



**ผลกระทบเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องในหิน
ที่มีต่อการระเบิดและการสั่นสะเทือน**

โดย
สง่า ตั้งชวาล
จดับ ปัทมสุต

โครงการวิจัยเลขที่ 42G-MN-2538
ทุนส่งเสริมการวิจัยด้วยเงินงบประมาณแผ่นดิน

สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ

ธันวาคม 2539

ผลกระทบเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องในหิน
ที่มีต่อการระเบิดและการสั่นสะเทือน

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร.สง่า ตั้งชवाल
วุฒิ Ph. D. (Mining Engineering)
รองศาสตราจารย์ อดิษฐ์ ปัทมสุต
วุฒิ M. Eng. Sc. (Mining)

โครงการวิจัยเลขที่ 42G-MN-2538
ทุนส่งเสริมการวิจัยด้วยเงินงบประมาณแผ่นดิน

สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ

ธันวาคม 2539

I140456A6

กองส่งเสริมและประสานงานวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มอบให้หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3 / ส.ค. / 2544



กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความสนับสนุนทางการเงิน

ในการจัดทำรายงานวิจัยจนเสร็จสิ้นสมบูรณ์นี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณอดีตนิสิตที่จบการศึกษาแล้ว และนิสิตปัจจุบันที่ยังศึกษาในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ตลอดจนบุคลากรหลายท่านที่ได้ช่วยแก้ปัญหา ตรวจสอบความถูกต้องของสูตร เขียนโปรแกรมแบบจำลองให้ใช้ได้กับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล วิเคราะห์ข้อมูลกับโปรแกรมเชิงสถิติ เก็บข้อมูลจากหน่วยงานและในภาคสนาม

ทีมงานผู้วิจัย ขอขอบคุณต่อ นาย ปริณญา วิลัยธรรม และ นาย ชาตรี ศรีชัย ที่ทำการเก็บข้อมูลและบันทึกผลในภาคสนาม ในการทำโครงการวิศวกรรมเหมืองแร่สำหรับนิสิตปีสุดท้าย โดยมีนาย อุทิศ ทองกลิ้ง และนาย ไผตรี กันทพลหาญ ช่วยบันทึกภาพ

สำหรับโปรแกรมแบบจำลองการคาดคะเนผลของการสั่นสะเทือน ที่เขียนด้วยภาษาซี (C) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นาย สุรชัย ลีพิทาเกียรติ ที่นำมาโปรแกรมเดิมของรายงานธรณีวิศวกรรมของนิสิตภาควิชาวิศวกรรมโยธามาเขียนใหม่ รวมทั้งแก้ไขตัดแปลงและเพิ่มเติมให้ครอบคลุมกับการคาดคะเนผลกระทบในภาคสนาม คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ไพฑูรย์ ศรีภคการ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยตรวจสอบการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการแก้ปัญหาคลื่นการสั่นสะเทือน

นอกจากนี้แล้ว คณะผู้วิจัยขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และวิศวกรหลายท่านของกองสิ่งแวดล้อมทรัพยากรธรณี และกองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี ได้แก่ นายช่าง สุเมธ แสลงประเสริฐ คุณ สุณทรี่ สุนทรานุสร นายช่าง สมเกียรติ ภูธรชัชฎฤทธิ์ นายช่าง วิษณุ ทับเที่ยง ตลอดจนขอขอบคุณ บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด และ บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (มหาชน) จำกัด โรงงานเขาวง ที่อำนวยความสะดวกและอนุญาตให้ทำการตรวจวัดบันทึกผลและถ่ายภาพ



ชื่อโครงการ ผลกระทบ เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องในหิน
ที่มีต่อการระเบิดและการสั่นสะเทือน
ชื่อผู้ดำเนินงาน รองศาสตราจารย์ ดร. สว่าง ตั้งชวาล หัวหน้าโครงการ
รองศาสตราจารย์ จดับ บัถมสุต ผู้ร่วมวิจัย
วันเดือนปี ที่ทำวิจัย มิถุนายน 2539

บทคัดย่อ

การประยุกต์วิธีการหาค่าเฉลี่ยที่แท้จริงของระนาบความไม่ต่อเนื่องของมวลหินในภาคสนาม ได้ถูกนำเสนอ เพื่อวิเคราะห์เชิงสถิติของความถูกต้องแม่นยำของ spherical distribution data ทฤษฎีเบื้องต้นของการสั่นสะเทือนและหลักการคำนวณในภาวะ Single Degree of Freedom และ Multi-Degree of Freedom ได้ถูกนำมา ทบทวน คณะผู้วิจัยได้รวบรวมสมการแบบจำลองการสั่นสะเทือนหลายรูปแบบ เพื่อความรวดเร็วและแม่นยำ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาซี (C) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อคาดการณ์การสั่นสะเทือนและผลกระทบอื่นต่อสิ่งแวดล้อมจากการระเบิดหิน ขั้นตอนสุดท้ายของการตัดสินใจหาค่าช่วงระยะปลอดภัยจากผลกระทบต่างๆ ได้มีการวิเคราะห์ตัวแปรหลายชนิดอย่างเป็นขั้นตอน ในบทสรุปได้มีการเสนอแนะแนวทางควบคุมและลดผลกระทบของการสั่นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิดในเหมืองหินแบบขี้ผึ้งได้อีกด้วย

Project Title: Impacts of Rock Discontinuity to Blasting and
Vibration

Name of Investigators:

- Associate Professor Dr. Sanga Tangchawal (Principal
Investigator)

- Associate Professor Chadap Padmasuta (Co-Researcher)

Month and Year: June 1996

ABSTRACT

Application of methods for solving the true mean orientation of discontinuity planes in rock mass was introduced. Its aim is to utilize the analytical method for statistical precision of estimate in the spherical distribution data. Basic theories of vibration and computational methods on Single Degree of Freedom and Multi-Degree of Freedom were reviewed. A team of researcher compiled a list of modelling equations for vibration. In order to compute fast and accurate, a packed program for vibration predictor was developed and written in C language. This packed program can predict the various degrees of vibration and other impacts to environment due to rock blasting. A final decision to decide the range of safe distances, was based on the steps of calculation involved in various impact factors. In addition, the researchers concluded some solutions to avoid damage from vibration and reduce impacts to environment from using explosives in quarry for bench blasting open pit mine.

สารบัญ

	หน้า
ปกใน	I
กิตติกรรมประกาศ	II
บทคัดย่อภาษาไทย	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	IV
สารบัญ	V
รายการตารางประกอบ	IX
รายการรูปประกอบ	XI
รายการสัญลักษณ์	XV
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ความไม่ต่อเนื่องในโครงสร้างหิน	3
2.1 ปัญหาของความไม่ต่อเนื่องในมวลหิน	3
2.1.1 ปัญหาทางด้านโครงสร้างของหิน	3
2.1.2 ปัญหาทางด้านเนื้อหิน	5
2.2 การวิเคราะห์ใน เรื่องการแตกหักของหิน	7
2.2.1 การระเบิดกับการแตกหักของหิน	7
2.2.2 การคาดคะเนการแตกหักของหินเนื่องจากการระเบิด	11
2.3 การวิเคราะห์ใน เรื่องผลกระทบจากการสั่นสะเทือน	16
บทที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลความไม่ต่อเนื่อง	20
3.1 หลักการของ Stereographic Projection	20
3.2 การวิเคราะห์ Clusters ของความไม่ต่อเนื่อง	21
3.2.1 วิธีการวิเคราะห์ของ Fisher	23
3.2.2 วิธีการวิเคราะห์ของ Priest	26
3.2.3 รายละเอียดของการวิเคราะห์ข้อมูลความไม่ต่อเนื่อง	27
3.3 การตัดสินใจขั้นสุดท้ายของข้อมูลความไม่ต่อเนื่องที่ได้วิเคราะห์	47
3.3.1 การพล็อตค่าความเป็นไปได้กับมุม Cone Angle	47

	หน้า
3.3.2 การพิจารณา Zone of Confidence	48
บทที่ 4 การวิเคราะห์การกระตุ้นของอิมพัลส์	54
4.1 การกระตุ้นของอิมพัลส์	54
4.2 การกระตุ้นเชิงพลศาสตร์พื้นฐาน	57
4.3 การวิเคราะห์ปัญหาคลื่นการสั่นสะเทือนในระบบ SDF	58
4.3.1 วิธี Finite Difference	58
4.3.2 วิธี Runge-Kutta	59
4.4 การวิเคราะห์ปัญหาคลื่นการสั่นสะเทือนในระบบ N-DOF	62
4.4.1 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ Normal Modes	62
4.4.2 วิธีการคำนวณของระบบ N-DOF	63
บทที่ 5 การสั่นสะเทือนเนื่องจากการระเบิด	68
5.1 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือน	68
5.1.1 ชนิดของพารามิเตอร์	68
5.1.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรและมิติ	70
5.2 การประเมินระดับการสั่นสะเทือน ;	73
5.2.1 ขนาดคลื่นหรือแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน	73
5.2.2 การประเมินค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด	75
5.2.3 การสเกลความเร็วอนุภาคสูงสุดโดยใช้รากกำลังสาม	78
5.2.4 การสเกลความเร็วอนุภาคสูงสุดโดยใช้รากกำลังสอง	81
5.2.5 ข้อเปรียบเทียบการสเกลของรากกำลังสอง กับรากกำลังสาม	83
5.3 มาตรฐานความปลอดภัยสำหรับการกำหนดค่าการสั่นสะเทือน	86
5.3.1 มาตรฐานความปลอดภัยของสหรัฐอเมริกา	86
5.3.2 มาตรฐานความปลอดภัยของออสเตรเลีย	89
บทที่ 6 เสียงดังจากการระเบิด หินปลิว และควันก๊าซพิษ	90
6.1 เสียงดังเกินขนาดจากการระเบิด	90
6.1.1 ลักษณะของคลื่นความดันในอากาศ	90
6.1.2 ระดับความดังของคลื่นเสียงจากการระเบิด	91

	หน้า
6.1.3 การประเมินผลกระทบของเสียงดัง และมาตรฐานความปลอดภัย	92
6.2 หินปลิวกระเด็นจากการระเบิด	96
6.2.1 ธรรมชาติของการปลิวกระเด็น	96
6.2.2 การประเมินระยะทางปลิวกระเด็นของหิน	97
บทที่ 7 ผลการตรวจวัดในภาคสนาม	103
7.1 การวัดขนาดการแตกหักของหินในภาคสนาม	103
7.1.1 วิธีการประเมินและเก็บข้อมูล	103
7.1.2 ผลการทดลองวัดขนาดของหินที่แตกหักจากการระเบิด	104
7.2 กราฟผลการทดลองการวัดขนาดของการแตกหัก	114
7.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบการแตกหักของหิน	121
7.4 การตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากการระเบิดในภาคสนาม	124
7.4.1 วิธีการศึกษาการสั่นสะเทือนในภาคสนาม	125
7.4.2 ข้อมูลของการบันทึกผลการสั่นสะเทือน ของการระเบิดหิน	127
7.5 การตรวจวัด Air Blast ในภาคสนาม	137
7.5.1 วิธีการตรวจวัดภาคสนาม	137
7.5.2 ผลการวัดระดับความดังเสียง	137
บทที่ 8 การคาดคะเนผลกระทบการสั่นสะเทือนและเสียงดังจากการระเบิดหิน	142
8.1 แบบจำลองการคาดคะเนการสั่นสะเทือนของอนุภาค	142
8.1.1 แบบจำลอง USBM	142
8.1.2 แบบจำลอง Långefors-Kihlstrom	143
8.1.3 แบบจำลอง Ambraseys-Hendron	143
8.1.4 แบบจำลอง Ghosh-Daeman	144
8.1.5 แบบจำลอง General Type	145
8.1.6 แบบจำลอง CMRS	145
8.2 ค่าคงที่สำหรับมวลสารชนิดต่างๆบริเวณตรวจวัด	146
8.3 โปรแกรมแบบจำลองการสั่นสะเทือน และผลกระทบของการระเบิดหิน	150
8.3.1 โปรแกรมแบบจำลองการคาดคะเน	150

	หน้า
8.3.2 ลักษณะทั่วไปของโปรแกรม VIBES	150
8.3.3 ส่วนประกอบและการทำงานของโปรแกรม	151
8.3.4 ตัวอย่างวิธีใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์ การสั่นสะเทือนและผลกระทบ	151
8.4 การสรุปผลกระทบของการสั่นสะเทือน และผลกระทบของตัวแปรอื่น	160
8.4.1 ความสัมพันธ์ของค่า Peak Velocity กับค่า Scaled Distance	160
8.4.2 ความสัมพันธ์ของค่า Peak Velocity กับค่า Frequency	160
8.4.3 ความสัมพันธ์ของค่า Air Blast กับค่า Safe Distance	161
8.5 การตัดสินใจขั้นสุดท้ายในการเลือกช่วงระยะความปลอดภัย	165
8.5.1 ช่วงระยะความปลอดภัยจากความเร็วของอนุภาค	165
8.5.2 ช่วงระยะความปลอดภัยจากความเร็วของคลื่น กับความเร็วอนุภาค	166
8.5.3 ช่วงระยะความปลอดภัยจากเสียงดังจากการระเบิด	168
บทที่ 9 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	169
9.1 ชนิดของตัวแปรจากงานระเบิด	169
9.1.1 ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้	169
9.1.2 ตัวแปรที่ควบคุมได้	170
9.2 ข้อเสนอแนะแนวทางควบคุมปัญหาผลกระทบและความเสียหาย	171
9.2.1 การควบคุมรูปแบบเรขาคณิตของการระเบิด	171
9.2.2 ปริมาณวัตถุระเบิดที่เหมาะสม	174
9.2.3 การออกแบบการระเบิดกรณีการสั่นสะเทือนมีผลกระทบ	176
9.3 การควบคุมผลกระทบและความเสียหายเพิ่มเติม	177
9.3.1 Controlled Blasting Methods	177
9.3.2 การเจาะ Line Slot Drilling	180
บรรณานุกรม	182

รายการตารางประกอบ

	หน้า
ตารางที่ 1 ข้อมูลดิบของการวางตัวของระนาบความไม่ต่อเนื่อง จากแนวสัณฐานตัวอย่างแนวแรก 349/05	36
ตารางที่ 2 ข้อมูลดิบของการวางตัวของระนาบความไม่ต่อเนื่อง จากแนวสัณฐานตัวอย่างแนวที่สอง 192/10	38
ตารางที่ 3 ค่ามุม θ ที่เบี่ยงเบนไปจาก true mean orientation	53
ตารางที่ 4 การคำนวณ center term แต่ละจุดของ i ตามวิธี Runge-Kutta	61
ตารางที่ 5 มิตติของตัวแปรใน เรื่องปรากฏการณ์ของการระเบิด	69
ตารางที่ 6 แสดงค่า Kv ตามลักษณะของชั้นดินที่เป็นตัวกลาง ระหว่างจุดที่ระเบิดกับจุดที่ตรวจวัด	74
ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัตถุระเบิดต่อระยะทาง ที่ scaled distance ต่างๆ	78
ตารางที่ 8 มาตรฐานความปลอดภัยของความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระยะทางต่างๆ	86
ตารางที่ 9 มาตรฐานความปลอดภัยของค่า scaled distance ที่ระยะต่างๆ	87
ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง d ของหลุมเจาะ กับ $0.44 D$ ของ ANFO	99
ตารางที่ 11 การจำแนกก๊าซพิษที่เกิดจากการระเบิด	101
ตารางที่ 12-17 แสดงเปอร์เซ็นต์ของหินแตกหักที่ขนาดต่างๆ (เหมืองปูนซีเมนต์เอเซียและปูนซีเมนต์ไทย)	105-107
ตารางที่ 18-24 ผลการตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากการระเบิด (เหมืองปูนซีเมนต์เอเซียและปูนซีเมนต์ไทย)	133-136
ตารางที่ 25 ผลการตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากการระเบิด (กลุ่มเหมืองหินปูน จังหวัดราชบุรี)	136
ตารางที่ 26-32 ระดับเสียงที่ตรวจวัดได้จากการระเบิด (เหมืองปูนซีเมนต์เอเซียและปูนซีเมนต์ไทย)	138-141
ตารางที่ 33 ระดับเสียงที่ตรวจวัดได้จากการระเบิด (กลุ่มเหมืองหินปูน จังหวัดราชบุรี)	141
ตารางที่ 34 ค่าคงที่สำหรับหินปูน (limestone) และดัชนีความนำเชื่อถือ	147
ตารางที่ 35 ค่าคงที่สำหรับหินแกรนิต (granite) และดัชนีความนำเชื่อถือ	147

	หน้า
ตารางที่ 36 ค่าคงที่สำหรับแร่เหล็ก (iron ore) และดัชนีความน่าเชื่อถือ	147
ตารางที่ 37 ค่าคงที่สำหรับถ่านหิน (coal) และดัชนีความน่าเชื่อถือ	148
ตารางที่ 38 ค่าคงที่สำหรับหินโดโลไมต์ (dolomite) และดัชนีความน่าเชื่อถือ	148
ตารางที่ 39 ค่าคงที่สำหรับหินบะซอลต์ (basalt) และดัชนีความน่าเชื่อถือ	148
ตารางที่ 40 ค่าคงที่สำหรับหินทราย (sandstone) และดัชนีความน่าเชื่อถือ	149
ตารางที่ 41 ค่าคงที่สำหรับหินทรายบนดินที่รากลุ่ม (sandstone-alluvium) และดัชนีความน่าเชื่อถือ	149
ตารางที่ 42 ค่าคงที่และดัชนีความน่าเชื่อถือของมวลสารหลายชนิดที่ใช้กับแบบจำลองของ CMRS	149
ตารางที่ 43 ค่าการหน่วง (damping) จากการตรวจวัดหลัง line slot	181

รายการรูปประกอบ

	หน้า
รูปที่ 1 ภาพมองลักษณะ plan view ของ vertical joint pattern	4
รูปที่ 2 การศึกษาผลกระทบของความไม่ต่อเนื่องในหิน กับ crater formation	6
รูปที่ 3 รูปแบบการวางแนวหลุมเจาะระเบิดในภาคสนาม	8
รูปที่ 4 ไดอะแกรมแสดง stress distribution ในการ ทำการระเบิดแบบ bench blasting	10
รูปที่ 5 ผลการบันทึกคลื่นพัลส์ของการระเบิดในภาคสนาม	17
รูปที่ 6 วิธีการฉายภาพของ hemispherical projection	20
รูปที่ 7 หน้าเหมืองหินปูนของบริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย	22
รูปที่ 8 กลุ่มข้อมูลที่ random จำนวน 50 ค่า	24
รูปที่ 9 การฉายภาพ 3 มิติ กับระบบ left-handed Cartesian coordinate system	28
รูปที่ 10 ค่าของ discontinuity normals ทั้ง 162 จุด ถูกพล็อต ลงบน equal angle stereo net	41
รูปที่ 11 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle ของเซต 1 - unweighted	49
รูปที่ 12 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle ของเซต 1 - weighted & normalized	49
รูปที่ 13 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle ของเซต 2 - unweighted	50
รูปที่ 14 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle ของเซต 2 - weighted & normalized	50
รูปที่ 15 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle ของเซต 3 - unweighted	51
รูปที่ 16 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle ของเซต 3 - weighted & normalized	51
รูปที่ 17 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle ของเซต 2 กับ 3 - unweighted	52

	หน้า
รูปที่ 18 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle ของเซต 2 กับ 3 - weighted & normalized	52
รูปที่ 19 ไดอะแกรมของแรงอิมพัลส์	55
รูปที่ 20 พอร์มการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือนชั่วคราว	55
รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดจากการระเบิด และค่า scaled distance	77
รูปที่ 22 กราฟแสดงผลการตรวจวัดในภาคสนามของความเร็วอนุภาค ในแนวรัศมี เมื่อเทียบกับสเกลที่เป็นรากกำลังสาม	80
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาค เมื่อเทียบกับการสเกลรากกำลังสอง	82
รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักวัตถุระเบิดกับระยะทาง เมื่อกำหนดให้ความเร็วอนุภาคสูงสุด เท่ากับ 51 มม./วินาที	84
รูปที่ 25 มาตรฐานของการสั่นสะเทือนเนื่องจากการระเบิด ที่มีผลกระทบ ต่อบ้านที่อยู่อาศัยไม่เกิน 3 ชั้น	88
รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วต่างๆ โดยการสเกลด้วยรากกำลังสาม สมมุติให้วัตถุระเบิดเป็น TNT	91
รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ของเสียงทั่วไปและเสียงดังจากการระเบิด	92
รูปที่ 28 Nomogram แสดงค่าความสัมพันธ์ของความดันเสียงที่ตั้ง เกินระดับกับการสเกลของรากกำลังสาม	94
รูปที่ 29 ปัญหาของ crater effects ของเหมืองหินแบบขี้มันได	96
รูปที่ 30 ระยะทางที่หินจะปลิวกระเด็นได้ไกลสูงสุด	98
รูปที่ 31 ภาพถ่ายหน้าเหมืองก่อนและหลังการระเบิด เมื่อวันที่ 8 ก.พ. 38 ที่ Asia Cement	108
รูปที่ 32 ภาพถ่ายหน้าเหมืองก่อนและหลังการระเบิด เมื่อวันที่ 10 ก.พ. 38 ที่ Asia Cement	109
รูปที่ 33 ภาพถ่ายหน้าเหมืองก่อนและหลังการระเบิด เมื่อวันที่ 6 มี.ค. 38 ที่ Asia Cement	110
รูปที่ 34 ภาพถ่ายหน้าเหมืองก่อนและหลังการระเบิด เมื่อวันที่ 7 มี.ค. 38 ที่ Siam Cement	111
รูปที่ 35 ภาพถ่ายหน้าเหมืองก่อนและหลังการระเบิด เมื่อวันที่ 8 มี.ค. 38 ที่ Siam Cement	112

	หน้า
รูปที่ 36 ภาพถ่ายหน้าเหมืองก่อนและหลังการระเบิด เมื่อวันที่ 8 มี.ค. ที่ Asia Cement	113
รูปที่ 37 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหินจากการระเบิด เมื่อวันที่ 8 ก.พ. 2538	115
รูปที่ 38 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหินจากการระเบิด เมื่อวันที่ 10 ก.พ. 2538	116
รูปที่ 39 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหินจากการระเบิด เมื่อวันที่ 17 มี.ค. 2538 (หน้างาน 1)	117
รูปที่ 40 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหินจากการระเบิด เมื่อวันที่ 17 มี.ค. 2538 (หน้างาน 2)	118
รูปที่ 41 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหินจากการระเบิด เมื่อวันที่ 14 มี.ค. 2538 (B +243)	119
รูปที่ 42 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหินจากการระเบิด เมื่อวันที่ 15 มี.ค. 2538 (B +260)	120
รูปที่ 43 กราฟแสดงผลของระยะเวลาถ่วงระหว่างหลุมเจาะกับขนาดเฉลี่ยของการแตกหักที่ค่า powder factor คงที่	123
รูปที่ 44 ขนาดของค่าเฉลี่ยการแตกหักของหินที่ขึ้นอยู่กับ specific charge และ burden	124
รูปที่ 45 การติดตั้งเครื่องวัดการสั่นสะเทือนให้พร้อมก่อนการระเบิด	126
รูปที่ 46 ตัวอย่าง Geophone และ Microphone เข้าที่จุดเสียบ	126
รูปที่ 47 ตัวอย่าง printout ของการระเบิดจริง เหมืองหินปูน บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด ในเดือน มีนาคม 2538	128
รูปที่ 48 ตัวอย่าง printout ของการระเบิดจริง เหมืองหินปูน บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ในเดือน มีนาคม 2538	129
รูปที่ 49 ตัวอย่าง plan view การระเบิดทดสอบ	131
รูปที่ 50 ตัวอย่างแผนที่สเกลเล็กที่แสดงตำแหน่งจุดที่ระเบิด กับจุดที่ติดตั้งเครื่องวัด	131
รูปที่ 51 ตัวอย่างของแผนที่สเกลใหญ่ที่ขยายให้เห็นบริเวณหน้าเหมือง	132
รูปที่ 52 เมื่อผู้ใช้ต้องการเข้าโปรแกรม จะปรากฏหน้าจอแรกแสดงรูปแบบของสมการแบบจำลองมาตรฐาน	153
รูปที่ 53 หน้าจอที่สอง อธิบายถึงโปรแกรมจะแสดงรูปภาพความสัมพันธ์ ระหว่าง น้ำหนักวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วง กับระยะทางจากจุดระเบิด	153

	หน้า
รูปที่ 54 หน้าจอแสดงการเลือกใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์	154
รูปที่ 55 เป็นเมนูการเลือกชนิดของหินและแร่ที่จะทำการระเบิด	154
รูปที่ 56 เมนูหลักของโปรแกรมการวิเคราะห์ แสดงความสามารถในการวิเคราะห์หลายรูปแบบ	155
รูปที่ 57 แสดงการเลือกเมนูของโปรแกรมการวิเคราะห์	155
รูปที่ 58 การป้อนข้อมูลดิบที่ได้จากการตรวจวัดหน้าเหมืองที่มีการระเบิดจริงในภาคสนาม เพื่อให้ทำการคำนวณในโปรแกรม	156
รูปที่ 59 เป็นการเลือกระดับขั้นของการสันสะเทือนที่ต้องการควบคุม โดยการป้อนตัวเลขเข้าไป	156
รูปที่ 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงฮิสตอกราฟของแบบจำลองมาตรฐานจากค่าที่ตรวจวัดในภาคสนาม สำหรับการสเกลรากกำลังสอง	157
รูปที่ 61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงฮิสตอกราฟของแบบจำลองมาตรฐานจากค่าที่ตรวจวัดในภาคสนาม สำหรับการสเกลรากกำลังสาม	158
รูปที่ 62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงฮิสตอกราฟของแบบจำลองมาตรฐานจากค่าที่ตรวจวัดในภาคสนาม สำหรับวิธีการอื่น	159
รูปที่ 63 ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่า scaled distance สำหรับการระเบิดจริงที่ตรวจวัด 9 ครั้ง	162
รูปที่ 64 ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ สำหรับการระเบิดจริงที่ตรวจวัด 9 ครั้ง	163
รูปที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดังของเสียง air blast กับค่าระยะทาง และการคำนวณหาค่าระยะปลอดภัย	164
รูปที่ 66 กราฟการคาดคะเนระยะความปลอดภัยสำหรับความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ให้ เป็น 1 นิ้ว/วินาที	167
รูปที่ 67 การหาความสัมพันธ์ของความเป็นไปได้ ระหว่างความถี่คลื่นกับระยะทางจากจุดระเบิด	167
รูปที่ 68 ระยะเฉลี่ยที่เหมาะสมของ burden แถวแรก	172
รูปที่ 69 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณวัตถุระเบิดที่ใช้กับคุณสมบัติของหินที่อยู่กับที่	175
รูปที่ 70 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดิบเชิงสถิติ จำนวนทั้งหมด 2,514 ค่า	178

รายการสัญลักษณ์

ในการอธิบายสัญลักษณ์ เพื่อเป็นการสะดวกในการหาหมายของอักษรภาษาอังกฤษ และคำสัญลักษณ์เหล่านี้จะเรียงลำดับอักษรและคำสัญลักษณ์ตามการออกเสียงในภาษาอังกฤษ

- A = displacement amplitude (maximum)
= empirical constant in the predictor equation
for vibration
= rock factor number
- \bar{A} = dynamic matrix
- \tilde{A} = square symmetrical matrix
- a = ground particle acceleration
- a_{max} = maximum ground particle acceleration
- [a] = flexibility matrix
- α = slope angle
- α_d = trend of maximum dip direction
- α_n = trend of normal direction
- α_{nj} = trend of j^{th} normal
- α_{rn} = mean trend of normal direction
- B = burden - distance between free face and blasthole
(one of blasting pattern dimension)
= slope of a predicted straight line in log-log
scale (amplitude decay constant)
- B_m = average front row burden
- b = minimum burden distance
- β = critical damping fraction = c_1/c_c
- β_d = plunge of maximum dip angle
- β_n = plunge of normal angle
- β_{nj} = plunge of j^{th} normal
- β_{rn} = mean plunge angle

- c = longitudinal propagation wave velocity
- c_1 = damping coefficient of the system (dashpot)
- c_c = critical damping
- D = detonation velocity
- D or r = distance (radial) from explosion
- D_e = diameter of explosive in the blasthole
- D_d = density of spherical distribution
- D_h = diameter of empty hole
- D_s = scaled distance
- d = diameter of blasthole
- dB = overpressure (decibel scale of noise)
- $d_{e.o.}$ = loading explosive/length
- δ = differential movement = $x - u$
= acute angle between the set normal and the sampling line
- δ_i = acute angle between the normal to the i^{th} and the sampling line
- $\ddot{\delta}$ = acceleration of the mass relative to the ground
- η = unit impulse or a delta function
- E = energy released
- e = exponent in mathematics
- F or K = Fisher's constant in spherical distribution
- $F(t)$ = excitation or arbitrary force
= solution of the equation
- \hat{F} = impulse excitation force (time integral)
- $\frac{\hat{F}}{\eta}$ = impulse excitation magnitude
- f = frequency of the motion
- $f(t)$ = arbitrary force
- H = hole length
- h = response time interval (increment) = Δt
- $h(t)$ = response function to a unit impulse
- I = inverse of the upper triangular matrix

- I_d = index of determination
- i = roughness angle of joint surface
- J = depth of subdrilling (depth of the hole drilled below quarry face)
- K = stiffness matrix
- = Meloy's size retaining
- = Schumann's m
- K or K_v = empirical constant depend on geology of the ground
- K_{50} = fragmented size at 50% loosened rock
- L = bench height (one of blast pattern dimension)
- = longitudinal component of ground motion
- l = length of the set normal
- l_o = loading density
- l_m = average length of boulder
- Λ = diagonal matrix of eigenvalues = $[\lambda_j]$
- λ = eigenvalue
- $\bar{\lambda}$ = eigenvalue (iteration)
- λ_s = length of the sampling line
- M = mass matrix
- m = mass of the system
- = number of basic dimensions
- = empirical constant for geology and topography of the area
- N = observed vectors or directions
- N_i = weight sample size for i^{th} set
- N_w = total weighted sample size
- n = empirical constant related to rock properties and geological discontinuities
- = blasting index parameter
- = number of total variables
- = amplitude decay constant
- n_{jx}, n_{jy}, n_{jz} = orientation of j^{th} normal vector for x, y, z Cartesian components

- ω = circular frequency = $2\pi f$
- ω_n = undamped natural circular frequency
- P = modal matrix
- P^T = transpose of modal matrix
- \tilde{P} = modal matrix (orthonormal mode)
- $P(\theta)$ = probability value
- $P_1(<\theta)$ = probability value for likely range of orientations for individual discontinuities
- $P_2(<\theta)$ = probability value for likely range of the mean orientation of the set
- p = constant of inelastic attenuation factor
= overpressure in units of pounds per square inch
- p_0 = reference pressure
- p_* = front pressure
- PC = length of explosive charge above grade level
- ϕ = eigenvector
= friction angle
= diameter of the fly rock
= longitude angle of a typical data point
- $\phi_i(x)$ = normal mode (eigenvector)
- $\phi_i^T(x)$ = transpose mode
- $\tilde{\phi}_i(x)$ = orthonormal mode (eigenvector)
- Q or W = charge weight per delay
- Q = weight of TNT explosive
- Q_0 = explosive mass/hole
- q = specific charge or powder factor
= parameter in degrees for quadrant determination
- R = Rayleigh surface wave
= resultant (mean) of vector magnitude
= radius of circular of Cartesian coordinate system
- R_c = rock constant factor for blasting index
- Re = retaining size percentage

- R^2 = sample coefficient of determination
- r_n = resultant of mean vector magnitude of normals
- r_x, r_y, r_z = resultants of vector magnitude in x, y, z
components for Cartesian coordinate system
- ρ = density of material
- S = spacing between blastholes (one of blast pattern
dimension)
- S = sweeping matrix
- SD = standard deviation of drilling accuracy
- S_t = relative weight strength
- s = number of Pi terms in Buckingham Pi theorem
- T = stemming length (collar distance, the portion of the
blasthole not containing explosive)
- T = transverse component of ground motion
- t = real time
- T_d = throw distance
- T_r = transmission number of Rayleigh wave
- τ = a variable (time) for integration of the wave pulse
- θ = cone angle of spherical data scattering
- U = transformation matrix
- u = ground particle displacement
- u_{max} = maximum ground particle displacement
- u_0 = initial displacement for time history
- \dot{u} = ground particle velocity
- \ddot{u} = ground particle acceleration
- V = ground particle velocity (vector sum)
- V = vertical component of ground motion
- V_f = vertical particle velocity in foundation of
the building
- V_g = vertical particle velocity of the ground surface
- V_r = ground particle velocity in radius direction
- V_0 = fragmented rock volume
- V_{max} = maximum ground particle velocity

- w = weighted sample size (factor) for a single normal
- w_j = weighting factor for j^{th} discontinuity
- w_j' = normalized weighting factor for j^{th} discontinuity
- X = mode vector
- = screen size
- X_0 = Shumann's K
- = characteristic (largest) particle size
- X_A = distance from slope crest to center of blast hole
- X_B = distance from slope toe to the projection point of slope crest
- X_m = mean fragment size
- x = axis in Cartesian coordinate system,
- = absolute displacement of the mass
- = independent variable in regression analysis
- = safe distance by particle velocity effect
- \dot{x} = absolute velocity of the mass
- \ddot{x} = absolute acceleration of the mass
- Y = transformed displacement vector
- y = axis in Cartesian coordinate system,
- = dependent variable in regression analysis
- = cumulative weight percentage
- z = axis in Cartesian coordinate system



บทที่ 1
บทนำ

รายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการวิจัยที่นำเสนอนี้ คณะผู้วิจัยได้อธิบายทฤษฎีของการประยุกต์ความไม่ต่อเนื่องในหินกับผลกระทบที่มีต่อการระเบิดและการสั่นสะเทือน มีการนำเสนอการวิเคราะห์ข้อมูลดิบของความไม่ต่อเนื่องที่ตรวจวัดในภาคสนาม เพื่อนำมาสู่ค่าเฉลี่ยที่แท้จริงของทิศทางและการเอียงตัวของระนาบความไม่ต่อเนื่อง โดยประยุกต์ใช้รูปแบบใหม่เชิง spherical distribution วิเคราะห์หากลุ่มตัวอย่างที่นำมาพล็อตลงบน stereo net แบบ equal angle projection

ในเรื่องการแตกหักของหินเนื่องจากความดันของการระเบิด และการคาดคะเนผลของการแตกหัก ถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการบันทึกผลการตรวจวัดในภาคสนาม กรณีของเรื่องการสั่นสะเทือนเนื่องจากการระเบิด ได้มีการนำเสนอทฤษฎีเชิง dimensional analysis ของการวิเคราะห์ตัวแปรจากการระเบิดหิน ซึ่งนำมาสู่การสเกลพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างค่าของความเร็วอนุภาคสูงสุด กับค่าของระยะทางคูณกับค่าของน้ำหนักวัตถุระเบิดในรูปของรากลกำลังสามหรือรากลกำลังสอง

ข้อมูลดิบภาคสนาม (field data) ที่ได้รับการอนุเคราะห์จากเจ้าหน้าที่ของกองสิ่งแวดล้อมทรัพยากรธรณีกับเจ้าหน้าที่ของกองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี ในระหว่างปี พ.ศ. 2537-2539 ถูกนำมาจัดเรียงใหม่ในรูปแบบที่สามารถจะป้อนเป็นข้อมูลเข้า (data input) ของการวิเคราะห์โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้งในเรื่องของการสั่นสะเทือนและผลกระทบในเรื่องความดังของเสียงที่เกินระดับ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นมา ใช้สำหรับวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจากการระเบิดหินและผลกระทบด้านอื่น เป็นโปรแกรมสำเร็จรูป (packet program) ที่เขียนเป็นภาษาซี (C) ใช้ Borland Turbo C++ เป็น compiler ผู้ใช้ต้องมีคอมพิวเตอร์ขนาดความจุหน่วยความจำปานกลางประกอบด้วยหน่วยที่วิเคราะห์ตัวเลขใน processor คณะผู้วิจัยได้ออกแบบโปรแกรมเป็นรูปแบบเมนูและวิเคราะห์ได้ทั้ง English units หรือ S.I. units โปรแกรมนี้ดั้งเดิมจะวิเคราะห์หินปูนเป็นส่วนใหญ่ แต่ปัจจุบันได้ดัดแปลงให้สามารถวิเคราะห์หิน/แร่ได้หลายชนิด ถ้ามีข้อมูลดิบของการตรวจวัดเพียงพอ

วิธีการใช้โปรแกรมผู้ใช้เพียงป้อนข้อมูลเข้าซึ่งเป็นค่าตัวแปรที่สำคัญต่างๆ เช่น ระยะทางที่ห่างจากจุดระเบิด น้ำหนักวัตถุระเบิดที่ใช้/จังหวัดวง เป็นต้น จากนั้นโปรแกรมก็จะวิเคราะห์ข้อมูลตามรูปแบบสมการมาตรฐานของแบบจำลองต่างๆ ที่มีการสเกลหลายรูปแบบ แสดงเป็นรูปกราฟฟิก นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถคำนวณหาสมการเฉพาะบริเวณตรวจวัด (specific equation for the observed area) เพื่อนำมาสู่การคาดคะเนช่วงระยะปลอดภัยที่ควรทำการระเบิด ในกรณีหลีกเลี่ยงผลเสียหายจากอาคารโครงสร้างและสิ่งก่อสร้างข้างเคียง จากผลกระทบของตัวแปรต่างๆของการระเบิด ได้แก่ ความเร็วอนุภาค ความถี่คลื่น และความดังของเสียงที่เกินระดับ เป็นต้น

เนื่องจากจุดมุ่งหมายสำคัญอีกอย่างหนึ่งของงานวิจัย คือ การออกแบบการระเบิดเหมือนหินแบบขี้น้ำมันใต้อให้มีประสิทธิภาพ และควบคุมผลกระทบให้อยู่ในขีดจำกัดที่ผู้ได้รับผลกระทบยอมรับได้ ในบทสรุปของรายงานฉบับสมบูรณ์นี้จึงได้เสนอข้อเสนอแนะวิธีการใหม่ๆที่มีผู้ทดลองภาคสนามและสรุปผลมาแล้ว เพื่อเป็นแนวทางควบคุมผลกระทบต่างๆและความเสียหายจากการใช้วัตถุระเบิดในงานอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ความไม่ต่อเนื่องในโครงสร้างหิน

ลักษณะของมวลหินในธรรมชาติ จะมีรอยแตกรอยแยกปรากฏเป็นโครงสร้างอยู่ทั่วไปและพบในหินทุกชนิด โครงสร้างที่เป็นความไม่ต่อเนื่องในหินและพบบ่อยที่สุด คือ แนวระนาบชั้นหินของหินตะกอน (sedimentary bedding plane) ที่พบบ่อยรองลงมาคือรอยแตกรอยแยกตามธรรมชาติของหิน (natural joint) ทั้งที่พบในหินตะกอนและหินอัคนี นอกจากนี้ก็แนวรอยแตกรอยแยกในหินแปรที่เรียกว่า แนวโฟลลิเอชัน (foliation) และยังอาจพบแนวระนาบของรอยเลื่อน (fault plane) ที่เกิดเป็นรอยแตกรอยแยกที่มีการเคลื่อนที่ออกจากกันของมวลหิน

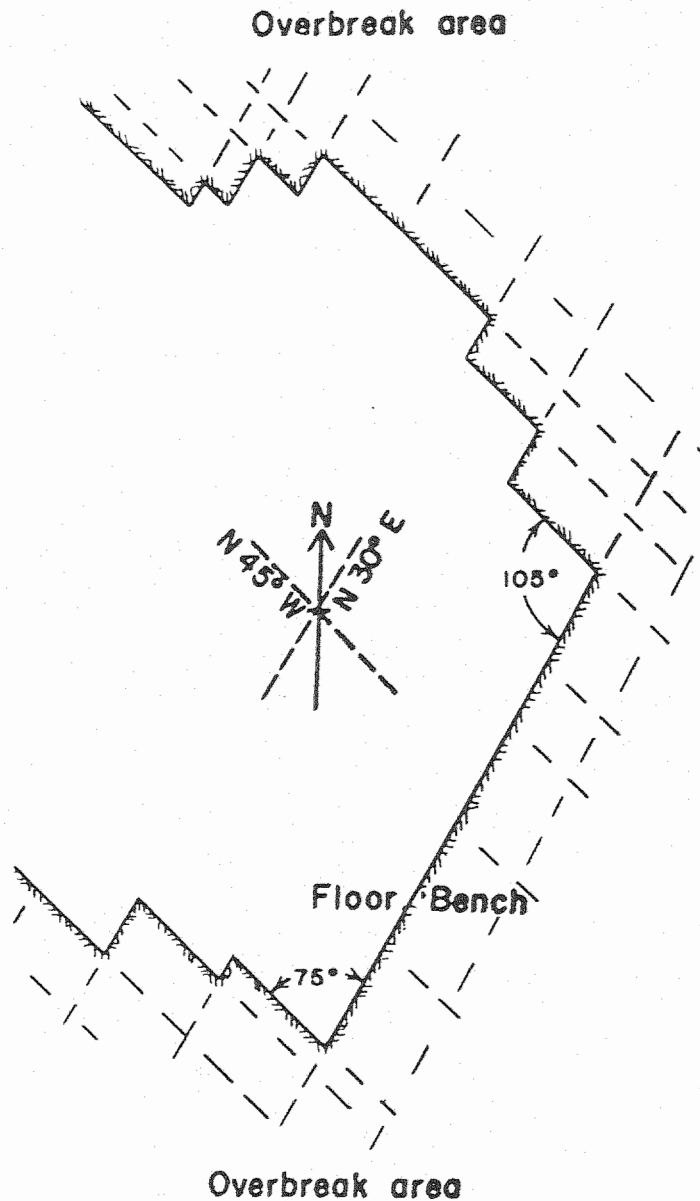
2.1 บทบาทของความไม่ต่อเนื่องในมวลหิน

ความหมายของคำว่า "ความไม่ต่อเนื่องของหิน (rock discontinuities)" ที่กล่าวในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้ นั้น ในเรื่องของระนาบหรือพื้นผิวที่แบ่งมวลสารของหินออกเป็นส่วนๆ แต่ละส่วน(หรือบล็อก)มีอนุภาคเกาะยึดติดอยู่ภายใน (A.G.I., 1976)

ดังนั้น ความไม่ต่อเนื่องในหินที่พบในภาคสนามไม่ว่าจะเป็นชนิดใด (bedding plane, joint, foliation, fault) มีผลทำให้มวลสารแยกออกจากกัน และการยึดเหนี่ยวของอนุภาคในมวลหินลดน้อยลง จึงมีผลโดยตรงต่อการระเบิดและการสั่นสะเทือน

2.1.1 บทบาททางด้านโครงสร้างหิน (rock structure)

ปกติความไม่ต่อเนื่องในหินเกิดจากกระบวนการทางธรณีวิทยา แต่ก็มีโอกาสที่มนุษย์เป็นผู้กระทำให้เกิดขึ้น รอยแตกรอยแยกเหล่านี้ที่พบในเหมืองหินหรือหน้างานการระเบิดทั่วไป (ดูรูปที่ 1 หน้า 4) อาจจะเป็นแบบปิดแน่น (tight) หรือแบบเปิด (open) โดยในบางครั้งอาจมีมวลสารเข้าไปอุด (filled) ความช่องว่างระหว่างระนาบของรอยแตกรอยแยก มีผลให้เกิดความแตกต่างทางด้านกำลังวัสดุ (strength) และความแตกต่างของพลังงานความเครียด (strain energy) ที่คลื่นพัลส์ของการระเบิดหินมีการส่งผ่านพลังงานเข้าไปในรอยแตกรอยแยกเหล่านี้



รูปที่ 1 ภาพมองลักษณะ plan view ของ vertical joint pattern ที่มักพบในเหมืองหิน

ถ้าหากรอยแตกรอยแยกของ joint เป็นแบบปิดแน่น (tight) คลื่นพัลส์จากการระเบิดที่เป็น compressive stress wave ก็จะส่งผ่านโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Obert and Duvall, 1950) ในทางตรงกันข้าม ถ้าหาก joint เป็นแบบเปิด (open) หรือถูกอุดคั้น (filled) ด้วยมวลสารอื่น จะก่อให้เกิดความแตกต่างในด้านการส่งผ่านพลังงาน ค่าของ strain energy ก็จะกระจุกกระจาย (เนื่องจากการสะท้อนและการหักเหของคลื่นพัลส์) สมมุติว่ามวลสารอื่นที่อุดคั้นและมีค่า acoustical impedance สูง ก็จะมีพลังงานในการส่งผ่าน (transmitted) เข้าไปในวัสดุมากกว่าพลังงานที่จะสะท้อนกลับ (reflected)

รอยเลื่อน (fault) เกิดเป็นรอยแตกรอยแยกในหินทำนองเดียวกับ joint ทำให้เกิดการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิมไป นอกจากนี้อาจมีวัสดุอื่นเข้าไปอัดแน่นในระนาบของรอยเลื่อน มีผลทำให้เกิดความสูญเสียทางด้านแรงไคฮ์ชัน หรือทำให้ค่าความต้านทานต่อไหลคลดต่ำลง รอยเลื่อนนี้ทำให้มีระนาบของความไม่ต่อเนื่องในหินเกิดขึ้นอย่างถาวร ซึ่งความต่อเนื่องนี้มีผลให้พลังงานจากการระเบิดสูญเสียไป เนื่องจากการจัดกระจายของพลังงานเมื่อกระทบระนาบของรอยเลื่อน

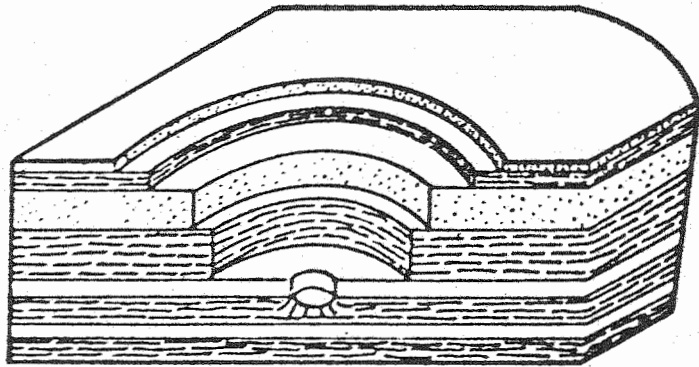
Gnirk and Pflaider (1968) ได้ศึกษาการระเบิดแบบ cratering กับคุณสมบัติของหิน (ดูรูปที่ 2 หน้า 6) ลักษณะที่คล้ายคลึงกันระหว่างหินตะกอนกับหินแปร คือ bedding กับ foliation เนื้อหินทางด้านหนึ่งของระนาบของ bedding หรือทางด้านหนึ่งของระนาบ foliation จะแตกต่างจากอีกด้านหนึ่ง

แต่ถ้าหากเกิด transverse joints มีผลทำให้ความแข็งแกร่ง (competent) ในมวลหินลดน้อยลง การยึดเกาะกันระหว่างชั้นของ bedding หรือ foliation จะไม่ค่อยดี เกิดการหลุดออกจากกันได้ง่ายเมื่อมีแรงมากกระทำเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้รูปร่างและชนิดแร่ที่ประกอบหินในเนื้อหิน ก็มีอยู่ในด้านความแข็งแกร่งของหิน แร่ควอร์ตซ์กับแร่เฟลสปาร์ที่ค่อนข้างกลมเกิดการยึดติดดีกว่าแร่ไมกาที่เป็นแผ่นแบบบาง

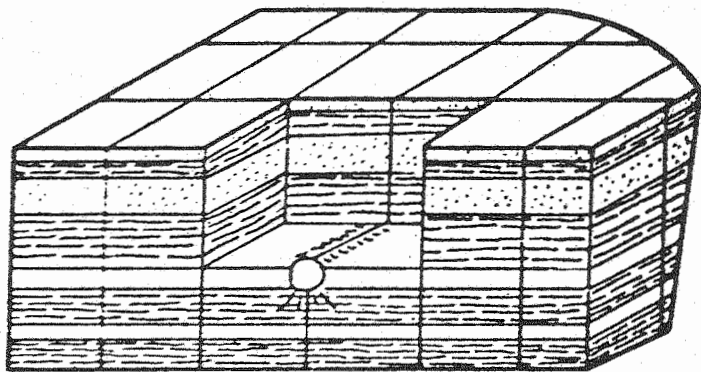
รอยพิคิวลิ (unconformity) เป็นลักษณะทางโครงสร้างที่มีระนาบชั้นหินมาวางทับกัน ระนาบของรอยพิคิวลินี้มักมีผิวขรุขระและเนื้อหินในแต่ละด้านมักมีคุณสมบัติแตกต่างกัน จึงมีผลกระทบคล้ายคลึงกับเรื่องของ joint, fault, foliation, bedding

2.1.2 ปัญหาทางด้านเนื้อหิน (rock texture)

คุณสมบัติของหินแตกต่างกันตามลักษณะของเนื้อหิน (texture) ในมวลสารหินอัคนีเกิดจากการตกผลึกของแร่ประกอบหินอัคนีอัดแน่น มีความพรุน (porosity) ค่าเนื้อหินมักไม่มีสารเชื่อมในหิน การยึดติดเป็นไปทางด้านกลศาสตร์อย่างเดียว หินอัคนีจึงมีความทนทานต่อแรงเฉือน (shear force) สูงและจะแตกแยกออกจากกันเป็นลักษณะ granular texture ซึ่งแสดงถึง brittle manner ในหินอัคนี ส่วนหินแปรที่เกิดจากกระบวนการแปรสัมผัส (contact metamorphism) ก็จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับหินอัคนี



a.



b.

รูปที่ 2 การศึกษาผลกระทบของความไม่ต่อเนื่องในหินกับ crater formation

- a) การเกิดของ crater formation เป็นแบบ กึ่งวงกลมในหินที่วางตัวในแนวราบ
- b) การเกิดของ crater formation เป็นแบบ บล็อก ในหินที่วางตัวในแนวราบมีแนวและ vertical joints 2 แนว

หินตะกอนมีค่ากำลังวัสดุหลายระดับ ถ้าเป็นหินตะกอนประเภทที่มีการตกตะกอนทางกลศาสตร์แบบพัดพามา (detrital) อนุภาคของตะกอนมีโอกาสดูดออกจากกันได้ ง่ายตามระนาบเปราะบางของชั้นหินตะกอน การแตกหักของหินจากการระเบิดก็จะเป็นไปแบบมีทิศทางค่อนข้างชัดเจน ความพรุนของหินก็จะแปรเปลี่ยนตามทิศทาง ซึ่งเป็นทำนองเดียวกับความเร็วของคลื่นพัลส์ที่เดินทางผ่านในชั้นหิน หินตะกอนที่เกิดจากการตกตะกอนทางเคมีค่อนข้างมีกำลังวัสดุปานกลาง คลื่นพัลส์มีความเร็วปานกลางในการเคลื่อนที่ผ่าน หินตะกอนที่มีกำเนิดทางเคมี หินที่มีรูพรุนสูง เช่นหินตะกอนบางชนิด หรือหินอัคนีที่มีกำเนิดมาจากลาวา (lava) เมื่อมีน้ำขังอยู่ในช่องว่างจะมีผลกระทบต่อพลังงานการระเบิดมาก และขังทำให้ค่ากำลังวัสดุในหินไม่ว่าจะเป็น compressive หรือ shear strength มีค่าลดน้อยลง ไปมาก

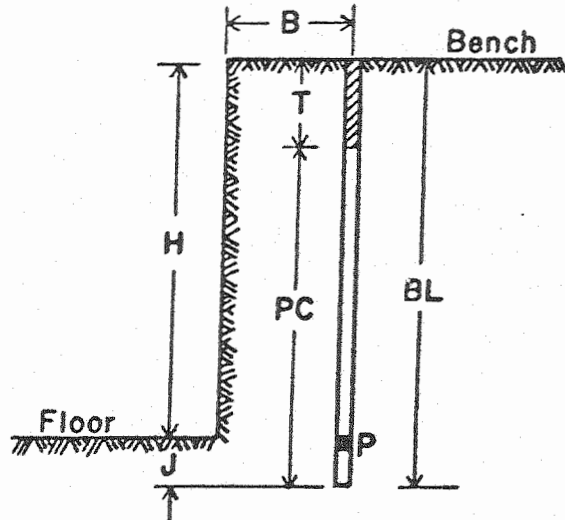
2.2 การวิเคราะห์ในเรื่องการแตกหักของหิน

ในภาคสนามเมื่อทำการระเบิดหิน มวลสารหินที่ทำการระเบิดนั้นจะหายากที่มวลหินเป็น homogeneous หรือ isotropic การศึกษาผลกระทบจึงต้องเน้นในเรื่องความไม่ต่อเนื่องในหินที่มีต่อการระเบิดจริงในภาคสนาม แบบ multiple cylindrical explosive charges รูปที่ 3 หน้า 8 แสดงแบบแผนการวางหลุมเจาะระเบิดของการพัฒนาหน้าเหมือง แบบ bench blasting แสดงให้เห็นการเจาะทั้งแบบรูตั้งและรูเอียง

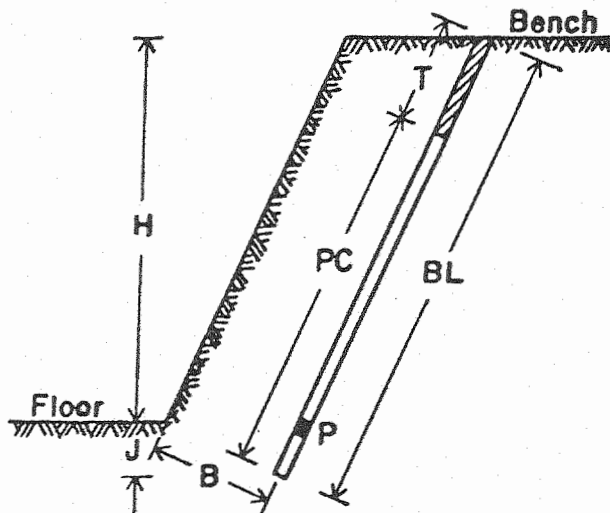
2.2.1 การระเบิดกับการแตกหักของหิน

ข้อมูลจากงานเอกสารและงานวิจัยหลายแห่ง (Duvall and Atchison, 1957; Ash, 1973, Dick et al., 1973, Dowding 1985, Mojtabai et al., 1990, Kuzmenko et al., 1993) มีผลสรุปคล้ายคลึงในทำนองเดียวกันว่าการแตกหัก (แยก) ของหิน (rock fracture) เนื่องจากการระเบิด ในกรณีที่ทำให้อัดตัวระเบิดโดยการเจาะหลุมระเบิดที่มีหน้าอิสระมากกว่า 2 หน้า จะได้ผลการแตกออกเป็นร่องยาวลึก ที่เรียกว่า prismatic crater

การที่หินจะเกิดการแตกหัก ได้นั้นขึ้นอยู่กับ การแตกในแนวรัศมีของมวลสาร ที่เรียกว่า radial fracturing หินที่มีรอยแตกเล็ก ๆ ในแนวรัศมี (radial crack) เกิดเนื่องจากการระเบิดที่ค่าความเค้นของ high tangential stresses (hoop stresses)



a. VERTICAL BLASTHOLE



b. INCLINED BLASTHOLE

รูปที่ 3 รูปแบบการวางแนวหลุมเจาะระเบิดในภาคสนาม

a) หลุมเจาะแบบตั้ง (vertical blasthole)

b) หลุมเจาะแบบรูเอียง (inclined blasthole)

- * สัญลักษณ์ B = Burden, BL = Length of Blasthole,
H = Bench Height, J = Depth of Subdrilling,
P = Primer Charge, PC = Charge Length,
T = Stemming Length

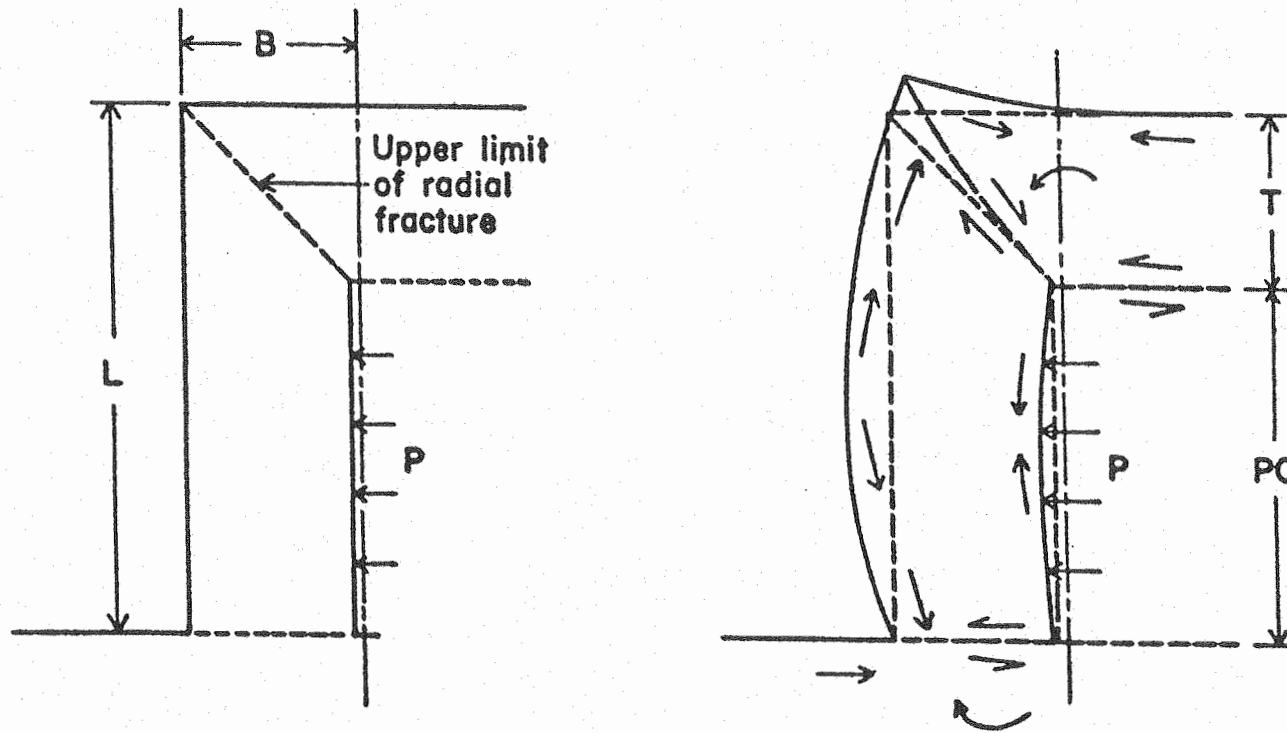
แนวรอยแตกเหล่านี้เกิดตามแนวของรอยแตกเดิม (preformed fractures) แต่ ถ้าหาก ไม่มีรอยแตกมาก่อน รอยแตกเล็ก ๆ หรือ cracks เหล่านี้จะเกิดที่ด้านข้างของ หลุมเจาะระเบิดในแนวที่ขนานกับ open face

เมื่อรอยแตกเล็ก ๆ เหล่านี้เกิดขึ้น ค่าความดันที่วิกฤตที่จะต้องการให้เกิดการ ขยายตัวของ cracks จะลดน้อยลงกว่าเดิม ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ใน เรื่องความดัน ของการระเบิดที่ต้องการให้เกิดการขยายตัวของรอยแตกในหินที่มี bedding planes หรือ jointed rocks ความดันนี้มีค่าต่ำกว่าความดันที่ต้องการให้เกิดการขยายตัวของ รอยแตกที่เกิดใน massive rock

ตามทฤษฎีของ fracture mechanics การขยายตัวของรอยแตกเล็ก ๆ หรือ การทำให้ crack length นั้นยาวขึ้นจะต้องมี strain energy ที่ต้องจำเป็นใช้เท่ากับ surface energy ที่ต้องการให้เกิด new surface (Broek, 1983) การขยายตัว ของรอยแตกเล็ก ๆ เกิดในแนวที่มีการใช้พลังงานน้อยสุด หรือเกิดตามแนว principal stress trajectory ของ stress field ที่เกิดจากความดันจากการระเบิดใน หลุมเจาะ (สมมุติว่าความดันของก๊าซไม่ได้เกิดตามมาในการขยายรอยแตกเล็ก ๆ นี้)

Ash (1973) ได้นำผลการตรวจวัดจากข้อมูลหลายแห่ง ซึ่งระบุว่าค่าของความ- เร็วในการเกิดรอยแตกเล็ก ๆ (crack propagation velocity) มีค่าประมาณ 0.2-0.4 ของความเร็วคลื่นตามยาวในวัสดุ (Ash, p. xxvi) ดังนั้นคลื่นพัลส์จากการ ระเบิด ที่อยู่ในรูปของ compressive stress wave ไม่ว่าจะตกกระทบโดยตรงหรือ สะท้อนกลับมีผลต่อกระบวนการขยายตัวของรอยแตกเล็ก ๆ น้อย เนื่องจากความไม่- ต่อเนื่องในหิน เช่น joint หรือ bedding plane ก่อให้เกิดความต้านทานค่า ต่อ tensile rupture จึงมีส่วนช่วยในการขยายตัวของ radial fracturing จึงมักพบว่าในภาคสนามแนวของ radial cracks ไม่ขยายตัวออกจากหลุมเจาะแบบ สมมาตร แต่จะเบี่ยงเบน (oriented) ตามรูปแบบหรือแพทเทิร์นของโครงสร้าง ความไม่ต่อเนื่องในหินและขยายตัวไปยังตำแหน่งของหน้าอิสระ (free face)

ทิศทางที่แนว radial cracks จะขยายตัว ยังเป็นสิ่งที่เป็นปัญหาอยู่ ในการ แพ่งกระจายความดันของคลื่นพัลส์จากการระเบิด มักกำหนดให้มีความสม่ำเสมอ สมอตลอดแนว หลุมเจาะ (ตามความยาวของวัตถุระเบิด) การปิดอัดวัสดุปากหลุมเจาะโดย stemming



รูปที่ 4 ไดอะแกรมแสดง stress distribution ในการทำการระเบิด
แบบ bench blasting (คัดลอกจาก Ash, 1973, p. 69)

หินตรงบริเวณ collar region ใกล้ปากหลุมเจาะควรจะไม่มีรอยแตก ทำนองเดียวกับ บริเวณทางก้นหลุมเจาะก็ควรไม่มีรอยแตก ในช่วงแรกของการระเบิดเกิดปรากฏการณ์ radial fracturing ของ column charge ก่อให้เกิดชั้นส่วนที่ไม่แตกหักตาม แนวยาวของหลุมเจาะโดยไม่มี transverse fracturing ปรากฏในระนาบตามแนว เส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะ

เนื่องจาก radial cracks เกิดในระนาบที่จำกัด จึงเป็นเหตุผลที่อธิบายว่า ลำพังการเกิด radial fracturing เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถทำให้หินเกิดการ แตกหัก (fragmentation) ได้ ส่วนที่ช่วยเสริมให้มีการแตกหักในหินก็มาจากความดัน ของก๊าซภายหลังมีการระเบิดเกิดขึ้น ความดันก๊าซนี้จะทำให้ชั้นส่วนของหิน เคลื่อนที่ไป ช้างหน้าทำให้เกิด longitudinal bending ของมวลสาร (ดูรูปที่ 4 หน้า 10) จาก นั้นจึงเกิด transverse fracturing ตามแนวระนาบเส้นผ่านศูนย์กลาง จนกระทั่งหิน เกิดการแตกหักเป็นบล็อกหรือชิ้นส่วนในที่สุด

ตามสมมุติฐานของ bending action จะมีการทำให้หินที่เป็นส่วนของ rock burden เคลื่อนที่ไปข้างหน้ามี time lapse ประมาณ 1 millisecond/ft of burden ก่อนที่จะเกิดการเคลื่อนที่ของหินบริเวณหน้าอิสระ ซึ่งหมายความว่า radial fracturing ที่เกิดใช้เวลาน้อยกว่านี้อีก การเกิดลักษณะของ overbreak ของหิน บริเวณหน้าเหมืองภายหลังการระเบิดเสร็จสิ้นอาจเกิดเนื่องจาก bending action ถึงแม้ว่า radial fracturing บริเวณปากหลุมจะทำให้หินใน burden เกิดการ เคลื่อนที่ เพราะต้องมีหน้าอิสระมากกว่าหนึ่งหน้า แต่กระบวนการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ มีผลมาจากการยกตัว (uplift) เมื่อมวลสารหินเกิด transverse rupture (ทำนอง เดียวกับการเกิด rupture ใน cantilever beam) เนื่องจาก stiffness ของ บล็อกหินจะทำให้เกิด transverse rupture ของหินเกิดที่ระยะ ไกลกว่าที่ burden จะ ก่อให้เกิด back break การเกิด bending ของมวลหินที่อยู่ ในระนาบที่ขนานกับแกน ของหลุมเจาะทำให้เกิด end break

2.2.2 การคาดคะเนการแตกหักของหินเนื่องจากการระเบิด

จากเอกสารและผลงานวิจัยที่สำคัญหลายแห่งที่ได้รวบรวมมา ได้แก่ Aimone, 1982; Cunningham, 1983; Clark, 1987; Rollins and Wang, 1989;

Singh and Pal Roy et al., 1993 จากเอกสารเหล่านี้ได้ผลสรุปแบบจำลอง การคาดคะเนผลการแตกหักของหิน หากจากค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ดังแสดงไว้ ในสมการที่ 1-16 (หน้าที่ 12-16)

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เหล่านี้ ถูกนำเสนอมาเพื่อให้เป็นการคาดคะเนของ ชิ้นส่วนหินในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ของ size distribution ของ rock fragment สิ่งที่เหมาะสมในภาคสนามคือ แบบจำลองแบบหนึ่งอาจเหมาะสมกับสถานการณ์ หนึ่ง มักจะใช้ไม่ได้กับทุกสถานการณ์ และแน่นอนว่าโครงสร้างของหินที่มีความไม่ต่อเนื่องในมวลสารก็เป็นองค์ประกอบหนึ่ง ที่ทำให้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการคาดคะเนเบี่ยงเบนไปจากความเป็นจริง ในทางปฏิบัติ ชนิดของหินกับชนิดของวัตถุระเบิดที่ใช้ ก็เป็นตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้ผลของการคาดคะเนผิดพลาดไปได้

1. สมการของ Gaudin-Meloy

$$Re = \left[1 - \frac{X}{X_0} \right].K \tag{1}$$

กำหนดให้ K = Meloy's size retaining

Re = Retaining size percentage

ค่า exponential ของ K เทียบได้กับค่าดัชนีการย่อยหิน (grindability index) ค่า X เป็น reference screen opening ของตะแกรงคัดขนาดหินตาม หน่วยความยาวของชิ้นส่วนหิน ปกติจะ normalized ให้ X = 1.0 สำหรับตะแกรง ตัวแรกของ screen ค่า X₀ เป็นขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดของ distribution curve ซึ่งค่า X₀ นี้หาได้จากกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติด้วยวิธีทาง regression analysis

2. สมการของ Schumann

$$Re = \left[1 - \frac{X}{X_0} \right].K \tag{2}$$

โดยที่ K = Schumann's m

X₀ = Schumann's K

ค่า exponential ของ K มีค่าเท่ากับ Schumann m สำหรับค่า m เป็นค่าความลาดเอียง (slope) ของขนาดอนุภาค (size) ที่พล็อตบน log-log scale เมื่อเทียบกับค่า $(1-Re)$ ที่เป็น fine size distribution ค่าของ X_0 แทนค่าของ Schumann size modulus K (นั่นคือค่า X_0 เป็นจุดตัดของเส้นตรงของ curve ที่ 100% size passing)

3. สมการของ Rosin-Rammler

$$Re = \exp[-bX^n] \quad (3)$$

ค่า \exp คือค่า exponential ส่วน b เป็นค่าคงที่ ต่อมาสมการที่ 3 นี้ถูกทำการปรับปรุงใหม่ได้สมการ

$$Re = \exp [- X/X_0]^n \quad (4)$$

เมื่อจัดเทอมใหม่และคูณเทอมลอการิทึมเข้าไป จะได้

$$\ln [\ln (1/Re)] = n. [\ln X - \ln X_0] \quad (5)$$

ค่า X เป็น screen size ส่วนค่า X_0 เป็นขนาดอนุภาคที่เด่น (characteristic particle size) หาได้ที่จุด 36.79% (ดูสมการที่ 6) ส่วนค่า n เป็นความลาดเอียงของเส้นตรง (ที่พล็อตในกราฟ log-log) ค่า n ในสมการที่ 3, 4, 5 เป็นค่าคงที่ในกระบวนการแตกหักบดย่อยของแต่ละกระบวนการ และ $n \ln X_0$ คือค่าที่ตัดแกนในแนวดิ่ง ถ้าให้ $X = X_0$ จะได้ค่า Re ซึ่งเป็น retained size ที่ 36.79% จะได้

$$X_0 = X_m [0.693]^{1/n} \quad (6)$$

แนวทางของรายงายวิจัยปัจจุบัน กำหนดให้ n เป็น blasting parameter โดยที่

$$n = \{[(2.2-14(B/d)) (1-SD/B)]\{[1+0.5(S/B-1)]\} PC/L \quad (7)$$

- กำหนดให้
- B = ระยะ burden (เมตร)
 - d = เส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะ (มม.)
 - SD = ค่าเชิงสถิติของ standard deviation of drilling accuracy (เมตร)
 - PC = ความยาวของแท่งวัตถุ วัตถุระเบิด คำนวณที่ above grade level (เมตร)
 - L = ความสูงของ bench (เมตร)

สมการที่ 7 ปกติใช้กับการเจาะหลุมระเบิดแบบ rectangular pattern หากนำไปใช้กับหลุมเจาะหลุมระเบิดแบบ staggered pattern ค่าของ n ในสมการที่ 7 จะสูงขึ้นราว 10%

4. สมการของ Kuznetsov

$$X_m = A \cdot [V_0/Q]^{0.8} \cdot Q^{1/6} \quad (8)$$

- กำหนดให้
- X_m = ชิ้นส่วนเฉลี่ยของหินที่แตกหัก (หน่วยเป็น ซม.)
 - A = คุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับชนิดของหิน เรียกว่า rock factor โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 8 ถึง 12 กำหนดให้
 - A = 7 สำหรับหินแข็งปานกลาง
 - A = 10 สำหรับหินแข็งมากและมีรอยแตกสูงมากในหิน
 - A = 13 สำหรับหินแข็งมากมีรอยแตกน้อยมากในหิน
 - V_0 = ปริมาตรของหินที่แตกหัก (ลบ.ม.)/หลุมเจาะ เท่ากับ spacing x burden x bench height
 - Q = น้ำหนักของวัตถุระเบิด TNT (กิโลกรัม) ซึ่งสมมูลกับพลังงานของวัตถุระเบิดในแต่ละหลุมเจาะ

5. สมการของ Sve De Fo

$$l_m = \frac{1}{2.27} [B^2 \{1.25/(S/B)\}^{0.5}]^{0.29} \cdot (R_c \times S_t/q)^{1.18} \quad (9)$$

- กำหนดให้ l_m = ค่าเฉลี่ยของด้านความยาว (เมตร) ของ boulder
 B = ระยะ burden (เมตร)
 S = ระยะ spacing (เมตร)
 q = specific charge (kg/m^3)
 S_t = relative weight strength
(เป็นค่าความสามารถของวัตถุระเบิดในการทำให้หินแตก)
 R_c = rock constant ในรูปของ blastability index
ที่เสนอโดย Langefors and Kihlstrom (1978)
ค่าเฉลี่ยของ R_c ประมาณ 0.4

ผลของพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ต่อมาเมื่อให้ K_{50} เป็นค่า fragment size factor ที่เป็นค่าเฉลี่ยที่ 50% ของ loosened rock อาจผ่านตะแกรง จะ ได้

$$K_{50} = l_m/2.6 \quad (10)$$

ซึ่งมีการนำเอาผลการทดลองของ Langefors ในเรื่องการระเบิดและการแตกหักของหินไปทดสอบกับสมการ 9 ข้อมูลเหล่านี้สามารถปรับปรุงได้สมการใหม่ที่ดีขึ้นเป็น

$$l_m = \frac{1}{2.69} [B^2 \{1.25/(S/B)\}^{0.5}]^{0.29} \cdot (R_c \times S_t/q)^{1.35} \quad (11)$$

คำนวณการแตกหักของหินแต่ละหลุมได้ hole fragmentation curve เป็น

$$y = 1 - \exp[-(0.76 X/K_{50})^{1.35}] \quad (12)$$

ค่า y ในสมการที่ 12 เป็น cumulative weight percentage ที่อนุภาคผ่าน (passing) ช่องตะแกรงที่มีขนาดเป็น mesh size ของ X (screen opening)

6. แบบจำลองของ Kuz-Ram

เมื่อทำการพัฒนาสมการของ Rosin-Rammler กับ Kuznetsov เข้าด้วยกัน

ทำให้ได้แบบจำลอง Kuz-Ram นำมาใช้เพื่อคาดคะเนของอนุภาคก้อนใหญ่สุดที่จะเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับการแตกหักของปริมาตรเดิมของหินต่อหลุมเจาะ

ในสมการ 8 แปลงค่าของ Q ที่เป็น explosive factor ในรูปแบบใหม่ คือ

$$Q = Q_e [S_t/115] \quad (13)$$

กำหนดให้ Q_e = มวลของวัตถุระเบิดที่ใช้ต่อหนึ่งหลุมเจาะ

S_t = ค่า relative weight strength ของวัตถุระเบิด
(ปกติให้ ANFO มีค่า relative weight strength เท่ากับ 100 และของ TNT มีค่า = 115)

จากความสัมพันธ์ของสมการ 8 และ 13 ทำให้ปรับปรุงสมการของ Kuznetsov เป็นแบบจำลองใหม่ของ Kuz-Ram คือ

$$X_m = A[V_0/Q_e]^{0.8} Q_e^{1/6} [S_t/115]^{1/6} [S_t/115]^{-0.8} \quad (14)$$

หรือได้ค่า

$$X_m = A[V_0/Q_e]^{0.8} Q_e^{1/6} [S_t/115]^{-19/30} \quad (15)$$

เทอม $[V_0/Q_e]$ เป็นค่าส่วนกลับของ specific charge หรือ powder factor ใช้แทนด้วยสัญลักษณ์ "q" ซึ่งค่า q มีหน่วยเป็น kg/m^3 ทำให้ได้สมการที่ 15 เปลี่ยนเป็นสมการสุดท้ายของแบบจำลอง Kuz-Ram คือ

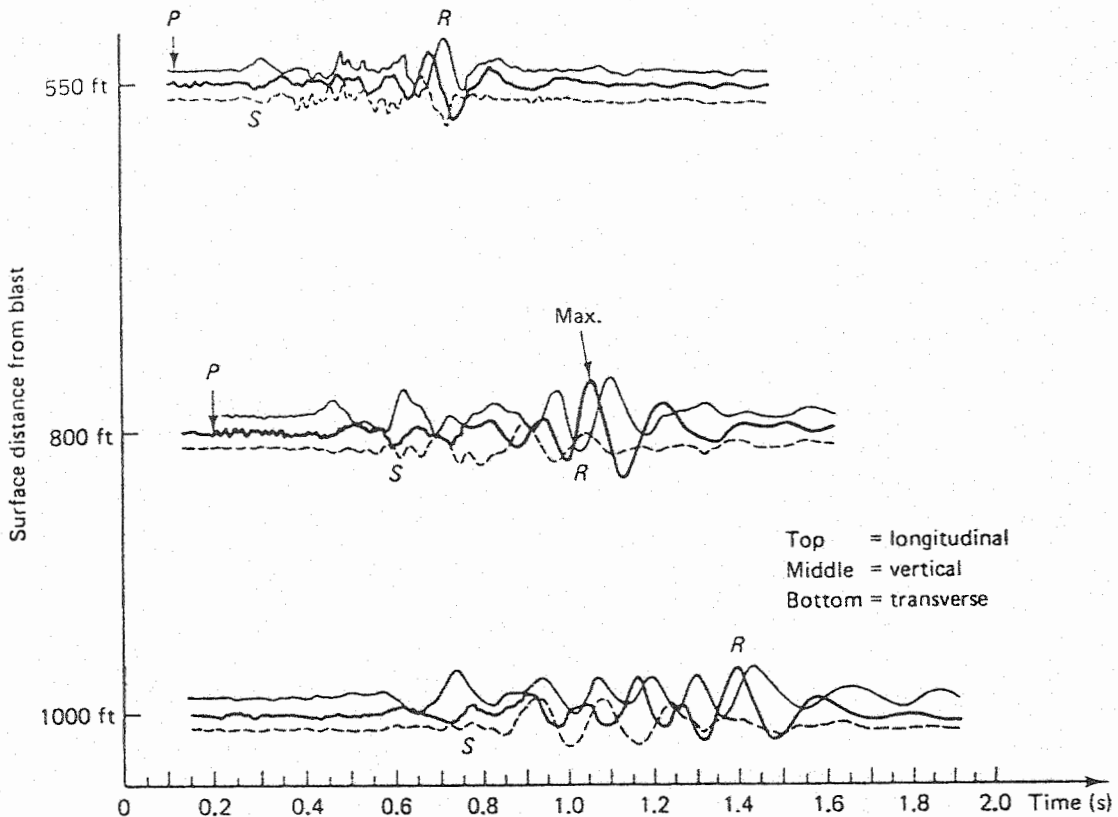
$$X_m = A.[q]^{-0.8} Q_e^{1/6} [115/S_t]^{19/30} \quad (16)$$

2.3 การวิเคราะห์ในเรื่องผลกระทบจากการสั่นสะเทือน

เมื่อมีการจุดระเบิดในหิน ก่อให้เกิดคลื่นพัลส์กระแทก (impact wave pulse) ที่มีการเกิดในช่วงระยะเวลาสั้นๆ พลังงานของคลื่นพัลส์กระแทกมีผลให้มวลหินเกิดการ

แตกหัก อีกส่วนหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเป็นคลื่นเสียง พลังงานที่เหลืออยู่จะมีผลทำให้คลื่นพัลส์กระแทกเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ในตัวกลาง อนุภาคของวัสดุในตัวกลางเกิดมีความเร็วและความเร่งอย่างกะทันหันในช่วงสั้นๆ ถ้าหากอนุภาคมีการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ (differential displacement) เกินขีดจำกัดที่ตัวกลางในวัสดุสามารถจะรับได้ ความเสียหายของโครงสร้างภายในวัสดุที่คลื่นพัลส์กระแทกมีการเคลื่อนที่ผ่านจะปรากฏเป็นรอยแตกร้าวของโครงสร้าง

คลื่นพัลส์จากการระเบิดสำหรับงานวิศวกรรมแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ compressive wave, shear wave และ surface wave คลื่นทั้ง 3 ประเภทนี้ยังสามารถจำแนกย่อยออกเป็น 2 varieties คือ body wave ที่มีการเดินทางผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุที่เป็นตัวกลาง (หินหรือดิน) และ surface wave ซึ่งเป็นคลื่นที่มีการเดินทางผ่านแนวพื้นดิน (ปกติเป็นพื้นผิวส่วนบน)



รูปที่ 5 ผลการบันทึกคลื่นพัลส์ของการระเบิดในภาคสนาม สัญลักษณ์ของ

P = compressive, S = shear, R = Rayleigh wave

รูปที่ 5 หน้าที่ 17 เป็นผลการตรวจวัดที่เจ้าหน้าที่ของ U.S. Bureau of Mines ทำการบันทึกไว้ และคณะผู้วิจัยได้คัดลอกจากตำราของ Dowding, 1985 (หน้า 7) ที่ได้ดัดแปลงแก้ไขแล้ว

ผลกระทบของการระเบิดในจุดที่มีระยะทางใกล้กับจุดระเบิดคลื่นที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ compressive body wave จนกระทั่งกระทบกับพื้นผิวสัมผัส (interface) ที่เป็นขอบเขตต่อเนื่องระหว่างชั้นหิน ระหว่างชั้นหินกับดิน หรือระหว่างพื้นผิวดินกับอากาศที่จุดพื้นผิวสัมผัสนี้ shear และ surface wave จะเดินทางมาทัน และคลื่นทั้ง 2 ประเภทนี้จะมีผลกระทบมากขึ้นที่ระยะทางไกลขึ้น คลื่นทั้งหมดนี้มีการเคลื่อนที่ในอนุภาคของดิน/หิน แตกต่างกันไป ดังนั้นโครงสร้างของอาคารสิ่งก่อสร้าง (เช่น ตึก) จะมีการเปลี่ยนรูปร่างและปริมาตร (deformation) แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดที่คลื่นเดินทางผ่าน

การศึกษาผลกระทบของธรณีวิทยาโครงสร้างของหินต่อการระเบิดหิน รายงานส่วนใหญ่ ระบุเป็นผลกระทบทางด้านพลังงานของการระเบิดกับประสิทธิภาพของการระเบิด (Burkle, 1980; Bhandari and Badal, 1990; Fordyce, et al., 1993) การสั่นสะเทือนเนื่องจากการระเบิดเป็นผลทางอ้อม หากการระเบิดมีประสิทธิภาพดี ใช้วัตถุระเบิดน้อยลง การสั่นสะเทือนก็ลดลง

ผลการระเบิดในเหมืองหินเมื่อเทียบกับโครงสร้างของความไม่ต่อเนื่อง ทั้งของ หินตะกอน หินอัคนี หรือหินแปร มีดังนี้

1. หากทำการระเบิดในทิศทางเดียวกับ มุมลาดเอียงของ bed หรือของ joint หรือของ foliation มีโอกาสที่จะเกิดปรากฏการณ์ของ backbreak แต่ได้ลักษณะของพื้นผิวของ floor ราบเรียบมากขึ้น

2. การทำการระเบิดไปในแนวเดียวกับ dip direction หรือ joint direction เป็นการใช้พลังงานของการระเบิดที่ได้ประโยชน์เต็มที่ เพราะโครงสร้างของหินลาดเอียงหลังแนวหลุมเจาะระเบิด (การไหลเลื่อนของมวลสารง่ายขึ้น) การทำการระเบิดไปในแนวลาดเอียงของมวลสาร ทำให้การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของมวลหิน ห่างจากหน้าเหมืองมากขึ้น มวลหินที่แตกหักจะไม่อัดคึดแน่นเป็นกอง muckpile สูงใหญ่นักหนาในเรื่อง toe ที่ยากต่อการขุดคัก จะมีน้อยลง

3. หากทำการระเบิดในแนวที่ตรงข้ามกับ dip or joint direction จะมีโอกาสที่การเกิด backbreak มีได้น้อยลง เพราะมวลหินลาดเอียงเข้าหาหน้าเหมือง ทำให้การระเบิดมีประสิทธิภาพน้อยลง การขุดค้ำของมวลหินที่ toe จะยากขึ้น ก่อให้เกิดกองขนาดใหญ่ของ muckpile และพื้นผิวของ floor มีลักษณะขรุขระตกร่องต่างยาก

4. ในกรณีที่ทำกรระเบิดสวนทางกับแนวการวางตัวของระนาบชั้นหิน (strike or joint direction) ทำให้เกิดปัญหา backbreak เป็นแห่ง ๆ (spot) และเนื่องจากเป็นการระเบิดที่ต้องผ่านระนาบหลายระนาบของหิน (หรือมีหินหลายชนิดในการระเบิดครั้งเดียวพร้อมกัน) การดำเนินการพัฒนาหน้าเหมืองต่อไปจะเป็นไปได้ยาก เพราะผลของการ reorientation ของ working face

5. ปัญหาในเรื่องการระเบิดสวนทางกับ strike อีกอย่างหนึ่งก็คือ พื้นของ floor ภายหลังการระเบิดจะมีลักษณะเป็นผิวขรุขระของชั้นหินที่ต่างชนิดกันประสานกันเป็นแบบฟันเลื่อย (sawtooth) เพราะหินชนิดหนึ่งมีปฏิกิริยาแตกต่างจากหินอีกชนิดหนึ่ง

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาแนวทิศทางที่เหมาะสมของการระเบิดกับแนวการวางตัวของระนาบความไม่ต่อเนื่อง ทำให้การวางแผนการเดินหน้าเหมืองมีประสิทธิภาพดีขึ้น วิศวกรอาจจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ spacing/burden ให้เหมาะสมกับ joint orientation

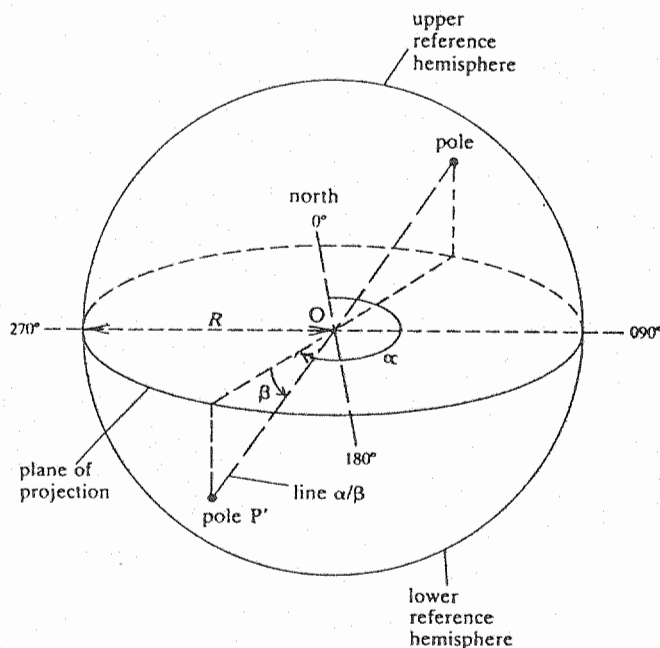
บทที่ 3

การวิเคราะห์ข้อมูลความไม่ต่อเนื่อง

การวิเคราะห์ข้อมูลความไม่ต่อเนื่องในหิน มีการวิเคราะห์หลายวิธีการ เช่น วิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) วิธีการสร้างเป็นเส้นชั้นความหนาแน่น (contouring method) หรือวิธีการเชิงสถิติของกลุ่มข้อมูล (statistical data grouping method) คณะผู้วิจัยได้คัดเลือกวิธีการผสมระหว่างการสร้างภาพกราฟิกของกลุ่มข้อมูลกับการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือเชิงสถิติ วิธีการที่จะนำเสนอมีหลายขั้นตอน

3.1 หลักการของ Stereographic Projection

วิธีการของ stereographic projection นี้เป็นวิธีการที่เกิดจากการฉายภาพ (projection) ที่เกิดและแทนที่บนระนาบครึ่งหนึ่งของการฉายภาพทรงกลม (spherical projection) ระนาบที่เป็น stereo projection นี้เป็นระนาบของ equatorial plane ของทรงกลม จุดเด่นของการฉายภาพแบบนี้ คือ สามารถจะนำเสนอข้อมูลการปรับเปลี่ยนตำแหน่ง (orientation) ของเส้น (line) ต่างๆที่เป็นข้อมูล 3 มิติ แทนที่เป็นจุด (point) บนระนาบของการฉายภาพได้ภาพกราฟิกบน 2 มิติ ทำให้ง่ายต่อการแปลความหมายและง่ายต่อการจดจำ



รูปที่ 6 วิธีการฉายภาพของ hemispherical projection ที่แทนเส้นที่เกิดจากระนาบความไม่ต่อเนื่องในหิน เป็นจุดบนทรงกลม

การฉายภาพเพื่อวิเคราะห์ปัญหาเชิงธรณีวิทยาบนระนาบนี้ นิยมใช้แค่ครึ่งวงกลม ผู้วิจัยส่วนใหญ่มักเลือกใช้ การฉายภาพของครึ่งวงกลมล่าง (lower hemispherical projection) โดยทำการฉายภาพจากทรงกลมอ้างอิง (reference sphere) ของเส้น (line) ที่รู้ค่าแนวการวางตัวของทิศทางในระนาบราบของอะซิมุท (azimuth) กับรู้ค่ามุมเอียงในระนาบตั้ง (vertical plane) ทำให้สามารถแทนด้วยจุด (point) บนระนาบของการฉายภาพ ตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 6 หน้า 20 แสดงให้เห็นว่า ถ้าหากทำการตรวจวัดค่าความไม่ต่อเนื่องในภาคสนาม เช่น วัด joint ของหิน ได้ค่าหนึ่งค่า ก็สามารถแทนแนวของเส้นการวางตัวที่ประกอบด้วย ค่าแนวการวางตัวของเส้นในแนวราบ หรือเรียกสั้นๆ ว่า trend (แสดงเป็นสัญลักษณ์ α) กับค่ามุมเอียงกับแนวระดับในระนาบแนวตั้งที่ผ่านเส้นการวางตัว หรือเรียกสั้นๆ ว่า plunge (แสดงเป็นสัญลักษณ์ β) โดยแทนเป็นจุดบนทรงกลม หรือเรียกสั้นๆ ว่า pole

รายละเอียดของวิธีการฉายภาพ (projection) เพื่อใช้วิเคราะห์หาเสถียรภาพของเหมืองเปิดและอุโมงค์ใต้ดิน หรือใช้วิเคราะห์ข้อมูลของธรณีโครงสร้าง ได้มีผู้บรรยายไว้หลายแหล่ง บทความหรือตำราที่เด่นๆ ที่คณะผู้วิจัยใช้เป็นหลักในการวิเคราะห์ข้อมูลคือความไม่ต่อเนื่อง ได้แก่ Fisher (1953), Watson (1966), Phillips (1971), Goodman (1976), Priest and Hudson (1976), Priest (1980), Cheeney (1983), Ragan (1985), Priest (1985, 1992)

3.2 การวิเคราะห์ Clusters ของความไม่ต่อเนื่องในหิน

สิ่งหนึ่งที่เป็นปัญหาหลักของนักธรณีวิทยา คือ การตรวจวัดรอยแตกรอยแยกของหน้าเหมืองในภาคสนาม จะปรากฏว่ามีระนาบของรอยแตกรอยแยกเหล่านี้ เช่น bedding plane หรือ joint plane ที่มีค่าใกล้เคียงกันในกลุ่มข้อมูลเล็กๆ (เรียกว่า cluster) เดียวกัน แต่ไม่มีเซตใดของระนาบความไม่ต่อเนื่องเหล่านี้ที่พบว่ามีค่าเท่ากัน จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการเชิงสถิติ ในการหาค่าเฉลี่ยของการปรับเปลี่ยนทิศทางของการวางตัวของระนาบ (mean orientation of plane) ตัวอย่างที่แสดงจากภาพถ่ายของหน้าเหมืองหินปูนในรูปที่ 7 หน้า 22 เป็นตัวอย่างที่ดีที่พบว่าในแนวเส้นสัมผัสตัวอย่าง (sampling line) เดียวกัน ไม่มีระนาบใดของ joint ในหินปูนที่มีค่าการวางตัวเหมือนกัน ดังนั้นจึงต้องนำค่าข้อมูลมาทำการปรับแต่ง (normalized) โดยคูณด้วยค่าตัวเลขของค้ำประกอบน้ำหนัก (weighting factor) เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น



รูปที่ 7 หน้าเหมืองหินปูนของบริษัท บุนซีเมนต์เอเชีย จังหวัดสระบุรี
ที่กำลังพัฒนาหน้าเหมือง แสดงระนาบของ joints ที่ปรากฏ
สัญลักษณ์ l = set normal, λ_s = assumed sampling
line, δ = acute angle

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์แบบจำลองของความไม่ต่อเนื่องในหิน ที่ประกอบด้วยเซตของ joints หลายเซต และต้องการประมาณค่าหลายค่าในหนึ่งเซตเป็นค่าทิศทางเดียว (single direction) ในกรณีนี้ต้องการให้ค่าที่ประมาณได้มีความถูกต้องแม่นยำสามารถจะนำค่าไปใช้ต่อในการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงธรณีวิทยา (geological structure) ของบริเวณที่ทำการตรวจวัดภาคสนาม

ปัญหาที่ประสพก็คือ การกระจายค่า (distribution) ของจุดข้อมูล (data points) ไม่สามารถทดสอบได้โดยตรงกับค่าการกระจายตัวที่ทราบค่าแล้ว (known distribution) ดังนั้นจึงมีผลทำให้ค่าความถูกต้องแม่นยำของค่าเฉลี่ยการวางตัว (mean attitude) ของระนาบความไม่ต่อเนื่อง ไม่สามารถประมาณได้โดยตรง จึงต้องหาวิธีการใหม่ที่จะหาค่าเฉลี่ย (mean or preferred) ทิศทางของกลุ่มข้อมูล ในการลุ่มตัวอย่างการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของความไม่ต่อเนื่องในหิน (rock discontinuity orientations)



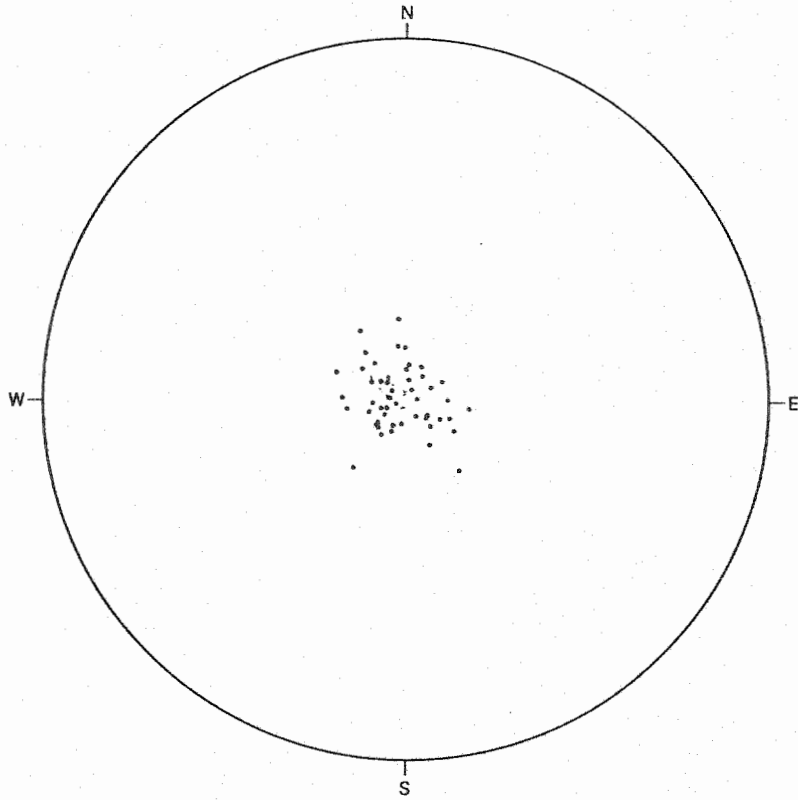
3.2.1 วิธีการวิเคราะห์ของ Fisher

Fisher (1953) ได้เสนอแนะการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของกลุ่มข้อมูลเล็กๆ (cluster) ขึ้นมา แต่เป็นแบบทางอ้อม (indirectly) โดยดูจากการกระจกระยะ (dispersion) ของกลุ่มข้อมูลที่พล็อตบน Arnold's spherical probability distribution

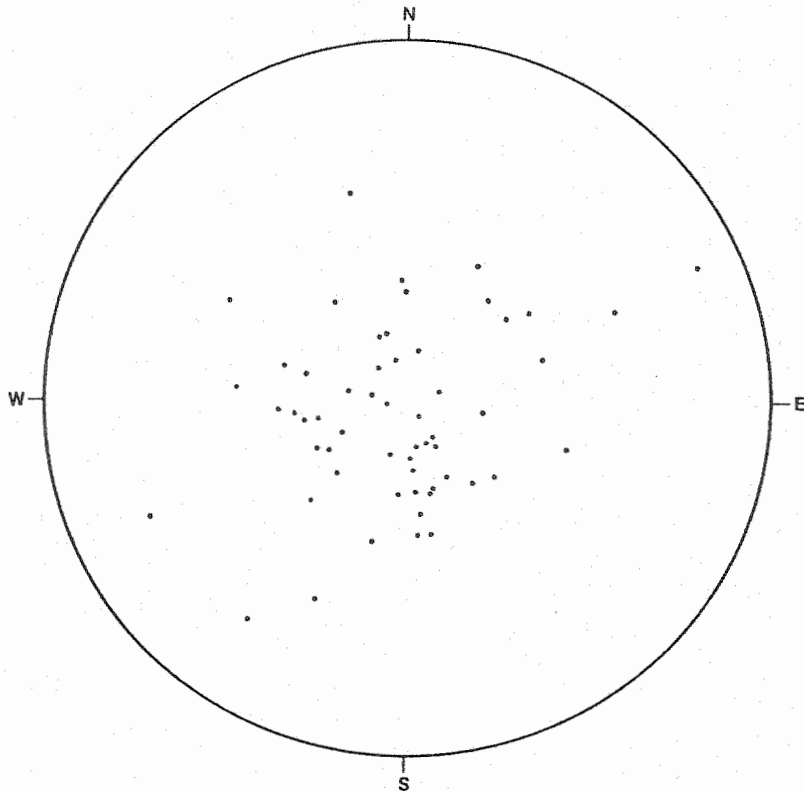
หลักการสำคัญคือการสร้างการกระจายค่าความถี่ (frequency distribution) ของจุดบนทรงกลมที่มีการฉายภาพ กำหนดให้ค่า frequency distribution นี้มีการกระจายค่าแบบสมมาตร (symmetrical distribution) รอบค่าทิศทางเฉลี่ยของ cluster หนึ่ง โดยเป็นไปในทำนองเดียวกับวิธีการเชิงสถิติที่มีค่าของ normal distribution มีการกระจายค่าแบบสมมาตรรอบค่า mean ในทางสถิติ สำหรับเรื่อง normal distribution ถ้าจะตรวจสอบระดับขึ้นความน่าเชื่อถือของการจับกลุ่มแบบ cluster ว่ามีการจับกลุ่มใกล้เคียงกับค่า mean หรือไม่ ก็ทำการตรวจสอบกับค่า standard deviation แต่สำหรับเรื่อง frequency distribution ถ้าต้องการตรวจสอบระดับขึ้นความน่าเชื่อถือ Fisher (ตัดแปลงแก้ไขโดย Watson, 1966) ได้กำหนดให้ ค่าของระดับขึ้นความหนาแน่นของกลุ่มข้อมูลเล็กๆ (degree of cluster tightness) เป็นค่าคงที่ เรียกว่า Fisher's constant หรือมีอีกชื่อหนึ่งเรียกว่า "estimate of precision" กำหนดให้มีสัญลักษณ์ "K" ถ้าหาก ค่า K มีค่าสูงก็แสดงว่าจุดที่พล็อตบน stereo (hemisphere) projection มีการจับกลุ่มของข้อมูลใกล้เคียง (close clustering) กับค่าเฉลี่ย (ดูรูปที่ 8a หน้า 24) ในทางกลับกัน ถ้าหากค่า K มีค่าต่ำ ก็แสดงว่าจุดที่พล็อตบน hemispherical projection มีการจับกลุ่มของข้อมูลเพียงเล็กน้อย (little clustering) หรือไม่มีการจับกลุ่มเลย (no clustering)

Fisher's distribution ตั้งต้นกำหนดค่าความเป็นได้ของหน่วยเวกเตอร์ (unit vector) ในการฉายภาพ 3 มิติ ได้ความสัมพันธ์ในเรื่องความหนาแน่นของกลุ่มข้อมูลที่เป็นจุดบนหน่วยทรงกลม (unit sphere) เป็น

$$f(\theta, \phi) = \frac{K}{4\pi \sinh(K)} \cdot e^{K \cos \theta} \quad (17)$$



รูปที่ 8a กลุ่มข้อมูลที่ random จำนวน 50 ค่า และได้พล็อตบน hemispherical projection ที่มีค่า K เท่ากับ 50



รูปที่ 8b กลุ่มข้อมูลที่ random จำนวน 50 ค่า และได้พล็อตบน hemispherical projection ที่มีค่า K เท่ากับ 10

กำหนดให้

$f(\theta, \phi)$ = density of Fisher distribution,
or spherical normal

θ = colatitude angle (on sphere) between
preferred direction and an observation

ϕ = longitude angle of a typical data point

K = Fisher's constant

ขนาด magnitude ผลลัพธ์ของทิศทางเวกเตอร์ (R) จะมีความสัมพันธ์กับค่า
ของ x, y, z Cartesian components ของค่าเวกเตอร์ผลลัพธ์ (เวกเตอร์เฉลี่ย)
ในแต่ละทิศทางเป็น

$$R = [r_x^2 + r_y^2 + r_z^2]^{1/2} \quad (18)$$

กำหนดให้

R = resultant (mean) of vector magnitude

r_x = resultant of vector magnitude in x component

r_y = resultant of vector magnitude in y component

r_z = resultant of vector magnitude in z component

ในการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ Watson (1966) ได้รวบรวมงานวิจัยในเรื่อง
ของ circular normal distribution มีผลสรุปว่า ถ้าหากให้ N เป็นจำนวนตัวเลข
ทั้งหมดของกลุ่มข้อมูลที่เป็นจุดพล็อตบนการฉายภาพทรงกลม หรือที่เรียกว่า "observed
unit vectors or directions" ของกลุ่มข้อมูลเล็กๆ (cluster) ที่จับกลุ่มอย่าง
หนาแน่นในทิศทางแนวหนึ่ง พบว่าความยาวของเวกเตอร์ผลลัพธ์ (R) ของ N vectors
จะมีค่าสูง (ใหญ่) เกือบเท่ากัน [นั่นคือค่า R ประมาณใกล้เคียงกับค่า N] แต่ถ้า
ปรากฏว่า N vectors มีการกระจัดกระจายสูง (highly dispersed) ค่าผลลัพธ์
เวกเตอร์, R จะมีค่าต่ำ (เล็ก) แสดงว่า expression ของ $(N-R)$ เป็นค่าที่
แสดงถึง a measure of vector dispersion นั่นคือ

$$K = 1/(N - R) \quad (19)$$

จากความรู้ทางคณิตศาสตร์เมื่อประยุกต์ method of maximum likelihood จะพบว่าค่าคงที่ K ที่เป็น estimator มีความสัมพันธ์กับสมการที่ 18 และ 19 เป็น

$$\coth(K) - 1/K = R/N \quad (20)$$

ซึ่งถ้าหากค่าคงที่ของ Fisher, K มีค่ามากกว่า 3 [ในทางปฏิบัติเชิงภาคสนามหายากมากกว่าค่า K น้อยกว่า 5; Priest, 1985 หน้า 46] จะได้ผลเฉลยเป็นค่า solution ที่ค่อนข้างแม่นยำ ในการหาค่า estimator สำหรับ frequency distribution ที่พล็อตบน hemispherical projection ได้แก่

$$K = (N - 1)/(N - R) \quad (21)$$

3.2.2 วิธีการวิเคราะห์ของ Priest

Priest (1985, 1992) ได้ปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ของ Fisher ขึ้นมาใหม่ ลักษณะที่เปลี่ยนแปลงเด่นๆ ที่แตกต่างจากวิธีการเดิม มี 2 ข้อ

1. วิธีการของ Fisher จะใช้ค่ากลุ่มข้อมูลดิบ เป็นค่าการวางตัวของระนาบความไม่ต่อเนื่อง สมมุติว่า วัด bedding plane ของหินตะกอน ก็จะพล็อตค่าทิศทางของ line of true dip direction of bed กับค่ามุมเอียงของ dip angle เป็นจุดหนึ่งของ discontinuities attitude บน hemispherical projection แต่วิธีการของ Priest จะแปลงค่าการวางตัวของระนาบเป็นค่า a pole of discontinuity planes แต่เพื่อป้องกันการสับสนของคำว่า "pole to a plane" คณะผู้วิจัยจึงไม่เรียกชื่อเป็น pole แต่จะเรียกชื่อใหม่เป็น normal to a plane ทั้งนี้เพราะว่าตามวิธีการของ Priest นี้ ค่า normal เป็นเส้นสมมุติ (imaginary line) ที่ลากตั้งฉากกับระนาบของ a given discontinuity plane นั่นคือ

$$\alpha_n = \alpha_d \pm 180^\circ \quad 0^\circ \leq \alpha_n \leq 360^\circ \quad (22)$$

$$\beta_n = 90^\circ - \beta_d \quad (23)$$

กำหนดให้

α_n = trend of normal direction

α_d = trend of maximum dip direction

β_n = plunge of normal angle

β_d = plunge of maximum dip angle

2. วิธีการของ Fisher ไม่ได้นำค่าของ weighted factor เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าคงที่ ที่เป็น estimate of precision แต่วิธีการของ Priest ได้ นำค่า weighted value มาคูณเพื่อ normalized ข้อมูลดิบให้มีค่าเป็น unity เป็นป้องกันการเกิด sampling bias ของการสำรวจในแนวเส้นตรง (linear survey)

3.2.3 รายละเอียดของการวิเคราะห์ข้อมูลความไม่ต่อเนื่อง

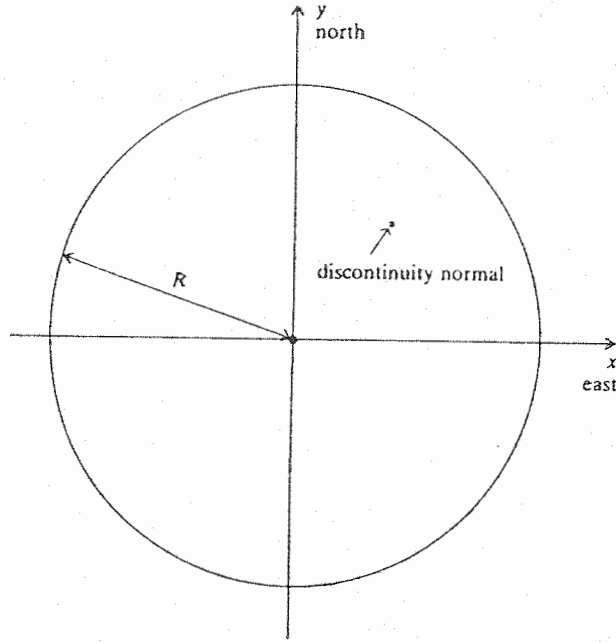
คณะผู้วิจัยได้ปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมทั้ง 2 วิธีการของ Fisher และ Priest เพื่อให้สามารถวิเคราะห์หาข้อมูลความไม่ต่อเนื่อง ที่ได้จากการตรวจวัดในแนวสัมผัสตัวอย่าง แนวใดแนวหนึ่ง หรือหลายแนวพร้อมกันในหน้าเหมืองเดียวกัน โดยลำดับขั้นตอนให้สามารถตัดแปลงเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ในภายหลัง และแบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 2 แบบ คือ แบบแรกเป็นการวิเคราะห์แบบธรรมดาโดยไม่อาศัยองค์ประกอบของตัวเลขน้ำหนัก กับ แบบที่สองเป็นการวิเคราะห์โดยองค์ประกอบของตัวเลขน้ำหนัก

1. การวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Unweighted

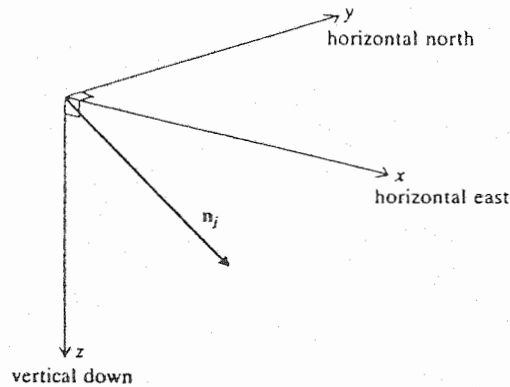
ลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของแนวทิศทาง (trend) กับมุมเอียง (plunge) ของ discontinuity normals มีดังนี้

1) ทำการแปลงค่าข้อมูลดิบ (raw data) การวางตัวสำหรับระนาบของความไม่ต่อเนื่อง จากค่าของ dip direction เป็นค่าของ normal trend และจากค่าของ dip angle เป็นค่าของ plunge angle โดยใช้สมการที่ 22 และ 23 หน้า 26

2) พล็อตข้อมูลของแต่ละจุดของ discontinuity normal ลงบน equal angle stereo net



รูปที่ 9a แสดงให้เห็นพื้นที่วงกลมของการฉายภาพ 3 มิติ กำหนดให้วงกลมมีรัศมีเท่ากับ R และในรูปร่างจัดให้มีความสัมพันธ์กับแต่ละค่าของ x, y Cartesian coordinate system จุดในวงกลมเป็นค่า discontinuity normal ของข้อมูลดิบ



รูปที่ 9b เป็นภาพกราฟิกแสดงถึงระบบ left-handed Cartesian coordinate system ซึ่งแกนบวกของ x อยู่ในแนวราบทางทิศตะวันออก (trend 90°) แกนบวกของ y อยู่ในแนวราบทางทิศเหนือ (trend 0°) และแกนบวกของ z อยู่ในแนวตั้งชี้มาทางด้านล่าง (plunge 90°)

3) พิจารณาการจับกลุ่มข้อมูลของแต่ละเขต โดยกำหนดพิสัย (range) ของค่า trend ว่าอยู่ระหว่างค่าที่เท่าไร ถึงค่าที่เท่าไร (ควรเขียนขอบเขตบน plotted net)

4) แปลงค่าของ discontinuity normal แต่ละค่าให้เป็นค่าเวกเตอร์ของทั้ง 3 แกนของ Cartesian coordinates (ดูรูปเปรียบเทียบ ระหว่าง 9a และ 9b) ดังนั้นจะได้หาความสัมพันธ์ได้ค่า x, y, z Cartesian components ของจุดปลาย (terminal point) ของเวกเตอร์ n_j (ดูรูปที่ 9b) ที่สมมติให้ขนานกับแนว " j^{th} " discontinuity normal ที่เขียนเป็นสัญลักษณ์ n_{jx}, n_{jy}, n_{jz} ตามลำดับได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} n_{jx} &= \sin \alpha_{nj} \cos \beta_{nj} \\ n_{jy} &= \cos \alpha_{nj} \cos \beta_{nj} \\ n_{jz} &= \sin \beta_{nj} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

โดยที่

n_{jx}, n_{jy}, n_{jz} = orientation of j^{th} normal vector for x, y, z components, respectively

α_{nj} = trend of j^{th} normal

β_{nj} = plunge of j^{th} normal

หากกำหนดให้มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด เท่ากับ N จะ ได้ค่าของ $j = 1$ ถึง N

5) ทำการหาผลลัพธ์ของเวกเตอร์ n_j ที่สมมติให้เป็นค่าเฉลี่ยของ orientation สำหรับ discontinuity normals หรือเรียกสั้นๆว่า mean normal เริ่มต้นโดยกำหนดให้ ผลลัพธ์ของเวกเตอร์เฉลี่ยของ normals (ใช้สัญลักษณ์ r_n) มีค่าผลลัพธ์สำหรับเวกเตอร์แต่ละแกนเป็น r_x, r_y, r_z จะ ได้ expressions ของ

$$\left. \begin{aligned} r_x &= \sum_{j=1}^N n_{jx} \\ r_y &= \sum_{j=1}^N n_{jy} \\ r_z &= \sum_{j=1}^N n_{jz} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

จากสมการที่ 25 จะหาแมกนิจูดของผลลัพธ์ค่าเฉลี่ย normals (ใช้สัญลักษณ์ R) เช่นเดียวกับสมการที่ 18 หน้า 25 นั่นคือ

$$R = [r_x^2 + r_y^2 + r_z^2]^{1/2}$$

6) ทำการคำนวณหาค่าของ trend และของ plunge จากสมการ

$$\alpha_{rn} = \arctan \{r_x/r_y\} + q \quad (26)$$

$$\beta_{rn} = \arctan [r_z \cdot \{r_x^2 + r_y^2\}^{1/2}] \quad (27)$$

อย่างไรก็ตามยังต้องมีเงื่อนไขสำหรับค่าพารามิเตอร์ q ที่เป็นค่ามุม (degree) ของสมการที่ 26 ทั้งหมด 3 ทั้งหมด 3 เงื่อนไข

- ก) ถ้าหากว่า $r_x \geq 0$ และ $r_y \geq 0$ จะได้ค่า $q = 0^\circ$
- ข) ถ้าหากว่า $r_x < 0$ และ $r_y \geq 0$ จะได้ค่า $q = 360^\circ$
- ค) ในกรณีที่ไมเข้าเงื่อนไขทั้ง ข้อ ก) และ ข้อ ข) จะได้ค่า $q = 180^\circ$

7) วิเคราะห์หาความน่าเชื่อถือของกลุ่มตัวอย่าง โดยทดสอบด้วย ค่าคงที่ของ Fisher ตามสมการที่ 21 หน้า 26 นั่นคือ

$$K = (N - 1)/(N - R)$$

8) ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติม ทางด้านความเป็นไปได้ (probability) และหาค่ามุม cone angle ของกลุ่มข้อมูลที่พล็อตบน stereo net รายละเอียดจะกล่าวต่อไปในเรื่องการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ตัวเลขน้ำหนัก

2. การวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Weighted and Normalized

การวิเคราะห์ข้อมูลแบบนี้เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของแนวทิศทาง (trend) ที่มี การปรับค่า (normalized) และได้ทำการคูณข้อมูลวิเคราะห์ด้วยตัวเลขน้ำหนัก (weighted

value) แล้ว ก่อนที่จะหาขนาดแมกนิจูดของผลลัพธ์ ลำดับขั้นตอนจะคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์แบบธรรมดา ตามรายละเอียดดังนี้

- 1) แปลงข้อมูลดิบให้เป็นค่า trend และ plunge ของ discontinuities
- 2) พล็อตข้อมูลลงบน equal angle stereo net
- 3) พิจารณาพิสัยและขอบเขตสำหรับกลุ่มของข้อมูลในแต่ละเซต
- 4) คำนวณค่า weighted factor ของ j^{th} normal (ใช้สัญลักษณ์ w_j) ซึ่งการที่จะหาค่า w_j มีหลายขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่หนึ่ง

จากการทำ joint survey จะพบว่ามีข้อผิดพลาด (error) เกิดขึ้นในแต่ละเซตของการสำรวจในแนวเส้นลุ่มตัวอย่าง Terzaghi (1965) ได้เสนอวิธีแก้ไข โดยให้เพิ่มค่า weighted sample size (N_i) ลงในกลุ่มข้อมูล

$$N_i = 1/\cos \delta_i \quad (28)$$

โดย

$$N_i = \text{weight sample size for } i^{\text{th}} \text{ set}$$
$$\delta_i = \text{acute angle between the normal to the } i^{\text{th}} \text{ set and the sampling line}$$

ขั้นตอนที่สอง

คำนวณค่าของตัวเลขน้ำหนักของ normal เดี่ยว โดยกำหนดให้มี single discontinuity สามารถจะเปรียบเทียบค่า weighted sample size (N_i) เป็นค่า weighted factor (w) ที่ใช้เป็นค่าคูณเฉพาะแต่ละค่าของการวางตัวของ normal

$$w = 1/\cos \delta \quad (29)$$

ขั้นตอนที่สาม

คำนวณหาค่าความสัมพันธ์ในเรื่องเส้นต่างๆของ trend และ plunge ที่พล็อตด้วยวิธีการ hemisphere projection ถ้าหากกำหนดให้มุม θ เป็นมุมระหว่างเส้นคู่หนึ่งของ trends มีค่าทิศทางเป็น α_1, α_2 และมีค่ามุม plunges เป็น β_1, β_2 ในเชิงเรขาคณิตจะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\cos \theta = \cos (\alpha_1 - \alpha_2) \cos \beta_1 \cos \beta_2 + \sin \beta_1 \sin \beta_2 \quad (30)$$

เมื่อนำสมการที่ 30 มาประยุกต์ใช้กับ cosine of acute angle จะได้สมการสำเร็จรูปในการคำนวณหาค่า weighting factor (w) สำหรับ normal เดี่ยว ของข้อมูลดิบแต่ละค่า เป็น

$$w = \frac{1}{|\cos (\alpha_n - \alpha_s) \cos \beta_n \cos \beta_s + \sin \beta_n \sin \beta_s|} \quad (31)$$

5) ถ้าหากพิจารณากลุ่มของ N discontinuities ที่สมมุติอยู่ในเขตเดียวกัน กำหนดให้ n_j เป็นค่าของ vector of normal of j^{th} discontinuity จะได้ค่าของ total weighted sample size, N_w ของแต่ละเขตเป็น

$$N_w = \sum_{j=1}^N w_j \quad (32)$$

ค่าของ N_w ที่คำนวณได้มีค่าประมาณ 2-5 เท่าของค่า N

6) เนื่องจากขนาดของ sample size มีความสำคัญอย่างมากต่อความถูกต้องแม่นยำของการประมาณการข้อมูลเป็นอย่างมาก จึงจำเป็นต้องปรับค่า (normalized) ของแต่ละค่าของ weighting factor, w_j ในเชิงสถิติจะได้ค่า normalized weighting factor, w'_j สำหรับเป็นตัวเลขขององค์ประกอบน้ำหนักคูณเข้าไปในการหาขนาดแมกนิจูดของ j^{th} discontinuity ใน Cartesian coordinates

$$w'_j = w_j N / N_w \quad (33)$$

7) ทำการคำนวณ orientation ของเวกเตอร์สำหรับ normal แต่ละค่าใน x, y, z Cartesian components โดยใช้สมการที่คล้ายคลึงกับสมการที่ 24 หน้า 29 แตกต่างเพียงแต่คูณด้วยค่าแมกนิจูด w'_j นั่นคือ

$$\left. \begin{aligned} n_{jx} &= w'_j \sin \alpha_{nj} \cos \beta_{nj} \\ n_{jy} &= w'_j \cos \alpha_{nj} \cos \beta_{nj} \\ n_{jz} &= w'_j \sin \beta_{nj} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

8) คำนวณหาผลลัพธ์เฉลี่ยของเวกเตอร์ r_x, r_y, r_z โดยใช้สมการเดียวกับสมการที่ 25 หน้า 29 และหาแมกนิจูดของผลลัพธ์ค่าเฉลี่ย normals ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ใหม่เป็น R_w (เพราะมีการ weighted and normalized)

$$R_w = [r_x^2 + r_y^2 + r_z^2]^{1/2} \quad (35)$$

9) ทำการคำนวณหาค่า mean ของ trend และ plunge โดยใช้สมการเช่นเดียวกับสมการที่ 26 และ 27 หน้า 30

10) หาค่าคงที่ของ Fisher เพื่อวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของกลุ่มตัวอย่างข้อมูล โดยใช้ค่า R_w แทนค่า R ในสมการเดิม

$$K = [N - 1]/[N - R_w] \quad (36)$$

11) ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมในเรื่องความเป็นไปได้ (probability) ของเวกเตอร์ที่เลือกแบบ random (นั่นคือไม่มีการ bias) จากกลุ่มตัวอย่าง ทำมุมของ cone angle (มุมของข้อมูล 2 มิติที่เป็นจุดบนเส้นรอบวงของวงกลม) อยู่ระหว่าง θ กับ $\theta + d\theta$ กับแนวทิศทางของ true orientation ได้ความสัมพันธ์เชิงสถิติสำหรับ distribution ของ cluster ที่อยู่รอบ a great circle เป็น

$$D_d = e^{K \cos 2\theta} \quad (37)$$

กำหนดให้

D_d = density of distribution

K = Fisher's constant (more than zero)

θ = cone angle of scattering about some central direction

ถ้าหากค่า N มีขนาดใหญ่ (เช่นมากกว่า 30) จะได้ Fisher's distribution, K คล้ายคลึงกับ normal (Gaussian) distribution ซึ่งมีค่า variance เป็น $1/K$ ทำให้สามารถประมาณค่าความเป็นไปได้ [probability value, $P(\theta)$] ออกเป็น 2 แบบ

a) แบบแรก ได้ค่า $P_1(<\theta)$ ซึ่งเป็นค่าความเป็นไปได้ ที่เวกเตอร์เดี่ยวที่ถูกเลือกอย่าง random จากกลุ่มตัวอย่างข้อมูล ทำมุมอันหนึ่งของ cone angle น้อยกว่าค่า θ กับแนวทิศทางของ true orientation

b) แบบที่สอง ได้ค่า $P_2(<\theta)$ ซึ่งเป็นค่าความเป็นไปได้ ที่ผลลัพธ์เวกเตอร์ (r_n) ทำมุมอันหนึ่งของ cone angle น้อยกว่าค่า θ กับแนวทิศทางของ true orientation

จากสมมติฐาน 2 แบบข้างบนจะเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิง expressions เป็น ความเป็นไปได้แบบแรก

$$P_1(<\theta) = 1 - e^{-K(1 - \cos \theta)} \quad (38)$$

หรือทำการ inversion สมการที่ 38 เสียใหม่ จะได้

$$\cos \theta = 1 + \frac{\log_e [1 - P_1(<\theta)]}{K} \quad (39)$$

ความเป็นไปได้แบบที่สอง

$$P_2(<\theta) = 1 - e^{-KR_n(1 - \cos \theta)} \quad (40)$$

หรือทำการ inversion สมการที่ 40 หน้า 34 เสียใหม่ จะได้

$$\cos \theta \approx 1 + \frac{\log_e [1 - P_2(< \theta)]}{KR_w} \quad (41)$$

สมการที่ 38 และ 39 ใช้ทดสอบว่าแบบจำลองของการกระจายข้อมูล (distribution) ถูกต้องใกล้เคียงกับกลุ่มของ orientation data และสมการที่ 39 ยังใช้วิเคราะห์หาพิสัย (range) ต่างๆ ของ orientations for individual discontinuities ส่วนสมการที่ 41 ใช้หาพิสัยของ mean orientation of the set ซึ่งสมการที่ 41 นี้จะได้ zone of confidence จากค่า true mean orientation

12) ทำการตัดสินใจขั้นสุดท้ายว่า กลุ่มข้อมูลคิเบเขตใดน่าเชื่อถือมากที่สุด หรือกลุ่มใดมีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง หรือกลุ่มใดน่าจะมีความผิดพลาดสูงในการถูกเลือกเป็นตัวแทน (representative) ของการปรับเปลี่ยนตำแหน่ง (orientation) ข้อมูลความไม่ต่อเนื่อง โดยใช้ผลการวิเคราะห์ของทั้งแบบ unweighted และแบบ weighted and normalized

3.3 ตัวอย่างของการวิเคราะห์ความไม่ต่อเนื่องในหิน

ข้อมูลคิบที่ได้จากการตรวจวัดค่าการวางตัว (attitude) ของระนาบความไม่ต่อเนื่อง เช่น joint, bedding plane, fault สามารถทำการบันทึกจากบริเวณหน้าเหมืองหิน (quarry face) โดยผู้ที่ทำการบันทึก (นักธรณีวิทยาหรือวิศวกร) กำหนดเส้นแนวสุ่มตัวอย่าง (sampling line) ขึ้นมาซึ่งมักเลือกแนวที่สะดวกในการตรวจวัดที่เป็นแนวที่มีพื้นที่ที่จะวางเข็มทิศบนดินและอุปกรณ์ตรวจวัดอื่นๆ จากนั้นบันทึกเป็นตาราง

ตัวอย่างที่น่าเสนอ เพื่อแสดงวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลคิบของความไม่ต่อเนื่องจากการตรวจวัดจากหน้าเหมืองหิน (Priest, 1985; หน้า 49) กำหนดให้มีเส้นของแนวสุ่มตัวอย่าง 2 แนว คือ แนวแรกมีค่าของ dip direction/dip amount (angle) เท่ากับ 349/05 ส่วนแนวที่สองมีค่าของ dip direction/dip amount เท่ากับ 192/10 จำนวนค่าการวางตัวที่ทำการตรวจวัดของแนวแรก เท่ากับ 80 ค่า และแนวที่สอง เท่ากับ 82 ค่า (ดูข้อมูลคิบจากคอลัมน์แรกของตารางที่ 1-2 หน้า 36-39)

ตารางที่ 1 ข้อมูลดิบของการวางตัวของระนาบความไม่ต่อเนื่อง จากแนว
 สุ่มตัวอย่างแนวแรก 349/05 ในตารางยังแสดงการแปลงค่า
 เป็น normal to a plane [trend/angle] ที่คำนวณจาก
 สมการที่ 22-23 ตลอดจนค่าของ weighted factor, w_j
 ที่คำนวณจากสมการที่ 31

	dip/direction/ dip angle	normal trend/ normal angle	weighted factor (w_j ; $j = 1-N$)
1.	003/68	183/22	1.158
2.	004/49	184/41	1.495
3.	008/77	188/13	1.113
4.	009/85	189/05	1.081
5.	011/77	191/13	1.136
6.	017/24	197/66	3.595
7.	018/24	198/66	3.639
8.	018/87	198/03	1.155
9.	019/74	199/16	1.242
10.	050/58	230/32	2.752
11.	107/69	287/21	2.137
12.	108/81	288/09	2.038
13.	110/72	290/18	1.942
14.	113/67	293/23	1.829
15.	113/68	293/22	1.821
16.	114/70	294/20	1.764
17.	115/72	295/18	1.713
18.	116/63	296/27	1.742
19.	116/66	296/24	1.715
20.	116/68	296/22	1.699
21.	119/68	299/22	1.597
22.	123/69	303/21	1.476
23.	124/77	304/23	1.465
24.	126/48	306/42	1.667
25.	131/68	311/22	1.315
26.	132/75	312/25	1.319
27.	133/69	313/21	1.276
28.	139/64	319/26	1.229
29.	139/72	319/18	1.180
30.	141/52	321/38	1.339
31.	141/77	321/13	1.141
32.	147/71	327/19	1.109
33.	149/75	329/15	1.079
34.	150/70	330/20	1.093
35.	150/81	330/09	1.059
36.	152/57	332/32	1.179
37.	152/72	332/18	1.072
38.	152/73	332/17	1.068
39.	154/71	334/19	1.066
40.	154/75	334/15	1.050

ตารางที่ 1 (ต่อ) ข้อมูลคืบและผลการคำนวณค่า normal และ weighted factor จากแนวสัณทิวอย่างแนวแรก 349/05

dip/direction/ dip angle	normal trend/ normal angle	weighted factor (w_j ; $j = 1-N$)
41. 156/69	336/21	1.067
42. 158/76	338/14	1.031
43. 158/80	338/10	1.007
44. 158/84	338/06	1.019
45. 159/75	339/15	1.031
46. 163/74	343/16	1.024
47. 166/85	346/05	1.001
48. 168/79	348/11	1.006
49. 168/82	348/08	1.002
50. 171/84	351/06	1.001
51. 218/26	038/64	2.741
52. 263/10	083/80	13.56
53. 267/10	087/80	16.19
54. 267/34	087/56	189.8
55. 297/61	117/29	2.024
56. 300/56	120/34	2.028
57. 306/46	126/44	2.157
58. 307/14	127/76	10.58
59. 315/33	135/57	2.655
60. 320/17	140/73	5.835
61. 320/22	140/68	4.072
62. 321/31	141/59	2.643
63. 323/27	143/63	3.041
64. 327/24	147/66	3.378
65. 329/21	149/69	3.935
66. 329/31	149/59	2.454
67. 331/25	151/65	2.001
68. 332/16	152/74	5.593
69. 332/44	152/46	1.669
70. 332/60	152/30	1.280
71. 335/38	155/52	1.900
72. 335/47	155/43	1.544
73. 336/25	154/65	3.052
74. 347/47	167/43	1.495
75. 348/23	168/67	3.237
76. 351/30	171/60	2.368
77. 353/11	173/79	9.609
78. 354/61	174/29	1.211
79. 355/42	175/48	1.672
80. 356/36	176/54	1.976

ตารางที่ 2 ข้อมูลดิบของการวางตัวของระนาบความไม่ต่อเนื่อง จากแนว
 สุ่มตัวอย่างแนวที่สอง 192/10 ในตารางยังแสดงการแปลงค่า
 เป็น normal to a plane [trend/angle] ที่คำนวณจาก
 สมการที่ 22-23 ตลอดจนค่าของ weighted factor, w_j
 ที่คำนวณจากสมการที่ 31

dip/direction/ dip angle	normal trend/ normal angle	weighted factor (w_j ; $j = 1-N$)
1. 000/38	180/52	1.370
2. 002/68	182/22	1.037
3. 003/32	183/58	1.680
4. 003/47	183/43	1.205
5. 005/77	185/13	1.009
6. 008/72	188/18	1.012
7. 009/76	189/14	1.004
8. 011/52	191/38	1.133
9. 012/27	192/63	1.662
10. 014/72	194/18	1.010
11. 014/80	194/10	1.001
12. 015/78	195/12	1.002
13. 017/50	197/40	1.159
14. 029/76	209/14	1.046
15. 036/67	216/23	1.116
16. 044/18	224/72	2.363
17. 052/56	232/34	1.384
18. 093/57	273/33	4.469
19. 094/77	274/13	5.793
20. 100/65	280/25	9.566
21. 109/68	289/22	21.63
22. 111/71	291/19	11.22
23. 113/62	293/28	11.85
24. 113/74	293/16	7.530
25. 114/67	294/23	8.290
26. 115/69	295/21	6.916
27. 118/70	298/20	5.110
28. 120/54	300/36	6.938
29. 125/77	305/13	2.977
30. 130/64	310/26	2.034
31. 132/81	312/09	2.178
32. 133/67	313/23	2.506
33. 147/73	327/17	1.626
34. 151/72	331/18	1.531
35. 152/66	332/24	1.617
36. 152/70	332/20	1.540
37. 153/72	333/18	1.483
38. 153/74	333/16	1.454
39. 154/78	334/12	1.383
40. 154/89	334/01	1.294

ตารางที่ 2 (ต่อ) ข้อมูลดิบและผลการคำนวณค่า normal และ weighted factor จากแนวสัณฐานตัวอย่างแนวที่สอง 192/10

dip/direction/ dip angle	normal trend/ normal angle	weighted factor (w_j ; $j = 1-N$)
41. 156/74	336/16	1.393
42. 157/71	337/19	1.416
43. 157/73	337/17	1.388
44. 160/63	340/27	1.503
45. 160/71	340/19	1.364
46. 160/72	340/18	1.350
47. 160/79	340/19	1.364
48. 164/77	344/13	1.237
49. 166/80	346/10	1.188
50. 168/71	348/19	1.259
51. 170/77	350/13	1.176
52. 173/73	353/17	1.191
53. 190/67	010/23	1.193
54. 232/66	052/24	1.617
55. 263/20	083/70	18.68
56. 278/68	098/22	5.509
57. 286/24	106/66	5.360
58. 286/53	106/37	6.275
59. 291/25	111/65	4.495
60. 302/26	122/64	3.293
61. 304/17	124/73	3.651
62. 313/21	133/69	2.908
63. 313/27	133/63	2.597
64. 318/33	138/57	2.170
65. 324/24	144/66	2.344
66. 327/17	147/73	2.705
67. 328/62	148/28	1.414
68. 329/23	149/67	2.266
69. 329/27	149/63	2.076
70. 330/38	150/52	1.702
71. 333/28	153/62	1.951
72. 335/23	155/67	2.141
73. 336/44	156/46	1.474
74. 337/35	157/55	1.653
75. 337/46	157/44	1.427
76. 339/31	159/59	1.741
77. 340/26	160/64	1.915
78. 342/22	162/68	2.081
79. 345/30	165/60	1.697
80. 351/38	171/52	1.423
81. 352/16	172/74	2.370
82. 352/26	172/64	1.780

Solution

ผลเฉลยของปัญหานี้ จะแยกทำ 2 วิธีทั้งวิธีการวิเคราะห์แบบ unweighted และแบบ weighted and normalized แต่ไม่ว่าจะใช้วิธีการไหน ผู้วิเคราะห์ต้องพล็อต ข้อมูลดิบของค่าการวางตัวของ normal (คอลัมน์ที่ 2 ตารางที่ 1-2 หน้า 36-39) โดย พล็อตลงบน lower hemispherical net (นิยมใช้แบบ equal angle projection) ค่าที่พล็อตทั้งหมด 162 จุด (ทั้งสองแนวเส้นลุ่มตัวอย่าง)

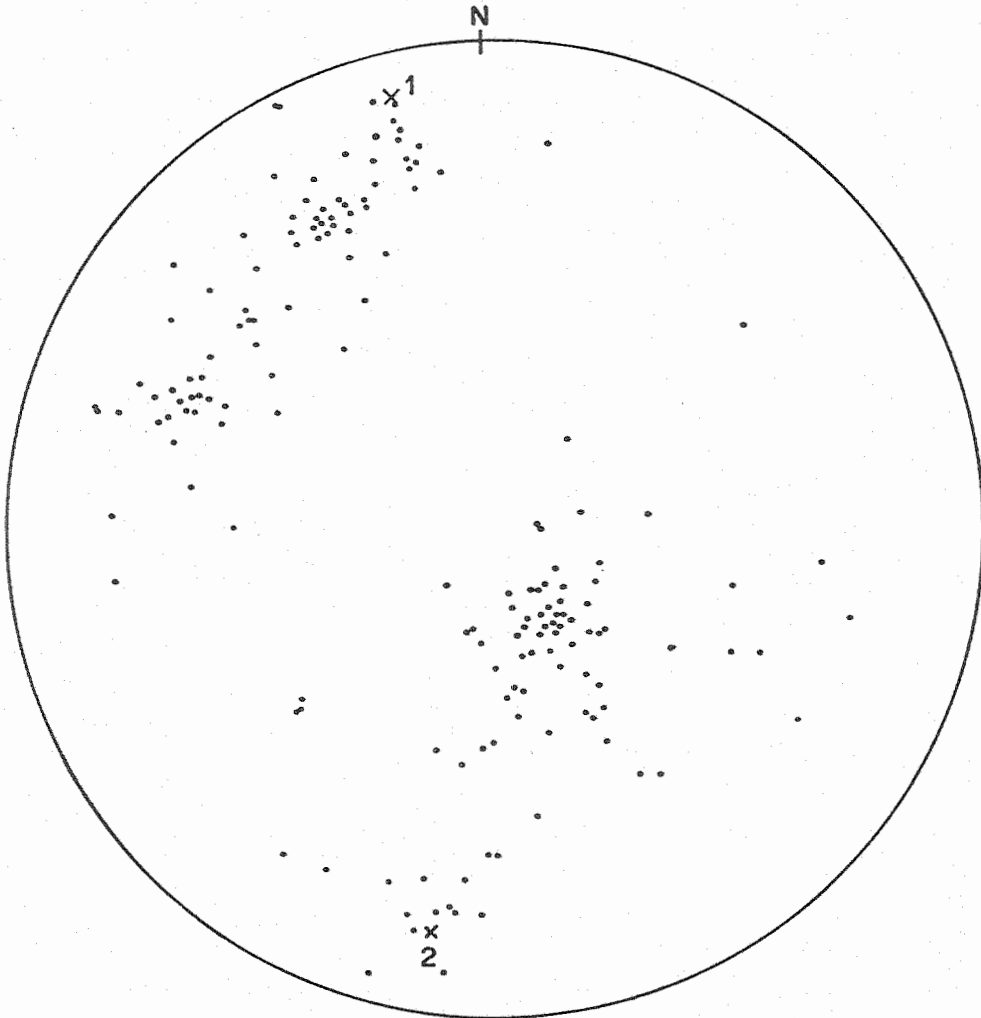
ในรูปที่ 10 หน้า 41 แสดงภาพกราฟฟิกของจุดต่างๆของ normal ที่พล็อต ลงบน net ซึ่งทำให้สามารถจัดเซตของข้อมูลที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป ออกได้เป็น 4 clusters บางกลุ่มตัวอย่างเล็กๆ (cluster) จะมีพิสัยของกลุ่มค่าเกี่ยวกับกลุ่ม ตัวอย่างอื่นได้ คณะผู้วิจัยแบ่งตามค่าของ normal trend direction (ค่า normal angle ที่อยู่ระหว่าง 0-90 องศาไม่ได้นำมาพิจารณา) ได้ดังนี้

a. เขตที่ 1 ค่าพิสัย normal trend อยู่ระหว่าง 030-260 องศา มีจำนวน ข้อมูลดิบ 86 ค่า ถ้าหากนับค่าตามแนวเส้นลุ่มตัวอย่างของตารางที่ 1-2 จะเป็น หมายเลขที่ 1-10 กับ 51-80 ของตารางที่ 1 และเป็นหมายเลข 1-17 กับ 54-82 ของตารางที่ 2

b. เขตที่ 2 ค่าพิสัย normal trend อยู่ระหว่าง 260-325 องศา มีจำนวน ข้อมูลดิบ 36 ค่า ถ้าหากนับค่าตามแนวเส้นลุ่มตัวอย่างของตารางที่ 1-2 จะเป็น หมายเลขที่ 11-31 ของตารางที่ 1 และเป็นหมายเลข 18-32 ของตารางที่ 2

c. เขตที่ 3 ค่าพิสัย normal trend อยู่ระหว่าง 315-030 องศา มีจำนวน ข้อมูลดิบ 44 ค่า ถ้าหากนับค่าตามแนวเส้นลุ่มตัวอย่างของตารางที่ 1-2 จะเป็น หมายเลขที่ 28-50 ของตารางที่ 1 และเป็นหมายเลข 33-53 ของตารางที่ 2

d. เขตที่ 2-3 (เป็นเขตข้อมูลกลุ่ม 4) ที่มีค่าพิสัยปกติ normal trend อยู่ระหว่าง 260-030 องศา มีจำนวนข้อมูลดิบ 76 ค่า ถ้าหากนับค่าตามแนวเส้น ลุ่มตัวอย่างของตารางที่ 1-2 จะเป็นหมายเลขที่ 11-50 ของตารางที่ 1 กับหมายเลข 18-53 ของตารางที่ 2



รูปที่ 10 ค่าของ discontinuity normals ทั้ง 162 จุด ถูกพล็อตลงบน equal angle stereo net ตำแหน่งของแนวเส้นลุ่มตัวอย่างแสดงเป็นรูปกากบาทพร้อมเลขอาระบิก หมายเลข 1 เป็นแนวเส้นลุ่มตัวอย่างแรก หมายเลข 2 เป็นแนวเส้นที่สอง

1. รายละเอียดการคำนวณผลของการวิเคราะห์แบบ Unweighted

1.1 ผลการคำนวณของเขต 1 ของ Unweighted

1.1.1 ใช้สมการที่ 24 หน้า 29 คำนวณหาค่าแต่ละค่าของ normal vector orientation สำหรับ Cartesian coordinates ตัวอย่างเช่นค่าที่คำนวณจาก discontinuity normal 183/22 [หมายเลข 1 ในตารางที่ 1] จะได้

$$n_{jx} = -0.0485$$

$$n_{jy} = -0.9259$$

$$n_{jz} = 0.3746$$

1.1.2 ทำการหาผลลัพธ์ทั้ง 86 ค่า สำหรับ normal vector orientations ของเขตที่ 1 [ซึ่งได้ระบุว่ามีความยาวไว้หน้า 40] โดยใช้สมการที่ 25 หน้า 29 จะได้

$$r_x = 10.9116$$

$$r_y = -41.3387$$

$$r_z = 61.0687$$

1.1.3 ทำการคำนวณหาขนาดแมกนิจูดของผลลัพธ์ค่าเฉลี่ย normal orientation โดยใช้สมการที่ 18 หน้า 25 จะได้

$$R = 74.55$$

1.1.4 หาค่าของ mean trend direction และ mean plunge angle จากสมการ 26 และ 27 ตามลำดับ จะได้

$$\alpha_{rn} = 165.2^\circ$$

$$\beta_{rn} = 55.0^\circ$$

1.1.5 คำนวณหาค่าคงที่ของ Fisher สำหรับข้อมูลเขตที่ 1 และ
ไม่ได้คิดตัวเลของค์ประกอบน้ำหนัก โดยใช้สมการที่ 21 หน้า 26 จะ ได้

$$F = 7.42$$

1.2 ผลการคำนวณของเขตอื่นของ Unweighted

การทำกรคำนวณในเขตอื่นก็มีลำดับขั้นตอนเดียวกับหัวข้อ 1.1 คณะผู้วิจัย ได้
บันทึกผลการคำนวณเขตอื่น ไว้ในหัวข้อนี้ ได้แก่

1.2.1 ค่าต่างๆของตัวแปรในเขตที่ 2 ที่มีข้อมูลดิบจำนวน 36 ค่า

$$r_x = -28.2097$$

$$r_y = 15.8038$$

$$r_z = 13.5388$$

$$R = 35.06$$

$$\alpha_{rn} = 299.3^\circ$$

$$\beta_{rn} = 22.7^\circ$$

$$F = 37.23$$

1.2.2 ค่าต่างๆของตัวแปรในเขตที่ 3 ที่มีข้อมูลดิบจำนวน 44 ค่า

$$r_x = -16.1760$$

$$r_y = 38.0187$$

$$r_z = 12.4218$$

$$R = 43.14$$

$$\alpha_{rn} = 336.9^\circ$$

$$\beta_{rn} = 16.7^\circ$$

$$F = 50.0$$

1.2.3 ค่าต่างๆของตัวแปรในเขต 2-3 (เขตที่ 4) ที่มีข้อมูลดิบจำนวน 76 ค่า

$$r_x = -42.0633$$

$$r_y = 51.0569$$

$$r_z = 24.3725$$

$$R = 70.49$$

$$\alpha_{rn} = 320.5^\circ$$

$$\beta_{rn} = 20.2^\circ$$

$$F = 13.61$$

2. รายละเอียดการคำนวณผลของการวิเคราะห์แบบ Weighted and Normalized

2.1 ผลการคำนวณของเขต 1 ของ Weighted and Normalized

2.1.1 ทำการคำนวณหาค่า total weighted sample size, N_w โดยใช้สมการที่ 34 หาผลรวมของ w_j จำนวนทั้งหมด 86 ค่า [แต่ละค่าของ w_j ได้แสดงไว้ในคอลัมน์ที่สามของตารางที่ 1-2] ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ N_w สำหรับเขต 1 เป็น

$$N_w = 435.924$$

2.1.2 คำนวณหาค่า normalized weighted factor, w'_j โดยใช้สมการที่ 33 หน้า 32

ตัวอย่างเช่น discontinuity normal 183/22 [หมายเลข 1 ใน ตารางที่ 1] มีค่า weighted factor, w_j เท่ากับ 1.158 จะแปลงได้ค่า w'_j เป็น

$$w'_j = 0.2285$$

2.1.3 นำค่า w'_j มาใช้ในการคำนวณหาค่าแต่ละค่าของ normal vector orientation สำหรับ Cartesian coordinates โดยใช้สมการที่ 34 หน้า ที่ 33 ค่าที่คำนวณจาก discontinuity normal 183/22 มีค่าเป็น

$$n_{jx} = -0.0111$$

$$n_{jy} = -0.2116$$

$$n_{jz} = 0.0856$$

2.1.4 ทำการหาผลลัพธ์ทั้ง 86 ค่า สำหรับ normal vector orientations ของเขตที่ 1 โดยใช้สมการที่ 25 หน้า 29 จะได้

$$r_x = 30.3016$$

$$r_y = -13.5743$$

$$r_z = 71.1105$$

2.1.5 ทำการคำนวณหาขนาดแมกนิจูดของผลลัพธ์ค่าเฉลี่ย normal orientation โดยใช้สมการที่ 35 หน้า 33 จะได้

$$R_w = 78.48$$

2.1.6 หาค่าของ mean trend direction และ mean plunge angle จากสมการ 26 และ 27 ตามลำดับ จะได้

$$\alpha_{rn} = 114.1^\circ$$

$$\beta_{rn} = 65.0^\circ$$

2.1.7 คำนวณหาค่าคงที่ของ Fisher สำหรับข้อมูลเขตที่ 1 และที่คิด
ตัวเลของค์ประกอบน้ำหนักและมีการปรับค่า โดยใช้สมการที่ 36 หน้า 33 จะได้

$$F = 11.30 \text{ (weighted and normalized)}$$

2.2 ผลการคำนวณของเขตอื่นของ Weighted and Normalized

การคำนวณในเขตอื่นก็มีลำดับขั้นแบบเดียวกับหัวข้อ 2.1 ผลเขตอื่น ได้แก่

2.2.1 ค่าต่างๆของตัวแปรในเขตที่ 2 ที่มีข้อมูลดิบจำนวน 36 ค่า

$$N_w = 142.411$$

$$r_x = -29.8034$$

$$r_y = 12.9435$$

$$r_z = 13.8524$$

$$R_w = 35.32$$

$$\alpha_{rn} = 293.5^\circ$$

$$\beta_{rn} = 23.1^\circ$$

$$F = 51.47 \text{ (weighted and normalized)}$$

2.2.2 ค่าต่างๆของตัวแปรในเขตที่ 3 ที่มีข้อมูลดิบจำนวน 44 ค่า

$$N_w = 53.803$$

$$r_x = -16.3212$$

$$r_y = 37.9345$$

$$r_z = 12.6334$$

$$R_w = 43.19$$

$$\alpha_{rn} = 336.7^\circ$$

$$\beta_{rn} = 17.0^\circ$$

$$F = 53.09 \text{ (weighted and normalized)}$$

2.2.3 ค่าต่างๆของตัวแปรในเซต 2-3 (เซตที่ 4) ที่มีข้อมูลดิบจำนวน

76 ค่า

$$N_w = 191.325$$

$$r_x = -53.6844$$

$$r_y = 37.4311$$

$$r_z = 27.6265$$

$$R_w = 71.04$$

$$\alpha_{rn} = 304.9^\circ$$

$$\beta_{rn} = 22.9^\circ$$

$$F = 15.12 \text{ (weighted and normalized)}$$

3.3 การตัดสินใจขั้นสุดท้ายของข้อมูลความไม่ต่อเนื่องที่ได้วิเคราะห์

วิธีการเชิงสถิติที่ควรนำมาใช้ก่อนทำการตัดสินใจขั้นสุดท้าย ก็คือ การนำค่าของ probability และ zone of confidence มาพิจารณาประกอบ

3.3.1 การพล็อตค่าความเป็นไปได้กับมุม Cone Angle

จากตัวอย่างในหัวข้อ 3.3 เมื่อนำค่าคงที่ของ Fisher มาวิเคราะห์ว่า พิสัยของ individual orientations มีความน่าเชื่อถือหรือไม่? ก็ประยุกต์ใช้สมการ

ที่ 38 หน้า 34 ซึ่งเป็นการศึกษาทดสอบว่า มีความเป็นไปได้ที่เวกเตอร์ของ discontinuity normals ที่ทำการเลือกแบบ random จะทำน้อยกว่าค่ามุม θ ของ cone (solid) angle (วัดเทียบกับ mean normal) ที่ค่าความเป็นไปได้ที่ค่าใด

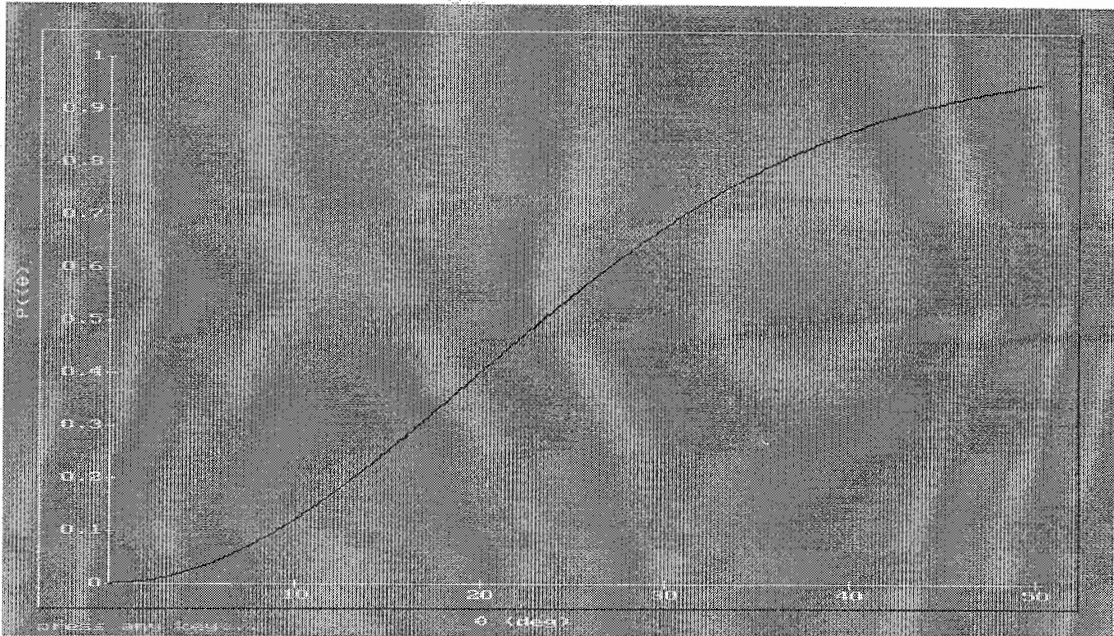
กราฟที่พล็อตหาความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความเป็นไปได้ [$P(<\theta)$] ของกลุ่มตัวอย่าง discontinuity normals กับค่ามุม θ ที่เทียบกับค่า true mean normal ได้แสดงไว้ในรูปที่ 11-18 หน้า 49-52 พิจารณาโดยทั่วไป กราฟของเขต 1 มีค่ามุมของ θ สูง แต่ probability ต่ำกว่าเขตอื่น ซึ่งเป็นข้อน่าสังเกตอย่างหนึ่งว่ากลุ่มของ cluster เขต 1 จับกลุ่มไม่ดีกระจุกกระจาย (ดูจากค่าคงที่ของ Fisher ต่ำด้วย)

3.3.2 การพิจารณา Zone of Confidence

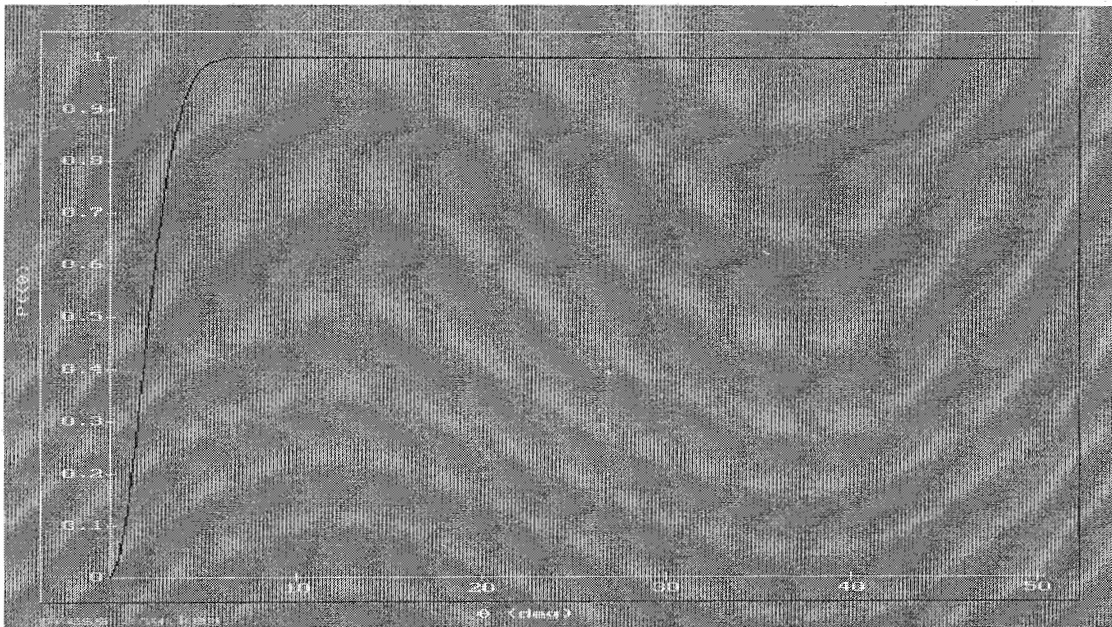
ถ้าหากผู้ทำการวิเคราะห์กำหนดค่าของ confidence zones ขึ้นมา 2-3 ค่า แล้วนำไปแทนค่าหาค่ามุมที่เบี่ยงเบนไปจาก center ของ true orientation ก็จะช่วยทำให้การพิจารณาง่ายขึ้น

ค่าที่นำเสนอในตารางที่ 3 หน้า 53 เป็นการแทนค่าของ 90% และ 95% confidence zone limits ลงในสมการที่ 41 หน้า 35 ของข้อมูลทั้ง 4 เขตทั้งที่มีการวิเคราะห์แบบธรรมดา (unweighted) และมีการวิเคราะห์แบบ weighted and normalized (ใช้สัญลักษณ์ w ในตาราง) ก็จะพบว่าเขต 1 มีการเบี่ยงเบนสูง ซึ่งค่ามุม θ สูงสุดที่ 95% confidence เท่ากับ 5.97 องศา สามารถสรุปได้ว่า มีความแน่ใจ (certainty) ได้ 95% ว่า true mean orientation ของเขต 1 อยู่ที่ค่าประมาณ 6 องศา เบี่ยงเบนจากค่าที่คำนวณได้ของทั้ง unweighted และ weighted

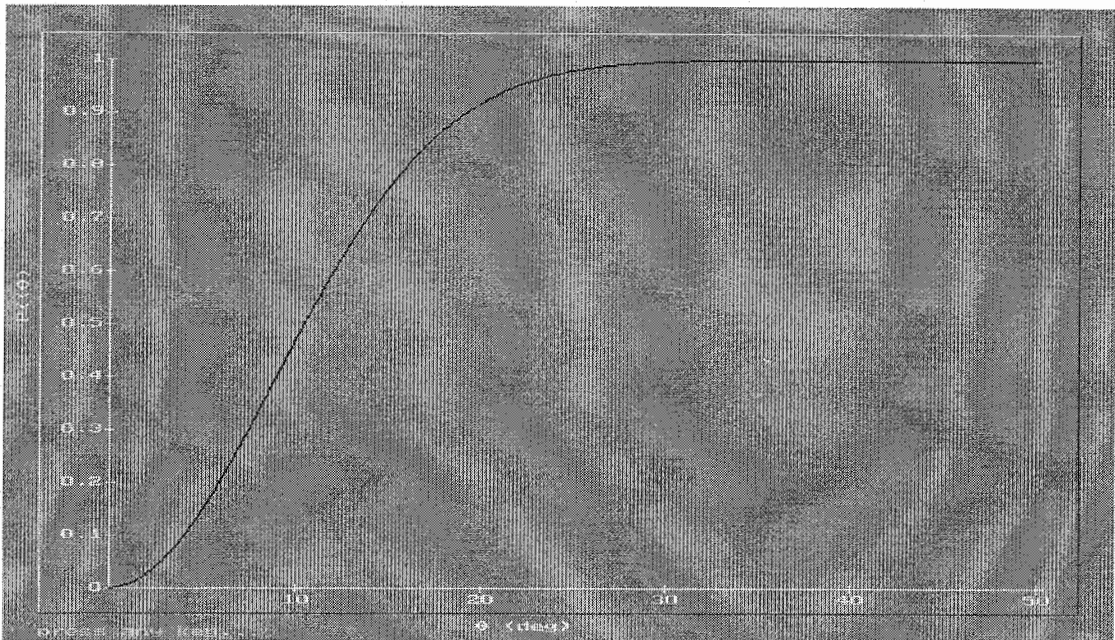
เมื่อนำค่า estimate of precision ต่างๆ ไม่ว่าจะ เป็นค่าคงที่ของ Fisher ค่า probability และค่า cone angle ที่ทราบค่าระดับเปอร์เซ็นต์ของความน่าเชื่อถือ มาประกอบการตัดสินใจ จะพบว่า กลุ่ม clusters ทั้ง 3 กลุ่ม คือ เขต 2, เขต 3, เขต 2 กับ 3 มีค่าคงที่ของ Fisher สูง กลุ่มข้อมูลมีการจับกลุ่มใกล้เคียงกับ true mean ดี และค่ามุมที่เบี่ยงเบนไปจาก center of orientation มีค่าต่ำ ประกอบ กับค่าเฉลี่ยความแตกต่างสูงสุดของ mean of normal trend ระหว่างข้อมูลที่วิเคราะห์ด้วยวิธี unweighted กับ weighted and normalized ในแต่ละเขต



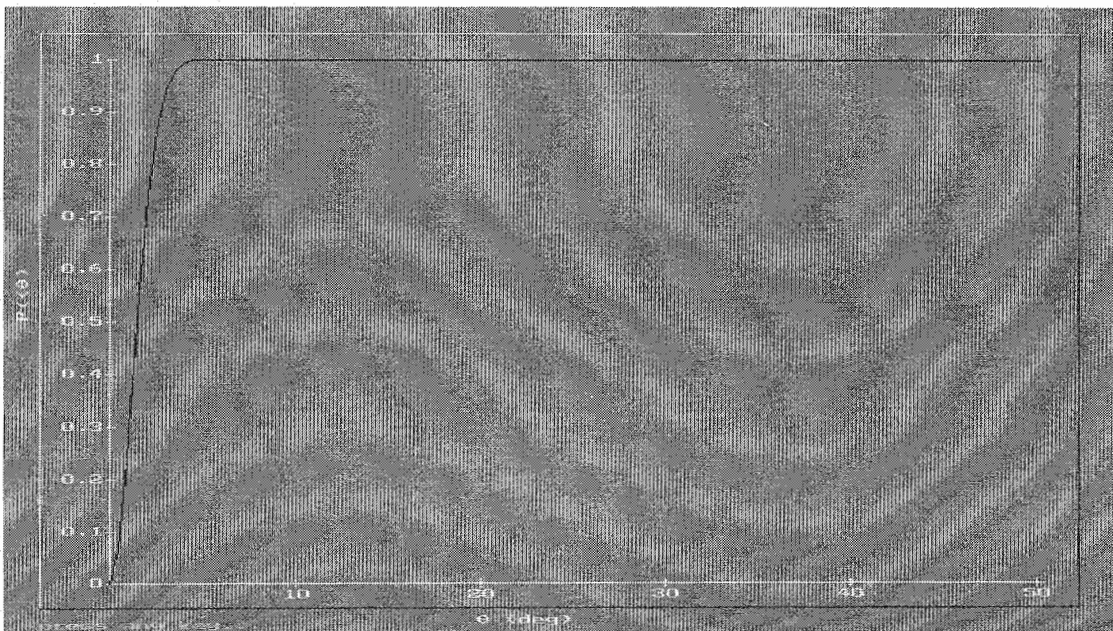
รูปที่ 11 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้ $P(<\mathit{\theta})$ กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle (θ) ของเซต 1 - unweighted



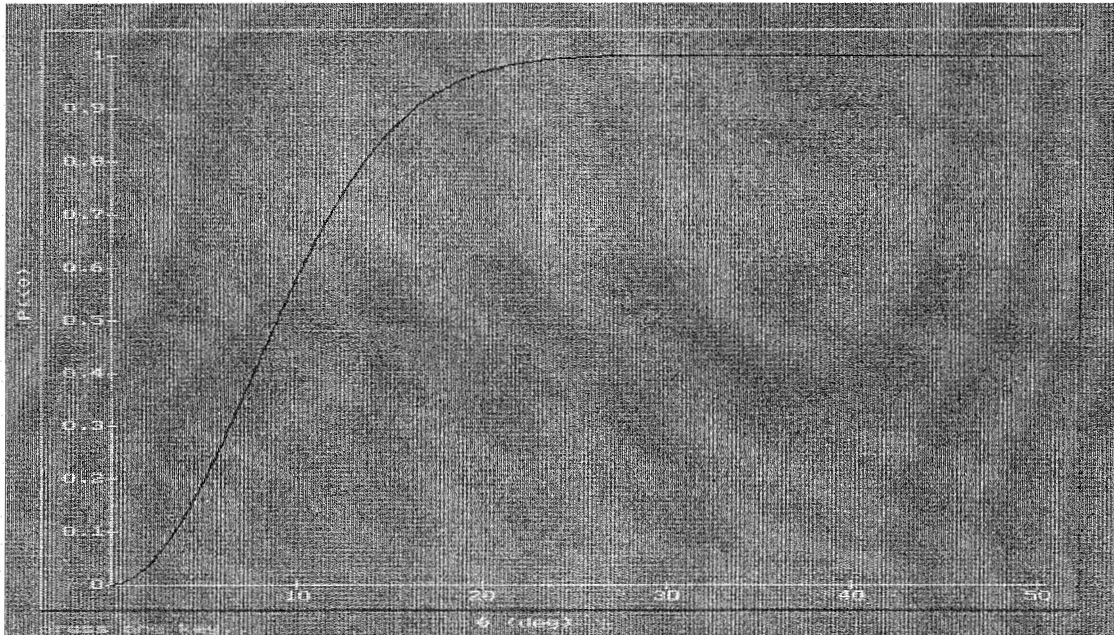
รูปที่ 12 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้ $P(<\mathit{\theta})$ กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle (θ) ของเซต 1 - weighted & normalized



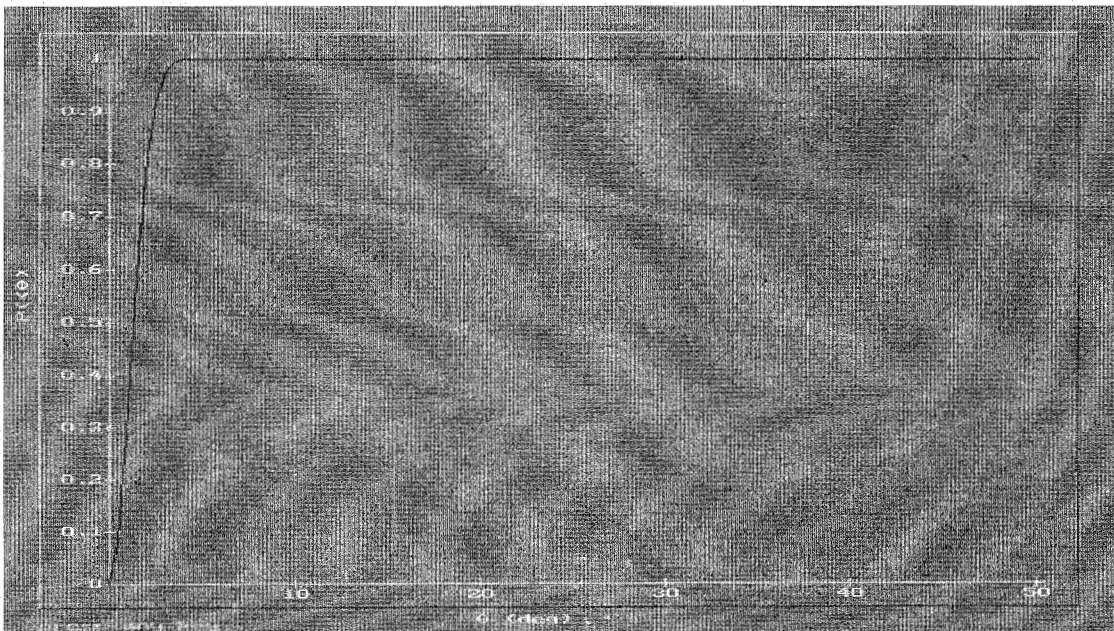
รูปที่ 13 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้ $P(< \theta)$ กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle (θ) ของเซต 2 - unweighted



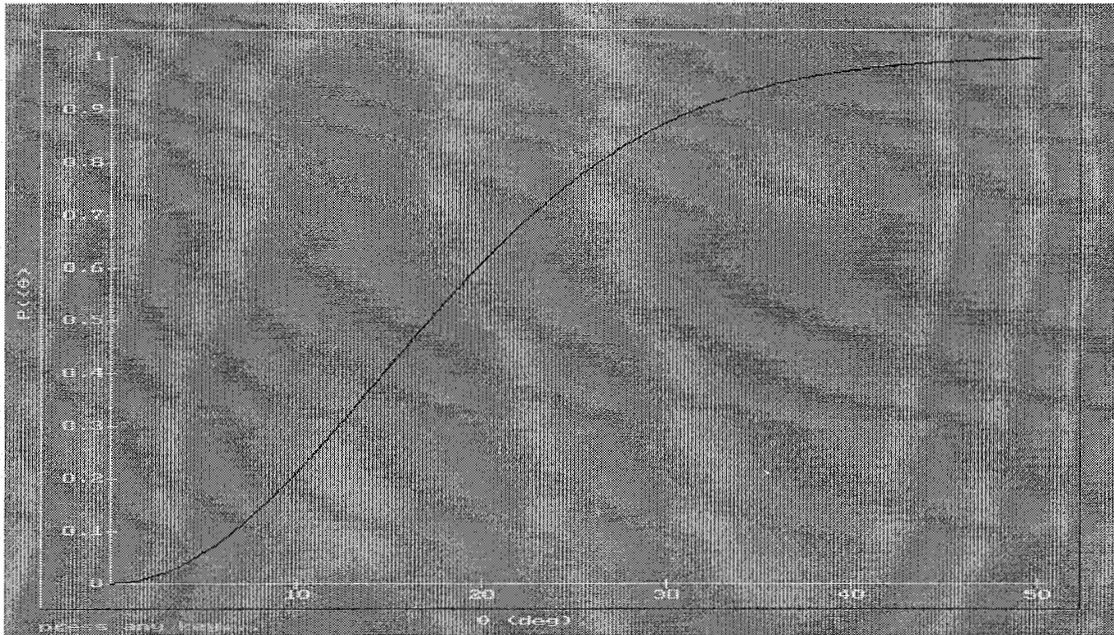
รูปที่ 14 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้ $P(< \theta)$ กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle (θ) ของเซต 2 - weighted & normalized



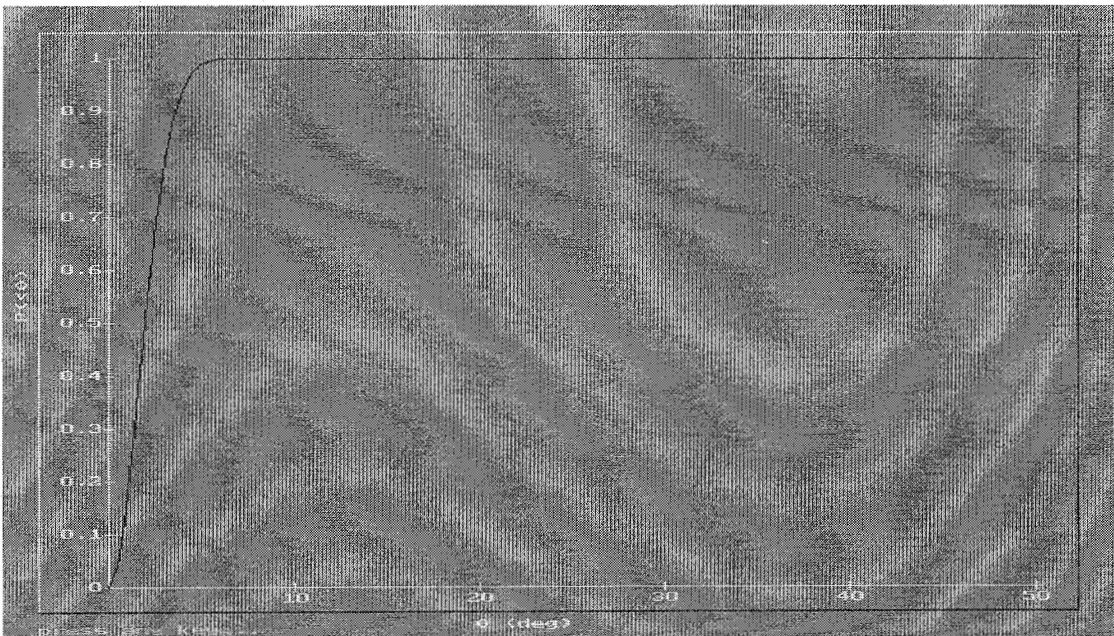
รูปที่ 15 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้ $P($\theta$)$ กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle (θ) ของเซต 3 - unweighted



รูปที่ 16 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้ $P($\theta$)$ กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle (θ) ของเซต 3 - weighted & normalized



รูปที่ 17 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้ $P($\theta$)$ กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle (θ) ของเขต 2 กับ 3 - unweighted



รูปที่ 18 กราฟระหว่างค่าความเป็นไปได้ $P($\theta$)$ กับค่ามุมที่น้อยกว่า cone angle (θ) ของเขต 2 กับ 3 - weighted & normalized

เท่ากับ 15.6 องศา ดังนั้นกลุ่มข้อมูลทั้ง 3 เขต [เขต 2, 3, 2-3] สามารถนำมาใช้เป็นตัวแทน (representative) ของ mean of discontinuity normals ได้ดี หรือจะคำนวณกลับเป็นค่า mean of discontinuity planes ที่พบตามบริเวณหน้า-เหมืองหินตามสมการที่กล่าวมาแล้วก็ได้

ในทางตรงกันข้าม จะพบว่า กลุ่ม cluster เขต 1 มีค่าคงที่ของ Fisher ค่ากลุ่มข้อมูลมีการจับกลุ่มกับ true mean ไม่ดี และค่ามุมที่เบี่ยงเบนไปจาก center of orientation มีค่าสูงกว่าค่าของเขตอื่น ประกอบกับค่าเฉลี่ยความแตกต่างสูงสุดของ mean of normal trends ระหว่างข้อมูลที่วิเคราะห์แบบ unweighted กับ weighted and normalized มีค่าสูงถึง 51.1 องศา ดังนั้น กลุ่มข้อมูลเขต 1 มีโอกาสของ sample bias สูง ก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ง่ายหากนำมาใช้ในการเป็นตัวแทนของ mean of discontinuity normals (or planes) ควรทำการหาข้อมูลดิบภาคสนามเพิ่มเติม เช่น เพิ่มแนวเส้นลุ่มตัวอย่างของ cluster เขต 1 เป็นต้น หรือในบางครั้งหากเวลาในการสำรวจมีจำกัดก็ควรคัดทิ้ง (discard) ข้อมูลดิบเขต 1

ตารางที่ 3 ค่ามุม θ ที่เบี่ยงเบนไปจาก true mean orientation

กลุ่ม cluster	ค่ามุม θ ที่ 90% limit	ค่ามุม θ ที่ 95% limit
เขต 1 - ธรรมดา	5.23 องศา	5.97 องศา
- w	4.13 องศา	4.71 องศา
เขต 2 - ธรรมดา	3.40 องศา	3.88 องศา
- w	2.88 องศา	3.29 องศา
เขต 3 - ธรรมดา	2.64 องศา	3.02 องศา
- w	2.56 องศา	2.93 องศา
เขต 2กับ3 - ธรรมดา	3.97 องศา	4.53 องศา
- w	3.75 องศา	4.28 องศา

บทที่ 4

การวิเคราะห์การกระตุ้นของอิมพัลส์

ในระยะเวลา 30 ปีที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาเรื่องการตอบสนองของโครงสร้างเชิงพลศาสตร์ (dynamic structure response) ที่มีต่อการกระตุ้นของอิมพัลส์ (impulse excitation) เป็นอย่างมาก ความรู้เหล่านี้นำไปใช้ประโยชน์ในการป้องกันผลกระทบของแผ่นดินไหว การระเบิดของนิวเคลียร์ และยังนำมาใช้ได้ดีกับการระเบิดหินในงานวิศวกรรม

2.1 การกระตุ้นของอิมพัลส์

อิมพัลส์ (impulse) เป็นหน่วย time integral ของแรง ซึ่งมีความสัมพันธ์คือ

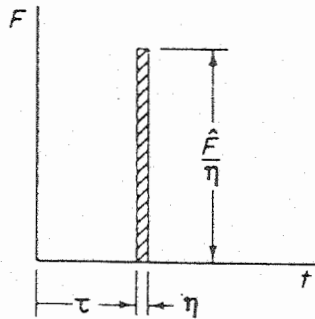
$$\hat{F} = \int F(t) dt \quad (42)$$

โดยที่ \hat{F} = impulsive force

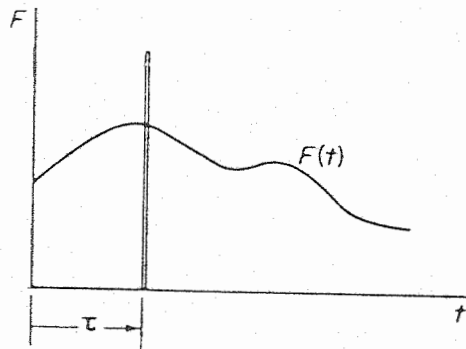
$F(t)$ = สัญลักษณ์ตัวแปรสำหรับแรงภายนอกที่เป็นอิมพัลส์

ค่า impulsive force มักมีขนาดใหญ่ (สูง) มาก และกระทำในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ โดยมี time integral มีภาวะเป็น finite จึงเรียกแรงประเภทนี้ว่า แรงอิมพัลส์หรือแรงคด (impulsive force) จากรูปที่ 19 หน้า 56 แสดงไดอะแกรมของแรงอิมพัลส์ที่มีขนาด \hat{F}/η ที่มี time duration เท่ากับ η ในขณะที่ η เข้าใกล้ศูนย์ แรงก็จะอยู่ในภาวะ infinite

อย่างไรก็ตาม นิยามของอิมพัลส์, \hat{F} ที่มีค่าของ time integral ในภาวะเป็น finite เมื่อ \hat{F} มีค่าเท่ากับ unity แรงที่มีชื่อจำกัดในกรณีนี้จะเรียกว่า หน่วยอิมพัลส์ (unit impulse) หรือในทางคณิตศาสตร์แทนได้ เท่ากับ delta function (ในกรณีที่มีค่า η เข้าใกล้ศูนย์) ค่า delta function ในขณะ $t = \tau$ จะแสดงเป็นรูปสัญลักษณ์ของ $\delta(t - \tau)$ และมีคุณสมบัติดังสมการที่ 43 หน้า 56 คือ



รูปที่ 19 ไตอะแกรมของแรงอิมพัลส์ กำหนดให้ time interval เป็น τ และมี delta function ที่ $t = \tau$



รูปที่ 20 พอร์มการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือนชั่วครู่ (transient vibration) ที่มีค่ออิมพัลส์ที่มากกระทำ

$$\left. \begin{aligned} \delta(t - \tau) &= 0 \quad \text{สำหรับทุกค่าที่ } t \neq \tau \\ &= \text{มีค่าสูงมาก เมื่อค่าสมมุติใดๆของ } t = \tau \\ \int_0^{\infty} \delta(t - \tau) dt &= 1.0 \quad \text{เมื่อกำหนดให้ } 0 < \tau < \infty \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

ถ้าหาก $\delta(t - \tau)$ ถูกคูณโดยค่า time function, $f(t)$ ใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 20 หน้า 55 คั้งนั้นผลคูณจะมีค่าเท่ากับศูนย์ทุกค่า ยกเว้นเมื่อ $t = \tau$ และค่า time integral ในช่วงนั้น มีภาวะเป็น

$$\int_0^{\infty} f(t) \delta(t - \tau) dt = f(\tau) \quad 0 < \tau < \infty \quad (44)$$

จากกฎของนิวตัน $Fdt = mdv$ เมื่ออิมพัลส์, \hat{F} กระทำต่อมวล, m มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็ว (ที่มีค่าเท่ากับ \hat{F}/m) อย่างทันทีทันใด โดยไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement) ที่ชัดเจน ภายใต้การสั่นสะเทือนของ free vibration พบว่าระบบ undamped spring-mass ที่มีสภาวะเริ่มต้นที่ค่า $x(0)$ และที่ค่า $\dot{x}(0)$ มีพฤติกรรมตามสมการข้างล่างนี้

$$x = \frac{\dot{x}(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t + x(0) \cos \omega_n t \quad (45)$$

คั้งนั้น เมื่อมีการตอบสนองของระบบ spring - mass ที่ถูกกระตุ้นจากจุดนิ่งด้วยอิมพัลส์ \hat{F} จะได้

$$x = \frac{\hat{F}}{m\omega_n} \sin \omega_n t = \hat{F}h(t) \quad (46)$$

โดยที่ $h(t)$ เป็นค่าการตอบสนอง (response) ของหน่วยอิมพัลส์

$$h(t) = \frac{1}{m\omega_n} \sin \omega_n t \quad (47)$$

Thomson (pp. 28-31, 93) สรุปการทำ solution ของ free vibration ที่เกิด damping เมื่อกำหนดสถานะเริ่มต้น (initial condition) ที่ $x(0) = 0$ จะได้ solution เป็น

$$x = \frac{\dot{x}(0) \cdot e^{-\beta\omega_n t} \cdot \sin(1 - \beta^2)^{1/2} \omega_n t}{\omega_n (1 - \beta^2)^{1/2}} \quad (48)$$

แทนค่าสำหรับ สถานะเริ่มต้นที่ $\dot{x}(0) = \hat{F}/m$ ได้สมการดังแสดงข้างล่างนี้

$$x = \frac{\hat{F}}{m\omega_n (1 - \beta^2)^{1/2}} \cdot e^{-\beta\omega_n t} \cdot \sin(1 - \beta^2)^{1/2} \omega_n t \quad (49)$$

จะเห็นได้ว่าค่า $h(t)$ ซึ่งเป็นผลการตอบสนองของหน่วยอิมพัลส์มีความสำคัญมากใน แก่ปัญหาคลื่นที่เกิดในภาวะชั่วคราว (transient wave) ดังนั้นไม่ว่าจะเป็น กรณีของ damped หรือ undamped สมการการตอบสนองของแรงอิมพัลส์จะอยู่ในรูปแบบของ

$$x = \hat{F}h(t) \quad (50)$$

ซึ่งสมการที่ 50 ข้างบนนี้เป็นส่วนหนึ่งที่อยู่ทางด้านขวาของสมการ 46 และ 49

4.2 การกระตุ้นเชิงพลศาสตร์พื้นฐาน

ปกติการกระตุ้นเชิงพลศาสตร์ (dynamical excitation) เป็นปรากฏการณ์ที่มีการเคลื่อนที่อย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค ความเร็วของอนุภาค และความเร่งของอนุภาค และสมการของการเคลื่อนที่ที่สามารถจะแสดงออก ในรูปแบบการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ (relative displacement, δ) โดยที่มีค่าของ $\delta = x - u$

สมการพื้นฐานของการเคลื่อนที่ (equation of motion) เชิงพลศาสตร์ ของ Single Degree of Freedom เมื่อมีการกระตุ้นบนพื้นผิวดิน (Dowding 1985; Meirovitch, 1986) ได้แก่

$$\ddot{\delta} + 2\beta\omega_n\dot{\delta} + \omega_n^2\delta = -\ddot{u} \quad (51)$$

ผลที่ระบบถูกกระตุ้นจากแรงภายนอก (external force-excited system) สามารถนำมาใช้กับการเคลื่อนที่ของระบบการกระตุ้นพื้นฐาน (base-excited system) เมื่อค่า F/m ถูกแทนที่ด้วย $-\ddot{u}$ หรือเป็นค่าลบของความเร่งพื้นฐาน

Thomson (1993) ได้แสดงวิธีพิสูจน์ (ในหน้าที่ 28-30) สรุปว่า การที่จะแก้ปัญหาของ viscously damped free vibration ด้วย differential equation of motion สามารถแสดงได้ในเทอมของ β และ ω_n ได้เป็น

$$\ddot{\delta} + 2\beta\omega_n\dot{\delta} + \omega_n^2\delta = F(t)/m \quad (52)$$

การหา solution ของสมการที่ 52 ข้างบนนี้ จะทำได้โดยหาผลรวมของค่า solutions หลายค่า homogeneous equation และของ solution เฉพาะตัว

4.3 การวิเคราะห์ปัญหาเคลื่อนที่การสั่นสะเทือนในระบบ SDF

ในบางกรณีสมการเชิง differential ไม่สามารถจะทำการ integrate ได้ในสภาพ closed form จำเป็นต้องแก้ปัญหของระบบนี้ด้วย numerical method สำหรับระบบที่ยู่ยากเช่นเป็น nonlinear หรือระบบที่ถูกกระตุ้นด้วยแรงภายนอก ไม่สามารถแสดงรูปแบบเป็น simple analytic functions การวิเคราะห์ที่จะอธิบายต่อไปนี้จะใช้ในการแก้ปัญหในระบบ Single Degree Freedom (SDF)

4.3.1 วิธี Finite Difference

ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหของ differential equation ที่อยู่ยาก วิธีคำนวณเชิง finite difference นี้จะใช้ได้ดี โดยแทนค่า continuous variable, t ด้วยค่า discrete variable, t_i แล้วทำการ solve differential equation อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เพิ่ม time increments, h [กำหนดให้ ($h = \Delta t$)] จากสภาวะเริ่มต้นที่รู้ค่า

การแก้ปัญหาคด้วยวิธี finite difference นี้ solution ที่หาได้จะเป็นเพียงค่าประมาณ แต่ก็มีคามแม่นยำที่สามารถยอมรับได้ในระดับที่มีการเพิ่ม time increment ช่วงเล็ก ๆ

4.3.2 วิธี Runge-Kutta

การวิเคราะห์ทางเชิงตัวเลข ที่นำมาใช้แก้ปัญหของ second - order differentiation equation มีหลายรูปแบบ แต่ที่นิยมใช้มากก็จะเป็นกระบวนการคำนวณของ Runge-Kutta สาเหตุเพราะว่า วิธีการของ Runge-Kutta นี้เป็นการเริ่มต้นคำนวณด้วยตนเองและให้ผลที่มีระดับความแม่นยำดี วิธีของ Runge-Kutta นี้จะมีลักษณะการแก้ปัญหใกล้เคียงมากกับ Taylor series expansion (ที่ใช้ในวิธี finite difference ในหัวข้อ 4.3.1)

การเริ่มต้นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของ Runge-Kutta จะมีการลด order ของ second-order differential equation หนึ่งสมการ ลงเป็นสมการของ first-order differential equations สองสมการ

ตัวอย่างที่นำมาใช้แก้ปัญหของการคาดคะเนการสั่นสะเทือน โดย dynamical differential equation ของระบบ Single Degree of Freedom (SDF)

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [f(t) - kx - c\dot{x}] = F(x, \dot{x}, t) \tag{53}$$

เมื่อทำการลด second-order equation ลงเหลือเป็น two first-order equations ก่อนทำการ integration ดังนั้นสมการในระบบเชิงพลศาสตร์จะเป็น

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= f(x, y, t) \end{aligned} \right\} \tag{54}$$

จากสมการ 54 ข้างบนนี้ นำมาเขียนใหม่ได้เป็น

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= F(x, y, t) \end{aligned} \right\} \tag{55}$$

ทั้งตัวแปร x และตัวแปร y จัดอยู่ในกลุ่มที่ใกล้เคียงกับ ค่าตัวแปร x_i และ y_i เมื่อเป็นเช่นนี้ก็สามารถจะเขียนให้อยู่ในพจน์ของ Taylor series ถ้าหากให้มีช่วงการเพิ่มของเวลา (time increment, h) มีค่าเท่ากับ Δt เขียนได้ series expansions คือ

$$\left. \begin{aligned} x &= x_i + \left(\frac{dx}{dt}\right)_i h + \left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)_i \frac{h^2}{2} + \dots \\ y &= y_i + \left(\frac{dy}{dt}\right)_i h + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_i \frac{h^2}{2} + \dots \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

อย่างไรก็ตามแทนที่จะแสดง expressions ของ series แบบสมการ 56 ยังสามารถจะแทนค่าของ first derivative โดยใช้ค่าเฉลี่ยของความลาดเอียง (slope) และละทิ้งค่า higher order derivatives (เพราะมีค่าน้อย) ถ้าสมมุติให้ av เป็นสัญลักษณ์แทนค่า average ทำให้เขียนสมการที่ 56 เป็น

$$\left. \begin{aligned} x &= x_i + \left(\frac{dx}{dt}\right)_{iav} h \\ y &= y_i + \left(\frac{dy}{dt}\right)_{iav} h \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

ถ้าหากต้องการให้เกิดการ fitting a second-order polynomial ก็ใช้ Simpson's rule [ซึ่ง modified มาจาก simple trapezoidal rule เพื่อที่จะ approximate curve] ซึ่งหาค่าเฉลี่ยของความลาดเอียงในช่วงระยะ h ทำให้ได้ค่า average slope เป็น

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_{iav} = \frac{1}{6} \left[\left(\frac{dy}{dt}\right)_{t_i} + 4\left(\frac{dy}{dt}\right)_{t_i+h/2} + \left(\frac{dy}{dt}\right)_{t_i+h} \right] \quad (58)$$

จากนั้นก็ทำการหาความแตกต่างของพจน์ที่อยู่ตรงกลาง โดยวิธีทำคล้าย ๆ กับวิธีที่ใช้ finite difference แต่วิธี Runge-Kutta จะแยกพจน์กลาง (center term)

ของสมการที่กำหนดให้แยกออกเป็น 2 พจน์และ 4 ค่า (ได้แก่ค่าของ t , x , y และ f) โดยถุณำมาคำนวณแต่ละจุดของ i ดังแสดงเป็นตารางที่ 4 ข้างล่างนี้

ตารางที่ 4 การคำนวณ center term แต่ละจุดของ i
ตามวิธีการของ Runge-Kutta

t	x	$y = \dot{x}$	$f = \dot{y} = \ddot{x}$
$T_0 = t_i$	$X_0 = x_i$	$Y_0 = y_i$	$F_0 = f(T_0, X_0, Y_0)$
$T_1 = t_i + \frac{h}{2}$	$X_1 = x_i + Y_0 \frac{h}{2}$	$Y_1 = y_i + F_0 \frac{h}{2}$	$F_1 = f(T_1, X_1, Y_1)$
$T_2 = t_i + \frac{h}{2}$	$X_2 = x_i + Y_1 \frac{h}{2}$	$Y_2 = y_i + F_1 \frac{h}{2}$	$F_2 = f(T_2, X_2, Y_2)$
$T_3 = t_i + h$	$X_3 = x_i + Y_2 h$	$Y_3 = y_i + F_2 h$	$F_3 = f(T_3, X_3, Y_3)$

เมื่อนำค่า quantities ของตารางที่ 4 ลงใน recurrence formula ได้

$$x_{i+1} = x_i + \frac{h}{6}(Y_1 + 2Y_2 + 2Y_3 + Y_4) \quad (59)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6}(F_1 + 2F_2 + 2F_3 + F_4) \quad (60)$$

เมื่อวิเคราะห์สมการทั้ง 2 ข้างบนนี้ จะเห็นว่า มีค่า Y จำนวน 4 ค่า ได้ถูกหารด้วย 6 จะเป็นค่าเฉลี่ยของความลาดเอียง "X" [average slope "X": (dx/dt)] และยังมีค่า F จำนวน 4 ค่าถูกหารด้วย 6 จะเป็นค่าเฉลี่ยของความลาดเอียง "Y" [average slope "Y": (dy/dt)] ตามที่ได้แสดงไว้ในสมการ 57 หน้า 60 ซึ่งได้กำหนดค่าของ x และ y ไว้

4.4 การวิเคราะห์ปัญหาคลื่นการสั่นสะเทือนในระบบ N-DOF

ถ้าหากระบบต้องการจุดพิกัดมากกว่าหนึ่ง เพื่อจะอธิบายการเคลื่อนที่ (motion) เรียกระบบนั้นว่า a multi-DOF system หรือ an N-DOF system ซึ่งค่า N คือ จำนวนของจุดพิกัดที่ต้องการ ดังนั้น 2-DOF system ก็ต้องการจุดพิกัดที่ไม่พึ่งพิงกัน 2 จุด เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่

ระบบ N-DOF ต่างจากระบบ SDF ตรงที่ค่าความถี่ธรรมชาติ N และแต่ละค่าของความถี่ธรรมชาติจะมีความสัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติ ซึ่งมีรูปแบบของการเปลี่ยนค่าแอมพลิจูดที่เรียกว่า normal mode เทอมทางคณิตศาสตร์ที่สัมพันธ์กับค่าตัวแปรเหล่านี้ เรียกว่า eigenvalues (characteristic values) และ eigenvectors (characteristic vectors)

4.4.1 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ Normal Modes

การสั่นสะเทือน normal modes เป็นการสั่นสะเทือนแบบ free undamped vibrations ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า mass กับค่า stiffness ของระบบ เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนที่โหนดใดโหนดหนึ่ง ทุกจุดในระบบจะเกิดการเคลื่อนที่ที่ทันที่ทันใดแบบ simple harmonic ผ่านตำแหน่งจุดสมดุล ถ้าหากจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่จุดหนึ่งของโหนด ระบบจะต้องมีสภาวะตั้งต้นที่สัมพันธ์กับ normal mode การวิเคราะห์ระบบที่มี degree of freedom มากกว่าหนึ่ง วิธีการเชิงตัวเลขควรนำมาใช้โดยเฉพาะระบบที่มี degree สูง ๆ เช่น วิธีการเชิง matrix เป็นสิ่งจำเป็น

ค่า eigenvalues และ eigenvectors เกิดจากสมการ N ของการเคลื่อนที่ ซึ่งอยู่ในเวลาเดียวกันของระบบ และเกี่ยวข้องกับ dynamic properties ของระบบ ในกรณีของค่า eigenvectors บางทีก็หมายถึง modal vectors และใช้แทนที่ลักษณะเชิงกายภาพของ natural modes กระบวนการที่จะปรับค่า elements ของ natural modes ให้ได้ค่าแอมพลิจูดหนึ่งเดียว (unique amplitude) จะมีชื่อเรียกว่า normalization เวกเตอร์ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการ normalization มีชื่อเรียกว่า normal modes

4.4.2 วิธีการคำนวณของระบบ N-DOF

กระบวนการพื้นฐานในการหาค่า eigenvalues และ eigenvectors ของระบบได้จากการหารากของ polynomial equation ที่ได้มาจาก characteristic determinant จากนั้นนำค่าของราก (หรือค่า eigenvalues) มาแทนที่ที่ละตัวในสมการของการเคลื่อนที่เพื่อหารูปร่างของโหมด (หรือค่า eigenvectors) ของระบบ

ในอีกแนวทางหนึ่งสามารถที่จะใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์อีกแนวทางหนึ่ง โดยใช้กระบวนการ transformation ของจุดพิคัดความคู่กับ iteration procedure ทำให้ได้ผลลัพธ์ของค่า eigenvalues และ eigenvectors พร้อมกัน ในเวลาเดียวกัน

วิธีการแนวใหม่ที่มีสมการของการเคลื่อนที่เป็น

$$[-\lambda M + K]X = 0 \tag{61}$$

สมการการเคลื่อนที่นี้ต้องแปรเปลี่ยนเป็นรูปแบบค่ามาตรฐานของ eigenvalues ที่ต้องนำไปใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ส่วนใหญ่ รูปแบบมาตรฐานได้แก่

$$[\tilde{A} - \lambda I]Y = 0 \tag{62}$$

โดยที่ \tilde{A} = square symmetrical matrix

Y = new displacement vector transformed from X

รูปแบบสมการ 62 ใช้ได้กับวิธี transformation และ matrix iteration

1. วิธีการที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ปกติจะหาค่าประมาณของพิสัย (range) ที่ครอบคลุม โดย และมีช่วง (interval) ของ $\Delta\lambda$ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย ดังนั้นสมการ polynomial ที่มี N-degree: $f(\lambda) = \lambda^n + c_1\lambda^{n-1} + c_2\lambda^{n-2} + \dots + c_n = 0$ จะถูก factored ได้เป็น

$$f(\lambda) = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2)(\lambda - \lambda_3) \dots = 0 \tag{63}$$

ในขณะที่ λ_1 เป็นรากของสมการ เมื่อทำการคูณ และทำการ factoring พอร์มของสมการ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ c_1 สำหรับค่ายกกำลังสูงสุดต่อไปของ λ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลบวกของรากสมการทั้งหมดเสมอไป ไม่ว่าค่า N จะมีค่าอย่างไร นั่นคือ สำหรับสมการยกกำลังสาม จะได้

$$f(\lambda) = \lambda^3 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)\lambda^2 + (\lambda_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3)\lambda - \lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 0 \quad (64)$$

กระบวนการที่แสดงในหัวข้อ 1 นี้ สามารถนำมาใช้หรือ modified ได้ สำหรับโปรแกรมคำนวณทางคอมพิวเตอร์ เนื่องจากความสามารถของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณค่า $\Delta\lambda$ เป็นพัน ๆ ค่าด้วยเวลาอันรวดเร็ว ทำให้การ interpolation ใกล้เคียงแม่นยำ

2. วิธี Gauss Elimination

วิธีของ Gauss ใช้แก้ปัญหารูปร่างของโหมด วิธีนี้เป็นแนวทางอีกแนวทางหนึ่ง ที่หาอัตราส่วนของแอมพลิจูด (ratio of amplitudes) ที่แตกต่างจากวิธีการเดิมที่ใช้แทนค่า eigenvalues ที่ละครั้งในสมการการเคลื่อนที่

ข้อดีสำหรับวิธีการของ Gauss ได้แก่ กระบวนการนี้จะลดสมการแมทริกซ์ไปเป็นรูปแบบ upper triangular form ซึ่งสามารถจะแก้ปัญหาสำหรับค่าแอมพลิจูดที่ตั้งต้นจากส่วนล่างสุดของสมการแมทริกซ์

ในการประยุกต์วิธีของ Gauss สมมติเริ่มต้นมีสมการการเคลื่อนที่ 3-DOF เป็น

$$m \begin{bmatrix} 2 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + k \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (65)$$

หรือ

$$\left(-\lambda \begin{bmatrix} 2 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (66)$$

โดยที่ $\lambda = \omega^2 m/k$

ค่า eigenvalues ของระบบ หาจากการ equated ค่า characteristic determinant ให้เป็นศูนย์ ทำให้ได้

$$\begin{vmatrix} (3 - 2\lambda) & -1 & 0 \\ -1 & (2 - \lambda) & -1 \\ 0 & -1 & (1 - \lambda) \end{vmatrix} = 0 \quad (67)$$

ต่อมาเริ่มประยุกต์วิธี Gauss elimination โดยเขียนสมการการเคลื่อนที่ให้อยู่ในเทอมของ λ

$$\begin{bmatrix} (3 - 2\lambda_i) & -1 & 0 \\ -1 & (2 - \lambda_i) & -1 \\ 0 & -1 & (1 - \lambda_i) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}^{(i)} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (68)$$

ค่า eigenvalues ที่ถูกใช้ในการแก้ปัญหานี้ คือ

$$\lambda = \omega^2 \frac{m}{k} = \begin{Bmatrix} 0.25536 \\ 1.3554 \\ 2.8892 \end{Bmatrix} \quad (69)$$

แทนค่า $\lambda_1 = 0.25536$ เข้าในสมการ 68 จะได้

$$\begin{bmatrix} 2.489 & -1 & 0 \\ -1 & 1.745 & -1 \\ 0 & -1 & 0.7446 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}^{(1)} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (70)$$

จากนั้น ทำการลดเทอมต่างๆของคอลัมน์แรกในแถวที่สอง และแถวที่สาม ไปเรื่อยๆ จะสามารถหาค่า eigenvectors ของทั้ง 3 โหมดได้

3. วิธี Matrix Iteration

วิธีการนี้เป็นการหาผลลัพธ์ของสมการพีชคณิตของ n^{th} order ในระบบ N-DOF ที่แตกต่างจากวิธีการ expansion ของ determinant equation ประโยชน์ของ matrix iteration ช่วยในการ formulated สมการการเคลื่อนที่ในเรื่องของ flexibility matrix และ stiffness matrix

ในกระบวนการ matrix iteration เทอมของ dynamic matrix, \bar{A} ไม่จำเป็นต้องเป็น symmetry เมื่อกำหนดให้ค่า flexibility matrix $[a] = K^{-1}$ จะทำให้ได้สมการของ normal mode vibration เป็น

$$\bar{A}X = \bar{\lambda}X \tag{71}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \bar{A} &= [a][m] = K^{-1}M \\ \bar{\lambda} &= 1/\omega^2 \end{aligned}$$

กระบวนการ iteration เริ่มต้นสมมติให้มีเซตของแอมพลิจูดเซตหนึ่ง สำหรับคอลัมน์ข้างซ้ายของสมการ 71 และทำปฏิบัติการได้ผลลัพธ์ของคอลัมน์ตัวเลข จากนั้นก็ใช้กระบวนการ normalization จนกระทั่งค่าแอมพลิจูดมีเสถียรภาพ เมื่อ normalized column ไม่ได้แตกต่างไปจากการ iteration ก่อนหน้านี้ มันก็จะถูก converged เป็น eigenvector ที่มีค่า eigenvalue ใหญ่(สูง)สุด ในกรณีนี้จะได้ค่าความถี่ธรรมชาติเล็ก(ต่ำ)สุด

4. พื้นฐานของโครงสร้างโปรแกรมในกระบวนการ Iteration

สมการเริ่มต้นของ Expansion Theorem :

$$X_1 = c_1\phi_1 + c_2\phi_2 + c_3\phi_3 + \dots + \tag{72}$$

โดยที่ค่า c_1 เป็นค่าคงที่

ในกระบวนการ iteration ที่จะ converge ไปให้ได้ค่า eigenvalue ใหญ่(สูง)สุด จุดเริ่มต้นก็ต้องการคูณโดย dynamic matrix, \bar{A} ทำให้เป็น

$$\bar{A}X_1 = X_2 = c_1\bar{A}\phi_1 + c_2\bar{A}\phi_2 + c_3\bar{A}\phi_3 + \dots + \tag{73}$$

เมื่อทำการปฏิบัติการซ้ำเพิ่มเติมเพื่อหา new displacement vector, X_2 ได้ผลลัพธ์เป็น

$$X_2 = c_1\frac{1}{\omega_1^2}\phi_1 + c_2\frac{1}{\omega_2^2}\phi_2 + c_3\frac{1}{\omega_3^2}\phi_3 + \dots +$$

หลังจากทำกระบวนการซ้ำๆ หลายครั้ง ได้สมการสุดท้ายของการ convergence

$$AX_{n-1} = X_n = c_1\frac{1}{\omega_1^{2n}}\phi_1 + c_2\frac{1}{\omega_2^{2n}}\phi_2 + c_3\frac{1}{\omega_3^{2n}}\phi_3 + \dots + \tag{74}$$

ทั้งนี้เพราะว่า $\omega_n^2 > \omega_{n-1}^2 > \dots > \omega_2^2 > \omega_1^2$ กระบวนการ convergence แปลงให้เป็น fundamental mode

ในการทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกระบวนการ iteration จำเป็นที่ต้อง เปลี่ยนแปลงรูปแบบ (form) ของ sweeping matrix, S การ transformation สำหรับเวกเตอร์แมตริกซ์ใช้วิธีการของ Gram-Schmidt orthogonalization ทำให้ เขียนสมการที่ 73 ใหม่ เป็น

$$X_2 = X_1 - \alpha_1 \phi_1 = c_2 \phi_2 + c_3 \phi_3 + \dots + \tag{75}$$

ในเทอมของ $\alpha_1 \phi_1$ นั้น ค่า component ของ ϕ_1 เป็นค่าที่ไม่ต้องการ จึงต้อง คูณสมการที่ 75 โดยใช้เทอมของ $\phi_1^T M$ ทำให้ได้เทอมใหม่เท่ากับศูนย์

$$\phi_1^T M (X_1 - \alpha_1 \phi_1) = 0$$

ได้ค่าคงที่ของ α_1 เป็น

$$\alpha_1 = \frac{\phi_1^T M X_1}{\phi_1^T M \phi_1} \tag{76}$$

แทนค่า α_1 ลงในสมการที่ 75 และทำการจัดเทอมใหม่จะได้

$$X_2 = X_1 - \frac{\phi_1 \phi_1^T M}{\phi_1^T M \phi_1} X_1 = \left[1 - \frac{\phi_1 \phi_1^T M}{\phi_1^T M \phi_1} \right] X_1$$

ดังนั้นจะได้ค่า expression สำหรับ sweeping matrix ที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้คำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ

$$S = \left[1 - \frac{\phi_1 \phi_1^T M}{\phi_1^T M \phi_1} \right] \tag{77}$$

บทที่ 5

การสั่นสะเทือนเนื่องจากการระเบิด

การศึกษาแนวโน้มของผลกระทบที่อาจก่อให้เกิดการเสียหายต่ออาคารโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับการระเบิด องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องค่อนข้างมากในเรื่องผลกระทบ ได้แก่ ขนาดของความรุนแรงของการสั่นสะเทือน ช่วงเวลาที่เกิดการสั่นสะเทือน ระยะทางที่ตั้งของอาคารกับหลุมเจาะระเบิด ปริมาณของวัตถุระเบิดที่ใช้ สภาพทางธรณีวิทยาของตัวกลางระหว่างการจุดระเบิด และรูปแบบกับเทคนิคของการระเบิด

5.1 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือน

การทำ empirical scaling สำหรับปรากฏการณ์ของคลื่นกระแทก (shock wave) จากการระเบิด เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดค่าพลศาสตร์ภาคสนาม โดยแปรผันกับจำนวนของวัตถุระเบิดที่ใช้ ดังนั้นการประมาณค่าแนวโน้มสามารถใช้การวิเคราะห์เชิงมิติช่วยประมาณการ ซึ่งเป็นพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีการจำลองแบบเชิง similitude

5.1.1 ชนิดของพารามิเตอร์

พารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรและเกี่ยวข้องกับการระเบิดมีดังนี้

1. ตัวแปรที่พึ่งพิง

ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (unknown) ของการตรวจวัดภาคสนาม จัดเป็นตัวแปรที่พึ่งพิง (dependent variables) ได้แก่

- ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดของอนุภาคบนพื้นผิว (maximum ground particle displacement, u_{max})
- ค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาคบนพื้นผิว (maximum ground particle velocity, V_{max})
- ค่าความเร่งสูงสุดของอนุภาคบนพื้นผิว (maximum ground particle acceleration, a_{max})

- ค่าความถี่ (frequency, f) ของการเคลื่อนที่

2. ตัวแปรที่ไม่พึงพิง

ตัวแปรที่ทราบค่า (known) ในการตรวจวัดภาคสนาม จัดเป็นตัวแปรที่ไม่ต้อง
พึงพิง ได้แก่

- พลังงานที่ใช้ออกมา (released) โดยวัตถุระเบิด, W
- ระยะจากจุดระเบิดจนถึงจุดสังเกตการณ์, r (หรือ D)
- ความหนาแน่นของหิน, ρ
- ความเร็ว compression seismic wave ในตัวกลาง (หินหรือดิน), c
- เวลา, t

ตารางที่ 5 ข้างล่างนี้ เป็นการจัดกลุ่มของตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์เชิงมิติในเรื่องที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ของการระเบิด ซึ่งนำมาใช้ในการทำ similitude โดยอาศัยทฤษฎีของ Buckingham Pi (Murphy, 1950)

ตารางที่ 5 มิติของตัวแปรในเรื่องปรากฏการณ์ของการระเบิด

Variable	Symbol	Dimension
<u>Independent variables</u>		
Energy released by explosion	W	FL
Distance from explosion (range)	r (D)	L
Seismic velocity of rock mass	c	LT^{-1}
Density of the rock mass	ρ	FT^2L^{-4}
Time	t	T
<u>Dependent variables</u>		
Displacement	u	L
Particle velocity	V	LT^{-1}
Acceleration	a	LT^{-2}
Frequency of motion	f	T^{-1}

5.1.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรและมิติ

Ambraseys และ Hendron Jr. (1968) ได้เสนอแนวทางที่จะทดลองทำการ similitude ของตัวแปรถึงแม้ว่าค่า exact form จะยังไม่ทราบค่า

คามทฤษฎี Buckingham Pi กล่าวว่า ในกรณีของปัญหาเชิงกายภาพที่เกี่ยวข้องกับจำนวนของตัวแปร และมิติ ได้ความสัมพันธ์กันคือ

$$s = n - m \quad (78)$$

โดยที่ s = จำนวนของ Pi เทอม

n = จำนวนของตัวแปรทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง (dependent and independent variables)

m = จำนวนของมิติพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

จากทฤษฎีนี้การที่จะหาพารามิเตอร์ที่ไม่มีมิติ (dimensionless) และเป็นค่าของ independent quantities มีผลดังต่อไปนี้

1. ปรากฏการณ์ทางกายภาพจากการศึกษาในเรื่องนี้สามารถทำความเข้าใจได้ดีจากการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่รวมกันเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีมิติ (Pi เทอม)
2. จากการรวมกลุ่มพารามิเตอร์ที่ไม่มีมิติ มีผลทำให้สามารถลดจำนวนของการเปรียบเทียบที่จำเป็นต้องมีในการอธิบายปรากฏการณ์จากการระเบิด
3. การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ไร้มิติทางกราฟฟิก การเปรียบเทียบนี้ได้มาจากการตรวจวัดในภาคสนาม มีผลทำให้ได้ความสัมพันธ์อย่างง่าย ๆ ระหว่างตัวแปรที่พึ่งพิงกับตัวแปรที่ไม่พึ่งพิง
4. จากความสัมพันธ์อย่างง่าย (ในข้อ 3) จะสามารถนำไปใช้เพื่อการประมาณแนวโน้มจากประสบการณ์ที่ผ่านๆ มาจนถึงแนวโน้มในสภาวะการณ์ใหม่ โดยเปรียบเทียบจากพารามิเตอร์ที่ไร้มิติ ดังนั้นจากประสบการณ์ในการตรวจวัดในภาคสนามสามารถนำมาใช้ในการหาแบบจำลอง (model) หรือต้นแบบ (prototype) ของความสัมพันธ์ของตัวแปรในการระเบิด

ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์หาได้จากสมการที่ 78 คือ $s = n - m$ จะได้
ค่า $s = 9 - 3 = 6$ ซึ่งค่าตัวแปรที่ไม่พึ่งพิงและไร้มิติทั้ง 6 ค่านี้ได้แก่เทอมดังต่อไปนี้
คือ $u/r, V/c, ar/c^2, f.t, tc/r, W/\rho c^2 r^3$

เทอม 4 เทอมแรกเป็นเทอมของตัวแปรที่พึ่งพิง (dependent variables)
และในกรณีของเทอม 2 เทอมหลังเป็นเทอมผสมของตัวแปรที่ไม่พึ่งพิง (independent
variables)

จากทฤษฎีของ Pi ยังกล่าวได้ต่อไปว่าพารามิเตอร์ข้างบนอาจจะยกกำลังใดก็ได้
อาจจะคูณเข้าด้วยกัน และพารามิเตอร์ที่ไร้มิติใดตัวหนึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันกับพารา-
มิเตอร์ที่ไร้มิติตัวอื่น ซึ่งเมื่อแยกเป็นความสัมพันธ์ของตัวแปรที่พึ่งพิงกับตัวแปรที่ไม่พึ่งพิง
ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\delta}{r} = g_1 \left[\frac{tc}{r}, \frac{W}{\rho c^2 r^3} \right] \quad (79)$$

$$\frac{V}{c} = g_2 \left[\frac{tc}{r}, \frac{W}{\rho c^2 r^3} \right] \quad (80)$$

$$\frac{ar}{c^2} = g_3 \left[\frac{tc}{r}, \frac{W}{\rho c^2 r^3} \right] \quad (81)$$

$$ft = g_4 \left[\frac{tc}{r}, \frac{W}{\rho c^2 r^3} \right] \quad (82)$$

จากสมการที่ 79-82 หน้า 71 สัญลักษณ์ g_1, g_2, g_3 และ g_4 เป็นฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่าของกลุ่มตัวแปรที่ฟังก์ชันและ ไร้มิติ (Pi เทอม)

สำหรับปรากฏการณ์ของการระเบิดมีผลต่างกันได้ ถึงแม้ว่าจะมีตัวกลางอย่างเดียวกัน (ค่าความหนาแน่นและความเร็วของคลื่นคงที่) โดยให้วิเคราะห์จากสมการที่ 80-83 จะได้พิสัย (range) ของสเกล r เป็นรากกำลังสาม (cube root) ของพลังงานที่ใช้ไปในการระเบิด ($W^{1/3}$) ทำนองเดียวกัน เวลา t สเกลกับ r ก็เป็นรากกำลังสามของพลังงานด้วย

สมการที่ 79 แสดงว่า เมื่อเปรียบเทียบสเกลของเวลา (t) กับพิสัย (r) ค่าการเปลี่ยนตำแหน่ง, u เป็นสัดส่วนกับ พิสัย, r จึงเป็น สัดส่วนกับรากกำลังสามของค่า yield ของ $W^{1/3}$ ด้วย ทำนองคล้ายคลึงกัน จากสมการที่ 80 ค่าความเร็วของอนุภาค, V ก็จะสเกลได้โดยตรง (ไม่เกี่ยวข้องกับ yield) ส่วนค่าความเร่ง, a จากสมการที่ 81 เป็นสัดส่วนผกผันกับ พิสัย, r ที่ช่วงเท่ากันของสเกลเวลาและพิสัย จึงพอสรุปได้ว่าความเร่งเป็นสัดส่วนผกผันกับรากกำลังสามของ yield สำหรับความถี่ของการเคลื่อนที่, f ที่มีค่าเท่ากับสเกลของ t และค่าพิสัย, r ก็จะเป็นสัดส่วนผกผันกับเวลา, t ดังนั้นความถี่จึงสเกลเป็นสัดส่วนผกผันกับรากกำลังสามของ yield

การสเกลตามวิธีที่กล่าวมานี้เป็นแบบ การสเกลของรากกำลังสาม (cube root scaling) มีประโยชน์มากในการปรับข้อมูลให้ปกติ (normalized data) สำหรับงานระเบิดหิน จำนวนวัตถุระเบิดที่ใช้, W มักจะระบุเป็นหน่วยน้ำหนักมากกว่าเป็นหน่วยพลังงาน จึงสามารถจะใช้แนวทางของการสเกลนี้แทนได้ ถ้าหากว่าพลังงานที่ใช้เป็นวัตถุระเบิดมากกว่า 1 ชนิต จำเป็นต้องมี correction factor เข้ามาช่วยด้วย

กล่าวโดยสรุป เมื่อพิจารณาสมการที่ 79-82 อีกครั้ง สังเกตได้ว่า ค่าความหนาแน่น, ρ ของมวลหินแม้ว่าหินจะแตกต่างกัน ไม่เคยแตกต่างกันมากกว่า 20% และค่าความเร็วคลื่น, c ก็ ไม่เคยแตกต่างกันเกิน 2 เท่า ดังนั้นค่าที่แปรผันและมีผลมากต่อความสัมพันธ์ของตัวแปร ได้แก่ ค่าพลังงาน, W และค่าระยะทาง, r ถ้าหากละเลยในเรื่องความแตกต่างของความหนาแน่นและความเร็วคลื่น จะทำให้เทอม $u/r, W/\rho c^2 r^3$ และ V/c เหลือเพียง ค่า $u/r, W/r^3$ และ V เท่านั้น (ทั้ง 3 เทอมนี้ไร้มิติ) จึงทำให้ได้ค่า u จะถูกสเกลกับ r ส่วนค่า r จะถูกสเกลกับ $W^{1/3}$

5.2 การประเมินระดับการสั่นสะเทือน

การตรวจสอบหรือตรวจวัดระดับความรุนแรง ของการสั่นสะเทือนจากการระเบิด มี 2 แนวทาง ได้แก่ การใช้ขนาดคลื่นหรือแอมพลิจูด (amplitude) ของการสั่นสะเทือน จากการระเบิด กับการใช้ค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาค (peak particle velocity) เป็นตัวบ่งชี้ระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือน

5.2.1 ขนาดคลื่นหรือแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน

ความสามารถในการรับรู้คลื่นการสั่นสะเทือนของมนุษย์ขึ้นอยู่กับ ขนาดความถี่ของการตั้ง ใจรับรู้และลักษณะ เฉพาะของบุคคล ขนาดของคลื่นความถี่ที่ปกติจะสามารถรับรู้ การสั่นสะเทือนได้ เมื่อขนาดคลื่น (amplitude) ตั้งแต่ 0.001 นิ้ว หรือประมาณ 25 ไมครอนขึ้นไป ขนาดของคลื่นที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารและสิ่งปลูกสร้าง ได้ ตั้งแต่ 0.04 นิ้ว หรือ 1016 ไมครอนขึ้นไป จากผลการศึกษาขนาดคลื่นการสั่นสะเทือน ที่ยอมรับได้ สำหรับสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ที่จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใด ๆ ควรอยู่ต่ำกว่า 0.008 นิ้ว หรือ 203 ไมครอน ในกรณีอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างนั้นเป็นโบราณสถานหรือ ป้องกันการร้องเรียน หรือป้องกันการขัดแย้งกับชุมชนขนาดคลื่นการสั่นสะเทือนควรต่ำกว่า 0.003 นิ้ว หรือ 76 ไมครอน

การสั่นสะเทือนจากการระเบิดในรูปคลื่นพัลส์ พบว่าเป็นความสัมพันธ์กับปริมาณ วัตถุระเบิดที่ระเบิดพร้อมกัน ระยะทางจากจุดระเบิด ไปยังจุดที่ได้รับผลกระทบจากการสั่น สะเทือน และสภาพทางธรณีวิทยาของชั้นหินและชั้นดินที่เป็นตัวกลางการส่งผ่านคลื่นการสั่น สะเทือน ความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปสมการที่ 83

$$A = \frac{Kv W^{1/2}}{r} \quad (83)$$

เมื่อ A = ขนาดแอมพลิจูดของคลื่นความสั่นสะเทือนสูงสุด (maximum amplitude) มีหน่วยเป็น เศษหนึ่งส่วนพันนิ้ว

W = น้ำหนักวัตถุระเบิด มีหน่วยเป็น ปอนด์

r = ระยะห่างจากจุดที่ทำการระเบิดถึงจุดที่ตรวจวัดมีหน่วยเป็น ฟุต

K_v = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีวิทยาและภูมิประเทศของพื้นที่ที่มีการระเบิดและจุดตรวจวัด

เคยมีผู้ทำการศึกษาความสัมพันธ์จากการระเบิดและประมาณค่า K_v ไว้ตามลักษณะของชั้นดินหินที่ทำการระเบิดและที่อยู่รอบ ๆ จุดที่มีการระเบิดไว้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงค่า K_v ตามลักษณะของชั้นดินหินที่เป็นตัวกลางระหว่างจุดที่ระเบิดกับจุดที่ตรวจวัด

ดินหินที่มีการระเบิด	ตัวกลางระหว่างจุดที่มีการระเบิดกับสิ่งก่อสร้างข้างเคียง	ค่าคงที่ K_v โดยประมาณ
หินแข็ง	หินแข็ง	100
หินแข็ง	ดินอ่อน	200
ดิน, หินค่อนข้างแข็ง	ดินอ่อน	300
ดินอ่อน	ดินอ่อน	300

ผลการทดลองในสนามพบว่า การระเบิดแร่หรือหินที่มีการใช้กับถ่วงเวลา ขนาดคลื่นการสั่นสะเทือนสูงสุดที่เกิดขึ้นที่จุดรอบ ๆ ที่มีการระเบิด ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณวัตถุระเบิดทั้งหมดที่มีการระเบิดในครั้งนั้น แต่ขึ้นกับปริมาณวัตถุระเบิดสูงสุดที่มีการจุดระเบิดพร้อมกัน ทั้งนี้ระยะเวลาในการถ่วงเวลาของแก๊บจะต้องไม่น้อยกว่า 25 millise. และปริมาณวัตถุระเบิดสูงสุดที่จุดระเบิดพร้อมกัน (maximum charge weight per delay) จะต้องมีปริมาณไม่เกินสองในสามของปริมาณวัตถุระเบิดทั้งหมดที่ใช้ในการระเบิด ดังนั้นในการระเบิดหินและแร่โดยใช้แก๊บถ่วงเวลาทั่วไป ทำให้สามารถประเมินขนาดแอมพลิจูดของคลื่นที่เกิดขึ้นรอบ ๆ จุดที่มีการระเบิดได้ จากสมการที่ 83 เมื่อแปลงหน่วยของแอมพลิจูดจากหน่วยหนึ่งส่วนพันนิ้วให้เป็นนิ้ว จะได้สมการข้างล่างนี้

$$A = \frac{0.001K_v W^{1/2}}{r} \tag{84}$$

r

- เมื่อ A = ขนาดแอมพลิจูดของคลื่นการสั่นสะเทือนสูงสุด (maximum amplitude) มีหน่วยเป็นนิ้ว
- W = ปริมาณวัตถุระเบิดสูงสุดต่อจังหวะถ่วง (maximum charge weight per delay) มีหน่วยเป็น ปอนด์
- r = ระยะห่างจากจุดที่ทำการระเบิดถึงจุดที่วัดมีหน่วยเป็น ฟุต
- K_v = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีวิทยาและภูมิประเทศของพื้นที่ที่มีการระเบิดและจุดตรวจวัด

5.2.2 การประเมินค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด

จากการศึกษาของหลายสถาบันเกี่ยวกับความสั่นสะเทือนจากการระเบิด พบว่าความเร็วอนุภาคสูงสุดเป็นตัวบ่งชี้ถึงอันตรายของการสั่นสะเทือนจากการระเบิดหิน ได้ดีกว่าค่าตัวแปรอื่น ดังนั้นการกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยจึงควรใช้ค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาค (peak particle velocity) เป็นตัวกำหนด โดยที่ความเร็วของอนุภาคมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณวัตถุระเบิด ระยะทางจากจุดระเบิดไปยังจุดที่ได้รับการสั่นสะเทือน สภาพทางธรณีวิทยา และตัวกลางที่ส่งผ่านคลื่นการสั่นสะเทือน ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นสมการ

$$V_r = K_v [r/W^{1/2}]^m \quad (85)$$

- เมื่อ V_r = ความเร็วอนุภาคสูงสุด (peak particle velocity) ในแนวรัศมีมีหน่วยเป็น นิ้ว/วินาที หรือปัจจุบันใช้เป็นค่า peak sum vector
- r = ระยะทางจากจุดระเบิดไปยังจุดตรวจวัดมีหน่วยเป็น ฟุต
- W = น้ำหนักวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วงที่ห่างกันเกิน 8 millisecc. มีหน่วยเป็น ปอนด์
- K_v และ m = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีวิทยาและภูมิประเทศจากจุดระเบิดไปยังจุดตรวจวัด

จากสมการดังกล่าวพบว่าค่า K_v และ m เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีวิทยาและภูมิประเทศต่าง ๆ ที่จุดนั้น ๆ จากการศึกษารายงานของ United States Bureau

of Mines (USBM) พบว่าการระเบิดที่หน้าเหมืองเป็นจำนวนมากหลายครั้ง หากนำผลมาสร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด V_x และค่า $r/W^{1/2}$ ใน log-log scale (ดังรูปที่ 21 หน้า 77) จะพบว่า K_v เป็นจุดตัดในแกนค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด ส่วนค่า m เป็นค่าความลาดชันของเส้นกราฟ ดังนั้นจึงได้สมการที่คำนวณหาค่า V_x ที่อยู่ในระดับความปลอดภัยสำหรับสภาพธรณีวิทยา หรือภูมิประเทศทุกสภาพ แล้วยังสามารถกำหนดค่า K_v และ m ที่อยู่ในระดับสูงสุดเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า V_x ที่มีโอกาสเกิดได้สูงสุดจากการระเบิด ซึ่ง USBM ได้กำหนดค่า K_v สูงสุดสำหรับชั้นดิน ให้ค่า $K_v = 160$ และให้ค่า $m = -1.6$

ส่วนค่า $r/W^{1/2}$ เป็น scaled distance มีหน่วยเป็น ฟุต/ปอนด์^{1/2} ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญของสมการ 85 หน้า 75 เหมาะสมกับการระเบิดโดยการบรรจุในรูเจาะที่มีความยาวช่วงบรรจุวัตถุระเบิดมีค่ามากกว่า 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ (cylinder charge) นอกจากนี้ยังไม่สามารถใช้ได้กับการระเบิดขนาดมหึมาศาล เช่นระเบิดนิวเคลียร์ หรือการระเบิดที่มีหน้าอิสระน้อย เช่นการเคาะไม้งัดโดยการเจาะแบบ burn cut หรือการระเบิดแบบ presplitting ซึ่งมีค่าการสั่นสะเทือนสูงกว่าการคำนวณโดยวิธีนี้

เมื่อกำหนดค่าคงที่ K_v และ m ไว้ที่ระดับสูง และทำการกำหนดค่าของ scaled distance ที่มีผลทำให้ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย จะสามารถคำนวณปริมาณวัตถุระเบิดต่อจังหวะต่างได้จากสูตร

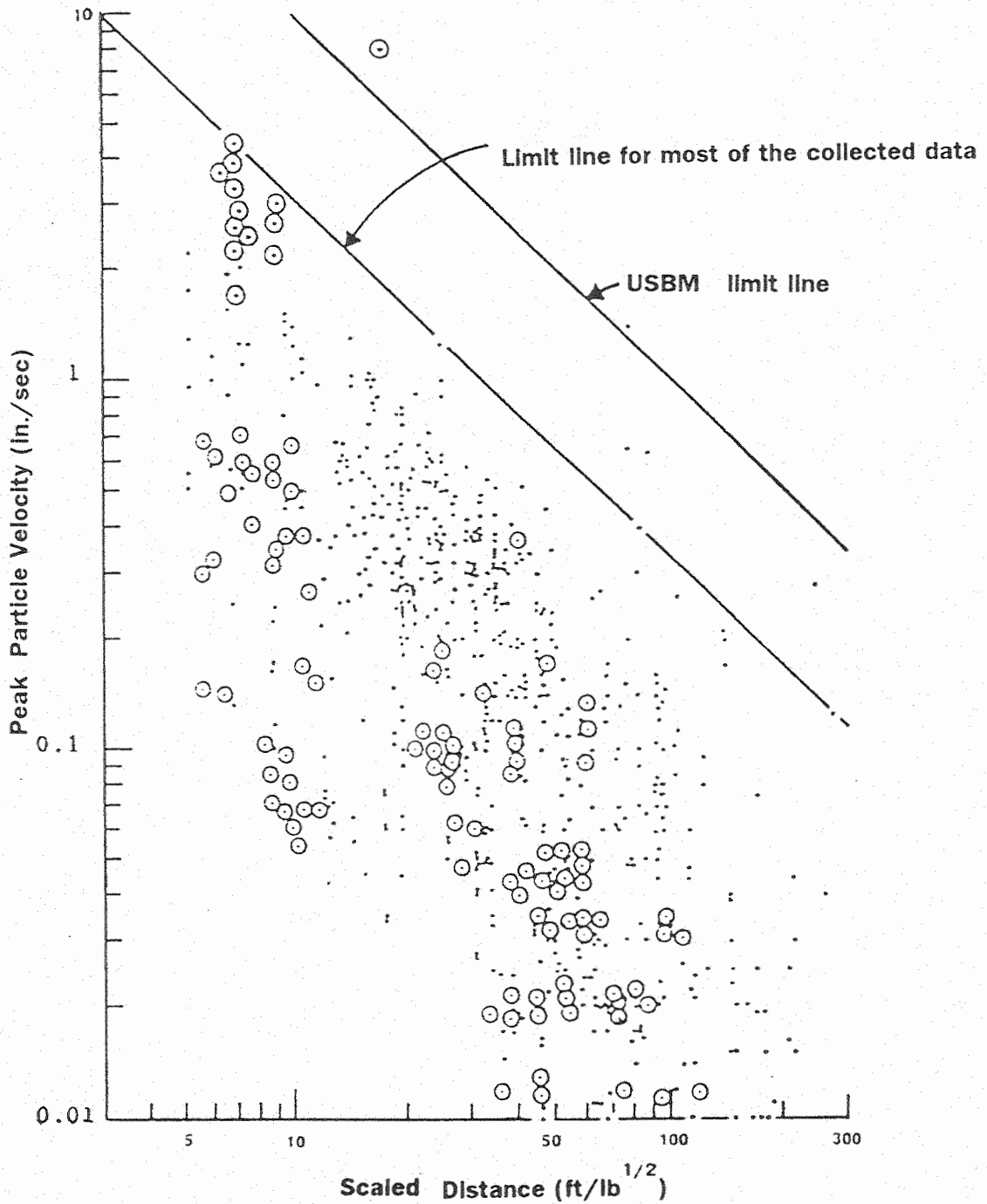
$$D_s = r/W^{1/2} \quad (86)$$

เมื่อ D_s = scaled distance ที่กำหนด (ฟุต/ปอนด์^{1/2})

r = ระยะทาง (ฟุต)

W = น้ำหนักวัตถุระเบิดต่อจังหวะต่าง (ปอนด์)

ดังนั้น เมื่อกำหนดค่า scaled distance ที่มีผลทำให้ค่าความเร็วของอนุภาคสูงสุดไม่เกินกำหนดแล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณวัตถุระเบิดที่ใช้ต่อจังหวะต่างได้อย่างคล่องตัวและรวดเร็วในทางปฏิบัติ ปกติค่า scaled distance ที่อยู่ในระดับที่ปลอดภัย



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดจากการระเบิดและค่า scaled distance ($r/W^{1/2}$)

ต้องสูงกว่า 50 ฟุต/ปอนด์^{1/2} ในกรณีที่มีการตรวจวัดความสั่นสะเทือนรวมทั้งการออกแบบการระเบิดที่เหมาะสมแล้วค่า scaled distance อาจสามารถลดลงมาถึงในระดับ 20 ฟุต/ปอนด์^{1/2}

ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัตถุระเบิดต่อระยะทางที่ scaled distance ต่าง ๆ

ระยะทาง (ฟุต)	ปริมาณวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วง (ปอนด์)	
	Scaled distance 50 ft/lb ^{1/2}	Scaled distance 20 ft/lb ^{1/2}
100	4	25
500	100	625
1,000	400	2,500
2,000	1,600	10,000

เมื่อค่า scaled distance ที่กำหนดไว้ 50 ฟุต/ปอนด์^{1/2} ทำให้โอกาสที่จะทำให้ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดวัดได้สูงกว่า 2 นิ้ว/วินาที มีน้อยมาก อย่างไรก็ตาม ยังพบว่าโอกาสที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง และกระทบกระเทือนต่อความรู้สึกของชุมชนว่าถูกรบกวนยังมีอยู่ จากการศึกษาในชั้นรายละเอียดพบว่า นอกจากความเร็วอนุภาคสูงสุดเป็นปัจจัยสำคัญต่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ยังพบว่าคลื่นความถี่ของการสั่นสะเทือนมีผลโดยตรงต่อสิ่งปลูกสร้าง เช่นเดียวกัน โครงสร้างของสิ่งปลูกสร้างก็เป็นปัจจัยสำคัญที่จะได้รับผลของการสั่นสะเทือน ทั้งนี้สภาพธรรมชาติของการสั่นสะเทือนคลื่นที่มีความถี่สูงจะสูญเสียพลังงานขณะเดินทางผ่านตัวกลางรวดเร็ว ค่าความถี่ที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างอยู่ระหว่าง 1-500 รอบ/วินาที (Hertz)

5.2.3 การสเกลค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาคโดยใช้รากกำลังสาม

ได้มีการเสนอแนวทางสำหรับสเกลค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาค เพื่อนำไปสู่เกณฑ์การหาผลเสียหาย (damage criteria) ของการระเบิดในงานวิศวกรรม ที่มี

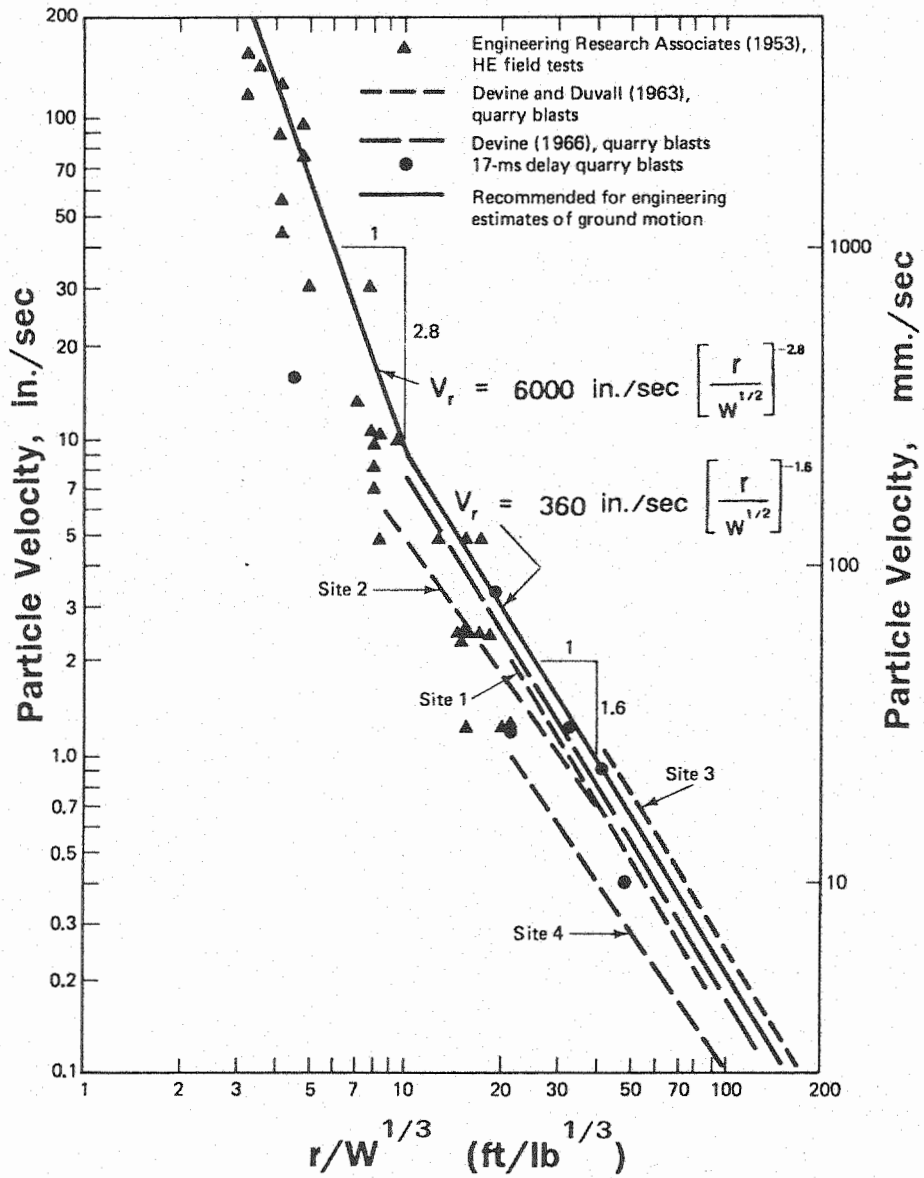
ผลกระทบต่อบ้านเรือนที่อยู่อาศัยความสูงไม่เกิน 2 ชั้น (Langefors, et al., 1958; Edwards and Northwood, 1960) เมื่อมีการรวบรวมผลของการวัดในภาคสนามจากข้อมูลหลายแหล่ง (Ambraseys and Hendron, 1968) พบว่า ค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาคสามารถเทียบได้กับรากกำลังสามของน้ำหนักวัตถุระเบิด ข้อมูลเหล่านี้ยังยืนยันต่อไปได้อีกว่า "ความเร็วสูงสุดของอนุภาคเป็นข้อมูลเข้าพลศาสตร์ (dynamic input) มีผลกระทบต่อ การเสียหาย (damage) มากที่สุด"

ข้อมูลเข้าในภาคสนาม ที่ได้มาจากการทดสอบวัตถุระเบิดพลังงานสูง (high explosive) และการระเบิดสำหรับเหมืองหิน (quarry blast) จากการจดบันทึกจำนวนหลายแหล่งข้อมูลเหล่านี้ (ดูรูปที่ 22) รวมทั้งค่าความเร็วของอนุภาคในแนวรัศมีที่เกิดจากการระเบิดแบบ spherical charges ช่วงตั้งแต่ 14-145,000 กิโลกรัม (30-320,000 ปอนด์) ต่อ 1 delay

ถึงแม้ว่าจะมีการแปรเปลี่ยน W เป็นช่วงระยะกว้างมาก ผลของการสเกลก็แสดงให้เห็นว่า ค่ายอดสูงสุดของความเร็วอนุภาคมีความสัมพันธ์คงที่กับพิสัยของสเกล $rW^{1/3}$ เมื่อวิเคราะห์ต่อความทฤษฎีออสติคของคลื่นทรงกลมที่เดินทางผ่านไป infinite body ได้คาดคะเนว่า "ยอดสูงสุดสำหรับแอมพลิจูดของความเร็วอนุภาคจะสลายไปในอัตราส่วนของ $(1/r)^n$ ซึ่งค่า n เท่ากับ 2 เมื่อใกล้กับจุดแหล่งกำเนิด และค่า n เท่ากับ 1 เมื่อระยะทางไกลขึ้น" (Duvall, 1953; Mueller, 1969)

จากการวิเคราะห์กราฟในรูปที่ 22 หน้า 80 จะสอดคล้องกับทฤษฎีทางออสติค โดยมีการสลายของความเร็วอนุภาคลดลง เมื่อสเกลของพิสัยมีระยะเพิ่มขึ้น ในระยะไกล ๆ ความเร็วของอนุภาคสลายเท่ากับ $(r/W^{1/3})^{-2.8}$ หรือเป็นสัดส่วนกับ $r^{-2.8}$ และในระยะไกลความเร็วของอนุภาคสลายเท่ากับ $(r/W^{1/3})^{-1.6}$ หรือเป็นสัดส่วนกับ $r^{-1.6}$ ซึ่งจากทฤษฎีออสติค ในระยะไกลควรจะสลายเท่ากับ $(r/W^{1/3})^{-1}$ ซึ่งพอจะอธิบายได้ว่า สาเหตุที่มีการสลายในอัตราสูงกว่า 1 เนื่องจากเกิดการหน่วง (damping) มาจากผลของ inelastic action ในมวลหินที่ทำการระเบิด

การประยุกต์ใช้ empirical scale ในภาคสนามนั้นต้องมีขอบเขตของพิสัยก่อนใช้ สมการทาง empirical ที่นำเสนอโดย Ambraseys and Hendron (1968) ที่จัดเป็น conservative equations คือ



รูปที่ 22 กราฟแสดงการตรวจวัดผลในภาคสนามของความเร็วอนุภาค
ในแนวรัศมี, V_r เมื่อเทียบกับสเกลที่เป็นรากกำลังสามของ
ระยะ, $rW^{1/3}$ (จาก Dowding, 1985 หน้า 26)

a) ถ้าหากพิสัยของสเกลเกิน 10 ฟุต/ปอนด์^{1/3} ควรใช้สมการ

$$V_r = 360 \text{ in./sec } (r/W^{1/3})^{-1.6} \quad (87)$$

b) ถ้าหากพิสัยของสเกลต่ำกว่า 10 ฟุต/ปอนด์^{1/3} ก็ใช้สมการ

$$V_r = 6,000 \text{ in./sec } (r/W^{1/3})^{-2.8} \quad (88)$$

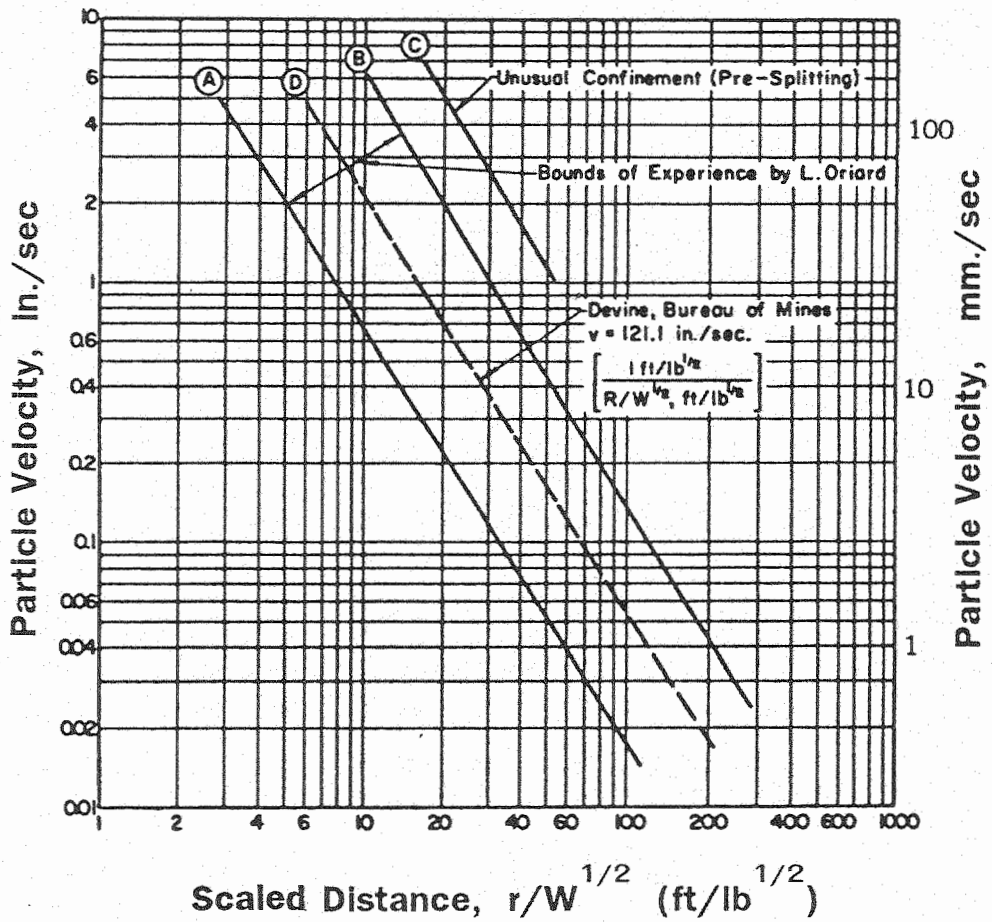
5.2.4 การสเกลค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดโดยใช้รากกำลังสอง

หลักการของการสเกลรากกำลังสอง ได้แก่ การพล็อตค่ายอดสูงสุดของความเร็วอนุภาคเป็นฟังก์ชันกับระยะทาง, r หารด้วย รากกำลังสองของน้ำหนักวัตถุระเบิด, $W^{1/2}$ กลายเป็นสเกลของพิสัย (scaled range) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าสเกลของระยะทาง (scaled distance) ทำให้สามารถเขียนอยู่ในรูปของ $r/W^{1/2}$

การสเกลรากกำลังสองนี้ ตั้งสมมุติฐานว่า วัตถุระเบิดถูกบรรจุ (โหลด) อยู่ในรูปทรงกระบอกยาว (เหมือนกับหลุมเจาะระเบิดที่อยู่ในสภาพจริง) กำหนดให้ ความหนาแน่นของหิน, ρ มีค่าคงที่ เส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะก็จะเป็นสัดส่วนกับรากกำลังสองของน้ำหนักวัตถุระเบิด ซึ่งจะได้อัตราส่วนของ $r/W^{1/2}$ หรือเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวสองอย่าง ความยาวประการแรกได้แก่ ระยะทางระหว่างจุดแหล่งกำเนิดการระเบิดจนถึงจุดที่ตั้งของ close-in transducer เท่ากับค่า r ความยาวประการสองได้แก่ รัศมีของหลุมเจาะระเบิดที่เป็นสัดส่วนกับน้ำหนักวัตถุระเบิด เท่ากับค่า $W^{1/2}$

Hendron และ Oriard (1972) ได้รวบรวมข้อมูลที่ใช้การสเกลของรากกำลังสอง โดยแสดงไว้ในรูปที่ 23 หน้า 82 ในรูปนี้เส้น A และ B เป็นกราฟที่ได้จากประสบการณ์ในการทำงานของ L. Oriard ซึ่งกำหนดให้เส้น A เป็น lower bound ส่วนเส้น B เป็น upper bound

ในเชิงปฏิบัติการจริง Oriard แนะนำให้ใช้เส้น upper bound (เส้น B) ส่วนเส้น C เป็นการระเบิดที่ใช้เทคนิคพิเศษเพื่อให้หินแตกเป็นแนวเรียบ ที่เรียกว่า preslitting หรือการระเบิดเป็นหลุมหรือแอ่ง ที่เรียกว่า cratering และการเริ่มต้นเปิดแนว bench ของเหมืองเปิดในแนวใหม่ สำหรับเส้น D ที่ปรากฏในรูปที่ 23 แสดง



รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาคเมื่อเทียบกับการสเกลรากล้างสองเพื่อประเมินหาค่าสมการการสลายตัวของคลื่น (จาก Hendron and Oriard, 1972)

กราฟที่ได้จากการฟิตแบบ best fit ของการตรวจวัดค่าความเร็วอนุภาคในแวนรัศมี ในระหว่างที่ทำการระเบิดหินซึ่งได้จากข้อมูลของรายงานโดย Devine (1966)

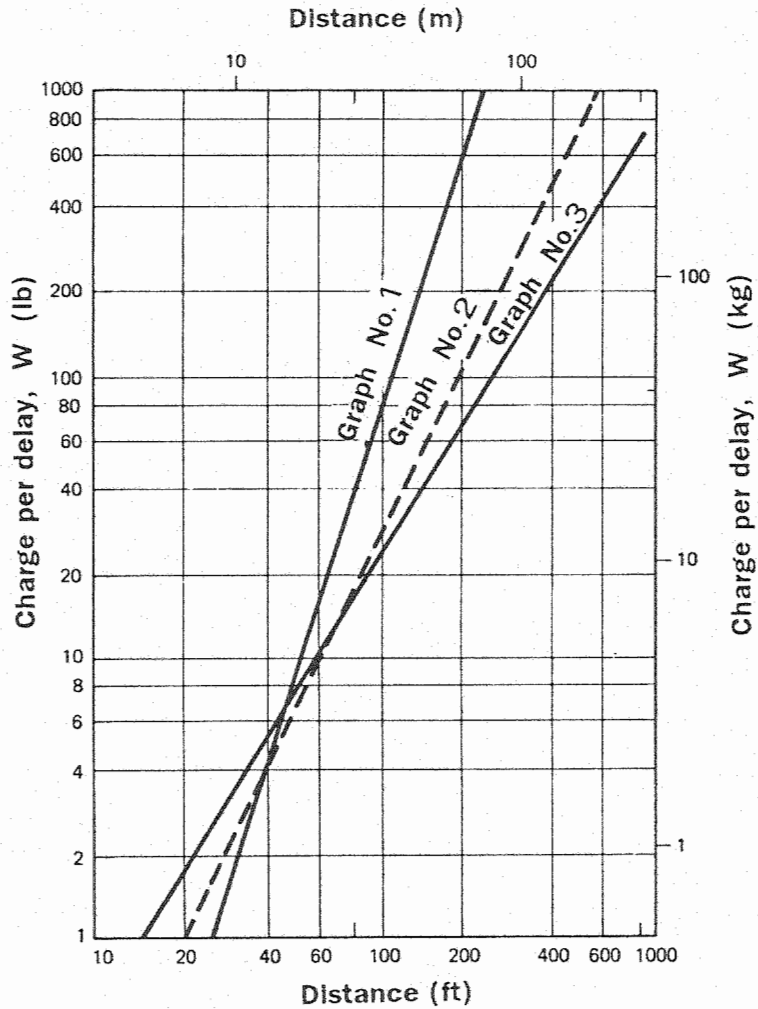
จากรูปที่ 23 มีข้อสังเกตว่า กราฟของเส้น D อยู่ตรงเกือบระยะกึ่งกลางระหว่าง กราฟของเส้น A และ B ซึ่งทำให้ยืนยันได้ว่า ถึงแม้ว่าข้อมูลจากการตรวจวัดการสั่นสะเทือนอยู่ในสภาพกระจาย (scattering) แสดงว่าธรรมชาติของการตรวจวัดการสั่นสะเทือนควรมีพิสัยอยู่ในระหว่าง เส้น A ถึงเส้น B

5.2.5 ข้อเปรียบเทียบการสเกลของรอกกำลังสองกับรอกกำลังสาม

ในการศึกษาข้อมูลของงานที่ผู้อื่นได้ทำมาจนถึงขณะนี้ คณะผู้วิจัยยังไม่สามารถจะระบุได้ว่าการสเกลรอกกำลังสองกับการสเกลรอกกำลังสามอย่างไหนดีกว่ากัน หรือยังไม่สามารถระบุไปได้ว่า การสเกลทั้งสองแบบนี้ แบบไหนเหมาะสำหรับการหาความเร็วของการเปลี่ยนแปลง แบบไหนเหมาะสำหรับการหาความสัมพันธ์ของความเร็วอนุภาค และแบบไหนเหมาะสำหรับการหาความสัมพันธ์ของความเร็วอนุภาค เพียงแต่พบว่า ในการทำการระเบิดหินภาคสนาม เหมือนเปิดส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะใช้การสเกลรอกกำลังสอง ในทางกลับกัน เหมือนได้หินส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะใช้การสเกลรอกกำลังสาม

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบเทคนิคของการสเกล จึงได้ทำการพล็อตความสัมพันธ์ของน้ำหนักวัตถุระเบิดกับระยะทางที่รวบรวมมาจากงานวิจัย 3 แหล่ง โดยแสดงไว้ในรูปที่ 24 หน้า 84 เส้นแรก (หมายเลข 1-หนึ่ง) เป็นเส้นกราฟที่ได้จากงานของ Ambraseys and Hendron (ใช้การสเกลรอกกำลังสาม) กำหนดให้ ความเร็วสูงสุดของอนุภาค เท่ากับ 51 มม./วินาที (2 นิ้ว/วินาที) และกราฟเส้นที่สอง (หมายเลข 2) เป็นเส้นกราฟที่ได้จากงานของ Oriard (ใช้การสเกลรอกกำลังสอง) โดยเลือกเส้น upper bound ส่วนกราฟเส้นที่สาม (หมายเลข 3) เป็นเส้นที่แสดงสำหรับความเร็วสูงสุดของอนุภาคที่กำหนดให้เท่ากับ 51 มม./วินาที ใช้เปรียบเทียบโดยตรงกับน้ำหนักวัตถุระเบิดกับระยะทาง (ไม่ได้ทำการสเกล) โดยรวบรวมไว้ในตำราการระเบิดของ Langefors and Kihlstrom (1978)

ข้อแตกต่างระหว่างการสเกลรอกกำลังสามกับการสเกลรอกกำลังสอง (กราฟเส้น 1 กับกราฟเส้น 2) ไม่เห็นความแตกต่างเด่นชัดให้ปรากฏมากนัก ในช่วงระยะ



รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักวัตถุระเบิดกับระยะทาง เมื่อกำหนดให้ ความเร็วอนุภาคสูงสุด เท่ากับ 51 มม./วินาที (2 นิ้ว/วินาที)

- กราฟหมายเลข 1 เป็นงานของ Ambraseys and Hendron ใช้สเกลรากกำลังสาม
- กราฟหมายเลข 2 เป็นงานของ Oriard ใช้สเกลรากกำลังสอง
- กราฟหมายเลข 3 เป็นงานของ Langefors and Kihlstrom ไม่ได้ทำการสเกล

ระหว่าง 6 ถึง 31 เมตร (20-100 ฟุต) แต่พบว่า เมื่อระยะมากกว่า 31 เมตร การใช้สเกลกำลังสองจะเป็นการเสี่ยงน้อยกว่า (more conservative) ในทำนองกลับกัน ที่ระยะน้อยกว่า 6 เมตร การสเกลรากกำลังสามจะเสี่ยงน้อยกว่า

สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างงานของ Langerfors and Kihlstrom กับเทคนิคการสเกลทั้ง 2 แบบ ในช่วงระยะไม่เกิน 24 เมตร (80 ฟุต) ไม่มีข้อแตกต่างชัดเจน แต่ถ้าเกิน 24 เมตร กราฟจากงานของ Langerfors and Kihlstrom จะแสดงให้เห็นว่ามีการเสี่ยงน้อยกว่า

ข้อสังเกตเพิ่มเติมในเรื่องเทคนิคของการสเกลคือ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและมิติต่าง ๆ จะถูกต้องมากที่สุด ขึ้นอยู่กับว่ามาจากค่า W และ r ที่ใกล้เคียงกัน ไม่ใช่มาจากอัตราส่วน ของ $r/W^{1/2}$ (ในกรณีสเกลรากกำลังสอง) ยกตัวอย่างเป็นตัวเลขเช่นชุดหนึ่งของ $W = 2500$ และ $r = 500$ กับอีกชุดหนึ่งของ $W = 25$ และ $r = 50$ ทั้งคู่ก็หาได้อัตราส่วน $r/W^{1/2} = 10$ นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ตามชนิดของคลื่น คลื่นแบบ surface wave จะปรากฏเด่นชัดที่ $r = 500$ ส่วนคลื่นแบบ body wave จะปรากฏให้เห็นเด่นชัดที่ $r = 50$ (เพราะเดินทางได้เร็วกว่า) จึงมีผลถึงอัตราการสลายของคลื่น ตลอดจนเป็นผลต่อความถี่ของคลื่น ทำให้ได้ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดแตกต่างกันด้วย

กล่าวโดยสรุป คณะผู้วิจัยขอเสนอแนะว่า ต้องการตอบสนองของโครงสร้างหินที่จะทำการระเบิดและสิ่งก่อสร้างข้างเคียง เพื่อหาเทคนิคของการสเกลกับชนิดของคลื่นที่มีผลกระทบก่อให้เกิดการเสียหาย ระดับของการตัดสินใจทางด้าน conservatism ขึ้นอยู่กับว่าการทดสอบการระเบิด (test blasts) ในขณะนั้น มีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับงานการระเบิดเพื่อพัฒนาหน้าเหมือง (production blasts) มากน้อยแค่ไหน กรณีตัวอย่างเช่น ถ้าหากทำการระเบิดในระยะใกล้ และต้องการให้การสั่นสะเทือนอยู่ในขอบเขตก็ต้องเปรียบเทียบกับสเกลในระยะใกล้ ในทำนองเดียวกันการสเกลในระยะไกลใช้เมื่อทำการระเบิดห่างออกไปจากจุดเดิม ปกติการสเกลของรากกำลังสามค่อนข้างจะเสรีมากกว่าการสเกลของรากกำลังสอง ในกรณีที่ต้องการเสี่ยงน้อย ควรเลือกออกแบบการระเบิดหินที่ใช้การสเกลของรากกำลังสอง ซึ่งต้องวิเคราะห์รวมถึงเรื่ององค์ประกอบอื่นที่เป็นตัวแปรในการตัดสินใจ เช่น ความไม่ต่อเนื่องของหิน เสียงดังจากการระเบิด หินปลิวกระเด็นจากการระเบิด และการใช้กับช่วงเวลา เป็นต้น

5.3 มาตรฐานความปลอดภัยสำหรับการกำหนดค่าการสั่นสะเทือน

จากข้อมูลที่ได้ทำการตรวจวัดจากหลายสถาบัน หลายแห่ง และหลายประเทศ สิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในเรื่องพิสัยหรือระดับขั้นของคว่ำแปรจากงานระเบิด ที่มีผลกระทบ น้อยที่สุดและเป็นที่ยอมรับได้ในระดับหนึ่ง จะถูกจัดเป็นมาตรฐานความปลอดภัย ตัวอย่างที่จะกล่าวต่อไปนี้ เป็นมาตรฐานความปลอดภัยของประเทศสหรัฐอเมริกาและของประเทศ ออสเตรเลีย

5.3.1. มาตรฐานความปลอดภัยของสหรัฐอเมริกา

United States Office of Surface Mining (OSM) ได้ทำการกำหนด มาตรฐานความปลอดภัยสำหรับการสั่นสะเทือนจากการระเบิดของเหมืองเปิด ไว้ดังนี้

1. ควบคุมความเร็วของอนุภาคสูงสุด (peak particle velocity) โดยทำการตรวจวัดและป้องกันไม่ให้ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดเกินมาตรฐานที่ระยะทางต่าง ๆ ดัง ตารางที่ 8 ซึ่งข้อกำหนดในตารางที่ 8 นี้ เปิดโอกาสให้มีการใช้วัตถุระเบิดจำนวนมาก ขึ้นได้ หรือออกแบบการระเบิดที่มีประสิทธิภาพสูงได้ แต่ต้องมีการตรวจวัดค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการระเบิดทุกครั้ง ข้อสังเกตสำหรับมาตรฐานความปลอดภัยนี้ ได้แก่ เมื่อระยะทางจากจุดระเบิดถึงจุดที่ได้รับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนห่างไกลออกไป ค่ามาตรฐานความเร็วอนุภาคสูงสุดลดลง เนื่องจากอันตรายที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนเป็น คลื่นความถี่ต่ำ

ตารางที่ 8 มาตรฐานความปลอดภัยของความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระยะทางต่าง ๆ

ระยะทาง (ฟุต)	ความเร็วอนุภาคสูงสุด (นิ้ว/วินาที)
0-300	1.25
301-5,000	1.00
มากกว่า 5,000	0.75

2. ความคุม scaled distance สำหรับเหมืองที่ไม่มีเครื่องตรวจวัดการสั่นสะเทือนจะกำหนดค่า scaled distance ค่าสุด ที่ระยะทางต่าง ๆ ไว้ ดังตารางที่ 9 ข้างล่างนี้

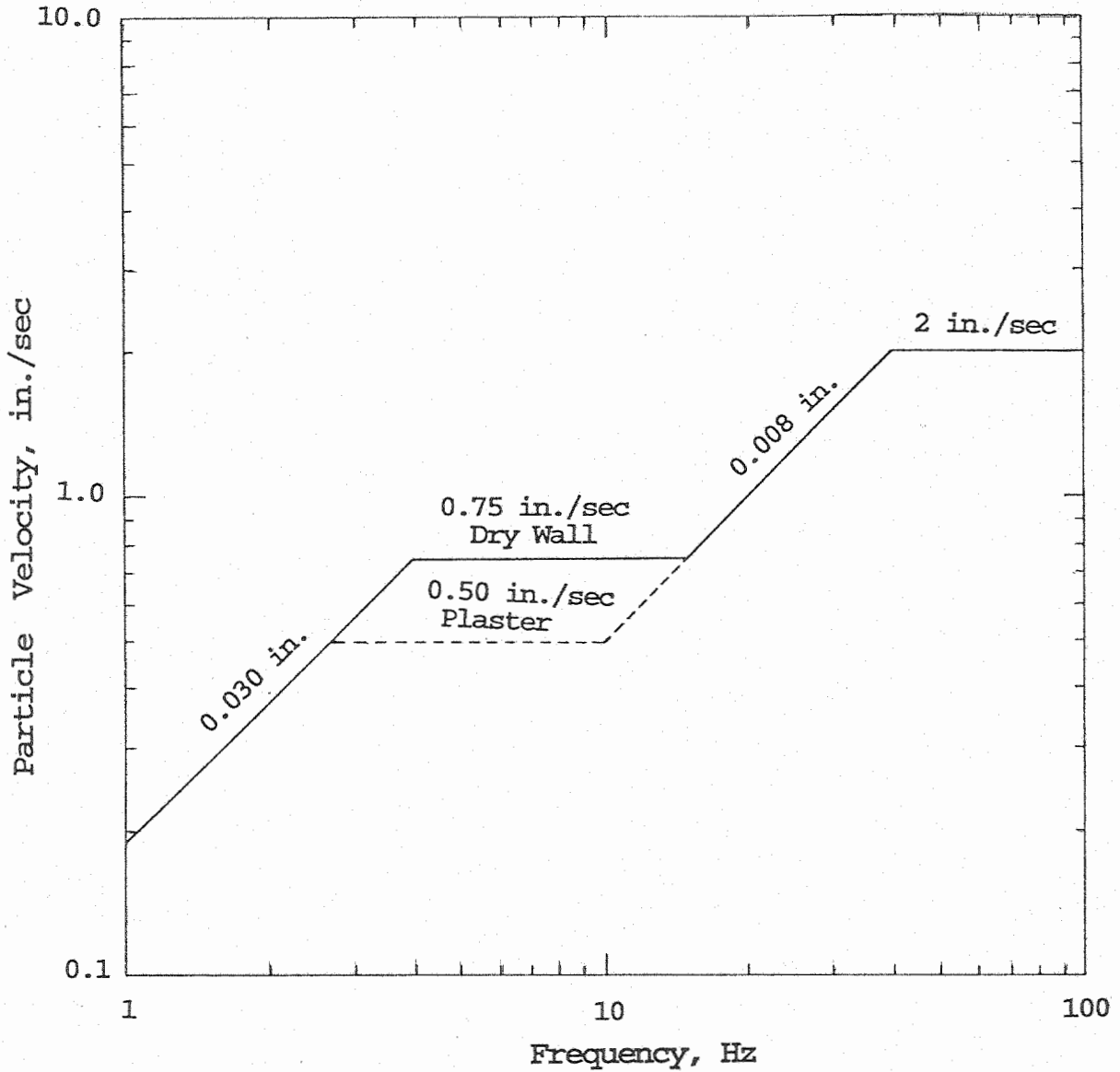
ตารางที่ 9 มาตรฐานความปลอดภัยของค่า scaled distance ที่ระยะต่าง ๆ

ระยะทาง (ฟุต)	Scaled distance (ฟุต/ปอนด์ ^{1/2})
0-300	50
301-5,000	55
มากกว่า 5,000	65

ค่า scaled distance ที่กำหนดไว้จะเป็นค่าที่ทำให้เกิดความเร็วอนุภาคสูงสุดที่อยู่ในระดับที่มีความปลอดภัย และสะดวกต่อการปฏิบัติงาน เมื่อต้องการคำนวณหาปริมาณวัตถุระเบิดสูงสุดต่อจังหวะถ่วง

3. ความคุมความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระดับความถี่ต่างๆ รูปที่ 25 หน้า 88 เป็นกราฟที่สรุปผลจากที่งานที่ศึกษา เรื่องการสั่นสะเทือนของ U.S. Bureau of Mines (Report of Investigations No. 8507) กำหนดค่าความปลอดภัยโดยการควบคุมความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ระดับความถี่ต่างๆ เส้นกราฟในรูปแสดงขอบเขตของค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ เช่น ที่ความถี่สูงกว่า 40 Hz ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดไม่เกิน 2.0 นิ้ว/วินาที ในขณะที่ความถี่ 1 Hz ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดไม่เกิน 0.2 นิ้ว/วินาที

ดังนั้น การระเบิดแต่ละครั้งจะต้องทำการตรวจวัดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดควบคู่กับการตรวจวัดค่าความถี่เนื่องจากการระเบิด ในกรณีของค่าความถี่สูงกว่า 40 Hertz ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดไม่เกิน 2.0 นิ้ว/วินาที แต่ที่ระดับต่ำกว่า 40 Hertz ค่าความเร็วอนุภาคที่อยู่ในระดับปลอดภัยลดต่ำลง เท่ากับ อัตราส่วนของการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุด 0.008 นิ้ว ที่ค่าความถี่ต่างๆนี้ ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ปลอดภัยสำหรับ dry wall คือ 0.75 นิ้ว/วินาที และสำหรับ plaster คือ 0.50 นิ้ว/วินาที



รูปที่ 25 มาตรฐานของการสั่นสะเทือนเนื่องจากการระเบิด ที่มีผลกระทบต่อบ้านที่อยู่อาศัยไม่เกิน 3 ชั้น ในกราฟได้กำหนดค่าของความเร็วอนุภาคสูงสุด (ควบคุมกับการเปลี่ยนตำแหน่งอนุภาค - displacement) ที่ค่าความถี่ระดับต่างๆ ตั้งแต่ 1 Hertz จนถึง 100 Hertz

กรณีของความถี่จากการระเบิดมีค่าต่ำกว่า 4 Hertz ค่าของการเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลอดภัยมีค่าสูงขึ้น แต่ไม่ควรเกิน 0.030 นิ้ว

5.3.2. มาตรฐานความปลอดภัยของออสเตรเลีย

ประเทศออสเตรเลียได้กำหนดค่ามาตรฐานความปลอดภัยของการสั่นสะเทือนจากการระเบิดตาม Australian Standards AS 2187-1983 ซึ่งกำหนดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด ตามสภาวะสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

1. โบราณสถาน ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดไม่เกิน 2 มิลลิเมตร/วินาที
2. บ้านพักอาศัย ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดไม่เกิน 10 มิลลิเมตร/วินาที
3. ศูนย์การค้า โรงงานอุตสาหกรรม สิ่งก่อสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดไม่เกิน 25 มิลลิเมตร/วินาที

ส่วนสถาบันอีกแห่งหนึ่งของออสเตรเลีย คือ Australian Environment Council (AEC) ได้กำหนดแนวทางการควบคุม ไม่ให้การสั่นสะเทือนจากการระเบิดรบกวนต่อชุมชนต่างๆ ไว้ดังนี้

1. ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่เกินกว่า 5 มิลลิเมตร/วินาที มีได้ไม่เกิน 5% ของจำนวนการระเบิดทั้งหมด
2. การระเบิดทุกครั้ง ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดไม่เกิน 10 มิลลิเมตร/วินาที



บทที่ 6

เสียงดังจากการระเบิด หินปลิว และ ควันท้าชพิษ

ผลกระทบคือสิ่งแวดล้อมในเรื่องของการพัฒนาเมืองหิน นอกจากเรื่องของการ
สิ้นสะเทือนแล้ว ก็ยังมีเรื่องเสียงดังของการระเบิดที่เกิดการรบกวนต่อผู้อยู่อาศัยใกล้เคียง
และอาจทำให้บางส่วนของอาคารโครงสร้าง เช่น กระจกเกิดการแตกร้าว เป็นต้น
ผลกระทบอื่น ๆ ได้แก่ หินปลิวที่เกิดจากการจุดระเบิด และหินได้ปลิวกระเด็นไปไกลกว่า
จุดที่คาดคะเนไว้ ความแรงจากไอเมเนคัมของมวลหินอาจก่อให้เกิดความสูญเสียในทรัพย์สิน
หรือขัดขวางการปฏิบัติงานภาคสนามได้ ถ้าหินปลิวตกไปในตำแหน่งบนถนนที่ทำการขนส่งหิน
และเครื่องจักรกล สำหรับผลกระทบเรื่องควันท้าชพิษ เกิดจากการไม่สมดุลในปฏิกิริยา
ของการผสมสารเคมีของวัตถุระเบิดในระหว่างการจุดติด

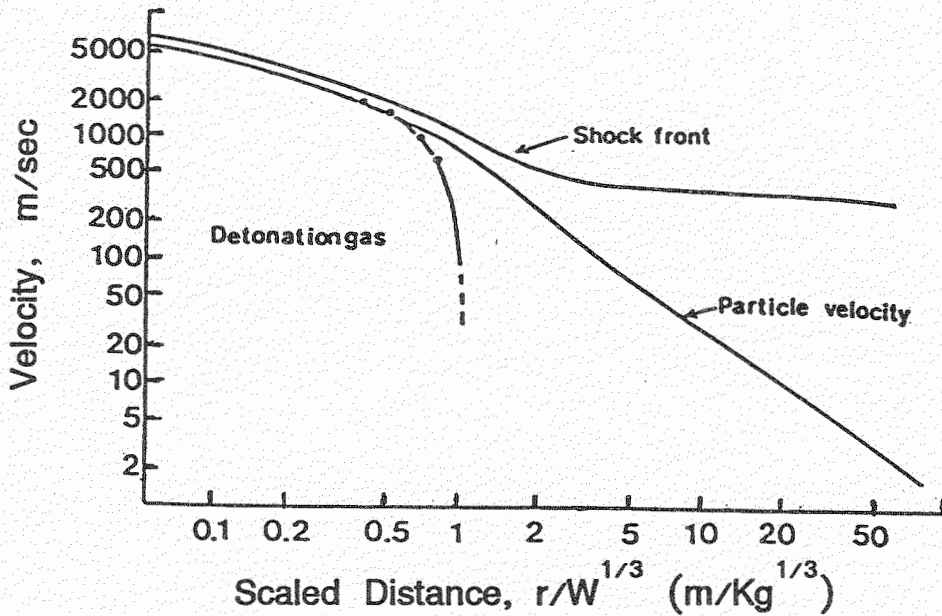
6.1 เสียงดังเกินขนาดจากการระเบิด

เมื่อมีการระเบิดเกิดขึ้น พลังงานส่วนหนึ่งของคลื่นความดันที่สูงกว่าความดัน
บรรยากาศ (overpressure) จะแผ่กระจายก่อให้เกิดผลกระทบจากเสียงที่เกิดจาก
การระเบิด คำศัพท์ที่เรียกว่า "air blast" จะใช้ในความหมายสำหรับความดันของ
คลื่นในอากาศที่เกิดจากการระเบิด ส่วนคำศัพท์ที่ใช้กันทั่วไปเกี่ยวกับเสียงคือ "noise"
จะเป็นเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินเมื่อคลื่นความถี่ระหว่าง 20-20,000 Hertz ถ้าหาก
คลื่นความถี่มีช่วงคลื่นต่ำกว่า 20 Hertz มนุษย์ไม่สามารถได้ยิน และใช้ศัพท์ว่า
อีกอย่างว่า "concussion"

6.1.1 ลักษณะของคลื่นความดันในอากาศ

เมื่อมีการจุดระเบิดของวัตถุระเบิดเกิดขึ้นในอากาศ เกิดปฏิกิริยาความดันของ
ก๊าซที่ขยายตัวอย่างรวดเร็วต่ออากาศที่อยู่รอบๆ ทำให้อากาศถูกบีบให้มีความเร็วตั้งต้นสูง
เท่ากับค่าความเร็วของ detonation velocity และความดันของก๊าซจากการระเบิด
จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเดินทางมาในระยะทางเพียงเล็กน้อย คลื่นกระแทกจากการ
ระเบิดนี้จะมี shock front สูงชัน และมีการลดค่าความดันจากความดันตั้งต้นพอสมควร

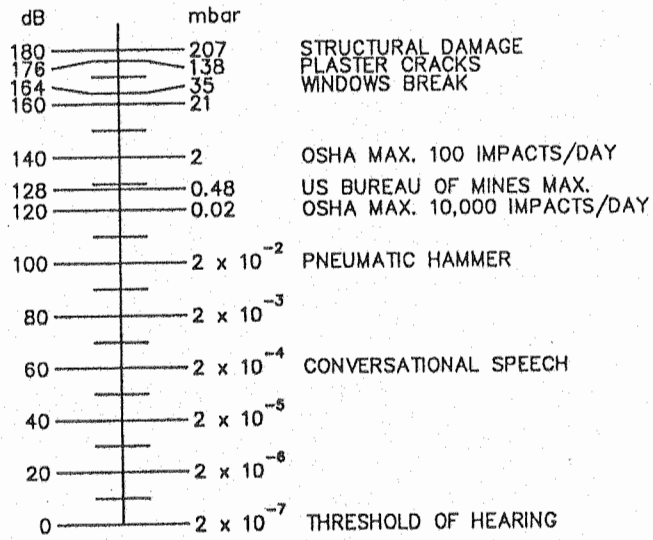
ส่วนความเร็วของอนุภาคจะลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นกราฟที่มีความลาดชันสูง (ดูรูปที่ 26) การเคลื่อนที่ผ่านของคลื่นเสียงเป็นฟังก์ชันกับระยะทาง จะหาความสัมพันธ์กับมวลวัตถุระเบิดจากการสเกลรากล้างสาม



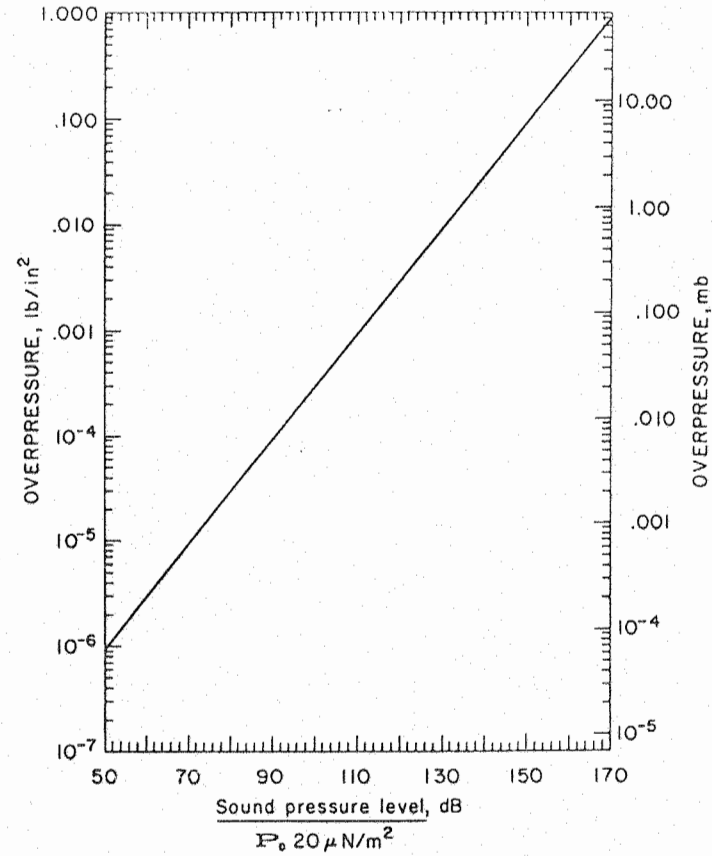
รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วต่าง ๆ ของคลื่นพัลส์ ความดันก๊าซ กับความเร็วอนุภาค โดยการสเกลด้วยรากกำลังสาม สมมติให้วัตถุระเบิดเป็น TNT (Persson et al., 1994)

6.1.2 ระดับความดังของคลื่นเสียงจากการระเบิด

ระดับความดังของเสียงที่มีต่อการได้ยินและค้นหาเนิคของเสียงที่ได้ยิน (ดูรูปที่ 27a หน้า 92) แบ่งออกเป็น 4 networks กำหนดให้มีสัญลักษณ์เป็น A, B, C และ Linear ความแตกต่างทางค่านี้นักของเสียงในระหว่างเครือข่ายเหล่านี้ เป็นความแตกต่างในความสามารถในการตรวจวัดเสียงที่มีความถี่ต่ำ เสียงในเครือข่าย A เป็นเสียงที่ได้ยินใกล้เคียงกับหูมนุษย์ สามารถทำการแยกได้อย่างชัดเจนคือเสียงที่มีความถี่ต่ำ เสียงในเครือข่าย B สามารถแยกได้ปานกลาง เสียงในเครือข่าย C สามารถแยกได้เล็กน้อย สำหรับเสียงในเครือข่าย Linear สามารถตรวจวัดได้ทุกค่าความถี่



a.



b.

รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ของเสียงทั่วไปและเสียงดังจากการระเบิด

a) ระดับความดังเสียงทั่วไป และต้นกำเนิดของเสียง

b) Nomogram แสดงการเปลี่ยนหน่วยของระดับความดังของ air blast และค่าสมมูล

เสียงดังที่เกิดจากการระเบิดเป็นเสียงที่มีค่าพลังงานความถี่ต่ำ เครื่องมือที่จะทำการตรวจวัดเสียงดังจากการระเบิดจะต้องมีประสิทธิภาพสูงพอที่จะตรวจวัดได้ในระดับของเสียงในเครือข่าย C หรืออย่างมีประสิทธิภาพค่าก็ควรตรวจวัด linear peak ได้

สำหรับกรณีของคลื่นกระแทกจากการระเบิด ถ้าหากมีความดันน้อย มักจะประมาณให้ค่าของ front pressure (หน่วยเป็นบาร์) จาก unconfined charge มีค่าดังสมการที่ 89 และควรจะใช้สมการนี้ เมื่อค่าสเกลของรากกำลังสาม มากกว่า $50 \text{ m/kg}^{1/3}$

$$p_r = \frac{0.7[W^{1/3}]}{r} \quad (89)$$

การวัดระดับของ overpressure ที่มีผลกระทบต่อการได้ยินของมนุษย์ มักจะระบุในหน่วยเดซิเบล จึงได้ความสัมพันธ์ของความเข้มของเสียง (sound intensity) เป็นรูปแบบของ logarithm ของความดันเกินระดับ (overpressure)

$$\text{dB} = 20 \log_{10}(p/p_0) \quad (90)$$

กำหนดให้

- dB = ค่าของ overpressure ในฟอร์มการได้ยิน หน่วยเป็นเดซิเบล
- p = overpressure ในฟอร์มของความดัน หน่วยเป็น ปอนด์/ตร.นิ้ว
- p₀ = ค่าของ reference pressure ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2×10^{-10} บาร์ หรือ 2.9×10^{-9} ปอนด์/ตร.นิ้ว ซึ่งเป็นค่า overpressure ค่าสุดของเสียงที่จะได้ยิน

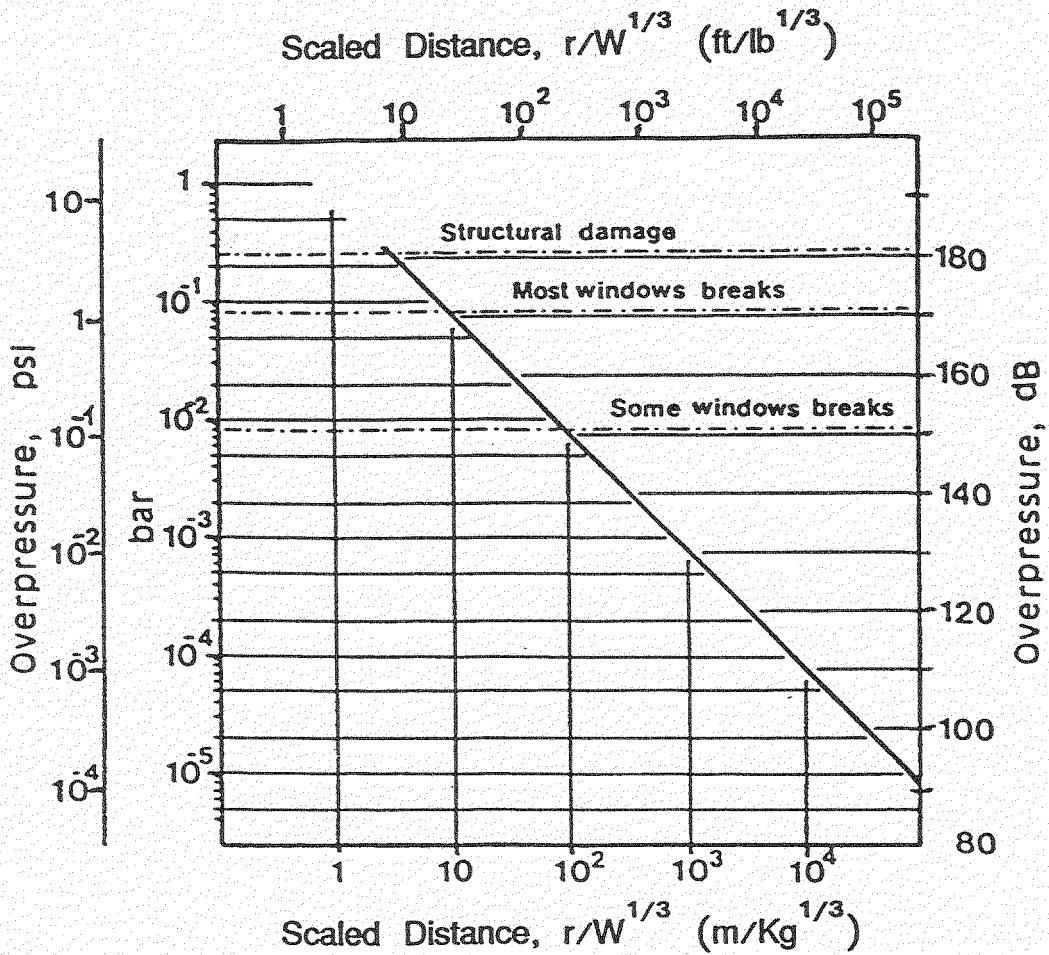
จากความสัมพันธ์ของหน่วยความดัน (psi) กับหน่วยเดซิเบล (dB) ที่ได้แสดงในสมการที่ 90 ที่มงานวิจัยของ Siskind et al. (1980a) ได้นำเสนอความสัมพันธ์ดังในรูปที่ 27b หน้า 92

ความรุนแรงของ overpressure จะมีสูงเมื่ออยู่ใกล้จุดระเบิดและจะลดลงไปตามลำดับเมื่อคลื่นแผ่กระจายออกไป ปกติคลื่นที่ความถี่สูงพลังงานจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ขณะคลื่นที่มีความถี่ค่าจะแผ่กระจายไม่ได้ไกล ขนาดความรุนแรงยังขึ้นอยู่กับสภาพบรรยากาศ และทิศทางลมอีกด้วย

6.1.3 การประเมินผลกระทบของเสียงคังและมาตรฐานความปลอดภัย

ความสัมพันธ์ของระดั้มการได้ยินกับความดันเสียงที่คังเกินระดั้ม ได้ถูกทำการสเกลโดยใช้รากกำลังสาม เพื่อหาผลกระทบต่ออาคารโครงสร้าง หรือส่วนประกอบของอาคารที่อยู่อาศัย ที่สร้างขึ้นในระดั้มใดๆ มีผลเป็นกราฟของ nomogram ข้างล่างนี้



รูปที่ 28 Nomogram แสดงค่าความสัมพันธ์ของความคังเสียงที่คังเกินระดั้มกับการสเกลของรากกำลังสาม และผลกระทบของความคังเสียงต่ออาคารโครงสร้างและส่วนประกอบ (Persson, et al., 1994)

ในทางปฏิบัติ U.S. Bureau of Mines ได้เสนอสูตรเชิงประสภการณ์ เพื่อประเมินผลกระทบของความดันเสียงจากการระเบิด ระหว่าง overpressure ที่เกิดขึ้นกับระยะทางและปริมาณวัตถุระเบิดที่อยู่ในรูป logarithm ของรากลำสาม ดังนี้

$$\text{dB} = 165 - 25 \log_{10} [r/W^{1/3}] \quad (91)$$

กำหนดให้ overpressure หน่วยเป็นเดซิเบล และสเกลรากลำสามของระยะทางกับวัตถุระเบิดมีหน่วยเป็น เมตร/กก^{1/3}

มาตรฐานความปลอดภัยสำหรับการกำหนดค่า overpressure ของความดันเสียงที่เกิดขึ้นจากการระเบิด ที่กำหนดโดยหน่วยงานต่าง ๆ มีดังนี้

1. United States Bureau of Mines (มาตรฐาน USBM-RI No. 8485)

ค่า overpressure ไม่เกิน 135 dB ที่ 0.1 Hertz

ค่า overpressure ไม่เกิน 134 dB ที่ 2 Hertz

ค่า overpressure ไม่เกิน 132 dB ที่ 6 Hertz

ค่า overpressure ไม่เกิน 112 dB ที่ 12 Hertz

นอกจากนี้ยังกำหนดให้ ทำการสเกลในรูปของรากลำสามของน้ำหนัวัตถุกับระยะทาง สำหรับเหมืองหินหรือเหมืองเปิดที่ไม่มีค่า scaled distance (cube root) ไม่ต่ำกว่า 250 ฟุต/ปอนด์^{1/3} งานก่อสร้างและงานโยธาไม่ต่ำกว่า 500 ฟุต/ปอนด์^{1/3}

2. ในประเทศออสเตรเลียกำหนดค่า overpressure สูงสุดไม่เกิน 128 dB หรือเท่ากับ 0.05 KPa นอกจากนี้ในบางรัฐของออสเตรเลียกำหนดค่ามาตรฐานไว้ดังนี้

ค่า overpressure จากการระเบิดที่เกินกว่า 115 dB มีได้ไม่เกิน 5% ของจำนวนการระเบิดทุกครั้ง และ ค่า overpressure สูงสุดไม่เกิน 120 dB

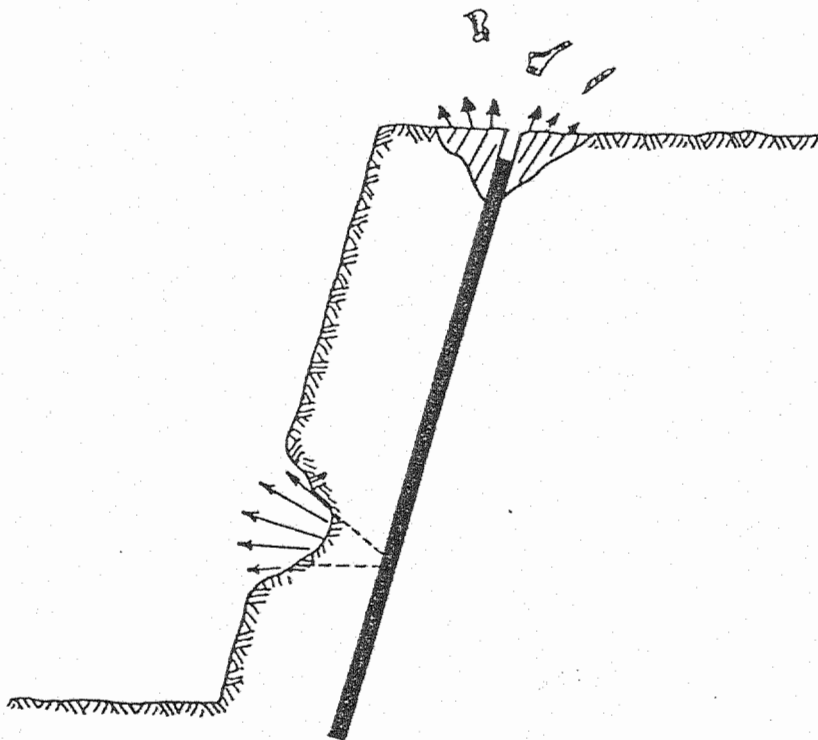
ธรรมชาติของการระเบิด หากมีการจุดระเบิดในบริเวณที่เปิดโล่ง มักจะตรวจวัดได้ ค่า overpressure ที่สูงมาก เพราะพลังงานที่เกิดเสียงแผ่กระจายสู่บรรยากาศง่าย

6.2 หินปลิวกระเด็นจากการระเบิด

การระเบิดหินที่ดีต้องมีการควบคุมหินปลิวกระเด็นจากการระเบิดให้อยู่ในขอบเขตไม่ให้ผลกระทบก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ หินปลิว (fly rock) จัดเป็นผลกระทบของการระเบิดที่ทำความเสียหายรุนแรงต่อสิ่งก่อสร้าง และก่อให้เกิดอุบัติเหตุที่อาจทำให้ผู้ประสบถึงกับเสียชีวิต

6.2.1 ธรรมชาติของการปลิวกระเด็น

การปลิวกระเด็นของหินมีโอกาสเกิดขึ้นได้ 2 บริเวณ บริเวณแรกพบใกล้ปากรูเจาะของเหมืองขี้มันโค (bench top or cratering) บริเวณที่สองพบตรงหน้า-อิสระที่อยู่ในแนวตั้งหรือเกือบตั้ง (vertical face or highwall) ปัญหาของหินปลิวที่พบบ่อย มักเกิดจากการกำหนดระยะ burden แลวหน้าสั้นเกินไป หรือเกิดจากการปิดอ้วคส์ที่อยู่ในส่วนของระยะ stemming ไม่ดีพอ ทำให้หินอาจปลิวกระเด็นไปในระยะไกลได้ (ดูรูปที่ 29)



รูปที่ 29 ปัญหาของ crater effects ของเหมืองหินแบบขี้มันโค

6.2.2 การประเมินระยะทางปลิวกระเด็นของหิน

การปลิวกระเด็นของหินมีโอกาสเกิดได้ทุกทิศทาง โดย projectile ของการปลิวอยู่ในรูป parabolic trajectory ความรุนแรงของการปลิวกระเด็นขึ้นอยู่กับความรุนแรงของคลื่นพัลส์จากการระเบิด รูปแบบแพทเทิร์นของหน้าเหมืองที่จะระเบิด รวมทั้งโครงสร้างของหิน เช่นหากมีรอยแตกร้าวมากหรือชั้นหินไม่แข็งแรง เมื่อทำการระเบิดอาจมีผลทำให้หินปลิวกระเด็นไปในระยะทางไกล ๆ ได้

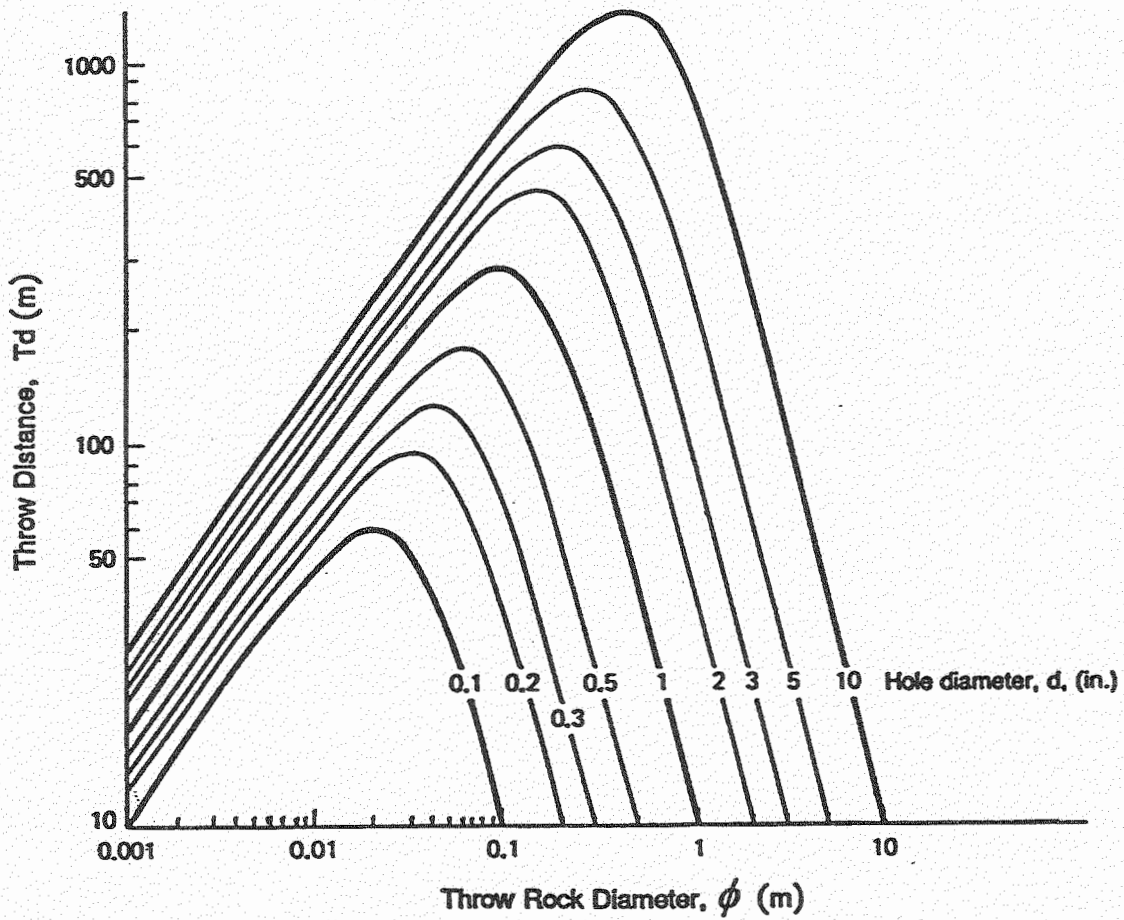
1. การประเมินระยะหินปลิวชนิดรุนแรงแบบ Crater Shots

Dowding (1985) ได้รวบรวมผลการศึกษาศึกษาของสถาบัน Swedish Detonic Institute ว่าระยะทางสูงสุดและความเร็วของหินปลิว จะมีความสัมพันธ์กับค่า powder factor หรือ specific charge

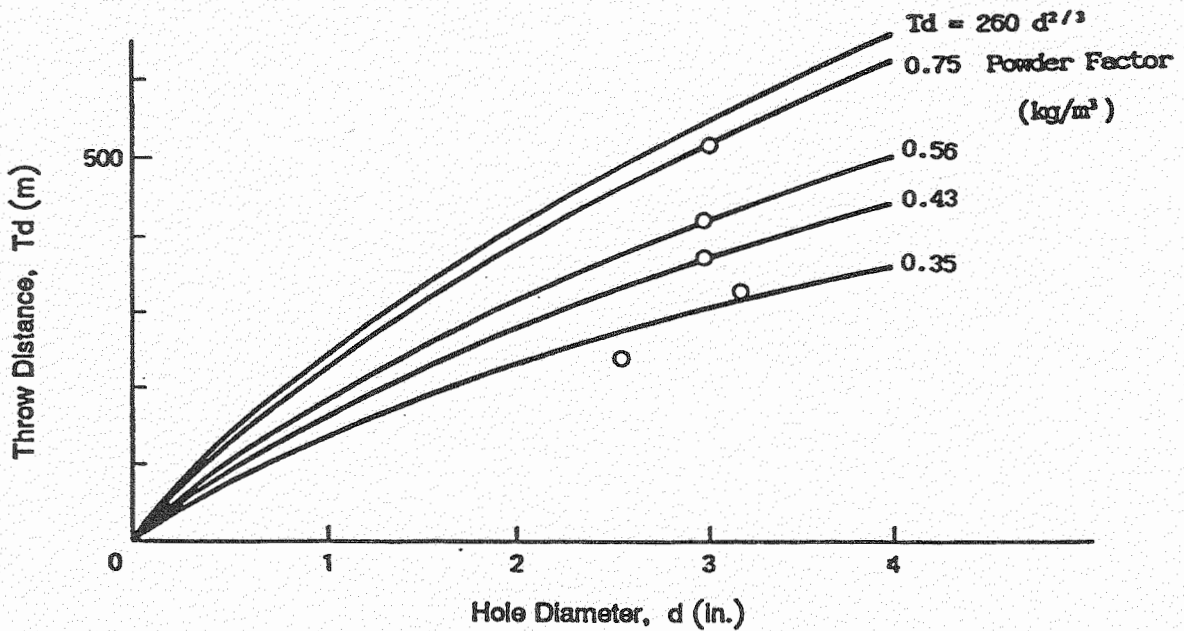
ในรูปที่ 30 a หน้า 98 เป็นระยะทางสูงสุดของหินปลิว (maximum throw distance, Td) ในรูปแบบ projectile ของหินแกรนิต เมื่อกำหนดตัวเลขค่าความเป็นไปได้ (probability) ที่ค่า 1×10^{-7} จะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของหินปลิวแบบโค้ง (throw rock diameter) ที่แปรเปลี่ยนตามขนาดต่าง ๆ ของเส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะระเบิด ในรูปที่ 30 a นี้ ไม่ได้คำนวณผลกระทบของวัตถุระเบิด แต่คำนึงถึงผลของ พลังงานจากอิมพัลส์เริ่มต้น (initial impulse energy) และผลของความต้านทานในอากาศ

ในรูปที่ 30 b เป็นการนำผลกระทบของวัตถุระเบิดที่ใช้ที่อยู่ในรูปของ powder factor [นั่นคือ น้ำหนักวัตถุระเบิดที่ใช้ทั้งหมดหารด้วยปริมาตรของหินที่แตกหัก] มาใช้ในการคำนวณด้วย จะเห็นได้ว่ายังมีค่า powder factor สูงก็ยิ่งจะทำให้มีหินปลิวเป็นระยะทางไกลมากขึ้น แต่ถ้าลดค่า powder factor ลงไปจนถึงค่าของ 0.2 กก./ลบ.ม. จะหมดปัญหาเรื่องหินปลิวแต่ก็อาจจะทำให้มวลหินที่ทำการระเบิดไม่แตกหักตามที่ต้องการ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะสูงสุดของหินปลิว (Td, เมตร) กับของเส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะ (d, นิ้ว) ที่ไม่พึ่งพิงกับค่าของ powder factor ได้แก่

$$Td = 260 d^{2/3} \quad (92)$$



a.



b.

รูปที่ 30 ระยะทางที่หินจะปลิวกระเด็นได้ไกลสูงสุด

a) ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะ

ไม่เกี่ยวกับจำนวนน้ำหนักวัตถุระเบิดที่ใช้

b) ผลกระทบจากวัตถุระเบิดที่ใช้ในรูปของ powder factor

2. การประเมินระยะหินเพลิงสำหรับหน้าอิสระแนวตั้ง

ตามรายงานของ U.S. Bureau of Mines ได้ทดลองทำการคาดคะเนระยะของหินเพลิง ไปใช้ในเหมืองหินหลายชนิด ทั้งของเหมืองหินแกรนิต หินทราย และหินปูน ผลสรุปของรายงานการศึกษาดังกล่าว คณะผู้วิจัยได้ทำการคัดลอกมาจาก U.S. Bureau of Mines OFR 77-81 มีหัวข้อสำคัญดังต่อไปนี้

จาก OFR report ได้มีการเสนอสูตรเชิงประสมการณ์ สำหรับการระเบิดในเหมืองหินเปิดที่ประกอบด้วยหินหลายชนิด กำหนดให้วัตถุระเบิดที่ใช้ในการระเบิดเป็น ANFO (Ammonium Nitrate - Fuel Oil) ที่มีค่า loading density (l_c) เป็น 0.85 กรัม/ลบ.ซม. ข้อกำหนดอีกอย่างหนึ่ง คือ การใช้ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง หลุมเจาะ (d) และความเร็วของคลื่น detonation velocity (D) เป็นไปตามตารางที่ 10 ที่รวบรวมค่า ANFO detonation velocities หลายค่าที่ตีพิมพ์ในเอกสารหลายแห่ง มาพล็อตในรูปแบบ ของ Eyring-type plot ระหว่าง ค่า D กับ ค่า $1/d$ ได้ความสัมพันธ์ข้างล่าง

ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง d ของหลุมเจาะ กับ $0.44D$ ของ ANFO

เส้นผ่านศูนย์กลาง หลุมเจาะ (d), นิ้ว	ค่า $0.44D$ ของ ANFO ฟุต/วินาที
2	4,900
3	5,300
4	5,900
6	6,450
9	6,700
12	6,800
15	6,850

การประเมินระยะทางที่ปลิวกระเด็นสูงสุดของหิน (T_d) กับความสัมพันธ์ของขนาดหลุมเจาะ (d) กับความเร็วของคลื่นพัลส์จากการจุดระเบิด (D) ในหินหลายชนิด มีความสัมพันธ์แตกต่างกันไป ได้เป็นสมการเชิงประสกรณ์ ตามชนิดของหิน คือ

a) หินแกรนิต

เมื่อคำนวณระยะสูงสุดที่หินปลิว จากค่าความเร็วที่ใช้ ANFO shots พบว่า T_d เป็นฟังก์ชันกับค่าอัตราส่วนของ d/b [กำหนดให้ $b = \text{minimum burden distance}$]

$$T_d = 0.334 [8.95 \times 10^5 \{d/b\}^2 - 584] \cdot (0.44D/7544)^2 \quad (93)$$

หน่วยของ T_d เป็น ฟุต, d เป็น นิ้ว, b เป็น ฟุต, และ D เป็น ฟุต/วินาที สมการที่ 93 ได้คูณค่าตัวเลขของ correction factor สำหรับหน่วยต่าง ๆ ไว้แล้ว ส่วนความหนาแน่นของหินแกรนิตกำหนดให้เป็น 2.6 กรัม/ลบ.ซม.

b) หินทราย

กรณีของหินทราย กำหนดให้ค่าความหนาแน่นเป็น 2.2 กรัม/ลบ.ซม. จะได้

$$T_d = 0.334 [6.86 \times 10^5 \{d/b\}^2 - 475] \cdot (0.44D/5740)^2 \quad (94)$$

c) หินปูนหรือหินโคลไลไมต์

สำหรับหินปูนหรือหินโคลไลไมต์ กำหนดความหนาแน่นเป็น 2.7 กรัม/ลบ.ซม. ได้

$$T_d = 0.334 [7.42 \times 10^5 - 200] \cdot (0.44D/5490)^2 \quad (95)$$

หากทำการเปรียบเทียบระยะการปลิวกระเด็น จะพบว่า ระยะหินปลิวจากการระเบิดปกติ จะต่ำกว่าที่คาดคะเนจากสมการของระยะไกลสุด (สมการที่ 92-95) มาก

6.3 ควันท้าพิษ

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการจุดระเบิด ถ้าหากมีการผสมสารเคมีในสภาวะที่เหมาะสมแบบ oxygen-balanced explosive ก็จะไม่เป็นอันตรายใด ๆ ต่อสุขภาพ

การจุดระเบิดที่สมบูรณ์แบบ ในกรณีของ CHNO explosive [C = Carbon, H = Hydrogen, N = Nitrogen, O = Oxygen] จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาของก๊าซ CO₂ ไอน้ำ (H₂O) และก๊าซไนโตรเจน (N₂) แต่ถ้าหากมีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดควันที่มีก๊าซพิษ (toxic fumes) ของ carbon monoxide (CO), nitrous oxide (NO) และ nitric oxide (NO₂)

ตารางที่ 11 การจำแนกก๊าซพิษที่เกิดจากการระเบิด

a. มาตรฐานความปลอดภัยของ U.S. Bureau of Mines

ชนิดของ กลุ่มควัน	ปริมาณก๊าซพิษ (ลบ.ฟ./ปอนด์)	ปริมาณก๊าซพิษ (ลิตร/กก.)
A	< 1.25	< 78
B	1.25-2.5	78-156

b. มาตรฐานความปลอดภัยของ Institute of Makers of Explosives

ชนิดของ กลุ่มควัน	ปริมาณก๊าซพิษ (ลบ.ฟ./ปอนด์)	ปริมาณก๊าซพิษ (ลิตร/กก.)
1	< 0.36	< 22.5
2	0.36-0.75	22.5-46.8
3	0.75-1.52	46.8-94.9

การกำหนดมาตรฐานของกลุ่มควันก๊าซพิษในเหมืองหินมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 11 a-b ข้างบนนี้ ในส่วนของตารางที่ 11 a เป็นของ U.S. Bureau

of Mines ที่กำหนดให้มีก๊าซพิษที่ยินยอมให้มีได้ไม่เกินกำหนด (permissible) โดยตรวจวัดก๊าซพิษทั้ง 4 ชนิด ประกอบด้วย CO, NO₂, NO และ H₂S ส่วนตารางที่ 11 b เป็นของ The Institute of Makers of Explosives (IME) ที่ตรวจวัดก๊าซพิษเพียงแค่ 2 ชนิด ประกอบด้วย CO และ H₂S

บทที่ 7

ผลการตรวจวัดในภาคสนาม

กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม ได้มีโครงการศึกษาผลกระทบของสิ่งแวดล้อมต่อการระเบิดหินในงานอุตสาหกรรม มีการเก็บข้อมูลของเจ้าหน้าที่จากกองการเหมืองแร่ และกองสิ่งแวดล้อมกรมทรัพยากรธรณี เป็นเวลาติดต่อกันมาหลายปี ในช่วงระหว่างปี 2537-2539 ที่คณะผู้วิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน โครงการ "ผลกระทบเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องในหินที่มีต่อการระเบิดและการสั่นสะเทือน" ทางคณะผู้วิจัย ได้ขอความร่วมมือจากกรมทรัพยากรธรณี เพื่อประสานงานในการเก็บข้อมูล ซึ่งมีการทำงานร่วมกันระหว่างเจ้าหน้าที่ของกรมทรัพยากรธรณีและคณะผู้วิจัย (อาจารย์ บุคลากร และนิสิตภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และนิโคโรเลียมทั้งที่กำลังศึกษาอยู่ในปีที่ 3 และปีที่ 4) โดยทำการ reconnaissance ตรวจวัดการระเบิดทดสอบและตรวจวัดการระเบิดจริงในภาคสนามหลายแห่ง แต่ข้อมูลที่พอจะนำมาวิเคราะห์ผลจะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับการระเบิดหินเกือบทั้งหมด

7.1 การวัดขนาดการแตกของหินในภาคสนาม

การศึกษาวិเคราะห์การแตกของหิน (fragmentation) จากการระเบิดหินเพื่ออุตสาหกรรมซีเมนต์ภายในประเทศ โครงการงานการศึกษานี้คณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาที่เหมืองหินปูนของบริษัทปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดสระบุรี และที่เหมืองหินปูนเขาวง บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ที่อำเภอดำรงวิทยาร่วมกัน

7.1.1 วิธีการประเมินผลและเก็บข้อมูล

การประเมินผลให้ได้ค่าทาง quantitative ของการแตกหักของหินนั้น วิธีการที่ดีที่สุดคือ ทำการคัดขนาดหินทั้งกองโดยผ่านตะแกรงคัดขนาด แต่วิธีการนี้เป็นสิ่งที่ปฏิบัติได้ยากสำหรับหน้าเหมืองที่กำลังพัฒนาเพราะจะทำให้งานทั้งระบบต้องช้าลงไป ไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐกิจ คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษารวบรวมโครงสร้างและชนิดของหิน ทำการถ่ายรูปหน้าเหมืองก่อนการระเบิดและภายหลังที่มีการระเบิดจริงเสร็จสิ้นไปแล้ว ซึ่งเป็น

การประเมินผลแบบ Visual Aid Analysis ปกกันแบบ Photographic Method จากนั้นก็ทำการนับ (counting) ขนาดหินก้อนใหญ่ (oversize boulders) ซึ่งมีการจัดบันทึกมิติของก้อนโดยเลือกขนาดก้อนที่มีความยาวด้านยาวที่สุดตั้งแต่ 50 ซม. จนถึงขนาดที่โตกว่า 2.0 เมตร โดยพยายามนับในช่วงที่รถดักทำการเกลี่ย ตัก และ ขุดชนก้อนหินที่แตกหักใส่รถบรรทุก (truck) ต่อมาก็ทำการนับจำนวนรถบรรทุกทั้งหมดที่จะป้อนหินเข้าสู่เครื่องบดย่อยหิน (crusher) เมื่อนับได้ครบแล้วจึงคำนวณปริมาตรหิน และเทียบหินขนาดต่าง ๆ ค่ารวมเป็นเปอร์เซ็นต์จากปริมาตรหินทั้งหมด

อนึ่งในช่วงของการนับนั้น ทางเหมืองก็ได้ทำการขุดค้ำขนย้ายหินตลอดเวลาทั้งกลางวันและกลางคืน ซึ่งก็ต้องอาศัยวิศวกรประจำเหมืองและไฟร์แมนหน้าเหมืองช่วยจดบันทึก หรือประมาณการให้

7.1.2 ผลการทดลองวัดขนาดของหินที่แตกหักจากการระเบิด

ตารางที่ 12 ถึงตารางที่ 17 (หน้าที่ 105-107) เป็นผลการตรวจวัดที่บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด กับที่เหมืองหินปูนแขวงของบริษัท ซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ในเขตพื้นที่ อำเภอพระพุทธบาท สระบุรี ข้อกำหนดในการคำนวณค่าการแตกหัก (fragmentation) เป็นเปอร์เซ็นต์ในขนาดของหินที่มีความยาวของก้อนน้อยกว่า 0.5 เมตร ได้จาก 100 ลบด้วยเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่โตกว่า 0.5 เมตร ทั้งนี้เมื่อรวมเปอร์เซ็นต์ของหินทั้งกองอาจไม่ได้ 100% เนื่องจากมีก้อนหินบางส่วนสูญเสียไปในลักษณะของหินปลิว (fly rock)

ภาพถ่ายที่แสดงไว้ในรูปที่ 31 ถึงรูปที่ 36 (หน้าที่ 108-113) เป็นภาพถ่ายเพื่อแสดงการเปรียบเทียบหน้าเหมือง ก่อนทำการระเบิดจริงเพื่อพัฒนาเหมืองหิน และภายหลังจากการระเบิดจริง โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเปรียบเทียบและทำการประเมินขนาดของก้อนที่แตกหักเพื่อเป็นแนวทางในการนับขนาดของหิน

1. ตารางบันทึกผลการตรวจวัดขนาดที่ บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด

ตารางที่ 12-15 ในหน้าที่ 105-106 เป็นผลการบันทึกหน้าเหมือง ปูนซีเมนต์เอเชีย ที่ทำการระเบิดในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 12 แสดงเปอร์เซ็นต์ของหินแตกหักที่ขนาดต่าง ๆ*

ขนาดของหิน (เมตร)	Fragmentation (เปอร์เซ็นต์)
มากกว่า 2 เมตร	0.05
1.75-2.00	0.05
1.50-1.75	0.10
1.25-1.50	0.50
1.00-1.25	0.50
0.75-1.00	2.00
0.50-0.75	15.0
น้อยกว่า 0.50 เมตร	81.8

* ระเบิดวันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2538 ที่หน้าเหมืองของบริษัทปูนซีเมนต์เอเชียจำกัด

ตารางที่ 13 แสดงเปอร์เซ็นต์ของหินแตกหักที่ขนาดต่าง ๆ*

ขนาดของหิน (เมตร)	Fragmentation (เปอร์เซ็นต์)
มากกว่า 2 เมตร	0.10
1.75-2.00	0.10
1.50-1.75	0.10
1.25-1.50	0.50
1.00-1.25	0.50
0.75-1.00	3.70
0.50-0.75	20.0
น้อยกว่า 0.50 เมตร	75.0

* ระเบิดวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2538 ที่หน้าเหมืองของบริษัทปูนซีเมนต์เอเชียจำกัด

ตารางที่ 14 แสดงเปอร์เซ็นต์ของหินแตกหักที่ขนาดต่าง ๆ*

ขนาดของหิน (เมตร)	Fragmentation (เปอร์เซ็นต์)
มากกว่า 2 เมตร	1.00
1.75-2.00	2.00
1.50-1.75	3.00
1.25-1.50	3.00
1.00-1.25	4.50
0.75-1.00	13.0
0.50-0.75	25.0
น้อยกว่า 0.50 เมตร	48.5

* ระเบิดวันที่ 17 มีนาคม 2538 ที่หน้าเหมืองของบริษัทปูนซีเมนต์เอเชียจำกัด (หน้างาน 1)

ตารางที่ 15 แสดงเปอร์เซ็นต์ของหินแตกหักที่ขนาดต่าง ๆ*

ขนาดของหิน (เมตร)	Fragmentation (เปอร์เซ็นต์)
มากกว่า 2 เมตร	0.90
1.75-2.00	0.70
1.50-1.75	0.90
1.25-1.50	0.60
1.00-1.25	3.30
0.75-1.00	4.60
0.50-0.75	9.10
น้อยกว่า 0.50 เมตร	79.9

* ระเบิดวันที่ 17 มีนาคม 2538 ที่บริษัทปูนซีเมนต์เอเชียจำกัด (หน้างาน 2)

2. ตารางบันทึกผลการตรวจวัดขนาดที่โรงงานแขวง บริษัทปูนซิเมนต์ไทยจำกัด

ตารางที่ 16 แสดงเปอร์เซ็นต์ของหินแตกหักที่ขนาดต่าง ๆ*

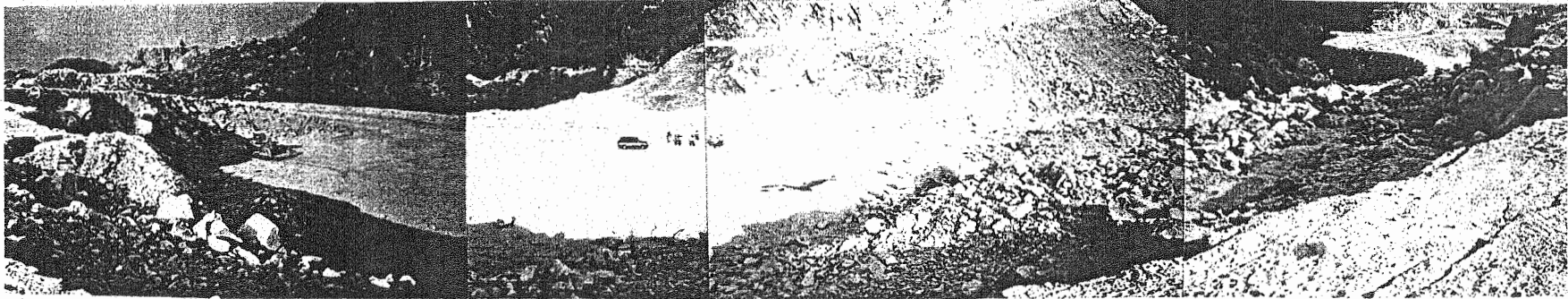
ขนาดของหิน (เมตร)	Fragmentation (เปอร์เซ็นต์)
มากกว่า 2 เมตร	0.10
1.75-2.00	0.10
1.50-1.75	0.10
1.25-1.50	0.20
1.00-1.25	3.20
0.75-1.00	1.80
0.50-0.75	5.90
น้อยกว่า 0.50 เมตร	91.6

* ทำการสังเกตศึกษาระหว่างวันที่ 13-16 มีนาคม 2538 หน่วยงาน B +243

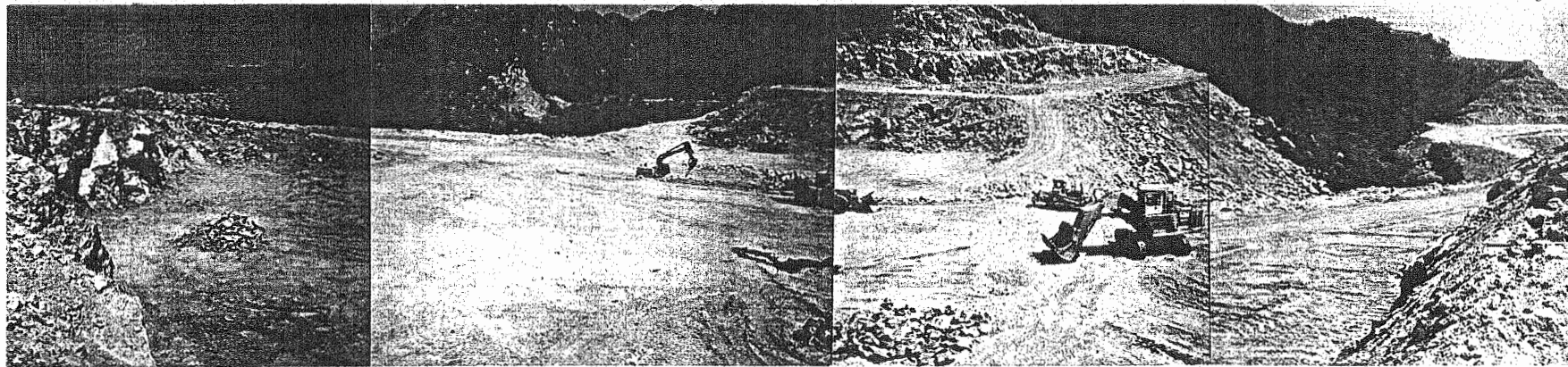
ตารางที่ 17 แสดงเปอร์เซ็นต์ของหินแตกหักที่ขนาดต่าง ๆ*

ขนาดของหิน (เมตร)	Fragmentation (เปอร์เซ็นต์)
มากกว่า 2 เมตร	0.50
1.75-2.00	1.90
1.50-1.75	1.70
1.25-1.50	2.10
1.00-1.25	4.50
0.75-1.00	4.20
0.50-0.75	8.60
น้อยกว่า 0.50 เมตร	76.5

* ทำการสังเกตศึกษาระหว่างวันที่ 13-16 มีนาคม 2538 หน่วยงาน B +260



a.

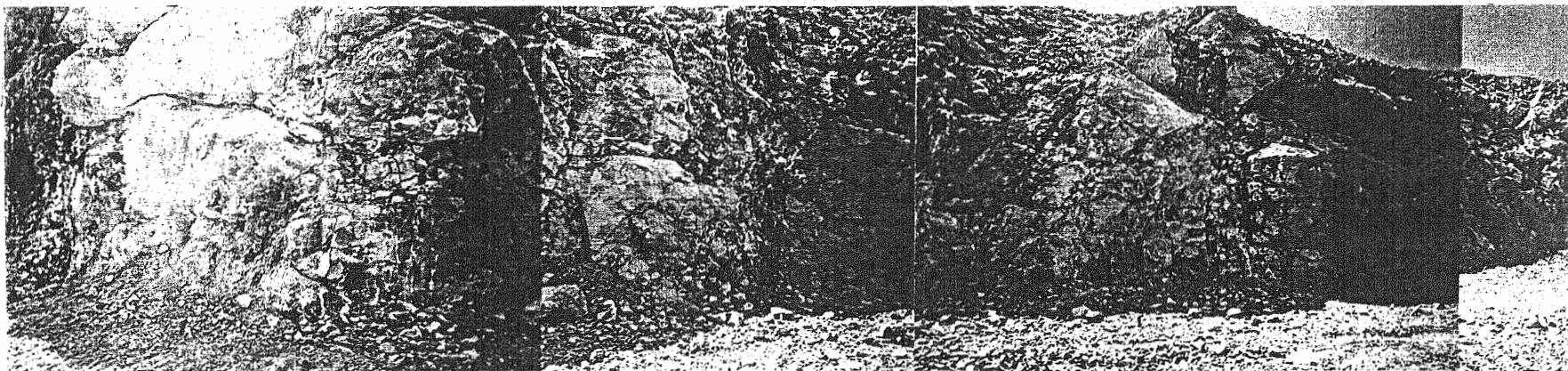


b.

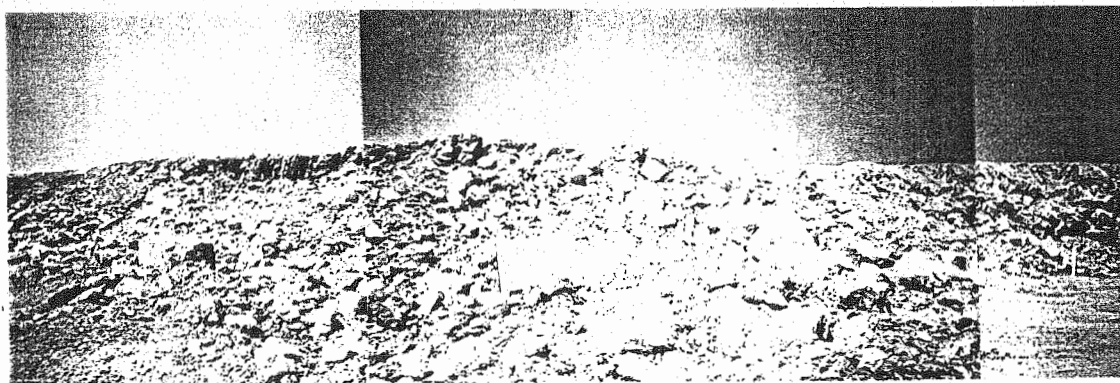
รูปที่ 31 ภาพถ่ายหน้าเหมืองก่อนและหลังการระเบิดเมื่อวันที่ 8 ก.พ.38 ที่ Asia Cement

a) ภาพหน้าเหมืองก่อนการระเบิด (ถ่ายจากด้านบน bench)

b) ภาพหน้าเหมืองหลังการระเบิด (ถ่ายจากด้านบน bench)



a.

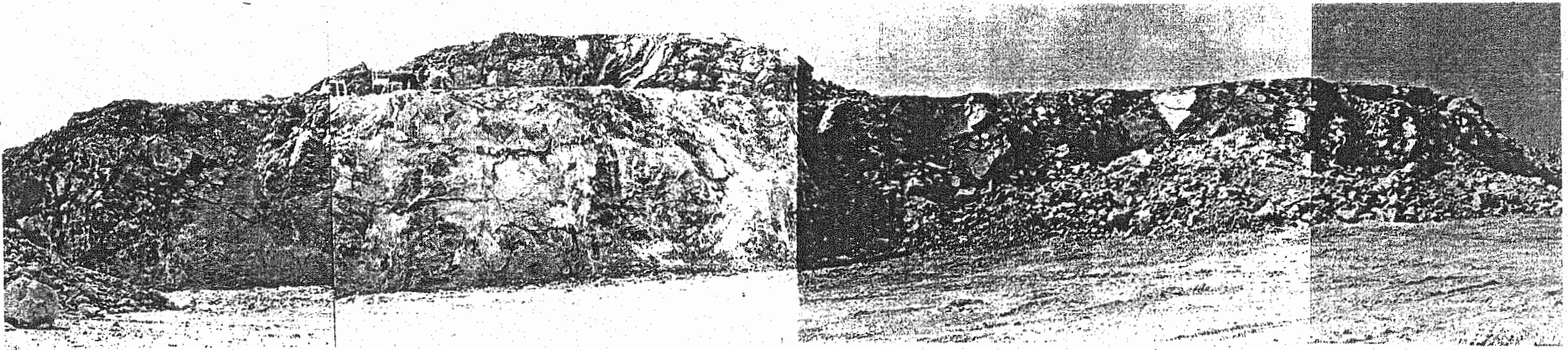


b.

รูปที่ 32 ภาพถ่ายหน้าเหมืองก่อนและหลังการระเบิดเมื่อวันที่ 10 ก.พ.38 ที่ Asia Cement

a) หน้าเหมืองก่อนการระเบิด

b) หน้าเหมืองหลังการระเบิด



a.

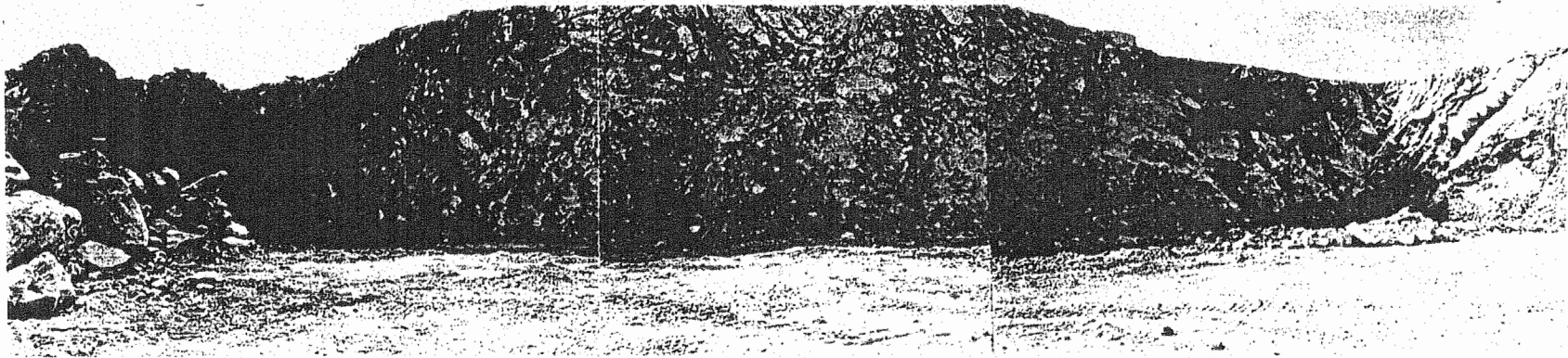


b.

รูปที่ 33 ภาพถ่ายหน้าเหมืองก่อนและหลังการระเบิดเมื่อวันที่ 6 มี.ค.38 ที่ Asia Cement

a) หน้าเหมืองก่อนการระเบิด

b) หน้าเหมืองหลังการระเบิด



a.



b.

รูปที่ 34 ภาพถ่ายหน้าเหมืองก่อนและหลังการระเบิดเมื่อวันที่ 7 มี.ค.38 ที่ Siam Cement

- a) สภาพหน้างานก่อนการระเบิด
- b) สภาพหน้างานหลังการระเบิด



a.

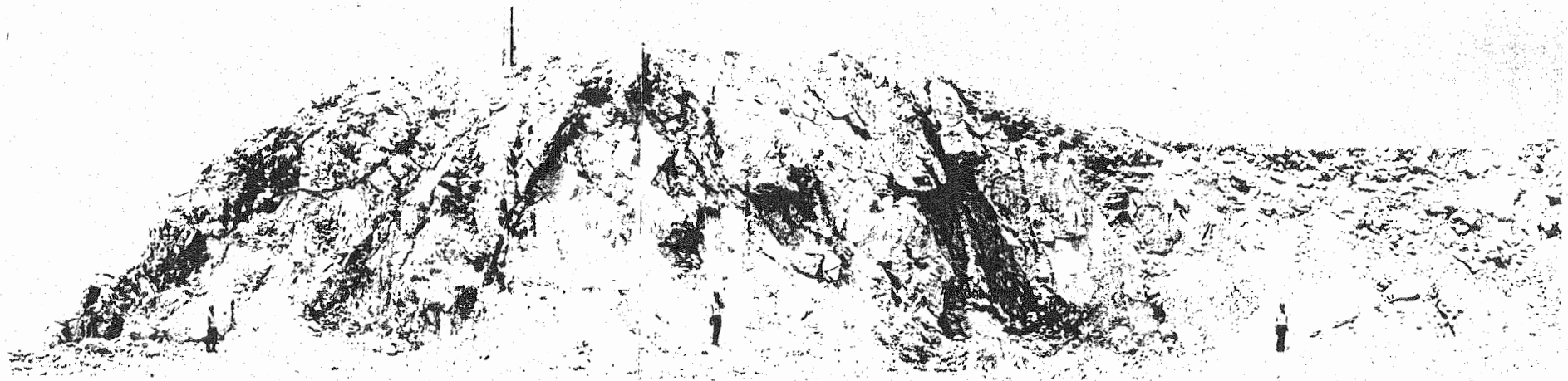


b.

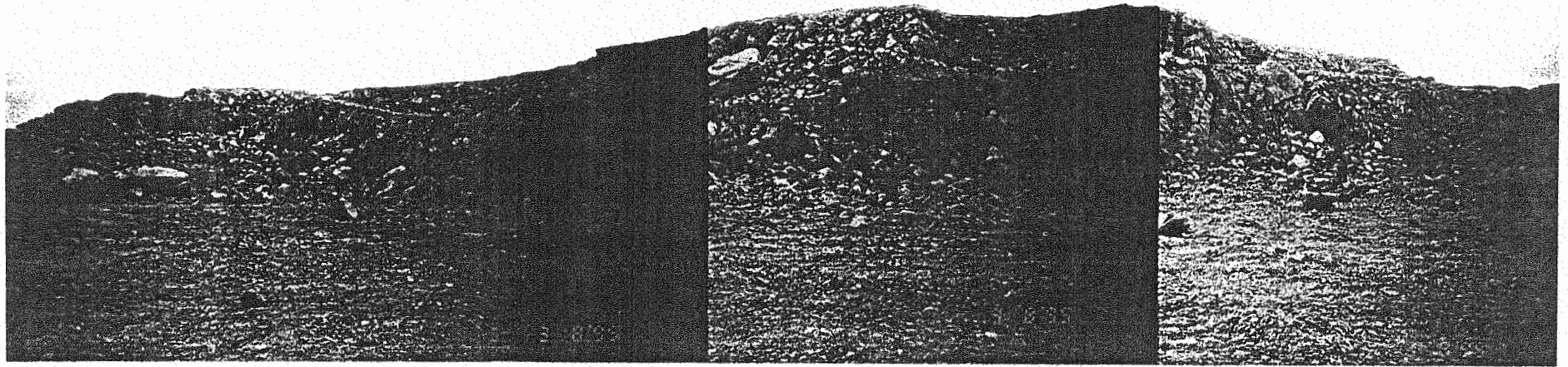
รูปที่ 35 ภาพถ่ายหน้าเหมืองก่อนและหลังการระเบิดเมื่อวันที่ 8 มี.ค.38 ที่ Siam Cement

a) สภาพหน้างานก่อนการระเบิด

b) สภาพหน้างานหลังการระเบิด



a.



b.

รูปที่ 36 ภาพถ่ายของหน้าเหมืองก่อนและหลังการระเบิดเมื่อวันที่ 8 มี.ค.38 ที่ Asia Cement

a) สภาพหน้างานก่อนการระเบิด

b) สภาพหน้างานหลังการระเบิด

7.2 กราฟผลการทดลองการวัดขนาดของการแตกหัก

ขนาดการแตกของหินปูนที่ได้จากการระเบิดในเหมืองหินปูนนั้น เป็นสิ่งที่จำเป็นมาก การที่จะแสดงว่าการแตกของหินในแต่ละเหมืองคือหรือไม่ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการวางแผนการระเบิดมากน้อยเพียงใด สิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาคือขนาดและปากเครื่องย่อยหรือปากเครื่องไม่หิน (crusher) โดยทั่วไปแล้วขนาดของหินที่ป้อนเข้าสู่เครื่องย่อยจะไม่เกิน 1 เมตร ซึ่งการศึกษานี้จะเรียกหินขนาดเล็กกว่า 1 เมตร ว่า undersize ส่วนใหญ่ที่ใหญ่กว่า 1 เมตร จะถือว่าเป็นพวก oversize ดังนั้นถ้าผลการระเบิดคำนวณได้เปอร์เซ็นต์ของ oversize สูงแล้ว แสดงว่ามีหินขนาดก้อนโตมาก ดังนั้นก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เครื่องย่อย จะต้องมีการย่อยได้มีขนาดเล็กกว่าปากเครื่องย่อยเสียก่อน ซึ่งเป็นการเสียเวลาและเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการทำเหมือง

จากผลการทดลอง เมื่อนำมาเขียนกราฟการกระจายขนาด เพื่อหาความสัมพันธ์ในเชิง size distribution จะได้ดังรูปที่ 37 ถึงรูปที่ 42 (หน้าที่ 115-120) และหาเปอร์เซ็นต์ของ oversize จากหน้างานระเบิดของทั้งสองเหมืองที่ไม่ทำการนับ โดยทำการนับเหมืองละ 2 หน้างาน ได้ผลดังนี้คือ

บริษัทปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด (ทำการนับวันที่ 17 มี.ค. 2538)

หน้างานที่ 1 ขนาด oversize เท่ากับ 13.50%

หน้างานที่ 2 ขนาด oversize เท่ากับ 6.40%

บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด(มหาชน) เหมืองหินปูนเขาวง

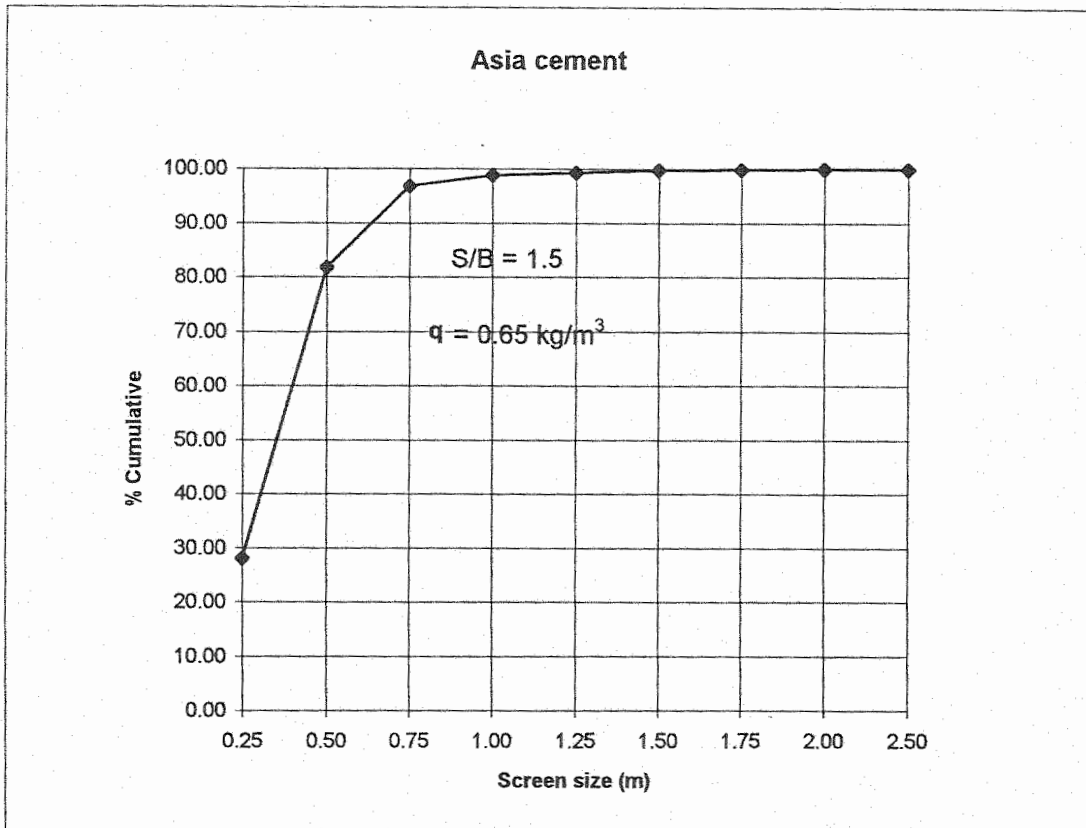
(ทำการนับวันที่ 14-16 มี.ค. 2538)

หน้างานที่ 1 (B +243) ขนาด oversize เท่ากับ 10.70%

หน้างานที่ 2 (B +260) ขนาด oversize เท่ากับ 0.70%

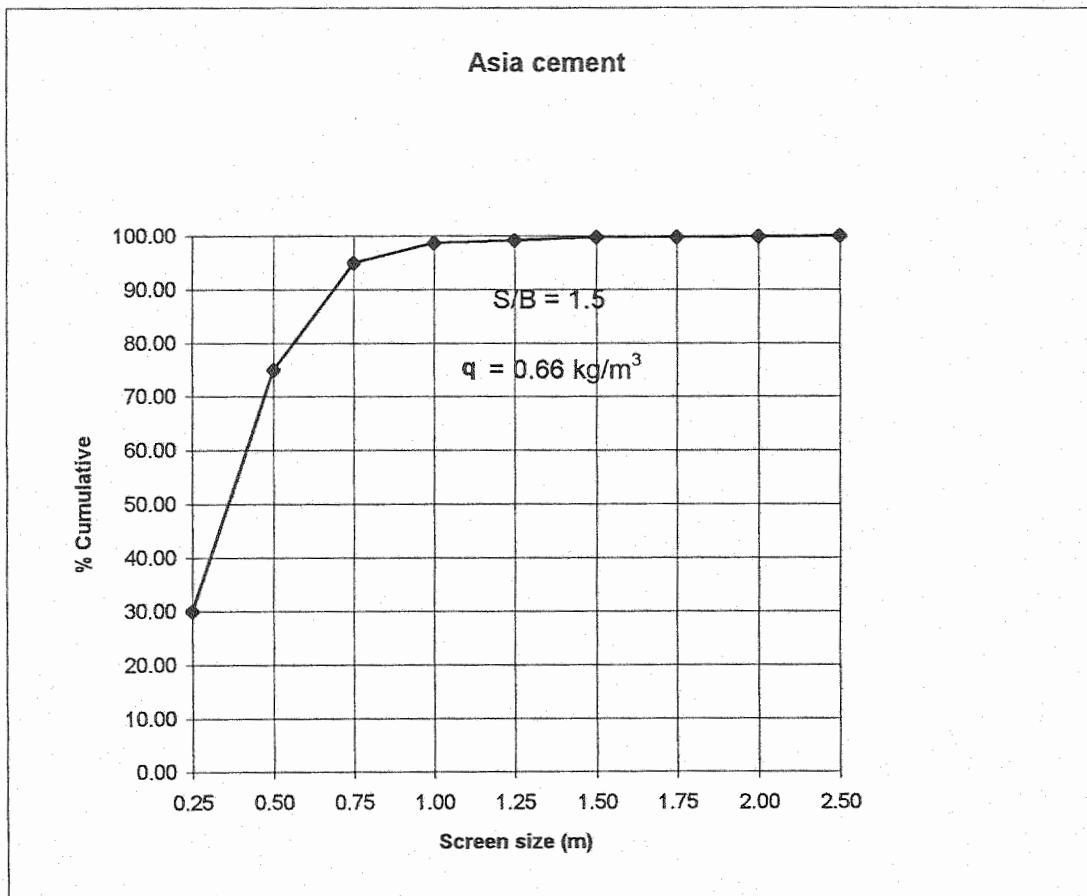
จากผลการนับขนาดที่ได้เปอร์เซ็นต์ oversize ของเหมืองหินปูนทั้งของบริษัทปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด กับเหมืองหินปูนเขาวง บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) มีแนวโน้มแสดงว่าผลการระเบิดของ บริษัทปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด จะได้ ขนาดของหินก้อนโตมากกว่า ของเหมืองหินปูนเขาวง บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)

Screen size (m)	% Passing	% Cumulative
0.25	28.00	28.00
0.50	53.80	81.80
0.75	15.00	96.80
1.00	2.00	98.80
1.25	0.50	99.30
1.50	0.50	99.80
1.75	0.10	99.90
2.00	0.05	99.95
2.50	0.05	100.00



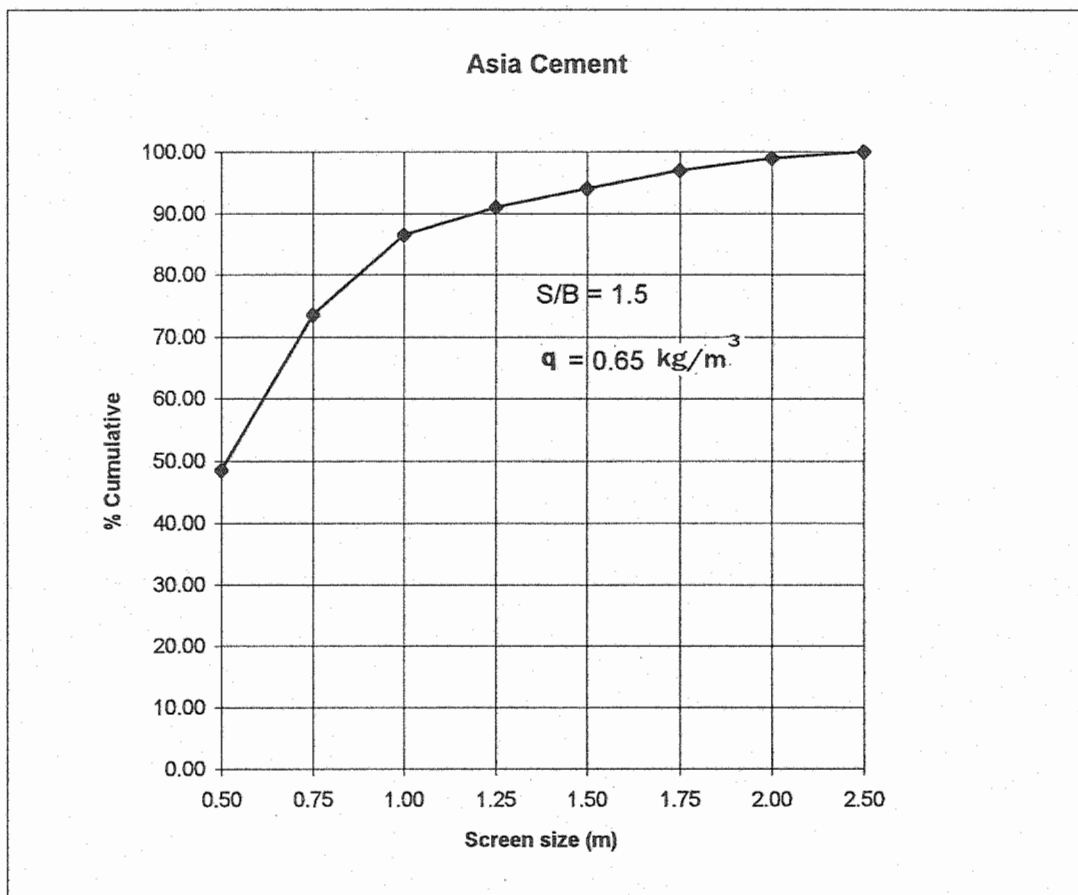
รูปที่ 37 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหินจากการระเบิดวันที่ 8 ก.พ. 2538

Screen size (m)	% Passing	% Cumulative
0.25	30.00	30.00
0.50	45.80	75.00
0.75	20.00	95.00
1.00	3.70	98.70
1.25	0.50	99.20
1.50	0.50	99.70
1.75	0.10	99.80
2.00	0.10	99.90
2.50	0.10	100.00



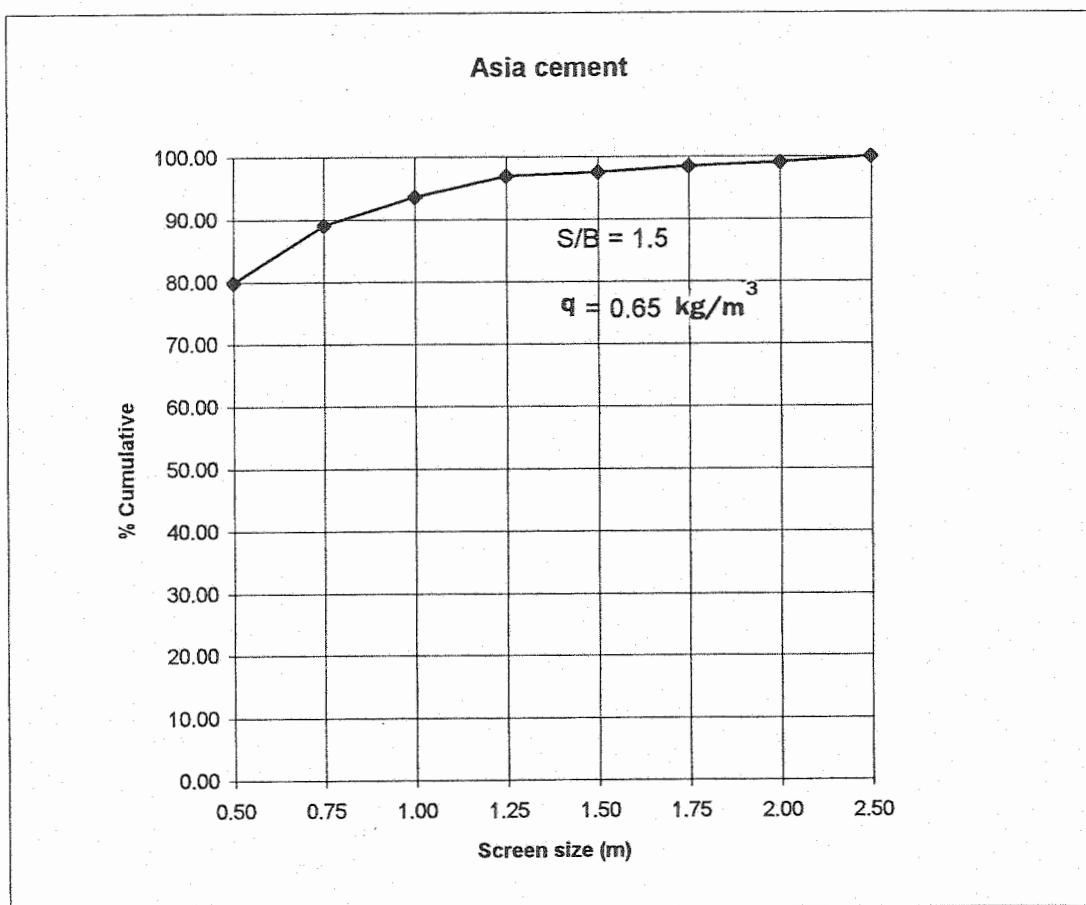
รูปที่ 38 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหินจากการระเบิดวันที่ 10 ก.พ. 2538

Screen size (m)	% Passing	% Cumulative
0.50	48.50	48.50
0.75	25.00	73.50
1.00	13.00	86.50
1.25	4.50	91.00
1.50	3.00	94.00
1.75	3.00	97.00
2.00	2.00	99.00
2.50	1.00	100.00



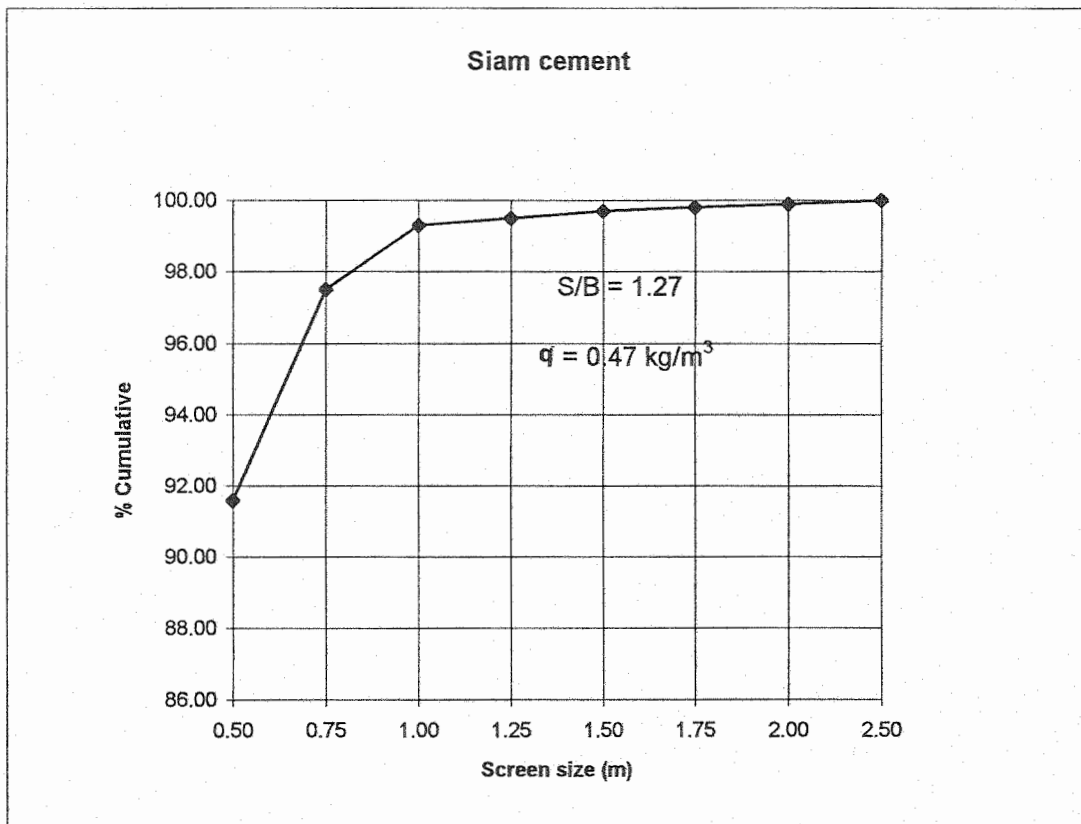
รูปที่ 39 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหินจากการระเบิดวันที่ 17 มี.ค.38(หน้างาน 1)

Screen size (m)	% Passing	% Cumulative
0.50	79.90	79.90
0.75	9.10	89.00
1.00	4.60	93.60
1.25	3.30	96.90
1.50	0.60	97.50
1.75	0.90	98.40
2.00	0.70	99.10
2.50	0.90	100.00



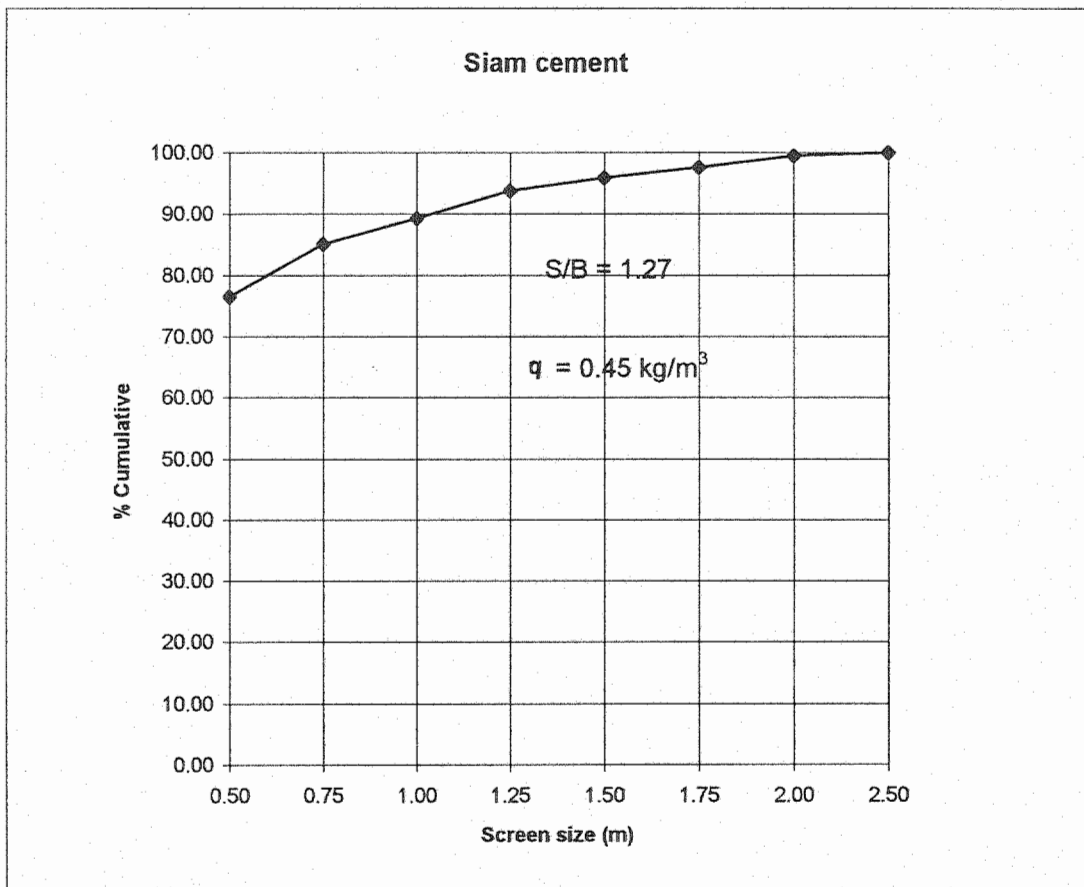
รูปที่ 40 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหินจากการระเบิดวันที่ 17 มี.ค.38(หน้างาน 2)

Screen size (m)	% Passing	% Cumulative
0.50	91.60	91.60
0.75	5.90	97.50
1.00	1.80	99.30
1.25	0.20	99.50
1.50	0.20	99.70
1.75	0.10	99.80
2.00	0.10	99.90
2.50	0.10	100.00



รูปที่ 41 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหินจากการระเบิดวันที่ 14 มี.ค.38(B +243)

Screen size (m)	% Passing	% Cumulative
0.50	76.50	76.50
0.75	8.60	85.10
1.00	4.20	89.30
1.25	4.50	93.80
1.50	2.10	95.90
1.75	1.70	97.60
2.00	1.90	99.50
2.50	0.50	100.00



รูปที่ 42 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหินจากการระเบิดวันที่ 15 มี.ค.38(B +260)

7.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบการแตกหักของหิน

เมื่อวิเคราะห์ผลการนับขนาดการแตกของหินที่ได้จากทั้งสองเหมือง โดยใช้
สมการแบบจำลองของ Kuznetsov-Rammler (K-R) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$X_m = A (V_0 / Q_e) Q_e^{1/6} (S_t/115)^{-19/30}$$

เมื่อ

X_m = ขนาดเฉลี่ยการแตก (เซนติเมตร)

A = rock factor มีค่าเท่ากับ 7 สำหรับหินแข็งปานกลาง มีค่า 10 สำหรับหินแข็ง และมีค่า 13 สำหรับหินแข็งที่มีรอยแตกต่ำกว่าปกติ และโดยทั่วไปจะมีค่าระหว่าง 8 ถึง 12 แต่สำหรับการวิเคราะห์นี้เป็นหินปูนซึ่งมีความแข็งปานกลาง จึงใช้ค่า A เท่ากับ 7

V_0 = ปริมาตรหินที่แตกต่อรูเจาะ (ลูกบาศก์เมตร) ซึ่งมีค่าเท่ากับ
burden x spacing x bench height

Q_e = มวลของวัตถุระเบิดต่อรู

S_t = relative weight strength ของวัตถุระเบิด

ANFO = 100

TNT = 115

a) ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการแบบจำลอง K-R ของบริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย

จำกัด

V_0 = burden x spacing x bench height

= 3.5x 4.5x 14 = 220.5 ลูกบาศก์เมตร

Q_e = 120 กก./หลุมเจาะ

ดังนั้น

X_m = 7(220.5/120)(120)^{1/6} (100/115)^{-19/30}

= 31.21 เซนติเมตร

b) ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการแบบจำลอง K-R ของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด

$$V_0 = 5.5 \times 7 \times 17 = 654.5 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

$$Q_0 = 250 \text{ กก./หลุมเจาะ}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} X_m &= 7(654.5/250)(250)^{1/6} (100/115)^{-19/30} \\ &= 50.25 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

จากสมการแบบจำลองของ K-R ซึ่งได้คาดคะเนค่าเฉลี่ยของขนาดหินที่เกิดการแตกหัก (X_m) ที่เหมืองหินปูนของ บริษัทปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด มีค่าเท่ากับ 31.21 เซนติเมตร ส่วนที่เหมืองหินปูนแขวง บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) มีค่าเท่ากับ 50.25 เซนติเมตร จากค่าที่ได้นั้นคาดคะเนผลการระเบิดได้ว่า ขนาดเฉลี่ยของการแตกทั่วไปจะมีขนาดเล็กตั้งแต่ 50 เซนติเมตรลงไป ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการเก็บข้อมูลที่ได้จากภาคสนามแล้วพบว่าแนวโน้มเป็นไปตามทฤษฎีทั้ง 2 เหมือง อย่างไรก็ตามค่าขนาดเฉลี่ยของหินที่คำนวณได้จากทฤษฎีนั้น ก็ไม่สามารถบ่งได้ว่า ผลการระเบิดของเหมืองที่มีค่าขนาดเฉลี่ยเล็กกว่าจะดีกว่าขนาดเฉลี่ยที่โตกว่า ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอย่างอื่น ดังต่อไปนี้

1) สภาพโครงสร้างทางธรณีวิทยา

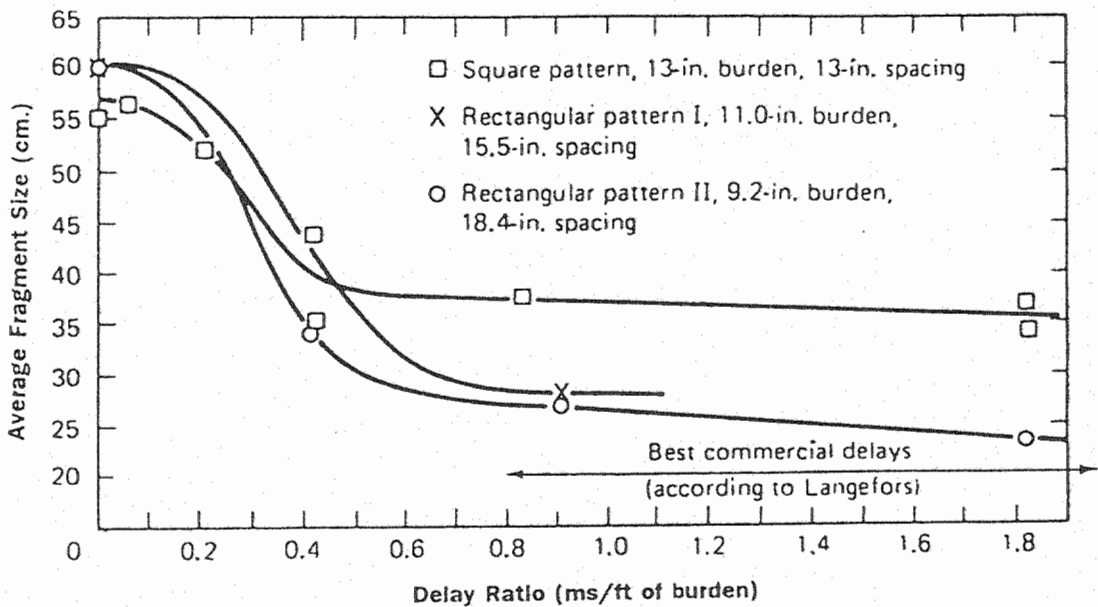
เนื่องจากเหมืองหินปูน บริษัทปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด มีลักษณะโครงสร้างของหินเป็นโพรง รอยแตกแยกของชั้นหินมาก ทำให้ผลการระเบิดได้หินขนาดก้อนโตในปริมาณที่มากกว่า ส่วนที่เหมืองหินปูนแขวง บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ลักษณะของชั้นหินปูนมีลักษณะเป็นเนื้อแน่น (massive) มีโพรงและรอยแตกแยกของชั้นหินน้อย ทำให้ผลการระเบิดออกมาดี คือ ได้หินที่แตกจากการระเบิดมีขนาดก้อนเล็กกว่า

2) รูปแบบของการระเบิด

2.1) จำนวนแท่งจันทะด่างระหว่างแถว (delay) ของการระเบิดจริง ส่วนใหญ่ จะเป็นการระเบิดหลายแถว (multiple-row blasts) ขณะที่มีการระเบิดหิน

ของแถวแรกจะทำให้หินได้รับความกดดัน ดังนั้นพอมีการระเบิดแถวที่สองจะช่วยเสริมพลังงานในการแตกหักให้กับหินแถวแรกที่ได้รับคามกดดันอยู่แล้ว ดังนั้นการเพิ่มจำนวนเบอร์แท็ปจังหวะต่งในแค่ละแถวมากขึ้น จะทำให้มีพลังงานช่วยเสริมในการบดขยี้ให้หินแตกคี่มากขึ้น เพราะว่าการเว้นช่วงเวลาระเบิดหลายครั้งจะทำให้เกิดการเสริมกันของพลังงานเกิดหลายครั้งขึ้น ซึ่งการที่เหมืองหินปูนแขวง บริษัทปูนซิเมนต์ไทย จำกัด ใช้จำนวนเบอร์ของแท็ป delay มากกว่าทำให้ผลการระเบิดได้ขนาดก้อนเล็กกว่า

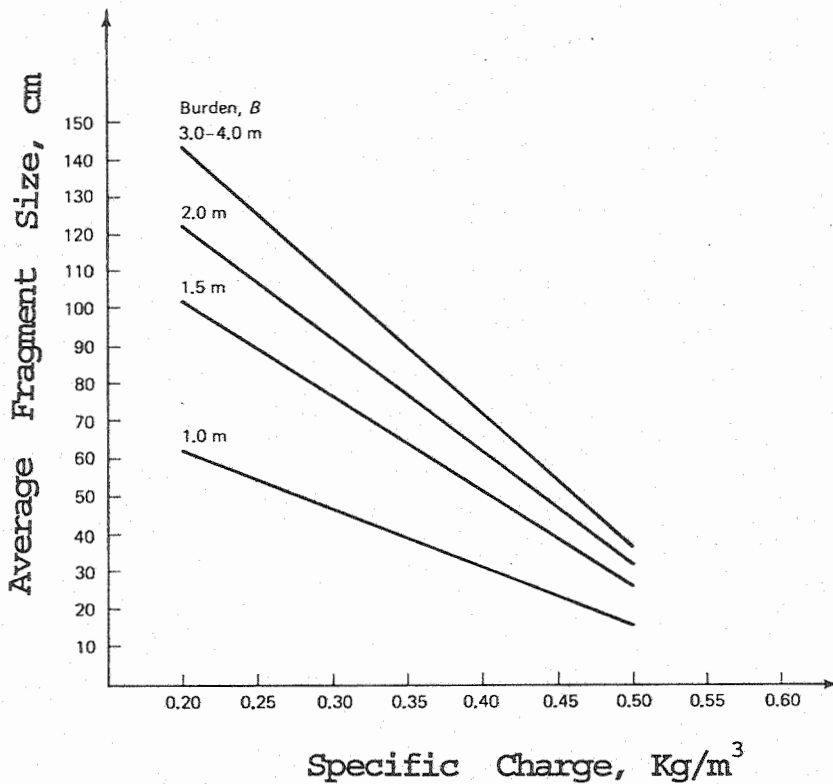
2.2) ค่าอัตราส่วนระหว่าง spacing/burden ที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 1.2-2.0 จากการศึกษาการแตกของหินที่ powder factor คงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ระยะเวลาระหว่างการถ่วงเวลาของการจุดระเบิดของแต่ละหลุมในแถวเดียวกัน จะต้องมีค่าอย่างน้อย 1 millisecc./ft จากการทดลองจุดระเบิด (Bergman et al., 1974) ที่ต่อแบบอนุกรมแถวเดียวจำนวน 5 หลุม นำผลมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 43 ข้างล่าง โดยการนำผลการทดลอง จากอัตราส่วนระหว่าง spacing กับระยะ burden (S/B) 3 ค่า คือ S/B = 1, 1.4 และ 2.0 ซึ่งค่าเฉลี่ยของการแตกหักจะมีค่าคงที่เมื่อ delay ratios มากกว่า 0.7 millisecc./ft



รูปที่ 43 กราฟแสดงผลของระยะเวลาถ่วงระหว่างหลุมเจาะกับขนาดเฉลี่ยของการแตกหักที่ค่า powder factor คงที่ (จาก Bergman et al., 1974)

3) Powder Factor

ปริมาณ powder factor (หรือเรียกว่า specific charge) จะต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้หินแตก จากรูปที่ 44 แสดงว่า เมื่อค่า powder factor มากขึ้น ขนาดเฉลี่ยของการแตกก็จะยิ่งเล็กลง ดังนั้นในการทดลองพบว่าบริษัทปูนซีเมนต์เอเชียจำกัด ใช้ค่า powder factor มากกว่าของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด (มหาชน) จึงทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของหินที่แตกขนาดเล็กกว่า



รูปที่ 44 ขนาดของค่าเฉลี่ยการแตกหักของหินที่ขึ้นอยู่กับ specific charge และ burden (From Gustafsson, 1981)

7.4 การตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากการระเบิดในภาคสนาม

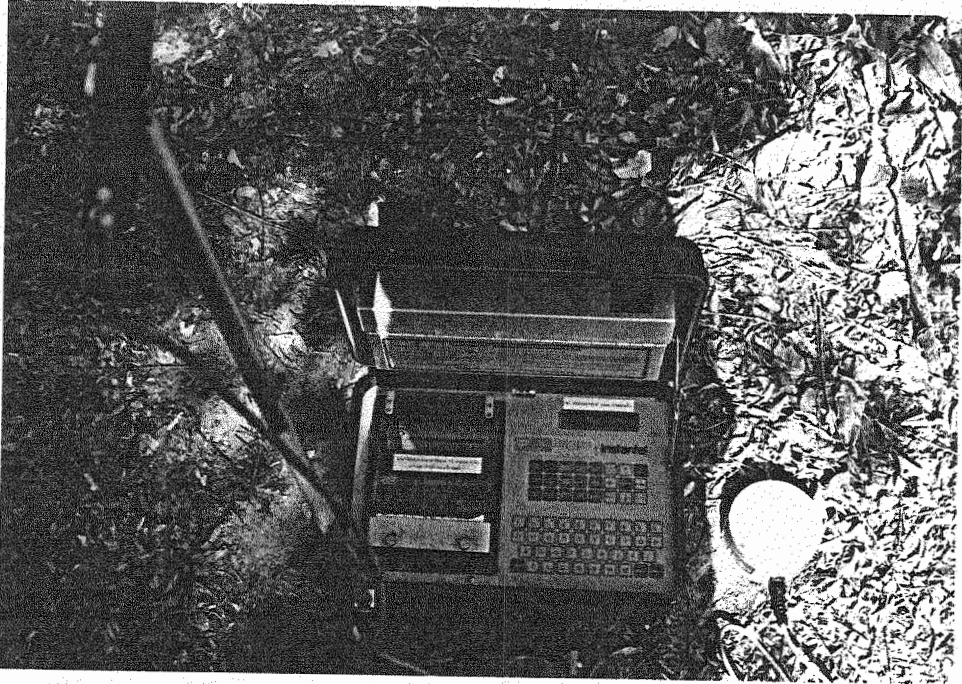
คณะผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือ จากวิศวกรและเจ้าหน้าที่ของกองสิ่งแวดล้อม ทรัพยากรธรณีและเจ้าหน้าที่ของกองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี ที่ได้ช่วยทำการตรวจวัดผล เมื่อมีการระเบิดในเหมืองหินปูนคุณภาพดี เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ

การศึกษาในเรื่องการสันสะเทือนจากการระเบิด มีการบันทึกข้อมูลทางด้านการ ออกแบบการเจาะระเบิด ชนิดของวัตถุระเบิดและปริมาณที่ใช้ แก๊บถ่วงเวลา ตลอดจน ศึกษาโครงสร้างทางธรณีวิทยา (เน้นทางด้านความไม่ต่อเนื่องในหิน) ความคู่ไปกับปัจจัยอื่น ที่อาจมีผลต่อการสันสะเทือน

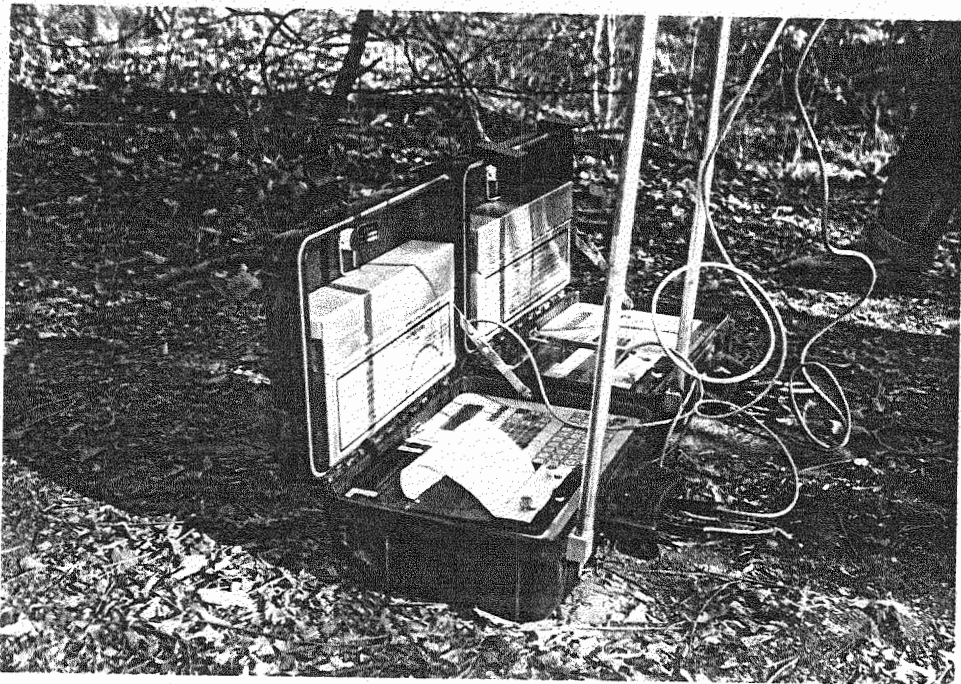
7.4.1 วิธีการศึกษาการสันสะเทือนในภาคสนาม

ขั้นตอนของการศึกษาเพื่อทำการเก็บข้อมูลการสันสะเทือนในภาคสนาม เมื่อมีการ ระเบิดหินปูน มีดังต่อไปนี้

1. ศึกษาภูมิประเทศและธรณีวิทยาทั่วไปของบริเวณหน้าเหมืองหินปูน
2. ทำการเจาะรูระเบิดตามรูปแบบที่กำหนด พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลที่สำคัญ เช่น ขนาดรูเจาะ ความลึกรูเจาะ จำนวนรูเจาะ
3. บรรจุวัตถุระเบิด ได้แก่ Ammonium Nitrate - Fuel Oil (ANFO) พร้อมทั้งบันทึกปริมาณวัตถุระเบิดต่อหลุมเจาะ ปริมาณวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วง ปริมาณวัตถุ ระเบิดทั้งหมดที่ใช้ในการระเบิดในแต่ละครั้ง ระยะ stemming ระยะความยาวของ charge length จำนวนแก๊บ delay และเบอร์แก๊บที่ใช้
4. ทำการศึกษาลักษณะทั่วไปของความไม่ต่อเนื่องชั้นหิน ระหว่างจุดหน้าเหมือง จนถึงตำแหน่งที่จะตรวจวัดการสันสะเทือน เช่น วัดแนว strike และมุม dip ของ ชั้นหิน วัดแนว joint direction และระยะ joint spacing เป็นต้น
5. ติดตั้งเครื่องตรวจวัดความสันสะเทือน (คูรูปที่ 45 และ 46) โดยใช้เครื่อง ตรวจวัด ซึ่งเป็นครุภัณฑ์ของกองสิ่งแวดล้อมทรัพยากรธรณี ชื่อทางการค้า Blasmate Series II DS-477, Serial No. 1480 V 4.50 - 477 พร้อมทั้งอุปกรณ์อื่นที่ทาง คณะผู้วิจัยจัดหา มา จากนั้นก็บันทึกระดับความสูงที่ติดตั้ง กับบันทึกระยะห่างระหว่างจุด หน้าเหมืองที่จะระเบิดกับจุดที่ติดตั้งเครื่องตรวจวัด
6. Set up เครื่องวัดความสันสะเทือนให้พร้อมที่จะทำการบันทึกผลโดยอัตโนมัติ เมื่อมีการระเบิด
7. หาอุปกรณ์ที่จำเป็นก้ำกั้วเครื่องตรวจวัด เช่น ล้อยางรถบรรทุก เครื่องหมายที่ ก้ำกั้วสำหรับคนและอุปกรณ์อื่น พร้อมทั้งเตรียมถ่ายรูปและถ่ายวีดีโอ (ในบางครั้ง) โดย บันทึกผลก่อนการระเบิดเล็กน้อย ช่วงที่มีการระเบิด และภายหลังการระเบิดเสร็จสิ้น
8. ตรวจนับขนาดการแตกหักของหินเป็นแนวๆ และจดบันทึกเปอร์เซ็นต์ขนาดไว้



รูปที่ 45 การติดตั้งเครื่องวัดการสั่นสะเทือนให้พร้อมก่อนการระเบิด อุปกรณ์ลักษณะกลมๆ เป็น Transducer ที่ต้องฝังเข้าไปในพื้นผิวหิน



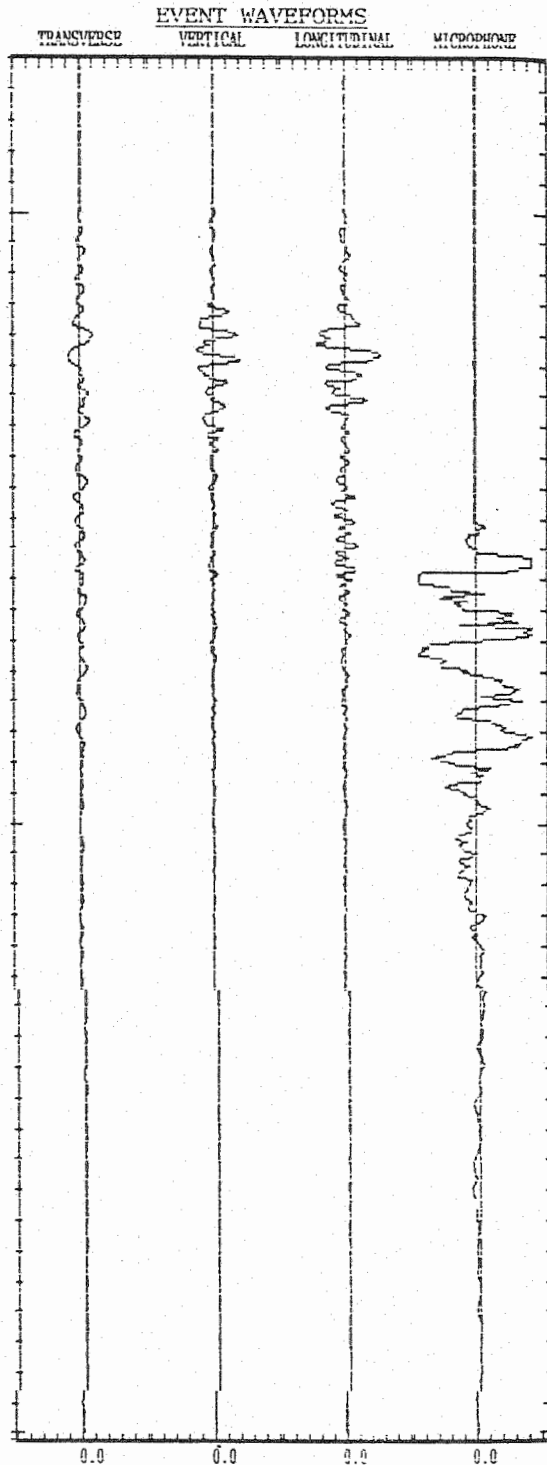
รูปที่ 46 คอ้สาย Geophone และสาย Microphone เข้าที่จุดเสียบสัญลักษณ์ GEO และ MIC ตามลำดับ แล้ว set up เครื่อง

7.4.2 ข้อมูลของการบันทึกผลการสั่นสะเทือนของการระเบิดหิน

ข้อมูลของค่าการสั่นสะเทือนจากการระเบิดหิน มี 2 แบบ คือ ข้อมูลที่ได้จากการระเบิดทดสอบ กับข้อมูลที่ได้จากการระเบิดจริงเพื่อพัฒนาหน้าเหมือง ก่อนทำการตรวจวัดการสั่นสะเทือนนี้จำเป็นต้องมีการ calibration เครื่องมือ และบางที่ก็ใช้เครื่องตรวจวัด 2 เครื่อง ระหว่างเครื่องของกองสิ่งแวดล้อมทรัพยากรธรณี กับเครื่องของกองการเหมืองแร่ ตรวจเช็คกัน และการระเบิดทดสอบยังช่วยให้นำค่าที่วัดได้มาพล็อตหาค่าตัวแปรในเรื่องการสั่นสะเทือนที่เกี่ยวข้องกับชนิดของหินอีกด้วย

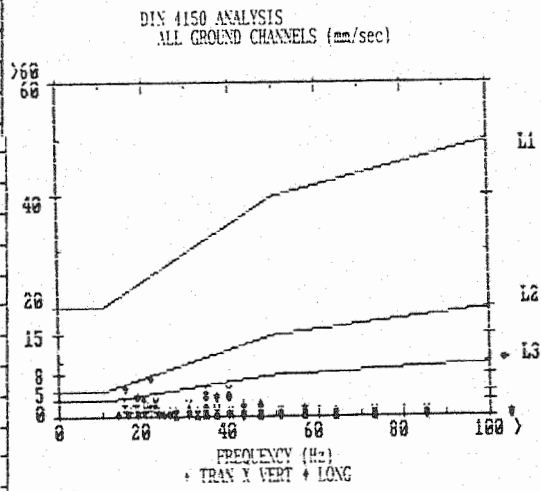
ข้อมูลที่ได้จากการวัดความสั่นสะเทือนของเครื่อง Blastmate Series II DS-477 มีการแสดงผลทั้งในรูปตัวเลขกับกราฟของค่าตัวแปรที่สำคัญต่าง ๆ ไว้ที่เกี่ยวข้องกับการระเบิดไว้ โดยได้แสดง printout ของข้อมูลเป็นตัวเลขและรูปภาพพิกศุดตัวอย่าง printout ที่นำเสนอของบริษัท ปูนซีเมนต์เอเชียและปูนซีเมนต์ไทย ในรูปที่ 47 และ 48 หน้า 128-129 ในระหว่างการบันทึก เครื่องตรวจวัดจะบันทึกค่าการสั่นสะเทือน เป็นรูปภาพของแอมพลิจูดของคลื่นที่เคลื่อนที่ทั้ง 3 ทิศทาง ได้แก่การเคลื่อนที่ตามยาว (longitudinal) เคลื่อนที่ตามขวาง (transverse) และเคลื่อนที่ตามแนวตั้ง (vertical) นอกจากนี้ก็ยังสามารถบันทึกค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (peak particle velocity) ซึ่งเป็นค่า peak vector summation และยังบันทึกค่าความเร่งของอนุภาค (particle acceleration) ในแต่ละทิศทาง ความถี่ของคลื่น (frequency) และค่า peak air blast ในแนวเส้นตรงจากจุดที่ทำการระเบิดถึงจุดตรวจวัด

อนึ่ง เครื่องตรวจวัดยังบันทึกผลเพิ่มเติมโดยอัตโนมัติเป็นรูปภาพ ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคในแต่ละทิศทางกับค่าความถี่ สำหรับพิจารณาผลของการสั่นสะเทือนที่อาจมีผลกระทบต่อโครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง ถ้าหากเลยขีดมาตรฐานความสั่นสะเทือนในช่วงที่มีการระเบิดโดยเส้น L1 (ดูรูปที่ 47 หรือ 48) เป็นกราฟมาตรฐานที่ใช้สำหรับเป็นขีดจำกัดเพื่อความปลอดภัย (threshold limit) ของตึกหรืออาคารสูง เส้น L2 เป็นกราฟมาตรฐานที่ใช้เป็นขีดจำกัดสำหรับที่อยู่อาศัย และเส้น L3 เป็นกราฟมาตรฐานที่ใช้เป็นขีดจำกัดสำหรับโบราณสถานหรือสถานที่ที่ควรอนุรักษ์ ถ้าหากการระเบิดแต่ละครั้ง ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ความถี่ต่าง ๆ ใน แต่ละช่วงไม่เกินเส้นมาตรฐานที่กำหนด ก็ไม่มีผลกระทบที่ก่อให้เกิดเป็นอันตรายต่อโครงสร้างของสิ่งก่อสร้างหรือโบราณสถานนั้น ๆ



SERIAL NO. 1480 V4.50-477
 CODE C4805BCF971
 TIME & DATE Vert. at 17:58:19 Mar 8, 1994
 TRIGGER SOURCE Geo 0.51 mm/sec
 RECORD TIME 2 sec
 LOCATION AMPUR PAPUTABATH
 CHANGWAT SARABURI
 CLIENT ASIA CEMENT
 USER ENVIRONMENTAL
 TECHNOLOGY DMR.
 SCALED DISTANCE 10.67 m/kg^{1/2}
 PEAK VECTOR SUM 7.48 mm/sec at 234 ms
 MICROPHONE LINEAR WEIGHTING
 PK AIR 142 dB(L) at 563 ms
 ZC FREQ 18 Hz

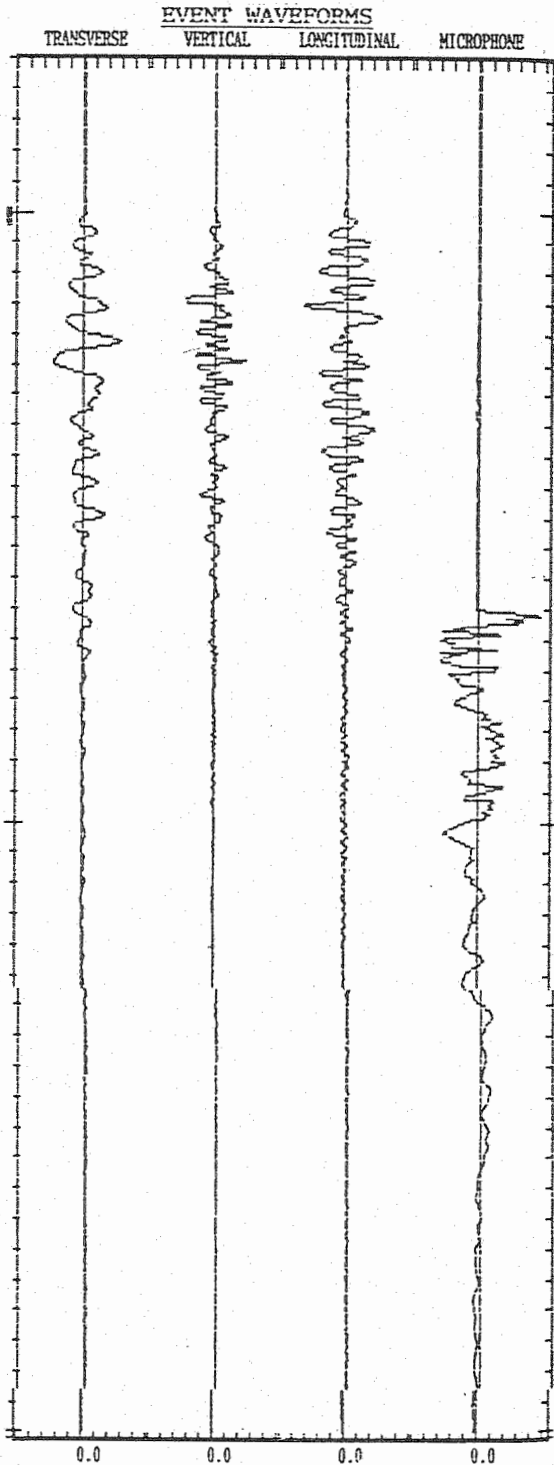
	TRAN	VERT	LONG
PPV	2.41	5.21	7.11 mm/sec
ZC FREQ	18	32	21 Hz
FFT FREQ	N/A	N/A	N/A Hz
TIME(REL TO TRIG)	200	241	232 ms
ACCEL	0.04	0.012	0.12 g
1/4 WAVE DISP	0.024	0.023	0.057 mm
SENSORCHECK	Passed	Passed	Passed
INTERNAL MIC CHANNEL TEST: Passed			
Freq = 20 Amp = 291			
BATTERY LEVEL	5.9 volts		
CALIBRATED ON Mar 20, 1992 by INSTANTEL INC.			
(N/A)-not applicable			



Copyright © InstanTEL 1990, 1991

AMPLITUDE SCALE: GEO: 2.54 mm/sec/div MIC: 56.98 pa(L)/div
 TIME SCALE: 50 msec/div 2.266 sec/date TRIGGER = █

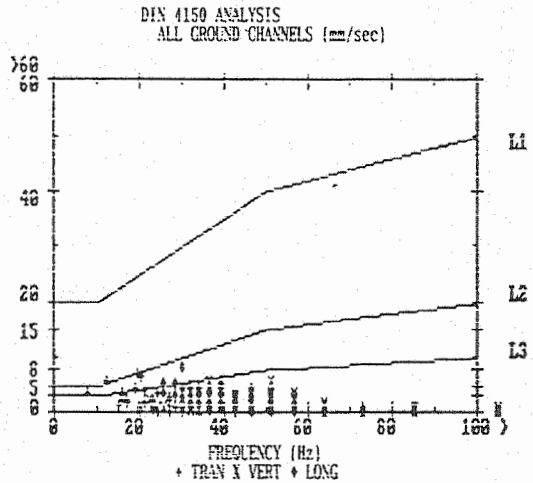
รูปที่ 47 ตัวอย่าง printout ของการระเบิดจริง ที่ได้ทำการบันทึกตัวเลขที่สำคัญ ขนาดแอมพลิจูดของคลื่น รูปกราฟทิกของขีดจำกัดเพื่อความปลอดภัย เหมือน หินปูนของ บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด ในเดือน มีนาคม 2538



SERIAL NO. 1480 V4.50-477
 CODE C4805BARIKI
 TIME & DATE Long. at 15:17:08 Mar 7, 1995
 TRIGGER SOURCE Geo 0.51 mm/sec
 RECORD TIME 2 sec
 LOCATION AMPUR PAPUTABATH
 CHANGWAT SARABURI
 CLIENT SIAM CEMENT
 USER ENVIRONMENTAL
 TECHNOLOGY DMR.
 SCALED DISTANCE 1600 m/kg^{1/2}
 PEAK VECTOR SUM 8.81 mm/sec at 153 ms
 MICROPHONE LINEAR WEIGHTING
 PK AIR 141.5 dB(L) at 661 ms
 ZC FREQ 22 Hz

	TRAN	VERT	LONG
PPV	7.24	5.97	8.26 mm/sec
ZC FREQ	19	47	30 Hz
PFT FREQ	N/A	N/A	N/A Hz
TIME(REL TO TRIG)	213	245	153 ms
ACCEL	0.08	0.17	0.15 g
1/4 WAVE DISP	0.0780	0.025	0.047 mm
SENSORCHECK	Passed	Passed	Passed
INTERNAL MIC CHANNEL TEST:	Passed		
	Freq = 20	Amp = 292	
BATTERY LEVEL	5.9 volts		
CALIBRATED ON Mar 20, 1992 by INSTANTEL INC.			

(N/A)-not applicable

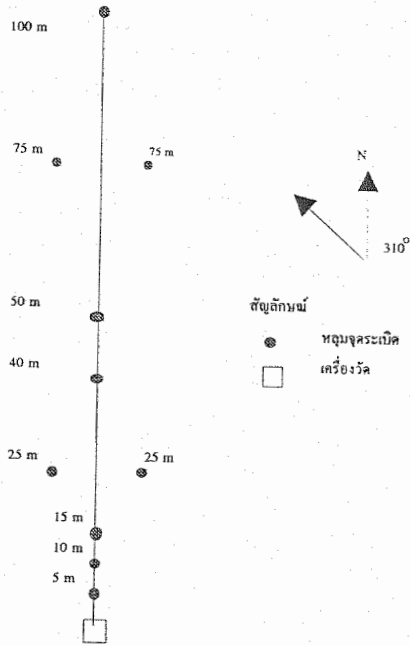


AMPLITUDE SCALE: GEO: 2.54 mm/sec/div MIC: 48.98 pa(L)/div
 TIME SCALE: 50 msec/div 2.266 sec/page TRIGGER =

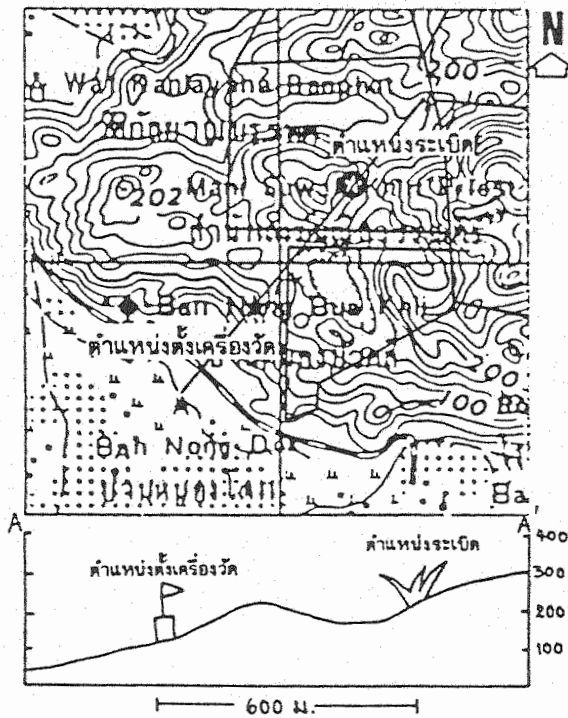
รูปที่ 48 ตัวอย่าง printout ของการระเบิดจริง ที่ได้ทำการบันทึกตัวเลขที่สำคัญ ขนาดแอมพลิจูดของคลื่น รูปกราฟฟิกของขีดจำกัดเพื่อความปลอดภัย เหมือน หินปูนของ บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ในเดือน มีนาคม 2538

รูปที่ 49 (หน้า 131) เป็นตัวอย่าง plan view ของการระเบิดทดสอบบริเวณหน้าเหมืองหินปูน รูปที่ 50 (หน้า 131) เป็นตัวอย่างแผนที่สเกลเล็ก (ขยาย) เพื่อแสดงตำแหน่งจุดที่ระเบิดกับจุดที่ตั้งเครื่องวัดโดยประมาณ สำหรับรูปที่ 51 (หน้า 132) เป็นตัวอย่างการแสดงผลแผนที่บริเวณหน้าเหมือง (ที่ขยายสเกล) เพื่อสามารถลงรายละเอียดตำแหน่งจุดที่ระเบิดกับจุดที่ตั้งเครื่องวัดการสั่นสะเทือน

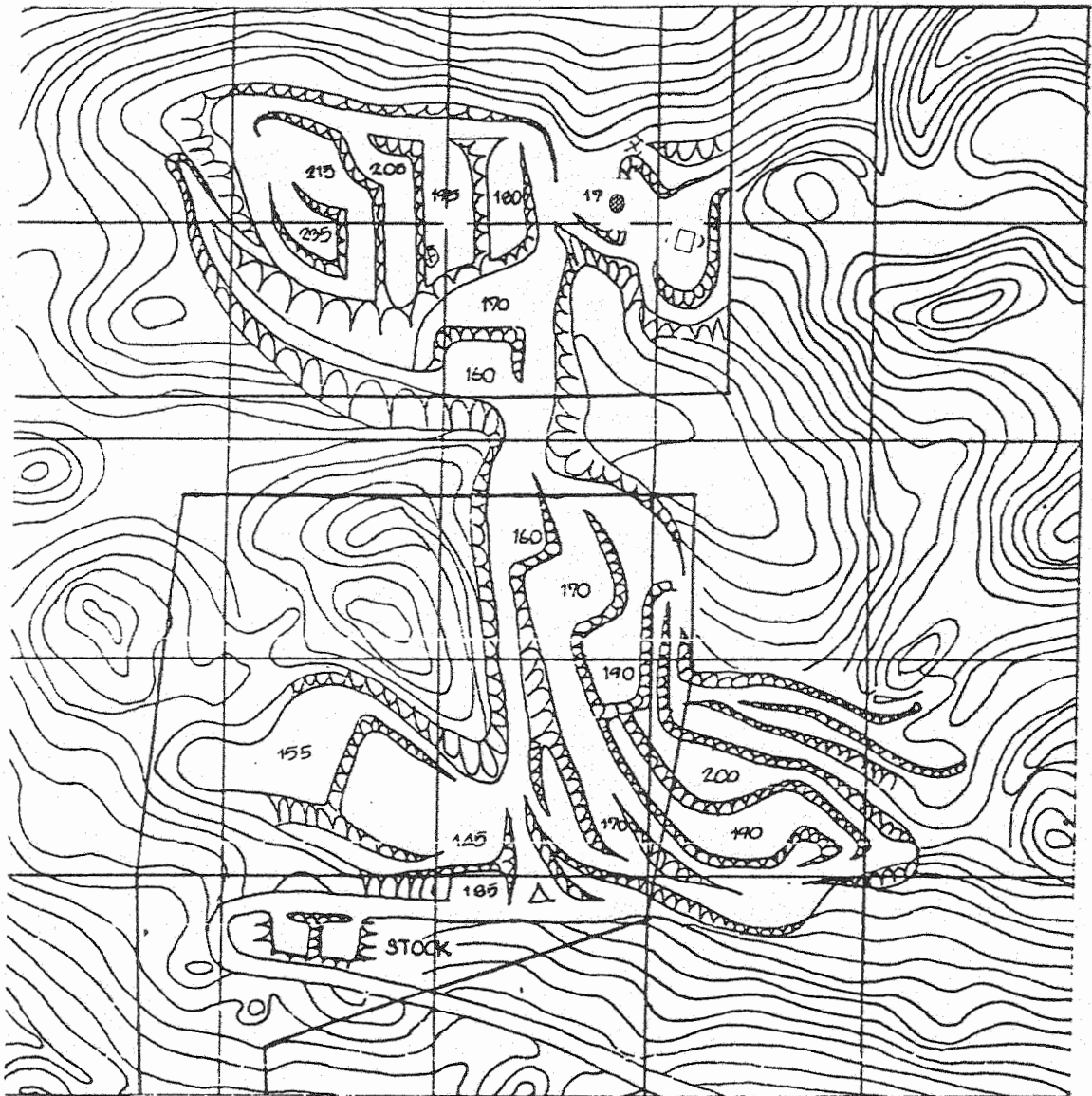
ข้อมูลดิบของผลการตรวจวัดการสั่นสะเทือน สำหรับเหมืองเปิดแบบจั่นมันโคของหินปูนคุณภาพดี ได้สรุปผลของตัวเลขขั้นที่สำคัญแสดงไว้ในตารางที่ 18-25 (หน้าที่ 133-136) สำหรับตารางที่ 18-22 เป็นข้อมูลในเรื่องการสั่นสะเทือนจากการระเบิดทดสอบที่เหมืองหินปูนของ บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด (อำเภอพระพุทธบาท) กับที่เหมืองหินปูนของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (อำเภอทุ่งสง) สำหรับตารางที่ 23-24 เป็นการบันทึกผลข้อมูลที่สำคัญในเรื่องการสั่นสะเทือนจากการระเบิดจริงเพื่อการพัฒนาหน้าเหมืองของบริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด กับเหมืองของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (ณ ที่อำเภอพระพุทธบาททั้งสองเหมือง) ตารางที่ 25 เป็นการบันทึกผลข้อมูลที่สำคัญในสำหรับการระเบิดแบบสลัฟพื้นปลายของเหมืองเปิด ที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุก่อสร้าง ในกลุ่มเหมืองหินปูน บริเวณเขตเขาสามง่าม อำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี



รูปที่ 49 ตัวอย่าง plan view การระเบิดทดสอบที่ทำเมื่อวันที่ 7 ธันวาคม 2537 ณ เข้มืองหินปูนของบริษัทปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด



รูปที่ 50 ตัวอย่างแผนที่สเกลเล็กที่แสดงตำแหน่งจุดที่ระเบิดกับจุดที่ตั้งเครื่องวัด การสันนิษฐานเนื่องจากการระเบิดจริงเพื่อพัฒนาเหมืองหินปูน ครัวจวัด เมื่อวันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2538 ณ บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด



- จุดที่ระเบิด
- จุดตั้งเครื่องวัด

รูปที่ 51 ตัวอย่างของแผนที่สเกลใหญ่ที่ขยายให้เห็นบริเวณหน้าเหมืองหินที่กำลังพัฒนา และตำแหน่งจุดที่ระเบิดกับจุดที่ตั้งเครื่องวัดการสันสะเทือนจากการระเบิดจริงเพื่อพัฒนาเหมืองหินปูนเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม 2537 ณ บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด

ตารางที่ 18 ผลการวัดการสั่นสะเทือนจากการระเบิดทดสอบที่บริษัท
ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด อำเภอพระพุทธบาท สระบุรี
ตรวจวัดวันที่ 7 ธันวาคม 2537

Hole Dia. (inches)	Distance (meters)	Weight/Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	PPV. (mm/sec)	Freq. (Hertz)
1 1/2	5	1	5	3.86	N/A*
1 1/2	10	1	10	23.72	N/A
1 1/2	15	1	15	4.13	N/A
1 1/2	20	1	20	4.18	N/A
1 1/2	25	1	25	9.11	N/A
1 1/2	25	1	25	1.33	N/A
1 1/2	40	1	40	0.92	73
1 1/2	75	1	75	1.68	51
1 1/2	75	1	75	1.21	39

* N/A = Not Applicable

ตารางที่ 19 ผลการวัดการสั่นสะเทือนจากการระเบิดทดสอบที่บริษัท
ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด อำเภอพระพุทธบาท สระบุรี
ตรวจวัดวันที่ 9 ธันวาคม 2537

Hole Dia. (inches)	Distance (meters)	Weight/Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	PPV. (mm/sec)	Freq. (Hertz)
1 1/2	15	3	8.66	16.86	20
1 1/2	25	3	14.43	6.64	23
1 1/2	50	3	28.87	0.78	27
1 1/2	75	3	43.30	1.59	34
1 1/2	100	3	57.74	1.16	64

* N/A = Not Applicable

ตารางที่ 20 ผลการวัดการสั่นสะเทือนจากการระเบิดทดสอบที่บริษัท
ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) อำเภอทุ่งสง
นครศรีธรรมราช ตรวจวัดวันที่ 13 พฤษภาคม 2537

Hole Dia. (inches)	Distance (meters)	Weight/Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	PPV. (mm/sec)	Freq. (Hertz)
2	5	1	5	22.61	2
2	10	1	10	4.92	N/A
2	15	1	15	0.68	N/A
2	25	1	25	3.75	32
2	25	1	25	1.10	2
2	50	1	50	0.86	64
2	93	1	93	0.70	51
2	96	1	96	0.94	64

ตารางที่ 21 ผลการวัดการสั่นสะเทือนจากการระเบิดทดสอบที่บริษัท
ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) อำเภอทุ่งสง
นครศรีธรรมราช ตรวจวัดวันที่ 11 สิงหาคม 2537

Hole Dia. (inches)	Distance (meters)	Weight/Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	PPV. (mm/sec)	Freq. (Hertz)
2	14	2	9.90	116.71	N/A
2	28	2	19.80	6.94	N/A
2	53	2	37.48	2.75	N/A
2	141	2	99.70	0.57	85

ตารางที่ 22 ผลการวัดการสั่นสะเทือนจากการระเบิดทดสอบที่บริษัท
ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) อำเภอทุ่งสง
นครศรีธรรมราช ตรวจวัดวันที่ 14 สิงหาคม 2537

Hole Dia. (inches)	Distance (meters)	Weight/Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	PPV. (mm/sec)	Freq. (Hertz)
2	10	1	10	20.53	N/A
2	15	1	15	3.35	N/A
2	25	1	25	2.65	2
2	40	1	40	1.40	85
2	9	3	5.20	31.58	2
2	26	3	15.01	7.33	N/A
2	70	3	40.41	1.03	43

ตารางที่ 23 ผลการวัดการสั่นสะเทือนจากการระเบิดจริง ที่บริษัท
ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด อำเภอพระพุทธบาท สระบุรี

ว/ค/ป	Hole Dia. (inches)	Distance (meters)	Weight/ Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	PPV. (mm/sec)	Freq. (Hertz)
30/09/37	7 1/2	600	764	21.71	1.65	2
08/12/37	3	55	100	5.50	34.04	11
08/12/37	3	50	87.5	5.34	9.68	18
13/12/37	7 1/2	400	1,575	10.08	1.49	3
08/02/38	5 1/2	600	1,457.5	15.72	1.57	10
09/02/38	3	400	130	35.09	0.52	17
10/02/38	5 1/2	500	1,375	13.48	1.94	3
06/03/38	5 1/2	300	1,583	7.50	6.97	20
08/03/38	5 1/2	300	790	10.67	7.48	18

ตารางที่ 24 ผลการวัดการสั่นสะเทือนจากการระเบิดจริง ที่บริษัท
บูเนิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) อำเภอพระพุทธบาท สระบุรี

ว/ด/ป	Hole Dia. (inches)	Distance (meters)	Weight/ Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	PPV. (mm/sec)	Freq. (Hertz)
07/03/38	7 7/8	300	1,600	7.50	8.81	22
08/03/38	7 7/8	300	1,090	9.10	1.62	20

* หมายเหตุ การระเบิดเพื่อศึกษา fragmentation ของวันที่ 13-14 มีนาคม 2538
ไม่มีการบันทึกค่าความสั่นสะเทือน

ตารางที่ 25 ผลการวัดการสั่นสะเทือนจากการระเบิดทดสอบ
ของกลุ่มเหมืองหินปูน ในเขตโรงไม้หินสามง่าม
อำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี ตรวจวัดระหว่าง
วันที่ 22-25 พฤษภาคม 2539

ว/ด/ป	Distance (meters)	Weight/Delay (kg)	PPV. (mm/sec)	Freq. (Hertz)
22/05/39	500	* N/A	0.43	43
22/05/39	500	N/A	0.57	7
22/05/39	500	N/A	0.76	18
22/05/39	500	N/A	0.54	51
22/05/39	500	N/A	0.62	N/A
24/05/39	750	N/A	0.40	47
24/05/39	750	N/A	0.40	19
24/05/39	750	N/A	3.35	51
24/05/39	500	N/A	0.75	N/A
24/05/39	500	N/A	0.48	34
25/05/39	500	N/A	0.43	39

* N/A = Not Applicable

7.5 การตรวจวัด Air Blast ในภาคสนาม

การตรวจวัดระดับความดังของเสียงที่เกิดจากการระเบิดหิน หรือที่เรียกว่า air blast มีการบันทึกโดยอัตโนมัติในช่วงเดียวกันกับการบันทึกผลค่าการสั่นสะเทือน

7.5.1 วิธีการตรวจวัดภาคสนาม

ในการทำการทดลองวัดค่าระดับเสียงหรือ peak air ที่เกิดขึ้นจากการระเบิด เมื่อได้ข้อมูลดิบจากการตรวจวัดแล้ว นำมาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง scaled distance กับ peak air ข้อจำกัดของการบันทึกผลค่า peak air คือเครื่องตรวจวัดจะบันทึกได้ค่า 142.0 dB เสมอ (เพราะเป็นค่าตัวเลขสูงสุดบนมาตรวัด) ถ้าหากค่าที่แท้จริงนั้นสูงกว่า 142.0 dB

7.5.2 ผลการวัดระดับความดังเสียง

ผลที่ได้จากการตรวจวัด peak air ในภาคสนามได้แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 26-33 หน้าที่ 138-141 โดยที่ตารางที่ 26-28 เป็นข้อมูลดิบผลการระเบิดทดสอบที่บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด ส่วนตารางที่ 29 เป็นข้อมูลดิบผลจากการระเบิดจริง

ตารางที่ 30-31 เป็นผลจากการตรวจวัดจากการระเบิดทดสอบ ที่บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ส่วนตารางที่ 32 เป็นการระเบิดจริง ในกรณีของการตรวจวัดการระเบิดแบบสลัฟฟิงปลาที่กลุ่มเหมืองหินปูน เขตเขาสามง่าม อำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี ได้แสดงผลไว้ในตารางที่ 33

ตารางที่ 26 ระดับเสียงที่ตรวจวัดได้จากการระเบิดทดสอบเมื่อวันที่ 7 ธ.ค. 2537
ที่บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด อ.พระพรหมบาท สระบุรี

ระยะทาง (m)	Weight/Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	Air Blast (dB)
5	1	5	142
10	1	10	142
15	1	15	142
20	1	20	142
25	1	25	142
25	1	25	138.7
40	1	40	133.8
75	1	75	138.2
75	1	75	124.4

ตารางที่ 27 ระดับเสียงที่ตรวจวัดได้จากการระเบิดทดสอบเมื่อวันที่ 9 ธ.ค.
และ 13 ธ.ค. 2537 ที่บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด

ระยะทาง (m)	Weight/Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	Air Blast (dB)
15	3	8.66	141.1
15	2	10.61	137.4
25	3	14.43	134.6
25	2	17.68	142.0
50	3	28.87	129.4
50	2	35.36	141.2
75	3	43.30	142.0
75	2	53.03	109.6
100	3	57.74	142.0

ตารางที่ 28 ระดับเสียงที่ตรวจวัดได้จากการระเบิดทดสอบเมื่อวันที่ 12 ธ.ค.2537
ที่บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด อ.พระพุทธบาท สระบุรี

ระยะทาง (m)	Weight/Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	Air Blast (dB)
5	1	5	142.0
10	1	10	141.6
15	1	15	142.0
30	1	30	138.9
40	1	40	136.4
50	1	50	141.7
60	1	60	142.0
80	1	80	126.1

ตารางที่ 29 ระดับเสียงที่ตรวจวัดได้จากการระเบิดจริงที่หน้าเหมืองบริษัท
ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด (เดือน ก.ย. 2537 ถึง มี.ค. 2538)

ระยะทาง (m)	Weight/Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	Air Blast (dB)
600	746	21.97	118.1
55	100	5.50	142.0
50	87.5	5.35	142.0
400	1575	10.08	123.7
600	1457.5	15.72	118.6
400	130	35.08	126.1
500	1375	13.48	116.6
300	790	10.67	142.0
300	1583	7.54	142.0

ตารางที่ 30 ระดับเสียงที่ตรวจวัดได้จากการระเบิดทดสอบเมื่อวันที่ 13 พ.ค.2537
และวันที่ 11 ส.ค. 2537 ที่บริษัทปูนซิเมนต์ไทยจำกัด (มหาชน)
อ.ทุ่งสง นครศรีธรรมราช

ระยะทาง (m)	Weight/Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	Air Blast (dB)
5	1	5.00	142.0
10	1	10.00	142.0
15	1	15.00	139.8
25	1	25.00	142.0
25	1	25.00	142.0
50	1	50.00	142.0
93	1	93.00	132.9
96	1	96.00	142.0
14	2	9.90	142.0
28	2	19.80	142.0
53	2	37.48	142.0
141	2	99.70	132.4

ตารางที่ 31 ระดับเสียงที่ตรวจวัดได้จากการระเบิดทดสอบเมื่อวันที่ 14 ส.ค.2537
ที่บริษัท ปูนซิเมนต์ไทยจำกัด (มหาชน) อ.ทุ่งสง นครศรีธรรมราช

ระยะทาง (m)	Weight/Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	Air Blast (dB)
10	1	10.00	142.0
15	1	15.00	142.0
25	1	25.00	142.0
40	1	40.00	136.0
9	3	5.20	42.0
26	3	15.01	142.0
70	3	40.41	140.6

ตารางที่ 32 ระดับเสียงที่ตรวจวัดจากการระเบิดจริง ที่บริษัทปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) อำเภอพระพุทธบาท สระบุรี

ว/ค/ป	Hole Dia. (inches)	Distance (meters)	Weight/ Delay (kg)	Scaled Distance (m/kg ^{1/2})	Air Blast (dB)
07/03/38	7 7/8	300	1,600	7.50	141.5
08/03/38	7 7/8	300	1,090	9.10	132.6

ตารางที่ 33 ระดับเสียงที่ตรวจวัดได้จากการระเบิดทดสอบ ของกลุ่มเหมืองหินปูน ในเขตโรงไม้หินสามง่าม อำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี
ตรวจวัดวันที่ 22-25 พฤษภาคม 2539

ว/ค/ป	Distance (meters)	Weight/Delay (kg)	Air Blast (dB)
22/05/39	500	* N/A	125.5
22/05/39	500	N/A	113.1
22/05/39	500	N/A	124.8
22/05/39	500	N/A	132.7
22/05/39	500	N/A	94.0
24/05/39	750	N/A	136.6
24/05/39	750	N/A	133.8
24/05/39	750	N/A	129.6
24/05/39	500	N/A	135.6
24/05/39	500	N/A	130.5
25/05/39	500	N/A	132.0

* N/A = Not Applicable

บทที่ 8

การคาดคะเนผลกระทบการสั่นสะเทือน และเสียงดังจากการระเบิดหิน

สิ่งที่มีผลกระทบค่อนข้างชัดเจนในเรื่องการระเบิดหินก็คือ ภายหลังจากปฏิบัติการระเบิดหินมีหลักฐานของความเสียหายต่ออาคารโครงสร้าง และการระเบิดก่อความรำคาญต่อบุคคลผู้ที่อาศัยใกล้เคียงกับบริเวณที่มีการพัฒนาหน้าเหมืองหิน สิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ปฏิบัติการภาคสนามต้องหาวิธีการที่มีประสิทธิผล ในการป้องกันและควบคุมผลเสียหายจากการใช้วัตถุระเบิดให้อยู่ในขอบเขตยอมรับได้

8.1 แบบจำลองการคาดคะเนการสั่นสะเทือนของอนภาค

การพัฒนาแบบจำลองการสั่นสะเทือนเนื่องจากการระเบิด ได้มีการคิดค้นและทดสอบในภาคสนามเป็นเวลานาน ดังได้กล่าวมาบางส่วนในบทที่ 5 สิ่งที่จะกล่าวต่อไปนี้จะเน้นทางด้านการพัฒนาวิธีการคาดคะเนผลกระทบของความเสียหาย เพื่อควบคุมให้การระเบิดมีหินที่แตกหัก ได้ขนาดที่เหมาะสมที่สุด แต่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมข้างเคียงน้อยสุด

ประเด็นหลักของการพัฒนาจะเน้นไปที่การหาความสัมพันธ์ของพลังงานที่ปลดปล่อย (energy released, E) แล้วพลังงานนี้ถูกนำไปใช้คำนวณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักวัตถุระเบิด (charge weight, Q หรือ W) ที่ถูกทำการจุดระเบิด ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองนี้อยู่ในรูปของ $E \propto Q^{1/2}$ หรือ $E \propto W^{1/2}$

8.1.1 แบบจำลอง USBM

คณะผู้วิจัยที่ทำการวิจัยอย่างต่อเนื่องและส่วนใหญ่ทำงานที่ U.S. Bureau of Mines ได้ทำการคัดแปลง แก้ไข ทดสอบข้อมูลในหินหลายชนิด เป็นเวลานาน ผู้วิจัยที่ควรได้รับการระบุชื่อไว้ ได้แก่ Crandell, 1949; Duvall and Fogelson, 1962; Nicholls et al., 1971; Siskind et al., 1980b ข้อสรุปสำหรับสูตรเชิงประสบการณ์ ที่รู้จักกันกว้างขวางและใช้กันแพร่หลายมากที่สุด โดยมีชื่อทั่วไป เรียกว่า "U.S. Bureau of Mines equation" หรือ "USBM equation" ได้แก่

$$V = K[D/Q^{1/2}]^{-B} \quad (96)$$

สมการข้างบนเป็นสมการเดียวกับสมการที่ 85 หน้า 75 [แต่เขียนในรูปฟอร์มแตกต่างกันเล็กน้อย เพื่อความสะดวกในการเขียนโปรแกรมแบบจำลอง] สมการนี้แสดงให้เห็นว่า มิติเส้นตรงใด ๆ ในเรื่องของกากระเบิดควรจะสเกลกับรากกำลังสองของน้ำหนักวัตถุระเบิด การระเบิดจึงถูกสเกลเป็นระยะสมมูล (equivalent distance) โดยมีศัพท์เฉพาะในเรื่องนี้เรียกว่า "scaled distance" ได้แก่ ระยะจริงจากจุดที่ทำกากระเบิดหารด้วยรากกำลังสองของน้ำหนักวัตถุระเบิด ส่วนค่าของ B ในสมการที่ 96 เป็นค่าความลาดเอียง (slope) สำหรับการวิเคราะห์ที่ใช้ best fit straight line ที่ได้จากการพล็อตบน log-log scale ระหว่างค่า ของ V (ground particle velocity) กับค่าของ $D/Q^{1/2}$ (square root scaled distance) ส่วนค่า K เป็นค่าคงที่ หาได้จากจุดตัดบนแกนความเร็วอนุภาค (แกน y) เมื่อกำหนดให้ $D/Q^{1/2} = 1$ (หนึ่ง)

8.1.2 แบบจำลอง Langefors-Kihlstrom

ต่อมาในปี ค.ศ. 1958 กลุ่มนักวิจัยชาวสวีเดน ได้แก่ Langefors, Westerberg and Kihlstrom ได้เสนอแนะสูตรเชิงประสภการณ์ที่ได้จากการตรวจวัดกากระเบิดทั้งบนพื้นผิวดินและในอุโมงค์ มีผลสรุปคือ

$$V = K[Q/D^{3/2}]^{B/2} \quad (97)$$

8.1.3 แบบจำลอง Ambraseys-Hendron

การปรับปรุงแบบจำลองในกลุ่มผู้วิจัย เพื่อหาสูตรเชิงประสภการณ์ที่เหมาะสมต่อมาเรื่อย ๆ กลุ่มผู้วิจัยที่เสนอการสเกลใหม่โดยเปลี่ยนจากรากกำลังสองเป็นรากกำลังสาม ได้แก่ Ambraseys and Hendron (1968) ซึ่งวิเคราะห์หาได้จากทฤษฎีพื้นฐานทาง dimensional analysis (ดูรายละเอียดจากบทที่ 5 หน้า 68-72) ได้ความสัมพันธ์ใหม่ที่เสนอแนะ ได้แก่

$$V = K[D/Q^{1/3}]^{-B} \quad (98)$$

การสเกลรากกำลังสองจะเหมาะสำหรับรูปแบบเรขาคณิตที่เป็น cylindrical charge ส่วนการสเกลรากกำลังสามเหมาะสำหรับรูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่นในลักษณะ spherical symmetry โดยทั่วไปเมื่อทำการระเบิดบนพื้นผิวดินการสเกลรากกำลังสองมีผู้ใช้มากกว่าการสเกลรากกำลังสาม ในทางกลับกันการสเกลรากกำลังสามจะใช้มากกว่าเมื่อทำการระเบิดใต้พื้นผิวดิน

8.1.4 แบบจำลอง Ghosh-Daeman

องค์ประกอบที่สำคัญในการลดขนาดแอมพลิจูดของคลื่นพัลส์ ที่แผ่กระจายไปในมวลสาร อันเป็นผลกระทมาจาก inelastic attenuation effects ทำให้พลังงานการระเบิดสูญเสียไป ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสูตรเชิงประสมการณ์ของ USBM และของ Ambraseys and Hendron ขึ้นมาใหม่ โดยนำค่าตัวแปรจากองค์ประกอบของ inelastic attenuation factor $[e^{-PD}]$ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย สมการใหม่นี้ Ghosh and Daeman (1983) ให้มีรูปแบบเป็น

$$V = K[D/Q^{1/2}]^{-B} \cdot e^{-PD} \quad (99)$$

และ

$$V = K[D/Q^{1/3}]^{-B} \cdot e^{-PD} \quad (100)$$

ผู้ใช้งานจำเป็นต้องตัดสินใจเลือกก่อนว่าจะทำการสเกลแบบไหน จากนั้นจึงเลือกใช้สมการที่ 99 หรือ 100

ผลกระทบเชิง inelastic effects นี้ได้มาจากความแตกต่างจากกรณีอุดมคติ (ideal case) เฉพาะที่เกี่ยวข้องกับคลื่นพัลส์ ได้แก่

- a) เกิดการลดแอมพลิจูดของคลื่น เนื่องจากมีน้ำในช่องว่างของมวลสารตัวกลาง
- b) การอึดตัวบางส่วน of โครงสร้างหิน เช่น มี gas-pockets squeezing
- c) การขยายตัวอย่างต่อเนื่องของรอยแตกเล็ก ๆ (cracks) ในมวลสาร
- d) ผลจากความไม่ต่อเนื่อง (discontinuities) ในมวลสารของโครงสร้างหิน เช่น joint, bedding และ void เป็นต้น

8.1.5 แบบจำลอง General Type

กลุ่มนักวิจัยชาวอังกฤษส่วนใหญ่มาจากสถาบัน Imperial College, London ได้แก่ Attewell, 1964; Davies et al., 1964; Birch and Chaffer, 1983 ได้เสนอว่า ไม่ควรมีสymmetry ของคลื่นพัลส์ของวัตถุระเบิด (charge symmetry) เกิดขึ้นในช่วงของการระเบิด นักวิจัยเหล่านี้ได้เสนอสมการทั่วไป (general equation) เป็น

$$V = KD^{-B}.Q^A \quad (101)$$

ค่าคงที่ของ K, A และ p ในสูตรเชิงประสมการณ์ข้างบนนี้ ไม่ได้หามาจากวิธี best fit curve แต่หามาจากวิธีการวิเคราะห์เชิง multiple regression ของค่าตัวแปรที่ไม่พึงพิง 2 ค่า

8.1.6 แบบจำลอง CMRS

กลุ่มนักวิจัยชาวอินเดีย ที่ทำงานในสังกัด Central Mining Research Station (CMRS) เมือง Dhanbad ได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองเดิมของ Ghosh-Daeman ขึ้นมาใหม่ โดยได้มีการนำค่าตัวแปรเชิงอิลาสติกที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนหลายค่าเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย องค์ประกอบสำคัญในการนำค่าตัวแปรเชิงอิลาสติกมาใช้ในแบบจำลอง CMRS นี้ ได้แก่

- a) inelastic damping
- b) specified constant for a particular wave type
- c) geometrical spreading at a particular blast site

ผลสรุปของแบบจำลอง CMRS (Singh and Pal Roy, et al., 1993) ได้รูปแบบจำลองอย่างง่ายเป็น

$$V = n + K[D/Q^{1/2}]^{-1} \quad (102)$$

ค่าคงที่ n ในสูตรเชิงประสมการณ์ข้างบนนี้เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์หลายอย่างของ rock properties และ geological discontinuities ค่าคงที่ K จะขึ้น

อยู่กับพารามิเตอร์ของการออกแบบการระเบิด ได้แก่ น้ำหนักวัตถุระเบิด ระยะทางห่างจากจุดระเบิด เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุระเบิด ช่วงระยะถ่วงเวลา ระยะ burden ระยะ spacing ระยะ subdrilling และระยะ stemming

คณะผู้วิจัยของ CMRS ได้เสนอค่าเชิงสถิติเป็นดัชนีความน่าเชื่อถือ (index of determination, Id) ไว้ในตารางที่ 34-42 กำหนดให้ ถ้าค่า Id ใกล้เคียงกับ 1 (หนึ่ง) ก็จะน่าเชื่อถือมากขึ้น นอกจากนี้ยังได้รวบรวมตัวเลขค่าคงที่เชิงอิลาสติกของหินที่อยู่กับที่ (in situ rock mass) สำหรับหินหลายชนิดไว้ด้วย รายละเอียดจะกล่าวต่อไปในหัวข้อต่อไป

8.2 ค่าคงที่สำหรับมวลสารชนิดต่างๆบริเวณตรวจวัด

ตารางที่ 34-42 ในหน้า 147-149 ได้แสดงค่าคงที่สำหรับหินและแร่หลายชนิด ค่าคงที่สำหรับมวลสารเหล่านี้ เป็นการคิดค้นในรูปแบบสูตรเชิงประสภการณ์ของ Central Mining Research Station โดยนักวิจัยในประเทศอินเดีย

ลักษณะของเนื้อหินและ โครงสร้างหินที่ได้ทำการหาค่าคงที่เชิงอิลาสติก มีคุณสมบัติ ดังนี้

- หินแกรนิต (granite) เป็นหินที่แข็งจับตัวแน่น ไม่มีรอยแตกร้าว และหินค่อนข้างสด (fresh)
- หินปูน (limestone) เป็นหินปูนที่มีรอยแตกรอยแยกในโครงสร้างหินสูงมาก (fissured and highly jointed)
- หินบะซอลต์ (basalt) เป็นหินบะซอลต์ที่ไม่ค่อยพุด
- หินทราย (sandstone) เป็นหินทรายพุด ผ่านการกัดกร่อนมาพอสมควร

นอกจากนี้ก็มีหินและแหล่งแร่ชนิดอื่น ที่ได้ทำการตรวจวัดและเสนอค่าคงที่ด้วย เช่น coal, iron ore, dolomite, sandstone-alluvium

อย่างไรก็ตาม สมมุติฐานในเรื่อง joint distribution ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2-3 ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยซึ่งคงมีผลกระทบต่อสมการในเรื่องความแม่นยำถูกต้องในการใช้ค่าคงที่ในตารางเหล่านี้

ตารางที่ 34 ค่าคงที่สำหรับหินปูน (limestone) และดัชนีความน่าเชื่อถือ

สมการแบบจำลอง	B	K	A	p	ld
USBM	1.95481	3352.63	x	x	0.898
Langefors-Kihlstrom	2.41363	534.56	x	x	0.747
Ambraseys-Hendron	1.83095	10520.30	x	x	0.909
General Type	1.8965	7890.32	0.73871	x	0.914
Ghosh-Daeman(square root)	1.01077	543.73	x	0.00333	0.948
Ghosh-Daeman (cube root)	1.05301	1268.53	x	0.00279	0.931

ตารางที่ 35 ค่าคงที่สำหรับหินแกรนิต (granite) และดัชนีความน่าเชื่อถือ

สมการแบบจำลอง	B	K	A	p	ld
USBM	1.53311	574.19	x	x	0.839
Langefors-Kihlstrom	1.80693	255.81	x	x	0.859
Ambraseys-Hendron	1.69131	1265.09	x	x	0.779
General Type	1.28351	186.75	0.94592	x	0.861
Ghosh-Daeman(square root)	1.76428	792.16	x	-0.00930	0.889
Ghosh-Daeman (cube root)	2.24944	6068.20	x	0.02575	0.827

ตารางที่ 36 ค่าคงที่สำหรับแร่เหล็ก (iron ore) และดัชนีความน่าเชื่อถือ

สมการแบบจำลอง	B	K	A	p	ld
USBM	1.80138	303.74	x	x	0.761
Langefors-Kihlstrom	2.50391	30.009	x	x	0.748
Ambraseys-Hendron	1.72116	2471.13	x	x	0.769
General Type	1.58818	495.22	0.09131	x	0.773
Ghosh-Daeman(square root)	1.18067	151.54	x	0.00078	0.789
Ghosh-Daeman (cube root)	1.19988	701.265	x	0.00067	0.786

ตารางที่ 37 ค่าคงที่สำหรับถ่านหิน (coal) และดัชนีความน่าเชื่อถือ

สมการแบบจำลอง	B	K	A	p	ld
USBM	1.40761	266.52	x	x	0.803
Langefors-Kihlstrom	1.75350	90.28	x	x	0.816
Ambraseys-Hendron	1.49335	864.066	x	x	0.777
General Type	1.21122	30.48	1.03659	x	0.820
Ghosh-Daeman(square root)	2.40458	1164.34	x	-0.01089	0.868
Ghosh-Daeman (cube root)	3.01538	25525.20	x	-0.01510	0.871

ตารางที่ 38 ค่าคงที่สำหรับหินโดโลไมต์ (dolomite) และดัชนีความน่าเชื่อถือ

สมการแบบจำลอง	B	K	A	p	ld
USBM	1.50848	174.24	x	x	0.769
Langefors-Kihlstrom	1.99050	112.40	x	x	0.762
Ambraseys-Hendron	1.48994	252.81	x	x	0.760
General Type	1.50851	170.52	0.76743	x	0.769
Ghosh-Daeman(square root)	1.00745	111.20	x	0.24357	0.793
Ghosh-Daeman (cube root)	1.00955	142.17	x	0.02271	0.776

ตารางที่ 39 ค่าคงที่สำหรับหินบะซอลต์ (basalt) และดัชนีความน่าเชื่อถือ

สมการแบบจำลอง	B	K	A	p	ld
USBM	2.152	895.64	x	x	0.903
Langefors-Kihlstrom	2.652	176.14	x	x	0.921
Ambraseys-Hendron	2.260	4765.47	x	x	0.926
General Type	2.171	1137.66	1.03420	x	0.936
Ghosh-Daeman(square root)	1.739	587.68	x	0.00733	0.944
Ghosh-Daeman (cube root)	2.456	6745.21	x	0.00318	0.926

ตารางที่ 40 ค่าคงที่สำหรับหินทราย (sandstone) และดัชนีความน่าเชื่อถือ

สมการแบบจำลอง	B	K	A	p	ld
USBM	0.82588	50.42	x	x	0.628
Langefors-Kihlstrom	1.02402	20.069	x	x	0.633
Ambraseys-Hendron	0.88603	144.40	x	x	0.616
General Type	0.70857	8.34	0.60317	x	0.635
Ghosh-Daeman(square root)	1.36410	59.020	x	-0.00462	0.705
Ghosh-Daeman (cube root)	1.61073	426.746	x	-0.00563	0.716

ตารางที่ 41 ค่าคงที่สำหรับหินทรายบนดินที่ราบลุ่ม (sandstone-alluvium) และดัชนีความน่าเชื่อถือ

สมการแบบจำลอง	B	K	A	p	ld
USBM	1.98017	1483.48	x	x	0.939
Langefors-Kihlstrom	2.52473	310.59	x	x	0.893
Ambraseys-Hendron	2.03149	7243.80	x	x	0.969
General Type	2.04178	35014.6	0.32523	x	0.980
Ghosh-Daeman(square root)	1.23200	697.41	x	0.00305	0.960
Ghosh-Daeman (cube root)	1.80014	4796.41	x	0.01027	0.970

ตารางที่ 42 ค่าคงที่และดัชนีความน่าเชื่อถือของมวลสารหลายชนิดที่ใช้กับแบบจำลองของ CMRS

ชนิดของมวลสาร	n	K	ld
Limestone	-11.04960	489.478	0.887
Granite	-0.83848	132.063	0.860
Iron Ore	-2.09833	98.358	0.911
Coal	-11.29100	277.186	0.703
Dolomite	-21.11840	339.377	0.945
Basalt	-10.14520	183.815	0.923
Sandstone	-18.62860	300.305	0.814
Sandstone-Alluvium	-27.02450	456.306	0.950

8.3 โปรแกรมแบบจำลองการสันสะเทือนและผลกระทบของการระเบิดหิน

การคาดคะเนผลของการสันสะเทือนและผลกระทบของการระเบิดหิน จะทำได้ อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ คาดคะเนผล และพล็อตเป็นภาพ กราฟทิก โปรแกรมแบบจำลองการคาดคะเนผลของการสันสะเทือนและผลกระทบ ควรเขียน โปรแกรมให้ใช้ได้กับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ไม่ต้องการหน่วยความจำสูง

8.3.1 โปรแกรมแบบจำลองการคาดคะเนการสันสะเทือนและผลกระทบ

โปรแกรมแบบจำลองการสันสะเทือนและผลกระทบเนื่องจากการระเบิดหิน คณะ ผู้วิจัย ได้พัฒนาขึ้นมา สำหรับเป็นแนวทางและใช้วิเคราะห์ข้อมูลดิบที่ได้จากภาคสนามทั้งที่ เป็นการระเบิดทดสอบและระเบิดจริง ตลอดจนคาดคะเนระยะที่ปลอดภัยของการระเบิดที่มี ตัวแปรที่สำคัญในการตัดสินใจ 3 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วของอนุภาค ความถี่ และเสียง- ดังจากการระเบิด

ตัวโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมาบรรจุไว้ในแผ่น diskette ที่ใส่อยู่ในซองหลังปก มีชื่อทั่วไปว่า โปรแกรม VIBES.EXE เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมา สำหรับ เป็นแบบเมนูสำเร็จรูป ผู้ใช้โปรแกรมสามารถเลือกหน่วยของการวิเคราะห์ จากนั้นก็เลือก ชนิดของหินหรือแร่ที่จะทำการวิเคราะห์ ก่อนเริ่มค้นวิเคราะห์ต้องมีการป้อนข้อมูลดิบเข้า (data input) โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ต่างๆเชิงสถิติ ประกอบกับการคาดคะเนระยะทางที่ปลอดภัยจากผลกระทบของความเร็วอนุภาค ความถี่ และผลกระทบด้านเสียงดัง ทำให้วิศวกรสามารถจะนำไปแก้ไขคัดแปลงการออกแบบการ ระเบิด เช่น หาน้ำหนักวัตถุระเบิดที่เหมาะสม แก้วรูปแบบแพทเทิร์นของหน้าเหมือง ตลอดจนจัดแนวของหน้าระเบิดให้เหมาะสมกับแนวความไม่ต่อเนื่องในหิน เป็นต้น

8.3.2 ลักษณะทั่วไปของโปรแกรม VIBES

โปรแกรม VIBES ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาด้วยการเขียนโปรแกรมเป็นภาษาซี (C) โดยมี file dynamic link library กับโปรแกรม Borland Turbo C++ Version 3.0 โปรแกรมสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ในส่วนของการแบบจำลอง การสันสะเทือนและผลกระทบ เช่น การหาสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงฮิสตอลจิกจาก

การบันทึกผลภาคสนาม การแสดงรูปภาพความสัมพันธ์ของแบบจำลองการสั่นสะเทือนต่างๆ ที่เป็นแบบจำลองมาตรฐาน และเมื่อทำการพล็อตข้อมูลดิบ เข้าโปรแกรมก็แสดงผลของกราฟ การคาดคะเนภาคสนามเปรียบเทียบกับแบบจำลองมาตรฐานหลายแบบ ตลอดจนการตัดสินใจขั้นสุดท้ายในการเลือกช่วงระยะของความปลอดภัยตามมาตรฐานความปลอดภัย

8.3.3 ส่วนประกอบและการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมย่อยหลายโปรแกรมในโปรแกรมหลัก มีชื่อและมีการทำงาน ดังนี้

1. โปรแกรม VIBES.C

เป็นโปรแกรมหลักที่ใช้แสดงผลในจอภาพในรูปแบบของตัวเลข และกราฟฟิก

2. โปรแกรม HEADING.C

เป็นโปรแกรมย่อยที่สร้างเป็นไฟล์สำหรับประกาศตัวแปรของโปรแกรม VIBES.C

3. โปรแกรม MENU.C

เป็นโปรแกรมย่อยที่สร้าง menu bar หน้าจอภาพ เพื่อความสะดวกของผู้ใช้ในการ execute โปรแกรม

4. โปรแกรม MENU.H

เป็นโปรแกรมย่อยที่สร้าง header file เพื่อที่จะให้โปรแกรม Menu.C อ้างอิง

5. โปรแกรม DECLAR.H

เป็นโปรแกรมย่อยที่สร้างเป็นไฟล์สำหรับเก็บค่าคงที่เชิงฮิสตริกต่าง ๆ และเป็น header file สำหรับโปรแกรม Util.C

6. โปรแกรม UTIL.C

เป็นโปรแกรมที่สร้างไฟล์ที่กำหนดค่าต่าง ๆ ของ keyboard ตลอดจนทำหน้าที่รับข้อมูลทาง keyboard เพื่อนำมาคำนวณในสมการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

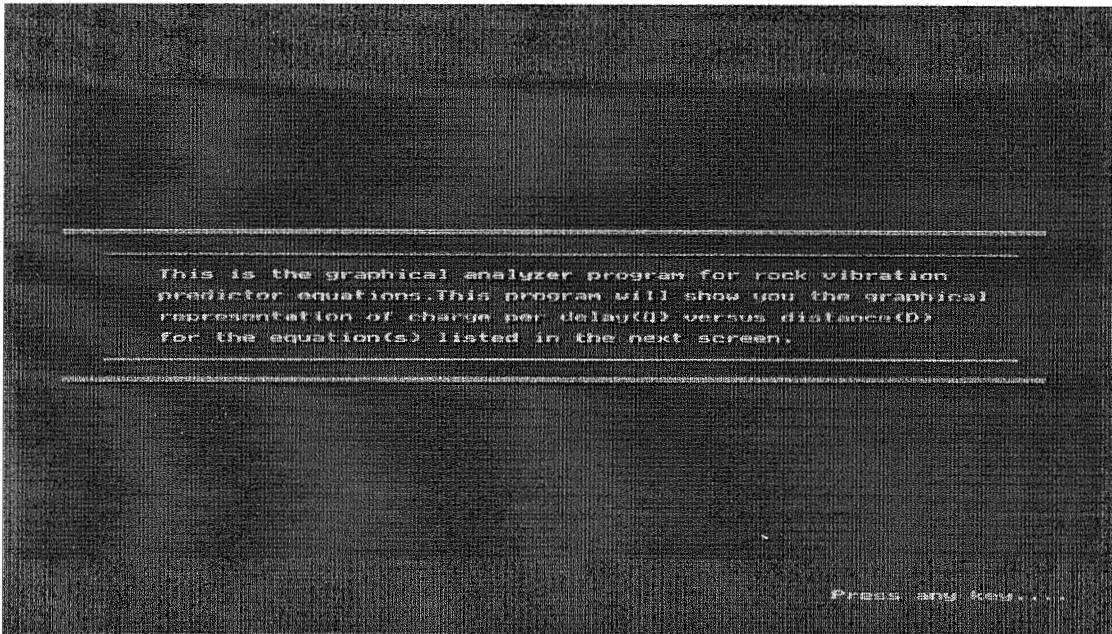
8.3.4 ตัวอย่างวิธีใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและผลกระทบ

ในการเริ่มต้นเมื่อผู้ใช้เรียกโปรแกรม VIBES ขึ้นมา จะมีการแสดงหน้าจอรูปภาพที่ปรากฏของรูปที่ 52-53 (หน้า 153) ภาพที่ปรากฏทั้ง 2 รูป เป็นการอธิบายและแสดงรูปแบบสมการแบบจำลองมาตรฐานต่าง ๆ ตามรายละเอียดในหน้าที่ 142-145

ต่อมาในรูปที่ 54 หน้า 154 เป็นการเลือกหน่วยของการวิเคราะห์ 2 หน่วยระหว่างหน่วย English system กับหน่วย S.I. system รูปที่ 55 หน้า 154 เป็นการเลือกชนิดของมวลหินหรือมวลแร่ที่อยู่ใต้มหาสมุทรที่ทำการตรวจวัด

ในรูปที่ 56 หน้า 155 เป็นเมนูหลักของโปรแกรม Vibes มีส่วนที่แสดงสมการของการลั่นสะเทือนหลายสมการเข้าด้วยกัน [แยกตามวิธีการสเกล] ตลอดจนเมนูหลักอื่นๆของโปรแกรม เช่น การป้อนข้อมูลดิบเข้าโปรแกรมการพล็อตข้อมูลเข้าเป็นรูปภาพ การวิเคราะห์หาสมการเชิงประสมการณเฉพาะบริเวณพื้นที่ที่จะทำการตรวจวัดเป็นต้น ส่วนรูปที่ 57 ในหน้าเดียวกัน เป็นการเลือกเมนูของโปรแกรม

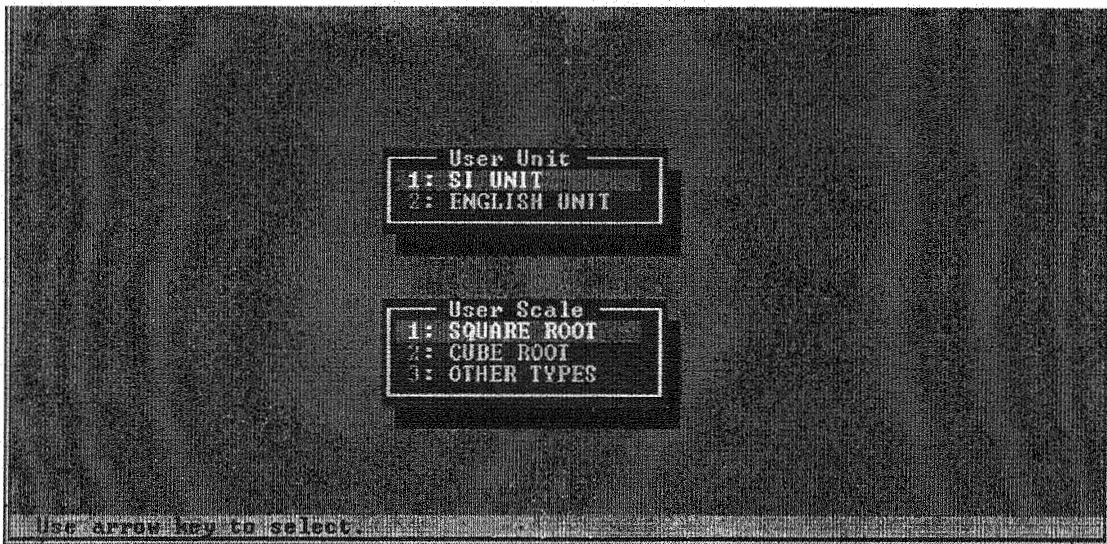
รูปที่ 58 หน้า 156 เป็นการแสดงหน้าจอของการรับข้อมูลดิบที่เป็นผลจากการตรวจวัดจริงในภาคสนาม เมื่อผู้ใช้ป้อนข้อมูลดิบเข้าในโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณและพล็อตกราฟ รูปที่ 59 หน้า 156 เป็นการเลือกระดับขั้นของความเร็วอนุภาค ส่วนรูปที่ 60-62 (หน้าที่ 157-159) เป็นการเปรียบเทียบรูปภาพของข้อมูลดิบภาคสนามกับสมการแบบจำลองมาตรฐานของการสเกลทั้งสองแบบ คือ การสเกลรากกำลังสอง การสเกลรากกำลังสาม และการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการแบบอื่น



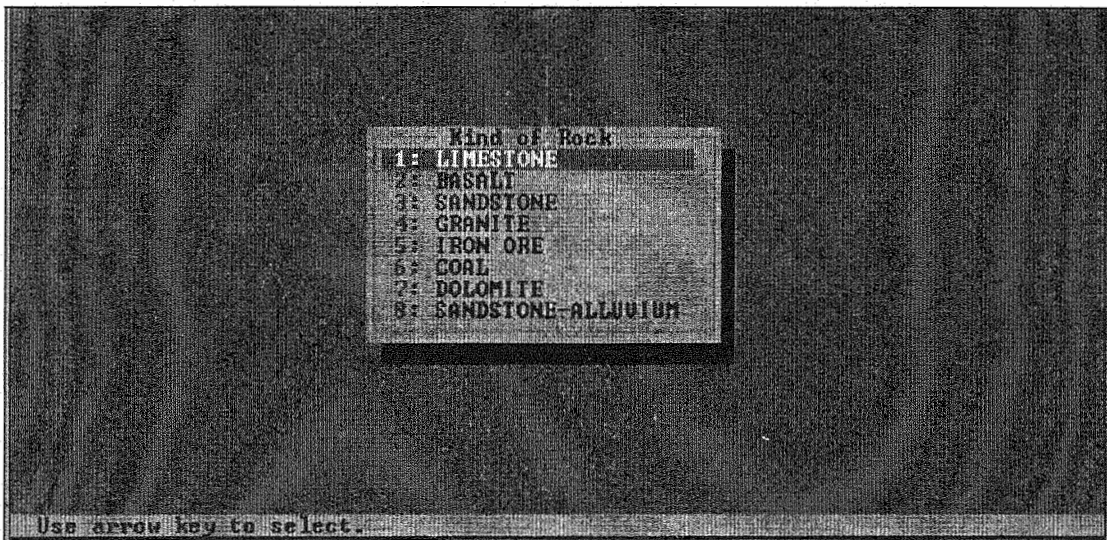
รูปที่ 52 เมื่อผู้ใช้ต้องการเข้าโปรแกรม จะปรากฏหน้าจอแรกอธิบายถึงการแสดง รูปกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างน้ำหนักวัตถุระเบิด ต่อจังหวะถ่วงกับระยะทาง จากจุดระเบิด



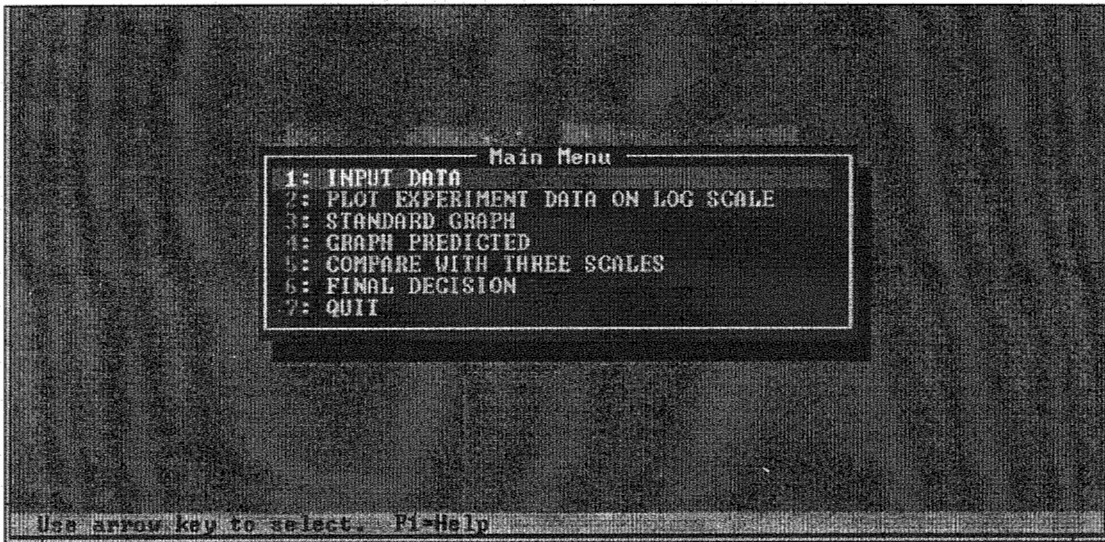
รูปที่ 53 หน้าจอที่สองแสดงรูปแบบของสมการแบบจำลองมาตรฐาน ทั้ง 6 แบบ (7 สมการ) ที่มีวิธีการต่างกัน



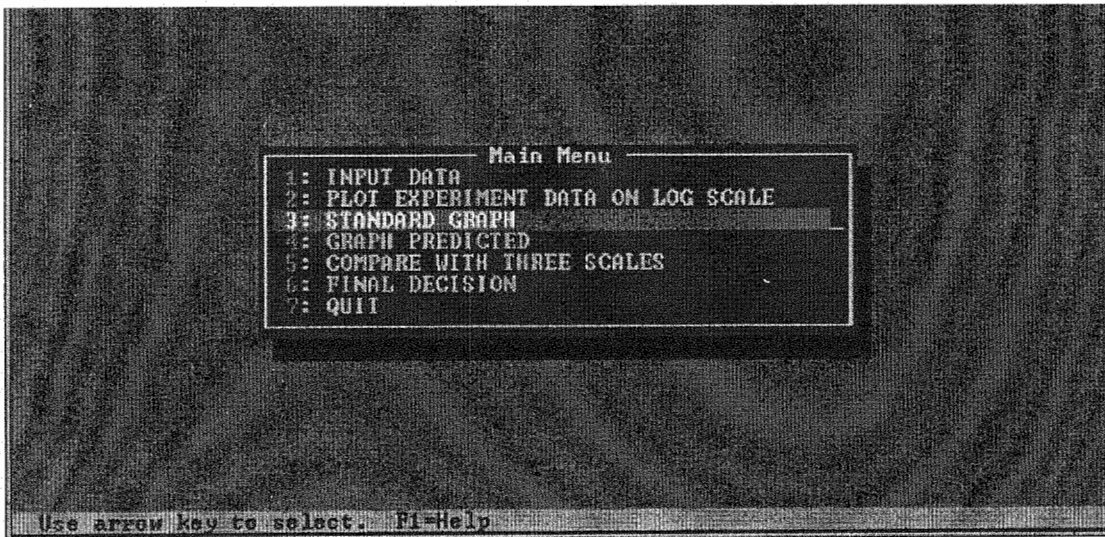
รูปที่ 54 หน้าจอแสดงการเลือกใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์



รูปที่ 55 เป็นเมนูของการเลือกชนิดของหินหรือแร่ที่จะทำการระเบิด



รูปที่ 56 เมนูของโปรแกรมการวิเคราะห์ แสดงความสามารถ ในการวิเคราะห์หลายรูปแบบ



รูปที่ 57 แสดงการเลือกเมนูของโปรแกรมในการวิเคราะห์

Input Data				
	PPU	Scaled Dist.	Frequency	D
#1	[1.65]	[21.71]	[2]	[600]
#2	[34.04]	[5.50]	[11]	[55]
#3	[9.68]	[5.34]	[18]	[50]
#4	[1.49]	[10.08]	[3]	[400]
#5	[1.57]	[15.72]	[10]	[600]
#6	[0.52]	[35.09]	[17]	[400]
#7	[1.94]	[13.48]	[3]	[500]
#8	[6.97]	[7.50]	[20]	[300]
#9	[7.48]	[10.67]	[18]	[300]

<Enter>=Edit, <ESC>=Finish

รูปที่ 58 การป้อนข้อมูลดิบที่ได้จากการตรวจวัดหน้าเหมืองที่มีการระเบิดจริงในภาคสนาม เพื่อให้ทำการคำนวณในโปรแกรม

Main Menu

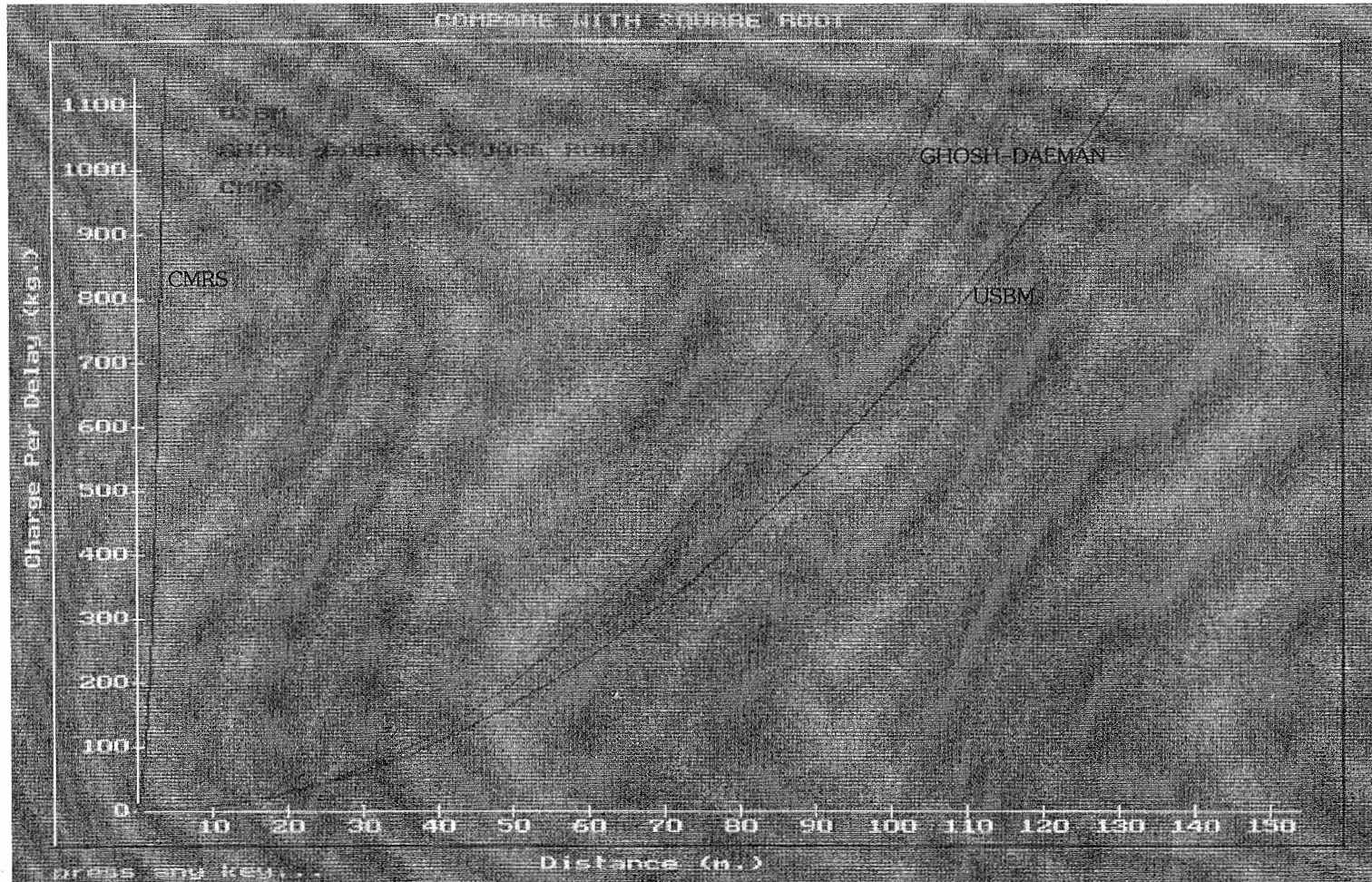
1: INPUT DATA
2: PLOT EXPERIMENT DATA ON LOG SCALE

Level of Vibration

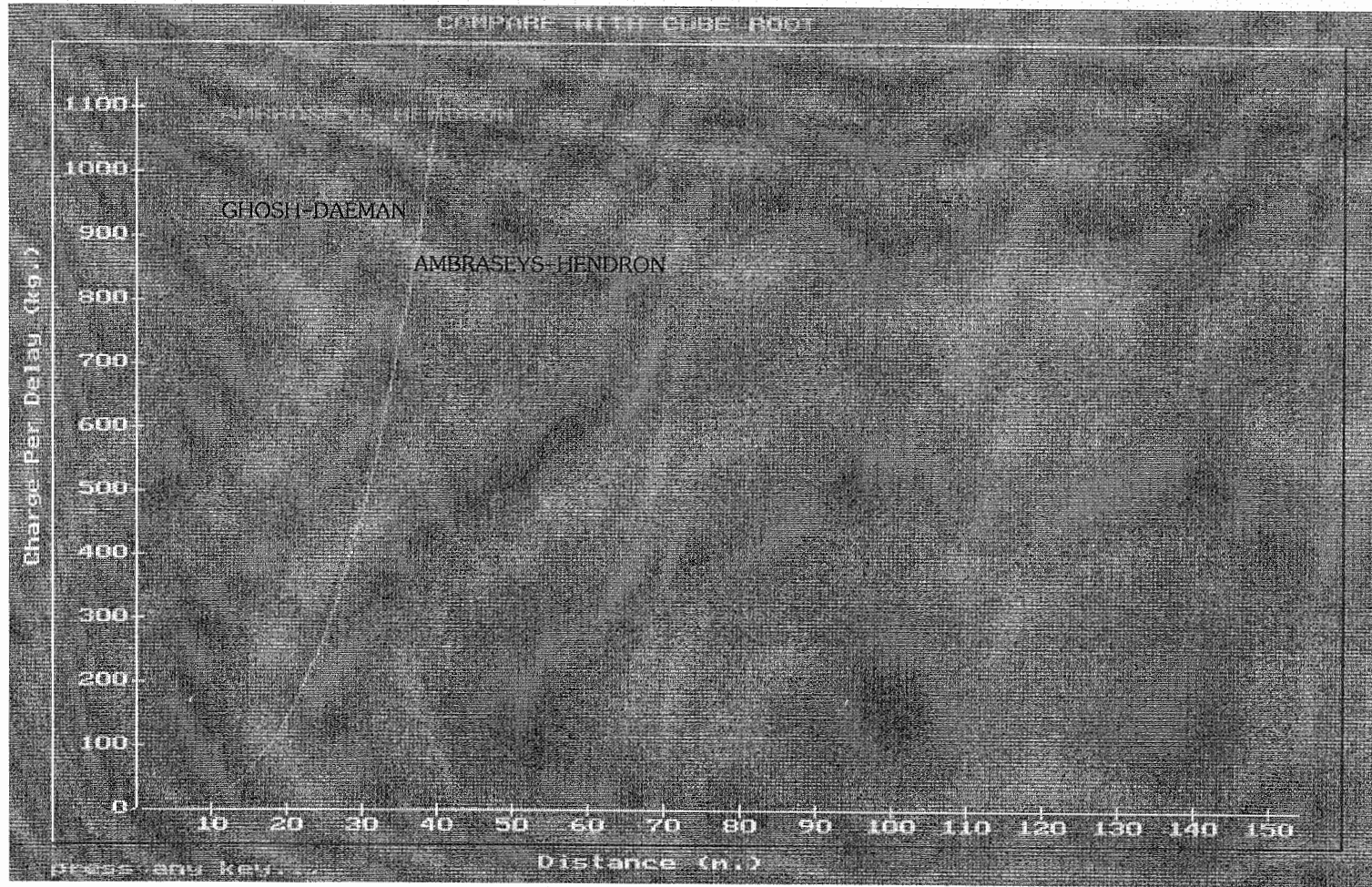
PLEASE ENTER LEVEL OF VIBRATION (cm/s) 25

Input Value

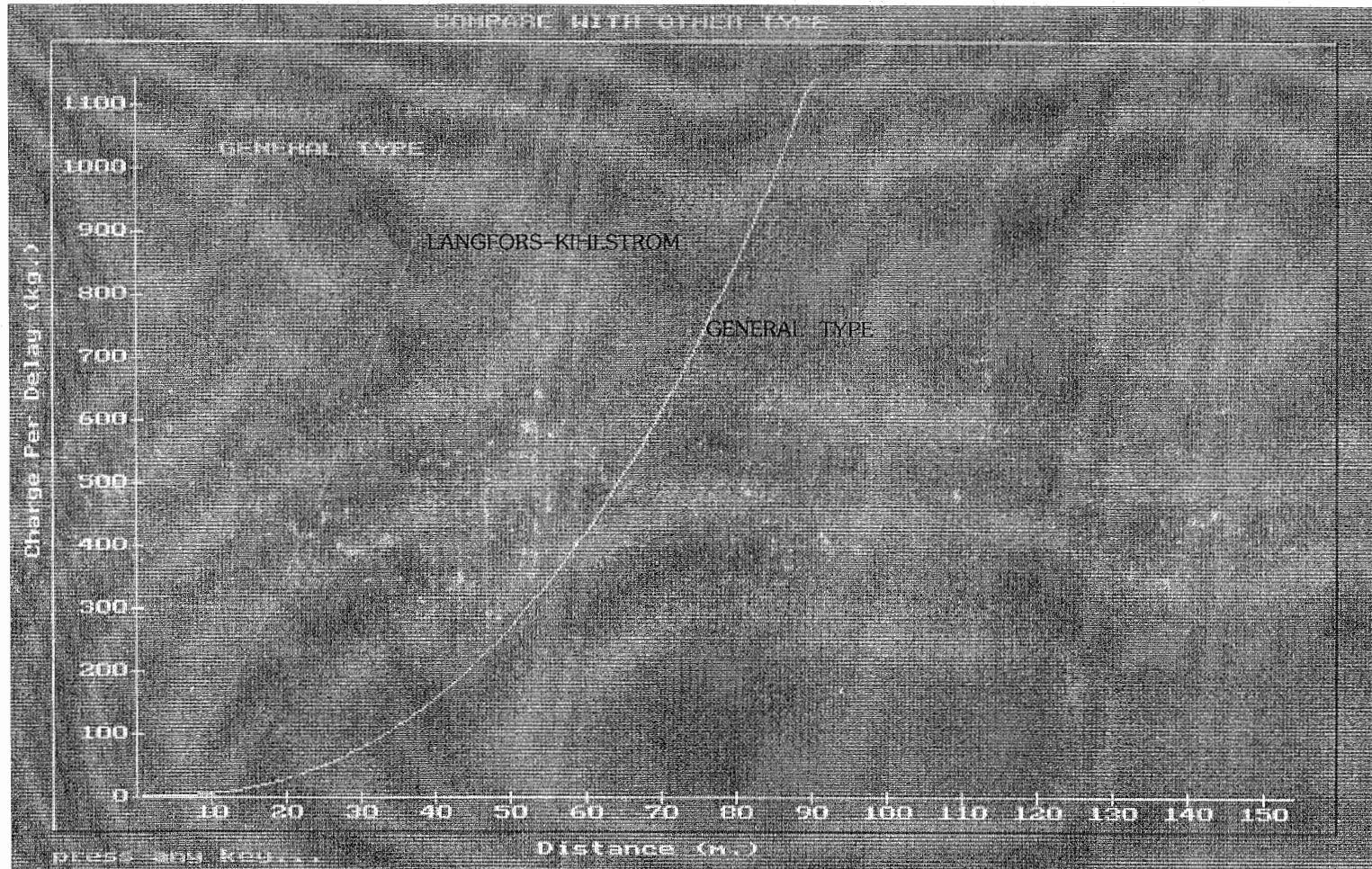
รูปที่ 59 เป็นการเลือกระดับขั้นของการสั่นสะเทือนที่ต้องการควบคุม โดยการป้อนตัวเลขเข้าไป เพื่อแสดงผลการคาดคะเนและทำการพล็อตกราฟความสั่นพ้อง



รูปที่ 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงอิลาสติกของแบบจำลองมาตรฐาน จากค่าที่ตรวจวัดภาคสนาม สำหรับการสเกลรากกำลังสอง



รูปที่ 61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงอิลาสติกของแบบจำลองมาตรฐาน จากค่าที่ตรวจวัดภาคสนาม สำหรับการสเกลรอกกำลังสาม



รูปที่ 62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงอิลาสติกของแบบจำลองมาตรฐาน จากค่าที่ตรวจวัดภาคสนาม สำหรับวิธีการอื่น ๆ

8.4 การสรุปผลกระทบของการสั่นสะเทือนและผลกระทบของตัวแปรอื่น

การวิเคราะห์เพิ่มเติมสำหรับตัวแปรของงานระเบิดหินต่าง ๆ มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลกระทบของการระเบิดต่อโครงสร้างอาคารสิ่งก่อสร้างและโบราณสถาน (ถ้ามี) รวมทั้งมีการศึกษาปริมาณวัตถุระเบิดสูงสุดต่อจังหวัดวัง และตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ของผลกระทบที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับโครงสร้างทางธรณีวิทยาของบริเวณหน้าเหมือง

8.4.1. ความสัมพันธ์ของค่า Peak Velocity กับค่า Scaled Distance

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด ซึ่งเป็น vector summation of peak particle velocity นำมาหาความสัมพันธ์กับสเกลรากกำลังสองของ scaled distance, $rW^{1/2}$ โดยพล็อตในกราฟ log-log scale ผู้ใช้สามารถเลือกเมนูของโปรแกรม VIBES เพื่อวิเคราะห์ค่าข้อมูลเชิงสถิติด้วยวิธี linear regression จากนั้นโปรแกรมก็จะแสดงความสัมพันธ์เป็นรูปกราฟ พร้อมทั้งแสดงสมการเฉพาะในบริเวณตรวจวัดที่ได้จากการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังแสดงตัวเลขที่สำคัญต่างๆ เช่น ค่าคงที่ K ที่หาได้จากจุดตัดแกน y ค่าความลาดชันของกราฟ, B และค่าตัวเลขความน่าเชื่อถือจาก regression method คือค่า coefficient of correlation, R^2

รูปที่ 63 หน้า 162 เป็นตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่า square root ของ scaled distance ที่เปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดมาตรฐานทั่วไปกับขีดจำกัดมาตรฐานของ U.S. Bureau of Mines (ดูรายละเอียดในหน้า 75-78) ข้อมูลดิบที่ป้อนเข้าไปได้แสดงไว้ในรูปที่ 58 หน้า 156

8.4.2 ความสัมพันธ์ของค่า Peak velocity กับค่า Frequency

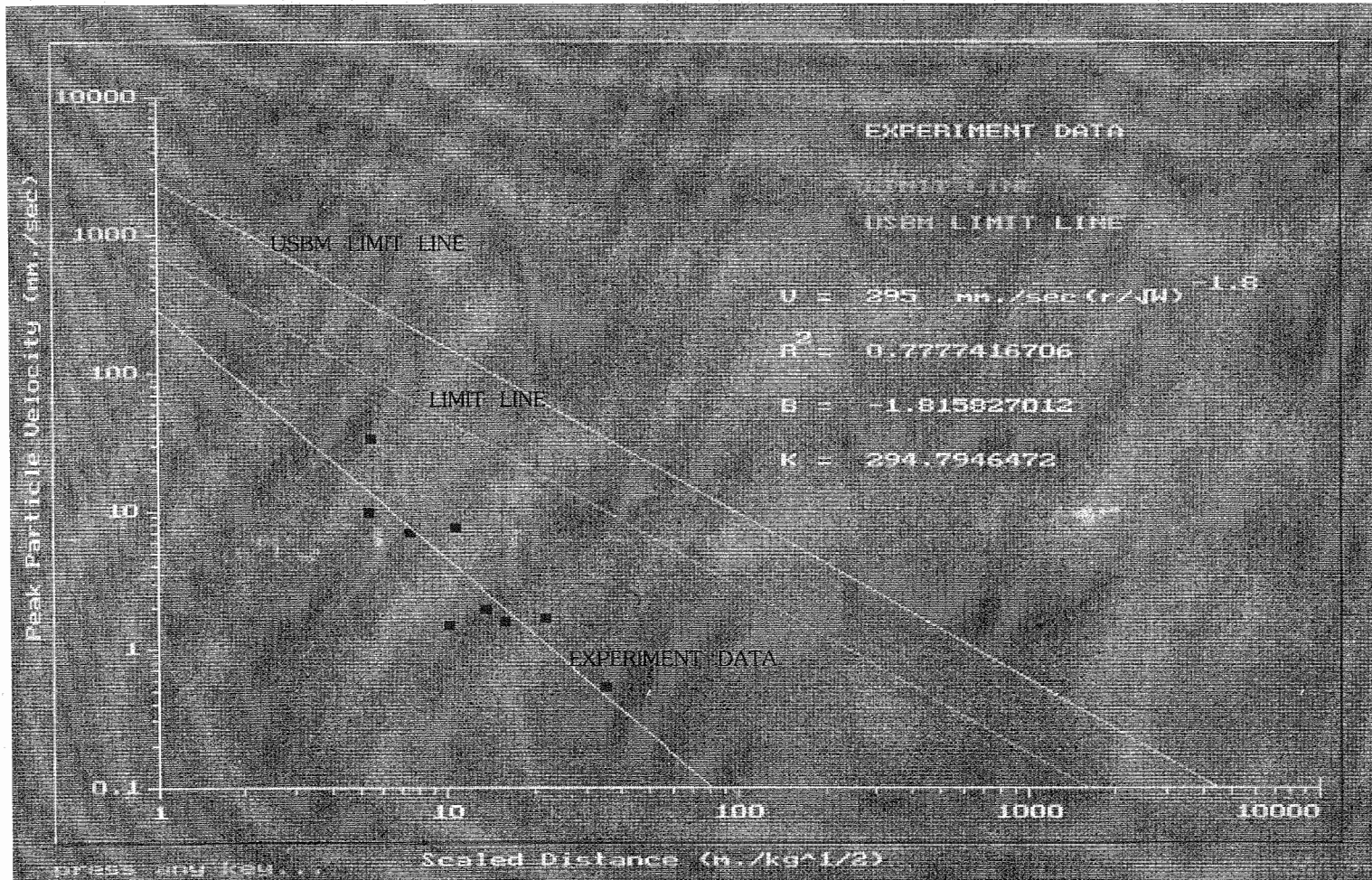
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ ได้มีการพล็อตหาความสัมพันธ์ทางด้าน threshold limits ที่มีต่อโครงสร้างของสิ่งก่อสร้างที่มีระยะการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคเข้ามาเกี่ยวข้อง นำข้อมูลดิบมาพล็อตบน log-log scale ซึ่งคัดแปลงมาจากกราฟรูปที่ 25 หน้า 88

ตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคกับค่าความถี่ต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 64 หน้า 163 ข้อมูลดิบที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรมมาจากตารางที่ 23 หน้า 135 ซึ่งเป็นข้อมูลแหล่งเดียวกับของรูปที่ 63

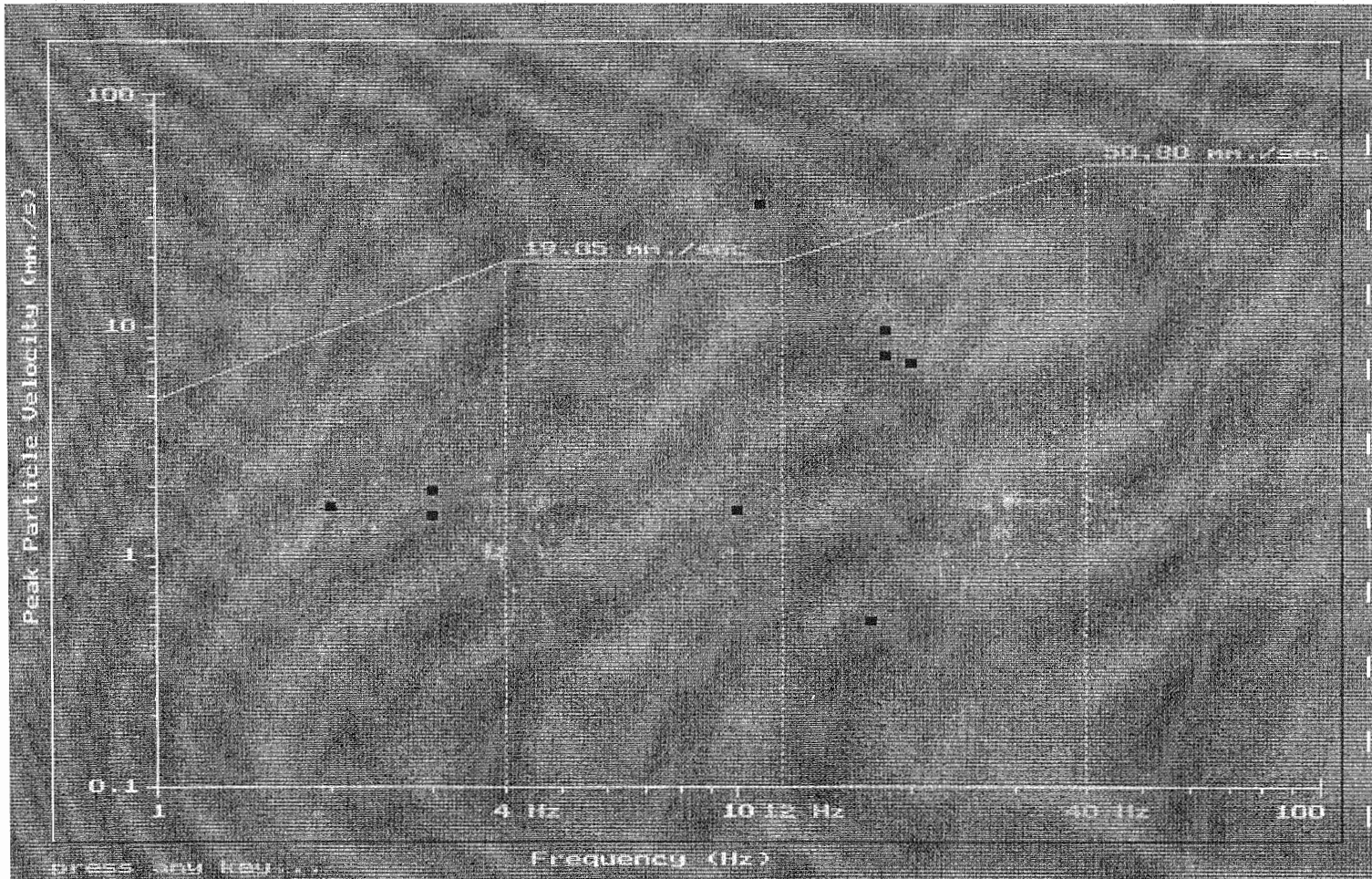
8.4.3 ความสัมพันธ์ของค่า Air Blast กับค่า Safe Distance

การประเมินผลกระทบของเสียงดังจากการระเบิดหิน จะอ้างอิงจากสูตรเชิงประสพการณ์ของ U.S. Bureau of Mines (สมการที่ 91 หน้า 95) โดยคณะผู้วิจัยกำหนดให้ขีดจำกัดของ peak air เท่ากับ 128 เดซิเบล และค่าน้ำหนักของวัตถุระเบิดสูงสุดต่อจังหวะถ่วงของการระเบิดจริงสำหรับหน้าเหมืองชั้นมันโคเป็น 1,600 กิโลกรัม

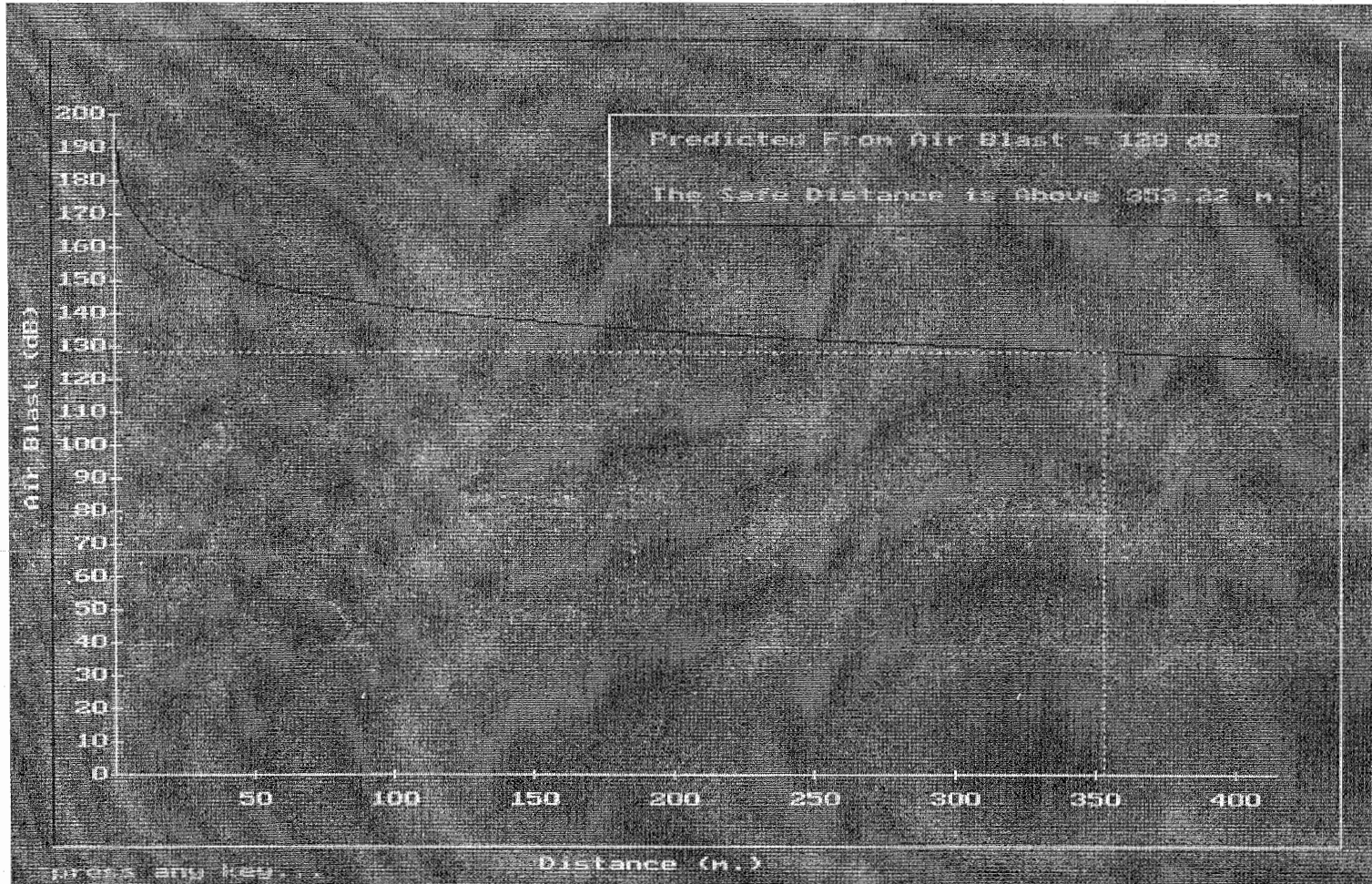
ตัวอย่างที่นำมาแสดง เป็นรูปกราฟความสัมพันธ์ของค่า air blast กับค่า distance ตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 91 จะหาระยะปลอดภัยของ air blast ได้จากเส้นกราฟหรือแสดงเป็นตัวเลขในรูปที่ 65 หน้า 164



รูปที่ 63 ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่า scale distance สำหรับการระเบิดจริง
ที่ตรวจวัด 9 ครั้ง ณ เหมืองหินปูนของบริษัท ปูนซิเมนต์เอเชีย จำกัด



รูปที่ 64 ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ของการระเบิดจริงที่ได้ตรวจวัด
จำนวน 9 ครั้ง ณ เหมืองหินปูนของบริษัท ปูนซิเมนต์เอเชีย จำกัด



รูปที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดังของเสียง air blast กับค่าระยะทาง และการคำนวณหาค่าระยะปลอดภัยจากเสียงดังจากการระเบิด

8.5 การตัดสินใจขั้นสุดท้ายในการเลือกช่วงระยะความปลอดภัย

โปรแกรม VIBES ได้ออกแบบให้ผู้ใช้โปรแกรมสามารถเลือกที่จะตัดสินใจว่า ภายหลังจากการคาดคะเนผลกระทบและความเสียหายต่างๆ จากตัวแปรที่สำคัญต่างๆ เช่น ความเร็วของอนุภาค ความถี่ตามธรรมชาติของคลื่น ความดันของเสียงที่เกินระดับ เป็นต้น

ในการตัดสินใจขั้นสุดท้าย (final decision) ก่อนที่จะทราบระยะปลอดภัยที่ต่ำสุด (minimum safe distance) จากจุดระเบิด หรือระยะปลอดภัยที่สูงสุด (maximum safe distance) ที่จะเกิดผลกระทบจากการระเบิด ผู้ตัดสินใจจำเป็นต้องได้ข้อมูลประกอบหลายแนวทาง คณะผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมสำเร็จรูป (ซึ่งเป็นโปรแกรมย่อยแสดงเป็นเมนูในโปรแกรม VIBES) เพื่อหาช่วงระยะหรือพิสัย (range) ของระยะปลอดภัยที่ต่ำสุดและสูงสุด โดยมีลำดับขั้นตอนในการคำนวณหาระยะปลอดภัยที่เกิดจากผลกระทบของตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง หรือหลายตัวแปรรวมกัน ดังต่อไปนี้

8.5.1 ช่วงระยะความปลอดภัยจากความเร็วของอนุภาค

การคำนวณหาระยะความปลอดภัยระยะใดระยะหนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากผลกระทบจากความเร็วอนุภาคสูงสุด (peak particle velocity) สามารถหาได้โดยตรงจากสมการความสัมพันธ์ของค่าความเร็วอนุภาคที่ถูกสเกลกับค่าของ scaled distance

ตัวอย่างของการหาระยะความปลอดภัยจากความเร็วอนุภาค (safe distance by particle velocity) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 66 หน้า 167 ในรูปนี้เป็นการคาดคะเนระยะความปลอดภัยที่กำหนดให้มาตรฐานความเร็วอนุภาคเป็น 1 นิ้ว/วินาที [หรือประมาณเป็นค่า Factor of Safety เท่ากับ 2 เพราะค่าขีดจำกัดทั่วไปให้ความเร็วอนุภาคเป็น 2 นิ้ว/วินาที] ข้อมูลดิบของกราฟการคาดคะเนระยะความปลอดภัยได้มาจากรูปที่ 58 หน้า 156 เส้นโค้งของกราฟที่พล็อตได้เป็น exponential curve ได้มาจากสมการเฉพาะบริเวณที่หาได้จากผลการวิเคราะห์ของรูปที่ 63 หน้า 162

ดังนั้นจากผลของการหาระยะความปลอดภัยแบบตัวอย่างในรูป 66 สมมติให้เป็นค่าระยะสูงของความปลอดภัย (maximum safe distance) โดยวิธีการอย่างเดียวกันเมื่อสมมติให้ความเร็วอนุภาคเป็น 2 นิ้ว/วินาที ก็จะหาระยะความปลอดภัยกราฟในรูป 66 ได้

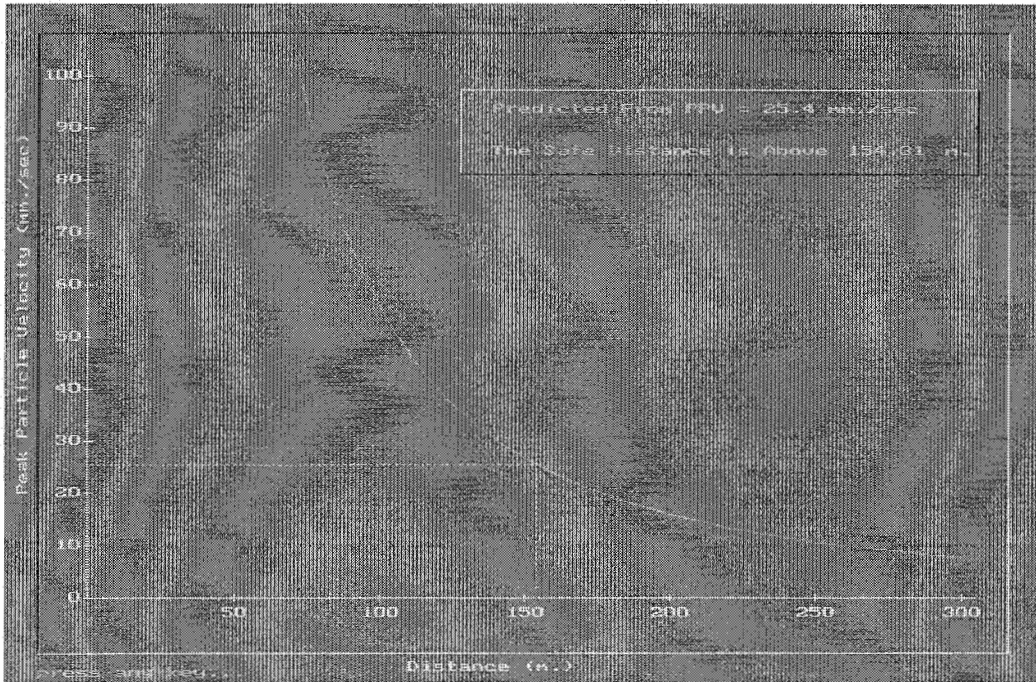
อีกค่าหนึ่ง จัดเป็นระยะความปลอดภัยต่ำสุด (minimum safe distance) โปรแกรมที่เขียนขึ้นมา ก็จะบันทึกค่าทั้งสองค่านี้ แสดงเป็นช่วงระยะความปลอดภัยเนื่องจากความเร็วสูงสุดของอนุภาค ตามวิธีการสเกล [รากกำลังสอง รากกำลังสาม หรือวิธีการอื่น] หากผู้ใช้โปรแกรมต้องการให้โปรแกรมแสดงระยะความปลอดภัยของอนุภาคความเร็วสูงสุดโดยวิธีการทั้ง 3 แบบ ก็เพียงกดปุ่ม enter ช่วงระยะความปลอดภัยต่าง ๆ ก็จะปรากฏบนจอ ซึ่งสามารถจะ print ค่าเหล่านี้ได้ในภายหลัง

8.5.2 ช่วงระยะความปลอดภัยจากความเร็วของคลื่นกับความเร็วอนุภาค

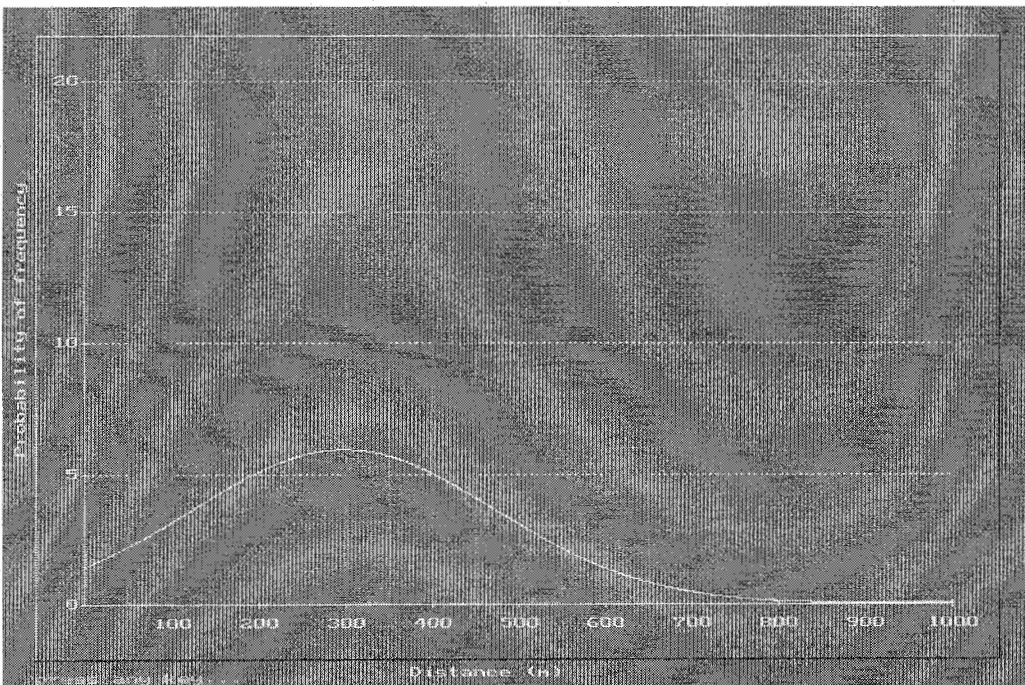
จากการศึกษาวิจัยของหลายประเทศพบว่า ยังไม่มีสูตรเชิงประสุมการณ์ที่จะคาดคะเนความถี่ของคลื่นพัลส์ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากการระเบิดได้โดยตรง ผลการวิเคราะห์อย่างหนึ่งที่ตรงกันจากงานวิจัยหลายประเทศ ก็คือ ความถี่คลื่นมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด เช่นรูปกราฟของรูปที่ 25 หน้า 88 ที่แสดงขอบเขตของขีดจำกัดในเรื่องผลกระทบของความเร็วอนุภาคที่ค่าความถี่ต่าง ๆ ทั้งสูงและต่ำ

คณะผู้วิจัยได้ทดลองพล็อตหาความสัมพันธ์ของค่าความถี่ที่ตรวจวัดจริงภาคสนามกับระยะห่างจากจุดระเบิดของข้อมูลดิบในตารางที่ 23 หน้า 135 พบว่าถ้าใช้สมมุติฐานของความเป็นไปได้ (probability) มาช่วยวิเคราะห์ โดยกำหนดให้ค่าความเร็วอนุภาค 2 ค่าที่ค่าความถี่ 2 ค่า (1 คู่) ถูกนำมาเฉลี่ยและสร้างเป็น histogram โดยเรียกระยะบนแกน y เป็น "probability of frequency" ส่วนระยะบนแกน x ยังเป็นระยะห่างจากจุดระเบิดตามเดิม พบว่าข้อมูลดิบของค่าความถี่สามารถ fit กับ normal (Gaussian) distribution curve ดังได้แสดงรูปกราฟของตัวอย่างนี้ไว้ในรูปที่ 67 หน้า 167 แนวทางทางด้านความเป็นไปนี้อาจนำไปใช้ได้ในการหาพื้นที่ของความไม่น่าเชื่อถือ (unreliable area) ซึ่งกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือช่วงระยะของความไม่ปลอดภัย

เนื่องจากยังมีข้อจำกัดในเรื่อง probability of particle velocity ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดในเรื่องผลกระทบ กราฟของรูปที่ 66 กับรูปที่ 67 จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้โดยตรง (direct method) อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยก็ทดลองใช้วิธีทางอ้อม (indirect method) มากำหนดค่าช่วงระยะความปลอดภัยในโปรแกรม ค่าของความถี่กับค่าของความเร็วอนุภาค ณ จุดตรวจวัดระยะเดียวกัน จะถูกแบ่งตามผลกระทบต่ออาคารโครงสร้าง แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้



รูปที่ 66 กราฟการคาดคะเนระยะความปลอดภัยสำหรับความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ให้เป็น 1 นิ้ว/วินาที จากสมการเฉพาะที่ได้จากการระเบิดจริง 9 ครั้ง



รูปที่ 67 การหาความสัมพันธ์ของความเป็นไปได้ระหว่างความถี่คลื่นกับระยะทางจากจุดระเบิด สำหรับข้อมูลดิบชุดเดียวกันกับรูปที่ 66



- a) กลุ่มที่ 1 ชุดของความถี่สูง (high frequency) สำหรับค่าความถี่ที่สูงกว่า 40 Hertz และในขณะเดียวกันมีความเร็วสูงสุดของอนุภาคสูงกว่า 2 นิ้ว/วินาที
- b) กลุ่มที่ 2 ชุดของความถี่ต่ำ (low frequency) สำหรับค่าความถี่ที่ต่ำกว่า 4 Hertz และในขณะเดียวกันมีความเร็วอนุภาคสูงกว่า 0.75 นิ้ว/วินาที

กลุ่มของความถี่กับความเร็วอนุภาคทั้ง 2 กลุ่ม ตามขีดจำกัดมาตรฐานทั่วไปไม่มีผลกระทบต่ออาคารบ้านเรือนที่สูงไม่เกิน 3 ชั้น ในโปรแกรมจะอ่านค่าของระยะทางที่ได้ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งทั้ง 2 กลุ่ม แต่ถ้าข้อมูลดิบไม่สามารถจัดให้อยู่ในกลุ่มใด ๆ ได้เลย โปรแกรมก็จะข้ามไปไม่อ่านหรือบันทึกค่า ในกรณีที่มีข้อมูลดิบมีค่าที่อ่านได้และผู้ใช้โปรแกรมต้องการทราบช่วงระยะที่เกิดจากผลกระทบในหัวข้อ 8.5.2 นี้ ผู้ใช้ก็กดปุ่ม enter ให้แสดงผลบนจอ หรือ print ผลที่ได้ในภายหลัง

8.5.3 ช่วงระยะความปลอดภัยจากเสียงดังจากการระเบิด

การหาระยะความปลอดภัยของเสียงดังจากการระเบิด จำเป็นต้องกำหนดค่าน้ำหนักวัตถุระเบิดสูงสุดต่อจังหวะถ่วง (maximum charge weight/delay) จากการทดลองวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์หลายรูปแบบ ทั้งของ linear regression, quadratic regression, cubic regression เพื่อหาสมการของการคาดคะเนที่เหมาะสมที่สุด และนำมาคำนวณตัวเลขที่เหมาะสมของค่าน้ำหนักวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วงได้ค่าเป็น 1,600 กิโลกรัม [ดูรายละเอียดจากรายงานฉบับแรก หน้า 76-81]

โปรแกรมการคำนวณหาระยะที่ปลอดภัยจึงใช้ค่าน้ำหนักวัตถุระเบิด 1,600 กก. ร่วมกับสมการการคาดคะเนของ U.S. Bureau of Mines (สมการที่ 91 หน้า 95) เมื่อให้ขีดจำกัดของระดับความดังสูงสุดเท่ากับ 128 dB จะได้ค่าระยะต่ำสุดที่ปลอดภัยจากความดันของเสียงจากการระเบิด (minimum safe distance from air blast) ต่อมากำหนดให้ ความดังสูงสุดเท่ากับ 120 dB (Factor of Safety ประมาณเกิน 2) จะได้ค่าระยะสูงสุดที่ปลอดภัยจากความดันของเสียงจากการระเบิด (maximum safe distance from air blast) โปรแกรมที่เขียนจะแสดงค่าช่วงระยะบนจอภาพเมื่อผู้ใช้ต้องการตรวจสอบดู และในทำนองเดียวกันก็ print ค่าช่วงระยะได้ ทำให้ผู้ใช้โปรแกรมตรวจสอบช่วงระยะกับตัวแปรอื่น เพื่อการตัดสินใจขั้นสุดท้ายที่จะเลือกช่วงระยะห่างจากการระเบิดที่เหมาะสมที่สุด (optimum range of distance from blasts)

บทที่ 9 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การระเบิดในงานวิศวกรรมเป็นการทำให้เกิดคลื่นพัลส์ที่ถูกกระตุ่นอย่างทันทีทันใด และอยู่ในรูปของคลื่นกระแทก (impact wave) ผลกระทบและความเสียหายที่สามารถประเมินได้ คือ การสั่นสะเทือน เสียงดัง หินปลิว ฝุ่นควันที่มีก๊าซพิษ

9.1 ชนิดของตัวแปรจากงานระเบิด

ในเชิงทฤษฎีผลกระทบในเรื่องการระเบิด เพื่อพัฒนาเหมืองมีตัวแปรต่าง ๆ ที่จัดเป็นกลุ่มได้สองแบบ คือ กลุ่มแรก ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (non-controllable variables) และกลุ่มสอง ตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (controllable variables)

9.1.1 ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้

ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ เป็นสิ่งที่เกิดตามธรรมชาติ มนุษย์ไม่สามารถจะไปแก้ไขปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ก่อนทำการระเบิด หรือถ้าทำได้ก็ไม่คุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจ ได้แก่

1. สภาพพื้นผิวของภูมิประเทศและโครงสร้างหิน

ภูมิประเทศของบริเวณและโครงสร้างของหินที่จะทำการระเบิด เป็นสิ่งที่มนุษย์ไม่สามารถจะไปแก้ไขให้ดีขึ้นได้ อาจทำได้เพียงปรับระดับพื้นผิว แต่ในกรณีที่มีมวลหินมีรอยแตกรอยแยกตามธรรมชาติอยู่ก่อนแล้ว ก็เป็นการยากที่จะไปปรับปรุงหรือทำให้ดีขึ้นกว่าเดิมก่อนทำการระเบิด

ในรายงานวิจัยโครงการนี้ ได้นำเสนอวิธีการจัดรูปแบบของโครงสร้างหินที่มีรอยแตกรอยแยกให้เป็นหมวดหมู่และสามารถแสดงผลที่น่าเชื่อถือเชิง quantitative ได้มากขึ้น หากนำวิธีการของ hemispherical projection มาใช้วิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของแนวทิศทางของความไม่ต่อเนื่องในหิน ดังที่ได้แสดงตัวอย่างไว้แล้วในบทที่ 3 เมื่อมีการตรวจวัดก่อนการทำการระเบิด (ระเบิดทดสอบหรือระเบิดจริง) ควรทำการบันทึกผลของค่าการวางตัวของ bedding หรือ joint ที่อยู่ระหว่างจุดตรวจวัดกับจุดที่ทำการ

ระเบิด จะทำให้ทราบผลกระทบของการสั่นสะเทือนว่ามีค่าแอมพลิจูดของคลื่นลดลงหรือไม่ เป็นอัตราส่วนเท่าใด เมื่อเทียบกับหินเนื้อแน่น (massive) การที่ได้ทำการบันทึกค่าแบบนี้หลายครั้งในหน้าเหมืองเดียวกัน สามารถที่จะนำผลของอัตราส่วนที่ได้มาวิเคราะห์เชิงสถิติต่อไป เพื่อหาสูตรเชิงประสบการณ์เฉพาะหน้าเหมืองนั้นได้

2. ความลึก ความหนาและชนิดของ Overburden

พื้นผิวที่ถูกปกคลุมด้วยชั้นดินหรือชั้น overburden อื่น ก็เป็นสิ่งที่เกิดตามกระบวนการทางธรรมชาติ ไม่สามารถควบคุมได้

3. ลม

การพัดและแนวทิศทางพัดของลมก็เป็นสิ่งที่ควบคุมไม่ได้

9.1.2 ตัวแปรที่ควบคุมได้

ตัวแปรที่ควบคุมได้ เป็นสิ่งที่มนุษย์ออกแบบ คัดแปลง และปรับปรุงพัฒนาให้ดีขึ้นได้ ดังต่อไปนี้

1. ชนิดของวัตถุระเบิด

ปัจจุบันมีการใช้วัตถุระเบิดมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดมี specification ให้ใช้เหมาะสมกับงานหนึ่งงานใด อย่างไรก็ตาม วัตถุระเบิดหลักในการระเบิดหินที่ใช้ในประเทศไทยคงเป็น ANFO (Ammonium Nitrate-Fuel Oil) เพราะราคาถูก หาง่าย วิธีใช้ไม่ยุ่งยาก

2. รูปแบบเรขาคณิตของการระเบิด

วิศวกรสามารถคำนวณปริมาตรของหน้าเหมืองหินที่ต้องการระเบิด ให้หินเกิดการแตกหักตามต้องการ ขนาดของรูเจาะ ระยะ burden ระยะ spacing ระยะ stemming และอัตราส่วนของ coupling ratio การวางแผนการจัดรูปแบบให้เหมาะสม เป็นสิ่งจำเป็นในการควบคุมผลกระทบและเป็นประเด็นหลักของการพิจารณา

3. จำนวนวัตถุระเบิดสูงสุดต่อจังหวะถ่วง และ แก๊ปถ่วงเวลา

วิศวกรสามารถควบคุมปริมาณของวัตถุระเบิดสูงสุดที่ใช้ต่อจังหวะถ่วงได้ โดยทำ

การออกแบบที่เหมาะสม ชนิดของแก๊สไฟฟ้าต่างเวลาก็มีให้เลือกหลายชนิด แต่ชนิดที่จะให้ผลดีต่อการระเบิดและความสั่นสะเทือน ต้องมีจังหวะต่างอย่างน้อย 8 milliseconds

4. ทิศทางของหน้าระเบิด

การวางแผนหน้าเหมืองหินให้ได้ทิศทางที่ดี จะช่วยลดการสั่นสะเทือนของบริเวณที่ต้องการ หลีกเลียงไม่ให้เกิดผลกระทบโดยตรงได้ ผลวิเคราะห์ข้อมูลจากการตรวจวัดของบุคลากรกองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี (สมเกียรติ และ ไพรัตน์, 2537) พบว่า การสั่นสะเทือนจากการระเบิดในทิศทางด้านหลังของหน้าระเบิดมีสูงกว่าทางทิศทางด้านหน้าระเบิด

9.2 ข้อเสนอแนะแนวทางควบคุมปัญหาผลกระทบและความเสียหาย

สิ่งหนึ่งที่เป็นปัญหาต่องานพัฒนาหน้าเหมืองตลอดเวลาก็คือ การที่จะให้ได้ผลลัพธ์ของ fragmentation ที่มีเสียงต่อการทำให้เกิด blast vibration สูงเกินขีดจำกัด การออกแบบการระเบิดจึงต้องแยกประเภทว่า ในบริเวณที่พัฒนาหน้าเหมืองส่วนใดที่ต้อง-การให้ผลกระทบทางด้านการสั่นสะเทือนจากการระเบิดเกิดขึ้นน้อยสุด และส่วนใดที่ยินยอมให้เกิดการสั่นสะเทือนในขีดจำกัดได้ (เพราะไม่มีโบราณสถานหรือที่อยู่อาศัยข้างเคียง)

ข้อเสนอแนะต่อไปนี้เป็นสิ่งที่ควรเป็นแนวทางเบื้องต้นของการวางแผน การเก็บข้อมูลภาคสนาม และการลองผิดลองถูก (trial and errors)

9.2.1 การควบคุมรูปแบบเรขาคณิตของการระเบิด

รูปแบบเชิงเรขาคณิตของหน้าเหมืองแบบขั้นบันได ตลอดจนการประยุกต์ใช้แก๊สต่างเวลา เป็นสิ่งที่สามารถทำการวางแผนล่วงหน้าก่อนทำการพัฒนาหน้าเหมืองได้

1. อัตราส่วนของ Spacing/Burden

แพทเทิร์นของการออกแบบหน้าเหมืองระเบิด ปกติจะเป็นแบบ square pattern หรือ staggered pattern อัตราส่วนของ S/B ที่นิยมใช้มีค่า S/B = 1:1 จนถึงค่า S/B = 1:2 ถ้าหากมวลหินที่จะทำการระเบิดมีความหนาแน่นสูง ก็เลือกใช้ค่าของ S/B ค่า ผลเสียของการใช้ S/B ค่า ก็คือ ก่อให้เกิด radial cracks ขยายตัวไปยังหน้าอิสระได้ง่าย มีเสียงดังจากการระเบิดมากและโอกาสที่หินปลิวมีสูง มีงานวิจัยของสวีเดน

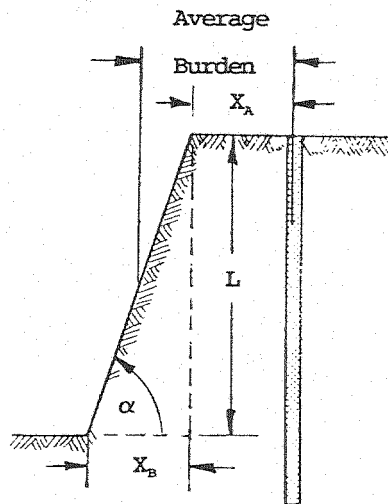
(Kihlstrom, 1973) ที่ได้ลองทำ full scale test ในหินแกรนิตและหินปูน พบว่า ถ้าหากขยายระยะของ spacing ของ staggered pattern ให้กว้างขึ้นกว่าปกติ จนได้ค่าของ S/B ไม่ต่ำกว่า 4 ประสิทธิภาพการระเบิดดีขึ้น ค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งหมด (total cost) ลดลงกว่าการใช้ S/B น้อยกว่า 4 แต่จากการสังเกตการณ์ของคณะผู้วิจัยพบว่าการแตกหักของหินเมื่อใช้อัตราส่วน S/B สูง ไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร

2. ระยะเฉลี่ยที่เหมาะสมของ Burden แถวแรก

การเริ่มต้นระยะเฉลี่ยของ burden แถวแรก ควรจะต้องแปรผันไปตามรูปหน้าตัดของเหมืองเปิดแบบขั้นบันได มุมลาดเอียงของ slope และความสูงของ bench (ดูรูปที่ 68 ประกอบ) ได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$B_m = X_A + 1/2 (X_B) = X_A + 1/2.L.\cot \alpha \quad (103)$$

- โดย
- B_m = ระยะเฉลี่ยของ burden แถวแรก
 - X_A = ระยะทางในแนวราบจาก crest of slope จนถึงจุดศูนย์กลางหลุมเจาะ
 - X_B = ระยะทางในแนวราบจาก toe of slope จนถึง projection ของจุด crest
 - α = มุมลาดเอียงของ slope
 - L = ความสูงในแนวตั้งของ bench



รูปที่ 68 ระยะเฉลี่ยที่เหมาะสมของ burden แถวแรก

3. ความลาดเอียงของหลุมเจาะ

จากผลงานวิจัยหลายแห่งมีผลสรุปว่า การเจาะระเบิดแบบรูเอียง จะมีช่วยลดผลกระทบทางด้าน back break หินมีการแตกหักดีขึ้น การเคลื่อนย้ายมวลหินภายหลังการระเบิดทำได้ง่ายขึ้น มุมเอียงจากแนวตั้งที่เหมาะสม ควรอยู่ระหว่าง 10-30 องศา

4. ระยะความลึกของ Subdrilling

ความลึกของระยะ subdrilling ที่ดี กำหนดให้มีค่าประมาณ 0.2B-0.3B ทั้งนี้เพื่อให้เกิดแนวแตกใต้พื้นประมาณ 15-25 องศา ทำให้รถขุดรถดักทำงานได้สะดวก ในการขนย้ายหิน

5. ระยะ Stemming

วิธีที่ลดผลกระทบของหินรื้อที่วิธีหนึ่งคือ การทำการปิดอ้วคสุดหน้าปากหลุมให้แน่น (เคยมีผู้เสนอทำ shotcrete) และทำให้มีความยาวของ stemming เพียงพอ กำหนดให้ไม่สั้นกว่า 2/3B ระยะที่เหมาะสมควรเป็น 0.7B-1.4B

6. Initiation Sequence and Delays

ผลของการทำการระเบิดชุดหนึ่งให้มีการจุดระเบิดหน้าเหมืองพร้อมกันทีเดียว ก่อให้เกิดความเร่งสูงในเวลาหิน อันที่จะมีผลต่อการไถลเลื่อน (sliding) ของมวลหินบริเวณหน้าเหมืองได้ แนวทางปฏิบัติที่ดี ก็คือ ควรใช้แถบถ่วงเวลาช่วยในการระเบิด โดยกำหนดให้ระยะห่างของเวลาการระเบิดระหว่างแถวที่ถัดไป ควรจะมี delay interval ประมาณ 3-6 millisecc./m

สูตรเชิงประสพการณ์ที่ควรรู้ (Hoek and Bray, 1981 หน้า 280) เมื่อให้ระยะ burden เท่ากับ 8 เมตร ควรกำหนด ให้ใช้แถบถ่วงเวลาไฟฟ้า ดังนี้

- แถวแรก - instantaneous
- แถวสอง - 35 millisecc. delay
- แถวสาม - 70 millisecc. delay
- แถวสี่ - 105 millisecc. delay

อนึ่งการระเบิดพร้อมกันทีเดียวหลายแถวในหนึ่งชุดมีผลต่อการสั่นสะเทือน ดังนั้นจำนวนแถวของการระเบิดในหนึ่งชุด ไม่ควรเกิน 4 แถว

9.2.2 ปริมาณวัตถุระเบิดที่เหมาะสม

ชนิดและคุณสมบัติประกอบกับข้อจำกัดในการใช้วัตถุระเบิด เป็นสิ่งจำเป็นเบื้องต้นที่ผู้นำวัตถุระเบิดต้องศึกษาอย่างละเอียดก่อนนำไปใช้ การคำนวณน้ำหนักวัตถุระเบิดและปริมาณของหิน จะช่วยให้การระเบิดมีประสิทธิภาพสูงและประหยัด ค่าใช้จ่าย

1. การเลือกสัดส่วนของ Powder Factor หรือ Specific Charge

วิธีการโดยตรงในการหาค่าของ powder factor ก็คือ การทำ full scale test สำหรับหินและโครงสร้างแต่ละชนิดในบริเวณที่จะทำการระเบิด และมีผู้เสนอแนะแนวทางที่ควรนำค่าคุณสมบัติของมวลหิน มาใช้ในการคำนวณน้ำหนักวัตถุระเบิด

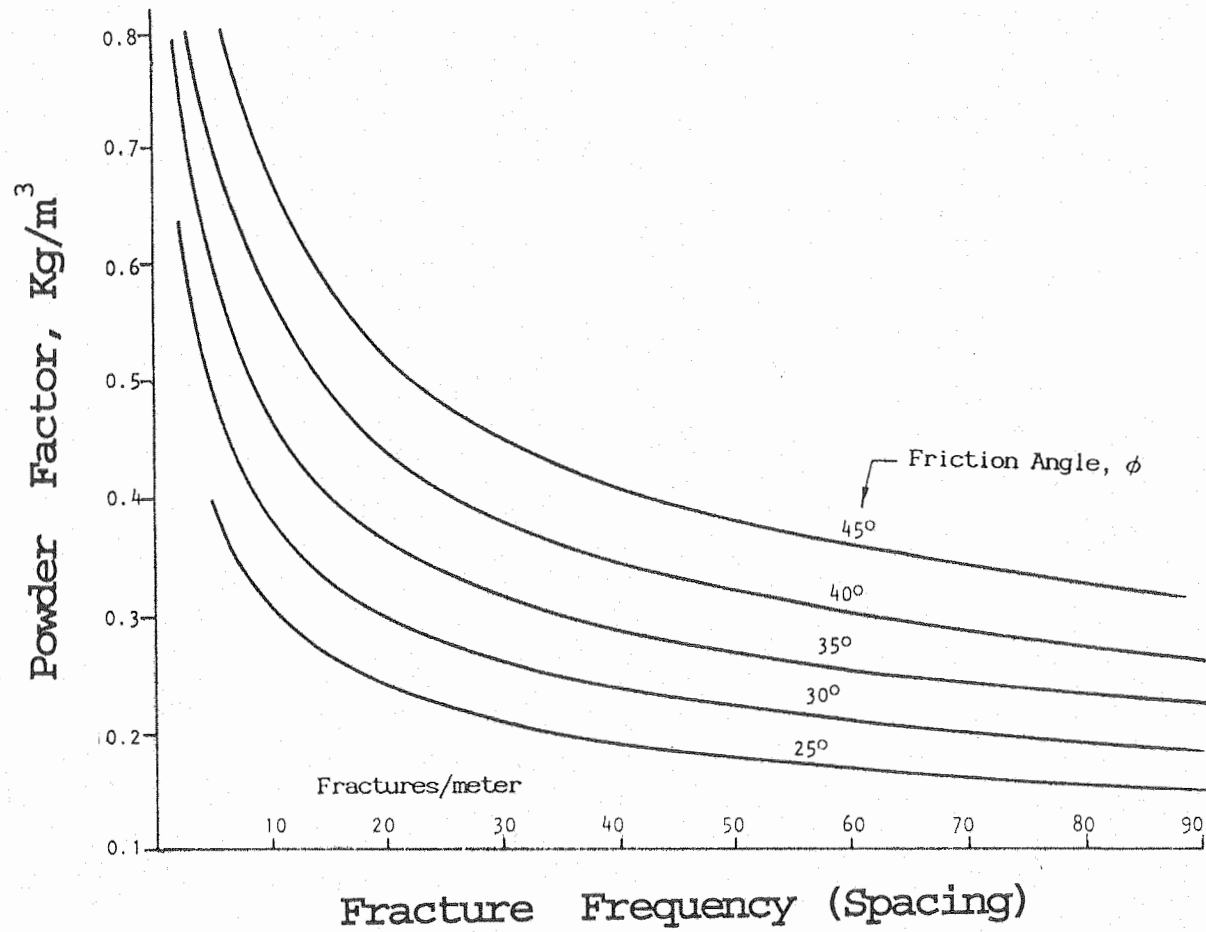
รูปที่ 69 ได้คัดลอกจาก Hoek and Bray (1981) หน้า 284 ที่มีการทดลองนำคุณสมบัติความไม่ต่อเนื่องของมวลหิน ณ จุดที่ทำการระเบิด มาใช้ประกอบในการคำนวณหาค่าปริมาณของวัตถุระเบิด ผู้ที่ริเริ่มคือ Ashby ทำงานเป็นวิศวกรของเหมืองทองแดงบริษัท Bougainville Copper จำกัด ในประเทศ Papua New Guinea ได้ทดลองนำค่า effective friction angle และ fracture spacing (frequency) มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งค่าคุณสมบัติเหล่านี้หาได้จากการสำรวจมวลหินที่จะทำการระเบิดในภาคสนาม กับจากการทดสอบหินในห้องปฏิบัติการ มีสูตรเชิงประสมการณ์ ดังนี้

$$[\text{Powder Factor}]_{\text{ANFO}} = \frac{1.4 \tan (\phi + i)}{\sqrt[3]{\text{fractures/meter}}} \quad (104)$$

ค่า powder factor มีหน่วยเป็น kg/m³ ส่วนค่า ϕ เป็นค่า angle of internal friction ค่า i เป็นค่าของ roughness angle ของความขรุขระบนพื้นผิวของรอยแตกรอยแยกในหิน (joint roughness) ที่อยู่ในแนวทิศทางของ shear plane ผลรวมของ friction กับ roughness ได้แก่ $(\phi + i)$ เป็นค่าของ effective friction angle ใน Mohr-Coulomb failure criteria

2. น้ำหนักวัตถุระเบิดและปริมาณหิน

สูตรเชิงประสมการณ์ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักวัตถุระเบิดที่เหมาะสมที่สุดกับปริมาณของหินที่แตกหัก ได้แก่



รูปที่ 69 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณวัตถุระเบิดที่ใช้กับคุณสมบัติของหินที่อยู่กับที่ (in situ rock mass) กราฟความสัมพันธ์นี้หามาจากสมการที่ 104

$$\text{Optimum charge} = \text{powder factor} \times \text{burden volume} \quad (105)$$

กำหนดให้

$$\text{Burden volume} = \text{burden} \times \text{spacing} \times \text{bench height} \quad (106)$$

ในเหมืองทั่วไป ความสูงของหน้าเหมืองถูกกำหนดจากขนาดมิติของเครื่องจักรกลที่ใช้ในการขุดและขนย้ายหิน ทำนองเดียวกัน ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะระเบิดถูกกำหนดโดยเครื่องเจาะที่มีอยู่ ส่วนของประกอบที่เหลือของแพทเทิร์นการระเบิด เช่น ระยะ subdrilling กับ ระยะ stemming ก็ถูกกำหนดโดยค่าการแตกหักของหิน (fragmentation value) ที่ต้องการ ดังนั้นจึงกำหนดค่าขึ้นมาใหม่ เรียกว่า "blasthole volume" ซึ่งเป็นค่า ปริมาตรของหินสำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะระเบิด (D_0)

$$\text{Blasthole volume} = \frac{1}{4} \pi D_0^2 \times [\text{bench height} + \text{subdrilling} - \text{stemming}] \quad (107)$$

ถ้าหากคำนวณได้ค่า blasthole volume ไม่สอดคล้องกับค่าน้ำหนักวัตถุระเบิด ก็ทำการตัดแปลงค่าระยะ burden กับ ระยะ spacing ใหม่

9.2.3 การออกแบบการระเบิดกรณีการสั่นสะเทือนมีผลกระทบ

ข้อกำหนดการออกแบบกรณีพิเศษ ถ้าหากการสั่นสะเทือนของงานระเบิดมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมใกล้เคียง ข้อสรุปนี้ได้คัดลอกมาจากตำราของ Dowding (1985) หน้า 258- 260 โดยมีขั้นตอนและกรณีเพื่อเลือก (option) ไว้ดังนี้

1. กำหนดให้โครงสร้างที่ต้องระวังผลกระทบในเรื่องการสั่นสะเทือน มีข้อจำกัดของค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (peak particle velocity) ได้ไม่เกิน 25.4 มม./วินาที หรือเท่ากับ 1 นิ้ว/วินาที และข้อจำกัดของค่าระดับความดังของเสียงจากการระเบิดในรัศมี 805 เมตรหรือ 0.5 ไมล์ จากจุดระเบิด ไม่เกิน 128 เดซิเบล

2. ถ้าหากว่าก่อนทำการระเบิดไม่ได้ติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดการสั่นสะเทือนไว้ ผู้ออกแบบแพทเทิร์นการระเบิดควรทำการคำนวณโดยใช้สูตรเชิงประสมการณ์เพื่อหาค่าของ

น้ำหนักวัตถุระเบิดสูงสุดต่อจังหวะถ่วง เมื่อกำหนดให้ ค่าของ W เป็นน้ำหนักวัตถุระเบิดของ ANFO/delay มีหน่วยเป็นปอนด์ และค่า r เป็นระยะที่ใกล้อาคารโครงสร้างมากที่สุด หน่วยเป็น ฟุต มีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$W = [r/60]^2 \quad (108)$$

สมการที่ 108 ที่ปรากฏข้างบนนี้ เป็นผลงานที่รวบรวมมาจากการบันทึกผลและเก็บข้อมูลของหน่วยงาน Illinois Institute of Natural Resources ที่มี การบันทึกผลทั้งหมด 40 แห่งที่หน้าเหมืองหินและหน้างานบริษัทก่อสร้าง ค่าความเร็วอนุภาคที่ใช้การบันทึกมีถึง 2,514 ค่า แล้วนำมาพล็อตหาความสัมพันธ์เชิงสถิติ ระหว่างค่าของ ground particle velocity กับค่าของสเกลรากกำลังสอง โดยแยกพล็อตเป็นกราฟ 3 กราฟ ได้แก่ กราฟการบันทึกของ surface coal mining, quarry, construction (ดูรูปที่ 70 หน้า 178) ค่าตัวเลข $r/W^{1/2}$ เท่ากับ 60 เป็นค่าที่ได้จาก 95% confidence line ที่ความเร็วต่ำกว่า 1 นิ้ว/วินาทีของเหมืองเปิดถ่านหิน

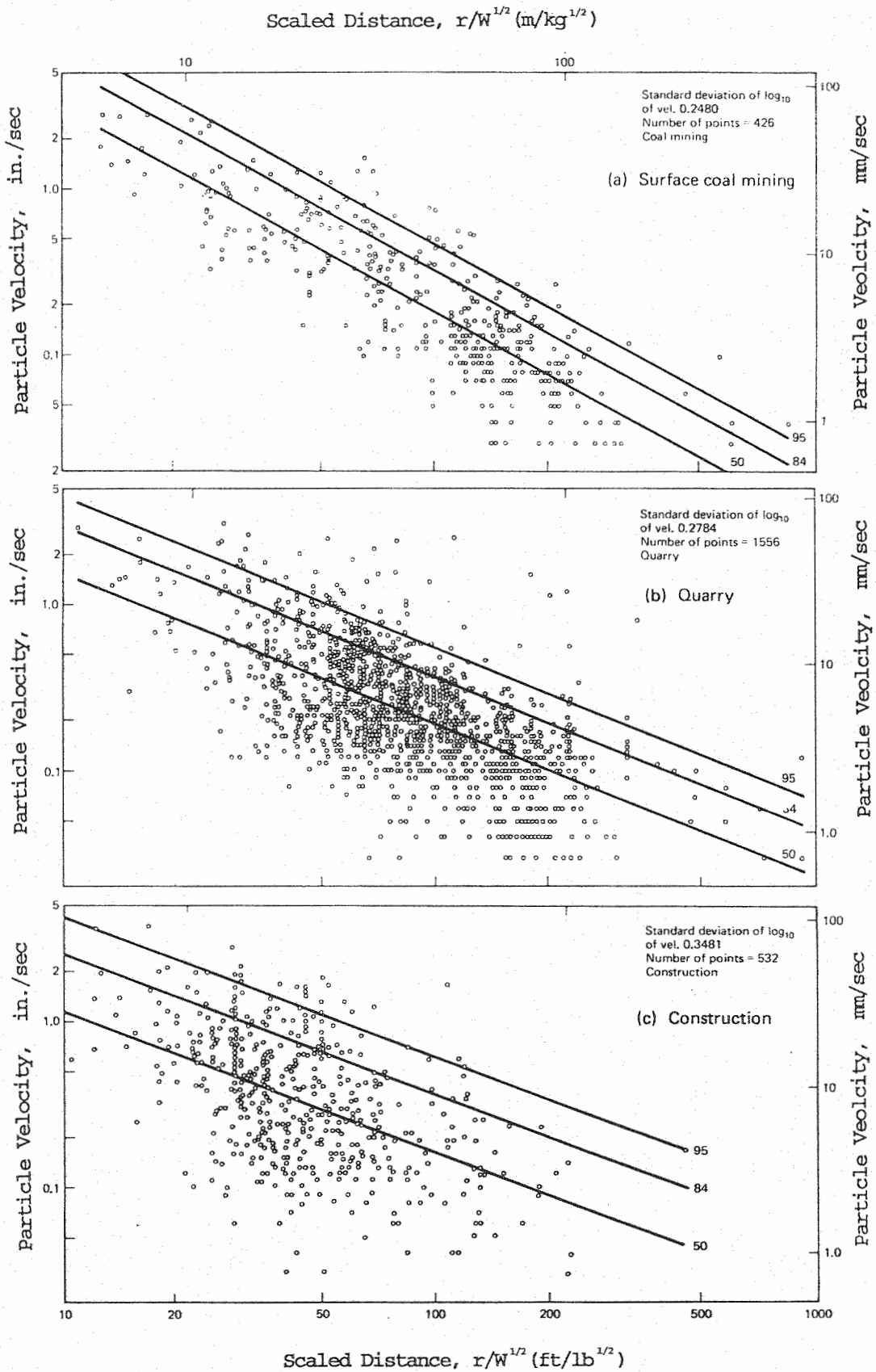
วิศวกรจำเป็นต้องทำการปรับปรุงแก้ไข 2 วิธี ถ้าหากผลการคำนวณไม่ได้ตามสมการที่ 108 นั่นคือ วิธีแรกทำการลดระยะ burden และ spacing ลง ทำให้ลดการใช้วัตถุระเบิด/หลุมเจาะให้น้อยลงกว่าเดิม วิธีที่สองทำการแยก column charge ออกเป็น 2 ส่วน (two decks) จะช่วยลดระยะความลึกหลุมเจาะที่ต้องโหลด ANFO ลง

9.2.4 การควบคุมผลกระทบและความเสียหายเพิ่มเติม

วิธีการอื่นๆที่จะควบคุมผลกระทบและความเสียหายจากการระเบิด นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วมีหลายรูปแบบ แต่ส่วนใหญ่ยังเป็นข้อเสนอแนะและยังไม่ได้ทำการทดสอบแบบ full scale test หลายบริเวณและครอบคลุมให้ใช้ได้กับหินหลายชนิด วิธีการเหล่านี้ค่อนข้างเป็นวิธีการที่ใช้เทคนิคเฉพาะอย่าง และนำมาใช้เฉพาะบางบริเวณ ได้แก่

1. Controlled Blasting

เป็นวิธีการพิเศษที่เป็นเทคนิคลดแรงสั่นสะเทือนและ overbreak ของหน้าเหมืองหินที่ใกล้ชุมชน ที่นิยมใช้กันมาก คือ smooth-wall blasting (หรือบางครั้งเรียกว่า cushion blasting) และ presplit blasting



รูปที่ 70 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลคืบเชิงสถิติ จำนวนทั้งหมด 2,514 ค่า แบ่งออกเป็น ส่วนของเหมืองเปิดถ่านหิน 426 ค่า (รูป 70 a) ส่วนของเหมืองหิน 1,556 ค่า (รูป 70 b) ส่วนของหน้างานก่อสร้าง 532 ค่า (รูป 70 c)

controlled blasting techniques มีหลายรูปแบบ เช่น presplitting, trim (cushion) blasting จากผลการทดลองทำด้วยเทคนิคพิเศษเหล่านี้ พบว่า ค่าใช้จ่ายในการระเบิดด้วยวิธีเหล่านี้ค่อนข้างสูง ความแม่นยำในการเจาะมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการทำให้การระเบิดมีผลดี

ปกติการควบคุมจะได้ผลดี มวลหินหน้าเหมืองควรเป็นหินเนื้อแน่นไม่มีรอยแตก รอยแยกสูง ถ้าหากหินมีรอยแตก เช่น joints ที่เกิดระหว่างหลุมเจาะสูง และ joints เหล่านี้วางตัวตัดกับหน้าเหมืองหิน เป็นมุมน้อยกว่า 15 องศา การควบคุมการระเบิดจะเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดผิวหน้าเหมืองเรียบ (smooth face) ก่อนทำการระเบิดด้วยวิธีนี้ควรแน่ใจก่อนว่า แนวระนาบของ joints วางตัวทำมุมมากกว่า 30 องศา อีกกรณีหนึ่งที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการควบคุมการระเบิด ก็คือ หินที่เปราะบาง (weak rocks) ก็ทำการควบคุมยาก ประสิทธิภาพของพนักงานที่ขับรถขุดคักมีส่วนอย่างมากที่จะทำให้การระเบิดได้ผลดี เพราะพนักงานที่ไม่ชำนาญอาจขุดคักหินที่เปราะบางไม่ได้แนวระดับที่ต้องการ

1. การวางแผนการระเบิดแบบ Presplitting

วิธีการนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดรอยแตกแยก (fracture) ตามแนวของรูเจาะหลายรูเจาะที่เป็นแนวการขุดเจาะขั้นสุดท้าย (final excavation) สิ่งที่ต้องระวังคือ จำนวนวัตถุระเบิดที่ใช้ ค่าประมาณของวัตถุระเบิด (Konya and Walter, 1991) ที่จะก่อให้เกิดความดันเพียงพอทำให้เกิด แนวแตกระหว่างหลุมเจาะ แต่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายของ wall หน้าเหมือง ได้แก่

$$d_{ec} = \frac{D_h^2}{28} \tag{109}$$

โดยที่ d_{ec} = จำนวนวัตถุระเบิดที่ไหลด, ปอนด์/ฟุต
 D_h = เส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะที่วางเปล่า, นิ้ว

ส่วนของระยะห่างระหว่างหลุมในแถวเดียวกัน ที่เรียกว่า spacing กำหนดให้

$$S = 10 (D_h) \tag{110}$$

2. การวางแผนการระเบิดแบบ Trim (Cushion) Blasting

การระเบิดแบบนี้จะทำหลังจากการระเบิดเพื่อพัฒนาหน้าเหมืองตามปกติเสร็จแล้ว บางที่เรียกการระเบิดแบบนี้ว่า smooth wall blasting มักใช้ในกรณีที่มีการระเบิดที่ slope มีปัญหา หรือต้องการควบคุม overbreak ความแตกต่างของการระเบิดแบบนี้จะกำหนดให้ระยะ spacing กว้างกว่าแบบของ presplitting เล็กน้อย

$$S = 16 (D_h) \quad (111)$$

ในการทำการระเบิดแบบ trim blasting นี้ ต้องมีการออกแบบระยะ burden เป็นพิเศษ เพื่อให้แน่ใจว่า รอยแตกแยกที่เป็น fractures ที่เกิดภายหลังการระเบิดมีการต่อเชื่อมระหว่างแนวหลุมเจาะในแถว และไม่ได้เกิดลึกเข้าไปใน burden วิธีการหลีกเลี่ยงปัญหานี้ ก็คือ การออกแบบระยะ burden ให้ยาวกว่า ระยะ spacing นั่นคือ

$$B = 1.3 S \quad (112)$$

9.3.2 การเจาะ Line Slot Drilling

วิธีการลดแรงสั่นสะเทือนอีกแบบหนึ่ง ก็คือ การทำให้เกิดช่องว่าง (void) ของพื้นผิวดินระหว่างจุดที่ทำการระเบิดกับจุดที่จะได้รับผลกระทบ หลักการนี้ได้ดัดแปลงมาจากวิธีการป้องกันอาคารโครงสร้างจากแผ่นดินไหว (Key, 1988) ช่องว่างที่เกิดขึ้นในพื้นผิวดิน ทำให้เกิดการแยกตัวออกจากกันของคลื่นกระแทก ในลักษณะแบบ shock isolation หรือทำให้เกิด energy absorber เป็นการตัดหรือจำกัดแรงสั่นสะเทือนให้ลดลง ผลกระทบที่ทำให้เกิดความเสียหายต่ออาคารโครงสร้างก็ลดลงไปด้วย แนวหลุมเจาะจะถูกเจาะเป็นแบบ slot ซึ่งเทคนิคการเจาะควรทำให้หลุมเจาะที่ใกล้เคียงกันในแนว line เดียวกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันประมาณ 2-4 เท่า เพื่อให้หลุมที่เจาะใกล้เคียงกันทำให้เกิด stress concentration ระหว่างหลุม เกิดรอยแตกเล็กๆ (cracks) ระหว่างหลุม

จากงานวิจัยของสวีเดนที่ค้นคว้าเกี่ยวกับเรื่อง traffic vibration และถูกอ้างโดย Persson et al. (1994) หน้า 367 กล่าวว่าจากผลการเปรียบเทียบค่า

ของการส่งผ่านคลื่น (wave transmission) โดยเฉพาะของคลื่นบนพื้นผิวของ Rayleigh wave มีการลดลงอย่างรวดเร็วในระดับลึก ถ้าหากกำหนดให้ T_r เป็นค่า transmission number จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$T_r = V_r/V_g \tag{113}$$

ค่า V_r = ความเร็วอนุภาคในแนวตั้งที่อยู่ในฐานรากของอาคารที่อยู่อาศัย

V_g = ความเร็วของอนุภาคที่อยู่ในพื้นผิวดิน (นอกอาคาร)

จากการตรวจวัดจำนวน 24 ครั้ง ของการสั่นสะเทือนของการจราจรต่อบ้านชั้นเดียว ๆ และอพาร์ทเมนต์ที่สูงไม่เกิน 7 ชั้น ค่าแอมพลิจูดแนวตั้งของคลื่น Rayleigh มีค่าสูงสุดในพื้นผิวดินลง ไม่เล็กน้อยและลดลงอย่างรวดเร็วในระดับที่ลึกลง

ตารางที่ 43 ค่าการหน่วง (damping) จากการตรวจวัดด้านหลัง line slot

ระยะทางห่างจาก slot (เมตร)	อัตราส่วนของ ระยะทาง/ความลึก slot	ค่า damping (เปอร์เซ็นต์)
น้อยกว่า 3	0.5	มากกว่า 80
3-6	0.5-1.0	65-80
6-9	1.0-1.5	50-65
มากกว่า 9	มากกว่า 1.5	น้อยกว่า 50

ตารางที่ 43 ข้างบนนี้แสดงผลการทดลองว่า vertical vibration ถูกหน่วง (damped) เมื่อผ่านจากพื้นผิวเข้าสู่อาคาร และค่าการหน่วง (damping) เพิ่มสูงขึ้นเมื่อฐานรากที่อยู่ลึกขึ้น ผลสรุปนี้คือ ค่าตัวเลขการส่งผ่านลดลงเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น (ความยาวคลื่นลดน้อยลง) จากการที่ทำ slot ระหว่างจุดกำเนิดการสั่นสะเทือนและอาคารที่มีผลกระทบจากการสั่นสะเทือน จะช่วยหน่วงคลื่นไว้ก่อนเข้าไปในอาคาร

บรรณานุกรม

1. ปริญา วิลัยธรรม และ ชาตรี ศรีวิชัย (2538)
"ความสั่นสะเทือนจากการระเบิด" โครงการวิศวกรรมเหมืองแร่ (Mining Engineering Project) ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พฤษภาคม 2538 จำนวน 231 หน้า
2. สง่า ตั้งชวาล และ จดับ บัทมสุต (2538)
"ผลกระทบเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องในหินที่มีต่อการระเบิดและการสั่นสะเทือน" รายงานความก้าวหน้า ฉบับที่ 1 โครงการวิจัยเงินทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2538 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สิงหาคม 2538 จำนวน 161 หน้า
3. สง่า ตั้งชวาล (2539)
"แบบจำลองการคาดคะเนของการระเบิดในเหมืองหิน เพื่อให้ได้การแตกหักที่เหมาะสมที่สุด" รายงานความก้าวหน้า ฉบับที่ 1 โครงการวิจัยสิ่งประดิษฐ์ประเภทโปรแกรมคอมพิวเตอร์ งบประมาณประจำปี 2538 ฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กุมภาพันธ์ 2539 จำนวน 58 หน้า
4. สง่า ตั้งชวาล (2539)
"การควบคุมผลกระทบและความเสียหาย จากการใช้วัตถุระเบิดในเหมืองหิน" เอกสารการสัมมนาเทคโนโลยีการทำเหมืองหินและโรงโม่หิน มีนาคม 2539 กรุงเทพมหานคร กรมทรัพยากรธรณี หน้า 125-187
5. สง่า ตั้งชวาล และ จดับ บัทมสุต (2539)
"ผลกระทบเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องในหินที่มีต่อการระเบิดและการสั่นสะเทือน" รายงานความก้าวหน้า ฉบับที่ 2 โครงการวิจัยเงินทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2538 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีนาคม 2539 จำนวน 78 หน้า
6. สมเกียรติ ภู่งงไชยฤทธิ์ และ ไพรัตน์ เจริญกิจ (2537)
"การป้องกันอันตรายและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากการใช้วัตถุระเบิดในงานเหมืองแร่" รายงานการศึกษา กองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี กรกฎาคม 2537 จำนวน 54 หน้า

7. Aimone, C.T. (1982)

"Three-Dimensional Wave Propagation Model of Full-Scale Rock Fragmentation, Unpublished Ph.D. Dissertation, Northwestern University, 295 pp.

8. Ambraseys, N.N. and A.J. Hendron, Jr. (1968)

"Dynamic Behaviour of Rock Masses," Chapter 7 in Rock Mechanics in Engineering Practice, K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz (Editors), John Wiley & Sons, London, pp. 203-236.

9. American Geological Institute (1976)

"Dictionary of Geological Terms: Revised Edition," Anchor Press/Doubleday, New York, 472 pp.

10. Ash, R.L. (1973)

"The Influence of Geological Discontinuities on Rock Blasting," Unpublished Ph.D. Dissertation, University of Minnesota, 289 pp.

11. Atlas Powder Company (1987)

"Explosives and Rock Blasting," Field Technical Operations, Atlas Powder Company, Dallas, 662 pp.

12. Attewell, P.B. (1964)

"Recording and Interpretation of Shock Effects in Rock," Mining and Minerals Engineering, London, Vol. 1, pp. 21-28.

13. Bhandari, S. and R. Badal (1990)

"Relationship of Joint Orientation with Hole Spacing Parameter in Multiple Blasting," Proceedings, Third International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, August 1990, Brisbane, Queensland, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 225-231.

14. Bergmann, O.R., F.C. Wu, J.W. Edl (1974)

"Model Rock Blasting Measures Effect of Delays and Hole Patterns on Rock Fragmentation," Engineering and Mining Journal, Vol. 175, No. 6, pp. 124-127.

15. Birch, W.J. and R. Chaffer (1983)

"Prediction of Ground Vibrations from Blasting on Opencast Sites," Transactions, Institution of Mining and Metallurgy, London, Section A (Mining Industry), Vol. 92, April 1983, pp. A103-A107.

16. Broek, D. (1983)

"Elementary Engineering Fracture Mechanics: Third Revised Edition," Martinus Nijhoff Publishers, Boston, 453 pp.

17. Burkle, W.C. (1980)

"Geology and Its Effect on Blasting," Proceedings of the Sixth Conference on Explosives and Blasting Technique, St. Louis, Annual Meeting - April 1980, Society of Explosives Engineers, Ohio, pp. 1-4.

18. Cheeney, R.F. (1983)

"Statistical Methods in Geology for Field and Lab Decisions," George Allen & Unwin, Boston, 169 pp.

19. Clark, G.B. (1987)

"Principles of Rock Fragmentation," John Wiley & Sons, New York, 610 pp.

20. Crandell, F.J. (1949)

"Ground Vibration due to Blasting and Its Effect upon Structures," Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Vol. 36, No. 2, pp. 222-245.

21. Cunningham, C. (1983)

"The Kuz-Ram Model for Prediction of Fragmentation from Blasting," First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, R. Holmberg and A. Rustan (Editors), August 1983, Lulea, Sweden, Vol. II, pp. 439-453.

22. Davies, B., I.W. Farmer and P.B. Attewell (1964)

"Ground Vibrations from Shallow Sub-Surface Blasts," The Engineer Journal, London, Vol. 217, No. 5644, March 1964, pp. 553-559.

23. Dick, R.A., L.R. Fletcher and D.V. D'Andrea (1973)

"A Study of Fragmentation from Bench Blasting in Limestone at a Reduced Scale," U.S. Bureau of Mines: Report of Investigations, No. 7704, 24 pp.

24. Dowding, C.H. (1971)

"Response of Buildings to Ground Vibrations Resulting from Construction Blasting," Unpublished Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, 204 pp.

25. Dowding, C.H. (1985)

"Blast Vibration Monitoring and Control," Prentice-Hall Inc., New Jersey, 297 pp.

26. Duvall, W.I. and T.C. Atchison (1957)

"Rock Breakage by Explosives," U.S. Bureau of Mines: Report of Investigations, No. 5356, 52 pp.

27. Duvall, W.I. and D.E. Folgelson (1962)

"Review of Criteria for Estimating Damage to Residences from Blasting Vibrations," U.S. Bureau of Mines: Report of Investigations, No. 5968, 19 pp.

28. Duvall, W.I., T.C. Atchison and D.E. Fogelson (1966)

"Empirical Approach to Problems in Blasting Research," Proceedings, 8th Symposium on Rock Mechanics, September 1966, C. Fairhurst (Editor), Held at University of Minnesota, Minnesota, AIME, New York, pp. 500-523.

29. Edwards, A.T. and T.D. Northwood (1960)

"Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures," The Engineer, London, Vol. 210, No. 5462, September 1960, pp. 538-546.

30. Fisher, R. (1953)

"Dispersion on a Sphere," Proceedings, Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 217, pp. 295-305.

31. Fordyce, D.L., W.L. Fourney, R.D. Dick, and X.J. Wang (1993)

"Effect of Joint on Stress Wave Transmission," Proceedings of the Fourth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, July 1993, H.-P. Rossmanith (Editor), Vienna, pp. 211-219.

32. Ghosh, A. and J.J.K. Daeman (1983)

"A Simple New Blast Vibration Predictor (Based on Wave Propagation Laws)," Proceedings 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics, June 1983, C. C. Mathewson (Editor), Held at University of Texas A & M, Texas, pp. 151-161.

33. Gnirk, P.P. and E.P. Pfleider (1968)

"On the Correlation Between Explosive Crater Formation and Rock Properties," Proceedings 9th U.S. Symposium on Rock Mechanics, April 1967, N.E. Gosvenor and B.W. Paulding, Jr. (Editors), AIME, New York, pp. 321-345.



34. Goodman, R. E. (1976)
"Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks," West Publishing Company, St Paul, 472 pp.
35. Gustafsson, R. (1981)
"Blasting Technique," Dynamite Nobel Wein, Vienna, 327 pp.
36. Habberjam, B.M. and J.T. Whetton (1952)
"On the Relation between Seismic Amplitude and Charge of Explosive fired in Routine Blasting Operations," Geophysics Journal, Vol. 17, No. 1, pp. 116-128.
37. Hendron Jr., A.A. and L.L. Oriard (1972)
"Specifications for Controlled Blasting in Civil Engineering Projects," Proceedings of the First North American Rapid Excavation and Tunneling Conference, June 1972, K.S. Lane and L.A. Garfield (Editors), SME of AIME, Chicago, Vol. II, pp. 1585-1609.
38. Hoek, E. and J.W. Bray (1981)
"Blasting," Chapter 11 in Rock Slope Engineering: Revised Third Edition, The Institute of Mining and Metallurgy, London, pp. 271-308.
39. ICI Explosives (1991)
"Safe and Efficient Blasting in Open Cut Mines and Quarries," ICI Australia Operations, A.C.N., 17 Chapters.
40. Key, D. (1988)
"Earthquake Design practice for Buildings," Thomas Telford, London, 218 pp.
41. Kihlstrom, B. (1973)
"The Swedish Wide Space-Blasting Technique," National

Symposium on Rock Fragmentation, Australian Geomechanics Society, Adelaide, Vol. II, pp. 8-14.

42. Konya, C.J. and E.J. Walter (1991)

"Rock Blasting and Overbreak Control," U.S. Department of Transportation: National Highway Institute, Course No. 13211, 415 pp.

43. Konya, C.J. (1995)

"Blast Design," Intercontinental Development Corporation, Montville, Ohio, 230 pp.

44. Kuzmenko, A.A. et al. (1993)

"Seismic Effects of Blasting in Rock," Russian Translations Series 103, M. Majithia (Editor), A.A. Balkema, Rotterdam, 169 pp.

45. Langefors, U. H. Westerberg and B. Kihlstrom (1958)

"Ground Vibration in Blasting," Water Power Journal, Vol. 10, Part I - September 1958, pp. 335-338, 351; Part II - October 1958, pp. 390-395; Part III - November 1958, pp. 421-424.

46. Langefors, U. and B. Kihlstrom (1978)

"The Modern Technique of Rock Blasting: Third Edition," A Halted Press Book, John Wiley & Sons, New York, 438 pp.

47. Medearis, K. (1978)

"Blasting Damage Criteria for Low-Rise Structures," Proceedings of the Fourth Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Society of Explosives Engineers, Miami, pp. 280-290.

48. Meirovitch, L. (1986)

"Element of Vibration Analysis: Second Edition," McGraw-Hill Book Company, New York, 560 pp.

49. Mojtabai, N., I.W. Farmer, J.P. Savely (1990)
"Optimization of Rock Fragmentation in Bench Blasting,"
Proceedings, 31th U.S. Rock Mechanics, June 1990, W.A.
Hustrulid and G.A. Johnson (Editors), A.A. Balkema, Rotterdam,
pp. 897-904.
50. Murphy, G. (1950)
"Similitude in Engineering," John Wiley & Sons, New York,
301 pp.
51. Nicholls, H.R., C.F. Johnson, W.I. Duvall (1971)
"Blasting Vibrations and Their Effects on Structures," U.S.
Bureau of Mines Bulletin: Bulletin, No. 656, 105 pp.
52. Persson, P.-A., R. Holmberg and J. Lee (1994)
"Rock Blasting and Explosives Engineering," CRC Press, Boca
Raton, Florida, 540 pp.
53. Phillips, F.C. (1971)
"The Use of Stereographic Projection in Structural Geology:
3rd Edition," Edward Arnold, London, 90 pp.
54. Priest, S. D. and J.A. Hudson (1976)
"Discontinuity Spacings in Rocks," International Journal
of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract,
Pergamon Press, Vol 13, No. 5, pp. 135-148.
55. Priest, S.D. (1980)
"The Use of Inclined Hemisphere Projection Methods for
the Determination of Kinematic Feasibility, Slide Direction and
Volume of Rock Blocks," International Journal of Rock Mechanics
and Mining Sciences & Geomechanics Abstract, Vol. 17, No.1,
pp. 1-23.

56. Priest, S.D. (1985)
"Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics,"
George Allen & Unwin, Boston, 124 pp.
57. Priest, S.D. (1992)
"Discontinuity Analysis for Rock Engineering," Chapman &
Hall, London, 473 pp.
58. Ragan, D.M. (1985)
"Structural Geology: An Introduction to Geometrical
Techniques, Third Edition," John Wiley & Sons Inc., New York,
393 pp.
59. Rollins, R.R. and Shih-wen Wang (1989)
"Prediction of Fragmentation by Blasting," Proceedings,
30th U.S. Symposium on Rock Mechanics, June 1989, A. W. Khair
(Editor), A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 587-594.
60. Singh, B., P. Pal Roy, R.B. Singh, A. Bagchi, M.M. Singh,
M.D. Nabiullah (1993)
"Blasting in Ground Excavations and Mines," A.A. Balkema,
Rotterdam, 177 pp.
61. Siskind, D.E., V.J. Stachura, M.S. Stagg and J.W. Kopp (1980a)
"Structure Response and Damage Produced by Airblast from
Surface Mining," U.S. Bureau of Mines: Report of Investigations,
No. 8485, 111 pp.
62. Siskind, D.E., M.S. Stagg, J.W. Kopp and C.H. Dowding (1980b)
"Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration
from Surface Mine Blasting," U.S. Bureau of Mines: Report of
Investigations, No. 8507, 74 pp.

63. Tangchawal, S. (1995)

"Elastic Models of Rock Due to Explosion Pressures,"

Proceedings, Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, April 1995, S. Prakash (Editor), St. Louis, University of Missouri-Rolla, Vol. III, pp. 1333-1338.

64. Tangchawal, S. (1995)

"Blasting Models in Open Pit," Proceedings of the

International Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of Indochina, November 1995, L. Wannakao (Editor-in-Chief), Khon Kaen, Khon Kaen University, pp. 409-416.

65. Terzaghi, R.D. (1965)

"Sources of Error in Joint Surveys," Geotechnique,

London, Vol. XV, No. 3, pp. 287-304.

66. Thomson, W.T. (1993)

"Theory of Vibration with Applications: Fourth Edition,"

Prentice-Hall International Inc., New Jersey, 546 pp.

67. U.S. Bureau of Mines (1979)

"A Model for the Determination of Flyrock Range as a Function of Shot Condition," U.S. Bureau of Mines: Open File Report, No. 77-81, 86 pp.

68. Watson, G.S. (1966)

"The Statistics of Orientation Data," The Journal of

Geology, The University of Chicago Press, Vol. 74, pp. 786-797.