

การสั่นสะเทือนของพื้นดินเนื่องจากการตอกเสาเข็มในภาคตะวันออก Ground Vibration Caused by Impact Pile Driving in the Eastern Region

วรรณวรรค์ รัตนนิคม¹ สยาม ยัมศิริ^{2,*} และ พัทธพงษ์ อาสนจินดา³

^{1,2,3} ศูนย์พัฒนาและที่ปรึกษาด้านวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

*Corresponding author; E-mail address: ysiam@bpu.ac.th

บทคัดย่อ

การตอกเสาเข็มในงานก่อสร้างมักก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและโครงสร้างใกล้เคียง โดยเฉพาะในภูมิภาคตะวันออกของประเทศไทยซึ่งกำลังพัฒนาอย่างรวดเร็วจากโครงการระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC) การประเมินการสั่นสะเทือนของพื้นดินที่เกิดจากการตอกเสาเข็มก่อนการก่อสร้างจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็มคอนกรีตสำเร็จรูปด้วยการใช้เครื่องตอกเสาเข็มแบบไฮดรอลิกในภาคตะวันออก การสั่นสะเทือนถูกวัดบนพื้นดินที่ระยะทางต่างๆ จากแหล่งกำเนิด ลักษณะของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็มที่นำเสนอในบทความนี้ประกอบด้วย: (i) ขนาดของความสัมพันธ์ของพื้นดินและทิศทางหลักระหว่างการตอกเสาเข็มและ (ii) ความถี่ของความสัมพันธ์หลัก รวมถึงนำเสนอสมการเชิงประจักษ์เฉพาะพื้นที่เพื่อประเมินการสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการตอกเสาเข็มในพื้นที่ภาคตะวันออก

คำสำคัญ: เสาเข็มตอก, การสั่นสะเทือน, ความถี่, ภาคตะวันออก

Abstract

Pile driving in construction often generates vibrations that impact the environment and nearby structures, particularly in the Eastern region of Thailand, which is rapidly developing due to the Eastern Economic Corridor (EEC) project. Assessment of ground vibrations caused by pile driving prior to construction is therefore essential for preventing potential damage. This article aims to investigate the vibrations caused by driving precast concrete piles using hydraulic pile drivers in the Eastern region. Ground vibrations were measured at different distances from the source. The characteristics of the resulting vibrations are presented in this article, i.e. (i) the magnitude of ground vibrations and the dominant direction during pile driving, and (ii) the dominant frequency of vibrations. In addition, site-specific empirical equation is proposed to evaluate ground vibrations caused by pile driving in the Eastern region.

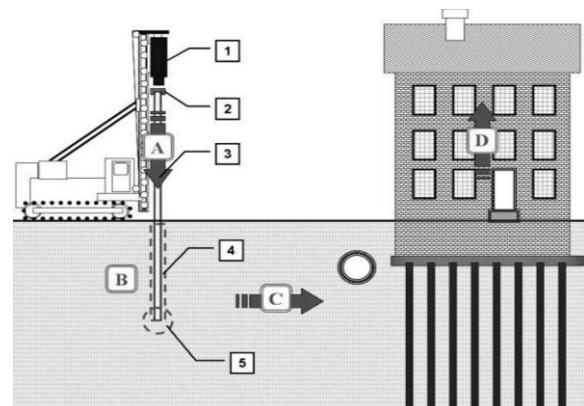
Keywords: driven pile, vibration, frequency, Eastern region

1. คำนำ

ในการก่อสร้างฐานรากในพื้นที่ที่ไม่สามารถรับน้ำหนักได้โดยตรง การตอกเสาเข็มถือเป็นวิธีการก่อสร้างฐานรากที่มีต้นทุนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น อย่างไรก็ตามวิธีการก่อสร้างเสาเข็มโดยการตอกกระแทกนั้นมักทำ

ให้พื้นดินโดยรอบเสาเข็มเกิดการสั่นสะเทือนและอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและฐานรากของอาคารใกล้เคียง การประเมินการสั่นสะเทือนของพื้นดินที่เกิดจากการตอกเสาเข็มก่อนการก่อสร้างจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น

เพื่อประเมินผลกระทบจากการตอกเสาเข็มจำเป็นต้องพิจารณากระบวนการส่งผ่านคลื่น (wave propagation) ตั้งแต่แหล่งกำเนิดไปจนถึงวัตถุที่อาจได้รับความเสียหายซึ่งสัมพันธ์กับสามองค์ประกอบ ได้แก่ แหล่งกำเนิดคลื่น ตัวกลาง และวัตถุหรืออาคารที่ได้รับผลกระทบ โดยในปี ค.ศ. 2008 Massarsch และ Fellenius ได้สรุปกระบวนการส่งผ่านคลื่นหรือแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็มไปยังโครงสร้างใกล้เคียงเป็น 4 ขั้นตอน [1] (ดังแสดงในรูปที่ 1) ได้แก่



รูปที่ 1 กระบวนการส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนของการตอกเสาเข็มและสิ่งปลูกสร้างข้างเคียง [2]

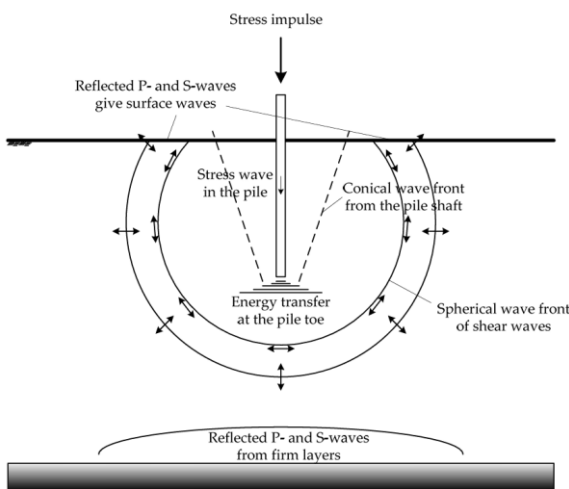
(i) การเดินทางของคลื่นในเสาเข็ม (A) คือ เมื่อค้อนตกระแทกที่หมอนรองเสาเข็มและหัวเสาเข็ม พลังงานและการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการตอกจะเคลื่อนตัวไปตามความยาวของเสาเข็ม

(ii) ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มกับดิน (B) การสั่นสะเทือนจากเสาเข็มจะถูกถ่ายโอนไปยังดินในรูปแบบของคลื่นและหน้าคลื่นในลักษณะที่ต่างกัน (ดังแสดงในรูปที่ 2) คือตามความยาวของเสาเข็มจะเกิดหน้าคลื่นรูปกรวยซึ่งประกอบด้วยคลื่นตามขวาง (S-waves) ในขณะที่บริเวณปลายเสาเข็มจะเกิดหน้าคลื่นทรงกลมของทั้งคลื่นตามยาว (P-waves) และคลื่นตามขวาง หากเปรียบเทียบผลกระทบจากการสั่นสะเทือนระหว่างแหล่งกำเนิดสองแห่งนี้ (ส่วนปลายเสาเข็มและตามยาวของเสาเข็ม) พบว่าโดยทั่วไปส่วนปลายเสาเข็มจะส่งผลกระทบต่อสั่นสะเทือนของพื้นดินมากกว่าเนื่องจากมีแรงต้านปลายเสาเข็มที่มีขนาดใหญ่ในกระบวนการตอกเสาเข็ม [3] เมื่อหน้าคลื่นเหล่านี้เคลื่อนที่มาถึงผิวดิน พลังงานบางส่วนของการสั่นสะเทือนจะถูกถ่ายโอนไปยังคลื่นผิวดิน (R-waves) คลื่นชนิดนี้มีอัตรา

การลดทอนที่ต่ำและมีพลังงานการสั่นสะเทือนในระดับสูง ดังนั้นจึงมีโอกาสทำให้โครงสร้างใกล้เคียงได้รับความเสียหายมากที่สุด

(iii) การเดินทางของคลื่นผ่านชั้นดิน (C) เมื่อคลื่นเดินทางผ่านไปตามชั้นดิน จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานของคลื่นสู่ดินทำให้เกิดการสะท้อนขึ้นในดิน และส่งผลไปยังบริเวณโดยรอบ โดยการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านไปตามชั้นดิน ที่ไกลขึ้นนี้จะทำให้เกิดการลดทอนขนาดของคลื่น ได้แก่ การขยายตัวของหน้าคลื่น (geometrical damping) และการสูญเสียพลังงานภายในดินเอง (material damping)

(iv) ปฏิกริยาระหว่างดินและโครงสร้างในลักษณะพลวัต (D) เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ถึงโครงสร้างจะส่งผลกระทบต่อเคลื่อนตัวของฐานรากและตัวโครงสร้าง โดยถ้าโครงสร้างมีความถี่ธรรมชาติที่สอดคล้องกับคลื่นที่มากระทบจะทำให้โครงสร้างเกิดการสั่นพ้องไปกับคลื่นที่มากระทบและสร้างความเสียหายให้กับโครงสร้างได้



รูปที่ 2 คลื่นที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม [4]

วิธีการทำนายการสั่นสะเทือนของพื้นดินที่เกิดจากการตอกเสาเข็มมีด้วยกันหลายวิธีและวิธีที่ได้รับความนิยมวิธีหนึ่งคือ Scaled-distance method วิธีนี้จะคาดการณ์ความเร็วอนุภาคสูงสุด (peak particle velocity, v) โดยพิจารณาพลังงานของค้อนและระยะทางจากแหล่งกำเนิด ดังสมการที่ (1) ซึ่งนำเสนอโดย Wiss ในปี ค.ศ. 1967 [5] และ Atterwell และ Farmer ในปี ค.ศ. 1973 [6] ซึ่งการคาดการณ์การสั่นสะเทือนของพื้นดินโดยใช้พลังงานนี้กลายมาเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาสมการเชิงประจักษ์ในเวลาต่อมามากมาย เช่น งานวิจัยของ Whyley และ Sarsby ในปี ค.ศ. 1992 [7]

$$v = k \left(\frac{\sqrt{E}}{r} \right)^n \quad (1)$$

เมื่อ E = พลังงานของค้อน

r = ระยะทางจากแหล่งกำเนิด

k และ n = ค่าคงที่จากการทดสอบ (empirical constants)

อย่างไรก็ตามเนื่องจากความซับซ้อนของกลไกการกระจายพลังงานในกระบวนการตอกเสาเข็ม อาจทำให้ระดับการสั่นสะเทือนที่ประมาณได้จากวิธีเชิงประจักษ์ต่างๆ มีความแปรผันสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมี

สมการเชิงประจักษ์ที่ได้จากข้อมูลของวิธีการตอกเสาเข็มและสภาพดินในพื้นที่เฉพาะ

2. วัตถุประสงค์

เพื่อสำรวจการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็มคอนกรีตสำเร็จรูปด้วยการใช้เครื่องตอกเสาเข็มแบบไฮดรอลิกและนำเสนอสมการเชิงประจักษ์เพื่อประเมินการสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการตอกเสาเข็มสำหรับพื้นที่ภาคตะวันออก

3. ขอบเขตและวิธีการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้ทำการบันทึกข้อมูลความเร็วของการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มในรูปแบบของเวลาในสามทิศทางตั้งฉากกัน ได้แก่ แนวยาว (longitudinal) แนวขวาง (transverse) และแนวดิ่ง (vertical) จากหลายสถานีพร้อมกันด้วยชุดทดสอบ Triaxial geophone (InstanTel D/N Triaxial geophone) ที่ตำบลมาตาบุด จังหวัดระยอง รายละเอียดของการตอกเสาเข็ม ได้แก่ ชนิด ขนาด และความยาวของเสาเข็ม ชนิดและพลังงานของค้อน รวมถึงตำแหน่งและจำนวนการตรวจวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม แสดงดังตารางที่ 1

การวิเคราะห์ความเร็วอนุภาคสูงสุด (v) ในสมการที่ (1) เป็นความเร็วสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างเหตุการณ์การสั่นสะเทือน ถูกนิยามไว้ใน 4 รูปแบบ ได้แก่

- ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดที่เกิดขึ้นในทิศทางแนวดิ่ง
- ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดของทั้งสามองค์ประกอบที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน
- ค่าผลรวมของความเร็วสูงสุดทั้งสามทิศทางตั้งฉากกัน (Peak vector sum velocity, PVS)
- ค่าผลรวมของความเร็วสูงสุดของแต่ละทิศทางโดยไม่คำนึงถึงเวลาที่ค่าดังกล่าวเกิดขึ้น (Pseudo, Simulated หรือ Square Root of the Sum of Squares: SRSS)

ในการศึกษานี้การประเมินการสั่นสะเทือนจะนำเสนอค่าผลรวมของความเร็วสูงสุดทั้งสามทิศทางตั้งฉากกันและพิจารณาค่าความเร็วสูงสุดของแต่ละทิศทางด้วย

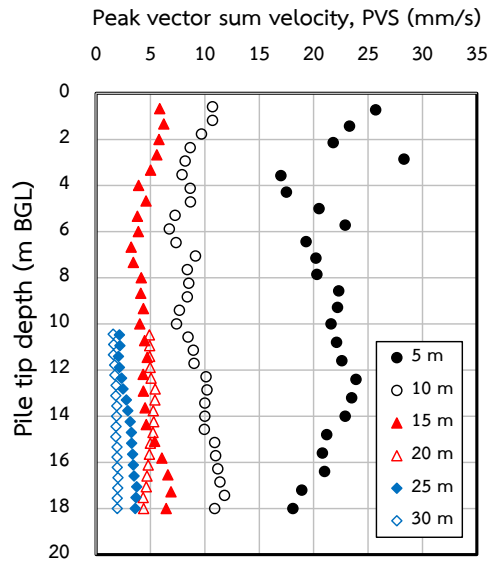
ตารางที่ 1 รายละเอียดของการตอกเสาเข็ม

สถานที่ทดสอบ	ต.มาตาบุด จ.ระยอง
เสาเข็ม	Ø 0.5 x 21 เมตร
ชนิดของค้อน	แบบไฮดรอลิก
พลังงานของค้อน	7 ตัน x 0.7 เมตร
ตำแหน่งการตรวจวัดความเร็วของการสั่นสะเทือน	พื้นดิน
จำนวนการตรวจวัดความเร็วของการสั่นสะเทือน	12

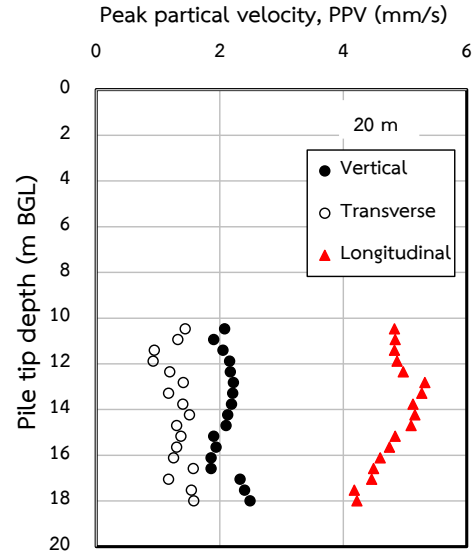
4. ผลการศึกษา

4.1 ความเร็วอนุภาคสูงสุด

ข้อมูลผลรวมของความเร็วสูงสุดของการสั่นสะเทือนของพื้นดินทั้งสามทิศทางตั้งฉากกัน (Peak vector sum velocity, PVS) ได้แก่ แนวยาว (longitudinal) แนวขวาง (transverse) และแนวดิ่ง (vertical) ที่ระยะทางต่างๆ จากแหล่งกำเนิดในระหว่างการตอกเสาเข็ม (ทุกๆ 5 เมตร จาก 5 ถึง 30 เมตร) แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าค่า PVS ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดการตอกกับความลึกของปลายเสาเข็ม

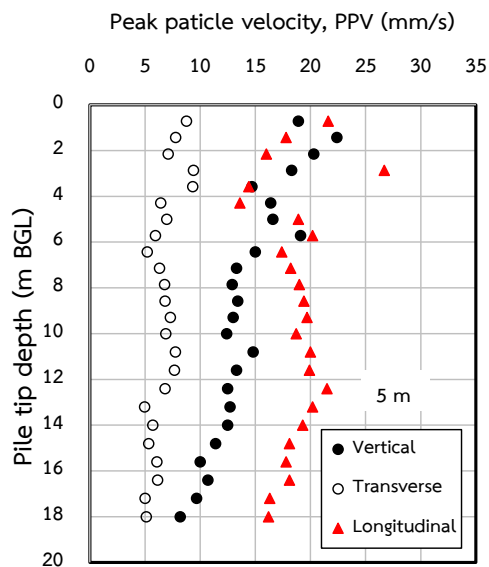


รูปที่ 3 ความเร็วสูงสุดของการสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการตอกเสาเข็ม
ที่ระยะทางต่างๆ จากแหล่งกำเนิด



(ข) ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด 20 m

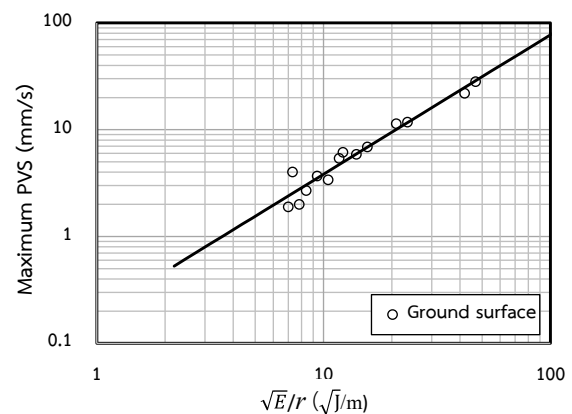
รูปที่ 4 ความเร็วอนุภาคสูงสุดในแต่ละทิศทางที่ระยะ 5 m และ 20 m
จากแหล่งกำเนิด



(ก) ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด 5 m

รูปที่ 4 แสดงความเร็วอนุภาคสูงสุด (Peak particle velocity, PPV) ในแต่ละทิศทางที่ตั้งฉากกันที่ระยะใกล้ 5 m. จากแหล่งกำเนิด ที่ระดับ pile tip 0-18 m. และระยะไกล 20 m. จากแหล่งกำเนิด ที่ระดับ pile tip 10-18 m. (โดยไม่มีการตรวจวัดที่ระดับ 0-10 m.) พบว่า ความเร็วอนุภาคสูงสุดในทิศทางตามยาวมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทิศทางอื่น

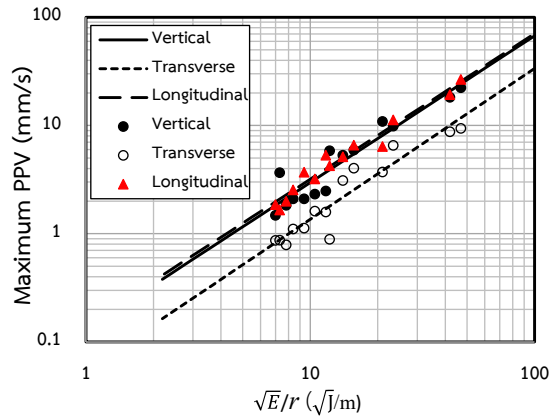
เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมสูงสุดของความเร็วของการสั่นสะเทือนของพื้นดินทั้งสามทิศทางที่ตั้งฉากกันและพลังงานของค้อนต่อระยะทางจากแหล่งกำเนิดตามวิธีการ Scaled-distance method ดังรูปที่ 5 พบว่าสมการเชิงประจักษ์เพื่อประเมินการสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการตอกเสาเข็มในพื้นที่ภาคตะวันออกที่เหมาะสมแสดงดังสมการที่ (2) โดยมีความเชื่อมั่น $r^2 = 0.942$



รูปที่ 5 สมการเชิงประจักษ์เพื่อประเมินการสั่นสะเทือนของพื้นดิน
จากการตอกเสาเข็มในพื้นที่ภาคตะวันออก

$$v = 0.19 \left(\frac{\sqrt{E}}{r} \right)^{1.31} \quad (2)$$

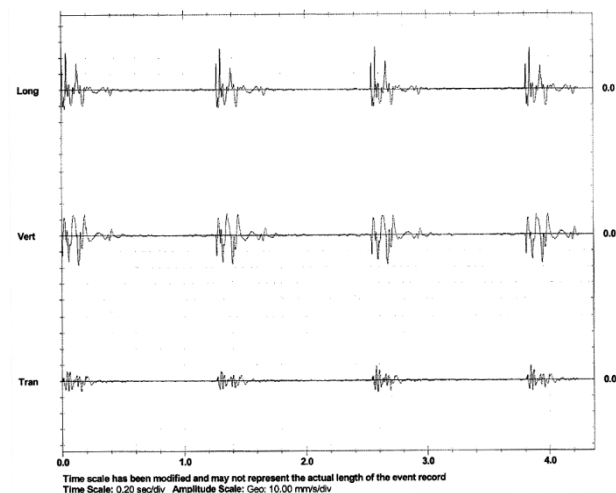
และเมื่อพิจารณาทิศทางของความเร็วอนุภาคสูงสุด (รูปที่ 6) พบว่า สมการเชิงประจักษ์ของทุกทิศทางมีความชันใกล้เคียงกัน และความเร็ว อนุภาคสูงสุดในทิศทางแนวดิ่งและแนวยาวมีค่าเท่ากันและสูงกว่าทิศทาง ขวาง



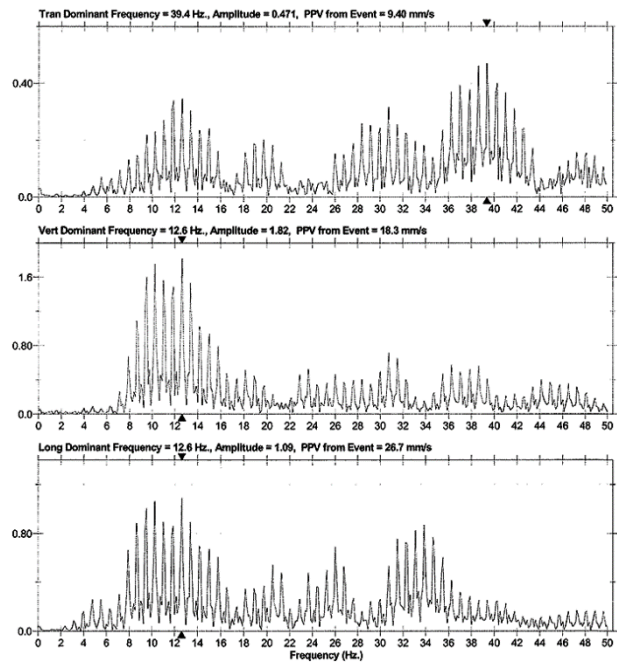
รูปที่ 6 สมการเชิงประจักษ์เพื่อประเมินการสั่นสะเทือนของพื้นดิน
เมื่อพิจารณาทิศทางของความเร็วอนุภาคสูงสุด

4.2 ความถี่

ประวัติความเร็วและเวลาถูกวิเคราะห์โดย Fast Fourier Transformation (FFT) ดังแสดงในรูปที่ 7 เพื่อหาสเปกตรัมความถี่ของ ความสั่นสะเทือน (frequency spectrum) โดยความถี่ของความ สั่นสะเทือนในการศึกษานี้พิจารณาความถี่ที่มีความเร็วอนุภาคสูงสุด และ แสดงดังรูปที่ 8 พบว่าความถี่ของความสั่นสะเทือนหลักบริเวณของพื้นผิว ดินมีค่า 10-25 Hz และมีแนวโน้มคงที่เมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิด เพิ่มขึ้น

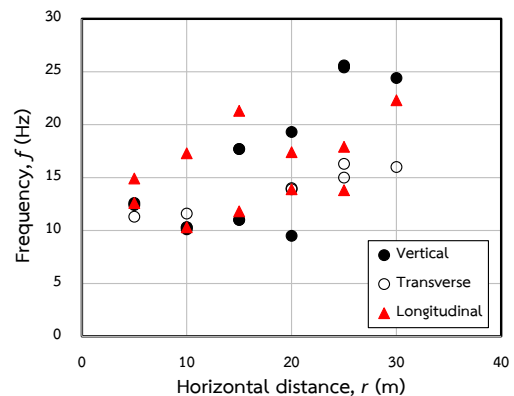


(a) ประวัติความเร็วและเวลา



(b) ผลการวิเคราะห์ FFT

รูปที่ 7 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความถี่ของความสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม



รูปที่ 8 ความถี่ของความสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม

5. สรุปผลการศึกษา

แรงสั่นสะเทือนของพื้นดินที่เกิดจากการตอกเสาเข็มมีความสัมพันธ์ โดยตรงกับสถานที่ก่อสร้าง ซึ่งเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพดิน วิธีการก่อสร้าง และระดับพลังงานของอุปกรณ์ก่อสร้าง การศึกษานี้ได้ทำ การสำรวจการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็มคอนกรีตสำเร็จรูปด้วย การใช้เครื่องตอกเสาเข็มแบบไฮดรอลิกและนำเสนอสมการเชิงประจักษ์ เพื่อประเมินการสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการตอกเสาเข็มที่เหมาะสม สำหรับพื้นที่ภาคตะวันออก ผลการศึกษาพบว่า ในระหว่างการตอกเสาเข็ม การสั่นสะเทือนของพื้นดินค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดการตอกเสาเข็ม สมการ เชิงประจักษ์เพื่อประเมินการสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการตอกเสาเข็มใน พื้นที่ภาคตะวันออกที่เหมาะสมแสดงดังสมการที่ (2) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงาน ของค้อนและระยะห่างจากแหล่งกำเนิด และความถี่ของความสั่นสะเทือน หลักบริเวณของพื้นผิวดินมีค่า 10-25 Hz ผลการศึกษาโดยละเอียดของ งานวิจัยนี้สามารถดูได้จาก Yimsiri และคณะ [8]

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 งบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม เลขที่สัญญา ววน. 64/2565 และขอขอบคุณนางสาวนันทิกานต์ อ่างแก้วและนายการเมื่อง ก้องแดนไพรที่ช่วยในการดำเนินการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Massarsch, K.R. and Fellenius, B.H. (2008). Ground vibrations induced by pile driving. *6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 12-16 August 2008, pp.38.
- [2] Massarsch, K.R. (2005). Ground vibrations caused by impact pile driving. *Proceedings, Environmental Vibrations: Prediction, Monitoring, Mitigation and Evaluation (ISEV 2005)*, Okayama University, Japan, 20 – 22 September 2005, pp. 369 – 379.
- [3] Massarsch, K. R. and Fellenius, B. H. (2015). Engineering assessment of ground vibrations caused by impact pile driving. *Geotechnical Engineering*, 46, 2, pp. 54-63.
- [4] Deckner, F., Viking K. and Hintze, S. (2012). Ground vibrations due to pile and sheet pile driving – prediction models of today. *Proceedings of the 22nd European Young Geotechnical Engineers Conference*, Gothenburg, Sweden, 26-29 August 2012, pp. 107-112.
- [5] Wiss, J. F. (1967). Damage effects of pile driving vibration. *Highway Research Record*, 155, pp. 14–20.
- [6] Attewell, P. B., and Farmer, I. W. (1973). Attenuation of ground vibrations from pile driving. *Ground Engineering*, June 1973, pp. 26–29
- [7] Whyte, P. J. and Sarsby, R. W. (1992) Groundborne vibration from piling. *Ground Engineering*, May 1992, pp 32-37
- [8] Yimsiri, S., Ratananikom, W., and Asnachinda, P. (2025), Ground-Borne Vibration and Noise from Impact Pile Driving: Case Studies of two Regions in Thailand. *Geotechnical and Geological Engineering* (in press)