

ความเสี่ยงเชิงเสถียรภาพของการขุดเจาะเปิดหน้างานดินและหิน

Risks on Excavation Stability of Soils and Rocks

สง่า ตั้งชาวล

Sanga Tangchawal

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 10330

โทร. 02-2186581 โทรสาร 02-2186920

E-mail: fmnstc@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

เสถียรภาพของการขุดเจาะมวลดิน (หรือมวลหิน) สามารถทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ ด้วยวิธีเชิงกำหนดพร้อมกันกับวิธีเชิงความเชื่อถือได้ การนำเสนอแนวทางวิธีเชิงความน่าจะเป็นในบทความนี้ ข้อมูลจากภาคสนามจะสมมุติให้มีการแจกแจงฟังก์ชัน ในรูปแบบปกติกับรูปแบบลอการิทึมปกติ เพื่อหาค่าโอกาสการพังทลายในช่วงการเปิดของหน้างานขุดเจาะ ทั้งนี้ค่าดัชนีดังกล่าว ใช้เปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณด้วยวิธีเชิงกำหนด การประยุกต์ทั้งสองวิธี ช่วยลดความเสี่ยงจากการเปิดหน้างานขุดเจาะ ด้วยเครื่องจักรกลหรือด้วยการใช้วัตถุระเบิดลง รวมทั้งป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ดีขึ้น และระบุค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเปิดหน้างานขุดเจาะ

Abstract

Analyses on stability of face excavation in soil (or rock) materials can concurrently process using both the deterministic and the reliability methods. The proposed probabilistic method in this article, field data are assumed to have either normal or lognormal distribution. Application of reliability method can lead to the value of probability of failure, in which it can compare with the factor of safety obtained by the deterministic method. Using of both methods, the risk from face excavation can be reduced, environmental impacts be better protected, and the cost of excavation be further optimized.

1. บทนำ

ดินส่วนใหญ่ในสถานที่ก่อสร้างของประเทศ เป็นดินใหม่ในยุคควาเทอร์นารี (Quaternary period) การขุดเจาะเปิดหน้างานดิน ปกติใช้เครื่องจักรกล เช่น รถขุด รถตัก การวางแผนและประเมินผลเสถียรภาพหน้างาน ใช้ตัวเลขที่ได้จากการคำนวณ คือ ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, F.S.) ค่าดัชนีเชิงเสถียรภาพนี้ คำนวณจากข้อมูลที่บันทึกจากภาคสนาม และจากห้องปฏิบัติการทดสอบดินและหิน ข้อดีของการใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) เพียงค่าเดียว ได้แก่ การที่ไม่สามารถระบุถึงการแปรผัน (variation) ของสมบัติมวลสารได้ ค่าสมบัติที่ใช้ เช่น มุมความเสียดทาน หน่วยน้ำหนักมวลสาร จะเป็นค่าตัวเลขเฉลี่ยเพียงค่าเดียว ในบางครั้งผลลัพธ์ของค่าอัตราส่วนปลอดภัย จะสูงหรือต่ำกว่าความเป็นจริง เมื่อนำไปใช้โดยตรง อาจก่อให้เกิดความเสียหายในภายหลังได้

แนวทางที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ของการวิเคราะห์ผลลัพธ์ ผู้เขียนบทความ ได้นำเสนอการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นเพื่อหาค่าโอกาสการพังทลาย ทำให้เพิ่มความเชื่อถือได้ (reliability) ของกระบวนการวิเคราะห์ ลดความเสี่ยงในการทำงาน เพิ่มความมั่นใจมากขึ้น ในกรณีของเหมืองหิน หรืองานก่อสร้างที่กระทำบนมวลหิน ต้องใช้การระเบิดหิน (rock blasting) ทำให้มวลหินขนาดใหญ่แตกเป็นชิ้นส่วนในขนาดที่เหมาะสมต่อการใช้เครื่องจักรกลขนย้าย หรือขนส่งไปบดย่อยต่อที่โรงโม่หิน วัตถุหลักของการระเบิดหินในประเทศ จะเป็น AN-FO (ammonium nitrate and fuel oil) หินที่ใช้เป็นมวลรวม (aggregate) ในการทำถนนหลวง

ทำคันทางโรยทางรถไฟ มี 3 ชนิด ที่ใช้มากที่สุดเป็นหินปูน ในยุคเพอร์เมียน-ออร์โดวิเซียน (Permian-Ordovician period) รองลงมาเป็นหินแกรนิตยุคครีเทเชียส (Cretaceous period) และที่ใช้น้อยสุดเป็นหินบะซอลต์ยุคเทอร์เชียรี (Tertiary period) เหมือนหินขนาดใหญ่ มีกำลังการผลิตได้สูงถึง 200,000 ลบ.เมตรต่อเดือน ส่วนใหญ่เป็นการระเบิดหินปูน เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์

2. การวางแผนเชิงเสถียรภาพมวลสาร

เมื่อตัดความลาดหรือปรับพื้นผิวดินฐานราก โดยใช้เครื่องจักรกล การวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพขึ้นอยู่กับชนิดของมวลสาร รูปแบบของการพังทลายในมวลดิน จะเป็น 2 แบบหลัก ได้แก่ การพังทลายแนวระนาบ (plane failure) หรือการพังทลายรูปวงกลม (circular failure) แต่ถ้าหากเป็นมวลหิน การพังทลายจะมีรูปแบบเพิ่มขึ้น ที่มักไม่พบในมวลดิน ได้แก่ การพังทลายแบบรูปสามเหลี่ยม (wedge failure) และการพังทลายแบบคะมำ (toppling failure)

แนวทางในการวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงสถิติ เพื่อหาค่าความน่าจะเป็น (probability) ของการพังทลาย ผู้เขียนบทความได้กำหนดให้ ตัวแปรสุ่ม (random variable) ที่เป็นข้อมูลเข้า (input) มีการแจกแจงฟังก์ชัน 2 รูปแบบ ได้แก่ การแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) กับ การแจกแจงแบบลอการิทึมปกติ (lognormal distribution) ทั้งนี้มีการทดสอบการแจกแจงในรูปแบบอื่น เช่น ฟังก์ชันบีตา (beta) ฟังก์ชันเลขชี้กำลัง (exponential) ปรากฏว่า ค่าสมบัติมวลสาร (เช่น ค่ามุมความเสียดทาน ค่าการยึดเกาะกันหรือโคฮีชัน) ไม่น่าจะมีการแจกแจงในลักษณะอื่นนอกจาก 2 รูปแบบที่กำหนดไว้

2.1 แบบจำลองเชิงความเสี่ยงของการพังทลาย

การกำหนดแบบจำลอง เพื่อหาค่าความเสี่ยงต่อการพังทลายของมวลสาร มีการระบุออกเป็น 3 รูปแบบ (สง่า ตั้งชาวล, 2552) **แบบจำลองที่หนึ่ง** มีการกำหนดให้การคำนวณค่าความเสี่ยง อิงกับค่าขอบของความปลอดภัย (safety margin) **แบบจำลองที่สอง** มีการกำหนดให้การคำนวณค่าความเสี่ยง อิงกับค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety) **แบบจำลองที่สาม** เป็นการจำลองข้อมูล (data simulation) มีการใช้

ขั้นตอนวิธี (algorithms) เพื่อก่อกำเนิดจำนวนตัวแปรสุ่ม ใช้การสุ่มข้อมูล และการคำนวณหาค่าโอกาสการพังทลาย

ค่าตัวเลขดัชนีของแบบจำลองที่หนึ่งกับแบบที่สอง เป็นค่าผลลัพธ์เชิงกำหนด ส่วนค่าตัวเลขดัชนีของแบบจำลองที่สาม เป็นค่าผลลัพธ์เชิงความน่าจะเป็น ที่ได้จากการคำนวณซ้ำหลายครั้ง (100-10,000 ครั้ง) ขั้นตอนของการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบจำลอง มีการอธิบายอย่างย่อ ดังนี้

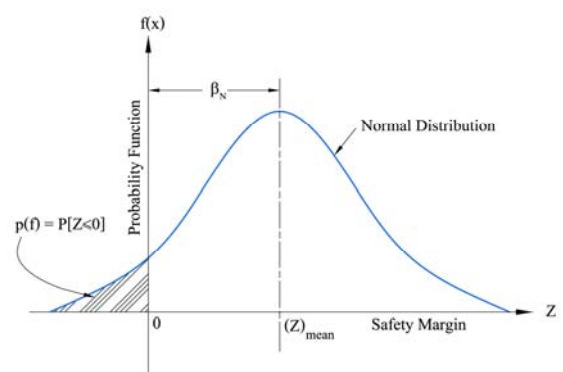
2.1.1 แบบจำลองที่ขึ้นกับค่าขอบความปลอดภัย

1) ถ้าหากตัวแปรสุ่มที่เป็นข้อมูลใช้คำนวณมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ (normal) ดังแสดงในรูปที่ 1 การหาความสัมพันธ์ที่เป็นขีดจำกัดของความปลอดภัย ระหว่างค่าแรงดันและแรงไถลเลื่อน เป็น ค่าขอบความปลอดภัย (safety margin, Z) Ang and Tang (1984); Haldar and Mahadevan (1995) ใช้สมการเชิงประพจน์ ดังนี้

$$Z = R - Q \quad (1)$$

$$(F.S.)_{\text{mean}} = \frac{R_{\text{mean}}}{Q_{\text{mean}}} \quad (2)$$

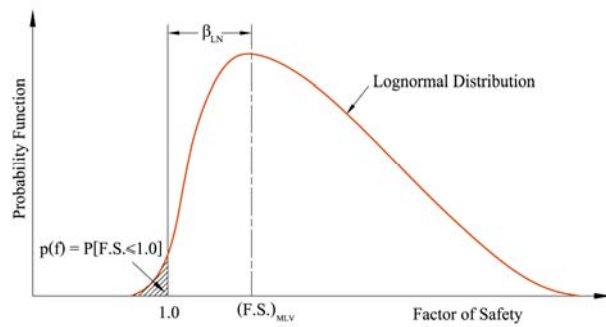
พจน์ $(F.S.)_{\text{mean}}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนปลอดภัยที่ได้ จากค่า R_{mean} ที่เป็นผลรวมเฉลี่ยแรงหรือโมเมนต์ที่ต้านการพังทลายบนระนาบ กับค่า Q_{mean} ที่เป็นผลรวมเฉลี่ยแรงหรือโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อนบนระนาบ



รูปที่ 1 สถานภาพของการพังทลาย ที่ขึ้นกับค่าขอบความปลอดภัย การพังทลายเกิดเมื่อ $Z < 0$

ในอีกแนวทางหนึ่ง ระบุเป็นพจน์ reliability หมายถึง ความเชื่อถือได้หรือความไว้วางใจได้ ในงานการขุดเจาะเปิด

หน้างาน และมีค่าเท่ากับหนึ่ง ลบด้วยค่าโอกาสการพังทลายในเชิงความน่าจะเป็น [probability of failure, $p(f)$] ถ้าให้ฟังก์ชัน $F(x)$ เป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (cumulative distribution function) โดยที่ฟังก์ชัน x เป็นตัวแปรสุ่มที่สมมุติขึ้นมา หรือในอีกรูปแบบหนึ่งเป็นค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (reliability index, β) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 4, 5 และ 6



รูปที่ 2 ค่าอัตราส่วนปลอดภัย ที่พล็อตเทียบกับข้อมูลเข้า ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ

$$\text{Reliability} = 1 - p(f) \quad (3)$$

$$p(f) = 1 - F(x) = 1 - F(\beta) \quad (4)$$

$$\beta_N = \frac{(R_{\text{mean}} - Q_{\text{mean}})}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (5)$$

พจน์ β_N ในรูปที่ 1 (และในสมการ 5) เป็นค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของข้อมูลตัวแปรสุ่ม หรือเป็นค่าตัวเลขการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, σ) ระหว่างค่า F.S. = 1.0 ($Z = 0$) และที่ค่าเฉลี่ยของ Z (Z_{mean})

2) ถ้าหากตัวแปรสุ่มที่สมมุติ $y = \ln x$ ที่ใช้เป็นข้อมูลมีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ (lognormal) และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation, CO.V.) เป็นตัวแปรที่ระบุหรือหาค่าได้ ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ (Harr, 1987) ของการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ, β_{LN} คือ

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left[\frac{R_{\text{mean}}}{Q_{\text{mean}}} \cdot \sqrt{\frac{1 + (C.O.V.)_Q^2}{\{1 + (C.O.V.)_R^2\} \{1 + (C.O.V.)_Q^2\}}} \right]}{\sqrt{\ln[1 + (C.O.V.)_R^2] (1 + (C.O.V.)_Q^2)}} \quad (6)$$

2.1.2 แบบจำลองที่ขึ้นกับค่าอัตราส่วนปลอดภัย

1) ถ้าหากตัวแปรสุ่มที่เป็นข้อมูลใช้คำนวณ มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบปกติ (normal) ค่าดัชนีความปลอดภัยที่ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด (the most likely value of factor of safety, $F.S._{MLV}$) คือ

$$\beta_N = \frac{[(F.S.)_{MLV} - 1]}{\sigma_{FS}} \quad (7)$$

2) ถ้าหากตัวแปรสุ่มที่เป็นข้อมูลใช้คำนวณ มีการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ (lognormal) ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของการแจกแจงฟังก์ชันแบบลอการิทึมปกติ, β_{LN} คือ

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left[\frac{(F.S.)_{MLV}}{\sqrt{1 + (C.O.V.)_{FS}^2}} \right]}{\sqrt{\ln[1 + (C.O.V.)_{FS}^2]}} \quad (8)$$

พจน์ $(F.S.)_{MLV}$ นี้มีการเสนอแนะโดยนักวิจัยหลายท่าน เช่น Duncan (2000), Duncan and Wright (2005) ระบุให้เป็นค่าที่ได้จากการเพิ่มกับการลดตัวแปรสุ่มเท่ากับ 1 S.D.

$$(F.S.)_{MLV} = \frac{(F_1^+ + F_1^-) + (F_2^+ + F_2^-) + \dots + (F_N^+ + F_N^-)}{2(N)} \quad (9)$$

พจน์ F_1^+ , F_1^- นี้เกิดจากการเพิ่มค่า 1 S.D. กับลดค่า 1 S.D. ของค่าเฉลี่ยสำหรับตัวแปรสุ่มที่หนึ่ง ในทำนองเดียวกัน F_2^+ , F_2^- เป็นการเพิ่มกับลดสำหรับของตัวแปรสุ่มที่สอง จนกระทั่งถึงตัวแปรสุ่มที่ N

ในกรณี ที่ต้องการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เป็นค่าใหม่ (Wolff, 1996) คำนี้อิงกับค่าอัตราส่วนปลอดภัย (σ_{FS}) คือ

$$\sigma_{FS} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_2}{2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta F_N}{2}\right)^2} \quad (10)$$

ค่าของ ΔF เป็นค่าสัมบูรณ์ที่เกิดจากผลต่างของการเพิ่มกับการลดค่าอัตราส่วนปลอดภัยของตัวแปร

$$\Delta F_1 = |F_1^+ - F_1^-| \quad (11)$$

นั่นคือ จะได้ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันที่ขึ้นกับค่าอัตราส่วนปลอดภัย เป็น

$$(C.O.V.)_{FS} = \frac{\sigma_{FS}}{(F.S.)_{MLV}} \quad (12)$$

จากการค้นคว้าเอกสารอ้างอิง (Harr, 1987; Duncan and Wright, 2005) เพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน ควรมีค่าประมาณที่ค่าไหน ผู้เขียนบทความนี้ สรุปว่า พิสัยของสมบัติมวลดิน (มวลหิน) ควรมีค่าระหว่าง 15-40%. ค่าที่ระดับ 15% เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันที่ค่าต่ำที่สุด [the lowest conceivable value of C.O.V., or $(C.O.V.)_{low}$] ส่วนค่าที่ระดับ 40% เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันที่ค่าสูงที่สุด [the highest conceivable value of C.O.V., or $(C.O.V.)_{high}$] ค่าทั้งสองค่านี้ใช้เป็นค่าข้อมูลสมมุติในกรณีที่ต้องการตรวจสอบในภาคสนาม มีข้อมูลจริงน้อยเกินไปที่จะมาวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงความน่าจะเป็น

2.1.3 แบบจำลองที่ขึ้นกับการจำลองข้อมูลจากการสุ่ม

แบบจำลองที่สามนี้ ใช้วิธีของมอนติคาร์โล (Monte Carlo) โดยมีจุดมุ่งหมายให้หาค่าผลลัพธ์ที่เป็นค่าความน่าจะเป็นที่อาจเกิดการพังทลาย [probability of failure, $p(f)$] และสามารถระบุ พิสัยของอัตราส่วนปลอดภัย (range of F.S.) กระบวนการจำลองข้อมูลที่ใช้วิธีการทำซ้ำ และก่อกำเนิดข้อมูลตัวแปรสุ่ม จำนวนระหว่าง 100-10,000 ครั้ง ค่าดัชนีเชิงความเชื่อถือได้ที่จากการจำลองข้อมูล จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนปลอดภัย ที่ได้จากแบบจำลองสองแบบแรก

ขั้นตอนของการจำลอง เริ่มจากจำนวนตัวแปรสุ่มระหว่างค่า 0-1.0 ถูกก่อกำเนิด (generated) และมีการสุ่มตัวแปรของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function, PDF) ที่อยู่ระหว่างค่า - 4 (S.D.) ถึง + 4 (S.D.) จากนั้นทำการคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัย ถ้า F.S. มากกว่าหนึ่ง ค่านี้อาจยอมรับและจัดเป็นข้อมูลออก (output) ถ้า F.S. น้อยกว่าหนึ่ง ค่านี้อาจถูกนำเข้าสู่กระบวนการคำนวณซ้ำ (ปกติให้ทำซ้ำ 1000 ครั้ง) การหาค่าโอกาสของความน่าจะเป็นที่เกิดการพังทลาย ได้จากอัตราส่วนของ

$$[p(f)]_{SIM} = \frac{(L - M)}{L} \quad (13)$$

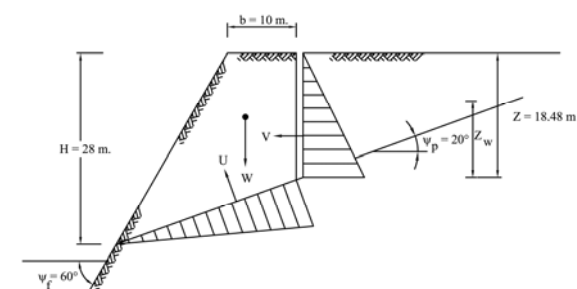
พจน์ $[p(f)]_{SIM}$ เป็นค่าโอกาสการพังทลายที่หาจากวิธีการจำลองข้อมูล ซึ่งอาจแตกต่างจากค่า $p(f)$ ที่หาจากวิธีเชิงกำหนด พจน์ M เป็นจำนวนครั้งที่ F.S. มากกว่าหนึ่ง ส่วนพจน์ L เป็นจำนวนครั้งที่มีการทำการคำนวณซ้ำ ในกระบวนการจำลองข้อมูล

3. การวิเคราะห์ย้อนหลังโดยการใช้โปรแกรม

การใช้แบบจำลองความเสี่ยง ทั้งสามแบบ ร่วมกับการคำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรภาพเชิงกำหนด กับค่าดัชนีเสถียรภาพเชิงความเชื่อถือได้ แสดงเป็นตัวอย่างในหัวข้อย่อนี้

3.1 ตัวอย่างการพังทลายแนวระนาบ

ตัวอย่างของการพังทลายแนวระนาบ (plane failure) รูปที่ 3 เป็นภาพตัดขวางความลาดเหมือนหิน ที่ระบุค่ามิติ รวมทั้งแรงดันน้ำต่าง ๆ กำหนดให้ มีรอยร้าวจากแรงดึง (tension crack, Z) เกิดบนชั้นตะกักด้านบน (upper bench) มุมหน้าความลาด (ψ_p) เท่ากับ 60 องศา กำหนดให้ตัวแปรสุ่มมี 4 พจน์ ได้แก่ มุมเอียงของระนาบ (ψ_p) เท่ากับ 20 องศา หน่วยน้ำหนักหิน (γ) เท่ากับ 25.1 กิโลนิวตันต่อลบ.เมตร มุมเสียดทานภายใน (ϕ) 20 องศา ค่าการยึดเกาะกันหรือโคฮีชัน (c) เท่ากับ 100 กิโลพาสคัล



รูปที่ 3 การพังทลายตามแนวระนาบของหน้าเหมือนหินปูน ความสูงแนวตั้ง (H) เท่ากับ 28 เมตร มีระดับน้ำ (z_w) ชึ่งเต็มรอยร้าวจากแรงดึง เท่ากับ 18.48 เมตร พจน์ U เป็นแรงยกตัว พจน์ V เป็นแรงผลักของน้ำ พจน์ W เป็นน้ำหนักมวลที่เกิดการพังทลาย และพจน์ b เป็นระยะแนวราบจากจุดยอดถึงรอยร้าว

$$\text{F.S.} = \frac{(\text{cL}) + [(\text{W} \cos \Psi_p) - \text{U} - (\text{V} \sin \Psi_p)] \tan \phi}{(\text{W} \sin \Psi_p) + (\text{V} \cos \Psi_p)} \quad (14)$$

ตารางที่ 1 ค่าการคำนวณ ที่ได้จากกรณีศึกษาของความลาด

RISK MODEL I	
$\beta_N = 0.114$	$(F.S.)_{\text{mean}} = 1.017$
RISK MODEL II	
$\beta_N = 0.136$	$(F.S.)_{\text{MLV}} = 1.021$
RISK MODEL III	
$(F.S.)_{\text{range}} = 0.61 - 1.44$	$[p(f)]_{\text{SIM}} = 42.0\%$

3.2 ตัวอย่างการพังทลายรูปวงกลม

Diagram of a retaining wall cross-section showing dimensions and soil properties:

- Wall height: 12.00 m
- Base width: 8.10 m
- Top of wall inclination: 61.93°
- Failure surface length: 16.00 m
- Failure surface vertical distance from ground: 3.50 m
- Soil unit weight: $\gamma = 16.8 \text{ kN/m}^3$
- Soil cohesion: $c_u = 50 \text{ kPa}$
- Soil friction angle: $c' = 40 \text{ kPa}$
- Failure surface slope: 0.625

รูปที่ 4 การพังทลายรูปวงกลม ตามแนวเส้นโค้ง BE ของความลาดที่ประกอบด้วยดินเหนียวอึดตัว มีน้ำข้างเต็มในรอยร้าวจากแรงดึง (tension crack, DE)

วิธีเชิงกำหนด ในการหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยการพังทลาย
รูปวงกลม ใช้การหาโมเมนต์รอบจุด O ดังนี้

$$\text{F.S.} = \frac{M_R}{M_D} \quad (15)$$

พจน์ M_R เป็นผลรวมโมเมนต์ที่ด้านการไหลเลื่อน และ
พจน์ M_D เป็นผลรวมโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการไหลเลื่อน

จากการตรวจสอบ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่หาจากค่าเฉลี่ยของสมบัติมวลสาร ได้ค่า F.S. เท่ากับ 0.876 แสดงว่ามีการไถลเลื่อนเกิดขึ้นตามแนวเส้นโค้ง ถ้าหากทำการแจกแจงค่าตัวแปรสุ่มเป็นแบบปกติ และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันที่ 15 % ได้ค่าโอกาสการพังทลายของแบบจำลองที่หนึ่ง, $[p(f)]_I$ เท่ากับ 82.8% ค่าโอกาสการพังทลายของแบบจำลองที่สอง, $[p(f)]_{II}$ เท่ากับ 73.8% ส่วนแบบจำลองที่เกิดจากการคำนวณซ้ำ 1000 ครั้ง ได้ค่า $[p(f)]_{SIM}$ เท่ากับ 73.9% ในอีกแนวทางหนึ่ง กำหนดให้ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงค่าแบบลอการิทึมปกติ ที่ระดับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน 15% จะได้ค่า $[p(f)]_I$ เท่ากับ 83.3% ค่า $[p(f)]_{II}$ เท่ากับ 76.1% ส่วนแบบจำลองที่เกิดจากการคำนวณซ้ำ 1000 ครั้ง ได้ค่า $[p(f)]_{SIM}$ เท่ากับ 73.3% ผลสรุปของกรณีนี้ แสดงว่า มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดระหว่างการแจกแจงค่าของตัวแปรสุ่มทั้ง 2 แบบ

4. เสถียรภาพมวลสาร เมื่อใช้วัตถุระเบิด

เมื่อมีการระเบิดหิน ปัญหาขนาดชิ้นส่วนหินที่เหมาะสมเมื่อเกิดการแตกหัก เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาควบคู่กับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนข้างเคียงกับหน้างานก่อสร้าง วิธีการระเบิดหินส่วนใหญ่ ใช้วิธีการระเบิดตัดเป็นชั้นตะพัก หรือเรียกว่า bench blasting สารผสมหลักในงานระเบิดจะเป็น AN-FO ที่ประกอบด้วย เม็ดแอมโมเนียมไนเตรท ที่มีมวลมีรูปทรงผสมในสัดส่วนที่เหมาะสมกับน้ำมันดีเซล อาจใช้เจลประเภท gelatine dynamite ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการระเบิด และมีแท่งไฟฟ้าถ่วงจังหวะ (electric delay cap) วางไว้ในแต่ละหลุม เพื่อกำหนดให้มีการถ่วงจังหวะและเกิดการระเบิดไม่พร้อมกันทีเดียว (ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแตกหักและลดผลกระทบ) เหมืองหินขนาดใหญ่ (รูปที่ 5) มักใช้การเจาะหลุมระเบิด เป็น 3 แถว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มม. ระยะห่างของแต่ละแถว (burden) 5.5 เมตร ระยะห่างระหว่างหลุมเจาะในแถว (spacing) 7.5 เมตร และกำหนดให้ความสูงหน้าเหมืองของแต่ละชั้นตะพักสูงถึง 20 เมตร จำนวนน้ำหนักรวมวัตถุระเบิด (explosive charge) ที่ใช้ประมาณ 500-800 กิโลกรัมต่อจังหวะถ่วง รายละเอียดของการออกแบบหน้างานระเบิด ระบุไว้ในรายงานที่ผู้เขียนเป็นหัวหน้าโครงการวิจัย (สง่า ตั้งซวาลและคณะ, 2542; สง่า ตั้งซวาล, 2543 ก. และ ข.)



รูปที่ 5 หน้างานระเบิดของเหมืองหินปูนขนาดใหญ่

4.1 การป้องกันผลกระทบที่ก่อให้เกิดความเสียหาย

การป้องกันผลกระทบการระเบิดหิน ใช้แนวทางที่คล้ายคลึงกับวิธีการที่อธิบายอย่างละเอียดในรายงานฉบับที่ 8507 ของ U.S. Bureau of Mines (Siskind, et al., 1980) ที่ใช้การวิเคราะห์เชิงมิติ (dimension analysis) หาค่าตัวแปรที่ใช้การ

วิเคราะห์เชิงมิติ (dimension analysis) หาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่มีอิทธิพลสูงสุด ต่อการสั่นสะเทือนของพื้นผิวดินจากผลของการระเบิดหิน ทำให้ได้ผลสรุปว่า น้ำหนักรวมวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วง (explosive weight per delay) ที่ใช้มีการแปรผันโดยตรง กับค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาค (peak particle velocity) ที่เกิดขึ้นภายหลังการระเบิดไม่จำกัดที่ค่าความถี่ของคลื่นระเบิดเท่าใด จากนั้นจึงกำหนดเป็นค่าอัตราส่วน ระหว่าง ค่าระยะทางห่างจากจุดระเบิด ต่อค่ารากกำลังสองของน้ำหนักรวมวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วง ที่เรียกชื่อเฉพาะของการสเกลระยะทางนี้ว่า square root scaled distance ผลจากการทำวิจัยโครงการอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปี คณะผู้วิจัยที่ผู้เขียนเป็นหัวหน้าโครงการ ได้ตรวจวัดค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือน และผลกระทบอย่างอื่น (หินปลิว เสียงที่ดังเกินขนาด เป็นต้น) ควบคู่กับการตรวจสอบประสิทธิภาพ การแตกหักของหิน

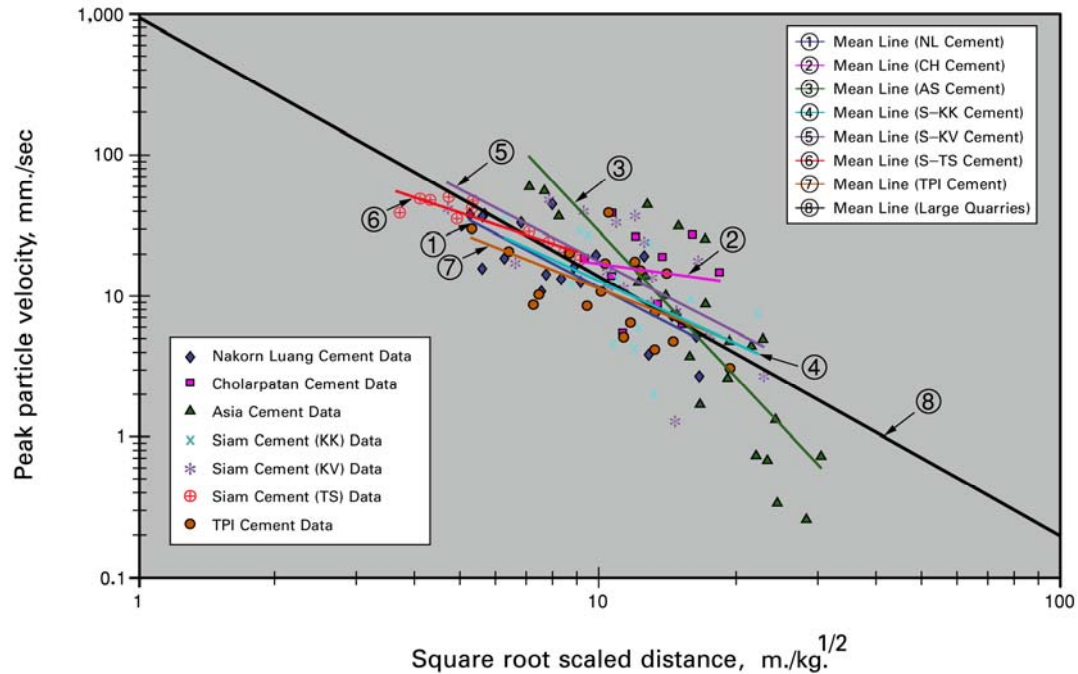
การตรวจสอบและวิเคราะห์ภายหลังการระเบิด โดยทำการพล็อตค่าที่ตรวจวัดในภาคสนาม บริเวณหน้าระเบิดของเหมืองหินปูน ที่ผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทย จำนวน 7 เหมือง จากนั้นใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น (linear regression analysis) เพื่อหาแนวเส้นขีดจำกัด (threshold limit line) ที่เหมาะสม ทั้งนี้ใช้ในการคาดคะเนค่าความเร็วอนุภาคที่อาจเกิดขึ้น ตามค่าของระยะทางจากหน้าระเบิด และน้ำหนักรวมวัตถุระเบิดที่ใช้ ผลสรุปการวิเคราะห์ค่าตรวจวัดดังกล่าว แสดงไว้ในรูปที่ 6 เกณฑ์ที่ใช้ปฏิบัติในประเทศสหรัฐอเมริกา ค่าของความเร็วอนุภาคสูงสุด ที่อาจก่อให้เกิดความเสียหาย กำหนดขีดจำกัดไว้ที่ 50 มม./วินาที แต่ในประเทศไทยค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ยอมรับกัน จะต่ำกว่า อยู่ที่ระดับ 25 มม./วินาที

4.2 การปรับแก้กราฟการคาดคะเน

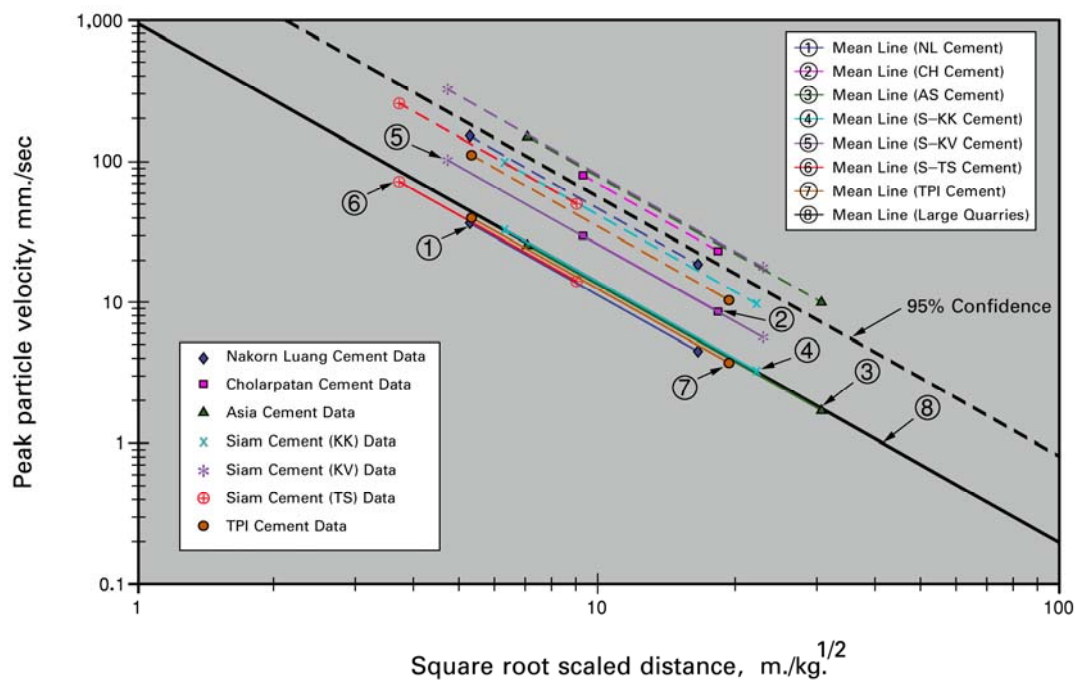
จากการพิจารณากราฟของรูปที่ 6 จะเห็นว่า มีการกระจายค่าค่อนข้างสูง (high scattering) จึงควรมีการปรับแก้ก่อนนำมาใช้จริง Birch and Pegden (2000) ได้เสนอให้นำวิธีการเชิงสถิติมาใช้ในการปรับแก้ โดยตั้งชื่อวิธีใหม่นี้ว่า modified trend line ทั้งนี้มีการกำหนดเส้นกราฟที่มีความเชื่อถือที่ระดับ 95 เปอร์เซนต์ (95% confidence limit) เป็นเส้นเทียบนำค่าผลการตรวจสอบในภาคสนามมาพล็อตใหม่

และให้เส้นกราฟการคาดคะเนของแต่ละเหมือง อยู่ในแนวทางเดียว กันกับเส้นที่ขีดจำกัด 95 เปอร์เซ็นต์ กราฟการคาดคะเนที่ได้จากการปรับแก้ใหม่นี้ (รูปที่ 7) มีผลลัพธ์น่าเชื่อถือมากขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ย้อนหลัง (back

analysis) พบว่า ที่ระดับค่าความถี่คลื่นระเบิด (blast frequency) ใด ๆ (สูงหรือต่ำกว่า 10 เฮิรตซ์) มีโอกาสน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ที่จะมีความเสียหายเกิดขึ้น ถ้าควบคุมให้ความเร็วอนุภาคไม่เกินระดับค่า 25 มม./วินาที



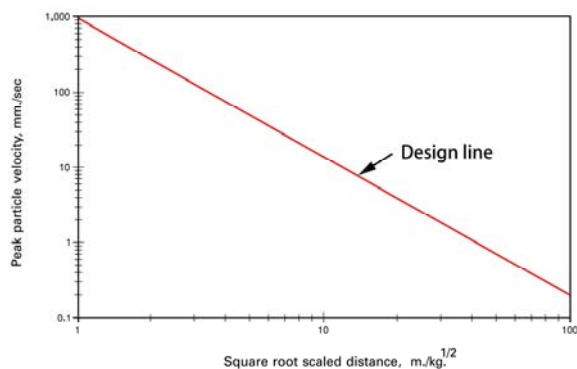
รูปที่ 6 การคาดคะเนผลของการสั่นสะเทือน ตามค่าของระยะทาง และน้ำหนักวัตถุระเบิดต่ออัตรากว้างที่ใช้



รูปที่ 7 การปรับแก้การคาดคะเนผล ด้วยวิธี modified trend line เพื่อให้ผลลัพธ์ มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

4.3 เกณฑ์การกำหนดค่าขีดจำกัดที่ก่อให้เกิดความเสียหาย

ถ้าหากออกแบบการระเบิดหิน ด้วยวิธีตัดชั้นตะพัก ตามมาตรฐานที่ระบุในคู่มือ ขนาดของชิ้นส่วนหินที่เกิดจากการระเบิดหินในแต่ละครั้ง จะได้ขนาดที่ดี ประมาณ 0.70-1.00 เมตร เมื่อนำไปบดย่อย ไม่มีปัญหาในการป้อนหินเข้าปากโม่ แต่ในเรื่องผลกระทบควรมีเกณฑ์ที่กำหนดไว้ 3 รูปแบบ ในกรณีแรกเป็น กรณีปกติ (normal case) กำหนดค่าขีดจำกัดของค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ 25 มม./วินาที โดยใช้ได้กับทุกค่าความถี่ของคลื่นระเบิด ค่าดังกล่าวนี้สามารถหาได้โดยตรงจากเส้นกราฟในรูปที่ 8 ที่ผู้เขียนออกแบบไว้ (จากการคัดแปลงมาจากกราฟของรูปที่ 7) เมื่อทราบค่าระยะทางที่อาจได้รับผลกระทบจากการระเบิด และคำนวณหาขีดจำกัดต่อจังหวะถ่วงที่ใช้

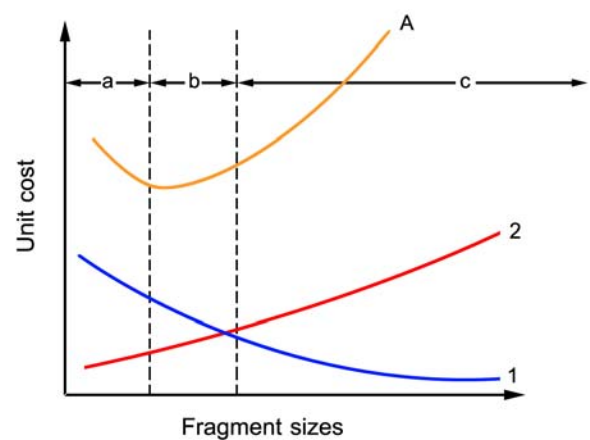


รูปที่ 8 การคาดคะเนค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด ที่ใช้เส้นค่าเฉลี่ยของรูปที่ 7 เป็นตัวแทนการหาผลลัพธ์

กรณีที่สอง เป็น **กรณีที่ควรระวัง** (awareness case) คณะผู้วิจัยเสนอให้มี ระยะห่างจากตำแหน่งระเบิดค่อนข้างไกลอยู่ที่ 150-500 เมตร ทุกค่าความถี่ ค่าของความเร็วอนุภาคสูงสุดไม่ควรเกิน 12 มม./วินาที แสดงว่าน้ำหนักวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วงต้องลดลงมากกว่าเดิม และอัตราส่วนของค่าการสเกลระยะทาง เท่ากับ 16 เมตร ต่อ (น้ำหนักวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วง)^{0.5} ส่วนกรณีสุดท้าย เป็น **กรณีที่ควรระวังอย่างยิ่ง** (extreme case) ใช้กับโครงสร้างสิ่งก่อสร้างเชิงประวัติศาสตร์ ระยะห่างจากจุดระเบิดควรต้องไม่น้อยกว่า 150 เมตร และค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ตรวจวัด ต้องไม่เกิน 4 มม./วินาที

5. สรุป

ในรูปแบบของการวิเคราะห์ปกติ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของมวลสารที่เท่ากับ 1.00, 1.01, 1.10 มีโอกาสที่เกิดการพังทลาย เนื่องจากการหาค่าจากตำแหน่งที่สมดุลของแรงหรือโมเมนต์ ค่าตัวแปรที่นำมาใช้ในการคำนวณมีการแปรผันได้ จึงควรนำวิธีเชิงความเชื่อถือได้มาวิเคราะห์ด้วย เป็นการลดความเสี่ยงในการปฏิบัติงานจริงภาคสนาม การวางแผนการขุดเจาะหน้างาน ควรมีการใช้วิธีประเมินผลเชิงเสถียรภาพควบคู่กับการประเมินค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน



รูปที่ 9 กราฟทดลอง เพื่อประเมินหาความเหมาะสมที่สุด หมายเลข 1 เป็นค่าใช้จ่ายโดยตรง หมายเลข 2 เป็น ค่าใช้จ่ายทางอ้อม ส่วนกราฟ A เป็น ค่าใช้จ่ายในการ ทั้งหมด ขนาดชิ้นส่วนหิน “a” เป็นขนาดเล็ก “b” เป็นขนาดกลาง (0.2-0.7 เมตร) “c” เป็นขนาดใหญ่

กราฟทดลอง (รูปที่ 9) ที่พล็อตระหว่างค่าใช้จ่ายต่อหน่วย (unit cost) เปรียบเทียบ กับการปฏิบัติงานหลายอย่างในเหมืองหิน เช่น ค่าใช้จ่ายโดยตรง เช่น การเจาะหลุม การระเบิด การขนย้าย ส่วนค่าใช้จ่ายทางอ้อม เป็นค่าดำเนินการอื่น การเปรียบเทียบ ขึ้นอยู่กับขนาดชิ้นส่วนของหินที่เกิดการแตกหักอีกด้วย จุดต่ำสุดของกราฟค่าใช้จ่ายทั้งหมดเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการปฏิบัติงาน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยของโครงการ ได้รับเงินทุนสนับสนุนจาก เงินทุนงบประมาณแผ่นดินคณะวิศวกรรมศาสตร์ เงินทุนจุฬา

เอกสารอ้างอิง

- [8] W.J. Birch and M. Pegden “Improved prediction of ground vibrations from blasting at quarries”, Transactions Institution of Mining and Metallurgy, London, 2000, Vol. 109, pp. A102-A106.
- [9] J. M. Duncan “Factors of safety and reliability in geotechnical engineering”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, Vol. 127, No. 4, pp. 307-316.
- [10] J. M. Duncan and S.G. Wright “Soil strength and slope stability”, John Wiley & Sons, New Jersey, U.S.A., 2005.
- [11] M. E. Harr “Reliability-based design in civil engineering”, McGraw-Hill Inc., New York, U.S.A., 1987.
- [12] A. Haldar, S. Mahadevan “First-order and second-order reliability methods” in Chapter 3 Probabilistic Structural Mechanics Handbook: Theory and Industrial Applications, Editor C. Sundararajan, Chapman & Hall, New York, 1995, pp. 27-52.
- [13] D. E. Siskind, M. S. Stagg, J. W. Kopp, C. H. Dowding “Structure response and damage-produced by ground vibration from surface mine blasting”, U.S. Bureau of Mines, R.I. No. 8507, 1980.
- [14] T. F. Wolff “Probabilistic slope stability in theory and practice” ASCE Proceedings of Special Conference, Uncertainty in Geologic Environment, Wisconsin, U.S.A., 1996, pp. 419-433.