



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การออกแบบคันดินเพื่อป้องกันการรุกล้ำของน้ำทะเล และน้ำท่วมชายฝั่ง
บริเวณพื้นที่ตำบลตำมะลัง อำเภอเมือง จังหวัดสตูล

Design of Dikes for protection of saltwater intrusion and coastal flooding
in Tambon Tammalang, Amphoe Mueang, Satun Province

ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 256107A1080012

สัญญาเลขที่ 122/2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การออกแบบคันดินเพื่อป้องกันการรุกคืบของน้ำทะเล และน้ำท่วมชายฝั่ง
บริเวณพื้นที่ตำบลตำมะลัง อำเภอเมือง จังหวัดสตูล

Design of Dikes for protection of saltwater intrusion and coastal flooding
in Tambon Tammalang, Amphoe Mueang, Satun Province

ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน 2562

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ตามเลขที่สัญญา 122/2561 ลงวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2560 ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ต่อเนื่องมาจากโครงการ “การศึกษาเพื่อป้องกันการรุกรานของน้ำทะเล และน้ำท่วมชายฝั่งบริเวณพื้นที่ตำบลตำมะลัง อำเภอเมือง จังหวัดสตูล” โดยได้รับทุนวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 (สัญญาเลขที่ 138/2559)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักชลประทานที่ 16 กรมชลประทาน รวมทั้งราษฎรในพื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลตำมะลัง อำเภอเมือง จังหวัดสตูล ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล รวมทั้งการอำนวยความสะดวกต่างๆ จนทำให้งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

หัวหน้าโครงการวิจัย

กันยายน 2562

บทคัดย่อ

ปัญหาน้ำท่วมชายฝั่งพบได้บริเวณพื้นที่ริมชายฝั่งทะเลและบริเวณปากแม่น้ำ ปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าว คือ น้ำทะเลหนุน แผ่นดินทรุดตัว แผ่นดินถูกน้ำฝนและน้ำท่ากัดเซาะ หรือน้ำทะเลที่เพิ่มสูงขึ้น การใช้ที่ดินที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ในบางพื้นที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ในการเพาะปลูกพืชหรืออยู่อาศัยได้ เช่น พื้นที่บริเวณตำบลท่ามะลิ อำเภอเมือง จังหวัดสตูล ซึ่งได้ถูกเลือกมาเป็นพื้นที่ศึกษาของโครงการนี้ วิธีการศึกษาประกอบด้วย การทดสอบหาคคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของตัวอย่างดิน การปรับปรุงคุณภาพของดินในพื้นที่เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างเพื่อลดราคาค่าก่อสร้าง วิธีการปรับปรุงคุณภาพดิน คือ การผสมดินในพื้นที่กับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยสัดส่วน 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมตัวอย่าง ได้จากปริมาณค่าความชื้นที่เหมาะสมของการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของแต่ละอัตราส่วนผสมดินซีเมนต์ วิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระถูกนำมาใช้เพื่อประเมินคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 0 7 และ 28 วัน จากตัวอย่างดินเหนียวที่นำมาจากพื้นที่ศึกษา พบว่า เป็นดินเหนียวอินทรีย์ชนิด Clay of low plasticity (CL) และ Clay of high plasticity (CH) ตาม Unified soil classification system จากผลการทดสอบ พบว่า อัตราส่วนของดินและปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล คือ ดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน และดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน เนื่องจากปริมาณดังกล่าวเป็นอัตราส่วนผสมที่น้อยที่สุดที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้มีค่าน้อยกว่า 10^{-8} เมตร/วินาที และยังมีกำลังรับแรงเฉือนที่เพียงพอในการนำไปใช้ก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล นอกจากนี้ อัตราส่วนดินซีเมนต์ที่เหมาะสมถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาเสถียรภาพของลาดดิน ปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดิน และค่าความเค็มของน้ำที่ไหลซึมผ่านคันดิน โดยใช้โปรแกรม GeoStudio 2007 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ดินเหนียวในพื้นที่ซึ่งผสมปูนซีเมนต์สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างคันดินได้ และที่อัตราส่วนผสมนี้ ค่าความเค็มของน้ำทะเลที่ไหลซึมผ่านคันดินและฐานราก มีค่าน้อยกว่า 10 กก./ลบ.ม. (10 ppt) ดังนั้น เพื่อเป็นการลดค่าวัสดุก่อสร้างการใช้ดินในพื้นที่ผสมกับปูนซีเมนต์สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างของคันดินได้ และคันดินสามารถป้องกันพื้นที่จากความเค็มของน้ำทะเลได้ ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ด้านหลังคันดินสามารถนำมาใช้ทำการเกษตรได้

คำหลัก: ดินซีเมนต์, ดินเหนียวอินทรีย์, คันดินกั้นน้ำทะเล, น้ำทะเลท่วมชายฝั่ง, ค่าความเค็ม

Abstract

Many coastal and estuary areas have been facing severe flooding problem. The main causes of this problem are high sea-level rise, ground collapse, soil erosion induced by heavy rainfall and water in the river and improper soil usage. As a result, some areas could not be used for agriculture and residential purpose including areas in Tammalang, Mueang, Satun province, which was used as a model in this study. The local soil was investigated for its engineering properties. In order to minimize the construction cost, the local soil was planned to use as a construction material. Initially, the properties of local soil were improved by mixing with Portland cement type 1. Soil specimens were mixed with Portland cement at ratios of 0, 2, 5, 8, and 10% by dry weight of soil. The quantity of water used in specimens was the optimum moisture content obtained from the standard compaction test for each soil-cement mixture. Consolidation test and unconfined compression test were used to evaluate the soil engineering properties after curing at 0, 7, and 28 days. It was found that the local soil was identified as organic clay and was categorized as Clay of Low Plasticity (CL) and Clay of High Plasticity (CH) according to the unified soil classification system. The results demonstrated that the optimum Portland cement contents for the construction of sea dike were at 2% with 0-day curing and 5% with 7-day curing by weight of oven-dry CL clay and CH clay, respectively. At these ratios, the permeability coefficients were less than 10^{-8} meters per second indicating that the shear strength of materials were acceptable for the construction of the sea dike. Furthermore, the optimum mixing ratio was analyzed to estimate the slope stability, the seepage through sea dike, and the salinity flowing through the sea dike by using GeoStudio 2007. The result demonstrated that the in-situ clay mixed with cement could be considered as suitable material for the construction of sea dike. At these ratios, the salinity of saltwater intrusion was lower than 10 kg/m^3 (10 ppt). In conclusion, the optimal construction materials with low cost were successfully obtained. After constructing sea dikes, the protected areas could be used for agricultural farming.

Keywords: Soil-cement, Organic Clay, Sea Dike, Coastal Flooding, Salinity

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ.....	ค
บทคัดย่อ	ง
Abstract.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตการวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2	7
พื้นที่ศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 พื้นที่ศึกษา.....	7
2.2 ดินเหนียว	9
2.3 ดินเหนียวอินทรีย์.....	10
2.4 การปรับปรุงคุณภาพดินด้านวิศวกรรม.....	11
2.5 คุณสมบัติของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้สารเสถียรภาพ.....	12
2.6 สารเสถียรภาพสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน.....	12
2.7 กลไกของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์ ดิน และน้ำ.....	12
2.8 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์ ดิน และน้ำ.....	13
2.9 คุณสมบัติของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเสถียรภาพ	14
2.10 ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคุณสมบัติของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้ปูนซีเมนต์..	16
2.11 การปรับปรุงคุณภาพดินด้านเกษตร	17

2.11.1	การจำแนกระดับความเค็มในดิน	17
2.11.2	การปรับปรุงคุณภาพดินเค็ม	18
2.12	พืชทนเค็ม.....	18
2.13	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	20
2.13.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความลาดคั่นดินและทางน้ำ	20
2.13.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคั่นดิน	26
2.13.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคั่นดิน	30
บทที่ 3	.....	34
วิธีดำเนินการวิจัย	.....	34
3.1	การทดลองเพื่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอินทรีย์.....	34
3.2	การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน	34
3.3	การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ	35
3.4	การทดสอบการอัดแบบอิสระ	36
3.5	ลำดับขั้นตอน และการเตรียมตัวอย่างการทดสอบของการปรับปรุงคุณภาพดิน	37
3.6	การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	38
3.6.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคั่นดินและทางน้ำ	40
3.6.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคั่นดิน	42
3.6.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคั่นดิน.....	43
3.7	การวิเคราะห์การทรุดตัวของคั่นดินกั้นน้ำทะเล	45
3.8	แนวคิดการออกแบบคั่นกั้นน้ำเค็ม	45
บทที่ 4	.....	47
ผลการวิจัย	.....	47
4.1	ผลการวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดิน	47
4.1.1	ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน	47
4.1.2	ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ	50
4.2	ค่าอัตราการบวมตัว	50
4.3	ค่าดัชนีของการอัดตัว.....	52
4.4	ค่าดัชนีของการบวมตัว	54

4.5	ค่าแรงดันสูงสุดในอดีต	57
4.6	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ	59
4.7	ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ	64
4.8	ผลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมปฐพีในสนาม	73
4.9	ผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	75
4.9.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดิน	75
4.9.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน	79
4.9.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน	85
4.10	ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล	88
บทที่ 5	.....	90
	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	90
5.1	สรุปผลการวิจัย	90
5.2	ข้อเสนอแนะ	92
ผลผลิต	.....	94
	ผลงานเชิงสาธารณะ	94
บรรณานุกรม	.....	95
ประวัตินักวิจัย	.....	99

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การจำแนกดินตามปริมาณสารอินทรีย์ในดิน.....	11
ตารางที่ 2.2 การจำแนกความเค็มของดินที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช.....	18
ตารางที่ 2.3 พันธุ์พืชทนเค็ม (อรุณี ยูวะนิยม และสมศรี อรุณินท์, 2539).....	19
ตารางที่ 2.4 เกณฑ์ต่ำสุดของอัตราส่วนปลอดภัยของค้ำดิน.....	25
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ.....	39
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ.....	40
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพค้ำดินแบบไม่มี ทางน้ำ.....	41
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพค้ำดินและทางน้ำ	41
ตารางที่ 3.5 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพค้ำดินแบบมีทาง น้ำ.....	42
ตารางที่ 3.6 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านค้ำดิน แบบไม่มีทางน้ำ.....	42
ตารางที่ 3.7 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านค้ำดิน แบบมีทางน้ำ.....	43
ตารางที่ 3.8 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่าน ค้ำดินแบบไม่มีทางน้ำ.....	43
ตารางที่ 3.9 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่าน ค้ำดินแบบมีทางน้ำ.....	44
ตารางที่ 3.10 รายละเอียดการวิเคราะห์การทรุดตัวของค้ำดินกั้นน้ำทะเล.....	45
ตารางที่ 3.11 รายละเอียดค้ำดินโดยใช้ดินที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการก่อสร้าง.....	46
ตารางที่ 3.12 รายละเอียดค้ำดินโดยปรับปรุงดินในสนามเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการ นำมาใช้ในการก่อสร้าง.....	46
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL.....	48
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH.....	49
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL แบบไม่แช่น้ำ.....	65

ตารางที่ 4.4	ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL แบบแช่น้ำ	66
ตารางที่ 4.5	ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH แบบไม่แช่น้ำ	68
ตารางที่ 4.6	ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH แบบแช่น้ำ.....	69
ตารางที่ 4.7	คุณสมบัติของดินเหนียว CL ที่ได้จากการทดสอบ.....	71
ตารางที่ 4.8	คุณสมบัติของดินเหนียว CH ที่ได้จากการทดสอบ	72
ตารางที่ 4.9	ลักษณะชั้นดินจากการสำรวจ	73
ตารางที่ 4.10	คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล	75
ตารางที่ 4.11	ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของความลาดคันดินแบบไม่มีทางน้ำ.....	76
ตารางที่ 4.12	ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ที่ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำ ต่าง ๆ.....	77
ตารางที่ 4.13	ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของความลาดคันดินแบบมีทางน้ำ.....	78
ตารางที่ 4.14	ปริมาณการไหลซึม และไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-1	79
ตารางที่ 4.15	ปริมาณการไหลซึม และไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-2.....	82
ตารางที่ 4.16	คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล	89
ตารางที่ 4.17	ค่าการทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล.....	89

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1	แผนที่แสดงที่ตั้งโดยสังเขปของพื้นที่ตำบลตำมะลัง (หมู่ที่ 2 และหมู่ที่ 3) อำเภอเมือง จังหวัดสตูล	1
ภาพที่ 1.2	หนังสือแจ้งถึงสภาพปัญหาและความต้องการให้ก่อสร้างถนนกั้นน้ำเค็มของ อบต.ตำมะ ลัง	2
ภาพที่ 1.3	แผนที่แสดงที่ตั้งโดยสังเขปของถนนกั้นน้ำเค็มตามความต้องการของ อบต.ตำมะลัง	3
ภาพที่ 2.1	พื้นที่ศึกษาหมู่ที่ 2 และ 3 บ้านตำมะลังใต้ ตำบลตำมะลัง อำเภอเมืองสตูล จังหวัดสตูล แนวคันดินกั้นน้ำทะเล ยาวประมาณ 2,800 เมตร ตามแนวเส้นสีแดงโดยประมาณ (กรมแผนที่ทหาร, 2539)	8
ภาพที่ 2.2	แผนผังดินเหนียวทรงเหลี่ยมสี่หน้า และทรงเหลี่ยมแปดหน้า (Holtz & Kovacs, 1981)	9
ภาพที่ 2.3	โครงสร้างของดินเหนียว (Das, 2010)	10
ภาพที่ 2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้และอัตราส่วนช่องว่าง (Deng, Yue, Liu, Chen, & Zhan, 2015)	15
ภาพที่ 2.5	การวิเคราะห์หาปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในดินซีเมนต์ด้วยวิธี XRD (ณพล อยู่บรรพต, 2556)	15
ภาพที่ 2.6	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มเมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน SEM (ณพล อยู่บรรพต, 2556)	16
ภาพที่ 2.7	ผลกระทบของน้ำทะเลตามการทดสอบแอดเตอร์เบิร์กจำกัด (Yukselen-Aksoy, Kaya, & Ören, 2008)	17
ภาพที่ 2.8	ผลกระทบของน้ำทะเลตามการทดสอบอัดตัวคายน้ำ (Yukselen-Aksoy et al., 2008)	17
ภาพที่ 2.9	แผนภาพชั้นดิน (Slice) แสดงสัญลักษณ์ และตัวแปรต่าง ๆ	21
ภาพที่ 2.10	ตัวอย่างแสดงค่าความชื้น ค่าฟังก์ชัน และค่า λ สำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธี Mergenstern and Price	24
ภาพที่ 2.11	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิเคราะห์เสถียรภาพของ ความลาดคันดิน	25
ภาพที่ 2.12	การไหลของน้ำผ่านรูปลูกบาศก์	26
ภาพที่ 2.13	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคัน ดิน (GEO-SLOPE International Ltd., 2002)	29

ภาพที่ 2.14 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านชั้นดินโดย Advection-dispersion analysis..... 32

ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านชั้นดินโดย Density-dependent analysis..... 33

ภาพที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน..... 34

ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคาน้ำ 35

ภาพที่ 3.3 ชุดทดสอบการอัดแบบอิสระ 36

ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน..... 37

ภาพที่ 3.5 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ..... 39

ภาพที่ 3.6 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ..... 39

ภาพที่ 3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบไม่มีทางน้ำ 40

ภาพที่ 3.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบมีทางน้ำ..... 41

ภาพที่ 3.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ 42

ภาพที่ 3.10 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ 43

ภาพที่ 3.11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ. 44

ภาพที่ 3.12 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ..... 44

ภาพที่ 3.13 แนวคิดการออกแบบคันกันน้ำเค็มโดยใช้ดินที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการก่อสร้าง.. 45

ภาพที่ 3.14 แนวคิดการออกแบบคันกันน้ำเค็มโดยปรับปรุงดินในสนามเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการก่อสร้าง..... 46

ภาพที่ 4.1 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL 48

ภาพที่ 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH..... 49

ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%)..... 50

ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL..... 51

ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH..... 52

ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (Cc) และปริมาณซีเมนต์ (%)..... 53

ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (Cc) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL..... 53

ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (C_c) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว
 CH..... 54

ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_s) และปริมาณซีเมนต์ (%)..... 55

ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว
 CL..... 56

ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว
 CH..... 56

ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต ($P'm$) และปริมาณซีเมนต์ (%)..... 57

ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต ($P'm$) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดิน
 เหนียว CL..... 58

ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต ($P'm$) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดิน
 เหนียว CH..... 58

ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1
 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%)..... 59

ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1
 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL 60

ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1
 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH..... 61

ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ the square root
 time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) 62

ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The square root
 time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL 62

ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The square root
 time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH..... 63

ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained shear strength, S_u (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%)
 ของดินเหนียว CL แบบไม่แช่น้ำ..... 64

ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained shear strength, S_u (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%)
 ของดินเหนียว CL แบบแช่น้ำ 66

ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained shear strength, S_u (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%)
 ของดินเหนียว CH แบบไม่แช่น้ำ..... 68

ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained shear strength, S_u (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH แบบแช่น้ำ.....	69
ภาพที่ 4.25 ลักษณะของชั้นดิน BH-1.....	74
ภาพที่ 4.26 ลักษณะของชั้นดิน BH-2.....	74
ภาพที่ 4.27 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1	80
ภาพที่ 4.28 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบมีทางน้ำ ในช่วงพื้นที่ BH-1	80
ภาพที่ 4.29 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1	81
ภาพที่ 4.30 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1	81
ภาพที่ 4.31 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2	83
ภาพที่ 4.32 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2	83
ภาพที่ 4.33 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2	84
ภาพที่ 4.34 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2	84
ภาพที่ 4.35 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ.....	86
ภาพที่ 4.36 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ.....	86
ภาพที่ 4.37 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ.....	87
ภาพที่ 4.38 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ.....	87

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

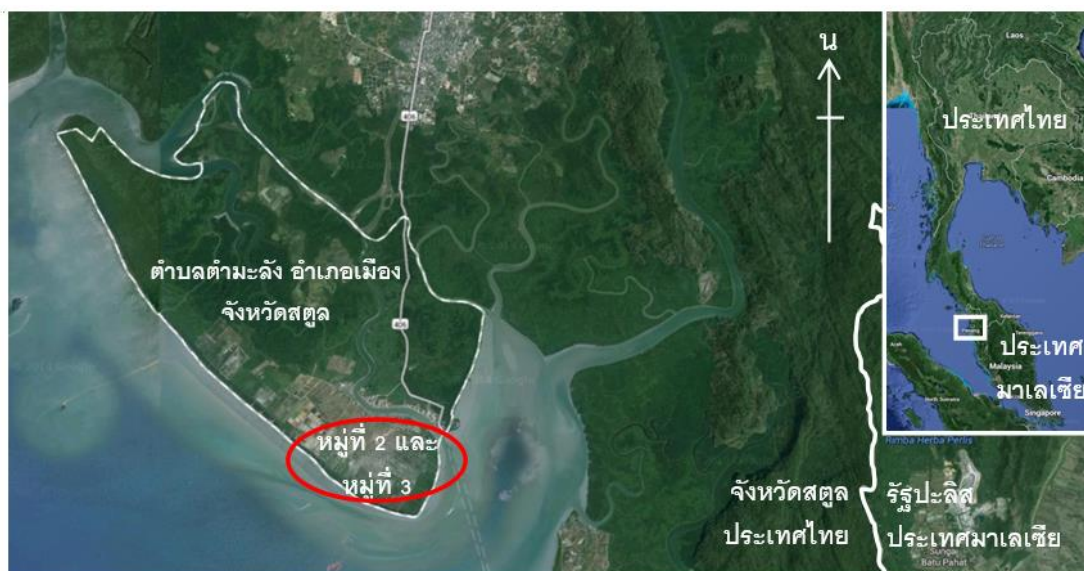
Borrow Area	บ่อยืมดิน
Borehole	หลุมเจาะสำรวจคุณสมบัติดิน
CH	High-plasticity clay
CL	Low-plasticity clay
USCS	ระบบการจำแนกดิน ย่อมาจาก Unified soil classification system
Clay	ดินเหนียว ตามวิธีการจำแนกดิน USCS
Sand	ทราย ตามวิธีการจำแนกดิน USCS
Silty Sand	ทรายปนทรายแป้ง ตามวิธีการจำแนกดิน USCS
k	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้
$\gamma_{d, \max}$	หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด
OMC	ค่าความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content)
C_c	ดัชนีของการอัดตัว
C_s	ดัชนีของการบวมตัว
P'_m	แรงดันสูงสุดในอดีต

บทที่ 1

บทนำ

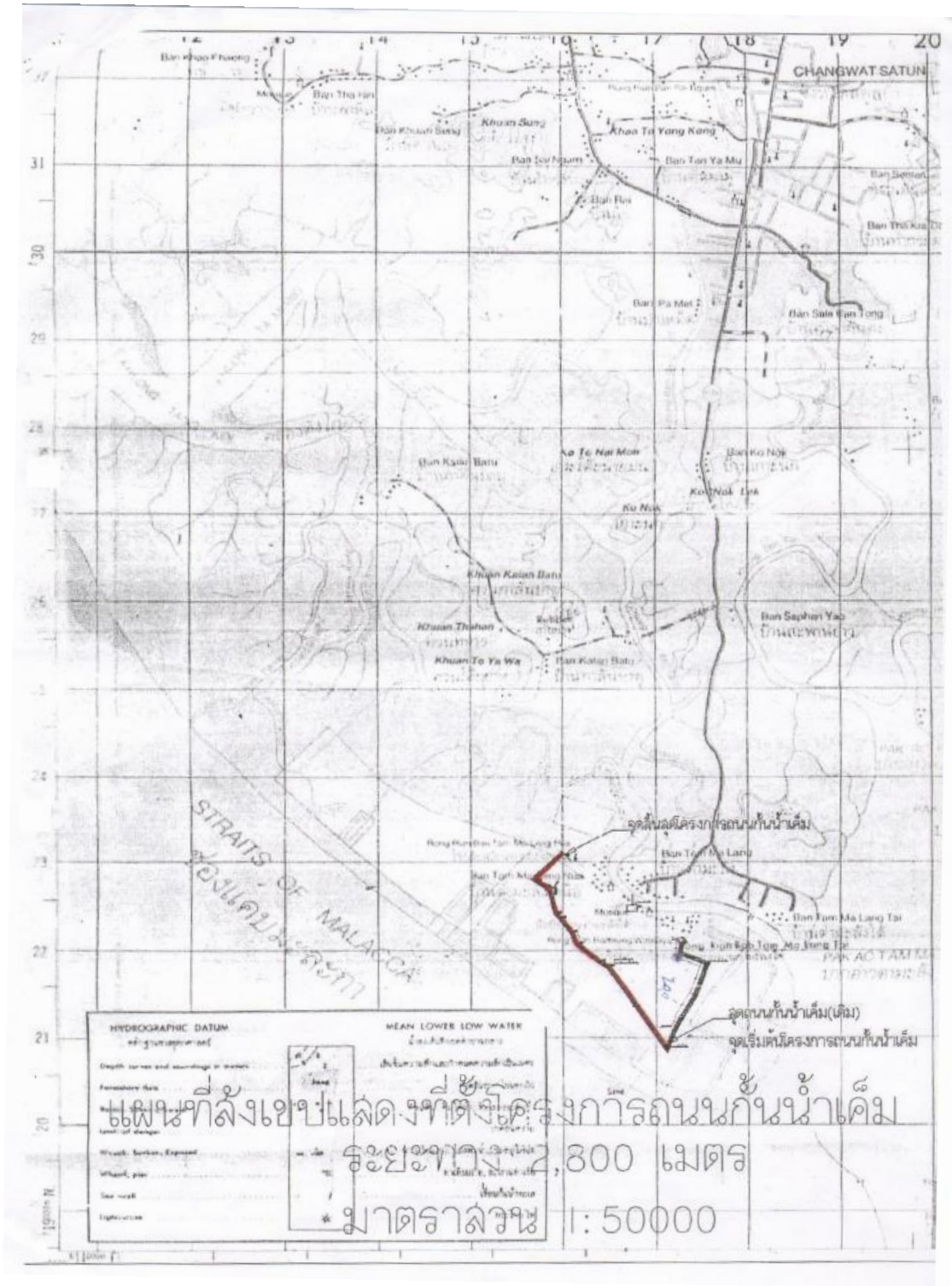
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ราษฎรในพื้นที่ตำบลตำมะลัง (หมู่ที่ 2 และหมู่ที่ 3) อำเภอเมือง จังหวัดสตูล (ดังแสดงในภาพที่ 1.1) มีความเดือดร้อนไม่สามารถใช้พื้นที่ทำการเกษตรได้ เนื่องจากต้องเผชิญกับปัญหาการรุกคืบของน้ำทะเลที่เกิดขึ้นได้ผิวดิน (Saltwater intrusion) และการเคลื่อนที่ของน้ำท่วมชายฝั่ง (Coastal flooding) เข้าท่วมพื้นที่ในช่วงที่น้ำทะเลหนุนสูง โดยองค์การบริหารส่วนตำบลตำมะลัง ได้ส่งหนังสือ (เลขที่ สต 72201/215 ลงวันที่ 27 พฤษภาคม 2551) ขอความอนุเคราะห์ให้ก่อสร้างถนนกั้นน้ำเค็มไปยังผู้อำนวยการโครงการก่อสร้าง 2 สำนักชลประทานที่ 16 กรมชลประทาน โดยอธิบายถึงสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นในพื้นที่ และความจำเป็นที่ต้องมีการก่อสร้างถนนกั้นน้ำเค็ม ดังแสดงในภาพที่ 1.2 และ 1.3



ภาพที่ 1.1 แผนที่แสดงที่ตั้งโดยสังเขปของพื้นที่ตำบลตำมะลัง (หมู่ที่ 2 และหมู่ที่ 3) อำเภอเมือง จังหวัดสตูล*

* ภาพแผนที่จาก <http://goo.gl/cts4ft>



ภาพที่ 1.3 แผนที่แสดงที่ตั้งโดยสังเขปของถนนกั้นน้ำเค็มตามความต้องการของ อบต.ตำมะลัง

เมื่อผู้อำนวยการโครงการก่อสร้าง 2 สำนักชลประทานที่ 16 ได้รับทราบเรื่องจึงได้ให้กลุ่มงานก่อสร้าง 3 โครงการก่อสร้าง 2 สำนักชลประทานที่ 16 พิจารณาโครงการดังกล่าว และนำเข้าบรรจุไว้ในแผนป้องกันภัยทางน้ำ ตามบันทึกแนบท้ายหนังสือ (ตั้งข้อความด้านล่างของภาพที่ 1.3)

ในเวลาต่อมา กลุ่มงานก่อสร้าง 3 ได้ทำบันทึกข้อความ (เลขที่ กส.3/2/16/131 ลงวันที่ 4 มิถุนายน 2551) เสนอไปยังผู้อำนวยการโครงการก่อสร้าง 2 ให้มีพิจารณาและดำเนินการตามที่ ราษฎรร้องขอความช่วยเหลือ ซึ่งผู้อำนวยการโครงการก่อสร้าง 2 ได้เขียนหนังสือสั่งการให้กลุ่มงานก่อสร้าง 3 เป็นผู้ประสานงานในการเข้าตรวจสอบสภาพพื้นที่เพื่อการออกแบบ และพิจารณาโครงการ โดยมีกลุ่มออกแบบ สำนักชลประทานที่ 16 เป็นผู้รับผิดชอบการออกแบบโครงการ ระหว่างที่อยู่ในขั้นตอนดำเนินการต่างๆ นี้ องค์การบริหารส่วนตำบลท่ามะลิ โดย นายสุรเชษฐ์ บัวประจิดต์ ปลัด อบต.ท่ามะลิ ได้ทำหนังสือ (เลขที่ สด 72201/557 ลงวันที่ 30 ตุลาคม 2552) แจ้งความต้องการให้ก่อสร้างถนนกั้นน้ำเค็มไปยังผู้อำนวยการโครงการก่อสร้าง 2 สำนักชลประทานที่ 16 อีกครั้ง เพื่ออธิบายถึงสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นและความเดือดร้อนของราษฎรในพื้นที่ รวมทั้งแสดงต้องการให้กรมชลประทานก่อสร้างถนนกั้นน้ำเค็ม เพื่อบรรเทาปัญหาความเดือดร้อนดังกล่าว เมื่อผู้อำนวยการโครงการก่อสร้าง 2 ทราบเรื่อง จึงได้เขียนหนังสือสั่งการให้กลุ่มงานก่อสร้าง 3 และกลุ่มงานวิศวกรรมบริหารของโครงการก่อสร้าง 2 สำนักชลประทานที่ 16 ตรวจสอบทางวิศวกรรมเพื่อดำเนินการต่อไป และในระยะเวลาที่ต่อเนื่องจากนั้นไม่นาน นายรอปานี ปุห์ยัง สมาชิกองค์การบริหารส่วนตำบลท่ามะลิ ได้ทำหนังสือ (ไม่มีเลขที่/2554 ลงวันที่ 21 พฤศจิกายน 2554) แจ้งความต้องการให้ก่อสร้างถนนกั้นน้ำเค็มไปยังผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ 16 เพื่ออธิบายถึงสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นและความเดือดร้อนของราษฎรในพื้นที่ โดยราษฎรในพื้นที่แสดงเจตนาที่จะยินยอมยกที่ดินในบริเวณที่จะสร้างก่อสร้างถนนกั้นน้ำเค็มให้กับทางราชการ ต่อมาเมื่อผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ 16 ทราบเรื่องจึงได้เขียนหนังสือสั่งการให้ผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมบริหาร, ผู้อำนวยการโครงการชลประทานสตูล และผู้อำนวยการโครงการก่อสร้าง 2 สำนักชลประทานที่ 16 ให้พิจารณาโครงการนี้

ต่อมารักษาการในตำแหน่งผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมบริหาร สำนักชลประทานที่ 16 ได้ทำบันทึกข้อความ (เลขที่ สชป16/วศ.7 ลงวันที่ 23 มกราคม 2555) เสนอเรื่องไปยังผู้อำนวยการโครงการชลประทานสตูล โดยแจ้งว่าเนื่องจากปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นมายาวนานกว่า 40 ปี ดังนั้นคุณภาพดินอาจเปลี่ยนไป จึงมีความเห็นให้ประสานงานกับสำนักงานเกษตร จังหวัดสตูล เพื่อตรวจสอบและพิจารณาความเหมาะสมในการทำการเกษตรของพื้นที่ดังกล่าว

ต่อมารักษาการในตำแหน่งผู้อำนวยการสถานีพัฒนาที่ดินสตูล ได้ทำหนังสือ (เลขที่ กษ 0819.08/230 ลงวันที่ 23 มีนาคม 2555) แจ้งเรื่อง ความเหมาะสมในการทำการเกษตรหลังการก่อสร้างถนนกั้นน้ำเค็มแล้วเสร็จ กลับมายังผู้อำนวยการโครงการชลประทานสตูล โดยอธิบายถึงลักษณะทางกายภาพ และเคมีของดินในพื้นที่ดังกล่าว ซึ่งมี 2 ลักษณะ โดยสามารถสรุปสภาพโดยรวมได้ดังนี้ กลุ่มดินที่เกิดจากตะกอนน้ำทะเล เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะมีสภาพเป็นกรด หากอยู่ในสภาพเปียกจะกลายเป็นดินเค็มจัดมาก มีความสามารถของการระบายน้ำอยู่ในระดับแย่มาก และมีลักษณะเป็นดินเลนไม่อยู่ตัว กลุ่มดินที่เกิดจากตะกอนทรายมีความสามารถของการระบายน้ำอยู่ใน

ระดับดีมาก มีสภาพความเป็นกรดสูง และมีความอุดมสมบูรณ์ทางธรรมชาติต่ำมาก อีกทั้งมีความเสี่ยงต่อการขาดน้ำ สถานีพัฒนาที่ดินสตูล มีข้อเสนอแนะว่า หากราษฎรต้องการปรับปรุงดินเพื่อทำการเพาะปลูกข้าวนั้นยังสามารถทำได้ แต่ต้องมีการดำเนินการป้องกันน้ำทะเลเข้าท่วมขัง การทำระบบชลประทานและระบบระบายน้ำ ควบคู่ไปกับการใช้สารเคมี เช่น ยิปซัม หรือผงกำมะถัน เป็นต้น เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความเป็นพิษต่อพืชลดลง และต้องมีการปรับปรุงให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ทางธรรมชาติมากขึ้นกว่าปัจจุบันนี้ อีกทั้งราษฎรควรเลือกใช้พันธุ์ข้าวที่มีความสามารถในการต้านทานความเค็มมาใช้ในการเพาะปลูก

ภายหลังจากที่รักษาการในตำแหน่งผู้อำนวยการโครงการชลประทานสตูล ทราบเรื่องจึงได้ทำบันทึกข้อความ (เลขที่ สชป 16.04/ฝสบ.1/64 ลงวันที่ 26 มีนาคม 2555) แจ้งไปยังผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมบริหาร สำนักชลประทานที่ 16 เพื่อให้ทราบเรื่องและพิจารณาดำเนินการต่อไป ผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมบริหาร สำนักชลประทานที่ 16 ได้เขียนเรื่องส่งการให้กลุ่มพิจารณาโครงการ สำนักชลประทานที่ 16 ทราบถึงผลการวิเคราะห์การใช้ที่ดินของสถานีพัฒนาที่ดินสตูล และหัวหน้ากลุ่มพิจารณาโครงการ ได้เขียนหนังสือส่งการให้เก็บผลการวิเคราะห์ดังกล่าวไว้เป็นข้อมูลเพื่อนำไปใช้ทำรายงานโครงการต่อไป ในเวลาต่อมา นายมะหะหมัด หลงกุนัน ประธานสภาองค์การบริหารส่วนตำบลตำมะลัง ได้ทำหนังสือ (เลขที่ พิเศษ/2556 ลงวันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2556) แจ้งเรื่องความต้องการก่อสร้างคันกั้นน้ำเค็มและสภาพปัญหาน้ำทะเลไหลเข้าท่วมพื้นที่การเกษตร ไปยังเลขาธิการมูลนิธิชัยพัฒนา เมื่อนายลลิต ถนอมสิงห์ ผู้ช่วยเลขาธิการสำนักงานฯ ทำการแทนกรรมการและเลขาธิการมูลนิธิชัยพัฒนา ทราบเรื่องจึงได้ส่งหนังสือ (เลขที่ ชพ (สบค) 589/2556 ลงวันที่ 21 มีนาคม 2556) มายังผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ 16 เพื่อขอความอนุเคราะห์เจ้าหน้าที่เข้าร่วมพิจารณาการให้ความช่วยเหลือราษฎรที่ตำบลตำมะลัง และเกาะยะระโตตน้อย จังหวัดสตูล

โครงการวิจัยนี้เป็นการสำรวจหาข้อมูลต่างๆ ของดินด้านวิศวกรรมในพื้นที่โครงการ เพื่อหาวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างคันกั้นน้ำเค็ม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของดินและปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพื่อนำดินที่ได้มาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล
2. การออกแบบเบื้องต้นคันดินกั้นน้ำทะเล เพื่อนำไปใช้เป็นทางเลือกของวิธีการก่อสร้างสำหรับการป้องกันการรุกล้ำของน้ำทะเลและการเคลื่อนที่ของน้ำท่วมชายฝั่ง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการทดลองเพื่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอินทรีย์ ที่เก็บตัวอย่างมาจากพื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลตำมะลัง อำเภอเมือง จังหวัดสตูล

2. ศึกษาการพัฒนากำลังและค่าความตึบน้ำของดินเหนียวอินทรีย์ผสมซีเมนต์ โดยใช้ การทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined compression test) และการทดสอบการอัดตัวคาย น้ำ (Consolidation test) เพื่อให้ได้ค่าปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุการบ่มที่เหมาะสมกับการ ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอินทรีย์แต่ละชนิด

3. ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 ซึ่งใช้เป็นสารผสมเพิ่มในการผสมตัวอย่าง ดินเหนียวอินทรีย์ ในอัตราส่วน 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง

4. ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างดินเหนียวอินทรีย์ผสมซีเมนต์ที่ 0 7 และ 28 วัน

5. วิธีการทดสอบอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined compression test) ซึ่งเป็นไปตาม มาตรฐาน ASTM D2166 - 00 และมาตรฐานที่ ทล.ม. 204/2533 ส่วนวิธีการทดสอบการอัดตัวคาย น้ำ (Consolidation test) ซึ่งเป็นไปตาม ASTM D2435-66

6. ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GeoStudio 2007 ในการคำนวณหาความมี เสถียรภาพของความลาดชันดิน โดยวิเคราะห์ด้วยวิธี Morgenstern & Price

7. ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GeoStudio 2007 ในการคำนวณหาปริมาณการ ไหลซึมคันดิน และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านฐานรากคันดิน โดยใช้เงื่อนไขการวิเคราะห์ แบบสถานะคงที่ (Steady-state analysis) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สมการของลาปลาซ (Laplace's equation)

8. ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GeoStudio 2007 ในการประเมินประสิทธิภาพ การป้องกันความเค็มของน้ำทะเลจากการเคลื่อนที่ผ่านคันดินและฐานราก โดยใช้วิธีการจำลองการ ไหลของน้ำ และการเคลื่อนที่ของเกลือด้วยการกำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Density-dependent analysis)

9. ใช้ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ข้างต้น ในการแนะนำพันธุ์พืช สำหรับการเพาะปลูกในพื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลท่ามะลิ อำเภอเมือง จังหวัดสตูล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอินทรีย์ด้วยการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสม เพิ่ม เพื่อให้คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดิน ได้แก่ กำลัง และความตึบน้ำ มีความเหมาะสมต่อการ นำไปใช้สำหรับการก่อสร้างคันดินเพื่อการป้องกันน้ำทะเล

2. ได้ทราบถึงอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียว อินทรีย์

3. ได้ทราบถึงรูปแบบของคันดินที่เหมาะสมต่อการป้องกันการรุกล้ำของน้ำทะเล ทั้งการ ไหลซึมผ่านคันดิน และการซึมผ่านฐานรากของคันดิน

4. ได้ทราบถึงพันธุ์พืชที่เหมาะสมสำหรับเพาะปลูกในพื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลท่ามะลิ อำเภอเมือง จังหวัดสตูล

บทที่ 2

พื้นที่ศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้อยู่ในพื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลท่ามะลิ่ง อำเภอเมืองสตูล จังหวัดสตูล ได้แก่ หมู่ที่ 1 บ้านกาลันบาตู หมู่ที่ 2 บ้านท่ามะลิ่งเหนือ และหมู่ที่ 3 บ้านท่ามะลิ่งใต้ มีจำนวนครัวเรือน 72, 518 และ 619 ครัวเรือน ตามลำดับ (ข้อมูล ณ เดือนพฤษภาคม 2555) ดังภาพที่ 2.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 2,000 ไร่ มีราษฎรอาศัยอยู่ประมาณ 200 ครัวเรือน จากคำบอกเล่าของราษฎรในพื้นที่ ในอดีตที่ผ่านมาพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่สามารถทำการเกษตร และเลี้ยงสัตว์ได้ แต่ปัจจุบันพื้นที่ดังกล่าวไม่สามารถทำการเกษตรใด ๆ ได้ เนื่องจากประสบปัญหาการรुक้ำของน้ำทะเล โดยปัญหานี้อาจเกิดจาก 3 สาเหตุใหญ่ ๆ ได้แก่ 1) อาจเกิดการทรุดตัวของพื้นดิน (Subsidence) เนื่องจากการระบายน้ำออกจากมวลดิน เพราะลักษณะดินในพื้นที่เป็นดินเนื้อละเอียด มีปริมาณน้ำในมวลดินสูงมาก การระบายน้ำออกจากมวลดินส่งผลให้ดินเกิดการทรุดตัวต่ำลง 2) อาจผนวกกับการเกิดปรากฏการณ์น้ำขึ้น-น้ำลงของน้ำทะเล (Tides) ที่เกิดขึ้นตามสภาพธรรมชาติ ทำให้น้ำสามารถไหลเข้าท่วมพื้นที่ซึ่งอยู่ติดกับชายฝั่งทะเลได้มากยิ่งขึ้น หรือ 3) อาจเกิดจากการที่ราษฎรเปลี่ยนแปลงการใช้พื้นที่ (Land use) จากการทำนาข้าวไปเป็นนาุ้ง ทำให้เกิดการรुक้ำของน้ำทะเลเข้าไปสู่พื้นที่ทำการเกษตรของราษฎร

จากปัญหาดังกล่าว ซึ่งส่งผลให้ราษฎรมีความเดือดร้อน จึงได้แจ้งไปยังสำนักชลประทานที่ 16 กรมชลประทาน ให้เข้ามาดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยในเบื้องต้นราษฎรมีความต้องการให้สร้างคันดินกั้นน้ำทะเลเป็นระยะทางยาวประมาณ 2,800 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ตามแนวเส้นสีแดงโดยประมาณ) เพื่อป้องกันมิให้น้ำทะเลไหลเข้าท่วมพื้นที่ เพื่อนำพื้นที่กลับมาใช้ทำการเกษตรต่อไป

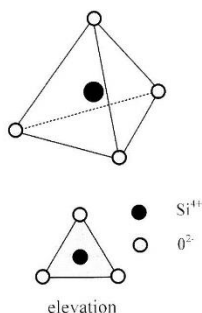


ภาพที่ 2.1 พื้นที่ศึกษาหมู่ที่ 2 และ 3 บ้านตำมะลังใต้ ตำบลตำมะลัง อำเภอเมืองสตูล จังหวัดสตูล แนวคันดินกั้นน้ำทะเล ยาวประมาณ 2,800 เมตร ตามแนวเส้นสีแดงโดยประมาณ (กรมแผนที่ทหาร, 2539)

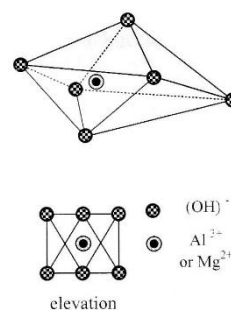
2.2 ดินเหนียว

โดยทั่วไปดินเหนียวเป็นดินจำพวกมวลละเอียด มีค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion, c) และมีขนาดอนุภาคดินเล็กกว่า 0.002 mm ในทางวิศวกรรมนั้นดินเหนียวเกิดจากการผุพังทางเคมี (Chemical weathering) ของหินที่มีไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrous aluminum silicates) ซึ่งธาตุอะลูมิเนียม (Aluminum, Al) อาจถูกแทนที่ด้วยธาตุกลุ่มโลหะ (Metallic elements) ทั้งหมด หรือเพียงบางส่วน เช่น ธาตุแมกนีเซียม (Magnesium, Mg) หรือธาตุเหล็ก (Iron หรือ Ferrum, Fe) เป็นต้น โดยมีสารประกอบเบสเป็นส่วนประกอบสำคัญ ทำให้เกิดเป็นดินเหนียวขึ้น

ดินเหนียวมีคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซึม และการหดตัว และจากคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของอนุภาคดินทำให้เกิดการจัดเรียงตัวในโครงสร้างของเม็ดดิน โดยในโครงสร้างดินเหนียวประกอบไปด้วย ทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Silica tetrahedron) และทรงเหลี่ยมแปดหน้า (Alumina octahedron) เมื่ออะตอมของทรงเหลี่ยมสี่หน้ามารวมตัวกันเป็นแผ่นชั้น เรียกว่า แผ่นซิลิกา (Silica layer, Si_4O_{10}) ซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และเมื่ออะตอมของทรงเหลี่ยมแปดหน้ามารวมตัวกัน เรียกว่า แผ่นออกตะฮีดรอน (Octahedral layer, $\text{Al}_4(\text{OH})_{12}$) ซึ่งมีส่วนประกอบของอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ดังภาพที่ 2.2



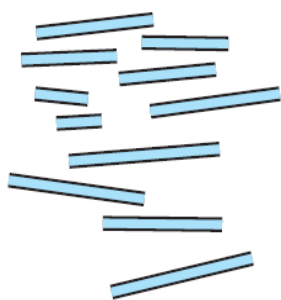
(ก) ทรงเหลี่ยมสี่หน้า



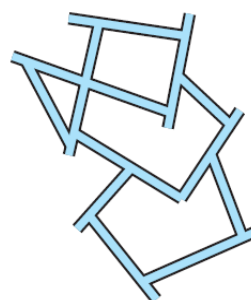
(ข) ทรงเหลี่ยมแปดหน้า

ภาพที่ 2.2 แผ่นผังดินเหนียวทรงเหลี่ยมสี่หน้า และทรงเหลี่ยมแปดหน้า (Holtz & Kovacs, 1981)

ดินเหนียวที่เกิดจากการตกตะกอนทับถมในน้ำจืด และผลลัพธ์ของการแลกเปลี่ยนไอออนทำให้อนุภาคของดินมีการจัดเรียงตัวแบบ Face-to-face เป็นโครงสร้างแบบเป็นระเบียบ (Dispersed structure) ดังภาพที่ 2.3 (ก) หรืออาจมีการจัดเรียงตัวแบบ Edge-to-face เป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculent structure) ดังภาพที่ 2.3 (ข) แต่เมื่อถูกแรง หรือน้ำหนักมากกระทำจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็น โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ



(ก) โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ



(ข) โครงสร้างแบบประเกะระกะ

ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของดินเหนียว (Das, 2010)

2.3 ดินเหนียวอินทรีย์

ดินเหนียวอินทรีย์ คือ ดินเหนียวที่มีการสะสมของสารอินทรีย์ (Organic matter) ซึ่งได้แก่ ซากพืช หรือซากสัตว์ เป็นต้น ปริมาณสารอินทรีย์หรืออินทรีย์วัตถุที่พบในดินทั่วไปมีปริมาณแตกต่างกัน สำหรับประเทศที่อยู่ในเขตร้อนมีการสะสมอินทรีย์วัตถุที่น้อย เนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นสูง ส่งผลให้การสลายตัวของจุลินทรีย์ในดินเกิดได้อย่างรวดเร็ว ส่วนประเทศที่อยู่ในเขตอากาศหนาวเย็น มีการสะสมอินทรีย์วัตถุที่มาก เพราะการสลายตัวของจุลินทรีย์ในดินเกิดได้ช้ากว่า เพราะว่ามีอุณหภูมิและความชื้นต่ำกว่า (พรชัย สุธาทร, 2525)

Germaine and Germaine (2009) ได้จำแนกดินตามปริมาณสารอินทรีย์ในดินได้เป็น 8 ชนิด ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกดินตามปริมาณสารอินทรีย์ในดิน

ประเภท	ปริมาณสารอินทรีย์ (%)
ดินที่มีการทับถมของซากพืช (Peats)	75-100
ดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์ หรือดินอินทรีย์สาร (Organic matter)	75-100
ดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์มาก (Highly organic soils)	30-75
ดินตะกอน/ทรายที่มีปริมาณอินทรีย์ (Organic silts/sand)	5-30
ดินร่วน (Loam borrow)	4-20
ดินซากพืช (Peat borrow)	< 25
วัสดุชั้นรองพื้นทาง (Road base material)	< 5
วัสดุสำหรับใช้ในงานถม (Structural fill)	< 2

2.4 การปรับปรุงคุณภาพดินด้านวิศวกรรม

การปรับปรุงคุณภาพดินนั้นมีหลายวิธีการ โดยมีการศึกษาแนวทางการปรับปรุงคุณภาพดิน วัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน และคุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงไป วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีคุณสมบัติด้านวิศวกรรมดีขึ้น ทั้งด้านกำลังและความตึบแน่น โดยทั่วไปวิธีการที่นิยมใช้อยู่ 4 วิธีการ ได้แก่

1. การทำให้แน่นขึ้น (Densification) คือ การทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดลดลงหรือเม็ดดินเคลื่อนที่เข้าใกล้ชิดกันด้วยการให้พลังงานในการบดอัดดินโดยใช้เครื่องจักรที่มีน้ำหนักมาก วิธีการนี้ต้องใช้พลังงานค่อนข้างมากในการบดอัด หากใช้พลังงานบดอัดที่สูงเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของดินบริเวณนั้น
2. การเสริมแรง (Reinforcement) คือ การเสริมวัสดุเพิ่มเข้าไปในเนื้อดิน ช่วยให้ดินรับกำลังได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้คือ วัสดุสังเคราะห์ ที่เรียกว่า Geosynthetics
3. การระบายน้ำ (Drainage) คือ เป็นวิธีการเร่งระบายน้ำออกจากมวลดินโดยใช้น้ำหนักกดทับ ซึ่งช่วยทำให้ดินมีความแข็งแรงมากขึ้น และมีปริมาณการยุบตัวน้อยลง
4. การใช้สารผสมเพิ่ม (Cementation) คือ การนำสารผสมเพิ่มมาเป็นตัวกลางทำปฏิกิริยาภายในเนื้อดิน ผลที่ได้ช่วยให้ดินมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปและมีเสถียรภาพดียิ่งขึ้น สารผสมเพิ่มถูกเรียกอีกชื่อว่า “สารเสถียรภาพ” (Stabilizing agents) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้ เช่น เบนโตนต์ ปูนขาว และปูนซีเมนต์ เป็นต้น

ในงานวิจัยชิ้นนี้เลือกวิธีการใช้สารเสถียรภาพ เพราะวิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้และใช้ระยะเวลาสั้น ผลที่ได้ช่วยให้ดินมีโครงสร้างและคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการ

2.5 คุณสมบัติของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้สารเสถียรภาพ

คุณสมบัติด้านความตึบแน่น Gleason, Daniel and Eykhole (1997) ได้นำเสนอการเลือกใช้ แคลเซียมเบนโทไนต์และโซเดียมเบนโทไนต์สำหรับการนำไปใช้ในสถานที่เก็บกักน้ำ พบว่า การใช้โซเดียมเบนโทไนต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (Permeability, k) น้อยกว่าแคลเซียมเบนโทไนต์ที่ปริมาณเท่ากัน และทวิศศักดิ์ วังไพศาล และนท แสงเทียน (2553); Chalermyanont & Arrykul (2004) เสนออัตราส่วนผสมระหว่างทรายและโซเดียมเบนโทไนต์ที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) ของน้ำน้อยกว่า 10^{-9} m/s พบว่า อัตราส่วนผสมระหว่างทรายและโซเดียมเบนโทไนต์ที่ 3% ของน้ำหนักทรายแห้งเพียงพอที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) ของน้ำน้อยกว่า 10^{-9} m/s

สำหรับคุณสมบัติด้านกำลัง Gleason et al. (1997) ได้นำเสนอการเลือกใช้ แคลเซียมเบนโทไนต์และโซเดียมเบนโทไนต์สำหรับการนำไปใช้ในสถานที่เก็บกักน้ำ พบว่า การใช้แคลเซียมเบนโทไนต์มีกำลังรับแรงเฉือนมากกว่าโซเดียมเบนโทไนต์ และ ศิริศักดิ์ จินดาพล, สยาม ยิ้มศิริ, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ และสัญญาชัย มิตรเอม (2550) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินท้องถิ่นในสภาพแช่้ำโดยการผสมปูนซีเมนต์และปูนขาวเพื่อให้มีคุณภาพที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันดินทางรถไฟ ซึ่งใช้การทดสอบ California bearing ratio หรือ CBR ตามมาตรฐาน ASTM D1883 Standard test method for CBR (California bearing ratio) of laboratory-compacted soils พบว่า การผสมปูนซีเมนต์ที่ปริมาณ 8% ทำให้ค่า CBR มากกว่าปูนขาวที่ปริมาณเดียวกัน

หน่วยงานกรมทางหลวงของสหรัฐอเมริกา (AASHTO, 1995) แนะนำว่า ดินในการบดอัดดินผสมปูนซีเมนต์ ดินเหนียวอินทรีย์ที่มีสีเทาถึงสีเทาเข้มควรผสมปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 4% และดินเหนียวอินทรีย์ที่มีสีดำควรผสมปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 6%

2.6 สารเสถียรภาพสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน

สารเสถียรภาพ (Stabilizing agent) ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินนั้นมีหลายชนิด เช่น ปูนขาว (Lime) เถ้าลอย (Fly ash) ปูนซีเมนต์ (Cement portland) เป็นต้น แต่ละชนิดจะให้ผลที่แตกต่างกันไปตามลักษณะของดิน สารที่อยู่ในดิน และผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีนั้น เพื่อใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเลให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยคำนึงคุณสมบัติทางด้านกำลังและความตึบแน่น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเสถียรภาพสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากเป็นสารเสถียรภาพที่นิยมใช้งาน คุณภาพปูนซีเมนต์คงที่ได้มาตรฐาน สามารถหาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพง มีวิธีการใช้งานง่ายไม่ต้องมีขั้นตอนการเตรียมก่อนใช้งาน และคุณสมบัติของผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับความต้องการ

2.7 กลไกของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์ ดิน และน้ำ

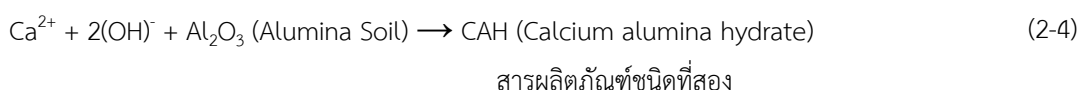
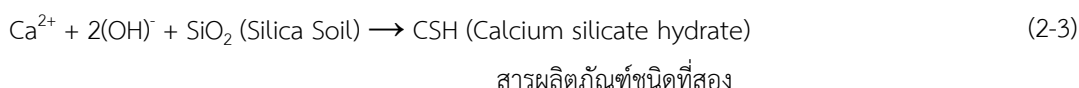
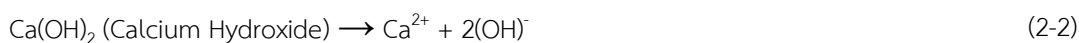
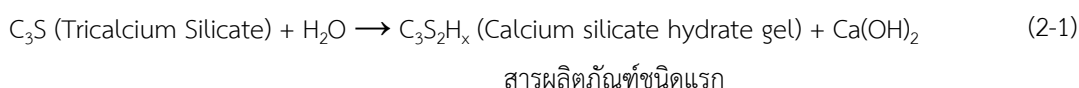
Davidson (1961) อธิบายว่า การผสมปูนซีเมนต์กับดินจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและโครงสร้างของดินได้ แต่ผลลัพธ์ที่ได้นั้นอาจแตกต่างกัน ถ้าคุณสมบัติทางเคมีของดินแตกต่างกัน

ถึงแม้ว่าจะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน และดินมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่เหมือนกันก็ตาม การผสมปูนซีเมนต์กับดินทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration ขึ้นระหว่างน้ำในมวลดินและปูนซีเมนต์ ทำให้เกิด Calcium ion และมีการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้ารอบ ๆ เม็ดดิน ทำให้เม็ดดินจับตัวเป็นก้อน ส่งผลให้ค่า Plasticity ลดลง และในขณะที่เกิดปฏิกิริยา Hydration นั้น จะมีการยึดประสานเกิดขึ้นระหว่างเม็ดดินกับปูนซีเมนต์ และระหว่างปูนซีเมนต์กับปูนซีเมนต์

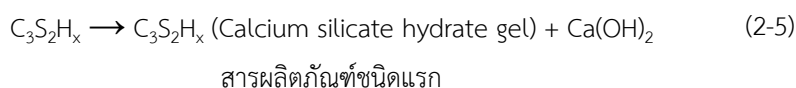
Lambe, Metchael and Moh (1959); Moh (1962) พบว่า เมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration นั้นทำให้เกิดสารประกอบ Calcium silicate hydrate (CSH), Calcium alumina hydrate (CAH) และ Released hydrate lime กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ทำให้กำลังของดินเพิ่มสูงขึ้น ส่วน Released hydrate lime ทำให้ pH ของน้ำในมวลดินมีค่าเพิ่มขึ้น (มีสภาพเป็นเบส) ซึ่งทำให้ Colloid gel หรือ Cement gel เกิดการรวมตัวยึดเกาะกันทำให้มีกำลังสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม

2.8 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์ ดิน และน้ำ

Bergado et al. (1996) กล่าวว่า ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์ ดิน และน้ำสามารถเขียนสมการแสดงได้ดังนี้



จากสมการที่ 2-1 ปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำในดิน ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารผลิตภัณฑ์ชนิดแรก ($C_3S_2H_x$ (Calcium silicate hydrate gel)) โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะแยกออกเป็นแคลเซียมไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนดังสมการที่ 2-2 ซึ่งไปทำปฏิกิริยากับแร่ในดินทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ชนิดที่สอง (CSH (Calcium silicate hydrate) และ CAH (Calcium alumina hydrate)) ดังสมการที่ 2-3 ถึง 2-4 ซึ่งสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ ทำให้เกิดการเชื่อมประสานและการแข็งตัวของดินซีเมนต์ ส่งผลให้มีคุณสมบัติด้านกำลังเพิ่มขึ้น และความตึบน้ำสูงขึ้น แต่ถ้าดินมีค่า pH น้อยกว่า 12.6 จะมีปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นตามมาดังสมการที่ 2-5



สารผลิตภัณฑ์ชนิดแรกเกิดการแตกตัวเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารผลิตภัณฑ์ชนิดแรก ($C_3S_2H_x$) อีกครั้ง โดยสารผลิตภัณฑ์ที่ได้กระบวนการนี้มีกำลังที่น้อยกว่าสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำในดิน ส่งผลให้กำลังของดินซีเมนต์มีค่าลดลงซึ่งการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ เรียกว่า ดินซีเมนต์ (ณพล อยู่บรรพต, 2556)

2.9 คุณสมบัติของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเสถียรภาพ

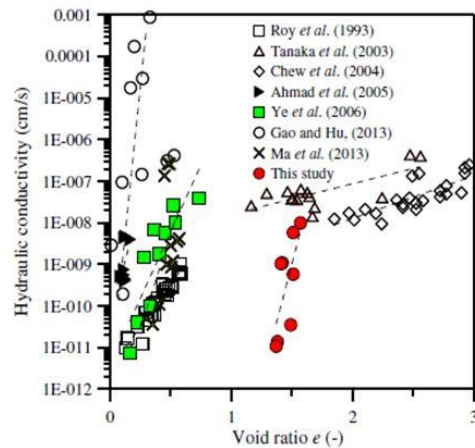
สำหรับคุณสมบัติด้านความตึบน้ำต้องคำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) ซึ่งกมล อมรฟ้า (2545) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว พบว่า เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) ของน้ำลดลง แต่เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) ของน้ำเพิ่มขึ้น และ มนตรี ฝ้ายอุประ (2547) ได้ศึกษาการลดค่าความซึมของดินกำแพงแสนโดยใช้ปูนขาว ซิลิกาซีเมนต์ และปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 พบว่า ดินที่ผสมปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำกว่าดินที่ผสมซิลิกาซีเมนต์ และปูนขาว

ส่วนคุณสมบัติด้านกำลังหรือความแข็งแรงในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล ต้องพิจารณาค่าแรงเชื่อมแน่น (c) ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอผลของการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังทางกลศาสตร์ (Strength และ Stiffness) ของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในสภาพแช่น้ำจากการทดสอบแบบแรงอัดไม่มีขอบเขตจำกัด ได้แก่ ศิริศักดิ์ จินดาพล, สยาม ยิ้มศิริ, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, และ อภินิติ โชติสังาส (2550) โดยผลการปรับปรุงดินนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่า เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าแรงเชื่อมแน่น (c) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ Sarosseiri and Muhunthan (2009); Pakbaz and Alipour (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปูนซีเมนต์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในท้องถื่น พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลให้มีความแข็งแรงของดินเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ เกษม เพชรเกตุ และโกศล ไกรพัฒน์พงศ์ (2553) ได้ศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง (pH value) ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ พบว่า ค่า Unconfined compressive strength จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH และอายุการบ่มเพิ่มขึ้น

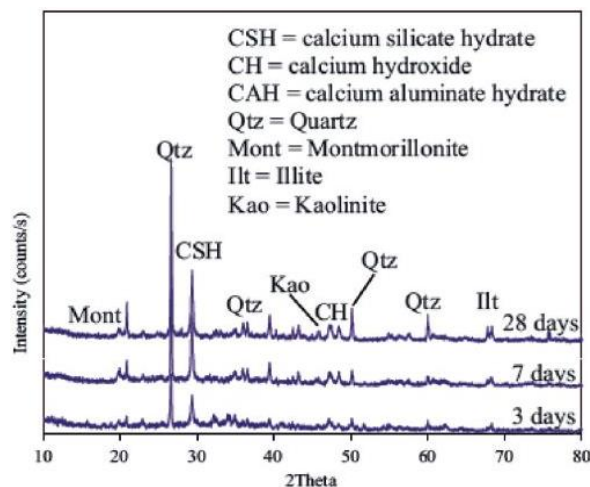
สำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นทะเลต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านความตึบน้ำสูง (หรือมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำต่ำ) และคุณสมบัติด้านกำลัง

Deng, Yue, Liu, Chen, & Zhan (2015) แสดงให้เห็น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้และอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio, e) ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึง เมื่ออัตราส่วนช่องว่างลดลง จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำลดลงเช่นกัน

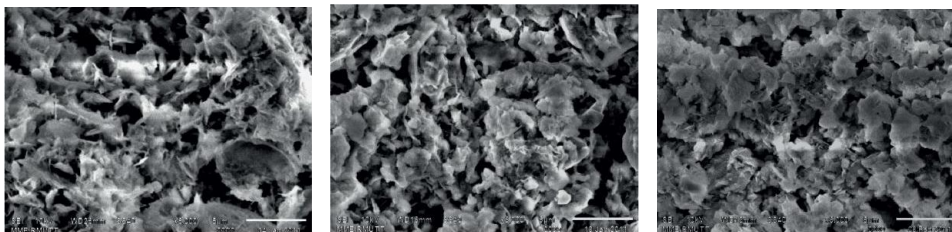


ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้และอัตราส่วนช่องว่าง (Deng, Yue, Liu, Chen, & Zhan, 2015)

ณพล อยู่บรรพต (2556) เสนอวิธีการศึกษาโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ช่วยอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ทำให้ทราบถึงประเภทและปริมาณของสารประกอบที่มีอยู่ในสารผลิตภัณฑ์ และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive method) พบว่า ผลลัพธ์จากปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำในดินเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์หลักประเภท Calcium silicate hydrate (CSH) ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้เกิดการเชื่อมประสานและการแข็งตัวของดินซีเมนต์ เมื่อปริมาณของ CSH เพิ่มมากขึ้นทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น และ CSH มีปริมาณสูงขึ้นตามอายุการบ่มโดยใช้วิธี XRD ในการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 2.5 และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มทราบโดยใช้ SEM ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.5 การวิเคราะห์หาปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในดินซีเมนต์ด้วยวิธี XRD (ณพล อยู่บรรพต, 2556)



(ก) อายุการบ่ม 3 วัน

(ข) อายุการบ่ม 7 วัน

(ค) อายุการบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มเมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM (ฉพล อยู่บรรพต, 2556)

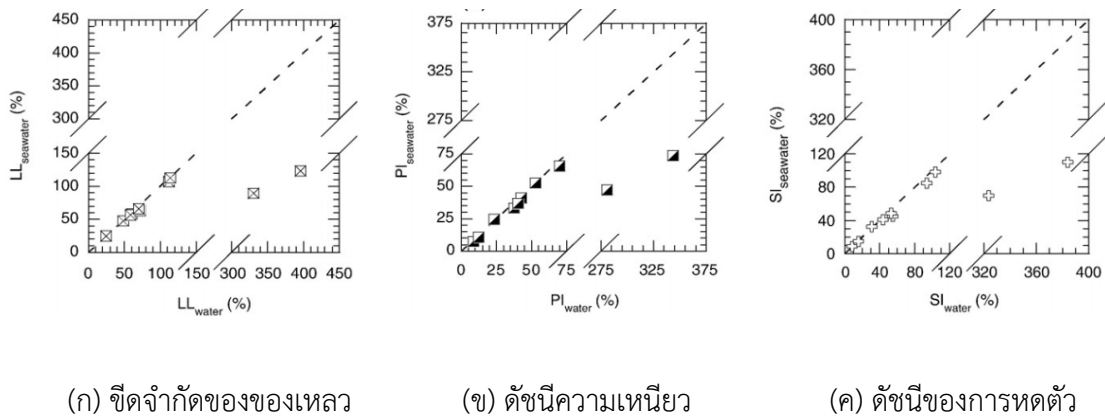
ดังนั้น คุณสมบัติของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเลต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านความตึบแน่นหรือมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำต่ำ และคุณสมบัติด้านกำลัง โดยที่ความตึบแน่นสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนช่องว่างหรือช่องว่างภายในเนื้อดิน และด้านกำลังสามารถพิจารณาได้จากปริมาณ CSH ซึ่งเป็นสารผลึกที่เกิดขึ้นที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำในดินมีคุณสมบัติทำให้เกิดการเชื่อมประสานและการแข็งตัวของดินซีเมนต์ โดยสามารถตรวจสอบได้โดยการทดสอบ Unconfined compressive strength

2.10 ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคุณสมบัติของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้ปูนซีเมนต์

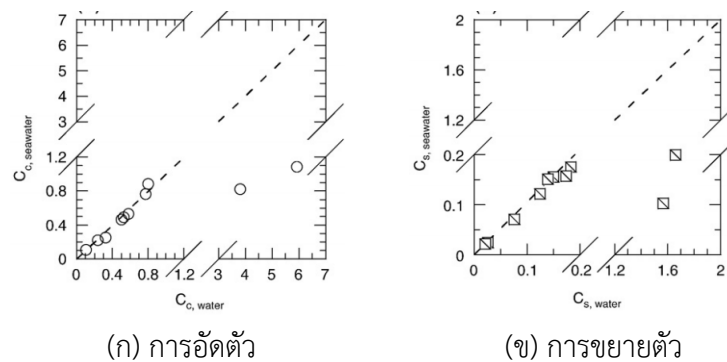
Ingles and Metcalf (1973) พบว่า เมื่อปรับปรุงคุณภาพดินโดยการผสมเกลือโซเดียมคลอไรด์กับดิน จะมีผลทำให้ความหนาแน่นของดินสูงขึ้น ลดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ ลดการบวมตัวของดินและการหดตัวของมวลดิน โดยเฉพาะในบริเวณที่มีสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงมากๆ

Hausmann (1990) อธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของน้ำที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่เมื่อน้ำไปผสมกับดิน จะมีผลทำให้หน้าที่ผสมในมวลดินมีค่าแรงดึงผิวมากขึ้น จุดเยือกแข็งของน้ำมีค่าลดลง แต่จุดเดือดของน้ำมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นคุณสมบัติของดินที่ได้รับการบดอัดจะยังคงสภาพอยู่ได้ เพราะการสูญเสียน้ำในมวลดินเกิดขึ้นน้อยกว่าการใช้น้ำปกติ หรือหากน้ำมีการระเหยออกไปจากมวลดิน ก้อนผลึกของเกลือโซเดียมคลอไรด์จะคงอยู่ในมวลดินทำให้ช่องว่างของมวลดินเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่าการใช้น้ำปกติในการบดอัด

Yukselen-Aksoy, Kaya, and Ören (2008) เสนอการศึกษาผลกระทบน้ำทะเลในการทดสอบขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์กและการอัดตัวคายน้ำ โดยทำการศึกษาจากตัวอย่างดินภายในประเทศตุรกี 8 แห่ง ซึ่งประกอบไปด้วยแร่ต่างๆ มากมาย อาทิเช่น แร่มอนต์โมริโอไนต์ แร่ดินเหนียวผสม แร่ฮัลโลไอไซด์ และ แร่อีลไลต์ เป็นต้น และตัวอย่างดินสังเคราะห์ 2 ชนิด โดยได้ใช้น้ำกลั่น และน้ำทะเล โดยทำการทดสอบแอดเตอร์เบิร์กจำกัด และการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ



ภาพที่ 2.7 ผลกระทบของน้ำทะเลตามการทดสอบแอดเตอร์เบิร์กจำกัด (Yukselen-Aksoy, Kaya, & Ören, 2008)



ภาพที่ 2.8 ผลกระทบของน้ำทะเลตามการทดสอบอัตราตัวคายน้ำ (Yukselen-Aksoy et al., 2008)

จากภาพที่ 2.7 และ 2.8 แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างดินที่ทดสอบส่วนใหญ่มีอิทธิพลต่อน้ำกลั่น และน้ำทะเลเป็นแบบ 1 : 1 ดังนั้น การใช้น้ำทะเลในการทดสอบให้ผลที่คล้ายกันกับการใช้น้ำกลั่นในการทดสอบ หรือน้ำทะเลไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของดิน

2.11 การปรับปรุงคุณภาพดินด้านเกษตร

2.11.1 การจำแนกระดับความเค็มในดิน

หากดินที่มีปริมาณเกลือละลายสะสมอยู่ จะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช และปริมาณรวมทั้งคุณภาพของผลผลิต และหากมีปริมาณเกลือละลายสะสมอยู่จำนวนมากอาจทำให้พืชตายได้ เนื่องจากเกิดความไม่สมดุลของแร่ธาตุในพืช พืชจะเกิดอาการขาดน้ำ และสะสมไอออนที่เป็นพิษกับพืชมากขึ้นไป วิธีการจำแนกความเค็มของดินที่ส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืช นิยมใช้วิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้าของดิน (Electrical conductivity, EC) โดยเป็นการวัดค่าการนำไฟฟ้าของ

ดินในขณะที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Electrical conductivity at saturation extract, ECe) ที่ 25°C ดังตารางที่ 2.2 (สมศรี อรุณินท์, 2539)

ตารางที่ 2.2 การจำแนกความเค็มของดินที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

ECe (dS/m)	ปริมาณเกลือ ในดิน (%)	ปริมาณเกลือ ในดิน (ppt)	ระดับความเค็ม ของดิน	อิทธิพลต่อพืช / พืชที่สามารถ เจริญเติบโตได้
2	<0.1	< 1-0	ไม่เค็ม	ไม่มีผลใด ๆ ต่อพืช
2-4	0.1-0.2	1.0-2.0	เค็มเล็กน้อย	มีผลต่อพืชที่ไม่ทนเค็ม
4-8	0.2-0.4	2.0-4.0	เค็มปานกลาง	มีผลต่อพืชหลาย ๆ ชนิด
8-16	0.4-0.8	4.0-8.0	เค็มมาก	พืชทนเค็ม
16	>0.8	>8.0	เค็มจัด	พืชทนเค็มไม่กี่ชนิด

หมายเหตุ: ppt คือ อัตราส่วนของปริมาณของแข็ง 1 ส่วน ต่อปริมาณของเหลว 1,000 ส่วน

2.11.2 การปรับปรุงคุณภาพดินเค็ม

การปรับปรุงคุณภาพของดินเค็ม คือ วิธีการที่ทำให้ปริมาณเกลือละลายสะสมอยู่ในดินลดลง โดยคำนึงถึงแนวทางการป้องกันไม่ให้เกิดการแพร่กระจายความเค็มเพิ่มมากขึ้น โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้ (สมศรี อรุณินท์, 2539)

1. การควบคุมความเค็ม เป็นวิธีการควบคุมการแพร่กระจายของความเค็ม ซึ่งทำได้โดยการให้น้ำถี่ขึ้น การเลือกชนิดพืชที่จะปลูก การเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อการชะล้าง การให้น้ำปริมาณมากก่อนการปลูกพืช การเลือกตำแหน่งหยอดเมล็ด การเปลี่ยนวิธีการให้น้ำชลประทาน การเปลี่ยนแหล่งน้ำชลประทาน การปรับระดับพื้นที่ การปรับปรุงหน้าตัดดิน และการระบายน้ำ

2. การทำให้น้ำซึมลงไปในดินได้เพิ่มขึ้น เป็นวิธีการที่ทำให้ดินมีความพรุนมากขึ้น ส่งผลให้น้ำสามารถไหลซึมลงไปในดินได้มากขึ้น โดยมีวิธีการที่นิยมใช้อยู่ 2 วิธี คือ วิธีการทางเคมีซึ่งเป็นการใช้ยิปซัมไลต์โซเดียมที่มีมากเกินไป และวิธีการทางกายภาพซึ่งใช้วิธีการไถเพื่อทำลายชั้นดาน (Sub Soiling) ช่วยให้การไหลซึมของน้ำผ่านชั้นดินดียิ่งขึ้น

3. การเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ดิน เมื่อดินเค็มปริมาณเกลือละลายได้ที่สะสมอยู่ ทำให้อินทรีย์วัตถุในดินถูกชะล้างไปจากเนื้อดินได้ง่าย เมื่อระดับความเค็มในดินลดลง ควรใส่อินทรีย์วัตถุจำพวกปุ๋ยเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ดิน

2.12 พืชทนเค็ม

พืชทนเค็ม คือ พืชที่มีความสามารถเจริญเติบโตได้ครบวงจรชีวิตในสภาพดินซึ่งมีความเค็มปรากฏอยู่ แต่เมื่อระดับความเค็มเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้การเจริญเติบโต และผลผลิตของพืชลดลง และอาจรุนแรงถึงทำให้พืชตายได้เช่นกัน โดยขึ้นกับระดับความสามารถในการทนเค็มของพืชแต่ละชนิด ดังตารางที่ 2.3 (สมศรี อรุณินท์, 2539)

ตารางที่ 2.3 พันธุ์พืชทนเค็ม (อรุณี ยูวณิยม และสมศรี อรุณินท์, 2539)

ระดับความเค็มของดิน	เค็มน้อย	เค็มปานกลาง	เค็มมาก	
เปอร์เซ็นต์เกลือ (%)	0.12-0.25	0.25-0.50	0.50-0.75	0.75-1.00
พืชสวน	ถั่วฝักยาว ผักกาด ขึ้นฉ่าย พริกไทย แตงร้าน แตงไทย	บวบ กะหล่ำดอก พริก ยักซ์ ถั่วลันเตา กะหล่ำปลี มันฝรั่ง น้ำเต้า กระเทียม หอมใหญ่ หอมแดง ข้าวโพดหวาน แตงโม ผักกาดหอม องุ่น แคนตาลูป สับปะรด ผักชี	ผักโขม ผักกาดหัว มะเขือเทศ	หน่อไม้ฝรั่ง คื่นห้าน้ำ กระเพรา ชะอม ผักบุงจีน
ไม้ดอก	เยอบีร่า	กุหลาบ	บานบุรี เฟื่องฟ้า บานไม่รู้โรย เลื้อยมีอนาง ชบา	คุณนายตื่นสาย เข็ม เขียวหมื่นปี แพรวเชียงใหม่
พืชไร่ พืชอาหารสัตว์	ถั่วเขียว ถั่วแขก ถั่วเหลือง ถั่วแดง ถั่วลิสง ถั่วปากอ้า งา	ข้าว โสนอินเดีย ป่าน ทานตะวัน โสน พื้นเมือง ปอแก้ว ข้าวโพด หม่อน ข้าวฟ่าง หญ้า เจ้าชู้ ถั่วพรี้า ถั่ว อัญชัญ มันสำปะหลัง ถั่วพุ่ม	หญ้านวลน้อย โสน คางคก ข้าวทนเค็ม คําฝอย โสนอัฟริกัน มัน เทศ หญ้าขน หญ้ากีนี	ฝ้าย แห้วหมู หญ้าแพรก หญ้าชันอากาศ ป่านศรนารายณ์
ไม้ผล ไม้โตเร็ว	อาโวคาโด กล้วย ลิ้นจี่ มะนาว ส้ม มะม่วง	ชมพู่ ทับทิม ปาล์ม น้ำมัน มะกอก แคน มะเดื่อ	ฝรั่ง ชี้เหล็ก มะยม มะม่วง ยูคาลิปตัส กระถินณรงค์ หิมพานต์	ละมุด พุทรา สน มะขาม มะพร้าว อินทผลัม มะขามเทศ สะเดา

หมายเหตุ: พืชที่สามารถทนเค็มจัด (เปอร์เซ็นต์เกลือมากกว่า 1%) ได้แก่ ชะคราม, สะเม็ต, แสมและโกงกาง พันธุ์ข้าวทนเค็ม ได้แก่ พันธุ์พื้นเมืองที่ปลูกในพื้นที่, พันธุ์หอมมะลิ 105, พันธุ์หอม จันท์, พันธุ์ขาวตาแห้ง, พันธุ์หอมอ้น, พันธุ์เจ๊กกระโดด, พันธุ์ขาวตาอู่, พันธุ์กอกเดียวเบา, พันธุ์แดงน้อย, พันธุ์เจ๊กกระโดด, พันธุ์ กข.1, พันธุ์ กข.6, พันธุ์ กข.7, พันธุ์ กข.8, พันธุ์ กข.15, พันธุ์สันป่าตอง, พันธุ์ขาวตาแห้ง, พันธุ์คําผาย 41, พันธุ์เกี้ยวรวง 88, พันธุ์ขาวปากหม้อ 148 เป็นต้น

2.13 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การจำลองสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GeoStudio 2007 ซึ่งได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดคั่นดิน (Slope stability analysis)
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคั่นดิน (Seepage analysis)
3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคั่นดิน (Density-dependent flow and transport analysis)

2.13.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความลาดคั่นดินและทางน้ำ

แบบจำลองนี้เป็นการจำลองสำหรับคำนวณหาค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของความลาดของดินและหินโดยใช้ทฤษฎีสมดุลจำกัด (Limit equilibrium theory) ได้ และพิจารณาลักษณะการพังของความลาดของดินและหิน ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์เพื่อการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของความลาดทั้งแบบง่ายและแบบซับซ้อน การคำนวณหาค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Safety factor, F.S.) ของความลาดของคั่นดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำ หาได้จากสมการที่ 2-6

$$F.S. = \frac{s}{s_m} = \frac{\tan(\phi')}{\tan(\phi_m'')} \quad (2-6)$$

เมื่อ $F.S.$ คือ ค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Safety factor)

s คือ กำลังรับแรงเฉือนของดิน (kPa)

s_m คือ หน่วยแรงเฉือนที่พัฒนาขึ้นบนพื้นผิววิกฤติ (kPa)

ϕ' คือ ค่ามุมเสียดทานประสิทธิผลของดิน (องศา)

ϕ_m'' คือ ค่ามุมเสียดทานประสิทธิผลของดินที่พัฒนาขึ้น (องศา)

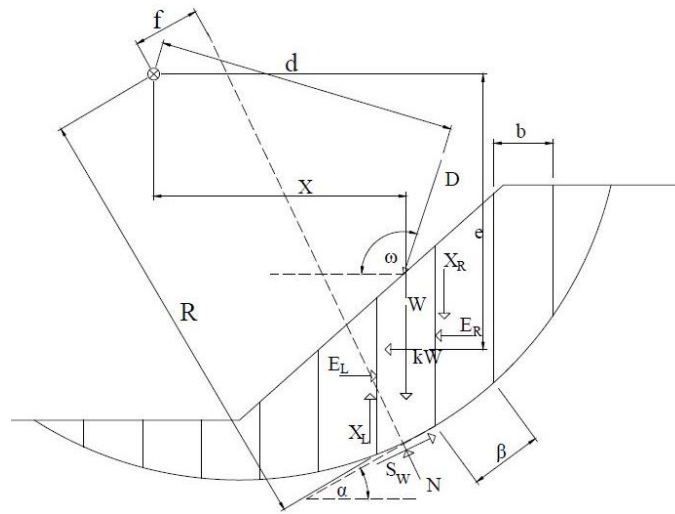
ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนของดินเกิดจากการพิจารณาวัสดุแบบ Mohr-coulomb โดยมีความสัมพันธ์ของค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion) และค่ามุมเสียดทาน (Friction angle) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการดังสมการที่ 2-7

$$s = c' + (\sigma_n - u) \tan(\phi') \quad (2-7)$$

เมื่อ c' คือ ความเชื่อมแน่นประสิทธิผล (kPa)

σ_n คือ หน่วยแรงตั้งฉากทั้งหมด (kPa)

u คือ ความดันของน้ำในมวลดิน (kPa)



ภาพที่ 2.9 แผนภาพชิ้นดิน (Slice) แสดงสัญลักษณ์ และตัวแปรต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาแผนภาพชิ้นดิน (Slice) แสดงสัญลักษณ์ และตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ แรงกระทำต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นดิน ตำแหน่งของแรงลัพธ์ และมุมต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.9 มีดังนี้

W คือ น้ำหนักทั้งหมดของชิ้นดิน (N)

N คือ แรงตั้งฉาก (Normal force) ที่ฐานของชิ้นดินย่อย (N)

E คือ แรงตั้งฉาก (Normal force) ที่ด้านข้างของชิ้นดินย่อย (N)

X คือ แรงเฉือน (Shear force) ที่ด้านข้างของชิ้นดินย่อย (N)

D คือ แรงกระทำภายนอกแบบจุด (External point load) (N)

kW คือ แรงกระทำแนวราบเนื่องจากความสั่นสะเทือน (N)

R คือ รัศมีระหว่างแรง S_m และจุดศูนย์กลาง

f คือ ระยะฉากระหว่างแรง N และจุดศูนย์กลาง

x คือ ระยะฉากระหว่างแรง W และจุดศูนย์กลาง

e คือ ระยะฉากระหว่างแรง kW และจุดศูนย์กลาง

d คือ ระยะฉากระหว่างแรง D และจุดศูนย์กลาง

h คือ ความสูงเฉลี่ยของชิ้นดินย่อย

ω คือ มุมระหว่างเส้นแก้นาฬิกาและแรง D วัดตามเข็มนาฬิกาจากเส้นแก้นาฬิกา

α คือ มุมระหว่างแกน x และแรง S_m วัดทวนเข็มนาฬิกา

β คือ ความยาวฐานของชิ้นดิน

λ คือ ตัวคูณของฟังก์ชันของแรงลัพธ์ระหว่างชิ้นดิน

จากสมการที่ 2-6 และ 2-7 สามารถนำมาเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2-8

$$F.S. = \frac{c' + (\sigma_n - u) \tan(\phi')}{s_m} = \frac{c' \beta + (N - u \beta) \tan(\phi')}{s_m} \quad (2-8)$$

เมื่อ N คือ แรงตั้งฉาก (Normal Force) ที่ฐานของชั้นย่อย (N)
 β คือ ความยาวของฐานรากของชั้นดินในแนวตั้ง (m ต่อ ความยาว 1 m)

จากภาพที่ 2.9 ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมที่กำหนดพื้นที่ผิววิบัติ ผลรวมของโมเมนต์ในทุกๆ ชั้นตั้ง ซึ่งพิจารณาให้โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกาเป็นบวกแสดงดังสมการที่ 2-9

$$\sum Wx - \sum s_m R - \sum Nf + \sum kWe \pm \sum Dd = 0 \quad (2-9)$$

จากสมการที่ 2-8 สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 2-10 และแทนสมการที่ 2-10 ลงในสมการที่ 2-9 และจัดรูปแบบใหม่ได้สมการค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากสมดุลโมเมนต์ดังสมการที่ 2-11

$$s_m = \frac{c' \beta + (N - u \beta) \tan(\phi')}{F.S.} \quad (2-10)$$

$$F.S._{moment} = \frac{\sum (c' \beta + (N - u \beta) \tan(\phi'))}{\sum Wx - \sum Nf + \sum kWe \pm \sum Dd} \quad (2-11)$$

หากพิจารณาภาพที่ 2.9 โดยพิจารณาจากผลรวมของแรงในราบของทุก ๆ ชั้นดินให้แรงในทิศทางไปทางขวาเป็นบวก ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2-12

$$\sum (E_L - E_R) - \sum s_m \cos(\alpha) - \sum N \sin(\alpha) + \sum kW \pm \sum D \cos(\omega) = 0 \quad (2-12)$$

จากสมการที่ 2-8 แทนลงในสมการที่ 2-12 และจัดรูปแบบใหม่ได้สมการค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากสมดุลแรงดังสมการที่ 2-13

$$F.S._{force} = \frac{\sum (c' \beta \cos(\alpha) + (N - u\beta) \tan(\phi') \cos(\alpha))}{\sum N \sin(\alpha) + \sum kW \pm \sum D \cos(\omega)} \quad (2-13)$$

หากพิจารณาภาพที่ 2.9 โดยพิจารณาจากผลรวมของแรงในราบของชั้นดินหนึ่งให้แรงในทิศทางไปทางขวาเป็นบวก ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2-14

$$-W + (X_L - X_R) + N \cos(\alpha) + S_m \sin(\alpha) - D \sin(\omega) = 0 \quad (2-14)$$

จากสมการที่ 2-10 แทนลงในสมการที่ 2-14 และจัดรูปแบบใหม่ได้สมการค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากสมดุลแรงดังสมการที่ 2-15

$$N = \frac{W + (X_L - X_R) + D \sin(\omega) + \frac{\beta \sin(\alpha)(c' - u \tan(\phi'))}{F.S.}}{\cos(\alpha) - \frac{\sin(\alpha) \tan(\phi')}{F.S.}} \quad (2-15)$$

ความสัมพันธ์ของแรง X และแรง E ถูกสมมุติขึ้นเพื่อสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดและคำนวณหาค่าสัดส่วนความปลอดภัย ซึ่งถูกสมมุติให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์และตัวคูณเลขจำนวนจริง ดังสมการที่ 2-16

$$X = \lambda E f(x) \quad (2-16)$$

เมื่อพิจารณาภาพที่ 2.9 สมดุลแรงในแนวราบของชั้นดินชั้นหนึ่ง ซึ่งแสดงในสมการที่ 2-17

$$(E_L - E_R) - N \sin \alpha + s_m \cos \alpha - kW + D \cos \omega = 0 \quad (2-17)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ 2-17 ใหม่ให้สอดคล้องกับสมการอื่น ๆ โดยแทนสมการที่ 2-10 ลงในสมการที่ 2-17 จะได้สมการที่ 2-18 ดังนี้

$$E_R = E_L - kW + D \cos \omega + N \sin \alpha + \frac{\cos \alpha (c' \beta + (N - \beta u) \tan \phi)}{F.S.} \quad (2-18)$$

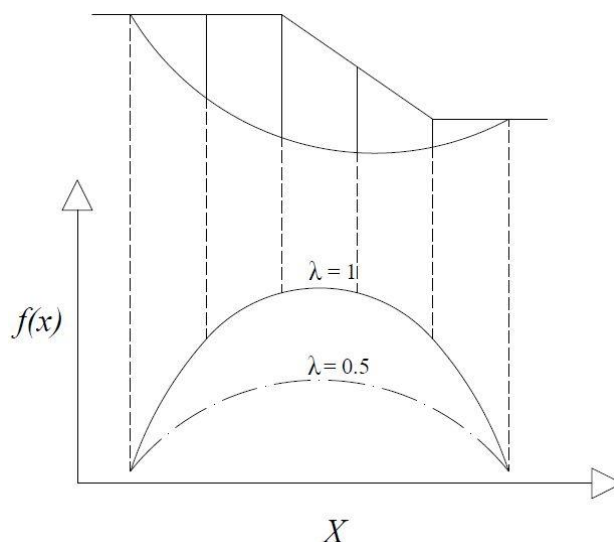
ในการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ ได้ใช้วิธีของ Mergenstern and Price's method (1965) มีสมมติฐานว่าแรงที่เกิดขึ้นบนระนาบวิบัติที่ต่อเนื่องกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าดินตลอดพื้นผิววิบัติเป็นวัสดุที่เปลี่ยนแปลงต่อเนื่องกันเป็นอย่างดี ซึ่งแรงลัพธ์ของชั้นดิน คือ ความชันของแรงลัพธ์ของแรงด้านข้างของชั้นย่อยแปรผันไปตามฟังก์ชันที่กำหนดให้ ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ใดๆ โดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2-19

$$\frac{X}{E} = \lambda f(x) \quad (2-19)$$

จากสมการที่ 2-19 แทนลงในสมการที่ 2-15 และจัดรูปแบบใหม่ได้ดังสมการที่ 2-20

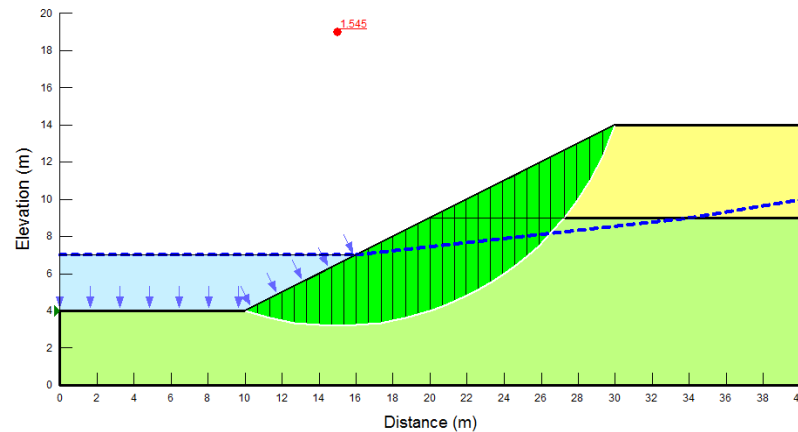
$$N = \frac{W + (E_L \lambda f(x) - E_R \lambda f(x)) + D \sin(\omega) + \frac{\beta \sin(\alpha)(c' - u \tan(\phi'))}{F.S.}}{\cos(\alpha) - \frac{\sin(\alpha) \tan(\phi')}{F.S.}} \quad (2-20)$$

พิจารณาสมการที่ 2-20 สามารถแทนได้โดยสมการที่ 2-18 ดังนั้นจึงสามารถหาค่าของแรง N ได้ โดยจำเป็นต้องสมมุติค่า λ และ F.S. จากนั้นนำไปสมการที่ 2-11 และ 2-13 โดยขั้นตอนทั่วไป ต้องสมมุติ λ ก่อน จากนั้นสมมุติค่า F.S. เป็นผลให้ได้ค่า F.S._{Force} และ F.S._{Moment} ซึ่งค่า λ ที่เหมาะสมทำให้ค่า F.S._{Force} และ F.S._{Moment} มีค่าเท่ากัน โดยค่าที่คำนวณภาพที่ 2-10 ซึ่งแสดงตัวอย่างค่าความชัน ค่าฟังก์ชัน และค่า λ สำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธี Mergenstern and Price



ภาพที่ 2.10 ตัวอย่างแสดงค่าความชัน ค่าฟังก์ชัน และค่า λ สำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธี Mergenstern and Price

ภาพที่ 2.11 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นการกำหนดจุดศูนย์กลาง และรัศมีของการเลื่อนไหลแบบจุดเดียวในการคำนวณ โดยค่าความปลอดภัยของความลาดคั่นดินที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ถูกกำหนดค่าความปลอดภัยต่ำสุดที่ยอมรับให้ (Minimum allowable Safety factor) ตามตารางที่ 2-5



ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดคั่นดิน

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์ต่ำสุดของอัตราส่วนปลอดภัยของคั่นดิน

กรณี	สภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์		Shear Strength	ลาดคั่น ที่ต้องวิเคราะห์	ค่าความปลอดภัยต่ำสุดที่ยอมรับให้
	สภาพคั่นดิน	ระดับน้ำ			
1	เมื่อสร้างคั่นดินเสร็จใหม่ ๆ ยัง	-	UU-test	เหนือน้ำ	1.3
2	ไม่มีการเก็บกักน้ำ	-		ท้ายน้ำ	
3	ระหว่างเก็บกักน้ำ	N.H.W.L.	CU-test	ท้ายน้ำ	1.5
4		I.W.L.		เหนือน้ำ	
5	น้ำลดระดับลงกะทันหัน	L.W.L.	CU-test	เหนือน้ำ	1.2

หมายเหตุ: N.H.W.L. คือ ระดับน้ำเก็บกักปกติสูงสุด (Normal high water level)

I.W.L. คือ ระดับน้ำเก็บกักปานกลาง (Intermediate water level)

L.W.L. คือ ระดับน้ำต่ำสุด (Low water level)

2.13.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน

แบบจำลองนี้เป็นการจำลองการเคลื่อนที่และการแพร่กระจายความดันของน้ำในช่องว่างภายในชั้นดินและชั้นหิน โดยใช้ Finite element สามารถวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาการซึมผ่านได้ทั้งแบบง่ายและแบบซับซ้อน ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบสำหรับโครงการทางวิศวกรรมปฐพี วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุทกธรณี และวิศวกรรมเหมืองแร่

การคำนวณหาปริมาณการไหลซึมและไหลลอดผ่านคันดิน ใช้สมการพื้นฐานของการไหลของน้ำผ่านตัวกลาง ซึ่งการวิเคราะห์การไหลซึมรูปแบบต่าง ๆ โดยพิจารณาชิ้นส่วนเล็ก ๆ รูปลูกบาศก์ และสามารถเขียนสมการดังต่อไปนี้

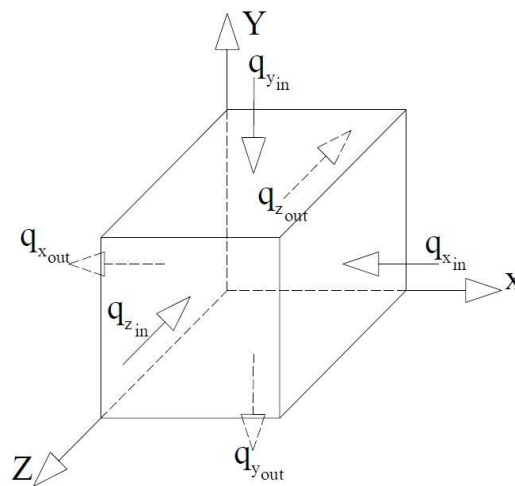
$$q = q_x + q_y + q_z \quad (2-21)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณการไหลของน้ำในดิน (m^3/s)

q_x คือ ปริมาณการไหลของน้ำในดินสุทธิในทิศทางแกน x (m^3/s)

q_y คือ ปริมาณการไหลของน้ำในดินสุทธิในทิศทางแกน y (m^3/s)

q_z คือ ปริมาณการไหลของน้ำในดินสุทธิในทิศทางแกน z (m^3/s)



ภาพที่ 2.12 การไหลของน้ำผ่านรูปลูกบาศก์

จากภาพที่ 2.12 การคำนวณหาปริมาณการไหลซึมและไหลลอดผ่านคันดินปริมาณน้ำที่ไหลเข้าในแต่ละทิศทาง จะคำนวณได้จาก $q = vA$ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q_{x_{in}} = v_x \cdot dy \cdot dz \quad (2-22)$$

$$q_{y_{in}} = v_y \cdot dz \cdot dx \quad (2-23)$$

$$q_{z_{in}} = v_z \cdot dx \cdot dy \quad (2-24)$$

เมื่อ v_x คือ ความเร็วการไหลของน้ำในดินในทิศทางแกน x (m^3/s)
 v_y คือ ความเร็วการไหลของน้ำในดินในทิศทางแกน y (m^3/s)
 v_z คือ ความเร็วการไหลของน้ำในดินในทิศทางแกน z (m^3/s)

ปริมาณน้ำที่ไหลออกในแต่ละทิศทางสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q_{x_{out}} = (v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot dx) dy \cdot dz \quad (2-25)$$

$$q_{y_{out}} = (v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot dy) dz \cdot dx \quad (2-26)$$

$$q_{z_{out}} = (v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \cdot dz) dx \cdot dy \quad (2-27)$$

ดังนั้นปริมาณการไหลของน้ำในดินสุทธิในแต่ละแกนมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและปริมาณน้ำที่ไหลออก ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q_x = q_{x_{in}} - q_{x_{out}} = -\frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2-28)$$

$$q_y = q_{y_{in}} - q_{y_{out}} = -\frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2-29)$$

$$q_z = q_{z_{in}} - q_{z_{out}} = -\frac{\partial v_z}{\partial z} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2-30)$$

จากนั้นนำสมการที่ 2-25 - 2-27 ไปแทนลงสมการที่ 2-18 ซึ่งสามารถเขียนสมการและจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 2-28 โดยที่ปริมาณการไหลของน้ำในดินมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน 1 ลูกบาศก์ต่อเวลา ต่อปริมาตร ($q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) \quad (2-31)$$

โดยสมการที่ 2-28 ถูกเรียกว่า Continuity equation ซึ่งเป็นพื้นฐานของการไหลของน้ำแบบ Laminar ผ่านตัวกลางของดิน และนอกจากนี้ในการคำนวณหารปริมาณการไหลของน้ำแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

1. กรณี Steady-state flow เป็นกรณีเฉพาะที่มีปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกมีอัตราเท่ากัน คือ ไม่มีน้ำเพิ่มขึ้นหรือลดลงในดิน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำในมวลดินเมื่อ

เทียบกับเวลาตามเวลา ($\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$) และจากกฎของ Darcy's law ($v_i = ki$) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (2-32)$$

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2-33)$$

เมื่อ k_x คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในดินในทิศทางแกน x (m^3/s)

k_y คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในดินในทิศทางแกน y (m^3/s)

k_z คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในดินในทิศทางแกน z (m^3/s)

h คือ ความสูงของระดับน้ำ (m)

x คือ ระยะทางในทิศทางแกน x (m)

y คือ ระยะทางในทิศทางแกน y (m)

z คือ ระยะทางในทิศทางแกน z (m)

2. กรณี Isotropic permeability เป็นกรณีที่คล้ายกับกรณี Steady-state flow แต่ดินมีเนื้อสม่ำเสมอ และมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในดินทั้ง 3 ทิศทางมีค่าเท่ากัน ($k_x = k_y = k_z = k$) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2-34

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2-34)$$

3. กรณีการไหลซึม 2 ทิศทาง เป็นกรณีที่คล้ายกับกรณี Isotropic permeability แต่ใช้ในกรณีของสิ่งก่อสร้างที่มีความยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้าง และการไหลซึมที่เกิดขึ้นตั้งฉากกับแกนยาวเท่านั้น (ในทิศทางแกน x และ y) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงในทิศทางแกน z จึงไม่มี คือ

$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2-35

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (2-35)$$

สมการที่ 2-32 ถึงสมการที่ 2-35 เป็นสมการที่ถูกระบุว่า Laplace's equation เป็นสมการเอาไว้อใช้ในการหาตาข่ายการไหล (Flow net) ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นกราฟที่เรียกว่า Equipotential line ซึ่งลากจากสิ่งกีดขวางหรือเส้นแบ่งระหว่างดินไม่อิ่มตัวและดินอิ่มตัวไปยังฐานของชั้นดิน และเส้นกราฟอีกเส้นที่เรียกว่า Flow line ซึ่งลากจากบริเวณน้ำที่ไหลเข้าไปยังบริเวณน้ำที่ไหลออก โดยเส้นกราฟทั้งสองเส้นตัดกันและตั้งฉากกัน นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านคันดินสามารถแบ่งการไหลซึมได้เป็น 2 ระยะ คือ

1. Unsteady-state flow เป็นระยะที่เริ่มเก็บกัก กล่าวคือ มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในอ่างและเป็นไปได้ที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากดินยังไม่อิ่มตัว ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาส่งผลให้ทำให้ขอบเขตการไหล (Boundary condition) มีการเปลี่ยนแปลง

2. Steady-state flow เป็นการไหลของน้ำผ่านช่องว่างของดิน โดยที่ระดับน้ำในอ่างและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

ในงานวิจัยชิ้นนี้การคำนวณหาปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล โดยใช้เงื่อนไขการวิเคราะห์แบบสถานะคงที่ (Steady-state analysis) ซึ่งคำนวณจากสมการของลาปลาซ (Laplace's equation) เพื่อหาตาข่ายการไหลจากสมการที่ 2-32 ถึงสมการที่ 2-35 และหาปริมาณการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินกั้นน้ำทะเลจากสมการที่ 2-36

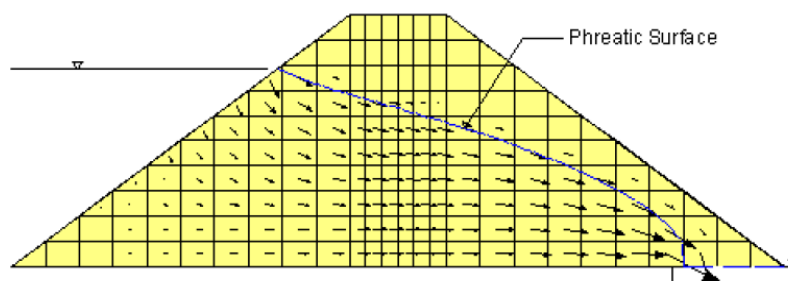
$$Q = (\Delta h)k \frac{n_f}{n_d} \quad (2-36)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (m^3/s)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (m/s)

n_f คือ จำนวนของเส้นทางการไหล (Flow path)

และ n_d คือ จำนวนของ Equipotential drops



ภาพที่ 2.13 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน (GEO-SLOPE International Ltd., 2002)

จากภาพที่ 2.13 ลูกศร (\rightarrow) แสดงทิศทางและความเร็วของการไหลของน้ำผ่านคันดิน ยิ่งลูกศรมีความยาวความเร็วของน้ำยิ่งมาก และสำหรับเส้น Phreatic surface แสดงขอบเขตของดินที่อิ่มตัวภายในคันดินใต้ระดับน้ำ

2.13.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน

แบบจำลองนี้เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนหรือน้ำทะเลในน้ำผ่านชั้นดินและชั้นหิน วิธีการที่ใช้ในแบบจำลองสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของน้ำ และกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจาย การกระจายตัว การดูดซับ การสลายตัวของสารปนเปื้อน และความแตกต่างของความหนาแน่น โดยแบบจำลองนี้ต้องใช้ควบคู่กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน ซึ่งสามารถใช้การคำนวณได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ วิธี Advection-dispersion analysis และวิธี Density-dependent analysis

ในการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลในน้ำใต้ดินมีลักษณะคล้ายกับกระบวนการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ซึ่งมีกระบวนการที่สำคัญ 3 กระบวนการ ดังนี้

Advection คือ กระบวนการพาสารไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของน้ำอันเนื่องมาจากความแตกต่างของระดับน้ำ โดยการไหลผ่านของน้ำผ่านช่องว่างของเม็ดดิน ถ้าชั้นดินประกอบด้วยชั้นทราย หรือกรวด ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สูง ลักษณะการเคลื่อนที่จะเป็นแบบ Advection เป็นหลัก

Dispersion คือ กระบวนการที่สารแพร่กระจายในน้ำ โดยการแพร่กระจายมีการเคลื่อนที่ทั้งในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของน้ำ และในทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วของการไหลของน้ำและการแพร่ (Diffusion) จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารที่สูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ

Hydrodynamic คือ การศึกษาการเคลื่อนที่ของการไหลของน้ำ ซึ่งการไหลที่เกิดขึ้นเป็นการไหลของของไหลในอุดมคติ โดยประกอบไปด้วยการไหลในสถานะคงที่ (Steady flow) การไหลที่อัดไม่ได้ (Incompressible flow) การไหลที่ไม่มีมีความหนืด (Nonviscous flow) และการไหลที่ไม่มีการหมุนวน (Irrotational flow)

วิธี Advection-dispersion analysis เป็นวิธีการที่ใช้การพาเป็นการเคลื่อนที่ด้วยการไหลของน้ำใต้ดิน และมีกระบวนการแพร่เป็นปรากฏการณ์ของการแพร่กระจายจากการเคลื่อนที่ในการประเมิน ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2-37

$$\Theta D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda \Theta C - \lambda S \rho_d = (\Theta + \rho_d \frac{\partial S}{\partial C}) \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2-37)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (kg/m^3)

Θ คือ ปริมาณของน้ำโดยปริมาตร (m^3)

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (m^2/s)

U คือ ความเร็วของ Darcian (m/s)

S คือ ค่าการดูดซึม

ρ_d คือ ความหนาแน่นแห้งของดิน (kg/m^3)

λ คือ ค่าอัตราการผลิต

t คือ เวลา (s)

และ x คือ ระยะทางในทิศทางแกน x (m)

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient, D) เกิดจากการเคลื่อนที่ของของเหลว 2 แบบ คือ แบบกระจายตัวเชิงกลของของเหลว (Mechanical dispersion, D_{mech}) และแบบกระจายตัวเชิงโมเลกุลของของเหลว (Molecular dispersion, D_{mol}) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 2-38

$$D = D_{mech} + D_{mol} \quad (2-38)$$

นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient, D) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-37 และ 2-38 โดยสมการนี้ได้คำนึงถึงผลของการแพร่กระจายและการกระจายตัวของสสารต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ในน้ำ

$$D_L = \alpha_L v + D^* \quad (2-39)$$

$$D_T = \alpha_T v + D^* \quad (2-40)$$

เมื่อ D_L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในทิศทางตามแนวยาว (m^2/s)

D_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในทิศทางตามแนวขวาง (m^2/s)

α_L คือ ค่าการปรับแก้ของการกระจายตัวในทิศทางตามแนวยาว (m)

α_T คือ ค่าการปรับแก้ของการกระจายตัวในทิศทางตามแนวขวาง (m)

v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)

D^* คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของโมเลกุล (m^2/s)

จากสมการที่ 2-7 ตามทฤษฎีของ Fickian อธิบายไว้ว่า ค่าการปรับแก้ของการกระจายตัวในทิศทางตามแนวยาว (α_L) ขึ้นอยู่กับความยาวของการไหลของของเหลวในทิศทางตามแนวยาว (L) โดยสามารถแสดงสมการได้ดังนี้ (Gelhar, Welty, & Kenneth, 1992)

$$\alpha_L = 0.1L \quad (2-41)$$

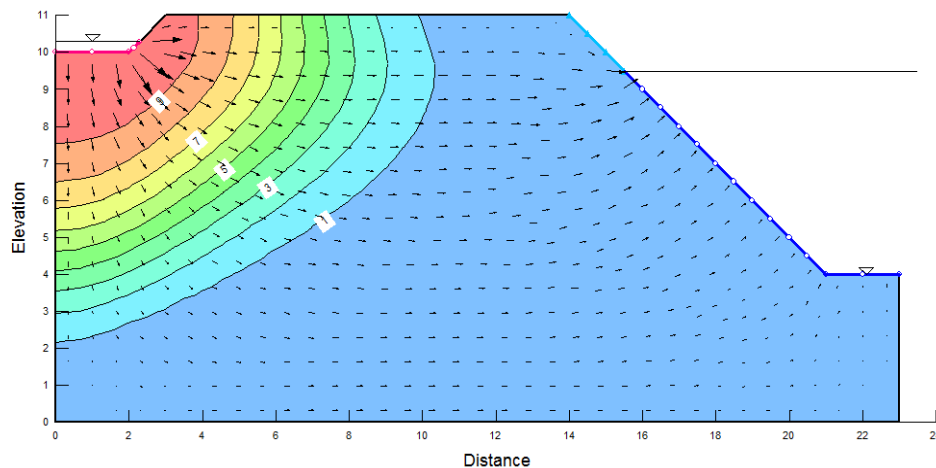
เมื่อ L คือ ความยาวของการไหลของของเหลวในทิศทางตามแนวยาว (m)

เมื่อความยาวของการไหลของของเหลวในทิศทางตามแนวยาวน้อยกว่า 3,500 m Nueman (1990) เสนอว่าควรใช้ค่า α_L ดังสมการที่ 2-43

$$\alpha_L = 0.0175L^{1.46} \quad (2-46)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของการไหลของของเหลวในทิศทางตามแนวยาว (m)

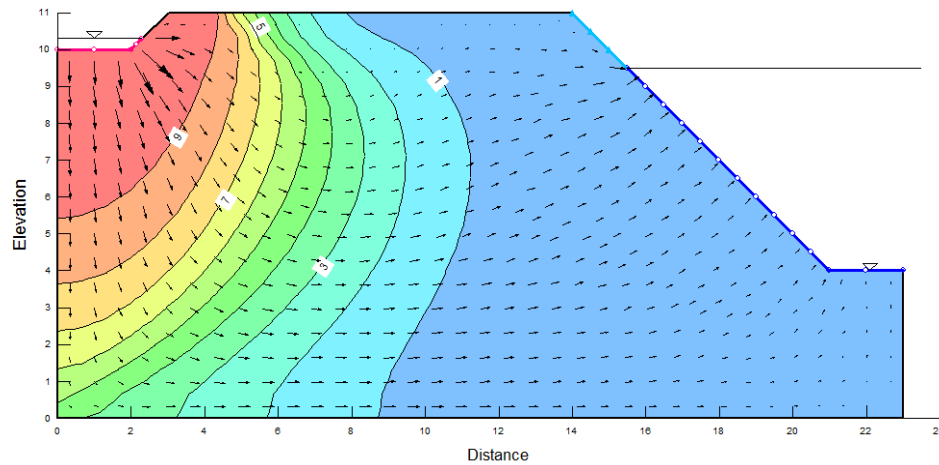
สำหรับค่าการปรับแก้ของการกระจายตัวในทิศทางตามแนวขวาง (α_T) มีค่า 1 ใน 10 ถึง 1 ใน 100 ของค่าการปรับแก้ของการกระจายตัวในทิศทางตามแนวยาว (α_L) (Gelhar et al., 1992)



ภาพที่ 2.14 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านชั้นดินโดย Advection-dispersion analysis

จากภาพที่ 2.14 เป็นผลการวิเคราะห์ของการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านชั้นดิน โดยมีเส้นและสีแสดงความเข้มข้นของสารปนเปื้อน และลูกศร (\rightarrow) แสดงทิศทางและขนาดของความเร็วของการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านชั้นดิน

วิธีการ Density-dependent analysis เป็นการวิเคราะห์โดยการคำนึงถึงความหนาแน่นของสารปนเปื้อนที่มีความแตกต่างกับความหนาแน่นของน้ำอย่างชัดเจนในการประเมิน ซึ่งถูกใช้แก้ปัญหาในการรุกรานของน้ำทะเล



ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านชั้นดินโดย Density-dependent analysis

จากภาพที่ 2.15 เป็นผลการวิเคราะห์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเล โดยมีเส้นและแถบสีแสดงความเข้มข้นของน้ำทะเล และลูกศร (\rightarrow) แสดงทิศทางและขนาดของความเร็วของการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านชั้นดิน

การวิเคราะห์ทฤษฎีเกี่ยวกับแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินว่า วิธี Density-dependent analysis มีความถูกต้องมากกว่าวิธี Advection-dispersion analysis สำหรับการศึกษากการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านชั้นดิน (Simpsons & Clement, 2003)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การทดลองเพื่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอินทรีย์

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติของตัวอย่างดินที่มีสภาพตามธรรมชาติ และตัวอย่างดินผสมปูนซีเมนต์ ซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ

3.2 การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน

การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard compaction test) เป็นการทดสอบตาม ASTM D1557 Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort ($56,000 \text{ ft-lbf/ft}^3$ or $2,700 \text{ kN-m/m}^3$) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{\text{dry max}}$) และค่าความชื้น หรือปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ในแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างดินและปูนซีเมนต์

วิธีการทดสอบโดยสรุป คือ นำตัวอย่างดินแห้งมาผสมกับน้ำที่ปริมาณความชื้นที่ต้องการเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำดินมาทำการบดอัดในแบบทรงกระบอกที่ใช้ในการบดอัด (Mold) จำนวน 3 ชั้นๆ ละ 25 ครั้ง แล้วทำการชั่งน้ำหนัก เก็บตัวอย่างดินเพื่อนำไปหาปริมาณความชื้น ทำซ้ำโดยการเพิ่มปริมาณน้ำให้มากขึ้น จนกระทั่งน้ำหนักเปลี่ยนจากเพิ่มขึ้นเป็นลดลง จากนั้นมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{\text{dry max}}$) และหาค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน

3.3 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) เป็นการทดสอบตาม ASTM D2435-96 Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) โดยใช้ น้ำ และอัตราการทรุดตัวในแต่ละอัตรา ส่วนผสมระหว่างดินและปูนซีเมนต์ ในการทดสอบได้ใช้อุปกรณ์ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

ทำการเตรียมตัวอย่างด้วยการใช้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d, (max)}$) และค่าความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ผสมให้ตัวอย่างและน้ำเข้ากัน แล้วนำมาอัดเข้าภายในแหวนทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm และหนา 20 mm จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ติดตั้งเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบ แล้วเริ่มให้น้ำหนักบรรทุกกับตัวอย่างดิน ขณะทำการทดลองทำการบันทึกค่าที่เวลา 6 15 30 วินาที 1 2 4 8 15 30 นาที 1 2 4 8 และ 24 ชั่วโมง นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟโดยวิธี Square root time หรือ Log time เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงให้ทำการเพิ่มน้ำหนักและบันทึกค่าที่เวลาเดิม

3.4 การทดสอบการอัดแบบอิสระ

การทดสอบการอัดแบบอิสระ (Unconfined compression test) เป็นการทดสอบตาม ASTM D2166/D2166M-16 Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion, c) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของกำลังรับแรงเฉือนของดิน ในการทดสอบได้ใช้อุปกรณ์ดังภาพที่ 3.3

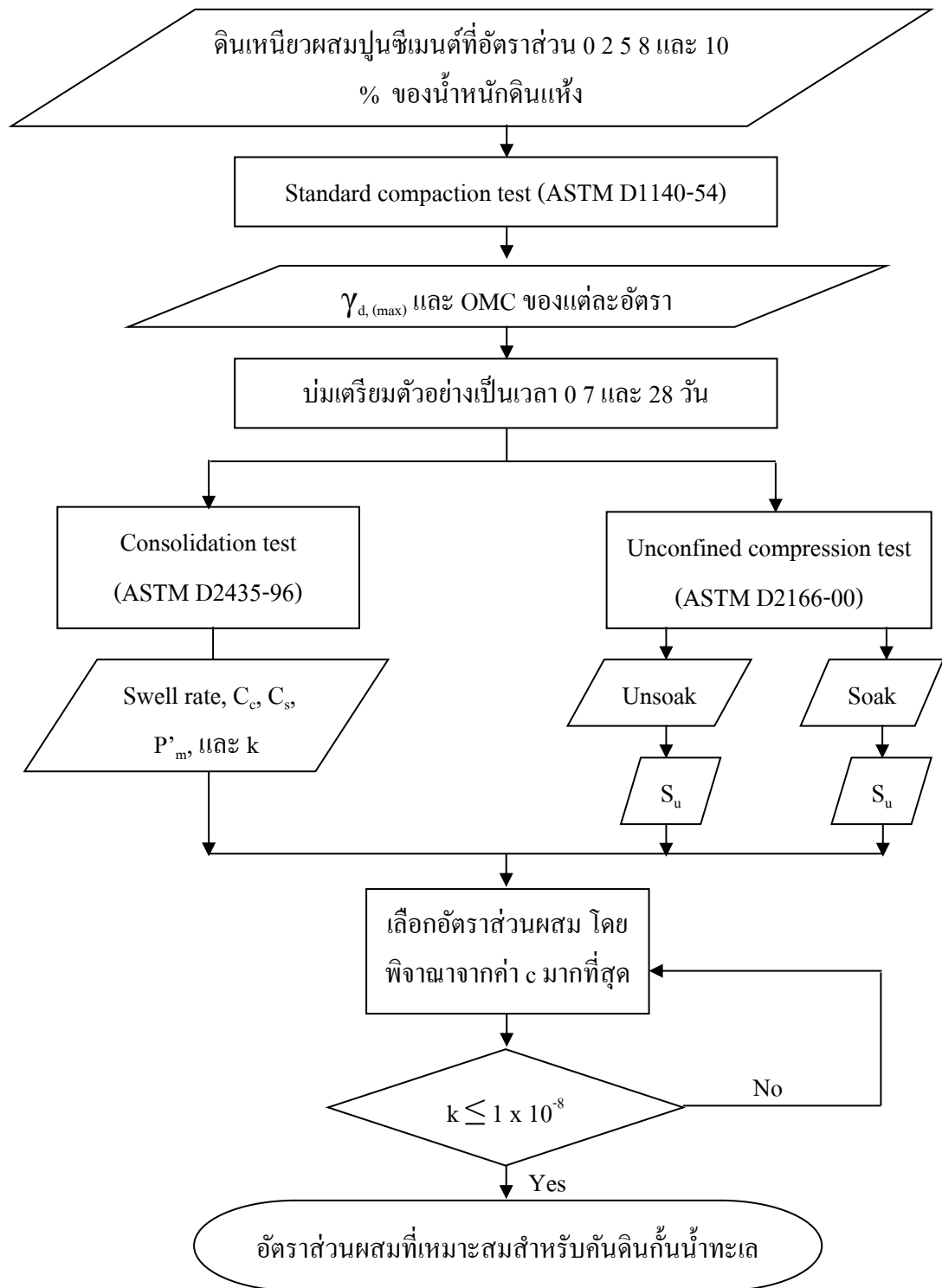


ภาพที่ 3.3 ชุดทดสอบการอัดแบบอิสระ

วิธีการทดสอบโดยสรุป คือ เตรียมตัวอย่างโดยใช้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{dry\ max}$) และค่าความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) แล้วนำตัวอย่างมาอัดเข้าแบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm และสูง 100 mm หลังจากนั้นติดตั้งแบบหล่อเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบ และทำการทดสอบโดยให้อัตราการกดคงที่ 0.05 นิ้วต่อนาที บันทึกข้อมูลทุกๆ ระยะการกด 0.5 นิ้ว กัดตัวอย่างจนกระทั่งแรงที่กระทำมีค่าลดลง หรือ จนกระทั่งระยะการกดมีค่าเท่ากับ 15% strain ถ่ายรูปหรือวาดรูปตัวอย่างในสภาพวิบัติ เพื่อหามุมที่กระทำกับแนบราบของระนาบวิบัติ และเก็บตัวอย่างดินนำไปหาความชื้น

ทำการทดสอบทั้งแบบ Unsoak และ Soak โดยการทดสอบแบบ Unsoak คือ เมื่อตัวอย่างอายุถึงกำหนดจะทำการทดสอบโดยทันที แต่สำหรับการทดสอบแบบ Soak คือ เมื่อตัวอย่างอายุถึงกำหนด จะนำตัวอย่างไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างมาทิ้งไว้ให้แห้งในสภาพอากาศปกติเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบ การทดสอบแบบ Soak เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวง ทล.ม. 204/2533 มาตรฐานพื้นทางซีเมนต์

3.5 ลำดับขั้นตอน และการเตรียมตัวอย่างการทดสอบของการปรับปรุงคุณภาพดิน



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

จากภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างดินและปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับคันดินกั้นน้ำทะเล โดยทดลองนำดินมาผสมปูนซีเมนต์ที่ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งตัวอย่างดินผสมปูนซีเมนต์ที่ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง คือ มีปริมาณดิน 100 ส่วน และมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 0 2 5 8 และ 10 ส่วน โดยน้ำหนักมาทำการทดสอบบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard proctor test) ซึ่งจะได้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$) และปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ของแต่ละอัตราส่วน

ต่อมานำค่าที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานมาทำการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำซึ่งได้ค่าอัตราการบวมตัว ค่าดัชนีของการอัดตัว (C_c) ค่าดัชนีของการคายตัว (C_u) ค่า Maximum past pressure (P'_m) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) และการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระเพื่อหาค่าความเชื่อมแน่น (Undrain shear strength, S_u) ของแต่ละอัตราส่วน

ในการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระถูกแบ่งออกเป็นแบบ Unsoak (ไม่แช่น้ำ) และแบบ Soak (แช่น้ำ) โดยในการทดสอบแบบ Unsoak เมื่อตัวอย่างอายุถึงกำหนดจะทำการทดสอบตัวอย่างในทันที และสำหรับการทดสอบแบบ Soak เมื่อตัวอย่างอายุถึงกำหนด ต้องนำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ต่อมาทำตัวอย่างให้แห้งโดยการปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการทดสอบตัวอย่าง

หลังจากนั้น เลือกอัตราส่วนระหว่างดินและปูนซีเมนต์ โดยจากพิจารณาค่า c มากที่สุดและต้องมีค่า k น้อยกว่า 1×10^{-8} m/s แต่ถ้าค่า k มากกว่า 1×10^{-8} m/s ให้ทำการเลือกอัตราส่วนระหว่างดินและปูนซีเมนต์ใหม่ เมื่อได้ค่าอัตราส่วนระหว่างดินและปูนซีเมนต์จะเป็นค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล เพื่อนำอัตราส่วนที่ได้นำไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

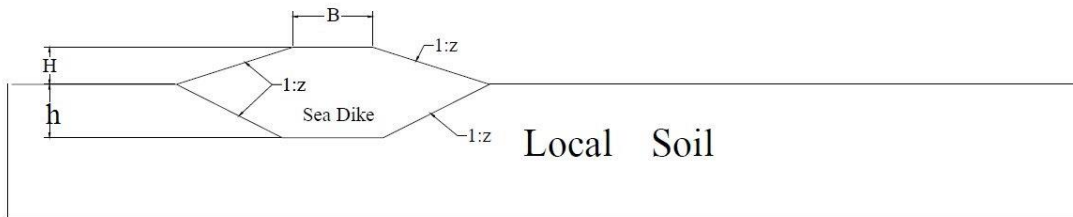
3.6 การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GeoStudio 2007 ในการวิเคราะห์รูปแบบต่างๆ ของคันดินกั้นน้ำทะเล และประเมินประสิทธิภาพในการป้องกัน การรुक้าของน้ำทะเลของคันดินกั้นน้ำทะเล ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ทำการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 3 แบบจำลอง ได้แก่

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำ (บ่อยืมดิน)
3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน มีรายละเอียดดังภาพที่ 3.5 และตารางที่ 3.1 ในการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เราได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำ

(บ่อเยี่ยมดิน) ในการออกแบบคันดินกั้นน้ำทะเล และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินประเมินประสิทธิภาพในการป้องกันการรुक้าของน้ำทะเลของคันดินกั้นน้ำทะเล

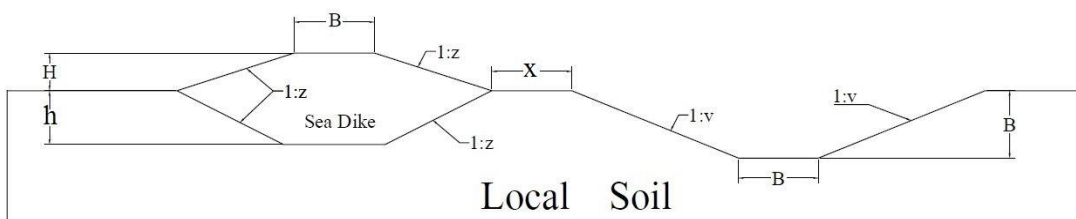


ภาพที่ 3.5 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ

รายละเอียด	ค่า
ความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเล, H (m. MSL.)	3.00
ความลึกของฐานรากคันดินกั้นน้ำทะเล, h (m)	0.50
ความกว้างของสันคันดินกั้นน้ำทะเล, B (m)	3.00
ความลาดของคันดินกั้นน้ำทะเลและความลาดของฐานราก (1 : z)	1 : 2
ลักษณะของชั้นดิน	แบบที่ 1 และ แบบที่ 2
จำนวนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำ สามารถนำดินในพื้นที่ศึกษามาใช้ในการก่อสร้างซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 3.6 และมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.2



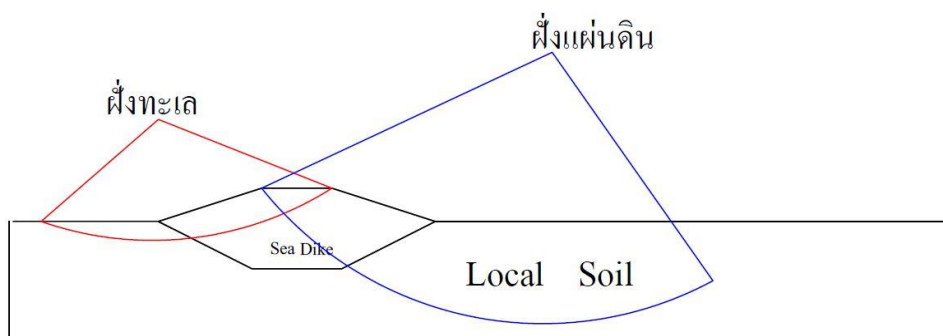
ภาพที่ 3.6 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ

รายละเอียด	ค่า
ความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเล, H (m. MSL.)	3.00
ความลึกของฐานรากคันดินกั้นน้ำทะเล, h (m)	0.50
ความกว้างของสันคันดินกั้นน้ำทะเล, B (m)	3.00
ความลาดของคันดินกั้นน้ำทะเลและความลาดของฐานราก (1 : z)	1 : 2
ความลึกของทางน้ำ, D (m)	2.50
ความกว้างของพื้นที่ทางน้ำ, B (m)	3.00
ความลาดของทางน้ำ (1 : v)	1 : 2.5
ลักษณะของชั้นดิน	แบบที่ 1 และ แบบที่ 2
จำนวนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2

3.6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำเป็นการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพ (ค่าอัตราส่วนปลอดภัย) ของความลาดคันดินกั้นน้ำทะเลดังภาพที่ 3.7 โดยทำการวิเคราะห์แบบ Morgenstern-price ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.3

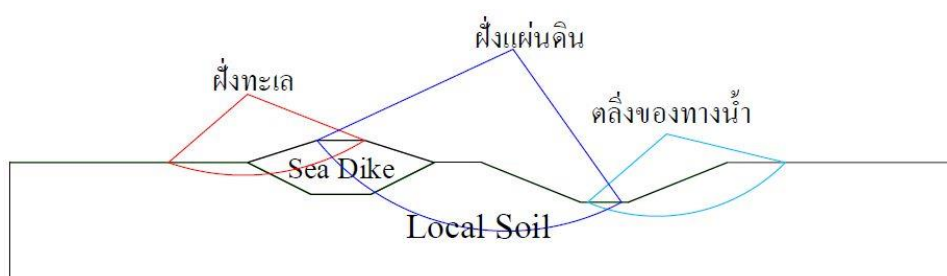


ภาพที่ 3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบไม่มีทางน้ำ

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบไม่มีทางน้ำ

รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	2
สภาพที่ใช้ทำการวิเคราะห์ (เมื่อก่อสร้างเสร็จ ขณะใช้งาน และระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน)	3
ตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ (เหนือน้ำ(ฝั่งทะเล) ท้ายน้ำ(ฝั่งแผ่นดิน))	2
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	24

สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบมีทางน้ำต้องวิเคราะห์หาค่าเสถียรภาพของความลาดบริเวณฝั่งแผ่นดินเมื่อก่อสร้างเสร็จ มีดังภาพที่ 3-23 และมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.4



ภาพที่ 3.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบมีทางน้ำ

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำ

รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	1
สภาพที่ใช้ทำการวิเคราะห์ (เมื่อก่อสร้างเสร็จ)	1
ตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ (ฝั่งแผ่นดิน)	1
ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำ, X (m)	x
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2x

โดยระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำ เริ่มที่ 3 m และเพิ่มทีละ 1 m จนกระทั่งค่าเสถียรภาพ (ค่าอัตราส่วนปลอดภัย) ของความลาดบริเวณฝั่งแผ่นดินเมื่อก่อสร้างเสร็จมีค่ามากกว่า 1.4 เนื่องจากค่าเสถียรภาพ (ค่าอัตราส่วนปลอดภัย) เมื่อขณะก่อสร้างเสร็จ มีค่า 1.3 ซึ่งเมื่อได้

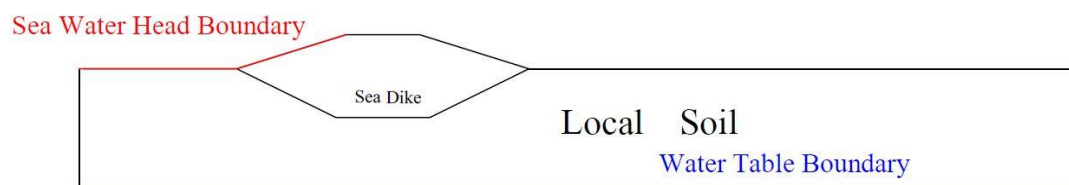
ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำ ถูกนำมาวิเคราะห์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เสถียรภาพคันดินและทางน้ำอีกครั้ง โดยมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบมีทางน้ำ

รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	2
สภาพที่ใช้ทำการวิเคราะห์ (เมื่อก่อสร้างเสร็จ ขณะใช้งาน และระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน)	3
ตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ (ฝั่งทะเล ฝั่งแผ่นดิน และตลิ่งของทางน้ำ)	3
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	36

3.6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน เป็นการวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินดังภาพที่ 3.9 โดยทำการวิเคราะห์แบบ Steady state ซึ่งมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.6

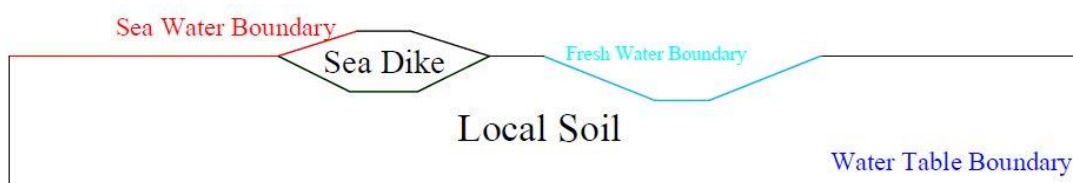


ภาพที่ 3.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ

รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	2
ระดับน้ำทะเล (m. MSL.)	2-07
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	1

สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำดังภาพที่ 3-25 และมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.7



ภาพที่ 3.10 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ

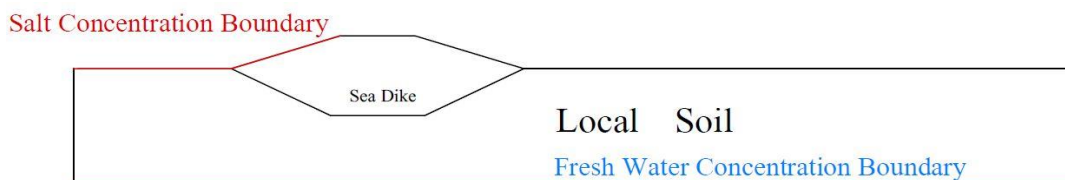
รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	2
ระดับจุดที่ถูกเก็บกักไว้ (m. จากระดับผิวดิน)	- 0-30
ระดับน้ำทะเล (m. MSL.)	2-07
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	4

3.6.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน เป็นการวิเคราะห์เพื่อประเมินและตรวจสอบประสิทธิภาพการป้องกันการรุกคืบของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเลดังภาพที่ 3.11 ในการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ใช้การวิเคราะห์แบบ Density-dependent analysis โดยทำการศึกษาดังตารางที่ 3.8

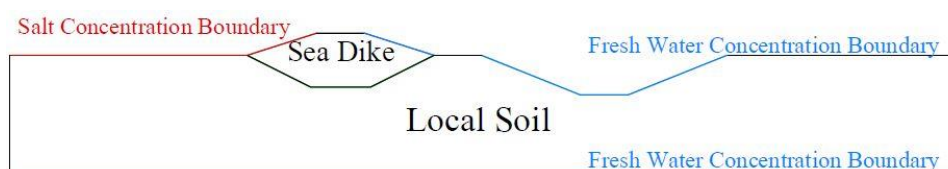
ตารางที่ 3.8 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ

รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	1
ระดับน้ำทะเล (m- MSL-)	2-07
ความเข้มข้นของน้ำทะเล, Csea water (kg/m ³)	35
ระยะเวลา (ปี)	100
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2



ภาพที่ 3.11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ

ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันการรุกคืบของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบไม่มีและมีทางน้ำเข้าไปในพื้นที่ศึกษา โดยแบบจำลองมีลักษณะดังภาพที่ 3.12 และมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.9



ภาพที่ 3.12 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ

ตารางที่ 3.9 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ

รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	1
ระดับจืดที่ถูกเก็บกักไว้ (m- จากระดับผิวดิน)	- 0-30
ระดับน้ำทะเล (m- MSL-)	2-07
ความเข้มข้นของน้ำทะเล, Csea water (kg/m ³)	35
ระยะเวลา (ปี)	100
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2

3.7 การวิเคราะห์การทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล

เป็นการคำนวณการทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล ซึ่งในการวิเคราะห์ซึ่งมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.10

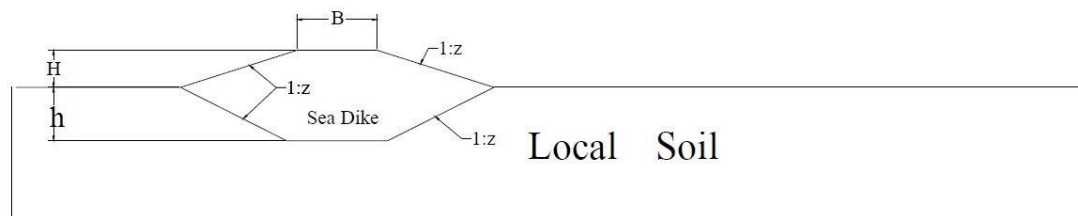
ตารางที่ 3.10 รายละเอียดการวิเคราะห์การทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล

ชั้นดิน	BH - 1				BH-2			
	Depth จากระดับ ผิวดิน -	Unit Weight γ	C_c	Void Ratio e	Depth จากระดับ ผิวดิน -	Unit Weight γ	C_c	Void Ratio e
	m	(kN/m ³)	-	(m ³ /m ³)	m	(kN/m ³)	-	(m ³ /m ³)
Clay-1	0-3.8	16.3	0.70	2.3	0-3.8	16.3	0.50	2.6
Clay-2	3.8-9.8	16.3	0.70	1.5	3.8-6.8	16.3	0.50	1.5
Clay-3	9.8-15.8	16.2	0.75	1.5	6.8-12.8	16.5	1.20	2.3

หมายเหตุ ระดับน้ำใต้ดิน -2.00 mจากระดับผิวดิน

3.8 แนวคิดการออกแบบคันกั้นน้ำเค็ม

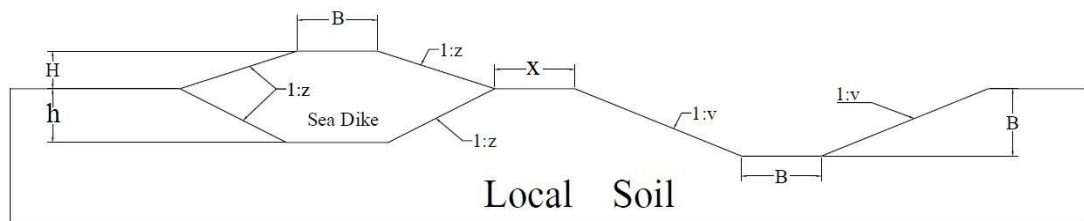
แนวคิดการออกแบบคันกั้นน้ำเค็ม แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การก่อสร้างคันดินโดยใช้ดินที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการก่อสร้าง และการก่อสร้างคันดินโดยปรับปรุงดินในสนามเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งจะทำให้เกิดบ่อยืมดิน (Borrow Area) ในบริเวณด้านข้างคันดิน ดังภาพที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดขนาดของคันดิน ดังตารางที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.13 แนวคิดการออกแบบคันกั้นน้ำเค็มโดยใช้ดินที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการก่อสร้าง

ตารางที่ 3.11 รายละเอียดคันดินโดยใช้ดินที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการก่อสร้าง

รายละเอียด	ค่า
ความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเล, H (m. MSL.)	3.00
ความลึกของฐานรากคันดินกั้นน้ำทะเล, h (m)	0.50
ความกว้างของสันคันดินกั้นน้ำทะเล, B (m)	3.00
ความลาดของคันดินกั้นน้ำทะเลและความลาดของฐานราก (1 : z)	1 : 2



ภาพที่ 3.14 แนวคิดการออกแบบคันกั้นน้ำเค็มโดยปรับปรุงดินในสนามเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการก่อสร้าง

ตารางที่ 3.12 รายละเอียดคันดินโดยปรับปรุงดินในสนามเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการก่อสร้าง

รายละเอียด	ค่า
ความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเล, H (m. MSL.)	3.00
ความลึกของฐานรากคันดินกั้นน้ำทะเล, h (m)	0.50
ความกว้างของสันคันดินกั้นน้ำทะเล, B (m)	3.00
ความลาดของคันดินกั้นน้ำทะเลและความลาดของฐานราก (1 : z)	1 : 2
ความลึกของทางน้ำ, D (m)	2.50
ความกว้างของพื้นที่ช่องทางน้ำ, B (m)	3.00
ความลาดของทางน้ำ (1 : v)	1 : 2.5

บทที่ 4

ผลการวิจัย

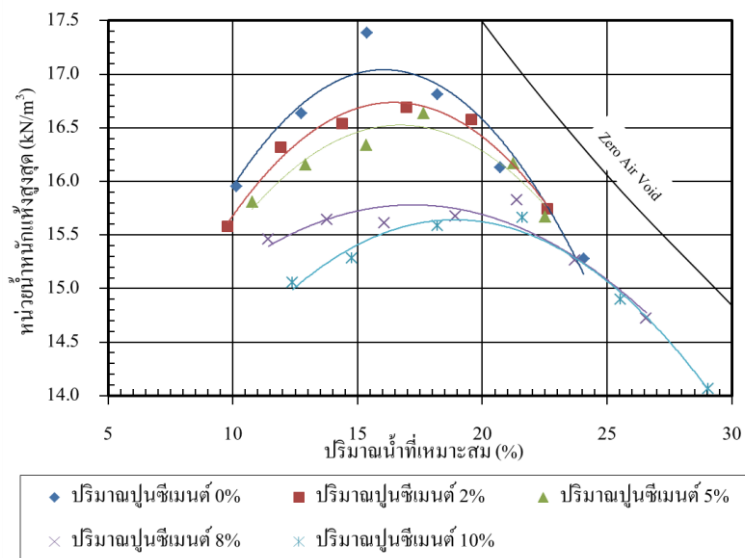
เนื่องจากตัวอย่างดินจากพื้นที่ศึกษาที่สำรวจพบนั้นเป็น ดินเหนียว (Clay) ชนิด Low plasticity (CL) และชนิด High plasticity (CH) มีสารอินทรีย์ประมาณ 8-9% ปะปนอยู่ในมวลดิน แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะเป็นดินเหนียวอินทรีย์ (Organic clay) ซึ่งยังคงมีการย่อยสลายของ สารอินทรีย์ในมวลดิน ทำให้ดินมีสภาพความเป็นกรด ส่งผลให้ดินมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมต่อการ นำมาใช้ในการก่อสร้างด้านวิศวกรรม เพราะดินมีความชื้นสูง ความสามารถในการรับน้ำหนักน้อย และการทรุดตัวมาก อีกทั้งดินที่มีสารอินทรีย์เป็นจำนวนมากจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้ ส่งผล ให้เกิดการทรุดตัวที่เพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากดินมีสภาพเป็นดินเหนียวซึ่งมีค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำ ดังนั้นหากต้องการนำมาใช้งาน ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดินก่อนเพื่อให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรม ของดินเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะด้านกำลังให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งผลการวิเคราะห์ เพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดินจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

4.1 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดิน

การปรับปรุงคุณภาพดิน กระทำโดยทดลองนำตัวอย่างดินมาผสมสารเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1) ที่ปริมาณ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้งแล้วนำไป ทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจาก 3 วิธีการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการ บดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard compaction test) การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) และการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined compression test)

4.1.1 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน

การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard compaction test) เป็นการ ทดสอบเพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d, max}$) และหาค่าความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ในแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างดินและปูนซีเมนต์ที่ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 และดังภาพที่ 4.1 และ 4.2

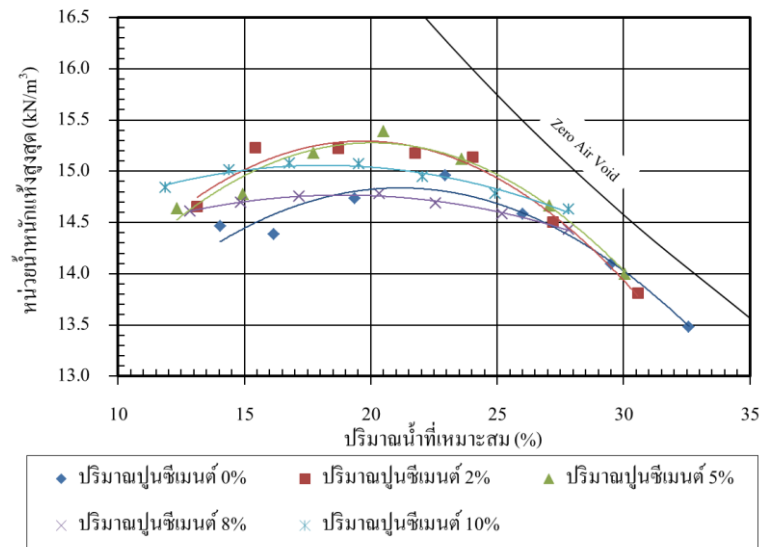


ภาพที่ 4.1 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL

ชื่อ	ปริมาณปูนซีเมนต์ (%)	$\gamma_{d, (max)}$ (kN/m ³)	OMC (%)
CL-C00	0	17.1	16-0
CL-C02	2	16.7	16-4
CL-C05	5	16.6	16.6
CL-C08	8	15.8	17.2
CL-C010	10	15.6	18.9

จากภาพที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากดินที่นำมาใช้มีขนาดคละที่ไม่ดี (Poorly graded soil) และเมื่อผสมปูนซีเมนต์ซึ่งมีขนาดคละเพียงขนาดเดียว ทำให้ขนาดคละของดินมีขนาดใดขนาดหนึ่งมากขึ้นทำให้มีขนาดคละไม่ดี (Poorly graded soil) และเป็นผลให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าลดลง แต่เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่ามากขึ้น เพราะดินเหนียว CL ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่าง ๆ มีความต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าลดลง



ภาพที่ 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH

ชื่อ	ปริมาณปูนซีเมนต์ (%)	$\gamma_{d, (max)}$ (kN/m ³)	OMC (%)
CH-C00	0	14.8	21.1
CH-C02	2	15.3	19.7
CH-C05	5	15.3	20.0
CH-C08	8	14.8	19.0
CH-C10	10	15.1	18.5

จากภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 พบว่า สำหรับดินเหนียว CH เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจนและอยู่ในช่วง แคบ ๆ ซึ่งมีค่าประมาณ 14.5-15.5 kN/m³ และเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มที่ลดลง และมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบ ๆ ประมาณ 18.0-23.0% และสังเกตเห็นได้ว่าการผสมอัตราส่วนปูนซีเมนต์มากขึ้น ไม่ต้องการเพิ่มปริมาณความชื้นที่มากขึ้น เนื่องจากปูนซีเมนต์ใช้น้ำที่มีอยู่ในมวลดินเพื่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งผลการทดสอบมีลักษณะสอดคล้องกับผลการทดสอบของศิริศักดิ์ จินดาพล, สยาม ยิ้มศิริ, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, และสัญญาชัย มิตรเอม (2550)

จากภาพที่ 4.1 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL และภาพที่ 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH ทำให้ทราบค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d, max}$) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC)

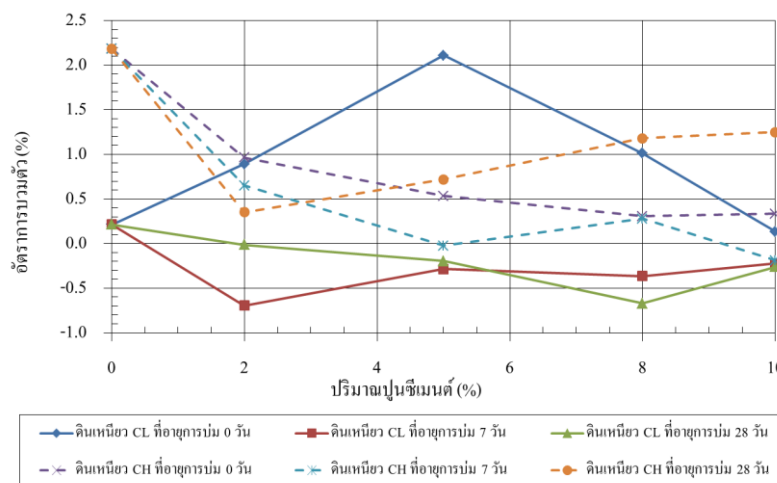
ในการบดอัดดินเหนียวแต่ละประเภท สำหรับอัตราส่วนผสมระหว่างดินและปูนซีเมนต์ที่ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งค่าทั้งสองจะนำไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระต่อไป

4.1.2 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราการบวมตัว ดัชนีของการอัดตัว (C_c) ดัชนีของการบวมตัว (C_s) แรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) โดยใช้ น้ำ ในแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างดินและปูนซีเมนต์ที่ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.3 ถึงภาพที่ 4.8

4.2 ค่าอัตราการบวมตัว

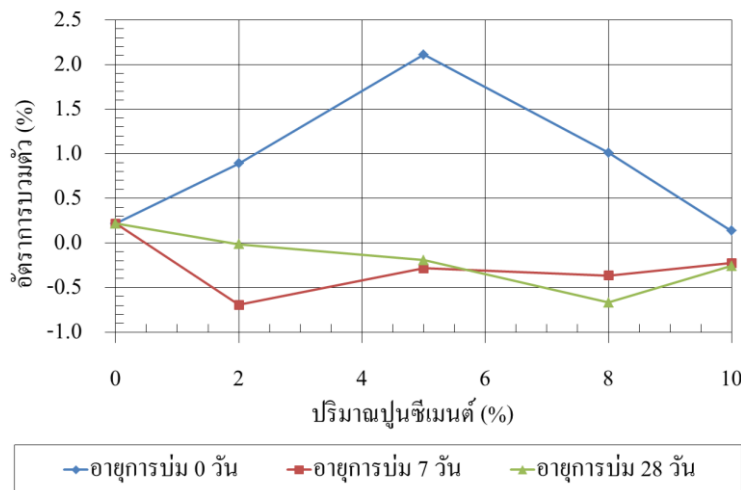
ค่าอัตราการบวมตัวในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ พิจารณาจากค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดิน ในการรับน้ำหนักที่ 25 kPa หากค่าอัตราการบวมตัวมีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างดินมีการทรุดตัวลงเมื่อรับน้ำหนักที่ 25 kPa แต่ค่าอัตราการบวมตัวมีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างดินมีการบวมตัวเมื่อรับน้ำหนักที่ 25 kPa ซึ่งค่าอัตราการบวมตัวที่ได้จากการทดสอบนำไปใช้ในการอธิบายว่า เมื่อดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ แล้วสัมผัสน้ำมีโอกาสเกิดการบวมตัวขึ้นหรือไม่



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%)

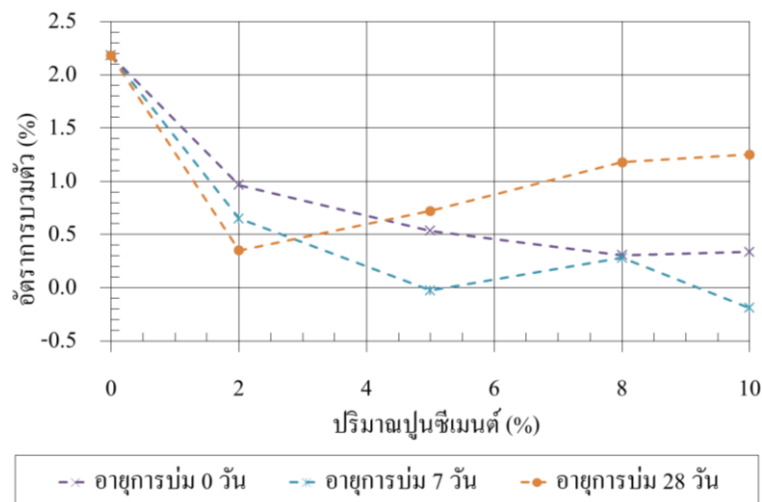
โดยจากการทดสอบสามารถนำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%) ดังแสดงในภาพที่ 4.3 โดยตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ของตัวอย่างดินเหนียว CH มีอัตราการบวมตัวมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CL เนื่องจากดินเหนียว CH เป็นดินเหนียวกลุ่ม High plasticity ซึ่งมีค่า Liquid limit สูงกว่าดินเหนียว CL ซึ่งเป็น

ดินเหนียวกลุ่ม Low plasticity ทำให้มีความไวต่อน้ำ (Sensitive) มากกว่าดินเหนียวกลุ่ม High plasticity



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL

หากพิจารณาดินเหนียว CL (ภาพที่ 4.4) ที่อายุการบ่ม 0 วัน เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าอัตราการบวมตัวมีค่ามากขึ้น แต่หากมีปริมาณซีเมนต์มากกว่า 5% ค่าอัตราการบวมตัวมีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นมาจากสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน รวมไปถึงสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกที่ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5% ทำให้ดินเหนียว CL มีค่าอัตราการบวมตัวมากขึ้นเมื่อเทียบกับดินเหนียว CL ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ แต่หากมีปริมาณซีเมนต์มากกว่า 5% สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกช่วยให้ค่าอัตราการบวมตัวมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ที่ 5% เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าอัตราการบวมตัวมีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ค่าอัตราการบวมตัวของดินเหนียว CL ลดลง โดยช่วงอัตราการบวมตัวของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราการบวมตัวน้อยกว่าดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงให้เห็นว่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นทำให้ค่าอัตราการบวมตัวมีค่าลดลง

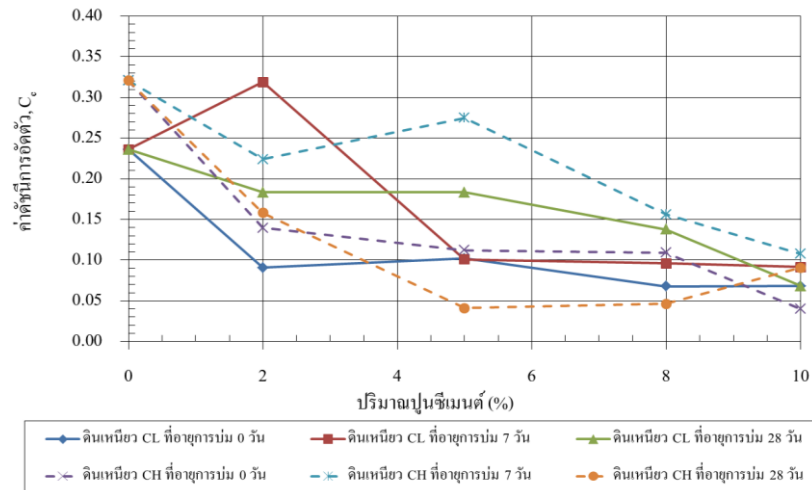


ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH

สำหรับดินเหนียว CH (ภาพที่ 4.5) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าอัตราการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ช่วงอัตราการบวมตัวของดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่เมื่อปริมาณซีเมนต์มากกว่า 2% ค่าอัตรา การบวมตัวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกนำมาใช้ในการทดสอบมีลักษณะที่แตกต่างกัน ช่วงของค่าอัตราการบวมตัวน้อยกว่าดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตรา การบวมตัวน้อยกว่าดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 และ 7 วัน ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่า แม้ว่าอายุการบ่มมากและปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น ไม่ช่วยให้ค่าอัตราการบวมตัวลดลงมากนักในดินเหนียว CH

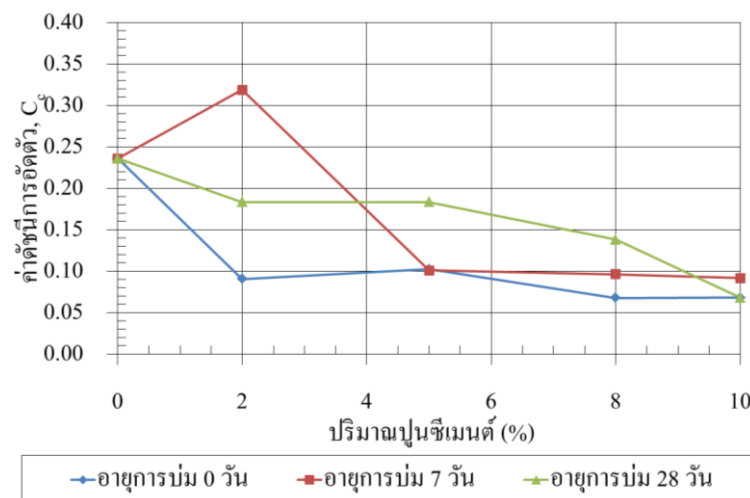
4.3 ค่าดัชนีของการอัดตัว

ค่าดัชนีของการอัดตัว (Compressibility index, C_c) ในการทดสอบการอัดตัวคาน้ำ บ่งบอกว่า เมื่อนำดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไปใช้ในการก่อสร้างแล้ว มีโอกาสเกิดการทรุดตัวมากหรือน้อยเพียงใด ซึ่งจากการทดสอบสามารถนำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (C_c) และปริมาณซีเมนต์ (%)



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (Cc) และปริมาณซีเมนต์ (%)

จากภาพที่ 4.6 พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ตัวอย่างดินเหนียว CH มีดัชนีของการอัดตัวมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CL เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินเหนียว CH จะมีการทรุดตัวที่มากเมื่อมีน้ำหนักมากกดทับ

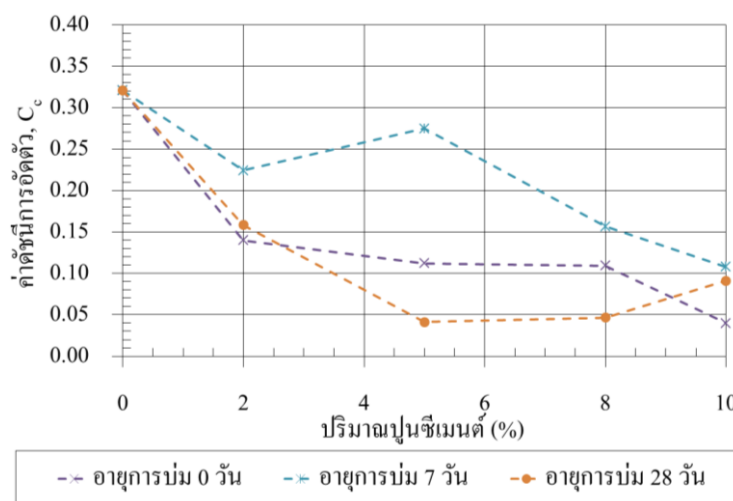


ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (Cc) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL

สำหรับดินเหนียว CL (ภาพที่ 4.7) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการอัดตัวมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่า สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CL มีค่าลดลง และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการอัดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์ไม่เกินกว่า 5% แต่เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% ค่า

ดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่ามากกว่าดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งบ่งบอกที่ปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มที่มากไม่ช่วยให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CL มีค่าลดลง

นอกจากนี้ช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน มีค่ามากกว่าดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของอายุการบ่มไม่ช่วยให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CL มีค่าลดลง



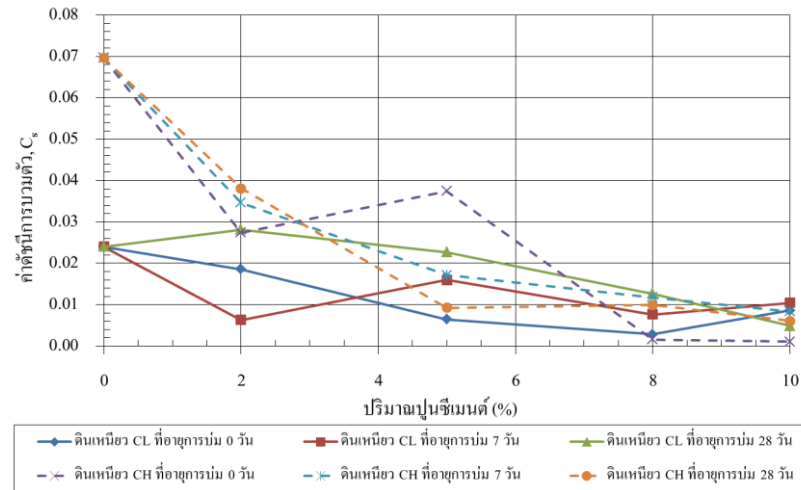
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (C_c) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH

สำหรับดินเหนียว CH (ภาพที่ 4.8) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการอัดตัวมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเห็นได้ว่า สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CH มีค่าลดลง แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าดัชนีของการอัดตัวมากที่สุด และดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าดัชนีของการอัดตัวน้อยที่สุด สาเหตุที่เกิดขึ้นอาจเป็นเพราะสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกันจึงอาจทำให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่ามากกว่าดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 วัน และสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CH มีค่าลดลง เมื่อมีอายุการบ่มที่มาก

4.4 ค่าดัชนีของการบวมตัว

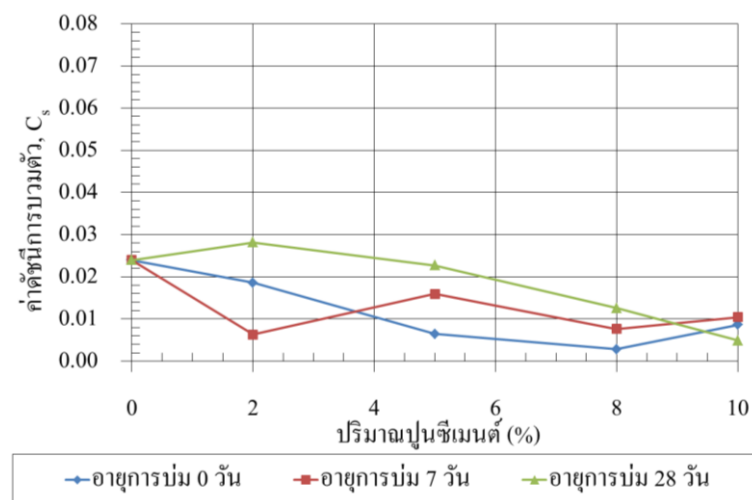
ค่าดัชนีของการบวมตัว (Swelling index, C_s) จากการทดสอบการอัดตัวคายนํ้า บ่งบอกว่า เมื่อนำดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไปใช้ในการก่อสร้างแล้ว มีโอกาสเกิดการคืบตัว

มากหรือน้อยเพียงใด โดยจากการทดสอบสามารถนำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_s) และปริมาณซีเมนต์ (%)



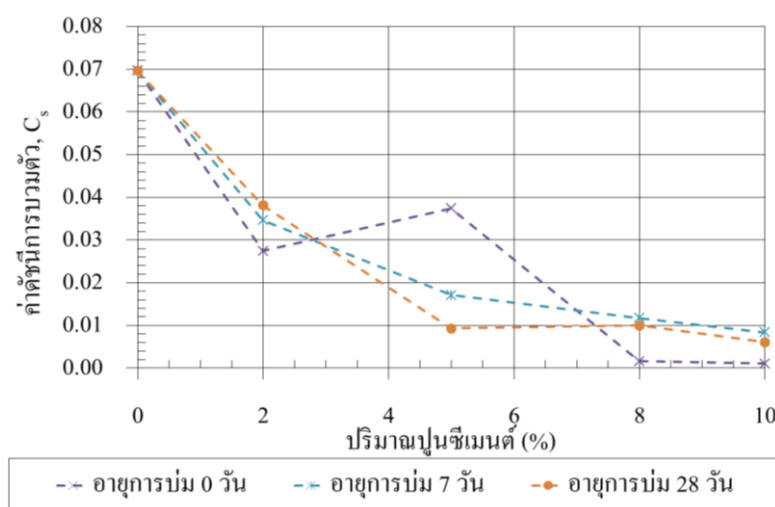
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_s) และปริมาณซีเมนต์ (%)

จากภาพที่ 4.9 พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ตัวอย่างดินเหนียว CH มีดัชนีของการอัดตัวมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CL เนื่องจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%) พบว่า ตัวอย่างดินเหนียว CH มีอัตราการบวมตัวมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CL ซึ่งบ่งบอกว่า คันดินที่ถูกสร้างโดยดินเหนียว CH มีโอกาสเกิดการคืบตัวได้มากกว่าคันดินที่ถูกสร้างโดยดินเหนียว CL เมื่อผสมปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5% แต่เมื่อผสมปูนซีเมนต์มากกว่า 5% คันดินที่ถูกสร้างโดยดินเหนียว CH มีโอกาสเกิดการคืบตัวได้ใกล้เคียงกับคันดินที่ถูกสร้างโดยดินเหนียว CL



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL

สำหรับดินเหนียว CL (ภาพที่ 4.10) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการอัดตัวมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่า สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ค่าดัชนีของการบวมตัวของดินเหนียว CL มีค่าลดลง และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าดัชนีของการอัดตัวมากที่สุด ดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าดัชนีของการอัดตัวน้อยที่สุดในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5% แต่เมื่อปริมาณซีเมนต์เกินกว่า 5% ดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน มีค่าดัชนีของการอัดตัวน้อยที่สุด โดยมีสาเหตุมาจากสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน และสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CH จึงอาจทำให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CL เกิดขึ้น

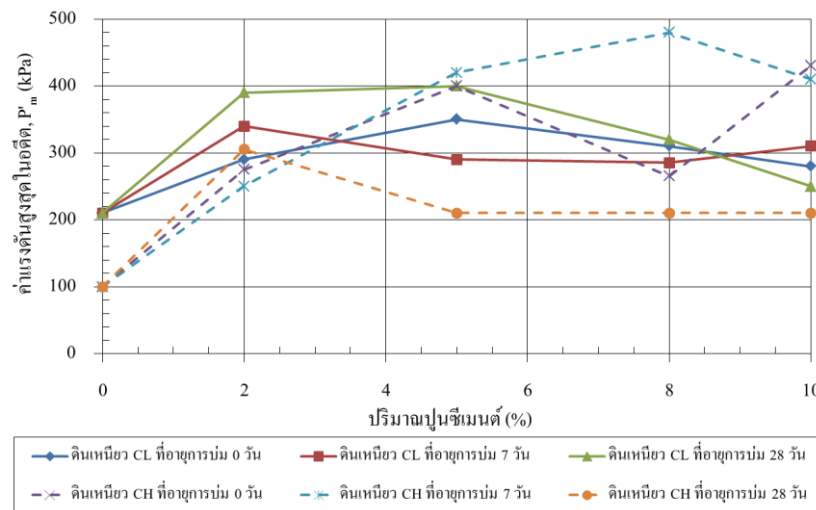


ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH

สำหรับดินเหนียว CH (ภาพที่ 4.11) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการอัดตัวมีแนวโน้มลดลง และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการอัดตัวมีความแตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งเห็นได้ว่า สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ดินเหนียว CH มีค่าดัชนีของการบวมตัวลดลง

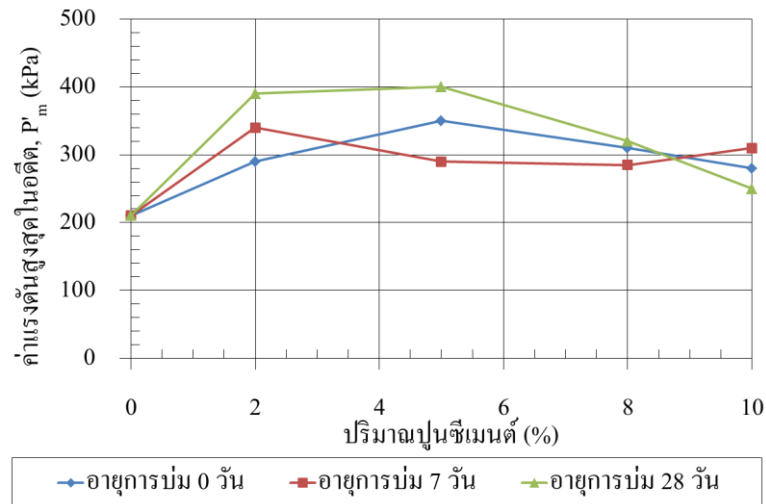
4.5 ค่าแรงดันสูงสุดในอดีต

ค่าแรงดันสูงสุดในอดีต (Maximum past pressure, P'_m) ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ บ่งบอกว่า แรงที่มากระทำต่อคันดินแล้วทำให้เริ่มเกิดการทรุดตัว โดยจากการทดสอบสามารถนำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และปริมาณซีเมนต์ (%)



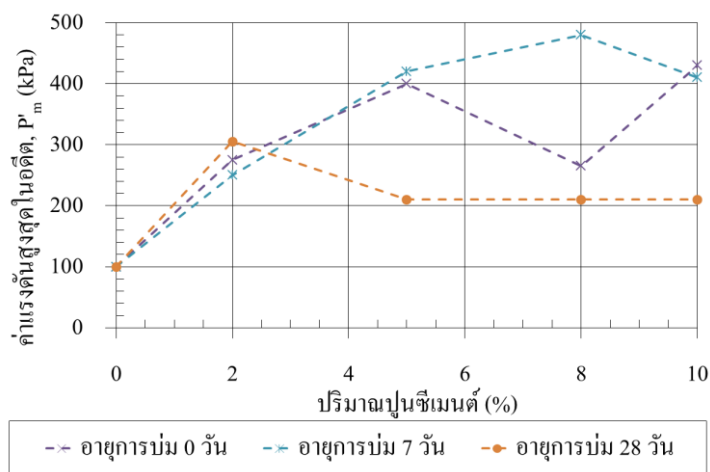
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และปริมาณซีเมนต์ (%)

จากภาพที่ 4.12 พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ตัวอย่างดินเหนียว CL มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CH เนื่องจากดินเหนียว CH เป็นดินเหนียว High plasticity ซึ่งมีค่า L.L. มากกว่าดินเหนียว CL เป็นดินเหนียว Low plasticity และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียว CL สามารถรับแรงได้ดีกว่าดินเหนียว CH ซึ่งดินเหนียว CL ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตเท่ากับ 200 kPa หากเมื่อผสมปูนซีเมนต์ดินเหนียว CL มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมากกว่า 300 kPa และดินเหนียว CH ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตเท่ากับ 100 kPa หากเมื่อผสมปูนซีเมนต์ดินเหนียว CH มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมากกว่า 250 kPa



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL

ดินเหนียว CL (ภาพที่ 4.13) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่ามีปริมาณปูนซีเมนต์มาก ก็ไม่ช่วยให้ดินเหนียว CL มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีสาเหตุมาจากมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากเกินไป จึงทำให้ดินเหนียว CL มีคุณสมบัติแข็ง แต่เปราะ และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ามากที่สุด และค่าแรงดันสูงสุดในอดีตของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าน้อยที่สุดในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์ไม่เกินกว่า 8% แต่เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 8% ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่ามากที่สุด และค่าแรงดันสูงสุดในอดีตของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งอาจเป็นเพราะสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน

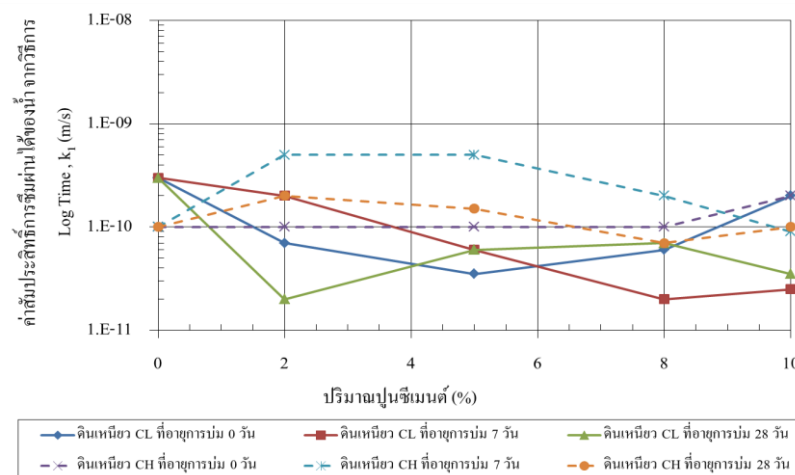


ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH

สำหรับดินเหนียว CH (ภาพที่ 4.14) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่ามีปริมาณปูนซีเมนต์มาก ก็ไม่ช่วยให้ดินเหนียว CH มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีสาเหตุมาจากมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากเกินไป จึงทำให้ดินเหนียว CH มีคุณสมบัติแข็ง แต่เปราะ และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีอายุการบ่ม 28 วัน ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีค่าลดลงและยังมีค่าน้อยกว่าดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 วัน ซึ่งอาจเป็นสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน

4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ

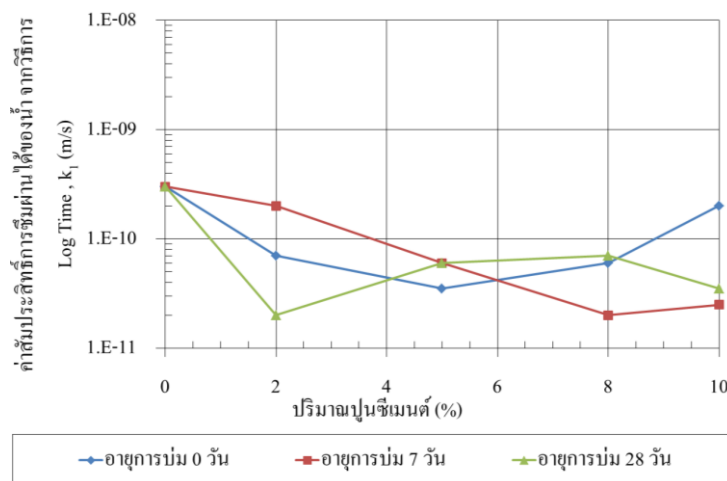
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ (Permeability, k) ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งสามารถหาได้จากวิธีการ Log time และ Square root time โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ (k) บ่งบอกว่า ความเร็วของน้ำที่ไหล โดยจากการทดสอบสามารถนำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability from the log time method, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) และความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability from the square root time method, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%)



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%)

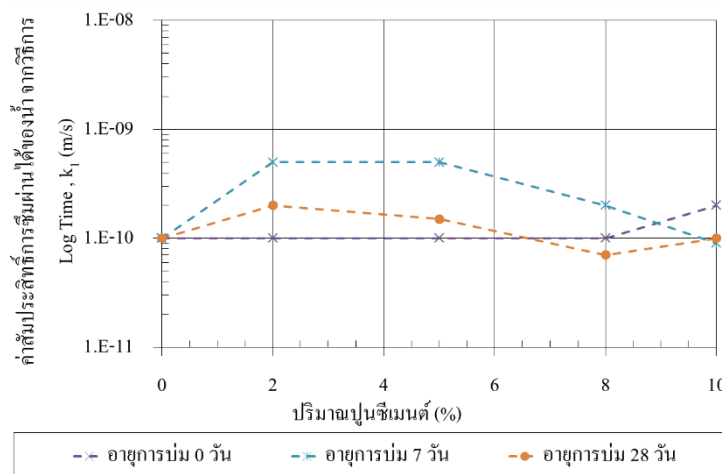
จากภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ตัวอย่าง

ดินเหนียว CL มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CH เนื่องจากดินเหนียว CL มีคุณสมบัติด้านการซึมผ่านได้ของน้ำดีกว่าดินเหนียว CH



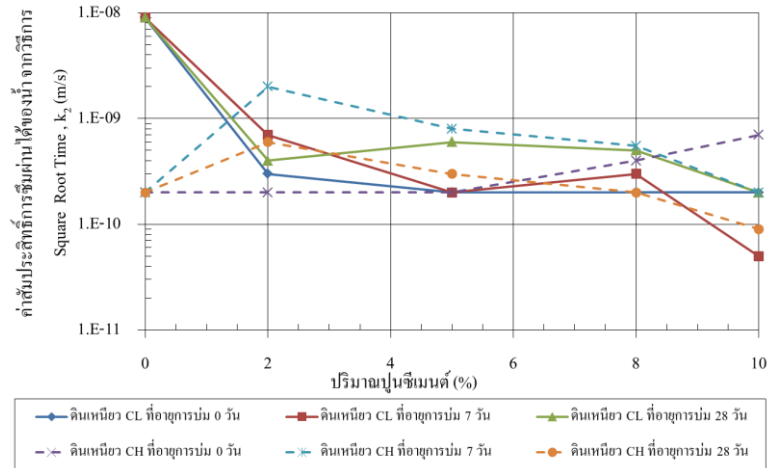
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL

ดินเหนียว CL (ภาพที่ 4.16) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่า การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CL ช่วยให้ความเร็วของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินเหนียว CL มีความเร็วลดลง เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติยึดเกาะช่วยอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลง แม้ว่าในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 8% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งอาจเป็นเพราะสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน



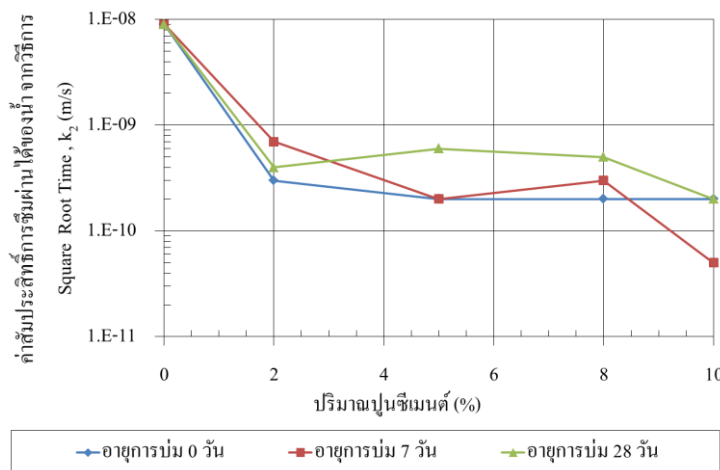
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH

ดินเหนียว CH (ภาพที่ 4.17) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลงในดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับดินเหนียว CH คือ การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CH ช่วยให้ความเร็วของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินเหนียว CH มีความเร็วลดลง เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติยึดเกาะช่วยอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน แต่ดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 วัน เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังเกิดไม่สมบูรณ์และ/หรือสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกันส่งผลให้ความเร็วของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินเหนียว CH มีความเร็วเพิ่มขึ้น และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลง แม้ว่าในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 8% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน มีค่าน้อยที่สุดในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์ไม่เกินกว่า 5% แต่เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน มีค่าน้อยกว่าดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ซึ่งอาจเป็นเพราะสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ the square root time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%)

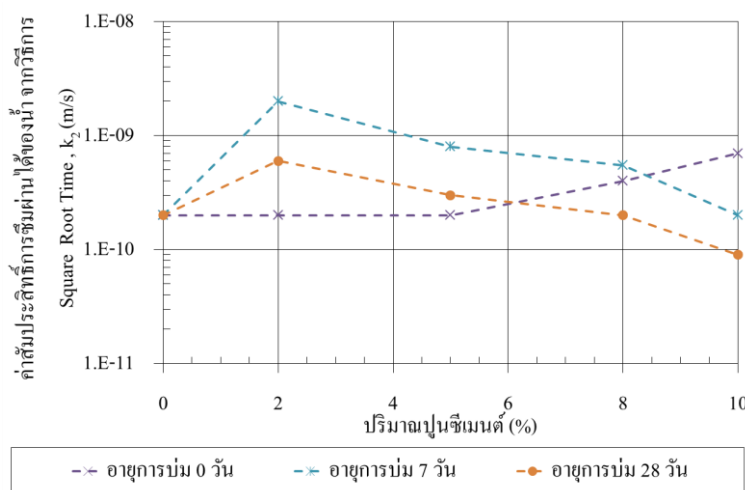
จากภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability from the square root time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ตัวอย่างดินเหนียว CL มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CH เนื่องจากดินเหนียว CL มีคุณสมบัติด้านการซึมผ่านได้ของน้ำดีกว่าดินเหนียว CH



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The square root time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL

ดินเหนียว CL (ภาพที่ 4.19) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่า การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CL ช่วยให้ความเร็วของน้ำที่ไหล

ซึมผ่านดินเหนียว CL มีความเร็วลดลง เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติยึดเกาะ ช่วยอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลงในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 8% แม้ว่าในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่า 8% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินเหนียว CL ไม่ปรากฏแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน ซึ่งอาจบ่งบอกได้ว่าการผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CL ที่อัตราส่วนเกินกว่า 8% สามารถทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านดินเหนียว CL ได้



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The square root time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH

ดินเหนียว CH (ภาพที่ 4.20) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลงในดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับดินเหนียว CH คือ การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CH ช่วยให้ความเร็วของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินเหนียว CH มีความเร็วลดลง เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติยึดเกาะช่วยอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน แต่ดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 วัน เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังเกิดไม่สมบูรณ์และ/หรือสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกันส่งผลให้ความเร็วของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินเหนียว CH มีความเร็วเพิ่มขึ้น และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลง แม้ว่าในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 8% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน มีค่าน้อยที่สุดในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์ไม่เกินกว่า 5% แต่เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินเหนียว CL ที่อายุ

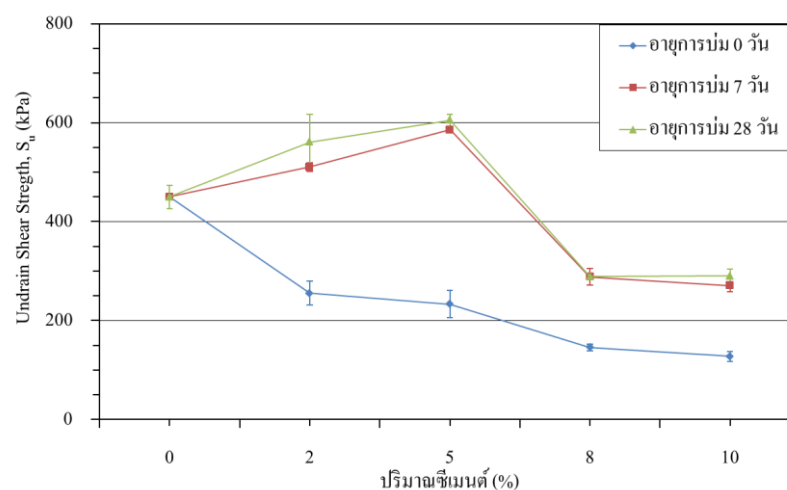
การบ่ม 0 วัน มีค่าน้อยกว่าดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ซึ่งอาจเป็นเพราะสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability from the log time method, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) และความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability from the square root time method, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ทำให้ทราบว่า ดินเหนียวทั้ง 2 ชนิด มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำน้อยกว่า 10^{-8} m/s

จากผลการทดสอบทั้งหมดของการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ทำให้ทราบว่า ดินเหนียว CL ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 5% เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ทำให้ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตสูงและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำน้อยกว่า 10^{-8} m/s ถึงแม้ว่าอัตราการบ่มตัวในช่วงอายุการบ่มแรก (อายุการบ่ม 0 วัน) ทำให้เกิดการบวมตัวมากเกินไปก็ตาม และดินเหนียว CH ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 8% เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ทำให้ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตสูง อัตราการบวมตัวในช่วงอายุการบ่มแรกที่น้อย และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำน้อยกว่า 10^{-8} m/s ซึ่งน้อยกว่าค่าแนะนำการนำดินไปใช้ในสร้างส่วนที่ทับน้ำ (วรากร ไม้เรียง, 2542)

4.7 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ

การทดสอบการอัดแบบอิสระ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเชื่อมั่นแน่น (S_u) ในแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างดินและสารเชื่อมประสานที่ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3 ถึงตารางที่ 4.6 และมีลักษณะดังภาพที่ 4.21 ถึงภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrain shear strength, S_u (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL แบบไม่แช่น้ำ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL แบบไม่แช่น้ำ

ปริมาณซีเมนต์ (%)	Undrained shear strength, S_u								
	ค่าเฉลี่ย (kPa)			ค่าเบี่ยงเบน, S.D. (kPa)			Relative standard deviation, R.S.D. (%)		
	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน
0	449.84			23.45			5.21		
2	255.45	510.18	560.76	24.58	9.09	56.55	9.62	1.78	10.08
5	233.41	585.33	604.84	27.81	3.75	12.50	11.91	0.64	2.07
8	145.61	287.97	289.05	6.35	16.66	7.22	4.36	5.79	2.50
10	127.54	270.62	290.50	10.30	12.93	13.91	8.08	4.78	4.54

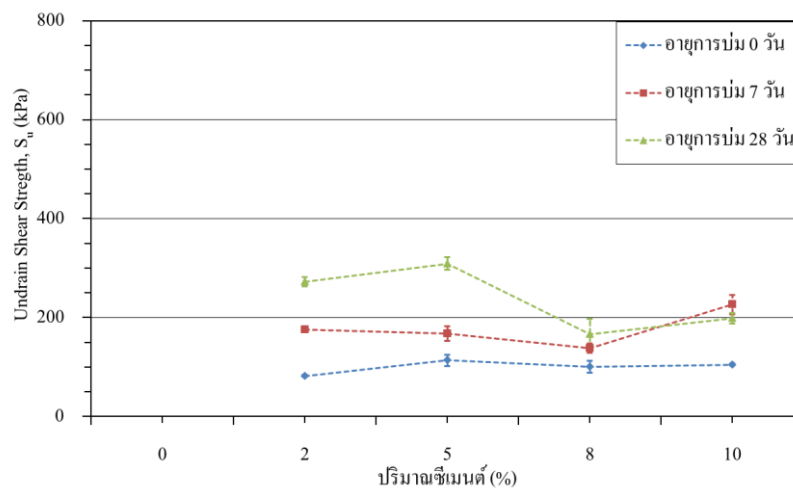
จากตารางที่ 4.3 และจากภาพที่ 4.21 พบว่า ในการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoak) เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มลดลงในช่วงอายุการบ่ม 0 วัน ซึ่งบ่งบอกว่า ในช่วงอายุการบ่ม 0 วัน กำลังของดินเหนียว CL มีค่าลดลง ถึงแม้ว่าปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังไม่สมบูรณ์ และกำลังของดินเหนียว CL ในช่วงอายุการบ่ม 0 วัน ขึ้นอยู่กับค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเหนียว CL ซึ่งเห็นได้จากภาพที่ 4-3 เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเหนียว CL ลดลง แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเกินกว่า 7 วัน ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5% แต่หากมีปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่า 5% ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มลดลง โดยแสดงให้เห็นว่า การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CL ช่วยให้ดินรับกำลังได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้กำลังของดินเหนียว CL มีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อปริมาณปูนเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณ ๑ หนึ่ง การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CL ไม่ช่วยให้ดินเหนียว CL รับกำลังได้มากขึ้น แต่กลับได้ค่ากำลังของดินเหนียว CL ลดลง เนื่องจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นซึ่ง ความแข็งแรงอาจมีความแข็งแรงน้อย เพราะดินเหนียว CL มีสภาพเป็นกรดซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยา ไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นผลให้ค่ากำลังของดินเหนียว CL ลดลง และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออายุการบ่มของสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์มากขึ้น ส่งผลให้ดินเหนียว CL มีกำลังมากขึ้น ถึงแม้ว่าค่า Undrained shear strength ที่อายุการบ่ม 28 วัน

เพิ่มขึ้นแต่เพิ่มในค่าที่น้อย เนื่องจากดินเหนียว CL มีสภาพเป็นกรดซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นผลให้การพัฒนากำลังของดินเหนียว CL ลดลง

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL แบบแช่น้ำ

ปริมาณซีเมนต์ (%)	Undrained shear strength, S_u								
	ค่าเฉลี่ย (kPa)			ค่าเบี่ยงเบน, S.D. (kPa)			Relative standard deviation, R.S.D. (%)		
	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน
0	N/A			N/A			N/A		
2	82.38	175.96	279.66	1.88	4.38	9.03	2.28	2.49	3.31
5	113.45	167.29	309.28	11.69	14.56	12.66	10.30	8.70	4.09
8	100.81	138.02	165.84	12.07	9.84	31.36	11.97	7.13	18.91
10	105.14	226.18	198.36	2.17	19.88	10.34	2.06	8.79	5.21

หมายเหตุ: N/A คือ ตัวอย่างดินสลายตัว ไม่สามารถคงรูปเป็นแท่งอยู่ในในขณะแช่น้ำ จึงไม่สามารถนำมาทดสอบได้



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained shear strength, S_u (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL แบบแช่น้ำ

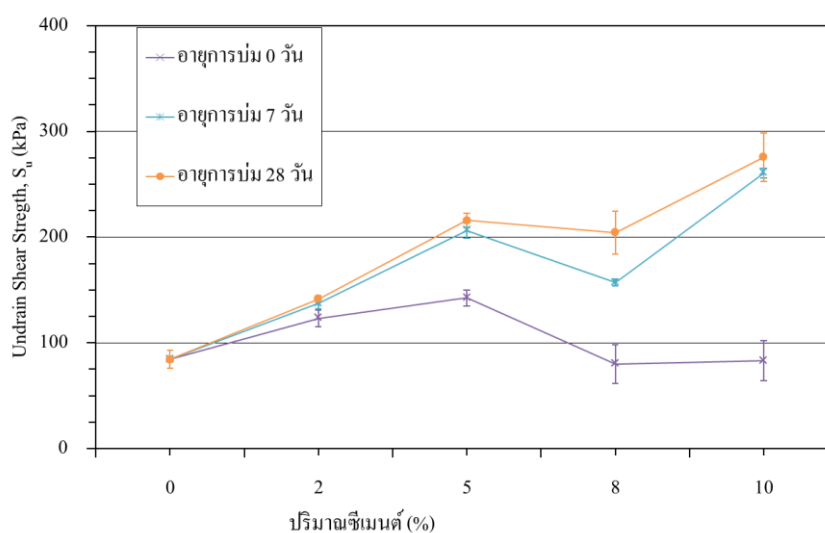
จากตารางที่ 4.4 และจากภาพที่ 4.22 พบว่า ในการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soak) ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ 0% ดินเหนียว CL ไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ เนื่องจากไม่มีสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ในการช่วยยึดเกาะอนุภาคดินเหนียว แต่เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่า 2% ดินเหนียว CL สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ โดยเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มคงที่ในช่วงอายุการบ่ม 0 วัน มีค่าประมาณ 100 kPa ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ช่วยยึดเกาะอนุภาคดินเหนียว แต่ไม่ช่วยให้กำลังของดินเหนียว CL เพิ่มขึ้น โดยอาจเป็นเพราะน้ำที่ซึมลงดินเหนียว CL ทำให้แรงเชื่อมแน่นของอนุภาคของดินเหนียว CL ที่จับกันลดลง แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเกินกว่า 7 วัน เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่า Undrained shear strength มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน อาจเป็นเพราะดินเหนียว CL ที่นำมาผสมกับปูนซีเมนต์มีลักษณะที่แตกต่างกัน นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่า 5% ที่อายุ 28 วัน มีค่า Undrained shear strength ลดลง ซึ่งเมื่อปริมาณปูนเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณ ๆ หนึ่ง การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CL ไม่ช่วยให้ดินเหนียว CL รับกำลังได้มากขึ้น แต่กลับได้ค่ากำลังของดินเหนียว CL ลดลง เนื่องจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งความแข็งแรงอาจมีความแข็งแรงน้อย เพราะดินเหนียว CL มีสภาพเป็นกรดซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นผลให้ค่ากำลังของดินเหนียว CL ลดลง และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออายุการบ่มของสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์มากขึ้นส่งผลให้ดินเหนียว CL มีกำลังมากขึ้น ซึ่งบ่งบอกว่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่ากำลังของดินมีค่าเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าค่า Undrained shear strength ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 10% ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าน้อยกว่าดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 10% ที่อายุการบ่ม 7 วัน เนื่องจากดินเหนียว CL มีสภาพเป็นกรดซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นผลให้การพัฒนา กำลังของดินเหนียว CL ลดลง

ค่า Undrained shear strength ที่ได้จากการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoak) มีค่ามากกว่าค่า Undrained shear strength ที่ได้จากการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soak) เนื่องจากมีน้ำที่ไหลซึมเข้าไปในแท่งตัวอย่างทดสอบ ทำให้แรงเชื่อมแน่นของอนุภาคของดินเหนียว CL ลดลง

จากผลการทดสอบ พบว่า ดินเหนียว CL ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 2% เพราะเป็นอัตราส่วนน้อยที่สุดที่ทำให้ดินเหนียวสามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกแช่น้ำ และยังมีกำลังรับแรงเฉือนที่มากเพียงพอต่อการรับน้ำหนัก (มากกว่า 80 kPa)

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH แบบไม่แช่น้ำ

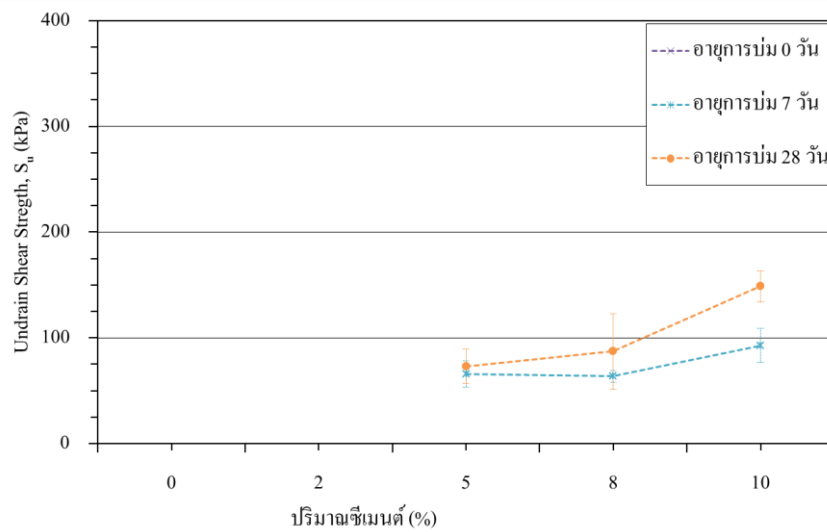
ปริมาณซีเมนต์ (%)	Undrained shear strength, S_u								
	ค่าเฉลี่ย (kPa)			ค่าเบี่ยงเบน, S.D. (kPa)			Relative standard deviation, R.S.D. (%)		
	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน
0	84.19			8.42			10.00		
2	123.21	137.30	141.64	7.99	5.01	3.31	6.48	3.65	2.34
5	142.36	206.31	215.70	7.22	7.38	6.59	5.07	3.58	3.06
8	79.85	156.81	204.50	18.60	3.31	20.29	23.29	2.11	9.92
10	83.10	260.51	275.68	19.28	4.89	22.90	23.20	1.88	8.31



ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained shear strength, S_u (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH แบบไม่แช่น้ำ

จากตารางที่ 4.5 และจากภาพที่ 4.23 พบว่า ในการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoak) เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ค่า Undrained shear strength มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน ในช่วงอายุการบ่ม 0 วัน อาจเป็นเพราะสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังไม่สมบูรณ์ และกำลังของดินเหนียว CH ในช่วงอายุการบ่ม 0 วันขึ้นอยู่กับค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเหนียว CH ซึ่งเห็นได้จากภาพที่ 4-4 คือ เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเหนียว CL มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน แต่เมื่ออายุ การบ่มเพิ่มขึ้น

เกินกว่า 7 วัน ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยแสดงให้เห็นว่า การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CH ช่วยให้ดินเหนียว CH รับกำลังได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้กำลังของดินเหนียว CH มีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออายุการบ่มของสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์มากขึ้นส่งผลให้ดินเหนียว CH มีกำลังมากขึ้น ถึงแม้ว่าค่า Undrained shear strength ที่อายุการบ่ม 28 วัน เพิ่มขึ้นแต่เพิ่มในค่าที่น้อย เนื่องจากดินเหนียว CH มีสภาพเป็นกรดซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นผลให้การพัฒนากำลังของดินเหนียว CH ลดลง



ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained shear strength, S_u (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH แบบแช่น้ำ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH แบบแช่น้ำ

ปริมาณซีเมนต์ (%)	Undrained shear strength, S_u								
	ค่าเฉลี่ย (kPa)			ค่าเบี่ยงเบน, S.D. (kPa)			Relative standard deviation, R.S.D. (%)		
	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน
0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5	N/A	65.76	72.99	N/A	12.70	16.59	N/A	19.31	22.73
8	N/A	63.59	87.08	N/A	5.46	35.46	N/A	8.59	40.72
10	N/A	92.86	148.86	N/A	16.24	14.72	N/A	17.49	9.89

หมายเหตุ: N/A คือ ตัวอย่างดินสลายตัว ไม่สามารถคงรูปเป็นแท่งอยู่ในขณะที่แช่น้ำ จึงไม่สามารถนำมาทดสอบได้

จากตารางที่ 4.6 และจากภาพที่ 4.24 พบว่า ในการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soak) ดินเหนียว CH ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ ถึงแม้ว่าดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ก็ยังไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ เนื่องจากไม่มีสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ในการช่วยยึดเกาะอนุภาคดินเหนียว รวมถึงดินเหนียว CH มีอัตราการบวมตัวที่มาก แต่เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่า 5% ดินเหนียว CH สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ โดยเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกว่า การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CH ช่วยให้ดินเหนียว CH รับกำลังได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้กำลังของดินเหนียว CH มีค่าเพิ่มมากขึ้น และดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 วัน ดินเหนียว CH ไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ ถึงแม้ว่าดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ก็ยังไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ เนื่องจากไม่มีสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ในการช่วยยึดเกาะอนุภาคดินเหนียว รวมถึงดินเหนียว CH มีอัตราการบวมตัวที่มาก แต่เมื่อดินเหนียว CH ที่อายุเกินกว่า 7 วัน สามารถคงสภาพอยู่ได้ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออายุการบ่มของสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์มากขึ้นส่งผลให้ดินเหนียว CH มีกำลังมากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้กำลังของดินเหนียว CH มีค่าเพิ่มมากขึ้น

ค่า Undrained shear strength ที่ได้จากการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoak) มีค่ามากกว่าค่า Undrained shear strength ที่ได้จากการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soak) เนื่องจากมีน้ำที่ไหลซึมเข้าไปในแท่งตัวอย่างทดสอบ ทำให้แรงเชื่อมแน่นของอนุภาคของดินเหนียว CH ลดลง

จากผลการทดสอบ พบว่า ดินเหนียว CH ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 5% เพราะ เป็นอัตราส่วนน้อยที่สุดที่ทำให้ดินเหนียวสามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกแช่น้ำ และยังมีกำลังรับแรงเฉือนที่มากเพียงพอต่อการรับน้ำหนัก (มากกว่า 60 kPa)

ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL และ CH ที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติของดินเหนียว CL ที่ได้จากการทดสอบ

ชื่อ	คุณสมบัติของดินเหนียว CL							
	อัตราความตัว (%)	ค่าดัชนีการอัดตัว, C_c	ค่าดัชนีการคายตัว, C_s	ค่าแรงดันสูงสุดในอดีต, P'_m (kPa)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำที่คำนวณจากวิธี Log time method (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำที่คำนวณจากวิธี Square root time method (m/s)	Unsoaked Undrained shear strength, S_u (kPa)	Soaked Undrained shear strength, S_u (kPa)
CL-C00	0.215	0.236	0.024	210	3.0×10^{-10}	9.0×10^{-9}	449.84	N/A
CL-C02-D00	0.890	0.091	0.019	290	7.0×10^{-10}	3.0×10^{-10}	255.45	82.38
CL-C02-D07	-0.695	0.319	0.006	340	2.0×10^{-10}	7.0×10^{-10}	510.18	175.96
CL-C02-D28	-0.015	0.183	0.028	390	2.0×10^{-11}	4.0×10^{-10}	560.76	272.43
CL-C05-D00	2.110	0.102	0.006	350	3.5×10^{-11}	2.0×10^{-10}	233.41	113.45
CL-C05-D07	-0.285	0.101	0.016	290	6.0×10^{-11}	2.0×10^{-10}	585.33	167.29
CL-C05-D28	-0.195	0.183	0.023	400	6.0×10^{-11}	6.0×10^{-10}	604.84	309.28
CL-C08-D00	1.010	0.068	0.003	310	6.0×10^{-11}	2.0×10^{-10}	145.61	100.81
CL-C08-D07	-0.365	0.096	0.008	285	2.0×10^{-11}	3.0×10^{-10}	287.97	138.02
CL-C08-D28	-0.670	0.138	0.013	320	7.0×10^{-11}	5.0×10^{-10}	289.05	179.93
CL-C10-D00	0.135	0.068	0.009	280	2.0×10^{-10}	2.0×10^{-10}	127.54	105.14
CL-C10-D07	-0.225	0.092	0.010	310	2.5×10^{-11}	5.0×10^{-11}	270.62	226.18
CL-C10-D28	-0.260	0.068	0.005	250	3.5×10^{-11}	2.0×10^{-10}	290.50	198.36

ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติของดินเหนียว CH ที่ได้จากการทดสอบ

ชื่อ	อัตราความรวมตัว (%)	ค่าดัชนีการอัดตัว, C_c	ค่าดัชนีการคายตัว, C_s	ค่าแรงดันสูงสุดในอดีต, P'_m (kPa)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำที่คำนวณจากวิธี Log time method (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำที่คำนวณจากวิธี Square root time method (m/s)	Unsoaked Undrained shear strength, S_u (kPa)	Soaked Undrained shear strength, S_u (kPa)
CH-C00	2.180	0.321	0.070	100	1.0×10^{-10}	2.0×10^{-10}	84.19	N/A
CH-C02-D00	0.965	0.140	0.027	275	1.0×10^{-10}	4.0×10^{-10}	123.21	N/A
CH-C02-D07	0.650	0.224	0.035	250	5.0×10^{-10}	2.0×10^{-9}	137.30	N/A
CH-C02-D28	0.350	0.158	0.038	305	2.0×10^{-10}	6.0×10^{-10}	141.64	N/A
CH-C05-D00	0.535	0.112	0.037	400	2.0×10^{-10}	7.0×10^{-10}	142.36	N/A
CH-C05-D07	-0.025	0.275	0.017	420	5.0×10^{-10}	8.0×10^{-10}	206.31	65.76
CH-C05-D28	0.720	0.041	0.009	210	1.5×10^{-10}	3.0×10^{-10}	215.70	72.99
CH-C08-D00	0.305	0.109	0.002	265	3.0×10^{-10}	5.5×10^{-10}	79.85	N/A
CH-C08-D07	0.280	0.156	0.012	480	2.0×10^{-10}	5.5×10^{-10}	156.81	63.59
CH-C08-D28	1.180	0.047	0.010	210	7.0×10^{-11}	2.0×10^{-10}	204.50	87.08
CH-C10-D00	0.335	0.040	0.001	430	2.0×10^{-11}	5.0×10^{-11}	83.10	N/A
CH-C10-D07	-0.190	0.108	0.008	410	9.0×10^{-11}	2.0×10^{-10}	260.51	92.86
CH-C10-D28	1.250	0.091	0.006	210	1.0×10^{-10}	9.0×10^{-11}	275.68	148.86

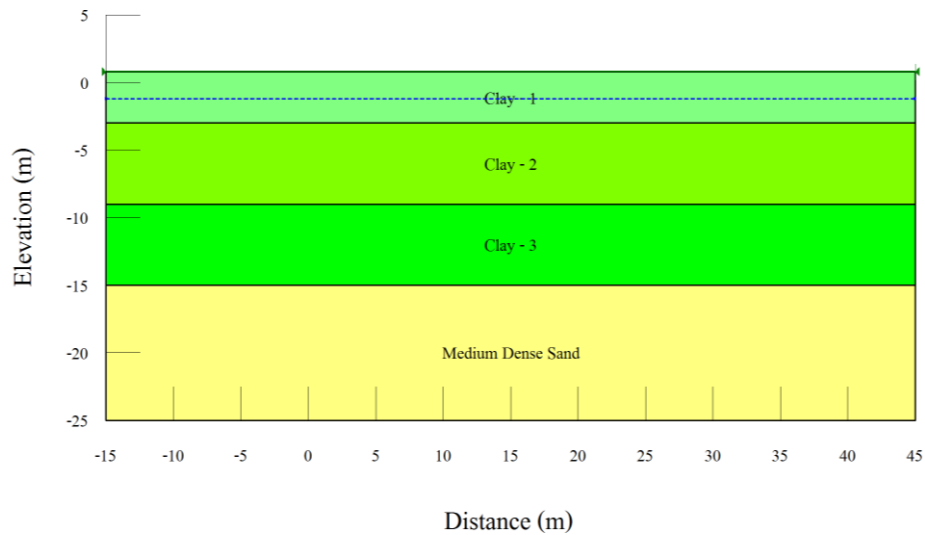
4.8 ผลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมปฐพีในสนาม

จากผลการสำรวจสำรวจลักษณะของชั้นดิน (Borehole, BH) จำนวนทั้งสิ้น 2 หลุม ความลึกประมาณ 21-50 m จากระดับผิวดิน และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในสนาม (Field permeability test, FPT) จำนวนทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง ทำให้ทราบว่าพื้นที่ศึกษามีลักษณะชั้นดินอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ มีข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ของกำลัง (c และ ϕ) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ (k) ความพรุน (n) และค่าดัชนีการเปลี่ยนแปลงมวลดินเมื่อเทียบกับแรง 1 kPa ดังตารางที่ 4.9 และค่าพารามิเตอร์ที่ได้ถูกนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลักษณะชั้นดินมีลักษณะดังภาพที่ 4.25 และ 4.26

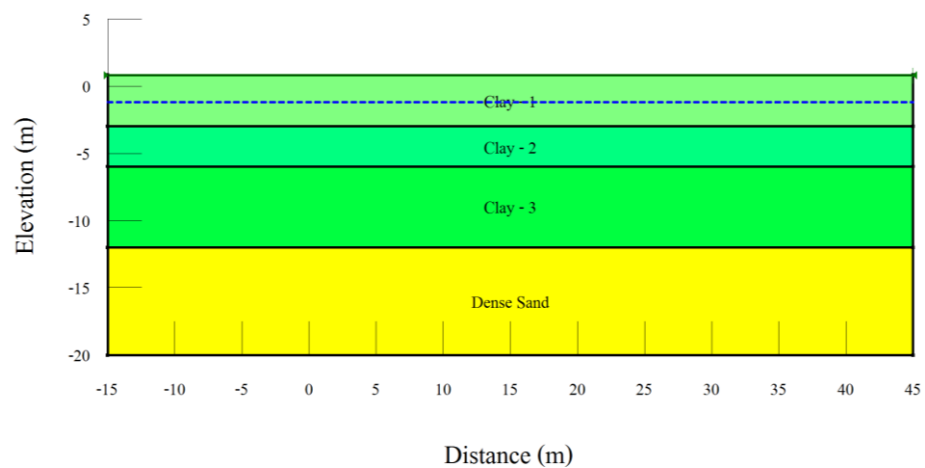
ตารางที่ 4.9 ลักษณะชั้นดินจากการสำรวจ

ชั้นดิน	Unit weight	Cohesion	Friction angle	Hydraulic conductivity		Porosity	
	γ	c	ϕ	k	n	m_v	
	(kN/m ³)	(kPa)	(degree)	(m/s)	(m/day)	(m ³ /m ³)	(m ² /kN)
BH-1							
Clay-1	16.0	15.0	0	1.0×10^{-6}	0.0864	0.697	1.0×10^{-3}
Clay-2	16.6	12.5	0	2.0×10^{-6}	0.1728	0.600	1.0×10^{-3}
Clay-3	16.2	20.0	0	2.0×10^{-6}	0.1728	0.600	1.2×10^{-3}
Medium Dense Sand	18.0	0	33	1.0×10^{-6}	0.0864	0.286	1.0×10^{-5}
BH-2							
Clay-1	16.0	15.0	0	1.0×10^{-6}	0.0864	0.722	1.7×10^{-3}
Clay-2	16.6	10.0	0	5.0×10^{-7}	0.0432	0.600	1.7×10^{-3}
Clay-3	16.5	17.5	0	5.0×10^{-7}	0.0432	0.697	1.8×10^{-3}
Dense Sand	21.0	0	39	1.0×10^{-6}	0.0864	0.286	1.0×10^{-5}

หมายเหตุ: ระดับน้ำใต้ดิน -2.00 m จากระดับผิวดิน



ภาพที่ 4.25 ลักษณะของชั้นดิน BH-1



ภาพที่ 4.26 ลักษณะของชั้นดิน BH-2

จากข้อมูลการสำรวจ แสดงให้เห็นว่า ลักษณะของชั้นดินในพื้นที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 4 ชั้น โดยสามชั้นแรกเป็นดินเหนียวและชั้นสุดท้ายเป็นดินทราย ซึ่งมีคุณสมบัติของแต่ละชั้นและแต่ละหลุมแตกต่างกัน โดยค่ากำลังของดินเหนียวของชั้นดิน BH-1 มากกว่า BH-2 และค่ากำลังของดินทรายของชั้นดิน BH-1 น้อยกว่า BH-2 แต่ BH-1 มีค่าการซึมผ่านมากกว่า BH-2 นอกจากนี้ ความหนาของชั้นดิน BH-1 มากกว่า BH-2

ค่ากำลังของดินประกอบไปด้วย 2 พารามิเตอร์ คือ ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion, c) และค่ามุมเสียดทาน (Friction angle, ϕ) ซึ่งสังเกตได้ว่า ดินเหนียวมีค่าความเชื่อมแน่นเพียงอย่างเดียว เนื่องจากดินเหนียวเป็นดินมวลละเอียด อนุภาคของดินจับกันและกันจึงเกิดเป็นแรงเชื่อมแน่น

และดินทรายมีค่ามุมเสียดทานเพียงอย่างเดียว เพราะว่า ดินทรายเป็นดินมวลหยาบ ซึ่งอนุภาคของดินขัดกันและกัน และอาจเป็นเพราะมีปริมาณของดินมวลละเอียดน้อย จึงทำให้ดินทรายไม่มีความเชื่อมั่น

4.9 ผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ถูกแบ่งออกเป็น 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน ในการศึกษาี้ กำหนดให้ มีวัสดุสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล คือ ดินเหนียว CL ที่ผสมปูนซีเมนต์ 2% มีอายุการบ่ม 0 วัน (CL-C02-D00) เรียกว่า Sea dike-1 และดินเหนียว CH บดอัดที่ผสมปูนซีเมนต์ 5% มีอายุการบ่ม 7 วัน (CH-C05-D07) เรียกว่า Sea dike-2 ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล

ชื่อ	Unit		Hydraulic		Void	Porosity	m_v
	weight		conductivity		ratio		
	γ	S_u	k		e		
(kN/m ³)	(kPa)	(m/s)	(m/day)	(m ³ /m ³)	(m ³ /m ³)	(m ² /kN)	
CL-C02-D00	19.4	82.38	3.0×10^{-10}	2.6×10^{-5}	0.690	0.408	2.1×10^{-5}
CH-C05-D07	18.4	65.76	8.0×10^{-10}	6.9×10^{-5}	0.893	0.472	2.0×10^{-5}

4.9.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดิน

จากการวิเคราะห์แบบจำลองแบบไม่มีทางน้ำได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4-15 ซึ่งทำให้ทราบค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของความลาดคันดินกั้นน้ำทะเล โดยกำหนดให้ มีน้ำหนักคงที่จากพื้นทางและน้ำหนักจรจากยานพาหนะ กระทำบนสันคันดิน 20 kN/m²

จากตารางที่ 4.11 พบว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) บริเวณท้ายน้ำ (ฝั่งแผ่นดิน) ในแต่ละกรณี มีค่าเท่ากันไม่ว่าคันดินกั้นน้ำทะเลอยู่ในสภาพเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ ขณะใช้งาน และระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน เนื่องจากบริเวณท้ายน้ำไม่รับผลกระทบจากระดับน้ำทะเล และระดับน้ำใต้ดิน จึงทำให้อัตราส่วนปลอดภัยมีค่าเท่ากัน และอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณท้ายน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1 มากกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 เพราะว่า ค่ากำลัง (ค่า Cohesion และ Friction angle) ของพื้นที่ BH-2 น้อยกว่าพื้นที่ BH-1

ตารางที่ 4.11 ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของความลาดคั่นดินแบบไม่มีทางน้ำ

คั่นดิน	เหนือน้ำ (ฝั่งทะเล)			ท้ายน้ำ (ฝั่งแผ่นดิน)		
	เมื่อก่อสร้างเสร็จ	ขณะใช้งาน	ระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน	เมื่อก่อสร้างเสร็จ	ขณะใช้งาน	ระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน
			BH-1			
Sea dike-1	3.646	7.596	3.914	3.876	3.876	3.876
Sea dike-2	3.838	7.697	4.130	3.946	3.946	3.946
			BH-2			
Sea dike-1	3.646	7.596	4.817	3.872	3.872	3.872
Sea dike-2	3.838	7.697	5.021	3.943	3.943	3.943

สำหรับค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณเหนือน้ำ (ฝั่งทะเล) โดยขณะใช้งานมีค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณเหนือน้ำมากที่สุด และเมื่อก่อสร้างเสร็จค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณเหนือน้ำน้อยที่สุด ซึ่งมีสาเหตุมาจากผลกระทบจากระดับน้ำทะเลและระดับน้ำใต้ดิน เป็นผลให้ขณะใช้งานมีแรงดันน้ำช่วยผลักดันคั่นดิน ไม่เหมือนกับขณะก่อสร้างเสร็จ และระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหันที่ไม่ใช่แรงดันน้ำช่วยผลักดันคั่นดิน แต่ค่าอัตราส่วนปลอดภัยขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหันมากกว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยขณะก่อสร้างเสร็จ เนื่องจากมีแรงดันน้ำที่ซึมลงไปในคั่นดินช่วยผลักดันคั่นดิน

นอกจากนี้ คั่นดิน Sea dike-2 มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยมากกว่าคั่นดิน Sea dike-1 เพราะว่า คั่นดิน Sea dike-1 (ใช้ดินเหนียว CL ในการก่อสร้าง) มีค่าหน่วยน้ำหนักที่มากกว่าคั่นดิน Sea dike-2 (ใช้ดินเหนียว CH ในการก่อสร้าง) ส่งผลให้พื้นดินในพื้นที่ศึกษารับน้ำหนักคั่นดิน Sea dike-1 มากกว่าคั่นดิน Sea dike-2 ทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลง

รูปแบบคั่นดินกั้นน้ำทะเล (คั่นดินกั้นน้ำทะเลแบบไม่มีทางน้ำ) สามารถนำไปก่อสร้างได้จริง เนื่องจากค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) ในตารางที่ 4.14 มีค่ามากกว่าเกณฑ์ต่ำสุดของอัตราส่วนปลอดภัยของคั่นดิน โดยค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) เมื่อขณะก่อสร้างเสร็จ ขณะใช้งาน และระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหันมีค่า 1.3 1.5 และ 1.2 ตามลำดับ แต่ในสภาพความเป็นจริง เราทำการก่อสร้างคั่นดินโดยใช้ดินในพื้นที่ศึกษา (บ่อยืมดิน) โดยอาจขุดเพื่อให้เป็นทางน้ำหรือแหล่งเก็บกักน้ำในพื้นที่ด้วย ทั้งนี้ต้องขุดให้ห่างจากคั่นดิน เพื่อไม่ให้เกิดการพังทลายของลาดดิน การวิเคราะห์ที่คั่นดิน Sea dike-1 และระยะห่างระหว่างคั่นดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.12 ซึ่งพิจารณาจากค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณท้ายน้ำเมื่อก่อสร้างเสร็จ

ตารางที่ 4.12 ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ที่ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำต่างๆ

ระยะห่าง, x(m)	ค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณท้ายน้ำเมื่อก่อสร้างเสร็จ
BH-1	
3	1.298
4	1.399
5	1.411
BH-2	
5	1.216
6	1.250
7	1.334
8	1.363
9	1.386
10	1.443

จากตารางที่ 4.12 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณท้ายน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ว่า ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่ระยะ 4-5 m และ ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่ระยะ 7-10 m มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยขณะก่อสร้างเสร็จมากกว่า 1.3 บ่งบอกว่า ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเลในช่วงพื้นที่ BH-1 ควรมีระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำไม่น้อยกว่า 4 m และในช่วงพื้นที่ BH-2 ควรมีระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำไม่น้อยกว่า 7 m

ดังนั้น ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเลจริง (คันดินกั้นน้ำทะเลแบบมีทางน้ำ) โดยระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1 ควรมีระยะ 5 m และ ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2 ควรมีระยะ 10 m ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์อีกครั้ง มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของความลาดคั่นดินแบบมีทางน้ำ

ชื่อ	เหนือน้ำ (ฝั่งทะเล)		ท้ายน้ำ (ฝั่งแผ่นดิน)			ตลิ่งของทางน้ำ			
	เมื่อก่อสร้างเสร็จ	ขณะใช้งาน	ระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน	เมื่อก่อสร้างเสร็จ	ขณะใช้งาน	ระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน	เมื่อก่อสร้างเสร็จ	ขณะใช้งาน	ระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน
BH-1									
Sea dike-1	3.646	7.596	4.054	1.411	2.143	2.143	2.069	4.360	4.360
Sea dike-2	3.838	7.697	4.283	1.445	2.222	2.222	2.069	4.360	4.360
BH-2									
Sea dike-1	3.646	7.596	4.895	1.443	2.222	2.222	1.842	3.842	3.842
Sea dike-2	3.838	7.697	5.117	1.463	2.269	2.269	1.842	3.842	3.842

จากตารางที่ 4.13 พบว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัย บริเวณตลิ่งของทางน้ำในแต่ละกรณี มีค่าเท่ากัน เนื่องจากตลิ่งของทางน้ำถูกสร้างในพื้นที่เดียวกัน

ค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณเหนือน้ำ (ฝั่งทะเล) ในแต่ละกรณี คั่นดินที่ Sea dike-1 มีค่ามากกว่าคั่นดิน Sea dike-2 เพราะว่า จากตารางที่ 4.8 ค่า Undrained shear strength (S_u) ของดินเหนียว CL (ใช้ในการก่อสร้าง Sea dike-1) มีค่ามากกว่าดินเหนียว CH (ใช้ในการก่อสร้าง Sea dike-2) เป็นผลให้คั่นดินสามารถรับกำลังได้มาก ซึ่งส่งผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) ของคั่นดินกั้นน้ำทะเล

ค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณท้ายน้ำ (ฝั่งแผ่นดิน) คั่นดิน Sea dike-1 มีค่าน้อยกว่าคั่นดิน Sea dike-2 เนื่องจาก ตารางที่ 4.8 ค่า Unit weight (γ) ของดินเหนียว CL (ใช้ในการก่อสร้าง Sea dike-1) มีค่ามากกว่าดินเหนียว CH (ใช้ในการก่อสร้าง Sea dike-2) เป็นผลให้สภาพพื้นที่รับกำลังมากขึ้น ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) ของคั่นดินกั้นน้ำทะเล

ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) ในตารางที่ 4.14 มีค่ามากกว่าเกณฑ์ต่ำสุดของอัตราส่วนปลอดภัยของคั่นดิน โดยค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) เมื่อขณะก่อสร้างเสร็จ ขณะใช้งาน และระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหันมีค่า 1.3 1.5 และ 1.2 ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) ขณะใช้งานมีค่ามากที่สุดเนื่องจากมีแรงดันน้ำช่วยผลักดันดินบริเวณที่จะเคลื่อนพังไม่ให้เกิดการเสียรูปส่งผลให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) มีค่ามาก และเมื่อระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหันแรงดันน้ำลดลงคั่นดินสามารถเคลื่อนพังได้จึงทำให้ค่าอัตราส่วน

ปลอดภัย (Safety factor) มีค่าลดลง แต่ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) เมื่อขณะก่อสร้างเสร็จมีค่าน้อย เนื่องจากคันดินไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันน้ำคอยช่วยผลักดันบริเวณที่จะเคลื่อนพังไม่ให้เกิดการเสียรูปเป็นผลให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) มีค่าน้อย

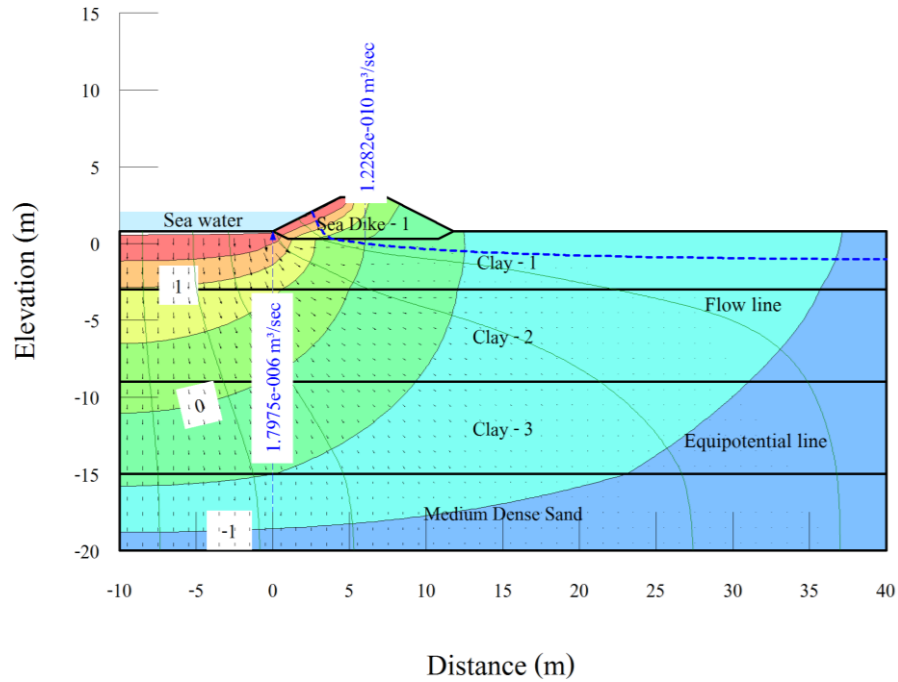
จากข้างต้น เห็นได้ว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) บริเวณเหนือน้ำ (ฝั่งทะเล) มีค่ามากที่สุด และค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) บริเวณเหนือน้ำ (ฝั่งทะเล) มีค่ามากกว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) บริเวณท้ายน้ำ (ฝั่งแผ่นดิน) เนื่องจากค่า Undrained Shear Strength ของคันดินกั้นน้ำทะเลและค่ากำลังของดินในพื้นที่เป็นตัวควบคุมค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) แต่ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) บริเวณตลิ่งของทางน้ำ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นดินเดิมซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเดิมเป็นตัวควบคุมค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor)

4.9.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน

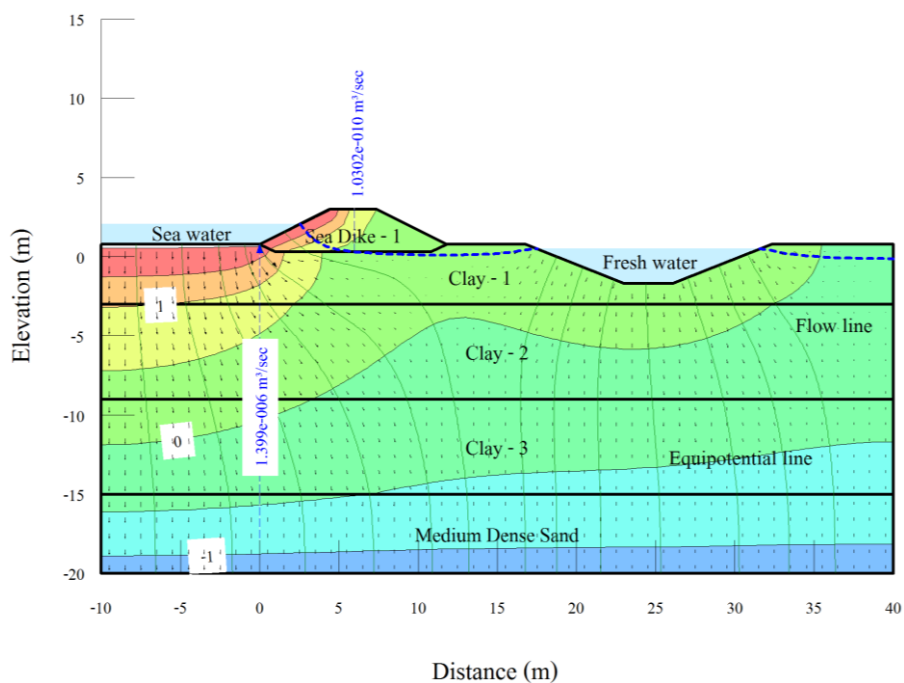
จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งทำให้ทราบปริมาณการไหลซึมและปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดิน ซึ่งมีค่าดังภาพที่ 4.27 ถึง 4.34 และดังตารางที่ 4.14 และ 4.15

ตารางที่ 4.14 ปริมาณการไหลซึม และไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-1

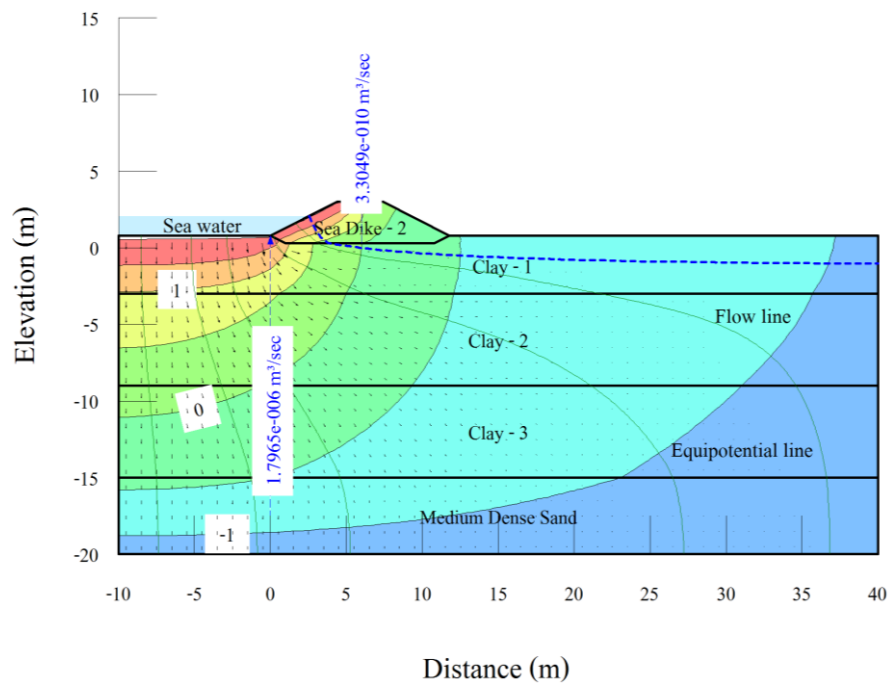
ชื่อ	ปริมาณการไหลซึมผ่านคันดิน ของน้ำทะเล, q ($m^3/s/m$)		ปริมาณการไหลลอดผ่านคันดิน ของน้ำทะเล, q ($m^3/s/m$)	
	แบบไม่มีทางน้ำ	แบบมีทางน้ำ	แบบไม่มีทางน้ำ	แบบมีทางน้ำ
Sea dike-1	1.2282×10^{-10}	1.0302×10^{-10}	1.7975×10^{-6}	1.3990×10^{-6}
Sea dike-2	3.3049×10^{-10}	2.7694×10^{-10}	1.7965×10^{-6}	1.3982×10^{-6}



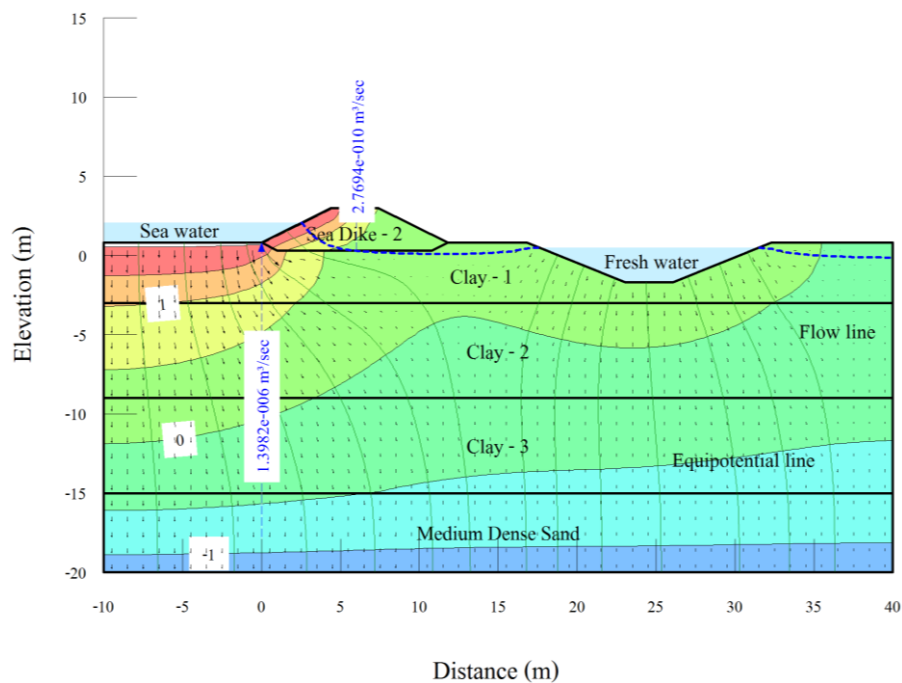
ภาพที่ 4.27 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1



ภาพที่ 4.28 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบมีทางน้ำ ในช่วงพื้นที่ BH-1



ภาพที่ 4.29 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1



ภาพที่ 4.30 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1

จากภาพที่ 4.27 ถึง 4.30 และตารางที่ 4.17 แสดงปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดิน และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-1 พบว่า การวิเคราะห์ปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดิน พบว่า คันดิน Sea dike-1 มีปริมาณการไหลซึมผ่าน คันดินที่น้อยกว่าคันดิน Sea dike-2 เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของ Sea dike-1 (ใช้ดินเหนียว CL ในการก่อสร้าง) มีค่าน้อยกว่า Sea dike-2 (ใช้ดินเหนียว CH ในการก่อสร้าง)

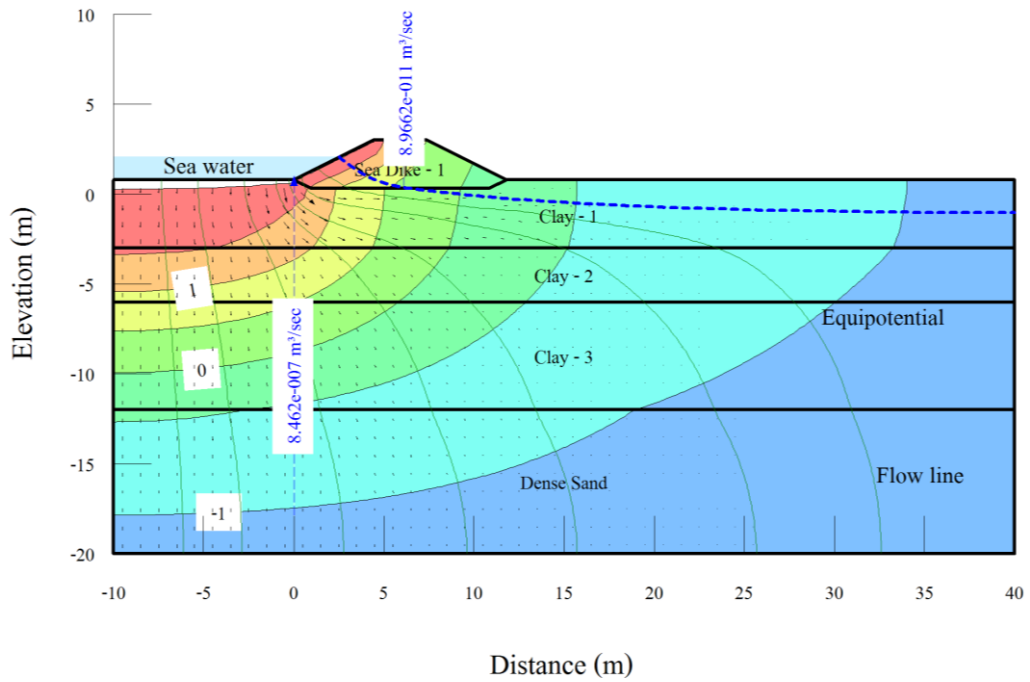
สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-1 มีค่าประมาณ $1-8 \times 10^{-6}$ m³/s/m ไม่ว่าจะคันดิน Sea dike-1 และ Sea dike-2 เนื่องจากปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินแต่ละชั้น

นอกจากนี้ ทั้งปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดิน และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำมีค่าลดลงและน้อยกว่าแบบไม่มีทางน้ำ ซึ่งบ่งบอกว่า เสดน้ำในทางน้ำช่วยลดปริมาณของน้ำทะเลที่ไหลซึมและไหลลอดผ่านคันดิน

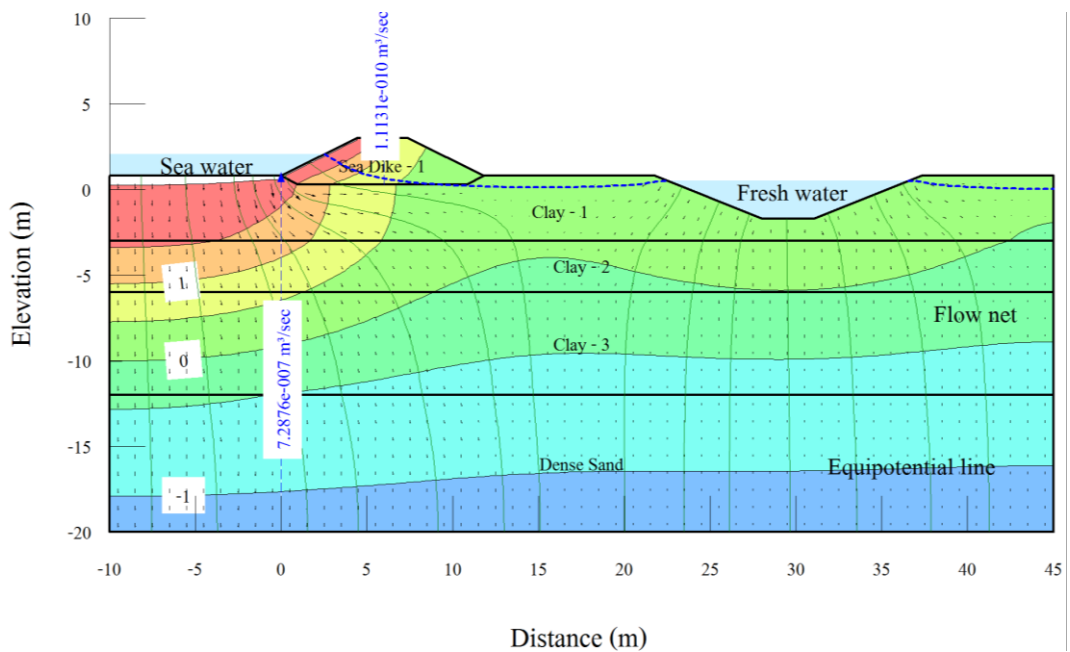
ส่วนปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดิน และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-1 ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.15 ปริมาณการไหลซึม และไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-2

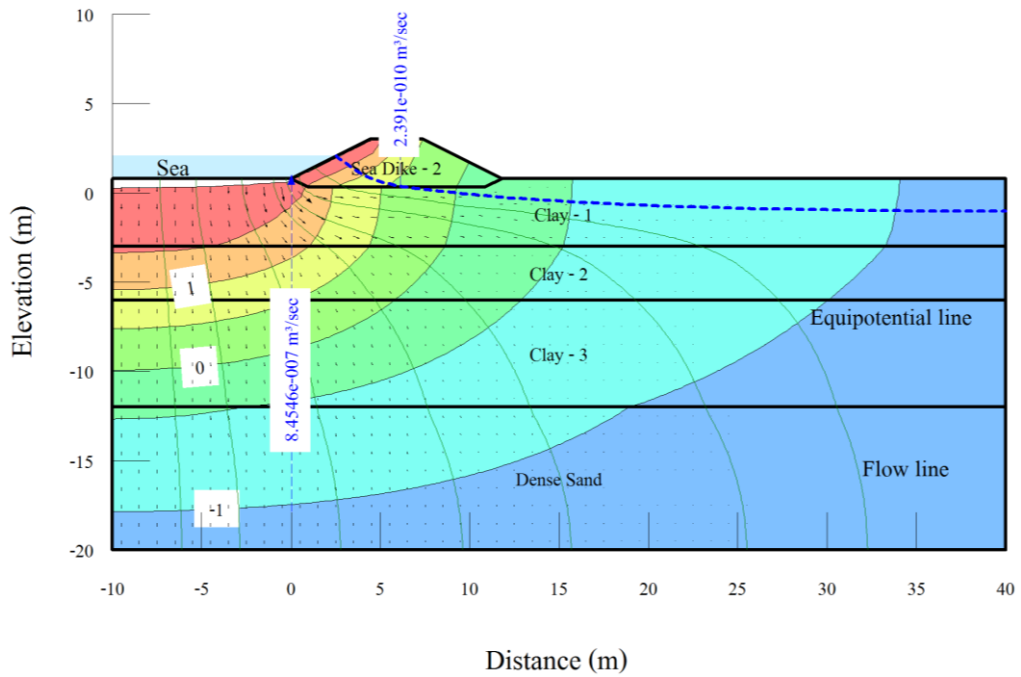
ชื่อ	ปริมาณการไหลซึมผ่านคันดิน ของน้ำทะเล, q (m ³ /s/m)		ปริมาณการไหลลอดผ่านคันดิน ของน้ำทะเล, q (m ³ /s/m)	
	แบบไม่มีทางน้ำ	แบบมีทางน้ำ	แบบไม่มีทางน้ำ	แบบมีทางน้ำ
Sea dike-1	8.9662×10^{-11}	1.1131×10^{-10}	8.4620×10^{-7}	7.2876×10^{-7}
Sea dike-2	2.3910×10^{-10}	2.9690×10^{-10}	8.4546×10^{-7}	7.2810×10^{-7}



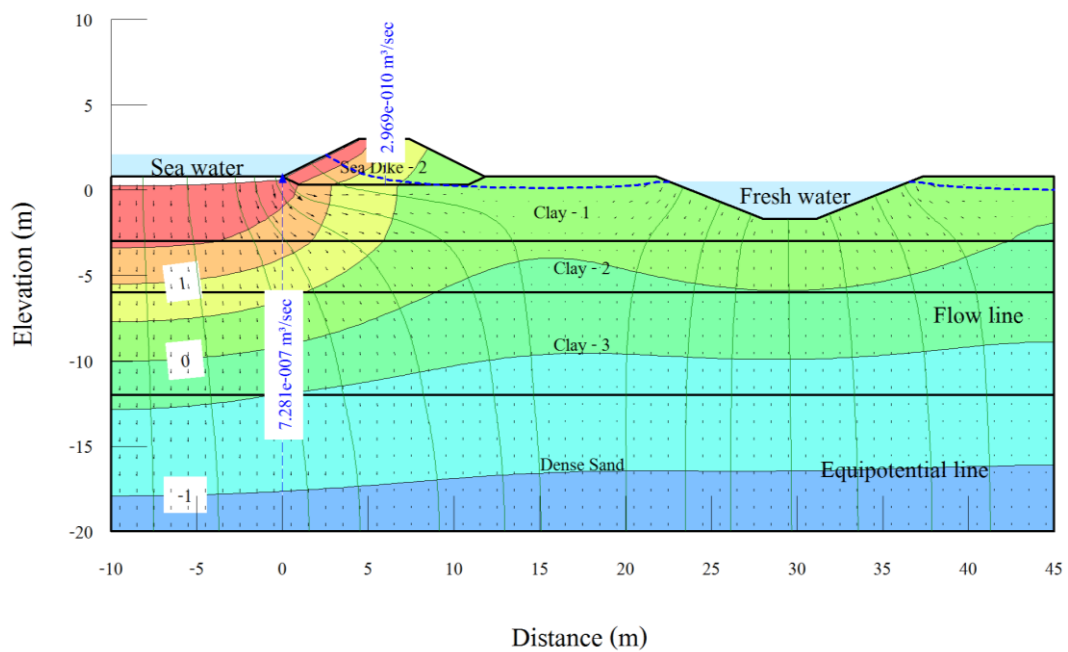
ภาพที่ 4.31 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2



ภาพที่ 4.32 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2



ภาพที่ 4.33 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2



ภาพที่ 4.34 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2

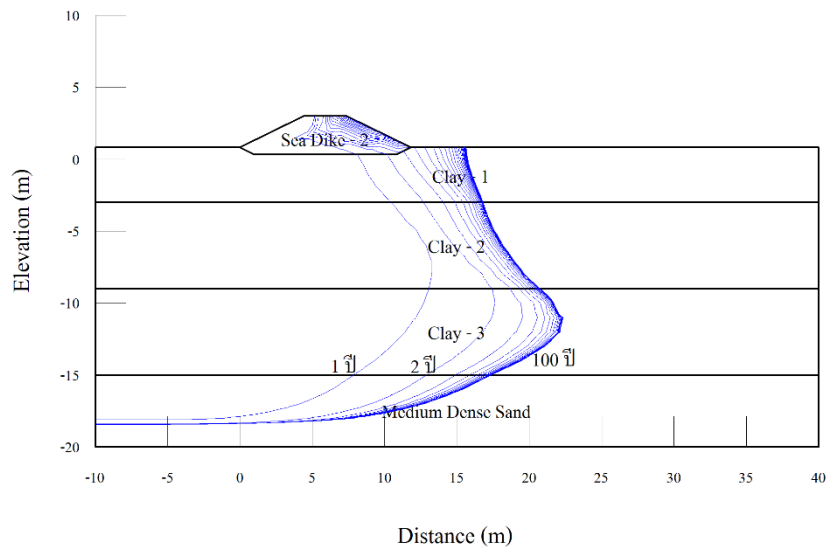
จากภาพที่ 4.31 ถึง 4.34 และตารางที่ 4.18 แสดงปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดิน และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-2 พบว่า การวิเคราะห์ปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดินเช่นเดียวกัน พบว่า คันดิน Sea dike-1 มีปริมาณการไหลซึมผ่านคันดินที่น้อยกว่าคันดิน Sea dike-2 เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของ Sea dike-1 (ใช้ดินเหนียว CL ในการก่อสร้าง) มีค่าน้อยกว่า Sea dike-2 (ใช้ดินเหนียว CH ในการก่อสร้าง) ซึ่งบ่งบอกว่า การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียวทำให้ปริมาณที่น้ำไหลซึมผ่านคันดินได้น้อย ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างคันดิน เพราะคันอันนี้ถูกสร้างเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำไหลเข้าท่วมพื้นที่ชายฝั่ง มีจะถูกนำมาใช้เป็นพื้นที่เกษตรกรรม

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-2 มีค่าประมาณ $8 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ไม่ว่าคันดิน Sea dike-1 และ Sea dike-2 เนื่องจากปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินแต่ละชั้น นอกจากนี้ ปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำมีค่าลดลงและน้อยกว่าแบบไม่มีทางน้ำ ซึ่งบ่งบอกว่า เสดน้ำในทางน้ำช่วยลดปริมาณของน้ำทะเลที่ไหลลอดผ่านคันดิน แต่ปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดินมีค่าเพิ่มขึ้นและมากกว่าแบบไม่มีทางน้ำ ซึ่งอาจเป็นเพราะมีเสตนน้ำจืดจากการขังน้ำไว้ในทางน้ำทำให้ลดปริมาณของน้ำทะเลที่ไหลลอดผ่านคันดิน น้ำทะเลจึงไหลซึมผ่านคันดินได้มากกว่าไหลลอดผ่านคันดิน

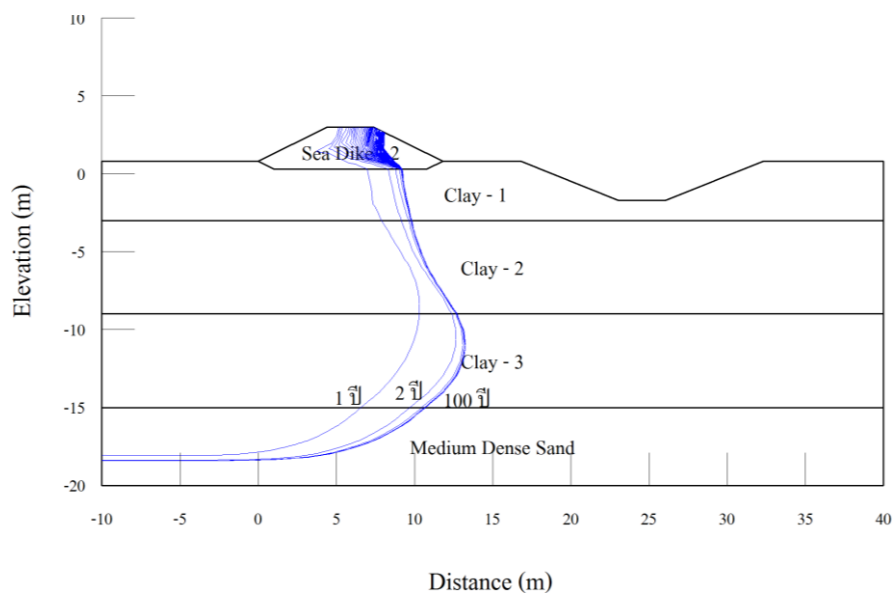
หากเปรียบเทียบข้อมูลทั้งสอง (ตารางที่ 4.17 และ ตารางที่ 4.18) ปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินทั้งแบบมีทางน้ำ ในช่วงพื้นที่ BH-1 มีค่ามากกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 เพราะค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1 มากกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 แต่ปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ ในช่วงพื้นที่ BH-1 มีค่าน้อยกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ ในช่วงพื้นที่ BH-1 มากกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 ผนวกกับมีเสตนน้ำจืดจากการขังน้ำไว้ในทางน้ำทำให้ลดปริมาณของน้ำทะเลที่ไหลลอดผ่านคันดิน น้ำทะเลจึงไหลซึมผ่านคันดินได้มากกว่าไหลลอดผ่านคันดิน

4.9.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน

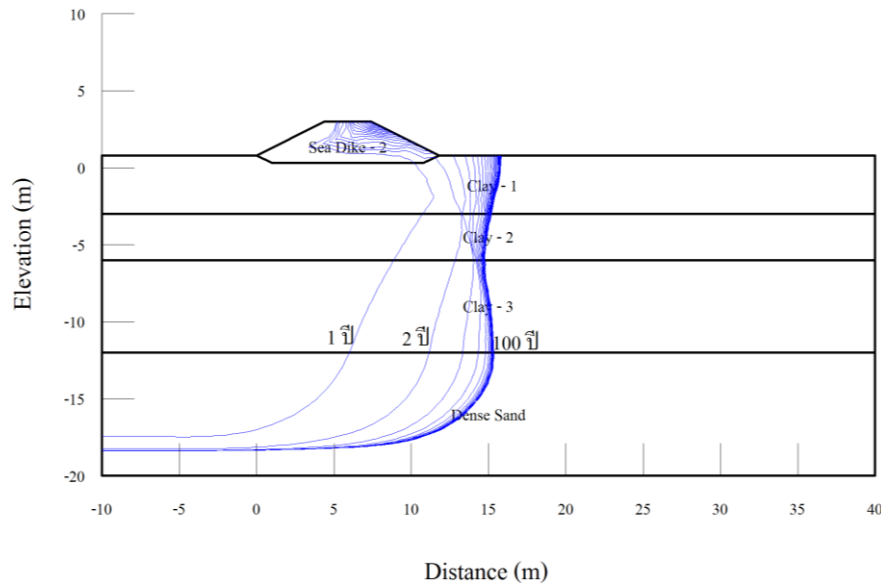
จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน ทำให้ทราบว่า ปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดินในคันดิน Sea dike-1 มีค่าน้อยกว่าคันดิน Sea dike-2 ดังนั้น ในการวิเคราะห์ที่ได้ใช้คันดิน (Sea dike-2) ซึ่งสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ที่ 5% และมีอายุการบ่ม 7 วัน ศึกษาค่าความเค็มที่ $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ (10 ppt) ไหลเข้าไปในแต่ละพื้นที่ ณ เวลาที่ผ่านไปเป็นเวลา 100 ปี ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่พืชสามารถทนได้ โดยแสดงเส้นความเข้มข้นของความเค็มที่พันธุ์พืชสามารถทนได้ที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งแสดงทุก ๆ 1 ปี ดังภาพที่ 4.35 ถึง 4.38



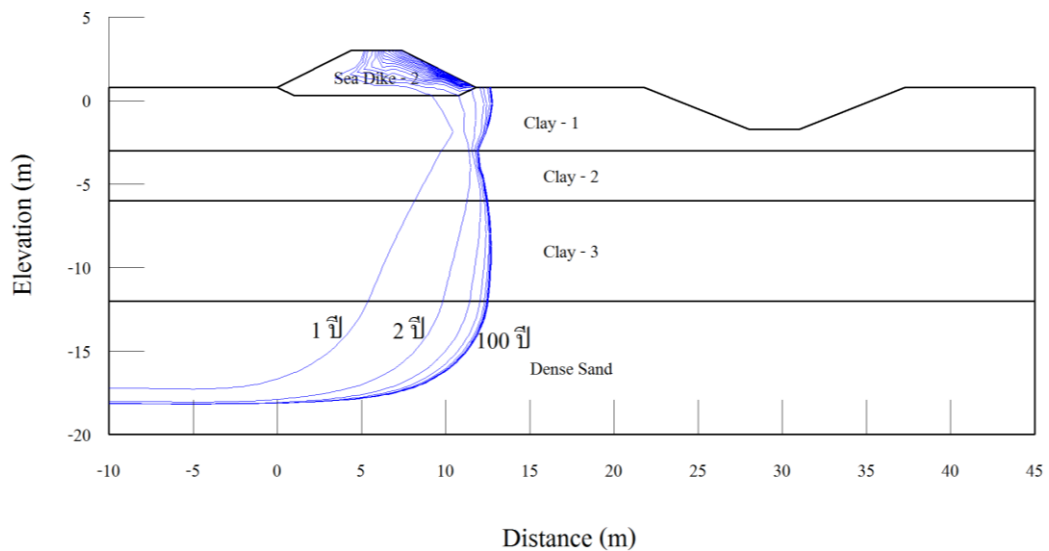
ภาพที่ 4.35 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ



ภาพที่ 4.36 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ



ภาพที่ 4.37 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ



ภาพที่ 4.38 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ

จากภาพที่ 4.35 และ 4.36 พบว่า ในช่วงพื้นที่ BH-1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 10 ปี มีการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งความเข้มข้นของความเค็มน้อย เนื่องจากรูปแบบการเคลื่อนที่ความเข้มข้นของความเค็มจึงเปลี่ยนจากการเคลื่อนแบบการพาเป็นการเคลื่อนแบบการออสโมซิส ซึ่งอยู่ที่ระยะประมาณ 4.00

m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งแผ่นดิน (ที่ระยะประมาณ 16.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งทะเล) โดยเมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ ใช้เวลาเพียง 3 ปี ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ถึงจะอยู่ที่สภาวะสมดุล แต่อยู่ที่ระยะประมาณ -2.50 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งแผ่นดิน (ที่ระยะประมาณ 9.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งทะเล) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เสดน้ำจืดในทางน้ำที่ถูกขังไว้ช่วยจำกัดการเคลื่อนที่ของความเข้มข้นของความเค็ม

จากภาพที่ 4.37 และ 4.38 พบว่า ในช่วงพื้นที่ BH-2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ ต้องใช้เวลามากกว่า 10 ปี ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ถึงจะอยู่ที่สภาวะสมดุล และอยู่ที่ระยะประมาณ 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งแผ่นดิน (ที่ระยะประมาณ 16.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งทะเล) หากเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 5 ปี ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ถึงจะปี มีการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งความเข้มข้นของความเค็มน้อยและอยู่ที่ระยะประมาณ 1.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งแผ่นดิน (ที่ระยะประมาณ 13.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งทะเล) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เสดน้ำจืดในทางน้ำที่ถูกขังไว้ช่วยจำกัดการเคลื่อนที่ของความเข้มข้นของความเค็มเช่นเดียวกันกับในช่วงพื้นที่ BH-1

เมื่อเปรียบเทียบในช่วงพื้นที่ BH-1 และ BH-2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 สามารถไหลเข้าไปในพื้นที่ศึกษาได้มากที่สุดที่ระยะประมาณ 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งแผ่นดิน และสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ในช่วงพื้นที่ BH-1 ไหลเข้าไปในพื้นที่ศึกษได้น้อยกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 ซึ่งอาจเป็นเพราะระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2 มีระยะมากกว่าในช่วงพื้นที่ BH-1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการไหลตลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินไม่ส่งผลกระทบต่อ การเคลื่อนที่ของความเข้มข้นของความเค็ม แต่เสดน้ำจืดในทางน้ำที่ถูกขังไว้ช่วยจำกัดการเคลื่อนที่ของความเข้มข้นของความเค็ม

จากข้างต้นที่กล่าวมา สามารถอธิบายได้ว่า ความเข้มข้นของความเค็มไหลเข้าสู่พื้นที่เกษตรกรรมผ่านเข้ามาในช่วงพื้นที่ BH-1 เข้าไปได้น้อยกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 และยังสามารถใช้พื้นที่เกษตรกรรมในการเพาะปลูกข้าวได้มากกว่า 50 ปี และถึงแม้ว่าทางน้ำจะพังทลาย ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 อยู่ที่ระยะประมาณ 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งแผ่นดิน

4.10 ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการคำนวณหาการทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล โดยในการวิเคราะห์ใช้น้ำหนักของคันดินกั้นน้ำทะเลมีค่าเท่า 20.0 kg/m^3 เนื่องจาก น้ำหนักของดินเหนียว CL บดอัดที่ผสมปูนซีเมนต์ 2% (CL-C02) ในทุก ๆ อายุการบ่ม มีค่าเท่ากับ 19.4 kg/m^3 และน้ำหนักของดินเหนียว

CH บดอัดที่ผสมปูนซีเมนต์ 5% (CH-C05) ในทุก ๆ อายุการบ่ม มีค่าเท่ากับ 18.4 kg/m^3 มาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.16 โดยมีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.16 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล

ชื่อดิน	Unit weight (γ)	C_c	C_s	Void ratio (e)
	(kN/m^3)	-	-	(m^3/m^3)
CL-C02-D00	19.4	0.091	0.019	0.676
CH-C05-D07	18.4	0.275	0.017	0.895

หมายเหตุ: ระดับน้ำใต้ดิน -2.00 m จากระดับผิวดิน

ตารางที่ 4.17 ค่าการทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล

วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง	ค่าการทรุดตัว (cm)	
	ช่วงพื้นที่ BH-1	ช่วงพื้นที่ BH-2
CL-C02-D00	60.4-63.1	50.8-53.5
CH-C05-D07	60.0-67.0	50.5-57.3

จากผลการวิเคราะห์ ทำให้ทราบว่า ลักษณะของชั้นดินช่วงพื้นที่ BH-1 มีการทรุดตัวอยู่ในช่วง 60.0-67.0 cm และสำหรับลักษณะของชั้นดินช่วงพื้นที่ BH-2 มีการทรุดตัวอยู่ในช่วง 50.5-57.3 cm ซึ่งบ่งบอกว่า ในช่วงพื้นที่ BH-2 มีการทรุดตัวน้อยกว่าช่วงพื้นที่ BH-1 โดยเป็นผลมาจากค่าดัชนีการอัดตัวของชั้นดิน 2 ชั้นแรกของช่วงพื้นที่ BH-2 มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีการอัดตัวของชั้นดิน 2 ชั้นแรกของช่วงพื้นที่ BH-1 รวมไปถึงความหนาของชั้นดิน

จากข้างต้นที่กล่าว หากเกิดการทรุดตัวขึ้นในช่วงพื้นที่ BH-1 ความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเลจะมีค่าเท่ากับ 2.330 m. MSL. (ค่าการทรุดตัวที่มากที่สุด 67.0 cm) และในช่วงพื้นที่ BH-2 ความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเลจะมีค่าเท่ากับ 2.427 m. MSL. (ค่าการทรุดตัวที่มากที่สุด 57.3 cm) ซึ่งยังมี ความสูงที่เพียงพอต่อการป้องกันไม่ให้น้ำทะเลไหลเข้าท่วมพื้นที่เกษตรกรรม เนื่องจากระดับน้ำทะเลสูงสุดอยู่ 2.070 m. MSL.

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษา ซึ่งนำดินตัวอย่างมาจากพื้นที่ศึกษาบริเวณ หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลท่ามะลิ อำเภอเมือง จังหวัดสตูล โดยทำการเจาะสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึกประมาณ 1-2 m ในลักษณะของการเก็บตัวอย่างดินแบบรบกวน (Disturbed soil samples) แล้วนำตัวอย่างดินที่ได้มา ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (Portland cement type I) โดยใช้วิธีการผสมแบบแห้ง หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีการทดสอบคุณสมบัติกายภาพและดัชนีของดิน คุณสมบัติทางเคมีของดิน และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดิน

การปรับปรุงคุณภาพดิน กระทำโดยทดลองนำตัวอย่างดินมาผสมสารเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1) ที่ปริมาณ 0 2 5 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้งแล้วนำไปทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจาก 3 วิธีการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) และการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined Compression Test) โดยมีอายุการบ่มที่ 0 7 และ 28 วัน

ผลการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดินสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าอัตราการบวมตัว ดินเหนียว CL เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น อัตราการบวมตัวมีแนวโน้มคงที่ แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นอัตราการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง สำหรับดินเหนียว CH อัตราการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น แต่ที่ปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่าอัตราการบวมตัวมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น
2. ค่าดัชนีของการอัดตัว (C_c) ทั้งดินเหนียว CL และดิน CH เมื่อผสมปูนซีเมนต์ การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีของการอัดตัวมีแนวโน้มลดลงในทุก ๆ อายุการบ่ม
3. ค่าดัชนีของการบวมตัว (C_s) ทั้งดินเหนียว CL และดินเหนียว CH ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการลดลงตัวมีแนวโน้มลดลง ในทุก ๆ อายุการบ่ม
4. ค่าแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) ดินเหนียว CL เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ตัวอย่างดินเหนียว CL มีค่าแรงดันในอดีตสูงสุดเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่ดินเหนียว CH เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าแรงดันในอดีตสูงสุดเพิ่มขึ้นในช่วงอายุการบ่ม 0 ถึง 7 วัน

5. ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) เมื่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ดินเหนียว CL มีแนวโน้มลดลง และดินเหนียว CH มีแนวโน้มคงที่ ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงของคุณสมบัติของวัสดุที่บ้น้ำ มีค่าน้อยกว่า 1×10^{-8} m/วินาที (วรากร ไม้เรียง, 2542)

6. ค่าแรงยึดเหนียว (S_u) ของการทดสอบตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked sample) ดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลง แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่ามากขึ้นในทุกๆอายุการบ่ม ซึ่งที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ดินเหนียว CL มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่มากกว่า 5% กำลังการรับแรงเฉือนมีแนวโน้มจะลดลง และคงที่ ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ 8 และ 10% และดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 วัน ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีแนวโน้มคงที่ แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่ามากขึ้นในทุกๆอายุการบ่ม ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ดินเหนียว CH ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์มากกว่า 5% กำลังรับแรงเฉือนมีแนวโน้มคงที่ในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง

7. ค่าแรงยึดเหนียว (S_u) ของการทดสอบตัวอย่างแบบแช่น้ำ (Soaked sample) ดินเหนียว CL เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นและอายุการบ่มที่นานขึ้น ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว CL มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่มากกว่า 5% กำลังการรับแรงเฉือนมีแนวโน้มที่ลดลงและคงที่ ทั้งในอายุการบ่มที่ 0 7 และ 28 วัน และสำหรับดินเหนียว CH เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้น ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว CH มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในทุกๆอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์และอายุการบ่ม

8. ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ดินเหนียวที่มีการปรับปรุงคุณภาพแล้ว และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการก่อสร้าง ได้แก่

8.1 ดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 0 วัน (CL-C02-D00) โดยมีค่าอัตราการบวมตัว = 0.890%, $C_c = 0.091$, $C_s = 0.019$, $P'_m = 290$ kPa, $k = 3.0 \times 10^{-10}$ m/s, S_u (Unsoaked sample) = 255.45 kPa, และ S_u (Soaked sample) = 82.38 kPa

8.2 ดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 7 วัน (CH-C05-D07) โดยมีค่าอัตราการบวมตัว = -0.025%, $C_c = 0.275$, $C_s = 0.017$, $P'_m = 420$ kPa, $k = 5.0 \times 10^{-10}$ m/s, S_u (Unsoaked sample) = 206.31 kPa, และ S_u (Soaked sample) = 65.76 kPa

ผลการทดสอบที่ได้ปรากฏความแปรปรวนอยู่บ้าง ซึ่งอาจเกิดจากการนำตัวอย่างดินจากหลายๆ หลุมเจาะสำรวจมาใช้ในการทดสอบ ซึ่งหากต้องการลดความแปรปรวนดังกล่าวอาจต้องนำตัวอย่างดินทั้งหมดมารวมกันแล้วจึงทำตัวอย่างเพื่อการทดสอบ

9. จากการศึกษาการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้เพื่อออกแบบคันดินกั้นน้ำทะเล และประเมินประสิทธิภาพในการป้องกันการรุกรานของน้ำทะเลของคันดินกั้นน้ำทะเล

9.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพลาดคันดินและทางน้ำ

ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety Factor) ของเสถียรภาพลาดคันดินและทางน้ำสำหรับทั้ง 3 กรณี ได้แก่ 1) เมื่อก่อสร้างเสร็จ 2) ขณะใช้งาน และ 3) ระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน โดยคำนวณด้วยวิธี Morgenstern & Price พบว่า ดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 0 วัน และดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยของเสถียรภาพมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ตามเกณฑ์การออกแบบในทุกกรณี

9.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน

ดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 0 วัน และดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 7 วัน เมื่อนำมาก่อสร้างเป็นคันดิน โดยคำนวณด้วยวิธีแบบสถานะคงที่ (Steady-state analysis) ซึ่งจะมีปริมาณน้ำไหลผ่านคันดินน้อยกว่า 3.5×10^{-10} m³/s : ความยาว 1 m เมื่อระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุด และมีปริมาณน้ำไหลผ่านฐานรากน้อยกว่า 1.8×10^{-6} m³/s : ความยาว 1 m เมื่อระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุด หากมีทางน้ำ ปริมาณน้ำไหลผ่านคันดินน้อยกว่า 3.0×10^{-10} m³/s : ความยาว 1 m เมื่อระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุด และปริมาณน้ำไหลผ่านฐานรากน้อยกว่า 1.4×10^{-6} m³/s : ความยาว 1 m เมื่อระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุด

9.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน

ค่าความเข้มข้นของความเค็มที่เคลื่อนที่ผ่านตัวคันดินและฐานรากของคันดินเมื่อคำนวณด้วยวิธีการจำลองการไหลของน้ำ และการเคลื่อนที่ของเกลือด้วยการกำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Density-dependent analysis) พิจารณาที่ค่าความเค็มที่ 10 kg/m³ (10 ppt) พบว่า เมื่อเวลาที่ผ่านไปเป็นระยะเวลา 100 ปี ค่าความเค็มดังกล่าวอยู่ที่ระยะประมาณ 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากดินคันดินฝั่งแผ่นดิน หากมีทางน้ำ พบว่า เมื่อเวลาที่ผ่านไปเป็นระยะเวลา 100 ปี ค่าความเค็มดังกล่าวอยู่ที่ระยะประมาณ -2.50 ถึง 1.00 m ที่ระดับผิวดินจากดินคันดินฝั่งแผ่นดิน

10. การทรุดตัวของคันดินมีค่าอยู่ระหว่าง 50.0-70.0 cm ทำให้ค่าความสูงของคันดินที่ถูกกำหนดขึ้นนั้น มีการกำหนดให้ชดเชยกับค่าการทรุดตัวของคันดินไว้แล้ว

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ถ้าหากสามารถจำแนกชนิดดินเหนียวในพื้นที่ได้ ค่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล คือ ดินเหนียว CL ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 2% โดยไม่ต้องทำการบ่มคันดินภายหลังการก่อสร้าง และดินเหนียว CH ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 5% และทำการบ่มคันดินภายหลังการก่อสร้างเป็นเวลา 7 วัน

แต่หากไม่สามารถจำแนกชนิดของดินเหนียวในพื้นที่ได้ ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 5% และทำการบ่มคันดินเป็นเวลา 7 วันภายหลังการก่อสร้าง เนื่องจากปริมาณดังกล่าวเป็นอัตรา

ส่วนผสมที่น้อยที่สุดที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้มีค่าน้อยกว่า 10-8 m/s และยังมีกำลังรับแรงเฉือนที่เพียงพอต่อการป้องกันการเคลื่อนพังของลาดดิน

2. จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ค่าความเข้มข้นของความเค็มไหลเข้าไปในพื้นที่ที่ระยะไม่เกิน 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากดินคันดินฝั่งแผ่นดิน แต่เมื่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ ระยะที่ค่าความเข้มข้นของความเค็มไหลเข้าไปในพื้นที่ได้น้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ คือ ที่ระยะไม่เกิน 1.00 m ที่ระดับผิวดินจากดินคันดินฝั่งแผ่นดิน

3. ระดับความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเล เท่ากับ +3.00 m. (รทก.) มีความสูงเพียงพอสำหรับการป้องกันไม่ให้น้ำทะเลไหลเข้าท่วมพื้นที่เกษตรกรรมด้านหลังคันดิน เนื่องจากหากเกิดการทรุดตัวขึ้นในช่วงพื้นที่ BH-1 มีค่าการทรุดตัวที่มากที่สุด 67.0 cm ทำให้ระดับความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 2.330 m. (รทก.) และในช่วงพื้นที่ BH-2 ค่าการทรุดตัวที่มากที่สุด 57.3 cm ทำให้ระดับความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 2.427 m. (รทก.) จากข้อมูลกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ค่าระดับน้ำทะเลสูงสุดอยู่ 2.070 m. (รทก.)

4. ในการก่อสร้างคันดิน หากต้องการขุดบ่อยึดดินขึ้นในพื้นที่ อาจขุดให้มีลักษณะเป็นทางน้ำขนานกับแนวคันดิน โดยให้มีระยะห่างระหว่างคันดินกับบ่อยึดดิน (ทางน้ำ) ประมาณ 5 m ช่วงพื้นที่ BH-1 และประมาณ 10 m ช่วงพื้นที่ BH-2

5. พันธุ์พืชสามารถนำพื้นที่บริเวณฝั่งแผ่นดินไปใช้ในการเกษตรได้ เมื่อทำการก่อสร้างคันกั้นน้ำทะเลแล้วเสร็จ เนื่องจากค่าความเข้มข้นของความเค็มไหลเข้าไปในพื้นที่ที่ระยะไม่เกิน 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากดินคันดินฝั่งแผ่นดิน

ผลผลิต

ผลงานเชิงสาธารณะ

ผลการวิจัยได้แบบเบี่ยงต้นคั่นกั้นน้ำทะเล ตำบลตำมะลัง (หมู่ที่ 2 และหมู่ที่ 3) อำเภอเมือง จังหวัดสตูล โดยคั่นกั้นน้ำทะเลใช้ดินในพื้นที่ซึ่งมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยด้วยปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุก่อสร้าง

บรรณานุกรม

- ทวีศักดิ์ รมิงวงศ์. 2546. *น้ำบาดาล*. ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. พรชัย สุธาทร. (2525). อินทรีย์วัตถุในดิน. *วารสารฝ่ายวิชาการโครงการพัฒนาที่ดินทุ่งกุลาร้องไห้*, 1(2), 25-36.
- วรากร ไม้เรียง. (2542). *วิศวกรรมเขื่อนดิน* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: ไรบรารี นาย.
- สมศรี อรุณินท์. (2539). *ดินเค็มในประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์,
- อรุณี ยูวะนิยม และสมศรี อรุณินท์. (2539). การวิจัยพีชทนเค็มและพีชชอบเกลือบางชนิดในพื้นที่ดินเค็มจัด. *เอกสารคู่มือเจ้าหน้าที่ของรัฐ เรื่องดินเค็ม กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์*, 278-283.
- AASHTO. (1995). Resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils. *American Association of state highway and transportation officials*, 46, 794-807.
- Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N., & Balasubramaniam, A.S. (1996). *Soft ground improvement*. United States of America: American society of civil engineers.
- Chalermyanont, T. & Arrykul, S. (2004). Compacted sand-bentonte mixtures for hydraulic containment liners. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 27(2), 313-323.
- Chang, S. W., Clement, T. P., Simpson, M. J., & Lee, K. (2011). Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion?. *Advances in water resources*, 34, 1283-1291.
- Cooper, Jr., H. H. (1986). A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer. In T. B. Nolan (Ed.), *Sea water in coastal aquifers* (pp. 1-12), Washington D.C.: U.S. Government printing office.
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering (Seventh edition)*. United States of America: RPK editorial services.
- Davidson, D. T. (1961). Soil stabilization with Portland cement. *National Research Council*, 292, 474.
- Deng, Y., Yue, X., Liu, S., Chen, Y., & Zhang, D. (2015). Hydraulic conductivity of cement stabilized marine clay with metakaolin and its correlation with pore size distribution. *Engineering geology*, 193, 146-153.

- Doornkamp, J. C. (1998). Coastal flooding, global warming and environmental management. *Journal of environmental management*, 52, 327-333.
- Drabbe, J., & Ghyben, B. W. (1889). Nota inverband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam [Notes on the probable results of the proposed well drilling near Amsterdam]: The Hague, *Koninkl. Inst. Ing. Tijdschr*, 8-22.
- Gelhar, L. W., Welty, C., & Kenneth, R. R. (1992). A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water resources research*, 28, 1955-1974.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2002). *Seep/W for infinite element seepage analysis*. Canada: GEO-SLOPE International Ltd.
- Germaine, J. T., & Germaine, A. V. (2009). *Geotechnical laboratory measurements for engineers*. New York: John Wiley & Sons.
- Gleason, M. H., Daniel, D. E., & Eykholt, G. E. (1997). Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment application. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, May 1997, 438-445.
- Hausmann, M. R. (1990). *Engineering principles of ground modification*. New York: McGraw-Hill.
- Henry, H. R. (1986). Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers. In T. B. Nolan (Ed.), *Sea water in coastal aquifers* (pp. 70-82), Washington D.C.: U.S. Government printing office.
- Henry, H. R. (1986). Interfaces between salt water and fresh water in coastal aquifers. In T. B. Nolan (Ed.), *Sea water in coastal aquifers* (pp. 30-70), Washington D.C.: U.S. Government printing office.
- Herzberg, A. (1901). Die Wasserversorgung einiger nordssbäder [The water supply on parts of the North Sea Coast]: Munich, *Jour. Gasbeleucht. U. Wasserversorg.*, 44, 815-819; 842-844.
- Hewitt, K., & Burton, I. (2008). *The hazardousness of place: a regional ecology of damaging events*. Toronto: University of Toronto Press.
- Holtz, R. D. & Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. United States of America: New Jersey.
- Ingles, O. G. & Metcalf, J. B. (1973). *Soil stabilization: Principles and practice*. New York: John Wiley & Sons.

- Kohout, F. A. (1986). The flow of fresh water and salt water in the biscayne aquifer of the Miami Area, Florida. In T. B. Nolan (Ed.), *Sea water in coastal aquifers* (pp. 12-32), Washington D.C.: U.S. Government printing office.
- Lambe, T. W., Metchael, A. S., & Moh, Z. C. (1959). Improvement of soil-cement with alkali metal compound. *National Research Council (Highway research board bulletin)*, 241, 67-103.
- Moh, Z. C. (1960). Soil stabilization with cement and sodium additives. *Journal of soil mechanic foundation engineering*, 88, 81-105.
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surface. *Geotechnique*, 15, 79-93.
- Natoinal Soil Survey Center. (2002). *Field book for describing and sampling soils* (Second edition). United States of America: Natural resources conservation service.
- Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zone. *Science*, 328, 1517-1520.
- Pakbaz, M. S., & Alipour, R. (2009). Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay. *Applied clay science*, 67-68, 1-4.
- Sariosseiri, F., & Muhunthan, B. (2009). Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington state soils. *Engineering geology*, 104, 119-125.
- Simpson, M. J., & Clement, T. P. (2003). Theoretical analysis of the worthiness of henry and elder problems as benchmarks of density-dependent groundwater flow models. *Advances in water resources*, 26, 17-31.
- Swasey, B. & Creamer, L. (2018). *Nor'easter Brings coastal flooding, heavy precipitation to mass*. Retrieved from <http://www.wbur.org/news/2018/03/02/storm-coastal-flooding-massachusetts>
- Todd, D. K. & Mays, L. W. (2004). *Groundwater hydrology* (Third edition). United States of America: Wiley.
- U.S. Army (2018). *Air force photos*. Retrieved from <http://www.af.mil/News/Photos/igphoto/2000098970/>

USACE. (2006). Coastal engineering manual. *Engineer manual 1110-2-1100*.

Washington D.C.: US army corps of engineers,

Yukselen-Aksoy, Y., Kaya, A., & Ören, A. H. (2008). Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays. *Engineering geology*, 102, 54-61.