สรุปผลการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยได้วิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรม ตลอดจนวิธีที่ใช้ในการทดสอบเสาเข็ม ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ โดยค่าหน่วยแรงของมวลดินที่ผิวเสาเข็มมีค่าเฉลี่ยจากการจำแนกผลการวิเคราะห์ตามลักษณะชั้นดินทั้ง 6 ประเภท คือ 1.) ชั้นดิน Very Soft to Soft Clay มีค่าเฉลี่ย 2 ตัน/ตร.ม. 2.) ชั้นดิน Medium Clay มีค่าเฉลี่ย 4.5 ตัน/ตร.ม. 3.) ชั้นดิน Stiff to Very Stiff Clay มีค่าเฉลี่ย 6.5 ตัน/ตร.ม. 4.) ชั้นดิน 1st Sand มีค่าเฉลี่ย 12 ตัน/ตร.ม. 5.) ชั้นดิน Hard Clay มีค่าเฉลี่ย 11 ตัน/ตร.ม. 6.) ชั้นดิน 2nd Sand มีค่าเฉลี่ย 25 ตัน/ตร.ม. โดยที่ค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มอยู่ในช่วง 2-12 มิลลิเมตร

2. เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มลงสู่ชั้นดินตามความลึกต่างๆ

2.1 เปอร์เซ็นต์ในการถ่ายแรงของเสาเข็ม ระหว่างเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 84 เปอร์เซ็นต์ กับเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงต้านที่ปลายเสาเข็มมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกประลัยหรือน้ำหนักทดสอบสูงสุดในกรณีที่มีการทดสอบเสาเข็มไม่เกิดการพิบัติ

2.2 เปอร์เซ็นต์ในการถ่ายแรงของเสาเข็ม ระหว่างเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 94 เปอร์เซ็นต์ กับเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงต้านที่ปลายเสาเข็มมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เสาเข็มรับน้ำหนักในขณะใช้งาน

2.3 เปอร์เซ็นต์การพัฒนาแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการทรุดตัวที่เกิดขึ้นที่ปลายเสาเข็มกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 - 12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการทรุดตัวที่ปลายเสาเข็มนั้นยังไม่เพียงพอต่อการพัฒนาค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็มสูงสุดได้

3. ค่าอัตราส่วนปลอดภัย

3.1 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม สภาวะที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกประลัยหรือน้ำหนักทดสอบสูงสุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.34 และสภาวะที่เสาเข็มใช้งานมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.09 ซึ่งค่าอัตราส่วนปลอดภัยโดยส่วนใหญ่ยังมีค่าเพียงพออยู่ในขณะที่มีการทดสอบเสาเข็มจนถึงจุดพิบัติแล้ว

3.2 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ในสภาวะที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกประลัยหรือน้ำหนักทดสอบสูงสุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.64 ซึ่งค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงต้านที่ปลายเสาเข็มยังพอมีค่าที่สูงอยู่ เนื่องจากการพัฒนาของแรงต้านที่ปลายยังเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่

4. การวิเคราะห์กลับเพื่อหาพารามิเตอร์จากผลการทดสอบเสาเข็ม

4.1 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียว (Undrained Shear Strength, S_u) จากการวิเคราะห์ข้อมูลเสาเข็มพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะค่อนข้างต่ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียวกระจายอยู่ในช่วง 2-15 ตัน/ตร.ม. โดยเฉพาะเมื่อค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียวมีค่าที่สูงขึ้น และมีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากผลการวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมาเป็นผลให้ความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน

4.2 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) กับมุมต้านทานภายในของทราย (Angle of Shearing Resistance, ϕ) มีความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำ อยู่ในช่วง 0.2-0.5 โดยค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานที่ได้มีค่ากระจายตัวและมีแนวโน้มไปในทางสภาวะ Passive เป็นลักษณะที่เสาเข็มขณะทำการทดสอบหรือเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกนั้นจะเคลื่อนตัวเข้าหามวลดิน และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1/3 ถึง 1/6 ของค่า $\beta = K_p \tan 2/3\phi$

4.3 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินทราย (Bearing Capacity Factor, N_q) ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bearing Capacity Factor, N_q กับค่ามุมต้านทานภายในของทราย (Angle of Shearing Resistance, ϕ) มีค่าแนวโน้มที่ต่ำโดยอยู่ในช่วง 2–12 ซึ่งใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบเสาเข็มจากพฤติกรรมการพิบัติที่บริเวณผิวเสาเข็มจนทำให้การทรุดตัวมีค่าสูงขึ้นใน

ขณะที่แรงต้านที่ปลายเสาเข็มการพัฒนาของแรงต้านที่ปลายไปสู่การพิบัติที่ปลายเสาเข็มยังไม่เพียงพอ

4.4 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินเหนียว (Bearing Capacity Factor, N_c) มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 9.4 สำหรับเสาเข็มที่ปลายอยู่ในชั้นดินเหนียว ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อช่วงปลายของเสาเข็มจมอยู่ในชั้นดินเหนียวมีค่ามุมต้านทานภายในเท่ากับศูนย์โดยค่า Bearing Capacity Factor, N_c เท่ากับ 9

5. การวิเคราะห์ผลทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test

5.1 การพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มในแต่ละชั้นดินด้วยวิธีการทดสอบเสาเข็มวิธี Bi-Directional Static Load Test พบว่าการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มเกิดการพัฒนาเต็มที่ในขณะที่การทรุดตัวของเสาเข็มเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณ 1-6 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องมาจากวิธีที่ใช้ในการซึ่งทำการถ่ายน้ำหนักบรรทุกให้แก่เสาเข็มโดยใช้แม่แรง Hydraulic Jack ที่ติดตั้งในตัวเสาเข็มโดยตรงในขณะทำการทดสอบแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มสามารถพัฒนาจนถึงค่าสูงสุดได้ก่อน เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบเสาเข็มวิธี Static Load Test ซึ่งเป็นการทดสอบที่ให้น้ำหนักบรรทุกที่หัวเสาเข็มโดยลักษณะการถ่ายแรงของเสาเข็มจะส่งถ่ายไปยังชั้นดินที่อยู่ด้านบนก่อนแล้วค่อยถ่ายแรงลงสู่ชั้นดินด้านล่าง

5.2 เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มจากวิธีการทดสอบเสาเข็ม Bi-Directional Static Load Test มีลักษณะที่แตกต่างจากการทดสอบโดยทั่วไป คือ การถ่ายแรงที่ผิวของเสาเข็มลงสู่ชั้นดินในช่วงบนของแม่แรง Hydraulic Jack ชั้นดินที่อยู่ด้านล่างหรือใกล้กับแม่แรงจะได้รับแรงที่มีค่าสูงกว่าดินชั้นบนขึ้นไป และจะค่อยลดลงเมื่อทดสอบน้ำหนักเพิ่มขึ้น ส่วนการถ่ายแรงของเสาเข็มในช่วงระหว่างแม่แรงตัวบนกับตัวล่าง พบว่าการถ่ายแรงมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยทั่วไปอันเนื่องมาจาก การทดสอบเป็นลักษณะของแรงอัด เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามน้ำหนักทดสอบที่เพิ่มขึ้นด้วย

5.3 การวิเคราะห์กลับเพื่อหาค่าพารามิเตอร์จากวิธีการทดสอบเสาเข็ม Bi-Directional Static Load Test ได้เปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้ในการทดสอบทั่วไป พบว่าค่าสัมประสิทธิ์

กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) มีค่าที่ต่ำกว่าประมาณ 1.50 เท่า ซึ่งมาจากผลของการทดสอบโดยการอัดแรงในลักษณะแรงดึง และเนื่องจากการเกิดแรงต้านจากดินชั้นบนไม่เพียงพอต่อแรงอัดของแม่แรง Hydraulic Jack ตัวกลาง, ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) มีค่าที่สูงกว่าประมาณ 2.0 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากในขณะทำการทดสอบแรงเสียดทานในชั้นทรายสามารถพัฒนาได้จนถึงค่าสูงสุดในขณะที่การเคลื่อนตัวของเสาเข็มมีค่าเพียงเล็กน้อย, ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินทราย (Bearing Capacity Factor, N_q) ที่กระจายอยู่ค่อนข้างสูงกว่าประมาณ 2.5 เท่า จากวิธีการทดสอบทำให้ทราบค่าความต้านทานของดินที่ปลายเสาเข็มโดยตรง, ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินเหนียว (Bearing Capacity Factor, N_c) มีค่าประมาณ 9.4 ในเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง (Hard Clay) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสมมุติฐานในการออกแบบ ทำให้ทราบค่าแรงต้านที่ปลายจากวิธีการทดสอบนี้ได้โดยตรง

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อมูลผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในส่วนของเสาเข็มที่มีขนาดกลางและมีความยาวไม่มาก เพื่อศึกษาพฤติกรรมต่างๆและสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

2. เครื่องมือที่ใช้ติดตั้งเพื่อวัดพฤติกรรมของเสาเข็ม ควรมีการพัฒนาให้สามารถอ่านค่าและแปรผลจากการทดสอบได้โดยตรง ทำให้เกิดความง่ายในการวิเคราะห์ผลอื่นๆต่อไป

3. ในขณะทำการทดสอบเสาเข็ม ควรมีการศึกษาถึงพฤติกรรมการอัดแรงภายในตัวเสาเข็ม (Pre-Stress Pile) เมื่อเสาเข็มได้รับน้ำหนักบรรทุกแต่ละรอบของการทดสอบ

4. การทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test ซึ่งยังไม่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานของเสาเข็มจริง เนื่องจากการถ่ายน้ำหนักบรรทุก ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้งแม่แรงภายในตัวเสาเข็ม ในขณะที่เสาเข็มโดยทั่วไปจะได้รับน้ำหนักจากหัวเสาเข็มและถ่ายแรงลงสู่ชั้นดินด้านล่าง

5. การศึกษาถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในขณะใช้งานจริง ผลจากการวิเคราะห์และตรวจวัดอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มก่อสร้างไปจนถึงสิ้นสุดโครงการ สามารถวิเคราะห์กลับเพื่อพิสูจน์ถึงทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบได้

6. ในส่วนของการศึกษาเพิ่มเติมควรมีการคำนึงถึงค่า Residual Load จากผลการทดสอบเสาเข็มที่มีมาจากผลการตรวจวัดค่าจากการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมไว้