

(67) 岩盤ブロックの各種試験より求めた波動伝播速度について

WAVE VELOCITY OF HARD ROCK BLOCK DUE TO SOME EXPERIMENTAL METHODS

佐藤正俊* ・ 上田稔** ・ 長谷部宣男*** ・ 近藤寛通****

Masatoshi SATO, Minoru UEDA, Norio HASEBE and Hiromichi KONDO

Dynamic loading test, resonance method and ultrasonic method are carried out for test specimens of hard rock blocks and these experimental results are compared. Wave velocities due to resonance method are faster than those due to dynamic loading method. And those due to ultrasonic method are the fastest. The similar results are obtained from those of tests for model specimen of hard rock block. From these results, the effect of loading rate dependence and the ratio of distance between cracks to wave length used in resonance method and ultrasonic method.

1. まえがき

著者らは硬質岩盤の波動伝播速度について研究を行っている¹⁾。硬質岩盤での標高差のある2ヶ所の地震観測記録から地震波伝播速度を求め、原位置における各種試験法（孔間速度検層、横坑間速度検層、ダウンホール法、屈折法弾性波探査）による波動伝播速度と比較すると、地震波伝播速度に対し各種原位置試験による波動伝播速度はかなり大きい¹⁾。

本研究では、この理由を考察するための基礎的研究として、割れ目を有する岩塊より切り出した岩盤ブロック供試体（図-1参照）を対象に、載荷速度を変えた動的圧縮試験、共振法、超音波法を行い、これらの各種試験法より求まる波動伝播速度の比較を行う。そして、各種試験法による波動伝播速度が異なる理由について、載荷速度依存性や割れ目の間隔と各種試験法で用いられる波長の比の影響から考察する。

2. 岩盤ブロック供試体の各種試験法による波動伝播速度の比較

動的載荷試験、共振法、超音波法の各種試験法を行い、波動伝播速度 V_p を求め、それらの違いを明らかにする。

2.1 岩盤ブロック供試体

図-1に岩盤ブロック供試体を示す。供試体は、アーチダムサイトで採取した岩塊（中生代の流紋岩）をダイヤモンドカッターで切り出し作製した。岩盤はかなり硬質で、基質部の剛性は40～50万 kgf/cm^2 程度である。供試体は、割れ目の量の多少によりA（割れ目量多）、B（割れ目量中）、C（割れ目量少）の3種類のそれぞれ1体を用いる。

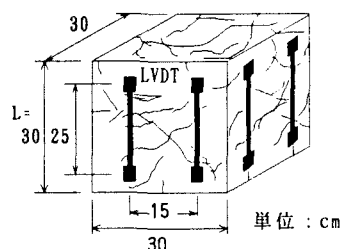


図-1 岩盤ブロック供試体と計測

2.2 動的圧縮試験

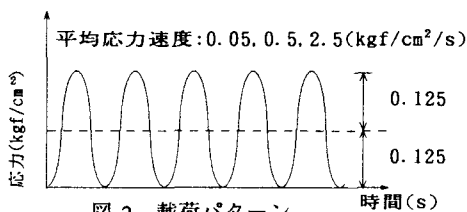
図-2に載荷パターンを示す。一定振幅のSIN波の周波数を変化させ載荷速度を変えた圧縮試験とした。試験の載荷速度（以下応力速度という）は、その平均値が原位置平板載荷試験の標準速度($5\text{kgf/cm}^2/\text{min}$)²⁾相当の値である $0.05\text{kgf/cm}^2/\text{s}$ と、そのオーダーを変えた3段階の速度とした。動的圧縮試験による V_p と共振法や超音波法による V_p を比較することから、載荷応力の中心値と振幅はできるだけ小さくすることとし、試験装置

* 正会員 工修 中部電力（株） 電力技術研究所

** 正会員 工博 中部電力（株） 電力技術研究所

*** 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部 社会開発工学科

**** 正会員 中部電力（株） 電力技術研究所 研究コーディネーター



の性能を考慮してそれらを0.125kgf/cm² (図-2) とした。

供試体の変位を約0.0003mmの精度を有する差動変圧器(LVDT)で計測した。LVDTは図-1に示すように供試体側面に直接接着した。岩盤ブロック供試体では、割れ目の分布が複雑であるので、1側面ごとに2ヶ所の合計8ヶ所で計測した。計測間隔は、計測精度を十分なものとするため、载荷速度にかかわらず約0.003kgf/cm²と細かくした。

動的圧縮試験で得られる応力-ひずみ曲線から弾性係数 E を求め、弾性波動論により次式で V_p を算出した。

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{-----}(1)$$

ここに、 ρ は密度、 ν はポアソン比である。密度 ρ は実測値で、供試体Aが2.5g/cm³、供試体B,Cが2.6g/cm³である。また、 ν は0.25とした。

2・3 共振法

共振法は、JIS A 1127に基づき³⁾ 動的圧縮試験実施前に、同じ供試体を用いて行った。測定した n 次固有振動数 f_n と供試体長さ L より V_p を、

$$V_p = \frac{2fnL}{n} \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{-----}(2)$$

で算出した。なお、 ν は動的圧縮試験と同じ値である。

2・4 超音波法

超音波法は超音波縦波パルスを供試体中に発信し、発信、受信トランスデューサー間(距離 L)の伝播時間 ΔT を測定し V_p を、

$$V_p = L / \Delta T \quad \text{-----}(3)$$

で算出した。超音波縦波パルスの発振周波数は24kHzと54kHzである。本試験も载荷試験前に行った。

2・5 各種試験法より求めた波動伝播速度の比較

図-3に動的圧縮試験、共振法、超音波法による V_p とひずみ速度の関係を各供試体ごとに示す。動的圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線は、载荷部分が直線で除荷部分が曲線のループを描く。このループの平均勾配(原点とループの頂点を結ぶ直線、即ち载荷部分の直線の勾配)より E を求め、式(1)により V_p を求めた。動的圧縮試験のひずみ速度は時間的に平均化した応力速度を E で除した値である。共振法による V_p は、計測した加速度が最大となる固有振動数に対する値である。その次数は、供試体A,Bでは3次、供試体Cでは2次であった。共振法、超音波法のひずみ速度の算出法については4章で説明する。

動的圧縮試験による V_p は、供試体によらずひずみ速度が大きくなると速くなる傾向が認められる。

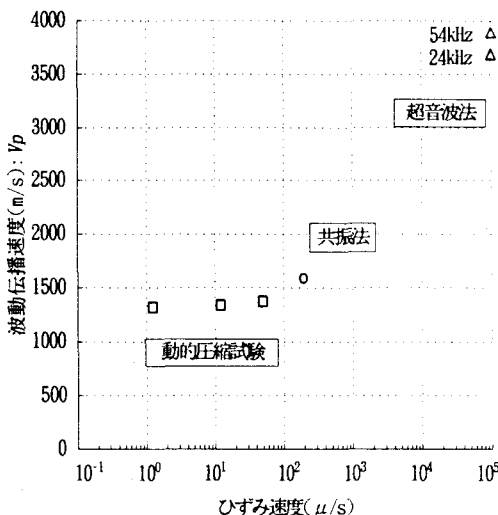
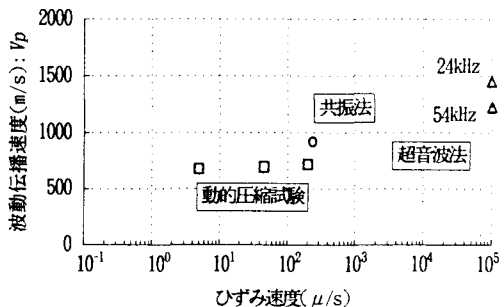
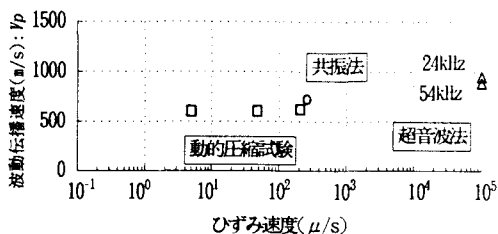


図-3 岩盤ブロック供試体の各種試験法による波動伝播速度とひずみ速度の関

しかし、その程度は小さく、ひずみ速度が数 $\mu \sim 200 \mu/s$ 程度の範囲では5%程度である。各種試験法により求まる v_p を比較すると、圧縮試験（応力速度 $0.05 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ ）による v_p に比べ、共振法による値は1.2～1.4倍、超音波法による値は1.5～2.2倍でかなり速い。各種試験法による v_p の差を供試体ごとに比較すると、供試体A、B、Cの順に大きくなっている。即ち割れ目の量が少ないほどその差が大きい。

次章以降で各種試験法による値が異なる理由について検討する。

3. 各種試験法より求めた波動伝播速度のひずみ速度やひずみのレベルの影響

前章の動的圧縮試験より、その程度は小さいが、波動伝播速度にひずみ速度依存性が存在することが明らかとなった。よって、各種試験法より求まる v_p が異なる要因の1つとして、ひずみ速度が挙げられる。また、各種試験法におけるひずみの大きさは異なっている。そこで各種試験法におけるひずみ速度やひずみを求めて、その影響を考察する。まずこれらの値の求め方から説明する。

3・1 共振法、超音波法におけるひずみ速度やひずみの算出

等方弾性体中を一方向に伝播する弾性波の波動方程式は、波動伝播方向の変位を u 、座標を x とすると、

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{-----}(4)$$

で表わされる。その解は、

$$u = A e^{\pm i V_p k t} \cdot e^{\pm i k x} \quad \text{-----}(5)$$

で、 k は境界条件から決まる定数である。

加速度を G^* とすると、

$$G^* = \partial^2 u / \partial t^2 = -V_p^2 k^2 \cdot u \quad \text{-----}(6)$$

なので、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は、

$$\dot{\epsilon} = \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} = -V_p k^2 \cdot u = \frac{G^*}{V_p} \quad \text{-----}(7)$$

である。

同様にひずみ ϵ 、速度を $V^* (= \partial u / \partial t)$ とすると、

$$\epsilon = \partial u / \partial x = \pm k \cdot u = V^* / V_p \quad \text{-----}(8)$$

となる。 V^* は周波数を f とすると、

$$V^* = G^* / 2\pi f \quad \text{-----}(9)$$

である。よって、加速度を求めればひずみ速度やひずみを求めることができる。

共振法や超音波法に対しては、所有している試験装置では加速度の測定ができないため、図-4に示す加速度測定システムを組み、供試体の端面で加速度を測定した。共振法における供試体の振動は、供試体両端面が腹で供試体中にその次数に応じた数の節と腹を持つ振動形状で、振幅が時間的に変化する。よって、共振法における加速度として、時間と空間に対し平均した値を求めた。超音波法の加速度は、受信側と発信側でそれぞれ計測した波の最初の1山を時間に対し平均した値の平均である。これらの平均加速度を用いて、共振法、超音波法におけるひずみ速度とひずみを、式(7),(8)より算出した。

3・2 ひずみ速度依存性の影響

共振法、超音波法におけるひずみ速度と v_p の関係が図-3に示してある。共振法のひずみ速度は、 $200 \mu/s$ 程度で動的圧縮試験の最もひずみ速度が大きい場合と同程度である。しかしいずれの供試体も、共振法による値の方が動的圧縮試験による値より大きく、両試験法による値の違いの理由をひずみ速度依存性で説明できない。超音波法のひずみ速度は、 $10^5 \mu/s$ 程度と動的圧縮試験の値に比べかなり大きい。この程度の大きなひずみ速度における v_p のひずみ速度依存性は不明である。しかし、共振法による v_p がひずみ速度依存性で説明されないことや、超音波法による値が動的圧縮試験や共振法による値に比べかなり大きいことから、超音波法による値もひずみ速度依存性のみでは説明されないと考えられる。

3・3 ひずみのレベルの影響

共振法、超音波法のひずみは微小で、それぞれ 10^{-2} と $10^{-1} \mu$ のオーダーである。これに対し、動的圧縮試験

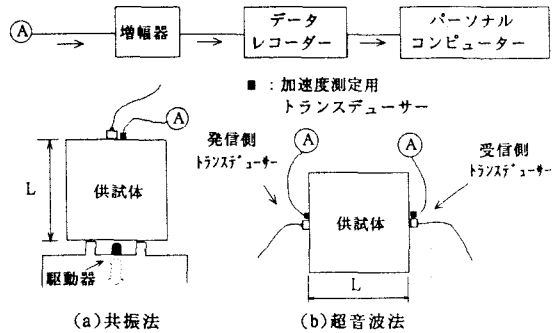


図-4 共振法、超音波法と加速度測定システム

のひずみの計測精度は 1μ 程度であり、動的圧縮試験において共振法や超音波法と同じ微小なひずみでの V_p は、厳密には不明である。しかし、図は省略するが動的圧縮試験の応力-ひずみ曲線は、載荷部で線形であることから、共振法、超音波法での微小なひずみで V_p がより大きくなる様な非線形性が存在するとは考えにくい。

以上のとおり、各種試験法により求めた V_p が異なる理由は、ひずみのレベルの影響とは考えにくく、ひずみ速度依存性のみでは説明できない。次章では、岩盤の割れ目の存在が V_p に与える影響について検討する。

4. モデル岩盤供試体の各種試験法による波動伝播速度の比較

渡辺ら⁴⁾は、基質層と低速度層を互層状に有する1次元モデルの V_p を実験と解析により調べている。それによれば、一定の長さのモデル中の基質層と低速度層の合計厚は同じでも、層数が多くなったり（即ち、1層当たりの層厚が薄い）、波長が長くなると、 V_p が低下することを示している。この結果から、不連続体である岩盤の V_p に、割れ目の間隔 d や波長 λ の相対的大きさが影響するものと推察される。そこで、岩盤の割れ目を模擬したモデル岩盤供試体を対象に、動的圧縮試験、共振法、超音波法を行い、 V_p と d/λ の関係を調べる。試験方法は、2章に述べた岩盤ブロック供試体の場合と同様である。

4・1 モデル岩盤供試体

図-5にモデル岩盤供試体を示す。モデル岩盤供試体の基質部の弾性係数 E は、岩盤ブロック供試体の割れ目の無い基質部の弾性係数程度である約40万kgf/cm²とした。そのため基質部は高強度モルタル（早強モルタルにシリカフュームを混入）で作製した。岩盤の割れ目は発泡スチロールで作製した。割れ目の多い（供試体A、 $d=1.2$ cm）、中程度（供試体B、 $d=1.7$ cm）、少ない（供試体C、 $d=2.7$ cm）、割れ目の無い（供試体D）の4種類の供試体とし、それぞれ3体作製した。供試体Bの割れ目量は、その圧縮試験による V_p が岩盤ブロック供試体のうち、各種試験による V_p の差が最も大きかった供試体Cのそれと同程度である。

4・2 各種試験法より求めた波動伝播速度の比較

図-6に各種試験法による V_p と d/λ の関係を示す。動的圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線は、ほぼ線形で可逆的であり、繰返し載荷や応力速度の影響もほとんどなかった。直線部の傾きより E を求め式(1)により V_p を算出した。ポアソン比 ν と密度 ρ は各供試体の実測値を用いた。圧縮試験、共振法、超音波法の順に、割れ目の多い供試体Aは□、○、△で、中程度の供試体Bは□、○、△、少ない供試体Cは■、●、▲でそれぞれの結果を示す。共振法については固有振動数が明確に判別できた1次と2次の結果を示してある。共振法、超音波法による値の平均値を、供試体ごとに実線、破線、一点鎖線で結んでいる。なお、供試体Bは試

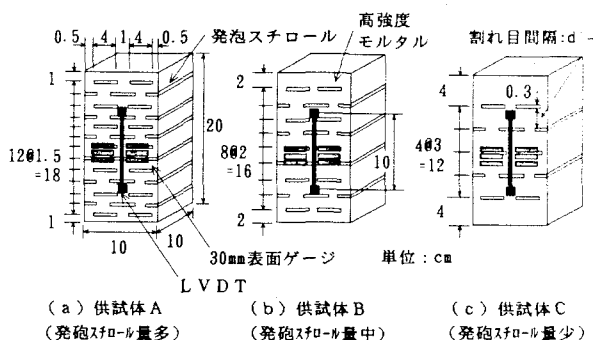


図-5 モデル岩盤供試体

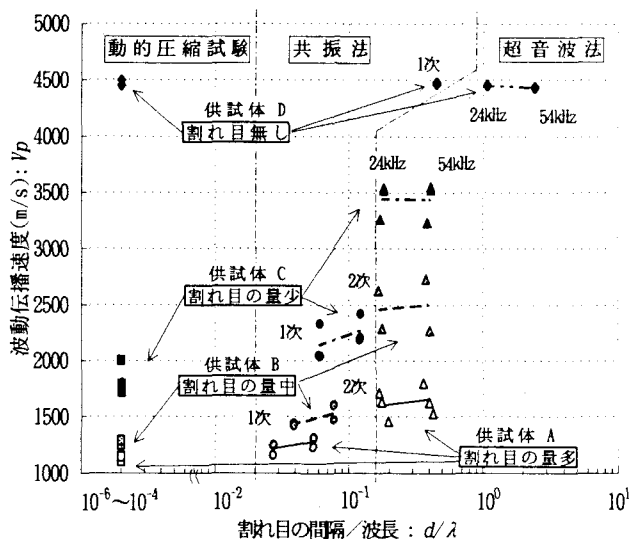


図-6 モデル岩盤供試体の各種試験法による波動伝播速度(V_p)と割れ目の間隔/波長(d/λ)の関係

験不良であった1体を除く2体の結果である。

各種試験法により求まる V_p を比較すると、動的圧縮試験による V_p に比べ共振法による値は1.1～1.3倍、超音波法による値は1.3～2.1倍でかなり速い。これに対し割れ目の無い供試体Dの結果を◆で示すが、 V_p は試験方法にかかわらず一定である。各種試験法による V_p の差を供試体ごとに比較すると、供試体A、B、Cの順に割れ目の量が少ない供試体ほどその差が大きくなり、岩盤ブロック供試体の場合と同じである。なお、動的圧縮試験の結果に応力速度による違いはほとんどなかったことから、モデル岩盤供試体の各種試験法による V_p の違いには、応力速度の影響は含まれていない。

4・3 波長に対する割れ目間隔の比 d/λ の影響

各種試験法における λ は、動的圧縮試験では $10^2 \sim 10^4$ m、共振法では供試体の長さの倍程度である 10^1 m、超音波法では共振法よりも1オーダー小さい 10^{-2} mである。 d/λ は図-6に示すとおり、動的圧縮試験が $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 、共振法が 10^{-2} 、超音波法が 10^{-1} のオーダーで、試験法によりかなり異なっている。動的圧縮試験による V_p は、 d/λ が異なってもほとんど同じである。しかし、各種試験法による V_p は、圧縮試験、共振法の1次、2次、超音波法の24kHz、54kHzの順で、 d/λ が大きくなる順に大きくなる。共振法による V_p をみると、同一の供試体でも1次に比べ2次の方が d/λ が大きく、 V_p が速くなっている。また、共振法による V_p の動的圧縮試験による V_p に対する比を調べると（以下()内にその比を記す）、供試体Aの1次(1.08)、供試体Bの1次(1.11)、供試体Aの2次(1.14)、供試体Cの1次(1.17)、供試体Bの2次(1.19)、供試体Cの2次(1.24)の順で、 d/λ が大きい程大きい。以上により d/λ が 10^2 程度以上では、 V_p は d/λ の影響を受け、 d/λ が大きい程 V_p は速くなる。

なお、超音波法による V_p はかなり速く、超音波の波動伝播経路を割れ目を避けた最短の経路と考えると、波動伝播速度は基質部そのものの値に等しい。これは谷本ら⁵⁾の試験結果と一致する。超音波法において受信側で計測される波動は基質部のみを伝播した波動であると考えられる。

5. 岩盤ブロック供試体の各種試験法による波動伝播速度の違いに関する考察

前章までの検討を基に、岩盤ブロック供試体の各種試験法による V_p の違いについて考察する。

モデル岩盤供試体の各種試験法による V_p は、波長に対する割れ目間隔の比 d/λ に依存していることを示したが、これより、岩盤ブロック供試体の各種試験法による V_p も、 d/λ に依存していると考えられる。岩盤ブロック供試体もモデル岩盤の場合と同様に、割れ目の量が少ない程、各種試験法による V_p の差が大きくなっていることもそれを裏付けていると考えられる。また、動的圧縮試験により示したとおり、岩盤ブロック供試体の V_p にはひずみ速度依存性が存在し、その程度はひずみ速度が数 $\mu \sim 200 \mu/s$ 程度の範囲では5%程度である。

以上より、岩盤ブロック供試体の各種試験法による V_p の違いとその理由をまとめると次のとおりである。

- (1) 動的圧縮試験より求めた V_p に比べ、共振法による値は大きい。この理由は、共振法のひずみ速度は動的圧縮試験のひずみ速度の範囲にほぼあるが、波長は供試体の長さの倍程度以下で、動的載荷試験の波長に比べかなり短い。このため、 d/λ の影響を受けるため、動的圧縮試験より求めた V_p と異なると考えられる。
- (2) 動的圧縮試験より求めた V_p に比べ、超音波法による値はかなり大きい。この理由は、ひずみ速度が動的圧縮試験に比べかなり大きいので、ひずみ速度依存性の影響を受ける上に、波長が共振法の波長よりも短く、 d/λ の影響をより大きく受けるためと考えられる。

6. 参考文献

- 1) 佐藤正俊、上田稔、近藤寛通、長谷部宣男：硬質岩盤の地震観測記録より求めた地震波伝播速度と各種原位置試験結果について、土木学会中部支部平成6年度研究発表会講演概要集，pp. Ⅲ 34-Ⅲ 35, 1995.
- 2) 土木学会：原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針 —解説と設計の指針—，pp. 3-16, 1983.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 基準編，pp. 303-313, 1991.
- 4) 渡辺俊樹、佐々宏一、芦田譲、岸本宗丸：多数の薄層からなる低速度帯がP波に及ぼす影響について，物理探査，Vol.42, No.2, pp.78-81, 1989.
- 5) 谷本親伯、岸田深：一軸圧縮状態での岩盤不連続面を透過する弾性波伝播特性に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.523/Ⅲ-32, pp.49-58, 1995.