

การตรวจสอบเสถียรภาพของโครงสร้างกำแพงป้องกันน้ำด้วยโปรแกรม Plaxis 2D

จักรกฤษณ์ ยืนยงค์¹ สุขสันต์ หอพิบูลสุข^{2*} อาทิตย์ อุดมชัย³ และ Menglim Hoy³

บทคัดย่อ

เขตนิคมอุตสาหกรรมนวนคร เป็นที่ตั้งของบริษัทชั้นนำระดับโลกที่ให้บริการด้านอุตสาหกรรมหลายประเภท ตั้งอยู่ในจังหวัดปทุมธานี ซึ่งมีพื้นที่มากกว่า 10 ตารางกิโลเมตร ในปี 2554 เกิดอุทกภัยทางธรรมชาติทำให้น้ำท่วมสูงประมาณ 4.7 เมตร เป็นเวลา 2 เดือน ส่งผลกระทบต่อเขตอุตสาหกรรมดังกล่าว ดังนั้นจึงได้มีการสร้างกำแพงป้องกันน้ำท่วมถาวรเพื่อสร้างความมั่นใจให้แก่นักลงทุน งานวิจัยนี้ประเมินความปลอดภัยและเสถียรภาพของกำแพงกันน้ำ Wall type-3 ต่อปัญหาน้ำท่วมเท่านั้น การประเมินผลการป้องกันน้ำท่วมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การสำรวจพื้นที่และชั้นดิน การตรวจสอบโครงสร้างกำแพงกันน้ำ และการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม Plaxis 2D การสำรวจชั้นดินประกอบด้วย การทดสอบหลุมเจาะ การทดสอบพิกัดอัตโนมัติ เบิร์ก การอัดตัวคายน้ำ และการทดสอบแรงอัดสามแกน เพื่อสำรวจลักษณะของชั้นดินและหาพารามิเตอร์พื้นฐานและพารามิเตอร์ทางวิศวกรรม การตรวจสอบโครงสร้างกำแพงกันน้ำประกอบด้วย การทดสอบทางกล ได้แก่ Schmidt Hammer test, Ferro scan test, และ Hardness test รวมไปถึงการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนปลอดภัยภายนอกที่ระดับน้ำเท่ากับ +5.20 เมตร (MSL) ในระยะเวลา 4 เดือน มีค่าเท่ากับ 6.717 และมากกว่าที่ผู้ออกแบบกำหนดไว้ที่ 1.50 สำหรับเสถียรภาพภายในของกำแพงที่ระยะเวลา 4 เดือน มีค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 6.185 kN-m/m และ 6.697 kN/m ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผู้ออกแบบซึ่งกำหนดค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่ยอมให้ไม่เกิน 17.50 kN-m/m และ 62.10 kN/m พบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 2.83 และ 9.27 ตามลำดับ ดังนั้น กำแพงกันน้ำ Wall type-3 มีเสถียรภาพภายในและภายนอกที่เพียงพอ ในขณะที่การซึมผ่านน้ำใต้ฐานรากของกำแพงที่ระยะเวลา 4 เดือน ของระดับน้ำ +5.20 เมตร ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบในเรื่องการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำภายในโครงการเนื่องจากอัตราการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำมีค่าที่ต่ำ

คำสำคัญ: ภัยพิบัติทางธรรมชาติ; กำแพงป้องกันน้ำท่วม; ไฟไนต์เอลิเมนต์; โปรแกรม Plaxis 2D

รับพิจารณา: 28 มิถุนายน 2561

แก้ไข: 20 มกราคม 2564

ตอบรับ: 4 กุมภาพันธ์ 2564

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และหัวหน้า ศูนย์เชี่ยวชาญด้านนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ นักวิจัยศูนย์เชี่ยวชาญด้านนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร. +669 8236 7650 อีเมล: chakkrid.sut@gmail.com

The Stability Investigation of Flood Wall Structure Using Plaxis 2D

Chakkrit Yeanyong¹ Suksun Horpibulsuk^{2*} Artit Udomchai³ and Menglim Hoy³

Abstract

Nava Nakorn Industrial is a home of world-class companies that serves many types of industries located in Pathumthani Province, Thailand with an area of more than 10 km². In 2011, the natural disaster, flooding up to about 4.7 m for 2 months caused the impacts in this industrial zone. The permanent flood wall protection was then built around the industrial area to ascertain the safety and to build the confidence for the investors. The evaluation of the safety and stability of the flood wall against the flooding problem is carried out in this research and divided into three main assessments, including site investigation and soil exploration, examination of the existing flood wall structures, and finite element analysis of its stability using Plaxis 2D. The site investigation and soil exploration, included boring, Atterberg limits, consolidation and triaxial tests to explore the basic and engineering parameters. The mechanical tests, including Schmidt Hammer test, Ferro scan test, Hardness test, as well as coring and compressive strength test of concrete were conducted. The finite element analysis results showed that the external factor of safety at a water level of +5.20 m (MSL) over a 4 months period was 6.717 higher than the designer specified at 1.50. Meanwhile, the bending moment and shear force values were 6.185 kN-m/m and 6.697 kN/m, respectively, which are lower than the allowable bending moment and shear force of 17.50 kN-m/m and 62.10 kN/m. In other words, the internal factor of safety against bending moment and shear force were 2.83 and 9.27, respectively. As such, the flood wall protection provides sufficient internal and external stability with low water permeability under the foundation of the flood wall for a period of 4 months at water level at +5.20 m. This research confirms there is no impact on the rise of water level within the studied area due to the flooding problem for a period of 4 months.

Keywords: Natural disaster; flood wall protection; finite element analysis; Plaxis 2D

Received: June 28, 2018

Revised: January 20, 2021

Accepted: February 4, 2021

¹ Master Degree Graduate, School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology

² Professor, School of Civil Engineering and Director, Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, Suranaree University of Technology

³ Researcher, Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author Tel. +669 8236 7650 e-mail: chakkrid.sut@gmail.com

1. บทนำ

ในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยได้ประสบกับปัญหาอุทกภัยครั้งรุนแรงที่สุดเป็นประวัติการณ์ ซึ่งอุทกภัยครั้งนั้นส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างหนักทั้งภาคการเกษตร อุตสาหกรรม เศรษฐกิจ สังคม และส่งผลกระทบต่อเป็นลูกโซ่ไปยังภาคส่วนอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในเขตส่งเสริมนิคมอุตสาหกรรมนวนคร จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเป็นอีกพื้นที่หนึ่งที่ประสบปัญหาน้ำท่วมซึ่งเป็นระยะเวลา นานกว่า 2 เดือน โดยมีระดับน้ำท่วมสูงถึง +4.70 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง (MSL) หลังจากสิ้นสุดวิกฤตการณ์น้ำท่วมในปีถัดมา พ.ศ. 2555 ได้มีการก่อสร้างกำแพงป้องกันน้ำท่วมถาวรรอบเขตนิคมอุตสาหกรรมนวนครเพื่อป้องกันน้ำท่วมซ้ำ ซึ่งกำแพงกันน้ำที่ใช้ในการก่อสร้างนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ กำแพงกันน้ำแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก และกำแพงกันน้ำสำเร็จรูปแบบฝังลงในชั้นดิน ซึ่งทำจากคอนกรีตอัดแรงรูปลอน ใช้วิธีการตอกแบบสั้นเสเทือน ลงไปในชั้นดินเป็นความลึกกว่า -6.95 เมตร และสูงขึ้นมาจากผิวดินอีก +3.80 เมตร มีความยาวโดยรวมกว่า 20.7 กิโลเมตร (รอบเขตพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมนวนคร) โดยที่ความสูงของกำแพงป้องกันน้ำแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางที่ +5.00 เมตร และคอนกรีตอัดแรงรูปลอนมีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางที่ +5.50 เมตร ซึ่งเป็นความสูงที่มากกว่าองค์การความร่วมมือระหว่างหน่วยงานของประเทศญี่ปุ่น (Japan International Cooperation Agency, JICA) [1] ได้แนะนำไว้ที่ +5.20 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ในการตรวจสอบเสถียรภาพของโครงสร้างกำแพงป้องกันน้ำ ผู้เขียนได้แบ่งลักษณะการตรวจสอบออกเป็นสามลักษณะ ได้แก่ การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก เสถียรภาพภายใน และการซึมผ่านน้ำในมวลดินของตัวโครงสร้างกำแพงกันน้ำแบบคอนกรีตเสริมเหล็กเท่านั้น เนื่องจากลักษณะโครงสร้างฐานรากของกำแพงชนิดนี้ฝังในชั้นดินที่ไม่ลึกมาก และอาจส่งผลทำให้น้ำไหลซึมผ่านใต้ฐาน

กำแพงได้ง่ายกว่ากำแพงกันน้ำสำเร็จรูปชนิดแบบฝังลงในชั้นดิน นอกจากนี้ยังเสี่ยงต่อการวิบัติแบบพลิกคว่ำและการเลื่อนไถลเนื่องจากแรงดันน้ำในกรณีที่เกิดน้ำท่วมขังได้ ดังนั้น ผู้เขียนได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการซึมผ่านน้ำใต้ฐานของกำแพงกันน้ำ

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนดของผู้ออกแบบและผลทดสอบในสนาม
- 2.2 เพื่อหาแนวทางการป้องกันหากเกิดกรณีที่เกิดเสถียรภาพของโครงสร้างกำแพงกันน้ำมีอัตราส่วนปลอดภัยที่ต่ำ

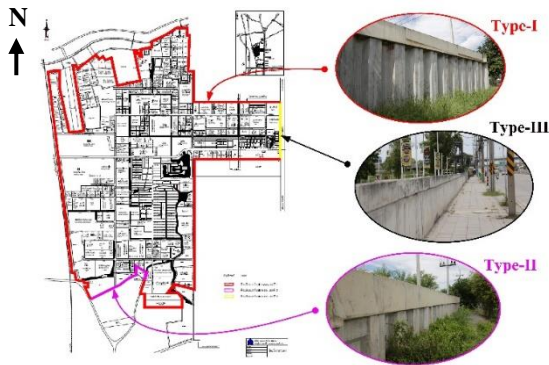
3. ข้อมูลโครงการ



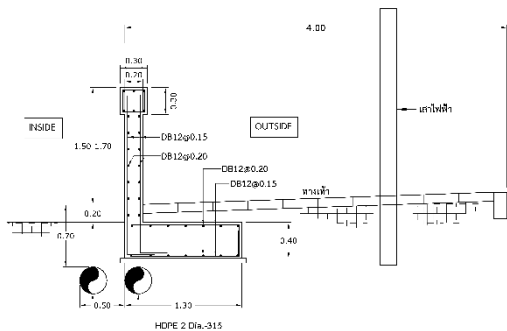
รูปที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนตัวของมวลน้ำ พ.ศ. 2554

รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของมวลน้ำในปี พ.ศ. 2554 เข้าสู่เขตพื้นที่ของนิคมอุตสาหกรรมนวนคร จ.ปทุมธานี จะเห็นได้ว่ามวลน้ำเคลื่อนที่ตามลูกศรจากที่สูง (ภาคเหนือ) ลงสู่แอ่งที่ราบ (ภาคกลาง) และรวมตัวกันไหลลงสู่ทะเลอ่าวไทย ดังนั้นเขตพื้นที่ที่มีมวลน้ำรวมตัวกันและมีฝนตกชุกจนมวลน้ำระบายไม่ทันจะมีผลให้ปริมาณของน้ำเพิ่มสูงขึ้นจนเกิดภาวะวิกฤติน้ำท่วมฉับพลันในเขตพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมนวนคร ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่ภาคกลางและมีน้ำท่วมสูงถึง +4.70 เมตร

(MSL) นาน 2 เดือน



รูปที่ 2 แผนผังที่ตั้งของโครงสร้างกำแพงกันน้ำ



รูปที่ 3 รูปตัดโครงสร้างกำแพง Retaining Wall (Wall Type-3)

รูปที่ 2 แสดงแผนผังตำแหน่งของโครงสร้างกำแพงป้องกันน้ำท่วมของนิคมอุตสาหกรรม นวนคร จ.ปทุมธานี ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของโครงสร้างได้ตามลักษณะการก่อสร้างออกเป็นสองแบบด้วยกันได้แก่ กำแพงกันน้ำแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก (Type III) และกำแพงกันน้ำสำเร็จรูปแบบฝังลงในชั้นดิน (Type I, Type II) สำหรับลักษณะและมิติของกำแพงกันน้ำคอนกรีตเสริมเหล็ก Type-3 (รูปที่ 3) ตั้งอยู่ที่ศตวันออกของนิคมอุตสาหกรรมนวนคร ติดกับถนนพหลโยธิน กิโลเมตรที่ 46 โดยมีความสูงจากผิวดินเท่ากับ 1.70 เมตร ฝังในชั้นดินลึกเท่ากับ 0.70 เมตร ความยาวที่ทำการก่อสร้างประมาณ 400

เมตร และมีการก่อสร้างระบบระบายน้ำที่บริเวณใต้ฐานของกำแพง

4. ขอบเขตการวิเคราะห์

การวิเคราะห์เสถียรภาพ พฤติกรรม และการซึมผ่านน้ำในมวลดินใต้โครงสร้างกำแพงกันน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาเฉพาะกรณี Wall type-3 เท่านั้น โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไป [2, 3, 4] ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกรณีศึกษาในการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินและหาสาเหตุที่ทำให้เกิดการวิบัติโดยมีแนวคิดที่ว่า หากแรงด้านข้างที่กระทำต่อโครงสร้างกำแพงกันดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยหรือเสถียรภาพของโครงสร้างกำแพงมีค่าที่ต่ำลง ดังนั้นผู้เขียนได้กำหนดขอบเขตการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างกำแพงดังต่อไปนี้

4.1 ความสูงของระดับน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 3 ระดับด้วยกันได้แก่ ระดับน้ำที่ +4.20, +4.70 และ +5.20 เมตร (MSL)

4.2 การวิเคราะห์จะไม่คำนึงถึงน้ำที่ไหลในหลุมหรือโพรงที่เกิดขึ้นในชั้นดิน

4.3 ระยะเวลาจำลองสถานะน้ำท่วมเพื่อวิเคราะห์การซึมผ่านน้ำในมวลดินและอัตราส่วนปลอดภัยจำลองที่ 1, 2, 3 และ 4 เดือน ตามลำดับ

4.4 ข้อมูลดินที่ใช้ในการวิเคราะห์อ้างอิงจากผลการเจาะสำรวจชั้นดินของหลุมเจาะ BH3 ภายในโครงการ

5. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ

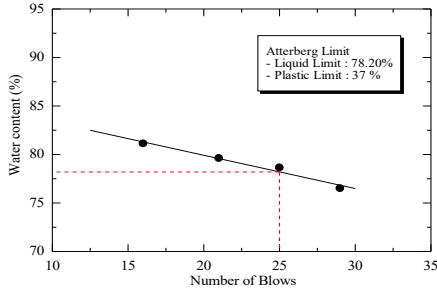
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของชั้นดิน

Parameter	Weathered crust	Soft clay	Stiff clay	Fine sand	Dense sand	Unit
Model	M-C	Soft soil	Soft soil	M-C	M-C	-
Young's modulus, (E')	4000	-	-	30,000	40,000	kPa
Frictional angle, (ϕ')	25	22	23	35	40	Deg.
Dilatancy, (ψ)	-	-	-	5	10	Deg.
Cohesion, (c')	30	10	12	1	1	kPa
Saturated unit weight, (γ_{sat})	18	17	18	19	19	kN/m ³
Dry unit weight, (γ_d)	16	15	16	17	17	kN/m ³
Compression index, (C_c)	-	0.10	0.40	-	-	-
Swell index, (C_s)	-	0.50	0.80	-	-	-
Over-consolidation ratio, (OCR)	-	1.25	1.56	-	-	-
Poisson's ratio, (ν')	0.30	0.40	0.40	0.30	0.30	-
Initial void ratio, (e_0)	0.900	1.581	1.241	0.957	0.942	-
Vertical permeability, (k_v)	2.67×10^{-4}	2.33×10^{-5}	2.33×10^{-5}	3.456	7.085	m/day
Horizontal permeability, (k_h)	5.44×10^{-4}	4.66×10^{-5}	4.66×10^{-5}	3.456	7.085	m/day

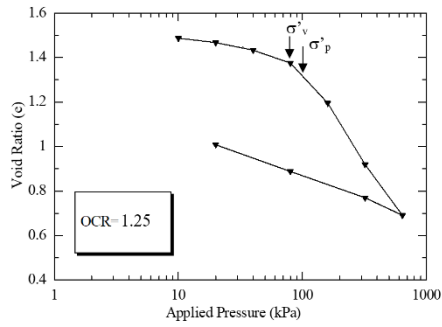
5.1 พารามิเตอร์ชั้นดิน

ตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและพฤติกรรมของโครงสร้างกำแพงกันน้ำ Wall type-3 สำหรับพารามิเตอร์ของชั้นดินในแต่ละชั้นเป็นพารามิเตอร์แบบกำลังประสิทธิผล เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพภายใน-นอก พฤติกรรมของโครงสร้างกำแพง และคาดคะเนการซึมผ่านของน้ำใต้ฐานรากโครงสร้างกำแพงในกรณีที่น้ำท่วมขังเป็นระยะเวลานานมากกว่า 2 เดือน (พื้นที่ของโครงการถูกน้ำท่วมนาน 2 เดือน) ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต พารามิเตอร์ของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินที่ได้จากการเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนที่ระดับความลึกเท่ากับ -6 เมตร ในสนามของหลุมเจาะ BH3 ที่อยู่ตำแหน่งบริเวณ กำแพง

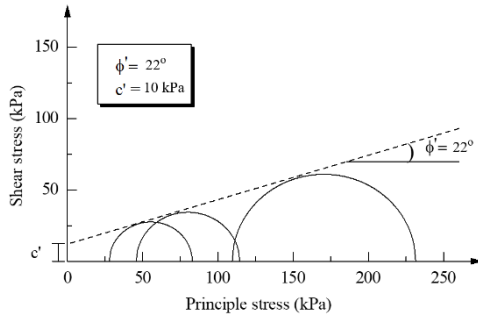
กันน้ำ Wall type-3 มาทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งประกอบด้วย การทดสอบพิกัดอัตราเบอร์ก การทดสอบอัดตัวคายน้ำและการทดสอบแรงอัดสามแกน ผลทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 ถึง รูปที่ 6 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลที่ได้จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำทำให้ทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในมวลดิน (k) ของชั้นดินเหนียว สำหรับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในชั้นดินเม็ดหยาบที่อยู่ลึกมากเมื่อเทียบกับระดับของกำแพงกันน้ำ จึงไม่มีอิทธิพลต่อการซึมผ่านผู้เขียนได้ใช้วิธีการประมาณเชิงประสบการณ์ [5] พารามิเตอร์ด้านกำลังของชั้นดินเหนียว Soft clay to Medium stiff clay ได้จากการทดสอบ Consolidated Undrained Triaxial Test ซึ่งมีค่า Cohesion เท่ากับ 10 kPa และมีค่า Frictional angle เท่ากับ 22 องศา



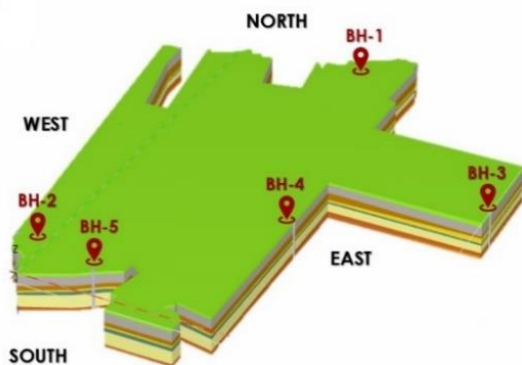
รูปที่ 4 Water content vs number of blows of soft clay -6 m depth at BH3



รูปที่ 5 Void ratio vs applied pressure of soft clay -6 m depth at BH3

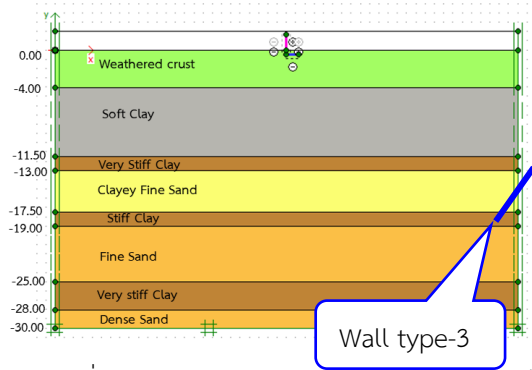


รูปที่ 6 Mohr's circle of soft clay -6 m depth at BH3



รูปที่ 7 ตำแหน่งที่เจาะสำรวจชั้นดิน

รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งที่ทำการเจาะสำรวจชั้นดิน ผลการเจาะสำรวจ พบว่า ความลึกและลักษณะของชั้นดินแต่ละชั้นประกอบด้วย ชั้นผิวดินมีความลึกจากผิวดิน +0.00 ถึง -4.00 เมตร ชั้นดินเหนียวอ่อนมีความลึกเท่ากับ -4.00 ถึง -11.50 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งมีความลึกเท่ากับ -11.50 ถึง -13.00 เมตร ชั้นทรายละเอียดปนดินเหนียวมีความลึกเท่ากับ -13.00 ถึง -17.50 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งมีความลึกเท่ากับ -17.50 ถึง -19.00 เมตร ชั้นทรายละเอียดมีความลึกเท่ากับ -19.00 ถึง -25.00 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งมีความลึกเท่ากับ -25.00 ถึง -28.00 เมตร ชั้นทรายแน่นลึก -28.00 ถึง -30.00 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แบบจำลองลักษณะชั้นดินที่ใช้วิเคราะห์

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์เทียบเท่าของโครงสร้างกำแพง

Parameter	Wall Type-3	Unit
Model	Elastic	-
Young's modulus, (E)	25.5x10 ⁶	kPa
Unit weight, (γ)	24	kN/m ³
Poisson's ratio, (ν)	0.15	-
Moment of inertia, (I)	6.67x10 ⁻⁴	m ⁴ /m
Weight, (W)	4.80	kN/m
Section area, (A)	0.20	m ²

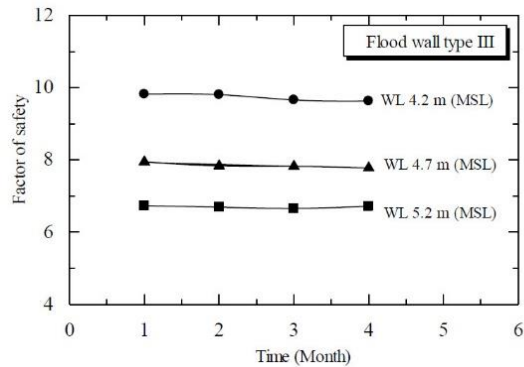
5.2 พารามิเตอร์โครงสร้างกำแพง

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์เทียบเท่าของโครงสร้างกำแพงกันน้ำ Wall type-3 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากทางผู้ออกแบบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างกำแพงกันน้ำ และยิ่งไปกว่านั้นผู้เขียนได้ทดสอบคุณสมบัติทางกลของตัวโครงสร้างกำแพงกันน้ำในสนามพร้อมกันกับเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะเก็บตัวอย่างในสนาม เพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตพร้อมกับเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับข้อมูลของผู้ออกแบบ จากผลการทดสอบกำแพงกันน้ำชนิด Wall type-3 และเปรียบเทียบกับผู้ออกแบบ พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกในห้องปฏิบัติการมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 40 MPa มีค่ามากกว่าผู้ออกแบบกำหนดไว้ที่ 35 MPa และมีชั้นคุณภาพของคอนกรีตเป็นไปตาม C35/40 มอก. 213-2552 สำหรับเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาด DB12 เกรด SD-40 มีกำลังดึงที่จุดครากเฉลี่ยเท่ากับ 603 MPa มีค่ามากกว่าผู้ออกแบบกำหนดไว้เท่ากับ 400 MPa และมีคุณสมบัติทางกลตรงตามมาตรฐานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตชนิดเหล็กข้ออ้อย มอก. 24-2548 จากผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของกำแพงกันน้ำชนิด Wall type-3 ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นผู้เขียนได้นำข้อมูลผลการเปรียบเทียบนี้มาพิจารณาเลือกใช้พารามิเตอร์เทียบเท่าของโครงสร้างกำแพงกันน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับแบบจำลองโครงสร้างกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพภายในของโครงสร้างกำแพงกันน้ำในโปรแกรม Plaxis 2D เป็นแบบยึดหยุ่นเชิงเส้น แนวคิดของทฤษฎีนี้ใช้สำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงที่กระทำ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุภายใต้การกระทำของแรงภายนอก เพื่อวิเคราะห์หาแรงดัดและแรงเฉือน ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างกำแพงกันน้ำโดยที่พฤติกรรมของโครงสร้างยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่น

6. ผลการวิเคราะห์

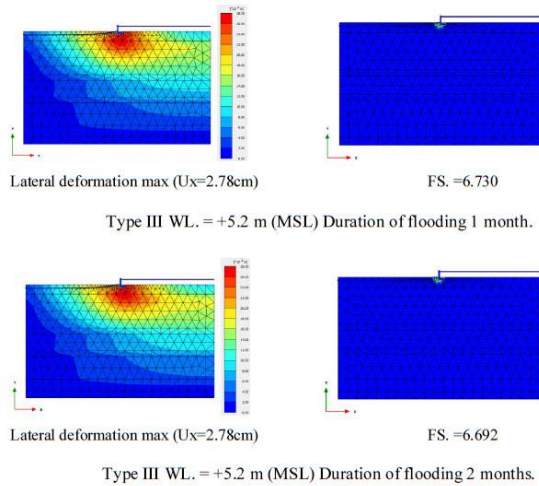
การตรวจสอบโครงสร้างกำแพงกันน้ำได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสามส่วนได้แก่ การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก เสถียรภาพภายใน และการซึมผ่านน้ำในมวลดิน ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังนี้

6.1 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอก

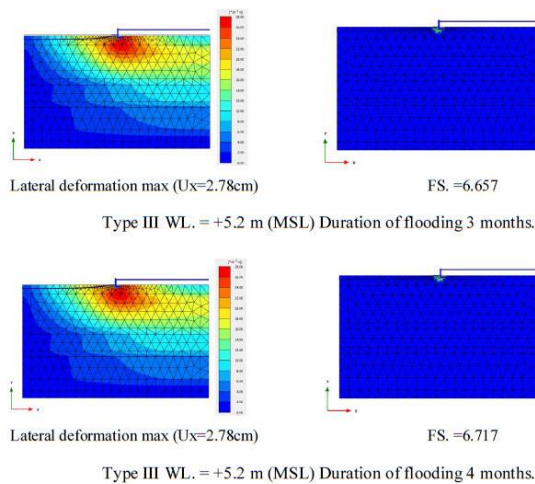


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อ้างอิงจากวิธีการ $c-\phi$ reduction method ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D [6] ของกำแพงกันน้ำชนิด Retaining wall type-3 พบว่าเสถียรภาพภายนอกของโครงสร้างกำแพงกันน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำและระยะเวลาอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำก่อให้เกิดแรงดันด้านข้างที่กระทำต่อโครงสร้างกำแพงกันน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [7] ดังนั้นอัตราส่วนความปลอดภัยจึงมีค่าที่ลดน้อยลงตามการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งมีค่าระหว่าง 6.730 ถึง 6.717 การเคลื่อนตัวในแนวราบเท่ากับ 2.78 cm ที่ระดับน้ำ +5.20 MSL. ในระยะเวลา 1 ถึง 4 เดือนตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการเคลื่อนตัวของมวลดินตามแนวราบมากที่สุดเกิดที่บริเวณฐานของโครงสร้างกำแพงกันน้ำ



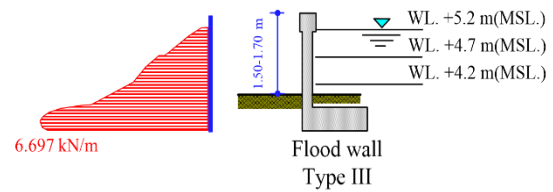
รูปที่ 10 การเคลื่อนตัวและอัตราส่วนความปลอดภัยของกำแพง Wall type-3 ที่เวลา 1 ถึง 2 เดือน (+5.20 m. MSL)



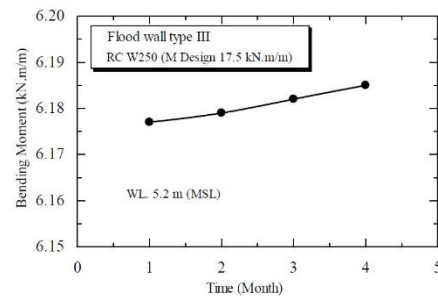
รูปที่ 11 การเคลื่อนตัวและอัตราส่วนความปลอดภัยของกำแพง Wall type-3 ที่เวลา 3 ถึง 4 เดือน (+5.20 m. MSL)

การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำและระยะเวลาที่น้ำท่วมจาก 1 ถึง 4 เดือน (รูปที่ 10-11) ก่อให้เกิดผลกระทบต่อารลดลงของอัตราส่วนปลอดภัยและการเคลื่อนตัวของมวลดินที่มากขึ้น [8, 9]

6.2 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใน



รูปที่ 12 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในกำแพง Retaining Wall (+5.20 m. MSL)



Relationship between time vs bending moment (Wall type 3).

รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในกำแพง

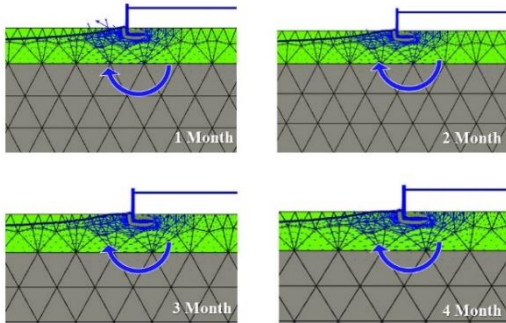
รูปที่ 12-13 แสดงค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D ซึ่งค่าแรงเฉือนที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 6.697 kN/m ส่วนโมเมนต์ดัดนั้นมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 6.185 kN-m/m ที่ระดับน้ำสูงสุด +5.20 เมตร (MSL) และที่ระยะเวลา 4 เดือน

ระยะเวลาของน้ำที่ท่วมจาก 1 ถึง 4 เดือน ทำให้ค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างกำแพงกันน้ำนั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพภายนอกเมื่อระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเสถียรภาพภายในมีความสัมพันธ์กันโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของเสถียรภาพภายนอก

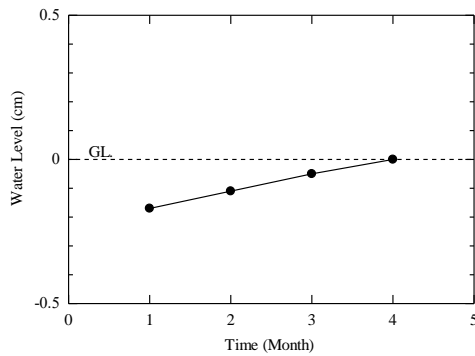
6.3 การซึมผ่านน้ำในมวลดิน

การวิเคราะห์การซึมผ่านน้ำในมวลดินพบว่า ระดับน้ำมีทิศทางไหลเข้ามายังฝั่งด้านในของกำแพงกันน้ำ

[10] และลอดผ่านใต้ฐานกำแพงแล้วพุ่งขึ้นผิวดิน การซึมผ่านของน้ำที่ไหลเข้ามาฝั่งด้านในกำแพงดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ทิศทางการไหลของน้ำในมวลดิน



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับระดับน้ำ

ผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นการซึมผ่านของน้ำใต้ดินฝั่งด้านในกำแพงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยมีค่าระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ -0.17, -0.10, -0.05 และ 0.00 เซนติเมตร ที่ระยะเวลา 1 ถึง 4 เดือน ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 15 นอกจากนี้ทิศทางการไหลของน้ำยังส่งผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพภายนอกลดลง เนื่องจากว่าทิศทางการไหลของน้ำก่อให้เกิดแรงดันน้ำใต้ดินฝั่งด้านนอกกำแพงเพิ่มขึ้นทำให้ตัวโครงสร้างกำแพงต้องรับแรงผลักดันข้างและเคลื่อนตัวด้านมวลดินฝั่งด้านในกำแพง

จากข้อมูลของแบบก่อสร้างทำให้ทราบว่ากำแพงกั้นน้ำชนิด Wall type-3 นี้ออกแบบให้วางบนชั้นผิวดิน ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่มากกว่าชั้นดินเหนียว

อ่อนทำให้น้ำฝั่งด้านนอกกำแพงนั้นไหลผ่านเฉพาะในชั้นผิวดินเท่านั้น และยังพบว่าระยะทางที่น้ำไหลลอดผ่านใต้ฐานกำแพงนั้นสั้นมาก จึงทำให้น้ำไหลซึมผ่านเข้าไปยังเขตพื้นที่ของโครงการได้ง่าย

7. สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาเสถียรภาพ พฤติกรรม และการซึมผ่านน้ำในมวลดินของโครงสร้างกำแพงกั้นน้ำ Wall type-3 เท่านั้น ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 อัตราส่วนความปลอดภัยเสถียรภาพภายนอกของกำแพงกั้นน้ำขึ้นอยู่กับระดับความสูงของน้ำและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนปลอดภัยที่เวลา 4 เดือน มีค่าเท่ากับ 6.717 มากกว่าผู้ออกแบบกำหนดไว้ที่ 1.50 ดังนั้นกำแพงกั้นน้ำนี้มีเสถียรภาพภายนอกเพียงพอ

6.2 เสถียรภาพภายในหรือความสามารถในการรับแรงภายในที่เกิดขึ้นในโครงสร้างกำแพงกั้นน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความสูงของน้ำและระยะเวลาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของกำแพงกั้นน้ำกับข้อมูลของผู้ออกแบบ ซึ่งออกแบบให้กำแพงชนิดนี้สามารถรับแรงดัดเท่ากับ 17.50 kN-m/m และแรงเฉือนเท่ากับ 62.10 kN/m เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ พบว่า โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 6.185 kN-m/m คิดเป็นอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.83 และแรงเฉือนมีค่าเท่ากับ 6.697 kN/m คิดเป็นอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 9.27 ที่ระยะเวลา 4 เดือน (+5.20 MSL) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างกำแพงกั้นน้ำมีความสามารถในการรับแรงภายในที่เกิดขึ้นได้ปลอดภัย

6.3 ทิศทางการไหลและการซึมผ่านของน้ำในมวลดินที่ได้จากการวิเคราะห์มีทิศทางการไหลเข้าฝั่งด้านในเขตพื้นที่ของโครงการ แต่การซึมผ่านน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์แทบ

จะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบในเรื่องการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำภายในโครงการ

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนงบประมาณและเครื่องมือในการทดสอบและขอขอบพระคุณนิคมอุตสาหกรรมนวนคร จ.ปทุมธานี และบริษัทอิตาเลียนไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และข้อมูลในสนาม

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] JICA, Technical Standards and Guidelines for Planning of Flood Control Structures, Tokyo, 2010.
- [2] C. C. Fang and Y. S. Fang, "Numerical solution of active earth pressure on rigid retaining walls built near rock faces," *Computers and Geotechnics*, vol. 37, no. 7-8, pp. 1023-1029, 2010.
- [3] Y. Yan, P. I. Damians and R. Bathurst, "Influence of choice of FLAC and PLAXIS interface models on reinforced soil-structure interactions," *Computers and Geotechnics*, vol. 65, pp. 164-174, 2015.
- [4] A. Udomchai, M. Hoy, S. Horpibulsuk, A. Chinkulkijniwat and A. Arulrajah, "Failure of riverbank protection structure and remedial approach: A case study in Suraburi province, Thailand," *Engineering Failure Analysis*, vol. 91, pp. 243-254, 2018.
- [5] A. Hazen, Water supply, in *American Civil Engineering Handbook*, New York: Wiley, 1930.
- [6] R. Brinkgreve and W. Broere, *PLAXIS 2D Reference Manual 2015*, Delft, Netherlands, 2010.
- [7] R. B. Seed, R. Bea, A. Athanasopoulos-Zekkos, G. Boutwell, J. D. Bray, C. Cheung, D. Cobos-Roa, L. Harder, R. Moss, J. Pestana, M. F. Riemer, D. Rogers, R. Storesund, X. Vera-Grunauer and J. Wartman, "New Orleans and Hurricane Katrina. III: The 17th Street Drainage Canal," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 134, no. 5, pp. 740-761, 2008.
- [8] S. L. Shen, H. N. Wu, Y. J. Cui and Z. Y. Yin, "Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 40, pp. 309-323, 2014.
- [9] S. L. Shen, Z. F. Wang and W. C. Cheng, "Estimation of lateral displacement induced by jet grouting in clayey soils," *Géotechnique*, vol. 67, no. 7, pp. 621-630, 2017.
- [10] X. Wang and M. Castay, "Failure analysis of the breached levee at the 17th Street Canal in New Orleans during Hurricane Katrina," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 49, pp. 812-834, 2012.