

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัยและการวิเคราะห์

4.1 ผลการศึกษาวิจัยในท้องปฏิบัติการ

4.1.1 การศึกษาค่า Plasticity ของส่วนผสมดินและปูนขาว

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบค่า Plasticity ของดินเมื่อผสมด้วยปูนขาว 3 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง

รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Liquid Limit และ Plastic Limit ของดินเมื่อผสมด้วยปูนขาว 3 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง และรูปที่ 4.2 แสดงค่า Plasticity index ของดินเมื่อผสมด้วยปูนขาว 3 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าค่า Liquid Limit ของดินจะลดลงเล็กน้อยเมื่อผสมด้วยปูนขาวและจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มปริมาณของปูนขาวที่ใช้ผสมขึ้นอีก ค่า Plastic Limit จะเพิ่มขึ้นมากเมื่อผสมด้วยปูนขาวและจะเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเปอร์เซ็นต์ของปูนขาวที่ใช้ผสมเท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณของปูนขาวขึ้นอีก ค่า Plastic Limit จะลดลง

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าค่า Plasticity index ของดินจะลดลงต่ำสุดเมื่อผสมด้วยปูนขาว 6 เปอร์เซ็นต์ คือจะมีค่าเท่ากับ 14.80 จากค่า Plasticity index ของดินเดิม ซึ่งเท่ากับ 41.73 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของปูนขาวขึ้นอีก ค่า Plasticity index จะเริ่มสูงขึ้นอีก

การเปลี่ยนแปลงค่า Plasticity ของดินเมื่อผสมด้วยปูนขาวเกิดจากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินและปูนขาว คือ Ca^{++} ของปูนขาวจะเข้าแทนที่ประจุบวกที่มีอยู่เดิมในดิน

และเกิดการรวมตัวของ Ca^{++} รอบ ๆ อนุภาคของเม็ดดิน ซึ่งเป็นผลให้อนุภาคของเม็ดดินมีการจัดเรียงตัวกันแบบ Flocculation มากขึ้น และการที่ค่า Plasticity index ของส่วนผสมดินหนองงูเห่าและปูนขาวลดลงต่ำสุดเมื่อเปอร์เซ็นต์ของปูนขาวที่ใช้ผสมเท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่า Lime fixation point ของดินหนองงูเห่าเท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่า Plasticity ของดินซึ่งได้ศึกษาไว้เดิม⁽²⁾

เนื่องจากการยากที่จะควบคุมเปอร์เซ็นต์ของปูนขาวให้คงที่ตลอดในการติดตั้งเสาเข็มปูนขาวในสนาม ดังนั้น จึงใช้เปอร์เซ็นต์ของปูนขาวเท่ากับ 6 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ เป็นช่วงที่ให้ค่า Plasticity Index ต่ำ ในการติดตั้งเสาเข็มปูนขาวในสนาม

ตารางที่ 4.1 ค่า Plasticity ของส่วนผสมดินและปูนขาว ทดสอบโดยตัวอย่างดินแห้งจากบริเวณหนองงูเห่าที่ความลึก 1.50-2.00 เมตร

% Lime	Liquid Limit	Plastic Limit	Plasticity index
0	82.66	40.93	41.73
3	81.46	55.30	26.16
4	80.65	58.69	21.96
5	79.10	60.41	18.69
6	76.40	61.60	14.80
7	74.70	59.70	15.00
8	74.50	58.50	16.00
9	73.40	55.30	18.10
10	73.10	54.70	20.40

4.1.2 ผลการศึกษาค่า Vertical permeability (k_v) ของเสาเข็มและดินเดิม

ค่า k_v ของดินเดิมจากการทดสอบโดย Consolidation Test แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าค่า k_v ของดินจะลดลงเมื่อ pressure เพิ่มขึ้น ค่า k_v มีค่าประมาณ 1.35×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาทีเมื่อ pressure เท่ากับ 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และจะลดลงจนมีค่าประมาณ 3.62×10^{-9} เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อ pressure เพิ่มขึ้นเป็น 8.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ในการทดสอบค่า k_v ของเสาเข็มปูนขาว โดยวิธี Consolidation Test ในขณะที่ pressure มีค่าต่ำ คือ 0.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและ 0.62 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตัวอย่างจะทรุดตัวน้อยมากและรวดเร็วมากทำให้ไม่สามารถหาค่า k_v ได้

ค่า k_v ของเสาเข็มปูนขาวแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ค่า k_v ของเสาเข็มปูนขาวจะลดลงเมื่อ pressure เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับดินเดิม ค่า k_v ของเสาเข็มปูนขาวจะมีค่าประมาณ 1.74×10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาทีเมื่อ pressure เท่ากับ 1.26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและจะลดลงจนมีค่าประมาณ 4.79×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาทีเมื่อ pressure เพิ่มขึ้นเป็น 40.30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 อาจเปรียบเทียบค่า k_v ของเสาเข็มปูนขาวและของดินเดิมที่ pressure เดียวกันได้ และพบว่า ค่า k_v ของเสาเข็มปูนขาวจะสูงกว่าค่า k_v ของดินเดิมประมาณ 100-200 เท่า เมื่อกดด้วย pressure เท่ากัน การที่เสาเข็มปูนขาวมีค่า permeability สูงกว่าดินเดิม คาดว่า เนื่องจากปฏิกิริยาของปูนขาวซึ่งทำให้เม็ดดินมีขนาดใหญ่ขึ้น ช่องทางที่น้ำซึมผ่านขยายขึ้น มีผลให้น้ำซึมผ่านได้สะดวกขึ้น

ตารางที่ 4.2 ค่า Vertical permeability ของดินเค็ม

ตัวอย่างที่	ค่า Vertical permeability ($\times 10^{-8}$ ซม./วินาที) ที่ pressure ต่าง ๆ					
	0.25 กก/ซม ² .	0.50 กก/ซม ² .	1.00 กก/ซม ² .	2.00 กก/ซม ² .	4.00 กก/ซม ² .	8.00 กก/ซม ² .
S1	15.0	5.90	2.31	1.54	1.32	0.38
S2	11.9	4.40	2.30	1.03	0.49	0.34
ค่าเฉลี่ย	13.5	5.20	2.30	1.29	0.91	0.36

ตารางที่ 4.3 ค่า Vertical permeability ของเสาเข็มปูนขาว

ตัวอย่างที่	ค่า Vertical permeability ($\times 10^{-8}$ ซม./วินาที) ที่ pressure ต่าง ๆ					
	1.26 กก/ซม ² .	2.52 กก/ซม ² .	5.04 กก/ซม ² .	10.07 กก/ซม ² .	20.15 กก/ซม ² .	40.30 กก/ซม ² .
C1	142	93	81.2	63.0	38.0	4.74
C2	206	129	90.2	77.9	41.0	4.84
ค่าเฉลี่ย	174	111	85.7	70.45	39.5	4.79

4.2 ผลการศึกษาวิจัยในสนาม

ผลการทดสอบดินเค็มและเสาเข็มปูนขาวอายุ 7 วัน, 1 เดือน, 3 เดือน, 6 เดือน และ 9 เดือน แสดงในรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ ผลการทดสอบเสาเข็มปูนขาวยาว 6.00 เมตร, 8.00 เมตร และ 10.00 เมตร ที่อายุต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.13 แสดงแรงพิบัติของเสาเข็มปูนขาวที่อายุต่าง ๆ ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.14 แสดงอัตราส่วนของแรงพิบัติของเสาเข็มปูนขาวต่อแรงพิบัติของดินเค็ม

แรงพิบัติของเสาเข็มปูนขาวตัวอย่างหาโดยวิธีของ Fuller, F.M. และ Hoy, H.E. (1970)⁽¹⁰⁾ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้หาแรงพิบัติของเสาเข็มทั่วไปที่ทดสอบด้วยวิธี Quick Maintain Load Test การหาแรงพิบัติหาจากลักษณะของกราฟ แรงทดสอบเสาเข็ม-ระยะทรุดตัวของหัวเสาเข็ม โดยลากเส้นสัมผัสกับส่วนของกราฟที่เป็นเส้นตรงสองส่วน แรงทดสอบเสาเข็มที่จุดตัดของเส้นสัมผัสทั้งสองถือเป็นแรงพิบัติของเสาเข็ม

จากผลการทดสอบดินเดิมดังแสดงในรูป 4.5 แรงพิบัติของดินเดิมซึ่งทดสอบด้วยแผ่นเหล็กขนาด 20 เซนติเมตร จะเท่ากับ 0.32 ดันหรือ 10.10 ดันต่อตารางเมตร

จากตารางที่ 4.4-4.5 และรูปที่ 4.10 ถึง 4.13 แสดงให้เห็นว่า ปฏิกริยาของดินและปูนขาวในเสาเข็มปูนขาว จะทำให้แรงพิบัติของเสาเข็มปูนขาวเพิ่มสูงกว่าแรงพิบัติของดินเดิม และเพิ่มสูงมากขึ้นเมื่ออายุของเสาเข็มปูนขาวเพิ่มขึ้น แรงพิบัติของเสาเข็มปูนขาว 7 วันทั้ง 3 ดัน (ยาว 6.00 เมตร, 8.00 เมตรและ 10.00 เมตร) มีค่าประมาณ 0.65 ดันหรือ 20.7 ดันต่อตารางเมตรหรือเท่ากับ 2.0 เท่าของแรงพิบัติของดินเดิม ต่อจากนั้นแรงพิบัติของเสาเข็มปูนขาวจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณ 1.79 ดัน หรือ 57 ดันต่อตารางเมตรหรือเท่ากับ 5.6 เท่าของดินเดิมเมื่ออายุของเสาเข็มปูนขาวเท่ากับ 9 เดือน

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ถึง 4.8 แสดงให้เห็นว่า แรงพิบัติและการทรุดตัวของเสาเข็มปูนขาวที่มีอายุเท่ากัน แต่มีความยาวต่างกัน (6.00 เมตร, 8.00 เมตร และ 10.00 เมตร) จะมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้สรุปได้ว่า แรงพิบัติและการทรุดตัวของเสาเข็มปูนขาวตัวอย่างที่ทดสอบจะไม่ขึ้นกับความยาวของเสาเข็ม เนื่องจากการพิบัติที่เกิดขึ้นเป็นการพิบัติที่เสาเข็มปูนขาว ไม่ใช่การพิบัติของดินรอบข้าง

ค่าแรงเสียดทานโดยรอบเสาเข็มปูนขาวอาจคำนวณได้จากสูตร

$$F = \alpha S_u A_p \quad (4.1)$$

เมื่อ	F	เป็นค่าแรงเสียดทานของดินโดยรอบเสาเข็ม
	α	เป็นค่า Adhesion factor
	S_u	เป็นค่า Undrain shear strength ของดิน
	A_p	เป็นพื้นที่โดยรอบของเสาเข็มปูนขาว

ในกรณีของเสาเข็มปูนขาวยาว 6.00 เมตร ค่า A_p จะเท่ากับ 3.77 ตารางเมตร ค่า α अनुโลมใช้ค่าที่ได้จากผลการทดสอบของ ศาสตราจารย์ ดร. ชัย มุกตพันธุ์ (1971)⁽¹⁹⁾ เกี่ยวกับค่าแรงเสียดทานของเสาเข็ม เจาะคอนกรีตในดินกรุงเทพฯ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.75 และค่า S_u ของดินที่วัดโดย Field Vane Test ในบริเวณหนองงูเห่าเฉลี่ยตั้งแต่ 1.00-6.00 เมตร จะมีค่าเท่ากับ 1.66 ดันต่อตารางเมตร

เมื่อแทนค่าในสูตร 4.1 จะได้ค่าแรงเสียดทานของดินเท่ากับ 4.69 ดัน สูงกว่าแรงพิบัติของเสาเข็มปูนขาวยาว 6.00 เมตร อายุ 9 เดือน ซึ่งวัดได้เท่ากับ 1.75 ดัน ประมาณ 2.6 เท่า แสดงให้เห็นว่า การพิบัติที่เกิดขึ้นเป็นการพิบัติที่เสาเข็มปูนขาว

ส่วนผลการทดสอบที่มีค่าแตกต่างกันไปบ้าง เข้าใจว่าเกิดจากวิธีการติดตั้งเสาเข็มปูนขาวตัวอย่าง ซึ่งไม่สามารถทำให้เสาเข็มปูนขาวมีคุณภาพคงที่ทุกคัน และบางส่วนอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนขณะทดสอบเสาเข็ม

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า กำลังรับแรงของเสาเข็มปูนขาวจะเพิ่มขึ้นช้าเมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนขาวในบริเวณชั้นผิวดิน สาเหตุสำคัญ เข้าใจว่า เนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มปูนขาวตามการวิจัยนี้ กระทำในขณะที่ดินมี Natural water content ซึ่งมีค่าสูงมาก และปูนขาวที่ใช้ผสมอยู่ในลักษณะของเหลว ส่วนการปรับปรุงเสาเข็มปูนขาวที่ผิวดินจะกระทำที่ Optimum water content และปูนขาวที่ผสมอยู่ในลักษณะ เป็นผงแห้ง

ตารางที่ 4.4 แรงพิบัติของเสาเข็มปูนขาวตัวอย่างที่อายุต่าง ๆ

อายุของเสาเข็ม	แรงพิบัติของเสาเข็มปูนขาว (ตัน)		
	เสาเข็มยาว 6.00 เมตร	เสาเข็มยาว 8.00 เมตร	เสาเข็มยาว 10.00 เมตร
7 วัน	0.64	0.67	0.65
1 เดือน	0.86	0.85	0.84
3 เดือน	1.20	1.17	1.29
6 เดือน	1.51	1.69	1.58
9 เดือน	1.75	1.76	1.86

หมายเหตุ แรงพิบัติของดินเดิมเท่ากับ 0.32 ตัน

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนแรงพิบัติของเสาเข็มปูนขาวต่อแรงพิบัติของดินเดิม

อายุของเสาเข็ม	แรงพิบัติของเสาเข็มปูนขาวต่อแรงพิบัติของดินเดิม (เท่า)		
	เสาเข็มยาว 6.00 เมตร	เสาเข็มยาว 8.00 เมตร	เสาเข็มยาว 10.00 เมตร
7 วัน	2.00	2.09	2.03
1 เดือน	2.67	2.66	2.63
3 เดือน	3.75	3.66	4.03
6 เดือน	4.72	5.28	4.94
9 เดือน	5.47	5.50	5.81