อิทธิพลของการเสื่อมสภาพต่อกำลังรับแรงเฉือนของหินทรายแป้งและเสถียรภาพเชิงลาด

INFLUENCE OF DEGRADATION ON MOBILIZED SHEAR STRENGTH OF SILTSTONE FOR SLOPE STABILITY ANALYSIS

นวัต ปรีชาศิลป์[1] บารเมศ วรรธนะภูติ[2] และ อภินิติ โชติสังกาศ[3,*]

[1] *นิสิตปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)*

[2,3] *อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)*

**Corresponding author; E-mail address: nawat.pr@ku.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของหินทรายแป้งที่เกิดขึ้นระหว่างการขุด-ถม และส่งผลต่อเสถียรภาพเชิงลาดของกองดินถม โดยหินตัวอย่างที่ศึกษาได้เก็บจาก โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง สภาพแวดล้อมและภูมิอากาศ สามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของหินทรายแป้ง ซึ่งสามารถจำลองในห้องปฏิบัติการด้วยกระบวนการเปียกสลับแห้ง และการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงกด ความคงสภาพและเสื่อมสภาพของหินทรายแป้ง สามารถวิเคราะห์ได้จากผลการทดสอบ Slaking Test, Crumb Test และ Grain Size Distribution Analysis ด้วยอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลง และสังเกตได้จากผลการทดสอบ Direct Shear Test และ Unconfined Compressive Strength Test กำลังรับแรงเฉือนของหินทรายแป้งทั้งแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการเสื่อมสภาพ ได้ถูกนำมาใช้จำลองในการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาด เพื่อประเมินค่าความปลอดภัยในสภาวะต่างๆ ซึ่งพบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัย คือ การเปลี่ยนแปลงสถานะของวัสดุจาก Soft Rock เป็น Hard Soil ซึ่งมีผลต่อการระบายน้ำและแรงดันน้ำส่วนเกินเมื่อถูกแรงเฉือน ซึ่งขึ้นกับอัตราการเสื่อมสภาพของวัสดุ โดยการพิบัติของเชิงลาดมีโอกาสเกิดขึ้นสูง (F.S. < 1.3) เมื่อ r_u > 0.53 และ s_u ≤ 460 kPa.

คำสำคัญ: การเสื่อมสภาพของหินทรายแป้ง, เสถียรภาพความลาดชัน, อัตราส่วนความปลอดภัยของดินถม

Abstract

This paper presents weathering behaviors of siltstone during cut and fill construction, which could affect the stability of slope. The siltstone specimen was taken from Mae Moh mine, Lampang province, Thailand. Construction activities and climate environments could alter the physical condition of siltstone. The physical alteration of siltstone had been simulated in laboratory by wet-dry process, and different loading magnitudes. The durability and degree of weathering of siltstone specimen was determined by slaking test, jar test and grain size distribution analysis. The weathering mechanisms significantly influence the shear strength of material obtained by direct shear test and unconfined compressive strength test. Variation of drained and undrained shear strength parameters of siltstone were summarized and utilized for slope stability analysis of a dumped embankment. The results reveal that the factor of safety (F.S.) is mainly influenced by degree of weathering from Soft Rock to Hard Soil. Material consistency could affect drainage condition and shear-induced pore-water pressure. The slope stability could become unstable (F.S. < 1.3) if r_u > 0.53 and s_u ≤ 460 kPa

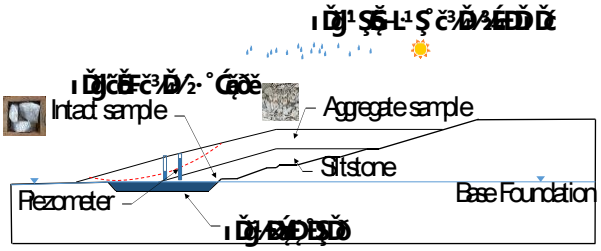
Keywords: Degradation of Siltstone, Slope Stability, Safety of Dump Material

1. บทนำ

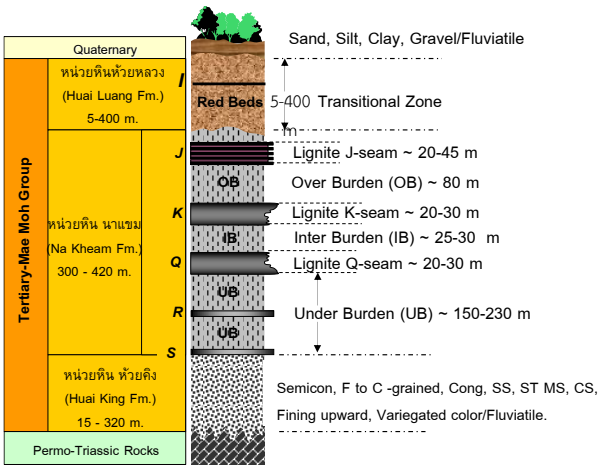
สมบัติและพฤติกรรมของหินทรายแป้งสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงตามกลไกการผุพังในธรรมชาติและอิทธิพลจากกระบวนการก่อสร้าง (Jackson, 1953; Sadisun et al., 2001; และ Gautam and Shakoor, 2013) จากพฤติกรรมเบื้องต้นที่กล่าวส่งผลต่อปัญหาเสถียรภาพเชิงลาดของหินทรายแป้งระหว่างงานขุดและงานถม ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ดังแสดงใน**รูปที่ 1** (Miscevic and Vlastelica, 2014, Rodvinij and Wattanachai, 2017 และ Preechasin, 2020)

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมและสมบัติการเสื่อมสภาพของหินทรายแป้ง ในพื้นที่เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นชั้นวัสดุหลัก (Overburden Layer) ที่อยู่เหนือชั้นถ่านหิน และเกิดขึ้นในยุค Tertiary

Period (หน่วยหินนาแขม) ดังแสดงใน**รูปที่ 2** ตัวอย่างวัสดุหินทรายแป้งถูกเก็บมาจากผนังเหมืองทิศตะวันออก ที่ระดับความลึกประมาณ +300 เมตร (รทก.) เพื่อนำมาจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพในห้องปฏิบัติการ (ได้แก่ การเปียกสลับแห้ง การขุด-ถม) และวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำ จากนั้นได้สร้างแบบจำลองเชิงลาด และวิเคราะห์ค่าความปลอดภัยเสถียรภาพของพื้นที่ทิ้งดิน เหมืองแม่เมาะ ศึกษาโอกาสเกิดการพิบัติของเชิงลาด ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของหินทรายแป้ง



รูปที่ 1 ตัวอย่างกลไกการเสื่อมสภาพของหินทรายแป้งต่อปัญหาเสถียรภาพเชิงลาด (Preechasin, 2020)



รูปที่ 2 ลักษณะทั่วไปของชั้นหิน เหมืองแม่เมาะ จ.ลำปาง (EGAT, 2012)

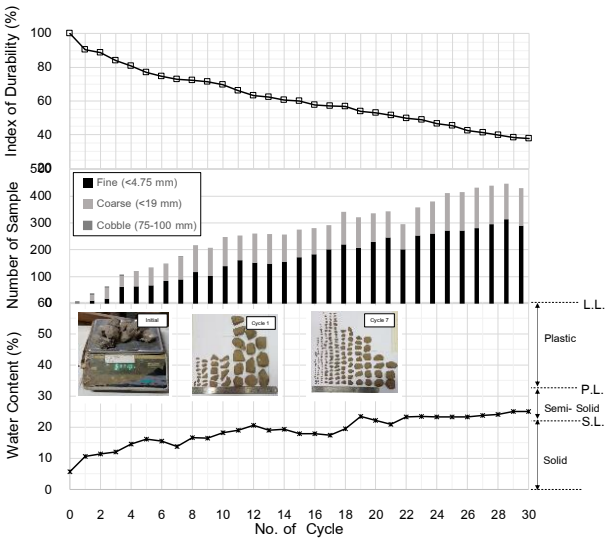
2. การจำลองการเสื่อมสภาพในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างหินทรายแป้ง ได้ถูกนำมาทดสอบดัชนีทางวิศวกรรมของวัสดุดังแสดงใน**ตารางที่ 1** และได้ประเมินความคงทนของหินทรายแป้งโดยการทดสอบ Slake Durability Test (ASTM D4644) และ Crumb Test (ASTM D6572 – 20) ซึ่งพบว่าวัสดุดังกล่าวมีความคงทนระดับปานกลางถึงสูง

ตารางที่ 1 สรุปค่าทดสอบดัชนีจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Preechasin, 2020)

Engineering Index	*Values*
Total density,γ (t/m^3)	*1.95*
Natural water content, w_n (%)	*6 - 15.0*
Liquid limit, LL (%)	*60.1*
Plastic limit, PL (%)	*32.5*
Plastic index, PI (%)	*27.3*
Durability index (%)	*77 - 83 (high)*
Crumb Test	*Class 4 (medium hard)*

รูปที่ 3 แสดงผลการจำลองสภาวะเปียกสลับแห้งของตัวอย่างหินทรายแป้ง โดยใช้เครื่องมือการทดสอบความคงทน Slake Durability Test (ASTM D4644) ที่จำนวน 30 วัฏจักร ซึ่งพบว่า ก่อนการทดสอบ ตัวอย่างวัสดุหินทรายแป้งมีขนาดอนุภาคระหว่าง 7.5 – 10.0 มม. และมีค่าความชื้นเฉลี่ยประมาณ 6 % เมื่อตัวอย่างวัสดุผ่านกระบวนการขัดสีและเปียกสลับแห้ง ทำให้มีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น และขนาดอนุภาคเล็กลง โดยการเปลี่ยนแปลงความชื้นและขนาดอนุภาคของวัสดุ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในช่วงวัฏจักรที่ 1 ถึง 3 อนุภาควัสดุเกิดการแตกตัวและมีจำนวนอนุภาคขนาด 7.5 – 10.0 มม. เหลือเพียง 50 % (ของจำนวนก้อนตัวอย่างทั้งหมด) วัสดุมีความชื้นเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง (Solid Stage) เป็นกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Stage) เมื่อถูกกระบวนการขัดสีและเปียกสลับแห้งจนถึงวัฏจักรที่ 10 และเมื่อจำนวนวัฏจักรเพิ่มขึ้นถึง 20 รอบ วัสดุตัวอย่างจะแตกตัวจนมีอนุภาคเล็กกว่า 4.45 มม. ประมาณ 50 % (ของจำนวนก้อนตัวอย่างทั้งหมด)



รูปที่ 3 การจำลองสภาวะเปียกสลับแห้งโดย Slaking test (Preechasin, 2020)

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและขนาดอนุภาควัสดุในห้องปฏิบัติการและสภาวะแวดล้อมในสนาม เช่น สภาพภูมิอากาศ และกระบวนการขุด-ถม ส่งผลต่อขนาดอนุภาคและการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักกดทับ จึงเกิดการจำลองโปรแกรมศึกษาอิทธิพลดังกล่าวต่อกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุหินทรายแป้ง โดยตัวแปรการเสื่อมสภาพประกอบด้วย

ขนาดอนุภาคตัวอย่าง จำนวนวัฏจักรเปียกสลับแห้ง และ หน่วยแรงกด ดังแสดงใน**ตารางที่ 2**

โปรแกรมการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของหินทรายแป้งจำแนกเป็น 2 ลักษณะ โดยวัสดุตัวอย่างที่ทดสอบประกอบด้วย (1) ตัวอย่างวัสดุที่เก็บในสนามชนิด Block Sample แบบไม่รบกวน (Intact Specimen) และ (2) ตัวอย่างวัสดุที่เก็บในสนามที่อนุภาคมีขนาดเล็ก (Reconstituted Specimen) และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 (Sieve opening = 2 มม.) โดย โปรแกรมที่ 1 นั้น ได้นำตัวอย่างวัสดุ Intact Specimen มาตัดให้มีขนาดสำหรับการทดสอบ Direct Shear test (DS) และ Unconfined Compression Test (UC) จากนั้น ตัวอย่างถูกนำมาผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง โดยการแช่น้ำ 24 ชั่วโมงและนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จำนวนวัฏจักร (N) เท่ากับ 0, 1 และ 7 ก่อนนำไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำต่อไป

สำหรับโปรแกรมที่ 2 วัสดุตัวอย่างซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็ก ได้ถูกนำมาใส่ในแบบพิมพ์ แช่น้ำ และทำการใส่น้ำหนักกดทับในแนวดิ่ง (σ'_n) แตกต่างกัน 6 ระดับ ได้แก่ 350 kPa, 700 kPa, 1,400 kPa, 3,400 kPa, 6,100 kPa, และ8,200 kPa และปล่อยทิ้งไว้จนการยุบตัวของตัวอย่าง มีค่าน้อยมาก (ประมาณ 24 ชั่วโมง.) จากนั้น จึงทำการถอดตัวอย่างออกจากแบบพิมพ์และนำไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือนต่อไป (Preechasin, 2020)

ตารางที่ 2 โปรแกรมการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างหินทรายแป้ง

Testing Program	*Sample*	*Sample preparation*	*No. of Test*
1	*Intact specimen (Coarse aggregate)*	*Wet and dry processing (N = 0, 1 and 7 cycles)*	*DS (3 sets) UC (3 set)*
2	*Reconstituted specimen (Fine aggregate)*	*Soak with different applied pressure (350 to 8232 kPa)*	*DS (2 sets) UC (6 set)*

3. ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของหินทรายแป้ง

3.1 การแปลผล Direct shear test

ผลการทดสอบตัวอย่างวัสดุ Intact Specimen (โปรแกรม 1) และ Reconstituted Specimen (โปรแกรม 2) ที่ได้ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง จำนวน 0, 1 และ 7 วัฏจักร ได้นำมาแปลผลเพื่อหาค่า Cohesion (c') และ Friction Angle (ϕ') ที่ Peak Value และ Residual Value ดังสรุปใน**ตารางที่ 3** และ**ตารางที่ 4**, ตามลำดับ

การแปลผลค่า Cohesion (c') และ Friction Angle (ϕ') พบว่า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อ Shear Strength Parameter คือ (1) ระดับการเสื่อมสภาพของตัวอย่าง อาทิ จำนวนวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (No. of Cycle) และ ขนาดอนุภาควัสดุ (Intact Specimen, Reconstituted Specimen และ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าและเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 10) ดังแสดงใน **รูปที่ 4** และ **รูปที่ 5** และ (2) Shear Strain at failure (Peak Shear Strength และ Residual Shear Strength) ดังสรุปใน**ตารางที่ 3** และ **4**

ตัวอย่าง Intact Specimen ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง จะมีค่า c' เท่ากับ 185 kPa และ ϕ'เท่ากับ 32 องศา และเมื่อผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง จะทำให้ค่า c' ลดลง เหลือ 118 kPa และ ϕ'เท่ากับ 30 องศา

อิทธิพลของการถูกรบกวนจากธรรมชาติและกระบวนการก่อสร้างส่งผลต่อขนาดอนุภาคตัวอย่างและ ค่า Cohesion โดย ตัวอย่างวัสดุ Intact Specimen มีค่า c' ที่สูงกว่า Reconstituted Specimen ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 11 kPa ถึง 50 kPa สำหรับ ขนาดอนุภาค 4 มม. – 2 มม. และ ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 2 มม., ตามลำดับ อย่างไรก็ดี ค่า Friction Angle ไม่มีความแตกต่างกันมากอย่างเป็นนัยยะสำคัญ

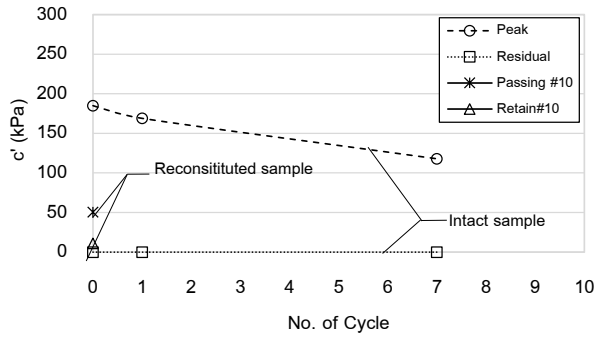
Shear Strain มีผลต่อค่า Cohesion (c') และ Friction Angle (ϕ') โดยที่ Residual Shear Strength จะมีค่า c' เท่ากับ ศูนย์ และ ϕ' มีค่าลดลงเล็กน้อย ประมาณ 26 ถึง 30 องศา ตามวัฏจักรเปียกสลับแห้ง

ตารางที่ 3 สรุปพารามิเตอร์ Direct shear, Coarse aggregate ที่ σ'_n ในช่วง 250 kPa ถึง 1,000 kPa

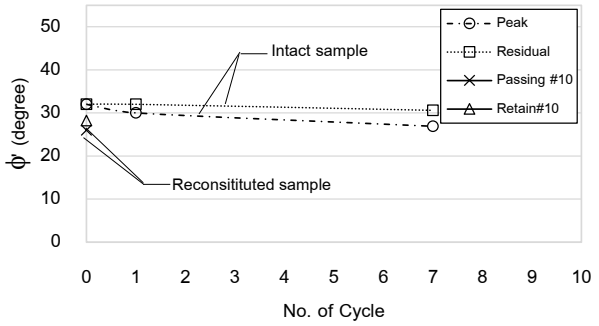
Parameter		*Coarse aggregate*		
		Initial	*1 cycle*	*7 cycle*
Peak	c'*(kPa)*	*185*	*169*	*118*
	ϕ'*(Degree)*	*32*	*30*	*30*
Residual	c'*(kPa)*	*0*	*0*	*0*
	ϕ'_r*(Degree)*	*32*	*32*	*30*

ตารางที่ 4 สรุปพารามิเตอร์ Direct shear, Fine aggregate

Parameter		*Fine aggregate*	
		Retain #10	*Passing #10*
Peak	c'*(kPa)*	*11*	*50.5*
	ϕ'*(Degree)*	*28.2*	*26*



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ Cohesion และ จำนวนวัฏจักร

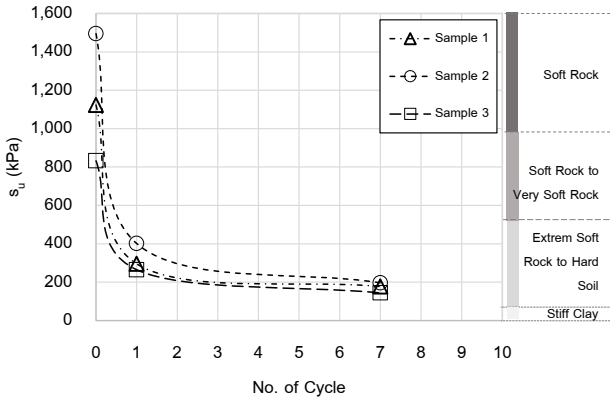


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ Friction angle และ จำนวนวัฏจักร

3.2 การแปลผล Unconfined Compression Test

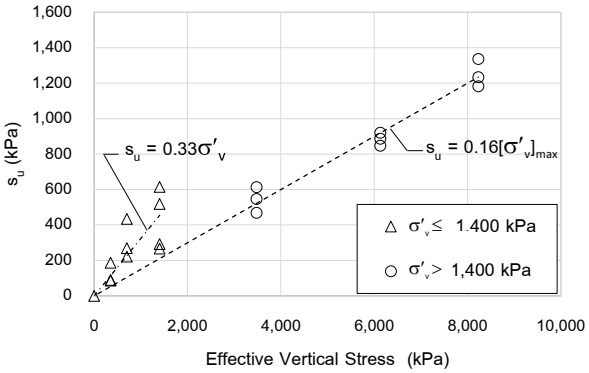
ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) ได้คำนวณจาก 0.5 เท่าของค่า Unconfined Compressive Strength ของตัวอย่าง (q_u) ซึ่งพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า s_u ได้แก่ (1) ระดับการเสื่อมสภาพของตัวอย่าง ซึ่งสะท้อนจากจำนวนวัฏจักรเปียกสลับแห้ง และจำลองโดยโปรแกรมทดสอบที่ 1 และ (2) หน่วยแรงกดสูงสุดในแนวดิ่งก่อนถูกเฉือน $[\sigma'_v]_{max}$ ซึ่งจำลองโดยโปรแกรมการทดสอบที่ 2

อิทธิพลของกระบวนการเสื่อมสภาพ (เปียกสลับแห้ง) ต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของวัสดุหินทรายแป้งแสดงดัง**รูปที่ 6** ตัวอย่างหินทรายแป้ง (Intact Specimen) ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งในห้องปฏิบัติการ จะมีค่า s_u อยู่ระหว่าง 830 – 1,500 kPa หรือ มีค่า q_u เฉลี่ยเท่ากับ 2.33 MPa ซึ่งจัดเป็นวัสดุประเภท Soft Rock (Kanji, 2014) และเมื่อวัสดุหินทรายแป้งผ่านการเปียกสลับแห้ง จำนวน 1 วัฏจักรทำให้ค่า s_u ลดลง อย่างมาก และมีค่าอยู่ในช่วง 250 - 450 kPa (หรือ ค่า q_u เท่ากับ 700 kPa) เทียบเท่ากับวัสดุประเภท Very Soft Rock และ Extremely Soft Rock เมื่อวัสดุผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งอย่างต่อเนื่องจนถึงวัฏจักรที่ 7 ค่า s_u ลดลงอยู่ระหว่าง 170 - 230 kPa (หรือ มีค่า q_u เท่ากับ 400 kPa) ซึ่งวัสดุได้แปรสภาพเป็น Extremely Soft Rock to Hard Soil



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง s_u กับ จำนวนวัฏจักร

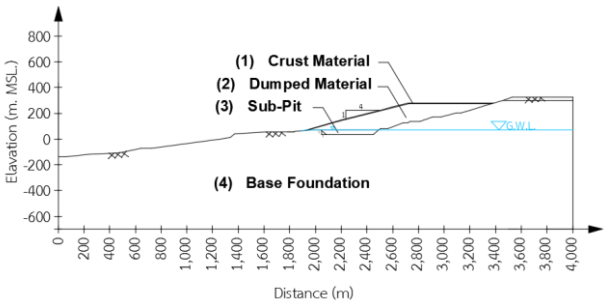
หน่วยแรงกดสูงสุดในแนวดิ่ง $[\sigma'_v]_{max}$ ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของวัสดุหินทรายแป้ง ดังแสดงใน**รูปที่ 7** ตัวอย่างวัสดุหินทรายแป้งที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (ขนาดเล็กกว่า 2 มิลิเมตร) เมื่อถูกทับถมและมีแรงกดกระทำที่มากขึ้น จะส่งผลให้มีค่า s_u เพิ่มขึ้น และสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้เท่ากับ $s_u = 0.16\ [\sigma'_v]_{max}$ ซึ่งคล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า $[s_u]_{mob} = 0.22\ \sigma'_p$ ของดินเหนียวอ่อน โดย σ'_p คือ ค่า Preconsolidation Pressure ของดินเหนียวอ่อน (Mesri , 1989) อย่างไรก็ดี เมื่อหน่วยแรงกดในแนวดิ่งน้อยกว่า 1,400 kPa ความสัมพันธ์ระหว่าง s_u และ σ'_v มีแนวโน้มไม่ชัดเจน ซึ่งคาดว่าได้รับอิทธิพลจากแรงที่เกิดระหว่างกระบวนการเตรียมตัวอย่างเข้าแม่พิมพ์ ทำให้ค่าความสัมพันธ์ สูงและเท่ากับ $s_u = 0.33\ \sigma'_v$



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง s_u และหน่วยแรงกดในแนวดิ่ง

4. แบบจำลองเสถียรภาพเชิงลาด

แบบจำลองเสถียรภาพเชิงลาด 2 มิติ ถูกสร้างขึ้นในโปรแกรม GeoStudio (V.12) เพื่อศึกษาอิทธิพลการเสื่อมสภาพของหินทรายแป้งต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเชิงลาด (F.S.) โดยกลไกการเสื่อมสภาพ จะทำให้ค่าพารามิเตอร์ c', ϕ', $\Delta u_{(shear\ induce)}$ และ s_u ของหินทรายแป้งเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในหัวข้อที่ 2 และ 3 ส่งผลให้ค่า F.S. ไม่คงที่



รูปที่ 8 พื้นหน้าตัดจำลองเสถียรภาพเชิงลาด

รูปที่ 8 แสดงแบบจำลองเสถียรภาพเชิงลาด บริเวณพื้นที่ทิ้งดินของเหมือง ซึ่งแบบจำลองมีความกว้าง 4,000 เมตร และสูง 1,000 เมตร กองวัสดุทิ้งดินมีความลาดชันเฉลี่ย 1:4 (V:H) มีความสูงจากระดับดินเดิมประมาณ 200 เมตร และที่ฐานชั้นดินเดิมบริเวณปลายเชิงลาด (Toe Slope) มีการขุดวัสดุออกเป็นแอ่งลึก (Sub-Pit) ประมาณ 38 เมตร ระดับ

น้ำใต้ดิน กำหนดให้อยู่ที่ระดับผิวชั้นดินเดิม [Elev. = + 75 m (MSL)] และเกณฑ์ค่า F.S. ≥ 1.3 สำหรับงานขุด-ถมในเหมือง

วัสดุในแบบจำลองประกอบด้วย 4 ประเภท ได้แก่ (1) วัสดุผิวดิน (Crust Material) ซึ่งมีความหนา 5 เมตร (2) วัสดุดินถม (Dumped Material) ซึ่งเป็นหินทรายแป้งที่ขุดออกมาจากการทำเหมืองถ่านหิน, (3) วัสดุถมในบ่อ (Sub-Pit) และ (4) วัสดุชั้นดินเดิม (Base Foundation) หนาประมาณ 1,100 เมตร

โปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาดประกอบด้วย 3 รูปแบบ โดยตัวแปรหลักในการศึกษา คือ ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ Dumped Material ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากกลไกการเสื่อมสภาพ และสภาวะการระบายน้ำ ซึ่งสมมุติให้วัสดุผิวดิน วัสดุถมในบ่อ และวัสดุชั้นดินเดิมมีสมบัติกำลังรับแรงเฉือน (c', ϕ') ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนี้

4.1 โปรแกรมที่ 1 (ESSA, $\Delta u_{(shear\ induce)} = 0$)

โปรแกรมที่ 1 สมมุติให้วัสดุทั้ง 4 ชนิดมีสภาวะระบายน้ำ (Fully Drained Condition) และ ใช้พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในสนามเป็นค่า c', ϕ' หรือ Effect Shear Strength Analysis (ESSA) ดังแสดงในสมการที่ (1) หน่วยแรงดันน้ำในดินประกอบด้วย หน่วยแรงดันน้ำสภาวะสถิต (Hydrostatic Porewater Pressure , u_o) และ หน่วยแรงดันน้ำส่วนเกินจากการถูกเฉือน [Shear Induced Porewater Pressure, $\Delta u_{(shear\ induce)}$] ซึ่ง กรณีนี้มีค่าเท่ากับศูนย์

$$[s_u]_{mob} = c' + [\sigma_n - (u_0 + \Delta u_{(shear-induce)})]\tan\phi' \quad (1)$$

โปรแกรมนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของ Mobilized Shear Strain และการเสื่อมสภาพวัสดุซึ่งประกอบด้วย Soft Rock (ใช้สมบัติของ Intact Specimen) และ Hard Soil (ใช้สมบัติของ Reconstituted Specimen) ต่อค่า F.S. ดังนั้นการจำลองค่า c', ϕ' ของวัสดุ Dumped Material จึงมีทั้งสิ้น 6 แบบ ดังแสดงใน**ตารางที่ 5**

ตารางที่ 5 กำลังรับแรงเฉือนของวัสดุสำหรับโปรแกรมวิเคราะห์ที่ 1

No.	*Material*		*c' or s_u (kPa)*	*ϕ'(degree)*
1.	*Crust*		*0*	*30*
2.	*Dumped Material (Soft Rock)*	*Peak*	*185*	*32*
		Fully soften	*0*	*32*
		Residual	*0*	*30*
	Dumped Material (Hard Soil)	*Peak*	*51*	*28*
		Fully soften	*0*	*28*
		Residual	*0*	*26*
3.	*Sub pit*		*0*	*30*
4.	*Base foundation*		*500*	*33.5*

4.2 โปรแกรมที่ 2 (USSA, $\Delta u_{(shear\ induce)} \neq 0$)

โปรแกรมที่ 2 สมมุติให้ Dumped Material มีการเสื่อมสภาพจาก Soft Rock เป็น Hard Soil และเกิดการพิบัติในสภาวะไม่ระบายน้ำ ($\Delta u_{(shear\ induce)} \neq 0$) โปรแกรมนี้ กำหนดให้กำลังรับน้ำแรงเฉือนของ Dumped Material เป็น Undrained Shear Strength Analysis (USSA) หรือ Total Strength Analysis โดยมีค่า $[s_u]_{mob}$ ของ Dumped Material ดังสมการที่ (2) ซึ่งขึ้นกับจำนวนวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (Low Weathering, N = 0 Cycle; Intermediate Weathering, N = 1 Cycle; High Weathering, N = 7 Cycles) และ อิทธิพลของหน่วยแรงกดในแนวดิ่ง [$[s_u]_{mob} = f(\sigma'_v)$] จำนวนการวิเคราะห์มีทั้งสิ้น 4 แบบ ดังแสดงใน**ตารางที่ 6**

$$[s_u]_{mob} = s_u \quad (2)$$

ตารางที่ 6 กำลังรับแรงเฉือนของวัสดุสำหรับโปรแกรมวิเคราะห์ที่ 2

No.	*Material*		*c' or s_u (kPa)*	*ϕ'(degree)*
1.	*Crust*		*0*	*30*
2.	*Dumped Material*	*N = 0 cycle*	*1,200*	-
		N = 1 Cycle	*400*	-
		N = 7 Cycle	*200*	-
		$s_u = f(\sigma_v)$	*0.33 σ'_v เมื่อ มีความลึก < 70 m*	-
			0.16 σ'_v เมื่อ มีความลึก ≥ 70 m	-
3.	*Sub pit*		*0*	*30*
4.	*Base foundation*		*500*	*33.5*

4.3 โปรแกรมที่ 3 (ESSA, $\Delta u_{(shear\ induce)} \neq 0$)

โปรแกรมที่ 3 มีสมมุติฐานเช่นเดียวกับโปรแกรมที่ 2 โดยกำหนดให้ Dumped Material เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินขณะถูกเฉือน (Undrained Condition) และวัสดุที่เหลืออยู่ในสภาวะระบายน้ำ อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาด ใช้พารามิเตอร์ของวัสดุ Dumped Material แบบ ESSA ที่มีสภาวะ Fully Soften (c' = 0 kPa, ϕ' = 32 องศา) และมีแรงดันน้ำส่วนเกินขณะถูกเฉือน ดังสมการที่ (1) และค่า $\Delta u_{(shear\ induce)}$ ถูกป้อนเข้าในโปรแกรม GeoStudio โดยแทนด้วยพารามิเตอร์ r_u Coefficient ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\Delta u_{(shear-induce)} = \frac{r_u}{\sigma_v} \quad (3)$$

โดยค่า σ_v คือ Total Vertical Stress ที่ระนาบพิบัติ ขั้นตอนการวิเคราะห์ จะทดลอง (Trial) ป้อนค่า r_u Coefficient ดังแสดงใน**ตารางที่ 7** จนได้ลักษณะระนาบพิบัติและ F.S. ใกล้เคียงกับโปรแกรมที่ 2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงดันน้ำส่วนเกินใน Dumped Material ต่อค่า F.S.

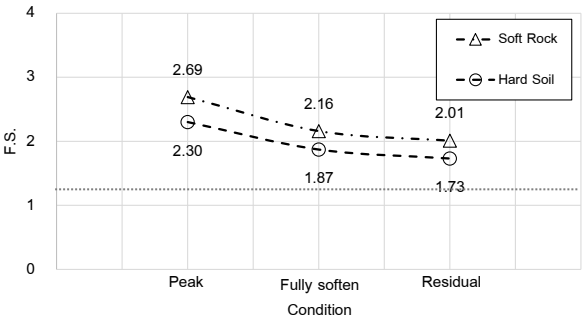
ตารางที่ 7 กำลังรับแรงเฉือนของวัสดุสำหรับโปรแกรมวิเคราะห์ที่ 3

No.	Material	c' or s_u (kPa)	ϕ'(degree)	r_u Coefficient
1.	Crust	0	30	-
2	Dumped Material	0	32	0 to 1
3.	Sub pit	0	30	-
4.	Base foundation	500	33.5	-

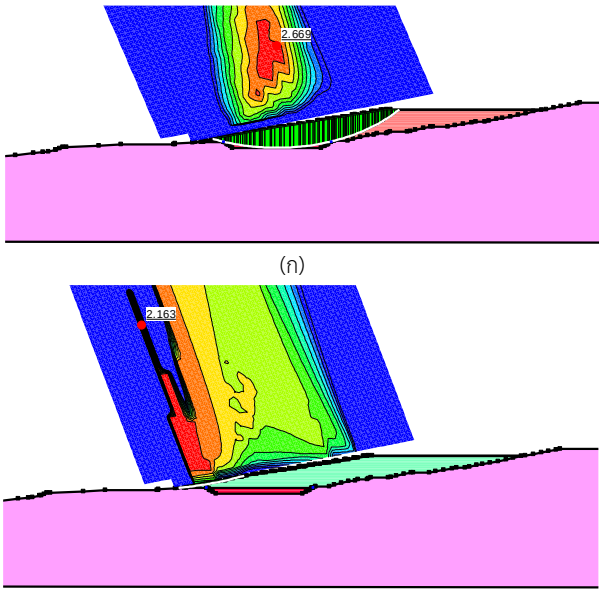
5. อิทธิพลการเสื่อมสภาพของหินทรายแป้งต่อ F.S.และลักษณะการพิบัติ

ผลการจำลองเสถียรภาพเชิงลาดของกองวัสดุหินทรายแป้ง พบว่ารูปแบบระนาบการพิบัติมีการเปลี่ยนแปลง และอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.56 ถึง 2.89 เนื่องจากพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของวัสดุหินทรายแป้ง ทำให้ (ก) ค่า Effective Shear Strength Parameter (c', ϕ') ได้รับอิทธิพลจาก Shear Strain และ ขนาดของวัสดุ (โปรแกรมที่ 1), (ข) ค่า Undrained Shear Strength Parameter (s_u) เปลี่ยนแปลง โดยวัสดุสามารถมีสภาพได้ทั้ง Soft Rock และ Hard Soil เนื่องจากอิทธิพลของความชื้น จำนวนวัฏจักรเปียกสลับแห้ง และหน่วยแรงที่กระทำ (โปรแกรมที่ 2) และ (ค) สภาวะการระบายน้ำ (Drainage Condition) ของวัสดุหินทรายแป้งและหน่วยแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นขณะถูกเฉือน [$\Delta u_{(shear\ induce)}$] (โปรแกรมที่ 3)

รูปที่ 9 แสดงอิทธิพลของ Shear Strain ต่อค่า F.S. ของกองวัสดุหินทรายแป้งในสภาวะ Fully Drained Condition [$\Delta u_{(shear\ induce)} = 0$] โดย F.S. มีค่าสูงเท่ากับ 2.30 ถึง 2.69 เมื่อวัสดุมีกำลังรับแรงเฉือนในสภาวะ Peak Shear Strength ($c' \neq 0$, ϕ') และระนาบพิบัติมีลักษณะลึก (Deep Failure Plane) ตัดผ่านวัสดุ Sub-pit และ Dumped Material ดังแสดงใน **รูปที่ 10ก** เมื่อกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ Dumped Material อยู่ในสภาวะ Fully Soften ($c' = 0$, ϕ') จะทำให้ F.S. ลดลง เท่ากับ 1.87 ถึง 2.16 และระนาบพิบัติเกิดขึ้นเฉพาะในวัสดุ Dumped Material และตื้นกว่าในสภาวะ Peak Shear Strength ดังแสดงใน**รูปที่ 10ข** อย่างไรก็ดี กองวัสดุดินถมยังคงมีความปลอดภัยแม้หินทรายแป้งอยู่ในสภาวะ Residual ($c' = 0$, ϕ'_r) ซึ่งค่า F.S. อยู่ในช่วง 1.73 ถึง 2.01 และระนาบพิบัติเกิดขึ้นในระดับตื้นคล้ายกับสภาวะ Fully Soften ผลการวิเคราะห์ยังพบว่า สภาพของวัสดุ (Soft Rock vs Hard Soil) มีอิทธิพลต่อค่า c' แต่มีผลกระทบน้อยกับค่า F.S.

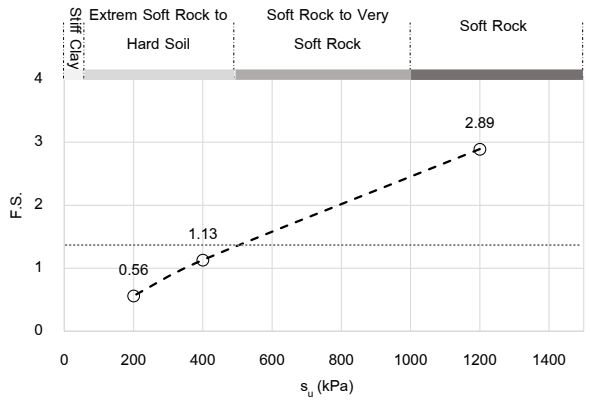


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง F.S. และกำลังรับแรงเฉือนของหินทรายแป้งในสภาวะระบายน้ำ ที่ Peak, Fully Soften และ Residual Shear Strength

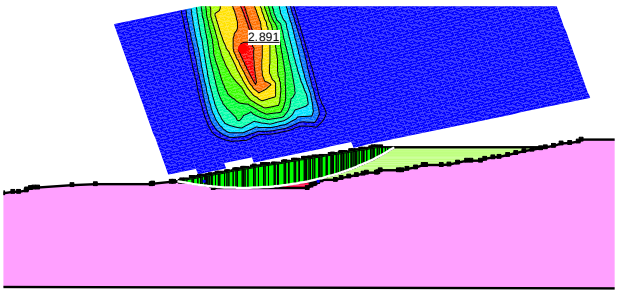


รูปที่ 10 ระนาบพิบัติที่เกิดขึ้นในสภาวะ (ก) Peak Shear Strength (ข) Fully Soften Shear Strength

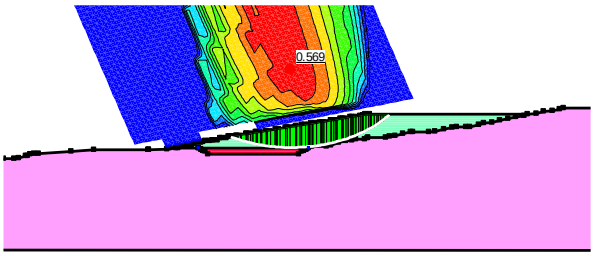
รูปที่ 11 แสดงอิทธิพลของพารามิเตอร์ Undrained Shear Strength (s_u) ต่อค่า F.S. ของกองวัสดุที่เกิดขึ้นในสภาวะ Undrained Condition [$\Delta u_{(shear\ induce)} \neq 0$] เมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนสภาพจาก Soft Rock เป็น Hard Soil มีผลทำให้ค่า s_u ลดลงอย่างมาก และอัตราส่วนความปลอดภัยลดลงจาก 2.89 ถึง 0.56 เชิงลาดของกองวัสดุเริ่มมีความไม่ปลอดภัย (F.S. $\leq$ 1.3) เมื่อ s_u ต่ำว่า 460 kPa เป็นที่สังเกตว่า ในสภาวะ Undrained Condition ระนาบพิบัติเกิดขึ้นที่ระดับลึก ตัดผ่านชั้นวัสดุ Sub-Pit และ Dumped Material ดังแสดงใน**รูปที่ 12**



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยและค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของวัสดุหินทรายแป้ง



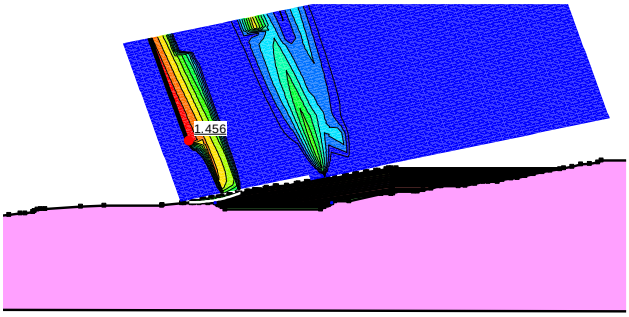
(ก)



(ข)

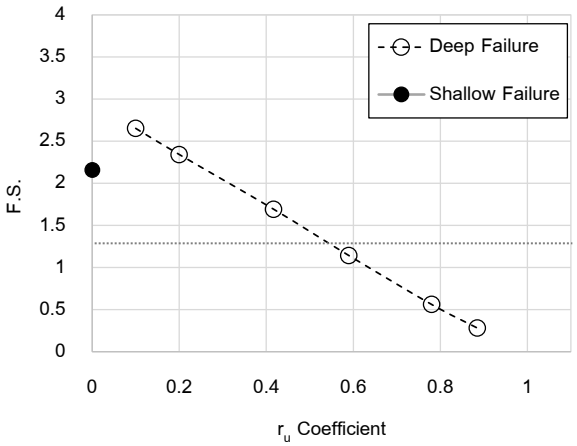
รูปที่ 12 ระนาบพิบัติที่เกิดขึ้นในสภาวะ Undrained Condition (ก) Low Weathering Condition (ข) High Weathering Condition

สำหรับกรณีที่ $s_u = f(\sigma'_v)$ พบว่าเชิงลาดมีความปลอดภัย และค่า F.S. เท่ากับ 1.45 ระนาบพิบัติเกิดขึ้นบริเวณปลายเชิงลาดตัดผ่านวัสดุ Dumped Material ดังแสดงใน**รูปที่ 13**



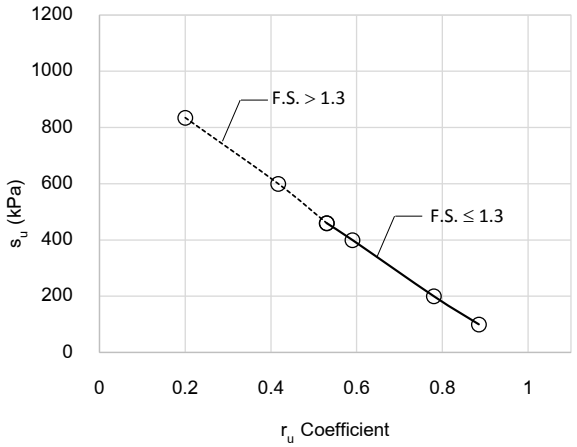
รูปที่ 13 ระนาบพิบัติที่เกิดขึ้นในกรณี $s_u = f(\sigma'_v)$

การรับแรงเฉือนของวัสดุ Dumped Material ในสภาวะไม่ระบายน้ำ โดยใช้พารามิเตอร์ USSA สะท้อนให้เห็นว่า เชิงลาดมีโอกาสเกิดการพิบัติสูง (ดังแสดงใน**รูปที่ 11**, F.S. ≤ 1.3) เมื่อแรงดันน้ำส่วนเกินเนื่องจากแรงเฉือนไม่สามารถระบายออกได้ ค่า $\Delta u_{(shear\ induce)}$ จึงเป็นหนึ่งปัจจัยสำคัญต่อเสถียรภาพเชิงลาด และสามารถวิเคราะห์ย้อนกลับโดย ใช้พารามิเตอร์ ESSA และ ค่า r_u Coefficient ผลการวิเคราะห์สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง r_u Coefficient และค่า F.S. ดังแสดงใน**รูปที่ 14** ซึ่งพบว่า ในกรณีที่ $r_u = 0$ [$\Delta u_{(shear\ induce)} = 0$] ระนาบการพิบัติจะเกิดขึ้นในลักษณะตื้นเช่นเดียวกับ**รูปที่ 10ข** และมีค่า F.S. = 2.16 และเมื่อเกิด $+\Delta u_{(shear\ induce)}$ ในวัสดุ Dumped Material (โดยค่า r_u Coefficient เท่ากับ 0.2 ถึง 0.88) จะทำให้ค่า F.S. ลดลง จาก 2.34 ถึง 0.28, ตามลำดับ



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง F.S. และ r_u Coefficient

รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง r_u Coefficient และ s_u ของเชิงลาดวัสดุ Dumped Material โดยที่เชิงลาดมีโอกาสเกิดการพิบัติสูง (F.S. < 1.3) เมื่อวัสดุอยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำและ ค่า s_u ของ Dumped Material ต่ำกว่า 460 kPa หรือวัสดุหินทรายแป้งกลายสภาพเป็น Very Soft Rock หรือ Hard Soil และ $\Delta u_{(shear\ induce)}$ มีค่ามากกว่า 0.53 / σ_v



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_u Coefficient และ s_u

6. สรุปและเสนอแนะ

การศึกษาพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของหินทรายแป้ง จากเหมืองแม่เมาะ จ.ลำปาง ได้ดำเนินการโดยเก็บตัวอย่างวัสดุ มาจำลองกลไกการผุพังในธรรมชาติและอิทธิพลจากการก่อสร้างในห้องปฏิบัติการ และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ ทั้งแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองเสถียรภาพเชิงลาดของพื้นที่ทิ้งดิน ผลการวิจัย พบว่า

1) ผลการวิเคราะห์การทดสอบ Slaking Test และ Crumb Test พบว่า วัสดุหินทรายแป้งมีค่าความคงทนอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง อย่างไรก็ดี อนุภาควัสดุมีการแตกตัวเล็กลงและมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างสังเกตได้ชัด และเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นกึ่งของแข็ง เมื่อผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งและการขัดสี 3 วัฏจักร
2) ผลการจำลองกลไกการผุพังในธรรมชาติต่อกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ พบว่า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่า c', ϕ' และ s_u ของวัสดุหินทรายแป้ง ได้แก่ ขนาดอนุภาค ปริมาณความชื้น จำนวนวัฏจักรเปียกสลับแห้ง ค่าความเครียด และหน่วยน้ำหนักกดทับ
3) แบบจำลองเสถียรภาพเชิงลาดของกองวัสดุหินทรายแป้งได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเสื่อมสภาพ และ สภาวะการระบายน้ำ ต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัย และพบว่า กลไกที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อค่า F.S. คือ การเปลี่ยนสถานะของวัสดุจาก Soft Rock เป็น Hard Soil และสภาวะการระบายน้ำของวัสดุ Dumped Material
4) ในกรณีที่วัสดุ Dumped Material อยู่ในสภาวะระบายน้ำ เชิงลาดจะมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยผ่านเกณฑ์ และค่า F.S. อยู่ระหว่าง 2.96 ถึง 1.73 ขึ้นกับค่า c', ϕ'
5) ในกรณีที่วัสดุ Dumped Material เสื่อมสภาพเป็น Very Soft Rock หรือ Hard Soil และอยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำ จะทำให้ค่า F.S. ลดต่ำลง และระนาบพิบัติมีโอกาสเกิดขึ้นที่ระดับลึก เมื่อ s_u มีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 460 kPa อย่างไรก็ตาม ถ้าอัตราการถมช้าและกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของวัสดุสามารถพัฒนาเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักกดทับ ในอัตราส่วน $s_u = 0.16\,\sigma'_v$ จะส่งผลให้ ค่า F.S. ของเชิงลาดผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย และมีค่าเท่ากับ 1.45
6) เมื่อวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาดโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ Dumped Material เป็น ESSA และมีแรงดันน้ำส่วนเกิน พบว่า เชิงลาดมีโอกาสเกิดการพิบัติเมื่อค่า r_u Coefficient สูงกว่า 0.53

ข้อเสนอแนะในการวิจัยอนาคตประกอบด้วย (ก) ควรศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของวัสดุหินทรายแป้งด้วยเครื่องมือ Triaxial Test ที่ Confining Pressure (σ'_c) ต่ำกว่า 1,400 kPa และ σ'_c สูงมากกว่า 1,400 เพื่อศึกษาพฤติกรรม ของ $\Delta u_{(shear\ induce)}$ และความสัมพันธ์ของ s_u และหน่วยแรงกดทับ, (ข) ตรวจสอบและติดตามการเสื่อมสภาพของวัสดุหินทรายแป้งที่เกิดขึ้นในสนาม และ (ค) ศึกษาปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อ ค่า F.S. ของกองวัสดุที่มีความสูงมากกว่า 200 เมตร อาทิ อิทธิพลของวัสดุ Sub Pit และ Base Foundation, อิทธิพลของแรงน้ำใต้ดินและ Seepage Force ที่อาจสูงขึ้นในระยะยาว เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองวิศวกรรมธรณี เหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลภาคสนาม ข้อมูลพื้นฐาน และสถานที่ในการเตรียมตัวอย่าง และได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ฟีซิโอ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด และผู้มีส่วนร่วมในการทำงานวิจัยนี้ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับงานทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

[1] Christopherson, R. W. (1994). *An Introduction to Physical Geography* (Vol. 2): Macmillan Coll Div; 2nd edition (January 1994).
[2] EGAT. (2012) Geotechnical Challenge in the future of Maemoh Deep Open Cut Mine (Overview) pp 5-12
[3] Galvan V. (1999).Simulation of the geotechnical properties of arenaceous soft rocks by means of artificial materials [PhD Thesis]. Sao Paulo: Escola Politecnica, Universidade de Sao Paulo.
[4] Gautam, T., & Shakoor, A. (2013). Slaking behaviour of clay bearing rocks during a one-year exposure to natural climatic conditions. *Engineering Geology* (166), pp 17-25.
[5] Jackson, M. S., and Sherman, G. D.,. (1953). Chemical Weathering of minerals in soils. *Advances in agronomy, 5*, pp 219-318.
[6] Kanji MA. (2014) Critical issues in soft rocks, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 6, pp 186-195
[7] Mesri G. (1989). A revaluation of $s_u(mob) = 0.22\sigma'_p$ using laboratory shear tests, Canadian *Geotechnical Journal, 26*(1), pp 162-164.
[8] Miscevic, P., & Vlastelica, G. (2014). Impact of weathering on slop stability in soft rock mass. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp 1-11.
[9] Preechasin N. (2020) Influence of Degradation on Mobilized Shear Strength of Siltstone for Slope Stability Analysis Research วิทยานิพนธ์ ระดับมหาบัณฑิต มหาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) (in press)
[10] Rodvinij, P., & Wattanachai, P. (2017). Influence of claystone deterioration on shear strength of backfill. *International Journal of GEOMATE, 13*(35), pp 54-59.

[11] Sadisun, I A, Shimada H., & MATSUI K. (2001). Determination of Strength Degradation of Subang Formation Claystone Due to Weathering, Proceeding of the 3rd Asian Symposium on Geology and the Environment (*ASEGE, 3) pp.37-46*.

[12] แผนกธรณีเทคนิคเหมืองแม่ะเมาะ (1985) Mae Moh Mine Geotechnical report, Volume 3 appendix E pp 14 - 40

[13] ดนุพล, ต. (2542). หลักการธรณีวิศวกรรม. สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.