การประมาณความยาวเสาเข็มด้วยการตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนจากหลายจุดกำเนิด
Pile length estimation by measurements of waves from multiple sources

อชิรพงศ์ ภิวัฒน์ธนบูรณ์[1,*] พลพัชร นิลวัชราภรณ์[2] ฐิรวัตร บุญญะฐี[3]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: Achiraphong.phi@gmail.com

บทคัดย่อ

ความยาวของเสาเข็มที่มีอยู่ก่อนแล้วเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการปรับปรุงอาคารหรือการขุดเจาะอุโมงค์ลอดใต้อาคาร การตรวจวัดเพื่อระบุความยาวเสาเข็มที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ วิธี Parallel seismic test ที่จำเป็นต้องเจาะหลุมสำรวจเพิ่มเติมในบริเวณด้านข้างของเสาเข็มเดิมเพื่อทำการทดสอบ, วิธี Side echo test และ Sonic echo test ซึ่งต้องเคาะด้วยค้อนที่บริเวณด้านข้างหรือที่หัวเสาเข็มเพื่อสร้างคลื่นสั่นสะเทือน สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาวิธีการประมาณความยาวเสาเข็มจากการตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดจากจุดกำเนิดหลายตำแหน่ง (Ultra seismic test, Jalinoos and Olson, 1996) โดยใช้มาตรวัดการสั่นสะเทือนติดที่ด้านข้างของเสาเข็มแล้วเคาะด้านข้างของเสาเข็มด้วยค้อนที่ตำแหน่งที่อยู่ห่างจากมาตรวัดเป็นระยะที่แตกต่างกันไปจำนวน 10 จุด ซึ่งทำให้สามารถพิสูจน์ทราบความยาวของเสาเข็มได้แม่นยำกว่าวิธี Side echo test ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบกับเสาเข็มตอกในพื้นที่กรุงเทพ โดยจัดวางตำแหน่งของจุดกำเนิดและจุดรับสัญญาณคลื่นในลักษณะต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบ และ หาวิธีการตรวจวัดและประมวลผลที่ให้ผลการตรวจวัดที่ดีที่สุด ซึ่งพบว่าความคลาดเคลื่อนในการประเมินความยาวเสาเข็มจากการจัดวางตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ใช้ในการศึกษานี้อยู่ในช่วง 2.96% ถึง 6.29%

คำสำคัญ: การประมาณความยาวเสาเข็ม, การทดสอบ Ultra seismic, ธรณีฟิสิกส์

Abstract

The length of pre-existing piles is an essential parameter for building renovation or tunneling under a building. Some conventional methods to identify pile lengths are the parallel seismic test, side echo test and sonic echo test. A parallel seismic test requires a borehole to be built parallel to the pile for testing. The side echo test and sonic echo test are performed by knocking on the side or head of a pile to generate elastic waves which travel in the pile's body and reflect at the pile tip. The accuracy of side echo test may be enhanced by increasing the number of receivers or seismic sources. One of the tests in this category is the Ultra Seismic method (Jalinoos and Olson, 1996). A technique similar to the Ultra Seismic method is investigated in this study by installing a receiver on a pile's side and using it to detect waves generated from 10 knocking positions on the pile's body. Based on test results on several driven piles in Bangkok area, the most suitable receiver-sources layout and signal processing method are determined. The differences between estimated and actual pile lengths in this study are between 2.96% and 6.29%.

Keywords: Pile length estimation, Ultra seismic testing, Geophysical prospecting

1. คำนำ

การออกแบบการปรับปรุงอาคารหรือการขุดเจาะอุโมงค์ลอดใต้อาคารหรือสะพาน ปัญหาที่พบคืออาจจะมีฐานรากที่ไม่สามารถทราบรายละเอียดของโครงสร้างฐานรากได้อย่างแน่ชัดเป็นจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งการทราบถึงความยาวของเสาเข็ม เป็นข้อมูลสำคัญที่จะนำมาใช้สำหรับการออกแบบ ตลอดจนการวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อเสาเข็มในงานก่อสร้างอุโมงค์ลอดใต้สะพาน การทดสอบเพื่อระบุความยาวเสาเข็มด้วยคลื่นไหวสะเทือนเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive test) ซึ่งการทดสอบดังกล่าวมีหลากหลายวิธี เช่น Parallel seismic test และ Side echo test สำหรับในงานวิจัยที่จะศึกษานี้ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธี Ultra seismic (US) ในการประเมินหาความยาวเสาเข็ม เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำได้โดยไม่จำเป็นต้องมีหลุมเจาะเพื่อหย่อนตัวรับสัญญาณ การทดสอบแบบ Ultra seismic ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาในปี 1996 [1] วิธีดังกล่าวได้ประยุกต์มาจากวิธี Sonic echo เพื่อพัฒนาความแม่นยำ และความสามารถในการทดสอบในพื้นที่ที่มีความซับซ้อนกว่าปกติ [2-4] และสามารถตรวจพบรอยต่อของชั้นดิน [5] และความไม่สมบูรณ์ของเสาเข็ม [6] ได้อีกด้วย

การทดสอบแบบ Ultra seismic ทำโดยการติดตั้งตัวรับสัญญาณจำนวนหลายตำแหน่งบริเวณด้านข้างของเสาเข็มแล้วเคาะเสาเข็มที่บริเวณด้านข้างของเสาเข็ม เพื่อให้คลื่นเดินทางตามเนื้อเสาเข็มลงไปสะท้อนที่บริเวณปลายเสาเข็มแล้วเคลื่อนที่กลับมายังอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นตรง (Direct wave) และคลื่นสะท้อน (Reflected wave) จะแสดงออกมาในกราฟระหว่างระยะทางกับเวลา

(Distance – Time domain) ซึ่งจะสามารถนำไปใช้คำนวณหาระยะห่างระหว่างพื้นผิวสะท้อน (ปลายเสาเข็ม) กับแหล่งกำเนิดคลื่น(บริเวณหัวเสาเข็ม)ได้ โดยใช้โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่เพื่อการศึกษานี้

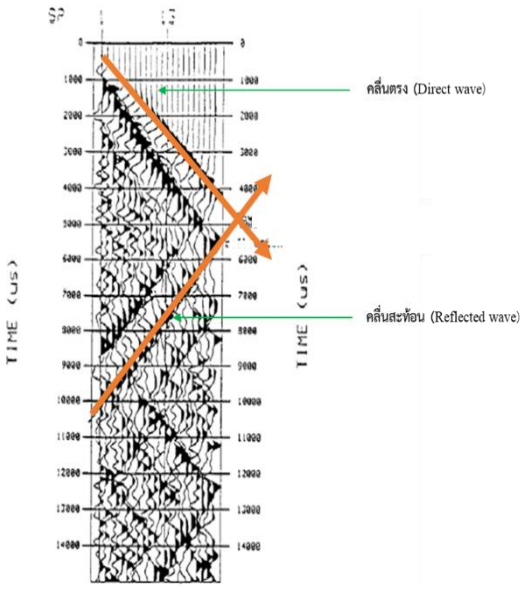
รูปที่ 1 ตัวอย่างเสาเข็มที่ต้องการทราบความยาวที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ทดสอบ

2. วิธีการทดสอบและการประมวลผล

2.1 การทดสอบแบบไม่ทำลาย ด้วยวิธี Ultra seismic

ปัจจุบันการหาความยาวเสาเข็มจะใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายซึ่งอาจจะแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ 1.การทดสอบโดยใช้แรงกระแทกที่หัวเสาเข็ม เช่น การทดสอบ Sonic echo [7] หรือ การทดสอบ Side echo [8] 2.การทดสอบโดยส่งอุปกรณ์ทดสอบไปตามท่อที่เตรียมไว้ล่วงหน้า เช่น การทดสอบ Parallel seismic [9] วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ วิธี Parallel seismic ซึ่งจะทดสอบโดยการสร้างคลื่นที่ส่วนบนฐานรากซึ่งคลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านเสาเข็มที่ระดับความลึกต่าง ๆ แล้วไปยังหลุมเจาะที่เจาะอยู่ด้านข้างของโครงสร้าง ซึ่งจะถูกตรวจจับได้จาก Geophone หรือ Hydrophone ที่ใส่ไว้ในหลุมเจาะนั้น เนื่องจากความเร็วคลื่นที่เดินทางในคอนกรีตสูงกว่าคลื่นที่เดินทางในชั้นดินมาก ตำแหน่งปลายเสาเข็มของเสาเข็มจะคาดการณ์ได้จากการสังเกตหาจุดหักเหในเส้นโค้ง สำหรับวิธี Side echo ที่ทดสอบโดยการติดตั้งตัวรับสัญญาณและสร้างคลื่นที่บริเวณด้านข้างของเสาเข็ม เพื่อวัดเวลาที่คลื่นเดินทางจากหัวเสาเข็มลงสู่ด้านล่างแล้วสะท้อนกลับมาจากปลายเสาเข็ม ซึ่งข้อจำกัดของวิธี Parallel seismic นั้นคือจะต้องเตรียมท่อไว้สำหรับการหย่อนตัวรับสัญญาณลงไปตามท่อ ซึ่งจะไม่สะดวกสำหรับพื้นที่ที่ไม่สามารถเตรียมท่อได้ หรือวิธี Side echo ที่ไม่สามารถให้ความแม่นยำได้อย่างเพียงพอเนื่องจากการติดตั้งตัวรับสัญญาณเพียง 1 ตัว และวิธีนี้จำเป็นจะต้องสมมติความเร็วของคอนกรีต ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้หาความยาวของเสาเข็ม

จากข้อจำกัดของวิธีที่กล่าวมาข้างต้น Jalinoos and Olson (1996) ได้เสนอ วิธี Ultra seismic โดยทดสอบบริเวณด้านข้างของหัวเสาเข็ม ซึ่งจะเพิ่มความแม่นยำได้เนื่องจากการมีจุดกำเนิดคลื่นหรือติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณหลายตำแหน่ง ในการทดสอบที่ผ่านมาจะทำการติดตัวรับสัญญาณหลายตัวบริเวณด้านข้างของเสาเข็มและทำการเคาะที่เสาเข็มเพื่อสร้างคลื่น โดยเมื่อเคาะแล้วนั้น คลื่นจะเดินทางไปสู่ตัวรับสัญญาณในแต่ละตัวทำให้เกิดคลื่นตรง (Direct wave signal) และคลื่นจะเดินทางไปยังปลายของเสาเข็มและทำการสะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณเรียกว่าคลื่นสะท้อน (Reflected wave signal) และเมื่อนำคลื่นมาหาความสัมพันธ์ในกราฟของระยะทาง (Offset) และเวลา (Time) นั้น จะทำให้สามารถระบุความชันของคลื่นตรงและคลื่นสะท้อน และหาความยาวเสาเข็มโดยการลากเส้นตัดระหว่างคลื่นตรงและคลื่นสะท้อนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลการทดสอบหาความยาวเสาเข็มด้วยวิธี Ultra seismic [1]

สำหรับการตรวจวัดในงานวิจัยนี้จะศึกษาโดยการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณประเภทเซนเซอร์วัดความเร่ง ติดที่ด้านข้างของเสาเข็มเพียง 1 ตำแหน่งที่บริเวณด้านข้างของเสาเข็ม และกำหนดจุดเคาะหลายตำแหน่งถัดจากอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยระยะเว้นที่เท่ากันทุกตำแหน่ง การจัดเรียงดังกล่าว เป็นการกำหนดจุดกำเนิดคลื่นที่ตำแหน่งแตกต่างกัน เพื่อให้คลื่นเดินทางจากแหล่งกำเนิดคลื่น ไปยังจุดรับสัญญาณด้วยเวลาที่แตกต่างกัน เพื่อนำผลตรวจวัดที่ได้ มาวิเคราะห์เพื่อระบุคลื่นตรง (Direct wave) และคลื่นสะท้อน (Reflected wave) จากนั้นจะสามารถลากเส้นความชันเพื่อวิเคราะห์ความยาวของเสาเข็มได้

2.2 ตัวกรองแบบ Band-pass

ในการประมวลผลข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์คลื่นสัญญาณ มักพบสัญญาณรบกวนและสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำและความละเอียดของคลื่นที่ได้ จึงมีการใช้ ตัวกรอง Band-pass เพื่อเลือกเฉพาะคลื่นที่มีความถี่ในช่วงที่สนใจออกจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ลมหรือคลื่นทะเล

3. อุปกรณ์และวิธีการทดสอบหาความยาวเสาเข็ม

ในการทดสอบหาความยาวเสาเข็มจะดำเนินการทดสอบกับเสาเข็มทั้งหมด 4 เสาเข็ม ซึ่งจะอยู่ในพื้นที่และเงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยในการเก็บข้อมูลสัญญาณคลื่นนั้นจะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง 356B18 ที่มีย่านความถี่ 500 – 3000 Hz โมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อคเป็นดิจิตอล 24 บิต

NI9234 Datalogger NI cRIO-9063 ซึ่งควบคุมผ่าน Tablet PC แสดงดังรูปที่ 3 และตัวอย่างสถานที่ที่จะทำการทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์ในการตรวจรับสัญญาณและอุปกรณ์ในการสร้างแหล่งกำเนิดคลื่นนั้น แสดงดังรูปที่ 4

รูปที่ 3 โมดูลแปลงสัญญาณ และData logger

รูปที่ 4 ตัวอย่างลักษณะของสถานที่ทำการทดสอบและตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์

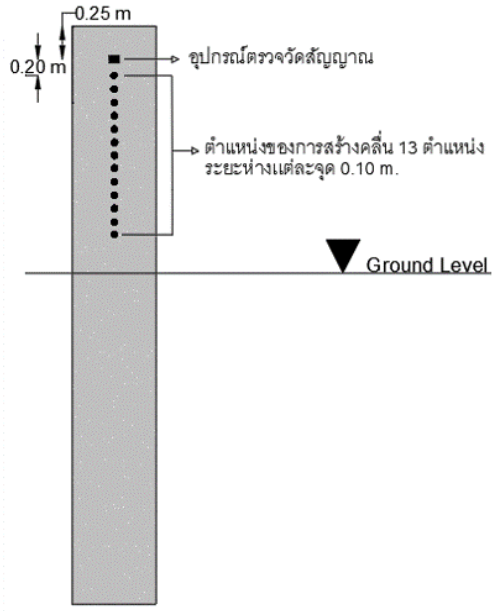
ในการทดสอบนั้นจะทดสอบเสาเข็มทั้งหมดจำนวน 3 ต้น มีรายละเอียดของพื้นที่ ความยาวเสาเข็มที่แท้จริงและการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบดังนี้

3.1 เสาเข็มสี่เหลี่ยมตัน (P1)

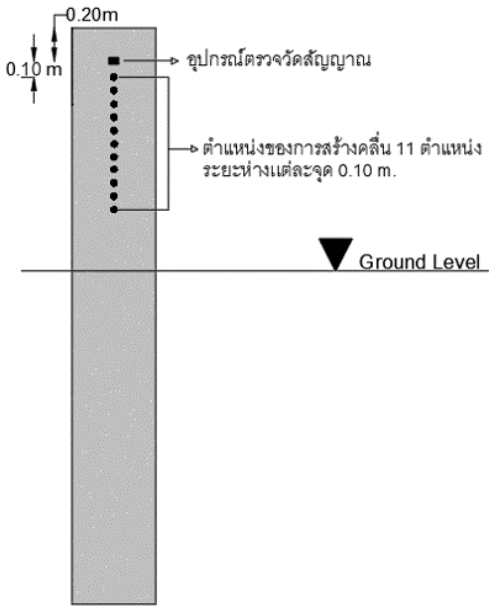
การทดสอบนี้ทดสอบบริเวณพื้นที่ลาดกระบัง ทดสอบกับเสาเข็มสี่เหลี่ยมกลวงขนาด 0.22x0.22 เมตร ยาว 28 เมตร ซึ่งเสาเข็มนั้นได้ทำการตอกลงไปในดินเรียบร้อยแล้ว และได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณและตำแหน่งการสร้างคลื่นสัญญาณ ดังรูปที่ 5

3.2 เสาเข็มหน้าตัดรูปตัวไอ (P2 , P3)

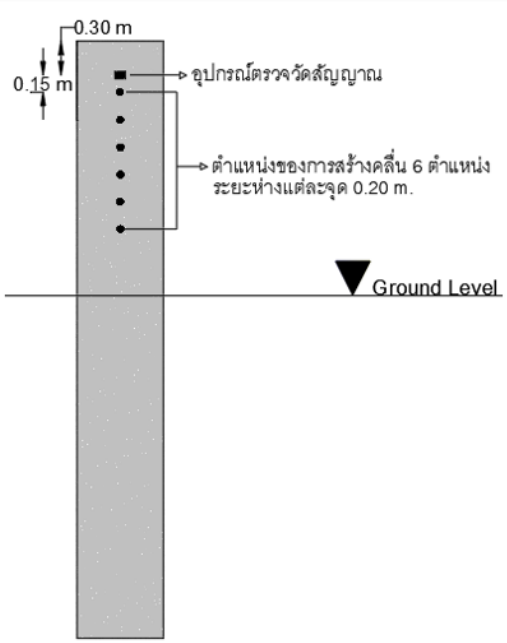
การทดสอบนี้ทดสอบบริเวณ ถนน บางนา - ตราด เป็นเสาเข็มหน้าตัดรูปตัวไอขนาด 0.30x0.30 เมตร ยาว 27 เมตร ทดสอบทั้งหมดเป็นจำนวน 2 ต้น ซึ่งมีข้อแตกต่างกันที่ระยะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณและตำแหน่งการสร้างคลื่นสัญญาณ ตามรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 5 รูปแบบการจัดเรียงระยะห่างระหว่างตำแหน่งการสร้างคลื่นและอุปกรณ์รับสัญญาณของเสาเข็มสี่เหลี่ยมตัน (P1)



รูปที่ 6 รูปแบบการจัดเรียงระยะห่างระหว่างตำแหน่งการสร้างคลื่นและอุปกรณ์รับสัญญาณของเสาเข็มหน้าตัดรูปตัวไอ (P2)



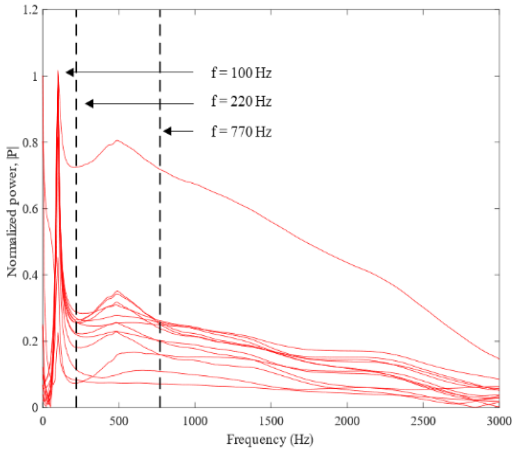
รูปที่ 7 รูปแบบการจัดเรียงระยะห่างระหว่างตำแหน่งการสร้างคลื่นและอุปกรณ์รับสัญญาณของเสาเข็มหน้าตัดรูปตัวไอ (P3)

4. การวิเคราะห์ผล

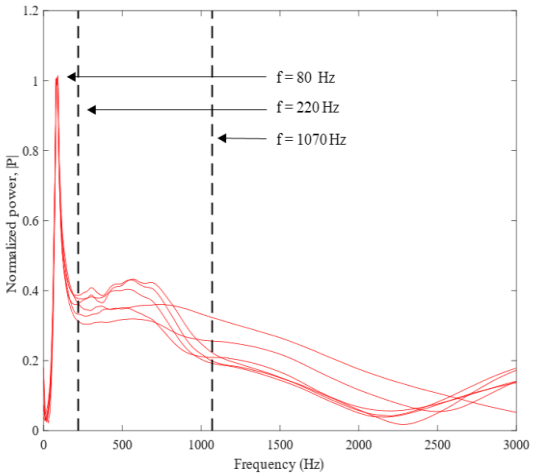
เมื่อนำผลตรวจวัดจากการเคาะทั้งหมด มาวิเคราะห์ความถี่ด้วยการแปลงแบบฟูรีเย (Fourier transform) พบว่าคลื่นที่ตรวจวัดได้ มีความถี่ที่ปรากฏขึ้นหลัก 2 ช่วง คือ 1. ช่วงความถี่ 80 – 100 Hz ที่เป็นความถี่ในการสั่นของเสาทั้งต้นเนื่องจากการเคาะ และ 2. ช่วงความถี่ 220 – 1000 Hz ซึ่งเป็นความถี่ของคลื่นที่วิ่งอยู่ในเสาเข็ม ดังรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10 เมื่อทำการวิเคราะห์ความถี่ของคลื่นในเสาเข็มแล้วเสร็จ จะนำช่วงความถี่ที่เหมาะสมมาใช้ในการกรองคลื่นด้วยตัวกรองแบบ Bandpass เพื่อขจัดสัญญาณรบกวนออกจากข้อมูล ความถี่ที่ใช้ในการกรองสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความถี่ที่ใช้ในการกรองแบบ Bandpass

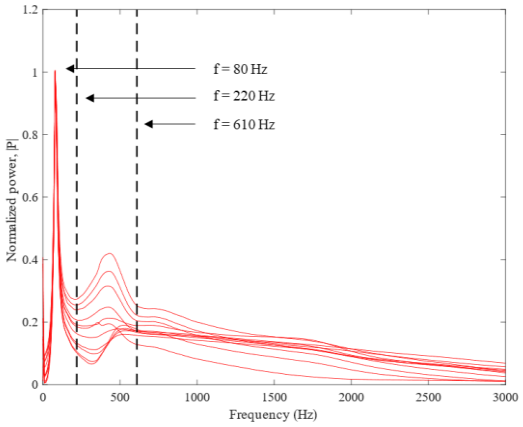
เสาเข็ม	ความถี่ต่ำสุด (Hz)	ความถี่สูงสุด (Hz)
P1	220	770
P2	220	1070
P3	220	610



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และ Normalized power ของเสาเข็ม P1



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และ Normalized power ของเสาเข็มต้น P2



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และ Normalized power ของเสาเข็มต้น P3

ผลที่ได้จากการกรองความถี่ที่เหมาะสม จะถูกนำมาแสดงผลในลักษณะของกราฟระหว่างตำแหน่งของจุดเคาะ (Offset) และเวลา (Time) พบว่าคลื่นตรงจะปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนที่ช่วงเวลา 5ms เนื่องจากทางผู้วิจัยได้กำหนดเวลารับสัญญาณคลื่นก่อนที่จะทำการเคาะ (Pre-triggered) เป็นเวลาเท่ากับ 5 ms และจะตรวจพบคลื่นอื่น ๆ ภายหลังจากเวลา 15 ms ซึ่งมีคลื่นจากการสะท้อนจากหัวเสาเข็ม ด้านข้างเสาเข็ม และการสะท้อนจากปลายเข็มปะปนอยู่

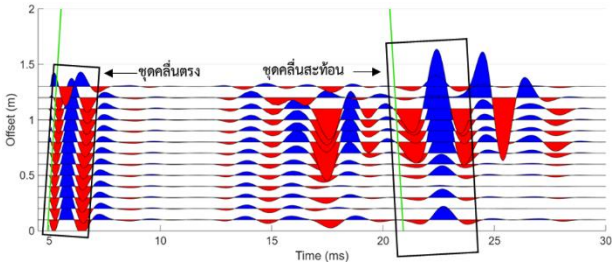
เพื่อที่จะจำแนกคลื่นสะท้อนจากปลายเข็มออกจากชุดคลื่นที่กล่าวไปข้างต้น การศึกษานี้จะใช้การลากเส้นความชันเชื่อมระหว่างหน้าคลื่นตรงเพื่อวิเคราะห์หาความเร็วของคลื่นตรง จากนั้นจะนำความเร็วเดียวกันนี้ มากำหนดของความชันของคลื่นสะท้อนที่เป็นไปได้ ซึ่งจะมีขนาดของความชัน (ความเร็ว)เท่ากัน แต่มีทิศทางตรงกันข้ามเพื่อเลือกชุดคลื่นสะท้อนจากปลายเข็มที่เหมาะสมที่สุด

เมื่อทำการวิเคราะห์เส้นความชันของหน้าคลื่นตรง และคลื่นสะท้อนจากปลายเข็มแล้วเสร็จ ความยาวของเสาเข็มจะสามารถคำนวณได้จากจุดตัดระหว่างเส้นความชั้นทั้ง 2 เส้น ผลการวิเคราะห์หาความยาว สามารถสรุปได้ดังนี้

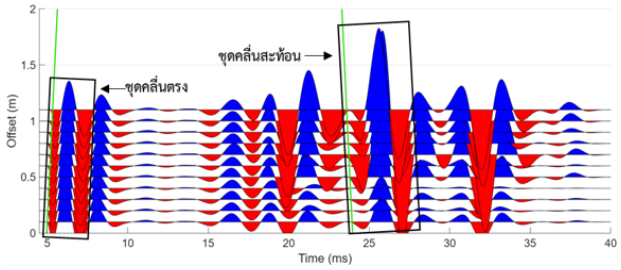
เสาเข็มสี่เหลี่ยมตัน (P1) ที่มีความยาวของเสาเข็ม 28 เมตร จะพบคลื่นตรงที่เวลาประมาณ 5.02 ms และพบคลื่นสะท้อนที่เวลาประมาณ 21 ms ที่ความถี่ช่วง 450 – 750 Hz ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในคอนกรีตนั้นมีค่า 3300 เมตร/วินาที เมื่อพิจารณาจากจุดตัดของเส้นความชันของคลื่นทั้งสองเส้นนั้น จะได้ความยาวเสาเข็มประมาณ 26.60 เมตร แสดงดังรูปที่ 11

เสาเข็มหน้าตัดรูปตัวไอ (P2) ที่มีความยาวของเสาเข็ม 27 เมตร จะพบคลื่นตรงที่ประมาณ 5.03 ms และพบคลื่นสะท้อนที่เวลาประมาณ 24 ms ที่ความถี่ช่วง 350 – 610 Hz ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในคอนกรีตนั้นมีค่า 3050 เมตร/วินาที เมื่อพิจารณาจากจุดตัดของเส้นความชันของคลื่นทั้งสองเส้นนั้น จะได้ความยาวเสาเข็มประมาณ 28.70 เมตร แสดงดังรูปที่ 12

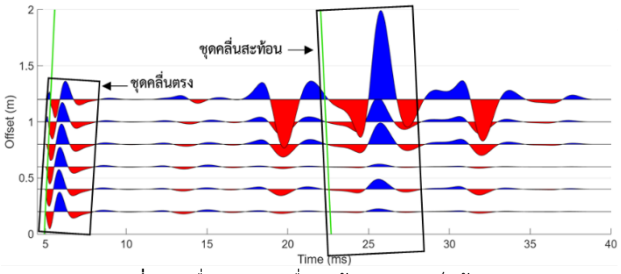
เสาเข็มหน้าตัดรูปตัวไอ (P3) ที่มีความยาวของเสาเข็ม 27 เมตร จะพบคลื่นตรงที่ประมาณ 5.05 ms และพบคลื่นสะท้อนที่เวลาประมาณ 22.7 ms ที่ความถี่ช่วง 300 – 900 Hz ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในคอนกรีตนั้นมีค่า 3050 เมตร/วินาที เมื่อพิจารณาจากจุดตัดของเส้นความชันของคลื่นทั้งสองเส้นนั้น จะได้ความยาวเสาเข็มประมาณ 27.80 เมตร แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 11 คลื่นตรงและคลื่นสะท้อนของเสาเข็มต้น P1



รูปที่ 12 คลื่นตรงและคลื่นสะท้อนของเสาเข็มต้น P2



รูปที่ 13 คลื่นตรงและคลื่นสะท้อนของเสาเข็มต้น P3

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ความยาวเสาเข็มทั้ง 3 ต้น พบว่าสามารถลดจุดเคาะที่ไม่จำเป็นต่อการแปรผลได้สำหรับในกรณีที่พื้นที่ทดสอบมีจำกัด เนื่องจากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 11 – 13 หากขาดการเคาะเสาเข็มที่บางตำแหน่ง จะไม่ส่งผลต่อการลากเส้นประมาณความชันของคลื่นตรงและคลื่นสะท้อน และจะยังสามารถวิเคราะห์ความยาวเสาเข็มได้เท่าเดิม ทั้งนี้การลดตำแหน่งการเคาะจะขึ้นอยู่กับระยะเว้นที่เหมาะสมต่อการแปรผลด้วย โดยการศึกษานี้กำหนดให้ระยะเว้นมีค่าไม่ต่ำกว่า 10 เซนติเมตร

5. สรุปผลการศึกษา

จากการทดสอบหาความยาวเสาเข็มทั้งหมด 3 รูปแบบนั้น แล้วนำไปประมวลผลนั้นสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1.การกรองความเร็วคลื่นแบบ Band pass ด้วยช่วงที่เหมาะสามสามารถกรองสัญญาณรบกวนอื่นออกได้

2.การวิเคราะห์ความยาวที่เกิดขึ้นนั้นค่อนข้างแม่นยำเมื่อเทียบกับความยาวที่แท้จริง โดยความคลาดเคลื่อนของ P1 P2 และ P3 เป็น 5.00% 6.29% และ 2.96% ตามลำดับ

3.ในกรณีที่มีพื้นที่จำกัดในการทดสอบ จะสามารถลดตำแหน่งการเคาะได้ โดยระยะเว้นของจุดเคาะมีค่าไม่ต่ำกว่า 10 เซนติเมตร

เอกสารอ้างอิง

[1] Jalinoos, F. and L. Olson (1996). Determination of unknown depth of bridge foundations using nondestructive testing methods. In: Structural Materials Technology, an NDT Conference, San Diego, CaliforniaStructural Materials Technology

[2] Wang, H., and C.-H. Hu. 2015. Identification on unknown bridge foundations using geophysical inspecting methods."e-J. Nondestr. Test.

[3] Wang, H., et al. (2017). Ultra-Seismic Depth Evaluation on Model Piles-A Pilot Experiment.

[4] Wang, H., et al. (2020). Depth evaluation of submerged pile bents. Journal of Performance of Constructed Facilities 34(1): 06019003.

[5] WANG, H., et al. (2014). Conditioning inspection on unknown bridge foundations. Cultural heritage **7**(P6): P5.

[6] Wu, S., et al. (2015). Integrity testing of model piles with pile cap. Proceedings of NDT-CE: 920-927.

[7] Gupta, S., et al. (2015). NDT Techniques for Determining Depth of Foundations. Proceedings, Indian Geotechnical Conference IGC-2015. Pune

[8] Rashidyan, S., et al. (2016). Bridge foundation depth estimation using sonic echo test. Experimental and Applied Mechanics, Volume 4: Proceedings of the 2015 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics,

[9] Sarkar, K., et al. (2015). Determination of unknown bridge foundation depths with parallel seismic (PS) systems, IABSE-JSCE.

[10] Stein, R. and N. Bartley (1983). Continuously time-variable recursive digital band-pass filters for seismic signal processing. Geophysics 48(6): 702-712.