเนินงาน ดังนี้

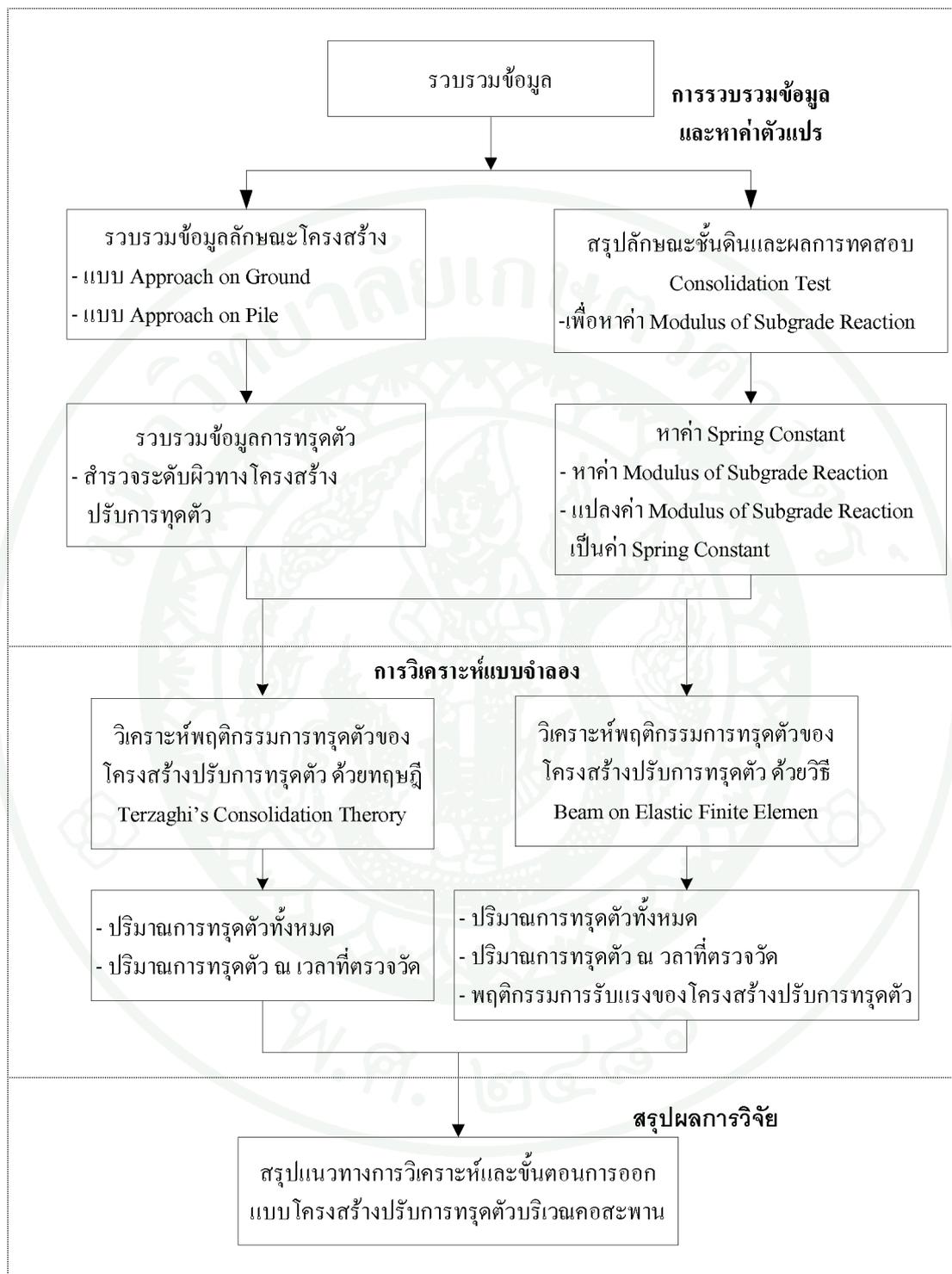
1. โครงการก่อสร้างสะพานข้ามคลองสอง บนถนนกรุงเทพกรีฑา- ร่มเกล้า ช่วงที่ 3 ในความรับผิดชอบของสำนักงานโยธา กรุงเทพมหานคร
2. โครงการก่อสร้างสะพานข้ามคลองบางตะไนย บนทางหลวงพิเศษหมายเลข 345 ตอน บางบัวทอง-บรรจบทางหลวงหมายเลข 307 ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวง
3. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

วิธีการ

การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานมีขั้นตอนดำเนินการดังนี้

1. รวบรวมผลการเจาะสำรวจดิน ผลการทดสอบสมบัติของดิน และผลการตรวจวัดการทรุดตัวภาคสนาม
2. วิเคราะห์ปริมาณและอัตราการทรุดตัวโดยใช้ทฤษฎี Terzaghi (1943)
3. หาค่า Spring Stiffness จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) โดยใช้หลักการ Tangent Modulus ของ Janbu (1963) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวด้วยวิธี Beam on Elastic Finite Element
4. สรุปแนวทางการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน

แนวทางและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของโครงการและผลการทดสอบดิน

การรวบรวมข้อมูลการก่อสร้างได้แก่ รูปแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัว แนวทางตั้ง (Vertical Alignment) ข้อมูลเจาะสำรวจและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดิน บริเวณพื้นที่ทำการศึกษาฯ จากรายงานผลการเจาะสำรวจ รวมถึงการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมในสนามประกอบด้วย ข้อมูลดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลการก่อสร้างได้แก่ รูปแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัว แนวทางตั้ง (Vertical Alignment) ข้อมูลเจาะสำรวจและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินบริเวณก่อสร้าง

2. ตรวจวัดการทรุดตัวในแนวตั้งบริเวณคอสะพาน โดยการสำรวจระดับผิวทางด้วยกล้องระดับ (อ้างอิงค่าระดับน้ำทะเลปานกลางและค่าระดับกรุงเทพมหานคร) และจากอุปกรณ์ Settlement Plate

3. ตรวจวัดการทรุดตัวในแนวราบบริเวณคอสะพาน จากอุปกรณ์ Vertical Inclinometer

การวิเคราะห์พฤติกรรมทรุดตัวโดย Terzaghi Consolidation Theory

สมมติฐานในการวิเคราะห์

1. ในชั้นดินเหนียว การทรุดตัวเกิดจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Theory) และพิจารณาเฉพาะ Primary Consolidation สำหรับการทรุดตัวของชั้นดินทรายใต้ชั้นดินเหนียว ซึ่งรับน้ำหนักของสะพาน โดยผ่านเสาเข็มนั้น ใช้ทฤษฎี Elastic Theory ในการวิเคราะห์

2. ไม่พิจารณาการทรุดตัวเนื่องจากแรงดันน้ำใต้ดินซึ่งมีค่าลดลงในชั้นทราย (สมมติให้น้ำใต้ดินอยู่ในสถานะ Hydrostatic และอยู่ที่ระดับผิวดินเดิม)

3. พิจารณาการทรุดตัวในแนวตั้งเท่านั้น และไม่พิจารณาการทรุดตัวเนื่องจากดินฐานรากไหลออกด้านข้าง

4. การวิเคราะห์อัตราการทรุดตัว ได้พิจารณาชั้นดินเหนียวเป็น Consolidation Layer ส่วนชั้นดินทรายใต้ชั้นดินเหนียว และชั้นดินถมหรือชั้นดินบนสุด เป็น Boundary Layer และสามารถระบายน้ำได้ดี (Double Drainage Boundary Condition)

5. พิจารณาอิทธิพลของชั้นดินเหนียว ซึ่งมีค่า c_v ต่างๆ ต่ออัตราการทรุดตัว โดยการคำนวณความลึกเทียบเท่าของชั้นดิน (Equivalent Thickness) เสนอโดย Barden and Younan (1969)

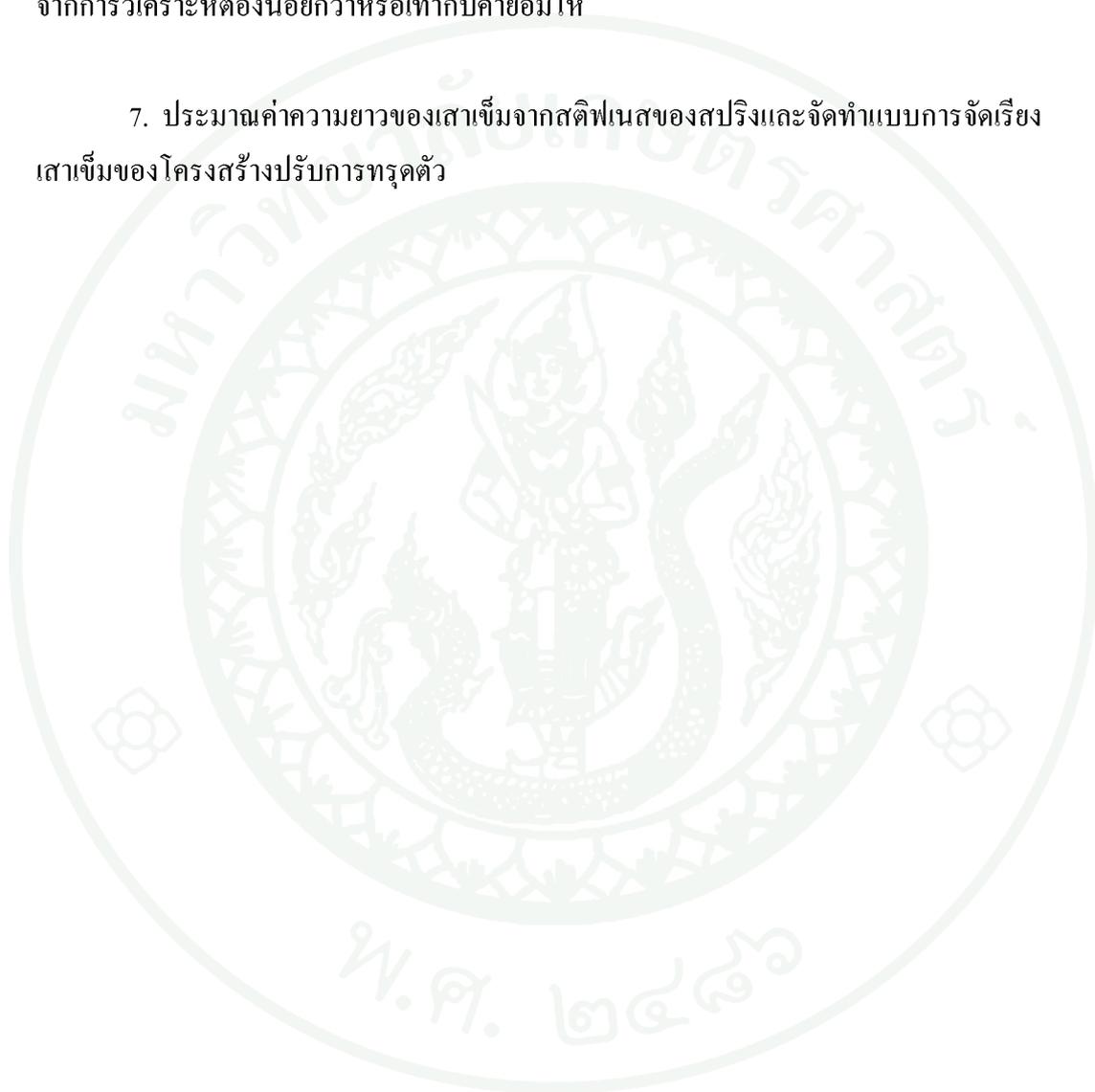
6. พิจารณาการทรุดตัวเนื่องจาก Primary Consolidation เริ่มขณะดำเนินการก่อสร้าง

แนวทางการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน

แนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบนั้น ใช้ความรู้ด้าน Geometric Design เพื่อหาค่าการทรุดตัวที่ยอมรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆ จากต่อม่อสะพาน และวิเคราะห์โครงสร้างโดยทฤษฎี Beam on Elastic Material เพื่อหาค่าการทรุดตัวและแรงภายในจุดต่อเพื่อใช้ทำนายค่าสตีเฟนของสปริงที่ใช้หาค่าการทรุดตัวที่เหมาะสมตาม Geometric Design โดยมีขั้นตอนดังนี้

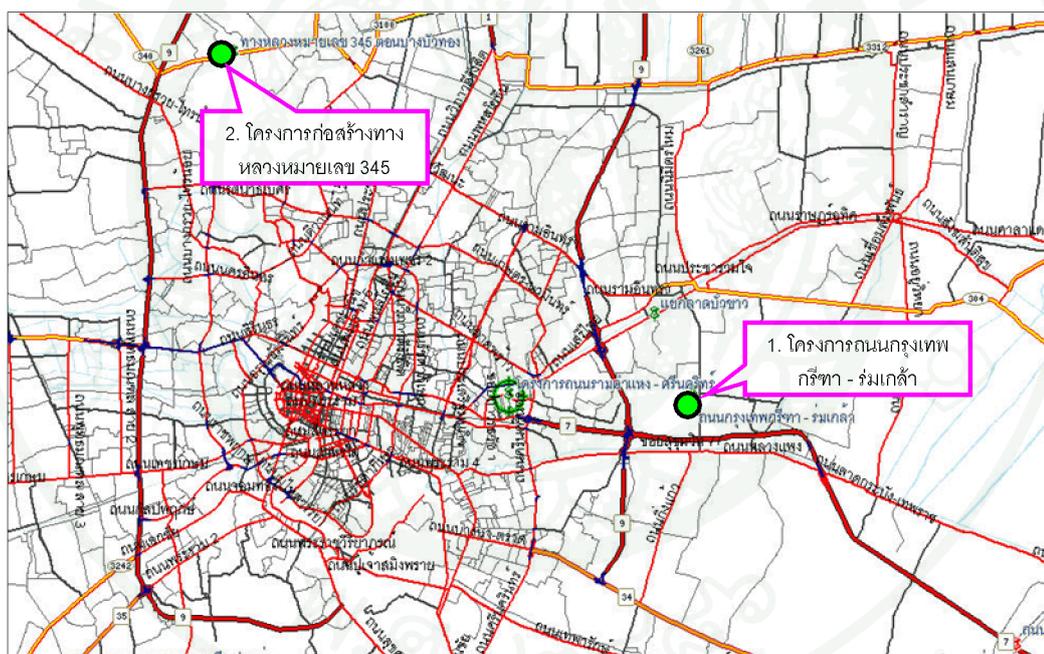
1. คำนวณค่าการทรุดตัวของคันทางบริเวณคอสะพาน ด้วยแบบจำลอง Beam on Elastic Material
2. คำนวณหาค่าความยาวของช่วงปรับการทรุดตัวที่เหมาะสม (Geometric Design) โดยใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงของความชันเป็นเกณฑ์
3. คำนวณค่าการทรุดตัวที่ยอมรับได้ (Control Settlement) ของช่วงปรับการทรุดตัวที่ระยะต่างๆจากต่อม่อสะพาน
4. จากแรงภายในที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างและค่าการทรุดตัวที่ยอมรับให้นำมาทำนายหาค่าสตีเฟนของสปริงที่เหมาะสม

5. นำค่าสปริงสติฟเนสที่ได้จากข้อ 4 ไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าการทรุดตัวแล้วหาค่าการเปลี่ยนแปลงความชันที่ได้จากการวิเคราะห์
6. เปรียบเทียบค่าเปลี่ยนแปลงความชันจากการวิเคราะห์กับค่าที่ยอมให้ และค่าความชันจากการวิเคราะห์ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับค่ายอมให้
7. ประมาณค่าความยาวของเสาเข็มจากสติฟเนสของสปริงและจัดทำแบบการจัดเรียงเสาเข็มของโครงสร้างปรับการทรุดตัว



ลักษณะพื้นที่ศึกษา

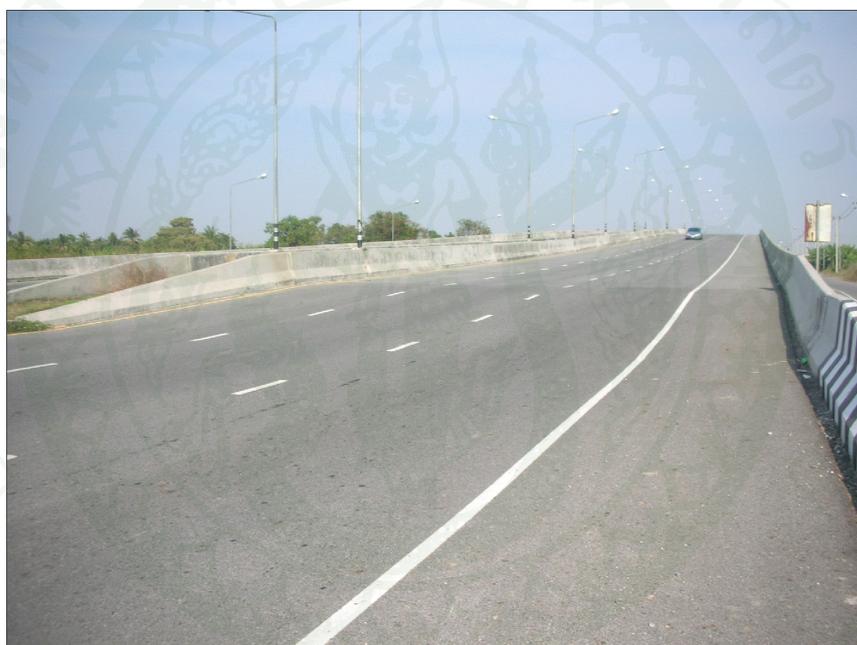
เนื่องจากการวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทุดตัวบริเวณคอสะพาน จึงเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับพฤติกรรมที่ได้จากการตรวจวัดในสนาม โดยคัดเลือกกรณีศึกษา 2 โครงการที่มีรูปแบบโครงสร้างปรับการทุดตัวต่างกัน ในบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล คือ โครงการสะพานข้ามคลองสอง บนถนนกรุงเทพฯกรีฑา-ร่มเกล้าช่วงที่ 3 และโครงการสะพานข้ามคลองบางตะไนย บนทางหลวงพิเศษหมายเลข 345 ตอนบางบัวทอง-บรรจบทางหลวงหมายเลข 307 ภาพที่ 22 แสดงตำแหน่งที่ตั้งโครงการทั้ง 2 โครงการ ซึ่งรายละเอียดการก่อสร้าง และข้อมูลทางกายภาพและลักษณะชั้นดิน ได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวงและสำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 22 ตำแหน่งที่ตั้งโครงการกรณีศึกษา 2 โครงการ คือ (1) โครงการสะพานข้ามคลองสองบนถนนกรุงเทพฯกรีฑา-ร่มเกล้าช่วงที่ 3, (2) โครงการสะพานข้ามคลองบางตะไนย บนทางหลวงพิเศษหมายเลข 345

โครงการสะพานข้ามคลองสองบนถนนกรุงเทพกรีฑา-ร่มเกล้า

โครงการสร้างสะพานข้ามคลองสองเป็นส่วนหนึ่งของโครงการก่อสร้างถนนกรุงเทพกรีฑา – ร่มเกล้าช่วงที่ 3 สะพานมีขนาด 3 ช่องจราจร, ความกว้างของช่องจราจรเท่ากับ 3.50 เมตร/ช่อง และความยาวของสะพานประมาณ 300 เมตร ส่วนเชื่อมต่อระหว่างสะพานและถนนนั้นได้ออกแบบและก่อสร้างโดยใช้โครงสร้างปรับการทรุดตัวชนิด Approach Slab on Ground ดังแสดงในภาพที่ 23 และก่อสร้างแล้วเสร็จเมื่อเดือน เมษายน พ.ศ.2547 (ชัยพร บัวสว่าง, 2551) ซึ่งในปัจจุบันเปิดบริการเพียงบางช่วงเท่านั้น



ภาพที่ 23 ลักษณะโครงสร้างปรับการทรุดตัว โครงการสะพานข้ามคลองสองบนถนนกรุงเทพกรีฑา – ร่มเกล้า ช่วงที่ 3

ลักษณะชั้นดิน

จากผลการเจาะสำรวจชั้นดินจำนวน 1 หลุม ถึงระดับความลึกประมาณ 22.00 เมตร และทำการทดสอบ Field Vane Shear ถึงระดับความลึก 13 เมตร จำนวน 1 หลุม บริเวณคอสะพาน สรุปได้ว่าชั้นดินประกอบด้วยชั้นดินถมหนาประมาณ 5.00 เมตร เป็นเศษหินปนทรายปนดินเหนียว ตามด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 11.00 เมตร ที่ระดับความลึกประมาณ 5.00 เมตร ถึง 16.00 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งหนาประมาณ 3.00 เมตร ที่ระดับความลึกประมาณ 16.00 เมตร ถึง 19.00 เมตร ได้ชั้นดินดังกล่าวเป็นดินเหนียวแข็งมาก มีความหนาไม่น้อยกว่า 3.00 เมตร ภาพที่ 24 แสดงคุณสมบัติของดินทางวิศวกรรมและตารางที่ 3 สรุปลักษณะชั้นดินที่ความลึกต่างๆ

ตารางที่ 3 สรุปลักษณะชั้นดินบริเวณคอสะพานข้ามคลองสอง บนถนนกรุงเทพกรีฑา – ร่มเกล้า

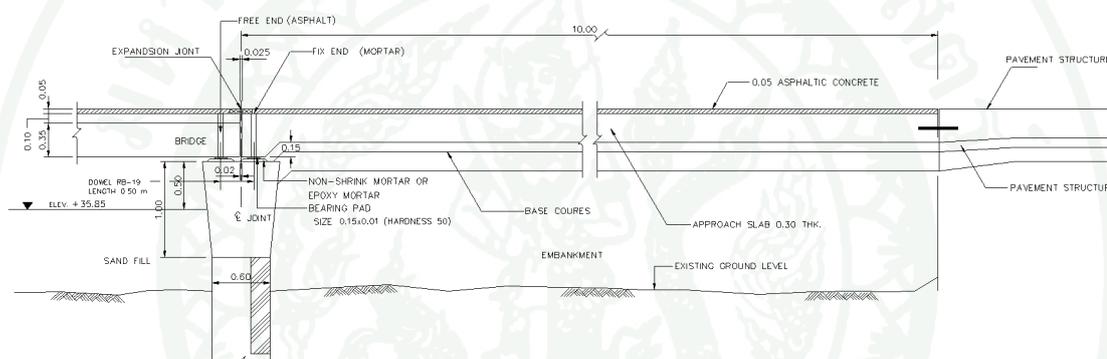
ความลึก (เมตร)	ชั้นดิน	ลักษณะที่พบ
0.00-5.00	ดินถม (Fill Material)	ดินทรายปนดินเหนียวปนเศษหิน มีค่า w_n ในดินอยู่ระหว่าง 20-40% จัดเป็นดินกลุ่ม CL, SM, SC
5.00-16.00	ดินเหนียวอ่อน (Soft Clay Layer)	ดินเหนียวอ่อน มีค่า w_n ในดินอยู่ระหว่าง 70-80% มีค่า Unconfined Compressive Strength อยู่ระหว่าง 2.0-2.5 ตันต่อตารางเมตร จัดเป็นดินกลุ่ม CH
16.00-19.00	ดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็ง (Medium to Stiff Clay Layer)	ดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็ง สีเทาเข้ม มีค่า w_n ในดินอยู่ระหว่าง 20-70% มีค่า SPT-N อยู่ระหว่าง 10-30 ครั้งต่อฟุต จัดเป็นดินกลุ่ม CH
19.00-21.45	ดินเหนียวแข็งมาก (Stiff to Very Stiff Clay Layer)	ดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก สีเทาเข้ม มีค่า w_n ในดินอยู่ระหว่าง 0-20% มีค่า SPT-N มากกว่า 50 ครั้งต่อฟุต จัดเป็นดินกลุ่ม CL

BORING LOG					BORING NO : BH-1		ELEV. (m) : -				
PROJECT : โครงการปรับปรุงการทรุดตัวบริเวณถนน					DEPTH (m) : 21.45		GWL. (m) : -2.00				
LOCATION : สะพานข้ามคลอง 2					COORD. N : -		DATE STARTED : 4 มิ.ค. 52				
จังหวัดกรุงเทพฯ ๑					E : -		DATE FINISHED : 4 มิ.ค. 52				
SOIL DESCRIPTION	DEPTH (m)	GRAPHIC LOG	METHOD	SAMPLE NO.	RECOVERY (cm)	SPT-N VALUE (blows/ft)	Wn LL PL (%)	Su UC × FVT (Undisturbed) △ FVT (Remold) (t/sq.m)	Consolidation test		
									TOTAL UNIT WEIGHT (t/cu.m)	Recompression Index (Cr)	Coefficient of compressibility (Cc)
						10 20 30 40	20 40 60 80	2 4 6 8	1.0 1.5 2.0	0.1 0.3 0.5	0.5 1.0 1.5
Fill Sand with Rock with Clay , Grey Brown (CL)	1.95	HA WC	SS-1	1							
SILTY SAND, GREY BROWN (SM)	3.45	WO	ST-2	2							
CLAY SAND, GREY (SC)	4.95	WO	ST-3	3							
SOFT CLAY, GREY (CH)	6.00	WO	ST-4	4					1.52	0.06	0.24
	7.00	WO	ST-5	5					1.54		
	8.00	WO	ST-6	6					1.54		
	9.00	WO	ST-7	7					1.58		
	10.00	WO	ST-8	8					1.55	0.11	0.32
	11.00	WO	ST-9	9					1.60		
	12.00	WO	ST-10	10							
	13.00	WO	ST-11	11					1.65		
	14.00	WO	SS-12	12							
	15.00	WO	SS-13	13							
MEDIUM STIFF CLAY, GREY (CH)	16.00	WO	SS-4	4							
16.95	WO										
18.50	WO										
19.95	WO										
21.45	WO										
END OF BORING											
PA = POWER AUGERING	HA = HAND AUGERING	WO = WASH OUT	ST = SHELBY TUBE	SS = SPLIT SPOON							
PARTY CHIEF:	MADE BY:	GEOLOGIST:	FILE :	DISK:							
RIG NO. :	DRILLER :	CASING Ø 3" TO m. DEPTH									

ภาพที่ 24 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดิน โครงการสะพานข้ามคลองสองบนถนน
กรุงเทพฯกรีฑา - ร่มเกล้า

รูปแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัว

โครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานข้ามคลองสอง มีลักษณะเป็น Approach Slab on Ground ดังแสดงในภาพที่ 25 โครงสร้างดังกล่าว มีความยาว 10.00 เมตร, กว้าง 13.00 เมตร และหนา 0.30 เมตร เชื่อมต่อกับสะพาน ซึ่งกว้างประมาณ 14.00 เมตร และยาวประมาณ 300.00 เมตร ปลายด้านหนึ่งของ Approach Slab วางบนคานขวาง (Cross Beam) ซึ่งถ่ายแรงลงฐานรากของสะพาน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งเชื่อมต่อกับถนนวางบนดินบดอัด และดินเดิม คันทางประกอบด้วย ชั้นผิวทาง และชั้นดินบดอัด ซึ่งชั้นผิวทางเป็นวัสดุ Concrete Slab หนา 0.25 เมตร และปูทับหน้าด้วย Asphaltic Concrete หนา 0.05 เมตร สำหรับชั้นดินบดอัดมีความหนา 2.00 เมตร



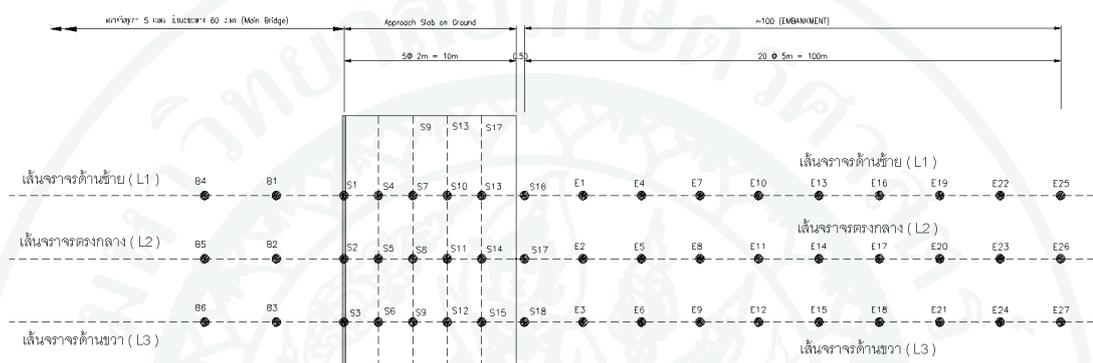
ภาพที่ 25 ภาพตัดตามยาวโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground

ที่มา: ชัยพร (2551)

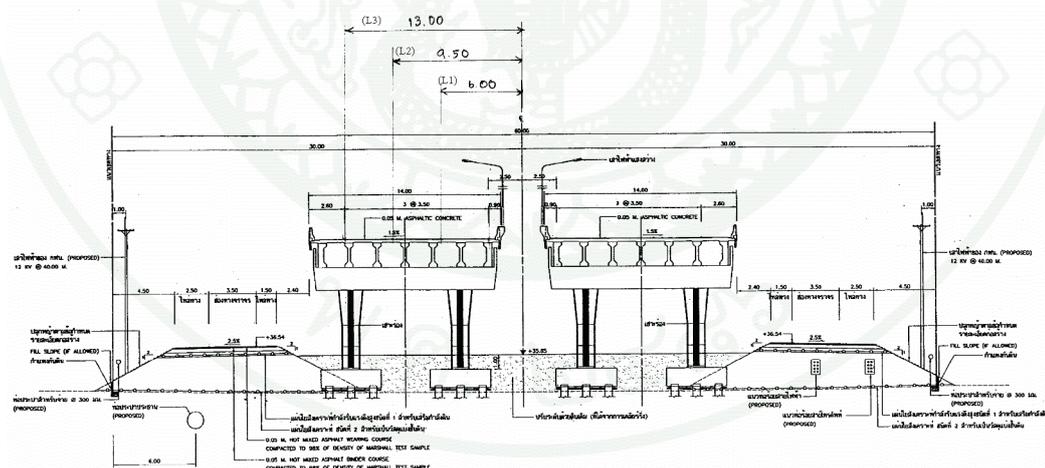
การตรวจวัดพฤติกรรมทรุดตัวในแนวตั้ง

การทรุดตัวในแนวตั้งของโครงสร้างปรับการทรุดตัว รวมทั้งสะพาน Approach Slab on Pile และถนนซึ่งเชื่อมต่อกับโครงสร้างปรับการทรุดตัว ได้ตรวจวัดจาก Surface Settlement Point ด้วยกล้องระดับได้ดำเนินการทั้งสิ้น 2 ครั้ง เมื่อเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2551 และ เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2552 ซึ่งได้ตรวจวัดในส่วนของโครงสร้างสะพานหลักตลอดความยาวของสะพานประมาณ 430 เมตร โครงสร้างปรับการทรุดตัวซึ่งมีความยาวประมาณ 10 เมตร และตรวจวัดค่าระดับในส่วนของคันทางต่อจากโครงสร้างปรับการทรุดตัวเป็นระยะทาง 100 เมตร โดยใช้กล้องระดับทำระดับจาก

หมุดมาตรฐานของกรุงเทพฯ (BMA Level) ตำแหน่งตรวจวัดมี 3 แนว คือ เส้นจราจรทางด้านซ้าย (L1) ตรงกลาง (L2) และด้านขวา (L3) ตำแหน่ง Surface Settlement Point และระยะในการตรวจวัดดังแสดงในภาพที่ 26 ถึงภาพที่ 27 รวมถึงข้อมูลการตรวจวัดของซัยพร (2551) ค่าระดับจากการตรวจวัดนำมาคำนวณ และแสดงเป็นค่า ระดับน้ำทะเลปานกลาง (รทก.) หรือ Mean Sea Level (MSL) ซึ่งค่า MSL = 0 เทียบเท่ากับค่า BMA Level = 35.030



ภาพที่ 26 แพลนแสดงตำแหน่งจุดสำรวจค่าระดับของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground



ภาพที่ 27 รูปตัดแสดงตำแหน่งจุดสำรวจค่าระดับของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

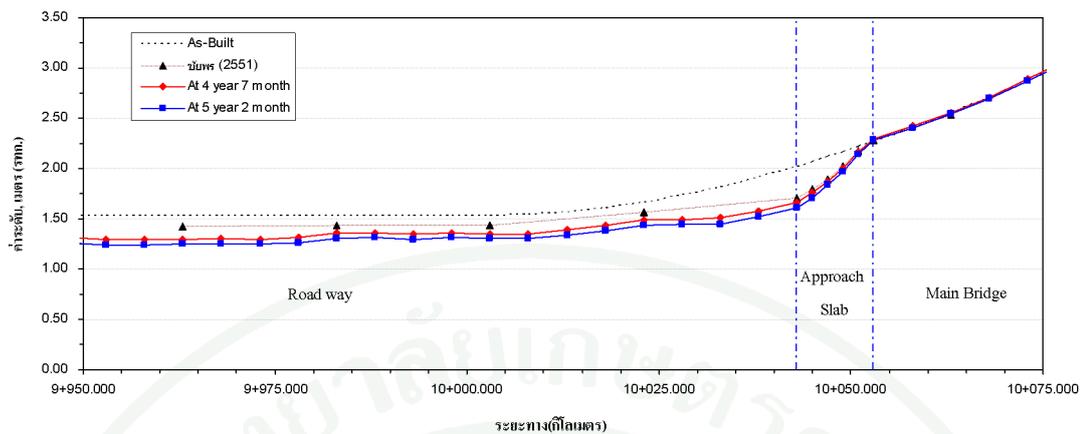
ข้อมูลระดับภายหลังการก่อสร้างที่แสดงเปรียบเทียบกับค่าระดับจากแบบแปลนก่อสร้างสะพาน (As-Built Drawing) เลือกลงใช้ข้อมูลตรวจวัดที่ตำแหน่ง L2 เนื่องจากเป็นตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ค่าการทรุดตัวสูงสุดของโครงสร้างปรับการทรุดตัว (Approach Slab on Ground) และคันทาง (Embankment Road) แสดงในตารางที่ 4 และได้สรุปค่าความลาดชันสูงสุดของโครงสร้างปรับการทรุดตัว และถนนบนคันดินถม (ซึ่งห่างจาก Approach Slab มากกว่า 40 เมตร) ในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ค่าการทรุดตัวสูงสุดของโครงการปรับการทรุดตัวประเภท Approach Slab on Ground และถนนบนคันดินถม

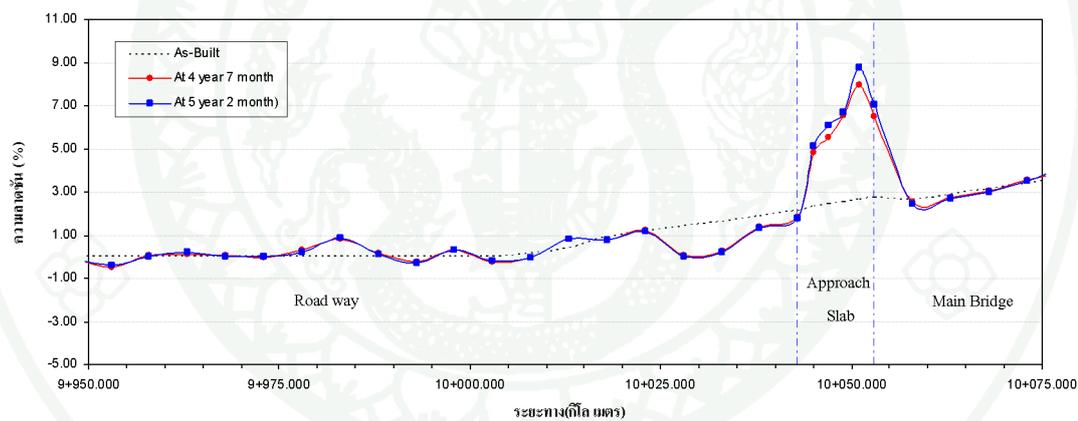
ช่วงโครงสร้าง	ค่าทรุดตัวสูงสุดฝั่งขาขึ้น (m)			ค่าทรุดตัวสูงสุดฝั่งขาลง (m)		
	ส.ค. 2550 3ปี 4 เดือน	พ.ย. 2551 4 ปี 7 เดือน	มิ.ย. 2552 5 ปี 2 เดือน	ส.ค. 2550 3ปี 4 เดือน	พ.ย. 2551 4 ปี 7 เดือน	มิ.ย. 2552 5 ปี 2 เดือน
โครงสร้างปรับการทรุดตัว	+0.28*	+0.40	+0.45	+0.25*	+0.37	+0.42
ถนนบนดินถม	+0.12*	+0.26	+0.26	+0.11*	+0.31	+0.36
Remarks	* ข้อมูลจากชัยพร บัวสรวง (2551) () ระยะเวลาตรวจวัดภายหลังจากการก่อสร้าง					

ตารางที่ 5 ความลาดชันของผิวทางแบบแปลนก่อสร้าง (As-Built Drawing) และผลตรวจวัดในสนาม ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

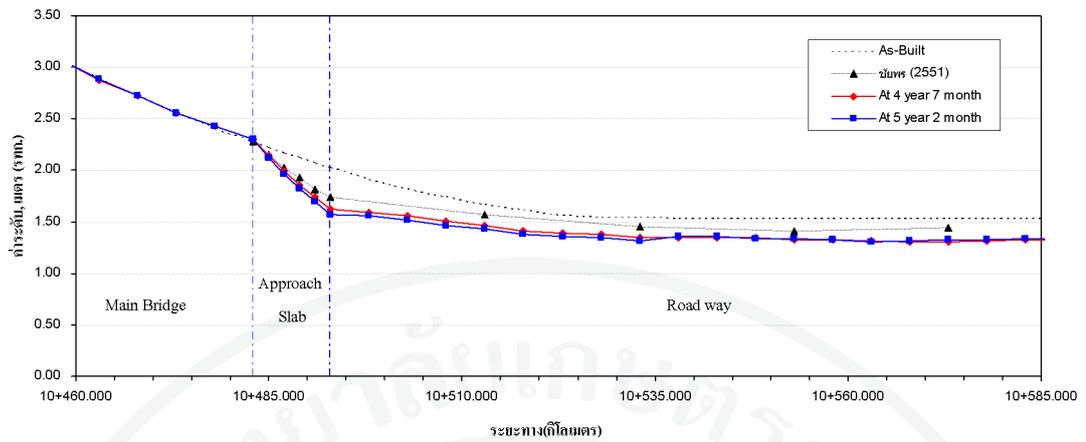
ช่วงโครงสร้าง	ความลาดชันสูงสุดฝั่งขาขึ้น (%)			ความลาดชันสูงสุดฝั่งขาลง (%)		
	As-Built Drawing	พ.ย. 2551 4 ปี 7 เดือน	มิ.ย. 2552 5 ปี 2 เดือน	As-Built Drawing	พ.ย. 2551 4 ปี 7 เดือน	มิ.ย. 2552 5 ปี 2 เดือน
โครงสร้างปรับการทรุดตัว	2.8	9.0	9.0	2.8	8.0	9.0
ถนนบนดินถม	0.0	0.5	0.5	0.0	1.0	1.0
Remarks	() ระยะเวลาตรวจวัดภายหลังจากการก่อสร้าง					



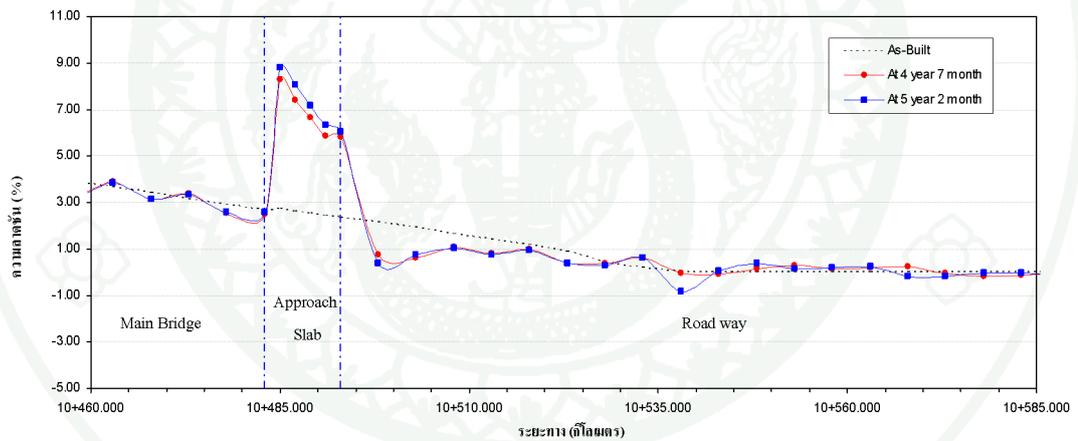
ภาพที่ 28 เปรียบเทียบค่าระดับจาก As-Built Drawing และผลการตรวจวัดระดับผิวทางภายหลังการก่อสร้าง ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground ฝั่งข้างสะพาน



ภาพที่ 29 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงความชัน ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground ฝั่งข้างสะพาน



ภาพที่ 30 เปรียบเทียบค่าระดับจาก As-Built Drawing และผลการตรวจวัดระดับผิวทางภายหลังการก่อสร้าง ของโครงสร้างปรับการหลุดตัวแบบ Approach Slab on Ground ฝั่งขาขึ้นสะพาน



ภาพที่ 31 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงความชัน ของโครงสร้างปรับการหลุดตัวแบบ Approach Slab on Ground ฝั่งขาขึ้นสะพาน

โครงการสะพานข้ามคลองบางตะไนย บนทางหลวงพิเศษหมายเลข 345

ทางหลวงพิเศษหมายเลข 345 ตอนบางบัวทอง - บรรจบทางหลวงหมายเลข 307 เป็นทางเชื่อมระหว่าง อ.บางบัวทอง จ.นนทบุรี ถึง แยกบางคูวัด อ.เมือง จ.ปทุมธานีซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวง การก่อสร้างสะพานใหม่ข้ามคลองบางตะไนยบริเวณ กม.3+400 เป็นส่วนหนึ่งของโครงการขยายช่องทางจราจรทางหลวงพิเศษหมายเลข 345 โดยสะพานเดิมซึ่งมีจำนวน 2 ช่องจราจรได้ถูกปรับปรุงเป็นทางสำหรับรถขาเข้า และดำเนินการก่อสร้างสะพานใหม่สำหรับรถขาออก มีขนาด 2 ช่องจราจร ดังแสดงในภาพที่ 32 ส่วนเชื่อมต่อระหว่างสะพานและถนนนั้นได้ออกแบบและก่อสร้างโดยใช้โครงสร้างปรับการทรุดตัวชนิด Approach Slab on Pile การก่อสร้างโครงการขยายช่องทางจราจรทางหลวงพิเศษหมายเลข 345 เสร็จสมบูรณ์เมื่อเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2550



ภาพที่ 32 ลักษณะ โครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน ข้ามคลองบางตะไนย

ลักษณะชั้นดิน

ผลการสำรวจชั้นดินจำนวน 1 หลุม ถึงระดับความลึกประมาณ 35.00 เมตร สรุปได้ดังนี้คือ ชั้นดินประกอบด้วย ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก หนาประมาณ 11.50 เมตร ตามด้วยชั้นดิน

เหนียวปนทรายอ่อน หนา 1.50 เมตร ได้ชั้นดินเหนียวปนทรายอ่อนเป็นชั้นดินเหนียวปนทรายแข็ง ปานกลางหนาประมาณ 3.50 เมตร และตามด้วยดินเหนียวปนทรายแข็งมาก หนาประมาณ 1.00 เมตร ได้ชั้นดินดังกล่าวเป็นดินทรายแน่นปานกลางหนา 1.50 เมตร และชั้นทรายแน่นถึงแน่นมาก มีความหนาไม่น้อยกว่า 16.00 เมตร ภาพที่ 33 และตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดิน และลักษณะชั้นดินที่ความลึกต่างๆ

ตารางที่ 6 สรุปลักษณะชั้นดินบริเวณคอสะพานข้ามคลองบางตะไนย

ความลึก (เมตร)	ชั้นดิน	ลักษณะที่พบ
0.00-11.50	ดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก (Very Soft to Soft Clay Layer)	ดินเหนียวอ่อนสีเทา มีค่า w_n ในดินอยู่ระหว่าง 55-85 % มีค่า Unconfined Compressive Strength อยู่ระหว่าง 0.9 - 2.4 ตันต่อตารางเมตร จัดเป็นดินกลุ่ม CH
11.50-13.00	ดินเหนียวปนทรายอ่อน (Soft fine Sandy Clay Layer)	ดินเหนียวปนทรายอ่อน สีเทา มีค่า w_n ในดินอยู่ระหว่าง 40-55 % มีค่า Unconfined Compressive Strength อยู่ระหว่าง 2.0 - 2.8 ตันต่อตารางเมตร จัดเป็นดินกลุ่ม CL
13.00-16.50	ดินเหนียวปนทรายแข็งปานกลาง (Medium Sandy Clay Layer)	ดินเหนียวปนทรายแข็งปานกลาง สีเทา มีค่า w_n ในดินอยู่ระหว่าง 20-45% มีค่า Unconfined Compressive Strength มากกว่า 3.0 ตันต่อตารางเมตร จัดเป็นดินกลุ่ม CL
16.50-17.50	ดินเหนียวปนทรายแข็งมาก (Very Stiff Sandy Clay Layer)	ดินเหนียวปนทรายแข็งมาก สีเทา มีค่า w_n ในดินอยู่ระหว่าง 15-20% ไม่มีค่าความเป็นพลาสติกที่ดี มีค่า SPT-N อยู่ระหว่าง 15-25 ครั้งต่อฟุต จัดเป็นดินกลุ่ม CL
17.50-19.00	ทรายแน่นปานกลาง (Medium Dense Sand Layer)	ดินทรายปนทรายแข็งแน่นปานกลาง สีน้ำตาล มีค่า w_n ในดินอยู่ระหว่าง 15-20% มีค่า SPT-N อยู่ระหว่าง 25-40 ครั้งต่อฟุต จัดเป็นดินกลุ่ม SM
19.00-35.20	ทรายแน่นถึงแน่นมาก (Dense to Very Dense Sand ayer)	ดินทรายปนทรายแข็งแน่นถึงแน่นมาก สีน้ำตาล มีค่า w_n ในดินอยู่ระหว่าง 15-20% มีค่า SPT-N อยู่ระหว่าง 38 ถึงมากกว่า 50 ครั้งต่อฟุตจัดเป็นดินกลุ่ม SM

ที่มา: จุฬา และ อรรถสิทธิ์ (2551)

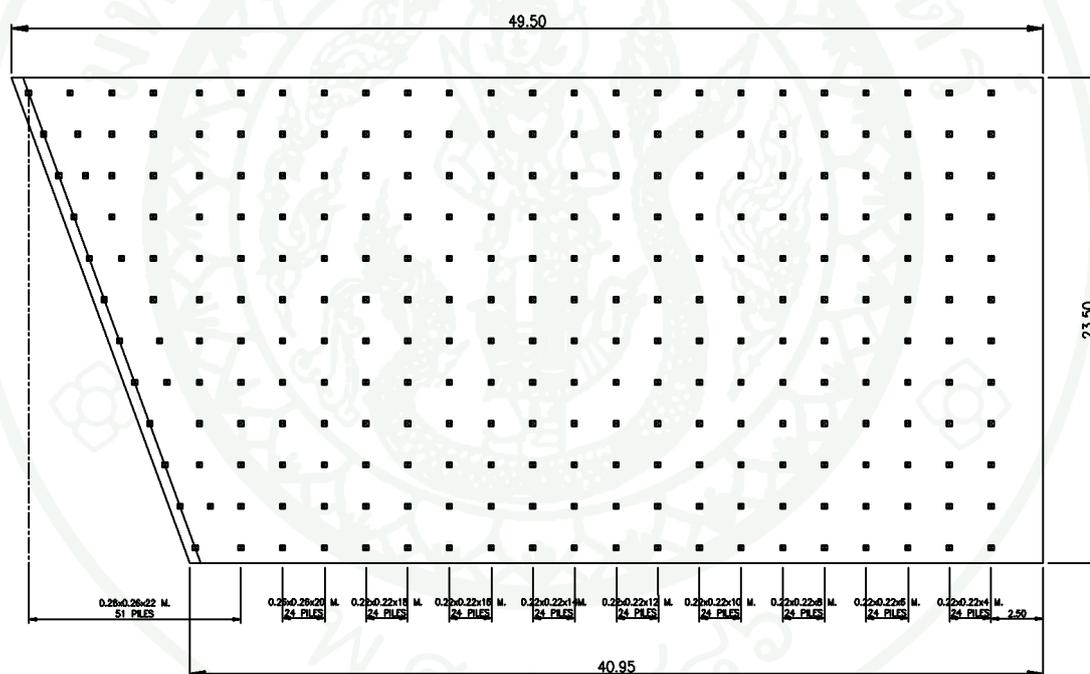
BORING LOG				BORING NO. : <u>BH-1</u>		ELEV. (m) : <u>-</u>																	
PROJECT : <u>ขยายคอสหามางตะไนย</u>				DEPTH (m) : <u>35.20</u>		GWL. (m) : <u>-0.50</u>																	
LOCATION : <u>ถนน 345 ตำบลบางตะไนย อำเภอปากเกร็ด</u>				COORD. N : <u>-</u>		DATE STARTED : <u>14/11/2006</u>																	
<u>จังหวัดนนทบุรี</u>				E : <u>-</u>		DATE FINISHED : <u>15/11/2006</u>																	
SOIL DESCRIPTION	DEPTH (m)	GRAPHIC LOG	METHOD	SAMPLE NO.	RECOVERY (cm)	SPT-N VALUE (blows/ft)	○ Wn ■ LL □ PL (%)	Su ○ UC × FVT (t/sq.m)	TOTAL UNIT WEIGHT (t/cu.m)	Consolidation test													
										Recompression Index (Cr)	Coefficient of compress ability (Cc)												
	10	20	30	40	20	40	60	80	1	2	3	4	1.6	1.8	2.0	0.1	0.3	0.5	0.6	1.0	1.5		
DENSE TO VERY DENSE SILTY FINE SAND, BROWN (SM)	21		WO																				
			SS	5	30	50/27cm									2.09								
	22		WO																				
			SS	6	20	50/25cm										2.19							
	23		WO																				
			SS	7	25		40									2.27							
	24		WO																				
			SS	8	20	50/22cm																	
	25		WO																				
			SS	9	25	50/24cm										2.28							
	26		WO																				
			SS	10	20	50/23cm										2.27							
	27		WO																				
			SS	11	30		41									2.08							
28		WO																					
		SS	12	25	50/28cm										2.19								
29		WO																					
		SS	13	20	50/25cm										2.12								
30		WO																					
		SS	14	20	50/20cm										2.17								
31		WO																					
32		SS	14	20	50/20cm																		
33		WO																					
34		SS	14	20	50/20cm																		
35	35.20	WO																					
END OF BORING																							

ภาพที่ 33 สรุปลักษณะชั้นดินบริเวณคอสหามางตะไนย (ต่อ)

ที่มา: จุฑา และ อรรถสิทธิ์ (2551)

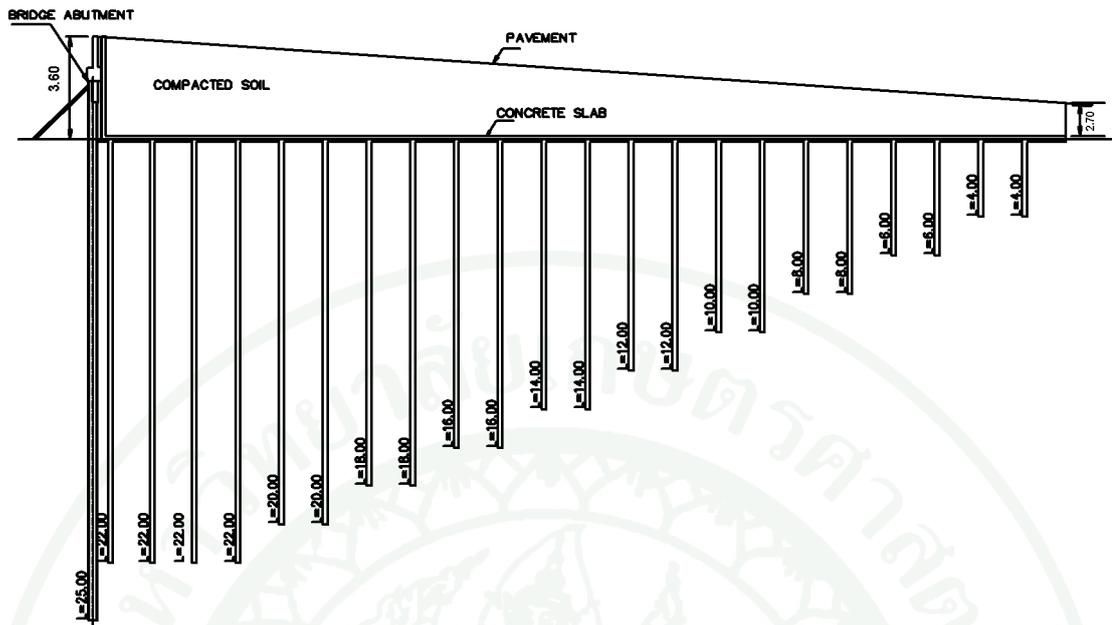
รูปแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัว

โครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานข้ามคลองบางตะไนย มีลักษณะเป็น Approach Slab on Pile Foundation โครงสร้างที่ทำการศึกษาคือสะพานฝั่งขวา ซึ่งด้านซ้ายมีความยาว 49.50 เมตร, ด้านขวา 40.95 เมตร และกว้าง 23.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 34 คันทางประกอบด้วยชั้นผิวทางและชั้นดินบดอัด ผิวทางเป็นวัสดุ Asphaltic Concrete หนา 0.05 เมตร ในส่วนชั้นดินบดอัดมีความหนา 3.60 เมตร จากจุดเชื่อมต่อกับโครงสร้างสะพาน และลดเหลือ 2.70 เมตร ณ จุดเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างปรับการทรุดตัวและคันทาง ได้ชั้นดินบดอัดเป็น Reinforced Concrete Slab ซึ่งมีความหนา 0.23 เมตร วางบนเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงที่มีขนาดตั้งแต่ 0.22 x 0.22 เมตร ถึง 0.26 x 0.26 เมตร และยาวตั้งแต่ 4 เมตร ถึง 22 เมตร



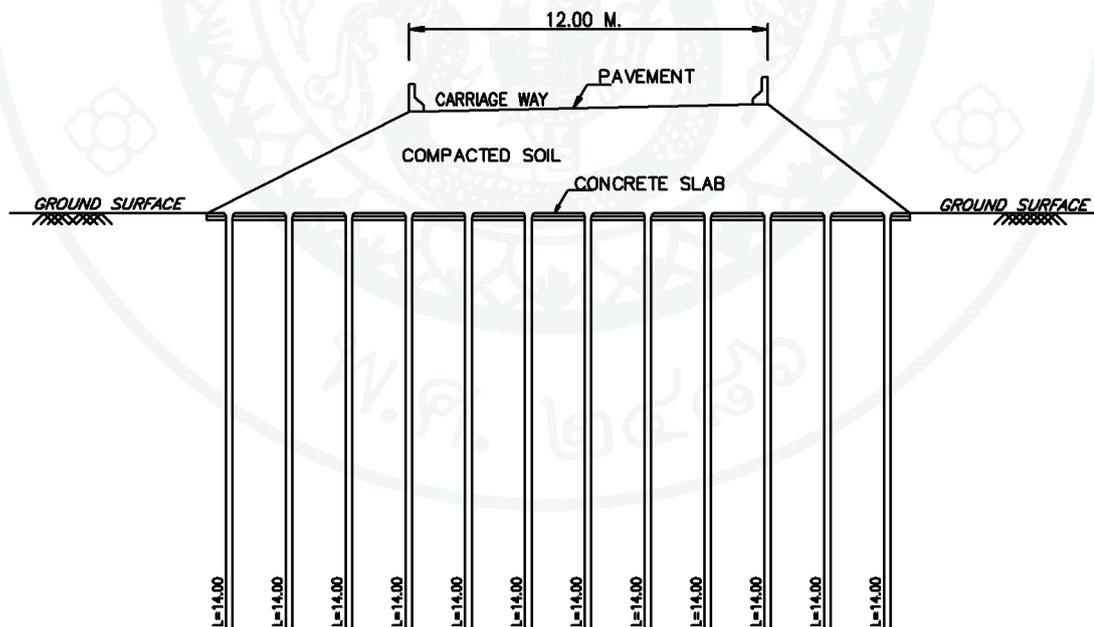
ภาพที่ 34 แปลนโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile

ที่มา: จุฑา และ อรรถสิทธิ์ (2551)



ภาพที่ 35 ภาพตัดตามยาวของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile

ที่มา: จุฬา และ อรรถสิทธิ์ (2551)



ภาพที่ 36 ภาพตัดตามขวางของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile

ที่มา: จุฬา และ อรรถสิทธิ์ (2551)

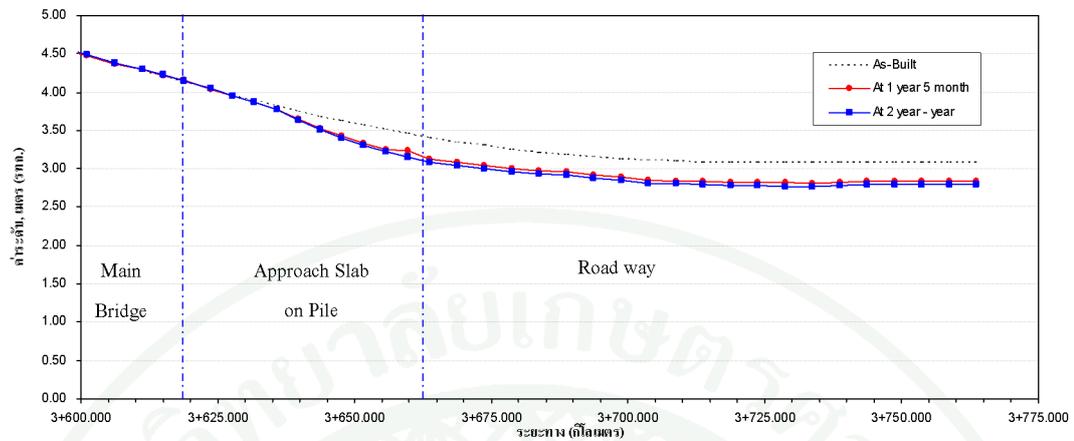
ผลการตรวจวัดระดับได้นำมาค่าระดับผิวทางและการเปลี่ยนแปลงความชันเปรียบเทียบกับแบบก่อสร้าง (As-Built Drawing) ดังแสดงในภาพที่ 39 และภาพที่ 42 รวมถึงข้อมูลการตรวจวัดค่าระดับผิวทางจากกรมทางหลวงบริเวณ โครงสร้างปรับการทรุดตัวและถนนบนดินเดิม ภายหลังจากการก่อสร้างเสร็จ 6 เดือน ดังแสดงในภาพที่ 41 และได้สรุปค่าการทรุดตัวสูงสุดของผิวทางและค่าความลาดชันสูงสุดระหว่างผิวทางจากการตรวจวัดในสนาม ดังแสดงในตารางที่ 7 และตารางที่ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ค่าสูงสุดของการทรุดตัวในช่วงโครงสร้างปรับการทรุดตัวประเภท Approach Slab on Pile และถนนบนคันดินถม

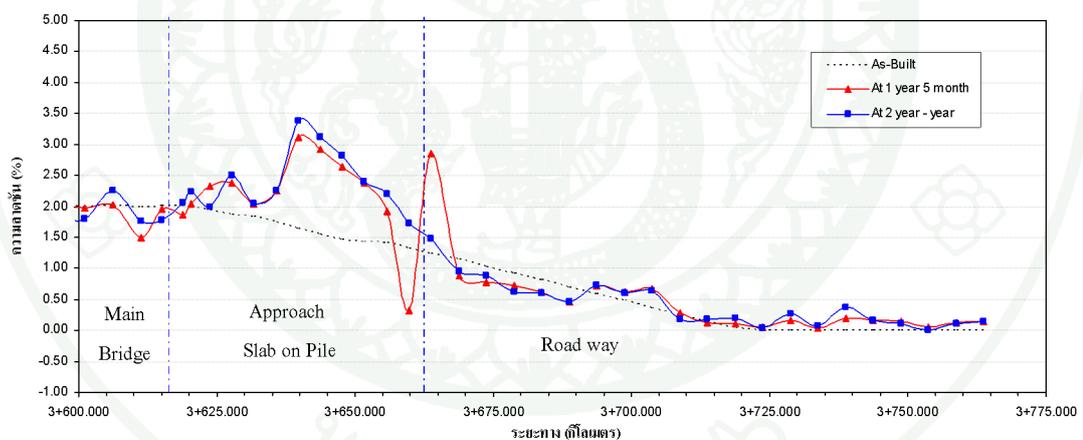
ช่วงโครงสร้าง	ค่าการทรุดตัวสูงสุดของขาลง (m)		
	ธ.ค. 2550 (-ปี 6 เดือน)	พ.ย. 2551 (1ปี 5 เดือน)	มิ.ย. 2552 (2ปี - เดือน)
โครงสร้างปรับการทรุดตัว	+ 0.26*	+ 0.27	+ 0.32
ถนนบนดินถม	+ 0.30*	+ 0.30	+ 0.34
Remarks	* ข้อมูลจากกรมทางหลวง () ระยะเวลาตรวจวัดภายหลังจากการก่อสร้าง		

ตารางที่ 8 ความลาดชันสูงสุดของผิวทางจากผลการตรวจวัดในสนาม ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

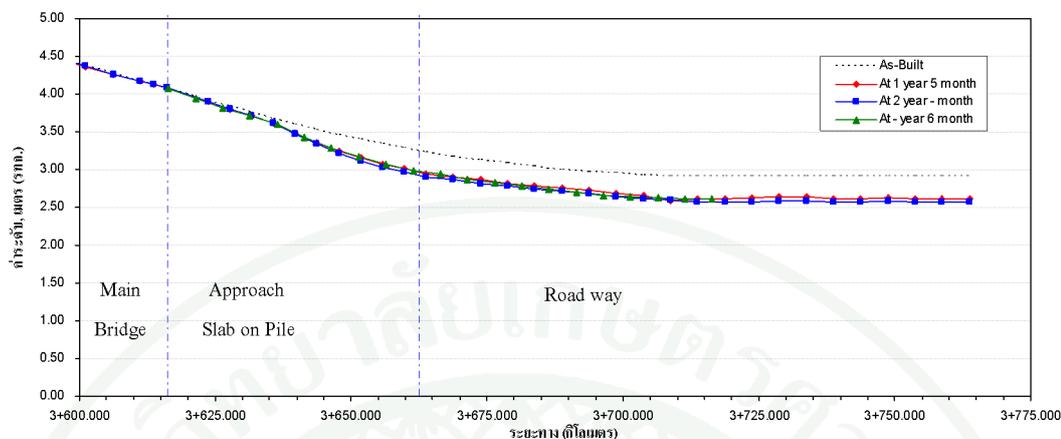
ช่วงโครงสร้าง	ความลาดชันสูงสุดของขาลง (%)		
	As-Built Drawing	พ.ย. 2551 (1ปี 5 เดือน)	มิ.ย. 2552 (2ปี - เดือน)
โครงสร้างปรับการทรุดตัว	1.5	3.5	3.6
ถนนบนดินถม	0.0	0.5	0.5
Remarks	() ระยะเวลาตรวจวัดภายหลังจากการก่อสร้าง		



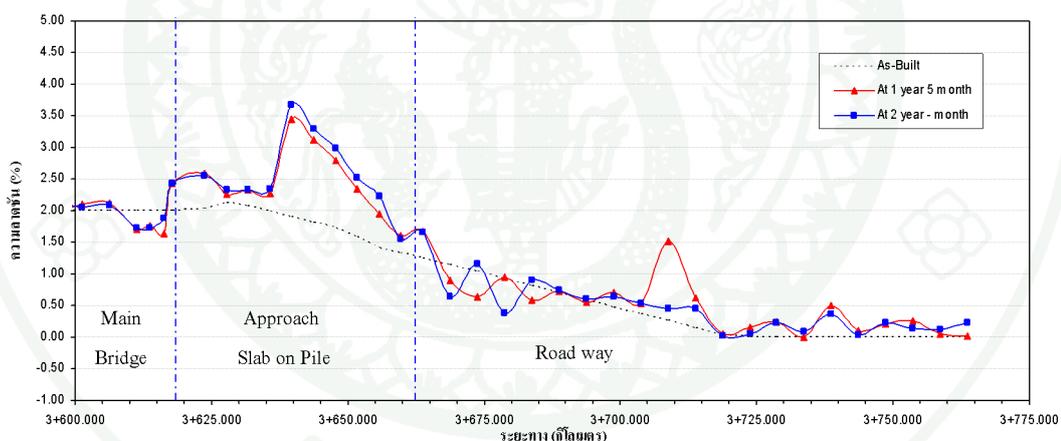
ภาพที่ 39 เปรียบเทียบค่าระดับจาก As-Built Drawing และผลการตรวจวัดระดับผิวทางภายหลังการก่อสร้างตามแนว L1 ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile



ภาพที่ 40 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงความชันตามแนว L1 ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile



ภาพที่ 41 เปรียบเทียบค่าระดับจาก As-Built Drawing และผลการตรวจวัดระดับผิวทางภายหลังการก่อสร้างตามแนว L2 ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile



ภาพที่ 42 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงความชันตามแนว L2 ของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile

ผลและวิจารณ์

การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน ประกอบด้วย การวิเคราะห์พฤติกรรมการทรุดตัวโดยใช้ Terzaghi Consolidation Theory (1943) กับ Elastic Theory และเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดในสนาม, การวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงรวมถึงการทรุดตัวของระบบโครงสร้างโดยใช้ทฤษฎี Beam on Elastic Material โดยสมมุติฐานให้ผิวทางคอนกรีตเป็นเสมือนคาน รองรับน้ำหนักที่กระทำและมีวัสดุยืดหยุ่นคือดินเป็นฐานรองรับ ซึ่งได้จำลองฐานรองรับแบบยืดหยุ่นเป็นสปริงตามแบบจำลองของ Winkler ค่าสติฟเนสของสปริงหาได้โดยหลักการ Tangent Modulus (Janbu, 1963) จากการวิเคราะห์ระบบโครงสร้างทำให้ทราบค่าการทรุดตัว แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น นำค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดมาเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตตามข้อกำหนดของ ว.ส.ท. ตารางที่ 6001 และ ACI 9.5.2.3 ดังนี้ หน่วยแรงเฉือนแบบคานที่ยอมให้เท่ากับ $0.29 \cdot \sqrt{f'c}$ หน่วยแรงเฉือนแบบเจาะทะลุที่ยอมให้เท่ากับ $0.53 \cdot \sqrt{f'c}$ และ โมดูลัสแตกร้าวเท่ากับ $1.99 \cdot \sqrt{f'c}$ โดยที่ $f'c$ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) การนำเสนอผลการวิเคราะห์ที่ได้จำแนกตามประเภทของโครงสร้างปรับการทรุดตัว ได้แก่ โครงสร้างปรับการทรุดตัวประเภท Approach Slab on Ground และ Approach Slab on Pile โดยใช้ข้อมูลจากโครงการสะพานข้ามคลองสอง และ โครงการสะพานข้ามคลองบางตะไนย

โครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground กรณีศึกษาโครงการสะพานข้ามคลองสอง

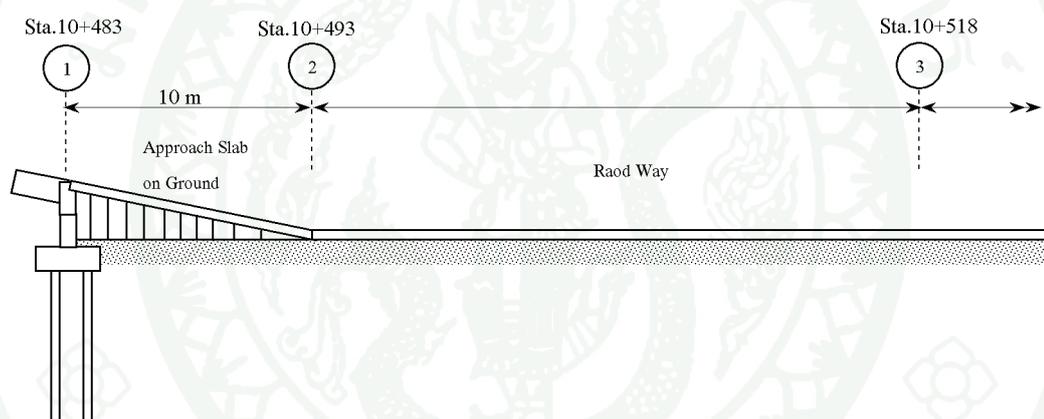
จากการรวบรวมข้อมูลทางกายภาพพบว่าดินถมคันทางมีความสูงจากระดับดินเดิม 2 เมตร น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 น้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

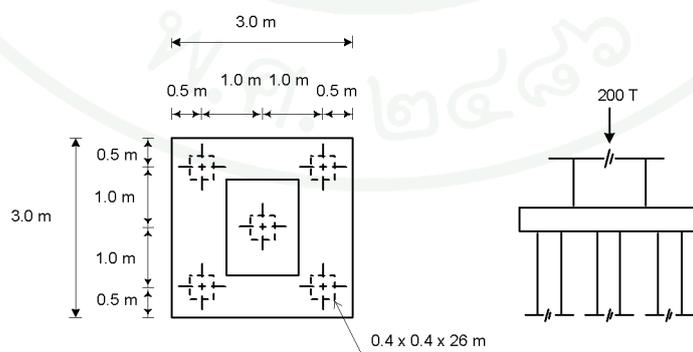
ชนิดของน้ำหนัก	ความหนา (m)	น้ำหนัก (kPa)
Asphaltic Concrete	0.05	1.2
Concrete Pavement	0.30	7.2
Compacted Soil	2.00	40.0
Live Load	-	10.0
รวมน้ำหนักทั้งสิ้น		58.4

การวิเคราะห์การทรุดตัวโดยใช้ Terzaghi Consolidation Theory และ Elastic Theory

ข้อมูลการตรวจวัดการทรุดตัวในสนามที่นำมาเปรียบกับการวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Primary Consolidation) จะพิจารณาโครงสร้างปรับการทรุดตัวขาขึ้นสะพานของถนนฝั่งขวา (RT) ซึ่งพิจารณา 3 ตำแหน่งดังนี้ คือ ปลาย Approach Slab ที่วางบนฐานรากสะพาน (กม.10+483) ปลาย Approach Slab ที่วางบนวัสดุคันทาง (กม.10+493) และดินถมคันทาง ห่างจากปลาย Approach Slab 25 เมตร (กม.10+518) ดังแสดงในภาพที่ 43 ส่วนการวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจาก Elastic Settlement พิจารณาที่ตำแหน่งต่อม่อสะพานเนื่องจากรองรับด้วยฐานรากเสาเข็มและปลายเสาเข็มที่ยังอยู่บนชั้นทราย ขนาดของฐานรากและแรงกระทำต่อฐานรากแสดงในภาพที่ 44

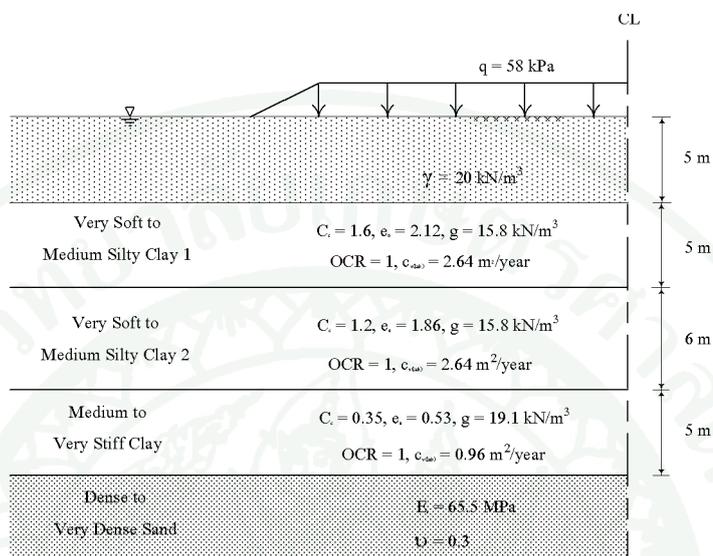


ภาพที่ 43 แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground



ภาพที่ 44 แรงกระทำต่อฐานรากเสาเข็มบริเวณคอสะพานของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

การวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจาก Primary Consolidation ได้พิจารณาตั้งแต่เริ่มดำเนินการก่อสร้าง ซึ่งระยะเวลาในการก่อสร้างเท่ากับ 2 ปี ชั้นดินและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ชั้นดินและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวคั่นทางของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

ปริมาณการทรุดตัวเนื่องจาก Elastic Settlement (S_e) ที่ตำแหน่งตอม่อสะพานมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การคำนวณ Elastic Settlement (s_e) ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

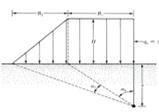
q (kPa)	B (m)	U	E_s (MPa)	I_w	s_e (mm)	หมายเหตุ
347	2.4	0.3	65.5	0.82	10	$S_e = qB \frac{(1-U^2)}{E_s} I_w$

ปริมาณการทรุดตัวเนื่องจาก Primary Settlement (S_p) จากการวิเคราะห์โดยใช้ Terzaghi Consolidation Theory (1943) ที่ตำแหน่งปลาย Approach Slab วางบนคั่นทาง (กม.10+490) มีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 1.32 เมตร และที่ตำแหน่งคั่นทาง ห่างจากปลาย Approach Slab 25 เมตร (กม.10+515) มีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 1.32 เมตร

PROJECT: **ศึกษาวิเคราะห์ผลของของ มนบนกรนเบบที่วางบนดิน**
 SUBJECT: _____ NO. _____
 DATE _____
 BY _____

I. Imposed Loading
 Fill Height = 2.00 m
 Dead load of fill material = 40.00 kN/m² γ = 20.00 kN/m³
 Dead load of approach slab = 7.20 kN/m²
 Dead load of AC = 1.20 kN/m²
 Live load of traffic = 10.00 kN/m²
 Loading for settlement calculation = 58.40 kN/m²

II. Stress Increase Under an Embankment



$$\Delta p = \frac{q_o}{\pi} \left[\left(\frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} (\alpha_2) \right]$$

B₁ = 15.5
 B₂ = 4

III. Formulae Used
 Recompression Settlement : S₁ = C_r / (1+e_o) H log₁₀ {σ'_p / σ'_{vo}}
 Compression Settlement : S₂ = C_c / (1+e_o) H log₁₀ {σ'_{at} / σ'_p}

IV. Consolidation Settlement: Increase in Effective Overburden Pressure, q_o (kN/m²) = **58.40**

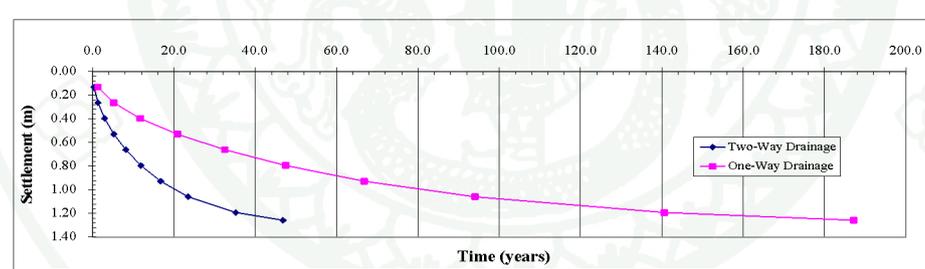
Layer NO.	Depth (m)	Thickness (m)	γ (kN/m ³)	z (m)	α ₁	α ₂	σ' _{vo} (kN/m ²)	OCR (kN/m ²)	σ' _p (kN/m ²)	2Δp (kN/m ²)	σ' _{at} =σ' _{vo} +2Δp (kN/m ²)	e _o	C _r	C _c	Recomp. Settl. S ₁ (m)	Com Settl. S ₂ (m)	Prim Settl. S ₃ (m)	
1	5.0	10.0	5.0	15.80	7.5	0.08	1.12	64.5	1.00	64.5	56.8	121.3	2.12	0.00	1.60	0.00	0.70	0.70
2	10.0	16.0	6.0	15.80	13.0	0.11	0.87	96.4	1.00	96.4	52.4	148.8	1.86	0.00	1.20	0.00	0.47	0.47
3	16.0	21.0	5.0	19.05	18.5	0.11	0.70	136.4	1.00	136.4	46.6	183.1	0.53	0.00	0.35	0.00	0.15	0.15
Total																	1.32	

Rate of Settlement
 $T_v = c_v \cdot t / H^2$ $t = (H^2 \cdot T_v) / c_v$
 c_{v(lab)} = 2.66 m²/yr; Assumed c_{v(Field)} = 1 x lab, c_{v(Field)} = 2.66 m²/yr Maximum drainage distance, H = 21.0 m (One way drainage)
 10.5 m (Two way drainage)

U = f(T_v) = 1.13 (T_v)^{0.5} for U < 60 %

Total Settlement (m) = Total											
U (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	Drainage
S ₁ (m)	0.13	0.26	0.40	0.53	0.66	0.79	0.93	1.06	1.19	1.26	
T _v	0.008	0.031	0.071	0.126	0.196	0.286	0.403	0.567	0.848	1.129	
t (yrs)	1.30	5.21	11.72	20.84	32.56	47.46	66.79	94.03	140.59	187.18	
t (yrs)	0.33	1.30	2.93	5.21	8.14	11.87	16.70	23.51	35.15	46.79	One way Two way

* Assume initial linear Δu

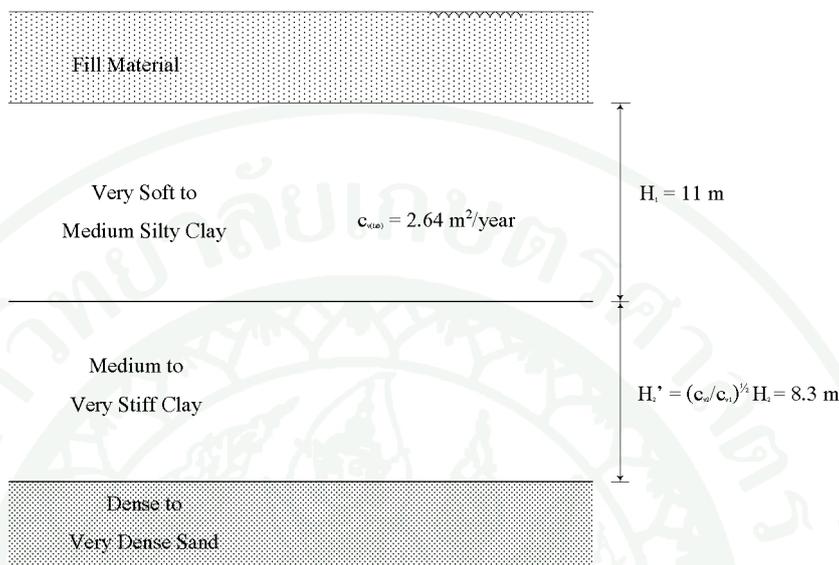


ภาพที่ 46 ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวโดยวิธี Terzaghi Consolidation Theory ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

อัตราการทรุดตัว

การวิเคราะห์หาอัตราการทรุดตัวได้ปรับแก้ความหนาของชั้นดิน Medium to Very Stiff Clay ซึ่งความหนาที่ปรับแก้ (H') เท่ากับ 8.3 เมตร กำหนดให้ขอบเขตการระบายน้ำเป็นแบบ Double Drainage และค่า Coefficient of Consolidation จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่ากับ

2.64 เมตร²/ปี ดังแสดงในภาพที่ 47 จากการวิเคราะห์พบว่า การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (Primary Settlement) ในชั้นดินเหนียวใช้เวลาทั้งสิ้น 39 ปี 7 เดือน

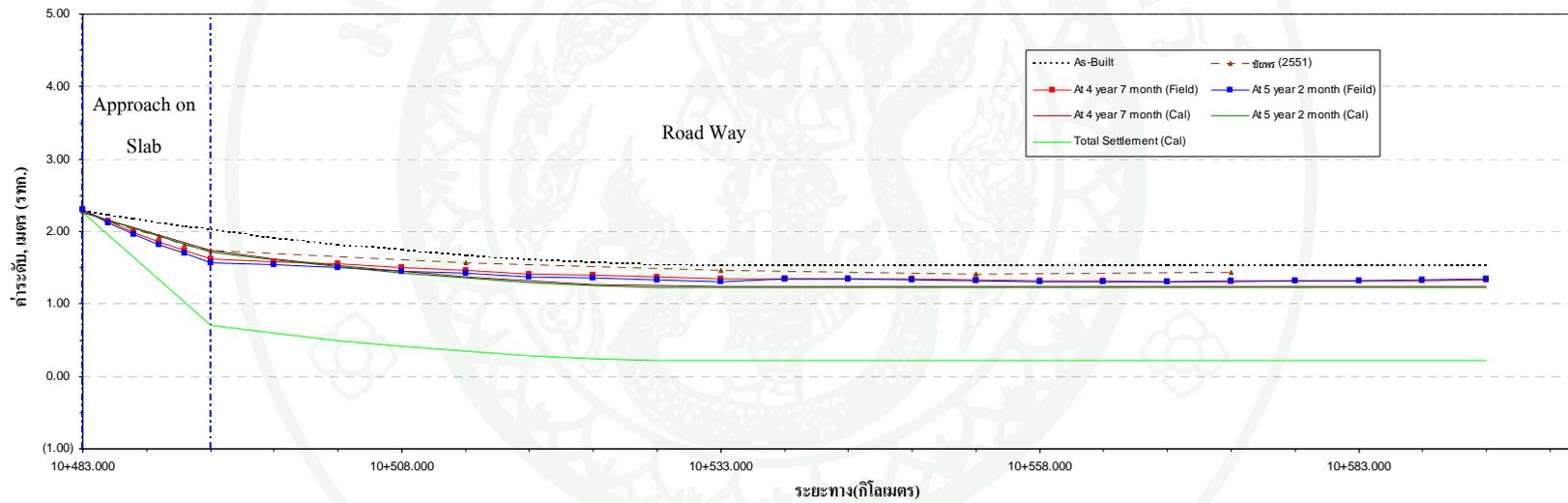


ภาพที่ 47 การปรับแก้ความหนาของชั้นดินและ Boundary Drainage Layer สำหรับวิเคราะห์อัตรา การทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

เนื่องจากระยะเวลาในการก่อสร้างเท่ากับ 2 ปี ดังนั้น Degree of Consolidation (U) ของชั้น ดินเหนียว ณ 2 ปี เท่ากับ 27 % ($T=0.0565$) และชั้นดินเหนียวทรุดตัวไปแล้วเท่ากับ 0.36 เมตร ที่ ระยะเวลาตรวจวัดครั้งที่ 1 (6 ปี 7 เดือน, $t_1=6.58$ ปี) และ ครั้งที่ 2 (7 ปี 2 เดือน, $t_2=7.17$ ปี) นับจาก เริ่มก่อสร้าง มีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 0.65 เมตร ($U=49\%$) และ 0.67 เมตร ($U=51\%$) ตามลำดับ

ดังนั้นค่าการทรุดตัวภายหลังจากการเปิดบริการ เป็นเวลา 4 ปี 7 เดือน (พฤศจิกายน 2551) และ 5 ปี 2 เดือน (มิถุนายน 2552) เท่ากับ 0.29 เมตร และ 0.31 เมตร ตามลำดับ สรุปได้ว่าปริมาณ การทรุดตัวจากการคำนวณโดยใช้ค่า $c_{v(lab)}$ มีค่าเท่ากับค่าที่ตรวจวัดได้ในสนาม ($\Delta S_{\text{observed } t=7.17 \text{ year}} = 0.31 \text{ เมตร}$)

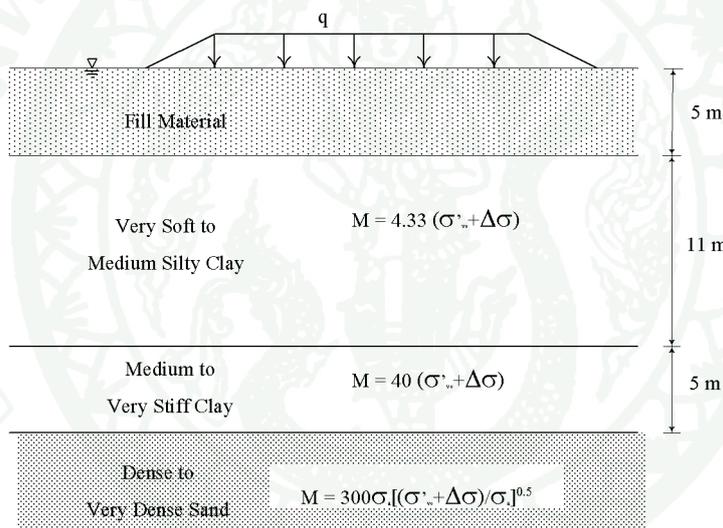
ผลวิเคราะห์นำมาหาค่าระดับผิวทางแล้วเปรียบเทียบกับค่าระดับภายหลังการก่อสร้างแล้ว เสร็จ (ข้อมูลจาก As-Built Drawing) ดังแสดงในภาพที่ 48



ภาพที่ 48 เปรียบเทียบค่าทรุดตัวของผลการวิเคราะห์และผลตรวจวัดในสนามของของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวโดยหลักการ Tangent Modulus ร่วมกับ Beam on Elastic Material

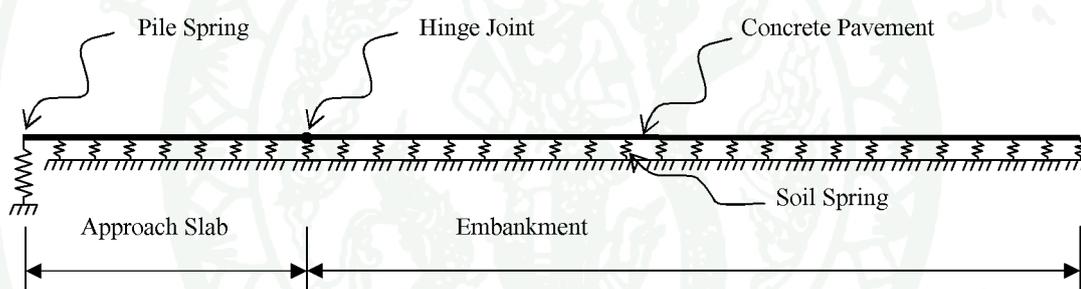
การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ตอม่อสะพานที่มีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทราย Approach Slab on Ground และ คันทางที่วางบนดินเดิม ค่าสติฟเนสของสปริงสามารถหาได้จากค่า Modulus of Subgrade Reaction และค่า Modulus of Subgrade Reaction หาได้จากค่า Tangent Modulus (M) ซึ่งค่า Tangent Modulus (M) ที่ความลึกต่างๆสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 49 และค่า Modulus of Subgrade Reaction ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างส่วนตอม่อสะพานมีค่าเท่ากับ 4,134 กิโลปาสคาลต่อเมตร (kPa/m) และโครงสร้างส่วน Approach Slab on Ground กับ คันทางมีค่าเท่ากับ 31.18 กิโลปาสคาลต่อเมตร (kPa/m)



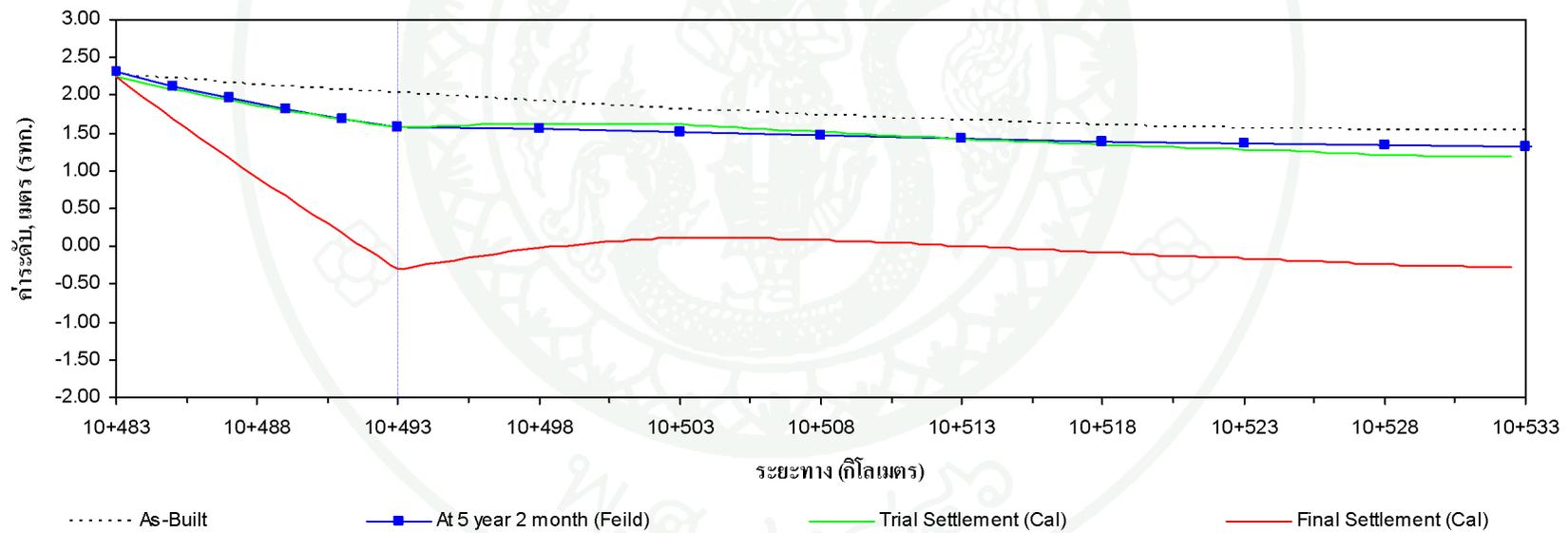
ภาพที่ 49 แสดงชั้นดินและสมการหาค่า Tangent Modulus ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

แบบจำลองโครงสร้างมีความยาว 49.50 เมตร มีจำนวนชิ้นส่วน 99 ชิ้นและมีความยาวชิ้นส่วนเท่าๆกันเท่ากับ 0.5 เมตร และกำหนดให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (f_c) มีค่าเท่ากับ 24 เมกะปาสคาล (MPa) จุดเชื่อมต่อระหว่าง Approach Slab และ ผิวทางคอนกรีตจำลองให้เป็นจุดต่อแบบ Hinge ดังแสดงในภาพที่ 50 จากการวิเคราะห์พบว่า การทรุดตัวบริเวณปลาย Approach Slab ที่เชื่อมต่อกับผิวทางคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 2.3 เมตร และการทรุดตัวบริเวณผิวทางคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 1.70 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 51

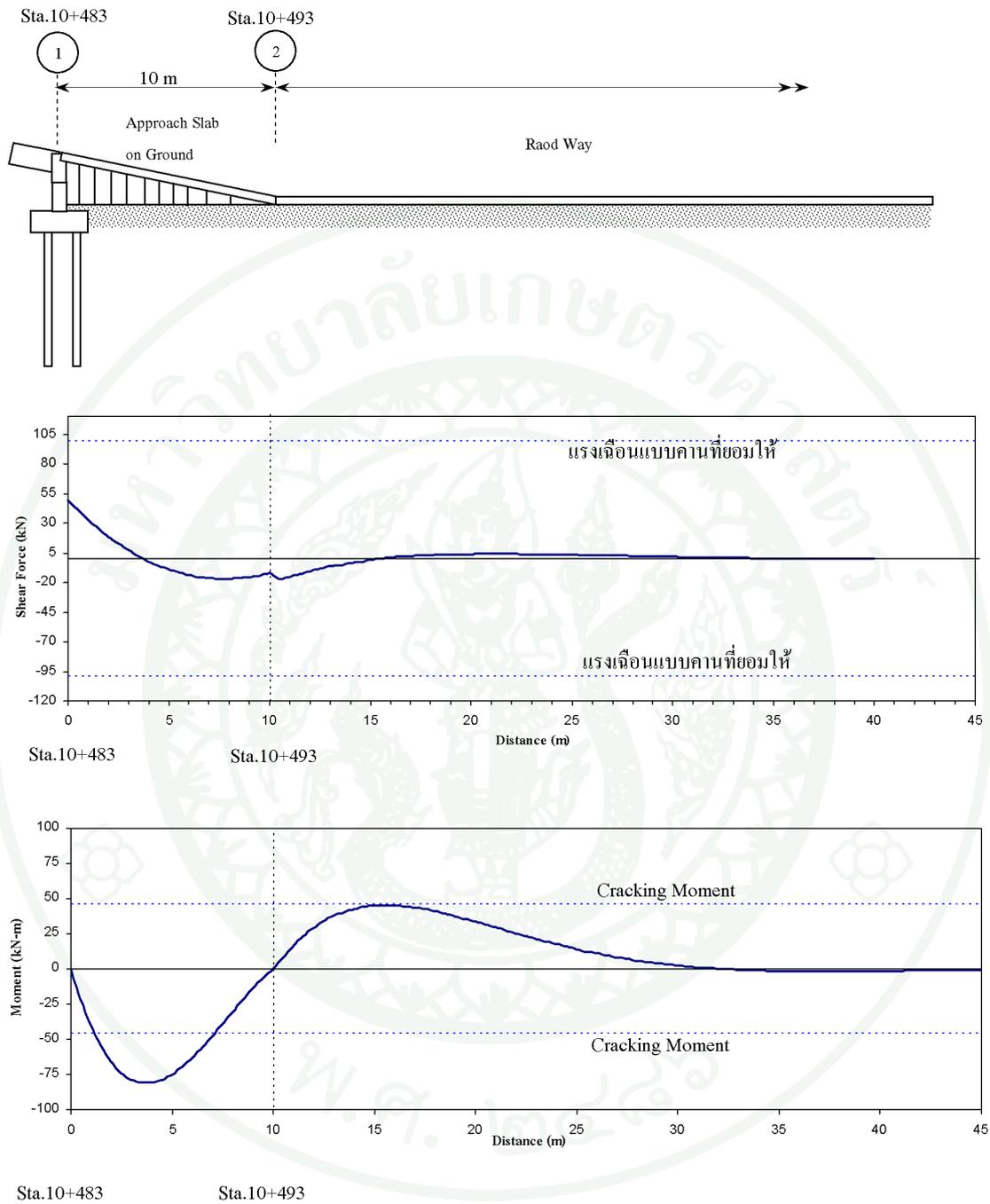
แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นใน Approach Slab ณ เวลาปัจจุบัน สามารถประมาณค่าได้โดยการหาค่า Modulus of Subgrade Reaction แล้ววิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวให้มีค่าใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนามโดยพิจารณาแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกของผิวทางคอนกรีตและน้ำหนักบรรทุกจร ดังแสดงในภาพที่ 52 จากการวิเคราะห์พบว่าค่า Modulus of Subgrade Reaction ที่ให้ค่าการทรุดตัวใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนามมีค่าเท่ากับ 51 กิโลปาสคาลต่อเมตร (kPa/m) แรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่อม่อสะพาน มีค่าเท่ากับ 50 กิโลนิวตัน (kN) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าแรงเฉือนแบบคานที่ยอมให้ (Allowable Flexural Shear) ซึ่งเท่ากับ 99 กิโลนิวตัน (kN) สำหรับโมเมนต์ดัดสูงสุดใน Approach Slab เกิดขึ้นที่ระยะประมาณ 4 เมตรจากตอม่อสะพาน มีค่าเท่ากับ 81 กิโลนิวตัน-เมตร มีค่าสูงกว่า Cracking Moment (M_{cr}) ซึ่งเท่ากับ 46 กิโลนิวตัน-เมตร ถึง 1.7 เท่า ดังนั้นอาจทำให้ Approach Slab เกิดรอยร้าวที่ตำแหน่งนี้ได้



ภาพที่ 50 แบบจำลองการวิเคราะห์การทรุดตัว และแรงภายในของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground



ภาพที่ 51 แสดงปริมาณการทรุดตัว จากภาพถ่ายค่าสถิติของสปริงเพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground



ภาพที่ 52 แสดงแรงเฉือน และ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นใน Concrete Pavement ที่ ระดับการทรุดตัว ปัจจุบัน ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

โครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile กรณีศึกษาโครงการสะพานข้ามคลองบางตะไนย

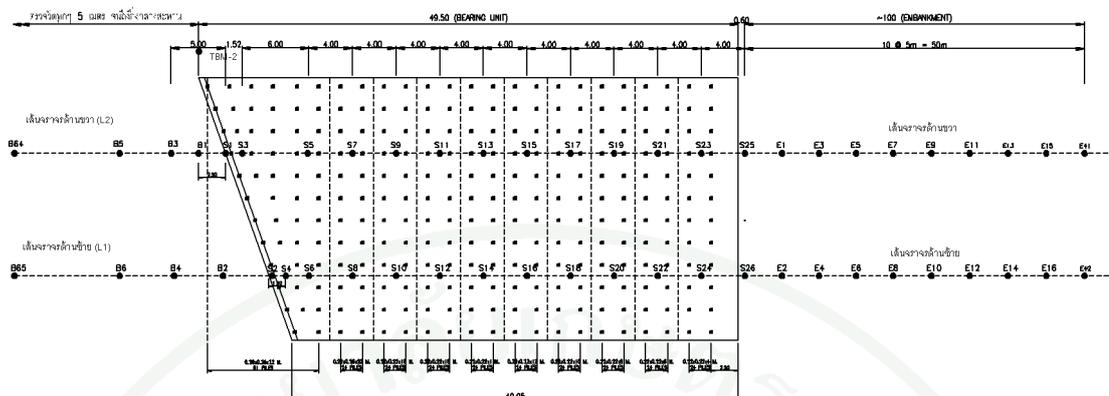
จากการรวบรวมข้อมูลทางกายภาพพบว่าดินถมคันทางบริเวณติดกับโครงสร้างสะพานซึ่งอยู่บนโครงสร้างปรับการทรุดตัวสูง 3.60 เมตร และลดลงเหลือ 2.70 เมตร ที่ปลายโครงสร้างปรับการทรุดตัว น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 น้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ชนิดของน้ำหนัก	ความหนา (m)	น้ำหนัก (kPa)
Asphaltic Concrete	0.05	1.2
Concrete Pavement	0.23	7.2
Compacted Soil	2.70 – 3.60	54.0 – 72.0
Live Load	-	10.0
รวมน้ำหนักทั้งสิ้น		71.0 – 88.0

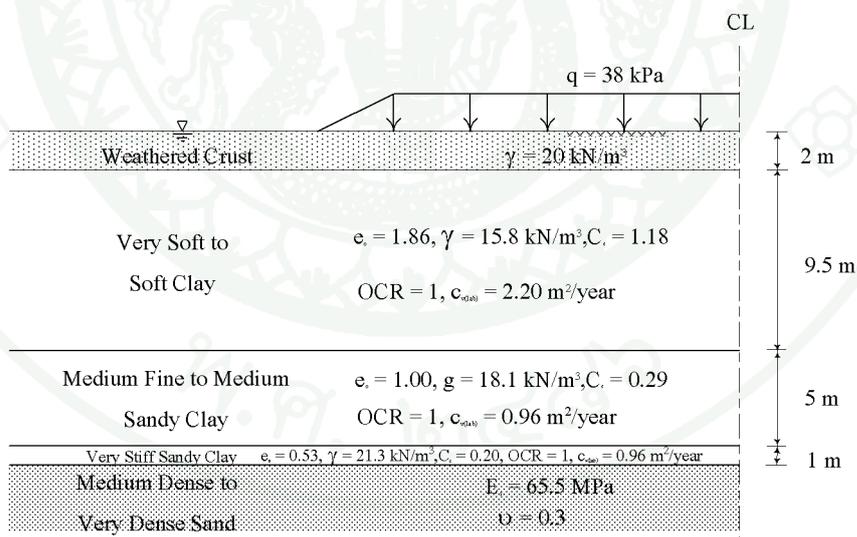
การวิเคราะห์การทรุดตัวโดยใช้ Terzaghi Consolidation Theory และ Elastic Theory

ข้อมูลการตรวจวัดการทรุดตัวในสนามที่นำมาเปรียบกับการวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Primary Consolidation) จะพิจารณาโครงสร้างปรับการทรุดตัวขาลงสะพานของถนนฝั่งซ้าย (LT) ตามตำแหน่ง Settlement Point และดินถมคันทาง ห่างจากปลาย Approach Slab on Pile 50 เมตร (กม.3+712) ส่วนการวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจาก Elastic Settlement พิจารณาที่ตำแหน่งปลายเสาเข็มซึ่งอยู่บนชั้นทราย ภาพที่ 53 แสดงตำแหน่งวิเคราะห์การทรุดตัว



ภาพที่ 53 ตำแหน่งการวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

การวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจาก Primary Consolidation ได้พิจารณาตั้งแต่เริ่มดำเนินการก่อสร้าง ซึ่งระยะเวลาในการก่อสร้างเท่ากับ 2 ปี ชั้นดินและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 54



ภาพที่ 54 ชั้นดินและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวคั่นทางของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ปริมาณการทรุดตัวเนื่องจาก Elastic Settlement (S_e) ที่ตำแหน่งปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นทราย ดังแสดงในตารางที่ 12 และสรุปค่าการทรุดตัวเนื่องจาก Elastic Settlement (S_e) และ Primary Settlement (S_p) ณ ตำแหน่งต่างๆ แสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 12 การคำนวณ Elastic Settlement (s_e) ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

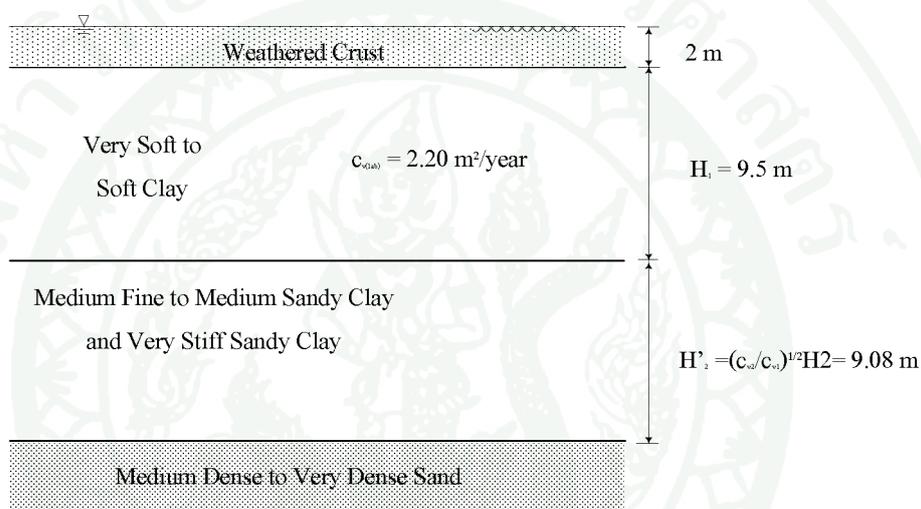
Location	Pile Length (m)	q (kPa)	B (m)	ν	ν^2	E_s (MPa)	I_w Rigid	s_i (mm)	Remark
S1-S6	22	86.52	9.00	0.30	0.09	65.50	0.82	8.90	$S_i = qB \frac{(1-\nu^2)}{E_s} I_w$
S7-S8	20	84.92	9.00	0.30	0.09	65.50	0.82	8.70	
S9-S10	18	83.12	9.00	0.30	0.09	65.50	0.82	8.50	

ตารางที่ 13 สรุปค่าการทรุดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

Location	Pile Length (m)	Distance from Bridge Abutment (m)	Settlement (m)	Method of Analysis
S1-S6	22	5	0.01	Elastic Theory
S7-S8	20	9	0.01	
S9-S10	18	13	0.01	
S11-S12	16	17	0.25	Consolidation Theory
S13-S14	14	21	0.38	
S15-S16	12	25	0.52	
S17-S18	10	29	0.66	
S19-S20	8	33	0.78	
S21-S22	6	37	0.92	
S23-S24	4	41	1.07	
Embankment	-	50	1.04	

อัตราการทรุดตัว

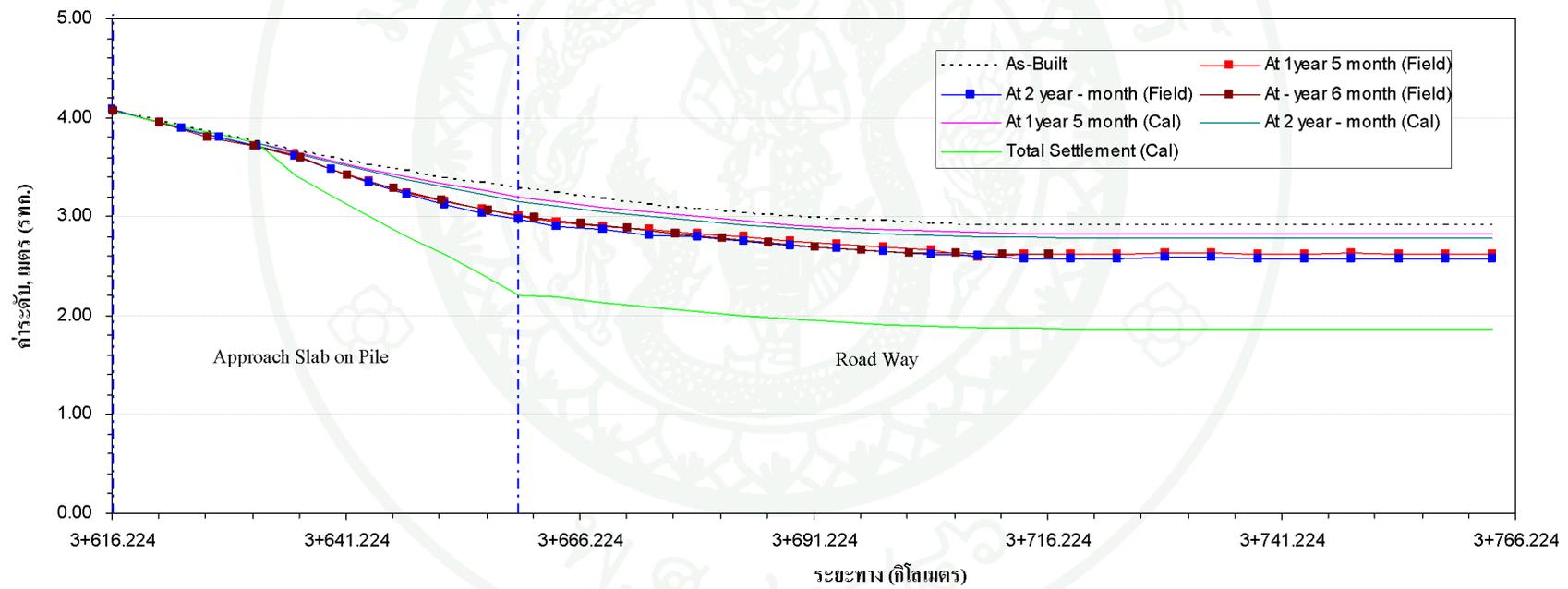
การวิเคราะห์หาอัตราการทรุดตัวได้ปรับแก้ความหนาของชั้นดิน Medium Fine to Medium Sandy Clay and Very Stiff Sandy Clay ซึ่งความหนาที่ปรับแก้ (H') เท่ากับ 9.08 เมตร กำหนดให้ขอบเขตการระบายน้ำเป็นแบบ Double Drainage และค่า Coefficient of Consolidation จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่ากับ 2.20 เมตร²/ปี ดังแสดงในภาพที่ 55 จากการวิเคราะห์พบว่า การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (Primary Settlement) ในชั้นดินเหนียวใช้เวลาทั้งสิ้น 44 ปี 4 เดือน



ภาพที่ 55 การปรับแก้ความหนาของชั้นดินและ Boundary Drainage Layer สำหรับวิเคราะห์อัตรา การทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

เนื่องจากระยะเวลาในการก่อสร้างเท่ากับ 2 ปี ดังนั้น Degree of Consolidation (U) ของชั้นดินเหนียว ณ 2 ปี เท่ากับ 25 % ($T=0.0509$) และชั้นดินเหนียวทรุดตัวไปแล้วเท่ากับ 0.26 เมตร ที่ระยะเวลาตรวจวัดครั้งที่ 1 (3 ปี 5 เดือน, $t_1=3.42$ ปี) และ ครั้งที่ 2 (4 ปี, $t_2=4$ ปี) นับจากเริ่มก่อสร้าง มีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 0.38 เมตร ($U=37\%$) และ 0.42 เมตร ($U=40\%$) ตามลำดับ

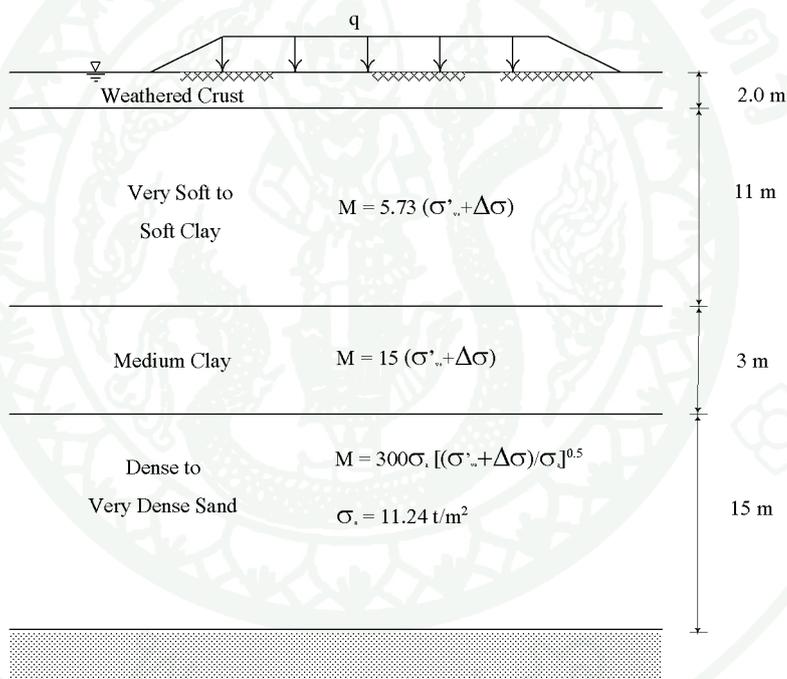
ดังนั้นค่าการทรุดตัวภายหลังจากการเปิดบริการ เป็นเวลา 1 ปี 5 เดือน และ 2 ปี เท่ากับ 0.12 เมตร และ 0.16 เมตร ตามลำดับ สรุปได้ว่าปริมาณการทรุดตัวจากการคำนวณโดยใช้ค่า $c_{v(lab)}$ มีค่าน้อยกว่าค่าที่ตรวจวัดได้ในสนาม 0.18 เมตร ($\Delta S_{observed\ t=4\ year} = 0.34$ เมตร) ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 56



ภาพที่ 56 เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวจากผลการวิเคราะห์และค่าตรวจวัดในสนามของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวโดยหลักการ Tangent Modulus ร่วมกับ Beam on Elastic Material

การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างพิจารณาโครงสร้าง Approach Slab on Pile และคันทางที่วางบนดินเดิม ค่าสถิติของสปริงสามารถหาได้จากค่า Modulus of Subgrade Reaction และค่า Modulus of Subgrade Reaction หาได้จากค่า Tangent Modulus (M) ซึ่งค่า Tangent Modulus (M) ที่ความลึกต่างๆสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 57 และค่า Modulus of Subgrade Reaction ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง Approach Slab on Pile แสดงในตารางที่ 14 และ บริเวณคันทางมีค่าเท่ากับ 45.91 กิโลปาสคาลต่อเมตร (kPa/m)



ภาพที่ 57 แสดงชั้นดินและสมการหาค่า Tangent Modulus ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ตารางที่ 14 แสดงค่า Modulus of Subgrade reaction และ Spring Constant ของเสาเข็มทั้งหมด
ภายใต้หน้าหน้กับบรรทุกของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

Distance m	Pile Length m	Modulus of Subgrade Reaction kPa/m	B m	Spring Spacing m	Spring Constant kN/m
Embankment	-	45.91	2.00	1.00	91.81
0.00	4.00	29.67	2.00	2.00	118.69
2.00	4.00	29.83	2.00	2.00	119.31
4.00	6.00	32.33	2.00	2.00	129.33
6.00	6.00	32.46	2.00	2.00	129.84
8.00	8.00	38.37	2.00	2.00	153.48
10.00	8.00	38.49	2.00	2.00	153.97
12.00	10.00	42.80	2.00	2.00	171.20
14.00	10.00	42.92	2.00	2.00	171.70
16.00	12.00	46.96	2.00	2.00	187.85
18.00	12.00	47.12	2.00	2.00	188.48
20.00	14.00	51.99	2.00	2.00	207.98
22.00	14.00	52.15	2.00	2.00	208.59
24.00	16.00	61.09	2.00	2.00	244.36
26.00	16.00	61.34	2.00	2.00	245.38
28.00	18.00	74.48	2.00	2.00	297.90
30.00	18.00	74.72	2.00	2.00	298.89
32.00	20.00	811.60	2.00	2.00	3,246.39
34.00	20.00	814.54	2.00	2.00	3,258.16
36.00	22.00	895.40	2.00	2.00	3,581.60
38.00	22.00	898.12	2.00	2.00	3,592.47
40.00	22.00	899.50	2.00	2.00	3,597.98
42.00	22.00	901.31	2.00	2.00	3,605.25

แบบจำลองโครงสร้างได้แบ่งเป็น 2 แบบจำลองคือ แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์การทรุดตัวและแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์หาแรงภายในโครงสร้าง Approach Slab on Pile ดังแสดงในภาพที่ 58 (ก) แบบจำลองวิเคราะห์การทรุดตัวมีความยาว 99 เมตร มีจำนวนชิ้นส่วน 99 ชิ้นและมีความยาวชิ้นส่วนเท่าๆกันเท่ากับ 1 เมตร กำหนดให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (f_c) มีค่าเท่ากับ 24 เมกะปาสกาล (MPa) จากการวิเคราะห์พบว่าการทรุดตัวสูงสุดเกิดที่บริเวณปลาย Approach Slab on Pile ที่เชื่อมต่อกับผิวทางคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 1.20 เมตร และการทรุดตัวบริเวณ

ผิวทางคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 1.54 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 59 และมีลักษณะการทรุดตัวคล้าย ชั้นบันได

แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นใน Approach Slab on Pile ณ เวลาปัจจุบัน สามารถประมาณค่าได้โดยการหาค่าสปริงสตีเฟนดังแสดงในตารางที่ 15 แล้ววิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวให้มีค่าใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนามโดยกำหนดให้ชั้นส่วนมีความยาวเท่าๆกันเท่ากับ 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 58 (ข) และผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 59

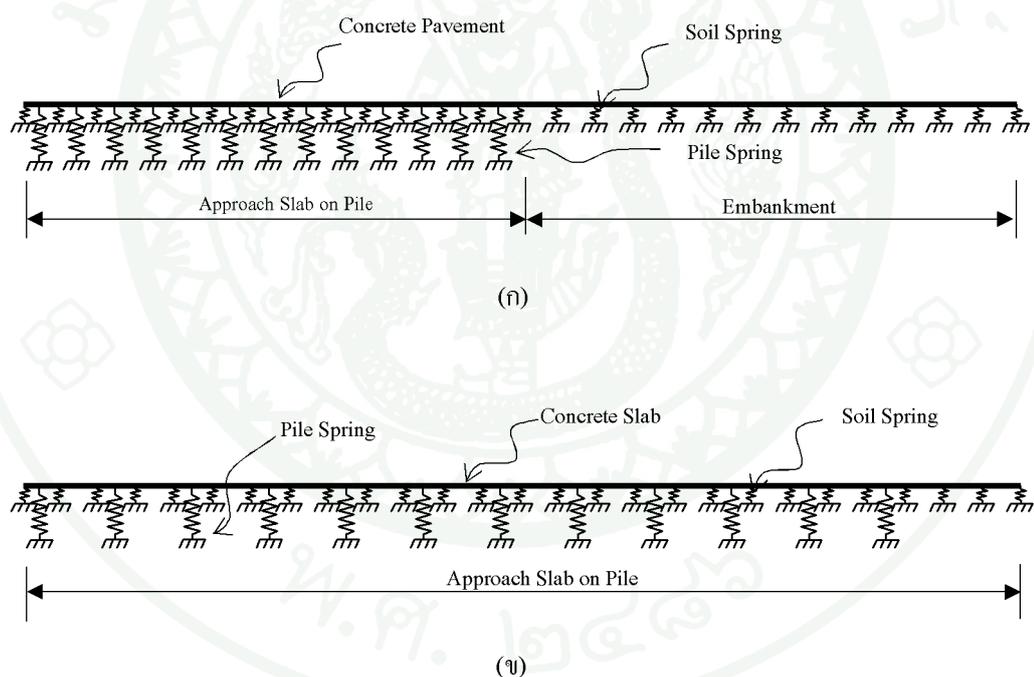
ตารางที่ 15 แสดงค่าสปริงสตีเฟนที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของพื้นคอนกรีตและค่าการทรุดตัวโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile หลังการใช้งาน 2 ปี

ระยะทางจากสะพาน (m)	ความยาวเสาเข็ม (m)	ค่าสตีเฟนของ สปริงที่เหมาะสม (kN/m)	ค่าการทรุดตัว (cm)	
			ผลการวิเคราะห์	ผลการตรวจวัด
0-6	22	21,000	1.13	1.30
8-10	20	12,500	1.94	2.47
12-14	18	6,800	3.48	3.27
16-18	16	6,800	4.38	4.27
20-22	14	4,600	5.42	5.73
24-26	12	1,500	10.62	12.84
28-30	10	900	18.69	18.81
32-34	8	680	24.48	23.83
36-38	6	610	27.41	27.60
40-42	4	610	31.12	30.82

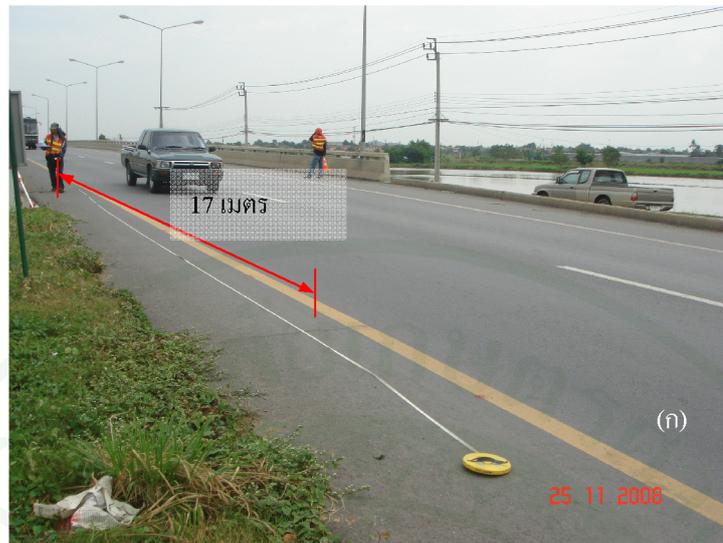
จากการวิเคราะห์พบว่าแรงเฉือนมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินแข็ง (Dense Sand) และเริ่มลดลงเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินอ่อน (Soft Clay) ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 236 กิโลนิวตัน ที่ระยะ 22.5 เมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าแรงเฉือนแบบคานที่ยอมให้ (Allowable Flexural Shear = 100 กิโลนิวตัน) เท่ากับ 2.3 เท่า และมีค่ามากกว่าค่าแรงเฉือนแบบเจาะทะลุที่ยอมให้ (Allowable Punching Shear = 182 กิโลนิวตัน) เท่ากับ 1.3 เท่า

สำหรับค่าโมเมนต์ค้ำที่เกิดขึ้นพบว่า ค่าโมเมนต์ค้ำที่มีค่าสูงกว่า Cracking Moment ($M_{cr} = 54$ กิโลนิวตัน-เมตร) อย่างชัดเจนเกิดขึ้นที่ 2 บริเวณคือที่ระยะ 16.5- 23.5 เมตรและ 37.5- 58 เมตร จากตอม่อสะพาน ความยาวเสาเข็มของทั้ง 2 บริเวณเท่ากับ 16-14 เมตรและ 8-6 เมตร ตามลำดับ ส่วนค่าโมเมนต์ค้ำสูงสุดเกิดขึ้นที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 242 กิโลนิวตัน-เมตร ที่ระยะ 22.5 เมตรและอยู่ในช่วง 16.5 - 23.5 เมตร มีค่าสูงกว่า M_{cr} ถึง 4.5 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 60 ดังนั้นอาจทำให้ Approach Slab on Pile เกิดรอยร้าวขึ้นได้ทั้งสองบริเวณ

จากการสำรวจในสนามพบว่าผิวทางมีรอยแตกร้าวที่ระยะห่างจากตอม่อสะพานที่ตำแหน่ง 15 และ 17 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 61 (ก) และ (ข) ซึ่งเกิดจากการทรุดตัวต่างระดับของเสาเข็มและสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้าง



ภาพที่ 58 แบบจำลองวิเคราะห์การทรุดตัวของ Concrete Pavement (ก) และ (ข) แบบจำลองวิเคราะห์แรงภายใน Concrete Slab ของของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile



ภาพที่ 61 ตำแหน่งรอยแตกที่เกิดขึ้นในสนาม (ก) และ (ข) รอยแตกที่ตำแหน่ง 15 เมตร และ 17 เมตร จากตอม่อสะพาน

การประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile

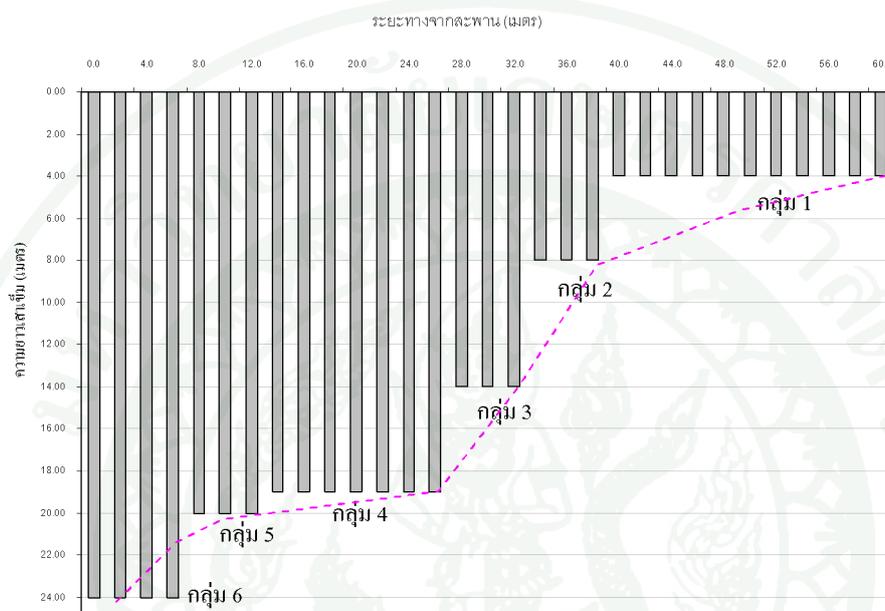
จากแนวทางการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัว จึงได้นำมาใช้ออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวกรณี Approach Slab on Pile โดยใช้ข้อมูลของโครงการสะพานข้ามคลองบางตะไนยและกำหนดให้ค่าความชันสูงสุดของช่วงปรับการทรุดตัวมีค่าไม่เกิน 5 % รายละเอียดและขั้นตอนตัวอย่างการออกแบบแสดงในภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้าง พบว่าค่าการทรุดตัวต่างระดับระหว่างสะพานและถนนมีค่าเท่ากับ 1.54 เมตร ทำให้ความยาวช่วงปรับการทรุดตัวที่ทำให้ค่าความชันสูงสุดมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดเท่ากับ 60 เมตร จากนั้นจึงคำนวณหาค่าการทรุดตัวควบคุมที่ตำแหน่งต่างๆ และวิเคราะห์โครงสร้างโดยการหาค่าสถิติของสปริงที่ให้ค่าการทรุดตัวที่เหมาะสมเพื่อออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน ความยาวเสาเข็มที่ระยะต่างๆจากสะพานและค่าสถิติของสปริงแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 แสดงค่าความยาวเสาเข็มและสถิติของสปริงที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile

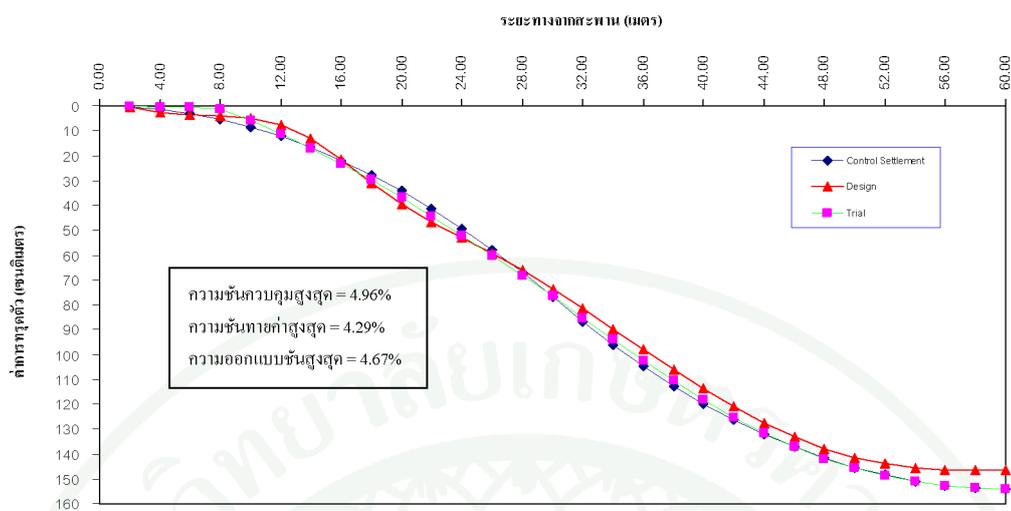
ระยะทางจากสะพาน (m)	ค่าสถิติของ สปริงจากการหาค่า	ค่าสถิติของสปริง ออกแบบ	ความยาวเสาเข็มออกแบบ (m)
	(kN/m)	(kN/m)	
0-6	35,000.00	4,049.49	24
8-12	1,110.00	3,198.82	20
14-18	650.00	337.54	19
20-26	300.00	337.54	19
28-32	200.00	205.97	14
34-38	150.00	155.09	8
40-44	120.00	126.90	4
46-50	110.00	107.76	4
52-60	100.00	107.76	4

การจัดเรียงเสาเข็มจะพิจารณาจากค่าสถิติเฟนสของสปริงเป็นหลัก ช่วงที่มีค่าใกล้เคียงกันจะรวมกลุ่มและใช้ความยาวเสาเข็มเท่ากัน โดยพิจารณาค่าจากรางความสัมพันธ์ระหว่างความสูงดินถมคันทาง ความยาวเข็มและค่าสถิติเฟนสของสปริงในภาคผนวก ง เสาเข็มถูกจัดเป็นกลุ่มทั้งหมด 6 กลุ่ม ที่มีความยาวและจำนวนไม่เท่ากัน รูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มดังแสดงในภาพที่ 62



ภาพที่ 62 รูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มและความยาวเสาเข็มของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile

เมื่อจัดรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มแล้ว ได้ตรวจสอบประสิทธิภาพโดยนำค่าสถิติเฟนสของสปริงที่ใช้ออกแบบไปวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบรูปแบบการทรุดตัวและความชันสูงสุดพบว่ารูปแบบการทรุดตัวใกล้เคียงกับรูปแบบการทรุดตัวที่ควบคุมและค่าการทรุดตัวจากการออกแบบมีค่าแตกต่างกับค่าการทรุดตัวควบคุมมากที่สุด 7 เซนติเมตร ที่ระยะ 60 เมตรจากสะพาน ส่วนค่าความชันมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 4.67 % ที่ระยะ 18 เมตรจากคอสสะพานและมีค่าน้อยกว่าความชันควบคุมซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.96 % ที่ระยะ 30 เมตร จากสะพาน ภาพที่ 63 แสดงรูปแบบการทรุดตัวควบคุมที่ระยะต่างๆ รูปแบบการทรุดตัวที่ได้จากการทายค่าสถิติเฟนสของสปริงที่เหมาะสมและรูปแบบการทรุดตัวจากค่าสถิติเฟนสของสปริงที่ใช้ในการออกแบบ



ภาพที่ 63 เปรียบเทียบรูปแบบการทรุดตัวควบคุม ทายค่าสถิติเนสของปริงที่เหมาะสมและค่าสถิติเนสของสปริงที่ใช้ในการออกแบบ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 กรณีคือ พฤติกรรมการทรุดตัวและพฤติกรรมของโครงสร้างเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากระทำ โดยมี การตรวจวัดพฤติกรรมในสนาม 2 กรณีศึกษาเพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ ผลการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์การทรุดตัวด้วย Elastic Theory และ Terzaghi Consolidation Theory (1943) โดยใช้ $c_{v(lab)}$ และปรับแก้ความหนาของชั้นดิน ทั้งโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานและคันทางให้ค่าการทรุดตัวใกล้เคียงกับผลตรวจวัดในสนามทั้ง 2 กรณีศึกษา
2. การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวได้จำลองโครงสร้างเป็นแบบคานบนฐานยืดหยุ่น (Beam on Elastic Material) ซึ่งจำลองฐานยืดหยุ่นเป็นสปริงตามสมมติฐานของWinkler และหาค่าสปริงสตีเฟนสโดยใช้หลัก Tangent Modulus (Janbu, 1963) เพื่อหาค่า Modulus of Subgrade Reaction จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test)
3. การแปลงค่า Modulus of Subgrade Reaction เป็นค่าสตีเฟนสของสปริงใช้หลักการคำนวณโดยวิธีแบ่งพื้นที่รับน้ำหนัก ซึ่งค่าสตีเฟนสของสปริงเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับขนาดของเสาเข็ม ความยาวของเสาเข็ม ลักษณะชั้นดิน หน่วยแรงประสิทธิผลและหลักการพิจารณาการกระจายแรงในมวลดิน
4. จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานและคันทางของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground และ Approach Slab on Pile ค่าการทรุดตัวที่ได้เป็นค่าการทรุดตัวทั้งหมด (Total Settlement) เนื่องจากค่าสตีเฟนสของสปริงที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) จึงเป็นค่าสปริงสตีเฟนสที่รวมพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินไว้ด้วย

5. ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Ground ณ เวลาตรวจวัดในสนาม เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำโดยพิจารณาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นใน พบว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าแรงเฉือนที่ยอมให้ จึงไม่ส่งผลให้ Approach Slab on Ground เกิดความเสียหาย ส่วนโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า Cracking Moment (M_{cr}) ดังนั้นอาจส่งผลให้ Approach Slab on Ground แตกร้าวได้ที่ตำแหน่ง 4 เมตร จากตอม่อสะพาน

6. ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile ณ เวลาตรวจวัดในสนาม เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำโดยพิจารณาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น พบว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 10.5 เมตร และ 12.5 เมตร จากตอม่อสะพาน มีค่ามากกว่าแรงเฉือนที่ยอมให้ ส่วนโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 16.5- 23.5 เมตรและ 37.5- 58 เมตร จากตอม่อสะพาน มีค่ามากกว่า Cracking Moment (M_{cr}) ส่งผลให้ Approach Slab on Pile แตกร้าวที่ตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับผลตรวจวัดในสนาม

7. ค่าสตีเฟนสของสปริงที่หาจากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำโดยใช้หลัก Tangent Modulus (Janbu, 1963) สามารถทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างที่เกิดขึ้นในช่วงการใช้งาน (Long Term Behavior) ได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับค่า Modulus Number สำหรับดินในประเทศไทยเพื่อประโยชน์ในการศึกษาและงานวิจัยในอนาคต
2. การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างเพื่อศึกษาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นอย่างละเอียด ควรจำลองโครงสร้างเป็นแบบ Plate เนื่องจากรูปแบบโครงสร้างจริงมีลักษณะเป็น Plate มากกว่าคาน (Beam)
3. ควรพัฒนาวิธีการหาค่าสตีเฟนสของสปริงให้หาค่า ณ เวลาใดๆ ได้ เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัว ณ เวลาที่ต้องการ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กฤษณ์ เสาเวียง, ก่อโชค จันทรวงกูร และ บารเมศ วรรณนะภูติ. 2552. พฤติกรรมโครงสร้างปรับ การทรุดตัวของบริเวณคอสะพานบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, น. 456-462. ใน การประชุม วิชาการครั้งที่ 47. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

กฤษณ์ เสาเวียง และ ก่อโชค จันทรวงกูร. ม.ป.ป. การหาค่าสติเฟเนสของสปริงโดยการ ประยุกต์ใช้หลักการ Tangent Modulus ร่วมกับการทดสอบการอัดตัวของน้ำ, คณะ วิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.(เอกสารไม่ตีพิมพ์)

คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. 2534. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน. แก้ไขปรับปรุงครั้งที่ 2, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

จุฑา สุนิตย์สกุล และ อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช (2551). การแก้ไขและป้องกันการทรุดตัวของถนน บริเวณคอสะพานเบื้องต้น (กรณีดินเหนียวอ่อน). รายงานฉบับร่าง, สำนักวิจัยและพัฒนา งานทาง, กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

ชัยพร บัวสรวง. 2551. การศึกษาและเปรียบเทียบในเชิงวิศวกรรมของโครงสร้างปรับการทรุดตัว บริเวณคอสะพานของสำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทินกร โรจนธรา. 2528. การทำนายการทรุดตัวของคอสะพานในบริเวณดินอ่อนโดยใช้หน่วย แบริ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ยงยุทธ เต๋ศิริ และ ทินกร โรจนธรา. 2529. การทรุดตัวของเสาเข็มคอสะพาน, น. 301- 321 ใน เอกสารประกอบการอบรมปฐพีกลศาสตร์ เรื่อง ฐานรากเสาเข็ม. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ จอม จันทร์หิรัญ. 2545. การวิเคราะห์พฤติกรรมของถนนบนดินอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วย Cement Column ของทางหลวงหมายเลข 34 ตอนบางนา – ชลบุรี. รายงานฉบับที่ วพ.197. ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง.
- ยงยุทธ เต้ศิริ, สุพจน์ หวลถนอม และ พิชัย ประทุมศรีสาคร. 2540. พฤติกรรมการทรุดตัวของถนนพระรามที่ 2. รายงานฉบับที่ วพ.160. ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง.
- วรวิทย์ รุ่งอรุณอินทัย. 2546. การวิเคราะห์การทรุดตัวของหน่วยแบริงบริเวณคอสะพานด้วยวิธีทางตัวเลข. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิชาญ ภูพัฒน์. 2523. การทรุดตัวของดินถมบริเวณคอสะพานบริเวณดินอ่อน. รายงานฉบับที่ 55. กองวิเคราะห์วิจัย, กรมทางหลวง.
- วิชาญ ภูพัฒน์. 2530. ฐานรากบนชั้นดินอ่อน. เอกสารการสอนวิชาฐานรากบนชั้นดินอ่อน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สมเจตน์ พรเพิ่มพูน. 2536. โปรแกรมออกแบบคอสะพานบนชั้นดินอ่อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- American Concrete Institute. 2005. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)**. American Concrete Institute, Washington.
- Barden. L and Younan, N.A. 1969. Consolidation of Layered Clays. **Canadian Geotechnical Journal**. Vol.6. No.4: 1090-1093.
- Bergado, D.T., Ahmed, S., Sampaco, C.L. and Balasubramaniam, A.S. 1990. Settlement of Bangna-Bangpakong Highway on Soft Bangkok Clay. **Journal of Geotechnical Engineering** . Vol.116. No.1: 136-155.

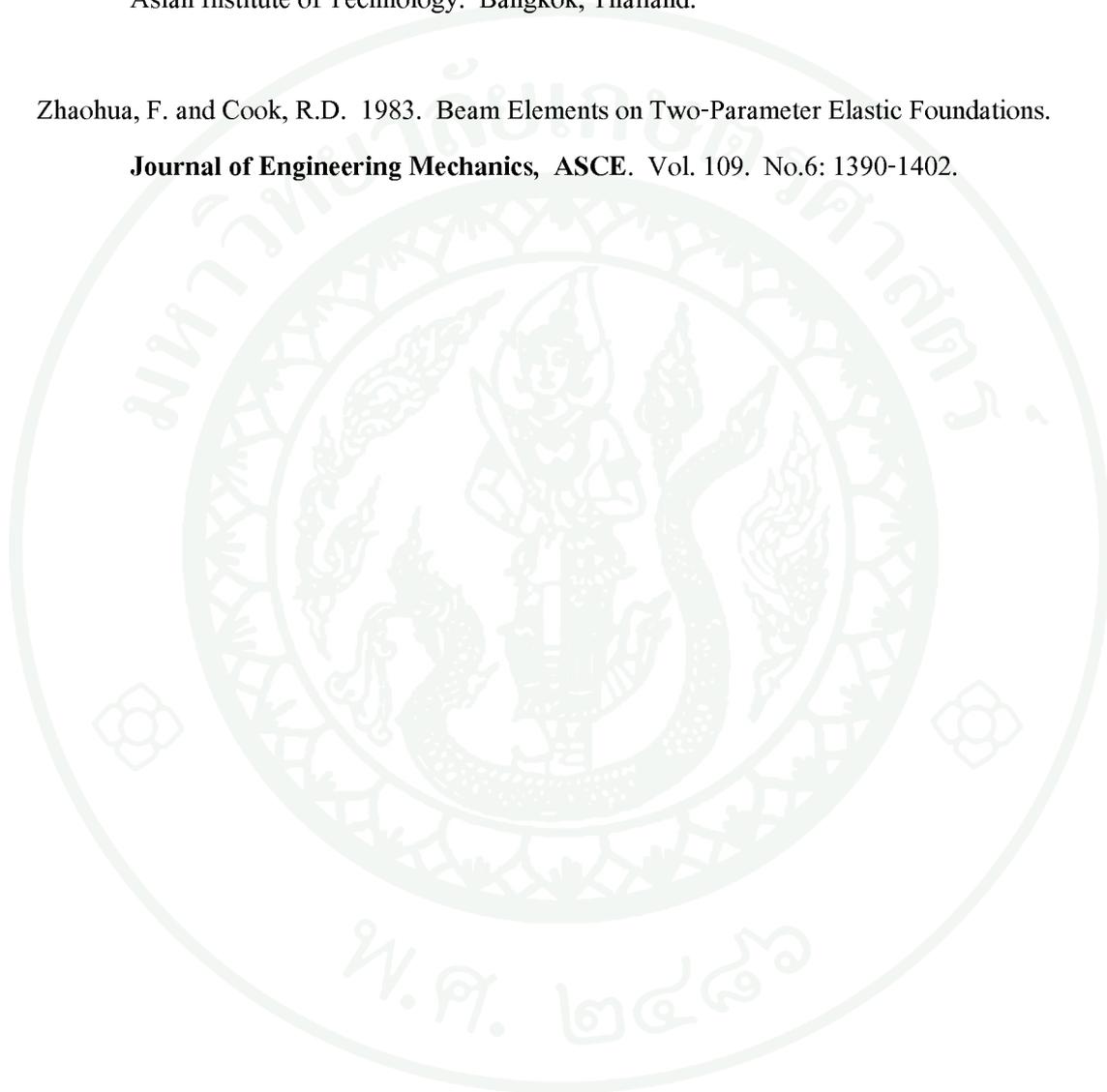
- Bergado, D.T., Lorenzo, G.A., Phien-wej, G.A., Lin, S.S. and Voottipruex. 2005. **Bearing and Compression mechanics of DMM pile supporting Reinforced Bridge approach embankment on soft and Subsiding Ground.** Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology.
- Boresi, P., Richard, J.S. and Omar, M.S. 1993. **Advanced Mechanics of Materials.** New York, John Wiley and Sons. 811 pp.
- Boussinesq, J. 1885. **Application des Potentials a L'Etude de L'Equilibre et due Mouvement des Solides Elastiques.** Gauthier-Villars.
- Briaud, J.L., Seo, J. and Ha, H. 2003. **Investigation of Settlement at Bridge Approach Slab Expansion Joint: Bump at the End of Bridge.** Texas Transportation Institute.
- Cai, C.S., Shi, X.M., Voyiadjis, G.Z. and Zhang, Z.J. 2005. Structure Performance of Bridge Approach Slabs under Given Embankment Settlement. **Journal of Bridge Engineering, ASCE.**
- Doyle, J. M. 1991. **Static and Dynamic Analysis of Structures with An Emphasis on Mechanics and Computer Matrix Methods.** Kluwer Academic Publishers. 448 pp.
- Hetenyi, M. 1946. **Beam on Elastic Foundation.** University of Michigan Press. Ann Arbor, Mich.
- Holmberg, S. 1978. Bridge Approach on Soft Clay Support by Embankment Piles. **Journal of Geotechnical Engineering 10.** 77-89.
- Janbu, N. 1963. Soil Compressibility as Determine by Oedometer and Triaxial Test. **Proceeding 3rd European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Wiesbaden 1:** 19-25.

- Janbu, N. 1965. Consolidation of Clay Layer Base on Non-Linear Stress-Strain. **Proceeding 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Montreal 1**: 88-87.
- Janbu, N. 1967. **Settlement Calculation Base on the Tangent Modulus Concept**. Three Guase Lecture at Moscow State University. Bulletin No.2 of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division at the Norwegian Institute of Technology, Trondheim : 1-57.
- Long, J.H.,Olson,S.M.,Stark,T.D.,and Samara,B.A. 2003. Differential Movement at Embankment Bridge Structure Interface in Illinois. **Jounal of Transportation Research Record 1633**. 53-60.
- Mesri, G. 1973. One-Dimension Consolidation of a Clay Layer with Impeded Drainage Boundaries. Water Resource Reserch. Vol.9. No. 4: 1090:1093.
- Mikhelson, I. 2004. **Structural Engineering Formulas**. NewYork, McGraw-Hill. 228 pp.
- Nassif, H., Nicolas, V., and Abu-Amar, T. 2003. **Bridge Analysis and Design of Bridge Approach and Transition Slab in New Jersey**. The State University of New Jersey.
- Reid, W.M., and Buchanan, N.W. 1984. **Bridge Approach Support Piling**. pp. 267-274, In Piling and Ground Treatment, Thomas Telford Ltd.
- Terzaghi, K. 1943. **Theoretical of Soil Mechanics**. NewYork, John Wiley and Sons. 510 pp.
- Terzaghi, K. and Fröhlich., O.K. 1936. **Theorie der stzung von tonschichten (Theory of settlement of clay layers)**. Franz Deuticke. Leipzig, Germany. 166 pp.

Terzaghi, K. and R.B. Peck. 1948. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. New York., John Wiley and Sons.

Wongsopit, K. 2000. **Bearing Unit Design in Bangkok Area**. Master Thesis No. GE-99-9. Asian Institute of Technology. Bangkok, Thailand.

Zhaohua, F. and Cook, R.D. 1983. Beam Elements on Two-Parameter Elastic Foundations. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**. Vol. 109. No.6: 1390-1402.



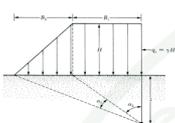
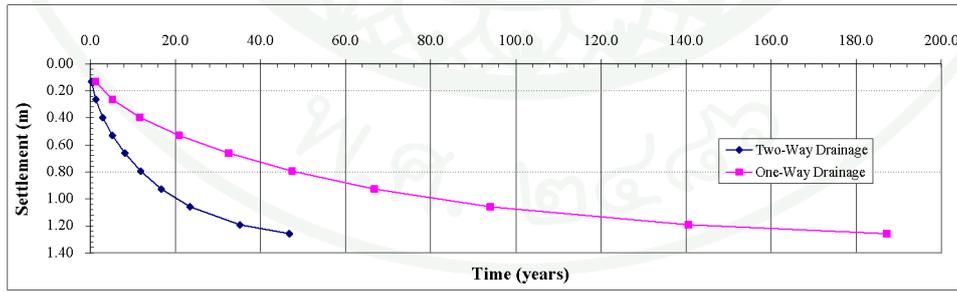


ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
การคำนวณค่าการทรุดตัวด้วยทฤษฎีของ Terzahi (1943)

กรณีศึกษาที่ 1 โครงการสะพานข้ามคลองสอง

PROJECT สะพานข้ามคลองสอง บนถนนบางเขนฯ-บางศรีเมือง SUBJECT:	NO. DATE BY																																																																																																		
I. Imposed Loading Fill Height = 2.00 m Dead load of fill material = 40.00 kN/m ² γ = 20.00 kN/m ³ Dead load of approach slab = 7.20 kN/m ² Dead load of AC = 1.20 kN/m ² Live load of traffic = 10.00 kN/m ² Loading for settlement calculation = 58.40 kN/m ²																																																																																																			
II. Stress Increase Under an Embankment  $\Delta p = \frac{q_o}{\pi} \left[\left(\frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} (\alpha_2) \right]$ B ₁ = 15.5 B ₂ = 4																																																																																																			
III. Formulae Used Recompression Settlement : S _r = C _r / (1+e _c) H log ₁₀ {σ' _p / σ' _{vo} } Compression Settlement : S _c = C _c / (1+e _c) H log ₁₀ {σ' _{vt} / σ' _p }																																																																																																			
IV. Consolidation Settlement: Increase in Effective Overburden Pressure, q _o (kN/m ²) = 58.40																																																																																																			
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Layer NO.</th> <th rowspan="2">Depth (m)</th> <th rowspan="2">Thickness (m)</th> <th rowspan="2">γ_i (kN/m³)</th> <th rowspan="2">z (m)</th> <th rowspan="2">α₁</th> <th rowspan="2">α₂</th> <th rowspan="2">σ'_{vo} (kN/m²)</th> <th rowspan="2">OCR (kN/m²)</th> <th rowspan="2">σ'_p (kN/m²)</th> <th rowspan="2">2Δp (kN/m²)</th> <th rowspan="2">σ'_{vt}=σ'_{vo}+2Δp (kN/m²)</th> <th rowspan="2">e_c</th> <th rowspan="2">C_r</th> <th rowspan="2">C_c</th> <th>Recomp. Settl.</th> <th>Com Settl.</th> <th>Prim Settl.</th> </tr> <tr> <th>S_r (m)</th> <th>S_c (m)</th> <th>S_p (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>5.0</td> <td>10.0</td> <td>5.0</td> <td>15.80</td> <td>7.5</td> <td>0.08</td> <td>1.12</td> <td>64.5</td> <td>1.00</td> <td>64.5</td> <td>56.8</td> <td>121.3</td> <td>2.12</td> <td>0.00</td> <td>1.60</td> <td>0.00</td> <td>0.70</td> <td>0.70</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10.0</td> <td>16.0</td> <td>6.0</td> <td>15.80</td> <td>13.0</td> <td>0.11</td> <td>0.87</td> <td>96.4</td> <td>1.00</td> <td>96.4</td> <td>52.4</td> <td>148.8</td> <td>1.86</td> <td>0.00</td> <td>1.20</td> <td>0.00</td> <td>0.47</td> <td>0.47</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>16.0</td> <td>21.0</td> <td>5.0</td> <td>19.05</td> <td>18.5</td> <td>0.11</td> <td>0.70</td> <td>136.4</td> <td>1.00</td> <td>136.4</td> <td>46.6</td> <td>183.1</td> <td>0.53</td> <td>0.00</td> <td>0.35</td> <td>0.00</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td colspan="16"></td> <td>Total</td> <td>1.32</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Layer NO.	Depth (m)	Thickness (m)	γ _i (kN/m ³)	z (m)	α ₁	α ₂	σ' _{vo} (kN/m ²)	OCR (kN/m ²)	σ' _p (kN/m ²)	2Δp (kN/m ²)	σ' _{vt} =σ' _{vo} +2Δp (kN/m ²)	e _c	C _r	C _c	Recomp. Settl.	Com Settl.	Prim Settl.	S _r (m)	S _c (m)	S _p (m)	1	5.0	10.0	5.0	15.80	7.5	0.08	1.12	64.5	1.00	64.5	56.8	121.3	2.12	0.00	1.60	0.00	0.70	0.70	2	10.0	16.0	6.0	15.80	13.0	0.11	0.87	96.4	1.00	96.4	52.4	148.8	1.86	0.00	1.20	0.00	0.47	0.47	3	16.0	21.0	5.0	19.05	18.5	0.11	0.70	136.4	1.00	136.4	46.6	183.1	0.53	0.00	0.35	0.00	0.15	0.15																	Total	1.32		
Layer NO.	Depth (m)																Thickness (m)	γ _i (kN/m ³)	z (m)	α ₁	α ₂	σ' _{vo} (kN/m ²)	OCR (kN/m ²)	σ' _p (kN/m ²)	2Δp (kN/m ²)	σ' _{vt} =σ' _{vo} +2Δp (kN/m ²)	e _c	C _r	C _c	Recomp. Settl.	Com Settl.	Prim Settl.																																																																			
		S _r (m)	S _c (m)	S _p (m)																																																																																															
1	5.0	10.0	5.0	15.80	7.5	0.08	1.12	64.5	1.00	64.5	56.8	121.3	2.12	0.00	1.60	0.00	0.70	0.70																																																																																	
2	10.0	16.0	6.0	15.80	13.0	0.11	0.87	96.4	1.00	96.4	52.4	148.8	1.86	0.00	1.20	0.00	0.47	0.47																																																																																	
3	16.0	21.0	5.0	19.05	18.5	0.11	0.70	136.4	1.00	136.4	46.6	183.1	0.53	0.00	0.35	0.00	0.15	0.15																																																																																	
																Total	1.32																																																																																		
Rate of Settlement $T_v = c_v * t / H^2$ $t = (H^2 * T_v) / c_v$ $c_{v(lab)} = 2.66 \text{ m}^2/\text{yr}$; Assumed $c_{v(field)} = 1 \times \text{lab}$; $c_{v(field)} = 2.66 \text{ m}^2/\text{yr}$ Maximum drainage distance, H = 21.0 m (One way drainage) 10.5 m (Two way drainage) $U = f(T_v) = 1.13 (T_v)^{0.5}$ for U < 60 %																																																																																																			
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="11">Total Settlement (m) = Total</th> </tr> <tr> <th>U (%)</th> <th>10</th> <th>20</th> <th>30</th> <th>40</th> <th>50</th> <th>60</th> <th>70</th> <th>80</th> <th>90</th> <th>95</th> <th>Drainage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S_p (m)</td> <td>0.13</td> <td>0.26</td> <td>0.40</td> <td>0.53</td> <td>0.66</td> <td>0.79</td> <td>0.93</td> <td>1.06</td> <td>1.19</td> <td>1.26</td> <td></td> </tr> <tr> <td>T_v</td> <td>0.008</td> <td>0.031</td> <td>0.071</td> <td>0.126</td> <td>0.196</td> <td>0.286</td> <td>0.403</td> <td>0.567</td> <td>0.848</td> <td>1.129</td> <td></td> </tr> <tr> <td>t (yrs)</td> <td>1.30</td> <td>5.21</td> <td>11.72</td> <td>20.84</td> <td>32.56</td> <td>47.46</td> <td>66.79</td> <td>94.03</td> <td>140.59</td> <td>187.18</td> <td>One way</td> </tr> <tr> <td>t (yrs)</td> <td>0.33</td> <td>1.30</td> <td>2.93</td> <td>5.21</td> <td>8.14</td> <td>11.87</td> <td>16.70</td> <td>23.51</td> <td>35.15</td> <td>46.79</td> <td>Two way</td> </tr> </tbody> </table>		Total Settlement (m) = Total											U (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	Drainage	S _p (m)	0.13	0.26	0.40	0.53	0.66	0.79	0.93	1.06	1.19	1.26		T _v	0.008	0.031	0.071	0.126	0.196	0.286	0.403	0.567	0.848	1.129		t (yrs)	1.30	5.21	11.72	20.84	32.56	47.46	66.79	94.03	140.59	187.18	One way	t (yrs)	0.33	1.30	2.93	5.21	8.14	11.87	16.70	23.51	35.15	46.79	Two way																											
Total Settlement (m) = Total																																																																																																			
U (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	Drainage																																																																																								
S _p (m)	0.13	0.26	0.40	0.53	0.66	0.79	0.93	1.06	1.19	1.26																																																																																									
T _v	0.008	0.031	0.071	0.126	0.196	0.286	0.403	0.567	0.848	1.129																																																																																									
t (yrs)	1.30	5.21	11.72	20.84	32.56	47.46	66.79	94.03	140.59	187.18	One way																																																																																								
t (yrs)	0.33	1.30	2.93	5.21	8.14	11.87	16.70	23.51	35.15	46.79	Two way																																																																																								
* Assume initial linear Δu 																																																																																																			

ภาพผนวกที่ ก1 การคำนวณค่าการทรุดตัวของคันท่างของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

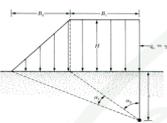
กรณีศึกษาที่ 2 โครงการสะพานข้ามคลองบางตะไนย

PROJECT: สะพานข้ามคลองบางตะไนย	NO.:
SUBJECT:	DATE:
	BY:

I. Imposed Loading

Fill Height = 1.00 m
 Dead load of fill material = 20.00 kN/m² γ = 20.00 kN/m³
 Dead load of rigid pavement = 7.20 kN/m²
 Dead load of AC = 1.20
 Live load of traffic = 10.00 kN/m²
 Loading for settlement calculation = 38.40 kN/m²

II. Stress Increase Under an Embankment



$$\Delta p = \frac{q_0}{\pi} \left[\left(\frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} (\alpha_2) \right]$$

B₁ = 6
 B₂ = 6

III. Formulae Used

Recompression Settlement: $S_1 = C_r / (1+e_c) H \log_{10} (\sigma'_c / \sigma'_{vc})$
 Compression Settlement: $S_2 = C_c / (1+e_c) H \log_{10} (\sigma'_{vt} / \sigma'_p)$

IV. Consolidation Settlement: Increase in Effective Overburden Pressure, q₀ (kN/m²) = 38.40

Layer NO.	Depth (m)	Thickness (m)	γ _s (kN/m ³)	z (m)	α ₁	α ₂	σ' _{vo} (kN/m ²)	OCR (kN/m ²)	σ' _p (kN/m ²)	2Δp (kN/m ²)	σ' _{vt} =σ' _{vo} +2Δp (kN/m ²)	e _c	C _r	C _c	Recomp. Settl.	Com Settl.	Prim Settl.	
															S ₁ (m)	S ₂ (m)	S _p (m)	
1	2.0	5.0	3.0	15.8	3.5	0.24	1.04	28.7	1.00	28.7	37.4	66.1	1.86	0.00	1.18	0.00	0.45	0.45
2	5.0	11.5	6.5	15.8	8.3	0.34	0.63	56.3	1.00	56.3	32.0	88.2	1.86	0.00	1.18	0.00	0.52	0.52
3	11.5	16.5	5.0	18.1	14.0	0.30	0.40	117.2	1.00	117.2	24.7	141.9	1.00	0.00	0.29	0.00	0.06	0.06
4	16.5	17.5	1.0	21.3	17.0	0.28	0.34	143.1	1.00	143.1	21.8	164.9	0.53	0.00	0.20	0.00	0.01	0.01
															Total		1.04	

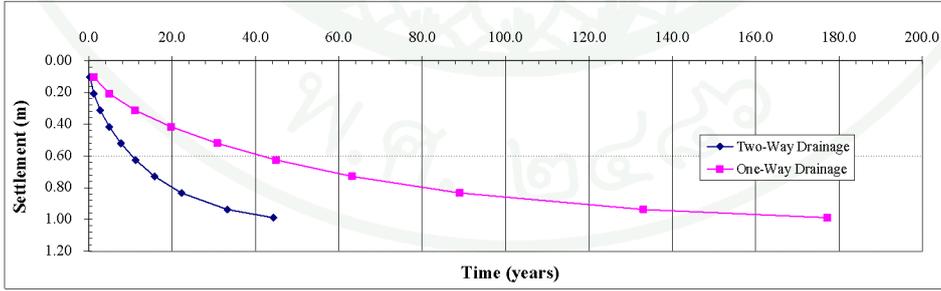
Rate of Settlement

$T_v = c_v * t / H^2$ $t = (H^2 * T_v) / c_v$
 c_{v(lab)} = 2.2 m²/yr; Assumed c_{v(Field)} = 1 x lab; c_{v(Field)} = 2.2 m²/yr Maximum drainage distance, H 18.6 m (One way drainage)
 9.3 m (Two way drainage)

U = f(T_v) = 1.13 (T_v)^{0.5} for U < 60 % Total Settlement (m) = 1.041

U (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	Drainage
S ₀ (m)	0.10	0.21	0.31	0.42	0.52	0.62	0.73	0.83	0.94	0.99	
T _v	0.008	0.031	0.071	0.126	0.196	0.286	0.403	0.567	0.848	1.129	
t (yrs)	1.23	4.93	11.09	19.72	30.81	44.92	63.21	88.99	133.07	177.16	One way
t (yrs)	0.31	1.23	2.77	4.93	7.70	11.23	15.80	22.25	33.27	44.29	Two way

* Assume initial linear Δu



ภาพผนวกที่ ก2 การคำนวณค่าการทรุดตัวของคันท่างของโครงสร้างแบบ

Approach Slab on Pile

PROJECT: สะพานข้ามคลองบางกอกใหญ่
SUBJECT:

NO. DATE BY

I. Imposed Loading

Fill Height = 2.72 m
 Dead load of fill material = 54.40 kN/m² γ = 20.00 kN/m³
 Dead load of AC = 1.20 kN/m²
 Dead load of Base Slab = 5.52 kN/m²
 Live load of traffic = 10.00 kN/m²
 Loading for settlement calculation = 71.12 kN/m²

II. Stress Increase Under an Embankment

Assume uniform strip load for each segment

$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} [\alpha + \sin \alpha \cos (\alpha + 2\delta)]$$

B = 9 m

III. Formulae Used

Recompression Settlement: $S_1 = C_r / (1+e_c) H \log_{10} \{ \sigma'_p / \sigma'_{vo} \}$
 Compression Settlement: $S_2 = C_c / (1+e_c) H \log_{10} \{ \sigma'_{vf} / \sigma'_p \}$

IV. Consolidation Settlement: Increase in Effective Overburden Pressure, q_0 (kN/m²) = 71.12

Layer NO.	Depth (m)	Thickness (m)	γ _i (kN/m ³)	z (m)	α	σ' _{vo} (kN/m ²)	OCR	σ' _p (kN/m ²)	Δp (kN/m ²)	σ' _{vf} =σ' _{vo} +Δp+Δpd (kN/m ²)	e _c	C _r	C _c	Recomp. Settl. S ₁ (m)	Com Settl. S ₂ (m)	Prim Settl. S _p (m)
1	2.7	5.0	2.3	15.8	3.8	2.63	1.00	30.6	70.6	101.3	1.86	0.00	1.18	0.00	0.50	0.50
2	5.0	11.5	6.5	15.8	8.3	1.36	1.00	56.3	52.9	109.1	1.86	0.00	1.18	0.00	0.77	0.77
3	11.5	16.5	5.0	18.1	14.0	0.76	1.00	117.2	32.7	149.9	1.00	0.00	0.29	0.00	0.08	0.08
4	16.5	17.5	1.0	21.3	17.0	0.61	1.00	143.1	26.7	169.8	0.53	0.00	0.20	0.00	0.01	0.01
															Total	1.36

Rate of Settlement

$$T_v = c_v * t / H^2 \quad t = (H^2 * T_v) / c_v$$

c_{v(lab)} = 2.2 m²/yr; Assumed c_{v(field)} = 1 x lab; c_{v(field)} = 2.2 m²/yr Maximum drainage distance, H: 18.6 m (One way drainage)
 9.3 m (Two way drainage)

U = f(T_v) = 1.13 (T_v)^{0.5} for U < 60 %

Total Settlement (m) = 1.358

U (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	Drainage
S _p (m)	0.14	0.27	0.41	0.54	0.68	0.81	0.95	1.09	1.22	1.29	
T _v	0.008	0.031	0.071	0.126	0.196	0.286	0.403	0.567	0.848	1.129	
t (yrs)	1.23	4.93	11.09	19.72	30.81	44.92	63.21	88.99	133.07	177.16	One way
t (yrs)	0.31	1.23	2.77	4.93	7.70	11.23	15.80	22.25	33.27	44.29	Two way

* Assume initial linear Δu

ภาพผนวกที่ ก3 การคำนวณค่าการทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

เสาเข็มยาว 4 เมตร

PROJECT: **สะพานข้ามคลองบางมด**
 SUBJECT: _____

NO. _____
 DATE _____
 BY _____

I. Imposed Loading

Fill Height = 2.98 m
 Dead load of fill material = 59.60 kN/m² $\gamma = 20.00 \text{ kN/m}^3$
 Dead load of AC = 1.20 kN/m²
 Dead load of Base Slab = 5.52 kN/m²
 Live load of traffic = 10.00 kN/m²
 Loading for settlement calculation = 76.32 kN/m²

II. Stress Increase Under an Embankment

Assume uniform strip load for each segment

$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} [a + \sin \alpha \cos (\alpha + 2\delta)]$$

B = 9 m

III. Formulae Used

Recompression Settlement : $S_1 = C_r / (1+e_o) H \log_{10} (\sigma'_p / \sigma'_{vo})$
 Compression Settlement : $S_2 = C_c / (1+e_o) H \log_{10} (\sigma'_{vf} / \sigma'_p)$

IV. Consolidation Settlement: Increase in Effective Overburden Pressure, q_o (kN/m²) = **76.32**

Layer NO.	Depth (m)	Thickness (m)	γ_i (kN/m ³)	z (m)	α	σ'_{vo} (kN/m ²)	OCR	σ'_p (kN/m ²)	Δp (kN/m ²)	$\sigma'_{vf} = \sigma'_{vo} + \Delta p$ (kN/m ²)	e_o	C_r	C_c	Comp. Sd	Com Settl	Prim Settl.
														S_1 (m)	S_2 (m)	S_o (m)
1	6.7	11.5	4.8	15.8	9.1	2.16	61.1	1.00	61.1	72.6	1.86	0.0	1.18	0.00	0.68	0.68
2	11.5	16.5	5.0	18.1	14.0	1.10	95.4	1.00	95.4	48.4	1.00	0.0	0.29	0.00	0.13	0.13
3	16.5	17.5	1.0	21.3	17.0	0.82	143.1	1.00	143.1	37.8	0.53	0.0	0.20	0.00	0.01	0.01
Total																0.82

Rate of Settlement

$T_v = c_v * t / H^2$ $t = (H^2 * T_v) / c_v$

$c_{v(lab)} = 2.2 \text{ m}^2/\text{yr}$; Assumed $c_{v(Field)} = 1 \times \text{lab}$; $c_{v(Field)} = 2.2 \text{ m}^2/\text{yr}$ Maximum drainage distance, H = 18.6 m (One way drainage)
 9.3 m (Two way drainage)

$U = f(T_v) = 1.13 (T_v)^{0.5}$ for $U < 60\%$

Total Settlement (m) = 0.821

U (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	Drainage
S_v (m)	0.08	0.16	0.25	0.33	0.41	0.49	0.57	0.66	0.74	0.78	
T_v	0.008	0.031	0.071	0.126	0.196	0.286	0.403	0.567	0.848	1.129	
t (yrs)	1.23	4.93	11.09	19.72	30.81	44.92	63.21	88.99	133.07	177.16	One way
t (yrs)	0.31	1.23	2.77	4.93	7.70	11.23	15.80	22.25	33.27	44.29	Two way

* Assume initial linear Δu

ภาพผนวกที่ 6 การคำนวณค่าการทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile
 เสาเข็มยาว 10 เมตร

PROJECT สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 SUBJECT: NO. _____
DATE _____
BY _____

I. Imposed Loading

Fill Height = 3.07 m
 Dead load of fill material = 61.40 kN/m² γ = 20.00 kN/m³
 Dead load of AC = 1.20 kN/m²
 Dead load of Base Slab = 5.52 kN/m²
 Live load of traffic = 10.00 kN/m²
 Loading for settlement calculation = 78.12 kN/m²

II. Stress Increase Under an Embankment

Assume uniform strip load for each segment

$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} [\alpha + \sin \alpha \cos (\alpha + 2\delta)]$$

B = 9 m

III. Formulae Used

Recompression Settlement : $S_1 = C_r / (1+e_v) H \log_{10} (\sigma'_p / \sigma'_{vso})$
 Compression Settlement : $S_2 = C_c / (1+e_v) H \log_{10} (\sigma'_{v1} / \sigma'_{v2})$

IV. Consolidation Settlement: Increase in Effective Overburden Pressure, q_0 (kN/m²) = 78.12

Layer NO.	Depth (m)	Thickness (m)	γ_i (kN/m ³)	z (m)	α	σ'_{vo} (kN/m ²)	OCR	σ'_p (kN/m ²)	Δp (kN/m ²)	$\sigma'_{v1} = \sigma'_{vo} + \Delta p$ (kN/m ²)	e_v	C_r	C_c	Recomp. Settl. S ₁ (m)	Com Settl. S ₂ (m)	Prim Settl. S _p (m)
1	8.0	11.5	3.5	15.8	9.8	2.40	65.0	1.00	65.0	76.5	1.86	0.0	1.18	0.00	0.49	0.49
2	11.5	16.5	5.0	18.1	14.0	1.29	95.4	1.00	95.4	55.9	1.00	0.0	0.29	0.00	0.15	0.15
3	16.5	17.5	1.0	21.3	17.0	0.93	143.1	1.00	143.1	43.0	0.53	0.0	0.20	0.00	0.01	0.01
															Total	0.65

Rate of Settlement

$T_v = c_v * t / H^2$ $t = (H^2 * T_v) / c_v$

$c_{v(lab)} = 2.2 \text{ m}^2/\text{yr}$; Assumed $c_{v(field)} = 1 \times \text{lab}$; $c_{v(field)} = 2.2 \text{ m}^2/\text{yr}$ Maximum drainage distance, H = 18.6 m (One way drainage)
 9.3 m (Two way drainage)

$U = f(T_v) = 1.13 (T_v)^{0.5}$ for $U < 60\%$

Total Settlement (m) = 0.648

U (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
S ₂ (m)	0.06	0.13	0.19	0.26	0.32	0.39	0.45	0.52	0.58	0.62
T _v	0.008	0.031	0.071	0.126	0.196	0.286	0.403	0.567	0.848	1.129
t (yrs)	1.23	4.93	11.09	19.72	30.81	44.92	63.21	88.99	133.07	177.16
t (yrs)	0.31	1.23	2.77	4.93	7.70	11.23	15.80	22.25	33.27	44.29

* Assume initial linear Δu

ภาพผนวกที่ ก7 การคำนวณค่าการทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile
 เสาเข็มยาว 12 เมตร

PROJECT: **สะพานข้ามคลองบางพระ**
 SUBJECT: _____

NO. _____
 DATE _____
 BY _____

I. Imposed Loading

Fill Height = 3.15 m
 Dead load of fill material = 63.00 kN/m² $\gamma = 20.00 \text{ kN/m}^3$
 Dead load of AC = 1.20 kN/m²
 Dead load of Base Slab = 5.52 kN/m²
 Live load of traffic = 10.00 kN/m²
 Loading for settlement calculation = 79.72 kN/m²

II. Stress Increase Under an Embankment

Assume uniform strip load for each segment

$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} [\alpha + \sin \alpha \cos (\alpha + 2\delta)]$$

B = 9 m

III. Formulae Used

Recompression Settlement: $S_1 = C_r / (1+e_o) H \log_{10} (\sigma'_p / \sigma'_{vo})$
 Compression Settlement: $S_2 = C_c / (1+e_o) H \log_{10} (\sigma'_{at} / \sigma'_p)$

IV. Consolidation Settlement: Increase in Effective Overburden Pressure, q_o (kN/m²) = **79.72**

Layer NO.	Depth (m)	Thickness (m)	γ_i (kN/m ³)	z (m)	α	σ'_{vo} (kN/m ²)	OCR (kN/m ²)	σ'_p (kN/m ²)	Δp (kN/m ²)	$\sigma'_{at} = \sigma'_{vo} + \Delta p$ (kN/m ²)	e_o	C_c	C_r	Recomp. Settl. S ₁ (m)	Com Settl. S ₂ (m)	Prim Settl. S _p (m)	
1	9.3	11.5	2.2	15.8	10.4	2.67	68.8	1.00	68.8	79.3	148.1	1.86	0.0	1.18	0.00	0.30	0.30
2	11.5	16.5	5.0	18.1	14.0	1.53	95.4	1.00	95.4	64.3	159.6	1.00	0.0	0.29	0.00	0.16	0.16
3	16.5	17.5	1.0	21.3	17.0	1.06	143.1	1.00	143.1	49.1	192.2	0.53	0.0	0.20	0.00	0.02	0.02
Total																0.48	

Rate of Settlement

$T_v = c_v * t / H^2$ $t = (H^2 * T_v) / c_v$

$c_{v(\text{lab})} = 2.2 \text{ m}^2/\text{yr}$; Assumed $c_{v(\text{field})} = 1 \times \text{lab}$; $c_{v(\text{field})} = 2.2 \text{ m}^2/\text{yr}$ Maximum drainage distance, H = 18.6 m (One way drainage)
 9.3 m (Two way drainage)

$U = f(T_v) = 1.13 (T_v)^{0.5}$ for $U < 60\%$

Total Settlement (m) = 0.477

U (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
S _v (m)	0.05	0.10	0.14	0.19	0.24	0.29	0.33	0.38	0.43	0.45
T _v	0.008	0.031	0.071	0.126	0.196	0.286	0.403	0.567	0.848	1.129
t (yrs)	1.23	4.93	11.09	19.72	30.81	44.92	63.21	88.99	133.07	177.16
t (yrs)	0.31	1.23	2.77	4.93	7.70	11.23	15.80	22.25	33.27	44.29

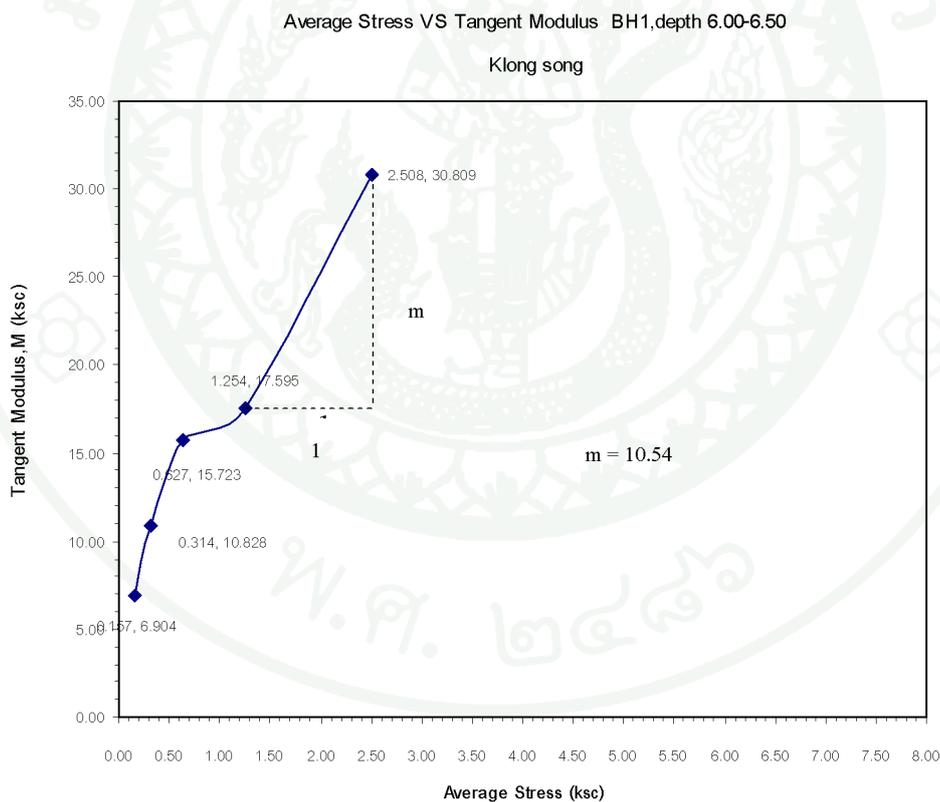
* Assume initial linear Δu

ภาพผนวกที่ 8 การคำนวณค่าการทรุดตัวของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile
 เสาเข็มยาว 14 เมตร



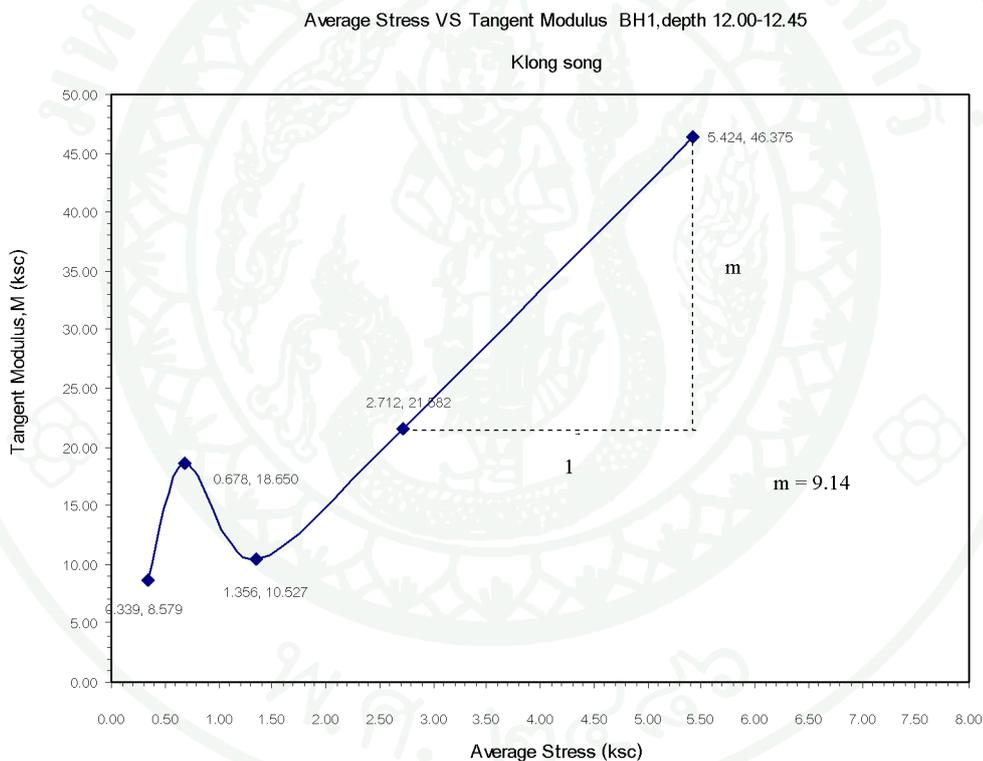
กรณีศึกษาที่ 1 โครงการสะพานข้ามคลองสอง

Boring No.			BH-1		
Depth		6.00 - 6.50	H _o (cm)		1.916
Pressure(Stress)			δ cm	Vertical Strain	M σ/ε
ksc	average				
0.000	0.105	0.052	0.074	0.039	0.000
0.105	0.209	0.157	0.103	0.054	6.904
0.209	0.418	0.314	0.140	0.073	10.828
0.418	0.837	0.627	0.191	0.100	15.723
0.837	1.672	1.254	0.282	0.147	17.595
1.672	3.345	2.508	0.386	0.201	30.809



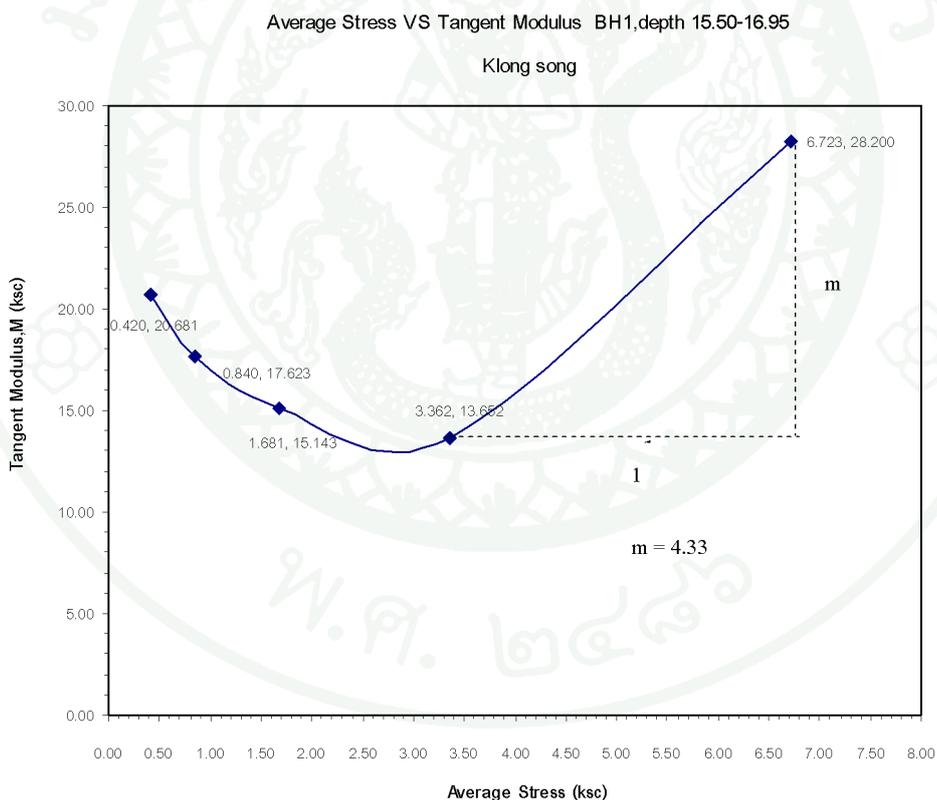
ภาพผนวกที่ ข1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m) ที่ความลึก 6.00-6.50 ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

Boring No.			BH-1		
Depth		12.00-12.45	H _o (cm)		1.898
Pressure(Stress)			δ cm	Vertical Strain	M σ/ε
ksc	average				
0.000	0.226	0.113	0.039	0.021	0.000
0.226	0.452	0.339	0.089	0.047	8.579
0.452	0.904	0.678	0.135	0.071	18.650
0.904	1.808	1.356	0.298	0.157	10.527
1.808	3.616	2.712	0.457	0.241	21.582
3.616	7.232	5.424	0.605	0.319	46.375



ภาพผนวกที่ ๒ ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m) ที่ความลึก 12.00-12.45 ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

Boring No.			BH-1		
Depth		15.50-16.95	H _o (cm)		1.919
Pressure			δ cm	Vertical Strain	M σ/ε
ksc	average				
0.000	0.280	0.140	0.091	0.047	0.000
0.280	0.560	0.420	0.117	0.061	20.681
0.560	1.121	0.840	0.178	0.093	17.623
1.121	2.241	1.681	0.320	0.167	15.143
2.241	4.482	3.362	0.635	0.331	13.652
4.482	8.964	6.723	0.940	0.490	28.200

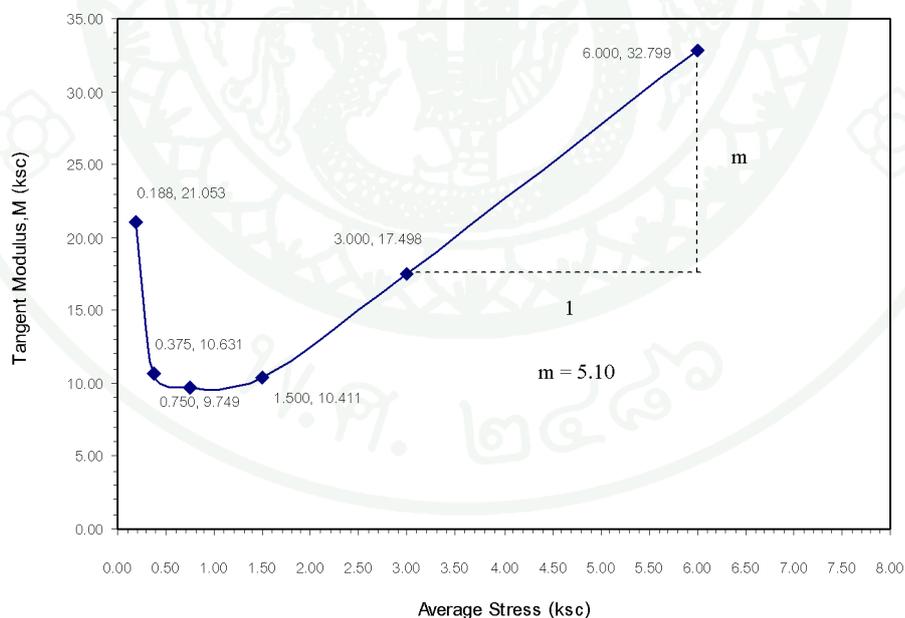


ภาพผนวกที่ ๓ ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m) ที่ความลึก 15.00-16.95 ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

กรณีศึกษาที่ 2 โครงการสะพานข้ามคลองสอง

Boring No.		BH-1			
Depth		4.50 - 5.00	H _o (cm)		2.56
Pressure(Stress)		δ cm	Vertical Strain	M	
ksc	average			σ/ε	
0.000	0.125	0.063	0.010	0.004	0.000
0.125	0.250	0.188	0.025	0.010	21.053
0.250	0.500	0.375	0.085	0.033	10.631
0.500	1.000	0.750	0.216	0.085	9.749
1.000	2.000	1.500	0.462	0.181	10.411
2.000	4.000	3.000	0.755	0.295	17.498
4.000	8.000	6.000	1.067	0.417	32.799

Average Stress VS Tangent Modulus BH1,depth 4.0-4.5
Klong Bangtanai

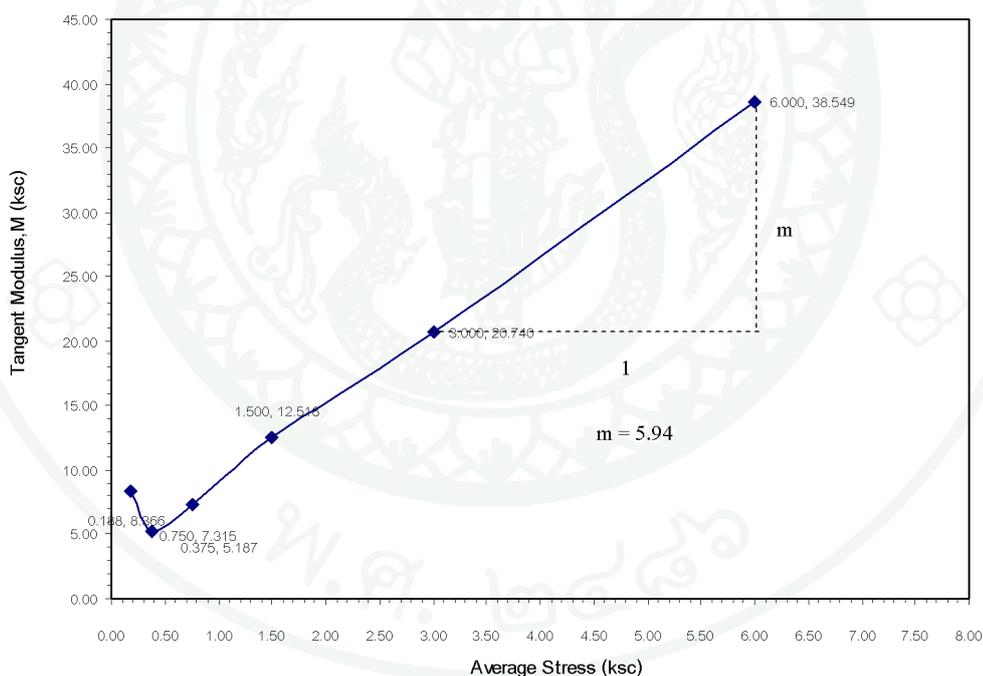


ภาพผนวกที่ ข4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m) ที่ความลึก 4.00-4.50 ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

Boring No.			BH-1		
Depth		7.50-8.00	H _o (cm)		2.55
Pressure(Stress)			δ cm	Vertical Strain	M σ/ε
ksc	average				
0.000	0.125	0.063	0.020	0.008	0.000
0.125	0.250	0.188	0.058	0.023	8.366
0.250	0.500	0.375	0.181	0.071	5.187
0.500	1.000	0.750	0.355	0.139	7.315
1.000	2.000	1.500	0.559	0.219	12.518
2.000	4.000	3.000	0.805	0.316	20.740
4.000	8.000	6.000	1.069	0.419	38.549

Average Stress VS Tangent Modulus BH1,depth 7.5-8.0

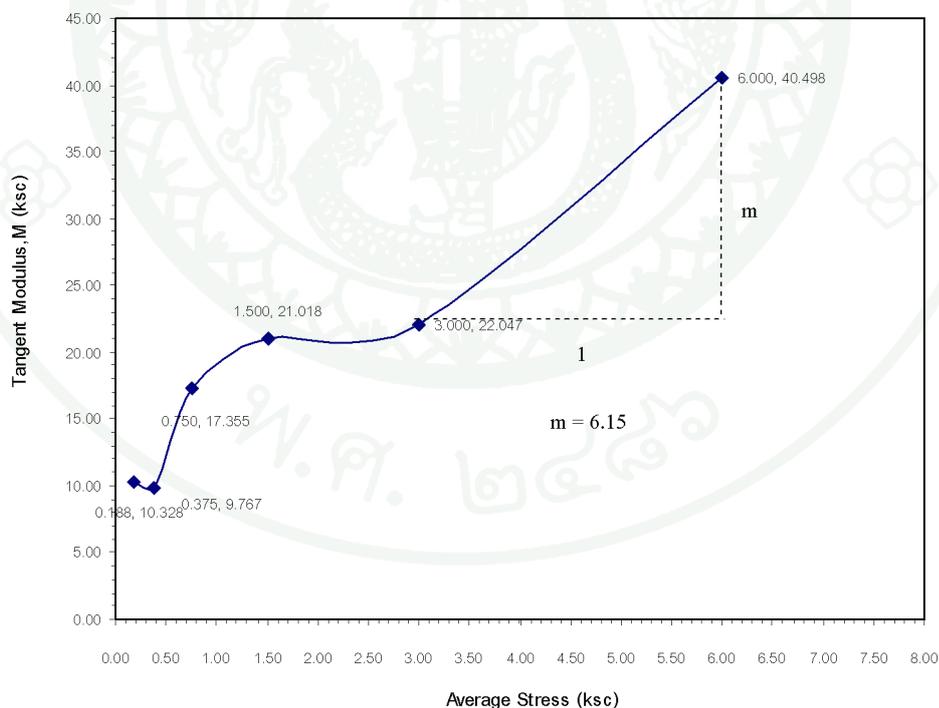
Klong Bangtanai



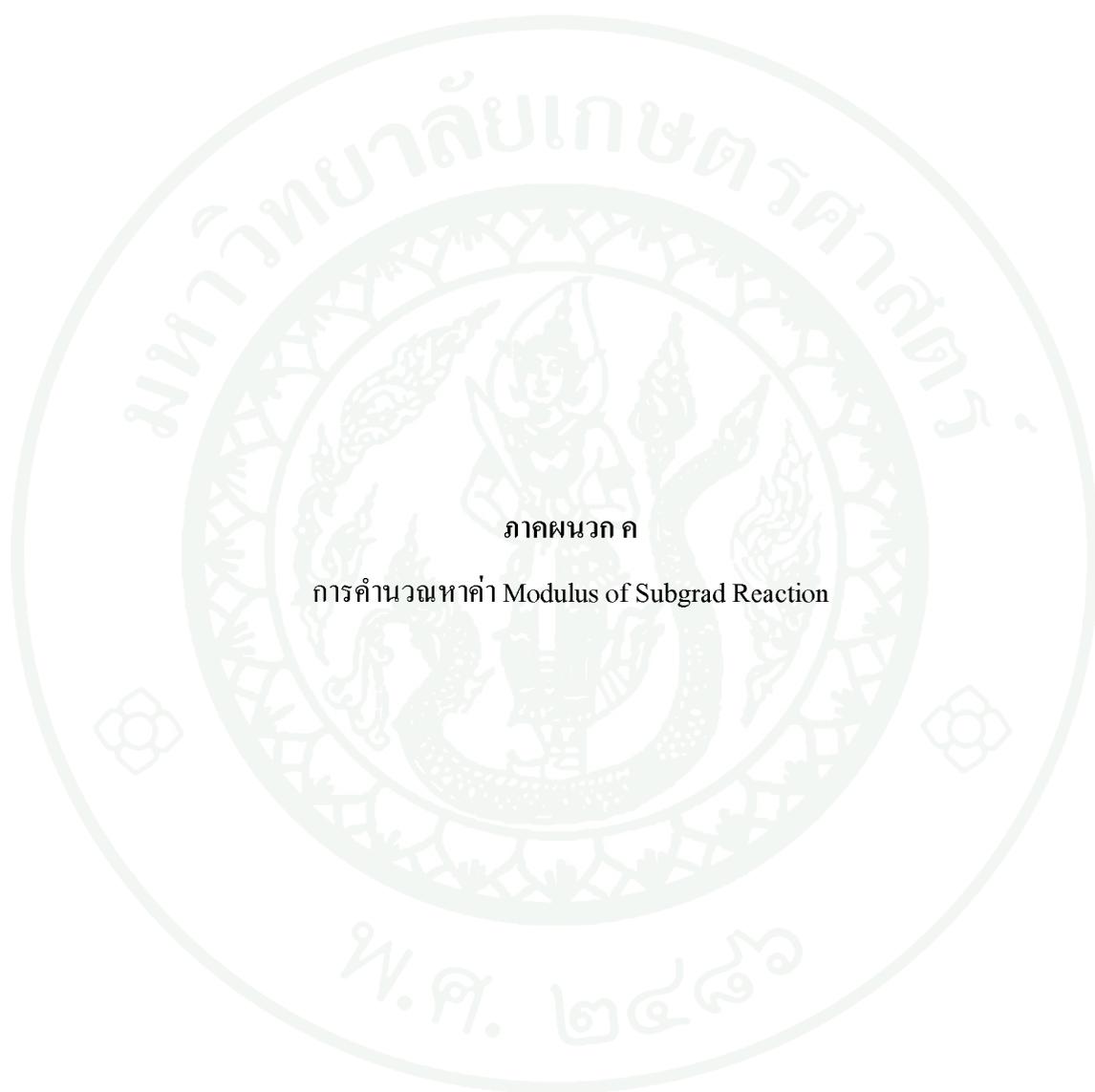
ภาพผนวกที่ ข5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m) ที่ความลึก 7.50-8.00 ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

Boring No.			BH-1		
Depth			H ₀ (cm)		
12.00-12.50			2.52		
Pressure			δ cm	Vertical Strain	M σ/ε
ksc		average			
0.000	0.125	0.063	0.012	0.005	0.000
0.125	0.250	0.188	0.043	0.017	10.328
0.250	0.500	0.375	0.107	0.043	9.767
0.500	1.000	0.750	0.180	0.071	17.355
1.000	2.000	1.500	0.300	0.119	21.018
2.000	4.000	3.000	0.528	0.210	22.047
4.000	8.000	6.000	0.777	0.308	40.498

Average Stress VS Tangent Modulus BH1,depth 12.0-12.5
Klong Bangtanai



ภาพผนวกที่ ข6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tangent Modulus กับ Average Stress เพื่อหาค่า Modulus Number (m) ที่ความลึก 12.00-12.50 ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile



ตารางช่วยคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction สำหรับ Approach Slab on Ground																					
Embankment Height	=	2	m	Concrete Slab	=	0.72	t/m ²														
q	=	γh	t/m ²	Asphaltic Concrete	=	0.12	t/m ²														
γ (Fill material)	=	2	t/m ³	LL	=	1	t/m ²														
q	=	4	t/m ²	Total Load	=	5.84	t														
Ref.: Janbu (1963)																					
Depth (m)	H (cm)	modulus number	Total Unit weight (t/m ²)	γ' (t/m ²)	σ _{vo} (t/m ²)	Δσ (t/m ²)	σ _v (t/m ²)	M (t/m ²)	M (kg/cm ²)	ks=M/L (kg/cm ³)	ks=M/L (kg/m ³)	ks-Mid.layer (kg/m ³)									
0		Top Crust						0	0.000	0.000	0.000										
1.00	500.00		1.58	0.58	0.58	5.83	6.41	0.00	0.00	0.000	-										
2.00			1.58	0.58	1.16	5.76	6.92	0.00	0.00	0.000	-										
3.00			1.64	0.64	1.92	5.60	7.52	0.00	0.00	0.000	-										
4.00			1.64	0.64	2.56	5.37	7.93	0.00	0.00	0.000	-										
5.00		1.52	0.52	2.60	5.09	7.69	0.00	0.00	0.000	-											
6.00	1100.00	m = 4.33 Layer 1	1.54	0.54	3.12	4.93	8.05	34.87	3.49	0.003	3,170.13										
7.00			1.54	0.54	3.78	4.78	8.56	37.06	3.71	0.003	3,369.11										
8.00			1.54	0.54	4.32	4.47	8.79	38.07	3.81	0.003	3,460.71										
9.00			1.58	0.54	4.86	4.18	9.04	39.13	3.91	0.004	3,557.30										
10.00			1.58	0.58	5.80	3.90	9.70	42.01	4.20	0.004	3,819.08	4,019.50									
11.00		Soft to Medium clay	1.55	0.58	6.38	3.65	10.03	43.43	4.34	0.004	3,947.95										
12.00			1.55	0.55	6.60	3.42	10.02	43.38	4.34	0.004	3,944.01										
13.00			1.60	0.6	7.80	3.21	11.01	47.68	4.77	0.004	4,334.30										
14.00			1.60	0.6	8.40	3.02	11.42	49.46	4.95	0.004	4,496.21										
15.00			1.65	0.65	9.75	2.85	12.60	54.56	5.46	0.005	4,960.39										
16.00	600.00	m = 40.00 Stiff to Very Stiff Clay	1.65	0.65	10.40	2.70	13.10	56.71	5.67	0.005	5,155.33										
17.00			1.65	0.65	11.05	2.56	13.61	54.25	5.42	0.091	90,707.79										
18.00			1.65	0.65	11.70	2.43	14.13	56.51	5.65	0.094	94,188.52										
19.00		2.16	1.16	12.35	2.31	14.66	58.64	58.65	0.098	97,743.87											
20.00		2.16	1.16	23.20	2.26	25.46	1018.28	101.83	0.170	169,713.52											
21.00		2.16	1.16	24.36	2.20	26.56	1062.59	106.26	0.177	177,098.74											
22.00	2.16	1.16	25.52	2.11	27.63	1105.07	110.51	0.184	184,179.06												
Remark: <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Depth</th> <th>Equation</th> <th>Remark</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5-16.00</td> <td>M = 4.33σ'</td> <td>Lab.Test</td> </tr> <tr> <td>16.0-22.0</td> <td>M = 40σ'</td> <td>Approx</td> </tr> </tbody> </table>													Depth	Equation	Remark	5-16.00	M = 4.33σ'	Lab.Test	16.0-22.0	M = 40σ'	Approx
Depth	Equation	Remark																			
5-16.00	M = 4.33σ'	Lab.Test																			
16.0-22.0	M = 40σ'	Approx																			
											k- Average	4,019.50									

ภาพผนวกที่ ค1 รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีคั่นทาง ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Ground

ตารางช่วยคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction สำหรับ Approach Slab on Ground																													
Embankment Height	=	2.5	m	Concrete Slab	=	0.72	t/m ²																						
q	=	γh	t/m ²	Asphaltic Concrete	=	0.12	t/m ²																						
γ (Fill material)	=	2	t/m ³	LL	=	1	t/m ²																						
q	=	5	t/m ²	Total Load	=	<u>6.84</u>	t/m																						
Ref.: Janbu (1963)																													
Depth (m)	H (cm)	modulus number	Total Unit weight (t/m ²)	γ' (t/m ²)	σ_{v0} (t/m ²)	$\Delta\sigma_v$ (t/m ²)	σ'_t (t/m ²)	M (t/m ²)	M (kg/cm ²)	$k_s=M/L$ (kg/cm ³)	$k_s=M/L$ (kg/m ³)																		
0	200.00	0.00						0	0.000	0	-																		
1.00		Top	1.58	0.58	0.58		7.41	0.00	0.00	0.000	-																		
2.00		Crust		0.58	1.16		7.91	0.00	0.00	0.000	-																		
3.00	1100.00	m = 5.73	1.64	0.64	1.92		8.48	48.61	4.86	0.004	4,418.79																		
4.00				0.64	2.56		8.85	50.71	5.07	0.005	4,609.69																		
5.00				0.63	3.15		9.11	52.18	5.22	0.005	4,743.57																		
6.00				0.63	3.78		9.56	54.77	5.48	0.005	4,978.97																		
7.00				1.51	0.51	3.57		9.17	52.53	5.25	0.005	4,775.30																	
8.00				1.58	0.58	4.64		9.88	56.60	5.66	0.005	5,145.19																	
9.00				1.55	0.55	4.95		9.84	56.40	5.64	0.005	5,126.92																	
10.00				1.55	0.55	5.50		10.07	57.70	5.77	0.005	5,245.66																	
11.00				1.59	0.59	6.49		10.76	61.68	6.17	0.006	5,607.24																	
12.00				1.75	0.75	9.00		13.00	74.52	7.45	0.007	6,774.39																	
13.00		1.84	0.84	10.92		14.68	84.12	8.41	0.008	7,647.33																			
14.00	300.00	15.00 Medium clay		1.07	14.98		18.52	277.80	27.78	0.093	92,598.68																		
15.00				1.07	16.05		19.39	290.85	29.08	0.097	96,948.57																		
16.00				1.07	17.12		20.26	304.18	30.42	0.101	101,392.26																		
17.00	1500.00	400.00 $\sigma_a = 11.24$ t/m ²		1.19	20.23		23.22	6462.65	646.26	0.431	430,843.13																		
18.00				2.19	1.19	21.42		24.26	6605.79	660.58	0.440	440,386.30																	
19.00					1.19	22.61		25.32	6747.65	674.77	0.450	449,843.49																	
20.00				2.19	1.19	23.80		26.44	6896.09	689.61	0.460	459,739.06																	
21.00					1.09	22.89		25.47	6768.27	676.83	0.451	451,217.96																	
22.00				2.09	1.09	23.98		26.45	6896.62	689.66	0.460	459,774.85																	
23.00				2.19	1.19	27.37		29.73	7312.33	731.23	0.487	487,488.76																	
24.00					1.19	28.56		30.82	7445.48	744.55	0.496	496,365.65																	
25.00				2.27	1.27	31.75		33.92	7810.91	781.09	0.521	520,727.21																	
26.00					1.27	33.02		35.11	7946.33	794.63	0.530	529,755.62																	
27.00				2.28	1.28	34.56		36.57	8110.14	811.01	0.541	540,676.04																	
28.00					1.28	35.84		37.78	8242.97	824.30	0.550	549,531.28																	
29.00				2.27	1.27	36.83		38.70	8343.01	834.30	0.556	556,200.76																	
30.00					1.08	32.40		34.21	7843.83	784.38	0.523	522,922.01																	
31.00		2.08	1.08	33.48		35.23	7960.01	796.00	0.53	530,667.65																			
										k_s	=	4,590.68																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Depth</th> <th>Equation</th> <th>Remark</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.0-13.0</td> <td>$M = 5.73\sigma'$</td> <td>Soft Clay</td> </tr> <tr> <td>14.0-16.0</td> <td>$M = 15\sigma'$</td> <td>Medium Clay</td> </tr> <tr> <td>17.0-31.0</td> <td>$M = m\sigma'_s(\sigma'_v/\sigma'_s)^a$</td> <td>Dense Sand</td> </tr> <tr> <td></td> <td>$m = 400$</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>$a = 0.5$</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>												Depth	Equation	Remark	2.0-13.0	$M = 5.73\sigma'$	Soft Clay	14.0-16.0	$M = 15\sigma'$	Medium Clay	17.0-31.0	$M = m\sigma'_s(\sigma'_v/\sigma'_s)^a$	Dense Sand		$m = 400$			$a = 0.5$	
Depth	Equation	Remark																											
2.0-13.0	$M = 5.73\sigma'$	Soft Clay																											
14.0-16.0	$M = 15\sigma'$	Medium Clay																											
17.0-31.0	$M = m\sigma'_s(\sigma'_v/\sigma'_s)^a$	Dense Sand																											
	$m = 400$																												
	$a = 0.5$																												

ภาพผนวกที่ ๒ รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีคั่นทาง ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ตารางห่วยคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction สำหรับ Approach Slab on Pile

Load Area (BxL)	=	2	2	m	DL :	Filled Material	=	5.4	t/m ²
Pile Size	=	0.22	0.22	m		Base Slab	=	0.55	t/m ²
Pile Tip	=	4		m		Asphaltic Conc.	=	0.12	t/m ²
Effective Zone (H/3)	=	1.33		m	LL :		=	1.00	t/m ²
Effective Depth (2H/3)	=	2.67		m	Total Load (Q)		=	28.29	t
Boundary Layer	=	0		m	q ₀		=	7.07	t/m ²

Ref.: Janbu (1963)

Depth m	H (cm)	modulus number	σ_z t/m ²	q_u/q	γ_t (t/m ³)	γ' (t/m ³)	σ_{v0} (t/m ²)	σ_t (t/m ²)	M (t/m ²)	M (kg/cm ²)	ks=M/L (kg/cm ³)	ks=M/L (kg/m ³)
0	200.00	0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.0000	-
1.00		Top	0.00	0.00	1.58	0.58	0.58	0.58	0.00	0.00	0.0000	-
2.00		Crust	0.00	0.00		0.58	1.16	1.16	0.00	0.00	0.0000	-
2.67	1100.00	m = 5.73	7.07	1.00	1.64	0.64	1.71	8.78	50.30	5.03	0.0046	4,672.89
3.00			5.20	0.73		0.64	1.92	7.12	40.77	4.08	0.0037	3,706.66
4.00			2.55	0.36	0.64	2.56	5.11	29.26	2.93	0.0027	2,659.72	
5.00			1.51	0.21	0.63	3.15	4.66	26.68	2.67	0.0024	2,425.59	
6.00			0.99	0.14	0.63	3.78	4.77	27.36	2.74	0.0025	2,487.08	
7.00			0.71	0.10	0.51	3.57	4.28	24.50	2.45	0.0022	2,227.01	
8.00			0.53	0.07	0.58	4.64	5.17	29.60	2.96	0.0027	2,691.02	
9.00			0.41	0.06	0.55	4.95	5.36	30.70	3.07	0.0028	2,790.69	
10.00			0.32	0.05	0.55	5.50	5.82	33.38	3.34	0.0030	3,034.16	
11.00			0.26	0.04	0.59	6.49	6.75	38.71	3.87	0.0035	3,518.70	
12.00			0.22	0.03	0.75	9.00	9.22	52.83	5.28	0.0048	4,802.90	
13.00	0.19	0.03	0.84	10.92	11.11	63.64	6.36	0.0058	5,785.20			
14.00	300.00	15.00	0.16	0.02	2.07	1.07	14.98	15.14	227.09	22.71	0.0757	75,695.60
15.00		Medium clay	0.14	0.02		1.07	16.05	16.19	242.82	24.28	0.0809	80,938.46
16.00		0.12	0.02	1.07		17.12	17.24	258.60	25.86	0.0862	86,201.59	
17.00	1500.00	400.00 $\sigma_a = 11.24$ t/m ²	0.11	0.01	2.19	1.07	18.19	18.30	5736.17	573.62	0.3824	382,411.01
18.00			0.09	0.01		1.19	21.42	21.51	6220.21	622.02	0.4147	414,680.89
19.00			0.08	0.01		1.19	22.61	22.69	6388.52	638.85	0.4259	425,901.30
20.00			0.08	0.01	2.19	1.19	23.80	23.88	6552.71	655.27	0.4368	436,847.42
21.00			0.07	0.01	2.09	1.09	22.89	22.96	6425.61	642.56	0.4284	428,373.79
22.00			0.06	0.01	2.09	1.09	23.98	24.04	6575.52	657.55	0.4384	438,367.75
23.00			0.06	0.01	2.19	1.19	27.37	27.43	7023.12	702.31	0.4682	468,207.95
24.00			0.05	0.01		1.19	28.56	28.61	7173.27	717.33	0.4782	478,217.73
25.00			0.05	0.01	2.27	1.27	31.75	31.80	7562.08	756.21	0.5041	504,138.95
26.00			0.04	0.01		1.27	33.02	33.06	7711.19	771.12	0.5141	514,079.27
27.00			0.04	0.01	2.28	1.28	34.56	34.60	7888.35	788.84	0.5259	525,990.01
28.00			0.04	0.01	2.28	1.28	35.84	35.88	8032.61	803.26	0.5355	535,507.03
29.00			0.04	0.00	2.27	1.27	36.83	36.87	8142.39	814.24	0.5428	542,825.71
30.00			0.03	0.00	2.08	1.08	32.40	32.43	7637.23	763.72	0.5091	509,148.68
31.00	0.03	0.00	1.08	33.48		33.51	7763.10	776.31	0.5175	517,540.00		

Depth	Equation	Remark
2.0-13.0	M = 5.73σ'	Soft Clay
14.0-16.0	M = 15σ'	Medium Clay
17.0-31.0	M = mσ _v (σ _v /σ _a) ^{1-a}	Dense Sand
	m = 400	
	a = 0.5	

k_s - Average 2,967.14

ภาพผนวกที่ ค3 รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 4.00 เมตรของ โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ตารางช่วยคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction สำหรับ Approach Slab on Pile

Load Area (BxL)	=	2	2	m	DL :	Filled Material	=	5.58	t/m ²
Pile Size	=	0.22	0.22	m		Base Slab	=	0.55	t/m ²
Pile Tip	=	6		m		Asphaltic Conc.	=	0.12	t/m ²
Effective Zone (H/3)	=	2.00		m	LL :		=	1.00	t/m ²
Effective Depth (2H/3)	=	4.00		m	Total Load (Q)		=	29.01	t
Boundary Layer	=	0		m	q ₀		=	7.25	t/m ²

Ref.: Janbu (1963)

Depth m	H (cm)	modulus number	σ_z t/m ²	q_p/q	γ_t (t/m ³)	γ' (t/m ³)	σ_{v0} (t/m ²)	σ_t (t/m ²)	M	M	ks=M/L (kg/cm ³)	ks=M/L (kg/m ³)	
0	200.00	0.00 Top Crust	0.00	0.00					0.00	0.00	0.0000	-	
1.00			0.00	0.00			0.58	0.58	0.58	0.00	0.00	0.0000	-
2.00			0.00	0.00	1.58		0.58	1.16	1.16	0.00	0.00	0.0000	-
3.00		1100.00	m = 5.73 Soft to clay	0.00	0.00	1.64		0.64	1.92	1.92	11.00	1.10	0.0010
4.00	7.25			1.00			0.64	2.56	9.81	56.22	5.62	0.0051	5,111.16
5.00	3.22			0.44	1.63		0.63	3.15	6.37	36.52	3.65	0.0033	3,319.81
6.00	1.81			0.25			0.63	3.78	5.59	32.05	3.20	0.0029	2,913.44
7.00	1.16			0.16	1.51		0.51	3.57	4.73	27.10	2.71	0.0025	2,464.07
8.00	0.81			0.11	1.58		0.58	4.64	5.45	31.20	3.12	0.0028	2,836.76
9.00	0.59			0.08	1.55		0.55	4.95	5.54	31.76	3.18	0.0029	2,886.88
10.00	0.45			0.06			0.55	5.50	5.95	34.11	3.41	0.0031	3,101.10
11.00	0.36			0.05	1.59		0.59	6.49	6.85	39.24	3.92	0.0036	3,567.25
12.00	0.29			0.04	1.75		0.75	9.00	9.29	53.23	5.32	0.0048	4,839.29
13.00	0.24	0.03	1.84		0.84	10.92	11.16	63.95	6.39	0.0058	5,813.21		
14.00	300.00	15.00 Medium clay	0.20	0.03			1.07	14.98	15.18	227.72	22.77	0.0759	75,907.22
15.00			0.17	0.02	2.07		1.07	16.05	16.22	243.32	24.33	0.0811	81,108.22
16.00			0.15	0.02			1.07	17.12	17.27	259.02	25.90	0.0863	86,340.00
17.00			0.13	0.02			1.07	18.19	18.32	5739.75	573.98	0.3827	382,650.14
18.00	1500.00	400.00 $\sigma_a =$ 11.24 t/m ² Dense to very Dense Sand	0.11	0.02	2.19		1.19	21.42	21.53	6222.98	622.30	0.4149	414,865.49
19.00			0.10	0.01			1.19	22.61	22.71	6390.80	639.08	0.4261	426,053.39
20.00			0.09	0.01	2.19		1.19	23.80	23.89	6564.61	656.46	0.4370	436,974.10
21.00			0.08	0.01	2.09		1.09	22.89	22.97	6427.28	642.73	0.4285	428,485.11
22.00			0.07	0.01			1.09	23.98	24.05	6576.93	657.69	0.4385	438,462.22
23.00			0.07	0.01	2.19		1.19	27.37	27.44	7024.28	702.43	0.4683	468,285.30
24.00			0.06	0.01			1.19	28.56	28.62	7174.27	717.43	0.4783	478,284.38
25.00			0.05	0.01	2.27		1.27	31.75	31.80	7562.92	756.29	0.5042	504,194.92
26.00			0.05	0.01			1.27	33.02	33.07	7711.92	771.19	0.5141	514,128.12
27.00			0.05	0.01	2.28		1.28	34.56	34.61	7888.99	788.90	0.5259	525,932.71
28.00	0.04	0.01			1.28	35.84	35.88	8033.17	803.32	0.5355	535,544.70		
29.00	0.04	0.01	2.27		1.27	36.83	36.87	8142.89	814.29	0.5429	542,859.23		
30.00	0.04	0.01			1.08	32.40	32.44	7637.72	763.77	0.5092	509,181.05		
31.00	0.03	0.00	2.08		1.08	33.48	33.51	7763.53	776.35	0.5176	517,568.95		

Depth	Equation	Remark
2.0-13.0	M = 5.73 σ'	Soft Clay
14.0-16.0	M = 15 σ'	Medium Clay
17.0-31.0	M = $m\sigma'_s(\sigma'_v/\sigma'_s)^{1-a}$	Dense Sand
	m = 400	
	a = 0.5	

k_s - Average 3,293.32

ภาพผนวกที่ ค4 รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 6.00 เมตรของ
โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ตารางช่วยคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction สำหรับ Approach Slab on Pile

Load Area (BxL)	=	2	2	m	DL :	Filled Material	=	5.74	t/m ²
Pile Size	=	0.22	0.22	m		Base Slab	=	0.55	t/m ²
Pile Tip	=	8		m		Asphaltic Conc.	=	0.12	t/m ²
Effective Zone (H/3)	=	2.67		m	LL :		=	1.00	t/m ²
Effective Depth (2H/3)	=	5.33		m	Total Load (Q)		=	29.65	t
Boundary Layer	=	0		m	q ₀		=	7.41	t/m ²

Ref.: Janbu (1963)

Depth m	H (cm)	modulus number	σ _z t/m ²	q ₀ /q	γ _t (t/m ³)	γ' (t/m ³)	σ _{vo} (t/m ²)	σ _t (t/m ²)	M (t/m ²)	M (kg/cm ²)	ks=M/L (kg/cm ³)	ks=M/L (kg/m ³)
0	200.00	0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.0000	-
1.00		Top	0.00	0.00	1.58	0.58	0.58	0.58	0.00	0.00	0.0000	-
2.00		Crust	0.00	0.00			0.58	1.16	1.16	0.00	0.00	0.0000
3.00	1100.00	m = 5.73	0.00	0.00	1.64	0.64	1.92	1.92	11.00	1.10	0.0010	1,000.15
4.00			0.00	0.00		0.64	2.56	2.56	14.67	1.47	0.0013	1,393.53
5.00			0.00	0.00		0.63	3.15	3.15	18.05	1.80	0.0016	1,640.86
5.33			7.41	1.00	1.63	0.63	3.36	10.77	61.72	6.17	0.0056	5,611.23
6.00			4.17	0.56		0.63	3.78	7.95	45.55	4.55	0.0041	4,140.84
7.00			2.21	0.30	1.51	0.51	3.57	5.78	33.09	3.31	0.0030	3,008.37
8.00			1.36	0.18	1.58	0.58	4.64	6.00	34.39	3.44	0.0031	3,126.18
9.00			0.92	0.12		0.55	4.95	5.87	33.65	3.37	0.0031	3,059.45
10.00			0.67	0.09		0.55	5.50	6.17	35.34	3.53	0.0032	3,212.49
11.00			0.50	0.07	1.59	0.59	6.49	6.99	40.08	4.01	0.0036	3,643.45
12.00			0.39	0.05	1.75	0.75	9.00	9.39	53.83	5.38	0.0049	4,893.80
13.00	0.32	0.04	1.84	0.84	10.92	11.24	64.39	6.44	0.0059	5,853.60		
14.00	0.26	0.04		1.07	14.98	15.24	228.61	22.86	0.0762	76,202.89		
15.00	0.22	0.03	2.07	1.07	16.05	16.27	244.02	24.40	0.0813	81,339.11		
16.00	0.18	0.02		1.07	17.12	17.30	259.57	25.96	0.0865	86,523.93		
17.00	0.16	0.02		1.07	18.19	18.35	5744.42	574.44	0.3830	382961.346		
18.00	0.14	0.02	2.19	1.19	21.42	21.56	6226.52	622.65	0.4151	415101.568		
19.00	0.12	0.02		1.19	22.61	22.73	6393.67	639.37	0.4262	426244.887		
20.00	0.11	0.01	2.19	1.19	23.80	23.91	6556.97	655.70	0.4371	437131.398		
21.00	0.09	0.01	2.09	1.09	22.89	22.98	6429.32	642.93	0.4286	428621.611		
22.00	0.09	0.01		1.09	23.98	24.07	6578.65	657.87	0.4386	438676.749		
23.00	0.08	0.01		1.19	27.37	27.45	7025.67	702.57	0.4684	468378.111		
24.00	0.07	0.01	2.19	1.19	28.56	28.63	7175.45	717.55	0.4784	478363.601		
25.00	0.06	0.01		1.27	31.75	31.81	7563.91	756.39	0.5043	504260.862		
26.00	0.06	0.01	2.27	1.27	33.02	33.08	7712.78	771.28	0.5142	514185.208		
27.00	0.05	0.01	2.28	1.28	34.56	34.61	7889.73	788.97	0.5260	526982.245		
28.00	0.05	0.01		1.28	35.84	35.89	8033.82	803.38	0.5356	535588.099		
29.00	0.05	0.01	2.27	1.27	36.83	36.88	8143.46	814.35	0.5429	542897.609		
30.00	0.04	0.01	2.08	1.08	32.40	32.44	7638.27	763.83	0.5092	509217.874		
31.00	0.04	0.01		1.08	33.48	33.52	7764.03	776.40	0.5176	517601.690		

Depth	Equation	Remark
2.0-13.0	M = 5.73σ'	Soft Clay
14.0-16.0	M = 15σ'	Medium Clay
17.0-31.0	M = mσ _v (σ' _v /σ _s) ^{1-a}	Dense Sand
	m = 400	
	a = 0.5	

k_s - Average 3,836.98

ภาพผนวกที่ ค5 รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 8.00 เมตรของ
โครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ตารางช่วยคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction สำหรับ Approach Slab on Pile												
Load Area (BxL)	=	2	2	m	DL :	Filled Material	=	5.92	t/m ²			
Pile Size	=	0.22	0.22	m		Base Slab	=	0.55	t/m ²			
Pile Tip	=	10		m		Asphaltic Conc.	=	0.12	t/m ²			
Effective Zone (H/3)	=	3.33		m	LL :		=	1.00	t/m ²			
Effective Depth (2H/3)	=	6.67		m	Total Load (Q)		=	30.37	t			
Boundary Layer	=	0		m	q ₀		=	7.59	t/m ²			
Ref.: Janbu (1963)												
Depth m	H (cm)	modulus number	$\Delta\sigma_z$ t/m ²	q ₀ /q	γ_t (t/m ³)	γ' (t/m ³)	σ_{v0} (t/m ²)	σ_v (t/m ²)	M (t/m ²)	M (kg/cm ²)	ks=M/L (kg/cm ³)	ks=M/L (kg/m ³)
0	200.00	0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.0000	-
1.00		Top	0.00	0.00	1.58	0.58	0.58	0.58	0.00	0.00	0.0000	-
2.00		Crust	0.00	0.00		0.58	1.16	1.16	0.00	0.00	0.0000	-
3.00	1100.00	m = 5.73	0.00	0.00	1.64	0.64	1.92	1.92	11.00	1.10	0.0010	1,000.15
4.00			0.00	0.00		0.64	2.56	2.56	14.67	1.47	0.0013	1,333.53
5.00			0.00	0.00		0.63	3.15	3.15	18.05	1.80	0.0016	1,640.86
6.00			0.00	0.00		0.63	3.78	3.78	21.66	2.17	0.0020	1,969.04
6.67			7.59	1.00		0.63	4.20	11.79	67.57	6.76	0.0061	6,142.56
7.00			5.58	0.73	1.51	0.51	3.57	9.15	52.42	5.24	0.0048	4,765.17
8.00			2.73	0.36	1.58	0.58	4.64	7.37	42.25	4.22	0.0038	3,840.73
9.00			1.62	0.21	1.55	0.55	4.95	6.57	37.63	3.76	0.0034	3,420.93
10.00			1.07	0.14	1.55	0.55	5.50	6.57	37.63	3.76	0.0034	3,421.14
11.00			0.76	0.10	1.59	0.59	6.49	7.25	41.53	4.15	0.0038	3,775.08
12.00			0.56	0.07	1.75	0.75	9.00	9.56	54.81	5.48	0.0050	4,982.34
13.00	0.44	0.06	1.84	0.84	10.92	11.36	65.08	6.51	0.0059	5,916.12		
14.00	300.00	15.00	0.35	0.05		1.07	14.98	15.33	229.93	22.99	0.0766	76,643.06
15.00		Medium clay	0.28	0.04	2.07	1.07	16.05	16.33	245.02	24.50	0.0817	81,672.02
16.00		clay	0.24	0.03		1.07	17.12	17.36	260.35	26.03	0.0868	86,782.15
17.00	1500.00	400.00 $\sigma_a = 11.24$ t/m ²	0.20	0.03		1.07	18.19	18.39	6750.82	675.08	0.3834	383388.025
18.00			0.17	0.02	2.19	1.19	21.42	21.59	6231.29	623.13	0.4154	415419.096
19.00			0.15	0.02		1.19	22.61	22.76	6397.47	639.75	0.4265	426498.178
20.00			0.13	0.02	2.19	1.19	23.80	23.93	6560.05	656.00	0.4373	437336.430
21.00			0.11	0.01		1.09	22.89	23.00	6431.96	643.20	0.4288	428797.246
22.00			0.10	0.01	2.09	1.09	23.98	24.08	6580.84	658.08	0.4387	438722.432
23.00			0.09	0.01		1.19	27.37	27.46	7027.42	702.74	0.4685	468494.968
24.00			0.08	0.01	2.19	1.19	28.56	28.64	7176.94	717.69	0.4785	478462.431
25.00			0.07	0.01		1.27	31.75	31.82	7565.14	756.51	0.5043	504342.453
26.00			0.07	0.01	2.27	1.27	33.02	33.09	7713.83	771.38	0.5143	514255.315
27.00			0.06	0.01	2.28	1.28	34.56	34.62	7890.64	789.06	0.5260	526042.665
28.00			0.06	0.01		1.28	35.84	35.90	8034.61	803.46	0.5356	535640.705
29.00			0.05	0.01	2.27	1.27	36.83	36.88	8144.16	814.42	0.5429	542943.859
30.00			0.05	0.01		1.08	32.40	32.45	7638.93	763.89	0.5093	509262.027
31.00	0.04	0.01	2.08	1.08	33.48	33.52	7764.61	776.46	0.5176	517640.756		
											4,533.01	
											76,643.06	
											k _s - Average 4,279.88	

ภาพผนวกที่ ๓๖ รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 10.00 เมตร
ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ตารางช่วยคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction สำหรับ Approach Slab on Pile

Load Area (BxL)	=	2	2	m	DL :	Filled Material	=	6.08	t/m ²
Pile Size	=	0.22	0.22	m		Base Slab	=	0.55	t/m ²
Pile Tip	=	12		m		Asphaltic Conc.	=	0.12	t/m ²
Effective Zone (H/3)	=	4.00		m	LL :		=	1.00	t/m ²
Effective Depth (2H/3)	=	8.00		m	Total Load (Q)		=	31.01	t
Boundary Layer	=	0		m	q ₀		=	7.75	t/m ²

Ref.: Janbu (1963)

Depth m	H (cm)	modulus number	σ _z t/m ²	q ₀ /q	γ _t (t/m ³)	γ' (t/m ³)	σ _{v0} (t/m ²)	σ _t (t/m ²)	M (t/m ²)	M (kg/cm ²)	ks=M/L (kg/cm ³)	ks=M/L (kg/m ³)	
0	200.00	0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.0000	-	
1.00		Top	0.00	0.00			0.58	0.58	0.58	0.00	0.00	0.0000	-
2.00		Crust	0.00	0.00	1.58		0.58	1.16	1.16	0.00	0.00	0.0000	-
3.00	1100.00	m = 5.73	0.00	0.00	1.64		0.64	1.92	1.92	11.00	1.10	0.0010	1,000.15
4.00			0.00	0.00		0.64	2.56	2.56	14.67	1.47	0.0013	1,333.53	
5.00			0.00	0.00	1.63		0.63	3.15	3.15	18.05	1.80	0.0016	1,640.86
6.00			0.00	0.00		0.63	3.78	3.78	21.66	2.17	0.0020	1,969.04	
7.00			0.00	0.00	1.51		0.51	3.57	3.57	20.46	2.05	0.0019	1,859.65
8.00			7.75	1.00	1.58		0.58	4.64	12.39	71.01	7.10	0.0065	6,455.11
9.00			3.45	0.44	1.55		0.55	4.95	8.40	48.11	4.81	0.0044	4,373.21
10.00			1.94	0.25		0.55	5.50	7.44	42.62	4.26	0.0039	3,874.52	
11.00			1.24	0.16	1.59		0.59	6.49	7.73	44.29	4.43	0.0040	4,026.79
12.00			0.86	0.11	1.75		0.75	9.00	9.86	56.51	5.65	0.0051	5,136.86
13.00			0.63	0.08	1.84		0.84	10.92	11.55	66.20	6.62	0.0060	6,017.97
14.00	0.48	0.06		1.07	14.98	15.46	231.97	23.20	0.0773	77,322.50			
15.00	0.38	0.05	2.07		1.07	16.05	16.43	246.49	24.65	0.0822	82,164.07		
16.00	0.31	0.04		1.07	17.12	17.43	261.45	26.15	0.0872	87,150.40			
17.00	0.26	0.03		1.07	18.19	18.45	5759.67	575.97	0.3840	383,977.79			
18.00	0.22	0.03	2.19		1.19	21.42	21.64	6237.71	623.77	0.4158	415,847.11		
19.00	0.18	0.02		1.19	22.61	22.79	6402.48	640.25	0.4268	426,832.22			
20.00	0.16	0.02	2.19		1.19	23.80	23.96	6564.03	656.40	0.4376	437,601.72		
21.00	0.14	0.02	2.09		1.09	22.89	23.03	6435.31	643.53	0.4290	429,020.69		
22.00	0.12	0.02		1.09	23.98	24.10	6583.58	658.36	0.4389	438,905.02			
23.00	0.11	0.01	2.19		1.19	27.37	27.48	7029.59	702.96	0.4686	468,639.48		
24.00	0.10	0.01		1.19	28.56	28.66	7178.75	717.87	0.4786	478,583.18			
25.00	0.09	0.01	2.27		1.27	31.75	31.84	7566.62	756.66	0.5044	504,441.05		
26.00	0.08	0.01		1.27	33.02	33.10	7715.09	771.51	0.5143	514,339.19			
27.00	0.07	0.01	2.28		1.28	34.56	34.63	7891.71	789.17	0.5261	526,114.29		
28.00	0.06	0.01		1.28	35.84	35.90	8035.54	803.55	0.5367	536,702.54			
29.00	0.06	0.01	2.27		1.27	36.83	36.89	8144.97	814.50	0.5430	542,997.80		
30.00	0.05	0.01	2.08		1.08	32.40	32.45	7639.70	763.97	0.5093	509,313.15		
31.00	0.05	0.01		1.08	33.48	33.53	7765.29	776.53	0.5177	517,685.69			

Depth	Equation	Remark	ks ₁
2.0-13.0	M = 5.73σ'	Soft Clay	4,980.74
14.0-16.0	M = 15σ'	Medium Clay	ks ₂ 82,212.32
17.0-31.0	M = mσ _v (σ' _v /σ _v) ^{1-a}	Dense Sand	
	m = 400 a = 0.5		

ks - equivalent 4,696.23

ภาพผนวกที่ ๗ รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 12.00 เมตร
ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ตารางช่วยคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction สำหรับ Approach Slab on Pile

Load Area (BxL)	=	2	2	m	DL :	Filled Material	=	6.26	t/m ²
Pile Size	=	0.22	0.22	m		Base Slab	=	0.55	t/m ²
Pile Tip	=	14		m		Asphaltic Conc.	=	0.12	t/m ²
Effective Zone (H/3)	=	4.67		m	LL :		=	1.00	t/m ²
Effective Depth (2H/3)	=	9.33		m	Total Load (Q)		=	31.73	t
Boundary Layer	=	0		m	q ₀		=	7.93	t/m ²

Ref.: Janbu (1963)

Depth m	H (cm)	modulus number	σ _z t/m ²	q ₀ /q	γ _t (t/m ³)	γ' (t/m ³)	σ _{v0} (t/m ²)	σ _t (t/m ²)	M (t/m ²)	M (kg/cm ²)	ks=M/L (kg/cm ³)	ks=M/L (kg/m ³)
0	200.00	0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.0000	-
1.00		Top	0.00	0.00	1.58	0.58	0.58	0.58	0.00	0.00	0.0000	-
2.00		Crust	0.00	0.00		0.58	1.16	1.16	0.00	0.00	0.0000	-
3.00	1100.00	m = 5.73	0.00	0.00	1.64	0.64	1.92	1.92	11.00	1.10	0.0010	1,000.15
4.00			0.00	0.00		0.64	2.56	2.56	14.67	1.47	0.0013	1,333.53
5.00			0.00	0.00	1.63	0.63	3.15	3.15	18.05	1.80	0.0016	1,640.86
6.00			0.00	0.00		0.63	3.78	3.78	21.66	2.17	0.0020	1,969.04
7.00			0.00	0.00	1.51	0.51	3.57	3.57	20.46	2.05	0.0019	1,859.65
8.00			0.00	0.00	1.58	0.58	4.64	4.64	26.59	2.66	0.0024	2,417.02
9.00			0.00	0.00		0.55	4.95	4.95	28.36	2.84	0.0026	2,578.50
9.33			7.93	1.00	1.55	0.55	5.13	13.07	74.86	7.49	0.0068	6,805.85
10.00			4.46	0.56		0.55	5.50	9.96	57.08	5.71	0.0052	5,189.17
11.00			2.36	0.30	1.59	0.59	6.49	8.85	50.71	5.07	0.0046	4,610.01
12.00			1.46	0.18	1.75	0.75	9.00	10.46	59.92	5.99	0.0054	5,447.09
13.00	0.99	0.12	1.84	0.84	10.92	11.91	68.23	6.82	0.0062	6,203.02		
14.00	300.00	15.00	0.71	0.09	2.07	0.84	11.76	12.47	187.11	18.71	0.0624	62,369.40
15.00		Medium	0.54	0.07		1.07	16.05	16.59	248.85	24.88	0.0829	82,948.98
16.00		clay	0.42	0.05		1.07	17.12	17.54	263.14	26.31	0.0877	87,712.07
17.00	1500.00	400.00 σ _a = 11.24 t/m ²	0.34	0.04	2.19	1.07	18.19	18.53	5772.65	577.27	0.3848	384,843.53
18.00			0.28	0.04		1.19	21.42	21.70	6246.86	624.69	0.4165	416,457.17
19.00			0.23	0.03		1.19	22.61	22.84	6409.45	640.94	0.4273	427,296.61
20.00			0.20	0.02	2.19	1.19	23.80	24.00	6569.44	656.94	0.4380	437,962.73
21.00			0.17	0.02	2.09	1.09	22.89	23.06	6439.79	643.98	0.4293	429,319.21
22.00			0.15	0.02	2.09	1.09	23.98	24.13	6587.18	658.72	0.4391	439,145.07
23.00			0.13	0.02	2.19	1.19	27.37	27.50	7032.40	703.24	0.4688	468,826.82
24.00			0.11	0.01	2.19	1.19	28.56	28.67	7181.07	718.11	0.4787	478,737.78
25.00			0.10	0.01	2.27	1.27	31.75	31.85	7568.49	756.85	0.5046	504,565.90
26.00			0.09	0.01	2.27	1.27	33.02	33.11	7716.67	771.67	0.5144	514,444.35
27.00			0.08	0.01	2.28	1.28	34.56	34.64	7893.05	789.30	0.5262	526,203.30
28.00			0.07	0.01	2.28	1.28	35.84	35.91	8036.68	803.67	0.5358	535,778.77
29.00			0.07	0.01	2.27	1.27	36.83	36.90	8145.96	814.60	0.5431	543,063.82
30.00			0.06	0.01	2.08	1.08	32.40	32.46	7640.63	764.06	0.5094	509,375.30
31.00	0.06	0.01	2.08	1.08	33.48	33.54	7766.10	776.61	0.5177	517,739.98		

Depth	Equation	Remark	ks ₁
2.0-13.0	M = 5.73σ'	Soft Clay	5,651.03
14.0-16.0	M = 15σ'	Medium Clay	77,676.82
17.0-31.0	M = mσ _v (σ _v /σ _s) ^{1-a}	Dense Sand	400,650.35
	m = 400		
	a = 0.5		
k _s - equivalent			5,199.43

ภาพผนวกที่ ค8 รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 14.00 เมตร
ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ตารางช่วยคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction สำหรับ Approach Slab on Pile

Load Area (BxL)	=	2	2	m	DL :	Filled Material	=	6.42	t/m ²
Pile Size	=	0.22	0.22	m		Base Slab	=	0.55	t/m ²
Pile Tip	=	16		m		Asphaltic Conc.	=	0.12	t/m ²
Effective Zone (H/3)	=	5.33		m	LL :		=	1.00	t/m ²
Effective Depth (2H/3)	=	10.67		m	Total Load (Q)		=	32.37	t
Boundary Layer	=	0		m	q ₀		=	8.09	t/m ²

Ref: Janbu (1963)

Depth m	H (cm)	modulus number	σ _z t/m ²	q _g /q	γ _t (t/m ³)	γ' (t/m ³)	σ _{v0} (t/m ²)	σ _{v1} (t/m ²)	M	M	ks=M/L (kg/cm ³)	ks=M/L (kg/m ³)
0	200.00	0.00	0.00	0.00	1.58	0.58	0.58	0.58	0.00	0.00	0.0000	-
1.00		Top	0.00	0.00					0.00	0.00	0.0000	-
2.00		Crust	0.00	0.00					0.00	0.00	0.0000	-
3.00	1100.00	m = 5.73 Soft to clay	0.00	0.00	1.64	0.64	1.92	1.92	11.00	1.10	0.0010	1,000.15
4.00			0.00	0.00		0.64	2.56	2.56	14.67	1.47	0.0013	1,333.53
5.00			0.00	0.00	1.63	0.63	3.15	3.15	18.05	1.80	0.0016	1,640.86
6.00			0.00	0.00		0.63	3.78	3.78	21.66	2.17	0.0020	1,969.04
7.00			0.00	0.00	1.51	0.51	3.57	3.57	20.46	2.05	0.0019	1,859.65
8.00			0.00	0.00	1.58	0.58	4.64	4.64	26.59	2.66	0.0024	2,417.02
9.00			0.00	0.00	1.55	0.55	4.95	4.95	28.36	2.84	0.0026	2,578.50
10.00			0.00	0.00		0.55	5.50	5.50	31.52	3.15	0.0029	2,865.00
10.67			8.09	1.00	1.59	0.59	6.29	14.39	82.43	8.24	0.0075	7,493.45
11.00			5.95	0.73		0.59	6.49	12.44	71.25	7.13	0.0065	6,477.58
12.00			2.91	0.36	1.75	0.75	9.00	11.91	68.26	6.83	0.0062	6,205.65
13.00	1.72	0.21	1.84	0.84	10.92	12.64	72.45	7.24	0.0066	6,586.24		
14.00	300.00	15.00	1.14	0.14	2.07	1.07	14.98	16.12	241.77	24.18	0.0806	80,589.69
15.00		Medium clay	0.81	0.10		1.07	16.05	16.86	252.85	25.29	0.0843	84,284.79
16.00		0.60	0.07	1.07		17.12	17.72	265.83	26.58	0.0886	88,609.42	
17.00	1500.00	400.00 σ _a = 11.24 t/m ² Dense to very Dense Sand	0.47	0.06	2.19	1.07	18.19	18.66	5792.33	579.23	0.3862	386,155.57
18.00			0.37	0.05		1.19	21.42	21.79	6260.19	626.02	0.4173	417,345.91
19.00			0.30	0.04	2.09	1.19	22.61	22.91	6419.27	641.93	0.4280	427,951.09
20.00			0.25	0.03		1.19	23.80	24.05	6576.86	657.69	0.4385	438,457.48
21.00			0.21	0.03	2.19	1.09	22.89	23.10	6445.78	644.58	0.4297	429,718.57
22.00			0.18	0.02		1.09	23.98	24.16	6591.89	659.19	0.4395	439,459.60
23.00			0.16	0.02	2.27	1.19	27.37	27.53	7036.02	703.60	0.4691	469,067.86
24.00			0.14	0.02		1.19	28.56	28.70	7184.00	718.40	0.4789	478,933.50
25.00			0.12	0.01	2.27	1.27	31.75	31.87	7570.83	757.08	0.5047	504,721.70
26.00			0.11	0.01		1.27	33.02	33.13	7718.61	771.86	0.5146	514,573.90
27.00			0.10	0.01	2.28	1.28	34.56	34.66	7894.67	789.47	0.5263	526,311.66
28.00			0.09	0.01		1.28	35.84	35.93	8038.06	803.81	0.5359	535,870.60
29.00			0.08	0.01	2.27	1.27	36.83	36.91	8147.14	814.71	0.5431	543,142.57
30.00			0.07	0.01		1.08	32.40	32.47	7641.73	764.17	0.5094	509,448.78
31.00	0.06	0.01	2.08	1.08	33.48	33.54	7767.05	776.71	0.5178	517,803.65		

Depth	Equation	Remark	ks ₁
2.0-13.0	M = 5.73σ'	Soft Clay	6,690.73
14.0-16.0	M = 15σ'	Medium Clay	84,494.63
17.0-31.0	M = mσ _s (σ _v /σ _s) ^{1-a}	Dense Sand	417,477.51
	m = 400		
	a = 0.5		
			ks - equivalent 6,109.07

ภาพผนวกที่ ๑๑ รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 16.00 เมตร
ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ตารางช่วยคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction สำหรับ Approach Slab on Pile

Load Area (BxL)	=	2	2	m	DL :	Filled Material	=	6.6	t/m ²
Pile Size	=	0.22	0.22	m		Base Slab	=	0.55	t/m ²
Pile Tip	=	18		m		Asphaltic Conc.	=	0.12	t/m ²
Effective Zone (H/3)	=	6.00		m	LL :		=	1.00	t/m ²
Effective Depth (2H/3)	=	12.00		m	Total Load(Q)		=	33.09	t
Boundary Layer	=	0		m	q ₀		=	8.27	t/m ²

Ref.: Janbu (1963)

Depth m	H (cm)	modulus number	σ _z t/m ²	q _g /q	γ _t (t/m ³)	γ' (t/m ³)	σ _{vo} (t/m ²)	σ _i (t/m ²)	M (t/m ²)	M (kg/cm ²)	ks=M/L (kg/cm ³)	ks=M/L (kg/m ³)	
0	200.00	0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.0000	-	
1.00		Top	0.00	0.00	1.58		0.58	0.58	0.58	0.00	0.0000	-	
2.00		Crust	0.00	0.00			0.58	1.16	1.16	0.00	0.0000	-	
3.00	1100.00	m = 5.73 Soft to clay	0.00	0.00	1.64		0.64	1.92	1.92	11.00	1.10	0.0010	1,000.15
4.00			0.00	0.00			0.64	2.56	2.56	14.67	1.47	0.0013	1,333.53
5.00			0.00	0.00	1.63		0.63	3.15	3.15	18.05	1.80	0.0016	1,640.86
6.00			0.00	0.00			0.63	3.78	3.78	21.66	2.17	0.0020	1,969.04
7.00			0.00	0.00	1.51		0.51	3.57	3.57	20.46	2.05	0.0019	1,859.65
8.00			0.00	0.00	1.58		0.58	4.64	4.64	26.59	2.66	0.0024	2,417.02
9.00			0.00	0.00			0.55	4.95	4.95	28.36	2.84	0.0026	2,678.50
10.00			0.00	0.00	1.55		0.55	5.50	5.50	31.52	3.15	0.0029	2,865.00
11.00			0.00	0.00	1.59		0.59	6.49	6.49	37.19	3.72	0.0034	3,380.70
12.00			8.27	1.00	1.75		0.75	9.00	17.27	98.97	9.90	0.0090	8,997.14
13.00			3.68	0.44	1.84		0.84	10.92	14.60	83.64	8.36	0.0076	7,603.42
14.00	15.00	0.25	2.07		1.07	14.98	17.05	255.72	25.57	0.0852	85,240.00		
15.00	1.32	0.16	2.07		1.07	16.05	17.37	260.60	26.06	0.0869	86,867.60		
16.00	0.92	0.11			1.07	17.12	18.04	270.59	27.06	0.0902	90,195.56		
17.00	1500.00	400.00 σ _a = 11.24 t/m ² Dense to very Dense Sand	0.68	0.08	2.19		1.07	18.19	18.87	5824.71	582.47	0.3883	388,314.27
18.00			0.52	0.06			1.19	21.42	21.94	6281.04	628.10	0.4187	418,736.20
19.00			0.41	0.05	2.19		1.19	22.61	23.02	6434.01	643.40	0.4289	428,933.87
20.00			0.33	0.04	2.19		1.19	23.80	24.13	6587.64	658.76	0.4392	439,175.87
21.00			0.27	0.03	2.09		1.09	22.89	23.16	6454.24	645.42	0.4303	430,282.37
22.00			0.23	0.03	2.09		1.09	23.98	24.21	6598.40	659.84	0.4399	439,893.24
23.00			0.20	0.02	2.19		1.19	27.37	27.57	7040.90	704.09	0.4694	469,393.52
24.00			0.17	0.02	2.19		1.19	28.56	28.73	7187.90	718.79	0.4792	479,193.32
25.00			0.15	0.02	2.27		1.27	31.75	31.90	7573.88	757.39	0.5049	504,925.38
26.00			0.13	0.02	2.27		1.27	33.02	33.15	7721.11	772.11	0.5147	514,740.98
27.00			0.11	0.01	2.28		1.28	34.56	34.67	7896.75	789.67	0.5264	526,449.77
28.00			0.10	0.01	2.28		1.28	35.84	35.94	8039.80	803.98	0.5360	535,986.38
29.00			0.09	0.01	2.27		1.27	36.83	36.92	8148.61	814.86	0.5432	543,240.92
30.00			0.08	0.01	2.08		1.08	32.40	32.48	7643.10	764.31	0.5095	509,539.76
31.00	0.08	0.01	2.08		1.08	33.48	33.56	7768.23	776.82	0.5179	517,881.86		

Depth	Equation	Remark	k _{s1}
2.0-13.0	M = 5.73σ'	Soft Clay	8,300.28
14.0-16.0	M = 15σ'	Medium Clay	87,434.39
17.0-31.0	M = mσ _s (σ'/σ _u) ^{1-a}	Dense Sand	424,222.64
	m = 400		
	a = 0.5		
			k _s -equivalent 7,447.56

ภาพผนวกที่ ค10 รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 18.00 เมตร
ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ตารางช่วยคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction สำหรับ Approach Slab on Pile

Load Area (BxL)	=	2	2	m	DL :	Filled Material	=	6.78	t/m ²
Pile Size	=	0.26	0.26	m		Base Slab	=	0.55	t/m ²
Pile Tip	=	20		m		Asphaltic Conc.	=	0.12	t/m ²
Effective Zone (H/3)	=	6.67		m	LL :		=	1.00	t/m ²
Effective Depth (2H/3)	=	13.33		m		Total Load (Q)	=	33.81	t
Boundary Layer	=	0		m		q ₀	=	8.45	t/m ²

Ref: Janbu (1963)

Depth m	H (cm)	modulus number	σ_z t/m ²	q_p/q	γ_r (t/m ³)	γ'_r (t/m ³)	σ_{v0} (t/m ²)	σ_r (t/m ²)	M (t/m ²)	M (kg/cm ²)	ks=M/L (kg/cm ³)	ks=M/L (kg/m ³)
0		0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.0000	-
1.00	200.00	Top	0.00	0.00	1.58	0.58	0.58	0.58	0.00	0.00	0.0000	-
2.00		Crust	0.00	0.00		0.58	1.16	1.16	0.00	0.00	0.0000	-
3.00			0.00	0.00	1.64	0.64	1.92	1.92	11.00	1.10	0.0010	1,000.15
4.00		m	0.00	0.00		0.64	2.56	2.56	14.67	1.47	0.0013	1,333.53
5.00		=	0.00	0.00	1.63	0.63	3.15	3.15	18.05	1.80	0.0016	1,640.86
6.00		5.73	0.00	0.00		0.63	3.78	3.78	21.66	2.17	0.0020	1,969.04
7.00			0.00	0.00	1.51	0.51	3.57	3.57	20.46	2.05	0.0019	1,869.65
8.00	1100.00	Soft to clay	0.00	0.00	1.58	0.58	4.64	4.64	26.59	2.66	0.0024	2,417.02
9.00			0.00	0.00	1.55	0.55	4.95	4.95	28.36	2.84	0.0026	2,578.50
10.00			0.00	0.00		0.55	5.50	5.50	31.52	3.15	0.0029	2,865.00
11.00			0.00	0.00	1.59	0.59	6.49	6.49	37.19	3.72	0.0034	3,380.70
12.00			0.00	0.00	1.75	0.75	9.00	9.00	51.57	5.16	0.0047	4,688.18
13.00			0.00	0.00	1.84	0.84	10.92	10.92	62.57	6.26	0.0057	5,688.33
13.33			8.45	1.00		1.07	14.27	22.72	340.78	34.08	0.1136	113,593.33
14.00		15.00	4.75	0.56	2.07	1.07	14.98	19.73	296.01	29.60	0.0987	98,671.25
15.00	300.00	Medium clay	2.51	0.30		1.07	16.05	18.56	278.47	27.85	0.0928	92,823.22
16.00			1.55	0.18		1.07	17.12	18.67	280.09	28.01	0.0934	93,362.04
17.00			1.05	0.12		1.07	18.19	19.24	5882.71	588.27	0.3922	392,180.97
18.00			0.76	0.09	2.19	1.19	21.42	22.18	6315.83	631.58	0.4211	421,055.47
19.00		400.00	0.58	0.07		1.19	22.61	23.19	6457.26	645.73	0.4305	430,484.14
20.00		$\sigma_a =$	0.45	0.05	2.19	1.19	23.80	24.25	6603.89	660.39	0.4403	440,259.48
21.00		11.24	0.36	0.04	2.09	1.09	22.89	23.25	6466.53	646.65	0.4311	431,102.12
22.00		t/m2	0.30	0.04		1.09	23.98	24.28	6607.57	660.76	0.4405	440,504.81
23.00			0.25	0.03	2.19	1.19	27.37	27.62	7047.62	704.76	0.4698	469,841.13
24.00	1500.00		0.21	0.02		1.19	28.56	28.77	7193.14	719.31	0.4795	479,542.62
25.00			0.18	0.02		1.27	31.75	31.93	7577.91	757.79	0.5052	505,194.01
26.00			0.16	0.02	2.27	1.27	33.02	33.18	7724.36	772.44	0.5150	514,957.66
27.00		Dense to	0.14	0.02	2.28	1.28	34.56	34.70	7899.39	789.94	0.5266	526,826.24
28.00		very Dense	0.12	0.01		1.28	35.84	35.96	8041.99	804.20	0.5361	536,132.39
29.00		Sand	0.11	0.01	2.27	1.27	36.83	36.94	8150.45	815.05	0.5434	543,363.50
30.00			0.10	0.01	2.08	1.08	32.40	32.50	7644.78	764.48	0.5097	509,651.95
31.00			0.09	0.01		1.08	33.48	33.57	7769.66	776.97	0.5180	517,977.39

Depth	Equation	Remark
2.0-13.0	M = 5.73σ'	Soft Clay
14.0-16.0	M = 15σ'	Medium Clay
17.0-31.0	M = mσ _v (σ _v /σ _a) ^{1-a}	Dense Sand
	m = 400	
	a = 0.5	

k_{s1} 99,612.46

k_{s2} 438,121.34

k_y-equivalent 81,159.76

ภาพผนวกที่ ค11 รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction กรณีเสาเข็มยาว 20.00 เมตร
ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

ตารางช่วยคำนวณค่า Modulus of Subgrad Reaction สำหรับ Approach Slab on Pile

Load Area (BxL)	=	2	2	m	DL :	Filled Material	=	7.2	t/m ²
Pile Size	=	0.26	0.26	m		Base Slab	=	0.55	t/m ²
Pile Tip	=	22		m		Asphaltic Conc.	=	0.12	t/m ²
Effective Zone (H/3)	=	7.33		m	LL :		=	1.00	t/m ²
Effective Depth (2H/3)	=	14.67		m	Total Load (Q)		=	35.49	t
Boundary Layer	=	-		m	q ₀		=	8.87	t/m ²

Ref.: Janbu (1963)

Depth m	H (cm)	modulus number	σ _z t/m ²	q _p /q _s	γ _t	γ' (t/m ²)	σ _{v0} (t/m ²)	σ _t (t/m ²)	M (t/m ²)	M (kg/cm ²)	ks=M/L (kg/cm ³)	ks=M/L (kg/m ³)
0		0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.0000	-
1.00	200.00	Top	0.00	0.00	1.58	0.58	0.58	0.58	0.00	0.00	0.0000	-
2.00		Crust	0.00	0.00		0.58	1.16	1.16	0.00	0.00	0.0000	-
3.00			0.00	0.00		0.64	1.92	1.92	11.00	1.10	0.0010	1,000.15
4.00		m	0.00	0.00	1.64	0.64	2.56	2.56	14.67	1.47	0.0013	1,333.53
5.00		=	0.00	0.00		0.63	3.15	3.15	18.05	1.80	0.0016	1,640.86
6.00		5.73	0.00	0.00	1.63	0.63	3.78	3.78	21.66	2.17	0.0020	1,969.04
7.00			0.00	0.00	1.51	0.51	3.57	3.57	20.46	2.05	0.0019	1,859.65
8.00	1100.00	Soft to clay	0.00	0.00	1.58	0.58	4.64	4.64	26.59	2.66	0.0024	2,417.02
9.00			0.00	0.00		0.55	4.95	4.95	28.36	2.84	0.0026	2,578.50
10.00			0.00	0.00	1.55	0.55	5.50	5.50	31.52	3.15	0.0029	2,865.00
11.00			0.00	0.00	1.59	0.59	6.49	6.49	37.19	3.72	0.0034	3,380.70
12.00			0.00	0.00	1.75	0.75	9.00	9.00	51.57	5.16	0.0047	4,688.18
13.00			0.00	0.00	1.84	0.84	10.92	10.92	62.57	6.26	0.0057	5,688.33
14.00		15.00	0.00	0.00		1.07	14.98	14.98	224.70	22.47	0.0749	74,900.00
14.67	300.00	Medium clay	8.87	1.00	2.07	1.07	15.69	24.57	368.48	36.85	0.1228	122,826.67
15.00			6.52	0.73		1.07	16.05	22.57	338.52	33.85	0.1128	112,841.02
16.00			3.19	0.36		1.07	17.12	20.31	304.71	30.47	0.1016	101,569.60
17.00			1.89	0.21		1.07	18.19	20.08	6009.30	600.93	0.4006	400,619.97
18.00			1.25	0.14	2.19	1.19	21.42	22.67	6384.78	638.48	0.4257	425,652.21
19.00		400.00	0.88	0.10		1.19	22.61	23.49	6500.23	650.02	0.4333	433,348.43
20.00		σ _a =	0.66	0.07	2.19	1.19	23.80	24.46	6632.40	663.24	0.4422	442,159.78
21.00		11.24	0.51	0.06	2.09	1.09	22.89	23.40	6487.25	648.72	0.4325	432,483.31
22.00		t/m ²	0.41	0.05		1.09	23.98	24.39	6622.56	662.26	0.4415	441,503.89
23.00			0.33	0.04	2.19	1.19	27.37	27.70	7058.32	705.83	0.4706	470,554.82
24.00	1500.00	Dense to very Dense Sand	0.28	0.03		1.19	28.56	28.84	7201.33	720.13	0.4801	480,068.81
25.00			0.23	0.03	2.27	1.27	31.75	31.98	7584.11	758.41	0.5056	505,607.54
26.00			0.20	0.02		1.27	33.02	33.22	7729.31	772.93	0.5153	515,287.04
27.00			0.17	0.02	2.28	1.28	34.56	34.73	7903.38	790.34	0.5269	526,891.75
28.00			0.15	0.02		1.28	35.84	35.99	8046.25	804.53	0.5364	536,350.25
29.00			0.13	0.01	2.27	1.27	36.83	36.96	8153.18	815.32	0.5435	543,545.17
30.00			0.12	0.01	2.08	1.08	32.40	32.52	7647.26	764.73	0.5098	509,817.33
31.00			0.11	0.01		1.08	33.48	33.59	7771.76	777.18	0.5181	518,117.59

Depth	Equation	Remark
2.0-13.0	M = 5.73σ' _t	Soft Clay
14.0-16.0	M = 15σ' _t	Medium Clay
17.0-31.0	M = mσ' _s (σ' _v /σ' _s) ^{1-a}	Dense Sand
	m = 300	
	a = 0.5	

k_{s1} 112,412.43

k_{s2} 454,730.58

k_s-equivalent 90,131.36

ภาพผนวกที่ ค12 รายการคำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction กรณีเสาเข็มยาว 22.00 เมตร
ของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile



ภาคผนวก

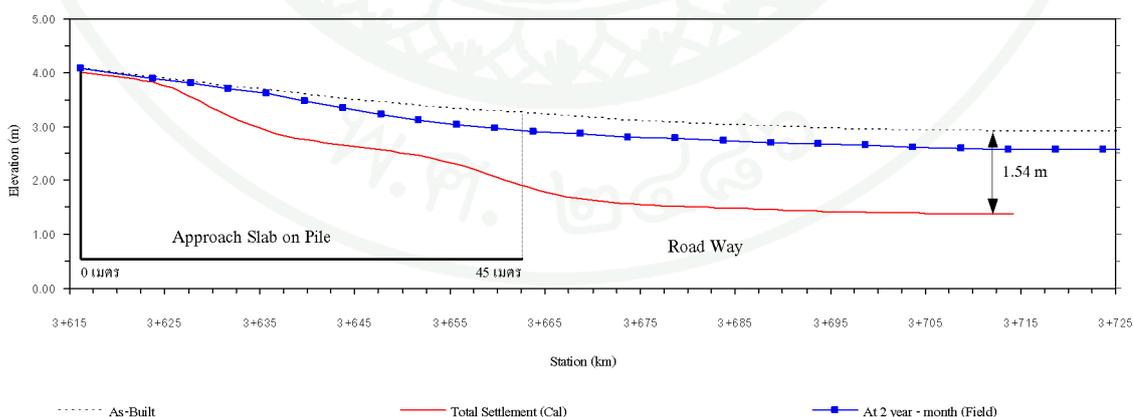
รายการคำนวณออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile

รายการคำนวณออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวบริเวณคอสะพานแบบ Approach on Pile

การคำนวณออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวกำหนดให้ใช้เสาเข็มตอก \square - 26.0x26.0 เซนติเมตร ในกรณีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินแข็งและ \square - 22.0x22.0 เซนติเมตร กรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินอ่อนระยะห่างเสาเข็มเท่ากับ 2 เมตร หน่วยน้ำหนักของดินถมเท่ากับ 2000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คอนกรีตและแอสฟัลติกคอนกรีตเท่ากับ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

วิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้แบบจำลองคานบนฐานยืดหยุ่น (Beam on Elastic Foundation) โดยให้ฐานรองรับที่จุดต่อเป็นแบบสปริง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร (Dead Load + Live Load) กำหนดใต้น้ำหนักจรเท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร กำลัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน เท่ากับ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Cylinder) ซึ่งรายละเอียดการคำนวณมีดังนี้

1. การคำนวณการทรุดตัวของโครงสร้างปรับการทรุดตัวและคันทางของถนนโดยกำหนดให้ ความสูงของดินถมที่ตำแหน่งติดกับสะพานเท่ากับ 3.60 เมตร ที่ตำแหน่งปลายโครงสร้างปรับการทรุดตัวเชื่อมกับถนนและคันทางเท่ากับ 2.50 เมตร ความหนาของผิวทางคอนกรีตเท่ากับ 0.25 เมตร ความหนาพื้นคอนกรีตของโครงสร้างปรับการทรุดตัวเท่ากับ 0.23 เมตร ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง Beam on Elastic Foundation มีค่าเท่ากับ 1.54 เมตร ดังแสดงในภาพผนวกที่ 1

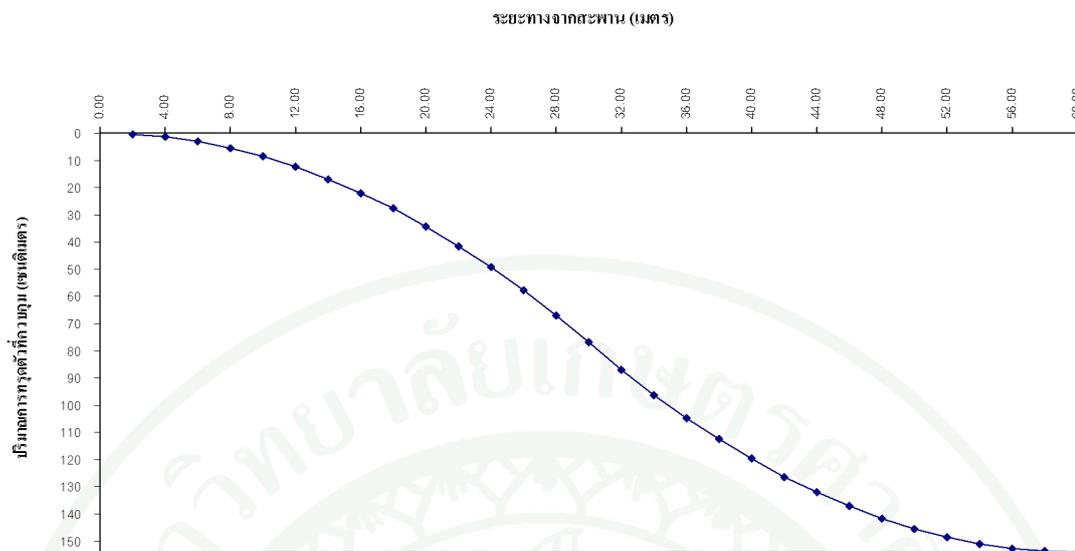


ภาพผนวกที่ 1 ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างปรับการทรุดตัวและคันทางของโครงสร้างแบบ Approach Slab on Pile

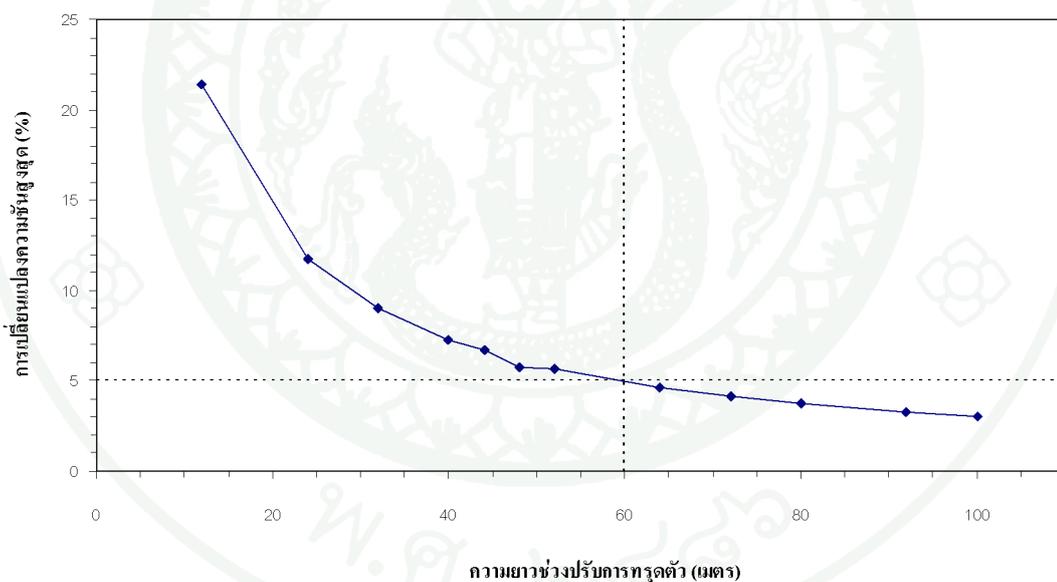
2. คำนวณหาความยาวช่วงปรับการหยุดตัวตามหลักการออกแบบโค้งวงกลม ที่ทำให้ความชันช่วงปรับการหยุดตัวไม่เกิน 5 % ซึ่งมีค่าเท่ากับ 60 เมตร และค่าระดับหลังทางที่ควบคุมให้เกิดความสม่ำเสมอและรักษาระยะ Stopping Sign Distance ดังแสดงในตารางผนวกที่ ง1 ภาพผนวกที่ ง 2 และภาพผนวกที่ ง3

ตารางผนวกที่ ง1 ระดับควบคุมการหยุดตัวและการเปลี่ยนแปลงความชันทุกๆ 2 เมตร

ระยะทางจาก สะพาน (m)	ปริมาณการหยุด ตัวควบคุม (cm)	การเปลี่ยนแปลงความชัน (%)	ระยะทางจาก สะพาน (m)	ปริมาณการหยุดตัว ควบคุม (cm)	การเปลี่ยนแปลง ความชัน (%)
0	0.00	0.00	32	86.92	4.96
2	0.34	0.17	34	96.16	4.62
4	1.37	0.51	36	104.72	4.28
6	3.08	0.86	38	112.59	3.94
8	5.48	1.20	40	119.78	3.59
10	8.56	1.54	42	126.28	3.25
12	12.32	1.88	44	132.10	2.91
14	16.77	2.22	46	137.23	2.57
16	21.90	2.57	48	141.68	2.22
18	27.72	2.91	50	145.44	1.88
20	34.22	3.25	52	148.52	1.54
22	41.41	3.59	54	150.92	1.20
24	49.28	3.94	56	152.63	0.86
26	57.84	4.28	58	153.66	0.51
28	67.08	4.62	60	154	0.17
30	77.00	4.96			



ภาพผนวกที่ 2 แสดงระดับควบคุมการจราจรของคันทางบริเวณคอสะพาน

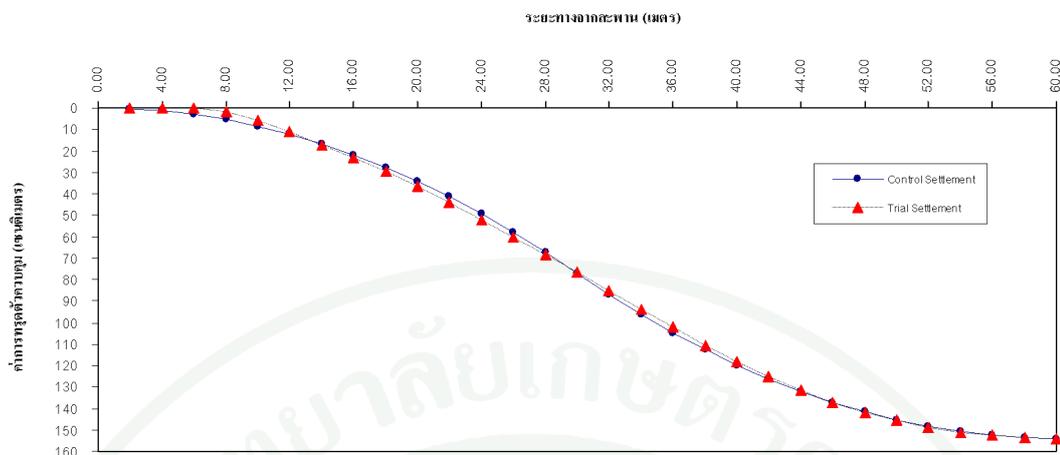


ภาพผนวกที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่วงปรับการจราจรกับการเปลี่ยนแปลงความชันสูงสุด (ค่าการจราจรของคันทางเท่ากับ 1.54 เมตร)

3. วิเคราะห์โครงสร้างโดยหาค่าสถิติเนสของสปริงที่ทำให้ค่าการจราจรที่ตำแหน่งต่างๆ ใกล้เคียงเคียงกับค่าการจราจรควบคุม ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางผนวกที่ 2 และภาพผนวกที่ 4

ตารางผนวกที่ ๒ เปรียบเทียบค่าจากการคำนวณทาง Geometric Design กับการวิเคราะห์

คำนวณทาง Geometric Design			การวิเคราะห์โครงสร้าง		
ระยะทาง (m)	ทรุดตัวควบคู่(cm)	ความชัน(%)	การทรุดตัว (cm)	ความชัน (%)	ค่าสติฟเนสสปริง(kN/m)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	35,000.00
2	0.34	0.17	0.11	0.08	
4	1.37	0.51	0.27	0.08	
6	3.08	0.86	0.27	0.00	
8	5.48	1.20	1.52	0.62	1,110.00
10	8.56	1.54	5.73	2.10	
12	12.32	1.88	11.29	2.78	
14	16.77	2.22	17.16	2.94	650.00
16	21.90	2.57	23.27	3.05	
18	27.72	2.91	29.65	3.19	
20	34.22	3.25	36.64	3.49	300.00
22	41.41	3.59	44.31	3.83	
24	49.28	3.94	52.15	3.92	
26	57.84	4.28	60.03	3.94	
28	67.08	4.62	68.15	4.06	200.00
30	77.00	4.96	76.61	4.23	
32	86.92	4.96	85.17	4.28	
34	96.16	4.62	93.76	4.29	150.00
36	104.72	4.28	102.27	4.26	
38	112.59	3.94	110.47	4.10	
40	119.78	3.59	118.21	3.87	120.00
42	126.28	3.25	125.37	3.58	
44	132.10	2.91	131.73	3.18	
46	137.23	2.57	137.25	2.76	110.00
48	141.68	2.22	141.91	2.33	
50	145.44	1.88	145.73	1.91	
52	148.52	1.54	148.78	1.52	100.00
54	150.92	1.20	151.09	1.16	
56	152.63	0.86	152.68	0.79	
58	153.66	0.51	153.61	0.47	
60	154.00		154.02	0.20	



ภาพผนวกที่ 4 เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวควบคุมกับค่าการทรุดตัวจากการหาค่าสติฟเนสของสปริง

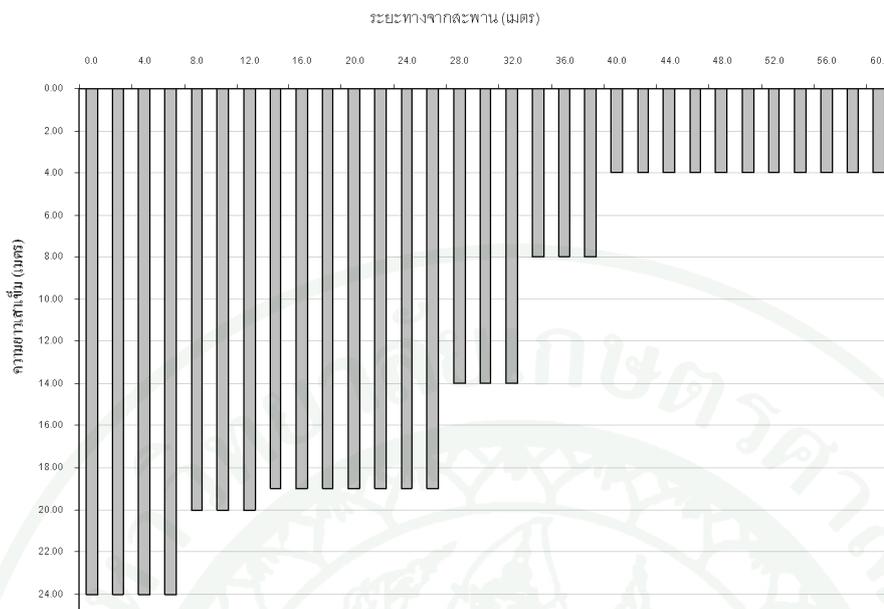
4. ผลการออกแบบความยาวเสาเข็มที่ตำแหน่งต่างๆแสดงในตารางผนวกที่ 3 โดยเลือกค่าสติฟเนสของสปริงจากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงดินถมคันทางกับความยาวเสาเข็มและค่าสติฟเนสของสปริงดังแสดงในตารางผนวกที่ 4 ให้ค่าใกล้เคียงกับข้อ 3

ตารางผนวกที่ 3 แสดงค่าความยาวเสาเข็มและสติฟเนสของสปริงที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile

ระยะทางจากสะพาน (m)	ค่าสติฟเนสของสปริงจากการหาค่า (kN/m)	ค่าสติฟเนสของสปริงออกแบบ (kN/m)	ความยาวเสาเข็มออกแบบ (m)
0-6	35,000.00	4,049.49	24
8-12	1,110.00	3,198.82	20
14-18	650.00	337.54	19
20-26	300.00	337.54	19
28-32	200.00	205.97	14
34-38	150.00	155.09	8
40-44	120.00	126.90	4
46-50	110.00	107.76	4
52-60	100.00	107.76	4

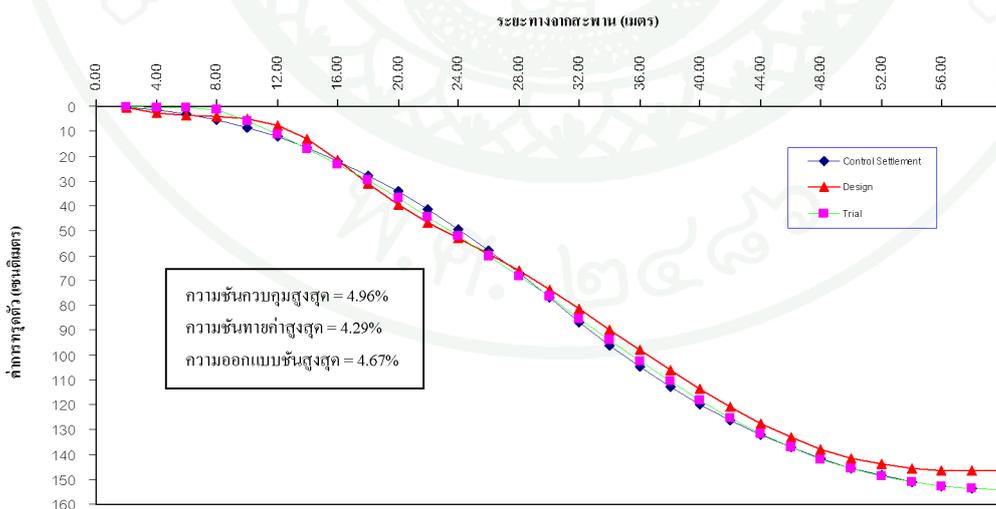
ตารางผนวกที่ 4 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความสูงดินถมคันทางกับความยาวเสาเข็ม
และค่าสตีเฟนของสปริง

Pile Leng (m)	K (kN/m) (H =1.0 m)	K (kN/m) (H=2.0 m)	K (kN/m) (H=3.0)	K (kN/m) (H=4.0)
4	92.15	107.706	126.90	138.98
5	99.20	113.05	126.90	140.75
6	106.85	119.41	131.97	144.53
7	116.96	130.92	144.89	158.85
8	130.30	142.70	155.09	167.49
9	135.96	148.52	161.08	173.64
10	146.51	159.1	171.70	184.15
11	153.70	166.23	178.67	191.02
12	161.74	174.59	187.34	200.01
13	166.28	181.72	197.00	212.11
14	174.74	190.44	205.97	221.34
15	187.80	204.58	221.18	237.61
16	198.95	219.65	240.10	260.30
17	214.24	236.32	258.11	279.65
18	240.14	265.47	290.46	315.15
19	263.38	293.35	322.91	352.07
20	2,916.97	3,059.12	3,198.82	3,336.14
21	3,009.83	3,165.54	3,318.35	3,468.36
22	3,121.66	3,312.47	3,498.96	3,681.32
23	3,234.12	3,445.52	3,651.74	3,853.03
24	3,399.81	3,665.68	3,923.48	4,173.66



ภาพผนวกที่ ๕ การออกแบบความยาวเสาเข็มของโครงสร้างปรับการทรุดตัวแบบ Approach Slab on Pile

5. วิเคราะห์โครงสร้างเพื่อตรวจสอบค่าการทรุดตัวและความชันของโครงสร้างปรับการทรุดตัวจากการออกแบบกับค่าที่กำหนดไว้ดังแสดงในภาพผนวกที่ ๖ และตารางผนวกที่ ๕



ภาพผนวกที่ ๖ เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวควบคุมกับค่าการทรุดตัวจากการออกแบบ

ตารางผนวกที่ 5 เปรียบเทียบค่าจากการคำนวณทาง Geometric Design กับการออกแบบ

ระยะทางจากสะพาน (m)	คำนวณทาง Geometric Design		ออกแบบ	
	การทรุดตัว ควบคุม (cm)	ความชัน (%)	การทรุดตัว (cm)	ความชัน (%)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.34	0.17	0.24	0.18
4	1.37	0.51	2.48	1.12
6	3.08	0.86	3.71	0.62
8	5.48	1.20	4.26	0.27
10	8.56	1.54	5.12	0.43
12	12.32	1.88	7.58	1.23
14	16.77	2.22	13.05	2.73
16	21.90	2.57	21.65	4.30
18	27.72	2.91	30.99	4.67
20	34.22	3.25	39.45	4.23
22	41.41	3.59	46.65	3.60
24	49.28	3.94	52.99	3.17
26	57.84	4.28	59.20	3.10
28	67.08	4.62	65.95	3.38
30	77.00	4.96	73.50	3.77
32	86.92	4.96	81.50	4.00
34	96.16	4.62	89.76	4.13
36	104.72	4.28	98.08	4.16
38	112.59	3.94	106.18	4.05
40	119.78	3.59	113.89	3.86
42	126.28	3.25	121.09	3.60
44	132.10	2.91	127.55	3.23
46	137.23	2.57	133.19	2.82
48	141.68	2.22	137.87	2.34
50	145.44	1.88	141.47	1.80
52	148.52	1.54	143.99	1.26
54	150.92	1.20	45.56	0.78
56	152.63	0.86	146.35	0.40
58	153.66	0.51	146.57	0.11
60	154.00		146.39	

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นาย กฤษณ์ เสาเวียง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	7 มีนาคม 2521
สถานที่เกิด	จังหวัดศรีสะเกษ
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (โยธา) มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี ปีการศึกษา 2545
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการวิจัยสำนักงานคณะกรรมการแห่งชาติ (วช.)