



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

ปริญญา

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเกิดร่องน้ำเนื่องจากการกัดเซาะด้วยการไหลซึมแบบสามมิติ

Channelization Due to Seepage Erosion in Three Dimensions

นามผู้วิจัย นายพีรพล แก้วนนท์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ยรรรณดี ไทยสยาม, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รอง

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อดิษฐ์ พรพรหมินทร์, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นภาพร เปี่ยมสง่า, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเกิดร่องน้ำเนื่องจากการกัดเซาะด้วยการไหลซึมแบบสามมิติ

Channelization Due to Seepage Erosion in Three Dimensions

โดย

นายพีรพล แก้วนนท์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิรพล แก้วนนท์ 2555: การเกิดร่องน้ำเนื่องจากการกัดเซาะด้วยการไหลซึมแบบสามมิติ
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) สาขาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ
ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์วรัณดี ไทยสยาม, Ph.D. 136 หน้า

การไหลซึมของน้ำใต้ดินส่งผลให้เกิดการกัดเซาะเม็ดดินที่บริเวณลาดดินที่น้ำไหลซึมออก
และทำให้ลาดดินขาดเสถียรภาพและพังทลายลงได้ ถ้าขบวนการกัดเซาะบริเวณลาดดินเกิดขึ้นอย่าง
ต่อเนื่องจะส่งผลให้เกิดการพัฒนาขึ้นของร่องน้ำ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเกิดร่องน้ำ
และรูปแบบร่องน้ำเนื่องจากการไหลซึมของน้ำใต้ดิน โดยการทดลองแบบสามมิติของการเกิดร่องน้ำ
ในห้องปฏิบัติการถูกสร้างขึ้นโดยใช้อ่างทดลองขนาด $1.00 \times 2.20 \times 0.225$ เมตร และใช้ตัวอย่างทราย
2 ชนิด ซึ่งมีค่า D_{50} เท่ากับ 0.56 และ 0.86 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยการทดลองได้ศึกษาปัจจัยของ
ความลาดชันท้องน้ำและระดับน้ำใต้ดินที่มีผลต่อขบวนการกัดเซาะของลาดดิน และการพัฒนาของ
ร่องน้ำ จากผลการทดลองพบว่าเม็ดทรายขนาดใหญ่ส่งผลต่อความเป็นวงกลม (circularity) ของร่อง
น้ำมากกว่าเม็ดทรายขนาดเล็ก เนื่องจากการเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง (bifurcation) ซึ่งเกิดขึ้นกรณี
ทรายเม็ดใหญ่เท่านั้น การพังทลายลาดดิน (mass failure) เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการไหลซึมของน้ำ
ใต้ดินส่งผลให้การถดถอยของหัวร่องน้ำเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และค่อนข้างคงที่เมื่อเวลานานมากขึ้น
นอกจากนี้ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำที่สูงขึ้นทำให้อัตราการไหลของน้ำใต้ดินสูงขึ้น
ส่งผลให้ความกว้างของร่องน้ำกว้างขึ้น ในขณะที่ความลึกของร่องน้ำด้านท้ายน้ำพบว่ามีค่าลึก
น้อยลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากการตกทับถมของตะกอนแบบใบพัด (alluvial fan) บริเวณด้านท้าย
น้ำของร่องน้ำ

Peerapon Kaewnon 2012: Channelization Due to Seepage Erosion in Three Dimensions.
Master of Engineering (Water Resources Engineering), Major Field: Water Resources
Engineering, Department of Water Resources Engineering. Thesis Advisor:
Miss. Wandee Thaisiam, Ph.D. 136 pages.

Seepage of groundwater causes soil piping at the scarp which results in the instability of the scarp and finally leads to the mass failure. If the mass failure at the scarp proceeds continuously, the channel could be developed. The purpose of this study is to investigate the channelization and channel characteristics due to seepage erosion. A three-dimensional laboratory experiment of channelization is performed in a chamber of 1.00 m x 2.20 m x 0.225 m. Two sizes of cohesionless soil ($D_{50} = 0.56$ mm and 0.86 mm) are employed in this study. The experiments are conducted in order to explore the effects of bed slope and groundwater head to seepage erosion and channelization process. Our results show that larger grain size displays more influence on the circularity of the channel than smaller grain size does since there is a bifurcation for large grain size only. In addition, the continuation of mass failure caused by seepage flow also results in a prolonged retreat of channel head and becomes rather steady with time. Moreover, the groundwater head and the increasing slope of channel bed allow greater flow for underground water. Consequently, the channel is wider while the depth of downstream channel becomes shallower as time passes because of the occurrence of alluvial fan at the downstream channel.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์วรรณดี ไทยสยาม ที่ปรึกษาหลักและผู้ช่วยศาสตราจารย์อดิษฐ์ พรพรหมินทร์ ที่ปรึกษารอง ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ นายพล สังขมณีและนายวิโรจน์ ศรีอัฐ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์บางเขน ที่คอยช่วยเหลือและแนะนำการใช้อุปกรณ์การทดลองในงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จากประสบการณ์ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ทำให้ผู้วิจัยได้เรียนรู้ถึงประโยชน์จากการทำวิจัยในครั้งนี้ที่ต้องใช้ความอดทน ความพากเพียรพยายามและความมุ่งมั่นจึงทำให้งานวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จด้วยดีซึ่งความสำเร็จและคุณค่าของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่ บิดา มารดา ซึ่งส่งเสริมให้การศึกษา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถและประสบผลสำเร็จในการศึกษาถึงขั้นนี้ได้

พีรพล แก้วนนท์
กันยายน 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
วิธีการ	35
ผลและวิจารณ์	45
ผล	45
วิจารณ์	89
สรุปและข้อเสนอแนะ	91
สรุป	91
ข้อเสนอแนะ	92
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	93
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก การหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis)	97
ภาคผนวก ข การหาความซึมผ่านของดิน (Soil Permeability Test)	106
ภาคผนวก ค การทดลองการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมของน้ำใต้ดิน	111
ภาคผนวก ง ผลการทดลองการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมของน้ำใต้ดิน	114
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	136

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินชนิดต่างๆ	16
2	ค่าการทดสอบหาขนาดผลของเม็ดทราย	35
3	ค่ามุมทรงตัวของเม็ดทราย	36
4	ค่าการทดสอบความชื้นน้ำของเม็ดทราย	36
5	สรุปการศึกษากรณีระดับน้ำใต้ดินต่างๆในการทดลอง	45
6	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 1	50
7	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2	55
8	อัตราการไหลที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 1	57
9	อัตราการไหลที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2	58
10	ความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 1	64
11	ความกว้างบริเวณกึ่งกลางความยาวน้ำร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 1	64
12	ความกว้างร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2 บริเวณท้ายน้ำ	66
13	ความกว้างบริเวณกึ่งกลางความยาวน้ำร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2	66
14	ความลึกร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 1	70
15	ความลึกร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 1	75
17	ความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2	77
18	พื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการ ทดลองของทรายชนิดที่ 1	80
19	พื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการ ทดลองของทรายชนิดที่ 2	81
20	ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 1	85
21	ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่เวลาร่องน้ำเกิดแยกเป็นสองทางของทรายชนิด ที่ 1	85
22	ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2	87
ตารางผนวกที่		
ก1	การแบ่งชนิดของเม็ดดิน	103

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การแบ่งโซนของน้ำใต้ดิน	6
2	แสดงชั้นน้ำใต้ดินอิสระและน้ำใต้ดินในที่กักขัง	7
3	การไหลซึมของน้ำในแนวเดียวผ่านแท่งดิน	8
4	แสดงเขตของน้ำที่จุดพิจารณา 2 ตำแหน่ง	10
5	แสดงน้ำไหลซึมผ่านตามช่องว่างของอนุภาคเม็ดดิน	11
6	แสดงน้ำไหลซึมผ่านในดิน	11
7	การไหลแบบคงตัวผ่านชั้นน้ำใต้ดินแบบอิสระ	12
8	การไหลตามสมการดูพิท กรณีมีน้ำเติมกลับ (recharge)	14
9	การทดสอบความซึมน้ำโดยวิธีความดันคงที่	15
10	การไหลของน้ำใต้ดินแบบ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ	18
11	ความเร็วการไหลซึมบริเวณลาดดิน	19
12	การพังทลายของลาดดินสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น	21
13	ลักษณะการเคลื่อนพังของลาดดิน	23
14	ขั้นตอนการกัดเซาะด้วยการไหลซึม	25
15	การแบ่งโซนในการทดลองการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมแบบสองมิติ	27
16	การแบ่งช่วงเวลาในการพัฒนาของร่องน้ำ	28
17	วิธีการศึกษา	34
18	อุปกรณ์การทดลอง	37
19	แสดงละเอียดของอุปกรณ์การทดลอง	37
20	แผนการทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง	38
21	การเตรียมสร้างแบบจำลองชั้นทรายในการทดลอง	39
22	การจำลองร่องน้ำเริ่มต้นสำหรับการทดลอง	40
23	แบบจำลองชั้นทรายในการทดลอง	40
24	การระบุพิกัดตำแหน่ง (x,y) ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลในการทดลอง	41

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	การวัดอัตราการไหลบริเวณท้ายน้ำของอ่างทดลอง	42
26	การวัดความลึกร่องน้ำ	43
27	การดิจิทัลข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง	44
28	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1	46
29	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1	46
30	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1	47
31	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1	48
32	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1	49
33	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1	49
34	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2	51
35	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2	51
36	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2	52
37	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2	53
38	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2	54

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2	54
40	อัตราการไหลที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 1	56
41	อัตราการไหลที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 2	58
42	การเปรียบเทียบอัตราการไหลของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0%	59
43	การเปรียบเทียบอัตราการไหลของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3%	59
44	ระยะหัวร่องน้ำเคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 1	60
45	ระยะหัวร่องน้ำเคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 2	61
46	การเปรียบเทียบระยะหัวร่องน้ำเคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0%	62
47	การเปรียบเทียบระยะหัวร่องน้ำเคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3%	62
48	ความกว้างร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 1	63
49	ความกว้างร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 2	65
50	การเปรียบเทียบความกว้างร่องน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0%	67
51	การเปรียบเทียบความกว้างร่องน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3%	68

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
52	ความถี่ร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1	69
53	ความถี่ร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1	69
54	ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางเดียวกันกับการไหลของทรายชนิดที่ 1	72
55	ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของทรายชนิดที่ 1	72
56	ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางเดียวกันกับการไหลของทรายชนิดที่ 1	73
57	ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของทรายชนิดที่ 1	73
58	ความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ ของทรายชนิดที่ 1	75
59	ความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ ของทรายชนิดที่ 2	76
60	การเปรียบเทียบความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0%	78
61	การเปรียบเทียบความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3%	78
62	พื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 1	79
63	พื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 2	81
64	การเปรียบเทียบพื้นที่ร่องน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0%	82

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
65	การเปรียบเทียบพื้นที่ร่องน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3%	83
66	ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1	84
67	ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1	84
68	ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2	86
69	ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2	87
ภาพผนวกที่		
ก1	ตระแกรงแต่ละเบอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	99
ก2	เครื่องเขย่าตะแกรงที่ใช้ในการทดสอบ	100
ก3	การชั่งน้ำหนักทรายแห้งหลังจากเข้าเครื่องเขย่าตะแกรง	101
ก4	กราฟการกระจายขนาดเม็ดดิน	102
ก5	แสดงการคำนวณหาขนาดเม็ดทรายที่ผ่านตระแกรงเบอร์ต่างๆ โดยใช้ excel	104
ก6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตระแกรงกับเปอร์เซ็นต์เม็ดทรายที่ผ่านตระแกรงของเม็ดทรายขนาด 0.5-1.1 มิลลิเมตร	104
ก7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตระแกรงกับเปอร์เซ็นต์เม็ดทรายที่ผ่านตระแกรงของเม็ดทรายขนาด 0.3-0.7 มิลลิเมตร	105
ข1	เครื่องมือการทดสอบค่าความซึมน้ำ	108
ข2	การติดตั้งโมลในการทดสอบค่าความซึมน้ำ	108

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข3 การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเพื่อหาค่าความชื้นน้ำ	109
ข4 การวัดอัตราการไหลของน้ำที่ไหลซึมผ่านเม็دتทราย	110
ข5 แสดงการคำนวณหาค่าความชื้นน้ำของเม็دتทรายโดยใช้ excel	110
ค1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเก็บข้อมูลในการทดลอง	112
ค2 การวัดความลึกร่องน้ำโดยใช้เวอร์เนียแบบสเกล	112
ค3 การปรับภาพที่ถ่ายได้จากกล้อง webcam ด้วยโปรแกรม photoshop	113
ค4 การดิจิทัลซ์ข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง	113
ง1 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำได้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1	115
ง2 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำได้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1	115
ง3 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำได้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1	116
ง4 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำได้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1	116
ง5 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำได้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2	117
ง6 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำได้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2	117
ง7 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำได้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2	118
ง8 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำได้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2	118

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง9 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำได้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2	119
ง10 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำได้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2	119
ง11 ความดันที่ระดับน้ำได้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางเดียวกันกับ การไหลของทรายชนิดที่ 1	120
ง12 ความดันที่ระดับน้ำได้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางตั้งฉากกับ การไหลของทรายชนิดที่ 1	120
ง13 ความดันที่ระดับน้ำได้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางเดียวกันกับ การไหลของทรายชนิดที่ 1	121
ง14 ความดันที่ระดับน้ำได้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางตั้งฉากกับ การไหลของทรายชนิดที่ 1	121
ง15 ความดันที่ระดับน้ำได้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางเดียวกันกับ การไหลของทรายชนิดที่ 1	122
ง16 ความดันที่ระดับน้ำได้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางตั้งฉากกับ การไหลของทรายชนิดที่ 1	122
ง17 ความดันที่ระดับน้ำได้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางเดียวกันกับ การไหลของทรายชนิดที่ 1	123
ง18 ความดันที่ระดับน้ำได้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางตั้งฉากกับ การไหลของทรายชนิดที่ 1	123
ง19 ความดันที่ระดับน้ำได้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางเดียวกันกับ การไหลของทรายชนิดที่ 2	124
ง20 ความดันที่ระดับน้ำได้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางตั้งฉากกับ การไหลของทรายชนิดที่ 2	124

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง21 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางเดียวกับ การไหลของทรายชนิดที่ 2	125
ง22 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางตั้งฉากกับ การไหลของทรายชนิดที่ 2	125
ง23 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางเดียวกับ การไหลของทรายชนิดที่ 2	126
ง24 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางตั้งฉากกับ การไหลของทรายชนิดที่ 2	126
ง25 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางเดียวกับ การไหลของทรายชนิดที่ 2	127
ง26 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางตั้งฉากกับ การไหลของทรายชนิดที่ 2	127
ง27 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางเดียวกับ การไหลของทรายชนิดที่ 2	128
ง28 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางตั้งฉากกับ การไหลของทรายชนิดที่ 2	128
ง29 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางเดียวกับ การไหลของทรายชนิดที่ 2	129
ง30 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางตั้งฉาก กับการไหลของทรายชนิดที่ 2	129
ง31 ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 15 ซม. ความลาดชัน ท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1	130
ง32 ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 15 ซม. ความลาดชัน ท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1	130

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง33	ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 17 ซม. ความลาดชัน ท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1	131
ง34	ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 17 ซม. ความลาดชัน ท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1	131
ง35	ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 19 ซม. ความลาดชัน ท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1	132
ง36	ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 19 ซม. ความลาดชัน ท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1	132
ง37	ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 15 ซม. ความลาดชัน ท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2	133
ง38	ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 15 ซม. ความลาดชัน ท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2	133
ง39	ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 17 ซม. ความลาดชัน ท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2	134
ง40	ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 17 ซม. ความลาดชัน ท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2	134
ง41	ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 19 ซม. ความลาดชัน ท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2	135
ง42	ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 19 ซม. ความลาดชัน ท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2	135

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก
h	=	แรงรวมในรูปความสูงน้ำ
i	=	ความลาดของระดับน้ำ
q	=	ปริมาณการไหลของน้ำผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วย
r	=	ความพรุน
A	=	พื้นที่หน้าตัด
H	=	ความต่างศักย์ระหว่างเหนือน้ำและท้ายน้ำ
K	=	สัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้
L	=	ความยาวของแนวน้ำไหล
P	=	แรงดันน้ำ
Q	=	ปริมาณการไหล
V	=	ความเร็วของการไหล
γ	=	หน่วยน้ำหนักของน้ำ
γ_w	=	หน่วยน้ำหนักของดินในสภาพประสิทธิผล
α	=	มุมลาดดิน
ϕ	=	มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน
λ	=	มุมระหว่างทิศทางการไหลของน้ำที่กระทำต่อเม็ดดินกับแรงตั้งฉากที่กระทำต่อเม็ดดิน
กก.	=	กิโลกรัม
ตร.ม.	=	ตารางเมตร
ซม.	=	เซนติเมตร
ซม. ²	=	ตารางเซนติเมตร
ซม. ³	=	ลูกบาศก์เซนติเมตร
ม.	=	เมตร
ม. ³	=	ลูกบาศก์เมตร

การเกิดร่องน้ำเนื่องจากการกัดเซาะด้วยการไหลซึมแบบสามมิติ

Channelization Due to Seepage Erosion in Three Dimensions

คำนำ

การพังทลายของลาดดินถือเป็นภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสามารถป้องกันได้ค่อนข้างยาก ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นหลังจากที่มวลดินที่ไหลมาตามลาดเขาได้เกิดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งดินถล่มมักเกิดตามมาหลังจากเกิดน้ำป่าไหลหลากบนผิวดิน ในขณะที่เกิดพายุฝนตกหนักรุนแรงต่อเนื่องหรือหลังจากเกิดฝนหนัก เมื่อฝนตกหนักน้ำจะซึมลงไปในดินอย่างรวดเร็วทำให้การอุ้มน้ำของดินจะมีน้อยลงเพราะดินอิ่มตัวจากน้ำในดินที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันระดับน้ำใต้ดิน (groundwater) จะสูงขึ้น น้ำใต้ดินจะไหลภายในช่องว่างระหว่างดินลงไปตามความชันของลาดเขา เมื่อเปลี่ยนความชันก็จะเกิดเป็นน้ำผุดออกมาจากลาดดินซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่มีการพังทลายของลาดดิน พื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มมักเป็นพื้นที่ที่อยู่ตามที่ลาดเชิงเขาหรือพื้นที่ลุ่มที่อยู่ติดกับภูเขาที่มีการพังทลายของดินสูง หรือเป็นแหล่งต้นน้ำที่มีอัตราในการทำลายป่าไม้สูง เป็นภูเขาหรือหน้าผาที่ผุพังง่าย ซึ่งสัญญาณเตือนภัยตามธรรมชาติที่อาจสังเกตได้ก่อนเกิดเหตุการณ์พังทลายลาดดิน เช่น เกิดฝนตกหนักติดต่อกันหลายวันจนดินในพื้นที่ต้นน้ำหรือที่ลาดเขาต้องอุ้มน้ำในปริมาณมาก น้ำในลำห้วยมีสีแดงขุ่นจากตะกอนที่ไหลมาตามลาดเขา มีเสียงดังเหมือนมีน้ำป่ามาหรือเหมือนเสียงต้นไม้ ก้อนหินกลิ้งดังกรีน ๆ เป็นต้น

น้ำใต้ดินที่ไหลซึมออกจากลาดดินเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ลาดดินขาดเสถียรภาพและพังทลายลงได้ เนื่องจากเมื่อดินบริเวณลาดดินสามารถหลุดออกเมื่อได้รับแรงลากและแรงยกจากน้ำใต้ดินที่ไหลซึมออกมา ถ้าเมื่อดินที่หลุดออกถูกพัดพาออกจากลาดดินจะทำให้ขบวนการกัดเซาะของชั้นดินบริเวณลาดดินเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสุดท้ายเกิดเป็นร่องน้ำ เมื่อเกิดร่องน้ำไปเรื่อยๆจะทำให้เกิดทางน้ำไหล ซึ่งทางน้ำไหลเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดเซาะผิวดินบริเวณที่อยู่รอบๆ รุนแรงขึ้น ทำให้เกิดอัตราการไหลของตะกอนสูงขึ้นและตะกอนที่ถูกพัดพามาจะเคลื่อนตัวไปยังท้ายน้ำทำให้ระดับน้ำด้านท้ายน้ำสูงขึ้น ซึ่งมีผลกระทบต่อ การเกษตรกรรม การใช้ที่ดิน และโครงสร้างต่างๆบริเวณนั้น นอกจากนี้ยังทำให้คุณภาพน้ำลดลงอีกด้วยเพราะอาจจะมีการชะล้างผิวดินที่มีสารอาหารและสารกำจัดศัตรูพืชที่ค้างอยู่ลงไปในแหล่งน้ำ จึงจำเป็นต้องเข้าใจการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมในน้ำใต้ดินให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งในปัจจุบันการศึกษาการเกิดร่องน้ำเนื่องจากการกัด

เพราะเนื่องจากการไหลซึมในน้ำใต้ดินมีจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับการเกิดร่องน้ำเนื่องจากการไหลของน้ำผิวดิน



วัตถุประสงค์

1. ศึกษาพฤติกรรมและการเกิดร่องน้ำ รูปร่างและลักษณะของร่องน้ำอันเนื่องมาจากการบีบอัดของขนาดเม็ดทราย ความลาดชันท้องน้ำและระดับน้ำใต้ดิน
2. วิเคราะห์อัตราการไหล ระยะถดถอยของหัวร่องน้ำ ความกว้างร่องน้ำ ความดันน้ำใต้ดิน ความลึกร่องน้ำซึ่งมีผลต่อการเกิดรูปร่างลักษณะของร่องน้ำ
3. วิเคราะห์การพัฒนาร่องน้ำเนื่องจากการกัดเซาะด้วยการไหลซึม โดยใช้ทฤษฎีความเป็นวงกลม (circularity)

ขอบเขตการศึกษา

1. ทบทวนการศึกษาซึ่งเกี่ยวกับการกัดเซาะจนทำให้เกิดร่องน้ำเนื่องจากไหลซึมน้ำใต้ดิน
2. ทำการทดลองการไหลซึมของน้ำใต้ดินที่มีผลต่อการเกิดร่องน้ำแบบ 3 มิติ
3. ประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางกายภาพ (physical theory) ในการวิเคราะห์การเกิดร่องน้ำอันเนื่องจากการไหลซึม
4. ศึกษาปัจจัยของระดับน้ำใต้ดิน ความลาดชันท้องน้ำและขนาดของเม็ดทรายต่อการเกิดร่องน้ำ

การตรวจเอกสาร

1. น้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดินเป็นแหล่งน้ำสำคัญที่นำมาใช้อุปโภคบริโภคในเมืองขนาดเล็กและตามหมู่บ้าน โดยเฉพาะในพื้นที่กึ่งแห้งแล้ง นอกจากนี้ น้ำใต้ดินยังเป็นองค์ประกอบสำคัญในระบบอุทกวิทยา การไหลในแม่น้ำสายใหญ่ส่วนหนึ่งได้มาจากน้ำใต้ดินที่สะสมอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูแล้ง น้ำใต้ดิน คือ น้ำที่ไหลอยู่ในชั้นหินที่เป็นเขตอิมตัวด้วยน้ำ ซึ่งอาจประกอบด้วย ชั้นกรวดทราย หรือชั้นหินเนื้อพรุน ในที่ว่างรอยแตกหรือ โพรงในชั้นหินอย่างใดอย่างหนึ่ง และชั้นน้ำใต้ดินเหล่านี้จะต้องรองรับด้วยหินเนื้อแน่น ไม่ยอมให้น้ำไหลซึม (seepage) ลงไปข้างล่างได้อีกต่อไป แต่น้ำใต้ดินจะมีการเคลื่อน ไหวอยู่ตลอดเวลา ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินนั้นช้ามาก ซึ่งอาจอยู่ในหน่วยของเซนติเมตรต่อวัน หรือในบางบริเวณอาจอยู่ในระดับเมตรหรือเซนติเมตรต่อปี เหตุผลที่ทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินช้ามากเนื่องจากว่า น้ำจะต้องเคลื่อนที่ผ่านช่องทางแคบๆที่อยู่ระหว่างช่องว่างของวัตถุ การไหลของน้ำใต้ดินจะไหลไปสู่ที่ซึ่งมีระดับต่ำ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของภูมิประเทศ และชั้นต่างๆ ของดินในชั้นลึกๆที่สามารถกักเก็บน้ำได้ ชั้นนี้ น้ำซึมผ่านได้ง่าย เช่น ชั้นกรวด ทราย เรียกว่า ชั้นที่น้ำซึมผ่านได้ (permeable layer) ชั้นที่น้ำซึมผ่านได้และชุ่มไปด้วยน้ำใต้ดิน เรียกว่า ชั้นหินอุ้มน้ำ (aquifer) ชั้นดินที่น้ำซึมผ่านได้ยากเช่นชั้นตะกอนหรือดินเหนียวเรียกว่า aquilude สำหรับชั้นที่น้ำซึมผ่าน ไม่ได้เช่นชั้นหินเรียกว่า aquifuge

โกลและคณะ (2523) กล่าวว่าสำหรับ aquifug และ aquilude รวมเรียกว่า ชั้นที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (impermeable impervious layer) ซึ่งแตกต่างจาก aquifer เพราะชั้นหินกักเก็บน้ำอาจจะให้น้ำได้มากเพียงพอหรือไม่เพียงพอใช้สอยได้ ส่วน aquifer จะสามารถกักเก็บน้ำและสามารถจ่ายน้ำให้เพียงพอในการใช้สอย สำหรับคุณสมบัติทางธรณีวิทยาชั้นพื้นฐานของชั้นหินที่จะบ่งให้ทราบว่า เป็นชั้นน้ำใต้ดินที่ได้นั้นได้แก่ ความพรุน (porosity) และความซึมได้ (permeability) ซึ่งความพรุนและความซึมได้ของหินอุ้มน้ำมีส่วนสำคัญยิ่งต่อการเกิดของน้ำใต้ดิน

1.1 การแบ่งโซนของชั้นน้ำใต้ดิน

น้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในเขตอิมตัวด้วยน้ำนี้เรียกว่า น้ำใต้ดิน (groundwater) ซึ่งระดับน้ำใต้ดิน (water table) ณ ระดับน้ำใต้ดินนี้แรงดันน้ำในชั้นหินหรือในชั้นตะกอนจะเท่ากับแรงดันของ

บรรยากาศ และในตำแหน่งที่ลึกลงไปจากระดับน้ำใต้ดิน แรงดันของน้ำจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของน้ำที่กดทับอยู่ ระดับน้ำใต้ดินนี้จะเปลี่ยนแปลงขึ้นลงไปตามฤดูกาล โดยในฤดูแล้ง ระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ลึกกว่าระดับปกติ ระดับน้ำใต้ดินส่วนใหญ่จะเอียงเทหรือวางตัวสอดคล้องไปตามลักษณะภูมิประเทศการแบ่งหิน ชั้นหิน ชั้นตะกอนและชั้นกรวด โดยใช้ระดับน้ำใต้ดินเป็นแนวแบ่งเขต จะแบ่งออกเป็น 2 เขต ดังนี้

1.1.1 เขตสัมพัทธ์อากาศ (zone of aeration) คือ บริเวณที่อยู่ระหว่างผิวดินกับระดับน้ำใต้ดิน (water table) เป็นเขตที่ดินยังไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ช่องว่างระหว่างเม็ดดินจึงมีทั้งอากาศและน้ำ โดยน้ำที่มีอยู่บริเวณนี้ได้ด้วยแรงเกาะติด (adhesion force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำกับเม็ดดินและแรงดูดซับ (capillary force) เรียกว่าน้ำในบริเวณนี้ว่าน้ำในเขตสัมพัทธ์อากาศ (vadose water) ซึ่งน้ำส่วนที่เกาะเม็ดดินเป็นแผ่นบางๆเรียกว่า น้ำเยื่อ (hygroscopic water) เป็นน้ำที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยแรงดึงดูดโลกหรือแรงดูดซับ โดยในเขตสัมพัทธ์อากาศนี้ยังแบ่งได้เป็น 3 เขตย่อย คือ

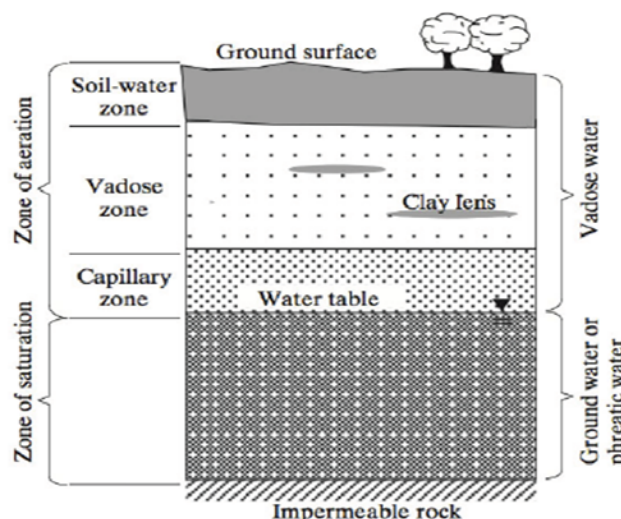
ก. เขตน้ำใต้ดิน (soil water zone) คือ บริเวณจากผิวดินลงไปจนถึงรากไม้สามารถชอนไชลงไปดูดน้ำมาใช้ได้ มีความหนาไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและชนิดของดิน

ข. เขตเชื่อมต่อ (intermediate zone) คือ เขตยังไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (vadose water) คือ บริเวณระหว่างเขตน้ำใต้ดินกับเขตชั้นยกน้ำ (capillary zone) เป็นเขตที่เป็นทางไหลผ่านของน้ำลงเพิ่มน้ำใต้ดินซึ่งพืชไม่สามารถดูดน้ำในบริเวณนี้ไปใช้ได้

ค. เขตชั้นยกน้ำ (capillary zone) คือ บริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งน้ำจะสูงขึ้นตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วยแรงดูดซับ (capillary force) โดยจะมีความสูงของชั้นยกน้ำมากน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและขนาดของเม็ดดิน

1.1.2 เขตอิ่มตัวด้วยน้ำ (zone of saturation) ซึ่งบางครั้งเรียกว่าเขตน้ำใต้ดิน (groundwater zone) น้ำในเขตนี้เป็นน้ำที่เหลือจากการถูกเก็บจาก 3 ชั้นดังกล่าว เขตนี้มักประกอบด้วย ชั้นกรวดทราย (sand & gravel) หรือหินเป็นเนื้อพรุนน้ำซึมได้ (previous rock) หรือที่ว่าง (void) ช่องว่าง (opening) รอยแตก (crack) หรือโพรง (caverns) ในหินอย่างใดอย่างหนึ่ง และเป็นแหล่งกักเก็บน้ำใต้ดินขนาดใหญ่ที่มีระดับน้ำใต้ดินอยู่บนสุด โดยถ้าระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงกว่า

ระดับน้ำในแม่น้ำลำคลองหรือในอ่างเก็บน้ำ น้ำใต้ดินจะทยอยไหลลงแม่น้ำลำคลองหรืออ่างเก็บน้ำ เป็นการเสริมแหล่งน้ำผิวดิน



ภาพที่ 1 การแบ่งโซนของน้ำใต้ดิน

ที่มา: Bedient *et al.* (2008)

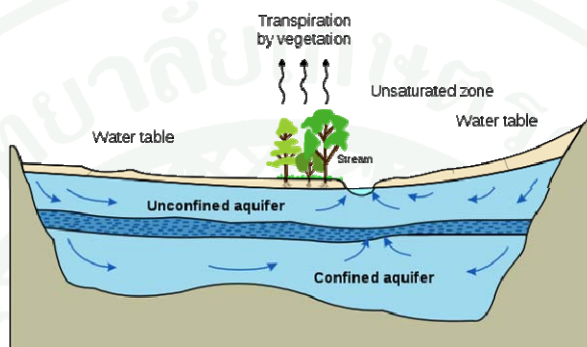
1.2 ชนิดของชั้นน้ำใต้ดิน

ชั้นหินอุ้มน้ำ (aquifer) คือชั้นของหินที่มีรูพรุนซึ่งสามารถกักเก็บน้ำและไหลผ่านรูพรุนเพื่อสูบใช้ได้ การที่ชั้นหินหรือชั้นตะกอนจะเป็น aquifer ได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับความพรุนและความซึมได้ โดยชั้นหินอุ้มน้ำแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ

1.2.1 ชั้นน้ำใต้ดินอิสระ (unconfined groundwater aquifer) ชั้นน้ำที่มีระดับผิวน้ำอยู่ที่ระดับน้ำใต้ดิน (water table) น้ำในชั้นนี้อยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure) เปรียบเหมือนน้ำในถังเปิด ชั้นหินอุ้มน้ำประเภทนี้เป็นชั้นที่อยู่ถัดลงมาจากชั้นยกน้ำ และมีชื่อเรียกว่า ชั้นหินอุ้มน้ำอิสระ (unconfined aquifer) ชั้นหินอุ้มน้ำประเภทนี้มักประกอบด้วยกรวดทราย อยู่ตอนบน มีชั้นล่างเป็นหินหรือดินเหนียวที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้

1.2.2 ชั้นน้ำใต้ดินในที่กักขัง (confined groundwater aquifer) ชั้นน้ำที่ถูกกักเก็บอยู่ในชั้นหินอุ้มน้ำ ซึ่งมีชั้นที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ขนาบอยู่ทั้งข้างบนและข้างล่าง ทำให้ชั้นหินอุ้มน้ำประเภท

นี้เรียกว่า confined aquifer เนื่องจากมีชั้นที่น้ำซึมผ่านไม่ได้กักตัวอยู่ข้างบน ทำให้น้ำในชั้นหินอุ้มน้ำไม่อยู่ใต้ความดันบรรยากาศแต่จะอยู่ภายใต้ความดัน ซึ่งมากกว่าความดันบรรยากาศ เมื่อเจาะหรือขุดบ่อลงไปถึงชั้นน้ำประเภทนี้ แรงดันจะดันให้ระดับน้ำขึ้นมาอยู่สูงกว่าระดับผิวชั้นหินอุ้มน้ำกักกั้น ระดับของน้ำในบ่อที่ขึ้นสูงมานี้ เราเรียกว่า ระดับความดัน (piezometric level)



- High hydraulic-conductivity aquifer
- Low hydraulic-conductivity confining unit
- Very low hydraulic-conductivity bedrock
- Direction of ground-water flow

ภาพที่ 2 แสดงชั้นน้ำใต้ดินอิสระและน้ำใต้ดินในที่เกิดกักกั้น

ที่มา: Hans (2007)

1.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในน้ำใต้ดิน

เนื่องจากน้ำใต้ดินมีการแพร่กระจายอยู่ทั่วไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือรอยหินแตกในเขตอิมตัวด้วยน้ำ ดังนั้นคุณสมบัติของชั้นน้ำใต้ดินจึงมีผลต่อปริมาณน้ำใต้ดิน ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญเหล่านี้ ได้แก่

1.3.1 ความพรุน (porosity), n คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่อปริมาตรทั้งหมดของดิน

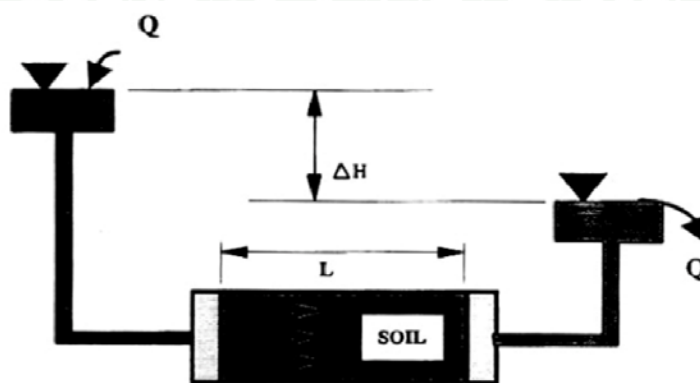
1.3.2 ความเร็วของการไหล (specific discharge), q คือ ปริมาณการไหลของน้ำผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วย A ต่อหน่วยเวลา ซึ่งมีหน่วยเป็นหน่วยความยาวต่อหน่วยเวลา

1.3.3 ปริมาณการไหล (discharge), Q มีหน่วยเป็นหน่วยของปริมาตรต่อหน่วยเวลา

1.3.4 ความนำชลศาสตร์ (hydraulic conductivity), K หรือเรียกอีกอย่างว่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำหรือของไหลและคุณสมบัติของตัวกลางที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็น หน่วยความยาวต่อหน่วยเวลา

2. ทฤษฎีพื้นฐานการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

โดยธรรมชาติของน้ำมีการไหลจากที่สูงไปสู่ที่ต่ำ หรือจากจุดที่มีความดันสูงไปสู่ความดันต่ำ Darcy (1856) วิศวกรชาวฝรั่งเศสได้แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วในการไหลซึมของน้ำใต้ดินซึ่งต่อมาเรียกว่า กฎของดาร์ซี กล่าวว่า ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลางพรุนแบบ laminar flow จะเป็นสัดส่วนกับ hydraulic gradient



ภาพที่ 3 การไหลซึมของน้ำในแนวเดียวผ่านแท่งดิน

ที่มา: วรากร (2542)

จากกฎของดาร์ซี ถ้าให้ V = ความเร็วของการไหลซึมของน้ำ

และ i = ความลาดของระดับน้ำ (hydraulic gradient) = $\frac{\Delta H}{L}$

เมื่อ $H =$ ความต่างศักย์ระหว่างเหนือหน้าและท้ายน้ำ
 $L =$ ความยาวของแท่งดินในแนวนอนน้ำไหล
 ดังนั้น $v \propto i$
 หรือ $v = k.i$

โดยที่ k เป็นค่าคงที่ซึ่งแสดงคุณสมบัติของดินที่ให้น้ำไหลผ่าน เรียกว่า hydraulic conductivity หรือ permeability หรือเรียกว่า ค่าความซึมน้ำ หน่วยที่ใช้เป็น ซม.ต่อนาที (cm/sec)

จากสมการข้างต้น เมื่อพิจารณาหน้าตัดของแท่งดิน เท่ากับ A ดังนั้นปริมาณการไหลต่อเวลาจะเป็น

$$q = v.A = k.i.A$$

เมื่อ พิจารณาเฉพาะช่วงเล็กๆที่มีความยาว dL ปริมาณน้ำจะเป็น

$$q = k \cdot \frac{dH}{dL} \cdot A \quad (1)$$

เมื่อ $\frac{dH}{dL}$ เป็นความชันของเส้นศักย์พิกาน้ำ ณ ตำแหน่งที่พิจารณา

จากสมการของ Bernoulli ซึ่งกล่าวว่า แรงดันน้ำรวม ณ จุดใดจุดหนึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปผลรวมของแรงดัน ความเร็ว และค่าระดับตั้งสมการ

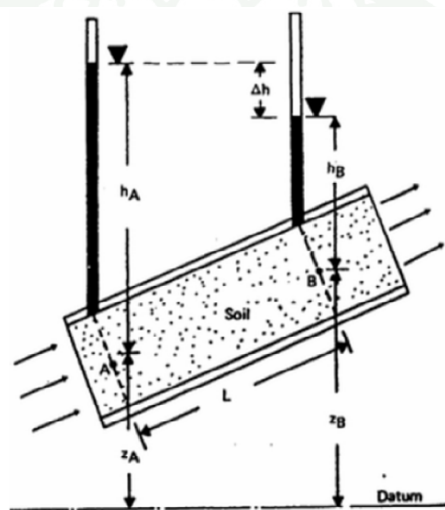
$$h = \frac{P}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z \quad (2)$$

เมื่อ $h =$ หน่วยแรงรวมในรูปความสูงน้ำ
 $P =$ หน่วยแรงดันน้ำ
 $V =$ ความเร็ว
 $g =$ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก
 $\gamma_w =$ หน่วยน้ำหนักของน้ำ

โดยที่ Z คือความสูงของจุดที่ต้องการหาแรงดันจนถึงระดับฐาน แรงดันน้ำสามารถเขียนอยู่ในรูปความสูงของน้ำโดยการหารด้วยน้ำหนักของน้ำ (γ_w)

สำหรับการไหลของน้ำผ่านดินนั้น เทอมของความเร็วของน้ำนั้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการข้างต้นสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$h = \frac{P}{\gamma_w} + Z \quad (3)$$

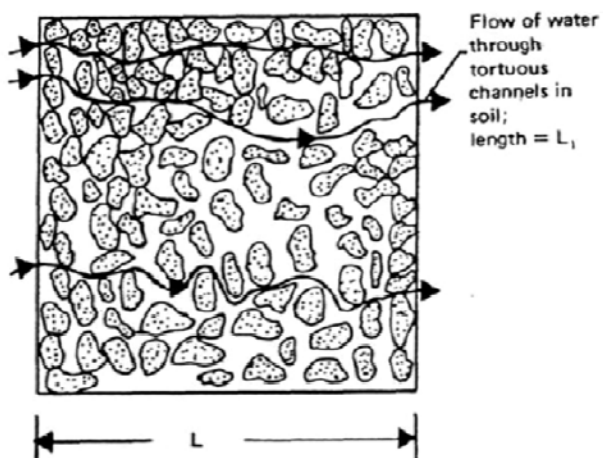


ภาพที่ 4 แสดงเส้นของน้ำที่จุดพิจารณา 2 ตำแหน่ง

ที่มา: Das (1990)

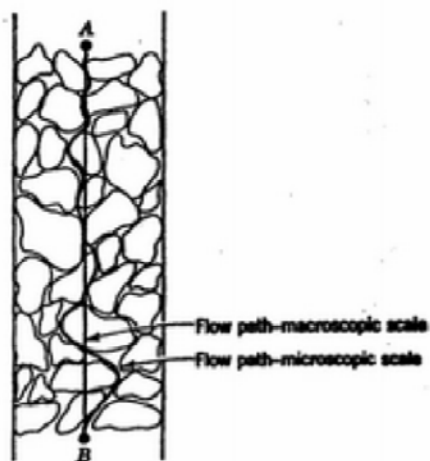
โดยปกติการสูญเสียพลังงานเนื่องจากน้ำไหลผ่านดิน น้ำจะไหลจากศักย์สูงไปยังศักย์ที่ต่ำกว่าและเกิดการสูญเสียพลังงานหรือเฮดเนื่องจากแรงเสียดทานตามทางที่น้ำไหลผ่าน การสูญเสียพลังงานระหว่างตำแหน่ง 2 จุด ตามทางที่น้ำไหลเมื่อพิจารณาดังภาพที่ 4 และสมการข้างล่างดังนี้

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(\frac{\rho_A}{\gamma_w} + Z_A \right) - \left(\frac{\rho_B}{\gamma_w} + Z_B \right)$$



ภาพที่ 5 แสดงน้ำไหลซึมผ่านตามช่องว่างของอนุภาคเม็ดดิน

ที่มา: Das (1990)



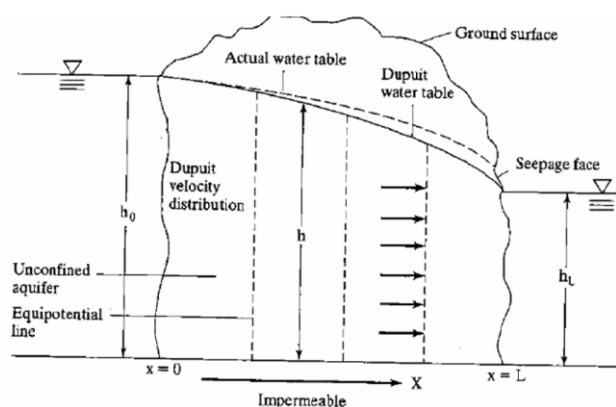
ภาพที่ 6 แสดงน้ำไหลซึมผ่านในดิน

ที่มา: Lambe and White (1979)

สมการของคูพิท (Dupuit's Equation)

Dupuit ได้นำเสนอสมการการไหลแบบคงตัว (steady flow) ของน้ำใต้ดินผ่านชั้นน้ำใต้ดินแบบอิสระ (unconfined aquifer) ซึ่งเป็นสมการคำนวณอย่างง่ายของการไหล โดยมีสมมุติฐานต่างๆ ดังนี้

1. ระดับน้ำใต้ดินหรือผิวอิสระของน้ำ มีความลาดเอียงเล็กน้อย
2. พิจารณาเส้นการไหล (streamline) ในแนวระนาบ และเส้นระดับความดันที่เท่ากันอยู่ในแนวตั้ง
3. ความลาดของผิวน้ำอิสระเท่ากับความลาดชลศาสตร์



ภาพที่ 7 การไหลแบบคงตัวผ่านชั้นน้ำใต้ดินแบบอิสระ

ที่มา: Bedient *et al.* (2008)

จากกฎของดาร์ซี (Darcy's law) สำหรับการไหลของน้ำ อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (q) หาได้จากสมการ

$$q = -Kh \frac{dh}{dx} \quad (4)$$

ที่ภาวะสมดุล (steady state) อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเทียบกับระยะทางมีค่าเป็นศูนย์ หรือ

$$\frac{d}{dx} \left[-Kh \frac{dh}{dx} \right] = 0 \quad (5)$$

หาอนุพันธ์ของสมการจะได้

$$-\frac{K}{2} \frac{d^2 h^2}{dx^2} = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{d^2 h^2}{dx^2} = 0$$

อินทิเกรตสมการจะได้

$$h^2 = ax + b \quad (6)$$

เมื่อ a และ b คือค่าคงที่

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต : $h = h_0$ เมื่อ $x = 0$ จะได้ $b = h_0^2$

หาอนุพันธ์ของสมการที่ 6 จะได้

$$a = 2h \frac{dh}{dx}$$

จากกฎของดาร์ซี :

$$h \frac{dh}{dx} = -\frac{q}{K}$$

แทนค่าลงในสมการที่ 6 จะได้

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2qL}{K}$$

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต $h = h_L$ เมื่อ $x = L$ และไม่คิดการไหลรั่วซึม (seepage) จะได้

$$h_L^2 = h_0^2 - \frac{2qL}{K}$$

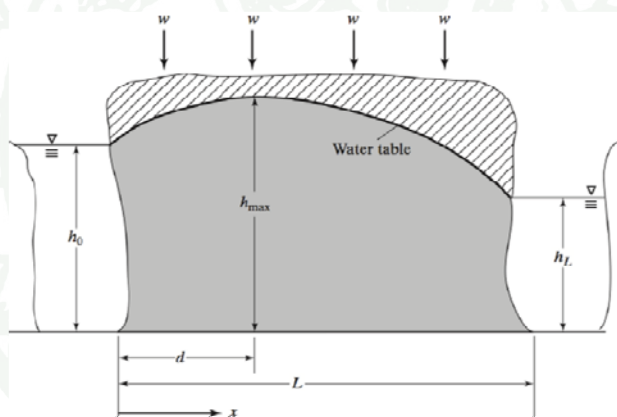
จัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการคูพิท คือ

$$q = \frac{K}{2L}(h_0^2 - h_L^2) \quad (7)$$

และเส้นแสดงระดับน้ำใต้ดินแบบพาราโบลาหาได้จาก

$$h^2 = h_0^2 - \frac{x}{L}(h_0^2 - h_L^2) \quad (8)$$

การคำนวณสมการคูฟิทที่กล่าวมา ไม่ได้รวมถึงปริมาณน้ำเติมกลับ (recharge) ให้กับชั้นน้ำใต้ดิน ในกรณีที่คิดปริมาณน้ำที่เติมกลับด้วย การคำนวณโดยสมการคูฟิทตามสมการที่ 8 จะได้ผิวการไหลอิสระรูปร่างโค้งมนตามภาพที่ 8 จุดที่ระดับ $h = h_{\max}$ เรียกว่า สันปันน้ำ (water divide) ซึ่ง $q = 0$ เนื่องจาก $\text{gradient} = 0$



ภาพที่ 8 การไหลตามสมการคูฟิท กรณีมีน้ำเติมกลับ (recharge)

ที่มา: Bedient *et al.* (2008)

2.1 ความสามารถการซึมน้ำในตัวกลางพรุน

การหาค่าความซึมน้ำในห้องปฏิบัติการ

2.1.1 วิธีความดันคงที่ (constant head) เป็นวิธีที่เหมาะสมกับดินเม็ดหยาบหรือดินที่มีความซึมน้ำสูง การทดลองมีการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 9 โดยดินที่นำมาทดสอบอยู่ใน mold รูป

ทรงกระบอก มีเสดคกที่ h และมีการรักษาเสดให้คงที่ ด้วยการปรับระดับน้ำจาก water supply ปริมาณน้ำที่ไหลออกมาวัดได้ด้วยทรงกระบอกวัดภายในช่วงเวลา t จากกฎของ Darcy (1856) จะได้ว่า

$$Q = vA = kiA \quad (9)$$

เมื่อ k = ค่าความซึมน้ำของตัวอย่างดิน ซึ่งต้องการทราบ

$$i = \text{ไฮโดรลิก เกรเดียน} = \frac{h}{L}$$

เมื่อแทนค่า i แล้วหาค่า k ในเทอมตัวแปรต่าง ๆ จะได้

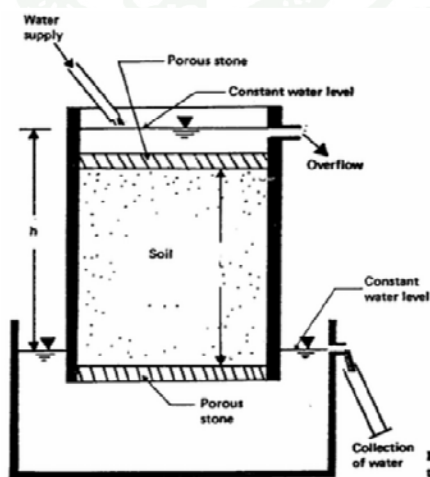
$$k = \frac{h}{L} \frac{QL}{Ah} \quad (10)$$

Q = ปริมาณน้ำที่วัดระหว่างการทดสอบ (ซม.³ / วินาที)

L = ความยาวของตัวอย่างดิน (ซม.)

A = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดิน (ซม.²)

h = ความต่างของระดับน้ำ (ซม.)



ภาพที่ 9 การทดสอบความซึมน้ำโดยวิธีความดันคงที่

ที่มา: Das (1990)

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินชนิดต่างๆ

ชนิดของดิน	k (เซนติเมตร/วินาที)
กรวด	$1-10^{-2}$
กรวดเม็ดละเอียด ทรายหยาบ	$1-10^{-3}$
ทรายละเอียดและดินตะกอนไม่อัดแน่น	$10^{-3}-10^{-5}$
ดินตะกอนอัดแน่นและดินตะกอนปนเหนียว	$10^{-5}-10^{-6}$
ดินเหนียวปนดินตะกอนและดินเหนียว	$10^{-6}-10^{-9}$

ที่มา: Das (1990) แปล

2.1.2 วิธีหาค่าความซึมน้ำโดยใช้ขนาดเม็ดทราย

ขนาดและรูปร่างของเม็ดดิน (grain size and shape) แท้ที่จริงแล้วค่าความซึมน้ำควรจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของช่องว่างระหว่างเม็ดดินมากกว่าแต่คุณสมบัติทั้งสองของมวลดินมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด เช่น ดินที่มีเม็ดเล็กบางและเป็นแผ่น ช่องว่างที่น้ำซึมผ่านก็มักจะ มีลักษณะเช่นเดียวกัน Hazen (1892) ได้เสนอว่าในทรายและกรวด ค่าความซึมน้ำสามารถสัมพันธ์กับขนาดเม็ดดังนี้

$$K = 100 \times (D_{10})^2 \text{ ซม./วินาที} \quad (11)$$

เมื่อ D_{10} = ขนาดเม็ดเมื่อมี 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเป็นเม็ดที่เล็กกว่าที่ระบุ (ซม.)

Skempton (1969) กล่าวว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความซึมน้ำของดิน ได้แก่

1. ขนาดของเม็ดดิน (grain size) และอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio) กล่าวได้ว่า ดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็กและอัตราส่วนช่องว่างน้อยจะมีค่าความซึมน้ำต่ำกว่า ดินที่มีขนาดใหญ่และอัตราส่วนช่องว่างมีค่ามาก

2. ส่วนประกอบทางเคมีของดิน (composition) พบว่ามีผลมากในกรณีที่เป็นดินเหนียวเนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนอออน ระหว่างโครงสร้างผลึกในดินเหนียว และพบว่าในดินที่มีการแลกเปลี่ยนอออนสูงจะมีค่าความชื้นน้ำต่ำ เช่น sodium monmorillonite ซึ่งมีค่าความชื้นน้ำต่ำกว่า 10-7 ซม./วินาที

3. ลักษณะโครงสร้างของดิน (fabric) โดยจะมีผลต่อค่าความชื้นน้ำของดินเม็ดละเอียด

4. ระดับความอิ่มตัวของดิน (degree of saturation) โดยเมื่อระดับความอิ่มตัวของดินยิ่งสูงขึ้น ค่าความชื้นน้ำของดินก็มากขึ้นตามไปด้วย

2.2 เงื่อนไขการไหลของน้ำใต้ดิน

2.2.1 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

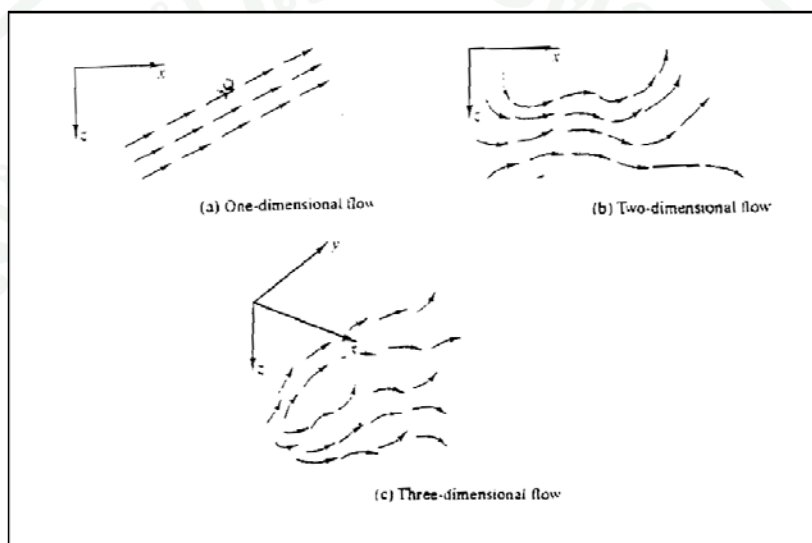
น้ำที่มีการไหลแบบราบเรียบสม่ำเสมอ (laminar flow) เป็นการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อมีความเร็วในการไหลน้อย ส่วนลักษณะการไหลอีกแบบหนึ่งเรียกว่า การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วการไหลมีค่าสูง และมีโอกาสที่จะทำให้เกิดการหมุนวน ลักษณะการไหลแบบนี้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานสูง ความเร็วการไหลของน้ำในดินส่วนใหญ่จะต่ำ ซึ่งลักษณะการไหลจะเป็นแบบราบเรียบและสิ่งที่กล่าวข้างต้นเป็นสิ่งสำคัญเพราะการวิเคราะห์ส่วนมากจะกำหนดให้เป็นลักษณะดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ดินเม็ดขนาดใหญ่หลายชนิด เช่น ทรายสะอาด ทรายที่มีการจัดเรียงตัวไม่ดี อาจจะมีความเร็วในการไหลผ่านสูงซึ่งทำให้ลักษณะการไหลเป็นแบบปั่นป่วน

2.2.2 การไหลของน้ำใต้ดินแบบ 1 มิติ 2 มิติ 3 มิติ

การไหลแบบ 1 มิติเวกเตอร์ความเร็วจะอยู่ในลักษณะขนานกันและมีขนาดเท่ากัน ซึ่งน้ำจะไหลไปในแกนเดียวกันและขนานกันเสมอ โดยไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดคงที่

การไหลแบบ 2 มิติเวกเตอร์ของความเร็วจะถูกจำกัดให้อยู่ในระนาบเดียว แต่ขนาดและทิศทางจะแตกต่างกันในระนาบนั้น การวิเคราะห์ เช่นการไหลของน้ำในดินธรรมชาติลอดเขื่อนคอนกรีต ซึ่งทำการวิเคราะห์ ซึ่งทำการวิเคราะห์แบบสองมิติในระนาบตั้งขนานกับลำน้ำ

การไหลแบบ 3 มิติ เป็นเงื่อนไขที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปส่วนใหญ่ เวกเตอร์ของความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทาง x, y, z



ภาพที่ 10 การไหลของน้ำใต้ดินแบบ 1 มิติ 2 มิติและ 3 มิติ

ที่มา: Coduto (1998)

2.2.3 การไหลแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเปลี่ยนแปลงตามเวลา (steady and unsteady flow) ในส่วนของเงื่อนไขที่การไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หมายถึงเป็นระบบการไหลที่มีความสมดุล ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับน้ำใต้ดินเงื่อนไขดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการไหลคงที่ ในทางตรงกันข้ามเงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือเรียกว่า transient condition เงื่อนไขดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันน้ำในดิน ตำแหน่งของระดับน้ำใต้ดิน และอัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา

3. การพังทลายลาดดินเนื่องจากน้ำใต้ดิน

Budhu and Gobin (1996) กล่าวว่า ถ้าการไหลซึมผ่านเม็ดดินจะทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลง สำหรับเม็ดดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (cohesionless soil) ลาดดินขาดเสถียรภาพขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลซึมของน้ำและมุมลาดดินเป็นสำคัญ มุมลาดดินที่มีค่ามากที่สุด เรียกว่า มุมความเสียดทานภายใน (angle of internal friction) โดยที่ค่าความปลอดภัย (factor of safety) ของการขาดเสถียรภาพของลาดดินจากกฎของคูลอมบ์ คือ

$$F = \frac{[(\gamma' / \gamma_w) \cos \alpha - i \cos \lambda] \tan \phi}{(\gamma' / \gamma_w) \sin \alpha + i \sin \lambda} \quad (12)$$

เมื่อ γ' = หน่วยน้ำหนักน้ำ (กก.นิวตัน/ม³)

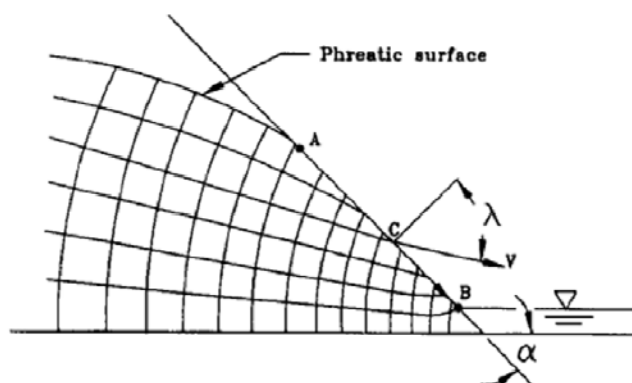
γ_w = หน่วยน้ำหนักของดินในสภาพประสิทธิผล (กก.นิวตัน/ม³)

α = มุมลาดดิน (องศา)

ϕ = มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (องศา)

λ = มุมระหว่างทิศทางการไหลของน้ำที่กระทำต่อเม็ดดินกับแรงตั้งฉากที่กระทำต่อเม็ดดิน (องศา)

i = ความลาดชลศาสตร์



ภาพที่ 11 ความเร็วการไหลซึมบริเวณลาดดิน

ที่มา: Harr (1962)

จากการพิจารณาโครงข่ายการไหล (flow net) ดังแสดงในภาพที่ 11 บนผิวหน้าการไหลซึม AB ค่า $\theta = 90^\circ$ ที่จุด A และ $\theta = 0^\circ$ ที่จุด B ซึ่ง Harr (1962) ได้แสดงความเร็วของการไหลซึมที่จุด C

$$v = \frac{k \sin \alpha}{\sin \lambda}$$

และจากกฎของคาร์ซีจะได้ว่า

$$i = \frac{\sin \alpha}{\sin \lambda} \quad (13)$$

แทนสมการที่ 13 ลงในสมการที่ 12 จะได้ว่า

$$F = \frac{[(\gamma' / \gamma_w) \cos \alpha - \sin \alpha \cot \lambda] \tan \phi}{\sin \alpha (\gamma' / \gamma_w + 1)} \quad (15)$$

3.1 การแบ่งดินในเชิงวิศวกรรม

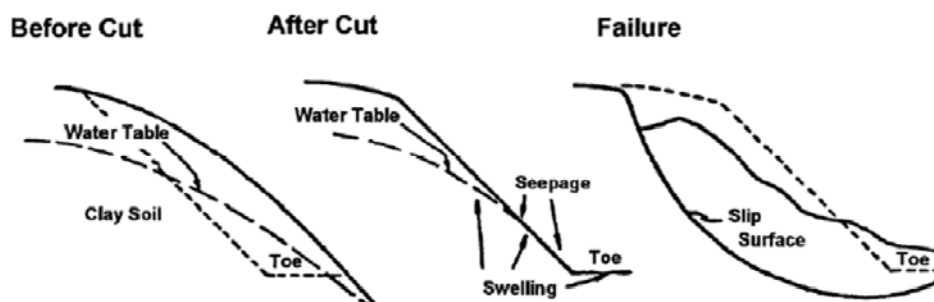
สามารถแบ่งอย่างง่าย ๆ ออกเป็น 2 แบบ คือ ดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (cohesionless soil) กับดินที่มีความเชื่อมแน่น (cohesive soil)

1. ดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น

ส่วนใหญ่จะเป็นกรวด ทราย ดินตะกอนซึ่งมักจะมีลักษณะของเม็ดดินเป็นรูปเหลี่ยม (angular particles) มักพบในที่ใกล้ๆ กับหินที่เป็นต้นกำเนิดและลักษณะของเม็ดดินค่อนข้างกลม (rounded particles) มักพบในที่ไกลๆ จากแหล่งกำเนิด ซึ่งเม็ดดินรูปเหลี่ยมจะมีคุณสมบัติต้านทานแรงเฉือนได้ดีกว่า ดินประเภทนี้มีความต้านทานต่อการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของกระแสน้ำได้ต่ำเพราะการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของเม็ดดินอาศัยเพียงแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคเป็นหลักเท่านั้น

2. ดินที่มีความเชื่อมแน่น (cohesive soil)

ส่วนใหญ่จะเป็นดินเหนียว (clay soil) ซึ่งเมื่อดินเหนียวมีลักษณะเป็นแผ่นแบนยาว ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวจึงทำให้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อแรงดึงดูดที่ผิวน้อยมาก ทำให้เม็ดดินเหนียวแสดงประจุไฟฟ้าลบออกมาที่บริเวณผิวจึงทำให้มีความสามารถดูดโมเลกุลของน้ำเข้ามารวมได้ทำให้เม็ดดินไม่หลุดออกจากกันได้ง่าย ทำให้ด้านทานต่อการกัดเซาะเนื่องจากการไหลจากกระแสน้ำได้เป็นอย่างดีซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความชื้นในดิน การพังทลายของดินประเภทนี้จะพบในลักษณะที่มีการเคลื่อนตัวเป็นแนวโค้งรูปอาร์กทรงกระบอกดังภาพที่ 12 เป็นส่วนใหญ่



ภาพที่ 12 การพังทลายของลาดดินสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น

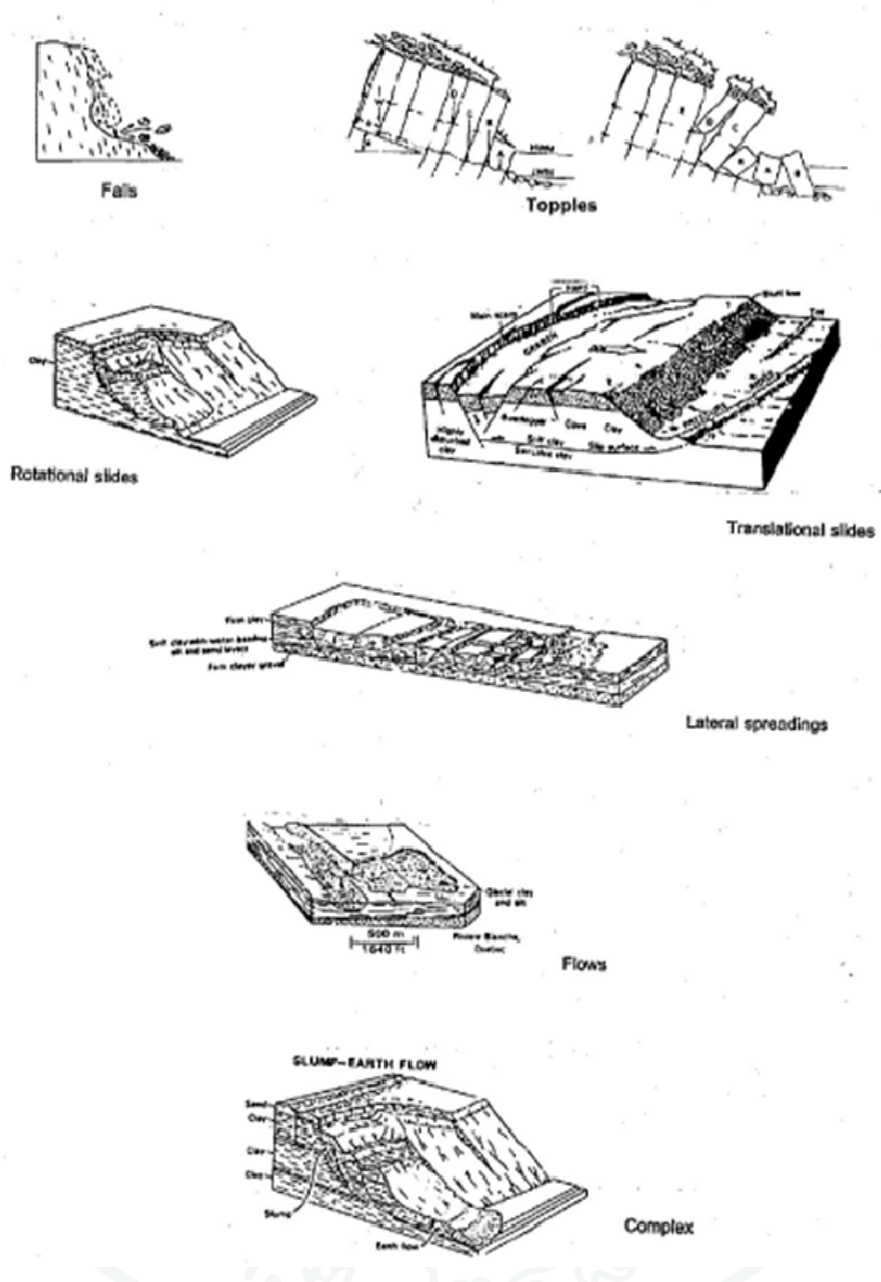
ที่มา: Yun (2006)

3.2 ลักษณะการพังทลายของลาดดิน

ลักษณะการพังทลายของดินถูกจำแนกเป็นประเภทต่างๆ โดย Varnes (1978) ดังนี้

1. การร่วงหล่น (falls) เป็นรูปแบบของการเคลื่อนตัวของมวลวัสดุที่เป็นกลุ่มก้อนหรือเป็นก้อนหินร่วงหล่นลงมาจากหน้าผา มีอัตราการเคลื่อนที่มากกว่า 3×10^{-3} ม./วินาที
2. แบบกลิ้งไปข้างหน้า (topples) เป็นรูปแบบของการเคลื่อนตัวต่อเนื่องกลายเป็นแบบร่วงหล่น (falls) หรือแบบเลื่อนไถล (slides) ได้ต่อไป

3. แบบเลื่อน ไถล (slides) เป็นรูปแบบของการเคลื่อนพังของมวลวัสดุในรูปแบบของการเลื่อน
4. แบบเคลื่อนตัวขยายตัวไปด้านข้าง (lateral spreads) มีลักษณะของการเคลื่อนตัวเป็นการขยายตัวด้านข้างของมวลวัสดุ การเคลื่อนที่แบบนี้มักพบในดินประเภท sensitive silt and clay ที่มีการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใดด้วยอัตราการเคลื่อนที่ระหว่าง 3×10^{-3} ม./วินาที แต่ถ้าพบในชั้นหิน อัตราการเคลื่อนที่จะน้อยกว่า 3×10^{-3} ม./วินาที
5. แบบไหล (flows) การเคลื่อนตัวแบบไหล มักพบในวัสดุที่ไม่มีการขุดตัว มีลักษณะการเคลื่อนตัวในรูปแบบของการไหลของของเหลวที่มีความหนืดขนานกับแนวลาดเดิม
6. แบบผสม (complex) มีลักษณะของการเคลื่อนตัวที่ประกอบด้วยหลายรูปแบบรวมกัน เช่น รูปแบบของการพังทลายลาดดินเป็นแบบผสมที่ประกอบด้วย rock slide, rock fall และ debris flow



ภาพที่ 13 ลักษณะการเคลื่อนพังของลาดดิน

ที่มา: Varnes (1978)

3.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดการพังทลายของลาดดิน

ดินพังทลายที่เกิดขึ้นพร้อมๆกับอุทกภัยจะเกิดขึ้นได้จากสาเหตุสองกลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มแรกเป็นปัจจัยทางธรรมชาติที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่น ฝนตกหนัก การเพิ่มขึ้นของน้ำใต้ดิน ความลาดชันของภูมิประเทศ เป็นต้น ส่วนกลุ่มที่สองเป็นปัจจัยที่มนุษย์ทำให้เกิดขึ้น โดยรูปแบบของการเกิดพังทลายของลาดดินขึ้นอยู่กับลักษณะทางภูมิประเทศ ลักษณะทางธรณีวิทยาและประวัติวิทยาของชั้นดินและชั้นหิน

สาเหตุจากธรรมชาติ

1. ลักษณะชั้นดินและชั้นหิน
2. ความลาดชันของลาดดิน
3. ปริมาณน้ำฝนและน้ำใต้ดิน
4. การเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลก

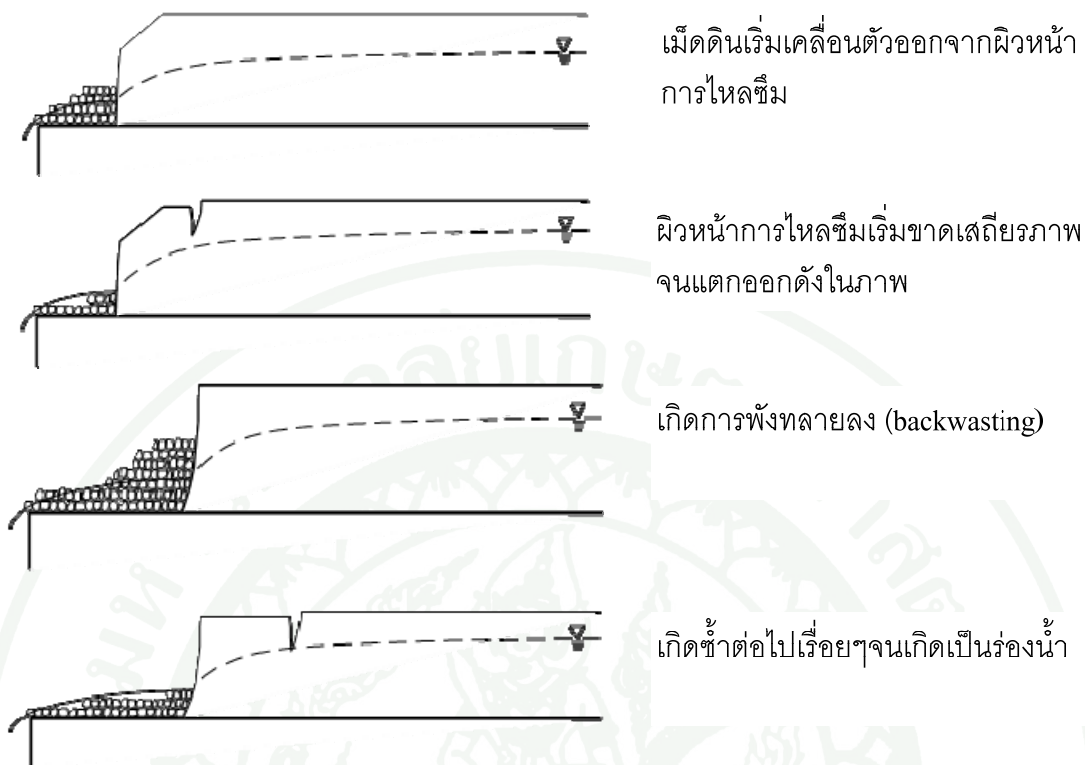
สาเหตุจากมนุษย์

1. การตัดไม้ทำลายป่า
2. การปลูกบ้านหรือพัฒนาที่ดิน
3. การตัดถนนเชิงเขาขวางทางน้ำ

4. การเกิดร่องน้ำเนื่องจากการกัดเซาะของน้ำใต้ดิน

การพังทลายลาดดินเนื่องจากน้ำใต้ดินเกิดขึ้นจากการไหลของน้ำใต้ดินผ่านเม็ดดิน โดยการไหลของน้ำใต้ดินทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนกระทำกับเม็ดดิน หากหน่วยแรงดังกล่าวมีขนาดสูงเกินกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของเม็ดดินและแรงดันน้ำใต้ดินในมวลดินสูงจะทำให้เกิดการกัดเซาะเม็ดดินให้ไหลหลุดออกไปจนเป็นโพรง (piping) ก็จะทำให้เกิดการพัฒนาเม็ดดินไปยังท้ายน้ำจนเกิดการทับถมของเม็ดดินบริเวณท้ายน้ำ (transport) จนเกิดความขาดเสถียรภาพของผิวลาดดินส่งผลให้ดินส่วนบนพังทลายลงมา (failure) ซึ่งลักษณะการพังทลายนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณการไหลซึม (seepage) ของน้ำใต้ดิน ความเร็วของกระแสน้ำใต้ดิน ขนาดและความลาดเอียงของชั้นน้ำใต้ดิน

การกัดเซาะด้วยการไหลซึม (seepage erosion) ถ้าการไหลซึมมีมากพอก็จะทำให้เกิดการกัดเซาะ (erosion) ขึ้นได้ดังนี้



ภาพที่ 14 ขั้นตอนการกัดเซาะด้วยการไหลซึม

ซึ่งระบบการเกิดการกัดเซาะด้วยการไหลซึมดังกล่าวสามารถที่จะแยกได้เป็น 2 ระบบที่สำคัญดังนี้

1. Groundwater Sapping เกิดขึ้นเมื่อระดับน้ำใต้ดิน (water table) มีระดับมากขึ้นจนเมื่อดินที่ผิวหน้าความลาดชัน (scarp) เกิดการขาดเสถียรภาพระหว่างเม็ดดินเนื่องจากแรงยก (lift force) และแรงผลัก (drag force) ของน้ำใต้ดินทำให้เม็ดดินหลุดออกจากผิวหน้าความลาดชันจนเกิดเป็นร่องเล็กๆ (incipient incision)
2. Backwasting เกิดขึ้นเมื่อ groundwater sapping ทำให้ผิวหน้าความลาดชันเป็นร่องรอยเล็กๆความเสถียรภาพของดินหน้าบนจะขาดเสถียรภาพเกิดการพังทลายแล้วสไลด์ตัวลงตามแรงโน้มถ่วงของน้ำหนักเม็ดดินในที่สุด

เกษม (2539) อธิบายกระบวนการเกิดการพังทลายของลาดดินแบ่งออกได้ 3 กระบวนการ ดังนี้

1. การแตกกระจายของเม็ดดิน (detachment) เป็นกระบวนการแรกของการพังทลายที่ทำให้เม็ดดินแตกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก และเม็ดดินขนาดเล็กๆเหล่านี้หลุดกระจายออกไป ซึ่งอาจจะหลุดจากเม็ดดินแล้วกระเด็นออกไปที่อื่น หรืออยู่ใกล้ๆบริเวณที่เกิดนั้นก็ได้

2. การเคลื่อนย้ายเม็ดดิน (transportation) เป็นกระบวนการที่สองของการพังทลายลาดดิน สืบต่อจากกระบวนการแรก กล่าวคือ เมื่อเม็ดดินแตกกระจายเป็นอนุภาคขนาดเล็กกระเด็นไปอุดรูพรุนของดินจะทำให้กระบวนการซึมน้ำผ่านผิวดินลดลง มีผลทำให้มีน้ำไหลผ่านหน้าผิวดินลงสู่ที่ต่ำมากขึ้น แต่อัตราการไหลจะรุนแรงมากขึ้นขึ้นอยู่กับความลาดชันและระยะทางของความลาดชันบริเวณลาดดิน อีกทั้งปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดการไหลตามผิวดิน กระบวนการขั้นนี้ นอกจากเป็นการพัดพาขนาดเม็ดดินเล็กๆ ยังมีอิทธิพลทำให้ดินอาจพังทลายโดยกระบวนการขูดผิวหน้าดิน (scouring actions) จากน้ำที่ไหลผ่านหน้าผิวดินอีกด้วย

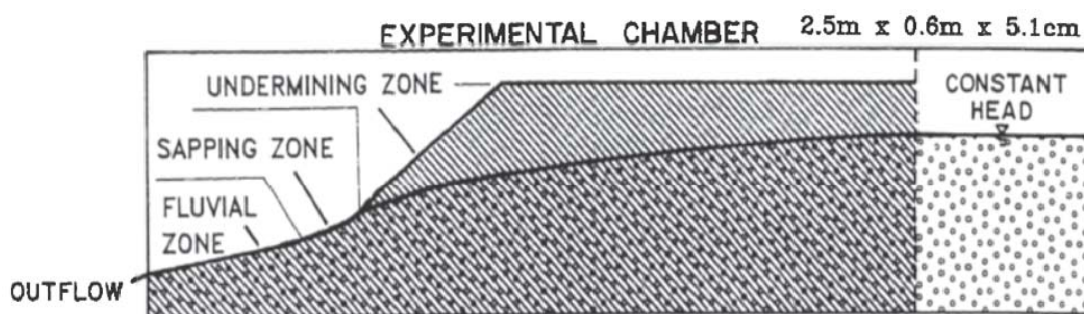
3. การทับถม (deposition) เป็นกระบวนการสุดท้ายของการพังทลายของดิน กล่าวคือ เป็นกระบวนการที่อนุภาคดินขนาดต่างๆ ตกตะกอนตามแอ่งน้ำหรือลำธาร สาเหตุอันสำคัญก็คืออัตราความเร็วของกระแสน้ำลดลงและหยุดนิ่ง ทำให้อนุภาคดินขนาดใหญ่ตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity) ส่วนอนุภาคดินขนาดเล็กก็จะเกาะตัวกันเองด้วยแรงประจุพหุมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่ทำให้แรงโน้มถ่วงของโลกมีอิทธิพลดึงดูดลงมาได้ แล้วจะตกตะกอนอีกต่อหนึ่ง

Howard and McLane III (1988) ได้ทำการทดลองการไหลซึมเนื่องจากน้ำใต้ดินแบบ 2 มิติ โดยแบ่งพื้นที่การทดลองเป็น 3 เขต

1. Undermining Zone คือ บริเวณนี้ตะกอนจะแห้ง ซึ่งน้ำหนักของตะกอนบริเวณนี้จะทำให้เกิด Backwasting

2. Sapping Zone คือ บริเวณพื้นที่ผิวเล็กๆที่อยู่ท้ายด้านเหนือน้ำของการไหลออกมาของการไหล ซึ่งในบริเวณนี้จะมีการไหลซึมมาก การกัดเซาะจะเกิดขึ้นในบริเวณนี้

3. Fluvial Zone คือ บริเวณที่อยู่ท้ายน้ำจาก sapping zone ไป ซึ่งในบริเวณนี้การไหลซึมจะน้อยและการพัดพาตะกอน (fluvial process) จะเกิดในบริเวณนี้

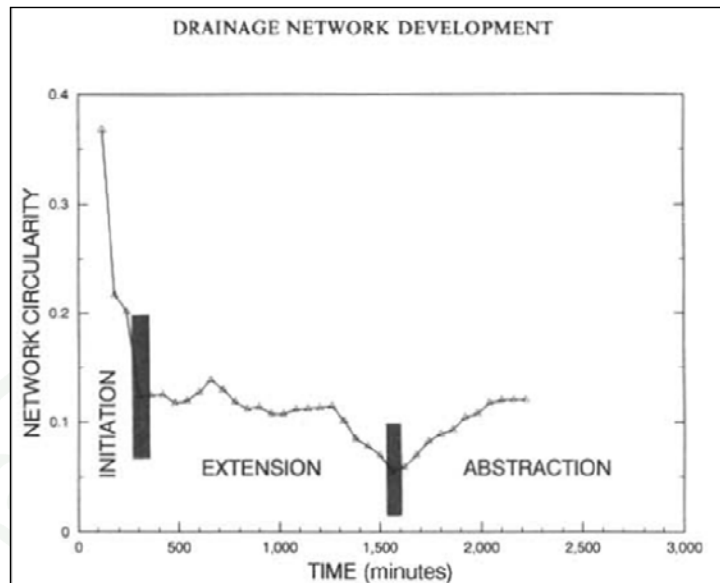


ภาพที่ 15 การแบ่งโซนในการทดลองการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมแบบสองมิติ

ที่มา: Howard (1988)

Gomez and Mullen (1991) ได้อธิบายการพัฒนาร่องน้ำโดยใช้ทฤษฎีความเป็นวงกลม (circularity) โดยที่ค่าความเป็นวงกลมของร่องน้ำขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของร่องน้ำที่เกิดขึ้นจากการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมของน้ำใต้ดิน โดยที่ค่าความเป็นวงกลมของร่องน้ำต่ำจะทำให้โอกาสการพัฒนาร่องน้ำแยกเป็นสองทางมากขึ้น และแบ่งการพัฒนาโครงข่ายร่องน้ำเป็น 3 ระยะ ดังนี้

1. Initiation คือ ระยะที่เกี่ยวข้องกับการเริ่มต้นของการเกิดการพัฒนาบริเวณร่องน้ำอย่างรวดเร็วในตอนต้น
2. Extension คือ ระยะเวลาของการขยายตัวของร่องน้ำซึ่งอาจจะมีการแยกตัวของร่องน้ำเกิดขึ้นเป็นหลายๆร่อง และการกัดเซาะทางหัวร่องน้ำและด้านข้างของร่องน้ำ
3. Abstraction คือ ระยะที่เกี่ยวข้องกับการแยกตัวของร่องน้ำเป็นหลายๆร่องแล้วเกิดการพังทลายของร่องน้ำที่แยกตัวออกไปจนกลับมาเป็นร่องน้ำเดียวกันในที่สุด



ภาพที่ 16 การแบ่งช่วงเวลาในการพัฒนาของร่องน้ำ

ที่มา: Gomez and Mullen (1991)

ความเป็นวงกลม คือ ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบวงของร่องน้ำที่ถูกกัดเซาะกับพื้นที่ของร่องน้ำที่ถูกกัดเซาะ

$$\text{Network Circularity} = \frac{A}{\pi \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2} \quad (12)$$

เมื่อ A = พื้นที่ร่องน้ำที่ถูกกัดเซาะ ซม.²

P = ความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะ ซม.

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Howard and McLane III (1988) ได้ทำการทดลองในอ่างทดลองแบบ 2 มิติ ซึ่งแบ่งเป็น 3 โซน ดังนี้ undermining zone , sapping zone , fluvial zone และนำทฤษฎีความสัมพันธ์ของโมเมนต์แรงเพื่อไปประยุกต์ใช้อธิบายรูปแบบและอัตราการเคลื่อนตัวของตะกอนซึ่งเกิดจากการกัดเซาะของชั้นทรายและวิเคราะห์อัตราการสึกกร่อน ซึ่งเป็นการรวมกันระหว่างแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน (groundwater flow model) และความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวของตะกอน (sediment transport relationship) ซึ่งเป็นตะกอนแบบไม่มีความเชื่อมแน่น (cohesionless sediment) ซึ่งความสัมพันธ์ของโมเมนต์แรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราการกัดเซาะของชั้นดิน จากการทดสอบพบว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการได้เป็นอย่างดี

Gomez and Mullen (1991) ทำการศึกษาการพัฒนาร่องน้ำโดยการกัดเซาะของชั้นทรายบริเวณท้ายน้ำ ความกว้างร่องน้ำที่เพิ่มขึ้นและการพังทลายของชั้นทรายในห้องปฏิบัติการโดยการทดลองนี้ใช้ทรายละเอียด (fine sand) ในการทดสอบ โดยควบคุมอัตราการไหลบริเวณด้านเหนือน้ำและความลาดชันของอ่างทดลองพบว่าการพัฒนาร่องน้ำจะเกิดขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้ความเป็นวงกลม (circularity) ในการอธิบายลักษณะของร่องน้ำที่เกิดขึ้น และได้แบ่งลักษณะการพัฒนาโครงข่ายของร่องน้ำเป็น 3 ช่วง คือช่วง initiation, extension และ abstraction ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าร่องน้ำเกิดการแยกเป็นสองทางหลายๆร่อง ทำให้พื้นที่และความยาวเส้นรอบวงของร่องน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปร่องน้ำที่แยกตัวออกเกิดพังทลายรวมกลับมาเป็นร่องเดียวทำให้พื้นที่ร่องน้ำที่ถูกกัดเซาะลดลงส่งผลให้เกิดช่วง abstraction เกิดขึ้น

Fox *et al.* (2006) ได้ศึกษากลไกการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินในแนวด้านข้าง (lateral subsurface flow) และสร้างแบบจำลองการเคลื่อนตัวของตะกอน (sediment transport model) ซึ่งเป็นแบบจำลองตะกอนที่ได้จากการทดลอง (empirical sediment model) สำหรับการกัดเซาะด้วยการไหลซึม (seepage erosion) ของตะกอนแบบไม่มีความเชื่อมแน่น (non - cohesive sediment) โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการซึ่งเลียนแบบชั้นดินของลำน้ำ Little Topashaw ทางตอนเหนือของ Mississippi แบบจำลองการเคลื่อนตัวของตะกอนอยู่บนพื้นฐานของอัตราการไหลของตะกอนแบบไร้มิติ (dimensionless sediment discharge) และความเค้นเฉือนการไหลซึมแบบไร้มิติ (dimensionless seepage flow shear stress) ซึ่งผลที่ได้พบว่าแบบจำลองมีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างดี ($R^2=0.86$)

Chu-Agor *et al.* (2008) การไหลซึม (seepage) เป็นปัจจัยที่สำคัญในทางน้ำไหลและฝั่งลำน้ำที่เกิดการกัดเซาะ ในการศึกษานี้ได้ตรวจสอบหาปัจจัยที่สำคัญของความไม่มีเสถียรภาพของลาดดินด้วยการไหลซึม โดยทำการวิจัยในห้องทดลองซึ่งสร้างชั้นดินด้วยดินร่วนปนทรายและดินทราย ซึ่งความหนาแน่นรวมของดินที่แตกต่างกัน 2 ประเภทนี้จะเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการพังทลายของลาดดินด้วยการไหลซึม โดยควบคุมน้ำที่ไหลเข้า (inflow) ในอ่างทดลองที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อที่จะตรวจสอบแรงลาดของการไหลซึม (seepage gradient force) การเคลื่อนที่ของตะกอนแบบ 3 มิติ และการกัดเซาะ (undercutting) จากผลการทดลองพบว่า 1. แรงดึงและแรงลากเนื่องจากการไหลซึมมีค่าเกินกว่าแรงเฉือนของเม็ดดิน (soil shear strength) ก่อให้เกิดแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นในมวลดิน (pore-water pressure) 2. เมื่อแรงลาดการไหลซึมเริ่มต้นมากกว่าแรงต้านทานของเม็ดดิน จะเกิดการเคลื่อนที่ของเม็ดดินและเกิดการกัดเซาะของตลิ่งจนเกิดการพังทลาย ซึ่งผลที่ได้จะถูกควบคุมโดยมุมลาดชันของลาดดินเป็นส่วนใหญ่

Chu-Agor *et al.* (2009) การกัดเซาะด้วยการไหลซึม (seepage erosion) เป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับความไม่มีเสถียรภาพและการเกิดการพังทลายของลาดดิน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษารูปแบบการพัดพาตะกอนในห้องปฏิบัติการ (empirical sediment transport function) ซึ่งสามารถวิเคราะห์การกัดเซาะด้วยการไหลซึมต่อเวลาบนความลาดชันที่มีเสถียรภาพของการทดลองแบบ 3 มิติ การทดลองครั้งนี้จะควบคุมการไหลของน้ำ ประเภทของดิน ความหนาแน่นรวม และความลาดชันวิกฤตของชั้นดิน ซึ่งจะถูกระบุโดยใช้ดินที่มีความเชื่อมั่นในการทดลองในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดลองพบว่า ความลาดชันวิกฤตมีผลต่อประสิทธิภาพความเชื่อมั่นของเม็ดดิน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเม็ดดินที่ถูกกัดเซาะจากลาดดินและระยะที่เม็ดดินถูกกัดเซาะออกจากลาดดินซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 3D Gaussian function

Abrams *et al.* (2009) กระบวนการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมก่อให้เกิดโครงข่ายร่องน้ำ (channel network) ซึ่งในการพัฒนาร่องน้ำนั้นเกิดจากความเร็วที่หัวร่องน้ำพัฒนาไปเป็นสัดส่วนกับการไหลของน้ำใต้ดินต่อหัวร่องน้ำ ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองและใช้ทฤษฎีทางกายภาพเพื่อแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ของร่องน้ำที่แยกเป็นสองทางต่อการไหลของน้ำใต้ดินทั้งหมด นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะความยาวระหว่างร่องน้ำด้วยการเชื่อมโยงการเคลื่อนตัวของพัฒนาร่องน้ำต่อลักษณะภูมิประเทศในแม่น้ำ Apalachicola ที่ Bristol, Florida ซึ่งอธิบายระยะเวลาในการเกิดและการพัฒนาจนเป็นร่องน้ำ รวมทั้งจำนวนร่องน้ำที่เกิดขึ้นได้ โดยการ

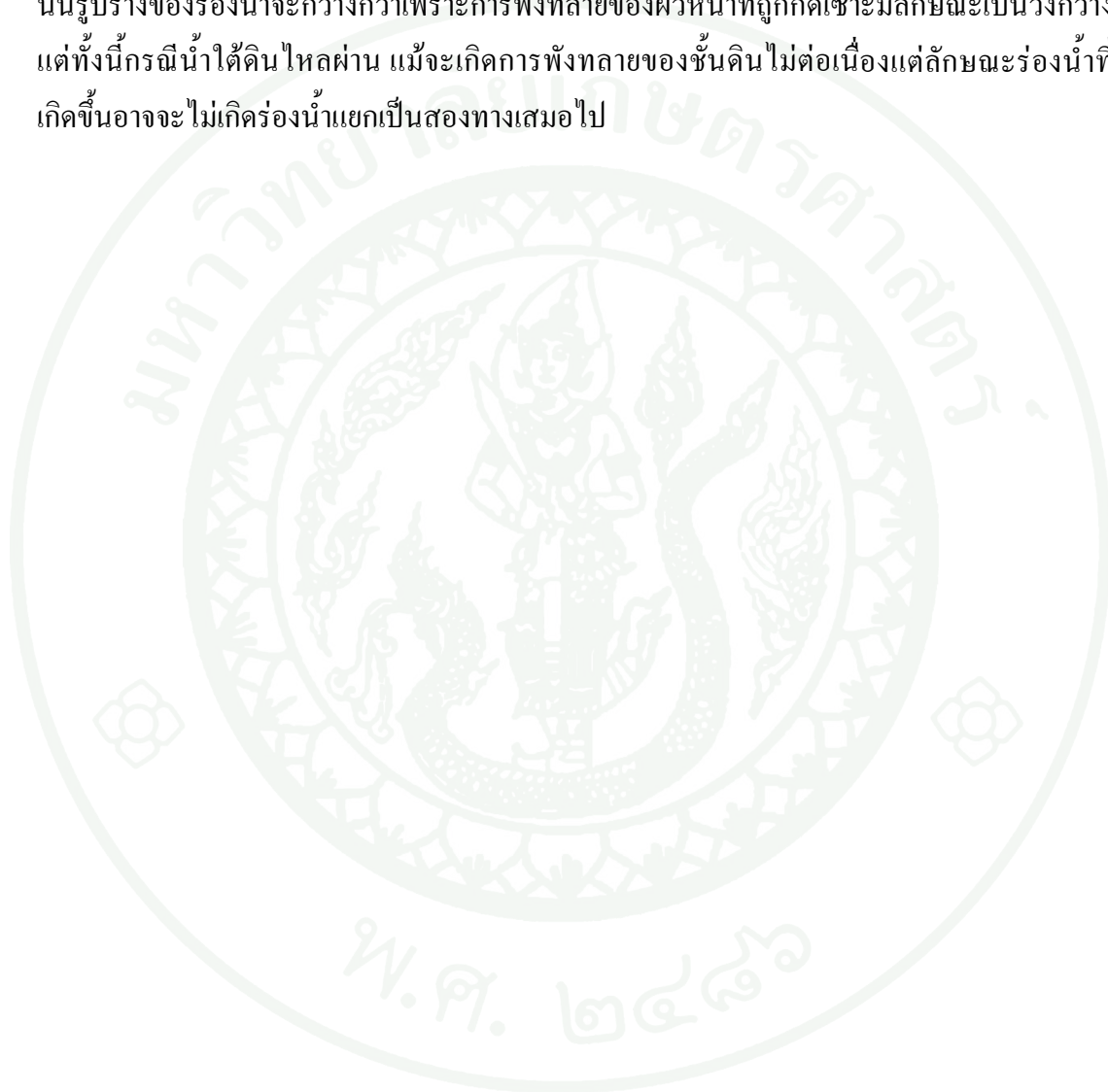
วิเคราะห์อัตราการกัดเซาะของร่องน้ำกับพื้นที่ร่องน้ำ ในปัจจุบันได้มีการหาสมการอย่างง่ายในการอธิบายอัตราการกัดเซาะและรูปตามยาวของร่องน้ำจากการสำรวจภาคสนาม

Pornprommin and Izumi (2010) ได้ศึกษาการเริ่มต้นของการเกิดการกัดเซาะด้วยการไหลซึมในห้องทดลองและใช้การวิเคราะห์การมีเสถียรภาพเชิงเส้น (linear stability analysis) ในการวิเคราะห์ลักษณะของรูปร่างของร่องน้ำเนื่องจากการกัดเซาะด้วยการไหลซึม (diffusion-like function) ซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราการถดถอย (retreat rate) โดยทำการทดลองในอ่างทดลองแบบ 3 มิติ และใช้เม็ดพลาสติกสังเคราะห์ในการทดลองและควบคุมอัตราการไหลด้านเหนือน้ำของอ่างทดลอง นอกจากนี้ยังหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะรูปร่างของชั้นดินที่ถูกกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมกับแรงยกและแรงลาก (driving force) ของน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นรูปแบบสมการเส้นตรง จากการทดลองพบว่าความสูงของชั้นตะกอนเพิ่มขึ้นทำให้การพังทลายลาดดินมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงเกิดความกว้างร่องน้ำมากขึ้น และความลาดชันสูงชันทำให้การไหลของน้ำใต้ดินไหลไปทางท้ายน้ำมากขึ้น จึงทำให้มีโอกาสเกิดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำเกิดขึ้น

Pornprommin *et al.* (2010) ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์การกัดเซาะด้วยการไหลซึม (seepage erosion) ซึ่งส่งผลต่อการเกิดรูปร่างลักษณะของร่องน้ำ โดยการปรับเปลี่ยนความสูงของชั้นตะกอนและความลาดชันของอ่างทดลองและใช้ทรายซึ่งมีลักษณะเป็นทรายหยาบ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความสูงของชั้นตะกอนเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความกว้างของร่องน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักตะกอนทำให้แรงลากและแรงยก (driving force) ของน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นและเมื่อปรับความลาดชันของอ่างทดลองเพิ่มขึ้น พบว่าความกว้างของร่องน้ำเพิ่มขึ้นเหมือนกรณีการเพิ่มความสูงของชั้นตะกอน นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นบนความลาดชันเท่ากันทำให้ความกว้างร่องน้ำเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง (bifurcation) พบว่า เม็ดทรายหยาบทำให้เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางเกิดขึ้น ซึ่งลักษณะการไหลของน้ำใต้ดินและความต้านทานการพังทลายของชั้นตะกอนของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบมีผลต่อการเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง ในการทดลองครั้งนี้ได้ตั้งสมมติฐานว่ารระดับน้ำใต้ดินสูงชันส่งผลให้เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางมากขึ้น

Berhanu *et al.* (2012) ตรวจสอบหารูปแบบการกัดเซาะของร่องน้ำซึ่งถูกตรวจสอบในห้องปฏิบัติการในอ่างทดลอง โดยที่ด้านท้ายน้ำสามารถระบายตะกอนที่ถูกกัดเซาะได้ และใช้เม็ดสังเคราะห์ซึ่งมีความเชื่อมั่นน้อยมากในการทดสอบ การวิเคราะห์ข้อมูลจะทำการวิเคราะห์โดยใช้

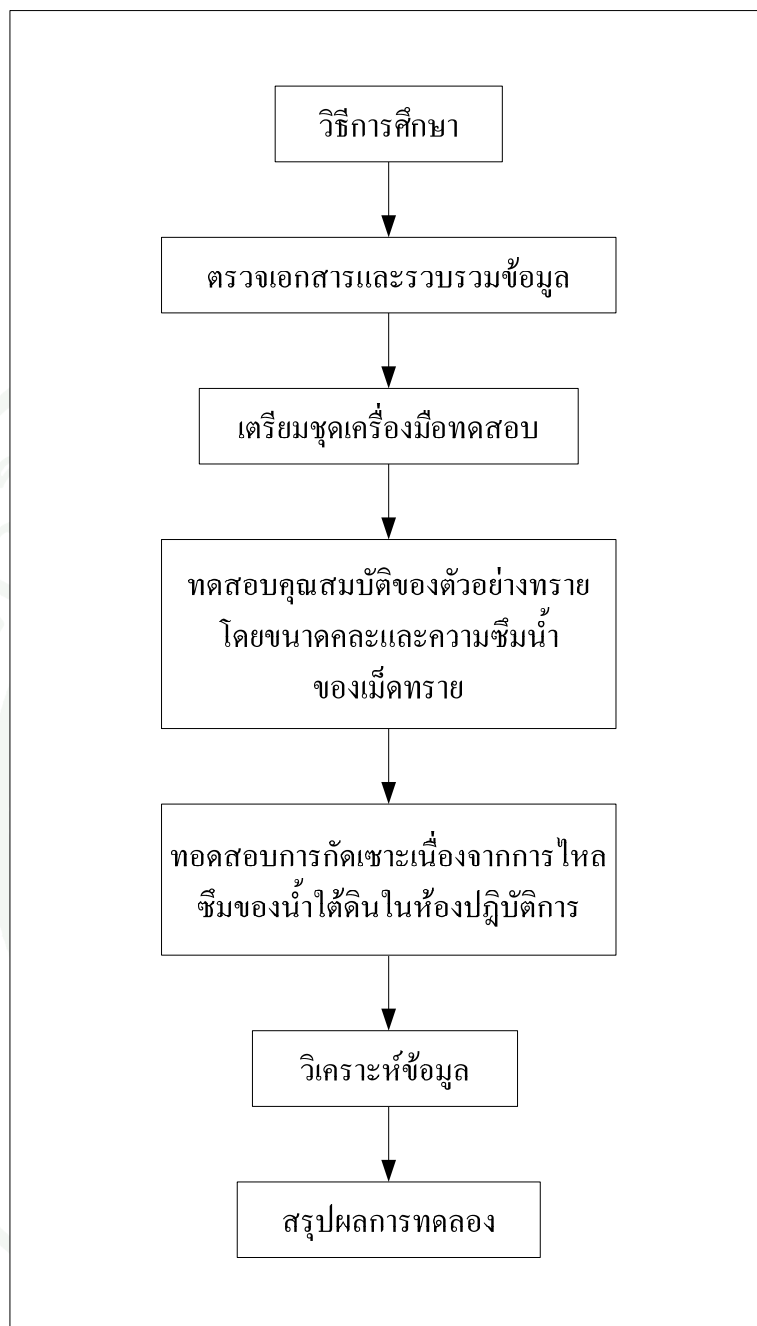
เทคนิค laser-aided topography ซึ่งการทดลองนี้ได้แบ่งเป็นสองกรณี กรณีแรกมีการไหลเฉพาะน้ำใต้ดิน กรณีที่สองมีน้ำฝนตกลงมา ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า กรณีน้ำใต้ดินไหลผ่านทำให้รูปร่างร่องน้ำที่เกิดขึ้นมีลักษณะถูกกัดเซาะไปทางด้านเหนือน้ำมากกว่า เนื่องจากการพังทลายของผิวหน้าที่ถูกกัดเซาะไม่ต่อเนื่องและลักษณะการพังทลายของชั้นดินเป็นวงแคบๆ ในกรณีที่ฝนตกนั้นรูปร่างของร่องน้ำจะกว้างกว่าเพราะการพังทลายของผิวหน้าที่ถูกกัดเซาะมีลักษณะเป็นวงกว้าง แต่ทั้งนี้กรณีน้ำใต้ดินไหลผ่าน แม้จะเกิดการพังทลายของชั้นดินไม่ต่อเนื่องแต่ลักษณะร่องน้ำที่เกิดขึ้นอาจจะไม่เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางเสมอไป



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อ่างทดลองขนาด 1.00 x 2.20 x 0.225 เมตร
2. เม็ดทรายขนาด D_{50} เท่ากับ 0.56 และ 0.86 มิลลิเมตร
3. ฉากพลาสติกกันชื้นทรายเพื่อใช้ในการจำลองร่องน้ำเริ่มต้น
4. เวอร์เนียแบบสเกล
5. webcam
6. กล้องถ่ายภาพดิจิทัลและอุปกรณ์ตั้งกล้อง
7. เครื่องคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 17 วิธีการศึกษา

วิธีการ

1. ทบทวนเอกสารและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา

2. เตรียมชุดเครื่องมือทดสอบ โดยได้ดัดแปลงเครื่องมือทดสอบ Basic Hydrology Apparatus ที่มีขนาด 1.00 x 2.20 x 0.225 เมตร ซึ่งใช้ในการทดลองการซึมลงดินของน้ำฝนมาเป็นเครื่องมือทดลองการกักเซาะเนื่องจากน้ำใต้ดิน

3. ทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างทราย

3.1 การหาขนาดและการกระจายของเม็ดดินอาจทำได้ด้วยกันหลายวิธี แต่ที่นิยมปฏิบัติกันแพร่หลายคือ วิธีร่อนผ่านตะแกรง (sieve analysis) มักใช้กับดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.075 มม. ขึ้นไป การทดสอบหาขนาดละเอียดของเม็ดทรายสามารถอ่านได้จากกราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (grain size distribution curve) ตามภาคผนวก ก ซึ่งผลการทดสอบหาขนาดละเอียดของเม็ดทรายดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าการทดสอบหาขนาดละเอียดของเม็ดทราย

ชนิดของเม็ดทราย	10 เปอร์เซนต์ของเม็ดทราย ที่ผ่านตะแกรง	50 เปอร์เซนต์ของเม็ดทราย ที่ผ่านตะแกรง
1	0.63	0.86
2	0.40	0.56

3.2 มุมทรงตัวของเม็ดดิน (angle of repose) คือ มุมที่กองวัสดุทำกับพื้นราบ ซึ่งเป็นมุมชันสูงสุดที่กองวัสดุคงอยู่ได้โดยไม่ไหลพังหรือเคลื่อนที่ลงมา ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุปริมาณมวล (bulk material) ซึ่งสัมพันธ์กับชนิดของวัสดุ ความชื้น ขนาดรูปร่างและความหนาแน่นรวม (bulk density) รวมถึงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน ซึ่งค่ามุมทรงตัวของเม็ดดินส่งผลต่อเสถียรภาพบริเวณลาดดินที่เกิดขึ้นจากการไหลซึมของน้ำใต้ดิน โดยค่ามุมทรงตัวของเม็ดดินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่ามุมทรงตัวของเม็ดทราย

ชนิดของเม็ดทราย	มุมทรงตัวของเม็ดทราย
	(องศา)
1	32.05°
2	30.57°

3.3 ความชื้นน้ำของดิน เป็นคุณสมบัติที่สำคัญ ซึ่งเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของดินหลายอย่าง เช่น การรั่วซึมของน้ำที่เก็บกัก ความมั่นคงของลาดดินซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดันน้ำทั้งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเกิดจากน้ำหนักสิ่งก่อสร้าง ความมั่นคงและปริมาณน้ำที่ไหลเข้าบ่อที่ขุดเพื่อก่อสร้างฐานราก ซึ่งการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านได้ของเม็ดทรายในการศึกษาครั้งนี้ ใช้วิธีความดันคงที่และใช้ขนาดเม็ดทราย จากขั้นตอนการทดลองและผลการทดลองตามภาคผนวก ข ได้ค่าความชื้นน้ำตามภาพตารางที่ 4

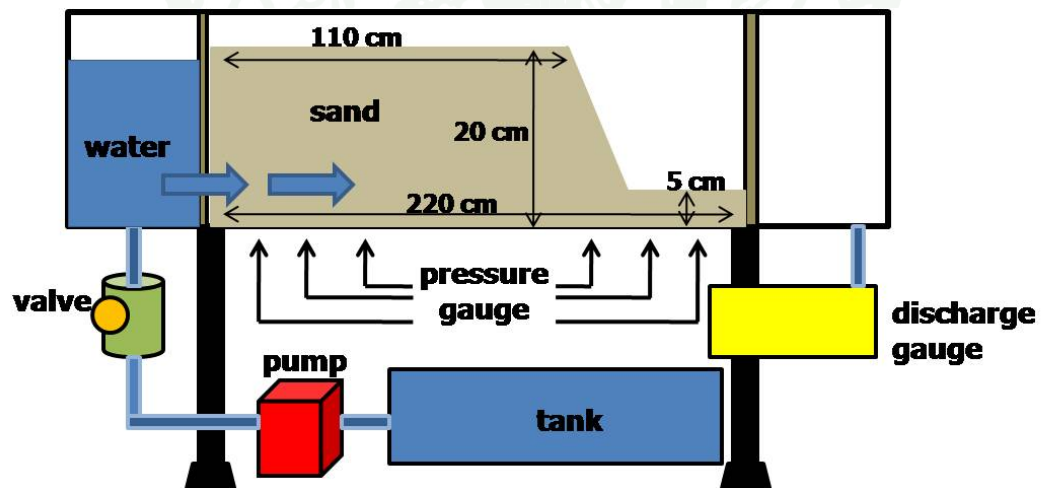
ตารางที่ 4 ค่าการทดสอบความชื้นน้ำของเม็ดทราย

ชนิดของเม็ดทราย	วิธีความกดดันคงที่	วิธีใช้ขนาดของเม็ดทราย
	(cm/sec)	(cm/sec)
1	0.51	0.40
2	0.23	0.16

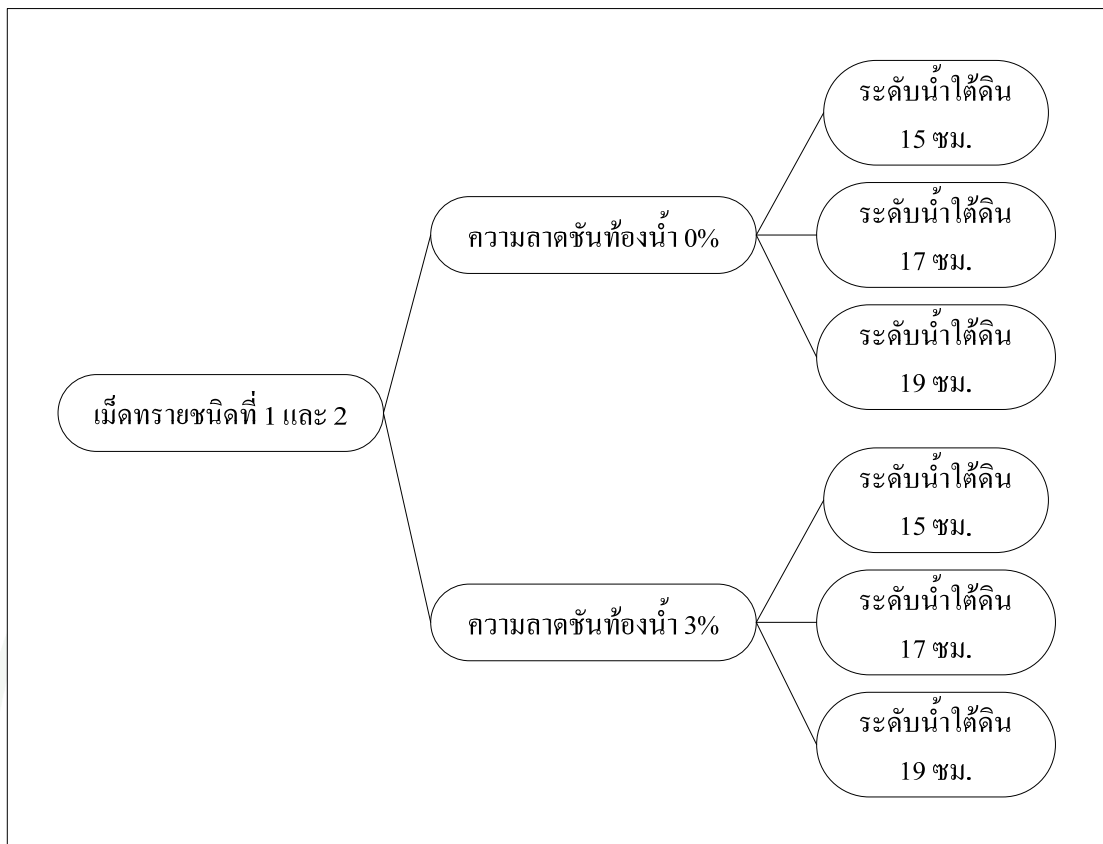
4. การทดลองการเกิดร่องน้ำเนื่องจากไหลซึมของน้ำใต้ดิน เครื่องมือทดลองสามารถควบคุมระดับน้ำใต้ดินด้านเหนือของอ่างทดลองและสามารถปรับความลาดชันท้องน้ำของอ่างทดลอง รวมทั้งวัดอัตราการไหลด้านท้ายน้ำและความดันของน้ำใต้ดินได้ นอกจากนี้เครื่องมือการทดลองยังมีตระแกรงที่กั้นเม็ดดินไม่ให้หลุดออกทั้งทางด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำอีกด้วยดังภาพที่ 18 และ 19 ซึ่งแผนการทดลองการกัดเซาะเนื่องจากน้ำใต้ดินทั้งหมดแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 18 อุปกรณ์การทดลอง



ภาพที่ 19 แสดงละเอียดของอุปกรณ์การทดลอง



ภาพที่ 20 แผนการทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง

การทดลองการเกิดร่องน้ำเนื่องจากไหลซึมของน้ำใต้ดินมีขั้นตอนดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ปรับความชันท้องน้ำของอ่างทดลองตามที่กำหนดไว้ 0% และ 3 %

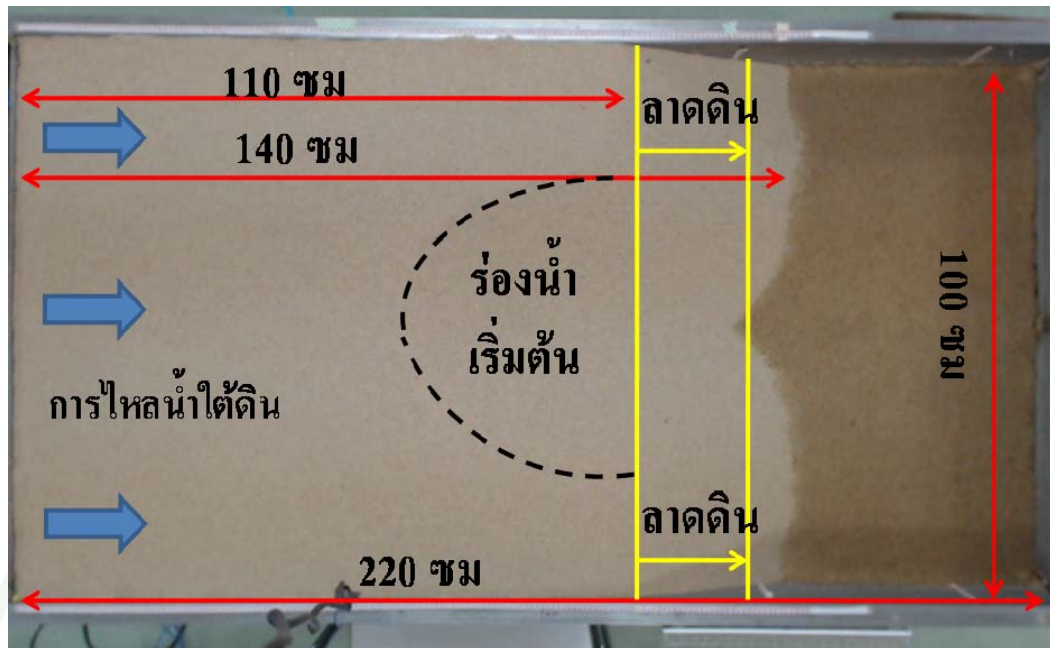
4.2 เททรายชนิดที่ 1 และ 2 ใส่อ่างทดลองโดยเทให้มีความสูงประมาณ 5 เซนติเมตรจากท้องอ่างทดลองเพื่อเป็นการปรับระดับท้องอ่างทดลองซึ่งมีระดับไม่เท่ากัน

4.3 นำแผ่นพลาสติกแข็งที่สร้างขึ้นมาโดยเฉพาะซึ่งมีลักษณะรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20x40x20 เซนติเมตร ติดอยู่กับที่กั้นชั้นทราย โดยนำมาวางที่ระยะ 130 เซนติเมตรจากด้านเหนือน้ำ แล้วจึงเททรายแห้งลงไปในอ่างทดลองให้ได้ความสูงอีก 15 เซนติเมตร ยาว 130 เซนติเมตรดังภาพที่ 21

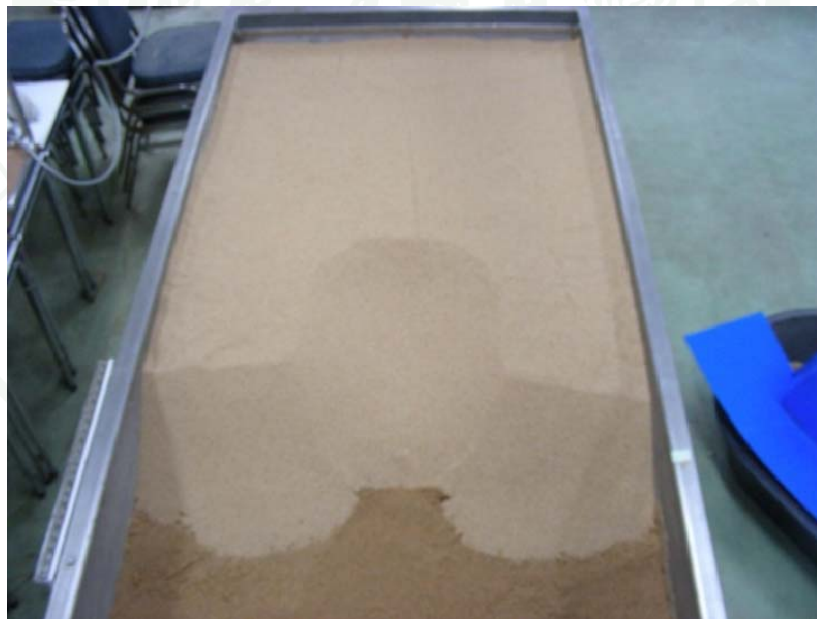


ภาพที่ 21 การเตรียมสร้างแบบจำลองชั้นทรายในการทดลอง

4.4 ดึงกล่องพลาสติกที่หุ้มพื้นผ้าที่ถูกสร้างขึ้นออกจากอ่างทดลองหลังจากนั้นจะได้ชั้นทรายและพื้นที่ตรงกลางของชั้นทรายจะเป็นร่องน้ำเริ่มต้นสำหรับการทดลองซึ่งแสดงด้วยเส้นประสีดำดังแสดงในภาพที่ 22 และแบบจำลองชั้นทรายสำหรับการทดลองเริ่มต้นดังภาพที่ 23



ภาพที่ 22 การจำลองร่องน้ำเริ่มต้นสำหรับการทดลอง



ภาพที่ 23 แบบจำลองชั้นทรายในการทดลอง

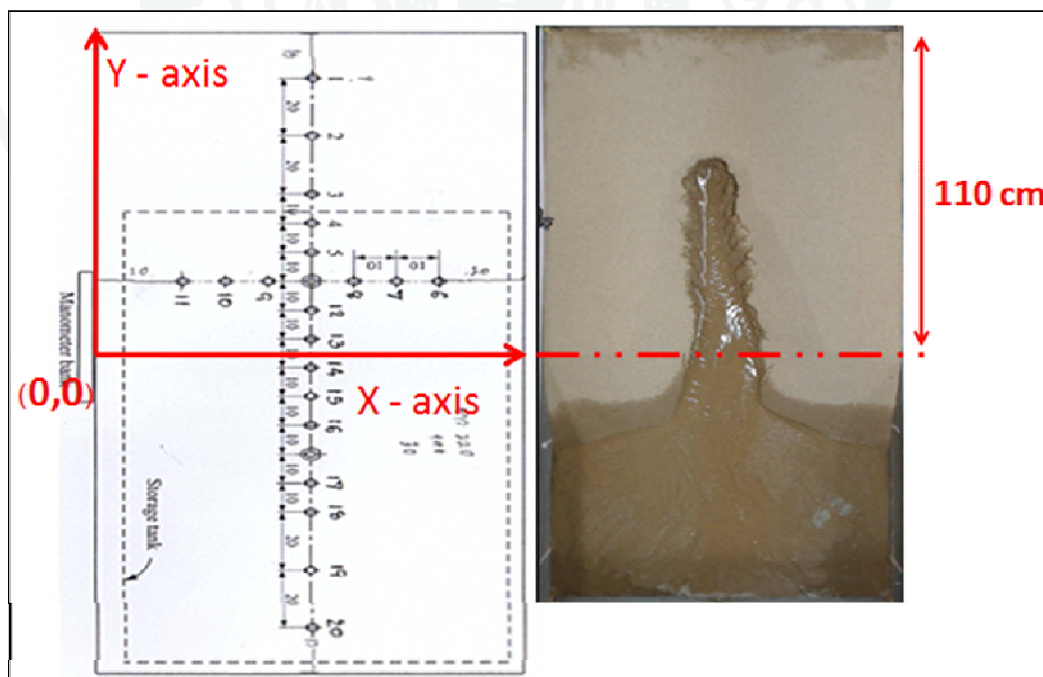
4.5 ติดตั้ง webcam ที่ตัวอ่างทดลองในตำแหน่ง top view โดยที่ตัว webcam เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ตลอดเวลา นอกจากนี้จะติดตั้งกล้องที่ความดันอ่างทดลองและเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำใต้ดินบริเวณท้ายน้ำของอ่างทดลอง

4.6 ปล่อยน้ำใต้ดินที่ด้านเหนือน้ำตามระดับน้ำใต้ดินที่ได้กำหนดไว้และรักษาระดับน้ำใต้ดินให้คงที่ตลอดการทดลอง

4.7 เมื่อร่องน้ำที่สร้างขึ้นถูกกักเซาะไปจนการพัฒนาร่องถึงบริเวณด้านเหนือน้ำจึงหยุดทำการทดลองได้

5. วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 การวิเคราะห์ข้อมูลความดันน้ำใต้ดิน ความลึกและความกว้างร่องน้ำที่บริเวณท้ายน้ำจะใช้ขอบบนของลาดดินที่ระยะทาง 110 เมตรจากด้านเหนือน้ำโดยใช้ระบบพิกัด (x,y) ในการระบุตำแหน่งของการวัดดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 การระบุพิกัดตำแหน่ง (x,y) ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลในการทดลอง

5.2 การวัดอัตราการไหลของน้ำใต้ดินจะวัดที่บริเวณท้ายน้ำของอ่างทดลอง ซึ่งมีเครื่องมือสำหรับการวัดอัตราการไหลโดยเฉพาะติดตั้งอยู่บริเวณด้านท้ายของตัวอ่างทดลองแสดงในภาพที่ 25



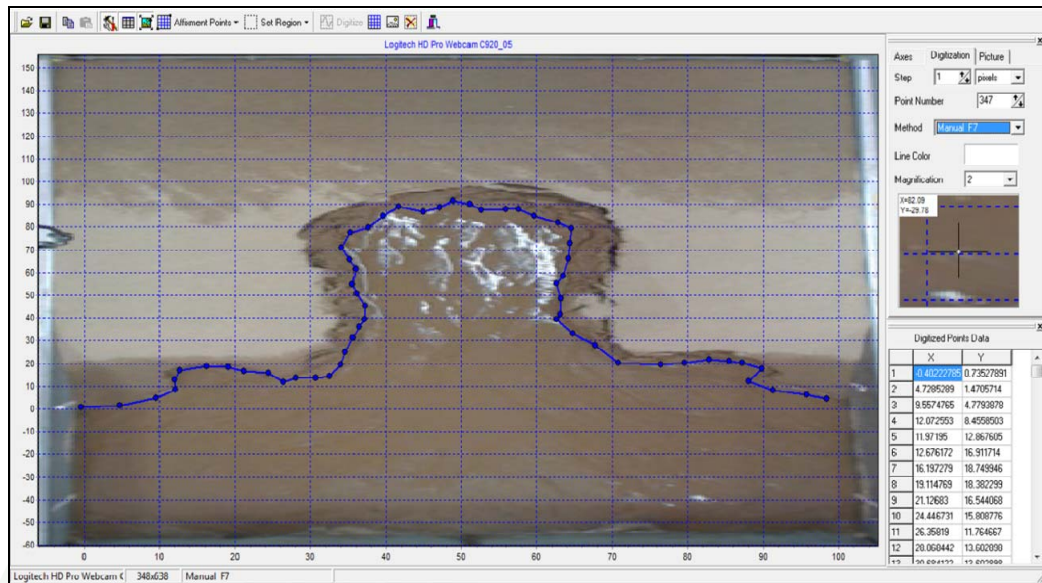
ภาพที่ 25 การวัดอัตราการไหลบริเวณท้ายน้ำของอ่างทดลอง

5.3 การวัดความลึกของร่องน้ำจะวัดทุกๆ 1 ชั่วโมง โดยใช้เวอร์เนียแบบสเกลวัดที่กึ่งกลางของความกว้างของร่องน้ำและทำการวัดความลึกของร่องน้ำจากด้านท้ายน้ำโดยใช้ระบบพิกัดที่ (0,0) ไปทางด้านเหนือน้ำทุกๆ 10 ซม. ของอ่างทดลองตามที่หัวร่องน้ำเกิดการพัฒนาร่องน้ำไปด้านเหนือน้ำดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 การวัดความลึกร่องน้ำ

5.4 ในระหว่างทำการทดลองทุกๆ 1 นาทิจะทำการจับภาพการพัฒนาร่องน้ำโดย webcam ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ ต่อจากนั้นนำภาพการเกิดร่องน้ำและการพัฒนาร่องน้ำที่ถ่ายได้จาก webcam ที่ติดอยู่ด้านบนของอ่างทดลองไปทำการปรับภาพและดิจิทัลไชน์ภาพการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 27 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของร่องน้ำ ความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำและกึ่งกลางความยาวของร่องน้ำ ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ของร่องน้ำที่ถูกกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมของน้ำใต้ดิน เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ความเป็นวงกลมของร่องน้ำต่อไป



ภาพที่ 27 การดิจิทัลข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลและวิจารณ์

ผล

การทดลองการเกิดร่องธารเนื่องจากไหลซึมของน้ำใต้ดินในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง โดยสามารถสรุปกรณีต่างๆได้ดังตารางที่ 5 จากการทดลองได้นำผลการทดลองมาวิเคราะห์หารูปร่างลักษณะของร่องน้ำ การถดถอยของหัวร่องน้ำ อัตราการไหลของน้ำใต้ดิน ความกว้างบริเวณท้ายน้ำและกึ่งกลางของความยาวร่องน้ำ ความลึกร่องน้ำ ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำเพื่อนำไปหาค่าความเป็นวงกลมของร่องน้ำ โดยผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

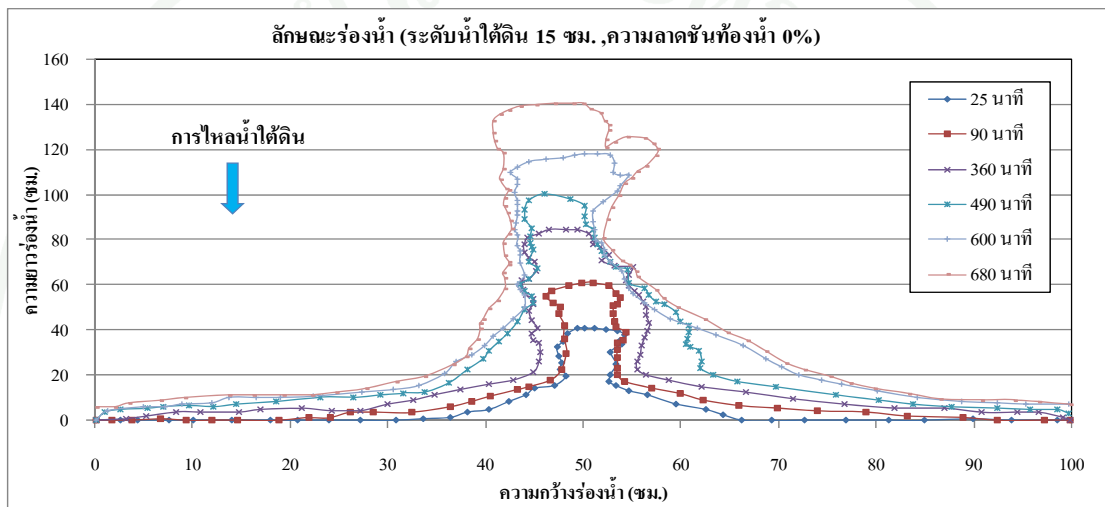
ตารางที่ 5 สรุปการศึกษากรณีระดับน้ำใต้ดินต่างๆในการทดลอง

ชนิด เม็ดทราย	กรณีที่	ความลาดชันอ่างทดลอง 0%			ความลาดชันอ่างทดลอง 3%		
		15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
ทราย ชนิดที่ 1	1	✓					
	2		✓				
	3			✓			
	4				✓		
	5					✓	
	6						✓
ทราย ชนิดที่ 2	1	✓					
	2		✓				
	3			✓			
	4				✓		
	5					✓	
	6						✓

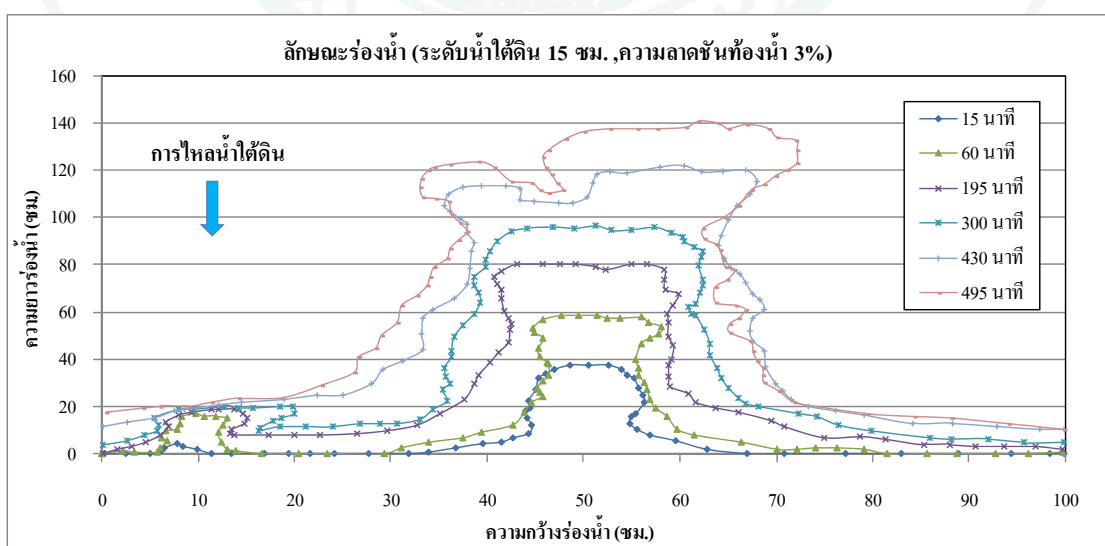
1. รูปร่างลักษณะของร่องน้ำ

1.1 การทดลองของทรายชนิดที่ 1

การเปรียบเทียบผลการทดลองระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ของทรายชนิดที่ 1 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 28 และภาพที่ 29



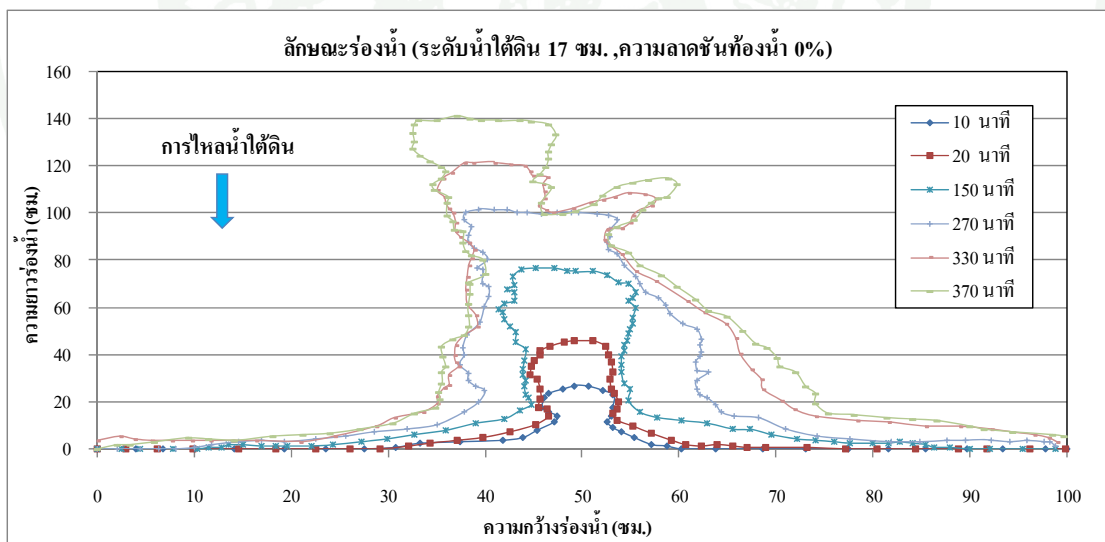
ภาพที่ 28 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1



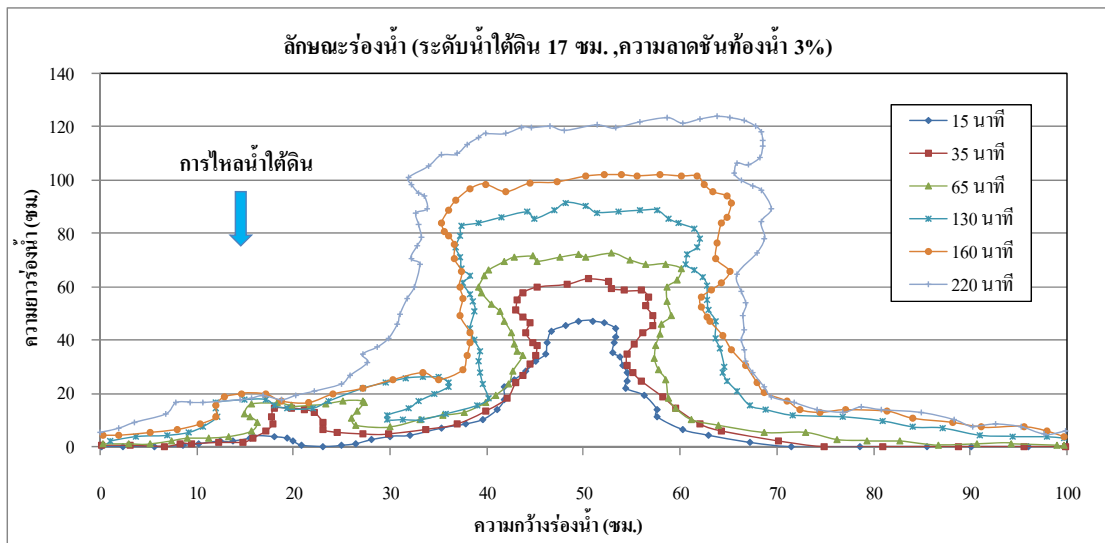
ภาพที่ 29 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1

จากผลการทดลองที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ระหว่างความลาดชันท้องน้ำ 0 และ 3% พบว่า ที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้เกิดรูปร่างร่องน้ำใหญ่กว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลงและเกิดการกัดเซาะเนื่องจากแรงลากและแรงยกของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่านเม็ดดินมากขึ้น ส่งผลให้เมื่อเวลาผ่านไปการกัดเซาะบริเวณหัวร่องน้ำไปทางด้านเหนือน้ำรุนแรงขึ้นจนเกิดเป็นร่องน้ำ นอกจากนี้ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% พบว่าเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง (bifurcation) ทั้งสองกรณี โดยที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางที่เวลา 400 นาทีของการทดลอง ซึ่งเกิดเร็วกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% ที่เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางที่เวลา 660 นาทีของการทดลอง นอกจากนี้ความลาดชันท้องน้ำ 3% พบการเกิดร่องน้ำเล็กๆ เกิดขึ้นบริเวณท้ายน้ำ เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำใต้ดินไหลไปยังท้ายน้ำมากขึ้น ส่งผลให้โอกาสเกิดร่องน้ำเล็กๆ ได้ง่ายขึ้นเหมือนกับผลการทดลองของ Pornprommin and Izumi (2010)

การเปรียบเทียบผลการทดลองระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ของทรายชนิดที่ 1 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 30 และภาพที่ 31



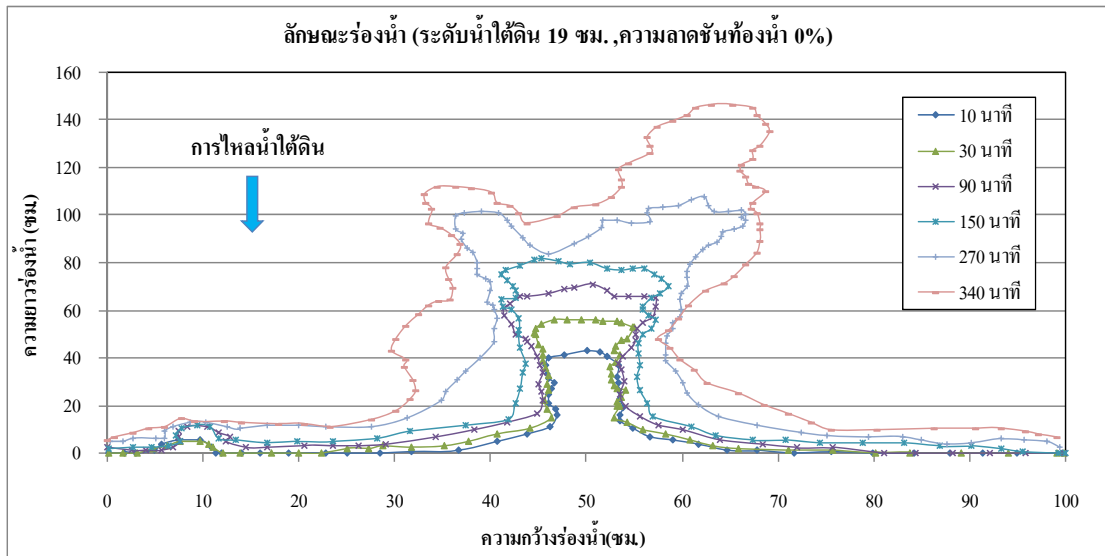
ภาพที่ 30 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1



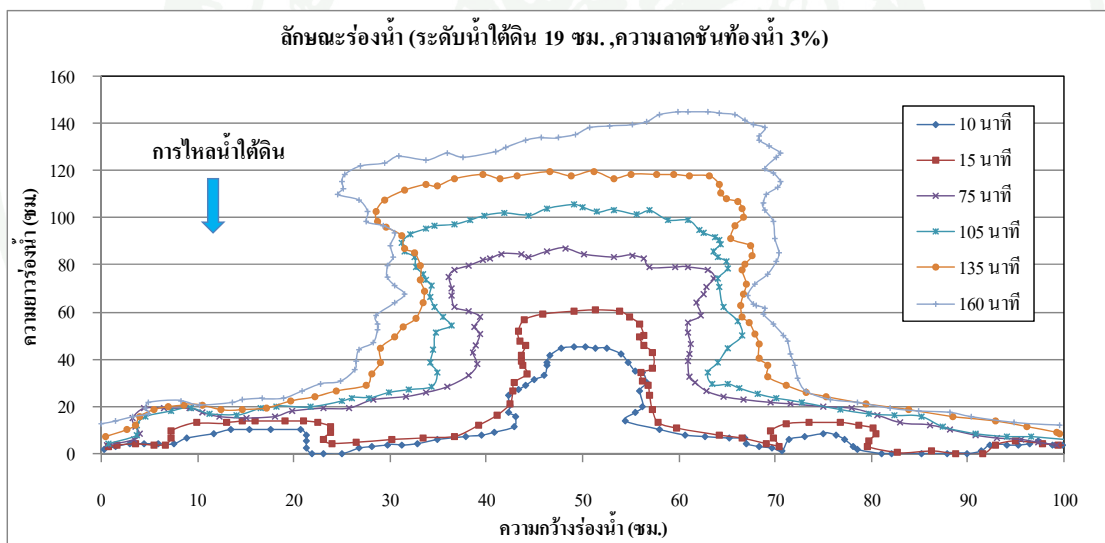
ภาพที่ 31 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1

จากผลการทดลองที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ระหว่างความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% พบว่าความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้รูปร่างร่องน้ำใหญ่กว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลงส่งผลให้เม็ดดินหลุดออกจากบริเวณลาดดินรุนแรงขึ้นและดินที่อยู่ด้านบนจะพังทลายลงมาเนื่องจากน้ำหนักของเม็ดดินเอง กระบวนการเช่นนี้จะเกิดต่อไปเรื่อยๆจนเกิดเป็นร่องน้ำในที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางที่เวลา 300 นาทีของการทดลอง ในขณะที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% ไม่เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง ซึ่งแตกต่างจากกรณีระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ในขณะที่การเกิดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำยังคงเกิดขึ้นกับความลาดชันท้องน้ำ 3%

การเปรียบเทียบผลการทดลองระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ของทรายชนิดที่ 1 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 32 และภาพที่ 33



ภาพที่ 32 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1



ภาพที่ 33 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1

จากผลการทดลองที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ระหว่างความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% พบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้เกิดรูปร่างร่องน้ำใหญ่กว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงลากและแรงยกของน้ำใต้ดินกระทำต่อเม็ดดินบริเวณผิวลาดดินมากขึ้นทำให้เม็ดดินหลุดออกได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางที่เวลา 240 นาทีของการทดลอง ในทางตรงกันข้ามความลาดชันท้องน้ำ 3% ไม่

เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง ในขณะที่การเกิดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำ เกิดขึ้นที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ทั้งสองกรณี โดยที่ขนาดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำของความลาดชันท้องน้ำ 3% ใหญ่กว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้การไหลซึมของน้ำใต้ดินไหลออกจากร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำที่ถูกกักเซาะมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0%

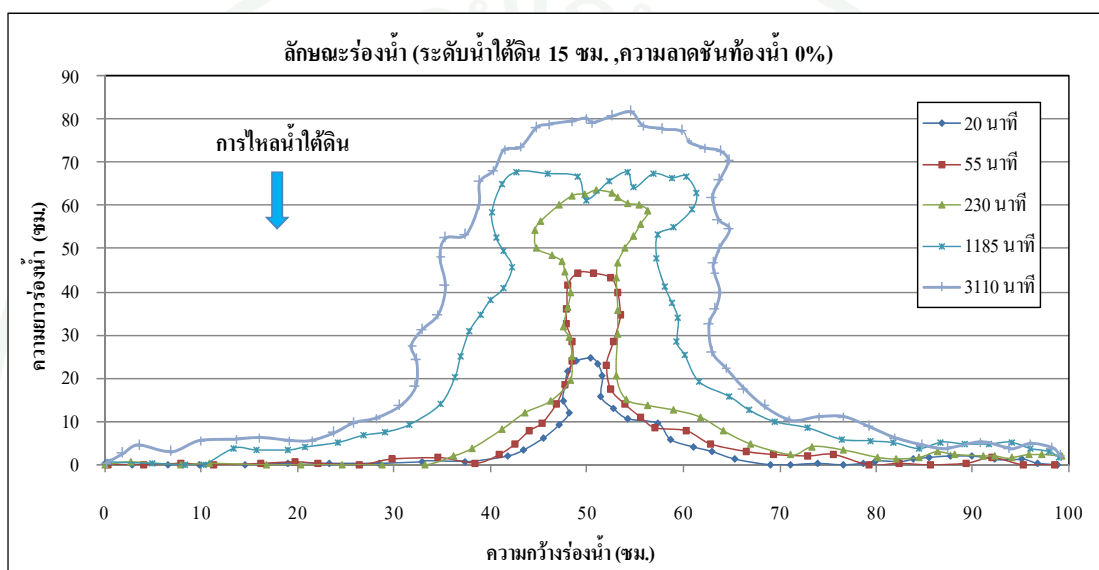
ตารางที่ 6 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 1

การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
เวลา (นาท)	690	380	340	510	225	165
ร่องน้ำแยกเป็น 2 ทาง	✓	✓	✓	✓	✗	✗
ร่องน้ำเล็ก ๆ บริเวณท้ายน้ำ	✗	✗	✓	✓	✓	✓

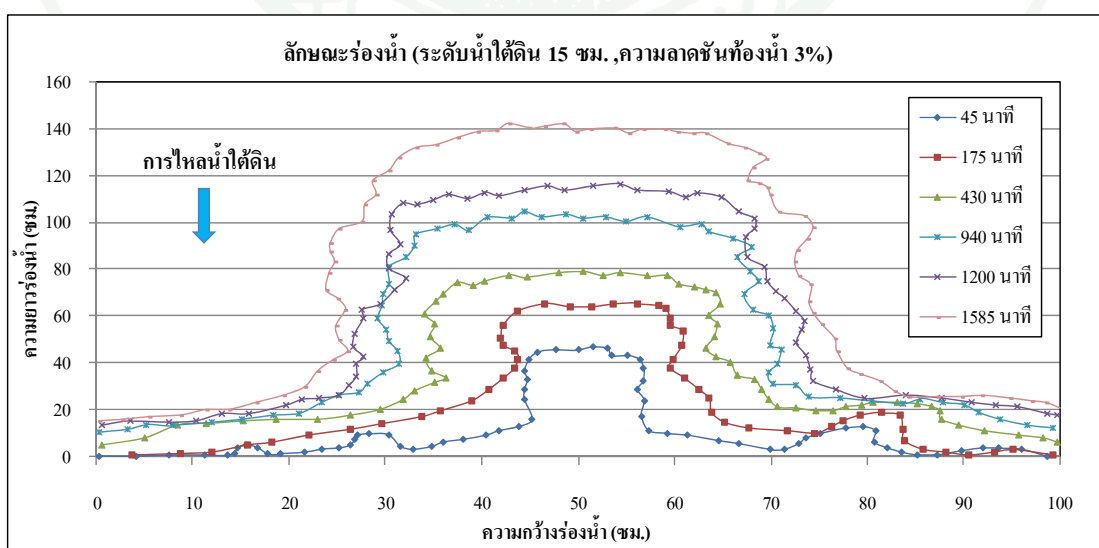
จากผลการทดลองตารางที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกัน พบว่าที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ก่อให้เกิดการกัดเซาะของชั้นทรายมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. เนื่องจากระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นทำให้เกิดการไหลของน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้เม็ดดินหลุดออกจากลาดดินได้ง่ายขึ้น เนื่องจากแรงยกและแรงลากของน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดการพังทลายลงมาของชั้นดินจนเกิดเป็นร่องน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. มีโอกาสทำให้เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง (bifurcation) มากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 17 และ 19 ซม. ซึ่งแตกต่างจากสมมติฐานของ Pornprommin *et al.* (2010) ที่กล่าวว่า ระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้น มีโอกาสเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. จะใช้เวลาในการเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางเร็วที่สุดและทำให้เกิดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. เนื่องจากระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้น ส่งผลให้การไหลของน้ำใต้ดินไปยังท้ายน้ำมากขึ้น ก่อให้เกิดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำมากขึ้น

1.2 การทดลองทรายชนิดที่ 2

การเปรียบเทียบผลการทดลองระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ของทรายชนิดที่ 2 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 24 และภาพที่ 35 ภายหลังจากการทดลองของทรายชนิดที่ 1



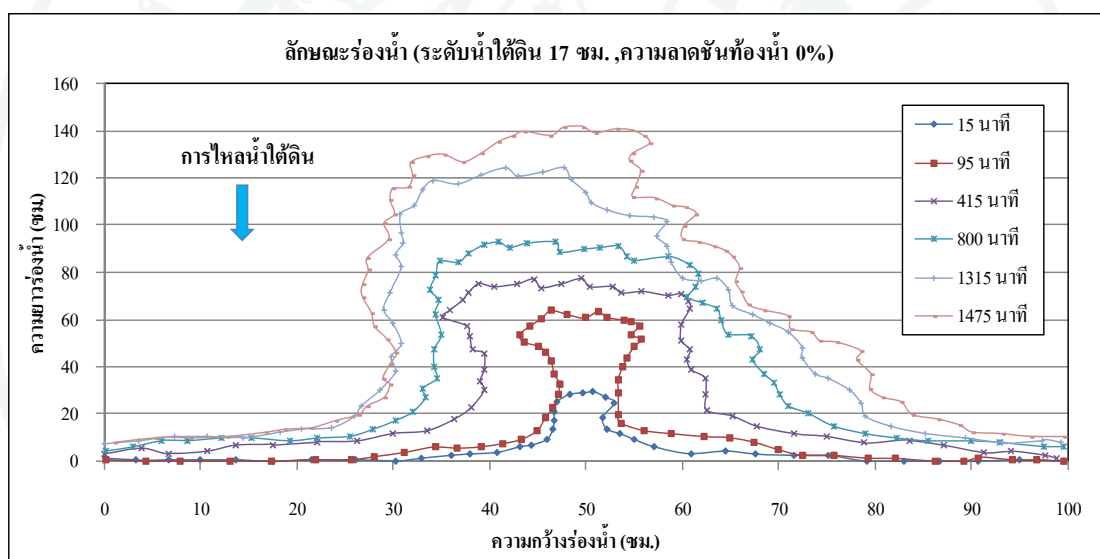
ภาพที่ 34 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2



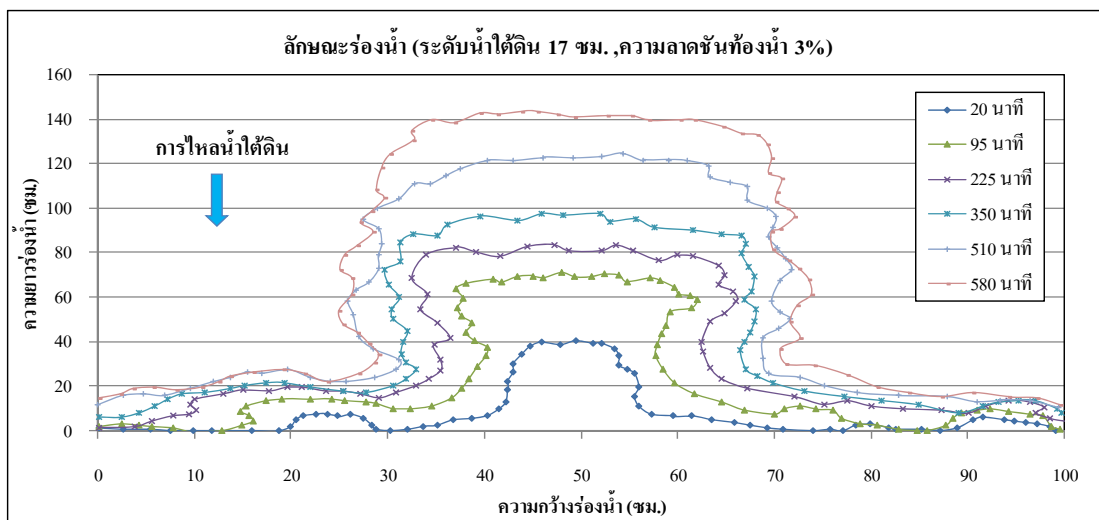
ภาพที่ 35 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2

จากผลการทดลองที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ระหว่างความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% พบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้รูปร่างร่องน้ำใหญ่กว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% นอกจากนี้ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% พบว่าไม่เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางทั้งสองกรณี ในขณะที่การเกิดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำเกิดขึ้นเฉพาะความลาดชันท้องน้ำ 3% เท่านั้น เหตุเพราะเมื่อความลาดชันท้องน้ำเพิ่มขึ้นลักษณะการไหลของน้ำใต้ดินมีโอกาสที่จะไหลเป็นเส้นตรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงทำให้น้ำใต้ดินไหลไปยังท้ายน้ำมากยิ่งขึ้น

การเปรียบเทียบผลการทดลองระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ของทรายชนิดที่ 2 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 36 และภาพที่ 37



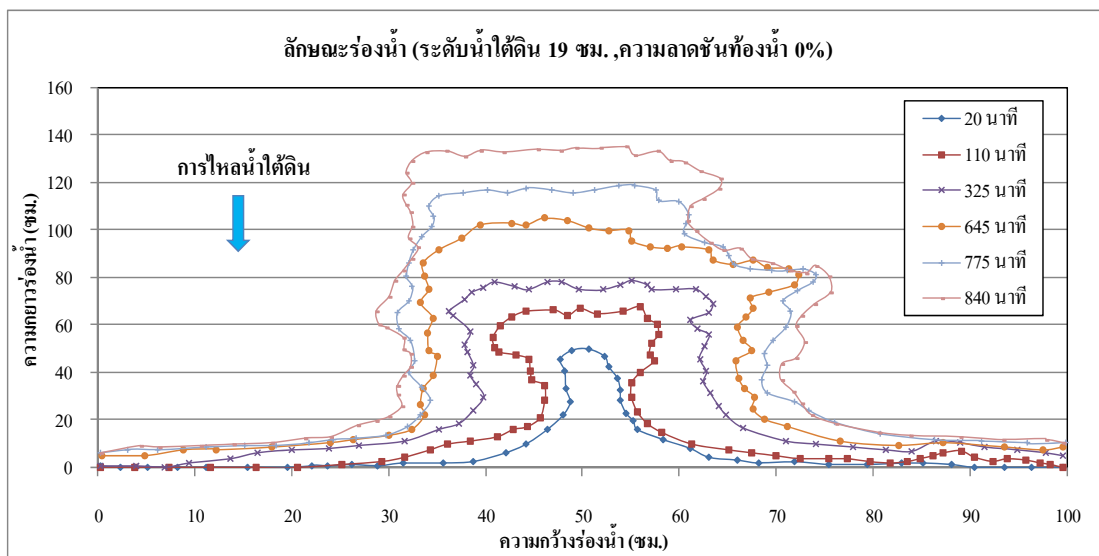
ภาพที่ 36 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2



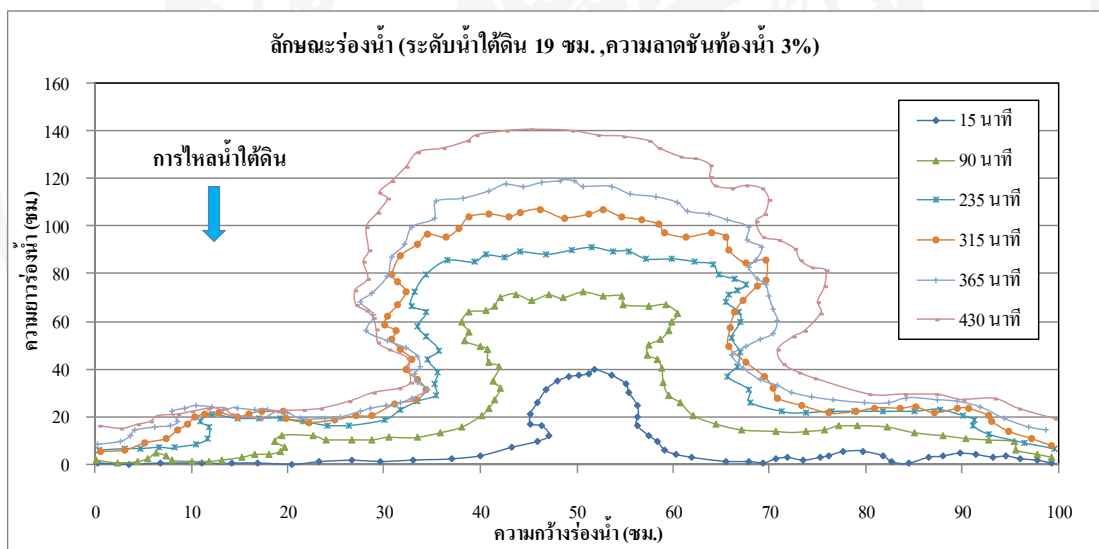
ภาพที่ 37 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2

จากผลการทดลองที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ระหว่างความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% พบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้รูปร่างร่องน้ำใหญ่กว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ไม่เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางทั้งสองกรณี ในขณะที่การเกิดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำยังคงเกิดขึ้นเฉพาะที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% เท่านั้น

การเปรียบเทียบผลการทดลองระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ที่ความลาดชัน 0% และ 3% ของทรายชนิดที่ 2 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 38 และภาพที่ 39



ภาพที่ 38 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2



ภาพที่ 39 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2

จากผลการทดลองที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ระหว่างความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% พบว่าความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้รูปร่างร่องน้ำใหญ่กว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ไม่เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง ในขณะที่การเกิดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำยังคงเกิดขึ้นกับความลาดชันท้องน้ำ 3% เท่านั้น

การเปรียบเทียบลักษณะร่องน้ำต่อเวลาที่ความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกันของทรายชนิดที่ 2 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การเกิดร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2

การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
เวลา (นาท)	3000	1480	800	1620	580	440
ร่องน้ำแยกเป็น 2 ทาง	×	×	×	×	×	×
ร่องน้ำเล็ก ๆ บริเวณท้ายน้ำ	×	×	×	✓	✓	✓

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกัน พบว่าที่ระดับน้ำใต้ดินที่ 19 ซม. ทำให้เกิดการกัดเซาะของชั้นทรายมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. นอกจากนี้ยังพบว่า การทดลองโดยใช้เม็ดทรายชนิดที่ 2 ไม่เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง (bifurcation) เลยทุกกรณี ในขณะที่การเกิดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำยังคงเกิดเฉพาะที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% เหมือนเม็ดทรายชนิดที่ 1

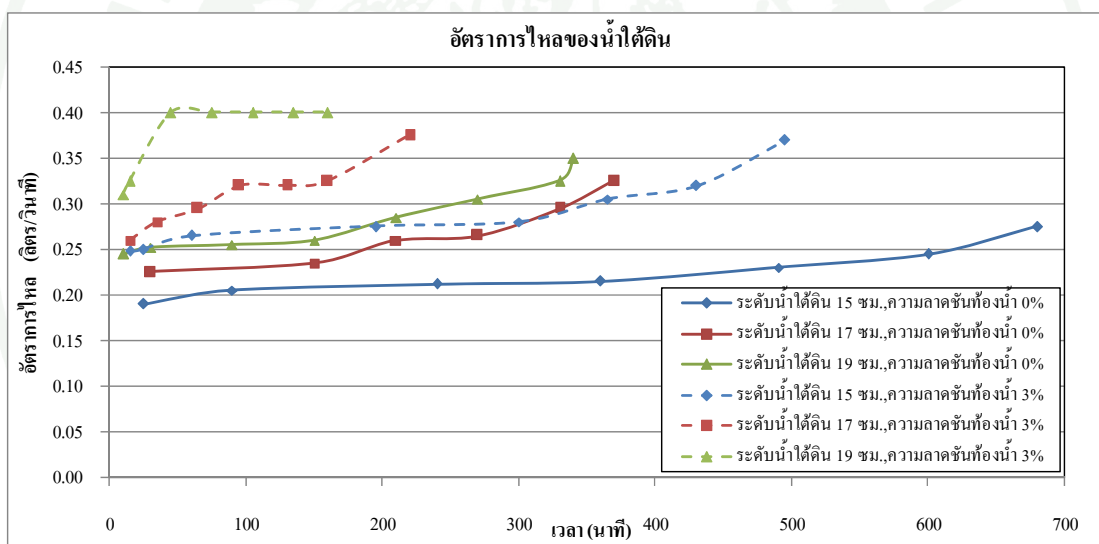
จากการเปรียบเทียบเม็ดทรายทั้งสองชนิดพบว่า เม็ดทรายชนิดที่ 1 ทำให้เกิดการขยายตัวของร่องน้ำเร็วกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2 อันเนื่องมาจากเม็ดทรายชนิดที่ 1 ให้ค่าความซึมน้ำ (permeability) มากกว่า เพราะว่ามีเม็ดทรายขนาดใหญ่ขึ้นทำให้น้ำใต้ดินไหลซึมเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดทราย เกิดแรงเสียดทานของเม็ดทรายที่กระทำต่อน้ำใต้ดินน้อยกว่าเม็ดทรายที่มีขนาดเล็กกว่า ส่งผลให้ค่าความซึมน้ำของเม็ดดินมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้เม็ดดินหลุดออกมาจากลาดดินได้ง่ายและเกิดการกัดเซาะบริเวณหัวร่องน้ำมากกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2 แต่ทว่าทรายชนิดที่ 2 กลับให้รูปร่างลักษณะร่องน้ำใหญ่กว่า เนื่องจากทรายชนิดที่ 2 มีขนาดเล็กทำให้ลักษณะการเกิดการพังทลายแบบเป็นวงกว้างกว่าทรายชนิดที่ 1 นอกจากนี้ทรายชนิดที่ 1 จะเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางโดยเฉพาะที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% จะเกิดทุกกรณี แต่เม็ดทรายชนิดที่ 2 กลับไม่ให้เกิด

ร่องน้ำแยกเป็นสองทางเลย ในขณะที่การเกิดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำ ทรายชนิดที่ 1 มีโอกาสเกิดมากกว่า ทั้งนี้เพราะทรายชนิดที่ 1 ทำให้น้ำใต้ดินไหลไปยังบริเวณท้ายน้ำมากกว่าทรายชนิดที่ 2

2. อัตราการไหลของน้ำใต้ดิน

2.1 การทดลองทรายชนิดที่ 1

การเปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำใต้ดินบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ ของทรายชนิดที่ 1 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 40 และอัตราการไหลเมื่อสิ้นสุดการทดลองดังตารางที่ 8



ภาพที่ 40 อัตราการไหลที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 1

ตารางที่ 8 อัตราการไหลที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของ
ทรายชนิดที่ 1

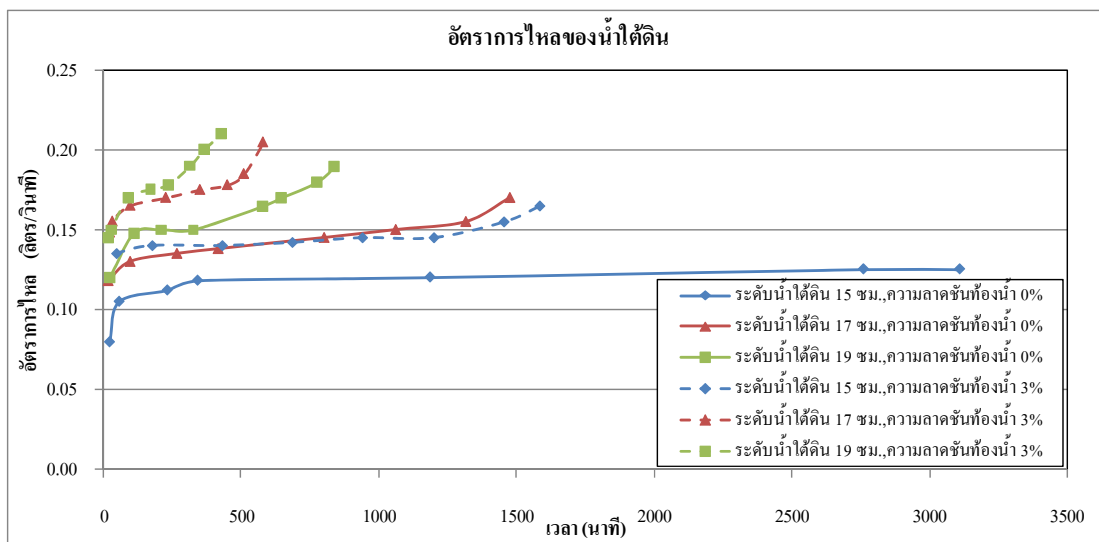
การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)	0.275	0.325	0.350	0.370	0.385	> 0.4*

หมายเหตุ * เครื่องมือวัดอัตราการไหลสามารถวัดได้สูงสุด 0.4 ลิตร/วินาที

จากผลการทดลอง ภาพที่ 40 และตารางที่ 8 แสดงอัตราการไหลของน้ำใต้ดินระหว่างการทดลองและเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ระดับน้ำใต้ดินเดียวกัน แต่ความลาดชันท้องน้ำแตกต่างกัน ความลาดชันท้องน้ำ 3% ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำแปรผันตรงกับอัตราการไหลของน้ำใต้ดินตามหลักความลาดชันพลังงานของการไหล และเมื่อเปรียบเทียบที่ความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกัน พบว่าที่ระดับน้ำใต้ดินที่ 19 ซม. ทำให้อัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองสูงกว่าที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. เนื่องจากอัตราการไหลแปรผันตรงกับความสูงของน้ำใต้ดินตามกฎดาร์ซี ซึ่งอัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดแรงยกและแรงลากของน้ำใต้ดินที่กระทำต่อเม็ดทรายเพิ่มขึ้น ทำให้เม็ดดินสามารถหลุดออกจากบริเวณผิวลาดดินได้ง่ายขึ้น

2.2 การทดลองทรายชนิดที่ 2

การเปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำใต้ดินบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ ของทรายชนิดที่ 2 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 41 และอัตราการไหลเมื่อสิ้นสุดการทดลองดังตารางที่ 9



ภาพที่ 41 อัตราการไหลที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 2

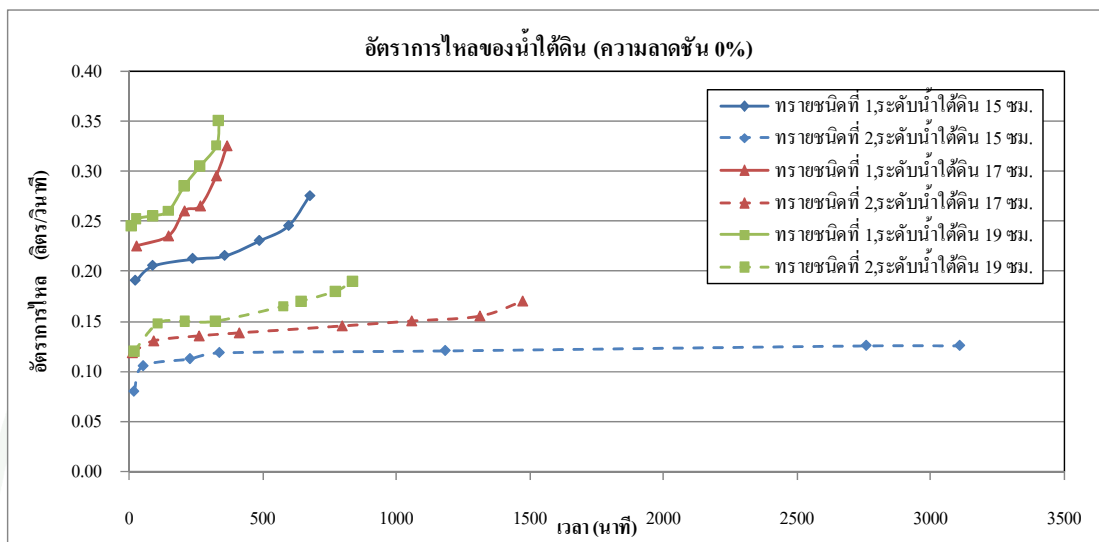
ตารางที่ 9 อัตราการไหลที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2

การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)	0.125	0.170	0.190	0.165	0.205	0.210

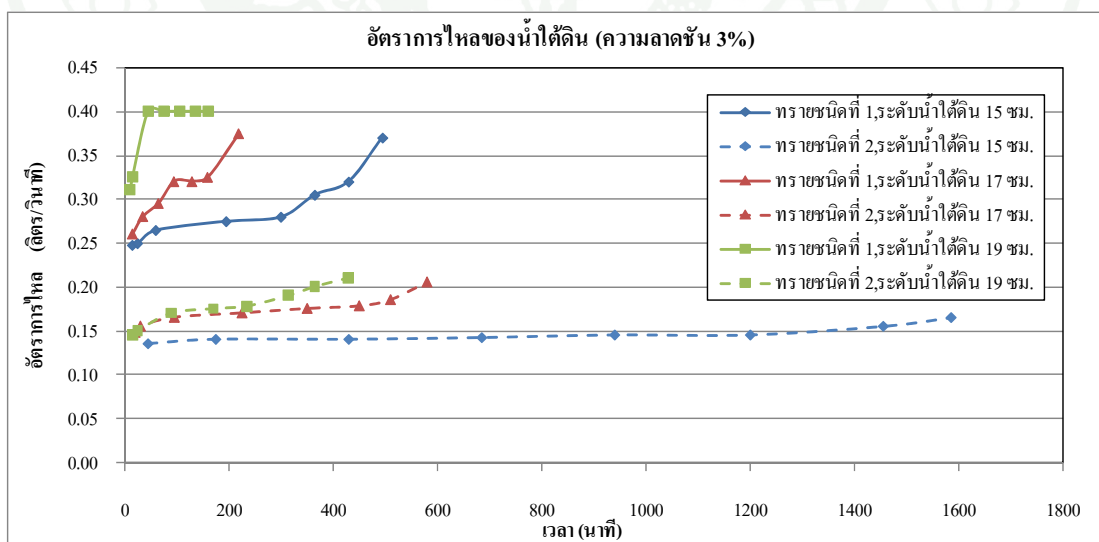
จากผลการทดลอง ภาพที่ 41 และตารางที่ 9 แสดงอัตราการไหลของน้ำใต้ดินระหว่างการทดลองและเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ระดับน้ำใต้ดินเดียวกัน แต่ความลาดชันท้องน้ำแตกต่างกัน ความลาดชันท้องน้ำ 3% ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่เวลาเดียวกัน และสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% และเมื่อเปรียบเทียบที่ความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกัน พบว่าระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ทำให้อัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองสูงกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม.

จากการเปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำใต้ดินบริเวณท้ายน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 42 และภาพที่

43



ภาพที่ 42 การเปรียบเทียบอัตราการไหลของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0%

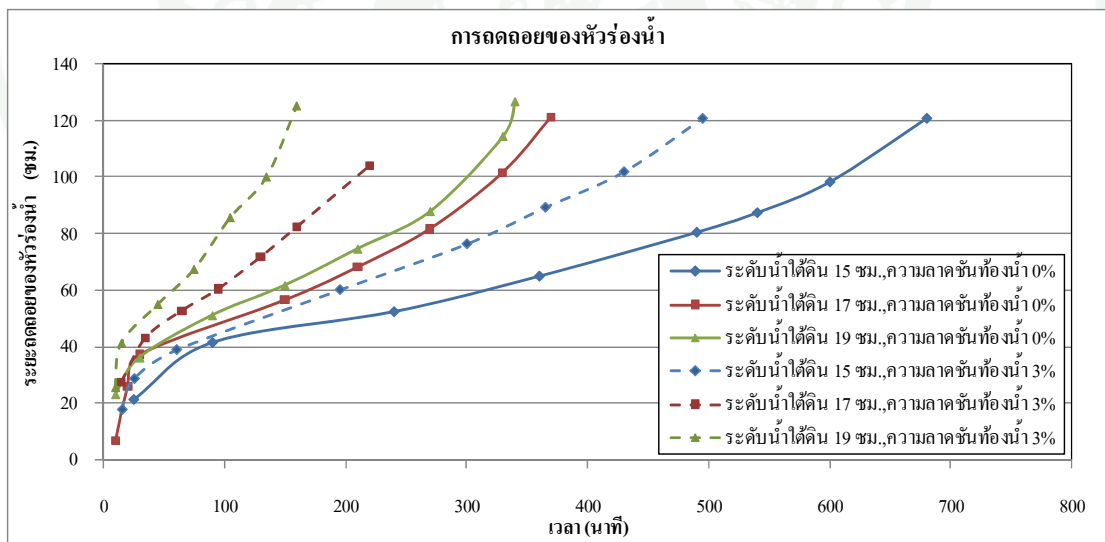


ภาพที่ 43 การเปรียบเทียบอัตราการไหลของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3%

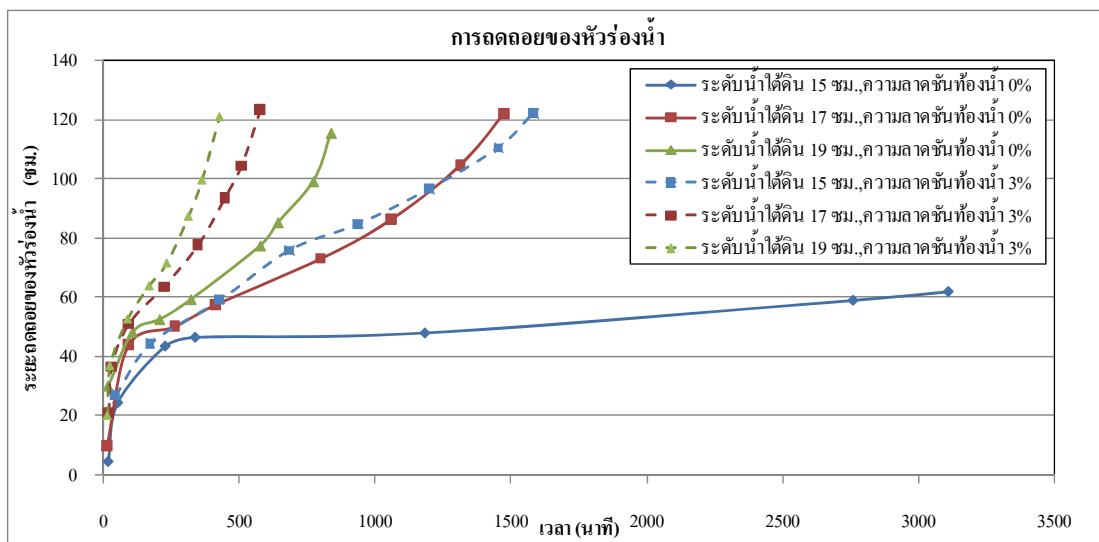
จากการเปรียบเทียบเม็ดยาทั้งสองชนิด พบว่าเม็ดยาชนิดที่ 1 ก่อให้เกิดอัตราการไหลของน้ำใต้ดินบริเวณท้ายน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองมากกว่าเม็ดยาชนิดที่ 2 อันเนื่องมาจากเม็ดยาชนิดที่ 1 มีขนาดใหญ่กว่าเม็ดยาชนิดที่ 2 ทำให้น้ำใต้ดินไหลซึมเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดยา เกิดแรงเสียดทานของเม็ดยาที่กระทำต่อน้ำใต้ดินน้อยกว่าเม็ดยาที่มีขนาดเล็กกว่า ส่งผลให้ค่าความซึมน้ำ (permeability) ของเม็ดยาชนิดที่ 1 มากกว่าเม็ดยาชนิดที่ 2 ดังแสดงการทดลองหาค่าความซึมน้ำของเม็ดยาในตารางที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความซึมน้ำของเม็ดยาชนิดที่ 1 มีค่ามากกว่าเม็ดยาชนิดที่ 2 สองเท่า ดังนั้นจึงก่อให้เกิดอัตราการไหลของน้ำใต้ดินของเม็ดยาชนิดที่ 1 มากกว่าเม็ดยาชนิดที่ 2 อยู่สองเท่าเช่นกัน ตามสมการการไหลซึมของน้ำผ่านเม็ดยาตามกฎของดาร์ซี

3. การถดถอยของหัวร่องน้ำ

การเปรียบเทียบระยะหัวร่องน้ำที่เคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ ของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 44 และ 45 ตามลำดับ



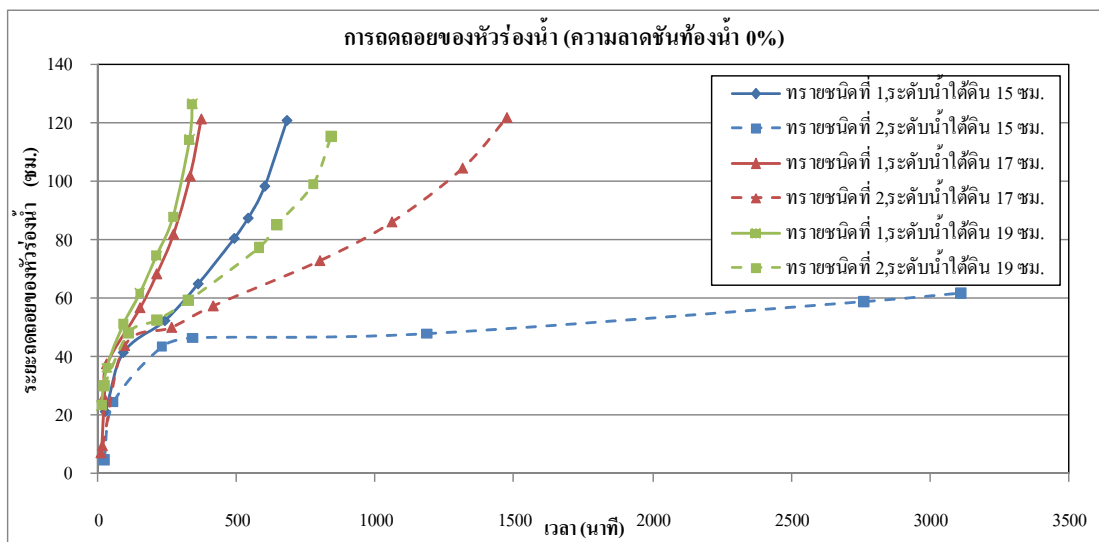
ภาพที่ 44 ระยะหัวร่องน้ำเคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 1



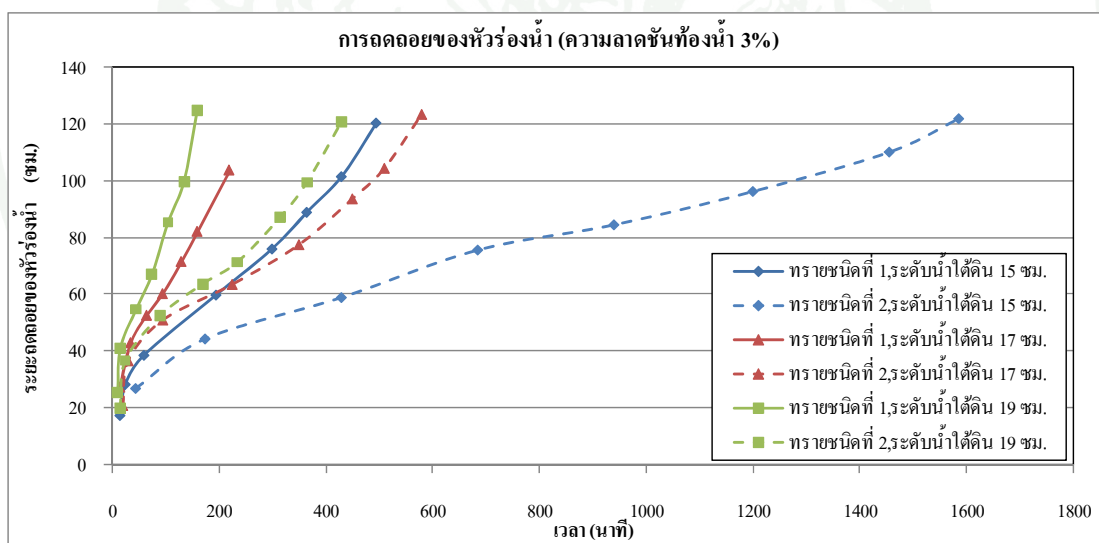
ภาพที่ 45 ระยะหัวร่องน้ำเคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 2

จากผลการทดลองภาพที่ 44 และ 45 แสดงระยะหัวร่องน้ำที่เคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำเมื่อเปรียบเทียบที่ความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกัน พบว่าที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ทำให้หัวร่องน้ำเคลื่อนที่ไปทางด้านเหนือน้ำที่เวลาเดียวกันเร็วกว่าระดับน้ำใต้ดินที่ 15 และ 17 ซม. เนื่องจากระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้นให้อัตราการไหลของน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบที่ระดับน้ำใต้ดินเท่ากัน แต่ความลาดชันท้องน้ำแตกต่างกัน พบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้เกิดหัวร่องน้ำเคลื่อนที่ไปยังด้านเหนือน้ำที่เวลาเดียวกันเร็วกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำเพิ่มขึ้นให้อัตราการไหลของน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการกัดเซาะของชั้นทรายบริเวณหัวร่องน้ำที่เวลาเดียวกันเร็วขึ้น และเป็นเช่นนี้ทั้งกรณีเม็ดทรายชนิดที่ 1 และ 2

จากการเปรียบเทียบทรายชนิดที่ 1 และ 2 ของระยะหัวร่องน้ำที่เคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 46 และภาพที่ 47



ภาพที่ 46 การเปรียบเทียบระยะหัวร่อนน้ำเคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำได้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0%



ภาพที่ 47 การเปรียบเทียบระยะหัวร่อนน้ำเคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำได้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3%

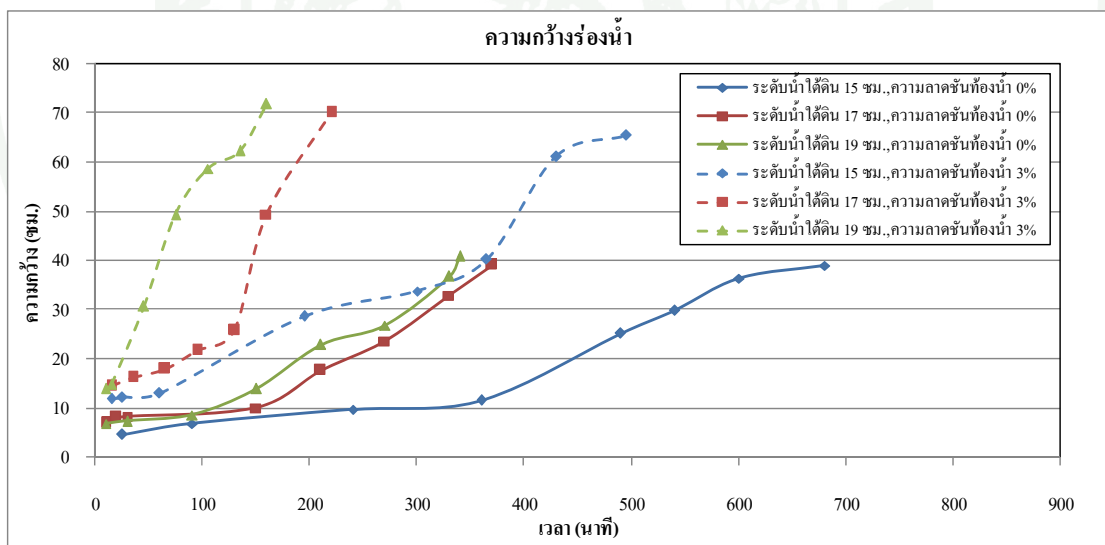
ผลการทดลองภาพที่ 46 และ 47 เป็นการเปรียบเทียบทรายทั้งสองชนิดของระยะหัวร่อนน้ำที่เคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำที่เวลาเดียวกันของความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% พบว่า เม็ดทรายชนิดที่ 1 ทำให้เกิดการกักเซาะบริเวณหัวร่อนน้ำที่เวลาเดียวกันเร็วกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2

เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำใต้ดินในเม็ดทรายชนิดที่ 1 มากกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2 ส่งผลให้เกิดการกัดเซาะบริเวณหัวร่องน้ำที่เวลาเดียวกันมากขึ้นและค่ามุมทรงตัวของเม็ดดิน (angle of repose) ของเม็ดทรายชนิดที่ 1 มากกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 3 ทำให้ลาดดินขาดเสถียรภาพได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดการพังทลายของลาดดินเนื่องจากการไหลซึมของน้ำใต้ดินในเม็ดทรายชนิดที่ 1 มากกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2 อีกด้วย

4. ความกว้างร่องน้ำ

4.1 การทดลองทรายชนิดที่ 1

จากการเปรียบเทียบความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ ของทรายชนิดที่ 1 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 48 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองดังตารางที่ 10 และความกว้างร่องน้ำที่กึ่งกลางของความยาวร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองดังตารางที่ 11



ภาพที่ 48 ความกว้างร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 1

ตารางที่ 10 ความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 1

การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
ความกว้าง (ซม.)	38.91	39.08	40.90	65.37	70.01	71.76

ตารางที่ 11 ความกว้างบริเวณกึ่งกลางความยาวร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 1

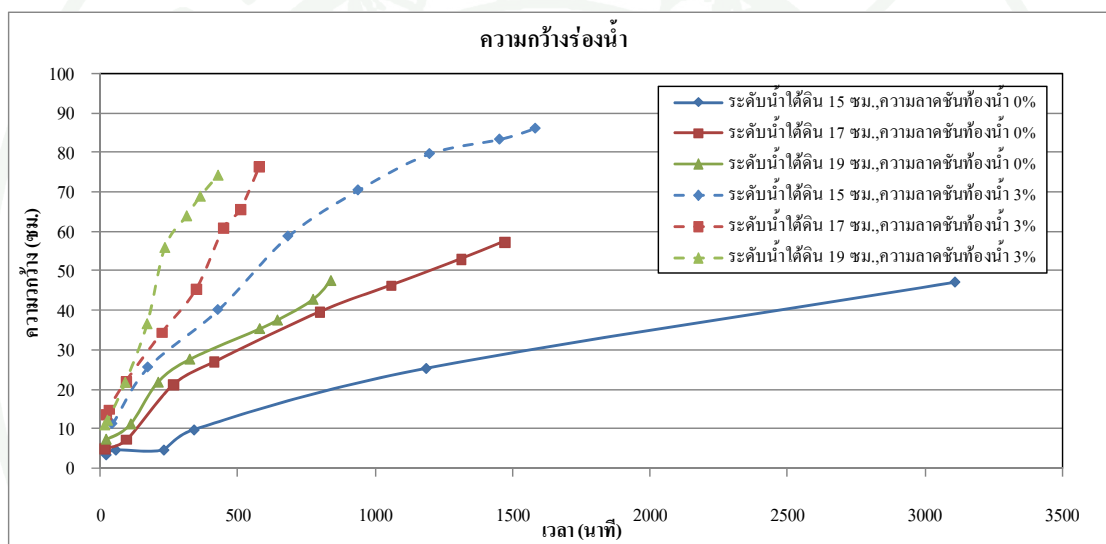
การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
ความกว้าง (ซม.)	11.89	20.84	29.40	30.06	33.44	37.82

จากผลการทดลองภาพที่ 48 และตารางที่ 10 แสดงความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองซึ่งเกิดจากทิศทางการไหลของน้ำที่พัดพาตะกอน ไปยังท้ายน้ำ (fluvial process) รวมทั้งตารางที่ 11 แสดงความกว้างที่กึ่งกลางของความยาวร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งเกิดจากขบวนการพังทลายของเม็ดดิน (backwasting) จากการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึม พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระดับน้ำใต้ดินเท่ากัน แต่ความลาดชันท้องน้ำแตกต่างกัน ความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้เกิดความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลอง รวมทั้งความกว้างที่กึ่งกลางของความยาวร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำ 3% ให้อัตราการไหลของน้ำใต้ดินสูงกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% และเมื่อเปรียบเทียบที่ความลาดชันท้องน้ำเท่ากัน แต่ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกัน พบว่าระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ทำให้เกิดความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลอง รวมทั้งความกว้างที่กึ่งกลางของความยาวร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ให้อัตราการไหลของน้ำใต้ดินเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มี

ปริมาณน้ำใต้ดินไหลซึมออกมาจากหัวร่อนน้ำและตามขอบร่อนน้ำมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการกัดเซาะบริเวณหัวร่อนน้ำรวมถึงขอบร่อนน้ำมากยิ่งขึ้นเหมือนผลการทดลองของ Pornprommin et al. (2010)

4.2 การทดลองทรายชนิดที่ 2

จากการเปรียบเทียบความกว้างร่อนน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ ของทรายชนิดที่ 2 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 49 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองดังตารางที่ 12 และความกว้างร่อนน้ำที่กึ่งกลางของความยาวร่อนน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองดังตารางที่ 13



ภาพที่ 49 ความกว้างร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 2

ตารางที่ 12 ความกว้างร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลอง
ของทรายชนิดที่ 2 บริเวณท้ายน้ำ

การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
ความกว้าง (ซม.)	47.12	57.48	47.47	86.30	76.37	74.31

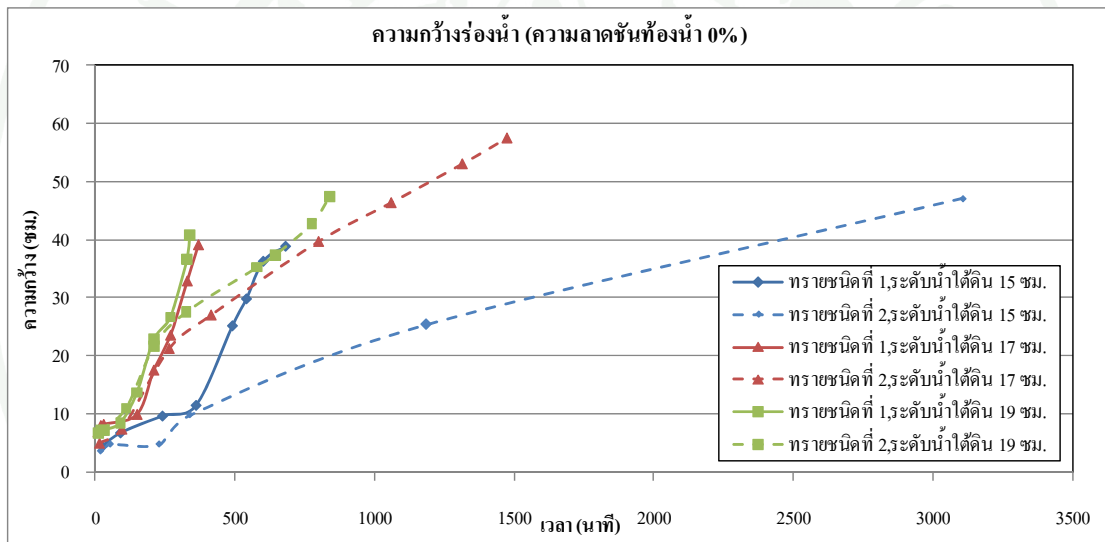
ตารางที่ 13 ความกว้างบริเวณกึ่งกลางความยาวร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำ
ต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2

การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
ความกว้าง (ซม.)	28.38	39.43	44.62	50.70	48.66	48.19

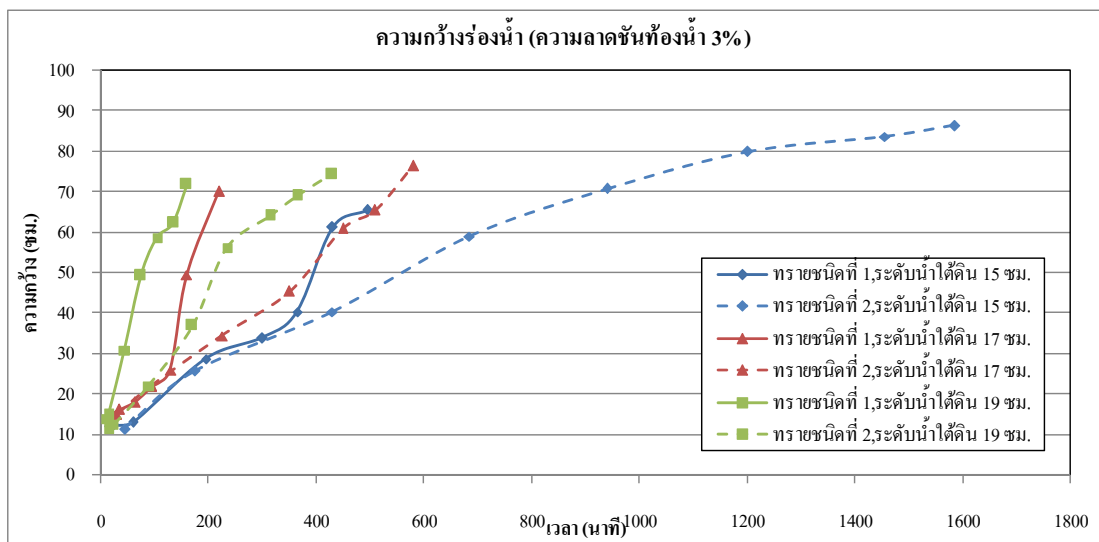
จากผลการทดลองภาพที่ 49 แสดงความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำ เมื่อเปรียบเทียบระดับน้ำใต้ดินเท่ากัน แต่ความลาดชันท้องน้ำแตกต่างกัน พบว่าความลาดชันท้องน้ำ 3% ให้ความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% แต่เมื่อเปรียบเทียบความลาดชันท้องน้ำเท่ากัน แต่ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกัน พบว่าระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ทำให้เกิดความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่เวลาเดียวกันมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ให้อัตราการไหลและการถดถอยของหัวร่องน้ำที่เวลาเดียวกันมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองดังตารางที่ 12 กลับพบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ให้ความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำมากที่สุด เนื่องจากร่องน้ำยังไม่เข้าสู่ความมีเสถียรภาพ ซึ่งแท้จริงแล้วร่องน้ำสามารถที่จะพัฒนาร่องน้ำไปได้อีกจนเข้าสู่สภาวะความมีเสถียรภาพ ในขณะที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ให้ความกว้างบริเวณท้ายน้ำมากที่สุดเนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. การพัฒนาร่องน้ำได้หยุดการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมเพราะร่องน้ำได้เข้าสู่ความมีเสถียรภาพแล้ว นอกจากนี้ตารางที่ 13 พบว่าที่

ความลาดชันท้องน้ำ 0% ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ให้ความกว้างที่กึ่งกลางของความยาวร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากที่สุด ตรงกันข้ามกับความลาดชันท้องน้ำ 3% ซึ่งระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ให้ความกว้างที่กึ่งกลางของความยาวร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากที่สุด เหตุเพราะว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% ทำให้ร่องน้ำพัฒนาไปสู่ความมีเสถียรภาพได้เร็วกว่าความลาดชันท้องน้ำ 3% ก่อให้เกิดความกว้างร่องน้ำที่กึ่งกลางของความยาวร่องน้ำพัฒนาไปสู่ความกว้างที่ควรจะเป็นได้เร็วกว่า

จากการเปรียบเทียบความกว้างร่องน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0 และ 3% ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 50 และภาพที่ 51



ภาพที่ 50 การเปรียบเทียบความกว้างร่องน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0%

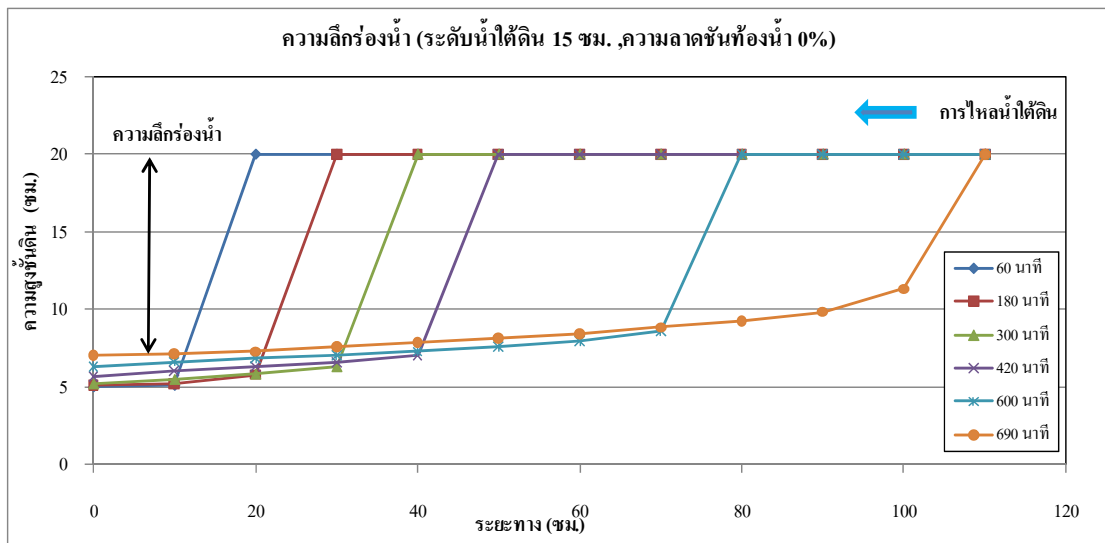


ภาพที่ 51 การเปรียบเทียบความกว้างร่องน้ำของทรายนชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3%

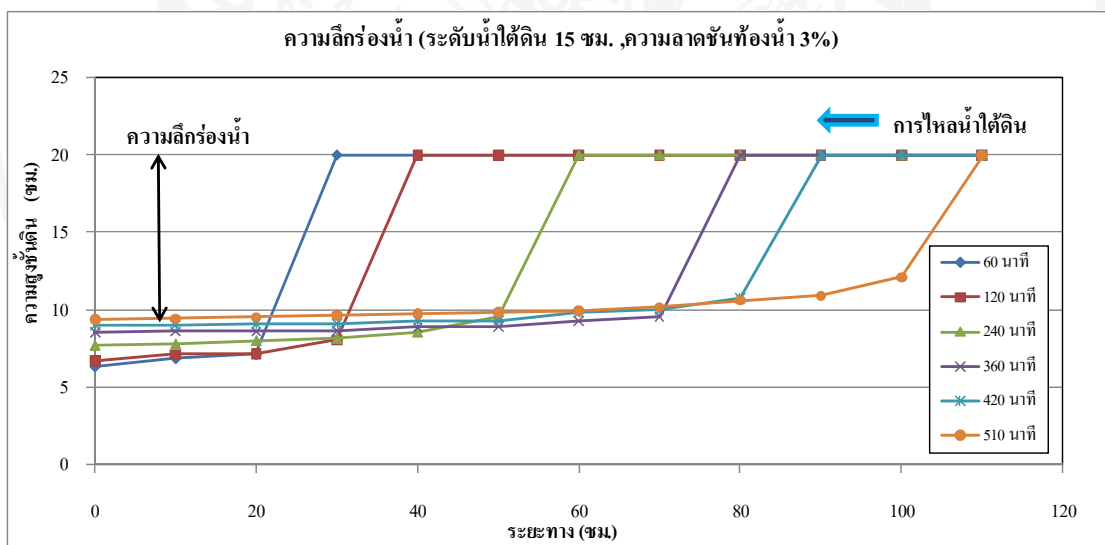
จากการเปรียบเทียบเม็ดทรายทั้งสองชนิดจะพบว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 1 ทำให้เกิดความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่เวลาเดียวกันมากกว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 2 อันเนื่องมาจากเม็ดทรายนชนิดที่ 1 มีขนาดของเม็ดทรายใหญ่กว่าจึงทำให้เกิดการกัดเซาะของร่องน้ำเนื่องจากอัตราการไหลของน้ำใต้ดินมากกว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 2 แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลับพบว่า ทรายนชนิดที่ 2 ทำให้เกิดความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำและกึ่งกลางของความยาวร่องน้ำมากกว่าทรายนชนิดที่ 1 เนื่องจากเม็ดทรายนชนิดที่ 2 ทำให้การพัฒนาร่องน้ำเข้าสู่ความมีเสถียรภาพได้เร็วกว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 1 และนอกจากนี้ยังพบว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 2 ทำให้เกิดการพังทลายของชั้นดินมีลักษณะเป็นวงกว้างมากกว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 1 เนื่องจากเม็ดทรายนชนิดที่ 2 ซึ่งมีขนาดเม็ดทรายเล็กกว่า เมื่อสัมผัสกับน้ำใต้ดินจะทำให้เม็ดดินเกิดการยึดเกาะระหว่างกันได้ดีมากกว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 1 ซึ่งมีขนาดเม็ดทรายใหญ่กว่า

5. ความลึกร่องน้ำ

จากการเปรียบเทียบความลึกร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ของทรายนชนิดที่ 1 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 52 และภาพที่ 53



ภาพที่ 52 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1



ภาพที่ 53 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1

จากผลการทดลองภาพที่ 52 และ 53 แสดงความลึกร่องน้ำซึ่งวัดได้จากความสูงของชั้นดิน พบว่าที่เวลาเริ่มต้นของการเกิดร่องน้ำ ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำจะมีความลึกมากที่สุด เมื่อเวลาผ่านไปความลึกบริเวณดังกล่าวจะค่อยๆลดลงตามเวลา อันเนื่องมาจากการพังทลายบริเวณลาดดิน

เนื่องจากการไหลซึมของน้ำใต้ดินและเกิดการพัดพาตะกอนไปตกทับถมยังบริเวณท้ายน้ำ (fluvial process) ทำให้ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำลดลง เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำแตกต่างกัน พบว่าความลาดชันท้องน้ำ 3% ก่อให้เกิดความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำน้อยกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เพราะความลาดชันเพิ่มขึ้นทำให้พัดพาเม็ดทรายไปได้ไกลขึ้นและลาดดินเกิดการพังทลายได้สูงขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของเม็ดทรายเอง รวมทั้งอัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้การไหลของน้ำใต้ดินไปยังท้ายน้ำมากขึ้นเป็นเหตุให้มีการพัดพาเม็ดทรายไปทางด้านท้ายน้ำได้มากขึ้น จนเกิดการทับถมของเม็ดทรายบริเวณท้ายน้ำสูงขึ้น ก่อให้เกิดความลึกของร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำลดลง และเป็นเช่นนี้ทั้งกรณีระดับน้ำใต้ดิน 17 และ 19 ซม. รวมทั้งเม็ดทรายชนิดที่ 2 ซึ่งแสดงความลึกของร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆสามารถดูได้จากภาพผนวก

จากการเปรียบเทียบความลึกร่องน้ำที่ความลาดชันท้องน้ำและระดับน้ำใต้ดินต่างๆของทรายชนิดที่ 1 และ 2 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 14 และ 15 ตามลำดับ

ตารางที่ 14 ความลึกร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 1

การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
ความลึก (ซม.)	12.96	10.70	10.50	10.67	10.63	10.42

ตารางที่ 15 ความลึกร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลอง
ของทรายชนิดที่ 2

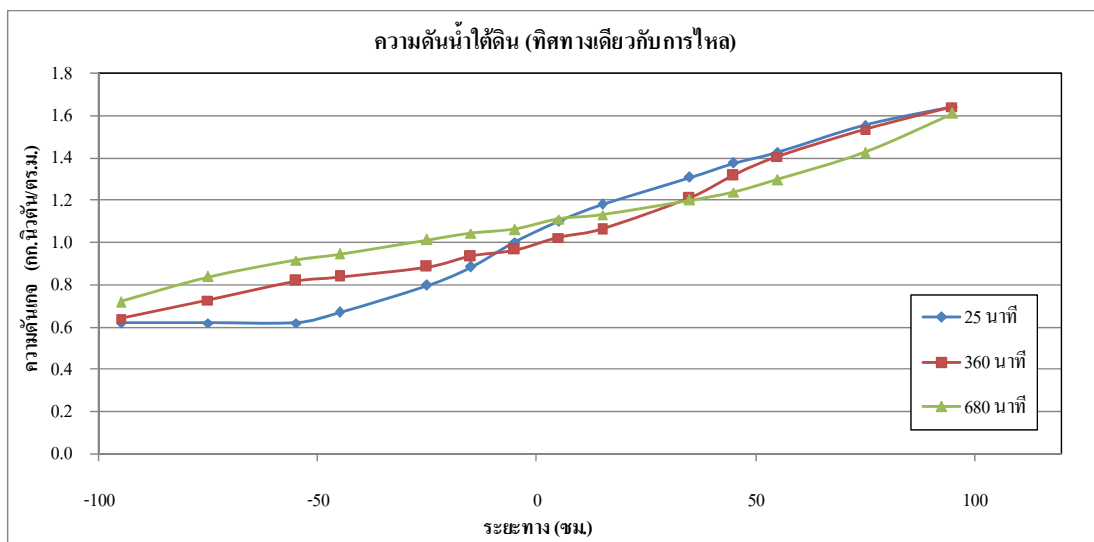
การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
ความลึก (ซม.)	13.50	10.90	10.60	10.95	10.88	10.48

จากผลการทดลองตารางที่ 14 และ 15 ของเม็ดทรายทั้งสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกัน พบว่าที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ทำให้เกิดความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองน้อยกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ทำให้เกิดอัตราการไหลของน้ำใต้ดินสูงกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. เป็นสาเหตุให้เกิดการพัดพาเม็ดทรายที่มาจากกรังทลายของลาดดินเนื่องจากการกัดเซาะด้วยการไหลซึมของน้ำใต้ดินและเกิดการทับถมของเม็ดทรายบริเวณท้ายน้ำมากขึ้น จนทำให้ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำลดลง ซึ่งเป็นเช่นนี้ทั้งกรณีเม็ดทรายชนิดที่ 1 และ 2

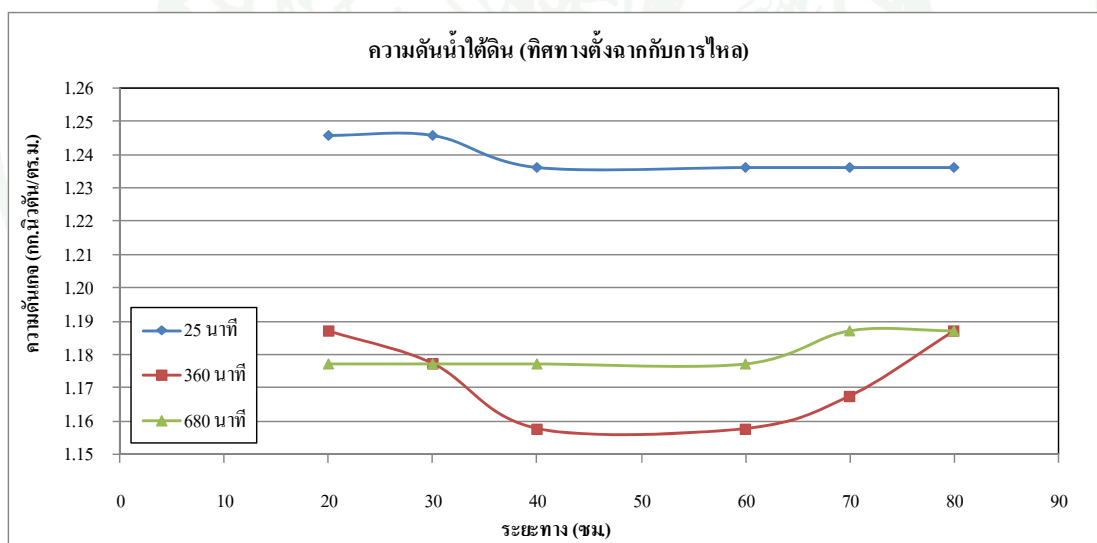
จากการเปรียบเทียบเม็ดทรายทั้งสองชนิด พบว่า เม็ดทรายชนิดที่ 1 ทำให้เกิดความลึกบริเวณท้ายน้ำน้อยกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2 เนื่องจากเม็ดทรายชนิดที่ 1 ให้มุมทรงตัวของเม็ดทรายมากกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2 ทำให้ลาดดินขาดเสถียรภาพได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ค่าความชื้นน้ำของเม็ดทรายชนิดที่ 1 มากกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2 จึงก่อให้เกิดอัตราการไหลของน้ำใต้ดินสูงขึ้น การพัดพาเม็ดทรายไปยังท้ายน้ำจนเกิดการทับถมของเม็ดทรายบริเวณท้ายน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำของเม็ดทรายชนิดที่ 1 น้อยกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2

6. ความดันน้ำใต้ดิน

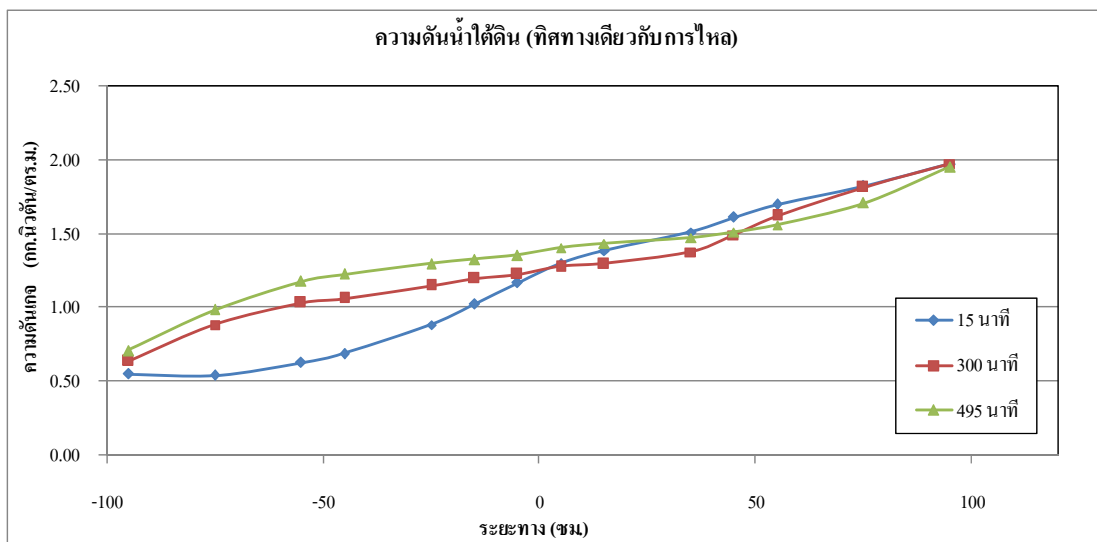
จากการเปรียบเทียบความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ของทรายชนิดที่ 1 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 54 ถึงภาพที่ 57



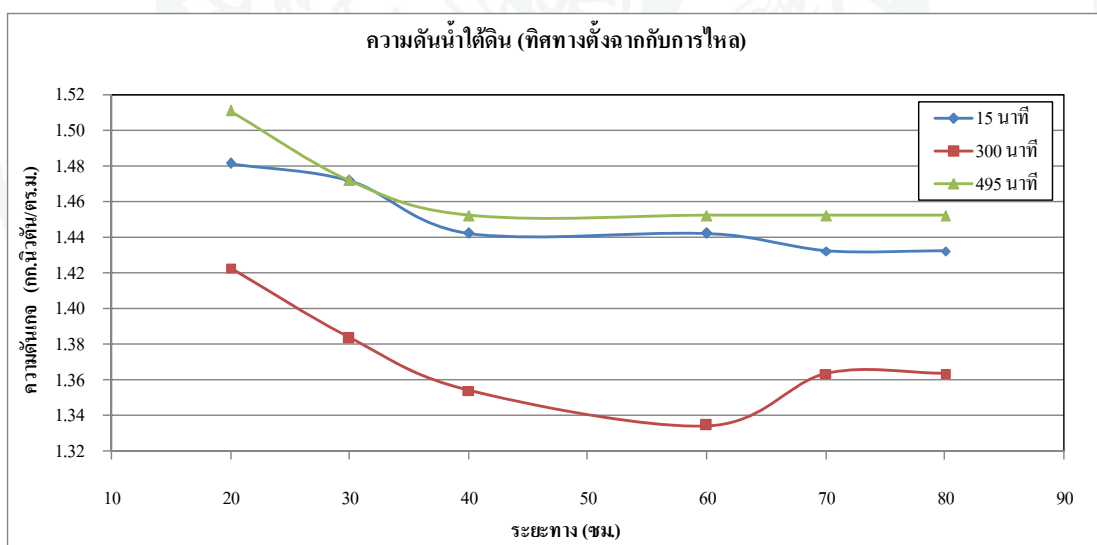
ภาพที่ 54 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางเดียวกับการไหล ของทรายชนิดที่ 1



ภาพที่ 55 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหล ของทรายชนิดที่ 1



ภาพที่ 56 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางเดียวกับการไหล ของทรายชนิดที่ 1



ภาพที่ 57 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหล ของทรายชนิดที่ 1

จากผลการทดลองภาพที่ 54 และ 57 แสดงความดันในทิศทางเดียวกับการไหลและทิศทางตั้งฉากกับการไหล พบว่าความดันน้ำใต้ดินในทิศทางตั้งฉากส่งผลต่อลักษณะรูปร่างของร่องน้ำ และความดันในทิศทางเดียวกับการไหลส่งผลต่อความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำ โดยที่ความดันน้ำ

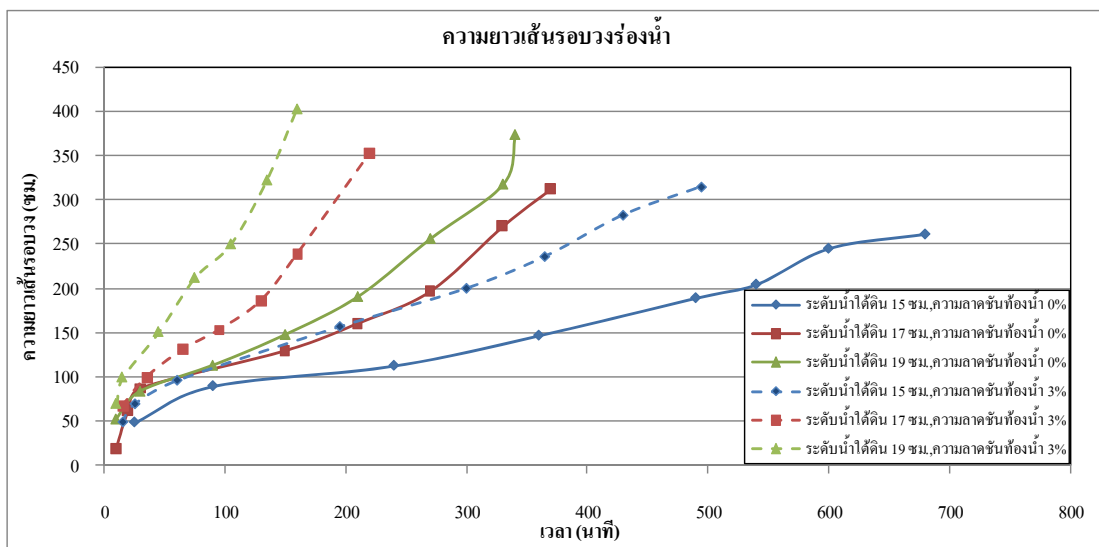
ได้ดินสูงขึ้น ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำก็ยิ่งลดลง เนื่องจากความดันน้ำได้ดินทำให้เกิดการกัดเซาะของชั้นทรายมากขึ้น จนเกิดการพัดพาเม็ดทรายไปยังท้ายน้ำได้มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระดับน้ำได้ดินเท่ากัน แต่ความลาดชันท้องน้ำแตกต่างกัน พบว่าความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้เกิดความดันของน้ำได้ดินสูงกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% และเมื่อเปรียบเทียบที่ความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับน้ำได้ดินแตกต่างกัน พบว่าที่ระดับน้ำได้ดิน 19 ซม. ทำให้เกิดความดันน้ำได้ดินมากกว่าที่ระดับน้ำได้ดิน 15 และ 17 ซม. เนื่องจากความสูงน้ำได้ดินแปรผันตรงกับความดันน้ำได้ดินตามกฎของปาสคาล ซึ่งเป็นเช่นนี้ทั้งกรณีเม็ดทรายชนิดที่ 2 ผลการทดลองความดันที่ระดับน้ำได้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆสามารถดูได้จากภาคผนวก ง

จากการเปรียบเทียบเม็ดทรายทั้งสองชนิด พบว่าเม็ดทรายชนิดที่ 1 ส่งผลต่อความดันน้ำได้ดินในทิศทางเดียวกับการไหลและทิศทางตั้งฉากกับการไหลคล้ายคลึงกับเม็ดทรายชนิดที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับน้ำได้ดินและความลาดชันท้องน้ำเดียว จึงพอสรุปได้ว่าขนาดของเม็ดทรายส่งผลต่อความดันน้ำได้ดินน้อยมาก

7. ความยาวเส้นรอบวง

7.1 การทดลองทรายชนิดที่ 1

จากการเปรียบเทียบเส้นรอบวงร่องน้ำที่ระดับน้ำได้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 1 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 58 และเส้นรอบวงร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองดังตารางที่ 16



ภาพที่ 58 ความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำที่ระดับน้ำได้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของ
ทรายชนิดที่ 1

ตารางที่ 16 ความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำที่ระดับน้ำได้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุด
การทดลองของทรายชนิดที่ 1

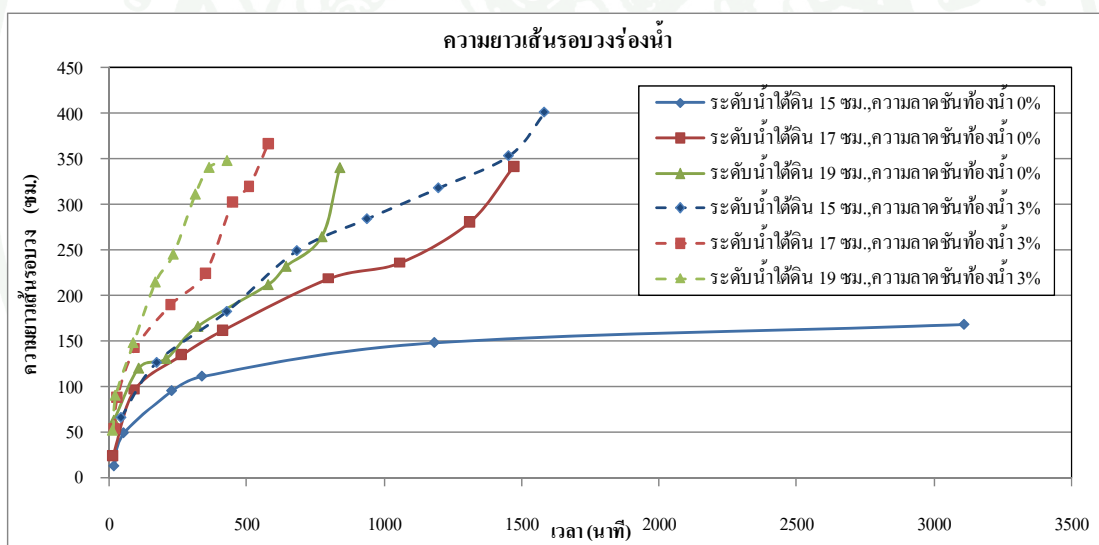
การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ได้ดิน	ได้ดิน	ได้ดิน	ได้ดิน	ได้ดิน	ได้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
ความยาวเส้นรอบวง (ซม.)	261.34	312.91	373.90	315.08	352.98	402.86

จากการทดลองภาพที่ 58 และตารางที่ 16 แสดงเส้นรอบวงของร่องน้ำที่เวลาเดียวกัน และสิ้นสุดการทดลอง พบว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ระดับน้ำได้ดินเท่ากัน แต่ความลาดชันท้องน้ำต่างกัน ความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้ความยาวเส้นรอบวง (perimeter) ของร่องน้ำที่ถูกกัดเซาะที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เพราะความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้เกิดความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลอง รวมทั้งความกว้างที่กึ่งกลางของความยาวร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% แต่เมื่อ

เปรียบเทียบที่ความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกัน พบว่าที่ระดับน้ำใต้ดินที่ 19 ซม. ทำให้เกิดความยาวเส้นรอบวงของร่องน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. เนื่องจากระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้น ทำให้เกิดความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลอง รวมทั้งความกว้างที่กึ่งกลางของความยาวร่องน้ำมากขึ้น

7.2 การทดลองทรายชนิดที่ 2

จากการเปรียบเทียบเส้นรอบวงร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ ของทรายชนิดที่ 2 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 59 และเส้นรอบวงร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองดังตารางที่ 17



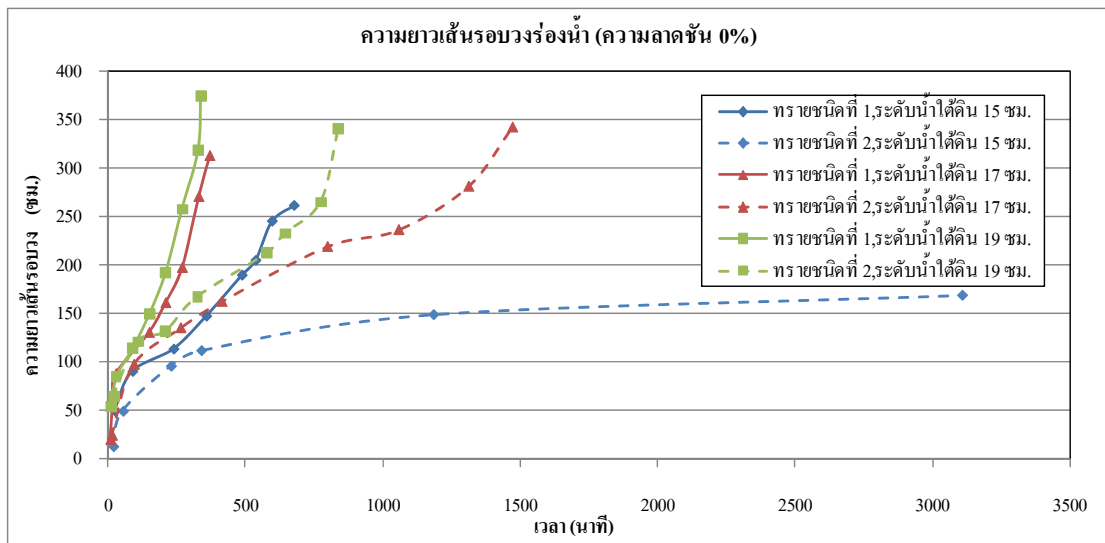
ภาพที่ 59 ความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ ของทรายชนิดที่ 2

ตารางที่ 17 ความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2

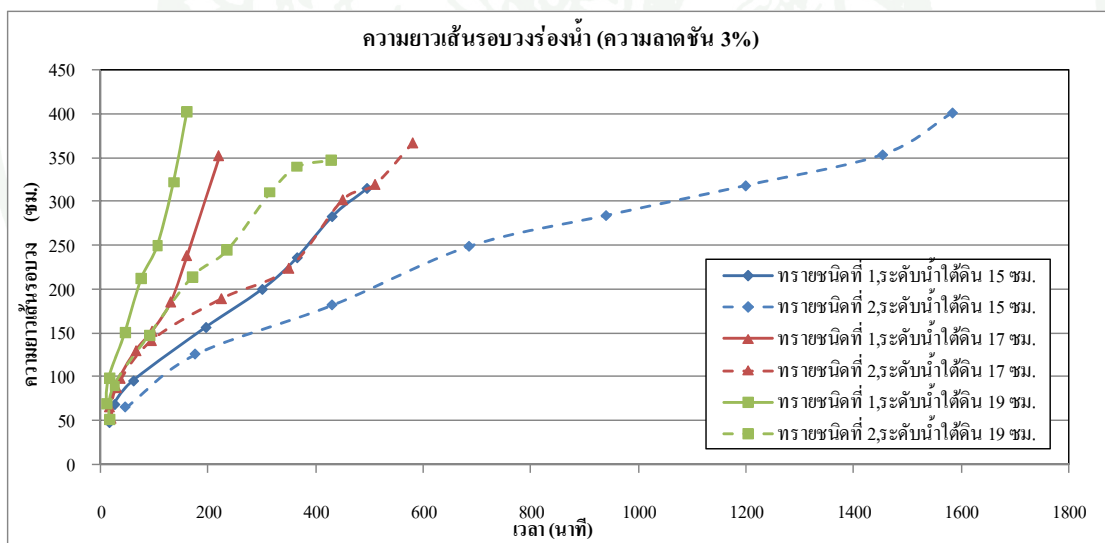
การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
ความยาวเส้นรอบวง (ซม.)	167.69	341.37	340.06	401.93	366.62	347.85

จากการทดลองภาพที่ 59 และตารางที่ 17 แสดงเส้นรอบวงของร่องน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับน้ำใต้ดินเท่ากัน แต่ความลาดชันท้องน้ำต่างกัน พบว่าความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้ความยาวเส้นรอบวงของร่องน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำ 3% ให้ความกว้างบริเวณท้ายน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลอง รวมถึงความกว้างที่กึ่งกลางของความยาวร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% แต่เมื่อเปรียบเทียบที่ความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกัน พบว่าระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ทำให้เกิดความยาวเส้นรอบวงของร่องน้ำที่เวลาเดียวกันมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ให้ความกว้างบริเวณท้ายน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลอง รวมถึงความกว้างที่กึ่งกลางของความยาวร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลับพบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ทำให้เกิดความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากที่สุด เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ให้ความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำและกึ่งกลางของความยาวร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากที่สุดและที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ทำให้เกิดความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองใกล้เคียงกับระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน 17 ให้ความกว้างบริเวณท้ายน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. แต่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ให้ความกว้างที่กึ่งกลางของความยาวร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม.

จากการเปรียบเทียบเส้นรอบวงร่องน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0 และ 3% ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 60 และภาพที่ 61



ภาพที่ 60 การเปรียบเทียบความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำของทรายนชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0%



ภาพที่ 61 การเปรียบเทียบความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำของทรายนชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3%

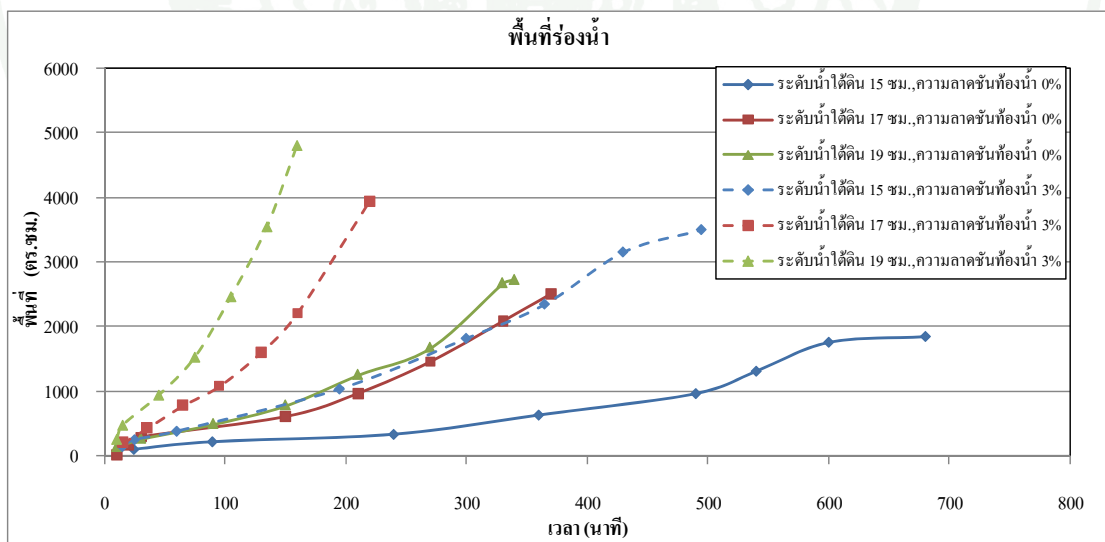
จากภาพที่ 60 และ 61 แสดงการเปรียบเทียบความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำของเม็ดทรายนชนิดที่ 1 และ 2 พบว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 1 ให้ความยาวเส้นรอบวงของร่องน้ำที่เวลาเดียวกันมากกว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 2 แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 2 ทำให้เกิดความยาวเส้นรอบวง

ของร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าทรายชนิดที่ 1 ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% แต่เมื่อทรายชนิดที่ 1 จะให้ความยาวเส้นรอบวงของร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าเมื่อทรายชนิดที่ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% เนื่องจากการพัฒนาร่องน้ำยังไม่เข้าสู่ความมีเสถียรภาพ และเมื่อพิจารณาที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% พบว่าทรายชนิดที่ 1 ให้ความยาวเส้นรอบวงของร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าเมื่อทรายชนิดที่ 2 แต่ที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% กลับพบว่าตรงกันข้ามกับความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากการทดลองระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของเม็ดทรายชนิดที่ 2 ร่องน้ำเข้าสู่ความมีเสถียรภาพแล้วทำให้ร่องน้ำไม่สามารถพัฒนาร่องน้ำต่อไปได้

8. พื้นที่ร่องน้ำ

8.1 การทดลองทรายชนิดที่ 1

จากการเปรียบเทียบพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ ของทรายชนิดที่ 1 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 62 และพื้นที่ร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองดังตารางที่ 18



ภาพที่ 62 พื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 1

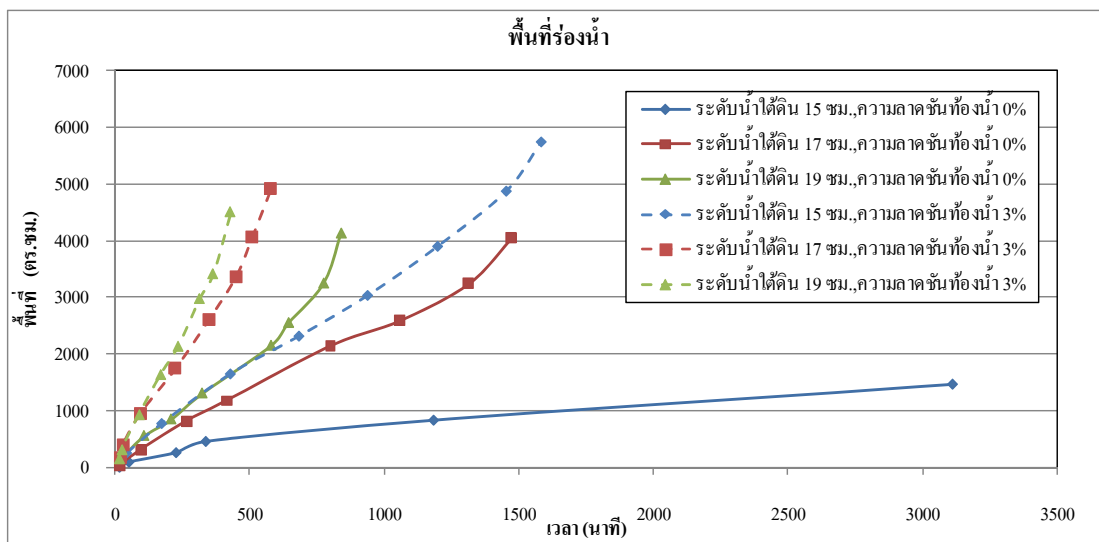
ตารางที่ 18 พื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของ
ทรายชนิดที่ 1

การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
พื้นที่ (ตร.ชม.)	1,845.92	2,519.97	2,728.67	3,496.36	3,948.97	4,809.66

จากผลการทดลองภาพที่ 62 และตารางที่ 18 แสดงพื้นที่ร่องน้ำที่ถูกกัดเซาะที่ระดับน้ำใต้ดินเดียวกัน แต่ความลาดชันท้องน้ำแตกต่างกัน พบว่าความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้เกิดพื้นที่ร่องน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำ 3% ให้ความยาวเส้นรอบวงของร่องน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% และเมื่อเปรียบเทียบที่ความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับน้ำใต้ดินแตกต่างกันพบว่า ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ทำให้เกิดพื้นที่ร่องน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ให้ความยาวเส้นรอบวงของร่องน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองมากกว่าที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม.

8.2 การทดลองทรายชนิดที่ 2

จากการเปรียบเทียบพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆ ของทรายชนิดที่ 2 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 63 และพื้นที่ร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองดังตารางที่ 19



ภาพที่ 63 พื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำได้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆของทรายชนิดที่ 2

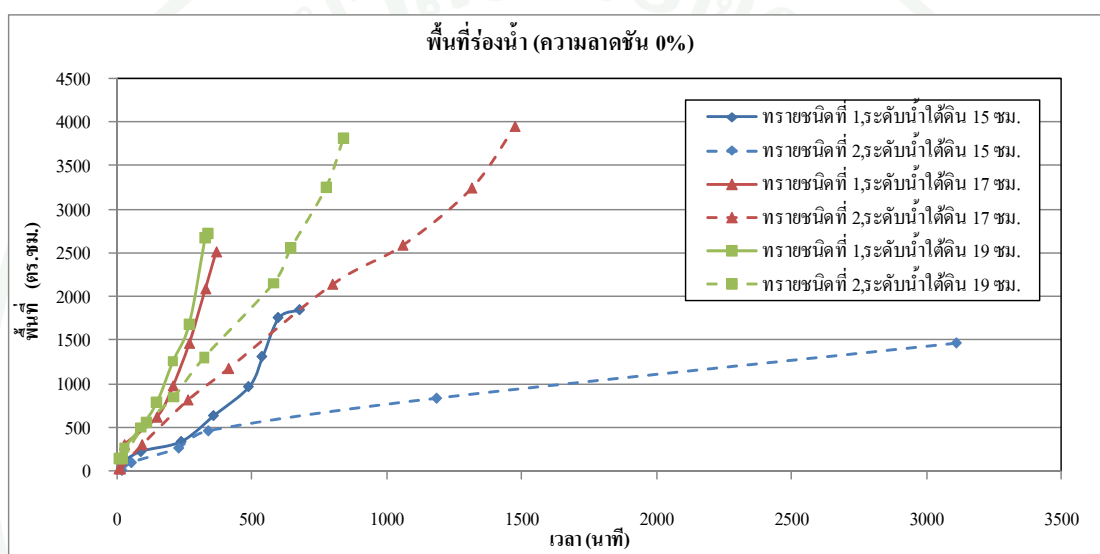
ตารางที่ 19 พื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำได้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2

การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ได้ดิน	ได้ดิน	ได้ดิน	ได้ดิน	ได้ดิน	ได้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
พื้นที่ (ตร.ชม.)	1,465.83	4,056.73	4,137.99	5,745.18	4,917.28	4,507.60

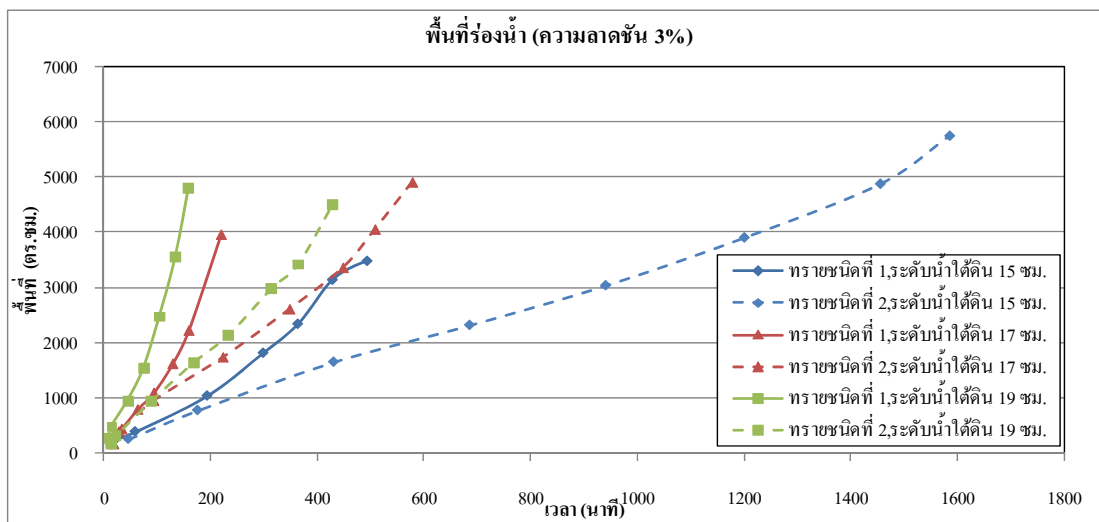
จากผลการทดลองภาพที่ 63 และตารางที่ 19 แสดงพื้นที่ร่องน้ำที่ถูกกัดเซาะที่ระดับน้ำได้ดินเดียวกัน แต่ความลาดชันท้องน้ำแตกต่างกัน พบว่าความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้เกิดพื้นที่ร่องน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำ 3% ให้ความยาวเส้นรอบวงของร่องน้ำที่เวลาเดียวกันและสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% และเมื่อเปรียบเทียบที่ความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับน้ำได้ดินแตกต่างกัน พบว่าระดับน้ำได้ดิน 19 ซม. ทำให้เกิดพื้นที่ร่องน้ำที่เวลาเดียวกันมากกว่าระดับน้ำได้ดิน 15 ซม. และ 17 ซม. แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลับพบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% ระดับน้ำได้ดิน 15 ซม. ทำให้เกิดพื้นที่ร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากที่สุด เนื่องจากระดับน้ำได้ดิน 15 ซม. ให้ความยาว

เส้นรอบวงของร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากที่สุด ในขณะที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% ระดับน้ำใต้ดิน 17 และ 19 ซม. ทำให้เกิดพื้นที่ร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน 17 และ 19 ซม. ให้ความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองใกล้เคียงกัน

จากการเปรียบเทียบพื้นที่ร่องน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0 และ 3% ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 64 และภาพที่ 65



ภาพที่ 64 การเปรียบเทียบพื้นที่ร่องน้ำของทรายชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0%



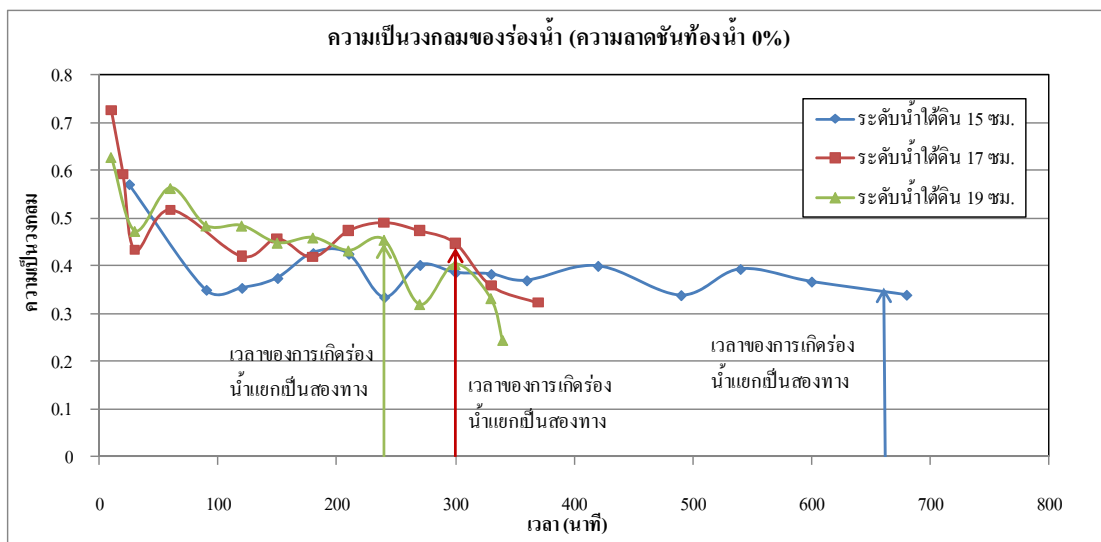
ภาพที่ 65 การเปรียบเทียบพื้นที่ร่องน้ำของทรายนชนิดที่ 1 และ 2 ที่ระดับน้ำได้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3%

จากผลการทดลองภาพที่ 64 และ 65 แสดงพื้นที่ร่องน้ำของเม็ดทรายทั้งสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ร่องน้ำของเม็ดทรายนชนิดที่ 1 และ 2 พบว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 1 ทำให้เกิดพื้นที่ร่องน้ำที่เวลาเดียวกันมากกว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 2 เนื่องจากเม็ดทรายนชนิดที่ 1 ให้ความยาวเส้นรอบวงร่องน้ำที่เวลาเดียวกันมากกว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 2 แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลับพบว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 2 ให้พื้นที่ร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าทรายนชนิดที่ 1 เว้นแต่กรณีระดับน้ำได้ดิน 15 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% และกรณีระดับน้ำได้ดิน 19 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% เนื่องจากเม็ดทรายนชนิดที่ 1 ของทั้งสองกรณีดังกล่าวให้ความยาวเส้นรอบวงของร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าเม็ดทรายนชนิดที่ 2

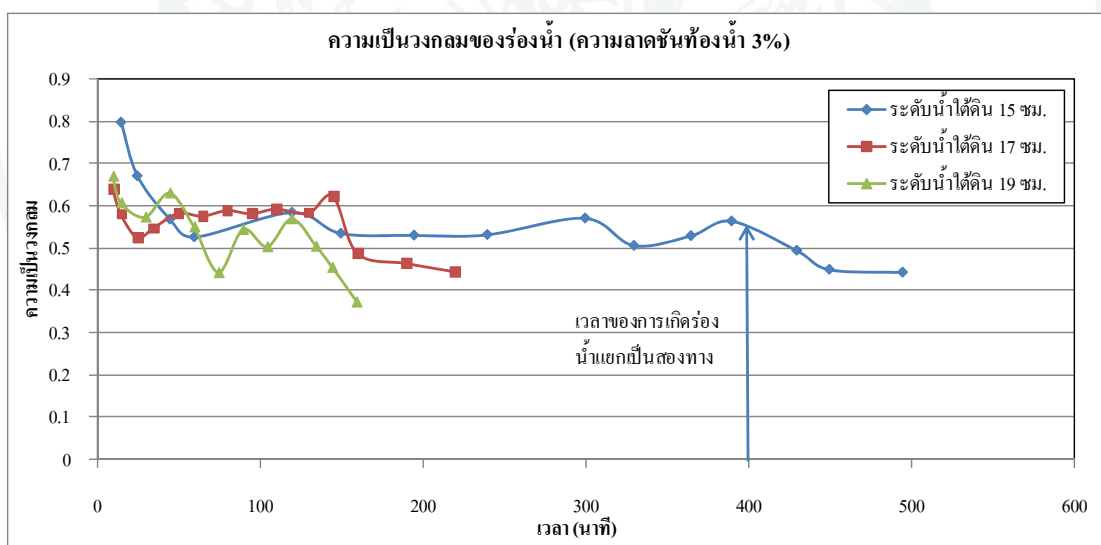
9. ความเป็นวงกลมของร่องน้ำ

9.1 การทดลองทรายนชนิดที่ 1

จากการเปรียบเทียบความเป็นวงกลมร่องน้ำที่ระดับน้ำได้ดินต่างๆ ที่ความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน 0% และ 3% ของทรายนชนิดที่ 1 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 66 และ 67 ตามลำดับ และความเป็นวงกลมร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองได้ผลการทดลองดังตารางที่ 20 รวมทั้งการเปรียบเทียบความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่เวลาการเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางดังตารางที่ 21



ภาพที่ 66 ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่ระดับน้ำได้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1



ภาพที่ 67 ความเป็นของวงกลมของร่องน้ำที่ระดับน้ำได้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1

ตารางที่ 20 ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 1

การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
ความเป็นวงกลม	0.34	0.32	0.25	0.44	0.40	0.37

ตารางที่ 21 ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่เวลาร่องน้ำเกิดแยกเป็นสองทางของทรายชนิดที่ 1

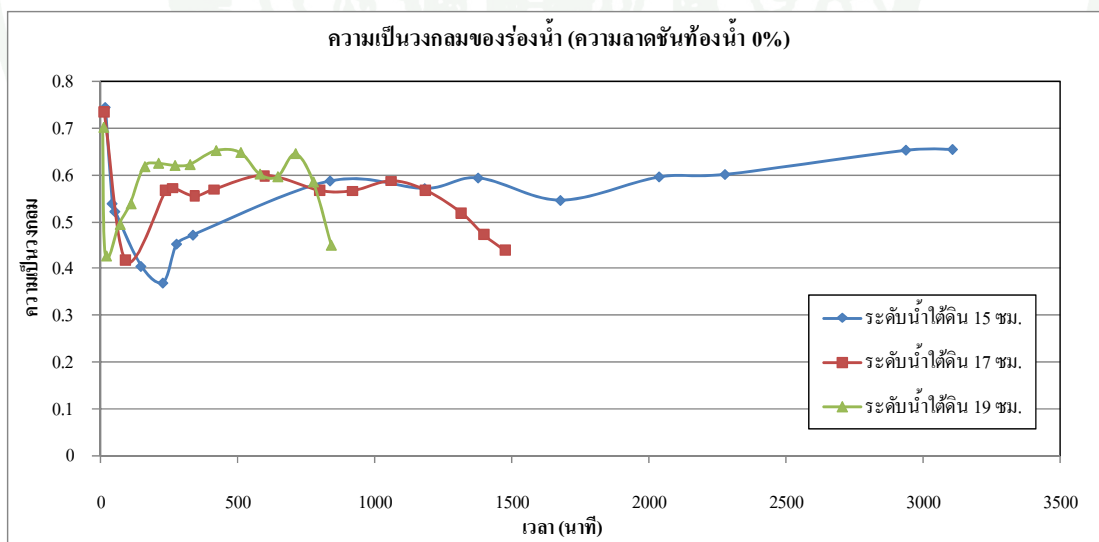
การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน	ใต้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
เวลาที่เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง (นาทีก)	660	300	240	400	×	×
ความเป็นวงกลมตอนเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง	0.35	0.45	0.46	0.54	×	×

จากการทดลองในภาพที่ 66 และ 67 รวมทั้งตารางที่ 20 และ 21 แสดงความเป็นวงกลมของร่องน้ำต่อเวลาและสิ้นสุดการทดลอง พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระดับน้ำใต้ดินเท่ากัน แต่ความลาดชันท้องน้ำแตกต่างกัน ความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้เกิดความเป็นวงกลมของร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำ 0% เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง (bifurcation) มากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 3% ซึ่งจะเห็นได้จากภาพที่ 66 ว่าเมื่อเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง ค่าความเป็นวงกลมของร่องน้ำกำลังลดลง และจากตารางที่ 21 พบว่าความเป็นวงกลมของร่องน้ำตอนเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ให้ค่าความเป็นวงกลมมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ใช้เวลาในการเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางเร็วที่สุด ทำให้ค่าความเป็นวงกลมมีค่ามากที่สุด แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลับ

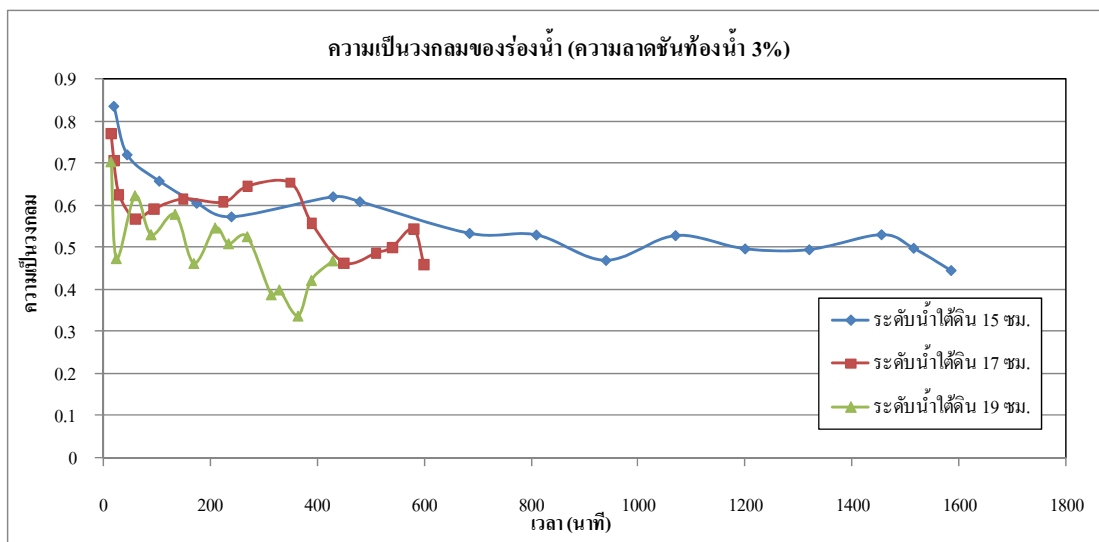
พบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ทำให้เกิดความเป็นวงกลมของร่องน้ำมากกว่าระดับน้ำใต้ดิน 17 และ 19 ซม. เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ให้ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองน้อยกว่าระดับน้ำใต้ดิน 17 และ 19 ซม. และจากภาพที่ 66 และ 67 พบว่าร่องน้ำพัฒนาถึงช่วง extension เท่านั้นตามที่ Gomez and Mullen (1991) ได้อธิบายไว้ เพราะในการทดลองเมล็ดทรายชนิดที่ 1 เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางเพียงร่องเดียว ทำให้โอกาสที่ร่องน้ำที่แยกเป็นสองทางเกิดการพังทลายของร่องน้ำกลับมาเป็นร่องน้ำเดิมนั้นไม่เกิดขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ร่องน้ำที่ถูกกัดเซาะไม่ลดลง เพราะฉะนั้นการพัฒนาร่องน้ำถึงช่วง abtraction จึงไม่เกิดขึ้นในการทดลองครั้งนี้ สามารถดูผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ถูกกัดเซาะ ที่ระดับน้ำใต้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆดังแสดงในภาคผนวก

9.2 การทดลองทรายชนิดที่ 2

จากการเปรียบเทียบความเป็นวงกลมร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ที่ความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน 0% และ 3% ของทรายชนิดที่ 2 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 68 และ 69 ตามลำดับ และความเป็นวงกลมร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองได้ผลการทดลองดังตารางที่ 22



ภาพที่ 68 ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2



ภาพที่ 69 ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่ระดับน้ำได้ดินต่างๆ ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2

ตารางที่ 22 ความเป็นวงกลมของร่องน้ำที่ระดับน้ำได้ดินและความลาดชันท้องน้ำต่างๆเมื่อสิ้นสุดการทดลองของทรายชนิดที่ 2

การทดลอง	ความลาดชันท้องน้ำ 0%			ความลาดชันท้องน้ำ 3%		
	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
	ได้ดิน	ได้ดิน	ได้ดิน	ได้ดิน	ได้ดิน	ได้ดิน
	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.	15 ซม.	17 ซม.	19 ซม.
ความเป็นวงกลม	0.66	0.44	0.45	0.45	0.46	0.47

จากผลการทดลองในภาพที่ 68 และ 69 รวมทั้งตารางที่ 22 แสดงความเป็นวงกลมของร่องน้ำต่อเวลาและสิ้นสุดการทดลอง พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระดับน้ำได้ดินเท่ากัน แต่ความลาดชันท้องน้ำแตกต่างกัน ความลาดชันท้องน้ำ 3% ทำให้เกิดความเป็นวงกลมของร่องน้ำมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำ 3% ให้ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าความลาดชันท้องน้ำ 0% เว้นแต่กรณีที่ระดับน้ำได้ดิน 15 ซม. เพราะที่ระดับน้ำได้ดิน 15 ซม. ที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% ร่องน้ำเข้าสู่ความมีเสถียรภาพแล้ว ส่งผลให้ความเป็นวงกลมของร่องน้ำมีค่ามากถึง 0.66 และเมื่อเปรียบเทียบความลาดชันท้องน้ำเดียวกัน แต่ระดับ

น้ำใต้ดินแตกต่างกัน พบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำ 3% ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ทำให้ความเป็นวงกลมของร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากที่สุด เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ให้ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองน้อยกว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 และ 17 ซม. แต่เมื่อพิจารณาที่ความลาดชันท้องน้ำ 0% พบว่าระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ทำให้ความเป็นวงกลมของร่องน้ำมากที่สุด เนื่องจากร่องน้ำเข้าสู่ความมีเสถียรภาพส่งผลให้ร่องน้ำหยุดการพัฒนา ค่าความเป็นวงกลมของร่องน้ำจึงมากที่สุด

จากการเปรียบเทียบระหว่างเม็ดทรายทั้งสองชนิด พบว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2 ทำให้เกิดความเป็นวงกลมของร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองมากกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 1 เนื่องจากเม็ดทรายชนิดที่ 1 เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางมากกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2 ส่งผลให้ความเป็นวงกลมของร่องน้ำน้อยกว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2 นอกจากนี้ยังพบว่าเม็ดทรายชนิดที่ 2 ให้ค่าความเป็นวงกลมของร่องน้ำใกล้เคียงกัน เนื่องจากเม็ดทรายชนิดที่ 2 ไม่เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางเลย เว้นแต่กรณีระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ที่เกิดร่องน้ำเข้าสู่ความมีเสถียรภาพแล้ว จนทำให้ค่าความเป็นวงกลมสูงกว่ากรณีอื่นๆ

วิจารณ์

1. เครื่องมือทดลองการกัดเซาะด้วยการไหลซึมสามารถควบคุมระดับน้ำใต้ดินด้านเหนือของอ่างทดลองให้มีค่าคงที่และปรับความลาดชันท้องน้ำ 0% ถึง 3% รวมทั้งวัดอัตราการไหลของน้ำใต้ดินด้วยฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้าใต้อ่างทดลองซึ่งติดตั้งอยู่บริเวณท้ายน้ำ การศึกษาครั้งนี้ได้ใช้เม็ดทรายสองขนาด ซึ่งมีขนาด D_{50} เท่ากับ 0.56 และ 0.86 โดยทำการควบคุมระดับน้ำใต้ดินด้านเหนือ น้ำ 15, 17 และ 19 ซม. และปรับความลาดชันท้องน้ำ 0% และ 3% ให้มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง
2. อัตราการไหลของน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของเม็ดทรายใหญ่ขึ้นทำให้น้ำใต้ดินไหลซึมเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดทราย เกิดแรงเสียดทานของเม็ดทรายที่กระทำต่อน้ำใต้ดินน้อยกว่าเม็ดทรายที่มีขนาดเล็กกว่า ส่งผลให้ค่าความซึมของเม็ดดินมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4
3. การถดถอยของหัวร่องน้ำเพิ่มขึ้นมีสาเหตุมาจากอัตราการไหลของน้ำใต้ดินสูงขึ้น ทำให้น้ำใต้ดินสามารถไหลเข้าไปสู่บริเวณหัวร่องน้ำได้มากขึ้น จนเกิดการกัดเซาะบริเวณหัวร่องน้ำไปทางด้านเหนือน้ำรุนแรงยิ่งขึ้น นอกจากนี้ขนาดของเม็ดทรายเป็นปัจจัยสำคัญต่อการถดถอยของหัวร่องน้ำด้วยเช่นกัน โดยพบว่าเม็ดทรายขนาดใหญ่ทำให้เกิดการถดถอยของหัวร่องน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเม็ดทรายขนาดใหญ่ให้ค่ามุมทรงตัวของเม็ดทรายมากกว่าเม็ดทรายขนาดเล็ก ดังแสดงในตารางที่ 3 ทำให้เกิดการพังทลายของลาดดินบริเวณหัวร่องน้ำได้มากขึ้น
4. ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำลดลงมีสาเหตุมาจากอัตราการไหลของน้ำใต้ดินสูงขึ้น ทำให้เกิดการพัดพาเม็ดดินเนื่องจากแรงลากของน้ำใต้ดินไปยังท้ายน้ำเพิ่มขึ้น จนเกิดการตกทับถมของเม็ดดินแบบใบพัด (alluvial fan) บริเวณท้ายน้ำมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดเม็ดทรายส่งผลต่อความลึกบริเวณท้ายน้ำ โดยเม็ดทรายขนาดใหญ่ให้ค่าความซึมและมุมทรงตัวของเม็ดดินมากกว่าเม็ดทรายขนาดเล็ก ทำให้ลาดดินเกิดการพังทลายได้ง่ายขึ้น จึงเกิดการพัดพาและตกทับถมของเม็ดทรายบริเวณท้ายน้ำมากยิ่งขึ้น ก่อให้เกิดความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำลดลง
5. ความกว้างบริเวณท้ายน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำใต้ดินสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกันของการทดลอง แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลับพบว่าขนาดของเม็ดทรายเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดความกว้างร่องน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลอง โดยพบว่าเม็ดทรายขนาดเล็กให้

ความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำและกึ่งกลางของความยาวร่องน้ำมากกว่าทรายขนาดใหญ่ เหตุเพราะเม็ดทรายขนาดเล็กทำให้เกิดการพังทลายของชั้นทรายมีลักษณะเป็นวงกว้างกว่าเม็ดทรายขนาดใหญ่ อันเนื่องมาจากเมื่อเม็ดทรายขนาดเล็กสัมผัสกับน้ำใต้ดินก่อให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างเม็ดทรายทำได้ดีกว่าเม็ดทรายขนาดใหญ่

6. การเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางมีโอกาสดังขึ้นเมื่อความลาดชันท้องน้ำต่ำๆ ซึ่งเหมือนกับผลการทดลองของ Pornprommin *et al.* (2010) นอกจากนี้ยังพบว่า ระดับน้ำใต้ดินส่งผลต่อการเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า ระดับน้ำใต้ดินต่ำๆทำให้มีโอกาสดังขึ้นของร่องน้ำแยกเป็นสองทางได้มากกว่าที่ระดับน้ำใต้ดินสูงๆ ซึ่งแตกต่างจากสมมติฐานของ Pornprommin *et al.* (2010) ที่กล่าวว่าระดับน้ำใต้ดินสูงๆมีโอกาสดังขึ้นของร่องน้ำเกิดแยกเป็นสองทางมากขึ้น โดยคาดว่าน่าจะเกิดจากระดับน้ำใต้ดินต่ำๆทำให้น้ำใต้ดินไหลเข้ามาสู่บริเวณหัวร่องน้ำได้น้อย จึงเกิดการพัฒนาร่องน้ำอย่างช้าๆ ก่อให้เกิดการพังทลายของลาดดินสลับไปมาทางซ้ายและขวาของร่องน้ำอย่างช้าๆ จนเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางในที่สุด

7. ความเป็นวงกลมของร่องน้ำลดลง เนื่องจากปัจจัยดังต่อไปนี้

7.1 ขนาดเม็ดทราย พบว่าเม็ดทรายขนาดใหญ่ส่งผลให้เกิดความเป็นวงกลมของร่องน้ำลดลงเนื่องจากเม็ดทรายขนาดใหญ่มีโอกาสดังขึ้นของร่องน้ำแยกเป็นสองทางมากกว่าเม็ดทรายขนาดเล็ก ซึ่งการเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางทำให้ค่าความเป็นวงกลมของร่องน้ำลดลงตามที่ Gomez and Mullen (1991) ได้อธิบายไว้

7.2 ระดับน้ำใต้ดิน พบว่าระดับน้ำใต้ดินที่ลดลงทำให้ความเป็นวงกลมของร่องน้ำลดลงในช่วงเวลาเริ่มต้นของการเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง เนื่องจากระดับน้ำใต้ดินที่ลดลงทำให้เวลาของการเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางได้ช้าขึ้น

7.3 ความลาดชันท้องน้ำ พบว่าความลาดชันท้องน้ำลดลงทำให้ความเป็นวงกลมของร่องน้ำลดลง เมื่อเปรียบเทียบในช่วงเวลาที่ร่องน้ำยังไม่เข้าสู่ความมีเสถียรภาพ เนื่องจากความลาดชันท้องน้ำลดลงทำให้มีโอกาสดังขึ้นของร่องน้ำแยกเป็นสองทางมากขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการกักเซาะเนื่องจากการไหลซึมของน้ำใต้ดินในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์และได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า

1. เม็ดทรายขนาดใหญ่ทำให้เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง (bifurcation) อัตราการไหลของน้ำใต้ดินมากกว่าเม็ดทรายขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกันพบว่า เม็ดทรายขนาดใหญ่ทำให้เกิดการถดถอยของหัวร่องน้ำ ความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำ ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำมากกว่าเม็ดทรายขนาดเล็ก แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลับพบว่า เม็ดทรายขนาดเล็กทำให้เกิดความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำและกึ่งกลางของความยาวร่องน้ำ ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำและความเป็นวงกลมของร่องน้ำ (circularity) มากกว่าเม็ดทรายขนาดใหญ่

2. ระดับน้ำใต้ดินที่สูงกว่าทำให้เกิดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำ อัตราการไหลและความดันของน้ำใต้ดินมากกว่าระดับน้ำใต้ดินที่ต่ำกว่า แต่ระดับน้ำใต้ดินที่ต่ำกว่าทำให้เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางมากกว่าระดับน้ำใต้ดินที่สูงกว่า โดยเมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกันพบว่า ระดับน้ำใต้ดินที่สูงกว่าทำให้เกิดการถดถอยของหัวร่องน้ำ ความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำ ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำมากกว่าระดับน้ำใต้ดินที่ต่ำกว่า แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ระดับน้ำใต้ดินที่ต่ำกว่าทำให้เกิดความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำมากกว่าระดับน้ำใต้ดินที่สูงกว่า

3. ความลาดชันท้องน้ำที่สูงกว่า ทำให้เกิดร่องน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำ อัตราการไหลและความดันของน้ำใต้ดิน ความกว้างร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำและกึ่งกลางของความยาวร่องน้ำ ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำมากกว่าความลาดชันท้องน้ำที่ต่ำกว่า แต่ความลาดชันท้องน้ำที่ต่ำกว่าทำให้เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางมากกว่าความลาดชันท้องน้ำที่สูงกว่า โดยเมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกันพบว่า ความลาดชันท้องน้ำที่สูงกว่าทำให้เกิดการถดถอยของหัวร่องน้ำมากกว่าความลาดชันท้องน้ำที่ต่ำกว่า แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ความลาดชันท้องน้ำที่ต่ำกว่าทำให้ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำมากกว่าความลาดชันท้องน้ำที่สูงกว่า

4. ความเป็นวงกลมของร่องน้ำพบว่า การเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางทำให้ความเป็น

วงกลมของร่องน้ำลดลง ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดินและความลาดชันท้องน้ำเป็นสำคัญ โดยที่ระดับน้ำได้ดินส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการพัฒนาร่องน้ำจนเกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทาง โดยพบว่าระดับน้ำได้ดินสูงขึ้นทำให้เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางเร็วขึ้น จึงทำให้ความเป็นวงกลมของร่องน้ำในช่วงที่เกิดร่องน้ำแยกเป็นสองทางมีค่ามากขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ประยุกต์มาจากอ่างทดลองสำหรับงานทางอุทกวิทยาทำให้ขั้นตอนในการทดลองการไหลซึมเนื่องจากน้ำได้ดินเกิดความยากลำบากในการทดลอง เพราะต้องปรับแก้ตัวเครื่องมือหลายจุดกว่าจะได้ผลเป็นที่น่าพอใจและผลที่ได้จากการทดลองยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์การทดลอง
2. การทำวิจัยในครั้งนี้จะวิเคราะห์ผลทางกายภาพเป็นส่วนใหญ่เท่านั้น ซึ่งในอนาคตอาจจะมีการนำการแก้ไขปัญหาเชิงคณิตศาสตร์เข้ามาวิเคราะห์เพิ่มเติม ทำให้ผลการทดลองเป็นที่น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- เกษม จันทร์แก้ว. 2539. **หลักการจัดการลุ่มน้ำ**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- โกมล สีวะบรม, เขายุทธ พรพิมลเทพมและสุวิทย์ ชุมนุมศิริวัฒน์. 2523. **การประปาเบื้องต้น**. ภาควิชาสุขาภิบาลวิศวกรรม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ.
- วรากร ไม้เรียง. 2542. **วิศวกรรมเขื่อนดิน**. ครั้งที่ 2. ไลบรารีเนาย, กรุงเทพฯ.
- Abrams,D.M., A.E.Lobkovsky, A.Petroff, K.M.Straub, B.McElroy, D.C.Mohrig, A.Kudrolli and D.H.Rothman. 2009. **Growth laws for channel networks incised by groundwater flow**. Nature Geoscience 2: 193 - 196.
- Bedient,P.B., W.C.Huber and B.E.Vieux. 2008. **Hydrology and Floodplain Analysis**, Chapter8, p.795. Prentice Hall, New Jersey.
- Berhanu,M., A.Petroff, O.Devauchelle, A.Kudrolli and D.H.Rothman. 2012. **Shape and dynamics of seepage erosion in a horizontal granular bed**. Physical Review Letters, The United States.
- Budhu,M. and R.Gobin. 1996. **Slope Instability From Groundwater Seepage**. Hydraulic Engineering 7 (122): 415-417.
- Chu-Agor,M.L., G.A.Fox, R.M.Cancienne and G.V.Wilson. 2008. **Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes**. Journal of Hydrology (359): 247-259.
- Chu-Agor,M.L., G.A.Fox and G.V.Wilson. 2009. **Empirical sediment transport function predicting seepage erosion undercutting for cohesive bank failure prediction**. Journal of Hydrology (377): 155-164.

Coduto,D.P. 1998. **Geotechnical Engineering Principle and Pratices**. Prentice Hall, New Jersey.

Darcy,H. 1856. **Les Fontaines publiques de la ville de Dijon**, Paris

Das,B.M. 1990. **Advanced Soil Mechanic**. McGraw-Hill, Singapore.

Hans,S. 2007. **Groundwater**. Groundwater. U.S. Geological Survey, The United States.

Harr,M.E. 1962. **Groundwater and Seepage**. McGraw-Hill, New York.

Hazen, A. 1892. **Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to their Use in Filtration**, pp. 539-556. Massachusetts State Board of Health, Massachusetts.

Howard,A.D. and C. F.McLaneIII. 1988. **Erosion of cohesionless sediment by groundwater seepage**. Water Resources Research 10 (24): 1659–1674.

Lambe,T.W. and R.V.Whitman. 1979. **Soil mechanics, SI version**. John Wiley and Sons Inc, New York.

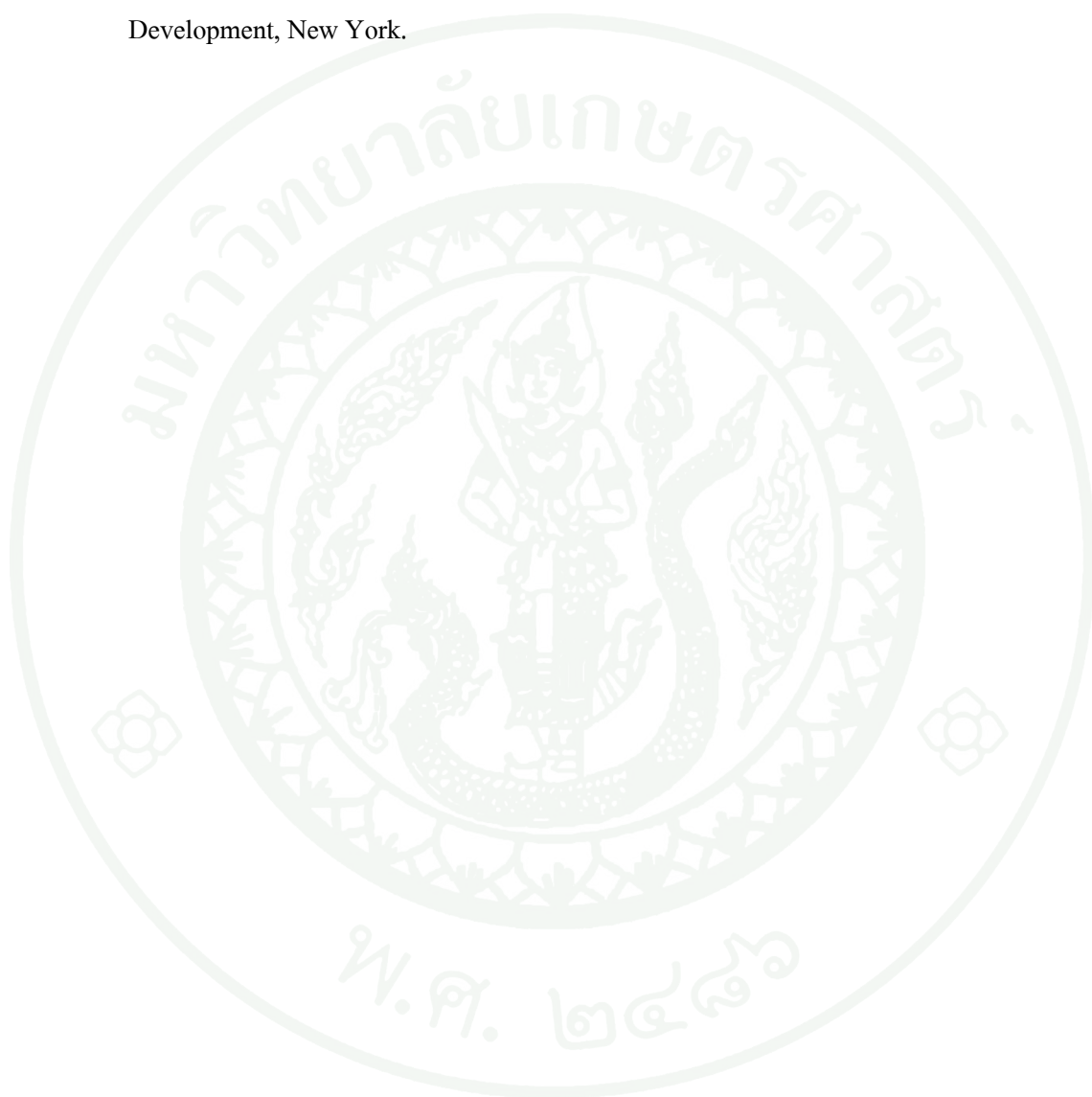
Pornprommin,A., Y.Takeib, A.M.Wubnehb and N.Izumi. 2010. **Channel inception in cohesionless sediment by seepage erosion**. Journal of Hydro-environment Research 4 (3): 232-238.

Pornprommin,A. and N.Izumi. 2010. **Inception of stream incision by seepage erosion**. Journal of Geophysical Research (115): 17.

Skempton,A.V. 1969. **The consolidation of clays by gravitational compaction**. Quarterly Journal of the Geological Society of London (125): 373-411.

Varnes,D.J. 1978. **Slope movement types and processes.** Transportation Research Board Special Report (176): 11-33.

Yun,Z. 2006. **Slope Stability Geotechnical Engineering.** Continuing Education and Development, New York.





ภาคผนวก



วิธีการทดลอง Grain Size Analysis

1. วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

- 1.1 เม็ดดินซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3-0.7 และ 0.5-1.1 มม.
- 1.2 ถาดใส่ตัวอย่าง (mixing pan)
- 1.3 ตะแกรงร่อน (sieve) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม.
- 1.4 เครื่องเขย่าตะแกรง (sieve shaker)
- 1.5 เครื่องชั่ง ขนาด 2 กก.อ่านละเอียด 0.1 กรัม
- 1.6 แพลงทำความสะอาดตะแกรง
- 1.7 ช้อนตักดิน (soil scoop)

2. วิธีการทดลอง

- 2.1 ทำความสะอาดตะแกรงทั้งหมดด้วยแพลงทำความสะอาด เพื่อป้องกันเศษทรายที่ค้างอยู่บนตะแกรง แล้วชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละเบอร์บันทึกค่า (ชั่งน้ำหนักของ pan ด้วย)



ภาพผนวกที่ ก1 ตระแกรงแต่ละเบอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

2.2 นำตระแกรงมาเรียงซ้อนกันโดยที่ให้ตระแกรงที่มีขนาดช่องใหญ่อยู่ชั้นบน แล้งเรียงขนาดเล็กตามลำดับดังนี้ ตะแกรงเบอร์ 16, 18, 20, 30, 40, 50, 60 และ pan



ภาพผนวกที่ ก2 เครื่องเขย่าตะแกรงที่ใช้ในการทดสอบ

2.3 นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้เทใส่ลงในตะแกรงที่เรียงลำดับจากหยาบไปละเอียด โดยมีฝาปิดด้านบนและมีถาด (pan) รองด้านล่าง แล้วจึงนำไปเข้าเครื่องเขย่า (sieve shaker) โดยเขย่านานอย่างน้อย 10 นาที ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก2



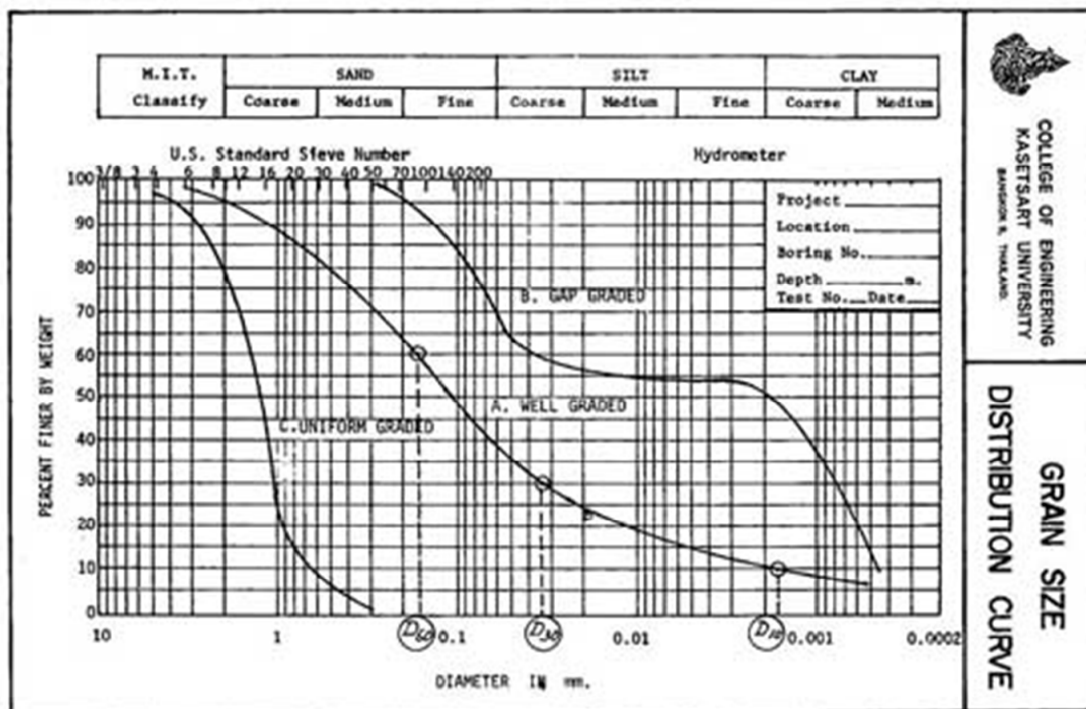
ภาพผนวกที่ ก3 การชั่งน้ำหนักทรายแห้งหลังจากเข้าเครื่องเขย่าตระแกรง

2.4 นำตระแกรงแต่ละเบอร์ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาค่าน้ำหนักของทรายที่ค้างอยู่บนแต่ละเบอร์

2.5 บันทึกผลและเขียนโค้งกระจาย (semi-log scale) เพื่อหา D_{10} และ D_{50}

3. ทฤษฎีการกระจายของขนาดเม็ดดิน

การกระจายของขนาดเม็ดดิน มักแสดงด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดในสเกลลอการิทึม (logarithmic Scale) และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่าที่ระบุ (percent finer) ซึ่งเรียกว่ากราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (grain size distribution curve) ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก4



ภาพผนวกที่ ก4 กราฟการกระจายขนาดเม็ดดิน

ที่มา: สื่อการสอนปฐพีกลศาสตร์ (2555)

ลักษณะของกราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน ดังแสดงในรูปที่ 1 แบ่งเป็น 2 จำพวกใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ

1. ดินที่มีขนาดเม็ดคละกันดี (well graded soil) คือดินมีเม็ดขนาดต่างๆ คละกันดี โดยพิจารณาจากช่วงของกราฟ เรียกว่า coefficient of uniformity

2. ดินที่ไม่มีขนาดเม็ดคละ (poorly graded soil) จะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.1 ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (gap graded) เช่น ในกราฟ รูปที่ 1 B จะเห็นว่าขนาดระหว่าง 0.0025 ถึง 0.017 ม.ม. หายไป กราฟจึงเป็นเส้นระนาบ

2.2 ดินที่มีเม็ดขนาดเดียว (uniform graded) เช่น ในกราฟ รูปที่ 1 C จะเห็นว่าขนาดของเม็ด ระหว่าง 1.0 - 2.0 มม. มีถึง 55 เปอร์เซ็นต์

ตารางผนวกที่ ก1 การแบ่งชนิดของเม็ดดิน

ชนิดของดิน	ช่องของขนาดเม็ดดิน (มม.)
หิน	ใหญ่กว่า 75 (3")
กรวดหยาบ	75 – 19 (3/4")
กรวดละเอียด	19 – 4.75 (#4)
ทรายหยาบ	4.75 – 2 (#10)
ทรายปานกลาง	2 – 0.425 (#40)
ทรายละเอียด	0.425 – 0.075 (#200)
ตะกอนทราย	0,075 – 0.005 หรือ 0.002
ดินเหนียว	0.005 หรือ 0.002 – 0.001
แวนลอย	เล็กกว่า 0.001

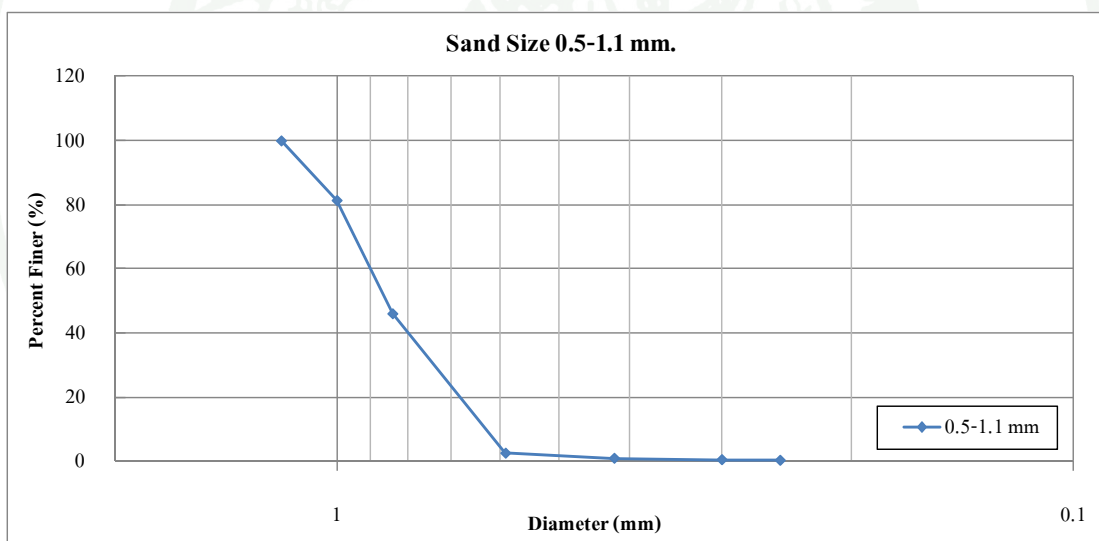
ที่มา: พลช (2553)

4. การคำนวณและการแสดงผล

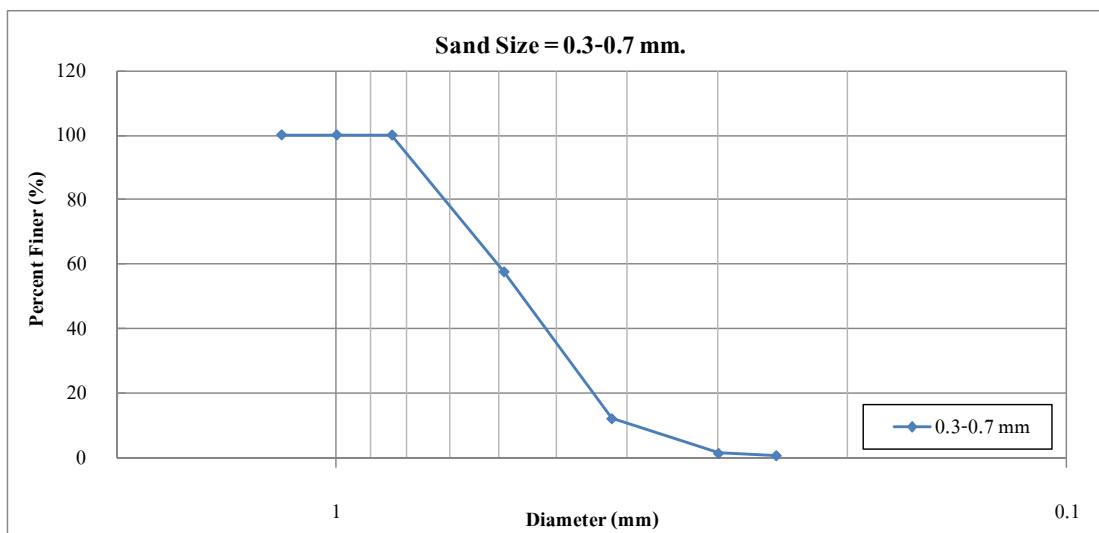
การคำนวณและการแสดงผลการกระจายของขนาดเม็ดดินสามารถคำนวณหาขนาดเม็ดทรายที่ผ่านตระแกรงเบอร์ต่างๆโดยใช้ excel ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก5 และนำผลที่ได้ไปทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตระแกรงกับเปอร์เซ็นต์เม็ดทรายที่ผ่านตระแกรงดังแสดงในภาพผนวกที่ ก6 และ ก7 แล้วอ่านค่า D_{10} และ D_{50} จากกราฟ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6					D10 =	0.63						D10 =	0.4				
7			0.5-1.1 mm		D50 =	0.86						0.3-0.7 mm		D50 =	0.56		
8			Sieve No.	Sieve Opening	Weight of Soil Retained	Cumulative Retained, g	Cumulative Retained, %	Percent Finer				Sieve No.	Sieve Opening	Weight of Soil Retained	Cumulative Retained, g	Cumulative Retained, %	Percent Finer
9			16	1.19	0.6	0.6	0.12	99.88				16	1.19	0.08	0.08	0.016	99.98
10			18	1	92.9	93.5	18.7	81.3				18	1	0.1	0.18	0.036	99.96
11			20	0.84	176.4	269.9	53.98	46.02				20	0.84	0.15	0.33	0.066	99.93
12			30	0.59	217	486.9	97.38	2.62				30	0.59	211.85	212.18	42.436	57.56
13			40	0.42	7.87	494.77	98.954	1.046				40	0.42	227.5	439.68	87.936	12.06
14			50	0.3	2.23	497	99.4	0.6				50	0.3	53.72	493.4	98.68	1.32
15			60	0.25	1	498	99.6	0.4				60	0.25	3.5	496.9	99.38	0.62
16			pan		2	500	100	0				pan		3.1	500	100	0
17					500									500			
18																	
19																	
20																	

ภาพผนวกที่ ก5 แสดงการคำนวณหาขนาดเม็ดทรายที่ผ่านตระแกรงเบอร์ต่างๆ โดยใช้ excel



ภาพผนวกที่ ก6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตระแกรงกับเปอร์เซ็นต์เม็ดทรายที่ผ่านตระแกรงของเม็ดทรายขนาด 0.5-1.1 มิลลิเมตร



ภาพผนวกที่ ก7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตระแกรงกับเปอร์เซ็นต์เม็ดทรายที่ผ่านตระแกรงของเม็ดทรายขนาด 0.3-0.7 มิลลิเมตร

จากกราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (grain size distribution curve) พบว่าที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทรายขนาด 0.3-0.7 มม. $D_{10} = 0.4$ และ $D_{50} = 0.56$ มม. แต่ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทรายขนาด 0.5-1.1 มม. $D_{10} = 0.63$ และ $D_{50} = 0.86$ มม.



วิธีการทดลอง Soil Permeability Test

การทดสอบความสามารถในการซึมได้ของเม็ดทราย โดยใช้วิธีระดับน้ำคงที่ (constant head test) เป็นวิธีที่นิยมใช้ทดลองในดินประเภทกรวด ทราย ดินที่มีตะกอนปนเล็กน้อยหรือไม่มีตะกอนปนเลย มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ปานกลางถึงสูง

1. อุปกรณ์การทดลอง

1.1 แผงเครื่องมือทดลองการซึมผ่านดังรูป

1.2 ครอบทดสอบการซึมน้ำ (mold)

1.3 ครอบกดวง 1000 ซม.³

1.4 นาฬิกาจับเวลา

1.5 ถังสำรองน้ำ

2. วิธีการทดลอง

2.1 เตรียมตัวอย่างดินสำหรับทดสอบ ให้นำตัวอย่างดินที่จะทำการทดสอบไปผึ่งแห้งโดยอากาศให้แห้งสนิท

2.2 วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงโมล (mold) เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของปริมาตรตัวอย่างดินแล้วนำวัสดุรองพื้น (ตระแกรง) ใส่เข้าไปในโมลเพื่อป้องกันเม็ดดินหลุดออกจากโมล



ภาพผนวกที่ ข1 เครื่องมือการทดสอบค่าความชื้นน้ำ

2.3 นำตัวอย่างดินที่จะทดสอบซึ่งแห้งสนิทแล้วใส่ในโมลแล้วนำตระแกรงวางหน้าบนของตัวอย่างดินอีกที่เพื่อป้องกันเม็ดดินเคลื่อนตัวออกจากโมล หลังจากนั้นนำฝาครอบปิดโมล โดยล็อกโมลให้แน่นสนิท



ภาพผนวกที่ ข2 การติดตั้งโมลในการทดสอบค่าความชื้นน้ำ

2.4 ประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้ากับตัวโมล ไม่ว่าจะป็นท่อวัดความดัน ท่อน้ำเข้าและออก



ภาพผนวกที่ ข3 การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเพื่อหาค่าความชื้นน้ำ

2.5 ปล่อน้ำเข้าโมลและในขณะเดียวกันก็ระบายอากาศออกโดยใช้วาล์วเปิดปิดซึ่งอยู่ด้านบนของโมลทำให้อากาศที่อยู่ในโมลสามารถระบายออกได้เพราะถ้าไม่ระบายอากาศออกอากาศสามารถเข้าไปแทรกตัวในชั้นดินทำให้การวัดปริมาณน้ำเกิดการผิดพลาดได้ เมื่อระบายอากาศออกหมดแล้ว รอให้ความดันคงที่แล้วจึงทำการวัดปริมาณน้ำที่ผ่านชั้นดินที่นำมาทดสอบ แล้วจับเวลาเป็นวินาทีเมื่อปริมาณของน้ำเต็มกระบอกตวง (1000 ลบ.ซม.) จดบันทึกเวลาและอุณหภูมิของน้ำ ทำซ้ำกันอย่างน้อย 3 ครั้ง โดยที่ข้อมูลไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก



ภาพผนวกที่ ข4 การวัดอัตราการไหลของน้ำที่ไหลซึมผ่านเมมเบรน

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2												
3											ที่ระดับจากพื้น	
4			Diameter	7.7 cm	A =	46.56625711 cm ²				Pressure บน	13	cm
5										Pressure กลาง	6.5	cm
6			ปริมาตร=	900 ml						Pressure ล่าง	0	cm
7												
8												
9		small size	0.235891									
10		อ่านจาก parameter			time	k กรณี บน-ล่าง	k กรณี กลาง-ล่าง					
11		Pressure บน	67 cm		32.9	0.232125437	0.237171642					
12		Pressure กลาง	50.2 cm		32.37	0.23592607	0.241054897					
13		Pressure ล่าง	34.1 cm		32.91	0.232054903	0.237099575					
14					32.72666667	0.233354865	0.238427797					
15												
16												
17		big size	0.514087									
18		อ่านจาก parameter			time	k กรณี บน-ล่าง	k กรณี กลาง-ล่าง					
19		Pressure บน	56.1 cm		28.28	0.499131665	0.522620214					
20		Pressure กลาง	46.8 cm		28.03	0.503583428	0.527281472					
21		Pressure ล่าง	38.3 cm		28	0.504122982	0.527846416					
22					28.10333333	0.502269369	0.525905574					
23												
24												

ภาพผนวกที่ ข5 แสดงการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของเมมเบรนโดยใช้ excel

จากการคำนวณพบว่า การทดลองหาค่าความเข้มข้นโดยใช้ขนาดเมมเบรนนั้นให้ค่า k ($D_{50} = 0.56$) เท่ากับ 0.16 ซม./วินาที และ k ($D_{50} = 0.86$) เท่ากับ 0.4 ซม./วินาที ในขณะที่การทดลองหาค่าความเข้มข้นโดยวิธีความดันคงที่นั้นให้ค่า k ($D_{50} = 0.56$) เท่ากับ 0.23 ซม./วินาที และ k ($D_{50} = 0.86$) เท่ากับ 0.51 ซม./วินาที สำหรับค่า k ที่หาได้จากการทดลองในครั้งนี้จะนำไปวิเคราะห์การกีดขวางของชั้นทรายเนื่องจากน้ำได้ดินต่อไป



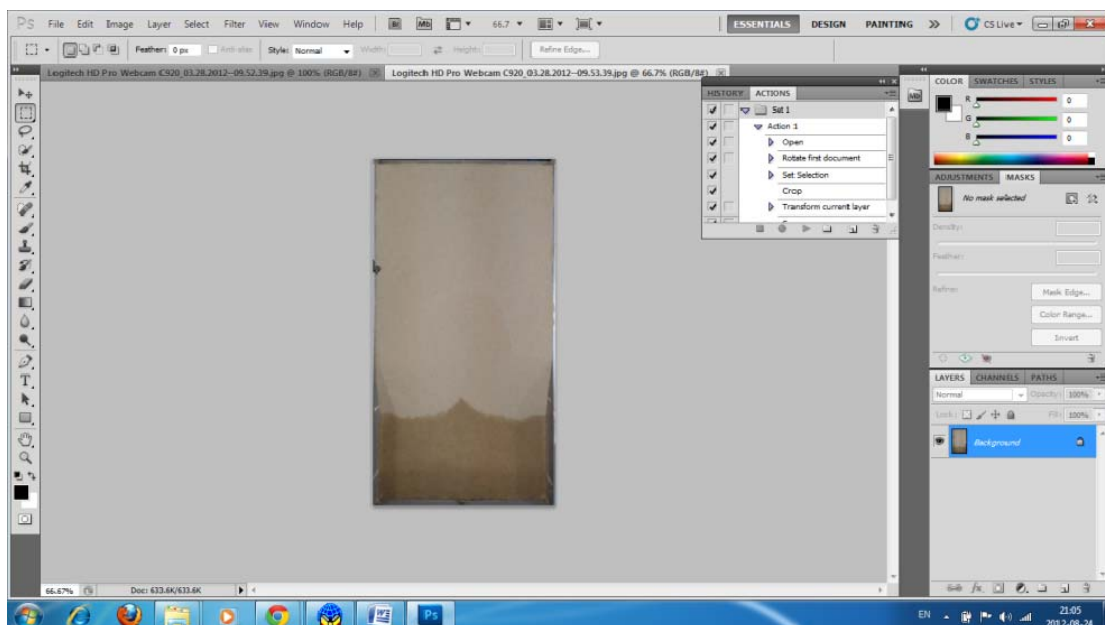
ภาคผนวก ค
การทดลองการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมของน้ำใต้ดิน



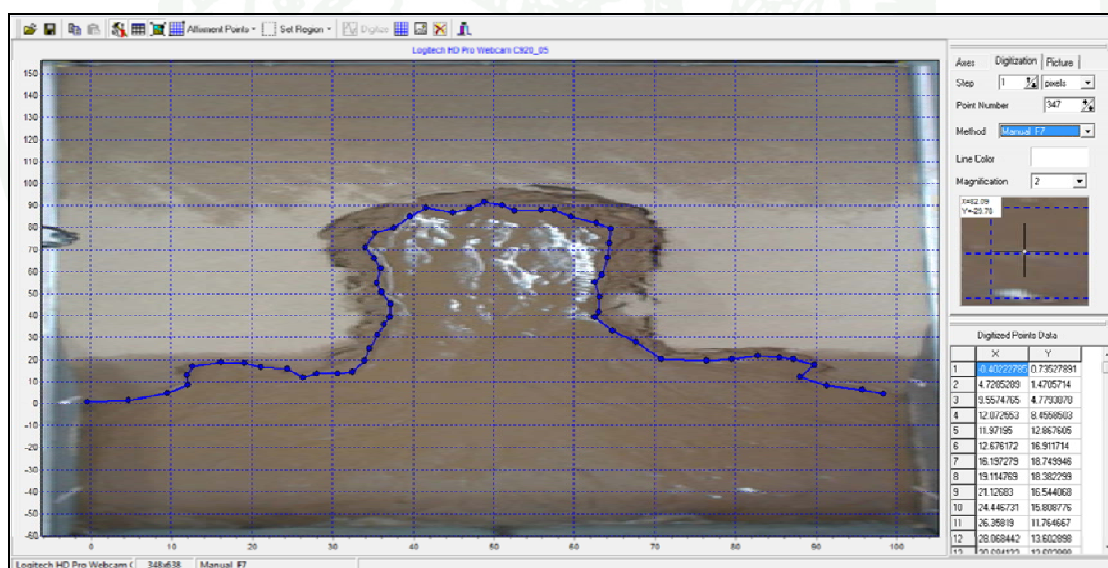
ภาพผนวกที่ ค1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเก็บข้อมูลในการทดลอง



ภาพผนวกที่ ค2 การวัดความลึกร่องน้ำโดยใช้เวอร์เนียแบบสเกล

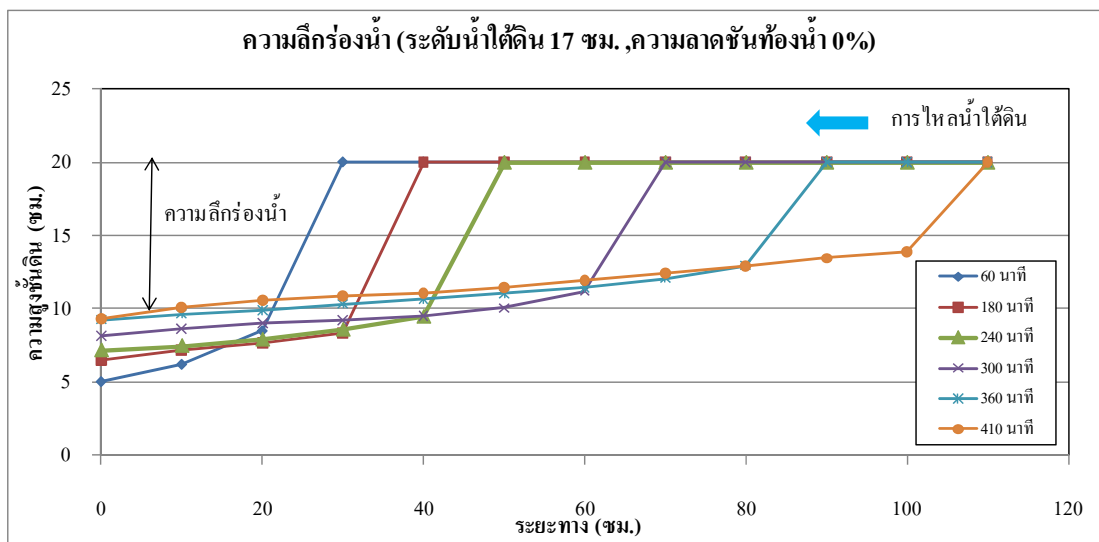


ภาพผนวกที่ ค3 การปรับภาพที่ถ่ายได้จากกล้อง webcam ด้วยโปรแกรม photoshop

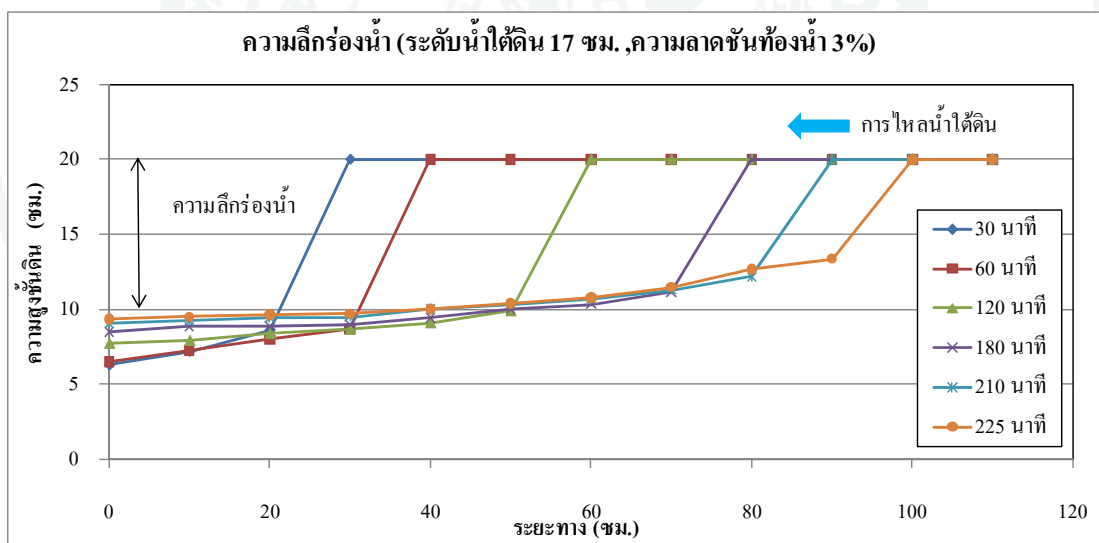


ภาพผนวกที่ ค4 การดิจิทัลข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง

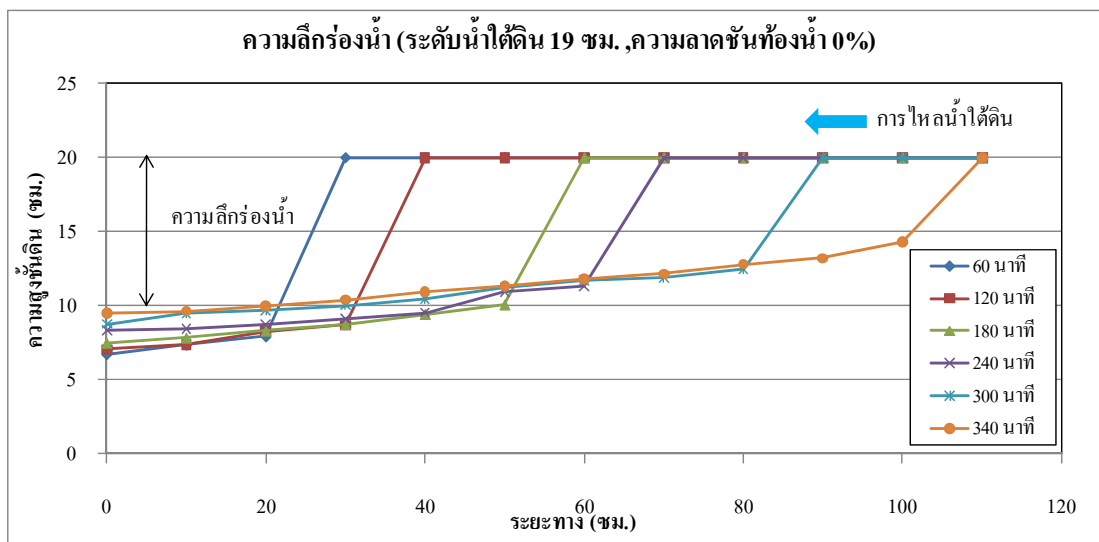




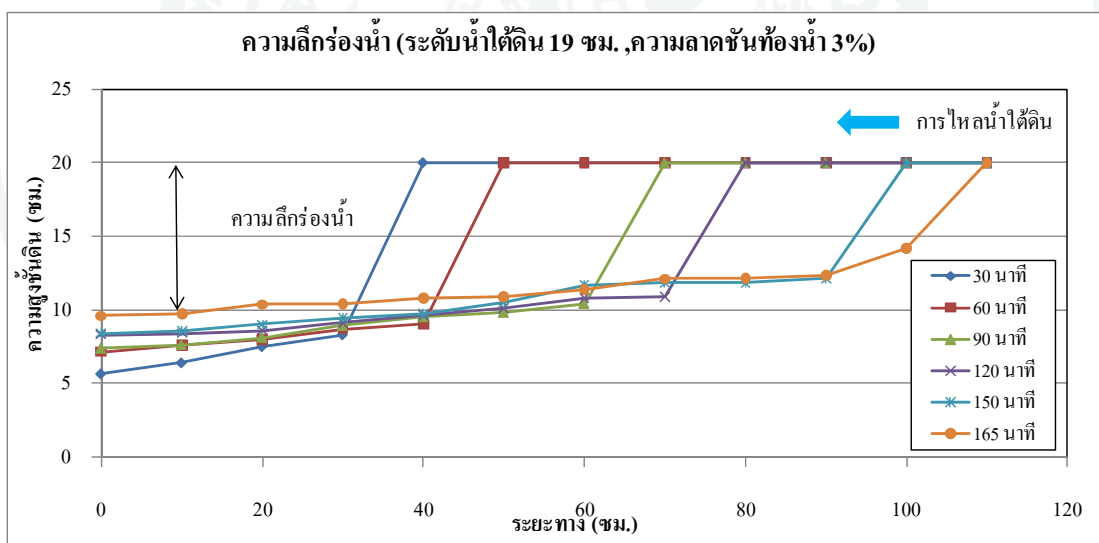
ภาพผนวกที่ ๑1 ความลึกกรองน้ำบริเวณทำน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1



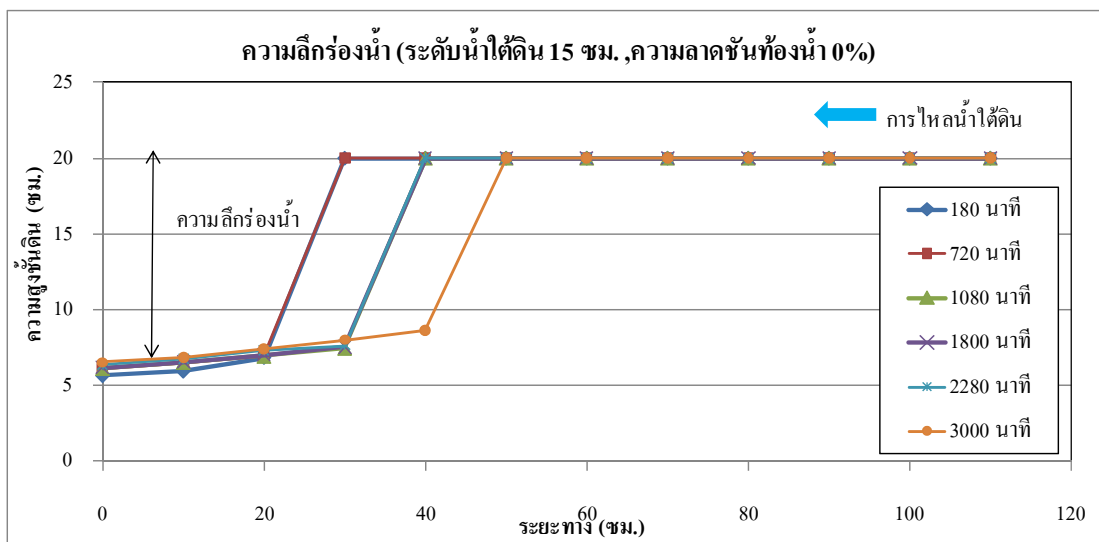
ภาพผนวกที่ ๑2 ความลึกกรองน้ำบริเวณทำน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1



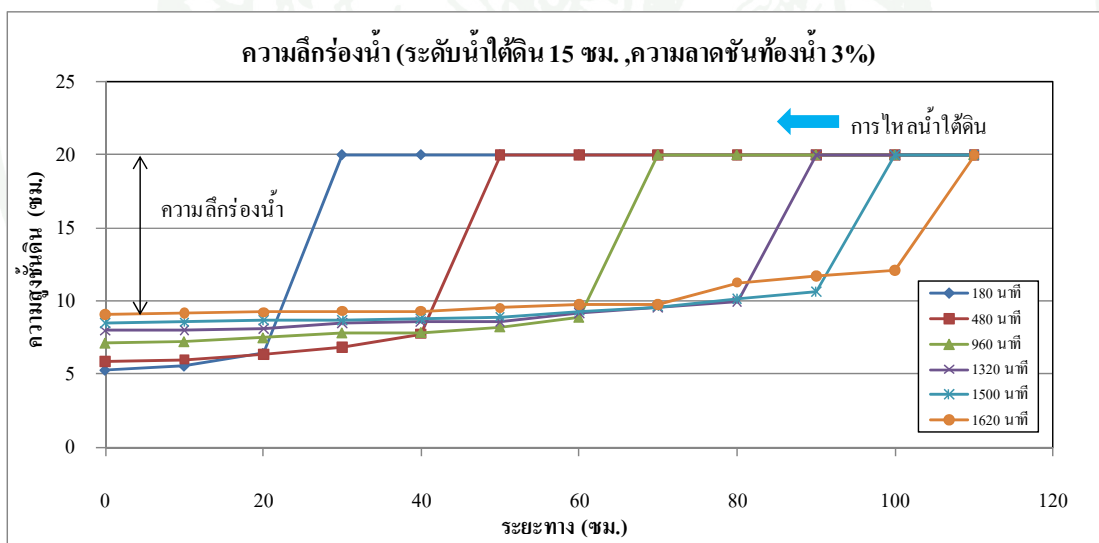
ภาพผนวกที่ ๓3 ความลึกกรองน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1



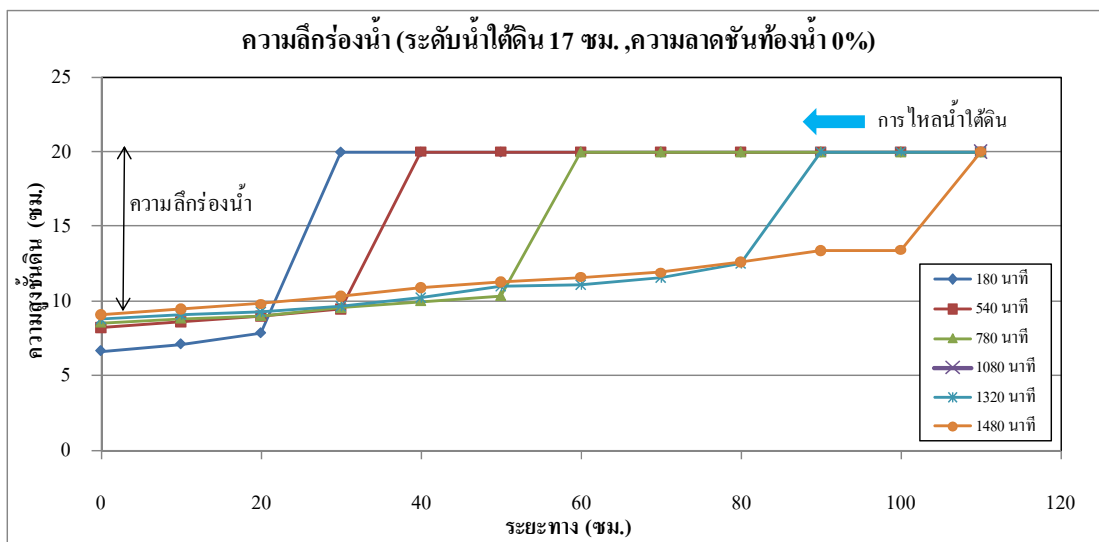
ภาพผนวกที่ ๓4 ความลึกกรองน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1



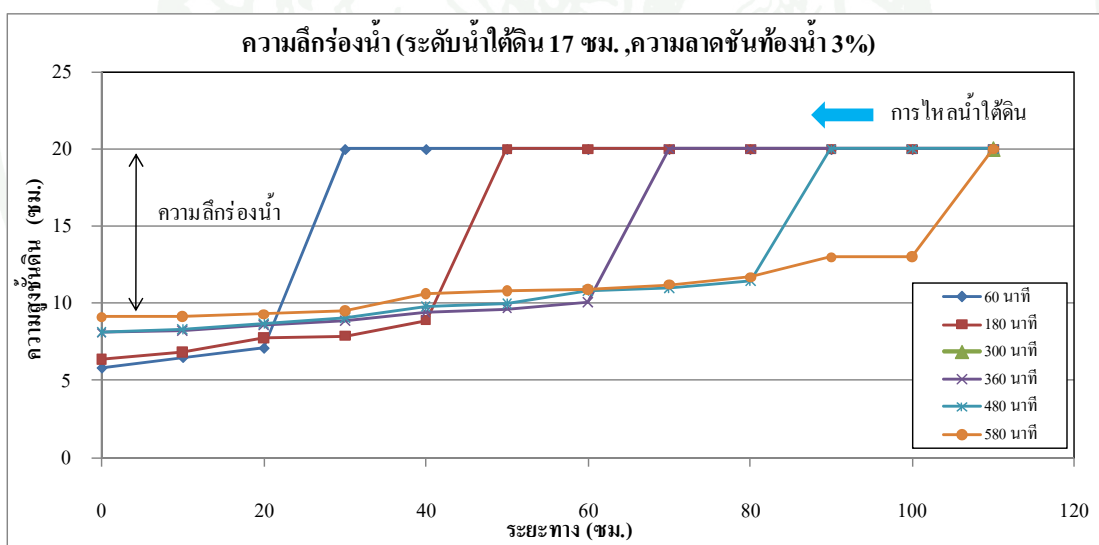
ภาพผนวกที่ 5 ความลึกของน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2



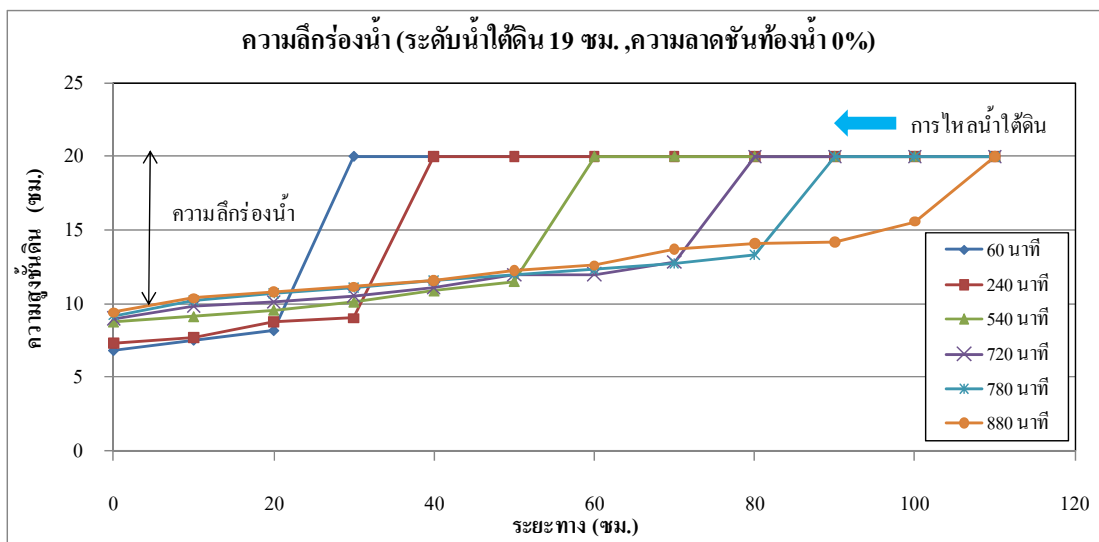
ภาพผนวกที่ 6 ความลึกของน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2



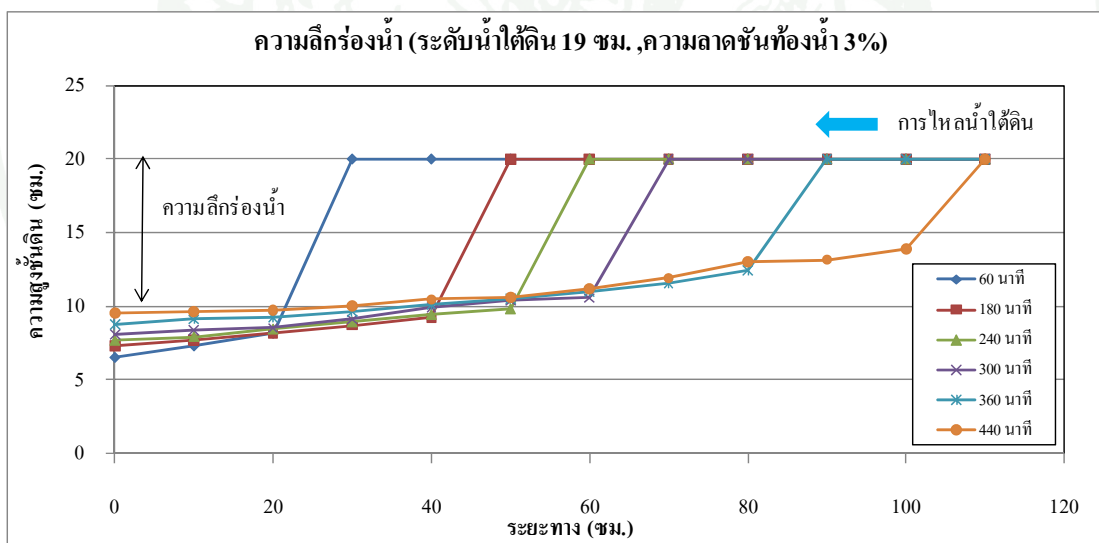
ภาพผนวกที่ ๗ ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2



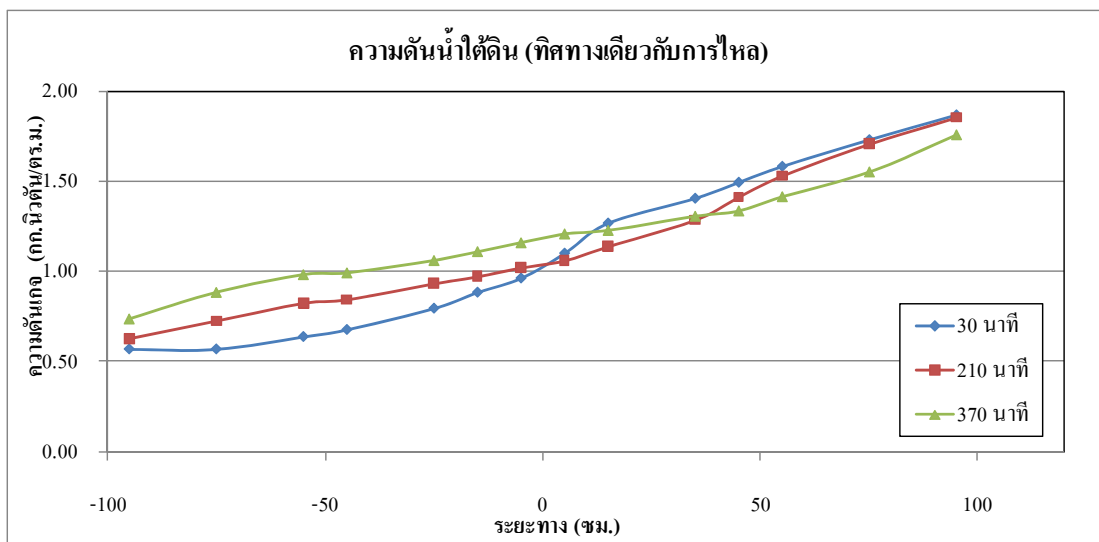
ภาพผนวกที่ ๘ ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2



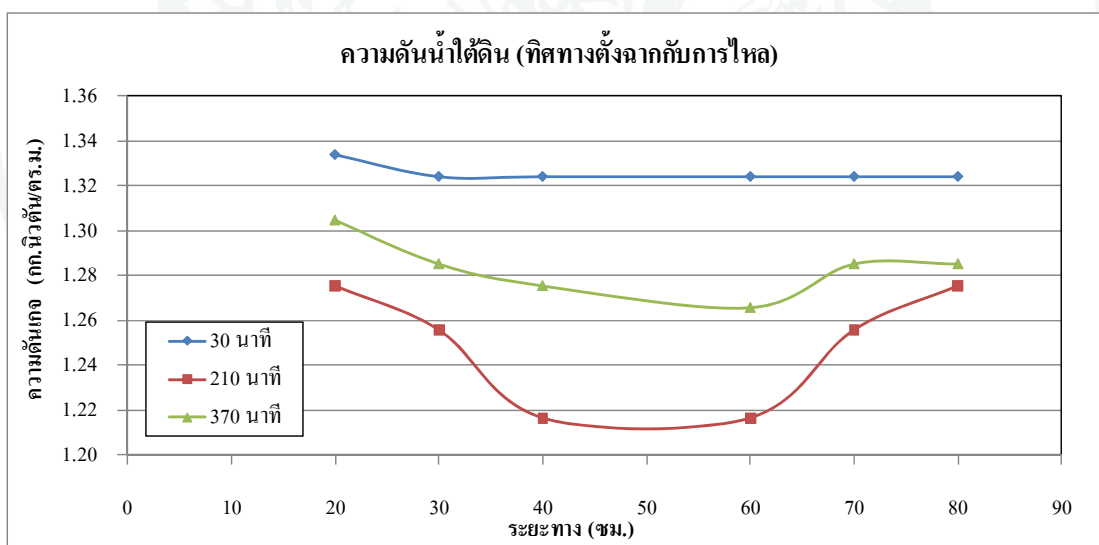
ภาพผนวกที่ 9 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2



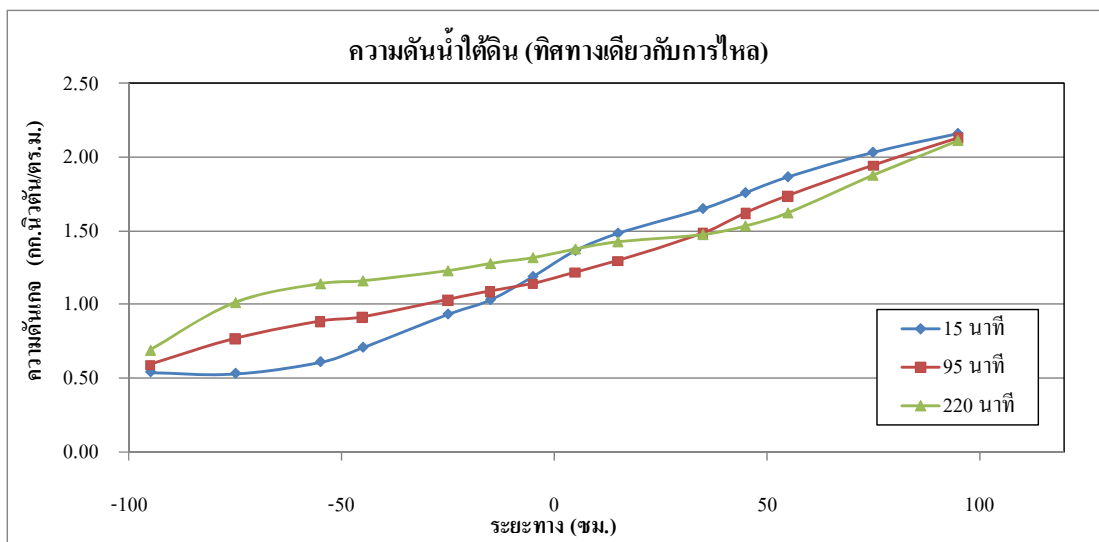
ภาพผนวกที่ 10 ความลึกร่องน้ำบริเวณท้ายน้ำที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2



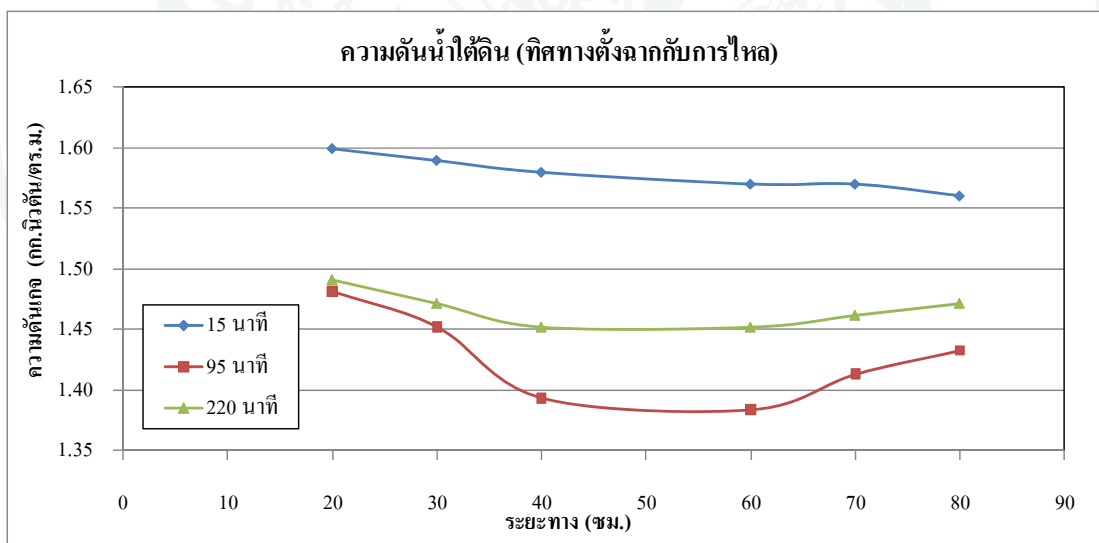
ภาพผนวกที่ 11 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางเดียวกับการไหลของทรายชนิดที่ 1



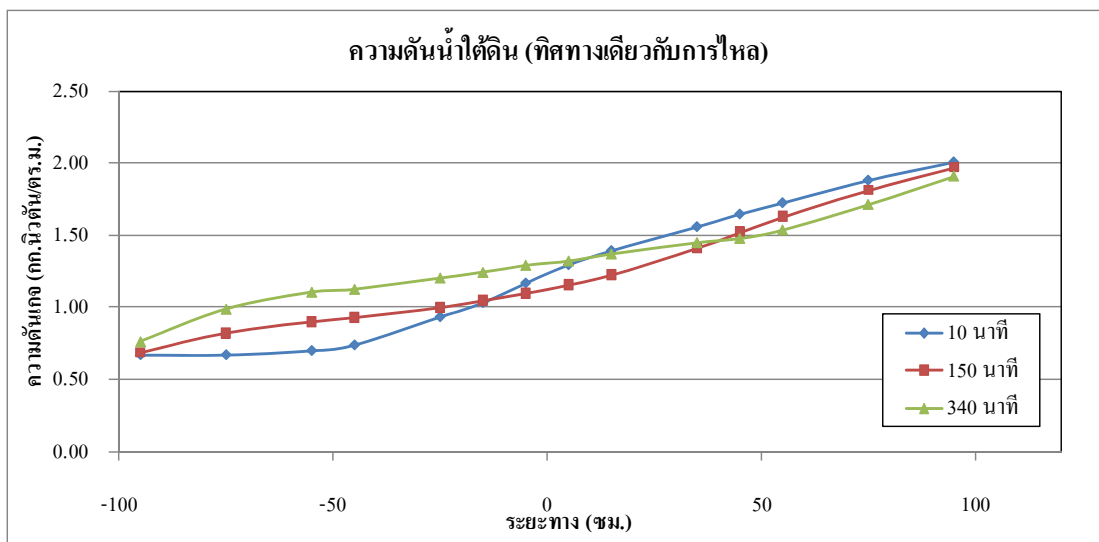
ภาพผนวกที่ 12 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของทรายชนิดที่ 1



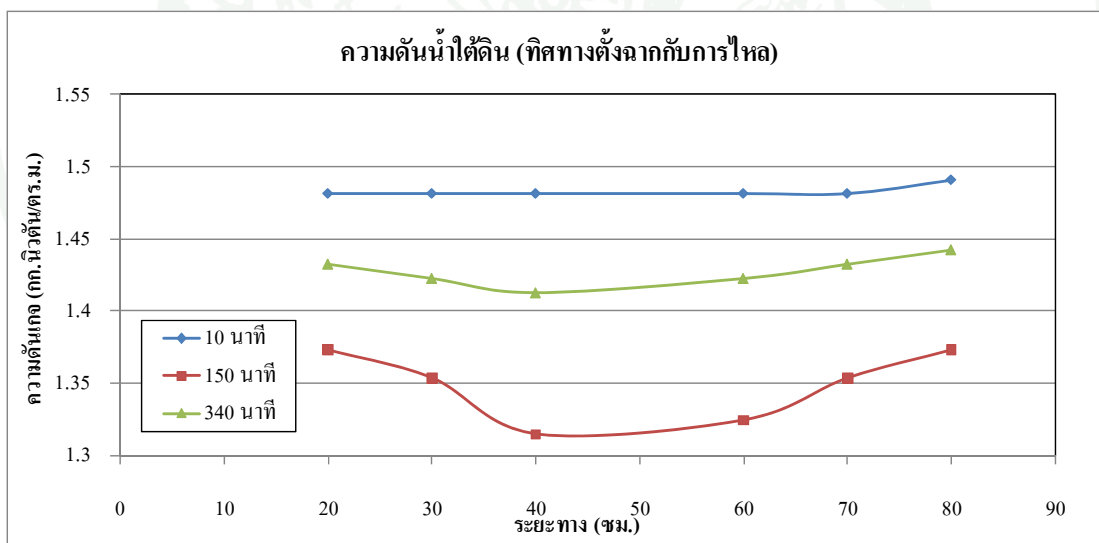
ภาพผนวกที่ 13 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางเดียวกับการไหลของทรายชนิดที่ 1



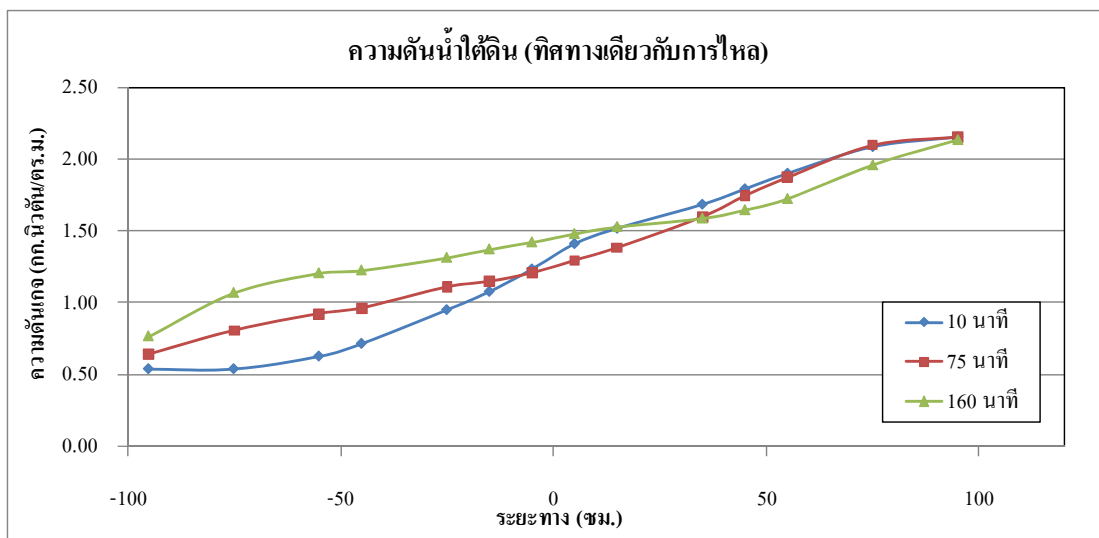
ภาพผนวกที่ 14 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของทรายชนิดที่ 1



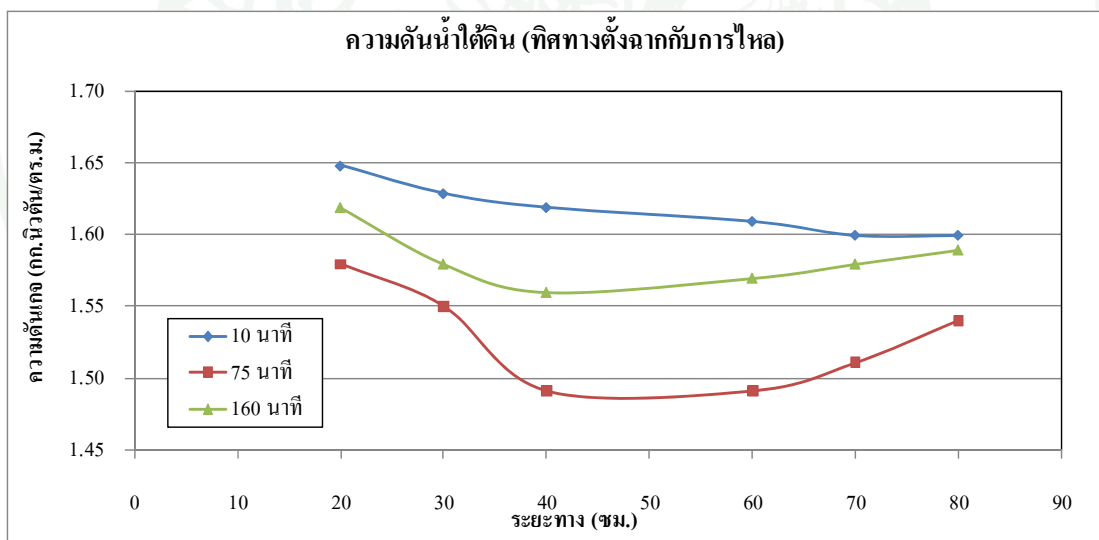
ภาพผนวกที่ 15 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางเดียวกับการไหลของทรายชนิดที่ 1



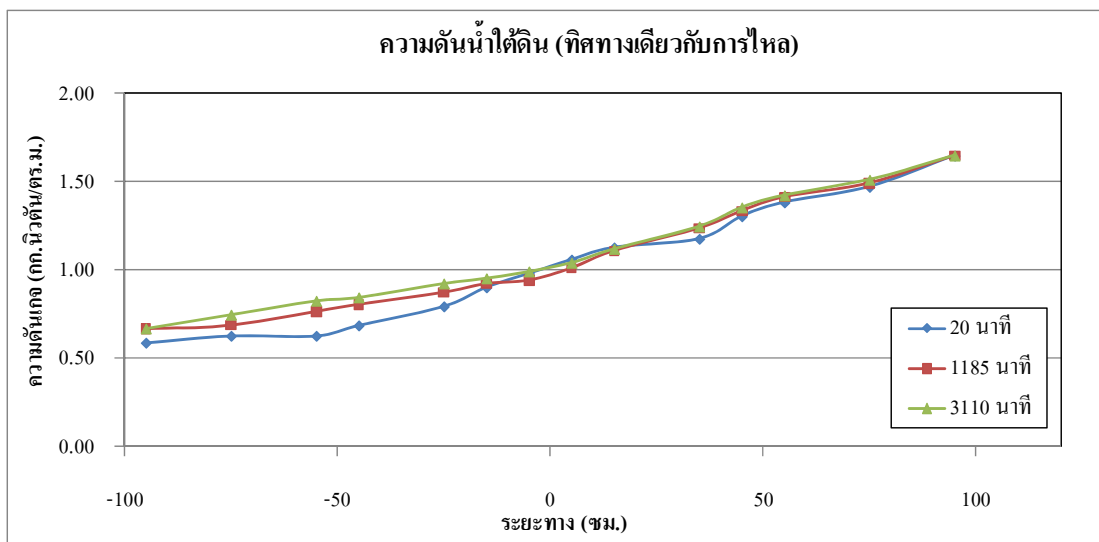
ภาพผนวกที่ 16 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของทรายชนิดที่ 1



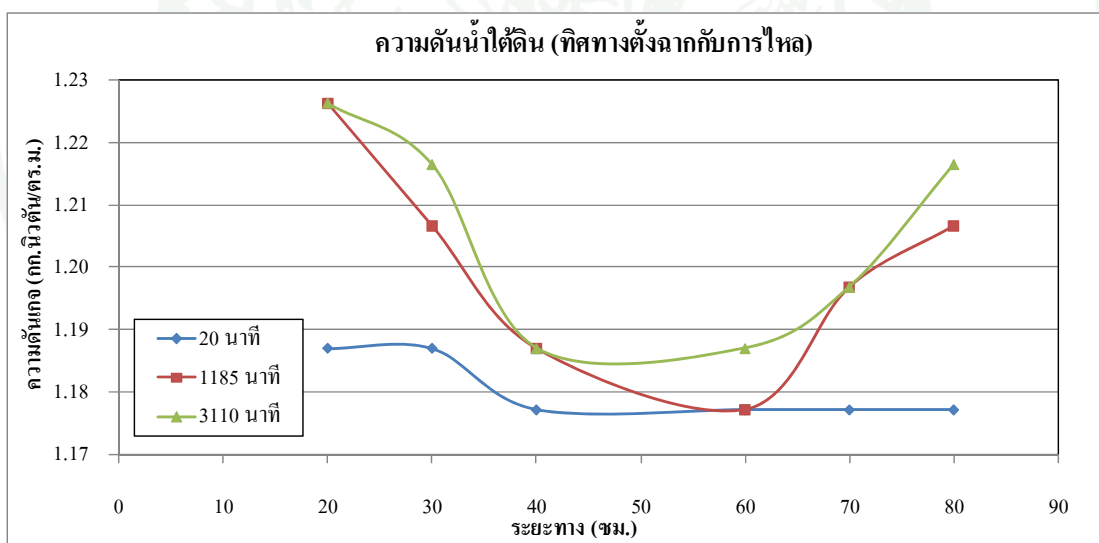
ภาพผนวกที่ 17 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางเดียวกับการไหลของทรายชนิดที่ 1



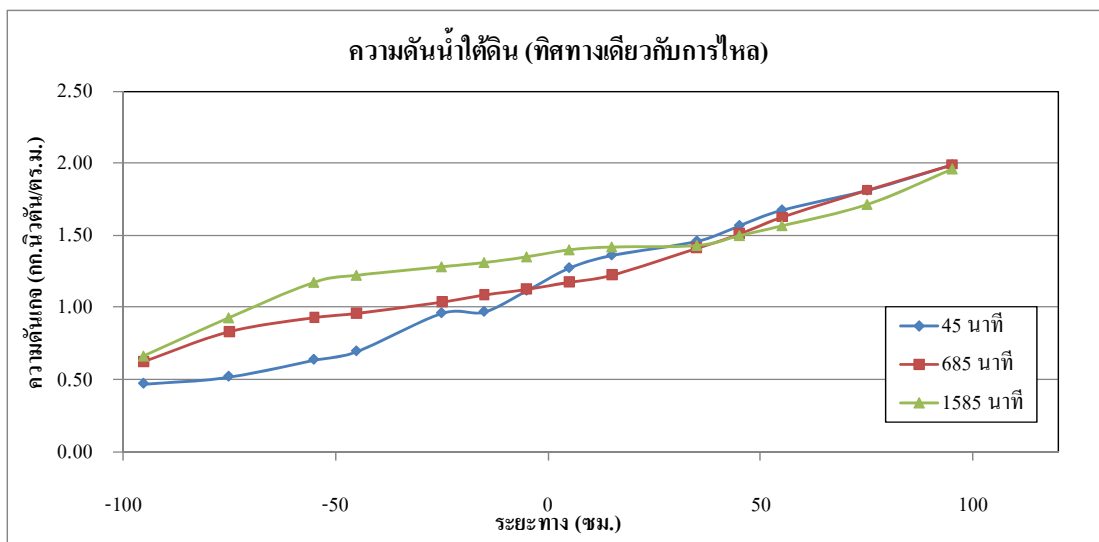
ภาพผนวกที่ 18 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของทรายชนิดที่ 1



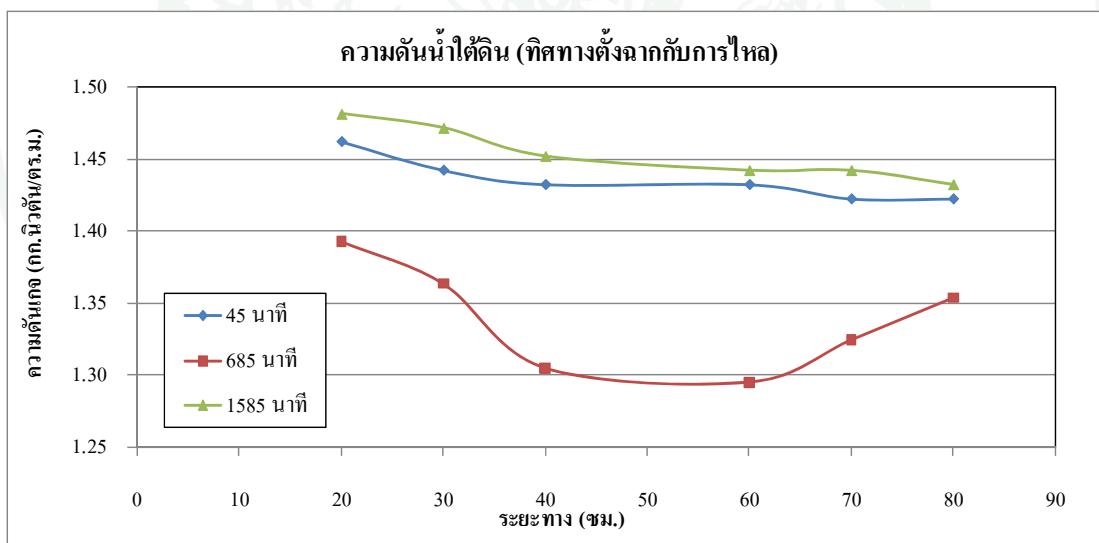
ภาพผนวกที่ 19 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางเดียวกับการไหลของทรายชนิดที่ 2



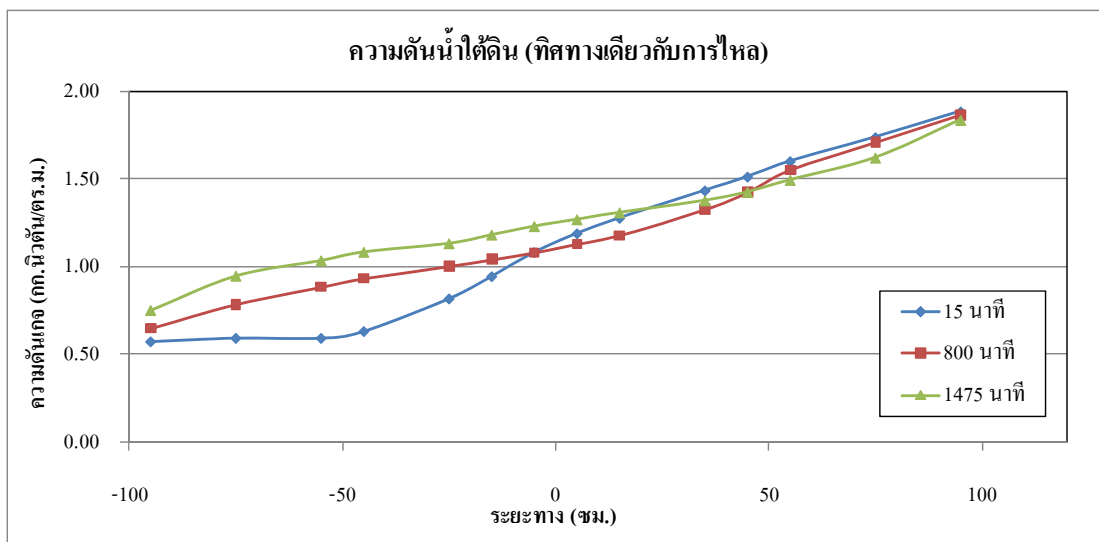
ภาพผนวกที่ 20 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของทรายชนิดที่ 2



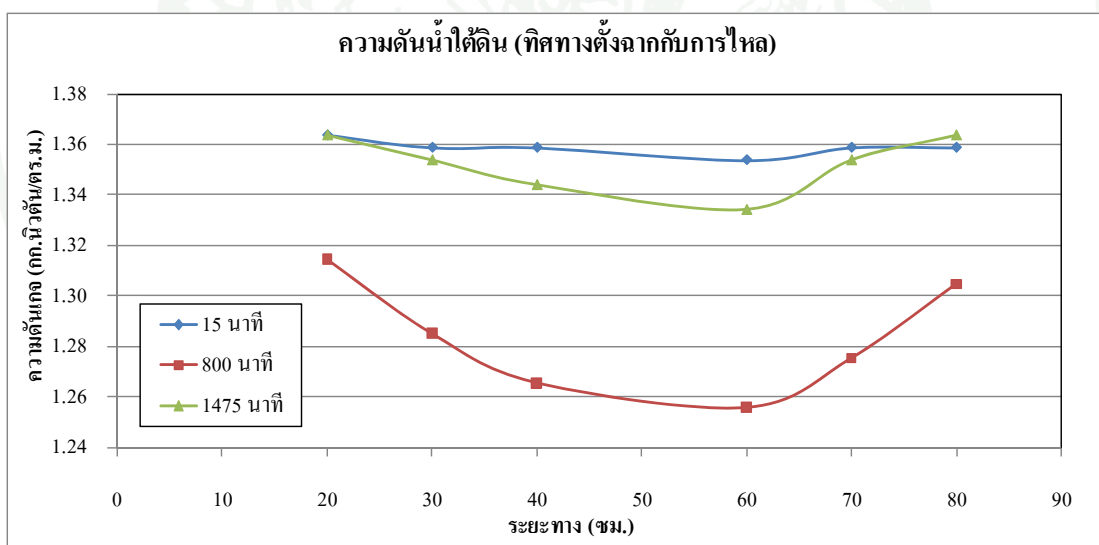
ภาพผนวกที่ 21 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางเดียวกับการไหลของทรายชนิดที่ 2



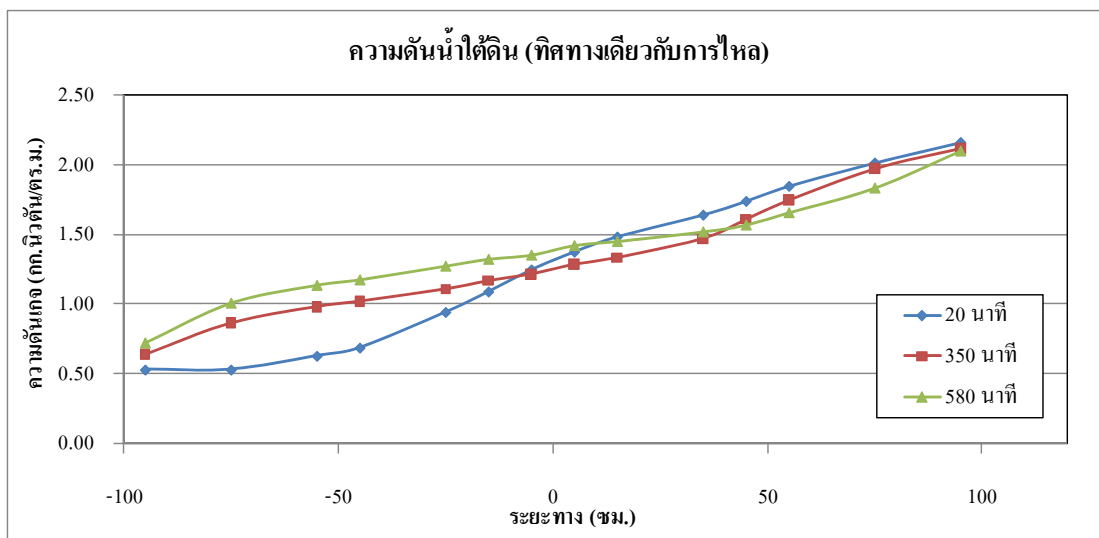
ภาพผนวกที่ 22 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของทรายชนิดที่ 2



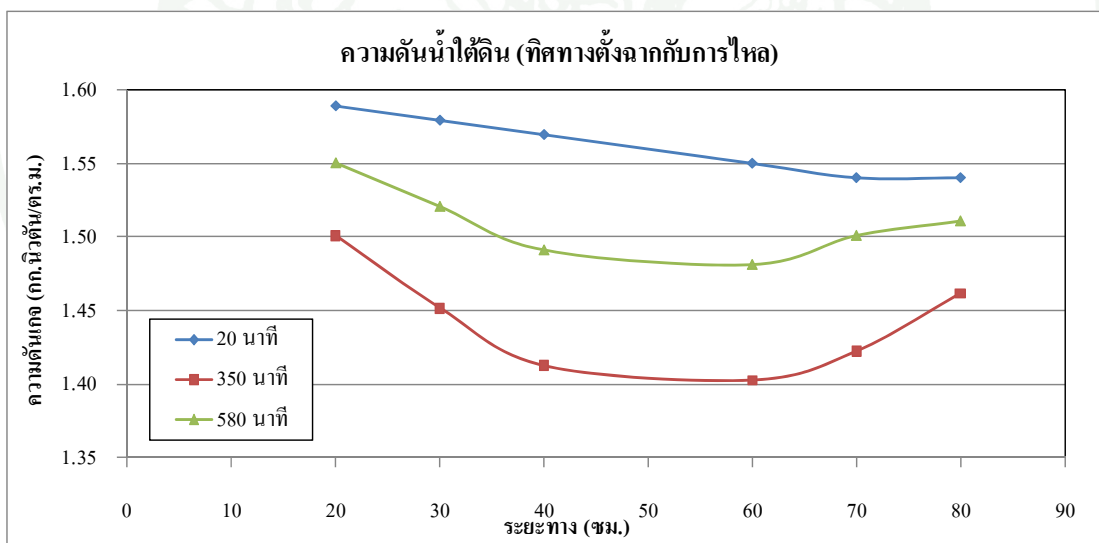
ภาพผนวกที่ ๒๓ ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางเดียวกับการไหลของทรายชนิดที่ 2



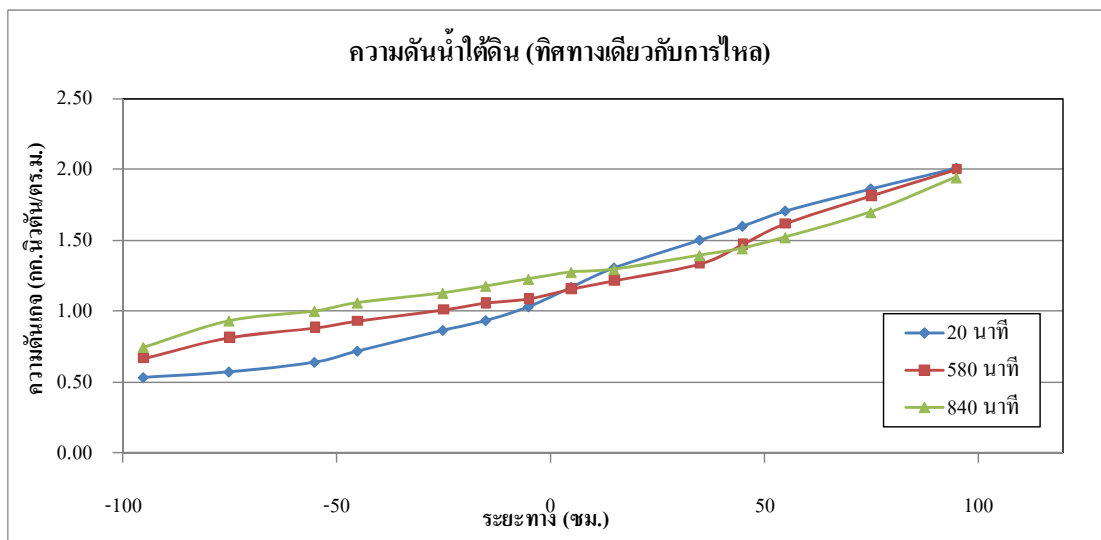
ภาพผนวกที่ ๒๔ ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของทรายชนิดที่ 2



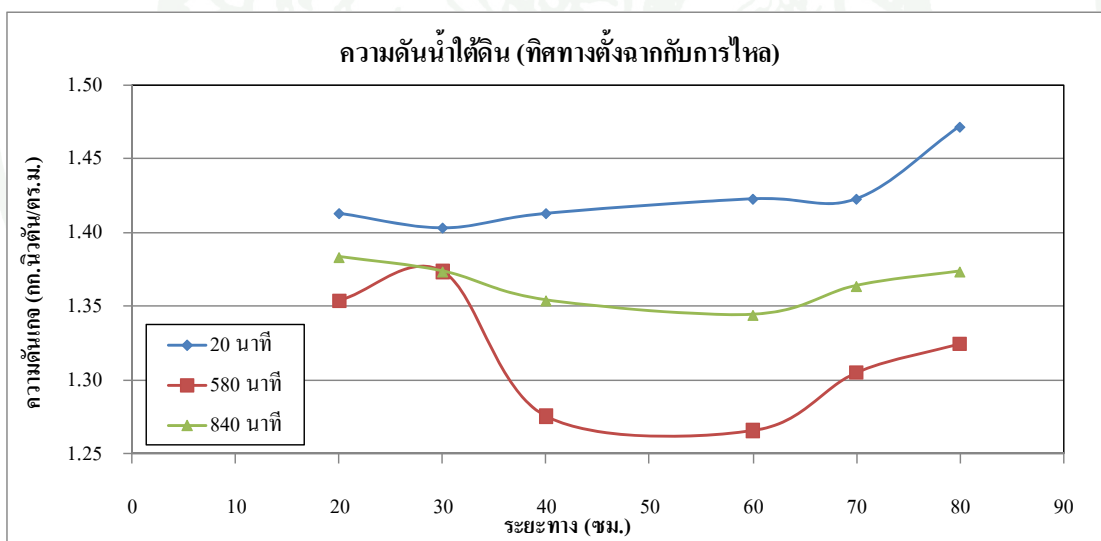
ภาพผนวกที่ ง25 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางเดียวกับการไหลของทรายชนิดที่ 2



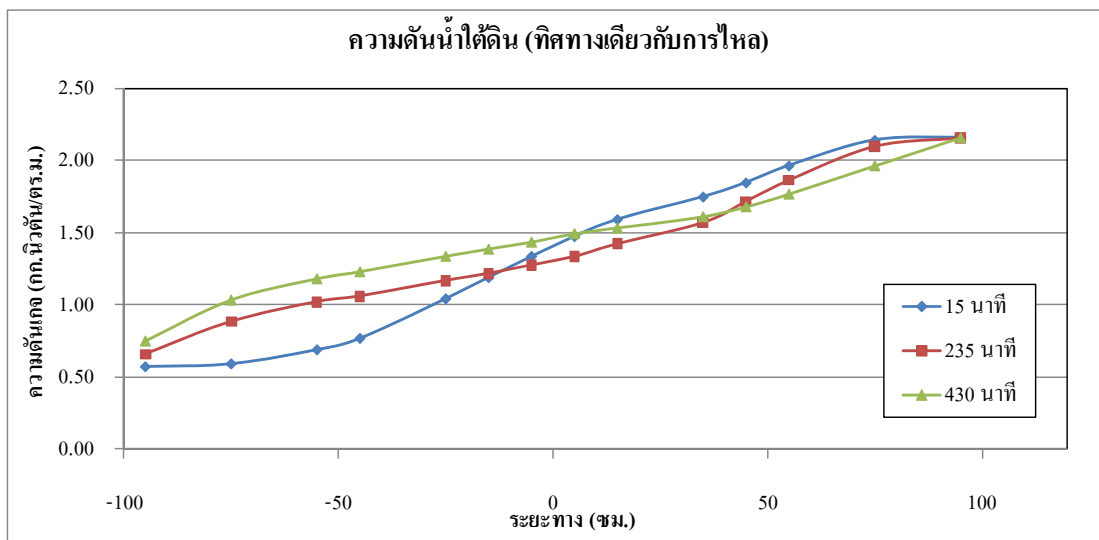
ภาพผนวกที่ ง26 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 17 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของทรายชนิดที่ 2



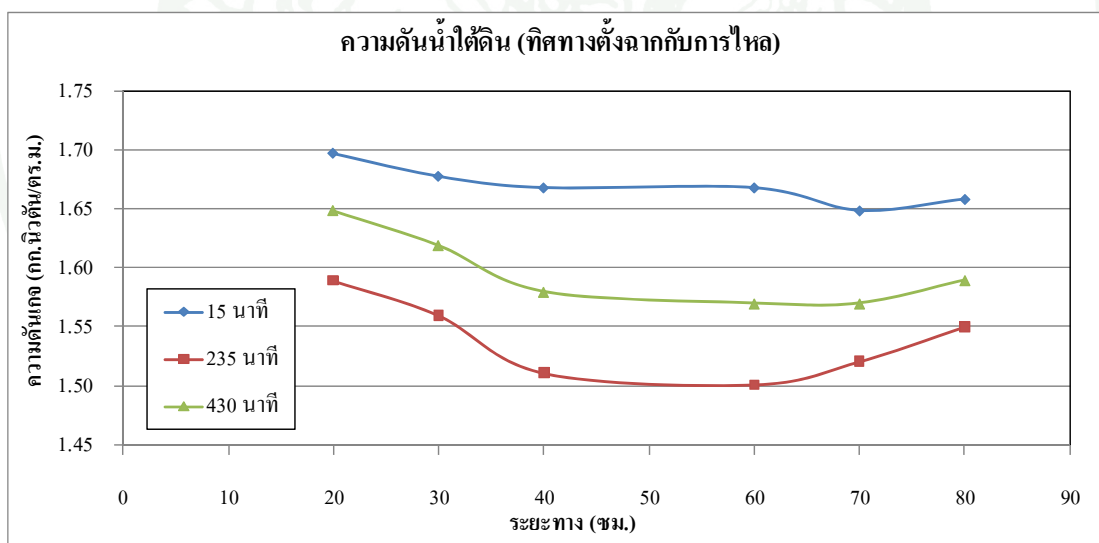
ภาพผนวกที่ 27 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางเดียวกับการไหลของทรายชนิดที่ 2



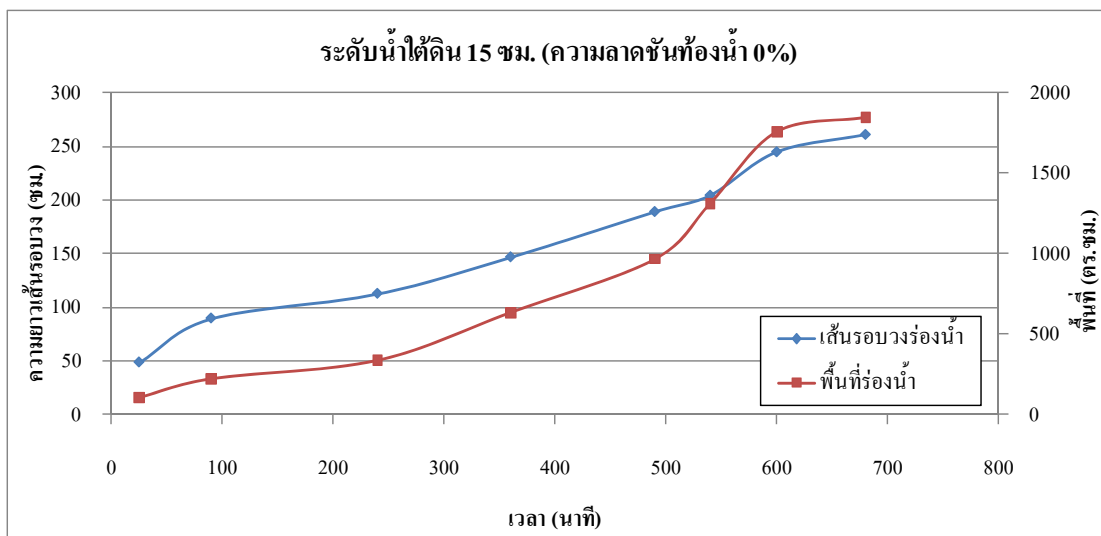
ภาพผนวกที่ 28 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของทรายชนิดที่ 2



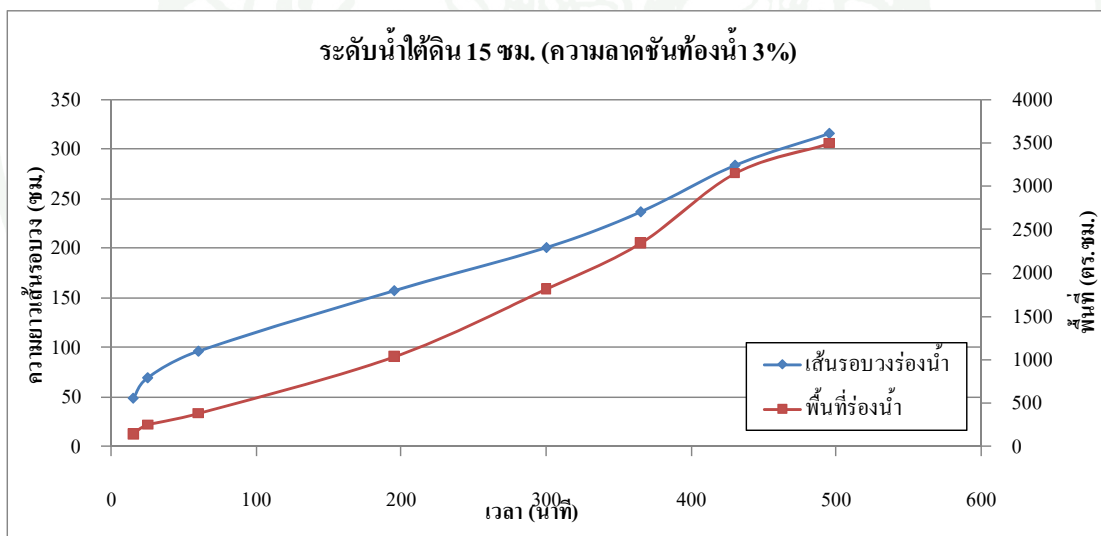
ภาพผนวกที่ 29 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางเดียวกับการไหลของทรายชนิดที่ 2



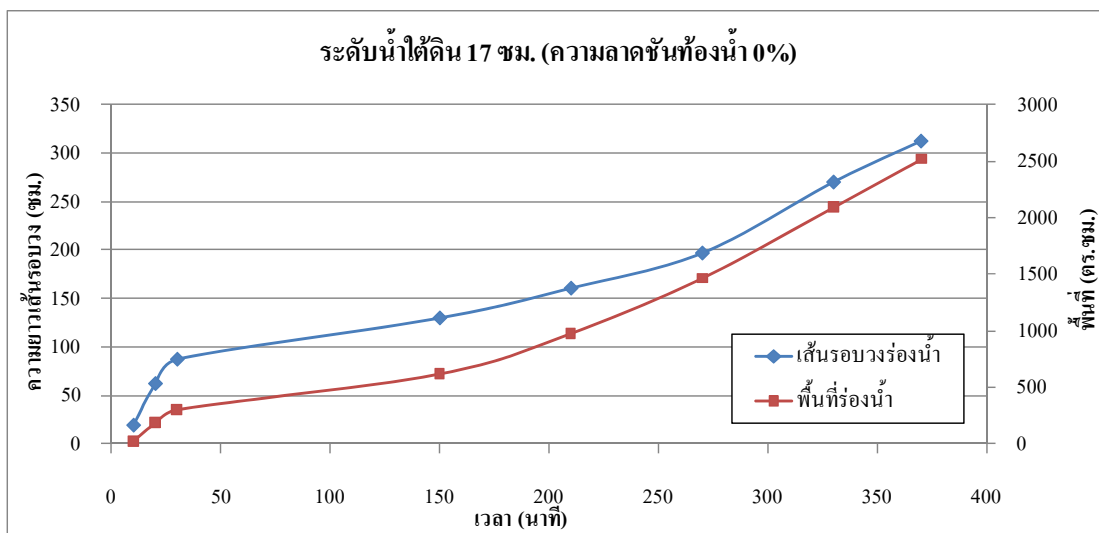
ภาพผนวกที่ 30 ความดันที่ระดับน้ำใต้ดิน 19 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของทรายชนิดที่ 2



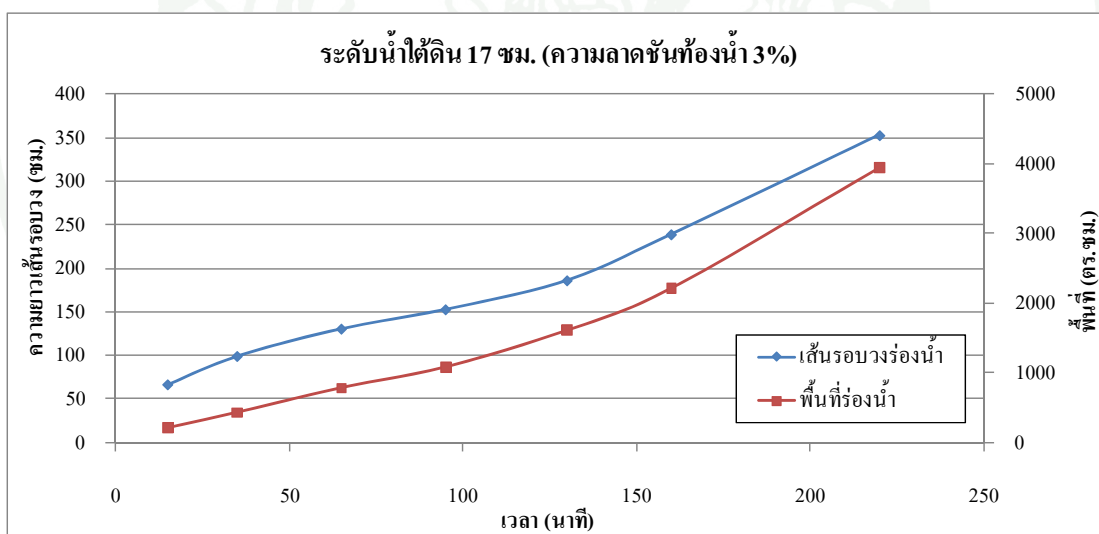
ภาพผนวกที่ ง31 ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1



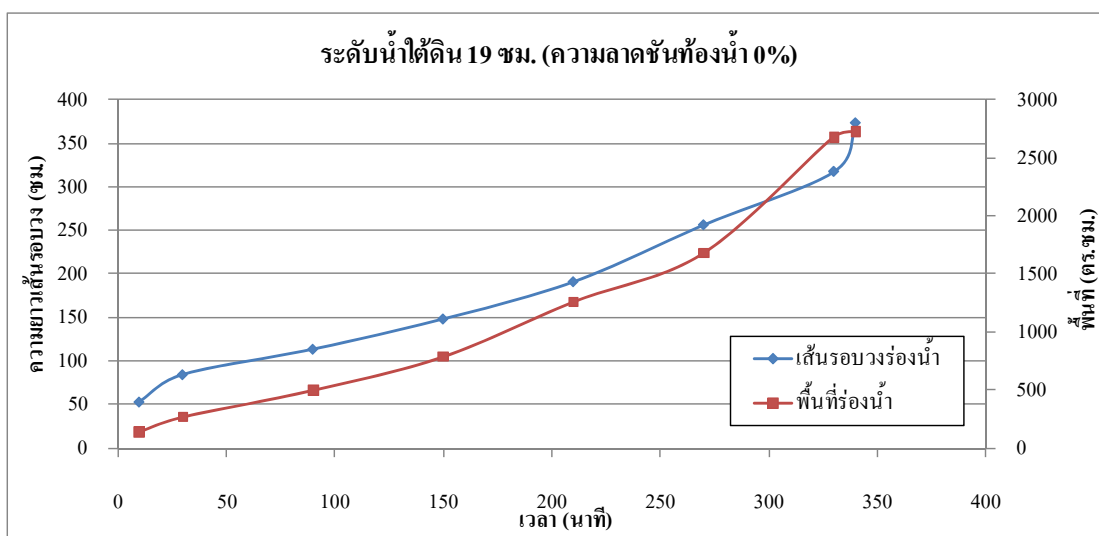
ภาพผนวกที่ ง32 ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่อนน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 15 ซม. ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1



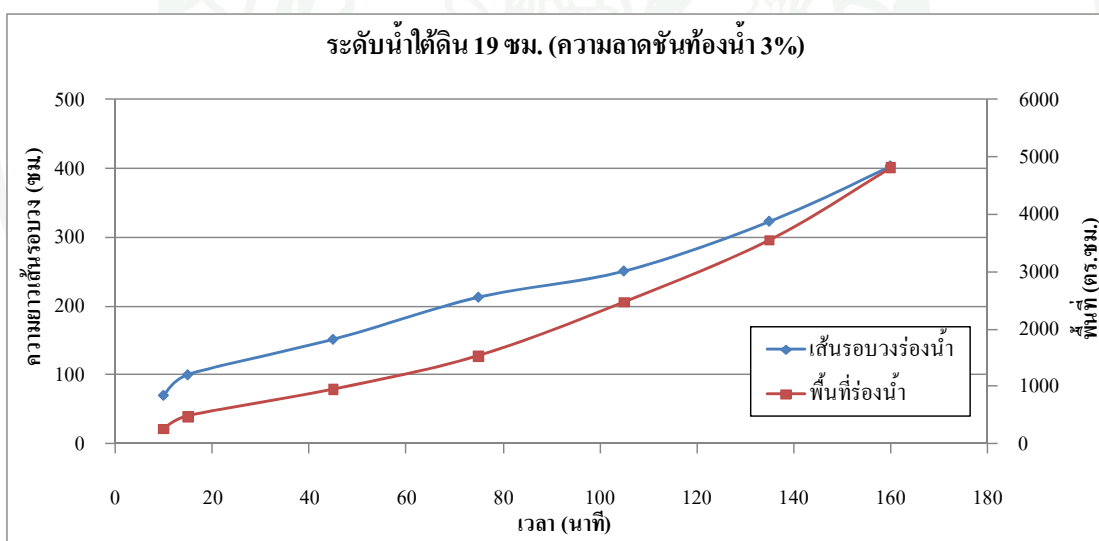
ภาพผนวกที่ 33 ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 17 ซม.
ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1



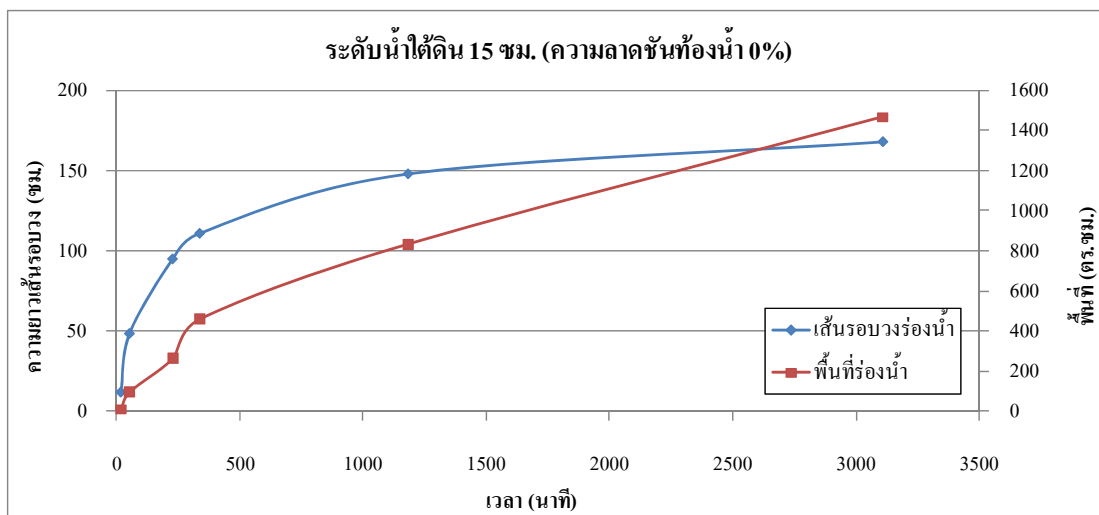
ภาพผนวกที่ 34 ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 17 ซม.
ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1



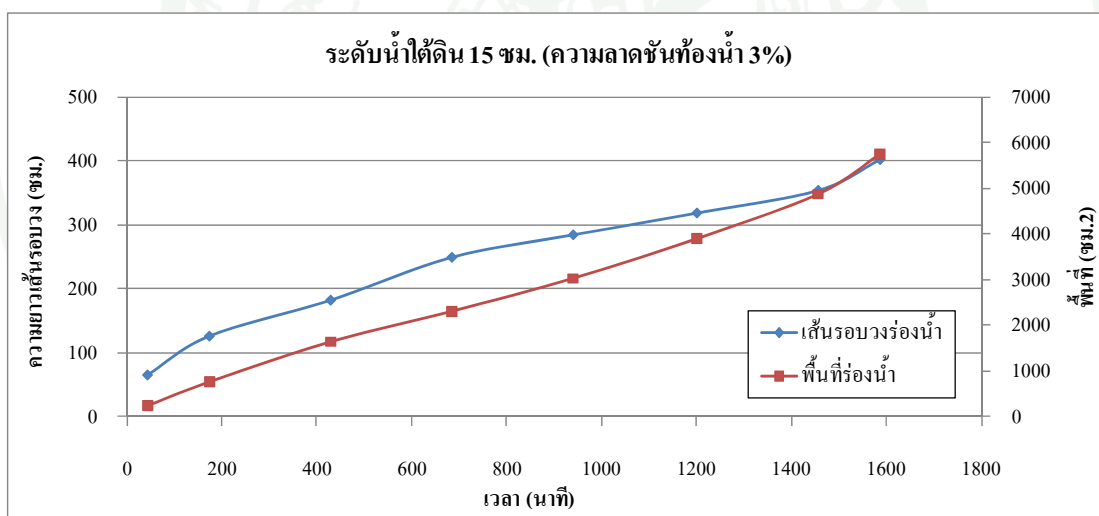
ภาพผนวกที่ ง35 ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 19 ซม.
ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 1



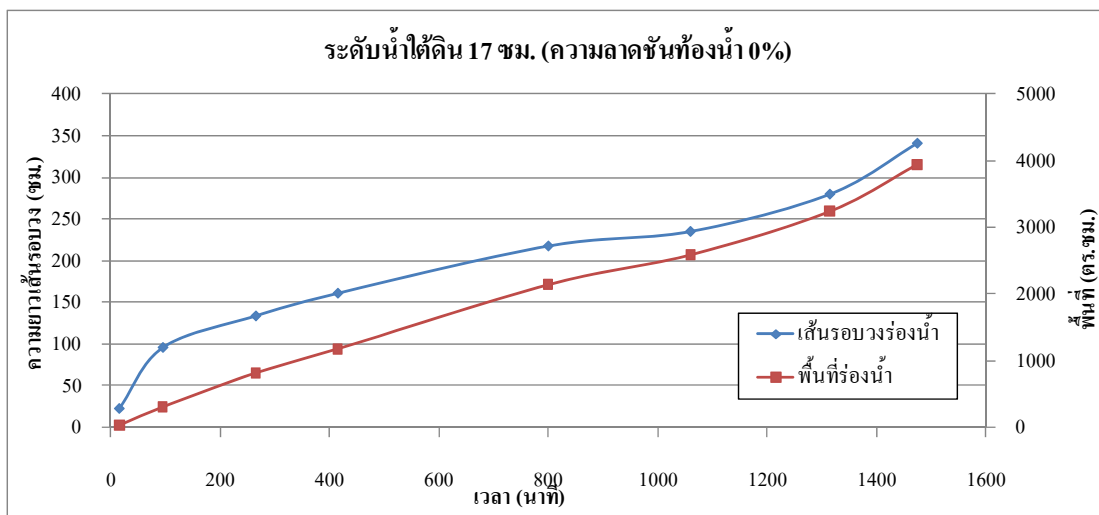
ภาพผนวกที่ ง36 ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 19 ซม.
ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 1



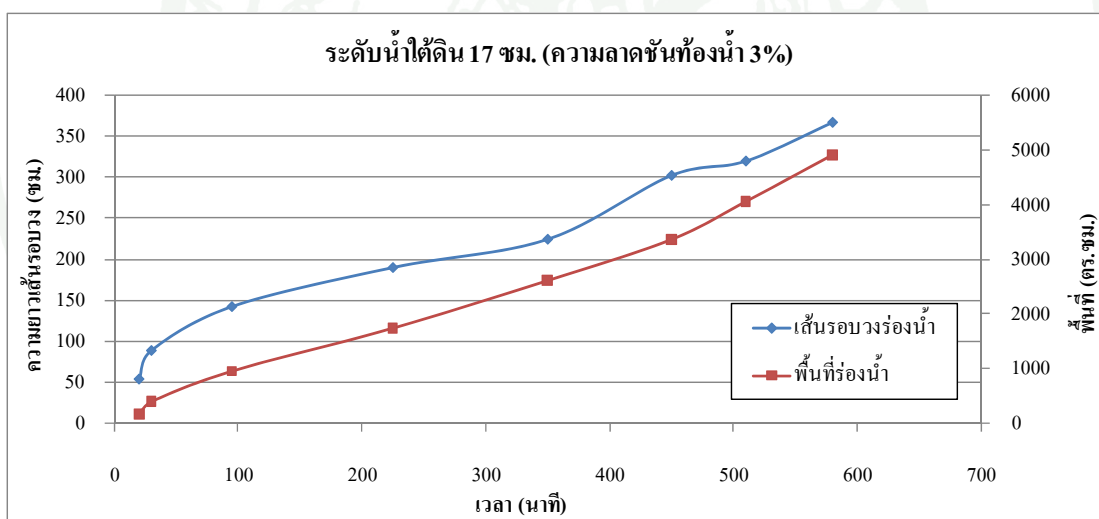
ภาพผนวกที่ 37 ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 15 ซม.
ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2



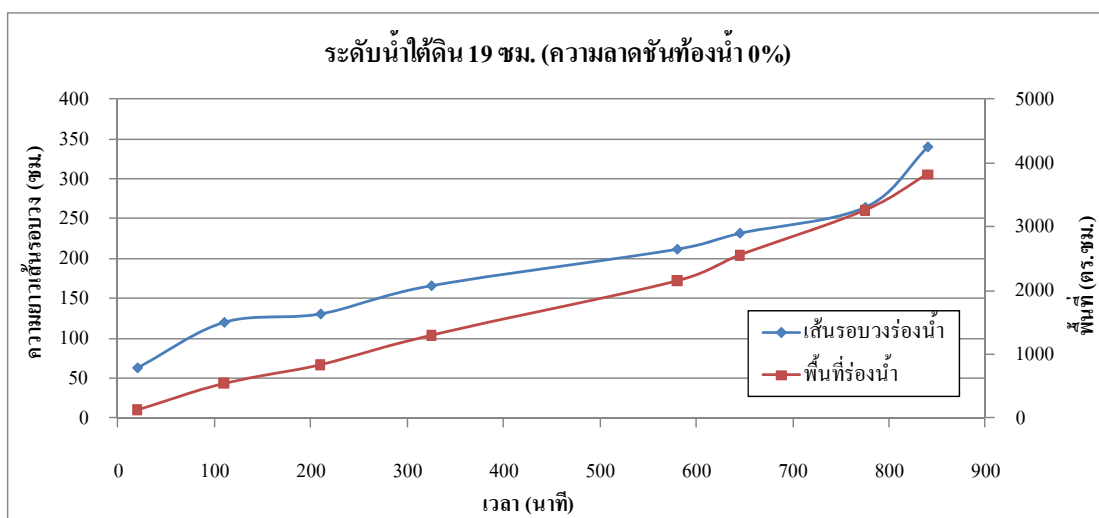
ภาพผนวกที่ 38 ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 15 ซม.
ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2



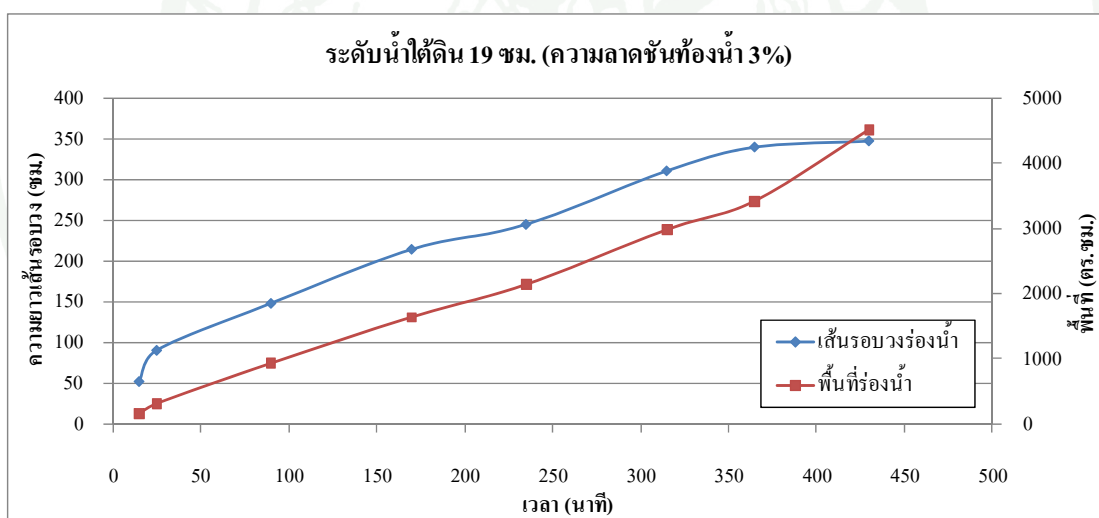
ภาพผนวกที่ 39 ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 17 ซม.
ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2



ภาพผนวกที่ 40 ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 17 ซม.
ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2



ภาพผนวกที่ ๔๑ ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 19 ซม.
ความลาดชันท้องน้ำ 0% ของทรายชนิดที่ 2



ภาพผนวกที่ ๔๒ ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ร่องน้ำที่ระดับน้ำใต้ดินน้ำ 19 ซม.
ความลาดชันท้องน้ำ 3% ของทรายชนิดที่ 2

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายพีรพล แก้วนนท์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 26 สิงหาคม 2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.ทน.(วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2552)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	กำลังศึกษาปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-