

บทที่ 2

แนวทางการหาค่าดัชนีเชิงความปลอดภัย

การวางแผนเพื่อพัฒนาเปิดหน้างานก่อสร้างในโครงสร้างมวลสารที่เป็นดินหรือหิน เช่น การตัดความลาดหน้าดินเพื่อทำถนน การปรับระดับให้มุมความชันของหน้าความลาดลดลง การตัดไหล่เขา การระเบิดหินที่เป็นเนินเขาให้เป็นขั้นตะพัก การปรับความลาดของคันเขื่อนดินหรือคันเขื่อนหินทิ้ง รวมทั้งการประเมินเสถียรภาพของมวลสารที่รองรับโหลดน้ำหนักได้ฐานราก งานพัฒนาเชิงวิศวกรรมที่กล่าวมาเหล่านี้ จำเป็นต้องมีการประเมินความปลอดภัยในระดับที่ยอมรับได้ และเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานพัฒนาอย่างเหมาะสม

2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนด

การหาเสถียรภาพความลาด (slope) หรือมวลสารที่รองรับโหลดได้ฐานราก (foundation) ด้วยวิธีเชิงกำหนด (deterministic method) นิยมระบุเป็นค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพของตัวเลขไร้มิติ มีชื่อเรียกทั่วไปว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, F.S.) ทั้งนี้ค่าตัวเลข F.S. = 1.0 แสดงว่ามวลสาร (ดินหรือหิน) ที่ตัดเป็นความลาดหรือรองรับโหลดได้ฐานราก อยู่ตรงตำแหน่งขอบต่อเนื่อง (boundary) ระหว่างความมีเสถียรภาพ (stability) กับความไม่มีเสถียรภาพ (instability) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ค่า F.S. = 1.0 แสดงว่า มวลสารอยู่ในภาวะสมดุลพอดี

เมื่อทำการคำนวณเสถียรภาพมวลสาร จากค่าตัวแปรต่างๆ แล้ว ได้ค่า F.S. น้อยกว่า 1.0 แสดงถึงภาวะของมวลสารที่ถูกใช้งาน (เป็นความลาด หรือมวลรับโหลดได้ฐานราก) มีโอกาสเกิดการพังทลาย (failure) แต่ถ้าได้ค่า F.S. มากกว่า 1.0 แสดงถึงภาวะของมวลสารมีเสถียรภาพ (stable) วิศวกรที่ทำงานเกี่ยวข้องกับมวลดินและมวลหิน นำข้อเสนอแนะในการหาค่าตัวเลขเสถียรภาพเชิงกำหนดไว้หลายแนวทาง และถูกใช้เป็นแนวทางประเมินเสถียรภาพมวลสารในภาคสนามอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน จนเรียกวิธีประเมินแบบ deterministic method เป็น conventional method

เมื่อกำหนดให้ ระบายการพังทลายเป็นแนวเชิงเส้นตรง ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (หรือค่า F.S.) ที่กำหนดอย่างง่าย คือ

$$F.S. = \frac{\tan \phi}{\tan \psi_p} \quad (2.1)$$

พจน์ ϕ หมายถึง ค่ามุมความเสียดทานภายใน ส่วนพจน์ ψ_p หมายถึง มุมเอียง (มุมชัน) ของระนาบประาะบางที่มีโอกาสที่มวลสารเกิดการพังทลายเมื่อมีการตัดความลาด

2.1.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรง

หลักการของการวิเคราะห์เชิงแรง จะกำหนดให้มวลสารที่มีโอกาสเกิดการพังทลายวางอยู่บนระนาบที่กำหนด มีชื่อเรียกระนาบดังกล่าวว่า ระนาบการพังทลายหรือการพิบัติ (failure plane) ทั้งนี้ในธรรมชาติจะพบว่า ระนาบอาจเป็นแนวเชิงเส้นตรง อาจเป็นแนวโค้งซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวงกลมรูปอาร์ก หรือเป็นรูปแบบผสมของระนาบหลายระนาบคล้ายลิ้ม และจากทฤษฎีการพังทลายของมวลสาร เช่น ทฤษฎีของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) กำหนดให้ตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อ การพังทลาย คือ ค่ากำลังวัสดุเฉือนของมวลสาร ดังนั้น การวิเคราะห์เสถียรภาพ จึงกำหนดนิยามของค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงแรงของมวลสารที่วางตัวบนระนาบการพังทลาย เป็น

$$F.S. = \frac{\text{ค่ากำลังวัสดุเฉือนของมวลดิน (มวลหิน)}}{\text{ความเค้นเฉือนที่ต้องการให้เกิดความสมดุล}} \quad (2.2)$$

หรือ

$$F.S. = \frac{\text{shear strength of the soil}}{\text{shear stress required for equilibrium}} \quad (2.3)$$

ในเชิงปฏิบัติ การคำนวณหาค่าผลลัพธ์ของ F.S. ใช้วิธีหาจากผลรวมแรงต้านทานทั้งหมดบนระนาบ (เชิงเส้นตรง หรือเชิงเส้นโค้ง) ต่อ ผลรวมของแรงที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลสารที่ปกติเป็นการไถลเลื่อนเชิงเส้น (translation sliding)

ตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.1 พจน์ตัวแปรที่เขียนเป็นภาษากรีก β คือ ค่ามุมความลาด ส่วนพจน์ ψ_p คือ ค่ามุมเอียงระนาบการพังทลายเทียบกับแนวราบ พจน์ N_u, N_r คือ ส่วนประกอบแรง

ฉากที่กระทำบนระนาบกับแรงปฏิกิริยาฉากบนระนาบ พจน์ S_a, S_r คือ แรงเฉือนที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อนกับแรงเฉือนที่ต้านการไถลเลื่อน พจน์ W, R_f คือ น้ำหนักของมวลสารกับแรงปฏิกิริยาเนื่องจากน้ำหนัก และพจน์ H คือ ความสูงในแนวตั้งของการตัดความลาด

2.1.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงโมเมนต์

หลักการของการวิเคราะห์เชิงโมเมนต์ นิยมใช้กับการพังทลายบนระนาบที่ไม่ใช่เส้นตรง ทั้งนี้กำหนดให้มีจุดศูนย์กลางของพื้นผิวการพังทลาย (อาร์กวงกลม) ที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดพิคคหนึ่ง และการไถลเลื่อนเป็นการเคลื่อนที่แบบหมุน (rotational motion) ดังนั้น การคำนวณหาค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพ จะเป็น

$$F.S. = \frac{\text{ผลรวมโมเมนต์ต้านการไถลเลื่อน}}{\text{ผลรวมโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อน}} \quad (2.4)$$

หรือ

$$F.S. = \frac{\text{summation of stabilizing (demand) moment}}{\text{summation of disturbing (demand) moment}} \quad (2.5)$$

การคำนวณค่าผลลัพธ์ของ F.S. ใช้การหาจากผลรวมของโมเมนต์ที่ต้านทานการไถลเลื่อน หาค่าโดยใช้แขนโมเมนต์ (moment arm) คูณด้วยแรงเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวโค้งรูปอาร์ก และการหาผลรวมของโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อน ก็ใช้วิธีการเดียวกัน ตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางของอาร์กวงกลม เป็นตำแหน่งที่ถูกเลือกจากการคำนวณ ที่เป็นตำแหน่งค่า F.S. ที่มีค่าต่ำ (น้อย) สุด ดังภาพสเกตช์ของรูปที่ 2.2 จุด O เป็นจุดศูนย์กลางอาร์กที่ถูกเลือก พจน์ x_1 เป็น แขนของโมเมนต์ พจน์ d เป็นค่าความยาวของอิลิเมนต์ที่กำหนด พจน์ N_r เป็น แรงปฏิกิริยาฉาก พจน์ S_r เป็น แรงเฉือนที่ต้านการไถลเลื่อนบนพื้นผิวโค้งรูปอาร์ก ส่วนพจน์ W เป็น น้ำหนักของมวลสารบนระนาบ และพจน์ r เป็นรัศมีของอาร์ก

2.1.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงพลังงาน

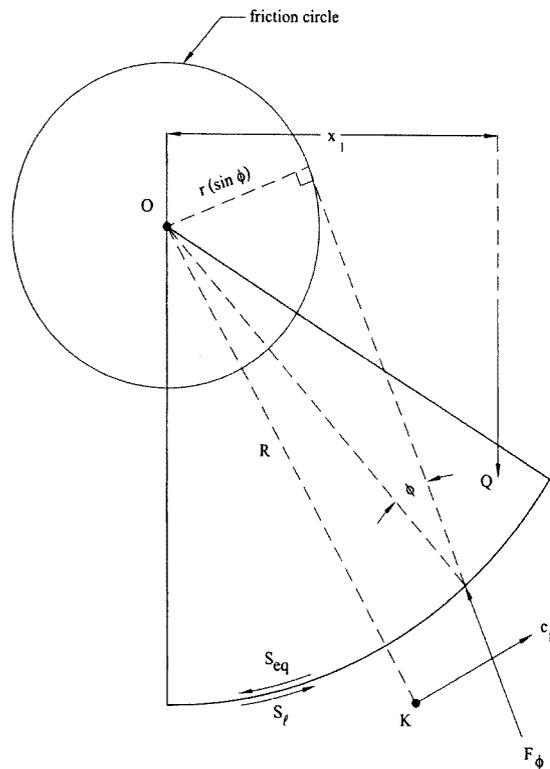
หลักการของการวิเคราะห์เชิงพลังงาน เป็นการประเมินผลลัพธ์จากตัวแปรหลัก 2 ตัวแปร ได้แก่ แรงกับความเร็ว ทั้งนี้กำหนดให้การที่มีมวลสารบนระนาบการพังทลายมีการเคลื่อนที่ได้โดยใช้ค่าความเร็วสัมพัทธ์ (relative velocity) การวิเคราะห์ประเภทนี้ใช้กับพื้นผิวการพังทลายรูปวงกลม และเทหวัตถุเป็นมวลคินที่มีค่าการยึดเกาะกันหรือโคฮีชัน เมื่อใช้วิธีการแบบใช้วงกลม

ความเสียดทาน (friction circle) วิเคราะห์หาค่าปัจจัยความปลอดภัยบนพื้นผิวของระนาบการพังทลาย จะกำหนดให้มวลดิน (ถึงแม้ว่ามีค่าความเสียดทาน) ตรงตำแหน่งพื้นผิวค่าความเสียดทานของมวลดินเป็นศูนย์ ดังนั้น ถ้านำค่าตัวแปรของแรง และค่าความเร็วเชิงกลศาสตร์ของวงกลมเสียดทาน จะได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเชิงพลังงาน เป็น

$$F.S. = \frac{\text{ผลรวมพลังงานจากแรงต้านการไถลเลื่อน}}{\text{ผลรวมพลังงานจากแรงที่กระทำให้ไถล}} \quad (2.6)$$

หรือ

$$F.S. = \frac{\text{summation of dissipated energy of resisting forces}}{\text{summation of actuated energy of existing forces}} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.3 การใช้วงกลมเสียดทานหลายวงกลมร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงพลังงาน

รูปที่ 2.3 เป็นรูปแสดงตัวอย่างการหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย ในเชิงค่าความเสียดทาน กับในเชิงแรงยึดเกาะกันของอนุภาคในมวลสารที่เป็นค่าโคฮีชัน มาแปลงเป็นพลังงาน แล้วหาค่า F.S. ที่เป็นค่าต่ำสุด พจน์ตัวแปร Q ในรูปหมายถึงแรงจากน้ำหนักมวลสารบนระนาบหรือเป็นแรงที่เป็นผลจากโหลดฐานรากที่กระทำเพิ่ม พจน์ ϕ เป็นค่ามุมเสียดทานภายในจากการทดสอบ พจน์

S_{eq} , S_e เป็นค่าแรงเฉือนด้านการเคลื่อนที่ ณ จุดจำกัดสมดุล กับแรงเฉือนที่เกิดมีผลให้เกิดการเคลื่อนที่ พจน์ r เป็นรัศมีของพื้นผิววงกลม พจน์ x_1 เป็นแกนของโมเมนต์ พจน์ O เป็นจุดศูนย์กลางวงกลมเสียดทาน ส่วนพจน์ R เป็นค่าระยะห่างจากจุดศูนย์กลางวงกลมเสียดทานเทียบกับตำแหน่งจุด K (เป็นจุดสมมุติให้เป็นจุดศูนย์กลางวงกลมเสียดทานที่กำหนดเพิ่ม) พจน์ F_ϕ เป็นค่าแรงลัพธ์เสียดทานที่พื้นผิววงกลม ส่วนพจน์ c_r เป็นแรงลัพธ์การยึดเกาะกัน (โคฮีชัน)

2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความเชื่อถือได้

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีเชิงกำหนด ปกติระบุค่าขนาดตัวแปรสมบัติมวลสารเพียงค่าเดียว เช่น ค่ามุมเสียดทานมีค่า 25 องศา ค่ากำลังวัสดุเฉือน 24 กิโลพาสคัล ในสภาวะธรรมชาติ ค่าตัวแปรเหล่านี้ เมื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ตัวอย่างเดียวกัน มีความแปรผัน (variation) ดังที่ผู้วิจัยได้คัดลอกค่าสมบัติดินในตารางที่ 2.1 ดินดังกล่าวเป็นดินโคลนทะเล (marine clay mud) ในอ่าวซานฟรานซิสโก รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา (Duncan and Buchignani, 1973; Duncan, 2000) การวิจัยใช้ตัวอย่างมาทดสอบหาค่ากำลังวัสดุเฉือนแบบไม่ยอมให้น้ำออกระหว่างทำการเฉือนดิน ค่ากำลังวัสดุนี้คือ “undrained shear strength” การทดสอบหาค่ากำลังวัสดุเฉือนนี้ใช้วิธีกดอัดสามทิศทาง (triaxial compression test) มีการแยกวิธีการทดสอบเป็น 2 วิธีย่อย วิธีแรก มีชื่อเรียกว่า UU Test ซึ่งหมายถึง Unconsolidated Undrained Test ในระหว่างการทดสอบแบบ UU นี้เป็นการทดสอบในสภาวะที่ไม่มีการยินยอมให้มีการขับน้ำออกจากมวลดินที่ใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบ และระหว่างการออกแรงจากอัดกดตัวอย่างดินที่ทดสอบมีการบังคับไม่ให้น้ำไหลออกจากตัวอย่างดินด้วย ส่วนวิธีที่สอง มีชื่อเรียกว่า CU Test ซึ่งหมายถึง Consolidated Undrained Test การทดสอบแบบ CU นี้เป็นการทดสอบในสภาวะที่ยินยอมให้มีการขับน้ำออกจากมวลดิน และระหว่างการออกแรงจากอัดกดตัวอย่างดินที่ทดสอบ มีการบังคับไม่ให้น้ำสามารถไหลออก

เมื่อพิจารณาในเชิงสถิติ สำหรับผลการทดสอบหาค่ากำลังวัสดุเฉือนแบบ “undrained shear strength: τ_u ” ทั้ง 20 ค่า ที่ระบุในตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ย (mean, x_{ave}) = 0.22 t/ft^2 (21.07 kPa) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, S.D.) = 0.033 t/ft^2 (3.16 kPa) และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation, C.O.V.) = 15 % จากผลการคำนวณได้ค่าเชิงสถิติ 3 ค่านี้ แสดงว่าข้อมูลที่เป็นคุณสมบัติเชิงกำลังเฉือนของมวลดินโคลนทะเลมีการกระจายค่าสูง

ตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบหาค่ากำลังวัสดุเหนือนดิน โคลนทะเล จาก San Francisco Bay, Marine County, California (Duncan and Buchignani, 1973)

depth (ft)	depth (m)	test	τ_u (t/ft ²)	τ_u (kPa)
10.5	3.20	UU	0.25	23.94
		CU	0.22	21.07
11.5	3.51	UU	0.23	22.02
		CU	0.25	23.94
14.0	4.27	UU	0.20	19.15
		CU	0.22	21.07
14.5	4.42	UU	0.15	14.36
		CU	0.18	17.24
16.0	4.88	UU	0.19	18.19
		CU	0.20	19.15
		UU	0.23	22.02
		CU	0.25	23.94
16.5	5.03	UU	0.15	14.36
		CU	0.18	17.24
17.0	5.18	UU	0.23	22.02
		CU	0.26	24.90
17.5	5.33	UU	0.24	22.98
		CU	0.25	23.94
19.5	5.94	UU	0.24	22.98
		CU	0.21	20.11

หมายเหตุ การแปลงค่านหน่วย 1 ton (US) = 2000 lbs; 1 ft = 0.3048 m; 1 t/ft² = 95.76 kPa

กล่าวอีกนัยหนึ่ง ข้อมูลมีความเอนเอียง (biased) สูง กรณีของค่าสัมประสิทธิ์ C.O.V. เป็นค่าไร้มติ ถึงแม้ว่าผลการทดสอบมีกำลังวัสดุเหนือนดินโคลนทะเลสูงกว่านี้สองเท่า แต่ค่า C.O.V. ยังคงที่ Duncan and Wright (2005) ระบุว่าค่า C.O.V. ต่ำสุดควรประมาณที่ 15% และใช้สำหรับการทดสอบที่เครื่องมือและกระบวนการทดสอบมีประสิทธิภาพสูง ในการทดสอบคุณสมบัติกำลังวัสดุเหนือนดิน มีผู้แนะนำว่าค่า C.O.V. สูงกว่านี้ เช่นอาจสูงถึง 40% (Harr, 1987)

2.2.1 ค่า Factor of Safety กับค่า Reliability

เมื่อทำการคำนวณค่า F.S. ของความลาดหรือมวลรับโหลดได้ฐานราก อย่างถูกต้องแม่นยำ วิศวกรได้ค่าของ F.S. = 1.1 หรือ = 1.01 ในเชิงทฤษฎีค่าดัชนีสองค่าเหล่านี้ควรยอมรับได้ว่า การดำเนินงานตัดความลาดหรืองานฐานรากมีความปลอดภัย แต่จากการที่ขยักตัวอย่างของการทดสอบหาค่ากำลังวัสดุเหนือนดินที่ระบุในตารางที่ 2.1 มีผลทำให้ค่าตัวเลขอัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณได้มีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นในหลายโอกาส เมื่อคำนึงถึงความมั่นใจที่โครงสร้างมวลสารต้องไม่มีการพังทลายถ้าค่าดัชนีของ F.S. สูงกว่าหนึ่ง จึงทำให้มีการหามาตรการในเชิงสถิติเพิ่มเติม ที่มุ่งเฉพาะถึงความเชื่อถือได้ของข้อมูลกับค่าจากการคำนวณ ค่าดัชนีดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า ค่าความเชื่อถือได้

หรือในบางครั้ง เรียกว่า ค่าความไว้ใจได้ (reliability, R) วิธีการประยุกต์ค่าดัชนีนี้เนื่องจากสมมติฐานเชิงความน่าจะเป็น (probability) ถ้าให้โครงสร้างมวลสารไม่เกิดการพังทลายมีค่าเท่ากับ 1 ลบด้วยค่าความน่าจะเป็นของการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] ได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$R = 1 - p(f) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 สามารถเรียกค่าความเชื่อถือได้ (R) เป็นค่าโอกาสของการไม่เกิดการพังทลาย (probability of no failure) ค่าดัชนี R กับค่าดัชนี F.S. เป็นตัวเลขเชิงตรรกะ (logical numeral) เกี่ยวกับเสถียรภาพของมวลสาร แต่ในภาคสนาม ถึงแม้ว่ามวลความลาดหรือมวลใต้ฐานรากที่ประเมินได้ว่าค่าความน่าจะเป็นของการพังทลายเป็น 0 (ศูนย์) แต่มวลความลาดยังมีโอกาสที่จะเกิดการพังทลายได้ ในงานวิจัยโครงการนี้ จึงมีกระบวนค่าทั้งสองค่า ได้แก่ ค่า F.S. กับค่า R [หรือ ค่า $p(f)$] ไปพร้อมกัน และมีประโยชน์ช่วยในการตัดสินใจมากกว่าที่จะทราบค่าดัชนีค่าใดค่าหนึ่งเพียงค่าเดียว

2.2.2 ค่า Reliability กับค่า Probability of Failure

ค่าความเชื่อถือได้, R ที่คำนวณได้ มีผลมาจากระบบมีความไม่แน่นอน (uncertainty) ในหลายสถานะและในหลายสภาวะ เปรียบเสมือนว่า ค่าโอกาสความไม่แน่นอนมีค่าได้ทั้งค่าสูงหรือค่าต่ำ Harr (1987) ระบุนิยามของคำว่า Reliability ในเชิงวิศวกรรมว่า “reliability is the probability of an object (item or system) performing its required function adequately for a specified period of time under stated conditions” แสดงว่า ค่าดัชนีความเชื่อถือได้นี้ เป็นค่าตัวเลขเชิงความน่าจะเป็นที่ต้องกำหนดระยะเวลาที่ระบุ จึงจะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม

ดังนั้นถ้าหากนำมาใช้กับโครงสร้างมวลดิน (มวลหิน) ที่ใช้เป็นความลาด หรือใช้รองรับน้ำหนักบรรทุกจากฐานราก สามารถระบุได้ว่า ความเชื่อถือได้ของโครงสร้างมวลสารที่จะมีเสถียรภาพต้องออกแบบให้อยู่ในภาวะที่กำหนด (specified conditions) เช่น สภาวะของการก่อสร้างที่สิ้นสุด (end of construction) การที่น้ำลดอย่างรวดเร็ว (rapid drawdown) ขนาด (magnitude) ของการไหวสะเทือนจากปรากฏการณ์แผ่นดินไหว เป็นต้น

เมื่อทำการออกแบบความลาดหรือฐานราก อายุการใช้งานของโครงสร้างเหล่านี้ปกติต้องการให้มีเสถียรภาพยาวนานเป็น 50 ปี หรือ 100 ปี เป็นต้น แต่สภาวะที่เกิดแผ่นดินไหวอาจทำให้ไม่สามารถใช้งานโครงสร้างมวลสารได้อีก ดังนั้นปรากฏการณ์ที่เกิดในลักษณะนี้จัดเป็นเหตุการณ์เชิงความน่าจะเป็น หรือระบุเป็น probabilistic function นักวิจัยหลายท่าน เช่น Christian



et al. (1994), Duncan (2000) ให้ความเห็นว่า ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ค่า Reliability ไม่ได้มีความแม่นยำถูกต้องมากหรือถูกต้องน้อยกว่าค่าของ Factor of Safety ที่คำนวณจากข้อมูลที่เป็นผลจากการทดสอบ (testing) ในห้องปฏิบัติการหรือในการทดสอบภาคสนาม ข้อมูลจากการพิจารณาวิเคราะห์ (judgment) และจากการประมาณ (approximation) แต่ดัชนีดังกล่าวช่วยเสริมความมั่นใจในเชิงการตัดสินใจ

2.3 แนวทางการใช้ค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพมวลสาร

แนวทางเดิมของการวิเคราะห์เสถียรภาพใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ค่าตัวแปรเสริม (parameter) ที่สำคัญและมีผลต่อการคำนวณ ได้แก่ ค่าการยึดเกาะกันกับค่าความเสียดทาน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอย่างละเอียด ตัวแปรเสริมเชิงกำลังวัสดุ ยังมีความเกี่ยวข้องกับแรงดันน้ำในมวลสาร และยังเกี่ยวข้องกับความเค้นจากอัดที่กระทำต่อมวลสารบนระนาบการพังทลาย ถ้าหากมีการเสริมเสถียรภาพค่าตัวแปรเสริมของแรงที่ใช้เสริมเสถียรภาพ ต้องนำมาประกอบในการพิจารณาอีกด้วย แต่ถ้าจะให้มีความสมบูรณ์ ต้องมีการวิเคราะห์เชิงความเสี่ยงเพิ่มเติมอีกด้วย

2.3.1 แนวทางการพิจารณาใช้ค่าดัชนีเชิงกำหนด

ในงานก่อสร้างที่มีโครงสร้างเป็นมวลสารประเภทที่เป็นดินหรือหิน ควรมีเกณฑ์เบื้องต้นเกี่ยวกับการกำหนดค่า F.S. ที่ต่ำสุด เมื่อโครงสร้างมวลสาร(ดินหรือหิน) มีการใช้งานเป็นมวลความลาด หรือใช้เป็นมวลรับโหลดจากฐานราก จึงต้องมีการกำหนดค่า F.S. ในสภาวะต่าง ๆ เช่น ขนาดของโครงสร้างมวลสาร อายุการใช้งาน สถานภาพที่เกิดในขณะที่มีการใช้งาน หรือก่อนการใช้งาน และภายหลังจากการใช้งานแล้ว

ตารางที่ 2.2 เป็นข้อมูลที่ผู้วิจัยโครงการนี้ ได้รวบรวมจากเอกสารที่เผยแพร่หลายแหล่ง ทั้งนี้มีการดัดแปลงปรับปรุงให้ข้อมูลที่ได้จากหลายแหล่ง จนจัดให้อยู่ในภาวะที่สามารถใช้แทนกันได้ (compatibility) กับทำให้มีความเหมาะสมกับเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้ใช้ได้กับการพัฒนาหน้างานก่อสร้างในประเทศไทย เนื่องจากเอกสารหลักเป็นเอกสารของต่างประเทศ ผู้วิจัยจึงใช้ภาษาอังกฤษเป็นภาษาหลักในตาราง แต่มีคำอธิบายสั้น ๆ ของผลสรุปจากตารางที่ 2.2 ที่พิมพ์ไว้ในกระดาษขนาด A3 (หน้าถัดไป) ทั้งนี้เป็นการระบุค่า F.S. ที่เป็นค่าต่ำสุด (minimum value) เมื่อมีการขุดเจาะเปิดหน้างาน (excavation) ในโครงสร้างมวลสารที่เป็นดินหรือหิน ผลสรุปของการวิเคราะห์โครงสร้างสิ่งก่อสร้างบนมวลสาร มีดังนี้

สำนักงานคณะกรรมการกำกับและส่งเสริมการประกอบธุรกิจ
ที่.....
วันที่ 31 ส.ค. 2553

ตาราง 2.2 เกณฑ์ในการพิจารณาค่าอัตราส่วนปลอดภัย หรือค่า Factor of Safety

ตาราง 2.2 ก) กรณีปกติ ใช้เฉพาะค่าตัวเลขดัชนีกับช่วงเวลาการใช้งานในการตัดหินใจ

Types of Slopes and Foundations	Required Factor of Safety	
	Short-Term Stability	Long-Term Stability
Slopes of dams, levees, dikes, and other rock excavation or earthwork	1.3	1.5
Earth retaining , supporting soil (rock) structures	1.5	2.0
Soil and rock foundations	2.0	3.0
Underground openings	4.0	8.0

ตาราง 2.2 ข) กรณีเฉพาะ ใช้ค่าตัวเลขดัชนีกับค่าซ่อมแซมโครงสร้างในการตัดหินใจ

Cost and Consequence of Geo-material failures	Required Factor of Safety for Uncertainties	
	Small Uncertainty	Long Uncertainty
Cost of repair comparable to incremental cost to excavation	1.25	1.50
Cost of repair greater than incremental cost to excavation	1.50	2.50

เอกสารอ้างอิง

1. CANMET (1976), Pit Slope Manual Chapter 1 Summary.
2. Duncan and Wright (2005), Soil Strength and Slope Stability.
3. Geotechnical Engineering Office, Hong Kong (2000), Preliminary Quantitative Risk Assessment of Earthquake-Induced Landslides at Man-Made Slopes in Hong Kong.
4. Harr, M.E. (1987), Reliability – Based in Civil Engineering.
5. Obert and Duvall (1967), Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock.
6. U.S. Army Corps of Engineers (1970), Engineering and Design: Stability of Earth and Rock-Fill Dams.
7. Wyllie and Mah (2004), Rock Slope Engineering: Civil and Mining – Fourth Edition.

1. ถ้าโครงสร้างมีขนาดใหญ่ ควรกำหนดให้มีค่า F.S. สูงกว่าค่า F.S. ของโครงสร้างขนาดเล็ก ในกรณีที่ใช้มวลสารชนิดเดียวกันในงานก่อสร้าง
2. โครงสร้างมวลสารที่มีความต้องการใช้งานในระยะเวลาสั้น สามารถกำหนดค่า F.S. ให้มีค่าน้อยกว่าโครงสร้างมวลสารที่ต้องการใช้งานในระยยะเวลานาน
3. โครงสร้างมวลสารบนพื้นผิวดิน สามารถกำหนดค่า F.S. ให้มีค่าน้อยกว่าโครงสร้างมวลสารที่อยู่ใต้พื้นผิวดิน
4. โครงสร้างมวลสารที่อาจมีการรับน้ำหนักเพิ่ม เช่น โหลดจากฐานรากของสิ่งก่อสร้างควรกำหนดค่า F.S. ให้สูงกว่าโครงสร้างมวลสารที่รับเพียงค่าน้ำหนักมวลสารอย่างเดียว (มวลดิน หรือ มวลหิน)
5. การประเมินค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมถ้าหากยอมให้มีโอกาสเกิดการพังทลาย มีผลโดยตรงกับการกำหนดค่า F.S. กรณีที่ค่าซ่อมแซมสูง ค่า F.S. ควรอยู่ในระดับสูงด้วย

2.3.2 แนวทางการพิจารณาใช้ค่าดัชนีเชิงความเสี่ยง

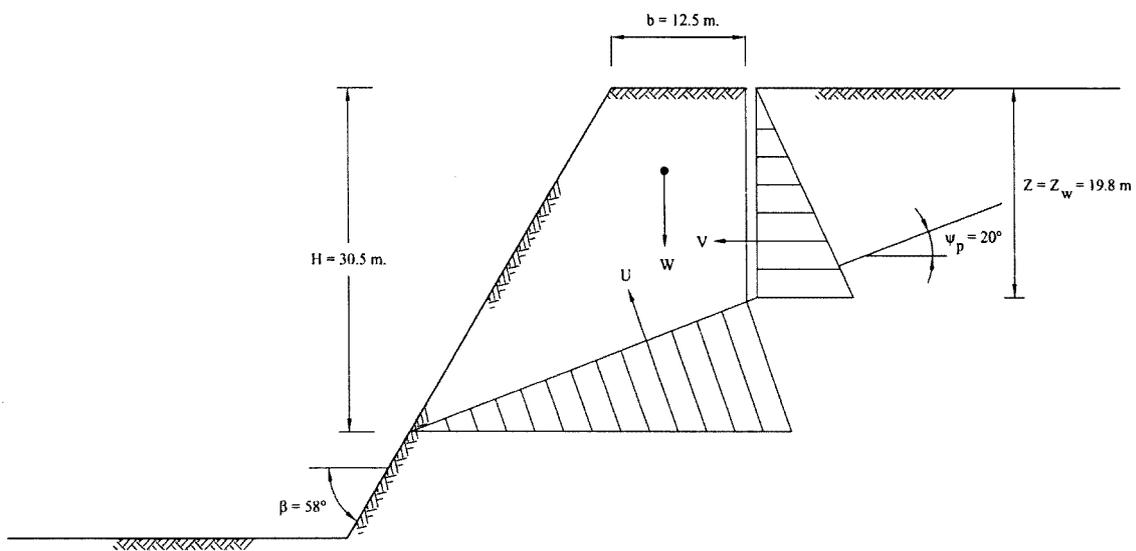
การพิจารณาเชิงความเสี่ยง (risk) ที่เกิดขึ้นในงานเทคนิคที่มีความเกี่ยวข้องกับมวลสารที่เป็นดินหรือหิน เป็นการใช้แนวทางการพิจารณาข้อมูลในเชิงสถิติ หาค่าความเป็นไปได้ของการลงทุนและค่าระดับขั้นของความปลอดภัย ตลอดจนเป็นการหาค่าความน่าจะเป็น (probability) หรือการกำหนดค่าดัชนีเชิงความเสี่ยงเชื่อถือได้

ก. การวิเคราะห์เชิงความอ่อนไหวหรือเชิงความแปรปรวนร่วมเกี่ยว

การวิเคราะห์ในลักษณะนี้ อาจเรียกชื่อเป็น sensitivity analysis เป็นการศึกษาลักษณะของตัวแปรเสริมที่มีความอ่อนไหวต่อค่าผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ ในทำนองเดียวกัน อาจพิจารณาเป็นการวิเคราะห์ที่เรียกว่า covariance analysis ซึ่งเป็นการศึกษาถึงความแปรปรวนของผลลัพธ์ที่มีตัวแปรเสริมร่วมกันเกี่ยวข้องกับการหาค่าผลเฉลย

ตัวอย่างของการวิเคราะห์เชิงความอ่อนไหวนี้ ผู้วิจัยได้คัดลอกจากหน้า 91-92 (Wyllie and Mah, 2004) ที่หาค่า F.S. ของเหมืองหินที่มีการตัดความลาดเป็นมุม 58 องศา และมีรอยร้าวจากแรงดึง (tension crack) อยู่ในตะพักชั้นบน ค่าระยะมิติของความลาด ระบุไว้ในรูปที่ 2.4 และตัวแปรเสริมเชิงกำลังวัสดุ ที่เป็นค่าการยึดเกาะกันหรือโคฮีชันมีค่าพิสัย 75-125 กิโลพาสคัล ค่ามุมเสียดทานมีพิสัย 15-25 องศา (ดูรูปที่ 2.5) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำที่ขังในรอยร้าว (ดูรูปที่ 2.6 ประกอบ) เช่น ถ้าน้ำที่ขังในรอยร้าวถูกระบายออกหมด หรืออยู่ในภาวะที่ fully drained กำหนดให้เหมืองหินในรูป 2.6 นี้ สามารถระเบิดตัดหน้าความลาดสูงสุดเป็นค่ามุมฉากได้ และยังมี

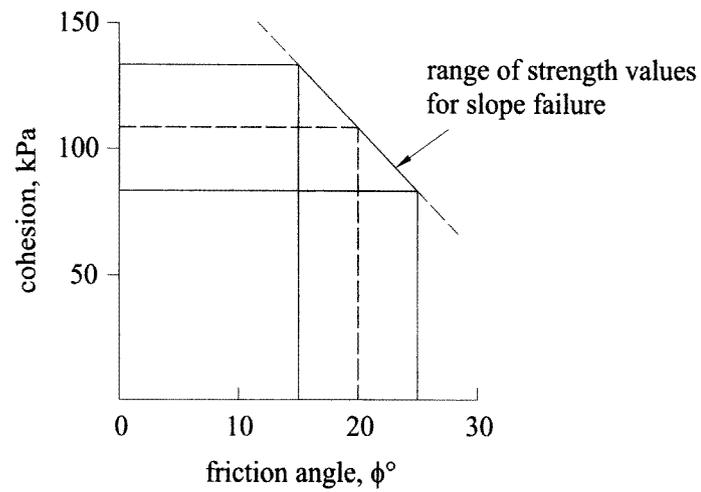
ค่า F.S. สูงกว่าหนึ่ง (มีเสถียรภาพ) ทั้งที่ใช้ค่ามุมความเสียดทานระดับต่ำหรือที่ระดับขีดจำกัดต่ำสุด (ที่ค่ามุม 15 องศา) แต่ในกรณีที่มีน้ำขังเต็มรอยร้าว หรืออยู่ในสถานะอิ่มตัว (saturated) เหมือนหิน ในรูป 2.6 สามารถระเบิดให้ตัดความลาดได้ที่มุมความชันสูงสุดแก่มุม 60 องศา (ค่ามุมสูงกว่านี้ไม่ปลอดภัย) ถึงแม้ว่าจะกำหนดให้ค่ามุมความเสียดทานเพิ่มขึ้นถึงขีดจำกัดสูงสุด (ที่มุม 25 องศา)



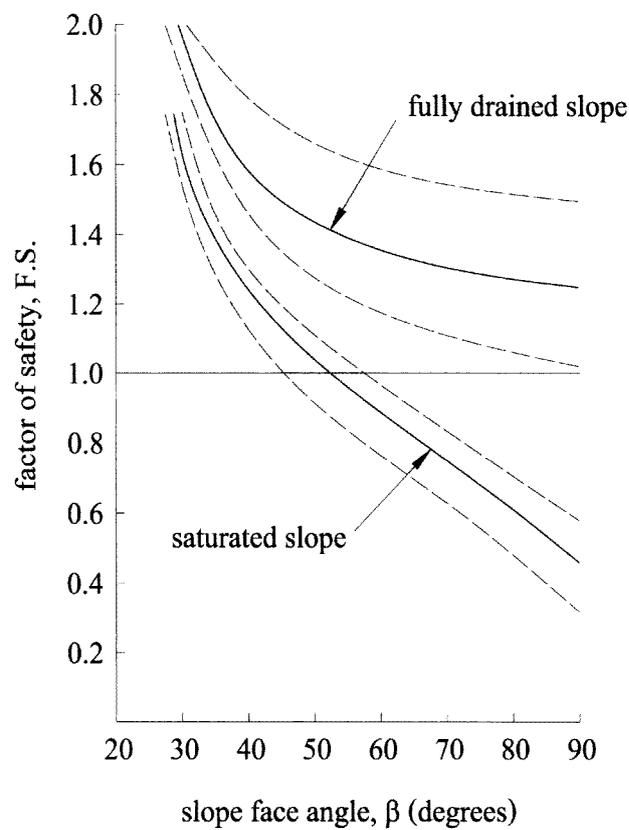
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์เชิงความอ่อนไหว (sensitivity) สำหรับการตัดความลาด ในเหมืองหิน สัญลักษณ์ตัวแปรเสริมกับสมการเชิงประสพการณ์หาค่าอัตราส่วน ปลอดภัย (factor of safety, F.S.) อธิบายไว้ในบทต่อไป

ข. การวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น

การวิเคราะห์ในลักษณะนี้ ได้อธิบายไว้ข้างแล้วในหัวข้อ 2.2 เป็นแนวทางวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น (probability analysis) ในช่วงแรกใช้กับโครงสร้างของเครื่องบินหรือจรวดอวกาศ แต่ในงานธรณีเทคนิค มีการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นในช่วงแรก เกี่ยวข้องกับการตัดความลาด ในเหมืองเปิด (open pit slope) เป็นการหาค่าผลลัพธ์ที่เป็นค่าความเสี่ยงต่อการพังทลาย (risk of failure) ในระยะใกล้เคียงกัน มีการนำค่าความเสี่ยงต่อการพังทลายมาใช้ในการเสริมเสถียรภาพในงานถนน และในงานการป้องกันดินถล่ม

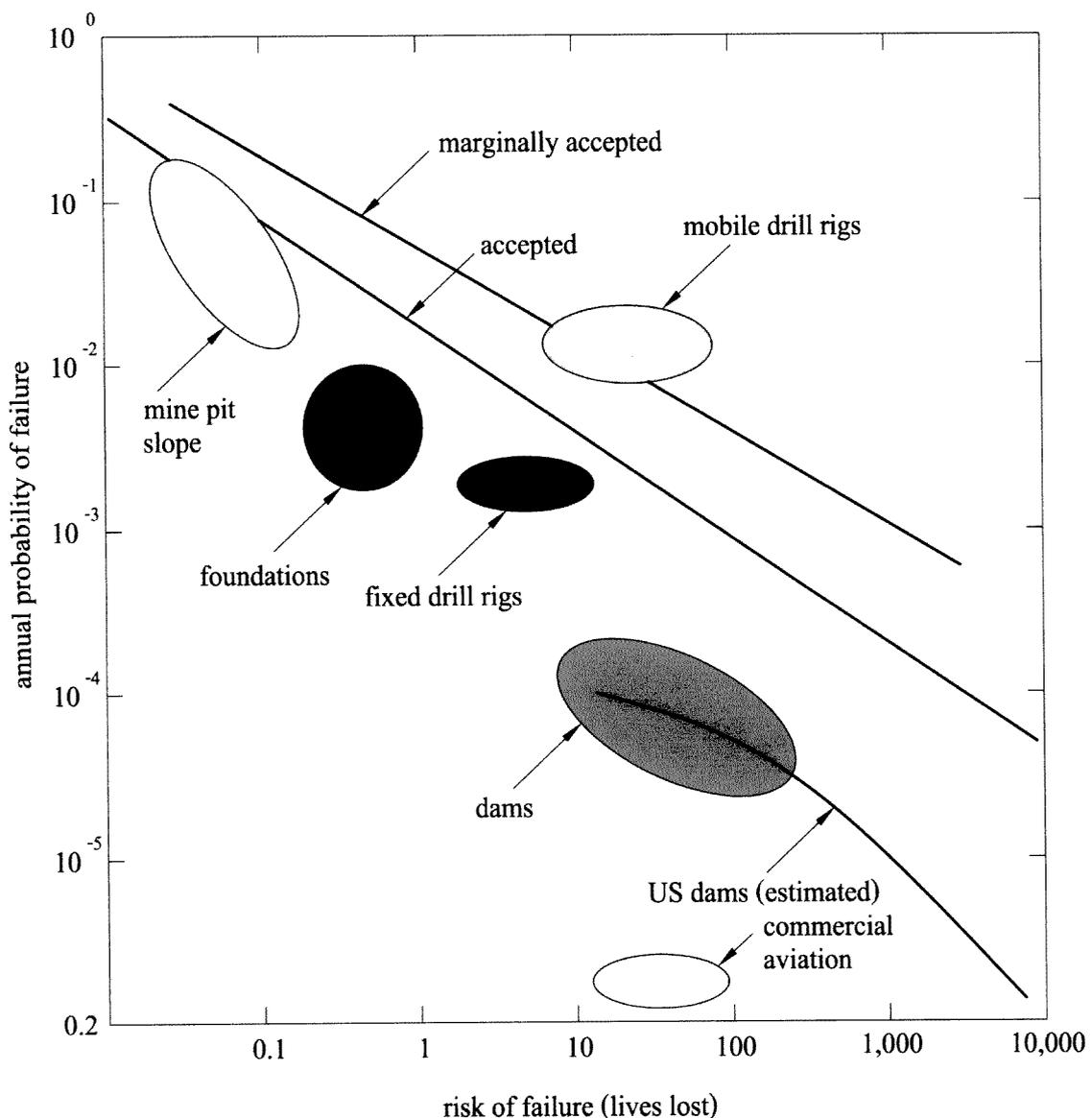


รูปที่ 2.5 ค่าตัวแปรเชิงกำลังวัสดุเฉือน ที่ตรวจสอบและระบุค่าพิสัย (range) ไว้



รูปที่ 2.6 ผลลัพธ์การวิเคราะห์เชิงความอ่อนไหว ระหว่างความลาดแห้งกับความลาดอิมตัวด้วยน้ำ เส้นเต็มหนาเป็นค่าเฉลี่ย ส่วนเส้นประเป็นเส้นขีดจำกัด (ต่ำสุดกับสูงสุด)

สิ่งที่สำคัญของการวิเคราะห์หาค่าความน่าจะเป็นในการพังทลายของมวลสาร (เมื่ออธิบายเพิ่มเติมในบทต่อไป) คือ การแปรผันของตัวแปรเสริมที่ใช้ในการหาผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ จึงต้องกำหนดให้มีการแจกแจงฟังก์ชันเชิงสถิติ และมีวิธีทำการคำนวณซ้ำ (iteration) จนกว่าได้ค่าผลลัพธ์ที่มีความเชื่อถือได้ หรืออาจต้องใช้ผู้ชำนาญการช่วยในการตรวจสอบกับช่วยปรับแก้ก่อนนำค่าผลลัพธ์มาใช้งานจริง



รูปที่ 2.7 ความเสี่ยงต่อชีวิตและทรัพย์สินต่อโครงการในงานก่อสร้างเชิงวิศวกรรมหลายรูปแบบ
โครงการขนาดใหญ่มีความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน มากกว่าโครงการขนาดเล็ก

ในเชิงการเปรียบเทียบ อาจมีการแสดงเป็นภาพกราฟิกส์ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7 ผู้วิจัยโครงการนี้ได้คัดลอกมาจากเอกสารเกี่ยวกับ “Risk Evaluation and Uncertainty in Geotechnical Engineering” ที่ R.V. Whitman (1984, 2000) ได้ระบุไว้ว่า ค่าตัวแปรของการปฏิบัติงานในรูปที่ 2.7 เป็นการเปรียบเทียบ ระหว่าง ผลของการพังทลายที่ทำให้เกิดการเสียชีวิตและทรัพย์สินจริง (actual lost) กับ ค่าตัวเลขความน่าจะเป็นต่อระยะเวลา 1 ปีของการทำงาน ภาพกราฟิกส์วงรีในรูปที่ 2.7 เป็นวิธีการทำงาน เช่น การตัดความลาดในงานเหมือง (mine pit slope) การทำเขื่อน (dam) การทำฐานราก (foundation) เป็นต้น ความสัมพันธ์เชิงความน่าจะเป็น มีความแตกต่างในแต่ละงานก่อสร้าง เช่น งานตัดความลาดในเหมือง ต้องมีการระวังเหตุอย่างใกล้ชิดต่อความเสี่ยงต่อชีวิตและทรัพย์สิน หรือความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ หรือทำให้โอกาสที่จะเกิดการพังทลายจริงมีความเป็นไปได้น้อย (มีค่าตัวเลขแกนตั้งที่มีความน่าจะเป็นของค่าโอกาสการเกิดการพังทลายสูง จึงต้องทำการควบคุมงานก่อสร้างให้มีค่าตัวเลขในแกนนอน ที่เป็นค่าความเสี่ยงต่อการเกิดการพังทลายให้อยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ) ในทางตรงกันข้าม งานก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น งานก่อสร้างทำเขื่อน ค่าโอกาสของความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดพังทลายต่ำ แต่ถ้าหากเกิดอุบัติเหตุหรือมีการพังทลายเกิดขึ้น ความสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินย่อมมีมาก (มีค่าตัวเลขผลลัพธ์ในแกนตั้งอยู่ในระดับต่ำ แต่ค่าตัวเลขผลลัพธ์ในแกนนอนอยู่ในระดับสูง)