

การทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ (High Strain Dynamic Load Test)

การทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี High Strain Dynamic Load Test นี้ อาศัยหลักการพื้นฐานจาก ทฤษฎีของคลื่นความเค้นในแท่งโลหะ (Stress-wave Theory) ซึ่งได้มีการพัฒนามาตั้งแต่ ปี คศ. 1787 สมการพื้นฐานของการเคลื่อนตัวของคลื่นความเค้นในแท่งโลหะ ได้แก่

โดย	E	=	ค่าโมดูลัสของ Young ของแท่งโลหะ
	ρ	=	ความหนาแน่นของมวลแท่งโลหะ
	u	=	การเคลื่อนตัวของอนุภาคในแท่งโลหะ
	x	=	ตำแหน่งตามแนวยาว (ดังรูปที่ 17)
	t	=	เวลา

ในการศึกษาคลื่นในเสาเข็มนี้ ความเร็วของอนุภาคในแท่งโลหะและความเร็วของคลื่น ความเค้นควรจะแยกกันให้ชัดเจน ดังรูปที่ 17 ความเร็วของคลื่นความเค้นนั้น (c) สามารถกำหนด โดยกฎของฮุกและนิวตัน มีค่าเท่ากับ $\sqrt{E/\rho}$ ส่วนความเร็วของอนุภาคในแท่งโลหะ (v) มีค่าดัง สมการข้างล่างโดยเกิดจากการทดสอบตัวอย่างของแท่งโลหะเมื่อมีคลื่นความเค้นวิ่งผ่าน

$$u = \frac{\sigma}{E} \Delta L = \frac{\sigma}{E} c \Delta t$$

$$V = \frac{u}{\Delta t} = \frac{\sigma}{E} c$$

รูปที่ 17 การเคลื่อนที่ของคลื่นในแท่งโลหะ

จากสมการที่ 5 จะเห็นว่าความเร็วของคลื่นความเค้น (C) และความเร็วอนุภาคในแท่งโลหะ (v) เป็นสัดส่วนกันมีทิศเดียวกัน ถ้าความเค้นในคลื่นเป็นความเค้นอัด (Compressive Stress) จะมีทิศตรงข้ามกัน กับคลื่นความเค้นดึง (Tensile Stress Wave) ความสัมพันธ์ระหว่างแรง ในแนวแกนแท่งโลหะกับความเร็วอนุภาค (v) จะเป็น

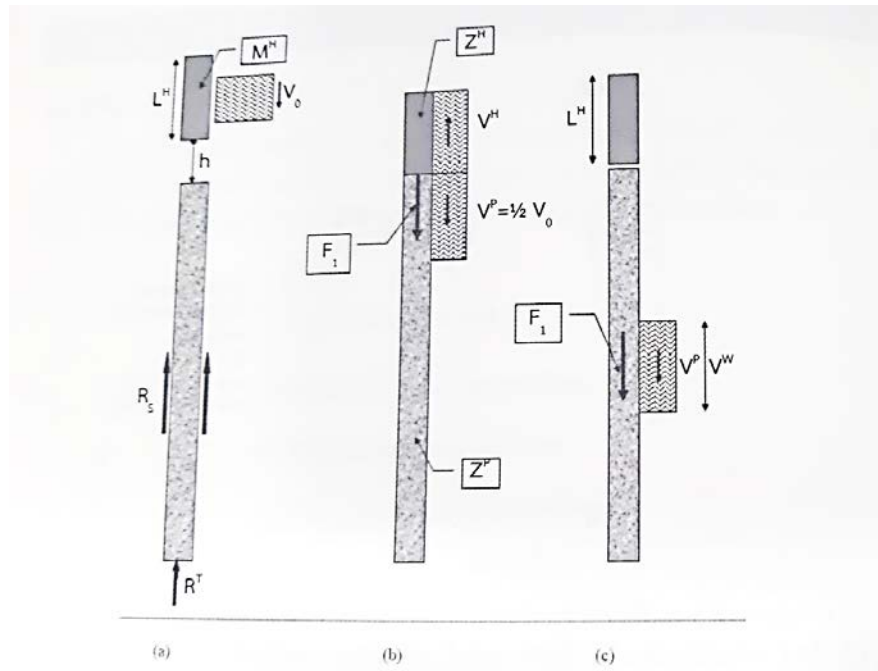
$$V = \frac{F \cdot c}{EA}$$

$$F = \frac{EA}{c} \cdot v = Zv$$

โดย A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งโลหะ ค่า EA/C จะถูกเรียกว่า อิมพีแดนซ์ (Impedance) Z ของแท่งโลหะ หรือความหยุ่นทางพลศาสตร์ (Dynamic Stiffness) หรือเป็นตัววัดการต้านทาน ต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วในแท่งโลหะ

คลื่นความเค้นในเสาเข็มระหว่างการตอก

สมมติให้ความเร็วตัมก่อนกระทบ V_0 (ดังรูปที่ 18) ขณะตอกเสาเข็ม ผลการตอกจะทำให้ เกิดคลื่นความเค้นวิ่งขึ้นในตุ่มส่วนหนึ่งและวิ่งลงในเสาเข็มอีกส่วนหนึ่ง สมมติความเร็วทางอนุภาค ในตุ่มมีทิศทางขึ้นตามความเค้นอัดมีค่า V_u และให้ความเร็วอนุภาคในเสาเข็มทิศลงมีค่า V_p จากสม ดุลของแรง



รูปที่ 18 แรงและความเร็วอนุภาคเสาเข็มขณะตอก (กรณี $Z_h = Z_p$)

$$Z_h V_p = Z_p V_o \quad \dots\dots\dots(7)$$

โดย Z_h และ V_p คือค่าอิมพีแดนซ์ของตุ้มและเสาเข็มตามลำดับ ที่หน้าสัมผัสความเร็วอนุภาค ของตุ้มและเข็มมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 8

$$V_o - V_h = V_p \quad \dots\dots\dots(8)$$

จาก (7) และ (8)

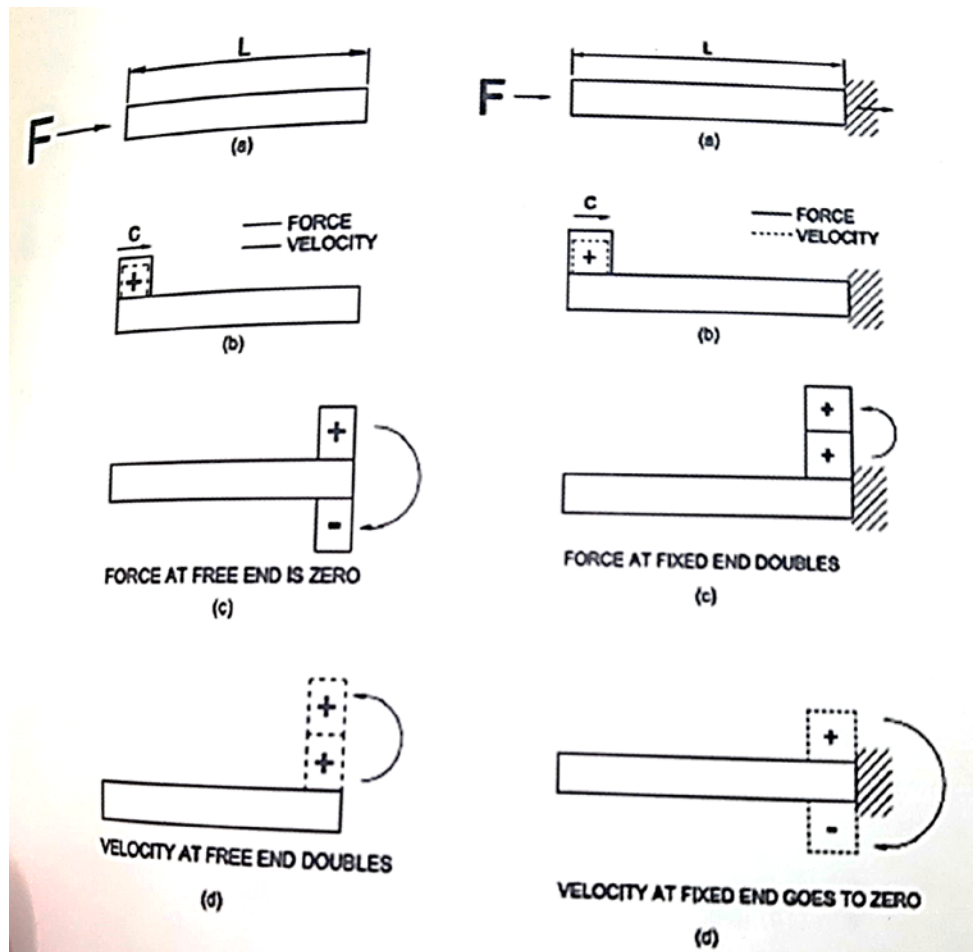
$$V_p = V_o = Z_h / (Z_h + Z_p) \quad \dots\dots\dots(9)$$

แรงในเสาเข็มขณะเกิดการตอกจะมีค่าขึ้นกับค่าความเร็วกระทบของตุ้ม V_o

$$F_1 = V_p Z_p = V_o Z_h Z_p / (Z_h + Z_p) \quad \dots\dots\dots(10)$$

ในกรณีที่ $Z_h = Z_p$ ค่า $F_1 = 0.5 V_o Z_p$ และ $Z_p = 1/2 V_o$ ดังรูปที่ 18 ช่วงเวลาการตอล t_o จะมีค่าเท่ากับ $2 L_h / C$ ซึ่งเป็นเวลาตั้งแต่เกิดคลื่นความเค้นในตุ้ม วิ่งขึ้นสะท้อนกลับเป็นคลื่น ความเค้นดึงวิ่งลงตามแนวแกนตุ้ม ผ่านไปยังเสาเข็มด้วยความเร็ว C เมื่อช่วงเวลาการตอลหมดไป ตั้มตอกจะมีความเร็วเป็นศูนย์ ถ่ายเทคลื่นความเค้นให้เสาเข็มหมดคลื่น

ในเทคโนโลยีคลื่นสะท้อนที่นำมาใช้กับเสาเข็มนี้ จะวัดข้อมูล 2 ส่วนจากสัญญาณสะท้อน คือแรงในแนวแกนวัดด้วย Strain Transducers และความเร็วอนุภาคในเสาเข็มด้วย Accelerometers ความสมบูรณ์ของเสาเข็มและกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะถูกแปลความจากข้อมูลทั้งสองนี้ ซึ่ง วัดจากหัวเสาเข็มเท่านั้น ความเร็วอนุภาคที่วัดที่หัวเสาเข็ม จะเป็นดังรูปที่ 19 คลื่นความเค้นนี้จะ วิ่งลงสู่ปลายเสาเข็มและสะท้อนกลับไปที่หัวเสาเข็มในเวลา $2L/C$ เมื่อ $L =$ ความยาวของเสาเข็ม



รูปที่ 19 แรงและความเร็วของอนุภาคกับเวลาที่วัดได้ที่หัวเสาเข็ม

3.2 การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

3.2.1 การคำนวณด้วยวิธี Case Method

เมื่อเสาเข็มถูกสมมุติว่าเป็นแท่งวัตถุอีลาสติกที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอ และดินเป็นวัตถุพลาสติก ค่าแรงต้านทานการตอกของดินทั้งหมดโดยวิธีการที่เรียกว่า Case Method (Rausche, 1970) มีค่าดังสมการ

$$R = [F(t_1) + F(t_2) + Z_p v(t_1) - Z_p v(t_2)] / 2 \quad \dots\dots\dots(11)$$

- โดย $t_2 = t_1 + 2L/c$
- และ $t_1 =$ เวลาที่เกิดความเร็วมากที่สุดที่หัวเสาเข็ม
- $Z_p =$ อิมพีแดนซ์ของเสาเข็ม

แรงต้านทานทั้งหมด (R) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงต้านทานสถิตยศาสตร์ (R_s) กับแรงต้านทานพลศาสตร์ (R_d) ดังสมการ

$$R = R_s + R_d \quad \dots\dots\dots(12)$$

แรงต้านทานพลศาสตร์ R_d สมมุติให้มีค่าเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเสาเข็ม



$$R = J_C Z_P V_{toe} \dots\dots\dots(13)$$

โดยค่า J_C = Dimensionless Case Damping Factor ซึ่งขึ้นกับชนิดของดิน

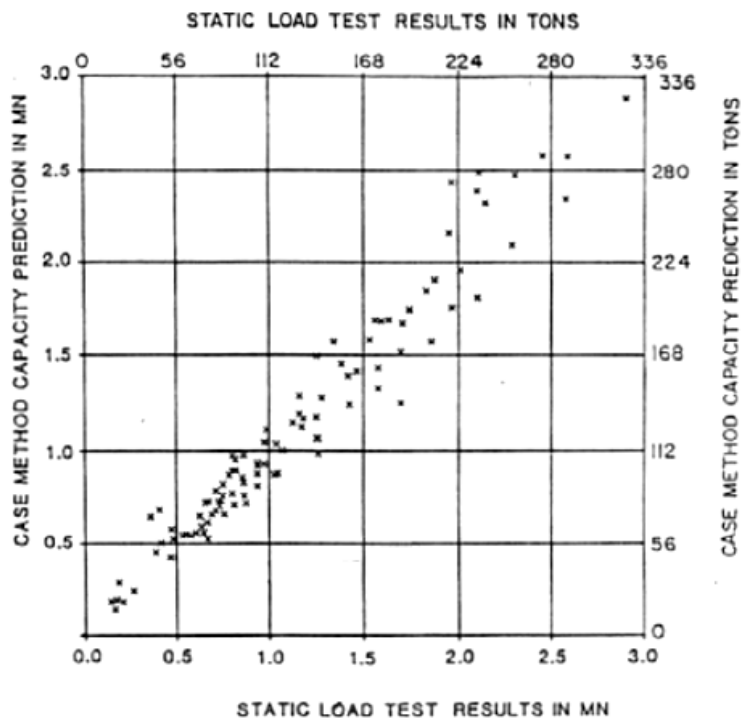
$$V_{toe} = 2V_{top} - R/Z_P \text{ เมื่อเสาเข็มถูกสมมุติเป็นวัตถุแกร่ง}$$

จาก (12) และ (13), ค่าแรงต้านทานสถิตยศาสตร์ เท่ากับ

$$R = R - R_d$$

$$R_s = R - J_C (2Z_P V_{top} - R) \dots\dots\dots(14)$$

จะเห็นว่าการคำนวณตาม Case Method ดังกล่าวข้างต้นมาจากสมมุติฐานหลายอย่างที่สำคัญ คือ เสาเข็มเป็นวัตถุแกร่ง และค่าแรงต้านทานของดินทางพลศาสตร์ ถูกสมมุติให้อยู่ที่ปลายเข็ม ดังสมการที่ 14 การคำนวณด้วยวิธีนี้จึงควรทำขณะที่ปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินแน่น ค่า J_C ที่ควรใช้ถูกแสดงในตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักโดยวิธีนี้กับวิธี Static Load Test เวกแสดงในรูปที่ 20 ซึ่งบ่งถึงความน่าเชื่อถือของวิธีนี้พอสมควร ในกรณีที่มีค่าการทดสอบเสาเข็มทางสถิตยศาสตร์ (Static Load Test) ค่า J_C สามารถคำนวณย้อนกลับ (Back-Figured) ได้ โดยที่ ข้อมูลจากค่า จากค่า J_C จากการคำนวณย้อนกลับหลายๆ ค่า ในสภาพดินเดียวกันจะช่วยให้วิศวกรสนาม มีความมั่นใจในการเลือกใช้ค่า J_C มากขึ้น



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธี Case Method กับ Static Load Test



ตารางที่ 1 แสดงค่า Damping factor (UL) ของดินชนิดต่างๆ

Soil at pile point	Damping factor, Jc
Sand	0.05
Silty sand	0.15
Sandy silt	0.20
Silt	0.30
Silt clay	0.55
Clay	1.10

3.2.2 การวิเคราะห์โดยอาศัย Matching Program

จะเห็นได้ว่าการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธี Case Method ข้างต้นจะมีความ ถูกต้องมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการพิจารณาเลือกค่า Jc ในการวิเคราะห์ (สมการ ที่ 14)

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้มีการพัฒนาเทคนิคในการกำหนดค่า Jc ดังกล่าวให้ถูกต้อง ใกล้เคียงที่สุด โดยใช้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Matching Programe) สร้างสัญญาณคลื่นความเค้น จำลองขึ้น แล้วนำไปเปรียบเทียบกับรูปแบบ สัญญาณคลื่นที่บันทึกไว้ในระหว่างการทดสอบ แล้วปรับแก้พารามิเตอร์ต่างๆ จนกระทั่งรูปแบบสัญญาณทั้งสองใกล้เคียงกัน ที่สุด (Matching) ก่อนนำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มต่อไป

Matching Programe ดังกล่าวมีการพัฒนาใช้งานอยู่หลายโปรแกรม อาทิเช่น CAPWAP และ TNOWAVE เป็นต้น

3.3 วิธีการทดสอบ

จากที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.1 การทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Dynamic Load Test นี้ต้อง อาศัยข้อมูล 2 ส่วนจากสัญญาณ สะท้อน คือ แรงในแนวแกน (Axial Force) ซึ่งสามารถวัดได้ด้วย อุปกรณ์ Strain Transducers และความเร็วอนุภาคในเสาเข็มที่วัดด้วย Accelerometers โดยอุปกรณ์ ทั้งสองจะถูกติดตั้งบริเวณด้านข้างเสาเข็ม ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าหัวเสาเข็มลงมาประมาณ 1.5-2.0 เท่าของ เส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม



รูปที่ 21 แสดงอุปกรณ์ Strain Transducers และ Accelerometers



เมื่อติดตั้งอุปกรณ์วัดทั้ง 2 แล้วเสร็จพร้อมต่อสายสัญญาณเข้ากับเครื่องวิเคราะห์และบันทึก ข้อมูล (Signal Analyzer Unit) ก็ สามารถเริ่มทำการทดสอบได้ทันที การทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีการ นี้จำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดคลื่นความเค้น ซึ่งโดยทั่วไปใช้การกระแทก หัวเสาเข็มด้วยตุ้มน้ำหนัก เพื่อส่งผ่านคลื่นความเค้นที่เกิดจากแรงกระแทก (Impact Force) ให้วิ่งผ่านลงไปเสาเข็ม แรงกระแทกใน ระหว่างการทดสอบต้องมากพอที่จะทำให้เสาเข็มเคลื่อนตัวอย่างเพียงพอ และ พัฒนา (Mobilize) แรงต้านทานให้สูงใกล้เคียงกำลังรับ น้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤติที่ต้องการมากที่สุด เท่าที่จะทำได้ แต่ต้องไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงเค้น (Stress) ในเสาเข็มทดสอบสูงเกินจนทำให้ เสาเข็ม เสียหาย



รูปที่ 21 การติดตั้งอุปกรณ์ทั้ง 2 อย่าง บริเวณด้านข้างเสาเข็ม

3.4 ลักษณะของการทดสอบ

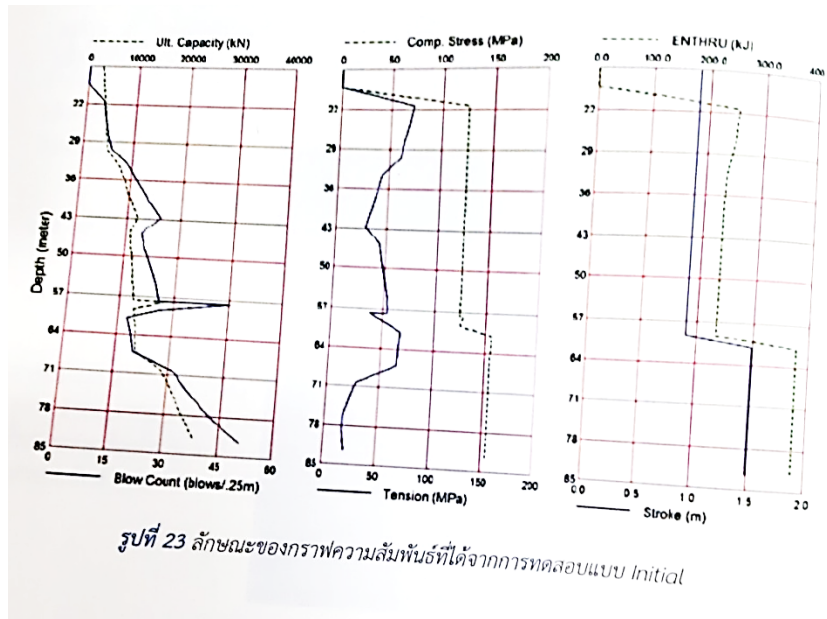
การทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Dynamic Load Test แบ่งตามลักษณะช่วงเวลาทำการทดสอบ ได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

3.4.1 Initial Driving Test (IDT)

เป็นการทดสอบในระหว่างการตอกเสาเข็ม โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดและบันทึกคลื่นสัญญาณ สะท้อนไปเป็นช่วงๆ ตลอดการตอก เสาเข็ม ทำให้ทราบข้อมูลต่างๆ เมื่อเสาเข็มอยู่ในตำแหน่ง Pile Tip ต่างๆ อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มที่ประเมินได้ จากการทดสอบในลักษณะ นี้ จะเป็นค่าแรงต้านทานของเสาเข็ม ณ เวลาที่ทดสอบซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีค่าต่ำกว่าค่ากำลังรับ น้ำหนักบรรทุกประลัย (Qu) เมื่อทิ้งให้ดินรอบเสาเข็มคืนสภาพ (Soil-Set up) เพียงพอ

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบลักษณะนี้ จะประกอบด้วย

- กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (ขณะตอกเสาเข็ม) และ Blow Counts เทียบกับความลึก
- กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยความเค้นภายในเสาเข็มเทียบกับความลึก
- กราฟความสัมพันธ์ระหว่างที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มและค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเทียบกับ ความลึก



รูปที่ 23 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบแบบ Initial

3.4.2 End of Driving (EOD)

เป็นการทดสอบทันทีเมื่อตอกเสาเข็มเสร็จสิ้น การทดสอบลักษณะนี้เป็นการทดสอบเนย ที่ปลายเสาเข็มอยู่ในตำแหน่งที่กำหนดหรือตำแหน่งที่คาดว่าเหมาะสมแล้ว แต่ดินรอบข้างเสาเข็ม ที่ถูกรบกวนจากการตอกเสาเข็มที่ผ่านไปยังไม่คืนสภาพ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบลักษณะนี้ จะประกอบด้วย

- กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม ณ เวลาที่ทดสอบคือขณะที่ตอกเสาเข็มแล้ว เสร็จ
- ค่าแรงเสียดทานผิวและแรงต้านปลายเสาเข็ม (เฉพาะเมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อด้วย Matching Program)
- ค่าหน่วยแรงเค้นอัดและดึง (Compression & Tension Stress) ที่เกิดขึ้นในเสาเข็มขณะ ทดสอบ
- สภาพความสมบูรณ์ของโครงสร้างเสาเข็ม

3.4.3 Restrike Test

เป็นการทดสอบภายหลังการตอกเสาเข็ม โดยทิ้งให้ดินรอบข้างคืนสภาพ (Soil Set-up) อย่างสมบูรณ์ เช่นเดียวกับการทดสอบ Static Load Test ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ประเมินจากการทดสอบนี้จึงใกล้เคียงกับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การ คืนสภาพของดินรอบข้างเสาเข็มสมบูรณ์เพียงใด

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบลักษณะนี้ จะประกอบด้วย

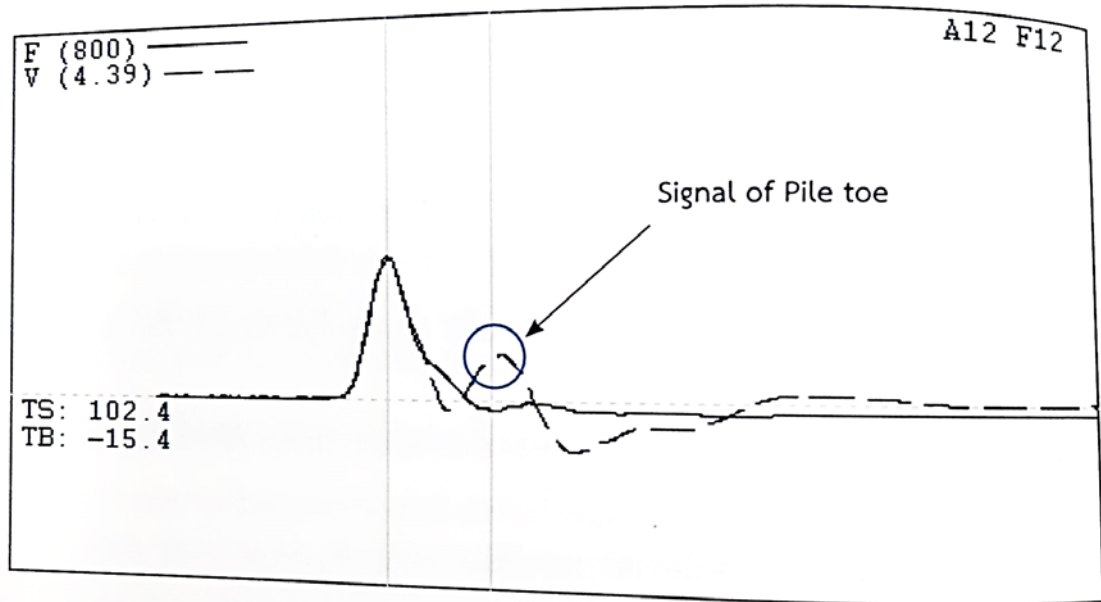
- กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม
- ค่าแรงเสียดทานผิวและแรงต้านปลายเสาเข็ม (เฉพาะเมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อด้วย Matching Program)
- ค่าหน่วยแรงเค้นอัดและดึง (Compression & Tension Stress) ที่เกิดขึ้นในเสาเข็มขณะ ทดสอบ
- สภาพความสมบูรณ์ของโครงสร้างเสาเข็ม

ในส่วนของคุณสมบัติของเสาเข็ม สำหรับเสาเข็มที่มีหน้าตัดและคุณสมบัติสมเสมอตลอดความยาว คลื่นความเค้นดึงที่เคลื่อนที่ขึ้นเนื่องจากการสะท้อนที่ปลายเข็ม ควรจะแสดง อย่างชัดเจนที่เวลาเท่ากับ $2L/c$ หลังจากการกระแทกของตู่มน้ำหนัก หากพบคลื่น ความเค้นดึงสะท้อนก่อนเวลา $2L/c$ แสดงถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงค่า impedance (ค่าคงที่ เปลี่ยนแปลงเมื่อพื้นที่และคุณสมบัติของวัตถุเปลี่ยนไป) ในลักษณะเดียวกับการทดสอบ Seismic Test ในรูปของค่าดัชนีแสดงสภาพความสมบูรณ์ (Integrity

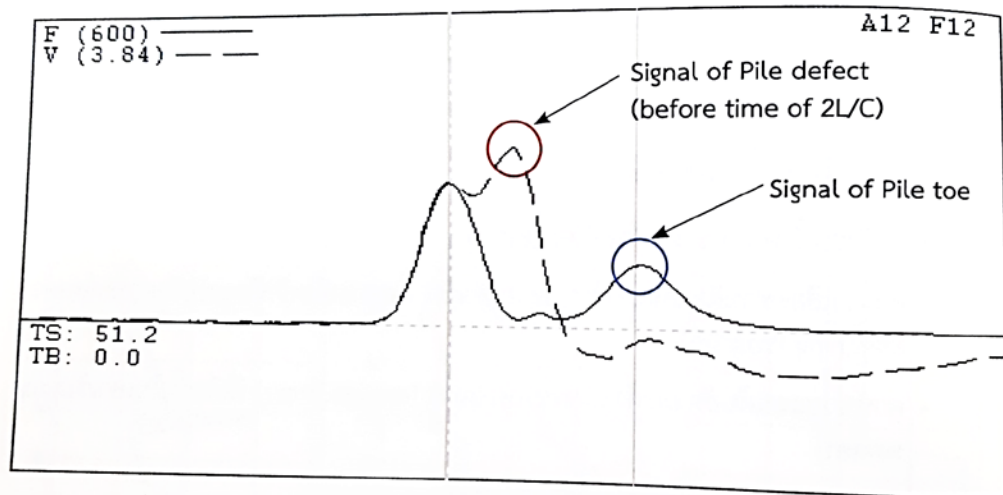


Factor, Beta value) ในกรณีที่พิจารณา ว่าคุณสมบัติของวัสดุคงที่ การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด ($\beta = Z_2 / Z_1$) สามารถหาได้จากสมการ

ค่าเบต้า ของการทดสอบ Seismic Test และ High Strain Dynamic Load Test อาจมีค่าแตกต่างกันได้เนื่องจากพลังงานที่ให้กับเสาเข็มมีค่าแตกต่างกัน



รูปที่ 24 ลักษณะสัญญาณของการทดสอบเสาเข็มที่มีสภาพสมบูรณ์



รูปที่ 25 ลักษณะสัญญาณของการทดสอบเสาเข็มที่มีสภาพไม่สมบูรณ์