

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยประกอบด้วยองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้อง คือ เสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ของมวลหินบนความลาดชันและรอบอุโมงค์ รูปแบบของการพังทลาย วิธีการวิเคราะห์ และแทนทดสอบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

2.1 รูปแบบการพังทลายพื้นฐานของความลาดเอียงมวลหิน

การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบความลาดเอียงมวลหินเป็นกิจกรรมที่พบมาก มีหลายรูปแบบและหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดเล็ก เช่น การขุดคลองส่งน้ำ ช่องเขาหรือไหล่เขาที่มีการขุดตัดเพื่อสร้างถนนหรือทางรถไฟ หินลาดที่ทำหน้าที่รองรับฐานรากของโครงสร้างทางวิศวกรรมไปจนถึงงานขนาดใหญ่ เช่น ความลาดเอียงมวลหินที่อยู่รอบอ่างเก็บน้ำ หรือเหมืองเปิดขนาดใหญ่ Hock and Bray (1981) ได้จำแนกความ ไม่มีเสถียรภาพหรือรูปแบบของการพังทลายของความลาดเอียงมวลหินออกเป็นสี่รูปแบบคือ

- 1) การพังทลายรูปโค้ง (Circular failure) ลักษณะเช่นนี้มักเกิดจากมวลหินที่มีรอยแตกมาก หรือมีความไม่ต่อเนื่องสูง และจะมีลักษณะคล้ายกับการพังทลายของมวลดินหรือมวลหินผสมดิน
- 2) การเลื่อนตามแผ่นระนาบ (Plane sliding) การเลื่อนเช่นนี้พบได้น้อย จะเกิดจากความลาดเอียงที่มีทิศทางหรือแนวระดับ (Strike) ขนานหรือเกือบขนานกับแนวระดับของความไม่ต่อเนื่องชุดหนึ่ง และมุมเท (Dip angle) ของความไม่ต่อเนื่องหรือของรอยแตกนั้นจะต้องสูงกว่ามุมเสียดทานของรอยแตก (Friction angle) แต่จะต้องมีค่าน้อยกว่ามุมเทของหน้าลาดเอียงมวลหิน
- 3) การเลื่อนแบบรูปสามเหลี่ยม (Wedge sliding) ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นเมื่อเส้นที่เกิดจากการตัดกันของรอยแตกสองชุดมีมุมเทไปในทิศทางเดียวกันหรือใกล้เคียงกันกับ “ทิศของมุมเท” (Dip direction) ของหน้าลาดเอียง และมุมเทของรอยแตกนั้นจะต้องมากกว่ามุมเสียดทานของรอยแตกของหิน แต่จะต้องน้อยกว่ามุมเทของความลาดชันมวลหิน รูปร่างของก้อนหินที่เลื่อนลงมาจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมซึ่งเกิดจากการตัดกันของรอยแตกทั้งสองชุด
- 4) การพังแบบพลิกคว่ำ (Toppling failure) ลักษณะการพังทลายเช่นนี้เกิดขึ้นเมื่อมวลหินมีชุดของความไม่ต่อเนื่องหรือชุดของรอยแตกหลักที่มีมุมเทสูง และมีทิศของมุมเทไปทางตรงกันข้ามกับทิศของมุมเทของหน้าลาดเอียงมวลหิน และอาจจะมีความไม่ต่อเนื่องอีกชุดหนึ่งที่มีทิศของมุมเทไปทางเดียวกับทิศของมุมเทของหน้าลาดเอียงมวลหิน โอกาสที่จะเกิดการพลิกคว่ำของ

ก็อ่อนหินที่เกิดจากการตัดกันของชุดรอยแตกทั้งสองนี้จะมีมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างรอยแตก (Spacing) ของชุดแรก (มีมุมเทสูง) มีค่าน้อยกว่าระยะห่างระหว่างรอยแตกของชุดที่สอง (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546)

รูปแบบการพังทลายของความลาดเอียงดังกล่าวเป็นที่ยอมรับและใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน (e.g. Jaeger and Cook, 1987; Goodman, 1989; Hoek, 1981; Bell, 1992)

วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเอียงมวลหินสามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่มหลัก คือ

- การวิเคราะห์เชิงสมดุลจำกัด (Limit equilibrium analysis)
- ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical methods)
- ทฤษฎีหินก้อน (Block theory)
- ระบบปัญญาประดิษฐ์และระบบผู้เชี่ยวชาญ (Artificial intelligence and Expert system)
- การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงกายภาพ (Physical Modeling)

วิธีเหล่านี้ได้นำมาวิเคราะห์และออกแบบความลาดเอียงที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเหมืองแร่เป็นส่วนใหญ่ (e. g. Endicott et al., 1981; Blackwell, 1986; Hantz, 1986; Mario et al., 1986; Martin et al., 1986; Tocher and Fishel, 1986; Jermy, 1991; Baliga and Singh, 1992; Lee et al., 1992; Leventhal et al., 1992; Stewart et al., 1996; Bye and Bell, 2001; Yoon et al., 2002) โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ความลาดเอียงมีเสถียรภาพสูงสุด และมีความสูงและความชันมากที่สุดโดยไม่ใช้วัสดุค้ำยัน ส่วนความลาดเอียงที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรมโยธาก็ได้อาศัยวิธีวิเคราะห์เหล่านี้เช่นกัน (e.g. Farquhar, 1980; Wannakao et al., 1985; Siddle and Hutchinson, 1991; Galster, 1992; Rechiski et al., 1992; Al-Homoud et al., 1994; Ulusay and Aksoy, 1994; Carson and Woods, 1995; Jeong-gi et al., 1996; Kumsar et al., 1998; Zhu and Zhang, 1998; Cai and Ugai, 2002) นอกจากนี้อาจจะมีการออกแบบการค้ำยันเพื่อเสริมเสถียรภาพของความลาดเอียงเนื่องจากต้องการเพิ่มค่าความปลอดภัย (Safety factor) ต่อชุมชนและทรัพย์สินในบริเวณใกล้เคียง (Douglas and Arthur, 1983) สำหรับความลาดเอียงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งสัมพันธ์กับการผุกร่อนและย่อยสลายของหินและมวลหินภายใต้ภูมิอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยก็อาศัยวิธีวิเคราะห์ดังกล่าวเช่นกัน (e.g. Sperling and Cooke, 1985; Culshaw and Bell, 1991; Froldi and Sartini, 1991; Ramamurthy et al., 1992; Brovis and Evans, 1996; Chang et al., 1998; Fujita, 1999)

การพังทลายของความลาดเอียงมวลหินมักจะเกิดหลายรูปแบบพร้อม ๆ กัน โดยส่วนใหญ่จะมีการพังแบบรูปโค้งเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพังทลายที่มีปัจจัยหลักมาจากการผุกร่อนและการย่อยสลายของหินและมวลหิน

ปัจจัยหลักที่นำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดเอียงมวลหินและสามารถตรวจวัดในภาคสนามหรือทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Hoek and Bray, 1981) มักจะประกอบด้วย ความสูงของความลาดเอียง ความชันของความลาดเอียง จำนวนชุดของรอยแตก ความกว้างของรอยแตก ระยะห่างและความต่อเนื่องของรอยแตก ทิศทางของความลาดเอียง ทิศทางของรอยแตกทั้งหมด ความสัมพันธ์ในพื้นที่ ความเสียดทานของหินระหว่างรอยแตก ความแข็งของเนื้อหิน ปริมาณและแรงดันน้ำในความลาดเอียง รูปร่างของความลาดเอียง และน้ำหนักกดทับบนความลาดเอียง เป็นต้น

น้ำมักจะเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดการพังทลายในความลาดเอียงมวลหินนอกเหนือจากปัจจัยหลักเบื้องต้นนี้แล้วยังมีปัจจัยอื่นที่ไม่สามารถประเมินได้ในเชิงตัวเลขแต่มีผลต่อเสถียรภาพของความลาดเอียงมวลหินเช่นกัน เช่น ลักษณะและอัตราการผุกร่อนและย่อยสลายของเนื้อหิน ซึ่งปัจจัยนี้จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ระยะยาวของมวลหิน Fuenkajorn and Kamutchat (2003) ได้เสนอปัจจัยเพิ่มเติมเพื่อประเมินเสถียรภาพของความลาดเอียงในภาคสนามได้อย่างใกล้เคียง ปัจจัยดังกล่าว ได้แก่ ลักษณะและความหนาแน่นของพีชปกคลุม แรงสัมพันธ์ ประสิทธิภาพพังทลายในอดีต วิธีที่ใช้ขุดเจาะ เป็นต้น ซึ่งเมื่อรวมปัจจัยต่าง ๆ เข้าไปในเชิงคณิตศาสตร์ก็จะเพิ่มความแม่นยำในการคาดคะเนเสถียรภาพความลาดเอียงมวลหินได้ดียิ่งขึ้น

การวิเคราะห์เชิงสมมูลจำกัด (Goodman, 1989) เป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้กันในอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งเหมาะสำหรับการพังทลายแบบแผ่นระนาบและแบบรูปลิ้ม วิธีนี้ได้มีการพัฒนาโดยการสร้างสมการควบคุมและอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยเพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดเอียง

ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Finite element analysis) (Crouch and Starfield, 1983; Segerlind, 1984; Pande et al., 1990; Forlati et al., 2001) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการพังทลายแบบรูปโค้งของมวลหิน จากนั้นได้มีการพัฒนาวิธีการคำนวณแบบใหม่เรียกว่า Discrete element analysis เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์การพังทลายแบบแผ่นระนาบและแบบรูปลิ้มด้วย

ทฤษฎีหินก้อน (Goodman and Shi, 1985) เป็นวิธีการวิเคราะห์แบบใหม่ล่าสุดสำหรับการพังทลายของมวลหิน ซึ่งเมื่อเริ่มแรกได้นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุโมงค์ในชั้นหิน ต่อมาได้มีการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับความลาดเอียงมวลหินด้วย แต่จะเหมาะสำหรับการพังแบบระนาบและแบบรูปลิ้มเท่านั้น

ระบบปัญญาประดิษฐ์และระบบผู้เชี่ยวชาญ (Smith and Oliphant, 1991; Moula et al., 1995; Mairaing, 1997; Fuenkajorn and Kamutchat, 2001; Fuenkajorn and Kamutchat, 2003) คือการนำคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์เข้ามาช่วยในการประเมินเสถียรภาพของมวลหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพของมวลหินนั้นไม่สามารถตรวจวัดได้อย่างครบถ้วน หรือเมื่อต้องการประเมินเสถียรภาพของมวลหินอย่างรวดเร็วโดยอาศัยเพียงข้อมูลในอดีต หรือวิจารณ์ญาณและคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546; Mairaing, 1997; Fuenkajorn and Kamutchat, 2001, 2003)

นอกจากวิธีหลักดังกล่าวข้างต้น ได้มีวิธีการอื่น ๆ ที่นักวิชาการได้พยายามนำมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยในการศึกษาและประเมินเสถียรภาพของมวลหินให้สะดวกขึ้น หรือเพื่อให้เกิดความมั่นใจมากขึ้น ตัวอย่างของวิธีดังกล่าวได้แก่ การใช้กฎเกณฑ์ทางด้านสถิติ (Kulatilake and Fuenkajorn, 1987) ทางด้าน Fractal (Ghosh and Daemen, 1993) รวมไปถึงแบบจำลองเชิงกายภาพ เป็นต้น

2.2 อุโมงค์ในมวลหิน

การนำองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์หินมาประยุกต์ใช้กับอุโมงค์ในมวลหิน หรือกับเหมืองใต้ดินมีมาช้านาน อาจจะกล่าวได้ว่ากลศาสตร์หินมีต้นกำเนิดที่สำคัญมาจากความต้องการในการเข้าใจพฤติกรรมของมวลหินและการประเมินเสถียรภาพของมวลหินในเหมืองใต้ดิน ซึ่งจำเป็นต้องเข้าใจการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในมวลหินที่อยู่รอบอุโมงค์ และผลกระทบด้านคุณสมบัติของมวลหิน กลศาสตร์หินจะมีบทบาทไม่มากนักในส่วนของการออกแบบรูปร่าง ขนาด และทิศทางของอุโมงค์ เนื่องจากการออกแบบส่วนใหญ่จะถูกกำหนดความต้องการทางด้านวิศวกรรมอื่น ๆ เช่น ขนาดและทิศทางของอุโมงค์ส่งน้ำจะถูกกำหนดโดยปริมาณน้ำที่ต้องการส่งผ่านและทิศทางของแหล่งต้นน้ำ อุโมงค์สำหรับทางถนนหรือทางรถไฟจะถูกกำหนดโดยความกว้างของผิวจราจร แพนผัง รูปร่าง และขนาดของแต่ละอุโมงค์ในเหมืองใต้ดินจะมีปัจจัยที่สำคัญในการเลือกสรรจากคุณสมบัติทางธรณีวิทยาและทางเรขาคณิตของสายแร่ที่ต้องการขุดออกมา เป็นต้น ดังนั้น เมื่อกล่าวถึงการออกแบบอุโมงค์ในเชิงวิศวกรรมหินส่วนใหญ่จะหมายถึงการออกแบบการค้ำยันของอุโมงค์ในสภาวะแวดล้อมที่ถูกกำหนดมาก่อน ซึ่งรวมถึงรูปร่าง ขนาด ความลึก และชนิดของมวลหินที่อุโมงค์นั้นวางตัวอยู่

Hoek and Brown (1980) และ Hoek et al. (1995) จำแนกลักษณะของความไม่มีเสถียรภาพของอุโมงค์ในมวลหินไว้ 4 ชนิด โดยอาศัยปัจจัยต้นเหตุที่มาของความไม่มีเสถียรภาพมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนก ได้แก่

1) ความไม่มีเสถียรภาพที่เกิดจากความเค้นในมวลหิน (Stress-controlled instability) ลักษณะเช่นนี้มักเกิดกับอุโมงค์ที่อยู่ระดับลึก โดยน้ำหนักของหินที่กดทับทำให้เกิดความเค้นรอบอุโมงค์สูงเกินกว่าที่หินรอบอุโมงค์จะรับได้

2) ความไม่มีเสถียรภาพที่เกิดจากโครงสร้างทางธรณีวิทยาในมวลหิน (Structure-controlled instability) ลักษณะเช่นนี้มักเกิดกับอุโมงค์ที่อยู่ระดับตื้นในมวลหินที่มีรอยแตกและรอยเลื่อนมาก ซึ่งทำให้ก้อนหินที่เกิดจากรอยแตกนั้นสามารถตกหรือเคลื่อนตัวเข้ามาในช่องว่างของอุโมงค์

3) ความไม่มีเสถียรภาพที่เกิดจากน้ำบาดาล (Groundwater pressure and flow) อุโมงค์ที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาลมักจะมีปัญหาทางด้านเสถียรภาพที่เกิดจากการไหลของน้ำบาดาลเข้ามาในอุโมงค์ ซึ่งเป็นอุปสรรคในการก่อสร้าง และเกิดจากความดันของน้ำบาดาลในมวลหินใกล้กับผนังของอุโมงค์ ซึ่งสามารถทำให้เกิดการพังทลายหรือเกิดการสึกกร่อนของหินที่อยู่รอบอุโมงค์

4) ความไม่มีเสถียรภาพที่เกิดจากการผุกร่อนของมวลหิน (Weathering and erosion) แร่ที่เป็นองค์ประกอบของหินบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับบรรยากาศ (อากาศและน้ำ) ได้เร็ว ซึ่งส่งผลให้เนื้อหินเปลี่ยนสภาพไป โดยทั่วไปจะทำให้มีความยึดติดน้อยลงและจะทำให้ความต้านแรงกดสูงสุดของหินต่ำลง ตัวอย่างเช่น กลุ่มแร่ดิน (Clay minerals) ที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของหินดินดาน หินโคลน และหินดิน เป็นต้น หินเหล่านี้เมื่อสัมผัสกับบรรยากาศเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์จะทำให้มีการผุกร่อนได้ง่าย ซึ่งในระยะเวลาหนึ่งเสถียรภาพของอุโมงค์ในหินเหล่านี้ก็จะต่ำลง

ความไม่มีเสถียรภาพทั้งสี่ชนิดดังกล่าวสามารถแยกกันเกิด หรือเกิดพร้อมกันในที่เดียวกันได้ ความไม่มีเสถียรภาพชนิดที่หนึ่งและสองจำเป็นต้องอาศัยความรู้ทางกลศาสตร์หินเข้ามาแก้ไข หรือเข้ามาประเมินความไม่มีเสถียรภาพนั้น ๆ ซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมในบทนี้ ส่วนความไม่มีเสถียรภาพของอุโมงค์สำหรับชนิดที่สามและสี่จะไม่สัมพันธ์โดยตรงกับกลศาสตร์หิน ซึ่งส่วนใหญ่สามารถแก้ไขได้ด้วยเทคโนโลยีและการวางแผนที่เหมาะสมในการออกแบบการก่อสร้างและการออกแบบการค้ำยัน

ในส่วนของการออกแบบการค้ำยันจะมีปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งเข้ามาเกี่ยวข้อง คือระดับของความปลอดภัย ซึ่งจะเกี่ยวเนื่องไปถึงอายุการใช้งานของอุโมงค์ และค่าใช้จ่ายสำหรับการค้ำยัน อุโมงค์ที่ก่อสร้างขึ้นเพื่อการใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธา เช่น อุโมงค์สำหรับทางถนนหรือทางรถไฟ ส่วนใหญ่ต้องการการค้ำยันที่ให้ความปลอดภัยสูงและมีอายุยืนยาวไปหลายสิบปี และจะทุ่มเทค่าใช้จ่ายในการค้ำยันเพื่อให้ได้มาซึ่งความต้องการนี้ Whittaker and Frith (1990) อธิบายรายละเอียดในการวางแผน การพิจารณา การจัดการ การออกแบบ วิธีค้ำยัน และการก่อสร้างอุโมงค์ชนิดนี้ไว้ว่า อุโมงค์ที่เจาะในเหมืองแร่ใต้ดินจะมีอายุการใช้งานค่อนข้างสั้น การค้ำยันและระดับความปลอดภัยจะออกแบบให้พอเพียงกันกับอายุการใช้งานเท่านั้น โดยนำปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์เข้ามาพิจารณาเป็นสำคัญ Brady and Brown (1985), Hartman (1987) และ Hoek and Brown (1980) เป็นเอกสารอ้างอิงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบการค้ำยันสำหรับอุโมงค์เหล่านี้ นอกจากนี้ Hoek et al. (1995) ได้อธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของวัสดุทางวิศวกรรมที่นำมาใช้ในการค้ำยัน ซึ่งรวมไปถึงหมุดยึดหิน (Rock bolt) ตาข่ายลวด (Wire mesh) ซีเมนต์ (Cement grout) แผ่นยึด (Strap) และแท่งเหล็กโค้ง (Steel arc) เป็นต้น

การวิเคราะห์เสถียรภาพของอุโมงค์ในมวลหิน และการออกแบบระบบการค้ำยันของหินรอบอุโมงค์มี 2 แนวทางหลัก คือ 1) อาศัยการจำแนกมวลหิน การเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาและหลักการแบบ Empirical และ 2) การใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งทั้ง 2 แนวทางมีการใช้อย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่จะใช้ร่วมกันและเปรียบเทียบผลประกอบกันไป ส่วนแบบจำลองเชิงกายภาพจะมีการใช้เป็นส่วนน้อยเนื่องจากอุปสรรคหลักของการสร้างแบบจำลองมีน้อย ประกอบกับต้องใช้เวลามากเมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตามแบบจำลองเชิงกายภาพยังคงให้ผลที่สามารถเห็นเป็นรูปธรรมและใช้คาดคะเนได้แม่นยำกว่า และจะทำให้วิศวกรหรือนักวิจัยเข้าใจกลไกของการเคลื่อนตัวของมวลหินรอบอุโมงค์ได้ดีกว่า (Hoek and Brown, 1980)

2.3 ผลกระทบของแผ่นดินไหว

การวิเคราะห์เสถียรภาพของมวลหินบนความลาดเอียงภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kramer (1996) เสนอว่า ต้องพิจารณาผลกระทบด้านความเค้นเชิงจลศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากการสั่นของแผ่นดินไหว และผลกระทบของแรงนี้ต่อความแข็งแรงและพฤติกรรมของความเค้น-ความเครียดของวัสดุบนความลาดเอียง Siad (2003) พบว่า ค่าปัจจัยของเสถียรภาพมวลหินมีความอ่อนไหวต่อความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ของคลื่นแผ่นดินไหวในแนวราบ โดยค่าปัจจัยของเสถียรภาพของมวลหินจะลดลงเนื่องจากผลกระทบของคลื่นแผ่นดินไหวในขณะที่ค่ามุมเสียดทานของรอยแตกเพิ่มขึ้น

การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงโครงสร้างของโลก โดยวิธี Pseudostatic เริ่มขึ้นในปี 1920 ซึ่งผลกระทบของแผ่นดินไหวแสดงโดยความเร่งในแนวราบ และ/หรือ ความเร่งในแนวตั้ง (Kramer, 1996) การประยุกต์วิธี Pseudostatic เพื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดเอียงมีขึ้นครั้งแรกโดย Terzaghi (1950) สำหรับการวิเคราะห์แบบ Pseudostatic นั้น Giani (1992) อธิบายว่า สามารถทำได้โดยใช้วิธี Limit equilibrium และใช้วิธี Dynamic loading ที่เกิดขึ้น เนื่องจากแรงที่เวลาคงที่มีค่าเหมาะสมต่อมวลของปริมาตรของหินที่ไม่มีเสถียรภาพตามค่าสัมประสิทธิ์ของคลื่นแผ่นดินไหว Kramer (1996) กล่าวว่า ขนาดของความเร่งเชิง Pseudostatic จะสัมพันธ์กับการคาดการณ์ความรุนแรงของการเคลื่อนที่ของมวล ซึ่งเป็นการเลือกความเร่งเชิง Pseudostatic สำหรับการออกแบบในสถานะที่เลวร้าย แรง Pseudostatic ในแนวราบจะทำให้ค่าปัจจัยความปลอดภัยลดลง โดยลดแรงต้าน ($\phi > 0$) และเพิ่มแรงเคลื่อน สำหรับแรง Pseudostatic ในแนวตั้งมีอิทธิพลต่อค่าปัจจัยความปลอดภัยน้อย เนื่องจากแรงที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นจะอยู่กับทิศทางของแรง ทั้งแรงเคลื่อนและแรงต้าน ดังนั้นบ่อยครั้งที่ไม่จำเป็นต้องนำผลกระทบอันเนื่องจากความเร่งในแนวตั้งมาพิจารณาในการแก้ปัญหาแรงที่ชักนำไปเกิดการพังทลายของมวลหิน ในทิศทางที่ขนานกับพื้นผิวที่เกิดการพังทลาย

การวิเคราะห์แบบสถิตเทียบ (Pseudostatic) เป็นการนำเสนอผลกระทบของแผ่นดินไหว โดยการประยุกต์ความเร่งในแนวตั้ง และ/หรือ แนวราบในเชิงสถิต เพื่อป้องกันความไม่มีเสถียรภาพของ



มวลดินหรือมวลหิน แรงเฉื่อยที่เกิดจากความเร่งเชิงสถิตเทียม (Pseudostatic accelerations) ทำให้แรงเคลื่อน (Driving force) เพิ่มขึ้น และจะลดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของความลาดเอียง การวิเคราะห์เชิงสถิตเทียม (Pseudostatic) จะไม่เหมาะสมสำหรับดินที่มีความดันในช่องว่างมาก หรือมีการสั่นกร่อนของความแข็ง เนื่องจากการเขย่าของแผ่นดินไหวเกิน 15% สถิติสภาพจะแสดงในส่วนของค่าปัจจัยความปลอดภัยเชิงสถิตเทียมที่คำนวณ โดยกระบวนการของสมดุลที่มีขอบเขตจำกัด (Limit equilibrium) การเลือกความเร่งเชิงสถิตเทียมที่เหมาะสมต้องพิจารณาค่าที่ต่ำกว่าความเร่งที่จุดสูงสุดของมวลหินที่ไหลเลื่อน

การวิเคราะห์ค่าปัจจัยความปลอดภัย

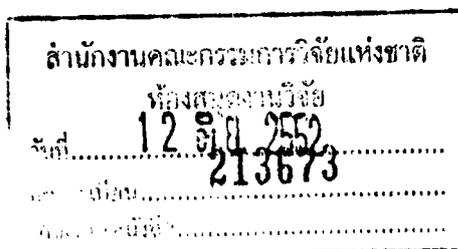
$$FS = \frac{\text{resisting force}}{\text{driving force}} = \frac{c l_{ab} + [(W - F_v) \cos \beta - F_h \sin \beta] \tan \phi}{(W - F_v) \sin \beta + F_h \cos \beta} \quad (2.1)$$

เมื่อ c และ ϕ คือค่าตัวแปรของความแข็งของ Mohr-Coulomb ส่วน l_{ab} คือความยาวของระนาบที่พังทลาย W คือน้ำหนักของมวลที่มีเกิดการพังทลาย F_h และ F_v คือแรงเฉื่อยในแนวราบและแนวตั้ง โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W \quad (2.2)$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \quad (2.3)$$

เมื่อ a_h และ a_v คือความเร่งเชิงสถิตเทียมในแนวราบและแนวตั้ง k_h และ k_v คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสถิตเทียมในแนวราบและแนวตั้งที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก



ในอดีตไม่ได้มีการบันทึกการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว แต่นักแผ่นดินไหววิทยาสามารถประเมินความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจาก Mercalli scale (ตารางที่ 2.1) ซึ่งข้อมูลที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นการบันทึกความสั่นสะเทือนแบบหยาบ ๆ ถ้าข้อมูลของความรุนแรงอยู่ในตำแหน่งที่ต่างกัน การประเมินขนาดของแผ่นดินไหวสามารถที่จะทำการประเมินขนาดของแผ่นดินไหวแบบหยาบ ๆ ได้เช่นกัน (Gendzwill, 2008)

2.4 แทนทดสอบสำหรับแบบจำลองเชิงกายภาพ

แบบจำลองเชิงกายภาพได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อศึกษาเสถียรภาพเชิงกล-ศาสตร์ของมวลดินบนความลาดชันในห้องปฏิบัติการ ซึ่งส่วนใหญ่จะมุ่งไปที่ผลกระทบที่เกิดจากน้ำและจากคุณสมบัติของดิน (e.g. Okura, et al., 2002; Harris, et al., 2002; Okura et al., 2000; Lin et al., 2002; Griffiths et al., 2004) การศึกษาผลกระทบของคลื่นแผ่นดินไหวต่อความลาดชันของดินก็มีการดำเนินการด้วยแบบจำลองเชิงกายภาพในห้องปฏิบัติการเช่นกัน เช่น Mauger et al. (2000) Kokusho and Ishizawa (2005) และ Al-Homoud and Tahtamoni (2000) แต่การศึกษาผลกระทบของคลื่นแผ่นดินไหวต่อความลาดเอียงมวลดินจะเป็นไปในเชิงทฤษฎีและเชิงคณิตศาสตร์ เช่น Luzi et al. (2000) Olson et al. (2005) และ Carro et al. (2003)

แบบจำลองทางกายภาพได้มีการนำมาใช้ในการจำลองการพังทลายของมวลหินบนความลาดเอียงในห้องปฏิบัติการมาเป็นระยะเวลานาน โดยใช้เป็นเครื่องมือในการสอนและการวิจัยที่แสดงกระบวนการพังทลายของมวลหินบนความลาดเอียงแบบ 2 มิติ ภายใต้อาการแตกต่างทางด้านลักษณะทางธรณีวิทยา แบบจำลองที่เป็นที่นิยมและถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางคือ โต๊ะแรงเสียดทานของ Goodman (Goodman, 1976) ซึ่ง Bray and Goodman (1981) ได้อภิปรายถึงหลักการของแรงเสียดทานพื้นฐานว่า มีการนำไปใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงดึงดูดในแบบจำลองทางกายภาพแบบ 2 มิติที่เกิดจากการขูดตักในหิน โดยได้พัฒนาหลักการทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างแรงดึงดูดและแรงเสียดทานพื้นฐานที่ได้จากการทดสอบ เพื่อยืนยันว่าสมการของการเคลื่อนที่นั้นสอดคล้องกับสภาพที่แท้จริงตามแบบจำลอง โดยการทำซ้ำในส่วนของความเร่งเชิงมุมและความเร่งเชิงเส้นตรงตามความเร่งเชิงมุมและความเร่งเชิงเส้นตรง สำหรับการวิเคราะห์แบบ Limit equilibrium จะมีข้อบกพร่องในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ โต๊ะแรงเสียดทานได้ถูกพัฒนาหลากหลายรูปแบบ โดยทั่วไปจะใช้ Block ที่มีส่วนผสมของซีเมนต์กับทรายหรือ Block ที่เป็นไม้หรือพลาสติก เพื่อนำ Block เหล่านี้ไปเป็นแบบจำลองของความลาดเอียง โดย Teme (1987) ได้ประยุกต์การเอียงตัวของโต๊ะแรงเสียดทานพื้นฐานเป็นเครื่องมือในการจำลองการเอียงตัวของความลาดเอียงของหินที่ถูกขูดตัก ซึ่งคล้ายกับหลักการของ Goodman (1976) Hoek and Bray (1981) และ Hittinger (1978) อย่างไร

ตารางที่ 2.1 ความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่ประเมินจาก Mercalli scale (ประยุกต์มาจาก Richter (1958) และ Wald et al. (1999))

อันดับ ความรุนแรงตาม มาตรา Mercalli	อัตราเร่ง (g)	ผลกระทบทั่วไป
I	<0.0017	ไม่รู้สึกรสั่นไหว ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือ
II	0.0017	รู้สึกบางคน โดยเฉพาะผู้อยู่ชั้นบนของอาคาร สิ่งของแกว่งไกว
III	0.014	ผู้อยู่ในอาคารรู้สึก โดยเฉพาะผู้อยู่ชั้นบนอาคาร แต่ผู้คนส่วนใหญ่ยังไม่รู้สึกว่ามีแผ่นดินไหว
IV	0.014-0.039	ในเวลากลางวันผู้คนที่อยู่ในอาคารรู้สึกมาก แต่ผู้อยู่นอกอาคารรู้สึกบางคน เกิดการสั่นของงาน หน้าต่าง ประตู คล้ายรถบรรทุกชนอาคาร
V	0.039-0.092	เกือบทุกคนรู้สึก หลายคนตกใจตื่น วัตถุที่ไม่มั่นคงล้มคว่ำ เสา ต้นไม้ แกว่งไกว
VI	0.092-0.18	ทุกคนรู้สึก เครื่องเรือนเคลื่อน ปล่องไฟแตก เกิดความเสียหายเล็กน้อยกับอาคาร
VII	0.18-0.34	ทุกคนตกใจวิ่งออกนอกอาคาร อาคารที่ออกแบบดีไม่เกิดความเสียหาย จะเกิดความเสียหายเล็กน้อยถึงปานกลางกับอาคารสิ่งก่อสร้างธรรมดา เสียหายมากกับอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผู้ขับรถรู้สึกว่ามีแผ่นดินไหว
VIII	0.34-0.65	เสียหายเล็กน้อยกับอาคารที่ออกแบบไว้ดี เสียหายมากในอาคารธรรมดา บางส่วนของอาคารพังทลาย เสียหายอย่างมากในอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผนังอาคารหลุดออกนอกอาคาร ปล่องไฟพัง ดินและทรายพุ่งขึ้นมา
IX	0.65-1.24	เสียหายมากในอาคารที่ออกแบบไว้ดี โครงของสิ่งก่อสร้างบิดเบนจากแนวตั้ง เสียหายอย่างมากกับอาคารและบางส่วนพังทลาย ตัวอาคารเคลื่อนจากฐานราก พื้นดินแตก ท่อใต้ดินแตกหัก
X	>1.24	อาคารไม้ที่สร้างไว้อย่างดี เสียหาย โครงสร้างอาคารพังทลาย รางรถไฟบิด พื้นดินแตก แผ่นดินถล่มหลายแห่ง ทรายและโคลนพุ่งจากพื้นดิน
XI	>1.24	สิ่งก่อสร้างเหลืออยู่น้อย สะพานถูกทำลาย พื้นดินมีรอยแยกกว้าง ท่อใต้ดินเสียหายหมด รางรถไฟบิดงอมาก
XII	>1.24	เสียหายทั้งหมด เห็นคลื่นบนพื้นดิน เส้นแนวระดับสายตาบิดเบน วัตถุสิ่งของกระเด็นในอากาศ

ก็ตามเครื่องยนต์ของ Teme สามารถจำลองมุมของการเอียงตัวได้อย่างหลากหลายในภาคสนาม และสามารถทดสอบกับวัสดุที่แข็งและอ่อนได้ ในปัจจุบันการวิเคราะห์เชิงตัวเลขส่วนใหญ่จะใช้ Distinct element methods เพื่อจำลองการพังทลายแบบเลื่อน ไถลตามแนวระนาบและการพังทลายแบบพลิกคว่ำ โดยสังเกตจากแบบจำลองความลาดเอียง (เช่น Kim and Lee (1992) และ Lanaro et al. (1997)) แล้วเปรียบเทียบผลจากการคำนวณและการสังเกตเพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมการพังทลายของความลาดเอียงของหินตามธรรมชาติได้ดีขึ้น ข้อเสียของ โต้ะแรงเสียดทานคือ แรงเคลื่อนซึ่งจะชักนำให้เกิดการเลื่อนไถลหรือการพังทลายนั้น ไม่ใช่แรงที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดของโลก โดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานและความเร็วของการเคลื่อนที่ของสายพาน ทำให้จำเป็นต้องปรับค่าหรือตรวจแก้ผลที่ได้เพื่อให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของความลาดเอียงที่แท้จริง พฤติกรรมของการเสียดสีระหว่างสายพานและวัสดุทดสอบมักเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วของสายพานต่ำ ทำให้แรงเคลื่อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของสายพานไม่ใช่แรงเคลื่อนที่ที่แท้จริง นอกจากนี้การที่โต้ะแรงเสียดทานอยู่ในแนวราบหรือเอียงเล็กน้อยจะทำให้ไม่สามารถทำการประเมินผลกระทบเนื่องจากน้ำได้