มยผ. 1252-51 และ มยผ. 1551-51

มาตรฐานการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ Dynamic Load Test และตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มด้วยวิธี Seismic Test

กรมโยธาธิการและผังเมือง
กระทรวงมหาดไทย
พ.ศ.2551

มาตรฐานการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ Dynamic Load Test และตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มด้วยวิธี Seismic Test

มยผ. 1252-51 และ มยผ. 1551-51

ISBN 978-974-16-5832-9

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2551 จำนวน 200 เล่ม

สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปพิมพ์จำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาต

คำนำ

กรมโยธาธิการและผังเมืองมีภารกิจเกี่ยวกับงานด้านการผังเมือง และด้านการโยธาธิการ ซึ่งงานด้านการโยธาธิการจะครอบคลุมถึง การออกแบบ การก่อสร้าง การควบคุมการก่อสร้างอาคาร การกำหนดคุณภาพและมาตรฐานการก่อสร้างด้านสถาปัตยกรรมและวิศวกรรม เพื่อให้เกิดมาตรฐานความปลอดภัยแก่สาธารณชน และเนื่องด้วยในปัจจุบันการก่อสร้างอาคารมีความก้าวหน้าทั้งทางด้านเทคโนโลยีในเรื่องของวัสดุ การออกแบบ และการก่อสร้างมากกว่าในอดีตมาก กรมโยธาธิการและผังเมือง จึงจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงและพัฒนามาตรฐานการออกแบบ การควบคุมงาน และการก่อสร้างให้สอดคล้องกับเทคโนโลยีในปัจจุบัน

สำหรับมาตรฐานทางด้านวิศวกรรมฉบับนี้ กรมโยธาธิการและผังเมืองได้จัดทำขึ้นเพื่อใช้เป็นมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมืองและหน่วยงานต่างๆ สำหรับให้เป็นแนวทางในการปฏิบัติให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ โดยกรมโยธาธิการและผังเมืองหวังเป็นอย่างยิ่งว่า มาตรฐานที่จัดทำขึ้นนี้จะมีประโยชน์และสามารถนำไปใช้อ้างอิงเพื่อทำให้งานก่อสร้างได้มาตรฐานและมีความปลอดภัยในการใช้งาน

(นายสมชาย ชุ่มรัตน์)
อธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง

สารบัญ

หน้า

1. มาตรฐานการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ Dynamic Load Test (มยผ. 1252-51)

1. ขอบข่าย 1
2. นิยามและรายการสัญลักษณ์ 1
   2.1 นิยาม 1
   2.2 รายการสัญลักษณ์ 4
3. อุปกรณ์การทดสอบ 5
   3.1 อุปกรณ์ตอกทดสอบ 5
   3.2 หัววัดสัญญาณ (Transducer) 6
   3.3 สายส่งสัญญาณ 7
   3.4 ระบบวัดสัญญาณ 7
4. วิธีการทดสอบ 9
   4.1 การวางแผนการทดสอบ 9
   4.2 การจัดวางอุปกรณ์การทดสอบ 10
   4.3 การตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ก่อนเริ่มตอกทดสอบ 13
   4.4 การตอกทดสอบและการตรวจวัดสัญญาณ 14
   4.5 การตรวจสอบคุณภาพสัญญาณและบันทึกผลการตรวจวัด 14
5. การวิเคราะห์และการรายงานผลการทดสอบ 15
   5.1 การแปรผลการวัด 15
   5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ 15
   5.3 การรายงานผลการทดสอบ 16
6. ข้อแนะนำและข้อควรคำนึงในการประยุกต์ใช้ผลการวิเคราะห์ 19
7. รายการอ้างถึงและรายการอ้างอิง 20

ภาคผนวก ก. ประวัติ ประโยชน์ และข้อจำกัดของการทดสอบ 22

ภาคผนวก ข. ทฤษฎีคลื่นหน่วยแรง 24

ภาคผนวก ค. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบและการตีความ 25

ภาคผนวก ง การประเมินความเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของเสาเข็มด้วยวิธีเบต้า 34

ภาคผนวก จ ตัวอย่างแบบฟอร์มสำหรับการทดสอบ 37

2. มาตรฐานการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มด้วยวิธี Seismic Test

(มยผ. 1551-51)

1. ขอบข่าย 39

1.1 ขอบเขตของการใช้งาน 39

1.2 วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบ 39

1.3 ข้อจำกัดของการตรวจสอบ 39

2. นิยาม และรายการสัญลักษณ์ 40

2.1 บทนิยาม 40

2.2 รายการสัญลักษณ์ 40

3. อุปกรณ์ทดสอบ 40

3.1 อุปกรณ์เคาะทดสอบ 41

3.2 หัววัดสัญญาณ 41

3.3 สายส่งสัญญาณ 42

3.4 ระบบวัดสัญญาณ 43

4. วิธีการทดสอบ 45

4.1 การเตรียมการทดสอบ 45

4.2 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบ 45

4.3 การทดสอบและบันทึกผลการวัด 45

5. การวิเคราะห์และการรายงานผลการทดสอบ 46

5.1 การแปรผลการวัด 46

5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ 46

5.3 การรายงานผลการตรวจสอบ 46

6. เอกสารอ้างอิง 48

ภาคผนวก ก. ทฤษฎีคลื่นหน่วยแรง 49

ภาคผนวก ข. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลและการตีความ 50

ภาคผนวก ค. ตัวอย่างรูปแบบของสัญญาณที่วัดได้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด 53

ภาคผนวก ง. ตัวอย่างสัญญาณจากการทดสอบกับแบบจำลองเสาเข็มในลักษณะต่างๆ 56

มยผ. 1252-51

มาตรฐานการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ Dynamic Load Test

1. ขอบข่าย

มาตรฐานการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์นี้ใช้อ้างอิงสำหรับกระบวนงานทดสอบเสาเข็มเดี่ยวหรือฐานรากลึกชนิดอื่นที่มีลักษณะการรับน้ำหนักเหมือนกัน โดยใช้แรงกระแทกที่หัวเสาเข็มในทิศทางตามแนวแกนแล้วนำผลตอบสนองที่วัดได้ ซึ่งอย่างน้อยได้แก่ แรงหน้าตัดและความเร็วอนุภาคของเสาเข็มไปวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎีคลื่นหน่วยแรง เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

การทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อ

(1) การพิสูจน์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ทั้งนี้การพิสูจน์ดังกล่าวจะกระทำได้หลังจากการตรวจประเมินความน่าเชื่อถือโดยการสอบเทียบกับวิธีการทดสอบบรรทุกเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์แล้ว

(2) การตรวจวัดคุณสมบัติอื่นๆ ที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของเสาเข็มภายใต้แรงกระทำเชิงพลวัต[1]

(3) การประเมินความสามารถของอุปกรณ์ตอกเสาเข็ม[2]

(4) การควบคุมการก่อสร้างเสาเข็มโดยเฉพาะในกรณีที่สภาพชั้นดินไม่สม่ำเสมอ

2. นิยามและรายการสัญลักษณ์

2.1 นิยาม

"**การทดสอบ**" หมายถึง การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ Dynamic Load Test

"**การตอกใหม่ (Redrive)**" หมายถึง การตอกเสาเข็มใหม่หลังจากการหยุดตอกชั่วคราวหรือหลังจากที่ตอกเสาเข็มเสร็จแล้ว เพื่อแก้ไขปัญหา อุปสรรคที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง

"**การตอกซ้ำ (Restrike)**" หมายถึง การตอกเสาเข็มต้นเดิมหลังจากทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้การรบกวนดินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตอกครั้งก่อนลดน้อยลงไป ระยะที่ทิ้งไว้เพื่อการดังกล่าวมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของดินและวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม[3]

"**การทรุดตัวสุทธิ (Net Settlement, Pile Set)**" หมายถึง การทรุดตัวถาวรที่เกิดภายหลังจากการตอกเสาเข็ม

---

[1] เช่น การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเสาเข็มตอกขณะก่อสร้าง การทดสอบเพื่อหาความสมบูรณ์ของเสาเข็มที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ การประเมินแรงต้านทานเชิงพลวัตของดิน การประเมินแรงหน่วงของโครงสร้างเสาเข็ม ฯลฯ

[2] เช่น การประเมินความสามารถในการตอกของเสาเข็มตอก การประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตอกเสาเข็ม

[3] ระยะที่ทิ้งไว้สำหรับประเทศไทยโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 7 วันสำหรับเสาเข็มตอกและ 21 วันขึ้นไปสำหรับเสาเข็มหล่อ

"**ความถี่ตัด (Cut-off Frequency)**" หมายถึง ความถี่ที่ตัวกรองสัญญาณสามารถทำให้สัญญาณป้อนเข้ามีขนาดลดลง 3 เดซิเบล

"**ความเร็วคลื่นยืดหยุ่น (Elastic Wave Velocity)**" หมายถึง ความเร็วของคลื่นยืดหยุ่นที่เคลื่อนผ่านเสาเข็ม สำหรับผลการตอกทดสอบ ที่สามารถวัดและแยกแยะคลื่นแรงดึงที่สะท้อนกลับจากปลายเสาเข็มได้ควรหาค่าความเร็วคลื่นยืดหยุ่นโดยการคำนวณย้อนกลับ โดยใช้ข้อมูลความยาวของเสาเข็มร่วมกับระยะเวลาที่คลื่นยืดหยุ่นใช้ในการเดินทาง ค่าความเร็วคลื่นยืดหยุ่นของเสาเข็มประเภทเสาเข็มตอกยังสามารถหาได้จากการสอบเทียบกับเสาเข็มจริงก่อนถูกตอกลงสู่ชั้นดิน โดยการติดตั้งมาตรความเร่งไว้ที่เสาเข็มแล้วใช้ค้อนขนาดเล็กตอกทดสอบเพื่อหาระยะเวลาที่คลื่นยืดหยุ่นใช้ในการเดินทางตามระยะทางที่ทราบค่า

"**ความเร็วอนุภาค (Particle Velocity)**" หมายถึง ความเร็วของอนุภาควัสดุขณะที่คลื่นยืดหยุ่นเคลื่อนผ่าน

"**จำนวนตอก (Blow Count)**" หมายถึง จำนวนครั้งที่ใช้ในการตอกเสาเข็มให้จมตัวลงเป็นระยะทางที่กำหนดไว้ เช่น 300 มิลลิเมตร (30 เซนติเมตร) เป็นต้น

"**ตัวกรองผ่านต่ำ (Low Pass Filter)**" หมายถึง ตัวกรองที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัดผ่านไปได้ และกรองเอาสัญญาณที่สูงกว่าความถี่ตัดทิ้งไป

"**ตุ้มตอกเสาเข็ม (Drop Hammer)**" หมายถึง อุปกรณ์ตอกเสาเข็มประเภทกระแทก การตอกเสาเข็มกระทำโดยการยกตุ้มน้ำหนักขึ้นแล้วปล่อยจากเหนือหัวเสาเข็มให้ตกลงกระแทกกับหมอนรองตุ้มตอกหรือ แผ่นเหล็กรองตุ้มตอก (Striker Plate)

"**มอดุลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)**" หมายถึง อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเนื้อวัสดุ มอดุลัสของความยืดหยุ่นมีค่าไม่คงที่และแปรผันตามระดับของหน่วยแรงหรือความเครียด อย่างไรก็ตามการออกแบบทางวิศวกรรมส่วนใหญ่นิยมสมมติให้มอดุลัสของความยืดหยุ่นมีค่าคงที่เพื่อความสะดวกในการคำนวณ

"**มอดุลัสของความยืดหยุ่นเชิงพลวัต (Dynamic Modulus of Elasticity)**" หมายถึง มอดุลัสของความยืดหยุ่นของเนื้อวัสดุที่วัดในขณะที่ได้รับแรงกระทำเชิงพลวัต (Dynamic Load) โดยนัยมีความหมายถึงมอดุลัสของความยืดหยุ่นในสภาพหน่วยแรงต่ำเช่นในสภาพที่คลื่นหน่วยแรงเคลื่อนที่ผ่านเนื้อวัสดุของเสาเข็ม เมื่อเปรียบเทียบกับมอดุลัสของความยืดหยุ่นเชิงสถิตซึ่งมีความหมายโดยนัย หมายถึงมอดุลัสของความยืดหยุ่นในสภาพหน่วยแรงสูง เช่นในขณะที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน โดยนัยดังกล่าว ค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นเชิงพลวัตจะสูงกว่าค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นเชิงสถิต มอดุลัสของความยืดหยุ่นเชิงพลวัตของเหล็กมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วง 200 ถึง 207 กิกาปาสกาล (2,039,432 ถึง 2,110,812 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) มอดุลัสของความยืดหยุ่นเชิงพลวัตสำหรับวัสดุประเภทไม้และคอนกรีตมีค่าไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังนั้นจึงควรวัดค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นเชิงพลวัตของไม้

หรือคอนกรีตจากการทดสอบโดยตรง ค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นเชิงพลวัตสามารถประมาณได้จากการวัดค่าความเร็วของคลื่นหน่วยแรงยืดหยุ่นแล้วคำนวณตามสมการ

$$E_d = \rho c^2 \qquad (1)$$

"**มาตรความเร่งสมบูรณ์ (DC Accelerometer)**" หมายถึง มาตรความเร่งที่สามารถวัดความเร่งได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ศูนย์เฮิรตซ์ขึ้นไป ในความหมายอย่างง่ายหมายถึงมาตรความเร่งที่สามารถวัดความเร่งธรรมชาติได้

"**มาตรความเร่งสัมพัทธ์ (AC Accelerometer)**" หมายถึง มาตรความเร่งที่วัดความเร่งที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนเท่านั้น มาตรความเร่งนี้ไม่สามารถวัดสัญญาณความเร่งที่มีความถี่เป็นศูนย์ (เช่น ความเร่งธรรมชาติ) ได้

"**แรงหน้าตัด (Section Force)**" หมายถึง แรงตามแนวแกนที่กระทำต่อหน้าตัดที่ตั้งฉากกับแนวแกนของเสาเข็ม

"**หมวกครอบหัวเสาเข็ม (Pile Helmet)**" หมายถึง กล่องหรือท่อเหล็กที่ใช้สวมหัวเสาเข็มในขณะตอกเพื่อช่วยให้การตอกทำได้สะดวกขึ้น

"**หมอนรองตุ้มตอก (Hammer Cushion)**" หมายถึง วัสดุที่ใช้รองระหว่างตุ้มตอกกับหมวกครอบหัวเสาเข็มเพื่อลดแรงกระแทกจากตุ้มตอกเสาเข็มไม่ให้มีค่าสูงจนเกิดความเสียหายต่อเสาเข็ม ในอดีตนิยมใช้แผ่นไม้เนื้อแข็งที่มีแนวเสี้ยนไม้ขนานกับแกนของเสาเข็ม แต่เนื่องจากการยุบอัดตัวที่รวดเร็วภายหลังการตอก และ มีความสามารถในการทนความร้อนที่เกิดขึ้นจากการตอกต่ำ จึงได้มีการพัฒนาวัสดุชนิดอื่นขึ้นใช้แทน เช่น สารประกอบพอลิเมอร์ เป็นต้น

"**หมอนรองหัวเสาเข็ม (Pile Cushion)**" หมายถึง วัสดุที่ใช้รองระหว่างหมวกครอบหัวเสาเข็มกับหัวเสาเข็ม เพื่อป้องกันไม่ให้หัวเสาเข็มเสียหายเนื่องจากการตอกเสาเข็ม ตัวอย่างของวัสดุที่ใช้เป็นหมอนรองหัวเสาเข็มเช่น ไม้อัด หรือ ไม้เนื้อแข็ง เป็นต้น สำหรับหมอนรองหัวเสาเข็มที่ทำจากไม้ควรเป็นไม้แห้งที่มีความหนาไม่ต่ำกว่า 100 มิลลิเมตร และควรเปลี่ยนทุกๆ การตอกระหว่าง 1,000 ถึง 2,000 ครั้ง

"**เหตุการณ์ตอก (Impact Event)**" หมายถึง เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นและสิ้นสุดลงเนื่องจากการตอกเสาเข็มด้วยอุปกรณ์ตอกทดสอบหรืออุปกรณ์ตอกเสาเข็มด้วยแรงกระแทกหนึ่งครั้ง

"**อุปกรณ์ตอกทดสอบ (Apparatus for Applying Impact Force)**" หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้สร้างแรงกระทำต่อหัวเสาเข็มสำหรับการทดสอบ

"**อุปกรณ์ตอกเสาเข็ม (Pile Hammer)**" หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้เพื่อการทำให้เสาเข็มจมลงในชั้นดิน อุปกรณ์ตอกเสาเข็มแบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่ ได้แก่ ประเภทกระแทก และ ประเภทเขย่า การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นดินและชนิดของเสาเข็ม อุปกรณ์ตอกเสาเข็มที่นิยมใช้ในประเทศไทย ได้แก่ ตุ้มตอกเสาเข็ม

"**อิมพีแดนซ์ (Impedance)**" หมายถึง ความต้านทานเชิงพลศาสตร์ของเนื้อวัสดุและพื้นที่หน้าตัดที่มีต่อคลื่นยืดหยุ่นที่เคลื่อนผ่านเสาเข็ม อิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Z = \frac{E_d A}{c} = \rho c A \qquad (2)$$

2.2 รายการสัญลักษณ์

A หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

c หมายถึง ความเร็วคลื่นยืดหยุ่นที่เดินทางภายในเสาเข็ม

E_d หมายถึง มอดุลัสของความยืดหยุ่นเชิงพลวัต

$E_{driving}$ หมายถึง พลังงานที่เสาเข็มได้รับเนื่องจากการตอกด้วยอุปกรณ์ตอกทดสอบ

$E(t)$ หมายถึง พลังงานที่เกิดจากการทรุดตัวของเสาเข็มที่เวลา t

ε หมายถึง ความเครียดที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม

F หมายถึง แรงหน้าตัดในทิศทางตามแนวแกน

$F(t)$ หมายถึง แรงหน้าตัดตามแนวแกนที่กระทำต่ออนุภาคเสาเข็มที่เวลา t ซึ่งวัดได้จากมาตรแรงหรือจากการคำนวณทางอ้อมโดยใช้สัญญาณจากมาตรความเครียดคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดและมอดุลัสของความยืดหยุ่น

g หมายถึง ความเร่งธรรมชาติ หรือ แรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.806 เมตรต่อกำลังสองของวินาที

h หมายถึง ระยะยกตุ้ม

J หมายถึง สัมประสิทธิ์ความหน่วง

L หมายถึง ระยะทางที่วัดจากตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดสัญญาณถึงปลายเสาเข็ม

n_c หมายถึง ประสิทธิภาพของปั้นจั่น

n_i หมายถึง ประสิทธิภาพของหมอนรองหัวเสาเข็ม

R_s หมายถึง กำลังรับน้ำหนักเชิงสถิตของเสาเข็มที่ได้จากคำนวณด้วยวิธีต่างๆ

ρ หมายถึง ความหนาแน่นของวัสดุเสาเข็ม

S_e หมายถึง การยุบตัวอิลาสติก

Q_{allow} หมายถึง น้ำหนักบรรทุกยอมให้ หรือ น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ผู้ออกแบบยอมให้กระทำต่อเสาเข็ม

FS หมายถึง ส่วนปลอดภัยที่ผู้ออกแบบใช้ในการระบุน้ำหนักบรรทุกยอมให้ของเสาเข็ม

S_p หมายถึง การทรุดตัวคงค้างของเสาเข็ม

$v(t)$ หมายถึง ความเร็วของอนุภาคเสาเข็มที่เวลา t ซึ่งวัดได้จากมาตรความเร็วหรือจากปริพันธ์ (Integration) ของสัญญาณจากมาตรความเร่ง

W หมายถึง น้ำหนักของตุ้มตอกเสาเข็ม

Z หมายถึง อิมพีแดนซ์

3. อุปกรณ์การทดสอบ

การทดสอบ ใช้อุปกรณ์หลายประเภทซึ่งต้องทำงานร่วมกัน ค่าที่กำหนดไว้สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ ตามมาตรฐานนี้จึงมีความเกี่ยวพันกันและกำหนดไว้เพื่อให้ผลการตรวจวัดในขั้นสุดท้ายมีความถูกต้องครบถ้วน และเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าเพื่อการวิเคราะห์ การเปลี่ยนคุณสมบัติของอุปกรณ์ส่วนหนึ่งส่วนใดที่แตกต่างจากที่ระบุไว้ อาจมีผลกระทบต่อคุณภาพของการตรวจวัดในขั้นสุดท้ายได้

เมื่อพิจารณาโดยรวม ผลการตรวจวัดที่ได้จะต้องมีความเที่ยงตรงที่ดีกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 2 ของค่าสูงสุดที่วัดได้จากการทดสอบ สัญญาณเชิงพลวัตที่บันทึกไว้ในย่านความถี่ต่ำกว่า 1,500 เฮิรตซ์จะต้องเป็นสัญญาณที่ไม่ผิดเพี้ยนเนื่องจากกระบวนการวัดและบันทึกผล อาทิ ความผิดเพี้ยนเนื่องจากตัวกรองสัญญาณ หรือ เนื่องจากการกำหนดความถี่ในการเก็บข้อมูลที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น

อุปกรณ์การทดสอบเมื่อแจกแจงออกจะแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนคือ

(1) อุปกรณ์ตอกทดสอบ
(2) หัววัดสัญญาณคลื่น
(3) สายส่งสัญญาณ
(4) ระบบวัดสัญญาณคลื่น

3.1 อุปกรณ์ตอกทดสอบ

ตุ้มตอกเสาเข็มเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นอุปกรณ์ตอกทดสอบ อย่างไรก็ตามผู้ทดสอบสามารถประยุกต์ใช้อุปกรณ์อื่นแทนได้เช่นกัน ทั้งนี้อุปกรณ์ตอกทดสอบนั้นต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

3.1.1 สามารถสร้างแรงกระแทกที่หัวเสาเข็มในทิศทางตามแกนและตรงศูนย์กับแกนเสาเข็ม

3.1.2 สามารถทำให้เสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวและพัฒนาแรงต้านทานได้มากถึงระดับที่บรรลุวัตถุประสงค์ของการทดสอบ[1]

3.1.3 สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย ณ ระดับพลังงานการตอกสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบ อุปกรณ์ตอกทดสอบต้องติดตั้งโดยใช้หมอนรองและหมวกครอบหัวเสาเข็มเท่าที่จำเป็นเพื่อป้องกันความเสียหายจากแรงกระแทกและแรงเยื้องศูนย์ที่เกิดจากการทดสอบ

---

[1] โดยทั่วไปตุ้มตอกจะมีน้ำหนักประมาณร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักบรรทุกเชิงสถิต และใช้ระยะยกตุ้มเท่ากับค่าที่มากกว่าระหว่างร้อยละ 8.5 ของความยาวเสาเข็มกับระยะ 2 เมตร อย่างไรก็ตามควรตรวจสอบอย่างละเอียดด้วยการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธีสมการคลื่น

3.2 หัววัดสัญญาณ (Transducer)

หัววัดสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ อย่างน้อยจะต้องประกอบด้วยมาตรความเครียด (Strain Gauge) และมาตรความเร่ง (Accelerometer) ชนิดละสองชิ้น[1] โดยต้องสอบเทียบให้ได้ความเที่ยงตรงที่ดีกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 3 ตลอดช่วงของค่าที่วัดได้จากการทดสอบ และถ้ามีเหตุให้สงสัยว่าเกิดความเสียหายแก่หัววัดสัญญาณเช่นมีการแปรปรวนของสัญญาณผิดปรกติระหว่างการทดสอบให้ทำการสอบเทียบใหม่ หากพบว่าหัววัดสัญญาณนั้นเสียหายจนไม่สามารถใช้การได้ให้เปลี่ยนหัววัดสัญญาณใหม่

3.2.1 มาตรความเครียด

3.2.1.1 มาตรความเครียดที่ใช้ในการทดสอบ จะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

(1) มีการตอบสนองเชิงแอมพลิจูดเป็นเส้นตรง (Linear Amplitude Response) ตลอดช่วงที่วัดได้จากการทดสอบ

(2) ความถี่ธรรมชาติเมื่อติดตั้งกับเสาเข็มแล้ว ไม่ต่ำกว่า 2,000 เฮิรตซ์

3.2.1.2 สัญญาณที่วัดได้จากมาตรความเครียดจะถูกแปลงเป็นแรงหน้าตัดในทิศทางตามแนวแกนโดยการคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดและมอดุลัสของความยืดหยุ่นเชิงพลวัตดังสมการ

$$F = E_d A\varepsilon \qquad (3)$$

3.2.1.3 ผู้ทดสอบอาจติดตั้งมาตรแรง (Force Transducer or Load Cell) ไว้ระหว่างหัวเสาเข็มกับตุ้มตอกเสาเข็มสำหรับวัดแรงกระทำตามแกนโดยตรงก็ได้ ทั้งนี้มาตรแรงดังกล่าวจะต้องมีการตอบสนองเชิงเส้นตลอดช่วงของแรงที่เกิดขึ้นในการทดสอบ และเพื่อลดผลกระทบที่มีต่อลักษณะเฉพาะเชิงพลวัตของระบบโดยรวม อิมพีแดนซ์ของมาตรแรงจะต้องมีค่าระหว่างครึ่งหนึ่งถึงสองเท่าของอิมพีแดนซ์ของเสาเข็ม มาตรแรงจะต้องโยงยึดกับหัวเสาเข็มด้วยอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักน้อยและใช้หมอนรองมาตรเท่าที่จำเป็นเท่านั้น

3.2.2 มาตรความเร่ง

3.2.2.1 มาตรความเร่งใช้เพื่อวัดความเร่งที่เกิดขึ้นขณะทดสอบแล้วนำไปหาปริพันธ์ (Integrate) เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงความเร็ว มาตรความเร่งที่ใช้ทดสอบกับเสาเข็มคอนกรีตต้องมีการตอบสนองสัญญาณเชิงแอมพลิจูดเป็นเส้นตรง (Linear Amplitude Response) อย่างน้อยจนถึงความถี่ 1,000 เฮิรตซ์และจนถึงความเร่ง 1,000 g สำหรับมาตรความเร่งที่ใช้ทดสอบกับเสาเข็มเหล็กต้องมีการตอบสนองสัญญาณเชิงแอมพลิจูดเป็นเส้นตรงอย่างน้อยจนถึงความถี่ 2,000 เฮิรตซ์และจนถึงความเร่ง 2,000 g

[1] ในกรณีที่เสาเข็มมีขนาดตั้งแต่ 1.20 เมตรขึ้นไป แนะนำให้ติดตั้งหัววัดสัญญาณชนิดละ 4 ชิ้น เพื่อป้องกันผลกระทบจากการดัดและบิดตัวของเสาเข็ม

3.2.2.2 มาตรความเร่งทั้งแบบสมบูรณ์และแบบสัมพัทธ์สามารถใช้ในการทดสอบได้ แต่จะต้องมีคุณสมบัติขั้นต่ำดังต่อไปนี้

(1) มาตรความเร่งสัมพัทธ์ต้องมีความถี่ธรรมชาติไม่ต่ำกว่า 30,000 เฮิรตซ์ และมีค่าคงที่ของเวลา (Time Constant) ไม่น้อยกว่า 1 วินาที

(2) มาตรความเร่งสมบูรณ์ต้องมีความถี่ธรรมชาติไม่ต่ำกว่า 2,500 เฮิรตซ์ และต้องถูกหน่วงด้วยตัวกรองผ่านต่ำเพื่อลดผลจากการสั่นพ้อง โดยตัวกรองผ่านต่ำต้องมีความถี่ตัดอย่างน้อยเท่ากับ 1,500 เฮิรตซ์

3.3 สายส่งสัญญาณ

สายส่งสัญญาณใช้เพื่อส่งผ่านสัญญาณจากหัววัดสัญญาณไปสู่อุปกรณ์ประกอบการทดสอบอื่นๆ อาทิ อุปกรณ์ปรับสัญญาณ อุปกรณ์บันทึกผล หรือ อุปกรณ์แสดงผล เป็นต้น สายสัญญาณที่ใช้ต้องเป็นสายสัญญาณแบบป้องกันการรบกวน (Shielded Cable) เพื่อลดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า อัตราส่วนระหว่างสัญญาณต้นทางกับสัญญาณปลายทางภายหลังส่งผ่านสายส่งสัญญาณจะต้องมีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ

3.4 ระบบวัดสัญญาณ

ระบบวัดสัญญาณประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วนคือ อุปกรณ์ปรับสัญญาณ อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ และอุปกรณ์แสดงผล ซึ่งอาจประกอบรวมกันเป็นอุปกรณ์ชิ้นเดียวก็ได้

3.4.1 อุปกรณ์ปรับสัญญาณ (Signal Conditioner)

3.4.1.1 อุปกรณ์ปรับสัญญาณทำหน้าที่ปรับสัญญาณที่ได้จากหัววัดสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบหรือลักษณะที่เหมาะสมต่อการบันทึกด้วยอุปกรณ์บันทึกสัญญาณหรือต่อการทำงานของอุปกรณ์การทดสอบอื่น ตัวอย่างของอุปกรณ์ปรับสัญญาณ เช่น อุปกรณ์อ่านค่าความเครียด อุปกรณ์ขยายสัญญาณ ตัวกรองผ่านต่ำ เป็นต้น

3.4.1.2 อุปกรณ์ปรับสัญญาณที่ใช้สำหรับการทดสอบ ทุกช่องสัญญาณซึ่งรวมถึงช่องสัญญาณของมาตรความเร่งและมาตรความเครียดจะต้องมีผลตอบสนองเชิงเฟสเหมือนกันสำหรับช่วงของความถี่ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ ทั้งนี้เพื่อป้องกันความผิดเพี้ยนเชิงสัมพัทธ์ระหว่างสัญญาณจากช่องสัญญาณต่างๆ

3.4.1.3 เนื่องจากสัญญาณจากหัววัดสัญญาณในขณะก่อนและหลังจากตอกทดสอบอาจมีค่าไม่เท่ากัน (Zero Drift) อุปกรณ์ปรับสัญญาณต้องสามารถปรับความเฉ (Offset) ของช่องสัญญาณต่างๆ ให้เป็นศูนย์ได้โดยอัตโนมัติเพื่อให้ค่าเริ่มต้นของสัญญาณจากช่องสัญญาณต่างๆ ของทุกเหตุการณ์ตอกมีค่าเป็นศูนย์

(1) อุปกรณ์ปรับสัญญาณสำหรับมาตรความเครียดต้องสามารถขยายสัญญาณจากมาตรวัดและแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของแรงหน้าตัดเพื่อใช้ประกอบการเฝ้าสังเกตในสนามได้

(2) อุปกรณ์ปรับสัญญาณที่ใช้ประกอบกับมาตรความเร่งต้องสามารถแปลงข้อมูลที่ได้จากมาตรวัดให้อยู่ในรูปของความเร็วโดยการหาปริพันธ์เพื่อใช้ประกอบการเฝ้าสังเกตในสนามได้

(3) ตัวกรองผ่านต่ำสำหรับทุกช่องสัญญาณที่วัดปริมาณเชิงพลวัต เช่น ความเร่งหรือความเครียดที่เกิดขึ้นขณะตอกทดสอบ ผู้ทดสอบจะต้องใช้ตัวกรองผ่านต่ำเพื่อกรองสัญญาณความถี่สูงกว่า 1,500 เฮิรตซ์ทิ้งไป ทั้งนี้ขบวนการกรองสัญญาณดังกล่าวจะต้องเกิดขึ้นก่อนที่สัญญาณจะถูกป้อนเข้าสู่อุปกรณ์บันทึกสัญญาณและอุปกรณ์แสดงผล

3.4.2 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Data Logger)

อุปกรณ์บันทึกสัญญาณใช้บันทึกสัญญาณที่ได้จากหัววัดสัญญาณหรือสัญญาณที่ได้ปรับสภาพด้วยอุปกรณ์ปรับสัญญาณแล้ว อุปกรณ์บันทึกสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อใช้บันทึกสัญญาณจากทุกช่องสัญญาณพร้อมกันจะต้องสามารถบันทึกสัญญาณได้ไม่น้อยกว่า 10,000 ข้อมูลต่อหนึ่งวินาทีต่อช่องสัญญาณ [1]

3.4.3 อุปกรณ์แสดงผล

3.4.3.1 อุปกรณ์แสดงผลใช้เพื่อการเฝ้าสังเกตในสนาม สัญญาณที่วัดได้เมื่อผ่านการปรับสภาพให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมแล้วจะต้องแสดงด้วยอุปกรณ์แสดงผลได้ภายในระยะเวลาอันสั้นในสถานที่ทดสอบ หรือ ก่อนเริ่มต้นการตอกทดสอบครั้งต่อไป ตัวอย่างของอุปกรณ์แสดงผล อาทิ ออสซิลโลสโคป ออสซิลโลกราฟ หรือ จอมอนิเตอร์ เป็นต้น

3.4.3.2 อุปกรณ์แสดงผลที่ใช้ในการทดสอบ ต้องสามารถแสดงสัญญาณที่วัดได้ในรูปแบบของกราฟการเปลี่ยนแปลงแรงเมื่อเทียบกับเวลา และ กราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็วเมื่อเทียบกับเวลา ต้องสามารถแสดงสัญญาณที่ได้จากเหตุการณ์ตอกปัจจุบันหรือจากเหตุการณ์ตอกในอดีตที่บันทึกไว้โดยอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ นอกจากนี้เพื่อการตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณที่วัดได้ อุปกรณ์แสดงผลต้องเลือกแสดงสัญญาณในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 5 ถึง 160 มิลลิวินาทีได้ สำหรับอุปกรณ์แสดงผลที่ไม่สามารถคงผลไว้

[1] เนื่องจากความเร็วคลื่นหน่วยแรงมีค่าประมาณ 4,000 – 5,000 เมตร/วินาที อัตราการบันทึกข้อมูลดังกล่าวจะทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงทุกๆ ระดับความลึก 0.5 เมตรได้

ได้อย่างถาวรเช่น ออสซิลโลสโคป อุปกรณ์แสดงผลนั้นจะต้องแสดงผลค้างไว้ได้เป็นระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 30 วินาที

4. วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนได้แก่ การวางแผนการทดสอบ การจัดวางอุปกรณ์การทดสอบ การตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ก่อนเริ่มตอกทดสอบ การตอกทดสอบและตรวจวัดสัญญาณ การตรวจสอบคุณภาพสัญญาณและบันทึกผลการตรวจวัด

4.1 การวางแผนการทดสอบ

ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวางแผนทดสอบได้แก่ ประเภทของการทดสอบ พลังงานการตอกที่ใช้ในการทดสอบ คุณสมบัติ จำนวน และ ตำแหน่งของเสาเข็มทดสอบ สัญญาณที่จะวัด และการแบ่งหน้าที่ความรับผิดชอบของผู้ปฏิบัติงาน[1] ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 ในการวางแผนการทดสอบ ควรกำหนดประเภทของการทดสอบให้ชัดเจนว่าเป็นการทดสอบด้วยการตอกต่อเนื่องหรือการทดสอบด้วยการตอกซ้ำ โดยพิจารณาตามความเหมาะสมกับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของเสาเข็ม วัตถุประสงค์ของการทดสอบ และพฤติกรรมของดินกับเวลาว่ากรณีใดให้กำลังรับน้ำหนักต่ำสุด เป็นต้น

4.1.2 พลังงานการตอกที่เกิดขึ้นจากแรงกระแทกนั้นต้องสามารถทำให้เสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวและพัฒนาแรงต้านทานได้มากถึงระดับที่บรรลุวัตถุประสงค์ของการทดสอบ [2]

4.1.3 เสาเข็มทดสอบต้องมีคุณสมบัติเหมือนกับเสาเข็มใช้งานและเสริมกำลังบริเวณหัวเสาเข็มให้เพียงพอต่อพลังงานการตอกที่ใช้ในการทดสอบ[3] จำนวนและตำแหน่งของเสาเข็มทดสอบต้องกำหนดให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการทดสอบ เสาเข็มทดสอบต้องสร้างด้วยวิธีเดียวกับเสาเข็มใช้งาน และต้องจัดทำบันทึกวิธีการก่อสร้างเสาเข็มทดสอบไว้ด้วย

---

[1] ผู้รับผิดชอบการทดสอบ มีหน้าที่ต้องจัดเตรียมข้อมูลข้างต้นให้เหมาะสมและสอดคล้องกับ (ก) วัตถุประสงค์ของการทดสอบ (ข) ลักษณะภูมิประเทศ ประเภทของชั้นดินแต่ละชั้นตลอดจนลักษณะเฉพาะของชั้นดินทางธรณีวิทยา (ค) วิธีการก่อสร้างเสาเข็มใช้งาน (ง) น้ำหนักใช้งาน ลักษณะการใช้งาน (จ) สมบัติ ขนาด จำนวน และ การจัดผังของเสาเข็มใช้งาน

[2] เป็นแรงกระแทกที่ทำให้เกิดผลอย่างหนึ่งอย่างใดตามหัวข้อต่อไปนี้

- เกิดการทรุดตัวถาวรภายหลังจากการทดสอบ
- แรงต้านทานเชิงสถิตของเสาเข็มที่พัฒนาขึ้นในระหว่างการทดสอบมีค่าสูงกว่าแรงต้านทานเชิงสถิตของเสาเข็มที่คำนวณเพื่อสภาพใช้งาน โดยสภาวะดังกล่าวดำรงอยู่เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 3 มิลลิวินาที

[3] เช่นการใส่เหล็กเสริมเอกและเหล็กปลอกในคอนกรีตมากขึ้น เพื่อรับหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจากการตอก หรือใช้เหล็กรูปพรรณประกอบเป็นโครงแข็งรัดรอบเพื่อควบคุมการเบ่งตัวและป้องกันการกะเทาะของคอนกรีตฐานราก

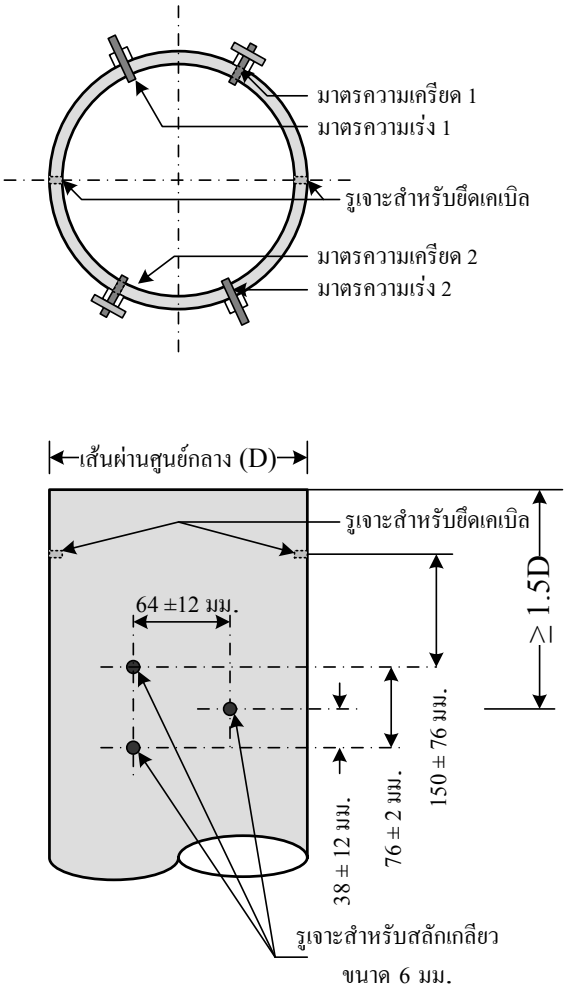
4.1.4 สัญญาณที่จะวัดอย่างน้อยต้องประกอบด้วย (ก) ความเครียดตามแกนของเสาเข็ม (ข) ความเร่งตามแกนของเสาเข็ม นอกจากนี้ยังอาจวางแผนให้มีการวัดสัญญาณอื่นเพิ่มเติมได้ตามวัตถุประสงค์ของการทดสอบ เช่น การเคลื่อนที่ตามแกนของเสาเข็ม เป็นต้น

4.1.5 ผู้ปฏิบัติงานในการทดสอบ อย่างน้อยต้องประกอบด้วย (ก) ผู้ควบคุมการทดสอบ (ข) ผู้ควบคุมอุปกรณ์ตอกทดสอบ (ค) ผู้ควบคุมและตรวจสอบความน่าเชื่อถือของระบบวัดสัญญาณ และ (ง) ผู้รับผิดชอบด้านความปลอดภัย ทั้งนี้ต้องกำหนดโครงสร้าง หน้าที่ ความรับผิดชอบและชื่อผู้รับผิดชอบในส่วนต่างๆ ให้ชัดเจน อนึ่งก่อนเริ่มการทดสอบ ควรจัดทำแผนปฏิบัติงานซึ่งประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

1. วัตถุประสงค์ของการทดสอบ
2. สภาพภูมิประเทศ ข้อมูลชั้นดิน
3. ประเภทการทดสอบ
4. พลังงานการตอกสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบ
5. คุณสมบัติ ตำแหน่ง
6. วิธีการก่อสร้างเสาเข็มทดสอบ
7. คุณสมบัติของอุปกรณ์ตอกทดสอบ
8. สัญญาณที่จะวัด
9. คุณสมบัติของระบบวัดสัญญาณ
10. ตำแหน่งติดตั้งหัววัดสัญญาณ
11. วิธีการตอกทดสอบ
12. ระยะเวลาการวัด และความถี่ในการเก็บข้อมูล
13. ผังหน้าที่ ความรับผิดชอบของผู้ปฏิบัติงาน
14. ตัวอย่างระเบียนการตอกทดสอบ
15. วิธีประมวล/วิเคราะห์ผลการทดสอบ
16. กำหนดการทดสอบ
17. หมายเหตุ และ ข้อสังเกตอื่นๆ

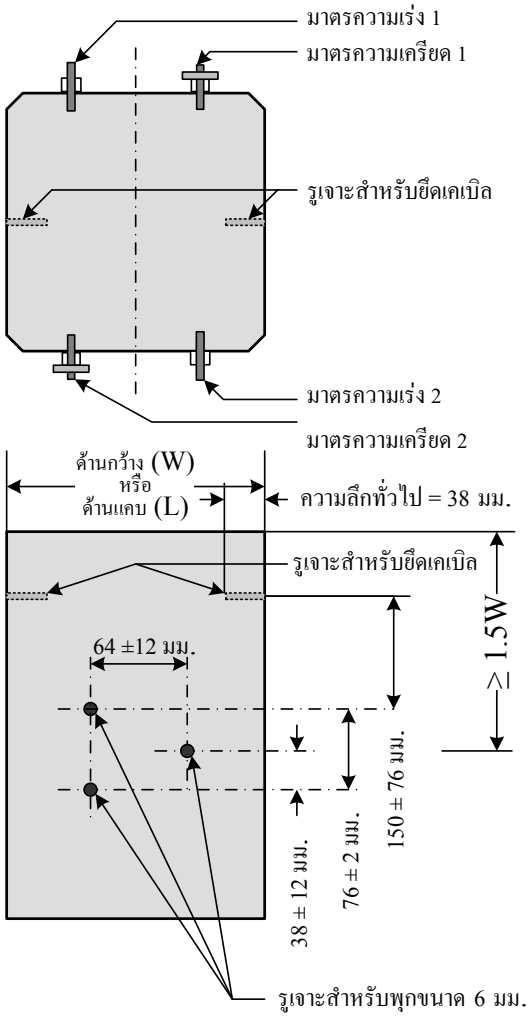
4.2 การจัดวางอุปกรณ์การทดสอบ

หัววัดสัญญาณจะต้องติดตั้งเข้ากับเสาเข็มในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สัญญาณคุณภาพดีและได้รับอิทธิพลจากเงื่อนไขขอบให้น้อยที่สุด มาตรความเร่งและมาตรความเครียดจะต้องติดตั้งเป็นคู่โดยติดตั้งที่ผิวด้านข้างของเสาเข็มในด้านที่ตรงข้ามกัน มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของเสาเข็มเท่ากันและห่างจากหัวเสาเข็มไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม นอกจากนี้หัววัดสัญญาณ แต่ละคู่จะต้องติดตั้งให้มีระยะห่างวัดจากหัวเสาเข็มเท่ากันซึ่งทำให้สามารถแยกผลจากแรงดัดและแรงตามแนวแกนของเสาเข็มออกจากกันได้ ทั้งนี้ผู้ทดสอบต้องติดตั้งหัววัดสัญญาณเข้ากับเสาเข็มโดยใช้วิธีการยึดที่มั่นคงเช่น สลักเกลียว กาว หรือ การเชื่อม เพื่อป้องกันการเลื่อนระหว่างทดสอบ ตำแหน่งแนะนำสำหรับการติดตั้งหัววัดสัญญาณเข้ากับเสาเข็มทดสอบชนิดต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ถึงรูปที่ 6



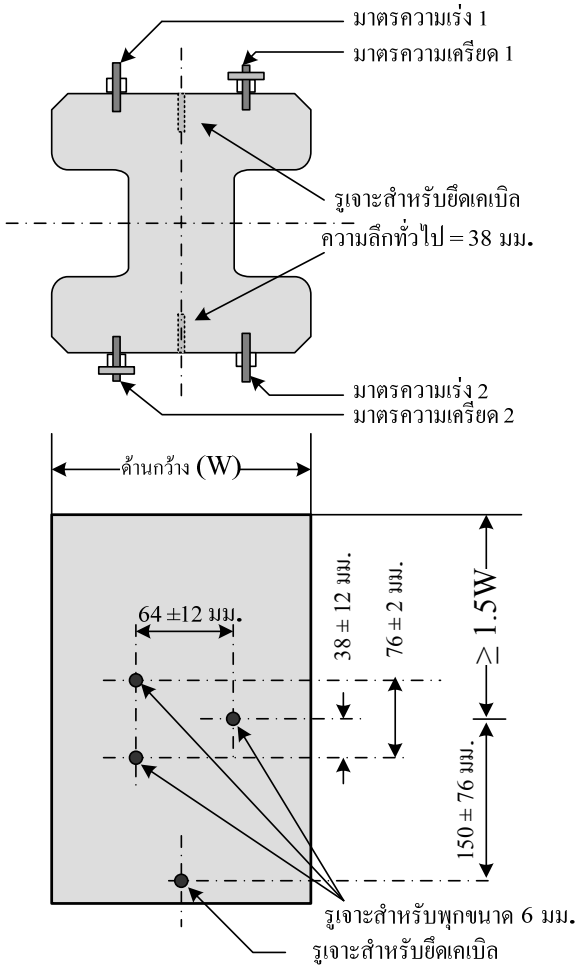
รูปที่ 1 ตำแหน่งแนะนำสำหรับการติดตั้งหัววัดสัญญาณเข้ากับเสาเข็มเหล็กแบบท่อ

(ข้อ 4.2)



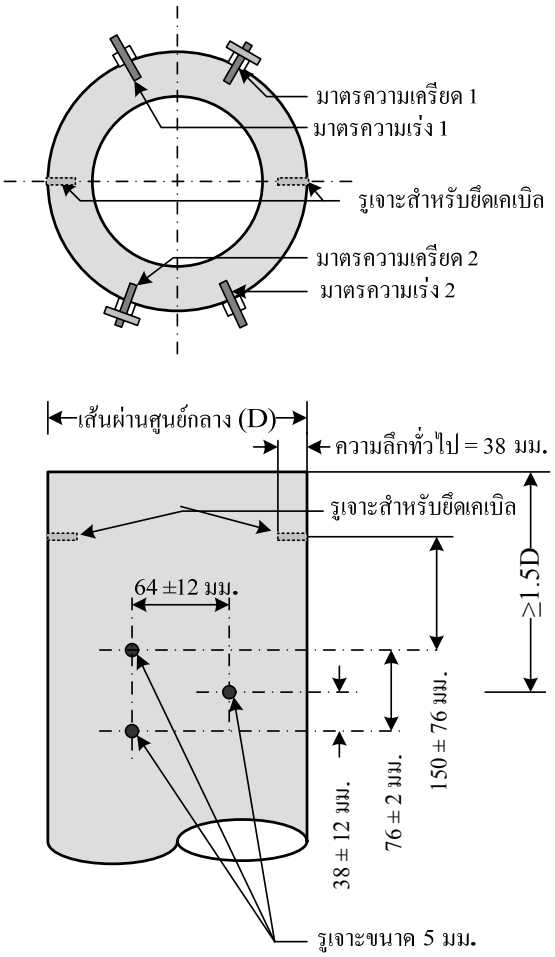
รูปที่ 2 ตำแหน่งแนะนำสำหรับการติดตั้งหัววัดสัญญาณเข้ากับเสาเข็มคอนกรีตสี่เหลี่ยมตัน

(ข้อ 4.2)



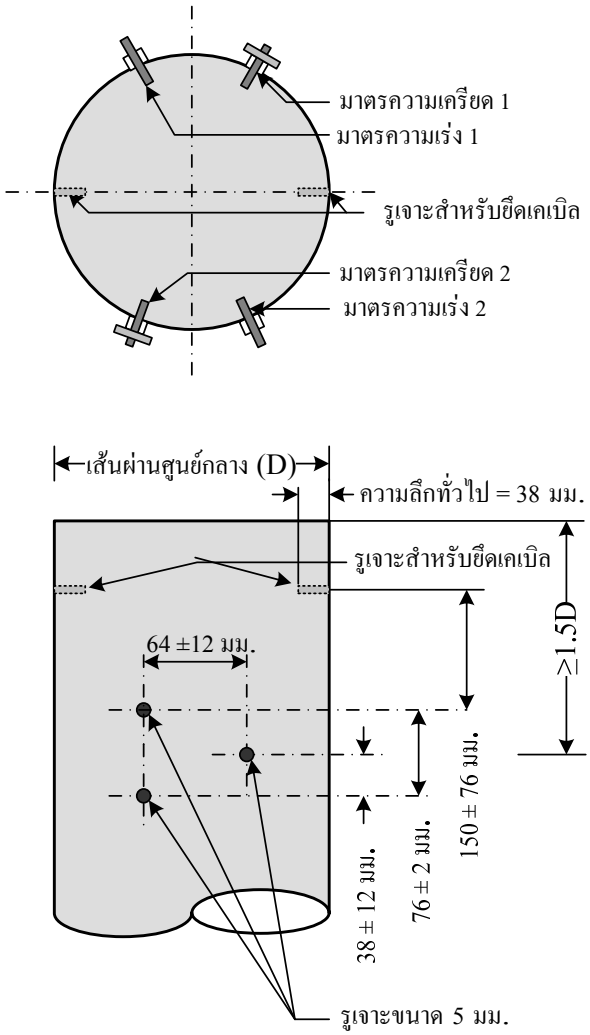
รูปที่ 3 ตำแหน่งแนะนำสำหรับการติดตั้งหัววัดสัญญาณเข้ากับเสาเข็มคอนกรีตรูปตัว I

(ข้อ 4.2)



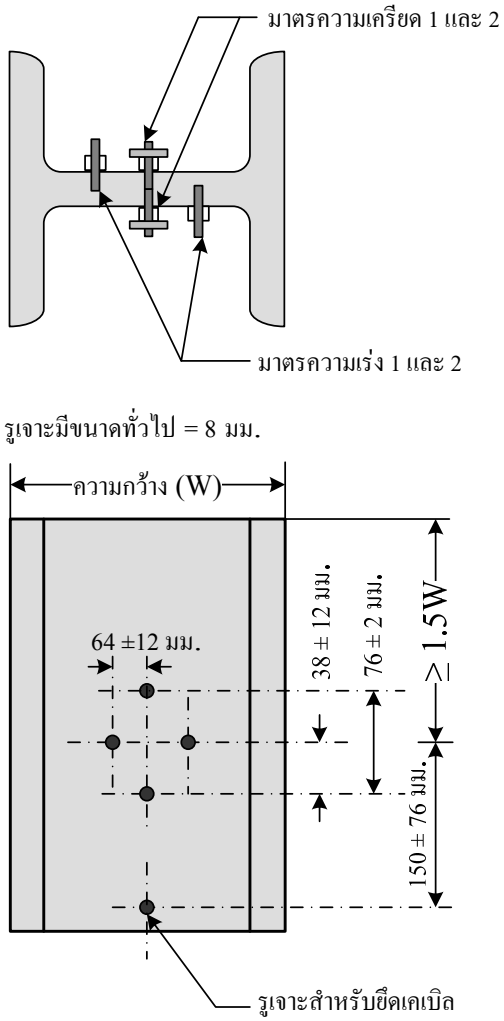
รูปที่ 4 ตำแหน่งแนะนำสำหรับการติดตั้งหัววัดสัญญาณเข้ากับเสาเข็มคอนกรีตกลมกลวง

(ข้อ 4.2)



รูปที่ 5 ตำแหน่งแนะนำสำหรับการติดตั้งหัววัดสัญญาณเข้ากับเสาเข็มไม้

(ข้อ 4.2)



รูปที่ 6 ตำแหน่งแนะนำสำหรับการติดตั้งหัววัดสัญญาณเข้ากับเสาเข็มเหล็กรูปพรรณ

(ข้อ 4.2)

4.3 การตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ก่อนเริ่มตอกทดสอบ

4.3.1 ก่อนเริ่มตอกทดสอบ ผู้ทดสอบต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าอุปกรณ์ตอกทดสอบติดตั้งได้ตรงศูนย์กับเสาเข็มทดสอบ และตรวจสอบการทำงานของหัววัดสัญญาณ สายส่งสัญญาณ และระบบตรวจวัดสัญญาณ ว่าสามารถทำงานได้ถูกต้องรวมทั้งต้องตรวจสอบสภาพสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าด้วย

4.3.2 ผู้ทดสอบต้องตรวจสอบระบบตรวจวัดสัญญาณด้วยตนเองอย่างน้อย 1 ครั้งสำหรับทุกวันที่ทำการทดสอบ หากพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเกินกว่าที่ผู้ผลิตได้ระบุไว้ให้ทำการสอบเทียบอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบตรวจวัดสัญญาณใหม่ก่อนนำไปใช้งาน นอกจากนี้ระบบตรวจวัดสัญญาณและหัววัดสัญญาณควรสอบเทียบตามมาตรฐานของผู้ผลิตอย่างน้อยทุกๆ 2 ปี

4.4 การตอกทดสอบและการตรวจวัดสัญญาณ

4.4.1 เมื่อได้ตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ทดสอบแล้ว ให้ตรวจสอบหรือปรับความเฉของช่องสัญญาณให้เป็นศูนย์ก่อนตอกทดสอบทุกครั้ง โดยทั่วไปการทดสอบจะเริ่มต้นด้วยการตอกเบาๆ เพื่อตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์และตรวจสอบค่าความเร็วของคลื่นยืดหยุ่นก่อน หลังจากนั้นแล้วจะค่อยๆ เพิ่มความแรงของการตอกขึ้นจนกระทั่งบรรลุเป้าหมายของการทดสอบ เช่น การทรุดตัวจากการตอกหนึ่งครั้งมีค่ามากจนเชื่อได้ว่าแรงต้านทานของชั้นดินมีค่าถึงขีดสุด หรือ กำลังรับน้ำหนักจากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่าน้ำหนักบรรทุกเป้าหมายแล้ว เป็นต้น หรือจนกระทั่งเมื่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นอาจทำความเสียหายต่อเสาเข็มได้

4.4.2 ในการทดสอบแต่ละครั้ง ผู้ทดสอบต้องตอกทดสอบและบันทึกสัญญาณที่ได้จากการตอกทดสอบประมาณ 2 ถึง 3 ชุดข้อมูลขึ้นไป โดยเพิ่มความแรงการตอกทดสอบจนกระทั่งบรรลุเป้าหมายของการทดสอบ ในการตอกทดสอบแต่ละครั้งผู้ทดสอบจะต้องตรวจสอบค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็มและค่าการทรุดตัวสุทธิของเสาเข็มเพื่อประเมินความแรงที่จะเพิ่มขึ้นในการตอกทดสอบครั้งต่อไป[1] นอกจากข้อมูลที่ได้จากหัววัดสัญญาณแล้วในขณะตอกทดสอบให้ผู้ทดสอบบันทึกข้อมูลดังต่อไปนี้ไว้ในระเบียนการตอกทดสอบด้วย

(1) จำนวนการตอกสะสม

(2) ครั้งที่ของการทดสอบ

(3) ความต้านทานการตอก[2] ทุกๆ ระดับความลึก

4.5 การตรวจสอบคุณภาพสัญญาณและบันทึกผลการตรวจวัด

4.5.1 การตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติ แต่เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยกรองผลการทดสอบที่มีคุณภาพต่ำทิ้งไปได้และทำให้สามารถตัดสินใจทำการทดสอบเสริมได้อย่างทันการณ์ การตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณ ประกอบด้วยการประเมินว่าสัญญาณที่วัดได้มีขนาดและระยะเวลาเป็นไปตามคาดการณ์หรือไม่ ผู้ทดสอบควรตรวจสอบความถูกต้องและคุณภาพของสัญญาณด้วยอุปกรณ์แสดงผลในทันที หากสัญญาณที่ได้มีลักษณะไม่สอดคล้องกันให้สันนิษฐานว่าอุปกรณ์การทดสอบชนิดใดชนิดหนึ่งทำงานผิดปกติหรือไม่ได้รับการสอบเทียบอย่างเหมาะสม และควรตรวจสอบหาสาเหตุทันที

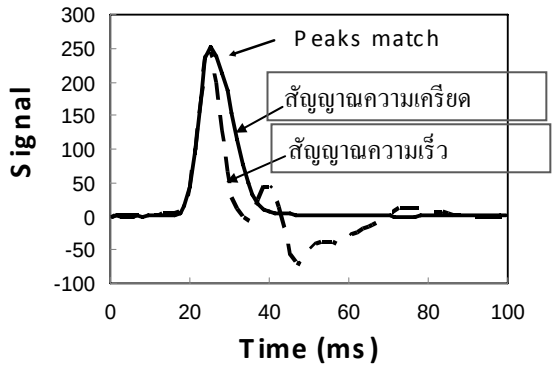
4.5.2 สัญญาณที่ได้จากมาตรความเครียดและจากมาตรความเร่งควรมีลักษณะสอดคล้องและเป็นสัดส่วนต่อกัน นอกจากนี้ลักษณะอื่นๆ ของสัญญาณ เช่น ค่าคงค้างของแรงและความเร็วภายหลัง

---

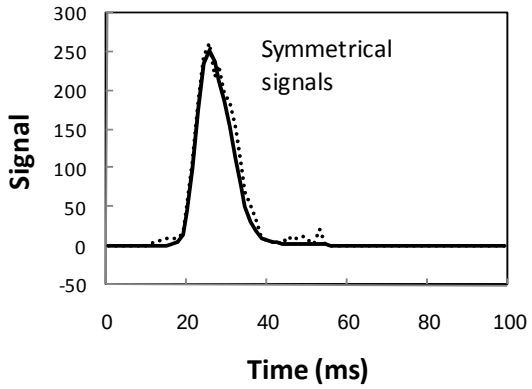
[1] หรืออาจจะประเมินระยะยกในการตอกครั้งต่อไปจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธีสมการคลื่น

[2] เช่น การยุบตัวและคืนตัว การทรุดตัวจากการตอกหนึ่งครั้ง ค่าจากการนับจำนวนตอก เป็นต้น

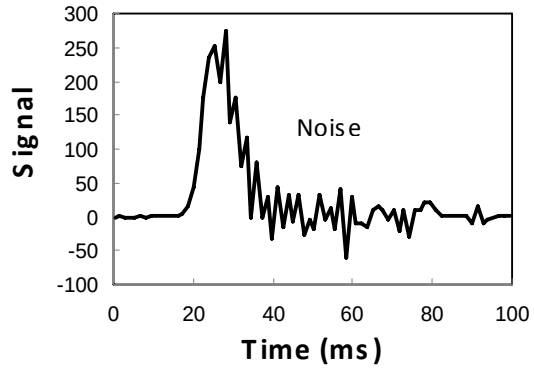
การทดสอบ รูปร่างของคลื่นและสัญญาณรบกวน และความสมมาตรของสัญญาณจากมาตรวัดที่ติดตั้งตรงข้ามกันก็สามารถใช้พิจารณาประกอบได้ดังแสดงในรูปที่ 7



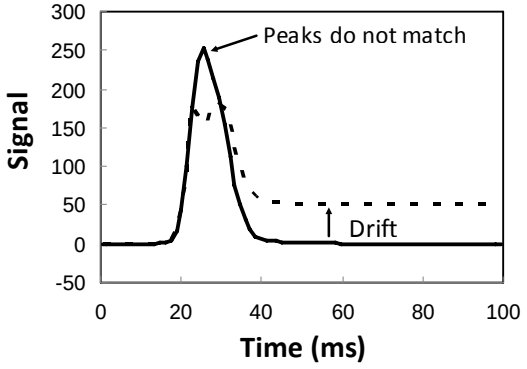
ก) สัญญาณความเครียดและความเร็วสอดคล้องกัน



ข) สัญญาณจากมาตรวัดคู่เดียวกันควรคล้ายกัน



ค) สัญญาณรบกวน



ง) สัญญาณจากมาตรวัดคู่เดียวกันที่ไม่ควรใช้

รูปที่ 7 ตัวอย่างของสัญญาณที่ควรใช้ (ก และ ข) และไม่ควรใช้ (ค และ ง)

(ข้อ 4.5)

5. การวิเคราะห์และการรายงานผลการทดสอบ

5.1 การแปรผลการวัด

สัญญาณที่วัดได้ต้องนำมาจัดทำให้อยู่ในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (1) แรงกระทำตามแกนกับเวลา (2) ความเร็วของอนุภาคเสาเข็มกับเวลา

5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

สัญญาณที่วัดได้จากการทดสอบให้วิเคราะห์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นจากทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงหรือวิธีอื่นๆ ที่สามารถจำลองการแพร่กระจายของคลื่นหน่วยแรงได้ เช่น วิธีของเคส วิธีจับคู่สัญญาณ เป็นต้น

5.3 การรายงานผลการทดสอบ

5.3.1 ผู้ทดสอบควรจัดเตรียมข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องของสถานที่ทดสอบเพื่อการตรวจสอบย้อนหลัง นอกจากนี้ยังควรจัดเตรียมข้อมูลชั้นดินหรือผลการทดสอบของเสาเข็มที่อยู่ใกล้เคียงเพื่อช่วยให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้น รายงานผลการทดสอบที่สมบูรณ์ควรประกอบด้วยรายการที่จะแสดงต่อไปนี้

1. หมวดทั่วไป
2. หมวดคุณสมบัติและวิธีก่อสร้างเสาเข็มทดสอบ
3. หมวดอุปกรณ์ทดสอบ
4. หมวดการทดสอบ
5. หมวดการประมวลและวิเคราะห์ผล
6. หมวดสรุป
7. หมวดอื่นๆ

5.3.2 ข้อมูลรายการใดที่ไม่สามารถหาได้ควรระบุไว้ให้ชัดเจนในรายงานด้วย สำหรับรายละเอียดของแต่ละรายการเป็นดังนี้

(1) หมวดทั่วไป

1.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

1.2 ข้อมูลของโครงการก่อสร้าง

1.3 ข้อมูลชั้นดินจากหลุมเจาะที่อยู่ใกล้เคียง

(2) หมวดคุณสมบัติและวิธีก่อสร้างเสาเข็มทดสอบ

2.1 คุณสมบัติของเสาเข็มทดสอบ

2.1.1 ข้อมูลที่ใช้อ้างอิงถึงเสาเข็ม เช่น พิกัดตำแหน่ง หรือ หมายเลขเสาเข็ม

2.1.2 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้และส่วนปลอดภัยของเสาเข็ม หรือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม

2.1.3 ชนิดและขนาดของเสาเข็ม

2.1.3.1 สำหรับเสาเข็มคอนกรีต ควรระบุ ขนาด ความยาว ประเภท (หล่อในที่ หรือ หล่อสำเร็จ) เวลาที่ก่อสร้างเสร็จ แรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบเสาเข็ม ความหนาแน่นของคอนกรีต แรงอัดประสิทธิผล รายละเอียดการเสริมเหล็ก

2.1.3.2 สำหรับเสาเข็มเหล็ก ควรระบุ ขนาด ความยาว ชนิดของเหล็ก กำลังคราก ชนิดของเสาเข็ม (เช่น เสาเข็มไร้รอยตะเข็บ เสาเข็มเหล็กม้วน เสาเข็มเหล็กรูปพรรณ เป็นต้น)

2.1.3.3 สำหรับเสาเข็มไม้ ควรระบุ ความยาว ความตรง วิธีการรักษาเนื้อไม้ ขนาดของปลายและโคนเสาเข็ม ความหนาแน่น

2.1.4 ตำแหน่งและลักษณะของรอยต่อ (ถ้ามี)

2.1.5 ลักษณะของการป้องกันปลายเสาเข็ม (ถ้ามี)

2.1.6 ลักษณะของการเคลือบผิวเสาเข็ม (ถ้ามี)

2.1.7 ความเอียงจากแกนดิ่งของเสาเข็ม (ถ้ามี)

2.1.8 ข้อสังเกตจากการตรวจสอบเสาเข็ม เช่น การหลุดร่อน รอยแตก ลักษณะของหน้าตัดบริเวณหัวเสาเข็ม

2.2 วิธีการก่อสร้างเสาเข็มทดสอบ

2.2.1 สำหรับเสาเข็มหล่อในที่ ให้ระบุขนาดของหัวเจาะ ความยาวเสาเข็มและปริมาตรคอนกรีตที่ใช้ ระดับตัดหัวเสาเข็ม (Cut-off Level) วิธีการที่ใช้ประกอบการก่อสร้าง เช่น ขบวนการทำงานในกรณีที่ใช้ปลอกเหล็กป้องกันหลุมเจาะพังทลาย เป็นต้น[1]

2.2.2 สำหรับเสาเข็มตอก ให้ระบุรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้และระเบียนการตอก เช่น น้ำหนักตุ้มตอกเสาเข็ม ระยะยกตุ้ม หรือ พลังงานของอุปกรณ์ตอกเสาเข็ม ชนิดของหมอนรองตุ้มตอก ชนิดของหมอนรองหัวเสาเข็ม ชนิดของเสาส่ง อุปกรณ์ที่ใช้ในการเจาะนำ จำนวนตอก หรือ อัตราการทรุดตัวต่อการตอกของเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการตอกก่อสร้าง เป็นต้น[2]

2.2.3 ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง อาทิ การหยุดตอกชั่วคราว การพังทลายของหลุมเจาะ ปริมาณทรายในเสาเข็มเหนือระดับตัดหัวเสาเข็ม

(3) หมวดอุปกรณ์ทดสอบ

3.1 อุปกรณ์ตอกทดสอบ

3.1.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของอุปกรณ์ตอกทดสอบ

3.1.2 ภาพถ่ายของอุปกรณ์และการปฏิบัติงาน

3.2 หัววัดสัญญาณ สายส่งสัญญาณ และระบบวัดสัญญาณ

3.2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของหัววัดสัญญาณ สายส่งสัญญาณ และระบบวัดสัญญาณ

3.2.2 ภาพถ่ายของอุปกรณ์และการปฏิบัติงาน (ถ้ามี)

3.2.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดสัญญาณบนเสาเข็มทดสอบ

3.2.4 ความยาวเสาเข็มระหว่างตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดสัญญาณถึงปลายเสาเข็ม พื้นที่หน้าตัด ความหนาแน่น ความเร็วคลื่นยืดหยุ่น และ มอดุลัสยืดหยุ่นเชิงพลวัตของเสาเข็มทดสอบ

---

[1] ตามมาตรฐาน มยธ. 106-2533

[2] ตามมาตรฐาน มยธ. 106-2533

3.2.5 ระยะเวลาการวัด และ ความถี่ในการเก็บข้อมูล

(4) หมวดการทดสอบ

4.1 วัน เวลาที่ทำการทดสอบ และประเภทของการตอกทดสอบ

4.2 สภาพอากาศ

4.3 วิธีการตอกทดสอบ

4.4 บันทึกการแก้ไขปัญหา การดำเนินงานที่ต่างไปจากแผนปฏิบัติงาน

4.5 ระเบียนการตอกทดสอบ ซึ่งแสดงถึงแรงต้านทานระหว่างการตอก เช่น การนับจำนวนตอก ระยะจมตัวต่อการตอกหนึ่งครั้ง เป็นต้น

(5) หมวดการประมวลและวิเคราะห์ผล

5.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความเร็วและแรงโดยใช้ข้อมูลจากผลการตอกที่เป็นตัวแทนของการทดสอบ

5.2 วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ เอกสารอ้างอิง รายละเอียดการวิเคราะห์ ประเภทแบบจำลอง รายการสรุปค่าตัวแปรที่ใช้ เช่น ค่าความหน่วง (Damping Factor) ค่าการเคลื่อนที่วิบัติ[1] (Quake) การกระจายแรงต้านทานตามความยาวของเสาเข็ม (Resistance Distribution) เป็นต้น

5.3 ผลการวิเคราะห์ ซึ่งอาจประกอบด้วย

5.3.1 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทดสอบ และ ข้อสังเกตเกี่ยวกับกำลังรับน้ำหนักที่วิเคราะห์ได้ว่าเป็นกำลังรับน้ำหนักในสภาพที่ดินถูกรบกวนหรือเป็นกำลังรับน้ำหนักในสภาพที่ดินคืนสภาพแล้วบางส่วน

5.3.2 ข้อมูลประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตอกทดสอบ เช่น โดยการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าที่ระบุโดยผู้ผลิต

5.3.3 ข้อมูลเกี่ยวกับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นขณะตอกเสาเข็ม (Driving Stress)

5.3.4 ข้อมูลเกี่ยวกับความสมบูรณ์ของเสาเข็ม (Integrity of Pile)

(6) หมวดสรุป อาทิ ผลสรุปโดยรวม ข้อสังเกต และ คำแนะนำอื่นๆ

(7) หมวดอื่นๆ อาทิ เอกสารอ้างอิง เอกสารการก่อสร้างที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น

---

[1] ค่าการเคลื่อนที่วิบัติ คือ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเสาเข็มและดินที่ทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดินมีค่าสูงจนดินเกิดการวิบัติ

6. ข้อแนะนำและข้อควรคำนึงในการประยุกต์ใช้ผลการวิเคราะห์

6.1 เมื่อพิจารณาถึงสภาวะของชั้นดินและเสาเข็มขณะโดนตอก ในสภาวะดังกล่าวเสาเข็มจะถูกตอกจนจมตัวลงโดยเกิดการเลื่อนไถลระหว่างผิวด้านข้างกับชั้นดินโดยรอบพร้อมกับการยุบอัดตัวของชั้นดินที่รองรับปลายเสาเข็ม พฤติกรรมการถ่ายแรงของดินทั้งสองบริเวณจะมีความแตกต่างกันโดยแรงต้านทานบริเวณผิวด้านข้างจะสามารถพัฒนากำลังจนถึงค่าสูงสุดได้รวดเร็วกว่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในขณะที่ทดสอบจะเกิดการวิบัติที่บริเวณผิวด้านข้างของเสาเข็มก่อน และจะต้องทำให้เสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวในปริมาณที่มากพอสมควรจึงจะเกิดการวิบัติที่ปลายเสาเข็มด้วย ดังนั้นผู้ทดสอบจำเป็นจะต้องทำให้การทรุดตัวสุทธิของเสาเข็มทดสอบมีค่ามากพอ เพื่อให้แน่ใจว่าขณะทดสอบดินบริเวณปลายเข็มได้พัฒนากำลังจนถึงค่าสูงสุด และเป็นสภาพที่ใกล้เคียงกับการวิบัติของเสาเข็ม

6.2 นอกจากกำลังรับน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบ ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ด้วย เช่น ชั้นดินอ่อนที่อยู่ใต้ปลายเสาเข็ม การต่อเสาเข็มตอกซึ่งมีผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวของคลื่น และการสูญเสียพลังงาน เป็นต้น

6.3 สำหรับการทดสอบ เพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ควรทดสอบ ร่วมกับการทดสอบบรรทุกเสาเข็มแบบสถิต และสอบเทียบผลที่ได้

6.4 เนื่องจากการทดสอบ เป็นการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในขณะทดสอบจึงต้องคำนึงถึงอิทธิพลของอายุเสาเข็มเช่น ผลของการคืนกำลังของดิน (Pile Setup) หรือการคลายตัวของดิน (Relaxation) และจะต้องระบุอายุของเสาเข็มขณะทำการทดสอบทุกครั้ง เนื่องจากสาเหตุดังกล่าวหากต้องการประเมินกำลังในระยะยาวของเสาเข็มควรทดสอบโดยการตอกซ้ำเพื่อรอให้ผลกระทบจากการก่อสร้างลดลงไปก่อน ซึ่งอาจเป็นระยะเวลาหลายชั่วโมงสำหรับเสาเข็มในชั้นทรายหรือเป็นระยะเวลาหลายสัปดาห์สำหรับเสาเข็มที่ก่อสร้างในชั้นดินเหนียว การทดสอบอย่างเร่งด่วนภายหลังก่อสร้างเสร็จใหม่ๆ จะทำให้ผลที่ได้ต่างกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกในระยะยาวของเสาเข็ม

6.5 หากสามารถสร้างความสัมพันธ์ (โดยมีค่าสหสัมพันธ์ที่ดี[1]) ระหว่างผลการทดสอบโดยการตอกซ้ำกับกำลังรับน้ำหนักขณะตอกได้ จะมีประโยชน์ต่อการควบคุมการตอกเสาเข็มเป็นอย่างมาก

---

[1] ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) หมายถึง การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปว่ามีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันในรูปแบบสมการเชิงเส้นรูปแบบใด เพื่อให้สามารถทำนายค่าตัวแปรใดๆ ได้ในกรณีที่ไม่ทราบค่าตัวแปรอีกตัวหนึ่ง โดยในกรณีนี้ หมายถึง ความสัมพันธ์ระหว่างผลการตอกซ้ำกับกำลังรับน้ำหนักขณะตอก

7. เอกสารอ้างอิง

7.1 American Society for Testing and Materials, ASTM (1994). Annual Book of Standards, ASTM D1143 Standard test method for piles under static axial compressive load.

7.2 American Society for Testing and Materials, ASTM (2000). Annual Book of Standards, ASTM D4945 Standard test method for high-strain dynamic testing of piles.

7.3 Goble, G.G. and Rausche, F. (1970). Pile Load Test by Impact Driving. Highway Research Record, Highway Research Board, No. 333, Washington, DC.

7.4 Goble, G.G., Likins, G.E. and Rausche, F. (1975). Bearing Capacity of Piles from Dynamic Meaurements. Final Report, Department of Civil Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio.

7.5 Goble, G.G. and Rausche, F. (1976). Wave Equation Analysis of Pile Driving – WEAP Program, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Research and Development, Washington, D.C., Volumes I-IV.

7.6 Goble, G.G. and Rausche, F. (1986). Wave Equation Analysis of Pile Driving – WEAP86 Program, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Implementation Division, McLean, Volumes I-IV.

7.7 Hannigan, P.J., Goble, G.G., Thendean, G., Likins, G.E. and Rausche, F. 1996. Design and construction of driven pile foundations. Workshop manual, Publication No. FHWA-HI-97-014.

7.8 Hirsch, T.J., Carr, L. and Lowery, L.L. (1976) Pile Driving Analysis. TTI Program. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Research and Development, Washington, D.C., Volumes I-IV.

7.9 Japanese geotechnical society, JGS (2002). Method for Dynamic Load Test of Single Piles, JGS 1816-2002.

7.10 Profound B.V., P.O. Box 469 2740 AL Waddinxveen, The Netherlands.

7.11 Pile dynamics, Inc. 4535 Renaissance Parkway Cleveland Ohio 44128 USA.

7.12 Rausche, F., Moses, F. and G.G. Goble 1972. Soil Resistance Predictions form Pile Dynamics. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, Vol. 98, SM 9.

7.13 Rausche, F. and G.G. Goble 1979. Determination of Pile Damage by Top Measurements. Behavior of Deep Foundation, ASTM STP 670. ASTM, 1979, pp. 500-506.

7.14 Rausche, F., G.G. Goble & G. Likins 1985. Dynamic determination of pile capacity. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, 111(3): 367-383.

7.15 Smith, E.A.L. (1960) "Pile-driving analysis by wave equation." Journal of soil mechanics and foundation division, ASCE, Vol. 86, SM4.

7.16 Test consult Ltd, Ruby House, 40A Hardwick Grange, Woolston, Warrington, WA1 4RF, Cheshire UK.

7.17 มาตรฐาน มยธ. 106-2533 มาตรฐานงานเสาเข็ม

ภาคผนวก ก. ประวัติ ประโยชน์ และข้อจำกัดของการทดสอบ

ก1. การทดสอบบรรทุกเสาเข็มแบบพลศาสตร์เป็นการทดสอบโดยการปล่อยตุ้มน้ำหนักให้ตกลงบนหัวเสาเข็มหรือใช้อุปกรณ์อื่นที่สามารถทำให้เกิดแรงในลักษณะเดียวกันต่อเสาเข็มแล้วใช้ผลตอบสนองของเสาเข็มที่วัดได้เป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์เชิงพลวัตเพื่อประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักเชิงสถิตของเสาเข็ม และความสม่ำเสมอของเสาเข็มทั้งในด้านขนาด ความแข็งเกร็ง และ ความต่อเนื่องของเนื้อวัสดุ

การทดสอบมีจุดเริ่มต้นจากการใช้สูตรตอกเสาเข็มเพื่อประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม แต่เนื่องจากผลที่ได้จากสูตรตอกเสาเข็มมีความคลาดเคลื่อนสูง[1] จึงมีความพยายามที่จะหาวิธีการที่ดีขึ้นโดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดเพิ่มขึ้นและใช้ทฤษฎีที่ซับซ้อนขึ้นเรื่อยๆ ในปี ค.ศ. 1958 นักศึกษาของสถาบันเทคโนโลยีเคส[2] ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่วัดได้จากการทดสอบเสาเข็ม ซึ่งต่อมาเป็นที่รู้จักกันว่า “วิธีของเคส” (CASE Method) หลังจากนั้นโครงการวิจัยดังกล่าวก็ได้รับการสนับสนุนอย่างต่อเนื่องจากทั้งกรมการขนส่งของรัฐโอไฮโอ[3]และสำนักงานทางหลวงแห่งสหรัฐอเมริกา[4] จนถึงปีค.ศ. 1976 และมีการวิจัยเกิดขึ้นหลายฉบับ[5]

การทดสอบ มีพัฒนาการอย่างรวดเร็วในช่วง 50 ปีที่ผ่านมา ทั้งนี้เนื่องจากความก้าวหน้าของอุปกรณ์วัดและบันทึกสัญญาณ เครื่องช่วยคำนวณ รวมทั้งระเบียบวิธีการวิเคราะห์ผล อุปกรณ์วัดที่ดีขึ้น ทำให้สามารถวัดสัญญาณที่ชัดเจนโดยมีสัญญาณรบกวนต่ำ ในขณะที่มาตรวัดต่างๆ มีขนาดเล็กลงทำให้สามารถติดตั้งกับเสาเข็มได้ง่าย พัฒนาการด้านอุปกรณ์ปรับสัญญาณ และอุปกรณ์บันทึกสัญญาณทำให้สามารถแยกความแตกต่างของสัญญาณได้ดีขึ้น และสามารถบันทึกข้อมูลได้รวดเร็วพอสำหรับการตรวจวัดเชิงพลวัต เครื่องช่วยคำนวณซึ่งได้แก่คอมพิวเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและลดความผิดพลาด ผลดังกล่าวช่วยกระตุ้นให้เกิดการพัฒนากระบวนวิธีการวิเคราะห์ที่ละเอียด ซับซ้อนและให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงมากขึ้น

ก2. การทดสอบสามารถให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ครอบคลุมตั้งแต่ช่วงวางแผนการก่อสร้างไปจนถึงช่วงที่ก่อสร้างเสาเข็มเสร็จสิ้นแล้ว โดยการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์

---

[1] Hannigan, P.J., Goble, G.G., Thendean, G., Likins, G.E. and Rausche, F. 1996. Design and construction of driven pile foundations. Workshop manual, Publication No. FHWA-HI-97-014.

[2] Case Institute of Technology ปัจจุบันคือ Case Western Reserve University

[3] Ohio department of transportation

[4] Federal highway administration

[5] เอกสารอ้างอิง 7.3, 7.4 และ 7.12

ตอกเสาเข็ม หน่วยแรงที่จะเกิดขึ้นขณะตอก ความต้านทานการตอกเสาเข็ม ซึ่งมีความสำคัญต่อการวางแผนงานก่อสร้างเสาเข็มตอก และความสมบูรณ์ของเสาเข็มที่ก่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วได้ เนื่องจากการทดสอบ ใช้เวลาไม่มากจึงสามารถทดสอบเสาเข็มได้หลายต้นภายในหนึ่งวันโดยเสียค่าใช้จ่ายต่ำ ผลการทดสอบเบื้องต้น (เช่นกำลังรับน้ำหนักตามวิธีของเคส) ยังทราบได้ทันทีหลังจากตอกทดสอบ ทำให้สามารถตัดสินใจแก้ไขปัญหาเร่งด่วนได้อย่างทันการณ์

ก3. การทดสอบสามารถใช้ประเมินกำลังรับน้ำหนักเชิงสถิตแต่ต้องภายหลังจากการพิสูจน์ทราบในพื้นที่ที่ต้องการประเมินกำลังรับน้ำหนักแล้วว่า ผลการประเมินที่ได้กับกำลังรับน้ำหนักเชิงสถิตมีความสัมพันธ์กัน การพิสูจน์ทราบดังกล่าวอาจทำได้โดยการสอบเทียบกับผลหรือข้อมูลที่สามารถประเมินผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์

ก4. สำหรับโครงการก่อสร้างในพื้นที่ที่ไม่เคยมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบกับกำลังรับน้ำหนักเชิงสถิตมาก่อน ควรใช้การทดสอบเป็นส่วนเสริมจากการทดสอบบรรทุกเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ซึ่งจะทำให้สามารถทดสอบได้ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้นโดยเสียค่าใช้จ่ายไม่มาก อย่างไรก็ตามเนื่องจากการทดสอบทั้งสองประเภทมีความแน่นอนต่างกัน (โดยการทดสอบบรรทุกเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์มีความแน่นอนมากกว่า) จึงต้องสอบเทียบระหว่างการทดสอบทั้งสองประเภทก่อนเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน

ก5. กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการทดสอบ นั้นจะให้ค่ากำลังสูงสุดที่เสาเข็มจะรับได้เท่านั้น กำลังรับน้ำหนักดังกล่าวไม่ใช่ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกตามนิยามต่างๆ เช่น นิยามของเดวิดสัน นิยามของมาร์เซอร์คิวิค เป็นต้น ดังนั้นในการนำผลการทดสอบ ไปใช้เปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกตามนิยามอื่นๆ จึงต้องคำนึงถึงความแตกต่างนี้ด้วย นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างแรงต้านทานที่ผิวด้านข้างของเสาเข็มและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบ จะมีความแตกต่างกับอัตราส่วนอย่างเดียวกันที่ได้จากการทดสอบบรรทุกเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ ดังนั้นจึงไม่สามารถนำผลการทดสอบ มาใช้ในการประเมินแรงต้านทานที่ผิวด้านข้างของเสาเข็มหรือแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มแบบแยกจากกัน โดยต้องพิจารณาเป็นกำลังรับน้ำหนักรวมเท่านั้น

ก6. สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มนั้น ผลการทำนายที่ได้จากการทดสอบ จะไม่ตรงกับผลที่ได้จากการทดสอบบรรทุกเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ โดยทั่วไปเมื่อเปรียบเทียบที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากันแล้ว ผลการทำนายการเคลื่อนตัวจากการทดสอบ จะมีค่าน้อยกว่าเป็นอย่างมาก

ภาคผนวก ข. ทฤษฎีคลื่นหน่วยแรง

ข1. เมื่อมีแรงกระแทกตามแนวแกนกระทำที่หัวเสาเข็มจะเกิดแรงเค้นแผ่ขยายออกไปในลักษณะของคลื่น คลื่นหน่วยแรงดังกล่าวจะเดินทางจากหัวเสาเข็มลงไปสู่ปลายเสาเข็มและสะท้อนกลับสู่หัวเสาเข็มอีกทีหนึ่ง ในระหว่างที่คลื่นหน่วยแรงเดินทางนี้จะได้รับอิทธิพลจากแรงต้านทานในมวลดินและจากคุณสมบัติของเสาเข็มทำให้คลื่นหน่วยแรงที่สะท้อนกลับขึ้นมามีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันไป

ข2. เนื่องจากพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของคลื่นหน่วยแรงดังกล่าวเป็นไปตามหลักการการเคลื่อนที่ของคลื่น จึงสามารถนำทฤษฎีพื้นฐานทางกลศาสตร์มาใช้วิเคราะห์ได้ สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \qquad \text{(ข.1)}$$

โดยที่ c คือ ความเร็วของการเดินทางของคลื่นหน่วยแรง

u คือ การเคลื่อนที่ของเนื้อวัสดุเสาเข็มโดยพิจารณาที่ตำแหน่ง x และ ณ เวลา t

ภาคผนวก ค. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบและการตีความ

เนื่องจากลักษณะของการทดสอบที่เป็นแบบพลวัตทำให้เสาเข็มมีแรงต้านทานเพิ่มขึ้นจากสภาพสถิต แรงต้านทานที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวได้แก่ แรงหน่วง (Damping Force) และ แรงเฉื่อย (Inertia Force) นอกจากนี้ แรงต้านทานที่วัดได้จากมาตรวัดที่ติดตั้งบนเสาเข็มยังได้รับผลกระทบจากการสั่นของเสาเข็ม (Wave Equation Phenomenon) ด้วย ดังนั้นแรงต้านทานที่วัดได้จากการทดสอบจึงยังไม่สามารถนำมาใช้ได้ทันที แต่ต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณ การกรองสัญญาณ แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ผลเพื่อแยกออกเป็นแรงต้านทางเชิงพลวัตและแรงต้านทานเชิงสถิตต่อไป

กระบวนการแปลและวิเคราะห์ผลการทดสอบบางส่วนที่นิยมใช้ในการทำงานปัจจุบันสามารถอธิบายโดยสังเขปได้ดังต่อไปนี้

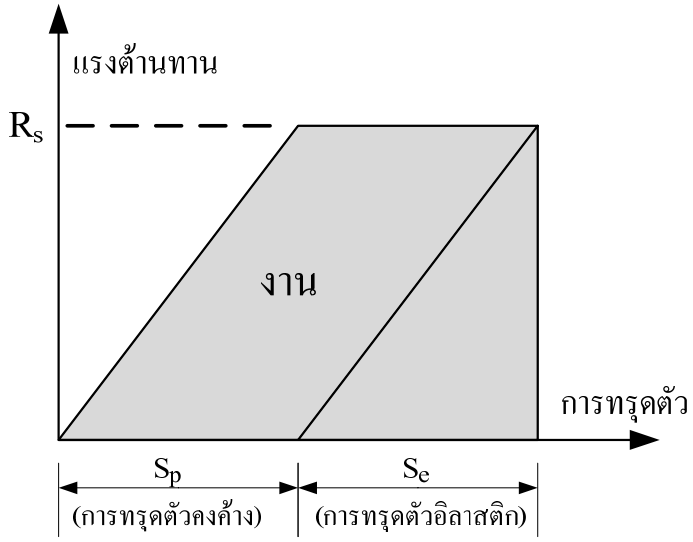
ค1. วิธีพลังงาน (Energy Approach)

วิธีพลังงานใช้หลักสมดุลระหว่างพลังงานที่ใช้ในการตอกเสาเข็มกับงานที่เกิดขึ้นจากการทรุดตัวของเสาเข็ม สมการสมดุลอย่างง่ายของพลังงานที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็มสามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_{driving} = R_s(0.5S_e + S_p) \qquad \text{(ค.1)}$$

พจน์ด้านซ้ายของสมการคือพลังงานจากอุปกรณ์ตอกทดสอบ ในขณะที่พจน์ด้านขวาของสมการคืองานที่เกิดขึ้นจากแรงต้านทานและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มโดยมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ ค-1

เนื่องจากไม่มีการแบ่งแยกว่าแรงต้านทานของเสาเข็มที่เกิดขึ้นขณะตอกเป็นแรงต้านทานเชิงสถิตหรือเป็นแรงต้านทานเชิงซ้อนที่เป็นผลรวมระหว่างแรงต้านทานเชิงสถิตและแรงต้านทานเชิงพลวัตประเภทต่างๆ กำลังของเสาเข็มที่ได้จากวิธีพลังงานจึงเป็นค่าประมาณที่มีความสัมพันธ์ทางอ้อมกับแรงต้านทานเชิงสถิตของเสาเข็มเท่านั้น ในบางกรณีกำลังของเสาเข็มที่ได้อาจแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดสอบกำลังของเสาเข็มด้วยวิธีสถิตก็ได้



รูปที่ ค-1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทาน การทรุดตัวของเสาเข็ม และงานที่เกิดขึ้น

(ข้อ ค1.)

ค1.1 สูตรตอกเสาเข็ม (Driving Formula)

จุดมุ่งหมายหลักของสูตรตอกเสาเข็ม คือ การประเมินกำลังของเสาเข็มในขณะตอกโดยใช้การทรุดตัวคงค้างของเสาเข็มภายหลังการตอก (Permanent Displacement of Pile or Pile Set) พลังงานที่ใช้ในการตอกเสาเข็มเกิดจากพลังงานศักย์ของตุ้มตอกเสาเข็มซึ่งแปรผันเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักของตุ้มและระยะยกตอก เมื่อตุ้มตกกระทบหัวเสาเข็มจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานไปสู่เสาเข็ม เสาเข็มจะใช้พลังงานที่ได้รับนี้ในรูปแบบต่างๆ พร้อมกัน กล่าวคือ พลังงานส่วนหนึ่งจะใช้ไปในการหดตัวของเสาเข็ม (Elastic Shortening) และเกิดการสะสมของพลังงานความเครียด (Strain Energy) พลังงานอีกส่วนหนึ่งจะใช้ไปเพื่อการเอาชนะแรงต้านทานของดินโดยรอบและของดินที่ปลายเสาเข็ม (Penetration Work) นอกจากนี้พลังงานศักย์บางส่วนจะสูญเสียไปเนื่องจากอุปกรณ์การตอกด้วย เช่น ที่หมอนรองตุ้มตอกเสาเข็ม ที่เสาส่ง หรือ ที่กว้านตอกเสาเข็ม เป็นต้น

สูตรตอกเสาเข็มประเมินค่าพลังงานการตอกด้วยสมการ (ค.2) ซึ่งประกอบด้วยพลังงานศักย์ของตุ้มตอกเสาเข็มและประสิทธิภาพของการตอก

$$E_{driving} = n_i n_c W h \qquad \text{(ค.2)}$$

จากสมการ (ค.1) และ (ค.2) ประกอบกับส่วนปลอดภัยสำหรับสูตรตอกเสาเข็ม จะสามารถคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกยอมให้ของเสาเข็มได้ดังนี้

$$Q_{allow} = \frac{R_s}{FS} \qquad \text{(ค.3)}$$

เนื่องจากค่า R_s เป็นค่ากำลังเชิงพลวัตที่มีความสัมพันธ์ทางอ้อมกับแรงต้านทานเชิงสถิตของเสาเข็มดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น จึงไม่แนะนำให้นำไปใช้ในการกำหนดน้ำหนักบรรทุกใช้งานของเสาเข็มโดยตรง การใช้ค่า R_s ที่เหมาะสมนั้นได้แก่การใช้เพื่อควบคุมความสม่ำเสมอของงานเสาเข็มตอกโดยตรวจสอบการทรุดตัวคงค้างจากการตอกเสาเข็มแต่ละครั้ง หรือจากการนับจำนวนตอก[1]

ค.1.2 วิธี Enthru

วิธี Enthru จะใช้ค่า Enthru เป็นค่าพลังงานการตอก ($E_{driving}$) แทนการคำนวณตามสมการ (ค.2) โดยนิยามของ Enthru คือพลังงานสูงสุดที่เสาเข็มสะสมได้จากการตอกทดสอบ ค่าของ Enthru นั้นต้องคำนวณจากสัญญาณเชิงพลศาสตร์ที่วัดได้จากหัววัดสัญญาณโดยตรง ซึ่งแตกต่างจากสูตรตอกเสาเข็มซึ่งคำนวณจากพลังงานศักย์และประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงาน

ตามหลักการของงานและพลังงาน พลังงานที่สะสมไว้ในเสาเข็มที่เวลาหนึ่งๆ จะคำนวณได้จาก

$$E(t) = \int_0^t F(\tau) \cdot v(\tau)\, d\tau \qquad \text{(ค.4)}$$

จากสมการข้างต้น พลังงานที่สะสมไว้ในเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเสาเข็มทรุดตัวลง เมื่อเสาเข็มหยุดทรุดตัวและกำลังจะสะท้อนกลับจะเป็นชั่วขณะเวลาที่พลังงานที่สะสมไว้มีค่ามากที่สุด เพราะหลังจากเสาเข็มเริ่มสะท้อนกลับพลังงานที่สะสมไว้ในเสาเข็มส่วนหนึ่งจะใช้ในการคืนรูปของเสาเข็ม ค่าพลังงานสะสมสูงสุดที่เกิดขึ้นนี้คือค่า Enthru

ค่า Enthru นี้สามารถใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการตอกตามวิธีสูตรตอกเสาเข็มได้ โดยประสิทธิภาพของการตอกมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่าง Enthru กับพลังงานศักย์ของตุ้มตอกเสาเข็มหรือพลังงานตอกที่ระบุไว้โดยผู้ผลิต โดยทั่วไปประสิทธิภาพนี้มีค่าระหว่างร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 85

ค.2 วิธีทฤษฎีคลื่นหน่วยแรง (Stress Wave Theory Approach)

เมื่อหัวเสาเข็มถูกตอกด้วยอุปกรณ์ตอกทดสอบจะเกิดคลื่นหน่วยแรงขึ้นภายในเสาเข็ม คลื่นหน่วยแรงนี้จะเดินทางจากหัวเสาเข็มไปสู่ปลายเสาเข็มและเกิดการสะท้อนจากปลายเสาเข็มกลับสู่หัวเสาเข็ม นอกจากการสะท้อนที่ปลายเสาเข็มแล้วในระหว่างที่คลื่นหน่วยแรงเดินทางไปตามความยาวของเสาเข็มอาจเกิดการสะท้อนกลับได้ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยหลายประการ เช่น การคอดของหน้าตัดเสาเข็ม หรือเสาเข็มเป็นโพรง เป็นต้น

---

[1] ค่าที่ได้จากการนับจำนวนตอกภายหลังเปลี่ยนหมอนรองหัวเสาเข็ม 100 ครั้งแรกไม่ควรนำไปใช้ในการคำนวณใดๆ เพราะหมอนรองหัวเสาเข็มจะยุบตัวมากในช่วงแรกๆ และเริ่มเข้าสู่สภาพคงที่หลังจากการตอกเต็มที่ประมาณ 100 ครั้ง

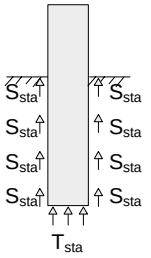
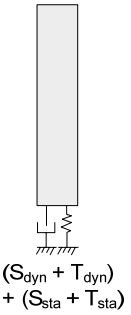
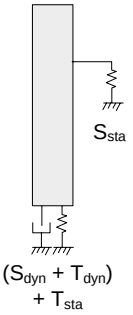
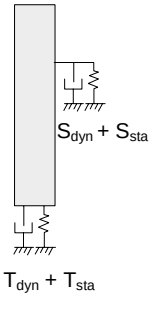
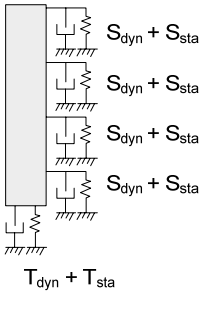
สัญญาณคลื่นสะท้อนที่วัดได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างคลื่นสะท้อนที่ได้จากเสาเข็มที่มีแรงต้านทานจากชั้นดินต่ำกับเสาเข็มที่มีแรงต้านทานจากชั้นดินสูงจะพบว่ามีความแตกต่างกัน โดยคลื่นที่เดินทางผ่านชั้นดินที่มีแรงต้านทานสูงมีแนวโน้มที่จะสูญเสียพลังงานมากกว่า ดังนั้นความแรงของคลื่นสะท้อนที่วัดได้จึงเป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงแรงต้านทานของชั้นดินหรือกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มได้

วิธีทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงใช้ค่าความเครียดและความเร็วของอนุภาคเสาเข็มที่วัดได้จากเหตุการณ์ตอกเป็นข้อมูลหลักเพื่อประเมินพฤติกรรม สภาพ หรือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยพิจารณาความแรงของสัญญาณและเวลาที่คลื่นหน่วยแรงสะท้อนกลับจากตำแหน่งต่างๆ ตามความยาวเสาเข็มเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันประกอบด้วยส่วนย่อยสองประเภทคือสปริงและแดชพอต โดยสปริงใช้จำลองความต้านทานชั้นดินและแดชพอตใช้จำลองความหน่วงของชั้นดินที่มีต่อการสั่นของเสาเข็ม เมื่อแบ่งตามวิธีการหาผลการคำนวณ วิธีทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงจะแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มคือ วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Methods) และวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods)

วิธีเชิงวิเคราะห์จำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อน แล้วหาผลเฉลยรูปแบบปิด (Closed Form Solution) ของสมการคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านแบบจำลองเสาเข็มโดยใช้วิธีลักษณะเฉพาะ (Characteristic Method) แบบจำลองที่ใช้ในวิธีเชิงวิเคราะห์ประกอบด้วยสปริงและแดชพอตจำนวนไม่มากโดยมีตัวอย่างเช่นดังแสดงไว้ในรูปที่ ค-2 วิธีเชิงวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น วิธีของเคส วิธีอิมพีแดนซ์ และ วิธีของTNO[1] เป็นต้น

1 Netherlands organization for applied scientific research (Nederlandse organisatie voor toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek)

สภาพจริง	วิธีเชิงวิเคราะห์ (ที่สามารถให้ผลการวิเคราะห์ขณะทดสอบได้ทันที)			วิธีเชิงตัวเลข (ทำในสำนักงาน)
	วิธีของเคส	วิธีอิมพีแดนซ์	วิธีของTNO	วิธีจับคู่สัญญาณ
				

หมายเหตุ : S_{sta} = Static Skin Resistance, T_{sta} = Static Toe Resistance,

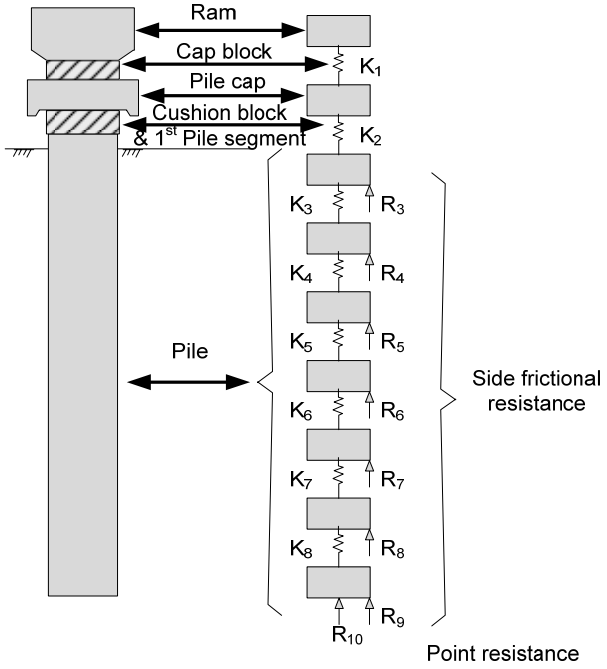
S_{dyn} = Dynamic Skin Resistance, T_{dyn} = Dynamic Toe Resistance

รูปที่ ค-2 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในวิธีทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงเชิงวิเคราะห์

(ข้อ ค.2)

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเชิงวิเคราะห์ แบบจำลองที่ใช้ในวิธีเชิงตัวเลขจะมีความซับซ้อนมากกว่าตัวอย่างเช่น แบบจำลองที่แสดงไว้ในรูปที่ ค-3 เนื่องจากความซับซ้อนดังกล่าวจึงไม่สามารถหาผลเฉลยรูปปิดได้โดยง่ายและจำเป็นจะต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ สมิทธ์[7.15] เป็นผู้เริ่มนำวิธีเชิงตัวเลขมาใช้งานจริง หลังจากนั้นวิธีการดังกล่าวได้รับการพัฒนาโดยนักวิชาการและหน่วยงานต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดของกระบวนงานแตกต่างกัน วิธีเชิงตัวเลขที่ได้พัฒนาขึ้นภายหลังนี้เมื่อแบ่งออกเป็นกลุ่มจะแยกเป็น วิธีสมการคลื่น วิธีจับคู่สัญญาณ และ วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

เนื่องจากกระบวนการคำนวณและแบบจำลองตามวิธีเชิงตัวเลขมีความซับซ้อน ในการทำงานจริงจึงมักพบว่าผลการคำนวณส่วนใหญ่จะได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปซึ่งเขียนขึ้นเพื่อการทดสอบโดยเฉพาะ ตัวอย่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธีสมการคลื่นเช่น TTI[7.8] WEAP[7.4,7.6] GRLWEAP[7.11] TNOWAVE[7.10] โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธีจับคู่สัญญาณเช่น CAPWAP[7.11] SIMBAT[7.16] เป็นต้น



ก) เสาเข็มจริง ข) แบบจำลอง

รูปที่ ค-3 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในวิธีทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงเชิงตัวเลข

(ข้อ ค.2)

ค2.1 วิธีของเคส (CASE Method)

วิธีของเคสเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน สามารถหาผลลัพธ์ได้รวดเร็ว ในการปฏิบัติงานปรกตินิยมใช้วิธีของเคสเพื่อการประเมินขั้นต้นในสนามและนำผลการตรวจวัดที่ได้ไปวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วยวิธีเชิงตัวเลขในภายหลัง

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามวิธีของเคสสมมุติให้แรงต้านทานและความหน่วงทั้งหมดเกิดขึ้นที่ปลายเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ ค-2 และคำนวณกำลังรับน้ำหนักเชิงสถิตของเสาเข็มจากสมการ (ค.5) โดยกำหนดให้เวลา t_1 ในสมการ (ค.5) เป็นเวลาที่แรงหน้าตัดหรือความเร็วของอนุภาคเสาเข็มมีค่ามากที่สุด[1]

$$R_s = T - D$$

$$T = \frac{1}{2}\left\{ F(t_1) + F(t_1 + 2\frac{L}{c}) + Z\left(v(t_1) + v(t_1 + 2\frac{L}{c}) \right) \right\} \qquad \text{(ค.5)}$$

$$D = J\left(2v(t_1) - \frac{T}{Z} \right)$$

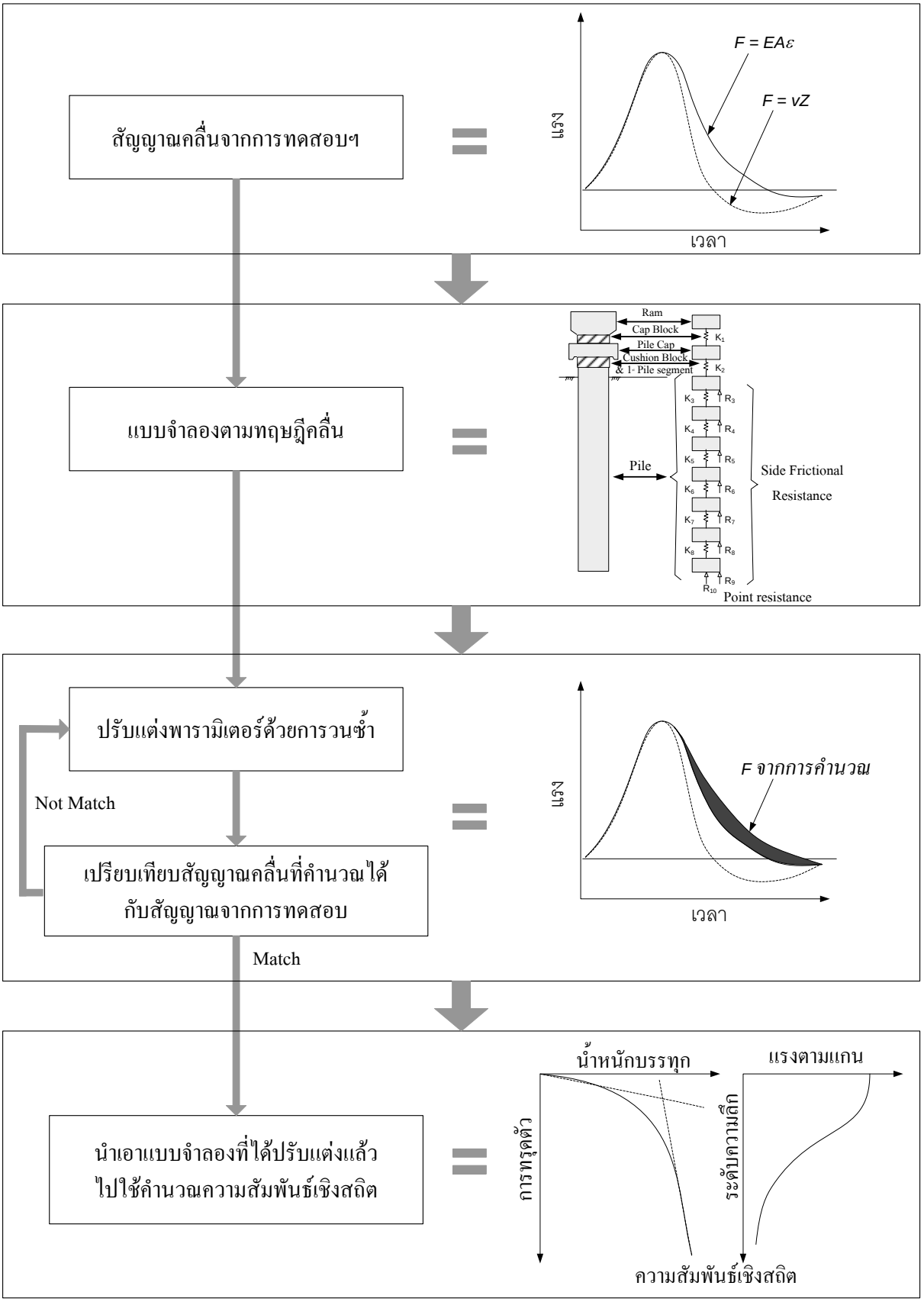
[1] สำหรับชั้นดินบางประเภท มีผู้เสนอให้ใช้วิธีทดลองแทนค่า t_1 ด้วยเวลาตำแหน่งต่างๆ และใช้ค่า t_1 ที่ทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักเชิงสถิตจากการคำนวณตามสมการ (ค.5) มีค่ามากที่สุด

ค.2.2 วิธีสมการคลื่น (Wave Equation Method)

วิธีเชิงตัวเลขโดยใช้แบบจำลองหนึ่งมิติมีหลักการสำคัญคือการจำลองพฤติกรรมของเสาเข็ม และชั้นดินด้วยชิ้นส่วนสั้นๆ ที่เรียงต่อกันตามความยาวเสาเข็ม และใช้สปริงและแดชพอตเป็นตัวแทนของแรงต้านทานที่เกิดขึ้นขณะที่คลื่นหน่วยแรงเคลื่อนที่ผ่านดังเช่นที่ได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ ค2 วิธีเชิงตัวเลขตามแนวทางนี้อาจมีรายละเอียดของขั้นตอนวิธี (Algorithm) แตกต่างกัน เช่น การคำนวณโดยใช้สมดุลของแรงระหว่างชิ้นส่วนย่อยเพียงอย่างเดียว (วิธีของสมิทธ์ โปรแกรม WEAP) หรือ การคำนวณโดยใช้สมดุลของแรงระหว่างชิ้นส่วนย่อยร่วมกับวิธีลักษณะเฉพาะ (โปรแกรม TNOWAVE) เป็นต้น

ค.2.3 วิธีจับคู่สัญญาณ (Signal Matching Method)

กลวิธีอย่างหนึ่งที่ใช้ในวิธีเชิงตัวเลขเช่นในโปรแกรม CAPWAP ได้แก่กระบวนงานจับคู่สัญญาณ (Signal Matching Procedure) ด้วยกลวิธีดังกล่าวคอมพิวเตอร์จะคำนวณสัญญาณคลื่นจากแบบจำลองแล้วเปรียบเทียบกับสัญญาณที่วัดได้จากหัววัดสัญญาณ หากสัญญาณทั้งสองมีค่าแตกต่างกันจะใช้วิธีทำซ้ำ (Iterative method) โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์เชิงสถิตและเชิงพลวัตของแบบจำลองจนกระทั่งสัญญาณทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน หลังจากกระบวนการจับคู่สัญญาณแล้ว กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเชิงสถิตจะคำนวณได้จากแบบจำลองที่ปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ โดยคำนึงถึงผลเฉพาะจากองค์ประกอบเชิงสถิตซึ่งโดยปรกติได้แก่ส่วนย่อยประเภทสปริง ผังงานของการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการจับคู่สัญญาณได้แสดงไว้ในค-4



รูปที่ ค-4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยกระบวนงานจับคู่สัญญาณ

(ข้อ ค.2.3)

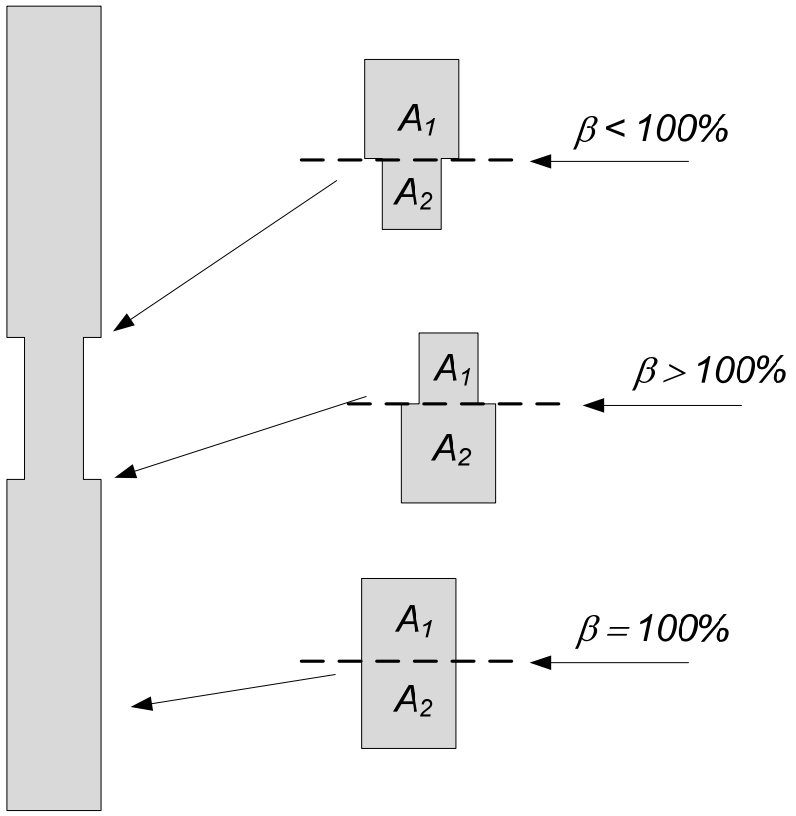
เนื่องจากแบบจำลองและวิธีการที่ใช้ในโปรแกรมต่างๆ มีความแตกต่างกัน ผู้วิเคราะห์จึงควรหาข้อมูลเพิ่มเติมและทำตามคำแนะนำของผู้เขียนโปรแกรมอย่างเคร่งครัด เนื่องจากโปรแกรมจะพยายามปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อทำให้ความคลาดเคลื่อนจากสัญญาณเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด ผู้วิเคราะห์จึงควรตรวจสอบค่าพารามิเตอร์หลังจากกระบวนงานจับคู่สัญญาณว่ามีค่าอยู่ในช่วงปรกติหรือไม่ ค่าพารามิเตอร์ป้อนเข้าของดินชนิดเดียวกันอาจเปลี่ยนแปลงได้แตกต่างกัน

ภาคผนวก ง การประเมินความเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของเสาเข็มด้วยวิธีเบต้า

การประยุกต์ใช้ผลจากการตรวจวัดสัญญาณคลื่นที่มีประโยชน์วิธีการหนึ่งคือ การพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของเสาเข็ม Rausche[7.13] ได้เสนอว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวใช้ประเมินความเสียหายของเสาเข็มได้และได้สรุปเป็นดัชนีที่นิยมเรียกกันในประเทศไทยว่า ค่าเบต้า

ค่าเบต้า หมายถึง อัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ของหน้าตัดด้านล่างต่ออิมพีแดนซ์ของหน้าตัดที่อยู่ด้านบน หรือเท่ากับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ทั้งสองในกรณีเสาเข็มเป็นวัสดุเนื้อเดียว

$$\beta = \frac{Z_2}{Z_1} \approx \frac{A_2}{A_1} \qquad (ง.1)$$



รูปที่ ง-1 ค่าเบต้าที่หน้าตัดต่างๆ กรณีที่เสาเข็มเป็นวัสดุเนื้อเดียว

Rausche [7.13] ได้เสนอตารางเปรียบเทียบความเสียหายของเสาเข็มกับค่าเบต้าไว้ดังนี้

ตารางที่ ง-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบต้ากับระดับความเสียหายของเสาเข็ม

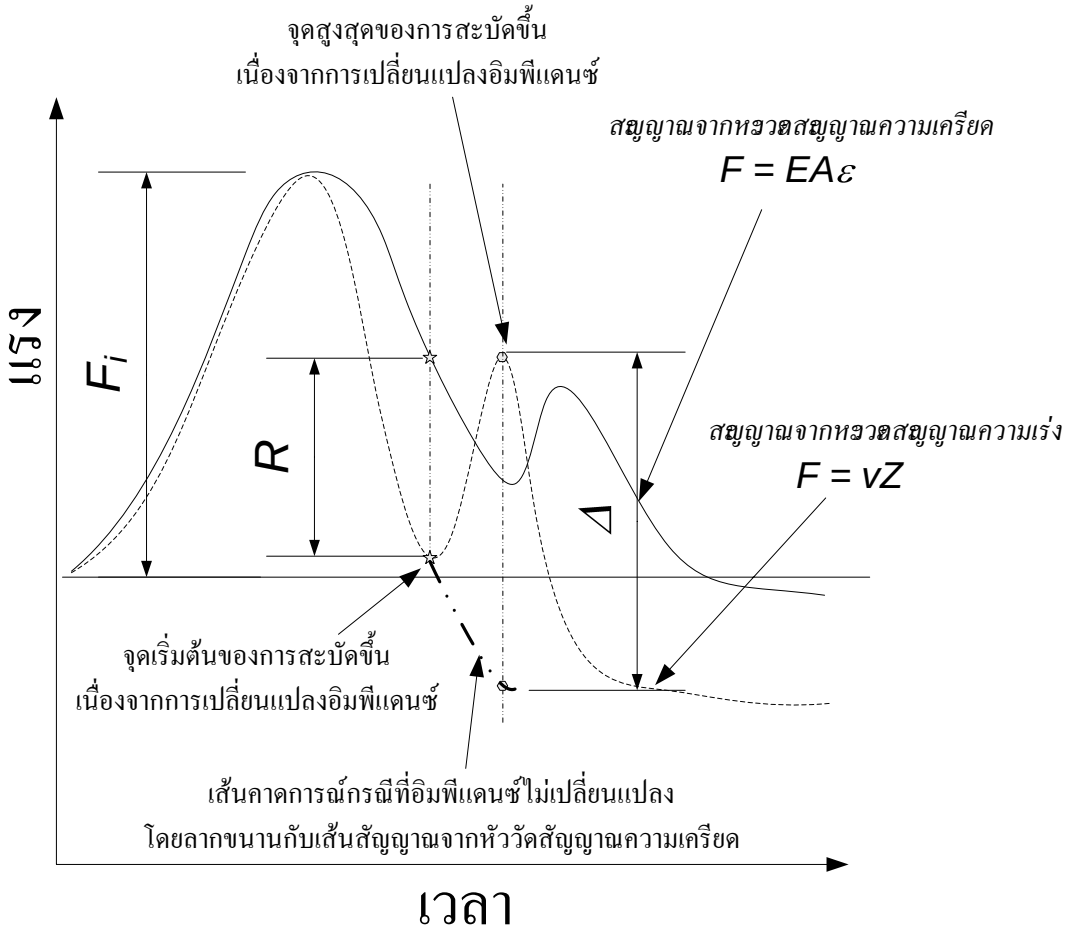
ค่าเบต้า	ระดับความเสียหาย
>100%	เสาเข็มมีหน้าตัดใหญ่ขึ้น
80% – 100%	เสาเข็มเสียหายน้อย
60% – 80%	เสาเข็มเสียหายอย่างมีนัยสำคัญ
ต่ำกว่า 60%	เสาเข็มหัก

ค่าเบต้าสำหรับหน้าตัดต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสัญญาณคลื่นที่วัดได้จากการตอกทดสอบโดยจำเป็นต้องใช้หัววัดสัญญาณอย่างน้อยสองชิ้นซึ่งได้แก่หัววัดสัญญาณความเร่งและหัววัดสัญญาณความเครียดประกอบกัน การคำนวณค่าเบต้าสำหรับหน้าตัดใดๆ มีรายละเอียดดังนี้

$$\beta = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \qquad \text{(ง.2)}$$

$$\alpha = \frac{\Delta}{2\left(F_i - R\right)} \qquad \text{(ง.3)}$$

โดยที่ค่า F_i หมายถึง แรงกระแทกสูงสุดขณะเริ่มตอกทดสอบ R หมายถึง ความแตกต่างระหว่างแรงที่คำนวณได้จากหัววัดสัญญาณความเครียดและหัววัดสัญญาณความเร่งขณะที่ความเร็วเริ่มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ Δ หมายถึง ความแตกต่างของแรงที่คำนวณได้จากหัววัดสัญญาณความเร่งจากสภาพปกติเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ ง-2



รูปที่ ง-2 ความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้คำนวณค่าเบต้าที่เวลาใดๆ

ภาคผนวก จ ตัวอย่างแบบฟอร์มสำหรับการทดสอบ

โครงการ _____ สถานที่ _____ วันที่ทดสอบ _____ แผ่นที่ _____	**บฟ.มยผ. 1252/1** (หน่วยงานที่ทำการทดสอบ) **การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์**	ผู้ทดสอบ _____ ผู้ควบคุม _____ ผู้อนุมัติ _____

<u>รายละเอียดเสาเข็มทดสอบ</u>

ชนิดของเสาเข็ม _____ ขนาดของเสาเข็ม _____

หมายเลขเสาเข็ม _____ หมายเลขฐานราก _____

ตำแหน่งอ้างอิง _____

ขนาดพื้นที่หน้าตัด A =_____ ตารางเซนติเมตร ขนาดเส้นรอบรูป P = _____ เมตร

ความเร็วคลื่นที่ใช้ C =_____ เมตร/วินาที

กำลังอัดคอนกรีต fc' = _____. โมดูลัส E_m = _____ เมตร

หน่วยน้ำหนักคอนกรีต SP = _____. ตัน/ลบ.ม.

<u>น้ำหนักบรรทุกออกแบบ</u>

น้ำหนักบรรทุกใช้งาน (Working load) = _____ ตัน น้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate load) _____ ตัน

ส่วนความปลอดภัย FS = _____ ตัน

<u>รายละเอียดการทดสอบ</u>

☐ ทดสอบขณะตอกเสาเข็ม (Initial drive)

☐ ทดสอบเสาเข็มเจาะ

☐ ทดสอบภายหลังตอกเสาเข็ม (Restrike)

วันที่ตอก (กรณีเข็มตอก)/วันที่หล่อเสาเข็ม (กรณีเสาเข็มเจาะ)/วันที่ทดสอบซ้ำ _____

ชนิดของตุ้มน้ำหนัก _____

น้ำหนักตุ้ม (Ram weight) _____ ตัน

หมอนรองตุ้มเสาเข็ม (Cushion) _____

ระยะยก (Stoke) _____ เมตร

ระดับหัวเสาเข็ม (Top level) _____ เมตร ระดับปลายเสาเข็ม (Tip Elev.)_____ เมตร

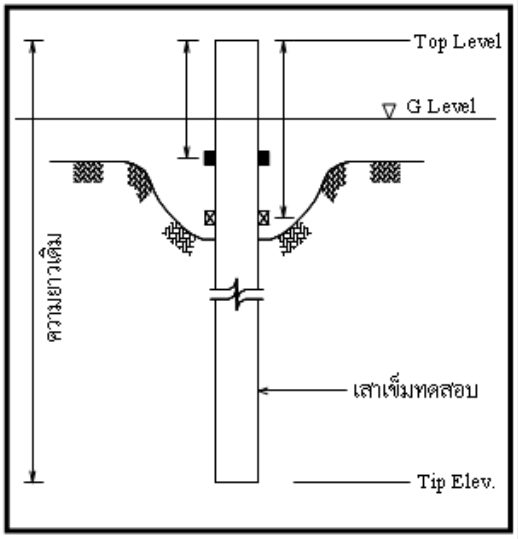
ระดับดิน (G-level.) _____. เมตร ความยาวเสาเข็ม _____ เมตร

ความยาวเสาเข็มใต้มาตรวัด _____ เมตร
ความยาวระยะฝังในดิน _____ เมตร
} (เฉพาะกรณีทดสอบภายหลัง)

โครงการ ----------	**บฟ.มยผ. 1252/2**	ผู้ทดสอบ ----------
สถานที่ ----------	(หน่วยงานที่ทำการทดสอบ)	ผู้ควบคุม ----------
วันที่ทดสอบ ----------	การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ด้วยวิธีพลศาสตร์	
แผ่นที่ ----------		ผู้อนุมัติ ----------

ตำแหน่งมาตรวัด

ชนิดมาตรวัด	มาตรวัด	รหัสมาตรวัด	ตัวคูณปรับแก้ (Calibration factor)
มาตรวัดความเครียด	F1		
	F2		
มาตรวัดความเร็ว	A1		
	A2		



■ ตำแหน่งมาตรวัดความเครียด
☒ ตำแหน่งมาตรวัดความเร็ว

ผลการทดสอบ

การทิ้งตุ้มทดสอบ	ระยะยกตุ้มทดสอบ (เมตร)	ระยะทรุดตัวของเสาเข็ม (เมตร)	ค่า RMX (ตัน)	JC	Beta-Value
1					
2					
3					
4					
5					

หมายเหตุ RMX (ตัน) = ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ทดสอบได้ โดย case method
JC = คุณสมบัติความหน่วงตามลักษณะชั้นดิน
Beta-Value = ดัชนีแสดงสภาพความสมบูรณ์ของเสาเข็มทดสอบ

มยผ. 1551-51

มาตรฐานการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มด้วยวิธี Seismic Test

1. ขอบข่าย

1.1 ขอบเขตของการใช้งาน

มาตรฐานการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มแบบพลศาสตร์นี้ใช้อ้างอิงสำหรับกระบวนงานตรวจสอบเสาเข็มเดี่ยวหรือฐานรากลึกชนิดอื่นที่มีลักษณะการรับน้ำหนักคล้ายคลึงกัน โดยใช้แรงกระแทกที่เสาเข็มแล้วนำผลตอบสนองที่วัดได้ซึ่งอย่างน้อยได้แก่ความเร็วอนุภาคของเสาเข็มไปวิเคราะห์สภาพของโครงสร้างเสาเข็มตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

1.2 วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบ

การตรวจสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อการประเมิน (ก) ความสมบูรณ์ของเสาเข็ม (ข) ขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม (ค) ความต่อเนื่องและความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุเสาเข็ม การตรวจสอบนี้ไม่สามารถใช้เพื่อการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

1.3 ข้อจำกัดของการตรวจสอบ

1.3.1 การตรวจสอบจะให้ผลลัพธ์ที่ดีเมื่อสภาพโครงสร้างเสาเข็มและชั้นดินใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามสภาพโครงสร้างเสาเข็มและชั้นดินในความเป็นจริงมีความซับซ้อนทำให้ไม่สามารถเป็นแบบจำลองได้ครบถ้วน

1.3.2 การตรวจสอบเป็นเพียงเครื่องช่วยในการหยั่ง ประเมินสิ่งผิดปรกติอย่างหนึ่งเท่านั้นไม่สามารถพิสูจน์ทราบสิ่งผิดปรกติทุกชนิดที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างเสาเข็มได้อย่างครบถ้วน[1]

1.3.3 ในกรณีที่เสาเข็มมีรอยแยกตลอดพื้นที่หน้าตัดหรือเป็นเสาเข็มที่ต่อหลายท่อน การตรวจสอบไม่สามารถใช้เพื่อการประเมินสภาพโครงสร้างส่วนที่อยู่ใต้รอยแยกหรือรอยต่อได้ ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานของคลื่นหน่วยแรงส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับสู่หัวเสาเข็มที่ระดับดังกล่าวและเหลือพลังงานเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เดินทางต่อไปยังโครงสร้างส่วนล่าง

1.3.4 สำหรับเสาเข็มยาวหรือเสาเข็มที่มีแรงเสียดทานที่ผิวด้านข้างมาก พลังงานของคลื่นหน่วยแรงส่วนใหญ่จะถูกดูดซับไปในระหว่างเดินทางและทำให้สัญญาณคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากปลายเสาเข็มมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้[2] ผลการตรวจสอบกับเสาเข็มเหล่านี้จึงมีนัยสำคัญเฉพาะช่วงความยาวเสาเข็มที่ตรวจจับสัญญาณได้ชัดเจนเท่านั้น

---

[1] อย่างไรก็ตามเนื่องจากการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มแบบพลศาสตร์เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ จึงแนะนำให้ทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 10 ของจำนวนเสาเข็ม เพื่อลดความเสี่ยงจากเสาเข็มที่มีความเสียหายมาก

[2] ความยาวสูงสุดที่สามารถตรวจสอบได้สำหรับเสาเข็มเสียดทานมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 30 เมตร

1.3.5 การตรวจสอบไม่เหมาะที่จะใช้กับเสาเข็มเหล็กแผ่น เสาเข็มเหล็กรูปพรรณ หรือเสาเข็มเหล็กรูปท่อกลวง นอกจากนี้การวิเคราะห์ผลการตรวจสอบของเสาเข็มที่มีพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงมากหรือมีความไม่ต่อเนื่องหลายตำแหน่งจะทำได้ยากและเกิดความผิดพลาดได้ง่าย นอกจากนี้การตรวจสอบยังไม่สามารถพิสูจน์ทราบความเสียหายในลักษณะรอยแตกตามแนวดิ่ง (ตามแนวแกนของเสาเข็ม) ทั้งนี้เนื่องจากความเสียหายในลักษณะดังกล่าวไม่ทำให้เกิดการขัดขวางการเดินทางของคลื่นหน่วยแรงนั่นเอง

2. นิยามและรายการสัญลักษณ์

2.1 นิยาม

"การตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็ม" หมายถึง การประเมินเชิงคุณภาพของขนาดหน้าตัด ความต่อเนื่องและความสม่ำเสมอของวัสดุเสาเข็ม

"อิมพีแดนซ์ (Impedance)" หมายถึง ความต้านทานเชิงพลศาสตร์ของเนื้อวัสดุและพื้นที่หน้าตัดที่มีต่อคลื่นหน่วยแรงที่เคลื่อนผ่านโครงสร้างเสาเข็ม อิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Z = \frac{E_d A}{c} = \rho c A \qquad (1)$$

"วิธีสะท้อนพัลส์ (Pulse Echo Method, PEM)" หมายถึง การตรวจสอบประเภทหนึ่งซึ่งวิเคราะห์ผลโดยใช้ผลตรวจวัดการเคลื่อนที่ของหัวเสาเข็มตามเวลา

"วิธีผลตอบสนองชั่วครู่ (Transient Response Method, TRM)" หมายถึง การตรวจสอบประเภทหนึ่งซึ่งวิเคราะห์ผลในปริภูมิความถี่โดยใช้ทั้งผลตรวจวัดการเคลื่อนที่และแรงกระทำที่หัวเสาตามเวลา

2.2 รายการสัญลักษณ์

E_d หมายถึง มอดุลัสของความยืดหยุ่นเชิงพลวัต หน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเมตร

c หมายถึง ความเร็วคลื่นหน่วยแรงที่เดินทางภายในเสาเข็ม

ρ หมายถึง ความหนาแน่นของวัสดุโครงสร้างเสาเข็ม

L หมายถึง ความยาวของเสาเข็ม

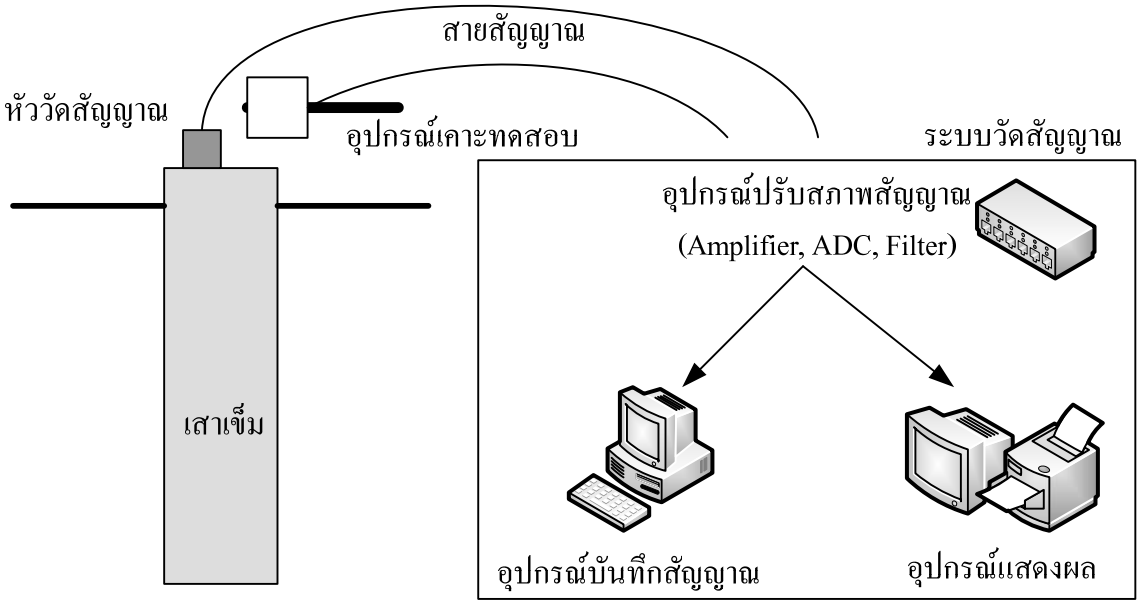
Z หมายถึง อิมพีแดนซ์

A หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

g หมายถึง ความเร่งธรรมชาติ หรือ แรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.806 เมตรต่อกำลังสองของวินาที

3. อุปกรณ์ทดสอบ

การตรวจสอบใช้อุปกรณ์หลายประเภทซึ่งต้องทำงานร่วมกัน ค่าที่กำหนดไว้สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ ตามมาตรฐานนี้จึงมีความเกี่ยวพันกันและกำหนดไว้เพื่อให้ผลการตรวจวัดในขั้นสุดท้ายมีความถูกต้องครบถ้วน และ เหมาะสมต่อการนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 1 อุปกรณ์ทดสอบสำหรับการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็ม

(ข้อ 3)

ผลการตรวจวัดที่ได้เช่นสัญญาณความเร็วและแรงกระแทกจะต้องมีความเที่ยงตรงไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 ตลอดช่วงของค่าที่วัดได้จากการทดสอบ สัญญาณเชิงพลวัตที่บันทึกได้ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 1,500 เฮิรตซ์ จะต้องเป็นสัญญาณที่ไม่ผิดเพี้ยนเนื่องจากขบวนการวัดและบันทึกผล อาทิ ความผิดเพี้ยนเนื่องจากตัวกรองสัญญาณ หรือ เนื่องจากการกำหนดความถี่ในการเก็บข้อมูลที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น อุปกรณ์การทดสอบเมื่อแจกแจงออกจะแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนคือ

1. อุปกรณ์เคาะทดสอบ
2. หัววัดสัญญาณ
3. สายส่งสัญญาณ
4. ระบบวัดสัญญาณ

3.1 อุปกรณ์เคาะทดสอบ

ค้อนมือถือหัวพลาสติกเป็นอุปกรณ์ที่แนะนำให้ใช้เคาะทดสอบ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์อื่นก็สามารถใช้แทนได้เช่นกัน ทั้งนี้ค้อนหรืออุปกรณ์อื่นนั้นจะต้องสามารถสร้างแรงกระแทกที่มีระยะเวลาน้อยกว่า 1 มิลลิวินาทีและไม่ทำให้เสาเข็มเกิดความเสียหายเฉพาะที่อันเนื่องมาจากแรงกระแทกนี้

3.2 หัววัดสัญญาณ

ข้อมูลหลักที่ใช้ในการตรวจสอบได้แก่สัญญาณความเร็วที่แปรเปลี่ยนตามเวลา ดังนั้นจึงกำหนดให้ใช้หัววัดสัญญาณเพื่อการวัดความเร็วอย่างน้อยหนึ่งชิ้น ผู้ทดสอบอาจใช้หัววัดสัญญาณมากกว่าหนึ่งชิ้นได้เพื่อการตรวจสอบด้วยส่วนซ้ำซ้อน

3.2.1 หัววัดสัญญาณเพื่อการวัดความเร็ว

3.2.1.1 การตรวจสอบต้องใช้หัววัดสัญญาณเพื่อการวัดความเร็วอย่างน้อยหนึ่งชิ้น หัววัดสัญญาณที่ใช้เป็นมาตรฐานเพื่อการดังกล่าวได้แก่มาตรความเร่ง ซึ่งต้องสอบเทียบให้ได้ความ

เที่ยงตรงที่ดีกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 5 ตลอดช่วงของค่าที่วัดได้จากการทดสอบ และถ้ามีเหตุให้สงสัยว่าเกิดความเสียหายแก่หัววัดสัญญาณให้ทำการสอบเทียบใหม่ หากพบว่าหัววัดสัญญาณนั้นเสียหายจนไม่สามารถใช้การได้ดีให้ทำการเปลี่ยนหัววัดสัญญาณใหม่

3.2.1.2 มาตรความเร่งที่ใช้ทดสอบกับเสาเข็มคอนกรีตต้องมีการตอบสนองสัญญาณเชิงแอมพลิจูดเป็นเส้นตรง (Linear Amplitude Response) อย่างน้อยจนถึงความเร่ง 50 *g* มาตรความเร่งทั้งแบบสมบูรณ์และแบบสัมพัทธ์สามารถใช้ในการทดสอบได้แต่จะต้องมีคุณสมบัติขั้นต่ำดังต่อไปนี้

(1) มาตรความเร่งสัมพัทธ์ต้องมีความถี่ธรรมชาติไม่ต่ำกว่า 30,000 เฮิรตซ์ และมีค่าคงที่ของเวลา (Time Constant) ไม่น้อยกว่า 0.5 วินาที

(2) มาตรความเร่งสมบูรณ์ต้องมีการตอบสนองสัญญาณเชิงเฟสคงที่จนถึงความถี่ 5,000 เฮิรตซ์หรือสูงกว่า

3.2.2 หัววัดสัญญาณเพื่อการวัดแรงกระแทก

3.2.2.1 หัววัดสัญญาณเพื่อการวัดแรงกระแทกเป็นอุปกรณ์เสริมที่เพิ่มขึ้นจากเกณฑ์ขั้นต่ำสำหรับการตรวจสอบวิธีสะท้อนพัลส์ และเป็นอุปกรณ์ที่ต้องใช้สำหรับการตรวจสอบวิธีผลตอบสนองชั่วครู่ ตัวอย่างของหัววัดสัญญาณเพื่อการดังกล่าวเช่นมาตรแรงที่ติดตั้งในหัวค้อนระหว่างส่วนที่เป็นพลาสติกกับส่วนที่เป็นโลหะ แรงกระแทกยังอาจคำนวณได้จากผลคูณระหว่างความเร่งกับมวลของหัวค้อนโดยความเร่งวัดได้จากมาตรความเร่งที่ติดตั้งที่หัวค้อน

3.2.2.2 แรงกระแทกที่วัดได้จากการตรวจสอบไม่ว่าจะใช้หัววัดสัญญาณชนิดใด จะต้องสอบเทียบให้ได้ความเที่ยงตรงที่ดีกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 5 ตลอดช่วงของค่าที่วัดได้จากการทดสอบค้อนหรืออุปกรณ์ตอกทดสอบสำหรับการตรวจสอบที่มีการวัดแรงกระแทกนั้น จะต้องถูกปรับแต่งเพื่อให้ผลการแปลงฟูเรียร์ของแรงที่วัดได้มีความราบเรียบและไม่มียอดเฉพาะที่เกิดขึ้น[1]

3.3 สายส่งสัญญาณ

สายส่งสัญญาณใช้เพื่อส่งผ่านสัญญาณจากหัววัดสัญญาณไปสู่อุปกรณ์ประกอบการทดสอบอื่นๆ อาทิ อุปกรณ์ปรับสัญญาณ อุปกรณ์บันทึกผล หรือ อุปกรณ์แสดงผล เป็นต้น สายสัญญาณที่ใช้ต้องเป็นสายสัญญาณแบบป้องกันการรบกวน (Shielded Cable) เพื่อลดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า สัญญาณ

[1] ในอีกนัยหนึ่ง อุปกรณ์เคาะนั้นต้องมีความถี่ธรรมชาติสูงกว่าช่วงความถี่ที่วัดได้จากการตรวจสอบ หรือในกรณีที่อุปกรณ์เคาะมีความถี่ธรรมชาติอยู่ในช่วงความถี่ที่วัดได้จะต้องใช้วัสดุหน่วงเพื่อทำให้การสั่นพ้องของหัวค้อนที่ความถี่ธรรมชาตินั้นถูกหน่วงลงอย่างรวดเร็ว

ปลายทางที่ได้จากการส่งผ่านสายส่งสัญญาณจะต้องมีค่าเป็นอัตราส่วนเชิงเส้นต่อสัญญาณต้นทางที่ได้จากหัววัดสัญญาณ ทั้งนี้เฉพาะในช่วงความถี่ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ

3.4 ระบบวัดสัญญาณ

3.4.1 ระบบวัดสัญญาณประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วน คือ อุปกรณ์ปรับสัญญาณ อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ และอุปกรณ์แสดงผล ซึ่งอาจประกอบรวมกันเป็นอุปกรณ์ชิ้นเดียวก็ได้ โดยมีคุณสมบัติดังนี้

3.4.1.1 ระบบวัดสัญญาณต้องสามารถขยายสัญญาณที่วัดได้จากหัววัดสัญญาณในข้อ 3.2.1 และต้องสามารถปรับอัตราการขยายสัญญาณให้เพิ่มขึ้นตามเวลาได้ด้วย [1]

3.4.1.2 สัญญาณต้องสามารถกรองสัญญาณได้ทั้งแบบผ่านสูง (High Pass) ผ่านต่ำ (Low Pass) และผ่านแถบ (Band Pass) โดยสามารถปรับความถี่ตัดได้จนถึง 15,000 เฮิรตซ์

3.4.1.3 ระบบวัดสัญญาณต้องมีความสามารถในการถ่ายโอนข้อมูลเข้าสู่หน่วยเก็บข้อมูลถาวร และการจัดทำข้อมูลเชิงกราฟแบบถาวรได้ด้วย นอกจากนี้ระบบวัดสัญญาณควรมีความสามารถในการเฉลี่ยค่าจากข้อมูลหลายชุดเพื่อเพิ่มความแรงของผลตอบสนองจากชั้นดินและเสาเข็มและลดสัญญาณรบกวนสุ่ม [2]

3.4.2 อุปกรณ์ปรับสัญญาณ (Signal Conditioner)

3.4.2.1 อุปกรณ์ปรับสัญญาณทำหน้าที่ปรับสัญญาณที่ได้จากหัววัดสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบหรือลักษณะที่เหมาะสมต่อการบันทึกด้วยอุปกรณ์บันทึกสัญญาณหรือต่อการทำงานของอุปกรณ์การทดสอบอื่น ตัวอย่างของอุปกรณ์ปรับสัญญาณ เช่น อุปกรณ์อ่านค่าความเครียด อุปกรณ์ขยายสัญญาณ ตัวกรองผ่านต่ำ เป็นต้น

3.4.2.2 อุปกรณ์ปรับสัญญาณที่ใช้สำหรับการตรวจสอบทุกช่องสัญญาณจะต้องมีผลตอบสนองเชิงเฟสเหมือนกันสำหรับช่วงของความถี่ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ ทั้งนี้เพื่อป้องกันความผิดเพี้ยนเชิงสัมพัทธ์ระหว่างสัญญาณจากช่องสัญญาณต่างๆ

3.4.2.3 เนื่องจากสัญญาณจากหัววัดสัญญาณในขณะก่อนและหลังจากตอกทดสอบอาจมีค่าไม่เท่ากัน (Zero Drift) อุปกรณ์ปรับสัญญาณต้องสามารถปรับความเฉ (Offset) ของ

---

[1] เนื่องจากคลื่นที่สะท้อนจากปลายเสาเข็มใช้เวลาเดินทางนานกว่าและมีความแรงของสัญญาณต่ำกว่าคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้างบริเวณใกล้หัวเข็ม ดังนั้นจึงต้องการอัตราการขยายสัญญาณที่สูงขึ้นตามเวลา

[2] เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากการวัดแต่ละครั้งประกอบด้วยสัญญาณที่มีลักษณะเฉพาะแน่นอนผสมกับสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม การนำเอาสัญญาณจากการวัดหลายๆ ครั้งมารวมยอดและหาค่าเฉลี่ยจะส่งผลให้สัญญาณรบกวนแบบสุ่มเกิดการหักล้างกันและสัญญาณลักษณะเฉพาะจะถูกขับเน้นให้เด่นชัดขึ้น

ช่องสัญญาณต่างๆ ให้เป็นศูนย์ได้โดยอัตโนมัติเพื่อให้ค่าเริ่มต้นของสัญญาณจากช่องสัญญาณต่างๆ ของทุกเหตุการณ์ตอกมีค่าเป็นศูนย์

3.4.2.4 อุปกรณ์ปรับสัญญาณสำหรับมาตรความเครียดต้องสามารถขยายสัญญาณจากมาตรวัดและแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของแรงหน้าตัดเพื่อใช้ประกอบการเฝ้าสังเกตในสนามได้

3.4.2.5 อุปกรณ์ปรับสัญญาณที่ใช้ประกอบกับมาตรความเร่งต้องสามารถแปลงข้อมูลที่ได้จากมาตรวัดให้อยู่ในรูปของความเร็วโดยการหาปริพันธ์ (Integrate) เพื่อใช้ประกอบการเฝ้าสังเกตในสนามได้

3.4.2.6 ตัวกรองผ่านต่ำสำหรับทุกช่องสัญญาณที่วัดปริมาณเชิงพลวัต เช่น ความเร่งหรือความเครียดที่เกิดขึ้นขณะตอกทดสอบ ผู้ทดสอบจะต้องใช้ตัวกรองผ่านต่ำเพื่อกรองสัญญาณความถี่สูงกว่า 15,000 เฮิรตซ์ทิ้งไป ทั้งนี้ขบวนการกรองสัญญาณดังกล่าวจะต้องเกิดขึ้นก่อนที่สัญญาณจะถูกป้อนเข้าสู่อุปกรณ์บันทึกสัญญาณและอุปกรณ์แสดงผล

3.4.3 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Data Logger)

อุปกรณ์บันทึกสัญญาณใช้บันทึกสัญญาณที่ได้จากหัววัดสัญญาณหรือสัญญาณที่ได้ปรับสภาพด้วยอุปกรณ์ปรับสัญญาณแล้ว อุปกรณ์บันทึกสัญญาณที่ใช้ในการตรวจสอบจะต้องเป็นแบบดิจิทัลเท่านั้น สัญญาณแบบแอนะล็อกจากหัววัดสัญญาณต้องถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยความละเอียดไม่น้อยกว่า 12 บิตและด้วยความถี่ในการเก็บข้อมูลไม่น้อยกว่า 30,000 ข้อมูลต่อหนึ่งวินาทีต่อช่องสัญญาณ ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนเชิงเวลาของสัญญาณต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.01

3.4.4 อุปกรณ์แสดงผล

3.4.4.1 อุปกรณ์แสดงผลใช้เพื่อการเฝ้าสังเกตในสนาม สัญญาณที่วัดได้เมื่อผ่านการปรับสภาพให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมแล้วจะต้องถูกแสดงด้วยอุปกรณ์แสดงผลได้ภายในระยะเวลาอันสั้นในสถานที่ทดสอบ หรือ ก่อนเริ่มต้นการตอกทดสอบครั้งต่อไป ตัวอย่างของอุปกรณ์แสดงผล อาทิ ออสซิลโลสโคป ออสซิลโลกราฟ หรือ จอมอนิเตอร์ เป็นต้น

3.4.4.1 อุปกรณ์แสดงผลที่ใช้ในการตรวจสอบต้องสามารถแสดงสัญญาณที่วัดได้ในรูปกราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็วเมื่อเทียบกับเวลา และในกรณีที่ใช้วิธีตรวจสอบ แบบผลตอบสนองชั่วครู่จะต้องสามารถแสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงความแรงเมื่อเทียบกับเวลาได้ด้วย อุปกรณ์แสดงผลต้องสามารถแสดงสัญญาณที่ได้จากเหตุการณ์ตอกปัจจุบันหรือจากเหตุการณ์ตอกในอดีตที่บันทึกไว้โดยอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ นอกจากนี้เพื่อการตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณที่วัดได้ อุปกรณ์แสดงผลต้องเลือกแสดงสัญญาณในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 2 ถึง 30 มิลลิวินาทีได้ สำหรับอุปกรณ์แสดงผลที่ไม่สามารถคงผลไว้ได้

อย่างถาวรเช่น ออสซิลโลสโคป อุปกรณ์แสดงผลนั้นจะต้องแสดงผลค้างไว้ได้เป็นระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 30 วินาที

4. วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมการทดสอบ การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบ การตอกทดสอบและวัดสัญญาณ การตรวจสอบคุณภาพสัญญาณและบันทึกผลการตรวจวัด

4.1 การเตรียมการทดสอบ

4.1.1 ก่อนดำเนินการทดสอบควรสำรวจสถานที่รวมถึงสภาพหัวเสาเข็มทดสอบ สถานที่ทดสอบควรเข้าถึงได้ง่ายและไม่มีน้ำท่วมขัง หัวเสาเข็มทดสอบควรมีผิวเรียบและเป็นส่วนที่คอนกรีตมีคุณภาพดี [1] โดยอนุญาตให้ใช้เครื่องมือกลเจียรแต่งผิวเสาเข็มเพื่อการดังกล่าวได้

4.1.2 สำหรับการตรวจสอบเสาเข็มคอนกรีตหรือเสาเข็มเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคอนกรีตต้องบ่มคอนกรีตให้มีกำลังไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของค่าออกแบบ หรือ บ่มให้ครบ 7 วันก่อน จึงจะเริ่มการทดสอบได้

4.2 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบ

ตรวจสอบการทำงานของหัววัดสัญญาณ สายส่งสัญญาณ และ ระบบวัดสัญญาณว่าสามารถทำงานได้ถูกต้องหัววัดสัญญาณต้องถูกต่อประกบเข้ากับผิวเสาเข็มโดยใช้สารเสริมสัมผัส[2] อย่างเหมาะสม ตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดสัญญาณควรอยู่ห่างจากขอบเสาเข็ม สำหรับเสาเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 500 มิลลิเมตร ต้องทำการวัดที่ตำแหน่งต่างกันอย่างน้อย 3 แห่งเพื่อลดผลจากความคลาดเคลื่อนเฉพาะที่

4.3 การทดสอบและบันทึกผลการวัด

4.3.1 ตรวจสอบหรือปรับความเฉของช่องสัญญาณให้เป็นศูนย์ก่อนตอกทดสอบทุกครั้ง การตอกทดสอบต้องกระทำในทิศทางตามแกนเสาเข็มห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดสัญญาณไม่เกิน 300 มิลลิเมตร

4.3.2 ในการตรวจสอบตำแหน่งหนึ่งๆ ผู้ทดสอบต้องตอกทดสอบไม่ต่ำกว่า 3 ครั้งและตรวจสอบว่าสัญญาณที่วัดได้คล้ายคลึงกันหรือไม่ ผู้ทดสอบสามารถบันทึกสัญญาณที่ได้จากการตอกทดสอบแต่ละครั้งแยกกันหรือบันทึกเฉพาะสัญญาณเฉลี่ยก็ได้ หากไม่สามารถทำซ้ำสัญญาณที่วัดจากการ

---

[1] การก่อสร้างเสาเข็มหล่อในที่นิยมหล่อคอนกรีตให้สูงกว่าระดับใช้งานจริงเล็กน้อยแล้วตัดส่วนดังกล่าวทิ้งในภายหลัง เนื่องจากในขณะทำการหล่อคอนกรีต คอนกรีตส่วนบนจะมีวัสดุอื่น เช่น ดิน หรือสารละลายพยุงหลุมเจาะปะปนอยู่จำนวนหนึ่งซึ่งทำให้คอนกรีตบริเวณดังกล่าวมีคุณภาพต่ำลง ดังนั้นการตรวจสอบจึงควรกระทำ ณ ระดับที่ตัดคอนกรีตส่วนดังกล่าวทิ้งไปแล้ว

[2] สารเสริมสัมผัส (Couplant) ได้แก่วัสดุที่ใช้ทาที่ผิวเสาเข็มก่อนที่จะต่อประกบตัวแปรสัญญาณเพื่อช่วยให้คลื่นหน่วยแรงวิ่งผ่านจากเนื้อวัสดุเสาเข็มเข้าสู่ตัวแปรสัญญาณได้ดีขึ้น ตัวอย่างของสารเสริมสัมผัส เช่น จาระบี ขี้ผึ้ง น้ำมัน สารกันรั่ว อีพอกซี วาสลิน เป็นต้น

ตอกหลายๆ ครั้งได้ให้สันนิษฐานว่าอุปกรณ์ทดสอบชนิดใดชนิดหนึ่งทำงานผิดปกติหรือไม่ได้รับการสอบเทียบอย่างเหมาะสม และควรทำการตรวจสอบหาสาเหตุทันที ในกรณีตรวจสอบแล้วพบว่าอุปกรณ์ทดสอบทำงานผิดปกติและไม่สามารถแก้ไขได้ให้ทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ พร้อมกับส่งอุปกรณ์ที่ผิดปกติไปซ่อมแซมและทำการสอบเทียบก่อนนำไปใช้งานอีกครั้งหนึ่ง

5. การวิเคราะห์และการรายงานผลการทดสอบ

5.1 การแปรผลการวัด

สัญญาณที่วัดได้ต้องถูกนำมาจัดทำให้อยู่ในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคเสาเข็มกับเวลา และในกรณีที่ใช้วิธีผลตอบสนองชั่วครู่จะต้องแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคกับเวลา และแรงกระทำตามแกนกับเวลา

5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

สัญญาณที่วัดได้จากการทดสอบให้วิเคราะห์ด้วยวิธีสะท้อนพัลส์หรือวิธีผลตอบสนองชั่วครู่

5.3 การรายงานผลการตรวจสอบ

5.3.1 ผู้ทดสอบควรจัดเตรียมข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องของสถานที่ทดสอบเพื่อการตรวจสอบย้อนหลัง นอกจากนี้ยังควรจัดเตรียมข้อมูลชั้นดินหรือผลการทดสอบของเสาเข็มที่อยู่ใกล้เคียงเพื่อช่วยให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้น รายงานผลการทดสอบที่สมบูรณ์ควรประกอบด้วยรายการที่จะแสดงต่อไปนี้ ข้อมูลรายการใดที่ไม่สามารถหาได้ควรระบุไว้ให้ชัดเจนในรายงานด้วย

1. หมวดทั่วไป
2. หมวดคุณสมบัติและก่อสร้างเสาเข็มทดสอบ
3. หมวดอุปกรณ์ทดสอบ
4. หมวดการทดสอบ
5. หมวดการประมวลและวิเคราะห์ผล
6. หมวดสรุป
7. หมวดอื่นๆ

5.3.2 ข้อมูลรายการใดที่ไม่สามารถหาได้ควรระบุไว้ให้ชัดเจนในรายงานด้วย สำหรับรายละเอียดของแต่ละรายการเป็นดังนี้

(1) หมวดทั่วไป

1.1 ข้อมูลของโครงการก่อสร้าง

1.2 ข้อมูลชั้นดินจากหลุมเจาะที่อยู่ใกล้เคียง (ถ้ามี)

(2) หมวดเสาเข็มทดสอบ

2.1 คุณสมบัติของเสาเข็มทดสอบ

2.1.1 ข้อมูลที่ใช้อ้างอิงถึงเสาเข็ม เช่น พิกัด หรือ หมายเลขเสาเข็ม

2.1.2 ชนิดและขนาดของเสาเข็ม

2.1.3 เวลาที่ก่อสร้างเสร็จ แรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบเสาเข็ม ความหนาแน่นของคอนกรีต แรงอัดประสิทธิผล รายละเอียดการเสริมเหล็ก (ถ้ามี)

2.1.4 ตำแหน่งและลักษณะของรอยต่อ (ถ้ามี)

2.1.5 ลักษณะของการป้องกันปลายเสาเข็ม (ถ้ามี)

2.1.6 ลักษณะของการเคลือบผิวเสาเข็ม (ถ้ามี)

2.1.7 ข้อสังเกตจากการตรวจสอบเสาเข็ม เช่น การหลุดร่อน รอยแตก ลักษณะของหน้าตัดบริเวณหัวเสาเข็ม

2.2 วิธีการก่อสร้างเสาเข็มทดสอบ

2.2.1 สำหรับเสาเข็มหล่อในที่ ให้ระบุขนาดของหัวเจาะ ความยาวเสาเข็มและปริมาตรคอนกรีตที่ใช้ วิธีการที่ใช้ประกอบการก่อสร้างเช่น ขบวนการทำงานในกรณีที่ใช้ปลอกเหล็กป้องกันหลุมเจาะพังทลาย เป็นต้น

2.2.2 สำหรับเสาเข็มตอก ให้ระบุรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้และระเบียนการตอก เช่น น้ำหนักตุ้มตอกเสาเข็ม ระยะยกตุ้ม หรือ พลังงานของอุปกรณ์ตอกเสาเข็ม ชนิดของหมอนรองตุ้มตอก ชนิดของหมอนรองหัวเสาเข็ม ชนิดของเสาส่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการเจาะนำ จำนวนตอก หรือ อัตราการทรุดตัวต่อการตอกของเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการตอกก่อสร้าง เป็นต้น

2.2.3 ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง การหยุดตอกชั่วคราว การพังทลายของหลุมเจาะ

(3) หมวดอุปกรณ์ทดสอบ

3.1 อุปกรณ์ตอกทดสอบ

3.1.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของอุปกรณ์ตอกทดสอบ

3.1.2 ภาพถ่ายของอุปกรณ์และการปฏิบัติงาน

3.2 หัววัดสัญญาณ สายส่งสัญญาณ และ ระบบวัดสัญญาณ

3.2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของหัววัดสัญญาณ สายส่งสัญญาณและระบบวัดสัญญาณ

3.2.2 ภาพถ่ายของอุปกรณ์และการปฏิบัติงาน

3.2.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดสัญญาณบนเสาเข็มทดสอบ

3.2.4 ความยาวเสาเข็มระหว่างตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดสัญญาณถึงปลายเสาเข็ม พื้นที่หน้าตัด ความหนาแน่น ความเร็วคลื่นหน่วยแรง และมอดุลัสยืดหยุ่นเชิงพลวัตของเสาเข็มทดสอบ

3.2.5 ระยะเวลาการวัด และ ความถี่ในการเก็บข้อมูล

(4) หมวดการตรวจสอบ

4.1 วัน เวลาที่ทำการทดสอบ

4.2 สภาพอากาศ

4.3 บันทึกการแก้ไขปัญหา การดำเนินงานที่ต่างไปจากแผนปฏิบัติงาน

(5) หมวดการประมวลและวิเคราะห์ผล

5.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความเร็วและแรงโดยใช้ข้อมูลจากผลการตอกที่เป็นตัวแทนของการตรวจสอบซึ่งต้องมีการปรับขยายสัญญาณให้อยู่ในมาตราส่วนที่เหมาะสมแก่การวิเคราะห์

5.2 วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ ความเร็วคลื่นหน่วยแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์และการได้มาของค่าดังกล่าว รายละเอียดของการวิเคราะห์

5.3 หากพบว่าเส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความเร็วและแรงที่ทดสอบได้ไม่ชัดเจนและยากต่อการวิเคราะห์ผล จะต้องทำการทดสอบใหม่เพื่อยืนยันความแน่นอนของผลการตรวจวัด ก่อนทำการสรุปผลการวิเคราะห์ต่อไป

(6) หมวดสรุป เช่น ผลสรุปเกี่ยวกับความสมบูรณ์ของเสาเข็ม อิทธิพลของสภาพชั้นดินและการก่อสร้างที่อาจมีผลต่อการวิเคราะห์ ข้อสังเกต และ คำแนะนำอื่นๆ

(7) หมวดอื่นๆ เช่น เอกสารอ้างอิง เอกสารการก่อสร้างที่เกี่ยวข้อง ฯลฯ

6. เอกสารอ้างอิง

6.1 American Society for Testing and Materials (2000). Annual Book of Standards, ASTM D5882 Standard test method for low strain integrity testing of piles.

6.2 Standard Association of Australia (1995). Australian Standards, AS2159 Piling Design and Installation.

6.3 Goble, G.G., Rausche, F. and Likins, Jr. G.E., (1980). The Analysis of Pile Driving – A state-of-the-art, Intl. Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles, Stockholm, 1980

6.4 Institution of Civil Engineers, (1996). Specification for Piling and Embedded Retaining Walls, Thomas Telford, London

6.5 Rausche, F. and Goble, G.G. (1979). Determination of Pile Damage by Top Measurements, Behavior of Deep Foundation, ASTM STP 670, Raymond Ludgre, Ed., American Society for Testing and Materials, 1979, pp. 500 – 506

6.6 Turner, M. J., (1997). Integrity Testing in Piling Practice, Construction Industry Research and Information Association (CIRIA Report no. 144), London

ภาคผนวก ก ทฤษฎีคลื่นหน่วยแรง

ก1. เมื่อมีแรงกระแทกตามแนวแกนกระทำที่หัวเสาเข็มจะเกิดแรงเค้นแผ่ขยายออกไปในลักษณะของคลื่น คลื่นหน่วยแรงดังกล่าวจะเดินทางจากหัวเสาเข็มลงไปสู่ปลายเสาเข็มและสะท้อนกลับสู่หัวเสาเข็มอีกทีหนึ่ง ในระหว่างที่คลื่นหน่วยแรงเดินทางนี้จะได้รับอิทธิพลจากแรงต้านทานในมวลดินและจากคุณสมบัติของโครงสร้างเสาเข็มทำให้คลื่นหน่วยแรงที่สะท้อนกลับขึ้นมามีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันไป

ก2. เนื่องจากพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของคลื่นหน่วยแรงดังกล่าวเป็นไปตามหลักการการเคลื่อนที่ของคลื่น จึงสามารถใช้ทฤษฎีพื้นฐานทางกลศาสตร์มาใช้วิเคราะห์ได้ สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามทฤษฎีคลื่นหน่วยแรงสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}$$

โดยที่ c คือ ความเร็วของการเดินทางของคลื่นหน่วยแรงภายในเสาเข็ม

u คือ การเคลื่อนที่ของอนุภาคเสาเข็ม

x คือ ตำแหน่งของอนุภาคเสาเข็ม

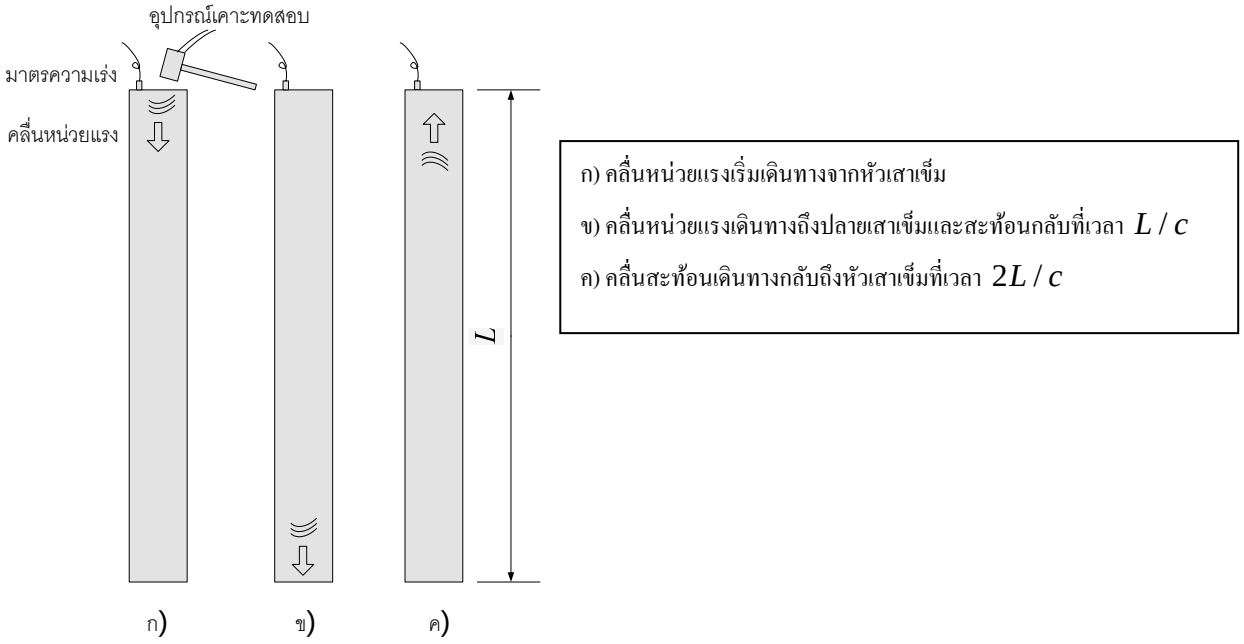
t คือ เวลา

ภาคผนวก ข. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลและการตีความ

การวิเคราะห์ผลสามารถกระทำได้สองวิธีได้แก่วิธีสะท้อนพัลส์ (Pulse Echo Method, PEM) และวิธีผลตอบสนองชั่วครู่ (Transient Response Method, TRM) ความแตกต่างประการหนึ่งระหว่างวิธีวิเคราะห์ทั้งสองคือข้อมูลขั้นต่ำที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ วิธีผลตอบสนองชั่วครู่ต้องการผลตรวจวัดการเคลื่อนที่และแรงกระทำที่หัวเสา ในขณะที่วิธีสะท้อนพัลส์ใช้เพียงข้อมูลการเคลื่อนที่ของหัวเสาเข็มเท่านั้น ความแตกต่างดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้วิธีสะท้อนพัลส์จึงได้รับความนิยมมากกว่าเพราะมีต้นทุนค่าอุปกรณ์ต่ำและมีขบวนการทำงานน้อย ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะแนวทางการวิเคราะห์ด้วยวิธีสะท้อนพัลส์เท่านั้น

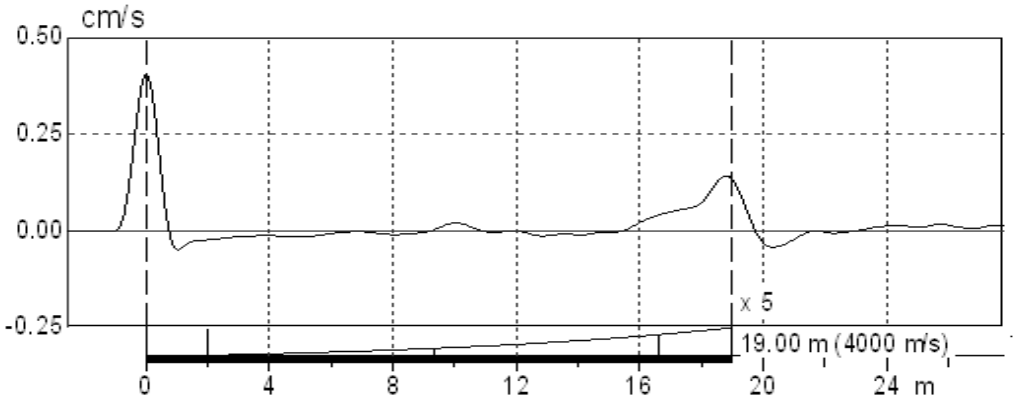
ข.1 หลักการของการวิเคราะห์

เมื่อเริ่มตอกทดสอบที่หัวเสาเข็มจะเกิดคลื่นหน่วยแรงเดินทางจากหัวเสาเข็มไปสู่ปลายเสาเข็มและเกิดการสะท้อนกลับที่ปลายเสาเข็ม เมื่อเสาเข็มมีความยาว L และคลื่นหน่วยแรงมีความเร็วเท่ากับ c จะสามารถคำนวณเวลาที่คลื่นหน่วยแรงใช้เดินทางจากหัวเสาเข็มไปสู่ปลายเสาเข็มและสะท้อนกลับสู่หัววัดสัญญาณได้เท่ากับ $2L/c$ ดังนั้นเมื่อทำการตรวจสอบกับเสาเข็มที่มีสภาพสมบูรณ์ ผลการวัดที่ได้จะมีลักษณะดังเช่นรูปที่ ข-2 โดยมีจุดยอดสองจุดห่างกันเป็นเวลา $2L/c$



รูปที่ ข1. ลักษณะการเดินทางของคลื่นหน่วยแรงในเสาเข็มที่สมบูรณ์

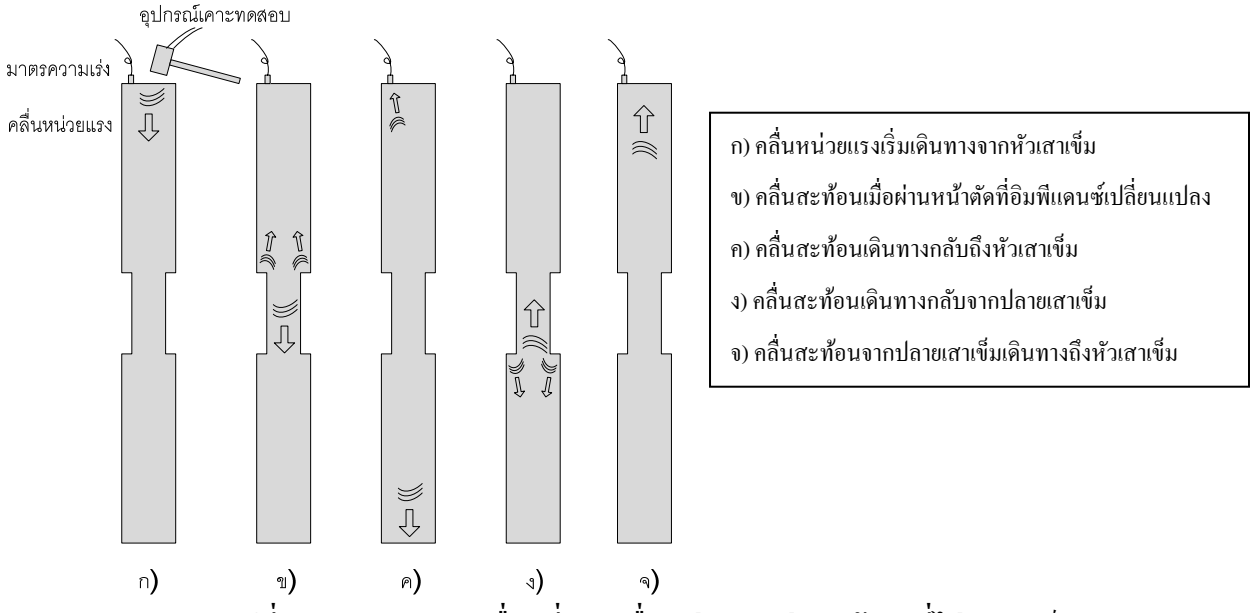
(ภาคผนวก ข ข้อ ข1)



รูปที่ ข-2 ตัวอย่างของค่าที่วัดได้จากหัววัดสัญญาณกรณีเสาเข็มมีสภาพสมบูรณ์

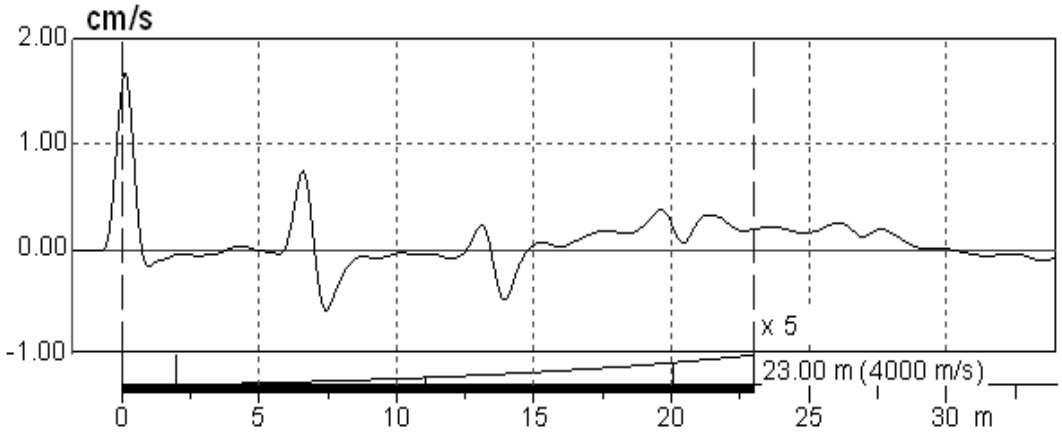
(ภาคผนวก ข ข้อ ข1)

ข2. ในกรณีที่เสาเข็มมีสภาพไม่สมบูรณ์เช่นมีการคอดของหน้าตัดหรือคุณสมบัติของคอนกรีตที่ระดับความลึกหนึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไป เมื่อคลื่นหน่วยแรงเดินทางจากหัวเสาเข็มผ่านหน้าตัดที่อิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลง คลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่หัวเสาเข็มแต่ยังคงมีคลื่นอีกส่วนหนึ่งเดินทางต่อไปทางปลายเสาเข็ม เนื่องจากคลื่นสะท้อนชุดแรกนี้จะเดินทางกลับถึงหัววัดสัญญาณที่หัวเสาเข็มก่อนคลื่นสะท้อนจากปลายเสาเข็มดังนั้นผลการวัดที่ได้จะปรากฏจุดยอดมากกว่ากรณีแรก โดยจุดยอดนั้นจะปรากฏที่เวลาเร็วกว่า $2L/c$ ด้วยดังแสดงในรูปที่ ข-4 นอกจากนี้คลื่นสะท้อนดังกล่าวก็สามารถสะท้อนกลับไปกลับมาได้ด้วยจึงทำให้สัญญาณที่วัดได้บริเวณหัวเสาเข็มนั้นซับซ้อนมากขึ้น เช่น มีชุดของจุดยอดที่ห่างกันคงที่หลายชุดซ้อนเหลื่อมกัน



รูปที่ ข-3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นหน่วยแรงผ่านหน้าตัดที่ไม่สมบูรณ์

(ภาคผนวก ข ข้อ ข2)



รูปที่ ข-4 ตัวอย่างของค่าที่วัดได้จากหัววัดสัญญาณกรณีเสาเข็มมีสภาพไม่สมบูรณ์

(ภาคผนวก ข ข้อ ข2)

ข3. การวิเคราะห์และแปลความหมายสัญญาณคลื่นที่วัดได้ที่หัวเสาเข็ม (Reflectogram) ให้ได้ผลที่น่าเชื่อถือและมีความถูกต้องนั้น โดยทั่วไปจะต้องดำเนินการเป็นสองขั้นตอนคือ

ข3.1 ในขั้นแรกให้คำนวณหาระดับความลึกที่อิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงจากคลื่นสัญญาณ โดยควรวิเคราะห์รูปแบบที่เปลี่ยนแปลงให้เห็นถึงรูปลักษณ์ของเสาเข็ม เช่น เป็นการเพิ่มหรือลดอิมพีแดนซ์ของตัวเสาเข็มเอง ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นการพิจารณาจากคลื่นสัญญาณทดสอบ (Acoustic Interpretation) อย่างเดียวก่อน

ข3.2 ขั้นตอนที่สองเป็นการแยกแปลความหมายของรูปลักษณะหรือสภาพของเสาเข็มแต่ละรูปแบบจากข้อมูลของการก่อสร้างเสาเข็ม ซึ่งต้องพิจารณาข้อมูลต่างๆทุกชนิดที่เกี่ยวข้องประกอบ เช่น ชั้นดินในหน่วยงาน ระเบียนการก่อสร้างเสาเข็มโดยเฉพาะอย่างยิ่งเรื่องของระบบเสาเข็ม (เจาะแห้งหรือเจาะเปียก ความยาวปลอกเหล็กชั่วคราว ปริมาณคอนกรีตที่ใช้และปัญหาในระหว่างการก่อสร้าง เป็นต้น)

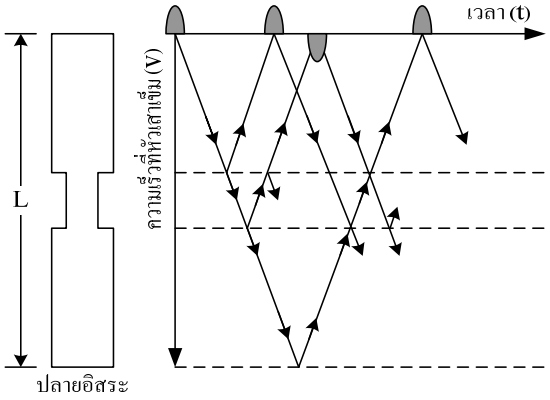
ข3.3 หลังจากนั้นจึงตั้งสมมุติฐานตามลักษณะคลื่นสัญญาณว่าการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์เกิดจากอะไร มาจากสาเหตุเดี่ยวหรือจากหลายๆสาเหตุรวมกัน ดังนั้นการแปลความหมายของคลื่นที่วัดได้จึงขึ้นอยู่กับความสามารถและประสบการณ์ของผู้วิเคราะห์ด้วย

ภาคผนวก ค. ตัวอย่างรูปแบบของสัญญาณที่วัดได้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด

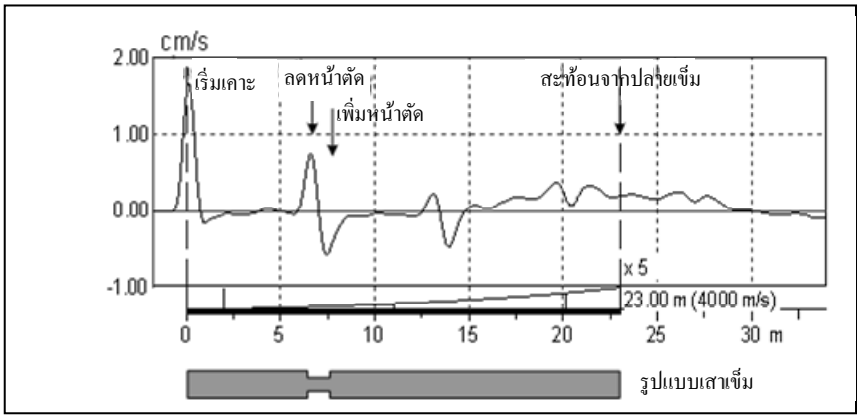
สัญญาณที่วัดได้จากการตรวจสอบนั้นเป็นผลจากการเดินทางผ่านหน้าตัดเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ โดยอิมพีแดนซ์ของหน้าตัดที่ความลึกนั้นอาจมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากหลายปัจจัย เช่น คุณสมบัติของวัสดุที่ทำเสาเข็มมีการเปลี่ยนแปลง หน้าตัดของเสาเข็มมีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของชั้นดิน เป็นต้น ในที่นี้จะนำเสนอตัวอย่างรูปแบบสัญญาณคลื่นที่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของเสาเข็มในลักษณะต่างๆ

ค1. กรณีเสาเข็มมีการคอด (หน้าตัดเล็กลง)

เมื่อเริ่มทำการเคาะค้อนจะเกิดคลื่นหน่วยแรงที่บริเวณหัวเสาเคลื่อนที่ และเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งที่มีการลดขนาดของหน้าตัดเสาเข็ม คลื่นจะสะท้อนกลับมาที่หัวเสาบางส่วนในแบบร่วมเฟสกัน (In Phase) และเมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่ต่อไปหลุดออกไปจากบริเวณหน้าตัดลดขนาดแล้ว ก็จะมีคลื่นบางส่วนสะท้อนกลับมาที่หัวเสาในแบบต่างเฟสกัน (Out of Phase) และก็จะมีคลื่นอีกบางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปจนถึงปลายเสาเข็มและสะท้อนกลับมาที่บริเวณหัวเสาเข็มในแบบร่วมเฟสกัน ซึ่งการเดินทางของคลื่นหน่วยแรง ตัวอย่างรูปแบบสัญญาณและการแปลความหมายได้แสดงไว้ในรูปที่ ค-1



(ก) การเดินทางของคลื่นทดสอบ



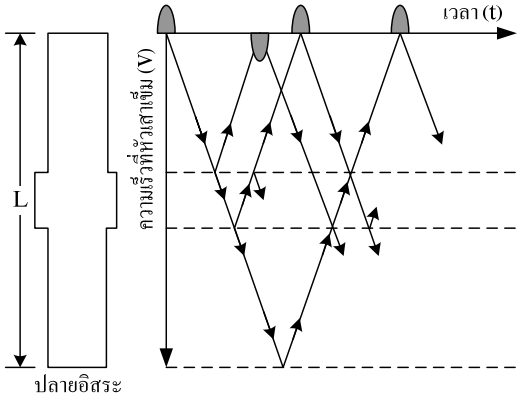
(ข) รูปแบบคลื่นและการแปลความหมาย

รูปที่ ค1 รูปแบบคลื่นทดสอบในเสาเข็มที่มีการคอดตัว

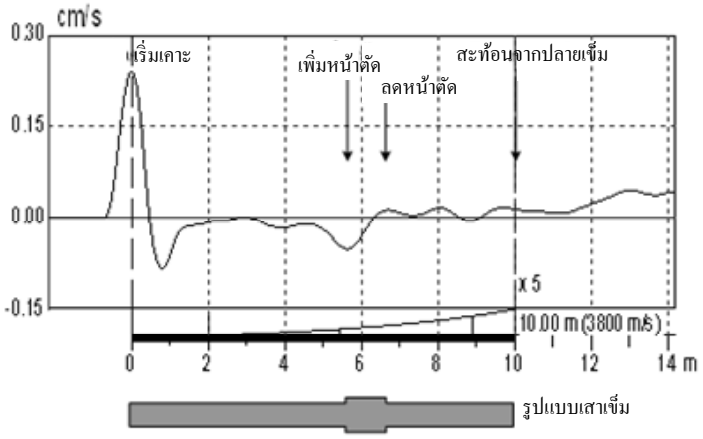
(ภาคผนวก ค ข้อ ค1)

ค2. กรณีเสาเข็มมีการบวม (หน้าตัดใหญ่ขึ้น)

คล้ายคลึงกับในกรณีที่เสาเข็มมีการคอดตัว แต่จะแตกต่างกันที่เฟสของคลื่นสะท้อน กล่าวคือเมื่อคลื่นจากการเคาะเสาเข็มเคลื่อนที่ตำแหน่งที่มีการเพิ่มขนาดของหน้าตัดเสาเข็ม คลื่นจะสะท้อนกลับมาที่หัวเสาบางส่วนในแบบต่างเฟสกัน และเมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่ต่อไปหลุดออกไปจากบริเวณหน้าตัดเพิ่มขนาดแล้ว ก็จะมีคลื่นบางส่วนสะท้อนกลับมาที่หัวเสาในแบบตรงเฟสกัน และก็จะมีคลื่นอีกบางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปจนถึงปลายเสาเข็มและสะท้อนกลับมาที่บริเวณหัวเสาเข็มในแบบร่วมเฟสกัน ซึ่งการเดินทางของคลื่นหน่วยแรง ตัวอย่างรูปแบบสัญญาณและการแปลความหมายได้แสดงไว้ในรูปที่ ค2



(ก) การเดินทางของคลื่นทดสอบ



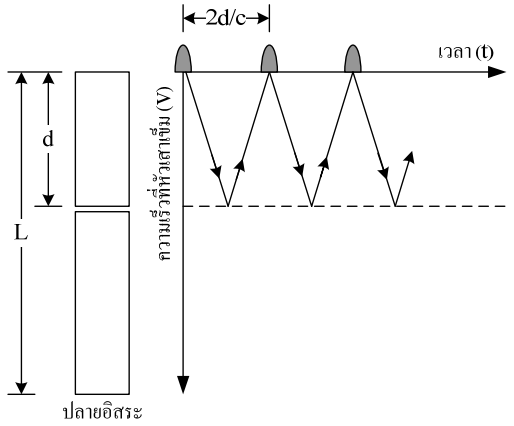
(ข) รูปแบบคลื่นและการแปลความหมาย

รูปที่ ค2 รูปแบบคลื่นทดสอบในเสาเข็มที่มีการบวมตัว

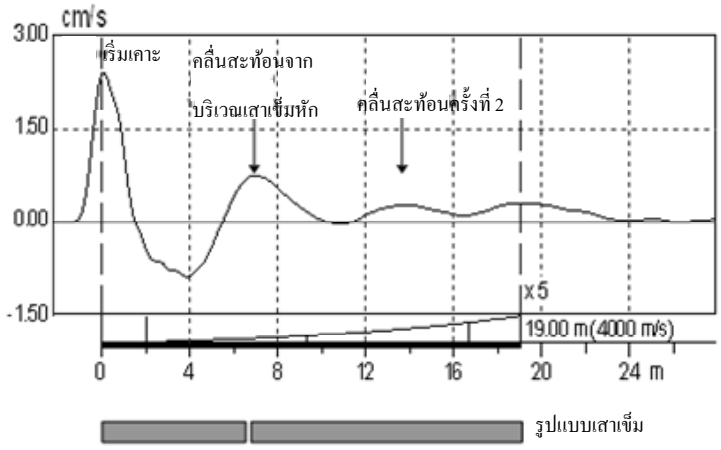
(ภาคผนวก ค ข้อ ค2.)

ค.3 กรณีเสาเข็มหัก (ขาดตอนหรือขาดความต่อเนื่อง)

ในกรณีเสาเข็มหักหรือคอนกรีตของตัวเสาเข็มขาดความต่อเนื่อง นั่นคืออิมพีแดนซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก คลื่นสัญญาณจากการเคาะที่หัวเสาเข็มจะเกิดการสะท้อนกลับซ้ำที่ตำแหน่งเดิม โดยจะแสดงให้เห็นจากคลื่นสัญญาณสะท้อนซ้ำๆ เกิดขึ้นเป็นระยะทางเท่าๆ กัน แต่ในช่วงท้ายๆ สัญญาณคลื่นอาจจะลดขนาดลงไปเรื่อยๆ เนื่องจากการสูญเสียพลังงานในการเดินทางกลับไปกลับมา ซึ่งการเดินทางของคลื่นหน่วยแรง ตัวอย่างรูปแบบสัญญาณและการแปลความหมายได้แสดงไว้ในรูปที่ ค-3



(ก) การเดินทางของคลื่นทดสอบ



(ข) รูปแบบคลื่นและการแปลความหมาย

รูปที่ ค3 รูปแบบคลื่นทดสอบในเสาเข็มที่มีการหัก

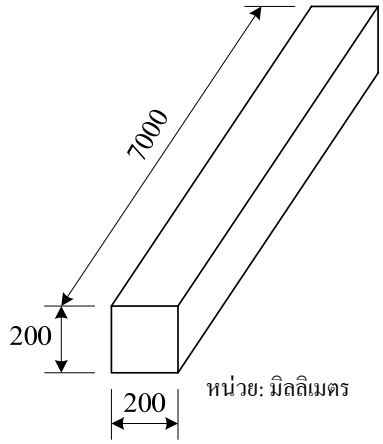
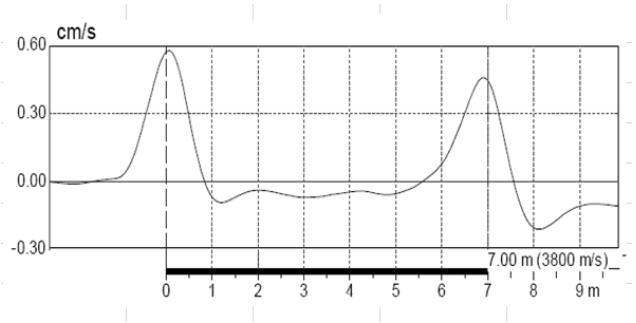
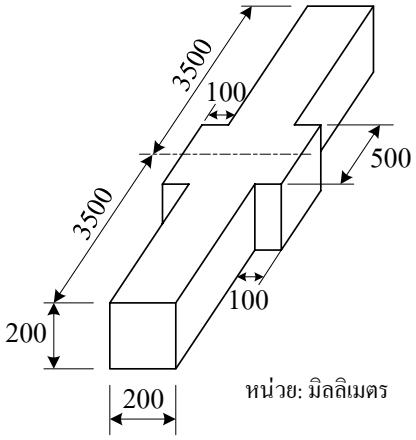
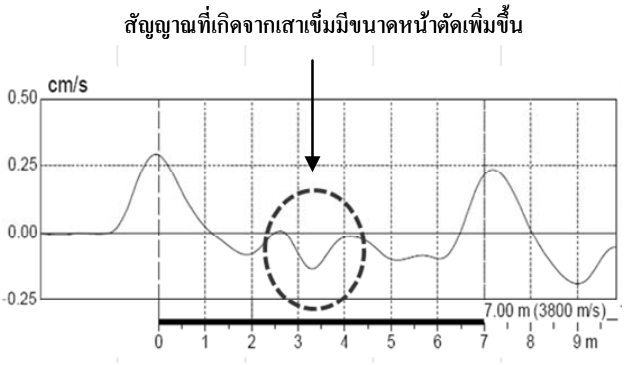
(ภาคผนวก ค ข้อ ค3.)

ภาคผนวก ง. ตัวอย่างสัญญาณจากการทดสอบกับแบบจำลองเสาเข็มในลักษณะต่างๆ

เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจและพิจารณาผลการการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มด้วยวิธี Seismic Test จึงได้รวบรวมตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบกับเสาเข็มจำลองที่มีสภาพความสมบูรณ์ต่างๆ กันมาแสดงไว้ในภาคผนวกนี้ดังตารางที่ ง1 อย่างไรก็ตามเสาเข็มจำลองมีสภาพเงื่อนไขขอบแตกต่างจากเสาเข็มใช้งานจริง กล่าวคือการทดสอบกระทำกับเสาเข็มจำลองที่วางอยู่บนที่รองรับที่ระดับพื้นดิน โดยมิได้เสียบลงไปในชั้นดินเหมือนเสาเข็มใช้งานจริง การนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้อ้างอิงหรือประกอบการตัดสินใจใดๆ จึงขอให้ตระหนักถึงความแตกต่างดังกล่าวไว้ด้วย

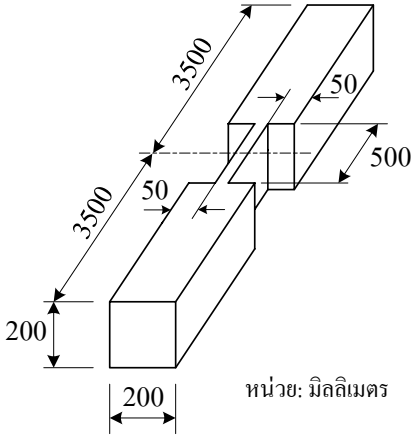
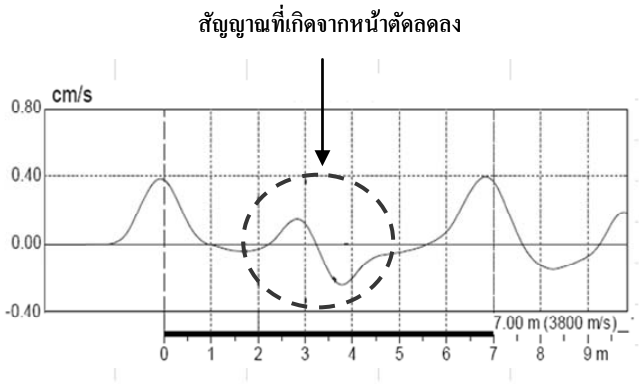
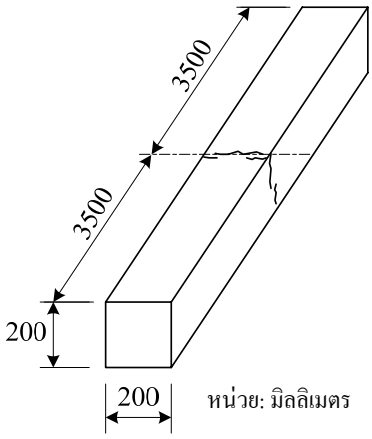
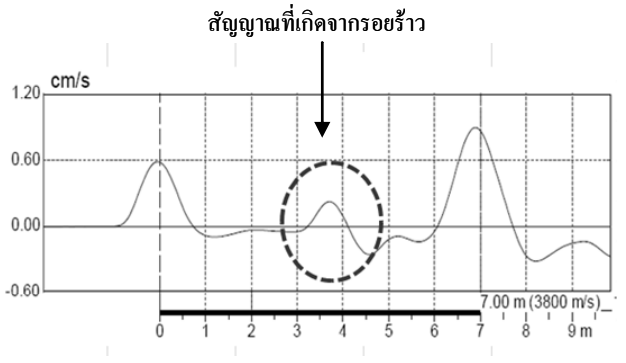
ตารางที่ ง1 ตัวอย่างสัญญาณจากการทดสอบกับแบบจำลองเสาเข็มในลักษณะต่างๆ

(ภาคผนวก ง)

ลักษณะของเสาเข็มจำลอง	สัญญาณคลื่นที่วัดได้จากการเคาะทดสอบ
เสาเข็มสมบูรณ์ 	
เสาเข็มมีขนาดหน้าตัดเพิ่มขึ้น 	

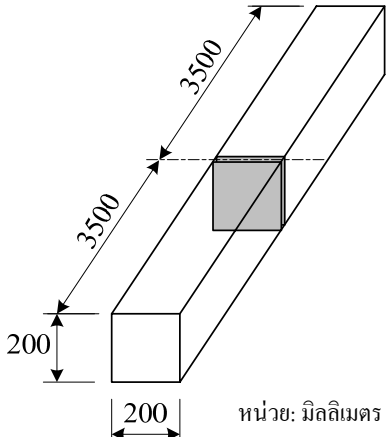
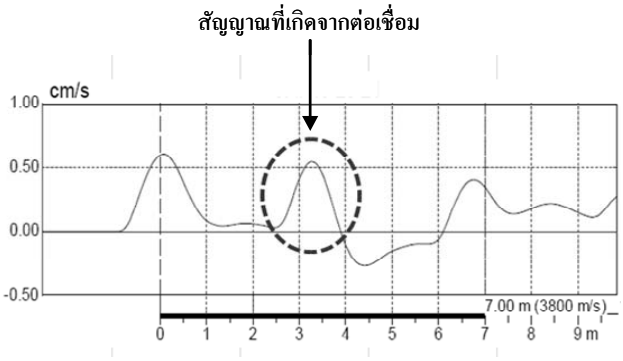
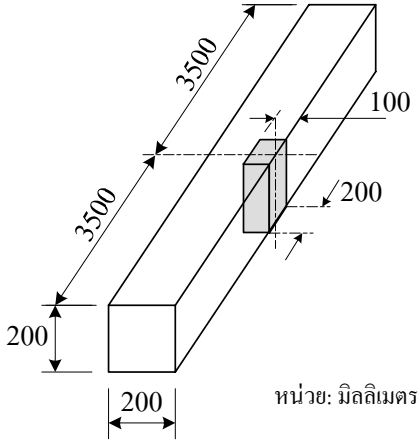
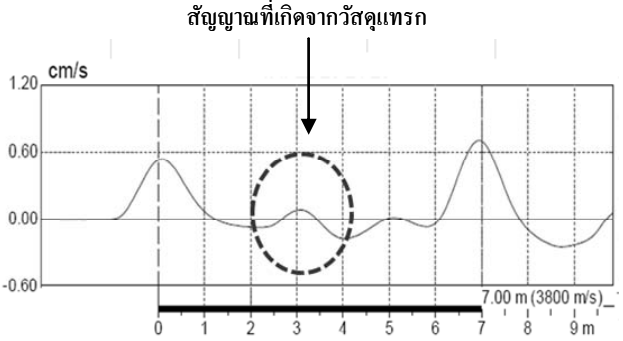
ตารางที่ ง1 ตัวอย่างสัญญาณจากการทดสอบกับแบบจำลองเสาเข็มในลักษณะต่างๆ (ต่อ)

(ภาคผนวก ง)

ลักษณะของเสาเข็มจำลอง	สัญญาณคลื่นที่วัดได้จากการเคาะทดสอบ
เสาเข็มมีขนาดหน้าตัดลดลง 	
เสาเข็มแตกร้าว 	

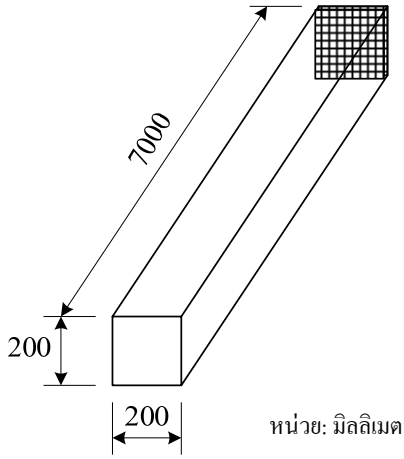
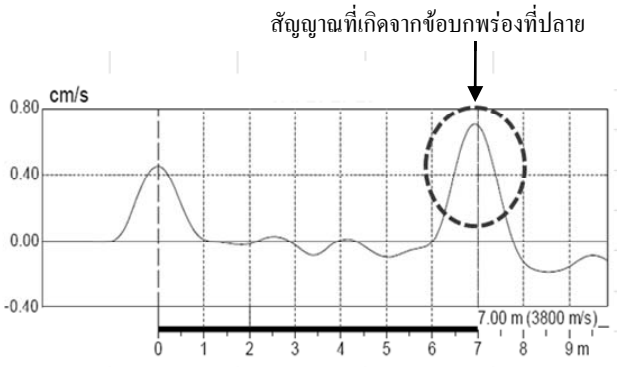
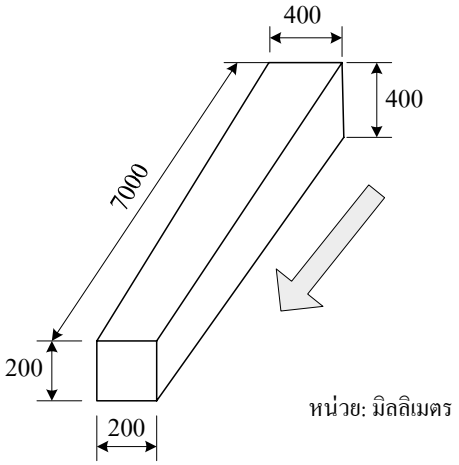
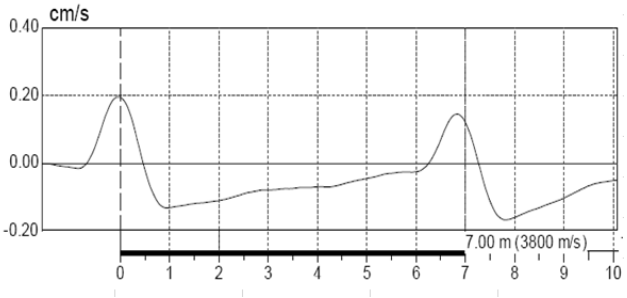
ตารางที่ ง1 ตัวอย่างสัญญาณจากการทดสอบกับแบบจำลองเสาเข็มในลักษณะต่างๆ (ต่อ)

(ภาคผนวก ง)

ลักษณะของเสาเข็มจำลอง	สัญญาณคลื่นที่วัดได้จากการเคาะทดสอบ
เสาเข็มมีการต่อเชื่อม  	
เสาเข็มมีวัสดุอื่นแทรกอยู่  	

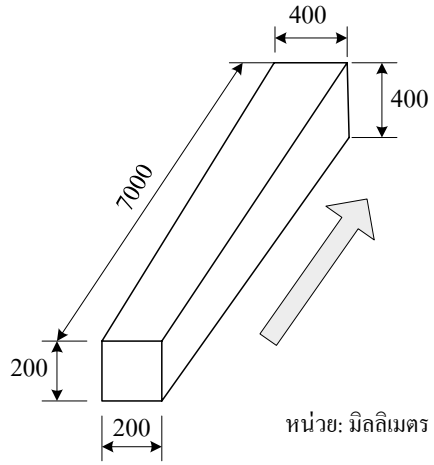
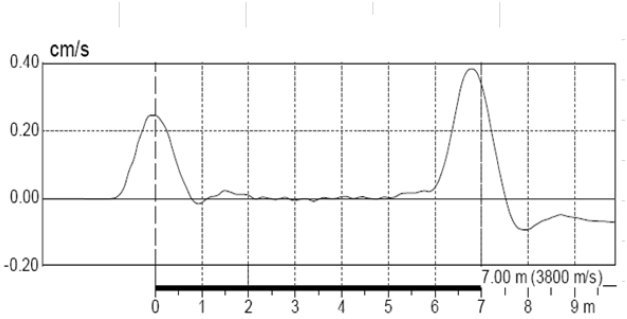
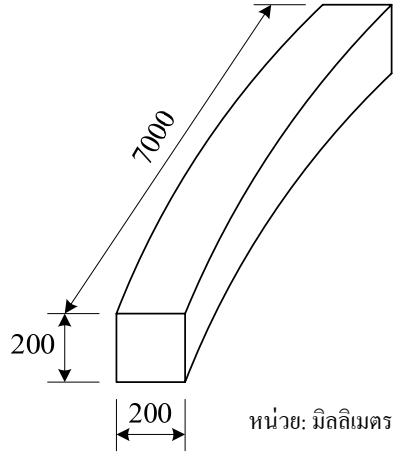
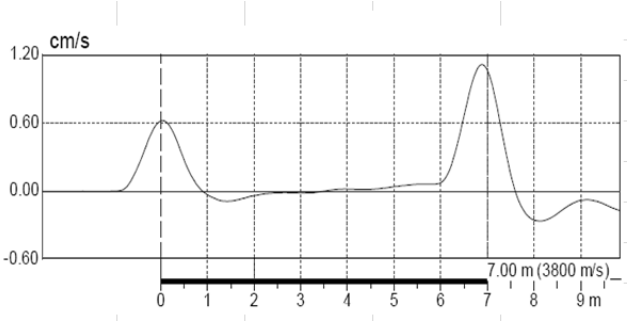
ตารางที่ ง1 ตัวอย่างสัญญาณจากการทดสอบกับแบบจำลองเสาเข็มในลักษณะต่างๆ (ต่อ)

(ภาคผนวก ง)

ลักษณะของเสาเข็มจำลอง	สัญญาณคลื่นที่วัดได้จากการเคาะทดสอบ
เสาเข็มมีสภาพบกพร่องที่ปลาย  	
เสาเข็มมีขนาดลดลงตามความลึก  	

ตารางที่ ง1 ตัวอย่างสัญญาณจากการทดสอบกับแบบจำลองเสาเข็มในลักษณะต่างๆ (ต่อ)

(ภาคผนวก ง)

ลักษณะของเสาเข็มจำลอง	สัญญาณคลื่นที่วัดได้จากการเคาะทดสอบ
เสาเข็มมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความลึก 	
เสาเข็มโค้ง 	

หมายเหตุ สัญญาณที่เกิดจากเสาเข็มมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความลึก สัญญาณที่เกิดจากเสาเข็มมีขนาดลดลงตามความลึก และสัญญาณที่เกิดจากเสาเข็มโค้ง ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่เกิดจากเสาเข็มสมบูรณ์ จึงไม่สามารถตรวจสอบสภาพเสาเข็มในกรณีที่มีความผิดปรกติในลักษณะนี้ได้

คณะกรรมการกำกับดูแลการปฏิบัติงานของที่ปรึกษา

เรื่อง มาตรฐานการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ Dynamic Load Test

และตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มด้วยวิธี Seismic Test

1.	นายเอกวิทย์	ถิระพร	รองอธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง	ประธานกรรมการ
2.	นายศิริชัย	กิจจารึก	ผู้อำนวยการสำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ	กรรมการ
3.	นายมนต์ชัย	ศุภมาร์คภักดี	วิศวกรวิชาชีพ 9 วช (วิศวกรรมโยธา) สวค.	กรรมการ
4.	นายนพ	โรจนวานิช	วิศวกรวิชาชีพ 9 วช (วิศวกรรมโยธา) สวค.	กรรมการ
5.	นายวิเชียร	ธนสุกาญจน์	วิศวกรโยธา 8 สวค.	กรรมการ
6.	นายวิสุทธิ์	เรืองสุขวรรณา	วิศวกรวิชาชีพ 8 วช (วิศวกรรมโยธา) สวค.	กรรมการ
7.	นายเสถียร	เจริญเหรียญ	วิศวกรวิชาชีพ 8 วช (วิศวกรรมโยธา) สนอ.	กรรมการ
8.	นายสุธี	ปิ่นไพสิฐ	วิศวกรไฟฟ้า 8 วช สวค.	กรรมการ
9.	นางขนิษฐา	ส่งสกุลชัย	วิศวกรโยธา 8 วช สวค.	กรรมการ
10.	นายไพฑูรย์	นนทสศุข	นักวิชาการพัสดุ 8 ว กค.	กรรมการ
11.	นางอภิญญา	จ่าวัง	วิศวกรวิชาชีพ 8 วช (วิศวกรรมโยธา) สวค.	กรรมการ
12.	นายครรชิต	ชิตสุริยวนิช	วิศวกรเครื่องกล 7 วช สวค.	กรรมการ
13.	นายกนก	สุจริตสัญชัย	วิศวกรวิชาชีพ 8 วช (วิศวกรรมโยธา) สวค.	กรรมการและเลขานุการ

คณะที่ปรึกษา เรื่อง มาตรฐานการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ Dynamic Load Test

และตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มด้วยวิธี Seismic Test

บริษัท เอส ที เอส เอ็นจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์ จำกัด

หัวหน้าคณะ:

ผศ. ดร.สุรฉัตร สัมพันธารักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะทำงาน:

ผศ. ดร. ฐิรวัตร บุญญะฐี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ. ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นาย ณัฐมนต์ กัมปนานนท์	วิศวกรประจำบริษัทฯ
นาย ธนบัตร เอื้อวรกุลชัย	วิศวกรประจำบริษัทฯ

กรมโยธาธิการและผังเมือง

สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ

ถนนพระรามที่ 6 แขวงสามเสนใน

เขตพญาไท กรุงเทพ 10400

โทร. 0 - 2299 - 4813 โทรสาร 0 - 2299 - 4797