

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดินขยายตัวที่ปรับปรุงคุณภาพ

Soil-Water Characteristic Curves and Empirical Models for Stabilized Expansive Soils

คุณมาศ พันธุเตชะ

Koonnamas Punthutaecha

สำนักบำรุงรักษาและอำนวยความสะดวกยานทาง กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม

เลขที่ 301 ถนนพหลโยธิน แขวงอนุสาวรีย์ชัย เขตบางเขน กทม. 10220

โทร. 0-2972-9548 ต่อ 127 โทรสาร 0-2972-9319

E-mail: koonnamas@yahoo.com

เทียม เจนงามกุล

Thiem Jenngamkul

สำนักบำรุงรักษาและอำนวยความสะดวกยานทาง กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม

เลขที่ 301 ถนนพหลโยธิน แขวงอนุสาวรีย์ชัย เขตบางเขน กทม. 10220

โทร. 0-2972-9548 ต่อ 102 โทรสาร 0-2972-9319

E-mail: maintenance.dor@mot.go.th

วิชัย วงศ์ศิริวิเศษสุข

Wichai Wongsiriwisesussuke

สำนักบำรุงรักษาและอำนวยความสะดวกยานทาง กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม

เลขที่ 301 ถนนพหลโยธิน แขวงอนุสาวรีย์ชัย เขตบางเขน กทม. 10220

โทร. 0-2972-9548 ต่อ 128 โทรสาร 0-2972-9319

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอและทำการวิเคราะห์กราฟแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำ (Soil-Water Characteristics Curve, SWCC) ที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างดินขยายตัวสองชนิดด้วยชุดเครื่องมือทดสอบที่เรียกว่า Pressure Plate โดยได้ทำการทดสอบตัวอย่างดินทั้งแบบที่มีการปรับปรุงคุณภาพและไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ นอกจากนี้ยังได้หาค่าคงตัวในแบบจำลอง SWCC ซึ่งวิเคราะห์โดยอาศัยสมการของ Fredlund, Xing, and Huang ร่วมกับการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณโดยอาศัยคุณสมบัติพื้นฐานของดินและคุณสมบัติของตัวปรับปรุงคุณภาพเป็นสำคัญ ผล

การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหกดัวแปรสำหรับตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียวและตัวแปรอิสระแปดตัวแปรสำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และใยสังเคราะห์ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูง อีกทั้ง Volumetric Water Contents ที่ได้จากการทำนายด้วยความสัมพันธ์ดังกล่าวให้ผลการคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 20\%$ สำหรับตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และให้ผลการคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 15\%$ สำหรับตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และใยสังเคราะห์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง อันเป็นสิ่งที่ใช้

RECEIVED 24 March, 2005

ACCEPTED 7 September, 2005

ยืนยันถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่สมมุติขึ้นต่อค่าคงตัว
ในแบบจำลอง SWCC อย่างมีเหตุผล

Abstract

In this paper, the soil-water characteristic curves (SWCC) of two expansive soils, both in natural and stabilized condition, were measured using the pressure plate apparatus, are presented and analyzed. The model constants for the SWCC obtained by analyzing the Fredlund, Xing, and Huang equation were correlated via multiple linear regression analysis with basic soil properties and other different stabilizer properties to determine the uniqueness of the data. The analysis showed that correlations with six and eight independent parameters provide high correlation coefficients for ash and ash-fiber treated soils, respectively. The comparisons between the predicted and measured volumetric water contents are within $\pm 20\%$ for isolated or ash treated soils, and within $\pm 15\%$ for combined ash and fiber treated soils. The analysis proved that the assumed independent parameters provide a reasonable representation of expansive soils and stabilizer variables that influence the SWCC model constants.

1. บทนำ

ดินขยายตัวเป็นดินที่พบอยู่ทั่วไปในเขตพื้นที่แห้งแล้งหรือกึ่งแห้งแล้ง ดังเช่น ออสเตรเลีย แคนาดา จีน อินเดีย อิสราเอล แอฟริกาใต้ และสหรัฐอเมริกา โดยส่วนใหญ่จะมีค่าดัชนีพลาสติก (PI) ปานกลางถึงสูง มีความแข็งแรงต่ำถึงปานกลาง และมีค่าการหดตัวและขยายตัวสูง ซึ่งก่อให้เกิดการแตกร้าวของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ข้างบน [1, 12]

อย่างไรก็ตามการจะเลี้ยงที่จะทำการก่อสร้างบนพื้นที่ดังกล่าวเป็นไปได้ยากโดยเฉพาะ โครงสร้าง

สาธารณูปโภคขนาดใหญ่ ด้วยเหตุนี้วิศวกรปฐพีจึงเริ่มให้ความสนใจมากขึ้นต่อการศึกษาพฤติกรรมของดินขยายตัวทั้งในระดับจุลภาคและมหภาค [1,2,5-8,10,12,15,17]

ในระดับมหภาคจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน คุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่ออธิบายพฤติกรรมและทำนายผลที่คาดว่าจะเกิดขึ้นสำหรับดินที่ปรับปรุงคุณภาพและไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ สำหรับในระดับจุลภาคจะเป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคของดิน น้ำ และอากาศในการวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น โดยอาศัยกราฟแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Matric Suction และ Volumetric Water Content อันเป็นที่รู้จักกันดีในนาม กราฟแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำ (SWCC: Soil-Water Characteristic Curve) ที่กล่าวถึงในกลศาสตร์ของดินไม่อิมตัวด้วยน้ำ [4]

แม้ว่าการศึกษาวิจัยในเรื่องของ SWCC จะมีเพิ่มขึ้นมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา แต่เป็นการศึกษาดินธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ และแทบจะไม่มีการศึกษาในส่วนของการปรับปรุงคุณภาพ ดังนั้นในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอ SWCC ของดินธรรมชาติและดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพที่ได้จากบริเวณพื้นที่ในเขตมรสุมที่กษัตติ์ปรับปรุงคุณภาพที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นการปรับปรุงโดยใช้ซีเมนต์ และกลุ่มที่สองเป็นการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ซีเมนต์ร่วมกับเส้นใยสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยแบบจำลองของ Fredlund et al [3] ร่วมกับการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ อีกทั้งได้อธิบายพฤติกรรมของดินที่เกิดขึ้นหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วย SWCC.

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

กราฟแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำ (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content (θ_v) และ Matric Suction [3] โดยคำนึงถึง Volumetric Water Content หมายถึง สัดส่วนของปริมาตรน้ำต่อปริมาตรทั้งหมด และ Matric Suction

หมายถึง ค่าความแตกต่างของแรงดันอากาศกับแรงดันน้ำในดิน

SWCC สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่เป็นการทดสอบที่ใช้เวลามาก อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายสูง ด้วยเหตุนี้จึงมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาจำนวนมากเพื่อใช้ในการประมาณ SWCC แทนการทดสอบ โดยสามารถใช้ได้กับดินธรรมชาติเท่านั้น [16] ซึ่งสามารถจัดแบ่งกลุ่มตามตัวแปรที่ปรากฏในแบบจำลอง ดังเช่น กลุ่มของแบบจำลองสองตัวแปร กลุ่มของแบบจำลองสามตัวแปร เป็นต้น ดังสรุปไว้ในบทความของ Leong [9,16]

ในจำนวนแบบจำลองที่มีนั้น แบบจำลองของ Fredlund et al [3] จัดได้ว่าเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากที่สุด อีกทั้งยังครอบคลุม Matric Suction ในช่วง 0 ถึง 10^6 kPa ซึ่งเพียงพอกับดินธรรมชาติทุกชนิด [9,18] ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\theta_v = \frac{\theta_s}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right]^m} \quad (1)$$

โดยที่ θ_v คือ Volumetric Water Content, θ_s คือ Volumetric Water Content ที่ ค่า Matric Suction เท่ากับ 0 kPa, ψ คือ matric suction, a , m , และ n คือ ค่าคงตัว และ e คือ อัตราส่วนช่องว่างในดิน

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ดินที่นำมาทดสอบ 2 ชนิด เป็นดินธรรมชาติที่นำมาจากบริเวณพื้นที่ทางใต้ของเมืองอาร์ลิงตัน (A) และพื้นที่ของสนามบินนานาชาติดัลลาส-ฟอร์ตเวิร์ด (D) ในมลรัฐเท็กซัส ซึ่งเป็นดินที่มีค่าความแข็งแรงต่ำ และแสดงการขยายตัวและหดตัวสูง คุณสมบัติทางกายภาพของดินทั้งสองชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดิน A และ D

คุณสมบัติ	ชนิดของดิน	
	A	D
Specific Gravity	2.46	2.65
Liquid Limit (%)	44	50
Plastic Limit (%)	22	18
Plasticity Index (%)	22	32
USCS Classification	CL	CL

ตัวปรับปรุงคุณภาพดินได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของซีเมนต์อันประกอบด้วย เถ้าลอยชนิดเอฟ 1 (F1) ที่ได้จาก Mohave plant และเถ้าลอยชนิดเอฟ 2 (F2) กับ เถ้าแกลบ (B) ที่ได้จาก Monticello plant ในมลรัฐเท็กซัส คุณสมบัติทางเคมีของซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอย (F1)	เถ้าลอย (F2)	เถ้าแกลบ (B)
SiO ₂	54.8	63.0	21 - 60
Al ₂ O ₃	22.3	19.7	10 - 37
CaO	9.8	7.4	0 - 22
SO ₃	0.6	0.1	N/A
Fe ₂ O ₃	5.1	4.9	5 - 37
MgO	-	1.6	0 - 4

หมายเหตุ: N/A = Not Available

สำหรับกลุ่มที่สองเป็นกลุ่มของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์อันประกอบด้วย Polypropylene (PP) และ Nylon (N) เส้นใยสังเคราะห์ทั้งสองชนิดจะถูกนำมาใช้ในการเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงในดิน คุณสมบัติต่างๆ ของเส้นใยสังเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 จากตารางจะพบว่าเส้นใยทั้งสองชนิดสามารถรับแรงดึงได้สูง มีจุดหลอมเหลวสูง ทนต่อสารเคมีและสภาวะที่เป็นกรดได้

คือ อีกทั้งยังทนต่อรังสีอุลตราไวโอเลต แต่มีสถานะเป็น
ตัวนำความร้อนที่ไม่ดี

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของโพลีเอทิลีนที่ใช้ในการศึกษา

คุณสมบัติ	ชนิดของโพลีเอทิลีน	
	PP	N
Tensile Strength, MPa	669	910-980
Young's Modulus, MPa	4020	5175
Melting Point, °C	165	224
Chemical Resistance	Excellent	Good
Alkali Resistance	Excellent	Excellent
Acid Resistance	High	Good
Ultraviolet Resistance	-	Excellent
Thermal Conductivity	-	Low
Absorption, %	None	4-5
Specific Gravity	0.91	1.10

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้พิจารณาสัดส่วนของตัว
ปรับปรุงคุณภาพในอัตราส่วนต่างๆ กันดังแสดงในตารางที่
4 และ 5 โดยแต่ละสัดส่วนมีตัวอย่างที่ใช้ถึง 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4 สัดส่วนของซีเมนต์ที่ใช้สำหรับดินที่ปรับปรุงด้วย
ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

ตัวปรับปรุงคุณภาพ	อัตราส่วนผสม (% โดยน้ำหนักดินแห้ง)
เถ้าลอย (F1)	0, 10, 15, 20
เถ้าลอย (F2)	0, 10, 15, 20
เถ้าแกลบ (B)	0, 10, 15, 20

3.2 การทดสอบวัดแรงดันในการขยายตัว

การทดสอบวัดแรงดันในการขยายตัว (Swell Pressure) ได้ประยุกต์มาจากการทดสอบการยุบอัดตัว (Consolidation Test) ตามมาตรฐาน ASTM D-4546 ตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มม. และมีความสูง 24.5 มม. ซึ่งได้จากการบดอัดจนมีระดับ

ความหนาแน่นแห้งสูงสุด หลังจากการบดอัด ตัวอย่างดิน
ทั้งหมดจะถูกนำไปรักษาไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ 25°
และมีความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 14 วัน ใน
การทดสอบจะมีการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อตัวอย่างดินอย่าง
ต่อเนื่อง เพื่อรักษาค่าความเครียดที่อ่านจากตัววัดให้มีค่า
เท่ากับศูนย์เสมอ น้ำหนักสุดท้ายที่ได้หลังจากไม่พบการ
เปลี่ยนแปลงของตัววัดแต่อย่างใด จะถูกนำมาคำนวณและ
แปลงค่าเป็น “แรงดันในการขยายตัวของดิน”

ตารางที่ 5 สัดส่วนของตัวปรับปรุงคุณภาพที่ใช้สำหรับดิน
ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และโพลีเอทิลีน

ตัวปรับปรุงคุณภาพ	อัตราส่วนผสม (% โดยน้ำหนักดินแห้ง)	
	A	D
F1+P	14.0 + 0.3	19.0 + 0.3
F1+N	14.0 + 0.4	19.0 + 0.5
F2+P	14.0 + 0.3	15.0 + 0.3
F2+N	14.0 + 0.4	15.0 + 0.5
B+P	18.0 + 0.3	19.0 + 0.3
B+N	18.0 + 0.4	19.0 + 0.5

หมายเหตุ: อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยและโพลีเอทิลีนที่แสดงใน
ตารางได้จาก Optimum Analysis [13]

3.3 การทดสอบหา SWCC

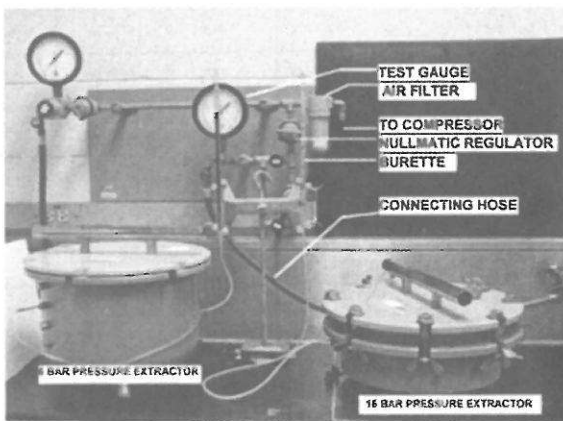
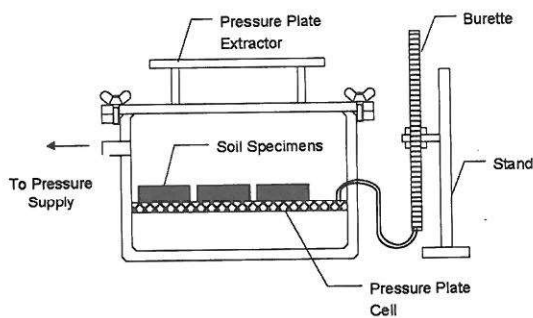
ในการทดสอบด้วย Pressure Plate Setup ดัง
แสดงในรูปที่ 1 เพื่อหา SWCC เป็นไปตามมาตรฐาน
ASTM D2325-2000 ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบมี
ขนาดและเตรียมได้เช่นเดียวกับการทดสอบวัดแรงดันใน
การขยายตัวในหัวข้อที่ 3.2 อย่างไรก็ตามก่อนทำการ
ทดสอบตัวอย่างดินเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมงต้อง
นำตัวอย่างดินทั้งหมดไปแช่น้ำเพื่อให้ดินมีสภาพอิ่มตัวด้วย
น้ำ

การทดสอบเริ่มด้วยการนำตัวอย่างดินวางบน
Pressure Plate Cell (รูปที่ 2) ที่มีสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ
เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน หลังจากปิดฝาครอบทำการเพิ่ม
แรงดันอากาศจนถึงระดับที่ต้องการและคงสภาพระดับ

ความดันไว้จนกว่าตัวอย่างดินจะอยู่ในสภาวะสมดุล โดยสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใน Burette ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง แสดงว่าตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบอยู่ในสภาวะสมดุล หลังจากเสร็จสิ้นการทดสอบนำตัวอย่างดินไปหาปริมาณความชื้นในดินเพื่อใช้ในการคำนวณหา Volumetric Water Content ดังสมการที่ 2

$$\theta_v = \frac{wG_m}{1+e} \quad (2)$$

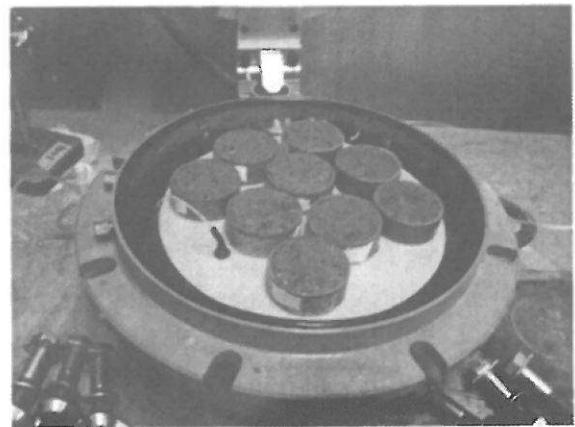
โดยที่ θ_v คือ Volumetric Water Content, w คือ ปริมาณความชื้นในดิน, G_m คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินและ e คือ อัตราส่วนช่องว่างในดิน



รูปที่ 1 Schematic diagram of pressure plate device and pressure plate setup in laboratory

กระบวนการทดสอบจะกระทำซ้ำโดยการเปลี่ยนระดับแรงดันอากาศในช่วง 0 ถึง 1000 kPa จนกระทั่ง

สามารถนำผลที่ได้มาแสดงเป็นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำ (SWCC) อย่างไรก็ตามการทดสอบหา SWCC ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ไม่ได้ทำการทดสอบตัวอย่างดินที่ผสมด้วยใยสังเคราะห์โดยปราศจากซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ใยสังเคราะห์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเพียงอย่างเดียวไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีอันนำมาซึ่งการเปลี่ยนแปลงอนุภาคและการกระจายตัวของตัวอย่างดิน [11]



รูปที่ 2 ตัวอย่างดินบน Pressure Plate Cell

3.4 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณถูกนำมาใช้สำหรับการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรคงที่ (a , n , และ m) ในแบบจำลองของ Fredlund et al [3] และตัวแปรอิสระ (คุณสมบัติของดินและตัวปรับปรุงคุณภาพดังแสดงในตารางที่ 6) โดยแสดงในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ 3 ถึง 5 อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณไม่สามารถระบุได้ว่าตัวแปรทั้งสองชุดมีความสัมพันธ์มากหรือน้อย ด้วยเหตุนี้จึงได้นำสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r_{xy}) ดังสมการที่ 6 มาใช้เพื่อเป็นการชี้วัดถึงระดับความสัมพันธ์ สำหรับในทางปฏิบัติการที่จะพิจารณาว่าตัวแปรคงที่กับตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์มาก ค่า r_{xy} จะมีค่าเข้าใกล้ 1 สำหรับค่า r_{xy} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันน้อย

$$\ln a = C_{0(a)} + C_{1(a)}X_{1(a)} + \dots + C_{k(a)}X_{k(a)} \quad (3)$$

$$\ln n = C_{0(n)} + C_{1(n)}X_{1(n)} + \dots + C_{k(n)}X_{k(n)} \quad (4)$$

$$m = C_{0(m)} + C_{1(m)}X_{1(m)}^3 + \dots + C_{k(m)}X_{k(m)}^3 \quad (5)$$

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (6)$$

โดยที่ $C_{0(a)}, C_{1(a)}, \dots, C_{k(a)}, C_{0(n)}, C_{1(n)}, \dots, C_{k(n)}, C_{0(m)}, C_{1(m)}, \dots, C_{k(m)}$ คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ, k คือ จำนวนของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการวิเคราะห์, x คือ ตัวแปรอิสระในที่นี้หมายถึงคุณสมบัติของดินและตัวปรับปรุงคุณภาพ, และ y คือ ค่าคงตัว (a, n , และ m)

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของดินและตัวปรับปรุงคุณภาพที่ใช้เป็นตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์การถดถอย

วิธีการปรับปรุงคุณภาพ	คุณสมบัติ
การปรับปรุงคุณภาพด้วยจี้เถ้า	$w, \gamma_{dry}, w_L, w_p, D_A, S_A$
การปรับปรุงคุณภาพด้วยจี้เถ้าและใยสังเคราะห์	$w, \gamma_{dry}, w_L, w_p, D_A, S_A, D_F, S_F$

หมายเหตุ: w = Optimum Moisture Content, γ_{dry} = Maximum Dry Unit Weight, w_L = Liquid Limit, w_p = Plastic Limit, D_A = Ash Proportion (% per dry weight of soil), S_A = Ash Types, D_F = Fiber Proportion (% per dry weight of soil), S_F = Fiber Types

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

4.1 ผลการทดสอบหา SWCC

ผลการทดสอบจากชุดทดสอบ Pressure Plate ถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองของ Fredlund et al [3] เพื่อแสดงกราฟลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3 ถึง 7 (กราฟอื่นๆ สามารถดูได้จาก Punthutaecha [13]) จากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้สามารถหาค่าคงตัว (a, n , and m) ในแบบจำลองได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7 และ 8

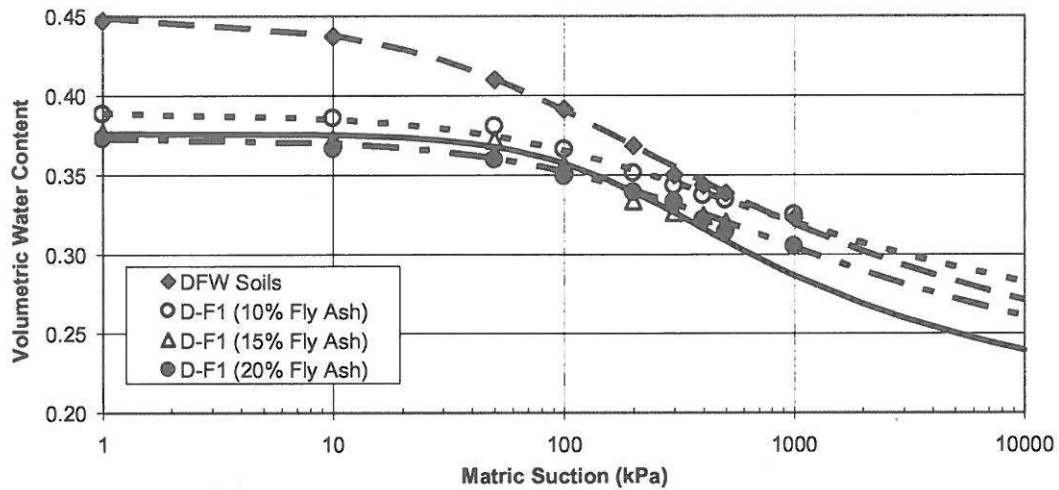
ตารางที่ 7 ค่าคงตัวของตัวแปร a, n , และ m ของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยจี้เถ้า

ตัวอย่าง	a	n	m	r
D	45	0.90	0.32	0.99
DF1-10	90	0.90	0.22	0.98
DF1-15	130	1.35	0.26	0.99
DF1-20	130	0.90	0.26	0.99
DF2-10	210	1.50	0.18	0.99
DF2-15	220	1.60	0.32	0.99
DF2-20	230	1.05	0.27	0.94
DB-10	180	1.70	0.27	0.97
DB-15	70	1.20	0.25	0.96
DB-20	60	1.10	0.26	0.95
A	100	1.60	0.28	0.99
AF1-10	120	1.80	0.27	0.96
AF1-15	150	1.20	0.30	0.97
AF1-20	190	1.60	0.27	0.94
AF2-10	250	1.50	0.53	0.98
AF2-15	70	1.44	0.31	0.99
AF2-20	75	1.60	0.18	0.98
AB-10	240	1.20	0.53	0.99
AB-15	129	1.44	0.31	0.99
AB-20	100	1.60	0.18	0.96

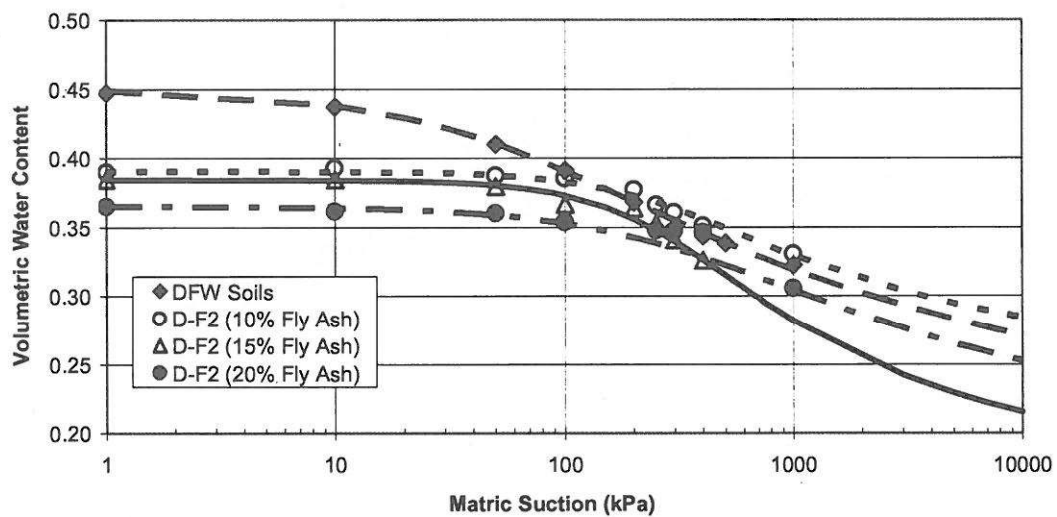
หมายเหตุ: r = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

จากตารางที่ 7 และ 8 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่ามากกว่า 0.9 ซึ่งแสดงว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและแบบจำลองของ Fredlund et al [3] มีความสัมพันธ์กันมาก ซึ่ง สามารถสรุปได้ดังนี้

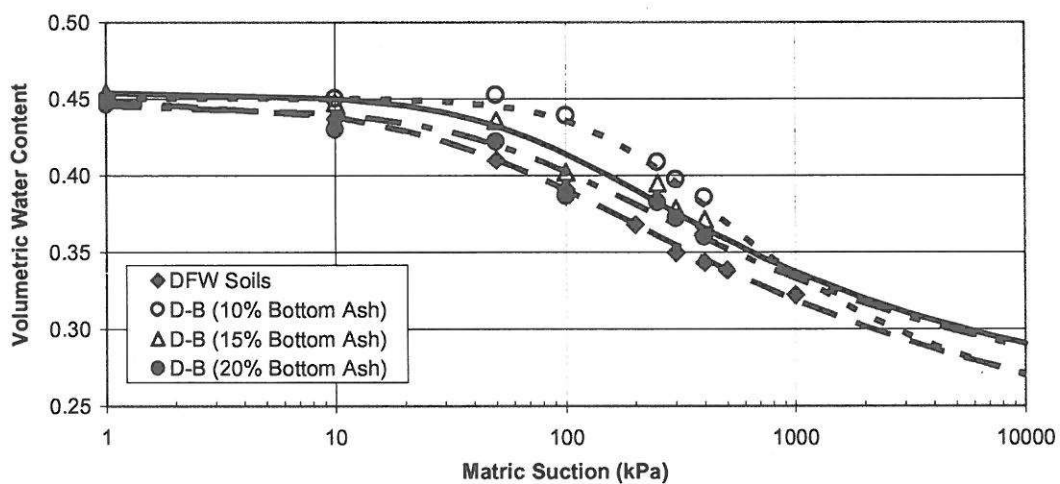
1. ดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย ค่า Volumetric Water Content (θ_v) มีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนปริมาณเถ้าลอยมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพราะขนาดอนุภาคของเถ้าลอยมีขนาดเล็กมากจนสามารถเข้าไปแทนที่ช่องว่างที่มีอยู่ในดิน ยังผลให้ไม่สามารถคงปริมาณน้ำในดินได้เช่นเดิม



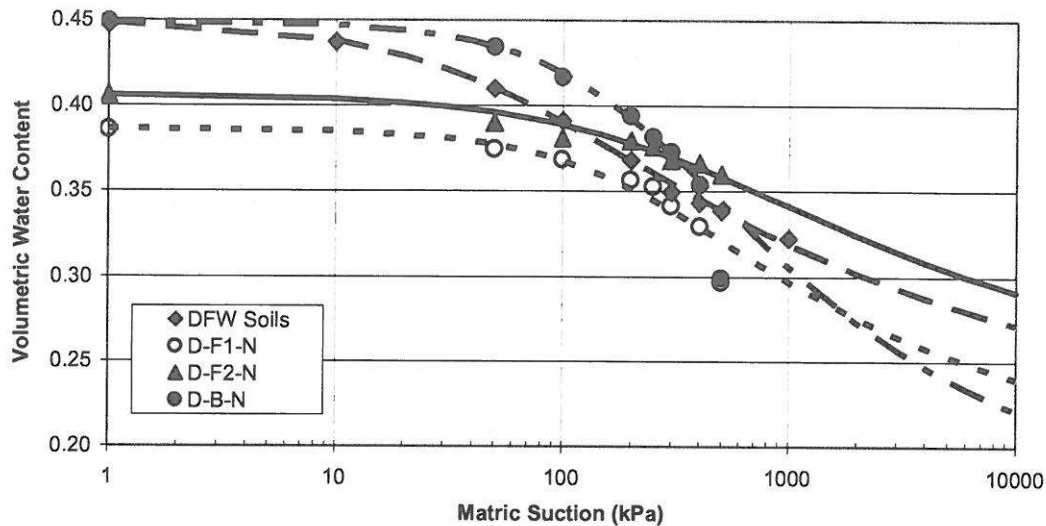
รูปที่ 3 Soil-Water Characteristic Curves สำหรับตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย F1



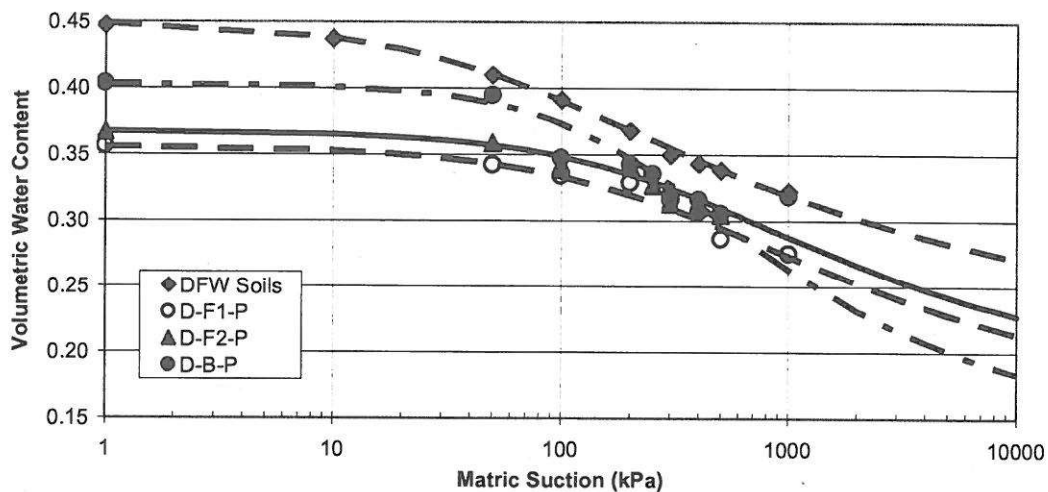
รูปที่ 4 Soil-Water Characteristic Curves สำหรับตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย F2



รูปที่ 5 Soil-Water Characteristic Curves สำหรับตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าแกลบ



รูปที่ 6 Soil-Water Characteristic Curves สำหรับตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และ Nylon



รูปที่ 7 Soil-Water Characteristic Curves สำหรับตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และ Polypropylene

2. การเปลี่ยนแปลงของค่า Volumetric Water Content (θ_v) ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าแกลบมีลักษณะเช่นเดียวกับเถ้าลอย แต่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ทั้งนี้เพราะขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบมีขนาดใหญ่กว่าเถ้าลอย แต่ยังคงเล็กกว่าอนุภาคดินแม้ว่าบางส่วนจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าดิน ซึ่งยังคงช่วยลดช่องว่างในดิน

3. Air Entry Value สำหรับดินที่ปรับปรุงคุณภาพมีค่าสูงกว่าดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ อย่างไรก็ตามการที่ค่า Air Entry Value ในดินที่ปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นนี้เนื่องจากยังผสมเถ้าแกลบมากเท่าไร ส่วนของวัสดุที่ใหญ่ก็

มากขึ้นตามอันส่งผลให้ช่องว่างมีมากขึ้นแต่ยังคงน้อยกว่าดินปกติที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

4. ค่าคงตัว n มีค่าตั้งแต่ 0.9 ถึง 1.8 แต่โดยส่วนใหญ่มีค่าในช่วง 1.0 โดยทั่วไปค่าคงตัว n สามารถบ่งบอกถึงลักษณะการกระจายตัว ซึ่งถ้า n มีค่ามากแสดงว่ามีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแบบ Uniform มาก

5. ค่าคงตัว m เป็นตัวบ่งบอกถึงความสมมาตรของกราฟความสัมพันธ์ ดังนั้นค่า m ที่มีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงถึงกราฟมีความชันปานกลาง สำหรับ m มีค่ามากกว่า 1.2 จะมีความชันของกราฟค่อนข้างมาก สำหรับดินที่ปรับปรุงคุณภาพค่า m อยู่ระหว่าง 0.18 ถึง 0.32

ตารางที่ 8 ค่าคงที่ของตัวแปร a, n, และ m ของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และโยสัเคราะห์

ตัวอย่าง	a	n	m	r
DF1P	200	0.90	0.40	0.98
DF2P	210	1.00	0.35	0.98
DBP	180	1.20	0.50	0.88
DF1N	170	1.20	0.30	0.95
DF2N	195	0.90	0.26	0.97
DBN	180	1.20	0.45	0.96
AF1P	200	0.70	0.30	0.99
AF2P	150	0.90	0.33	0.94
ABP	150	1.35	0.30	0.97
AF1N	240	1.00	0.25	0.82
AF2N	210	1.30	0.30	0.96
ABN	180	1.20	0.40	0.97

หมายเหตุ: r = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

6. ค่า Volumetric Water Content ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และโยสัเคราะห์ มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับดินธรรมชาติ แต่ค่าที่ลดลงนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนของซีเมนต์ ซึ่งหมายความว่าโยสัเคราะห์นั้นไม่มีผลกับค่า Volumetric Water Content แต่อย่างใด

4.2 ผลการทดสอบวัดแรงดันในการขยายตัว

ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันในการขยายตัวแสดงไว้ในตารางที่ 9 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยชนิดเพอช่วยในการลดแรงดันในการขยายตัวจากดินธรรมชาติในปริมาณ 61% ถึง 72% สำหรับเถ้ากลบช่วยลดแรงดันลงถึง 54% ถึง 58% ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบหา SWCC

4.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

จากตารางที่ 10 ซึ่งแสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ โดยแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพิ่มมากขึ้นเมื่อ

วิเคราะห์โดยใช้จำนวนตัวแปรอิสระมากขึ้น และให้ค่าสูงสุดเมื่อกำหนดคุณสมบัติทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 8 เป็นตัวแปรอิสระ ในตารางที่ 11 ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และโยสัเคราะห์ โดยผลการวิเคราะห์ให้ผลลัพธ์ที่แสดงแนวโน้มเช่นเดียวกันกับผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ อย่างไรก็ตามกลุ่มของตัวแปรอิสระที่แสดงในตารางที่ 10 และ 11 เป็นเพียงบางส่วนที่ได้ทำการวิเคราะห์ซึ่งได้มีการจัดกลุ่มมากกว่า 20 กลุ่ม [13]

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบวัดแรงดันในการขยายตัว

ตัวปรับปรุงคุณภาพ	แรงดันในการขยายตัว (kPa)	
	D	A
No Treatment	101.6	116.0
F1-10	75.3 (-26%) ¹	78.7 (-32%) ¹
F1-15	47.5 (-53%) ¹	47.5 (-59%) ¹
F1-20	39.3 (-61%) ¹	40.8 (-64%) ¹
F2-10	61.9 (-39%) ¹	76.8 (-34%) ¹
F2-15	41.7 (-59%) ¹	61.9 (-47%) ¹
F2-20	27.8 (-72%) ¹	42.3 (-64%) ¹
B-10	60.5 (-40%) ¹	59.5 (-49%) ¹
B-15	48.9 (-52%) ¹	59.0 (-49%) ¹
B-20	46.1 (-54%) ¹	47.9 (-58%) ¹

¹ - Percent reductions When Compare to Control Soil Properties

ตารางที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับกลุ่มของตัวแปรสำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์

จำนวนตัวแปร	ตัวแปร	r _{xy} (Avg.)
4	w _L , w _p , D _A , S _A	0.63
5	γ _{dry} , w _L , w _p , D _A , S _A	0.67
6	w, γ _{dry} , w _L , w _p , D _A , S _A	0.73

ตารางที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับกลุ่มของตัวแปรสำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และใยสังเคราะห์

จำนวนตัวแปร	ตัวแปร	r_{xy} (Avg.)
6	$w_L, w_p, D_A, S_A, D_F, S_F$	0.90
7	$\gamma_{dry}, w, w_p, D_A, S_A, D_F, S_F$	0.90
8	$\gamma_{dry}, w, w_L, w_p, D_A, S_A, D_F, S_F$	0.94

4.4 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ

ตารางที่ 12 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณของชุดที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุด จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่า Liquid Limit, ปริมาณความชื้นในการบดอัด และหน่วยน้ำหนักแห้งของทั้งดินธรรมชาติและดินที่ปรับปรุงคุณภาพเป็นตัวแปรอิสระที่สำคัญในการวิเคราะห์ และมีอิทธิพลต่อตัวแปรคงที่ (a, n, และ m) อย่างมากสำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์

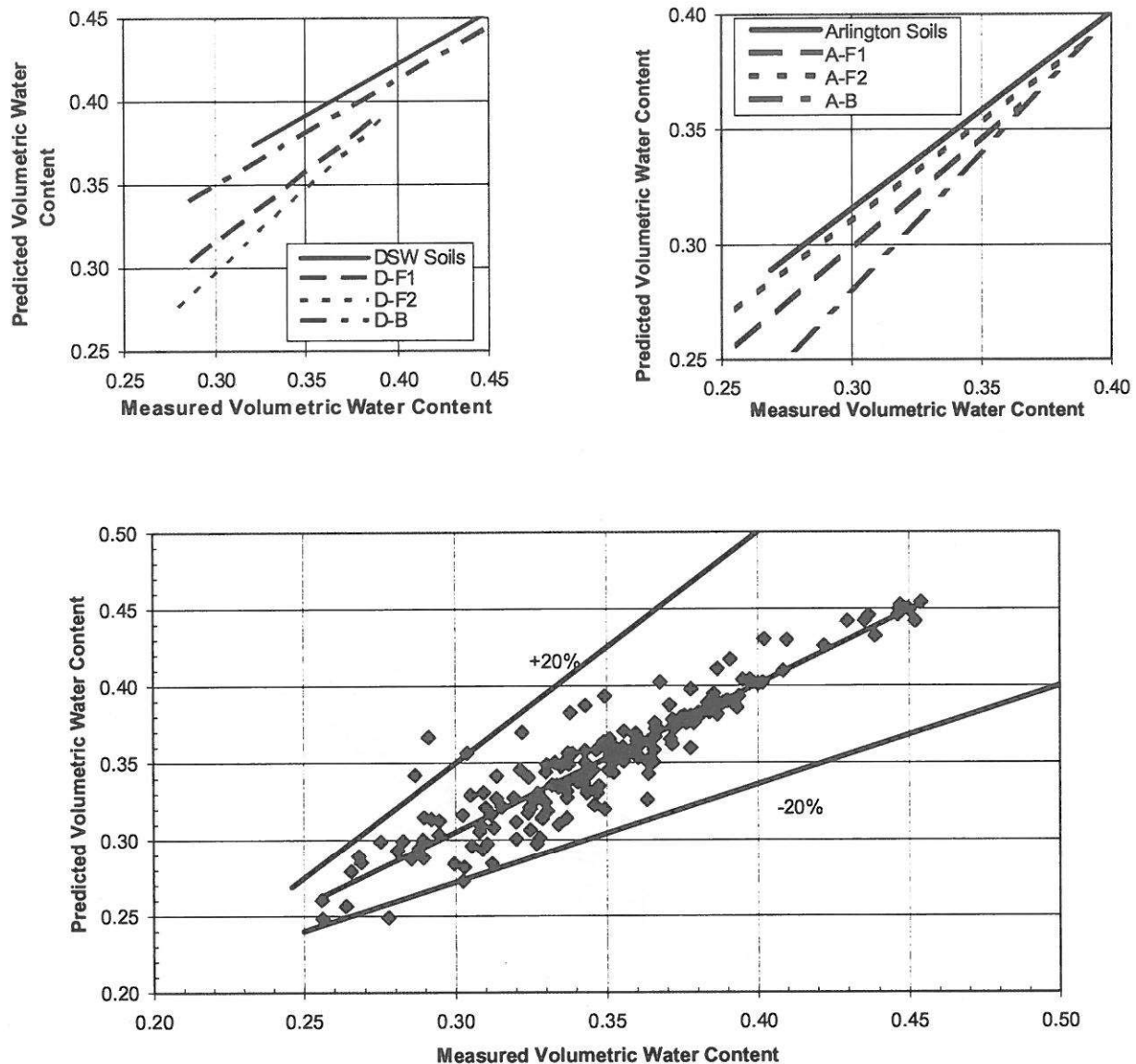
และการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และใยสังเคราะห์

4.5 การประเมินผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นแบบพหุคูณ

ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นแบบพหุคูณซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 12 นำมาใช้ร่วมกับสมการที่ 1 สามารถที่จะใช้ทำนายค่า volumetric water contents ค่าที่ทำนายได้นั้นถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยชุดเครื่องมือทดสอบ Pressure Plate ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 สำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และใยสังเคราะห์ จากรูปที่ 8 และ 9 พบว่าความแปรปรวนของค่าที่ได้จากการทำนายและที่ได้จากการทดสอบมีค่าไม่มากนัก ซึ่งให้ค่าการทำนายที่ผิดพลาดไม่เกิน $\pm 20\%$ สำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ และ $\pm 15\%$ สำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และใยสังเคราะห์

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณของชุดที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุด

วิธีการปรับปรุงคุณภาพ	กลุ่มตัวแปร	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวกับคุณสมบัติต่างๆ
การปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์	$w, \gamma_{dry}, w_L, w_p, D_A, S_A$	$\ln a = -13.96 + 0.25(w) + 0.78(\gamma_{dry}) - 0.04(w_L) + 0.17(w_p) - 0.03(D_A) + 0.20(S_A)$ $\ln n = -2.54 + 0.07(w) + 0.18(\gamma_{dry}) - 0.03(w_L) + 0.003(w_p) - 0.01(D_A) + 0.07(S_A)$ $m = 0.79 - 0.00009(w) - 0.00005(\gamma_{dry}) - 0.000002(w_L) + 0.00004(w_p) - 0.00005(D_A) + 0.005(S_A)$
การปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และใยสังเคราะห์	$w, \gamma_{dry}, w_L, w_p, D_A, S_A, D_F, S_F$	$\ln a = 10.33 - 0.02(w) - 0.22(\gamma_{dry}) + 0.04(w_L) - 0.06(w_p) - 0.05(D_A) - 0.06(S_A) - 2.96(D_F) + 0.44(S_F)$ $\ln n = -5.93 + 0.01(w) + 0.19(\gamma_{dry}) - 0.04(w_L) + 0.08(w_p) + 0.05(D_A) + 0.06(S_A) - 0.23(D_F) + 0.26(S_F)$ $m = -0.73 + 0.000003(w) + 0.0002(\gamma_{dry}) + 0.000004(w_L) - 0.00002(w_p) + 0.00003(D_A) + 0.004(S_A) - 0.18(D_F) + 0.02(S_F)$

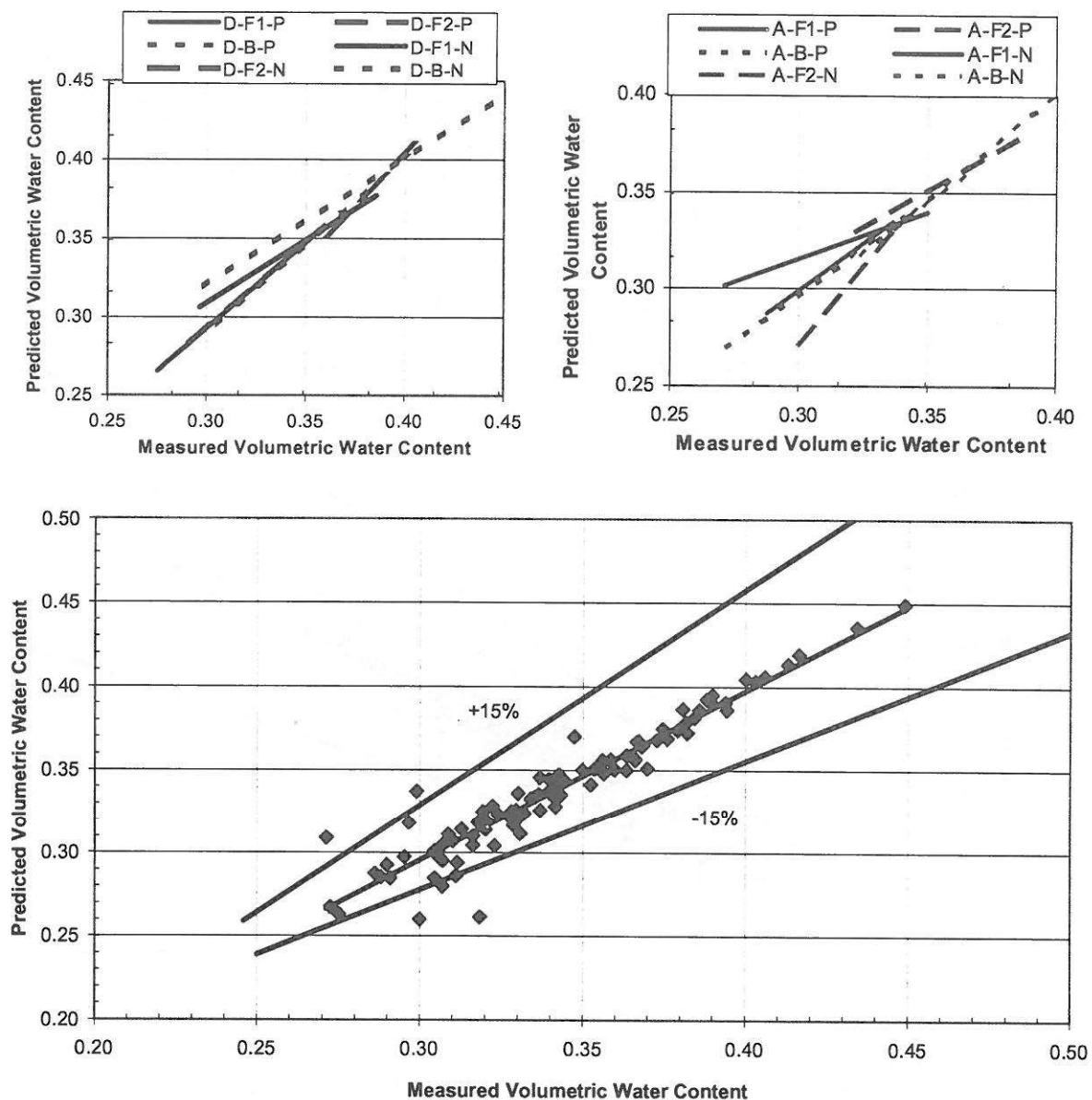


รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่า Volumetric Water Content ที่ได้จากการทำนายและผลการทดสอบของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์โดยใช้ชุดตัวแปรอิสระ 6 ตัวแปร

แม้ว่าผลลัพธ์ทั้งหมดที่ออกมาเป็นที่น่าพอใจ แต่แบบจำลองและสมการความสัมพันธ์ที่นำเสนอขึ้นมาก็ยังคงอยู่ที่ต้องใช้ตัวอย่างดินและตัวปรับปรุงคุณภาพที่มีเงื่อนไขเดียวกันกับที่ใช้ในการทดสอบ อย่างไรก็ตามรูปแบบการวิเคราะห์ที่นำเสนอสามารถใช้เป็นแบบอย่างสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลชุดอื่นต่อไปในอนาคต จนสามารถที่จะสร้างสมการความสัมพันธ์ที่ใช้ได้อย่างกว้างขวาง

5. สรุป

บทความนี้ได้แสดงผลการทดสอบและผลของการศึกษาแบบจำลอง SWCC ของดินขยายตัวสองชนิดที่ใช้ซีเมนต์และใยสังเคราะห์อย่างละสองชนิดเป็นตัวปรับปรุงคุณภาพ ข้อมูล SWCC ที่ได้สามารถแสดงผลได้โดยอาศัยสมการของ Fredlund et al. [3] ผลการศึกษาพบว่าค่า Volumetric Water Contents ของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอยลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่า Volumetric Water Content ที่ได้จากการทำนายและผลการทดสอบของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และโพลีเอครีติกโดยใช้ชุดตัวแปรอิสระ 8 ตัวแปร

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมาจากการเปลี่ยนการกระจายตัวของอนุภาคที่จัดเรียงตัวขึ้นมาใหม่ สำหรับถ้าเกิดผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยซึ่งอาจเป็นเพราะความหยาบอันเป็นธรรมชาติของวัสดุ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าโพลีเอครีติกไม่ได้มีส่วนช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ SWCC แต่อย่างใด

ในส่วนของการทดสอบแรงดันในการขยายตัวของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเกลือให้ประสิทธิภาพ

สูงที่สุด โดยสามารถลดค่าแรงดันของดินทั้งสองชนิดโดยเฉลี่ยได้ถึง 65% สำหรับถ้าเกิดผลสามารถลดได้โดยเฉลี่ยประมาณ 56%

ในส่วนของการคำนวณค่าที่หาจากแบบจำลองของ Fredlund et al. [3] และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณโดยให้มีสหสัมพันธ์กับคุณสมบัติต่างๆของดินและตัวปรับปรุงคุณภาพให้ผลเป็นที่น่าพอใจเมื่อ

เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดสอบมีความผิดพลาดในช่วง 15 ถึง 20%

จากทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า ผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นในบทความนี้ได้แสดงถึงพฤติกรรมของ SWCC ซึ่งสามารถให้เป็นเครื่องมือเพื่อทำความเข้าใจของผลที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงคุณภาพดิน และสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการศึกษาในเรื่องอื่นๆ ต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ The Advanced Technology Program (ATP) of Texas Higher Education Coordinating Board, Austin, Texas ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายทั้งหมดตลอดการศึกษาวิจัย และบริษัท Boral Material Technologies, Texas ที่สนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chen, F.H. (1988). *Foundations on Expansive Soils*, 2nd ed., Elsevier Science Publications, New York.
- [2] Fredlund, D.G. (1987). "The stress state for expansive soils." *Proc. 6th Int. Conf. Expansive Soils*, Delhi, India, 1-9.
- [3] Fredlund, D.G., Xing, A., and Huang, S. (1994). "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 533-546.
- [4] Fredlund, D.G. (2000). "The 1999 R.M. Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics in to geotechnical engineering." *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 963-986
- [5] Gallipoli D., Gens, A., Sharma, R.S., and Vaunat, J (2003). "An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effect of degree of saturation on mechanical behavior." *Geotechnique*, 53(1), 123-135.
- [6] Holtz, W.G. (1959). "Expansive clays properties and problems." *Theoretical and Practical Treatment of Expansive Soils, 1st Conf. Mech. Soils*, Colorado School of Mines, Golden, 54(4), 89-117.
- [7] Hunter, D. (1988). "Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 114(2), 150-167.
- [8] Jennings, J.E. (1953). "The heaving of buildings on Desiccated clay." *Proceedings 3rd ICSSMFE*, Zurich, Switzerland, 1, 390-396.
- [9] Leong, E.C., and Rahardjo, H. (1997). "Review of soil-water characteristic curve equations." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(12), 1106 - 1117.
- [10] Mitchell, J.K., (1986). "Practical Problems from Surprising Soil Behavior." *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(3), 259-289.
- [11] Musenda, C. (1999). "Investigations on the Effects of Using Discrete Randomly Distributed Fiber Reinforcement in Expansive Foundation Soils." MS Thesis, The University of Texas at Arlington, Arlington, TX.
- [12] Nielsen, J.D., and Miller, D.J., (1992). *Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*, John Wiley & Sons Inc, New York.
- [13] Punthutaecha, K. (2002). "Volume change behavior of expansive soils modified with recycled materials." PhD Thesis, The University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, 261 pages.
- [14] Sherwood, P.T. (1962). "The effect of sulfates on cement and lime-stabilized soils." *Highway Research Board Bulletin*, 355, 98-107.

[15] Sherwood, P.T. (1995). *Soil Stabilization with Cement and Lime*. HMSO Publications Center, London.

[16] Sillers, W.S., Fredlund, D.G., and Zakerzadeh, N. (2001). "Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models." *Geotechnical and Geological Engineering*, 19, 243 – 283.

[17] Snethen, D.R. (1986). "Expansive soils: where are we?" *Ground Failure*, Nat. Res. Council Comm. On Ground Failure Hazards, No. 3, 12-16.

[18] Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. and Pufahl, D.E. (1999). "Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till." *Geotechnique*, 49, 2, 143-159.