

การศึกษาความสัมพันธ์การลดทอนคลื่นสั้นสะท้อนของพื้นดินจากการใช้วัตถุระเบิด

นายกษิตศ สินโน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

THE ATTENUATION RELATION OF GROUND VIBRATION FROM EXPLOSIVE

Mr. Kasidit Sinno

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษความสัมพันธ์การลดทอนคลื่นสั้นสะเทือน
ของพื้นดินจากการใช้วัตถุระเบิด

โดย

นายกษิตศ สิ้นโน

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศสิทธิ์วงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ณะเจริญกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ธนกร ชมภูรัตน์)

กษิติศ สิ้นโน : การศึกษาความสัมพันธ์การลดทอนคลื่น สั่นสะเทือนของพื้นดินจากการใช้
วัตถุระเบิด. (The Attenuation Relation of Ground Vibration from Explosive) อ.ที่
ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 95 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสร้างการทำนายความสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการใช้วัตถุ
ระเบิด โดยการส่งสัญญาณคลื่น สั่นสะเทือนลงสู่ชั้น ธรณีวิทยาใต้พื้นดิน โดยการทำนายค่า ความ
สั่นสะเทือนจากทฤษฎีมีค่าน้อยกว่าค่า ความสั่นสะเทือนจากตรวจวัดข้อมูลภาค ในสนามประมาณ
1.7 เท่า (Jones & Stokes, 2004) ซึ่งความสั่นสะเทือนพื้นดินอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทาง
วิศวกรรมต่างๆ โดยรอบพื้นที่ ในการตรวจวัดความสั่นสะเทือนจะใช้มาตรวัดความเร็วในแกนตั้ง
จำนวน 16 ตัว โดยกำหนดตำแหน่งการวางมาตรวัดตัวแรกให้มีระยะห่างจากหลุมระเบิดประมาณ
10 เมตร และวางตำแหน่งมาตรวัดตัวอื่น ๆ ระยะห่างประมาณ 20 เมตร ตามแนวหลุมระเบิด ทำ
การติดตั้งเครื่องบันทึกข้อมูล

จากการตรวจวัดความสั่นสะเทือนซึ่งมีพื้นที่แตกต่างกันประกอบด้วย พื้นที่ดินปนทราย
พื้นที่ทรายปนหิน และพื้นที่ดินเหนียว พบว่าค่าการส่งผ่านความสั่นสะเทือน ในพื้นที่ดินเหนียวมีค่า
สูงและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่นสั่นสะเทือนของพื้นที่การตรวจวัดเกิด จากการรวมตัวกัน
ระหว่างคลื่นในตัวกลาง (Body waves) และคลื่นพื้นผิว (Surface wave) ซึ่งความเร็วอนุภาคสูงสุด
จะมีค่าการลดทอนคลื่นสั่นสะเทือนแบบเลขชี้กำลังตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น เมื่อระยะทางมากกว่า
500 เมตร น้ำหนักวัตถุระเบิดมีค่าไม่เกิน 4 กิโลกรัมทุกลักษณะชั้นดิน ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดจะ
มีค่าไม่เกิน 3 มม/วินาที ด้านความถี่การสั่นสะเทือนดินเหนียว สามารถกระจายความถี่สั่นสะเทือน
มากกว่าชั้นดินประเภทอื่น โดยพื้นที่ดินปนทรายและพื้นที่หินปนทราย ค่าการตรวจวัดมีค่าความเร็ว
อนุภาคสูงสุดมีค่าสูงและมีค่าความถี่ต่ำ พื้นที่ดินเหนียวค่าการตรวจวัดมีค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด
มีค่าสูงและมีค่าความถี่สูง ซึ่งค่าความถี่ต่ำ จะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม มากกว่า
ค่าความถี่สูง

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา..... 2554

527059682: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : GROUND VIBRATION / PEAK PARTICLE VELOCITY / SCALE DISTANCE

KASIDIT SINNO: THE ATTENUATION RELATION OF GROUND VIBRATION
FROM EXPLOSIVE. ADVISOR : ASSOC. PROF. SUPOT TEACHAVORASINSKUN,
Ph.D., 95 pp.

This research aimed to create of ground vibrated prediction from blasting by transmitted seismic wave into the ground. However, in theory of ground vibration prediction is lower than field measurement data about 1.7 times (Jones & Stokes, 2004). Ground vibration may affect to structure around sites. The experiment can measure ground shaking by using 16 geophones in vertical direction. The 1st geophone should be placed far from blast about 10 meters and 20 meters from nearby geophones before install data logger.

The measurement induced sandy clay loam, clay and sand rock shows that the clay material transmitted seismic wave higher than another material and coefficient attenuation combined to body wave and surface wave. When a distance is more than 500 meters, weight of blast is not more than 4 kg in every soil layer and peak particle velocity is less than 3 mm/s. In the frequency, clay can provide the vibrating frequency than other soil. For clayey-sand and sandy-gravel, there are high value of peak particle velocity and low frequency. For clay, there are high value of peak particle velocity and frequency which the area of low frequency value will be effected to the civil structure than high value of frequency.

Department :Civil Engineering.....Student's Signature.....

Field of Study : ..Civil Engineering.....Advisor's Signature.....

Academic Year :2011.....

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง "การตรวจวัดความสั่นสะเทือนจากการใช้วัตต์ระเบิด" ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำทุกสิ่งทุกอย่างในการทำวิจัยมาด้วยดีตลอด และกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ธีระกิจเจริญ ประธานกรรมการ ดร.ธนกร ชมพูรัตน์ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์นี้ จนสมบูรณ์ และอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมธรณีเทคนิคทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนตลอดมา

นายรัฐวุฒิ เหมะภูลิน นายพิธาน ไพโรจน์ นายสิริชัย เพ็ชรรุ่ง นายกฤษฎา ภูมิ นายสมพงษ์ ชำแจ่ม สำหรับคำชี้แนะแนวทาง และช่วยเหลือในการติดเครื่องมือในภาคสนาม นอกจากนี้ผู้เขียนต้องขอขอบคุณ คุณวรวรรณชกาและเจ้าหน้าที่กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการเก็บข้อมูลครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอระลึกถึงพระคุณ บิดา-มารดา และครอบครัว สำหรับร่างกาย แรงใจ และทุนทรัพย์จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การสำรวจหาปิโตรเลียม	4
2.1.1 การสำรวจทางธรณีวิทยา.....	4
2.1.2 การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์.....	4
2.1.3 การเจาะสำรวจ	5
2.2 การสำรวจคลื่นสั่นสะเทือนบนพื้นดิน (Seismic survey)	6
2.2.1 การสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนโดย การปล่อยแท่งน้ำหนักด้วยความเร่ง	7
2.2.2 การสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนโดย การใช้เครื่องกระทบดิน (Wacker)	8
2.2.3 การสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนโดยการใช้วัตถุระเบิด.....	9
2.3 ชนิดของวัตถุระเบิด	9

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 วัดถูระเบิดในงานอุตสาหกรรม	10
2.3.2 วัดถูระเบิดในงานสำรวจคลื่นสั้นสะเทือน	12
2.3.3 คุณสมบัติวัดถูระเบิดในงานอุตสาหกรรม	13
2.4 ผลกระทบจากการใช้วัดถูระเบิด	15
2.4.1 ชนิดของคลื่นสั้นสะเทือนจากการใช้วัดถูระเบิด	15
2.4.2 รูปแบบคลื่นสั้นสะเทือน	20
2.4.3 ความเร็วอนุภาคสูงสุด	21
2.4.4 ความถี่การสั้นสะเทือน	22
2.4.5 ขนาดความสั้นสะเทือน	23
2.4.6 การลดทอนคลื่นสั้นสะเทือนจากการใช้วัดถูระเบิด	25
2.4.7 อัตราส่วนระยะทาง	27
2.4.8 การทำนายความสั้นสะเทือนจากการใช้วัดถูระเบิด	29
2.4.9 มาตรฐานความสั้นสะเทือนจากการใช้วัดถูระเบิด	34
2.4.9.1 เกณฑ์ความเสียหายจากพลังงานสั้นสะเทือน	36
2.4.9.2 เกณฑ์ความเสียหายจากค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด	36
2.4.9.3 เกณฑ์ความเสียหายจากค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับ ค่าความถี่ความสั้นสะเทือน	38
2.4.9.4 เกณฑ์ความเสียหายจากค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับ อัตราส่วนระยะทาง	45
บทที่ 3 วิธีและขั้นตอนการดำเนินงาน	47
3.1 เครื่องมือตรวจวัด	47
3.1.1 มาตรฐานวัดความเร็ว	47
3.1.2 เครื่องบันทึกข้อมูล	48
3.2 ขั้นตอนการตรวจวัด	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 แนวทางการศึกษา.....	51
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์	52
4.1 ผลการตรวจวัด.....	52
4.2 การจำแนกพื้นที่การตรวจวัด	75
4.3 การวิเคราะห์ผลการสัมประสิทธิ์ของพื้นดิน	76
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับระยะทาง	77
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่	78
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับ	
ค่าอัตราส่วนระยะทาง	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	84
รายการอ้างอิง	86
ภาคผนวก	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	95

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 แสดงส่วนประกอบประเภทต่างๆของวัตถุระเบิด	10
ตารางที่ 2-2 แสดงคุณสมบัติของวัตถุระเบิดประเภท Emulex 700	13
ตารางที่ 2-3 แสดงความเร็วอนุภาคจากการวัดค่าจริงกับการคำนวณตามทฤษฎี ของตัวกลางแตกต่างกัน	22
ตารางที่ 2-4 แสดงแสดงค่าความถี่ธรรมชาติของวัสดุธรรมชาติ	23
ตารางที่ 2-5 แสดงมาตรฐานขนาดคลื่นสั้นสะเทือนที่ปลอดภัย	24
ตารางที่ 2-6 แสดงค่า K สำหรับสมการขนาดคลื่นสั้นสะเทือน	25
ตารางที่ 2-7 แสดงสรุปค่าระยะทางที่ปลอดภัยกับ ปริมาณน้ำหนักวัตถุระเบิด	28
ตารางที่ 2-8 แสดงค่าระยะทางและอัตราส่วนระยะทางกำหนดโดย OSM	28
ตารางที่ 2-9 แสดงค่า K สำหรับสมการข้างต้น.....	29
ตารางที่ 2-10 แสดงเกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความเสียหาย Langefors et al	37
ตารางที่ 2-11 แสดงเกณฑ์ความเสียหายจากความสั้นสะเทือนของ Edwards and Northwood's.....	37
ตารางที่ 2-12 แสดงเกณฑ์ความเสียหายจากค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดของ USBM's.....	37
ตารางที่ 2-13 แสดงเกณฑ์ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดในตัวกลางของ Indian Standard Institute.....	38
ตารางที่ 2-14 แสดงเกณฑ์ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ส่งผลต่อความเสียหาย ของโครงสร้างแบบต่างๆ.....	38
ตารางที่ 2-15 แสดงเกณฑ์กำหนดความสั้นสะเทือนของ Langefors และ Kihlstrom's	39
ตารางที่ 2-16 แสดงระดับความปลอดภัยของโครงสร้างของ USBM's	39
ตารางที่ 2-17 แสดงเกณฑ์มาตรฐานค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดของ DIN 4150.....	40
ตารางที่ 2-18 แสดงความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ ที่มีผลต่อสิ่งปลูกสร้างประเภทต่างๆ.....	41

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 2-19 เกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ปลอดภัยจากคลื่นสั่นสะเทือน ที่กำหนดโดยประเทศออสเตรเลีย	42
ตารางที่ 2-22 แสดงมาตรฐานความสั่นสะเทือนเพื่อป้องกัน ผลกระทบต่ออาคารของประเทศไทย	44
ตารางที่ 2-23 แสดงระดับการสั่นสะเทือนของ The Office of Surface Mining	45
ตารางที่ 4-1 แสดงรายละเอียดทั่วไปของการตรวจวัด	53
ตารางที่ 4-2 แสดงตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดในภาคสนาม	55
ตารางที่ 4-3 แสดงผลการตรวจวัดข้อมูลในภาคสนามที่ระยะทางต่างๆ วันที่ 17 พฤศจิกายน 2553	56
ตารางที่ 4-4 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 27-28 พฤศจิกายน 2553.....	57
ตารางที่ 4-5 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลที่ระยะต่างๆ วันที่ 28 พฤศจิกายน 2553.....	59
ตารางที่ 4-6 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 21-22 มกราคม 2554.....	60
ตารางที่ 4-7 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลที่ระยะต่างๆ วันที่ 21 มกราคม 2554.....	62
ตารางที่ 4-8 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 24-25 มกราคม 2554.....	62
ตารางที่ 4-9 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลที่ระยะต่างๆ วันที่ 24 มกราคม 2554.....	64
ตารางที่ 4-10 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 2 เมษายน 2554	64
ตารางที่ 4-11 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลที่ระยะต่างๆ วันที่ 2 เมษายน 2554	65
ตารางที่ 4-12 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 3-4 มิถุนายน 2554	66
ตารางที่ 4-13 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลที่ระยะต่างๆ วันที่ 3 มิถุนายน 2554	68
ตารางที่ 4-14 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 17-18 กรกฎาคม 2554	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4-15 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลทีระยะต่างๆ วันที่ 17 กรกฎาคม 2554	70
ตารางที่ 4-16 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 9-10 สิงหาคม 2554	70
ตารางที่ 4-17 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลทีระยะต่างๆ วันที่ 10 สิงหาคม 2554.....	72
ตารางที่ 4-18 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 6-8 กันยายน 2554	73
ตารางที่ 4-19 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลทีระยะต่างๆ วันที่ 9 สิงหาคม 2554.....	75
ตารางที่ 4-20 แสดงตารางสรุปค่าตัวแปรจากความสัมพันธ์แบบถดถอยเชิงเส้น	83
ตารางที่ 5-1 แสดงตารางสรุปค่าตัวแปรจากความสัมพันธ์แบบถดถอยเชิงเส้น	84

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1 แสดงตัวอย่างแหล่งกำเนิดคลื่นแบบ ปล่อยแท่งน้ำหนักด้วยความเร่ง	7
ภาพที่ 2-2 แสดงลักษณะการสำรวจโดยการปล่อยแท่ง น้ำหนักด้วยความเร่งเป็นจุดกำเนิดคลื่น	7
ภาพที่ 2-3 แสดงตัวอย่างการสำรวจโดยใช้เครื่องกระตุ้นดิน	8
ภาพที่ 2-4 แสดงตัวอย่างการสำรวจโดยใช้เครื่องกระตุ้นดิน	8
ภาพที่ 2-5 แสดงการลักษณะการสำรวจวัดคลื่นสั้นสะเทือน	9
ภาพที่ 2-6 แสดงโครงสร้างของวัตถุระเบิดแบบ Watergel	11
ภาพที่ 2-7 แสดงโครงสร้างภายในของวัตถุระเบิดประเภท Emulsion	12
ภาพที่ 2-8 แสดงวัตถุระเบิดประเภท Emulex 700	13
ภาพที่ 2-9 แสดงความเสียหายบริเวณหลุมระเบิดขณะเกิดการระเบิด	16
ภาพที่ 2-10 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นสั้นสะเทือนในชั้นดินที่มีความแตกต่างกัน	17
ภาพที่ 2-11 แสดงลักษณะคลื่นสั้นสะเทือนจากการระเบิด	17
ภาพที่ 2-12 แสดงคลื่นอัด	18
ภาพที่ 2-13 แสดงคลื่นเฉือน.....	18
ภาพที่ 2-14 แสดงคลื่นเรย์ลี	19
ภาพที่ 2-15 แสดงระบบคลื่นสั้นสะเทือนจากแหล่งกำเนิด	20
ภาพที่ 2-16 แสดงองค์ประกอบการสั้นสะเทือน.....	20
ภาพที่ 2-17 แสดงภาพแบบของคลื่นการสั้นสะเทือนจากจุดระเบิดมายังตำแหน่งตรวจวัด : A ตำแหน่งตรวจวัดระยะใกล้ และ B ตำแหน่งตรวจวัดที่ระยะไกล	21
ภาพที่ 2-18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับ Scaled Distance ที่ความลึกต่างๆ.....	32
ภาพที่ 2-19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุด กับความลึกที่ Scale distance ต่างๆ.....	33
ภาพที่ 2-20 แสดงแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด ของระเบิดแบบ ANFO และ Slurry.....	34
ภาพที่ 2-21 แสดงกราฟความสั้นสะเทือน โดย OSM.....	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2-22 แสดงเกณฑ์กำหนดความสิ้นสะเก็อนของ USBM,1980	39
ภาพที่ 2-23 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ของค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด กับค่าความถี่	43
ภาพที่ 2-24 แสดงเกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่หลักที่ปลอดภัยจากคลื่นสิ้นสะเก็อน ที่กำหนดโดยประเทศสหราชอาณาจักร (BS 7385)	43
ภาพที่ 2-23 แสดงเกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่ปลอดภัยจากคลื่นสิ้นสะเก็อน ที่กำหนดโดย Swiss Mining Standard (SN 640 312a)	43
ภาพที่ 2-24 แสดงเกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่ปลอดภัยจากคลื่นสิ้นสะเก็อน ที่กำหนดโดยประเทศสเปน Spanish Standard (CP UNE 22.381)	43
ภาพที่ 2-25 แสดงเกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่ปลอดภัยจากคลื่นสิ้นสะเก็อน ที่กำหนดโดยประเทศฝรั่งเศส Groupe Francais l'Energie Explosive (GFEE)	44
ภาพที่ 2-26 แสดงข้อกำหนดการสิ้นสะเก็อนของ The Office of Surface Mining (OSM)	46
ภาพที่ 3-1 แสดงมาตรวัดในแนวแกนดิ่ง	47
ภาพที่ 3-2 แสดงส่วนประกอบภายในมาตรวัด	48
ภาพที่ 3-3 แสดงเครื่องบันทึกข้อมูล	49
ภาพที่ 3-4 แสดงการกำหนดตำแหน่งมาตรวัด	49
ภาพที่ 3-5 แสดงการวางตำแหน่งมาตรวัด	50
ภาพที่ 3-6 แสดงการวางตำแหน่งมาตรวัด	50
ภาพที่ 3-7 แสดงการติดตั้งเครื่องบันทึกข้อมูล	51
ภาพที่ 3-8 แสดงการติดตั้งมาตรวัดตามแนวหลุมระเบิด	51
ภาพที่ 4-2 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	53
ภาพที่ 4-3 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	53
ภาพที่ 4-3 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ.มหาสารคาม	54
ภาพที่ 4-4 แสดงตัวอย่างกราฟสิ้นสะเก็อนจากการตรวจวัดในสนาม	56
ภาพที่ 4-5 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	57
ภาพที่ 4-6 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	58
ภาพที่ 4-7 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ.บุรีรัมย์	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4-8 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	60
ภาพที่ 4-9 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	60
ภาพที่ 4-10 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ.อุดรธานี	61
ภาพที่ 4-11 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	63
ภาพที่ 4-12 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	63
ภาพที่ 4-13 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	65
ภาพที่ 4-14 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	66
ภาพที่ 4-15 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ.กาฬสินธุ์	67
ภาพที่ 4-16 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	75
ภาพที่ 4-17 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ.อุบลราชธานี	69
ภาพที่ 4-18 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	71
ภาพที่ 4-19 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ.สุพรรณบุรี	71
ภาพที่ 4-20 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล	73
ภาพที่ 4-21 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ.สุราษฎร์ธานี	74
ภาพที่ 4-22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด กับระยะทางลักษณะชั้นดินเหนียว	78
ภาพที่ 4-23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด กับระยะทางลักษณะหินปนทราย	78
ภาพที่ 4-24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด กับระยะทางลักษณะดินปนทราย	79
ภาพที่ 4-25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุด กับค่าความถี่ของดินเหนียว	80
ภาพที่ 4-26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับ ค่าความถี่ของดินปนหิน	80
ภาพที่ 4-27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับ ค่าความถี่ของดินปนทราย	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4-28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับ อัตราส่วนระยะทางของดินเหนียว	82
ภาพที่ 4-29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับ อัตราส่วนระยะทางของหินปนทราย	82
ภาพที่ 4-30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับ อัตราส่วนระยะทางของดินปนทราย.....	83
ภาพ ก-1 แสดงตัวอย่างสันสะเทือนในเวลาต่างๆ	91
ภาพ ก-2 แสดงตัวอย่างค่า predominant period	91
ภาพ ก-3 แสดงตัวอย่างข้อมูลการสันสะเทือน.....	92
ภาพ ก-4 แสดงตัวอย่างข้อมูลดิบจากการตรวจวัด	93
ภาพ ก-5 แสดงตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดจากการแปลงค่าแล้ว	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานถือว่าเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นต่อชีวิตประจำวันของทุกคนและมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ เมื่อความต้องการใช้พลังงานมากขึ้น จำเป็นต้องมีการสำรวจหาแหล่งพลังงานเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ ดังนั้นการสำรวจแหล่งพลังงานที่อยู่ใต้พื้นดินเพื่อตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างทางธรณีวิทยาของชั้นดินและชั้นหิน โดยการส่งสัญญาณคลื่นสั่นสะเทือนจากผิวดินที่ระดับตื้นๆ ลงสู่ชั้นธรณีวิทยาใต้ผิวดิน ในขณะที่คลื่นสั่นสะเทือนถูกส่งลงไปสู่ชั้นดินหรือชั้นหิน คลื่นสั่นสะเทือนบางส่วนจะสะท้อนกลับขึ้นมายังชั้นผิวดิน ส่งผลให้ที่ระดับผิวดินเกิดการสั่นสะเทือน และการสะท้อนกลับของคลื่นสั่นสะเทือนที่ระดับลึกๆ ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวดินในบริเวณรอบๆ แหล่งกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือน อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่ส่งผลต่อ ระดับความรุนแรง จากการสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับชนิด ปริมาณ และความลึกของแหล่งกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือน ระยะห่าง และลักษณะทางธรณีวิทยา เป็นต้น คลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวระหว่างคลื่นพื้นผิว (Surface waves) และคลื่นในตัวกลาง (Body waves) อาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม ต่างๆ ในพื้นที่โดยรอบ การใช้วัตถุระเบิดเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือนจะก่อให้เกิดพลังงานสูง แรงสั่นสะเทือนเป็นแรงที่กระทำอย่างรวดเร็ว มีการกระทำซ้ำบ่อย เรียกว่าแรงแบบ shock load (สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 2549) โดยกระบวนการที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อโครงสร้างในบริเวณใกล้เคียง ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ (ธีระพล ฮวดพรหม และ นฤวัต กลอยเทพ, 2552)

1. แหล่งกำเนิดพลังงานคลื่นสั่นสะเทือน โดยมีต้นกำเนิดพลังงานจากวัตถุระเบิด
2. ตัวกลางการแพร่พลังงานคลื่นสั่นสะเทือน ได้แก่ ชั้นดินต่างๆ ในตำแหน่งการจุดระเบิดพลังงานจะถูกส่งผ่านไปในพื้นที่ดินในรูปคลื่นสั่นสะเทือน และบางส่วนก็จะถูกชั้นดินดูดซับ ซึ่งในชั้นดินแต่ละชนิดก็จะมีมีความสามารถในการดูดซับพลังงานที่แตกต่างกันออกไป

3. ตัวรับพลังงานสั่นสะเทือน ได้แก่ สิ่งปลูกสร้างประเภทต่างๆ โดยรอบพื้นที่ซึ่งสามารถรับพลังงาน คลื่น สั่นสะเทือน ถึงแม้ว่าจะสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับชั้นดิน แต่ก็ยังมีพลังงานเหลืออยู่พอที่จะทำให้โครงสร้างเกิดการสั่นสะเทือน

งานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาการวัดปริมาณแรงสั่นสะเทือนจากการใช้วัตตุระเบิดที่แพร่กระจายผ่านชั้นดิน ซึ่งยังไม่มีมีการวัดแรงสั่นสะเทือนจากการใช้วัตตุระเบิด ผลการศึกษาทำให้ ทราบค่าแรงสั่นสะเทือนในดินเป็นตัวเลขที่แน่นอนได้ และสามารถนำข้อมูลและผลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการป้องกันผลกระทบที่เกิดจากแรงสั่นสะเทือนจากการใช้วัตตุระเบิดได้

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 ตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการใช้วัตตุระเบิด
- 1.2.2 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด ระยะทางและความถี่ของแรงสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการใช้วัตตุระเบิด

1.3 ขอบเขตการดำเนินการวิจัย

- 1.3.1 แหล่งกำเนิดพลังงานคลื่นสั่นสะเทือนจากการใช้วัตตุระเบิดน้ำหนัก 1-4 กิโลกรัม
- 1.3.2 สร้างความสัมพันธ์การลดทอนแรงสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการใช้วัตตุระเบิด
- 1.3.3 อุปกรณ์การตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนแบบแกนเดียว (แนวแกนตั้ง)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถทราบค่าตัวเลขแรงสั่นสะเทือนในการผ่านชั้นดิน ที่ระยะการจุดระเบิด
ต่างๆกัน

1.4.2 สามารถนำสมการการทำนายค่าแรงสั่นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิดในสภาพ
พื้นที่ที่แตกต่างกัน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การสำรวจหาปิโตรเลียม

การค้นหาแหล่งปิโตรเลียมถือว่ามีผลสำคัญต่อการพัฒนาประเทศและยังเป็นปัจจัยขั้นพื้นฐานต่อการดำเนินชีวิตประจำวัน การค้นหาแหล่งปิโตรเลียมที่อยู่ลึกลงไปใต้พื้นดินซึ่งมีความซับซ้อนและมีความแตกต่างทางธรณีวิทยาและไม่รู้ตำแหน่งที่แน่นอนของแหล่งปิโตรเลียม ในการสำรวจเพื่อประเมินข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวกับขนาด รูปร่างและลักษณะของแหล่งกักเก็บปิโตรเลียม สำหรับการคำนวณปริมาณและคุณภาพของปิโตรเลียมเพื่อความคุ้มค่าสำหรับการลงทุนพัฒนาใช้เป็นแหล่งปิโตรเลียมต่อไป ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีที่มีความถูกต้อง แม่นยำและทันสมัยให้เหมาะสมกับการสำรวจหาแหล่งปิโตรเลียม โดยวิธีการสำรวจหาแหล่งปิโตรเลียมมีดังต่อไปนี้

2.1.1 การสำรวจทางธรณีวิทยา

การสำรวจทางธรณีวิทยา (Geological exploration) ใช้การเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับโครงสร้างธรณีวิทยา เช่น ข้อมูลจากภาพถ่ายทางอากาศและภาพถ่ายจากดาวเทียม ซึ่งบ่งบอกลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่การสำรวจควบคู่กับการเก็บตัวอย่างหินมาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพเพื่อเทียบกับคุณสมบัติของหินต้นกำเนิดและทำการวิเคราะห์เพื่อหาแนวโน้มความน่าจะเป็นของหินต้นกำเนิด หินกักเก็บปิโตรเลียม ซึ่งจะกลายเป็นพัฒนาแหล่งปิโตรเลียมต่อไป

2.1.2 การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์

การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ (Geophysical exploration) ใช้การประยุกต์หลักวิชาฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนและการหักเหของคลื่นผ่านตัวกลาง โดยการสร้างคลื่นสั้นสะเทือนลงสู่ใต้ผิวดินและวัดอัตราเร็วคลื่นที่สะท้อนและหักเหกลับของตัวกลางทั้งชั้นดินและชั้นหินเพื่อตรวจสอบ

คุณสมบัติทางกายภาพของพื้นที่การสำรวจ การสำรวจด้วยวิธีนี้สามารถช่วยในการระบุตำแหน่ง วัตถุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน นอกจากนี้การสำรวจธรณีฟิสิกส์ มีความรวดเร็วและครอบคลุมพื้นที่การสำรวจ ซึ่งการสำรวจธรณีฟิสิกส์มีวิธีการสำรวจดังนี้

การสำรวจความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity survey) โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปได้ พื้นดินแล้ววัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นดินและชั้นหินจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพ เหมาะสำหรับการสำรวจหาแหล่งน้ำบาดาล ฐานรากการก่อสร้างขนาดใหญ่ เป็นต้น

การสำรวจแม่เหล็ก (Magnetic survey) เป็นการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดยใช้ความแตกต่างของสนามแม่เหล็กในชั้นดินและชั้นหิน เนื่องจากบริเวณใต้ผิวดินมีปริมาณแร่หรือสารประกอบแตกต่างกัน เหมาะสำหรับการสำรวจหาแหล่งแร่ เช่น แร่ทองคำ

การสำรวจคลื่นไหวสะเทือน (Seismic survey) เป็นการวัดความเร็วคลื่นจากการสะท้อน (refraction) และการหักเห (reflection) ผ่านชั้นตัวกลาง โดยการจุดกำเนิดคลื่นไหวสะเทือนลงไป ใต้พื้นดินและวัดเวลาที่คลื่นเดินทางตามตำแหน่งต่างๆ ซึ่งความหนาแน่นและสมบัติความยืดหยุ่นของตัวกลางจะมีความเร็วแตกต่างกัน เหมาะสำหรับการสำรวจแหล่งแร่ระดับลึกๆจากพื้นดิน เช่น น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ

การสำรวจความถ่วง (Gravity survey) เป็นการวัดมวลความหนาแน่นของชั้นดินและชั้นหิน เป็นการวัดความเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแรงโน้มถ่วงโลก ซึ่งความหนาแน่นเป็นคุณสมบัติทางกายภาพ เหมาะสำหรับการสำรวจหาแหล่งแร่โลหะ เช่น ทองคำ

2.1.3 การเจาะสำรวจ

การเจาะสำรวจ (Drilling exploration) เป็นตรวจสอบโครงสร้างธรณีวิทยาว่ามีปิโตรเลียมหรือไม่ โดยการนำข้อมูลจากการสำรวจก่อนหน้า มาทำการวิเคราะห์ในการกำหนดตำแหน่งของหลุมปิโตรเลียมอย่างคร่าวๆ และใช้การเจาะสำรวจเพื่อหาข้อมูลธรณีวิทยาใต้พื้นดินและลำดับชั้นของหิน เมื่อพบว่าใต้พื้นดินมีแหล่งปิโตรเลียมการเจาะสำรวจเพื่อศึกษาและตรวจสอบข้อมูลเพิ่มเติม เช่น คุณภาพของปิโตรเลียม อายุของชั้นกัก กีบปิโตรเลียม คุณสมบัติการไหลซึมผ่านเนื้อหิน เป็นต้น เมื่อทราบถึงคุณภาพการทดสอบหลุมเจาะสำรวจสำหรับการประเมินความสามารถในการผลิต การเจาะสำรวจเพิ่มเติมสำหรับการกำหนดขอบเขต ปริมาณการไหล ปริมาณสำรองของแหล่งกักเก็บปิโตรเลียม

2.2 การสำรวจคลื่นสั่นสะเทือนบนพื้นดิน (Seismic survey)

การสำรวจคลื่นสั่นสะเทือน (Seismic survey) เป็นการสำรวจข้อมูลของโครงสร้างทางธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่การสำรวจ โดยการสร้างจุดกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือนในแนวตั้งสามารถทำได้ทั้งบนผิวดินและการฝังวัตถุระเบิดลงใต้ผิวดินทำการวัดความเร็วคลื่นการสะท้อน (refraction) และการหักเห (reflection) ผ่านชั้นตัวกลางมาถึงมาตรวัดสัญญาณ (Geophone) โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็วคลื่นสั่นสะเทือนของตัวกลาง ได้แก่การกำเนิดของชั้นตัวกลาง การดูดซับของตัวกลาง การเลี้ยวเบน การสะท้อนและการหักเหของตัวกลาง ซึ่งชั้นดินและชั้นหินที่มีความหนาแน่นสูงและมีความพรุนต่ำคลื่นสั่นสะเทือนจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าชั้นดินและชั้นหินที่มีความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ตำแหน่งจากรอยเลื่อนและความโค้งของชั้นดินและชั้นหินทำให้คลื่นสั่นสะเทือนมีการหักเหสามารถบ่งบอกถึงลักษณะโครงสร้างธรณีวิทยาของชั้นดินและ ชั้นหิน การสำรวจด้วยวิธีวัดคลื่นสั่นสะเทือนสามารถใช้แหล่งกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือนได้หลายประเภท การเลือกจุดกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือนจะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่การสำรวจหรือระดับความลึกของข้อมูลที่ต้องการ สำหรับประเทศไทยการสำรวจหาแหล่งปิโตรเลียมจุดกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือนจะใช้วัตถุระเบิด การปล่อยแท่งน้ำหนักด้วยความเร่ง (AWD) และการใช้เครื่องกระทุ้งดิน (Wacker) โดยขั้นตอนการสำรวจคลื่นสั่นสะเทือนมีดังนี้

การเก็บข้อมูล (Data acquisition) จะใช้การเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนจริงในพื้นที่สำรวจ โดยใช้แหล่งกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือนและมาตรวัด (Geophone) โดยคลื่นสั่นสะเทือนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นชั้นดินและชั้นหินไปยังมาตรวัดสัญญาณ แรงสั่นสะเทือนจะถูกแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าไปตามสายสัญญาณเพื่อบันทึกข้อมูล

การแปรผลข้อมูล (Data processing) เป็นการนำข้อมูลข้างต้นมาทำการแปรผลข้อมูลโดยผู้เชี่ยวชาญทางธรณีฟิสิกส์ให้อยู่ในรูปของภาพตัดขวางสั่นสะเทือน (Seismic section) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างธรณีวิทยาที่คาดว่าจะแหล่งสะสมของปิโตรเลียม

การแปลความหมายข้อมูล (Data interpretation) เป็นการแปลความหมายจากข้อมูลภาพตัดขวางสั่นสะเทือนโดยผู้เชี่ยวชาญซึ่งแสดงถึงโครงสร้างทางธรณีวิทยาและข้อมูลต่างๆที่สำคัญ เช่น การสะสมของตะกอนและชนิดของดินและหิน ในการแปลความหมายการรู้ถึงสภาพพื้นที่หรือลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ใกล้เคียงจะทำข้อมูลมีความถูกต้องมากขึ้น

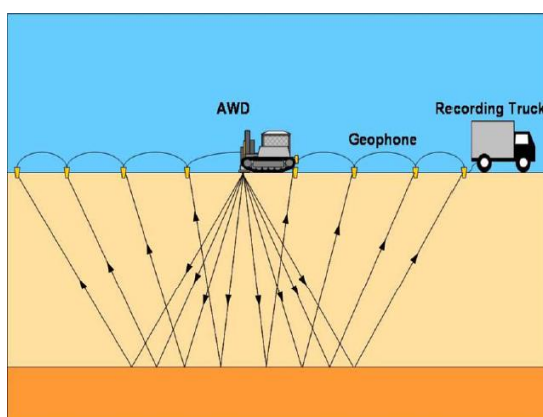
2.2.1 การสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนโดยการปล่อยแท่งน้ำหนักด้วยความเร่ง

การสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนโดยใช้เครื่องปล่อยแท่งน้ำหนักด้วยความเร่ง

(Accelerated Weight Drop:AWD) เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือน โดยการปล่อยแท่งน้ำหนักลงกระทบบนแผ่นเหล็กที่วางบนแผ่นดินทำให้เกิดคลื่นสั่นสะเทือนลงสู่ชั้นดินและชั้นหินประมาณ 70 – 100 กิโลจูลส์ คลื่นสามารถเดินทางลงไปยังความลึกประมาณ 4000 เมตร (บริษัท มิตรรา เอ็นเนอร์ยี ลิมิเต็ด , 2552) ตัวอย่างเครื่องการปล่อยแท่งน้ำหนักที่ใช้ในประเทศไทยดัง ภาพที่ 2-1 และลักษณะการสำรวจด้วยวิธีการปล่อยน้ำหนักด้วยความเร่งดัง ภาพที่ 2-2 การสำรวจด้วยการปล่อยแท่งน้ำหนักด้วยความเร่งเหมาะสำหรับพื้นที่ชุมชนหรือกิ่งชุมชน เนื่องจากเกิดแรงสั่นสะเทือนระดับต่ำทำให้เกิดผลกระทบเล็กน้อย



ภาพที่ 2-1 แสดงตัวอย่างแหล่งกำเนิดคลื่นแบบปล่อยแท่งน้ำหนักด้วยความเร่ง (บริษัท มิตรรา เอ็นเนอร์ยี ลิมิเต็ด, 2552)



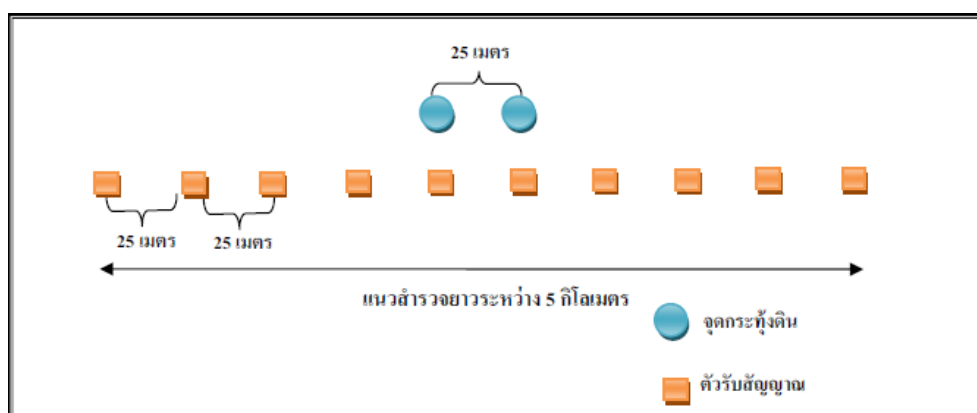
ภาพที่ 2-2 แสดงลักษณะการสำรวจโดยการปล่อยแท่งน้ำหนักด้วยความเร่งเป็นจุดกำเนิดคลื่น (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2553 : ออนไลน์)

2.2.2 การสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนโดยการใช้เครื่องกระทุ้งดิน (Wacker)

การสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนโดยการใช้เครื่องกระทุ้งดินเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือน ตัวอย่างการสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนโดยการใช้เครื่องกระทุ้งดินเป็นแหล่งกำเนิดคลื่น ดัง ภาพที่ 2-3 โดยเครื่องกระทุ้งดินจะประกอบด้วยตัวสั่นสะเทือนยึดติดกับแผ่นเหล็กซึ่งเครื่องกระทุ้งดินมีน้ำหนักประมาณ 60 กิโลกรัม ทำการกระทุ้งดินไปตามแนว มาตรฐาน ดัง ภาพที่ 2-4 การสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนโดยการใช้เครื่องกระทุ้งดินเหมาะสำหรับพื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ทะเลทรายและพื้นที่ที่มีถนนตัดผ่าน รวมถึงพื้นที่กิ่งชุมชนหรือพื้นที่ชุมชนเนื่องจากส่งผลกระทบต่อระดับต่ำและสามารถควบคุมพลังงานได้



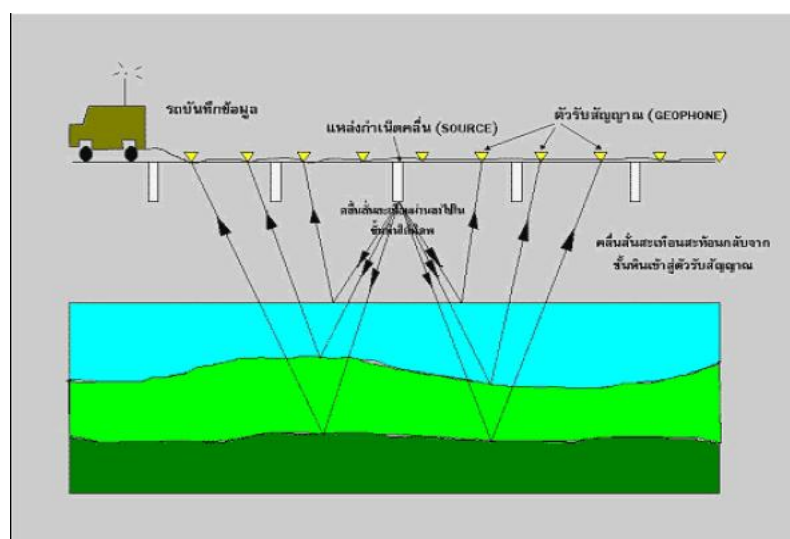
ภาพที่ 2-3 แสดงตัวอย่างการสำรวจโดยการใช้เครื่องกระทุ้งดิน (บริษัท เฟอร์ล ออย จำกัด, 2553)



ภาพที่ 2-4 แสดงตัวอย่างการสำรวจโดยการใช้เครื่องกระทุ้งดิน (บริษัท เฟอร์ล ออย จำกัด, 2553)

2.2.3 การสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนโดยใช้วัตถุระเบิด

การสำรวจด้วยวิธีวัดคลื่นสั่นสะเทือนโดยใช้วัตถุระเบิด (Seismic explosive) เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือนเป็นการจุดระเบิดแบบหลุมเดี่ยว (Single hole) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมระเบิดประมาณ 8 เซนติเมตร ความลึกประมาณ 6–23 เมตร และใช้วัตถุระเบิด 1–4 กิโลกรัมต่อหลุม ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่และความต้องการข้อมูลที่ระดับความลึกค่อนข้างมาก การสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนการวางตำแหน่งของหลุมกำเนิดคลื่น (Shot point) และตัวรับสัญญาณ (Geophone) ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 แสดงการลักษณะการสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือน (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2553: ออนไลน์)

2.3 ชนิดของวัตถุระเบิด

วัตถุระเบิดเป็นสารประกอบทางเคมีเมื่อเกิดความร้อนหรือการกระทบกระชอนการปฏิกิริยาเคมีความร้อน ส่วนประกอบหลักของวัตถุระเบิดประกอบด้วย สารช่วยเร่งการเผาไหม้ สารเผาไหม้และสารเร่งปฏิกิริยา วัตถุระเบิดประเภทต่างๆ มีส่วนประกอบดังตารางที่ 2-1 เมื่อวัตถุระเบิดเกิดการระเบิดภายในหลุมหรือพื้นที่จำกัด ดัง ภาพที่ 2-6 พลังงานจากการระเบิดประกอบด้วยพลังงานจากแรงดันและพลังงานจากความร้อนแพร่กระจายในตัวกลางซึ่งอาจส่งผล

กระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้เกิดความเสียหาย ผลกระทบจากการระเบิด เช่น การสั่นสะเทือนของดิน เสียงและคลื่นอัดอากาศ ฝุ่น คิว้นและกลิ่นจากการระเบิด ในการเลือกใช้วัตถุระเบิดให้เหมาะสมกับงานควรมีการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของวัตถุระเบิด เช่น ชนิดของวัตถุระเบิด คุณภาพและปริมาณของวัตถุระเบิด ราคาวัตถุระเบิด เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้วัตถุระเบิด ควรใช้ให้ถูกวิธี สามารถลดผลกระทบและมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2-1 แสดงส่วนประกอบประเภทต่างๆของวัตถุระเบิด (สภาวิศวกร, 2552)

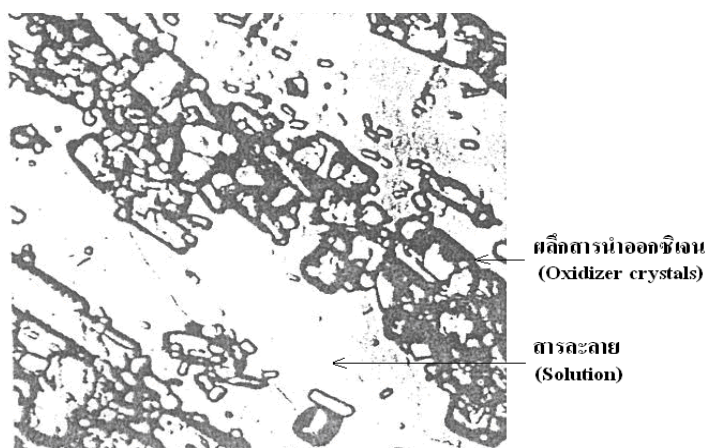
ชนิดของวัตถุระเบิด	ส่วนประกอบของวัตถุระเบิด		
	สารนำออกซิเจน (OXIDIZERS)	สารเผาไหม้ (FUELS)	สารเร่งปฏิกิริยา (SENSITIZERS)
DYNAMITE	Sodium nitrate	Carbonaceous fuel	Nitroglycerin
AMMONIA DYNAMITE	Sodium nitrate Ammonium nitrate	Carbonaceous fuel	Nitroglycerin
WATERGEL	Ammonium nitrate Calcium nitrate	Oil, Others	TNT, Methylamin nitrate, Others
EMULSION	Ammonium nitrate Calcium nitrate	Oil / Waxes, Others	Chemical gassing Microballoons
ENERGAN	Ammonium nitrate Calcium nitrate	Oil, Others	Air
ANFO	Ammonium nitrate	Fuel Oil / Distillate Aluminium	Air

2.3.1 วัตถุระเบิดในงานอุตสาหกรรม

การดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัตถุระเบิดการเลือกใช้วัตถุระเบิดให้มีความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของงานและลักษณะของพื้นที่ที่จะช่วยลดผลกระทบที่อาจเกิดจากการใช้วัตถุระเบิดได้ ดังนั้นการจำแนกวัตถุระเบิดได้ ดังนี้

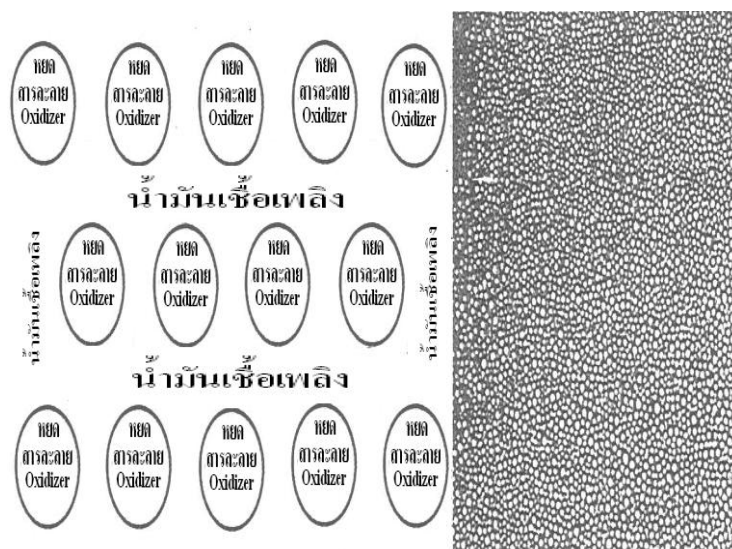
วัตถุระเบิดประเภท Nitroglycerin เป็นส่วนประกอบหลัก วัตถุระเบิดประเภทนี้สามารถปรับเปลี่ยนส่วนประกอบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานและมีความเร็วในการระเบิดสูง แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มไดนาไมท์ (Dynamite) และ เจลาติน (Gelatin) คุณสมบัติของแต่ละกลุ่มจะมีความแตกต่างกันตามการใช้งานดังนี้ กลุ่มไดนาไมท์ จะให้ความเร็วการระเบิดและความไวการกระแทกสูงกว่ากลุ่มเจลาติน การเสียดสีและคว้นพิษน้อยกว่ากลุ่มเจลาติน ส่วนกลุ่มเจลาติน จะให้ความทนน้ำสูงกว่ากลุ่มไดนาไมท์ ซึ่งทั้งสองกลุ่มคว้นพิษจะมีค่าขึ้นกับการส่วนประกอบแอมโมเนียไนเตรท ถ้าผสมแอมโมเนียไนเตรทมากจะเกิดคว้นน้อย

วัตถุระเบิดประเภท Watergel เป็นส่วนประกอบหลัก มีส่วนประกอบคือ แอมโมเนียไนเตรทเป็นส่วนประกอบหลัก น้ำ 10-30 เปอร์เซ็นต์ สารคาร์บอนเขียส, TNT และอลูมิเนียม ดังภาพที่ 2-7 คุณสมบัติของวัตถุระเบิดประเภทนี้ จะมีความไวต่อการจุดระเบิดสามารถจุดระเบิดด้วยเชื้อปะทุ (Cap-sensitive) หรือจุดระเบิดด้วยวัตถุระเบิดแรงสูง (Primer-sensitive) หรือเรียกว่าวัตถุระเบิดเหลว (slurry explosive) มีความเร็วของวัตถุระเบิดประมาณ 3400 – 5500 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 2-6 แสดงโครงสร้างของวัตถุระเบิดแบบ Watergel (สภาวิศวกร, 2552)

วัตถุระเบิดประเภท Emulsion เป็นส่วนประกอบหลัก การผสมกันของน้ำมันเชื้อเพลิงกับสารละลายซึ่งได้แก่สารละลายแอมโมเนียไนเตรทและสารนำออกซิเจนเกิดฟองอากาศขนาดเล็ก หรือเรียกว่า Microballoons จำนวนมากกระจายตัวในแท่งวัตถุระเบิดโดยมีน้ำมันเชื้อเพลิงสอดแทรกตามช่องว่าง ดัง ภาพที่ 2-8 เมื่อเกิดเสียดสีหรือการกระทบ Microballoons เกิดการอัดตัวและเกิดความร้อนสูงส่งผลให้ปฏิกิริยาการระเบิดอย่างรวดเร็ว ซึ่ง Microballoons จะทำหน้าที่ควบคุมความไวและความหนาแน่นของวัตถุระเบิด นอกจากนี้ขนาดของ Microballoons ยังส่งผลต่อความเร็วในการระเบิด กล่าวคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงความเร็วในการระเบิดจะลดลงเช่นกัน ส่วนความรุนแรงหรือ อพลังงานจะถูกควบคุมด้วยน้ำมันเชื้อเพลิงและอลูมิเนียม เมื่ออลูมิเนียมมีปริมาณสูงจะมีความทนน้ำสูงเช่นกัน



ภาพที่ 2-7 แสดงโครงสร้างภายในของวัตถุระเบิดประเภท Emulsion (สภาวิศวกร, 2552)

สำหรับวัตถุระเบิดประเภท emulsion นิยมใช้กันคือ แอมโมเนียมไนเตรทผสมน้ำ น้ำมันเชื้อเพลิงหรือ ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil) โดยสัดส่วนในการผสมที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จะใช้ปริมาณ แอมโมเนียมไนเตรท 94.3% และปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง 5.7% ซึ่งจากสัดส่วนการผสมดังกล่าวทำให้ความเร็วของการระเบิดสูง

วัตถุระเบิดประเภท Pentolite เป็นส่วนประกอบหลัก วัตถุระเบิดประเภทนี้เหมาะสำหรับการระเบิดชั้นหินแข็งเนื่องจากมีพลังงานและความเร็วของการระเบิดสูง สัดส่วนของวัตถุระเบิดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดประกอบด้วย PETN กับ TNT ซึ่งผสมกันอยู่ประมาณ 10 – 50 % ของ PETN และมี PETN กับ TNT ผสมกันอยู่ประมาณ 90 – 50 % ของ TNT

2.3.2 วัตถุระเบิดในงานสำรวจคลื่นสั่นสะเทือน

ในงานสำรวจคลื่นสั่นสะเทือนเป็นวัตถุระเบิดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือนบริเวณแนวตึง ซึ่งเป็นวัตถุระเบิดชนิดแอมโมเนียมไนเตรทอิมัลชัน แบบ Emulex700 ดังภาพที่ 2-9 มีแอมโมเนียมไนเตรทเป็นสารที่ได้การทำปฏิกิริยาเป็นส่วนประกอบ ดินระเบิดจะมีสีเทา ไม่สามารถติดไฟได้เองและไม่มีการบิน บรรจุมาในรูปแบบ Water in oil emulsion explosive ห่อหุ้มด้วยพลาสติกลงในกล่องกระดาษลูกฟูกเพื่อกันกระแทก คุณสมบัติต่างๆ ของวัตถุระเบิดแสดงดังตารางที่ 2-2 มีน้ำหนักแห้งละ 1.1 ปอนด์ หรือประมาณ 0.5 กิโลกรัม (บริษัท Tenaga Kimia, 2553:ออนไลน์)



ภาพที่ 2-8 แสดงวัตถุระเบิดประเภท Emulex 700 (Tenaga Kimia, 2553:online)

ตารางที่ 2-2 แสดงคุณสมบัติของวัตถุระเบิดประเภท Emulex 700 (Tenaga Kimia Sendirian Berhad, 2553:ออนไลน์)

Grade/Series	Density (g/cc)	Detonation Velocity (m/s)	Explosion Energy (MJ/kg)	Bulk Strength (% Rel ANFO)	Water Resistance	Cap Sensitive	Fume Class
Emulex 700	1.15-1.20	5,000-5,500	3.00	117	Excellent	Standard seismic detonator	1

2.2.3 คุณสมบัติวัตถุระเบิดในงานอุตสาหกรรม

การพิจารณาข้อมูลพื้นฐานของวัตถุระเบิดสำหรับการเลือกใช้วัตถุระเบิดให้มีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงาน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและมีความปลอดภัยในการทำงาน การพิจารณาข้อมูลพื้นฐานหลักๆ ของวัตถุระเบิด ดังนี้ (สภาวิศวกร, 2552)

ความเร็วในการระเบิด หมายถึงความเร็วคลื่นการระเบิดเคลื่อนที่ไปตามแท่งวัตถุระเบิด โดยความเร็วในการระเบิดมีค่าประมาณ 2,438 – 7,925 เมตรต่อวินาที ความเร็วในการระเบิดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ส่วนผสม ขนาดของวัตถุระเบิด ขนาดอนุภาคในวัตถุระเบิด พื้นที่ในการระเบิด โดยพื้นที่จำกัดหรือหลุมลึกลงไปใต้ดินจะมีความเร็วในการระเบิด

มากกว่าการระเบิดในพื้นที่โล่ง ความเร็วในการระเบิดที่มีประสิทธิภาพควรมีค่าประมาณค่า
ความเร็วคลื่น Seismic shock

ความหนาแน่น หมายถึงปริมาณน้ำหนักต่อปริมาตรของวัตถุระเบิด หรือค่าหน่วยน้ำหนัก
วัตถุระเบิด (หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) โดยค่าความหนาแน่นจะบ่งบอกการอัดตัวกันของ
ส่วนผสมในแท่งวัตถุระเบิดทำให้ความเร็วในการระเบิดและแรงดันการระเบิดมีประสิทธิภาพ ซึ่งค่า
ความหนาแน่นของวัตถุระเบิดจะมีค่าอยู่ระหว่าง ระหว่าง 0.7 – 1.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

แรงดันการระเบิด หมายถึงแรงที่เกิดระหว่างทำปฏิกิริยาเคมี (Reaction zone) โดยปัจจัย
ที่มีผลต่อแรงดันการระเบิดคือ ความเร็วในการระเบิดและความหนาแน่นของวัตถุระเบิด ซึ่งค่า
ความเร็วในการระเบิดจะส่งผลโดยตรงกับค่าแรงดันการระเบิด กล่าวคือค่าความเร็วในการระเบิด
สูงจะเกิดแรงดันการระเบิดสูงเช่นกัน

ความไวของการกระตุ้น หมายถึงการส่งถ่ายพลังงานการระเบิดของวัตถุระเบิดสองแท่งที่
ระยะห่างกัน กล่าวคือ เมื่อเกิดการระเบิดของวัตถุระเบิดแท่งแรกสามารถกระตุ้นให้วัตถุระเบิดอีก
แท่งเกิดการระเบิด โดยปัจจัยที่มีผลต่อความไวของการระเบิด คือความต่อเนื่องจากการอัดตัวกัน
ของแท่งวัตถุระเบิดหรือมีช่องว่างระหว่างส่วนผสมน้อย

ขนาดอนุภาควัตถุระเบิด หมายถึงอนุภาคของส่วนผสมวัตถุระเบิดที่มีขนาดเล็กมากๆ โดย
ขนาดอนุภาคจะส่งผลให้แท่งวัตถุระเบิดเกิดช่องว่างและมีผลกระทบประสิทธิภาพของวัตถุระเบิด
ในการหาค่าขนาดอนุภาควัตถุระเบิดจะทดสอบการจุดระเบิดของขนาดอนุภาควัตถุระเบิดแตกต่างกัน

พลังงานหรือกำลังของวัตถุระเบิด หมายถึงพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีขณะเกิดการระเบิด
โดยพลังงานของวัตถุระเบิดจะอยู่ในรูปของความร้อน เสียง แรงสั่นสะเทือนหรือแรงกระแทก
พลังงานจากการระเบิดมีค่าสูงยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพของวัตถุระเบิดและการใช้งาน

ความทนน้ำของวัตถุระเบิด หมายถึงการไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหรือความเสียหายเมื่อ
ถูกน้ำ เช่น ความไวของการกระตุ้น โดยผลกระทบของน้ำทำให้เกิดความเสียหายของวัตถุระเบิดคือ
เกิดการละลายตัวของส่วนผสมบางชนิด เช่น เกลือ หรืออาจเกิดจากแรงดันน้ำทำให้จำนวน
microballoons ลดลง สำหรับ วัตถุระเบิดประเภท emulsions จะมีค่าความทนน้ำสูงเนื่องจากมี
ฟิล์มของน้ำมันทำหน้าที่ป้องกันน้ำซึมเข้าเนื้อวัตถุระเบิด

การดำเนินการและความสำคัญที่เกี่ยวข้องกับวัตถุระเบิดคือความปลอดภัย เนื่องจากวัตถุ
ระเบิดมีความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดอันตรายได้ทุกขณะทั้งจากการขนส่งวัตถุระเบิดหรือจาก
ผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นวิธีการทดสอบวัตถุระเบิดก่อนนำไปใช้งาน เช่นการหาพลังงานการระเบิด การ

กระแทกหรือการเสียดสีหรือความร้อนที่มีผลทำให้เกิดการระเบิด ค่าเหล่านี้สามารถ นำไปป้องกันไม่ให้วัตถุระเบิดเกิดการระเบิดก่อนการปฏิบัติงานและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้

2.4 ผลกระทบจากการใช้วัตถุระเบิด

การดำเนินกิจกรรมต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับ การใช้วัตถุระเบิดอาจก่อให้เกิดผลกระทบ เนื่องจากวัตถุระเบิดเป็นวัตถุที่มีพลังงานสูงและมี ราคาถูกเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดพลังงานชนิดอื่น พลังงานจากการระเบิดถือว่ามีค่าสำคัญและอาจสร้างปัญหาส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบ พื้นที่ ซึ่งผลกระทบส่วนใหญ่ที่พบหรือมีการร้องเรียน คือ ผลจากการกระเด็นของหิน การ สั่นสะเทือน ฝุ่นละอองและมลภาวะทางเสียง ซึ่งปัญหาดังกล่าวควรมีการป้องกันความเสียหายหรือผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้จะเน้นถึงความสำคัญของการสั่นสะเทือนของพื้นดินเป็นสำคัญ สำหรับการตรวจวัดค่าความสั่นสะเทือนเพื่อพิจารณาถึงเกณฑ์มาตรฐานในการป้องกันความเสียหายของโครงสร้างต่างๆ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม โดย ลักษณะความเสียหายของอาคารมีดังนี้

ระดับเสียหายเบาบาง (Threshold damage) เกิดจากการขยายตัวของรอยแตกเดิม ซึ่ง รอยแตกมีขนาดเล็กเท่ากับเส้นผม (Hairline cracking) หรือการเกิดรอยแตกใหม่ของผิวฉาบ (Cosmetic cracking) รวมถึงการหลุดร่อนของส่วนที่แตกร้าวเดิม

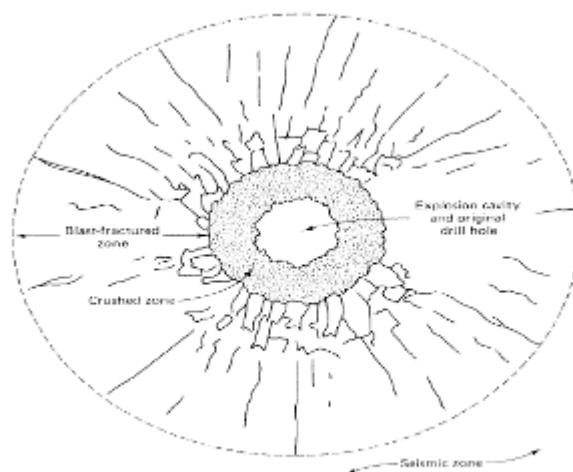
ระดับเสียหายเล็กน้อย (Minor damage) ความเสียหายไม่มีความรุนแรงและไม่ส่งผลกระทบท่อกำลังของโครงสร้างอาคาร

ระดับเสียหายมาก (Major damage) ความเสียหายส่งผลกระทบต่อกำลังของโครงสร้างอาคาร เช่น รอยแตกในคานหรือเสาอาคาร การเคลื่อนตัวของฐานราก

2.4.1 ชนิดของคลื่นสั่นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิด

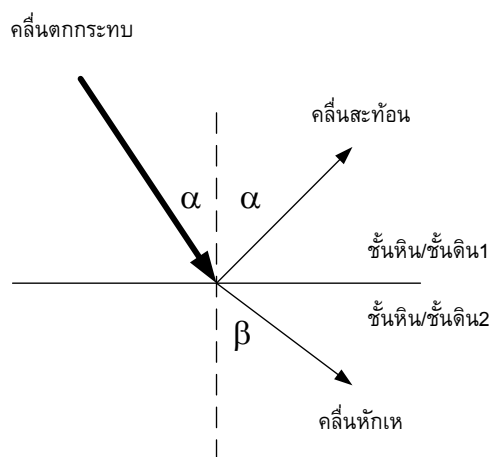
วัตถุระเบิดเมื่อถูกกระตุ้นจากความร้อนหรือการกระแทกในปริมาณที่เพียงพอจะทำให้เกิดกระบวนการปฏิกิริยาเคมีความร้อน (Thermo Chemical) เกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วและปลดปล่อยพลังงานจำนวนมากออกมา พลังงานจากการระเบิดสามารถแยกออกได้เป็นพลังงานแรงกระแทก (Shock energy) และพลังงานแก๊ส (Gas energy) โดยพลังงานจากแรงกระแทกจะ

สร้างคลื่นสั้นสะเทือนแพร่กระจายผ่านตัวกลางและสร้างความเสียหายรอบๆ หลุมระเบิด ดัง ภาพที่ 2-9



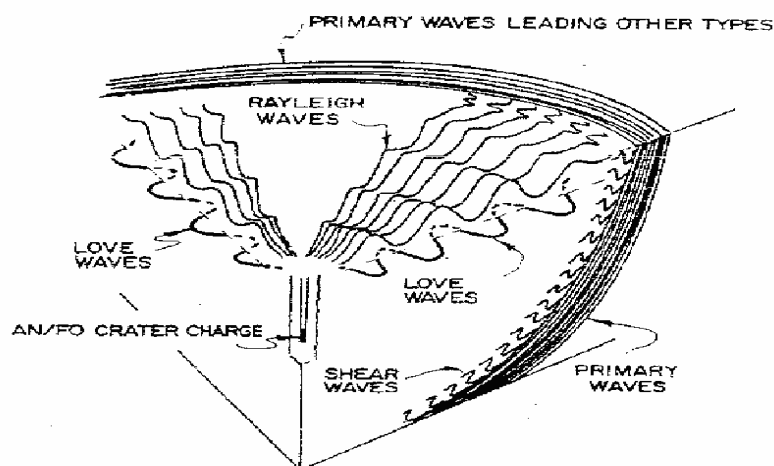
ภาพที่ 2-9 แสดงความเสียหายบริเวณหลุมระเบิดขณะเกิดการระเบิด (After Du Pont, 1977)

ในการเคลื่อนที่ของคลื่นสั้นสะเทือนผ่านตัวกลางที่มีความแตกต่างทางธรณีวิทยา ซึ่งอาศัยหลักการทางฟิสิกส์ที่ว่า คลื่นสั้นสะเทือนจะเกิดการหักเห (Refraction) เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใหม่ และบางส่วนจะเกิดการสะท้อน (Reflection) และเคลื่อนที่กลับเข้าสู่ตัวกลางเดิม ดังภาพที่ 2-10 โดยใช้สมมุติฐานที่ว่า มุมตกกระทบ (α) มีค่าเท่ากับมุมสะท้อน (α) และมุมตกกระทบและมุมหักเหมีความสัมพันธ์กันดังนี้
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$
 ที่ระดับ ความลึกของลักษณะ ชั้นหิน/ชั้นดินจะมีความหนาแน่น (ความเร็วคลื่นสั้นสะเทือน) แตกต่างกัน ที่ระดับลึกจะมีความหนาแน่น สูงกว่าลักษณะชั้นหิน/ชั้นดินที่อยู่ทีระดับตื้น ปัจจัยในการตอบสนองต่อความสั้นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิด ส่งผลให้เกิดปัญหาในด้านต่างๆ เช่น การกระตุ้นความสั้นสะเทือนสูง จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดพลังงานสูง ซึ่งหมายถึง ต้องใช้วัตถุระเบิดที่มีน้ำหนักมากขึ้น ส่งผลให้การทำงานมีความเสี่ยงและอันตรายมากยิ่งขึ้น การกระตุ้นให้เกิดความสั้นสะเทือน ส่งผลให้เกิดความสั้นสะเทือนกระจาย โดยรอบพื้นที่การสำรวจ ดังนั้น การใช้พลังงานกระตุ้น ความสั้นสะเทือนสูง ความสั้นสะเทือน กระจายโดยรอบพื้นที่การสำรวจเพิ่มมากขึ้นไปด้วย ซึ่งอาจจะ ก่อให้เกิด ผลกระทบต่อ ผู้อยู่อาศัยและ โครงสร้างทางวิศวกรรมที่ตั้งอยู่ในบริเวณโดยรอบพื้นที่



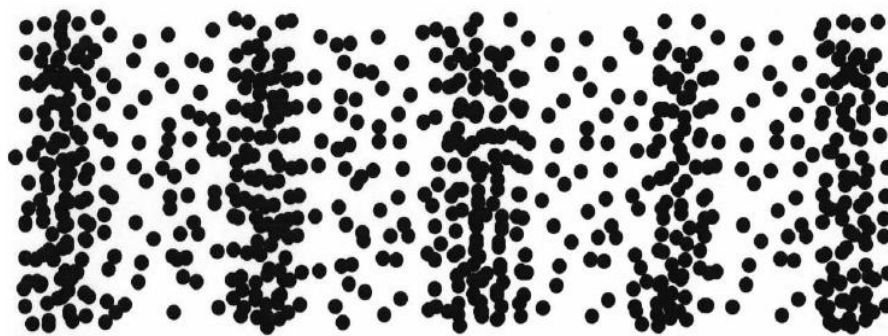
ภาพที่ 2-10 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นสั้นสะท้อนในชั้นดินที่มีความแตกต่างกัน

พลังงานจากการระเบิดก่อให้เกิดคลื่นสั้นสะท้อนแพร่ กระจายผ่านตัวกลาง ซึ่งลักษณะทั่วไปของการเกิดคลื่นสั้นสะท้อนจากวัตถุระเบิด ดังภาพที่ 2-11 ซึ่งระยะห่างออกไปคลื่นสั้นสะท้อนจากวัตถุระเบิดประกอบด้วย



ภาพที่ 2-11 แสดงลักษณะคลื่นสั้นสะท้อนจากการระเบิด (Nicholson, 2005)

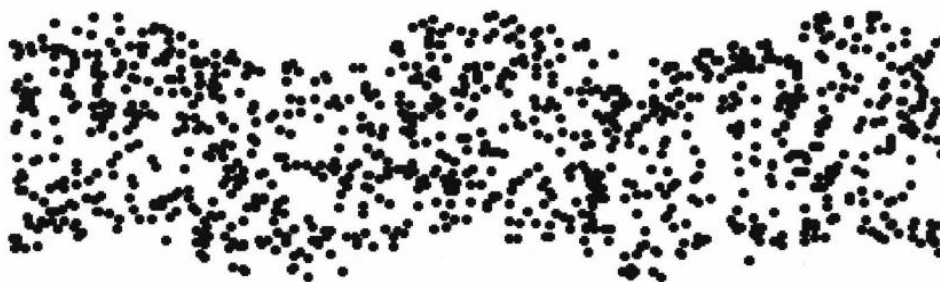
คลื่นแรงอัด (Compression wave หรือ transverse wave:P-wave) เป็นคลื่นที่ทำให้เกิดการอัดและการขยายตัวของอนุภาคตัวกลางในทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปหรือทิศทางเคลื่อนที่จะมีทิศทางขนานกับทิศทางของการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวกลาง ดังภาพที่ 2-12 โดยคลื่นอัดสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้ทั้งของแข็งและของเหลว



Compression or Primary Wave (P-Wave)

ภาพที่ 2-12 แสดงคลื่นอัด (Jones and Stokes, 2004)

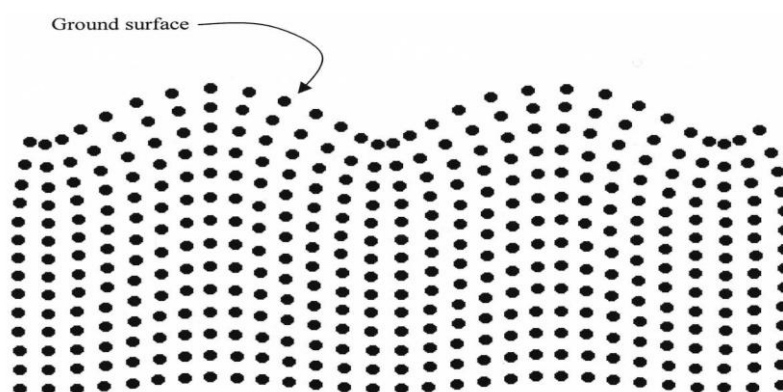
คลื่นแรงเฉือน (Shear wave หรือ Longitudinal wave:S-wave) เป็นคลื่นที่ทำให้เกิดการเฉือนตัวในอนุภาคของตัวกลางในขณะที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าไป หรือทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของตัวกลาง ดัง ภาพที่ 2-13 โดยคลื่นอัดจะมีความเร็วประมาณ 0.6 เท่าของคลื่นอัด (สภาวิศวกร, 2552) คลื่นเฉือนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้แค่ตัวกลางที่เป็นของแข็งเท่านั้นไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวได้หรือไม่เกิดแรงเฉือนในของเหลว



Shear or Secondary Wave (S-Wave)

ภาพที่ 2-13 แสดงคลื่นเฉือน (Jones and Stokes, 2004)

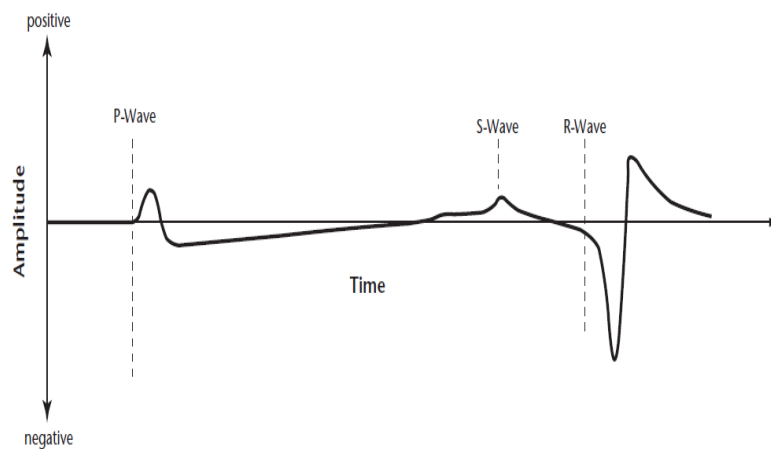
คลื่นเรย์ลี (Rayleigh wave หรือ Vertical wave) เป็นคลื่นเกิดจากการรวมตัวกันของคลื่นอัดและคลื่นเฉือนทั้งในแนวตั้งและแนวราบทำให้มีการเคลื่อนตัวของอนุภาคทั้งในแนวตั้งและแนวราบหรือมีการหมุนตัวของอนุภาคในการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเกิดที่บริเวณผิวดินหรือเรียกว่าคลื่นพื้นผิว ดัง ภาพที่ 2-14 โดยคลื่นผิวมีความเร็วประมาณ 0.9 เท่าของคลื่นเฉือน (สภาวิศวกร, 2552)



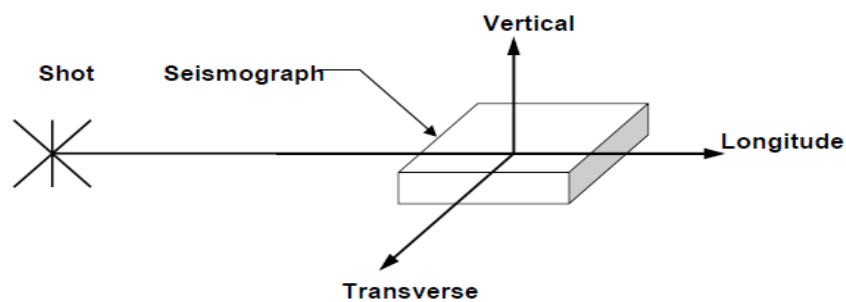
ภาพที่ 2-14 แสดงคลื่นเรย์ลี (Jones and Stokes, 2004)

เมื่อเกิดการระเบิดจะก่อให้เกิดคลื่นสั้นสะเทือนซึ่งมีความเร็วแตกต่างกันโดยคลื่นอัดจะมีความเร็วสูงสุดตามด้วยคลื่นเฉือนและคลื่นพื้นผิว ดังภาพที่ 2-15 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นสั้นสะเทือนสามารถอธิบายพลังงานในการส่งผ่านตัวกลาง สำหรับการจุดระเบิดแบบครั้งเดียว (single short point) พลังงานจากการระเบิดจะทำให้เกิดคลื่นเรย์ลี 67% คลื่นแรงเฉือน 26% และคลื่นแรงอัด 7% ของพลังงานจากการระเบิด (Sharma, 2006) ดังนั้นคลื่นเรย์ลีเป็นคลื่นที่มีการสั้นสะเทือนของพื้นดินมากที่สุดและจะสังเกตความแตกต่างของคลื่นได้ชัดเจน เมื่อระยะห่างพอสมควรจากแหล่งกำเนิดคลื่น อย่างไรก็ตามเมื่อความสั้นสะเทือนมีความถี่สูงอาจไม่สามารถจำแนกคลื่นเรย์ลีได้ เนื่องจากความซับซ้อนของการไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชั้นดินซึ่งมีผลต่อการแพร่กระจาย ดังนั้นคลื่นสั้นสะเทือนจากดินต่างชนิดกันจะทำให้การสั้นสะเทือนแตกต่างกัน (Jones and Stokes, 2004)

แม้ว่าการอธิบายความสั้นสะเทือนจากวัตถุระเบิดจำเป็นต้องพิจารณาทิศการเคลื่อนที่ของอนุภาค ประกอบด้วย ทิศแกนนอน (longitudinal) ทิศแกนตั้งฉาก (horizontal) และทิศแกนตั้ง (vertical) ดังภาพที่ 2-16 และผลลัพธ์ซึ่งได้จากการรวมเวกเตอร์ขององค์ประกอบทั้งสามแกน อย่างไรก็ตามในการตรวจวัดความสั้นสะเทือนอาจใช้ทิศแกนตั้งในการอธิบายความสั้นสะเทือนเนื่องจากจะปรากฏคลื่นสั้นสะเทือนตามผิวดิน ซึ่งแนวแกนตั้งจะเกิดความสั้นสะเทือนมากที่สุด (Hendriks, 2002) และที่สำคัญความสั้นสะเทือนแนวแกนตั้งสามารถใช้เป็นตัวแทนความสั้นสะเทือนจากทิศการเคลื่อนที่ของอนุภาคและยังสามารถทำการตรวจวัดได้ง่ายที่สุด (Jones and Stokes, 2004)



ภาพที่ 2-15 แสดงระบบคลื่นสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิด (Jones and Stokes.2004)

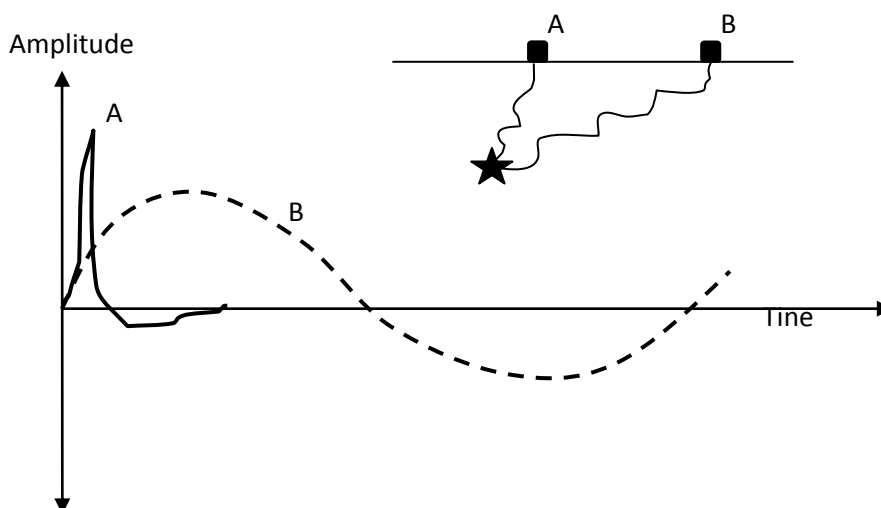


ภาพที่ 2-16 แสดงองค์ประกอบการสั่นสะเทือน (Akeil, 2004)

2.4.2 รูปแบบคลื่นสั่นสะเทือน

การพิจารณาปัญหาที่เกี่ยวข้องกับแรงสั่นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิดซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม ตัวแปรสำคัญที่ต้องคำนึงถึงประกอบด้วย ตัวแปรด้านความเร็วอนุภาคสูงสุด (Peak Particle Velocity) ตัวแปรด้านความถี่การสั่นสะเทือน (Frequency) และตัวแปรด้านขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) ซึ่งตัวแปรที่ได้รับการยอมรับและอธิบายความเสียหายจากการสั่นสะเทือน ได้แก่ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ของการสั่นสะเทือน ทั้งนี้สำหรับการตรวจวัดการสั่นสะเทือนในระยะใกล้ลักษณะคลื่นสั่นสะเทือน จะมีลักษณะเป็นยอดแหลม (Single

spiked pulse) (Dowding,1984) ดังภาพที่ 2-17 อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการตรวจวัดในระยะไกล จากแหล่งกำเนิดรูปแบบของคลื่นสั้นสะเทือนคลื่นจะมีลักษณะเป็นรูปไซน์ (Sinusoidal wave)



ภาพที่ 2-17 แสดงรูปแบบของคลื่นการสั่นสะเทือนจากจุดระเบิดมายังตำแหน่งตรวจวัด : A ตำแหน่งตรวจวัดระยะใกล้ และ B ตำแหน่งตรวจวัดที่ระยะไกล

2.4.3 ความเร็วอนุภาคสูงสุด

ที่ผ่านมา เราศึกษาเกี่ยวกับความเสียหายของโครงสร้างทางวิศวกรรมจากความสั่นสะเทือนของพื้นดินอย่างกว้างขวาง พบว่าค่าความเร็วจะได้รับการยอมรับและใช้บังคับสำหรับการประเมินศักยภาพของโครงสร้างทางวิศวกรรม โดยคลื่นสั้นสะเทือนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางส่งผลให้อนุภาคตัวกลางมีการเคลื่อนที่ ซึ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะกล่าวถึงความสั่นสะเทือน ความเร็วอนุภาคจากการสั่นสะเทือนมีค่าสูงสุดจะเรียกว่าความเร็วอนุภาคสูงสุด หน่วย มิลลิเมตรต่อวินาที หรือ นิ้วต่อนาที ความเร็วคลื่นในการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะเรียกว่าการแพร่กระจายความเร็ว (Propagation velocity) สำหรับชั้นดินเดียวกันการแพร่กระจายความเร็วของคลื่นความสั่นสะเทือนจะมีค่า 0.5 ถึง 0.67 ของคลื่นแรงอัด และคลื่นแรงเฉือนชั้นดินเดียวกันจะมีค่า 0.9 – 0.95 ของคลื่นแรงเฉือน (Dowding,1984) โดยค่าความลึกแปรผันตรงกับค่าการแพร่กระจายความเร็วผ่านตัวกลางจะขึ้นอยู่กับตัวกลางในการเคลื่อนที่ ดังตารางที่ 2-3 และผลจากความแตกต่างของขนาดและรูปร่างของตัวกลาง ช่องว่างของตัวกลาง ของเหลวในตัวกลาง ซึ่งทำให้ตัวกลางแต่ละชนิดมีความหนาแน่นแตกต่างกันส่งผลให้ความเร็วคลื่นมีความแตกต่างกันด้วย ในการตรวจวัด

ความเร็วอนุภาคสูงสุด พบว่า ความเร็วอนุภาคสูงสุดโดยการตรวจวัดจริงในสนามอาจมีค่าสูงกว่าค่าจากการคำนวณทางทฤษฎีประมาณ 1.73 เท่า (Jones & Stokes, 2004)

ตารางที่ 2-3 แสดงความเร็วอนุภาคจากการวัดค่าจริงกับการคำนวณตามทฤษฎีของตัวกลางแตกต่างกัน (Lindsey, 1989)

Blast	Type of Rock	Range of Theoretical Propagation Velocities (ft/sec)	Measured Propagation Velocities (ft/sec)
2	Limestone	4350 - 7550	8900
16	Sandstone	3250 - 5650	8900
17	Sandstone	3250 - 5650	5900
18	Sandstone	3250 - 5650	10200

ความเร็วคลื่นอัด (P-wave) จะมีความสัมพันธ์กับค่าแรงดันรอบข้าง (Confining pressure) กล่าวคือถ้าความเร็วเพิ่มสูงขึ้นค่าแรงดันจะสูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งความเร็วคลื่นอัดในชั้นทรายและชั้นดินตามความเร็วคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกและระยะเวลาการอัดตัวและการเชื่อมประสานกันของชั้นหิน ส่วนความเร็วคลื่นอัดในชั้นหินตะกอนจะเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของชั้นหิน อัตราส่วนปัวซองและอัตราส่วนระหว่างความเร็วคลื่นอัดกับความเร็วคลื่นเฉือนมีค่าลดลง

2.4.4 ความถี่การสั่นสะเทือน

ความรุนแรงจากความสั่นสะเทือนของพื้นดินไม่สามารถบ่งบอกได้ด้วยค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดเพียงอย่างเดียว ตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องได้แก่ ค่าความถี่หลัก (Predominant frequency) จากความสั่นสะเทือนของพื้นดิน ค่าความถี่ แสดงถึงจำนวนรอบการสั่นสะเทือนใน 1 วินาที (หน่วย Hz) ความถี่จากการใช้วัตถุระเบิดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-200 Hz ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติ ของวัสดุธรรมชาติ ดังตารางที่ 2-4 และค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างทางวิศวกรรมมีค่าระหว่าง 4-12 Hz (Akiel, 2004) อย่างไรก็ตาม การสั่นสะเทือนค่าความถี่ต่ำจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมมากกว่าค่าความถี่สูง เนื่องจากการขยายตัวและมีระยะเวลาการเคลื่อนตัวมากกว่า นอกจากนี้ความหนาแน่นดินและระยะทางมากจะทำให้เกิดคลื่นต่อเนื่องมีระยะเวลานานและความถี่ต่ำซึ่งจะเพิ่มการกระตุ้นให้โครงสร้างเกิดความเสียหายในพื้นที่ใกล้เคียง

ตารางที่ 2-4 แสดงแสดงค่าความถี่ธรรมชาติของวัสดุธรรมชาติ (Liu et.al,1979)

วัสดุธรรมชาติ	ค่าความถี่ธรรมชาติของวัสดุ (Hz)
ดินปนทราย,peat,loose alluvium	5-10
ดินเหนียว (อ่อน,แข็ง)	15-25
ทราย	30-40
หิน	40-90

Siskind et al. (1980) ทำการศึกษาและสรุปผลการศึกษา สำหรับการอธิบายความสัมพันธ์ของพื้นดินสรุปได้ดังนี้ ปัจจัยจากค่าความถี่ (frequency) ขนาดคลื่น (Amplitude) ระยะเวลา (Duration) ส่งผลต่อการแพร่กระจายความสัมพันธ์ ดังนี้

- ผลจากความแตกต่างทางธรณีวิทยากับชั้นดินที่เชื่อมต่อกับโครงสร้าง
- การแพร่กระจายแบบคลื่นต่อเนื่องการกระจายตัวออกไป
- เมื่อค่าความถี่สูงจะมีการดูดซับคลื่นมากขึ้น

แม้ว่าการประมาณค่าความเร็วอนุภาคจากพลังงานการสั่นสะเทือนคงค้างจากชั้นวัสดุหนึ่งไปยังชั้นวัสดุถัดไป (ชั้นดินไปยังชั้นหิน) พบว่า ค่าความถี่การสั่นสะเทือนและผลของระยะการเคลื่อนที่และขนาดความเร่งจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของชั้นตัวกลางในการแพร่กระจาย ความหนาแน่นตัวกลางมากและมีระยะทางที่แน่นอนจะทำให้เวลาการสั่นสะเทือนยาวนานและเกิดคลื่นความถี่ต่ำอย่างต่อเนื่องซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มผลกระทบต่อโครงสร้างบริเวณใกล้เคียง

คุณสมบัติของความถี่การสั่นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านความแข็งแรงของชั้นตัวกลางเป็นหลัก โดยตัวกลางที่เป็นชั้นหินซึ่งจะยกเว้นสำหรับระยะทางใกล้ๆ เนื่องจากความยากในการทำนายและมีความแตกต่างกันของชั้นหิน

2.4.5 ขนาดความสัมพันธ์ (Amplitude)

การประเมินขนาดความสัมพันธ์หรือความสูงคลื่นสั่นสะเทือนซึ่งแสดงถึงความรุนแรงของความสัมพันธ์ถือได้ว่าเป็นทฤษฎีเก่า และไม่สามารถนำไปใช้ได้กับการระเบิดที่มีความซับซ้อนอย่างไรในปัจจุบัน ในการประเมินค่าความปลอดภัยจากขนาดความสัมพันธ์จากการใช้วัตถุระเบิดจำเป็นต้องกำหนดน้ำหนักวัตถุระเบิดก่อนการระเบิดทุกครั้งและทำการติดตั้งเครื่องตรวจวัดในสนาม ณ ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างทางวิศวกรรมที่อยู่ใกล้เคียงที่สุด โดยข้อกำหนด

ขนาดคลื่นสั้นสะเทือนไว้สำหรับอาคารก่อสร้างต่างๆ ดังตารางที่ 2-5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดคลื่นสั้นสะเทือนจากการระเบิด ได้แก่ระยะทาง น้ำหนักวัตถุระเบิดและสภาพทางธรณีวิทยาของพื้นที่

ตารางที่ 2-5 แสดงมาตรฐานขนาดคลื่นสั้นสะเทือนที่ปลอดภัย (ฉบับ บัณฑิต, 2523)

ชนิดของอาคารก่อสร้าง	ขนาดคลื่นสั้นสะเทือนสูงสุด(มม)
โบราณสถานที่ยังคงมีคุณค่าสูง	0.1
บ้านที่มีสภาพทรุดโทรม อนุสาวรีย์	0.2
อาคารที่พักอาศัยที่อยู่ใกล้กัน	
อาคารที่พักอาศัยที่อยู่โดดเดี่ยว	0.4
โครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา	0.76

ในอดีตได้มีการศึกษาเกี่ยวกับความสั้นสะเทือนจากวัตถุระเบิดและสามารถหาสมการขนาดคลื่นสั้นสะเทือนสำหรับการประเมินผลกระทบ (สภาวิศวกร, 2552) ดังนี้

$$A = \frac{KE^{\frac{1}{3}}}{d} \quad (2.1)$$

เมื่อ A = ขนาดคลื่นสั้นสะเทือน

E = น้ำหนักวัตถุระเบิด

d = ระยะห่างระหว่างจุดที่ระเบิดกับจุดที่วัดหาค่าความสูงของคลื่น สั้นสะเทือน

k = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับสภาพของดินหินและสภาพแวดล้อมของ บริเวณนั้น

หมายเหตุ * จากสมการหาขนาดของคลื่นจะใช้ได้เมื่อระยะห่างระหว่างจุดวัดความสูงคลื่นกับระยะจุดระเบิดมีค่ามากกว่า 35 เมตร ค่า K แสดงดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 แสดงค่า K สำหรับสมการขนาดคลื่นสั้นสะเทือน (สภาวิศวรร, 2552)

สภาพพื้นที่ที่จุดระเบิด	สภาพพื้นที่ที่ตั้งอาคาร	ค่า K
หิน	ดิน	0.57 - 1.15
หิน	หิน	1.15 - 2.30
ดิน	ดิน	1.15 - 2.30
ดิน	หิน	2.30 - 3.40

2.4.6 การลดทอนคลื่นสั้นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิด

การส่งผ่านคลื่นสั้นสะเทือนซึ่งเดินทางผ่านตัวกลางซึ่งประกอบด้วยคลื่นในตัวกลาง (Body wave) และคลื่นผิว (Surface wave) ซึ่งพลังงานการสั้นสะเทือนที่ส่งผ่านไปในตัวกลางจะมีค่าลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นซึ่งเรียกว่า ค่าการลดทอนคลื่น (Attenuation) สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎี Seismic Wave Energy (Telford et al. 1990) ดังสมการ

$$E = E_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\gamma} \exp\left(-\alpha(r-r_0)\right) \quad (2.2)$$

โดยที่ E_0 และ E คือพลังงานคลื่นสั้นสะเทือนที่ระยะ r_0 และ r จากแหล่งกำเนิด α คือค่าสัมประสิทธิ์ การลดทอนคลื่น (Attenuation coefficient) และ γ คือสัมประสิทธิ์การคลื่น (Geometrical attenuation coefficient) โดยที่ γ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของคลื่นการสั้นสะเทือนซึ่งประกอบด้วยคลื่นในตัวกลาง (Body wave) มีค่าเท่ากับ 2 และคลื่นผิว (Surface wave) มีค่าเท่ากับ 1 (Santamarina et al. 2001) อย่างไรก็ตาม Tripathy and Gupta (2002) ได้พัฒนาสมการให้มีความสอดคล้องกับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัตถุระเบิด ในการพัฒนาโดยการเปลี่ยนค่าพลังงานเริ่มต้น (E_0) เป็นน้ำหนักวัตถุระเบิด และ ระยะ r_0 สมการที่แก้ไขดังสมการ

$$\frac{V}{P} = KQ^m R^{-n} \exp(-\alpha R) \quad (2.3)$$

โดยที่ Q = น้ำหนักวัตถุระเบิด (กิโลกรัม, kg)

R = ระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นถึงตำแหน่งที่ตรวจวัด (เมตร, m)

V_p = ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (Peak particle velocity) ที่ระยะ R (มม/วินาที) และ m และ n ค่าคงที่

จากการศึกษาพบว่าค่า α มีผลต่อการลดทอนคลื่น (Attenuation) ซึ่งจะมีผลเมื่อระยะการตรวจวัดมีระยะห่างมากๆ ซึ่งระยะดังกล่าวคลื่นสั่นสะเทือนจากการระเบิดจะไม่พบการสั่นสะเทือน หรือมีเพียงเล็กน้อยไม่ส่งผลกระทบต่อจึงไม่นำตัวแปรดังกล่าวมาพิจารณาและได้ทำการจัดรูปสมการใหม่แสดงค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดดังสมการ

$$V_p = K \left(\frac{R}{Q^s} \right)^{-n} \quad (2.4)$$

หรือ

$$\log V_p = \log K - n \log \left(\frac{R}{Q^s} \right) \quad (2.5)$$

โดยที่ค่า $s = m/n$ หรือเรียกอีกอย่างว่า กฎมาตราส่วน Square root, Cube root และ Two-third root โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.5, 0.33 และ 0.66 ซึ่งทฤษฎีทั้งสามมีข้อแตกต่างกันตามลักษณะการทำนายการสั่นสะเทือน ดังนี้ ทฤษฎี Cube root พบว่าค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) จะมีค่าสูงเกินไป ขณะที่ทฤษฎี Two-third root พบว่าการทำนายผลกระทบที่ระยะทางจากแหล่งกำเนิดมีค่าไม่มากนัก ส่วนทฤษฎี Square root ได้สร้างขึ้นตามสมมติฐานของ Siskind et al. (1980) ที่ว่าวัตถุระเบิดรูปทรงกระบอกที่ติดตั้งและถูกจำกัดในหลุมเจาะที่ระดับต่างๆ ซึ่งสำหรับการศึกษาผลกระทบจากการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ การใช้ทฤษฎี Square root จึงเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

อย่างไรก็ตามการใช้ทฤษฎีต่างๆ สำหรับการทำนายผลการสั่นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิด ซึ่งข้อจำกัดของการทำนายผลจำเป็นต้องกำหนดตัวแปรมาตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับนำไปประกอบกับค่าน้ำหนักวัตถุระเบิดในการแก้ปัญหา ได้มีพัฒนาารูปแบบสมการข้าง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression) ดังสมการ

$$\log V_p = \log K - n \log \left(\frac{R}{Q^s} \right) = \log K - n \log R + n' s \log Q = \log K - n \log R + m \log Q \quad (2.6)$$

ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression) จะสามารถทำนายผลการสั่นสะเทือนอย่างมีประสิทธิภาพแต่ไม่สามารถทำนายผลที่มีขนาดใหญ่ได้จึงไม่เป็นที่ยอมรับมากนัก

โดยการทำนายผลการสิ้นสระเพื่อนปัจจุบันนิยมใช้ทฤษฎี Square root หรือทฤษฎี Cube root สำหรับการศึกษากการแพร่กระจายคลื่นสิ้นสระเพื่อนที่เกิดจากการใช้วัตตระเบิด

2.4.7 อัตราส่วนระยะทาง (Scale Distance)

อัตราส่วนระยะทางซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจากการระเบิดกับความสิ้นสระเพื่อนของพื้นดิน ซึ่งเป็นการรวมกันของน้ำหนักระเบิดกับระยะทางที่มีอิทธิพลต่อการเกิดพลังงานคลื่นสิ้นสระเพื่อน โดยทั่วไปค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดจะใช้อธิบายถึงความสิ้นสระเพื่อนของโครงสร้างทางวิศวกรรม สำหรับความ ต้านทานความเสียหายขณะเกิดการระเบิด การศึกษาความชัดเจนจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) กับน้ำหนักวัตตระเบิด (Q) และระยะทาง (R) (Persson et al.,1994)

$$PPV = \left[\frac{K}{R} \right] \alpha \quad (2.7)$$

สมการข้างต้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยจากค่าคงที่ K, α ซึ่งขึ้นกับพื้นที่สำรวจ ค่า R แสดงระยะทางจากจุดระเบิด ค่า Q แสดงน้ำหนักวัตตระเบิด ค่า $\frac{R}{\sqrt{Q}}$ แสดงอัตราส่วนระยะทาง ในการหาค่าคงที่ K, α จากกราฟ log โดยการพล็อตระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าอัตราส่วนระยะทาง ซึ่งกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าความชันติดลบ ค่า α แสดงค่าการลดทอนความเร็วอนุภาคสูงสุด ซึ่งหาได้ความชันจากกราฟ ค่า K แสดงค่าของแกน Y ซึ่งมีค่าอัตราส่วนระยะทางเท่ากับ 1

โดยชั้นหินและชั้นดินตามธรรมชาติทั่วไปเมื่อระยะทางจากการระเบิดเพิ่มมากขึ้น ความสิ้นสระเพื่อนจะมีค่าลดลง จากการศึกษาและทำการตรวจวัดความสิ้นสระเพื่อนสามารถสรุปค่าระยะทางที่ปลอดภัยกับค่าน้ำหนักวัตตระเบิด ดังตารางที่ 2-7 และนำเสนออัตราส่วนระยะทางดังนี้

$$\left[\frac{R}{\sqrt{Q}} \right] \geq 20 \quad \text{สำหรับการตรวจวัดความสิ้นสระเพื่อน ฟุต ต่อ ปอนด์}$$

$$\left[\frac{R}{\sqrt{Q}} \right] \geq 50 \quad \text{สำหรับไม่มีการตรวจวัดความสิ้นสระเพื่อน ฟุต ต่อ ปอนด์}$$

ตารางที่ 2-7 แสดงสรุปค่าระยะทางที่ปลอดภัยกับปริมาณน้ำหนักรั่วระเบิด (กรมทรัพยากรธรณี, กองการเหมืองแร่, 2527)

ระยะทางที่ปลอดภัย (ft)	ปริมาณน้ำหนักรั่วระเบิด (lb)	
	$\left[\frac{R}{\sqrt{Q}}\right] \geq 50$	$\left[\frac{R}{\sqrt{Q}}\right] \geq 20$
100	4	25
500	100	625
1,000	600	2,500
2,000	1,600	10,000

การควบคุมผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากความสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการใช้วัตถุระเบิด โดยทางสำนัก การเหมืองแร่ผิวดินสหรัฐอเมริกา (The United States Office of Surface Mining:OSM) ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนระยะทางจากการใช้วัตถุระเบิด ซึ่งค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) ที่ได้จากการกำหนดอัตราส่วนระยะทางนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม ดังตารางที่ 2-8 การควบคุมด้วยวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องตรวจวัดความสั่นสะเทือน

ตารางที่ 2-8 แสดงค่าระยะทางและอัตราส่วนระยะทางกำหนดโดย OSM (กรมทรัพยากรธรณี, กองการเหมืองแร่, 2527)

ระยะทางจาก ตำแหน่งวัตถุ ระเบิด(ft)	อัตราส่วนระยะทาง $\left[\frac{R}{\sqrt{Q}}\right]$ b/ft) (Scale Distance to be use without seismic monitoring)	ความเร็วอนุภาค สูงสุดที่ยอมรับได้ (in/sec)
0-300	50	1.25
300-5000	55	1.00
5001 ขึ้นไป	65	0.75

2.4.8 การทำนายความสั่นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิด

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำนายความสั่นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิดและพัฒนาทฤษฎีสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล จากการทดสอบ ซึ่งความสัมพันธ์ของพลังงานความสั่นสะเทือนที่ปลดปล่อยออกมาจะถูกพิจารณาสัดส่วนค่ารากที่สองของน้ำหนักรั่วระเบิด

การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นสั้นสะท้อนซึ่งแสดงถึงขนาดการเคลื่อนที่ของอนุภาค การระเบิดควรจะมีสัดส่วนการเทียบเคียงกับระยะทาง ซึ่งระยะทาง จะถูกปรับทอนด้วยค่ารากที่สองของน้ำหนักวัตูระเบิด ซึ่งการทำนายขนาดคลื่นสั้นสะท้อนสภาพวิศวกรรมได้กำหนดสมการ ดังนี้

$$A = K \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{d} \quad (2.8)$$

เมื่อ A คือขนาดของคลื่นไหวสะเทือน* (มิลลิเมตร)

Q คือปริมาณน้ำหนักวัตูระเบิด (กิโลกรัม)

K คือค่าคงที่ของสภาพดินและหิน

d คือระยะห่างจากจุดระเบิด(เมตร)

หมายเหตุ* จากสมการหาขนาดของคลื่นจะใช้ได้เมื่อระยะห่างระหว่างจุดวัดความสูงคลื่นกับระยะจุดระเบิดมีค่ามากกว่า 35 เมตร ค่า K ดังตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-9 แสดงค่า K สำหรับสมการข้างต้น (สภาวิศวกร, 2552)

สภาพพื้นที่ที่จุดระเบิด	สภาพพื้นที่ที่ตั้งอาคาร	ค่า K
หิน	ดิน	0.57 - 1.15
หิน	หิน	1.15 - 2.30
ดิน	ดิน	1.15 - 2.30
ดิน	หิน	2.30 - 3.40

สำหรับแนวคิดการทำนาย ความสั้นสะท้อนของพื้นดินจากวัตูระเบิดจะใช้ความเร็วอนุภาคสูงสุดซึ่งมีผู้ทำการศึกษา ดังนี้

(1) United State Bureau of Mines (USBM) (Mohamed)

ได้มีผู้ร่วมทำการศึกษามากมาย อาทิ Duvall and Petkof (1959), Duvall and Fogelson (1962), Duvall et al (1963), Sinkin et al (1980), Daemen (1983) โดยใช้อัตราส่วน ค่ารากที่สองของน้ำหนักวัตูระเบิด ซึ่งสมการการทำนายของ USBM มีดังนี้

$$PPV = K \left[\frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}} \right]^{-B} \quad (2.9)$$

เมื่อ PPV = ความเร็วอนุภาคสูงสุด (mm/s)
 R = ระยะห่างจากจุดระเบิด (m)
 Q = น้ำหนักวัตถุระเบิด (kg)
 K = ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับพื้นที่การระเบิด

(2) Langefors และ Khilstrom (1963) (Mohamed)

Langefors และคณะ (1958) และ Langefors and Khilstrom, (1963) ได้เสนอตามความสัมพันธ์สำหรับแปรเปลี่ยนน้ำหนักวัตถุระเบิด ดังสมการ

$$PPV = K \left[\left(\frac{Q}{R^3} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^B \quad (2.10)$$

(3) Ambraseys และ Hendron (1968) (Mohamed)

ได้นำเสนอสัดส่วนรากที่สามของน้ำหนักวัตถุระเบิดที่มีรูปร่างกลมและพบว่าค่ายกกำลังมีค่าผกผันกับความสัมพันธ์ของขนาดคลื่นสั้นสะท้อนและสัดส่วนระยะทาง ดังสมการ

$$PPV = K \left[\left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}} \right) \right]^{-B} \quad (2.11)$$

(4) Indian Standard Predictor (1973) (Mohamed)

พบว่าวัตถุระเบิดควรจะปรับระยะให้เทียบเท่ากับระยะทางหรืออัตราส่วนระยะทาง สำหรับการกำหนดน้ำหนักวัตถุระเบิดโดยการแบ่งส่วนตามระยะทางจริง ดังสมการ

$$PPV = K \left[\left(\frac{Q}{R^3} \right) \right]^B \quad (2.12)$$

(5) การทำนายโดยใช้สมการเชิงประสพการณ์ (1964) (Mohamed)

การนำเสนอเกี่ยวกับสมการการทำนายเชิงประสพการณ์เกี่ยวกับการสั้นสะท้อนจากการใช้วัตถุระเบิดอย่างมากมาย อาทิ Davies et al 1964; Attewell, 1964; Birch and Chaffer, 1983 เป็นต้น โดยการพิจารณาจากน้ำหนักวัตถุระเบิด ดังสมการ

$$PPV = KR^{-B}Q^A \quad (2.13)$$

เมื่อ PPV=ความเร็วอนุภาคสูงสุด (mm/s)
 R=ระยะห่างจากจุดระเบิด (m)
 Q=น้ำหนักวัตถุระเบิด (kg)
 K, A, B=ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับพื้นที่การระเบิด

(6) Ghosh และ Daemon (1983) (Mohamed)

ได้นำเสนอความไม่ยืดหยุ่นที่มีความหลากหลายที่ส่งผลทำให้สูญเสียพลังงานขณะมีการแพร่กระจายคลื่นสั่นสะเทือนในตัวกลางที่มีความหลากหลาย ซึ่ง ผลจากความไม่ยืดหยุ่นนำไปสู่การลดขนาดคลื่นสั่นสะเทือน โดยการเพิ่มปัจจัยความไม่ยืดหยุ่น (α) ในสมการของ USBM ดังสมการ

$$\text{Gh-Dae1} \quad PPV = K \left[\frac{R}{Q^{1/3}} \right]^{-B} e^{-\alpha R} \quad (2.14)$$

$$\text{Gh-Dae2} \quad PPV = K \left[\frac{R}{Q^{1/3}} \right]^{-B} e^{-\alpha R} \quad (2.15)$$

เมื่อ K, B, α =ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับพื้นที่การระเบิด

(7) Central of Mining Research Institute (1993) (Mohamed)

ได้นำเสนอสมการการทำนายโดยการรวบรวมข้อมูลที่มีความแตกต่างสภาพธรณีของเหมืองแร่ในประเทศอินเดีย สมการที่ได้จะมีความเหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่ได้รับความสั่นสะเทือนดังสมการ

$$PPV = n + K \left[\frac{R}{(Q^{1/3})} \right]^{-1} \quad (2.15)$$

(8). Toomik และ Tomberg (1999) (Mohamed)

ได้ทำการศึกษาผลของความลึกของระเบิดกับแรงสั่นสะเทือนในงานทำเหมืองแร่ ความลึกที่ระเบิดอยู่ระหว่าง 20-50 เมตรจากผิวดิน น้ำหนักระเบิดที่ใช้ 3.6 – 36 กิโลกรัม และพบว่าค่า

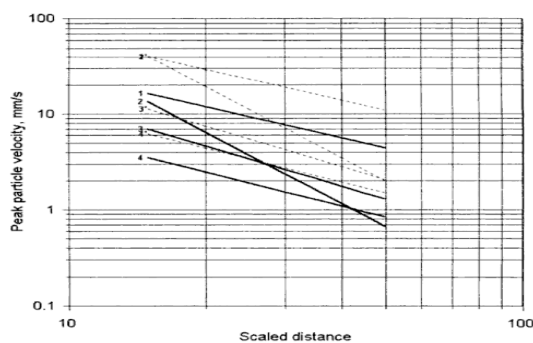
ความเร็วอนุภาคสูงสุดจะลดลงตามความลึกของระเบิดและได้เสนอสมการในการประมาณค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อวินาทีดังสมการ

$$PPV = AH^B - 50 \quad (2.16)$$

เมื่อ H คือความลึกหลุมระเบิดหน่วยเป็นเมตร

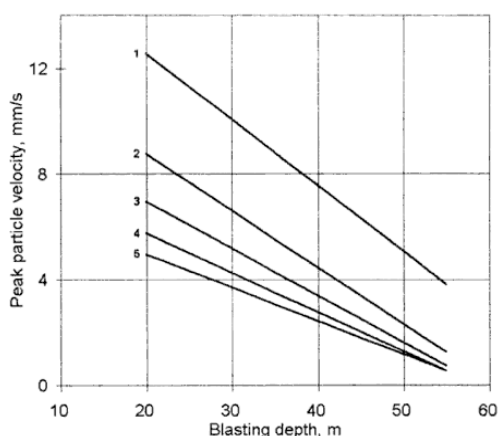
$$A = 149.48e^{-0.01306d} \quad (2.17)$$

$$B = 0.0029d - 0.1746 \quad (2.18)$$



Variation of peak particle velocities depending on scaled distances according to experimental data: 1, 2, 3, and 4 - for blasting depths 20, 37, 48, and 51 m, respectively, statistical with 95 % upper confidence lines 1', 2', 3', and 4'

ภาพที่ 2-18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับ Scaled Distance ที่ความลึกต่างๆ



Variation of peak particle velocities depending on blasting depth: 1, 2, 3, 4, and 5 - scaled distances 20, 25, 30, 35, and 40 $m \cdot kg^{-0.5}$, respectively

ภาพที่ 2-19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความลึกที่ Scale distance ต่างๆ

(9) Hossaini, S. M. และ Sen, G. C (2006) (Mohamed)

ได้ทำการวิจัยโดยวิเคราะห์ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดเมื่อใช้ระเบิดชนิด ANFO และ Slurry ที่อยู่ในรูปแบบ Scale distance และสมการลดทอนได้สมการดังนี้สำหรับ ANFO

สำหรับ ANFO

$$PPV = 1269.9[SD]^{-1.6628} \quad (2.19)$$

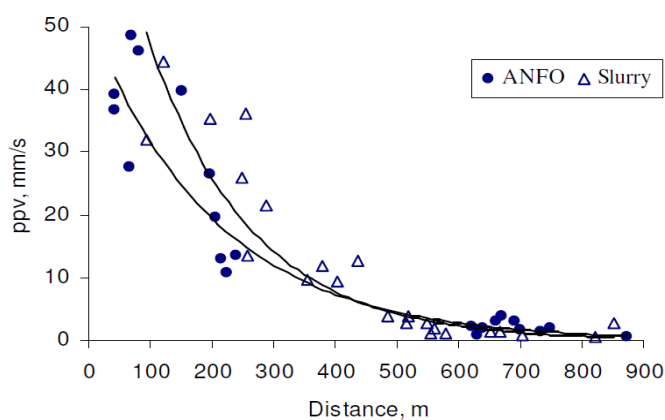
$$PPV = 51.538e^{-0.0049d} \quad (2.20)$$

สำหรับ Slurry

$$PPV = 2239.3[SD]^{-1.838} \quad (2.21)$$

$$PPV = 86.119e^{-0.006d} \quad (2.22)$$

เมื่อนำค่าอนุภาคสูงสุดของระเบิดแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบดัง ภาพที่ 2-21 พบว่าชนิดของระเบิดมีผลกับแรงสั่นสะเทือน ที่ระยะใกล้ๆ กับหลุมระเบิดค่าแรงสั่นสะเทือนของ Slurry มากกว่า ANFO แต่ที่ระยะไกลๆ ค่าแรงสั่นสะเทือนมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 2-20 แสดงแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดของระเบิดแบบ ANFO และ Slurry

(10) Giraudi et al (2009)

ได้ทำการปรับแก้สมการความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) โดยขึ้นอยู่กับความเร็วของการระเบิด (Velocity of Detonation: VOD หน่วยเมตร วินาที⁻¹)

$$PPV = K \left[\frac{2d^2VOD^{\frac{1}{2}}}{Nl\phi(\pi\rho_e)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (2.22)$$

เมื่อ	N	คือจำนวนแท่งของวัตถุระเบิดในหลุมระเบิด
	l	คือความยาวของแท่งวัตถุระเบิด หน่วย มิลลิเมตร
	ϕ	คือเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแท่งวัตถุระเบิด หน่วย มิลลิเมตร
	ρ_e	คือความหนาแน่นของวัตถุระเบิด หน่วย กิโลกรัม ต่อลบ.ม
	d	คือระยะระหว่างศูนย์กลางของวัตถุระเบิดถึงจุดสังเกต หน่วย เมตร
	K	คือค่าคงที่ของสภาพดิน ขึ้นกับการวัดค่าในสนาม

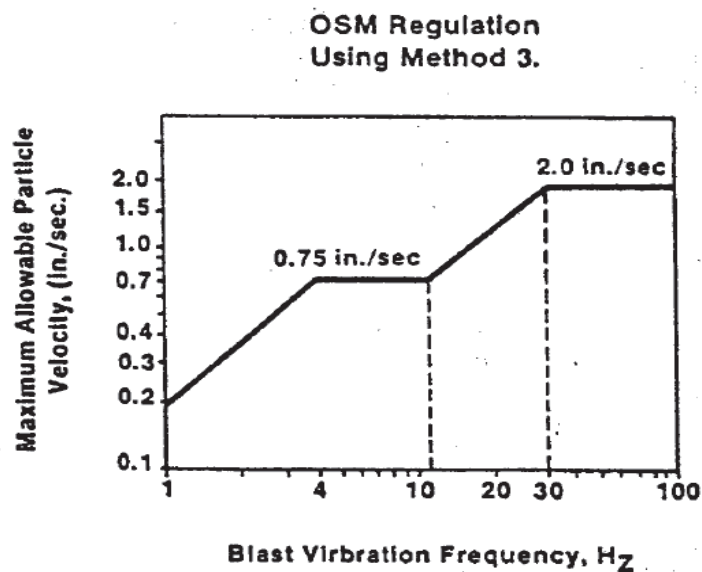
2.4.9 มาตรฐานความสั่นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิด

การกำหนดแนวทางการป้องกันหรือเกณฑ์มาตรฐานความสั่นสะเทือนปลอดภัยซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมเกิดความเสียหาย ซึ่งสำนักงานเหมืองแร่ ผิวดิน สหรัฐอเมริกา(The United States Office of Surface Mining: OSM) ได้ทำการกำหนดแนวทางการป้องกันความเสียหายจากความสั่นสะเทือนของพื้นดิน ดังนี้

1. วิธีการจำกัดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (Limiting particle velocity criterion) โดยการวัดความเร็วอนุภาคสูงสุดจาก ตำแหน่งวัตถุระเบิดกับโครงสร้างทางวิศวกรรมที่ใกล้ที่สุด ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ยอมรับได้จากการตรวจวัดต้องมีค่าไม่เกินที่กำหนด ดังตารางที่ 2-8

2. วิธีการจำกัดอัตราส่วนระยะทางต่อน้ำหนักวัตถุระเบิด (Scaled distance equation criterion) โดยการกำหนดอัตราส่วนระยะทาง ดังตารางที่ 2-8 ซึ่งค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดจะไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม และไม่ต้องทำการตรวจวัดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดแต่ต้องมีการออกแบบการระเบิด

3. วิธีการใช้กราฟความสั่นสะเทือน (Blast level chart criterion) โดยการใช้ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ ซึ่งจำเป็นต้องมีการตรวจวัดข้อมูลด้านความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่จากการระเบิดและสร้างความสัมพันธ์โดยไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมตามข้อกำหนด OSM ดังภาพที่ 2-21



ภาพที่ 2-21 แสดงกราฟความสั่นสะเทือน โดย OSM

นอกจากนี้ยังมีหน่วยงานต่างๆ ในหลายประเทศได้ทำการศึกษาและเก็บข้อมูลเพื่อที่จะสามารถอธิบายรายละเอียดของความสั่นสะเทือน แนวทางการควบคุมความสั่นสะเทือนภายใต้ข้อกำหนดค่าความถี่และค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด ซึ่งในแต่ละมาตรฐานมีข้อกำหนดความสั่นสะเทือนจะมีความแตกต่างกัน ดังนี้

2.4.9.1 เกณฑ์ความเสียหายจากพลังงานสั่นสะเทือน

(1) Rockwell's Energy, (1934) (Akeil,2004 อ้างอิงจาก Kahrman, 2001b)

โดยการพิจารณาตัวแปรด้านความถี่กับขนาดความสั่นสะเทือน ดังสมการ ในการประมาณความเสียหายของโครงสร้างทางวิศวกรรม

$$E = \left(\frac{f}{A}\right)^2 \quad (2.23)$$

(2) USBM, (1942) (Akeil,2004 อ้างอิงจาก Kahrman, 2001b)

โดยการพิจารณาเกณฑ์ที่เกิดการระเบิดส่งผลให้พื้นดินมีความสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับปัจจัยจากน้ำหนักวัตถุระเบิด ขนาดความสั่นสะเทือนและระยะทาง

(3) Crandell's Energy Ratio,(1949) (Akeil, 2004)

โดยการพัฒนาแนวคิดค่าอัตราส่วนพลังงาน ซึ่งกำหนดค่าอัตราส่วนของค่าความเร่งกับค่าความถี่ ดังสมการ เกณฑ์ความเสียหายขึ้นอยู่กับ การตรวจสอบก่อนและหลังจากการระเบิดและได้นำเสนอค่าอัตราส่วนพลังงาน(ER) มีค่าต่ำกว่า 3 จะไม่เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม

$$ER = \left(\frac{A}{f}\right)^2 \quad (2.24)$$

2.4.9.2 เกณฑ์ความเสียหายจากค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด

(1) Langefors et al, (1958) ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างความสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการใช้วัตถุระเบิดกับความเสียหายของโครงสร้างระหว่างการซ่อมแซม พบว่า ค่าความถี่จากการตรวจวัดช่วง 50 ถึง 500 Hz และขนาดคลื่นสั่นสะเทือน 0.02 ถึง 0.5 สรุปได้ว่าค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดเป็นแนวคิดที่ดีที่สุดสำหรับความเสียหายต่อโครงสร้าง และสรุปค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด ดังตารางที่ 2-10

ตารางที่ 2-10 แสดงเกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความเสียหาย Langefors et al, 1958 (Mohamed, 2010)

ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด(นิ้ว/วินาที)	ความเสียหาย
2.8	ไม่เกิดความเสียหาย
4.3	พบรอยแตกของผนังเล็กน้อย
6.3	เกิดรอยแตกของอิฐ
9.1	เกิดความเสียหายมาก

(2) Edwards Northwood's, (1960) โดยเกณฑ์นี้จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่มีช่วง 3-30 Hz และขนาดคลื่นสั่นสะเทือน ช่วง 0.25-9 mm ซึ่งสรุปความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดมากกว่าระยะการเคลื่อนที่หรือค่าความเร่งและความเสียหายเล็กน้อยมีแนวโน้มจะเกิดขึ้นจากค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ 100-125 mm/s ดังตารางที่ 2-11

ตารางที่ 2-11 แสดงเกณฑ์ความเสียหายจากความสั่นสะเทือนของ Edwards Northwood's, 1960

ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด(นิ้ว/วินาที)	ความเสียหาย
≤ 2	ไม่เกิดความเสียหาย
2.4	ระมัดระวัง
> 4	เกิดความเสียหาย

(3) USBM's,(1971) ได้กำหนดเกณฑ์ความเสียหายจากค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดมีค่าน้อยกว่า 2 in/sec ส่งผลให้ความเสียหายของโครงสร้างเล็กน้อย ดังตารางที่ 2-12

ตารางที่ 2-12 แสดงเกณฑ์ความเสียหายจากค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดของ USBM's 1971

ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด(นิ้ว/วินาที)	ความเสียหาย
≤ 2	ไม่เกิดความเสียหาย
2.0-2.4	ผนังเกิดรอยแตก
4.0-7.0	เกิดความเสียหายเล็กน้อย
> 7	เกิดความเสียหายมาก

(4) Indian Standard Institute,(1973) ได้กำหนดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดและชนิดตัวกลาง ดังตารางที่ 2-13

ตารางที่ 2-13 แสดงเกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดในตัวกลางของ Indian Standard Institute,(1973)

ตัวกลางการเคลื่อนที่	ความเร็วอนุภาคสูงสุด (mm/s)
ชั้นดินต่างๆ	70 mm/s
ชั้นหินต่างๆ	100 mm/s

(5) Bauer และ Calder's, (1977) ได้กำหนดเกณฑ์โดยพิจารณาความเร็วอนุภาคสูงสุดที่เชื่อมต่อกับส่วนประกอบของโครงสร้างและชนิดของความเสียหาย ดังตารางที่ 2-14 และพบว่าค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดต่ำกว่า 0.5 mm/s จะไม่เกิดความเสียหาย

ตารางที่ 2-14 แสดงเกณฑ์ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ส่งผลต่อความเสียหายของโครงสร้างแบบต่างๆ (Mohamed, 2010)

Type of structure	Type of damage	Particle velocity at which damage starts
Rigidity mounted mercury switches	Trip out	0.5 in/sec
Houses	Plaster cracking	2 in/sec
Concrete blocks in a new home	Cracks in block	8 in/sec
Cased drill holes	Horizontal offset	15 in/sec
Mechanical equipment pumps compressors	Shafts misaligned	40 in/sec
Prefabricated metal building on concrete pads	Cracked pads building twisted and distorted	60 in/sec

2.4.9.3 เกณฑ์ความเสียหายจากค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ความสั่นสะเทือน

(1) Langefors and Kihlstrom's, (1967) ได้กำหนดเกณฑ์จากผลของความถี่อนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ ดังตารางที่ 2-15

ตารางที่ 2-15 แสดงเกณฑ์กำหนดความถี่ความสั่นสะเทือนของ Langefors และ Kihlstrom's (Akeil, 2004)

Damage Effects	Peak Particle Velocity					
	Sand, gravel, clay below water level; c=1,000-1,500 m/sec ¹		Moraine, slate, or soft limestone; c=2,000-3,000 m/sec		Granite, hard limestone, diabase c=4,500-6,000 m/sec	
	mm/sec	in/sec	mm/sec	in/sec	mm/sec	in/sec
No noticeable crack formation	18	0.71	35	1.4	70	2.8
Fine cracks & falling plaster...	30	1.2	55	2.2	100	3.9
Crack formation.....	40	1.6	80	3.2	150	5.9
Severe crack.....	60	2.4	115	4.5	225	8.9

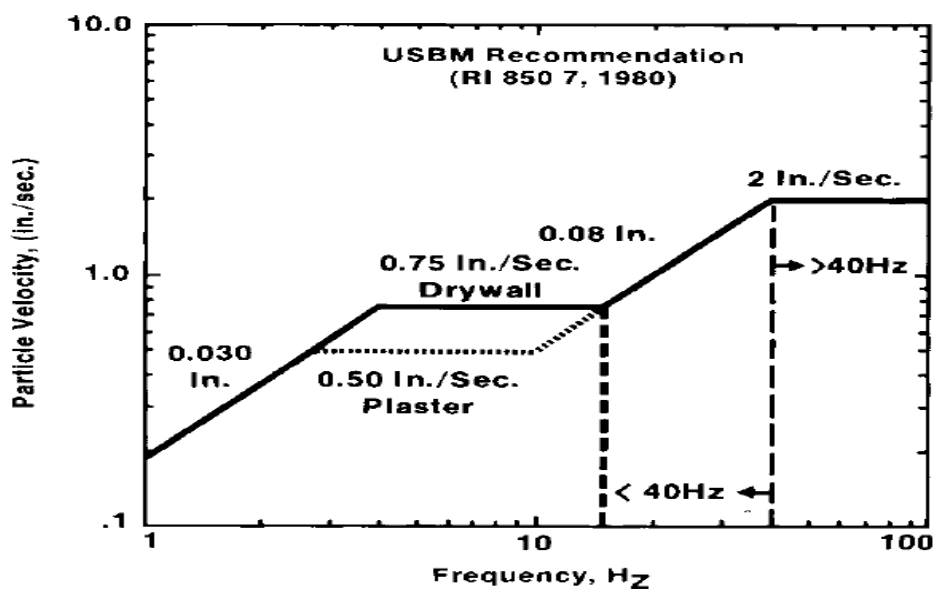
เมื่อค่า c คือค่าการแพร่กระจายความเร็ว

(2) Medearis, (1976) ได้ระบุความเสียหายจากความถี่ความสั่นสะเทือนของพื้นดินขึ้นอยู่กับปัจจัยค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่หลัก

(3) USBM, (1980) ได้กำหนดเกณฑ์ความปลอดภัยของโครงสร้างจากการความเสียหายของสั่นสะเทือน ดังตารางที่ 2-16 และภาพที่ 2-20 ระดับความสั่นสะเทือนจากการระเบิดช่วง 0.5 - 2.0 in/sec ซึ่งมีค่าความถี่ 2 ช่วง ซึ่งค่าความถี่ที่มีความชัดเจนที่ 40 Hz และใช้พิจารณาแบ่งช่วงความถี่ โดยค่าความถี่มากกว่า 40 Hz จะเป็นค่าความถี่สูง และค่าความถี่ต่ำกว่า 40 Hz จะเป็นค่าความถี่ต่ำ

ตารางที่ 2-16 แสดงระดับความปลอดภัยของโครงสร้างของ USBM's,1980

Type of Structure	Peak Particle Velocity (in./sec.)	
	At low frequency (<40Hz)	At high frequency (>40Hz)
Modern homes, Drywall interiors	0.75	2.00
Older homes, plaster on wood laths for interior walls	0.50	2.00



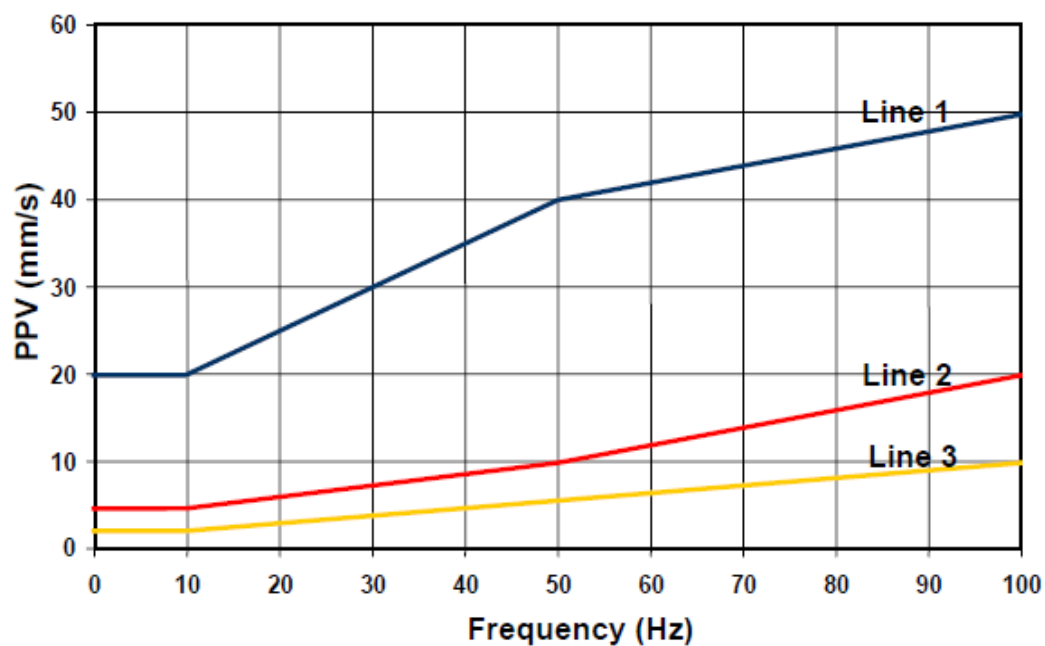
ภาพที่ 2-22 แสดงเกณฑ์กำหนดความสั่นสะเทือนของ USBM,1980

(4) เกณฑ์มาตรฐานของประเทศเยอรมัน (DIN 4150) ได้พัฒนาเกณฑ์มาตรฐานที่ส่งผลต่อโครงสร้างโดยขึ้นกับค่าความถี่อนุภาคสูงสุด ค่าความถี่และรูปแบบโครงสร้าง ดังตารางที่ 2-17 และภาพที่ 2-21

ตารางที่ 2-17 แสดงเกณฑ์มาตรฐานค่าความถี่อนุภาคสูงสุดของ DIN 4150

Line	Type of Structure	Vibration Velocity (mm/sec)		
		Foundation Frequency		
		Less than 10 Hz	10 to 50 Hz	50 to 100 ¹ Hz
1	Buildings used for commercial purposes, industrial buildings and buildings of similar design	20	20 to 40	40 to 50
2	Dwellings and buildings of similar design and/or use	5	5 to 15	15 to 20
3	Structures that, because of their sensitivity to vibration, do not correspond to those listed in lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (eg buildings that are under a preservation order)	3	8 to 10	8 to 10

* For frequencies above 100 Hz, at least the values specified in this column shall be applied



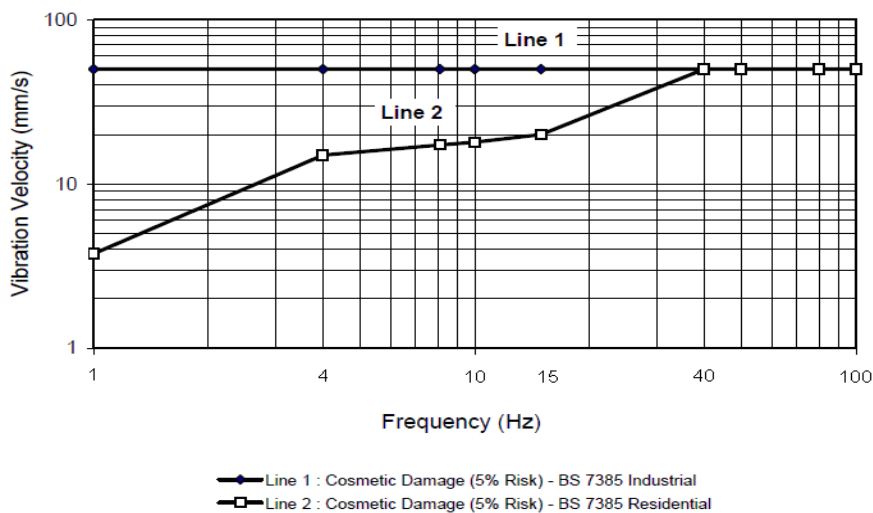
ภาพที่ 2-23 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ของค่าความถี่อนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ (Akiel, 2004)

(5) เกณฑ์มาตรฐาน Indian CMRI,(1993) โดยกำหนดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ซึ่งเกี่ยวข้องกับข้อกำหนดของโครงสร้าง ดังตารางที่ 2-18

ตารางที่ 2-18 แสดงความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ที่มีผลต่อสิ่งปลูกสร้างประเภทต่างๆ

Type of structures	PPV(mm/s)	
	<24 Hz	>24 Hz
Domestic houses, dry well interior, construction Structures with plasters, bridge	5.0	10.0
Industrial buildings, steel or reinforced concrete structures	12.5	25.5
Object of historical importance, very sensitive Structures, more than 50 years old construction and Structures in poor state condition	2.0	5.0

(6) มาตรฐานของประเทศ สหราชอาณาจักร (BS 7385) ได้กำหนดเกณฑ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่ หลักที่อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างจะปลอดภัยจากคลื่นสั่นสะเทือน ดัง ภาพที่ 2-24 โดยแบ่งอาคารออกเป็น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กและโรงงานอุตสาหกรรม (Line 1) และอาคารคอนกรีตขนาดเบา บ้านขนาดเล็ก (Line 2)



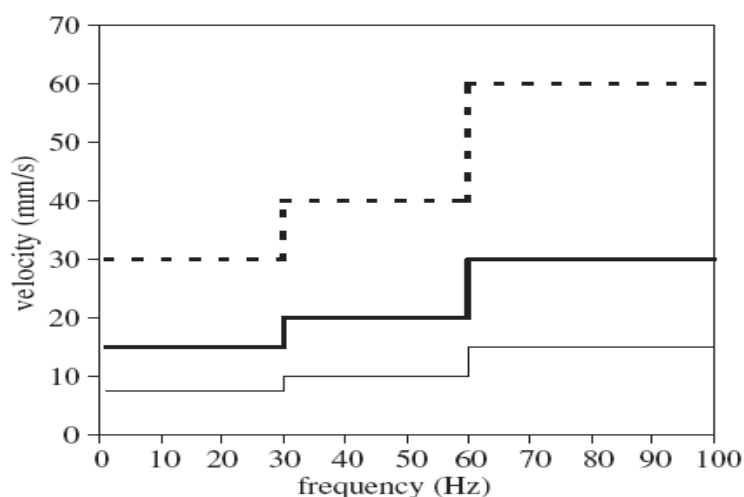
ภาพที่ 2-24 แสดงเกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่หลักที่ปลอดภัยจากคลื่นสั่นสะเทือนที่กำหนดโดยประเทศสหราชอาณาจักร (BS 7385) (สภาวิศวกร, 2552)

(7) มาตรฐานของประเทศออสเตรเลีย (AS 2187) ได้กำหนดเกณฑ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่หลักที่อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างจะปลอดภัยจากคลื่นสั่นสะเทือน ดังตารางที่ 2-19

ตารางที่ 2-19 เกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ปลอดภัยจากคลื่นสั่นสะเทือนที่กำหนดโดยประเทศออสเตรเลีย (สภาวิศวกร, 2552)

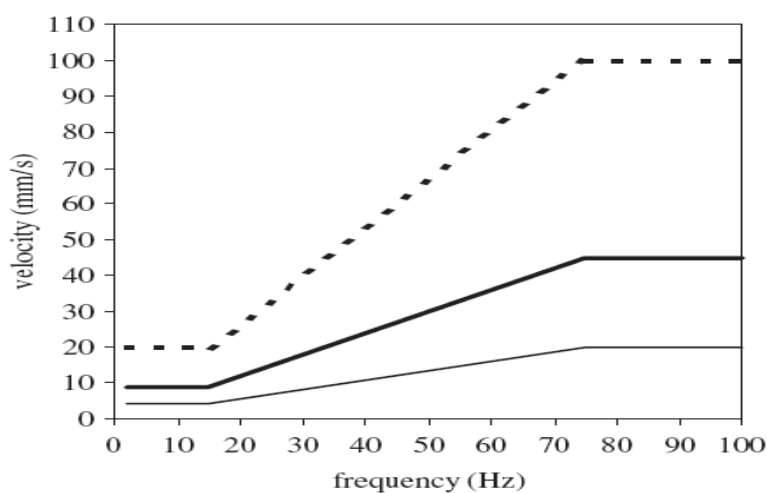
ชนิดสิ่งปลูกสร้าง	ความเร็วสูงสุด (mm/s)
สิ่งปลูกสร้างประวัติศาสตร์หรืออนุสาวรีย์ที่มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์	2
บ้านพักอาศัย หรือ อาคารพาณิชย์ที่ไม่ใช่อาคารสูง	5
อาคารพาณิชย์หรือโรงงานอุตสาหกรรม ที่โครงสร้างเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กหรือเหล็ก	25

(8) มาตรฐาน Swiss Mining Standard (SN 640 312a) ได้กำหนดเกณฑ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่หลักที่อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างจะปลอดภัย จากคลื่นสั่นสะเทือน ดังภาพที่ 2-23



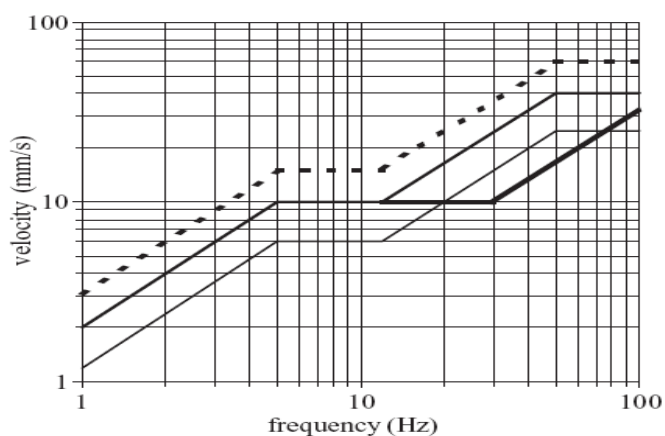
ภาพที่ 2-25 แสดงเกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่หลักที่ปลอดภัยจากคลื่นสั่นสะเทือนที่กำหนดโดย Swiss Mining Standard (SN 640 312a)

(9) มาตรฐานของประเทศสเปน Spanish Standard (CP UNE 22.381) ได้กำหนดเกณฑ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่หลักที่อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างจะปลอดภัยจากคลื่นสั่นสะเทือน ดังภาพที่ 2-24



ภาพที่ 2-26 แสดงเกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่หลักที่ปลอดภัยจากคลื่นสั่นสะเทือนที่กำหนดโดยประเทศสเปน Spanish Standard (CP UNE 22.381)

(10) มาตรฐานของประเทศฝรั่งเศส Groupe Francais l'Energie Explosive (GFEE) ได้กำหนดเกณฑ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่หลักที่อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างจะปลอดภัยจากคลื่นสั่นสะเทือน ดังภาพที่ 2-25



ภาพที่ 2-27 แสดงเกณฑ์ความเร็วอนุภาคสูงสุดกับความถี่หลักที่ปลอดภัยจากคลื่นสั่นสะเทือนที่กำหนดโดยประเทศฝรั่งเศส Groupe Francais l'Energie Explosive (GFEE)

(11) มาตรฐานการสั่นสะเทือนเพื่อป้องกันผลกระทบต่ออาคาร (ประกาศคณะ
สิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2553) ดังตารางที่ 2-22

ตารางที่ 2-22 แสดงมาตรฐานความสั่นสะเทือนเพื่อป้องกันผลกระทบต่ออาคารของประเทศไทย

อาคาร ประเภทที่	จุดตรวจวัด	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความเร็วอนุภาคสูงสุดไม่เกิน (มิลลิเมตรต่อวินาที)	
			ความสั่นสะเทือน กรณีที่ ๑	ความสั่นสะเทือน กรณีที่ ๒
๑	๑.๑ ฐานรากหรือชั้นล่างของอาคาร	$f \leq ๑๐$	๒๐	-
		$๑๐ < f \leq ๕๐$	$๐.๕ f + ๑๕$	
		$๕๐ < f \leq ๑๐๐$	$๐.๒ f + ๓๐$	
		$f > ๑๐๐$	๕๐	
	๑.๒ ชั้นบนสุดของอาคาร	ทุกความถี่	$๔๐'$	$๑๐'$
๑.๓ พื้นอาคารในแต่ละชั้น	ทุกความถี่	๒๐''	$๑๐''$	
๒	๒.๑ ฐานรากหรือชั้นล่างของอาคาร	$f \leq ๑๐$	๕	-
		$๑๐ < f \leq ๕๐$	$๐.๒๕ f + ๒.๕$	
		$๕๐ < f \leq ๑๐๐$	$๐.๑ f + ๑๐$	
		$f > ๑๐๐$	๒๐	
	๒.๒ ชั้นบนสุดของอาคาร	ทุกความถี่	$๑๕'$	$๕'$
๒.๓ พื้นอาคารในแต่ละชั้น	ทุกความถี่	๒๐''	$๑๐''$	
๓	๓.๑ ฐานรากหรือชั้นล่างของอาคาร	$f \leq ๑๐$	๓	-
		$๑๐ < f \leq ๕๐$	$๐.๑๒๕ f + ๑.๗๕$	
		$๕๐ < f \leq ๑๐๐$	$๐.๐๔ f + ๖$	
		$f > ๑๐๐$	๑๐	
	๓.๒ ชั้นบนสุดของอาคาร	ทุกความถี่	$๘'$	$๒.๕'$
๓.๓ พื้นอาคารในแต่ละชั้น	ทุกความถี่	๒๐''	$๑๐''$	

อาคารประเภท 1 ประกอบด้วย อาคารที่ใช้เป็นโรงงาน อาคารพาณิชย์ อาคารสำนักงาน
อาคารคลังสินค้า อาคารพิเศษ อาคารขนาดใหญ่

อาคารประเภท 2 ประกอบด้วย อาคารอยู่อาศัย อาคารอยู่อาศัยรวม ห้องแถว ตึกแถว
อาคารชุด อาคารที่ใช้เป็นสถานพยาบาล อาคารที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษา อาคารที่ใช้ประโยชน์เพื่อ
กิจกรรมทางศาสนา

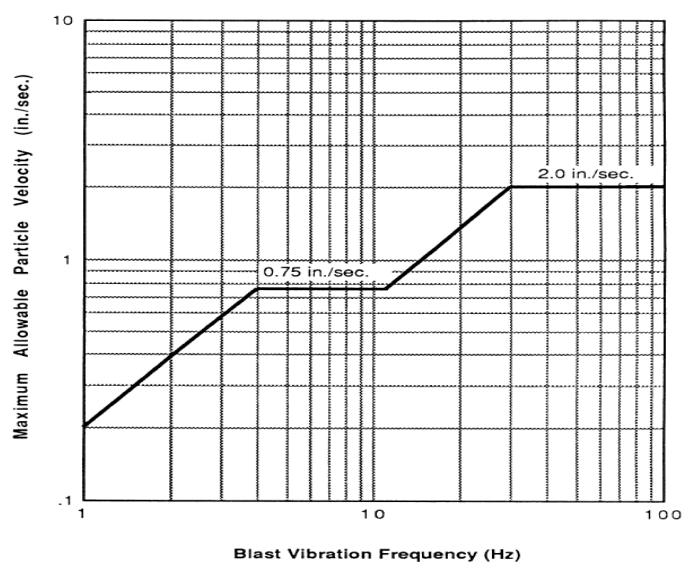
อาคารประเภท 3 ประกอบด้วย โบราณสถาน โบราณวัตถุ ศิลปวัตถุ และพิพิธภัณฑสถาน
แห่งชาติ

2.4.9.4 เกณฑ์ความเสียหายจากค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับอัตราส่วนระยะทาง

(1) The Office of Surface Mining (OSM) ได้ทำการปรับปรุงเกณฑ์มาตรฐานของ USBM
ให้มีความเข้มงวดมากยิ่งขึ้น ดังตารางที่ 2-23 และ ดังภาพที่ 2-26

ตารางที่ 2-23 แสดงระดับการสั่นสะเทือนของ The Office of Surface Mining (OSM)

Distance (D) from the blasting site (feet)	Maximum allowable peak particle velocity for ground vibration (in./sec.)	Scaled-distance factor to be applied without seismic monitoring
0 to 300	1.25	50
301 to 5000	1.00	55
5001 and beyond	0.75	65



ภาพที่ 2-28 แสดงข้อกำหนดการสั่นสะเทือนของ The Office of Surface Mining (OSM)

ปัจจุบันเกณฑ์มาตรฐานของหลายประเทศซึ่งมีค่าความเสียหายอยู่ระดับต่ำมีเหตุผลหลัก 2 ประการ คือ

ประการแรก เกณฑ์ป้องกันที่มีอิทธิพล จากมนุษย์สำหรับการตอบสนองความสั่นสะเทือน มนุษย์จะมีความอ่อนไหวมากกว่าโครงสร้างทางวิศวกรรมประมาณ 10 เท่า

ประการที่สอง เกณฑ์ ป้องกันที่มีอยู่มากมายโดยไม่ทอด สอบทางวิทยาศาสตร์ และมีการ รายงานความสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าว โดยทั่วไปเกณฑ์ความสั่นสะเทือนจะใ้ ้ช้การ ตรวจวัดความสั่นสะเทือนและ มีข้อมูลอย่างต่อเนื่องจากบ้านพักอาศัยเพื่อคลายความกังวลใจของ ผู้คนในพื้นที่

บทที่ 3

วิธีและขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 เครื่องมือตรวจวัด

3.1.1 มาตรฐานความเร็ว (Geophone)

ในการตรวจวัดความสั่นสะเทือนจะใช้มาตรฐาน ความเร็วในแกนตั้งจำนวน 16 ตัว ดังแสดง ตัวอย่างมาตรฐานใน ภาพที่ 3-1 บันทึกข้อมูลการสั่นสะเทือนของพื้นดิน โดยการเปลี่ยน ค่าการ สั่นสะเทือนให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า ส่วนประกอบภายในมาตรฐาน ประกอบด้วยขดลวดทองแดงอยู่ตรงกลางระหว่างแท่งแม่เหล็ก ดังแสดงภาพที่ 3-2 ซึ่งค่าความถี่ ธรรมชาติของมาตรฐาน (Natural Frequency, F_n) เท่ากับ 4.5 Hz



ภาพที่ 3-1 แสดงมาตรฐานในแนวแกนตั้ง

เมื่อมีการสั่นสะเทือน ขดลวด ทองแดง จะเกิดการเคลื่อนที่ อย่างต่อเนื่อง ตัดผ่าน สนามแม่เหล็กทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าขึ้นในขดลวดทองแดง แรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กั

ความเร็วของการสั้นของขดลวด ทองแดงหรือความรุนแรงของการสั้นสะเก็ดเทียน ซึ่งจะทำให้การบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลต่อไป

3.1.2 เครื่องบันทึกข้อมูล

ข้อมูลความสั้นสะเก็ดเทียนที่เกิดขึ้นทำการบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล จากแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาต่างๆ ซึ่งลักษณะของเครื่องบันทึกข้อมูล ดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-2 แสดงเครื่องบันทึกข้อมูล

3.2 ขั้นตอนการตรวจวัด

การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการตรวจวัดความสั้นสะเก็ดเทียนทำโดยกำหนดตำแหน่งการวางมาตรวัดตัวแรกให้มีระยะห่างจากหลุมระเบิดประมาณ 10 เมตร และวางตำแหน่งมาตรวัดตัวอื่น ๆ ระยะห่างประมาณ 20 เมตร ตามแนวหลุมระเบิดทั้งหมด 16 ตัว แสดงดังภาพที่ 3-4 และ รูป 3-5 การติดตั้งมาตรวัดทำโดยการขุดดินฝังกลบ ทำการติดตั้งเครื่องบันทึกข้อมูล เมื่อทำการติดตั้งเครื่องบันทึกข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้วแสดงดัง ภาพที่ 3-6 และ ภาพที่ 3-7 แนวการวางตำแหน่งมาตรวัดตามแนวหลุมระเบิด ดังภาพที่ 3-8 และ 3-9 เมื่อติดตั้งเครื่องมือเสร็จเรียบร้อยแล้วจากนั้นทำการ

ทดสอบการรับสัญญาณของมาตรวัดว่าทำงานหรือไม่ โดยการทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเช่นการ กระทุ้งดินใกล้กับมาตรวัด การเก็บข้อมูลแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดครั้งละประมาณ 0.5 ถึง 2 วินาที



ภาพที่ 3-3 แสดงการกำหนดตำแหน่งมาตรวัด



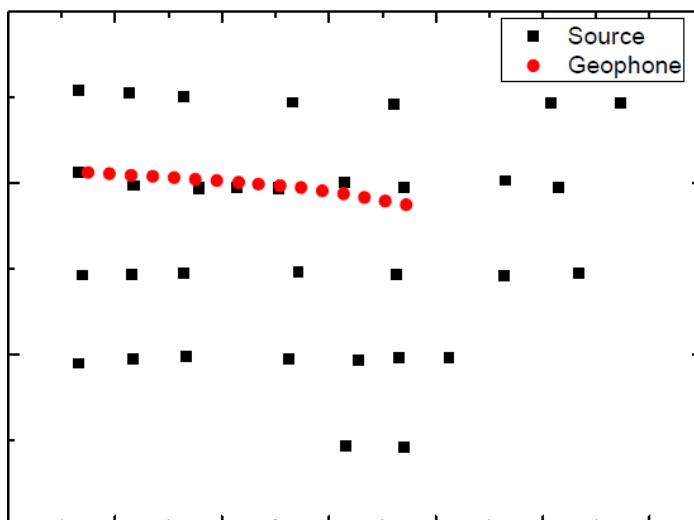
ภาพที่ 3-4 แสดงการวางตำแหน่งมาตรวัด



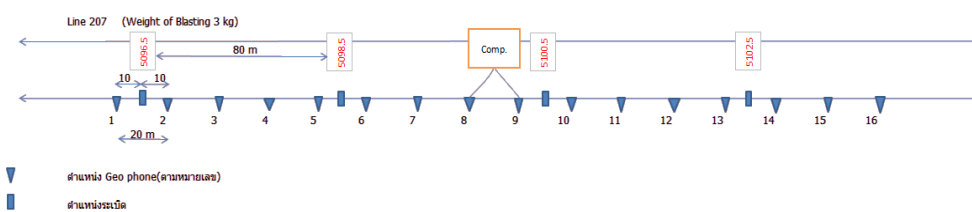
ภาพที่ 3-5 แสดงการวางตำแหน่งมาตรวัด



ภาพที่ 3-6 แสดงการติดตั้งเครื่องบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 3-7 แสดงการติดตั้งมาตรวัดตามแนวหลุมระเบิด



ภาพที่ 3-8 แสดงการติดตั้งมาตรวัดตามแนวหลุมระเบิด

3.3 แนวทางการศึกษา

จากการตรวจวัดข้อมูลความสั่นสะเทือนในภาคสนามข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ ดังนี้

1. การตรวจวัดความสั่นสะเทือนในภาคสนามประกอบด้วยข้อมูลความสั่นสะเทือนและเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วอนุภาคสูงสุด (mm/s) และเวลา (s)
2. การวิเคราะห์ข้อมูลโดยนำข้อมูลภาคสนามมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด ค่าความถี่ ในพื้นที่ที่แตกต่างกัน
3. นำผลการตรวจวัดความสั่นสะเทือนเปรียบเทียบกับมาตรฐานจากประกาศ คณะอนุกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์

4.1 ผลการตรวจวัด

สำหรับการรวบรวมข้อมูลการตรวจวัดจะแสดงในรูปความสัมพันธ์ของพื้นดิน ซึ่งรายละเอียดการเก็บข้อมูลในภาคสนามแต่ละพื้นที่ประกอบด้วยน้ำหนักวัดระเบิดและความลึกหลุมระเบิด การตรวจวัดจะใช้การตรวจวัดแนวแกนดิ่ง (vertical) ซึ่งข้อมูลดิบจากการตรวจวัดประกอบด้วย ค่าความเร็วอนุภาค และเวลา ซึ่งได้จากตัวรับสัญญาณทั้งหมด 16 ตัว ต่อการระเบิด 1 ครั้ง โดยค่าความเร็วอนุภาคจากการตรวจวัดจำเป็นต้องแปลงสัญญาณโดยการคูณค่าสอบเทียบของตัวรับสัญญาณ โดยข้อมูลการตรวจวัดมีลักษณะดังนี้

(ก). ข้อมูลระหว่างความเร็วอนุภาคกับเวลา ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากตัวรับสัญญาณทั้งหมด 16 ตัว ซึ่งหมายความว่าในการระเบิด 1 ครั้ง จะมีข้อมูลความเร็วอนุภาคกับเวลาทั้งหมด 16 ข้อมูล

(ข). ข้อมูลระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับระยะทาง โดยค่าความเร็วสามารถหาได้จากการนำข้อมูลจากตัวรับสัญญาณคูณกับค่าสอบเทียบของเครื่องมือตรวจวัด ส่วนระยะทางหาได้จากการคำนวณพิกัดของตำแหน่งหลุมระเบิดกับตำแหน่งตัวรับสัญญาณ

(ค). ข้อมูลด้านความถี่สัมพันธ์ซึ่งมีความสัมพันธ์ด้านความเร็วอนุภาคกับเวลา โดยการแปลงข้อมูลดังกล่าวให้อยู่ในรูปของความถี่สำหรับการประมาณค่าความถี่หลัก

อย่างไรก็ตามผลการตรวจวัดจะเสนอตามวันในการเก็บข้อมูล ดังนี้

(1). การตรวจวัดข้อมูลวันที่ 17-18 พฤศจิกายน 2553

สำหรับการเก็บข้อมูลในภาคสนาม พื้นที่ อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทุ่งนา ดังภาพที่ 4-1 และ ภาพที่ 4-2 จากข้อมูลกรมวิชาเกษตรลักษณะชั้นดินในพื้นที่การตรวจวัด พบว่า ดินชั้นบนมีลักษณะเป็นดิน ร่วนเหนียวปนทราย ที่ระดับลึกลงไปเป็น ดินเหนียวปนดินทรายแข็ง ซึ่งดินทรายแข็งเมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดการขยายตัวทำให้การรับกำลังของดินลดลง ตัวอย่างลักษณะชั้นดิน บริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่การตรวจวัด ดังภาพที่ 4-3 แสดงข้อมูลชั้นดินจากการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring log) โดยข้อมูลการตรวจวัดมีรายละเอียด ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงรายละเอียดทั่วไปของการตรวจวัด

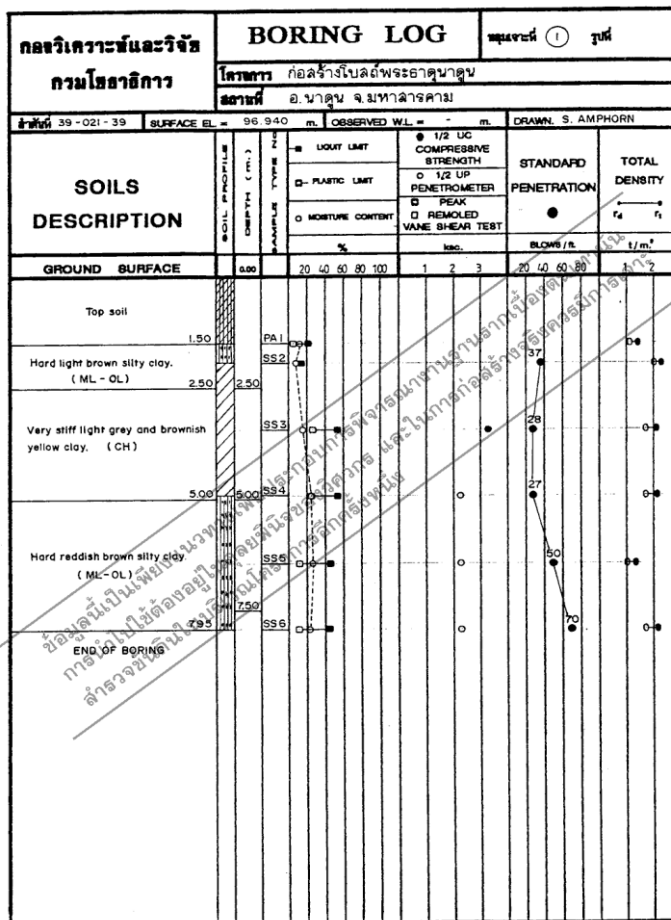
น้ำหนักวัสดุ ระเบิด (Kg)	ความลึก หลุมระเบิด (m)	ลักษณะการ เก็บข้อมูล	พื้นที่โดยทั่วไป	ชนิดของวัตถุระเบิด
3	12.4	1 แกน (แนวตั้ง)	ทุ่งนา	แอมโมเนียไนเตรท



ภาพที่ 4-1 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล

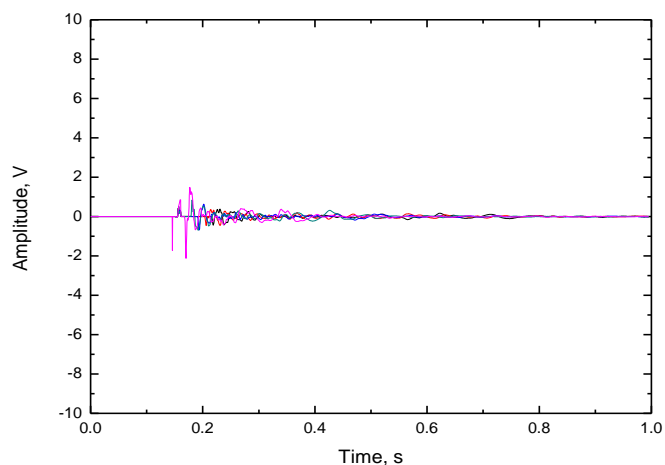


ภาพที่ 4-2 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล



ภาพที่ 4-3 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ.มหาสารคาม (กองวิศวกรรมและวิจัย กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2554:online)

การตรวจวัดข้อมูลในภาคสนาม ตัวอย่างของข้อมูลที่วัดจาก การระเบิดแบบหลุมเดี่ยว (single shot point) ดังตารางที่ 4-2 และนำข้อมูลดังกล่าวมาแสดงในรูปของกราฟ ดัง ภาพที่ 4-4 เมื่อนำผลการตรวจวัดมาหาค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดและความถี่หลักที่ได้จากมาตรวัดแต่ละตัวที่ ระยะต่างๆจากระเบิด ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (Peak Particle Velocity, PPV) และความถี่หลัก (Dominant Frequency) ที่ได้จากการแปลงข้อมูลตรวจวัดในสนามโดยวิธีฟาสฟูเรียทรานฟอร์ม (Fast Fourier Transform, FFT) ดังตารางที่ 4-3 ต่อไปนี้



ภาพที่ 4-4 แสดงตัวอย่างกราฟคลื่นสะท้อนจากการตรวจวัดในสนาม

ตารางที่ 4-3 แสดงผลการตรวจวัดข้อมูลในภาคสนามที่ระยะทางต่างๆ วันที่ 17 พฤศจิกายน 2553

Geophone No.	Max Value (mm/s)	Dominant Frequency (Hz)	Distance from Shoting Point (m)
1	22.496	9.698	70
2	41.737	9.116	50
3	>50	38.987	30
4	>50	10.862	10
5	>50	36.659	10
6	>50	41.315	30
7	33.257	46.358	50
8	33.071	46.358	70
9	10.096	9.892	90
10	11.334	32.586	110
11	5.992	33.362	130
12	5.231	34.526	150
13	4.563	35.302	170
14	3.724	42.672	190
15	3.258	39.569	210
16	2.619	33.556	230

(2). การตรวจวัดข้อมูลวันที่ 27-28 พฤศจิกายน 2553

สำหรับการเก็บข้อมูลในภาคสนาม พื้นที่ อ.พุทธไธสง จ.บุรีรัมย์ พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทุ่งนา ดังภาพที่ 4-5 และ 4-6 ลักษณะชั้นดินในพื้นที่การตรวจวัด พบว่า ดินชั้นบนมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทรายมีความหนาประมาณ 1- 10 เมตร ที่ระดับลึกลงไปเป็นดินเหนียวปนทราย หรือดินร่วนปนดินเหนียว (ฉัตรชัย โชติษฐียงกุล , เซาว์ หิรัญดิยะกุล , เนาะ สง่าบ้านโคก , 2548) ตัวอย่างลักษณะชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่การตรวจวัด ของข้อมูลชั้นดินจากการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring log) ดังภาพที่ 4-7 โดยข้อมูลการตรวจวัดมีรายละเอียด ดังตารางที่ดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 27-28 พฤศจิกายน 2553

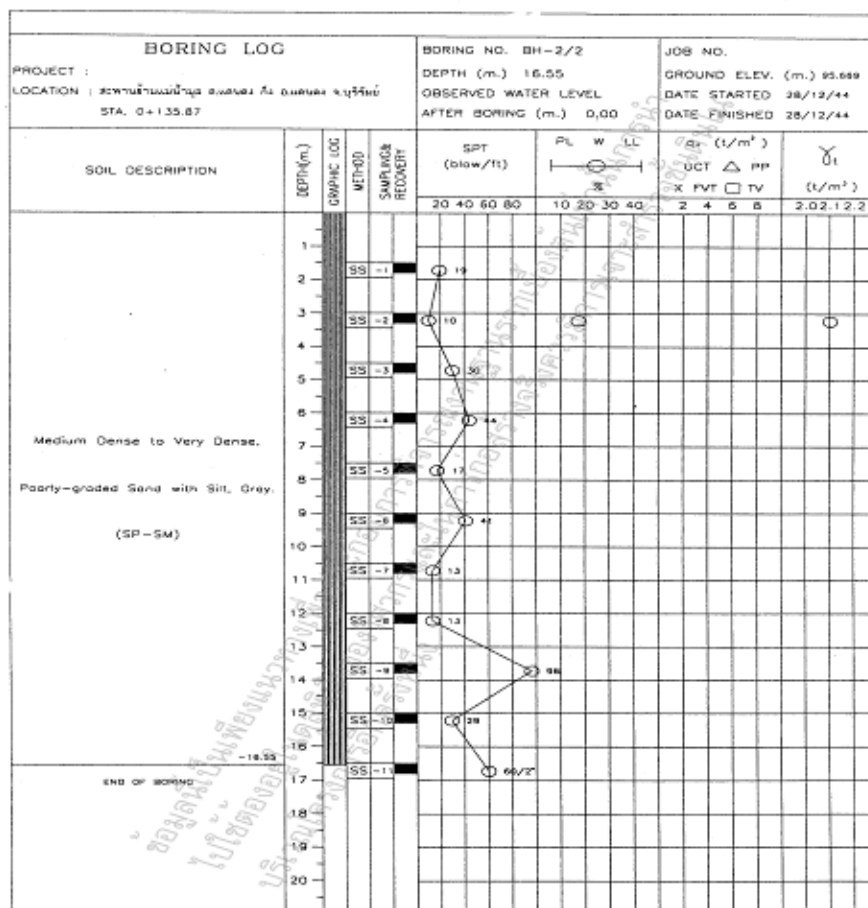
น้ำหนักวัตถุระเบิด (Kg)	ความลึกหลุมระเบิด (m)	ลักษณะการเก็บข้อมูล	พื้นที่โดยทั่วไป	ชนิดของวัตถุระเบิด
3	12.4	1แกน (แนวตั้ง)	ทุ่งนา	แอมโมเนียไนเตรท



ภาพที่ 4-5 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล



ภาพที่ 4-6 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล



ภาพที่ 4-7 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ.บุรีรัมย์ (กองวิเคราะห์และวิจัย กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2554:online)

การตรวจวัดข้อมูลในภาคสนาม ตัวอย่างข้อมูลที่วัดจากการระเบิดแบบหลุมเดี่ยว (single shot) ผลการตรวจวัดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (Peak Particle Velocity, PPV) และความถี่หลัก (Dominant Frequency) ที่ได้จากมาตรวัดแต่ละตัวที่ระยะต่างๆ ดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลที่ระยะต่างๆ วันที่ 28 พฤศจิกายน 2553

Geophone No.	PPV (mm/s)	Frequency (Hz)	Distance (m)
1	3.42	37.4	470
2	2.44	5.43	490
3	1.9	6.07	510
4	1.52	6.07	530
5	1.66	6.07	550
6	2.33	6.07	570
7	1.8	17.58	590
8	2.18	19.5	610
9	2.08	18.54	630
10	3.01	15.34	650
11	2.09	34.84	670
12	2.85	32.92	690
13	3.71	37.72	710
14	3.79	57.54	730
15	5.39	39.32	750
16	3.42	37.4	470

(3). การตรวจวัดข้อมูลวันที่ 21-22 มกราคม 2554

สำหรับการเก็บข้อมูลในภาคสนาม พื้นที่ อ.หนองบัวซอ จ.อุดรธานี พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะลาดชัน และ ภูเขา ที่ผิวดินชั้นบนเป็นดินเหนียวปนทรายซึ่งมีความหนาไม่มากนักสลับกับหิน ดังภาพที่ 4-8 และ 4-9 โดยข้อมูลชั้นดินจากการเจาะสำรวจชั้น ดิน (Boring log) ดังภาพที่ 4-10 ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 21-22 มกราคม 2554

น้ำหนักวัตถุ ระเบิด (Kg)	ความลึกหลุม ระเบิด (m)	ลักษณะการ เก็บข้อมูล	พื้นที่โดยทั่วไป	ชนิดของวัตถุระเบิด
1.5	5-9	1 แกน (แนวตั้ง)	ที่ลาดชัน ภูเขา	แอมโมเนียไนเตรท



ภาพที่ 4-8 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล



ภาพที่ 4-9 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล

ตารางที่ 4-7 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลที่ระยะต่างๆ วันที่ 21 มกราคม 2554

Geophone No.	PPV (mm/s)	Frequency (Hz)	Distance (m)
1	1.4	31.9	62.5
2	5.48	32.79	37.5
3	18.77	29.24	12.5
4	18.93	31.01	12.5
5	3.91	38.1	37.5
6	1.97	31.9	62.5
7	0.71	36.33	87.5
8	0.9	31.9	112.5
9	0.3	15.95	132.5
10	0.32	15.95	152.5
11	0.21	15.95	172.5
12	0.19	11.52	192.5
13	0.18	12.41	212.5
14	0.19	14.18	232.5
15	0.14	10.63	252.5
16	0.13	15.95	272.5

(4). การตรวจวัดข้อมูลวันที่ 24-25 มกราคม 2554

สำหรับการเก็บข้อมูลในภาคสนาม พื้นที่ อ.สตึก จ.สุรินทร์ พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทุ่งนา ดังภาพที่ 4-11 และ 4-12 จากข้อมูลกรมวิชาเกษตรลักษณะชั้นดินในพื้นที่การตรวจวัด พบว่าดินชั้นบนมีลักษณะเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายซึ่งมีลักษณะคล้ายกับพื้นที่ อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม โดยข้อมูลการตรวจวัดมีรายละเอียดดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 24-25 มกราคม 2554

น้ำหนักวัตถุ ระเบิด (Kg)	ความลึกหลุม ระเบิด (m)	ลักษณะการ เก็บข้อมูล	พื้นที่โดยทั่วไป	ชนิดของวัตถุระเบิด
3 และ 4	13	1แกน (แนวตั้ง)	ทุ่งนา	แอมโมเนียไนเตรท



ภาพที่ 4-11 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล



ภาพที่ 4-12 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล

การตรวจวัดข้อมูลในภาคสนาม ตัวอย่างข้อมูลที่วัดจากการระเบิดแบบหลุมเดี่ยว (single shot) ผลการตรวจวัดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (Peak Particle Velocity, PPV) และความถี่หลัก (Dominant Frequency) ที่ได้จากมาตรวัดแต่ละตัวที่ระยะต่างๆ ดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลทีละระยะต่างๆ วันที่ 24 มกราคม 2554

Geophone	PPV	Frequency	Distance
1	1.34	11.52	430
2	1.1	11.52	410
3	0.62	11.52	390
4	1.21	11.52	370
5	1.38	12.41	350
6	1.18	12.41	330
7	1.36	12.41	310
8	1.82	12.41	290
9	2.21	12.41	270
10	2.45	12.41	250
11	3.34	13.29	230
12	2.93	7.98	210
13	4.21	10.63	190
14	3.61	4.43	170
15	2.77	4.43	150
16	3.97	5.32	130

(5). การตรวจวัดข้อมูลวันที่ 2 เมษายน 2554

สำหรับการเก็บข้อมูลในภาคสนาม พื้นที่ อ.หนองบัวซอ จ.อุดรธานี พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะลาดชัน และ ภูเขา ที่ผิวดินชั้นบนเป็นดินเหนียวปนทรายซึ่งมีความหนาไม่มากนักสลับกับหิน ดังภาพที่ 4-13 โดยข้อมูลการตรวจวัดมีรายละเอียด ดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 2 เมษายน 2554

น้ำหนักวัตถุ ระเบิด (Kg)	ความลึก หลุมระเบิด (m)	ลักษณะการ เก็บข้อมูล	พื้นที่โดยทั่วไป	ชนิดของวัตถุระเบิด
1.5 และ 2.0	9.6	1แกน (แนวตั้ง)	ที่ลาด	แอมโมเนียไนเตรท



ภาพที่ 4-13 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล

การตรวจวัดข้อมูลในภาคสนามตัวอย่างข้อมูลที่วัดจากการระเบิดแบบหลุมเดี่ยว (single shot) ผลการตรวจวัดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (Peak Particle Velocity, PPV) และความถี่หลัก (Dominant Frequency) ที่ได้จากมาตรวัดแต่ละตัวที่ระยะต่างๆ ดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลที่ระยะต่างๆ วันที่ 2 เมษายน 2554

Geophone No.	PPV (mm/s)	Frequency (Hz)	Distance (m)
1	0.78	8.15	260.4
2	0.64	9.31	281.5
3	0.63	9.31	302.0
4	0.67	9.7	322.8
5	0.5	8.54	343.8
6	0.48	9.31	364.7
7	0.38	7.76	385.9
8	0.4	8.15	406.6
9	0.33	8.15	427.7
10	0.22	8.54	448.8
11	0.19	8.54	469.8
12	0.15	8.15	490.6
13	0.13	8.15	511.4
14	0.12	8.93	532.3
15	0.13	8.54	553.1
16	0.13	8.54	573.6

(6). การตรวจวัดข้อมูลวันที่ 3-4 มิถุนายน 2554

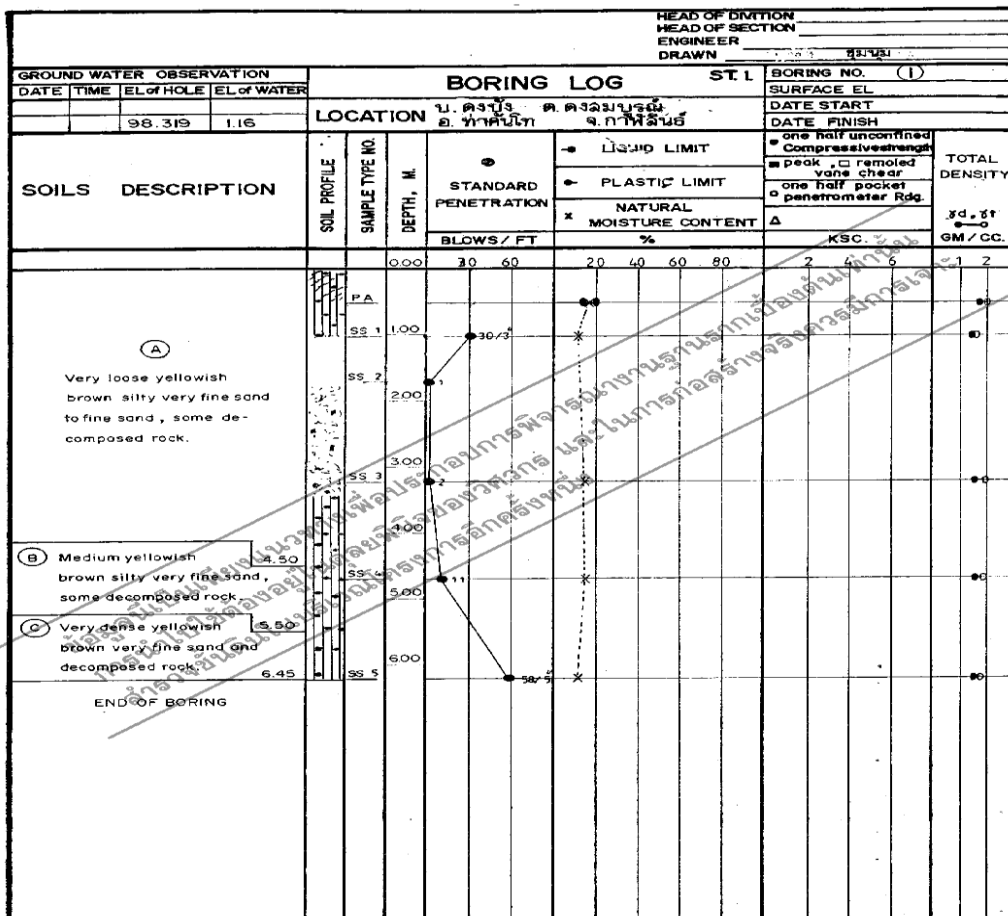
สำหรับการเก็บข้อมูลในภาคสนาม พื้นที่ อ.ท่าคันโท จ.กาฬสินธุ์ พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นที่ลาดและพื้นที่ไร่ย่อย ดังภาพที่ 4-14 ลักษณะชั้นดินในพื้นที่การตรวจวัด พบว่า ที่ระดับผิวดินเป็นดินทรายปนหินที่มีความแข็งไม่มากนัก โดยข้อมูลการตรวจวัดมีรายละเอียด ดังตารางที่ 4-12 และลักษณะชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่การตรวจวัดของข้อมูลชั้นดินจากการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring log) ดังภาพที่ 4-15

ตารางที่ 4-12 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 3-4 มิถุนายน 2554

น้ำหนักวัตถุ ระเบิด (Kg)	ความลึกหลุม ระเบิด (m)	ลักษณะการ เก็บข้อมูล	พื้นที่โดยทั่วไป	ชนิดของวัตถุระเบิด
1.5	9	1แกน (แนวตั้ง)	ที่ลาด	แอมโมเนียไนเตรท



ภาพที่ 4-14 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล



ภาพที่ 4-15 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ.กาฬสินธุ์ (กองวิเคราะห์และวิจัย กรมโยธาธิการ และผังเมือง, 2554:online)

การตรวจวัดข้อมูลในภาคสนาม ตัวอย่างข้อมูลที่วัดจากการระเบิดแบบหลุมเดี่ยว (single shot) ผลการตรวจวัดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (Peak Particle Velocity, PPV) และความถี่หลัก (Dominant Frequency) ที่ได้จากมาตรวัดแต่ละตัวที่ระยะต่างๆ ดังตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลที่ระยะต่างๆ วันที่ 3 มิถุนายน 2554

Geophone No.	PPV (mm/s)	Frequency (Hz)	Distance (m)
1	0.4	27.81	50.4
2	4.45	12.44	30.2
3	17.38	12.44	10.7
4	14.28	12.44	10.1
5	2.97	14.64	30.2
6	1.53	16.1	50.1
7	1.18	17.57	71.0
8	0.68	13.91	91.3
9	0.23	12.44	108.4
10	0.26	12.44	132.1
11	0.22	15.37	150.4
12	0.17	15.37	170.6
13	0.16	14.64	190.0
14	0.19	16.83	211.4
15	0.22	16.1	231.1
16	0.14	16.1	250.3

(7). การตรวจวัดข้อมูลวันที่ 17-18 กรกฎาคม 2554

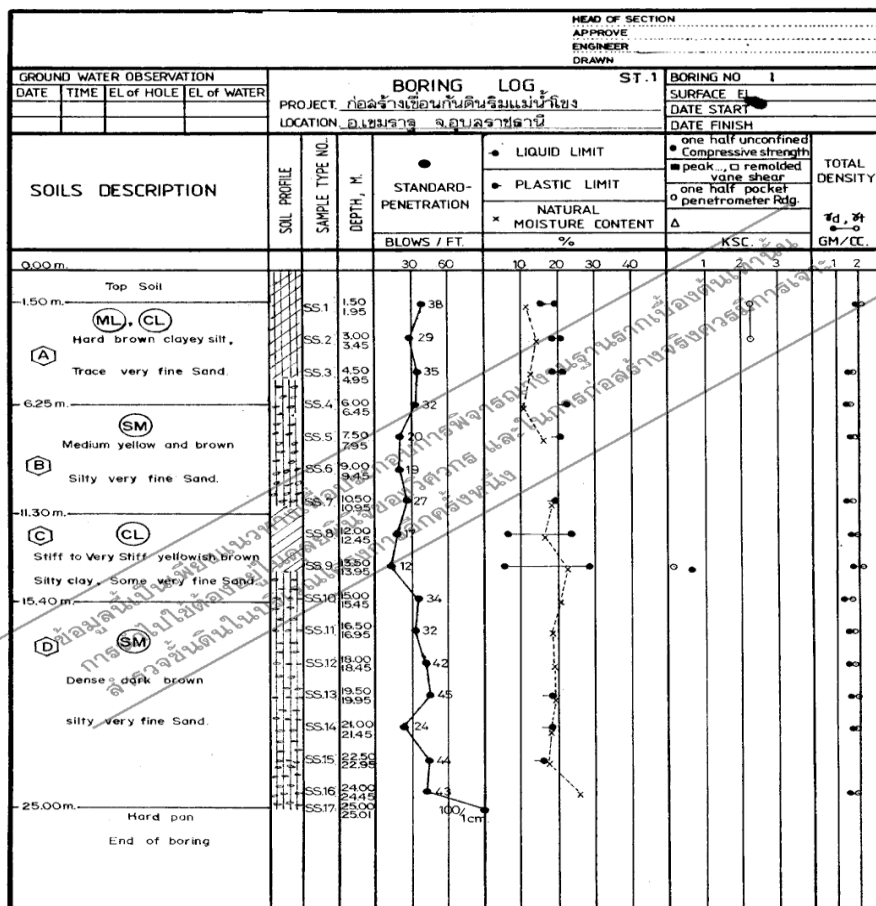
สำหรับการเก็บข้อมูลในภาคสนาม พื้นที่ อ.เขมราฐ จ.อุบลราชธานี พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทุ่งนา ไร่มันสำปะหลัง ดังภาพที่ 4-16 ลักษณะชั้นดินในพื้นที่การตรวจวัด พบว่า โดยที่บริเวณผิวดินเป็นดินทรายปนดินร่วนหรือดินร่วนปนทราย ที่ระดับลึกลงไปเป็นดินเหนียวปนทราย ตัวอย่างลักษณะชั้นดิน บริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่การตรวจวัดของข้อมูลชั้นดินจากการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring log) ดังภาพที่ 4-17 และข้อมูลการตรวจวัดมีรายละเอียด ดังตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 17-18 กรกฎาคม 2554

น้ำหนักวัตถุ ระเบิด (Kg)	ความลึกหลุม ระเบิด (m)	ลักษณะการ เก็บข้อมูล	พื้นที่โดยทั่วไป	ชนิดของวัตถุระเบิด
1.5	5-12	1แกน (แนวตั้ง)	ทุ่งนา	แอมโมเนียไนเตรท



ภาพที่ 4-16 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล



ภาพที่ 4-17 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ.อุบลราชธานี (กองวิเคราะห์และวิจัย กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2554:online)

การตรวจวัดข้อมูลในภาคสนาม ตัวอย่างข้อมูลที่วัดจากการระเบิดแบบหลุมเดี่ยว (single shot) ผลการตรวจวัดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (Peak Particle Velocity, PPV) และความถี่หลัก (Dominant Frequency) ที่ได้จากมาตรวัดแต่ละตัวที่ระยะต่างๆ ดังตารางที่ 4-15

ตารางที่ 4-15 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลที่ระยะต่างๆ วันที่ 17 กรกฎาคม 2554

Geophone No.	PPV (mm/s)	Frequency (Hz)	Distance (m)
1	0.35	14.64	156.2
2	1.11	11.71	130.4
3	0.58	13.18	150.4
4	0.59	10.25	170.4
5	0.35	10.98	190.3
6	0.31	10.98	210.3
7	0.3	16.1	230.3
8	0.42	14.64	250.2
9	0.31	11.71	270.3
10	0.29	10.25	290.1
11	0.19	10.98	310.3
12	0.21	14.64	330.2
13	0.2	19.76	350.2
14	0.21	16.83	370.2
15	0.16	11.71	390.2
16	0.11	10.25	410.2

(8). การตรวจวัดข้อมูลวันที่ 9-10 สิงหาคม 2554

สำหรับการเก็บข้อมูลในภาคสนาม พื้นที่ อ.อุ้มของ จ.สุพรรณบุรี พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทุ่งนา ดังภาพที่ 4-18 ลักษณะชั้นดินในพื้นที่การตรวจวัด พบว่า ชั้นดินมีลักษณะเป็น ดินเหนียว มีความหนาสูง ตัวอย่าง ลักษณะชั้นดิน บริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่การตรวจวัด ของข้อมูลชั้นดินจากการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring log) ดังภาพที่ 4-19 และข้อมูลการตรวจวัดมีรายละเอียด ดังตารางที่ 4-16

ตารางที่ 4-16 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 9-10 สิงหาคม 2554

น้ำหนักวัตถุระเบิด (Kg)	ความลึกหลุมระเบิด (m)	ลักษณะการเก็บข้อมูล	พื้นที่โดยทั่วไป	ชนิดของวัตถุระเบิด
1	21	1แกน (แนวตั้ง)	ทุ่งนา	แอมโมเนียไนเตรท



ภาพที่ 4-18 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล

BORING LOG																	
PROJECT.																	
LOCATION อ.อุ้มทอง จ.สุพรรณบุรี																	
SURFACE EL. M		OBSERVED W.L. = 1.00 m.		BORING No. 1.		DATE START.		DRAWN BY Pichit									
SOILS DESCRIPTION	SOIL PROFILE	DEPTH M.	SAMPLE TYPE NO.	LIQUID LIMIT				STRENGTH			STANDARD PENETRATION		TOTAL DENSITY				
				PLASTIC LIMIT				1/2 UP PENETROMETER									
				MOISTURE CONTENT %				PEAK REMOLED VANE SHEAR TEST KSC.			BLOWS / FT		Yd Yt t/m ³				
GROUND SURFACE 0.00				20	40	60	80	100	1	2	3	20	40	60	80	1	2
Filled Top Soil																	
1.00																	
Stiff dark brown silty clay. CL - CL - ML																	
2.75																	
Hard brownish grey silt with gravel. OL - ML																	
4.00																	
Dense brownish grey clayey sand with gravel. SC																	
5.50																	
Hard brownish grey lean clay with gravel. CL																	
7.0																	
8.0																	
9.0																	
END OF BORING 9.45																	
10.0																	
11.0																	
12.0																	
13.0																	
14.0																	
15.0																	
16.0																	
17.0																	
18.0																	
19.0																	
20.0																	
21.0																	
22.0																	
23.0																	
24.0																	

ภาพที่ 4-19 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ.สุพรรณบุรี (กองวิเคราะห้และวิจัย กรมโยธาธิการ และผังเมือง, 2554:online)

การตรวจวัดข้อมูลในภาคสนาม ตัวอย่างข้อมูลที่วัดจากการระเบิดแบบหลุม เดี่ยว (single shot) ผลการตรวจวัดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (Peak Particle Velocity, PPV) และความถี่หลัก (Dominant Frequency) ที่ได้จากมาตรวัดแต่ละตัวที่ระยะต่างๆ ดังตารางที่ 4-17

ตารางที่ 4-17 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลที่ระยะต่างๆ วันที่ 10 สิงหาคม 2554

Geophone No.	PPV (mm/s)	Frequency (Hz)	Distance (m)
1	10.25	64.45	91.2
2	7.94	66.41	106.4
3	12.56	52.73	122.9
4	10.04	60.55	140.5
5	8.42	64.45	158.6
6	10.16	56.64	177.0
7	8.73	58.59	195.5
8	4.92	52.73	214.2
9	7.86	50.78	234.1
10	8.25	46.88	254.1
11	8.51	39.06	274.0
12	3.55	56.64	293.6
13	3.43	33.2	313.5
14	3.4	42.97	333.5
15	3.21	52.73	353.4
16	3.35	42.97	373.4

(9). การตรวจวัดข้อมูลวันที่ 6-8 กันยายน 2554

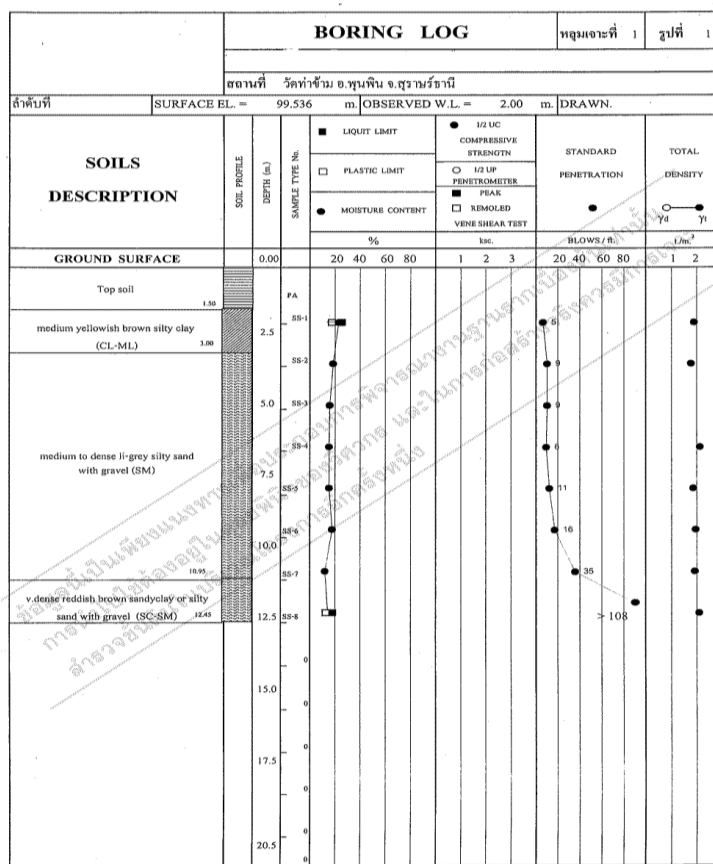
สำหรับการเก็บข้อมูลในภาคสนามพื้นที่ อ.พุนพิน จ.สุราษฎร์ธานี พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นพื้นที่สวนยางพารา ดังภาพที่ 4-20 ลักษณะชั้นดินในพื้นที่การตรวจวัด พบว่า ดินชั้นบน มีสภาพเป็นดินร่วนปนทราย ที่ระดับลึกลงเป็นชั้นดินทรายปนกรวด ตัวอย่างลักษณะชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่การตรวจวัดของข้อมูลชั้นดินจากการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring log) ดังภาพที่ 4-21 และข้อมูลการตรวจวัดมีรายละเอียด ดังตารางที่ 4-18

ตารางที่ 4-18 แสดงข้อมูลทั่วไปของการตรวจวัดวันที่ 6-8 กันยายน 2554

น้ำหนักวัตถุ ระเบิด (Kg)	ความลึกหลุม ระเบิด (m)	ลักษณะการ เก็บข้อมูล	พื้นที่โดยทั่วไป	ชนิดของวัตถุระเบิด
1	15-19	1 แถบ (แนวตั้ง)	สวนยางพารา	แอมโมเนียไนเตรท



ภาพที่ 4-20 แสดงลักษณะพื้นที่การเก็บข้อมูล



ภาพที่ 4-21 แสดงข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน จ. สุราษฎร์ธานี (กองวิเคราะห์และวิจัย กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2554:online)

การตรวจวัดข้อมูลในภาคสนาม ตัวอย่างข้อมูลที่วัดจากการระเบิดแบบหลุมเดี่ยว (single shot point) ผลการตรวจวัดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (Peak Particle Velocity, PPV) และความถี่หลัก (Dominant Frequency) ที่ได้จากมาตรวัดแต่ละตัวที่ระยะต่างๆ ดังตารางที่ 4-19

ตารางที่ 4-19 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดข้อมูลในระยะต่างๆ วันที่ 9 สิงหาคม 2554

Geophone No.	PPV (mm/s)	Frequency (Hz)	Distance (m)
1	0.7	48.83	317.3
2	0.74	50.78	297.3
3	0.76	42.97	277.3
4	1.1	46.88	257.3
5	1.06	52.73	237.3
6	1.28	39.06	217.3
7	1.15	50.78	197.3
8	1.71	37.11	177.3
9	1.48	41.02	157.3
10	1.44	41.02	137.3
11	1.71	39.06	97.3
12	2.52	48.83	77.3
13	3.39	41.02	57.3
14	3.07	41.02	37.3
15	5.86	48.83	17.3
16	9.31	89.84	37.3

4.2 การจำแนกพื้นที่การตรวจวัด

จากรายละเอียดการตรวจวัดความสั่นสะเทือนของพื้นดินพบว่าสภาพพื้นที่การตรวจวัดมีแตกต่างกัน โดยการเคลื่อนที่และการลดทอนคลื่นสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสภาพธรณีวิทยาชั้นพื้นผิว เนื่องจาก ลักษณะชั้นดินเป็นตัวกลางการส่งผ่านพลังงานการสั่นสะเทือนโดยเฉพาะบริเวณใกล้พื้นผิวคลื่นสั่นสะเทือนจะส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับโครงสร้างทางวิศวกรรมในพื้นที่การตรวจวัด ดังนั้นการจำแนกพื้นที่การตรวจวัดที่มีลักษณะชั้นดินมีความสอดคล้องและนำข้อมูลคลื่นสั่นสะเทือนมาทำการวิเคราะห์และแปรผลข้อมูลร่วมกัน ดังนี้

ลักษณะดินปนทราย : เป็นพื้นที่ที่ลักษณะชั้นผิวดินมีสภาพเป็นดิน ปนทรายและ/หรือดินเหนียว ประกอบด้วย พื้นที่การตรวจวัดจังหวัดมหาสารคาม สุรินทร์ และสุราษฎร์ธานี

ลักษณะดินทรายปนหิน : เป็นพื้นที่ที่ลักษณะชั้นผิวดินมีสภาพเป็น ดินทรายปนหินหรือลักษณะพื้นที่ที่มีความลาดชันและภูเขา ประกอบด้วย พื้นที่การตรวจวัด จังหวัดอุดรธานี กา พินันธุ์ และอุบลราชธานี

ลักษณะดินเหนียว : เป็นพื้นที่ที่ลักษณะชั้นผิวดินมีสภาพเป็น ดินเหนียวที่มีความหนา มากกว่า 3 เมตรขึ้นไป ประกอบด้วยพื้นที่การตรวจวัดจังหวัดสุพรรณบุรี

4.3 การวิเคราะห์ผลการสัมประสิทธิ์ของพื้นดิน

ในการระเบิดแบบหลุมเดี่ยว (single hole) ข้อมูลการสัมประสิทธิ์ของพื้นดินประกอบด้วย ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด ระยะทางจากหลุมระเบิดและน้ำหนักวัตถุระเบิดที่แตกต่างกัน ใน การศึกษาครั้งนี้การวิเคราะห์การทำนายความสัมประสิทธิ์ของพื้นดินจะทำการทำนายตามลักษณะ พื้นดิน ซึ่งการสัมประสิทธิ์ของพื้นดินสามารถอธิบายด้วยค่าความเร็วอนุภาคแนวแกนตั้งและ ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง แม้ ว่าการทำนายค่าความสัมประสิทธิ์ของพื้นดินจะมีผู้ศึกษาอย่าง กว้างขวางในอดีตซึ่งความสัมพันธ์ที่มีความน่าเชื่อถือมากที่สุดคือค่าอัตราส่วนระยะทาง (scaled distance) กับค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) โดยที่ค่าอัตราส่วนระยะทางจะแสดงถึงปริมาณ น้ำหนักวัตถุระเบิดในการสร้าง พลังงานคลื่นสัมประสิทธิ์และผลกระทบของระยะทาง ค่า อัตราส่วนระยะทางสามารถอธิบาย ดังสมการ 4-1

$$SD = \frac{R}{\sqrt{W}} \quad (4-1)$$

โดยที่ ค่า SD คือ อัตราส่วนระยะทาง และค่า R คือระยะทางจากตำแหน่งหลุมระเบิด (m), และค่า W คือน้ำหนักวัตถุระเบิด (kg)

ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) สามารถหาได้จากสมการของ USBM ซึ่งเป็นที่ยอมรับกัน อย่างกว้างขวาง ดังสมการที่ 4-2

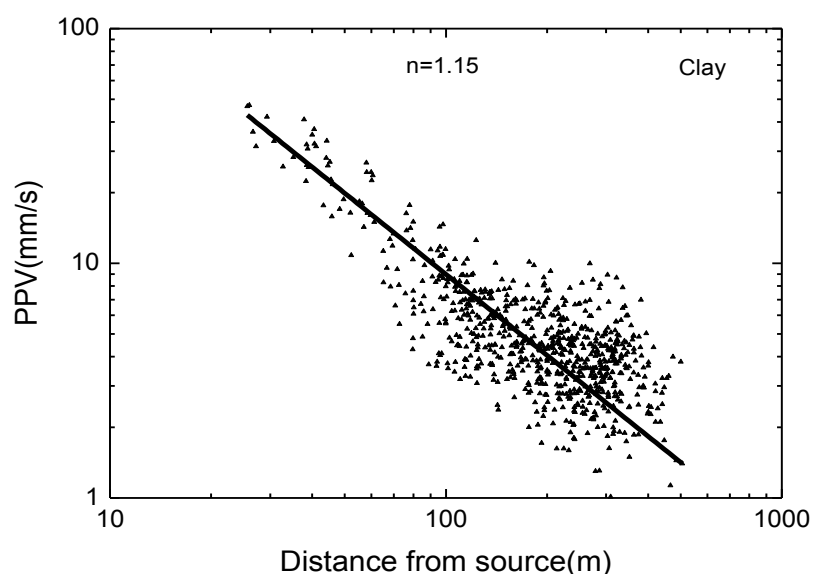
$$PPV = K(SD)^{-\alpha} \quad (4-2)$$

โดยที่ค่า K คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านพื้นดิน และค่า α คือ ค่าการลดทอนความเร็ว อนุภาคสูงสุด ซึ่งค่า K, α ขึ้นกับปัจจัยจากพื้นที่สำรวจ

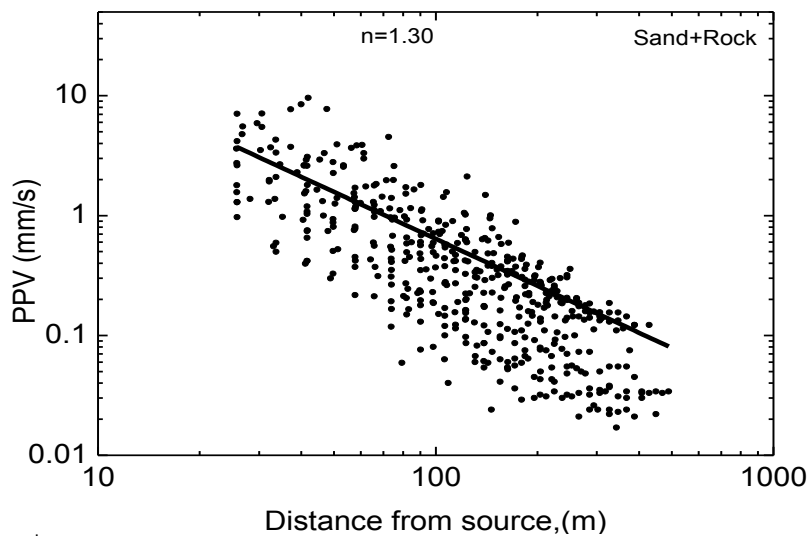
ในทางตรงกันข้าม การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าอัตราส่วนระยะทาง ซึ่งการวิเคราะห์แบบถดถอยอย่างง่ายจำเป็นต้องมีการดำเนินการโดยใช้ข้อมูลจากการระเบิด

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับระยะทาง

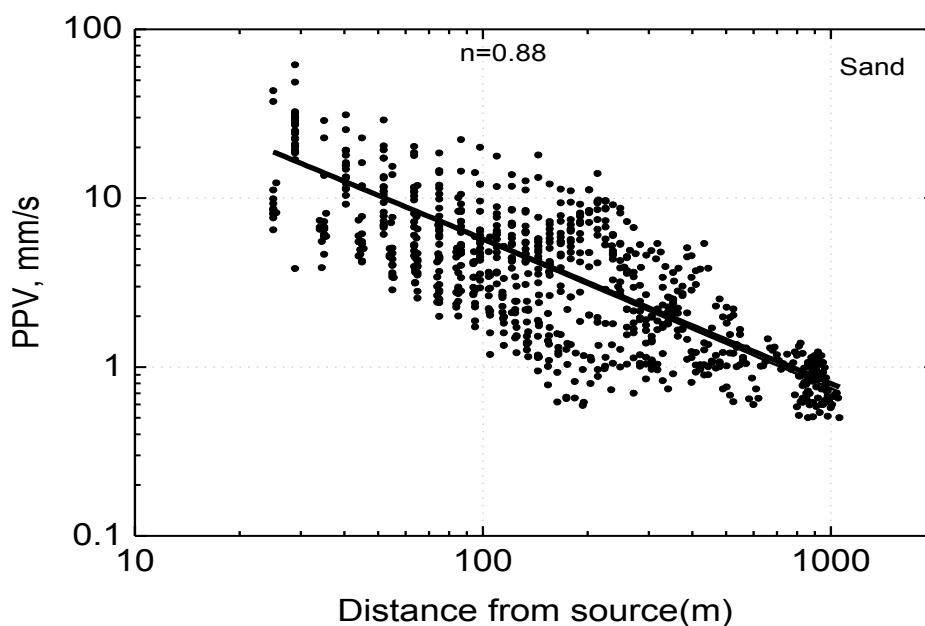
เมื่อนำข้อมูลการตรวจวัดมาสร้างความสัมพันธ์ เชิงเส้นแบบ log-log ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดและระยะทางจาก วัดถูระเบิด ซึ่งแยกตามลักษณะดิน ดัง ภาพที่ 4-22, ภาพที่ 4-23 และภาพที่ 4-24 พบว่า ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดมีค่าลดลงตามระยะทางที่ เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่นสั้นสะเทือน (n) ทุกลักษณะชั้นดิน มีค่าเท่ากับ 1.15, 1.30, 0.85 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม คลื่นสั้นสะเทือนจากการตรวจวัดเกิดจากการรวมตัวกัน ระหว่างคลื่นในตัวกลาง (Body waves) ซึ่งมีค่า n เท่ากับ 2 และคลื่นพื้นผิว (Surface wave) ซึ่งมีค่า n เท่ากับ 0.5 (Kim and Lee, อ้างอิง G.A. Athanasopoulos, P.C. Pelekis, 2000) โดยที่ระยะทางมากกว่า 500 เมตร น้ำหนักวัดถูระเบิดมีค่าไม่เกิน 4 กิโลกรัม ทุกลักษณะชั้นดิน ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดจะมีค่าไม่เกิน 3 มม/วินาที ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างประเภทต่างๆ ตามการสั้นสะเทือนเพื่อป้องกันผลกระทบต่ออาคารตามประกาศคณะสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2553 ดังตารางที่ 2-22



ภาพที่ 4-22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับระยะทาง ลักษณะชั้นดินเหนียว



ภาพที่ 4-23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับระยะทาง
ลักษณะหินปนทราย

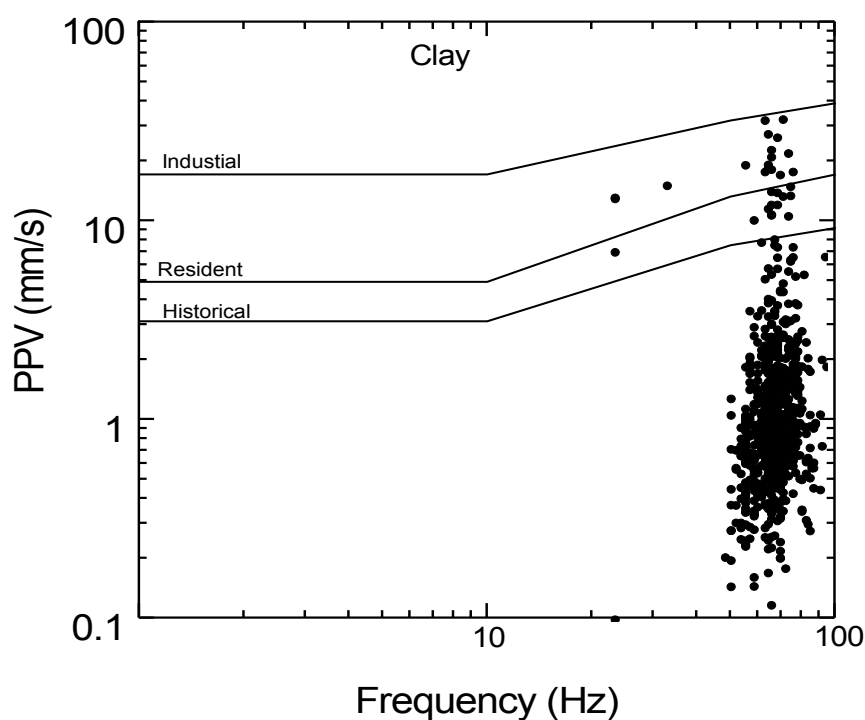


ภาพที่ 4-24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับระยะทางลักษณะดินปนทราย

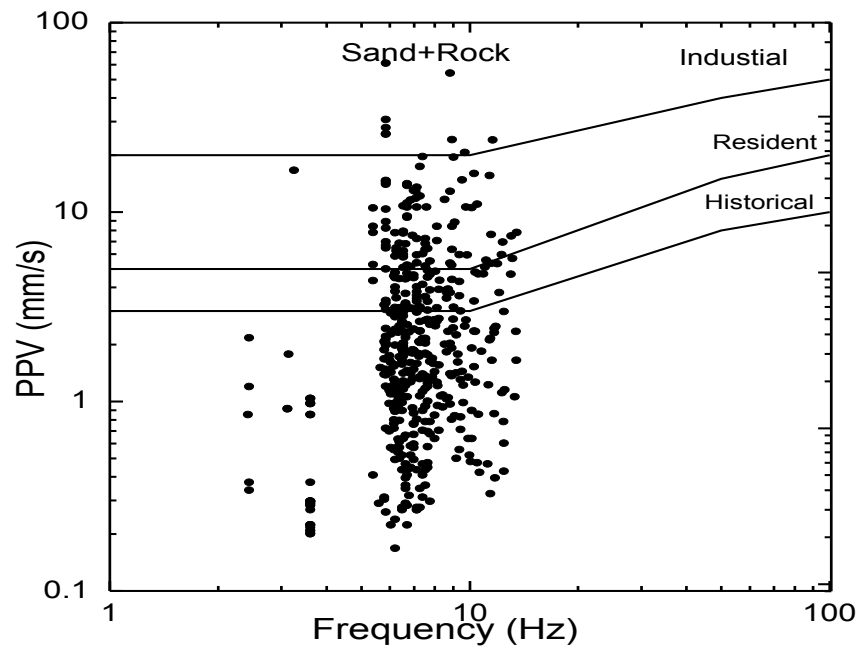
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่

เมื่อนำข้อมูลการตรวจวัดมาสร้างความสัมพันธ์ แบบ log-log ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดและค่าความถี่ จากการระเบิดซึ่ง แสดงในรูป กราฟแยกตามลักษณะ ชั้นดิน ดังภาพที่ 4-25, ภาพที่ 4-26 และภาพที่ 4-27 พบว่า ความถี่การสั่นสะเทือนในพื้นที่ดินเหนียวมีค่าสูงกว่าพื้นที่ดิน

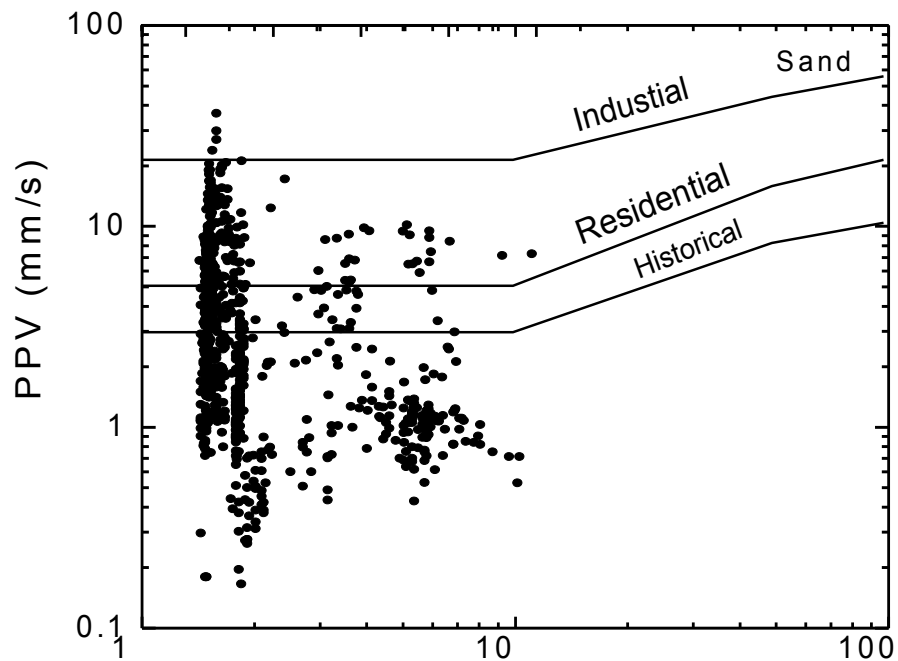
ปนทรายและพื้นที่หินปนทรายซึ่งชั้นดินเหนียวอ่อนมีความสามารถกระจายการความถี่การสั่นสะเทือนมากกว่าชั้นดินประเภทอื่น (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2554: ออนไลน์) เมื่อพิจารณาความเร็วอนุภาคสูงสุดและค่าความถี่เปรียบเทียบกับ มาตรฐานการสั่นสะเทือนเพื่อป้องกันผลกระทบต่ออาคารตามประกาศคณะสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2553 พบว่า พื้นที่ดินปนทรายและพื้นที่หินปนทรายค่าการตรวจวัดมีค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดมีค่าสูง และมีค่าความถี่ต่ำ ซึ่งมีค่าสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานสำหรับโครงสร้างโบราณสถานต่างๆ มากพอสมควร ส่วนพื้นที่ดินเหนียวค่าการตรวจวัดมีค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดมีค่าสูง และมีค่าความถี่สูง ซึ่งมีค่าสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานสำหรับโครงสร้างโบราณสถานต่างๆ ไม่มากนัก จากที่กล่าวในบทที่ 2 ค่าความสั่นสะเทือนของพื้นดินจะขึ้นอยู่กับความถี่ของอนุภาคตัวกลาง และค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างอาคารมีค่าระหว่าง 4-12 เฮิรตซ์ และค่าความถี่ต่ำ จะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม มากกว่าค่าความถี่สูง



ภาพที่ 4-25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ของดินเหนียว



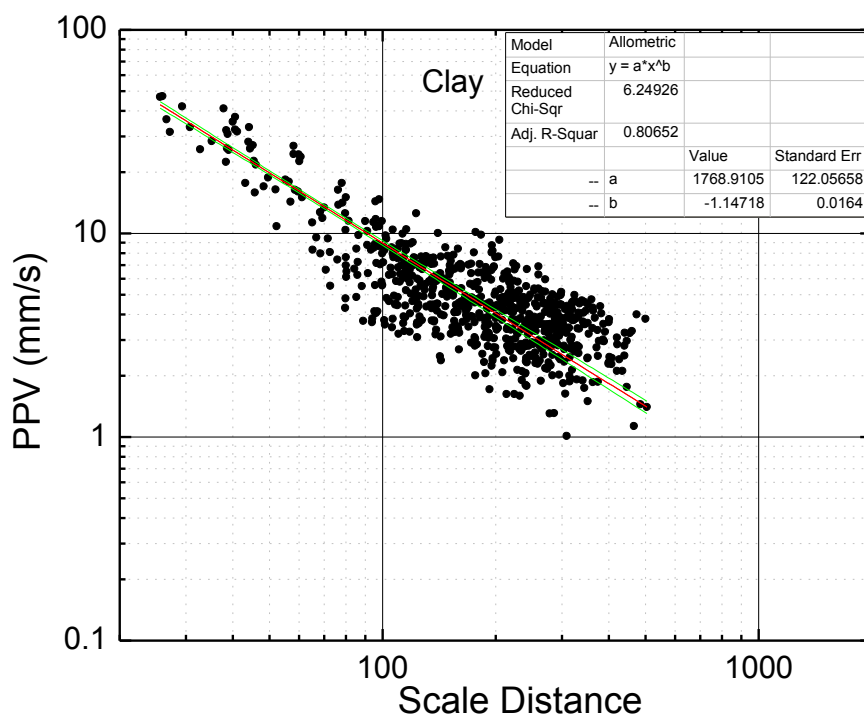
ภาพที่ 4-26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ของดินปนหิน



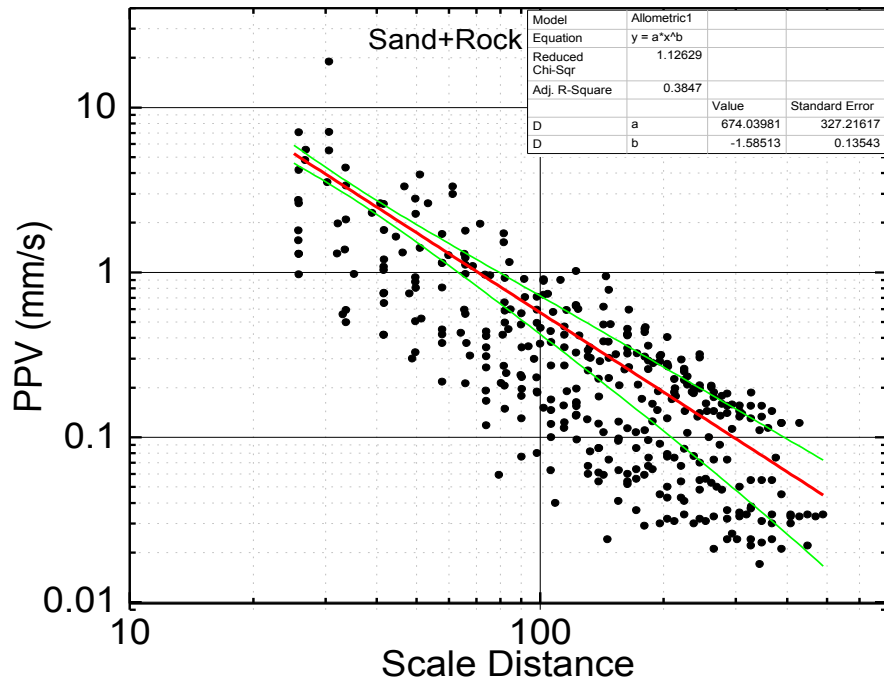
ภาพที่ 4-27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าความถี่ของดินปนทราย

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าอัตราส่วนระยะทาง

การหาความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบ log-log ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดและระยะทางซึ่งขึ้นกับน้ำหนักรวดตะกอนได้มีผู้เสนอทฤษฎีไว้มากมาย อย่างไรก็ตามการศึกษาจะนำเสนอตามความสัมพันธ์ของ United States Bureau of Mines (USBM) ดังภาพที่ 4-28, ภาพที่ 4-29 และภาพที่ 4-30 พบว่า ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดมีความสัมพันธ์กันในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าอัตราส่วนระยะทาง ตัวแปรของความสัมพันธ์แบบถดถอยเชิงเส้น สรุปดังตารางที่ 4-20 ค่าการส่งผ่านการสั่นสะเทือนในพื้นที่ดินเหนียวมีค่าสูงที่สุด (ค่า a) เท่ากับ 1768.9 และพื้นที่ดินปนทรายมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 302.52 ส่วนค่าการลดทอนความเร็วอนุภาคในพื้นที่ดินปนทรายมีค่าการลดทอนสูงที่สุด (ค่า b) เท่ากับ 1.55 และในพื้นที่หินปนทรายมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.55 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากการปรับแก้ (R^2 -adj) ในพื้นที่ดินเหนียวมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.806 และในพื้นที่หินปนทรายมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.385

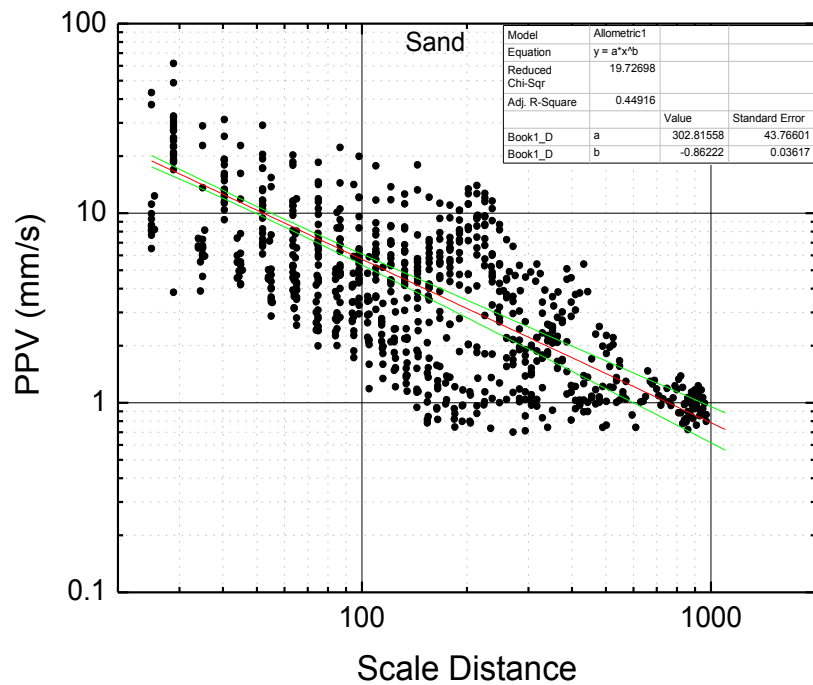


ภาพที่ 4-28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดและอัตราส่วนระยะทางของดินเหนียว



ภาพที่ 4-29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วอนุภาคสูงสุดและอัตราส่วนระยะทางของหินปน

ทราย



ภาพที่ 4-30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุดและอัตราส่วนระยะทางของดินปน

ทราย

ตารางที่ 4-20 แสดงตารางสรุปค่าตัวแปรจากความสัมพันธ์แบบถดถอยเชิงเส้น

สภาพพื้นที่	ตัวแปรจากความสัมพันธ์			สมการ
	a	b	R ² -adj	PPV = aX ^b
ดินเหนียว	1768.91	-1.1472	0.8065	PPV = 1768.91X^{-1.1472}
หินปนทราย	302.82	-0.88	0.4492	PPV = 302.82X^{-0.8622}
ดินปนทราย	674.04	-1.5851	0.3847	PPV = 674.04X^{-1.5851}

หมายเหตุ ค่า x หมายถึงค่าอัตราส่วนระยะทาง (Scale Distance)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความสัมพันธ์ความสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการใช้วัตถุระเบิด โดยทำการเก็บข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ ภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ โดยมีลักษณะพื้นที่โดยทั่วไปมีความแตกต่างกัน เช่น ลักษณะทุ่ง นา สวนยางพารา และพื้นที่ลาดเชิงเขา ซึ่งจากการตรวจวัดความสั่นสะเทือนและผลการวิเคราะห์ สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. จากการตรวจวัดความสั่นสะเทือนซึ่งมีพื้นที่แตกต่างกัน สามารถจำแนกลักษณะพื้นที่ได้ ดังนี้ พื้นที่ดินปนทราย พื้นที่ทรายปนหิน และพื้นที่ดินเหนียว ซึ่งผลการตรวจวัดสามารถสรุปได้ ดังนี้

สภาพพื้นที่	ตัวแปรจากความสัมพันธ์			สมการ $PPV = aX^b$
	a	b	R ² -adj	
ดินเหนียว	1768.91	-1.1472	0.8065	$PPV = 1768.91X^{-1.1472}$
หินปนทราย	302.82	-0.88	0.4492	$PPV = 302.82X^{-0.8622}$
ดินปนทราย	674.04	-1.5851	0.3847	$PPV = 674.04X^{-1.5851}$

หมายเหตุ ค่า x หมายถึงค่าอัตราส่วนระยะทาง (Scale Distance)

จากตารางพบว่า ค่าการส่งผ่าน ความสั่นสะเทือน (a) พื้นที่ดินเหนียวมีค่ามากที่สุด ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่นสั่นสะเทือน (b) ทุกลักษณะชั้นดินซึ่งเกิดจากการรวมตัวกัน ระหว่างคลื่นในตัวกลาง (Body waves) และคลื่นพื้นผิว (Surface wave)

2. ความเร็วอนุภาคสูงสุดมีค่าการลดทอนคลื่นสั่นสะเทือนแบบเลขชี้กำลังตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความแตกต่างจากลักษณะพื้นที่ส่งผลต่อความสั่นสะเทือน จากผลการตรวจวัดความสั่นสะเทือน พบว่า ระยะทางมากกว่า 500 เมตร น้ำหนักวัตถุระเบิดมีค่าไม่เกิน 4 กิโลกรัมทุกลักษณะชั้นดิน ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดจะมีค่าไม่เกิน 3 มม/วินาที จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งปลูก

สร้างประเภทต่างๆ ตามการสิ้นสະเทือนเพื่อการป้องกันผลกระทบต่ออาคารตามประกาศคณะ
สิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2553

3. ความถี่การสิ้นสະเทือนในพื้นที่ดินเหนียวมีค่าสูงกว่าพื้นที่ดินปนทรายและพื้นที่หินปน
ทรายซึ่งชั้นดินเหนียวอ่อนมีความสามารถกระจายการความถี่การสิ้นสະเทือนมากกว่าชั้นดิน
ประเภทอื่น และพื้นที่ดินปนทรายและพื้นที่หินปนทรายค่าการตรวจวัดมีค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดมี
ค่าสูงและมีค่าความถี่ต่ำ พื้นที่ดินเหนียวค่าการตรวจวัดมีค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดมีค่าสูง และมี
ค่าความถี่สูง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เชื้อเพลิงธรรมชาติ , กรม .2553. ความรู้เรื่องปิโตรเลียม (ออนไลน์) . แหล่งที่มา : <http://www.dmf.go.th>[5 กรกฎาคม 2553]
- ทรัพยากรธรณี, กรม. 2527. การใช้วัตถุระเบิดในงานเหมืองแร่และเหมืองหิน พัฒนาที่ดิน,กรม. การใช้ประโยชน์ที่ดิน (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.ldd.go.th>[5 กรกฎาคม 2554]
- โยธาธิการและผังเมือง ,กรม . ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน (ออนไลน์) .แหล่งที่มา : <http://www.dpt.go.th>[10 กรกฎาคม 2553]
- วิชาการเกษตร , กรม. การใช้ประโยชน์ที่ดิน (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th>[3 กรกฎาคม 2554]
- คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ , สำนักงาน. 2553. มาตรฐานความ สันตะเพื่อนเพื่อป้องกันผลกระทบต่ออาคาร. กรุงเทพมหานคร. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2555. รายงานโครงการกำหนดระยะปลอดภัยของแรงสั่นสะเทือนจากการสำรวจปิโตรเลียมโดยวิธีคลื่นไหวสะเทือน . กรุงเทพมหานคร: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (อัดสำเนา)
- ฉบับ ปัทมสุต. 2523. วัตถุระเบิด. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฉัตรชัย โชติษฐียงกุล , เซาว์ หิรัญติยะกุล , เนาะ สง่าบ้านโคก. 2548 การพัฒนาแบบจำลองทางอุทกวิทยาเพื่อการศึกษาสมดุลของน้ำสำหรับลุ่มน้ำย่อยที่ดิน นเค็มในลุ่มน้ำมูล ,ในการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ 10, 2-4 พฤษภาคม 2548 ณ โรงแรมแอมบาสเดอร์ซีดี จอมเทียน จังหวัดชลบุรี
- นฤวัต กลอยเทพ และ วีระพล ฮวดพรหม . 2552. การศึกษาการลดทอนการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็ม .โครงการวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไปร เอ็น เทคโนโลยี จำกัด, บริษัท. 2552. รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโครงการสำรวจปิโตรเลียมโดยวิธีวัดความไหวสะเทือนแบบสองมิติ และสามมิติแปลงสำรวจบนบก หมายเลข L15/50 จังหวัดขอนแก่น และชัยภูมิ. (อัดสำเนา)

- เฟิร์ล ออย (รีซอสเซส) จำกัด, บริษัท. 2553. รายงานแผนการบริหารจัดการด้านความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อมสำหรับการสำรวจปิโตรเลียมโดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบ 2 มิติ แปลงสำรวจบนบกหมายเลข L50/50 จังหวัดบุรีรัมย์ และจังหวัดสระแก้ว. (อัดสำเนา)
- มิตรา เอ็นเนอร์ยี ลิมิเต็ด, บริษัท. 2552. โครงการสำรวจปิโตรเลียมบนบกด้วยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบ 2 มิติ และ 3 มิติแปลงสำรวจบนบกหมายเลข L45/50 กรุงเทพมหานครปทุม และนนทบุรี. (อัดสำเนา)
- สภาวิศวกร. 2552. มาตรฐานการใช้วัตถุระเบิดในงานวิศวกรรม.
- สุพจน์ เตชวรสินสกุล. 2549. พฤติกรรมของดินทางพลศาสตร์ พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

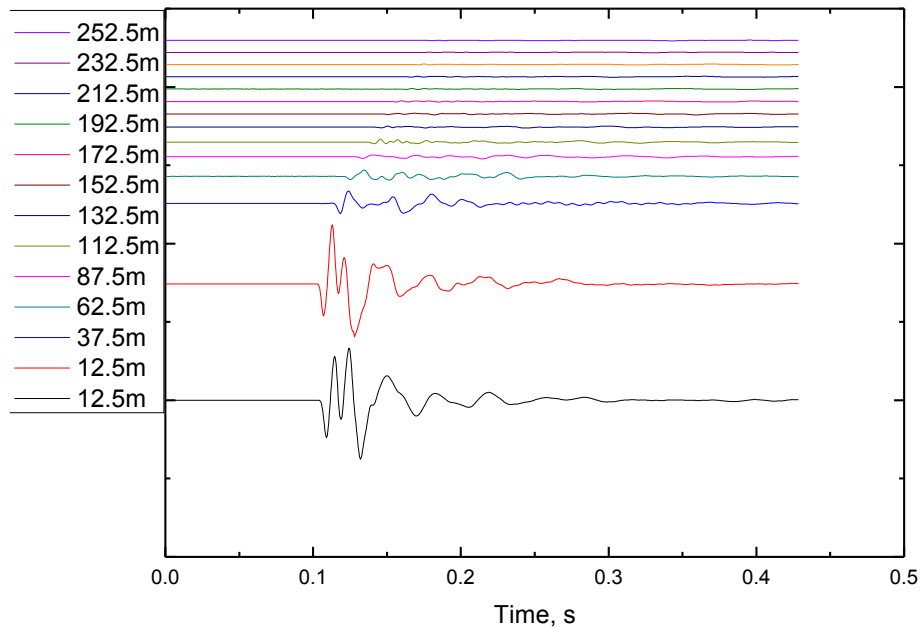
ภาษาอังกฤษ

- Akeil, S. 2004. Comparative study on ground vibration prediction by statistical and neural networks approaches at Tuncbilek coal mine, Panel byh. Master's Thesis. Department of Mining Engineering, Middle east technical university.
- Ambraseys, N. R. and Hendron, A. J. (1968). Dynamic behavior of rock. United States of America: John Wiley and Sons.
- Athanasopoulos, G. A. and Pelekis, P.C., (2000), Effect of Soil Stiffness in the Attenuation of Rayleigh-Wave Motions from Field Measurements, Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 19, no 4:277-288.
- Auersch, L and Said, S. 2010. Attenuation of ground vibrations due to different technical sources, Earthquake Engineering and Engineering Vibration. vol 9: 337-344
- Dowding, C. H. (1984). Blast vibration monitoring and control. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Giraudi, A. Cardu, M. and Kecojevic, V. 2009. An Assessment of Blasting Vibrations: A Case Study on Quarry Operation. American Journal of Environmental Sciences vol 5, no 4: 467-473
- Guowei, M. and Yingxin, Z. 2000. Assessment of structure damage to blasting induced ground motions. J: 1378- 1389.

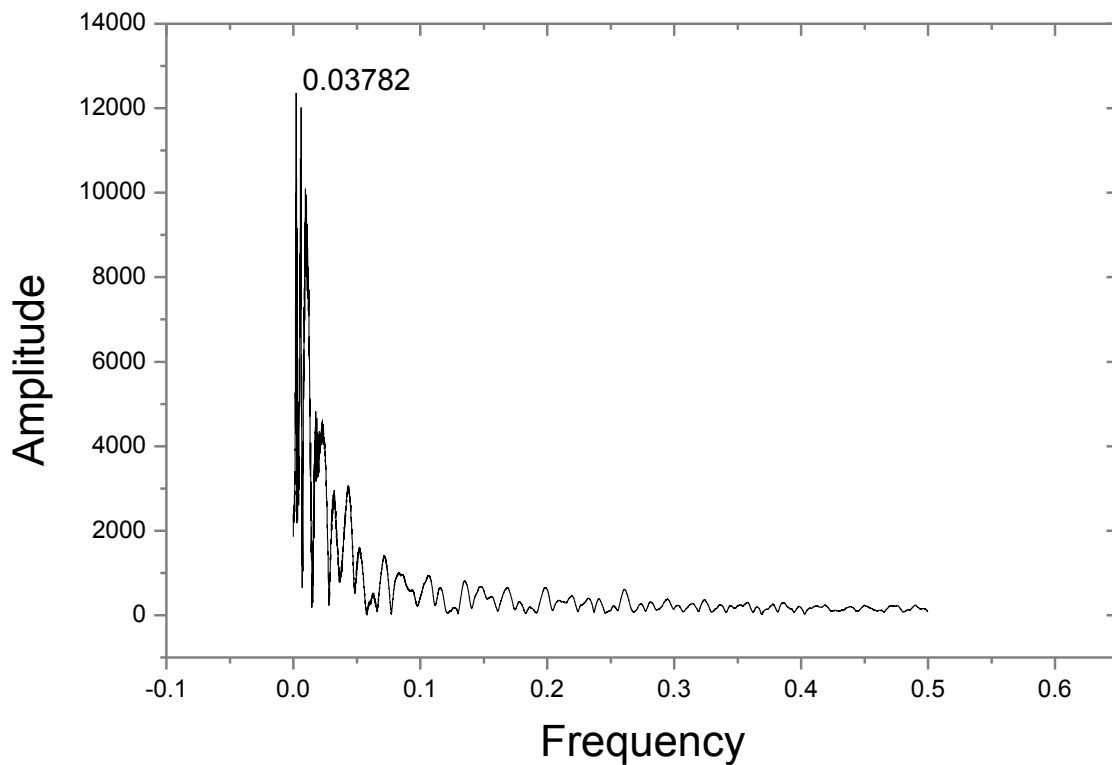
- Hossaini, S. M. and Sen, G. C. 2006. Ground Vibrations Arising from Using Two Types of Explosives – A Comparative Study in Azizi, Turkey. Coal Operators' Conference: 349-364. University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy: University of Wollongong.
- Jones and Stokes, 2004. Transportation and construction induced vibration guidance manual. California: Department of Transportation, Noise, Vibration and Hazardous Waste Management Office, USA. (Mimeographed)
- Kujur, B. K. 2010. Blast vibration studies in surface mines. Bachelor's Thesis. Degree in Mining Engineering, National Institute of Technology Rourkela.
- Kuzu, C. and H. Ergin. 2005. An assessment of environmental impacts of quarry-blasting operation: A case study in Istanbul, Turkey. Environ. Geol. Vol 48, no 2: 211- 217.
- Lindsay, D.E. 1989. An investigation of blasting criteria for structural and ground vibration. Master's Thesis. College of Engineering and Technology, Ohio University.
- Manoj, K. and Singh, T. N. 2007. Evaluation of blast-induced ground vibration predictors. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol 45, no 2: 116–125
- Mohamed M T. Vibration control. Department of Mining and Metallurgical, Faculty of engineering, Assiut university.
- Nicolson, R. F. 2005. Determination of blast vibration using peak particle velocity at Bengal quarry in St Ann Jamaica. Master's thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Lulea University of Technology.
- Park.D et al., 2009. A numerical study on the screening of blast-induced waves for reducing ground vibration. Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 42, no. 3: 449-473
- Persson, P. A. 1994. Rock Blasting and Explosives Engineering. Boca Raton, USA: CRC Press
- Santamarina, J.C., 2001. Determination of critical state parameters in sandy soils. Geotechnical Testing Journal , GTJODJ, vol 24 no 2:185-192.

- Sharma, P.D. 2006. Open Pit Mega Blasting with In-Hole Delays and / or Pre-Splitting of Production Blast – Measures to Control Adverse Impact of Complex Vibration Arising due to Presence of Underground Working in The Vicinity or in Otherwise Sensitive Areas. Journal of Mining Engineer's, vol 45 No.1
- Siskind, D. E and Kopp, J. W. 1987 Blasting effects on Appalachian water wells, Proceedings Bureau of Mines Technology Transfer Seminar. Chicago. USA
- Telford, W. S, et al. (1990). Applied Geophysics, Second Edition. UK:Cambridge University Press.
- Tomberg, T. and Toomik, A. 1999. Environmental impact of mine blasting, Proceedings In Environment Technology Resources International Conference. Rezekne, Latvia.
- Tripathy, G. R. and Gupta, I. D. 2002. Prediction of ground vibration due to construction blasts in difference type of rock. J.Rock Mech and Rock Eng, vol 35 no 3:195–204 [technical note]
- Wu.C et al., 2003. Characterisation of underground blast-induced ground motions from large-scale field tests, J. Shock Waves, vol.13, no 3: 237–252.

ภาคผนวก



ภาพ ก-1 แสดงตัวอย่างคลื่นสะเทือนในเวลาต่างๆ



ภาพ ก-2 แสดงตัวอย่างค่า predominant period

Date of Record	17 November 2010															
Sample Rate (Hz)	1652															
Calibration Values for each Geophone																
Geophone No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Calibration Values (V/mm/s)	11.78	10.77	11.24	10.71	10.3	11.95	10.89	12.14	11.67	12.24	10.4	10.02	11.05	11.08	11.08	11.24
Raw Data																

Time (sec)	Geo-1 (V)	Geo-2 (V)	Geo-3 (V)	Geo-4 (V)	Geo-5 (V)	Geo-6 (V)	Geo-7 (V)	Geo-8 (V)	Geo-9 (V)	Geo-10 (V)	Geo-11 (V)	Geo-12 (V)	Geo-13 (V)	Geo-14 (V)	Geo-15 (V)	Geo-16 (V)
0.00061	-0.001	-0.001	-0.001	0	-0.003	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	0.001	0	-0.015	-0.001	0	-0.013	-0.001
0.00121	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.016	-0.002	0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00182	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.012	-0.001	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00242	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.014	-0.001	0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00303	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00363	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.014	-0.002	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00424	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00484	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	-0.003	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00545	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	0.003	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00605	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00666	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00726	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.014	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00787	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.014	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00847	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.016	-0.001	-0.004	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00908	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.015	-0.001	0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.00969	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01029	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.014	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.0109	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.014	-0.001	0.003	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.0115	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.014	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01211	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.015	-0.001	0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01271	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01332	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01392	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01453	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.014	-0.001	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01513	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.012	-0.001	0.003	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01574	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	0.003	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01634	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.012	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01695	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01755	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01816	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.012	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01877	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.012	-0.001	0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01937	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.012	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.01998	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.02058	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.012	-0.001	0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.02119	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.02179	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.011	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.0224	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.023	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.012	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.02361	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.012	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.02421	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.012	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.02482	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.013	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
0.02542	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.012	-0.001	0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001

ภาพ ก-3 แสดงตัวอย่างข้อมูลการสั่นสะเทือน

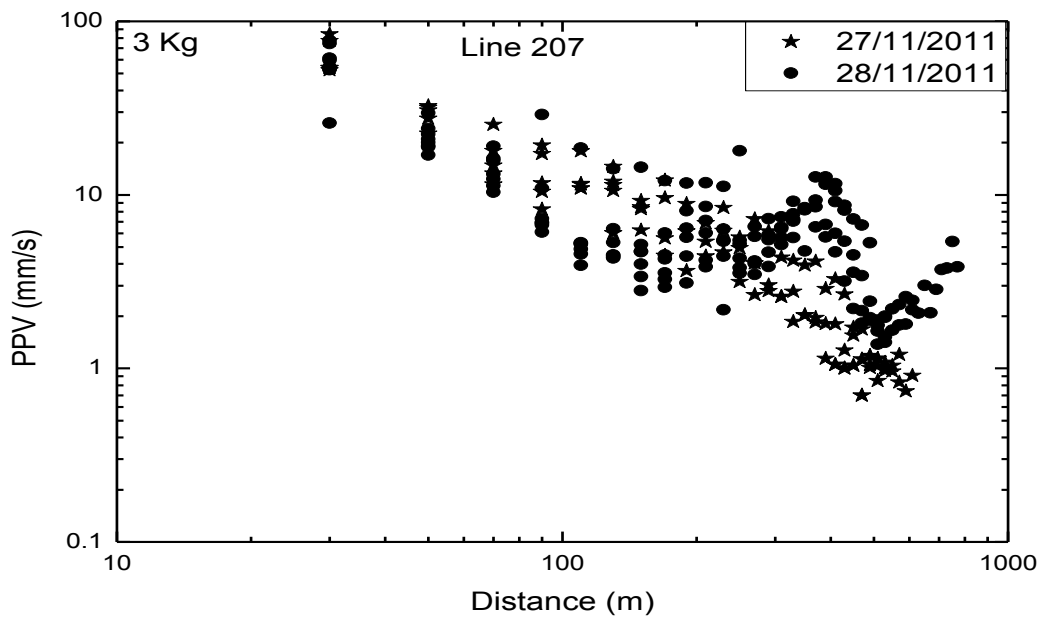
-0.001	-0.001	-0.003	-0.009	0.019	0.022
-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.005
-0.001	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.004
-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.001	-0.005
-0.001	-0.002	-0.002	-0.001	-0.002	-0.006
-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.006
-0.001	-0.001	-0.002	-0.001	-0.002	-0.007
-0.001	-0.002	-0.001	-0.001	-0.002	-0.007
-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002	-0.007
-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.008
-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.001	-0.008
-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002	-0.009
-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.009
-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002	-0.009
-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.003	-0.01

ภาพ ก-4 แสดงตัวอย่างข้อมูลดิบจากการตรวจวัด

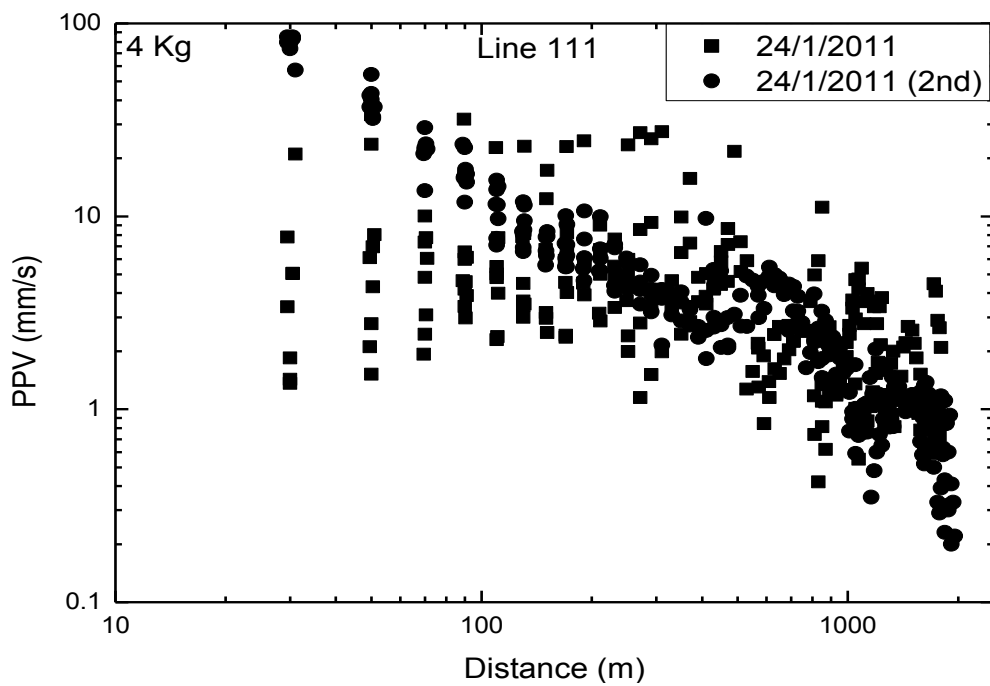
fileName	MaxValue-Geo1 (mm/s)	DominantFrequency (Hz)	Distance (m)
5088.5-d14_14_32 .csv	2.24	0.26	310
5089.5-d14_16_26 .csv	2.59	49.64	270
5090.5-d14_19_08.csv	4.04	7.39	230
5092.5-d14_22_29 .csv	8.43	9.24	150
5096.5-d14_27_07.csv	127.07	4.22	10
5098.5-d14_30_43 - .csv	11.71	7.66	90
5100.5-d14_36_25 -.csv	9.58	46.2	170
5102.5-d14_39_50 .csv	4.95	10.82	250
5106.5-d14_56_19 .csv	1.66	18.48	330
5108.5-d15_02_14 .csv	1.12	6.07	410
5110.5-d15_06_37 .csv	1.44	19.27	490
5112.5-d15_12_43 .csv	0.92	17.69	570
5114.5-d15_19_02 .csv	0.54	18.22	650

ภาพ ก-5 แสดงตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดจากการแปลงค่าแล้ว

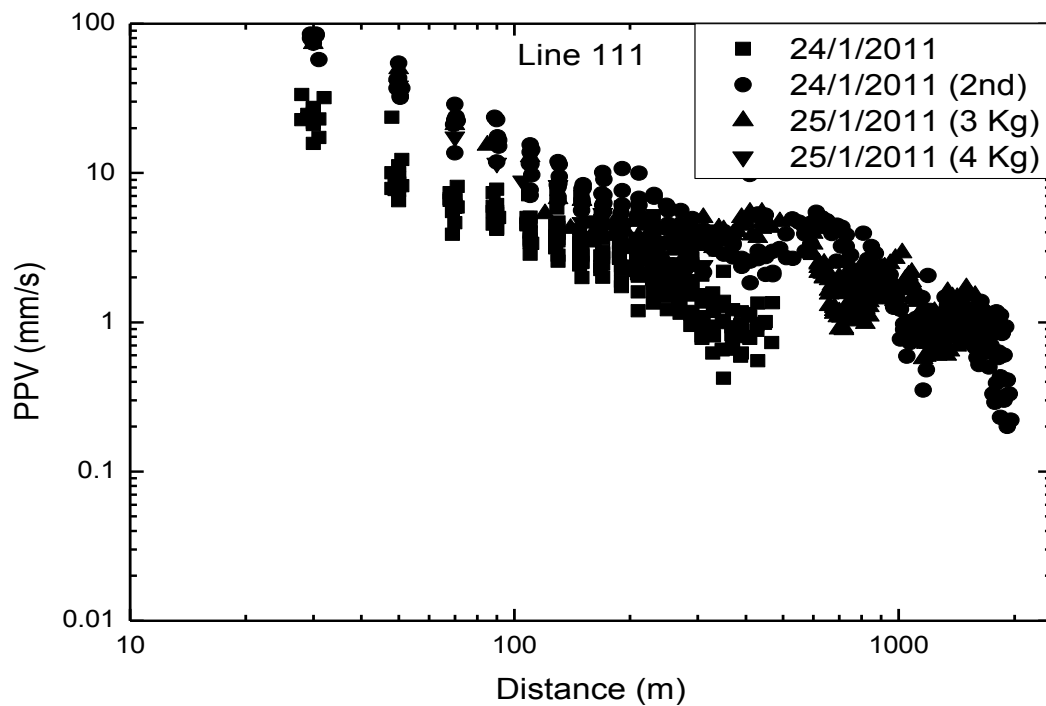
ผลการตรวจวัดความสั่นสะเทือน



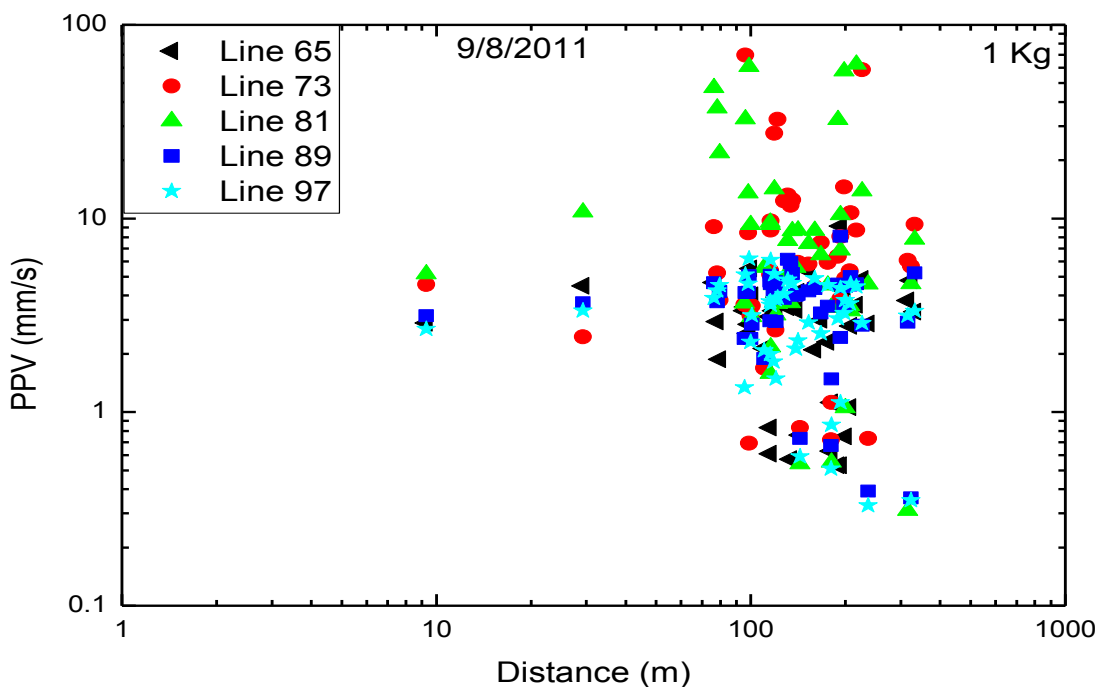
ภาพ ก-6 แสดงตัวอย่างPPVกับระยะทาง Line 207



ภาพ ก-7 แสดงตัวอย่างPPVกับระยะทาง Line111



ภาพ ก-8 แสดงตัวอย่าง PPV กับระยะทาง Line 111 น้ำหนักวัตถุระเบิดแตกต่างกัน



ภาพ ก-9 แสดงตัวอย่าง PPV กับระยะทางที่ตำแหน่งวัตถุระเบิดต่างๆ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกษิตศ สิ้นโน เกิดเมื่อวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ.2524 ที่จังหวัดหนองคาย สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยบูรพา ปีการศึกษา 2550 และเข้า
ศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมธรณีเทคนิค ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาการศึกษาด้าน ปีการศึกษา 2552