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

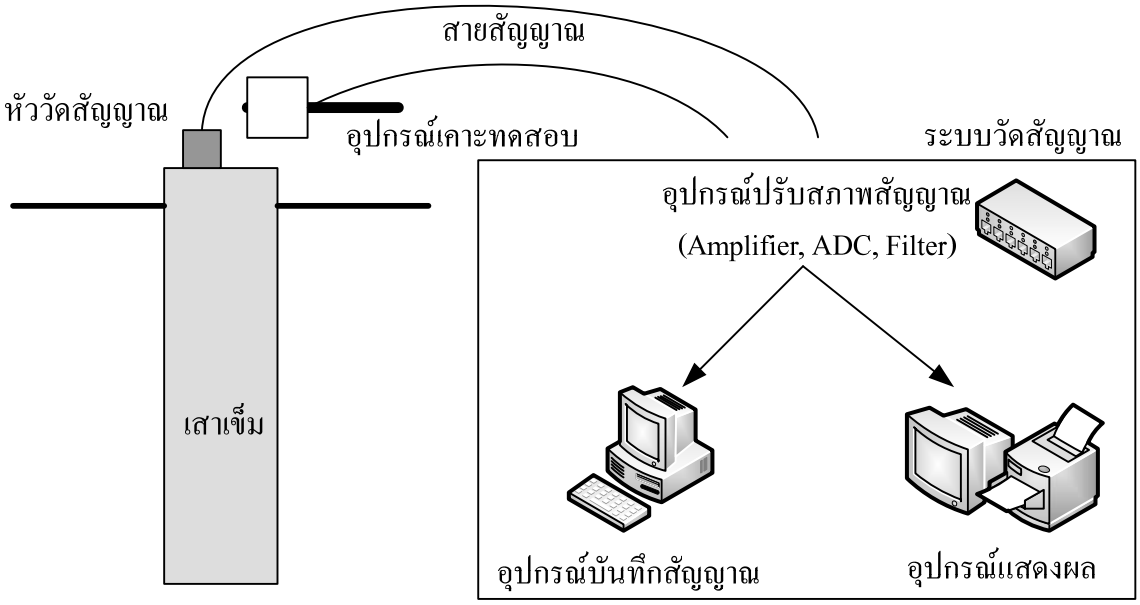
Z หมายถึง อิมพีแดนซ์

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

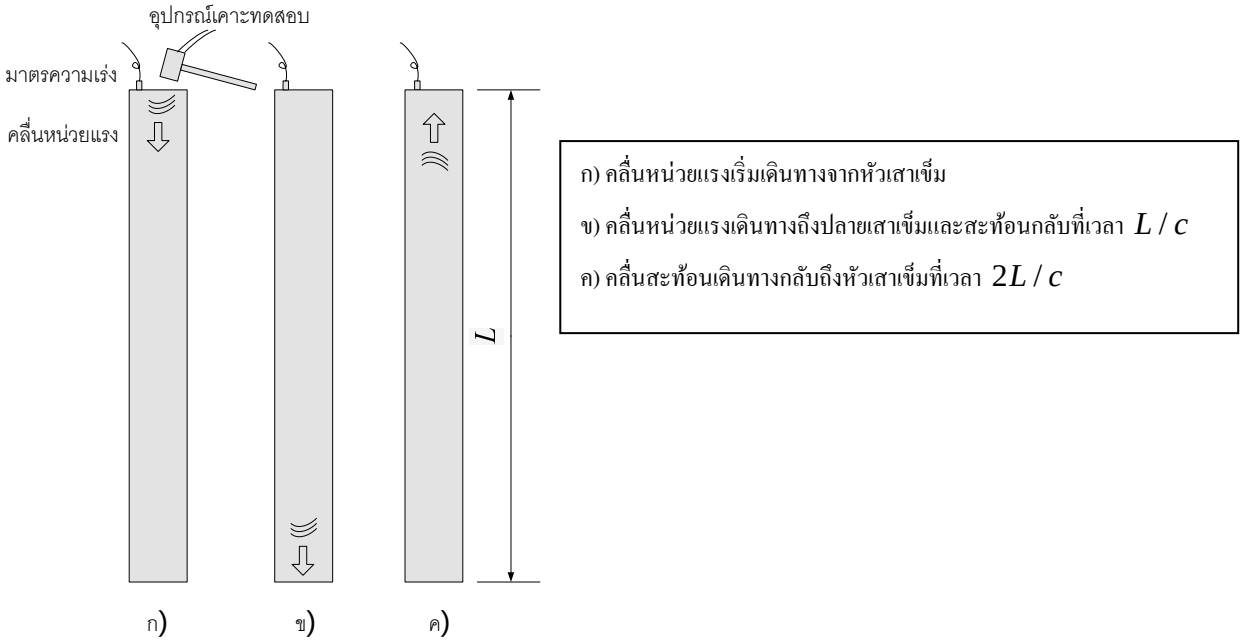
t คือ เวลา

ภาคผนวก ข. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลและการตีความ

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

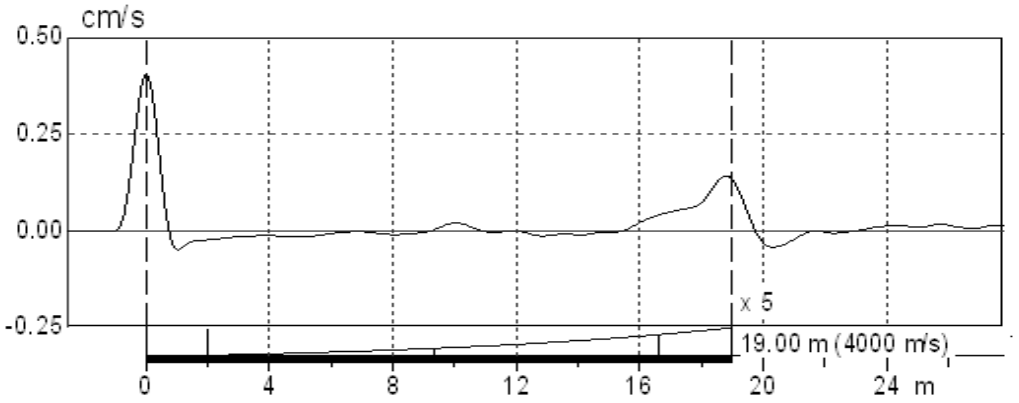
ข.1 หลักการของการวิเคราะห์

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



รูปที่ ข1. ลักษณะการเดินทางของคลื่นหน่วยแรงในเสาเข็มที่สมบูรณ์

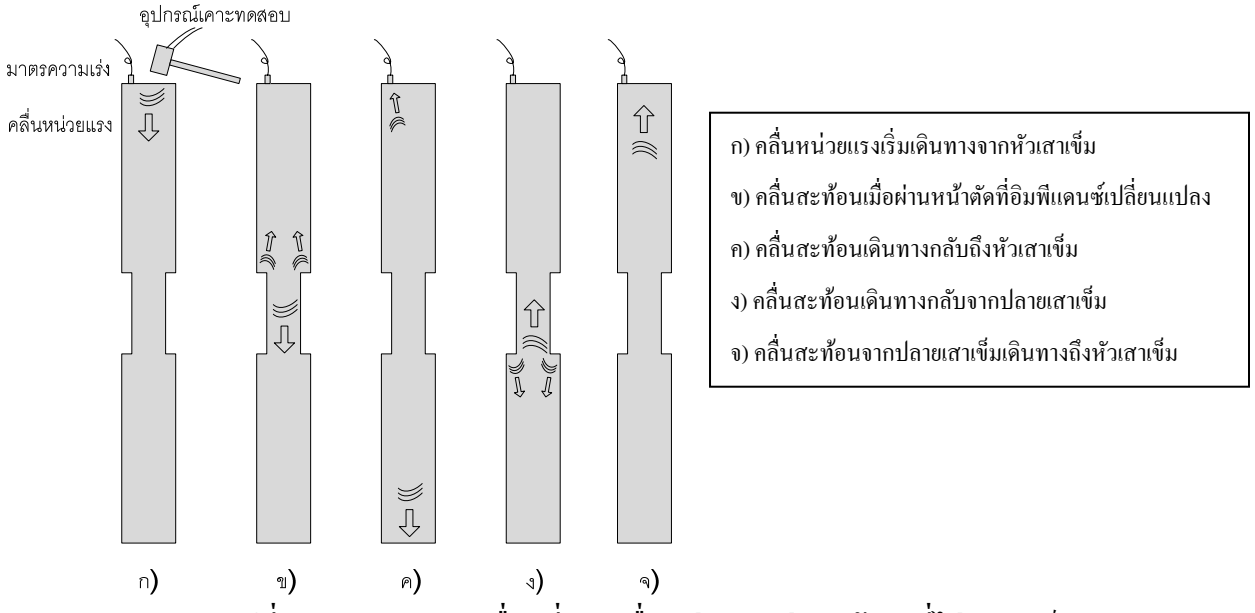
(ภาคผนวก ข ข้อ ข1)



รูปที่ ข-2 ตัวอย่างของค่าที่วัดได้จากหัววัดสัญญาณกรณีเสาเข็มมีสภาพสมบูรณ์

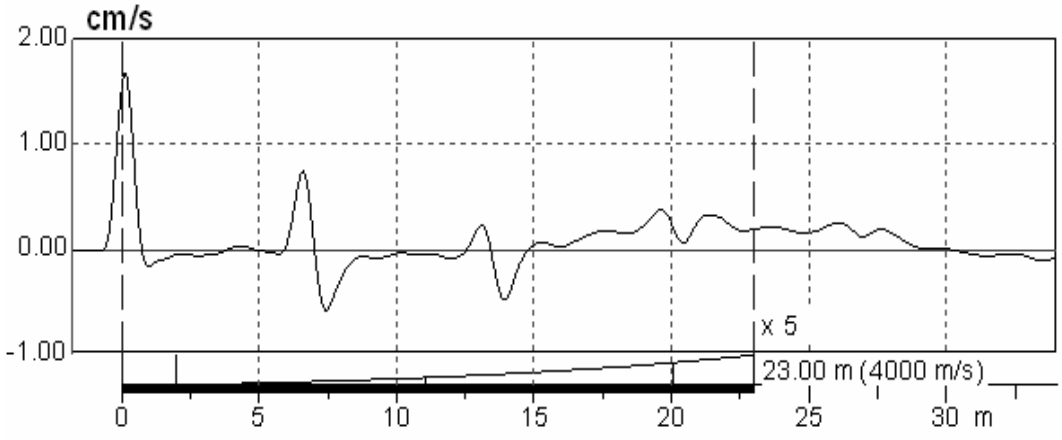
(ภาคผนวก ข ข้อ ข1)

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)

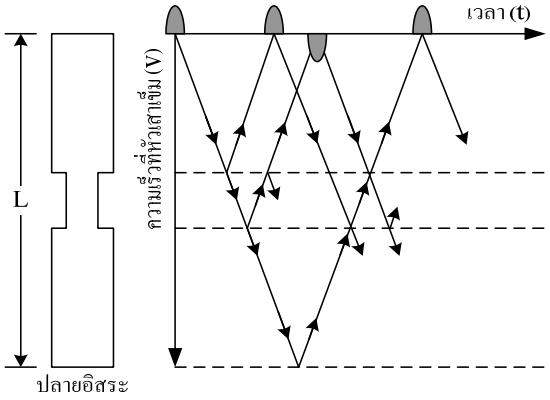
ข3.3 หลังจากนั้นจึงตั้งสมมุติฐานตามลักษณะคลื่นสัญญาณว่าการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์เกิดจากอะไร มาจากสาเหตุเดี่ยวหรือจากหลายๆสาเหตุรวมกัน ดังนั้นการแปลความหมายของคลื่นที่วัดได้จึงขึ้นอยู่กับความสามารถและประสบการณ์ของผู้วิเคราะห์ด้วย

ภาคผนวก ค. ตัวอย่างรูปแบบของสัญญาณที่วัดได้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด

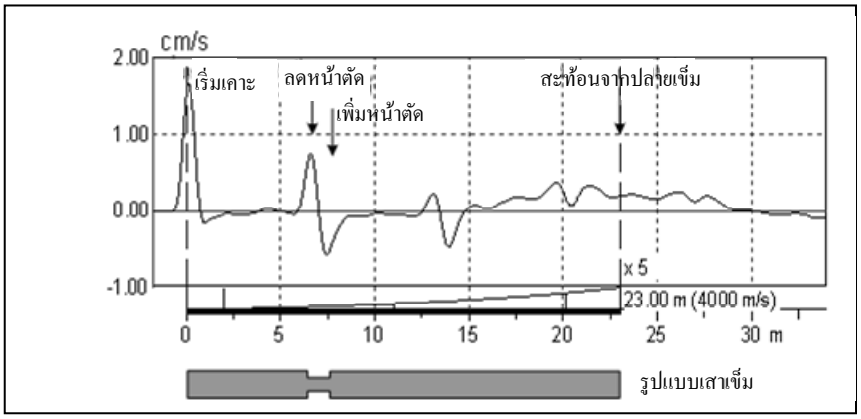
สัญญาณที่วัดได้จากการตรวจสอบนั้นเป็นผลจากการเดินทางผ่านหน้าตัดเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ โดยอิมพีแดนซ์ของหน้าตัดที่ความลึกนั้นอาจมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากหลายปัจจัย เช่น คุณสมบัติของวัสดุที่ทำเสาเข็มมีการเปลี่ยนแปลง หน้าตัดของเสาเข็มมีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของชั้นดิน เป็นต้น ในที่นี้จะนำเสนอตัวอย่างรูปแบบสัญญาณคลื่นที่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของเสาเข็มในลักษณะต่างๆ

ค1. กรณีเสาเข็มมีการคอด (หน้าตัดเล็กลง)

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



(ก) การเดินทางของคลื่นทดสอบ



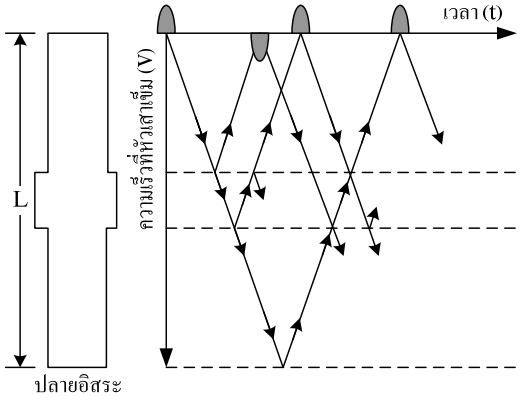
(ข) รูปแบบคลื่นและการแปลความหมาย

รูปที่ ค1 รูปแบบคลื่นทดสอบในเสาเข็มที่มีการคอดตัว

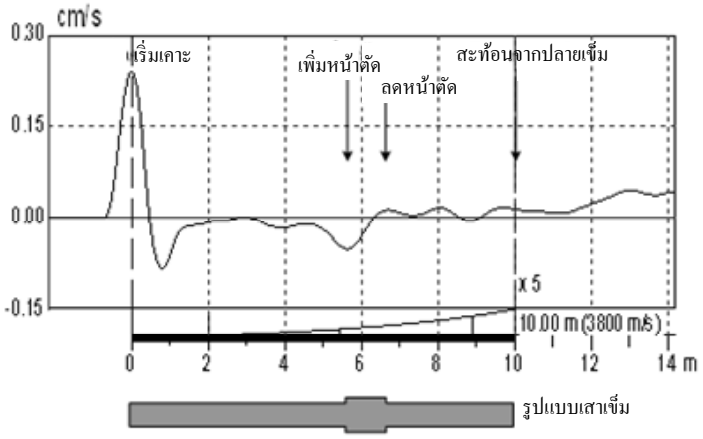
(ภาคผนวก ค ข้อ ค1)

ค2. กรณีเสาเข็มมีการบวม (หน้าตัดใหญ่ขึ้น)

คล้ายคลึงกับในกรณีที่เสาเข็มมีการคอดตัว แต่จะแตกต่างกันที่เฟสของคลื่นสะท้อน กล่าวคือเมื่อคลื่นจากการเคาะเสาเข็มเคลื่อนที่ตำแหน่งที่มีการเพิ่มขนาดของหน้าตัดเสาเข็ม คลื่นจะสะท้อนกลับมาที่หัวเสาบางส่วนในแบบต่างเฟสกัน และเมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่ต่อไปหลุดออกไปจากบริเวณหน้าตัดเพิ่มขนาดแล้ว ก็จะมีคลื่นบางส่วนสะท้อนกลับมาที่หัวเสาในแบบตรงเฟสกัน และก็จะมีคลื่นอีกบางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปจนถึงปลายเสาเข็มและสะท้อนกลับมาที่บริเวณหัวเสาเข็มในแบบร่วมเฟสกัน ซึ่งการเดินทางของคลื่นหน่วยแรง ตัวอย่างรูปแบบสัญญาณและการแปลความหมายได้แสดงไว้ในรูปที่ ค2



(ก) การเดินทางของคลื่นทดสอบ



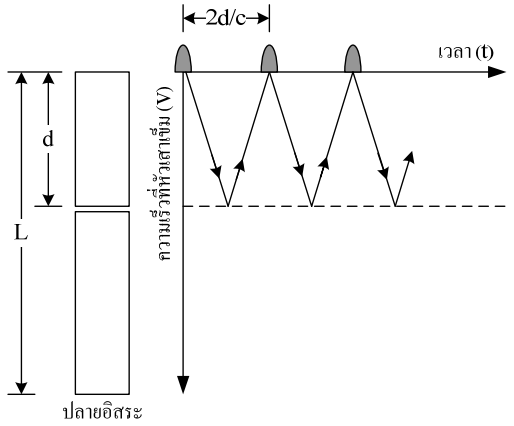
(ข) รูปแบบคลื่นและการแปลความหมาย

รูปที่ ค2 รูปแบบคลื่นทดสอบในเสาเข็มที่มีการบวมตัว

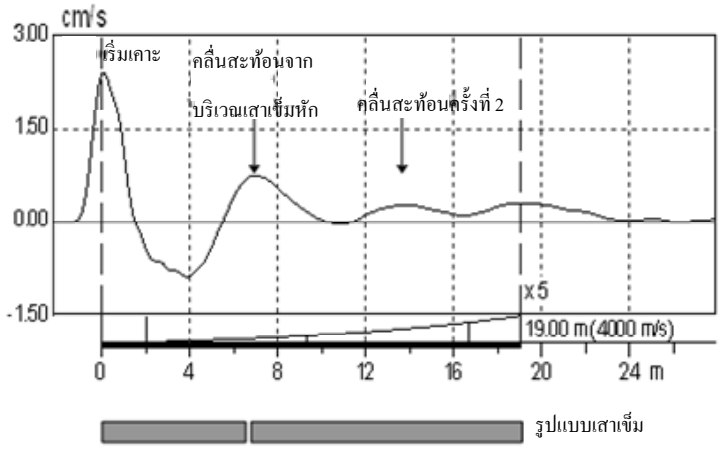
(ภาคผนวก ค ข้อ ค2.)

ค.3 กรณีเสาเข็มหัก (ขาดตอนหรือขาดความต่อเนื่อง)

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



(ก) การเดินทางของคลื่นทดสอบ



(ข) รูปแบบคลื่นและการแปลความหมาย

รูปที่ ค3 รูปแบบคลื่นทดสอบในเสาเข็มที่มีการหัก

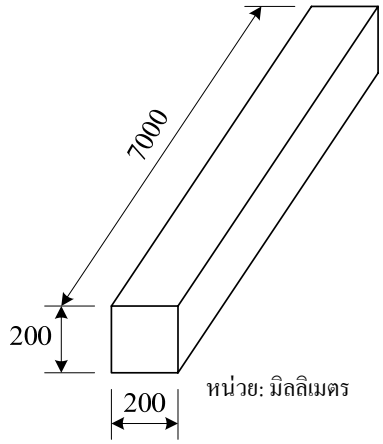
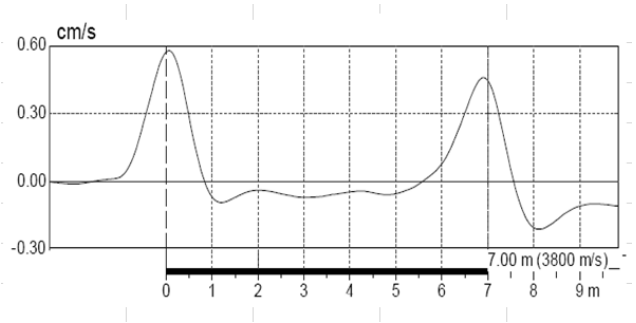
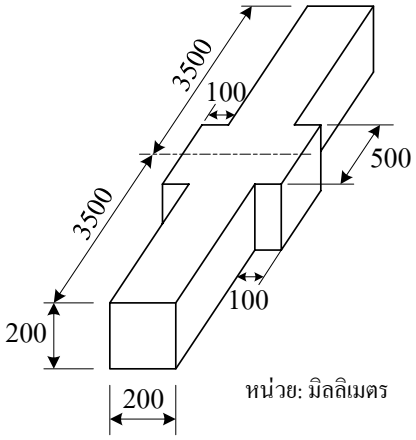
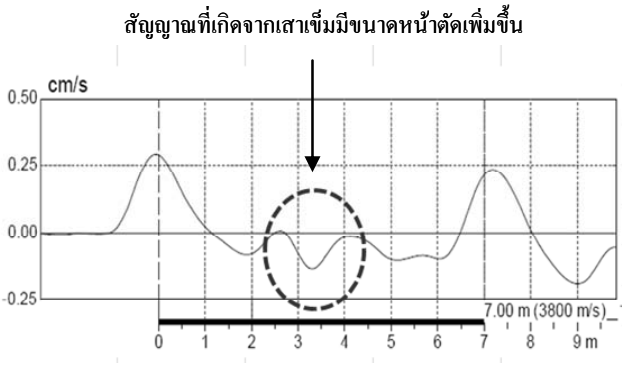
(ภาคผนวก ค ข้อ ค3.)

ภาคผนวก ง. ตัวอย่างสัญญาณจากการทดสอบกับแบบจำลองเสาเข็มในลักษณะต่างๆ

เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจและพิจารณาผลการการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มด้วยวิธี Seismic Test จึงได้รวบรวมตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบกับเสาเข็มจำลองที่มีสภาพความสมบูรณ์ต่างๆ กันมาแสดงไว้ในภาคผนวกนี้ดังตารางที่ ง1 อย่างไรก็ตามเสาเข็มจำลองมีสภาพเงื่อนไขขอบแตกต่างจากเสาเข็มใช้งานจริง กล่าวคือการทดสอบกระทำกับเสาเข็มจำลองที่วางอยู่บนที่รองรับที่ระดับพื้นดิน โดยมิได้เสียบลงไปในชั้นดินเหมือนเสาเข็มใช้งานจริง การนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้อ้างอิงหรือประกอบการตัดสินใจใดๆ จึงขอให้ตระหนักถึงความแตกต่างดังกล่าวไว้ด้วย

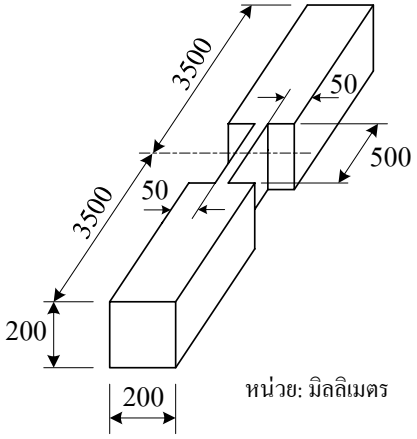
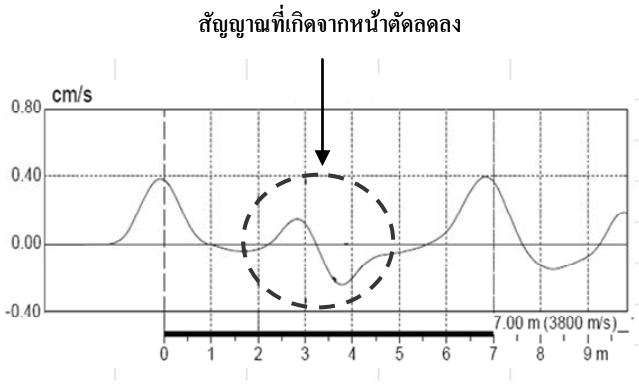
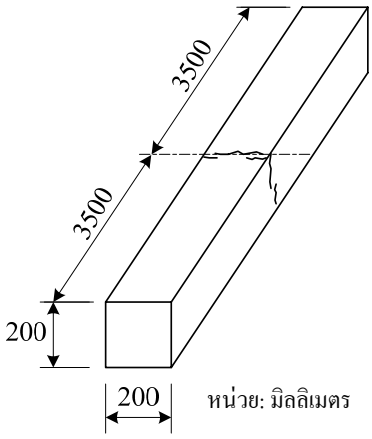
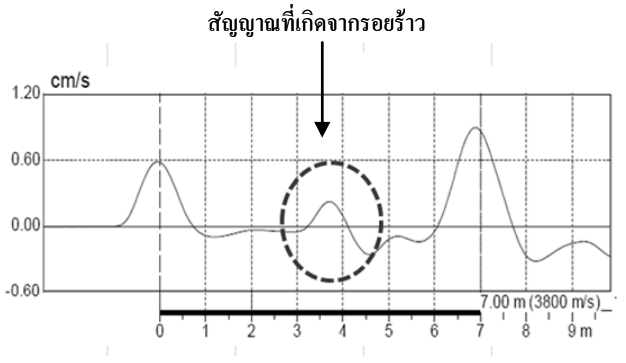
ตารางที่ ง1 ตัวอย่างสัญญาณจากการทดสอบกับแบบจำลองเสาเข็มในลักษณะต่างๆ

(ภาคผนวก ง)

ลักษณะของเสาเข็มจำลอง	สัญญาณคลื่นที่วัดได้จากการเคาะทดสอบ
เสาเข็มสมบูรณ์ 	
เสาเข็มมีขนาดหน้าตัดเพิ่มขึ้น 	

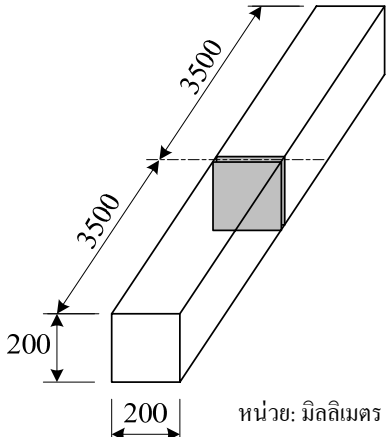
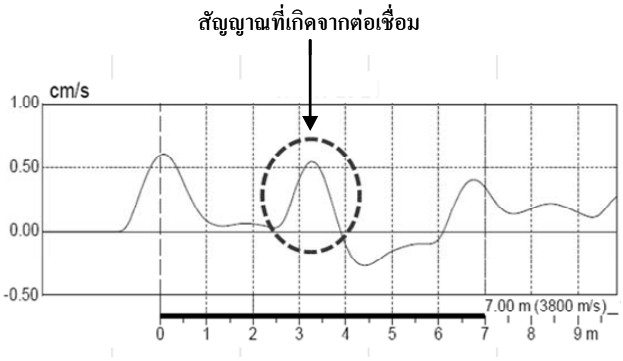
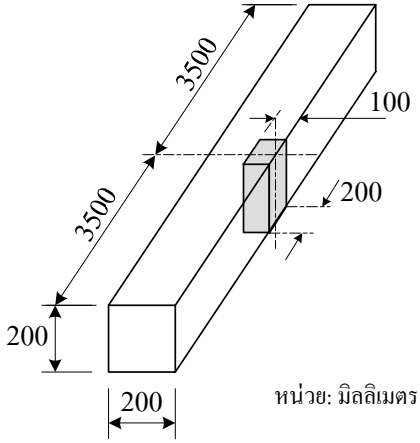
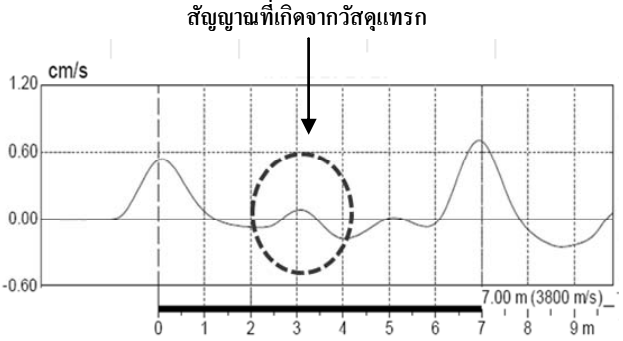
ตารางที่ ง1 ตัวอย่างสัญญาณจากการทดสอบกับแบบจำลองเสาเข็มในลักษณะต่างๆ (ต่อ)

(ภาคผนวก ง)

ลักษณะของเสาเข็มจำลอง	สัญญาณคลื่นที่วัดได้จากการเคาะทดสอบ
เสาเข็มมีขนาดหน้าตัดลดลง 	
เสาเข็มแตกร้าว 	

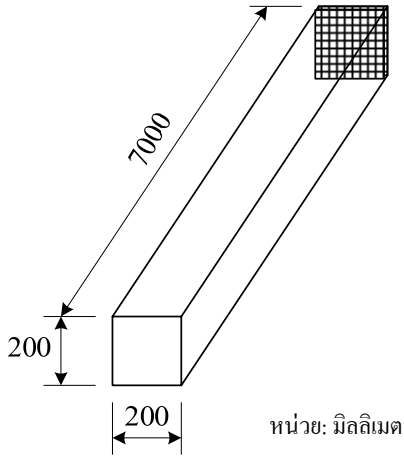
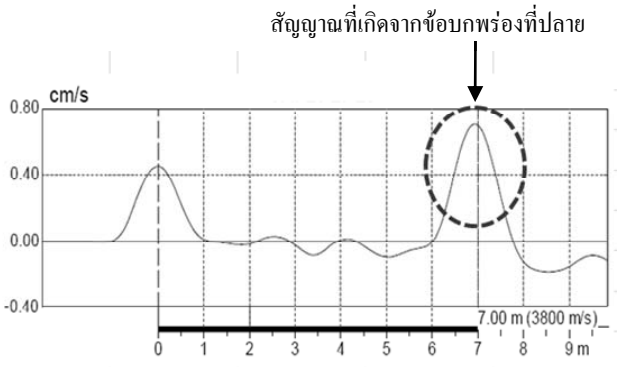
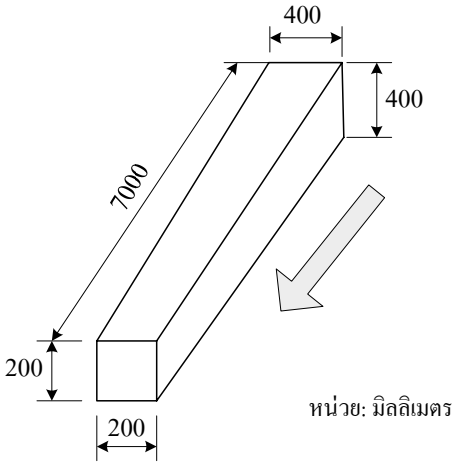
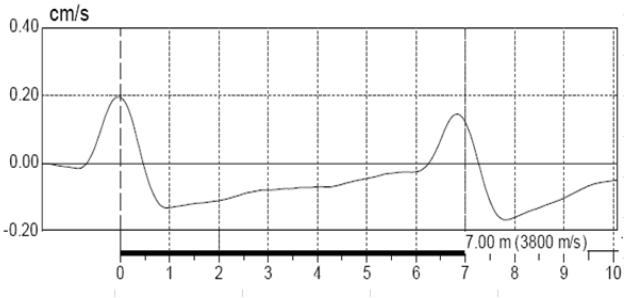
ตารางที่ ง1 ตัวอย่างสัญญาณจากการทดสอบกับแบบจำลองเสาเข็มในลักษณะต่างๆ (ต่อ)

(ภาคผนวก ง)

ลักษณะของเสาเข็มจำลอง	สัญญาณคลื่นที่วัดได้จากการเคาะทดสอบ
เสาเข็มมีการต่อเชื่อม  	
เสาเข็มมีวัสดุอื่นแทรกอยู่  	

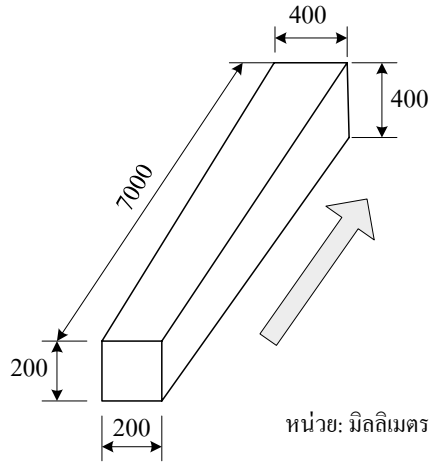
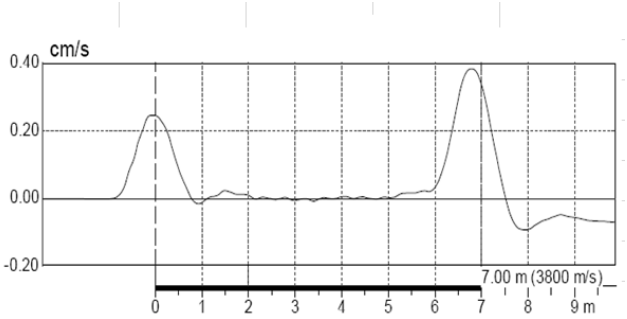
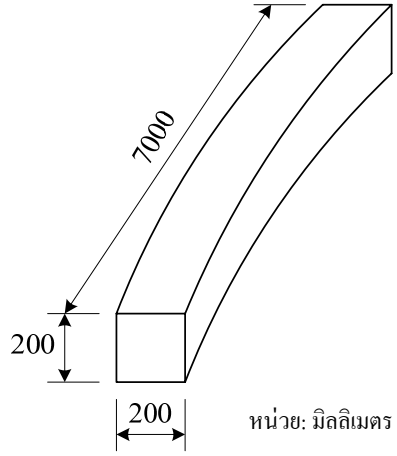
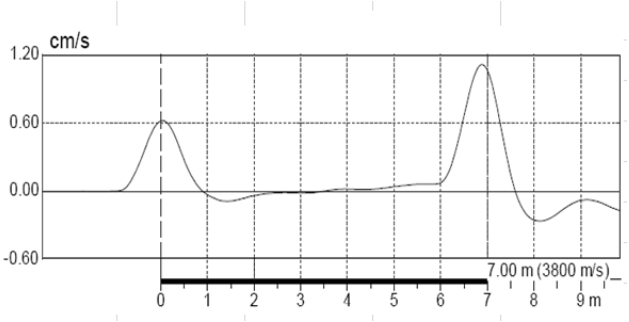
ตารางที่ ง1 ตัวอย่างสัญญาณจากการทดสอบกับแบบจำลองเสาเข็มในลักษณะต่างๆ (ต่อ)

(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