エコーチップ硬さ試験機による岩石の力学特性推定の試み

川崎 了*・谷本親伯**・小泉和広***・石川正基***

要 旨

国内の数地点より採取された岩石コアを対象としたエコーチップ硬さ試験, 一軸圧縮試験および弾性波試験を行い, 得られた硬さ指標と力学特性の相関関係について検討を実施した. その結果, 硬さ指標を用いて岩石の一軸圧縮強度が大略推定できる可能性が大きいことがわかった.

Key words: エコーチップ硬さ試験機 Equotip hardness tester, 岩石 rock, 一軸圧縮強度 unconfined compressive strength, 弾性波速度 elastic wave velocity

1. はじめに

筆者らは, 金属材料の弾性的性質を把握するために開発されたエコーチップ硬さ試験機¹⁾に着目し, 本試験機の岩質材料への適用性について検討中である. シュミットハンマーの小型版とも言える本試験機を用いて岩石の力学特性を現場あるいは室内で簡便に推定することができれば, 応用地質学あるいは岩盤(岩石)力学の面で非常に有効となる. しかしながら, 現時点では国内外の諸現場において試行的にデータ取得のみが実施されている程度に過ぎず, 得られた試験結果が十分に生かされていないのが現状と思われる. これらの試験結果を広く, かつ有効に活用して本試験機の岩質材料への早期実用化を図るためには, 試験結果の解釈よりもまずは試験結果の前向きで積極的な公表に期待するところが大きいと考える.

以上のことから, 本報告では国内の数地点から採取された岩石コアに対してエコーチップ硬さ試験を実施し, 現在までに得られている試験結果を用いて岩石の代表的な力学特性である一軸圧縮強度と弾性波速度の推定に関する検討を行った結果について述べる.

2. 岩石試料

試験に用いた岩石試料は, 直径 50 mm のボーリングコアである. また, 岩石の性状は, すべて強制湿潤状態であり, さらに未風化の状態(または風化の程度が非常に小さい状態)にある. 岩種は, 砂岩(愛媛県産, 徳島県産), 頁岩(和歌山県産), 緑色片岩(愛知県産×2 地点), ホルンフェルス(広島県産), 花崗岩(広島県産)であり, 一軸圧縮試験および弾性波試験に供するために直径 50 mm×高さ 100 mm の円柱形に(端面)成形した. なお, 供試体の本数は, 試験に使用できるコアの長さによる制約条件から, 岩種(地点)によって3~11本と大きく異なっている. 一方, エコーチップ硬さ試験で用いる岩石試料に関しては, 深度方向において円柱形供試体の直上および直下付近に存在する別のコアを使用し, さらに文献 2)を参考にして高さが約 40 mm 以上の岩石コアを供試体とした.

3. 試験方法

一軸圧縮試験は, 毎分 0.1% 程度の軸ひずみ速度で行った. また, 弾性波試験は, 一軸圧縮試験と同一の供試体を用いて超音波パルス法により実施した. なお, 花崗岩については, 都合により弾性波試験を実施していない. 一方, エコーチップ硬さ試験では, 前述した供試体に対して 10 回ずつ試験を実施し, その平均値を硬さ指標 L とした. また, L の値は種々の試験条件による影響を受けるため, その影響を避ける目的で試験に関するその他の試験条件については文献 2)を参考にして試験を行った.

* 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 Department of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University((現)北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻)(会員)

** 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 Department of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University

*** (株)ダイヤコンサルタント Dia Consultants Co., Ltd.

4. 試験結果

4.1 q_u - L 関係

砂岩(Sandstone), 頁岩(Shale), 緑色片岩(Greenschist), ホルンフェルス(Hornfels), 花崗岩(Granite)の岩種に着目して整理した一軸圧縮強度 q_u と L の関係を, それぞれ図-1~5に示す。ここで, 同図中に示した数式は, 最小自乗法により得られた q_u - L 関係の回帰直線と相関係数 R であり, 図中では実線あるいは点線で表現されている。これらの図より, 以下のことが言える。

- ①回帰直線は, 花崗岩(Granite)を除いて全体的に右上がりの直線となっている。すなわち, 花崗岩(Granite)以外の岩石の q_u と L の間には, 正の相関関係が存在する。
- ② R が比較的大きいのは, 砂岩(Sandstone)の q_u (Ehime), 頁岩(Shale)の q_u (Wakayama), 緑色片岩(Greenschist)の q_u (Aichi-2)の3つであり, いずれも R が0.8以上である。
- ③ R が比較的大きい q_u - L 関係を示す岩石に関しては, 今回得られた L の範囲内において回帰直線を用いれば, L

から q_u を大略推定できる可能性が大きい。

次の図-6は, 本試験で使用した岩石すべての q_u - L 関係である。なお, 図中の直線および点線は, 最小自乗法で得られた各岩石の q_u - L 関係の回帰直線である。この図より, 試験データの大部分は, 上から Sandstone(Toku-

図-3 緑色片岩(Greenschist)の q_u - L 関係

図-1 砂岩(Sandstone)の q_u - L 関係

図-4 ホルンフェルス(Hornfels)の q_u - L 関係

図-2 頁岩(Shale)の q_u - L 関係

図-5 花崗岩(Granite)の q_u - L 関係

図-6 試験に使用した全岩石の q_u - L 関係

shima), Sandstone(Ehime), Greenschist(Aichi-2), Greenschist(Aichi-1)の4本の回帰直線よりも右側に分布しているのがわかる. また, L が最も大きいのはGranite(Hiroshima)であるが, q_u が一番大きいのはSandstone(Tokushima)であり, q_u - L 関係を岩石全体で考えると, L が最も大きい岩石の q_u が一番大きいとは限らないことを示している.

以上のことから, q_u - L 関係は岩石全体で考えるのではなく, 岩種ごとに異なる関係式が存在することが推定されるため, ここで砂岩(Sandstone)を例にした場合の既存の試験結果²⁾を含めた q_u - L 関係を図-7に示す. 前述したとおり, L が比較的狭い範囲では q_u - L 関係が岩種(地点)ごとに異なる直線で示されるのに対し, 同図を見ると $L \approx 300 \sim 800$ の広い範囲において q_u - L 関係は左下から右上の方向に伸びる下に凸の1本の曲線(放物線)として表現されている. このことから, 砂岩(Sandstone)の場合には, この q_u - L 関係を用いれば L から q_u が推定できる可能性が高いと考えられる. なお, 同図の縦軸(q_u 軸)を対数目盛にすれば, q_u - L 関係は図-8に示すように片対数紙上で直線になることから, 利用者が使いやすい関係式の表現方法についても検討する必要がある. 今後は, さらなる試験データの収集を行って砂岩(Sandstone)の q_u - L 関係の精度および信頼性を高めると同時に, 砂岩(Sandstone)以外の岩石および岩種(地点)ごとの q_u - L 関係についても検討を実施する必要がある, 今後の検討課題である.

4.2 V_p - L および V_s - L 関係

砂岩(Sandstone), 頁岩(Shale), 緑色片岩(Greenschist), ホルンフェルス(Hornfels)の岩石ごとに整理した弾性波速度 V_p および V_s と L の関係を, それぞれ図-9~12に示す. 同図より, 以下のことが知られる.

①回帰直線は, 砂岩(Sandstone)の V_p (Tokushima), V_s (Tokushima)を除いて, 全体的に緩やかな右上がりの直線となっている.

図-7 既存の試験結果を含めた砂岩(Sandstone)の q_u - L 関係 図-8 既存の試験結果を含めた砂岩(Sandstone)の q_u - L 関係 (片対数表示)

② R が0.8以上の砂岩(Sandstone)の V_s (Ehime)と緑色片岩(Greenschist)の V_p (Aichi-2), V_s (Aichi-2)を除き, 全体的に R は小さい.

③前述の q_u - L 関係と比較すると, 試験データのバラツキが大きく, 全体的に V_p - L および V_s - L 関係の R は小さいことから, 今回得られた試験データによる L から V_p および V_s の推定は難しい.

次に, 今回の試験で得られた全岩石の V_p - L および V_s - L 関係について調べると次のとおりである. 図-13は, 試験に用いた岩石全体の V_p - L および V_s - L 関係である. なお, 同図中の点線および実線は, それぞれ V_p - L および V_s - L 関係の回帰直線を示している. 同図には, 前の図-9~12よりも広範囲に及ぶ V_p - L および V_s - L 関係が示されており, $L \approx 250 \sim 800$ の広い範囲において $V_p \approx 2.0 \sim 5.5$ km, $V_s \approx 1.5 \sim 3.5$ kmの試験データが得られているのがわかる. また, V_p - L および V_s - L 関係は, ともに全体的には正の相関関係が存在し, 右上がりの直線で表現できそうであるが, 前述の q_u - L 関係と比較して試験デー

図-9 砂岩(Sandstone)の V_p - L および V_s - L 関係 図-12 ホルンフェルスの(Hornfels) V_p - L および V_s - L 関係 図-10 頁岩(Shale)の V_p - L および V_s - L 関係 図-13 試験に使用した全岩石の V_p - L および V_s - L 関係 図-11 緑色片岩(Greenschist)の V_p - L および V_s - L 関係

タのバラツキが大きい。今後とも継続的にさらなる試験データの収集を行う必要がある。

5. ま と め

本報告で得られた主な知見をまとめると、以下に示すとおりである。

① q_u - L 関係については、岩種ごとに異なる関係式が存在し、その関係式は全体的に右上がりの直線や曲線となっている。また、岩種ごとに今回得られた L の範囲において適切な q_u - L 関係を用いれば、 L から q_u を大略推定できる可能性が大きい。

② V_p - L および V_s - L 関係の回帰直線は、全体的に緩やかな右上がりの直線となっている。しかし、 q_u - L 関係と比較して試験データのバラツキが大きく、また全体的に V_p - L および V_s - L 関係の R は小さいことから、今回得られた試験データによる L から V_p および V_s の推定は難しい。

③現時点では試験データが不足しているため、今後とも継続的にさらなる試験データの収集を行うと同時に、岩種(地点)に着目した q_u - L 、 V_p - L および V_s - L 関係について検討を実施する必要がある。

謝辞 本報告の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金奨励研究(A)(課題番号：12780107、研究代表者：川崎 了)の補助を受けて行われた。末筆ながらここに記して、感謝の意を表する次第である。

引 用 文 献

- 1) PROCEQ S. A. (1977) : Equotip Operations Instructions, 5th Ed., PROCEQ S. A., Zurich, Switzerland.
- 2) 川崎了・吉田昌登・谷本親伯・舩屋直(2000) : 簡易反発硬度

試験による岩質材料の物性評価手法の開発－試験条件の影響と基本特性に関する調査－, 応用地質, 第41巻, 第4号, pp.230-241.

(2002年1月22日受付, 2002年4月17日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.43, No.4, pp.244-248, 2002

An Attempt to Estimate Mechanical Properties of Rocks Using the Equotip Hardness Tester

Satoru KAWASAKI, Chikaosa TANIMOTO, Kazuhiro KOIZUMI
and Masaki ISHIKAWA

Abstract

The Equotip hardness tests, unconfined compression tests and elastic wave tests were conducted using rock cores sampled from several sites in Japan, and a consideration of correlations between obtained hardness indexes and mechanical properties was carried out. As a result, it was found that there was a fair possibility of estimating the values of unconfined compressive strength using hardness indexes.

Key words : Equotip hardness tester, rock, unconfined compressive strength, elastic wave velocity