

การปรับปรุงคุณภาพดินทรายแป้งจากหินแกรนิตโดยผสมดินเหนียวเคโอลินในงานวิศวกรรมเชิงลาด

IMPROVEMENT OF GRANITIC SILTY SOIL BY MIXING WITH
KAOLIN FOR SLOPE ENGINEERINGปฏิพัฒน์ บุญเจริญพานิช (Patipat Booncharoenpanich)¹อภินิติ โชติสังกาศ (Apiniti Jotisankasa)²¹นิสิตปริญญาโท วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (pat24_pat@hotmail.com)²อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (fengatj@ku.ac.th)

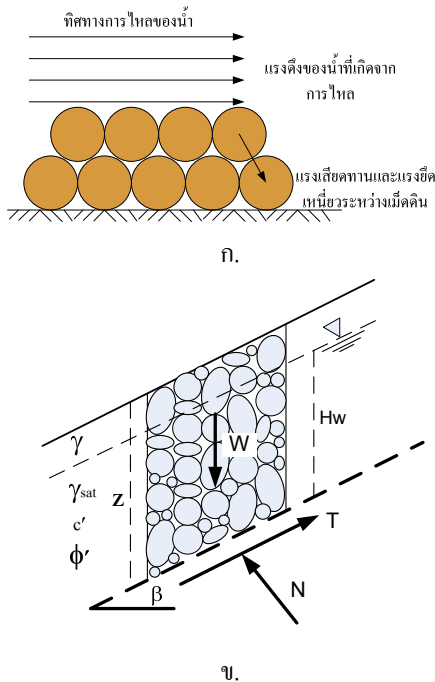
บทคัดย่อ : บทความนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินทรายแป้งที่ผุพังจากหินแกรนิตโดยการผสมกับแร่ดินเหนียวเคโอลิน เพื่อป้องกันการกัดเซาะและเพิ่มเสถียรภาพของลาด โดยนำดินทรายแป้งที่ผุพังจากหินแกรนิตผสมกับเคโอลินที่อัตราส่วนผสม 0, 10, 15 และ 20 % โดยน้ำหนัก และทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ต่างๆของดินที่เปลี่ยนไปในด้านกำลังเฉือนและการอุ้มน้ำ ทั้งในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ สำหรับในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนที่ส่วนผสมเคโอลิน 10 % โดยน้ำหนัก จะให้กำลังสูงสุดอีกทั้งค่าแรงเชื่อมแน่นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเคโอลินที่ผสมและมุมเสียดทานภายในจะมีค่าสูงสุดที่ส่วนผสมเคโอลิน 10 % โดยน้ำหนักแล้วจึงมีค่าลดลง ส่วนในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีลักษณะของเส้น Envelop ของดินทั้ง 4 ชนิดไม่เป็นเส้นตรง จากความสัมพันธ์ระหว่างความเชื่อมแน่นรวมและแรงเฉือนที่ทดสอบได้พบว่าดินทรายแป้งที่ผสมด้วยเคโอลินจะต้านทานการกัดเซาะได้ดีกว่า ในการวิจัยยังได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ผสมด้วยเคโอลินอัตราส่วนต่างๆ ที่ช่วงแรงดันน้ำในดินตั้งแต่ -60 ถึง 10 kPa พบว่า ลาดดินที่ผสมเคโอลินอัตราส่วน 10-15% จะมีความปลอดภัยสูงกว่าลาดดินทรายแป้งเพียงอย่างเดียวเสมอ

ABSTRACT : The paper reports on the study about improvement of decomposed-granite silty soils by mixing with kaolin, with the purpose of protection erosion and slope stabilization. Shear strength and water retention behaviour of the decomposed granite silty soil, mixed with different proportions of kaolin (0, 10, 15, and 20 % by weight) were tested. Tensiometers were also incorporated in the direct shear box and wetting/drying tests in order to investigate unsaturated properties. The silty soil mixed with 10 % kaolin possess the highest saturated shear strength. The effective cohesion increases with increasing kaolin quantity while the effective friction angle reaches the maximum for the 10 % kaolin mixture, then decreasing with greater kaolin amount. In unsaturated condition, the shear strength versus matric suction envelop to be non-linear. Based on the variation of total cohesion with suction, the silt mixed with kaolin appears to be more erosion-resistant than the silt without kaolin. Infinite slope stability analysis of the silt with varying amount of kaolin also shows that typical silty soil slope with 10-15% of kaolin appear to be consistently more stable than the silty soil slope without kaolin.

KEYWORDS : soil improvement, shear strength, unsaturated soils, suction, kaolin, slope protection

1. บทนำ

ดินทรายแป้งที่ผุพังจากหินแกรนิตมีกระจายอยู่หลายภูมิภาคในประเทศไทย ดินประเภทนี้เมื่อนำมาบดอัดทำเป็นลาดดินคันทางหรือถมดินเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ แล้วไม่มีสิ่งปกคลุมผิวหน้าลาดมักจะเกิดกระบวนการกัดเซาะ โดยมีสาเหตุหลักๆมาจาก ลม และ น้ำ (Morgan and Rickson, 1995) Gray and Sotir (1996) ได้อธิบายกลไกการเกิดการกัดเซาะจากน้ำว่าเกิดขึ้นเมื่อแรงดึงที่เกิดจากการไหลของน้ำที่กระทำกับอนุภาคเม็ดดิน (Drag force) มีค่ามากกว่าแรงต้านของเม็ดดิน (แรงเชื่อมแน่น, แรงเสียดทาน) ดังภาพที่ 1 ก. ซึ่งในระยะยาวมักจะทำให้ลาดดินมีความชันเพิ่มขึ้น และก่อให้เกิดการพิบัติในลักษณะเสถียรภาพ (Mass stability) ได้ดังภาพที่ 1 ข



ภาพที่ 1 รูปแบบการพิบัติของลาดดิน ก) การกัดเซาะ ข) การพิบัติลักษณะเสถียรภาพ

การป้องกันการกัดเซาะลาดดินที่ผุพังจากหินแกรนิตหรือลาดดินทั่วไปวิธีที่นิยมใช้คือการปลูกพืช เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดแต่เมื่อเกิดฝนตกในขณะที่รากพืชยังไม่หยั่งลึกและแผ่กระจายยึดเกาะหน้าดิน พืชจะไม่สามารถป้องกันการกัดเซาะได้ การผสมแร่ดินเหนียวกับดินเม็ดหยาบทำพร้อมกับการปลูกพืชจะเป็นตัวช่วยให้ลดการเกิดการกัดเซาะเนื่องจาก แร่ดินเหนียวจะช่วยให้เม็ดดินจับตัวกันทำให้เกิดการกัดเซาะได้ยากขึ้น

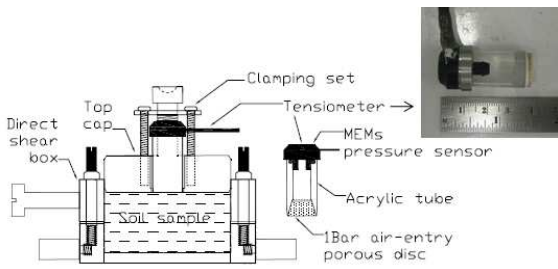
โดยจะต้องผสมดินเหนียวในปริมาณที่พอเหมาะยกตัวอย่าง Kyu-Hyun et al (2007) ได้ศึกษาอิทธิพลของดินเม็ดละเอียดที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน ไม่อึดตัวด้วยน้ำพบว่าค่าความปลอดภัยของลาดดินมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อนำดินเม็ดละเอียดผสมกับดินทรายแป้งที่ 10-15% โดยน้ำหนักแต่ถ้าผสมดินเม็ดละเอียดในปริมาณที่มากไปความปลอดภัยของลาดดินจะมีค่าลดลง

งานวิจัยนี้จึงเสนอการป้องกันการกัดเซาะลาดด้วยการผสมดินเหนียวเคโอลินกับดินทรายแป้งที่ผุพังจากหินแกรนิต โดยจะทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางกลศาสตร์ต่างๆของดินและเสถียรภาพของลาดดินที่เปลี่ยนไปทั้งในสภาวะที่อึดตัวและไม่อึดตัวด้วยน้ำโดยการศึกษาจะเน้นหนักไปในสภาวะดินไม่อึดตัวด้วยน้ำเป็นหลัก

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 แรงดันน้ำในดินด้านลบและเครื่องมือวัด

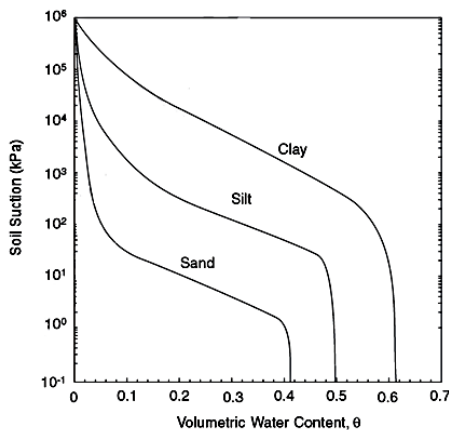
ในสภาวะจริงตามธรรมชาติลาดดินมีทั้งสภาวะอึดตัวและไม่อึดตัวด้วยน้ำขึ้นกับฤดูกาล ลักษณะของชั้นดิน และพืชปกคลุม ถ้าลาดดินอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินมักจะอยู่ในสภาวะอึดตัวด้วยน้ำ แต่ถ้าอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ในสภาวะไม่อึดตัวด้วยน้ำ ดินที่อยู่เหนือระดับน้ำจะเกิดแรงดูดหรือแรงดันน้ำด้านลบโดยน้ำในสภาวะแรงดึง น้ำจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนแรงเชื่อมแน่นยึดเม็ดดินไว้ ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้น โดยสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นในดิน การวัดแรงดันน้ำในดินด้านลบวิธีที่นิยมใช้กันคือ Tensiometer อภินิติและวิชัยพงษ์ (2551) ได้พัฒนา KU-Tensiometer ขึ้นซึ่งมีส่วนประกอบหลักๆ คือ ปลายดินเผาที่มีค่าความตึงน้ำวัดเป็นหน่วยแรงดันอากาศขนาด (Air entry value) ต่างๆ, กะเปาะน้ำและอุปกรณ์วัดแรงดันโดย KU-Tensiometer ที่พัฒนาสามารถวัดแรงดูดอยู่ในช่วงประมาณ 0-90 kPa. นอกจากนี้ Jotisankasa and Mairaing (2010) ยังได้ดัดแปลงเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนตรงสำหรับวัดแรงดูดโดย Tensiometer ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวจะถูกติดตั้งผ่านช่องเปิดของฝาครอบ (Top cap) แล้วถูกยึดด้วยแผ่นเหล็กและสกรู แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนตรงตัดแปลงสำหรับวัดแรงดูด โดย Tensiometer. (Jotisankasa and Mairaing, 2010) [4]

2.2 เส้นโค้งอุ้มน้ำ (Soil Water Characteristic Curve, SWCC)

เส้นโค้งอุ้มน้ำคือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (θ , Volumetric water content คือปริมาณน้ำในดินต่อปริมาตรทั้งหมดของดิน) ต่อแรงดูดหรือแรงดันน้ำในดินด้านลบซึ่งสามารถแสดงเส้นโค้งอุ้มน้ำของตัวอย่างดินชนิดต่างๆ ได้ดังภาพที่ 3 ประโยชน์ของเส้นโค้งอุ้มน้ำคือสามารถนำไปใช้ประมาณกำลังรับแรงเฉือนของดินและความซึมผ่านของน้ำในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้ (Lu and Likos, 2003) [7]



ภาพที่ 3 แสดงเส้นโค้งอุ้มน้ำของดินชนิดต่างๆ. (Lu and Likos, 2003) [7]

2.3 กำลังรับแรงเฉือนของดินและการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

กำลังรับแรงเฉือนของดินทั้งในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและอิ่มตัวด้วยน้ำสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\tau = c' + c^s + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (1)$$

โดยที่ c' คือ แรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล, σ คือหน่วยแรงกดตั้งฉาก, u_a คือ แรงดันอากาศมีค่าเท่ากับ 0, u_w คือ แรงดันน้ำในดิน

, ϕ' คือ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล, c^s คือ แรงเชื่อมแน่นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันน้ำในดินด้านลบหรือแรงดูด (Suction) ตามสมการของ Fredlund and Morgenstern (1993) c^s มีค่าเท่ากับ $(u_a - u_w) \tan \phi^b$ โดยที่ ϕ^b คือ มุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงดันน้ำในดินด้านลบ มีค่าเท่ากับ ϕ' เมื่อดินอยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ และตามสมการของ Lu and Godt (2008) จะเป็นการประมาณจากเส้นโค้งอุ้มน้ำโดย c^s มีค่าเท่ากับ $(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r})(u_a - u_w) \tan \phi'$, θ คือ ปริมาณน้ำในดินต่อปริมาตรทั้งหมดของดินที่สถานะใดๆ, θ_s คือ ปริมาณน้ำในดินต่อปริมาตรทั้งหมดของดินที่สถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ, θ_r คือ ปริมาณน้ำในดินต่อปริมาตรทั้งหมดของดินที่สถานะดินแห้งมาก และสามารถประเมินเสถียรภาพของลาดดินอนันต์แสดงออกมาในรูปแบบสมการอัตราส่วนความปลอดภัยได้ดังนี้

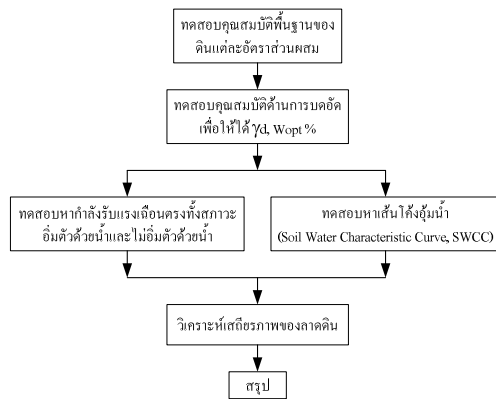
$$F.S. = \frac{c' + c^s + (\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \beta) \tan \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (2)$$

Jotisankasa and Mairaing (2010) ได้ทำการทดสอบหาค่า c^s ของดินจากพื้นที่ดินถล่มหลายแห่งในประเทศไทย โดยวิธีทดสอบแรงเฉือนตรงชนิดวัดแรงดันน้ำในดินด้านลบดังภาพที่ 2 ผลการทดสอบพบว่าสามารถประมาณค่า c^s ได้โดยง่ายโดยใช้เส้นโค้งอุ้มน้ำหรือค่าความชื้นที่จุด Field capacity, θ_{33} หรือที่ค่า Suction = 33kPa, $c^s = \frac{\theta_{33}}{\theta_s} (u_a - u_w) \tan \phi'$

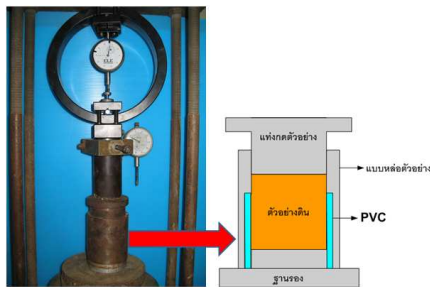
3. วิธีการวิจัย

สำหรับแร่ดินเหนียวเคโอลินที่ใช้ในการวิจัยนี้ นำมาจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำเหมืองดินขาว จังหวัดอุดรธานี ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 400 เท่ากับ 100 % และดินทรายแป้งที่สุ่งจากหินแกรนิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นดินบริเวณโครงการก่อสร้างเจดีย์บูรพาวิจิตรวิทยาประชาสามัคคี วัดเขาสุกิม ตั้งอยู่ที่อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี สำหรับขั้นตอนในการทดสอบสามารถแสดงดังภาพที่ 4 โดยจะนำดินทรายแป้งที่สุ่งจากหินแกรนิตมาผสมกับแร่ดินเหนียวเคโอลินที่ส่วนผสม 0, 10, 15 และ 20 % โดยน้ำหนัก (ยกตัวอย่างที่ 10 % เคโอลิน ดินทรายแป้ง 100 กรัม ใช้เคโอลิน 10 กรัม) ทำการทดสอบคุณสมบัติ

พื้นฐาน (พิกัดแอดเตอร์เบิร์ก, ความถ่วงจำเพาะ, การจำแนกดิน), คุณสมบัติด้านบดอัดแบบมาตรฐาน หลังจากนั้นนำดินที่ผสมระหว่างดินทรายแป้งที่ผสมจากหินแกรนิตกับเคโอลินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ใส่ในแบบหล่อตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 5 เพื่อบดอัดดินตามความหนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐาน ดินที่บดอัดจะใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนทั้งในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ, สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและทดสอบหาเส้นโค้งอุ้มน้ำ (SWCC)



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการทดสอบ

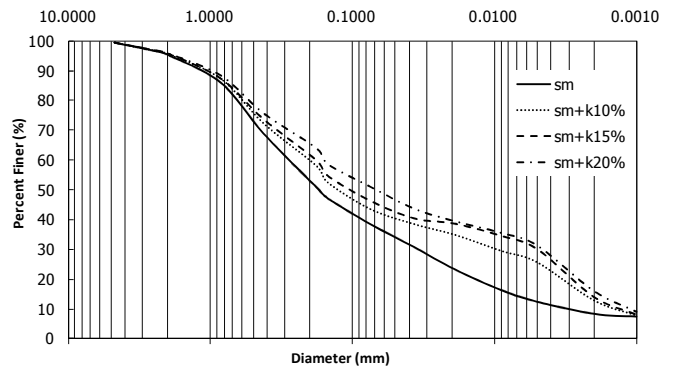


ภาพที่ 5 การบดอัดดินสำหรับทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือน

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

สำหรับดินทรายแป้งที่ผสมกับเคโอลินที่ 0, 10, 15 และ 20 % โดยน้ำหนัก สามารถแสดงการกระจายตัวของเม็ดดินได้ตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ได้ดังภาพที่ 6 และทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพแสดงได้ดังตารางที่ 1



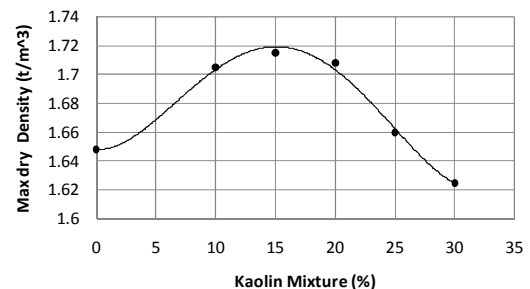
ภาพที่ 6 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดินที่ส่วนผสมต่างๆ

4.2 ผลการทดสอบด้านบดอัดดิน

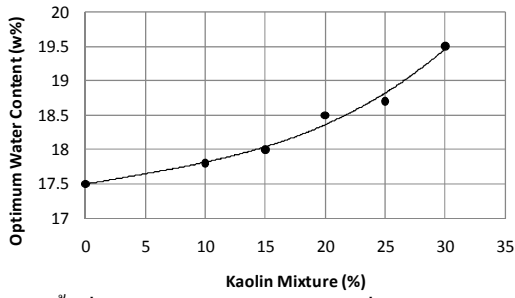
จากการทดสอบการบดอัดที่อัตราส่วนผสมเคโอลินที่ % ต่างๆพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเคโอลินจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของเคโอลินไปแทรกตามช่องว่างของดินทรายแป้งจึงทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณเคโอลินเพิ่มขึ้นในปริมาณที่มากเกินไป 15 % จะทำให้ความหนาแน่นแห้งเริ่มลดลงแสดงดังภาพที่ 7 อีกทั้งปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%Optimum water content) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเคโอลินที่เพิ่มขึ้นแสดงดังภาพที่ 8

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของดินที่ทดสอบ

สัญลักษณ์	ประเภทดิน	พิกัดแอดเตอร์เบิร์ก			ความถ่วงจำเพาะ (Gs)
		LL	PL	PI	
SM	SM	-	-	-	2.63
SM+k 10%	SM	36.01	28.34	7.67	2.64
SM+k 15%	SM	33.58	25.06	8.52	2.64
SM+k 20%	SC	35.65	22.6	13.05	2.66



ภาพที่ 7 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณเคโอลินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



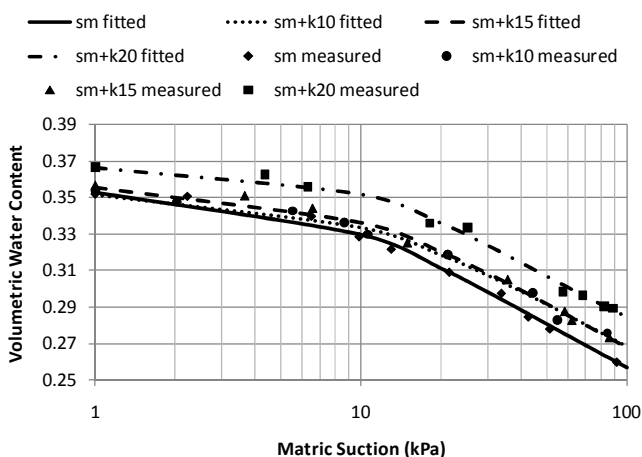
ภาพที่ 8 ความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณเคโอลินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

4.3 ผลการทดสอบเส้นโค้งอุ้มน้ำ

ภาพที่ 9 แสดงเส้นโค้งอุ้มน้ำที่ได้จากการวัดจริงและการประมาณจากสมการของ Van Genuchten (1991) ดังสมการที่ 3

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha(u_a - u_w))^n)^{1-1/n}} \quad (3)$$

โดยที่ n และ α คือ Fitting parameter ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ตัวแปรที่ใช้ในการประมาณแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าเส้นโค้งอุ้มน้ำของดินทั้ง 4 อัตราส่วนผสมมีลักษณะคล้ายกันแต่เมื่อเทียบแรงดูดน้ำที่ θ (Volumetric water content) เท่ากันของดินแต่ละอัตราส่วนผสม ดินที่มีอัตราส่วนผสมเคโอลินมากจะมีค่าแรงดูดน้ำในดินมากกว่าดินที่มีอัตราส่วนผสมเคโอลินน้อย เคโอลินที่ผสมไปนี้จะดูดซับน้ำไว้กับตัวและจะเป็นตัวช่วยเพิ่มแรงดูดน้ำในดิน

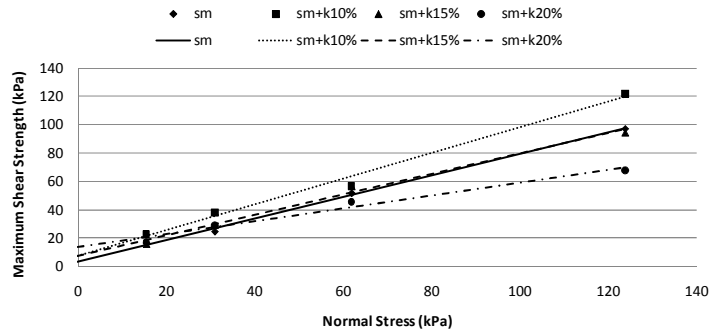


ภาพที่ 9 กราฟเส้นโค้งอุ้มน้ำของดินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

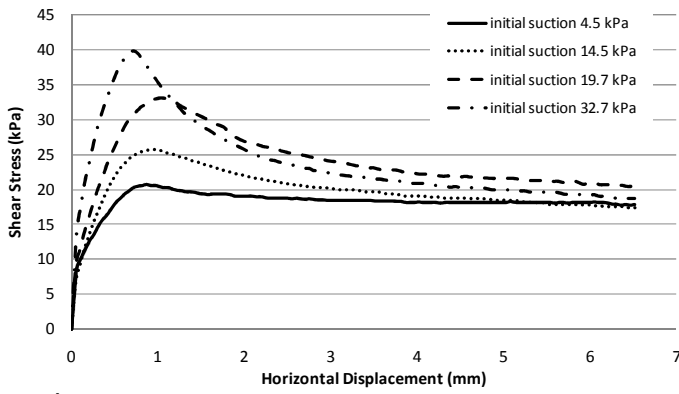
การทดสอบหาลังรับแรงเฉือนตรงในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ทำการทดสอบแบบ Consolidated drain test ภายใต้สภาวะแรง

กดในแนวตั้งเท่ากับ 15.5, 31, 62 และ 124 kPa แสดงดังภาพที่ 10 สิ่งที่น่าประหลาดใจก็คือกำลังรับแรงเฉือนของส่วนผสมระหว่างทรายแป้งกับเคโอลิน 10 % โดยน้ำหนัก จะมีค่ามากกว่าดินอัตราส่วนผสมอื่นๆ ส่วนค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ผสมระหว่างทรายแป้งกับเคโอลินเท่ากับ 0 และ 15 % โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มใกล้เคียงกันและยังพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนเริ่มมีค่าลดลงที่ 20 % โดยน้ำหนัก

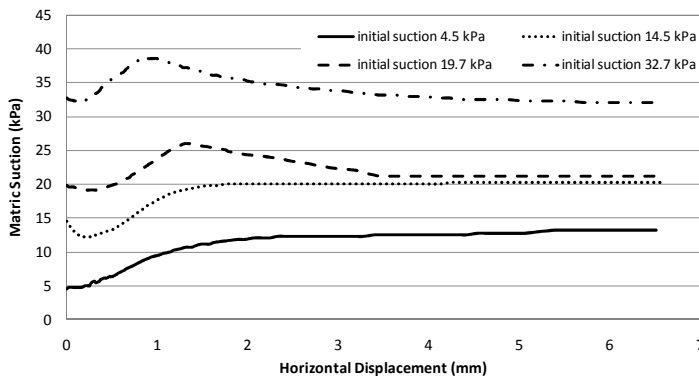


ภาพที่ 10 กราฟกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงตั้งฉากที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

สำหรับการหาลังรับแรงเฉือนตรงในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำทำการทดสอบแบบ Consolidated drain test ติดตั้ง KU-Tensiometer บน direct shear box ภายใต้สภาวะแรงกดในแนวตั้งเท่ากับ 15.5 kPa และทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นในตัวอย่างดินจนได้ค่าแรงดูดต่างๆกันก่อนเริ่มทดสอบโดยผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 11 และ 12 เป็นตัวอย่างของอัตราส่วนผสมเคโอลินที่ 20 % โดยน้ำหนัก ช่วงแรกของการเฉือนแรงดูดจะมีค่าลดลงเนื่องจากดินมีการยุบตัวทำให้เกิดแรงดันน้ำสูงขึ้น แต่เมื่อทำการเฉือนต่อมามีค่าแรงดันน้ำในดินด้านลบจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนบริเวณจุด Peak และเมื่อเฉือนดินจนกำลังรับแรงเฉือนเข้าสู่จุด Ultimate ค่าแรงดูดจะมีค่าคงที่ ภาพที่ 13 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) กับแรงดูด พบว่าลักษณะของเส้น Envelop ของดินทั้ง 4 ชนิด ไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถสรุปแรงเชื่อมแน่น, มุมเสียดทานภายในและมุมของแรงเฉือนเนื่องจากแรงดันน้ำในดินด้านลบ ได้ดังตารางที่ 2



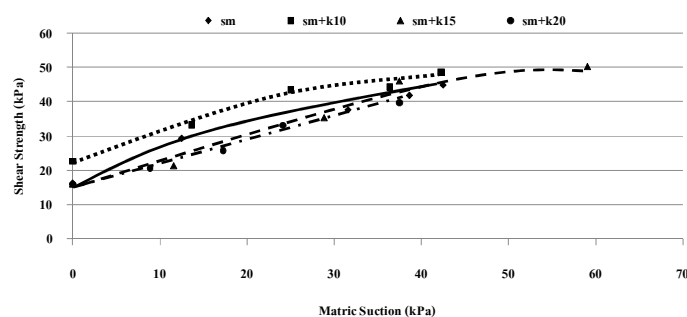
ภาพที่ 11 กราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวนอน



ภาพที่ 12 กราฟแรงดันน้ำในดินด้านลบกับการเคลื่อนที่ในแนวนอน

ตารางที่ 2 แสดงตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดสอบ

สัญลักษณ์	c' (kPa)	ϕ'	ϕ^b	θ_r	θ_s	α	n
sm	0	36.8	26.6	0.125	0.353	0.074	1.268
sm+k 10%	7.0	41.8	27.3	0.018	0.353	0.064	1.149
sm+k 15%	7.2	35.8	31.8	0.016	0.358	0.066	1.154
sm+k 20%	12.8	24.9	34.3	0.202	0.367	0.052	1.404



ภาพที่ 13 กราฟกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับแรงดันน้ำในดินด้านลบที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

5. ผลของการเพิ่มปริมาณเคโอลินกับการกัดเซาะ

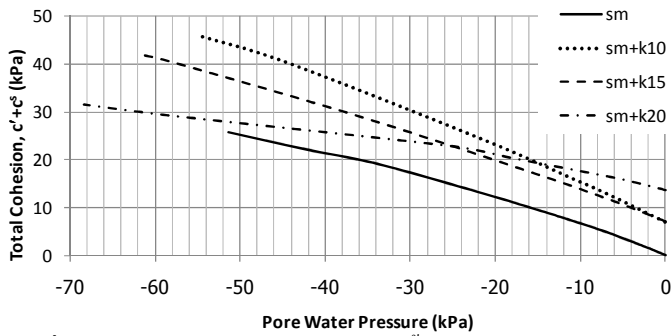
การเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดเซาะจากการผสมเคโอลินซึ่งถ้าพิจารณาตามภาพที่ 1 ก. จะเห็นได้ว่าดินที่มี

ความเข้มข้นมากก็จะต้านทานการกัดเซาะได้มากเช่นกัน ภาพที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเชื่อมแน่นรวม ($c' + c^s$) กับการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำ พบว่าในสถานะที่แรงดันน้ำมีค่าบวกและอิ่มตัวด้วยน้ำ ($c^s = 0$) การเพิ่มเคโอลินจะเป็นตัวช่วยเพิ่มค่าแรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') เป็นผลทำให้เม็ดดินมีแรงต้านต่อการดึงของน้ำได้มากขึ้นเป็นผลทำให้การเกิดกัดเซาะลดลง สำหรับในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะเกิดแรงเชื่อมแน่นเนื่องจากแรงดันน้ำในดินด้านลบขึ้น (c^s) เมื่อพิจารณาที่แรงดันน้ำในดินด้านลบเท่ากับ 0 ถึง 70 kPa. ที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 10 % โดยน้ำหนักจะมีค่าแรงเชื่อมแน่นรวมมากที่สุด ทั้งนี้ค่า c^s จะขึ้นอยู่กับความชื้นของดินด้วย ดังสมการ $c^s = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)(u_a - u_w) \tan \phi'$ ดังนั้นถึงแม้ว่าค่าแรงดูด ($u_a - u_w$) จะมีค่ามาก แต่ถ้าค่า θ มีค่าน้อยจนเข้าใกล้ศูนย์ค่า c^s ก็จะมีค่าใกล้ศูนย์เช่นกัน ดังกรณีของปราสาททรายที่แห้งมากก็จะพังทลายได้ง่าย ซึ่งแรงดูดอาจจะไม่เป็นตัวช่วยในการเพิ่มค่าแรงเชื่อมแน่น เมื่ออ้างอิงตามผลการทดสอบของ Wan and Fell (2004) จากการทดสอบบดอัดดินจากหลายตัวอย่างพบว่าดินที่บดอัดในดินด้านแห้งกว่าจุดเหมาะสม (Dry of optimum) มีโอกาสเกิดการกัดเซาะมากกว่าด้านเปียก นอกจากนั้น ดินทรายปนทรายแป้งชนิด SM เป็นดินเม็ดหยาบซึ่งเมื่อมีน้ำซึมผ่านดินอาจสูญเสียค่า c^s ได้ง่ายแต่เมื่อผสมแร่ดินเหนียวเคโอลินเข้าไปจะทำให้ดินมีความตึบแน่นมากขึ้นทำให้น้ำไหลซึมสู่ดินได้ในปริมาณที่น้อยลงและเคโอลินจะเป็นตัวช่วยรักษาแรงดูดน้ำในดินและความเชื่อมแน่นไว้

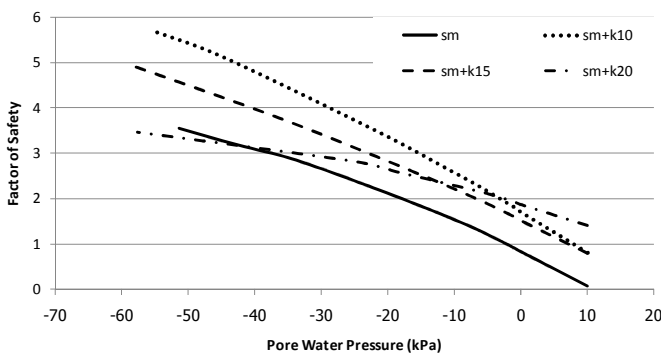
6. ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินอนันต์

ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันน้ำในดิน บนพื้นฐานของสมการลาดดินอนันต์ (อาทิ Lu and Godt, 2008) กำหนดให้ลาดดินมีมุมเท่ากับ 42 องศา, จำลองชั้นดินที่ผสมด้วยเคโอลินที่ส่วนผสมต่างๆมีความหนา 1 ม. และใช้ตัวแปรในการคำนวณตามตารางที่ 2 ภาพที่ 15 แสดงผลจากการวิเคราะห์พบว่าที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 10 % โดยน้ำหนักจะมีค่าความปลอดภัยสูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆในช่วงแรงดูดมากกว่า 5 kPa. ขึ้นไป แต่เมื่อแรงดูดมีค่าลดลงต่ำกว่า 5 kPa. และเข้าสู่สถานะอิ่มตัวด้วยน้ำค่า

อัตราส่วนความปลอดภัยที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 20 % โดยน้ำหนักจะมีค่าสูงสุด



ภาพที่ 14 กราฟแรงเชื่อมแน่นรวมกับแรงดันน้ำในดิน



ภาพที่ 15 กราฟอัตราส่วนความปลอดภัยกับแรงดันน้ำในดินของดินที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

6. สรุป

1. จากการทดสอบการบดอัดที่อัตราส่วนผสมเคโอลินที่ % ต่างๆพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเคโอลินจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณเคโอลินเพิ่มขึ้นในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ความหนาแน่นแห้งเริ่มลดลง อีกทั้งปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%Optimum water content) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเคโอลินที่เพิ่มขึ้น

2. กำลังรับแรงเฉือนของดินผสมระหว่างทรายแป้งที่ผู้พังจากหินแกรนิตกับเคโอลิน 10 % โดยน้ำหนัก จะมีค่ามากกว่าดินอัตราส่วนผสมอื่นๆ แต่แรงเชื่อมแน่นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเคโอลินที่ผสมเพิ่มขึ้น ส่วนมุมเสียดทานภายในประสิทธิผลจะมีค่าสูงสุดที่ส่วนผสมเคโอลิน เท่ากับ 10 % โดยน้ำหนัก แล้วจึงมีค่าลดลงตามปริมาณเคโอลินที่เพิ่มขึ้นและลักษณะของเส้น Envelop ของดินทั้ง 4 ชนิดไม่เป็นเส้นตรง

3. ปริมาณเคโอลินที่ผสมไปนี้จะเป็นตัวช่วยเพิ่มแรงดูดน้ำในดินและความอุ้มน้ำทำให้ดินมีความเชื่อมแน่นมากขึ้นเป็นผล

ให้เกิดการกัดเซาะได้น้อยลง ส่วนด้านเสถียรภาพของลาดดินที่อัตราส่วนผสมเคโอลิน 10 % โดยน้ำหนักจะมีค่าความปลอดภัยสูงสุดที่แรงดันน้ำในดินด้านลบมากกว่า 5 kPa. ขึ้นไป การผสมเคโอลินในปริมาณที่มากจะเป็นตัวช่วยลดการเกิดการกัดเซาะแต่จะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของลาดดินเช่นกัน ซึ่งจากการศึกษาบ่งชี้ว่าอัตราส่วนผสมเคโอลินที่ 10 % โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงแต่จะต้องมีการทดสอบการกัดเซาะที่เกิดขึ้นจริงในสนามต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] อภินิติ ไชตสังกาศ และ วิชญพงศ์ พอลิละ. 2551. การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำในดิน. การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 46 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, จัดโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บางเขน
- [2] Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soil*. John Wiley & Sons.
- [3] Gray, D.H. and Sotir, R.B. 1996. *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization A Practical Guide for Erosion Control*. John Wiley & Sons.
- [4] Jotisankasa, A. and Mairaing, W. 2010. *Suction-monitored direct shear testing of residual soils from landslide-prone areas*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 136, No. 3, March 1, 2010.
- [5] Kyu-Hyun, L., Sang-Seom, J., Tae-Hyung, K. 2007. *Effect of Fines on the Stability of Unsaturated Soil Slope*. Journal of the KGS, Vol. 23, No 3, pp. 101-109.
- [6] Lu, N., and J., Godt. 2008. *Infinite Slope Stability under Steady Unsaturated Seepage Conditions*. Water Resour. Res., 44, W11404, doi:10.1029/2008WR006976.
- [7] Lu, N. and Likos, W.J. 2003. *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- [8] Van Genuchten, M. T. 1980. *A Closed form Equation for Predicting The Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892– 898.
- [9] Wan, C.F. and Fell, R. 2004. *Investigation of Rate of Erosion of Soil in Embankment Dam*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 2, pp. 378-380.