

## การประเมินความน่าจะเป็นของความเสียหายจากระบบกำแพงกันดินแบบเข็มพืดค้ำยันในงานขุด เพื่อใช้ในธุรกิจประกันภัย

### Evaluation of Damage Probability from Sheet Pile-Braced Cut System for Insurance Business

วรสิทธิ์ กิจกิตติกร<sup>1\*</sup> และ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup> นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน 10900

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน 10900

E-mail: <sup>1</sup> waurasith.k@bangkokinsurance.com, <sup>2</sup> soralump\_s@yahoo.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประเมินความเสียหายและความน่าจะเป็นของอาคารที่อยู่บริเวณโครงการก่อสร้างชั้นใต้ดินที่มีระบบกำแพงกันดินแบบเข็มพืดค้ำยันในชั้นดินเหนียวอ่อน วิธีการประเมินความเสียหายได้จากวิธีจำลองโครงสร้างอาคารและระบบกำแพงกันดิน โดยใช้น้ำหนักอาคารกระทำในแบบจำลองโครงสร้างซึ่งเป็นผลให้ค่าการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของอาคารในแบบจำลองสอดคล้องกับสภาพจริง ความเสียหายของอาคารที่เกิดขึ้นจากการเสียรูปเชิงมุมสามารถประเมินได้จากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ นอกจากนี้การประเมินความเสียหายด้วยวิธีเอ็มไพริคัลจากค่าดัชนีวัดความเสียหาย Damage Potential Index (*DPI*) ซึ่งใช้ตัวแปรต่างๆที่สำคัญได้แก่ ความแข็งแรงของระบบกำแพงกันดิน ค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ความแข็งแรงของสิ่งปลูกสร้าง และระยะห่าง ผลการประเมินความเสียหายสอดคล้องกับความเสียหายจริง ค่าดัชนีวัดความเสียหายสามารถวิเคราะห์ในเชิงความน่าจะเป็นด้วยวิธี First Order Reliability Method (*FORM*) โดยพิจารณา แรงต้านทานของอาคาร Resistance (*R*) แรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของดิน Load (*L*) รวมถึงความไม่แน่นอนของดินและวัสดุอื่นๆและ โมเดลโบลอช

การประเมินความเสียหายและความน่าจะเป็นของอาคารสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในธุรกิจประกันภัย โดยความเสียหายในระดับร้ายแรงของอาคารต้องพิจารณาค่าร้อยละของอาคารที่เสียหาย และกำหนดจำนวนเงินความรับผิดชอบส่วนแรกสูง และจำกัดจำนวนเงินความรับผิดชอบต่ำกว่าปกติ **คำสำคัญ:** ระบบกำแพงกันดินแบบเข็มพืด, ความน่าจะเป็นของความเสียหาย, ประกันภัยงานก่อสร้าง, ค่าดัชนีวัดความเสียหาย

#### Abstract

This thesis is study to evaluate level of damage and probability of damage for adjacent building that induced the damage by the sheet pile braced-cut excavation in soft clay. The procedure of damage evaluation uses finite element analysis by model structure building and braced-cut excavation including building weight act on structure model. The result of settlement and lateral movement in model building conform the occurrence damage. Additional the damage evaluation by empirical method using Damage

Potential Index (*DPI*) that indicated by wall system, stiffness soil properties, structure stiffness and the distance from wall conform the building damage. The *DPI* could be analyzed in probabilistic by the First Order Reliability Method that apply to the function between the Resistance represented by the capacity of a building to resist serviceability damage and the loading represented by the demand on the excavation induced ground movement including uncertainty in soil and non-soil and model bias.

The damage evaluation and probability of damage could be applied to insurance business. The severe level damage of building should considers the demolition cost and set the deductible in high and limit of loss in low.

**Keywords:** Sheet pile wall, Probability of damage, Contractor's All risks, Damage potential index.

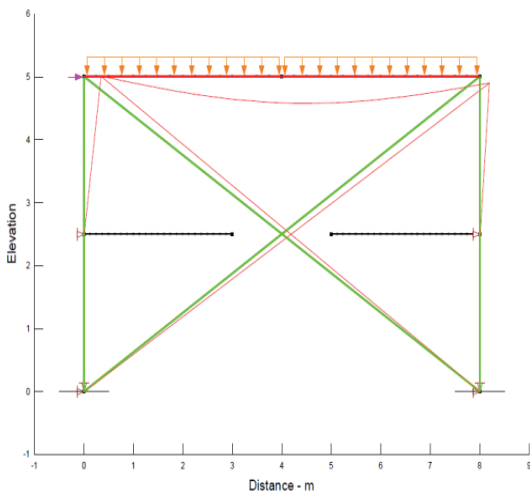
#### 1. คำนำ

งานก่อสร้างชั้นใต้ดินที่มีความลึก 2-10 เมตรมีการใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเข็มพืดค้ำยัน (Sheet Pile braced cut) โดยส่วนใหญ่พื้นที่ก่อสร้างจะมีบ้านเรือนประชาชนอยู่ใกล้ การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในระหว่างการก่อสร้าง ทำให้ดินหลังกำแพงเกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบและแนวตั้ง ส่งผลต่อโครงสร้างของอาคารที่มีฐานรากตื้นหรือเสาเข็มสั้นได้รับความเสียหาย อาคารจะเกิดการเสียรูปเชิงมุม (Angular Distortion) และความเครียดแนวราบ (Lateral Strain) การประเมินความเสียหายของอาคารสามารถวิเคราะห์ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยการจำลองโครงสร้างอาคารและระบบกำแพงกันดิน เพื่อพิจารณาค่าการเสียรูปเชิงมุมซึ่งเป็นพฤติกรรมที่บ่งบอกถึงความเสียหาย นอกจากนี้ความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นสามารถประเมินได้จากวิธีเอ็มไพริคัลโดยใช้ดัชนีวัดความเสียหาย Damage Potential Index (*DPI*) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ในเชิงความน่าจะเป็นจากความไม่แน่นอนของดินและวัสดุอื่นๆ วิธีการดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ในธุรกิจประกันภัยงานก่อสร้างสำหรับประเมินความเสียหายของอาคารและความน่าจะเป็น และกำหนดจำนวนเงินความรับผิดชอบส่วนแรกและจำนวนเงินจำกัดความรับผิดชอบต่อทรัพย์สินบุคคลภายนอกให้สอดคล้องกับความเสียหายที่แท้จริง

## 2. การสร้างแบบจำลองระบบกำแพงกันดินและโครงสร้างของสิ่งปลูกสร้างเพื่อใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปัจจุบันระบบกำแพงกันดินสามารถสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดิน การเคลื่อนตัวของพื้นดิน โหมดเมนต์และแรงเฉือนในกำแพงกันดิน ค่าตัวแปรที่ใส่ในโปรแกรมและการสร้างแบบจำลองระบบกำแพงกันดินจำเป็นต้องศึกษางานวิจัยในอดีตหรือรูปแบบวิธีการจำลองจะต้องมีวิธีการเสมือนจริงตามวิธีการก่อสร้าง

โครงสร้างของสิ่งปลูกสร้างสามารถจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อพิจารณาพฤติกรรมต่างๆ ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์คือ วัสดุของโครงสร้าง แรงที่กระทำ และระยะต่างๆ การสร้างแบบจำลองโครงสร้างต้องพิจารณาจากข้อกำหนดของโปรแกรมซึ่งมีการวิเคราะห์แบบ Plane Strain การวิเคราะห์จะเป็นระนาบ 2 มิติ ลักษณะโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ เป็น Frame Structure ที่แสดงในรูปที่ 1 โครงสร้างอาคารกำหนดเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น เสาเข็มฐานราก คาน เสา และพื้น ซึ่งมีน้ำหนักที่ถ่ายแรงจากโครงสร้างส่วนบนและถ่ายน้ำหนักทั้งหมดไปยังเสาเข็มของอาคาร การรวมแบบจำลองระบบกำแพงกันดินและแบบจำลองโครงสร้างของสิ่งปลูกสร้างเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวในมิติต่างๆของอาคาร



รูปที่ 1 แบบจำลองโครงสร้างในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Frame Structure (Geostudio user's manual)

แรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างอาคารได้แก่ น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรกำหนดเป็นแรงที่กระทำลงบน Element แบบ Distribution Load โดยวิธีประมาณน้ำหนักจากการถ่ายแรง น้ำหนักผนังอาคารหรือแรงอื่นๆที่เกิดขึ้นกับสิ่งปลูกสร้างสามารถกำหนดเป็นแรงลงบน Element ด้วยเช่นเดียวกัน วิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์ในกรณีต้องการทำการเคลื่อนตัวในแนวราบและแนวตั้ง ค่าทางวัสดุวิศวกรรมที่ต้องใส่ในโปรแกรมคือ ค่าโมดูลัสของวัสดุ  $E$  และค่าโมเมนต์ความเฉื่อย  $I$  ส่วนการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดของชิ้นส่วนโครงสร้าง ค่าโมดูลัสของวัสดุ  $E$  และพื้นที่หน้าตัด  $A$  ของโครงสร้างจะทำให้ผลความเค้นและความเครียดเปลี่ยนแปลงไป

โครงสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กคานและพื้น สามารถแปลงหน้าตัดเหล็กเป็นหน้าตัดของคอนกรีตจากอัตราส่วนของค่าโมดูลัสของเหล็กและคอนกรีต ค่าโมดูลัสของวัสดุแสดงในตารางที่ 1 การแปลงหน้าตัดเพื่อหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคานแบบ (Doubly Reinforced Beam) และพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก Element ที่เป็นตัวแทนของคานและพื้นพิจารณาต่อช่วง Span ตามแกน Z

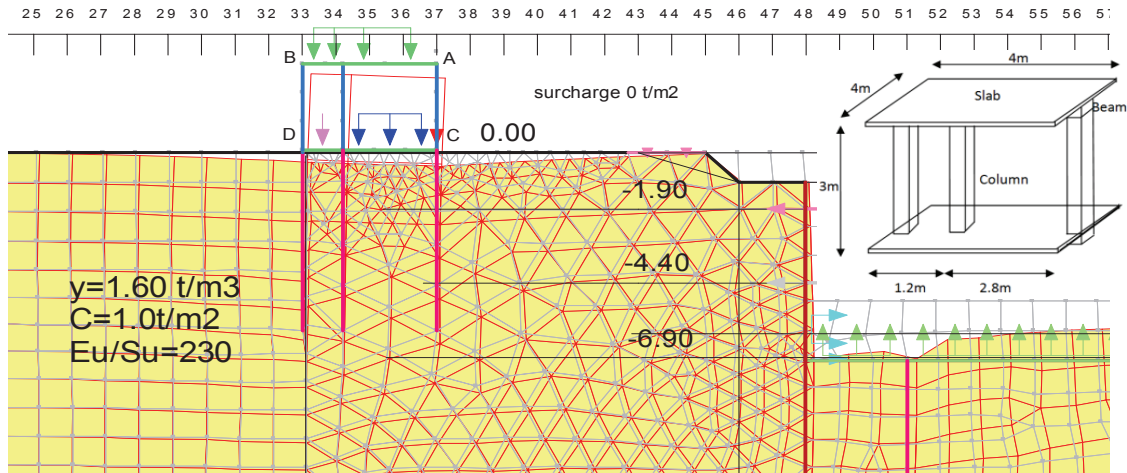
ตารางที่ 1 ค่าโมดูลัสของวัสดุในการวิเคราะห์โครงสร้าง

วัสดุ	โมดูลัสของวัสดุ	หมายเหตุ
คอนกรีต	$15,210 (f_c)^{1/2}$	$f_c$ กำลังอัดปลายคอนกรีต(ksc) (ว.ส.ท. 6202ก)
เหล็กเสริม	$2.04 \times 10^6$	kg/cm <sup>2</sup> (ว.ส.ท. 6203)

น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรที่ใช้ในการวิจัยนี้ตามที่กำหนดไว้ในบทบัญญัติเกี่ยวกับอาคารทั่วไป ซึ่งกำหนดน้ำหนักคอนกรีตเสริมเหล็กเท่ากับ  $2,400 \text{ kg/m}^3$  น้ำหนักบรรทุกจรของที่พักอาศัย  $150 \text{ kg/m}^2$  กรณีพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 10 cm. น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ  $390 \text{ kg/m}^2$  นอกจากนี้มีผนังอิฐมวลรวมฉาบหนา 10 cm. มีน้ำหนักบรรทุกจร  $200 \text{ kg/m}^2$  ในรูปที่ 2 การกำหนดโครงสร้างอย่างง่ายสามารถพิจารณาเป็นช่วง เช่น อาคารลักษณะเดียวกันเรียงต่อเนื่องกันตามแนวกำแพงกันดิน ความกว้างและความยาวของอาคาร 4 เมตร ในกรณีนี้จะพิจารณาเพียง 1 ช่วง span (4เมตร) ส่วนระยะอื่นๆของอาคาร ความสูง 3 เมตร ระยะห่างของสิ่งปลูกสร้างและกำแพงกันดิน 11 เมตร

Franzius (2004) ได้ทำการศึกษาดูด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อผลกระทบของน้ำหนักอาคารในแนวการสร้างอุโมงค์ใต้ดิน การศึกษาในช่วงแรกได้จำลองโครงสร้างอาคารแบบไร้น้ำหนักตามวิธีของ (Potts and Addenbrooke, 1997) และต่อมาได้ศึกษาเรื่องน้ำหนักของโครงสร้างโดยให้ความเค้นแทนน้ำหนักของอาคารกระทำลงบน Beam Element ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างอาคารและดินรอบๆอุโมงค์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง นอกจากนี้ Law (2012) ได้แนะนำว่า น้ำหนักของอาคารในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่สามารถละเลยได้

การจำลองระบบกำแพงกันดิน เพื่อทำการเคลื่อนตัวของกำแพงและดิน งานวิจัยที่สำคัญได้แนะนำค่าข้อมูล เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ชั้นดินเหนียวอ่อน เช่น Teparaksa (1999) ได้แนะนำค่า Soil Stiffness ในเทอมของ Young's Modulus,  $E_s$  ในชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าเท่ากับ  $\alpha s_u$  ,โดย  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ 150-250 โมเดลของดินเป็น Elastic-Plastic สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน โมเดลของดินเป็น Elastic-Plastic ข้อมูลประเภท Soil Property อื่นๆ จำเป็นต้องมีการเก็บตัวอย่างดิน เช่น ค่าหน่วยน้ำหนักดิน , ค่า Undrained Shear Strength,  $s_u$  สำหรับค่าข้อมูลประเภท Non-Soil เช่น Modulus of Elastic Steel และ Moment of Inertia ของเข็มพืด สามารถใช้ข้อมูลจากแหล่งผลิต ทั้งนี้ระยะในมิติต่างๆควรมีค่าใกล้เคียงสภาพจริง รวมถึงการวิเคราะห์สภาวะหรืออุปสรรคอื่นๆ เช่น การเกิด Surcharge Load รอบพื้นที่บ่อขุด การอัดแรง Pre-Load ในค้ำยัน หรือการลดแรงดันดินด้านข้างด้วยการขุดลอกหน้าดินออก จำเป็นต้องนำมาวิเคราะห์ในโมเดล



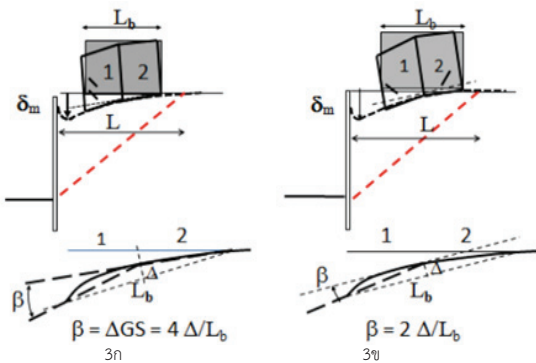
รูปที่ 2 การจำลองโครงสร้างสิ่งปลูกสร้างอย่างง่ายในบริเวณที่มีการก่อสร้างระบบกำแพงกันดิน

## 2.1 การเสียรูปเชิงมุม การเคลื่อนตัวในแนวราบและแนวตั้ง และการเกิดรอยร้าวในอาคาร

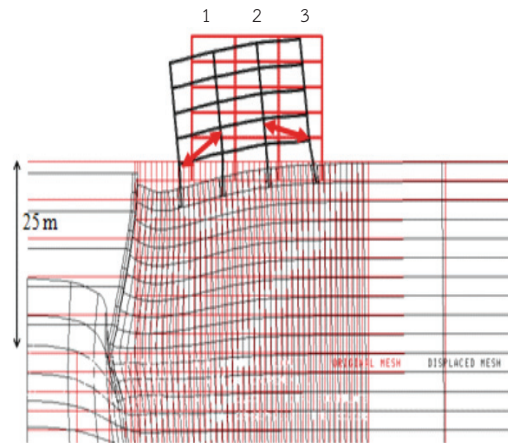
Son (2010) ได้แสดงค่าการเสียรูปเชิงมุมกรณีอาคารตั้งอยู่ในระยะที่ดินมีการเคลื่อนตัว ในรูปที่ 3 การเสียรูปเชิงมุมในรูปที่ 3ก เมื่ออาคารส่วนที่ 1 มีความแข็งแรงน้อยกว่าส่วนที่ 2 อาคารส่วนที่ 1 เกิดความเสียหายมาก, ในรูปที่ 3ข เกิดการเอียงตามกันทั้งอาคารที่ 1 และอาคารที่ 2 ทำให้อาคารเอียงตัวมากขึ้นแต่การเสียรูปเชิงมุมจะลดลง จะเกิดความเสียหายกับผนังและโครงสร้างอาคาร

Ghahreman (2004) ได้จำลองโครงสร้างด้วย FEM ที่แสดงในรูปที่ 4 จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 3 โดยกำหนดคานามีคุณสมบัติเป็น Elastic และโครงสร้างแบบ Frame Structure อาคารใน Span ที่ 3 เกิดการเอียงตัวไปตาม Span ที่ 1 ทำให้เกิดแรงเฉือนบิดขึ้นที่ Span ที่ 3 ในกรณีนี้ฐานรากอาคารแยกกันอย่างอิสระ ที่เสาตอม่อจะเกิดความเครียดจาก Bending ที่เป็นผลจากฐานรากอาคารทรุดตัว มีผลทำให้เกิดการแตกร้าวของเสาตอม่อ

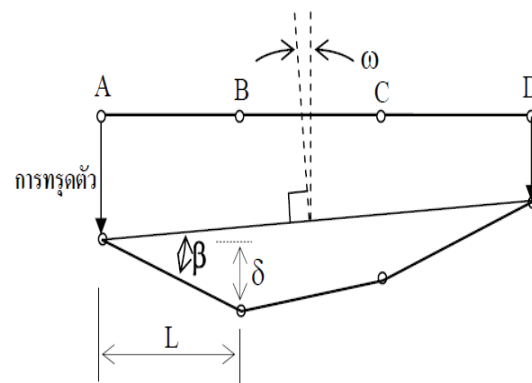
การหาค่าการเสียรูปเชิงมุม  $\beta$  (Angular Distortion) (มยพ.1552-151) แสดงในรูปที่ 5 มีค่าเท่ากับ  $(\delta/L) - \omega$  โดย  $\delta$  คือผลแตกต่างระหว่างการทรุดตัวของจุดสองจุดบนโครงสร้าง,  $L$  คือระยะทางระหว่างจุดทั้งสองและ  $\omega$  คือการเอียงตัวของโครงสร้างโดยรวมการเสียรูปเชิงมุม  $\beta$



รูปที่ 3 Buildings moves with the ground, Tilt reduces angular distortion. Son and Cording (2010)



รูปที่ 4 Distortion of concrete frame adjacent to excavation with finite element analysis. Ghahreman (2010)



รูปที่ 5 การเสียรูปเชิงมุมของอาคาร (มาตรฐานการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคาร มยพ.1552-51)

การเสียรูปเชิงมุมได้มีการประเมินขีดจำกัด หากเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้จะส่งผลกระทบต่อความเสียหายกับอาคาร ความเสียหายสามารถระบุได้เป็น 2 ลักษณะสำคัญๆคือ ผนังอาคารและโครงสร้างอาคาร ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขีดจำกัดของการเสียรูปเชิงมุม ( $\beta$ ) ที่ยอมได้สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเสา คาน และชนิดผนังรับน้ำหนัก

ความเสียหาย	ขีดจำกัดการเสียรูปเชิงมุม ( $\beta$ )	
	Skempton & MacDonald (1956)	Mayerhof (1953)
โครงสร้างอาคาร	1/150	1/250
ผนังอาคารเริ่มแตกร้าว	1/300	1/500

การแตกร้าวของผนังอาคารสามารถระบุระดับความเสียหายของอาคารได้โดยการจำแนกตามความกว้างของรอยร้าว ในตารางที่ 3 เมื่อเกิดรอยร้าวที่ผนังกว้างมากแสดงถึงโครงสร้างอาคารมีการเคลื่อนตัวหรือทรุดตัวมาก ส่งผลให้ผนังเกิดความเสียหาย แต่การทรุดตัวที่เท่ากัน รอยร้าวของผนังอาจไม่เกิดขึ้น ลักษณะการประเมินนี้จะเป็นการประเมินความเสียหายหลังจากเกิดความเสียหายขึ้นแล้ว

ตารางที่ 3 สภาพความเสียหายของอาคารจำแนกตามความกว้างของรอยร้าวของผนังอิฐก่อ (Burland et al.,1977)

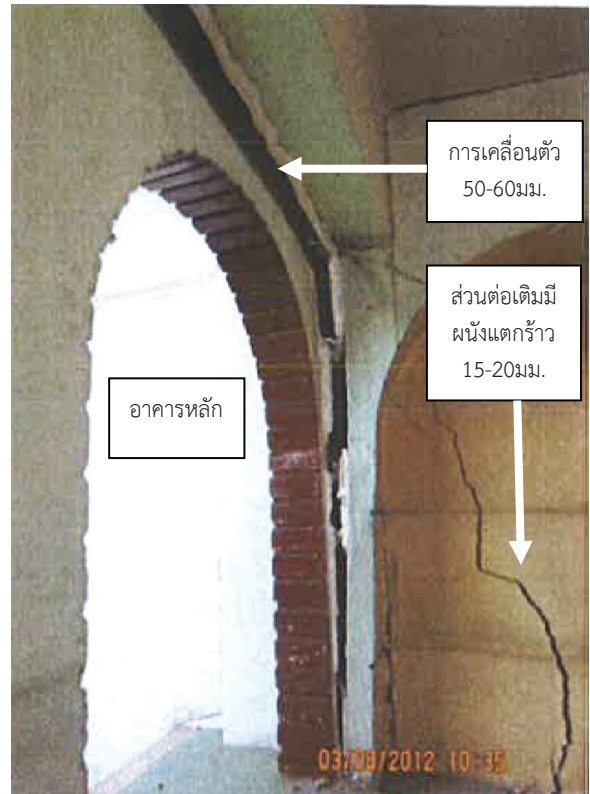
สภาพความเสียหาย	ลักษณะความเสียหาย	ความกว้างของรอยร้าวโดยประมาณ
ไม่เสียหาย	รอยร้าวขนาดเส้นผม (Hairline Cracks)	< 0.1 มม.
น้อยมาก	รอยร้าวขนาดเล็ก สัมผัสเห็นได้ยาก หากไม่ตรวจสอบอย่างถี่ รอยร้าวนี้ไม่จำเป็นต้องแก้ไข และสามารถปกปิดได้เมื่อมีการทาสี	< 1 มม.
เล็กน้อย	มีรอยร้าวที่สามารถสังเกตเห็นได้ และอาจจำเป็นต้องตกแต่งโดยการยาสุน ผนังต่างและประตูหน้าต่าง	< 5 มม.
ปานกลาง	มีรอยร้าวที่จำเป็นต้องแก้ไขโดยกระทะรอยร้าวออกและยาสุนใหม่ บางครั้งอาจจะต้องรื้อผนังบางส่วนออกแล้วก่ออิฐใหม่ ประตูและหน้าต่างตักขีด และอาจมีการแตกของท่อที่ติดหรือฝังในผนัง อาจกษายนอกพัดผ่านเข้าในอาคารผ่านรอยร้าวได้	5-15 มม. หรือมีหลายรอยร้าว กว้างถึง 3 มม.
ร้ายแรง	มีรอยร้าวขนาดใหญ่หลายรอยที่ตึงตึงโดยกระทบผนังทั้งบางส่วนแล้วสร้างใหม่ โดยเฉพาะส่วนที่อยู่เหนือประตูและหน้าต่าง วงกบประตูและหน้าต่างบิดเบี้ยว สามารถสังเกตเห็นพื้นลาดเอียง ผนังเอียงไม่ได้ตั้ง ท่อแตก และกานอาจสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนัก	15-20 มม. และ ขึ้นอยู่กับจำนวนรอยร้าว
ร้ายแรงมาก	มีรอยร้าวที่ตึงตึงแก้ไขโดยด่วน โดยอาจต้องรื้อสร้างใหม่ทั้งหมดหรือบางส่วน เนื่องจากความสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนักและผนังเอียงจนต้องย้าย ผนังต่างแตก และโครงสร้าง ไม่มีลมบดลอคภัย	> 25 มม. และขึ้นอยู่กับ จำนวนรอยร้าว

## 2.2 พื้นที่วิเคราะห์และความเสียหาย

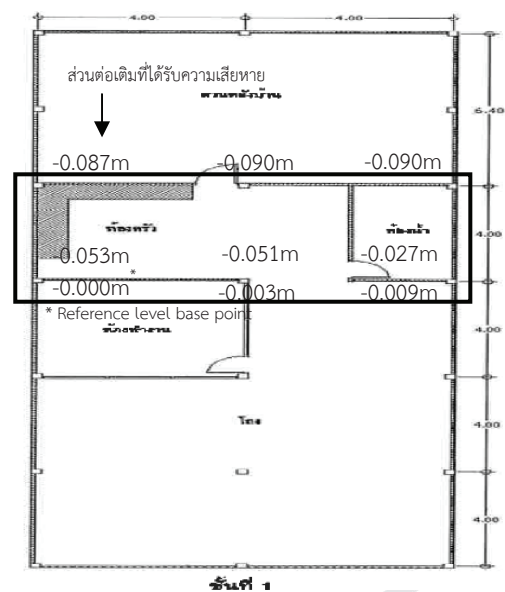
ในพื้นที่ก่อสร้างอาคารที่มีชั้นใต้ดิน ระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มพืดค้ำยันได้ถูกนำมาเป็นระบบกำแพงกันดินแบบชั่วคราวโดยรอบพื้นที่ก่อสร้างมีอาคารพาณิชย์และส่วนต่อเติมอาคารโดยรอบก่อนเริ่มโครงการก่อสร้างได้ทำการสำรวจสภาพอาคารและส่วนต่อเติมเพื่อบันทึกสภาพอาคาร โดยทั่วไปไม่พบความเสียหายที่รุนแรง และไม่พบโครงสร้างเกิดความเสียหายแตกร้าวจนเห็นได้ชัดเจน ผนังอาคารมีรอยร้าวบ้างเพียงเล็กน้อย พื้นอาคารมีสภาพปกติไม่พบการแอ่นตัวหรือแตกร้าว

การก่อสร้างระบบกำแพงกันดินของโครงการ มีการขุดดินลึกสุดที่ระดับต่ำกว่าผิวดินเดิม 6.90 เมตร กำแพงกันดินใช้เข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile) Type IV ความยาว 16-17 เมตร ระบบค้ำยันจำนวน 2 ชั้น ระยะห่างจากกำแพงกันดินถึงสิ่งปลูกสร้างข้างเคียง 11 เมตร เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบของเข็มพืดคือ Inclinator โดยหลังจากทำการก่อสร้างชั้นใต้ดินแล้วเสร็จ พบว่ามีความเสียหายของอาคารข้างเคียง ผนังอาคารส่วนต่อเติมเกิดการแตกร้าวขนาดความ

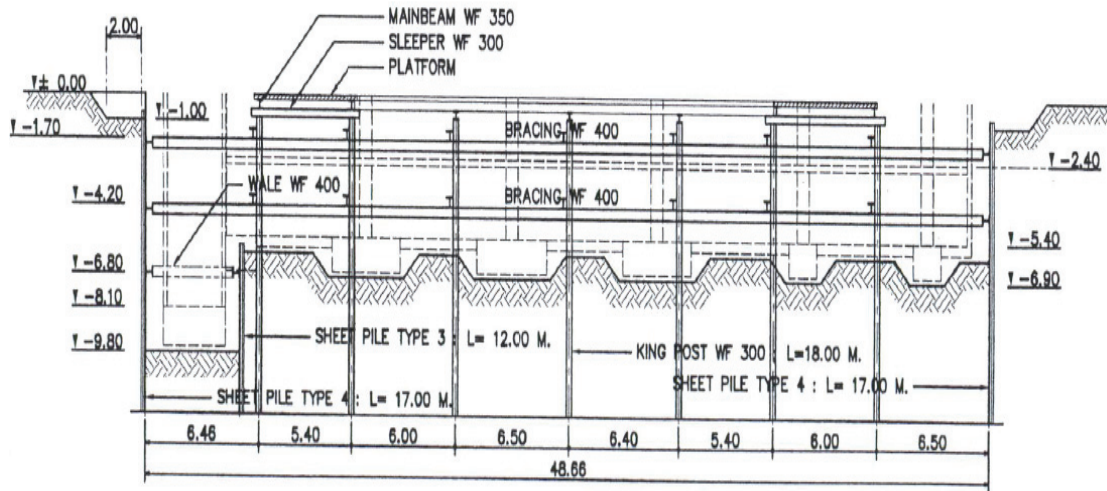
กว้าง 20 มม. พื้นอาคารส่วนต่อเติมเกิดการทรุดตัวประมาณ 90 มม. และเกิดรอยแยกของอาคารส่วนต่อเติมและอาคารหลัก มีความกว้างของรอยแยกประมาณ 50-60 มม. แสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับแบบก่อสร้างระบบกำแพงกันดินแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ความเสียหายของส่วนต่อเติม



รูปที่ 7 ระดับพื้นอาคารส่วนต่อเติมที่เกิดการทรุดตัว



รูปที่ 8 ภาคตัดขวางระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มพืดค้ำยัน

### 2.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบกำแพงกันดินและสิ่งปลูกสร้าง (Geostudio, SIGMA/W version:2007) สามารถวิเคราะห์ Element Deformation และ Load Element โดยเริ่มจากการวิเคราะห์กลับ จากผลการวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินด้วย Inclinometer เพื่อหาค่าโมดูลัสของดิน  $E_s$ , การวัดระดับการทรุดตัวของพื้นอาคาร, การเคลื่อนตัวของอาคารในแนวราบ และ

ตารางที่ 4 ตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองระบบกำแพงกันดิน

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร	หน่วย
หน่วยน้ำหนักดิน ชั้นดิน 0-11 เมตร	16	kN/m <sup>3</sup>
$S_u$ ชั้นดิน 0-11 เมตร	10	kN/m <sup>2</sup>
$E_s$ ชั้นดิน 0-11 เมตร	2,300	kN/m <sup>2</sup>
หน่วยน้ำหนักดินของชั้นดิน 11-14 เมตร	17	kN/m <sup>3</sup>
$S_u$ ชั้นดิน 11-14 เมตร	16	kN/m <sup>2</sup>
$E_s$ ชั้นดิน 11-14 เมตร	3,500	kN/m <sup>2</sup>
หน่วยน้ำหนักดินของชั้นดิน 14-17 เมตร	17	kN/m <sup>3</sup>
$S_u$ ชั้นดิน 14-17 เมตร	27	kN/m <sup>2</sup>
$E_s$ ชั้นดิน 14-17 เมตร	10,000	kN/m <sup>2</sup>
หน่วยน้ำหนักดินของชั้นดิน ต่ำกว่า 17 เมตร	18	kN/m <sup>3</sup>
$S_u$ ชั้นดินต่ำกว่า 17 เมตร	170	kN/m <sup>2</sup>
$E_s$ ชั้นดินต่ำกว่า 17 เมตร	90,000	kN/m <sup>2</sup>
Sheet Pile Moment of Inertia	0.000386	m <sup>4</sup>
Sheet Pile Modulus of Steel	2,040,000	kN/m <sup>2</sup>

ข้อมูลทางวิศวกรรมส่วนหนึ่งได้จากการทดสอบ เช่น การทดสอบกำลังของคอนกรีต ค่าทางวิศวกรรมดิน สภาพของชั้นดินในพื้นที่ และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผนังและโครงสร้าง ตารางที่ 4 ตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบกำแพงกันดินแบบเข็มพืดค้ำยัน

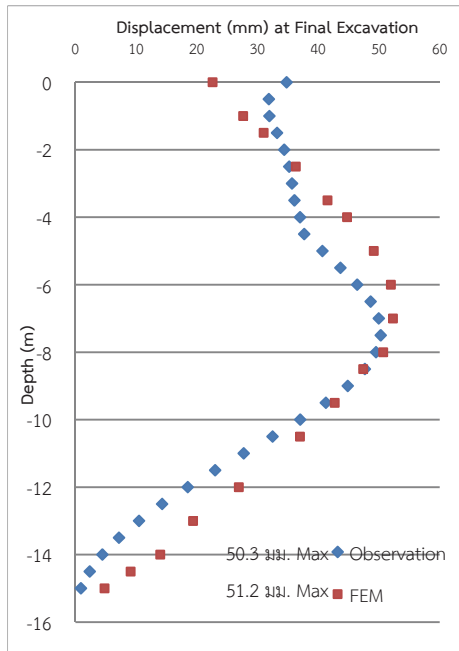
ตารางที่ 5 เป็นค่าตัวแปรที่ใช้สำหรับกรวิเคราะห์โครงสร้างของส่วนต่อเติม ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนโครงสร้าง เสา คาน พื้น และเสาเข็ม ที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด ค่ากำลังประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 200 ksc จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วย Schmidt Hammer เหล็กเสริมในคอนกรีตทำการแปลงหน้าตัดเหล็กเป็นคอนกรีต

ตารางที่ 5 ตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองโครงสร้างสิ่งปลูกสร้าง

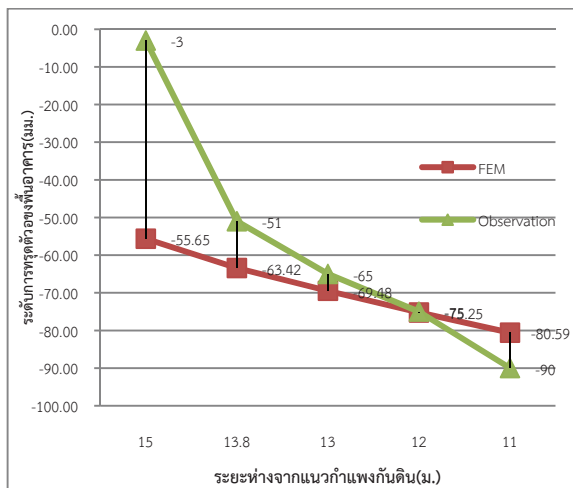
ตัวแปร	โมดูลัสของวัสดุ kPa	โมเมนต์ความเฉื่อย m <sup>4</sup>	หน้าตัด m <sup>2</sup>
พื้นและคาน (4m x 4m)	21,101,494	0.00125	0.48
เสา (0.2m x 0.2m)	21,101,494	0.000162	0.0442
เสาเข็มหกเหลี่ยม	27,914,653	0.00000545	0.0138

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวราบของอาคารระหว่างการวัดค่าระดับและไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปที่ 8 และรูปที่ 9 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินจากการวัดด้วย Inclinometer และไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการวัดการทรุดตัวของพื้นอาคารและไฟไนต์เอลิเมนต์ตามลำดับ

การให้แรงกระทำหรือความเครียดกับ Element ในแบบจำลองโครงสร้างอาคาร พิจารณาจากมวลดินระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างเมื่อดินเริ่มเคลื่อนตัวเข้าหากำแพงกันดิน ที่แสดงในรูปที่ 10 พบว่ามวลดินมีการเคลื่อนตัว 3.9 มม. (ดินที่ปลายเสาเข็ม) การเคลื่อนตัวของมวลดินทำให้แรง Skin Friction ลดลง น้ำหนักของอาคารจะมีผลกระทบต่อทรุดตัว ความเครียดจะเริ่มใส่ใน Element ในขั้นตอนการก่อสร้างอันดับถัดไป



รูปที่ 9 ผลการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินกับการวิเคราะห์ด้วย FEM

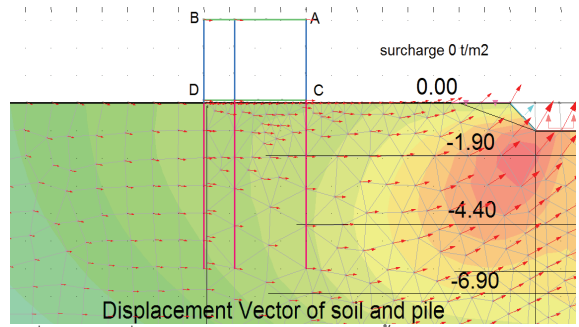


รูปที่ 10 เปรียบเทียบระดับการทรุดตัวของพื้นอาคาร

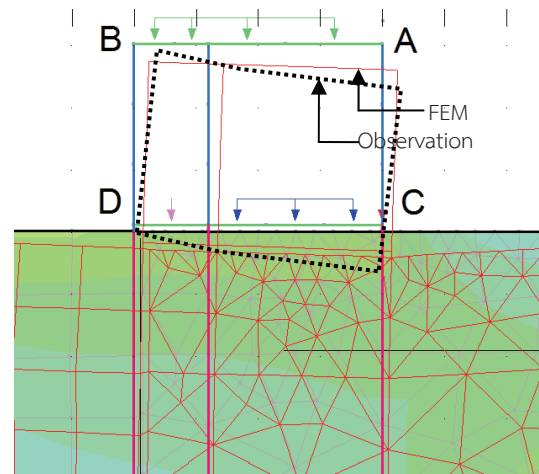
การเคลื่อนตัวของอาคารในแนวราบจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์ บริเวณพื้นบนของอาคาร มีระยะเคลื่อนตัว 46.40 มม. ส่วนการวัดรอยแยกตัวของอาคารส่วนต่อเติมกับอาคารหลักมีค่าอยู่ระหว่าง 55 มม. การเคลื่อนตัวของอาคารในแนวราบ แสดงในตารางที่ 6 รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอาคาร Observation และ FEM

ตารางที่ 6 การแยกตัวของอาคารที่ระดับความสูงต่างๆของอาคาร

ที่ความสูง(ม.)	Observation(มม.)	FEM (มม.)
3	55	46.40
2	40	40.47
1	20	34.74
0	9	28.93



รูปที่ 11 การเคลื่อนตัวในแนวราบของดินระหว่างขั้นตอนการขุดดินช่วงแรก



รูปที่ 12 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของอาคารระหว่าง Observation (เส้นประ) และ FEM (เส้นเต็ม) ในขั้นตอน Final Excavation

ตารางที่ 7 สรุปผลระหว่างการวัดและการวิเคราะห์ด้วย FEM

วิธี	การเสียรูปเชิงมุม	การเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดของอาคาร(มม.)	การทรุดตัวสูงสุดของพื้นอาคาร(มม.)
Observation	1/25, 1/72	55	90
FEM	1/154, 1/163	46.4	80.59

การวิเคราะห์ที่สิ่งปลูกสร้างข้างเคียงด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นการหาค่า Deformation Element และ Load element ซึ่งแสดงค่าในเชิงวิศวกรรม การเสียรูปเชิงมุมหรือการเคลื่อนตัวในแนวราบของอาคารสามารถระบุความเสียหายได้ในระดับหนึ่ง Schuster(2008) ได้แนะนำวิธีการระบุความเสียหายของอาคาร และความน่าจะเป็นของความเสียหายนั้น โดยพิจารณาความไม่แน่นอนของค่าคุณสมบัติดินและวัสดุอื่นๆของระบบกำแพงกันดิน รวมถึงความแข็งแรงของอาคาร วิธีการดังกล่าวใช้โมเดลซึ่งเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จาก Empirical และ FEM

### 2.3 การระบุความเสียหายของอาคารด้วยวิธี Damage Potential Index (DPI)

Schuster(2008) ได้เสนอเกณฑ์ระดับความเสียหายของอาคารจากดัชนีวัดความเสียหาย (DPI) ที่เป็นผลมาจากการเสียรูปเชิงมุมและการเคลื่อนตัวในแนวราบของอาคาร โดยผ่านการโมเดล KJHH สำหรับ

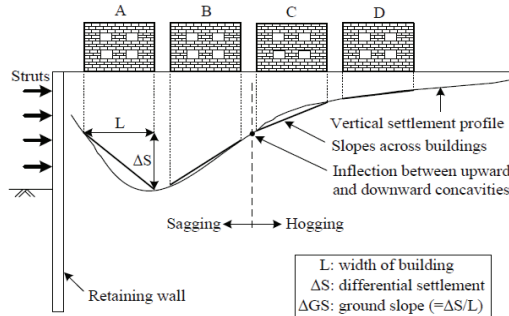
ทำนายการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงกันดินและทำนายการทรุดตัวของผิวดิน, โมเดล KSJH สำหรับทำนายการเคลื่อนตัวในแนวราบของดิน และโมเดล Angular Distortion,  $\beta$  และ Lateral Strain,  $\epsilon_l$  สำหรับทำนายการเสียรูปเชิงมุมและความเครียดในอาคาร และได้เสนอแนะสมการ  $DPI$  แสดงในสมการที่ 1 ซึ่งเป็นเกณฑ์วัดความเสียหาย

$$DPI = \epsilon_l / (1/200)$$

$$= 20 \times 10^3 (\epsilon_l \cos^2 \theta_{max} + \beta \sin \theta_{max} \cos \theta_{max}) \quad (1)$$

เมื่อ  $\theta_{max}$  คือมุมของการแตกร้าววัดจากแนวดิ่ง  $\tan(2\theta_{max}) = \beta / \epsilon_l$ . โดย  $\epsilon_l \times 10^{-3}$  และ  $\beta \times 10^{-3}$

ค่า  $DPI$  ตามวิธีการของ Schuster(2008) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ระบุระดับความเสียหายของอาคารในตารางที่ 8 การพิจารณาความเสียหายคำนึงถึงรูปแบบของการทรุดตัวของดิน คือ Hogging และ Sagging ซึ่งแสดงในรูปที่ 12 รูปแบบของการทรุดตัวของดิน Hogging จะมีความเสียหายรุนแรงมากกว่าการรูปแบบ Sagging



รูปที่ 13 Sagging or Hogging damage pattern of building (Schuster, 2008)

## 2.4 การหาความน่าจะเป็นของความเสียหายของอาคารจากระบบกำแพงกันดิน

วิธีการของ Schuster(2008) ตามสมการที่ 2 เป็นสมการสำหรับหาความน่าจะเป็นของความเสียหายของอาคารโดยพิจารณาความไม่แน่นอนของคุณสมบัติดินและวัสดุอื่นๆ และใช้โมเดลไบแอส ( $c_1, c_2$ ) สำหรับความไม่แน่นอนของการใช้ค่าเฉลี่ย โดยจัดอยู่ในรูปสมการ

ตารางที่ 8 เกณฑ์การพิจารณาความรุนแรงของความเสียหายจาก ค่า  $DPI$  และรูปแบบของการเสียรูป Schuster(2008)

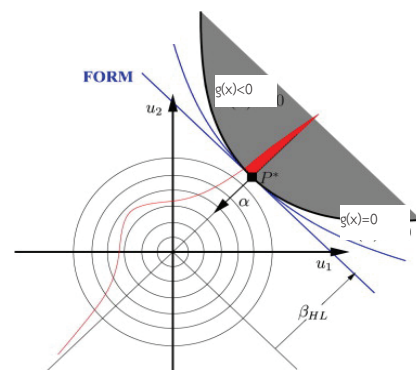
Level of building damage caused by excavation	Damage potential index (DPI)		Remedial measures
	Sagging $d/H_c \leq 1.4$	Hogging $d/H_c > 1.4$	
1 Negligible to very slight	0 – 15	0 – 10	Such damage levels are considered as tolerable, and no scheme to protect adjacent buildings is required.
2 Slight	15 – 25	10 – 20	
3 Slight to moderate	25 – 35	20 – 30	In this level, possible damage to adjacent buildings might be intolerable. A protection scheme might be required in the design stage. If not implemented, great caution must be exercised to monitor the building during the construction.
4 Moderate	35 – 60	30 – 50	
5 Severe	60 – 85	50 – 80	These levels of damage are definitely intolerable. The excavation design should be re-examined and possibly changed. Or, a proper protection scheme must be implemented to protect adjacent buildings.
6 Very severe	> 85	> 80	

เมื่อ  $g(x) = 0$  อาคารจะอยู่ในสภาวะ Serviceability limit state เมื่อมีแรงภายนอกกระทำแล้วไม่ทำให้เกิดความเสียหาย การหาค่าของฟังก์ชัน  $g(x) = 0$  สามารถใช้วิธี First-Order Reliability Method (FORM) ที่เสนอโดย Hasofer and Lind (1974) วิธี FORM เป็นการหาความน่าจะเป็นของฟังก์ชันใดที่มีผลลัพธ์มีค่าน้อยกว่า 0 โดยมีวิธีการตามสมการที่ 3 เมื่อ  $\beta$  คือระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดศูนย์กลาง

$$g(x) = (23.8)c_1 - (DPI)c_2 \quad (2)$$

$$\beta = \min_{g=0} \sqrt{\left\{ \frac{X'_i - \mu_i^N}{\sigma_i^N} \right\}^T [R]^{-1} \left\{ \frac{X'_i - \mu_i^N}{\sigma_i^N} \right\}} \quad (3)$$

$X'_i$  คือค่าการสุ่ม,  $T = Transpose Matrix$ ,  $R = Correlation matrix$



รูปที่ 14 ระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดศูนย์กลางไปหาจุดที่ฟังก์ชันมีค่าเท่ากับ 0 คือค่า Reliability Index

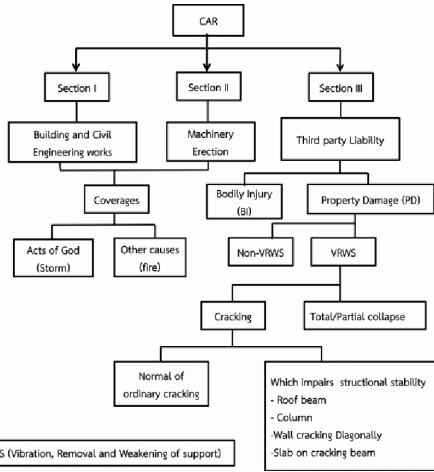
ความน่าจะเป็นถูกกำหนดเป็นระยะทางที่สั้นที่สุดที่ออกจากค่าเฉลี่ย (จุดศูนย์กลางของวงกลม) หรือ Reliability Index ( $\beta$ ) รูปที่ 13 ระยะทางที่สั้นที่สุดคือจุดที่ฟังก์ชัน  $g(x)$  ตัดผ่านและเกิดเป็นพื้นที่ 2 ส่วนใน Bell Curve พื้นที่ที่ไกลออกจาก Reliability Index เป็นพื้นที่ของความน่าจะเป็นที่ฟังก์ชันมีค่าน้อยกว่าผลลัพธ์ที่ถูกกำหนดไว้

## 2.5 การประยุกต์ความน่าจะเป็นของความเสียหายและการประกันความเสี่ยงทุกชนิดของผู้รับเหมา

การประกันความเสี่ยงทุกชนิดของผู้รับเหมา (Contractors' All Risks Insurance) หรือ CAR (ซี เอ อาร์) เป็นการประกันภัยทรัพย์สินที่เอาประกันภัย ที่อยู่ในระหว่างการก่อสร้าง การประกันชนิดนี้ให้ความคุ้มครองอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นทันทีทันใด และไม่ได้คาดคิดมาก่อน ต่องานรับเหมาตามสัญญา เครื่องมือเครื่องใช้ เครื่องจักรที่อยู่ในสถานที่ก่อสร้าง ตลอดจนความรับผิดชอบต่อบุคคลภายนอกที่เกิดขึ้นจากอุบัติเหตุในระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งมีผังรายละเอียดการประกันภัยความเสี่ยงทุกชนิดของผู้รับเหมา (CAR) ดังรูปที่ 14

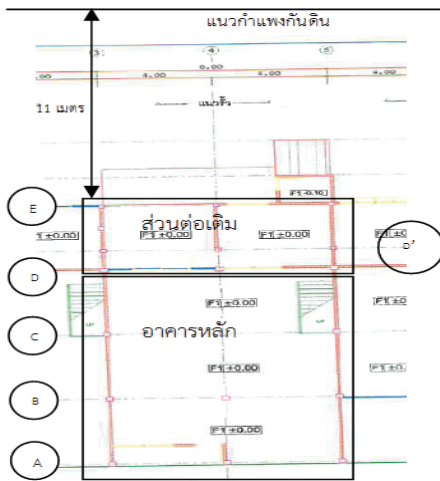
ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสิ่งปลูกสร้างของบุคคลภายนอก กรณีที่เสียหายถึงโครงสร้างหลัก เช่น เสาและคานอาคารแตกร้าวและทรุดตัว การเอียงตัวของอาคาร ผนังอาคารเกิดความเสียหายมาก ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยต่อการอยู่อาศัยหรือใช้งานอาคาร ความเสียหายในลักษณะนี้ ได้รับความคุ้มครองตามกรมธรรม์ กรณีที่ผนังอาคารบางส่วนมีรอยร้าวขนาดเล็ก (0.1-5 มม.) การแตกร้าวของผนังฉาบปูน

การทรุดตัวของพื้นบนดิน(Slab on ground) ไม่เกิดการแตกตัวของคานและเสา ความเสียหายในลักษณะนี้คือ ผู้เอาประกันภัยจะไม่ได้รับความคุ้มครอง



รูปที่ 15 ผังแสดงรายละเอียดความคุ้มครองในการประกันภัย CAR

อย่างไรก็ตามมาตรฐานของกรมธรรม์ CAR จะระบุจำนวนเงินความรับผิดชอบแรก (Deductible หรือ Excess) และ จำกัดความรับผิดชอบความเสียหายทั้งหมด Limit of Loss หากโครงการก่อสร้างมีความเสี่ยงต่อทรัพย์สินของบุคคลภายนอก



รูปที่ 16 แบบแปลนอาคารอยู่อาศัยและส่วนต่อเติม

จากกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารที่มีชั้นใต้ดินซึ่งเป็นโครงการที่วิเคราะห์ด้วย FEM ในเบื้องต้น การหาความน่าจะเป็นของความเสียหาย มีตัวแปรที่ได้จากแบบก่อสร้าง การเก็บตัวอย่างดิน ผลการทดสอบคุณสมบัติดินในกรุงเทพฯและการวัดระยะในสนาม สำหรับค่าตัวแปรและค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนที่ใช้ในการหาความน่าจะเป็นแสดงดังตารางที่ 9

แบบแปลนของอาคารดังรูปที่ 15 อาคารหลัก Grid A-D ช่วงละ 4 เมตร และส่วนต่อเติม Grid D'-D' มีระยะช่วงเสา 1.20 เมตร และ Grid D'-E มีระยะช่วงเสา 2.80 เมตร อาคารหลักเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กมีเสาเข็มตอกขนาด 1 ขนาด 22x22ซม. ความยาว 18 เมตร ส่วน

อาคารต่อเติม 1 ชั้น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหกเหลี่ยม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. ความยาว 6 เมตร โครงสร้างอาคารทั้งสองส่วนไม่ได้ก่อสร้างต่อเนื่องกัน สภาพอาคารอยู่ในลักษณะชิดกัน

ตารางที่ 9 ตัวแปรสำหรับวิเคราะห์  $P_D$

ตัวแปร	Value	Unit	COV
$H_e$	6.9	m.	0.05
$EI$	211.5	-	0.05
$\gamma_w h_{avg}^2$	24	m.	0.05
$B/2$	0.245	-	0.16
$\frac{S_u}{\sigma'_v}$	224	-	0.16
$\frac{E_i}{\sigma'_v}$	1	-	0.05
$\frac{\sum H_{clay}}{H_{wall}}$	1	-	0.50
$c_2$	140	-	0.05
$E_s L^2 / GHb$	0.35	$\times 10^{-3}$	0.05
$\epsilon_t$	12.1	m.	0.05
$C_1$	1.1	-	0.4
Distance	11	m.	-
Span	2.8	m.	-
T	19	m.	-

การสำรวจความเสียหายของอาคารส่วนต่อเติมมีความเสียหายเกิดขึ้นกับโครงสร้างซึ่งสามารถสรุปความเสียหายไว้ดังนี้

- ลักษณะของความเสียหายซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

  - 1 การแตกตัวของคอนกรีต ความยาวรวม 20.6 เมตร
  - 2 การแยกตัวของส่วนต่อเติมกับอาคารหลัก ยาว 37.2 (เมตร)

ผลของการเสียรูปเชิงมุมของส่วนต่อเติมจากการวัดในสนาม (1/72) ระดับความเสียหายตามวิธีของ Skempton and MacDonald (1956) ในตารางที่ 2 สามารถระบุได้ในระดับ “โครงสร้างอาคารมีความเสียหาย” และการประเมินความเสียหายตามวิธีของ Burland et al. (1977) ในตารางที่ 3 ผนังมีรอยร้าวขนาด 15-20 มม. สามารถระบุความเสียหายในระดับ “ร้ายแรง” (Severe)

การหาความน่าจะเป็นของความเสียหาย มีค่าเท่ากับ 0.99999 และ ค่า  $DPI$  มีค่าเท่ากับ 144 ในตารางที่ 8 ความเสียหายอยู่ในระดับ “ร้ายแรงมาก” Very Severe (Hogging) ซึ่งหมายถึงอาคารจะเสียหายไม่สามารถใช้งานอาคารได้ ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.99999

การจ่ายค่าสินไหมทดแทนเพื่อซ่อมแซมอาคารที่เสียหายโดยแบ่งเป็นการรื้อถอนอาคารส่วนต่อเติมเดิมออกและก่อสร้างใหม่ให้มีลักษณะเดิม มีรายละเอียดดังตารางที่ 10

ราคาประเมินค่าก่อสร้างอาคาร ปี 2555 จากสำนักงานคณะกรรมการกำกับและส่งเสริมการประกอบธุรกิจประกันภัย (คปภ.) ประเภททาวนเฮ้าส์ 2 ชั้น (ราคาระดับกลางและไม่รวมฐานราก) เป็นจำนวนเงิน 8,860 บาท / ตารางเมตร และค่าก่อสร้างฐานรากเป็นเงิน 77,260 บาท รวมเป็นเงินราคาประเมินค่าก่อสร้างใหม่ทั้งหมดเป็นจำนวนเงิน 644,300 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 51.1 ของราคาค่าซ่อมแซมใหม่ในตารางที่ 10



ตารางที่ 10 รายการและค่าซ่อมแซมส่วนต่อเติมขนาด 64 ตารางเมตร

รายการค่าซ่อมแซมส่วนต่อเติม	จำนวนเงิน(บาท)
1 รื้อถอนสิ่งปลูกสร้างที่เสียหาย	459,400
2 โครงสร้างใหม่	285,377
3 สถาปัตยกรรม	280,906
4 ระบบอาคาร	25,000
5 ค่าดำเนินการ ร้อยละ 20	210,137
รายการ 1-5 รวมเป็นเงิน	1,260,820
ราคาประเมินค่าก่อสร้างอาคาร ปี2555(คปก.)	644,300

ดังนั้นมูลค่าความเสียหายของสิ่งปลูกสร้างในระดับร้ายแรงมาก (Very Severe) จากการประเมินค่าก่อสร้างอาคาร ปีพ.ศ. 2555 น้อยกว่ารายการค่าซ่อมแซมอาคารร้อยละ 195 จำนวนเงินที่สูงขึ้นมาจากค่าการรื้อถอนอาคารที่เสียหายเดิมออก

### 3 สรุปและวิจารณ์

ความเสี่ยงภัยในงานก่อสร้างระบบกำแพงกันดินพึ่งต่อสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงสามารถประเมินความเสี่ยงภัยได้ วิธีการทั้งไฟไนต์อีลิเมนต์และ Empirical มีวิธีที่แตกต่างกันแต่มีผลลัพธ์การประเมินความเสี่ยงสอดคล้องกัน วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ความสำคัญของการใช้วิธีการนั้นขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรระบบกำแพงกันดินและโครงสร้างของสิ่งปลูกสร้าง แรงกระทำบน Element (Building Weight) เป็นสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในแบบจำลอง ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เปลี่ยนแปลงไปจากขั้นตอนการก่อสร้าง ผลการทำนายจะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น จากกรณีศึกษาพบว่าการทรุดตัวของอาคารที่ด้านใกล้กับกำแพงกันดินมีการทรุดตัวใกล้เคียงกับการวัดระดับพื้น ส่วนการทรุดตัวของผนังด้านที่ห่างจากกำแพงกันดินมีระยะการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างไฟไนต์อีลิเมนต์และการวัด ซึ่งอาจเกิดจากสภาพจริงของอาคารมีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอาคารหลักและส่วนต่อเติม ทำให้อาคารด้านที่ห่างจากกำแพงกันดินเกิดการทรุดตัวน้อยมากหรืออาจเกิดการตั้งรับอาคารไม่ให้เกิดเคลื่อนตัวในแนวราบ เป็นผลให้มีพฤติกรรมตามรูปที่ 3ก ส่วนการเคลื่อนตัวในแนวราบมีลักษณะเอียงตัวตามแรงกดจากน้ำหนักกำแพงที่อยู่บริเวณด้านใกล้กับกำแพงกันดิน ในขณะที่กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม(แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม) ลดลงตามขั้นตอนการขุดดิน ซึ่งพบว่าในการขุดดินที่ระดับ -2.50 เมตร มวลดินตลอดแนวเสาเข็มเริ่มมีการเคลื่อนตัวเข้าหากำแพงกันดิน

วิธี Empirical เป็นการรวบรวมข้อมูลโดยแทนค่าลงในสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินความเสียหาย ความสำคัญของวิธีการคือค่าตัวแปรที่นำมาใช้ การระบุระดับความเสียหายด้วย  $DPI$  ให้ผลที่สอดคล้องกับความเสียหายที่เกิดขึ้น ความน่าจะเป็นของความเสียหายจากความไม่แน่นอนของดินและวัสดุอื่นๆ เป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ Quantitative Risk Assessment ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประกันภัยเพื่อการตัดสินใจก่อนที่จะรับประกันภัย ผลของการประยุกต์ใช้การประเมินความเสียหายและความน่าจะเป็นเพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดจำนวนเงินความรับผิดชอบส่วนแรกและจำกัดจำนวนเงินความรับผิดเพื่อส่งเสริมธุรกิจประกันภัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] วิชาญ ภูพัฒน์. 2530. เอกสารการสัมมนาทางวิชาการ เรื่อง การออกแบบ Sheet Pile เรื่องลักษณะชนิดการใช้งานและพฤติกรรมของ Sheet Pile ในงานก่อสร้าง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ๖.267 น.
- [2] วุทธิ สอง. 2530. การเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการขุดค้ำยันในชั้นดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] วันชัย เทพรักษ์. 2539. เอกสารการสัมมนาทางวิชาการ เรื่อง การก่อสร้างใต้ดิน 39. เรื่อง การออกแบบค้ำยันเข็มพืดสำหรับงานขุดดินลึกในดินเหนียวอ่อน.วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ๖. 154 น.
- [4] สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, บรรพต กุลสุวรรณ, วรากร ไม้เรียง และ อติชาติ สุรินทร์คำ "การพัฒนาฐานข้อมูลดินทางวิศวกรรมเพื่อสนับสนุนการพัฒนาและบำรุงรักษาโครง สร้างพื้นฐาน : กรณีศึกษาพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ" โยธาสาร ฉบับเดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ 2553
- [5] Arduino, P., Hashash, Y., Finno, R. (eds.). Earth Retention Conference 3 : proceedings of the 2010 Earth Retention Conference
- [6] Boone, S. J. (1996). "Ground-movement-related building damage," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 122(11), 886-896.
- [7] Boscardin, M.D. and Cording, E.J. (1989). "Building response to excavation-induced settlement," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 115(1), 1-21.
- [8] Burland, J. B., and Wroth, C. P. (1975). "Settlement of buildings and associated damage," *Proc. Conference on Settlement of Structures*, Cambridge, 611-654.
- [9] Duncan, J.M., 2000. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4):307-316.
- [10] Finno, R. J., and Bryson, L. S. (2002). "Response of Building Adjacent to Stiff Excavation Support System in Soft Clay," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, Vol. 16, No. 1, February 1, pp. 10-20.
- [11] Hasofer, A. M., and Lind, N. C. (1974), "Exact and Invariant Second-Moment Code Format." *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 100, No. 1, pp. 111-121
- [12] Hsiao, E.C.L., Kung, G.T.C., Juang, C.H., and Schuster, M. (2006), "Estimation of wall deflection in braced excavation in clays using artificial neural networks," *GeoCongress 2006 (CD-ROM)*, Atlanta, ASCE.
- [13] Likitlersuang, S. & Houlsby, G.T. (2007), "Prediction of a Continuous Hyperplasticity Model for Bangkok Clay", *Geomechanics and Geoengineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 147 – 157.
- [14] Low, B.K., and Tang, W.H. (1997), "Efficient reliability evaluation using spreadsheet," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 7, pp. 749-752
- [15] Phoon, K.K. (2004), General Non-Gaussian Probability Models for First Order Reliability Method (FORM): A State-of-the Art Report. *ICG Report 2004-2-4 (NGI Report 20031091-4)*, International Center for Geohazards, Oslo, Norway.
- [16] Son, M. and Cording, E.J. (2005). "Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131(2), 162-177.