



พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจากอิทธิพลของอาคารข้างเคียง

BEHAVIOR OF SHEET PILE WALL MOVEMENT DUE TO NEIGHBORING BUILDING

ศลิษา ไชยพุท¹ พงศ์ศิริ สุนัด² สกาวเดือน ถึงอินทร์³ และธนาตล กงสมบุญ⁴

อาจารย์¹, นักศึกษา^{2,3}, ผู้ช่วยศาสตราจารย์⁴

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงสร้างกันดินชนิดกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีราคาถูก และ ติดตั้งด้วยระยะเวลาอันสั้น แต่ระบบดังกล่าวมีการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงเมื่อเทียบกับ โครงสร้างกันดินชนิดอื่น พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน ออกแบบและวิเคราะห์จากข้อมูลการสำรวจสภาพชั้นดิน โดยไม่ได้คำนึงถึงสภาพสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ โครงการ และสิ่งปลูกสร้าง ที่อยู่ใกล้เคียง การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน ไม่เพียงแต่ส่งผลต่อ โครงการก่อสร้างโดยตรง แต่ยังสามารถส่งผลต่อ โครงสร้างของอาคารข้างเคียงที่มีอยู่เดิมบริเวณรอบ ๆ โครงการก่อสร้าง เป็นผลให้ประชาชนที่อาศัยอยู่ข้างเคียงร้องเรียน และเรียกร้อง ให้ผู้ก่อสร้างรับผิดชอบความเสียหายของทรัพย์สิน ค่าใช้จ่าย เวลา และจิตใจ จนเกิดเป็นคดีความต่าง ๆ มากมาย งานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างกันดินซึ่งได้รับอิทธิพลจากน้ำหนักของอาคารข้างเคียงด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ แบบ 2 มิติ เพื่อวิเคราะห์หาระยะห่างระหว่าง โครงสร้างกันดินและอาคารข้างเคียงที่เหมาะสม ซึ่งจากการศึกษาพบว่า อาคารข้างเคียงที่มีน้ำหนักน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ควรมีระยะห่างระหว่าง โครงสร้างกันดินและอาคารข้างเคียง ไม่น้อยกว่า 2 เมตร และกรณีอาคารข้างเคียงที่มีน้ำหนักมากกว่า 1000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ควรนำความยาวเสาเข็มของอาคารข้างเคียงมาพิจารณา เพื่อกำหนดระยะห่างที่ปลอดภัย

คำสำคัญ: ชีทพืด, ไฟไนท์อีลิเมนต์, ค่าความปลอดภัย, การเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, โครงสร้างข้างเคียง

ABSTRACT

Sheet pile wall has been widely applied due to low cost construction and short time installation. On the other hand, this method has high lateral movement. The lateral movement of sheet pile wall is designed and analyzed base on the soil investigation data, that is not concerned in the construction environment and the neighboring structures. The lateral movement is not only effect to the construction site directly but also effect to the existing building, that makes a complaint and a require for responsibility from the construction company. There are many lawsuits occur which substantially affect to construction project and people, who living near the construction site, in term of asset damage, expenses, time and mind. This paper analyzed the behavior of sheet pile wall

Salisa Chaiyaput¹ Pongsiri Sunath² Sakawduen Thuengain³ and Thanadol Kongsomboon⁴
Lecturer¹, Undergraduate Student^{2,3}, Assistant Professor⁴

due to the effect of neighboring building by using 2D finite element method (FEM) to determine the proper spacing between sheet pile wall and existing building. Consequently, it was found that the spacing between sheet pile wall and existing building should not less than 2 m. in case of the weight of surround building less than $1,000 \text{ kg/m}^2$. On the contrary, the pile depth of existing building should be considered to determine the proper spacing when the weight of surround building more than $1,000 \text{ kg/m}^2$.

KEYWORDS: sheet pile, FEM, factor of safety, lateral movement, neighboring structure

1. บทนำ

การขยายตัวของเขตเมืองเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ในขณะที่พื้นที่ใช้สอยบนดินมีอยู่อย่างจำกัด ส่งผลให้ราคาที่ดินสูงขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล และพบว่าทิศทางการก่อสร้างในแนวราบดังในอดีตที่ผ่านมาถูกเปลี่ยนเป็นการก่อสร้างที่เน้นทิศทางการก่อสร้างในแนวตั้งมากขึ้น เพื่อใช้ที่ดินให้เกิดประโยชน์สูงสุด

จากการก่อสร้างแนวตั้งที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ใต้ดิน โดยโครงสร้างใต้ดินมีการก่อสร้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โครงสร้างกันดินจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญและถูกนำมาใช้งาน เพื่อใช้เป็นโครงสร้างรับแรงดันดินด้านข้าง ซึ่งเกิดจากระดับดินที่ต่างกัน เมื่อมีการก่อสร้าง หรือสภาพธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลงที่ทำให้เกิดระดับดินที่ต่างกัน และมีความลาดชันมากกว่าที่ดินจะคงตัวอยู่ได้อย่างปลอดภัย [1] ดังนั้นเพื่อที่จะป้องกันการพังทลายหรือการเคลื่อนตัวที่มากเกินไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อสร้างบริเวณกรุงเทพมหานครและพื้นที่ในเขตปริมณฑลซึ่งมีสภาพชั้นดินเป็นดินเหนียวอ่อน จึงทำให้ต้องเพิ่มความรอบคอบและความระมัดระวังในการก่อสร้างเป็นพิเศษ ดังนั้นวิศวกรต้องออกแบบและก่อสร้างให้โครงสร้างกันดิน มีความเหมาะสมกับพื้นที่การก่อสร้าง ขั้นตอนการก่อสร้าง ความประหยัด และความปลอดภัยในการก่อสร้าง ระบบป้องกันดินพังทลายในขณะและหลังการขุดดิน ซึ่งโดยทั่วไปจะมีในลักษณะเป็นกำแพงค้ำยัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบกำแพงยืดหยุ่น (Flexible Wall) ซึ่งเหมาะสมกับงานก่อสร้างใต้ดินที่ไม่ลึกมาก เนื่องจากมีราคาถูก ประหยัด แต่ดินจะเกิดการเคลื่อนตัวสูง ส่งผลกับโครงสร้างข้างเคียง เช่น กำแพงเข็มพืดเหล็ก (Steel Sheet Pile Wall) และระบบกำแพงแบบแข็ง (Rigid Wall) เช่น กำแพงกันดิน (Retaining Wall) กำแพงเสาเข็ม (Pile Wall) และกำแพงไดอะแฟรม (Diaphragm Wall)

การศึกษาการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่เกิดจากงานขุดดิน เพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน พบว่าการเลือกระบบป้องกันดินพังทลายและวิธีการก่อสร้างที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ในแต่ละบริเวณที่ก่อสร้าง ขั้นตอนการออกแบบและก่อสร้างเป็นตัวแปรสำคัญที่สุดในการควบคุมการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินให้มีการเคลื่อนตัวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และลดผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียง ประกอบกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดิน ให้การคำนวณมีความถูกต้องแม่นยำ สะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น [2] ซึ่งจากการศึกษาพฤติกรรมและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคาร 2 หลัง ที่ก่อสร้างชิดติดกัน และอยู่ใกล้กำแพงกันดินที่เกิดจากการขุดดิน โดยอาคารดังกล่าวตั้งอยู่ในรัศมีและระยะที่ได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนตัวของดิน ความเสียหายของอาคารได้นำมาพิจารณาเพื่อวิเคราะห์หาความเสียหายที่เกิดขึ้น พบว่ากรณีที่ 2 อาคารปลูกสร้างติดกัน อาคารหลังที่มีความแข็งแรงน้อยและอยู่ใกล้กำแพงกันดินได้รับอิทธิพลของการเคลื่อนตัวที่สูงกว่าผลกระทบและความเสียหายที่เกิดขึ้นมีมากกว่า หากทั้ง 2 อาคารที่อยู่ชิดติดกันมีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน เมื่อมีการเคลื่อนตัวของดินเกิดขึ้น พบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวโครงสร้างหรือตัวอาคารมีค่าน้อยกว่า [3] โดยในการศึกษาวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์นั้น เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุที่มีรูปร่างและคุณสมบัติต่าง ๆ ได้ ด้วยการกำหนดคุณสมบัติที่ต่างกันในแต่ละอีลิเมนต์ เช่น คุณสมบัติของสภาพชั้นดินในแต่ละชั้น ขอบเขตการ

เคลื่อนตัว แรงดันน้ำ และความแรงกระทำต่าง ๆ นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังสามารถที่จะกำหนดความแม่นยำให้การคำนวณอยู่ในขอบเขตที่ต้องการ

การออกแบบระบบโครงสร้างกันดิน พบว่ามีตัวแปรบางตัวมิได้ถูกนำมาพิจารณาประกอบในขั้นตอนการคำนวณและออกแบบ ทำให้เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่พบในสภาวะจริง ทั้งสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกบริเวณก่อสร้าง เช่น อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างเดิมก่อนหรือถอนภายในพื้นที่โครงการก่อสร้าง ประเภทของยานพาหนะของประชาชนที่ใช้ในการสัญจรในพื้นที่ข้างเคียงบริเวณก่อสร้าง หรือลักษณะของอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ข้างเคียงบริเวณก่อสร้าง ตัวแปรที่กล่าวมานั้นอาจส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน ทำให้ค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงในการก่อสร้างสูงเกินกว่าค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการออกแบบ ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวที่ผิดพลาด ส่งผลกระทบต่อบริเวณก่อสร้างและส่งผลกระทบต่อความเสียหายของโครงสร้างอาคารที่อยู่ข้างเคียง จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยและตัวแปรที่ส่งผลให้โครงสร้างกันดินเกิดการเคลื่อนตัว ได้แก่ อิทธิพลของน้ำหนักโครงสร้างหรืออาคารข้างเคียง ระยะห่างระหว่างกำแพงกันดินและอาคารข้างเคียงที่เหมาะสม และลักษณะฐานรากของอาคารข้างเคียง เช่น ฐานรากแผ่และเสาเข็มสั้น เพื่อใช้เป็นแนวทางประกอบการพิจารณาออกแบบและก่อสร้างต่อไป

2. การเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด

การเสวยรูปทุกรูปแบบของกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile) จะเกิดขึ้นพร้อมกับการวิบัติของกำแพงเข็มพืดที่มีลักษณะป่องเข้า (Inward Bulging) การเสวยรูปจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าสติเฟเนสของเข็มพืด การเสวยรูปของกำแพงเข็มพืด แบ่งออกเป็น 4 รูปแบบดังนี้

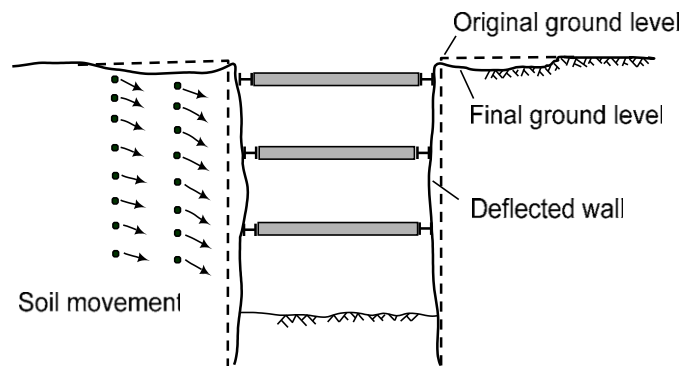
1) การเคลื่อนตัว (Translation) มีการเคลื่อนตัวเกิดขึ้นโดยเฉพาะบริเวณส่วนล่างของกำแพงเข็มพืด สาเหตุจากปลายของกำแพงเข็มพืดยังไม่ถึงชั้นดินแข็งทำให้มีการเคลื่อนตัวเกิดขึ้น

2) การหมุนของกำแพงเข็มพืดส่วนบน (Rotational at Top) การวิบัติเกิดขึ้นในลักษณะหมุน เนื่องจากกำแพงเข็มพืดวางอยู่บนชั้นดินแข็ง การเสวยรูปแบบนี้รวมไปถึงการเสวยรูปในลักษณะคานยื่น (Cantilever Type) ซึ่งจะพบในช่วงแรกของการขุดดิน และส่วนมากเกิดขึ้นก่อนขั้นตอนการติดตั้ง Strut

3) การหมุนของกำแพงเข็มพืดส่วนล่าง (Rotational at Bottom) การเสวยรูปของกำแพงเข็มพืดเกิดจากการวิบัติแบบหมุนบริเวณส่วนล่างของกำแพงเข็มพืด โดยไม่มีการวิบัติในลักษณะเคลื่อนตัว (Translation) ร่วมด้วย มีสาเหตุมาจาก การขุดดินและติดตั้งค้ำยันใกล้เคียงกับระดับดินเดิมหลังกำแพงเข็มพืด และกำแพงเข็มพืดวางอยู่บนชั้นดินอ่อน

4) การหมุนจากกรณีปลายเข็มทั้งสองด้านถูกยึด (Fixed) การเสวยรูปที่เกิดขึ้นที่ปลายของกำแพงเข็มพืดส่วนบนและส่วนล่างในลักษณะหมุน โดยกำแพงเข็มพืดไม่มีการเคลื่อนตัว (Translation) เกิดขึ้น ส่วนมากเกิดกับงานขุดที่มีระดับค้ำยันใกล้เคียงกับระดับดินเดิมหลังกำแพงเข็มพืด และมีกำแพงวางอยู่บนชั้นดินแข็ง

เนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างกำแพงเข็มพืด ซึ่งออกแบบให้มีลักษณะเป็นกำแพงกันดินชั่วคราว ที่ติดตั้งให้อยู่ชิดกับโครงสร้างของอาคาร หรือบ้านเรือนที่ปลูกสร้างมาก่อนแล้ว สาเหตุมาจากที่ดินซึ่งมีราคาแพง ทำให้เจ้าของงานหรือเจ้าของโครงการส่วนใหญ่ จำเป็นที่จะต้องใช้พื้นที่โครงการให้เกิดประโยชน์และความคุ้มค่ามากที่สุด ในทางทฤษฎีการคำนวณออกแบบโครงสร้างกันดินจะมีเสถียรภาพเพียงพอ แต่บางครั้งกำแพงกันดินจะมีการเคลื่อนตัวสูงมากในความเป็นจริง ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินในบริเวณรอบ ๆ พื้นที่งานขุด และส่งผลให้เกิดการวิบัติของอาคารที่อยู่ข้างเคียงได้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเคลื่อนตัวของดินบริเวณรอบโครงสร้างกันดิน [4]

การกำหนดระดับความระมัดระวังจากการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน ประเมิน โดยใช้ค่าการเคลื่อนตัวที่คำนวณจาก ทฤษฎีในขั้นตอนการออกแบบ เทียบกับค่าการเคลื่อนตัวของ โครงสร้างกันดินหน้างาน [5] แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

1) Alert Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัด ได้จริงมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ ผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายต้องทำการตรวจสอบขั้นตอนการก่อสร้าง

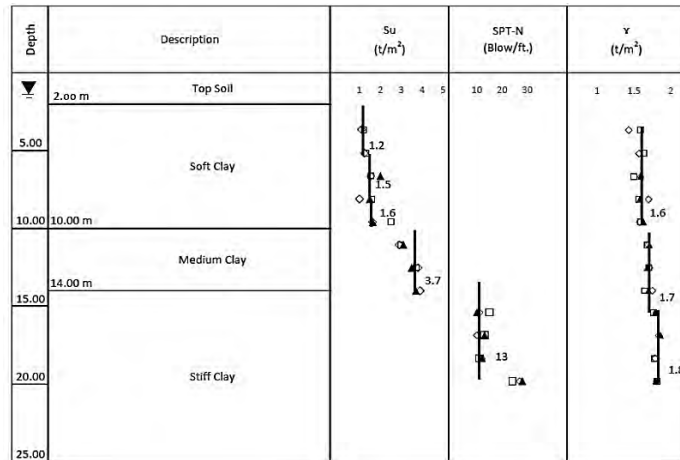
2) Alarm Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัด ได้จริงมีค่ามากกว่าร้อยละ 80 ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ ผู้เกี่ยวข้องต้องปรึกษาผู้ออกแบบเพื่อความมั่นใจว่าระบบการก่อสร้างมีความปลอดภัยและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับ โครงสร้างข้างเคียง

3) Action Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัด ได้จริงมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ ต้องหยุดการก่อสร้างเพื่อตรวจสอบความปลอดภัยและผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียงอย่างละเอียด

3. พื้นที่ทำการศึกษา

3.1 สภาพชั้นดิน

พื้นที่ทำการศึกษาดังอยู่บนถนนสุขุมวิท ซึ่งเป็นพื้นที่เศรษฐกิจใจกลางกรุงเทพมหานคร เป็นการก่อสร้างอาคารที่พักอาศัย ขนาดใหญ่ มีชั้นจอดรถใต้ดิน 5 ชั้น ซึ่งต้องขุดดินลึก 13 เมตร ข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดินจนถึงระดับความลึก 25 เมตร ดัง แสดงในรูปที่ 2 โดยสามารถแบ่งชั้นดินเหนียวอ่อนเป็น 4 ชั้น ประกอบด้วย



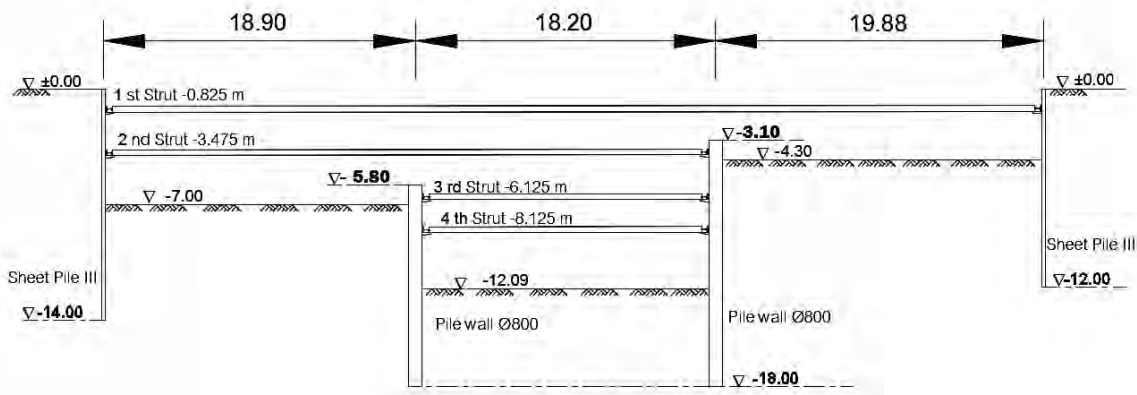
รูปที่ 2 ลักษณะชั้นดินของหลุมเจาะสำรวจระดับความลึก 25 เมตร

ชั้นผิวดิน (Top Soil) มีความหนาจากระดับผิวดินประมาณ 2.00 เมตร จากนั้นเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) ที่ระดับ 2.00 เมตร ถึงระดับ 10.00 เมตร จากผิวดิน และเป็นชั้นดินเหนียวปานกลาง (Medium Clay) ที่ระดับ 10.00 ถึงระดับประมาณ 14.00 เมตร ส่วนชั้นสุดท้ายเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) ที่ระดับตั้งแต่ 14.00 เมตร ถึงระดับสิ้นสุดการเจาะสำรวจ

3.2 ระบบกำแพงเข็มพืด

ระบบป้องกันดินพังทลายในโครงการแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ระบบกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) และ ระบบกำแพงเสาเข็ม (Pile Wall) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งมีลำดับการดำเนินการก่อสร้าง 7 ขั้นตอนดังนี้

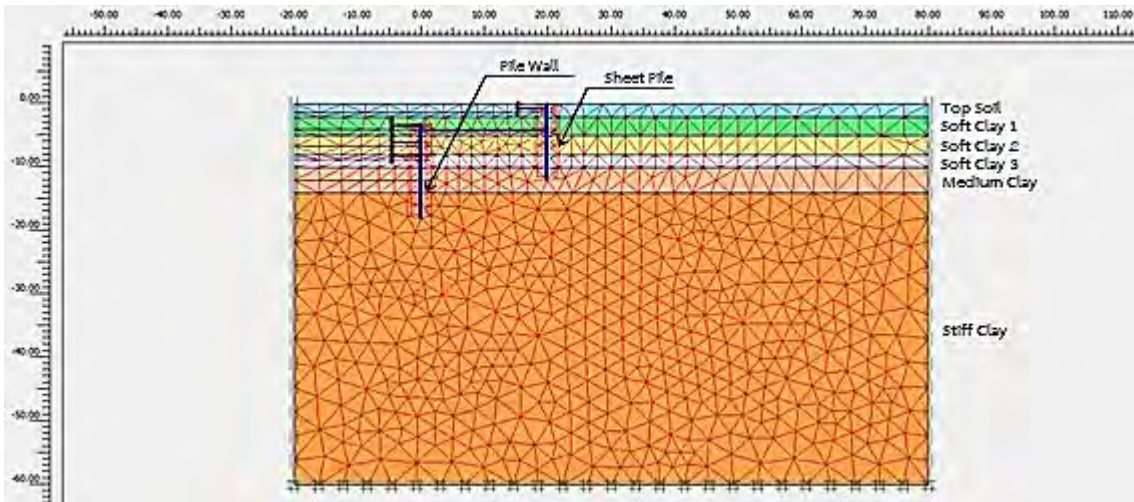
- 1) ก่อสร้าง Pile Wall และกวด Sheet Pile รอบนอก
- 2) ขุดดินถึงระดับ -1.40 เมตร และติดตั้งค้ำยันที่ระดับ -0.825 เมตร
- 3) ขุดดินถึงระดับ -4.05 เมตร และติดตั้งค้ำยันที่ระดับ -3.475 เมตร และอัดแรงในค้ำยัน 10 t/m
- 4) ขุดดินถึงระดับ -4.30 เมตร
- 5) ขุดดินถึงระดับ -6.70 เมตร และติดตั้งค้ำยันที่ระดับ -6.125 เมตร และอัดแรงในค้ำยัน 10 t/m
- 6) ขุดดินถึงระดับ -8.70 เมตร และติดตั้งค้ำยันที่ระดับ -8.125 เมตร และอัดแรงในค้ำยัน 20 t/m
- 7) ขุดดินถึงระดับสุดท้าย -12.09 เมตร เท lean Concrete ชน Pile Wall และขุดเพื่อก่อสร้าง Pile Cap ที่หลุม



รูปที่ 3 รูปตัดระบบค้ำยัน กำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) และ กำแพงเสาเข็ม (Pile Wall)

4. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด ถูกนำมาศึกษาและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ (2D Finite Element Method) บนระนาบความเครียด (Plane Strain) กำหนดให้ 1 ชั้นส่วนรูปสามเหลี่ยม (Triangular Element) ประกอบไปด้วย 15 จุดต่อ (Nodes) และกำหนดคอลลิเมนต์ที่มีความละเอียดมาก (Very Fine Mesh) เพื่อมาใช้ในวิเคราะห์ แบบจำลองกำแพงเข็มพืดมีขนาด 100 เมตร ในแนวแกน x และ 60 เมตร ในแนวแกน y ตามลำดับ ซึ่งขนาดของแบบจำลองดังกล่าวมีขนาดเพียงพอ ทำให้ไม่ได้รับอิทธิพลจากขอบเขตของแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4 ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจสภาพชั้นดินในบริเวณก่อสร้างนำมาเป็นค่าตัวแปรเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงเข็มพืดในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 1 สภาพชั้นดินที่จำลองแบ่งเป็น ชั้นผิวดิน (Top Soil) ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) และชั้นดินแข็ง (Stiff Clay) เสมือนจริงตามข้อมูลที่ได้จากหลุมเจาะ เนื่องจากดินเหนียวอ่อนเป็นชั้นดินที่คุณสมบัติในการรับน้ำหนักไม่ดี จึงทำให้ค่าการเคลื่อนตัวในชั้นดินดังกล่าวมีค่าสูง และข้อมูลจากการเจาะสำรวจพบว่าดินเหนียวอ่อนมีความลึก 8 เมตร ดังนั้นเพื่อให้ผลการศึกษาที่มีความละเอียดใกล้เคียงสภาพดินที่มีอยู่ในธรรมชาติมากที่สุด ชั้นดินเหนียวอ่อนในแบบจำลอง จึงถูกแบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ ชั้นดินเหนียวอ่อนชั้นที่ 1 (Soft Clay 1) มีความลึกตั้งแต่ระดับ 2.00-5.00 เมตร ชั้นดินเหนียวอ่อนชั้นที่ 2 (Soft Clay 2) มีความลึกตั้งแต่ระดับ 5.00-8.00 เมตร และ ชั้นดินเหนียวอ่อนชั้นที่ 3 (Soft Clay 3) มีความลึกตั้งแต่ระดับ 8.00-10.00 เมตร ตามลำดับ โดยระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึก 1.5 เมตร จากผิวดิน การวิเคราะห์กำหนดให้พฤติกรรมของดินอยู่ภายใต้เงื่อนไขการวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Failure Criteria) โดยมีพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) ขึ้นตอนและลำดับการวิเคราะห์ในแบบจำลองได้กำหนดขึ้นตามขั้นตอนการก่อสร้างจริง



รูปที่ 4 แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

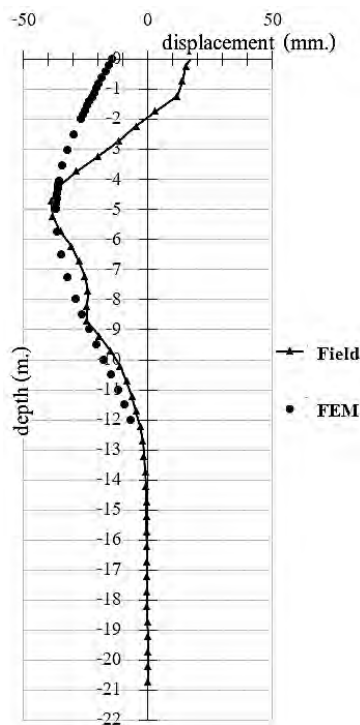
Depth (m)	Type of Soil	γ (kN/m ³)	Su (kPa)	Eu (kPa)	ν	Material Model	Material Type	Interfaces
0.0 - 2.0	Top Soil	18	40	20000	0.35			
2.0 - 5.0	Soft Clay 1	16	12	1800	0.35			
5.0 - 8.0	Soft Clay 2	16	15	2250	0.35	Mohr-Colomb	Undrained	0.7
8.0 - 10.0	Soft Clay 3	16	16	2400	0.35			
10.0 - 14.0	Medium Clay	17	37	18500	0.35			
14.0 - 25.0	Stiff Clay	18	90	108000	0.35			

5. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

บริเวณก่อสร้างมีการติดตั้ง Inclinometer เพื่อวัดค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) ดังนั้น เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรที่แสดงคุณสมบัติของชั้นดินในแบบจำลองที่สร้างขึ้น ให้มีค่าใกล้เคียงกับคุณสมบัติของชั้นดิน ในบริเวณก่อสร้าง การวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) จึงเป็นขั้นตอนสำคัญ เพื่อเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงของกำแพงเข็มพืดในบริเวณก่อสร้าง และค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลอง โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) การสร้างแบบจำลองภายใต้เงื่อนไข มอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) ซึ่งประกอบด้วย Soil Strength Parameter ที่สำคัญ 5 ตัวแปร ได้แก่ ค่าหน่วยน้ำหนัก (γ), ค่าโมดูลัสของดิน (Eu), อัตราส่วนปัวซอง (ν), ค่าแรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดิน (c), และ ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) อัตราส่วน Eu/Su เพื่อใช้วิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด คือ Eu/Su = 150, 500, 1200 สำหรับดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็งปานกลาง และดินเหนียวแข็ง ตามลำดับ สอดคล้องกับอัตราส่วน Eu/Su ที่แนะนำโดย วันชัย (2539) [6]

รูปที่ 5 แสดงการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Black Analysis) เพื่อปรับเทียบค่าความถูกต้องของแบบจำลอง (Validate) ด้วยค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดที่ตรวจวัดในบริเวณก่อสร้างจากการติดตั้ง Inclinometer และค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระดับความลึกต่าง ๆ ที่เวลา 120 วัน ภายหลังจากติดตั้งกำแพงเข็มพืด จากกราฟค่าการ

เคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงเข็มที่ผิวดิน จนถึงระดับความลึก 4 เมตร ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีค่ามากกว่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้จริงบริเวณก่อสร้าง เนื่องจากดินบริเวณก่อสร้างอยู่ในสภาพอัดแน่นเกินปกติซึ่งมีค่า OCR สูง เพราะบริเวณดังกล่าวเดิมเป็นสถานที่ตั้งของอาคารพาณิชย์ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มที่ระดับความลึกตั้งแต่ 4 เมตร ลงไปถึงปลายของกำแพงเข็ม พบว่าค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ และค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มที่วัดได้จาก Inclinometer มีค่าใกล้เคียงกัน สามารถวิเคราะห์ได้ว่าแบบจำลองกำแพงเข็มที่สร้างขึ้น และตัวแปรที่นำมาจากข้อมูลการสำรวจมีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลการเคลื่อนตัวที่วัดได้จากสภาพจริงในบริเวณก่อสร้าง ดังนั้นแบบจำลองและตัวแปรดังกล่าวสามารถนำมาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกำแพงเข็มต่อไป



รูปที่ 5 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงเข็มที่ระดับความลึกต่าง ๆ (120 วัน)

6. เงื่อนไขในการวิเคราะห์

การศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินที่ได้รับอิทธิพลจากน้ำหนักของอาคารข้างเคียง มีตัวแปรที่มีอิทธิพล ดังนี้

1) ระยะห่าง (Spacing) ระหว่างกำแพงเข็ม และ โครงสร้างอาคารข้างเคียง อ้างอิงจากกฎกระทรวง ฉบับที่ 55 (พ.ศ.2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 หมวด 4 แนวอาคารและระยะต่างๆของอาคาร ข้อ 49 [7] ดังนี้

“ข้อ 49 การก่อสร้างอาคารในบริเวณด้านข้างของห้องแถวหรือตึกแถว”

(1) ถ้าห้องแถวหรือตึกแถวนั้นมีจำนวนรวมกันได้ตั้งแต่สิบคูหา หรือมีความยาวรวมกันได้ตั้งแต่ 40 เมตรขึ้นไป และอาคารที่สร้างขึ้นเป็นห้องแถวหรือตึกแถว ห้องแถวหรือตึกแถวที่สร้างขึ้นต้องห่างจากผนังด้านข้างของห้องแถว หรือตึกแถวเดิมไม่น้อยกว่า 4 เมตร แต่ถ้าเป็นอาคารอื่นต้องห่างจากผนังด้านข้างของห้องแถว หรือตึกแถวเดิมไม่น้อยกว่า 2 เมตร

(2) ถ้าห้องแถว หรือตึกแถวนั้นมีจำนวนไม่ถึงสิบคูหาและความยาวรวมกันไม่ถึง 40 เมตร อาคารที่สร้างขึ้นจะต้องห่างจากผนังด้านข้างของห้องแถว หรือตึกแถวเดิมไม่น้อยกว่า 2 เมตร”

2) น้ำหนักของโครงสร้างหรืออาคารข้างเคียง (Distributed Load) ตั้งแต่ 1000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ในการวิเคราะห์ น้ำหนักรวมของอาคารตั้งแต่ 1 ชั้นขึ้นไปจนถึง 2 ชั้น กรณีอาคารที่สูง 3 ชั้น ขึ้นไป การออกแบบจะเป็นลักษณะฐานรากเสาเข็มซึ่งมีความยาว และวางบนชั้นดินแข็ง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างกันดิน

3) ความยาวของเสาเข็มของโครงสร้างข้างเคียง (Pile's Depth) ตั้งแต่ 0-10 เมตร ซึ่งเป็นความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ

ค่าของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเสาเข็มพืดที่ได้รับอิทธิพลจากโครงสร้างหรืออาคารข้างเคียง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์

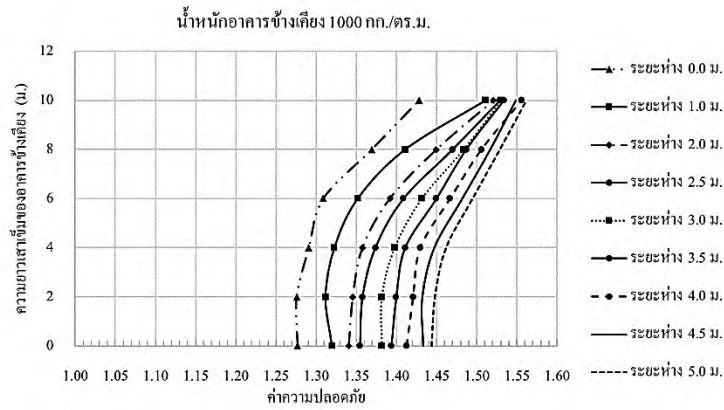
ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
ระยะห่าง (Spacing)	0 – 5 ม.
น้ำหนักของโครงสร้างอาคารข้างเคียง (Distributed Load)	0 – 3000 กก./ตร.ม.
ความยาวของเสาเข็มของโครงสร้างข้างเคียง (Pile's Depth)	0 – 10 ม.

7. ผลการวิเคราะห์

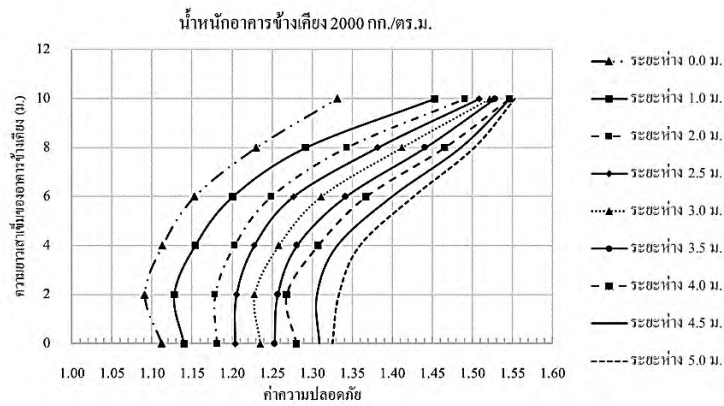
การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ากรณีไม่พิจารณาน้ำหนักของโครงสร้างหรืออาคารข้างเคียง มีค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) ประมาณ 1.5 ซึ่งการวิเคราะห์ที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขสภาพชั้นดินไม่ถูกรบกวน ดังนั้นการคำนวณจึงไม่คำนึงถึงค่า OCR ของผิวดิน (Top Soil) รูปที่ 6, 7 และ 8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) และความยาวเสาเข็มของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth) ที่ระยะห่าง (Spacing) ต่าง ๆ โดยกำหนดน้ำหนักของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) เท่ากับ 1000, 2000 และ 3000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ และจากกราฟสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้คือ

- 1) กรณีอาคารข้างเคียงมีน้ำหนัก 1000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร
 - ระยะห่างจากกำแพงเข็มพืด ควรมีระยะตั้งแต่ 2 เมตร ขึ้นไป ในทุกความยาวเสาเข็ม
- 2) กรณีอาคารข้างเคียงมีน้ำหนัก 2000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร
 - ระยะห่างจากกำแพงเข็มพืด ควรมีระยะตั้งแต่ 2 เมตร ขึ้นไป และวางอยู่บนเสาเข็มที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 8 เมตร
 - ระยะห่างจากกำแพงเข็มพืดตั้งแต่ 4 เมตร ขึ้นไป และวางอยู่บนเสาเข็มที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 4 เมตร
 - ระยะห่างจากกำแพงเข็มพืดตั้งแต่ 5 เมตร ขึ้นไป สามารถใช้ได้กับความยาวของเสาเข็มในทุกกรณี
- 3) กรณีน้ำหนักของอาคารข้างเคียง 3000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

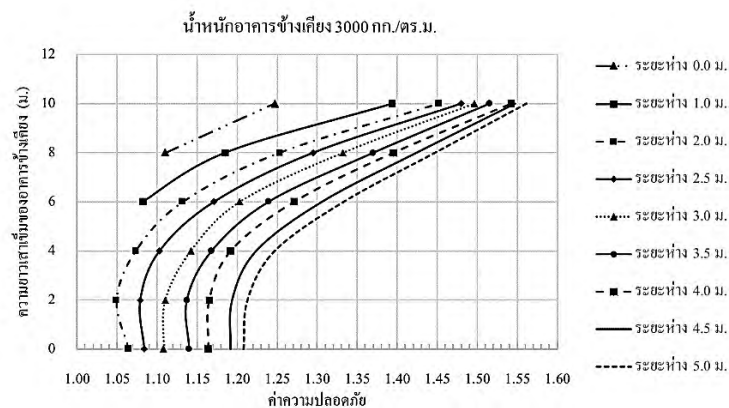
- ระยะห่างจากกำแพงเข็มที่ควรมีระยะตั้งแต่ 2 เมตรขึ้นไป และวางอยู่บนเสาเข็มที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 8 เมตร
- ระยะห่างจากกำแพงเข็มที่ควรมีระยะตั้งแต่ 4 เมตร ขึ้นไป และวางอยู่บนเสาเข็มที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 6 เมตร



รูปที่ 6 ค่าความปลอดภัยจากอิทธิพลของน้ำหนักอาคารข้างเคียง 1000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร



รูปที่ 7 ค่าความปลอดภัยจากอิทธิพลของน้ำหนักอาคารข้างเคียง 2000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร



รูปที่ 8 ค่าความปลอดภัยจากอิทธิพลของน้ำหนักอาคารข้างเคียง 3000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

จากกราฟพบว่าเมื่อเข็มมีความยาวเพิ่มมากขึ้น และ ระยะห่างระหว่างโครงสร้างกันดินกับอาคารข้างเคียงมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยในทุกกรณี หากเป็นกรณีที่พิจารณาหน้าหนึ่งของอาคารข้างเคียง จะพบว่าหน้าหนึ่งของอาคารข้างเคียงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) มีค่าลดลง

8. สรุป

การศึกษาการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน จากอิทธิพลของระยะห่างจากตำแหน่งกำแพงเข็มพืดถึงอาคารข้างเคียง (Spacing) หน้าหนึ่งของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) และความยาวของเสาเข็มของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth) พบว่า ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) จะสูงขึ้น ทั้งนี้ หากอาคารข้างเคียงมีหน้าหนึ่งน้อย เสาเข็มของอาคารข้างเคียงมีความยาว และ ระยะห่างจากกำแพงเข็มพืดถึงอาคารข้างเคียงมีเพียงพอ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) กำแพงเข็มพืดและ โครงสร้างข้างเคียง ควรมีระยะห่างไม่น้อยกว่า 2 เมตร
- 2) กรณีที่หน้าหนึ่งของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) น้อยกว่า 1000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร กำแพงเข็มพืดและอาคารข้างเคียงควรมีระยะห่างไม่น้อยกว่า 2 เมตร โดยไม่ต้องพิจารณาถึงความยาวเสาเข็มของอาคารข้างเคียง (Pile's Depth)
- 3) กรณีที่หน้าหนึ่งของอาคารข้างเคียง (Distributed Load) ตั้งแต่ 1000 กิโลกรัมต่อตารางเมตรขึ้นไป กำแพงเข็มพืดและ โครงสร้างข้างเคียงควรมีระยะห่างไม่น้อยกว่า 2 เมตร และอาคารหรือโครงสร้างข้างเคียงต้องวางอยู่บนฐานรากเสาเข็มที่มีความลึก (Pile's Depth) มากกว่า 8 เมตร และกรณีระยะห่างระหว่างกำแพงเข็มพืดและ โครงสร้างข้างเคียงมีระยะห่างมากกว่า 4 เมตร อาคารหรือโครงสร้างข้างเคียงต้องวางอยู่บนเสาเข็มที่มีความลึก (Pile's Depth) มากกว่า 6 เมตร

เอกสารอ้างอิง

- [1] Maireang, V. Earth retaining structure, *Handout*, 21 August 2007. Available from: http://irrigation.rid.go.th/rid4/km4/_data/58/rampart%20design.pdf [Accessed 30 September 2017] (in Thai).
- [2] Thasnanipan, N. *et al.* Wall movement induced by underground structure construction. *The 12th National Convention on Civil Engineering*, Amarin Lagoon Hotel, Phitsanulok, 2-4 May 2007 (in Thai).
- [3] Son, M. and Cording, E. J. Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2005, 131(2), pp. 162-177.
- [4] Williams, B.P and Waite, D. *The design and construction of sheet - piled cofferdams*. Construction Industry Research and Information Association, Special Publication 95, Thomas Telford Publication, 1993.
- [5] Teparaksa, W. Damage assessment due to deep braced excavation nearby the existing structures in Bangkok soft clay. *The 8th National Convention on Civil Engineering*, Hotel Sofitel Raja Orchid, Khon Kaen, 23-25 October 2002 (in Thai).
- [6] Teparaksa, W. Design of sheet pile bracing system for deep excavation in soft Bangkok clay. *Seminar on Foundation Work and Underground Construction*, Engineering Institute of Thailand, 1991 (in Thai).
- [7] Ministerial Regulation No.55 (B.E. 2543), Issued by virtue of the Building Control Act B.E. 2522, Chapter 4 Building boundary and clearance Clause 49 [28 July B.E. 2543].