

國內 花崗岩의 力學的 性質間의 相關性

申僖淳* · 權光秀*

Relationships between Mechanical Properties of Granites, Korea

Hee Soon Shin and Kwang Soo Kwon

Abstract : Extensive sets of data on the mechanical properties of more than 1000 granite specimens were analyzed to derive the relationships of the various properties : those are, (1) density, (2) porosity, (3) absorption ratio, (4) sonic wave velocity, (5) uniaxial compressive strength, (6) tensile strength, and (7) dynamic & static Young's moduli.

The results will be of use to understand the mechanical characteristics of granites and some unknown properties can be estimated from the others.

The various equations derived from the least square regression analysis and a brief description of the correlations are presented in this paper.

序言

政府는 山地資源化계획의 重點施策으로 國內에 부존되어 있는 良質의 可用石材資源의 開發을 극대화시키고 採石 및 加工技術의 改善을 통하여 石材産業을 적극 육성하려 하고있다.

可用石材중에서 특히 花崗岩은 風化에 強하고 堅固하며, 다양한 色相과 用途로 최근 建築材로서 需要가 급증하고 있다.

花崗岩은 전국적으로 산출되고 있는데 주로 侏羅紀의 大寶花崗岩(全國土 면적의 약 14.4%)과 白堊紀에서 古第三紀에 이르는 佛國寺花崗岩(全國土 면적의 약 7.6%)이 주요대상이 되고있다(李大聲, 1982).

韓國動力資源研究所 鑛山工學研究室에서는 지난 1983년도 부터 民願受託事業으로 石材에 대한 各種 物性試驗을 취급하면서 특히 花崗岩에 대해서는 全國에 분포되어 있는 風化岩에서 新鮮岩까지의 총 2,000여 試驗片에 대한 物性試驗을 실시하여 오고있다.

本研究에서는 이들 物性資料들을 정리 요약하여 石材分類에 사용되는 物理, 力學的 性質들을 중심으로 物性間 및 物性-力學的 性質間 相關性을 다루었다.

岩石試料 및 實驗方法

本 研究에서 다룬 試料는 서울, 포천, 강화, 제천, 익산, 문경, 상주, 거창, 함양 등 全國에 걸쳐 분포하는 花崗岩을 대상으로 하였으며 岩石試驗片의 크기 및 형태는 $\phi 30 \times 60$ mm인 圓柱型이었으며 實驗方法은 ASTM과 ISRM 規定에 따라 실시하였다.

有效空隙率(ϕ), 吸水率(W), 動的彈性係數(E_d)는 다음 관계식들을 이용하여 구하였다.

$$\phi = \frac{W_h - W_d}{W_h - W_s} \times 100(\%)$$

$$W = \frac{W_h - W_d}{W_d} \times 100(\%)$$

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$$

여기서,

W_h = 水分飽和時의 重量

W_d = 乾燥時의 重量

W_s = 水中重量

ρ = 密度

V_p = 從波傳播速度

V_s = 橫波傳播速度

*韓國動力資源研究所(Korea Institute of Energy and Resources, Garibong-Dong, Kuro-Gu Seoul, 152-600, Korea)

岩石내 從, 橫波傳播速度측정에는 彈性波速度測定器

Table 1. Physical and mechanical properties of granites

Apparent Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Absorption Ratio (%)	Wave P-Wave	Velocity(m/s) s-Wave	Uniaxial Compressive Strength (kgf/cm ²)	Tensile Strength (kgf/cm ²)	Young's Modulus (10 ⁵ kgf/cm ²)	Poissons Ratio
2.61±0.05	1.45±1.34	0.64±0.50	3870	2350±500	1220±530	85±40	3.20±1.70	0.23±0.08
(1352)	(92)	(1168)	(668)	(608)	(2123)	(162)	(186)	(147)

() : Number of specimens

(Terrametrics Co. 製)를 사용하였고, 靜的 試驗에서는 壓縮試驗機로서 160톤 용량의 Servocontrolled type MTS compression test system을 이용하였다.

實驗結果 및 考察

전국 花崗岩에 대한 物理, 力學的 性質들을 綜合한 結果는 Table 1에서와 같다.

吸水率과 空隙率

空隙는 岩石의 生成時 또는 變成, 再結晶과정의 결과로서 다양한 형태로 생기는데 空隙率은 粒子가 均一한 岩石이 不均一한 岩石보다 더 크며 均一한 粒子로 된 경우엔 둥근 粒子의 岩石이 가장 높은 空隙率을 보이며 粒子의 크기와 형태가 같더라도 粒子와 粒子사이의 다른 관계때문에 空隙率은 달라질 수가 있다.

空隙들사이의 연결이 불량하면 水分으로 완전飽和되었을 때라도 상당량의 가스 또는 空氣가 갇혀있게 될 수 있으므로 空隙率이 吸水率보다 훨씬 더 커질 수가 있다.

國內 花崗岩의 空隙率(ϕ)과 吸水率(W)의 관계를 Fig. 1에 表示하였다. 이들 사이는 回歸分析

(regression analysis)에 의해 다음과 같이 관련시킬 수 있다.

$$\phi = 2.52W + 0.05$$

이식의 correction coefficient(相關係數, r)는 0.97이다.

吸水率은 風化程度와도 밀접한 관계가 있어 風化도가 높을 수록 높아진다.

花崗岩에 있어서 粒子크기의 감소와 K-feldspar量의 증가는 空隙率의 증가를 가져오며, K-feldspar가 풍부한 花崗岩은 plagioclase가 풍부한 것보다 더 높은 空隙率을 가지고 있는데, 이것은 K-feldspar는 plagioclase feldspar에 비해 風化에 더 약하기 때문인 것으로 설명된다(金永和, 1983).

花崗岩은 完晶質 等粒狀組織을 지니고 있으며 外部와 연결되는 空隙은 주로 鑛物粒子경계의 crack狀 空隙으로 판단된다(申信淳, 1986).

壓縮強度와 密度

壓縮強度와 密度간의 관계는 뚜렷한 경향은 없으며 일반적인 경향은 密度가 증가하면 壓縮強度는 증가한다.

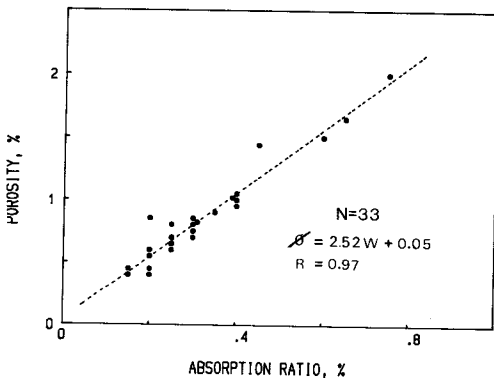


Fig. 1. Relationship between apparent porosity and absorption ratio of 33 granites.

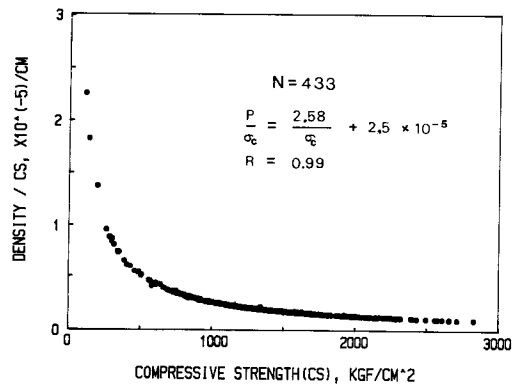


Fig. 2. Relationship between ρ / σ_c and σ_c

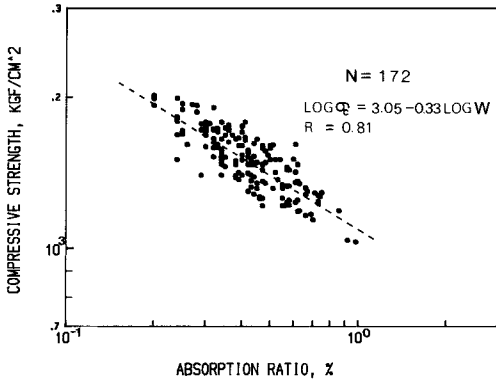


Fig. 3. Relationship between compressive strength and absorption ratio

壓縮強度에 영향을 미치는 가장 중요한 요소는 岩石의 粒子사이의 結合條件이다. 粒子사이의 粘着力(Cohesive strength)은 粒子자체의 強度보다 작기 때문에 岩石의 破壞는 結晶사이에서 발생된다.

國內 花崗岩의 壓縮強度와 密度사이에는 다음 관계가 성립한다고 볼 수 있다(Fig. 2 참조).

$$\frac{\rho}{\sigma_c} = \frac{2.58}{\sigma_c} + 2.5 \times 10^{-5} (r=0.99)$$

$$\rho = 2.58 + 2.5 \times 10^{-5} \sigma_c$$

여기서, σ_c = 一軸壓縮強度(kgf/cm²)

ρ = 密度(g/cm³)

石英粒子 壓縮強度는 5,000kgf/cm²이고, feldspar, pyroxene 등은 2,000~5,000kgf/cm²로 石英의 量이 많을 수록 強度는 높아진다(Rzhevsky and Novik, 1971).

壓縮強度와 吸水率, 空隙率

壓縮強度(σ_c)와 吸水率(W)간의 關係를 Fig. 3에서와 같이 對數 graph上으로 표시하였는데, 吸水率이 증가하면 強度는 급격히 감소함을 보이고 있다. 이들사이에는 다음과 같은 傾向을 보인다.

$$\sigma_c = 1130W^{-0.33} (r=0.81)$$

壓縮強度와 空隙率의 關係도 이와 비슷한 傾向을 보이는 데, 이것을 空隙率이 커지면 空隙의 존재로 인한, 有效面積이 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

壓縮強度와 引張強度

引張強度에 대한 壓縮強度의 比는 어느정도 分散은

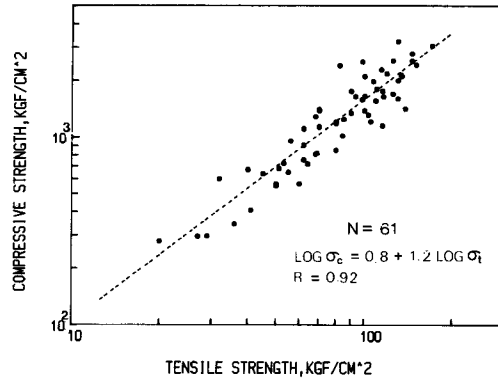


Fig. 4. Relationship between compressive strength and tensile strength

있지만 평균적으로 新鮮한 岩에서는 약 20이지만 變質된 花崗岩에서는 약 12로 감소된다.

引張強度는 壓縮強度의 10%를 넘는 경우가 드문데, 이것은 brittleness(脆性度)로서 岩石內의 교란, 不均質, 粒子사이의 약한 粘着力으로 설명된다.

예를들어 金屬에 대한 σ_c/σ_t 의 比는 거의 3배에 가까운데, 花崗岩을 비롯한 대부분의 岩石의 引張強度는 200kgf/cm²를 넘지 않는다.

σ_c/σ_t 의 比는 風化程度가 증가함에 따라 일반적으로 증가하는 傾向이 있는데 水分含有量이 증가하면 감소한다.

壓縮強度와 引張強度 사이의 關係는 다음과 같았다. (Fig. 4 참조)

$$\sigma_c = 6.5 \sigma_t^{1.2} (r=0.92)$$

壓縮強度와 彈性係數

壓縮強度와 彈性係數는 岩盤變動의 모델링과 地下構造物의 安定性 評價에 필요한 요소이다.

Fig. 5는 이들 두 要素에 의해 구분되는 工學的分類(Deere and Miller, 1966)를 실시한 結果이다.

國內 花崗岩은 彈性係數比로 볼 때 대략 Medium Modulus Ratio에 속하며 新鮮岩은 BM, 風化岩은 DM, EM으로 分類된다.

壓縮強度(σ_c)와 彈性係數(E)는 空隙에 영향을 많이 받으므로 空隙로 인해 어떤 關係를 상정할 수가 있다. 이들 사이에는 일반적으로 좋은 相關關係를 보이는데 실험적으로 얻어진 關係는 다음의 범위내에 있었다.

$$\sigma_c = 850E \times 10^{-5}$$

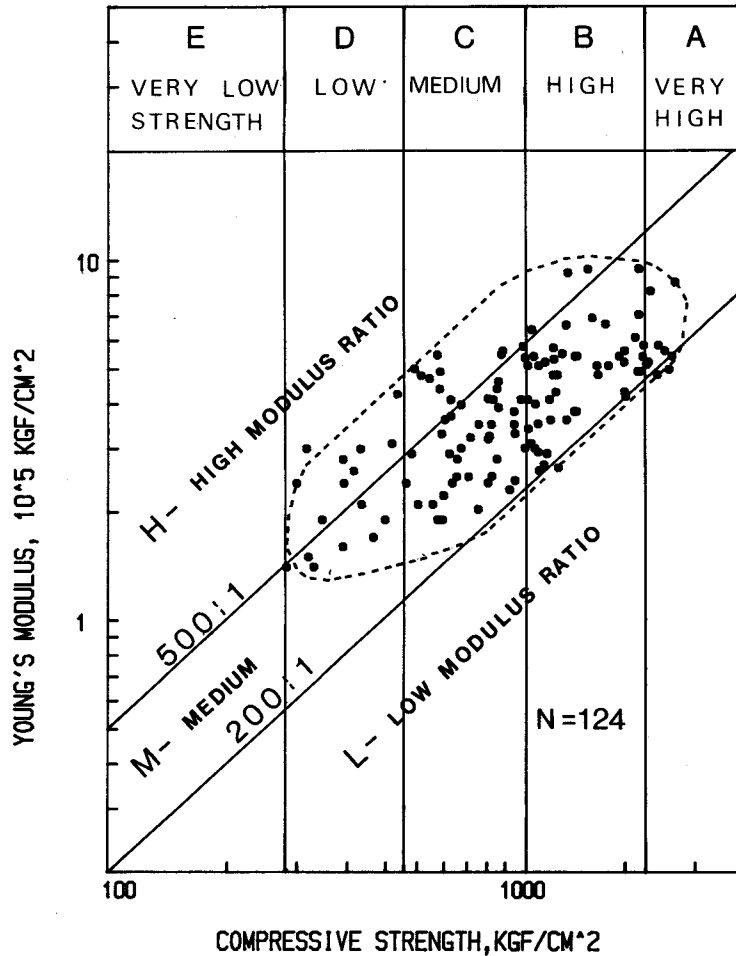


Fig. 5. Engineering classification for granites

$$\sigma_c = 200E \times 10^{-5}$$

分散이 작지 않으나 回歸分析한 結果 대략 다음과 같이 관련 시킬 수 있다.

$$E = 0.05 \sigma_c^{0.62} \times 10^5 (r=0.72)$$

從波傳播速度와 密度

岩石內의 彈性波速度는 構成鑛物成分과 粒子的 크기, 結晶의 方向등에 따라 달라질 수 있는데, 堅固하고 緻密한 岩石에서는 彈性波速度가 크며, 粗粒質 岩石보다는 細粒質 岩石에서 더 크며 密度가 증가할수록 더 커진다. 密度의 범위는 주로 空隙率의 差異로 인한 것이다(申僖淳, 1986).

從波速度(V_p)와 密度(ρ)와의 關係를 Fig. 6에 표시

하였다. 分散이 크지만 이들 關係는 대략 다음과 같이 표시할 수가 있다.

$$V_p = 94e^{1.44\rho} (r=0.63)$$

일반적으로 높은 密度의 岩石은 높은 彈率을 갖고 彈率이 큰 岩石은 彈性波速度가 빠르다.

同種岩石內의 彈性波速度는 空隙率에 주로 좌우되나, 花崗岩과 같이 낮은 空隙率을 지닌 경우는 構成鑛物의 密度가 彈性波速度에 적지않은 影響을 끼칠 수 있다(권병두, 1987).

주로 石英, K-feldspar, plagioclase feldspar로 구성 되어 있는 花崗岩에서 彈性波速度와 石英含有量사이의 상호關係는 不良하고 K-feldspar가 풍부한 花崗岩은 plagioclase가 풍부한 花崗岩보다 약간 낮은 彈性波速

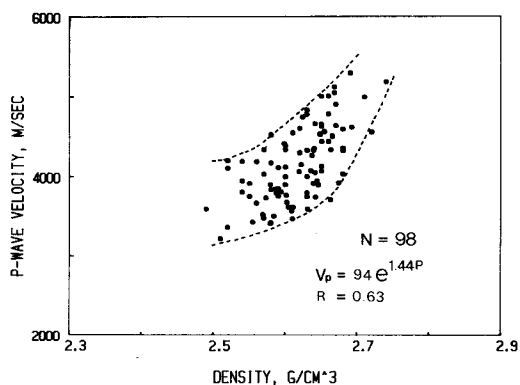


Fig. 6. Relationship between longitudinal wave velocity and density.

도를 보인다(金永和, 1983).

從波速度와 吸水率, 空腔率

彈性波速度와 吸水率의 關係를 Fig. 7에 圖示하였다. 이들사이의 關係는 分散이 심해 圖面上에 範圍로 표시하였는데 다음과 같은 대략적인 關係式이 유도되었다.

$$V_p = 3045W^{-0.2} (r=0.5)$$

여기서, W=吸水率(%)

V_p =從波速度(m/sec)

空腔內를 채우는 物質內의 從波速度가 빠를수록 岩石의 從波速度는 더 커지는데, 물에서의 從波速度는 1485m/sec로서 空氣中의 速度 331m/sec보다 5배나 더 빠르므로 물의 吸水는 岩石內 從波速度의 增加를 가져옴을 알수있다.

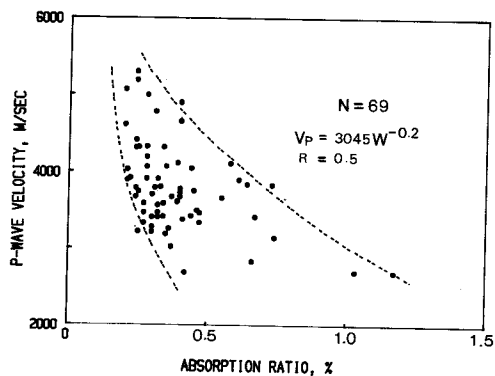


Fig. 7. Relationship between longitudinal wave velocity and absorption ratio.

空腔率에 대한 彈性波速度의 依存性은 거의 線形的 反비례 關係가 있다. 空腔率가 큰 岩石일 수록 速度가 늦어지는 傾向은 空腔이 크면 波의 실제 傳播距離가 길어지기 때문인 것으로 설명될 수 있다.

調査대상 花崗岩의 空腔率은 2.5%이하인데, 이와같이 낮은 空腔率을 지닌 岩石의 경우, 岩石內의 微細한 龜裂의 존재나 組織등이 彈性波速度에 커다란 影響을 미칠 수 있음이 발표된 바 있다(권병두, 1987).

從波速度와 强度

彈性波速度는 영률과 직접 관련이 있으며 영률은 壓縮强度와 깊은 關係가 있으나 彈性波速度와 壓縮强度사이에는 비교적 分散이 심하다. 分散의 原因으로서는 構成礦物의 差異, 生成조건, 緻密程度, 結보기 密度 등으로 인한 것으로 보인다.

彈性波速度에 가장 중요한 影響要素는 結보기 密度이고 다음으로는 結合(cementing)조건이다(Inoue and Ohomi, 1981).

낮은 密度의 岩石에서는 結보기 密度變化의 대부분이 空腔率의 變化에 의한 것이고 높은 密度의 岩石에서는 주로 再結晶과 조밀(稠密)한 礦物含有量의 증가로 인한 것이다.

從波速度와 壓縮强度의 關係를 表示한 것이 Fig. 8이다. 彈性波速度가 壓縮强度가 증가함에 따라 비례적으로 증가함을 알 수 있으나 分散이 심하였다. 따라서 이들사이의 關係를 圖面上에 範圍로 표시하였다. 이들사이의 대략적인 關係式은 다음과 같다.

$$V_p = 550 \sigma_c^{0.28} (r=0.60)$$

Fig. 9는 從波速度와 引張强度의 關係를 나타내고 있

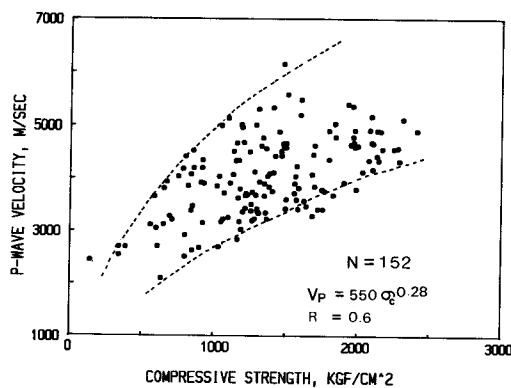


Fig. 8. Relationship between longitudinal wave velocity and compressive strength.

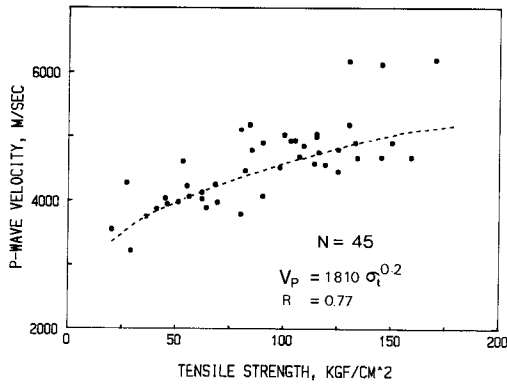


Fig. 9. Relationship between longitudinal wave velocity and tensile strength.

는데 이들 사이의 관계식은 다음과 같이 유도되었다.

$$V_p = 1810 \sigma_t^{0.2} (r = 0.77)$$

從波速度와 橫波速度

岩石내 從, 橫波의 速度比(V_p/V_s)는 포아송比(ν)의 函數이며 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V_p/V_s = \sqrt{2 \cdot \frac{1-\nu}{1-2\nu}}$$

V_p/V_s 의 값은 岩種에 따라 다른데, 調查대상 花崗岩은 대부분 1.5과 1.9사이의 좁은 범위내에서 변화하였다.

從, 橫波速度의 관계를 표시한 것이 Fig. 10이다. 그림에서 破線은 포아송比가 0.25인 完全彈性體의 速度比 $\sqrt{3}$ 을 나타내고 있다.

弛緩된 岩石은 内部摩擦로 결정되는 剪斷力에 대한

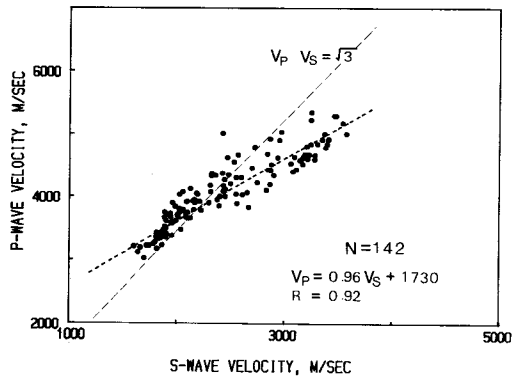


Fig. 10. Relationship between longitudinal wave velocity and transverse wave velocity.

低抗이 없으므로 液體에서와 같이 從波만이 傳播된다. 따라서 龜裂또는 風化 등에 의해 岩石이 교란될 수록 彈性波速度는 늦어지고 그곳에서의 橫波의 吸收는 더욱 커진다. 이와같은 성질을 이용하여 V_p/V_s 比를 岩盤의 特性을 조사하는데 많이 활용되고 있다.

國內 花崗岩에서의 從, 橫波速度간에는 다음식이 성립한다.

$$V_p = 0.96 V_s + 1730 (r = 0.92)$$

從波速度와 靜的彈性係數

彈性波速度와 靜的彈性係數간에는 相關關係가 있는데 彈性波速度(V_p)가 크게되면 靜彈性係數(E_s)는 指數的으로 증가하는 경향이 있다. 이들 사이의 關係式은 다음과 같다.

$$E_s = 24 \times V_p^{0.9} (r = 0.71)$$

彈性波速度는 波가 傳播하는 岩石의 彈性係數와 密度에 의해 결정되는데 Fig. 11은 이들 사이의 관계를 보여주고 있으며 關係式은 다음과 같이 표시된다.

$$V_p = 3780 \left(\sqrt{\frac{E}{\rho}} \right)^{0.62} (r = 0.7)$$

動的彈性係數와 靜的彈性係數

岩石의 動的彈性係數는 대규모現場에서도 저렴, 신속하게 추정할 수 있는 잇점에도 불구하고 動的彈性係數가 岩盤엔지니어링分野에서 널리 사용되지 못하고 있는 주요原因은 대부분의 岩石이 完全히 線形的인 彈性, 均質, 等方體로 舉動하지 않아 設計目的에 필요한 靜的彈性係數와 動的彈性係數사이에서 差異가 있기 때문이다.

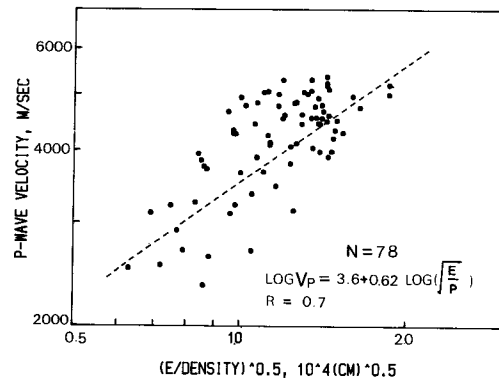


Fig. 11. Relationship between longitudinal wave velocity and $(E/\rho)^{1/2}$

만일 動的彈性係數로부터 신뢰성있는 靜的彈性係數를 算定할 수 있다면 價値있는 設計資料로 사용될 수 있을 것이다.

岩石의 靜的 및 動的彈性係數사이의 關係를 규명하려는 많은 研究가 시도되었는데 일반적으로 이들 研究는 動的영률(E_d)은 靜的영률(E_s)보다 0~300% 크며, 動的포아송比(ν_d)는 靜的포아송比(ν_s)보다 약간 크음을 보여준다(Heerden, 1987). 두 彈性係數의 값이 近似할 수록 더 緻密한 岩石으로 볼 수 있다(Lama and Vutukuri, 1978).

實驗室 實驗에서 動的彈性係數를 구하기위한 彈性波速度측정은 통상 낮은 應力수준에서 실시되므로 靜的, 動的彈性係數의 比較는 靜的彈性係數의 값이 이에 相應하는 應力수준에서 구해질 때 意義가 있는 것이다.

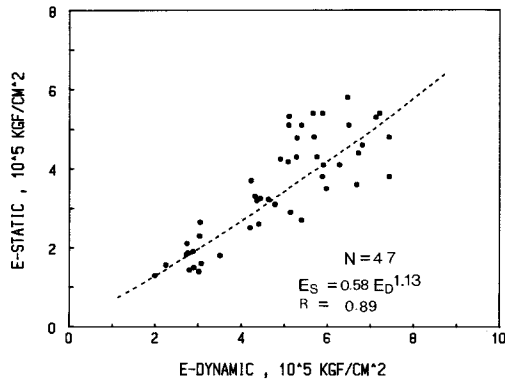


Fig. 12. Relationship between static Young's modulus and dynamic Young's modulus.

Fig. 12는 國內 花崗岩의 靜的, 動的彈性係數사이의 關係를 보여주고 있다. 靜的彈性係數는 壓縮強度의 $\frac{1}{2}$ 의 應力수준에서 구한 接線彈性係數값이고 動的彈性係數值는 無荷重상태에서 측정하여 算定한 값이다.

따라서 同等한 應力수준에서 비교한다면 靜的彈性係數에 대한 動的彈性係數의 比는 좀더 증가될 것이다.

靜的彈性係數에 대한 動的彈性係數의 比는 1.1에서 부터 3.0까지의 범위에 있었다.

測定資料들을 回歸分析한 결과 두 값 사이에는 다음과 같은 關係가 있었다.

$$E_s = 0.58 E_d^{1.13} (r = 0.89)$$

結論

全國의 花崗岩을 대상으로 力學的性質 사이의 相互關係에 대해 regression analysis(回歸分析)을 실시하여 여러 相關關係式들을 구하였다. 이들 式들은 工學의 目的으로한 花崗岩의 物性值를 推定하는 데 參考資料가 될 수 있을 것이다.

參考文獻

- 권병두, 진홍성(1987) 炭田地域에 분포하는 堆積岩類의 物理的 特性연구. 한국지구과학회지 제8권 2호, p.133-142.
- 金永和(1983) 地震波速度에 미치는 영향 要因에 대한 實驗的 研究. 지질학회지 제19권 3호, p.136-144.
- 申信淳(1986) 岩石의 彈性波傳播速度 및 動的特性에 관한 研究. 서울대학교 博士學位論文, 206p.
- 李大聲(1982) 韓國의 地質과 鑛物資源, 金玉準교수 정년퇴임기념 論文集, p.425~427.
- ASTM(1974) ASTM(American Society for Testing and Materials) Annual Book of Standards. ASTM, Philadelphia.
- Brown, E. T.(1981) Rock characterization testing and monitoring-ISM suggested methods. Pergamon Press, 211p.
- Deere, D. U. and Miller, R. P.(1966) Engineering classification and index properties for intact rocks. Technical Report No. AFLTR-65-116, Air Force Weapon's Laboratory, New Mexico, 308 p.
- Heerden, W. L.(1987) General relations between static and dynamic moduli of rocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.24, No.6, p.381-385.
- Inoue, M. and Ohomi, M.(1981) Relation between uniaxial compressive strength and elastic wave velocity of soft rock. Proc. of the Int. Symposium on Weak Rock, Tokyo, p.21-24.
- Lama, R. D. and Vutukuri, V. S.(1978) Handbook on mechanical properties of rocks. Vol.2, Trans Tech Publications, p.196-220.
- Rzhevsky V. and Novik, G. (1971) The physics of rocks. Mir Publishers, Moscow, p.107-181.