

อิทธิพลของความหนาแน่นต่อความสามารถในการรับแรงถอน ของแบบจำลองเสาเข็มเหล็กในชั้นดินทราย

โสทธิพันธ์ โอภาส¹ และ วีรยา จิมอ้อย²

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12121

รับเมื่อ 1 กรกฎาคม 2548 ตอบรับเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2548

บทคัดย่อ

โครงสร้างบริเวณชายฝั่งนั้นนอกจากแรงในทิศทางลงตามแนวแกน (Compressive force) ที่กระทำต่อฐานรากเสาเข็มแล้ว ยังมีแรงกระทำต่อฐานรากเสาเข็มในทิศทางขึ้นตามแนวแกนหรือแรงถอน (Uplift force) อันเนื่องมาจากแรงดันของน้ำ (Hydrostatic pressure) ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงถอนของเสาเข็มในชั้นดินทรายของแบบจำลอง อันเนื่องมาจากอิทธิพลของค่าความหนาแน่นและพื้นที่ผิวของเสาเข็ม โดยทดสอบค่าความสามารถในการรับแรงถอน (Uplift capacity) ของแบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวเรียบและผิวขรุขระในชั้นดินทรายแห้งแบบแน่น ($D_r = 80\%$) และแบบหลวม ($D_r = 25\%$) ที่ค่าอัตราส่วนของความลึกการฝังต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/d) เท่ากับ 8, 16, 24 และ 28 ซึ่งใช้แรงถอนจากน้ำหนักถ่วงโดยตรงผ่านลวดสลิงที่มีรอกช่วยในการเคลื่อนที่

จากผลการทดสอบพบว่าค่าความสามารถในการรับแรงถอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนของความลึกการฝังต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม (L/d) มีค่าเพิ่มขึ้น ในกรณีที่มีค่า L/d มีค่าน้อยๆ พบว่าลักษณะพื้นที่ผิวของเสาเข็มที่ต่างกันมีค่าความสามารถในการรับแรงถอนต่างกันน้อยมาก แต่เมื่อค่า L/d มีค่าเพิ่มขึ้นความแตกต่างของค่าความสามารถในการรับแรงถอนก็มากขึ้น ความสามารถในการรับแรงถอนของเสาเข็มขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของดินทรายและแรงเสียดทานระหว่างผิวเสาเข็มกับดิน

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

Effect of Density on Uplift Capacity of Model Piles in Sand

Sottiponth Opasa¹ and Weeraya Chim-oye²

Thammasat University, Rangsit Campus, Klong Laung, Pathum Thani 12121

Received 1 July 2005 ; accepted 10 November 2005

Abstract

For the offshore structure, the pile is subjected not only the compressive force but also the tensile force or uplift force due to the hydrostatic pressure. This research aims to study the effects of sand density and the soil-pile friction resistant on the uplift capacity of pile in sand. The model piles were 19.6 mm in diameter. Sixteen tests on smooth and rough steel piles embedded in dense sand ($D_r = 80\%$) and loose sand ($D_r = 25\%$) were carried out. The soil-smooth pile friction angles were 29.5° and 33.8° in loose and dense sand. In the case of rough pile, the soil-pile friction angles were 34.0° and 35.8° in loose and dense sand. The ratios of the embedment length diameter (L/d) were 8, 16, 24 and 28. The piles were subjected to pull out load through a double pulley arrangement with flexible wire. The experiment results indicated that the uplift capacity increased with increasing of the embedment length/diameter ratios. At the small L/d , the uplift capacity has slightly difference between smooth and rough pile, but the differences increase rapidly when L/d increase. The uplift capacity depends on sand density and the soil-pile resistant.

¹ Graduate Student, Department of Civil Engineering.

² Assistance Professor, Department of Civil Engineering.

1. บทนำ

ปัจจุบันในพื้นที่บริเวณใกล้ชายฝั่งทะเลมีได้มีโครงการก่อสร้างเกิดขึ้นมาก เพื่อเป็นการตอบสนองการพัฒนาพื้นที่ใกล้ชายฝั่งทะเลให้มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและการท่องเที่ยว รวมทั้งในบริเวณพื้นที่ที่มีการพัฒนาเพื่อเป็นนิคมอุตสาหกรรม ดังนั้นโครงการก่อสร้างในการพัฒนาพื้นที่ใกล้ชายฝั่งทะเลนี้จึงมีเพิ่มขึ้นอย่างมากมายเช่น อาคาร ท่าเทียบเรือ สระน้ำ และสะพาน ในการก่อสร้างของโครงการทั้งหมดนี้สิ่งที่สำคัญจะต้องพิจารณา ลักษณะของชั้นดินที่จะเป็นฐานรากในการรองรับน้ำหนักจากโครงสร้างเหล่านี้ โดยในพื้นที่บริเวณใกล้ชายฝั่งทะเลนั้นสภาพชั้นดินโดยทั่วไปมักจะเป็นชั้นดินทราย สมบัติของชั้นดินทรายจะเป็นชั้นดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น สำหรับโครงสร้างบริเวณชายฝั่งนั้นพบว่าแรงที่กระทำต่อฐานรากเสาเข็มนั้น นอกเหนือจากแรงกระทำที่เป็นแรงกระทำในทิศทางลงตามแนวแกน (Compressive force) แล้วยังมีแรงกระทำต่อฐานรากเสาเข็มในทิศทางขึ้นตามแนวแกนหรือแรงถอน (Uplift force) อันเนื่องมาจากแรงดันของน้ำ (Hydrostatic and hydrodynamic pressure)

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงถอนของเสาเข็มในชั้นดินทรายในแบบจำลองที่ได้จัดทำขึ้น โดยทำการทดสอบในชั้นทรายแน่น (ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 80%) และทรายหลวม (ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 25%) โดยใช้ค่าความลึกการฝังต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/d) 4 ค่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8, 16, 24 และ 28 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของความหนาแน่นของดินทรายและค่าอัตราส่วนของความลึกการฝังต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มที่มีต่อความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุด (Ultimate uplift capacity) นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลของพื้นผิวเสาเข็มต่อพฤติกรรมการรับแรงถอนของเสาเข็ม โดยใช้แบบจำลองเสาเข็มเป็นเหล็กแท่งกลมตันที่เป็นแบบผิวเรียบและผิวขรุขระ

2. วัสดุที่ใช้

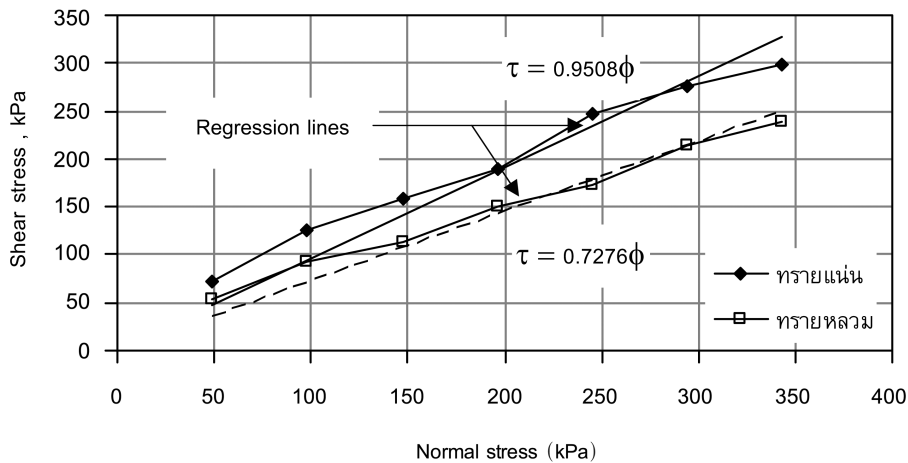
2.1 ดินทราย

ใช้ทรายแห้งในการทดสอบโดยนำทรายก่อสร้างซึ่งร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 (0.297 มม.) เพื่อให้ได้สัดส่วนของขนาดของเม็ดดินกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มเท่ากับ 80 มาอบแห้งซึ่งการอบแห้งนั้น ไม่ทำให้การกระจายตัวของเม็ดดินเปลี่ยนแปลง [1] โดยทรายที่ใช้มีค่า D_{50} เท่ากับ 0.23 มม. ซึ่งเป็นทรายที่มีขนาดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่ (Uniformly graded sand) มีค่า C_u เท่ากับ 2.50 และมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เท่ากับ 2.65 โดยค่าความหนาแน่นแห้ง (ρ_d) ในกรณีทรายแน่น ($D_r = 80\%$) เท่ากับ 1.65 กรัม/ซม³. และในกรณีทรายหลวม ($D_r = 25\%$) เท่ากับ 1.47 กรัม/ซม³. ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงเฉือนโดยวิธีเฉือนโดยตรง (Direct shear test) ที่มีค่า Normal stress เท่ากับ 49.05 kPa, 98.10 kPa, 147.15 kPa, 196.20 kPa, 245.25 kPa, 294.30 kPa และ 343.30 kPa จากนั้นจะนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear stress กับเปอร์เซ็นต์ Strain ค่าโมดูลัสของดินทรายจะแปรตามค่า Normal stress เนื่องจากดินทรายเมื่อถูกหน่วยแรงตั้งฉากกระทำทำให้มีความสามารถในการรับกำลังการต้านแรงเฉือน ซึ่งถ้าค่า Normal stress มีค่าเพิ่มขึ้น ความสามารถในการรับกำลังต้านทานแรงเฉือนก็จะสูงขึ้น ทำให้ค่าโมดูลัสของดินทรายมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า Normal stress [2] สำหรับวิธีการหาค่าโมดูลัสของดินทรายทำได้โดยลากเส้นตรงจากจุดกำเนิด (ที่ค่า Shear stress = 0) ไปที่ค่า Shear stress เท่ากับ $\frac{1}{2}$ ของค่า Shear stress

สูงสุดบนเส้นกราฟของการทดสอบ จากนั้นหาค่าความชันของเส้นตรงซึ่งจะเป็นค่าโมดูลัสของดินทราย [2] ดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับค่ามุมเสียดทานภายในของดินทราย (ϕ) จะหาได้จากค่าความลาดชันจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Maximum shear stress กับ ค่า Normal stress โดยการลากเส้นตรงเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 1 เท่ากับ 43.56° ในกรณีทรายแน่น ($D_r = 80\%$) และ เท่ากับ 36.04° ในกรณีทรายหลวม ($D_r = 25\%$)

ตารางที่ 1 ค่าโมดูลัสของดินทราย (E_{sand})

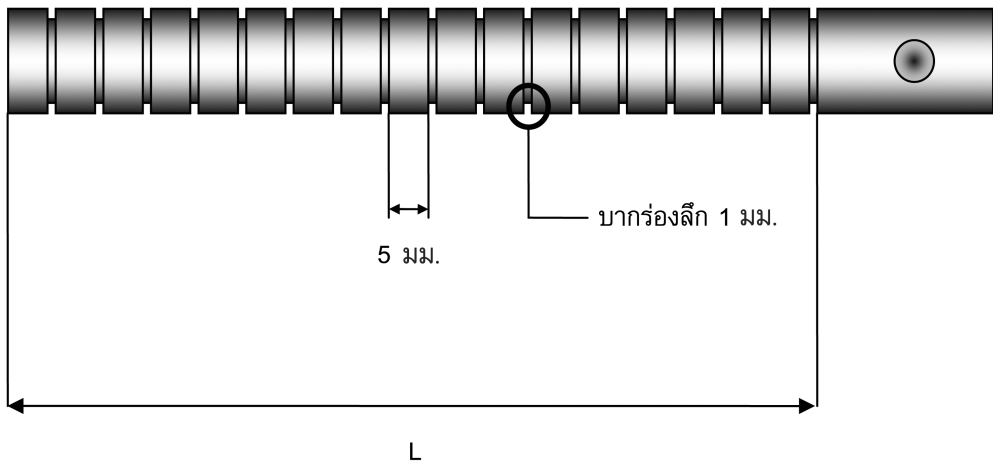
กรณี	ค่าโมดูลัสของดินทราย (E_{sand}) (kPa)						
	49.05	98.10	147.15	196.20	245.25	294.30	343.30
ทดสอบ โดย $\sigma =$	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
ทรายแน่น ($D_r = 80\%$)	7,254	8,596	9,529	11,084	12,939	15,844	25,000
ทรายหลวม ($D_r = 25\%$)	2,888	3,641	4,478	5,788	6,354	7,124	8,015



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal stress กับ Shear stress ของดินทราย

2.2 แบบจำลองเสาเข็ม

ในงานวิจัยนี้แบบจำลองเสาเข็มที่ใช้เป็นเหล็กแท่งกลมตันที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) เท่ากับ 19.6 มม. และมีค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นเท่ากับ $39,434 \text{ MN/m}^2$. โดยกำหนดให้มีค่าความลึกของการฝัง (L) ต่างๆ กัน 4 ค่า ได้แก่ 157 มม. , 314 มม. , 470 มม. และ 550 มม. ตามอัตราส่วนความลึกของการฝังต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/d) เท่ากับ 8, 16, 24 และ 28 ซึ่งมีทั้งเหล็กผิวเรียบและเหล็กผิวขรุขระ สำหรับเหล็กผิวขรุขระนั้นใช้การบากร่องตามขวางลึก 1 มม. ทุกระยะห่าง 5 มม. ตลอดความยาวของเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 2 ในการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงเฉือนโดยวิธีแรงเฉือนโดยตรงโดยใช้แผ่นเหล็กที่บากร่องในลักษณะเดียวกับแบบจำลองเสาเข็ม ผลการทดสอบที่ได้จะนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear stress กับ เปอร์เซ็นต์ Strain เพื่อทำการคำนวณหาค่าโมดูลัสของดินทรายกับเหล็ก ($E_{\text{interface}}$) โดยใช้วิธีเดียวกันกับในหัวข้อที่ 2.1 ค่าที่ได้นั้นดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าค่าโมดูลัสของดินทรายกับเหล็ก ($E_{\text{interface}}$) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าหน่วยแรงตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีของเหล็กผิวเรียบและผิวขรุขระ สำหรับค่ามุมเสียดทานของดินทรายกับผิวเหล็ก (δ) นั้นจะทำการคำนวณจากค่าความลาดชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear stress กับ Normal stress ค่าที่ได้นั้นดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 2 แบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวขรุขระ

ตารางที่ 2 ค่าโมดูลัสของดินทรายกับเหล็ก ($E_{\text{interface}}$) ผิวเรียบและผิวขรุขระ

ลักษณะ ผิวเหล็ก	กรณีทดสอบ โดย $\sigma =$	ค่าโมดูลัสของดินทรายกับเหล็ก ($E_{\text{interface}}$) (kPa)						
		49.05 kPa	98.1 kPa	147.15 kPa	196.2 kPa	245.25 kPa	294.3 kPa	343.35 kPa
ผิวเรียบ	ทรายแน่น ($D_r = 80\%$)	4,135	6,897	8,451	9,987	11,024	12,239	14,459
	ทรายหลวม ($D_r = 25\%$)	1,999	2,532	2,900	3,332	4,112	6,007	7,278
ผิวขรุขระ	ทรายแน่น ($D_r = 80\%$)	5,963	7,859	9,542	10,975	12,901	14,471	18,817
	ทรายหลวม ($D_r = 25\%$)	2,741	3,215	3,941	5,425	6,010	6,745	7,732

ตารางที่ 3 ค่ามุมเสียดทานของดินทรายกับผิวเหล็ก (δ) แบบผิวเรียบและผิวขรุขระ

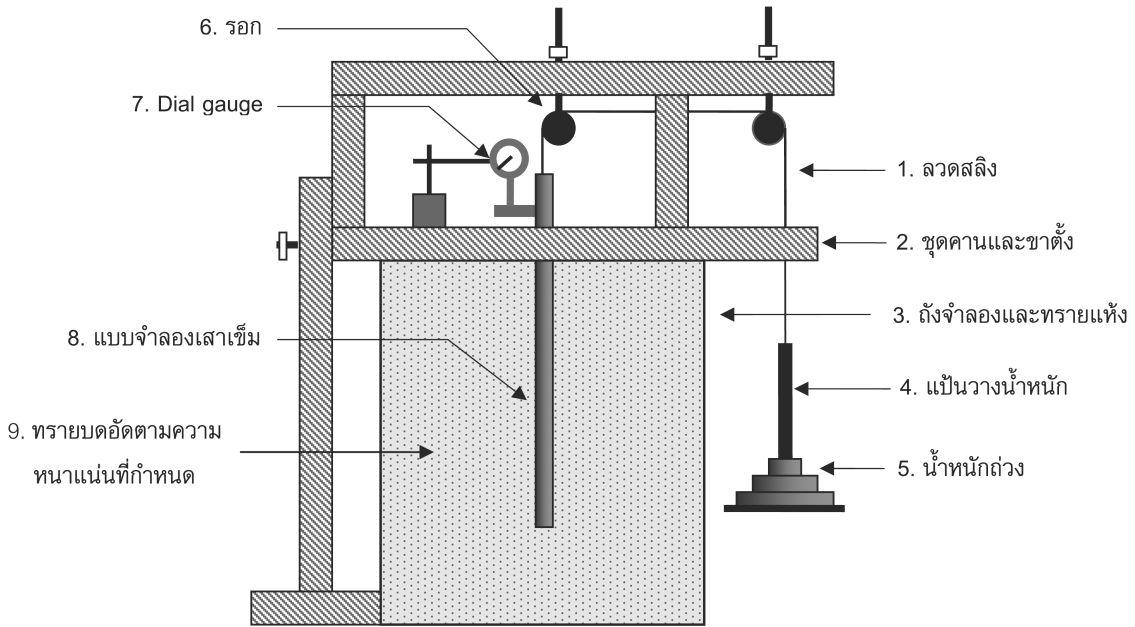
ค่ามุมเสียดทานของดินทรายกับผิวเหล็ก (δ) (องศา)			
เหล็กผิวเรียบ		เหล็กผิวขรุขระ	
ทรายแน่น ($D_r = 80\%$)	ทรายหลวม ($D_r = 25\%$)	ทรายแน่น ($D_r = 80\%$)	ทรายหลวม ($D_r = 25\%$)
$\phi = 43.56$	$\phi = 36.04$	$\phi = 43.56$	$\phi = 36.04$
34.61 (0.79 ϕ)	30.20 (0.88 ϕ)	36.49 (0.84 ϕ)	34.25 (0.95 ϕ)

3. วิธีการวิจัย

การทดสอบเพื่อหาค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุด จะทำการทดสอบในถังกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 65 ซม. ลึก 75 ซม. เพื่อที่จะไม่ให้เกิดอิทธิพลของขอบถึงต่อพฤติกรรมการรับแรงถอนของเสาเข็มเนื่องจากบริเวณที่จะเกิดผลกระทบต่อชั้นดินทรายจากการติดตั้งเสาเข็มและขณะทำการทดสอบอยู่ที่ระยะ 8 - 10 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (d) [3] ในกรณีของทรายแน่นจะเตรียมแบบจำลองชั้นดินทรายโดยใช้ทรายลงในถังที่แบ่งเป็นชั้นๆ แล้วจึงบดอัดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นตามที่ต้องการ ($\rho_d = 1.65 \text{ ก./ซม.}^3$) ส่วนในการทดสอบกรณีของทรายหลวมนั้นจะใช้การโปรยดินทรายผ่านกรวยเป็นชั้นๆ โดยให้ปลายกรวยยกสูงจากผิวชั้นดินประมาณ 2.5 ถึง 3.0 ซม. เพื่อให้ได้ความหนาแน่นตามที่ต้องการ ($\rho_d = 1.47 \text{ ก./ซม.}^3$) การติดตั้งแบบจำลองเสาเข็มจะอาศัยการฝังในชั้นดินทรายตามอัตราส่วนค่าความลึกของการฝังต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/d) ค่าต่างๆ ที่กำหนดไว้ดังแสดงในตารางที่ 4 จากนั้นจึงติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบแรงถอนเข้ากับตัวแบบจำลองเสาเข็มและติดตั้งแสดงในรูปที่ 3 ค่าความสามารถในการรับแรงถอน (Uplift force capacity) ของแบบจำลองเสาเข็มนั้นได้จากการใช้น้ำหนักถ่วงโดยตรงผ่านลวดสลิงที่ใช้รอกช่วยในการเคลื่อนที่ ในการทดสอบได้ทำการวัดการเคลื่อนที่ (displacement) โดยใช้ Dial gauge ซึ่งจะอ่านค่าหลังจากได้ค้ำน้ำหนักถ่วงไว้จนค่าการเคลื่อนที่คงที่ แล้วจึงเพิ่มน้ำหนักถ่วงเพื่อทำการอ่านค่าการเคลื่อนที่ค่าต่อไป ในการทดสอบจะทำการบันทึกค่าการเคลื่อนที่และค่าความสามารถในการรับแรงถอน ซึ่งค่าแรงถอนนี้จะได้จากค้ำน้ำหนักถ่วงที่หักค้ำน้ำหนักของเสาเข็มกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการรับแรงถอนและค่าการเคลื่อนที่ จะสามารถหาค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุด (Ultimate uplift capacity) ได้จากการประยุกต์ใช้วิธีการหาค้ำน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงของเสาเข็มโดยวิธี Modified Mazurkiewicz [4]

ตารางที่ 4 สรุปจำนวนการทดสอบ

กรณีทดสอบ		L/d			
ทรายแน่น ($D_r = 80\%$)	ผิวเรียบ	8	16	24	28
	ผิวขรุขระ	8	16	24	28
ทรายหลวม ($D_r = 25\%$)	ผิวเรียบ	8	16	24	28
	ผิวขรุขระ	8	16	24	28

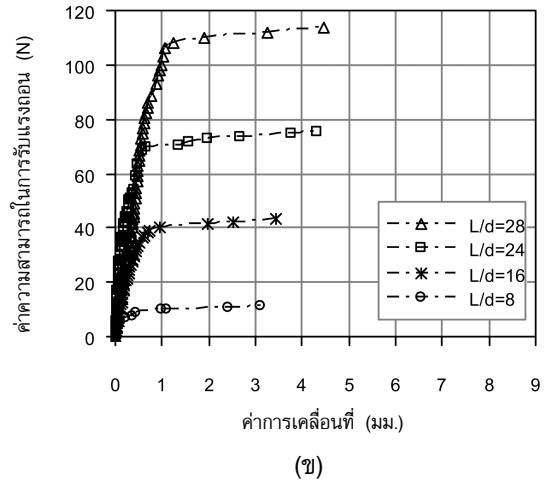
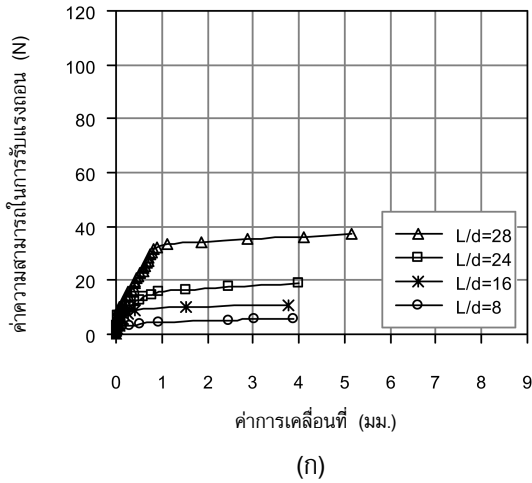


รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาค่าความสามารถในการรับแรงถอน

4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

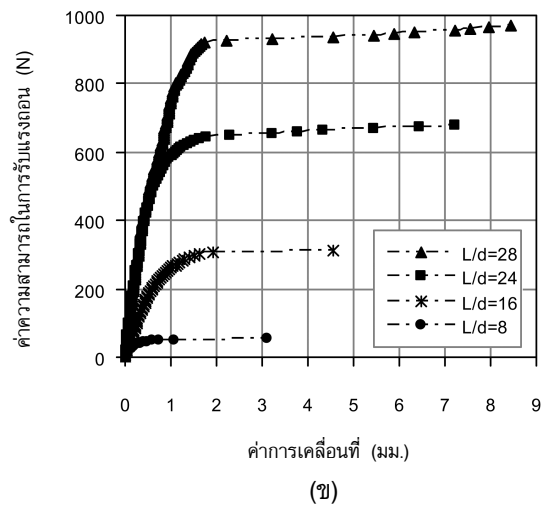
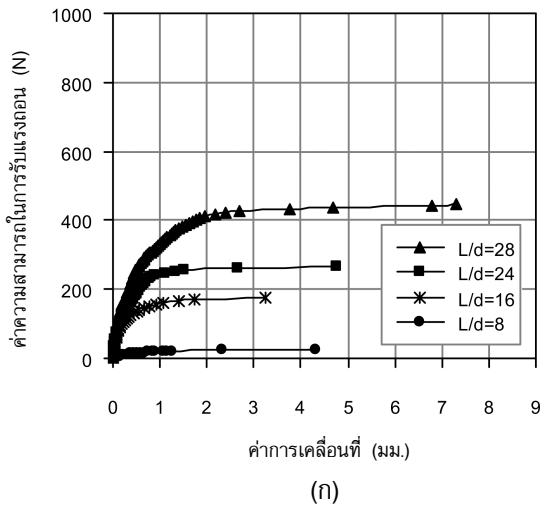
4.1 พฤติกรรมในการรับแรงถอน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการรับแรงถอนกับค่าการเคลื่อนที่ของการทดสอบเสาเข็มเหล็กผิวเรียบและผิวขรุขระในการทดสอบกรณีทรายหลวมและทรายแน่นดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 พบว่าทั้งการทดสอบกรณีทรายหลวมและทรายแน่นค่าความสามารถในการรับแรงถอนของแบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวขรุขระจะมีค่ามากกว่าเสาเข็มเหล็กผิวเรียบเมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความลึกการฝังต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/d) ค่าเดียวกัน และในการทดสอบกรณีทรายแน่นนั้นค่าความสามารถในการรับแรงถอนที่ได้จะมีค่ามากกว่าการทดสอบกรณีทรายหลวม สำหรับแนวโน้มของค่าความสามารถในการรับแรงถอนของการทดสอบกรณีทรายหลวมทั้งแบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวเรียบและผิวขรุขระพบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่ค่าการเคลื่อนที่มีค่าประมาณ 1 มม. หลังจากนั้นค่าก็จะคงที่ มีเพียงค่าการเคลื่อนที่เท่านั้นที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับการทดสอบกรณีทรายแน่นของแบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวเรียบแนวโน้มของค่าความสามารถในการรับแรงถอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่ค่าการเคลื่อนที่มีค่าประมาณ 1 มม. ซึ่งแตกต่างกับแบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวขรุขระที่ค่าความสามารถในการรับแรงถอนจะมีค่าเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่ค่าการเคลื่อนที่ประมาณ 2 มม. หลังจากนั้นค่าจึงคงที่ มีเพียงค่าการเคลื่อนที่เท่านั้นที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการรับแรงดงอนกับค่าการเคลื่อนที่ในการทดสอบกรณีทรายหลวม ($D_r = 25\%$)

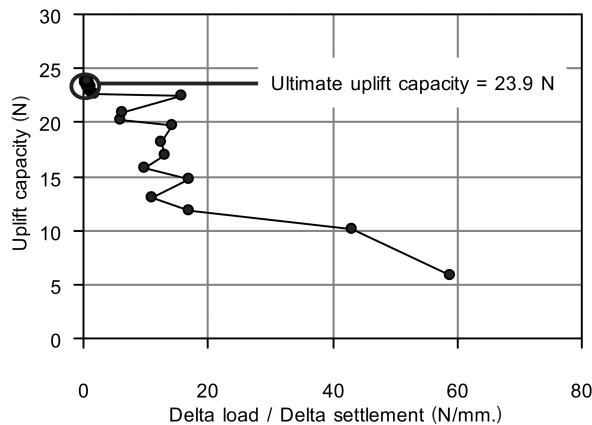
(ก) แบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวเรียบ (ข) แบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวขรุขระ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการรับแรงดงอนกับค่าการเคลื่อนที่ในการทดสอบกรณีทรายแน่น ($D_r = 80\%$)

(ก) แบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวเรียบ (ข) แบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวขรุขระ

จากรูปที่ 4 และรูปที่ 5 นั้นพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการรับแรงถอนและค่าการเคลื่อนที่ไม่แสดงจุดสูงสุด (peak) ของค่าความสามารถในการรับแรงถอนทั้งกรณีของทรายแน่นและทรายหลวม ดังนั้นค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดจึงหาได้ยาก ในงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงของเสาเข็มโดยวิธี Modified Mazurkiewicz [4] โดยทำการแบ่งค่าการเคลื่อนที่ของเสาเข็มออกหลายๆ ค่า ให้ค่าเหล่านี้อยู่ในอนุกรมเลขคณิต จากค่าที่ได้จะทำการลากเส้นตรงไปตัดกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการรับแรงถอนกับการเคลื่อนที่ แล้วลากเส้นมาตัดแกนค่าความสามารถในการรับแรงถอน จากนั้นจึงสร้างกราฟขึ้นมาใหม่โดยกำหนดให้แกน X คือผลต่างของค่าความสามารถในการรับแรงถอนทดสอบในช่วงติดกันหารด้วยผลต่างของค่าการเคลื่อนที่ของเสาเข็มในช่วงที่ติดกัน (Delta load / Delta settlement) และให้แกน Y คือค่าความสามารถในการรับแรงถอนของเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดคือค่าความสามารถในการรับแรงถอนบนแกน Y เมื่อค่าในแกน X มีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์ โดยค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดที่วิเคราะห์ได้จากผลการทดสอบนั้นแสดงดังตารางที่ 5



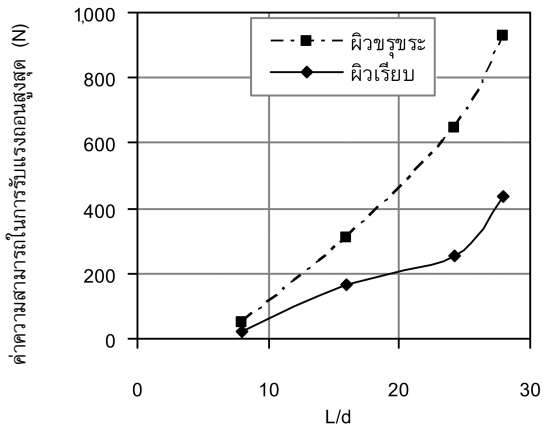
รูปที่ 6 การหาค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดของแบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวเรียบในการทดสอบกรณีทรายแน่นที่มีค่า L/d เท่ากับ 8

ตารางที่ 5 ค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดของแบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวเรียบและผิวขรุขระ

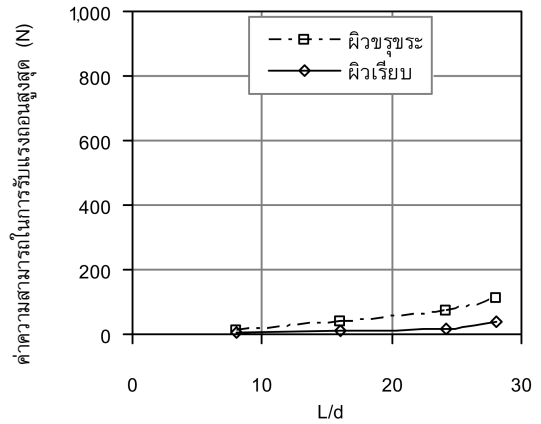
L/d	ค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุด (N)			
	ทรายแน่น ($D_r = 80\%$)		ทรายหลวม ($D_r = 25\%$)	
	ผิวเรียบ	ผิวขรุขระ	ผิวเรียบ	ผิวขรุขระ
8	23.90	51.55	4.56	10.37
16	168.20	310.00	9.89	40.99
24	256.40	648.00	17.84	69.99
28	437.40	926.60	36.25	111.30

4.2 อิทธิพลของพื้นผิวเสาะเข็มและค่าความหนาแน่นของดินทรายต่อพฤติกรรมในการรับแรงถอน

เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของพื้นผิวเสาะเข็มและค่าความหนาแน่นของดินทรายที่มีต่อค่าความสามารถในการรับแรงถอนจึงใช้ค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดที่สามารถคำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 5 ในหัวข้อที่ 4.1 เพื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดกับค่าอัตราส่วนความลึกการฝังต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาะเข็ม (L/d) ของแบบจำลองเสาะเข็มเหล็กผิวเรียบเปรียบเทียบกับผิวขรุขระในการทดสอบกรณีทรายแน่นและทรายหลวม ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนของความลึกการฝังต่อขนาดเสาะเข็ม (L/d) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความลึกการฝัง (L) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นทำให้ค่า Effective stress ที่กระทำต่อแบบจำลองเสาะเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ในการทดสอบกรณีทรายแน่นดังแสดงในรูปที่ 7(ก) นั้นพบว่าค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดของแบบจำลองเสาะเข็มผิวเรียบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อค่า L/d มีค่าน้อยกว่า 24 หลังจากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลองเสาะเข็มผิวขรุขระที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นทันทีเมื่อค่า L/d มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระจะทำให้ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในการทดสอบแบบทรายแน่นนั้น Effective stress ที่กระทำต่อแบบจำลองเสาะเข็มมีค่าค่อนข้างมากจึงทำให้เกิด Interlocking ในร่องที่บาก ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนพังในดินทราย ค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้มีค่ามากกว่าการทดสอบแบบจำลองเสาะเข็มผิวเรียบอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าที่แตกต่างกันนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า L/d มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [5] และ [6] ในการทดสอบกรณีทรายหลวมดังแสดงในรูปที่ 7(ข) นั้นพบว่าค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อค่า L/d มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการทดสอบแบบจำลองเสาะเข็มผิวเรียบและผิวขรุขระในทรายหลวมนั้นแบบจำลองเสาะเข็มสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายเพราะค่า Effective stress มีค่าน้อย จึงไม่เกิด Interlocking เหมือนในแบบจำลองเสาะเข็มผิวขรุขระ ค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดของการทดสอบกรณีทรายแน่นนั้นจะมีค่ามากกว่าการทดสอบกรณีทรายหลวม เนื่องจากการความหนาแน่นที่ใช้ในการทดสอบมีค่ามากกว่าทำให้ค่า Effective stress ที่กระทำต่อแบบจำลองเสาะเข็มในการทดสอบกรณีทรายแน่นมีค่ามากกว่าการทดสอบกรณีทรายหลวม



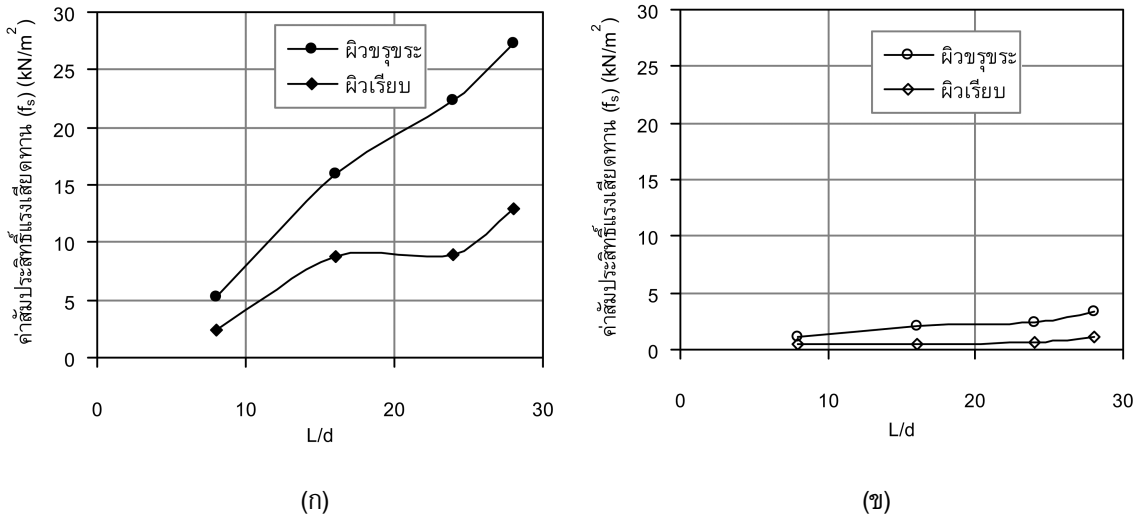
(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดกับค่าอัตราส่วนของความถี่การฝังต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/d) ของเสาเข็มผิวเรียบเปรียบเทียบกับเสาเข็มผิวขรุขระ
(ก) การทดสอบกรณีทรายแน่น (ข) การทดสอบกรณีทรายหลวม

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f_s) กับค่าอัตราส่วนของความถี่การฝังต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/d) โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหาได้จากสมการ $f_s = Q_u / pL$ เมื่อ Q_u คือค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดและ pL คือพื้นที่ผิวของเสาเข็ม ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นในกรณีของเสาเข็มผิวอย่างชัดเจนทั้งในกรณีเสาเข็มผิวเรียบและผิวขรุขระในกรณีของทรายแน่น ดังแสดงในรูป 8 (ก) ส่วนในกรณีของทรายหลวมนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทั้งในกรณีเสาเข็มผิวเรียบและผิวขรุขระ ดังแสดงในรูป 8 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของความหนาแน่นของดินทรายมีผลต่อค่าความสามารถในการรับแรงถอนมากกว่าอิทธิพลของพื้นที่ผิวของเสาเข็มเนื่องจากผลของ Effective stress



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f_s) กับค่าอัตราส่วนของความลึกการฝังต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/d) ของเสาเข็มผิวยุขระเปรียบเทียบกับผิวยุขระ
(ก) การทดสอบกรณีทรายแน่น (ข) การทดสอบกรณีทรายหลวม

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลทดสอบความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุด จะวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการแรงถอนสูงสุดที่ได้จากวิธีการคำนวณที่เสนอโดย [7] กับผลที่ได้จากการทดสอบหาค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุด โดยทำการหาค่าน้ำหนักของแบบจำลองเสาเข็ม โดยสมมุติลักษณะผิวของการเคลื่อนพังเป็นแบบ Cylindrical shear คือให้การเคลื่อนพังเกิดเนื่องจากแรงเฉือนที่ผิวของเสาเข็ม และแรงถอนที่เกิดจะถูกต้านทานโดยน้ำหนักของเสาเข็มและแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็ม การวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดสามารถหาค่าได้โดยอาศัยสมการที่ (1)

$$P_{\text{Unet}} = \pi d \frac{L^2}{2} K \gamma \tan \delta \quad (1)$$

โดย

- P_{Unet} = ค่าความสามารถในการรับแรงถอนสุทธิ
- d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม
- L = ความลึกการฝังของเสาเข็ม
- γ = ค่าหน่วยน้ำหนักประสิทธิผล
- ϕ = ค่ามุมเสียดทานภายในของดินทราย
- K = ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินทางด้านข้าง

ในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินทางด้านข้าง (Coefficient of lateral earth pressure, K) ได้มีการเสนอให้เลือกใช้ค่า K เท่ากับ ค่า K_a ในกรณีที่เสาเข็มอยู่ในทรายหลวมและใช้ค่า K เท่ากับ $\sqrt{K_p}$ ในกรณีที่เสาเข็มอยู่ในทรายแน่น ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$K_a = \frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \quad (2)$$

$$\sqrt{K_p} = \sqrt{\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}} = \sqrt{\tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)} \quad (3)$$

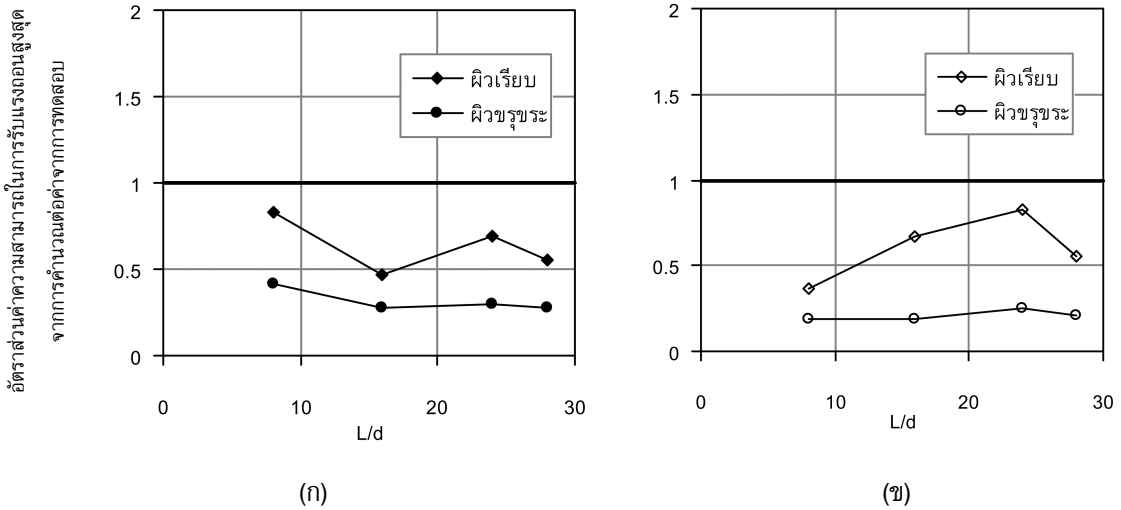
โดยค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดที่ได้จากการคำนวณจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบในกรณีทรายแน่นและทรายหลวมดังแสดงในตารางที่ 6 และตารางที่ 7 ตามลำดับ พบว่าค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดที่ได้จากการคำนวณนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า L/d มีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งแบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวเรียบและผิวขรุขระ เมื่อทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดที่ได้จากการคำนวณต่อค่าที่ได้จากการทดสอบกับค่า L/d ของเสาเข็มผิวเรียบเปรียบเทียบกับเสาเข็มผิวขรุขระ (Ultimate uplift capacity from theory per ultimate uplift capacity from test) กับค่า L/d ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าในการทดสอบกรณีทรายแน่นดังแสดงในรูปที่ 9(ก) นั้นกราฟความสัมพันธ์ในการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มผิวเรียบจะมีค่าในช่วง 0.5 - 0.7 โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า L/d เพิ่มขึ้น สำหรับการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มผิวขรุขระนั้นกราฟความสัมพันธ์จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.3 - 0.4 ซึ่งมีแนวโน้มที่ค่อนข้างคงที่เมื่อค่า L/d มีค่าเพิ่มขึ้น การทดสอบในกรณีทรายหลวมดังแสดงในภาพที่ 9(ข) พบว่ากราฟความสัมพันธ์ในการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มผิวเรียบจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.4 - 0.7 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า L/d มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มผิวขรุขระนั้นนำกราฟความสัมพันธ์จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 - 0.3 ซึ่งมีแนวโน้มที่ค่อนข้างคงที่เมื่อค่า L/d มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการทดสอบในกรณีทรายแน่นและทรายหลวมนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มผิวเรียบมากกว่าแบบจำลองเสาเข็มผิวขรุขระ เนื่องจากการคำนวณที่เสนอโดย [7] มีการสมมุติให้ลักษณะการเคลื่อนพังเกิดที่บริเวณผิวของเสาเข็มซึ่งเหมาะสมกับการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มผิวเรียบ ส่วนในแบบจำลองเสาเข็มผิวขรุขระนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่ค่อนข้างต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบค่อนข้างมาก เพราะลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระในการทดสอบทำให้เกิด Interlocking ซึ่งทำให้ลักษณะของการเคลื่อนพังไม่สอดคล้องกับสมมุติฐานที่เสนอไว้

ตารางที่ 6 ความสามารถในการรับแรงถอนที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ
ในกรณีทรายแน่น ($D_r = 80\%$)

เสาเข็มเหล็กกลม	ค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุด (N)				
	ค่า L/d	8	16	24	28
ผิวเรียบ	ค่าจากการคำนวณ	19.76	79.04	177.08	242.50
	ค่าจากการทดสอบ	23.50	168.20	256.40	437.40
	อัตราส่วน (คำนวณ/ทดสอบ)	0.84	0.47	0.69	0.55
ผิวขรุขระ	ค่าจากการคำนวณ	21.15	84.72	189.81	259.93
	ค่าจากการทดสอบ	51.58	310.00	648.00	926.60
	อัตราส่วน (คำนวณ/ทดสอบ)	0.41	0.27	0.29	0.28

ตารางที่ 7 ความสามารถในการรับแรงถอนที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ
ในกรณีทรายหลวม ($D_r = 25\%$)

เสาเข็มเหล็กกลม	ค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุด (N)				
	ค่า L/d	8	16	24	28
ผิวเรียบ	ค่าจากการคำนวณ	1.65	6.60	14.78	20.24
	ค่าจากการทดสอบ	4.56	9.89	17.84	36.25
	อัตราส่วน (คำนวณ/ทดสอบ)	0.36	0.67	0.83	0.56
ผิวขรุขระ	ค่าจากการคำนวณ	1.93	7.72	17.29	23.68
	ค่าจากการทดสอบ	10.37	40.99	69.99	111.30
	อัตราส่วน (คำนวณ/ทดสอบ)	0.19	0.19	0.25	0.21



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่าความสามารถในการรับแรงถอนสูงสุดที่ได้จากการคำนวณต่อค่าที่ได้จากการทดสอบกับค่า L/d ของเสาเข็มผิวเรียบเปรียบเทียบกับเสาเข็มผิวขรุขระ
(ก) การทดสอบกรณีทรายแน่น (ข) การทดสอบกรณีทรายหลวม

5. สรุปผลการวิจัย

ผลงานวิจัยนี้ได้แสดงถึงอิทธิพลของค่าความหนาแน่นของดินทรายที่มีต่อค่าความสามารถในการรับแรงถอนของแบบจำลองเสาเข็มเหล็ก โดยทำการทดสอบการรับแรงถอนของแบบจำลองเสาเข็มเหล็กผิวเรียบและผิวขรุขระในชั้นดินทรายแน่น ($D_r = 80\%$) และทรายหลวม ($D_r = 25\%$) ที่ค่าอัตราส่วนของความลึกการฝังต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มค่าต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าความหนาแน่นของดินทรายที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการรับแรงถอนของแบบจำลองเสาเข็มในชั้นดินทรายมีค่าเพิ่มขึ้น
2. ค่าอัตราส่วนของความลึกการฝังต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/d) ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการรับแรงถอนมีค่าเพิ่มขึ้น
3. ลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันของแบบจำลองเสาเข็ม (ผิวเรียบและผิวขรุขระ) มีผลต่อค่าความสามารถในการรับแรงถอน โดยแบบจำลองเสาเข็มผิวขรุขระจะมีค่าความสามารถในการรับแรงถอนมากกว่าเนื่องมาจากผลของค่ามุมเสียดทานของดินทรายกับผิวเหล็กมีค่ามากกว่า ในกรณีของแบบจำลองเสาเข็มผิวเรียบ

6. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากค่าความสามารถในการรับแรงถอนขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวของแบบจำลองเสาเข็มกับดินทราย ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการเปลี่ยนชนิดของวัสดุแบบจำลองเสาเข็มและชนิดของเสาเข็ม เช่น เสาเข็มกลวง และเสาเข็มตัน เป็นต้น นอกจากนี้ควรศึกษาถึงอิทธิพลของวิธีการติดตั้งแบบจำลองเสาเข็มด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

1. พัฒนศักดิ์ อบเชย, 2546, “พฤติกรรมของแบบจำลองเสาเข็มในดินทรายที่รับแรงกระทำด้านข้าง”, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
2. Lambe, T.W. and Robert, V.W., 1997, *Soil Mechanics*, SI Version, John Wiley & Sons, New York.
3. Robinsky, E.I. and Morrison, C.F., 1964, “Sand Displacement and Compaction around Model Friction Piles”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 1, No. 2, pp. 81-93.
4. คณะอนุกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพี คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, 2542, *การหาค่าลึกลับบรรทุกน้ำหนักเสาเข็มจากการทดสอบ*, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพมหานคร
5. Dash, B.K. and Pise, P.J., 2003, “Effective of Compressive Load on Uplift Capacity of Model Piles”, *Journal of Geotechnics and Environmental Engineering*, ASCE, November, pp. 987-992.
6. Subba Rao, K.S. and Venkatesh, K.H., 1985, “Uplift Behavior of Short Piles in Uniform Sand”, *Soils and Foundation*, Vol. 25, No. 4, pp. 1-7.
7. Kulhawy, F.H., Kozera, D.W., and Withaim, J.L., 1979, “Uplift Testing of Model Drilled Shafts in Sand”, *Journal of Geotechnics and Environmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, January, pp. 31-47.

