ตัวแปรแสดงสถานะของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในสภาวะความเค้นที่แตกต่างกัน

STATE PARAMETER FOR CEMENT ADMIXED CLAY WITH DIFFERENT STRESS STATES.

ศุภณัฐ ดิ้นเมือง[1,*], สมโพธิ อยู่ไว[2]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
[2] ผศ.ดร., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
[*]Corresponding author address: nuts1995@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวป่าสักที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่สภาวะของความเค้นที่ต่างกันไปด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกน นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอตัวแปรแสดงสถานะ (ψ_i) ที่เหมาะสมของดินชนิดนี้รวมทั้งมีการหาสมการอัตราส่วนช่องว่างประสิทธิผลของดินที่สภาวะคงค้างอีกด้วย (effective void ratio at steady state) จากผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรแสดงสถานะสามารถใช้แสดงพฤติกรรมของดินเหนียวผสมซีเมนต์ได้ กำลังและความแข็งแรงของดินเหนียวป่าสักเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อค่าตัวแปรแสดงสถานะลดลง สมการที่พัฒนามาจากตัวแปรแสดงสถานะสามารถทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวป่าสักผสมซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้ยังมีการนำเสนอเส้นการตอบสนองของความเค้นที่มีต่อการเพิ่มขึ้นความเครียดของดินเหนียวป่าสักผสมซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ที่แตกต่างกัน รวมทั้งมีการนำเสนอสมการอัตราส่วนช่องว่างประสิทธิผลของดินที่สภาวะคงค้าง (essl) อีกด้วย

คำสำคัญ: *การทดสอบแรงอัดสามแกน, ตัวแปรแสดงสถานะ, สมการอัตราส่วนช่องว่างประสิทธิผลที่สภาวะคงค้าง*

Abstract

This study is a study of the behavior of cement admixed Pasak clay at different stress conditions with triaxial compression test. In addition, the state parameter (ψ_i) of this soil type and the effective void ratio at steady state (essl) are presented. From the study found that the state parameter can be used to show behavior of cement admixed clay. The strength of Pasak clay significantly increased as the state parameter decreased. The equation developed from the state parameter can predict the undrained shear strength of admixed Pasak clay. The stress response envelopes of cement admixed Pasak clay with different mixing ratio are presented.

Keywords: *triaxial compression test, state parameter, effective void ratio at steady state.*

1. บทนำ

แม่น้ำป่าสักถือเป็นแม่น้ำสายสำคัญสายหนึ่งของไทยที่มีการใช้งานในด้านต่างๆมากมายไม่ว่าจะเป็นด้านการเดินทางด้านการขนส่งและคมนาคมเป็นต้น แต่เนื่องด้วยความที่ว่าแม่น้ำสายนี้เป็นแม่น้ำที่มีตะกอนค่อนข้างเยอะอีกทั้งด้านความตื้นของแม่น้ำจึงเป็นอุปสรรคจึงมีการปรับปรุงริมฝั่งแม่น้ำด้วยการขุดลอกและเสริมเสถียรภาพริมฝั่งด้วยกำแพงกันดินแต่เนื่องจากดินในบริเวณริมฝั่งแม่น้ำส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวอ่อนซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวะกรรมต่ำซึ่งไม่เป็นผลดีกับโครงสร้างกำแพงกันดินดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้จึงมีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีซีเมนต์ผสมดิน โดยวิธีการนี้ถูกใช้งานครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่นและในกลุ่มภูมิภาคนอร์ดิกในช่วงกลางของปีคริสต์ศักราชที่ 1970 และหลังจากนั้นจึงพบการใช้งานในประเทศไทยและในประเทศต่างๆ [1-2] และในการออกแบบและแก้ปัญหาช่วงระหว่างและหลังเริ่มโครงการก่อสร้างกำแพงกันดิน DCM จำเป็นต้องอาศัยค่าจากผลทดสอบในห้องทดสอบแต่เนื่องจากโครงการครอบคลุมพื้นที่ตามแนวแม่น้ำป่าสักเป็นระยะยาวดังนั้นเป็นไปได้ยากที่จะเก็บตัวอย่างดินในโครงการทั้งหมดมาทดสอบในห้องทดสอบจึงมีความจำเป็นในการศึกษาหาตัวแปรที่สามารถแสดงสถานะของ DCM ในโครงการมาทดแทนผลจากห้องทดสอบ ซึ่งในประเทศไทยพบว่ามีการศึกษาตัวแปรแสดงสถานะที่ใช้ทำนายคุณลักษณะทางด้านกำลังและการเสียรูปของดินซีเมนต์โดยใช้ตัวแปรอัตราส่วนระหว่างเปอร์เซนต์น้ำรวมที่ใช้ในการผสมกับเปอร์เซนต์ปูนซีเมนต์ (C_w/A_w) [3] ต่อมา **Lorenzo**[4] นำเสนออัตราส่วนระหว่างอัตราส่วนช่องว่างหลังการบ่ม (e_{ot}) กับปริมาณซีเมนต์ [4-6] และได้นำเสนอตัวแปรอัตราส่วนช่องว่างทั้งหมดแบบประสิทธิผล (e_{st}) ที่สามารถสื่อได้ถึงพฤติกรรมรับแรงอัดแบบไม่มีผลของแรงอัดด้านข้าง (q_u) และความเค้นครากได้เป็นอย่างดีแต่เนื่องจากตัวแปร (e_{st}) ยังไม่คำนึงถึงระดับความเค้น **Nakin** [7] จึงได้ใช้แนวคิดของ **Been** [8] ที่นำเสนอตัวแปรแสดงสถานะของทราย (ψ_i) ซึ่งสามารถใช้แสดงถึงพฤติกรรมของดินซีเมนต์ได้

งานวิจัยในอดีตพบว่ามีการนำเสนอค่าตัวแปรแสดงสถานะ

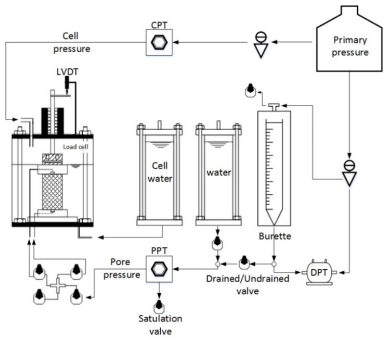
(ψ_i) [3-4] เพื่อใช้ทำนายลักษณะทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมกับดินเหนียวกรุงเทพ งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในการขยายผลใช้กับดินผสมซีเมนต์ที่ใช้ดินในโครงการก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งริมฝั่งที่อยู่ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาซึ่งโดยปกติแล้วดินในแต่ละพื้นที่จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของดินในโครงการและทดสอบสามแกนกับตัวอย่างซีเมนต์ผสมกับดินในโครงการดังกล่าวเพื่อศึกษาพฤติกรรมและสอบเทียบแนวโน้มของพฤติกรรมต่อค่าตัวแปรแสดงสถานะ e_{st} และ ψ_i

2. วิธีที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะใช้วิธีการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของดินเหนียวปาสักด้วยวิธี undrained triaxial compression โดยจะแบ่งเป็นสองวิธีการทดสอบย่อยนั้นคือ stress control และ strain control เพื่อให้สามารถหาค่าที่สภาวะสมดุลได้นั้นเอง

2.1. เครื่องมือการทดสอบที่ได้มีการพัฒนา

เครื่องมือที่ถูกปรับแต่งขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบ triaxial โดยมีการปรับปรุงให้สามารถใช้ในการทดสอบได้ทั้ง 2 รูปแบบทั้งแบบ loading และ unloading รวมถึงสามารถทดสอบในรูปแบบ strain and stress control ได้



รูปที่ 1 รูปแบบเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

2.2. การทดสอบทางกายภาพ

ตัวอย่างดินถูกนำมาทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานตามธรรมชาติซึ่งได้ผลดังตารางที่ 1 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพฯ ในการศึกษาก่อนหน้าของ [5-6] พบว่าดินบริเวณนี้มีค่า ขีดจำกัดเหลว(LL), ขีดจำกัดพลาสติก (PL), ดัชนีพลาสติก (PI), อัตราส่วนปริมาณน้ำ (w) และ ดัชนีเหลว (LI) ต่ำกว่าอย่างชัดเจน โดยค่าคุณสมบัติเหล่านี้จะใช้ในขั้นตอนผสมพิสูจน์และเตรียมตัวอย่างต่อไป

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานตามธรรมชาติของดิน

คุณสมบัติ	การศึกษานี้ (ดินป่าสัก)	[5] (ดินเหนียวกรุงเทพฯ)	[7] (ดินเหนียวกรุงเทพฯ)
Liquid limit, LL(%)	83	103	119
Plastic limit, PL(%)	30.71	43	41
Plastic index, PI(%)	52.29	60	78
Water content, w(%)	41.76	76-84	103
Specific gravity, G_s	2.71	2.72	2.69

2.3. การเตรียมและผสมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

การผสมเพื่อทดสอบหาค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำทั้งหมดกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทำให้ค่ากำลังแรงอัดแบบไม่มีแรงดันด้านข้างที่อายุ 28 วันเท่ากับในโครงการคือ 600 กิโลปาสกาล โดยใช้สมการของความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 1 [9]

$$C_w = w^* + (w/c)A_w \quad (1)$$

C_w คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำทั้งหมด, w* คือ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการปั้นใหม่, A_w คือ ปริมาณซีเมนต์, w/c คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ของน้ำปูน โดยใช้ w* เท่ากับ 125 เปอร์เซนต์, w/c เท่ากับ 1 และใช้ C_w เท่ากับ 150 เปอร์เซนต์คงที่เท่ากันทุกส่วนผสมและเปลี่ยนแปลงปริมาณซีเมนต์ซึ่งพบว่าค่าปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 21.67 เปอร์เซนต์ มีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่มีแรงดันด้านข้างที่อายุ 28 วันเท่ากับ 600 กิโลปาสกาล

การเตรียมจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างหลักที่มีส่วนผสมที่ต่างกันนั้นคือจะอัตราส่วนผสมปริมาณน้ำกับซีเมนต์ (C_w/A_w) เท่ากับ 2.92 6.92 และ 10.92 ตามลำดับโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมกับดินที่ผ่านการปั้นใหม่ด้วยค่า w* เท่ากับ 125 เปอร์เซนต์ และปริมาณน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 1 ให้ได้ปริมาณอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 1.0 โดยพยายามผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันและมีคุณสมบัติเหมือนกันเมื่อผสมเข้ากันดีแล้วนำไปใส่แบบ พีวีซี (PVC) รูปทรงกระบอกสูง 150 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 แล้วนำไปเก็บไว้ในห้องรักษาอุณภูมิเป็นเวลา 28 วัน จึงนำมาทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำโดยก่อนการทดสอบต้องทำการวัดและหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างและเลือกใช้เพียงตัวอย่างที่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน

รูปที่ 2 ตัวอย่างที่เตรียมในการทดสอบ

2.4. เตรียมตัวอย่างให้อิ่มตัวด้วยน้ำ

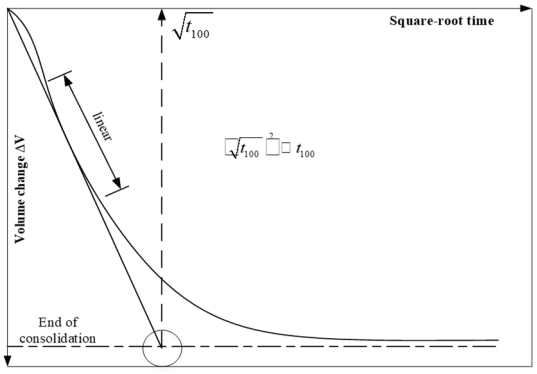
เพิ่มความดันเซลล์ (Cell pressure) และความดันภายใน (back pressure) แบบเป็นช่วง ช่วงละ 20 กิโลปาสคาล [9] โดยให้ความดันเซลล์ และความดันภายในแตกต่างกัน 10 กิโลปาสกาล เพิ่มความดันจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับ 300 กิโลปาสกาล และทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง จากนั้นตรวจสอบค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ จากอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงความดันเซลล์ (B) โดยต้องได้ค่าดังกล่าวไม่น้อยกว่า 0.90 [10]

2.5. ขั้นตอนการอัดและคายตัวของน้ำ

หลังจากตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว ($B \geq 0.90$) ให้เพิ่มความดันเซลล์ตามที่กำหนดไว้ในการทดสอบคือ 50, 100 และ 200 กิโลปาสกาล วัดค่าความดันน้ำที่เพิ่มขึ้นหลังจากนั้นเปิดวาล์วระบายน้ำรอ 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าค่าความดันน้ำลดลง 95 เปอร์เซนต์ ของความดันน้ำที่เพิ่มขึ้น

2.6. การเฉือนของตัวอย่าง

หลังจากกระบวนการอัดคายน้ำเสร็จสิ้นจะทำการปิดวาล์วระบายน้ำในใช้อุปกรณ์ในการวัดการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง (LVDT) และเริ่มทำการเฉือนตัวอย่าง โดยอัตราการเฉือนในแต่ละตัวอย่างจะถูกคำนวณด้วยค่า factor ตามตารางที่ 2 (Head, 2006)



รูปที่ 2 Derivation of theoretical t100 from colume change square-root time consolidation curve for a triaxial specimen(Head, 2006)

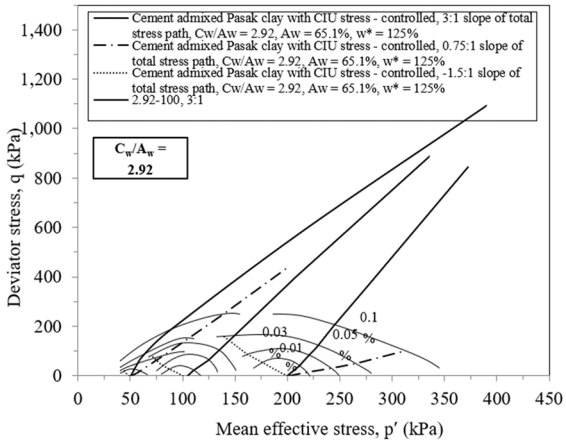
ตารางที่ 2 Factor for calculating time to failure(Head, 2006)

TIME OF TEST (ANY DIAMETER) (2:1 RATIO)	NO SIDE DRAINS	WITH SIDE DRAINS
UNDRAINED (CU)*	0.53×T100	1.8×T100
DRAINED (CD)	8.5×T100	14×T100

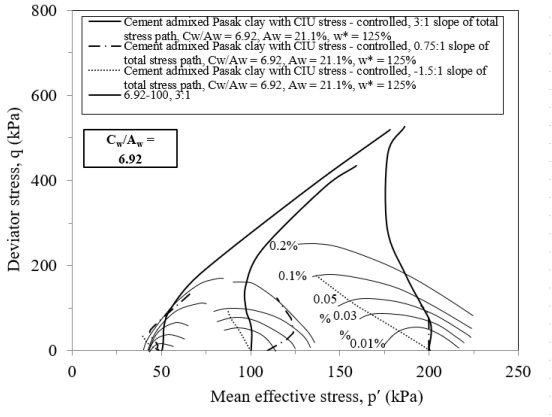
3. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.1. ผลการทดสอบในด้านการตอบสนองต่อความเครียด (STRESS RESPONSE)ของวัสดุตัวอย่าง

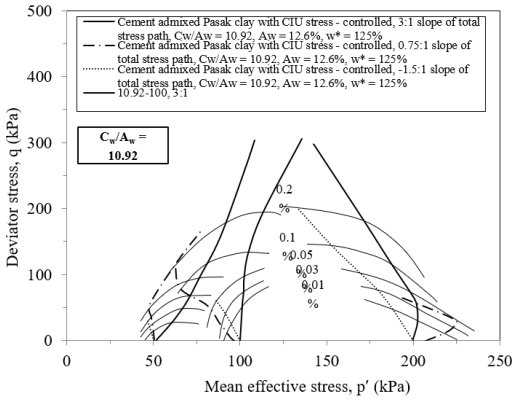
จากการนำผลการทดสอบ triaxial ไปวิเคราะห์การตอบสนองต่อความเครียดโดยเมื่อนำไปสร้างความสัมพันธ์กับการศึกษาเดิมจะได้ความสัมพันธุ์ของการตอบสนองต่อความเครียดในแต่ละส่วนผสม ดังในรูปที่ 3-5



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของการตอบสนองต่อความเครียดในตัวอย่าง C_w/A_w = 2.92



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของการตอบสนองต่อความเครียดในตัวอย่าง C_w/A_w = 6.92



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของการตอบสนองต่อความเครียดในตัวอย่าง C_w/A_w = 10.92

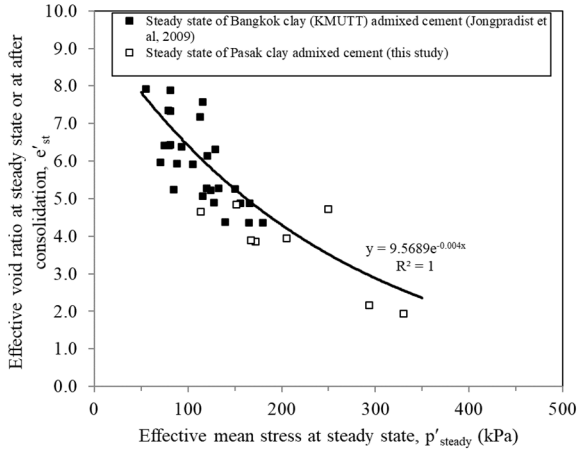
3.2. ผลการวิเคราะห์สร้างสมการหาค่าอัตราส่วนช่องว่างบนเส้นสถานะคงที่(E_{SSL})

เนื่องจากในงานวิจัยตัวเก่าได้ใช้สมการในการหาค่าอัตราส่วนช่องว่างบนเส้นสถานะคงที่(e_{ssl})ของดินเหนียวกรุงเทพฯ คือ

$$e_{ssl} = 9.7\ e^{-0.0042p'} \quad (2)$$

ทำให้ค่าที่ได้ยังไม่ใช่ค่าคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับดินป่าสักจากรูปที่ 6 เป็นผลการวิเคราะห์หาสมการหาค่าอัตราส่วนช่องว่างบนเส้นสถานะคงที่(e_{ssl}) ของดินเหนียวป่าสัก จากในงานวิจัยนี้จึงได้สมการในการหาค่าอัตราส่วนช่องว่าง(e_{ssl}) ของดินเหนียวป่าสัก คือ

$$e_{ssl} = 9.5689\ e^{-0.004p'} \quad (3)$$



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์อัตราส่วนช่องว่างบนเส้นสถานะคงที่

3.3. ผลการวิเคราะห์ตัวแปรสถานะของดินป่าสัก

จากสมการหาค่าอัตราส่วนช่องว่างบนเส้นสถานะคงที่(e_{ssl})

$$e_{ssl} = 9.5689\ e^{-0.004p'}$$

สามารถนำมาสร้างค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรสถานะกับค่ากำลังรับแรงเฉือน ดังรูปที่7 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรสถานะกับค่าแรงดันน้ำที่สภาวะพัง

จากการศึกษาของ [5-7] พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอัตราส่วนระหว่างอัตราส่วนช่องว่างหลังการบ่มกับปริมาณปูนซีเมนต์(e_{ot}/A_w) ไม่สามารถสื่อถึงพฤติกรรมจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบเท่ากันทุกทิศทางแบบไม่ระบายน้ำได้ จึงได้นำเสนอตัวแปร es ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$e_s = w^* \times \ln(e_{ot} / A_w) \quad (4)$$

โดยที่ e_s คือ อัตราส่วนช่องว่างแบบประสิทธิผล, w* คือ ปริมาณน้ำในการปั้นใหม่, e_{ot} คือ อัตราส่วนช่องว่างหลังการบ่ม และ A_w คือ ปริมาณปูนซีเมนต์แต่เนื่องจาก e_s ไม่ได้คำนึงถึงปริมาตรน้ำทั้งหมดที่ใช้ในการผสมน้ำปูนซีเมนต์ [5-7] จึงทำการปรับปรุงเป็น est ดังสมการที่ 4

$$e_{st} = C_w \times \ln(e_{ot} / A_w) \quad (5)$$

โดยที่ e_{st} คือ อัตราส่วนช่องว่างทั้งหมดแบบประสิทธิผล, e_{ot} คือ อัตราส่วนช่องว่างหลังการบ่ม, C_w คือ ปริมาณน้ำทั้งหมด และ Aw คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ โดยตัวแปรแสดงสถานะนี้ [5-7] ได้นำมาสร้างความสัมพันธ์กับความเค้นหลักสูงสุดพบว่า ปริมาณความเค้นหลักสูงสุด ของตัวอย่าง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสวนทางกับค่า e_{st} ที่ลดลงและจากการศึกษาของ [6-7] พบว่าค่า e_{st} มีความพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่มีแรงดันด้านข้าง (q_u) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมดินเหนียวกรุงเทพ และสามารถหาสมการทำนายผลค่า q_u จากตัวแปรแสดงสถานะ e_{st} และเมื่อนำแนวคิดนี้มาใช้กับตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมดินเหนียวต่างชนิดกันคือดินเหนียวป่าสัก พบว่าสามารถหาความสัมพันธ์ และสมการทำนายค่า qu จากสมการที่ 6

$$q_u = 35771.6148 \times \exp^{(-1.21543 e_{st})} \quad (6)$$

โดยที่ e_{st} คือ อัตราส่วนช่องว่างทั้งหมดแบบประสิทธิผล และนอกเหนือจากนี้ [7] ได้นำตัวแปรแสดงสถานะที่ดัดแปลงมาจากแนวคิดของ [8] คือ ψ ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนช่องว่างที่สถานะเริ่มแรกกับอัตราส่วนช่องว่างบนเส้นสถานะคงที่ ดังสมการที่ 7

$$\psi = e'_{st} - e_{ssl} \quad (7)$$

โดย e_{ssl} คือ อัตราส่วนช่องว่างบนเส้นสถานะคงที่และเมื่อนำ ψ มาพลอตหาค่าความสัมพันธ์พบว่า ψ มีความสัมพันธ์กับ ค่ากำลังสูงสุดของการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสามแกนที่ (q_{max}) นอร์มัลไล ด้วย แรงดันด้านข้าง (P'_c) ดังที่ แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งความสัมพันธ์นี้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกับงานวิจัยของ [7] และสามารถหาสมการความสัมพนธ์เพื่อใช้ทำนายค่า q_{max}/p'_c ของตัวอย่างดินซีเมนต์ของดินเหนียวกรุงเทพและดินเหนียวป่าสักได้ตามสมการที่ 8

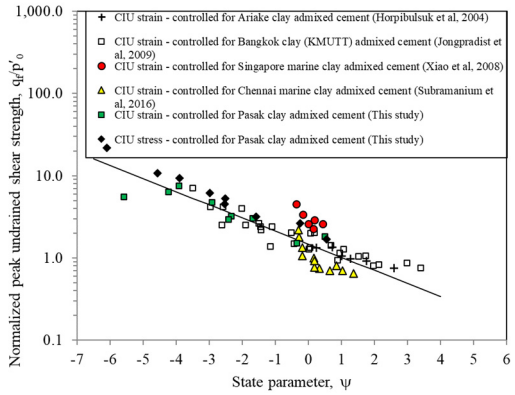
$$q_{max}/p'_c = 1.4721e^{-0.367\psi_i} \quad (8)$$

โดยที่ ψ_i คือ ตัวแปรแสดงสถานะที่สามารถหาได้จากสมการที่ 7, q_{max} คือ ค่ากำลังระบบแรงสูงสุดของตัวอย่าง และ p'c คือ แรงดันด้านข้างที่ใช้ในการทดสอบ

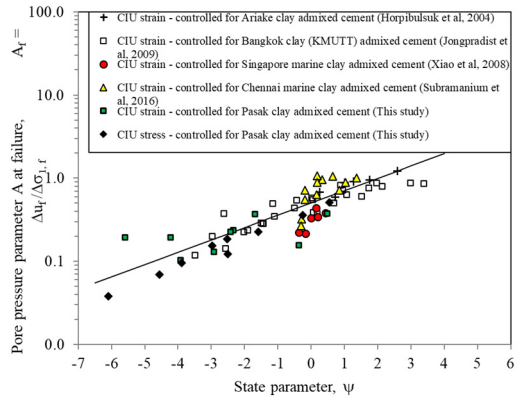
จากรูปที่ 8พบว่าตัวแปรแสดงสถานะเริ่มต้น (ψ_i) มีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์แรงดันน้ำของสเกร็มตัน (A_f) โดยค่าพารามิเตอร์ A_f มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า และความสัมพันธ์ของปูนซีเมนต์ผสมดินเหนียวกรุงเทพและดินเหนียวป่าสัก มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันและสามารถหาสมการของความสัมพันธ์นี้ได้ดังสมการที่ 9

$$A_f = 0.5025e^{0.3415\,\psi_i} \quad (9)$$

โดยที่ ψ_i คือ ตัวแปรแสดงสถานะ, A_f คือ พารามิเตอร์แสดงสถานะของสเกร็มตัน



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรสถานะและค่ากำลังรับแรงเฉือน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรสถานะและค่าแรงดันน้ำที่สภาวะพัง

4. สรุปผลของงานวิจัย

งานวิจัยในส่วนนี้ได้เน้นไปที่เติมเต็มและแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัยฉบับเก่าทั้งในด้านการสร้างความสัมพันธ์การตอบต่อความเครียด(stress response) ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและการแก้ไขข้อบกพร่องเรื่องการใช้สมการหาค่าอัตราส่วนช่องว่างบนเส้นสถานะคงที่(e_{ssl}) ที่เคยใช้ของ[7] ซึ่งเป็นของดินเหนียวกรุงเทพฯ มาเป็นสมการใหม่ที่เกิดจากการทดสอบคุณสมบัติของดินป่าสักโดยสามารถสรุปผลออกมาได้ดังต่อนี้

1.การสร้างความสัมพันธ์ในด้านการตอบสนองของความเครียด (stress response) ของวัสดุตัวอย่างเป็นไปตามในรูปที่ 3-5

2.สมการการหาค่าอัตราส่วนช่องว่างบนเส้นสถานะคงที่ (e_{ssl}) ของดินเหนียวป่าสักซึ่งนำมาใช้แทนสมการเดินของ[7] ซึ่งเป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ ผลปรากฏว่ามีค่าไม่แตกต่างไปจากค่าเดิมมากจึงทำให้ผลการทดสอบรวมยังอยู่ในแนวโน้มเดิม ดังนี้

$$e_{ssl} = 9.5689\ e^{-0.004p'}$$

3.จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของตัวแปรแสดงสถานะคือ ψ [5] ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงสูงสุดของการทดสอบสามแกน (q_{max}) ของตัวอย่างดินซีเมนต์ของดินเหนียวกรุงเทพที่ดัดแปลงมาจากแนวคิดของ [8] มีความสัมพันธ์กับผลพฤติกรรมของตัวอย่างดินซีเมนต์ของดินเหนียวป่าสักเป็นไปในทางเดียวกันซึ่งจากความสัมพันธ์นี้สามารถได้สมการทำนายค่า q_{max} ได้ดังสมการดังนี้

$$q_{max}/p'_c = 1.4721e^{-0.367\psi_i}$$

4. ค่าตัวแปรแสดงสถานะ (ψ_i) มีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับพารามิเตอร์แรงดันน้ำของสเกร็มตัน (A_f) โดยความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์สำหรับซีเมนต์ผสมดินเหนียวป่าสัก และซีเมนต์ผสมดินเหนียวกรุงเทพ มีแนวโน้วไปในทางเดียวกันและสามารถหาเป็นสมการทำนายผลได้ ดังนี้

$$A_f = 0.5025e^{0.3415\,\psi_i}$$

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทางอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยผู้ควบคุมและดูแลห้องปฏิบัติการรวมทั้งทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Coastal Development Institute of Technology (CDIT), (2002), *The Deep Mixing method: Principle, Design and Construction*. A.A. Balkema, The Netherlands.

[2] Bhadriraju, V., Puppala, A., Madhyannapu, R. and Williammee, R., (2008). Laboratory procedure to obtain well-mixed soil binder samples of medium stiff to stiff expansive clayey soil for Deep Soil Mixing simulation. *Geotechnical Testing Journal,* 31, pp. 225–238.

[3] Horpibulsuk, S., and Miura, N. (2001). A new approach for studying behavior of cement stabilized clays.

International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE15), Istanbul, Turkey Republic, 1 Jan 2001, pp. 1759–1762.

[4] Lorenzo, G.A. and Bergado, D.T. (2004), Fundamental parameters of cement-admixed clay new approach. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. Vol 130, No. 10,pp. 1042-1050.

[5] Chaowalittrakul, N. (2006). Strength and Deformation Characteristics of Cement Admixed Clay Under Compression Unloading Stress Condition and Its Constitutive Model. M. Eng. Thesis, King Mongkut's University of Technology, Bangkok Thailand.

[6] J.Pornkasem, Y.Sompote, J.Chai. (2011). Effective Void Ratio for Assesing the Mechanical Properties of Cement-Clay Admixture at High Water Content. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137, pp. 621-627.

[7] Nakin, S. (2005). Strength and deformation characteristic of cement admixed clay at high water content. M. Eng. Thesis, King Monkut's University of Technology Thonburi, Bangkok Thailand.

[8] Been, K. and Jefferies, M.G., (1985), A State Parameter for Sands, Geotechnique, 35, pp. 99-112.

[9] Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T. S., (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, Soils Found, 41(5), pp. 33–45.

[10] K.H. Head. (1982). *Manual of soil laboratory testing*. Vol. 3. Pentech Press Ltd. London. UK, Inc., pp. 210-240.