

都心地 發破에서의 地盤振動 測定에 關한 研究

金雄秀* · 李慶雲** · 林漢旭*** · 徐栢洙****

A study on Measurement of Blast-Induced Ground Vibrations in Urban Areas

Woong-Soo Kim* · Kyoung-Woon Lee** · Han-Uk Lim*** · Baek-Soo Suh****

Abstracts

The blast vibrations were measured from 10 places through Seoul subway area to study their effects on the structures and to establish the safe blasting limits.

For purpose of the present study, particle velocity only was recorded and analyzed, because it correlated most directly with damage.

The results are as follows :

- (1) The proagation equation, $V=K(D/W^{1/3})^{-n}$ was obtained. Typical values could be found for n range from 1.7 to 1.5 and for k range from 48 to 138.
- (2) From the relationship between schmidt hammer rebound hardness and uniaxial compressive strength, $Sc=0.514 \times (S, H)^{0.23}$, the compressive strength at any area can be assumed.
- (3) The use of AN--FO and other explosives with low detonation pressure may reduce vibration levels generated.

1. 序 論

物體를 破壞하기 爲하여 發破作業을 施行하는 境遇 이로 因하여 地盤의 振動(ground vibration), 破壞되는 物體의 飛散, 騒音 및 空氣中을 傳播하는 爆風壓(air blast) 등이 發生되어 周邊 施設物에 被害를 미칠 憂慮가 있기 때문

에 都心地에서의 發破는 많은 制限을 받게 된다. 따라서 被害를 줄이기 爲하여 都心地 發破의 境遇 微振動爆藥을 使用한다든가, 制御發破(controlled blasting) 工法을 採擇하는데 完全한 것은 아니다.

最近 서울을 비롯한 都市의 地下鐵 工事中 가장 큰 問題點中の 하나는 地下鐵 路線이 商街, 住宅街, 病院, 文化財 및 其他 主要 施設

* 江原大學校 工科大學 資源工學科 教授

** 韓國動力資源研究所 責任研究員

*** 江原大學校 工科大學 資源工學科 助教授

**** 江原大學校 工科大學 資源工學科 專任講師

* Professor, Dept. of Resources Eng. Kangweon National University

** Korea Institute of Energy Resources

*** Assistant Professor, Dept. of Resources Eng. Kangweon National University

**** Instructor, Dept. of Resources Eng. Kangweon National University

물이 密集된 場所를 通過하기 때문에 土工作業時 隨伴되는 發破作業으로 地盤이 振動되어 各種 施設物에 深刻한 被害를 미칠 念慮가 있다는 點이다. 人間이 느끼는 發破振動의 限界値는 建物이 被害를 받는 振動限界値보다 낮으며 精密電子製品이나 機械類 역시 正常稼動을 爲해선 固有의 振動限界値를 갖고 있으므로 發破를 할 때 隣接한 施設物이나 振動에 敏感한 機械類 또는 人體의 感度等を 考慮하여 發破振動의 크기를 制限해야 할 것이다. 그러나 都心地 全體 區間에 걸쳐 被害를 미치지 않은 安全한 限界値를 定하면 發破振動의 被害를 막을 수는 있지만 効果의인 發破作業을 遂行할 수 없기 때문에 自然히 工程이 遲延되고 工事費의 負擔이 크게 될 것이다.

그러므로 都心地에서 發破를 하는 境遇 各作業場마다 가장 振動에 敏感한 對象을 考慮하여 數時로 發破作業을 調整하면서 安全 및 能率 向上을 同時에 追求하여야 할 것이다.

이를 爲하여 本 研究에서는 發破地點으로부터 40m 以內로 隣接하여 施設物이 있을 때 市街地에서의 發破를 效果의으로 施行할 수 있도록 發破條件을 여러가지로 달리하면서 發破振動值의 크기를 實測하고 이로부터 振動式을 設定함으로써 制御發破 指針을 提示코져 한다.

2. 測定方法

2-1. 發破振動의 特性

爆藥이 發破孔內에서 爆發하면 強力한 爆轟衝擊을 周圍岩盤에 加하게 되는데 이때 發生되는 全體 에너지中에서 0.5~20%가 彈性波로 變換되어 發破振動으로 消費되는 것으로 알려져 있다.^{9), 12)}

發破에 依해서 發生되는 이러한 彈性波가 岩盤中을 傳播하는 形態는 크게 立體波(body waves)와 表面波(surface waves)로 나누어지고 더욱 細分하면 P波, S波, R波, Q波 및 H波 등으로 分類된다.⁹⁾ 그러나 振動을 測定하는 地點이 發破地點에서 가 가까우면 이러한 모든 波

들은 各各 區分되지 않고 合成되어 複合波의 形態로 나타난다. 實際로 地下鐵 工事와 같은 都心地 發破에서는 發破振動으로 問題가 되는 地點이 施設物과 不過 數十m 以內이기 때문에 위와 같은 여러 波들이 到達하는 時間이 거의 같아서 記錄紙上에서 肉眼으로 分別하기 어렵고 또 被害限界를 決定할 때는 區分할 必要가 없다. 地表上에서 測定하는 이 複合波는 傳播되는 方向에 따라 普通 垂直方向(vertical)의 成分, 振動源으로부터 測點을 向하는 平面上의 進行方向(radial)의 成分, 그리고 이 두 方向과 直角을 이루는 方向(transverse) 등 3成分으로 이루어지는데 그림 1은 測定된 振動의 3成分을 나타내는 例이다.

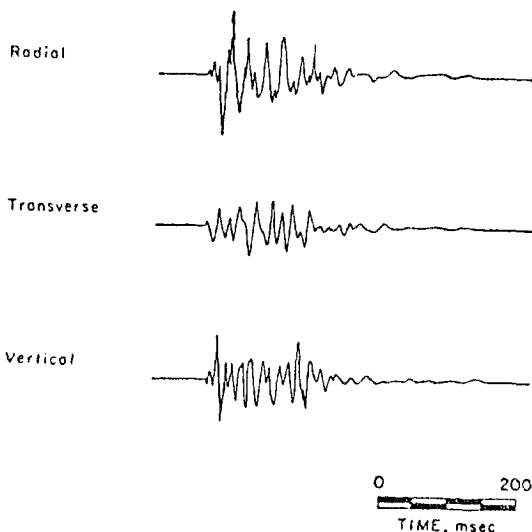


Fig. 1. Typical blast vibration time histories

한편 發破에 依한 地盤運動은 보통 變位(displacement), 速度(particle velocity) 및 加速度(acceleration) 등 3種類로 表示되는데 이들 變位(D), 速度(V) 및 加速度(A) 사이에는 다음과 같은 數學的 關係가 成立되므로 서로 變換이 可能하다.^{9), 11)}

$$D = \int V \cdot dt \quad V = \frac{dD}{dt} \dots\dots\dots ①$$

$$V = \int A \cdot dt \quad A = \frac{dV}{dt} \dots\dots\dots ②$$

여기서 t는 時間

또한 이러한 地盤運動은 여러가지 周波數를

갖는 波形이 重疊된 것이지만 이것을 地盤의 單純振動(simple sinusoidal harmonic motion)으로 볼 때 最大振幅에서의 變位, 速度, 加速度 사이에는 다음 關係式이 成立된다.^{9),10),11)}

$$D = \frac{V}{2\pi f}, \quad V = 2\pi f \cdot D \dots\dots\dots ③$$

$$V = \frac{A}{2\pi f}, \quad A = 2\pi f \cdot V \dots\dots\dots ④$$

$$f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots ⑤$$

- 여기서 D : 最大變位
 V : 最大振動速度
 f : 最大變位에서의 振動周波數
 T : 最大變位에서의 振動週期

2-2. 發破振動的 許容值

發破振動的 크기를 表示하거나 또는 이의 許容水準을 規定할 때는 地盤의 움직이는 程度를 나타내는 變位, 또는 地盤이 움직이는 速度나 加速度의 크기로 나타낸다. 그러나 지금까지의 研究結果에 依하면 人體가 感應하는 程度는 加速度 成分에 따라 變化하고 構造物이 받는 被害의 程度는 地盤의 振動速度 成分과 直接的인 關聯이 있다.^{9),10)} 또한 測定할 때 變位成分은 가장 적은 값이기 때문에 誤差 發生 可能性이 많고 周波數를 正確히 잡지 못하면 값이 變할 우려가 있을 뿐만 아니라 時間과 變位 또는 時間과 加速度의 關係로부터 速度를 求하기는 때때로 어려우므로 變位나 加速度보다는 速度를 測定하는 것이 바람직하다.^{2),9),10)}

한편 構造物이 받는 被害의 程度는 여러 學者들의^{1),2),3),4),5),6),7),8),9)} 研究結果 그림 2와 같으나 이들은 測定條件 即 構造物의 狀態, 建物の 基礎 등이 서로 다르기 때문에 比較하기는 어렵다. 그러나 Duvall 과 Fogelson 은 振動速度가 5.0cm/sec 이하인 때는 安全하고 5.0~13.5cm/sec인 때는 輕微한 被害를 입고 13.5cm/sec 以上인 때는 相當한 被害를 當한다고 報告하였다. 따라서 이들 學者들의 結果를 綜合하여 安全하게 最低值를 設定한다면 Dvorak 의 1.0cm/sec, Langefors 의 0.4cm/sec, Susuki 의 1.0cm/sec라고 볼 수 있다.

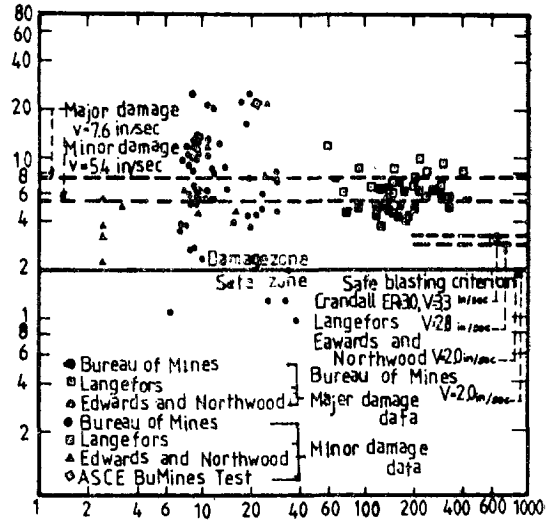


Fig.2. Particle velocity versus frequency for no damage data

2-3. 測定方法

發破振動을 正確히 測定하기 爲하여 3臺의 測定器로 同時에 測定하고 相互 比較 補完하였다. 即 美國 Sprengnether Instrument Co 製品인 VS-1200을 主로 使用하고 日本 Rion社 製品인 VM-12B와 스웨덴 Nitroconsult Inc 製品의

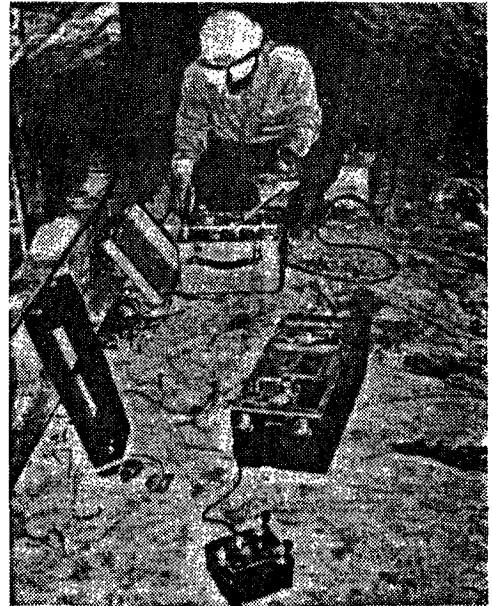


Fig.3. Measuring device (VS-1200)

VME-F를 補助用으로 使用하였다. VS-1200 (그림 3)은 發破振動에서 變位, 速度 및 加速度成分을 選擇할 수 있도록 되어 있고 이 選擇한 各要素에 對하여 垂直, 進行 및 transverse 方向을 同時에 記錄할 수 있게 되어 있다. 또한 必要할 때는 各成分의 에너지比(energy ratio)註¹⁾와 空氣中 發破에 依한 爆風壓도 測定할 수 있다. 이들 값은 械器 内部에 있는 感光 記錄紙에 記錄되는데 誘導電流에 依하여 作動되는 갈바노메터에 光源이 反射됨으로써 微細한 變化를 記錄할 수 있도록 되어 있다.

一般的으로 發破振動的 크기에 影響을 미치는 重要 要素로는 火藥類의 種類에 따른 特性, 使用 火藥의 量 即 裝藥量, 起爆方法, 填塞의 形態와 火藥의 裝填密度, 自由面의 數, 爆源과 測點間의 距離, 地質條件 등을 들 수 있고 地質 條件으로써 考慮되어야 할 點은 發破에 依한 彈性波가 傳達되는 岩盤의 物性 및 表土層의 두께이다. 그런데 이들 많은 要素中에서 가장 重要한 變數는 裝藥量 그리고 發破地點과 測定點間의 距離이고 나머지는 이 變數에 影響을 미치는 常數로 決定된다.

測定方法은 火藥量과 距離를 달리하면서 現場에서 여러번 測定을 하여 換算距離(scaled distance), 裝藥指數 및 減衰指數를 統計的으로 求하였다. 以外에도 振動式을 求하기 爲한 試驗發破와 火藥의 威力를 比較하기 爲하여 標準發破도 並行하여 實施하였다.

2-4. 測定資料 處理

振動的 傳播式은 理論的으로 完全히 이루어졌다고 보기에 어려우나 現在까지의 研究結果를 綜合하면 다음과 같이 表示할 수 있다. ^{3), 4), 5), 9), 10)}

$$V=K(D/W)^n \dots \dots \dots \textcircled{6}$$

여기서 n : 減衰指數
b : 裝藥指數

註 energy ratio란 Crandell에 依해 提示된 것으로¹⁾

$$E, R = \frac{a^2}{f^2} = 16\pi^4 f^2 u^2 = 4\pi^2 v^2$$

a : 最大 加速度值 u : 最大 變位值
v : 最大 速度值 f : 最大 振幅에서의 周波數

k : 自由面의 狀態, 爆藥의 種類, 岩質 등에 따른 常數

D : 爆源으로부터의 距離(m)

W : 遲發當 裝藥量(kg)

V : 振動速度(cm/sec)

윗 式에서 裝藥指數 b에 對하여 美國 鑛務局의 實驗值는 1/2을 提案하였는데 이를 自乘根換算(root scaling)이라 한다. 또 하나의 값은 1/3으로써 이를 3乘根換算(cubic root scaling)이라 하는데 次元解析(dimension analysis)의 理論을 根據로 하고 있다. 이 裝藥指數를 求하기 爲해서는 距離를 固定시키고 裝藥量을 變化시켜 裝藥量에 對한 振動水準을, 그리고 裝藥量을 固定시키고 距離를 變化시켜 距離에 對한 振動水準의 合成으로부터 決定할 수 있으나 本實驗에서는 現場의 特殊한 事情等 여러가지 어려움 때문에 任意의 距離와 裝藥量에 對한 振動值를 測定하고 이를 重回歸分析(multiple regression analysis)에 依해 一般式을 誘導하고 乘根換算 또는 三乘根換算에 對한 回歸線(regression line)을 求하여 回歸線에 對한 適合度가 좋은 쪽을 擇하여 比較 檢討하였다.

⑥式의 兩邊에 log를 取해 linear form으로 바꿔쓰면 ⑦式과 같다.

$$\log V = A + B \log D + C \log W \dots \dots \dots \textcircled{7}$$

여기서 A=log K, B=-n, C=bn이다.

⑦式은 다시 ⑧式으로 表示할 수 있다.

$$Y_i = A + BX_{i1} + CX_{i2} + e_i \dots \dots \dots \textcircled{8}$$

여기서 X_{i1}, X_{i2} : 두 獨立變數 log D, log W의 i번째 測定值

Y_i : (X_{i1}, X_{i2})에 對한 log V의 測定值

e_i : error term

⑧式에서 n個의 資料를 ⑦式의 回歸平面으로 代表시키기 爲해서는

$$S = \sum_{i=1}^n \{Y_i - (A + BX_{i1} + CX_{i2})\}^2 \text{을 最小로}$$

하는 A, B, C 값을 求하면 된다. 이 S를 最小로 하는 값은 ⑨式으로 表示되는 正規方程式

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 0, \frac{\partial S}{\partial B} = 0, \frac{\partial S}{\partial C} = 0 \dots \dots \dots \textcircled{9}$$

의 根이며 matrix form으로 簡單히 나타내면 ⑩式이다.

$$\begin{pmatrix} n & \sum X_{i1} & \sum X_{i2} \\ \sum X_{i1} & \sum X_{i1}^2 & \sum X_{i1}X_{i2} \\ \sum X_{i2} & \sum X_{i2}X_{i1} & \sum X_{i2}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum Y_i \\ \sum X_{i1}Y_i \\ \sum X_{i2}Y_i \end{pmatrix} \dots \textcircled{10}$$

本實驗의 測定資料들은 韓國科學技術院의 Cyber CDC 6000 series 의 단말장치를 使用하여 處理하였다.

自乘根과 3乘根換算의 境遇 各各

$$\left. \begin{aligned} \log V &= A + B(\log D - \frac{1}{2} \log W) \\ \log V &= A + B(\log D - \frac{1}{3} \log W) \end{aligned} \right\} \dots \textcircled{11}$$

로 ⑦式의 特別한 形態이며 對數方眼紙에서 直

線으로 表示되고 A는 切片을 B는 기울기를 나타낸다.

3. 測定結果 및 解析

3-1. 岩石의 力學的 性質

現場測定 地點은 그림 4와 같이 10個 工區에서 總 109회를 實施하였는데 이들 位置는 全體 地下鐵 施工 區間中 岩質面에서 硬岩, 準硬岩, 軟岩을 代表할 수 있는 곳으로 作業條件을 考慮하여 選定한 것인데 主要 物性은 表 1과 같다.

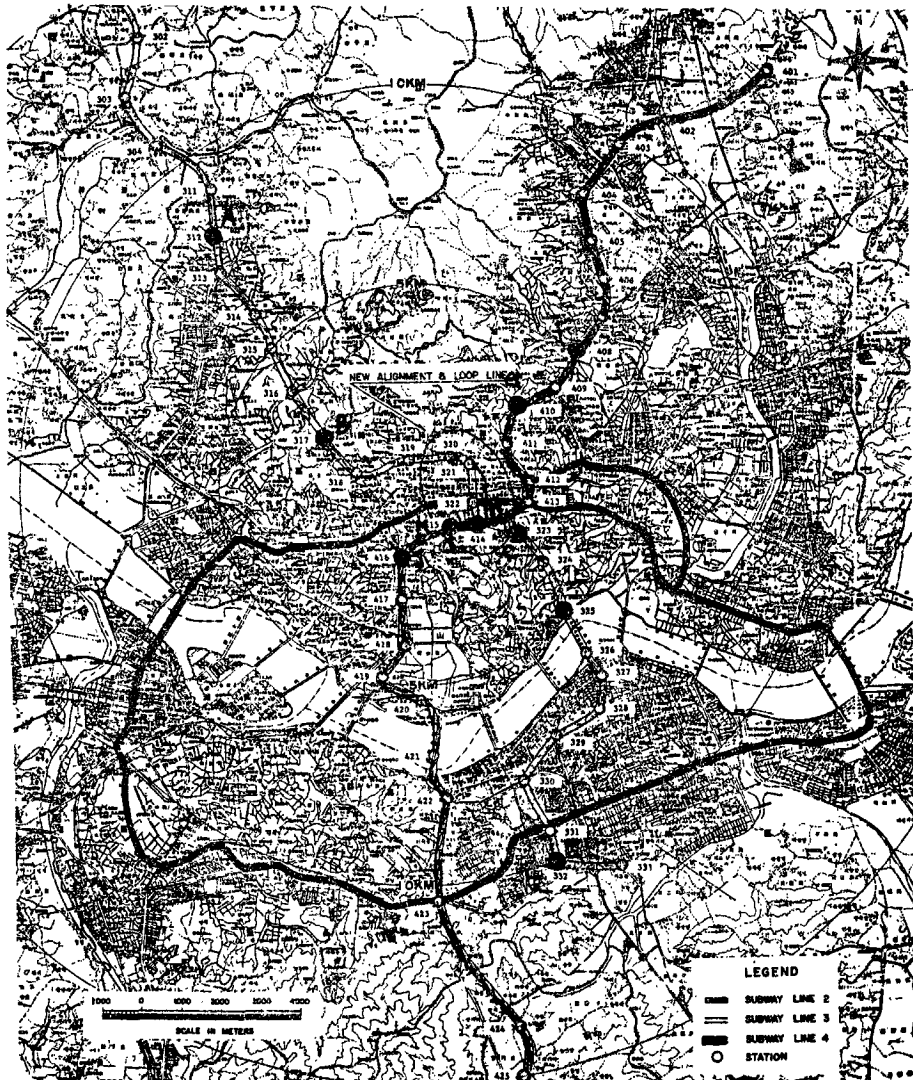


Fig. 4. Location of test sites

Table 1. Rock properties of test sites

| Site | Rock type | Specific gravity | Schmidt hammer rebound value | Compressive strength (kg/cm ²) | Tensile strength (kg/cm ²) | Wave velocity (m/sec) | | Young's modulus (static) X10 ⁵ kg/cm ² | Poisson's ratio (static) |
|-------------|-----------|------------------|------------------------------|--|--|-----------------------|--------|--|--------------------------|
| | | | | | | P-wave | S-wave | | |
| A 工區 (박석고개) | | | | | | | | | |
| tunnel | gneiss | 2.67 | 39 | 849 | 15.3 | 5,939 | 2,029 | 7.65 | 0.14 |
| B 工區 (홍운동) | | | | | | | | | |
| upper part | granite | 2.57 | 18.4 | 115 | 22.3 | 3,476 | 2,042 | 0.32 | 0.14 |
| tunnel | | 2.53 | 28.6 | 345 | 36 | 3,751 | 2,069 | 1.9 | 0.21 |
| C 工區 (장충동) | | | | | | | | | |
| tunnel | " | 2.56 | 37 | 784 | 83 | 4,178 | 2,309 | 3.4 | 0.24 |
| D 工區 (금호동) | | | | | | | | | |
| | " | 2.53 | 44 | 1,234 | 112.5 | 4,609 | 2,492 | 4.23 | 0.29 |
| E 工區 (우인동) | | | | | | | | | |
| lower part | gneiss | 2.74 | 43 | 949 | 126 | 5,729 | 2,994 | 2.2 | 0.29 |
| upper part | | 2.72 | 29 | 379 | 27 | 4,880 | 2,684 | 1.83 | 0.24 |
| F 工區 (미아리) | | | | | | | | | |
| station | granite | 2.57 | 43 | 1,194 | 94 | 4,919 | 2,577 | 2.38 | 0.2 |
| tunnel | | 2.55 | 36.7 | 883 | 62 | 4,031 | 2,042 | 2.8 | 0.32 |
| G 工區 (상선교) | | | | | | | | | |
| | " | 2.57 | 49.9 | 1,452 | 113 | 4,880 | 2,648 | 3.5 | 0.22 |
| H 工區 (퇴계로) | | | | | | | | | |
| station | granite | 2.51 | 29.7 | 387 | 46 | 3,946 | 2,375 | 0.83 | 0.21 |
| tunnel | | 2.54 | 22.5 | 227 | 28 | 3,920 | 2,217 | 0.65 | 0.17 |
| I 工區 (퇴계로) | | | | | | | | | |
| tunnel | " | 2.49 | 14 | 153 | 26 | 3,361 | 1,810 | 0.55 | 0.22 |
| J 工區 (동자동) | | | | | | | | | |
| | gneiss | 2.68 | 45 | 1,384 | 178 | 4,600 | 2,641 | 2.35 | 0.27 |
| K 工區 (서울역) | | | | | | | | | |
| | granite | 2.63 | 13.8 | 147 | 22 | 3,249 | 2,282 | 0.6 | 0.31 |

(1) 岩石의 壓縮強度와 schmidt hammer 에 의한 反撥硬度

schmidt hammer 는 岩石表面에 打擊을 加했을 때 反撥하는 程度를 測定하여 強度를 推定하는 方法인데 地下鐵 施工 區間에서 試料를 採取하여 $\phi 42mm$ 試片을 單軸壓縮하여 구한 強度와 反撥硬度 사이에는 다음과 같이 關係式이 成立되고 이를 表示하면 그림 5와 같다.

$$Sc = 0.514 \times (SH)^{2.03} \dots \dots \dots \textcircled{12}$$

여기서 Sc : 單軸壓縮強度 (kg/cm²)

SH : schmidt hammer 反撥硬度

⑫式으로부터 schmidt hammer 値를 알면 쉽게 現場岩石에 對한 大體的인 單軸壓縮強度를 求할 수 있다.

(2) P波 傳播速度와 壓縮強度

彈性波의 傳播速度는 岩盤內 空隙, 龜裂 等

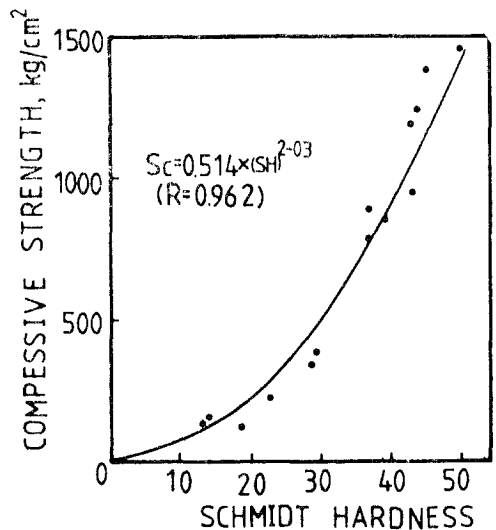


Fig. 5. Relationship between Schmidt rebound hardness and uniaxial compressive strength

構造的인 與件에 影響을 받으므로 岩盤의 強度 또는 新鮮度를 推定할 수 있다. 그림 6은 各 區間에서 採取한 岩石들에 對하여 實驗室에서 測定한 P波 傳播速度와 單軸壓縮強度와의 關係를 圖示한 것이다. 이 두 要素사이에는 뚜렷한 比例關係가 成立되지는 않으나 壓縮強度가 낮을수록 傳播速度가 減少하는 傾向을 보이며 發破振動에서 減衰指數가 더 큰 것을 測定을 通

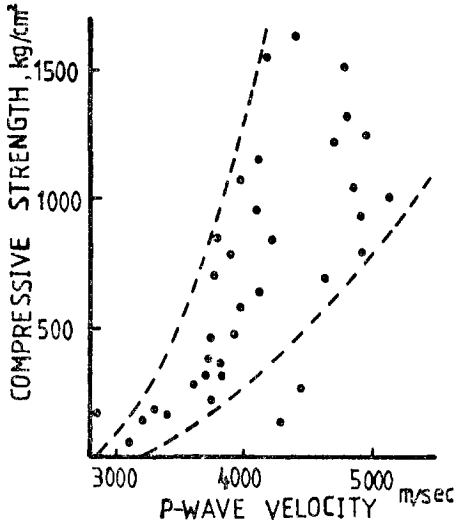


Fig. 6. Relation between P-wave velocity and compressive strength

Table 2. Summary of blasting tests

| No. of blasting | Kind of explosives | Distance from shot (m) | Total weight of delay charge (kg) | Scaled distance (m/kg ^{1/3}) | Max particle velocity (cm/sec) | Propagation equation |
|-----------------|--------------------|------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------------|---------------------------|
| 1 | dynamyite | 15.2 | 0.1125 | 31.5 | 0.5 | $V=94(D/W^{1/3})^{-1.64}$ |
| 2 | " | 16.3 | 0.1125 | 33.8 | 0.35 | |
| 3 | " | 17.4 | 0.1125 | 36.0 | 0.3 | |
| 4 | " | 18.5 | 0.1125 | 38.2 | 0.24 | |
| 5 | " | 19.5 | 0.1125 | 40.4 | 0.2 | |
| 6 | " | 15.2 | 0.225 | 25.0 | 0.7 | |
| 7 | " | 17.4 | 0.225 | 28.6 | 0.3 | |
| 8 | " | 18.5 | 0.225 | 30.4 | 0.25 | |
| 9 | " | 19.5 | 0.225 | 32.1 | 0.23 | |
| 10 | " | 17.6 | 0.3375 | 25.3 | 0.4 | |
| 11 | " | 18.8 | 0.3375 | 27.0 | 0.34 | |
| 12 | " | 20.0 | 0.3375 | 28.7 | 0.3 | |
| 13 | " | 14.0 | 0.3375 | 20.1 | 0.6 | |
| 14 | " | 13.6 | 0.45 | 17.7 | 0.7 | |

하여 確認하였다.

한편 岩石을 工學的으로 分類하기 爲하여 彈性係數와 壓縮強度를 基準으로 삼기도 하는데¹²⁾ 工事區間에서 採取한 花崗岩 試料의 分析結果를 보면 壓縮強度는 軟質 내지는 中硬質을 또 彈性係數로 볼 때는 中級에 屬하는 것으로 風化度가 큰 花崗岩을 알 수 있다.

3-2. 測定結果

그림 4에서 表示한 바와 같이 10個 工區에서 測定하였는데 地表로부터의 垂直高는 大部分 30m 内外이며 住宅과 매우 隣接된 狀態이다. 測定한 主要內容은 自由面이 1인 터널發破와 2인 바닥(floor)發破로 區分하였고 使用爆藥은 다이나마이트, 含水爆藥, 硝油爆藥을 各各 單獨 使用하거나 混合 使用하면서 標準發破와 振動을 測定하였는데 이들中 B地域을 例로 들면 表 2 및 그림 7과 같다.

花崗岩인 境遇 振動係數 K는 43~138의 變化幅을 갖으며 裝藥係數 b는 0.57로 一定하며 振動減衰指數 n 또한 -1.70으로 一定한 값을 갖고 있음이 밝혀졌다. 그러나 片麻岩의 境遇 k는 17~87, b는 0.5 n은 -1.50으로 역시 振動係數만 變化幅이 있고 b, n 값은 一定值은

at site : B
bench blasting

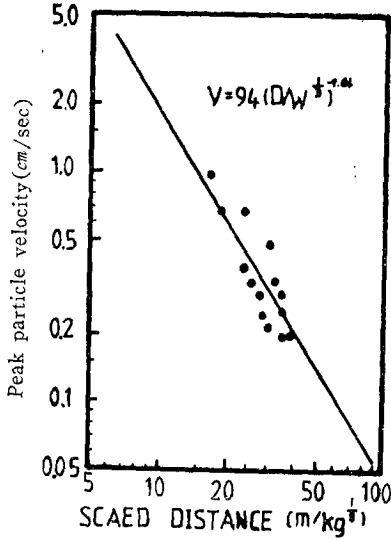


Fig. 7. Peak particle velocity versus scaled distance

것는다. 換算距離에 依한 裝藥指數는 3乘根(cubic root)이 가장 偏差가 적은 回歸線(regression line)으로 近接함을 알 수 있었다.

(1) 岩石의 強度 發破方法에 따른 振動常數의 變化

工事 區間別로 岩石의 種類, 이들의 強度, 火藥의 種類, 發破方法(터널發破, 階段發破, 바닥發破 등)의 變化에 따라 振動常數를 알아 보기로 한다. 우선 花崗岩의 경우 岩石의 強度와 發破方法에 따른 振動常數와의 關係는 式⑬과 같다.

$$\left. \begin{aligned} K_T &= 0.0371 S_C + 60 \\ K_{BT} &= 0.0371 S_C + 80 \\ K_{Be} &= 0.0371 S_C + 50 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots ⑬$$

여기서 K_T : 터널發破의 發破振動常數

K_{BT} : 바닥發破의 發破振動常數

K_{Be} : 側壁發破의 發破振動常數

S_C : 單軸壓縮強度(kg/cm²)

바닥發破의 振動常數가 側壁(階段)發破의 그것보다 30이 높은 것은 바닥發破가 自由面이 하나인 反面 階段發破는 自由面이 2이므로 自由面의 差異에 基因한 것으로 생각된다. ⑬式의 關係를 圖示하면 그림 8과 같다.

한편 片麻岩의 境遇 터널發破를 基準한 振動

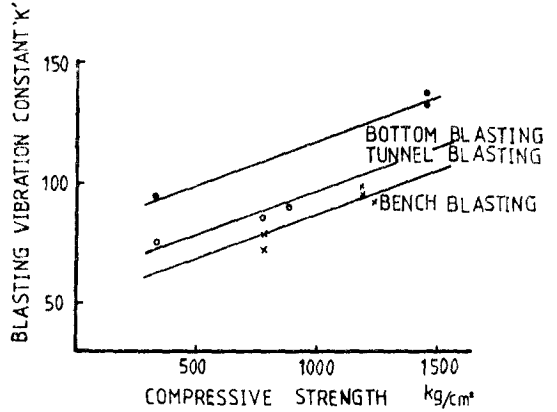


Fig. 8. Relationship between vibration constant and compressive strength

常數는 바닥發破의 경우보다 20이 적고 側壁發破보다 10만큼 더 크다.

한편 使用火藥에 따른 發破振動常數의 變化를 檢討한바, 舍水爆藥(slurry explosives)은 다이나마이트에 比하여 振動速度의 크기가 80%이고 硝油爆藥은 約 65%에 不過하였다.

4. 適正裝藥量의 算定

許容振動値를 考慮한 裝藥量을 決定하는 主要 要素로는 使用爆藥의 種類, 發破地點으로부터 建物까지의 距離, 發破方法, 最小抵抗線 또는 基盤岩의 強度率을 들 수 있다. 서울 地下鐵 施工 區間의 岩質을 花崗岩과 片麻岩으로 大別하는 境遇 減衰指數 n은 各各 -1.7과 -1.5로써 發破對象 岩石의 壓縮強度를 schmidt hammer에 依해 알 수 있으면 表 3으로부터 振動常數值 k가 주어지므로 式⑥으로부터 許容裝藥量을 求할 수 있다.

實際 計算의 例를 들면 아래와 같다.

- (例) 地質條件: 서울 花崗岩 地域
- 岩石強度: 840 kg/cm²
- 가장 隣接한 建物과의 距離: 15m
- 發破 許容 振動速度: 0.7 cm/sec
- 發破區分: 터널發破
- 穿孔徑: 38m/m
- 藥包徑: 25m/m

Table.3. The Value of vibration constant

“K” 진 동 식 $V=KW^{0.57}D^{-1.7}$
 지질조건 서울화강암
 천공경 38mm

| 區分 | 發破方法 | 開 整 式 | | 턴 벨 식 | | |
|-------|---------------------------|-----------|---------|---------|---------|----|
| | | 바 닥 發 破 | 階 段 發 破 | 心 拔 發 破 | 擴 大 發 破 | |
| 火藥類 | 壓縮強度(kg/cm ²) | | | | | |
| | 다 이 나 | 1800—1500 | 147 | 117 | 127 | 97 |
| | 마 이 트 | 1500—1200 | 136 | 106 | 116 | 86 |
| | | 1200—900 | 125 | 95 | 105 | 75 |
| | | 900—600 | 114 | 84 | 94 | 64 |
| 600이하 | 103 | 73 | 83 | 53 | | |
| 含水爆藥 | 1800—1500 | 117 | 94 | 102 | 78 | |
| | 1500—1200 | 109 | 85 | 93 | 69 | |
| | 1200—900 | 100 | 76 | 84 | 60 | |
| | 900—600 | 91 | 67 | 75 | 51 | |
| | 600이하 | 82 | 58 | 66 | 42 | |
| 硝油爆藥 | 1800—1500 | 96 | 76 | 66 | 63 | |
| | 1500—1200 | 87 | 68 | 74 | 55 | |
| | 1200—900 | 80 | 61 | 67 | 48 | |
| | 900—600 | 73 | 54 | 60 | 41 | |
| | 600이하 | 66 | 46 | 53 | 34 | |

表 3에서 岩石強度 840kg/cm²은 600~900 사 이에 있으므로 適用되는 發破振動係數 k는 心 拔發破로써 다이나마이트를 使用하면 94이므로 이들을 ⑥式에 代入 求하면 裝藥量은 592.83gr 이 된다.

即 $V=K(D/W^{1/3})^{-n}$ 에서

$$W = \left(\frac{V}{K}\right)^{+3/n} \cdot D^3 = \left(\frac{0.7}{94}\right)^{3/1.7} \times 15^3$$

$$= 0.59283(kg)$$

따라서 이들을 火藥의 種類別로, 發破方法別

Table.4. Max weight of charge per delay (gr)

| 火藥類 | 다 이 마 이 트 | 含 水 爆 藥 | 硝 油 爆 藥 |
|---------|-----------|----------|----------|
| 發 破 區 分 | | | |
| 心 拔 發 破 | 592.83 | 883.05 | 1,309.16 |
| 擴 大 發 破 | 1,168.26 | 1,744.05 | 2,563.47 |

로 區分하여 整理하면 表 4와 같다. 이를 解析 하면 施設物과 發破地點과의 最短距離가 15m 이고 이곳에서의 最大振動值를 0.7cm/sec 以下 로 하고져 할 때 含水爆藥으로 自由面이 1인 心拔發破時 遲發當 最大裝藥量은 883.05gr임을 나타낸다.

定하기 爲하여 美國 鑛務局에서 採擇한 發破振動 公式을 使用하였는데 다만 自乘根換算距離 보다 三乘根換算距離가 信賴도가 높아서 이를 適用하였다. 이 振動公式은 地質條件에 따라 地域常數가 뚜렷히 區別되어 크게 花崗岩 地域과 片麻岩 地域으로 나누었으며 各 岩種內에서도 岩石의 壓縮強度, 使用火藥, 發破方法 等에 따라 發破振動常數가 一定한 關係를 가지면서 變化하는 것을 밝혔다. 이렇게하여 確立된 式을 쉽게 適用하기 爲하여 岩種을 壓縮強度에

5. 結 論

本 研究에서는 發破로 인한 振動의 크기를 推

따라 5가지로 大別하여 各各 距離變化에 따른 遲發當 適正裝藥量을 電算處理하여 數表化하였다. 아울러 슈미트합마를 利用하면 現地에서 쉽게 壓縮強度를 구할 수 있는데 이를 爲하여 슈미트합마와 壓縮強度와의 關係式을 구하였다. 그리고 適正裝藥量 公式를 提示하여 經濟적인 火藥量을 計算할 수 있도록 하였는데 이를 要約하면 다음과 같다.

(1) 發破振動公式은

$V=K(D/W^{1/3})^n$ 에서 減衰指數 n은 서울 花崗岩의 경우 -1.7이고 서울 片麻岩의 경우 -1.5이다.

(2) 슈미트합마와 壓縮強度와의 關係式

$S_c=0.514 \times (S.H)^{0.23}$ S_c 는 압축강도이고 SH는 슈미트합마값이다.

(3) 統制된 距離內에서는 반드시 MS 및 DS 段發 硯관을 使用하여 遲發發破를 實施하고 硯관의 數가 不足한 境遇는 分割發破를 實施하여야 한다.

(4) 許容振動值가 주어지면 이에 따른 制限裝藥量을 嚴格히 지켜야 한다.

後 記

本 研究는 當研究所와 서울地下鐵公社間에 체결된 研究用役에 依해 遂行되었는바 關係職員 여러분과 韓國動力資源研究所의 金旻圭, 申僖淳 研究員에게 謝意를 드리는 바이다.

參 考 文 獻

1. Crandell, F. J. ; "Ground Vibration Due to Blasting and Its Effect upon Structures" : J. of the Boston Soc. of Civil Engineers, pp. 222~245. (1949)
2. Duvall, W. I., and D. E. Fogelson ; Review of Criteria for Estimating Damage to Residences

- from Blasting Vibrations : Bu Mines Rept. of Inv. 5968, 18pp. (1962)
3. Duvall, W. I. and J. F. Devinc ; "Avoiding Damage by Air Blasts and Ground Vibrations from Blasting" : Surface Mining. AIME, pp. 398~412. (1968)
4. Dvorak, A. ; "Seismic Effects of Blasting on Brick Houses" : Prace geofyrikeniha Ustance Ceskoslovenski Akademie Ved, N.169. Geophysikalni shornik, pp. 189~202. (1962)
5. Edwards, A. T., and T. D. Northwood ; "Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures" : The Engineer, V. 210, pp. 538~546. (1960)
6. Farmer, I. W. ; Engineering Properties of Rocks : E. & F. N SPON LTD, pp. 71~85. (1968)
7. Langefors, Ulf, et al. ; Ground Vibrations in Blasting : Water Power, pp. 335~338, 390~395, 421~424. (1958)
8. Langefors, U., and B. Kihlstrom ; Rock Blasting : John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 262~264. (1963)
9. Nicholls, H. R., and Other ; Basting Vibrations and their Effects on Structures : Bureau of Mines Bulletin 656. (1971)
10. Siskind, D. E., and J.J. Snodgrass, et. al. ; Mine Roof Vibrations from Underground Blasts, Pilot Knob, Mo. : Bu Mines Rept. of Inv. 7764, 21pp. (1973)
11. Stagg, N. S., and A.J. Engler. ; Measurement of Blast-Induced Ground Vibrations and Seismograph Calibration ; Bu Mines Rept. of Inv. 8506, 63pp. (1980)
12. 柳暢夏, 李正仁 ; 發破作業에 依한 地盤振動이 地上構造物에 미치는 影響에 關한 研究 : 大韓鑛山學會誌. Vol. 16, No. 1, pp. 41~50. (1979)