



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่บนฐานรากที่มี
การทรุดตัวไม่เท่ากัน

Effect of Differential Settlement on Structural Behavior of Large-scale Reinforced
Concrete Building

นามผู้วิจัย นายณพเก้า บุญเรืองขาว

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิจพัฒน์ ภูววรรณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสีทจี มตาวิตยาสยเกษตรศาสตร

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่บนฐานรากที่มีการทรุดตัวไม่เท่ากัน

Effect of Differential Settlement on Structural Behavior of Large-scale
Reinforced Concrete Building

โดย

นายณพเก้า บุญเรืองขาว

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อขอความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

นพเก้า บุญเรืองขาว 2553: ผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
ขนาดใหญ่บนฐานรากที่มีการทรุดตัวไม่เท่ากัน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิจพัฒน์ ภู่วรรณ, Ph.D. 154 หน้า

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบต่องานโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
ขนาดใหญ่บนฐานรากที่มีการทรุดตัวไม่เท่ากัน การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของฐานรากจะทำให้เกิด
การการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของโครงสร้าง การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของฐานรากสามารถเกิดขึ้น
ได้โดยทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอาคารขนาดใหญ่ที่อยู่บนพื้นที่กว้างจะมีโอกาสเกิดการทรุดตัว
ไม่เท่ากันได้หลายจุด การวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างในกรณีปกติเปรียบเทียบกับ
กรณีที่เกิดการทรุดตัวเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น

จากการศึกษาพบว่าตำแหน่งของฐานรากที่เกิดการทรุดตัวส่งผลให้การเปลี่ยนแปลง
โมเมนต์และแรงเฉือนในโครงสร้างมีความแตกต่างกันตามลักษณะของโครงสร้างคือ ฐานราก
บริเวณมุมของอาคาร ฐานรากบริเวณด้านข้างอาคารและฐานรากบริเวณภายในของอาคาร โดย
ฐานรากบริเวณมุมอาคารเกิดการทรุดตัวจะมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์และแรงเฉือนน้อยกว่าฐาน
รากบริเวณภายในอาคารและฐานรากบริเวณด้านข้างของอาคารเกิดการทรุดตัว และเมื่อมีการทรุด
ของฐานรากบริเวณด้านข้างของอาคารจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์และแรงเฉือนที่มากที่สุด

นอกจากนี้ยังพบว่า ผลกระทบจากการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นของอาคาร จะเกิด
การเปลี่ยนแปลงมากที่สุดบริเวณชั้นล่างและจะมีผลกระทบลดลงในชั้นที่สูงขึ้น เมื่อมาพิจารณา
ผลกระทบที่เกิดจากระยะการทรุดตัว พบว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์และแรงเฉือน
ที่มาก เมื่อโครงสร้างเกิดการทรุดตัวสูงและจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์และแรงเฉือนน้อย
เมื่อโครงสร้างเกิดการทรุดตัวน้อย เมื่อพิจารณาโครงสร้างที่เกิดการทรุดตัวหลายๆจุดพบว่า
ค่าการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากผลต่างของการทรุดตัว
ในฐานรากที่ใกล้เคียงกัน

Noppakao Bunruangkhaw 2010: Effect of Differential Settlement on Structural Behavior of Large-scale Reinforced Concrete Building. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Kitjapat Phuvorawan, Ph.D. 154 pages.

This thesis presents the effect of differential settlement on structural behavior for large-scale reinforced concrete building. The differential settlement of foundation alters the structural behavior from the general analysis without settlement. The differential settlement can occur in general situation. Especially for large-scaled building that occupies large area, the settlements can take place at several spots. In order to investigate the effect of differential settlement, this research compares the behavior of structure under differential settlement condition to the behavior of structure under normal condition.

It is found that the positions of foundation settlement yields different effect on the change of moment and shear. Three cases of different locations of foundation settlement has been studied; namely, at the corner, at the edge, and at the middle point of building. The analysis indicates that the settlement at the corner yields the least effect of moment and shear change while the settlement at the edge gives the maximum effect.

Furthermore, when considering the effect of settlement to the structural behavior of members on different floors, the analysis shows that maximum effect of moment and shear change occurs at the lower level and the effect reduces as the floor is higher. When focusing on the magnitude of settlement, it is found that the effect varies linearly with the amount of settlement. In other words, when the magnitude of settlement is higher, the effect of moment and shear change gets elevated. For the case of large-scale building with several locations and amounts of settlement, the main effect of moment and shear change pronounces at the members near the location of large amount of differential settlement, but not the amount of settlement itself.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิจพัฒน์ ภู่วรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในระหว่างการทำงานวิจัย ตลอดจนตรวจและแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์จนกระทั่งโครงการวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คณาจารย์ภาควิชา วิศวกรรมศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ทางทฤษฎี และปลูกฝังแนวความคิดในการสร้างสรรค์ให้เกิดสิ่งต่างๆ มากมาย ขอขอบคุณเพื่อนๆ ปริญญาโท วิศวกรรมโครงสร้างทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบคุณวัดเขาสุทิม อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี ที่อนุญาตให้เข้าทำการศึกษา อาคารเจดีย์บูรพาภิวัตน์วิद्याประชาสามัคคี ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนข้อมูลการวิจัย และคำแนะนำในการทำวิจัย บริษัท เอสพีซี คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียرز จำกัด คุณสินธุ พูนศิริวงศ์ ประธานบริษัท คุณอนันต์ สุนทรศิริ รองประธานบริษัท ที่อนุเคราะห์สนับสนุนในการใช้โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง RISA-3D Version 4.5 B และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่ได้สั่งสอน ให้คำแนะนำและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

นพเก้า บุญเรืองขาว

เมษายน 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	76
สรุปและข้อเสนอแนะ	126
สรุป	126
ข้อเสนอแนะ	128
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	129
ภาคผนวก	131

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขนาดของโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์	30
2	น้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง	33
3	เปรียบเทียบขนาดของโครงสร้างจากการออกแบบและจากการวิเคราะห์	62
4	น้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง	65
5	น้ำหนักกระทำต่อการหลุดตัวของเสาเข็มเฉลี่ยในช่วงความยาวที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง	73
6	น้ำหนักกระทำต่อการหลุดตัวของฐานรากที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง	74
7	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของโมเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการหลุดตัวที่ระยะต่างๆ	113
8	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของโมเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการหลุดตัวที่ระยะต่างๆ	117
9	ขนาดของแรงกระทำในฐานรากจากการวิเคราะห์	122
10	ขนาดของแรงสูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคารจากการวิเคราะห์	122
11	ขนาดของแรงกระทำในฐานรากที่หลุดตัวจากการวิเคราะห์	123
12	ขนาดของแรงสูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคารจากการวิเคราะห์ฐานรากที่หลุดตัว	123
13	ตารางเปรียบเทียบแรงกระทำในฐานราก	124
14	ตารางเปรียบเทียบแรง Axial load สูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคาร	124
15	ตารางเปรียบเทียบแรง Shear สูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคาร	125
16	ตารางเปรียบเทียบแรง Bending Moment สูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคาร	125

ตารางผนวกที่

1	เปรียบเทียบแรงกระทำต่อฐานรากไม่หลุดตัวและหลุดตัว ที่ L/240 ณ ตำแหน่งที่ 6	135
---	---	-----

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ความเสียหายของธรณีประดูเนื่องจาก Load bearing wall และการ โกงของ Neuture Axis ที่ฐานของของกำแพง	6
2	ลักษณะทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด	2
3	การเคลื่อนตัวของดินบริเวณเสาเข็ม	11
4	ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม เพื่อพัฒนากลังรับน้ำหนักจนถึง จุดสูงสุดสัมพันธ์กับดิน	12
5	การพัฒนากำลังแรงเสียดทาน และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม	13
6	รูปแบบการพิบัติของฐานรากแผ่และฐานรากลึก	16
7	รูปแบบการพิบัติของเสาเข็มตามลักษณะความแข็งแรงของชั้นดิน	17
8	พฤติกรรมของเสาเข็ม (Pile Behavior) พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกกับค่า การทรุดตัว (Load – Settlement Curve)	19
9	รูปแสดงของโปรแกรม General Material Property ของ Program RISA 3D จากรูปที่ 1 สามารถแสดงได้ดังนี้	21
10	ตารางค่า Node Coordinate Spreadsheet and Temperatures	23
11	Member Section Set Spreadsheet จะเป็นตารางที่กำหนด คุณสมบัติของ Member element และสามารถแก้ไขคุณสมบัติของ Member ได้ใน Manu นี้	24
12	ตารางแสดงค่าของ Member	25
13	ตัวอย่างตารางกำหนดจุดรองรับของของโครงสร้างแต่ละตำแหน่ง	26
14	ตัวอย่างตารางกำหนดแรงกระทำต่อโครงสร้างโดยกำหนดเป็นน้ำหนักกระทำ แต่ละชนิด	27
15	ตัวอย่างตารางกำหนดแรงกระทำต่อโครงสร้างโดยรวมทั้งหมดที่ใช้ วิเคราะห์ร่วมกัน	27
16	ภาพโครงสร้างองค์อาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการวิเคราะห์โครงสร้าง ของอาคารในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง Risa3d (version4.5B)	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	ภาพจตุรกรับของโครงสร้างองค์อาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการวิเคราะห์ในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง Risa3d (version 4.5B)	31
18	ภาพแรงในแนว F_y ที่จตุรกรับของอาคารอาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานราก	34
19	ภาพแสดงโมเมนต์บริเวณชั้น Ground ของอาคารอาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานราก	34
20	ภาพแสดงแรงเฉือนบริเวณชั้น Ground ของอาคารอาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานราก	35
21	ภาพแสดงจุดที่เกิดการทรุดตัวที่พิจารณา ของอาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานราก	36
22	โครงสร้างแบบอินดิเทอร์มินเนทมีตัว redundant อยู่หนึ่งตัว	38
23	Primary structure	38
24	โครงสร้างแบบอินดิเทอร์มินเนทมีตัว Redundant R_b	39
25	ในกรณีที่มีน้ำหนักแผ่นมาเสมอ w กระทำบน Primary structure	39
26	ในกรณีที่มีแรงเพียงหนึ่งของตัว Redundant R_b กระทำที่จุด B	39
27	ภาพตัวอย่างการคำนวณหา Bending Moment Diagram และ Shear Force Diagram ของการทรุดตัวที่ L/240	41
28	เลือกจตุรกรับที่จุด B ออก โครงสร้างจะกลายเป็นแบบอินดิเทอร์มินเนท ซึ่งเรียกว่า Primary structure	42
29	หาระยะโก่ง เนื่องจากการกระทำของน้ำหนักหรือแรงภายนอก ที่จุดและทิศทางเดียวกันกับการกระทำของตัว Redundant	43
30	การหาค่าของเปลี่ยนแปลงมุมหรือมุมลาดเอียงที่จุดนั้น เนื่องจากการกระทำของตัว Redundant	43
31	หาระยะโก่ง ที่จุดนั้น เนื่องจากการกระทำของตัว Redundant	44
32	หาระยะโก่ง ที่จุดนั้น เนื่องจากการกระทำของตัว Redundant และผลการวิเคราะห์	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
33	ภาพตัวอย่างการคำนวณหา Bending Moment Diagram และ Shear Force Diagram ของโครงที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้การทรุดตัวที่ L/240	47
34	ภาพตัวอย่างเอาตัว Redundant จุติ 6 ออก เพื่อการคำนวณหา Bending Moment Diagram และ Shear Force Diagram ของโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้การทรุดตัวที่ L/240	48
35	ภาพตัวอย่างเนื่องจากการกระทำของน้ำหนักหรือแรงภายนอก และระยะโก่งที่เกิดขึ้น จุติ 6 ออก ของโครงที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้การทรุดตัวที่ L/240	48
36	ภาพตัวอย่างเนื่องจากการกระทำของน้ำหนักหรือแรงภายนอก และระยะโก่งที่เกิดขึ้น จุติ 6 ออก ของโครงที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้การทรุดตัวที่ L/240	49
37	ภาพตัวอย่างเนื่องจากการกระทำของน้ำหนักหรือแรงภายนอก และน้ำหนักที่ฐานรากที่ระยะโก่งที่เกิดขึ้น เท่ากับ -4.167 cm, จุติ 6 ออก (การทรุดตัวที่ L/240)	51
38	ภาพลักษณะชั้นดินบริเวณก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาฐิตวิริยาประชาสามัคคี (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)	55
39	การทดสอบ Dynamic load test ของเสาเข็มเจาะเดิม (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)	56
40	การหามอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	60
41	อาคารเจดีย์บูรพาฐิตวิริยาประชาสามัคคี (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)	61
42	อาคารเจดีย์บูรพาฐิตวิริยาประชาสามัคคี ที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง Risa 3d	65
43	การทดสอบ Static load test ของเสาเข็มเจาะเดิมไม่ผ่านทั้งหมด (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก F7-5 โครงการก่อสร้างอาคาร เจดีย์บูรพาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี และฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)	67
45	ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก K7-3 โครงการก่อสร้างอาคาร เจดีย์บูรพาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี และฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)	68
46	ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก G18-1 โครงการก่อสร้างอาคาร เจดีย์บูรพาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี และฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)	68
47	ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก G16-4 โครงการก่อสร้างอาคารเจดีย์ เจดีย์บูรพาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี และฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)	69
48	ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก K11-8 โครงการก่อสร้างอาคาร เจดีย์บูรพาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี และฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)	69
49	ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก K12-5 โครงการก่อสร้างอาคาร เจดีย์บูรพาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี และฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)	70
50	ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก F17-3 โครงการก่อสร้างอาคารเจดีย์ เจดีย์บูรพาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี และฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)	70
51	ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก E16-1 โครงการก่อสร้างอาคารเจดีย์ เจดีย์บูรพาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี และฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)	71
52	ภาพฐานรากบริเวณก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
53	ภาพจุลทรรศน์ที่มีการทุดตัวเนื่องจากน้ำหนักกระทำของ อาคารเจดีย์บูรพาวิจิตรวิทยาประชาสามัคคีที่ใช้ในการวิเคราะห์	75
54	ตำแหน่งฐานรากขององค์อาคารที่พิจารณาการทุดตัว	76
55	การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 1 ขององค์อาคาร	77
56	การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทุดตัวที่ตำแหน่งที่ 1 ในคาน ที่พิจารณา	77
57	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทุดตัวของ ตำแหน่งที่ 1	78
58	การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 4 ขององค์อาคาร	79
60	การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทุดตัวที่ตำแหน่งที่ 4 ในแนวกานที่ 1	80
61	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทุดตัวของ ตำแหน่งที่ 4 แนวกานที่ 1	81
62	การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทุดตัวที่ตำแหน่งที่ 4 ในแนวกานที่ 2	82
63	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทุดตัวของ ตำแหน่งที่ 4 แนวกานที่ 2	83
64	การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 6 ขององค์อาคาร	84
65	การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ในแนวกาน ที่พิจารณา	84
66	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทุดตัวของ ตำแหน่งที่ 6	85
67	การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 1 ขององค์อาคาร	87
68	การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทุดตัวที่ตำแหน่งที่ 1 ในคาน ที่พิจารณา	87
69	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานเนื่องจากการทุดตัวของ ตำแหน่งที่ 1	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
70	การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 4 ขององค์อาคาร	89
71	การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 1 แนวคานที่ 1	90
72	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานเนื่องจากการทรุดตัวของ ตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 1	90
73	การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 2	91
74	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานเนื่องจากการทรุดตัวของ ตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 2	92
75	การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 6 ขององค์อาคาร	93
76	การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ในคาน ที่พิจารณา	94
77	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานเนื่องจากการทรุดตัวของ ตำแหน่งที่ 6 ที่พิจารณา	94
78	การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 2 ขององค์อาคาร	95
79	การเปรียบเทียบ โมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 2 ขององค์อาคาร	96
80	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 2 เนื่องจากการทรุดตัวของ ตำแหน่งที่ 6	96
81	การเปรียบเทียบ โมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 3 ขององค์อาคาร	98
82	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 3 เนื่องจากการทรุดตัว ของตำแหน่งที่ 6	99
83	การเปรียบเทียบ โมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 4 ขององค์อาคาร	99
84	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 4 เนื่องจากการทรุดตัว ของตำแหน่งที่ 6	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
85	การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 5 ขององค์อาคาร	101
86	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 5 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6	101
87	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในแต่ละชั้นของจุดที่เกิดการทรุดตัวของคานในตำแหน่งที่ 6	102
88	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของแรงที่จุกรองรับแต่ละชั้นของคานในตำแหน่งที่ 6	102
89	การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 2	103
90	การเปรียบเทียบแรงเฉือนชั้นที่ 2 ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6	104
91	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานชั้นที่ 2 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6	104
92	การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 3 ขององค์อาคาร	106
93	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 3 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6	106
94	การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 4 ขององค์อาคาร	107
95	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 4 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6	108
96	เปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 5 ขององค์อาคาร	108
97	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 5 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6	109
98	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในแต่ละชั้นของจุดที่ 5 (จุดที่ทรุดตัว) ของการทรุดตำแหน่งที่ 6	109

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
99	การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทрудตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทрудตัวที่ L/360	109
100	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จากการทрудตัวของตำแหน่งที่ 6 ระยะการทрудตัวที่ L/360	111
101	การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทрудตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทрудตัวที่ L/500	112
102	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จากการทрудตัวของตำแหน่งที่ 6 ระยะการทрудตัวที่ L/500	112
103	การเปรียบเทียบระยะการทрудตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จุดที่ 9	113
104	การเปรียบเทียบระยะการทрудตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จุดที่ 8	114
105	การเปรียบเทียบระยะการทрудตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จุดที่ 7	114
106	การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทрудตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทрудตัวที่ L/360	115
107	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทрудตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทрудตัวที่ L/360	116
108	การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทрудตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทрудตัวที่ L/500	116
109	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทрудตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทрудตัวที่ L/500	117
110	การเปรียบเทียบระยะการทрудตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนจุดที่ 5	118
111	การเปรียบเทียบระยะการทрудตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนจุดที่ 4 ใน	118

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
112	การเปรียบเทียบระยะการทรุดตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือน จุดที่ 4 นอก	119
113	การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการทรุดตัวที่พิจารณา ขององค์อาคารเจดีย์ ฯ	120
114	การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่พิจารณา ของ องค์อาคารเจดีย์ ฯ	120
115	การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่พิจารณา ของ องค์อาคารเจดีย์ ฯ	121
ภาพผนวกที่		
1	ฐานรากขององค์อาคารที่มีความสมมาตร 1 ใน 8 ส่วน	132
2	แรงปฏิกิริยาของฐานรากเกิดการทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6	133
3	แรงปฏิกิริยาของฐานรากไม่เกิดการทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6	134
4	โมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่เกิดการทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6	137
5	โมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ไม่เกิดการทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6	138
6	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL A, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	139
7	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL A, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	140
8	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ GL A, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	140
9	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ GL A, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	141
10	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL B, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	142

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
11	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL B, 1-9 (การทดสอบที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	142
12	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ GL B, 1-9 (การทดสอบที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	143
13	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ GL B, 1-9 (การทดสอบที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	144
14	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL C, 1-9 (การทดสอบที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	146
15	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL C, 1-9 (การทดสอบที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	146
16	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ GL C, 1-9 (การทดสอบที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	147
17	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ GL C, 1-9 (การทดสอบที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	147
18	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL D, 1-9 (การทดสอบที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	149
19	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ GL D, 1-9 (การทดสอบที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	150
20	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL E, 1-9 (การทดสอบที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	151
21	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ GL D, 1-9 (การทดสอบที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)	152
22	ภาพการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6	153

ผลกระทบต่อการสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่บนฐานราก ที่มีการทรุดตัวไม่เท่ากัน

Effect of Differential Settlement on Structural Behavior of Large-scale Reinforced Concrete Building

คำนำ

ในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป นิยม ตั้งสมมติฐานว่าฐานรากที่รองรับโครงสร้างอาคารมีการทรุดตัวในแนวตั้งใกล้เคียงกัน เนื่องจากการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของฐานราก (Differential Settlement) มีผลโดยตรงต่อการรับน้ำหนักของโครงสร้างอาคาร การทรุดตัวไม่เท่ากันเปรียบเสมือนเป็นแรงภายนอกที่กระทำเข้ากับโครงสร้างอาคาร ซึ่งทำให้กำลังของโครงสร้างในการรับน้ำหนักมีกำลังน้อยลง อย่างไรก็ตาม ในการก่อสร้างบางประเภทไม่สามารถควบคุมฐานรากให้มีการทรุดตัวที่ต่างกันได้อย่างแน่นอน ตัวอย่างเช่น การก่อสร้างอาคารบนภูเขาที่มีชั้นดินแข็งต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างอาคารภายใต้สภาวะการทรุดตัวต่างกันจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ถ้าโครงสร้างไม่มีการวิเคราะห์และออกแบบซึ่งคำนึงถึงผลของการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน อาจทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายภายใต้สภาวะการใช้งานปกติได้ โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่บนฐานรากหลายประเภทที่มีการทรุดตัวไม่เท่ากัน โดยมุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบของกำลังรับน้ำหนักที่ลดลงของโครงสร้างในการรับแรงในสภาวะใช้งาน อาคารคอนกรีตที่จะทำการศึกษาเป็นอาคารบูรพาภิวัตน์วิद्याประชาสามัคคีซึ่งเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่ที่วางอยู่บนฐานรากหลายประเภทที่และตั้งอยู่บนภูเขาซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารเจดีย์บูรพาภิวัตน์วิद्याประชาสามัคคี วัดเขาสุกิม อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี มีความกว้างยาวประมาณ 99x99 เมตร สูง 119 เมตร ทำการก่อสร้างบริเวณภูเขา ที่มีชั้นหินที่มีความลาดตามแนวภูเขาทำให้ความยาวเสาเข็มของอาคารมีความยาวต่างกัน โดยการออกแบบเดิมของอาคารเป็นการออกแบบฐานรากเสาเข็มเจาะและในระหว่างการก่อสร้างเสาเข็มพบชั้นหินดานบริเวณด้านทิศตะวันตกอยู่ในระดับใกล้ผิวดินไม่สามารถทำเสาเข็มเจาะได้ จึงมีการแก้ไขในการก่อสร้างในขณะนั้น โดยการก่อสร้างฐานรากแผ่ แทนการสร้างเสาเข็มเจาะ ส่วนของการก่อสร้างเสาเข็มเจาะบริเวณที่สามารถดำเนินการได้ด้านทิศตะวันออกสามารถ

ดำเนินการได้จนแล้วเสร็จโดยมีความยาวของเสาเข็มจะแตกต่างกันไปตามความลาดของชั้นหิน หลังจากนั้นได้มีการเข้าตรวจสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ปรากฏว่าเสาเข็มเจาะที่ได้ดำเนินการไปนั้นไม่สามารถรับน้ำหนักตามที่ผู้ออกแบบได้ออกแบบไว้เนื่องจากปลายของเสาเข็มเจาะตั้งอยู่บนชั้นหินย่อยที่อยู่บนชั้นหินดานจึงมีการเคลื่อนตัวเมื่อน้ำหนักกระทำ จึงได้ทำการศึกษาและได้ข้อสรุปว่าควรดำเนินการใช้เสาเข็มตอกในการรับน้ำหนักของโครงสร้างโดยให้ดำเนินการตอกเสาเข็มไปจนถึงชั้นหินดานจึงจะสามารถรับน้ำหนักได้ตามที่กำหนดซึ่งในลักษณะความแตกต่างของฐานราก ความยาวของเสาเข็ม และความแตกต่างของการทรุดตัวไม่เท่ากันทำให้เกิดพฤติกรรมและแรงต่างๆ ภายในองค์อาคารต่างจากที่ออกแบบไว้ และอาจเป็นผลทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายจากการทรุดตัวที่แตกต่างกันได้ จึงนำผลการทรุดตัวของเสาเข็มจากการทดสอบเสาเข็มมาทำการวิเคราะห์ร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อศึกษาผลกระทบการทรุดตัวของเสาเข็มที่กระทบต่อโครงสร้างของอาคาร

ซึ่งการศึกษานี้จะใช้โปรแกรม วิเคราะห์โครงสร้าง RISA-3D Version4.5 B เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นโดยมีน้ำหนักการกระทำต่อโครงสร้างคือ ที่น้ำหนักบรรทุกทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร กระทำต่อองค์อาคาร โดย โปรแกรม วิเคราะห์โครงสร้าง RISA-3D Version4.5 B เป็นโปรแกรม STRUCTURE ANALYSIS ที่ได้รับการยอมรับและใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมในการออกแบบก่อสร้างในปัจจุบัน

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารเจดีย์บูรพาจิตวิริยาประชาสามัคคี วัดเขาสุทิม อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี โดยจะนำผลและพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นในโปรแกรมวิเคราะห์เพื่อทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเกิดการทรุดตัวไม่เท่ากันของเสาเข็มและฐานรากต่างๆ ที่มีผลต่อโครงสร้างขนาดใหญ่ เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างขนาดใหญ่โดยใช้สมมติฐานว่าฐานรากมีการทรุดตัวในแนวตั้งใกล้เคียงกัน ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างขนาดใหญ่โดยใช้สมมติฐานว่าฐานรากมีการทรุดตัวในแนวตั้งแตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงของโครงสร้าง แบบจำลองขนาดใหญ่ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กบนฐานรากที่มีการทรุดตัวใกล้เคียงกันและฐานรากที่มีการทรุดตัวแตกต่างกัน

ขอบเขตการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ จะใช้กรณีศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองในโปรแกรม วิเคราะห์โครงสร้าง RISA-3D Version 4.5 B เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นโดยมีน้ำหนักการกระทำต่อโครงสร้างคือน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร กระทำต่อองค์อาคาร เป็นลักษณะโครงสร้างสามมิติ โดยการใช้การวิเคราะห์แบบ Linear Static และนำผลของการวิเคราะห์โครงสร้าง ที่ไม่เกิดการทรุดตัว และเกิดการทรุดตัว เนื่องจากของเสาเข็มและฐานรากของอาคาร มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พิจารณาพฤติกรรมและความแตกต่างของพฤติกรรมที่เกิดขึ้น เพื่อระบุผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อโครงสร้าง ได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ทราบถึงพฤติกรรมของโครงสร้างขนาดใหญ่ในสภาวะปกติและในสภาวะของการทรุดตัวต่างกัน และผลกระทบต่อโครงสร้างเนื่องจากการทรุดตัวที่ต่างกัน

การตรวจเอกสาร

การทรุดตัวไม่เท่ากันเปรียบเหมือนเป็นแรงภายนอกที่กระทำเข้ากับโครงสร้างอาคาร ซึ่งทำให้กำลังของโครงสร้างในการรับน้ำหนักมีกำลังน้อยลง อย่างไรก็ตาม ในการก่อสร้างบางประเภทไม่สามารถควบคุมฐานรากให้มีการทรุดตัวที่ต่างกัน ได้ ตัวอย่างเช่นการก่อสร้างอาคารบนภูเขาที่มีชั้นดินแข็งต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างอาคารภายใต้สภาวะการทรุดตัวต่างกันจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ถ้าโครงสร้างไม่มีการวิเคราะห์และออกแบบซึ่งคำนึงถึงผลของการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน อาจทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายภายใต้สภาวะการใช้งานปกติได้ โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่บนฐานรากหลายประเภทที่มีการทรุดตัวไม่เท่ากัน โดยมุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบของกำลังรับน้ำหนักที่ลดลงของโครงสร้างในการรับแรงในสภาวะใช้งาน ซึ่งผลกระทบที่เกิดจากการทรุดอาจสร้างความเสียหายได้ตั้งแต่เกิดรอยร้าวในกำแพงจนถึงการเกิดการพังทลายของโครงสร้างได้

การทรุดตัวของโครงสร้าง

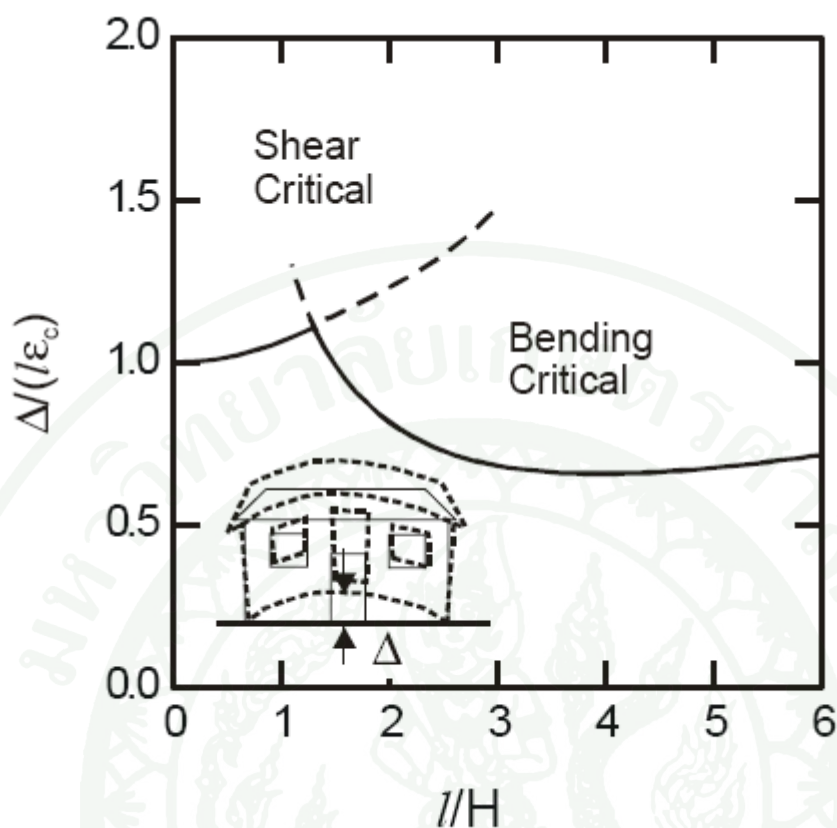
ฐานรากเสาเข็มเป็นโครงสร้างที่ใช้ถ่ายน้ำหนักจากอาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ ลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรงกว่าเบื้องล่าง ทั้งยังทำให้การทรุดตัวลดลงจนไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้าง เมื่อเสาเข็มเริ่มบรรทุกน้ำหนักก็จะเริ่มเคลื่อนที่ลงตามทิศทางของแรงมีการถ่ายแรงจากเสาเข็มลงสู่ชั้นดินและเกิดการเคลื่อนที่ของชั้นดินตามเสาเข็มลงไปด้วย การเคลื่อนที่นี้จะเกิดมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุก สูงขึ้น ผลสุดท้ายเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากจนชั้นดินไม่สามารถต้านทานได้ ก็จะเกิดเป็นแนวเคลื่อนพัง (Shear Plane) เปรียบได้เช่นเดียวกับวัสดุทางวิศวกรรม เมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำไปที่วัสดุ วัสดุนั้นก็จะเกิดความเครียดขึ้นในเนื้อวัสดุ ซึ่งความเครียดนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีหน่วยแรงที่มากขึ้น จนกระทั่งวัสดุนั้นไม่สามารถต้านทานได้ ก็จะเกิดการพิบัติ เสาเข็มนั้นจะเกิดการพิบัติในชั้นดินบริเวณโดยรอบผิวเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็ม การที่เสาเข็มนั้นเคลื่อนที่ลงเมื่อได้รับแรงกระทำนั้น มีรูปแบบของพฤติกรรมคล้ายกับความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ ฉะนั้นในการศึกษาครั้งนี้ ส่วนหนึ่งจะทำการศึกษาจากพื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ซึ่งสามารถนำไปอธิบายพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มได้

Skempton and Mac Donald (1956) ได้สำรวจ 98 กรณี จากอดีตเพื่อที่จะหาหลักการของการคำนวณการทรุดตัวที่ยอมรับได้และการทรุดตัวของฐานราก จากทั้งหมดที่ได้ศึกษามีเพียง 13 กรณีที่เกี่ยวข้อง โดยมีมากกว่าครึ่งที่เขาได้สำรวจไม่มีการเสียรูปทรงเสียหายเลย จากงานของเขา เขาได้ชี้แนะว่าการโก่งตัวของโครงสร้าง เกิดจาก Radius of curvature (รัศมีการโค้งงอ) และ angular distortion (การบิดของมุม) สามารถหาได้โดยการหาอัตราส่วนของการงอออกจากรูปทรง (δ) แล้วก็ ระยะทางระหว่าง 2 จุด (l) โดย angular distortion จะเท่ากับ δ / l

ในช่วงแรกได้มีข้อกำหนดการโก่งตัวไว้เท่ากับ $1/300$ โดยได้แนะนำไว้ว่าอัตรานี้สามารถนำมาใช้ได้กับ Load-bearing wall หรือ Masonry in-fill panels คือการนำหินไปใส่ในกำแพงค้ำที่มี Frame แต่ปัญหาของเทคนิคนี้ คือว่าไม่ได้คำนึงถึงความยาวหรือความสูงของส่วนนี้ที่นำมาเทียบกับความยาวหรือความสูงของทั้งค้ำ โดยการแยกหมวดหมู่และการจัดระดับความเสียหายมีเพียง 2 แบบนั้นก็คือ

1. แบบ cracking ที่มีการแตกเล็กน้อย และ
2. การพังทลายของโครงสร้างเท่านั้น

Burland and Colleagues (1975) ได้เปรียบเทียบปฏิกิริยาของกำแพงหินที่ใส่เข้าไปข้างในโครงสร้าง และกำแพงกำลังมีการงอออกจากรูปทรง โดยเปรียบเทียบกำแพงนี้ให้เท่ากับคานรับ



ภาพที่ 1 ความเสียหายของธรณีประตุนี้อาจเกิดจาก Load bearing wall และการ โค้งของ Neutere Axis ที่ฐานของของกำแพง

ที่มา: Burland and Wroth (1975)

นำหน้ามาวางไว้ตรงจุดกลางของคานนี้ โดยใช้อัตราส่วน Central deflection การงอหรือการเปลี่ยนแปลงตรงกลาง ใช้เป็นตัว Δ กับความยาวของคานรับน้ำหนักซึ่งใช้ตัว l เพื่อที่จะทำการหาอัตราการเปลี่ยนรูปทรงของโครงสร้าง (Deflection Ratio) ที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ “Curvature”

โดยรวมเขาถือว่าการ โค้งลงต่ำกว่า (Neutral axis) อยู่ตรงข้างล่างสุดของเสา หรือกำแพง หลังจากนั้นเขานำสมการ การงอของเสา มารวมกับ critical strain ใช้สัญลักษณ์ ϵ_c เพื่อที่จะมาเชื่อมโยง การแตกร้าวถึงการเปลี่ยนรูปทรงความสูงและความยาวของเสาโดยเทียบเคียงของเสาแล้ว critical strain นี้ไว้ประมาณ 0.03% critical strain ในแง่นี้ถ้าหากเกินอัตราส่วนนี้แล้ว จะเกิดการเสียหายหรือพังทลายได้

George and Denys (2002) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการทรุดตัวของดินที่มีผลต่อโครงสร้าง โดยเสนอการวิเคราะห์คาน 2 ช่วง และการทรุดตัวของจตุรรองรับ โดยเสนอรูปแบบการทรุดตัวของฐานรากที่ไม่เท่ากัน เพื่อ ทำการวิเคราะห์ผลจากทรุดตัว โดยจะได้ว่าค่าการทรุดตัวเกิดขึ้นในแต่ละจุดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่เกิดขึ้น

Berardi and Bovolenta (2005) ได้ทำการศึกษา การหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม โดยวิธี Non-linear ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบการทรุดตัวของเสาเข็มที่ทำการทดสอบและการเปรียบเทียบโดยวิธีการคำนวณโดยวิธี Non-linear ที่มีตัวแปรของ Shear Modulus (G) แต่ละระดับความลึกและ Parameter in solution for axial pile response (μ, ζ) โดยมีผลที่เปรียบเทียบได้ใกล้เคียงกัน

พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

Lee (2007) ได้ทำการศึกษาการทรุดตัวของเสาเข็มเจาะที่มีหัวเสาเข็มด้านล่าง พบว่าการทรุดตัวของเสาเข็มจะน้อยลงเมื่อมีขนาดของฐานกว้างขึ้นและการกระจายน้ำหนักของฐานเสาเข็มจะมีมากขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (Stress – Strain Relation)

จากทฤษฎีกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจากภายนอกจะเกิดการกระจายของหน่วยแรงในวัสดุ มีผลทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนตัว (deformation) ลักษณะและขนาดของการเคลื่อนตัวจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (Stress – Strain Relationship) โดยวัสดุต่างชนิดกันจะมีลักษณะความสัมพันธ์ที่ต่างกัน การศึกษาพฤติกรรมเหล่านี้สามารถใช้อธิบายพฤติกรรม การรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มได้

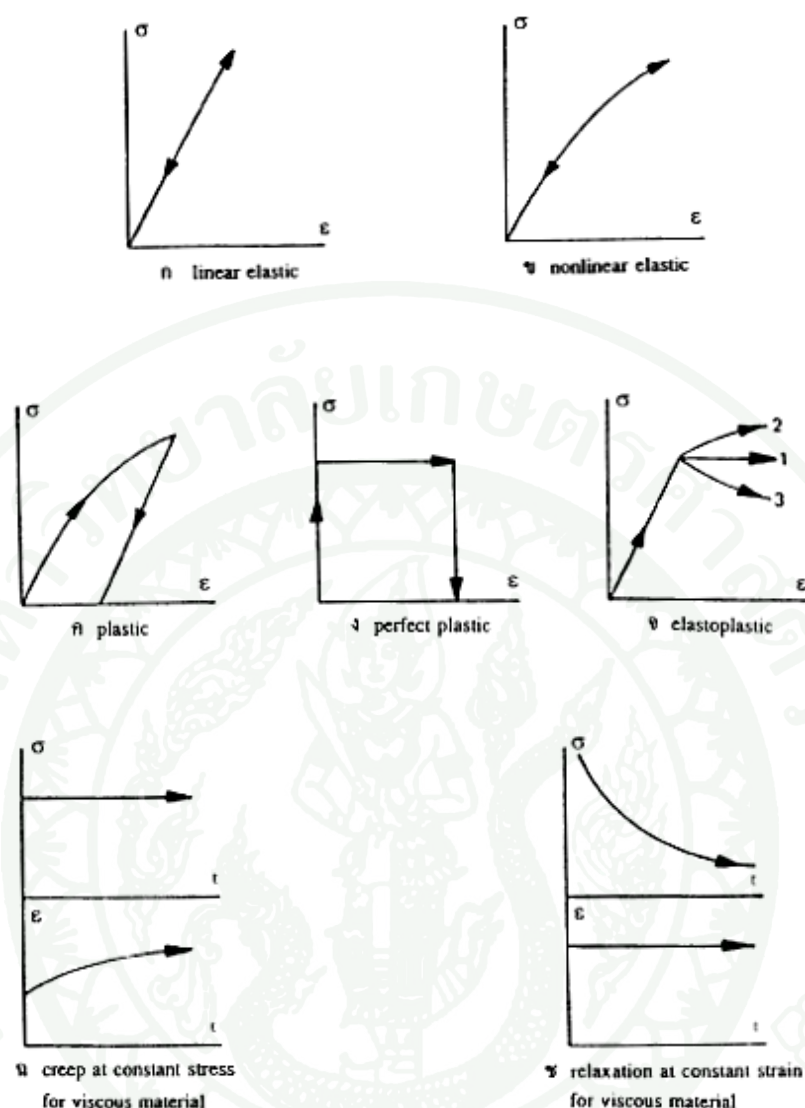
โดยทั่วไป ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุ สามารถจำแนกได้หลายประเภทดังในภาพที่ 1

แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อมีแรงกระทำ ซึ่งเมื่อนำแรงกระทำออกความเครียดทั้งหมดที่เกิดขึ้นก็สามารถคืนกลับได้ เปรียบได้กับพฤติกรรมของการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ในช่วงน้ำหนักน้อยๆพฤติกรรมลักษณะนี้เรียกว่าพฤติกรรม

แบบ Elastic และถ้าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดหรือน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มเป็นสัดส่วนที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง (Linear) ดังภาพที่ 1 ก แสดงว่าวัสดุที่มีความสัมพันธ์เป็นแบบ Linear Elastic แต่ถ้าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว เป็นลักษณะเส้นโค้งแต่ยังคงคืนตัวได้ ดังภาพที่ 1 ข แสดงว่าวัสดุนี้มีพฤติกรรมเป็นแบบ Non – Linear Elastic

ในกรณีที่ความเครียดหรือการทรุดตัวของเสาเข็มไม่สามารถคืนกลับได้ทั้งหมดเมื่อนำแรงกระทำออก ดังภาพที่ 1ค เราเรียกลักษณะเช่นนี้ว่า Plastic Strain หรือ Plastic Settlement และเสาเข็มจะแสดงพฤติกรรมแบบ Plastic ส่วนในภาพที่ 1ง แสดงพฤติกรรมแบบ Rigid – Plastic ซึ่งไม่มีช่วงความเครียดในลักษณะ Elastic เลย หรือการทรุดตัวของเสาเข็มที่ไม่สามารถคืนกลับได้

สภาพธรรมชาติวัสดุอาจเกิดความเครียด ทั้งแบบที่สามารถคืนกลับได้ ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบผสมผสานทั้ง Elastic และ Plastic หรือ Elastoplastic ดังภาพที่ 1จ แสดงถึงพฤติกรรมแบบ Elastoplastic สามประเภท ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันหลังจากหน่วยแรงเพิ่มขึ้นถึงจุดคลาก (Yield Stress, σ_y) โดยที่ curve 1 เป็นแบบ Perfectly Plastic เป็นหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นจนเลยจุดคลากแล้วค่า Strain เพิ่มขึ้น โดยที่ค่า Stress คงที่ ส่วน curve 2 และ curve 3 เป็นพฤติกรรมในกรณีของการเพิ่มหน่วยแรงที่เกินกว่าจุดคลาก และมีค่า Strain เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่า Stress ก็เพิ่มขึ้น ที่เรียกว่า Strain Hardening แต่ถ้า Stress ลดลง เราเรียกว่า Strain Softening ซึ่งจากการรวบรวมผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจนถึงจุดพิบัติ พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวจะมีพฤติกรรมทั้ง 3 รูปแบบดังกล่าวข้างต้น



ภาพที่ 2 ลักษณะทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด

ที่มา: Desai and Christian (1977)

นอกจากนี้ วัสดุบางชนิดอาจมีพฤติกรรมขึ้นกับเวลา เนื่องจากมีความหนืด (Viscous Material) โดยมีคุณสมบัติเป็น Viscoelastic, Viscoplastic หรือ Elastoviscoplastic ซึ่งถ้าอัตราการเพิ่มแรงกระทำต่ำกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุ (การกระจายหน่วยแรงและความเครียด) พฤติกรรมของวัสดุจะมีลักษณะเช่นเดียวกับวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบไม่ขึ้นกับเวลา แต่ถ้าอัตราการเพิ่มแรงกระทำสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา จะทำให้วัสดุได้รับหน่วยแรงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเครียด และถ้าหยุดการเพิ่มน้ำหนักกระทำ จะทำให้หน่วยแรงในวัสดุ

คงที่ โดยมีความเครียดเพิ่มขึ้น ลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ที่มีลักษณะของการบีบอัดแบบที่มีการทรุดตัวลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่ไม่มี的增加น้ำหนักเลย ดังแสดงในภาพที่ 1c แต่ถ้าเป็นการคลายตัวของความเค้น ณ ที่ความเครียดคงที่เมื่อเวลาเปลี่ยนไป จะเป็นพฤติกรรมดังในภาพที่ 1x ตัวอย่างเช่นการคลายตัวของลวด Prestress ในเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เป็นต้น

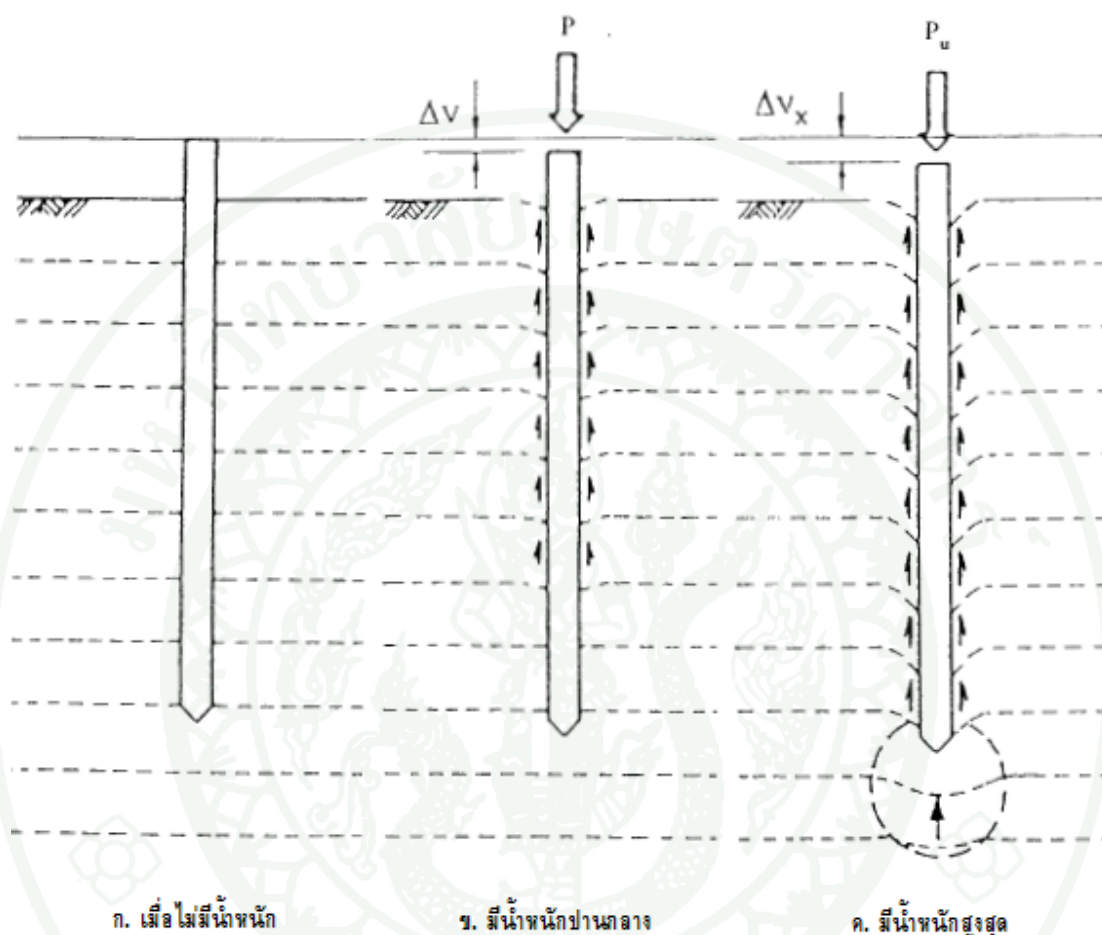
จากการศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุแต่ละประเภท ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มนั้น สามารถจำแนกพฤติกรรมของวัสดุได้ดังในภาพที่ 1 ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ของวัสดุที่แตกต่างกัน นั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ (Homogeneity) การที่คุณสมบัติของวัสดุมีความเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic) และความต่อเนื่องของวัสดุ ความต้านทานต่อแรงกระทำในช่วงเวลาหนึ่ง รวมทั้งอัตราและขนาดของแรงกระทำ ซึ่งสอดคล้องกับปัจจัยการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่อาจจะต้องขึ้นกับค่ากำลังของคอนกรีต ชนิดและวัสดุของชั้นดินที่อยู่โดยรอบเสาเข็ม

เป็นที่ทราบกันดีว่า พฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดของดินไม่เป็น Linear Elastic ตลอดช่วงการรับแรงกระทำ และมีพฤติกรรมแตกต่างกันไปตามสภาพที่แตกต่างกัน จึงใช้สมการคณิตศาสตร์อธิบายพฤติกรรมเชิงซ้อนและพฤติกรรมการรับน้ำหนักได้ไม่สมบูรณ์ การแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มจากรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม จากปัจจัยอื่นๆ ประกอบด้วย

การจำลองพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มลงสู่ชั้นดิน

พฤติกรรมเคลื่อนที่ลงเพื่อถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มลงบนชั้นดินฐานราก เสาเข็มเมื่อตกลงหรือติดตั้งลงในชั้นดินด้วยวิธีใดก็ตาม ถ้าไม่พิจารณาถึงการกระทบกระเทือนของชั้นดิน เนื่องจากการตอกหรือเจาะเพื่อติดตั้งเสาเข็มแล้ว ชั้นดินหรือเสาเข็มก็จะมีเคลื่อนที่ลงตามทิศทางของแรง ในขณะที่เดียวกันดินที่เกาะอยู่ข้างผิวเสาเข็มก็ต้านทานไว้ จึงมีการถ่ายแรงจากเสาเข็มลงสู่ชั้นดิน ชั้นดินมีการเคลื่อนที่ตามเสาเข็มลงไปด้วย การเคลื่อนที่ที่เกิดมากเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้น การพัฒนาแรงต้านที่ปลายเสาเข็มเกิดตามมา ดังแสดงในภาพที่ 2 จนชั้นดินไม่สามารถ

ด้านทานน้ำหนักที่เพิ่มได้ จะเกิดแนวเคลื่อนพังโดยรอบเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็มทำให้มีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate pile Capacity)



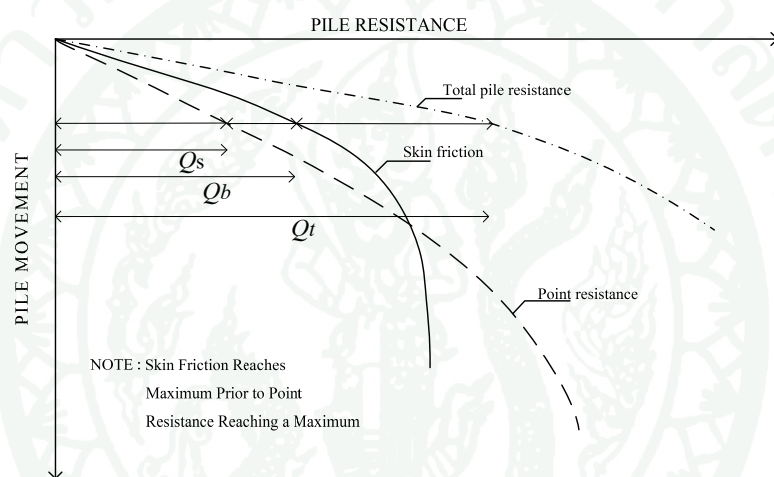
ภาพที่ 3 การเคลื่อนตัวของดินบริเวณเสาเข็ม

ที่มา: วรากร (2539)

โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่เนื่องจากคุณสมบัติทางด้านออสติก มีค่าเพียงพอที่จะทำให้เกิดการพัฒนากำลังของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม ในเสาเข็มตอกสภาพดินที่ปลายเสาเข็ม จะถูกอัดตัวแน่นในกระบวนการตอกมากกว่ากระบวนการเจาะเสาเข็ม การที่เสาเข็มมีแรงต้านทานที่ผิวเสาเข็มเต็มกำลัง เกิดการเคลื่อนที่ลงระยะหนึ่ง ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าการเคลื่อนที่ลงที่จะต้องใช้ในการพัฒนาจนถึงแรงต้านทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็ม เป็นกรณีเดียวกันกับแรงต้านทานที่ผิวพัฒนาถึงค่าสูงสุดก่อนการพัฒนาแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ดังแสดงในภาพที่ 3 และ 4 แรงต้านทานที่ผิว

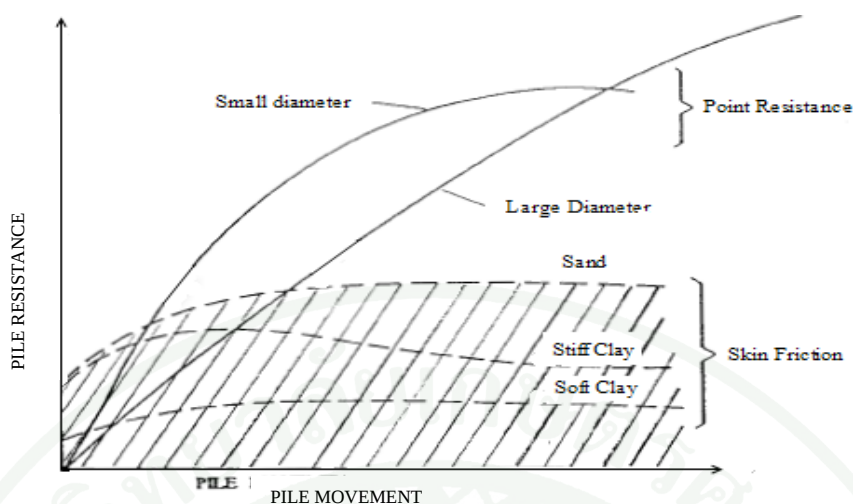
เมื่อพัฒนาถึงค่าสูงสุดแล้วจะมีค่าค่อนข้างคงที่ แม้ว่าจะมีการเคลื่อนที่ลงของเสาเข็มอยู่อีก ในชั้น Stiff Clay อาจเกิดค่ากำลังต้านทานที่ผิวลดลง ภายหลังจากที่เสาเข็มเคลื่อนที่ลงเพื่อพัฒนากำลัง ไปจนกระทั่งจุดสูงสุดแล้ว

เมื่อน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มมากจนกระทั่งชั้นดินไม่สามารถจะต้านทานการถ่าน้ำหนักจากเสาเข็มได้แล้ว จะเกิดแนวเคลื่อนพัง (Shear Plan) โดยรอบผิวเสาเข็ม และที่ปลายเสาเข็ม โดยมีการเคลื่อนที่ลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกน้ำหนักบรรทุกที่จุดนี้ว่า น้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติของเสาเข็ม (Ultimate Pile Capacity)



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม เพื่อพัฒนากำลังรับน้ำหนักจนถึงจุดสูงสุดสัมพันธ์กับดิน

ที่มา: Carroll (1987)



ภาพที่ 5 การพัฒนากำลังแรงเสียดทาน และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

ที่มา: Carroll (1987)

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

สามารถจำแนกเป็น 3 วิธีหลักๆที่แตกต่างกัน คือ

1. Static Method เป็นวิธีวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม โดยอาศัยกำลังรับน้ำหนักของชั้นดิน เป็นมาตรฐานในการออกแบบ โดยเฉพาะเมื่อทราบลักษณะชั้นดินจากการเจาะสำรวจ และทดสอบคุณสมบัติในบริเวณที่จะทำการตอกหรือติดตั้งเสาเข็ม

2. Dynamic Method การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากข้อมูลการตอกเสาเข็มนี้ นอกจากคำนวณแรงต้านทานการตอกเสาเข็มได้แล้ว ในทางปฏิบัติยังเป็นการตรวจสอบว่าปลายของเสาเข็มยังลงถึงชั้นดินที่มีความแข็งแรงพอหรือไม่ โดยใช้กฎตกกระทบของ Newton มาประยุกต์เพื่อหาแรงต้านทานของเสาเข็ม จากการปล่อยลูกตุ้มลงกระทบบนหัวเสาเข็ม จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานลงสู่เสาเข็ม ทำให้เสาเข็มเคลื่อนลงสู่ชั้นดิน ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะทราบค่าที่แท้จริง ของพลังงานที่สูญหายขณะตอกเสาเข็ม จึงเป็นสาเหตุที่วิธีนี้ไม่เป็นที่ยอมรับ แต่มีประโยชน์ในการตรวจสอบการตอกเสาเข็มร่วมไปกับการตรวจสอบวิธีอื่น

3. การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มจริงในสนาม เป็นวิธีการหาลำดับรับน้ำหนักของเสาเข็มในสถานที่ก่อสร้างจริง โดยใช้น้ำหนักบรรทุกจริงลงบนเสาเข็ม และทำการวัดค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ เพื่อนำมาศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็ม แล้วทำการวิเคราะห์หาลำดับรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดที่เหมาะสมต่อไป

วัตถุประสงค์การทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

ในโครงการที่ต้องใช้เสาเข็มจำนวนมาก หรือฐานรากที่มีความสำคัญมาก การออกแบบน้ำหนักบรรทุก หรือการประมาณการเคลื่อนตัว การทดสอบแรงดันในสถานที่ก่อสร้างจริง มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อเป็นการพิสูจน์แรงต้านทานในสนามเปรียบเทียบกับแรงต้านทานที่ต้องการในการออกแบบ (Proof Test) ซึ่งคำนวณจากข้อมูลชั้นดิน ในการทดสอบไม่ถึงน้ำหนักพิบัติ การทดสอบเพื่อแน่ใจว่าเสาเข็มรับน้ำหนักได้มากกว่าสองเท่าของแรงในการออกแบบเพียงพอแล้ว
2. เพื่อหาแรงต้านทานสูงสุดของเสาเข็ม และพฤติกรรมการทรุดตัว แล้วนำไปปรับลดหรือเพิ่มแรงแบกทานในการออกแบบเสาเข็ม และศึกษาการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็ม
3. หาข้อมูลเกี่ยวกับความยาวเสาเข็มที่แท้จริง ความเหมาะสมของเครื่องจักรในการติดตั้ง และจำนวนครั้งการตอกเสาเข็มขณะที่หยั่งถึงชั้นดินแข็ง เพื่อเป็นแนวทางในการก่อสร้างและควบคุมคุณภาพต่อไป
4. ตรวจสอบความแข็งแรงของโครงสร้างเสาเข็ม

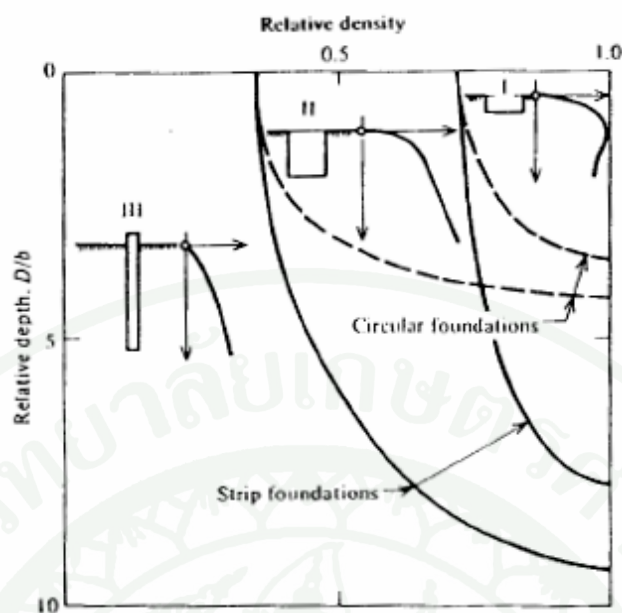
ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม คือการหาความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ตลอดจนนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนัก โดยเฉพาะช่วงน้ำหนักใช้งานสัมพันธ์กับค่าการทรุดตัว และส่งผลถึงกระบวนการทำงานติดตั้งเสาเข็มมีความเหมาะสมหรือไม่

การแปลผลการทดสอบเสาเข็ม เพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบ Static Load Test

จากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม ผลที่ได้คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกบนเสาเข็มและการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ดังนั้นการหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุด หรือค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ จึงเป็นวิธีการที่มีหลากหลาย และจะทำให้ได้ผลที่แตกต่างกัน

พฤติกรรมที่แสดงการพิบัติของเสาเข็ม

ในการศึกษาการพิบัติของฐานรากเสาเข็มนั้น เราพบว่ารูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม มีรูปแบบคล้ายคลึงกับกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัวของฐานรากแผ่ แม้ว่าสัดส่วนความลึกต่อความกว้างของเสาเข็มจะไม่ใช้สัดส่วนเดียวกับฐานรากแผ่ก็ตาม จึงนำพิจารณาได้ว่าแนวการเคลื่อนพังของปลายเสาเข็มอาจมีรูปแบบการพิบัติที่ใกล้เคียงกับการพิบัติของฐานรากแผ่ ที่ Vesic (1958) ได้รวบรวมไว้ 3 รูปแบบ แสดงในภาพที่ 5 เป็นความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของดิน และอัตราส่วนความลึกต่อความยาวของฐานราก สามารถสรุปได้ว่าฐานรากแบบลึกโดยเฉพาะเสาเข็ม ถ้าไม่มีแรงต้านทานเนื่องจากความเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม โดยมากจะมีรูปแบบการพิบัติแบบปักลงของเสาเข็ม (Punching Failure) ดังนี้



I. General Shear Failure II. Local Shear Failure III. Punching Shear Failure

ภาพที่ 6 รูปแบบการพังทลายของฐานรากแผ่และฐานรากลึก

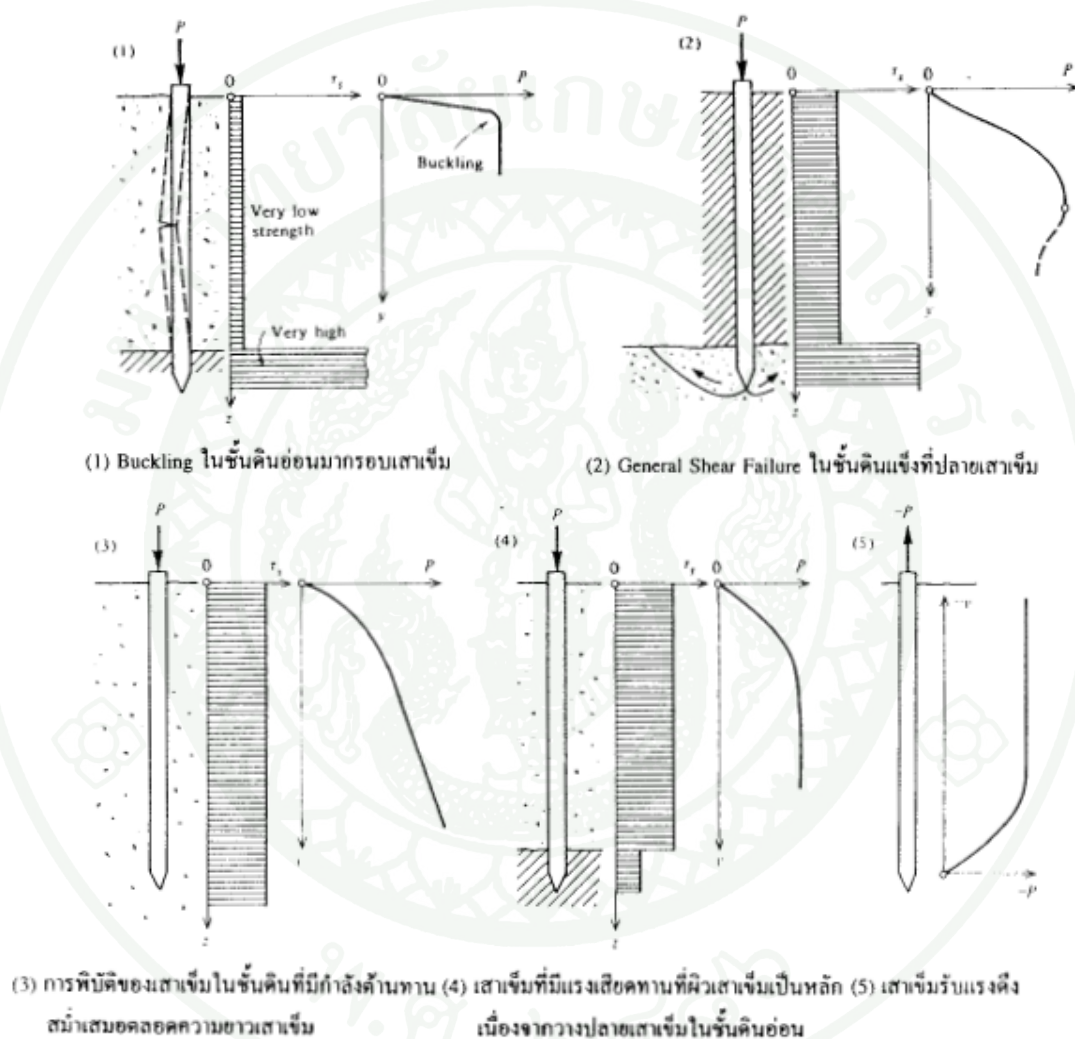
ที่มา: Winterkorn and Fang (1975)

1. General Shear Failure (Caquot, 1934) เป็นฐานรากแผ่บนดินเหนียวแข็ง หรือดินทรายแน่นที่ปรากฏจุดพิบัติเป็นแนวรอยเลื่อนต่อเนื่องเป็นผิวการเคลื่อนพังถึงผิวดินชัดเจน

2. Local Shear Failure (Terzaghi, 1943) เป็นฐานรากบนดินเหนียวแข็งปานกลางและดินทรายหลวมปานกลาง จะปรากฏผิวการเคลื่อนพังที่จะสังเกตเห็นแนวแรงต่อเนื่องกันเฉพาะบางส่วนเท่านั้น ไม่ถึงผิวดิน ซึ่งรูปภาพแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัว จะไม่ปรากฏจุดพิบัติที่ชัดเจน

3. Punching Shear Failure (De Beer and Vesic, 1958) เป็นฐานรากบนดินเหนียวอ่อนและทรายหลวม จะมีแรงต้านทานน้อยมาก การเคลื่อนพังจะสังเกตเห็นได้ไม่ชัดเจน มีเฉพาะการยุบตัวของดินใต้ฐานรากในแนวตั้งเพียงอย่างเดียว

รูปแบบความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัว เป็นสาเหตุจากการพิบัติที่แตกต่างกันของเสาเข็ม โดยแต่ละรูปแบบจะแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุก และค่าการทรุดตัวต่างๆ กันตามสภาพการรับแรงเฉือนของดินรอบเสาเข็ม และกำลังต้านทานชั้นดินหรือหินปลายเสาเข็ม ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 7 รูปแบบการพิบัติของเสาเข็มตามลักษณะความแข็งแรงของชั้นดิน

ที่มา: Winterkorn and Fang (1975)

1. เมื่อเราพิจารณาเสาเข็มคอก (ไม้, คอนกรีตอัดแรง) ที่มีปลายเสาเข็มวางบนชั้นดินแข็งมาก(หิน) ชั้นดินโดยรอบเสาเข็มเป็นดินอ่อนมาก ไม่สามารถเป็นแรงดันด้านข้างได้ จะเกิดการพิบัติแบบ Bucking หลังจากรับแรงกดจะมีพฤติกรรมแบบเสาชะลูด (Slender Column) น้ำหนักบรรทุกสูงสุดกำหนดได้ชัดเจน แสดงในภาพที่ 6-1

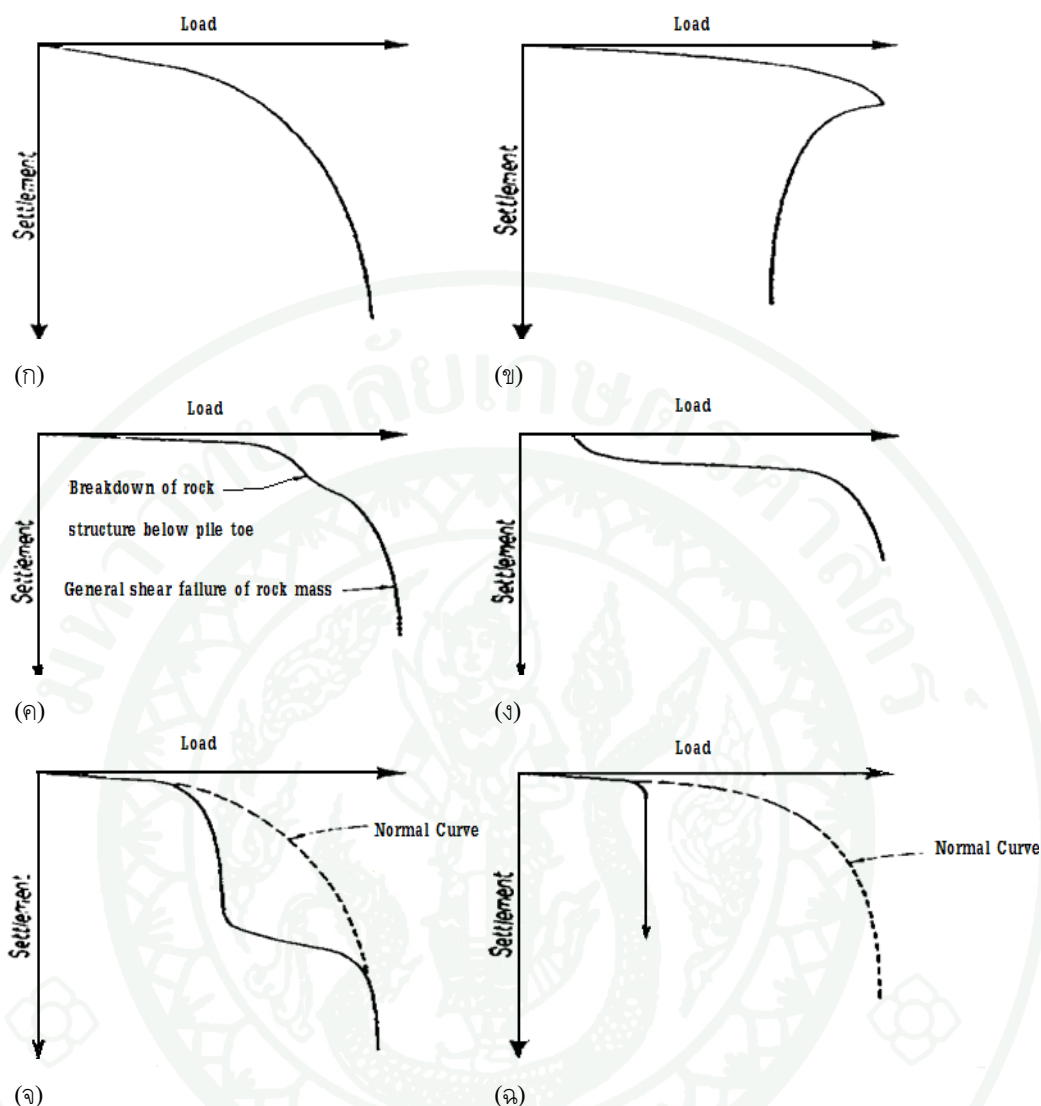
2. รูปแบบเสาเข็มปักลงผ่านชั้นดินมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ และปลายเสาเข็มวางลงชั้นที่มีกำลังรับแรงเฉือนสูง โดยไม่มีชั้นดินอ่อนที่ปลายเสาเข็ม เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นจะเกิดการพังแบบ General Shear Failure เฉพาะที่ชั้นดินปลายเสาเข็มชั้นดินรอบเสาเข็มเกิดการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อย ส่งผลให้แรงเสียดทานที่ผิวเกิดน้อยแสดงในภาพที่ 6-2

3. กำลังรับแรงเฉือนดินรอบเสาเข็ม ก่อนข้างเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ ดังนั้นเกิด Punching Failure กราฟความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวไม่เป็นเส้นในแนวดิ่ง ดังนั้นค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติไม่สามารถกำหนดได้อย่างชัดเจน แสดงในภาพที่ 6-3 รูปแบบนี้ถูกพิจารณาว่าน้ำหนักบรรทุกถูกต้านทานด้วยแรงเสียดทานที่ผิว และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มเท่าๆกัน

4. ชั้นดินที่ปลายเสาเข็มมีกำลังอ่อนกว่าชั้นดินโดยรอบเสาเข็ม น้ำหนักบรรทุกต้านทานโดยแรงเสียดทานที่ผิวเพียงอย่างเดียว รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวที่จุดพิบัติมีรูปแบบเป็นเส้นแนวดิ่ง เป็นจุดที่แรงเสียดทานได้พัฒนาเต็มที่ แสดงในภาพที่ 6-4

5. เสาเข็มรับแรงดึง ที่แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มถูกพิจารณาเป็นศูนย์ รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว มีพฤติกรรมเหมือนกับในลักษณะที่ 4 แต่มีพฤติกรรม Heave เกิดขึ้น แสดงในภาพที่ 6-5

การศึกษาแบบกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวจากการทดสอบเสาเข็มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม สามารถแยกออกเป็นรูปแบบทั่วไปของพฤติกรรมการรับน้ำหนักตามสภาพปัจจัยโดยรอบเสาเข็ม ซึ่งมีรูปแบบแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 8 พฤติกรรมของเสาเข็ม (Pile Behavior) พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัว (Load – Settlement Curve)

- (ก) เสาเข็มในชั้นดินอ่อน หรือชั้นดินทรายหลวม
- (ข) เสาเข็มในชั้นดินดาน
- (ค) เสาเข็มที่ปลายอยู่บนชั้นหินปูน
- (ง) เสาเข็มที่ถูกดันจากชั้นหินแข็งไปสู่ชั้นหินใหม่
- (จ) เสาเข็มที่มีช่องว่างเกิดขึ้นที่ผิวเสาเข็ม
- (ฉ) เสาเข็มที่มีกำลังคอนกรีตต่ำถูกเฉือนโดยน้ำหนักทดสอบ

ที่มา: Tomlinson (1994)

โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างที่ใช้ในการทำวิจัย

RISA 3D

เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างระบบ 3 มิติ ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถ สร้างรายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์ และการแก้ไขโครงสร้าง 3 มิติ โดยมีการใช้งานที่ง่ายและรวดเร็วในการวิเคราะห์โครงสร้าง มีการวิเคราะห์การคำนวณการโก่งและ Stress ที่เกิดขึ้น ได้สูงสุดของความสามารถที่มีของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยสามารถใช้วัสดุชนิดเดียวหรือหลายชนิดได้ ในการสร้างของโครงสร้างเหล็กและไม้จะสามารถออกแบบได้จนสำเร็จถึงขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งโปรแกรมได้รวบรวมข้อกำหนดและค่าต่างๆ ของวัสดุนี้ใช้ในโปรแกรมแล้ว

RISA 3D มีการแสดงรูปแบบโครงสร้างและรูปประกอบที่สมบูรณ์ ผู้ที่ใช้สามารถเขียน Model โครงสร้างบนหน้าจอ Computer ได้และสามารถแสดงหน้าต่างอื่นๆ ของโปรแกรมได้ ซึ่งสามารถดูรูปแบบของโปรแกรมได้หลายหน้าต่างและสามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลได้จากหน้าต่างได้โดยตรง

ในทุกๆ หน้าต่างของ RISA 3D สามารถป้อนและแก้ไขข้อมูลได้ง่ายการแสดงผลที่เป็นรูปร่างของ Model และการใส่น้ำหนักที่กระทำลงใน Model, แก้ไขเพิ่มเติมจุดรองรับของโครงสร้าง (Boundary Condition) และอื่นๆ อีกมากมายสามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงได้ง่าย รวมไปถึงการวิเคราะห์ การตรวจสอบข้อมูล การแก้ไขใหม่ และวิเคราะห์ใหม่ ฯลฯ โดยระบบ Inter active ของ RISA 3D สามารถตอบสนองการใช้งานได้ดี

การรองรับการป้อนข้อมูลของโปรแกรม (Program Limits)

RISA 3D สามารถป้อนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สูงสุดดังนี้

32000 joints

32000 Members

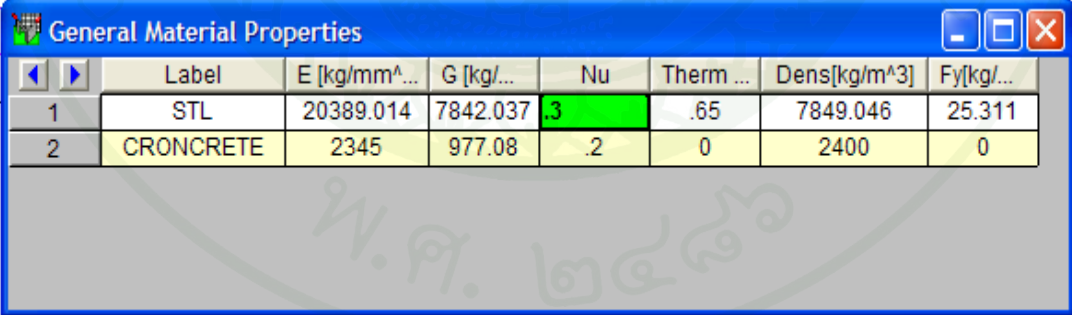
32000 Plates

5000 Section sets
 500 Diaphragms
 200000 Loads
 1000 Moving
 999 Load Patterns
 1000 Basic load case
 1000 Load Combination
 300 Model Shapes
 1000 Enforced Displacements

วิธีการ Input ข้อมูล

1. การกำหนดค่า Material Property

โปรแกรม RISA 3D เป็นโปรแกรมวิเคราะห์โดยสร้าง 3 มิติ ซึ่งสามารถ Input Material Property ได้ 500 sets ซึ่งค่าที่แสดงในตารางของโปรแกรม ดังแสดงใน General Material Property



	Label	E [kg/mm ²]	G [kg/mm ²]	Nu	Therm ...	Dens[kg/m ³]	Fy[kg/mm ²]
1	STL	20389.014	7842.037	.3	.65	7849.046	25.311
2	CRONCRETE	2345	977.08	.2	0	2400	0

ภาพที่ 9 รูปแสดงของโปรแกรม General Material Property ของ Program RISA 3D

จากรูปที่ 1 สามารถแสดงได้ดังนี้

Column 1 Label เป็นการแสดงชื่อของ Material Property ที่ใช้

Column 2 E เป็นค่าของ Young's Material ที่ใช้ในการวิเคราะห์

Column 3 G เป็นค่าของ Shear modulus ที่ใช้ในการวิเคราะห์

Column 4 Nu เป็นค่าของ Poisson's ratio

Column 5 Therm เป็นค่า Coefficient of thermal expansion

Column 6 Dens เป็นค่าของความหนาแน่นของวัสดุ ใช้สำหรับคำนวณน้ำหนักของวัสดุที่ใช้และใช้ในการเพิ่มการคำนวณเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง (self weight) ของโปรแกรมในชั้นรวมที่ทำการวิเคราะห์

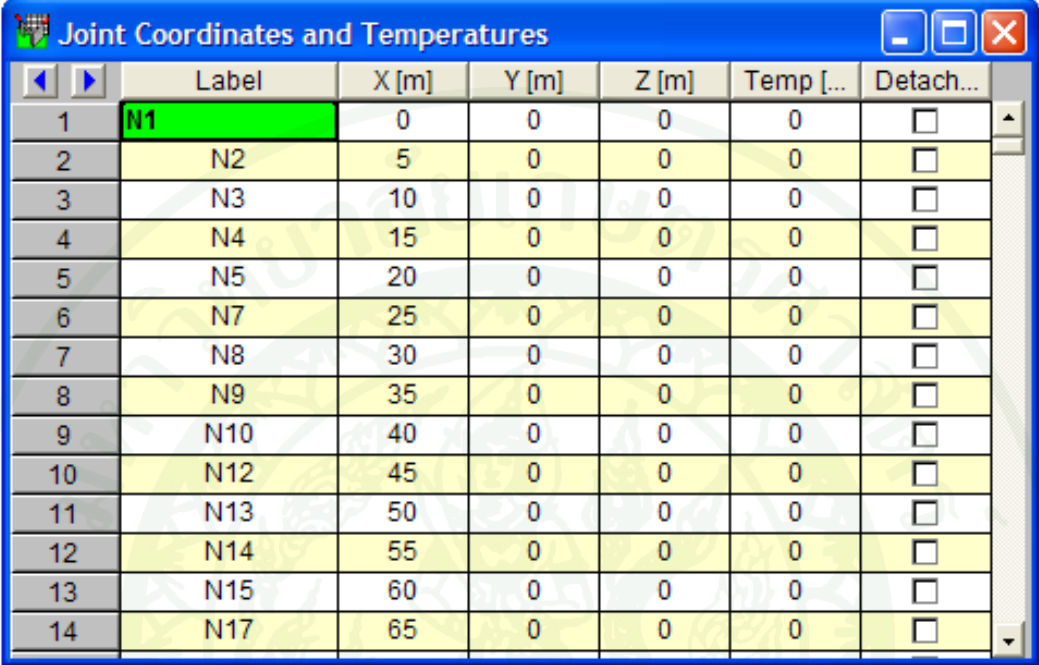
Column 7 Fy เป็นค่าของ Yield stress ของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยโปรแกรมจะใช้ในการคำนวณ ออกแบบโครงสร้างเหล็กตาม AISC ถ้าไม่ใช้โครงสร้างเหล็กให้กำหนดค่า $F_y = 0$

2. การกำหนด Joints

Joints ใช้สำหรับการกำหนดค่าเริ่มต้นและค่าสิ้นสุดของ Member หรือ Plate และ Joint ยังเป็นจุดกำหนดของ Boundary Condition และน้ำหนักที่กระทำที่ Joint ซึ่ง Joint เป็นจุดที่ระบุตำแหน่ง โดย Coordinate ในแกน X, Y, Z และการกำหนดอุณหภูมิโดยสามารถใช้ในจุดที่เป็นจุดต่อโดยอยู่ในรูปของ Thermal Load

Joints Coordinate Spreadsheet

The Joints Coordinate Spreadsheet เป็นตารางใส่ค่าตำแหน่งของ Joints และค่าของอุณหภูมิโดยรอบของ Joints



	Label	X [m]	Y [m]	Z [m]	Temp [...]	Detach...
1	N1	0	0	0	0	☐
2	N2	5	0	0	0	☐
3	N3	10	0	0	0	☐
4	N4	15	0	0	0	☐
5	N5	20	0	0	0	☐
6	N7	25	0	0	0	☐
7	N8	30	0	0	0	☐
8	N9	35	0	0	0	☐
9	N10	40	0	0	0	☐
10	N12	45	0	0	0	☐
11	N13	50	0	0	0	☐
12	N14	55	0	0	0	☐
13	N15	60	0	0	0	☐
14	N17	65	0	0	0	☐

ภาพที่ 10 ตารางค่า Node Coordinate Spreadsheet and Temperatures

จากรูปที่ 2 สามารถแสดงได้ดังนี้

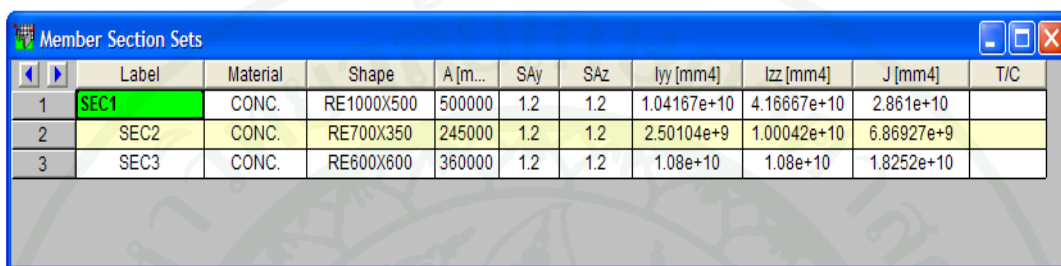
- Column1 เป็นค่าที่ใส่เป็นชื่อของ Joints
- Column2 เป็นค่าที่ใส่ตำแหน่งของ Joints ใน Coordinate X
- Column3 เป็นค่าที่ใส่ตำแหน่งของ Joints ใน Coordinate Y
- Column4 เป็นค่าที่ใส่ตำแหน่งของ Joints ใน Coordinate Z
- Column5 เป็นค่าที่ใส่อุณหภูมิโดยรอบของ Joints
- Column6 เป็นค่าที่ยกเลิก Joints จาก Diaphragms

3. การกำหนด Members

RISA 3 D จะกำหนด Member ที่ใช้เป็นลักษณะ Beam element ถ้าต้องการใช้เป็นลักษณะ Truss Member ต้องทำการแก้ไขค่าของ Member ซึ่งจะแสดงในตารางของ Member Spreadsheet

Material and Cross Section

วัสดุของ Member และ Section Properties สามารถกำหนดค่าได้ใน Section Set ซึ่งสามารถกำหนด Properties ของกลุ่มของ Member ขนาดรูปร่างของที่เหมือนกันใน Properties เดียวกัน



	Label	Material	Shape	A [m...]	SAy	SAz	Iyy [mm4]	Izz [mm4]	J [mm4]	T/C
1	SEC1	CONC.	RE1000X500	500000	1.2	1.2	1.04167e+10	4.16667e+10	2.861e+10	
2	SEC2	CONC.	RE700X350	245000	1.2	1.2	2.50104e+9	1.00042e+10	6.86927e+9	
3	SEC3	CONC.	RE600X600	360000	1.2	1.2	1.08e+10	1.08e+10	1.8252e+10	

ภาพที่ 11 Member Section Set Spreadsheet จะเป็นตารางที่กำหนด คุณสมบัติของ Member element และสามารถแก้ไขคุณสมบัติของ Member ได้ใน Menu นี้

Column1	Label	เป็นชื่อของ Member Section
Column2	Material	เป็นค่าที่ใส่ของ ชนิดของวัสดุ
Column3	Shape	เป็นค่าที่ใส่ชื่อหน้าตัด
Column4	A	เป็นค่าที่ใส่ขนาดหน้าตัด
Column5	SAy	เป็น Effect Shear Area ในแกน Y
Column6	SAz	เป็น Effect Shear Area ในแกน Z
Column7	Iyy	เป็นค่าที่ใส่ Moment of Inertia ในแกน Y-Y
Column8	Izz	เป็นค่าที่ใส่ Moment of Inertia ในแกน Z-Z
Column9	T/C	เป็นการระบุว่า Member รับเฉพาะแรงกฏหรือแรงดึงเท่านั้น

	Label	I Joint	J Joint	K Joint	Rotat...	Section	Material	Ph...	TOM	I Relea...	J Rele...	I Offset...	J Offe...	...	Length...
1	M1	N1	N2			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
2	M2	N2	N3			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
3	M3	N3	N4			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
4	M4	N4	N5			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
5	M5	N5	N7			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
6	M6	N7	N8			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
7	M7	N8	N9			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
8	M8	N9	N10			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
9	M9	N10	N12			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
10	M10	N12	N13			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
11	M11	N13	N14			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
12	M12	N14	N15			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
13	M13	N15	N17			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
14	M14	N17	N18			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
15	M15	N18	N19			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
16	M16	N19	N20			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
17	M17	N18A	N19A			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
18	M18	N19A	N20A			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
19	M19	N20A	N21			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
20	M20	N21	N22			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
21	M21	N22	N23			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
22	M22	N23	N24			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
23	M23	N24	N25			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5
24	M24	N25	N26			SEC1	CONC.	☒	☐		000X00				5

ภาพที่ 12 ตารางแสดงค่าของ Member

Column1	Label	เป็นค่าที่แสดงชื่อของ Members
Column2	I Joint	เป็นการระบุตำแหน่ง Joint เริ่มต้นของ Member
Column3	J Joint	เป็นการระบุตำแหน่ง Joint สุดท้ายของ Member
Column4	k Joint	เป็นการระบุ Plane ของ Member ตามแนวตำแหน่งของ Node ที่กำหนด
Column5	Rotation (Deg.)	เป็นการระบุ Plane ของ Member ตามแนว มุมองศา ที่กำหนด

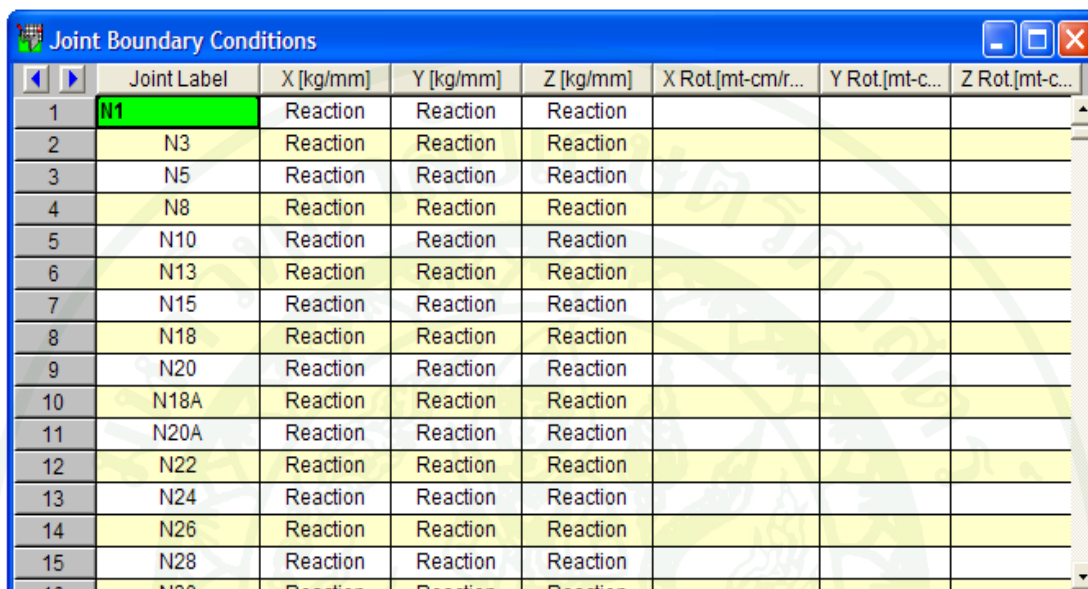
เป็นต้น โดยค่า Member End Joints ค่า I Joints และ J Joints เป็นค่าแสดงจุดเริ่มต้นและจุดปลายของ Member K Joints and X- axis rotation เป็นค่าที่กำหนด Plan ของ Section ตามตำแหน่งของ K ว่าหมุนไปอย่างไร

Boundary Condition

เป็นการกำหนดจุดรองรับของโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

Column1	Label	เป็นค่าที่แสดงชื่อของ จุดรองรับ
Column2	X	เป็นรูปแบบของการจุดรองรับในแกน X
Column3	Y	เป็นรูปแบบของการจุดรองรับในแกน Y
Column4	Z	เป็นรูปแบบของการจุดรองรับในแกน Z

Column5 X rotation เป็นรูปแบบของจุดรองรับการหมุนในแกน X
 Column6 Y rotation เป็นรูปแบบของจุดรองรับการหมุนในแกน Y
 Column7 Z rotation เป็นรูปแบบของจุดรองรับการหมุนในแกน Z

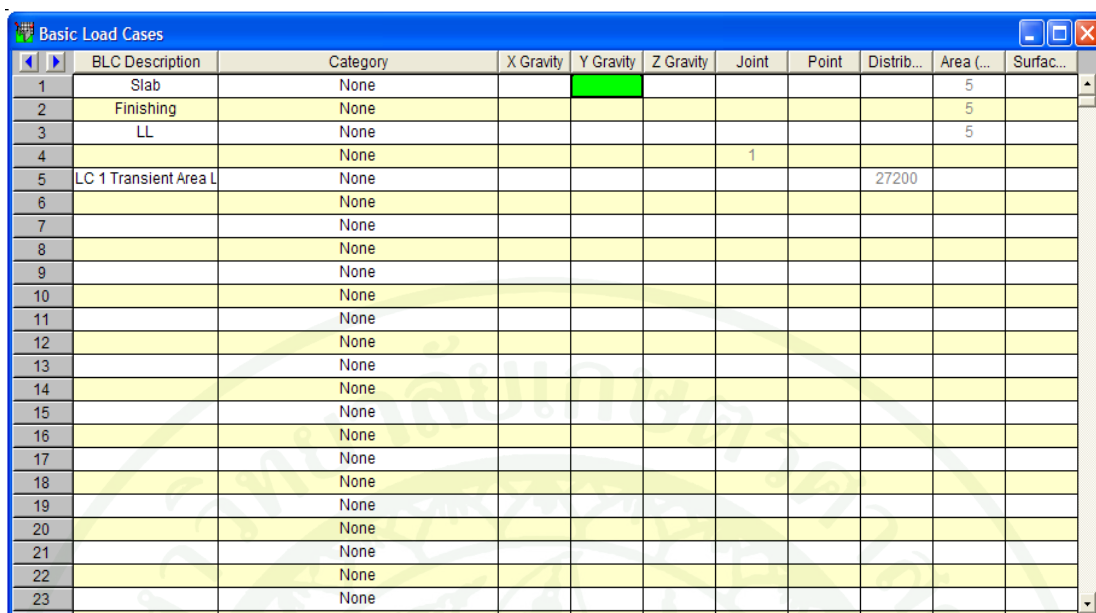


	Joint Label	X [kg/mm]	Y [kg/mm]	Z [kg/mm]	X Rot [mt-cm/r...]	Y Rot [mt-c...	Z Rot [mt-c...
1	N1	Reaction	Reaction	Reaction			
2	N3	Reaction	Reaction	Reaction			
3	N5	Reaction	Reaction	Reaction			
4	N8	Reaction	Reaction	Reaction			
5	N10	Reaction	Reaction	Reaction			
6	N13	Reaction	Reaction	Reaction			
7	N15	Reaction	Reaction	Reaction			
8	N18	Reaction	Reaction	Reaction			
9	N20	Reaction	Reaction	Reaction			
10	N18A	Reaction	Reaction	Reaction			
11	N20A	Reaction	Reaction	Reaction			
12	N22	Reaction	Reaction	Reaction			
13	N24	Reaction	Reaction	Reaction			
14	N26	Reaction	Reaction	Reaction			
15	N28	Reaction	Reaction	Reaction			

ภาพที่ 13 ตัวอย่างตารางกำหนดจุดรองรับของของโครงสร้างแต่ละตำแหน่ง

Basic Load Case

เป็นการระบุน้ำหนักกระทำต่อโครงสร้างโดยสามารถใส่ Basic Load Case ได้ 1000 set
 โดยในแต่ละ Basic Load Case สามารถใส่ Load ได้ อีก รวม 200,000 Load

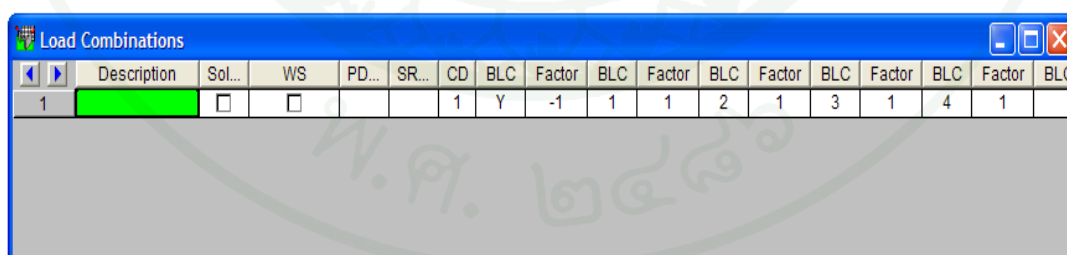


	BLC Description	Category	X Gravity	Y Gravity	Z Gravity	Joint	Point	Distrib...	Area (...)	Surfac...
1	Slab	None							5	
2	Finishing	None							5	
3	LL	None							5	
4		None				1				
5	LC 1 Transient Area L	None						27200		
6		None								
7		None								
8		None								
9		None								
10		None								
11		None								
12		None								
13		None								
14		None								
15		None								
16		None								
17		None								
18		None								
19		None								
20		None								
21		None								
22		None								
23		None								

ภาพที่ 14 ตัวอย่างตารางกำหนดแรงกระทำต่อโครงสร้างโดยกำหนดเป็นน้ำหนักกระทำแต่ละชนิด

Load Combination

Load Combination คือการนำ น้ำหนักต่างๆที่กระทำต่อ โครงสร้าง ที่ได้ระบุไว้ใน Basic Load Case มาทำการวิเคราะห์รวมกันตามแต่ละกรณีที่เกี่ยวข้องกัน โดย Load Combination สามารถ กำหนดได้ทั้งหมด 1,000 set และสามารถวิเคราะห์ในแต่ละ set ร่วมกันได้



	Description	Sol...	WS	PD...	SR...	CD	BLC	Factor	BLC	Factor	BLC	Factor	BLC	Factor	BLC	Factor	BLC
1						1	Y	-1	1	1	2	1	3	1	4	1	

ภาพที่ 15 ตัวอย่างตารางกำหนดแรงกระทำต่อโครงสร้างโดยรวมทั้งหมดที่ใช้วิเคราะห์ร่วมกัน

ผลการวิเคราะห์ Result

ผลของการวิเคราะห์โปรแกรมจะแสดงผลดังต่อไปนี้

1. Joint Reactions โปรแกรมจะแสดงค่าของแรงกระทำที่เกิดขึ้นบริเวณจุดรองรับตามที่ระบุไว้
2. Joint Deflection โปรแกรมจะระบุค่าการทรุดตัวของ Joint แต่ละตำแหน่งของโครงสร้างทุก Joint
3. Member Force โปรแกรมจะแสดงค่า Shear, Moment, Axial, Torsion ที่เกิดขึ้นใน Member
4. Member Deflection โปรแกรมจะแสดงค่าการโก่งตัวของ Member

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง RISA-3D Version 4.5 B

วิธีการ

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างขนาดใหญ่โดยใช้สมมติฐานว่าฐานรากมีการทรุดตัวในแนวตั้งใกล้เคียงกัน ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ

อาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานราก โดยจะทำการจำลองโครงสร้างอาคารคอนกรีตขนาด กว้าง 80x80 เมตร สูง 25 เมตร (เป็นอาคารสูง 5 ชั้น) มีความกว้าง ช่วงเสา 10.00 เมตร รวมช่วงเสา 8 ช่วง โดยแต่ละช่วงเสามีคานยาว 10.00 เมตร ขนาด 50x100 เซนติเมตร ระหว่างเสา มีคานฝากที่กลางคาน ที่ระยะ 5.00 เมตร ขนาด 35x70 เซนติเมตร โดยมีเสาขนาด 60x60 เซนติเมตร ดังภาพที่ 16 เป็นภาพจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

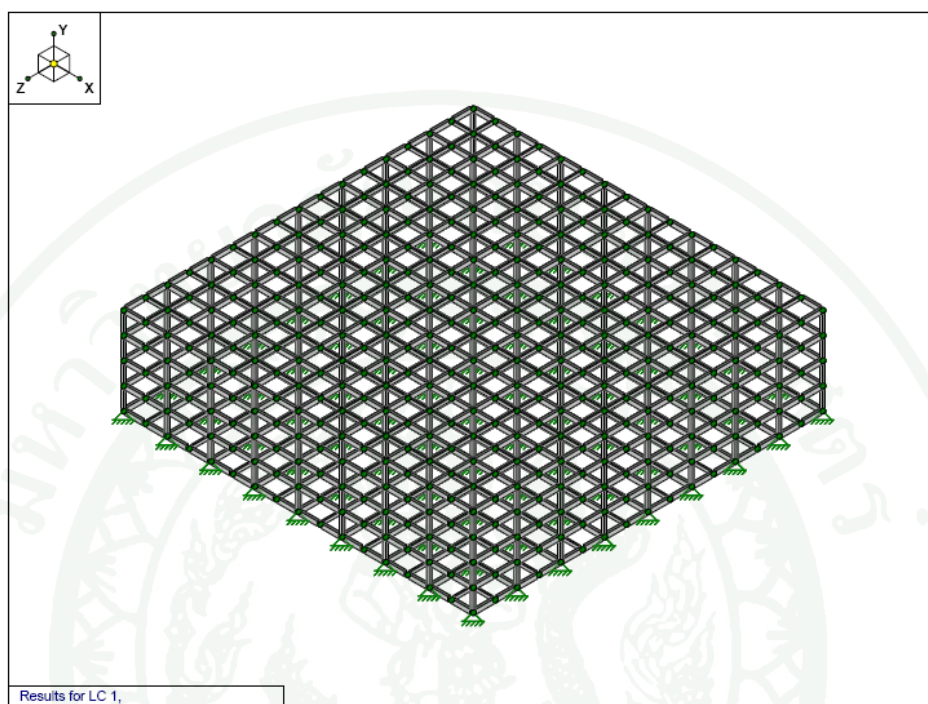
การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Risa 3 D (Versions 4.5b)

การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างอาคารโดยสามารถเปรียบเทียบลักษณะของโครงสร้างจากการออกแบบและการวิเคราะห์ได้จากขนาดของโครงสร้างได้จากตารางที่ 1 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยขนาดของโครงสร้างที่ใช้จะนำไปประกอบเป็นโครงสร้างแต่ละส่วนของอาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษา

จุดรองรับ (Boundary condition)

จุดรองรับที่ใช้ในการพิจารณาการวิเคราะห์ ในการออกแบบก่อสร้างผู้ออกแบบได้กำหนดให้ไม่เกิดการทรุดตัวในฐานรากหรือจุดรองรับ และไม่เกิดโมเมนต์ดัดขึ้นในจุดรองรับ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งหมดให้มีรูปแบบและการถ่ายแรง โดยเป็นหลักการทั่วไป

ในการออกแบบ ซึ่งการกำหนดให้ จุตรองรับในโปรแกรม Risa 3 D (Versions 4.5b) ได้กำหนด จุตรองรับ เป็นแบบไม่เกิดการเคลื่อนตัวของจตุรรองรับทุกแกนและไม่รับ โมเมนต์ (Pin support)



ภาพที่ 16 ภาพโครงสร้างองค์อาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการวิเคราะห์โครงสร้างของอาคารในโปรแกรม วิเคราะห์โครงสร้าง Risa3d (version4.5B)

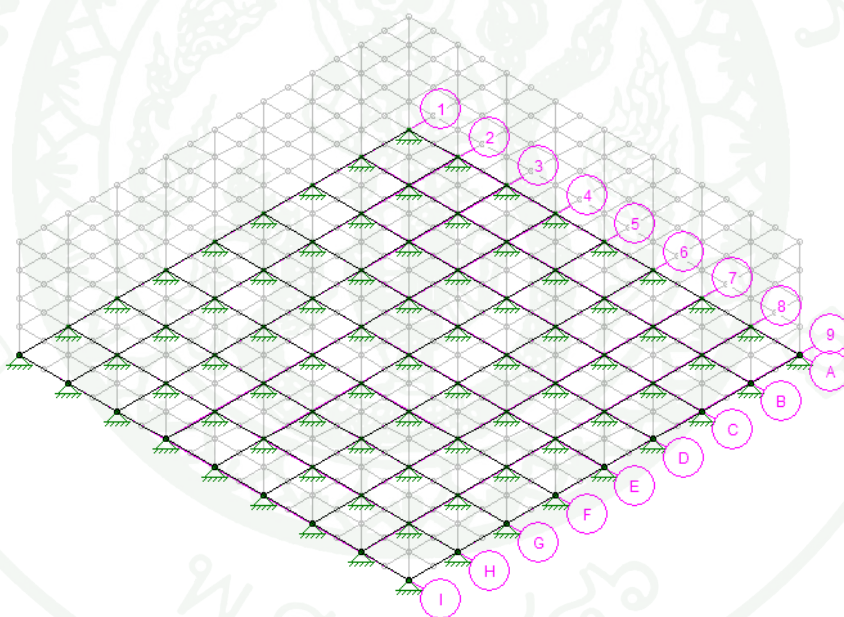
ตารางที่ 1 ขนาดของโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์

MEMBER SECTION SET		
Element	Shape (m.)	Structure Drawing
SEC1	1.00x0.50	B1
SEC2	0.70x0.35	B2
SEC3	0.60x0.60	C1

น้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load)

น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่มีตำแหน่งของการกระทำคงที่หรือถาวรตลอดเวลาและไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของน้ำหนัก เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เกิดขึ้นจากแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้น จึงมีแรงในแนวดิ่งและแนวตั้งเสมอ น้ำหนักบรรทุกทุกแบบนี้ น้ำหนักของส่วนโครงสร้างเองที่ประกอบรวมกันเป็นองค์อาคารประเภทต่างๆ เช่น น้ำหนักของแผ่นพื้น วัสดุปูพื้น ส่วนที่แขวนห้อย ผนังคาน เสา ฯลฯ ซึ่งขึ้นกับขนาดและชนิดของวัสดุที่ผู้ออกแบบกำหนดขึ้นหรือเลือกใช้



ภาพที่ 17 ภาพจุดรองรับของโครงสร้างองค์อาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการวิเคราะห์ในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง Risa3d (version4.5B)

โดยปกติ น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) ที่กระทำบนโครงสร้างมักเป็นน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอ โดยมีหน่วยเป็น ก.ก. ต่อ ตารางเมตร สำหรับการคำนวณออกแบบแผ่นพื้น หรือมีหน่วย ก.ก. ต่อ เมตร การคำนวณออกแบบคาน

น้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างในการวิจัย

$$W_c = 2400 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

น้ำหนักตักแต่ง

น้ำหนักของแผ่นพื้น วัสดุปูพื้น

$$\text{Finishing} = 120 \text{ kg/m}^2$$

น้ำหนักบรรทุกจร (Live load)

น้ำหนักบรรทุกจร (Live load) หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่กระทำชั่วคราวและอาจเปลี่ยนแปลงขนาดของน้ำหนักได้ ประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกกระทำในแนวดิ่ง และน้ำหนักบรรทุกกระทำทางด้านข้างของอาคาร

น้ำหนักบรรทุกที่กระทำในแนวดิ่ง ได้แก่ น้ำหนักของผู้ใช้อาคาร น้ำหนักของเครื่องเรือน เครื่องจักร หรือสิ่งของและสินค้าต่างๆ เช่น หนังสืออุปกรณ์สำนักงาน วัสดุก่อสร้าง ฯลฯ นอกจากนี้ยังรวมถึง น้ำหนักของรถยนต์นั่ง รถยนต์บรรทุก รถไฟ ซึ่งเป็นน้ำหนักบรรทุกที่เคลื่อนที่ได้ และทำให้เกิดการกระแทก

น้ำหนักบรรทุกที่กระทำทางด้านข้างของอาคาร ได้แก่ แรงลม แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว แรงดันของดินหรือของไหล

ในแต่ละประเทศจะมีพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร และมีกฎกระทรวงเกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุกขั้นต่ำที่ต้องพิจารณาใช้สำหรับการคำนวณออกแบบโดยขึ้นกับประเภทและการใช้สอยของอาคารนั้น สำหรับการคำนวณออกแบบโครงสร้างนี้ พิจารณาจากข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2544 ที่ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร ซึ่งกำหนดน้ำหนักบรรทุกขั้นต่ำสำหรับใช้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างอาคารต่างๆ ไว้

น้ำหนักบรรทุกจร (Live load) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างในการวิจัย

โดยพิจารณาใช้ หั้วข้อ น้ำหนักบรรทุกจร (Live load) ของ ห้องโถง บันได ทางเดินของ
ของห้างสรรพสินค้า โรงมหรสพ ห้องประชุม ภัตตาคาร และห้องสมุด

$$LL. = 500 \quad \text{kg/ m}^2$$

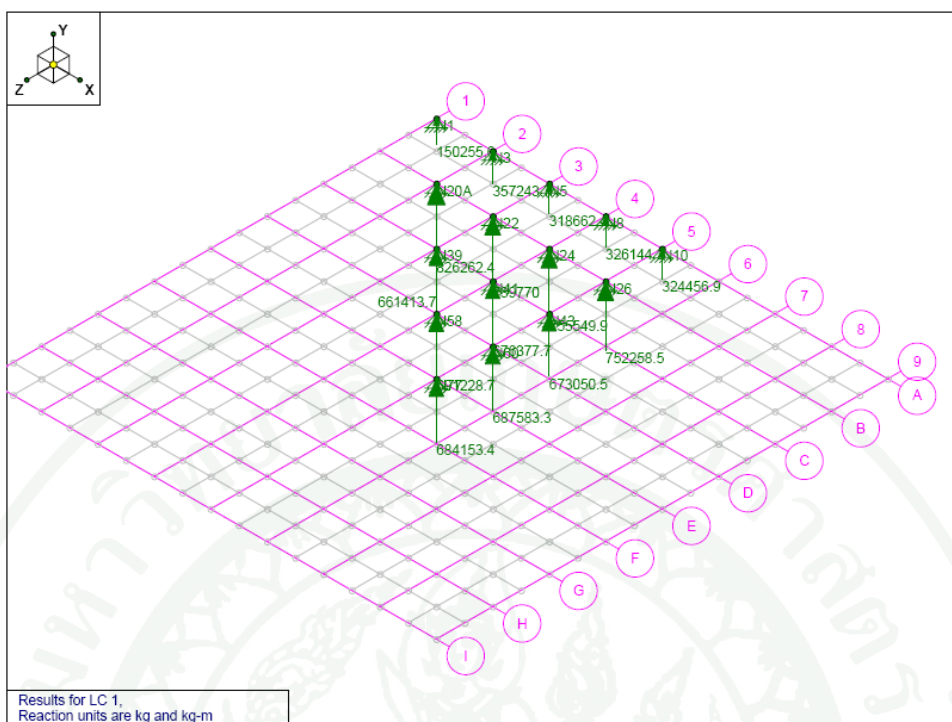
ตารางที่ 2 น้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

ชื่อน้ำหนัก	จำนวน	หน่วย
น้ำหนักพื้น	360	kg/ m ²
น้ำหนักจร	500	kg/ m ²
น้ำหนักคกแต่ง	120	kg/ m ²

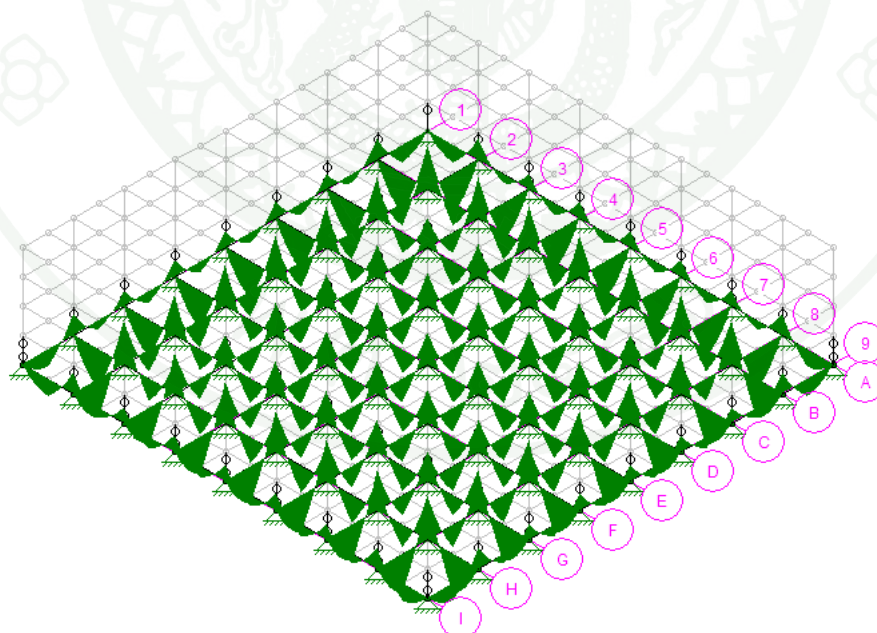
2. การวิเคราะห์พฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างขนาดใหญ่โดยใช้สมมติฐานว่าฐานรากมีการทรุดตัวในแนวตั้งใกล้เคียงกัน ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ โดยใช้ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ

จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยการใช้โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง Risa 3d

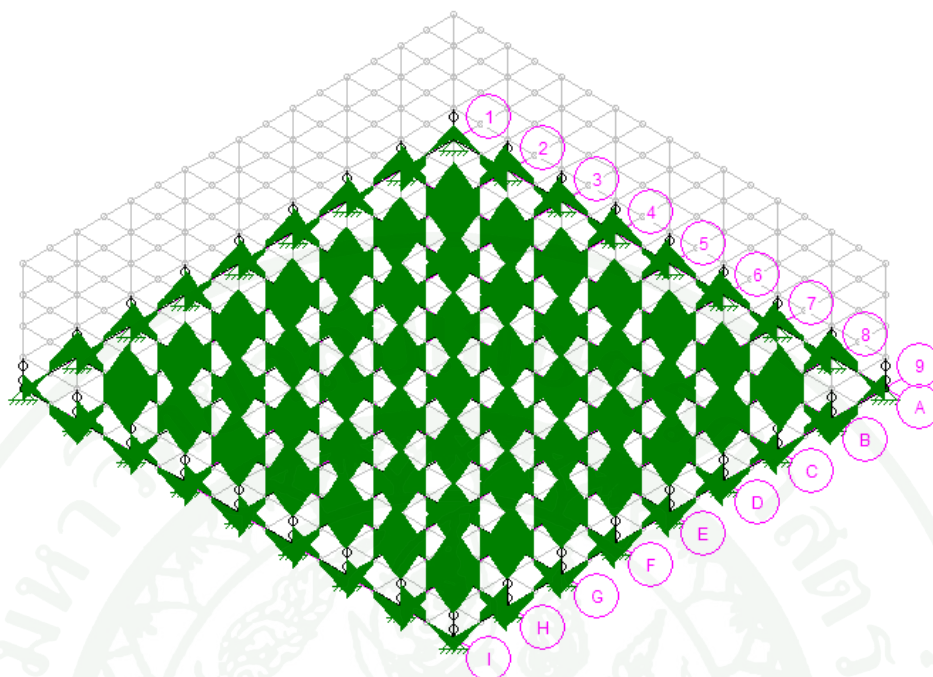
การวิเคราะห์ผลของพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างขนาดใหญ่โดยใช้สมมติฐานว่าฐานรากมีการทรุดตัวในแนวตั้งใกล้เคียงกัน ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ โดยจะนำค่าของ Moment Shear ที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อใช้เปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์พฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างขนาดใหญ่โดยใช้สมมติฐานว่าฐานรากมีการทรุดตัวในแนวตั้งแตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติโดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวที่จุดต่างๆ ที่มีผลต่อโครงสร้างต่อไป



ภาพที่ 18 ภาพแรงในแนว F_y ที่จุดรองรับของอาคารอาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษาผลกระทบ
เนื่องจากการทรุดตัวของฐานราก



ภาพที่ 19 ภาพแสดงโมเมนต์บริเวณชั้น Ground ของอาคารอาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษา
ผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานราก



ภาพที่ 20 ภาพแสดงแรงเฉือนบริเวณชั้น Ground ของอาคารอาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานราก

3. การวิเคราะห์พฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างขนาดใหญ่โดยใช้สมมติฐานว่าฐานรากมีการทรุดตัวในแนวตั้งแตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติโดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวที่จุดต่างๆ ที่มีผลต่อโครงสร้าง

4. การทรุดตัวที่พิจารณา

การพิจารณาการทรุดตัวของโครงสร้างจะพิจารณาการทรุดตัวในแต่ละจุดรองรับของโครงสร้างอาคาร เพื่อศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้าง ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทรุดตัว โดยจุดที่เกิดการทรุดตัวที่จะทำการศึกษา โดยจะพิจารณาการทรุดตัว ที่ L/240, L/360, L/500 โดย

L = ช่วงความยาวของคาน (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.00 เมตร)

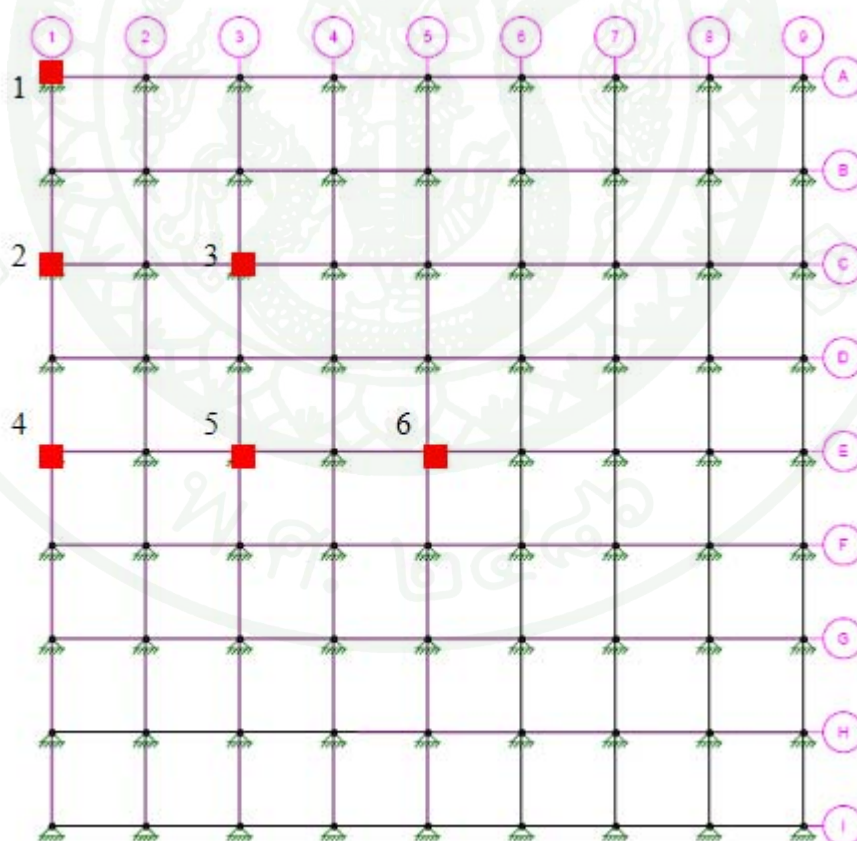
จะพิจารณาการทรุดตัวที่ $L/240$ เท่ากับ 4.167 เซนติเมตร

จะพิจารณาการทรุดตัวที่ $L/360$ เท่ากับ 2.778 เซนติเมตร

จะพิจารณาการทรุดตัวที่ $L/500$ เท่ากับ 2.000 เซนติเมตร

5. จุดที่เกิดการทรุดตัวที่พิจารณา

จากการพิจารณาการทรุดตัวที่จุดต่างๆ ของโครงสร้างที่ทำการศึกษา พบว่าโครงสร้างที่ใช้เป็นลักษณะที่สมมาตรในทุกด้าน โดยสามารถพิจารณาจุดที่เกิดการทรุดตัวได้ เป็น 8 ส่วน ซึ่งจะได้ค่าที่แสดงผลของการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกัน โดยแบ่ง จุดที่พิจารณา ได้ 6 จุด คือ ได้ดังภาพที่ 21 ภาพแสดงจุดที่เกิดการทรุดตัวที่พิจารณาของอาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานราก และจะใช้จุดที่ 6 การทรุดตัวที่ $L/240$ เป็นจุดอ้างอิงและเปรียบเทียบผลการทรุดตัวที่ $L/360$, $L/500$ และเป็นตัวเปรียบเทียบผล ของการทรุดตัวใน ตำแหน่งต่างๆ ด้วย

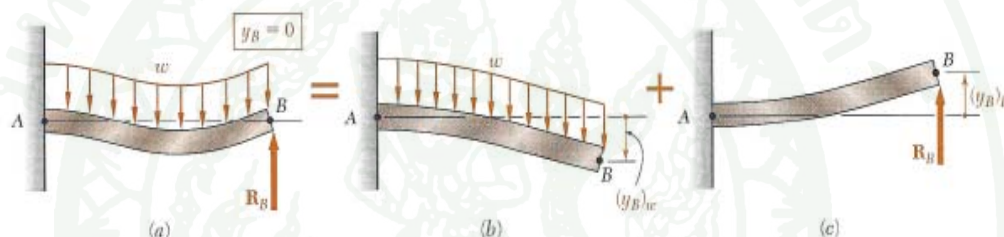


ภาพที่ 21 ภาพแสดงจุดที่เกิดการทรุดตัวที่พิจารณาของอาคารขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานราก

6. การสร้างการหลุดตัวที่พิจารณาในโปรแกรม Risa 3 D (Versions 4.5b)

เนื่องจากการกำหนดค่าของระยะการหลุดตัวที่แน่นอน ไม่สามารถกำหนดได้ในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง Risa 3 D (Versions 4.5b) จึงต้องมีการสร้างการหลุดตัวเปรียบเทียบของจุดที่เกิดการหลุดตัว โดยใช้การคำนวณจากหลักการของวิธี Superposition ซึ่งจะนำผลของระยะการหลุดตัวมาพิจารณา ร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างของ โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง Risa 3 D (Versions 4.5b)

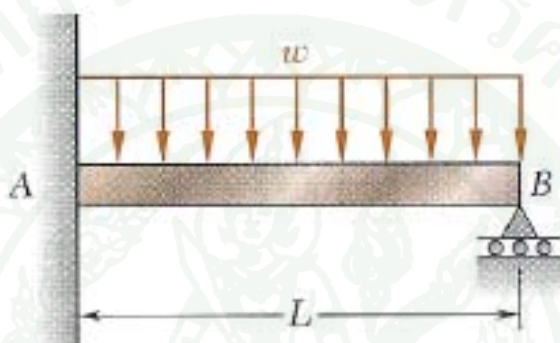
วิธี Superposition



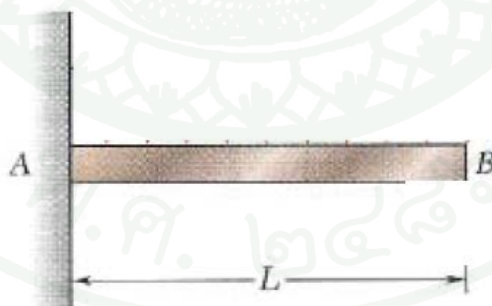
การวิเคราะห์โครงสร้างแบบอินดีเทอร์มิเนทโดยใช้วิธี Superposition นี้ เป็นวิธีการเบื้องต้นที่นิยมใช้กันมาก ค่าของตัว redundant จะคำนวณได้จากสมการหลายชั้น (simultaneous equation) ซึ่งได้จากเงื่อนไขการโก่งตัวของโครงสร้าง ดังนั้นวิธีนี้อาจจะเรียกว่า วิธี Consistent Deformation วิธีนี้ไม่เหมาะกับโครงสร้างที่มีดีกรีของอินดีเทอร์มิเนทสูงๆ เพราะจะเสียเวลา ในการหาการโก่งตัวของโครงสร้างและในการแก้สมการหลายชั้นด้วย

พิจารณาการรับน้ำหนัก รูปที่ 22 ของจะเห็นว่าคานที่กำหนดให้ นี้ เป็นโครงสร้างแบบอินดีเทอร์มิเนทที่มีตัว redundant อยู่หนึ่งตัว ดังนั้น คานมีดีกรีของอินดีเทอร์มิเนทเท่ากับหนึ่ง (first degree of indeterminacy) ถ้าสมมติให้แรงปฏิกิริยาที่จุด b เป็นตัว redundant ฉะนั้น เมื่อนำเอาตัว redundant นี้ออกไป โครงสร้างจะกลายเป็นแบบดีเทอร์มิเนททันที ค่าของแรงปฏิกิริยา ต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักหรือแรงภายนอกที่กระทำก็สามารถหาได้ โดยใช้สมการสมดุล โครงสร้างที่ได้นี้ เรียกว่า primary structure ดังรูปที่ 23

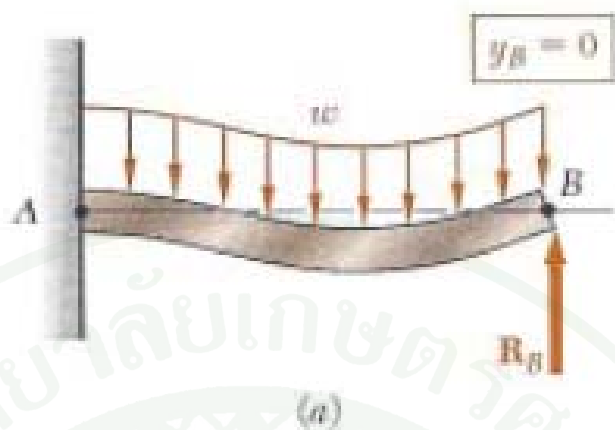
ถ้าพิจารณาว่า primary structure นี้ มีน้ำหนักบรรทุกกระทำและมีตัว redundant กระทำด้วย เสมือนว่าเป็นส่วนหนึ่งของน้ำหนักหรือแรงภายนอก ถ้าตัว redundant X_b นี้มีค่าเท่ากับค่าของ แรงปฏิกิริยาที่จุด b ดังนั้นค่าแรงเฉือนที่ และโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในรูป 22 ก็ต้องเหมือนกันกับใน รูปที่ 24 ตลอดจนการโก่งตัวและมุมลาดเอียงที่จุดต่างๆ ก็ต้องเหมือนกันด้วย ฉะนั้นที่จุด b ในรูปที่ 22 ไม่มีการโก่งตัวของโครงสร้าง การโก่งตัวที่จุด b ในรูปที่ 24 ของ primary structure ก็ไม่ต้องมี เช่นกัน



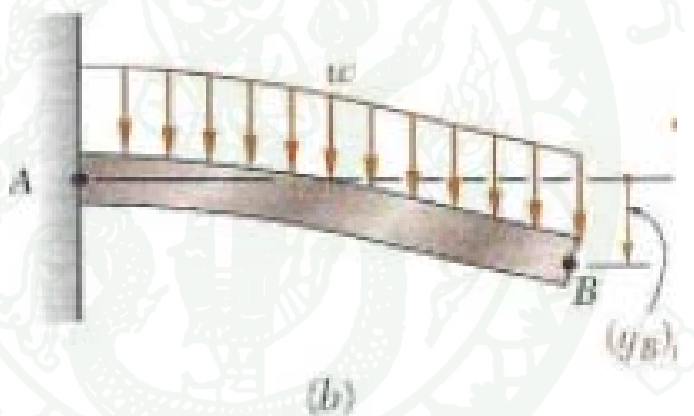
ภาพที่ 22 โครงสร้างแบบอินดีเทอร์มิเนตมีตัว redundant อยู่หนึ่งตัว



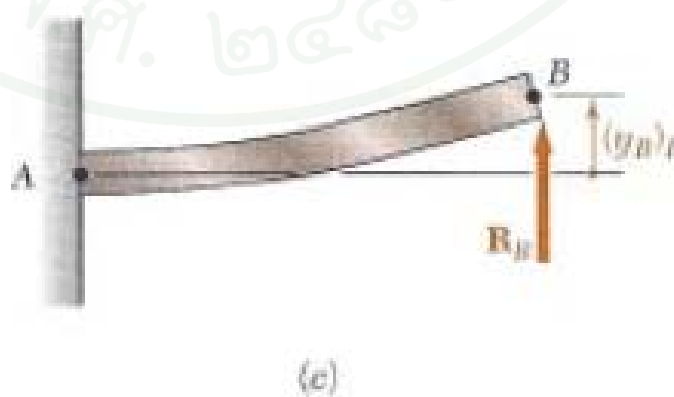
ภาพที่ 23 Primary structure



ภาพที่ 24 โครงสร้างแบบอินดิเทอร์มิเนตมีตัว Redundant R_B



ภาพที่ 25 ในกรณีที่น้ำหนักแผ่นสม่ำเสมอ w กระทำบน Primary structure



ภาพที่ 26 ในกรณีที่มียแรงเพียงหนึ่งส่วนของตัว Redundant R_B กระทำที่จุด B

พิจารณารูปที่ 25 ในกรณีที่มีน้ำหนักแผ่นสม่ำเสมอ w กระทำบน Primary structure เพียงอย่างเดียว จะได้

$$(y_b)_a = \text{ระยะโก่งตัวที่จุด B เนื่องจากน้ำหนักแผ่น } w$$

พิจารณารูปที่ 26 ในกรณีที่มีแรงเพียงหนึ่งส่วนของตัว Redundant R_b กระทำที่จุด B จะได้

$$(\delta_b)_b = \text{ระยะโก่งตัวที่จุด B เนื่องจาก Redundant } R_b \text{ เพียงหนึ่งส่วน}$$

$$\text{ถ้าระยะ } (y_b)_b = \text{ระยะโก่งตัวที่จุด B เนื่องจาก Redundant } R_b \text{ ทั้งหมด}$$

$$\text{ดังนั้น } (y_b)_b = (R_b) * (\delta_b)_b$$

$$\text{จากสมการ Principle of Superposition : } (y_b) = (y_b)_a + (y_b)_b$$

$$\text{ดังนั้น } (y_b) = (y_b)_a + (R_b) * (\delta_b)_b \text{ เรียกสมการนี้ว่า Superposition Equation}$$

$$\text{แต่ที่ปลายจุด B ไม่มีการทรุดตัว หรือการโก่ง นั่นคือ } (y_b) = 0$$

$$\text{จะได้ค่าของ Redundant } (R_b) = - (y_b)_a / (\delta_b)_b$$

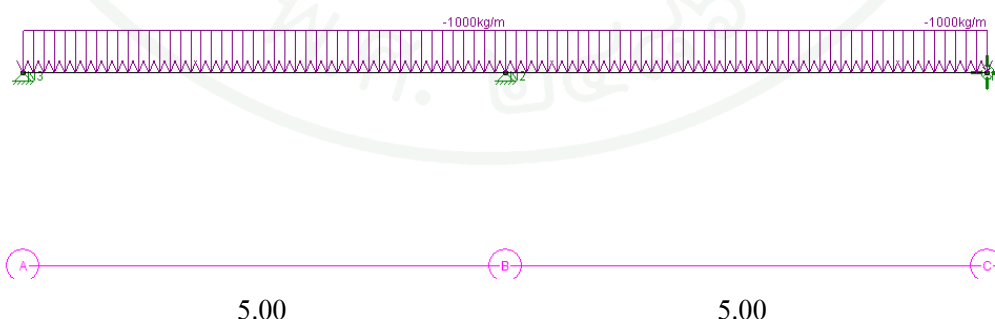
จากสมการข้างต้น จะเห็นได้ว่า ค่าของตัว Redundant (R_b) จะหาได้จากค่าของ $(y_b)_a$ และ $(\delta_b)_b$ ซึ่งค่าของระยะโก่งตัว $(y_b)_a$ และ $(\delta_b)_b$ นี้ สามารถหาได้

เมื่อทราบค่าของตัว Redundant นี้แล้ว ค่าของแรงปฏิกิริยาอื่นๆ ในโครงสร้างก็จะหาได้จากสมการสมดุล

ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างแบบอินดีเทอร์มิเนต โดยใช้วิธี Superposition นี้
อาจจะสรุปได้เป็นลำดับขั้นดังนี้

1. เอาตัว Redundant ออกให้เท่ากับจำนวนของดีกรีของอินดีเทอร์มิเนต ดังนั้น โครงสร้างที่กำหนดให้จะกลายเป็นแบบดีเทอร์มิเนต ซึ่งเรียกว่า Primary structure
2. หาระยะโก่ง การเปลี่ยนแปลงมุม หรือมุมลาดเอียง เนื่องจากการกระทำของน้ำหนักหรือแรงภายนอก ที่จุดและทิศทางเดียวกันกับการกระทำของตัว Redundant แต่ละตัว
3. หาระยะโก่ง การเปลี่ยนแปลงมุมหรือมุมลาดเอียงที่จุดนั้น เนื่องจากการกระทำของตัว Redundant ทีละตัว
4. หาผลรวมระยะการโก่งหรือมุมลาดเอียงที่จุดนั้นๆ เนื่องจากรน้ำหนักหรือแรงที่กำหนดให้ และของตัว Redundant
5. หาค่าของตัว Redundant ต่างๆ โดยการแก้สมการหลายชั้น (Simultaneous equation) ที่ได้จากข้อ 4.
6. ใช้สมการของการสมดุลหาค่าของแรงปฏิกิริยาตัวอื่นๆ ของโครงสร้างที่กำหนดให้

ตัวอย่าง



ภาพที่ 27 ภาพตัวอย่างการคำนวณหา Bending Moment Diagram และ Shear Force Diagram ของ
การท่อดัดที่ $L/240$

คำนวณหา Bending Moment Diagram และ Shear Force Diagram ของการทรุดตัวที่ L/240 (2.083 cm.) โดย กำหนดให้

$$E = 234500 \text{ ksc.}$$

$$I = 45000 \text{ cm}^4$$

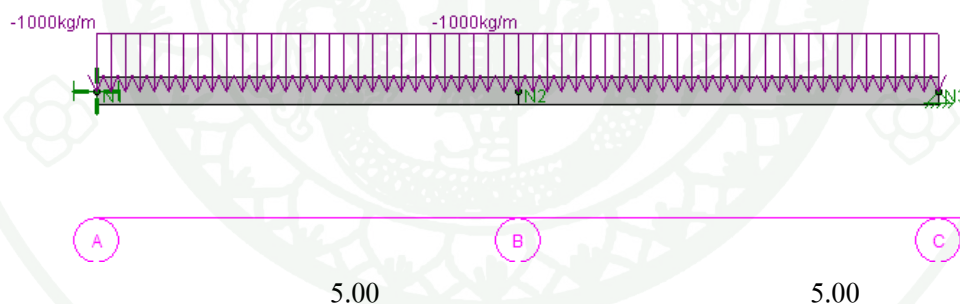
$$W = 1000 \text{ kg/m.}$$

$$\Delta = -2.083 \text{ cm. ที่จุด B}$$

วิธีทำ

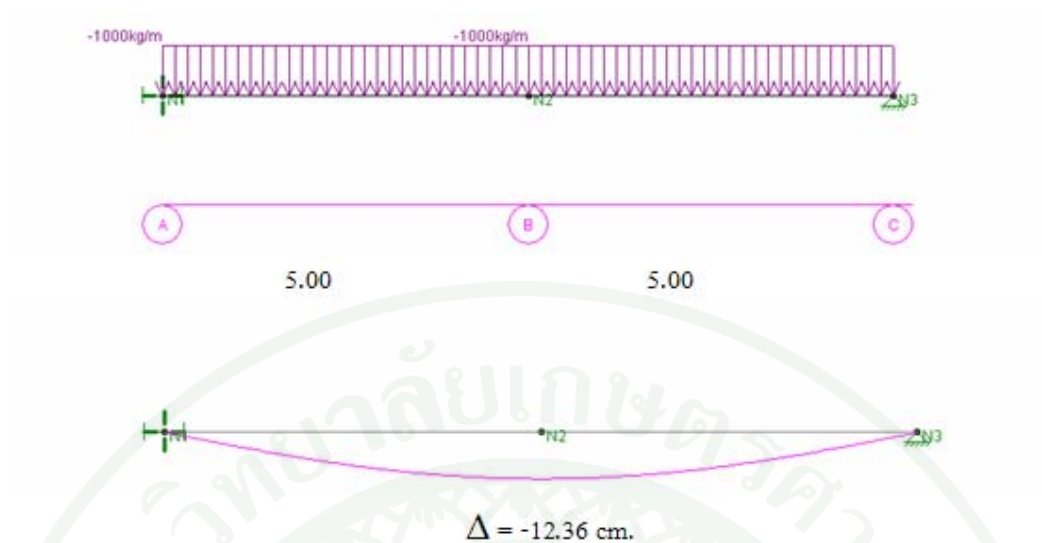
1. เอาตัว Redundant ออกให้เท่ากับจำนวนของคิกริของอินดีเทอรัมีเนท ดังนั้น โครงสร้างที่กำหนดให้จะกลายเป็นแบบคิเทอรัมีเนท ซึ่งเรียกว่า Primary structure

โดยเลือก จุตรองรับที่จุด B ออก โครงสร้างจะกลายเป็นแบบคิเทอรัมีเนท ซึ่งเรียกว่า Primary structure



ภาพที่ 28 เลือกจุตรองรับที่จุด B ออก โครงสร้างจะกลายเป็นแบบคิเทอรัมีเนท ซึ่งเรียกว่า Primary structure

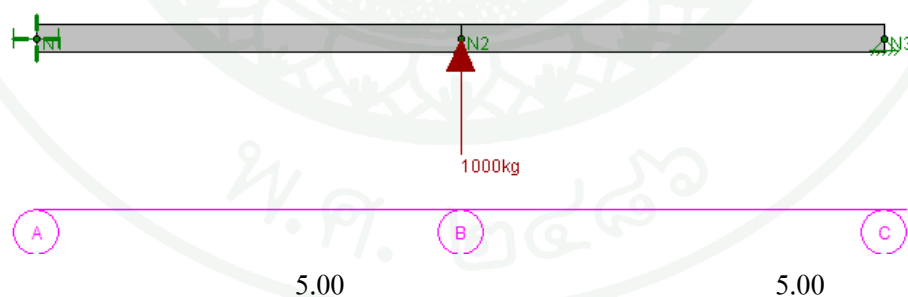
2. หาระยะโก่ง การเปลี่ยนแปลงมุม หรือมุมลาดเอียง เนื่องจากการกระทำของน้ำหนัก หรือแรงภายนอก ที่จุดและทิศทางเดียวกันกับการกระทำของตัว Redundant แต่ละตัว



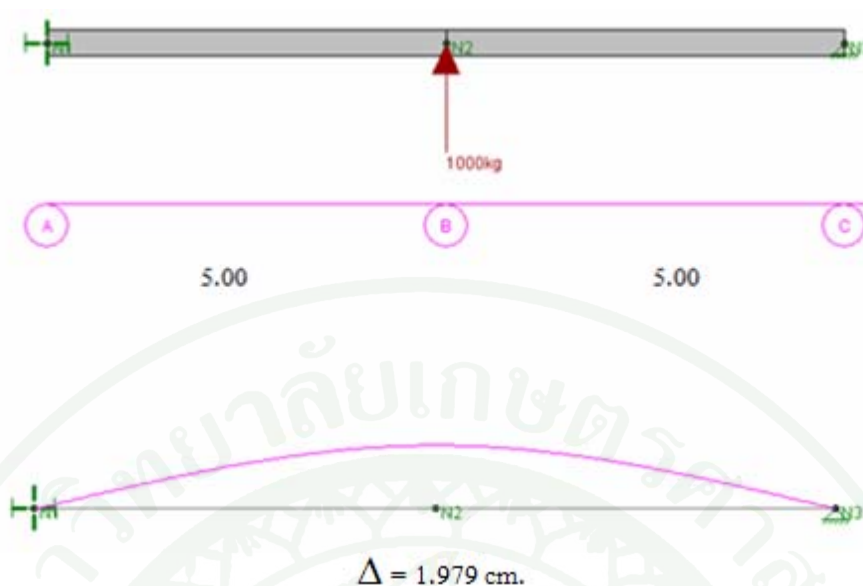
ภาพที่ 29 หาระยะโก่ง เนื่องจากการกระทำของน้ำหนักหรือแรงภายนอก ที่จุดและทิศทางเดียวกันกับการกระทำของตัว Redundant

โดย จะได้ระยะ โก่งจากการคำนวณเท่ากับ -12.36 cm.

3. หาระยะโก่ง การเปลี่ยนแปลงมุมหรือมุมลาดเอียงที่จุดนั้น เนื่องจากการกระทำของตัว Redundant



ภาพที่ 30 การหาค่าของเปลี่ยนแปลงมุมหรือมุมลาดเอียงที่จุดนั้น เนื่องจากการกระทำของตัว Redundant



ภาพที่ 31 หาระยะโก่ง ที่จุดนั้น เนื่องจากการกระทำของตัว Redundant

4. หาผลรวมระยะการโก่งหรือมุมลาดลาดที่จุดนั้นๆ เนื่องจากน้ำหนักหรือแรงที่กำหนดให้ และของตัว Redundant

ผลรวมของระยะโก่งที่ต้องการของจุดนี้คือ $L/240 = -2.0833 \text{ cm}$.

5. หาค่าของตัว Redundant ต่างๆ โดยการแก้สมการหลายชั้น (Simultaneous equation) ที่ได้จากข้อ 4.

การรวมสมการ จะได้ว่า

$$\Delta_{\text{รวม}} = \Delta_{\text{แรงภายนอก}} + (\Delta_{\text{Redundant}}) \times R_b$$

$$-2.0833 = -12.36 + 1.97828 \times R_b$$

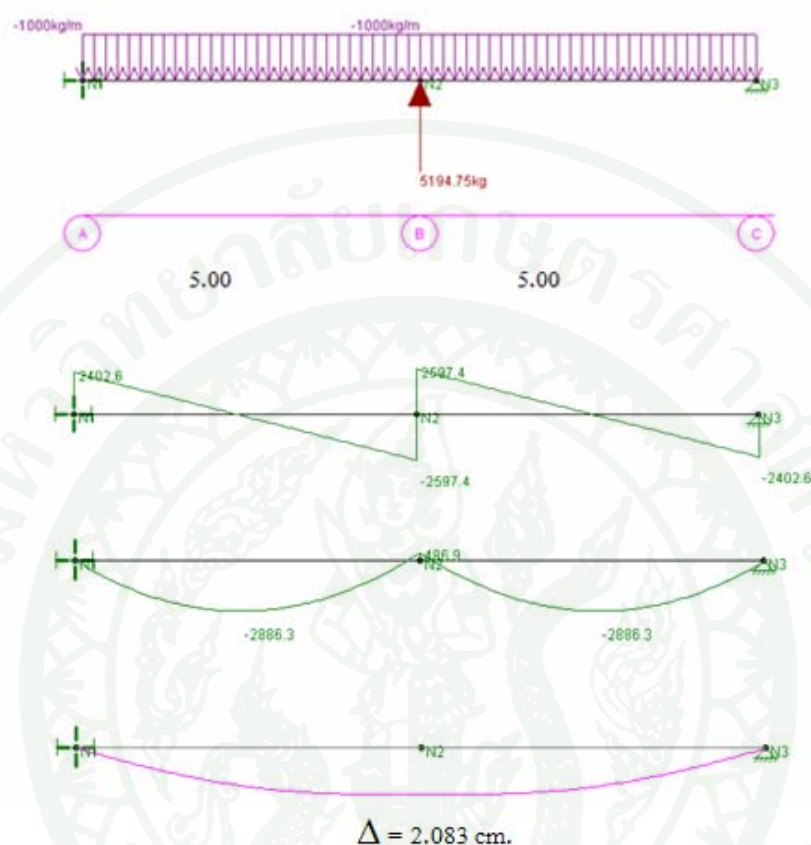
$$R_b = 10.2767 / 1.97828 \text{ cm.}$$

$$R_b = 5.19476 \text{ kg.}$$

$$\text{Redundant} = 1,000$$

$$\text{จะได้ แรงปฏิกิริยา ที่จุด b } R_b = 5,194.76 \text{ kg}$$

6. ใช้สมการของการสมดุลหาค่าของแรงปฏิกิริยาตัวอื่นๆ ของโครงสร้างที่กำหนดให้



ภาพที่ 32 ทหาระยะ โกง ที่จุดนั้น เนื่องจากการกระทำของตัว Redundant และผลการวิเคราะห์

คำนวณเปรียบเทียบโดยใช้ วิธี **Three Moment Diagram**

คำนวณหา Bending Moment Diagram และ Shear Force Diagram ของการท่อดัดตัวที่ L/240 (-2.083 cm .) โดย กำหนดให้

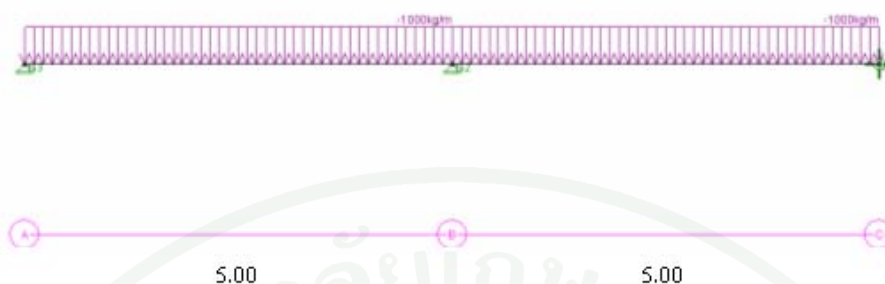
$$E = 234500 \text{ ksc.}$$

$$I = 45000 \text{ cm}^4$$

$$W = 1000 \text{ kg/m.}$$

$$\Delta = -2.083 \text{ cm. ที่จุด B}$$

วิธีทำ



จาก สมการ

$$M_a \left(\frac{L_a}{I_a} \right) + 2M_b \left(\frac{L_a}{I_a} + \frac{L_b}{I_b} \right) + M_c \left(\frac{L_b}{I_b} \right) = \frac{-6A_a X_a}{I_a L_a} - \frac{6A_b X_b}{I_b L_b} + 6 E c (\alpha_a - \alpha_b)$$

$$M_a = M_c = 0$$

$$0 + 2 * M_b * (500/45000 + 500/45000) + 0 = \frac{-6A_a X_a}{I_a L_a} - \frac{6A_b X_b}{I_b L_b} + 6 E c (\alpha_a - \alpha_b)$$

โดย

$$\frac{-6A_a X_a}{I_a L_a} = -6 * 2/3 * 312500 * 500 * 250 / (45000 * 500) = -6,944.44 \text{ kg-cm}$$

$$\frac{6A_b X_b}{I_b L_b} = -6 * 2/3 * 312500 * 500 * 250 / (45000 * 500) = -6,944.44 \text{ kg-cm}$$

$$6 E c (\alpha_a - \alpha_b) = 6 * 234500 * (2.0833/500 + 2.0833/500) = 11,725.00 \text{ kg-cm}$$

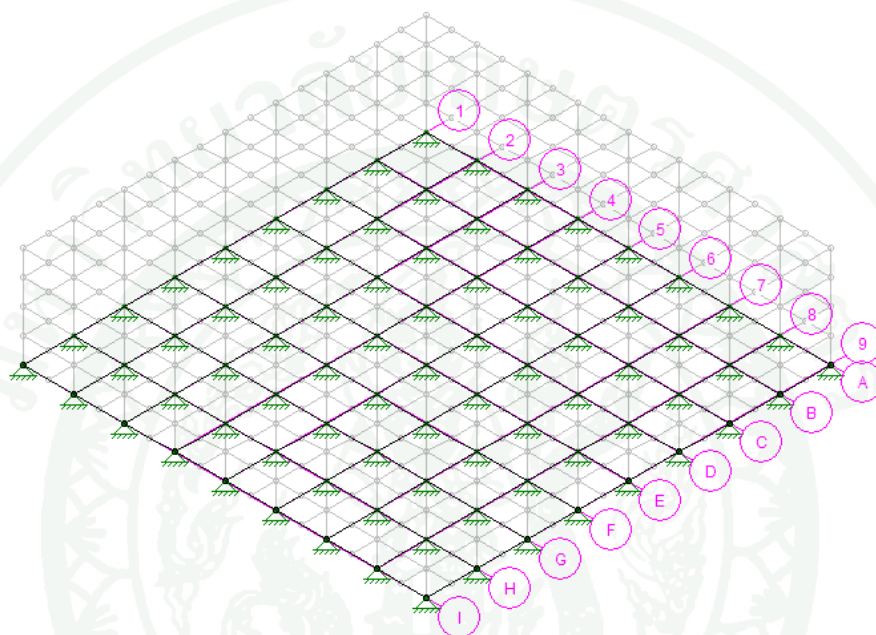
$$M_b = -48,687.50 \text{ kg-cm} \quad (-486.88 \text{ kg-m.})$$

$$M^+ = 288,630.34 \text{ kg-cm} \quad (-2886.30 \text{ kg-m.}) \text{ Moment max. At Point A-B}$$

$$M^+ = 288,630.34 \text{ kg-cm} \quad (-2886.30 \text{ kg-m.}) \text{ Moment max. At Point B-C}$$

วิธีการวิเคราะห์โครงสร้าง

โดยพิจารณาจาก ภาพที่ 33 เป็นภาพขั้นที่ 1 ของโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์โดยนำวิธี Superposition มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังนี้



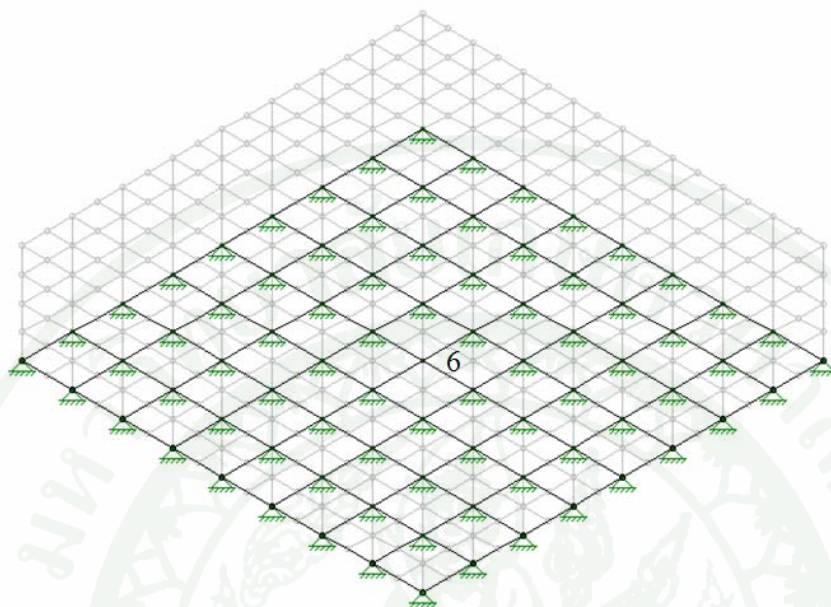
ภาพที่ 33 ภาพตัวอย่างการคำนวณหา Bending Moment Diagram และ Shear Force Diagram ของ โครงที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้การทรุดตัวที่ $L/240$

1. เอาตัว Redundant ออกให้เท่ากับจำนวนของดีกรีของอินดีเทอรัเมนต์ ดังนั้นโครงสร้างที่กำหนดให้จะกลายเป็นแบบดีเทอร์มิเนต ซึ่งเรียกว่า Primary structure

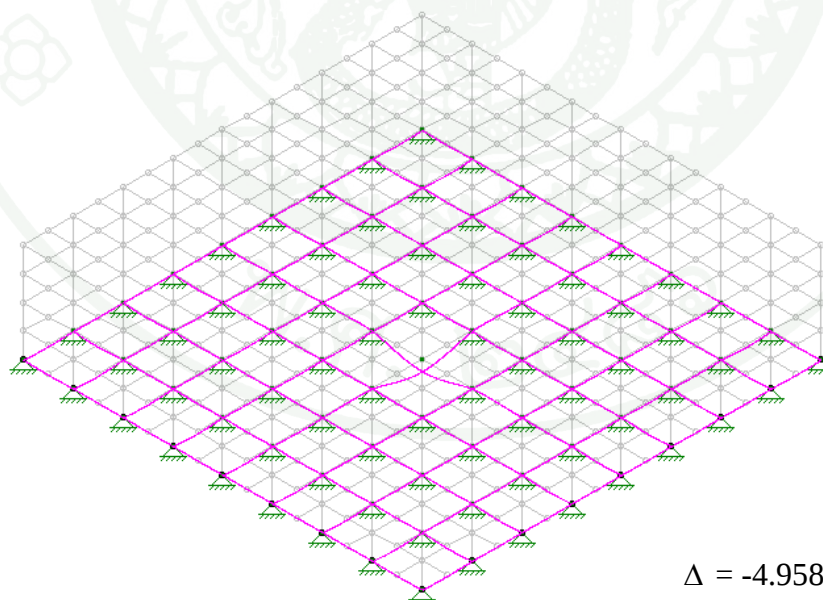
โดยเลือก จุดรองรับที่จุดที่ 6 ออก โครงสร้างจะกลายเป็นแบบดีเทอร์มิเนต ซึ่งเรียกว่า Primary structure ดังภาพที่ 34

2. หาระยะโก่ง การเปลี่ยนแปลงมุม หรือมุมลาดเอียง เนื่องจากการกระทำของน้ำหนัก หรือแรงภายนอก ที่จุดและทิศทางเดียวกันกับการกระทำของตัว Redundant แต่ละตัว

หาระยะโก่ง การเปลี่ยนแปลงมุม เนื่องจากการกระทำของน้ำหนักหรือแรงภายนอก
 ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 34 ภาพตัวอย่างเอาตัว Redundant จุที 6 ออก เพื่อการคำนวณหา Bending Moment Diagram และ Shear Force Diagram ของโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้การทอดตัวที่ L/240



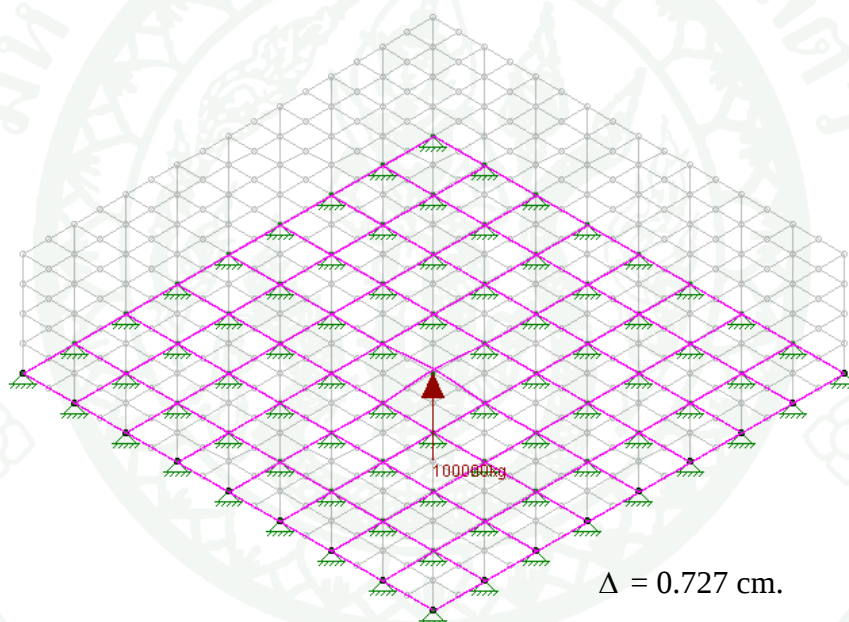
ภาพที่ 35 ภาพตัวอย่างเนื่องจากการกระทำของน้ำหนักหรือแรงภายนอก และระยะโก่งที่เกิดขึ้น
 จุดที่ 6 ออก ของโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้การทอดตัวที่ L/240

3. หาระยะโค้ง การเปลี่ยนแปลงมุมหรือมุมลาดเอียงที่จุดนั้น เนื่องจากการกระทำของ
ตัว Redundant

หาระยะโค้ง การเปลี่ยนแปลงมุม เนื่องจากการกระทำของ Redundant ดังภาพที่ 36

4. หาผลรวมระยะการโค้งหรือมุมลาดลาดที่จุดนั้นๆ เนื่องจากรู้น้ำหนักหรือแรงที่กำหนดให้
และของตัว Redundant

ผลรวมของระยะโค้งที่ต้องการของจุดนี้คือ $L/240 = -4.167$ cm.



ภาพที่ 36 ภาพตัวอย่างเนื่องจากการกระทำของน้ำหนักหรือแรงภายนอก และระยะโค้งที่เกิดขึ้น
จุดที่ 6 ออก ของโครงที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้การทรุดตัวที่ $L/240$

5. หาค่าของตัวRedundantต่างๆโดยการแก้สมการหลายชั้น (Simultaneous equation) ที่ได้จากข้อ 4.

การรวมสมการ จะได้ว่า

$$\Delta_{\text{รวม}} = \Delta_{\text{แรงภายนอก}} + (\Delta_{\text{Redundant}}) \times R_b$$

$$-4.167 = -4.958 + 0.727 \times R_b$$

$$R_b = (-4.2767 + 4.958) / 0.727 \text{ cm.}$$

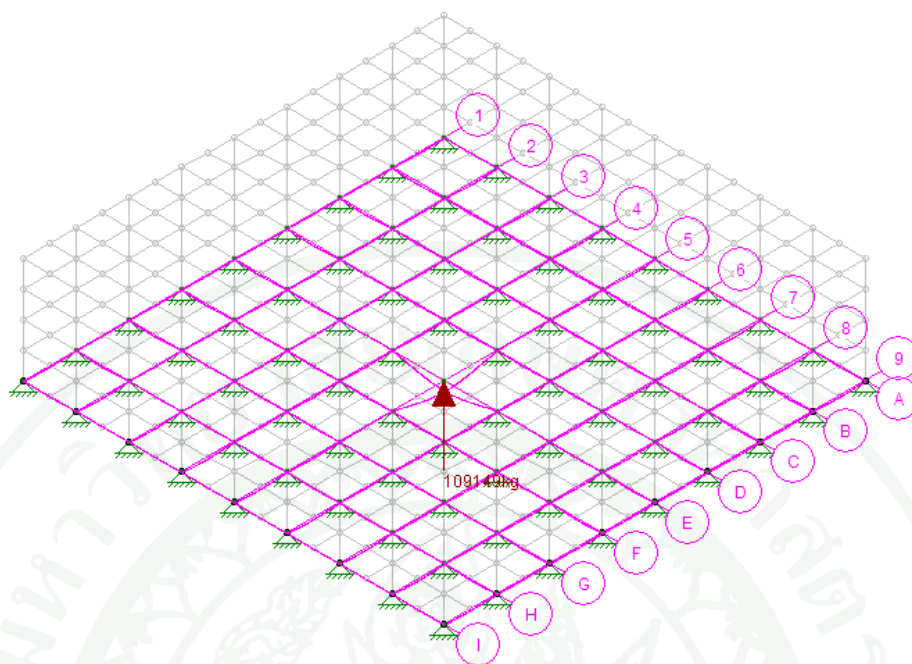
$$R_b = 1.091494 \text{ kg.}$$

$$\text{Redundant} = 100,000$$

$$\text{จะได้ แรงปฏิกิริยา ที่จุด b } R_b = 109,149.40 \text{ kg}$$

6. ใช้สมการของการสมมูลหาค่าของแรงปฏิกิริยาตัวอื่นๆ ของโครงสร้างที่กำหนดให้

นำค่าของแรงปฏิกิริยาที่ได้ มาทำการวิเคราะห์ รวมทั้งหาค่า Bending Moment Diagram และ Shear Force Diagram ของโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้การทฤษฎีที่ L/240 จะได้ผลการวิเคราะห์ที่ต้องการ



ภาพที่ 37 ภาพตัวอย่างเนื่องจากการกระทำของน้ำหนักหรือแรงภายนอก และน้ำหนักที่ฐานราก
ที่ระยะ โคง่ที่เกิดขึ้น เท่ากับ -4.167 cm, จุดที่ 6 ออก (การทรุดตัวที่ $L/240$)

1. การวิเคราะห์โครงสร้าง

ทำการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้วิธีการ Superposition โดยทำการวิเคราะห์ โครงสร้าง
ทั้งหมดดังนี้

การวิเคราะห์พิจารณาการทรุดตัวที่ $L/240$ เท่ากับ 4.167 เซนติเมตร จำนวน 6 จุด

ตำแหน่งที่ 1 บริเวณ Grid line 1, A มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัว
ที่ $L/240$ เท่ากับ $86,569.97$ kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ
 $150,255.605$ kg. คิดเป็น 57.62 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 2 บริเวณ Grid line 1, C มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัว
ที่ $L/240$ เท่ากับ $21,493.11$ kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ
 $318,683.979$ kg. คิดเป็น 6.74 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 3 บริเวณ Grid line 3, C มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัวที่ L/240 เท่ากับ 92,905.84 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 661,413.67 kg. คิดเป็น 14.05 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 4 บริเวณ Grid line 1, E มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัวที่ L/240 เท่ากับ 23,465.71 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 324,454.55 kg. คิดเป็น 7.23 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 5 บริเวณ Grid line 3, E มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัวที่ L/240 เท่ากับ 101,097.51 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 672,929.08 kg. คิดเป็น 15.02 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 6 บริเวณ Grid line 5, E มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัวที่ L/240 เท่ากับ 109,149.43 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 684,153.80 kg. คิดเป็น 15.95 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

การวิเคราะห์พิจารณาการทรุดตัวที่ L/360 เท่ากับ 2.778 เซนติเมตร จำนวน 6 จุด

ตำแหน่งที่ 1 บริเวณ Grid line 1, A มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัวที่ L/360 เท่ากับ 107,774.39 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 150,255.605 kg. คิดเป็น 57.62 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 2 บริเวณ Grid line 1, C มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัวที่ L/360 เท่ากับ 120,557.93 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 318,683.979 kg. คิดเป็น 37.83 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 3 บริเวณ Grid line 3, C มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัวที่ L/360 เท่ากับ 282,293.15 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 661,413.67 kg. คิดเป็น 42.68 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 4 บริเวณ Grid line 1, E มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัว ที่ L/360 เท่ากับ 123,643.79 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 324,454.55 kg. คิดเป็น 38.11 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 5 บริเวณ Grid line 3, E มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัว ที่ L/360 เท่ากับ 291,531.33 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 300,720.11 kg. คิดเป็น 43.32 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 6 บริเวณ Grid line 5, E มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัว ที่ L/360 เท่ากับ 109,149.43 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 684,153.80 kg. คิดเป็น 43.96 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

การวิเคราะห์พิจารณาการทรุดตัวที่ L/500 เท่ากับ 2.000 เซนติเมตร จำนวน 6 จุด

ตำแหน่งที่ 1 บริเวณ Grid line 1, A มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัว ที่ L/500 เท่ากับ 119,648.85 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 150,255.605 kg. คิดเป็น 79.63 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 2 บริเวณ Grid line 1, C มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัว ที่ L/500 เท่ากับ 176,034.24 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 318,683.979 kg. คิดเป็น 55.24 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 3 บริเวณ Grid line 3, C มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัว ที่ L/500 เท่ากับ 388,305.04 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 661,413.67 kg. คิดเป็น 58.72 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 4 บริเวณ Grid line 1, E มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัว ที่ L/500 เท่ากับ 179,743.51 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 324,454.55 kg. คิดเป็น 55.40 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 5 บริเวณ Grid line 3, E มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัวที่ L/500 เท่ากับ 398,714.26 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 300,720.11 kg. คิดเป็น 59.17 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

ตำแหน่งที่ 6 บริเวณ Grid line 5, E มีแรงกระทำจากเสาเข็มทำให้เกิดการทรุดตัวที่ L/500 เท่ากับ 408,000.00 kg. จากเดิมมีแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 684,153.80 kg. คิดเป็น 59.64 % จากแรงกระทำต่อฐานรากที่ยังไม่เกิดการทรุดตัว

กรณีศึกษา เจดีย์บูรพาวิสุทธิวิทยาประชาสามัคคี

โครงการก่อสร้างเจดีย์บูรพาวิสุทธิวิทยาประชาสามัคคี วัดเขาสุกิม ได้ก่อสร้างขึ้นตามเจตนารมณ์ของ พระวิสุทธิญาณเถร (หลวงปู่สมชาย ฐิตวิริโย) เพื่อประดิษฐานพระพุทธรูปหินอ่อน และพระบรมสารีริกธาตุขององค์สมเด็จพระสัมมาสัมพุทธเจ้า ภาพขององค์เจดีย์แสดงในภาพที่ 55

โดยได้เริ่มดำเนินการก่อสร้างเมื่อปีพุทธศักราช 2538 และพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ทรงโปรดเกล้าฯ ให้ ฯพณฯ พลอากาศตรี กำธน สินธวานนท์ องคมนตรี เป็นผู้แทนพระองค์มาประกอบพิธีวางศิลาฤกษ์เจดีย์ เมื่อวันที่ 14 เมษายน 2538

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารเจดีย์บูรพาวิสุทธิวิทยาประชาสามัคคี วัดเขาสุกิม อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี มีความกว้างยาวประมาณ 99x99 เมตร สูง 119 เมตรดังภาพที่ 1 ทำการก่อสร้างบริเวณภูเขา ที่มีชั้นหินที่มีความลาดตามแนวภูเขาทำให้ความยาวเสาเข็มของอาคารมีความยาวต่างกัน โดยการออกแบบเดิมของอาคารเป็นการออกแบบฐานรากเสาเข็มเจาะและในระหว่างการก่อสร้างเสาเข็ม พบชั้นหินดานบริเวณด้านทิศตะวันตกอยู่ในระดับใกล้เคียงดินไม่สามารถทำเสาเข็มเจาะได้จึงมีการแก้ไขในการก่อสร้างในขณะนั้นโดยการก่อสร้างฐานรากแผ่ แทนการสร้างเสาเข็มเจาะ ส่วนของการก่อสร้างเสาเข็มเจาะบริเวณที่สามารถดำเนินการได้ด้านทิศตะวันออกสามารถดำเนินการได้จนแล้วเสร็จ โดยมีความยาวของเสาเข็มเจาะแตกต่างกันไปตามความลาดของชั้นหิน แสดงในภาพที่ 5

ภายหลังจากวางศิลาฤกษ์แล้วได้ดำเนินการก่อสร้างฐานรากเจดีย์ โดยสรุปมีขั้นตอนดังนี้

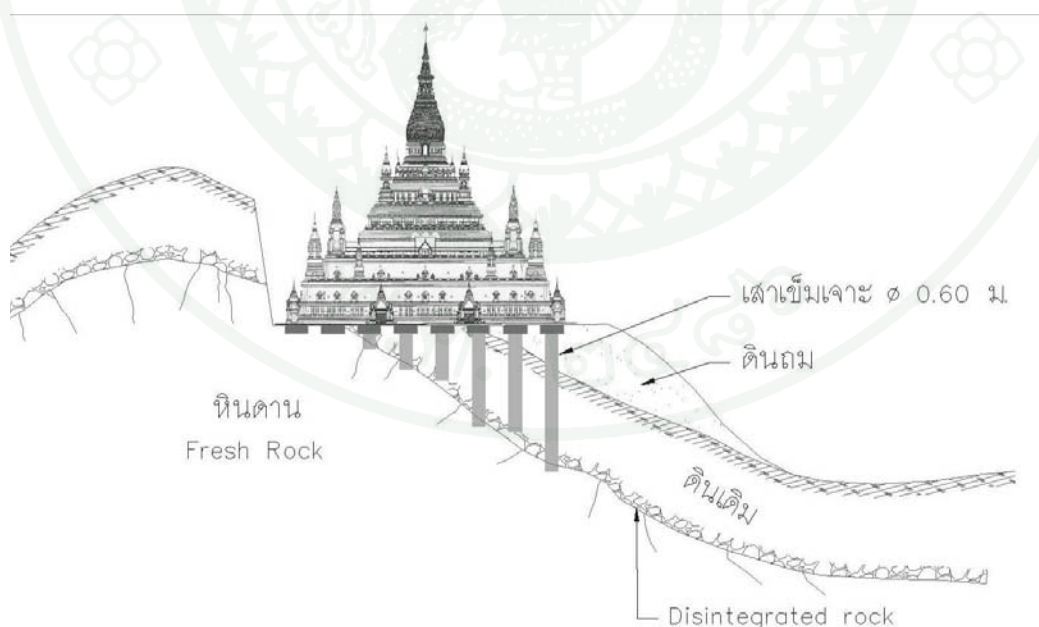
1. งานปรับพื้นที่ เริ่มจากการระเบิดแนวภูเขา เพื่อดำเนินการปรับพื้นที่ ซึ่งโครงสร้างขององค์เจดีย์นั้นวางอยู่บนฐานรากสองชนิดคือ ฐานรากแผ่นบนชั้นบริเวณใกล้แนวสันเขา อีกส่วนหนึ่งวางอยู่บนฐานรากเสาเข็มบริเวณใกล้แนวหน้าผาดังภาพที่ 3.2

2. งานก่อสร้างเสาเข็มเจาะ

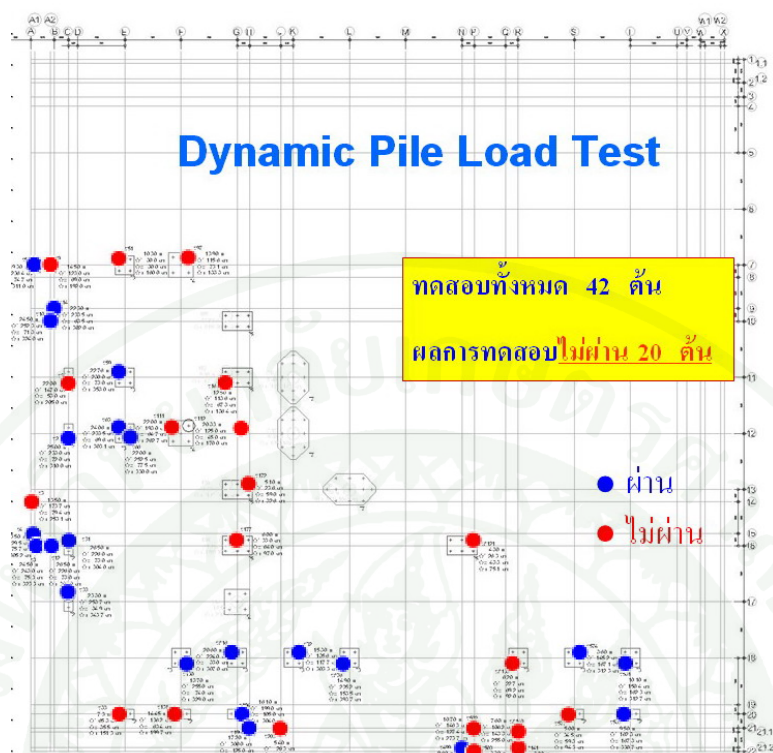
3. งานฐานราก งานตอม่อ งานเทพื้นบางส่วนและงานเทคาน

4. งานทดสอบกำลังรับน้ำหนัก มีการทดสอบสองวิธี คือ

4.1 ทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธี Dynamic pile load test คือทดสอบด้วยตุ้มน้ำหนัก ทำการทดสอบทั้งหมด 42 ตัน ผลการทดสอบปรากฏว่าไม่ผ่านการทดสอบมากถึง 20 ตัน ดังแสดงในภาพที่ 3.5 (ทดสอบ พ.ศ.2541)



ภาพที่ 38 ภาพลักษณะชั้นดินบริเวณก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาจิตตวิริยาประชาสามัคคี (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)



ภาพที่ 39 การทดสอบ Dynamic load test ของเสาเข็มเจาะเดิม (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)

4.2 ทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มด้วยวิธี Static pile load test คือ การนำน้ำหนักมาวางบนเสาเข็มทดสอบ ซึ่งในงานนี้ใช้น้ำหนักเสาเข็มเก่ามาเรียงกันให้น้ำหนัก 300 ตัน การทดสอบ เสาเข็มขององค์เจดีย์ ต้องรับน้ำหนักบรรทุกทุกตลอดภัยที่ 120 ตัน/ตัน (allowable load) ซึ่งทำการทดสอบทั้งหมด 8 ต้น ผลการทดสอบปรากฏว่าไม่ผ่านทั้ง 8 ต้น ดังภาพที่ 3.6 (ทดสอบ พ.ศ. 2541)

การศึกษาแบบโครงสร้างอาคารเจดีย์บูรพาจุติวิริยาประชาสามัคคี

การศึกษาแบบก่อสร้าง งานโครงสร้างขององค์อาคารเจดีย์บูรพาจุติวิริยาประชาสามัคคีที่ใช้ในการก่อสร้างเพื่อนำมาศึกษาพฤติกรรม ของโครงสร้างจากการออกแบบ และพฤติกรรมของโครงสร้าง จากการหลุดตัวของเสาเข็มและฐานราก นำมาเปรียบเทียบเพื่อศึกษาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากการหลุดตัวของโครงสร้างและฐานราก

โดยนำข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

1. เสาเข็มและฐานรากขององค์อาคาร

ลักษณะฐานรากขององค์อาคารเจดีย์บูรพาจุติวริยาประชาสามัคคีเป็นฐานรากตั้งอยู่บนเสาเข็ม จากการออกแบบมีฐานรากอยู่ 5 แบบคือ

1. ฐานราก F-1 เป็นฐานรากเสาเข็มเดี่ยว รับน้ำหนักปลอดภัย 120 ตันต่อต้น
2. ฐานราก F-2 เป็นฐานรากเสาเข็มเดี่ยว รับน้ำหนักปลอดภัย 240 ตันต่อต้น
3. ฐานราก F-4 เป็นฐานรากเสาเข็มเดี่ยว รับน้ำหนักปลอดภัย 480 ตันต่อต้น
4. ฐานราก F-6 เป็นฐานรากเสาเข็มเดี่ยว รับน้ำหนักปลอดภัย 720 ตันต่อต้น
5. ฐานราก F-12 เป็นฐานรากเสาเข็มเดี่ยว รับน้ำหนักปลอดภัย 1440 ตันต่อต้น

จากการออกแบบจะไม่พิจารณาการทรุดตัวของฐานรากและเสาเข็ม โดยเสาเข็มเป็นเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80 เมตร รับน้ำหนัก ปลอดภัย 120 ตันต่อต้น

2. ลักษณะโครงสร้างขององค์อาคารเจดีย์บูรพาจุติวริยาประชาสามัคคี

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารเจดีย์บูรพาจุติวริยาประชาสามัคคี วัดเขาสุกิม อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี มีความกว้างยาวประมาณ 99x99 เมตร สูง 119 ทำการก่อสร้างบริเวณภูเขาที่มีชั้นหินที่มีความลาดตามแนวภูเขาทำให้ความยาวเสาเข็มของอาคารมีความยาวต่างกัน โดยการออกแบบเดิมของอาคารเป็นการออกแบบฐานรากเสาเข็มเจาะและในระหว่างการก่อสร้างเสาเข็มพบชั้นหินดานบริเวณด้านทิศตะวันตกอยู่ในระดับใกล้เคียงดินไม่สามารถทำเสาเข็มเจาะได้จึงมีการแก้ไขในการก่อสร้างในขณะนั้น โดยการก่อสร้างฐานรากแผ่แทนการสร้างเสาเข็มเจาะ ส่วนของการก่อสร้างเสาเข็มเจาะบริเวณที่สามารถดำเนินการได้ด้านทิศตะวันออกสามารถดำเนินการได้จนแล้วเสร็จโดยมีความยาวของเสาเข็มเจาะแตกต่างกันไปตามความลาดของชั้นหิน โครงสร้างขององค์อาคารเจดีย์บูรพาจุติวริยาประชาสามัคคีจากการออกแบบเป็นลักษณะโครงสร้าง พื้นคาน โดยพื้นจะวางอยู่บนคานและถายน้ำหนักลงบนคาน คานจะถายน้ำหนักต่อไปยังเสา และเสาทำการถายน้ำหนักสู่ฐานรากต่อไป

3. การสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์โครงสร้าง

การสร้างแบบจำลองในวิธานิพนธ์นี้ จะสร้างเป็นแบบวิเคราะห์โครงสร้างวิธีเมตริก (Matrix Analysis) โดยคาน เสา กำแพง คอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกจำลองเป็นชิ้นส่วนสองมิติ (2D) โดยตามแบบจำลองขององค์อาคาร ประกอบขึ้นเป็นองค์อาคารขนาดใหญ่เพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างองค์อาคาร ในการรับน้ำหนักที่กระทำโดยพิจารณาการกระจายน้ำหนักสูงสุดที่ใช้ในการออกแบบ ณ ตำแหน่งต่างๆ ผ่านโครงสร้างต่างๆ ขององค์อาคารลงสู่ฐานรากและเสาเข็มของอาคาร โดยค่าที่เกิดขึ้นจะสามารถนำไปพิจารณาพฤติกรรมขององค์อาคารได้ต่อไป

การสร้างแบบจำลองโครงสร้างวิธีเมตริก (Matrix Analysis) นี้ เพื่อทำนายพฤติกรรมโดยรวมของการรับน้ำหนักขององค์อาคารลงสู่ฐานราก จำเป็นต้องเข้าใจหลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับพฤติกรรมและคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ (Material property), ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุ (Stress-strain relationship), ชนิดของเอลิเมนต์ (Element type), การกำหนดเอลิเมนต์ต่างๆ ของโครงสร้างตลอดจนเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) และน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อแบบจำลอง

1. คุณสมบัติของวัสดุ (Material Property)

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้มาจากการนำคอนกรีตและเหล็กเสริมมารวมกันในแบบหล่อ ในลักษณะที่ทำให้ได้ส่วนของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมร่วมกันรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามต้องการ เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบของซีเมนต์ทรายหินน้ำทำให้คุณสมบัติทางวัสดุของคอนกรีตไม่สามารถระบุได้โดยง่าย เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ คอนกรีตและเหล็กเสริม มันถูกพิจารณาให้เป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous material) ดังนั้นเพื่อที่จะให้การวิเคราะห์โดยวิธีเมตริก (Matrix Analysis) มีความถูกต้องจำเป็นที่จะต้องทราบถึงคุณสมบัติทางพฤติกรรมของวัสดุด้วย

คอนกรีต

คอนกรีตถูกแทนด้วยเอลิเมนต์แบบสองมิติ (2D) มีความอิสระในการเคลื่อนที่ (Degree of Freedom) ได้ใน 3 ทิศทางคือในทิศทางตามแนวแกน X, Y และ Z โดยที่เอลิเมนต์ต้องการคุณสมบัติความเท่ากันทุกทิศทางในช่วงเส้นตรง (Linear isotropic) ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) สามารถหาได้จากสมการที่ 30

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) เป็นคุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องการมากที่สุดเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว เนื่องจากพบว่ากำลังต้านทานของคอนกรีตต่อแรงกระทำแบบอื่น เช่น กำลังต้านทานแรงดึง กำลังต้านทานแรงคด กำลังต้านทานแรงเฉือนและกำลังยึดเหนี่ยว หรือแม้แต่ความทนทานและการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ล้วนเป็นสัดส่วนเทียบได้กับกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตทั้งสิ้น นั่นหมายความว่า เมื่อคอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงอัดสูง ค่ากำลังต้านทานแรงอย่างอื่นหรือความทนทานก็สูงตามไปด้วย

มอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

มอดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต E_c เป็นตัวบ่งหรือแสดงถึงความต้านทานต่อการเสียรูป (Deformation) ของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักหรือแรงอัดกระทำ พบว่ามอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตลอดจนขนาดและระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกอยู่ในช่วงใช้งานและกระทำอยู่ในช่วงเวลานั้นๆ อาจสมมติว่าคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น (Elastic material) โดยมีหน่วยการหดตัว (Elastic strain) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ แต่เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกคงที่เป็นเวลานาน (Long-term loading) หรือเมื่อต้องรับน้ำหนักหรือแรงกระทำซ้ำซาก (Repeated loading) เป็นวัฏจักร ต้องพิจารณารวมหน่วยการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic strain) หรือที่มักเรียกกันว่าหน่วยการล้าของคอนกรีต (Creep strain) ด้วยเพราะมอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะลดน้อยลงตามลำดับ ทำให้คอนกรีตเกิดการเสียรูปมากขึ้นและจะมีการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อลดน้ำหนักหรือแรงกระทำค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต หาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อหน่วยการหดตัวของเส้นสัมผัสระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งโดยทั่วไปเส้นสัมพัทธ์นี้มีลักษณะเป็นรูปโค้งพาราโบลา แต่สามารถหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้ดังนี้

$$E_c = 15100 \sqrt{f_c'} \quad (\text{ksc})$$

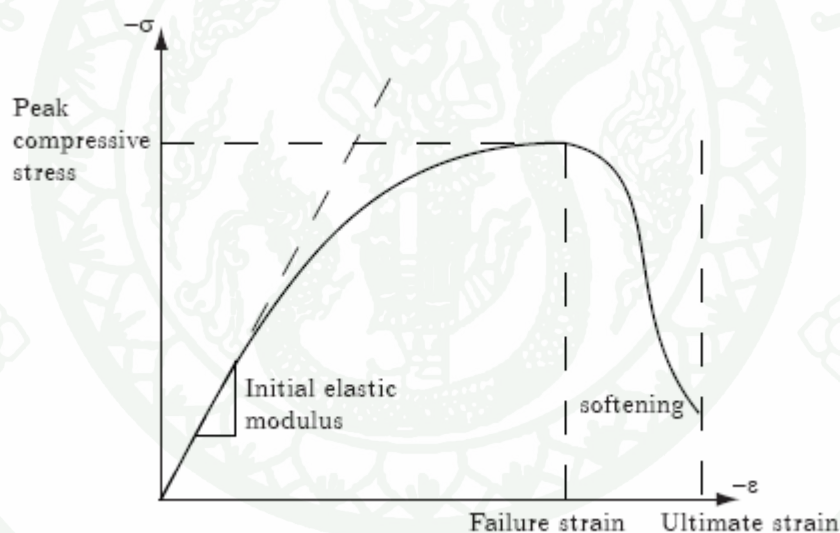
$$G = E_c / (2 * (1 + \mu))$$

เมื่อ E_c = มอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต, (ksc)

f_c' = กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต, (ksc)

G = Shear Modulus, (ksc)

μ = Poisson's ratio



ภาพที่ 40 การหามอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

อัตราส่วนปัวซองส์ของคอนกรีต (Poisson's ratio) หมายถึง อัตราระหว่างหน่วยยืดหดทางด้านข้างต่อหน่วยการยืดหดตามแนวแกนที่รับน้ำหนัก จากการทดสอบเพื่อหากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานพบว่า เมื่อคอนกรีตรับแรงอัดตามแนวแกนสูงมากขึ้น คอนกรีตจะขยายตัวออกทางด้านข้างมากและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากการแตกร้าวภายในเนื้อคอนกรีตในแนวที่ขนานกับแรงที่กระทำ คอนกรีตธรรมดาที่มีค่าอัตราส่วนปัวซองส์อยู่ระหว่าง

0.15 – 0.25 และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.17 เมื่อ คอนกรีตมีกำลังสูงมากขึ้นปัวของสโระจะน้อยลง นั่นคือ คอนกรีตมีกำลังสูงมากขึ้นความเหนียวของคอนกรีตจะน้อยลง

การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Risa 3 D (Versions 4.5b)

การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างอาคารโดยสามารถเปรียบเทียบลักษณะของโครงสร้างจากการออกแบบและการวิเคราะห์ได้จากขนาดของโครงสร้างได้จากตารางที่ 111 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ต่อไป



ภาพที่ 41 อาคารเจดีย์บูรพาวิสุทธิวิทยาประชาสามัคคี (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบขนาดของโครงสร้างจากการออกแบบและจากการวิเคราะห์

MEMBER SECTION SET		
Element	Shape (m.)	Structure Drawing
C1	0.5x0.5	C1
C2	1.0x1.0	C2,C3,C4
C3	0.3x0.3	C5,C7
C4	0.4x0.4	C6
B1	0.5x0.8	B1,B2
B2	0.8x1.20	B3,B4,B5,B39
B3	0.3x0.8	B6
B4	0.2x1.20	B8,B9
B5	0.4x0.9	B10,B16,B17,B18,B21,B24,B38
B6	0.2x0.9	B11,B22,B23,
B7	0.15x0.4	B12
B8	0.3x0.6	B13,B14,B19,B20,B33
B9	1.0X2.50	B15
B10	0.8X1.4	B35,B36,B37
B11	1.0X0.9	B40
B12	0.2X0.5	B25,B32,B34,B41,
B13	0.3X1.6	B26
B14	0.3X1.0	B27

จุดรองรับ(Boundary condition)

จุดรองรับที่ใช้ในการพิจารณาการวิเคราะห์ ในการออกแบบก่อสร้างผู้ออกแบบได้ กำหนดให้ไม่เกิดการทรุดตัวในฐานรากหรือจุดรองรับ และไม่เกิดโมเมนต์ดัดขึ้นในจุดรองรับ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งหมดให้มีรูปแบบและการถ่ายแรงง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยเป็นหลักการทั่วไปในการออกแบบ ซึ่งการกำหนดให้ จุดรองรับในโปรแกรม Risa 3 D (Versions 4.5b)

ได้กำหนดจุดรองรับ เป็นแบบไม่เกิดการเคลื่อนตัวของจุดรองรับทุกแกนและไม่รับโมเมนต์ (Pin support)

น้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load)

น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่มีตำแหน่งของการกระทำคงที่หรือถาวรตลอดเวลาและไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของน้ำหนัก เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เกิดขึ้นจากแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้น จึงมีแรงในแนวดิ่งและแนวตั้งเสมอ น้ำหนักบรรทุกแบบนี้ น้ำหนักของส่วนโครงสร้างเองที่ประกอบรวมกันเป็นองค์อาคารประเภทต่างๆ เช่น น้ำหนักของแผ่นพื้น วัสดุปูพื้น ส่วนที่แขวนห้อย ผนังคาน เสา ฯลฯ ซึ่งขึ้นกับขนาดและชนิดของวัสดุที่ผู้ออกแบบกำหนดขึ้นหรือเลือกใช้

โดยปกติ น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) ที่กระทำบนโครงสร้างมักเป็นน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอ โดยมีหน่วยเป็น ก.ก. ต่อ ตารางเมตร สำหรับการคำนวณออกแบบแผ่นพื้น หรือมีหน่วย ก.ก. ต่อ เมตร การคำนวณออกแบบคาน

น้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างในการวิจัย

$$W_c = 2400 \quad (\text{kg/m}^3)$$

น้ำหนักตกแต่ง

น้ำหนักของแผ่นพื้น วัสดุปูพื้น

$$\text{Finishing} = 120 \quad \text{kg/m}^2$$

น้ำหนักบรรทุกจร (Live load)

น้ำหนักบรรทุกจร (Live load) หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่กระทำชั่วคราวและอาจเปลี่ยนแปลงขนาดของน้ำหนักได้ ประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกจรกระทำในแนวดิ่ง และน้ำหนักบรรทุกจรกระทำทางด้านข้างของอาคาร

น้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำในแนวดิ่ง ได้แก่ น้ำหนักของผู้ใช้อาคาร น้ำหนักของเครื่องเรือน เครื่องจักร หรือสิ่งของและสินค้าต่างๆ เช่น หนังสืออุปกรณ์สำนักงาน วัสดุก่อสร้าง ฯลฯ นอกจากนี้ยังรวมถึง น้ำหนักของรถยนต์นั่ง รถยนต์บรรทุก รถไฟ ซึ่งเป็นน้ำหนักบรรทุกจรที่เคลื่อนที่ได้ และทำให้เกิดการกระแทก

น้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำทางด้านข้างของอาคาร ได้แก่ แรงลม แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว แรงดันของดินหรือของไหล

ในแต่ละประเทศจะมีพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร และมีกฎกระทรวงเกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุกจรขั้นต่ำที่ต้องพิจารณาใช้สำหรับการคำนวณออกแบบโดยขึ้นกับประเภทและการใช้สอยของอาคารนั้น สำหรับการคำนวณออกแบบโครงสร้างนี้ พิจารณาจากข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2544 ที่ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร ซึ่งกำหนดน้ำหนักบรรทุกจรขั้นต่ำสำหรับใช้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างต่างๆ ไว้

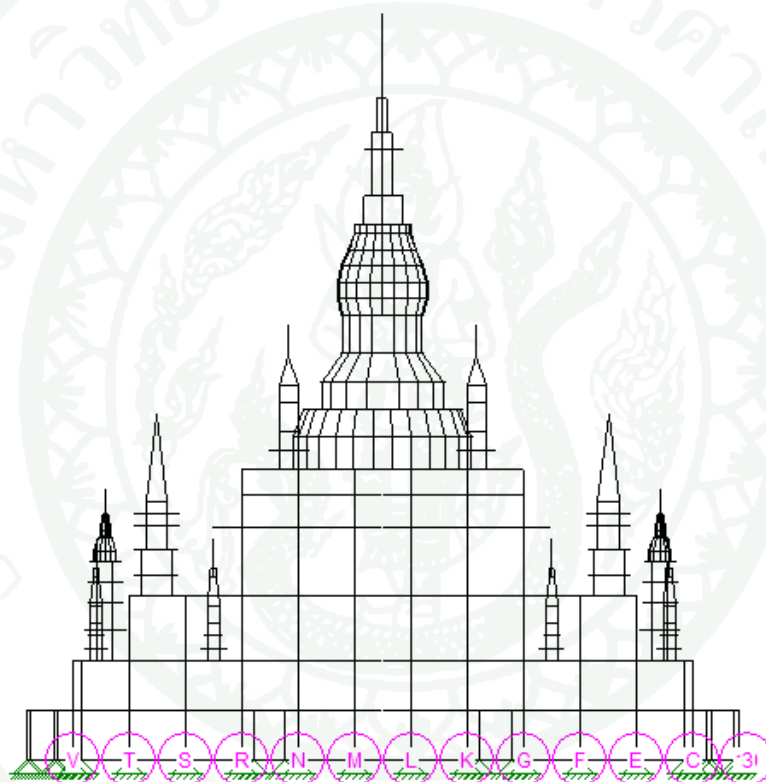
น้ำหนักบรรทุกจร (Live load) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างในการวิจัย

โดยพิจารณาใช้ หักข้อ น้ำหนักบรรทุกจร (Live load) ของ ห้องโถง บ้านใด ทางเดินของของห้างสรรพสินค้า โรงมหรสพ ห้องประชุม ภัตตาคาร และห้องสมุด

$$LL. = 500 \quad \text{kg/m}^2$$

ตารางที่ 4 น้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

ชื่อน้ำหนัก	จำนวน	หน่วย
น้ำหนักพื้น	360	kg/ m ²
น้ำหนักจร	500	kg/ m ²
น้ำหนักคกแต่ง	120	kg/ m ²



ภาพที่ 42 อาคารเจดีย์บูรพาวิริยาประชาสามัคคี ที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง

Risa 3d

แนวทางการแก้ปัญหา

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์ ได้ทำการวิเคราะห์ และทำการสำรวจชั้นดินบริเวณก่อสร้างเจดีย์บูรพาญาติวิธีประชาชนสามัคคี และได้ข้อสรุปว่าควรดำเนินการแก้ไขระบบฐานรากเดิม โดยใช้วิธีการเข็มตอกเสาเข็มแฉะ ซึ่งตอกเสาเข็มด้วยระบบ Pre-Bored คือมีการเจาะหลุมนำ ก่อนตอกเสาเข็ม ใช้เสาเข็มขนาด 52.5x52.5 ซม.

ชนิดของเสาเข็ม

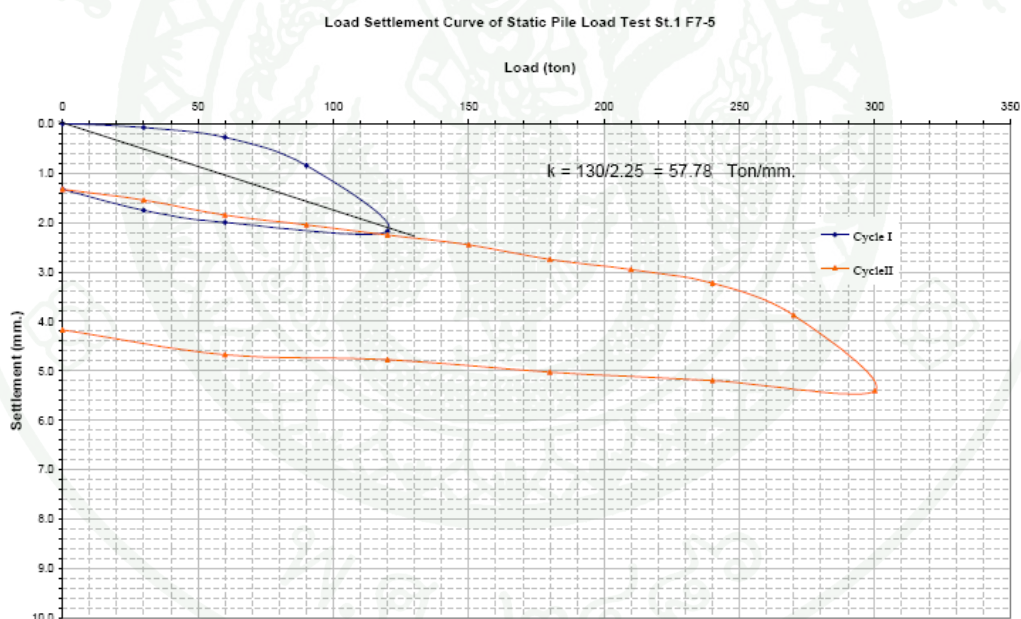
จากผลการสำรวจสภาพพื้นที่ก่อสร้างเจดีย์ ได้ออกแบบการใช้งานเสาเข็มที่ใช้ก่อสร้างในโครงการก่อสร้างนี้เป็น เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 52.5x52.5 ตาราง เซนติเมตร ความยาวของเสาเข็มที่ใช้มี 4 ขนาดความยาว คือ เสาเข็มยาว 11 เมตร จำนวน 204 ต้น, เสาเข็มยาว 18 เมตร จำนวน 98 ต้น, เสาเข็มยาว 21 เมตร จำนวน 94 ต้นและเสาเข็มยาว 24 เมตร จำนวน 52 ต้นเป็นจำนวนทั้งหมด 448 ต้น เสาเข็มที่ใช้มีการออกแบบเป็นพิเศษให้ปลายเสาเข็มมีหัวสวมเหล็ก โดยวัตถุประสงค์เพื่อที่จะสามารถตอกผ่านทะลุชั้นหินล่อยได้ และสามารถส่งปลายเสาเข็มลึกลงไปในชั้นหินดังแสดงในภาพที่ 3.17



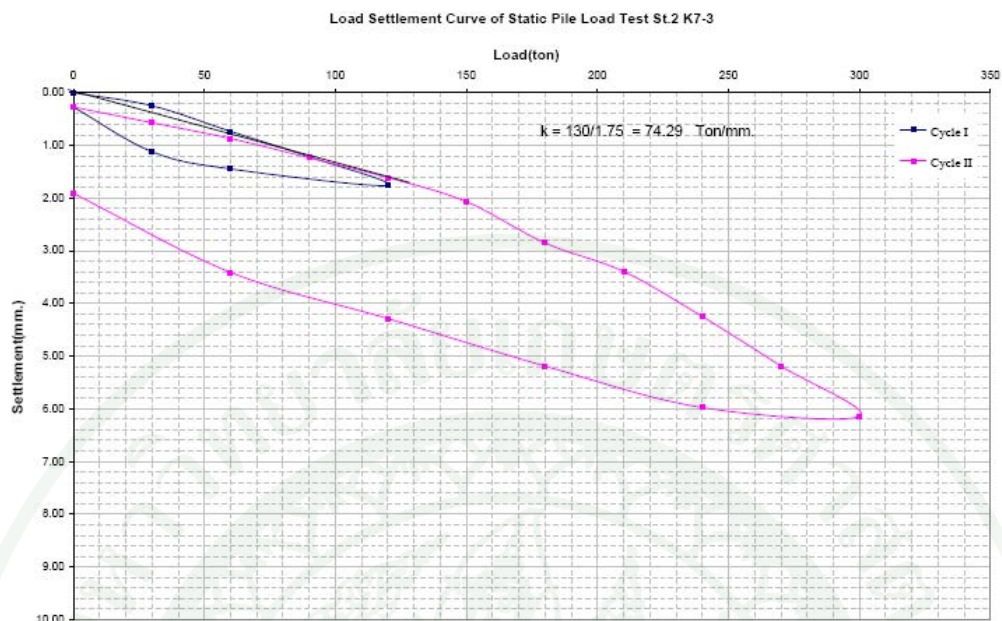
ภาพที่ 43 ลักษณะเสาเข็มและหัวสวมเหล็กของเสาเข็มที่ใช้ในโครงการ (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)

การนำผลการทดสอบเสาเข็มมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

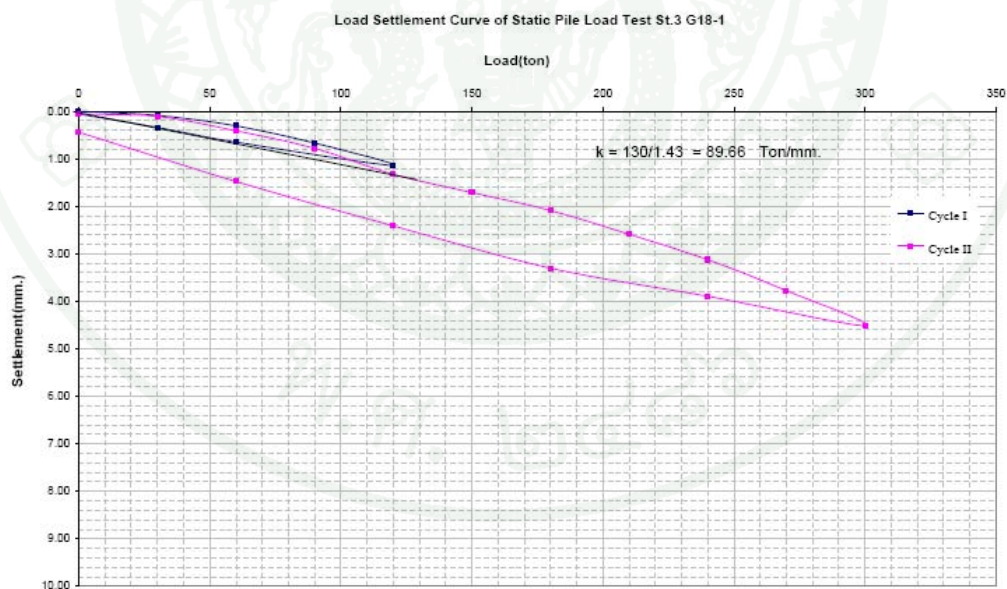
ชั้นดินของโครงสร้างอาคารเจดีย์บูรพาฐิตวิริยาประชาสามัคคีจะมีชั้นดินตามแนวลาดของภูเขา มีชั้นหินย่อยปกคลุมบนชั้นดินดานและมีชั้นดินเดิมอยู่ด้านบน เมื่อมีการปรับหน้าดินเพื่อทำการก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาฐิตวิริยาประชาสามัคคีโดยการตัดหน้าดินบริเวณด้านทิศตะวันตกถึงชั้นดินดานและมีการถมดินบริเวณด้านทิศตะวันออก ดังภาพที่ 5 โดยการทรุดตัวของชั้นดินดานเมื่อมีแรงกระทำมีน้อยมากจึงพิจารณาได้ว่าไม่เกิดการทรุดตัวขณะมีแรงกระทำ ในส่วนของเสาเข็มตอกที่ใช้แทนเสาเข็มเจาะนั้นยื่นอยู่บนชั้นดินดาน ดังภาพที่ 6 ซึ่งมีการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มจำนวน 8 ต้น ที่น้ำหนัก 2.5 เท่าของแรงที่ออกแบบไว้ปรากฏว่าเสาเข็มทั้ง 8 ต้นสามารถรับน้ำหนักได้ โดยมีการทรุดตัวของเสาเข็มเมื่อเทียบกับความยาวตามตารางที่ 7 ซึ่งจะนำค่าการรับน้ำหนักต่อการทรุดตัวมาพิจารณาการทรุดตัวที่มีผลต่อโครงสร้างต่อไป



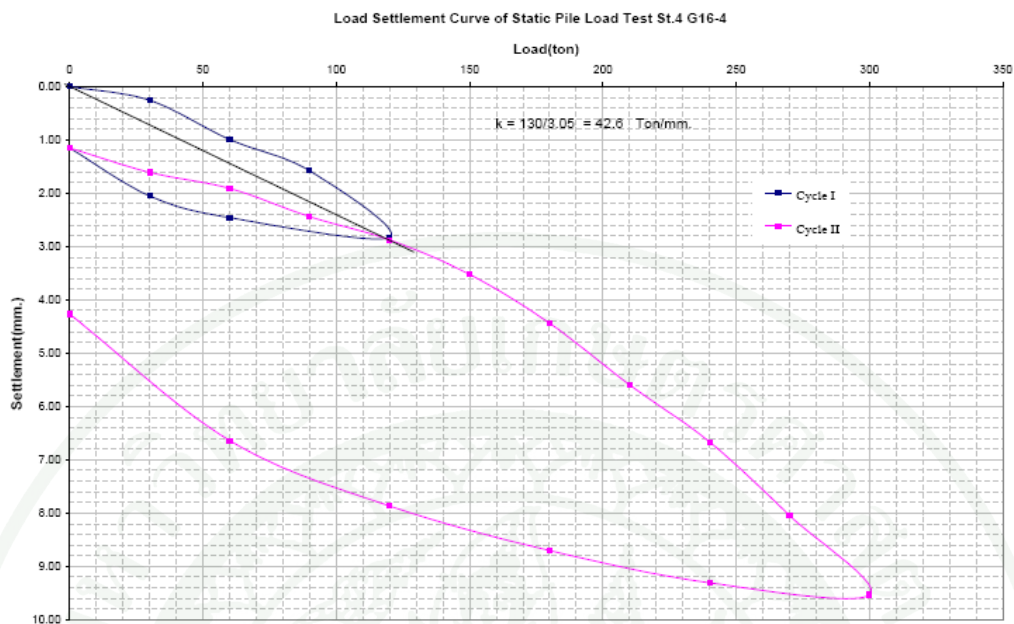
ภาพที่ 44 ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก F7-5 โครงการก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาฐิตวิริยาประชาสามัคคี (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)



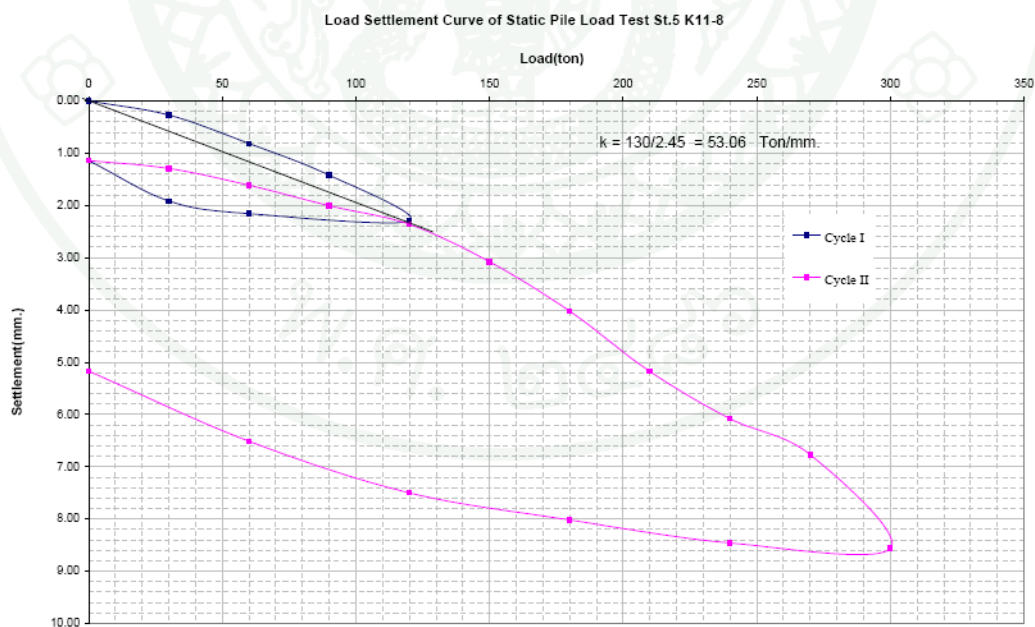
ภาพที่ 45 ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก K7-3 โครงการก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาจิตติวิทยา
ประชาสามัคคี (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)



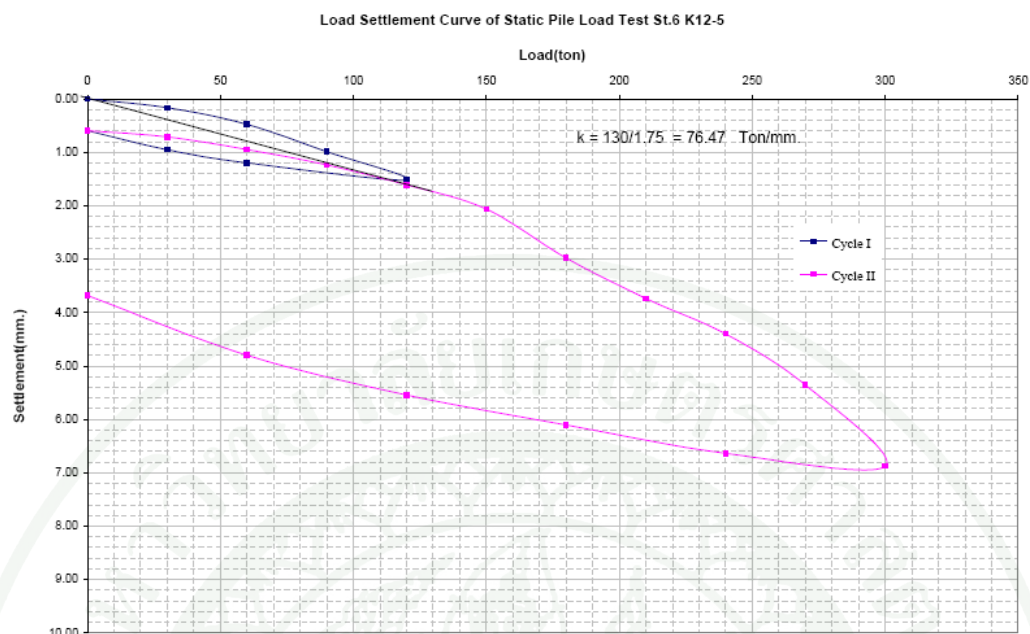
ภาพที่ 46 ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก G18-1 โครงการก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาจิตติวิทยา
ประชาสามัคคี (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)



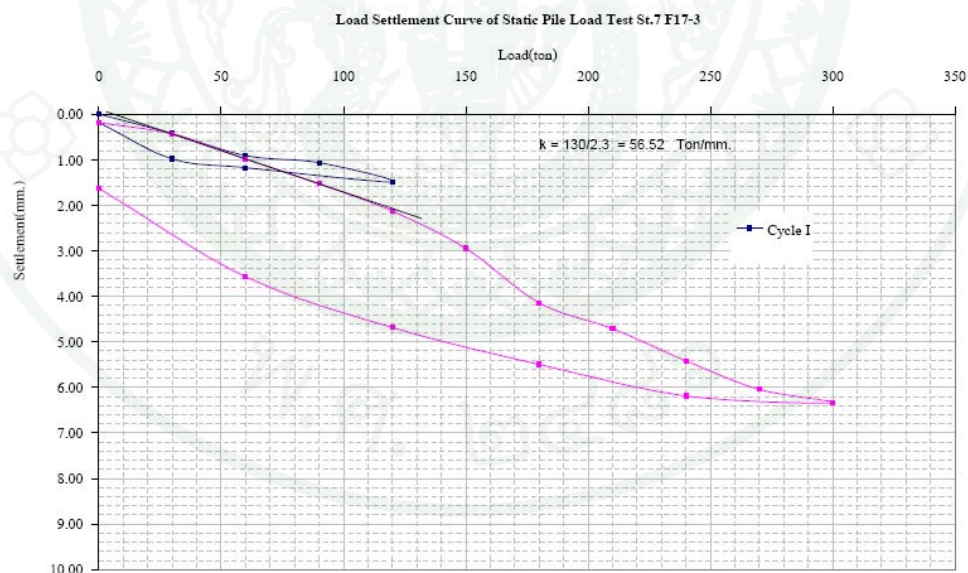
ภาพที่ 47 ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก G16-4 โครงการก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)



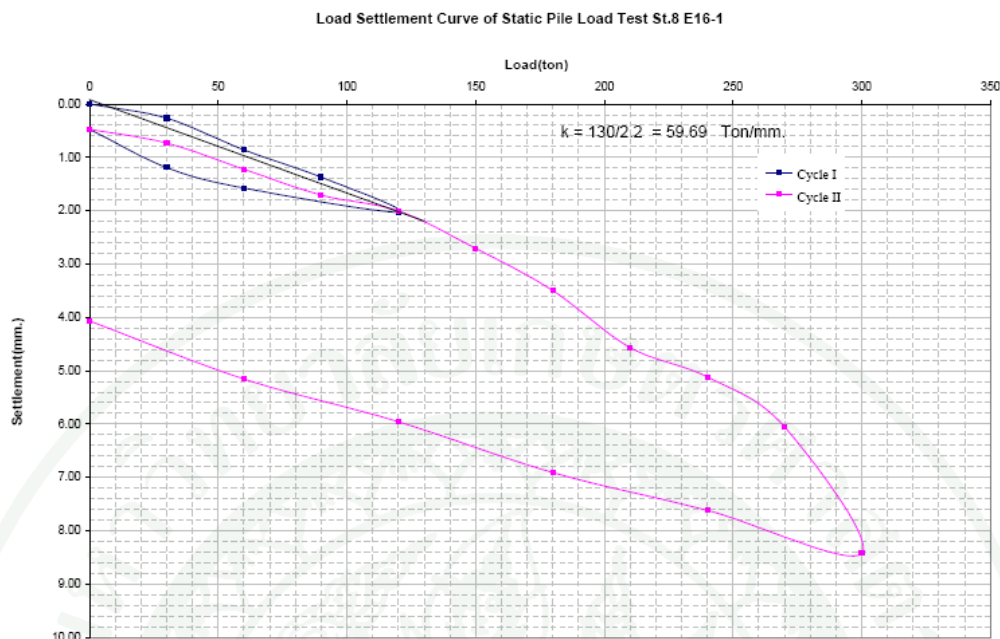
ภาพที่ 48 ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก K11-8 โครงการก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)



ภาพที่ 49 ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก K12-5 โครงการก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาวิทยุวิทยาลัยประชาสามัคคี (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)



ภาพที่ 50 ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก F17-3 โครงการก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาวิทยุวิทยาลัยประชาสามัคคี (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)



ภาพที่ 51 ภาพกราฟผลการทดสอบเสาเข็มตอก E16-1 โครงการก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาวิจิตรวิทยา
ประชาสามัคคี (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์)

การนำผลของการทดสอบเสาเข็มมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างโดยพิจารณาการทรุดตัวของเสาเข็มขณะที่มีน้ำหนักกระทำซึ่งจะได้ค่าของการทรุดตัวจากกราฟแสดงผลของน้ำหนักกระทำและการทรุดตัว โดยข้อมูลที่ได้จากศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์ ได้ทำการทดสอบเสาเข็มเสาเข็มตอกจำนวน 8 ต้น โดยมีกราฟแสดงผลการทดสอบ ดังภาพที่ 67-74

นำค่าการทรุดตัวเมื่อมีน้ำหนักกระทำ (Load Settlement Curve) มาทำการหาค่าการทรุดตัวแต่ละค่า ของความยาวเสาเข็ม โดยจะได้ค่าการทรุดตัวเมื่อมีน้ำหนักกระทำ (Load Settlement Curve) ดังตารางที่ 7 หลังจากที่ได้ค่าการทรุดตัวเมื่อมีน้ำหนักกระทำ (Load Settlement Curve) เป็นตัวแทนของเสาเข็มเดี่ยวแล้ว นำค่าที่ได้มาทำการรวมกันตามขนาดของฐานราก โดยฐานรากแต่ละขนาดจะมีจำนวนเสาเข็มต่างกัน โดย ฐานราก F1 จะมีเสาเข็มจำนวน 1 ต้น ฐานราก F2 จะมีเสาเข็มจำนวน 2 ต้น ฐานราก F4 จะมีเสาเข็มจำนวน 4 ต้น ฐานราก F6 จะมีเสาเข็มจำนวน 6 ต้น ฐานราก F12 จะมีเสาเข็มจำนวน 12 ต้น ดังตารางที่ 8 จะได้ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเมื่อมีน้ำหนักกระทำ (Load Settlement Curve) ของฐานรากแต่ละขนาด เพื่อนำค่าการทรุดตัวนี้ไป ในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างตามตำแหน่งของฐานราก ต่อไป

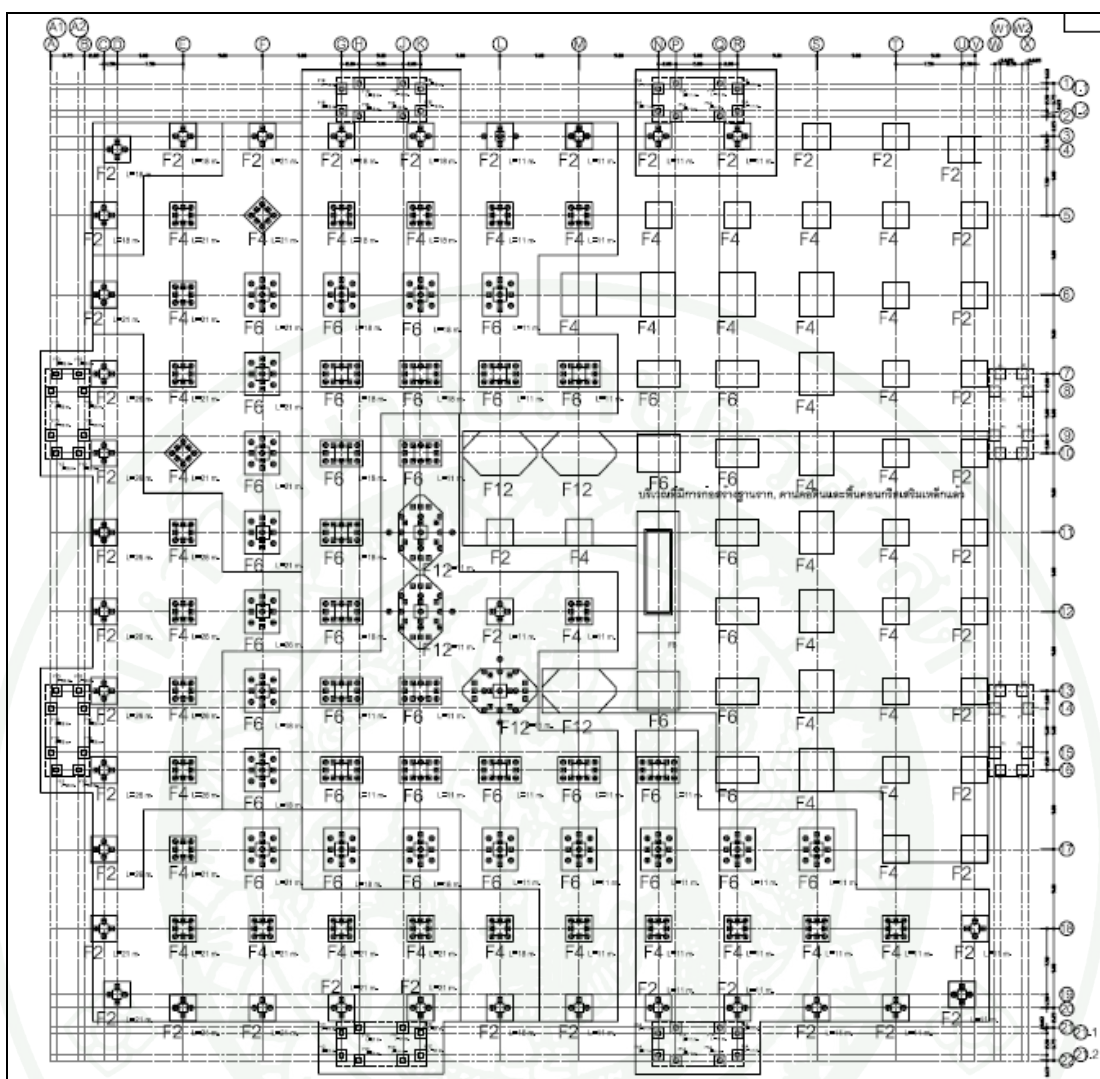
การหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม (K)

การกำหนดค่าน้ำหนักที่ต้องการทราบค่า โดยพิจารณาจากการวิเคราะห์โครงสร้างที่ไม่เกิดการทรุดตัวขององค์อาคารเจดีย์ ฯ จะได้ว่าเสาเข็ม 1 ต้นจะรับน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 120 ตันต่อต้น ดังนั้นแรงที่จะพิจารณาควรไม่ต่ำกว่า 120 ตันต่อต้น จึงเลือกใช้ค่าที่จะใช้ในการกำหนดน้ำหนักเท่ากับ 130 ตันต่อต้น หลังจากนั้นทำการกำหนดจุดที่เท่ากับ 130 ตันต่อต้น ในกราฟจากการทดสอบเสาเข็มของ โครงการก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาจุติวิริยาประชาสามัคคี จากศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ม.เกษตรศาสตร์ จะทราบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นนำค่าการทรุดตัวมาทำการหารแรงกระทำจากการทดสอบ ที่ 130 ตันต่อต้น จะได้ค่า K ที่ต้องการ

$$K = \frac{P}{\Delta}$$

P = น้ำหนักกระทำที่ 130 ตัน

Δ = ระยะการทรุดตัวจากกราฟ



ภาพที่ 52 ภาพฐานรากบริเวณก่อสร้างอาคารเจดีย์บูรพาพิทยวิद्याประชาสามัคคี

ตารางที่ 5 น้ำหนักกระทำต่อการทรุดตัวของเสาเข็มเฉลี่ยในช่วงความยาวที่ใช้ในการวิเคราะห์
โครงสร้าง

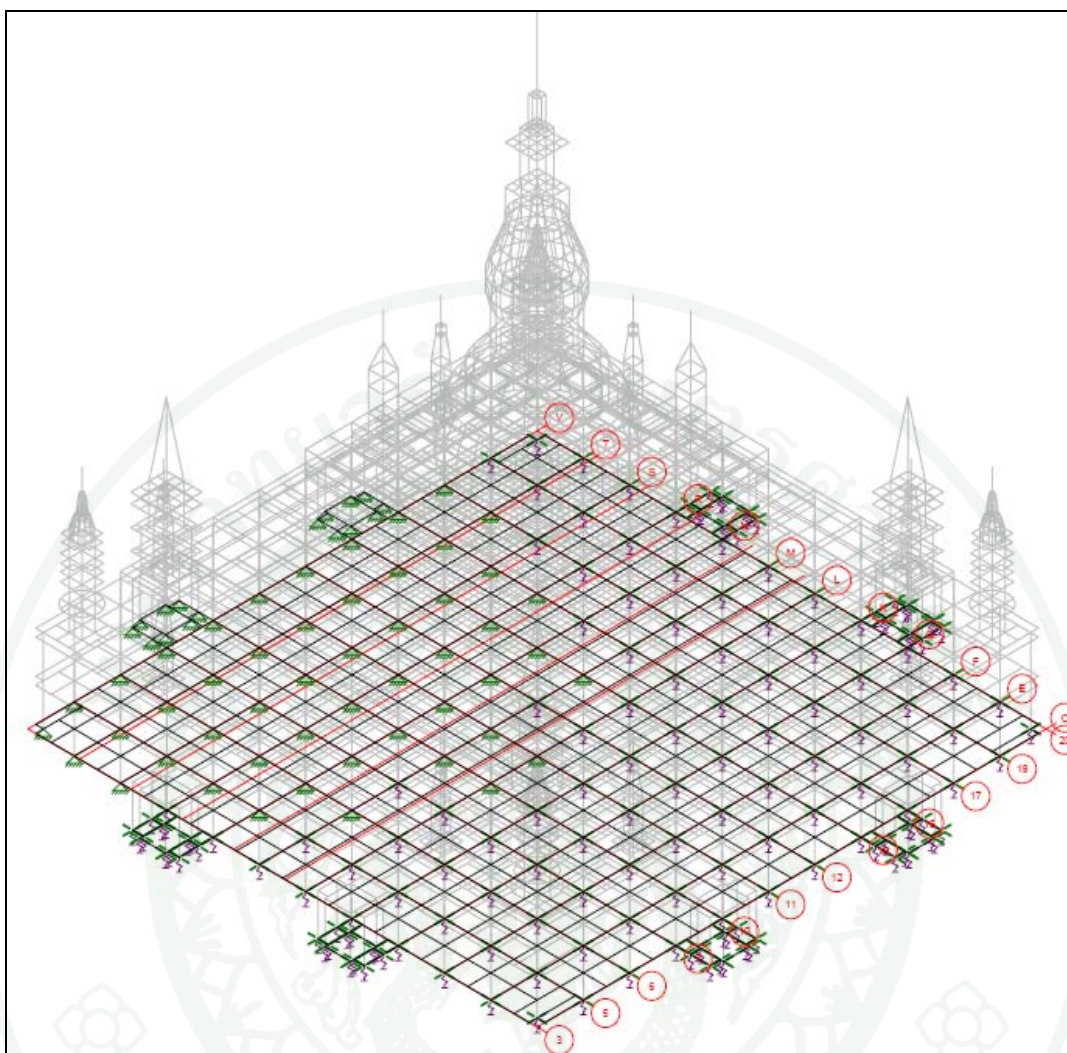
เสาเข็มความยาว	K	หน่วย
11 เมตร	57.38	Ton/ mm.
18 เมตร	74.29	Ton/ mm.
21 เมตร	67.98	Ton/ mm.
26 เมตร	59.09	Ton/ mm.

การวิเคราะห์โครงสร้างเมื่อฐานรากมีอัตราการทรุดตัวในแนวตั้งแตกต่างกัน

การวิเคราะห์โครงสร้างของอาคารเจดีย์บูรพาวิจิตรวิทยาลัยประชาสามัคคีในขั้นตอนนี้จะนำค่าน้ำหนักกระทำต่อการทรุดตัวของเสาเข็มมาใช้ในจตุรรองรับของอาคารในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง RISA-3D Version 4.5 B ซึ่งเดิมใช้เป็นจตุรรองรับแบบยึดหมุน (Pin) ซึ่งรับแรงในสามแกนคือ F_x , F_y , F_z โดยไม่มีการทรุดตัวเปลี่ยนเป็นรับแรงในสามแกนแต่มีการทรุดตัวในแนวแกน Y โดยใช้ค่าน้ำหนักกระทำต่อการทรุดตัวของเสาเข็มมาใช้ ดังภาพที่ 76 และมีค่าการทรุดตัวต่อฐานรากดังตารางที่ 5 โดยพิจารณาจำนวนเสาเข็มต่อฐานรากที่ได้ดำเนินการก่อสร้าง

ตารางที่ 6 น้ำหนักกระทำต่อการทรุดตัวของฐานรากที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

ฐานราก	น้ำหนักกระทำต่อการทรุดตัว(Ton/mm.)			
	11 เมตร	18 เมตร	21 เมตร	26 เมตร
F-1	57.38	74.26	67.98	59.09
F-2	114.77	148.57	135.97	118.18
F-4	229.54	297.14	271.94	236.36
F-6	344.31	445.71	407.91	354.55
F-12	688.61			



ภาพที่ 53 ภาพจากรองรับที่มีการทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักกระทำของอาคารเจดีย์บูรพาจุฬารัตนวิริยา
ประชาสามัคคีที่ใช้ในการวิเคราะห์

4. ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงของโครงสร้าง แบบจำลองขนาดใหญ่
ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กบนฐานรากที่มีการทรุดตัวใกล้เคียงกันและฐานรากที่มี
การทรุดตัวแตกต่างกัน

นำผลการวิเคราะห์ ทั้งในกรณีที่ไม่เกิดการทรุดตัวและในกรณีที่เกิดการทรุดตัวมาทำ
การเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น

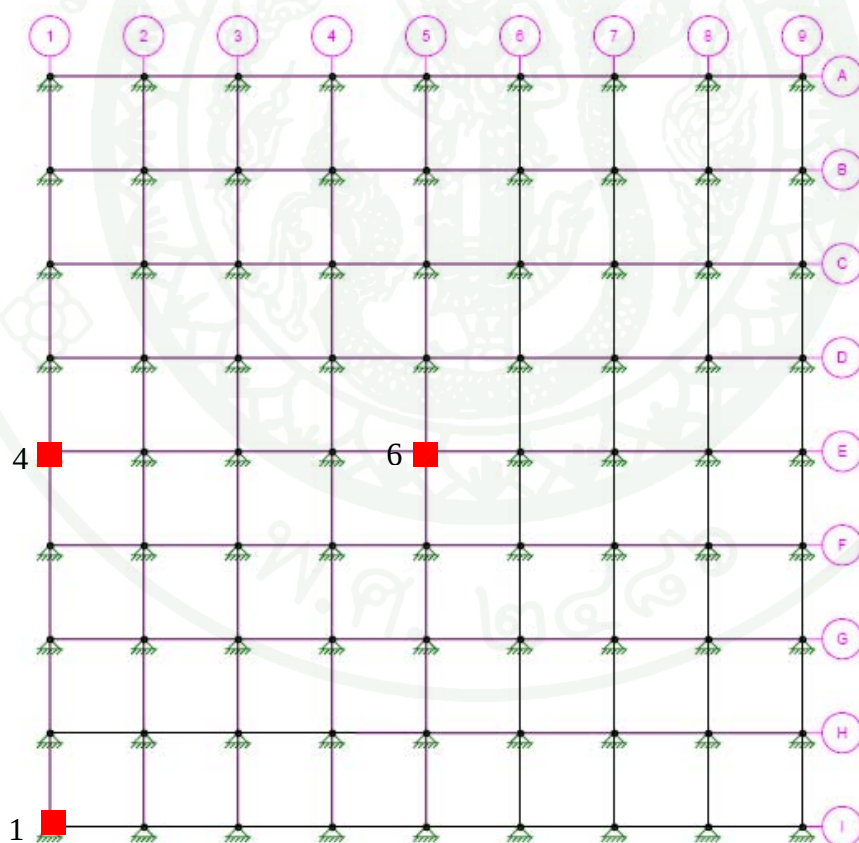
ผลและวิจารณ์

การศึกษาที่ 1

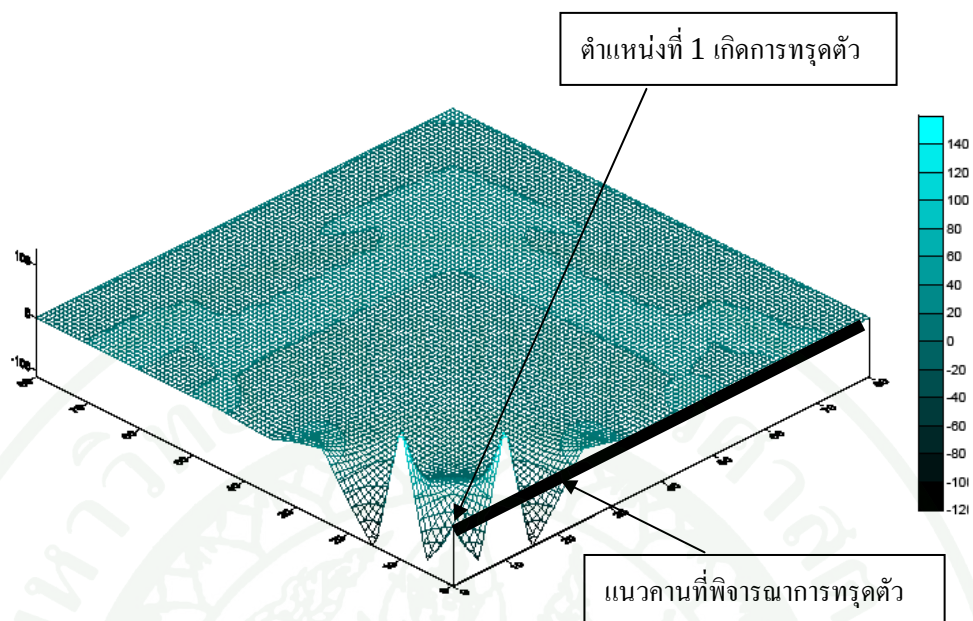
ตำแหน่งการทรุดตัว

การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1

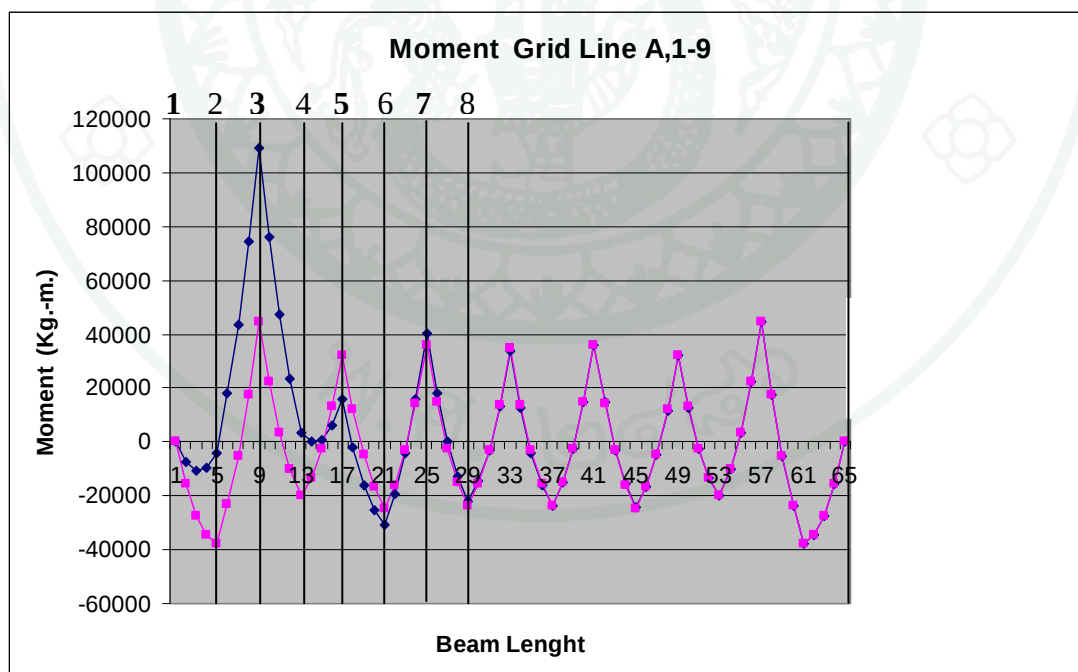
การทรุดตัวของฐานรากในตำแหน่งที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 54 และภาพที่ 55 เกิดการทรุดตัวที่ L/240 หรือที่การทรุดตัวเท่ากับ 4.167 เซนติเมตร จะมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เกิดขึ้น โดยพิจารณาจากกราฟการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ ก่อนและหลังการทรุดตัว โดยแนวนอน



ภาพที่ 54 ตำแหน่งฐานรากขององค์อาคารที่พิจารณาการทรุดตัว

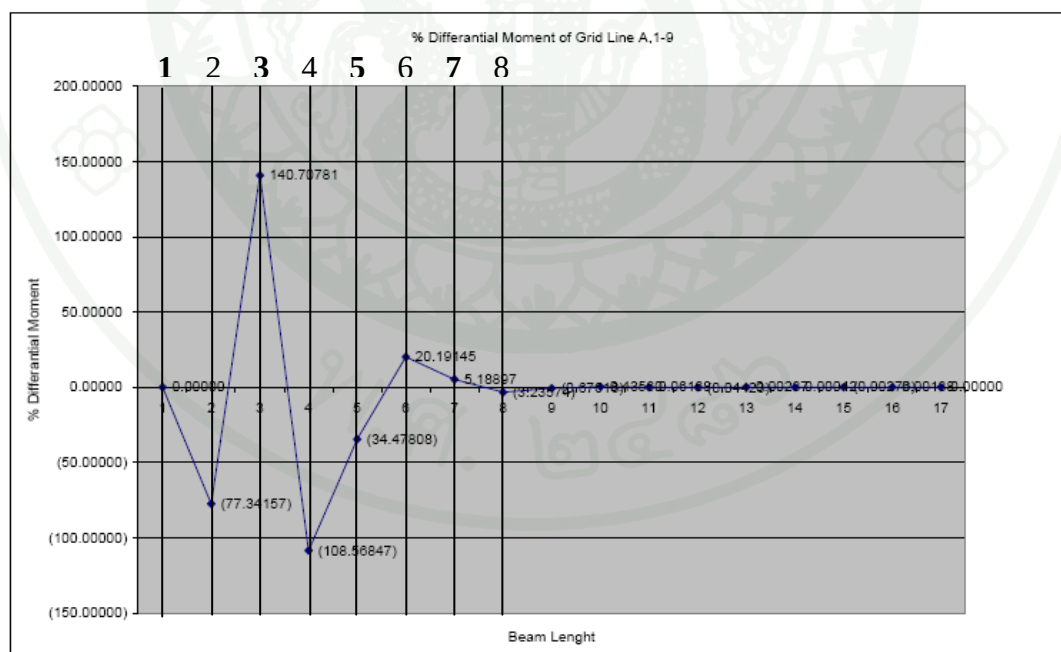


ภาพที่ 55 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการหลุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 1 ขององค์อาคาร



ภาพที่ 56 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการหลุดตัวที่ตำแหน่งที่ 1 ในคานที่พิจารณา

ที่พิจารณามีความสมมาตรกัน จึงพิจารณาแนวแกนเพียงแนวแกนเดียวดังแสดงในภาพที่ 55 จากภาพที่ 56 พบว่า จุดที่ 1 ที่เกิดการทรุดตัว ไม่เกิดการการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากจุดที่เกิดการทรุดตัวเดิมไม่มีโมเมนต์เกิดขึ้นเนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นหรือจุดปลายของคาน ถัดมาพิจารณาที่กลางคาน ซึ่งเป็นจุดที่ 2 ถัดจากจุดที่เกิดการทรุดตัวพบว่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ลดลงเนื่องจากจุดที่ 1 เกิดการทรุดตัวทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาลดลงส่งผลให้เกิดโมเมนต์ในช่วงกลางคาน จุดที่ 2 ลดลง ถัดมาพิจารณาผลกระทบที่เกิดที่จุดที่ 3 ซึ่งเป็นหัวเสาถัดจากจุดที่เกิดการทรุดตัว พบว่ามีเกิดโมเมนต์บริเวณนี้สูงมาก ซึ่งโมเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นมาจากการที่ฐานรากบริเวณจุดนี้รับน้ำหนักมากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดโมเมนต์ในคานที่จุดดังกล่าวสูงมากขึ้น จุดถัดมา จุดที่ 4 ซึ่งเป็นจุดที่มีโมเมนต์ที่เกิดขึ้นน้อยกว่าค่าโมเมนต์เดิมเนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่สูงจากจุดที่ 3 ส่งผลกระทบต่อเนื่องมา ซึ่งน้ำหนักที่กระทำให้เกิดการลดโมเมนต์จากจุดดังกล่าวคงที่ ทำให้โมเมนต์ที่จุดดังกล่าวมีค่าลดลง และเกิดการกลับทิศ ต่อมาพิจารณาจุดที่ 5 ซึ่งเป็นเสาที่ 3 นับจากจุดที่ทรุดตัว จากภาพที่ 56 จะเห็นได้ว่า โมเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลง เนื่องจากแรงปฏิกิริยาในจุดที่ 5 ลดลง ส่งผลให้เกิดโมเมนต์ลดลงในจุดที่ 6 ซึ่งเป็นช่วงกลางคานจะมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่สูงขึ้นเนื่องจากแรงปฏิกิริยาในจุดที่ 5 ลดลง และค่าโมเมนต์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไม่สูงมากนัก หลังจากจุดที่ 7 มีค่า



ภาพที่ 57 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 1

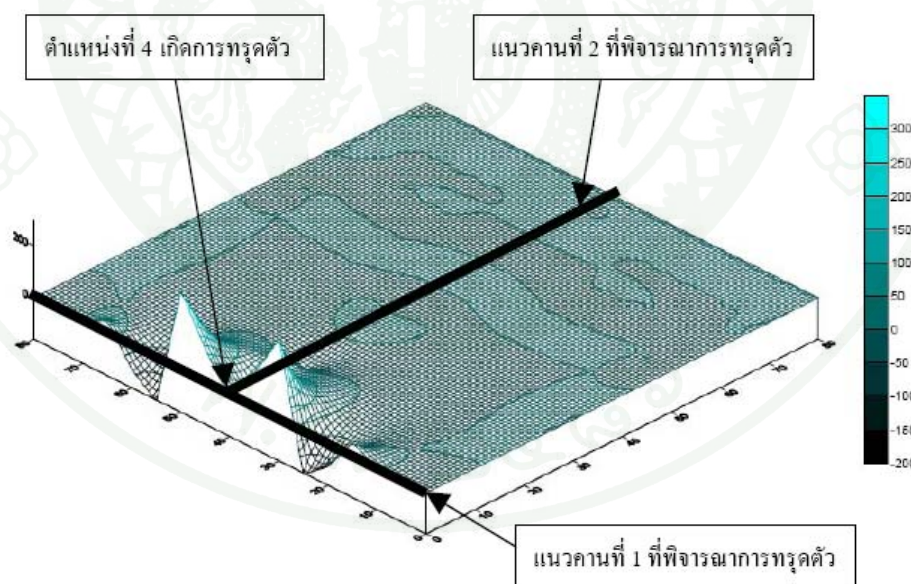
การเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนพิจารณาได้ว่าไม่เกิดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง ซึ่งค่าของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้แสดงในภาพที่ 57 ซึ่งแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการหลุดตัวของตำแหน่งที่ 1

การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการหลุดตัวตำแหน่งที่ 4

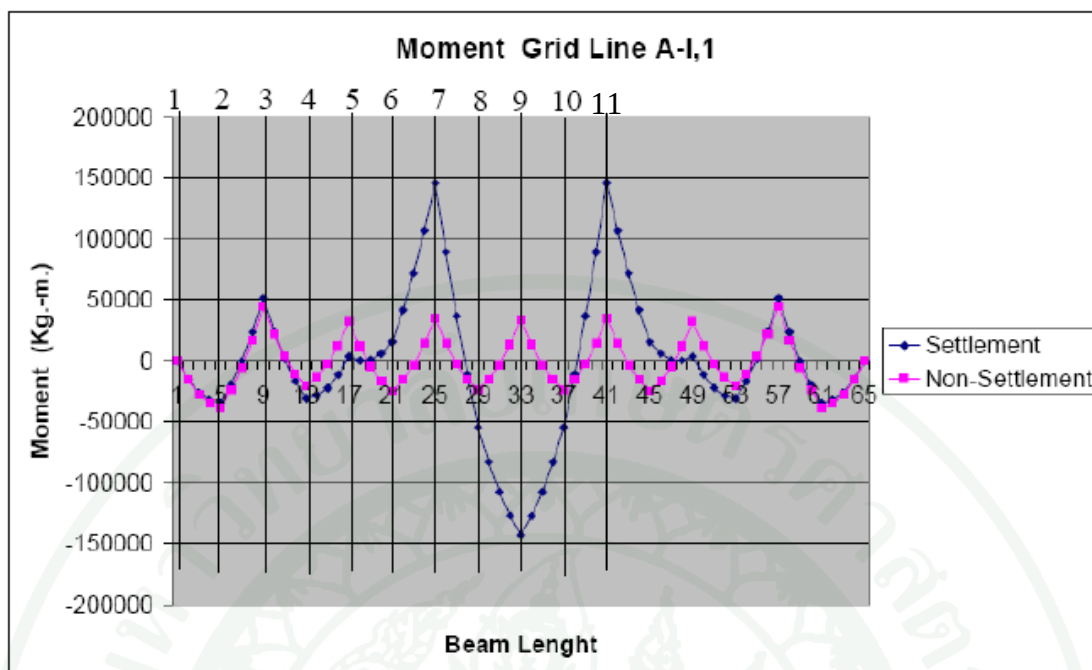
การหลุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 4 เกิดการหลุดตัว ดังแสดงในภาพที่ 54 และภาพที่ 59 โดยทำการพิจารณาคานอยู่ 2 แนว คือ แนวคานที่ 1 และแนวคานที่ 2 ดังภาพที่ 59 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ ณ จุดนี้ มีผลกระทบต่อคานในแนวที่ 1 และแนวคานที่ 2 ต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ผลกระทบที่เกิดในแนวคานที่ 1

จากการพิจารณา การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการหลุดตัวที่ตำแหน่งที่ 4 ในแนว



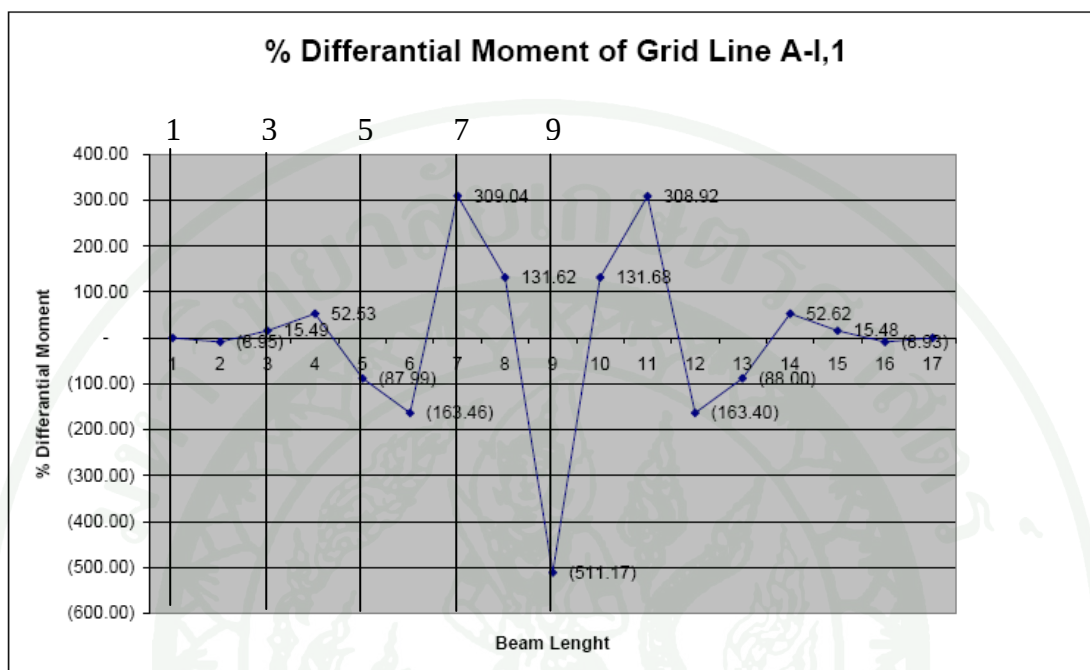
ภาพที่ 58 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการหลุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 4 ขององค์อาคาร



ภาพที่ 60 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 4 ในแนวคานที่ 1

คานที่ 1 ดังภาพที่ 60 พบว่า เมื่อจุดที่ 9 (ตำแหน่งที่ 4) เกิดการทรุดตัว แรงปฏิกิริยาที่รากฐานจะน้อยลง ส่งผลให้คานบริเวณจุดที่ 9 เปลี่ยนความยาวช่วงจากเดิม มีความยาวช่วงจากเดิม 10 เมตร เป็น 20 เมตร ซึ่งจากภาพที่ 60 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการเกิดโมเมนต์ ในคานเปรียบได้กับคานช่วงความยาว 20 เมตร มีแรงกระทำเป็นจุด (point load) เนื่องจากฐานรากที่กึ่งกลางคาน และมีจุดที่ 7 และ 10 เป็นจุดรองรับ ซึ่งจะมีโมเมนต์ที่หัวเสาสูง และการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่จุดที่ 9 จะเปลี่ยนในลักษณะการกลับทิศ คือเดิมเกิดโมเมนต์ที่หัวเสาในจุดที่ 9 กลับทิศทางเป็นโมเมนต์บวกกลางคานซึ่งมีค่าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าสูงมาก ดังแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6 ในภาพที่ 61 ถัดมาในจุดที่ 8 ค่าของโมเมนต์ที่กลับทิศยังสูงอยู่ ส่งผลให้จุดที่ 8 ซึ่งเดิมเป็นโมเมนต์บวกบริเวณกลางคานมีโมเมนต์บวกเพิ่มขึ้นจากเดิมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่ลดลงจากจุดสูงสุดของจุดที่ 9 มีค่าสูงมาก ถัดมาจุดที่ 7 เป็นตำแหน่งหัวเสาแรกถัดจากจุดที่เกิดการทรุดตัวซึ่งเมื่อจุดที่ 9 ทรุดตัวกำลังรับน้ำหนักของฐานรากในจุดที่ 9 จะน้อยลงส่งผลให้จุดที่ 7 และ 11 รับน้ำหนักมากขึ้น (การกระจายน้ำหนักจะเกิดในจุดรองรับที่ใกล้กับจุดที่ทรุดตัวโดยรอบ) ส่งผลให้เกิดโมเมนต์บริเวณหัวเสาของจุดที่ 7 มากขึ้น ถัดมาเป็นจุดที่ 6 ซึ่งเป็นจุดกลางคานซึ่งเดิมเป็นโมเมนต์บวกช่วงกลางคาน เปลี่ยนเป็นโมเมนต์ลบเนื่องจากผลของโมเมนต์ในจุดที่ 7 สูงและการลดลงของโมเมนต์จากจุดที่ 7 โดยการกระทำของแรงภายนอก (น้ำหนักตัวเอง, น้ำหนักคกแต่ง,

น้ำหนักจกร) คงที่จึงไม่สามารถลดโมเมนต์ที่สูงจากจุดที่ 7 ลงเท่าเดิมได้เนื่องจากแรงปฏิกิริยาในจุดที่ 7 มีสูงจึงส่งผลให้จุดนี้ยังคงเป็น โมเมนต์ลบบริเวณหัวเสาอยู่ ถัดมาในจุดที่ 5

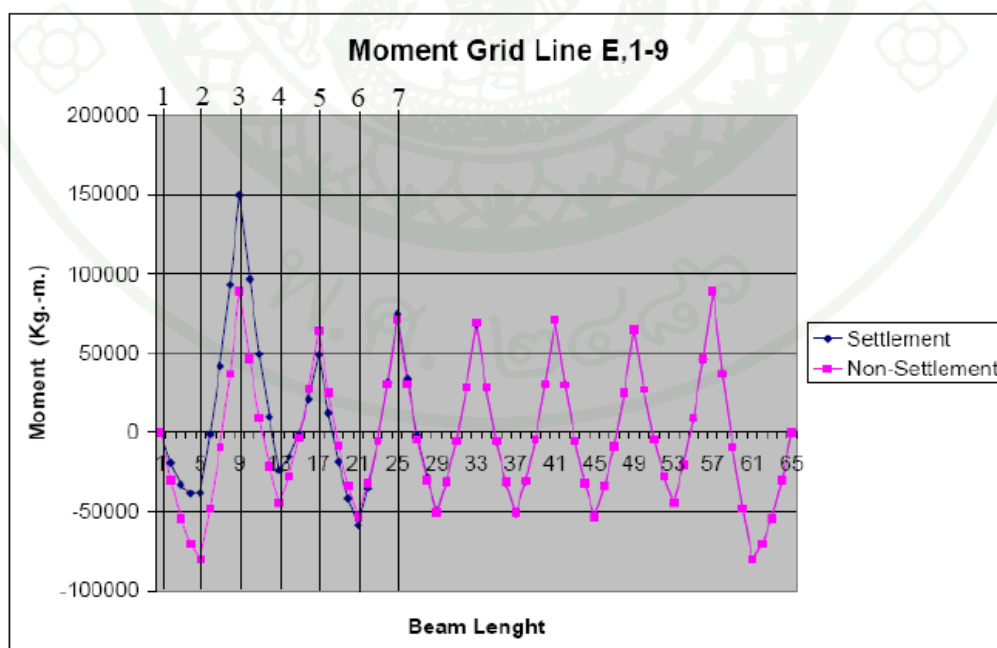


ภาพที่ 61 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 1

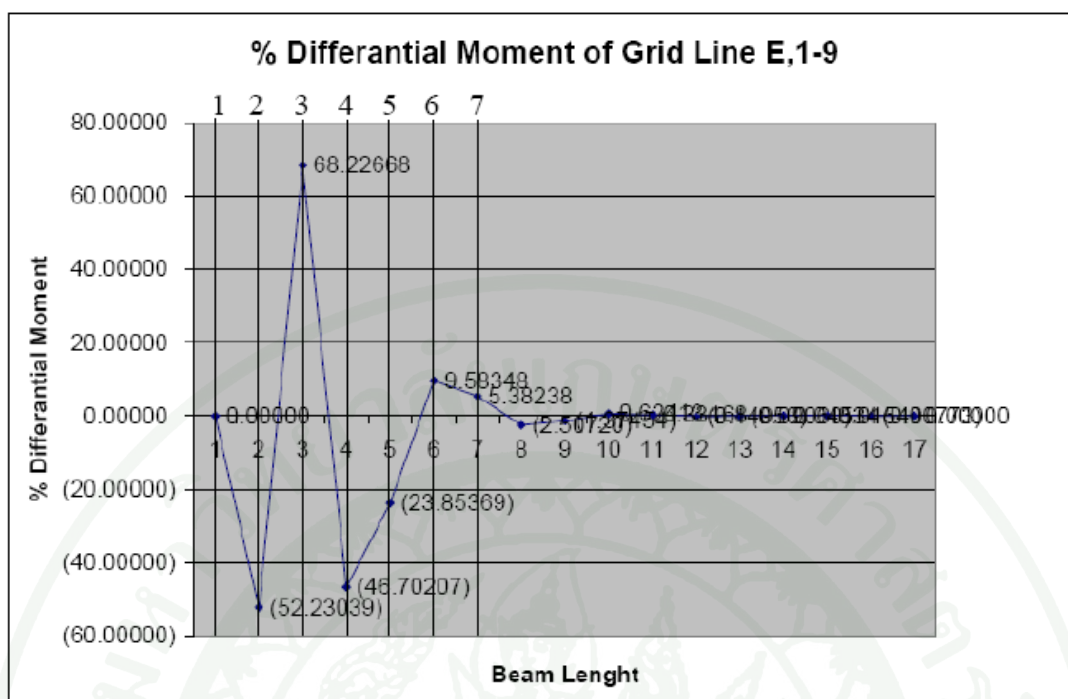
ซึ่งเป็นตำแหน่งเสาถัดจากจุดที่ 7 มีผลกระทบจากการทรุดตัวในจุดที่ 9 คือเมื่อจุดที่ 9 ทรุดตัวน้ำหนักที่จุดที่ 9 รับจะลดลงส่งผลให้เกิดการจัดขึ้นในแนวคานทำให้จุดที่ 5 รับน้ำหนักน้อยลงส่งผลให้เกิดโมเมนต์ของคานบริเวณหัวเสาน้อยลงถัดมาในจุดที่ 4 เมื่อจุดที่ 5 มีแรงปฏิกิริยาน้อยลงแต่น้ำหนักกระทำคงที่ส่งผลให้จุดที่ 4 เกิดโมเมนต์บวกสูงขึ้นเนื่องจากแรงกระทำภายนอกยังเท่าเดิมแต่แรงปฏิกิริยาในจุดที่ 5 น้อยทำให้เกิดโมเมนต์บวกมากขึ้น ถัดมาในจุดที่ 3 เมื่อแรงปฏิกิริยาในจุดที่ 5 น้อยลงส่งผลให้จุดที่ 3 รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น แต่น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นไม่มากนักซึ่งยังคงส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์บริเวณหัวเสาในจุดที่ 3 โดยค่าที่เพิ่มขึ้นไม่สูงมากนัก ถัดมาในจุดที่ 2 และจุดที่ 1 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์มีน้อยและไม่เกิดผลกระทบต่อโครงสร้าง ซึ่งค่าของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 4 ได้แสดงในภาพที่ 61 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 1

ผลกระทบที่เกิดในแนวกานที่ 2

พิจารณาการทรุดตัวที่มีผลกระทบต่อแนวกานที่ 2 ซึ่งเป็นคานในของอาคาร โดยมีการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 4 ดังแสดงในภาพที่ 59 (การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวที่ 4 ขององค์อาคาร) ดังภาพที่ 62 พบว่า จุดที่ 1 ที่เกิดการทรุดตัว ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ เนื่องจากจุดที่เกิดการทรุดตัวเดิมไม่มีโมเมนต์เกิดขึ้นเนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นหรือจุดปลายของคาน ถัดมาพิจารณาที่กลางคาน ซึ่งเป็นจุดที่ 2 ถัดจากจุดที่เกิดการทรุดตัวพบว่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ลดลงเนื่องจากจุดที่ 1 เกิดการทรุดตัวทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาลดลงส่งผลให้เกิดโมเมนต์ในช่วงกลางคาน จุดที่ 2 ลดลง ถัดมาพิจารณาผลกระทบที่เกิดที่จุดที่ 3 ซึ่งเป็นหัวเสาถัดจากจุดที่เกิดการทรุดตัว พบว่ามีเกิดโมเมนต์บริเวณนี้สูงมาก ซึ่งโมเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นมาจากการที่ฐานรากบริเวณจุดนี้รับน้ำหนักมากขึ้นส่งผลทำให้เกิดโมเมนต์ในคานที่จุดดังกล่าวสูงมากขึ้น จุดถัดมา จุดที่ 4 ซึ่งเป็นจุดที่ ซึ่งโมเมนต์ที่เกิดขึ้นน้อยกว่าค่าโมเมนต์เดิมเนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่สูงจากจุดที่ 3 ส่งผลกระทบต่อเนื่องมา ซึ่งน้ำหนักที่กระทำให้เกิดการลดโมเมนต์จากจุดดังกล่าวลงทำให้โมเมนต์ที่จุดดังกล่าวมีค่าลดลง ต่อมาพิจารณาจุดที่ 5 ซึ่งเป็นเสาที่ 3 นับจากจุดที่ทรุดตัวจากภาพที่ 62 จะเห็นได้ว่า โมเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลง ส่งผลให้เกิดแรงปฏิกิริยาในจุดที่ 5 ลดลงด้วย



ภาพที่ 62 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 4 ในแนวกานที่ 2

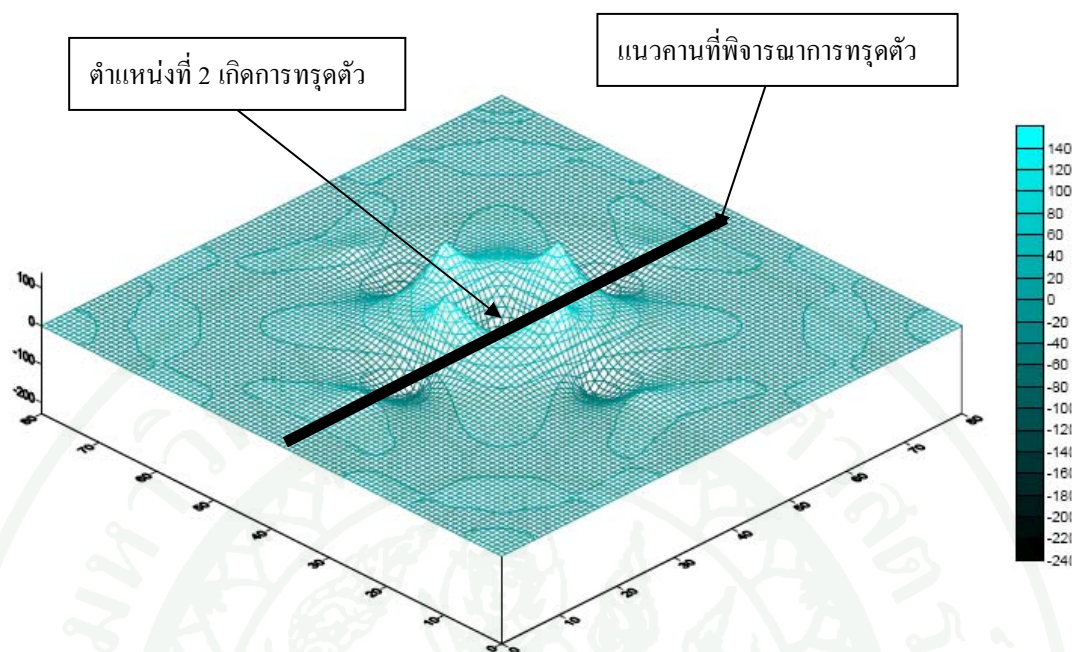


ภาพที่ 63 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 2

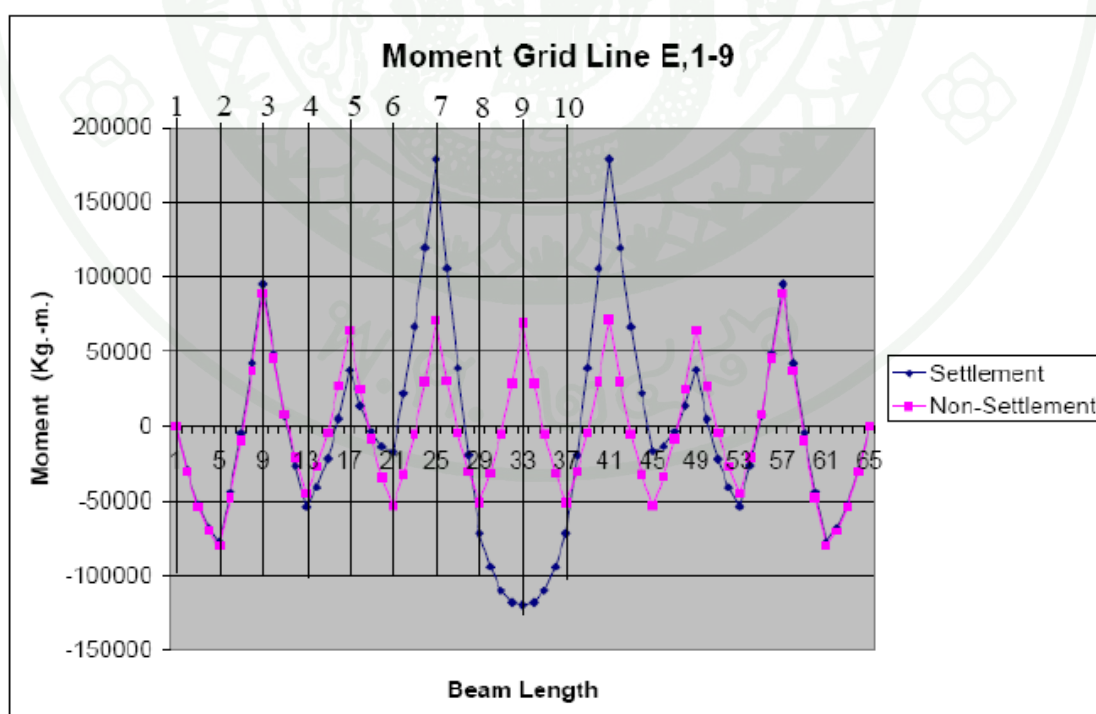
ในจุดที่ 6 ซึ่งเป็นช่วงกลางคานจะมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่สูงขึ้นเนื่องจากแรงปฏิกิริยา ในจุดที่ 5 ลดลงและค่าโมเมนต์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไม่สูงมากนัก หลังจากจุดที่ 7 มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนพิจารณาได้ว่าไม่เกิดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง ซึ่งค่าของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้แสดงในภาพที่ 63 ซึ่งแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 2

การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6

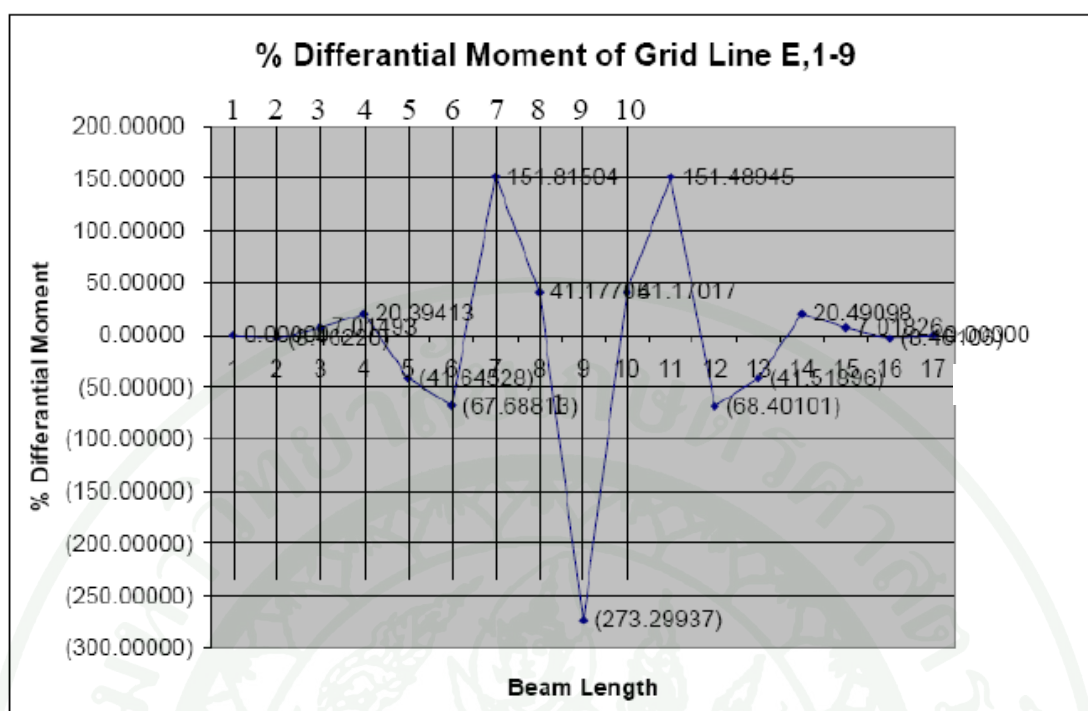
การทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 6 ดังแสดงในภาพที่ 54 และภาพที่ 64 เกิดการทรุดตัวที่ L/240 หรือ ที่การทรุดตัวเท่ากับ 4.167 เซนติเมตร จะมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เกิดขึ้น โดยพิจารณาจากกราฟการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ ก่อนและหลังการทรุดตัว โดยแนวคานที่พิจารณามีความสมมาตรกัน จึงพิจารณาแนวคานเพียงแนวคานเดียวดังแสดงในภาพที่ 64 และภาพที่ 65 (การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ในแนวคานที่พิจารณา)



ภาพที่ 64 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 6 ขององค์อาคาร



ภาพที่ 65 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ในแนวคานที่พิจารณา



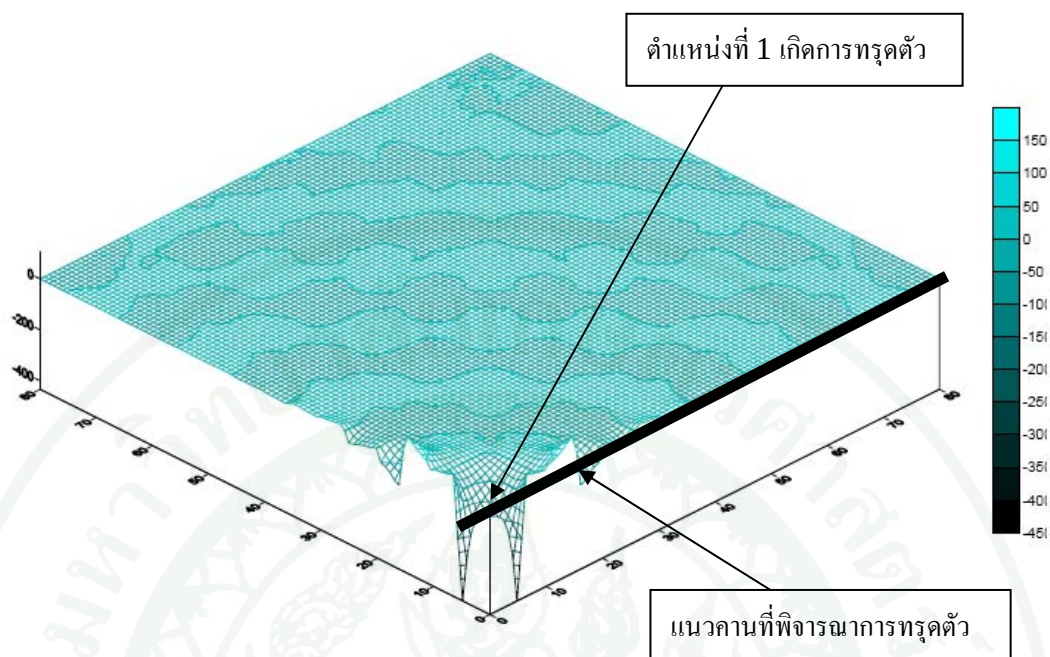
ภาพที่ 66 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6

พบว่า เมื่อจุดที่ 9 (ตำแหน่งที่ 6) เกิดการทรุดตัว แรงปฏิกิริยาที่รากฐานจะน้อยลง ส่งผลให้คานบริเวณจุดที่ 9 เปลี่ยนความยาวช่วงจากเดิม มีความยาวช่วงจากเดิม 10 เมตร เป็น 20 เมตร ซึ่งจากภาพที่ 65 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการเกิดโมเมนต์ ในคานเปรียบได้กับคานช่วงความยาว 20 เมตร มีแรงกระทำเป็นจุด (point load) เนื่องจากฐานรากที่กึ่งกลางคาน และมีจุดที่ 7 และ 10 เป็นจุดรองรับ ซึ่งจะมีโมเมนต์ที่หัวเสาสูง และการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่จุดที่ 9 จะเปลี่ยนในลักษณะการกลับทิศ คือเดิมเกิดโมเมนต์ที่หัวเสาในจุดที่ 9 กลับทิศทางเป็นโมเมนต์บวกกลางคานซึ่งมีค่าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าสูงมาก ดังแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6 ในภาพที่ 66 ถัดมาในจุดที่ 8 ค่าของโมเมนต์ที่กลับทิศยังสูงอยู่ ส่งผลให้จุดที่ 8 ซึ่งเดิมเป็นโมเมนต์บวกบริเวณกลางคานมีโมเมนต์บวกเพิ่มขึ้นจากเดิมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่ลดลงจากจุดสูงสุดของจุดที่ 9 มีค่าสูงมาก ถัดมาจุดที่ 7 เป็นตำแหน่งหัวเสาแรกถัดจากจุดที่เกิดการทรุดตัวซึ่งเมื่อจุดที่ 9 ทรุดตัวกำลังรับน้ำหนักของฐานรากในจุดที่ 9 จะน้อยลงส่งผลให้จุดที่ 7 และ 11 รับน้ำหนักมากขึ้น (การกระจายน้ำหนักจะเกิดในจุดรองรับที่ใกล้กับจุดที่ทรุดตัวโดยรอบ) ส่งผลให้เกิดโมเมนต์บริเวณหัวเสาของจุดที่ 7 มากขึ้น ถัดมาเป็นจุดที่ 6 ซึ่งเป็นจุดกลางคานซึ่งเดิมเป็นโมเมนต์บวกช่วงกลางคาน เปลี่ยนเป็นโมเมนต์ลบเนื่องจากผลของโมเมนต์ในจุดที่ 7 สูงและการลดลงของโมเมนต์จากจุดที่ 7 โดยการกระทำของแรงภายนอก (น้ำหนักตัวเอง , น้ำหนัก

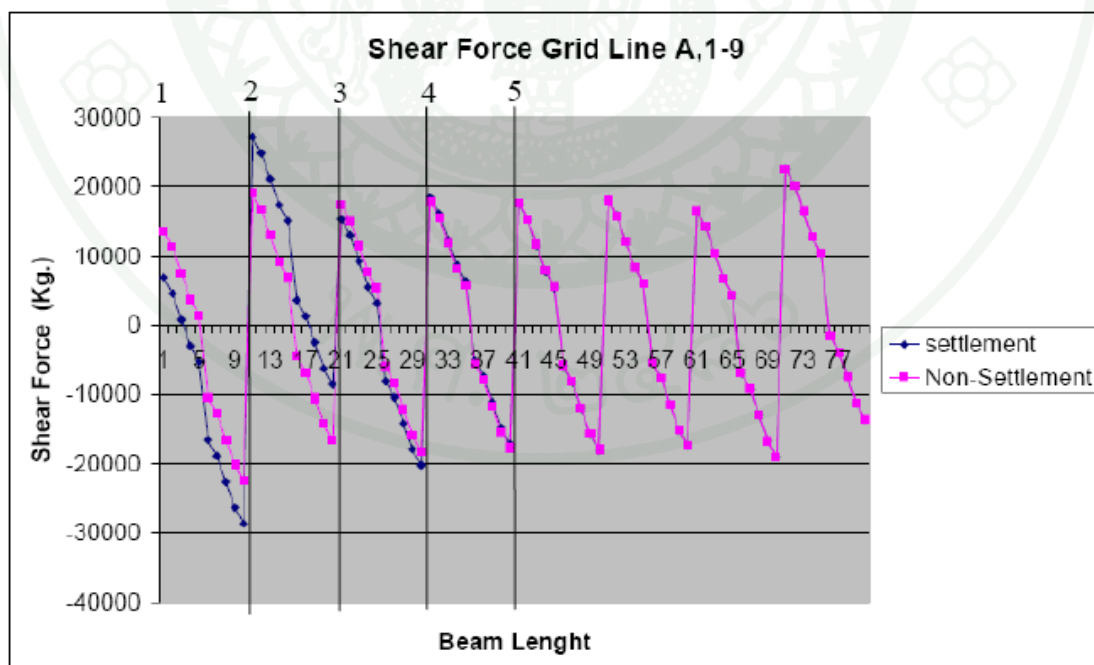
ตกแต่ง , น้ำหนักจรรยา) คงที่จึงไม่สามารถลดโมเมนต์ที่สูงจากจุดที่ 7 ลงเท่าเดิมได้เนื่องจากแรงปฏิกิริยาในจุดที่ 7 มีสูงจึงส่งผลให้จุดนี้ยังคงเป็นโมเมนต์ลบบริเวณหัวเสาอยู่ ถัดมาในจุดที่ 5 ซึ่งเป็นตำแหน่งเสาถัดจากจุดที่ 7 มีผลกระทบจากการทรุดตัวในจุดที่ 9 คือเมื่อจุดที่ 9 ทรุดตัว น้ำหนักที่จุดที่ 9 รับจะลดลงส่งผลให้เกิดการรั้งขึ้นในแนวนอนทำให้จุดที่ 5 รับน้ำหนักน้อยลง ส่งผลให้เกิดโมเมนต์ของคานบริเวณหัวเสาน้อยลงถัดมาในจุดที่ 4 เมื่อจุดที่ 5 มีแรงปฏิกิริยาน้อยลงแต่น้ำหนักกระทำคงที่ส่งผลให้จุดที่ 4 เกิดโมเมนต์บวกสูงขึ้นเนื่องจากแรงกระทำภายนอกยังเท่าเดิมแต่แรงปฏิกิริยาในจุดที่ 5 น้อยทำให้เกิดโมเมนต์บวกมากขึ้น ถัดมาในจุดที่ 3 เมื่อแรงปฏิกิริยาในจุดที่ 5 น้อยลงส่งผลให้จุดที่ 3 รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น แต่น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นไม่มากนักซึ่งยังคงส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์บริเวณหัวเสาในจุดที่ 3 โดยค่าที่เพิ่มขึ้นไม่สูงมากนัก ถัดมาในจุดที่ 2 และจุดที่ 1 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์มีน้อยและไม่เกิดผลกระทบต่อโครงสร้าง ซึ่งค่าของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6 ได้แสดงในภาพที่ 66 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6

การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1

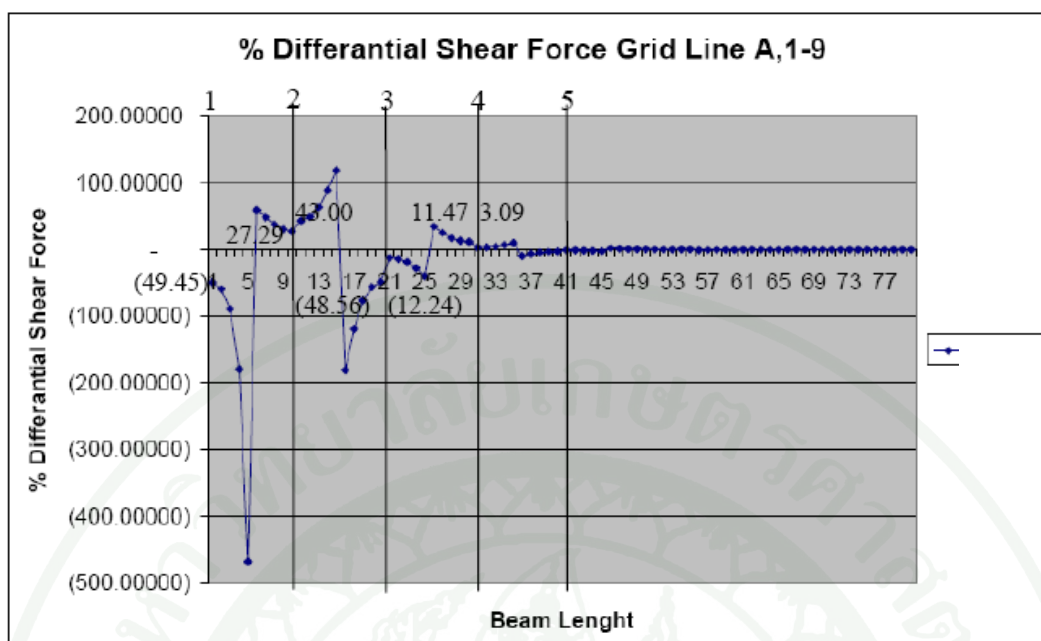
การทรุดตัวของฐานรากในตำแหน่งที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 54 เกิดการทรุดตัวที่ L/240 จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเกิดขึ้น ซึ่งแสดงในภาพที่ 67 (การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 1 ขององค์อาคาร) และในภาพที่ 68 (การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 1 ในคานที่พิจารณา) โดยแนวนอนที่พิจารณามีความสมมาตรกัน จึงพิจารณาแนวนอนเพียงแนวนอนเดียวดังแสดงในภาพที่ 67 ซึ่งพบว่าเมื่อ จุดที่ 1 เกิดการทรุดตัว (ตำแหน่งที่ 1) แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะลดลง เนื่องจากฐานรากที่ทรุดตัวรับแรงน้อยลงส่งผลให้คาน ณ จุดที่ 1 รับแรงเฉือนน้อยลง ถัดมาในจุดที่ 2 จะพิจารณา 2 ด้านคือแรงเฉือนในคานก่อนถึงจุดที่ 2 และหลังจุดที่ 2 โดยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานก่อนถึงจุดที่ 2 จะมีแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเนื่องจากฐานราก



ภาพที่ 67 การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 1 ขององค์อาคาร



ภาพที่ 68 การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 1 ในคานที่พิจารณา

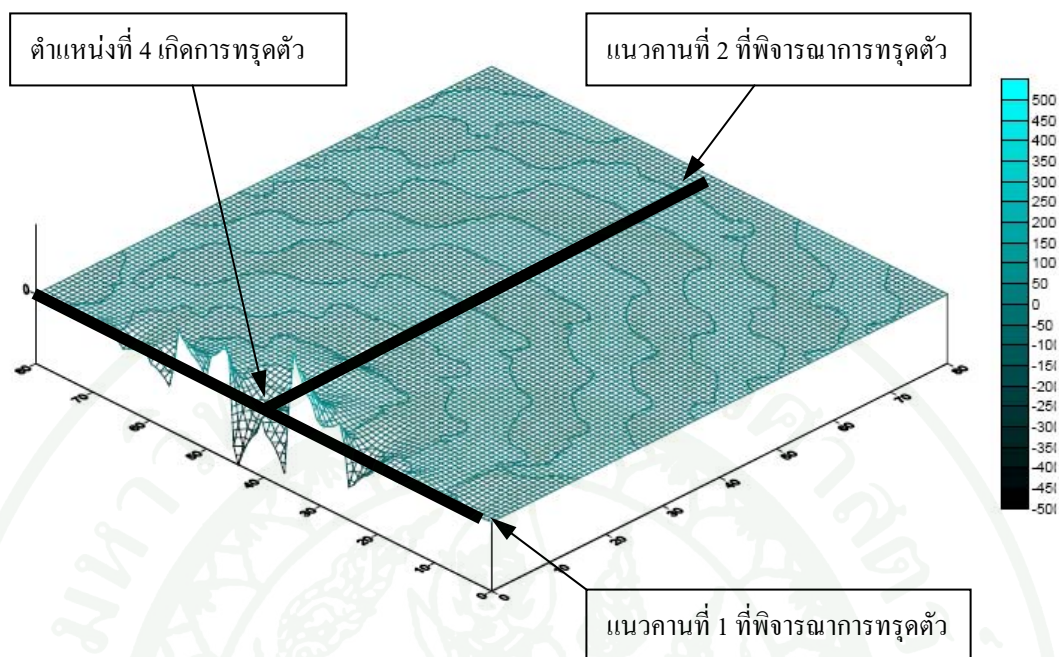


ภาพที่ 69 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 1

ถัดจากจุดที่เกิดการทรุดตัวรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีแรงเฉือนในคานเพิ่มขึ้น และหลังจุดที่ 2 ก็เป็นลักษณะเดียวกันโดยมีค่าที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ถัดมาในจุดที่ 3 เนื่องจากฐานรากในจุดนี้รับน้ำหนักน้อยลงส่งผลให้คานที่บริเวณจุดที่ 3 แรงเฉือนน้อยลงทั้งในช่วงก่อนถึงจุดที่ 3 และหลังจุดที่ 3 ถัดมาในจุดที่ 4 คานจะเกิดแรงเฉือนสูงขึ้นแต่ไม่มากเนื่องจากฐานรากรับน้ำหนักมากขึ้นส่งผลให้คานในจุดนี้รับน้ำหนักมากขึ้น ส่วนในจุดที่ 5 และจุดถัดไปมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนจึงไม่มีผลกระทบต่อคาน โดยค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนได้แสดงในภาพที่ 69 (เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 1)

การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 4

การทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 4 เกิดการทรุดตัว ดังแสดงในภาพที่ 54 และภาพที่ 70 มีการพิจารณาคานอยู่ 2 แนว คือ แนวคานที่ 1 และแนวคานที่ 2 ดังภาพที่ 71 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือน ณ จุดนี้ มีผลกระทบต่อคานในแนวที่ 1 และแนวคานที่ 2 ต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้



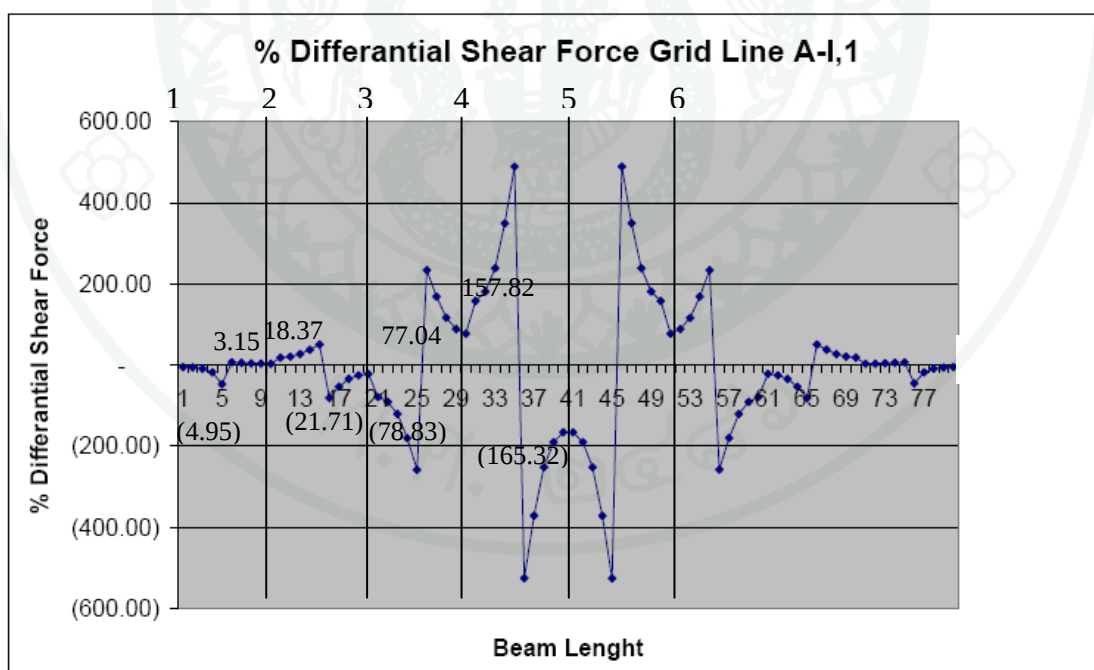
ภาพที่ 70 การเปลี่ยนแปลงแรงเหวี่ยงเนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 4 ขององค์อาคาร

ผลกระทบที่เกิดในแนวคานที่ 1

พิจารณาการทรุดตัวที่มีผลกระทบต่อแนวคานที่ 1 ซึ่งเป็นคานด้านข้างของอาคาร โดยมีการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 4 ดังแสดงในภาพที่ 70 (การเปลี่ยนแปลงแรงเหวี่ยงเนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 4 ขององค์อาคาร) การเปลี่ยนแปลงแรงเหวี่ยงเนื่องจากการทรุดตัวที่ $L/240$ จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงเหวี่ยงเกิดขึ้น ซึ่งแสดงในภาพที่ 71 (การเปรียบเทียบแรงเหวี่ยงก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 1) พบว่า ในจุดที่ 1 การเปลี่ยนแปลงแรงเหวี่ยงมีค่าน้อยลง เนื่องจากแรงปฏิกิริยาจากฐานรากบริเวณจุดที่ 1 น้อยลง ส่งผลให้เกิดแรงเหวี่ยงน้อยลง ถัดมาจุดที่ 2 แรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 2 และถัดจากจุดที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากฐานรากในจุดที่ 2 รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงเหวี่ยงเพิ่มขึ้น จุดที่ 3 แรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 3 และถัดจากจุดที่ 3 มีค่าลดลงเนื่องจาก ฐานรากในจุดที่ 3 รับน้ำหนักน้อยลง ส่งผลให้เกิดแรงเหวี่ยงน้อยลง ในจุดที่ 4 แรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 4 และถัดจากจุดที่ 4 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากฐานรากในจุดที่ 4 รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงแรงเหวี่ยงสูงมาก ถัดมาในจุดที่ 5 ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการทรุดตัว พบว่าแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณ



ภาพที่ 71 การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 1 แนวคานที่ 1

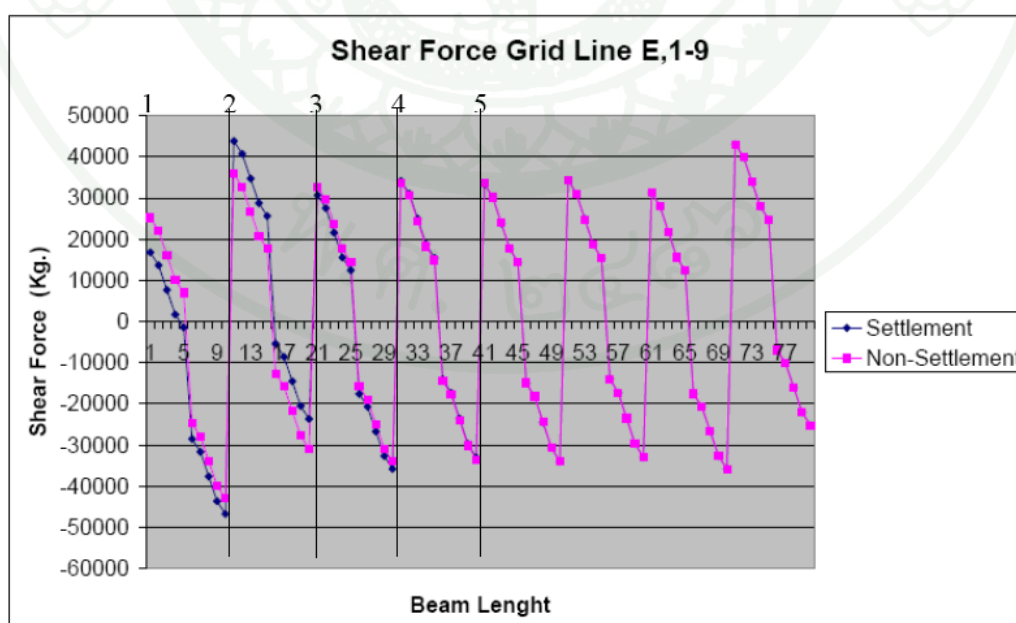


ภาพที่ 72 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 1

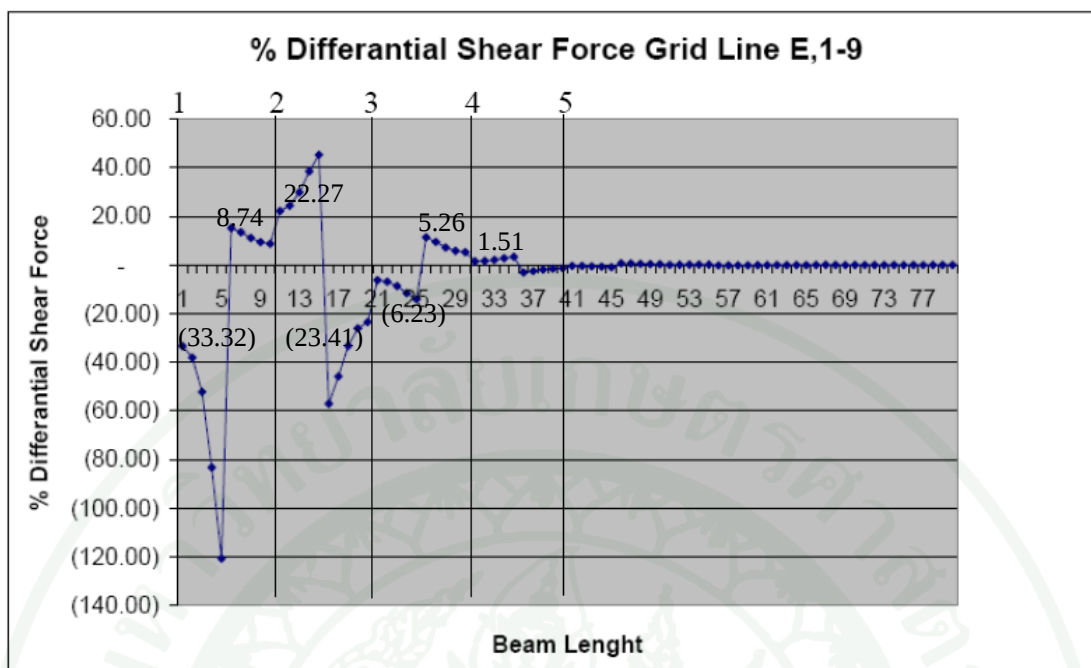
ก่อนถึงจุดที่ 5 และถัดจากจุดที่ 5 มีค่าลดลงเนื่องจาก ฐานรากในจุดที่ 5 รับน้ำหนักน้อยลง ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนน้อยลง โดยค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนที่บริเวณหัวเสาและจุดที่เกิดการทรุดตัวได้ แสดงในภาพที่ 72 (เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 1)

ผลกระทบที่เกิดในแนวคานที่ 2

พิจารณาการทรุดตัวที่มีผลกระทบต่อแนวคานที่ 2 ซึ่งเป็นคานด้านข้างของอาคาร โดยมีการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 4 ดังแสดงในภาพที่ 70 (การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 4 ขององค์อาคาร) การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวที่ $L/240$ จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเกิดขึ้น ซึ่งแสดงในภาพที่ 73 (การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 1) พบว่า เมื่อจุดที่ 1 (ตำแหน่งที่ 4) เกิดการทรุดตัว แรงปฏิกิริยาของจุดที่เกิดการทรุดตัวจะมีค่าน้อยลงส่งผลให้แรงเฉือนในคานลดลง ถัดมาจุดที่ 2 ซึ่งเป็นเสาถัดจากจุดที่เกิดการทรุดตัวจะมีแรงปฏิกิริยาสูงในตำแหน่งนี้ โดยจะส่งผลให้ส่งผลให้แรงเฉือนในคานสูงทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 2 และถัดจากจุดที่ 2 ถัดมาในจุดที่ 3 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 3 และถัดจากจุดที่ 3 มีค่าลดลงเนื่องจาก ฐานรากในจุดที่ 3 รับน้ำหนักน้อยลง ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนน้อยลง ในจุดที่ 4 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 4 และถัดจากจุดที่



ภาพที่ 73 การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 2

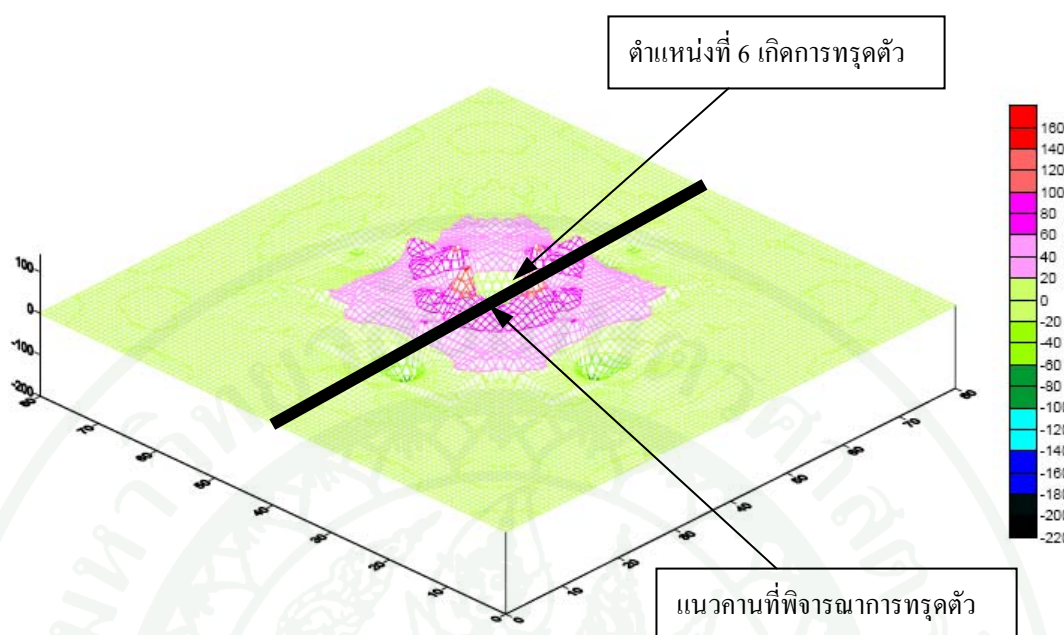


ภาพที่ 74 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 2

4 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากฐานรากในจุดที่ 4 รับน้ำหนักเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนักส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงเฉือนไม่มาก ส่วนในจุดที่ 5 และจุดถัดไปมีการเปลี่ยนแปลงน้อยไม่เกิดผลกระทบต่อโครงสร้างโดยค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนที่บริเวณหัวเสาและจุดที่เกิดการทรุดตัวได้แสดงในภาพที่ 74 (เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 4 แนวคานที่ 2)

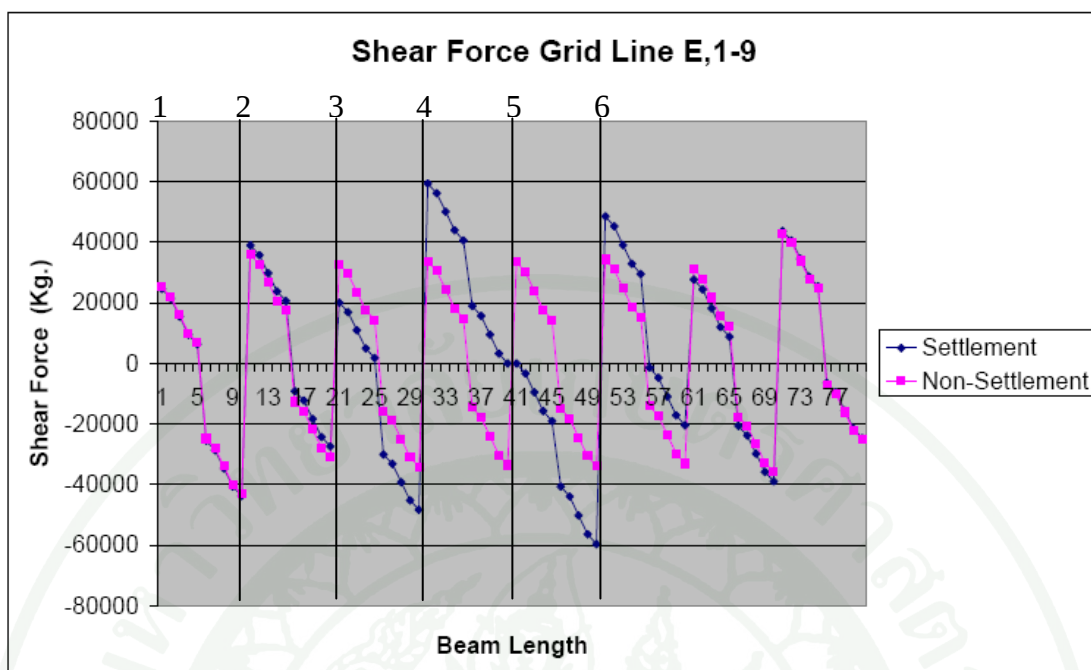
การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6

การทรุดตัวของฐานรากในตำแหน่งที่ 6 เกิดการทรุดตัว ดังแสดงในภาพที่ 54 ที่ โดยมีการทรุดตัว L/240 จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเกิดขึ้น ซึ่งแสดงในภาพที่ 75 (การเปลี่ยนแปลงแรง

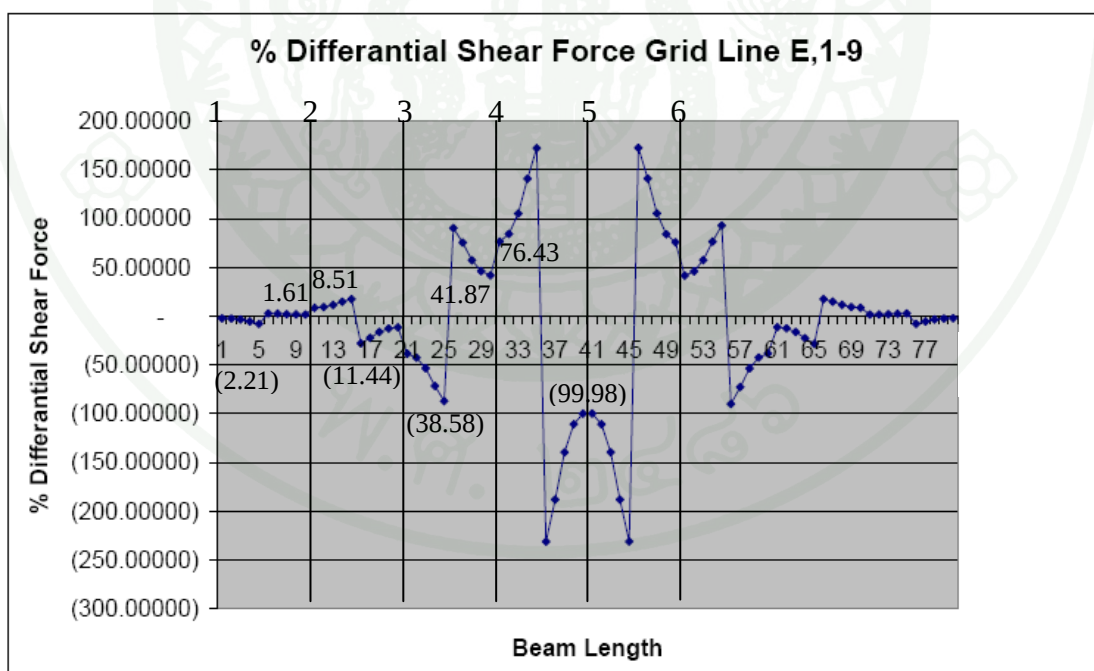


ภาพที่ 75 การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 6 ขององค์อาคาร

เฉือนเนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 1 ขององค์อาคาร) โดยแนวคานที่พิจารณามีความสมมาตร กัน จึงพิจารณาแนวคานเพียงแนวคาน เดียว ดังแสดงในภาพที่ 75 และในภาพที่ 76 (การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 1 ในคานที่พิจารณา) ซึ่งพบว่าเมื่อ จุดที่ 1 ในจุดที่ 1 การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนมีค่าน้อยลง เนื่องจากแรงปฏิกิริยาจากฐานรากบริเวณจุดที่ 1 น้อยลง ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนน้อยลง ถัดมาจุดที่ 2 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 2 และถัดจากจุดที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากฐานรากในจุดที่ 2 รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้น จุดที่ 3 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 3 และถัดจากจุดที่ 3 มีค่าลดลงเนื่องจาก ฐานรากในจุดที่ 3 รับน้ำหนักน้อยลงส่งผลให้เกิดแรงเฉือนน้อยลง ในจุดที่ 4 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 4 และถัดจากจุดที่ 4 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากฐานรากในจุดที่ 4 รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนสูงมาก ถัดมาในจุดที่ 5 ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการทรุดตัว พบว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 5 และถัดจากจุดที่ 5 มีค่าลดลงเนื่องจาก ฐานรากในจุดที่ 5 รับน้ำหนักน้อยลง ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนน้อยลง โดยค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนที่บริเวณหัวเสาและจุดที่เกิดการทรุดตัวได้แสดงในภาพที่ 77 (เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6 ที่พิจารณา)



ภาพที่ 76 การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ในกานที่พิจารณา



ภาพที่ 77 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในกานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6 ที่พิจารณา

การทรุดตัวที่มีผลต่อชั้น (Floor)

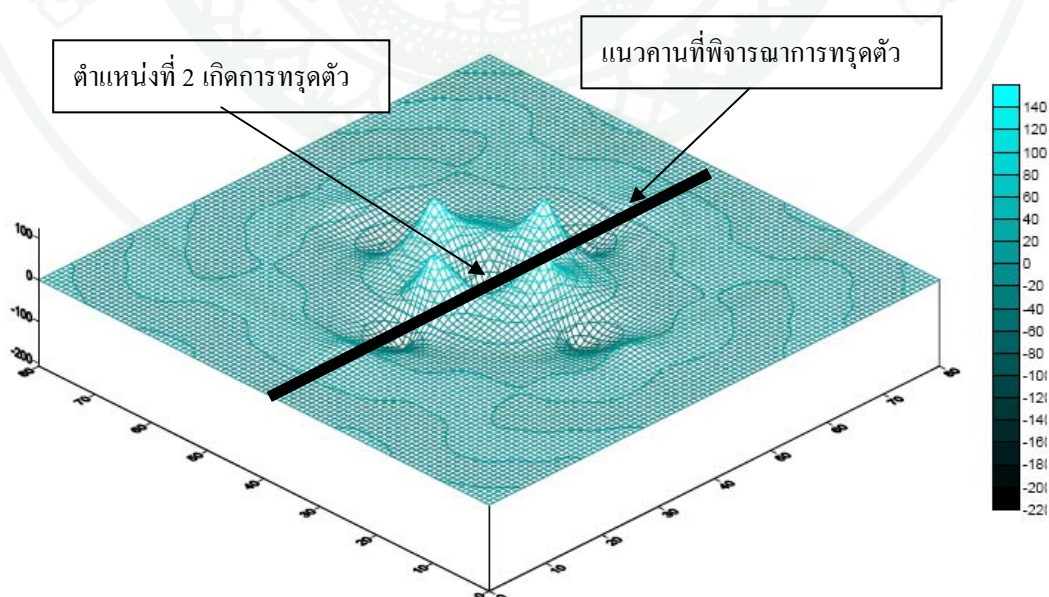
ผลของการทรุดตัวที่มีผลต่อชั้นจะแสดงผลจากการทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 6 ซึ่งแสดงในภาพที่ 54 (ตำแหน่งฐานรากขององค์อาคารที่พิจารณาการทรุดตัว) โดยจะมีผลจากการทรุดตัวดังนี้

ผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในชั้นที่ 1 ของตำแหน่งที่ 6

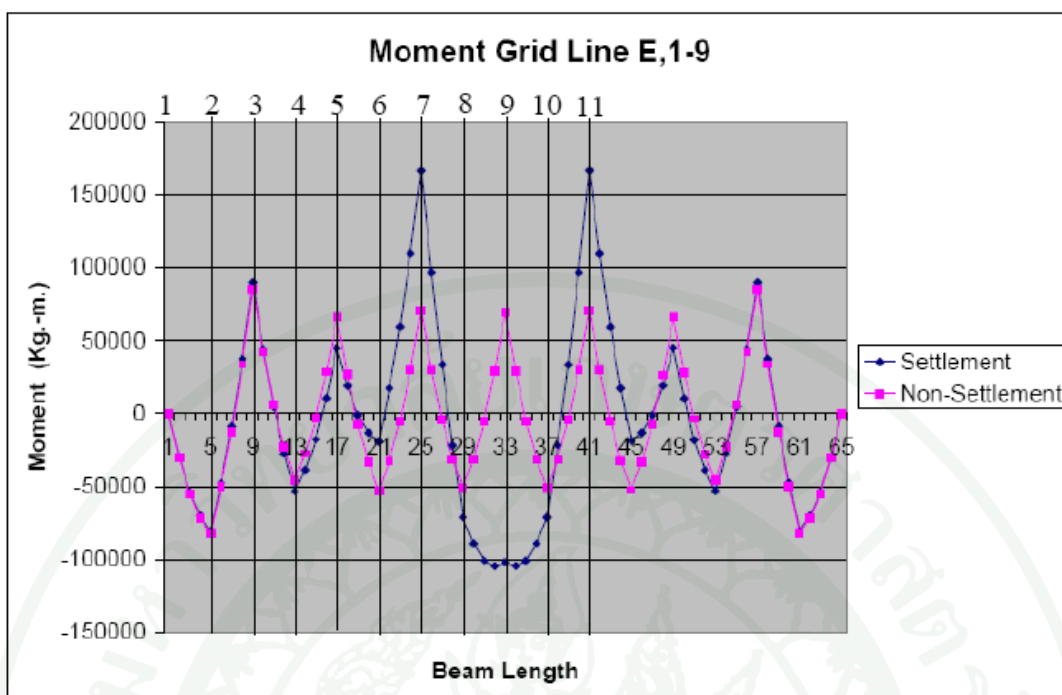
ได้แสดงในข้อที่ 1 ตำแหน่งการทรุดตัว หัวข้อการทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 6 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 (หน้าที่ 77)

ผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในชั้นที่ 2 ของตำแหน่งที่ 6

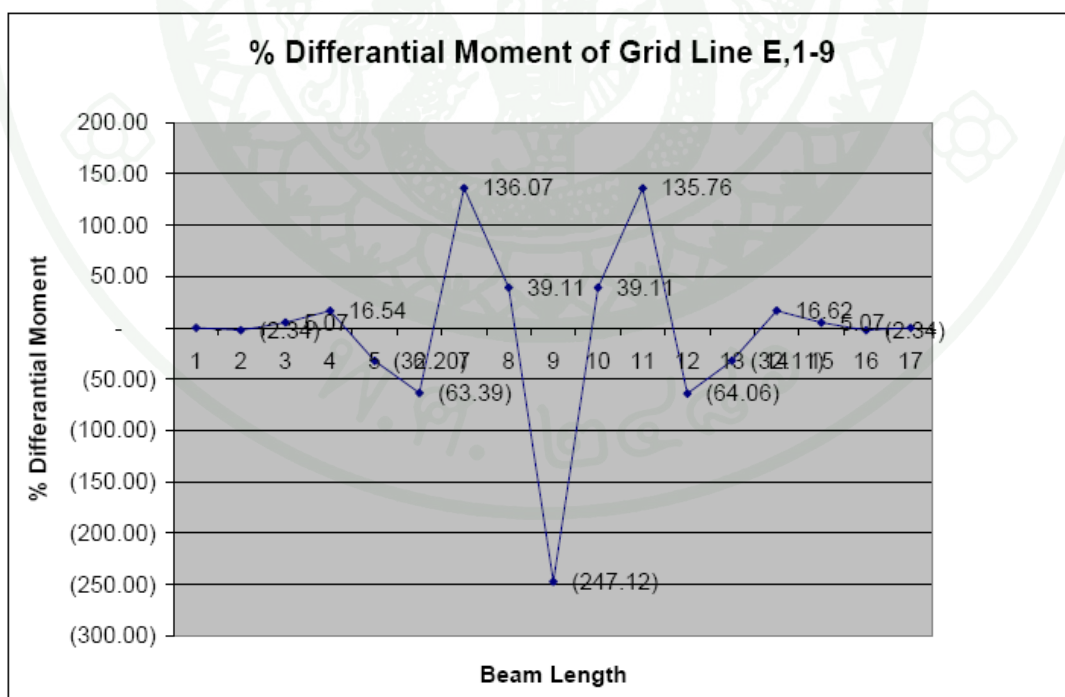
การทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 6 ดังแสดงในภาพที่ 54 และภาพที่ 78 เกิดการทรุดตัวที่ L/240 หรือ ที่การทรุดตัวเท่ากับ 4.167 เซนติเมตร จะมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เกิดขึ้น โดยพิจารณาจากกราฟการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ ก่อนและหลังการทรุดตัว โดยแนวแกนที่พิจารณามี



ภาพที่ 78 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 2 ขององค์อาคาร



ภาพที่ 79 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 2 ขององค์อาคาร

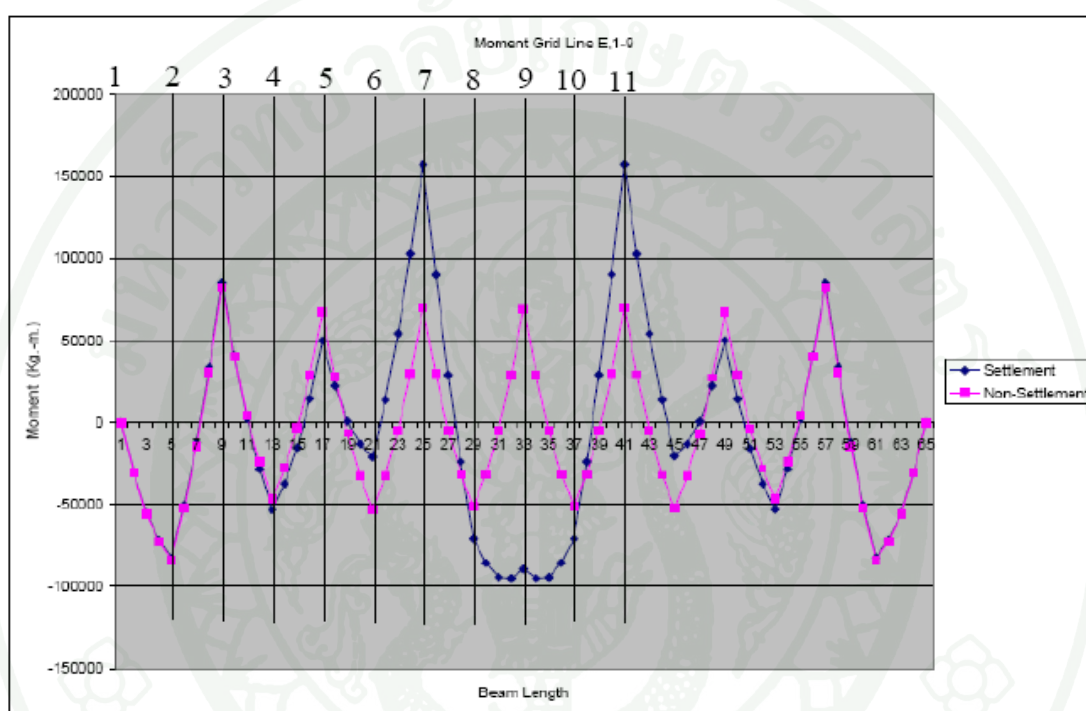


ภาพที่ 80 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 2 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6

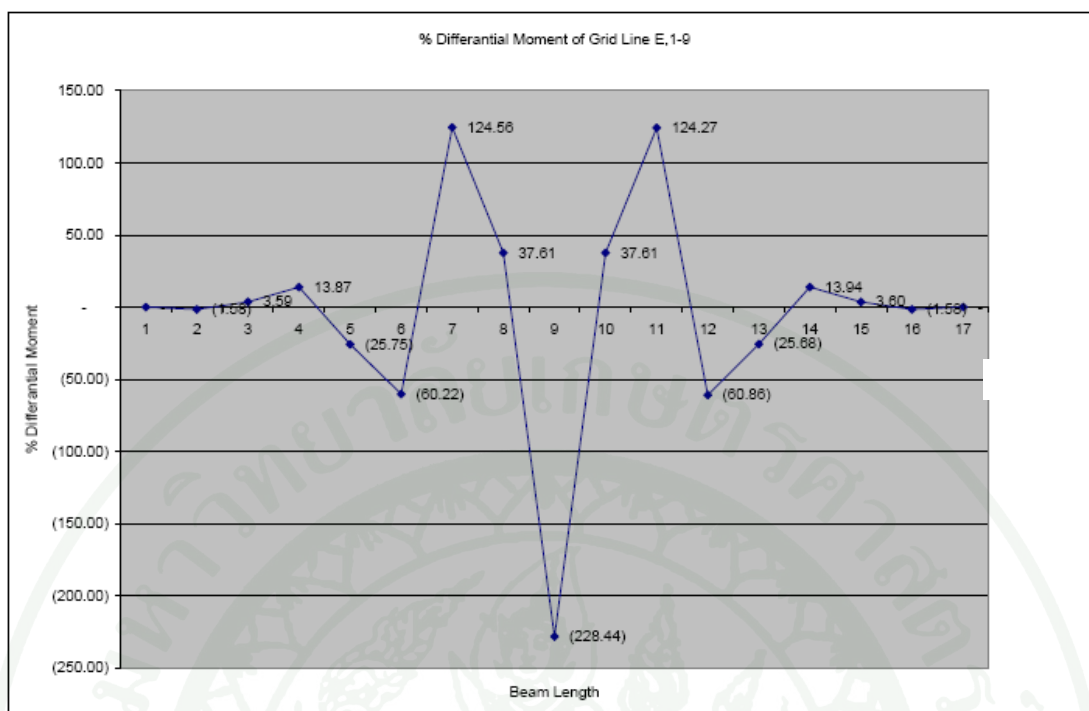
ความสมมาตรกัน จึงพิจารณาแนวคานเพียงแนวคานเดียวดังแสดงในภาพที่ 78 และภาพที่ 79 (การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ในแนวคานที่พิจารณา) พบว่าเมื่อจุดที่ 9 (ตำแหน่งที่ 6) เกิดการทรุดตัว แรงปฏิกิริยาที่รากฐานจะน้อยลง ส่งผลให้คานบริเวณจุดที่ 9 เปลี่ยนความยาวช่วงจากเดิม มีความยาวช่วงจากเดิม 10 เมตร เป็น 20 เมตร ซึ่งจากภาพที่ 79 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการเกิดโมเมนต์ ในคานเปรียบได้กับคานช่วงความยาว 20 เมตร มีแรงกระทำเป็นจุด (point load) เนื่องจากฐานรากที่กึ่งกลางคาน และมีจุดที่ 7 และ 10 เป็นจุดรองรับ ซึ่งจะมีโมเมนต์ที่หัวเสาสูง และการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่จุดที่ 9 จะเปลี่ยนในลักษณะการกลับทิศ คือเดิมเกิดโมเมนต์ที่หัวเสาในจุดที่ 9 กลับทิศทางเป็นโมเมนต์บวกกึ่งกลางคานซึ่งมีค่าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าสูงมาก ดังแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6 ในภาพที่ 80 ถัดมาในจุดที่ 8 ค่าของโมเมนต์ที่กลับทิศยังสูงอยู่ ส่งผลให้จุดที่ 8 ซึ่งเดิมเป็นโมเมนต์บวกบริเวณกึ่งกลางคานมีโมเมนต์บวกเพิ่มขึ้นจากเดิมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่ลดลงจากจุดสูงสุดของจุดที่ 9 มีค่าสูงมาก ถัดมาจุดที่ 7 เป็นตำแหน่งหัวเสาแรกถัดจากจุดที่เกิดการทรุดตัวซึ่งเมื่อจุดที่ 9 ทรุดตัวกำลังรับน้ำหนักของฐานรากในจุดที่ 9 จะน้อยลงส่งผลให้จุดที่ 7 และ 11 รับน้ำหนักมากขึ้น (การกระจายน้ำหนักจะเกิดในจุดรองรับที่ใกล้กับจุดที่ทรุดตัวโดยรอบ) ส่งผลให้เกิดโมเมนต์บริเวณหัวเสาของจุดที่ 7 มากขึ้น ถัดมาเป็นจุดที่ 6 ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางคานซึ่งเดิมเป็นโมเมนต์บวกช่วงกึ่งกลางคาน เปลี่ยนเป็นโมเมนต์ลบเนื่องจากผลของโมเมนต์ในจุดที่ 7 สูงและการลดลงของโมเมนต์จากจุดที่ 7 โดยการกระทำของแรงภายนอก (น้ำหนักตัวเอง, น้ำหนักคาน, น้ำหนักจร) คงที่จึงไม่สามารถลดโมเมนต์ที่สูงจากจุดที่ 7 ลงเท่าเดิมได้เนื่องจากแรงปฏิกิริยาในจุดที่ 7 มีสูงจึงส่งผลให้จุดนี้ยังคงเป็นโมเมนต์ลบบริเวณหัวเสาอยู่ ถัดมาในจุดที่ 5 ซึ่งเป็นตำแหน่งเสาถัดจากจุดที่ 7 มีผลกระทบจากการทรุดตัวในจุดที่ 9 คือเมื่อจุดที่ 9 ทรุดตัวน้ำหนักที่จุดที่ 9 รับจะลดลงส่งผลให้เกิดการจัดขึ้นในแนวคานทำให้จุดที่ 5 รับน้ำหนักน้อยลงส่งผลให้เกิดโมเมนต์ของคานบริเวณหัวเสาน้อยลงถัดมาในจุดที่ 4 เมื่อจุดที่ 5 มีแรงปฏิกิริยาน้อยลงแต่น้ำหนักกระทำคงที่ส่งผลให้จุดที่ 4 เกิดโมเมนต์บวกสูงขึ้นเนื่องจากแรงกระทำภายนอกยังเท่าเดิมแต่แรงปฏิกิริยาในจุดที่ 5 น้อยทำให้เกิดโมเมนต์บวกมากขึ้น ถัดมาในจุดที่ 3 เมื่อแรงปฏิกิริยาในจุดที่ 5 น้อยลงส่งผลให้จุดที่ 3 รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น แต่น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นไม่มากนักซึ่งยังคงส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์บริเวณหัวเสาในจุดที่ 3 โดยค่าที่เพิ่มขึ้นไม่สูงมากนัก ถัดมาในจุดที่ 2 และจุดที่ 1 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์มีน้อยและไม่เกิดผลกระทบต่อโครงสร้าง ซึ่งค่าของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานเนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 2 ได้แสดงในภาพที่ 80

ผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในชั้นที่ 3 ของตำแหน่งที่ 6

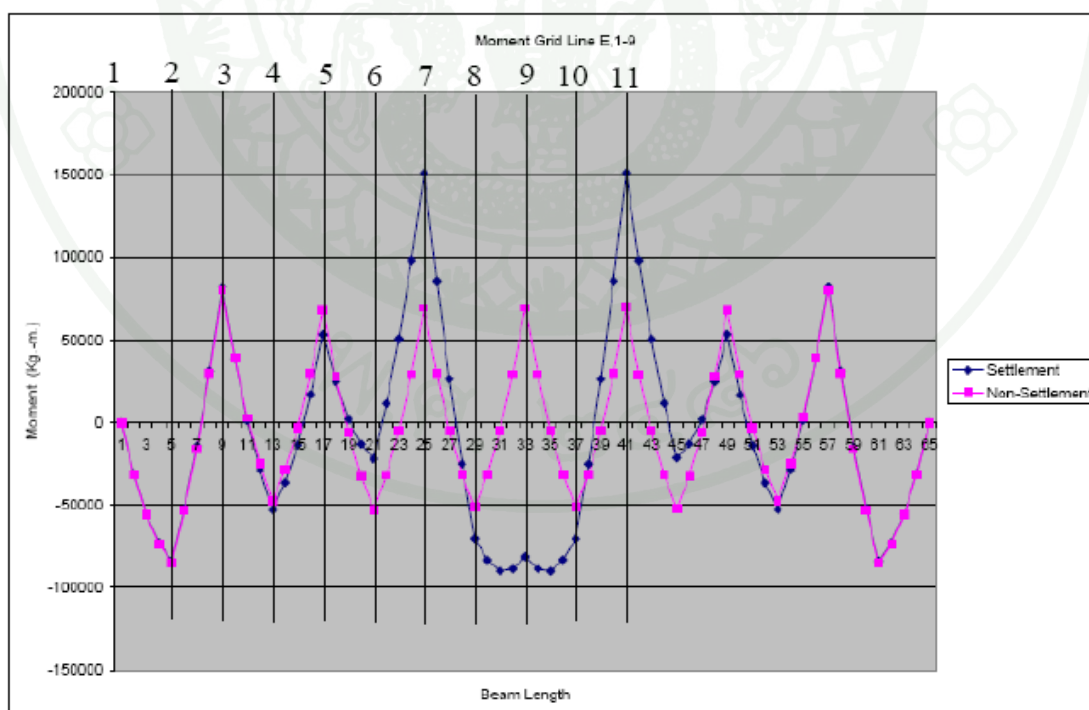
ผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในชั้นที่ 3 ของตำแหน่งที่ 6 จะเกิดพฤติกรรมในลักษณะเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จะแตกต่างกัน โดย ได้แสดงภาพที่ 81 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 3 ขององค์อาคาร และภาพที่ 82 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 3 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6



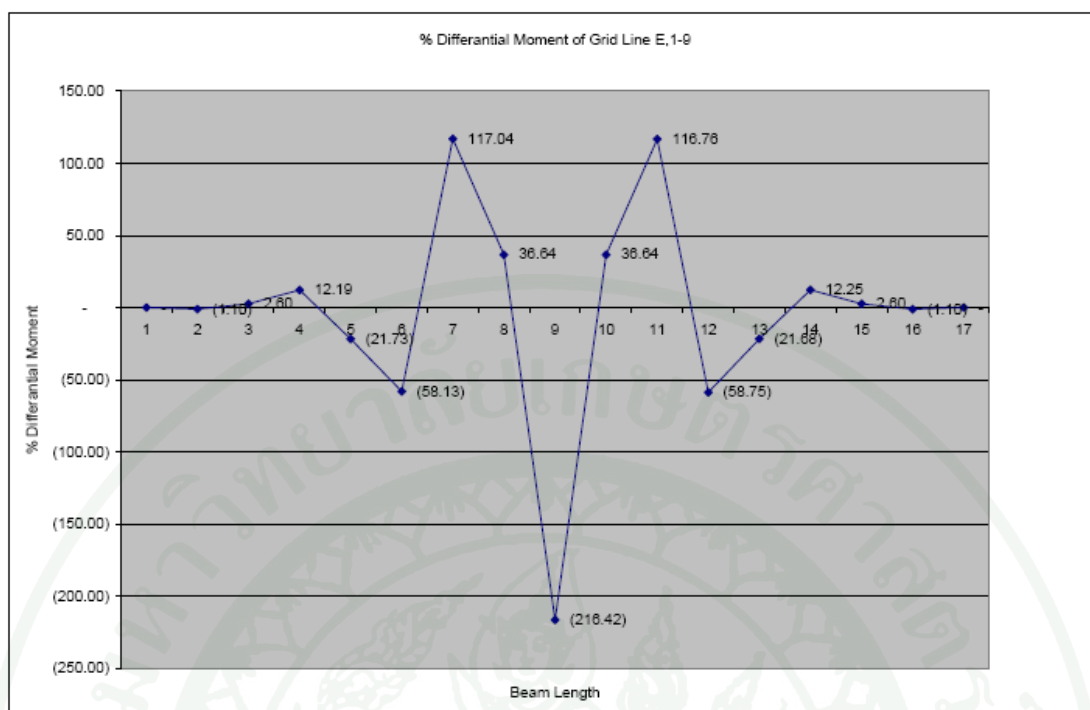
ภาพที่ 81 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 3 ขององค์อาคาร



ภาพที่ 82 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 3 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6



ภาพที่ 83 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 4 ขององค์อาคาร



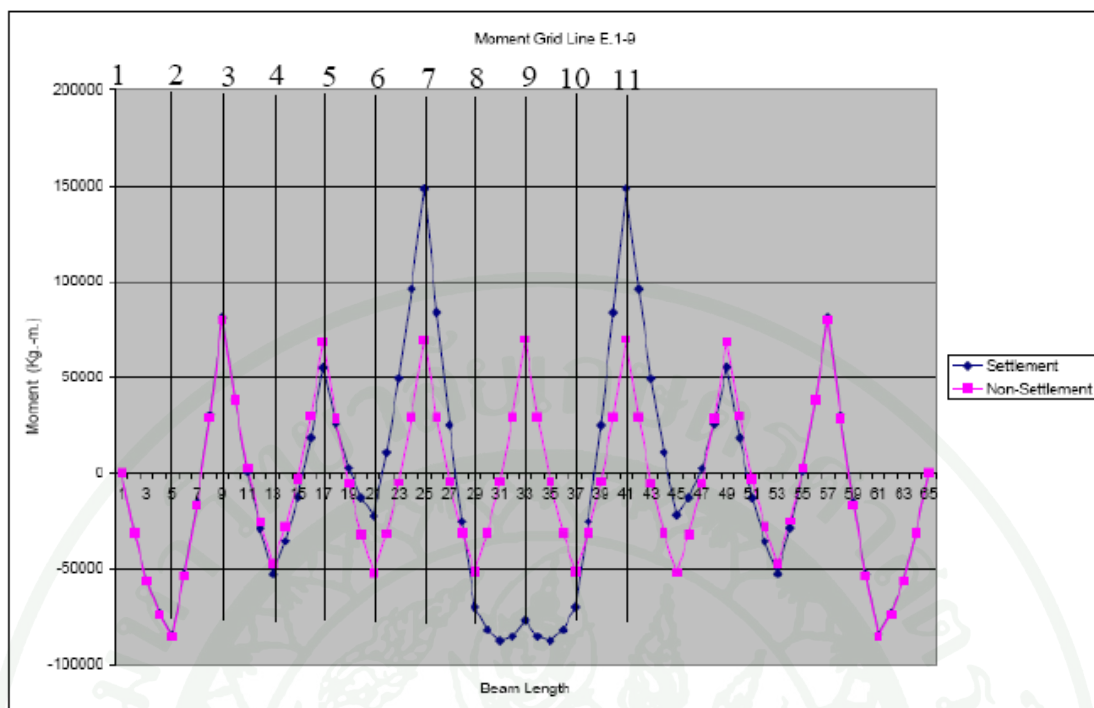
ภาพที่ 84 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 4 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6

ผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในชั้นที่ 4 ของตำแหน่งที่ 6

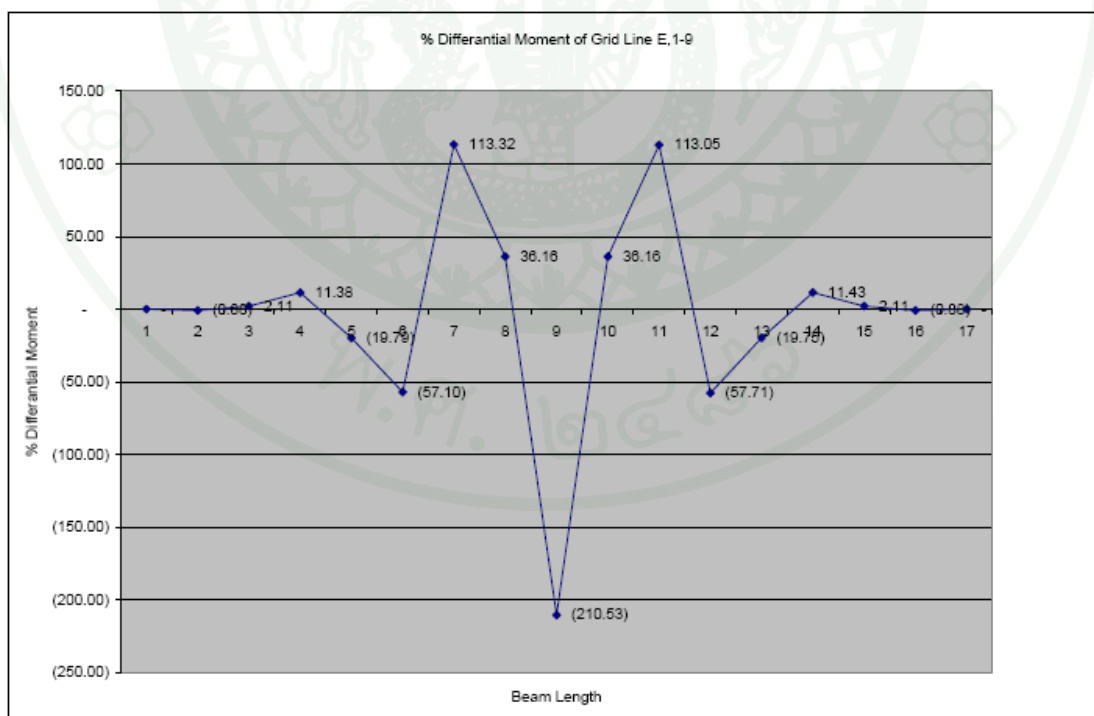
ผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในชั้นที่ 4 ของตำแหน่งที่ 6 จะเกิดพฤติกรรมในลักษณะเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในชั้นที่ 1, ชั้นที่ 2, และชั้นที่ 3 แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จะแตกต่างกัน โดย ได้แสดงภาพที่ 83 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 4 ขององค์อาคาร และภาพที่ 84 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 4 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6

ผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในชั้นที่ 5 ของตำแหน่งที่ 6

ผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในชั้นที่ 5 ของตำแหน่งที่ 6 จะเกิดพฤติกรรมในลักษณะเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในชั้นที่ 1, ชั้นที่ 2, ชั้นที่ 3 และชั้นที่ 4 แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จะแตกต่างกัน โดย ได้แสดงภาพที่ 85 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 5 ขององค์อาคาร และภาพที่ 86 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 5 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6



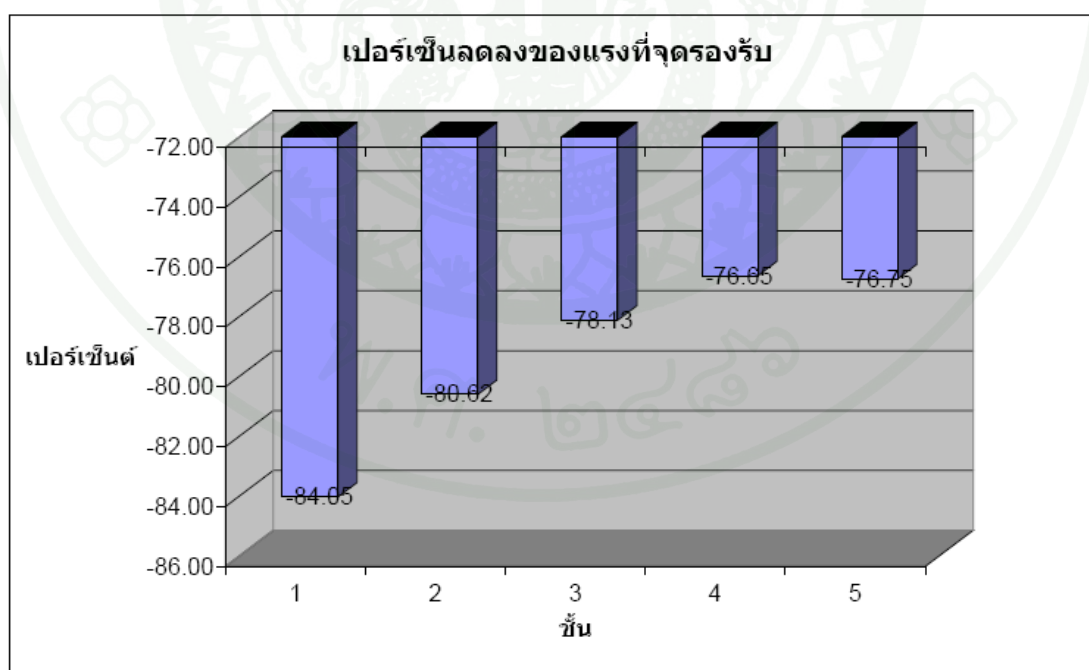
ภาพที่ 85 การเปรียบเทียบ โมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 5 ขององค์อาคาร



ภาพที่ 86 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 5 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6



ภาพที่ 87 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในแต่ละชั้นของจุดที่เกิดการทรุดตัวของคานในตำแหน่งที่ 6



ภาพที่ 88 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของแรงที่จตุรรองรับแต่ละชั้นของคานในตำแหน่งที่ 6

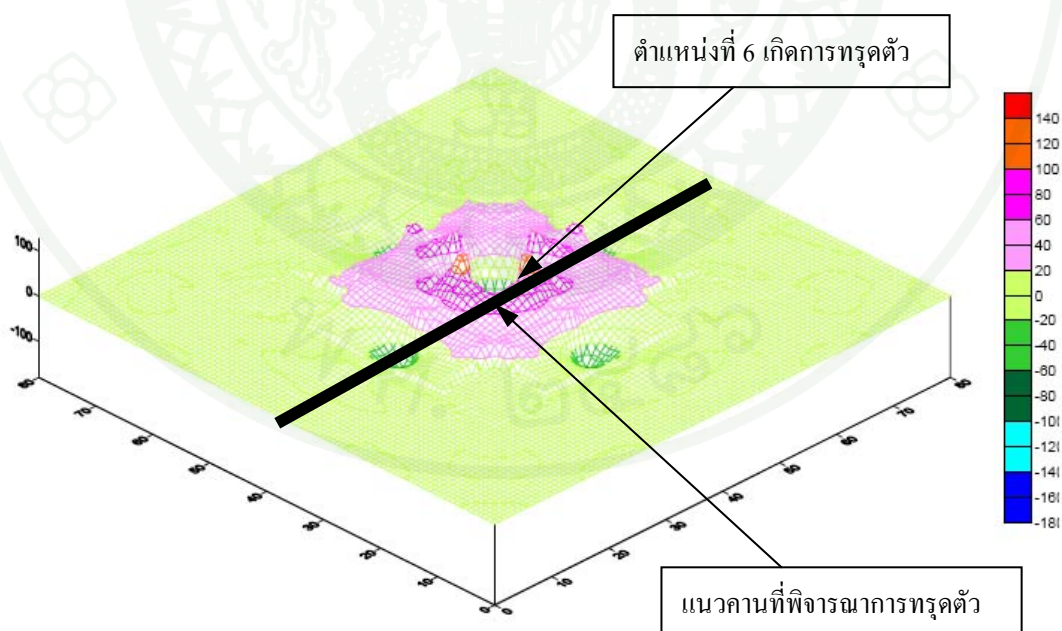
จากการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของจุดที่ 6 ในแต่ละชั้น จะเห็นได้ว่าจะเกิดการลดลงของแรงที่จู่รองรับในแต่ละชั้นเหนือจุดที่เกิดการทรุดตัว ดังแสดงในภาพที่ 88 (เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของแรงที่จู่รองรับแต่ละชั้นของคานในตำแหน่งที่ 6) จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของคานที่ ลดลงตามไปด้วย ดังภาพที่ 87 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในแต่ละชั้นของจุดที่เกิดการทรุดตัวของคานในตำแหน่งที่ 6

การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 1

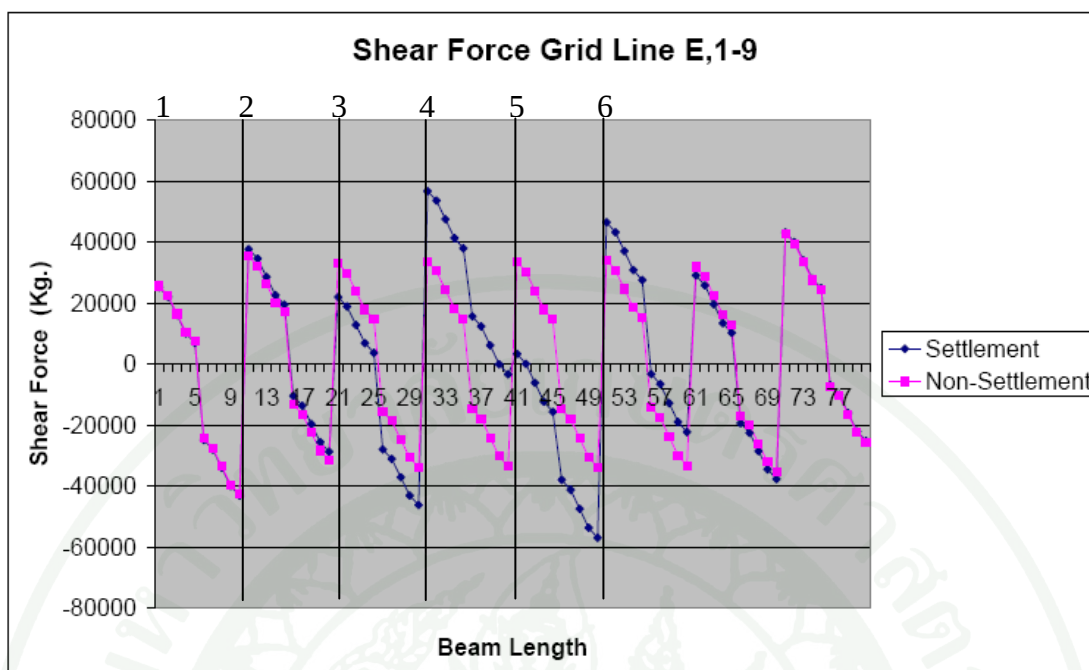
ได้แสดงในข้อที่ 1 ตำแหน่งการทรุดตัว หัวข้อการทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 6 การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 (หน้าที่ 86)

การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 2

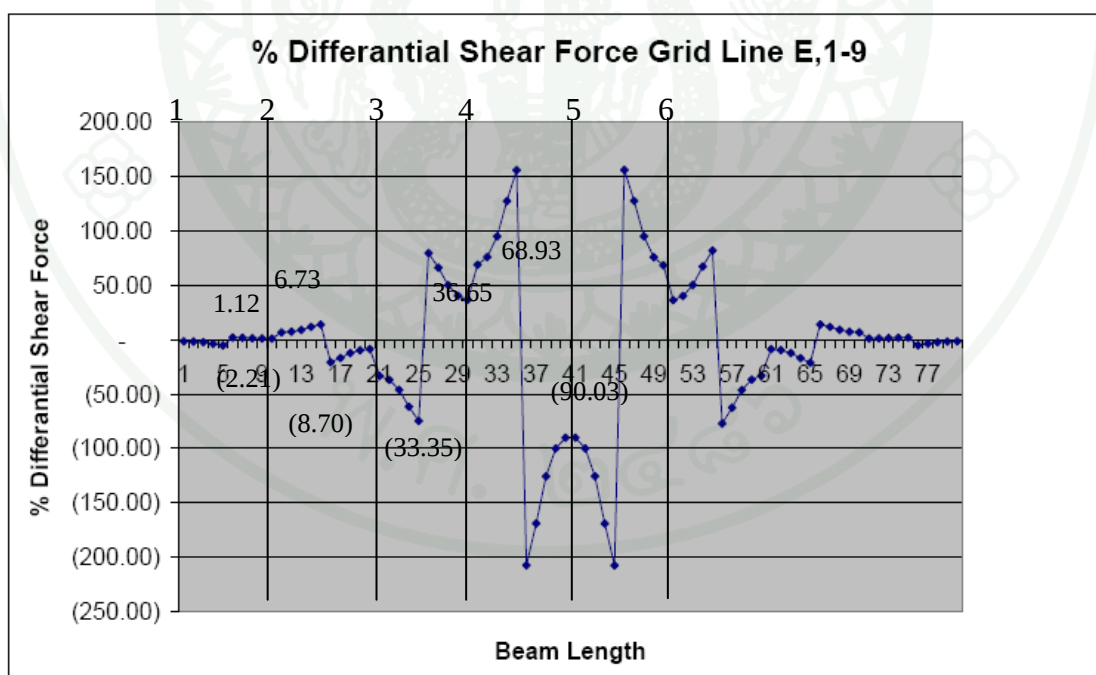
การทรุดตัวของฐานรากในตำแหน่งที่ 6 เกิดการทรุดตัว ดังแสดงในภาพที่ 54 ที่ โดยมีการทรุดตัว L/240 จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเกิดขึ้น ซึ่งแสดงในภาพที่ 89 (การเปลี่ยนแปลงแรง



ภาพที่ 89 การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 2



ภาพที่ 90 การเปรียบเทียบแรงเฉือนชั้นที่ 2 ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6

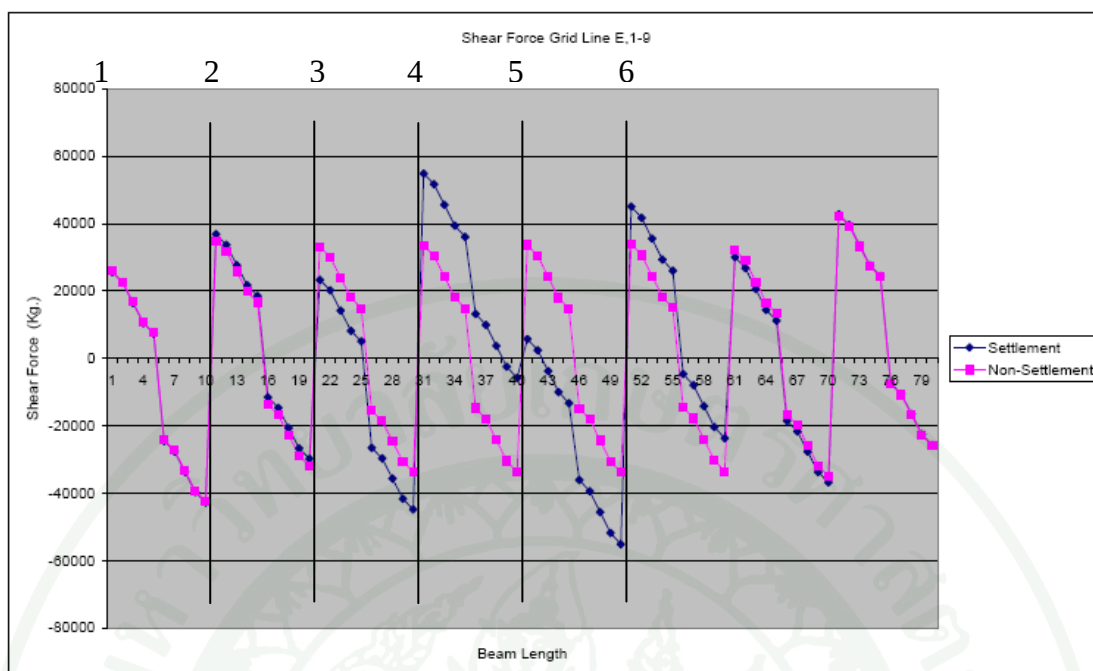


ภาพที่ 91 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานชั้นที่ 2 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6

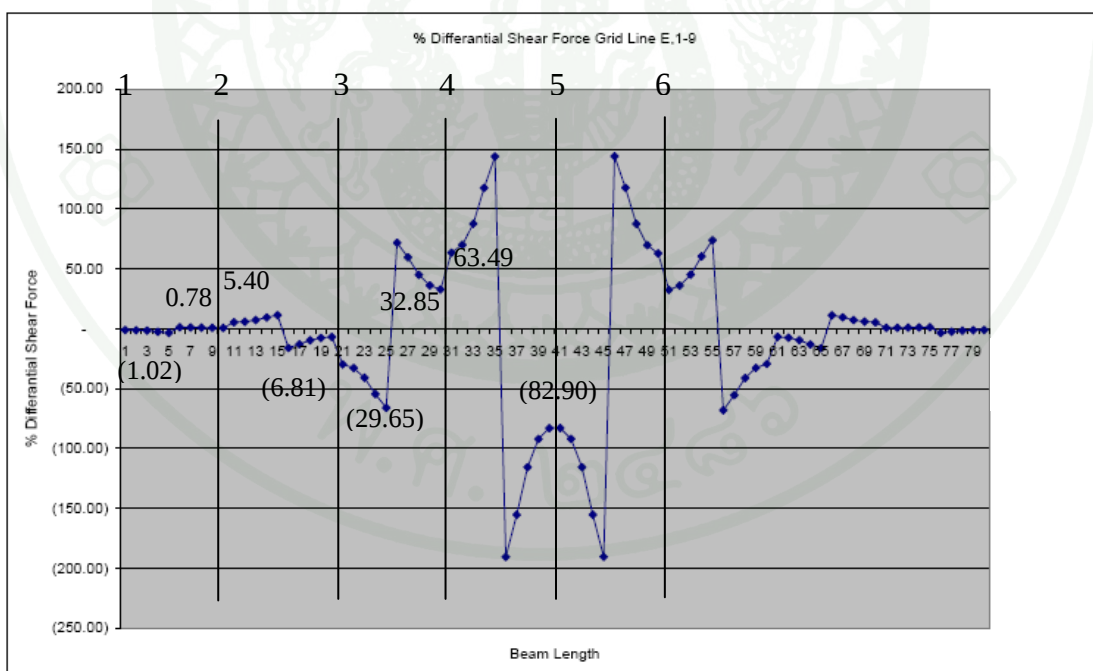
เนื่องจากการทรุดตัวที่ ตำแหน่งที่ 1 ขององค์อาคาร) โดยแนวคานที่พิจารณา มีความสมมาตร กัน จึงพิจารณาแนวคานเพียงแนวคาน เดียว ดังแสดงในภาพที่ 89 และในภาพที่ 90 (การเปรียบเทียบแรงเฉือนชั้นที่ 2 ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6) ซึ่งพบว่าเมื่อ จุดที่ 1 ในจุดที่ 1 การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนมีค่าน้อยลง เนื่องจากแรงปฏิกิริยาจากฐานรากบริเวณจุดที่ 1 น้อยลง ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนน้อยลง ถัดมาจุดที่ 2 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 2 และถัดจากจุดที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากฐานรากในจุดที่ 2 รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้น จุดที่ 3 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 3 และถัดจากจุดที่ 3 มีค่าลดลง เนื่องจาก ฐานรากในจุดที่ 3 รับน้ำหนักน้อยลงส่งผลให้เกิดแรงเฉือนน้อยลง ในจุดที่ 4 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 4 และถัดจากจุดที่ 4 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากฐานรากในจุดที่ 4 รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนสูงมาก ถัดมาในจุดที่ 5 ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการทรุดตัว พบว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานทั้งบริเวณก่อนถึงจุดที่ 5 และถัดจากจุดที่ 5 มีค่าลดลง เนื่องจาก ฐานรากในจุดที่ 5 รับน้ำหนักน้อยลง ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนน้อยลง โดยค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนที่บริเวณหัวเสาและจุดที่เกิดการทรุดตัวได้แสดงในภาพที่ 91 (เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในคานชั้นที่ 2 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6)

การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 3

ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในชั้นที่ 3 ของตำแหน่งที่ 6 จะเกิดพฤติกรรมในลักษณะ เดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในชั้นที่ 1, และชั้นที่ 2 แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนจะ แตกต่างกัน โดย ได้แสดงภาพที่ 92 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 3 ขององค์อาคาร และภาพที่ 93 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 3 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6



ภาพที่ 92 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 3 ขององค์อาคาร



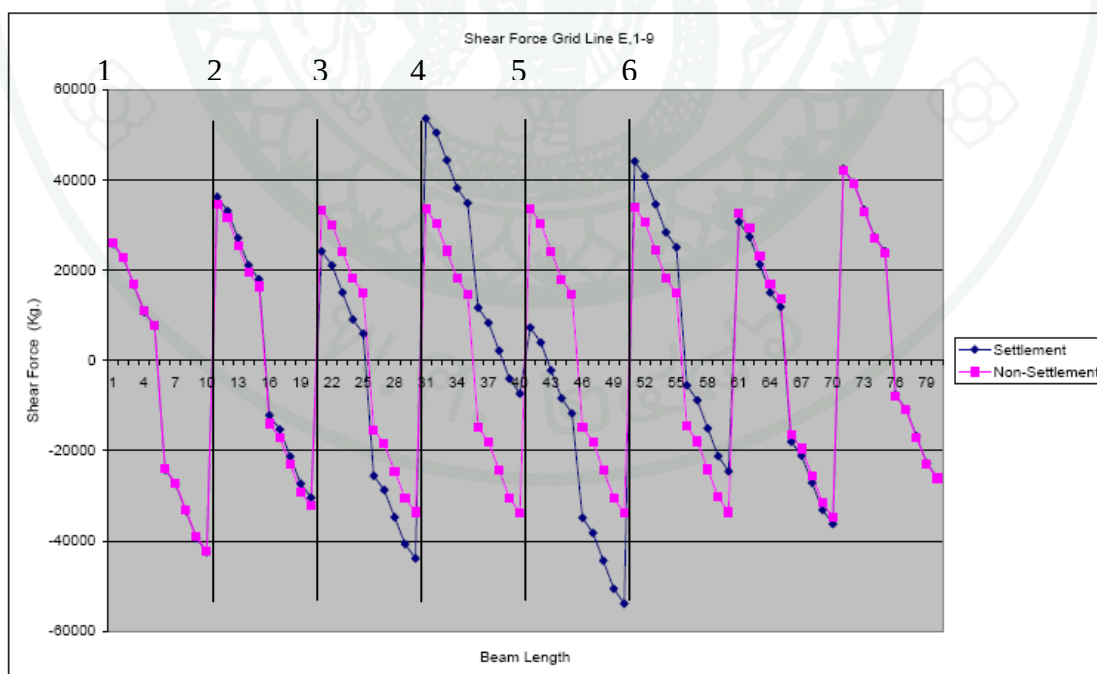
ภาพที่ 93 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 3 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6

การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 4

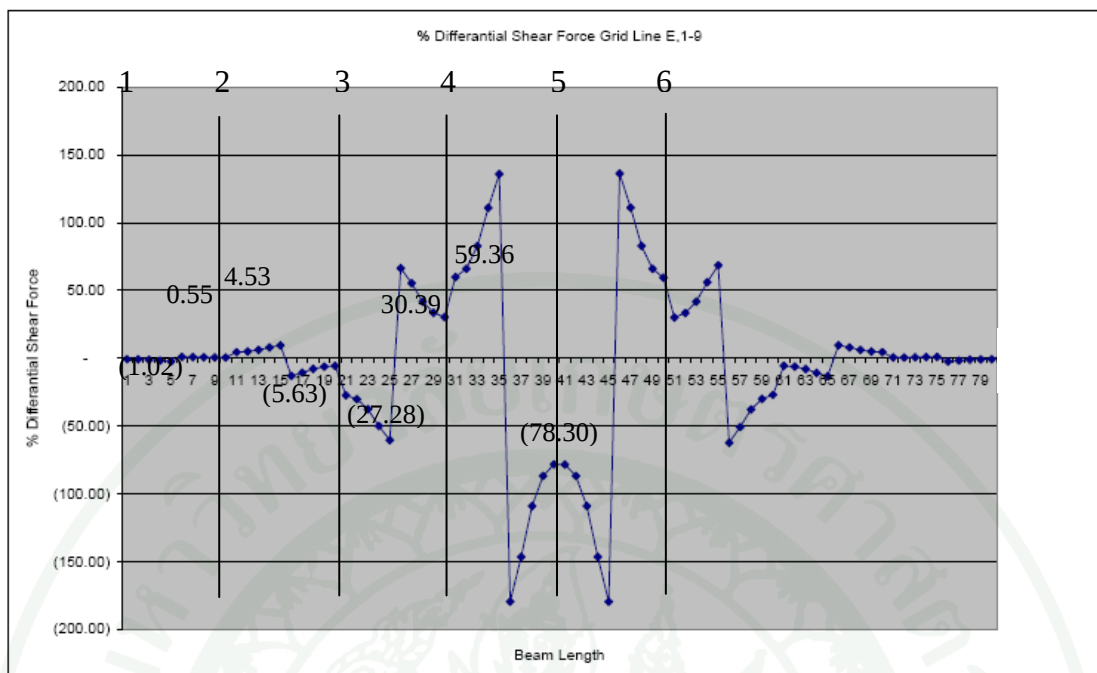
ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในชั้นที่ 4 ของตำแหน่งที่ 6 จะเกิดพฤติกรรมในลักษณะเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในชั้นที่ 1, ชั้นที่ 2, และชั้นที่ 3 แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนจะแตกต่างกัน โดย ได้แสดงภาพที่ 94 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 4 ขององค์อาคาร และภาพที่ 95 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 4 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6

การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 5

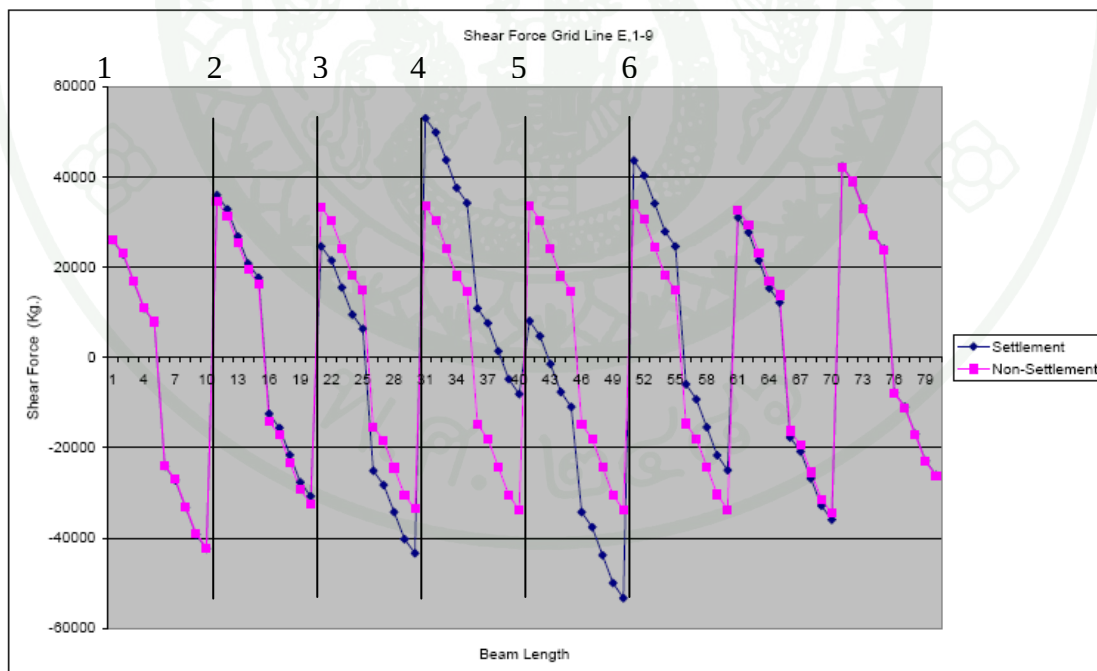
ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในชั้นที่ 5 ของตำแหน่งที่ 6 จะเกิดพฤติกรรมในลักษณะเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในชั้นที่ 1, ชั้นที่ 2, ชั้นที่ 3, และชั้นที่ 4 แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนจะแตกต่างกัน โดย ได้แสดงภาพที่ 96 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 5 ขององค์อาคาร และภาพที่ 97 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 5 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6



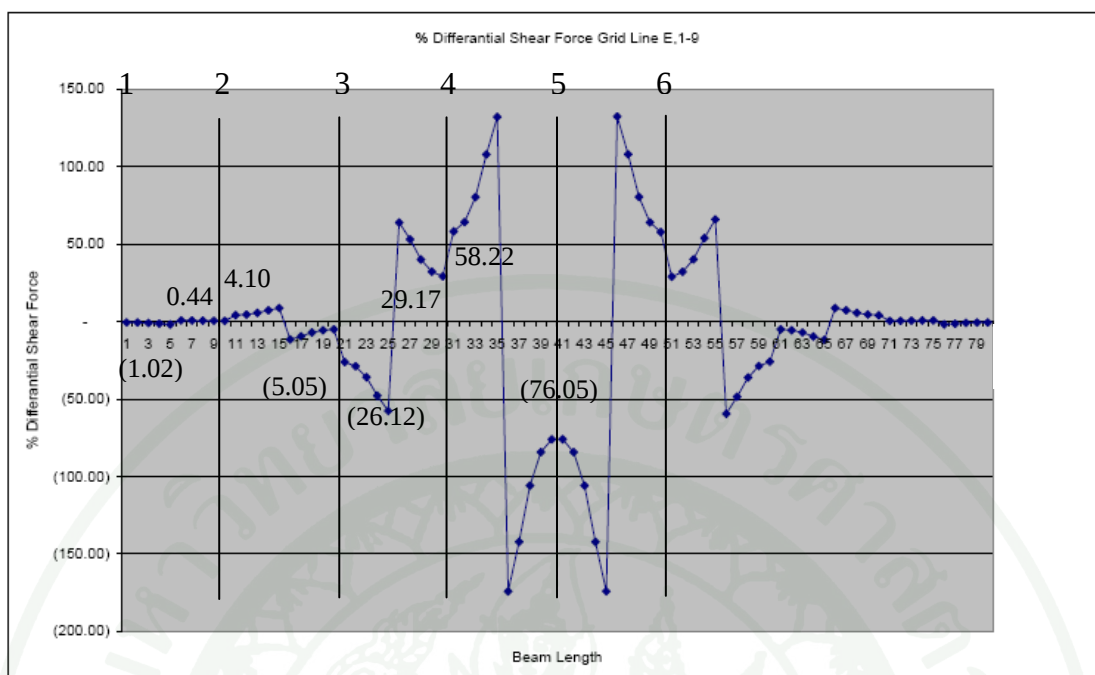
ภาพที่ 94 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 4 ขององค์อาคาร



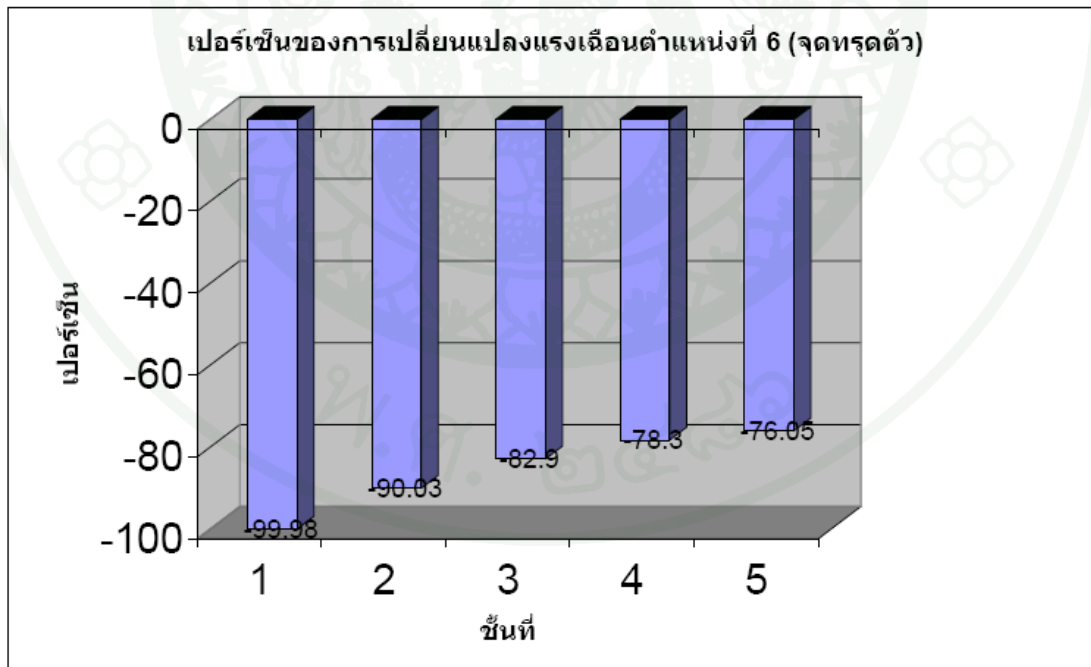
ภาพที่ 95 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 4 เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6



ภาพที่ 96 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ชั้นที่ 5 ขององค์อาคาร



ภาพที่ 97 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในคานชั้นที่ 5 เนื่องจากการหลุดตัวของตำแหน่งที่ 6



ภาพที่ 98 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในแต่ละชั้นของจุดที่ 5 (จุดที่หลุดตัว) ของการหลุดตำแหน่งที่ 6

จากการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 (ดังแสดงในภาพที่ 98) เปรอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในแต่ละชั้นของจุดที่ 5 (จุดที่ทรุดตัว) ของการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6) จะเห็นได้ว่าบริเวณชั้นที่ 1 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนที่สูงที่สุดและลดลงในชั้นที่สูงขึ้น โดยจะลดลงในชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 เท่ากับ 9.95 % ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 เท่ากับ 7.13 % ชั้นที่ 3 และชั้นที่ 4 เท่ากับ 4.60 % ชั้นที่ 4 และชั้นที่ 5 เท่ากับ 2.25 %

ผลของระยะการทรุดตัว

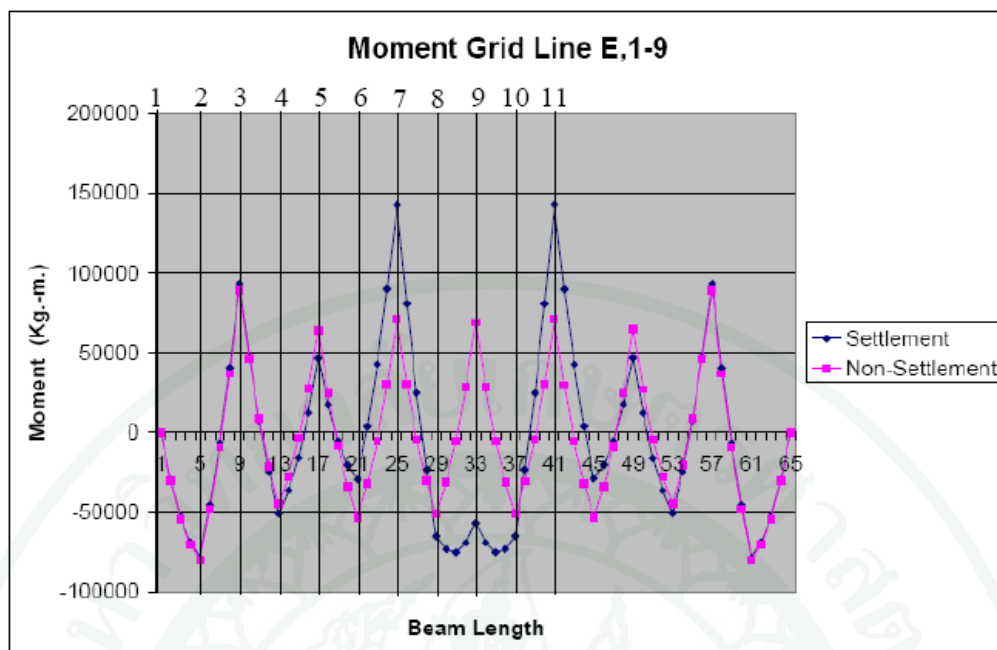
โดยจะทำการเปรียบเทียบผลของระยะการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 6 โดยมีระยะการทรุดตัวที่ L/240, L/360, L/500 ซึ่งมีผลการเปลี่ยนแปลงดังนี้

การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/240

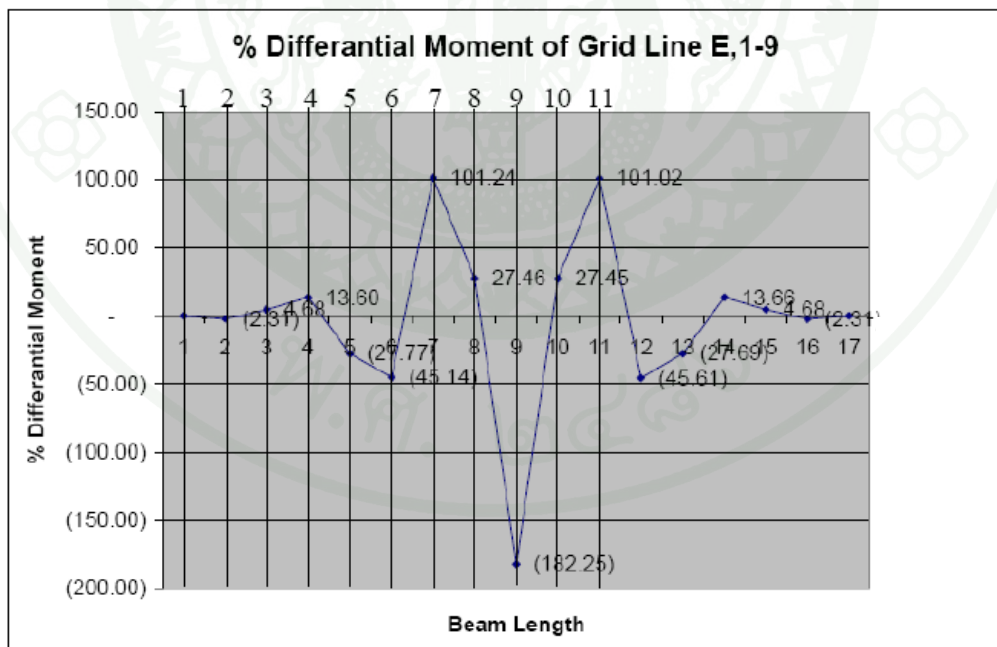
ได้แสดงในข้อที่ 1 ตำแหน่งการทรุดตัว หัวข้อการทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 6 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 (หน้าที่ 8)

การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/360

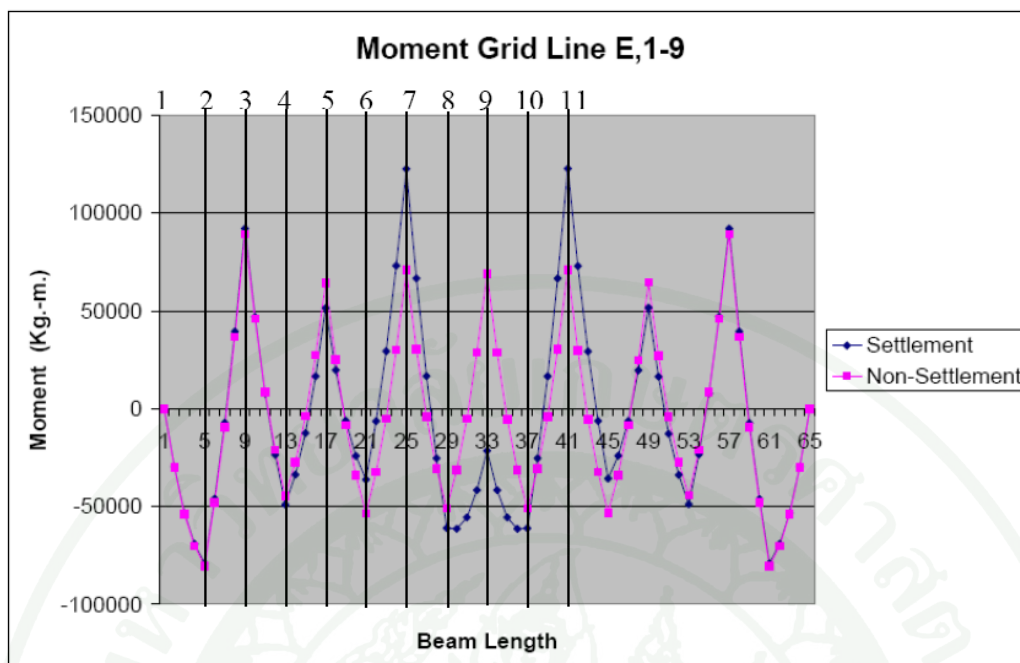
ผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/360 จะเกิดพฤติกรรมในลักษณะเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/240 แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จะแตกต่างกันโดย ได้แสดงภาพที่ 99 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/360 และภาพที่ 100 เปรอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/360



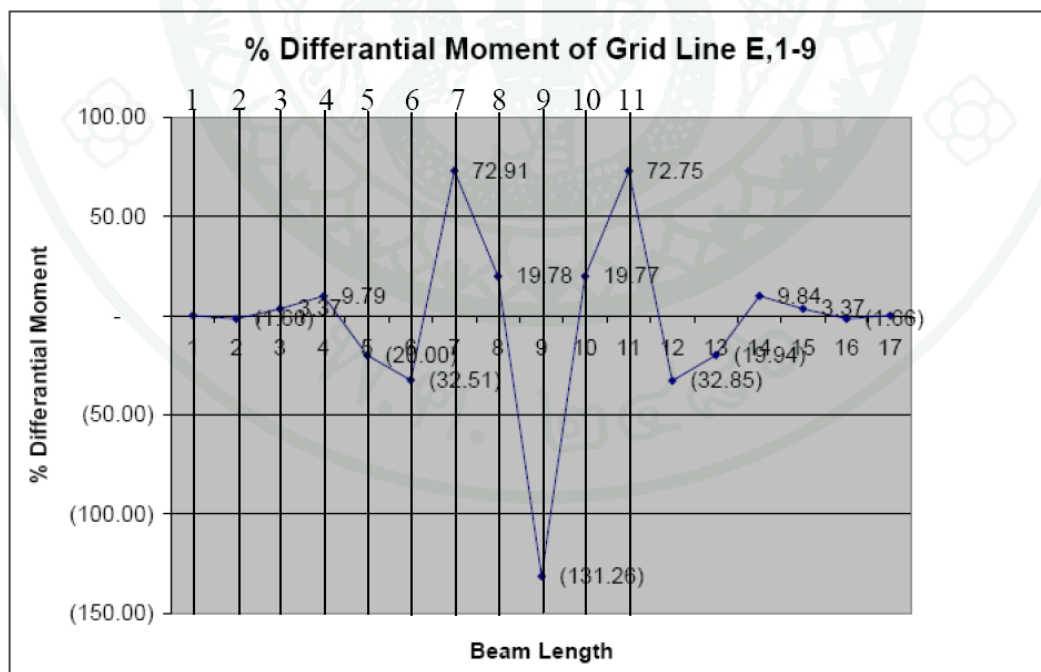
ภาพที่ 99 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/360



ภาพที่ 100 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/360



ภาพที่ 101 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ $L/500$

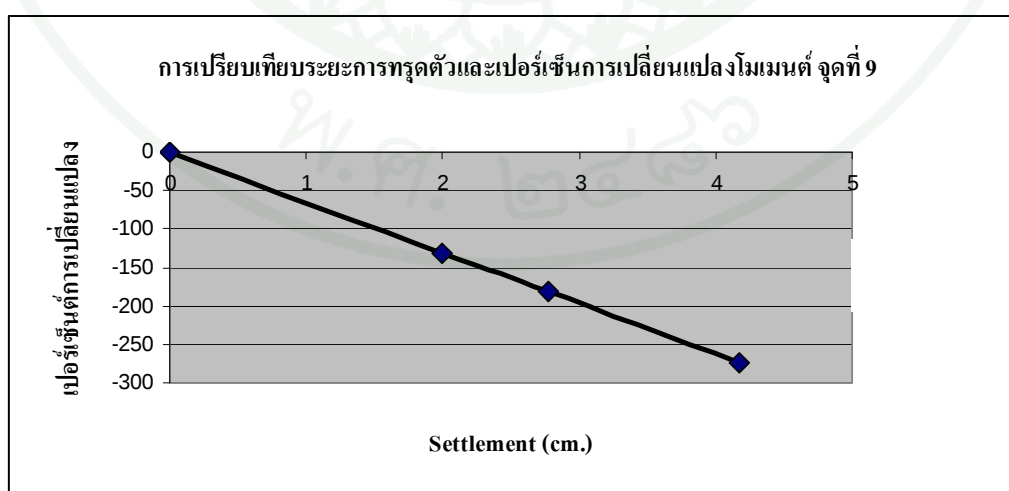


ภาพที่ 102 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ $L/500$

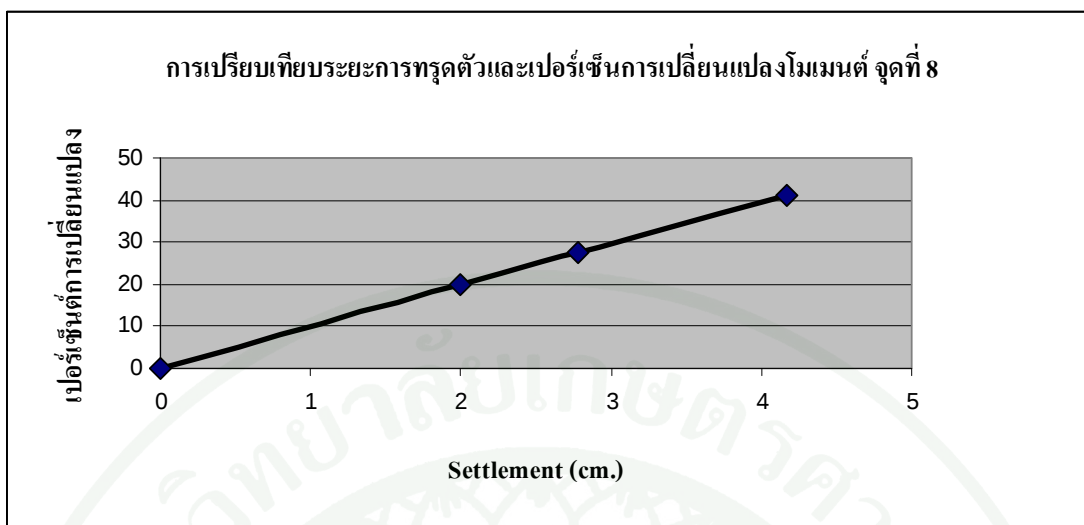
ตารางที่ 7 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของโมเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการทรุดตัวที่ ระยะต่างๆ

ระยะการทรุดตัว เซนติเมตร	L/240	L/360	L/500	ไม่เกิดการทรุดตัว
จุดที่ 1				
จุดที่ 2				
จุดที่ 3	7.01	4.68	3.37	-
จุดที่ 4	20.39	13.6	9.79	-
จุดที่ 5	-41.65	-27.77	-20	-
จุดที่ 6	-67.69	-45.14	-32.51	-
จุดที่ 7	151.82	101.24	72.91	-
จุดที่ 8	41.18	27.46	19.78	-
จุดที่ 9	-273.3	-182.25	-131.26	-

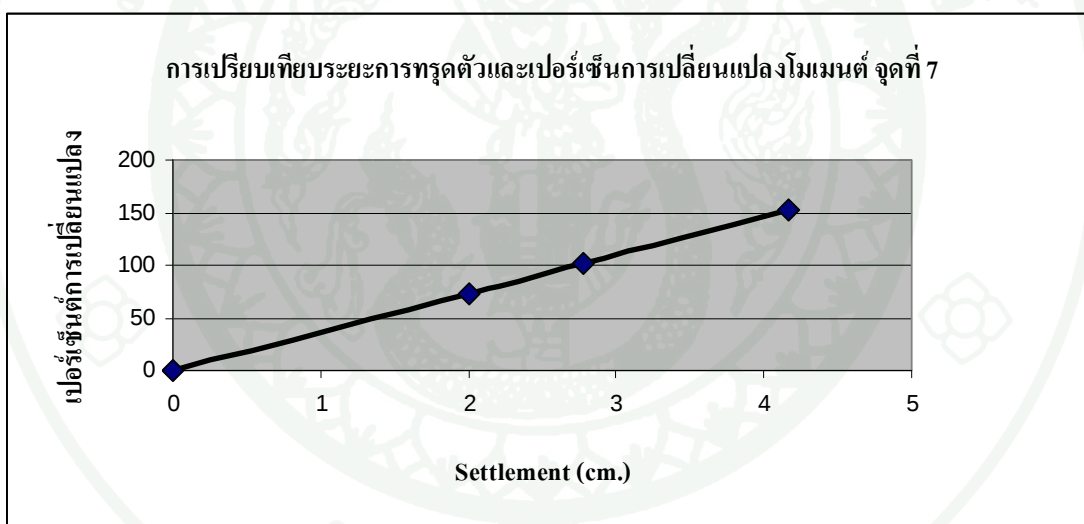
นาระยะการทรุดตัวที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 ไปทำการเขียนกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ดังภาพที่ 103-105 (การเปรียบเทียบระยะการทรุดตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ จุดที่ 9, 8, 7) พบว่า การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวระยะต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงในลักษณะแปรผันตรง ส่งผลให้ทราบว่า ถ้าได้ทราบค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่ ระยะการทรุดตัวใดๆ จะสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงที่การทรุดตัวระยะต่างๆ ณ จุดที่พิจารณาได้



ภาพที่ 103 การเปรียบเทียบระยะการทรุดตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ จุดที่ 9



ภาพที่ 104 การเปรียบเทียบระยะการทรุดตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ จุดที่ 8



ภาพที่ 105 การเปรียบเทียบระยะการทรุดตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ จุดที่ 7

การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/240

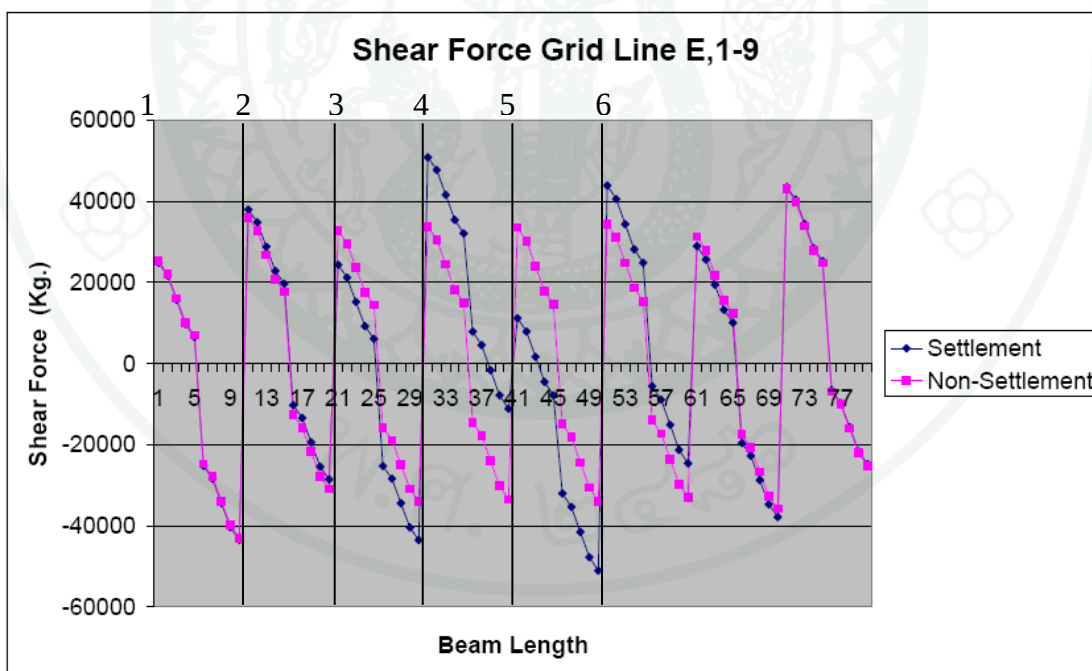
ได้แสดงในข้อที่ 1 ตำแหน่งการทรุดตัว หัวข้อการทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 6
การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 (หน้าที่ 17)

การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/360

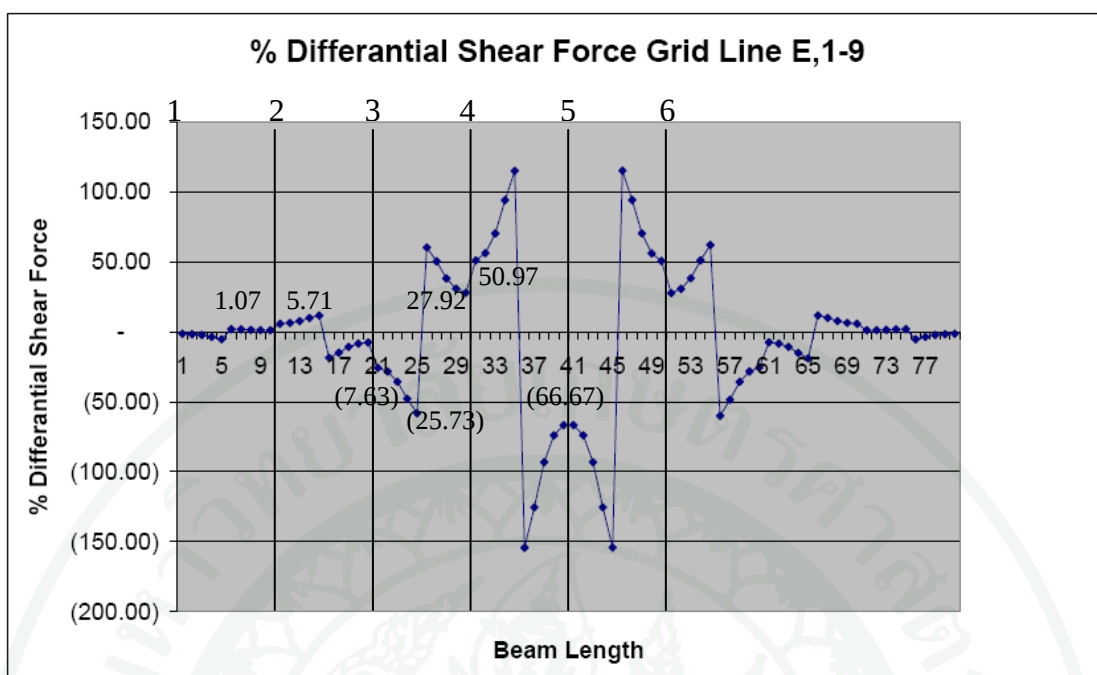
ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนของตำแหน่งที่ 6 จะเกิดพฤติกรรมในลักษณะเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนระยะการทรุดตัวที่ $L/240$ แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนจะแตกต่างกัน โดยได้แสดงภาพที่ 96 การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ $L/360$ และภาพที่ 97 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ $L/360$

การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ $L/500$

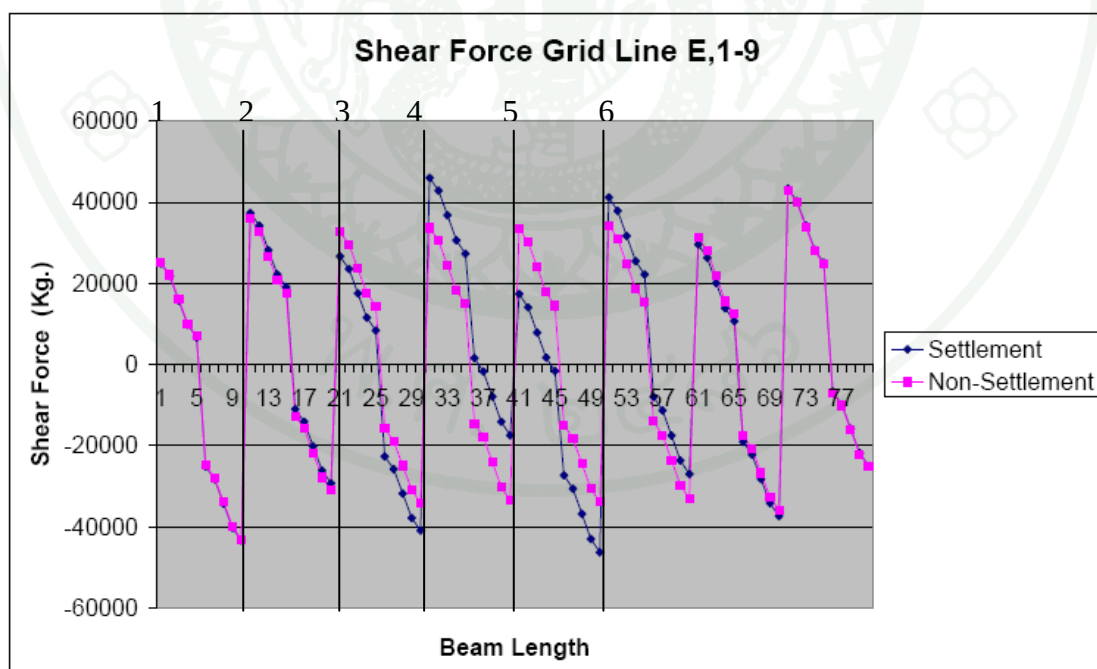
ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนของตำแหน่งที่ 6 จะเกิดพฤติกรรมในลักษณะเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนระยะการทรุดตัวที่ $L/240$ แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนจะแตกต่างกัน โดยได้แสดงภาพที่ 108 การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ $L/500$ และภาพที่ 109 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ $L/500$



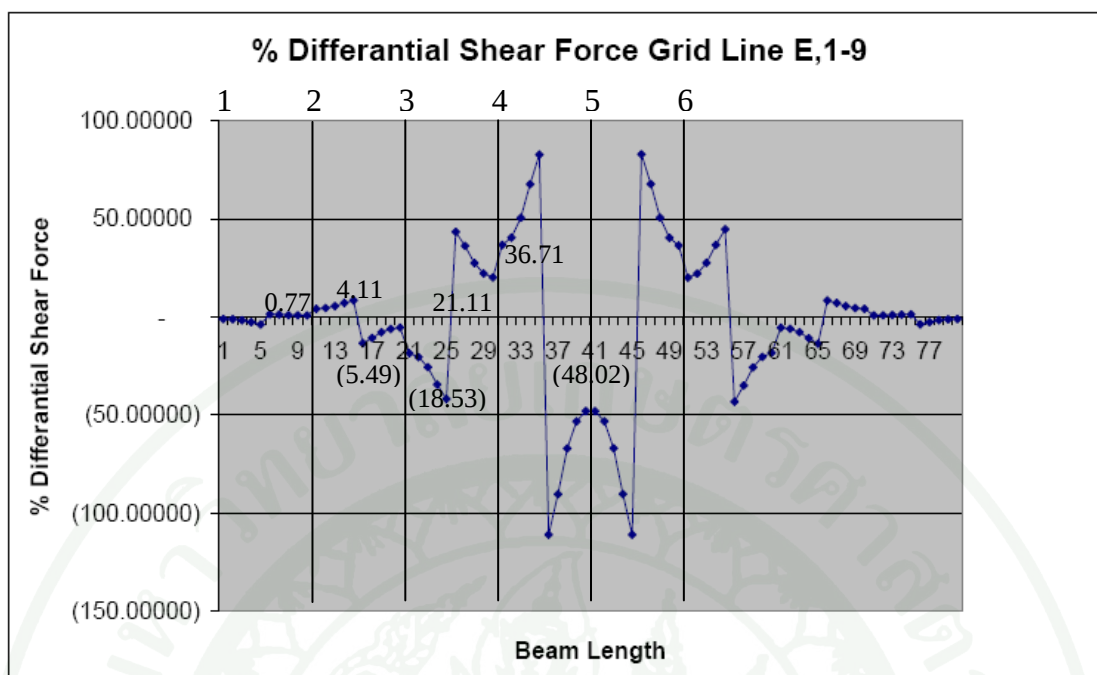
ภาพที่ 106 การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ $L/360$



ภาพที่ 107 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/360



ภาพที่ 108 การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/500

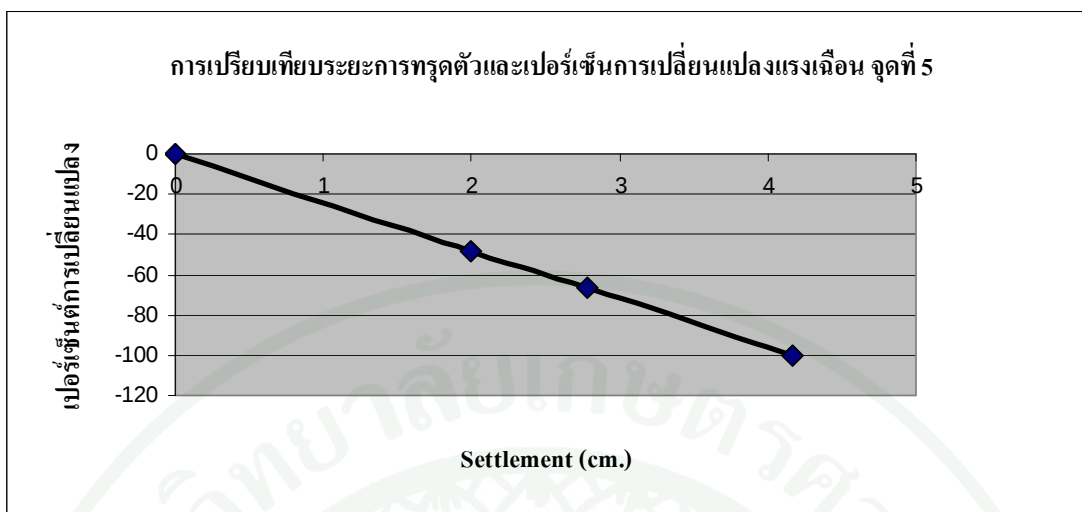


ภาพที่ 109 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เนื่องจากการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่ 6 ระยะการทรุดตัวที่ L/500

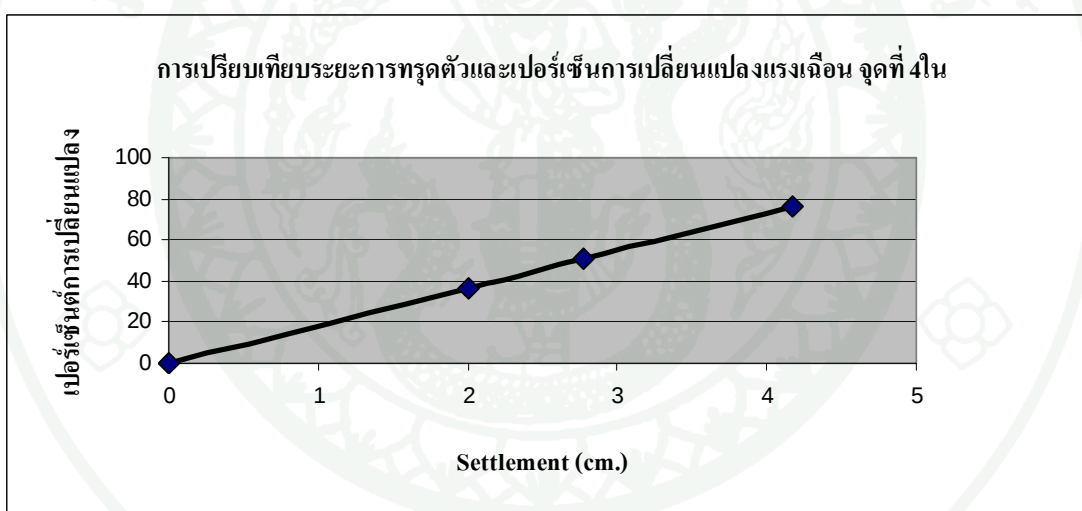
ตารางที่ 8 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของโมเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการทรุดตัวที่ ระยะต่างๆ

ระยะการทรุดตัว	L/240	L/360	L/500	ไม่เกิดการทรุดตัว
เซนติเมตร	4.17	2.78	2.00	-
จุดที่ 2 นอก	1.61	1.07	0.77	-
จุดที่ 2 ใน	8.51	5.71	4.11	-
จุดที่ 3 นอก	-11.44	-7.63	-5.49	-
จุดที่ 3 ใน	-38.58	-25.73	-18.53	-
จุดที่ 4 นอก	41.87	27.92	21.11	-
จุดที่ 4 ใน	76.43	50.97	36.71	-
จุดที่ 5	-99.98	-66.67	-48.02	-

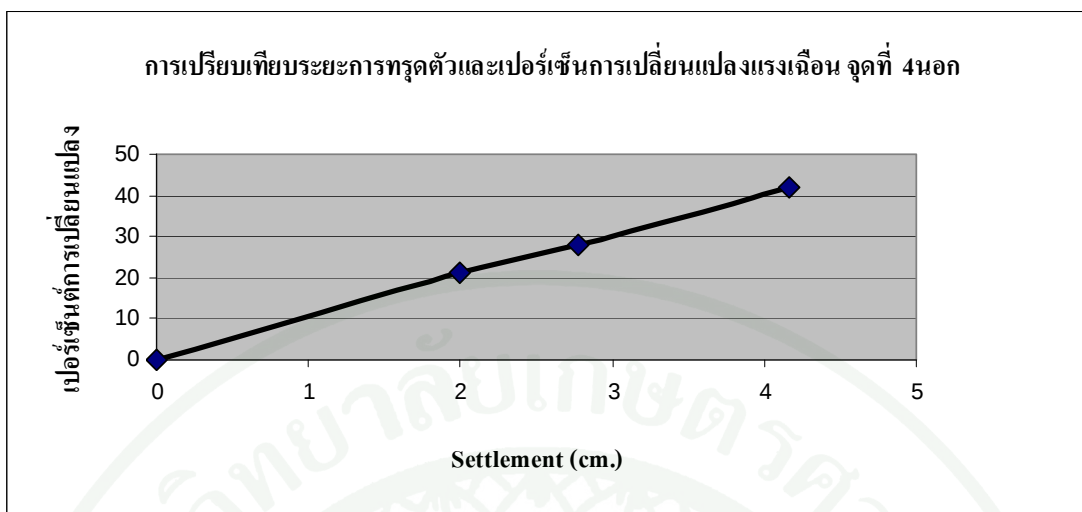
นาระยะการทรุดตัวที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวตำแหน่งที่ 6 ไปทำการเขียนกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ดังภาพที่ 110-112 (การเปรียบเทียบระยะการทรุดตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือน จุดที่ 5, 4ใน, 4นอก) พบว่า การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของแรงเฉือน เนื่องจากการทรุดตัวที่ระยะต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงในลักษณะแปรผันตรง ส่งผลให้ทราบ



ภาพที่ 110 การเปรียบเทียบระยะการทรุดตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือน จุดที่ 5



ภาพที่ 111 การเปรียบเทียบระยะการทรุดตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือน จุดที่ 4 ใน



ภาพที่ 112 การเปรียบเทียบระยะการทรุดตัวและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือน จุดที่ 4 นอก

ว่า ถ้าได้ทราบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนที่ ระยะการทรุดตัวใดๆ จะสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงที่การทรุดตัวระยะต่างๆ ณ จุดที่พิจารณาได้

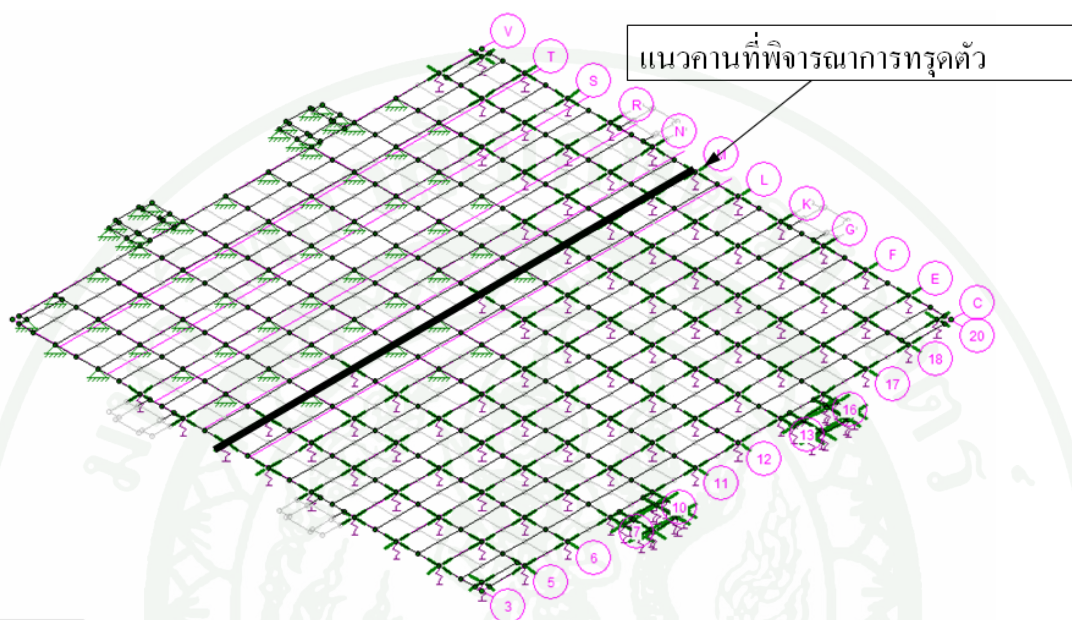
กรณีศึกษาที่ 2

กรณีศึกษา เจดีย์บูรพาวิจิตรวิद्याประชาสามัคคี

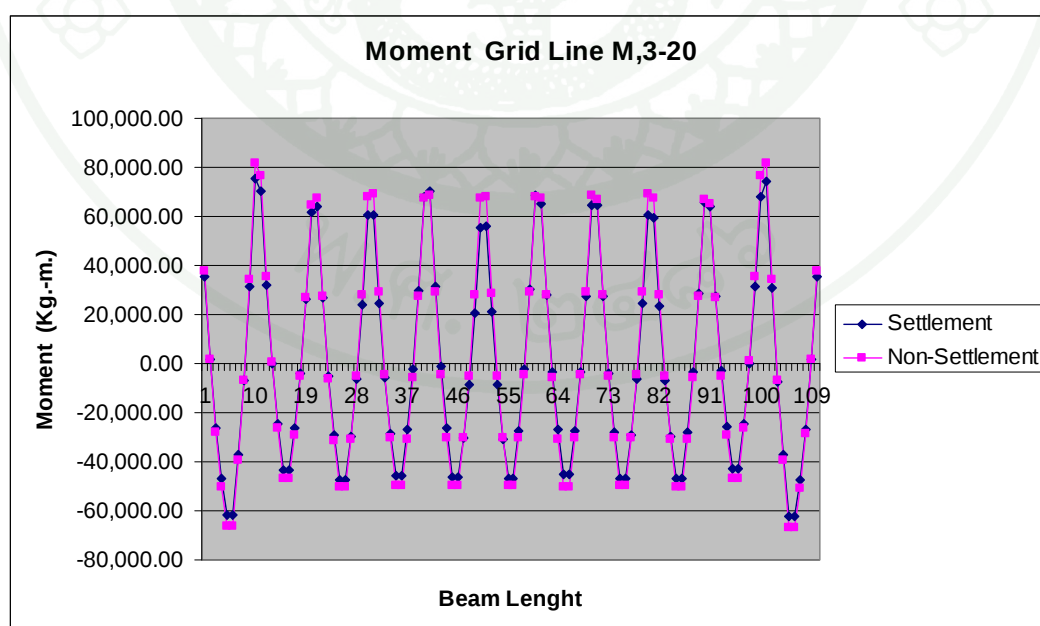
การวิเคราะห์ผลของพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างขนาดใหญ่โดยใช้สมมติฐานว่าฐานรากมีการทรุดตัวในแนวตั้งใกล้เคียงกัน ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ โดยจะนำค่าของ Moment Shear ที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อใช้เปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์พฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างขนาดใหญ่โดยใช้สมมติฐานว่าฐานรากมีการทรุดตัวในแนวตั้งแตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติโดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวที่จุดต่างๆ ที่มีผลต่อโครงสร้าง

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของอาคารเจดีย์บูรพาวิจิตรวิद्याประชาสามัคคี พบว่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณฐานราก จากการวิเคราะห์ในกรณีฐานรากเกิดการทรุดตัวและฐานรากไม่เกิดการทรุดตัว ผลที่ได้คือ การเปลี่ยนแปลงในบริเวณฐานรากที่เกิดขึ้น มีน้อยมาก สืบเนื่องมาจากการ ค่า K ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่าที่ สูงมากซึ่งหมายถึงความสามารถในการรับน้ำหนักที่สูงและมีการทรุดตัวน้อย ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงอัด โมเมนต์ แรงเฉือนในชิ้นส่วนต่างๆ

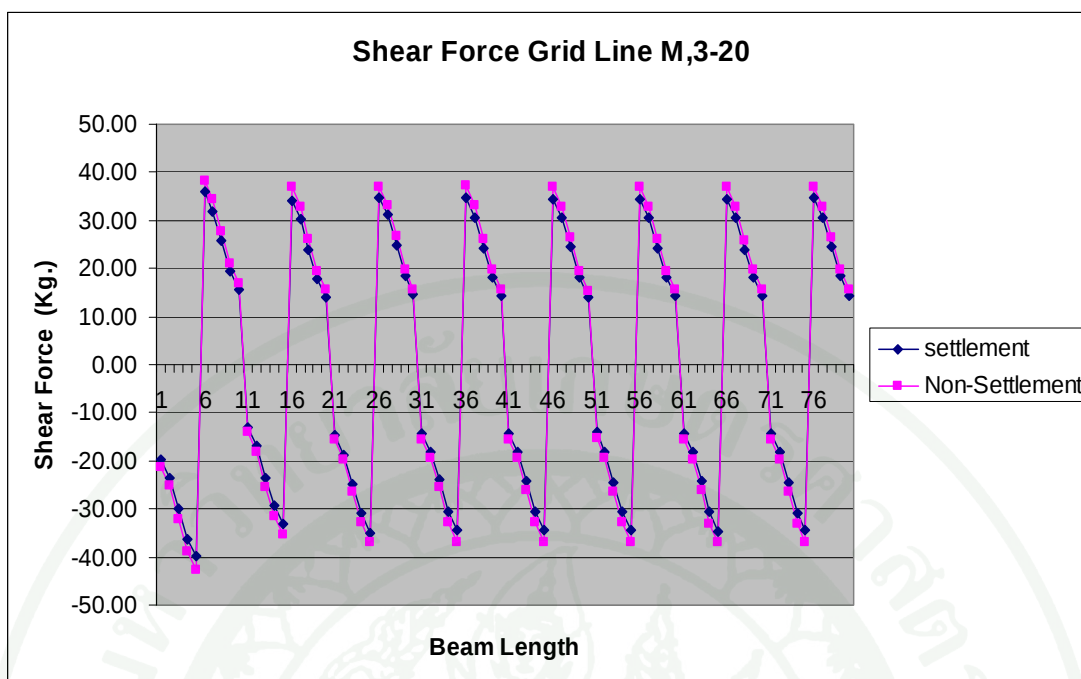
ของโครงสร้างองค์อาคารมีน้อยตามไปด้วยซึ่งไปตามการวิเคราะห์ในการศึกษาที่ 1 คือ เมื่อเกิดการทรุดตัวที่ น้อยลงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมที่น้อยลงไปด้วย โดยผลกระทบที่เกิดจากการ



ภาพที่ 113 การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการทรุดตัวที่พิจารณา ขององค์อาคารเจดีย์ ฯ



ภาพที่ 114 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่พิจารณา ขององค์อาคารเจดีย์ ฯ



ภาพที่ 115 การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่พิจารณา ขององค์อาคารเจดีย์ ฯ

ทรุดตัว จะเกิดจาก Differential settlement หมายถึง ผลต่างการทรุดตัวของฐานรากที่ใกล้เคียงกัน ที่เกิดการทรุดตัวต่างกัน ถ้าค่าการทรุดตัวระหว่างฐานรากมีน้อยก็จะเกิดผลกระทบน้อย ถึงแม้ว่าจะเกิด Total settlement สูง ก็จะทำให้เกิดผลกระทบน้อย ซึ่งในกรณีนี้ทำให้การวิเคราะห์โครงสร้างในชั้นส่วนต่างๆ เหมือนการวิเคราะห์ในกรณีฐานราก ไม่เกิดการทรุดตัว โดยขนาดของแรงกระทำในฐานรากจากการวิเคราะห์ที่ไม่เกิดการทรุดตัว ดังในภาพที่ 113 การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการทรุดตัวที่พิจารณา ขององค์อาคารเจดีย์ ฯ ภาพที่ 114 การเปรียบเทียบโมเมนต์ก่อนและหลังการทรุดตัวที่พิจารณา ขององค์อาคารเจดีย์ ฯ ภาพที่ 115 การเปรียบเทียบแรงเฉือนก่อนและหลังการทรุดตัวที่พิจารณา ขององค์อาคารเจดีย์ ฯ ตารางที่ 5 และตารางที่ 7 ขนาดของแรงสูงสุด ในชั้นส่วนขององค์อาคารจากการวิเคราะห์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าการวิเคราะห์การทรุดตัวของจตุรกรับต่อไป

ตารางที่ 9 ขนาดของแรงกระทำในฐานรากจากการวิเคราะห์

ชื่อฐานราก	น้ำหนักกระทำมากที่สุด	หน่วย
F-2	278.25	Ton
F-4	703.65	Ton
F-6	850.05	Ton
F-12	1412.58	Ton

ตารางที่ 10 ขนาดของแรงสูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคารจากการวิเคราะห์

ชื่อชิ้นส่วน	Axial(Ton)	Shear(Ton)	Moment(kg-m)
M5366	161.491	84.90	-908,215.76
M5367	157.107	-99.644	-887,284.75
M5368	146.623	76.64	-737,957.96
M5365	150.891	-73.958	-838,639.25
M5192	75.439	19.1975	-746,891.98
M5193A	77.451	-40.438	-786,455.57
M5186A	66.346	20.055	-740,072.40

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเมื่อฐานรากมีอัตราทรุดตัวในแนวดิ่งแตกต่างกันจะได้แรงกระทำที่ฐานราก ดังตารางที่ 9 ขนาดของแรงกระทำในฐานรากที่ทรุดตัวจากการวิเคราะห์และแรงในชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีแรงกระทำมากที่สุด ดังตารางที่ 10 ของแรงสูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคารจากการวิเคราะห์ฐานรากที่ทรุดตัว โดยจะพิจารณาในส่วนของแรงในฐานรากและชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มี Bending Moment กระทำมากที่สุดซึ่งจะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบต่อไป

ตารางที่ 11 ขนาดของแรงกระทำในฐานรากที่ทรุดตัวจากการวิเคราะห์

ชื่อฐานราก	น้ำหนักกระทำมากที่สุด	หน่วย
F-2	279.67	Ton
F-4	696.73	Ton
F-6	795.82	Ton
F-12	1409.06	Ton

ตารางที่ 12 ขนาดของแรงสูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคารจากการวิเคราะห์ฐานรากที่ทรุดตัว

ชื่อชิ้นส่วน	Axial(Ton)	Shear(Ton)	Moment(kg-m)
M5366	161.131	84.70	-907,673.58
M5367	157.13	-100.279	-888,225.43
M5368	147.664	77.659	-738,332.84
M5365	151.297	-74.42	-839,624.49
M5192	75.388	19.405	-745,630.54
M5193A	77.457	-40.34	-786,130.69
M5186A	66.877	19.594	-742,174.36

จากการนำผลการวิเคราะห์ของแรงกระทำในฐานรากและการเกิดโมเมนต์คัต Axial load แรงเฉือน ดังตารางที่ 8 ตารางเปรียบเทียบแรงกระทำในฐานราก ตารางที่ 9 ตารางเปรียบเทียบแรง Axial load สูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคาร ตารางที่ 10 ตารางเปรียบเทียบแรง Shear สูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคาร และตารางที่ 11 ตารางเปรียบเทียบแรง Bending Moment สูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคาร

ตารางที่ 13 ตารางเปรียบเทียบแรงกระทำในฐานราก

ชื่อฐานราก	ฐานรากไม่ทรุดตัว น้ำหนัก(Ton)	ฐานรากทรุดตัว น้ำหนัก(Ton)	ผลต่าง %
F-2	278.25	279.67	0.50
F-4	703.65	696.73	0.99
F-6	850.05	795.82	6.81
F-12	1412.58	1409.06	0.25

ตารางที่ 14 ตารางเปรียบเทียบแรง Axial load สูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคาร

ชื่อชิ้นส่วน	ฐานรากไม่ทรุดตัว	ฐานรากทรุดตัว	ผลต่าง %
	Axial(Ton)	Axial(Ton)	
M5366	161.491	161.131	0.22
M5367	157.107	157.13	-0.01
M5368	146.623	147.664	-0.70
M5365	150.891	151.297	-0.27
M5192	75.439	75.388	0.07
M5193A	77.451	77.457	-0.01
M5186A	66.346	66.877	-0.79

ตารางที่ 15 ตารางเปรียบเทียบแรง Shear สูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคาร

ชื่อชิ้นส่วน	ฐานรากไม่ทรุดตัว	ฐานรากทรุดตัว	ผลต่าง %
	Shear(Ton)	Shear(Ton)	
M5366	84.90	84.70	0.24
M5367	-99.644	-100.279	-0.63
M5368	76.64	77.659	-1.31
M5365	-73.958	-74.42	-0.62
M5192	19.1975	19.405	-1.07
M5193A	-40.438	-40.34	0.24
M5186A	20.055	19.594	2.35

ตารางที่ 16 ตารางเปรียบเทียบแรง Bending Moment สูงสุดในชิ้นส่วนขององค์อาคาร

ชื่อชิ้นส่วน	ฐานรากไม่ทรุดตัว	ฐานรากทรุดตัว	ผลต่าง %
	Moment(kg-m)	Moment(kg-m)	
M5366	-908,215.76	-907,673.58	0.06
M5367	-887,284.75	-888,225.43	-0.11
M5368	-737,957.96	-738,332.84	-0.05
M5365	-838,639.25	-839,624.49	-0.12
M5192	-746,891.98	-745,630.54	0.17
M5193A	-786,455.57	-786,130.69	0.04
M5186A	-740,072.40	-742,174.36	0.28

พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงแรงต่างๆที่เกิดขึ้นน้อยเนื่องจากการที่ฐานรากเกิดการตัวน้อย ซึ่งเป็นไปตามผลของการวิเคราะห์ในการศึกษาที่ 1 การเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่น้อยลงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงภายในน้อยลงไปด้วย โดยฐานราเสาเข็มตอกที่ทำการเสริมใหม่ได้ค่าการทรุดใกล้เคียงกับการที่ฐานรากไม่เกิดการทรุดตัวจึงเกิดผลกระทบต่อโครงสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับกรออกแบบจึงมีน้อยมาก เนื่องจากเสาเข็มที่ใช้ในโครงการมีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นหินดานซึ่งไม่เกิดการทรุดตัวสามารถถ่ายแรงที่ได้รับจากโครงสร้างผ่านฐานรากไปถึงชั้นหินดานได้ดีจึงลดปัญหาที่จะเกิดกับโครงสร้างของอาคารเนื่องจากการทรุดตัวของเสาเข็ม

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากที่มีผลกระทบต่ออาคารโดยการศึกษาจะพิจารณาจุดต่างๆของอาคารที่เกิดการทรุดตัว เพื่อนำผลกระทบจากการทรุดตัวนั้นมาพิจารณา โดยกำหนดการทรุดตัวของฐานรากอาคารที่ อัตราส่วนความยาวช่วงของคานต่อ 240, 360, และ 500 (L/240, L/360, L/500) จากผลของการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถสรุปผลของการทรุดตัวที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างได้ดังนี้

ผลของตำแหน่งการทรุดตัว

ผลการศึกษาพบว่า การทรุดตัวของฐานราก ของโครงสร้างที่ทำการศึกษา ในตำแหน่งต่างๆของอาคารที่เกิดการทรุดตัวที่เท่ากันจะเกิดผลกระทบ โครงสร้างของอาคารต่างกันและจะมีผลกระทบส่งต่อไปยังชั้นที่สูงขึ้นด้วย โดยมีค่าของผลกระทบที่แตกต่างกันไปตามตำแหน่งการทรุดตัว โดยผลกระทบที่เกิดจาก แรงเฉือน โมเมนต์บริเวณจตุรรองรับที่เกิดการทรุดตัว และโมเมนต์บริเวณหัวเสาถัดไปที่ไม่เกิดการทรุดตัว โดยแบ่งได้เป็น 3 กรณีคือ

1. บริเวณมุมของอาคาร จะมีผลกระทบน้อยที่สุดและจะเกิดความเสียหายบริเวณหัวเสาถัดไปของจุดที่เกิดการทรุดตัว
2. บริเวณด้านข้างอาคาร จะมีผลกระทบมากที่สุดและจะเกิดความเสียหายบริเวณหัวเสาถัดไปและจตุรรองรับที่เกิดการทรุดตัว
3. บริเวณภายในอาคาร จะมีผลกระทบมาก แต่น้อยกว่า บริเวณด้านข้างอาคาร และจะเกิดความเสียหายบริเวณหัวเสาถัดไปและจตุรรองรับที่เกิดการทรุดตัว

ผลของชั้นที่เกิดการทรุดตัว

ผลการศึกษาพบว่า การทรุดตัวของฐานราก ของโครงสร้างที่ทำการศึกษา ในส่วนของผลของชั้นที่เกิดการทรุดตัว พบว่าจะเกิดการลดลงของแรงอัดที่เกิดขึ้นในเสาของจุดที่เกิดการทรุดตัวโดยในชั้นที่ 1 แรงปฏิกิริยาจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ชั้นถัดมาจะน้อยลง ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ลดลงเมื่อชั้นที่อยู่เหนือจุดที่เกิดการทรุดตัวสูงขึ้นแต่ค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงยังมีสูงซึ่งมีค่าความแตกต่างที่เกิดในบริเวณชั้นที่ 1 ไม่มากนักซึ่งผลจากการทรุดตัวของฐานรากยังสามารถสร้างความเสียหายในชั้นนั้นๆ ได้

ผลของขนาดการทรุดตัว

ผลการศึกษาพบว่า การทรุดตัวของฐานราก ของโครงสร้างที่ทำการศึกษา ในส่วนของขนาดการทรุดตัว ต่างๆ ของอาคาร จะเกิดผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของโครงสร้างในส่วนต่างๆ ในอาคารเป็นลักษณะที่แปรผันตรงต่อการทรุดตัวโครงสร้างของอาคาร กล่าวคือ เมื่อเราทราบผลของการทรุดตัวที่ อัตราส่วนใดๆ ค่าหนึ่งก็จะสามารถหาค่าประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการทรุดตัวที่ อัตราส่วนอื่นๆ ที่เกิดในโครงสร้างเดียวกันและตำแหน่งเดียวกันได้

ผลของการทรุดตัวที่มากกว่าหนึ่งจุด

จากการศึกษาพบว่า การทรุดตัวของฐานรากที่เกิดหลายๆจุด พบว่าการทรุดตัวที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือน, โมเมนต์, และแรงต่างๆ ภายในชิ้นส่วนต่างๆ ขององค์อาคารจะมาจากการทรุดตัวของฐานรากที่ใกล้เคียงกัน (Differential settlement) ซึ่งถ้าทรุดตัวของฐานรากที่ใกล้เคียงกันมีค่ามาก ก็จะทำให้เกิดผลกระทบจากการทรุดตัวที่สูง และถ้าทรุดตัวของฐานรากที่ใกล้เคียงกันมีค่าน้อย จะทำให้เกิดผลกระทบจากการทรุดตัวที่น้อย ถึงแม้ว่าค่าการทรุดตัวโดยรวม (Total settlement) จะสูงก็ตาม

ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองในการวิเคราะห์โครงสร้างนี้เป็นการสร้างการวิเคราะห์โครงสร้างโดยรวมทั้งอาคารซึ่งผลของการวิเคราะห์สามารถแสดงผลและเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการคำนวณในระบบ 2 มิติ ได้ และสามารถอธิบายผลของการหลุดตัวของโครงสร้างได้ โดยการทราบค่าการหลุดตัวของเสาเข็มหรือฐานรากของอาคาร เพื่อทราบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการหลุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ที่เกิดการหลุดตัว และตำแหน่งอื่นๆ ที่เกิดผลกระทบเนื่องจากการหลุดตัว ได้

ในอนาคตหากมีการศึกษาและพัฒนาการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อศึกษาการหลุดตัวที่เกิดผลกระทบต่อโครงสร้าง ควรกำหนดค่าการหลุดตัวของเสาเข็มในลักษณะเดียวกันกับการหลุดตัวต่อแรงที่กระทำของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งเป็นค่าที่เกิดในลักษณะไม่แปรผันตรง (Non-Linear) จะได้ค่าที่ใกล้เคียงและแม่นยำมากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา ประจำปี 2533-2534. 2550. ม.ป.ป. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. บ. โกลบอล กราฟฟิค จำกัด, ม.ป.ท.

ต่อกุล กาญจนาลัย. 2528. หนังสือพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็ก. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ การพิมพ์, กรุงเทพฯ.

วินิต ช่อวิเชียร. 2545. การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 3. ห้างหุ้นส่วนจำกัด ป. สัมพันธ์พาณิชย์, กรุงเทพฯ.

สถาพร โภคา. 2545. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 2. ไลบรารี นาย, กรุงเทพฯ.

Almusallam, A. A., Al-Gahtani, A. S., Aziz, A.R., and Rasheeduzzafar. 1996. Effect of reinforcement corrosion on bond strength. **Construction and Building Materials** 10 (2): 123-129.

Al-Sulaimani, G. J., M. Kaleemullah, I. A Basunbul and Rasheeduzzafar. 1990. Influence of corrosion and cracking on bond behaviour and strength of reinforced concrete members. **ACI Structural Journal** 87 (2): 220-231.

Berardi, R. and R. Bovolenta. 2005. Pile-settlement evaluation using field stiffness non-linearity. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering** 158

Faisal, H., A. Bujang, B.K. Huat and. S.K. Lee. 2008. Pile Instrumentation Using Retrieval Sensors. **American Journal of Applied Sciences** 5 (5): 597-604.

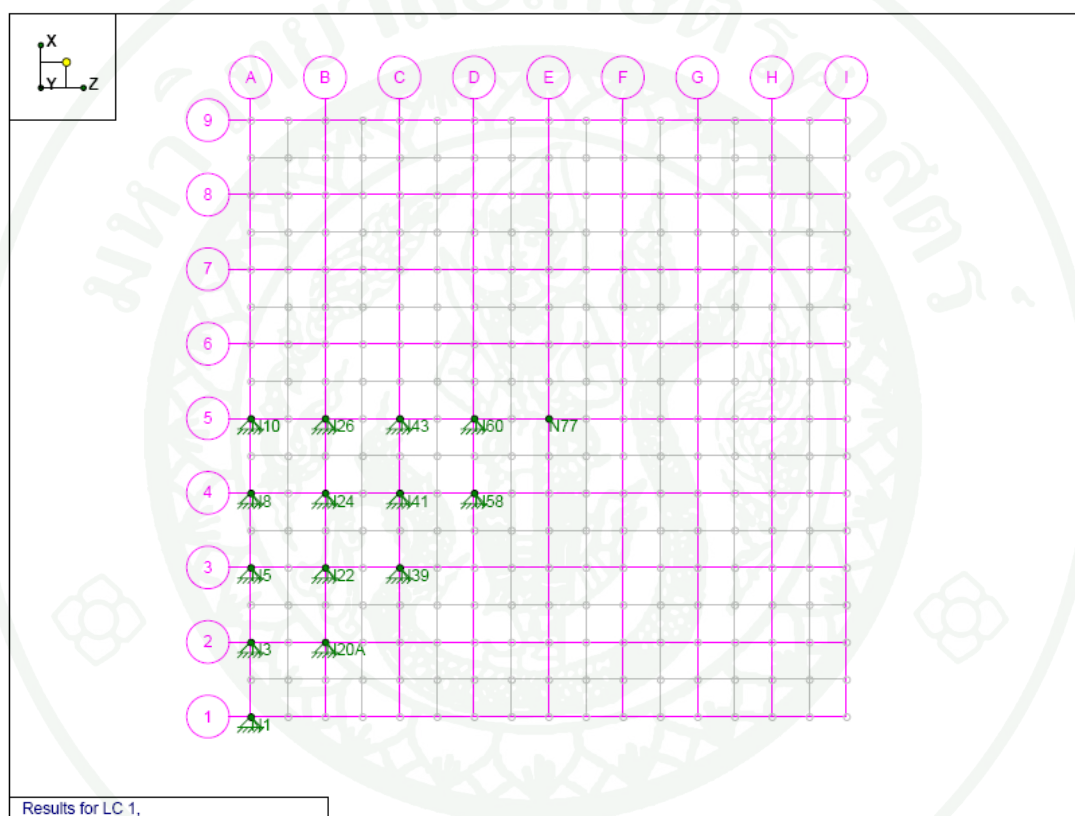
Frantziskonis, G. and D. Breyssse. 2003. Influence of soil variability on differential settlements of structures. **Computers and Geotechnics** 30 (2003) 217-230.

- Hu, H.T., F.M. Lin and Y.Y. Jan. 2003. Nonlinear finite element analysis of Reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics. **Composite Structures** **63** (2004) 271–281.
- Kyung, N.K., S.H. Lee, K.S. Kim, C.K. Chung, M.K. Myoung, H.S. Lee. 2001. Optimal pile arrangement for minimizing differential settlements in piled raft foundations. **Computers and Geotechnics** **28** (2001): 235–253.
- Lee, C. Y. 2007. Settlement and Load Distribution Analysis of Under reamed Piles. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**. ISSN 1819-6608.
- Noura, A.B., A. Slimania and N. Laouamia. 2002 . Foundation settlement statistics via finite element analysis. **Computers and Geotechnics** **29** (2002) 641–672
- Papanicolaou, A.N. and P. Diplas. 1997. Numerical solution of a non-linear model for self-weight solids settlement. **Applied Mathematical Modelling** **23** (1999) 345±362.



ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 6 ของการทรุดตัว L/240

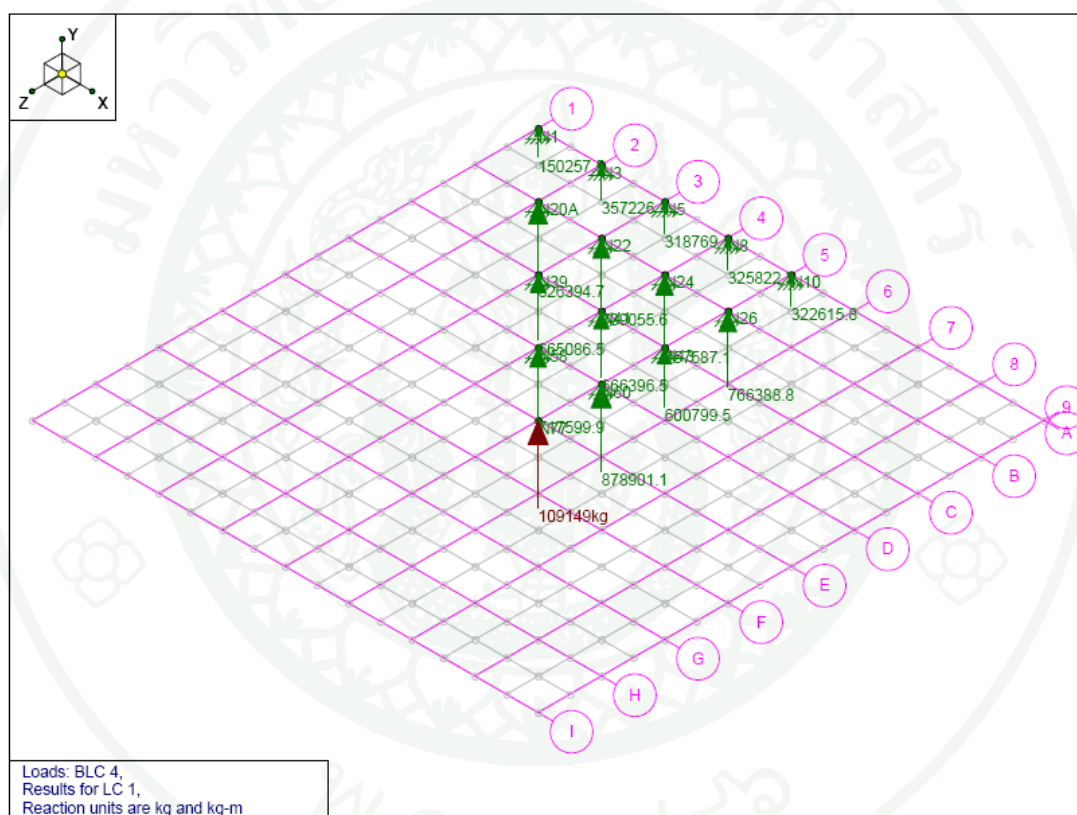
พิจารณาแรงกระทำต่อฐานรากตำแหน่งที่ 6 ของการทรุดตัว L/240 ทั้งหมดเปรียบเทียบกับฐานรากขององค์อาคารที่ไม่เกิดการทรุดตัวและเกิดการทรุดตัว พบว่ามีผลต่างของแรงที่มากระทำต่อฐานรากสามารถพิจารณา ในลักษณะขององค์อาคารที่มีความสมมาตรได้เป็น 8 ส่วนซึ่งแต่ละส่วนมีแรงกระทำต่อองค์ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถแสดงผลต่างของแรงกระทำต่อฐานรากตามรูปที่ 1



ภาพผนวกที่ 1 ฐานรากขององค์อาคารที่มีความสมมาตร 1 ใน 8 ส่วน

รูปที่ 2 และ ตารางที่ 1 โดยเปอร์เซ็นต์ผลต่างของแรงกระทำต่อ ฐานราก บริเวณ Grid line 1-A และ 2-A มีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งแสดงว่าไม่เกิดผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานรากบริเวณตำแหน่งที่ 6 ส่วนในตำแหน่งที่จุด 3-A มีค่าเท่ากับ - 0.03 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก จึงพิจารณาว่าไม่เกิดผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานรากบริเวณตำแหน่งที่ 6 เช่นกัน ส่วนในบริเวณ Grid line 4-A มีค่าเท่ากับ 0.10 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่สูงขึ้นน้อยมากซึ่งอาจพิจารณาได้ว่ามีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของการทำของฐานรากบริเวณ Grid line 5-A โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแรงกระทำต่อ

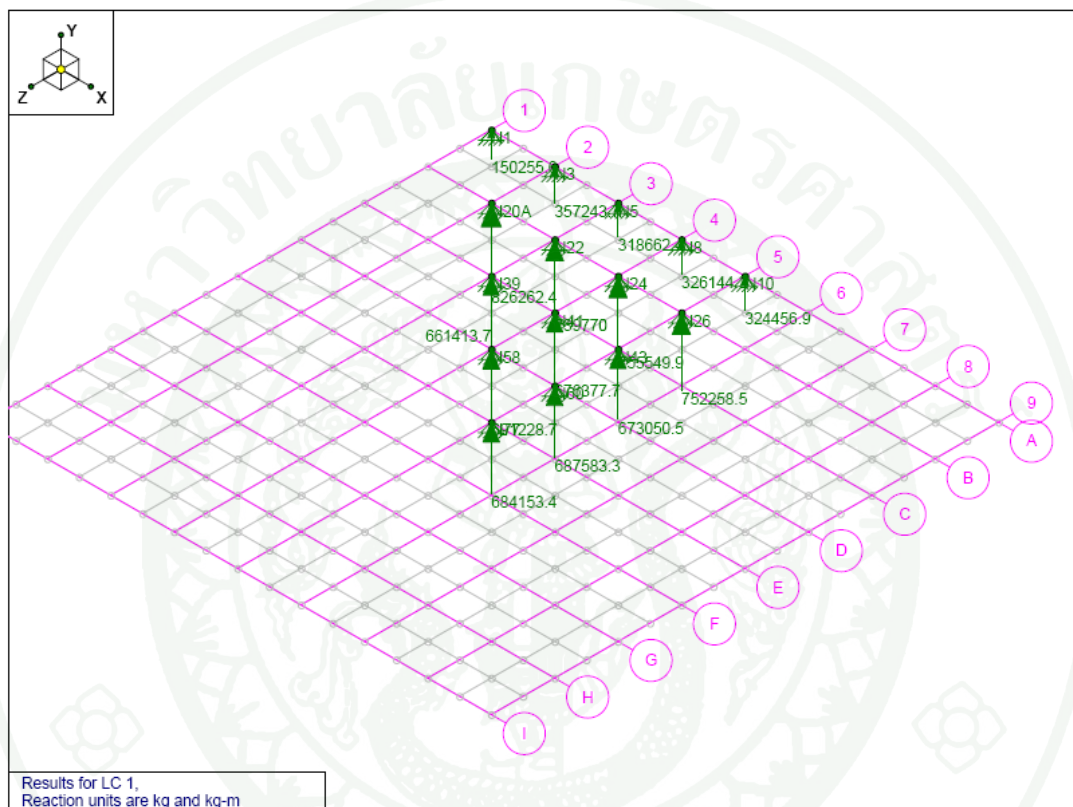
ฐานรากมีค่าเท่ากับ 0.57 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากตำแหน่งฐานราก Grid line 5-A เป็นฐานรากที่อยู่ในแนวเดียวกับจุดที่มีการทรุดตัว คือ ตำแหน่งที่ 6 Grid line 5-E แต่อยู่ในระยะที่ห่าง จึงมีผลกระทบน้อยเพราะว่ามีฐานราก 3 ตัวที่อยู่ใกล้และอยู่ในแนวเดียวกันเป็นตัวรับและกระจายน้ำหนักเนื่องจากการทรุดตัวของ ตำแหน่งที่ 6 Grid line 6-E อยู่ก่อนแล้ว ตำแหน่งบริเวณ Grid line 2-B เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อฐานรากมีค่าเท่ากับ -0.20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยแต่ก็เริ่มมีการเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตำแหน่งบริเวณ Grid line 2-A ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายแรงจากตำแหน่ง Grid line 5-B ในตำแหน่งของ Grid line 3-B ก็เช่นเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้นจาก Grid line 2-B



ภาพผนวกที่ 2 แรงปฏิกิริยาของฐานรากเกิดการทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6

โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อฐานรากมีค่าเท่ากับ 0.10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นอัตราที่เพิ่มขึ้นแต่มีค่าน้อยจึงยังไม่เกิดผลกระทบจากการทรุดตัวของฐานรากบริเวณ ตำแหน่ง 6 ในส่วนของตำแหน่ง Grid line 4-B มีค่าเพิ่มขึ้นจากตำแหน่ง Grid line 3-B โดยจะมีค่าเท่ากับ -0.27 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่าที่ได้ยังมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงไม่มีผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานรากบริเวณตำแหน่งที่ 6 ในตำแหน่งของ Grid line 5-B จะมีค่าเท่ากับ -1.88 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพิ่มขึ้น

มากกว่าแรงกระทำต่อฐานรากบริเวณ Grid line 4-B และมากกว่าบริเวณ Grid line 4-A ซึ่งอยู่ในแนวเดียวกัน เนื่องจากฐานราก Grid line 5-B อยู่ใกล้จุดที่มีการทรุดตัวมากกว่าจึงได้รับผลกระทบมากกว่า แต่ค่าที่เปลี่ยนแปลงยังมีค่าไม่มาก ถือว่า ไม่มีผลกระทบเนื่องจากการทรุดตัวของฐานราก ตำแหน่งที่ 6 มาพิจารณาบริเวณ Grid line C โดยในตำแหน่ง GL. 3-C จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเท่ากับ



ภาพผนวกที่ 3 แรงปฏิกิริยาของฐานรากไม่เกิดการทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6

-0.56 % มากเท่า GL. 3-B และ GL3-A เนื่องจากใกล้จุดที่เกิดการทรุดตัวมากกว่าตำแหน่ง GL. 4-C มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 1.48 % มากกว่า GL. 4-B และ GL. 4-A โดยตำแหน่ง GL. 5-C จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 10.73 % ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่า GL4-C มาก เนื่องจากเป็นแนวคานกันเดียวกับการทรุดตัว เมื่อพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นต่อฐานรากจะน้อยกว่าปกติ 10.73 % เนื่องจากการทรุดตัวของตำแหน่งที่ 6 GL. 5-E เมื่อมีการทรุดตัวฐานรากจะรับน้ำหนักน้อยลงและคานจะเป็นตัวถ่ายแรงเนื่องจากการทรุดตัวมายังตำแหน่งที่ 5-D ซึ่งในตำแหน่งนี้ จะมีการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นถึง 27.82 % จากการรับน้ำหนักของเดิมที่ไม่เกิดการทรุดตัวและคานมีการค้ำขึ้นหลังจากผ่านจุด GL5-D ทำให้จุด GL5- E รับแรงน้อยลงจากปกติ 10.73 % และจะเพิ่มขึ้นที่จุด GL5-B ซึ่งมี

ค่าเปลี่ยนแปลง 1.88 % และจุด GL5- A จะน้อยลง 0.57 % ซึ่งมีค่าน้อยและไม่เกิดผลกระทบต่อเสาเข็มแล้ว เมื่อมาพิจารณา GL4-D ค่าเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเท่ากับ 3.82 % ซึ่งเป็นค่าที่รับน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากการพิจารณายังมีค่าไม่มากที่จะส่งผลกระทบต่อฐานรากถึงตำแหน่ง GL4-D จะอยู่ใกล้ฐานรากที่การทรุดตัวมาก เนื่องจากตำแหน่ง GL4-D ไม่มีแนวแกนที่จะถ่ายเทแรงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมาสู่ตำแหน่ง GL4-D โดยตรงค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้จึงมีค่าน้อยโดยค่าที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 3.82 % เกิดขึ้นนี้เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของฐานรากบริเวณ GL5-D และ GL4-E ได้รับผลกระทบน้อย

ตารางผนวกที่ 1 เปรียบเทียบแรงกระทำต่อฐานรากไม่ทรุดตัวและทรุดตัว ที่ L/240 ณ ตำแหน่งที่ 6

Grid Line			ไม่ทรุดตัว	ทรุดตัว	Local		%ผลต่าง
		Node	Ry(Kg.)	Ry(Kg.)	X	Local Y	Ry(Kg.)
1	A	N1	150255.6	150257.498	0	0	0.00
2	A	N3	357243.7	357226.034	10	0	0.00
3	A	N5	318662.4	318768.966	20	0	0.03
4	A	N8	326144.3	325822.264	30	0	-0.10
5	A	N10	324456.9	322615.828	40	0	-0.57
6	A	N13	326118.9	325796.783	50	0	-0.10
7	A	N15	319063.1	319169.751	60	0	0.03
8	A	N18	356668.3	356650.712	70	0	0.00
9	A	N20	156509.9	156511.816	80	0	0.00
2	B	N20A	826262.4	826394.658	10	10	0.02
3	B	N22	739770	739055.61	20	10	-0.10
4	B	N24	755549.9	757587.085	30	10	0.27
5	B	N26	752258.5	766388.775	40	10	1.88
3	C	N39	661413.7	665086.477	20	20	0.56
4	C	N41	676377.7	666396.498	30	20	-1.48

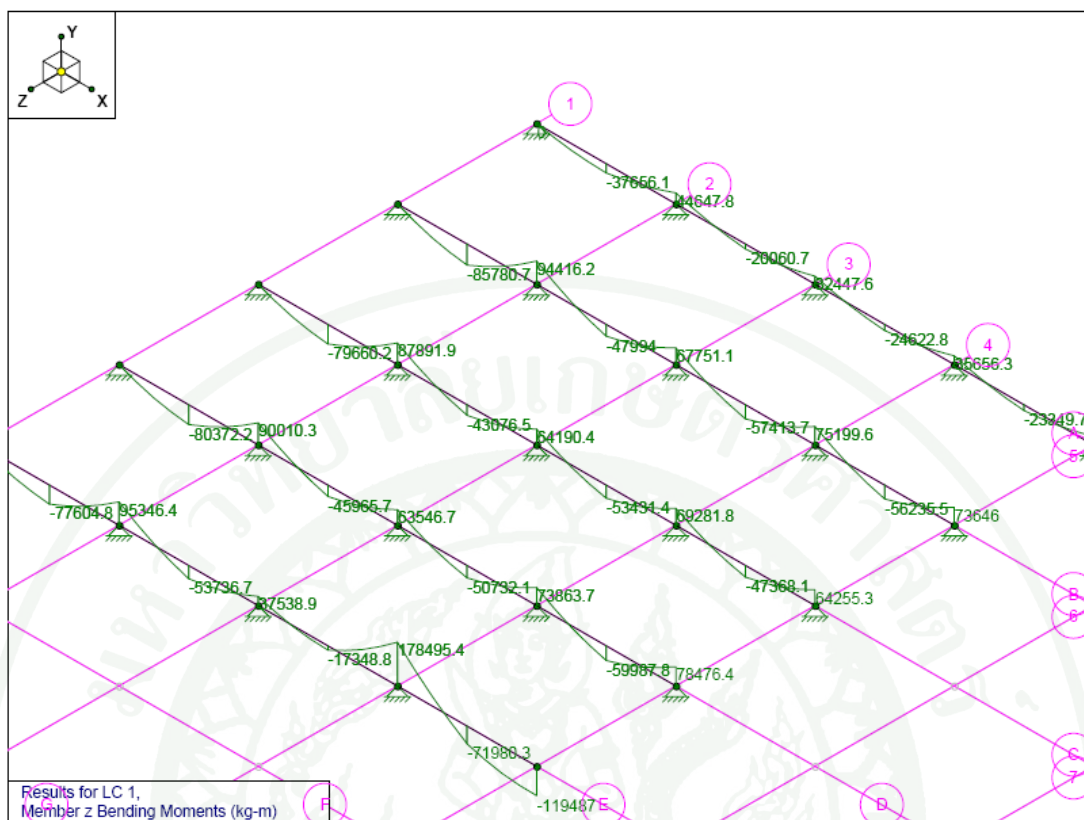
ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

Grid Line			ไม่ทรุดตัว	ทรุดตัว				%ผลต่าง
			Local					
		Node	Ry(Kg.)	Ry(Kg.)	X	Local Y	Ry(Kg.)	
5	C	N43	673050.6	600799.533	40	20		-10.73
4	D	N58	691228.7	717599.91	30	30		3.82
5	D	N60	687583.3	878901.09	40	30		27.82
5	E	N77	684153.4	109,149.00	40	40		-84.05

สรุป การเปลี่ยนแปลงของแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในฐานราก เนื่องจากการทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 6 GL.5-E จะมีผลกระทบต่อฐานรากที่อยู่ในแนวแกนเดียวกับจุดที่เกิดการทรุดตัว โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในฐานรากที่อยู่ใกล้ที่สุดจะมีการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น 27.82 % ทั้ง 4 ด้าน ฐานรากถัดไปจะรับน้ำหนักน้อยลงจากเดิมเนื่องจากการทรุดตัวจะทำให้คันมีการ โกงตัวมีผลทำให้เกิดการรุดขึ้นในฐานรากตัวถัดไป จะทำให้ฐานรากในตัวถัดไปรับน้ำหนักลดลงโดยจะลดลงเท่ากับ 10.73 % ทั้ง 4 ด้าน ฐานรากตัวถัดไปจะรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1.88 % และฐานรากตัวถัดไปจะรับน้ำหนักลดลง 0.57 %

พิจารณาพฤติกรรมของคานเนื่องจากการทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 6 ของการทรุดตัว L/240 ทั้งหมดเปรียบเทียบกับฐานรากขององค์อาคารที่ไม่เกิดการทรุดตัวและเกิดการทรุดตัว พบว่ามีผลต่างของแรงที่มากระทำต่อฐานรากสามารถพิจารณา ในลักษณะขององค์อาคารที่มีความสมมาตรได้เป็น 8 ส่วนซึ่งแต่ละส่วนมีแรงกระทำต่อองค์ใกล้เคียงกันและเพื่อเป็นการแสดงค่าของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ที่ต่อเนื่องกันจึงนำเสนอรูปแบบของโดยการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คัตของคานเนื่องในแนวของ GL. A-E โดยจะแสดงผลจากการทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 6 มีดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คัตและแรงเฉือนของคานเนื่องจากการทรุดตัวของฐานรากตำแหน่งที่ 6 ต่อคานชั้น Ground มีผลดังนี้



ภาพผนวกที่ 4 โมเมนต์คัตชั้น Ground ที่เกิดการทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6

พิจารณา โมเมนต์คัตในแนว GL. 1-5, A

การเปลี่ยนแปลง Moment ของคาน โดยพิจารณา GL. 1-5, A มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

พิจารณา Moment บริเวณ GL1, A มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0 % (ไม่เปลี่ยนแปลง)

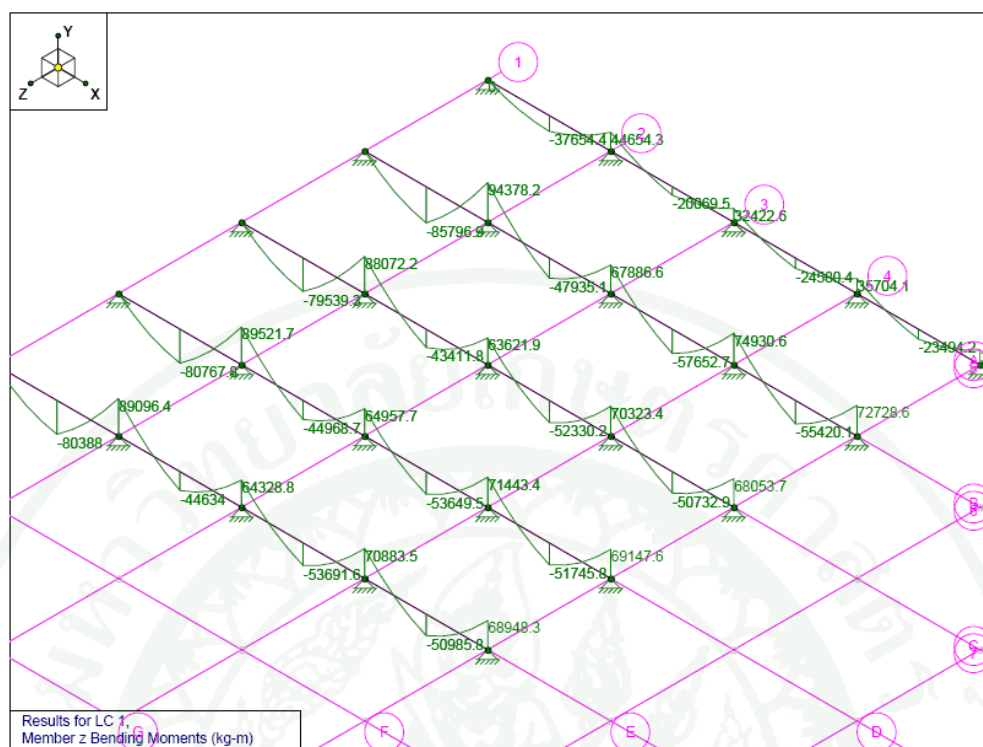
พิจารณา Moment + บริเวณ GL1- 2, A มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.00457 % (มีค่าลดลง)

พิจารณา Moment - บริเวณ GL 2, A มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ - 0.0146 % (มีค่าลดลง)

พิจารณา Moment + บริเวณ GL 2-3, A มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ - 0.04373 % (มีค่าลดลง)

พิจารณา Moment - บริเวณ GL 3, A มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.07713 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)

พิจารณา Moment + บริเวณ GL 3-4, A มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.17245 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)



ภาพผนวกที่ 5 โมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ไม่เกิดการทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6

พิจารณา Moment - บริเวณ GL 4,A มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ - 0.13371 % (มีค่าลดลง)

พิจารณา Moment + บริเวณ GL 4-5 ,A มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ - 0.615 % (มีค่าลดลง)

พิจารณา Moment - บริเวณ GL 5 ,A มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ - 0.469 % (มีค่าลดลง)

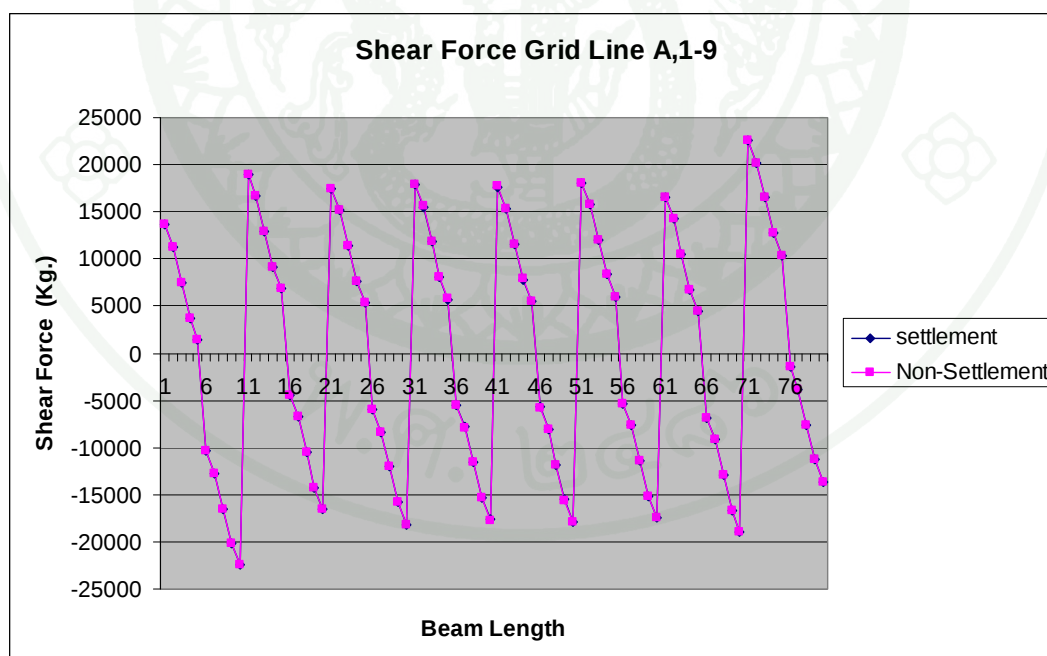
จากผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดของคานใน GL. 1-5,A ซึ่งจะเห็นได้แก่ค่าเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดของคานใน GL. A (รอบนอกอาคาร) มีผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดเนื่องจากการทรุดตัวของฐานรากในตำแหน่งที่ 6 น้อยมาก (ค่าสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดเท่ากับ - 0.615 %) จึงถือว่าไม่เกิดผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 6

พิจารณา แรงเฉือนในแนว GL. 1-5, A

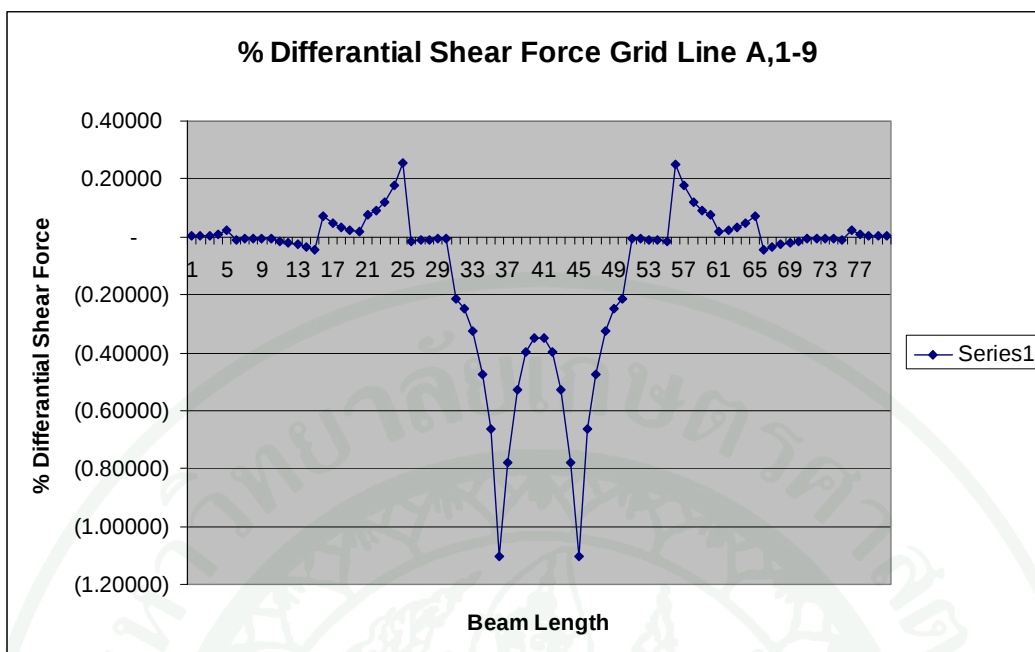
การเปลี่ยนแปลง แรงเฉือน ของคานโดยพิจารณา GL. 1-5 ,A มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
พิจารณา แรงเฉือน บริเวณ GL1,A มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.00253 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)

พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL1- 2,A	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.00920 % (มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 2,A	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.01609 % (มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 2-3,A	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.07302 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 3,A	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.07722 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 3-4 ,A	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.01782 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 4,A	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ - 0.21473 % (มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 4-5 ,A	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ - 1.10256 % (มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 5 ,A	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ - 0.34701 % (มีค่าลดลง)

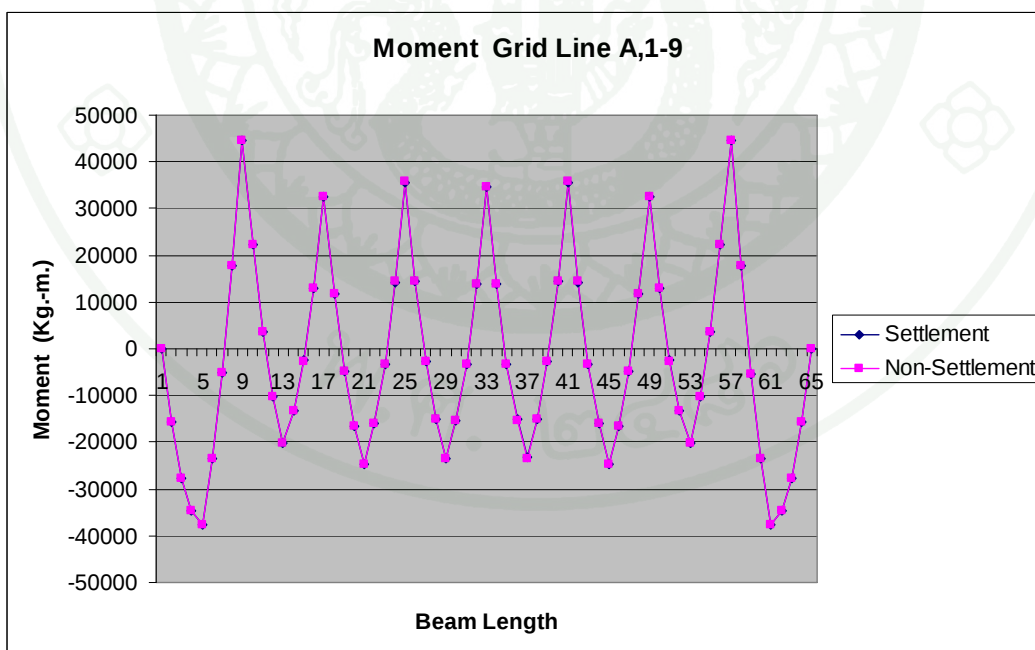
จากผลของการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนของคานใน GL. 1-5, A ซึ่งจะเห็นได้แก่ค่าเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนของคานใน GL.A (รอบนอกอาคาร) มีผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเนื่องจากการทรุดตัวของฐานรากในตำแหน่งที่ 6 น้อยมาก (ค่าสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนตัดเท่ากับ - 1.10256 %) จึงถือว่าไม่เกิดผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 6



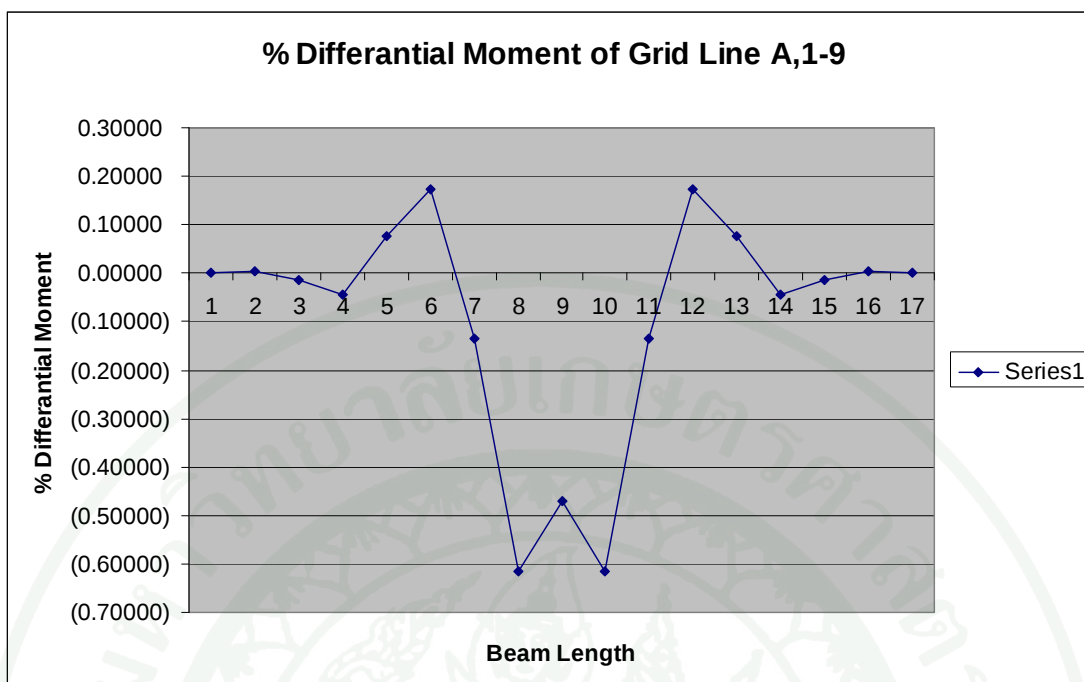
ภาพผนวกที่ 6 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL A, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)



ภาพผนวกที่ 7 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL A, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)



ภาพผนวกที่ 8 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คัดชั้น Ground ที่ GL A, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)



ภาพผนวกที่ 9 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ GL A, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)

พิจารณา โมเมนต์ดัดในแนว GL. 1-5, B

การเปลี่ยนแปลง Moment ของคาน โดยพิจารณา GL. 1-5 ,B มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของ GL1-5, A แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงยังมีค่าที่น้อยอยู่ ดังแสดงต่อไปนี้

พิจารณา Moment บริเวณ GL1, B มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0 % (ไม่เปลี่ยนแปลง)

พิจารณา Moment + บริเวณ GL1- 2, B มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.01883 % (มีค่าลดลง)

พิจารณา Moment - บริเวณ GL 2, B มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.04024 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)

พิจารณา Moment + บริเวณ GL 2-3, B มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.12276 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)

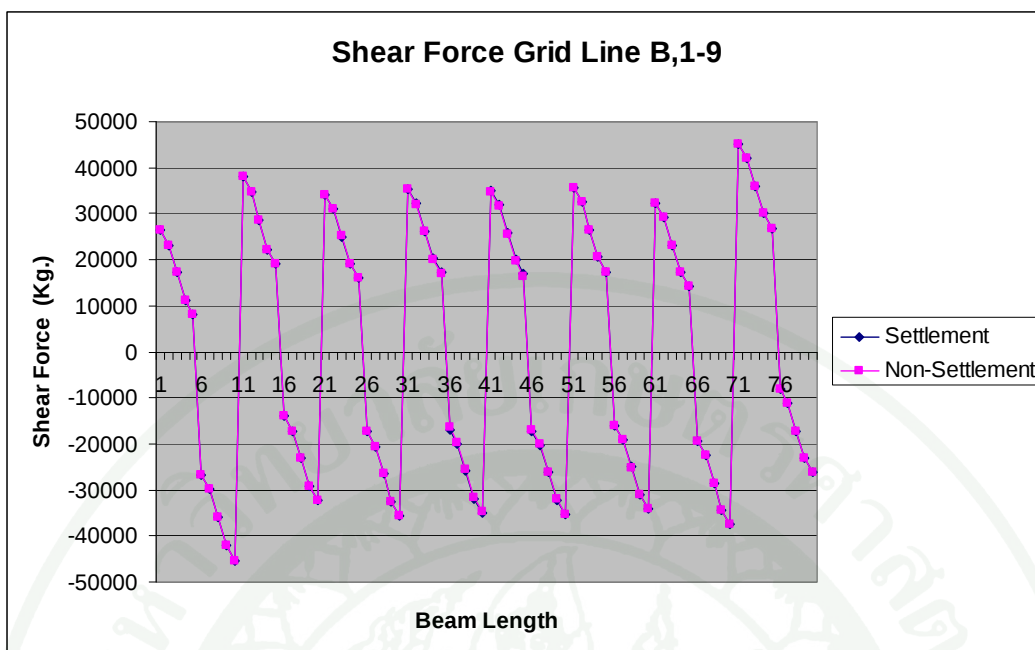
พิจารณา Moment - บริเวณ GL 3, B มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.19966 % (มีค่าลดลง)

พิจารณา Moment + บริเวณ GL 3-4 , B มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.41454 % (มีค่าลดลง)

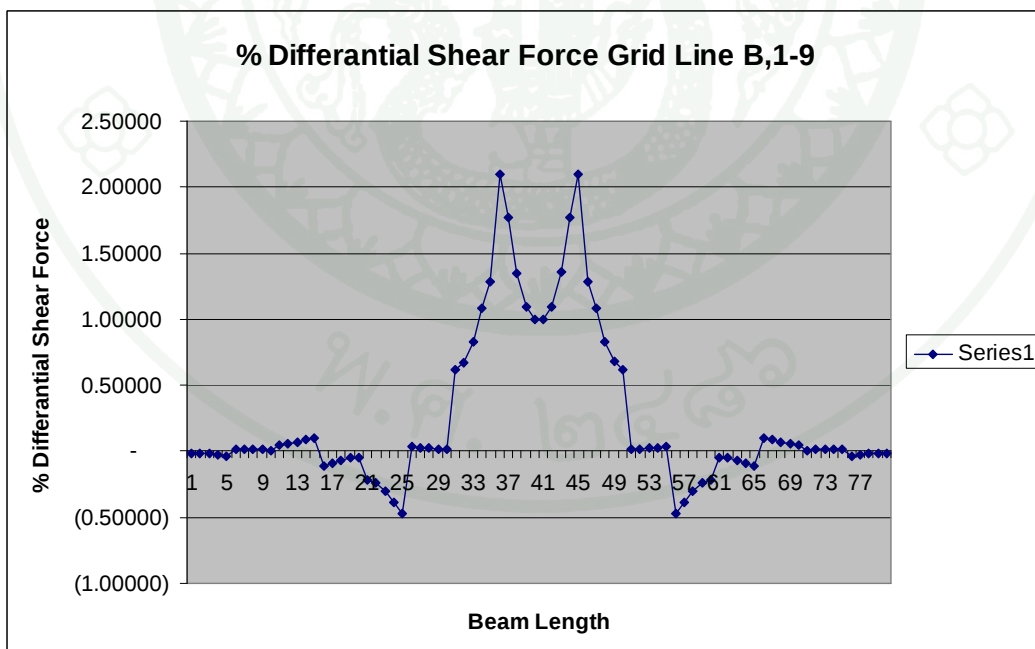
พิจารณา Moment - บริเวณ GL 4, B มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.35904 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)

พิจารณา Moment + บริเวณ GL 4-5, B มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 1.47132 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)

พิจารณา Moment - บริเวณ GL 5 , B มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 1.26140 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)

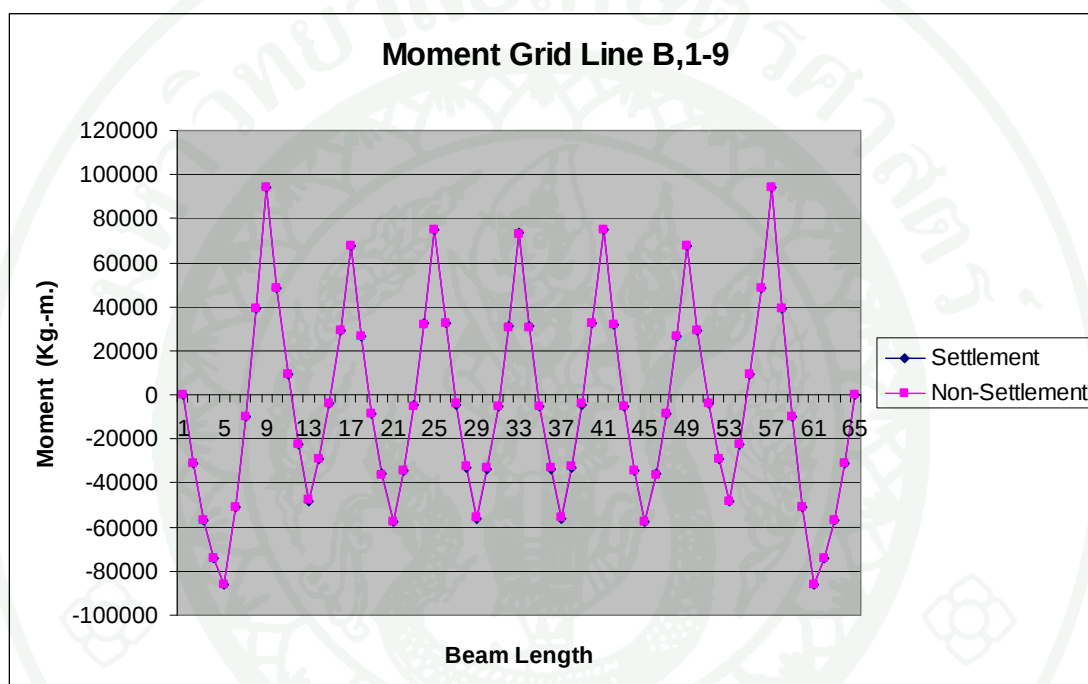


ภาพผนวกที่ 10 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL B, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)

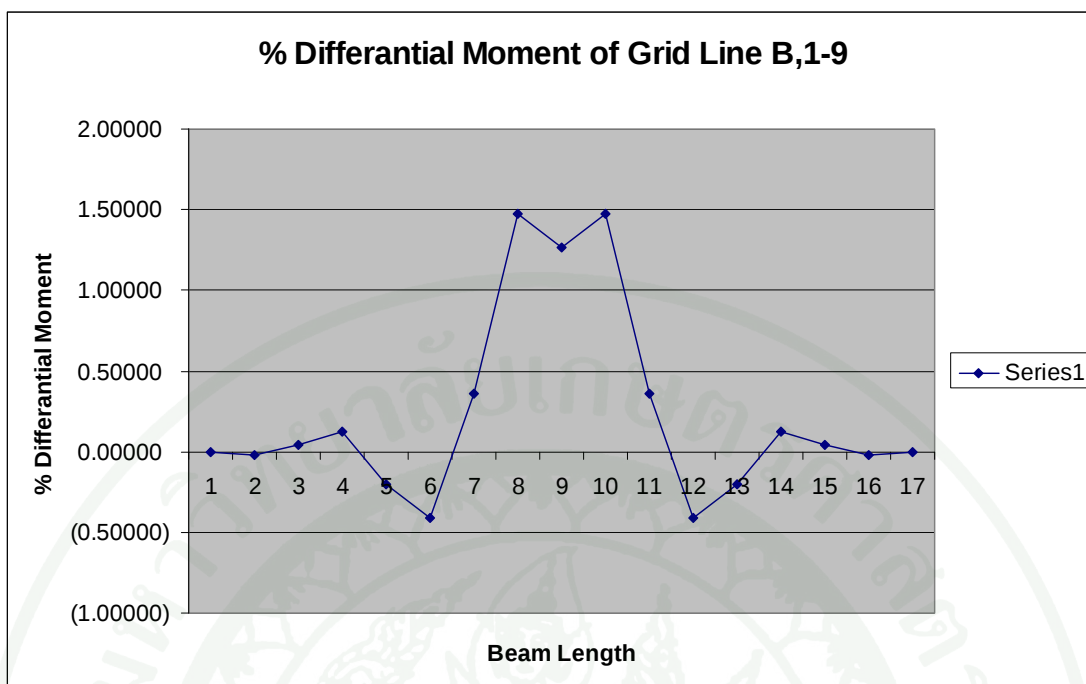


ภาพผนวกที่ 11 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL B, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)

จากผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดของคานใน GL. 1-5, B ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดของคานบริเวณคาน GL. 1-5, B (ห่างจากจุดพิจารณา 30 เมตร) มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในแนว GL. 1-5, A แต่ค่าที่ได้มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สูงมากนัก คือมีค่าการเปลี่ยนแปลงในส่วนของโมเมนต์บวก (+) เพิ่มขึ้น 1.47132 % และค่าการเปลี่ยนแปลงในส่วนของโมเมนต์ลบ (-) เพิ่มขึ้น 1.26140 % ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อย จึงถือว่าไม่เกิดผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 6



ภาพผนวกที่ 12 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ GL B, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)



ภาพผนวกที่ 13 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คัตฐาน Ground ที่ GL B, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)

พิจารณา แรงเฉือนในแนว GL. 1-5, B

การเปลี่ยนแปลง แรงเฉือน ของคานโดยพิจารณา GL. 1-5 ,B มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการเปลี่ยนแปลง แรงเฉือน ของ GL1-5, A แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงยังมีค่าที่น้อยอยู่ ดังแสดงต่อไปนี้

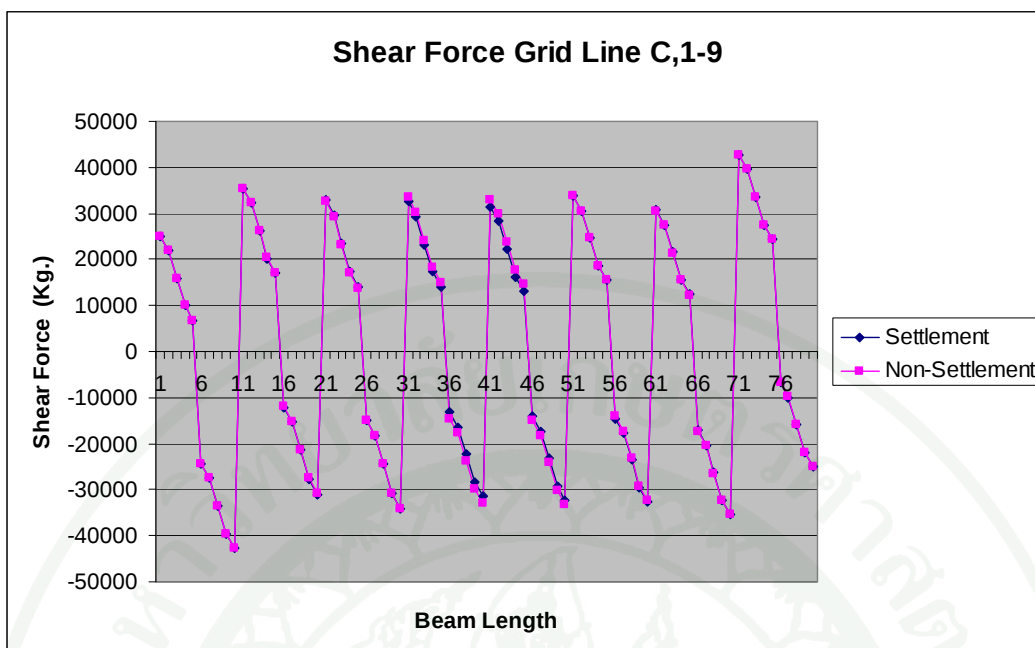
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL1, B	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.01228 % (มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL1- 2, B	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.01628 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 2, B	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.05103 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 2-3, B	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.11026 % (มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 3, B	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ - 0.21882 % (มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 3-4 , B	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.03455 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 4, B	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.61562 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 4-5 , B	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 2.09977% (มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 5 , B	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.99716 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)

จากผลของการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนของคานใน GL. 1-5, B ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนของคานบริเวณคาน GL. 1-5, B (ห่างจากจุดพิจารณา 30 เมตร) มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในแนว GL. 1-5, A แต่ค่าที่ได้มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สูงมากนัก คือมีค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดเพิ่มขึ้น 2.09977 % ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อย จึงถือว่าไม่เกิดผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 6

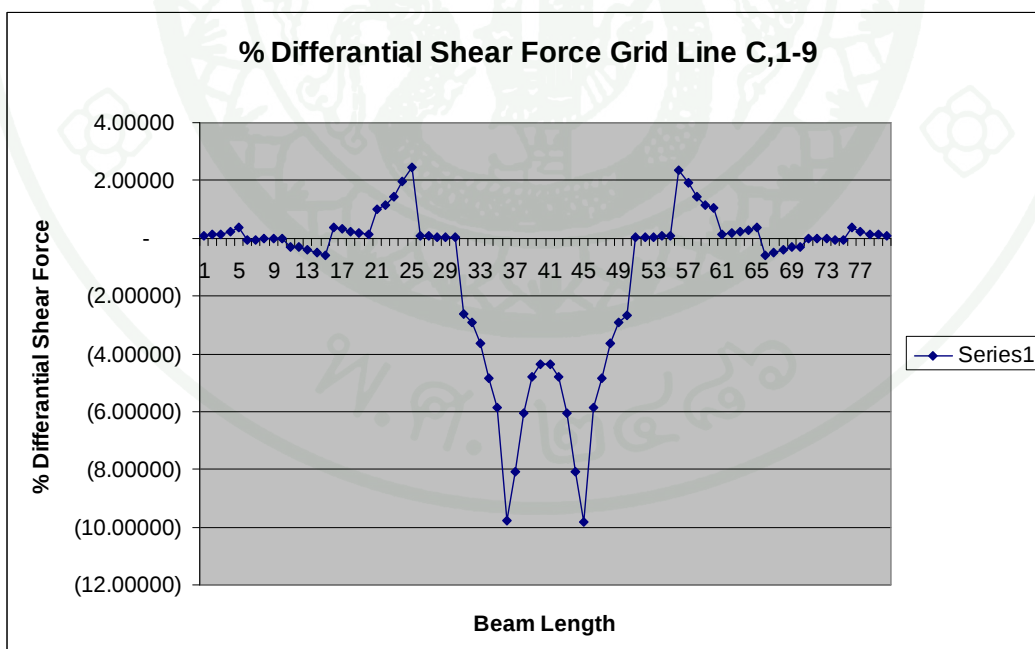
พิจารณา โมเมนต์ดัดในแนว GL. 1-5, C

การเปลี่ยนแปลง Moment ของคานโดยพิจารณา GL. 1-5, C มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของ GL1-5, B แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงยังมีค่าที่น้อยอยู่ ดังแสดงต่อไปนี้

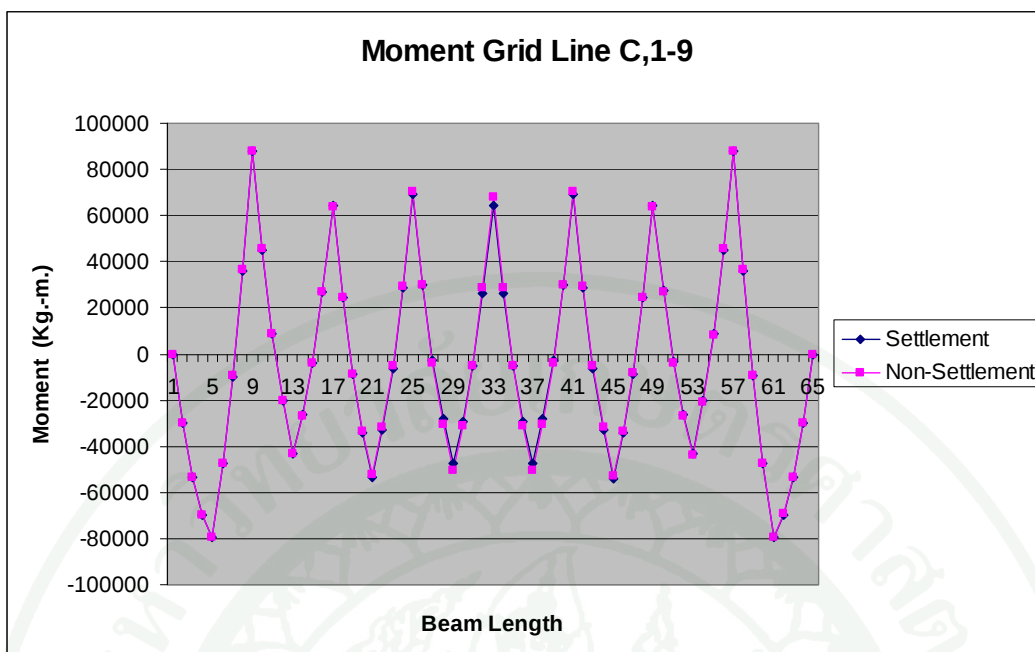
พิจารณา Moment บริเวณ GL1, C มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0 % (ไม่เปลี่ยนแปลง)
 พิจารณา Moment + บริเวณ GL1- 2, C มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.15203 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
 พิจารณา Moment - บริเวณ GL 2, C มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.04024 % (มีค่าลดลง)
 พิจารณา Moment + บริเวณ GL 2-3, C มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.77247 % (มีค่าลดลง)
 พิจารณา Moment - บริเวณ GL 3, C มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.89350 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
 พิจารณา Moment + บริเวณ GL 3-4, C มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 2.10435 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
 พิจารณา Moment - บริเวณ GL 4, C มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -1.48113 % (มีค่าลดลง)
 พิจารณา Moment + บริเวณ GL 4-5, C มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -6.63233 % (มีค่าลดลง)
 พิจารณา Moment - บริเวณ GL 5, C มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -5.58154 % (มีค่าลดลง)



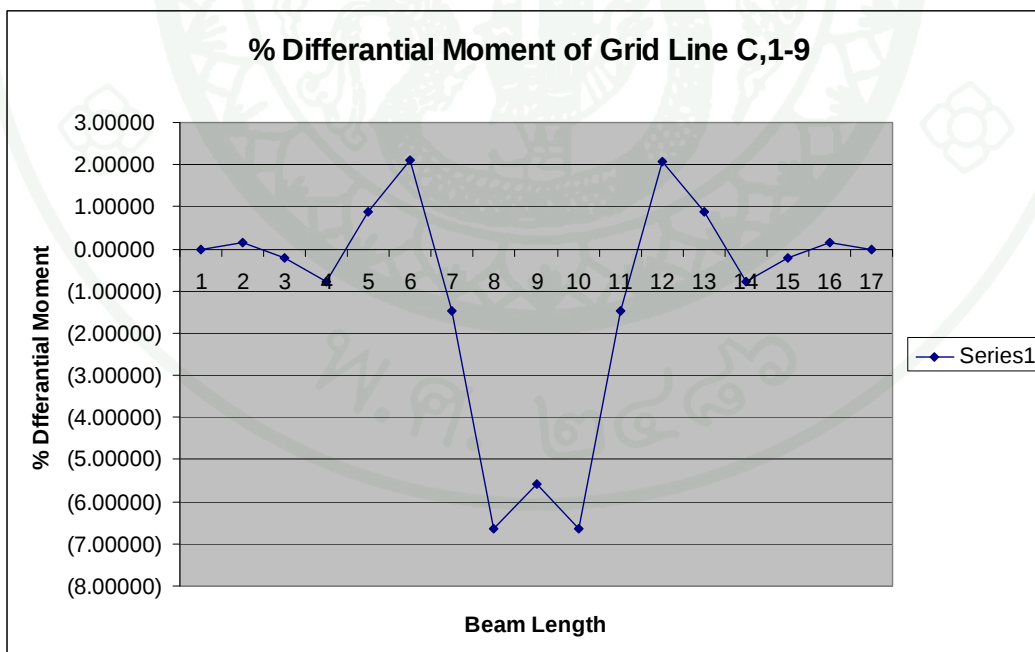
ภาพผนวกที่ 14 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL C, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)



ภาพผนวกที่ 15 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL C, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)



ภาพผนวกที่ 16 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดขึ้น Ground ที่ GL C, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)



ภาพผนวกที่ 17 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดขึ้น Ground ที่ GL C, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)

จากผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คัตของคานใน GL. 1-5, C ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คัตของคานบริเวณคาน GL. 1-5, B (ห่างจากจุดพิจารณา 20 เมตร) มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในแนว GL. 1-5, B แต่ค่าที่ได้มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สูงมากนัก คือมีค่าการเปลี่ยนแปลงในส่วนของโมเมนต์บวก (+) ลดลง -6.63233 % และค่าการเปลี่ยนแปลงในส่วนของโมเมนต์ลบ (-) ลดลง -5.58154 % ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อย

พิจารณา แรงเฉือนในแนว GL. 1-5, C

การเปลี่ยนแปลง แรงเฉือน ของคานโดยพิจารณา GL. 1-5, C มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนของ GL1-5, B แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงยังมีค่าที่น้อยอยู่ ดังแสดงต่อไปนี้

พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL1, C	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.09661 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL1- 2, C	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.04866 % (มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 2, C	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.29113 % (มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 2-3, C	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.38754 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 3, C	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 1.02126 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 3-4, C	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.07939 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 4, C	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -2.62268 % (มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 4-5, C	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -9.79094 % (มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 5, C	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -4.35688 % (มีค่าลดลง)

จากผลของการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนของคานใน GL. 1-5, C ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนของคานบริเวณคาน GL. 1-5, B (ห่างจากจุดพิจารณา 20 เมตร) มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในแนว GL. 1-5, B แต่ค่าที่ได้มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สูงมากนัก คือมีค่าการเปลี่ยนแปลงในส่วนของแรงเฉือนมากที่สุด ลดลง -9.79094 ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อย

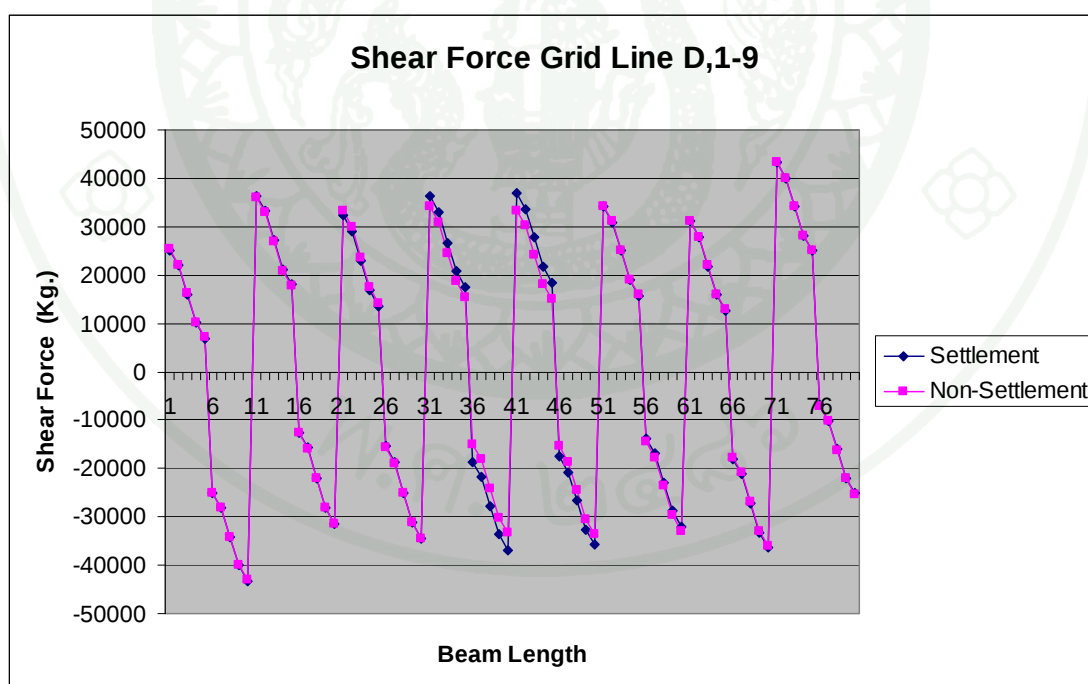
พิจารณา โมเมนต์คัตในแนว GL. 1-5, D

การเปลี่ยนแปลง Moment ของคานโดยพิจารณา GL. 1-5, D มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของ GL1-5, C แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงยังมีค่าที่น้อยอยู่ ดังแสดงต่อไปนี้

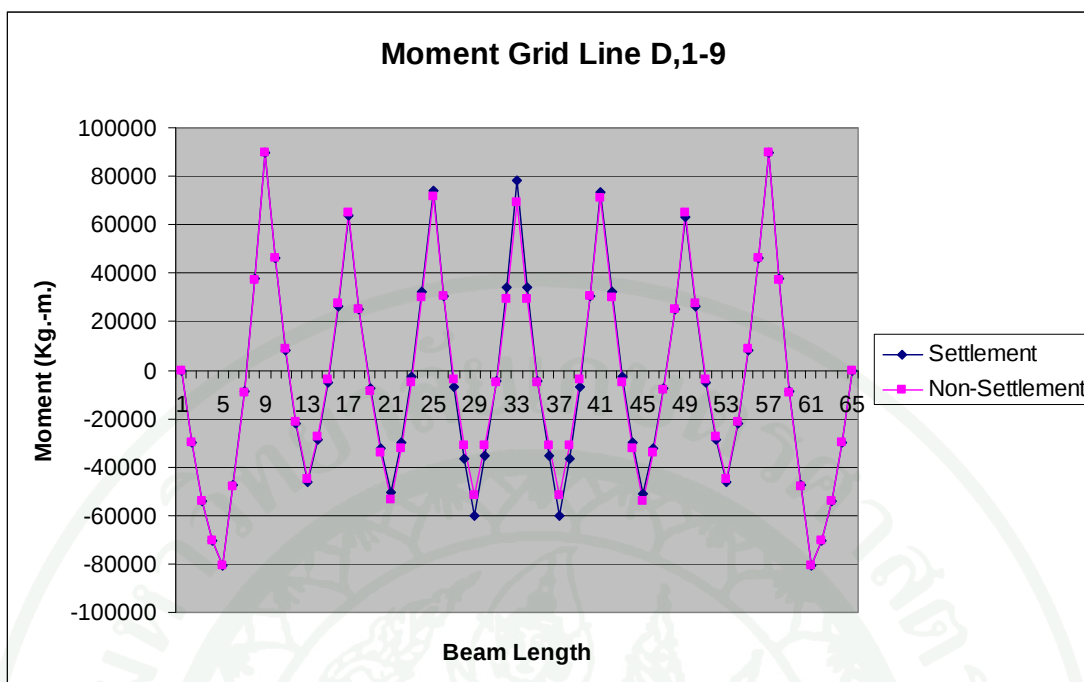
พิจารณา Moment	บริเวณ GL1, D	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0 % (ไม่เปลี่ยนแปลง)
พิจารณา Moment +	บริเวณ GL1- 2, D	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.48975 % (มีค่าลดลง)
พิจารณา Moment -	บริเวณ GL 2, D	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.54572 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)

พิจารณา Moment + บริเวณ GL 2-3, D มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 2.2170 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
 พิจารณา Moment - บริเวณ GL 3, D มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -2.17211 % (มีค่าลดลง)
 พิจารณา Moment + บริเวณ GL 3-4, D มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -5.43791 % (มีค่าลดลง)
 พิจารณา Moment - บริเวณ GL 4, D มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 3.38766 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
 พิจารณา Moment + บริเวณ GL 4-5, D มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 15.92790 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)
 พิจารณา Moment - บริเวณ GL 5, D มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 13.49109 % (มีค่าเพิ่มขึ้น)

จากผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คดของคานใน GL. 1-5, D ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คดของคานบริเวณคาน GL. 1-5, D (ห่างจากจุดพิจารณา 10 เมตร) มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในแนว GL. 1-5, C และค่าที่ได้มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่สูงมากขึ้น เนื่องจากจุดที่พิจารณาเข้าใกล้จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นจึงได้รับผลกระทบจากการทรุดตัวมากขึ้น คือมีค่าการเปลี่ยนแปลงในส่วนของโมเมนต์บวก (+) มากที่สุดของ GL. 1-5, D เพิ่มขึ้น 15.92790 % และค่าการเปลี่ยนแปลงในส่วนของโมเมนต์ลบ (-) มากที่สุดของ GL. 1-5, D เพิ่มขึ้น 13.49109 % ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่สูงและจะมีผลกระทบต่อความสามารถรับโมเมนต์ในของคานได้



ภาพผนวกที่ 18 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL D, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)



ภาพผนวกที่ 19 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ GL D, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)

พิจารณา แรงเฉือนดัดในแนว GL. 1-5, D

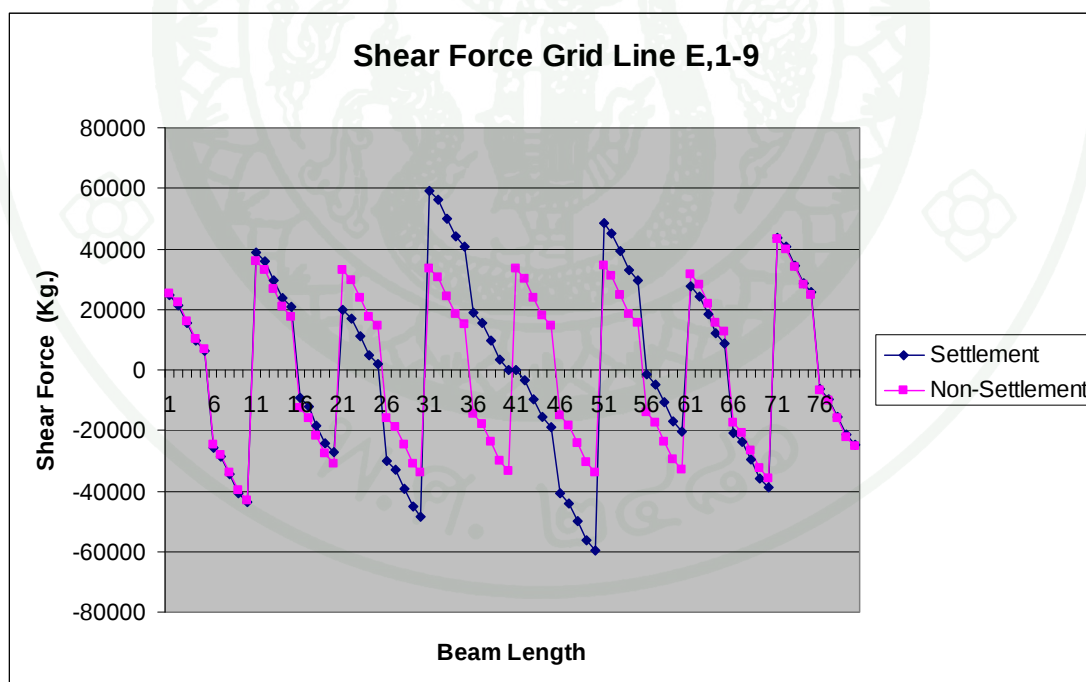
การเปลี่ยนแปลง แรงเฉือน ของคานโดยพิจารณา GL. 1-5 , D มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนของ GL1-5, C แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงยังมีค่าน้อยอยู่ ดังแสดงต่อไปนี้

พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL1, D	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.31322 %	(มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL1- 2, D	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.07452%	(มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 2, D	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.82525 %	(มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 2-3, D	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -0.65440 %	(มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 3, D	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ - 2.60853 %	(มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 3-4 , D	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ - 0.63927 %	(มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 4, D	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 6.26273 %	(มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 4-5 , D	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 23.37762 %	(มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเฉือน	บริเวณ GL 5 , D	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 10.54353 %	(มีค่าเพิ่มขึ้น)

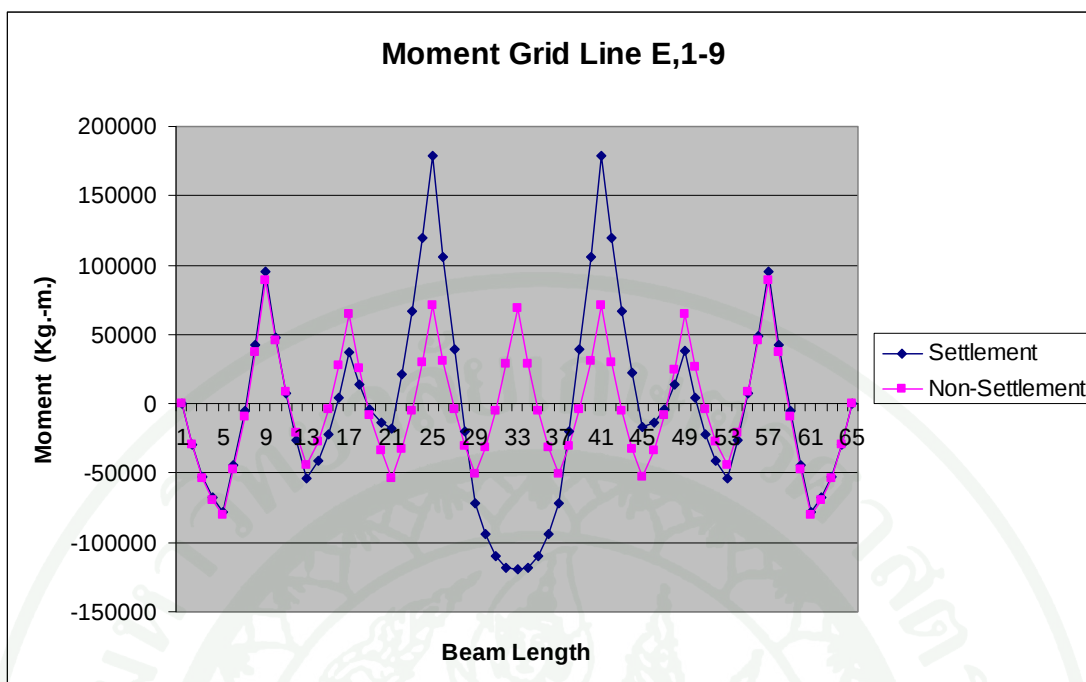
จากผลของการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนของคานใน GL. 1-5, D ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนของคานบริเวณคาน GL. 1-5, D (ห่างจากจุดพิจารณา 10 เมตร) มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในแนว GL. 1-5, C และค่าที่ได้มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่สูงมากขึ้น เนื่องจากจุดที่พิจารณาเข้าใกล้จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นจึงได้รับผลกระทบจากการทรุดตัวมากขึ้น คือมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของแรงเฉือนมากที่สุดของ GL. 1-5, D เพิ่มขึ้น 23.37762 % ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่สูงและจะมีผลกระทบต่อความสามารถรับแรงเฉือนในของคานได้

พิจารณา โมเมนต์คัตในแนว GL. 1-5, E

การเปลี่ยนแปลง Moment ของคานโดยพิจารณา GL. 1-5, E มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของ GL1-5, C โดยค่าการเปลี่ยนแปลงที่มีค่าสูงเนื่องจากอยู่ในแนวคานเดียวกับจุดที่เกิดการทรุดตัวจึงได้รับผลกระทบโดยตรงทำให้เกิดค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์สูง ดังแสดงต่อไปนี้

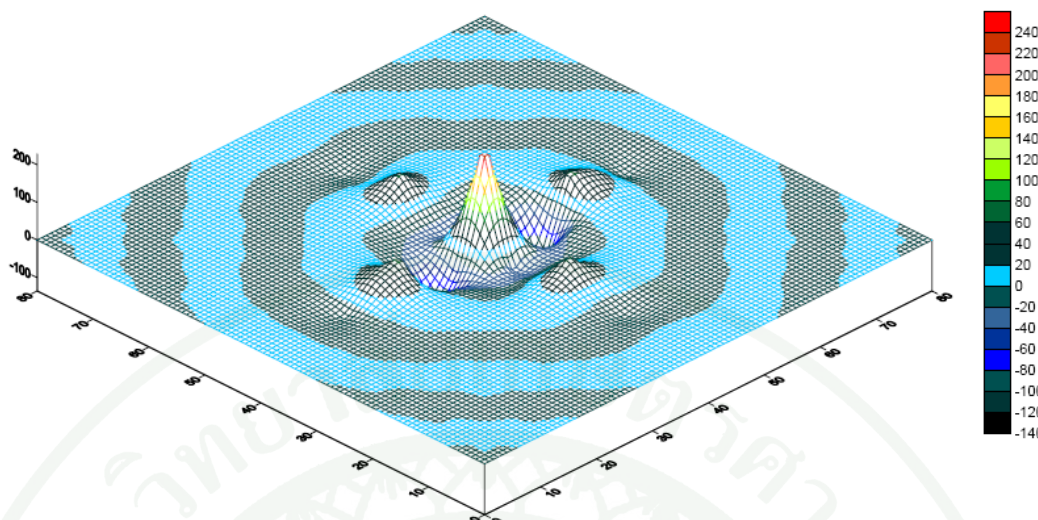


ภาพผนวกที่ 20 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนชั้น Ground ที่ GL E, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)



ภาพผนวกที่ 21 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดชั้น Ground ที่ GL D, 1-9 (การทรุดตัวที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6)

พิจารณา Moment	บริเวณ GL1, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0 %	(ไม่เปลี่ยนแปลง)
พิจารณา Moment +	บริเวณ GL1- 2, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -3.46220 %	(มีค่าลดลง)
พิจารณา Moment -	บริเวณ GL 2, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 7.01493 %	(มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา Moment +	บริเวณ GL 2-3, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 20.39413 %	(มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา Moment -	บริเวณ GL 3, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -41.64528 %	(มีค่าลดลง)
พิจารณา Moment +	บริเวณ GL 3-4, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -67.68813 %	(มีค่าลดลง)
พิจารณา Moment -	บริเวณ GL 4, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 151.81504 %	(มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา Moment +	บริเวณ GL 4-5, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 41.17705 %	(มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา Moment -	บริเวณ GL 5, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ - 273.29937 %	(เปลี่ยนทิศ)



ภาพผนวกที่ 22 ภาพการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คัตชั้น Ground ที่ L/240 บริเวณตำแหน่งที่ 6

จากผลของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คัตของคานใน GL. 1-5, E ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คัตของคานบริเวณคาน GL. 1-5, D และเป็นแนวเดียวกับจุดที่เกิดการทรุดตัว มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในแนว GL. 1-5, E โดยค่าที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงที่สูงมาก โดยจุดเริ่มของคานไม่มีการเปลี่ยนแปลงและในจุดถัดมา คือจุดกึ่งกลางของฐานรากด้านขอบและฐานรากลำดับที่สองมีการเปลี่ยนแปลงลดลง 3.46220 % ซึ่งยังถือว่าไม่มาก ต่อมาตำแหน่งหัวเสาที่สองมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 7.01493 % ถัดมากลางช่วงคานที่สองการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 20.39413 % ซึ่งเป็นการการเปลี่ยนแปลงที่สูง ต่อมาตำแหน่งหัวเสาที่สามมีการเปลี่ยนแปลงลดลง 41.64528 % ในช่วงคานที่สามการเปลี่ยนแปลงลดลง -67.68813 % ต่อมาตำแหน่งหัวเสาที่สี่ มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 151.81504 % ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก ถัดมากลางช่วงคานที่สี่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 41.17705 % และในจุดที่เกิดการทรุดตัวมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์โดยการเปลี่ยนทิศ เดิมเป็นโมเมนต์ลบที่หัวเสาเปลี่ยนทิศกลายเป็น โมเมนต์บวก และต่างทิศทางการเสริมเหล็กเดิม โดยค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงคือ - 273.29937 % ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก

พิจารณา แรงเหวี่ยงในแนว GL. 1-5, E

การเปลี่ยนแปลง แรงเหวี่ยง ของคานโดยพิจารณา GL. 1-5 , E มีค่าการเปลี่ยนแปลง มากกว่าการเปลี่ยนแปลงแรงเหวี่ยงของ GL1-5, C โดยค่าการเปลี่ยนแปลงที่มีค่าสูงเนื่องจากอยู่ใน แนวคานเดียวกับจุดที่เกิดการทรุดตัวจึงได้รับผลกระทบโดยตรงทำให้เกิดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเหวี่ยง สูง ดังแสดงต่อไปนี้

พิจารณา แรงเหวี่ยง	บริเวณ GL1, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 2.20866 %	(มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเหวี่ยง	บริเวณ GL1- 2, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 2.79902 %	(มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเหวี่ยง	บริเวณ GL 2, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 8.55997 %	(มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเหวี่ยง	บริเวณ GL 2-3, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -27.92520 %	(มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเหวี่ยง	บริเวณ GL 3, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -38.57900 %	(มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเหวี่ยง	บริเวณ GL 3-4 , E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 90.27093 %	(มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเหวี่ยง	บริเวณ GL 4, E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 76.43310 %	(มีค่าเพิ่มขึ้น)
พิจารณา แรงเหวี่ยง	บริเวณ GL 4-5 , E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -231.28759 %	(มีค่าลดลง)
พิจารณา แรงเหวี่ยง	บริเวณ GL 5 , E	มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -99.98068%	(เปลี่ยนทิศ)

จากผลของการเปลี่ยนแปลงแรงเหวี่ยงของคานใน GL. 1-5, E ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเปลี่ยนแปลงแรงเหวี่ยงของคานบริเวณคาน GL. 1-5, D และเป็นแนวเดียวกับจุดที่เกิดการทรุดตัว มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในแนว GL. 1-5, E โดยค่าที่ได้มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่สูงมาก โดยจุดเริ่มของคานมีการเปลี่ยนแปลง -2.20866 % และในจุดถัดมา คือจุดกึ่งกลางระหว่างของฐานรากด้านขอบและฐานรากลำดับที่สองมีการเปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น 2.79902 % ซึ่งยังถือว่าไม่มาก ต่อมาตำแหน่งหัวเสาที่สอง มีการเปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น 8.55997 % ถัดมากลางช่วงคานที่สองการเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลง 27.92520 % ต่อมาตำแหน่งหัวเสาที่สามมีการเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลง 38.57900 % ในช่วงคานที่สามการเปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น 90.27093 % ต่อมาตำแหน่งหัวเสาที่สี่มีการเปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น 76.43310 % ซึ่งเป็นการการเปลี่ยนแปลงที่สูง ในช่วงคานที่สาม มีการเปลี่ยนแปลงลดลง 231.28759 % และในจุดที่เกิดการทรุดตัวมีการเปลี่ยนแปลงแรงเหวี่ยงลดลงจากเดิมเป็นแรงเหวี่ยงที่มีค่าน้อย เนื่องจากการลดลงของแรงปฏิกิริยาของฐานรากลดลงเนื่องจากการทรุดตัว โดยค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงคือลดลงเท่ากับ -99.98068 %