

การทดสอบและวัดในสนาม (Field Measurement)

สารบัญ

หน้า

คำนำ

สารบัญ

การทดสอบและวัดในสนาม(Field Measurement)	1
1. บทนำ	1
2. Instrumentation For Load Test	1
1.การทดสอบดิน	1
1.1. Plate bearing test	1
1.2.Standard penetration test(SPT)	8
1.3.Cone Penetration test(CPT)	9
2.ทดสอบเสาเข็ม	14
2.1.การทดสอบแรงดึง	14
2.2.การทดสอบแรงอัด	15
2.2.1.Static Load Test	15
2.2.2.Dynamic Load Test	19
2.2.3.Statnamics Test	20
2.3.การทดสอบแรงกระทำด้านข้าง	21
2.4.การทดสอบความสมบูรณ์	21
2.4.1.การทดสอบโดยวิธี Sonic Integrity	21
3.ทดสอบกำลังของโครงสร้าง	22
3.1.การทดสอบแบบทำลาย(Destructive test)	22
3.1.1.Core testing	22
3.2.การทดสอบแบบกึ่งทำลาย(Semi-destructive test)	24
3.2.1.Pull-out test	24
3.2.2.Pull-off test	25
3.3.การทดสอบแบบไม่ทำลาย(Non-destructive test)	27
3.3.1.Schmidt Hammer	27
3.3.2.Ultrasonic Pulse Velocity Test	29
3. การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างจริง(Building Load Test)	33
4. Measurement Of Settlement In Building	36

หนังสืออ้างอิง

การทดสอบและวัดในสนาม

(Field Measurement)

① บทนำ

ในที่นี้จะเป็นการพูดถึงโครงสร้างในส่วนของการสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก(คสล. และ คอ.ร.)เท่านั้น เนื้อหาจะประกอบด้วยหัวข้อหลักคือ

1. Instrumentation For Load Test
2. การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างจริง(Building Load Test)
3. Measurement Of Settlement In Building

ภาพโดยรวมของเนื้อหาว่าด้วยเรื่องของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ด้านวัสดุและโครงสร้างในสนาม อุปกรณ์และวิธีการในการตรวจวัดการทรุดตัวของโครงสร้าง และสุดท้ายเป็นการตรวจสอบหลังจากมีการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

② Instrumentation For Load Test

① ทดสอบดิน

1.1. Plate bearing test

เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับการทรุดตัว โดยให้น้ำหนักกดผ่านแผ่นเหล็กรูปวงกลมตาม ASTM D 1196 – 93 (Re-approved 1997)

การบดอัดดินนอกจากจะมีวัตถุประสงค์เพื่อลดช่องว่างระหว่างมวลหรือทำให้ดินมีความแน่นแล้ว ยังต้องการให้ดินหรือมวลรวมที่ถูกบดอัดเสถียร(Stable) กล่าวคือ มีกำลังต้านทานน้ำหนักกดทับ เช่น น้ำหนักจากอาคารทั้งหมด น้ำหนักจากยานพาหนะ โดยที่ดินไม่ยุบ หรือทรุดตัว (Settlement) ไม่เกินกว่าเกณฑ์กำหนด

ดังนั้นการทำให้ดินแน่นขึ้น(กรณีดินถมใหม่หรือชั้นทางต่างๆ) จึงขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้เครื่องจักรกลบดอัดดิน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณงาน คุณสมบัติที่ต้องการ (เช่น ความแน่น) กำลังหรือประสิทธิภาพของเครื่องจักรกล ปกติเครื่องจักรกลบดอัดดินแบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก ตามองค์ประกอบและกลไกในการบดอัด ได้แก่ บดอัดโดยกดทับด้วยน้ำหนัก (Static loading compactor) คืออาศัยน้ำหนักกดทับเพื่อให้ดินหรือวัสดุคัดเลือกอื่นแน่นตัว โดยกระบวนอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) บดอัดโดยกดทับหรือวิ่งผ่านซ้ำ ๆ กันหลายรอบ (Rolling) วิธีนี้ใช้น้ำหนักของเครื่องจักรกลวิ่งกดทับซ้ำ ๆ กันหลาย ๆ รอบ (Pass) จำนวนรอบของการบดอัดแต่ละชั้นขึ้นอยู่กับความหนาของดินหรือวัสดุคัดเลือกแต่ละชั้น(Lift)และน้ำหนักของเครื่องจักรกล การบด

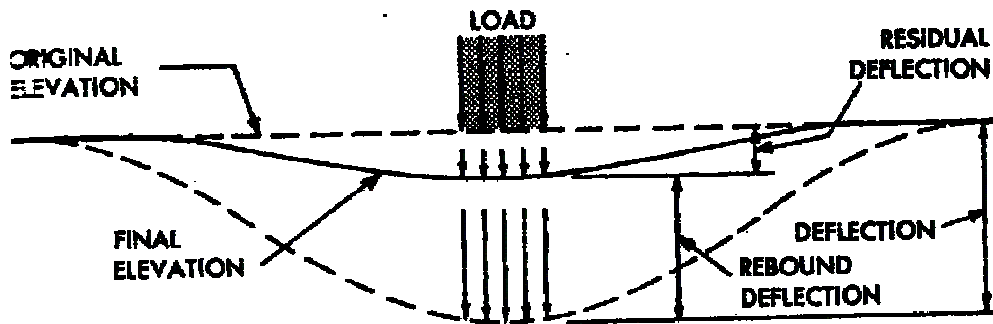
อัดโดยการเค้นหรือย่ำ (Kneading) ใช้เครื่องจักรกลคล้าย 2 ประเภทแรกก็ต้องมีน้ำหนักมาก แต่แตกต่างตรงการย่ำให้เกิดความเค้น เช่น หากบดอัดดินเหนียว โดยล้อบดจะมีปุ่มคล้ายตีนแกะ (Sheep foot roller drum) เพื่อใช้เค้นหรือย่ำลงไปในดิน ผนวกกับน้ำหนัก หรือแรงสั่นสะเทือน ทำให้ดินแน่น หากใช้บดอัดมวลโตะจำพวกหินล้อยบดก็จะเป็นโครงตาข่าย(Grid mesh) ส่วนวิธีสั่นสะเทือน (Vibrating)วิธีนี้เหมาะกับทรายหรือดินจำพวกทราย ที่มีอนุภาคร่วน เครื่องจักรกลประเภทนี้อาศัยแผ่นที่สั่นสะเทือนได้ เพื่อสั่น หรือตบ (Tamping) เพื่อลดช่องว่างในดิน หรือทำให้ดินแน่น

ความแน่นของดินจึงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิด หรือคุณสมบัติทางกายภาพของดิน หรือวัสดุคัดเลือก เช่น ขนาดมวล ความชื้น (หรือปริมาณน้ำที่แทรกตัวระหว่างมวลดิน) ในสภาพจริงนอกจากดินหรือมวลรวมจะยุบตัวภายใต้ น้ำหนักกดแล้ว ยังอาจยุบตัวเนื่องจากสาเหตุอื่น ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินบริเวณข้างเคียง เป็นต้น ดังนั้นแม้ดินหรือมวลรวมจะถูกบดอัดโดยวิธีหรือเครื่องจักรกลที่เหมาะสม จนมีความแน่นเพียงพอ(ซึ่งทดสอบความแน่นโดยหาหน่วยน้ำหนัก หรือความหนาแน่น - Density ทั้งความหนาแน่นในห้องปฏิบัติการ หรือในสนาม)แล้ว ยังต้องทดสอบความแน่นของดินในเชิงใช้งาน คือการยุบตัวหรือทรุดตัวเมื่อรับน้ำหนักหรือด้านทางแรงกด

หลักการทดสอบความแน่นของดิน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับการทรุดตัว คือให้น้ำหนักกดผ่านแผ่นเหล็กรูปวงกลมหลายขนาดที่วางซ้อนและร่วมศูนย์กลางกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกด(หรือหน่วยแรง)และการทรุดตัว ปกติการทรุดตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักกด และเมื่อคลายน้ำหนัก ดินหรือมวลรวมจะคลายตัว(ในทิศทางตรงข้าม) เรียกการคืนตัว อย่างไรก็ตามหากน้ำหนักกดมีค่ามากพอ เมื่อคลายน้ำหนักออกก็จะยังปรากฏค่าทรุดตัวคงค้างหรือค่าทรุดตัวคงเหลือ

นิยามศัพท์ เกี่ยวกับการทรุดตัว (Settlement)หรือการขจัดในแนวดิ่ง(Deflection - รูปที่ 1 ประกอบ)

1. Deflection (ค่าการขจัด หรือทรุดตัว) หมายถึงปริมาณการทรุดตัวในแนวดิ่งของผิวทดสอบเนื่องจากมีน้ำหนักกระทำบนพื้นผิวนั้น
2. Rebound Deflection (ค่าการคืนตัว) หมายถึงปริมาณการคืนตัวในแนวดิ่งของผิวทดสอบเมื่อมีการนำน้ำหนักกระทำนั้นออกไป
3. Residual Deflection (ค่าการทรุดตัวคงเหลือ) หมายถึง ค่าส่วนต่างระดับของพื้นผิวทดสอบก่อนมีน้ำหนักกระทำและหลังจากเอาน้ำหนักกระทำนั้นออกไป



รูปที่ 1 แสดงการทรุดตัวเมื่อของผิวทดสอบภายใต้น้ำหนักกด

ค่า Modulus of subgrade reaction, k คำนวณจาก

$$K = P / \Delta$$

โดย k : Modulus of subgrade reaction, lb/in^3 หรือ pci
 p : หน่วยน้ำหนักกดบนแผ่นเหล็ก, lb/in^2 หรือ psi
 Δ : ค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักกด p , $inch$

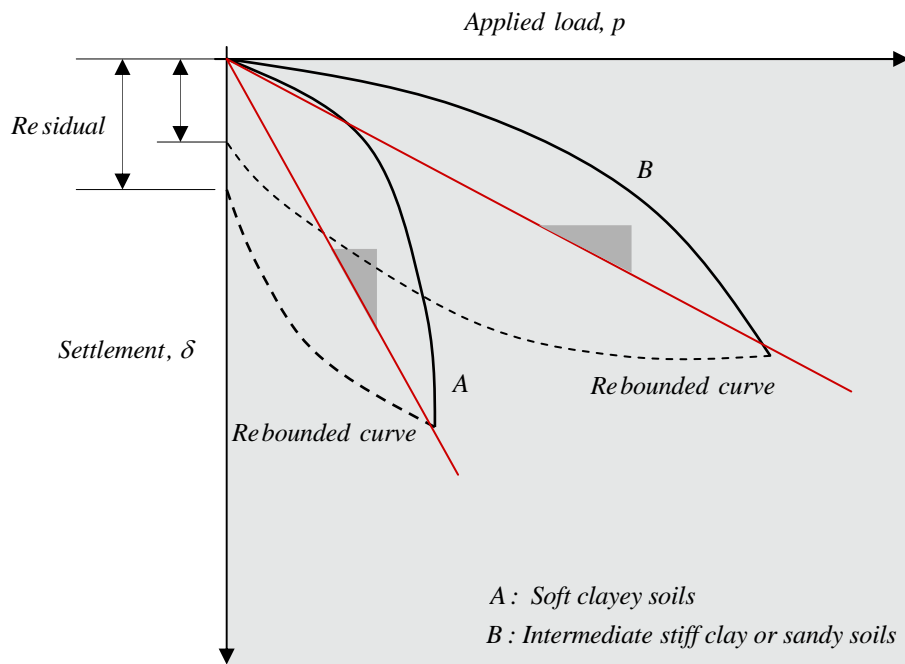
ส่วนใหญ่ในทางปฏิบัติ จะคำนวณค่า k ภายใต้การทดสอบ Plate ที่ $p = 10 \text{ psi}$

ปกติการบดอัดดินหรือมวลรวม นอกจากคุณสมบัติทางกายภาพ หรือกลสมบัติ แล้ว รายการก่อสร้างอาจจะรับกำลังรับแรงแบกทาน หรือแรงธาร (Bearing capacity) และการทรุดตัวสูงสุด (Maximum allowable settlement) ของดินหรือมวลรวมไว้ด้วย

ส่วนการคำนวณ Modulus of sub grade reaction นั้น เมื่อพิจารณาสมการข้างต้นหรือความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดทับ (หรือหน่วยแรง) กับการทรุดตัว ค่า Modulus of subgrade reaction ก็คือความลาดชันของความสัมพันธ์ดังกล่าวนั่นเอง ในทางปฏิบัติ Modulus of subgrade reaction ที่คำนวณจากเส้นความสัมพันธ์ดังกล่าวจะหมายถึง Secant Modulus ณ ภาวะต่าง ๆ เช่น ที่ร้อยละ 25 หรือ 50 หรือ ณ น้ำหนักกด (หรือหน่วยแรง) สูงสุด เป็นต้น (ดูรูปที่ 2 ประกอบ) สำหรับการทดสอบแบบให้น้ำหนักซ้ำ ๆ กันหลายรอบ (Repetitive loads) จะสามารถเปรียบเทียบค่า Modulus of subgrade reaction ของกระบวนการทดสอบหรือให้น้ำหนักแต่ละรอบได้

ดินหรือมวลรวมมีคุณสมบัติมักจะไม่ใช่เนื้อเนื้อ (Non-homogeneous) และไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic material) ดังนั้นจึงไม่อาจแสดงกลสมบัติของดินด้วยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity; E) ดังเช่นวัสดุอื่น ๆ เพราะค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินนอกจากจะ

ทดสอบหรือคำนวณได้ยากแล้ว ยังไม่แน่นอนแปรเปลี่ยนได้ตามชั้นดิน และอาจแตกต่างกันบ้างในแต่ละทิศทาง แต่เพราะเหตุที่ดินมีสภาพที่ยึดหยุ่นคล้ายสปริง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ดินสามารถยุบตัวภายใต้น้ำหนักกด ดังนั้นจึงอาจแสดงกลสมบัติของดินด้วย Modulus of subgrade reaction ซึ่งเปรียบเสมือนค่าแรงของสปริง(Spring constant; $k = F/x$) สำหรับดินในประเทศไทย มีค่า k ประมาณ 2,000 นิวตันต่อลูกบาศก์เมตร(ความหมายของค่าดังกล่าวในเชิงปริมาณคือ แรงที่ต้องใช้กดดินในพื้นที่ 1 ตารางเมตร ให้ยุบตัว 1 เมตร) อนึ่ง การประเมินค่าโมดูลัสความยึดหยุ่น และการแปลงค่าโมดูลัสความยึดหยุ่นให้เป็นค่าคงที่ k ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ยังคงเป็นเพียงอาศัยสมการที่สังเคราะห์จากผลการทดสอบ(Empirical formula) หากจะนำไปใช้งาน เช่น คำนวณออกแบบ ควรพิจารณาให้รอบคอบ เช่น อาจสอบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีอื่น ๆ หรือค่าที่แนะนำให้ใช้ในเชิงปฏิบัติ



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดทับ (หรือหน่วยแรง) กับการทรุดตัว

นอกเหนือจาก การทดสอบ Plate load เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดทับ(หรือหน่วยแรง) กับการทรุดตัว ค่าการทรุดตัวสูงสุด ค่าการทรุดตัวคงค้าง และค่า Modulus of subgrade reaction ของดินหรือมวลรวมในสนามแล้ว ยังมีวิธีทดสอบอื่น ๆ ที่มีหลักการคล้ายคลึงกัน เช่น ทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) ซึ่งศึกษาพฤติกรรมของดินที่ถูกอัดตัวในขอบเขตจำกัด และทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกด(หรือหน่วยแรง)กับช่องว่าง(หรือ

ปริมาตร – void, e) ระหว่างมวลดินที่ลดลง ผลที่ได้มักจะนำไปใช้คาดคะเนการทรุดตัวของดิน หรือสิ่งปลูกสร้างบนดินที่สัมพันธ์กับเวลา (Time dependent settlement)

ชุดเครื่องมือทดสอบประกอบด้วย

1. เครื่องให้น้ำหนัก เช่น รถบรรทุก รถพ่วง ฯลฯ
2. แม่แรงไฮดรอลิก
3. ชุดแผ่นเหล็กรูปวงกลม ความหนา 1" ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6", 12", 18", 24" และ 30"
4. ไดอัลเกจสำหรับวัดการแอ่นตัวจำนวน 2 อัน หรือมากกว่า มีความละเอียดวัดได้ 0.001" และวัดการแอ่นตัวได้มากที่สุด 1"
5. คานเหล็กสำหรับติดตั้งไดอัลเกจ
6. ทราชะเลียด หรือปูนปลาสเตอร์สำหรับปรับระดับพื้นที่ทดสอบ
7. เครื่องมือวัดระดับ

ลำดับขั้นตอนและวิธีทดสอบ

ลำดับขั้นตอนและวิธีทดสอบมี ดังนี้ (ดูรูปที่ 3 ประกอบ)

1. เตรียมพื้นที่ทดสอบให้เรียบและได้ระดับ โดยใช้ทราชะเลียดกับปูนปลาสเตอร์ หรือปูนปลาสเตอร์อย่างเดียวก็น่าจะเป็นทราชะเลียดก็ได้
2. วางแผ่นเหล็กขนาด นิ้วลงตรงศูนย์กลางบริเวณที่ต้องการทดสอบและปรับระดับให้ได้ระนาบ
3. วางแผ่นเหล็กขนาดที่เหลือลงบนแผ่นแรกให้ร่วมศูนย์กลางกันทุกแผ่น
4. สำหรับการทดสอบแบบ unconfined ของชั้นดินที่ระดับลึกลงไปจากผิวดิน ให้ขุดดินหรือวัสดุโดยรอบออกให้มีระยะห่างจากขอบแผ่นเหล็ก 1 หรือ 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเหล็ก สำหรับการทดสอบแบบ confined ต้องขุดดินหรือวัสดุออกให้เป็นหลุมเพียงพอที่จะวางแผ่นเหล็กลงไป
5. ติดตั้งไดอัลเกจไว้บนแผ่นเหล็กแผ่นล่างสุดเพื่อวัดค่าการเคลื่อนที่ทางดิ่งของแผ่นเหล็กในกรณีใช้เกจ 2 อัน ให้ติดไว้ตรงข้ามกัน และห่างจากขอบแผ่นเหล็ก 1 นิ้ว ในกรณีใช้เกจ 3 อัน ให้ติดตั้งโดยทำมุมระหว่างกัน 120 องศา เกจดังกล่าวต้องยึดติดกับคานเหล็กที่มีฐานรองรับอยู่ห่างจากขอบของแผ่นเหล็กอย่างน้อยที่สุดข้างละ 8 ฟุต ให้เฉลี่ยค่าที่อ่านได้จากไดอัลเกจทุกตัว เป็นค่าการทรุดตัวโดยเฉลี่ยของการอ่านค่าแต่ละครั้ง
6. ถอยรถบรรทุกให้กึ่งกลางเพลายู่บนกึ่งกลางของแผ่นเหล็ก ติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิกบนแผ่นเหล็กโดยให้แกนอยู่กึ่งกลางเพลารถยนต์พอดี

7. เมื่อติดตั้งเครื่องมือทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว เริ่มให้น้ำหนักเริ่มต้น โดยการเพิ่มน้ำหนัก และลดลงอย่างรวดเร็ว โดยน้ำหนักที่ให้อาจเพียงพอให้เกิดการทรุดตัวไม่น้อยกว่า 0.01 นิ้ว และไม่เกิน 0.02 นิ้ว เมื่อเข็มของเกจหยุดนิ่งหลังจากลดน้ำหนัก ให้กดน้ำหนักลงบนแผ่นเหล็กอีกครั้งประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำหนักที่ทำให้เกิดการทรุดตัวระหว่าง 0.01 – 0.02 นิ้วดังกล่าว(ค่าน้ำหนักนี้เรียกว่า seating load) เมื่อเข็มหยุดนิ่งจึงตั้งค่าเริ่มต้น (Zero mark) ของเกจทุกตัว
8. ก่อนให้น้ำหนัก ควรวางแผนให้รอบคอบ โดยพิจารณาค่าน้ำหนักสูงสุดที่เครื่องมือสามารถทดสอบได้ (หรือพิจารณาน้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบ) แล้วแบ่งค่าน้ำหนักทดสอบออกเป็นช่วง ๆ ที่เท่ากัน ทั้งนี้จำนวนช่วงที่แบ่งควรจะไม่น้อยกว่า 6 ช่วง เพื่อให้เพียงพอสำหรับสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนัก และการทรุดตัว (Load – Deflection)
9. เริ่มให้น้ำหนักทีละช่วงตามที่แบ่งไว้ในข้อ (8) ในแต่ละช่วงน้ำหนักที่กด ให้รอจนกระทั่งอัตราการทรุดตัวไม่เกิน 0.001 นิ้ว (0.03 มิลลิเมตร) ต่อนาที ในช่วงเวลาสามนาทีติดต่อกัน จึงอ่านค่าการทรุดตัว และหาค่าเฉลี่ยของการทรุดตัวจากค่าที่อ่านได้จากเกจทั้งหมด
10. เพิ่มน้ำหนักกดเป็นช่วง ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่าการทรุดตัวถึงที่กำหนดไว้ (โดยปกติโครงสร้างอาคารใช้การทรุดตัว 25 มิลลิเมตร) หรือจนกระทั่งน้ำหนักกดถึงขีดจำกัดของเครื่องมือที่ทดสอบ ขึ้นอยู่กับอย่างไหนจะถึงก่อน ณ จุดนี้ ให้คงน้ำหนักกดไว้รอจนกระทั่งอัตราการทรุดตัวไม่เกิน 0.001 นิ้วต่อนาที ในช่วงสามนาทีติดต่อกัน บันทึกค่าการทรุดตัว หลังจากนั้นคลายน้ำหนักกดจนกระทั่งถึงค่า Seating load คงน้ำหนักนี้ไว้จนอัตราการทรุดตัวไม่เกิน 0.001 นิ้วต่อนาที ในช่วงสามนาทีติดต่อกัน บันทึกค่าการทรุดตัวที่ Seating load

11. อ่านค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ที่แขวนอยู่ใกล้กับแผ่นเหล็กทุกครั้งชั่วโมง

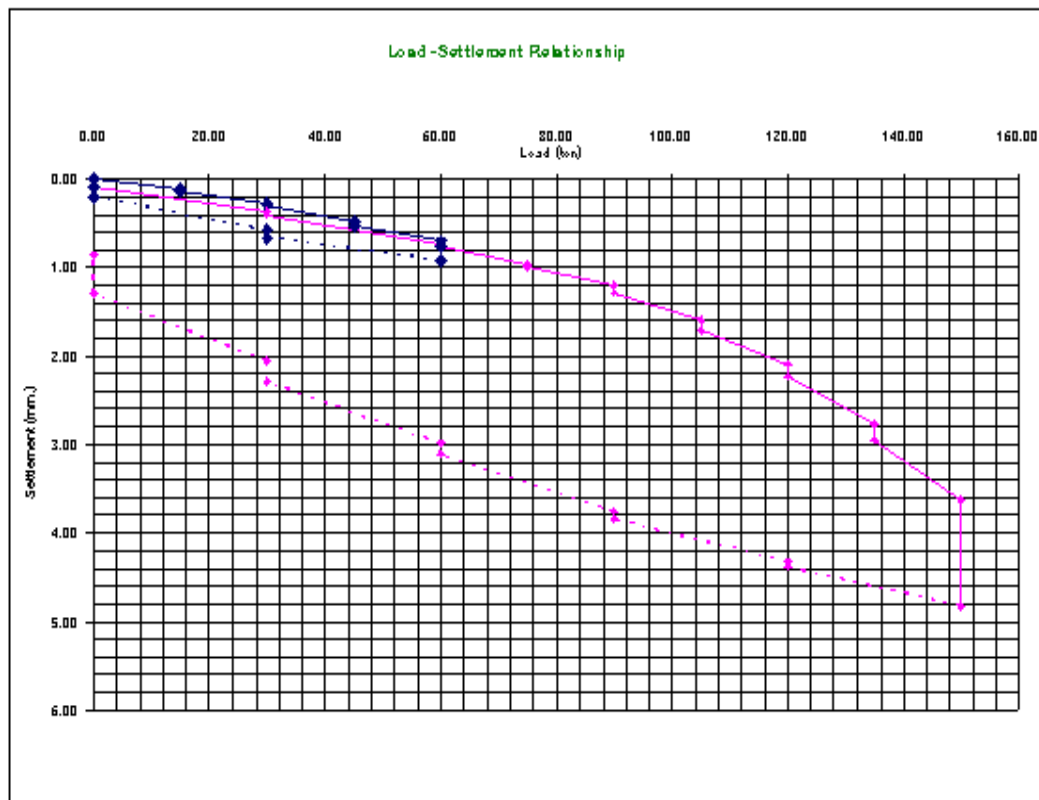


รูปที่ 3-1 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ Plate load ผลทดสอบและการคำนวณ



รูปที่ 3-2 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ Plate load ในอีกลักษณะหนึ่ง

นำผลทดสอบที่ได้จากชั้นตอนทดสอบ (8) ถึง (10) ไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกด และการทรุดตัว และคำนวณหา Modulus of subgrade reaction (ดูตัวอย่างในรูปที่ 4)



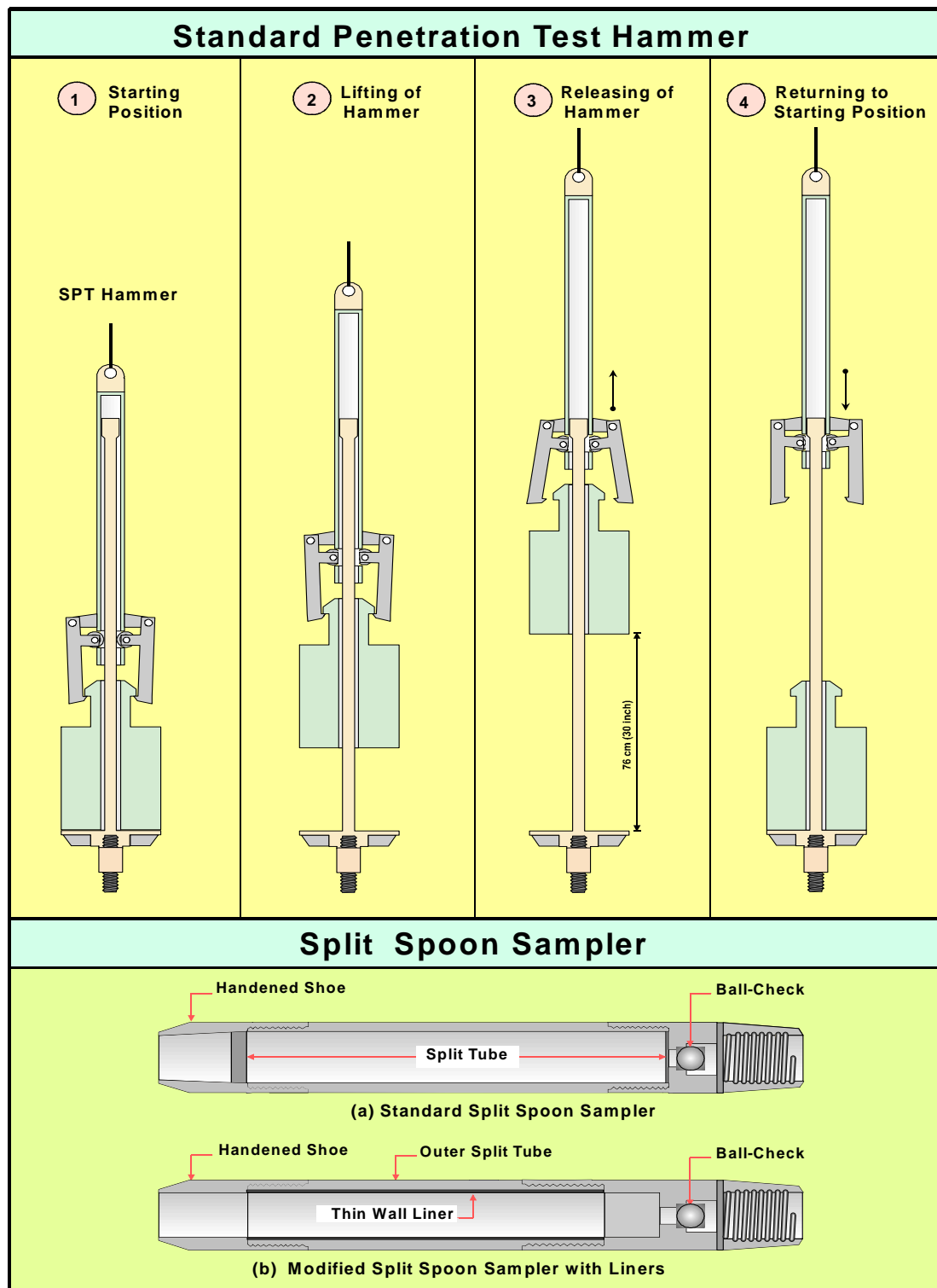
รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกด และการทรุดตัวจากการทดสอบ Plate load.

1.2. Standard penetration test (SPT)

การทดสอบโดยวิธีดังกล่าวมีวัตถุประสงค์ เพื่อหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ในสนามของชั้นทราย-กรวด หรือเพื่อหาค่าความแข็ง-อ่อนในที่ของชั้นดินเหนียว การทดสอบจะทำการตอกลูกตุ้มน้ำหนักส่งถ่ายแรงไปยังกระบอกผ่าซีกให้จมไปในดินโดยส่งผ่านทางก้านเจาะ การทดสอบแบบนี้ นอกจากจะเป็นการทดสอบในสนามแล้ว ในขณะที่ทดสอบก็จะเกิดการเก็บตัวอย่างดินในระดับที่ทำการเจาะ(ทดสอบ)ไปพร้อมๆกัน

อุปกรณ์ที่สำคัญประกอบด้วย(ดูรูปที่ 5) ตั้มน้ำหนักหนัก 140 ปอนด์(63.5 กก.) มีระยะยกสูง 30 นิ้ว โดยลูกตุ้มจะถูกปล่อยให้ตกลงมาโดยอิสระผ่านแกนนำ แล้งดกระทบยังป่าหรือเป็นรองรับ และที่ปลายล่างสุดของก้านเจาะจะเป็นหัวทดสอบ ซึ่งเป็นแบบกระบอกผ่าซีกมาตรฐาน มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 2 นิ้วและยาวไม่น้อยกว่า 30 นิ้ว

ค่าที่วัดได้จากผลการทดสอบจะเป็นจำนวนครั้งที่ตอก(N)ต่อระยะการจม(ตามที่มาตรฐานกำหนด) แต่ค่าดังกล่าวไม่อาจนำไปใช้ได้โดยทันที จำเป็นต้องมีการปรับแก้เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น การสูญเสียพลังงานขณะตอก



รูปที่ 5 แสดงชุดอุปกรณ์ทดสอบ SPT.

1.3.Cone Penetration test

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบโดยวิธีนี้มักเรียกว่า “เครื่องมือดัดโคน” (ดูรูปที่ 6 ประกอบ) ซึ่งการทดสอบในสนามโดยวิธีนี้ผลการทดสอบที่ได้ มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ใน

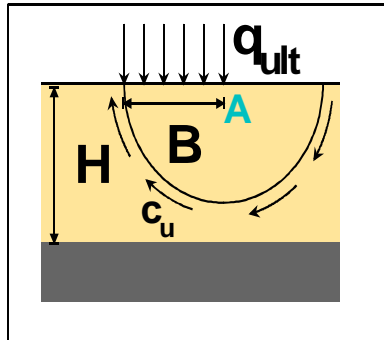
การออกแบบฐานรากเสาเข็ม การทดสอบจะเริ่มจากเครื่องมือดังกล่าวทั้งหมดจะถูกกดผ่านก้านเหล็ก ไปยังระดับความลึกที่ต้องการจะทดสอบ หลังจากนั้นกรวยจะถูกกดลงไปพร้อมกับปลอกวัดแรงเสียดทานเพื่อวัดแรงต้านทานรวม ซึ่งเกิดจากแรงด้านปลายกรวยรวมกับแรงเสียดทาน ซึ่งค่าแรงเสียดทานคำนวณได้จาก “ค่าแรงเสียดทานรวมลบด้วยแรงด้านที่ปลายกรวย” การทดลองจะถูกกระทำซ้ำอีกทุกๆ ระยะ 0.20 เมตร ในช่วงของความลึกถัดไป ส่วนค่าของหน่วยแรงต้านทานที่ปลายกรวย(Cone Resistance , q_c) คำนวณได้จากแรง “ด้านที่ปลายกรวยหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของกรวย(1,000 ตร.มิลลิเมตร)” ส่วนหน่วยแรงเสียดทาน(Friction Resistance , f_s) คำนวณได้จาก “แรงเสียดทานของปลอกเหล็กหารด้วยพื้นที่ผิวของปลอกเหล็กที่สัมผัสกับดิน

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องมือชนิดนี้ในลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์คือ Electronic Cone ซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแบบอิเล็กทรอนิกส์ และได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้ยังมีขนาดเท่าชนิดดั้งเดิม และได้มีการนำไปใช้ในการสำรวจดินไม่เพียงแต่เฉพาะบนบกเท่านั้น แต่ยังมีการนำไปใช้ในการหยั่งได้น้ำเพื่อทำงานในทะเลอีกด้วย เช่น ในงานสำรวจแท่นขุดเจาะน้ำมันในทะเล

เนื่องจากเครื่องมือชนิดนี้สามารถกดกรวยและปลอกวัดแรงเสียดทานไปได้พร้อมๆ กัน จึงสามารถวัดได้ทั้งแรงด้านที่กรวย และแรงเสียดทานที่ผิวแยกกันได้ในเวลาเดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้ได้ข้อมูลของแรงด้านทั้ง 2 ชนิดพร้อมกัน อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงความลึกที่ทำการทดสอบ ยกเว้นเพียงช่วงที่มีการตอกันเหล็กเพื่อกดในช่วงความลึกถัดไปเท่านั้น

ในบางครั้งเครื่องมือชนิดนี้มีการติดตั้งหินพรุน(Porous Stone)ที่กรวย เพื่อใช้ในการวัดแรงดันน้ำในดินโดยตรงได้อีกด้วย ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้เรียกว่า “Piezocone”

ในขณะเดียวกันเครื่องมือชนิดนี้ก็ยังมีข้อจำกัดเช่นกันคือ ไม่สามารถกดผ่านชั้นทรายแน่นมากและชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมากๆ ได้ แต่สำหรับกรณีของดินเหนียวหรือดินอ่อนสามารถกดหัวกรวยได้ถึงความลึกมากกว่า 40 เมตร แต่การทดสอบที่ระดับความลึกมากกว่า 20 เมตร อาจพบปัญหาเนื่องจากก้านเหล็กเบนออกจากแนวตั้ง ซึ่งส่งผลให้ค่าความลึกที่วัดได้จากความยาวก้านเหล็กมีค่ามากกว่าความเป็นจริง



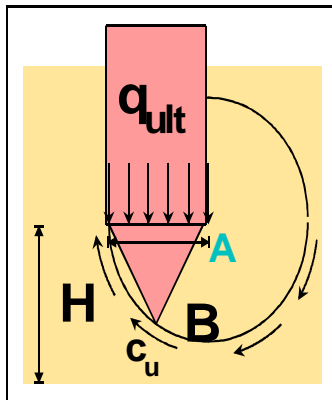
Taking moment at Point A:

Driving Moment, $M_{\text{driving}} = q_{\text{ult}} \times B \times B/2$

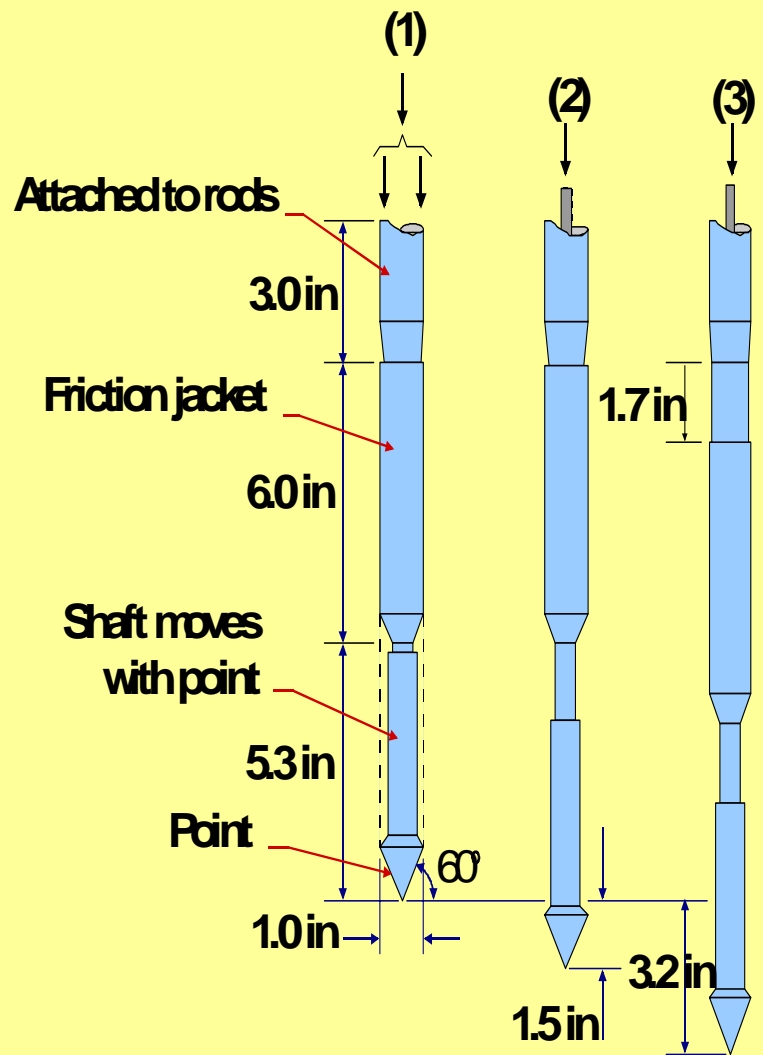
Resisting Moment, $M_{\text{resisting}} = c_u \times B \times \pi \times B$

Equating, Resisting Moment = Driving Moment,

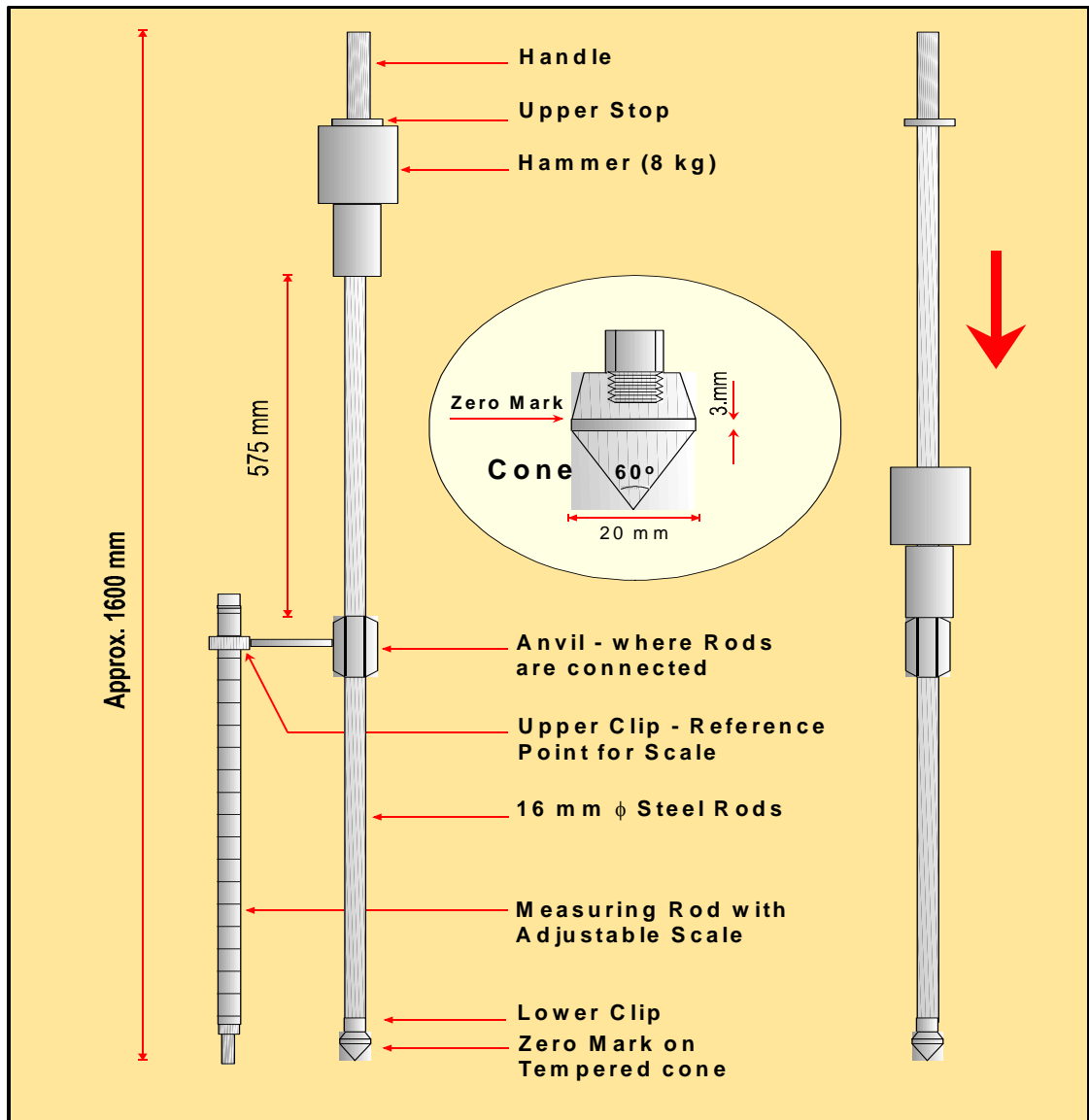
Giving, $q_{\text{ult}} = 2 \pi c_u \approx 6 c_u$



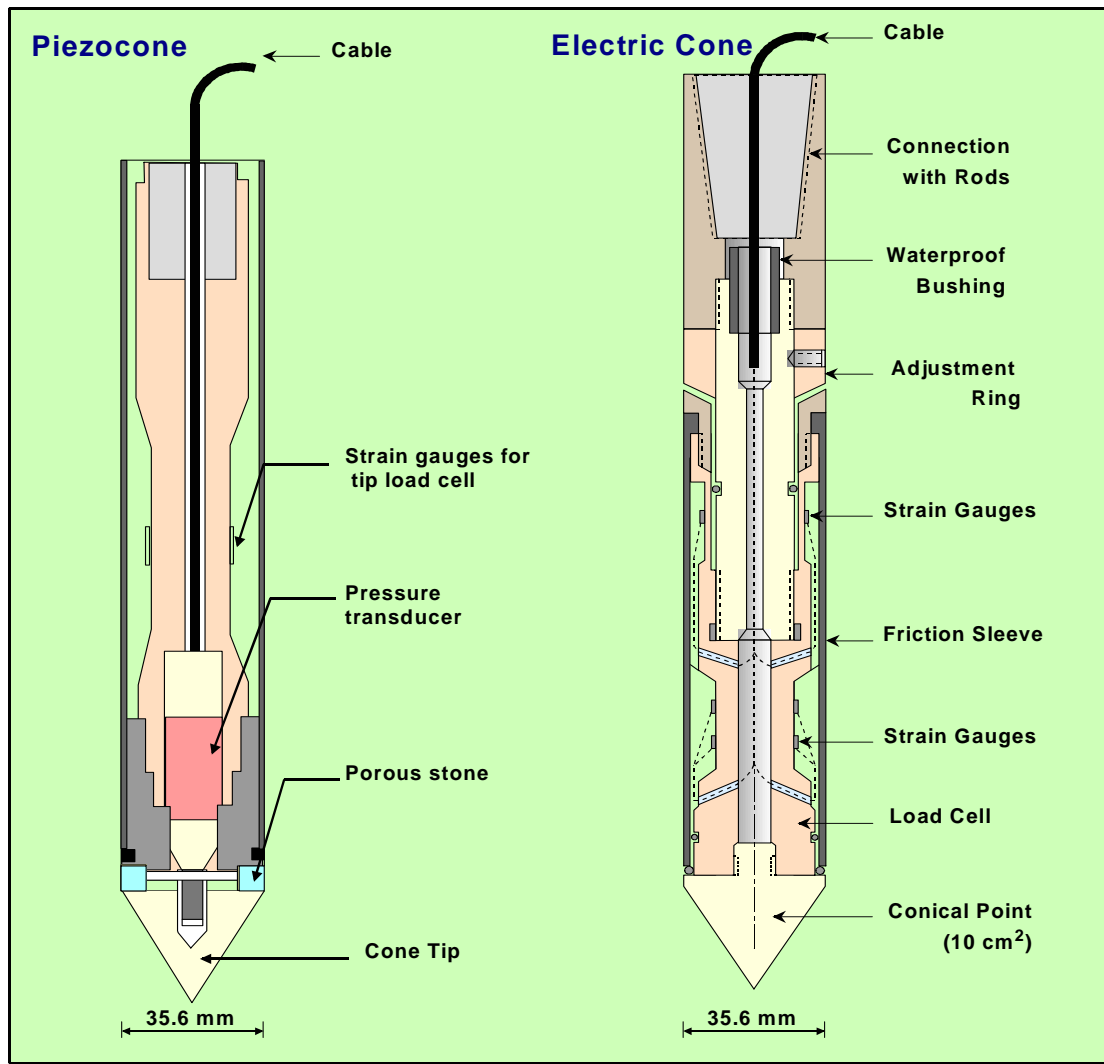
Giving, $q_{\text{ult}} = 3 \pi c_u \approx 9 c_u$



รูปที่ 6-1 แสดง Cone Penetration (mechanical)



รูปที่ 6-2 แสดง Dynamic Cone Penetration (DCP)



รูปที่ 6-3 แสดง Cone Penetration (Electrical)



รูปที่ 6-4 แสดงการเตรียมชุดทดสอบ Cone Penetration

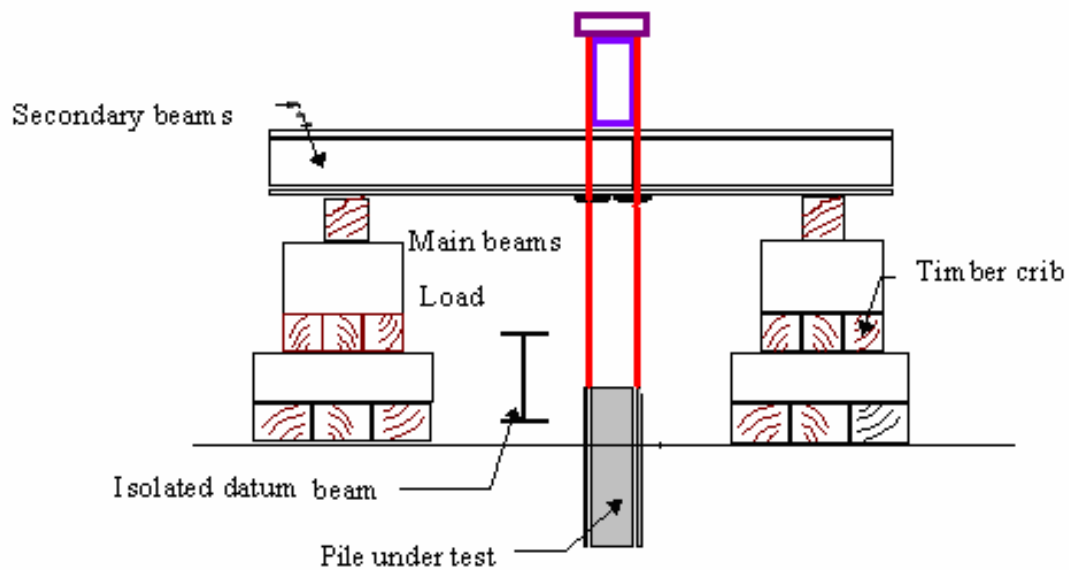


รูปที่ 6-5 แสดงการทดสอบ Cone Penetration โดยหน่วยรถเคลื่อนที่

② ทดสอบเสาเข็ม

2.1. การทดสอบแรงดึง

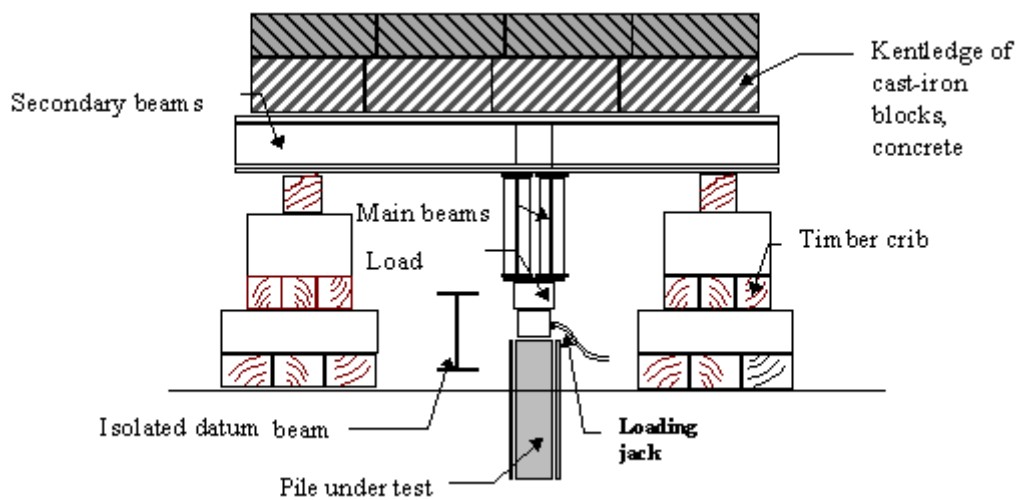
การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 3689-83 ใช้ทดสอบเสาเข็มในกรณีที่เสาเข็มถูกออกแบบให้รับแรงดึง (รูปที่ 7 ประกอบ) เช่น เสาเข็มรับแรงลอยตัวของสระว่ายน้ำ เสาเข็มรับแรงดึงจากฐานรากกำแพงกันดิน หรืออาจต้องการศึกษาถึงความสามารถในการรับแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็ม ในกรณีที่เสาเข็มรับน้ำหนักในรูปของแรงต้านทานที่ปลายและแรงเสียดทานโดยรอบเสาเข็ม การทดสอบก็ไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบโดยใช้วิธีของเสาเข็มสมอ แต่ใช้ลักษณะแบบตักน้ำหนักแต่ไม่ต้องใช้น้ำหนัก ซึ่งการติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบก็เหมือนกับการทำการทดสอบในวิธี Static Load Test แต่ไม่ต้องใช้น้ำหนักทั้งนี้เพราะเราจะใช้ Hydraulic Jack ตั้งบนคานตัวกลางแทนที่จะตั้งบนหัวเสาเข็ม (หรือข้างล่างคานตัวกลาง) จากนั้นให้ใช้เหล็กเส้นคล้อง Hydraulic Jack ลงมาเชื่อมต่อกับหัวเสาเข็มที่จะทดสอบ ซึ่งตรงบริเวณดังกล่าวนี้จะต้องมีการดูแลเป็นพิเศษเพราะจะเป็นจุดที่ weak ที่สุด เมื่อเริ่มทำการทดสอบก้าน Hydraulic Jack จะเคลื่อนที่ขึ้นซึ่งมันจะดึงหัวเสาเข็มขึ้นไปด้วย โดยแรงที่ใช้ในการดึงเสาเข็มจะถูกส่งถ่ายผ่านคานตัวกลาง ไปยังคานหัวท้ายและถ่ายลงไปยังฐาน



รูปที่ 7 แสดงการติดตั้งชุดทดสอบเสาเข็มรับแรงดิ่ง

2.2.การทดสอบแรงอัด

2.2.1.Static Load Test



รูปที่ 8-1 แสดงการติดตั้งชุดทดสอบเสาเข็มรับแรงอัด(Static Load Test)



รูปที่ 8-2 แสดงการติดตั้งชุดทดสอบเสาเข็มรับแรงอัด(Static Load Test)



รูปที่ 8-3 แสดงการติดตั้งชุดทดสอบเสาเข็มรับแรงอัด(Static Load Test)

การทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวนี้(ดูรูปที่ 8 ประกอบ) เป็นวิธีการทดสอบมาตรฐานเพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ใช้อ้างอิงเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบด้วยวิธีอื่นๆ

ประเภทของการทดสอบ

การทดสอบ Static Load Test ในเสาเข็ม โดยทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. การทดสอบแรงกดในแนวดิ่ง (Vertical Compression Load Test)

เป็นการทดสอบโดยทั่วไปเพื่อประเมินการรับน้ำหนักของเสาเข็มเดียว โดยการเพิ่มน้ำหนักด้วยแม่แรงไฮโดรลิก ที่วางอยู่บนหัวเสาเข็ม แล้วทำการวัดค่า การทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ

การทดสอบ Compression Load Test นี้ แบ่งตามลักษณะของการติดตั้งได้ 3 ลักษณะดังนี้

1.1 การทดสอบโดยใช้เสาเข็มสมอเป็นแรงปฏิกิริยา (Anchor Pile Reaction System) ในกรณีนี้คานปฏิกิริยาจะถูกยึดติดกับเสาเข็มสมอ ซึ่งอาจจะเป็น 4, 6, 8 หรือ 10 ต้น แล้วแต่ความเหมาะสม (ตามภาพประกอบ)

1.2 การทดสอบโดยใช้น้ำหนักบรรทุกคงที่เป็นแรงปฏิกิริยา (Counter Weight System, Kentage) เป็นการติดตั้งโดยใช้ก้อนน้ำหนักบรรทุกคงที่ซึ่งมากกว่าน้ำหนักบรรทุกที่จะทดสอบ วางทับบนแม่แรงไฮโดรลิก เป็นแรงปฏิกิริยา (ตามภาพประกอบ)

1.3 การทดสอบโดยวิธีผสม (Combine Reaction System) เป็นการนำวิธีที่ 1.1 และ 1.2 มารวมกัน (ตามภาพประกอบ)

2. การทดสอบแรงดันด้านข้าง (Lateral Load Test)

เป็นการทดสอบเพื่อประเมินความสามารถของเสาเข็มที่ออกแบบรับ แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Load) โดยการติดตั้งแม่แรงไฮโดรลิก ในแนวนอนดันกับเสาเข็มทดสอบ ให้เคลื่อนตัวในแนวราบพร้อมวัดค่าการเคลื่อนตัวที่แรงดันต่างๆ (ตามภาพประกอบ)

3. การทดสอบแรงดึงในแนวตั้ง (Vertical Tension Test, Uplift test)

ในบางกรณีเสาเข็มต้องรับแรงดึง ซึ่งสามารถทดสอบหาพฤติกรรมของการรับแรงได้ โดยติดตั้งแม่แรงไฮโดรลิกเหนือคานทดสอบ ซึ่งวางอยู่บนเสา Support หรือพื้นดิน วัดค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มทดสอบ ที่แรงดึงต่างๆ (ตามภาพประกอบ)

วิธีการทดสอบ และมาตรฐานในการทดสอบ

วิธีการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะใหญ่ ตามลักษณะของการเพิ่มน้ำหนักทดสอบ ดังนี้

1. การทดสอบ Slow Maintain Load Test (SL-Test) เป็นการทดสอบโดยการเพิ่มน้ำหนักทดสอบ เป็นขั้นๆ 8-12 ขั้นจนกว่าจะถึงน้ำหนักทดสอบสูงสุด แต่ละขั้นต้องรักษาน้ำหนักทดสอบดังกล่าวไว้จนกว่าจะสอดคล้องกับข้อกำหนด (Stability Criteria) มาตรฐานที่กำหนดการทดสอบการลักษณะนี้ อาทิเช่นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1143-81 หัวข้อ 5.1 “Standard Loading Procedure” หรือตามมาตรฐาน มยธ.106

2. การทดสอบแบบ Quick Maintain Load Test (ML-Test) หรือเรียกว่า Quest Test เป็นการทดสอบที่กำหนดเพิ่มน้ำหนักทดสอบเป็นขั้นๆ เช่นเดียวกับ SL-Test แต่รักษาน้ำหนักทดสอบในแต่ละขั้นเพียง 10-15 นาที การทดสอบนี้ตรงตามมาตรฐาน ASTM D 1143-81 หัวข้อ “Quick Load Test”

3. การทดสอบแบบ Constant Rate of Penetration (CRP-Test) การทดสอบด้วยวิธีนี้จะต้องเพิ่มน้ำหนักทดสอบให้เกิดการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบอย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตราการทรุดตัวประมาณ 0.50-1.00 มม./นาที จนกว่าเสาเข็มจะถึงจุด Failure หรือ ถึงน้ำหนักทดสอบสูงสุด

4. การทดสอบแบบ Cyclic Load Test (CL-Test) เป็นการทดสอบ ที่อาจจะนำเอาการทดสอบหัวข้อใดหัวข้อหนึ่งหรือทั้ง 3 หัวข้อมาประกอบกันทำการทดสอบเป็นรอบๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มที่น้ำหนักทดสอบต่างๆ โดยละเอียด การทดสอบวิธีนี้เป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน เพราะให้รายละเอียดพฤติกรรมของเสาเข็มชัดเจน

ตัวอย่างข้างท้ายนี้เป็นการกำหนดวิธีการทดสอบแบบ Cyclic Loading โดยนำการทดสอบทั้ง 3 หัวข้อมารวมกัน

รอบที่ 1 (SL-Test)

0% --> 25% --> 50% --> 75% --> 100% (*) --> 50% --> 25% --> 10%

รอบที่ 2 (ML-Test)

0% --> 25% --> 50% --> 75% --> 100% (*) --> 125% --> 150% --> 175%
--> 200% --> 225% --> 250% --> 200% --> 150% --> 100% --> 50% --> 0%

รอบที่ 3 (CRP-Test)

0% -----> Failure -----> 0%

หมายเหตุ น้ำหนักทดสอบแต่ละข้อกำหนดเป็น % ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ

ข้อกำหนด

1. รักษาน้ำหนักทดสอบในแต่ละขั้นของรอบที่ 1 จนกว่าอัตราการทรุดตัวจะน้อยกว่า 0.25 มม./ชม. แต่ไม่เกิน 2 ชม. (ASTM D 1143)
2. รักษาน้ำหนักทดสอบสูงสุดในรอบที่ 1 (100%) เป็นเวลา 24 ชม.
3. รักษาน้ำหนักทดสอบในแต่ละขั้นของรอบที่ 2 เป็นเวลา 10 นาที

ชุดเครื่องมือทดสอบประกอบด้วย

1. คานรับแรงปฏิกิริยา (Reaction Beam) เป็นคานเหล็กซึ่งได้รับการออกแบบมาเพื่อยึดติดกับเสาเข็มสมอ หรือรองรับก้อนน้ำหนักบรรทุกคงที่ ต้องมีความสามารถที่จะรับน้ำหนักทดสอบได้ไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของน้ำหนักทดสอบสูงสุด
2. แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) เป็นอุปกรณ์เพิ่มน้ำหนักทดสอบแก่เสาเข็ม อาจใช้เพียง 1 ชุด หรือหลายชุดรวมกันตามความเหมาะสมของน้ำหนักทดสอบ เช่นเดียวกัน แม่แรงไฮดรอลิกควรที่กำลังรวมกันไม่น้อยกว่า 1.2 เท่าของน้ำหนักทดสอบสูงสุด

3. บอลเบริง (Ball bearing) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ลดแรงดัด (Bending Moment) ที่อาจเกิดขึ้นจากข้อผิดพลาดในการติดตั้งคานทดสอบหรือจากการตอกเสาเข็ม ทั้งนี้เพื่อให้แรงที่กระทำต่อเสาเข็มทดสอบมีเฉพาะแรงในแนวดิ่ง
4. ไดอัลเกจ (Dial Gauges) เป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม มีความละเอียดถึง 0.01 มม. นิยมติดตั้งพร้อมกัน 4 ตัว ทำมุม 90 องศา รอบเสาเข็มทดสอบ
5. คานอ้างอิง (Referenced beam) เป็นคานเหล็กติดตั้งขนานเสาเข็มทดสอบ วางบนฐานที่มั่นคง, แข็งแรง และแยกเป็นอิสระจากเสาเข็มทดสอบ คานอ้างอิงนี้ปลายข้างหนึ่งควรมียึดติดแน่น ในขณะที่อีกข้างหนึ่งปล่อยให้อยู่โดดๆ, หดตัวได้อย่างอิสระ
6. กล้องระดับ (Leveling) ติดตั้งวัดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มทดสอบ, คานอ้างอิง, เสาเข็มสมอ เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในกรณีที่เกิดปัญหาในการวัดด้วย Dial Gauge
7. ลวดเปียโน (Piano Wire) เป็นอุปกรณ์ช่วยวัดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มทดสอบอีกชนิดหนึ่งเพื่อให้เป็นอ้างอิง เช่นเดียวกับข้อ 6

ผลการทดสอบ

รายงานการทดสอบกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มแบบ Static Load Test ควรจะประกอบไปด้วย

1. ตารางแสดงข้อมูลการทดสอบ เช่น เวลา น้ำหนักบรรทุก การทรุดตัว และอื่นๆ
2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุก-การทรุดตัว และน้ำหนักบรรทุกการคืนตัว
3. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลา-น้ำหนักบรรทุก
4. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลา-การทรุดตัว และเวลา-การคืนตัว
5. สรุปผลการทดสอบ

2.2.2. Dynamic Load Test

การทดสอบโดยวิธีนี้อิงตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM D 4945-89 การทดสอบโดยวิธีนี้ค่อนข้างทำได้สะดวกรวดเร็ว ใช้เวลาทดสอบสั้นซึ่งสามารถทำเสร็จได้ภายในวันเดียวเลย ซึ่งปัจจุบันการทดสอบโดยวิธีนี้กำลังได้รับความนิยมในประเทศไทย แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการทดสอบโดยวิธีนี้ก็มีข้อเสียตรงที่ผลที่ได้อาจมีค่าผิดพลาดสูงถึง 30% ประกอบกับการแปรผลที่ได้จากการทดสอบต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของผู้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลรวมถึงความสมบูรณ์ของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบด้วย

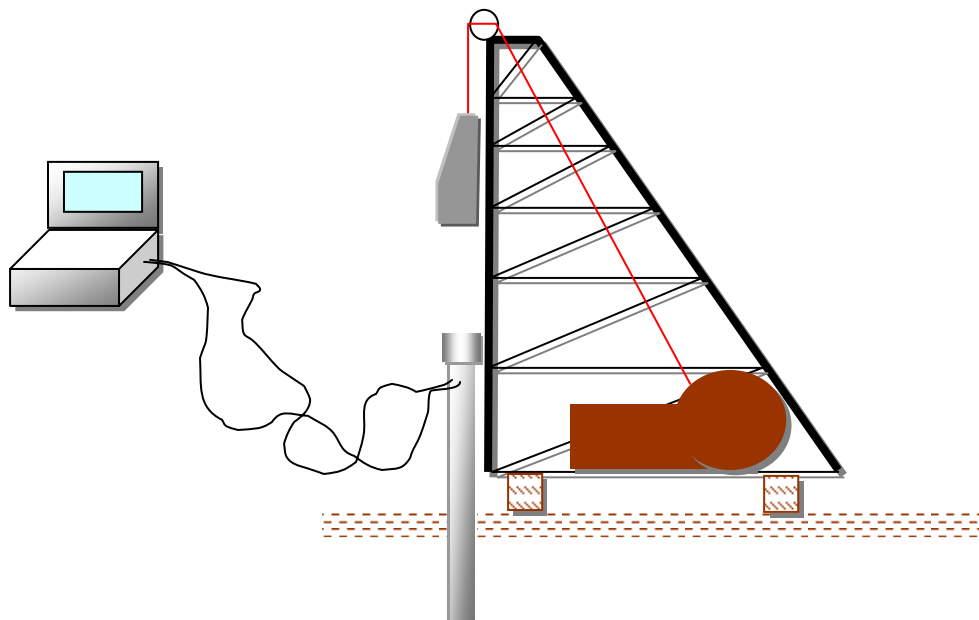
วิธีการทดสอบทำได้ในสองลักษณะคือ ทดสอบไปพร้อมๆกับการตอกเสาเข็ม และทดสอบหลังจากตอกเสาเข็มแล้ว หลักการคือ(ดูรูปที่ 9 ประกอบ)ใช้การปล่อยให้น้ำหนักของลูกตุ้มหล่นลงไปกระทบกับหัวเสาเข็ม คลื่นสัญญาณข้อมูลที่เกิดหลังจากการตกกระทบของลูกตุ้ม

จะถูกส่งผ่านสายส่งสัญญาณทั้งสองที่ถูกติดตั้งไว้ก่อนการทดสอบที่บริเวณหัวเสาเข็ม ในรูปของสัญญาณคลื่นความถี่และระยะการทรุดตัวของเสาเข็มไปยังเครื่องบันทึกข้อมูลและประมวลผลที่ถูกควบคุมโดยวิศวกรผู้ทำการทดสอบ

ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลและแปลความหมายด้วยระบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งระบบโปรแกรมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลมีด้วยกันหลายระบบ แต่ที่นิยมใช้กันมากมีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบคือ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ CAPWAPC(Case Pile Wave Analysis Program Continuous Model) เป็นโปรแกรมจาก Pile Dynamic Inc. , USA.

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ TNO-Wave จากสถาบัน TNO for Building Materials and Building Structure ประเทศฮอลแลนด์



รูปที่ 9 แสดงการติดตั้งชุดทดสอบเสาเข็มรับแรงอัด(Dynamic Load Test)

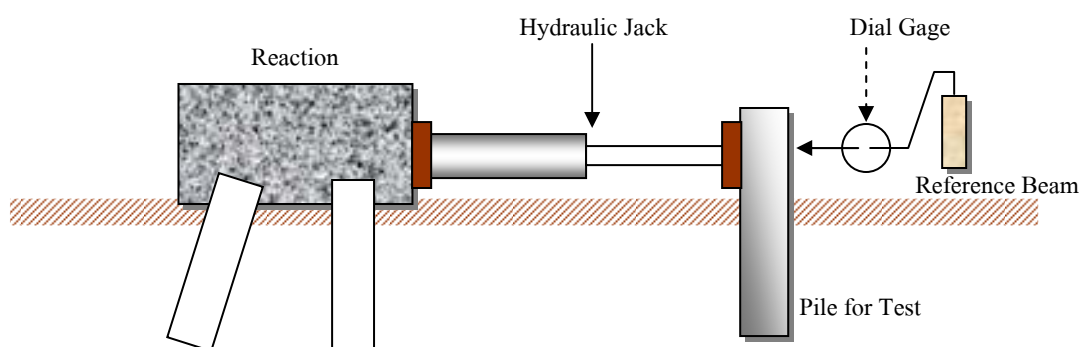
2.2.3.Statnamics Test

เป็นการทดสอบในรูปแบบใหม่ เสนอวิธีการโดยความร่วมมือระหว่าง TNO จากประเทศฮอลแลนด์ และ Bermingham hammer ชุดอุปกรณ์ทดสอบประกอบด้วยน้ำหนักจำนวนหนึ่งวางบนแท่นสูงอยู่บนแกนกลางที่มีรูตรงกลาง ซึ่งน้ำหนักดังกล่าวนี้มีไว้เพื่อดันแรงระเบิดเพื่อให้เกิดแรงปฏิกิริยากระทำบนหัวเสาเข็ม ที่ส่วนล่างจะมีห้องจุระเบิดซึ่งจะคล้ายกับเครื่องตอกเสาเข็มชนิดเครื่องดีเซล เมื่อมีการจุระเบิดน้ำหนักจะถูกยกขึ้นเนื่องจากแรงระเบิด ซึ่งมีขนาดสูงมากถึง 20g และทำให้เกิดแรงกระทำบนหัวเสาเข็มในช่วง 0.1 – 0.2 วินาที ซึ่งผลของแรงที่เกิดขึ้นจะทำให้ชุดอุปกรณ์ทั้งหมดรวมถึงเสาเข็มด้วย เกิดการทรุดตัวลงไปพร้อมๆ กันเหมือน

หนึ่งเป็นวัตถุชิ้นเดียวกัน น้ำหนักที่กระทำบนหัวเสาเข็มและค่าการทรุดตัวจะถูกตรวจวัดโดยอุปกรณ์ตรวจวัด แล้วเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง “น้ำหนัก – ค่าการทรุดตัว” ได้โดยตรง

2.3.การทดสอบแรงกระทำด้านข้าง

การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM D 3966-81 ซึ่งเป็นการทดสอบความสามารถในการรับแรงดันในแนวนอน แต่ว่าทั้งนี้ทั้งนั้นการทดสอบโดยวิธีดังกล่าวไม่ค่อยเห็นหรือแทบไม่เห็นมีการทดสอบในประเทศไทยเลย ขั้นตอนในการทดสอบ(ดูรูปที่ 10 ประกอบ)ไม่มีความยุ่งยาก แต่จะไปยุ่งยากกับการติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดสอบมากกว่า ซึ่งการทดสอบในลักษณะนี้อาจต้องมีการใช้เสาเข็มสมอ หรือชุดหลุมเพื่อใช้แรงจากผนังบ่อดิน หรือน้ำหนักมาก ๆ เพื่อสร้างแรงเสียดทานด้านข้างเมื่อถูกดันด้วย Hydraulic Jack



รูปที่ 10 แสดงการติดตั้งชุดทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้าง

2.4.การทดสอบความสมบูรณ์

ในที่นี้จะกล่าวถึงการทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็ม(Integrity Test) ซึ่งสามารถทำได้ในหลายวิธี คือ Acoustic tests(single และ double hold) , Radiometric test , Seismic or Sonic echo tests , Stress Wave tests , Dynamic Response tests และ Electric tests แต่ในประเทศไทยนิยมใช้การทดสอบโดยวิธี Sonic ซึ่งมีอยู่ด้วยกันใน 2 วิธีหลักๆคือ 1.Sonic Integrity 2.Sonic Logging

2.4.1.การทดสอบโดยวิธี Sonic Integrity

(ดูรูปที่ 11 ประกอบ)เป็นวิธีการทดสอบโดยใช้ฆ้อนขนาดเล็กเคาะไปที่บริเวณหัวของเสาเข็ม ผลจากการเคาะจะก่อให้เกิดคลื่นสั่นสะเทือนวิ่งลงสู่ปลายของเสาเข็ม แล้วสะท้อนกลับมายังหัวเสาเข็ม



รูปที่ 11 แสดงการทดสอบโดยวิธี Sonic Integrity

③ ทดสอบกำลังของโครงสร้าง

3.1.การทดสอบแบบทำลาย(Destructive test)

3.1.1.Core testing

การทดสอบด้วยวิธีนี้ เป็นการทดสอบคุณภาพของคอนกรีตด้านกำลังรับแรงอัด (f_c') โดยการเจาะเอาแท่งตัวอย่างตรงบริเวณที่ต้องการทราบค่าดังกล่าวไปทดสอบ ด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐานของ ASTM C 39 และ ASTM C 42 ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นกำลังที่แท้จริงในขณะนั้นๆของโครงสร้าง การทดสอบโดยวิธีนี้ควรใช้ควบคู่กับเครื่องมือสำหรับหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเสริม(มักเรียกว่า Pachometer) ไม่เช่นนั้นขณะทำการเจาะเพื่อเก็บแท่งตัวอย่าง เหล็กเสริมคอนกรีตอาจถูกทำลายหรือถูกตัดขาดได้ ซึ่งจะเป็นการยิ่งช่วยเพิ่มปัญหาขึ้นไปอีก ข้อควรระวังอีกประการหนึ่งซึ่งสำคัญมากคือ แท่งตัวอย่างที่จะทำการทดสอบควร

เตรียมสภาพของแท่งตัวอย่าง ให้เหมือนกับสภาพที่เป็นจริงของโครงสร้างในสภาพการใช้งานจริง และจำนวนของแท่งตัวอย่างที่ทำการทดสอบไม่ควรใช้น้อยกว่า 3 ตัวอย่างจากจุดเก็บตัวอย่างบริเวณเดียวกัน



รูปที่ 12 แสดงชุดอุปกรณ์การเจาะแก่นคอนกรีต

ชุดเครื่องมือทดสอบประกอบด้วย(ดูรูปที่ 12 ประกอบ)

เครื่องเจาะแก่นเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต(Core Drilling Machine) ครอบอกเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต(Diamond Bit แบบ Core Barrel) และเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression Machine)

ส่วนแท่งตัวอย่างที่เก็บมาทดสอบ นั้นโดยทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 5 ซม. 10 ซม. และ 15 ซม. ส่วนความยาวของแท่งตัวอย่างนั้นตามมาตรฐานของ ASTM C 42 กำหนดให้ ให้อยู่ในช่วง 1 – 2.10 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง แต่ที่มักนิยมใช้จะอยู่ในช่วง 1 – 1.2 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ซึ่งถ้าหากว่าความยาวของแท่งตัวอย่างบวกกับความหนาของ cap หัวแท่งตัวอย่างอยู่ในช่วง 1.94 – 2.10 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบได้ก็ไม่จำเป็นต้องทำการปรับแก้ แต่ถ้าหากว่าความยาวของแท่งตัวอย่างบวกกับความหนาของ cap หัวแท่งตัวอย่างอยู่ในช่วง 1.0 – 1.93 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบได้ จำเป็นจะต้องทำการปรับแก้ค่าก่อนดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าตัวเลขปรับแก้กำลังรับแรงของแท่งทดสอบที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนของ ความยาว/เส้นผ่าศูนย์กลาง	ค่าปรับแก้กำลังของ แท่งตัวอย่างคอนกรีต
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.0	0.87

3.2.การทดสอบแบบกึ่งทำลาย(Semi-destructive test)

3.2.1.Pull-out test

วิธีที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นวิธีที่ทำการดัดแปลงมาจากวิธี Pull-out Test เรียกว่า Internal Fracture Test โดยการทดสอบดังกล่าวอิงจากมาตรฐานของ BS 1881 : Part 207 วิธีการทดสอบ(ดูรูปที่ 13 ประกอบ)นี้อาศัยหลักการพื้นฐานในการวัดค่าแรงดึงที่ทำให้คอนกรีตรอบๆ Anchor Bolt เกิดการ Failure เป็นรูปกรวยหรือโคน(Conic Fracture Surface) ขนาดประมาณ 17 มม. x 75 มม. แล้วจึงนำไปแปรผลเป็นค่ากำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต

ชุดเครื่องมือทดสอบประกอบด้วย

1. Anchor Bolt ขนาด M6(6 มม.) ตามมาตรฐาน ISO หรือ BS 3643 : Part 1
2. Circular Reaction Stand ซึ่งเป็นวงแหวนเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในไม่น้อยกว่า 80 มิลลิเมตร ใช้สำหรับวางครอบตำแหน่งติดตั้ง Anchor Bolt เพื่อถ่ายแรงปฏิกิริยาในขณะทดสอบ
3. Loading System เป็นชุดอุปกรณ์เพิ่มแรงดึงใน Anchor Bolt ซึ่งอาจเป็น Hydraulic Jack หรือ Skew Jack ก็ได้ ซึ่งชุดอุปกรณ์ดังกล่าวต้องมีความละเอียด $\pm 3\%$ และผ่านการสอบเทียบมาก่อนแล้ว
4. ส่วนไฟฟ้าและชุดทำความสะอาดรูเจาะ

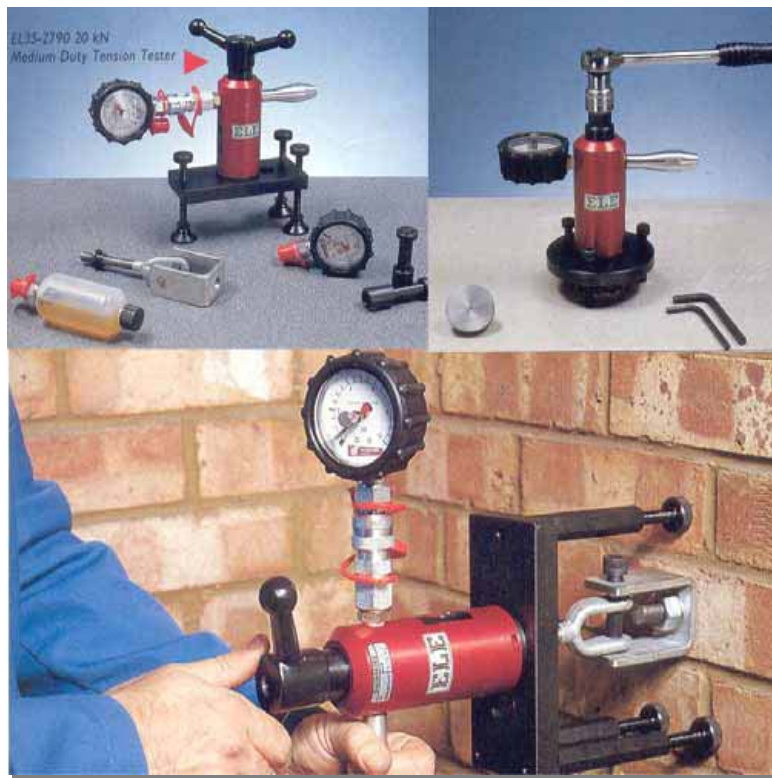
เทคนิคและวิธีการทดสอบ

เริ่มจากการเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.10 – 6.40 มิลลิเมตร และลึกประมาณ 30 – 35 มิลลิเมตร ทำความสะอาดฝุ่นผงรูที่เจาะแล้วด้วย Air Blower จากนั้นทำการติดตั้ง Anchor Bolt ให้ตำแหน่งขอบล่างของช่องขยายตัว(Expanding Sleeve) อยู่ที่ความลึกประมาณ 20 มิลลิเมตร จากนั้นทำการติดตั้ง Reaction Stand และ Loading System แล้วเริ่มทำการทดสอบโดย

การเพิ่มแรงดึงอย่างต่อเนื่องจนจนกระทั่งเกิดการ Failure ให้ทำการบันทึกค่าแรงดึงสูงสุดที่ใช้เพื่อนำไปแปรผลเป็นค่ากำลังอัดสูงสุดต่อไป

ตำแหน่งทดสอบควรอยู่ห่างกันไม่น้อยกว่า 150 มิลลิเมตร และห่างจากขอบของค้ำอาคารไม่น้อยกว่า 75 มิลลิเมตร และ Conic Cone ควรอยู่ห่างจากตำแหน่งเหล็กเสริมเพียงพอ

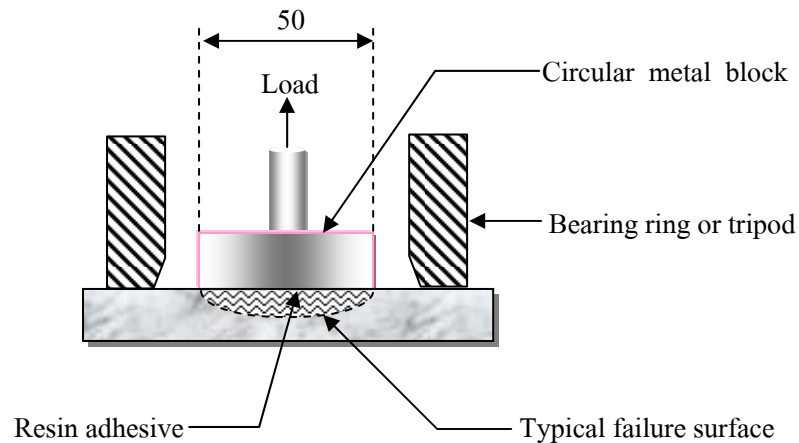
เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวได้ทำการดัดแปลงมาจากวิธีการทดสอบ Pull Out Test โดยพยายามที่จะทำให้เกิด Failure Surface ในลักษณะใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามแต่การแปรผลจากการทดสอบโดยวิธีดังกล่าวไปเป็นค่ากำลังอัดสูงสุดจำเป็นต้อง มีการสอบเทียบเพื่อประเมินความสัมพันธ์ขึ้นเองสำหรับแต่ละชนิดของ Anchor Bolt ที่นำมาทดสอบ



รูปที่ 13 แสดงชุดอุปกรณ์ทดสอบ Pull-out test

3.2.2. Pull-off test

อ้างอิงตามมาตรฐานของ BS 1881 : Part 207 เป็นการทดสอบด้วยการดึงแผ่นโลหะที่ยึดติดกับเนื้อของคอนกรีตด้วย Adhesive ให้หลุดหรือถอนออกมาพร้อมกับเนื้อของคอนกรีต แล้วประเมินกำลังรับแรงอัดจากหลักการที่ว่า แรงดึงที่ใช้ในการดึงดังกล่าวมีนัยสำคัญโดยตรงกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต(ดูรูปที่ 14 ประกอบ)



รูปที่ 14 แสดงลักษณะการทดสอบโดยวิธี Pull-off Test

ชุดเครื่องมือทดสอบประกอบด้วย

1. Metal Block เป็นแผ่นโลหะรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 – 70 มิลลิเมตร ความหนาไม่น้อยกว่า 40% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง
2. Bearing ring มีลักษณะเป็นวงแหวนเหล็ก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในโตกว่า Metal Block เล็กน้อย เพื่อใช้ถ่ายแรงปฏิกิริยาในระหว่างการทดสอบ
3. Loading System เป็นอุปกรณ์เพิ่มแรงดึง ซึ่งติดตั้งอยู่บน Bearing ring อีกทีหนึ่ง อาจเป็น Hydraulic Jack หรือ Skew Jack ก็ได้

เทคนิคและวิธีการทดสอบ

เริ่มด้วยการขัดผิวคอนกรีตให้เรียบแล้วทำความสะอาด ก่อนทำการติดตั้งชุดเครื่องมือทดสอบ คือ Metal Block ด้วย Adhesive ที่เหมาะสม ซึ่งอาจจะเป็น Epoxy Resin หรือ Polymer Resin เมื่อ Adhesive เริ่ม Set ตัวตามเวลาที่กำหนดแล้ว(โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 15 – 24 ชั่วโมง) ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบอื่นๆ คือ Bearing ring , Loading System ยึดติดกับ Metal Block แล้วเริ่มทำการทดสอบโดยการ เพิ่มแรงดึงให้กับ Metal Block อย่างสม่ำเสมอจนกระทั่ง Metal Block หลุดออกมาพร้อมกับเนื้อของคอนกรีต ก็ให้ทำการบันทึกค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด(Pull-of Stress) แล้วนำไปแปลผลออกมาเป็นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยอาศัยสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pull-of Stress กับกำลังรับแรงอัดสูงสุด โดยตำแหน่งของแต่ละจุดที่จะทำการทดสอบต้องห่างกันอย่างน้อย 2 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของ Metal Block และต้องมีระยะห่างจากขอบขององค์อาคารไม่น้อยกว่า 1 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของ Metal Block โดยทั่วไปการทดสอบด้วยวิธีนี้จะไม่ได้รับผลกระทบจากเหล็กเสริม ถึงแม้ว่าจุดทดสอบจะอยู่ตรงตำแหน่งของ

เหล็กเสริม ยกเว้นกรณีของการทำ Core ตัดเนื้อคอนกรีตรอบ Metal Block ออกก่อน(Partial Core) จึงควรหลีกเลี่ยงไม่ให้อยู่ตรงตำแหน่งของเหล็กเสริม

การแปรผลที่ได้จากการทดสอบ

เนื่องจากค่าหน่วยแรงเค้นดึง(Tension Stress)ที่ประเมินได้จากการทดสอบ ไม่ใช่ค่า Tensile Strength ของคอนกรีตโดยตรง ดังนั้นการแปรผลจะต้องมีการปรับแก้โดยการสอบเทียบความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยตรง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวม ขนาดและความหนาของ Metal Block

การทดสอบ Pull-off test นี้ สามารถนำไปประยุกต์เพื่อทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ 2 ชนิด หรือที่เรียกว่า Bond Test ยกตัวอย่างเช่น ระหว่างสารเคลือบ(Coating Material)กับผิวของคอนกรีต หรือระหว่างวัสดุเชื่อมกับคอนกรีตเดิม เป็นต้น การทดสอบ Pull-off แบบ Bond Test นี้จำเป็นจะต้องเจาะตัดผิวคอนกรีตรอบ Metal Block ให้ขาดจากเนื้อคอนกรีตโดยรอบ ก่อนเพิ่มแรงดึง

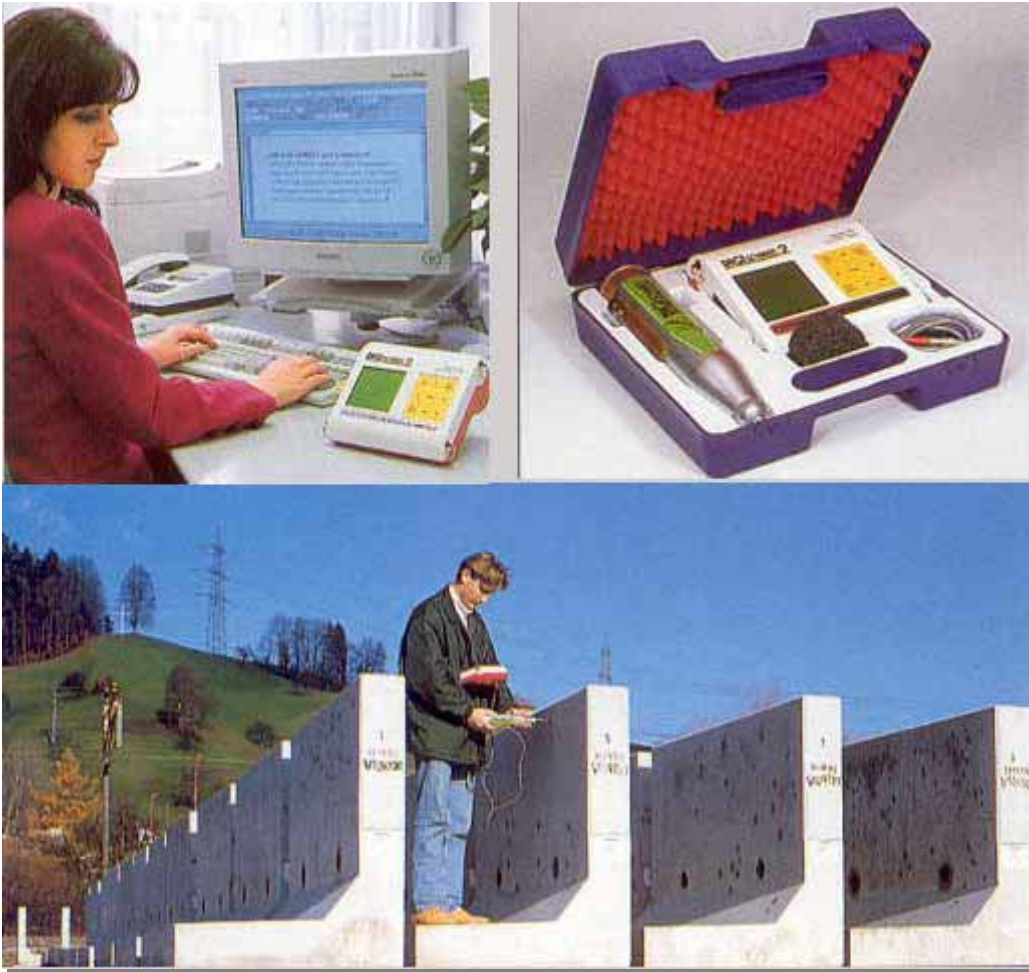
3.3.การทดสอบแบบไม่ทำลาย(Non-destructive test)

3.3.1.Schmidt Hammer Or Rebound Hammer

เป็นเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัย(f_c')ที่เก่าแก่ชนิดหนึ่ง ได้ถูกคิดค้นขึ้นในปี พ.ศ.2483 – 2492 โดย Mr.Ernst Schmitd(รูปที่ 15 ประกอบ) ลักษณะเด่นของเครื่องมือชนิดนี้คือ มีขนาดเล็กกระทัดรัด พกพาได้สะดวกและทำการทดสอบได้โดยง่ายในคราวหลายๆ ตัวอย่าง โดยการทดสอบโดยทั่วไปมักนิยมใช้มาตรฐานการทดสอบของ ASTM C 805 และมาตรฐานการทดสอบของ BS1881 Part 202



รูปที่ 15-1 แสดงชุดทดสอบ Schmidt Hammer



รูปที่ 15-2 แสดงชุดทดสอบ Schmidt Hammer

หลักการทำงานก็โดยอาศัยหลักการวัดค่าดัชนีสะท้อนกลับ(Rebound Number) ที่เกิดจากการยิงหรือกดก้านทดสอบ(Plunger) โดยที่กระบอกทดสอบตั้งฉากกับผิวของแท่งตัวอย่างหรือผิวหน้าของจุดที่ต้องการทดสอบ แรงกระแทกจากสปริงภายในจะทำให้ก้านทดสอบสะท้อนกลับ โดยค่าดัชนีดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของคอนกรีตหรือความสามารถในการดูดซับพลังงานของคอนกรีต โดยหลักการคือคอนกรีตที่แข็งแรงกว่าจะมีค่าของดัชนีสะท้อนกลับที่สูงกว่า

จะเห็นว่าจากวิธีการทดสอบตามมาตรฐานทั้ง 2 และวิธีการอ่านค่าและประเมินผล ทำให้กรรมวิธีการทดสอบดังกล่าวทำได้โดยสะดวกและรวดเร็ว แต่เหมาะสำหรับการทดสอบเพื่อประเมินผลในเบื้องต้นเท่านั้น ทั้งนี้เพราะการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวไม่สามารถที่จะประเมินค่ากำลังกำลังอัดประลัย(f_c')ได้โดยตรง แต่ต้องอาศัยการแปลความหมายของผลที่ได้จากการทดสอบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสบการณ์และประสาทสัมผัสของผู้ทำการทดสอบเองเป็นหลัก กอปรกับผลการทดสอบที่วัดได้เป็นเพียงค่าที่อยู่ใกล้กับบริเวณผิวที่ทดสอบเท่านั้น ซึ่งไม่อาจเป็นตัวแทนของค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัยตลอดหน้าตัดได้

ชุดเครื่องมือทดสอบประกอบด้วย

ชุดทดสอบ Rebound Hammer ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายขนาดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ เช่น

1. Type P , PM : ให้พลังงานกระแทก 0.883 Nm. ซึ่งเหมาะสำหรับการทดสอบวัสดุเบา เช่น ผนังก่ออิฐ ไม้ เป็นต้น
2. Type N : ให้พลังงานกระแทก 2.207 Nm. ซึ่งเหมาะสำหรับการทดสอบโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กและสะพาน
3. Type M : ให้พลังงานกระแทก 29.43 Nm. ซึ่งเหมาะสำหรับการทดสอบโครงสร้างประเภท Mass Concrete เช่น สนามบิน , ผิวถนน เป็นต้น

หลักการทดสอบที่สำคัญและต้องใส่ใจเป็นอย่างมากคือ

การเตรียมผิวตัวอย่างทดสอบ ซึ่งตามมาตรฐานระบุให้ใช้พื้นที่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 15 ซม. / 1 จุดทดสอบ ที่สำคัญคือพื้นผิวที่เตรียมจะต้องจัดให้เรียบและต้องเป็นเนื้อแท้ๆของโครงสร้าง ไม่ใช่ผิวที่ถูกฉาบหรือโปะเพื่อตกแต่งความสวยงาม

จำนวนครั้งในการกดหรือยิงทดสอบ / 1 จุดทดสอบ ควรอยู่ในช่วง 10 – 13 ครั้งโดยในแต่ละครั้งควรเว้นระยะห่างประมาณ 2.50 ซม.

ค่าดัชนีสะท้อนกลับที่ได้จากการยิงทดสอบในแต่ละครั้ง ไม่ควรมีค่าแตกต่างกันเกิน 12 และค่าดัชนีสะท้อนกลับใดๆที่มีค่าต่างจากค่าเฉลี่ยเกิน 6 ให้ตัดค่านั้นทิ้ง แล้วนำค่าเฉลี่ยที่เหลือไปใช้งาน แต่ถ้าค่าดัชนีสะท้อนกลับใดๆที่มีค่าต่างจากค่าเฉลี่ยเกิน 6 อยู่มากกว่า 2 ค่า ให้ทำการทดสอบที่จุดทดสอบนั้นใหม่

หลังจากนั้นนำค่าเฉลี่ยของ Rebound Hammer ที่ตรวจสอบได้มาหาค่า Strength of Concrete จากกราฟที่ใช้ในการปรับค่า

3.3.2.Ultrasonic Pulse Velocity Test

(ดูรูปที่ 16 ประกอบ)เป็นการตรวจสอบคอนกรีตด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Pundit(Portable Ultrasonic Non Destructive Integrity Test) เป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM C 597 และ BS 1881 : Part 203 ซึ่งวิธีการทดสอบดังกล่าวไม่ได้หมายความว่า เป็นการทดสอบหาค่ากำลังของคอนกรีต(Strength)หรือค่าของ Elastic Modulus ของคอนกรีตได้โดยตรง แต่จะเป็นการหาความต่อเนื่องของคอนกรีต ความเปลี่ยนแปลงของคุณภาพของคอนกรีตเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ทั้งนี้เพื่อทำนายระยะความเสียหายที่ผิวของคอนกรีต และความลึกของรอยร้าว

หลักการทำงานของเครื่อง Pundit ก็โดยการอาศัยคุณสมบัติของคลื่น Ultrasonic ทั้งนี้เนื่องจากคลื่นประเภทนี้มีควมถี่สูงจึงสามารถเดินทางทะลุทะลวงคอนกรีตหนาๆได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นการทดสอบโดยวิธีนี้จึงเหมาะสำหรับการทดสอบกับองค์อาคารต่างๆ คลื่น Ultrasonic ดังกล่าวถูกสร้างขึ้นจากเครื่อง Pulse Generator แล้วถูกส่งจากตัวส่งสัญญาณ(Transmitted Transducer) ผ่านเนื้อของคอนกรีตไปสู่ตัวรับสัญญาณ(Receiving Transducer) หลังจากนั้นเครื่องจะทำการแปลงสัญญาณที่ได้รับออกมาเป็นเวลาในการเดินทางผ่านเนื้อคอนกรีต ในหน่วยการวัดคือ microseconds และเมื่อทราบระยะเวลาและระยะทางในการเดินทางของคลื่น เราก็สามารถแปลงค่าดังกล่าวมาอยู่ในรูปของความเร็วของคลื่น(Longitudinal Pulse Velocity ; V)ได้จากสมการ

$$V = L / T$$

ซึ่งการแปลงผลการทดสอบอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่น(Pulse Velocity ; V) กับค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด(f_c') โดยผลการทดสอบดังกล่าวจะเป็นค่ากำลังอัดเฉลี่ยตลอดหน้าตัดที่ทำการทดสอบ(เฉลี่ยระหว่างระยะห่างของหัววัดสัญญาณ)

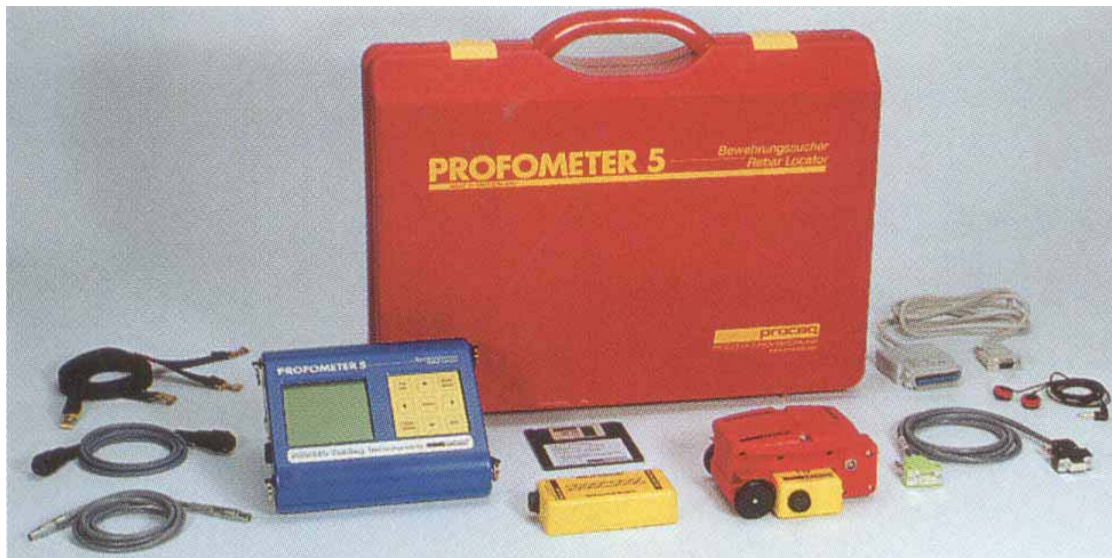
ในบางกรณีนั้นเวลาที่เราวัดได้จากการทดสอบ จำเป็นต้องมีการนำมาปรับแก้ไขก่อนอันเนื่องมาจาก Factors ในการทดสอบบางตัว เช่น อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมในขณะทดสอบ คลื่นบางส่วนที่วิ่งผ่านเหล็กเสริมคอนกรีต ชนิดของปูนซีเมนต์ ชนิดของมวลรวมผสม ค่าความชื้นของเนื้อคอนกรีตขณะทดสอบ รวมถึงความเรียบรอยของผิว ในกรณีที่มีโพรงอากาศหรือรอยแตกร้าว จะมีผลทำให้ค่าความเร็วคลื่นที่วัดได้มีค่าลดต่ำลงอย่างมาก เหล่านี้เป็นต้น

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

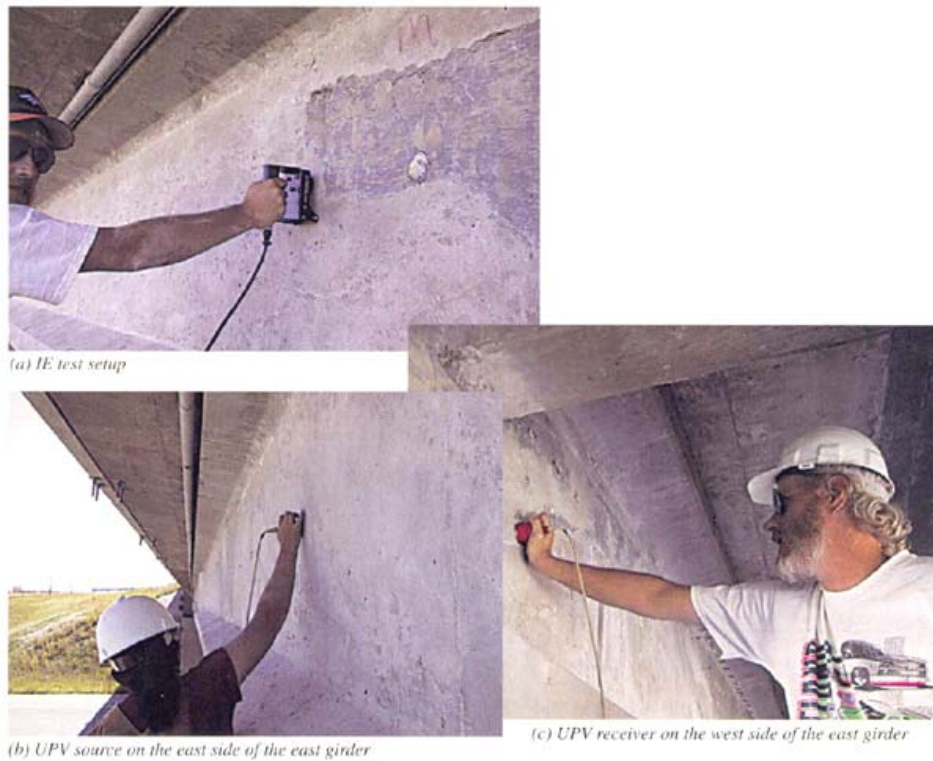
1. เครื่อง Pundit Test(Portable Ultrasonic Non Destructive Integrity Tester)
2. เครื่อง Pachometer ใช้ในการหาระยะที่คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม และหาตำแหน่งการวางตัวของเหล็กเสริม



รูปที่ 16-1 แสดงชุดทดสอบ Ultrasonic Pulse Velocity



รูปที่ 16-2 แสดงชุดทดสอบหาตำแหน่งและระยะของเหล็กเสริม



รูปที่ 16-3 แสดงการทดสอบโดยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity Test

วิธีการทดสอบ

1. ทำการสุ่มเลือกจุดที่จะทำการทดสอบในแบบแปลน
2. ในการทดสอบจะต้องกระทำต่อผิวที่เป็นเนื้อแท้ของโครงสร้างเท่านั้น ฉะนั้นจึงต้องมีการสกัดเอาผิวปูนฉาบออกให้หมดในจุดที่จะทดสอบ จากนั้นให้ทำการขัดผิวหน้าจุดทดสอบให้เรียบ แล้วกำหนดจุดที่จะทำการติดตั้งหัวรับ-ส่งสัญญาณทั้งสอง
3. นำเครื่อง Pachometer มาหาระยะของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม และตำแหน่งของเหล็กเสริมที่จุดทั้งสอง แล้วบันทึกค่าลงในตารางการทดสอบ
4. ก่อนการทดสอบให้ทำการ Calibration เครื่อง Pundit Test ตามคู่มือ
5. ทาจารบี หรือ Conductivity Gel Echotrace 900 ระหว่างหัวรับ-ส่งสัญญาณทั้งสอง
6. เริ่มทดสอบโดยการส่งคลื่นอัลตราโซนิกจากหัวส่งสัญญาณ ผ่านเนื้อคอนกรีตไปยังหัวรับสัญญาณ จากนั้นอ่านค่าระยะเวลาที่คลื่นผ่าน (Transit Time ; T) จำนวน 5 ครั้ง แล้วจดค่าลงในตารางการทดสอบพร้อมกับระยะทางที่ปล่อยให้คลื่นเคลื่อนผ่าน (Path Length ; L) อย่างละเอียด

7. คำนวณหาค่าความเร็วของคลื่น (Longitudinal Pulse Velocity ; V) จากสมการ

$$V = L / T$$

8. ทำการปรับแก้ค่าความเร็วของคลื่น(Longitudinal Pulse Velocity ; V) อันเนื่องมาจากปัจจัยแวดล้อมต่างๆ ที่อาจส่งผลต่อค่าของความเร็วที่วัดค่าได้ ดังได้กล่าวมาแล้ว
9. นำค่าความเร็วของคลื่น(Longitudinal Pulse Velocity ; V) ที่ทำการปรับแก้แล้วมาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาคุณภาพของคอนกรีต และหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยประมาณ ซึ่งตามมาตรฐานของ BS 1881 : Part 203 ได้ระบุวิธีการหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจากผลการทดสอบวิธีดังกล่าวคือ ต้องสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ Ultrasonic Pulse Velocity Test กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างด้วยการทำ Core Test แล้วจึงใช้กราฟความสัมพันธ์นี้ในการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตของโครงสร้างอื่นๆ

③ การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างจริง(Building Load Test)

ในที่นี้หมายถึงการทดสอบเพื่อให้ทราบว่า โครงสร้างนั้นๆมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจร(Live Load) ตามเทศบัญญัติของกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2522 ได้อย่างปลอดภัยตามมาตรฐานของ ACI Code 318-89 หรือไม่ ซึ่งการทดสอบดังกล่าวต้องอาศัยวิศวกรผู้เชี่ยวชาญและมีประสบการณ์ทางด้านนี้โดยเฉพาะ

ข้อกำหนดทั่วไปของการทดสอบ(General)

1. ในขณะทำการทดสอบต้องมีวิศวกรควบคุมดูแลอย่างใกล้ชิด
2. ส่วนของโครงสร้างที่จะทำการทดสอบ ต้องมีอายุไม่น้อยกว่า 56 วัน(นอกเสียจากว่าทางเจ้าของโครงการและผู้มีอำนาจในการรับทั้งหมด ให้ความเห็นชอบและให้ทำการทดสอบได้)
3. ในการทดสอบควรเป็นการสุ่มทดสอบในส่วน of โครงสร้างที่คิดว่ามีปัญหา หรือมีปัญหาที่วิกฤตที่สุดหรือแข็งแรงน้อยที่สุด
4. น้ำหนักบรรทุกคงที่(Dead Load)ของโครงสร้างที่จะมีผลต่อโครงสร้างในส่วนที่กำลังทำการทดสอบ ต้องไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงและอยู่คงที่ก่อนการทดสอบเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 48 ชั่วโมง

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. Displacement Transducer ที่สามารถวัดค่าได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตรพร้อมด้วยสายรับสัญญาณ

2. Dial Gauge ขนาดก้านยาว 1 เซนติเมตรหรือมากกว่า อ่านค่าความละเอียดได้ถึง 0.01 มิลลิเมตร
3. Data Logger ใช้อ่านค่าและบันทึกค่าจาก Displacement Transducer
4. Magnetic Holder ใช้สำหรับยึดจับ Displacement Transducer และ Dial Gauge

การจัดวางน้ำหนักบรรทุก

วัสดุที่จะนำมาใช้เป็นน้ำหนักบรรทุกมีได้ในหลายประเภท เช่น น้ำ ปูนซีเมนต์ หิน-ทราย อิฐ ฯลฯ แต่ที่นิยมใช้คือน้ำทั้งนี้เพราะน้ำจัดหาและเตรียมได้โดยง่าย ราคาถูก และที่สำคัญคือน้ำสามารถทำการใส่หรือจัดวางและปลดออกได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว เพราะหากว่าในขณะที่ทำการทดสอบเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน เช่นหากพบว่าในขณะที่ทดสอบ โครงสร้างกำลังเกิดการแอ่นตัวมากผิดปกติและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เราก็สามารถปลดน้ำหนักทดสอบออกได้อย่างทันที ก่อนที่โครงสร้างจะเกิดการเสียหายอันอาจเป็นสาเหตุนำไปสู่การวิบัติในอนาคตเนื่องเพราะการทดสอบได้

การจัดวางและขนาดของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่จะใช้ทดสอบ จะเป็นไปตามมาตรฐานของ ACI 318-89 คือ

$$\text{Total Load} = 0.85 \times (1.4 \text{DL} + 1.7 \text{LL}) - \text{Dead Load}$$

ซึ่งน้ำหนักบรรทุกรวมดังกล่าวจะนำมาทำการแบ่งและจัดวางเป็น 4 ชั้นๆละเท่าๆกัน โดยมีลำดับของการจัดวางดังนี้

0% - 25% - 50% - 75% - 100%** - 50% - 0%**

การทดสอบและบันทึกค่าการแอ่นตัว

1. ให้ทำการบันทึกค่าการแอ่นตัว และอุณหภูมิ ก่อนทำการทดสอบบรรทุกน้ำหนัก
2. ทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็น 4 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นละ 25% ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด และจะทำการคั่งน้ำหนักของในแต่ละชั้นไว้ที่ 1 ชั่วโมง และจึงเริ่มทำการบันทึกค่าการแอ่นตัวและอุณหภูมิที่เวลา 0 , 5 , 15 , 30 และ 60 นาที
3. ที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่มีเครื่องหมายดอกจัน(**) จะคั่งน้ำหนักบรรทุกไว้ 24 ชั่วโมง และจึงเริ่มทำการบันทึกค่าการแอ่นตัวและอุณหภูมิที่เวลา 0 , 5 , 15 , 30 และ 60 นาที และต่อไปทุกๆ 1 ชั่วโมงจนกว่าจะครบ 24 ชั่วโมง

4. ค่าการแอ่นตัวที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดและคงน้ำหนักไว้ 24 ชั่วโมง จะเป็นค่า Initial Deflection หรือ Maximum Deflection แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นในขณะทดสอบโครงสร้างจะต้องไม่แสดงความเสียหายปรากฏให้เห็น คือ การแตกร้าว การขยายตัวหรือการแอ่นตัวของโครงสร้างมีมากจนสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยสายตา
5. ทำการปลดน้ำหนักบรรทุก(Re-bound Test Load) โดยทำการปลดน้ำหนักบรรทุกออก 50% ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด และคงน้ำหนักบรรทุกที่เหลือไว้ 1 ชั่วโมง และจึงเริ่มทำการบันทึกค่าการแอ่นตัวและอุณหภูมิที่เวลา 0 , 5 , 15 , 30 และ 60 นาที
6. ปลดน้ำหนักบรรทุกที่เหลือออกให้หมด(ขั้นที่มีเครื่องหมายดอกจัน(**)แสดงไว้) และคงน้ำหนักบรรทุกไว้ 24 ชั่วโมงและจึงเริ่มทำการบันทึกค่าการแอ่นตัวและอุณหภูมิที่เวลา 0 , 5 , 15 , 30 และ 60 นาที และต่อไปทุกๆ 1 ชั่วโมงจนกว่าจะครบ 24 ชั่วโมง
7. ค่าการแอ่นตัวที่วัดได้ หลังจากทำการปลดน้ำหนักบรรทุกออกหมดแล้ว และปล่อยให้คืนรูปอีก 24 ชั่วโมง จะเป็นค่า Final Deflection
8. ทำการคำนวณหาค่าการคืนตัว “Recovery of deflection” ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ Initial Deflection - Final Deflection
9. นำค่าการแอ่นตัวที่วัดและบันทึกไว้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก(Load)ที่ใส่กับค่าการแอ่นตัว(Total Deflection) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก(Load)ที่ใส่ , เวลา กับค่าการแอ่นตัว(Total Deflection) ที่ตำแหน่งที่เกิดการแอ่นตัวสูงสุด

เกณฑ์การพิจารณา

1. ในการทดสอบนั้นโครงสร้างจะต้องไม่มีส่วนใดๆของโครงสร้างเกิดความเสียหาย (Visible evidence of failure)
2. ค่าการแอ่นตัวสูงสุด(Maximum deflection) ต้องไม่เกิน $IPP^2/20,000h$
โดย l = ช่วงความยาวของ member ที่ทำการทดสอบ ; มิลลิเมตร
(สำหรับ Cantilever member ค่าดังกล่าวจะใช้เท่ากับ $2l$)
 h = ความหนาของโครงสร้างที่ทำการทดสอบ ; มิลลิเมตร
3. หากค่าการแอ่นตัวสูงสุด(Maximum deflection)มีค่าเกิน $l^2/20,000h$ จะต้องมีการคืนตัวภายหลังปลดน้ำหนักบรรทุกออกหมดแล้ว 24 ชั่วโมง(Recovery of deflection) ไม่น้อยกว่า 75% ของค่าการแอ่นตัวสูงสุด(สำหรับกรณีของคอนกรีตหล่อในที่) และ ไม่น้อยกว่า 80% ของค่าการแอ่นตัวสูงสุด(สำหรับกรณีของคอนกรีตอัดแรง)

④ Measurement Of Settlement In Building

การวัดการทรุดตัวของโครงสร้าง สามารถกระทำได้ทั้งก่อนการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น (เป็นการเก็บข้อมูลเพื่อประเมินสถานการณ์ ในการกำหนดกรอบและแนวทางการแก้ไข) ขณะแก้ไข ปัญหา(เพื่อการใช้ระดับของความพอใจในการแก้ไขปัญหา และหลังจากแก้ไขปัญหาแล้ว (เพื่อการตรวจสอบผลหลังการแก้ไขปัญหา)

4.1.สำรวจค่าการทรุดตัวของโครงสร้าง(Settlement survey)

การสำรวจค่าการทรุดตัวของอาคารในงานแก้ไขอาคารทรุดตัวนั้น เป็นสิ่งสำคัญ ยิ่ง เพราะจะทำให้เราทราบความเคลื่อนไหวของอาคารตลอดเวลา ดังนั้นการสำรวจเพื่อวัดค่าการ ทรุดตัว ควรกระทำทั้งก่อนการเสริมฐานราก ขณะเสริมฐานราก และภายหลังการเสริมฐานราก แล้ว

โดยทั่วไปการสำรวจค่าการทรุดตัว จะใช้กล้องระดับธรรมดาควบคู่กับไม้บรรทัดหรือไม้ ระดับ ซึ่งกล้องระดับที่ควรใช้ได้แก่

1. กล้องระดับแบบ Tiling laser leveling scope ซึ่งจะมีค่าความละเอียดอยู่ที่ 0.10 มิลลิเมตร ซึ่งเหมาะกับงานในที่มืดหรือแสงสว่างไม่เพียงพอ
2. กล้องระดับธรรมดาที่ติด Parallel Plate ที่สามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร ซึ่งกล้องชนิดนี้จะช่วยลดระยะเวลาในการสำรวจให้ลดลงอย่างมาก

ขั้นตอนการสำรวจ

1. ใช้กล้องระดับเล็งตำแหน่ง ทำเครื่องหมายและติดตั้งไม้บรรทัด(Staff Gauge)ที่เสา ทุกๆต้นของอาคาร หรือตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าการทรุดตัว
2. เมื่อทำเครื่องหมายและติดตั้งไม้บรรทัด(Staff Gauge)ที่เสาครบทุกต้นแล้ว จากนั้นให้ เริ่มต้นตั้งกล้องระดับ เพื่ออ่านและบันทึกค่าจากไม้บรรทัด โดยตำแหน่งที่ตั้งกล้อง นั้นเพื่ออ่านค่านั้น ควรไล่ลำดับให้ตรงกับตำแหน่งที่เคยตั้งกล้องในตอนที่เคยตั้ง กล้องเพื่อทำเครื่องหมาย
3. เมื่ออ่านค่าและบันทึกครบทุกเสาแล้ว ให้นำค่าที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณค่าความต่าง ระดับของเสาทุกต้น เทียบกับเสาต้นใดต้นหนึ่งในอาคารที่กำหนดให้เป็นเสาอ้างอิง ซึ่งเสาต้นที่จะเลือกเป็นเสาอ้างอิงนั้นควรเลือกเสาต้นที่มีค่าการทรุดตัวน้อยที่สุด แต่ ถึงอย่างไรก็แล้วแต่หากต่อมาพบว่าเสาต้นที่เลือกเป็นเสาอ้างอิงไม่มีความเหมาะสมอีก ต่อไป ก็สามารถทำการเปลี่ยนไปเลือกตำแหน่งของเสาอ้างอิงต้นใหม่ได้

หมายเหตุ : หากนำค่าการทรุดตัวที่ทำการวัดและบันทึกไว้มาเขียนเป็นกราฟสามมิติ จะ ทำให้เราเห็นลักษณะของการทรุดตัวและแนวโน้มการเอียงตัวของโครงสร้างได้ชัดเจนขึ้น

4.2.การแก้ไขการทรุดตัวของอาคาร

ขั้นตอนของการแก้ไขการทรุดตัวของอาคาร มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. คำนวณน้ำหนักที่ถ่ายลงฐานรากดินที่จะทำการเสริมเสาเข็ม
2. เลือกชนิดของเสาเข็ม ซึ่งขนาดและความยาวของเสาเข็มควรพิจารณาจากข้อมูลของดินที่ทำการเจาะสำรวจ ในขั้นตอนของการสำรวจเก็บข้อมูล และที่สำคัญแนะนำให้ควรนำข้อมูลของเสาเข็มเดิมมาร่วมพิจารณาด้วย
3. คำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัยของเสาเข็มที่จะเสริม โดยพิจารณาจากข้อมูลการเจาะสำรวจดิน
4. กำหนดจำนวนเสาเข็มที่จะเสริมในแต่ละฐาน จากสภาพของน้ำหนักที่ถ่ายลงฐานรากนั้นๆและค่าการทรุดตัวที่วิเคราะห์ได้ หากว่าในฐานรากใดๆยังมีเสาเข็มเดิมบางต้นที่ยังมีความสามารถในการรับน้ำหนักได้อยู่ ก็ให้ออกแบบดึงเสาเข็มเดิมนั้นมาช่วยรับน้ำหนักด้วย ทั้งนี้ทั้งนั้นจะทำให้ค่าใช้จ่ายลดลงได้ด้วย
5. ตำแหน่งที่จะเสริมเสาเข็มควรเลือกใช้ตำแหน่งที่น้ำหนัก สามารถส่งถ่ายผ่านมายังกลุ่มของเสาเข็มที่เสริมใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งตำแหน่งที่เหมาะสมคือตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่งของเสาเข็มเดิม
6. หลังจากนั้นก็ทำการถ่ายน้ำหนักของอาคารเข้าสู่เสาเข็มที่เสริมทุกต้น ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการทรุดตัวควรที่จะค่อยๆน้อยลงๆจนถึงหยุดนิ่ง ทั้งนี้เราทราบได้จากการทำการสำรวจค่าการทรุดโดยวิธีที่กล่าวมาแล้วนั่นเอง



รูปที่ 17 แสดงการแก้ไขการทรุดตัวของอาคาร

4.3.การตรวจสอบและทดสอบสภาพอาคารภายหลังการแก้ไขการทรุดตัวของอาคาร

การตรวจสอบหลักๆ ที่สำคัญๆ ประกอบด้วย

1. สำรวจค่าการทรุดตัวหลังจากได้ทำการเสริมฐานรากแล้ว(Settlement survey)
2. ตรวจสอบกำลังและคุณภาพของคอนกรีตโครงสร้าง(Strength and Quality of concrete)
3. ทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง(Building load test)

4.4.การสำรวจค่าการทรุดตัวหลังการเสริมฐานราก(Settlement survey)

การสำรวจค่าการทรุดตัวของอาคารในงานแก้ไขอาคารทรุดตัวนั้น เป็นสิ่งสำคัญยิ่ง เพราะจะทำให้เราทราบความเคลื่อนไหวของอาคารตลอดเวลา ดังนั้นการสำรวจเพื่อวัดค่าการทรุดตัว ควรกระทำทั้งก่อนการเสริมฐานราก ขณะเสริมฐานราก และภายหลังการเสริมฐานรากแล้ว

โดยทั่วไปการสำรวจค่าการทรุดตัว จะใช้กล้องระดับธรรมดาควบคู่กับไม้บรรทัดหรือไม้ระดับ ซึ่งกล้องระดับที่ควรใช้ได้แก่

3. กล้องระดับแบบ Tiling laser leveling scope ซึ่งจะมีค่าความละเอียดอยู่ที่ 0.10 มิลลิเมตร ซึ่งเหมาะกับงานในที่มืดหรือแสงสว่างไม่เพียงพอ

4. กล้องระดับธรรมดาที่ติด Parallel Plate ที่สามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร ซึ่งกล้องชนิดนี้จะช่วยลดระยะเวลาในการสำรวจให้ลดลงอย่างมาก

ข้อเสนอแนะ

ภายหลังทำการเสริมฐานรากแล้วควรสำรวจค่าการทรุดตัว เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 6 เดือน และต้องทำการสำรวจอย่างน้อยเดือนละ 1 – 2 ครั้ง ทั้งนี้เพราะโดยทั่วไปแล้วอาคารที่เกิดการทรุดตัว จะเกิดการแตกร้าวภายใน 6 เดือน

ภายหลังฤดูฝนประมาณ 2 – 3 เดือนเป็นระยะเวลาที่ควรสำรวจค่าการทรุดตัวของอาคาร ทั้งนี้เพราะในช่วงฤดูฝนนั้นน้ำในช่องว่างของดินจะมีมากกว่าปกติ แต่พอภายหลังเมื่อน้ำในช่องว่างไหลออกไป ระดับน้ำใต้ดินจะลดต่ำลงและเมื่อดินเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้ชั้นดินที่อยู่ในระดับช่วงบนจะเกิดการยุบตัวลง เป็นเหตุให้อาคารที่ฐานรากวางตัวอยู่บนเสาเข็มสั้นหรืออาคารที่เป็นฐานรากแผ่ จะเกิดการทรุดตัวตามไปด้วย ฉะนั้นเมื่อทำการแก้ไขอาคารแล้ว ควรตรวจสอบการทรุดตัวในระยะเวลาดังกล่าวด้วย

ส่วนขั้นตอนของการตรวจสอบกำลังและคุณภาพของคอนกรีตโครงสร้าง(Strength and Quality of concrete) และทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง(Building load test) ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้

หนังสือสารอ้างอิง

- ชนเศ วีระศิริ, นพดล ปัญญาวุธตระกูล, 2543. การตรวจสอบและทดสอบสภาพของอาคารภายหลังการแก้ไขการทรุดตัว. โยธาสาร. 2543. : 28
- คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. การหาค่าลึงบรทุกน้ำหนักเสาเข็มจากการทดสอบ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ม.ป.ท.
- ณัฐมนต์ กัมปนานนท์, จุลเสรษฐ์ กฤษณะภักดี, 2545. เอกสารประกอบการอบรมเทคนิคและวิธีการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตในสนาม. เทคโนโลยีการทดสอบคอนกรีต, สถาบัน-ราชภัฏนครราชสีมา.
- ไกร ตั้งสง่า, สมศักดิ์ เตชะวิจิตรไพศาล, สมชาย ประยงค์พันธ์ และวิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา, 2537. **Prediction Of Drivability Of Driven Piles In BANGKOK.** การประชุมใหญ่ทางวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์.
- รุธิร์ เผ่าชัยยังยืน, 2542. เอกสารประกอบการอบรมเรื่องการแปลค่าและตัวอย่างการคำนวณ **Cone Penetration Test(CPT).** การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการและในสนาม รวมถึงการแปลข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-ลาดกระบัง.
- สืบศักดิ์ พรหมบุญ, 2544. เอกสารประกอบการอบรมเรื่องตัวอย่างการวิบัติของอาคารและ **วิธีแก้ไข.** การสำรวจชั้นดิน การออกแบบ และการก่อสร้างงานฐานราก, โรงแรมโซฟิเทล ราชอาเธอร์คิด ขอนแก่น.
- ชนเศ วีระศิริ, 2546. เอกสารประกอบการอบรมเรื่องการตรวจสอบความแข็งแรงของโครงสร้าง-อาคาร. ความมั่นคงปลอดภัยของอาคารและการตรวจสอบอาคาร, มหาวิทยาลัย-อุบลราชธานี
- กมล คำริสธอมารค, 2545. การวิบัติของอาคารและการแก้ไขโครงสร้างคอนกรีตโดยไม่ทำลาย. กรุงเทพฯ : ม.ป.ท.(อค์ตำนา)
- โยธาธิการ กรม, 2533. มาตรฐานงานช่าง. กรุงเทพฯ : การศาสนา