บทที่ 5

สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิเคราะห์

ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1.)การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load test) เป็นวิธีหนึ่งซึ่งสามารถใช้ในการประเมินผลความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มได้ดี เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าว กับผลจากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีแบบสถิตศาสตร์ ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load test , Y) กับแบบสถิตศาสตร์ (Static pile load test , X) เมื่อใช้ค่าน้ำหนักสูงสุดตามวิธีของ Mazurkiewicz (1972) ทั้งคู่

(i) สำหรับเสาเข็มตอก ในดินกรุงเทพ

- แบบไม่แยกโครงการ

$$Y = 0.957\ X \quad ; \quad R^2 = 0.82$$

- พิจารณาเฉพาะโครงการทางด่วนสายรามอินทรา-อาจณรงค์ เสาเข็มแรงเหวี่ยง SP.0.60 ม.ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายกรุงเทพชั้นแรก เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แบบแยกโครงการ และแยกขนาดเสาเข็ม ความสัมพันธ์จะเปลี่ยนไปจากแบบไม่แยกโครงการ และสำหรับโครงการนี้จะได้ค่า R^2 ลดลง

$$Y = 0.891\ X \quad ; \quad R^2 = 0.77$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ii) สำหรับเสาเข็มตอกในดินจังหวัดระยอง

- แบบไม่แยกโครงการ

$$Y = 1.188\ X \ ; \ R^2 = 0.64$$

- พิจารณาเฉพาะโครงการโรงปุ๋ยแห่งชาติ ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้น Clayey sand (Completely decomposed granite) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แบบแยกโครงการและแยกขนาดเสาเข็ม พบว่า ความสัมพันธ์จะเปลี่ยนไปจากแบบไม่แยกโครงการ และได้ค่า R^2 ดีขึ้น

- เสาเข็ม SQ.0.35 ม. $Y = 1.431\ X$; $R^2 = 0.90$

- เสาเข็ม SQ.0.45 ม. $Y = 1.090\ X$; $R^2 = 0.95$

(ข)ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load test , Y) เมื่อใช้ CAPWAPC Capacity กับทดสอบแบบสถิตศาสตร์ (Static pile load test , X) เมื่อใช้ค่าน้ำหนักสูงสุดตามวิธีของ Mazurkiewicz (1972)

(i) สำหรับเสาเข็มตอก ในดินกรุงเทพ

- แบบไม่แยกโครงการ

$$Y = 0.963\ X \ : \ R^2 = 0.85$$

- โครงการทางด่วนสายรามอินทรา-อาจณรงค์ เสาเข็มแรงเหวี่ยง SP.0.60 ม. ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายกรุงเทพชั้นแรก ความสัมพันธ์แบบแยกโครงการ และแยกขนาดเสาเข็ม ความสัมพันธ์จะเปลี่ยนไป จากแบบไม่แยกโครงการ และสำหรับโครงการนี้จะได้ค่า R^2 ลดลง

$$Y = 0.947\ X \ : \ R^2 = 0.81$$

(ii) สำหรับเสาเข็มตอกในดินจังหวัดระยอง

- แบบไม่แยกโครงการ

$$Y = 1.172\ X \ : \ R^2 = 0.68$$

- โครงการโรงปุ๋ยแห่งชาติ ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้น Clayey sand (Completely decomposed granite) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แบบแยกโครงการ แยกขนาดเสาเข็ม พบว่า ความสัมพันธ์จะเปลี่ยนไปจากแบบไม่แยกโครงการ และมีค่า R^2 ดีขึ้น

- เสาเข็ม SQ.0.35 ม. $Y = 1.364 X$; $R^2 = 0.92$

- เสาเข็ม SQ.0.45 ม. $Y = 1.019 X$; $R^2 = 0.92$

2.) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ (Y) โดยใช้ CAPWAPC Capacity เมื่อ restrike test ต่อ initial test กับเวลา (วัน , X)

(ก) ปลายเสาเข็มอยู่ในดินกรุงเทพ

(i)โครงการโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมวังน้อย ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง

- เสาเข็มขนาด SQ.0.40 ม. $Y = 1.25 \text{ Ln } (X) - 2.98$; $R^2 = 0.95$

  waiting periods 35 - 63 วัน

- เสาเข็มขนาด SQ.0.45 ม. $Y = 0.45 \text{ Ln } (X) + 0.06$; $R^2 = 0.78$

  waiting periods 42 - 80 วัน

(ii)โครงการทางด่วนสายรามอินทรา - อาจณรงค์ ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก

- เสาเข็มขนาด SP.0.60 ม. $Y = 0.32 \text{ Ln } (X) + 0.81$; $R^2 = 0.52$

  waiting periods 8 - 29 วัน

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการรับน้ำหนักของเสาเข็ม พิจารณาแยกตามขนาดเสาเข็ม และแยกโครงการ ของโครงการทั้งสอง พบว่า เป็นไปในทางเพิ่มขึ้นกับเวลา ในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ข) ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินจังหวัดระยอง

(i)โครงการ Siam Styrene Monomer ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้น Clayey sand

- เสาเข็มขนาด SQ.0.40 ม. $Y = 0.71 \text{ Ln } (X) - 0.80$; $R^2 = 0.47$

  waiting periods 13 - 19 วัน

(ii)โครงการโรงปุ๋ยแห่งชาติ ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้น Clayey sand (Completely decomposed granite)

- เสาเข็มขนาด SQ.0.35 ม. $Y = -0.71 \text{ Ln } (X) + 2.91$; $R^2 = 0.71$

  waiting periods 7 - 13 วัน

- เสาเข็มขนาด SQ.0.45 ม. $Y = -0.50 \text{ Ln } (X) + 2.38$; $R^2 = 0.79$

  waiting periods 7 - 11 วัน

ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงการรับน้ำหนักของเสาเข็มกับเวลาเมื่อแยกพิจารณาตามขนาดเสาเข็มและแยกโครงการ พบว่า เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ของโครงการทั้งสองแตกต่างกัน กล่าวคือ โครงการ Siam Styrene monomer ความสัมพันธ์จะเปลี่ยนไปในทางเพิ่มขึ้นกับเวลา ขณะที่โครงการโรงปุ๋ยแห่งชาติจะลดลงกับเวลา ในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ

ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ เป็นเพียงแนวทางในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เวลาต่างกัน ว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไร แต่เนื่องจากจำนวนของข้อมูลมีจำกัด และแต่ละจุดของข้อมูลเป็นผลจากการทดสอบเสาเข็มต่างต้นกัน จึงทำให้อาจมี variation จากข้อมูลดิน และพลังงานที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม เป็นต้น จึงไม่อาจใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวในการทำนายการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เวลาต่างไปจากนี้ เมื่อมีเพียงผลการทดสอบแบบพลศาสตร์แต่เพียงที่ initial test ด้วยสภาพและเงื่อนไขที่แตกต่างไปจากเงื่อนไขที่ใช้ในการวิจัยนี้

3.)การเปรียบเทียบผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีแบบพลศาสตร์ กับการวิเคราะห์การรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีปฐพีกลศาสตร์ โดยแยกพิจารณาเป็นแรงเสียดทานที่ผิว แรงธารที่ปลายเสาเข็ม และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็ม พบว่า

- สำหรับดินกรุงเทพ เสาเข็มแรงเหวี่ยงขนาด 0.60 ม. โครงการทางด่วนสายรามอินทรา-อาจณรงค์ ซึ่งปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายกรุงเทพชั้นแรกนั้น ค่าแรงเสียดทานที่ผิวแรงธารที่ปลายเสาเข็ม และกำลังรับน้ำหนักสูงสุด จากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีมีความใกล้เคียงกันมาก แต่สำหรับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง ในโครงการโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมวังน้อย การวิเคราะห์ทั้งสองวิธีให้ค่าที่ค่อนข้างแตกต่างกัน

- สำหรับดินจังหวัดระยอง เมื่อแยกพิจารณาเป็นค่าแรงเสียดทานที่ผิว และแรงธารที่ปลายเสาเข็ม ทั้งสองวิธีจะให้ผลที่แตกต่างกัน แต่ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดจากการวิเคราะห์โดยทั้งสองวิธี มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นเช่นนี้ทั้งโครงการ Siam Styrene Monomer และ โครงการโรงปุ๋ยแห่งชาติ

4.) สำหรับ parameters ที่มีผลต่อการวิเคราะห์นั้น พบว่า ค่า total static resistance มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์มากกว่าที่จะแยกเป็นแรงเสียดทานที่ผิว หรือแรงธารที่ปลายเสาเข็ม ส่วน CAPWAPC Variables นั้น มีเป็นจำนวนมาก และมี variation ค่อนข้างสูง

งานวิจัยนี้ เพื่อประเมินผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ ซึ่งปัจจุบันเป็นวิธีที่เป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายมากขึ้น เพราะประหยัดทั้งเวลา และค่าใช้จ่าย อย่างไรก็ดี การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีนี้ นับว่ายังเป็นเรื่องที่ใหม่อยู่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้ในการประเมินการรับน้ำหนักของเสาเข็มดั้งเดิมอย่างการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีแบบสถิตศาสตร์ หรือการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีปฐพีกลศาสตร์ และเนื่องจากการประเมินผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีแบบพลศาสตร์นี้สามารถทำได้อย่างง่ายดายสะดวกและรวดเร็ว ดังนั้น หากผู้ทดสอบและวิเคราะห์ผล ขาดความเข้าใจในเรื่องเกี่ยวกับกลศาสตร์ของดิน และพฤติกรรมทาง dynamic ของดินและเสาเข็มแล้ว ผลการทดสอบอาจมีความคลาดเคลื่อนผิดไปจากความเป็นจริงได้ ข้อจำกัดอย่างหนึ่งของการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีนี้ คือ การขาดความเป็นหนึ่งเดียวกันของผลทดสอบ (unique) ในแง่ของ parameters ที่ป้อนเข้าไปเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ จึงควรที่จะมีการศึกษาถึงพฤติกรรมทาง dynamic ที่แท้จริงของชั้นดิน ร่วมกับศึกษาถึงการทำงานของ CAPWAPC การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีแบบพลศาสตร์ จึงสามารถใช้เสริมการทดสอบการรับน้ำหนักด้วยวิธีแบบสถิตศาสตร์ เพื่อความสะดวกและรวดเร็ว แต่ยังไม่ควรใช้เป็นการทดสอบแทนการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีแบบสถิตศาสตร์

5.2 ข้อเสนอแนะและศึกษาเพิ่มเติม

1.)ศึกษาหาความสัมพันธ์เพิ่มเติม ระว่างการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์กับแบบสถิตศาสตร์ควรทำการทดสอบที่เวลาซึ่งแตกต่างกันน้อยที่สุด สำหรับการทดสอบแบบสถิตศาสตร์ ควรทดสอบถึง fail และสำหรับการทดสอบแบบพลศาสตร์ควรใช้พลังงานในการตอกที่มากพอเพื่อให้ดินเกิดการเคลื่อนตัวจนสามารถ mobilize load ได้เต็มที่ ทั้งนี้จะต้องไม่มากจนโครงสร้างเสาเข็มเกิดความเสียหาย ซึ่งการเปรียบเทียบผลทดสอบทั้งสองวิธี ควรกระทำด้วย criteria อันเดียวกัน นอกจากนี้ การเปรียบเทียบการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีปฐพีกลศาสตร์ กับผลการทดสอบการรับน้ำหนักด้วยวิธีแบบสถิตศาสตร์ แยกเป็น แรงเสียดทานที่ผิว แรงธารที่ปลายเสาเข็ม และค่ารับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็ม โดยการทดสอบการรับน้ำหนักด้วยวิธีแบบสถิตศาสตร์ ควรกระทำโดยติดตั้งเครื่องมือ (tell-tale rod) เพื่อแยกกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มออกเป็นแรงเสียดทานที่ผิว แรงธารที่ปลายเสาเข็ม เพื่อใช้ตรวจสอบกับผลจากการทดสอบด้วยวิธีแบบพลศาสตร์

2.)การศึกษาหาความสัมพันธ์เพิ่มเติม ระหว่างอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม จากการทดสอบการรับน้ำหนักด้วยวิธีแบบพลศาสตร์ ที่ restrike test ต่อ initial test กับเวลา ควรทำการทดสอบ restrike ที่เวลาต่างๆกัน ในเสาเข็มต้นเดียวกัน เพื่อพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงการรับน้ำหนักของเสาเข็มในชั้นดินนั้นๆจะต้องใช้เวลานานเท่าไร ขบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากผลของการตอกเสาเข็มจึงจะสิ้นสุด และท้ายที่สุดเมื่อขบวนการดังกล่าวสิ้นสุดลงแล้วกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะแตกต่างไปจากผลการรับน้ำหนักเมื่อ initial test เท่าใด

3.)ควรมีการศึกษาพฤติกรรมทาง dynamic ที่แท้จริงของชั้นดิน ร่วมกับศึกษาการทำงานของ CAPWAPC โดยเฉพาะในส่วนของ CAPWAPC variables ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อเป็นที่แน่ใจว่าการประเมินผลทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ มีความใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

ไกร ตั้งสง่า. การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยใช้ Pile Driving Analyser. การสัมนาทางวิชาการเรื่องงานฐานรากและงานก่อสร้างใต้ดิน, 26-27 กุมภาพันธ์, หน้า 11-16. ว.ส.ท., 2534.

วิจินต์ แก้วปัญญา. การประเมินค่าคุณสมบัติดินที่เกี่ยวข้องกับกำลังรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มในรูปค่าทะลุทะลวงมาตรฐานของชั้นทรายชั้นที่สองของชั้นดินกรุงเทพ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.

วีระ วศินวรรธนะ และ ณัฐมนต์ กัมปนานนท์. ประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของ Dynamic load test. การสัมมนาทางวิชาการเรื่องฐานราก'40, 4 กุมภาพันธ์, หน้า 79-93. ว.ส.ท. 2540.

นริศ ชาญโกเวทย์. การหาค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแทนที่ดิน(ชนิดแฟรงกี) ในดินจังหวัดระยอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

สุพจน์ เจียมจรัสรังษี. การคาดคะเนการรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกในดินกรุงเทพโดยใช้สมการคลื่น. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.

ภาษาอังกฤษ

AASTHO Designation: T 298-93. Standard method of test for High Strain Dynamic Testing of Piles, n.d.

Authier, J. and Fellenius, B.H. Dynamic measurements as an inspection tool for discovering damage. Civil Talk No.1 on Application of Stress wave Measurement of Piles Using Dynamic Testing, March 17, pp. 1-34. Bangkok: The Engineering Institute of Thailand, 1992.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Authier, J. and Fellenius, B.H. Dynamic measurement as an inspection tool for discovering damage to spliced an unspliced precast concrete piles-Two case histories.in H. Bredenberg(eds.), Proceeding of the International Seminar on the Application of Wave Theory, June 4-5 , pp. 121 -127, Stockholm: Royal Institute of Technology, A.A.Balkema , 1981.

Braja M. Das. Principles of foundation engineering. 2nd edition. Boston: PWS-KENT Publishing Company, 1992.

Cheong Kok Leong and Krai Tungsanga. Evaluation of bearing capacity and performance of pile using stress wave measurement (Dynamic load test). Civil Talk No.1 on Application of Stress wave Measurement of Piles Using Dynamic Testing, March 17, Bangkok: The Engineering Institute of Thailand, 1992.

Fernando, I.C.R. Analysis of dynamic measurement in piles. Master's Thesis, Asian Institute of Technology, 1993.

Goble, G.G. Modern procedures for the design of driven pile foundations. Civil Talk No.1 on Application of Stress wave Measurement of Piles Using Dynamic Testing, March 17, pp. 1-34. Bangkok: The Engineering Institute of Thailand, 1992.

Goble, G.G. et al. Prediction the pile bearing capacity of a pile from dynamic measurements. Springfield: National Technical Information Service, 1974.

Goble, G.G. et al. Dynamic studies on the bearing capacity of piles 1. Springfield: Clearinghouse, 1967.

Goble, G.G., Rausche, F. and Likins, G.E. CAPWAP user's manual. 1990.

Goble, G.G., Rausche, F. and Likins, G.E. CAPWAP user's manual. 1993.

Goble, G.G., Rausche, F. and Likins, G.E. The analysis of pile driving - A state - of the - art. in H. Bredenberg (eds.), Proceeding of the International Seminar on The Application of Wave Theory on Piles, June 4-5 , pp. 131 -161, Stockholm:Royal Institute of Technology, A.A.Balkema , 1981.

Hannigan, P.J. Dynamic monitoring and analysis of pile foundation installation. Sem. on Wave Equation Analysis of Pile Driving and Dynamic Pile Testing, May 4, pp. 55-69. Bangkok: The Engineering Institute of Thailand, 1995.

Rausche, F.,Goble, G.G. and Likins, G.E. Dynamic determination of pile capacity. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111 (March 1985): 367-383.

Rausche, F. and Goble, G.G. Determination of pile damage by top measurements. Behavior of deep foundation, ASTM 670, ASTM, 1979: 500-506.

Surachat Sumbhandharaksa. Recent piling practice in Bangkok plan. ว.ส.ท. ประชุมใหญ่วิชาการ, 2533.

Surachat Sumbhandharaksa. The influence of land subsidence on foundation design in Bangkok subsoils. ว.ส.ท. ประชุมใหญ่วิชาการ, 2533.

Tien, N.T. Dynamic and static behaviour of driven pile. Swedish Geotechnical Institute, Report No.33 (1987): 1-200.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย