

หลักการระเบิดหินอย่างมีประสิทธิภาพ

PRINCIPLES OF EFFECTIVE ROCK BLASTING

สง่า ตั้งชवाल

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Sanga Tangchawal

*Department of Mining and Petroleum Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University*

บทคัดย่อ

การระเบิดหินที่ดีและมีประสิทธิภาพ นอกจากจะต้องมีการวางแผนงานที่ดี ยังจำเป็นต้องกำหนดให้ใช้พลังงานจากวัตถุระเบิดที่เหมาะสมคู่กับค่าใช้จ่ายที่ลงทุน ผลของการระเบิดควรก่อให้เกิดการแตกหักของหินที่ได้ขนาด กองหินที่ระเบิดสะดวกต่อการขนย้ายมวลหิน อนึ่งพลังงานส่วนที่เหลือเป็นเสียง การสั่นสะเทือนกับชิ้นส่วนหินที่ปลิวกระเด็นต้อง อยู่ในขอบเขตที่กฎหมายกำหนด มีผลกระทบต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อม

ABSTRACT

Besides well planning for effective blasting practice, one has to limit on explosive consumption as appropriate to the cost of investment. Fragment results of blasting should be at optimum sizes. Muck piles of rock fragment are easy to hauling and transporting. The rest of energy initiated from blasting which is in the forms of air blast sound, vibration, and fly rock need to be in the limit of regulations. Rock blasting has to be the least impacts to community and environment.

1. บทนำ

การใช้วัตถุระเบิดในเชิงอุตสาหกรรมได้มีการเริ่มต้นใช้อย่างจริงจังในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 16 และใน ค.ศ. 1831 เริ่มมีการประดิษฐ์ชนวนระเบิด ที่เรียกว่า "safety fuse" อันเป็นวิธีการเริ่มแรกของการใช้ดินดำอย่างปลอดภัย ในช่วงเวลาต่อมาได้มีการค้นพบสารเคมี ไนโตรกลีเซอริน (nitroglycerin) และไนโตรเซลลูโลส (nitrocellulose) โดยชาวอิตาลีชื่อ แอสคาโนโซเบรโร (Ascanio Sobrero) ซึ่งได้ค้นพบว่าสารเหล่านี้นำไปใช้เป็นวัตถุระเบิดได้ แต่ยังไม่ปลอดภัยและสะดวกในการใช้ เพราะไนโตรกลีเซอรินที่ค้นพบเป็นของเหลวระเบิดได้ง่าย

จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1862 นักเคมีผู้ยิ่งใหญ่ชาวสวีเดน ชื่อว่า อัลเฟรด โนเบล (Alfred Nobel) ซึ่งเป็นผู้ตั้งรางวัลโนเบลภายหลัง ได้ค้นพบวิธีการอัดบรรจุสารไนโตรกลีเซอรินเป็นแท่งได้ สารผสมที่โนเบลค้นพบนี้เรียกว่า ไดนาไมต์ (dynamite)

ตั้งแต่มีการประดิษฐ์ไดนาไมต์ ก็มีการประยุกต์ใช้วัตถุระเบิดประเภทอื่นในเชิงงานวิศวกรรมมากมายหลายประเภท สำหรับงานการระเบิดหิน สารผสมที่ใช้เป็นวัตถุระเบิดมากที่สุดคือ AN-FO (Ammonium Nitrate-Fuel Oil) จากการค้นพบว่าสารแอมโมเนียมไนเตรตสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุระเบิดได้ จึงมีการจดทะเบียนลิขสิทธิ์ ในปี ค.ศ. 1867 ที่ประเทศสวีเดน ในครั้งแรกนั้นไม่ได้นำแอมโมเนียมไนเตรตมาผสมกับน้ำมันดีเซลอย่างที่ใช้ในปัจจุบัน การใช้น้ำมันดีเซลมาผสมกับแอมโมเนียมไนเตรดครั้งแรกเกิดในปี ค.ศ. 1945

การใช้วัตถุระเบิดเพื่อการระเบิดหินในประเทศไทย มีจุดประสงค์ที่จะนำวัสดุที่แตกหักจากการระเบิดหรือวัสดุที่บดย่อยแล้ว มาใช้ในอุตสาหกรรมหินก่อสร้างและอุตสาหกรรมซีเมนต์ ซึ่งมีปริมาณการใช้ของวัตถุระเบิดสูงมากถึงประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์เทียบกับการใช้วัตถุระเบิดเพื่องานอื่น แหล่งที่มีการระเบิดหินมากอยู่ใน

จังหวัดภาคกลาง จังหวัดที่มีการระเบิดได้ปริมาณหินต่อปีมากที่สุดได้แก่ จังหวัดสระบุรี สุพรรณบุรี และราชบุรี

2. กลไกที่สำคัญในการระเบิดหิน

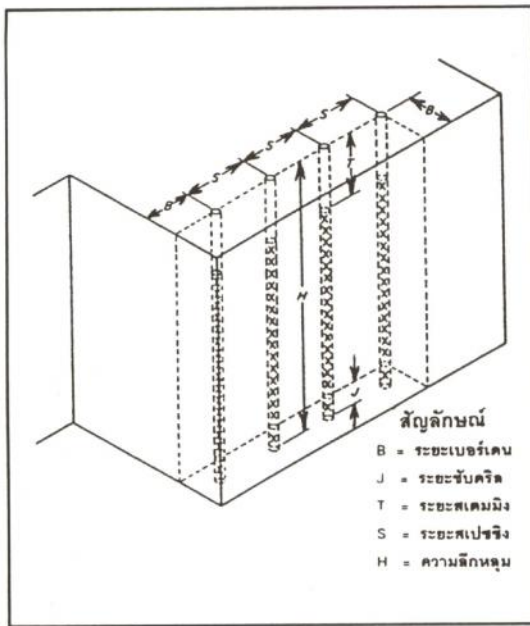
วัตถุระเบิดแรงสูงที่ใช้ในการระเบิดหินนั้น มีธาตุประกอบหลักอยู่ 4 อย่าง ได้แก่ C, H, N, O ซึ่ง AN-FO ไม่จัดเป็นวัตถุระเบิดที่แท้จริง มักนิยมเรียกว่า สารผสมระเบิด (blasting agent) อัตราส่วนที่เหมาะสมก็คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแอมโมเนียมไนเตรต (ammonium nitrate) ต่อ น้ำมันดีเซล (fuel oil) เท่ากับ 94.3 : 5.7 เมื่อมีการผสมของสารทั้งสองอย่างเหมาะสมก็จะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมาก และให้ปริมาณออกซิเจนกับพลังงานความร้อนอย่างมากมายปฏิกิริยาของ AN-FO มีดังนี้



ถ้าหาก AN-FO มีการผสมไม่เหมาะสม พลังงานของการระเบิดจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนผสมที่แตกต่างไปเพียง 0.5% มีผลทำให้พลังงานสูญเสีย (energy loss) ไปได้ถึง 5% และพลังงานจะยิ่งสูญเสียมากขึ้นเมื่อส่วนผสมต่างไปจากเดิมมากกว่านี้

การสังเกตในภาคสนาม การระเบิดที่ดีจะมีกลุ่มควันสีเทาอ่อนเกิดขึ้น แต่ถ้าหากมีส่วนผสมของน้ำมันดีเซลน้อยเกินไปจะเกิดก๊าซไนตรัสออกไซด์ (nitrous oxides) ก่อให้เกิดกลุ่มควันสีเหลืองปนเทา ในทางกลับกันถ้าหากมีส่วนผสมของน้ำมันดีเซลมากเกินไป จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) กับคาร์บอน (C) ทำให้ได้กลุ่มควันสีดำ

ในการผลิตหินเพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้างเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง ต้องมีการเจาะหลุมลึกลงไปและโหลดวัตถุระเบิดลงในหลุม ในการปฏิบัติจริงภาคสนาม การเจาะจะเป็นแบบเจาะหลายรูกับเจาะหลายแถว ทำให้หินที่ระเบิดออกมามีลักษณะเป็น ตะพัก



รูปที่ 1 การตัดหน้าเหมืองให้เป็นแบบขั้นบันไดโดยใช้รูเจาะแนวตั้ง

(bench) จึงเรียกการระเบิดหินแบบนี้ว่า การระเบิดหินแบบขั้นบันได (bench blasting) รูปแบบเชิงเรขาคณิตที่สำคัญของการระเบิดหินแบบนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1

หน้าที่ของการทำงานสำหรับรูปแบบเชิงเรขาคณิตของหน้าเหมืองหินมีดังนี้

ก. เส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะระเบิด (blast hole diameter, DH)

การเลือกขนาดของหลุมเจาะ มีผลโดยตรงต่อการแตกหักของหินที่คุ้มค่าที่สุด ตามปกติค่าใช้จ่ายในการเจาะระเบิดและการใช้วัตถุระเบิดจะลดน้อยลง เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะระเบิดใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตาม ตัวประกอบอื่นก็ต้องนำมาวิเคราะห์ด้วย เช่น ระยะความสูงของหน้าเหมือง กฎเกณฑ์ทางด้านการสั่นสะเทือนและผลกระทบอื่น ความแข็งแรงและโครงสร้างของมวลหินที่ทำการระเบิด ถ้าหินแข็งมากก็จะทำให้ระเบิดออกมามีก้อนขนาดใหญ่เกินความต้องการ (oversize) มากเกินไป

ข. ระยะห่างระหว่างแถวหรือระยะเบอร์เดน (burden, B)

ระยะเบอร์เดน (burden) เป็นระยะที่สั้นที่สุดที่ใช้เวลาในการจุดระเบิดและก่อให้เกิดการเคลื่อนย้ายมวลสารออกจากหน้าอิสระ (free face) การเลือกระยะห่างของเบอร์เดน จัดว่าเป็นส่วนสำคัญที่สุดในการออกแบบงานระเบิด

ถ้าหากว่าระยะห่างของเบอร์เดนแคบ (ถี่) เกินไป หินจะปลิวกระเด็นไปได้ไกลจากบริเวณหน้าเหมือง ระดับความดังของเสียงที่เกิดจากการระเบิดจะมีสูง และการแตกหักของหินจะแตกละเอียดได้ก่อนเล็กน้อยขนาดที่ต้องการ (undersize) มากเกินไป ในทางกลับกันถ้าหากระยะห่างของเบอร์เดนกว้าง (ยาว) มากเกินไป ปรากฏการณ์ของการแตกร้าวทางด้านหลังของแนวระเบิดมาก หลุมขรุขระที่เกิดจากการระเบิดจะมีสูง

ค. ระยะห่างระหว่างหลุมเจาะในแถวหรือระยะสเปซซิง (spacing, S)

ระยะสเปซซิง จะเป็นระยะตั้งฉากกับระยะเบอร์เดน ผลกระทบของระยะสเปซซิงที่แคบเกินไปจะก่อให้เกิดการแตกร้าวระหว่างหลุมเจาะข้างเคียง หรือวัสดุที่ปิดอัดหลุม (stemming materials) มีการปลิวกระเด็นก่อนเวลาที่ควร ก๊าซในหลุมเจาะถูกปล่อยออกมาเร็วและเสียงดังจากการระเบิดมีสูง ในการพัฒนาเหมืองหิน ถ้าหากระยะสเปซซิงแคบ (ถี่) มากเกินไป โซนการแตกร้าว (shattered zone) ระหว่างหลุมเจาะจะมีอยู่สูง

ถ้าหากระยะสเปซซิงกว้าง (ยาว) มากเกินไป มวลหินระหว่างหลุมเจาะที่อยู่ข้างเคียงอาจมีการแตกหักไม่ดี ทำให้ได้การระเบิดตัดหน้าพื้นเหมืองที่ไม่เรียบ ในทำนองเดียวกันพื้นผิวหน้าเหมืองก็ไม่เรียบ (rough wall) ด้วย

ง. ความสูงของตะพักหรือหน้าเหมือง (bench height, L)

ความสูงของตะพักหรือหน้าเหมือง จำเป็นต้องมีสัดส่วนพอดีกับระยะเบอร์เดน (B) ถ้าพิจารณาความสูงอย่างเดียว (L) จะมีความสำคัญต่องานระเบิดน้อย

กว่าอัตราส่วนของ L/B ซึ่งมีอีกชื่อหนึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของสติฟเนส (stiffness ratio) ซึ่งมีผลกระทบสำคัญในเรื่องการแตกหักและความสั่นสะเทือน

จ. ระยะเจาะลึกใต้ระดับพื้นเหมืองหรือระยะขั้วดริลลิง (subdrilling, J)

การที่ทำการเจาะลึกต่ำกว่าระดับพื้นของเหมือง ที่มีการใช้เครื่องจักรกลเพื่อขนย้ายหินในบริเวณ ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าตลอดหน้างาน (full face) สามารถนำเครื่องจักรกลเข้าไปปฏิบัติงานได้ ไม่มีขีดหินเกะกะบริเวณพื้นเหมือง เหตุผลอีกประการหนึ่ง ก็คือขนาดแอมพลิจูดของคลื่นพัลส์กระแทกจากการระเบิด ไม่ได้มีค่าสูงสุดที่จุดล่างสุดของคอลัมน์วัตถุระเบิด (explosive column) จึงมีผลทำให้การแตกหักที่จุดล่างสุดความลาดเอียง (toe) ทำได้หินขนาดใหญ่เกินควรบริเวณหน้าเหมือง แต่ถ้าบริเวณพื้นเหมืองมีลักษณะโครงสร้างหินในบริเวณมีรอยแตกรอยแยกมากอยู่ก่อนแล้ว การเจาะระเบิดต่ำกว่าระดับพื้นก็ไม่จำเป็น

ฉ. แบบอย่างหลุมเจาะระเบิด

แบบอย่างหรือแพตเทิร์น (pattern) ของหลุมเจาะระเบิด นิยมใช้เพียง 3 แบบ

ก. แบบอย่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส (square pattern) มีค่าอัตราส่วนของระยะเบอร์เดน / ระยะสเปซิง (B/S) เท่ากับ 1:1

ข. แบบอย่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular pattern) มีค่าอัตราส่วนของระยะเบอร์เดน/ระยะสเปซิง (B/S) ไม่เท่ากับ 1:1 นิยมใช้ 1:1.25

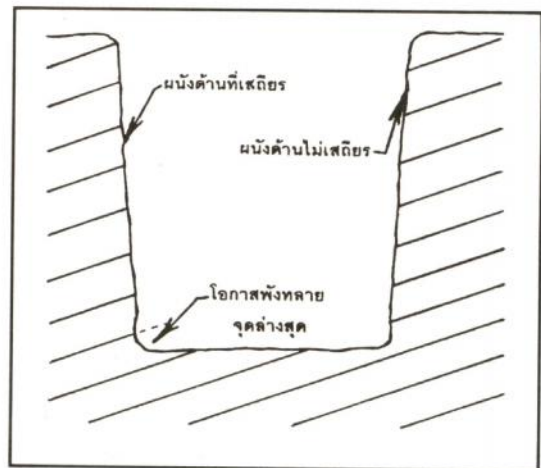
ค. แบบอย่างสลับฟันปลา (staggered pattern) มีค่าอัตราส่วนของระยะเบอร์เดน / ระยะสเปซิง (B/S) เท่ากับ 1:1.15

3. ข้อที่ต้องคำนึงในงานระเบิดหน้าเหมือง

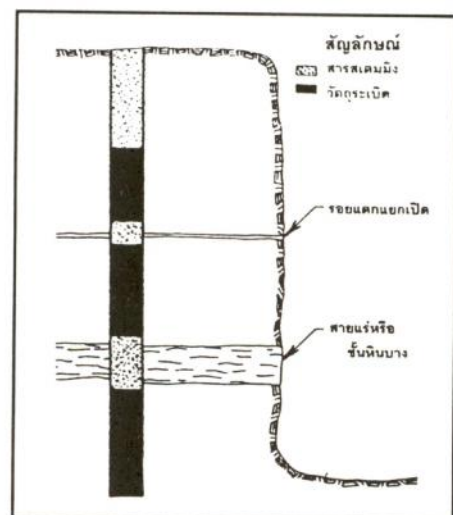
งานการระเบิดหินหน้าเหมือง ไม่ใช่สิ่งที่สามารถกำหนดได้แน่นอน องค์ประกอบหลักที่ทำให้ผล

การแตกหักและผลกระทบของการสั่นสะเทือน สำหรับเหมืองหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอีกเหมืองหนึ่ง มีค่าแตกต่างกัน เกิดจากองค์ประกอบมากมายหลายอย่าง สิ่งที่น่ามาอภิปรายในบทความนี้ เป็นเพียงปัญหาหลักที่ผู้ประกอบการในด้านการระเบิดเพื่องานอุตสาหกรรม มักจะพบในช่วงการปฏิบัติงานภาคสนาม

3.1 คุณสมบัติและสภาพเชิงธรณีวิทยาของมวลหินที่จะทำการระเบิด



รูปที่ 2 รอยแตกแยกตามธรรมชาติในหิน ที่มีผลต่อเสถียรภาพของการเปิดหน้าเหมือง



รูปที่ 3 ชั้นดินหรือสายแร่ที่ทำให้พลังงานการระเบิดสูญเสียไป การควบคุมผลกระทบจากการระเบิดทำได้ยาก

มวลหินในแต่ละแหล่งจะมีสภาพทางธรณีวิทยาแตกต่างกัน ทั้งทางด้านชนิดของหินความหนาและความลึกของชั้นหิน คุณสมบัติพื้นฐานของมวลหินนั้น เช่น ความแข็งความถ่วงจำเพาะ โพรงในมวลหิน รอยแตกรอยแยกในมวลหิน เป็นต้น

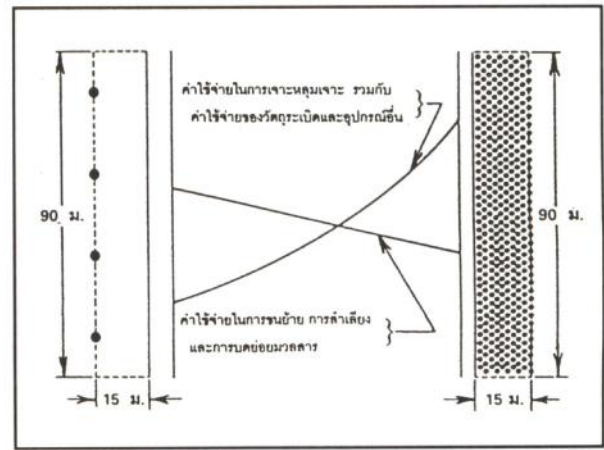
ตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 2 เป็นลักษณะของรอยแตกแยก (joint) ที่มีผลต่อเสถียรภาพของมวลหินที่อาจก่อให้เกิดการพังทลายของมวลหินได้ และมีผลต่อการพังทลายที่จุดล่างสุดของความลาดเอียง

สำหรับตัวอย่างในรูปที่ 3 เป็นรอยแตกแยกที่เปิด (open joint) หรือชั้นดินหรือสายแร่แทรกในมวลหิน เมื่อตัดผ่านหลุมเจาะระเบิด เกิดการสูญเสียของพลังงาน คลื่นพัลส์เมื่อมีการระเบิดทำให้ประสิทธิภาพของการแตกหักของหินลดลง การควบคุมความสั่นสะเทือนทำได้ยาก

3.2 ขนาดของหลุมเจาะระเบิด และค่าใช้จ่าย

ในบางกรณีขนาดหลุมเจาะระเบิด ไม่สามารถเลือกได้ เพราะทางเหมืองได้จัดซื้อเครื่องเจาะไว้แล้ว แต่หลักการทั่วไปของการเลือกขนาดของหลุมเจาะ ก็คือต้องเลือกให้มีความสัมพันธ์กันกับรูปแบบเชิงเรขาคณิตของพื้นที่หน้าตัดของหน้างานระเบิด ชนิดของวัตถุระเบิด และชนิดของหินที่จะทำการระเบิด พื้นฐานของการออกแบบแพตเทิร์นของการระเบิด มักเริ่มต้นที่ขนาดหลุมเจาะก่อน จากนั้นจึงเป็นค่าระยะมิติอื่น

ตัวอย่างในรูปที่ 4 เป็นการสมมติพื้นที่หน้าตัดที่มีขนาดเท่ากับ 8,200 ตร.ม. ในรูปที่เป็นโดอะแกรมด้านซ้ายมีหลุมเจาะขนาด 500 มม. (20 นิ้ว) อยู่เป็นจำนวน 4 หลุม และใช้ค่าระยะเบอร์เดน เท่ากับ 15 เมตร ระยะ สเปซซิง เท่ากับ 23 เมตร ส่วนรูปที่เป็นโดอะแกรมด้านขวา ใช้หลุมเจาะขนาด 50 มม. (2 นิ้ว) เป็นจำนวน 400 หลุม ใช้ค่าระยะเบอร์เดน เท่ากับ 1.5 เมตร ระยะสเปซซิง เท่ากับ 2.3 เมตร



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการเจาะระเบิด กับการขนย้ายและบดย่อย (จาก Dick et al., 1983)

เมื่อทำการพล็อตหาค่าใช้จ่าย ปรากฏว่า การเจาะหลุมขนาดใหญ่ (500 มม.) มีค่าใช้จ่ายในการเจาะและการใช้วัตถุระเบิดต่ำ แต่มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งและลำเลียงกับการบดย่อยหินสูง ส่วนในกรณีที่ใช้เจาะหลุมขนาดเล็ก (50 มม.) ปรากฏว่าได้ค่าใช้จ่ายในการเจาะและใช้วัตถุระเบิดสูง แต่มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งและลำเลียงกับการบดย่อยหินหน้าเหมืองต่ำ จุดเหมาะสมของการเลือกขนาดหลุมเจาะจะได้ขนาดหลุมเจาะที่มีค่าปานกลาง ได้แก่ หลุมเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 150 – 200 มม.

3.3 ชนิดของตัวแปรจากงานระเบิดหิน

ในเชิงทฤษฎีผลกระทบในเรื่องการระเบิดหิน เพื่อการผลิตหินหน้าเหมือง มีตัวแปรต่างๆ ที่จัดเป็นกลุ่มได้สองแบบ ได้แก่ กลุ่มตัวแปรแรก ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (non-controllable variables) และตัวแปรกลุ่มสอง ตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (controllable variables)

3.3.1 ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้

ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ เป็นสิ่งที่เกิดตามธรรมชาติ มนุษย์ไม่สามารถจะไปแก้ไขปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ก่อนทำการระเบิด หรือถ้าทำได้ก็ไม่คุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจ ได้แก่

- ก. สภาพพื้นผิวของภูมิประเทศและโครงสร้างหิน
- ข. ความลึก ความหนาและชนิดของพื้นผิวที่ปกคลุม
- ค. ลม

3.3.2 ตัวแปรที่ควบคุมได้

ตัวแปรที่ควบคุมได้ เป็นสิ่งที่มนุษย์ออกแบบ ดัดแปลง และปรับปรุงพัฒนาให้ดีขึ้นได้

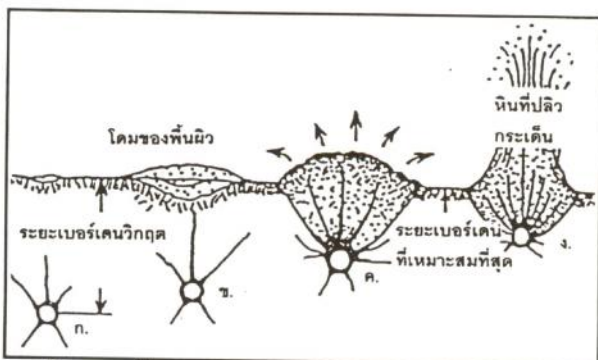
- ก. ชนิดของวัตถุระเบิด
- ข. รูปแบบเรขาคณิตของการระเบิด
- ค. จำนวนวัตถุระเบิดสูงสุดต่อจังหวัด และเก็บ ถ่วงเวลา
- ง. ทิศทางของหน้าระเบิด
- จ. การเปิดหน้าเหมืองหินให้เหมาะสมกับสภาพธรณีวิทยา

4. การแตกหักของหินจากการระเบิด

ทฤษฎีการแตกหักของหินจากการระเบิดแบบ ชั่นบันได มีหลายรูปแบบ แต่ที่ยอมรับ และนิยมใช้ในปัจจุบันมีเพียง 2 รูปแบบ คือการแตกหักเป็นหลุมขรุขระแบบเครเตอร์ กับการแตกหักแบบโค้งตัวของคาน

4.1 การแตกหักของหินเป็นหลุมขรุขระแบบเครเตอร์

ทฤษฎีการแตกหักที่เกิดเป็นหลุมลึกขรุขระที่เรียกชื่อเฉพาะว่า "crater" มีการประยุกต์ใช้มาค่อนข้างยาวนาน แต่ภายหลังมักพบว่า การแตกหักแบบเครเตอร์นี้ใกล้เคียงกับการระเบิดที่ใช้ระเบิดนิวเคลียร์มาก



รูปที่ 5 ขั้นตอนต่างๆของการเกิดหลุมเครเตอร์ เมื่อทำการลดระยะห่างของหลุมระเบิด แถวแรกลง สมมุติใช้วัตถุระเบิดเป็น AN-FO หน้า 18 กก.

ก. ระยะเบอร์เดนวิกฤตเท่ากับ 12 ฟุต เป็นจุดที่เริ่มต้นการแตกหัก

ข. ระยะเบอร์เดนเท่ากับ 9 ฟุต มีหินปลิวเป็นโดมอย่างชัดเจน

ค. ระยะเบอร์เดนเท่ากับ 6 ฟุต เป็นระยะที่เกิดหลุมเครเตอร์ขรุขระสมบูรณ์แบบ เป็นระยะเบอร์เดนที่เหมาะสม

ง. ระยะเบอร์เดนเท่ากับ 3 ฟุต เป็นระยะที่สั้นไป หินแตกหักสูง มีการปลิวกระเด็นของชิ้นส่วน และเกิดเสียงระเบิดดังมาก

ตามหลักการจะสมมติว่า คลื่นพัลส์จากการระเบิดมีลักษณะทรงกลม เมื่อมาประยุกต์ใช้กับการเจาะรูปทรงกระบอกในเหมืองหินก็ให้อัตราส่วนของคลื่นพัลส์ทรงกลมที่ต่อเนื่องกันตลอดความยาว ในหลุมเจาะทรงกระบอกมีจำนวนเท่ากับ 6 ทรงกลม/หลุมเจาะ ซึ่งจะทำให้เกิดความดันของการระเบิดในหลุมเจาะได้ประสิทธิภาพสูงสุด ทำให้ได้การแตกหักเป็นหลุมเครเตอร์ขนาดใหญ่ (ดูรูปที่ 5 ค)

ระยะของเบอร์เดนเฉพาะที่เกิดขึ้นในกรณีของรูป 5 ก นี้ จะมีชื่อเรียกว่า ระยะห่างวิกฤต (critical distance) ซึ่งเป็นระยะสั้นสุดที่จะเกิดพลังงานการระเบิดต้นเอามวลหินหลุดออกจากหน้าอิสระได้

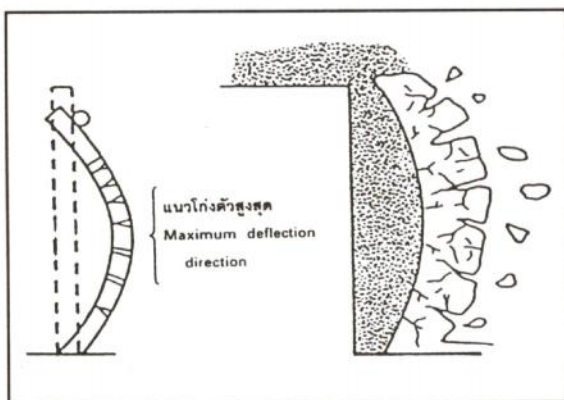
4.2 การแตกหักของหินโดยการโค้งตัวแบบคาน

จากการตรวจสอบในภาคสนามของการระเบิดแบบชั่นบันได (bench blasting) พบว่ารอยแตกเล็ก ๆ ในแนวรัศมี (radial cracks) เกิดในระนาบที่จำกัด ส่วนใหญ่จะเกิดในแนวระนาบขนานกับแกนหลุมเจาะ ความดันก๊าซที่เกิดขึ้นภายหลังเกิดการระเบิดมีส่วนทำให้ชิ้นส่วนของหินเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

ระหว่างที่มีการจุดระเบิดในสภาวะที่ปิดอัดในหลุมเจาะหนึ่ง ๆ ความดันที่สำคัญมีอยู่สองชนิด ความดันแรกเป็นความดันการจุดระเบิดหรือความดันดีโตนชัน (detonation pressure) จะกระทบกับผนัง

หลุมเจาะเป็นช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ความดันที่สองเกิดจากก๊าซร้อนที่ความดันสูงมาก ก๊าซที่กระทำกับผนังหลุมเจาะระเบิดและมีความดันอยู่คงที่เป็นระยะเวลาค่อนข้างนาน (เมื่อเทียบกับความดันดีโทเนชัน) จนกว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรขึ้นมาภายหลัง มีผู้วิจัยหลายท่านเน้นว่าพลังงานที่ทำให้หินแตกหัก จำนวน 90% จาก 100% นี้ เป็นผลมาจากความดันก๊าซ (gas pressure) การแตกหักของหินโดยการโก่งตัว คล้ายกับการโก่งตัวของคาน (beam bending) และเกิดแตกหักของคานภายหลังโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณกึ่งกลางคาน มีชื่อเรียกเฉพาะว่า การแตกหักเนื่องจากแรงดัด (flexural rupture) การอธิบายปรากฏการณ์ได้แสดงในรูปที่ 6

ระดับขั้นของการแตกหักขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงความเหนียว ที่เรียกว่า สติฟฟ์เนส (stiffness) ของมวลหินแถวแรก ค่าสติฟฟ์เนสนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะในภาคสนามที่ด้านการเคลื่อนที่ของมวลค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) การแตกในแนวรัศมีของหินขนาดของมิติต่าง ๆ (ความหนา, ความกว้าง, ความสูง) ของคานมวลหิน



รูปที่ 6 แบบจำลองการโก่งตัวของคานมวลหินหน้าหลุมระเบิดที่มีปรากฏการณ์โก่งตัวภายหลังทำการจุดระเบิด (จาก สง่า ตั้งชวล, 2541)

5. การคาดคะเนการแตกหักของหิน

จุดมุ่งหมายของงานระเบิดหินต้องการให้การแตกหักของมวลหินออกเป็นชิ้นส่วนที่มีขนาดพอเหมาะ และพยายามให้มีขนาดของก้อนที่ขนาดใหญ่มากกว่าการใช้งาน หรือขนาดของก้อนที่ขนาดเล็กกว่าการใช้งานที่ผลิตได้ มีเปอร์เซ็นต์ที่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

การคาดคะเนผลของชิ้นส่วนหินที่แตกหักเนื่องจากการระเบิด กับการคาดคะเนผลการแตกหักของหินที่ผ่านปากไม่ มีความแตกต่างในหลายแนวทาง ถึงแม้ว่าสมการดั้งเดิมที่ใช้คาดคะเนของสูตรเชิงประสบการณ์จะมาจากของ ทฤษฎีการบดย่อย (comminution theory) เนื่องจากตัวแปรที่สำคัญของการคาดคะเนชิ้นส่วนของหินที่แตกหักจากการระเบิดมีความแตกต่างจากการ บดย่อยหินในโรงโม่ ซึ่งได้แก่ พลังงานของการระเบิด และรูปแบบของการเจาะระเบิดหน้าเหมืองหิน

5.1 แบบจำลองการคาดคะเนการแตกหัก

แนวทางที่ใช้เป็นแบบจำลองการคาดคะเน ในงานวิจัยหลายโครงการที่ผู้เขียนบทความเป็นผู้วิจัยหลัก ได้ใช้สูตรเชิงประสบการณ์ที่เป็นข้อเสนอแนะมาจากนักวิจัยหลายท่านดังนี้

ในปี ค.ศ.1973 คูซเน็ตซอฟ (Kuznetsov) ได้เสนอการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของชิ้นส่วนหินที่แตกหักเนื่องจากการระเบิดไว้ดังนี้

$$X_m = A [V_0/Q]^{0.8} Q^{1/6} \quad (2)$$

กำหนดให้

X_m = ชิ้นส่วนเฉลี่ยของหินที่แตกหัก (หน่วยเป็น ซม.)

A = คุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับชนิดของหิน เรียกว่าตัวประกอบชนิดหิน (rock factor) โดยทั่วไปมี

ค่าอยู่ระหว่าง 7 ถึง 13 [หินปูน = 7;
หินแกรนิตที่แตกแยก = 10]

V_0 = ปริมาตรของหินที่แน่น (ลบ.ม.)/หลุมเจาะ

Q = น้ำหนักของวัตถุระเบิด TNT (กิโลกรัม) ซึ่ง
สมดุลกับพลังงานของวัตถุระเบิดในแต่ละ
หลุมเจาะ

เมื่อกำหนดสัญลักษณ์ q ที่ใช้เป็นค่าปริมาณ
วัตถุระเบิดที่ใช้ หรือเรียกว่าค่าเพาเดอร์แฟกเตอร์
(powder factor) ที่เป็นค่าน้ำหนักวัตถุระเบิดที่ใช้ต่อ
ปริมาตรหินแน่นที่จะระเบิด มีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม.
และเป็นค่าอัตราส่วนกลับของพจน์ [V_0 / Q_0]

$$X_m = A [q]^{-0.8} Q_0^{1/6} [115/S_r]^{19/30} \quad (3)$$

กำหนดให้

Q_0 = มวลของวัตถุระเบิดที่ใช้ต่อหนึ่งหลุมเจาะ

S_r = ค่ากำลังน้ำหนัวัตถุระเบิดสัมพัทธ์ (relative
weight strength) ให้ Ammonium Nitrate—
Fuel Oil มีค่า $S_r = 100$ และของ TNT
มีค่า = 115

Rollins และ Wang (1990) ได้เสนอแนวทาง
ที่จะวิเคราะห์ค่าการแตกหักของมวลหินที่เกิดจากการ
ระเบิดของ แต่หลุมเจาะแล้วพล็อตค่าบนกราฟเพื่อหา
เปอร์เซ็นต์การกระจายขนาดทั้งหมด (total
fragmentation size distribution: P_i)

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_j [P_j/V_T] \quad (4)$$

สมการข้างบนตั้งสมมุติฐานให้จำนวนข้อมูลดิบมีทั้ง
หมดเท่ากับ n ตัวอย่าง, ค่า P_i เป็นเปอร์เซ็นต์สะสม
ขนาดของชิ้นส่วนที่ผ่านตะแกรงทั้งหมดในแต่ละ
หลุมเจาะระเบิด, ค่า V_j เป็นปริมาตรหินที่แตกหักต่อ

หลุมเจาะ (volume per hole) มีหน่วยเป็น ลบ.ม.,
ค่า V_T เป็นปริมาตรของหินทั้งหมดที่แตกหัก

5.2 การวัดขนาดการแตกของหินในภาคสนาม

การศึกษาภายในประเทศเพื่อวิเคราะห์การ
แตกของหินจากการระเบิด คณะผู้ศึกษาวิจัยของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้รับความร่วมมือจากเจ้าหน้าที่
ของกองการเหมืองแร่และกองสิ่งแวดล้อมทรัพยากรธรณี
กรมทรัพยากรธรณี ไปทำการศึกษาที่เหมืองหินหลาย
แห่งทั้งที่เป็นเหมืองหินปูน (ดูรูปที่ 7) เหมืองหินบะซอลต์
และเหมืองหินแกรนิต

ผลการศึกษาทำให้สามารถหาประสิทธิภาพ
ของงานระเบิดแต่ละหน้าเหมืองเปรียบเทียบกับค่าของ
การคาดคะเนผลการแตกหักเป็นชิ้นส่วนหิน ซึ่งที่ได้เขียน
เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปใช้ได้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทั่วไปที่ไม่ต้องมีหน่วยความจำมาก



รูปที่ 7 การศึกษาขนาดชิ้นส่วนของหินที่แตกหัก
ถ่ายรูป ที่หน้าเหมืองหินปูน บริษัท
ปูนซีเมนต์ไทย (ทุ่งสง) นครศรีธรรมราช

การประเมินผลให้ได้ค่าเชิงวิเคราะห์
(quantitative) การแตกหักหินจากการระเบิดจริงนั้น
วิธีการที่ดีที่สุดคือ ทำการคัดขนาดหินทั้งกองโดยผ่านแ
รงคัดขนาด แต่ละวิธีการนี้เป็นสิ่งที่ปฏิบัติได้ยากสำหรับ
หน้าเหมืองที่กำลังพัฒนา เพราะจะทำให้งานทั้งระบบ
ต้องช้าลงไปไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐกิจ จึงเพียงได้ทำการ
ศึกษาตรวจวัดโครงสร้างและชนิดของหิน รวมทั้งทำการ

ถ่ายรูปหน้าเหมืองก่อนการระเบิดและภายหลังที่มีการระเบิดจริงเสร็จสิ้นไปแล้ว ซึ่งเป็นการประเมินผลด้วยการตรวจสอบด้วยตาเปล่า (visual aid analysis) ปนกับวิธีการถ่ายรูป (photographic method) จากนั้นก็ทำการนับ(counting) ขนาดหินก้อนใหญ่เกินขนาด (oversize boulders) ทำการจดบันทึกมิติของก้อน โดยเลือกขนาดก้อนที่มีความยาวด้านยาวที่สุดตั้งแต่ 50 ซม. จนถึงขนาดที่โตกว่า 2.0 เมตร การนับขนาดพยายามนับในช่วงที่รถดักทำการเกลี่ย ดัก และ ขุดขนก้อนหินที่แตกหักใส่รถบรรทุก (truck) ต่อมาก็ทำการนับจำนวนรถบรรทุกทั้งหมดที่จะป้อนหินเข้าสู่เครื่องบดย่อยหิน (crusher) เมื่อนับได้ครบแล้วจึงคำนวณปริมาตรหินและเทียบหินขนาดต่าง ๆ คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ปริมาณหินทั้งหมด บางช่วงเวลาของการนับขนาดนั้นก็ ต้องอาศัยวิศวกรประจำเหมืองและไฟร์แมนหน้าเหมืองช่วยจดบันทึกหรือประมาณการให้

6. การป้องกันผลกระทบการสั่นสะเทือน

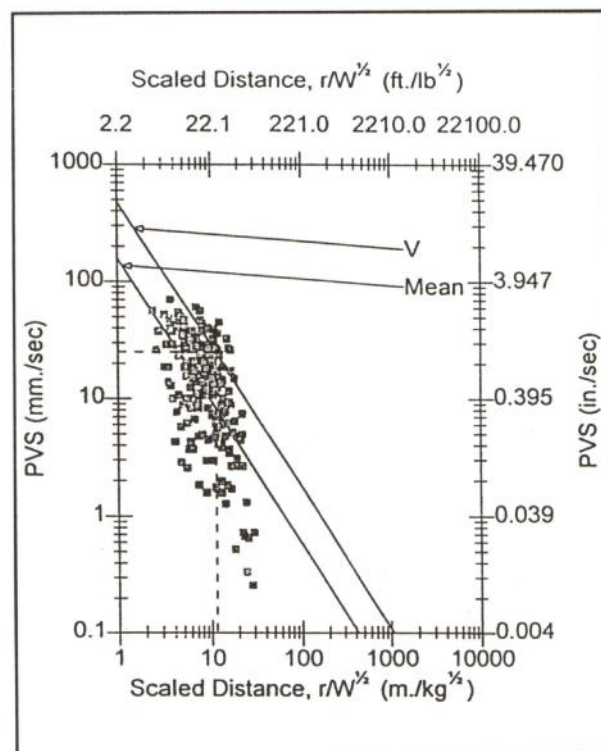
ข้อกำหนดที่น่าจะนำมาใช้ ถ้าหากเหมืองหินหรือเหมืองแร่ มีเครื่องมือตรวจวัดความสั่นสะเทือนและเสียงดังจากการระเบิด มีค่าขีดจำกัด คือ ความเร็วอนุภาคสูงสุด (peak particle velocity) มีค่าไม่เกิน 25.4 มม./วินาที ระดับความดังของเสียงจากการระเบิดในรัศมี 800 เมตร ไม่เกิน 128 เดซิเบล (Dowding, 1996, หน้า 483—484) ถ้าหากก่อนทำการระเบิด เหมืองหินไม่มีเครื่องตรวจวัด ก็ใช้สูตรเชิงประสบการณ์ เพื่อหาค่าน้ำหนักวัตถุระเบิดสูงสุดต่อจังหวะถ่วง ดังนี้

$$W = 0.205 [r/60]^2 \quad (5)$$

ค่าของ W เป็นน้ำหนักวัตถุระเบิดสูงสุดของ AN—FO/delay มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อจังหวะถ่วง และค่า r เป็นระยะที่ใกล้มากที่สุดที่วัด หน่วยเป็นเมตร

สมการข้างบนนี้ จัดเป็นแนวทางเปรียบเทียบค่าการตรวจวัดของคณะทำงานวิจัยด้านการสั่นสะเทือนจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อหาค่าระยะความปลอดภัยจากการระเบิดหินในประเทศ และเสนอแนวทางการควบคุมการใช้วัตถุระเบิดในการทำเหมืองแร่และเหมืองหินค่าคำตอบระยะความปลอดภัยจากการสั่นสะเทือนและผลกระทบอื่น จากการเก็บข้อมูลดิบและตรวจวัดจริงในภาคสนามเป็นเวลาต่อเนื่องมามากกว่า 3 ปี แล้วนำผลมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นมาโดยเฉพาะในงานวิจัย ก็ได้ในระดับใกล้เคียงกัน

ตัวอย่างการคาดคะเนผลกระทบการสั่นสะเทือนจากภาคสนามโดยใช้ค่าที่ตรวจวัดได้มาพล็อตหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคของพื้นผิวดิน (PVS)ที่ได้จากผลลัพธ์ของการรวมเวกเตอร์ทั้ง 3



รูปที่ 8 การประเมินผลโดยใช้การสเกลระยะทางด้วยรากกำลังสอง สำหรับบันทึกค่าการสั่นสะเทือนพื้นผิวดินที่เกิดจากความอนุภาคสูงสุดตรวจวัดภาคสนาม ที่หน้าเหมืองหินปูนแบบชั้นบันไดทั่วประเทศไทย (จาก สง่า ตั้งชวาล และคณะ, 2540)

ทิศทาง กับค่าการสเกลระยะทาง (scaled distance) ของวัตถุระเบิดด้วยรากกำลังสอง ($r/W^{1/2}$) โดยที่ค่า r เป็นระยะห่างจากจุดระเบิดถึงผู้สังเกตการณ์ และค่า W เป็นน้ำหนักวัตถุระเบิดสูงสุดต่อจังหวะถ่วงค่าความสัมพันธ์นี้หาได้จากเหมืองหินปูนแบบชั้นบันไดทั่วประเทศมากกว่า 20 แห่ง ในภาคกลางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ ที่ได้ค่าการตรวจวัดจำนวน 196 จุด เพื่อหาสมการเชิงประสพการณ์สำหรับการคาดคะเนความเร็วอนุภาคที่ 95% ของขีดจำกัดความเชื่อมั่นและหน่วยค่าการสเกลระยะทาง เป็น เมตร/(กิโลกรัม)^{0.5}

$$V = 481.69 (\text{mm./sec}) \times (r/W^{0.5})^{-1.22} \quad (6)$$

7. การควบคุมผลกระทบเพิ่มเติม

วิธีการอื่น ๆ ที่จะควบคุมผลกระทบและความเสียหายจากการระเบิด นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วมาแล้วมีหลายรูป วิธีการต่อไปนี้ค่อนข้างเป็นวิธีการที่ใช้เทคนิคเฉพาะอย่าง สูตรเชิงประสพการณ์ ตั้งแต่สมการที่ 7—9 อ้างอิงมาจาก Konya (1995) และนำมาใช้เฉพาะได้กับเหมืองหินบางบริเวณ และในบางสถานการณ์ ได้แก่

7.1 การระเบิดเพื่อควบคุมผลกระทบ

วิธีการระเบิดควบคุม (controlled blasting) เป็นเทคนิคพิเศษที่ใช้ลดแรงสั่นสะเทือน แบ่งชนิดของการระเบิดควบคุมที่สำคัญออกเป็น 3 แบบคือ

7.1.1 การวางแผนการระเบิดแบบแตกระหว่างแถว (presplitting)

วิธีการระเบิดให้มวลแตกแยกระหว่างแถว มีชื่อเรียกเฉพาะว่า presplitting โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดรอยแตกรอยแยก (fracture) ตามแถวของรูเจาะ ที่เป็นแนวการขุดเจาะขั้นสุดท้าย (final excavation) ค่าประมาณของการใช้วัตถุระเบิดที่พอดี เมื่อกำหนดให้ W_f เป็นน้ำหนักวัตถุระเบิดที่โหลด หน่วยกรัม/เมตร คือ

$$W_f = (d_h)^2/12.14 \quad (7)$$

$$S = 10 (d_h) \quad (8)$$

ค่า S เป็นระยะสเปซซิง หน่วยเป็นมิลลิเมตร และค่า d_h เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะเปล่า (ไม่ใช่วัตถุระเบิด) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

7.1.2 การระเบิดแบบตัดหน้าเรียบ [trim (post-split) blasting]

เป็นเทคนิคการเจาะระเบิด ที่ทำภายหลังจากการระเบิดตามปกติเพื่อพัฒนาหน้าเหมืองเสร็จสิ้นแล้ว บางที่เรียกการระเบิดแบบนี้ว่า ระเบิดตัดผิวหน้าเรียบ (smooth wall blasting) มักใช้กับกรณีที่มีการระเบิดหน้าเหมืองมีความลาดเอียง (slope) ที่น่าจะก่อให้เกิดปัญหา หรือต้องการควบคุมการแตกหักเกินขีดจำกัด มีการกำหนดระยะสเปซซิงกว้างแบบ presplitting ระหว่างของหลุมเจาะแถวเดียวกัน (S) หาได้จาก

$$B \geq 1.3 S \quad (9)$$

7.1.3 การเจาะหลุมเปล่าเพื่อลดผลกระทบ

วิธีการลดแรงสั่นสะเทือนอีกแบบหนึ่ง ก็คือการเจาะหลุมเปล่าในแถว (line slot drilling) ซึ่งเป็นการทำให้เกิดช่องว่าง (void) ของพื้นผิวดินระหว่างจุดที่ทำกรระเบิดกับจุดที่จะได้รับผลกระทบ หลักการนี้ได้ดัดแปลงมาจากวิธีการป้องกันอาคารโครงสร้างจากแผ่นดินไหว ช่องว่างที่เกิดขึ้นในพื้นดินทำให้เกิดการแยกตัวออกจากกันของคลื่นกระแทก ในลักษณะแบบการแยกคลื่นกระแทก (shock isolation) หรือ ทำให้เกิดการดูดกลืนที่พลังงาน (energy absorber) เป็นการตัดหรือจำกัดแรงการสั่นสะเทือนให้ลดลง ผลกระทบที่ทำให้เกิดความเสียหายต่ออาคารโครงสร้างก็ลดลงไปด้วยแนวหลุมเจาะจะถูกเจาะเป็นแบบสลอต (slot) ซึ่งเทคนิคการเจาะควรทำให้หลุมเจาะที่ใกล้เคียงในแนวแถว (line) เดียวกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันประมาณ 2—4 เท่า เพื่อทำให้หลุมที่เจาะใกล้เคียง

กันทำให้เกิดการสะสมความเค้น (stress concentration) ก่อให้เกิดรอยแตกเล็ก ๆ (cracks) ระหว่างหลุม

8. บทสรุปของการจัดการวางแผนงานระเบิดหิน

ผลการแตกหักของหินจากการระเบิดที่เสียค่าใช้จ่ายในการผลิตน้อยสุดเป็นหัวใจของงานการวางแผนหน้าเหมืองหิน อย่างไรก็ตามการสั่นสะเทือนและผลกระทบอื่นที่เกี่ยวข้องกับงานการใช้วัตถุระเบิดในเชิงวิศวกรรม ก็เป็นสิ่งที่ต้องปฏิบัติตามให้อยู่ในขอบเขตที่กฎหมายกำหนด และเป็นที่ยอมรับได้ของชุมชนใกล้เคียงหน้างาน

ผู้ปฏิบัติงานต้องคำนวณค่าจำนวนวัตถุระเบิดที่ใช้ไม่ให้เกิดค่าประมาณที่เป็นจริง (overestimate) ผลกระทบและความเสียหายต่อมนุษย์และโครงสร้างของสิ่งก่อสร้างอาจก่อให้เกิดการถูกฟ้องเรียกค่าเสียหายได้ แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าผู้ปฏิบัติงานคำนวณค่าจำนวนวัตถุระเบิดที่ใช้ น้อยกว่าค่าประมาณที่เป็นจริง (underestimate) ความคืบหน้าของงานก็จะช้ามาก ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินโครงการมาก

ถ้าต้องการแก้ปัญหการฟ้องร้องและการร้องเรียนของชุมชน ผู้ที่ปฏิบัติงานภาคสนามควรจะทำให้ความเข้าใจเกี่ยวกับธรรมชาติการตอบสนองต่อความรู้สึกของมนุษย์ (human response) ที่มีต่อการสั่นสะเทือนและผลกระทบใกล้เคียง เพื่อให้การปฏิบัติงานอยู่ในระดับการยอมรับได้ (tolerable level) ของชุมชน และผู้ที่ได้รับผลกระทบ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอแสดงความขอบคุณต่อวิศวกรและเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้อง ทั้งจากกรมทรัพยากรธรณี กรมทางหลวง และกรมศิลปากร ที่ให้ความให้ความสนับสนุนทั้งทางข้อมูลด้านวิชาการ ทางด้านการเงิน และบุคลากร ต่อคณะผู้วิจัยของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นอกจากนี้ยังขอขอบคุณต่อคณะกรรมการ

พิจารณาเงินทุนวิจัย ของคณะวิศวกรรมศาสตร์กับของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนด้านการเงิน

ความร่วมมือที่ได้รับจากทางบริษัทเหมืองหินและโรงโม่หินขนาดใหญ่ และบริษัทเหมืองหินและโรงโม่หินขนาดปานกลางและขนาดเล็ก ตลอดจนเหมืองแร่อื่น ๆ ก็เป็นสิ่งที่น่าเป็นนิมิตหมายที่ดี สำหรับการดำเนินงานเพื่อจัดการด้านสิ่งแวดล้อมจากการทำเหมืองและโรงโม่หินให้อยู่ในสภาวะที่ยอมรับได้ต่อสังคมทั่วไป

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณต่อคณาจารย์ผู้ร่วมศึกษาวิจัย นิสิต และบุคลากร ที่ได้ช่วยทั้งงานวิจัยที่ผู้เขียนบทความเป็นผู้วิจัยหลัก ความช่วยเหลือนี้มีทั้งการตรวจวัดภาคสนามและงานวิเคราะห์ผลในห้องปฏิบัติการ เขียนโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งมีอยู่หลายโครงการที่ศึกษาวิจัยเสร็จสิ้นแล้วและยังดำเนินการอยู่

เอกสารอ้างอิง

1. สง่า ตั้งขวาล (2538) "แบบจำลองการยืดหยุ่นตัวของหิน เนื่องจากความดันจากการระเบิด" รายงานฉบับสมบูรณ์ มีนาคม 2538 เงินทุนวิจัยคณะของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 102 หน้า
2. สง่า ตั้งขวาล, อดิษฐ์ ปัทมสูตร และ มณฑนา ปราการสมุทร (2538) "การพัฒนาแบบจำลองการสั่นสะเทือนเนื่องจากระเบิด" รายงานฉบับสมบูรณ์ปีแรก มิถุนายน 2538 เงินทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช กองส่งเสริมและประสานงานวิจัยฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 159 หน้า
3. สง่า ตั้งขวาล และ อดิษฐ์ ปัทมสูตร (2539) "ผลกระทบเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องในหิน ที่มีต่อการระเบิดและการสั่นสะเทือน" รายงานฉบับสมบูรณ์ ธันวาคม 2539 เงินทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดินสถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 191 หน้า

4. สง่า ตั้งขวาล, สมศักดิ์ สายสินธุ์ชัย, สุรพล ภูวิจิตร และภิญโญ มีชำนะ (2540) "ผลกระทบอันเนื่องมาจากการใช้วัตถุระเบิด ในงานเหมืองแร่และเหมืองหิน" ร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ กรกฎาคม 2540 เงินทุนศึกษาวิจัยกรมทรัพยากรธรณี กองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม จำนวน 228 หน้า
5. สง่า ตั้งขวาล, สมศักดิ์ สายสินธุ์ชัย, สุรพล ภูวิจิตร และภิญโญ มีชำนะ (2542) "ผลกระทบอันเนื่องมาจากการใช้วัตถุระเบิด ในงานเหมืองแร่และเหมืองหิน" รายงานฉบับสมบูรณ์ กุมภาพันธ์ 2542 เงินทุนศึกษาวิจัยกรมทรัพยากรธรณี กองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม (อยู่ในระหว่างการจัดพิมพ์)
6. สง่า ตั้งขวาล (2540) "แบบจำลองการคาดคะเนของผลการระเบิดเหมืองหิน เพื่อให้ได้การแตกหักที่เหมาะสมที่สุด" รายงานฉบับสมบูรณ์ พฤศจิกายน 2540 เงินทุนอุดหนุนโครงการวิจัยสิ่งประดิษฐ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองส่งเสริมและประสานงานวิจัย ฝ่ายวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 112 หน้า
7. สง่า ตั้งขวาล (2541) "การระเบิดหินและผลกระทบ" ตำราประกอบการเรียนการสอนในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สิงหาคม 2541 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จัดจำหน่ายโดย ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 220 หน้า
8. Dick, R.A., L.A. Fitcher and D.V. D'Andrea (1983) "Explosives and Blasting Procedures Manual," Bureau of Mines—Information Circular, IC No. 8925, 105 pp.
9. Dowding, C.H., Jr. (1996) "Construction Vibrations," Prentice Hall, Inc., New Jersey, 610 pp.
10. Konya, C.J. (1995) "Blast Design," Intercontinental Development Corporation, Montville, Ohio, 230 pp.
11. Kuznetsov, V.M. (1973) "The Mean Diameter of the Fragments formed by Blasting," *Soviet Mining Science*, Vol. 9, No. 2, pp. 144—148.
12. Rollins, R. R. and Shih—Wen Wang (1990) "Fragmentation Prediction in Bench Blasting," *Proceedings Third International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, August 1990, Brisbane, Australia, pp. 195—198.
13. Tangchawal, S. (1997 a) "Vibration and Damage control for Two Limestone Quarries in Thailand," *Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, June 1997, Editors : Marinis et al., Held in Athens, Greece, A.A. Balkema, Vol. 3, pp. 2543—2548.
14. Tangchawal, S. (1997 b) "Blasting Models in Open Pit," *Proceedings The Research Conference, Chulalongkorn University 80th Anniversary*, October 1997, Research Affairs, Chulalongkorn University, Vol. 2, pp. 1131—1141.
15. Tangchawal, S. (1997 c) "Vibration and Damage Control of Rock Blasting in Thailand," *Proceedings of the 30th Anniversary Symposium of the Southeast Asian Geotechnical Society*, November 1997, Asian Institute of Technology, from page 4—66 until page 4—76.



ขอเชิญส่งบทความ

วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา

(Research & Development Journal of the Engineering Institute of Thailand)

ในปัจจุบันนี้ประเทศไทยกำลังเร่งพัฒนาตัวเอง ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสมัยใหม่ เพื่อรองรับการเจริญเติบโตของภาคอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ ให้สามารถก้าวไปสู่ความเป็นประเทศพัฒนาทางอุตสาหกรรมสมัยใหม่ (Newly Industrialized Country) ได้ การพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทำได้เร็วที่สุด คือ การซื้อเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ดังเช่น ประเทศญี่ปุ่นในสมัยหลังสงครามโลก วิธีการนี้จะได้ผลเร็ว เพราะไม่ต้องเสียเวลาของการวิจัย แต่ในขณะเดียวกัน นอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองเงินตราแล้ว ยังทำให้ประเทศนั้นต้องพึ่งพาประเทศอื่นๆ อยู่ตลอดไป ประเทศที่ยอมซื้อไม่ว่าจะเป็นประเทศญี่ปุ่นจนมาถึงไต้หวัน เกาหลี และประเทศเพื่อนบ้านเรา คือ สิงคโปร์ในขณะนี้ ประเทศเหล่านั้นต่างมองการณ์ไกล เล็งเห็นถึงความสำคัญของการทำการวิจัยเพื่อพัฒนาวิทยาการต่างๆ ให้สามารถรองรับการขยายตัวของอุตสาหกรรมต่างๆ ได้เพื่อจะได้ค่อยๆ ปลอดภัยจากภาวะที่เกิดจากการเอารัดเอาเปรียบของประเทศที่เป็นเจ้าของเทคโนโลยีได้

ปัจจัยหนึ่งของการส่งเสริมการทํารวบรวม คือ การมีวารสารวิจัยและพัฒนา มารองรับเพื่อเป็นการเผยแพร่ผลงานของนักวิชาการ และนักวิจัย เอาไว้ประโยชน์ที่มีนอกจากช่วยไม่ให้มีการทํารวบรวมซ้ำซ้อนกันแล้ว ยังช่วยให้เกิดความร่วมมือระหว่างนักวิชาการและนักวิจัยที่สนใจในปัญหาเดียวกัน เกิดมีการวิพากษ์วิจารณ์เพื่อให้ผลงานที่ติดตามมามีคุณภาพดียิ่งขึ้น วารสารทางวิชาการนี้จึงเป็นทรัพยากรทางความรู้ที่สามารถใช้เป็นเอกสารอ้างอิงในอนาคต สำหรับวิศวกร นักวิชาการ และนักวิจัยรุ่นหลังได้

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ ได้เล็งเห็นความสำคัญของการมี “วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา” จึงเห็นสมควรแยกเล่มออกมาจาก “วิศวกรรมสาร” (ซึ่งต่อไปจะเน้นไปทางสารคดีทั้งวิชาการและข่าวสารบริหารศนมากกว่า) ต่อไปนี้วารสารวิชาการของ ว.ส.ท. จะออกเป็น ราย 6 เดือน โดยจะรวมทุกสาขาวิชาทางวิศวกรรมศาสตร์เข้าด้วยกัน บทความทุกบทความที่ลงพิมพ์ในวารสารจะได้รับการประเมิน (Review) โดยกรรมการสาขานิยม และผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้มั่นใจว่าทุกบทความที่ได้รับการลงพิมพ์ใน “วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา” เป็นบทความที่มีคุณภาพและมีคุณค่า

การส่งบทความ เพื่อให้วารสารทางวิชาการมีมาตรฐานไม่ด้อยกว่าวารสารของสมาคมวิชาชีพทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอื่นๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ คณะกรรมการสาขานิยมได้ให้ข้อเสนอแนะให้ผู้เขียนจะได้ใช้ในการพิจารณาส่งบทความมาลงตีพิมพ์ “วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา” ดังนี้

1. บทความที่จะส่งควรเป็นผลงานการค้นคว้าวิจัยของผู้เขียนเอง และมีคุณค่าทางวิชาการพอสมควร
2. ภาษาที่ใช้อาจเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ แต่ชื่อบทความ (title) ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
3. เพื่อให้บทความมีความกะทัดรัดไม่เยิ่นเย้อ และบทความควรมีความยาวประมาณ 10 หน้า แต่ไม่เกิน 15 หน้ากระดาษพิมพ์ดีด รวมทั้งรูปและตาราง
4. บทความต้องมีบทคัดย่อยาวไม่เกิน 15 บรรทัดพิมพ์ โดยมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
5. ทุกบทความควรมีบทนำ (Introduction) บทสรุป (Conclusion) และเอกสารอ้างอิง (Reference)
6. เอกสารอ้างอิงถ้ามาจากเอกสารภาษาต่างประเทศ ให้เขียนเอกสารอ้างอิงนั้นด้วยภาษาอังกฤษ เอกสารอ้างอิงจะต้องประกอบด้วยชื่อผู้เขียน ชื่อบทความ ชื่อเอกสารที่ตีพิมพ์ สถานที่ตีพิมพ์ (ถ้าเป็นหนังสือ) ปีที่พิมพ์ และหน้าของบทความดังกล่าวในเอกสารนั้น
7. ตารางและกราฟ ควรเป็นต้นฉบับที่ชัดเจน รูปถ่ายควรแนบฟิล์มมาด้วย คำบรรยายภาพควรเป็นภาษาอังกฤษ
8. โปรดส่งบทความมายังคณะกรรมการสาขานิยมฉบับวิจัยและพัฒนา ณ สำนักงานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร. 218-6794-9, 251-2504 และ 250-1900
9. บทความทุกบทความจะได้รับการประเมินเพื่อตีพิมพ์โดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาเดียวกันจำนวน 2 ท่าน
10. คณะกรรมการสาขานิยม อาจให้ผู้เขียนปรับปรุงบทความให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น และทรงไว้ซึ่งสิทธิในการตัดสินใจตีพิมพ์บทความหรือไม่ก็ได้
11. บทความที่ลงพิมพ์ฉบับอื่นแล้ว จะไม่สามารถนำมาพิมพ์ในวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนาได้
12. กรณีที่เป็นบทความที่ลงในประเทศแล้ว จะต้องขอโอนลิขสิทธิ์จากเจ้าของเสียก่อน ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลยพินิจของคณะกรรมการสาขานิยมว่าจะให้พิมพ์ได้หรือไม่
13. ผู้เขียนบทความเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากบทความนั้นๆ

RESEARCH AND DEVELOPMENT JOURNAL OF THE ENGINEERING INSTITUTE OF THAILAND

Notes for Contributors

1. Paper should be original contribution and substantial technical quality.
2. The main body of the paper can be written either in Thai or English. Regardless of the language of the main body, the title, the summary of the paper and the author name(s) must be submitted both in Thai and English.
3. The manuscript should typed one and a half space on one side of the paper. The total number of pages should normally not exceed 10 pages including figures and tables.
4. The paper should be reasonably divided into sections, which may include Introduction, Conclusions and References. Numbering of Sections should be avoided.
5. References should be quoted in the text sequentially by Arabic numerals and grouped together at the end in numerical order. References should include author(s), title, name of the publication (Journals, Reports, etc.), publisher, place and date of publication, and page numbers.
6. Original tables and figures must be submitted with the manuscript. Description should be English.
7. The manuscript should be submitted to the Chief Editor, Prof. Dr. Prida Wibulswas, The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage, Henry Dunant Road, Bangkok 10330, Thailand, or any of the Associate Editors whose field is close to the nature of the paper.
8. All papers will be evaluated by reviewers before the final decision on publication is made. The editors reserve the right to recommend for revision as a condition for final acceptance.
9. In submitting the manuscript, the author(s) transfer the copyright to TJEIT, but still accepts any legality consequence for having the paper published.