# สาเหตุและแนวทางการแก้ไขการแตกร้าวของผนัง ในอาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

นายเสกสิทธิ์ เกิดกิจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

# สาเหตุและแนวทางการแก้ไขการแตกร้าวของผนัง ในอาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

_____

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
ประธานกรรมการ

_____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

_____

(ผศ. ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์)
กรรมการ

_____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เสกสิทธิ์ เกิดกิจ : สาเหตุและแนวทางการแก้ไขการแตกร้าวของผนังในอาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ (CAUSE AND SOLUTION APPROACH FOR WALL CRACKS IN THE 60TH ANNIVERSARY OF HIS MAJESTY THE KING'S ACCESSION TO THE THORNE BUILDING, PHETCHABUN RAJABHAT UNIVERSITY) อาจารย์ที่ปรึกษา: ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข

อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี (อาคารสำนักงานอธิการบดี) มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 7 ชั้น ที่มีพื้นที่ใช้สอยทั้งสิ้น 13,761 ตารางเมตร และมีฐานรากเป็นแบบฐานรากลึก (Deep foundation) การก่อสร้างได้มีการออกแบบตามหลักวิศวกรรมและมีการควบคุมงานก่อสร้างและตรวจรับงานเป็นไปตามแบบรูปที่กำหนดและตามหลักวิชาการที่ได้มาตรฐาน อาคารดังกล่าวได้ดำเนินการก่อสร้างและส่งมอบเมื่อ 10 กันยายน 2551 หลังการใช้งานเป็นระยะเวลา 5 ปี ผนังของอาคารเกิดการแตกร้าวอย่างเห็นได้ชัด และจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสาเหตุของการแตกร้าว เพื่อกำหนดรูปแบบการแก้ไขที่เหมาะสมทางวิศวกรรม ความปลอดภัย และเศรษฐศาสตร์ การศึกษาแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักคือการสำรวจรอยแตกร้าวในอาคาร และสร้างระเบียนรอยแตกร้าว พร้อมทั้งถ่ายภาพรอยแตกร้าว การศึกษาหาแนวทางการแก้ไขตามหลักวิศวกรรมที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่าการแตกร้าวของอาคารไม่ได้เกิดจากการทรุดตัวที่แตกต่างกันของฐานราก แต่อาจเกิดจากการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (Steel relaxation loss) อันเนื่องมาจากการใช้พื้นที่ในอาคารผิดประเภท ดังจะเห็นได้จากกองเอกสารบนพื้นบริเวณที่เกิดการแตกร้าวของผนัง แนวทางแก้ไขการความเสียหายขององค์อาคารสามารถกระทำได้โดยปรับเปลี่ยนการใช้พื้นที่ในอาคารให้เหมาะ และจัดเตรียมพื้นที่สำหรับกองเอกสารให้เหมาะสม การแก้ไขนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นสำหรับพื้นที่ของอาคารอื่น ที่เกิดปัญหาลักษณะเดียวกัน ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

SEKSIT KERDKIJ : CAUSE AND SOLUTION APPROACH FOR WALL CRACKS IN THE 60TH ANNIVERSARY OF HIS MAJESTY THE KING'S ACCESSION TO THE THORNE BUILDING, PHETCHABUN RAJABHAT UNIVERSITY. ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

The 60th Anniversary of His Majesty The King's Accession to the Thorne Building of Phetchabun Rajabhat University is a 7 story concrete building with a total 13,761 $m^2$ service area. The building is founded on deep foundations. The building has been designed according Thailand engineering codes and constructed and inspected professionally. Only after 5 years of service, the cracks on the walls were clearly observed, which needs to be. The construction was completed and ready for service in 10 September 2008. After 5 years of service, the cracks on the building wall were clearly observed and are required an urgent repair. This research aims to investigate a cause of cracks to determine a suitable repair approach in term of engineering, safety and economical perspectives. The study consists of two main tasks: crack and settlement profile observations and a determination of engineering based repair approach. The observed results indicate that the cracking is not caused by the differential settlements of the foundations but is caused by the steel tensile relaxation in pre-cast concretes due to an improper building service as seen by document stockpiles on floors close to cracked wall. A proposed solution is to revise the building service and prepare an area for the document stockpile. This is a primary solution, which can be applied to other similar cracked buildings in Phetchabun Rajabhat University

School of Civil Engineering Student's Signature_____

Academic Year 2014 Advisor's Signature_____

# กิตติกรรมประกาศ

โครงงานการศึกษานี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำในการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ แนะนำแนวทางการทำงานเพิ่มเติม และให้ความเอาใจใส่ ความเมตตากรุณาถ่ายทอดความรู้แก่ศิษย์เป็นอย่างดี ทั้งยังปลูกฝังให้ผู้ศึกษามีความอดทน มีวินัย หมั่นค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติม ผู้ศึกษาจึงขอขอบพระคุณท่าน ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข ไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ให้แก่ผู้ศึกษา ซึ่งเป็นความรู้และประสบการณ์ที่มีค่าและมีประโยชน์ในการทำงานของผู้ศึกษาต่อไป ผู้ศึกษาขอระลึกถึงพระคุณบิดาและมารดา ที่ได้อบรมสั่งสอนให้เป็นคนดี รักการศึกษา และหมั่นหาความรู้เพิ่มเติม และไม่ย่อท้อต่อปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ภรรยาและบุตร ที่ค่อยให้กำลังใจอยู่เสมอ ขอขอบพระคุณกลุ่มเพื่อนร่วมงานในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ที่ได้ส่งเสริมในศึกษาต่อระดับมหาบัณฑิต ท้ายสุดขอขอบคุณเพื่อนๆ และรุ่นพี่ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดการทำงานศึกษาครั้งนี้เป็นอย่างดี

เสกสิทธิ์ เกิดกิจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ข

กิตติกรรมประกาศ ค

สารบัญ ง

สารบัญตาราง ฉ

สารบัญรูปภาพ ช

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 1

1.3 ผลที่จะได้รับ 2

1.4 ขอบเขตงานวิจัย 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 ปริทัศน์วรรณกรรม 4

2.1 มาตรฐานการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคาร 4

2.1.1 นิยาม 4

2.1.2 มาตรฐานอ้างอิง 5

2.1.3 ข้อกำหนดทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ 5

2.1.4 หมุด 8

2.1.5 มาตรวัด 9

2.1.6 การบันทึกข้อมูลและข้อมูลการตรวจวัด 14

2.1.7 วิธีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคาร 17

2.1.8 การตรวจสอบความกว้างของรอยร้าว 22

2.1.9 การรายงานผลการตรวจวัด 29

2.1.10 เกณฑ์การยอมรับ 29

2.1.11 แบบฟอร์มการบันทึกข้อมูล 34

2.2 การแก้ไขอาคารทรุด และเทคนิคการยกอาคารที่ทรุดเอียง 39

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.2.1 ลักษณะการทรุดตัวของอาคาร 41
2.2.2 สาเหตุการทรุดตัว 41
2.2.3 การแก้ไขอาคารทรุด 46
2.2.4 เสาเข็มที่ใช้เสริมฐานราก 47
2.2.5 ขั้นตอนการเสริมฐานราก 48
2.3 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมแรงอัด (Steel relaxation loss) 51
2.4 การโกงตัวของแผ่นพื้นสองทาง 52
3 วิธีดำเนินการทำโครงงาน 57
3.1 การสำรวจรอยแตกร้าว 57
3.2 การสำรวจภายในและภายนอกอาคาร 60
4 ผลการสำรวจ 63
4.1 การสำรวจการทรุดตัวของเสาแต่ละต้นด้วยกล้องระดับ 63
4.2 การตรวจสอบรอยร้าวพื้นที่ชั้นต่างๆ 67
4.3 การประมาณน้ำหนักบรรทุกบนพื้นบริเวณที่เกิดการแตกร้าวบนผนัง 69
4.4 การหาน้ำหนักของกระดาษที่กระทำต่อพื้นที่ที่เกิดรอยร้าว 69
4.5 การแก้ไขและวิธีการป้องกันการเกิดปัญหา 70
5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 71
เอกสารอ้างอิง 72
ประวัติผู้เขียน 74

# สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อมูลที่ต้องตรวจวัดสำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ 15

2.2 สภาพความเสียหายของอาคารจำแนกตามความกว้างของรอยร้าวของผนังอิฐก่อ 24

2.3 ความกว้างของรอยร้าวที่ยอมให้ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก 25

2.4 ขีดจำกัดของการเสียรูปเชิงมุม ($\beta$) ที่ยอมได้สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ชนิดเสา-คาน และชนิดผนังรับน้ำหนัก 30

2.5 ขีดจำกัดการเสียรูปเชิงมุม ($\beta$) ที่ยอมให้ของอาคาร ตามคำแนะนำของ Bjerrum (1963) 30

2.6 ขีดจำกัดของการแอ่นตัวที่ยอมได้สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI 318-99 และ วสท. 1008-38 31

2.7 ค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (ไม่รวมการสูญเสียแรงดึงจากความฝืดและการเข้าที่ของสมอยึด) 52

2.8 ระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ (มาตรฐานสำหรับงานคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537) 52

2.9 สัมประสิทธิ์สำหรับโมเมนต์บวกในแผ่นพื้นคิดเฉพาะน้ำหนักบรรทุกจรเท่านั้น 54

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญรูปภาพ


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 1.1 | อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี (อาคารสำนักงานอธิการบดี) | 2 |
| 2.1 | นิยามการทรุดตัวของโครงสร้าง | 5 |
| 2.2 | รายละเอียดแผนฐานวัดความเอียง | 19 |
| 2.3 | ลักษณะการทรุดตัวจากงานขุดดินในชั้นทราย (Clough and O'Rourke, 1990) | 20 |
| 2.4 | ลักษณะการเคลื่อนตัวจากงานขุดดินในชั้นดินเหนียวแข็ง (Clough and O'Rourke, 1990) | 21 |
| 2.5 | ลักษณะการทรุดตัวจากการขุดดินในชั้นดินเหนียวอ่อน (Clough and O'Rourke, 1990) | 21 |
| 2.6 | มาตรวัดการขยายตัวของรอยร้าวสำหรับวัดการขยายตัวของรอยร้าวบนผนัง | 27 |
| 2.7 | มาตรวัดการขยายตัวของรอยร้าวสำหรับวัดการขยายตัวของรอยร้าวที่มุมผนัง | 28 |
| 2.8 | หมุดวัดการขยายตัวของรอยร้าว | 28 |
| 2.9 | การวัดการขยายตัวของรอยร้าวโดยใช้หมุด 3 ตัว [ Hanna, T.H 1985] | 29 |
| 2.10 | ความเสียหายที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและแนวราบของอาคาร (Boscardin and Cording 1989) | 32 |
| 2.11 | แบบฟอร์มการบันทึกข้อมูลการติดตั้งเครื่องมือ | 34 |
| 2.12 | แบบฟอร์มการรังวัดค่าระดับของหมุดวัดการทรุดตัว | 35 |
| 2.13 | แบบฟอร์มการรังวัดตำแหน่งของหมุดวัดการเคลื่อนตัว | 36 |
| 2.14 | แบบฟอร์มการตรวจวัดความกว้างรอยร้าว (1) | 37 |
| 2.15 | แบบฟอร์มการตรวจวัดความกว้างรอยร้าว (2) | 38 |
| 2.16 | การทรุดตัวซึ่งสามารถเขียนเป็นกราฟ | 39 |
| 2.17 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเจาะ | 40 |
| 2.18 | การทรุดตัวจากเสาเข็มสั้นเกินไป | 42 |
| 2.19 | การทรุดตัวจากเสาเข็มบกพร่อง | 43 |
| 2.20 | ลักษณะฐานรากเยื้องศูนย์ | 44 |
| 2.21 | เสาเข็มอยู่บนดินต่างชนิดกัน | 44 |
| 2.22 | เสาเข็มอยู่บนดินต่างชนิดกัน | 45 |
| 2.23 | เสาเข็ม FM-Pile และเสาเข็มเหล็ก H-Beam | 48 |

2.24 การขุดดินบริเวณฐานราก 49
2.25 การกดเสาเข็มลงดิน 49
2.26 การทำ Tranefer Beam 50
2.27 การทำ Preloading 50
2.28 แผนภาพโมเมนต์สำหรับการคำนวณค่าการโก่งตัวของแผ่นพื้นสองทาง 53
3.1 แปลนฐานราก (เสาเข็มกลุ่ม) อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี 57
3.2 แปลนชั้น 1 อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี 58
3.3 แปลนแปลนชั้นลอย อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี 58
3.4 แปลนชั้น 2 อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี 59
3.5 แปลนชั้น 3-7 อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี 59
3.6 รอยแตกร้าวของผนังภายในอาคารตามแนว ก1 ถึง ก14 จนถึงแนว ธ1 ถึง ธ14 60
3.7 รอยแตกร้าวของผนังภายนอกอาคารตามแนว ก12 และ ก14 จนถึงแนว ธ1 และ ธ14 61
3.8 ลักษณะการแตกร้าวของผนังอาคารที่บ่งบอกว่าเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกัน ของฐานราก 62
4.1 พื้นที่ที่เกิดรอยร้าว 63
4.2 ระเบียนการทรุดตัวของอาคาร 63
4.3 ตำแหน่งการสำรวจการทรุดตัวของอาคารด้วยกล้องระดับ ในพื้นที่ชั้นลอย 64
4.4 การสำรวจการทรุดตัวของอาคารด้วยกล้องระดับ 65
4.5 (1) การใช้พื้นที่เป็นที่เก็บเอกสารและสิ่งของ บริเวณภายนอกผนังที่เกิดการแตกร้าว ในพื้นที่ชั้นลอย 65
4.5 (2) การใช้พื้นที่เป็นที่เก็บเอกสารและสิ่งของ บริเวณภายนอกผนังที่เกิดการแตกร้าว ในพื้นที่ชั้นลอย 66
4.6 การใช้พื้นที่เป็นที่เก็บเอกสารและสิ่งของ บริเวณภายในผนังที่เกิดการแตกร้าว ในพื้นที่ชั้นลอย 66
4.7 พื้นที่ชั้น 2 บริเวณพื้นที่เดียวกับรอยร้าวผนังในชั้นลอย 67
4.8 (1) พื้นที่ชั้น 3 บริเวณพื้นที่เดียวกับรอยร้าวผนังในชั้นลอย 67
4.8 (2) พื้นที่ชั้น 3 บริเวณพื้นที่เดียวกับรอยร้าวผนังในชั้นลอย 68
4.9 พื้นที่ชั้น 4-7 บริเวณพื้นที่เดียวกับรอยร้าวผนังในชั้นลอย 68
4.10 การเสริมเหล็กพื้น Post-tensioned 69

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์เป็นมหาวิทยาลัยที่ได้รับการยอมรับจากสังคมว่ามีระบบการศึกษาที่ดี มุ่งเน้นการผลิตบัณฑิตที่มีคุณภาพ ตอบสนองต่อความต้องการของสังคม อีกทั้งยังเป็นหน่วยงานที่ให้บริการและสนับสนุนงานด้านวิชาการต่างๆ มากมาย ทำให้ปัจจุบันมีจำนวนนักศึกษาและจำนวนผู้เข้ามาใช้บริการด้านต่างๆ ทางวิชาการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้เองพื้นที่ห้องเรียนที่ต้องรองรับจำนวนนักศึกษาจึงมีน้อยลง ประกอบกับอาคารที่ใช้งานเป็นเวลานานเกิดการเสื่อมสภาพและไม่สามารถใช้งานได้ มหาวิทยาลัยฯ จึงจำเป็นต้องขยายห้องเรียนและอาคาร รวมทั้งขอรับงบประมาณแผ่นดินในการก่อสร้างอาคารใหม่ เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้พื้นที่ของนักศึกษา บุคลากร และผู้มาเยือน การก่อสร้างได้มีการออกแบบตามหลักวิศวกรรมและมีการสำรวจพื้นที่ก่อนออกแบบทุกครั้ง รวมถึงในระหว่างการก่อสร้างมีการควบคุมงานก่อสร้างให้เป็นไปตามแบบรูปที่กำหนด และมีการตรวจรับงานตามหลักวิชาการที่ได้มาตรฐานในทุกโครงการ

อย่างไรก็ตาม อาคารบางหลังที่สร้างแล้วเสร็จในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ เมื่อใช้ประโยชน์ได้สักระยะหนึ่ง ได้เกิดการแตกร้าวและจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบสาเหตุที่ชัดเจนเพื่อนำมากำหนดรูปแบบการแก้ไขที่เหมาะสมทางวิศวกรรม ความปลอดภัย และเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ อาคารกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้คืออาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี (อาคารสำนักงานอธิการบดี) ซึ่งมี 7 ชั้น และมีพื้นที่ใช้สอยทั้งสิ้น 13,761 ตารางเมตร อาคารดังกล่าวได้ดำเนินการก่อสร้างและส่งมอบอาคารเมื่อ 10 กันยายน 2551 และเกิดการแตกร้าวอย่างเห็นได้ชัดหลังการใช้งานเป็นระยะเวลา 5 ปี

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อการศึกษาลักษณะและสาเหตุของความเสียหายของอาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี พร้อมทั้งหาแนวทางการแก้ไขตามหลักวิศวกรรมที่เหมาะสม เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพ

## 1.3 ผลที่จะได้รับ

1.3.1 ทำให้ทราบถึงปัจจัยและสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวของอาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี

1.3.2 ทำให้ทราบถึงแนวทางการแก้ไขตามหลักวิศวกรรมที่เหมาะสม เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพ

## 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาสภาพปัญหา ปัจจัย และสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี เพื่อแนวทางการแก้ไขปัญหาที่ถูกต้องตามหลักวิศวกรรมด้วยความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี (อาคารสำนักงานอธิการบดี) เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปตัว L ตั้ง จำนวน 7 ชั้น และมีพื้นที่ใช้สอยรวมทั้งหมด 13,761 ตารางเมตร (รูปที่ 1.1)

รูปที่ 1.1 อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี (อาคารสำนักงานอธิการบดี)

**1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1.5.1 ทราบถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดปัญหาการแตกร้าวของตัวอาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี

1.5.2 ทราบถึงแนวทางในการแก้ปัญหาการแตกร้าวของอาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 2
# ปริทัศน์วรรณกรรม

ในการศึกษาและสืบค้นข้อมูล ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัย เรื่องแนวทางการแก้ไขปัญหาการทรุดตัวของอาคารในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้รวบรวมเอกสารหรือหลักวิชาการที่เกี่ยวข้องมาใช้ประกอบในการศึกษาวิจัย โดยผู้ศึกษาได้กำหนดประเด็นของการศึกษาวิจัย ไว้ดังนี้

1. มาตรฐานการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคาร
2. แนวทางพิจารณาสาเหตุ (เบื้องต้น) การทรุดตัวของอาคาร

## 2.1 มาตรฐานการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคาร

กรมโยธาธิการและผังเมืองมีภารกิจเกี่ยวกับงานด้านการผังเมือง และด้านการโยธาธิการ ซึ่งด้านงานโยธาธิการจะครอบคลุมถึงการออกแบบ การก่อสร้าง การควบคุมการก่อสร้างอาคาร การกำหนดคุณภาพ และมาตรฐานก่อสร้างด้านสถาปัตยกรรมและวิศวกรรม เพื่อให้เกิดมาตรฐานความปลอดภัยแก่สาธารณชน โดยมาตรฐานนี้ใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติให้ถูกต้องตามหลักวิชาการให้แก่กรมโยธาธิการและผังเมือง และหน่วยงานต่างๆ โดยสามารถใช้อ้างอิงเพื่อให้งานก่อสร้างได้มาตรฐานและปลอดภัยในการใช้งาน

### 2.1.1 นิยาม

**“วิศวกร”** หมายถึง วิศวกรผู้ที่ได้รับใบประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม สาขาวิศวกรรมโยธา จากสภา
วิศวกร ผู้ทำหน้าที่ควบคุมงานก่อสร้าง ของเจ้าของงาน

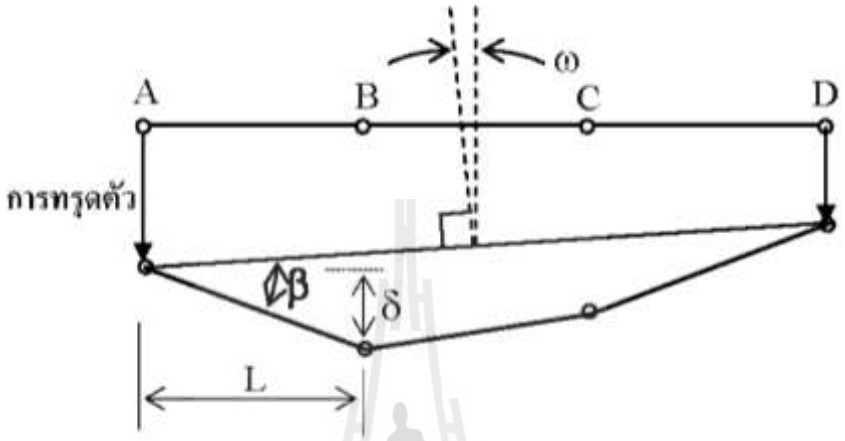
**“แบบ”** หมายถึง แบบก่อสร้างตามสัญญา หรือแบบที่ได้รับความเห็นชอบจากวิศวกร

**“รายการข้อกำหนด (Specification)”** หมายถึง เอกสารซึ่งจัดเตรียมขึ้นมาเพื่ออธิบายรายละเอียดของขั้นตอนวิธีการ วัสดุที่ใช้ก่อสร้างตามสัญญา

**“การเอียงตัวของโครงสร้างโดยรวม (Tilt)”** หมายถึง มุม $\omega$ แสดงดังรูปที่ 2.1

**“การเสียรูปเชิงมุม $\beta$ (Angular Distortion)”** เท่ากับ $(\delta/L)$-$\omega$ โดย $\delta$ คือ ผลแตกต่างระหว่างการทรุดตัวของจุดสองจุดบนโครงสร้าง L คือระยะทางระหว่างจุดทั้งสอง และ $\omega$ คือการเอียงตัวของโครงสร้างโดยรวมการเสียรูปเชิงมุม $\beta$ แสดงในรูปที่ 2.1

**“ค่าฐานอ้างอิง”** หมายถึงค่าที่ตรวจวัดเริ่มต้น เช่น ระดับ พิกัด และความเอียงของอาคาร ก่อนที่จะมีการก่อสร้างใด ๆ ที่มีผลกระทบต่ออาคาร ค่าฐานอ้างอิงจะใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้ขณะก่อสร้างเพื่อหาผลกระทบจากการก่อสร้าง




รูปที่ 2.1 นิยามการทรุดตัวของโครงสร้าง
(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)

### 2.1.2 มาตรฐานอ้างอิง

Materials & Workmanship Specification for Civil and Structural Works, Land and Transport Authority, Singapore.

### 2.1.3 ข้อกำหนดทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์

**1. ข้อกำหนดทั่วไป**

**1.1 ข้อกำหนด**

- เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมด จะต้องเป็นที่ยอมรับและได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถใช้งานได้อย่างน่าเชื่อถือในงานลักษณะที่คล้ายกับที่จะทำการตรวจวัด
- เครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดจะต้องเป็นของผู้ผลิตที่ได้รับการยอมรับและได้รับการพิสูจน์ว่ามีประสบการณ์ในงานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคาร และต้องได้รับการยินยอมจากวิศวกร

- ผลกระทบต่อความแม่นยำของเครื่องมือและอุปกรณ์จากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือกระแสไฟฟ้า จะต้องอยู่ในขนาดที่ยอมรับได้ว่าไม่มีผลต่อการตรวจวัด

**1.2 การสอบเทียบ (Calibration)**

เครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดจะต้องได้รับการสอบเทียบจากสถาบันที่เป็นที่ยอมรับ โดยมีหนังสือรับรองมาแสดงก่อนการใช้ตรวจวัด นอกจากนี้การสอบเทียบจะต้องกระทำเป็นระยะตามเวลาที่กำหนด โดยผู้ผลิตหรือตามที่วิศวกรเห็นสมควร

**1.3 การบำรุงรักษาและป้องกันเครื่องมือและอุปกรณ์**

- เครื่องมือและอุปกรณ์จะต้องทดสอบและบำรุงรักษาตามที่ผู้ผลิตแนะนำ การทดสอบจะกระทำเพื่อให้แน่ใจว่า เครื่องมือและอุปกรณ์สามารถทำงานตามปกติในแต่ละขั้นตอนของการติดตั้ง เครื่องมือและอุปกรณ์ที่พบว่าทำงานไม่ปกติจะต้องรายงานให้วิศวกรทราบ และจะต้องเปลี่ยนเครื่องมือและอุปกรณ์นั้นภายใน 24 ชั่วโมง หลังจากการพบความผิดปกติ
- เครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดจะต้องถูกติดตั้งอย่างมั่นคง สายไฟที่ต่อเชื่อม หรือแผงสวิตช์ หรืออุปกรณ์ต่อเชื่อมอื่นๆ จะต้องถูกป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายจากการชนหรือกระแทกของวัตถุ จากสภาพอากาศที่มีผลกระทบต่อการทำงาน และจากน้ำหรือฝุ่นละออง เป็นต้น
- เครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมด จะต้องมีแผ่นป้ายติดอยู่บนเครื่องมือและอุปกรณ์อย่างมั่นคง และสามารถ อ่านได้อย่างชัดเจนไม่ลบเลือน โดยต้องระบุข้อมูลของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่อไปนี้
  1. ชื่อโครงการ
  2. หมายเลขเครื่องมือ
  3. ชื่อของผู้ที่รับผิดชอบ
  4. หมายเลขโทรศัพท์ของผู้รับผิดชอบ
- เครื่องมือและอุปกรณ์จะต้องถูกตรวจสอบเป็นระยะตามหมายกำหนดการที่ได้รับความเห็นชอบจากวิศวกร เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องมือและอุปกรณ์ยังคงทำงานตามปกติ และผลการสอบเทียบยังคงใช้ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

**2. เครื่องมืออ่านและบันทึกข้อมูล**

**2.1 สายสัญญาณ**

- สายสัญญาณจะต้องทนทาน สามารถป้องกันน้ำและการกัดกร่อนของสารเคมี ซึ่งอาจจะอยู่ในบริเวณก่อสร้าง ส่วนที่ไม่ใช่โลหะต้องไม่ใช่สารไวไฟ ในกรณีเกิดไฟไหม้ต้องสามารถดับไฟได้โดยง่าย และไม่มีสารและควันพิษเกิดขึ้นเมื่อถูกไฟไหม้
- สายสัญญาณจะต้องต่อเชื่อมกับเครื่องมือและอุปกรณ์อย่างมั่นคงและเป็นระเบียบเรียบร้อยพร้อมทั้งมีป้ายระบุเป็นสายสัญญาณของค่าตรวจวัดใดให้ชัดเจน ต้องมีป้ายระบุที่จุดเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัด และที่จุดเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อ่านหรือบันทึกผลเป็นอย่างน้อยพร้อมทั้งต้องมีแผนผังสายสัญญาณแสดงอย่างชัดเจน

**2.2 การอ่านและบันทึกข้อมูล**

- ทันทีที่เครื่องมือถูกติดตั้งแล้วเสร็จ จะต้องทำการกำหนดค่าฐานอ้างอิงสำหรับการตรวจวัด โดยจะต้องทำการอ่านผลตรวจวัดอย่างน้อยวันละครั้งเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์เมื่อผลการอ่านแสดงว่า ค่าที่ตรวจวัดเสถียรเป็นเวลา 1 สัปดาห์ติดต่อกัน ให้นำค่าที่อ่านได้มาเฉลี่ย และใช้เป็นค่าฐานอ้างอิงสำหรับการตรวจวัดต่อไป ในขณะทำการกำหนดค่าฐานอ้างอิงนี้ จะต้องไม่มีกิจกรรมการก่อสร้างใดๆ ที่อาจกระทบต่อผลการอ่าน ถ้าหากผลการอ่านแสดงว่าค่าตรวจวัดไม่เสถียร จะต้องหาสาเหตุและทำการแก้ไขตามที่วิศวกรเห็นชอบ ซึ่งรวมถึงการทำการติดตั้งเครื่องมือใหม่
- ตลอดการตรวจวัดจะต้องใช้เครื่องมือวัดชุดเดิมตลอด หากมีเหตุสุดวิสัยไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดชุดเดิมได้ จะต้องทำการกำหนดค่าฐานอ้างอิงใหม่ทันที ด้วยเครื่องมือวัดชุดใหม่
- ขณะที่อ่านผลการตรวจวัด จะต้องบันทึกข้อมูลเหล่านี้ทุกครั้ง
    1. สภาพของสถานที่ทำการวัดซึ่งอาจมีผลต่อการตรวจวัด เช่น อุณหภูมิ และความชื้น
    2. ข้อมูลพื้นฐานของการตรวจวัด เช่น ชนิดของเครื่องมือตรวจวัด ตำแหน่งค่าฐานอ้างอิง และเวลา
    3. บุคลากรที่ทำการตรวจวัด
    4. หมายเลขเครื่องของอุปกรณ์อ่านผล

5. เหตุต่างๆ ที่อาจมีผลต่อการตรวจวัด

**2.1.4 หมุด**

**1. หมุดอ้างอิงระดับและหมุดอ้างอิงทางราบ (Bench Mark และ Reference Point)**

**1.1 ข้อกำหนดของเครื่องมือและอุปกรณ์**

- หมุดอ้างอิงระดับและหมุดอ้างอิงทางราบจะต้องมั่นคง มีความทนทาน ทำจากโลหะที่ไม่เป็นสนิม การเคลื่อนตัวของหมุดอ้างอิงระดับและหมุดอ้างอิงทางราบตลอดอายุใช้งาน จะต้องอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ และได้รับความเห็นชอบจากวิศวกร
- หัวหมุดอ้างอิงระดับจะต้องโค้งมน โดยมีตำแหน่งสูงสุดอยู่ตรงกลางหมุด เพื่อให้การตั้งไม้ระดับ (Staff) อยู่ในตำแหน่งเดียวทุกครั้ง
- หัวหมุดอ้างอิงตำแหน่งทางราบ จะต้องมีตำแหน่งที่ตอกลงในเนื้อโลหะเป็นจุด หรือกากบาทให้เห็นชัดเจน เพื่อให้การติดตั้งเครื่องมือสำรวจได้ถูกต้องตามตำแหน่งทุกครั้ง

**1.2 การติดตั้ง**

การติดตั้งหมุดอ้างอิงระดับและหมุดอ้างอิงทางราบจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับอาคารที่จะตรวจวัด เพื่อให้สะดวกแก่การสำรวจ แต่ต้องไม่อยู่ในตำแหน่งที่มีผลกระทบจากการก่อสร้างหมุดอ้างอิงระดับจะต้องติดตั้งบนโครงสร้างที่อยู่บนเสาเข็มที่หยั่งลงในชั้นดินแข็งโดยโครงสร้างจะต้องอยู่ใกล้เคียงกับบริเวณก่อสร้างแต่ต้องไม่เคลื่อนตัวขณะก่อสร้าง ในกรณีที่ไม่มีโครงสร้างที่สามารถใช้ติดตั้งหมุดอ้างอิงระดับอยู่ในบริเวณก่อสร้าง จะต้องติดตั้งหมุดอ้างอิงระดับบนแกนโลหะที่หยั่งถึงชั้นดินแข็ง และจะต้องป้องกันไม่ให้ดินอ่อนสัมผัสกับแกนโลหะโดยใช้เหล็กปลอก ตำแหน่งของหมุดอ้างอิงระดับจะต้องเป็นตามที่กำหนดในแบบ หรือที่ได้รับความเห็นชอบจากวิศวกร

**ข้อแนะนำ 1.**

แผ่นดินโดยทั่วไปจะเคลื่อนตัวโดยเฉพาะในแนวดิ่งอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากหลายสาเหตุ เช่นการสูบน้ำบาดาล น้ำหนักกดทับจากสิ่งก่อสร้าง เป็นต้น การเคลื่อนตัวนี้เกิดขึ้นตลอดความลึกของชั้นดิน ถึงแม้ว่าหมุดอ้างอิงจะถูกติดตั้งบนเสาเข็มที่หยั่งถึงชั้นดินแข็ง แต่หมุดย่อมต้องเคลื่อนตัวตามการเคลื่อนตัวของดินที่ปลายเสาเข็ม ขนาดของการเคลื่อนตัวของหมุดอ้างอิงที่ยอมได้ไม่ควรเกินความละเอียดของการวัดที่ต้องการวัด

**2 หมุดวัดการทรุดตัว (Settlement Point)**

**2.1 ข้อกำหนดของเครื่องมือและอุปกรณ์**

- หมุดวัดการทรุดตัวต้องเป็นตามแบบหรือได้รับความเห็นชอบจากวิศวกร การวัดระดับของหมุดจะต้องทำโดยวิธีการสำรวจที่มีความละเอียดของการวัดไม่ต่ำกว่า ± 1.0 มิลลิเมตร หรือได้รับความเห็นชอบจากวิศวกร ทั้งนี้วิศวกรอาจกำหนดให้ใช้วิธีการวัดระดับการทรุดตัวอย่างอื่นได้
- หัวหมุดวัดการทรุดตัวจะต้องโค้งมน โดยมีตำแหน่งสูงสุดอยู่ตรงกลางหมุด เพื่อให้การตั้งไม้ระดับอยู่ในตำแหน่งเดียวทุกครั้ง

**2.2 การติดตั้ง**

หมุดวัดการทรุดตัวจะต้องติดตั้งตามตำแหน่งและด้วยวิธีการที่ระบุในแบบหรือที่ได้รับความเห็นชอบจากวิศวกร โดยตำแหน่งที่ติดตั้งอาจอยู่บนดินหรือบนโครงสร้างอาคารก็ได้ หมุดวัดการทรุดตัวจะต้องมีหมายเลขกำกับให้ชัดเจน และเมื่อติดตั้งแล้วเสร็จจะต้องไม่โยกคลอนและจะต้องป้องกันหมุดวัดการทรุดตัวจากความเสียหายที่อาจเกิดจากการก่อสร้าง

**2.1.5 มาตรวัด**

**1. มาตรวัดความเอียง(Tilt Meter)**

**1.1 ข้อกำหนดของเครื่องมือและอุปกรณ์**

- มาตรวัดความเอียง เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดการเอียงตัวของโครงสร้าง เพื่อให้ทราบประวัติการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเมื่อเวลาต่างๆ และเพื่อใช้เป็นเครื่องมือเตือนภัยล่วงหน้าถึงการวิบัติที่จะเกิดขึ้นของโครงสร้าง
- มาตรวัดความเอียง โดยทั่วไปประกอบด้วยแผ่นเหล็กฐานวัดความเอียง (Tilt Plate) ซึ่งอาจมีหลายแผ่นติดตั้งบนตำแหน่งต่างๆ บนโครงสร้างที่ต้องการวัดความเอียง และตัววัดความเอียง (Tilt Meter) และอุปกรณ์อ่าน การวัดความเอียงสามารถทำได้ทั้งวัดแบบต่อเนื่องและวัดตามเวลาที่กำหนด สำหรับการวัดแบบต่อเนื่อง ตัววัดความเอียงจะถูกติดตั้งอยู่บนแผ่นเหล็กฐานวัดความเอียงแต่ละตัวแล้วทำการวัดความเอียงอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล ในกรณีนี้ต้องมีตัววัดความเอียงจำนวน

เท่ากับจำนวนตำแหน่งที่ต้องการวัด ส่วนการวัดตามเวลาที่กำหนด อาจมีตัววัดความเอียงเพียงชุดเดียวโดยสามารถย้ายไปติดตั้งบนแผ่นเหล็กฐานที่ตำแหน่งต่างๆ ได้

- แผ่นเหล็กฐานจะต้องมีผิวที่ราบเรียบทนทานต่อสภาพอากาศ และมีหมุดสำหรับติดตั้งตัววัดความเอียง ตัววัดความเอียงต้องมีกล่องป้องกันที่ทนทาน มีฝาด้านที่ติดตั้งกับแผ่นเหล็กฐานที่ราบเรียบและต้องสามารถประกบอยู่กับแผ่นเหล็กฐานอย่างแนบสนิทและตรงตามตำแหน่งที่ต้องการ อุปกรณ์อ่านจะต้องทนทานสามารถป้องกันน้ำได้ พร้อมทั้งต้องมีสายสัญญาณยาวเพียงพอสำหรับที่จะต่อเชื่อมกับตัววัดความเอียงที่ติดตั้งบนแผ่นเหล็กฐานที่ตำแหน่งต่างๆ บนโครงสร้าง
- ตัววัดความเอียงจะต้องสามารถวัดความเอียงได้ในช่วง ±10 องศาจากแนวดิ่งได้ โดยมีความละเอียด 8 พิลิปดา และการคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิต้องไม่เกินร้อยละ ±0.05 ของค่าที่อ่าน + 5 พิลิปดา ต่อ 1 องศาเซลเซียส1

**1.2 การติดตั้ง**

- แผ่นเหล็กฐานจะต้องติดตั้งอย่างมั่นคงบนตำแหน่งที่ต้องการวัดความเอียง การติดตั้งอาจใช้กาว อีพอกซีหรือใช้สลักเกลียวยึดติดกับโครงสร้าง การติดตั้งแผ่นเหล็กฐานจะต้องระมัดระวังให้ทิศทางการวัดการเอียงตัวอยู่ในแนวที่ต้องการ
- การอ่านความเอียงจะกระทำโดยการติดตั้งตัววัดความเอียงลงบนแผ่นเหล็กฐานในตำแหน่งที่ต้องการ โดยจะต้องตรวจสอบทิศทางการวัดความเอียงให้ถูกต้องตามที่กำหนด จากนั้นจึงต่อเชื่อมอุปกรณ์อ่านและอ่านค่าความเอียง
- ก่อนเริ่มการอ่านความเอียงทุกครั้ง ควรตรวจสอบความถูกต้องของตัววัดความเอียง โดยการอ่านความเอียงของแผ่นฐานวัดฐานใดฐานหนึ่งแล้วหมุนตัววัดความเอียง 180 องศาและอ่านอีกครั้งหนึ่ง หากค่าที่อ่านได้แตกต่างจากครั้งแรกเกินความละเอียดของเครื่องมือ จะต้องตรวจสอบสาเหตุและแก้ไขให้ถูกต้อง

**2. มาตรวัดการเคลื่อนตัวทางแนวราบ (Inclinometer)**

**2.1 ข้อกำหนดของเครื่องมือและอุปกรณ์**

- มาตรวัดการเคลื่อนตัวทางแนวราบ ใช้สำหรับวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบของดิน หรือโครงสร้างกันดินที่ระดับความลึกต่างๆ
- มาตรวัดการเคลื่อนตัวทางแนวราบประกอบด้วย ท่อตรวจวัดที่มีร่องนำ 2 คู่ ที่ตั้งฉากกันติดตั้งในหลุมเจาะหรือในกำแพงกันดิน แล้วอัดฉีด (Grout) ด้วยวัสดุอัดฉีดรอบๆ ท่อ ถ้าไม่มีการกำหนดเป็นอย่างอื่น ท่อตรวจวัดจะถูกติดตั้งให้แนวร่องนำคู่หนึ่งตั้งฉากกับทิศทางที่จะวัดการเคลื่อนตัว ส่วนอีกคู่หนึ่งขนานกับทิศทางที่จะวัดการเคลื่อนตัว
- การวัดการเคลื่อนตัวจะทำโดยหย่อนหัวอ่านวัดการเอียงตัว (Probe) ที่มีลูกล้อนำทางลงไปในท่อตรวจวัด โดยลูกล้อจะเคลื่อนที่ตามแนวร่องนำ และวัดการเอียงตัวของท่อตรวจวัดในแนวร่องนำทั้งสองทิศทาง
- ท่อตรวจวัดจะต้องทำจากพลาสติกหรือวัสดุอื่นที่ได้รับความเห็นชอบจากวิศวกร โดยต้องมีขนาดสม่ำเสมอและมีร่องนำทางที่เป็นแนวเส้นตรงไม่บิดเบี้ยว ตลอดขั้นตอนผลิตจนถึงติดตั้ง รอยต่อระหว่างท่อตรวจวัดจะต้องมั่นคงแข็งแรง และร่องนำจะต้องเชื่อมต่อเนื่องกันเป็นแนวเส้นตรงอย่างแม่นยำ เพื่อให้หัวอ่านเคลื่อนที่ผ่านได้อย่างราบรื่นไม่สะดุด ปลายด้านล่างของท่อตรวจวัดจะต้องปิดด้วยฝาปิด ทั้งรอยต่อและฝาปิดจะต้องผนึกให้ดีจนสามารถป้องกันไม่ให้วัสดุอัดฉีด เข้าสู่ภายในท่อตรวจวัดได้
- หัวอ่านจะต้องสามารถวัดการเคลื่อนที่ 2 ทิศทาง (Biaxial) ด้วยความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 มิลลิเมตรต่อความยาว 25 เมตร หัวอ่านจะต้องเป็นเหล็กกันสนิมที่สามารถป้องกันไม่ให้น้ำสัมผัสกับอุปกรณ์ภายใน เมื่อหัวอ่านถูกหย่อนลงในท่อตรวจวัดจะต้องสามารถวัดตำแหน่งความลึกของหัวอ่านด้วยความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ±10 มิลลิเมตร

**2.2 การติดตั้ง**

- การติดตั้งท่อตรวจวัดของมาตรวัดการเคลื่อนตัวทางแนวราบ ต้องอยู่ในตำแหน่งและความลึกที่กำหนดในแบบที่ได้รับการยอมรับจากวิศวกร ท่อตรวจวัดสามารถติดตั้งทั้งในโครงสร้างกันดิน (กำแพงไดอะแฟรม เสาเข็มเจาะ หรือ เสาเข็มพืด เป็นต้น) หรือติดตั้งในดิน แล้วแต่จะระบุในแบบหรือกำหนดโดยวิศวกร

- ในกรณีที่ติดตั้งในโครงสร้างกันดิน ท่อปลอกซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าท่อตรวจวัด จะต้องยึดติดกับเหล็กเสริมในตำแหน่งที่ต้องการ เมื่อเทคอนกรีตแล้วเสร็จ ท่อตรวจวัดจะถูกหย่อนลงไปในท่อปลอก ในกรณีที่ติดตั้งในดินท่อตรวจวัดจะถูกหย่อนในหลุมเจาะ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าท่อตรวจวัด ขณะที่หย่อนท่อตรวจวัดลงในท่อปลอกหรือหลุมเจาะปลายท่อด้านล่างของท่อตรวจวัดต้องมีฝาปิดและต้องเติมน้ำใส่ท่อตรวจวัดเพื่อป้องกันไม่ให้ท่อลอย
- ในการต่อท่อ ยึดท่อท่อนที่ถูกหย่อนลงในหลุมเจาะหรือท่อปลอกให้อยู่ในตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการที่ปากหลุม แล้วจึงต่อท่อนที่อยู่เหนือขึ้นไปและพันด้วยเทปปิดผนึกไม่ให้วัสดุอัดฉีดไหลเข้าสู่ภายในท่อ หลังจากนั้น จึงทำการหย่อนท่อท่อนที่ต่อเรียบร้อยแล้วลงในหลุมเจาะและทำการต่อท่อนต่อไปจนได้ความลึกที่ต้องการ เมื่อท่อตรวจวัดถูกติดตั้งแล้วเสร็จจะต้องทำการทดสอบความราบเรียบของท่อโดยใช้หัวอ่านสำรอง (Dummy) หย่อนลงไปในท่อตรวจวัดเพื่อทดสอบว่าหัวอ่านสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างราบเรียบตลอดความลึกของท่อหรือไม่
- ช่องว่างระหว่างท่อตรวจวัดและท่อปลอก (กรณีก่อสร้างกำแพงกันดิน) หรือหลุมเจาะ (กรณีเจาะติดตั้งใหม่) จะต้องถูกอัดฉีดด้วยวัสดุอัดฉีด
- ทันทีที่ติดตั้งท่อตรวจวัดแล้วเสร็จ จะต้องทำการวัดมุมบิดของท่อ (Spiral Test) โดยใช้หัวอ่านวัดการบิดตัว เพื่อใช้ในการปรับแก้ค่าที่อ่านได้ภายหลัง ทั้งนี้มุมบิดของท่อต้องไม่เกินกว่าที่กำหนดโดยผู้ผลิต หลังจากนั้นจะต้องทำการวัดความเอียงเริ่มต้นของท่อตรวจวัดเพื่อใช้เป็นค่าฐานอ้างอิงสำหรับตรวจวัดการเคลื่อนตัวที่จะเกิดขึ้นจากการก่อสร้างต่อไป ในการวัดการเคลื่อนตัวจะต้องใช้หัวอ่านตัวเดียวกับที่ใช้กำหนดฐานอ้างอิง
- ปลายด้านบนของท่อตรวจวัดต้องมีฝาปิดที่สามารถถอดออกได้ และจะต้องป้องกันปลายของท่อจากความเสียหายที่เกิดจากการก่อสร้าง
- ก่อนและหลังวัดการเคลื่อนตัว จะต้องทำการวัดตำแหน่งและระดับของปลายท่อตรวจวัดโดยวิธีการสำรวจที่เหมาะสม ก่อนที่จะหย่อนหัวอ่านลงไปในท่อตรวจวัด จะต้องหย่อนหัวอ่านสำรอง (Dummy) ลงไป เพื่อตรวจสอบว่ามีสิ่งกีดขวางอยู่ในท่อหรือไม่ หลังจากนั้นจึงหย่อนหัวอ่าน

จริงลงไปจนถึงปลายท่อ แล้วจึงดึงหัวอ่านขึ้น พร้อมทั้งอ่านความเอียงของท่อทุกๆ ระยะ 0.5 เมตร จนถึงปลายด้านบน หลังจากนั้นจะทำการอ่านอีกครั้งหนึ่ง โดยกลับหัวอ่าน 180 องศา

**ข้อแนะนำ 2.**

(1) ปลายของท่อตรวจวัดควรฝังอยู่ในชั้นดินที่ไม่มีการเคลื่อนตัวอย่างน้อย 3 ถึง 6 เมตร เพื่อใช้เป็นฐานอ้างอิงสำหรับการวัดการเคลื่อนตัว โดยให้ร่องนำของท่อตรวจวัดชุดหนึ่งอยู่ในทิศทางที่คาดว่าจะมีการเคลื่อนตัวสูงสุด ซึ่งจะทำให้การแปลผลการตรวจวัดง่าย เนื่องจากการเคลื่อนตัวส่วนใหญ่จะถูกวัดในแกนหลักแกนเดียว ส่วนอีกแกนหนึ่งจะมีการเคลื่อนตัวเพียงเล็กน้อย

(2) ท่อตรวจวัดควรอยู่ในแนวดิ่งและเป็นเส้นตรง ถึงแม้ว่าการเอียงตัวหรือการโก่งตัวของท่อตรวจวัดจะสามารถปรับแก้ได้ โดยการอ่านค่าเริ่มต้นของการเอียงตัวเริ่มต้นของท่อก่อนการก่อสร้าง แต่อาจก่อให้เกิดความสับสนและอาจทำให้เกิดความผิดพลาดของการวัดได้ง่าย

(3) การทรุดตัวของดินรอบท่อตรวจวัดจะส่งผลให้ท่อตรวจวัดเกิดการโก่งตัว หรือคดงอได้ ดังนั้น ในกรณีที่คาดว่าจะมีการทรุดตัวของดินควรใช้ท่อตรวจวัดชนิดที่สามารถยุบตัวได้ การโก่งตัวของท่ออาจเกิดในขณะที่ทำการอัดฉีดหลุมเจาะได้ เนื่องจากแรงลอยตัวที่เกิดในท่อ ถึงแม้ว่าท่อจะเติมด้วยน้ำขณะอัดฉีด แต่ความหนาแน่นของวัสดุอัดฉีดจะสูงกว่าความหนาแน่นของน้ำ ทำให้เกิดแรงลอยตัวกระทำต่อท่อ การป้องกันไม่ให้ท่อลอยโดยการกดท่อที่ปากหลุม ทำให้เกิดแรงอัดขึ้นในท่อ และอาจทำให้ท่อโก่งตัวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ท่อมีความยาวมากๆ การแก้ไขการลอยตัวอาจทำได้โดยการอัดฉีดส่วนล่างของหลุมเจาะ แล้วรอจนวัสดุอัดฉีดแข็งพอที่จะยึดท่อได้แล้วจึงอัดฉีดส่วนที่เหลือหรืออาจเติมโคลนเบนโทไนท์ (Bentonite) ลงในท่อเพื่อเพิ่มน้ำ

**3. กล้องระดับ**

**3.1 ข้อกำหนดของเครื่องมือและอุปกรณ์**

- ชนิดของกล้องระดับที่ใช้ในการตรวจสอบการทรุดตัวของอาคารขึ้นอยู่กับความละเอียดของค่าระดับที่ต้องการวัดซึ่งอยู่ในดุลยพินิจของวิศวกร

- ในกรณีที่จำเป็นต้องถ่ายระดับจากหมุดอ้างอิงที่ค่อนข้างไกล หรืออยู่ในพื้นที่ที่มีสิ่งบดบังการส่องกล้องหลายตำแหน่ง ทำให้ต้องมีการย้ายจุดตั้งกล้องหลายครั้งในการอ่านหมุดวัดการทรุดตัวทั้งหมด ในกรณีเช่นนี้อาจจำเป็นต้องใช้กล้องระดับความละเอียดสูง (Precise Levels) ซึ่งเป็นกล้องที่มีเลนซ์ที่มีพลังจำแนกและกำลังขยายสูงไม่ต่ำกว่า 40 เท่า และมีระบบปรับระดับแบบอัตโนมัติพร้อมทั้งมีระบบช่วยอ่านด้วยไมโครมิเตอร์ทำให้อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร ไม้ระดับที่ใช้ต้องเป็นไม้ระดับอินวาร์
- ในกรณีที่อาคารมีการทรุดตัวสูง หรือกรณีที่หมุดวัดการทรุดตัวทุกหมุดสามารถอ่านได้จากการตั้งกล้องเพียงครั้งเดียวอาจใช้กล้องระดับธรรมดาซึ่งมีความละเอียดของการอ่าน 1 มิลลิเมตรได้

**3.2 การติดตั้ง**

- กล้องระดับจะต้องติดตั้งอย่างมั่นคงบนขาตั้งที่ปักแน่นบนพื้นดิน ในกรณีที่เป็นพื้นคอนกรีตหรือพื้นอื่นๆ ที่ไม่สามารถปักขาตั้งกล้องให้ยึดแน่นได้ ต้องมีอุปกรณ์ยึดรั้งขาตั้งกล้องให้มั่นคงไม่ขยับเขยื้อนในขณะสำรวจ เมื่อติดตั้งกล้องระดับบนขาตั้งกล้องเรียบร้อยแล้ว ให้ปรับหมุดระดับน้ำที่ขากล้องระดับ จนกระทั่งลูกน้ำตาไก่เข้าศูนย์กลาง ตรวจสอบความถูกต้องโดยการหมุนกล้องระดับ 180 องศา ทั้งสองด้าน ตรวจสอบว่าลูกน้ำตาไก่ยังอยู่ในศูนย์กลาง
- ไม้ระดับให้ติดตั้งบนหมุดตรวจวัด โดยให้กึ่งกลางปลายด้านล่างวางบนส่วนโค้งแทน ไม้ระดับต้องอยู่ในแนวดิ่งในขณะที่อ่านค่า

**2.1.6 การบันทึกข้อมูลและข้อมูลการตรวจวัด**

**1. ข้อมูลการติดตั้งเครื่องมือ**

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งเครื่องมือ จะต้องสรุปเป็นรายงานทันทีที่การติดตั้งเครื่องมือแล้วเสร็จ รายงานนี้ต้องมีข้อมูลต่างๆ ดังนี้

1.1 หมายเลขเครื่องมือ ตำแหน่ง และระดับของเครื่องมือ

1.2 ชื่อผู้ที่รับผิดชอบติดตั้งเครื่องมือ

1.3 วันเวลาที่เริ่มติดตั้งและวันเวลาที่ติดตั้งแล้วเสร็จ

1.4 สภาพบริเวณที่ติดตั้ง

1.5 ข้อมูลตรวจวัดเริ่มต้นเมื่อติดตั้งแล้วเสร็จ ที่ใช้เป็นฐานอ้างอิง

1.6 เอกสารรับรองผลการสอบเทียบเครื่องมือ

1.7 แผนผังแสดงตำแหน่งของเครื่องมือ

1.8 รายละเอียดของท่อตรวจวัด เช่น จำนวนการต่อท่อที่ใช้

1.9 ปัญหาและอุปสรรคที่พบ

1.10 รายละเอียดของการป้องกันเครื่องมือจากความเสียหาย และจากสภาพอากาศ

**2 ข้อมูลที่ต้องตรวจวัด**

2.1 ก่อนเริ่มทำการตรวจวัด จะต้องเตรียมแบบฟอร์มที่ใช้บันทึกของการตรวจวัดที่เหมาะสม และเสนอให้วิศวกรเห็นชอบ ในกรณีที่ใช้เครื่องบันทึกข้อมูลจะต้องแปลงข้อมูลให้อยู่ในแบบฟอร์มที่ได้รับความเห็นชอบ ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบของตาราง หรือกราฟ ข้อมูลที่ต้องแสดงสำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ นอกเหนือจากข้อมูลทั่วไป (ตามข้อ 2.) มีดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลที่ต้องตรวจวัดสำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ

| **เครื่องมือและอุปกรณ์** | **ข้อมูลที่ต้องตรวจวัด** |
|---|---|
| หมุดวัดการทรุดตัว<br>(Settlement Point) | - ระดับของหมุด<br>- การเปลี่ยนแปลงระดับเทียบกับฐานอ้างอิงก่อนก่อสร้าง |
| หมุดวัดการเคลื่อนตัว<br>(Displacement Marker) | - พิกัดของหมุด<br>- การเปลี่ยนแปลงพิกัดเทียบกับฐานอ้างอิงก่อนก่อสร้าง |
| มาตรวัดความเอียง<br>(Tilt Meter) | - ความเอียง<br>- การเปลี่ยนแปลงความเอียงเทียบกับค่าฐานอ้างอิงเริ่มต้น |
| มาตรวัดการเคลื่อนตัว<br>ทางแนวราบ<br>(Inclinometer) | - ระดับของหัวท่อตรวจวัด<br>- ระดับของดินรอบๆ ท่อตรวจวัด<br>- การเคลื่อนตัวของแนวราบ<br>- ชื่อไฟล์ (File) ข้อมูลการตรวจวัดในเครื่องบันทึกข้อมูล |

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

| เครื่องมือและอุปกรณ์ | ข้อมูลที่ต้องตรวจวัด |
|---|---|
| | - การเคลื่อนตัวในแนวราบทุก 0.5 เมตร ทั้งสองหน้าพร้อมทั้งค่าปรับแก้เนื่องจากการบิดของท่อ (ถ้ามี)<br>- กราฟและตารางเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวราบเทียบกับค่าฐานอ้างอิงเริ่มต้นที่ความลึกต่างๆ |
| ความกว้างของรอยร้าว | - ตำแหน่งของรอยร้าว<br>- ความกว้างของรอยร้าว<br>- การขยายตัวของรอยร้าว<br>- รอยร้าวที่เกิดใหม่ (ถ้ามี) |

หมายเหตุ: 1) การทรุดตัวของมาตรวัดความดันน้ำใต้ดิน อาจประมาณจากการวัดการทรุดตัวของดินที่ความลึกต่างๆ โดยมาตรวัดการยืดตัวชนิดแม่เหล็ก หรือ ชนิดแท่ง ในกรณีที่ไม่มีการวัดการทรุดตัวของดิน อาจประมาณจากการคำนวณการทรุดตัวของดินที่ระดับต่างๆ แทน

2.2 ข้อมูลทั่วไป ที่ต้องบันทึก

1. เครื่องมือที่ตรวจวัด พร้อมที่ระบุหมายเลขอ้างอิงของเครื่องมือ หมายเลขอุปกรณ์อ่านผล
2. วันเวลาที่ตรวจวัด
3. ชื่อผู้ทำการตรวจวัด
4. กิจกรรมการก่อสร้างขณะตรวจวัด เช่น ความลึกของงานขุดดิน ถมดิน
5. สภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิ และความชื้น
6. ตำแหน่งของเครื่องมือตรวจวัด

**3. ความถี่ของการตรวจวัด**

การตรวจวัดจะกระทำทันทีก่อนและหลังแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง (Stage of Construction) ใดๆ เช่นงานขุดดิน หรืองานถมดิน ในกรณีที่ขั้นตอนการก่อสร้างต้องใช้เวลามากกว่า 1 วัน การตรวจวัดจะกระทำทุกวัน หรือตามที่ได้รับความเห็นชอบจากวิศวกร ซึ่งรวมถึงการวัดอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล ภายหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จจะต้องทำการตรวจวัดทุกๆ เดือนจนกว่าจะถึงวันสิ้นสุดสัญญา หากวิศวกรเห็นว่าจำเป็น

**2.1.7 วิธีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคาร**

**1. การวัดการทรุดตัวด้วยกล้องระดับ**

1.1 วิธีการนี้ดำเนินการโดยติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ บนอาคาร แล้วทำการวัดระดับของหมุดเทียบกับหมุดอ้างอิงด้วยกล้องระดับ ก่อนที่จะทำการก่อสร้างใดๆ จะทำการสำรวจระดับเริ่มต้นเพื่อเป็นฐานอ้างอิง แล้วจึงทำการสำรวจระดับของหมุดในช่วงระหว่างการก่อสร้าง เมื่อเปรียบเทียบกับระดับเริ่มต้นจะทำให้ทราบการทรุดตัวของอาคารที่ตำแหน่งที่ติดตั้งหมุด

1.2 การวัดระดับโดยทั่วไปจะใช้วิธีวัดระดับด้วยความละเอียดสูง ซึ่งต้องใช้กล้องวัดระดับความละเอียดสูงที่มีไมโครมิเตอร์ช่วยอ่าน และใช้ไม้วัดระดับอินวาร์ โดยความละเอียดของการอ่านจะไม่น้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร ในการวัดระดับต้องวัดเป็นวงรอบตามมาตรฐานงานชั้นที่หนึ่งโดยความคลาดเคลื่อนบรรจบควรไม่เกิน $3\sqrt{k}$ มิลลิเมตร โดยที่ $k$ หมายถึง ระยะตามแนววงรอบที่รังวัดหน่วยเป็นกิโลเมตร

1.3 โดยทั่วไปหมุดจะถูกติดตั้งที่บริเวณโคนเสาของอาคาร จำนวนหมุดที่ติดตั้งขึ้นอยู่กับความเสี่ยงของอาคารที่จะเกิดการเคลื่อนตัว ทั้งนี้จำนวนและตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งหมุด ขึ้นอยู่กับดุลพินิจของวิศวกร

**2. การวัดการเคลื่อนตัวด้วยวิธีการสำรวจ**

2.1 วิธีการนี้ดำเนินการโดยติดตั้งหมุดวัดการเคลื่อนตัวที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนดบนอาคาร โดย ก่อนที่จะทำการก่อสร้างใดๆ จะทำการสำรวจพิกัดเริ่มต้นของหมุดด้วยวิธีการสำรวจเพื่อเป็นฐานอ้างอิง ขณะก่อสร้างจะทำการสำรวจพิกัดของหมุดที่เวลาต่างๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับพิกัดเริ่มต้นของหมุด ทำให้ทราบการเคลื่อนตัวทางแนวราบของอาคารที่ตำแหน่งที่ติดตั้งหมุด

2.2 วิธีการสำรวจพิกัดของหมุดสามารถทำได้โดยการวัดระยะหรือทิศทางของหมุดเทียบกับหมุดอ้างอิงอย่างน้อยสองหมุด ความละเอียดของการวัดพิกัดขึ้นอยู่กับความละเอียดของการวัดระยะทาง ซึ่งอาจใช้เทปวัดระยะทางหรือใช้เครื่องวัดระยะทางอิเล็กทรอนิกส์ ปัจจุบันความละ -เอียดของการวัดระยะทางยังอยู่ในระดับ ±(2 มิลลิเมตร+2 ในล้านส่วน)

2.3 โดยทั่วไป หมุดจะถูกติดตั้งที่บริเวณโคนเสาของอาคาร จำนวนหมุดที่ติดตั้งขึ้นอยู่กับความเสี่ยงของอาคารที่จะเกิดการเคลื่อนตัว ทั้งนี้จำนวนและตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งหมุดขึ้นอยู่กับดุลพินิจของวิศวกร

**3. การตรวจวัดด้วยมาตรวัดการยืดตัวชนิดเทป**

3.1 มาตรวัดการยืดตัวชนิดเทป ใช้สำหรับวัดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างจุดสองจุดบนอาคารอย่างละเอียด ถึงแม้ว่าเครื่องมือชนิดนี้ไม่สามารถวัดการเคลื่อนตัวสัมบูรณ์ของโครง สร้างอาคารได้เหมือนกับวิธีการสำรวจด้วยกล้องสำรวจ แต่วิธีการนี้สามารถใช้วัดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างจุดสองจุดได้ละเอียดกว่าวิธีการสำรวจด้วยกล้องสำรวจ ซึ่งในแง่ของความเสียหายของโครงสร้างอาคารแล้ว การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์มีความสำคัญกว่าการเคลื่อนตัวสัมบูรณ์ของโครงสร้างอาคาร

3.2 เครื่องมือชนิดนี้โดยมากจะใช้วัดการยืดหรือการหดตัวของโครงสร้างอาคาร โดยการติดตั้งหมุดขอเกี่ยวบนโครงสร้างอาคารซึ่งอาจเป็นที่โคนเสา หรือผนังของอาคาร แล้วทำการวัดระยะระหว่างหมุดขอเกี่ยวที่เวลาต่างๆ ด้วยมาตรวัดการยืดตัว ซึ่งทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างหมุดขอเกี่ยว ด้วยความละเอียดถึง ± 0.1 มิลลิเมตร การเปรียบเทียบกับระยะเริ่มต้นทำให้ทราบว่าโครงสร้างอาคารเกิดการยืดหรือหดตัวหรือไม่

**4. การวัดการเอียงตัวด้วยมาตรวัดการเอียงตัว**

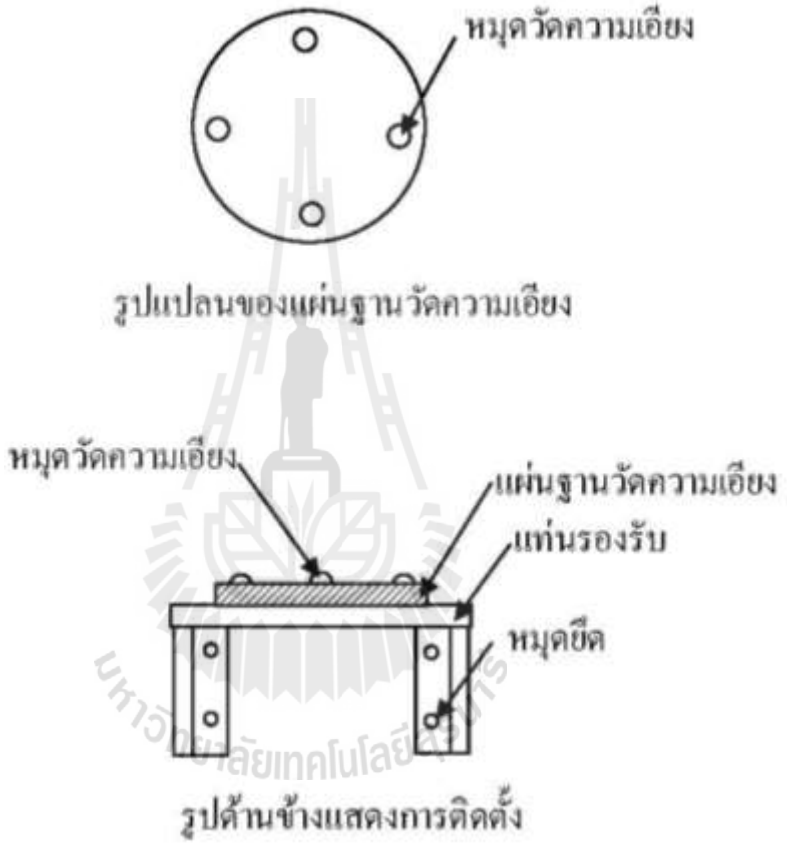
4.1 มาตรวัดการเอียงตัวใช้สำหรับวัดการเอียงตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ของอาคาร ในการวัดการเอียงตัวจะต้องติดตั้งแผ่นฐานวัดความเอียงที่ตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปจะยึดติดที่โคนเสาหรือกำแพง โดยใช้แท่นรองรับดังแสดงในรูปที่ 2.2

4.2 การติดตั้งควรให้ทิศทางของหมุดที่วัดคู่หนึ่งขนานกับทิศทางที่คาดว่าจะมีการเอียงตัวสูงสุดเช่น ทิศทางที่ตั้งฉากกับขอบบ่อขุดดิน เป็นต้น

4.3 ในการตรวจวัดการเอียง จะนำตัววัดความเอียงมาวางบนแผ่นฐานวัดแล้วอ่านความเอียง ก่อนเริ่มการก่อสร้างจะต้องทำการตรวจวัดความเอียงเริ่มต้นของทุกแผ่นฐานวัด เพื่อใช้เปรียบเทียบกับความเอียงที่เกิดจากการก่อสร้าง ในกรณีที่ตรวจวัดการเอียงตัวเป็นระยะตามเวลาที่กำหนดสามารถใช้ตัววัดความเอียงเพียงหนึ่งตัวสำหรับวัดความเอียงของทุกแผ่นฐานวัด แต่ในกรณีที่จำเป็นต้องวัดการเอียงตัวอย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นเครื่องเตือนภัยที่อาจเกิดขึ้น

จะต้องติดตัวอ่านความเอียงไว้บนแผ่นฐานวัดตลอดเวลาแล้วทำการตรวจติดตามการเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่อง

4.4 จำนวนจุดที่ติดตั้งขึ้นอยู่กับความเสี่ยงของอาคารที่จะเกิดการเคลื่อนตัว ดังที่อธิบายในข้อแนะนำ ทั้งนี้ จำนวนและตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งหมุด ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของวิศวกร



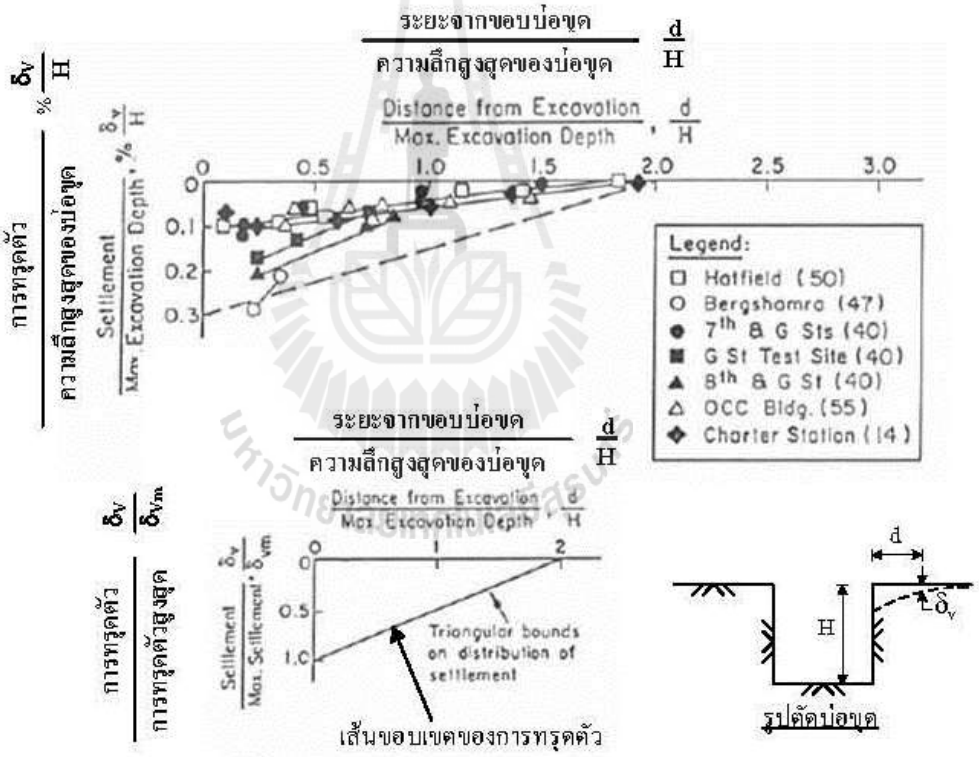

รูปที่ 2.2 รายละเอียดแผนฐานวัดความเอียง

(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง, ปี พ.ศ. 2551)

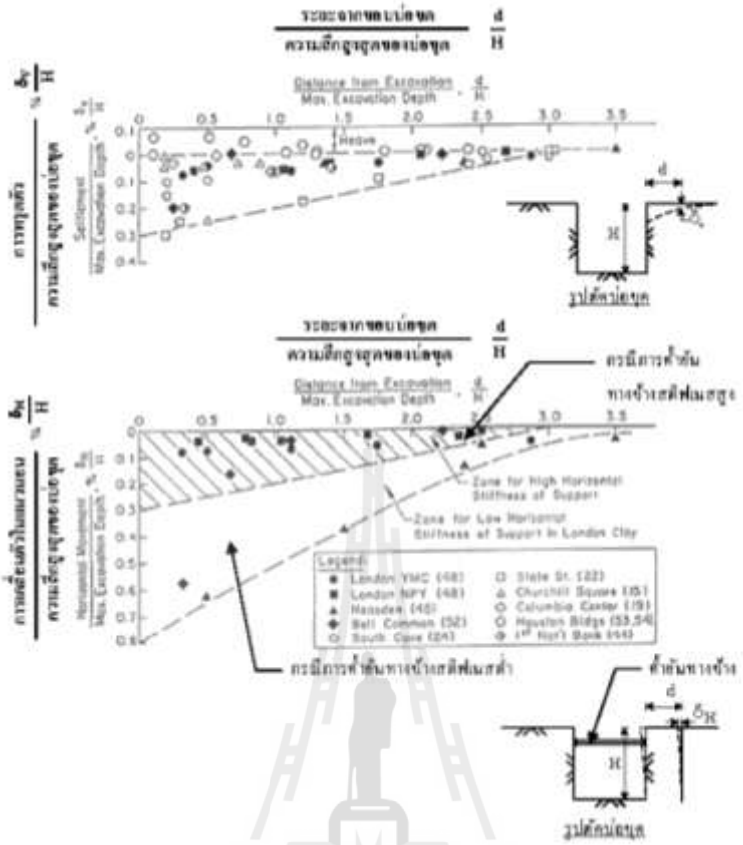
**ข้อแนะนำ 1.-4.**

(1) การเคลื่อนตัวเนื่องจากการขุดดิน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง รวมถึงลักษณะของชั้นดิน ขั้นตอนการก่อสร้าง และวิธีการก่อสร้าง เป็นต้น จากข้อมูลในอดีตที่ผ่านมา พบว่าการทรุดตัวจากการขุดดินในชั้นดินทราย ดินเหนียวแข็ง และดินเหนียวอ่อน มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.3 ถึงรูปที่ 2.5 ตามลำดับจะเห็นว่าลักษณะการทรุดตัวของดินจะสูงสุด ณ

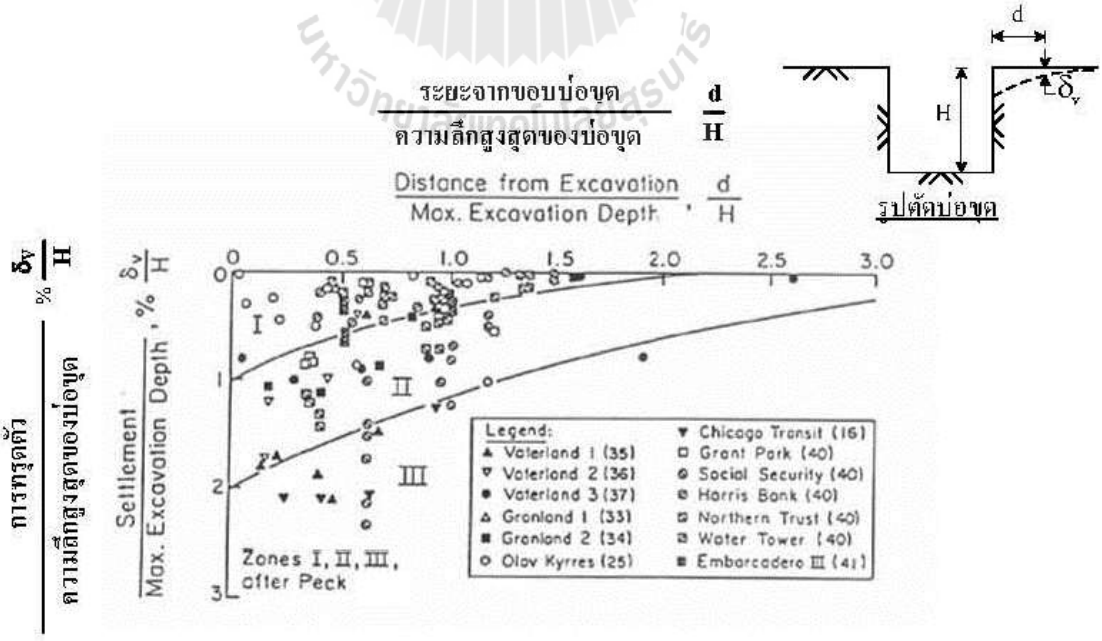
บริเวณขอบของบ่อขุดดินและจะค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์ที่ระยะห่างจากขอบบ่อขุดดินประมาณ 2 ถึง 3 เท่าของความลึกสูงสุดที่ขุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอาคารที่อยู่ห่างจากบ่อขุดดินเกิน 3 เท่าของความลึกสูงสุดของบ่อขุด ไม่น่าจะได้รับผลกระทบรุนแรงจากการขุดดิน แต่เป็นที่น่าเสียดายที่การศึกษาเรื่องการเคลื่อนตัวในแนวราบเนื่องจากการขุดดินยังมีจำกัดเฉพาะกรณีดินเหนียวแข็ง รูปที่ 4 แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวในแนวราบขึ้นอยู่กับความแกร่ง (Rigidity) ของระบบค้ำยัน โดยมีขนาดสูงสุดที่ขอบบ่อขุด แล้วค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์ที่ระยะประมาณ 3 เท่าของความลึกของการขุดดิน




รูปที่ 2.3 ลักษณะการทรุดตัวจากงานขุดดินในชั้นทราย *(Clough and O'Rourke, 1990)* (สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง, ปี พ.ศ. 2551)




รูปที่ 2.4 ลักษณะการเคลื่อนตัวจากงานขุดดินในชั้นดินเหนียวแข็ง *(Clough and O'Rourke, 1990)*
(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)




รูปที่ 2.5 ลักษณะการทรุดตัวจากการขุดดินในชั้นดินเหนียวอ่อน *(Clough and O'Rourke, 1990)*
(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)

หมายเหตุ: Zone I, II, III (After Peck, 1969) หมายถึง

Zone I : สำหรับทราย และดินเหนียวอ่อนถึงแข็ง และคุณภาพงานก่อสร้างปานกลาง

Zone II : สำหรับดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก ในกรณี

(1) มีชั้นดินเหนียวอยู่ใต้ท้องบ่อขุดไม่มาก

(2) ความลึกของชั้นดินเหนียวใต้บ่อขุดมาก แต่ $N_b <$ $N_{cb*}$

Zone III : สำหรับดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก และมีความลึกของชั้นดินเหนียวใต้บ่อขุดมาก

และ $N_b > N_{cb}$

โดยที่ $N_b$ หมายถึง ค่าเสถียรภาพ (Stability No.) ซึ่งพิจารณาจากค่า C ใต้ระดับฐาน = $\gamma H/C_b$

$N_{cb}$ หมายถึง ค่าเสถียรภาพ วิกฤติสำหรับการอูดของฐาน (Basal Heave), $\gamma$ หมายถึง หน่วยน้ำหนักของดิน และ C หมายถึง กำลังรับแรงเฉือนของดิน

(2) ความจำเป็นของการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคาร ขึ้นอยู่กับความเสี่ยงของอาคารที่จะเกิดความเสียหายจากการเคลื่อนตัวของดิน ในกรณีที่อาคารที่มีความเสี่ยงสูง เช่น อาคารที่อยู่บนฐานรากตื้น หรืออยู่บนเสาเข็มสั้นที่อยู่ชิดกับบริเวณที่ทำการขุดดิน อาจจำเป็นต้องพิจารณาตรวจวัดการเคลื่อนตัวเป็นพิเศษ โดยอาจจะต้องทำการวัดการเคลื่อนตัวที่ตำแหน่งโคนเสาทุกต้นของอาคาร ในทางกลับกัน ในกรณีที่อาคารมีความเสี่ยงต่ำ เช่น อาคารที่อยู่บนฐานรากที่ปลายเสาเข็มอยู่ลึกกว่าระดับขุดดินมากๆ และมีการยึดโยงฐานรากด้วยคานคอดินและระบบพื้นอย่างดี หรืออาคารที่อยู่ห่างจากบริเวณที่ทำการขุดดินมากๆ ความจำเป็นที่จะต้องตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคารมีน้อย ทั้งนี้ความจำเป็นของการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคารขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของวิศวกร

### 2.1.8 การตรวจสอบความกว้างของรอยร้าว

**1. การตรวจวัดความกว้างของรอยร้าว**

1.1 ความกว้างของรอยร้าว จะวัดโดยเกจวัดความกว้างของรอยร้าว (Crack Width Gauge) ซึ่งมีชนิดที่เป็นแผ่นพลาสติกใสที่มีเส้นขนาดความกว้างต่างๆ ใช้ทาบวัดความกว้าง และที่ชนิดเป็นชุดแถบโลหะที่มีความหนาต่างๆ (Feeler Gauge) ใช้เสียบเข้าไปในรอยร้าวเพื่อวัดความกว้างของรอยร้าว

1.2 การวัดความกว้างของรอยร้าวด้วยเกจชนิดพลาสติกจะทำโดยการเอาแผ่นเกจทาบกับรอยร้าวแล้วเลือกขนาดเส้นที่มีขนาดใกล้เคียงกับรอยร้าวมากที่สุด

1.3 การวัดความกว้างของรอยร้าวด้วยเกจชนิดแถบโลหะ (Feeler Gauge) จะทำโดยการลองเสียบแผ่นเกจลงในรอยร้าว โดยเริ่มจากขนาดเล็กไปสู่ขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถเสียบเข้ารอยร้าวได้ความหนาสุดท้ายของแผ่นเกจที่เสียบได้ จะเป็นขนาดของรอยร้าวนั้น

**ข้อแนะนำ 11. 1**

(1) รอยร้าวในอาคารอาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ ได้มากมาย ทั้งที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของอาคารจากผลกระทบของการก่อสร้างข้างเคียง และที่ไม่ได้เกิดจากผลกระทบของการก่อสร้าง เช่น เกิดจากการหดตัวของคอนกรีตจากการสูญเสียความชื้นหรือจากอุณหภูมิ และการทรุดตัวไม่เท่ากันของอาคารจากน้ำหนักของอาคารเอง เป็นต้น

(2) ลักษณะรอยร้าวในอาคาร เช่น ความกว้าง จำนวน ตำแหน่งและทิศทางของรอยร้าว เป็นตัวบ่งชี้ว่าอาคารมีความเสียหายหรือไม่และมีความเสียหายอย่างไร การประเมินความเสียหายของอาคารจำเป็นต้องใช้วิศวกรผู้เชี่ยวชาญ อย่างไรก็ตาม ความกว้างของรอยร้าวเป็นตัวบ่งชี้สำคัญที่ทำให้ทราบถึงสภาพความเสียหายของอาคาร ตารางที่ 4 แสดงสภาพความเสียหายของอาคารจำแนกตามความกว้างของรอยร้าวที่เกิดขึ้นตามข้อแนะนำของ Burland et al, 1977 1

(3) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมาตรฐาน ACI 224R – 90 ได้ให้คำแนะนำว่าขนาดของความกว้างของรอยแตกร้าวที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นดังแสดงในตารางที่ 5

(4) ก่อนการก่อสร้างใดๆ ที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียง ควรมีการสำรวจสภาพรอยร้าวของอาคารข้างเคียง ในรัศมีที่คาดว่าผลกระทบจากการก่อสร้างจะไปถึ

(5) โดยทั่วไป อาคารส่วนใหญ่โดยเฉพาะอาคารเก่า อาจมีรอยร้าวอยู่ก่อนแล้ว ดังนั้น การสำรวจสภาพรอยร้าวของอาคารข้างเคียงก่อนการก่อสร้างใดๆ จะทำให้ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องรวม ถึงเจ้าของอาคาร เจ้าของโครงการ ผู้รับเหมา ผู้ควบคุมงาน ทราบถึงสภาพของอาคารก่อนการก่อสร้าง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการประเมินว่าการก่อสร้างก่อให้เกิดความเสียหายเพิ่มเติมต่ออาคารข้างเคียงหรือไม่และอย่างไรนอกจากนี้ รอยร้าวของอาคารข้างเคียงยังเป็นเครื่องมือบ่งบอกว่าอาคารอยู่ในสภาพที่จะสามารถรองรับผลกระทบจากการก่อสร้างได้มากน้อยเพียงใด และจำเป็นจะต้องมีมาตรการพิเศษอะไรหรือไม่ ในการป้องกันอาคารที่อยู่ในสภาพที่ไม่ค่อยมั่นคงอยู่ก่อนแล้วไม่ให้พังพลายระหว่างก่อสร้าง

ตารางที่ 2.2 สภาพความเสียหายของอาคารจำแนกตามความกว้างของรอยร้าวของผนังอิฐก่อ

ที่มา: Burland et al, 1977

| **สภาพความเสียหาย** | **ลักษณะความเสียหาย** | **ความกว้างของรอยร้าวโดยประมาณ** |
|---|---|---|
| ไม่เสียหาย | รอยร้าวขนาดเส้นผม (Hairline Cracks) | < 0.1 มม. |
| น้อยมาก | รอยร้าวขนาดเล็ก สังเกตเห็นได้ยาก หากไม่ตรวจสอบอย่างดี รอยร้าวนี้ไม่จำเป็นต้องแก้ไข และสามารถปกปิดได้เมื่อมีการทาสี | < 1 มม. |
| เล็กน้อย | มีรอยร้าวที่สามารถสังเกตเห็นได้ และอาจจำเป็นต้องตกแต่งโดยการยาปูน หน้าต่างและประตูอาจติดขัด | < 5 มม. |
| ปานกลาง | มีรอยร้าวที่จำเป็นต้องแก้ไขโดยกระเทาะรอยร้าวออกและยาปูนใหม่ บางครั้งอาจจะต้องรื้อผนังบางส่วนออกแล้วก่ออิฐใหม่ ประตูและหน้าต่างติดขัด และอาจมีการแตกของท่อที่ติดหรือฝังในผนัง อากาศภายนอกพัดผ่านเข้าในอาคารผ่านรอยร้าวได้ | 5-15 มม. หรือมีหลายรอยร้าวกว้างเกิน 3 มม. |

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

| สภาพความเสียหาย | ลักษณะความเสียหาย | ความกว้างของรอยร้าวโดยประมาณ |
|---|---|---|
| ร้ายแรง | มีรอยร้าวขนาดใหญ่หลายรอยที่ต้องแก้ไขโดยการทุบผนังทิ้งบางส่วนแล้วสร้างใหม่ โดยเฉพาะส่วนที่อยู่เหนือประตูและหน้าต่าง วงกบประตูและหน้าต่างบิดเบี้ยว สามารถสังเกตเห็นพื้นลาดเอียง ผนังเอียงไม่ได้ดิ่ง ท่อแตก และคานอาจสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนัก | 15-20 มม. และขึ้นอยู่กับจำนวนรอยร้าว |
| ร้ายแรงมาก | มีรอยร้าวที่ต้องแก้ไขโดยด่วน โดยอาจต้องรื้อสร้างใหม่ทั้งหมดหรือบางส่วน เนื่องจากความสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนักและผนังเอียงจนต้องค้ำยัน หน้าต่างแตกและโครงสร้างไม่มั่นคงปลอดภัย | > 25 มม. และขึ้นอยู่กับจำนวนรอยร้าว |

ตารางที่ 2.3 ความกว้างของรอยร้าวที่ยอมให้ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ที่มา: ACI 224R – 90

| สภาวะที่คอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม | ความกว้างของรอยแตกที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ | |
|---|---|---|
| | (นิ้ว) | (มม.) |
| อากาศแห้ง, มีการหุ้มป้องกัน | 0.0016 | 0.41 |
| อากาศชื้น, ในดิน | 0.012 | 0.30 |
| สัมผัสกับสารเคมีสำหรับละลายน้ำแข็ง | 0.007 | 0.18 |
| น้ำทะเล, ละอองน้ำทะเล, เปียกสลับแห้ง | 0.006 | 0.15 |
| โครงสร้างเก็บกักน้ำ1) | 0.004 | 0.10 |

**2. การวัดการขยายตัวและการหดตัวของรอยร้าว**

2.1 การวัดการขยายและการหดตัวของรอยร้าว จะกระทำโดยใช้อุปกรณ์ ซึ่งได้แก่ มาตรวัดการขยายตัวและการหดตัวของรอยร้าว (Tell-Tale Crack Gauge) หรือหมุดวัดระยะที่ฝังอยู่ 2 ข้างของรอยร้าวเพื่อใช้วัดการ

เปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างหมุด อุปกรณ์ที่ใช้ต้องมีความทนทาน มีความละเอียดของการวัดไม่ต่ำกว่า 1 มิลลิเมตรสำหรับการวัดด้วยไม้บรรทัด และไม่ต่ำกว่า 0.1 มิลลิเมตรสำหรับการวัดด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ และสามารถยึดติดคร่อมรอยร้าวอย่างมั่นคง

2.2 ไม้วัดการขยายตัวของรอยร้าวจะต้องยึดแน่นกับตัวผนังแต่ละข้างของรอยร้าว ไม่โยกคลอนและต้องให้สายใยอ่านอยู่ในแนวตั้งฉากกับไม้บรรทัดอ่าน

2.3 หมุดวัดระยะทางจะต้องถูกฝังอยู่ในแต่ละข้างของรอยร้าวอย่างมั่นคงแข็งแรง ไม่โยกคลอนและต้องมีระยะห่างระหว่างหมุดที่สามารถวัดด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์อย่างสะดวก จำนวนหมุดที่วัดแต่ละชุดอาจมี 2 หรือ 3 จุด ขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของโครงสร้างทั้งสองฝั่งของรอยร้าว

***ข้อแนะนำ 2.***

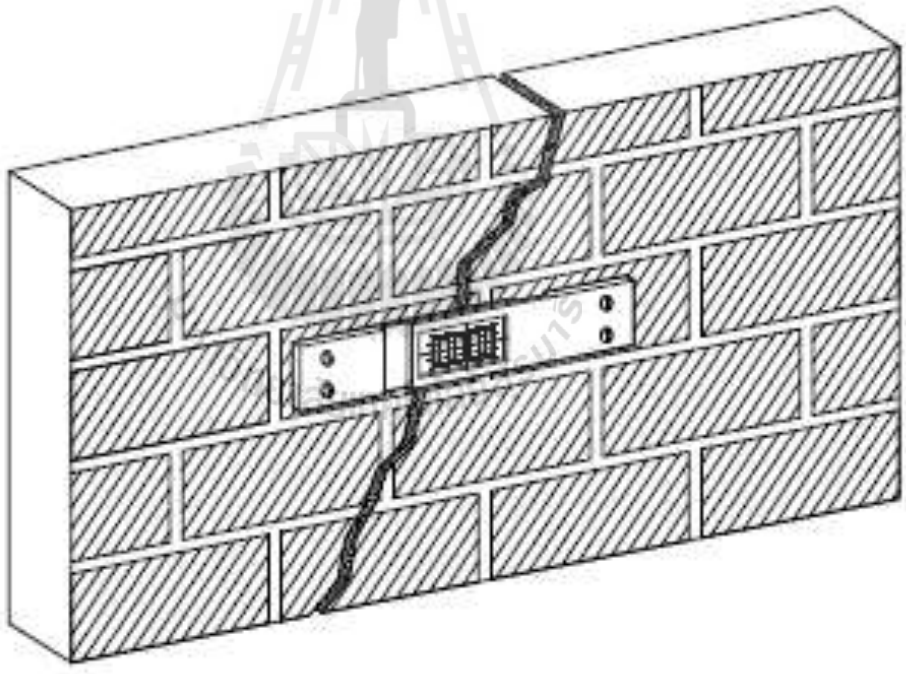
(1) เมื่ออาคารมีรอยแตกร้าวในลักษณะที่อาจมีสาเหตุจากปัญหาเรื่องความมั่นคงของโครงสร้าง การตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงของขนาดของรอยร้าวเป็นมาตรการที่ใช้บ่งชี้ว่าปัญหาที่เกิดขึ้นกำลังทวีความรุนแรงขึ้นหรือหยุดแล้ว ถ้าหากรอยร้าวขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ย่อมแสดงให้เห็นว่าปัญหาที่เกิดขึ้นยังคงส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารอย่างต่อเนื่อง หากรอยร้าวมีขนาดคงที่ไม่ขยายตัวแล้ว ย่อมแสดงว่าโครงสร้างอาคารอยู่ในสภาวะสมดุลแล้ว นอกจากนี้การก่อสร้างใกล้อาคารที่มีรอยร้าวอยู่แล้วอาจจะต้องทำการติดตามการขยายตัวของรอยร้าวที่อาจเกิดขึ้น เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ว่าผลกระทบจากการก่อสร้างต่ออาคารที่มีรอยร้าวอยู่แล้วอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถควบคุมได้หรือไม่ และจะส่งผลต่อความมั่นคงแข็งแรงของอาคารที่มีรอยร้าวหรือไม่

(2) อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของรอยร้าวที่ใช้กันส่วนใหญ่ในปัจจุบัน คือ มาตรวัดการขยายตัวของรอยร้าว และหมุดวัดระยะห่างของรอยร้าว

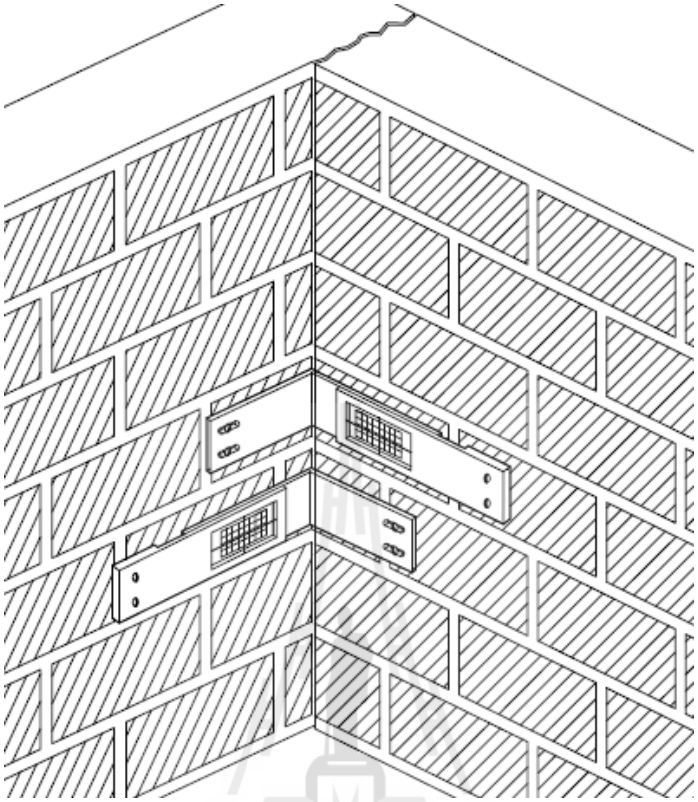
- มาตรวัดการขยายตัวของรอยร้าว เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยแผ่นไม้บรรทัดและแผ่นสายใยที่ติดอยู่คนละด้านของรอยร้าว ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อรอยร้าวมีการหดตัวหรือขยายตัว แผ่นสายใยจะเคลื่อนที่เข้าหาหรือออกจากแผ่นไม้บรรทัด และสามารถอ่านขนาดการขยายตัว

หรือการหดตัวของรอยร้าวโดยเทียบสายใยกับแผ่นไม้บรรทัดที่เวลาต่างๆ ได้ โดยทั่วไปความละเอียดของการอ่านจะอยู่ที่ 1 มิลลิเมตร มาตรวัดการขยายตัวของรอยร้าวสามารถติดตั้งเพื่อวัดรอยร้าวที่มุมของอาคารได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7

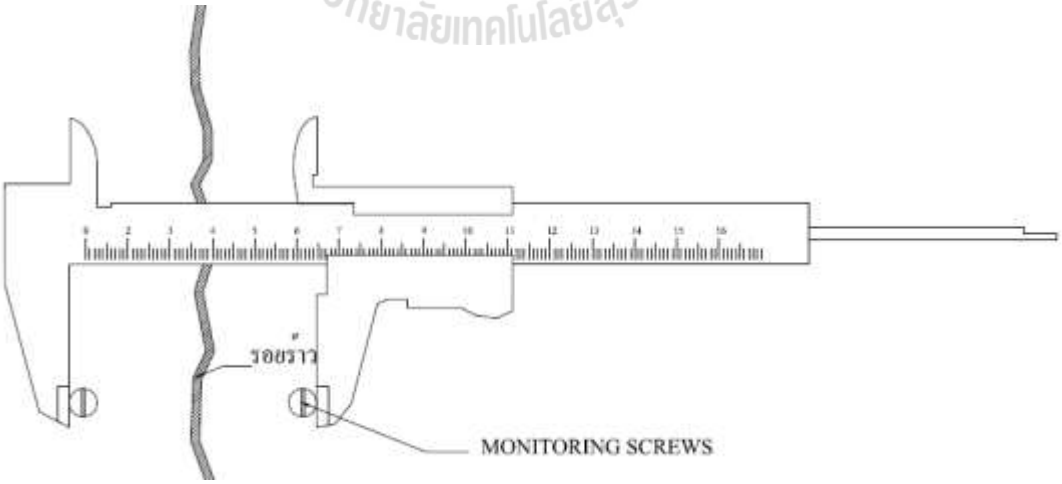
- หมุดวัดระยะห่างของรอยร้าว ประกอบด้วยหมุดอย่างน้อย 2 หมุด ติดตั้งอยู่คนละด้านของรอยร้าว โดยระยะห่างระหว่างหมุดสามารถอ่านได้ด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ระยะห่างที่วัดได้ที่เวลาต่างๆ เทียบกับระยะเริ่มต้น จะบ่งบอกการเคลื่อนตัวของรอยร้าว ในกรณีที่ติดตั้งหมุด 3 จุดดังแสดงในรูปที่ 2.9 จะสามารถใช้วัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากและขนานกับรอยร้าวได้ [1] ความละเอียดของการวัดด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีขนาดความละเอียด 0.1 ถึง 0.02 มิลลิเมตร



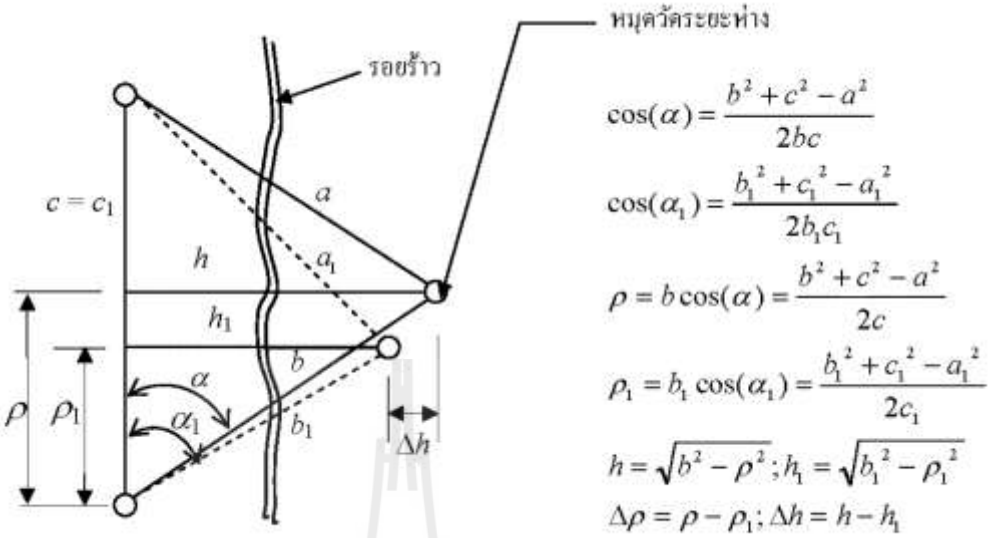
รูปที่ 2.6 มาตรวัดการขยายตัวของรอยร้าวสำหรับวัดการขยายตัวของรอยร้าวบนผนัง (สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)



รูปที่ 2.7 มาตรวัดการขยายตัวของรอยร้าวสำหรับวัดการขยายตัวของรอยร้าวที่มุมผนัง
(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)




รูปที่ 2.8 หมุดวัดการขยายตัวของรอยร้าว
(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)




รูปที่ 2.9 การวัดการขยายตัวของรอยร้าวโดยใช้หมุด 3 ตัว [ Hanna, T.H 1985]
(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)

**2.1.9 การรายงานผลการตรวจวัด**

รายงานผลการตรวจวัดจะต้องส่งให้วิศวกรรับทราบทุกสัปดาห์ถ้าไม่กำหนดเป็นอย่างอื่น รูป แบบของรายงานจะต้องได้รับการยอมรับจากวิศวกร โดยเนื้อหาของรายงานอย่างน้อยจะต้องประกอบด้วย

1. กราฟแสดงค่าตรวจวัด เช่น การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวในแนวราบกับเวลา การทรุดตัวและการเคลื่อนตัวในแนวราบกับความลึกของการขุดดิน
2. การวิเคราะห์ผลการตรวจวัด เปรียบเทียบกับค่าที่ประมาณการไว้ และการคาดการณ์ แนวโน้มของการเคลื่อนตัวในอนาคต
3. มาตรการที่ใช้แก้ไข ในกรณีที่ผลการตรวจวัดแสดงว่า การเคลื่อนตัวสูงกว่า หรือมีแนวโน้มที่จะสูงกว่าที่ประมาณการไว้
4. ในทุกเดือนจะต้องจัดทำรายงานสรุปผลการตรวจวัดและรายงานให้วิศวกรรับทราบ

**2.1.10 เกณฑ์การยอมรับ**

**1. การทรุดตัวในแนวดิ่งที่แตกต่างกัน**

เกณฑ์การยอมรับสำหรับการทรุดตัวที่แตกต่างกันมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น วัสดุที่ใช้สร้างอาคาร ลักษณะของโครงสร้างอาคาร สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กชนิด เสา-คาน และชนิดผนังรับน้ำหนัก ค่าการทรุดตัวที่ยอมรับได้ในรูปของการเสียรูปเชิงมุม (Angular Distortion: $\beta$) แสดงดังตารางที่ 2.4 และ 2.5 นอกจากนี้มาตรฐาน ACI 318-99 และ วสท. 1008-38 ได้กำหนดข้อจำกัดการแอ่นตัวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.4 ขีดจำกัดของการเสียรูปเชิงมุม ($\beta$) ที่ยอมได้ สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเสา-คาน และชนิดผนังรับน้ำหนัก

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

ตารางที่ 2.5 ขีดจำกัดการเสียรูปเชิงมุม ($\beta$) ที่ยอมให้ของอาคารตามคำแนะนำของ Bjerrum (1963)

| **ชนิดของความเสียหาย** | **ขีดจำกัดการเสียรูปเชิงมุม ($\beta$)** |
|---|---|
| อันตรายต่อเครื่องจักรที่ไวต่อการทรุดตัว | 1/750 |
| อันตรายต่อโครงสร้างโครงข้อแข็งที่มีโครงทแยง (Frames with Diagonals) | 1/600 |
| ขีดจำกัดที่ไม่ก่อให้เกิดรอยร้าวในอาคาร | 1/500 |
| ขีดจำกัดที่รอยร้าวในอาคารเริ่มเกิดขึ้นที่ผนังอาคาร หรืออาจก่อให้เกิดปัญหา ในการใช้งานปั้นจั่นเหนือศีรษะ (Overhead Crane) | 1/300 |
| เริ่มสังเกตเห็นการเอียงของอาคารสูง | 1/250 |
| รอยร้าวในผนังก่ออิฐของอาคารเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก | 1/150 |
| อันตรายต่อความเสียหายต่อโครงสร้างอาคาร | 1/150 |
| ขีดจำกัดปลอดภัยสำหรับผนังก่ออิฐซึ่งมีอัตราส่วนความสูงต่อความยาวน้อยกว่าหนึ่งต่อสี่ | 1/150 |

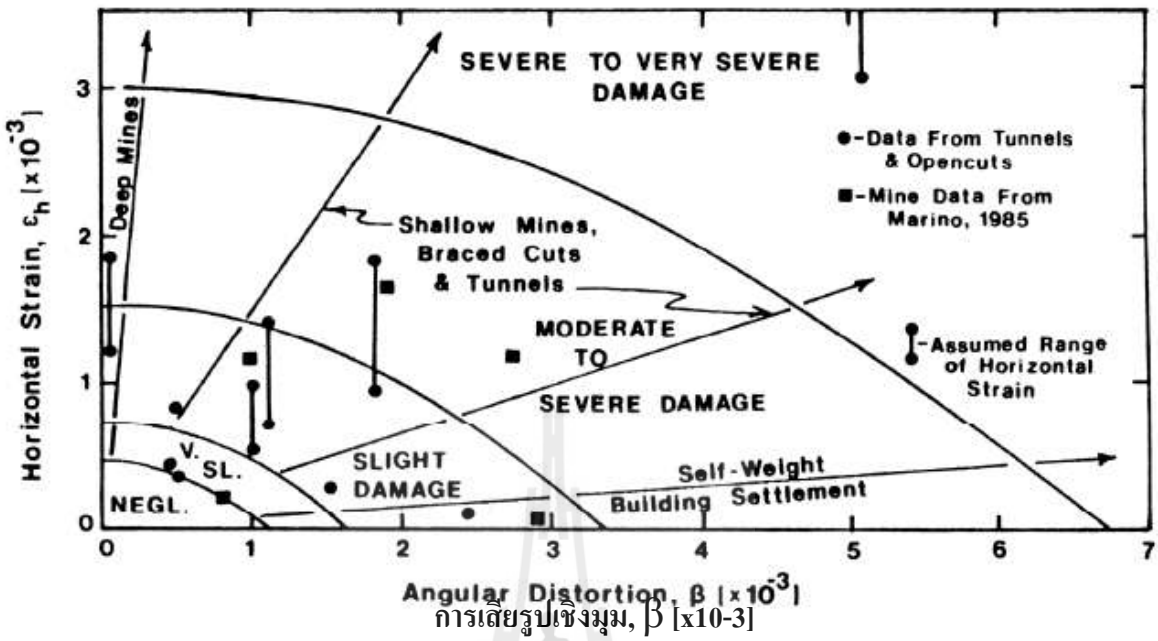
ตารางที่ 2.6 ขีดจำกัดของการแอ่นตัวที่ยอมได้สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามมาตรฐาน ACI 318-99 และ วสท. 1008-38

| ชนิดขององค์อาคาร | การแอ่นตัวที่ต้องพิจารณา | ขีดจำกัด[1)] การโก่งตัว |
|---|---|---|
| หลังคาราบที่ไม่รองรับหรือยึดติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก | การแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร | L/800 |
| พื้นซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก | | L/360 |
| หลังคาหรือพื้นซึ่งรองรับหรือติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก | ส่วนของการแอ่นตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังจากการยึดติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (ผลรวมของการแอ่นที่เพิ่มขึ้นตามเวลาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกค้างทั้งหมดและระยะแอ่นที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้น) | L/480 |
| หลังคาหรือพื้นซึ่งรองรับหรือที่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก | | L/240 |

หมายเหตุ 1) L หมายถึง ความยาวช่วงของโครงสร้างที่พิจารณา

**2. การเคลื่อนตัวแนวดิ่งร่วมกับแนวราบจากการขุดดิน**

เกณฑ์การยอมรับสำหรับการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งร่วมกับแนวราบจากการขุดดิน ให้พิจารณาตามคำแนะนำของ Boscardin และ Cording 1989 ดังแสดงในรูปที่ 2.10[1]




รูปที่ 2.10 ความเสียหายที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและแนวราบของอาคาร (Boscardin and Cording 1989)

(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)

***หมายเหตุ:***

1) Self-Weight Building Settlement : สำหรับอาคารที่มีการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักอาคารเอง
2) Shallow Mines, Braced Cuts & Tunnel: สำหรับงานเหมืองตื้น งานขุดดิน และงานอุโมงค์
3) Deep Mines : สำหรับงานเหมืองลึก
4) ความเครียดในแนวราบ สามารถประเมินได้จากการเคลื่อนตัวทางราบที่แตกต่างกันของขอบอาคาร 2 ฝั่งตรงข้ามกันในทิศทางที่พิจารณาด้วยการตรวจวัดตามวิธีการในข้อ 10.2 หรือ 10.3
5) การเสียรูปเชิงมุม สามารถประเมินได้จากการตรวจวัดตามข้อ 10.1 และ 10.4
6) ระดับความเสียหายตามรูปมีรายละเอียดดังนี้
   - NEGLEGIBLE (NEGL) หมายถึง ไม่เสียหาย

- VERY SLIGHT DAMAGE (V.SL.) หมายถึง ความเสียหายน้อยมาก
- SLIGHT DAMAGE หมายถึง ความเสียหายน้อย
- MODERATE TO SEVERE DAMAGE หมายถึง ความเสียหายปานกลางถึงรุนแรง
- SEVERE *TO VERY SEVERE DAMAGE หมายถึง ความเสียหายรุนแรงถึงรุนแรงมาก*

***ข้อแนะนำ 1.-2.***

(1) การเคลื่อนตัวของอาคารอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การทรุดตัวจากน้ำหนักของอาคารเอง การเคลื่อนตัวเนื่องจากการขุดดินข้างเคียง และการทรุดตัวของแผ่นดินจากการสูบน้ำใต้ดิน เป็นต้น การทรุดตัวของอาคารจากน้ำหนักของตัวเองและจากการลดระดับน้ำใต้ดินก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเป็นหลัก ในขณะที่การขุดดินข้างเคียงอาจทำให้อาคารเคลื่อนตัวทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่อาคารรุนแรงกว่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเพียงอย่างเดียว

(2) ความเสียหายของอาคารที่เกิดจากการเคลื่อนตัว ขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้น ในกรณีการเคลื่อนตัวของทุกตำแหน่งในอาคารมีขนาดใกล้เคียงกัน การเคลื่อนตัวจะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของอาคาร แต่อาจทำให้การใช้งานของอาคารมีปัญหา เช่น อาคารทรุดตัวจนต่ำกว่าดินรอบๆจนน้ำท่วมขัง หรือท่อที่เชื่อมต่อเข้าอาคารแตกหัก แต่หากการเคลื่อนตัวของอาคารที่ตำแหน่งต่างๆ มีความแตกต่างกันมากจะก่อให้เกิดหน่วยแรงเพิ่มเติมขึ้นกับโครงสร้างและผนังของอาคาร และอาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างอาคารได้

**2.1.11 แบบฟอร์มการบันทึกข้อมูล**

<table>
<tr><td>โครงการ: .....<br>สถานที่: .....<br>ชนิดของเครื่องมือตรวจวัดที่ติดตั้ง: .....<br>.....<br>หมายเลขอ้างอิงของหลุมเจาะ: .....<br>วันเวลาที่เริ่มติดตั้ง: .....<br>วันเวลาสิ้นสุดการติดตั้ง : .....</td><td>บฟ. มยผ. 1552-1<br>(หน่วยงานที่ทำการติดตั้ง)<br>การบันทึกข้อมูล<br>การติดตั้งเครื่องมือ</td><td>ทะเบียนตรวจสอบ:<br>.....<br>แผ่นที่ ...../.....<br>ผู้ติดตั้ง: .....<br>ผู้ตรวจสอบ: .....</td></tr>
<tr><td colspan="3">วิธีการเจาะ: .....</td></tr>
<tr><td colspan="3">ความลึกของเครื่องมือ: .....</td></tr>
<tr><td colspan="3">หมายเลขเอกสารรับรองผลการสอบเทียบเครื่องมือ: ..... ลงวันที่: .....</td></tr>
<tr><td colspan="3">สภาพสนามบริเวณที่ติดตั้ง</td></tr>
<tr><td colspan="3">รายละเอียดของการติดตั้ง เช่น การอัดฉีด การยึดเครื่องมือ เป็นต้น</td></tr>
<tr><td colspan="3">รายละเอียดของการป้องกันเครื่องมือจากความเสียหาย และจากสภาพอากาศ</td></tr>
<tr><td colspan="3">แผนผังแสดงตำแหน่งของเครื่องมือ ผู้ควบคุม การเดินสายสัญญาณ</td></tr>
<tr><td colspan="3">ปัญหาและอุปสรรคอื่นๆ ที่พบ</td></tr>
</table>

รูปที่ 2.11 แบบฟอร์มการบันทึกข้อมูลการติดตั้งเครื่องมือ

(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)

| โครงการ: ..... ตำแหน่งการวัด: ..... วันที่รังวัด: ..... ชนิดกล้องระดับที่ใช้: ..... หมายเลขของกล้องระดับ: ..... | บฟ. มยผ. 1552-3 (หน่วยงานที่ทำการรังวัด) การรังวัดค่าระดับของหมุดวัดการทรุดตัว | ทะเบียนทดสอบ: ..... | แผ่นที่ ...../..... |
|---|---|---|---|
| | | ผู้รังวัด: ..... | |
| | | ผู้ตรวจ: ..... | |

| สถานี (Station) | ค่าอ่าน Back Sight | | | ค่าเฉลี่ย | ระยะทาง | ค่าอ่าน Intermediate Fore Sight | | | ค่าเฉลี่ย | ระยะทาง | ค่าอ่าน Fore Sight | | | ค่าเฉลี่ย | ระยะทาง |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | U | M | L | | | U | M | L | | | U | M | L | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

หมายเหตุ: ค่าอ่าน Back Sight หมายถึง ค่าอ่านไม้สตาฟที่ส่องครั้งแรกหลังจากตั้งกล้องเสร็จไปหาหมุดอ้างอิง (Bench Mark) หรือจุดที่รู้ค่าระดับแล้ว

ค่าอ่าน Intermediate Fore Sight หมายถึง ค่าอ่านไม้สตาฟของตำแหน่งอื่นๆ ที่ส่องภายหลังจากค่าอ่าน Back Sight

ค่าอ่าน Fore Sight หมายถึง ค่าอ่านไม้สตาฟตำแหน่งสุดท้ายเพื่อต้องการทราบค่าระดับหรือย้ายค่าระดับต่อนย้ายกล้อง

U, M, และ L หมายถึงค่าอ่านสายไยบน, สายไยกลาง และสายไยล่างตามลำดับ

ค่าเฉลี่ย หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าอ่านสายไยบน, สายไยกลาง และสายไยล่าง

ระยะทาง หมายถึง ระยะทางซึ่งคำนวณได้จากค่าอ่านสายไยบน, สายไยกลาง และสายไยล่าง

รูปที่ 2.12 แบบฟอร์มการรังวัดค่าระดับของหมุดวัดการทรุดตัว

(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)

โครงการ: .....
ตำแหน่งตรวจวัด: .....
วันที่รังวัด: .....
ชนิดของกล้องที่ใช้: .....
หมายเลขของกล้อง: .....

**บฟ.มยผ. 1552-4**

**(หน่วยงานที่ทำการรังวัด)**

**การรังวัดตำแหน่งของหมุดวัดการเคลื่อนตัว**

ทะเบียนทดสอบ: .....
แผ่นที่: .....รวมทั้งหมด.....แผ่น
ผู้ตรวจวัด: .....
ผู้ตรวจสอบ: .....

| สถานี (Station) | ค่ามุมที่อ่านได้ ° | ' | " | ค่าปรับแก้ | มุมแอซิมัท (Azimuth) ° | ' | " | ระยะทาง | ตำแหน่งที่ตรวจวัดได้ก่อนปรับแก้ ΔN | ΔE | ค่าปรับแก้ $N_{corr}$ | $E_{corr}$ | ตำแหน่งที่ปรับแก้แล้ว N | E | สถานี (Station) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ค่าคลาดเคลื่อนเชิงมุม (Error Angle) : ..... | ผลรวมระยะวงรอบ: .....เมตร (Closure Distance) | ระยะทั้งหมด: .....เมตร | พื้นที่: .....ตรม. | ความแม่นยำในการวัด: ..... (Precision Ration) |

รูปที่ 2.13 แบบฟอร์มการรังวัดตำแหน่งของหมุดวัดการเคลื่อนตัว

(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)

| | | |
|---|---|---|
| โครงการ: ........................<br>สถานที่: ........................ | **บท.มยผ. 1552-11/1** | ทะเบียนตรวจสอบ: ........................ |
| ตำแหน่งตรวจวัด: ........................<br>อุปกรณ์ตรวจวัด: ........................ | (หน่วยงานที่ทำการตรวจวัด) | แผ่นที่ .............. / .............. |
| หมายเลขอุปกรณ์: ........................<br>วันที่ติดตั้งอุปกรณ์: ........................ | | ผู้ตรวจวัด: ........................ |
| หมายเลขเครื่องอ่าน: ........................ | **การตรวจวัดความกว้างรอยร้าว** | ผู้ตรวจสอบ: ........................ |

| ครั้งที่ | วันที่ | ค่าอ่านปัจจุบัน | | | | | การขยาย/การหดตัวเทียบกับค่าเริ่มต้น | | | | | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | CG1 | CG2 | CG3 | CG4 | CG5 | CG1 | CG2 | CG3 | CG4 | CG5 | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

☐ มีรอยร้าวเพิ่มขึ้น (ตามแบบแนบท้าย) ☐ จำนวนรอยร้าวเท่าเดิม

หมายเหตุ: 1) เครื่องหมายบวก "+" หมายถึง รอยร้าวมีความกว้างเพิ่มขึ้น

เครื่องหมายลบ "-" หมายถึง รอยร้าวมีความกว้างลดลง

2) ตำแหน่งของรอยร้าวเป็นไปตามเอกสารแนบท้าย

3) CG1, CG2, ..., CG5 หมายถึงตำแหน่งของรอยร้าวที่ตรวจวัดความกว้าง

รูปที่ 2.14 แบบฟอร์มการตรวจวัดความกว้างรอยร้าว (1)

(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)

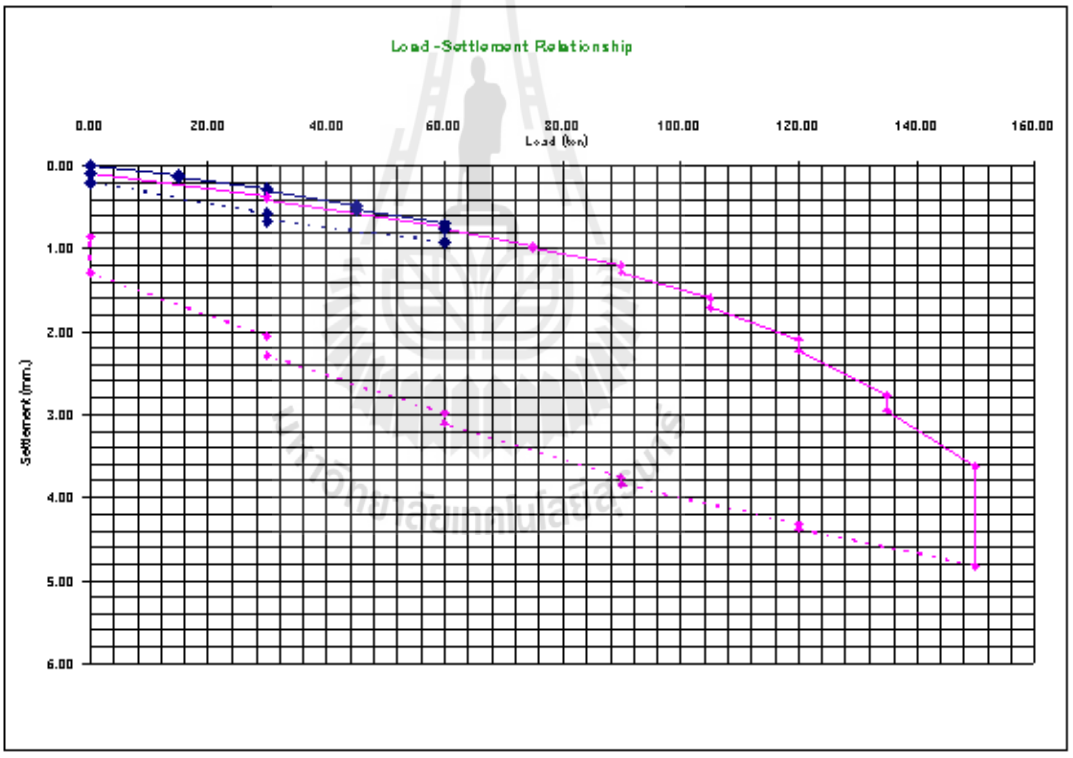
| | | |
|---|---|---|
| | **บฟ. มยผ. 1552-11/2** | ทะเบียนตรวจสอบ: ..... |
| โครงการ: .....<br>งานที่: .....<br>แหน่งตรวจวัด: ..... | (หน่วยงานที่ทำการตรวจวัด)<br>**การตรวจวัดความกว้างรอยร้าว** | แผ่นที่ ..... / .....<br>ผู้ตรวจวัด: .....<br>ผู้ตรวจสอบ: ..... |

รูปที่ 2.15 แบบฟอร์มการตรวจวัดความกว้างรอยร้าว (2)

(สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง , ปี พ.ศ. 2551)

## 2.2 การแก้ไขอาคารทรุด และเทคนิคการยกอาคารที่ทรุดเอียง

ฐานรากที่รองรับอาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ ทั้งชนิดที่เป็นฐานรากแผ่และฐานรากเสาเข็ม เมื่อรับ น้ำหนักบรรทุกย่อมต้องเกิดการทรุดตัว ระดับหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากดินที่รองรับฐานรากเป็นวัสดุที่ยืดตัว หรือยุบตัวเสียรูปได้เมื่อมีแรงมากระทำ แต่การทรุดตัวที่เกิดขึ้นต้อง ไม่มากเกินไป ไม่ควรมีการทรุดตัว ที่แตกต่างกันมาก (Differential settlement) และเมื่อฐานรากรับน้ำหนักบรรทุกคงที่เป็น ระยะเวลาหนึ่ง อัตราการทรุดตัวควรมีค่าลดลง โครงสร้างของอาคารที่วางบนฐานรากนั้นจึงจะไม่เกิดการแตกร้าวหรือ วิบัติในภายหลัง ในกรณีที่เป็นฐานรากเสาเข็มพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก จะพิจารณา ได้จากผลการทดสอบกำลัง รับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Pile load test) ซึ่งผลการ ทดสอบเสาเข็มจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับ ค่าการทรุดตัวซึ่งสามารถเขียนเป็นกราฟ ได้ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.15

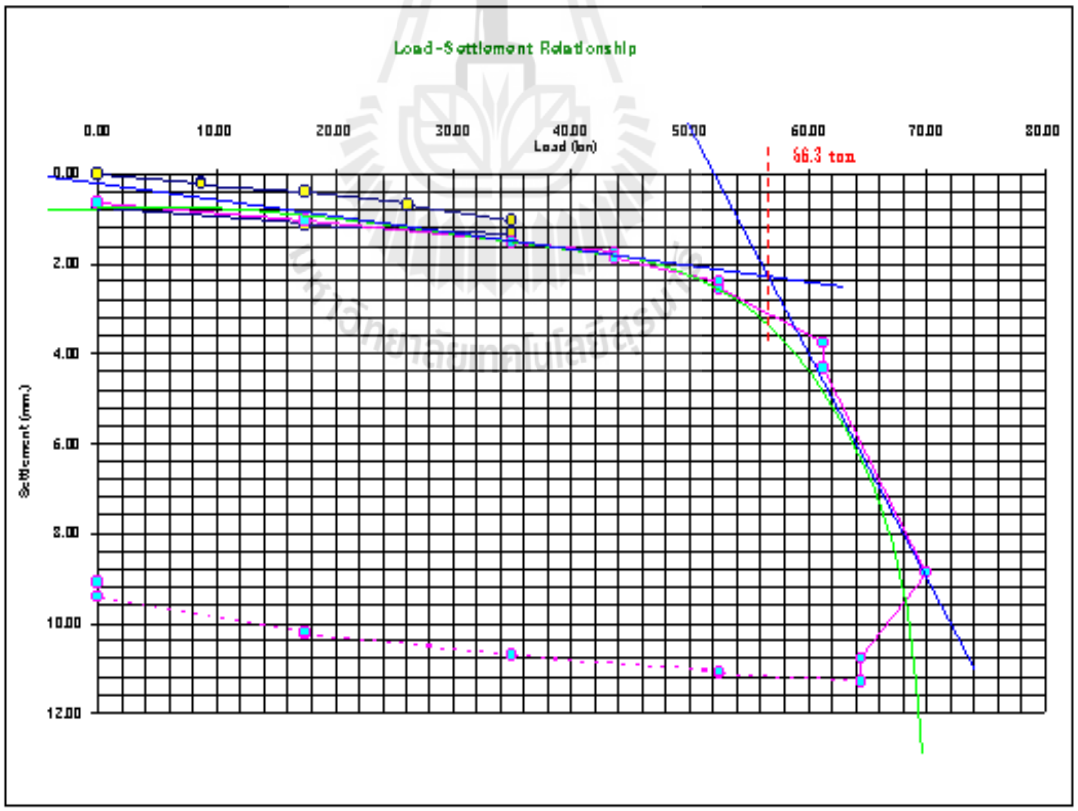



รูปที่ 2.16 การทรุดตัวซึ่งสามารถเขียนเป็นกราฟ
(คุณธเนศ วีระศิริ บริษัท ฟีเนสส์ ซฮยล์ เทสติ้ง จำกัด, ปี พ.ศ. 2544)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก-ค่าการทรุดตัว จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มน้ำหนัก บรรทุกในแต่ละครั้งเสาเข็มจะเกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้น เสาเข็มจะรับน้ำหนักที่ต้องการได้หรือไม่นั้นต้อง พิจารณาว่าเมื่อแช่น้ำหนักไว้ อัตราการทรุดตัว (ค่าการทรุดตัวต่อช่วงเวลา) มีค่า

ลดลงหรือไม่ หากยังเกิด การทรุดตัวอย่างต่อเนื่อง แสดงว่าที่สภาวะน้ำหนักนั้นไม่ปลอดภัย อาคารจะเกิดการทรุดตัวมากจนเป็น ผลให้โครงสร้างเกิดการแตกร้าว ลักษณะเช่นนี้จะเปรียบเสมือนอาคารที่สร้างแล้วเสร็จ น้ำหนักคงที่ ของอาคาร (Dead weight) จะกดลงเสาเข็มอยู่ตลอดเวลา หากพบว่าอาคารเกิดการทรุดตัวและอัตราการ ทรุดตัวไม่มีแนวโน้มลดลงนั่นแสดงว่าอาคารอยู่ในสภาวะไม่ปลอดภัยควรรีบดำเนินการแก้ไข

การเลือกใช้น้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็มควรเลือกใช้น้ำหนักในช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก-การทรุดตัวเป็นเส้นตรง เพราะในช่วงดังกล่าวเมื่อแช่น้ำหนักบรรทุกไว้อัตราการทรุด ตัวจะมีค่าลดลงตามช่วงเวลา นั่นแสดงว่าดินโดยรอบเสาเข็มยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพียงพอ นอกจากนั้นความแตกต่างของน้ำหนักในช่วงที่เป็นเส้นตรงยังทำให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันน้อย มาก ถ้าจะเปรียบเทียบไปแล้วก็เหมือนกับน้ำหนักที่ลงฐานรากแต่ละฐานในอาคารย่อมจะมีความ แตกต่างกันแต่หากน้ำหนักที่ลงเสาเข็มแต่ละต้น (Load/Pile) ไม่แตกต่างกันมากและยังอยู่ในช่วงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก-ค่าการทรุดตัวเป็นเส้นตรง การทรุดตัวจะแตกต่างกันไม่มาก อาคารจะไม่เกิดการแตกร้าว




รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเจาะ (คุณธเนศ วีระศิริ บริษัท ฟีเนสส์ ซฮยล์ เทสติ้ง จำกัด, ปี พ.ศ. 2544)

รูปที่ 2.16 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเจาะ ลักษณะ ของกราฟแสดงให้เห็นว่าในช่วงน้ำหนักบรรทุกท้ายๆนั้นมีค่าการทรุดตัวมาก ซึ่งถ้าพิจารณาจากสภาพ การทดสอบเสาเข็มในสนามแล้วไม่น่าเชื่อว่าจะสามารถแช่น้ำหนักบรรทุกท้ายสุด ไว้ได้ทั้งนี้เพราะค่า การทรุดตัวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีค่าการทรุดตัวเป็นเซนติเมตร ลักษณะเช่นนี้น้ำหนักที่อ่านจาก Pressure Gauge จะลดต่ำลงเพราะไม่มีแรงต้านจากเสาเข็ม นั่นแสดงว่าไม่สามารถใส่น้ำหนักบรรทุก ท้ายสุดได้ เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุก 70 ตันไม่ได้ ดังนั้นเสาเข็มต้นนี้จึงมีอัตราส่วนความปลอดภัยไม่ เท่ากับ 2 การเลือกใช้น้ำหนักบรรทุกสำหรับเสาเข็มเช่นนี้ต้องระวังไม่ให้น้ำหนักบรรทุกเกิน 35 ตัน เพราะหากน้ำหนักบรรทุกเกินจากนี้แม้มีความแตกต่างของน้ำหนักในแต่ละฐานรากของอาคารเพียง เล็กน้อย ก็มีโอกาสเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันมากได้

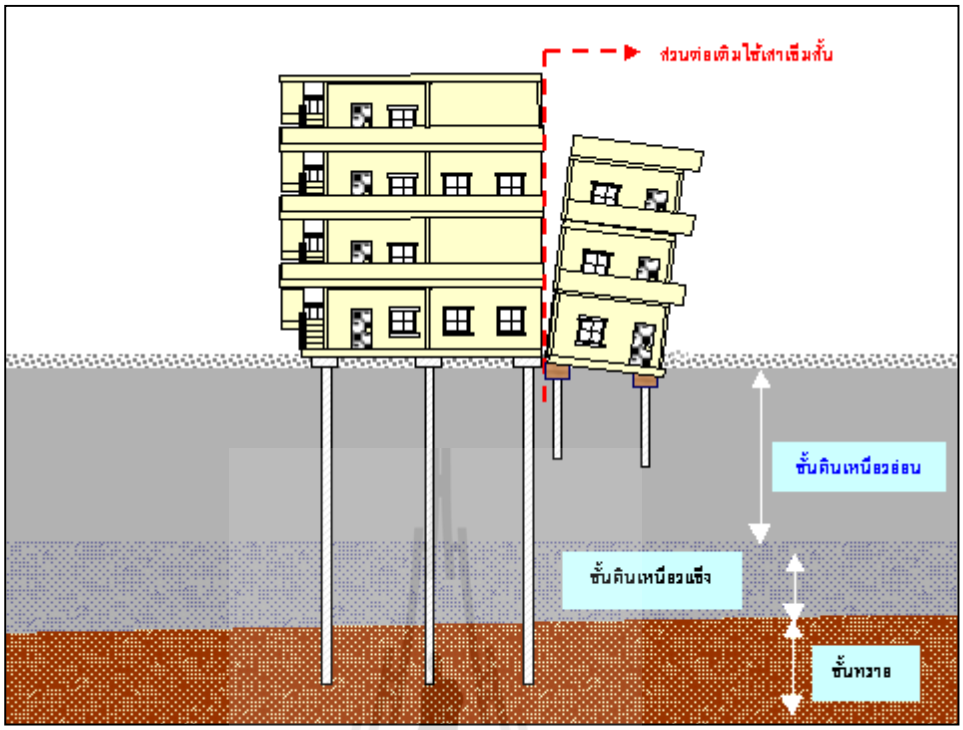
**2.2.1 ลักษณะการทรุดตัวของอาคาร**

เมื่อเสาเข็มไม่สามารถรับน้ำหนักได้จะเกิดการทรุดตัวจมลง เป็นผลให้อาคารเกิดการแตกร้าวเสียรูปไป จากเดิม เท่าที่พบเห็นอาคารจะเกิดการทรุดตัวเป็นสองแบบคือ

1. **ฐานรากทรุดตัวไม่เท่ากัน (Differential Settlement)** ลักษณะการทรุดตัวเช่นนี้มีสาเหตุจาก เสาเข็มรับ น้ำหนักบรรทุกต่างกันมาก เสาเข็มบกพร่อง ฐานรากบางฐานเกิดการเยื้องศูนย์หรือปลายเสาเข็มอยู่บน ดินต่างชนิดกัน เมื่อฐานรากเกิดการทรุดตัวไม่เท่ากันจะทำให้โครงสร้างบิดตัวแตกร้าว มักจะพบว่า อาคารที่มีปัญหาเช่นนี้ผนังจะแตกร้าวเป็นแนวเฉียง
2. **อาคารทรุดเอียง** ลักษณะการทรุดตัวของอาคารแบบนี้เกิดจากฐานรากส่วนใหญ่ของอาคารเยื้องศูนย์ และเยื้องศูนย์ไปในทิศทางเดียวกันซึ่งมักจะเกิดขึ้นจากการก่อสร้างที่มีการวางตำแหน่งเสาเข็มผิดพลาด หรือเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกไม่ได้และ มีน้ำหนักบรรทุกลงฐานรากกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งมากเกินไปทำให้ อาคารทรุดจมลงด้านเดียว เมื่ออาคารทรุดจม ลงด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งของอาคารจะถูกดึงขึ้น การทรุด ตัวของอาคารแบบนี้จะไม่พบการแตกร้าวของโครงสร้างส่วนบน แม้แต่รอยแตกร้าวที่ผนังก็พบเห็น น้อยมาก รอยแตกร้าวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ฐานราก เสาเข็มหรือตอม่อบริเวณด้านของอาคารที่ถูกดึง

**2.2.2 สาเหตุการทรุดตัว** การทรุดตัวของฐานรากส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจาก

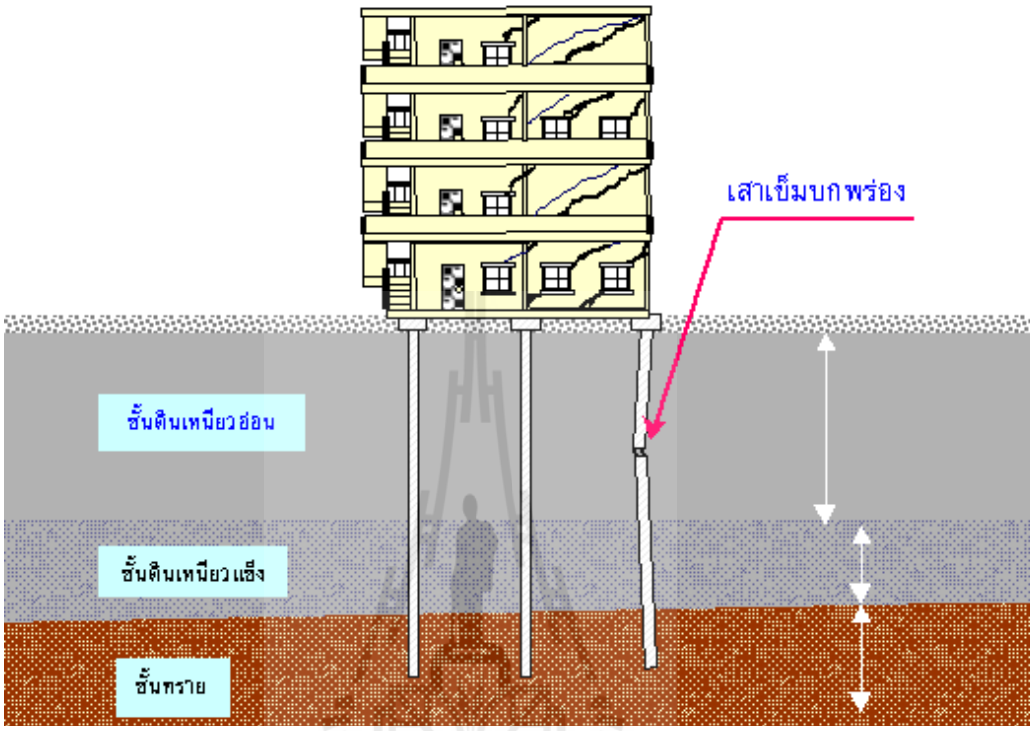
1. **เสาเข็มสั้นเกินไป** ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินอ่อนซึ่งรับแรงแบกทานได้น้อย และยังเป็นดินที่ยุบตัวได้ง่าย การยุบตัวของดินอันเนื่องจากมีน้ำหนักมากระทำหรือระดับน้ำใต้ดินลดต่ำลง เป็นผลให้เสาเข็ม ทรุดตัวตามไปด้วย




รูปที่ 2.18 การทรุดตัวจากเสาเข็มสั้นเกินไป
(คุณธเนศ วีระศิริ บริษัท ฟีเนสส์ ซอยล์ เทสติ้ง จำกัด, ปี พ.ศ. 2544)

2. **เสาเข็มบกพร่อง** เช่นเสาเข็มแตกหักหรือขาดจากกันขณะติดตั้ง เป็นสาเหตุที่ทำให้เสาเข็มไม่สามารถ ส่งผ่านน้ำหนักลงไปยังชั้นดินแข็งที่ลึกลงไปได้ กลางเสาเข็ม กรณีที่เป็นเสาเข็มตอกมักพบได้จากการที่ พยายามตอกเข่นเสาเข็มให้ผ่านชั้นดินที่มีค่า SPT (Stand Penetration Test) มากกว่า 30 Bl/ft และดินชั้น นั้นมีความหนามากกว่า 5- 6 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม สำหรับเสาเข็มเจาะข้อบกพร่องจะเป็น ถอนปลอกเหล็ก (Temporary Casing) ที่อาจถอนจนหลุดจากคอนกรีตทำให้ดินเคลื่อนตัวเข้ามาแทรก กลายเป็นเสาเข็มขาด นอกจากนั้นการเลือกใช้เสาเข็มเจาะระบบแห้งโดยกำหนดให้ปลายเสาเข็มอยู่ใน ชั้นทรายหรือทรายปนดินเหนียวที่เรียกกันว่า First sand layer นั้นปลายหลุมเจาะก่อนเทคอนกรีตจะมี น้ำไหลเข้าสภาพดินทรายบริเวณปลายเข็มจะหลวม เสาเข็มเจาะแบบนี้จะไม่มีแรงต้านทานที่ปลาย เสาเข็ม เสาเข็มบกพร่องอีกกรณีหนึ่งคือการใช้เสาเข็มตอกชนิดสองท่อนต่อที่รอยต่อของเสาเข็มอยู่ในชั้นดิน อ่อนซึ่งมีค่าความชื้นในดิน (Natural water content) มากกว่าหรือใกล้เคียงขีดจำกัดเหลวของดิน (Liquid Limit) สภาพดิน เช่นนี้จะเคลื่อนตัวได้ง่ายเมื่อทำการตอก เสาเข็มดินที่ถูกเสาเข็มแทนที่จะ เคลื่อนตัวดันรอยต่อของ เสาเข็มต้นข้างเคียงที่ตอกเสร็จแล้วให้เคลื่อนหรือบิดงอได้ ลักษณะเช่นนี้ อาคารจะเกิดการทรุดตัวลง

ทางด้านเสาเข็มที่ทำการตอกเป็นลำดับแรกๆ พบเห็นได้มากบริเวณ บางนา บางพลีและสมุทรปราการ



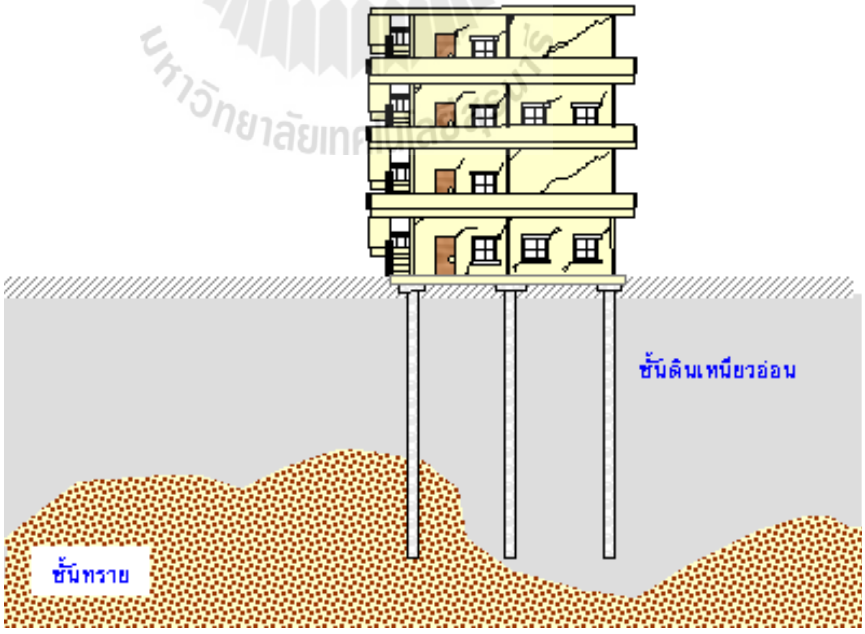

รูปที่ 2.19 การทรุดตัวจากเสาเข็มบกพร่อง
(คุณธเนศ วีระศิริ บริษัท ฟีเนสส์ ซฮยล์ เทสติ้ง จำกัด, ปี พ.ศ. 2544)

3. **ฐานรากเยื้องศูนย์** จุดศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็มไม่ตรงกับตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ กรณี เช่นนี้จะพบเห็นมากกับอาคารที่ใช้เสาเข็มเดี่ยว ซึ่งการติดตั้งเสาเข็มอาจคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่ กำหนดไปมาก และไม่ได้ทำการแก้ไขหรือแก้ไขไม่ถูกต้อง เมื่อน้ำหนักจากอาคารลงตรงตำแหน่งที่ ไม่ใช่ศูนย์กลางเสาเข็มจะทำให้ฐานรากพลิกตัว หากฐานรากส่วนใหญ่ในอาคารมีการเยื้องศูนย์และเป็น การเยื้องศูนย์ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันอาคารจะทรุดเอียง การทรุดเอียงแบบนี้โครงสร้างจะไม่เกิดการ แตกร้าวเพราะไม่เกิดการดึงรั้งภายในโครงสร้าง การแตกร้าวจะพบที่ฐานรากหรือตอม่อของด้านที่ถูก ดึงและเป็นรอยแตกร้าวแนวนอน (Horizontal crack)

รูปที่ 2.20 ลักษณะฐานรากเยื้องศูนย์

(คุณธเนศ วีระศิริ บริษัท ฟีเนสส์ ซฮยล์ เทสติ้ง จำกัด, ปี พ.ศ. 2544)

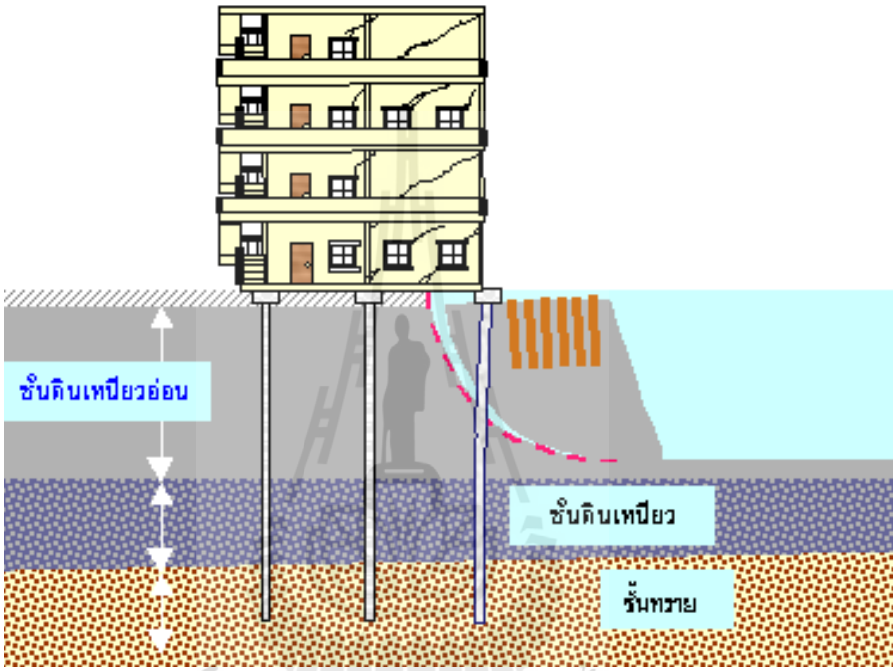
4. **เสาเข็มอยู่บนดินต่างชนิดกัน** ส่วนมากเกิดขึ้นเพราะไม่มีการเจาะสำรวจดินก่อนการก่อสร้าง ทำให้ไม่ ทราบลักษณะการจัดเรียงตัวของชั้นดิน นอกจากนั้นการกำหนดให้เสาเข็มยาวเท่ากันทั้งหมดนั้นยังไม่ ถูกต้องนัก เพราะการกำหนดเช่นนั้นปลายเสาเข็มของอาคารด้านหนึ่งอาจวางอยู่ในดินเหนียวแข็ง หรือ ชั้นทรายแน่นในขณะที่อีกด้านหนึ่งยังอยู่ในชั้นดินที่อ่อนกว่า ลักษณะเช่นนี้ก็เป็นกรณีที่พบเห็นมาก เช่นกัน




รูปที่ 2.21 เสาเข็มอยู่บนดินต่างชนิดกัน

(คุณธเนศ วีระศิริ บริษัท ฟีเนสส์ ซฮยล์ เทสติ้ง จำกัด, ปี พ.ศ. 2544)

5. **เกิดการเคลื่อนตัวของดิน** มักจะเป็นการชำรุดเสียหายที่เกิดขึ้นภายหลังจากการการติดตั้งเสาเข็มและ ก่อสร้างอาคารเรียบร้อยแล้ว ความเสียหายในภายหลังนี้จะเกิดขึ้นจากแรงกระทำภายนอกเช่นมีการขุด ดินบริเวณข้างเคียง ทำให้ดินเคลื่อนตัวดันเสาเข็มให้เคลื่อนจากตำแหน่งเดิม อาคารเกิดการทรุดตัวและแตกร้าวได้เช่นกัน




รูปที่ 2.22 เสาเข็มอยู่บนดินต่างชนิดกัน
(คุณธเนศ วีระศิริ บริษัท ฟีเนสส์ ซอยล์ เทสติ้ง จำกัด, ปี พ.ศ. 2544)

6. **เสาเข็มรับน้ำหนักได้ไม่เพียงพอ** ไม่มีการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน อาศัยข้อมูลจากการบอกเล่าว่าเคย ใช้เสาเข็มยาวเท่านั้นเท่านี้ หรืออาศัยข้อมูลจากอาคารข้างเคียง บางครั้งก็อาจเกิดข้อผิดพลาดได้เช่นไม่ ทราบประวัติว่าบริเวณที่จะทำการก่อสร้างเป็นบึงน้ำ หรือบ่อน้ำมาก่อนแล้วมาถมดินภายหลัง สภาพ เช่นนี้ดินที่ถมใหม่ไม่ช่วยรับแรงและยังเป็น Negative skin friction ต่อเสาเข็มอีกด้วย ดังนั้นแม้จะใช้ เสาเข็มชนิดเดียวกันและความยาวเท่ากันกับเสาเข็มของอาคารข้างเคียง เสาเข็มนั้นจะไม่สามารถรับ น้ำหนักได้เท่ากัน

อีกกรณีหนึ่งที่พบเห็นบ่อยครั้งคือการเปลี่ยนเสาเข็มตอกเป็นเสาเข็มเจาะ เหตุผลที่เปลี่ยนส่วนใหญ่เป็น เพราะพื้นที่คับแคบไม่สะดวกในการขนส่งเสาเข็มหรือ บริเวณที่ก่อสร้างใกล้ชิดกับอาคารข้างเคียงมาก เกินไปเกรงว่าจะกระทบกระเทือนในขณะทำการตอกเสาเข็ม การเปลี่ยนชนิดเสาเข็มเช่นนี้ควร ระมัดระวังเรื่องกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ไม่ควรเปลี่ยนเสาเข็มตอกเป็นเสาเข็มเจาะที่มีขนาด เท่ากันเพราะเสาเข็มเจาะจะรับน้ำหนักบรรทุกได้น้อยกว่า แนะนำว่าควรทำการเจาะสำรวจดินเพื่อ พิจารณาขนาดเสาเข็มจะเป็นการดีที่สุด

**2.2.3 การแก้ไขอาคารทรุด**

อาคารเกิดการแตกร้าวและ สภาพการแตกร้าวนั้นมีแนวโน้มว่าเป็น ผลมาจากการทรุดตัวของ ฐานรากที่รองรับอาคาร การจะตอบคำถามเหล่านี้ได้คงต้องพิจารณาถึง พฤติกรรมการถ่ายเทน้ำหนักของอาคารลงสู่เสาเข็ม และจากเสาเข็มลงสู่ดินโดยรอบ รวมถึงพิจารณา ลักษณะชั้นดินแต่ละแห่งที่อาคารตั้งอยู่และความเป็นไปได้ของ การทรุดตัวที่อาจจะเกิดขึ้น ในตอนที่ แล้วผู้เขียนได้กล่าวถึงลักษณะการทรุดตัวที่แบ่งได้เป็นสองแบบคือ

1. ฐานรากในอาคารเกิดการทรุดตัวไม่เท่ากัน ลักษณะเช่นนี้อาคารจะเกิดการแตกร้าวให้เห็น ชัดเจน
2. อาคารเกิดการทรุดเอียง ลักษณะการทรุดตัวเช่นนี้จะไม่เกิดรอยแตกร้าวที่โครงสร้างส่วนบน ของอาคาร ตำแหน่งที่แตกร้าวจะเป็นส่วนของคานคอดิน เสาตอม่อหรือฐานราก ซึ่งต้องเปิด พื้นหรือขุดดินลงไปจึงจะพบเห็นได้

สภาพการแตกร้าวของอาคารเป็นสัญญาณที่บ่งบอกในเบื้องต้นว่าอาคารเกิดการทรุดตัวหรือไม่และ ทิศทางของการทรุดตัวเป็นเช่นใด แต่รอยร้าวที่พบเห็นอาจไม่ใช่เกิดขึ้นจากการทรุดตัวของฐานราก เสมอไป กรณีโครงสร้างของอาคารเล็กเกินไปหรือรับน้ำหนักบรรทุกเกินกำลังก็ทำให้เกิดการแตกร้าว เช่นกัน

เมื่อพบว่าอาคารเกิดการทรุดตัวไม่ว่าจะเป็นเพราะฐานรากทรุดตัวแตกต่างกันหรืออาคารเกิดการทรุด เอียง ควรรีบดำเนินการแก้ไขให้อาคารหยุดการทรุดตัวเป็นอันดับแรกก่อน ต่อจากนั้นจึงค่อยแก้ไข โครงสร้างที่แตกร้าวหรือทำการยกอาคารเป็นลำดับถัดไป และดังที่ได้กล่าวแล้วว่าการทรุดตัวของ อาคารจนเกิดการแตกร้าวนั้นมีผลมาจากฐานรากและเสาเข็ม ดังนั้นการแก้ไขที่ถูกต้องและตรงประเด็น ที่สุดจึงควรเป็นการแก้ไขตรงตำแหน่งฐานรากด้วยการเสริมเสาเข็มหรือเสริมกำลังฐานราก ไม่ใช่ไป เสริมกำลังของคานหรือเสริมเสาเข็มตรงตำแหน่งกลางคานเพราะนอกจากจะไม่เป็นการแก้ปัญหาที่ ถูกต้องแล้ว ยังเป็นการเปลี่ยนพฤติกรรมของคานที่เป็นอยู่เดิมอีกด้วย ควรทำการแก้ไขฐานรากที่เกิดการทรุดตัวด้วยการเสริมเสาเข็มใหม่ที่มีกำลังรับน้ำหนัก

เพียงพอสามารถ รับแรงแบกทาน อันเนื่องจากน้ำหนักของอาคารได้ สำหรับเสาเข็มเดิมจะยังคงใช้งานได้หรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับผลการวิเคราะห์สาเหตุการทรุดตัว หากเสาเข็มเดิมยังสามารถนำมาใช้ได้ก็จะเป็นการประหยัด ค่าใช้จ่ายในการแก้ไข โดยทั่วไปก่อนจะดำเนินการแก้ไขควรศึกษาข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และ ออกแบบดังนี้

1. ศึกษาแบบแปลนรายละเอียดของอาคาร ชนิดฐานราก ขนาดและระดับปลายเสาเข็มที่ใช้
2. คำนวณน้ำหนักที่ลงฐานรากแต่ละฐาน
3. สำรวจสภาพชั้นดิน
4. คำนวณกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มเดิมจากผลข้อมูลดินที่สำรวจ
5. เลือกชนิดและขนาดของเสาเข็มพร้อมทั้งคำนวณกำลังรับน้ำของเสาเข็มที่จะนำมาใช้เสริมฐาน ราก
6. สำรวจการทรุดตัวของอาคาร การสำรวจการทรุดตัวของอาคารนั้นทำการสำรวจเพียงครั้งเดียว จะไม่ได้ค่าอัตราการทรุดตัว การสำรวจเพียงครั้งเดียวจะได้เพียงค่าความต่างระดับของอาคารที่ เกิดขึ้นแล้วเท่านั้น ควรสำรวจอย่างน้อย 3 ครั้ง โดยครั้งที่1 จะเป็นการตั้งจุดอ้างอิงทุกเสา (สำรวจการทรุดตัวของอาคารควรสำรวจที่ตำแหน่งเสา) เมื่อสำรวจครั้งที่ 2 , 3 จะทำให้ทราบ ค่าความเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัว หากยังไม่ทราบผลควรสำรวจเพิ่มเติมอีก การสำรวจการ ทรุดตัวนั้นควรใช้กล้องที่มีความละเอียดเป็นจุดทศนิยมของมิลลิเมตรจะได้ผลที่แน่นอนกว่า

หมายเหตุ : รายละเอียดวิธีการสำรวจการทรุดตัวของอาคาร ผู้เขียนได้เขียนไว้ในหนังสือโยธา สารฉบับที่ 1 และ 2 ปี พ.ศ. 2543

**2.2.4 เสาเข็มที่ใช้เสริมฐานราก**

เสาเข็มที่เหมาะสมจะนำมาใช้ในงานเสริมฐานรากอาคารนั้นควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ควรเป็นเสาเข็มที่ไม่ก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนขณะติดตั้ง มิฉะนั้นอาคารจะเกิดการทรุดตัวมาก ขึ้น จนอาจพังทลายขณะทำเสาเข็ม
2. ควรเป็นเสาเข็มที่ใช้รับน้ำหนักได้ทันทีเมื่อติดตั้งแล้วเสร็จ และสามารถทำค้ำยัน (Shoring)กับ ตัวอาคารได้ง่าย
3. เป็นเสาเข็มที่ทำได้ในสถานที่คับแคบมีพื้นที่ทำงานจำกัด
4. เป็นเสาเข็มที่สามารถทราบกำลังรับน้ำหนักที่แท้จริงได้ทุกต้น

คุณสมบัติของเสาเข็มที่กล่าวถึงนี้เหมาะสำหรับอาคารที่เกิดการทรุดตัวมากๆ อยู่ในภาวะที่ต้องรีบแก้ไข ซึ่งได้แก่เสาเข็มที่กดลงดินด้วยแม่แรงไฮดรอลิก เช่นเสาเข็มเหล็ก H-Beam เสาเข็มเหล็ก Pipe หรือ เสาเข็ม FN-Pile (Segmented composite pile) เป็นต้น เสาเข็มที่ทำด้วยการกดโดยใช้แม่แรงไฮดรอลิกจะ ไม่ก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนขณะทำการติดตั้ง ทำได้ในพื้นที่คับแคบเพราะสามารถต่อเป็นท่อนๆได้ เมื่อทำเสร็จสามารถทำค้ำยันได้ทันทีทำให้อาคารที่กำลังเกิดการทรุดตัวอยู่นั้นชะลอการทรุดตัวลงจน หยุดการทรุดตัวได้ในที่สุด การใช้แม่แรงไฮดรอลิกกดเสาเข็มนั้นสามารถทราบค่ากำลังรับน้ำหนักของ เสาเข็มแต่ละต้นได้จาก Pressure Gauge ที่ติดตั้งกับระบบขับดันแม่แรงไฮดรอลิก สำหรับอาคารที่เกิดการทรุดตัวไม่มากนักมีพื้นที่ในการทำงานกว้างเพียงพอและอาคารยังพอรับ แรงสั่นสะเทือนได้ อาจนำเสาเข็มเจาะมาใช้เสริมได้ แต่อย่างไรก็ตามควรตรวจวัดค่าการทรุดตัวขณะทำเสาเข็มตลอดเวลาว่า อาคารเกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้นมากน้อยเพียงใดหากพบว่ามีความเสี่ยงควรรีบ เปลี่ยนแปลงไปใช้เสาเข็มชนิดกด ด้วยแม่แรงไฮดรอลิกแทน

**2.2.5 ขั้นตอนการเสริมฐานราก**

ลำดับขั้นตอนต่อไปนี้เป็นการเสริมฐานรากที่เกิดการทรุดตัวด้วยเสาเข็มใหม่

1. เตรียมเสาเข็มชนิดที่จะใช้กดลงดินด้วยแม่แรงไฮดรอลิก ความยาวเสาเข็มประมาณ 1.00

รูปที่ 2.23 เสาเข็ม FM-Pile และเสาเข็มเหล็ก H-Beam
(คุณธเนศ วีระศิริ บริษัท ฟีเนสส์ ซฮยล์ เทสติ้ง จำกัด, ปี พ.ศ. 2544)

2. ขุดดินบริเวณฐานรากที่จะทำการเสริม เพื่อกำหนดตำแหน่งของเสาเข็มให้ใกล้ตำแหน่งเสาเข็มเดิม

รูปที่ 2.24 การขุดดินบริเวณฐานราก
(คุณธเนศ วีระศิริ บริษัท ฟีเนสส์ ซฮยล์ เทสติ้ง จำกัด, ปี พ.ศ. 2544)

3. การกดเสาเข็มลงดิน โดยใช้อาคารเป็น Reaction Load

รูปที่ 2.25 การกดเสาเข็มลงดิน
(คุณธเนศ วีระศิริ บริษัท ฟีเนสส์ ซฮยล์ เทสติ้ง จำกัด, ปี พ.ศ. 2544)

4. เมื่อกดเสาเข็มได้ความยาวที่ต้องการแล้ว ทำ Transfer Beam เพื่อถ่ายน้ำหนักอาคารลงเสาเข็มใหม่

รูปที่ 2.26 การทำ Tranefer Beam
(คุณธเนศ วีระศิริ บริษัท ฟีเนสส์ ซฮยล์ เทสติ้ง จำกัด, ปี พ.ศ. 2544)

5. Preloading ให้เสาเข็มต้นใหม่รับน้ำหนัก

รูปที่ 2.27 การทำ Preloading
(คุณธเนศ วีระศิริ บริษัท ฟีเนสส์ ซฮยล์ เทสติ้ง จำกัด, ปี พ.ศ. 2544)

ในกรณีที่น้ำหนักอาคารไม่มากนัก Transfer Beam สามารถรับน้ำหนักได้เพียงพอ อาจไม่จำเป็นต้องทำฐานรากใหม่เพราะนอกจากคอนกรีตที่เทปิดผิว จะไม่ช่วยรับน้ำหนักแล้วยังเป็น การเพิ่มน้ำหนักลงเสาเข็มอีกด้วย แต่ถ้าน้ำหนักของอาคารมากและต้องเสริมเสาเข็มจำนวน หลายต้น ควร ทำฐานรากใหม่เพื่อยึดหัวเสาเข็มที่เสริม และเป็นตัวถ่ายน้ำหนักให้ลงเสาเข็มได้ สม่ำเสมอกัน

วิธีการแก้ไขทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นการแก้ไขอาคารทรุดในภาพรวม ในรายละเอียดการแก้ไขอาคารแต่ ละหลังจะขึ้นอยู่กับสภาพของปัญหาและผลการวิเคราะห์

**2.3 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมแรงอัด (Steel relaxation loss)**

การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเกิดเนื่องจากการคลายแรงดึงในตัวเหล็กเสริมอัดแรงเอง ขนาดของแรงดึงที่ลดลงขึ้นอยู่กับค่าของหน่วยแรงดึงแรกเริ่ม เวลาที่ผ่านไปหลังจากดึงเหล็กเสริมอัดแรง และชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง การคำนวณออกแบบสามารถใช้มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ซึ่งแสดงตามสมการ ดังต่อไปนี้

สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง

ก) ลวดเกลียวอัดแรง เกรด 1725 และ 1860 (มอก. 420-2525)

$$RE = 1410-0.4ES – 0.2(SH+CR)$$

ข) ลวดอัดแรง (มอก. 95-2525)

$$RE = 1270-0.4ES – 0.2(SH+CR)$$

ค) เหล็กเส้นอัดแรง

$$RE = 210$$

โดยที่ *RE* คือหน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงเอง, กก./ซม.$^2$

*ES* คือหน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต, กก./ซม.$^2$

*SH* คือหน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต, กก./ซม.$^2$

*CR* คือหน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการคืบของคอนกรีต, กก./ซม.$^2$

*FR* คือหน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากความฝืดของคอนกรีต, กก./ซม.$^2$

**ค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง**

การคำนวณค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงสามารถใช้ค่าประมาณตามตารางที่ 2.7 ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ซึ่งประเมินภายใต้สมมติฐานของคอนกรีตน้ำหนักปกติ (normal weight concrete) การอัดแรงในระดับธรรมดาและภายใต้สภาวะ

แวดล้อมปานกลาง ค่าการสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงในตาราง 2.7 ไม่รวมถึงการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดและการเข้าที่ของสมอยึด

ตารางที่ 2.7 ค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (ไม่รวมการสูญเสียแรงดึงจากความฝืดและการเข้าที่ของสมอยึด)

| **ชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง** | **ค่าหน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กอัดแรง,กก./ซม.$^2$** | |
|---|---|---|
| | **$f_c'$ = 300 กก./ซม.$^2$** | **$f_c'$ = 300 กก./ซม.$^2$** |
| สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง | | |
| - ลวดอัดแรง,ลวดเกลียวอัดแรง | 2,270 | 2,320 |
| - เหล็กเส้นอัดแรง | 1,570 | 1,620 |

## 2.4 การโก่งตัวของแผ่นพื้นสองทาง

ในการออกแบบแผ่นพื้นจะต้องมีการคำนวณการโก่งตัวของแผ่นพื้นเพื่อตรวจสอบไม่ให้เกินค่าการโก่งตัวที่ยอมให้ ระยะโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 แสดงไว้ในตาราง 2.8

ตารางที่ 2.8 ระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ (มาตรฐานสำหรับงานคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)

| **ปะเภทของชิ้นส่วน** | **การโกงตัวที่พิจารณา** | **พิกัดการโกงตัว** |
|---|---|---|
| ดาดฟ้าเรียบไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไมใช่โครงสร้าง (non-structural) ซึ่งอาจเสียหายจากการโกงตัวมากได้ | การโกงตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักจร | $\frac{L}{180}$ |
| พื้นไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมาก | การโกงตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักจร | $\frac{L}{360}$ |

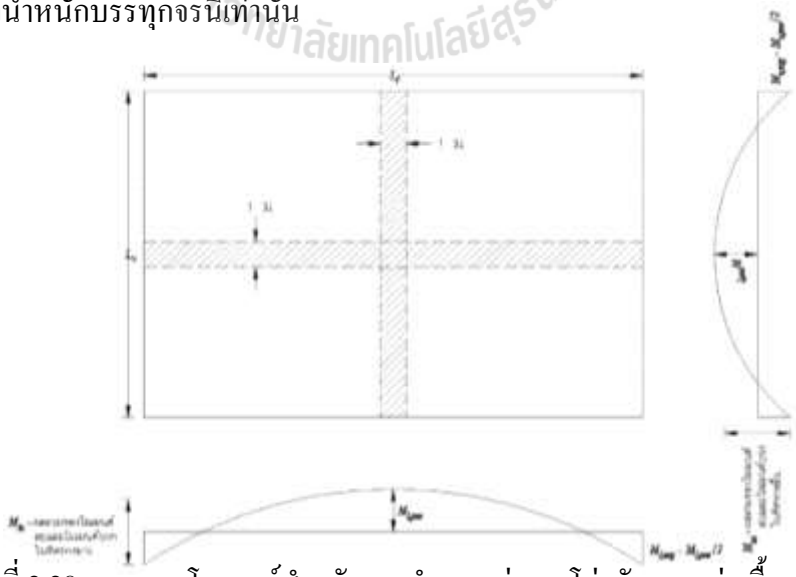
ตารางที่ 2.8 (ต่อ)

| ปะเภทของชิ้นส่วน | การโกงตัวที่พิจารณา | พิกัดการโกงตัว |
|---|---|---|
| พื้นและดาดฟ้ารองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากได้ | ส่วนของการโก่งตัวทั้งหมด ที่เกิดขึ้นหลังจากการติดตั้งชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างแล้ว (ผลรวมของการโกงตัวระยะยาวจากน้ำหนักบรรทุกจรใดๆ ที่เพิ่มขึ้น) | $\frac{L}{480}$ |
| พื้นและดาดฟ้ารองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งไม่น่าจะเสียหายจากการโก่งตัว | | $\frac{L}{240}$ |

***หมายเหตุ*** - สำหรับชิ้นส่วนรับแรงดัด ให้คำนวณการโก่งตัวทันทีโดยวิธีปกติ หรือใช้สูตรสำหรับการโก่งตัวอีลาสติก โดยสามารถใช้โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดเดิมสำหรับหน้าตัดไม่แตกร้าว

- ในการคำนวณการโก่งตัวเพิ่มเติมในระยะยาวของชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงให้คำนึงถึงหน่วยแรงในคอนกรีตและในเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง (sustained load)และผนวกผลจากการคืบตัว การหดตัวของคอนกรีต และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงด้วย

การออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงในทางปฏิบัติ อาจออกแบบให้แรงพยุงเนื่องจากเหล็กเสริมอัดแรงพอดีเท่ากับน้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมด ดังนั้นในขณะที่ยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกจรมากระทำ แผ่นพื้นก็จะไม่มีการโก่งตัวใดๆ และเมื่อน้ำหนักบรรทุกจรมากระทำ พื้นก็จะเกิดการโก่งตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรนี้เท่านั้น



รูปที่ 2.28 แผนภาพโมเมนต์สำหรับการคำนวณค่าการโก่งตัวของแผ่นพื้นสองทาง
(ดร.นเรศ พันธราธร, ปี พ.ศ. 2543)

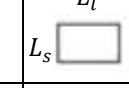
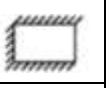
การโกงตัวของแผ่นพื้นจะมีค่าสูงสุดเมื่อน้ำหนักบรรทุกจรกระจายเต็มพื้นที่พิจารณานั้น และไม่มีน้ำหนักบรรทุกจรบนแผ่นพื้นข้างเคียงที่ติดกับแผ่นพื้นที่พิจารณา ค่าโมเมนต์บวกในตารางที่ 2.9 เป็นโมเมนต์บวกที่มากที่สุดซึ่งได้จากการจัดน้ำหนักบรรทุกเต็มแผ่นพื้นที่พิจารณาและไม่มีน้ำหนักบรรทุกจรบนแผ่นพื้นข้างเคียง ซึ่งเป็นรูปแบบเดียวกับการจัดน้ำหนักบรรทุกจรให้เกิดการโก่งตัวสูงสุด ดังนั้นการคำนวณการโก่งตัวจึงใช้โมเมนต์บวกที่หาจากตาราง 2.9

ในคานที่มีปลายยึดแน่นทั้งสองข้าง ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ปลายยึด (Fixed end moment) มีค่าเท่ากับ $\frac{l}{12}wL^2$ ถ้าให้ $M_o$ คือโมเมนต์บวกที่เกิดจากผลรวมของโมนเมนต์ลบและโมเมนต์บวกซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{l}{8}wL^2$ ดังนั้นโมเมนต์บวกที่เกิดขึ้นที่กึ่งกลางคานจะมีค่าเท่ากับ $\frac{l}{8}wL^2$ - $\frac{l}{12}wL^2$ = $\frac{l}{24}wL^2$ ดังนั้นในกรณีของปลายยึดแน่นโมเมนต์ที่กึ่งกลางคานมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{3}M_o$ และโมเมนต์ที่ปลายยึดแน่นมีค่าเท่ากับ $\frac{2}{3}M_o$ แต่สำหรับกรณีของพื้นซึ่งมีที่รองรับที่ปลายพื้นนั้นการยึดแน่นจะไม่ยึดแน่นอย่างเต็มที่ ในสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการโก่งของพื้นจะให้ปลายยึดเพียง 50% เท่านั้น ดังนั้นโมเมนต์ลบที่ปลายแผ่นพื้นจึงมีค่าลดลงจาก $\frac{2}{3}M_o$ เหลือเพียง $\frac{1}{3}M_o$ และโมเมนต์บวกที่กึ่งกลางคานจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $M_o$ - $\frac{1}{3}M_o$ = $\frac{2}{3}M_o$ จะเห็นได้ว่าโมเมนต์ลบที่ปลายแผ่นพื้นมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของโมเมนต์บวกกึ่งกลางช่วงพื้น จากรูปที่ 2.25 ถ้าให้โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วงพื้นของทิศทางสั้นและยาวเป็น $M_{s,pos}$ และ $M_{l,pos}$ ตามลำดับ จะได้ว่าโมเมนต์ลบที่บริเวณปลายรองรับในทิศทางสั้น $M_{s,neg}$ และในทิศทางยาว $M_{l,neg}$ มีค่าเท่ากับ $M_{s,pos}$ /2 และ $M_{l,pos}$ /2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.9 สัมประสิทธิ์สำหรับโมเมนต์บวกในแผ่นพื้นคิดเฉพาะน้ำหนักบรรทุกจรเท่านั้น*

$M_{s,pos,ll} = C_{s,ll} \times w \times L_s^2$ w = *น้ำหนักจรที่แผ่กระจายทั้งหมด*

$M_{l,pos,ll} = C_{l,ll} \times w \times L_l^2$

| อัตราส่วน $m = \frac{L_s}{L_l}$ | | กรณีที่ 1  | กรณีที่ 2 | กรณีที่ 3 | กรณีที่ 4 | กรณีที่ 5 | กรณีที่ 6 | กรณีที่ 7 | กรณีที่ 8 | กรณีที่ 9  |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.00 | $C_{s,ll}$ | 0.036 | 0.027 | 0.027 | 0.032 | 0.032 | 0.035 | 0.032 | 0.028 | 0.030 |
| | $C_{l,ll}$ | 0.036 | 0.027 | 0.032 | 0.032 | 0.027 | 0.032 | 0.035 | 0.030 | 0.028 |
| 0.95 | $C_{s,ll}$ | 0.040 | 0.030 | 0.031 | 0.035 | 0.034 | 0.038 | 0.036 | 0.031 | 0.033 |
| | $C_{l,ll}$ | 0.033 | 0.025 | 0.029 | 0.029 | 0.024 | 0.029 | 0.032 | 0.027 | 0.025 |
| 0.90 | $C_{s,ll}$ | 0.045 | 0.034 | 0.035 | 0.039 | 0.037 | 0.042 | 0.040 | 0.035 | 0.036 |
| | $C_{l,ll}$ | 0.029 | 0.022 | 0.027 | 0.026 | 0.021 | 0.025 | 0.029 | 0.024 | 0.022 |

ตารางที่ 2.9 (ต่อ)

| อัตราส่วน $m = \frac{L_s}{L_l}$ | | กรณีที่ 1 $L_l$ $L_s$ | กรณีที่ 2 | กรณีที่ 3 | กรณีที่ 4 | กรณีที่ 5 | กรณีที่ 6 | กรณีที่ 7 | กรณีที่ 8 | กรณีที่ 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.85 | $C_{s,ll}$ | 0.050 | 0.037 | 0.040 | 0.043 | 0.041 | 0.046 | 0.045 | 0.040 | 0.039 |
| | $C_{l,ll}$ | 0.026 | 0.019 | 0.024 | 0.023 | 0.019 | 0.022 | 0.026 | 0.026 | 0.020 |
| 0.80 | $C_{s,ll}$ | 0.058 | 0.041 | 0.045 | 0.048 | 0.044 | 0.051 | 0.051 | 0.044 | 0.042 |
| | $C_{l,ll}$ | 0.023 | 0.017 | 0.022 | 0.020 | 0.016 | 0.019 | 0.023 | 0.019 | 0.017 |
| 0.70 | $C_{s,ll}$ | 0.061 | 0.045 | 0.051 | 0.052 | 0.047 | 0.055 | 0.056 | 0.049 | 0.046 |
| | $C_{l,ll}$ | 0.019 | 0.014 | 0.019 | 0.016 | 0.013 | 0.016 | 0.020 | 0.016 | 0.013 |
| 0.75 | $C_{s,ll}$ | 0.068 | 0.049 | 0.057 | 0.057 | 0.051 | 0.060 | 0.063 | 0.054 | 0.050 |
| | $C_{l,ll}$ | 0.016 | 0.012 | 0.016 | 0.014 | 0.011 | 0.013 | 0.017 | 0.014 | 0.011 |
| 0.65 | $C_{s,ll}$ | 0.074 | 0.053 | 0.064 | 0.062 | 0.055 | 0.064 | 0.070 | 0.059 | 0.054 |
| | $C_{l,ll}$ | 0.013 | 0.010 | 0.014 | 0.011 | 0.009 | 0.010 | 0.014 | 0.011 | 0.009 |
| 0.60 | $C_{s,ll}$ | 0.081 | 0.058 | 0.071 | 0.067 | 0.059 | 0.068 | 0.077 | 0.065 | 0.059 |
| | $C_{l,ll}$ | 0.010 | 0.007 | 0.011 | 0.009 | 0.007 | 0.008 | 0.011 | 0.009 | 0.007 |
| 0.55 | $C_{s,ll}$ | 0.088 | 0.062 | 0.080 | 0.072 | 0.063 | 0.073 | 0.085 | 0.070 | 0.063 |
| | $C_{l,ll}$ | 0.008 | 0.006 | 0.009 | 0.007 | 0.005 | 0.006 | 0.009 | 0.007 | 0.006 |
| 0.50 | $C_{s,ll}$ | 0.095 | 0.066 | 0.088 | 0.077 | 0.067 | 0.078 | 0.092 | 0.076 | 0.067 |
| | $C_{l,ll}$ | 0.006 | 0.004 | 0.007 | 0.005 | 0.004 | 0.005 | 0.007 | 0.005 | 0.004 |

*ขอบที่มีเส้นแรเงา แสดงว่าที่รองรับของแผ่นพื้นด้านนั้นมีการต่อเนื่อง หรือติดตาย และขอบที่ไม่มีเส้นแรเงา แสดงว่าที่รองรับด้านนั้นมีความต้านทานแรงบิดน้อยมาก

ค่า $M_{l,pos}$ และ $M_{s,pos}$ หาได้จากตารางที่ 4.2 และสามารถหาค่าการโก่งตัว $\Delta$ ได้โดยใช้ทฤษฎีอีลาสติก เช่น ทฤษฎีพื้นที่โมเมนต์ (moment-area theorem) ซึ่งหาค่า $\Delta$ ได้จาก

$$\Delta_s = \frac{3}{32}\frac{M_{s,pos}\ L_s^2}{E_c I_c} \qquad (4.1)$$

$$\Delta_l = \frac{3}{32}\frac{M_{l,pos}\ L_l^2}{E_c I_c} \qquad (4.2)$$

โดยที่ $\Delta_s, \Delta_l$ คือ การโกงตัวที่กึ่งกลางช่วงพื้นในทิศทางสั้นและยาวตามลำดับ

| | | |
|---|---|---|
| $M_{s,pos}$ , $M_{l,pos}$ | คือ | โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วงพื้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรในทิศทางสั้นและยาว |
| $L_s$ , $L_l$ | คือ | ความยาวของช่วงพื้นในทิศทางสั้นและยาวตามลำดับ |
| $E_c$ , $I_c$ | คือ | โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และโมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดคอนกรีตที่มีความกว้าง 1 เมตร ตามลำดับ |

ค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางช่วงพื้นในทางทิศทางสั้น $\Delta_s$ และยาว $\Delta_l$ ที่คำนวณจากสมการที่ 4.1 และ 4.2 ควรจะมีค่าเท่ากัน แต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าโมเมนต์จากตารางสัมประสิทธิ์อาจทำให้ $\Delta_s$ และ $\Delta_l$ ที่คำนวณออกมามีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นค่าการโก่งตัวสำหรับแผ่นพื้นนี้อาจใช้ค่าเฉลี่ยของ $\Delta_s$ และ $\Delta_l$

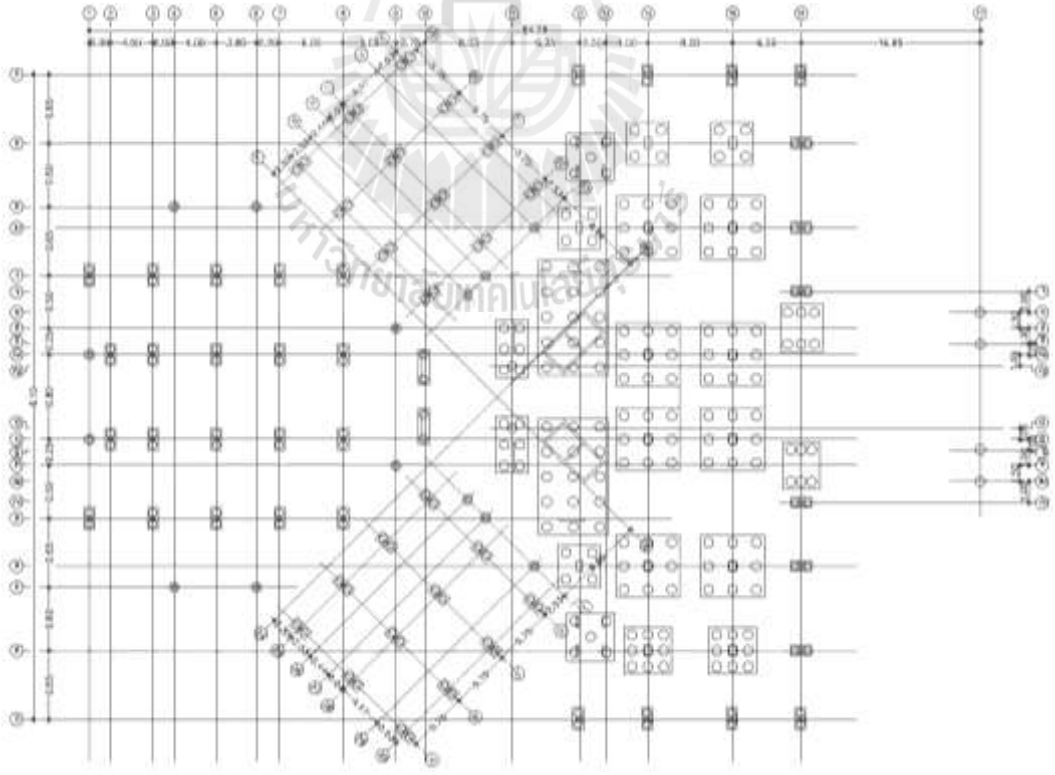
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 3
# วิธีดำเนินการทำโครงงาน

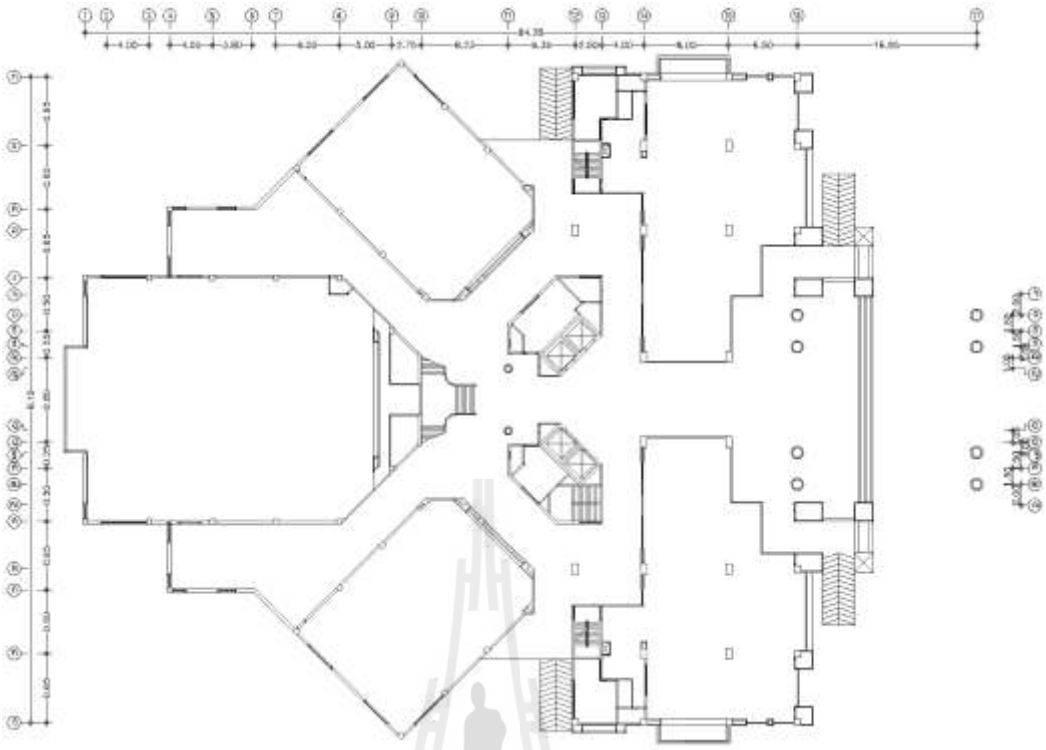
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้กำหนดขั้นตอนการศึกษาวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ 1) การสำรวจอาคารด้วยการดูรอยแตกร้าวของอาคารและสรุปแนวทางการเคลื่อนตัวของอาคารอย่างคร่าวๆ และ 2) การสำรวจการทรุดตัวของอาคารด้วยกล้องระดับ การสำรวจนี้กระทำเพื่อสร้างระเบียนการทรุดตัว และหาอัตราการทรุดตัวของอาคาร

## 3.1 การสำรวจรอยแตกร้าว

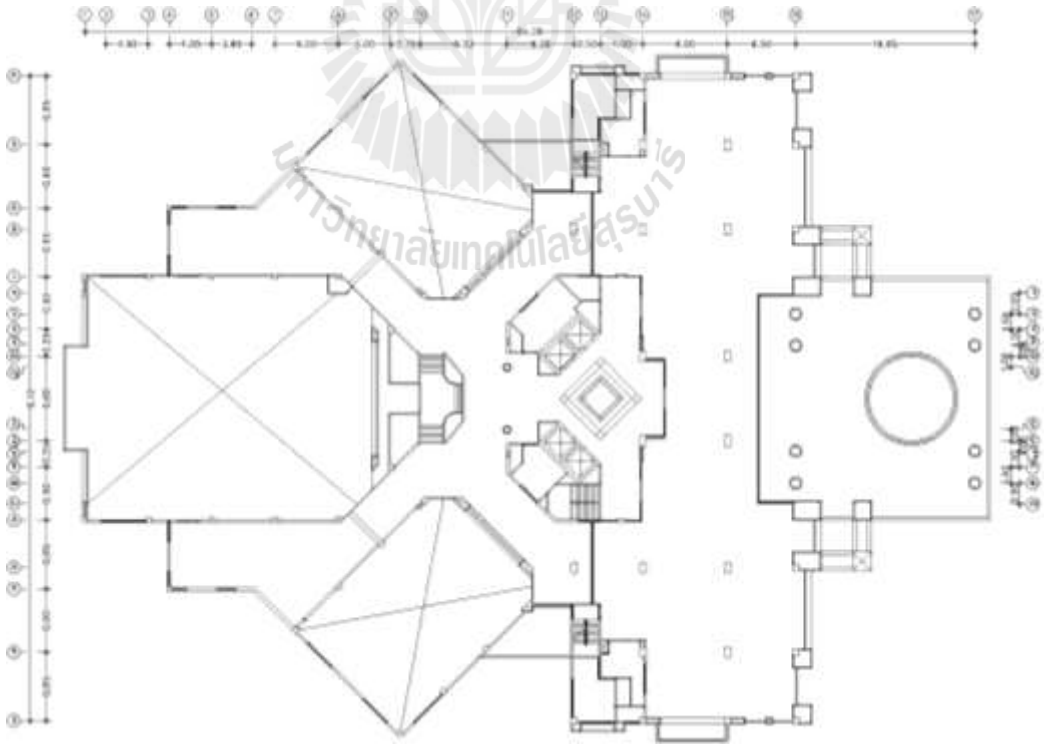
ผู้ศึกษาได้ตรวจดูการแตกร้าวของอาคาร พร้อมทั้งถ่ายภาพรอยแตกร้าว รอยแตกร้าวสามารถบอกลักษณะการวิบัติ และแนวการทรุดตัวของอาคารได้อย่างคร่าวๆ เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งของรอยแตก ผู้วิจัยจะอ้างอิงโดยใช้ตำแหน่งของ Grid line ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และสำรวจในพื้นที่อาคารแต่ละชั้น โดยมีพื้นที่สำรวจ ดังแสดงในรูปที่ 3.2-3.5



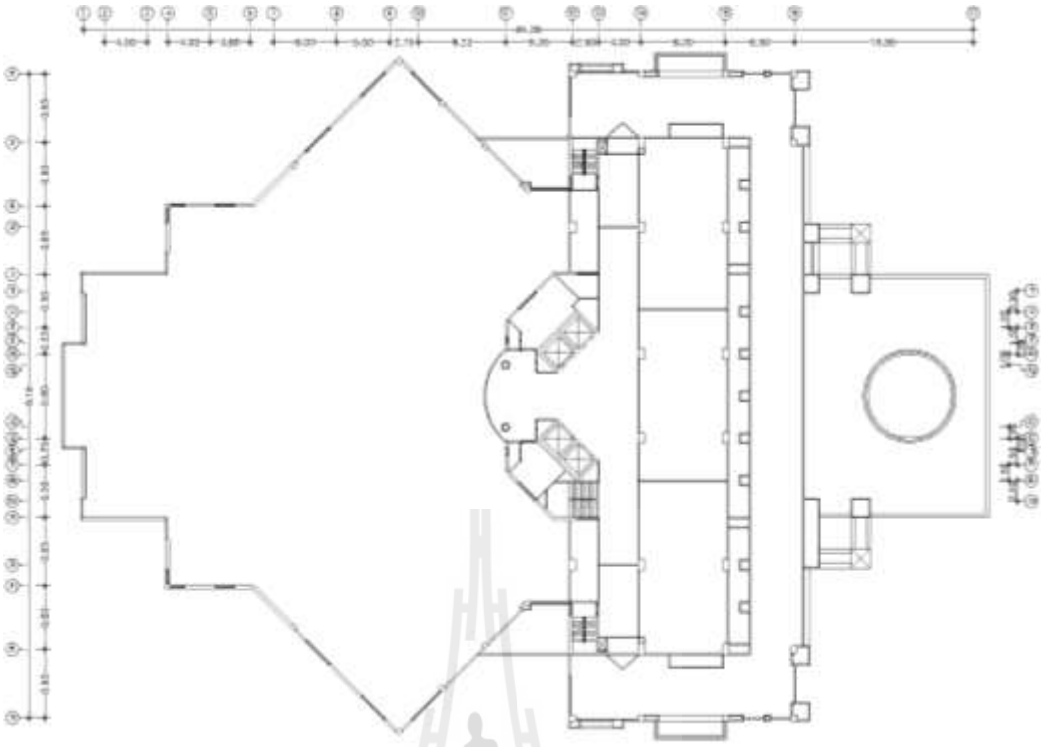
รูปที่ 3.1 แปลนฐานราก (เสาเข็มกลุ่ม) อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี (อาคารสำนักงานอธิการบดี)



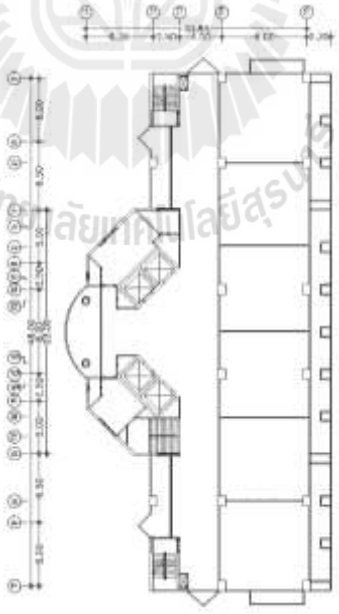
รูปที่ 3.2 แปลนชั้น 1 อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี
(อาคารสำนักงานอธิการบดี)



รูปที่ 3.3 แปลนแปลนชั้นลอย อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี
(อาคารสำนักงานอธิการบดี)



รูปที่ 3.4 แปลนชั้น 2 อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี
(อาคารสำนักงานอธิการบดี)



รูปที่ 3.5 แปลนชั้น 3-7 อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี
(อาคารสำนักงานอธิการบดี)

**3.2 การสำรวจภายในและภายนอกอาคาร**

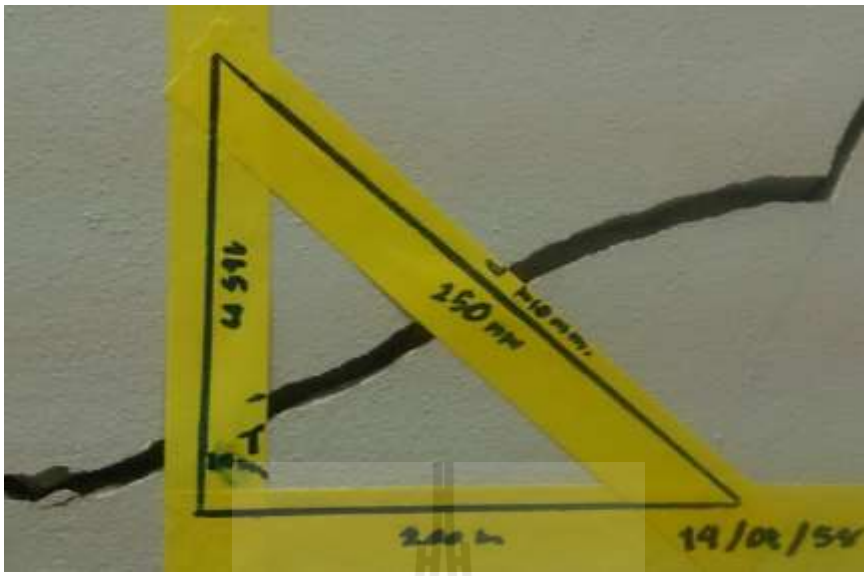
จากการเดินสำรวจรอบนอกอาคารพบว่า รอยแตกร้าวส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบริเวณตามแนว ก1 ถึง ก14 จนถึงแนว ธ1 ถึง ธ14 และเป็นรอยแตกที่เห็นได้อย่างชัดเจน รูปที่ 2.2 แสดงรอยแตกตามแนว ก1 ถึง ก14 จนถึงแนว ธ1 ถึง ธ14 ภายในอาคาร

รูปที่ 3.6 รอยแตกร้าวของผนังภายในอาคารตามแนว ก1 ถึง ก14 จนถึงแนว ธ1 ถึง ธ14

รอยแตกรอบนอกอาคารตามแนว ก1 ถึง ก14 จนถึงแนว ธ1 ถึง ธ14 ดังแสดงในรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 รอยแตกร้าวของผนังภายนอกอาคารตามแนว ก12 และ ก14 จนถึงแนว ธ1 และ ธ14

ลักษณะของรอยแตก (รูปที่ 3.8) ที่พบทำให้ทราบว่า แนวการแตกร้าวทำมุมประมาณ 45 องศากับแนวนอน




รูปที่ 3.8 ลักษณะการแตกร้าวของผนังอาคารที่บ่งบอกว่าเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันของฐานราก

**บทสรุป**

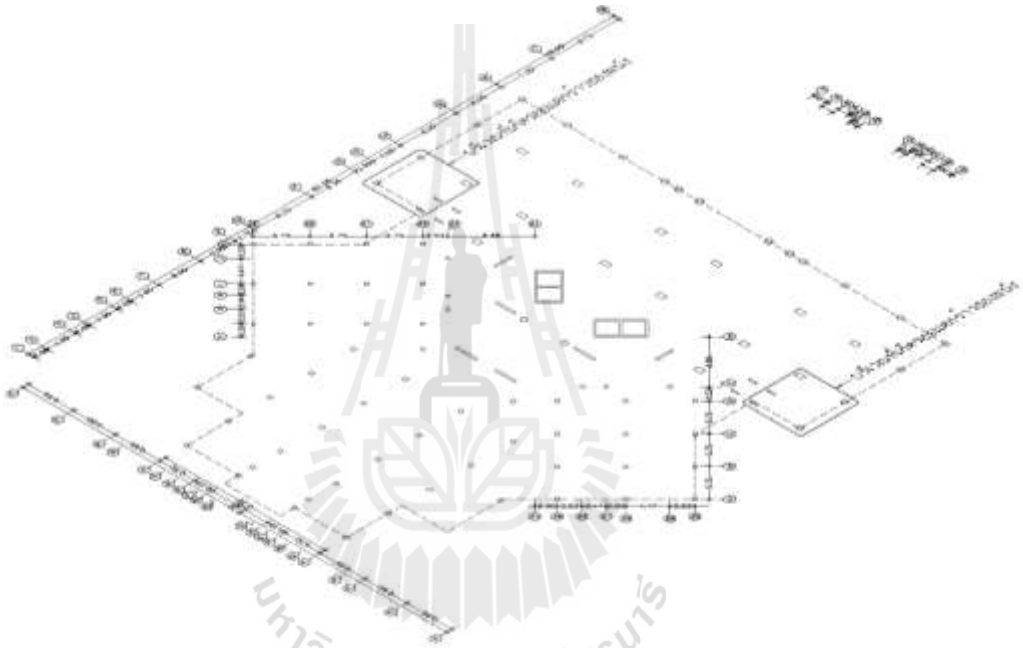
จากการสำรวจในขั้นต้น ผู้สำรวจตั้งสมมตฐานว่าการวิบัติของอาคารน่าจะเกิดจากการทรุดตัวของโครงสร้าง และผู้สำรวจจำเป็นต้องเก็บข้อมูลในช่วงระยะเวลาหนึ่งเพื่อตรวจหาอัตราการทรุดตัวของโครงสร้างอาคารว่าการทรุดตัวอย่างที่ตั้งสมมติฐานไว้มากน้อยเพียงใด

.

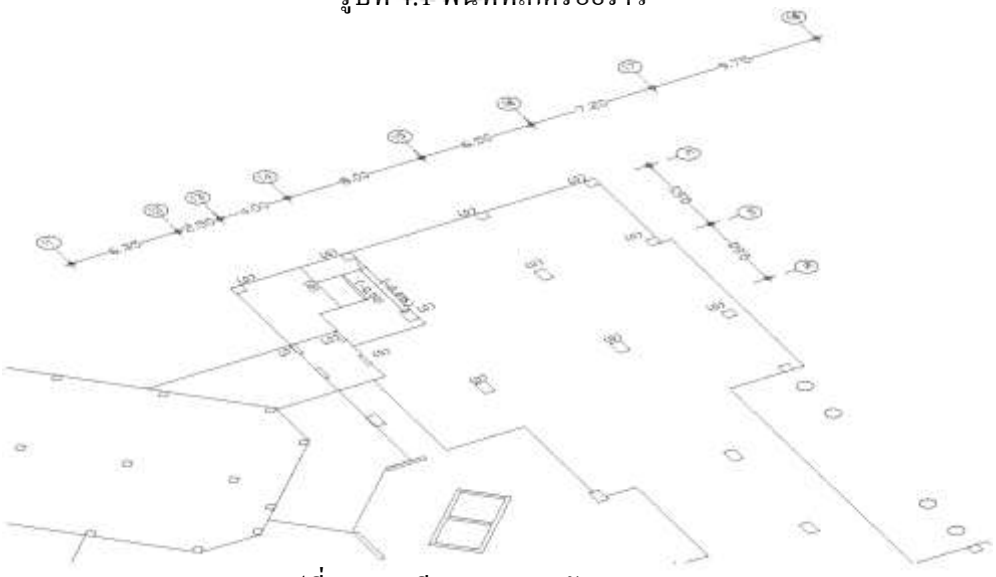
# บทที่ 4
# ผลการสำรวจ

## 4.1 การสำรวจการทรุดตัวของเสาแต่ละต้นด้วยกล้องระดับ

เพื่อเป็นการยืนยันข้อสมมติฐานที่ว่าการวิบัติขององค์อาคารเกิดจากการทรุดตัวที่แตกต่างกัน ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจการทรุดตัวของฐานรากแต่ละฐาน แสดงตำแหน่งพื้นที่เกิดรอยร้าว ดังรูปที่ 4.1 และจัดทำระเบียนการทรุดตัวของอาคาร ดังรูปที่ 4.2

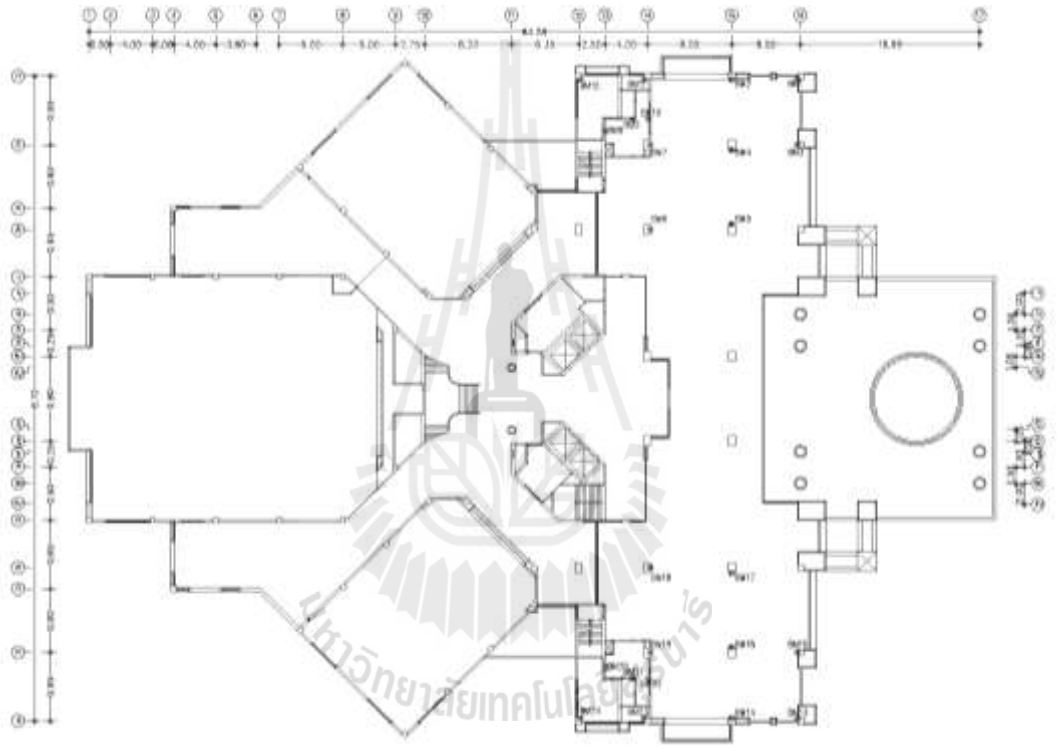


รูปที่ 4.1 พื้นที่ที่เกิดรอยร้าว



รูปที่ 4.2 ระเบียนการทรุดตัวของอาคาร

จะเห็นได้ชัดว่า บริเวณพื้นที่ ก12-ข12, ก14-ข14, ท12-ธ12 และ ท14-ธ14 เป็นพื้นที่ที่เกิดการแตกร้าวของผนังอย่างมาก การสำรวจเพื่อบันทึกระเบียนค่าระดับของโครงสร้าง ซึ่งเป็นค่าเป็นค่าเฉลี่ยของการวัดสามครั้ง ในช่วงวันที่ 19 มกราคม 2558 ถึง 30 เมษายน 2558 พบวาการวัดค่าระดับเกิดความแตกต่างของระดับของเสาโครงสร้างน้อยมาก แต่ขนาดรอยแตกร้าวที่ผนังภายในพื้นที่เกิดการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ผลวัดรอยแตกร้าวของผนังพบการขยายตัวของรอยผนังมีอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 0.02 มิลลิเมตรต่อเดือน



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งการสำรวจการทรุดตัวของอาคารด้วยกล้องระดับ ในพื้นที่ชั้นลอย

รูปที่ 4.4 การสำรวจการทรุดตัวของอาคารด้วยกล้องระดับ

ผลการตรวจวัดการทรุดตัวซึ่งแสดงข้างต้น นำมาซึ่งบทสรุปที่ว่าการแตกร้าวของอาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี (อาคารสำนักงานอธิการบดี) ไม่ได้เกิดจากการทรุดตัวที่แตกต่างกันของฐานราก แต่อาจเกิดจากการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (Steel relaxation loss) อันเนื่องมาจากการใช้พื้นที่ในอาคารผิดประเภท ผลสำรวจชี้ชัดว่าพื้นที่ที่เกิดการแตกร้าวถูกใช้เป็นพื้นที่กองเก็บเอกสารและสิ่งของ ส่งผลให้น้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงมีค่าสูงกว่าน้ำหนักบรรทุกจรที่ใช้ในการออกแบบ

รูปที่ 4.5 (1) การใช้พื้นที่เป็นที่เก็บเอกสารและสิ่งของ บริเวณภายนอกผนังที่เกิดการแตกร้าวในพื้นที่ชั้นลอย

รูปที่ 4.5 (2) การใช้พื้นที่เป็นที่เก็บเอกสารและสิ่งของ บริเวณภายนอกผนังที่เกิดการแตกร้าวในพื้นที่ชั้นลอย

รูปที่ 4.6 การใช้พื้นที่เป็นที่เก็บเอกสารและสิ่งของ บริเวณภายในผนังที่เกิดการแตกร้าวในพื้นที่ชั้นลอย

**4.2 การตรวจสอบรอยร้าวพื้นที่ชั้นต่าง ๆ**

เพื่อเป็นการตรวจสอบสมมติฐานที่ว่าการแตกร้าวเกิดจาการใช้อาคารผิดประเภท ผู้สำรวจได้ตรวจสอบพื้นที่ส่วนอื่นของอาคารในบริเวณที่เกิดรอยแตกร้าวของผนังในชั้นอื่น ผลการสำรวจไม่พบรอยร้าวของผนังในบริเวณพื้นที่เดียวกับรอยร้าวผนังในชั้นลอย ดังรูป 4.6-4.8 หรืออาจกล่าวได้ว่าพื้นชั้นอื่นของอาคารที่มีกิจกรรมและพฤติกรรมการใช้ประโยชน์ของพื้นที่อาคารตามวัตถุประสงค์การออกแบบ ไม่ปรากฏรอยร้าวของผนังแต่อย่างใด

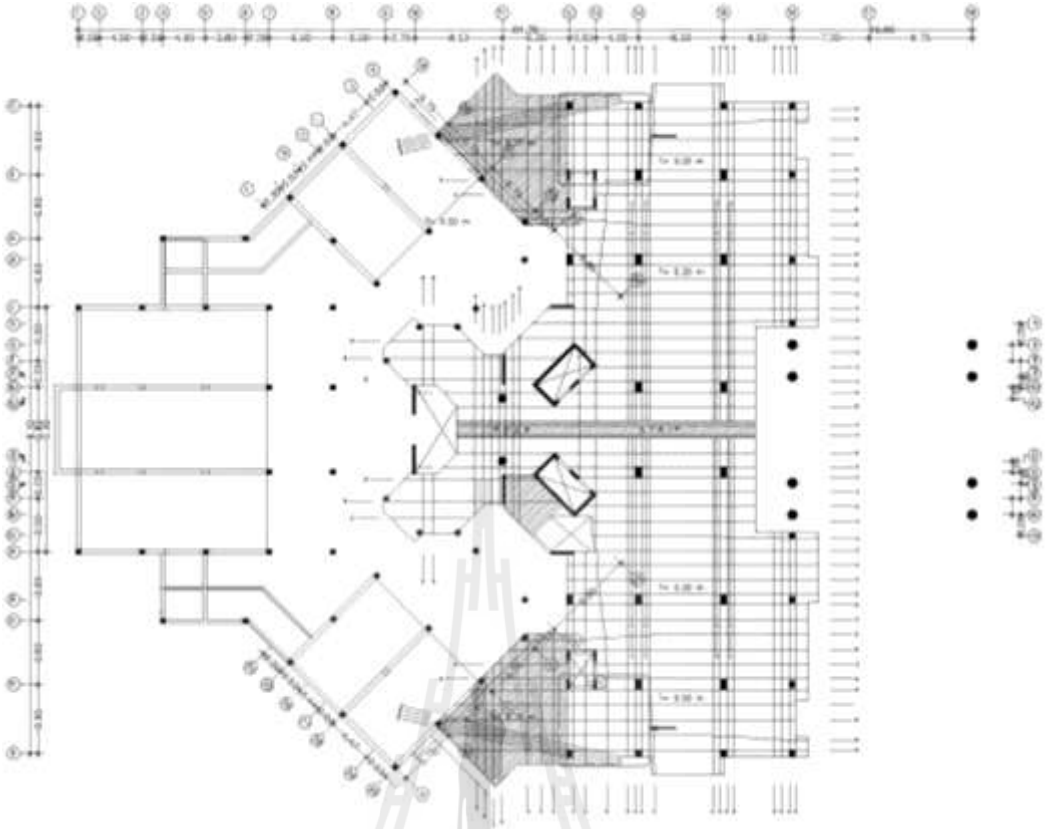
รูปที่ 4.7 พื้นที่ชั้น 2 บริเวณพื้นที่เดียวกับรอยร้าวผนังในชั้นลอย

รูปที่ 4.8 (1) พื้นที่ชั้น 3 บริเวณพื้นที่เดียวกับรอยร้าวผนังในชั้นลอย

รูปที่ 4.8 (2) พื้นที่ชั้น 3 บริเวณพื้นที่เดียวกับรอยร้าวผนังในชั้นลอย

รูปที่ 4.9 พื้นที่ชั้น 4-7 บริเวณพื้นที่เดียวกับรอยร้าวผนังในชั้นลอย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.10 การเสริมเหล็กพื้น Post-tensioned

### 4.3 การประมาณน้ำหนักบรรทุกบนพื้นบริเวณที่เกิดการแตกร้าวบนผนัง

พื้นอาคารเป็นแบบ Post-tensioned Slab Bonded System และได้ถูกออกแบบให้มีความสามารถในการการรับน้ำหนักบรรทุกคงตัว (Dead Load, DL) เท่ากับ 200 ksm และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load, LL) เท่ากับ 300 ksm ตามรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นค่าการรับน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. ปี 2537

### 4.4 การหาน้ำหนักของกระดาษที่กระทำต่อพื้นที่ที่เกิดรอยร้าว

- น้ำหนักกระดาษขนาด A4 หนา 80 แกรม 1 รีม มีน้ำหนัก 2.50 kg./$m^2$
- จากรูปที่ 4.4 ปริมาณกระดาษที่วางอยู่ประมาณ 265 รีม เท่ากับ 265 x 2.50 = 662.50 kg.
- กองกระดาษใช้พื้นที่ประมาณ 3.00 x 0.70 = 2.10 $m^2$
- ดังนั้นน้ำหนักที่กระทำต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตรจะเท่ากับ 662.50/2.10 = 315.47 kg./$m^2$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักบรรทุกจรที่ใช้ออกแบบ

**4.5 การแก้ไขและวิธีการป้องกันการเกิดปัญหา**

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ารอยร้าวตามผนังเกิดจากการใช้อาคารผิดประเภท โดยมีการวางน้ำหนักบรรทุกมากเกินไป ทำให้เกิดการแอ่นตัวของแผ่นพื้นเฉพาะจุดมากเกินไปและดึงให้ผนังเกิดการแตกร้าว การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถกระทำโดยการเคลื่อนย้ายกองวัสดุในพื้นที่บริเวณที่เกิดการแตกร้าวของผนัง และปรับปรุงการใช้พื้นที่ใช้สอยให้เหมาะสม หลังจากนั้นทำการสำรวจเป็นระยะๆ หากการสำรวจเก็บข้อมูลในอนาคตยังเกิดการขยายตัวของรอยร้าวของผนังอาจมีการเสริมความแข็งแรงของพื้นคอนกรีตโดยใช้วิธีที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 5
# สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี (อาคารสำนักงานอธิการบดี) มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ได้ก่อสร้างแล้วเสร็จตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2551 (เป็นเวลา 7 ปีแล้ว) ผนังอาคารบางส่วนเกิดรอยแตกร้าวทำให้ผู้ใช้อาคารเกิดข้อกังวลใจ ผู้วิจัยจึงได้ทำการสำรวจการแตกร้าวของผนังเพื่อหาสาเหตุและแนวทางการแก้ปัญหาที่เหมาะสมทางวิศวกรรม ผลงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผู้ศึกษาได้ตรวจการแตกร้าวของอาคาร พร้อมทั้งถ่ายภาพรอยแตกร้าว และสำรวจการทรุดตัวของอาคารด้วยกล้องระดับเพื่อจัดทำระเบียนการทรุดตัว การแตกร้าวบนผนังมีอัตราการขยายตัว 0.02 มิลลิเมตรต่อเดือน ขณะที่ การทรุดตัวที่แตกต่างกันของตอม่ออาคารมีค่าต่ำมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าสาเหตุการแตกร้าวของผนังไม่ได้เกิดจากการทรุดตัวที่แตกต่างกันของฐานราก
2. ผลการสำรวจการใช้อาคารพบว่าผู้ใช้อาคาร อาคารดังกล่าว วางกองกระดาษบนพื้นเป็นกองสูง ซึ่งก่อให้เกิดน้ำหนักแบบจุด (Point load) เฉพาะพื้นที่ ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวเฉพาะที่และก่อให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันบนแผ่นพื้น การทรุดตัวที่แตกต่างกันนี้ก่อให้เกิดแรงดึงที่ผนังและเกิดเป็นรอยร้าวทะแยงมุมประมาณ 45 องศา ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการแตกร้าวของผนังเกิดจากการใช้อาคารผิดประเภท
3. แนวทางการแก้ปัญหาการแตกร้าวของผนังทำได้โดยการเคลื่อนย้ายกองสิ่งของและเอกสารที่ไม่จำเป็นออกจากพื้นอาคารบริเวณที่เกิดการแตกร้าวของผนัง และทำการซ่อมผนังด้วยอีฟอกซีและติดตามร้อยแตกร้าวของผนัง

**ข้อเสนอแนะ**

การแก้ไขปัญหาการแตกร้าวของผนังอาคารเบื้องต้นที่สามารถกระทำได้และเป็นการประหยัดงบประมาณคือการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของผู้ใช้อาคารให้รับรู้ถึงข้อมูลและผลกระทบจากพฤติกรรมของผู้ใช้อาคารที่มีผลต่อโครงสร้างอาคาร และทำการแก้ไขพื้นที่จุดเสี่ยงโดยการลำเลียงสิ่งของและเอกสารต่างๆ ที่ไม่จำเป็นออกจากพื้นที่ เพื่อเป็นการลดน้ำหนักบรรทุกที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างอาคาร และทำการตรวจสอบรอยร้าวของผนังต่อไปการศึกษาในลำดับต่อไปควรเป็นการรื้อฝ้าเพดานเพื่อตรวจวัดการโกงตัวของพื้นคอนกรีต และเปรียบเทียบกับค่ายอมให้ รวมทั้งซ่อมแซมรอยแตกร้าวตามผนังและตรวจวัดการรอยแตกร้าวหลังจากซ่อมแซมแล้วเสร็จ

# เอกสารอ้างอิง

**มาตรฐานการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคาร.** ได้จาก dhttp://www.dpt.go.th/csb/Picture/MRT/MRT04.pdf กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2551).

**การแก้ไขอาคารทรุด และเทคนิคการยกอาคารที่ทรุดเอียง (Foundation Repair).** ฟีเนสส์ ซอยล์ เทสติ้ง จำกัด จาก: http://www.finessesoil.com.

Foundation Design, Principles & Practice - Coduto 2001 (2nd Edition).DONALD P. CODUTO จาก: http://fepoderymilagros.org/social/blog/view/272647/ foundation-design-principles-and-practices-2nd-edition-by-coduto-donald-p-download-pdf-and-epub

นเรศ พันธราธร. **Design of Prestressed Concrete** : การออกแบบคอนกรีตอัดแรง

วสท. 1008-38: **มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง.**

ACI 224R-90: **Control of Cracking in Concrete Structures**, American Concrete Institute.

ACI 318-99: **Building Code Requirements for Structural Concr ete**, American Concrete Institute.

Australian Standard, AS 2870 (1996). **Residential Slabs and footings**.

Bjerrum, L. (1963). **Allowable Settlements of Structures**, Proceeding of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Weisbaden, Vol 2, 135-137.

Boone, S.L. (2001). **Assessing Construction and Settlement-Induced Building Damage**: A Return to Fundamental Principles, Proceedings, Underground Construction, Institute of Mining and Metalurgy, London, 559-570.

Boscardin, M.D. and Cording, E.J. (1989. **Building Response to Excavation-Induced Settlement**, J. of Geotech. Eng., ASCE, 115(1), 1-12.

Burland,J.B., Broms,B.B., and DeMello, V.F.B. (1977). **Behavior of Foundations and Structures: State of The Art Report.,** Proc. of The 9th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, 495-546.

Clough, G.W. and O'Rourke, T.D. (1990). **Construction Induced Movements of In-Situ Walls**., Proc. ASCE Specialty Conference, Cornell. ASCE Geo Special Publication 25.

Finno, R. J., Voss, F.T. Jr., Rossow E. and Blackburn J. T., **Evaluating Damage.**

Gue & Partners SDN BHD (1999), **Instrumentation and Monitoring Specification for Retaining Structure and Excavation.**

Hanna, T.H. (1985). **Field Instrumentation in Geotechnical Engineering**. Trans Tech Publications.

Mayerhof, G.G. (1956). **Discussion paper by Skempton Et. Al.** Settlement Analysis of Six Structures in Chicago and London, Proceeding of ICE, Vol 5, 170.

Skempton, A.W. and MacDonald, D.H. (1956). **Allowable Settlement of Buildings**. Proc. ICE, part 3,727

State-of-The-Art Report, **Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structure** (2002), FIB Task Group, Europe

# ประวัติผู้เขียน

นายเสกสิทธิ์ เกิดกิจ เกิดเมื่อวันที่ 19 ตุลาคม 2519 สถานที่เกิด อำเภอเมืองเพชรบูรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 79 หมู่ 11 ตำบลนาป่า อำเภอเมืองเพชรบูรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์ ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2526-2532 ประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลเพชรบูรณ์ อำเภอเมืองเพชรบูรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์ พ.ศ. 2533-2538 มัธยมศึกษา โรงเรียนเพชรพิทยาคม อำเภอเมืองเพชรบูรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์ พ.ศ. 2538-2542ปริญญาตรี สถาปัตยกรรมศาสตร์ (สถ.บ.) สาขาสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยศรีปทุม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ ประวัติการทำงาน พ.ศ. 2545 ตำแหน่งพนักงานผังเมือง ฝ่ายผังเมือง สำนักงานโยธาธิการและผังเมือง อำเภอเมืองเพชรบูรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์ พ.ศ. 2553 ตำแหน่ง สถาปนิก งานผังแม่บทและออกแบบก่อสร้าง กองนโยบายและแผน มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อำเภอเมืองเพชรบูรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี