

割れ目を有する硬質岩盤の微小ひずみ領域での 変形性と波動伝播速度

佐藤正俊¹・上田稔²・長谷部宣男³・近藤寛通⁴

¹正会員 工修 中部電力(株) 電力技術研究所(〒459 名古屋市緑区大高町字北関山20-1)

²正会員 工博 中部電力(株) 電力技術研究所 研究主査

³正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部 社会開発工学科

⁴正会員 中部電力(株) 土木建築部(〒461 名古屋市東区東新町1番地) 副部長

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を対象に、荷重載荷速度を変えた動的圧縮試験を行い、微小ひずみ領域での高精度な測定を行った。さらに共振法、超音波法試験を行い、各種試験法より求まる波動伝播速度の比較を行った。その結果得られた値は、各種試験法により異なり、その違いの程度は割れ目の量に影響されることが分かった。割れ目を有する硬質岩盤の微小ひずみ領域における変形性を示すとともに、各種試験法による波動伝播速度が異なる理由を検討し、波動伝播速度のひずみ速度依存性、割れ目の間隔と波長の比や波動伝播経路の影響について考察した。

Key Words : *hard rock block, crack, deformation characteristic, wave velocity, low strain level, dynamic loading test, resonance method, ultrasonic method*

1. まえがき

ダム等岩盤上や地下空洞等岩盤内に建設される重要構造物の地震時挙動を把握するために、地震応答解析が実施されている。この際構造物の挙動を正確にとらえるためには、岩盤の地震波伝播速度を的確に評価する必要がある。岩盤の波動伝播速度を求める原位置試験として弾性波探査試験やボーリング孔による速度検層等がある。これらの原位置試験で対象とする波動は、実地震波に比べかなり微弱で高周波である。また、波動の発信源が点であり、波動伝播は部分的であるのに対し、地震波の伝播は対象サイトの全体的な振動による。このように実地震波と差異のある波動による試験結果を、割れ目を有する岩盤の地震時の波動伝播速度として用いてよいのかという疑問もある。このため、上述の地震応答解析における岩盤の波動伝播速度の設定等に大きな問題を残している。

この点について明確にすることを目的として、著者らは、硬質岩盤での地震観測記録から地震波伝播速度を求め、原位置における弾性波探査試験やボーリング孔による速度検層結果との比較を行っている。それによれば原位置試験による波動伝播速度は、地震波伝播速度に対して、同程度からかなり大きい場合までサイトにより大きく異なっている。本研究は、この理由を明らかにするための基礎的研究を行うものである。

粘性土、砂質土、砂礫、軟岩を対象として、室内

載荷試験で高精度な測定を行い、微小ひずみ領域での変形性を調べた上で、室内試験と原位置試験の関係等を明確にする研究が精力的に行われている^{1), 2)}。一方、割れ目を有する硬質岩盤に関しては、古くからその基質部に相当する岩石を対象に、静的載荷試験や共振法、超音波法試験が数多くなされ、それらの試験結果の比較が行われている^{3), 4)}。しかし、割れ目を有する硬質岩盤そのものを対象に、載荷試験を行い微小ひずみ領域で高精度な測定を行った例はほとんどない。これは、硬質岩盤を特徴付ける割れ目を有する供試体を作製することが、難しいこともその理由であろう。しかし硬質岩盤では割れ目の影響により、その変形性や波動伝播速度がその他の地盤材料と大きく異なることも予想される。硬質岩盤に対しても、現地の観測や試験結果の明確な理解に資するため、微小ひずみ領域での変形性や波動伝播速度について明らかにすることが望まれる。

そこで本研究は、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を対象に、荷重載荷速度を変えた動的圧縮試験を行い、微小ひずみ領域における変形性を調べる。さらに共振法、超音波法試験を行い、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。硬質岩盤の変形性や波動伝播速度に割れ目の存在が及ぼす影響を調べるため、割れ目の量が異なるいくつかのブロック供試体に対し試験を行う。また割れ目の配列を単純化したモデル岩盤を対象に、割れ目の間隔をいくつか変えて同様の各種試験を行う。これらにより、割れ目を有する硬質岩

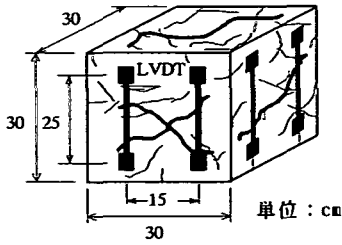


図-1 岩盤ブロックの形状と差動変圧器による計測

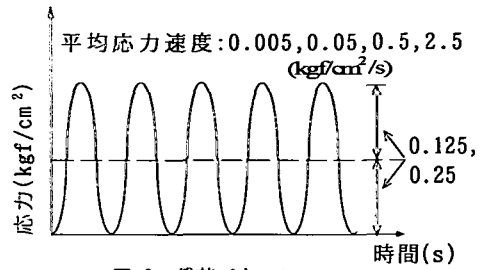


図-3 荷重パターン

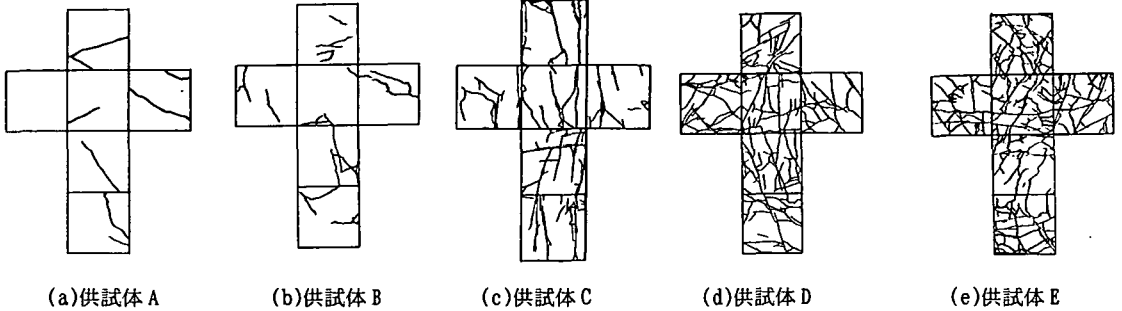


図-2 岩盤ブロック表面の割れ目の状況を示す展開図

盤の微小ひずみ領域における変形性を示すとともに、各種試験法による波動伝播速度が異なる理由を検討し、波動伝播速度の荷重速度依存性、割れ目の間隔と波長の比や波動伝播経路の影響について考察する。

2. 岩盤ブロックの微小ひずみ領域での変形性

(1) 岩盤ブロック供試体

図-1に岩盤ブロックの形状を示す。供試体は一辺が30cmの立方体で、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。岩盤はかなり堅硬で、基質部の弾性係数は40万kgf/cm²程度である。供試体は割れ目が及ぼす影響を調べるため、割れ目の量が異なるA（割れ目が少ない、密度 $\rho=2.66\text{g/cm}^3$ ）、B（割れ目が比較的少ない、 $\rho=2.65\text{g/cm}^3$ ）、C（割れ目の量が中程度、 $\rho=2.63\text{g/cm}^3$ ）、D（割れ目が比較的多い、 $\rho=2.57\text{g/cm}^3$ ）、E（割れ目が多い、 $\rho=2.53\text{g/cm}^3$ ）の5体を作製した。各供試体の密度は、割れ目が多い程小さくなっている。表面の割れ目の観察結果の展開図を図-2に示す。なお、岩盤ブロック供試体の他に、岩塊の割れ目がない部分よりコアリングした、岩石コアの円柱供試体（直径9cm、高さ18cm）に対しても、3体試験を行った。岩石コアの密度は $\rho=2.7\text{g/cm}^3$ 前後である。供試体は気乾状態で試験を行った。

(2) 試験方法

試験は一軸圧縮試験で、サーボコントロール型剛

性試験装置で行った。図-3に荷重パターンを示す。一定振幅の正弦波の周波数を変化させ（0.01, 0.1, 1, 5Hz）、荷重速度を変えた動的圧縮試験とした。正弦波の繰り返し回数は5回である。荷重速度の平均値（以下応力速度という）が、原位置平板荷重試験の標準速度（5kgf/cm²/min）程度の値である0.05kgf/cm²/sと、そのオーダーを変えた4段階の速度（0.005, 0.05, 0.5, 2.5kgf/cm²/s）である。荷重応力の中心値と振幅はできるだけ小さくすることとし、試験装置の荷重性能を考慮して、それらを0.125kgf/cm²（図-3参照）と0.25kgf/cm²の2ケースとした。0.125kgf/cm²のケースを行ったのち0.25kgf/cm²のケースの試験を行った。

供試体の変位を差動変圧器(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。岩石コアの計測は、ひずみゲージによる。計測間隔は、計測精度を十分なものとするため、応力速度にかかわらず約0.003kgf/cm²と細かくした。試験の制御とデータ収録はパソコンによって行った。

(3) 高荷重まで荷重した場合の応力-変形曲線

微小ひずみ領域での試験結果を示す前に、通常の原位置平板荷重試験と同じ荷重パターンと荷重速度（5kgf/cm²/min）で、高荷重まで荷重した場合の応力-変形曲線の代表例を、図-4に示す。供試体はEで、試験は微小ひずみ領域での試験を実施した後に行った。応力-変形曲線はループを描き、荷重保持時にクリープ、除荷時には残留変形が生じている。

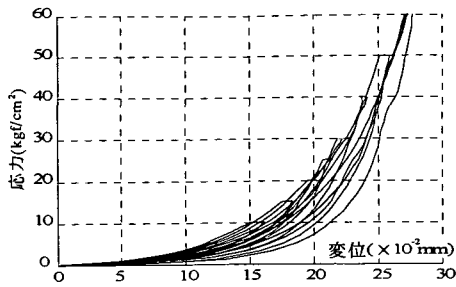


図-4 岩盤ブロックの応力-変形曲線

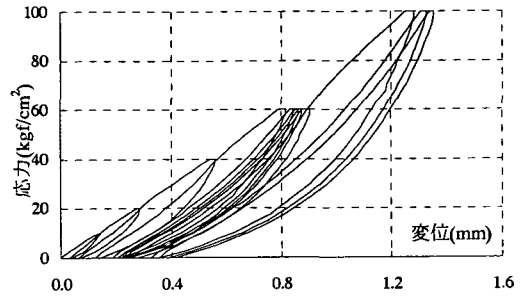


図-5 原位置平板荷重試験の応力-変形曲線

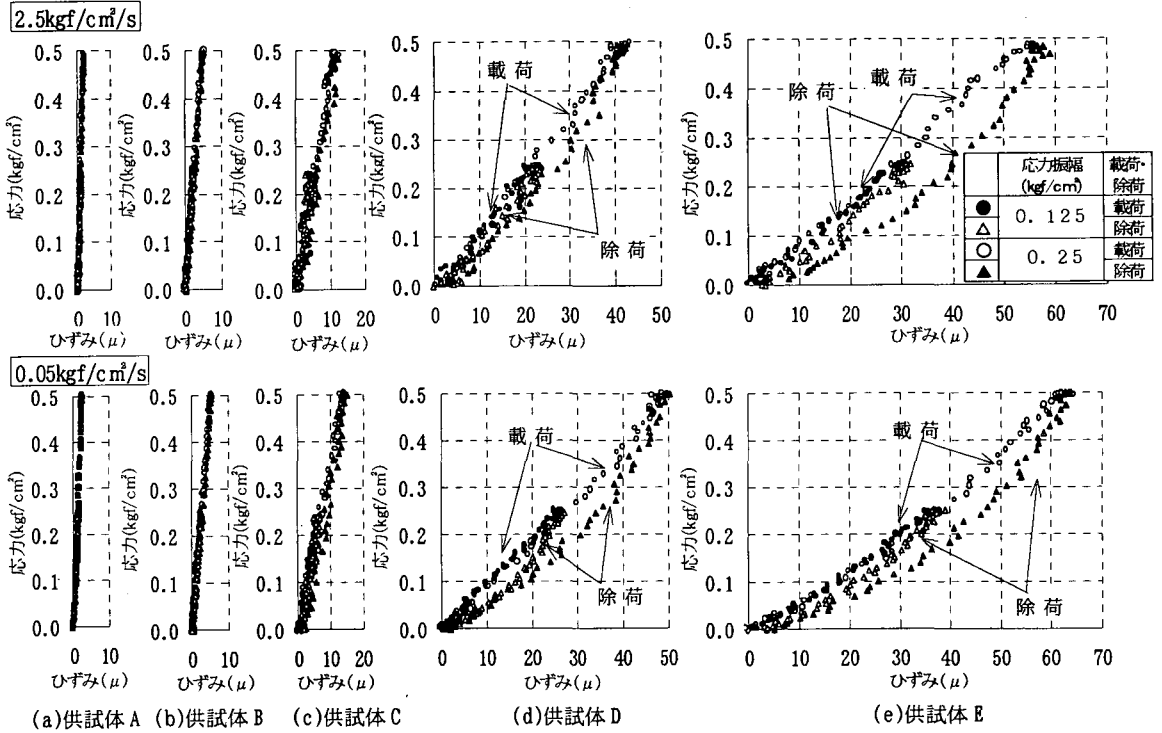


図-6 岩盤ブロックの微小ひずみ領域での応力-ひずみ曲線

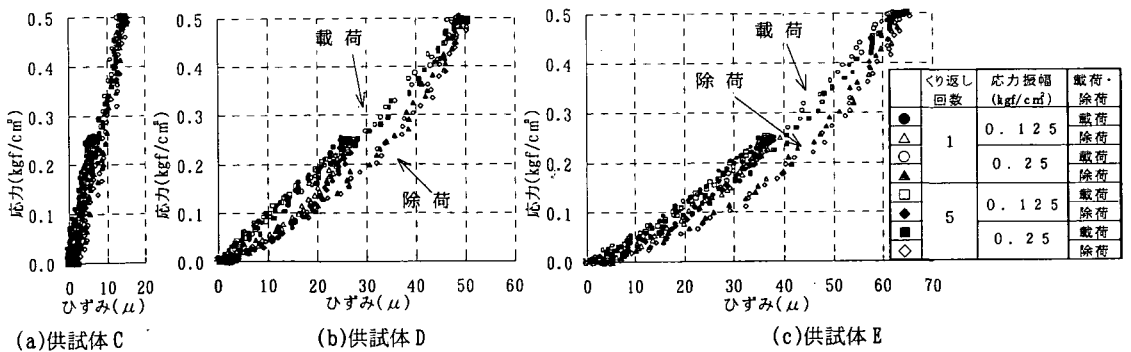


図-7 岩盤ブロックの微小ひずみ領域での応力-ひずみ曲線と載荷回数

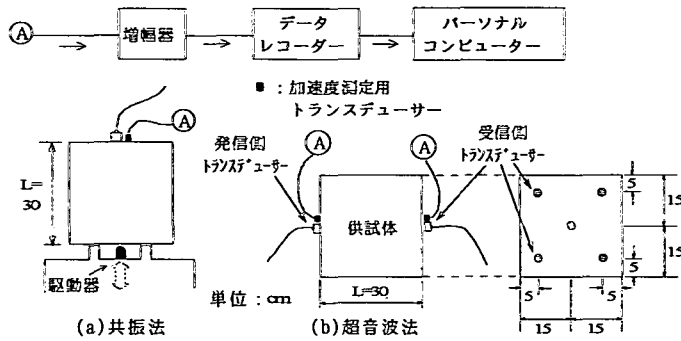


図-8 共振法, 超音波法の加速度測定システム

図-5に、岩盤ブロック供試体を作製するための、岩塊を採取したサイトで実施した原位置平板載荷試験の応力-変形曲線の例を示すが、図-4とよく似ていることがわかる。

(4) 微小ひずみ領域での応力-ひずみ曲線と変形性
 供試体ごとの微小ひずみ領域における応力-ひずみ曲線を、図-6に示す。左図から供試体A, B, C, D, Eの順で、下段が応力速度が原位置平板載荷試験程度の $0.05\text{kgf/cm}^2/\text{s}$ の場合、上段が $2.5\text{kgf/cm}^2/\text{s}$ の場合である。いずれも1回目の載荷の結果を示している。

供試体A, Bの応力-ひずみ曲線は載荷時、除荷時ともほぼ線形である。特に割れ目が少ない供試体Aでは、計測データがほぼ一直線上にある。これは岩石コア供試体も同様であった。供試体Cの応力-ひずみ曲線も、概ね線形であるが、応力速度が $0.05\text{kgf/cm}^2/\text{s}$ 場合で、 0.5kgf/cm^2 まで載荷した場合の除荷時に、幾分下に凸の曲線になる傾向がある。供試体Dは、ひずみで 40μ (4×10^{-5})、供試体Eは 20μ 程度まで、載荷時に応力-ひずみ曲線がほぼ線形とみなされる範囲が存在する。その応力範囲は、割れ目が少ないほど広い。応力-ひずみ曲線が直線性を示すひずみより大きいひずみ領域では、徐々に勾配が大きくなる。一方、除荷時の応力-ひずみ曲線は下に凸の曲線である。載荷時の応力-ひずみ曲線が直線であるひずみ領域でも、除荷時は下に凸の曲線である。

図-6より応力速度が速くなると、載荷時の応力-ひずみ曲線はほぼ直線となり、除荷時の曲線は下に凸の程度が弱まっていることがわかる。また直線部の勾配は、応力速度が速くなると大きくなっている。これについては次章(4)で説明する。

図-7は供試体C, D, Eに対し、載荷が1回目と5回目の応力-ひずみ曲線を比較したものである。応力速度は $0.05\text{kgf/cm}^2/\text{s}$ の場合である。これによれば載荷が1回目と5回目で差がなく、応力-ひずみ曲線に繰り返し載荷の影響はほとんどないと言える。なお、その他の応力速度の場合も繰り返し載荷の影響はほとんどなかった。以上のことは割れ目がより少ない

供試体A, Bの場合も同様であった。

以上、硬質岩盤ブロックの微小ひずみ領域の応力-ひずみ曲線は、載荷時に線形であるにも関わらず、除荷時には下に凸の曲線であり、載荷速度依存性があるが、繰り返し載荷の影響はない。前述したとおり、硬質岩盤の基質部に相当する岩石コアの応力-ひずみ曲線は、載荷時、除荷時とも線形であり、3章(4)で述べるが、ひずみ速度依存性がほとんどない。このことから、上記の変形特性は割れ目に起因するものと考えられるが、この点に関する明確な説明は今後の課題である。

3. 岩盤ブロックの各種試験法による波動伝播速度の比較

前章の動的圧縮試験に加え、共振法、超音波法の各種試験を行い、波動伝播速度 V_p を求め、それらの違いを明らかにする。

(1) 動的圧縮試験による方法

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

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

ここに、 ρ は密度、 ν はポアソン比である。

(2) 共振法による方法

共振法は、JIS A 11279に基づき、動的圧縮試験実施前に、同じ供試体を用いて行った(図-8参照)。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、

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

で算出した。

(3) 超音波法による方法

超音波法は超音波縦波パルスを供試体中に発信し、

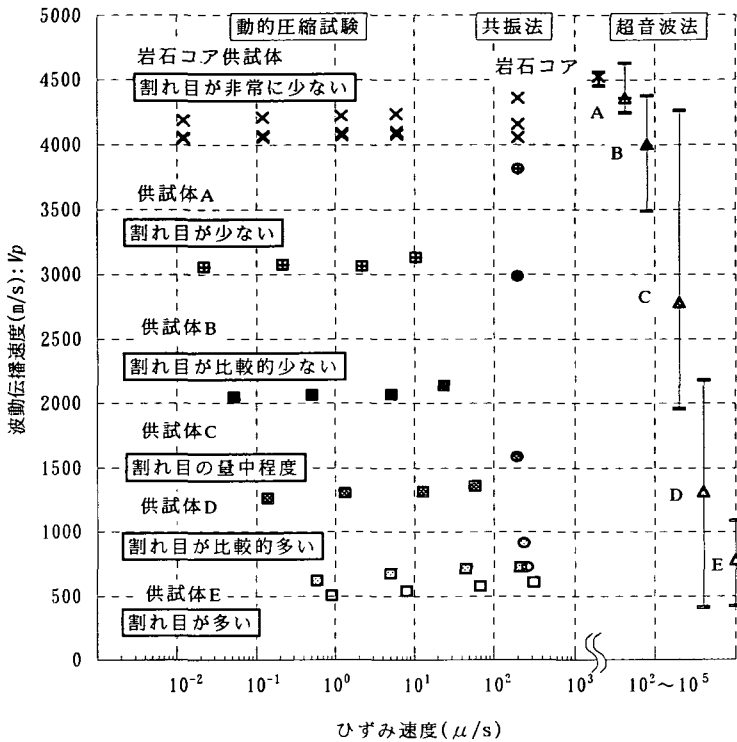


図-9 岩盤ブロックの各種試験法による波動伝播速度とひずみ速度の関係

発信, 受信トランスデューサー間 (距離 L , 図-8 参照) の伝播時間 ΔT を測定し V_p を,

$$V_p = L / \Delta T \quad (3)$$

で算出した。超音波縦波パルスの発信周波数は 24kHz と 54kHz である。本試験も動的圧縮試験実施前に行った。

(4) 各種試験法より求めた波動伝播速度の比較

図-9 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示す。圧縮試験, 共振法, 超音波法の順に, 供試体 A は \boxplus , \oplus , \triangle , 供試体 B は \boxtimes , \bullet , \blacktriangle , 供試体 C は \boxtimes , \bullet , \blacktriangle , 供試体 D は \boxtimes , \bullet , \blacktriangle , 供試体 E は \square , \circ , \triangle で, それぞれの結果を示す。岩石コア供試体の V_p は \times で示す。

動的圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線は, 載荷時が直線で除荷時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, 即ち載荷時の直線部の勾配) より動弾性係数 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, 応力速度を動弾性係数 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でそ

の判別が明確にできた, 固有振動数に対する値である。その次数は, 岩石コア供試体と供試体 A, B では 1 次, 供試体 C は 2 次, 供試体 D, E では 3 次であった。

超音波法の発信点と受信点は, 供試体の両端面で同一位置で, 図-8 に示す 5ヶ所とした。図-9 には 5ヶ所の計測値の範囲と平均を示す。発信周波数が 24kHz と 54kHz の差は小さく, 図には 54kHz の結果を示している。共振法, 超音波法のひずみ速度の算出については, 4章で説明する。超音波法では, 受信点で計測される波はかなり減衰する。よって超音波法のひずみ速度は, 得られた値の範囲を横軸に示している。

動的圧縮試験による V_p は, ひずみ速度が大きくなると速くなる傾向が認められる。その程度は, 供試体 B, C, D, E では, ひずみ速度が $0.5 \sim 100 \mu/s$ 程度の範囲では 5~20% 程度で, 割れ目が多くなる程ひずみ速度依存性の程度が大きくなる傾向がある。岩石コアや割れ目が少ない供試体 A のひずみ速度依存性は数% 程度である。以上のことは, 硬質岩盤の V_p のひずみ速度依存性が割れ目に起因していることを示している。岩石コアにもわずかだが, ひずみ

表-1 各種試験の周波数，加速度，ひずみ速度，ひずみ，波長のオーダー

方法	周波数 (Hz)	加速度 (gal)	ひずみ速度 (μ/s)	ひずみ (μ)	波長 (m)
動的圧縮試験	$10^{-2} \sim 10^0$	$10^{-1} \sim 10^1$	$10^{-1} \sim 10^2$	$\sim 10^3$	$10^2 \sim 10^5$
共振法	10^0	10^2	10^2	10^{-2}	10^{-1}
超音波法	10^4	$10^3 \sim 10^4$	$10^2 \sim 10^5$	$10^{-4} \sim 10^{-1}$	$10^2 \sim 10^{-1}$

速度依存性があるのは，岩石コアにも微小な割れ目が存在しているためと考えられる。なお，文献7)にも，岩石コアの動弾性係数にひずみ速度依存性がないことが示されている。超音波法による V_p は，同一供試体でも計測位置によりかなり異なる。特に供試体C，Dで V_p の範囲が広い。それに比べ供試体A，Bでの値の範囲が小さいのは，割れ目が少ないためである。一方，供試体Eでの値の範囲が小さいのは，割れ目が多いため，計測位置にかかわらず割れ目の影響が平均化されるためと考えられる。

各種試験法による V_p を比較すると，動的圧縮試験(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 $1.2 \sim 1.4$ 倍，超音波法による値はその平均値で $1.5 \sim 2.1$ 倍でかなり速い。各供試体に対して各種試験法による V_p の差を比較すると，割れ目が多い供試体Eはその差が小さいが，供試体E，D，C，Bの順に，割れ目が少ないほどその差が大きいく。しかし割れ目がさらに少ない供試体Aでは，供試体Bより各種試験法による V_p の差は小さい。岩石コアではその差はさらに小さくなり，動的圧縮試験と共振法による V_p はほぼ同じである。しかし，これらの値と超音波法による V_p には，小さいものの差が認められる。これは岩石コアでの微小な割れ目や不均質差の存在によるもので，これらが存在しない場合は一致すると考えられる。なお，共振法と超音波法の結果に，ほとんど差異がない報告もいくつかなされている⁹⁾。

なお動的圧縮試験と共振法による V_p の算出において，密度 ρ は各供試体の実測値を用い，ポアソン比は 0.25 としている。いま仮にポアソン比を岩盤ブロックの基質部に相当する岩石コアのポアソン比程度である 0.17 としても，求められる V_p に及ぼす影響は 5% 程度であり，ポアソン比が V_p に及ぼす影響は小さい。ただし岩石コアと供試体Aは，ひずみゲージによる横ひずみの測定が可能であったので，実測値を用いている。その値は岩石コアで $0.15 \sim 0.2$ ，供試体Aで 0.2 である。

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。

4. 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レベルの影響

前章の動的圧縮試験より，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，各種試験法により求められる 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。

(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 ，時間を t とすると，

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

で表わされる。その解は，

$$u = Ae^{\pm iV_p k t} \cdot e^{\pm i k x} \quad (5)$$

で， i は複素単位， k は波数である。

変位加速度を G^* とすると，

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

であり，ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は，

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

により求められる。

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

$$\epsilon = \partial u / \partial x = \pm i k \cdot u = V^* / V_p \quad (8)$$

となる。 V^* は式(5)，(6)と周波数を f とし，関係式 $V_p k = 2\pi f$ を用いると，

$$V^* = G^* / (2\pi f) \quad (9)$$

と表わされる。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。

(2) 各種試験法における周波数，加速度，ひずみ速度，ひずみ，波長の比較

表-1に，各種試験法での周波数，加速度，ひずみ速度，ひずみ，波長の大きさのオーダーを示す。

まず周波数は，動的圧縮試験は載荷した正弦波の周波数($0.01 \sim 5\text{Hz}$)，共振法は測定された固有振動数($3000 \sim 7000\text{Hz}$ 程度)，超音波法は発信側トランスデューサーの固有振動数(24kHz ， 54kHz)に対応する値である。

動的圧縮試験のひずみ速度は，試験を実施した範

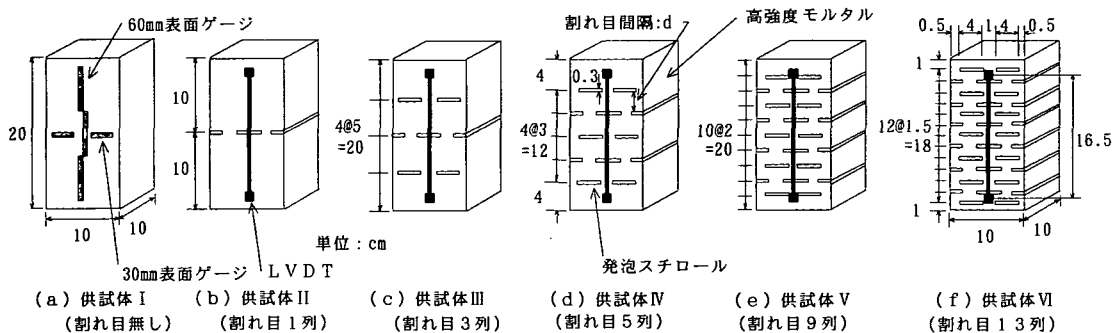


図-10 モデル岩盤

囲の値であり、ひずみは応力-ひずみ曲線が載荷時に直線性を示す範囲の値である。共振法や超音波法に対しては、図-8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。超音波法の受信点で計測される加速度はかなり減衰する。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範囲である。これらの加速度を用いて、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。

波長は $\lambda = V_p / f$ により求めた。共振法の波長は、供試体の長さ程度であり、超音波法の波長は同程度かそれよりも1オーダー小さい。

表-1にまとめた結果より、各種試験法における周波数、加速度、ひずみ速度、ひずみ、波長は、一部を除いて、その値のオーダーが異なっていることが分かる。

(3) 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 の関係を図-9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、 $10^2 \sim 10^5 \mu/s$ 程度と動的圧縮試験や共振法の値に比べ大きい。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、6章で述べるが、超音波法の波動伝播経路は割れ目を避けた基質部と考えられる。そして3章(4)で述べたとおり、硬質岩盤の基質部の動弾性係数にひずみ速度依存性がほとんどないことから、超音波法による V_p の他の試験法による値との差は、ひずみ速度依存性では説明されない。

(4) 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 $10^2 \mu$ と $10^4 \sim 10^1 \mu$ のオーダーである。動的圧縮試験においてこの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-6に示したとおり、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のとき 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られた 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。本章では、岩盤の割れ目が V_p に与える影響について検討する。

5. モデル岩盤の各種試験法による波動伝播速度の比較

渡辺ら⁹⁾は、基質層と低速度層を互層状に有する1次元モデルの波動伝播速度 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 と波長 λ の相対的大きさが影響するものと推察される。また超音波法による V_p は、波動伝播距離として発信点と受信点を結ぶ直線距離を用いて求められている。しかし、割れ目を有する岩盤では、受信点で計測される初動の伝播経路に割れ目が影響を与えていると考えられる。

そこで、割れ目の配列を単純化したモデル岩盤供試体を対象に、動的圧縮試験、共振法、超音波法試験を行い、 V_p の割れ目の間隔 d と波長 λ の比である d/λ や波動伝播経路の影響を調べる。試験方法は、岩盤ブロック供試体の場合と同じである。

(1) モデル岩盤供試体

図-10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は、岩盤ブロック供試体の

表-2 モデル岩盤に用いた高強度モルタルの配合

水セメント比 W/(C+Si)(%)	シリカフューム 混入率Si/(C+Si) (%)	単位量 (kg/㎡)			
		W	C	Si	S
22.0	20.0	264	960	240	780

基質部の弾性係数の大きさ程度である約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。高強度モルタルの配合を表-2に示す。割れ目は発泡スチロールで作製した。供試体は割れ目の量が異なり少ない順に、I（割れ目無し、密度 $\rho = 2.25\text{g/cm}^3$ ）、II（割れ目が1列、 $\rho = 2.24\text{g/cm}^3$ ）、III（割れ目が3列、割れ目の間隔、 $d = 4.7\text{cm}$ 、 $\rho = 2.20\text{g/cm}^3$ ）、IV（割れ目が5列、 $d = 2.7\text{cm}$ 、 $\rho = 2.13\text{g/cm}^3$ ）、V（割れ目が9列、 $d = 1.7\text{cm}$ 、 $\rho = 2.08\text{g/cm}^3$ ）、VI（割れ目が13列、 $d = 1.2\text{cm}$ 、 $\rho = 2.01\text{g/cm}^3$ ）の6種類の供試体とし、供試体Iは6体、その他はそれぞれ3体作製した。各供試体の密度は、割れ目が多いほど小さくなっていく。

ところで、一般的にモルタルやコンクリートの動弾性係数には、ひずみ速度依存性がある⁹⁾¹⁰⁾。しかし3章(4)で述べたとおり、硬質岩盤の基質部には、その動弾性係数にひずみ速度依存性がほとんどない。本試験では、高強度モルタルを用いているため、その動弾性係数のひずみ速度依存性の程度は小さいものと予想される。しかし念のため、周波数を変えた正弦波入力により、載荷速度を変えた動的圧縮試験を行い確認することとした。試験は50tonアクチュエータ試験機で行った。ひずみ速度の平均値が、岩盤ブロックの動的圧縮試験を実施したひずみ速度ならびに、4章(2)で求めた共振法のひずみ速度を十分含む範囲とした。供試体数は3体である。試験結果を図-11に示す。ひずみ速度によらず動弾性係数はほぼ一定で、硬質岩盤の基質部が有すべき性質を満足している。

供試体の養生は、所要の弾性係数を発現させるために、約80°Cの熱水養生を7日間行った後、試験材令28日まで水中養生とした。供試体は気乾状態で試験を行った。供試体の変位を岩盤ブロックの場合と同じLVDTにより計測した（図-10参照）。ただし供試体Iの計測はひずみゲージによった。

(2) 各種試験法より求めた波動伝播速度の比較

図-12に各種試験法による V_p と d/λ の関係を示す。 d/λ については次節で述べる。動的圧縮試験、共振法、超音波法の順に、供試体IIは \boxplus , \oplus , \triangle , 供試体IIIは \blacksquare , \bullet , \blacktriangle , 供試体IVは \boxtimes , \odot , \blacktriangle , 供試体Vは \boxdot , \ominus , \triangle , 供試体VIは \square , \circ , \triangle で、それぞれの結果を示す。供試体Iの V_p は \times で示す。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、繰り返し載荷や応力速度の影響もほとんどなかった。直線部の傾きより動弾性係数

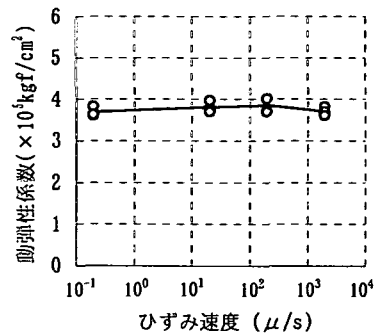


図-11 高強度モルタルの動弾性係数とひずみ速度の関係

Eを求め、式(1)により V_p を算出した。その結果は図-12で応力速度が最も速い場合を示す。ただし、計測区間外（LVDTと供試体端面との間）の高強度モルタル部の動弾性係数は、供試体Iの平均値を用いて、共振法や超音波法による V_p と比較可能な供試体全体に対する V_p を求めた。このことの妥当性についてみるために、供試体Iは供試体数を多くし6体試験を実施したが、図-12に示すとおり、試験結果のばらつきは非常に小さかった。供試体VIは、計測区間外にも割れ目があるので、計測範囲と供試体Iの動弾性係数を用いて、供試体全体の動弾性係数を求めた。密度 ρ は各供試体の実測値を、ポアソン比 ν は供試体Iは実測値の0.26を、その他の割れ目のある供試体は0.3とした。共振法については固有振動数が明確に判別できた供試体I, II, IIIは1次、供試体IV, V, VIは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、供試体ごとに線で結んでいる。なお供試体I, IIに対しては d/λ が定義されないが、図中の適当な位置に結果を示している。

各種試験法により求まる V_p を比較する。まず割れ目の無い供試体Iの V_p は、試験方法によらずほぼ同じである。割れ目のある供試体は、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。各供試体に対して各種試験法により求まる V_p の差を比較すると、割れ目が少ない方から、供試体IV, V, VIの順にその差が大きいく。この割れ目の量の多少が、各種試験法の V_p の差の程度に与える影響の傾向は、岩盤ブロックの供試体B, C, D, Eの場合と同じである。割れ目が1列と3列の供試体II, IIIでは、動的圧縮試験と共振法による V_p はほぼ同じであり、超音波法の V_p は割れ目の無い供試体Iに近い値である。この供試体II, IIIの各種試験法による V_p の違いは、岩石コアのそれと同じである。

以上、モデル岩盤供試体での各種試験法による V_p と割れ目の量の関係は、岩盤ブロックや岩石コアの場合と同様の関係である。ただし岩盤ブロックの供試体A, Bで、動的圧縮試験と共振法による V_p

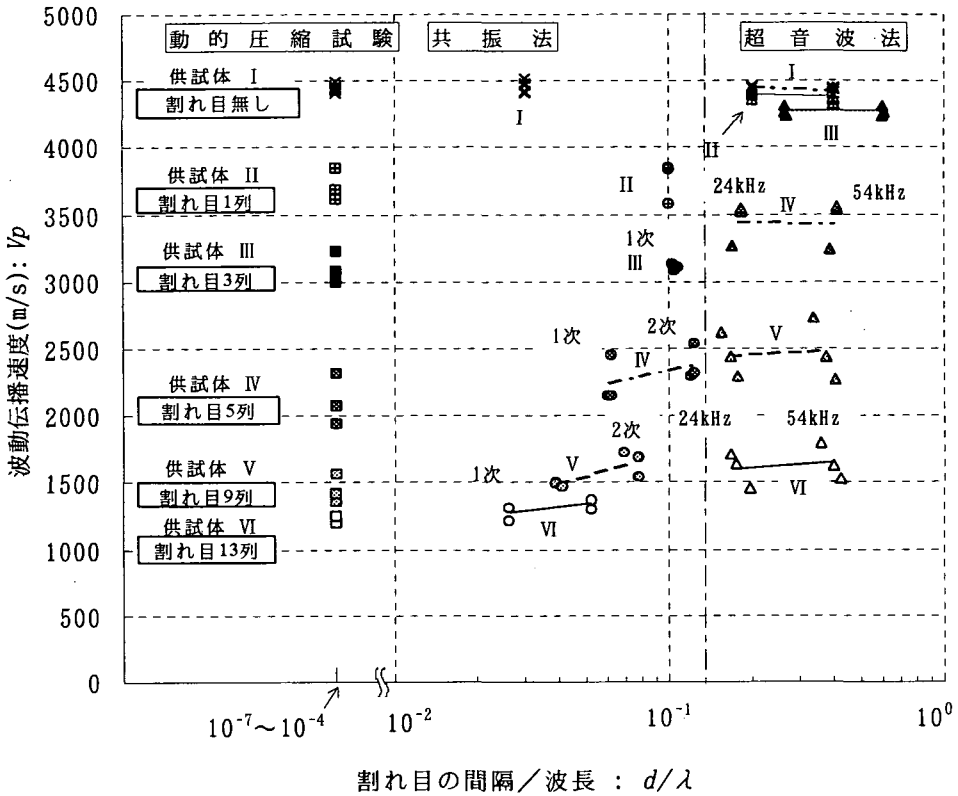


図-12 モデル岩盤の各種試験による波動伝播速度(V_p)と割れ目の間隔/波長(d/λ)の関係

の差が大きいが、モデル岩盤供試体では、このような大きな差がある結果は得られなかった。共振法では、ひずみが最大となる供試体の中央（1次の場合）付近に存在する割れ目の影響が大きいことが知られている³⁾。モデル岩盤供試体では、いずれの供試体も供試体の中央に割れ目が存在する。しかし、岩盤ブロックでは、割れ目が少ない方の供試体A、Bはより割れ目が多い供試体に比べて、供試体の中央付近に割れ目が少ない可能性がある。このことや、モデル岩盤より不規則かつ複雑に割れ目が分布していることが、その理由とも思われる。

なお、モデル岩盤供試体の動的圧縮試験結果に、ひずみ速度による違いはほとんどなかった。このことから、各種試験法の V_p の違いには、ひずみ速度の影響はない。

(3) 波長に対する割れ目の間隔の比 d/λ の影響

各種試験法での波長 λ の大きさのオーダーを示すと、動的圧縮試験では $10^2 \sim 10^5$ m、共振法では供試体の長さかその倍程度である。超音波法では共振法と同程度かそれよりも1オーダー小さい $10^2 \sim 10^1$ mである。これは岩盤ブロックの場合（表-1参照）と同じである。 d/λ は図-12に示すとおり、動的圧縮試験が $10^{-7} \sim 10^{-4}$ 、共振法が $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 、超音波法が 10^0 のオーダーで、試験法によりかなり異なっている。

る。

動的圧縮試験で周波数を変えて得られる V_p は、 d/λ が異なっても各供試体でほぼ同じである。しかし、供試体IV、V、VIの動的圧縮試験と共振法の V_p は、動的圧縮試験、共振法の1次、2次の順で、 d/λ が大きい順に速い。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、共振法の V_p と動的圧縮試験の V_p との差を調べると、供試体VIの1次、供試体Vの1次、供試体VIの2次、供試体IVの1次、供試体Vの2次、供試体IVの2次の順で、 d/λ が大きい程大きい。しかし割れ目が1列と3列の供試体II、IIIでは、動的圧縮試験と共振法による V_p はほぼ同じである。以上により割れ目がある程度以上存在する場合、 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。しかし、 d/λ が 10^0 以下ではその影響は受けない。

(4) 超音波法での波動伝播

図-12に示すとおり、超音波法による波動伝播速度は、岩盤ブロックの場合と同様に、24kHzと54kHzで違いは認められずほぼ同じである。超音波法による V_p は、波動伝播距離として受信点と発信点間の直線距離を用いて算出している。いま波動伝播経路を割れ目を避けた最短の経路（例として供試

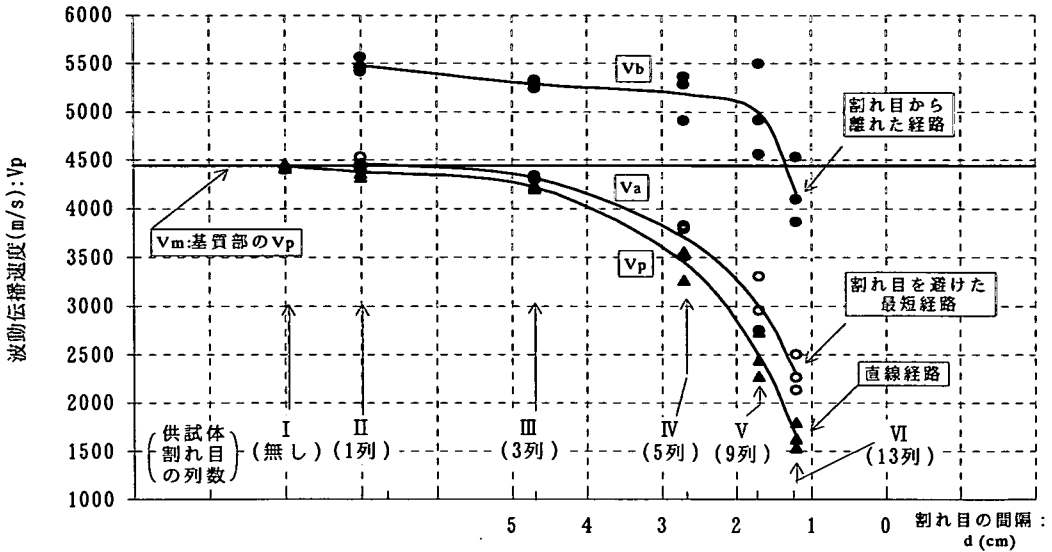


図-14 モデル岩盤の超音波法による波動伝播速度と波動伝播経路

体IVの場合を図-13に点線で示す), 並びに割れ目から最も離れた基質部の中心を通る経路(図-13に実線で示す)として, 波動伝播速度を求めた結果を図-14に示す。横軸には割れ目の間隔 d をとっている。それぞれの波動伝播速度を V_a , V_b とし, 基質部である高強度モルタルのそれを V_m とする。図-14には, 波動伝播経路を受信点と発信点間の直線として求めた V_p も示す(式(3)参照)。割れ目の間隔 d が小さくなる程 V_p が遅くなるのがわかる。図-14によれば, 割れ目が1列の場合は V_a は V_m とほぼ同じである。これは谷本ら¹¹⁾が, 石こうで作製した円柱供試体を用いて, 円柱の側面の1方向から円柱軸に直角に1つの割れ目を入れて行った弾性波伝播実験(供試体の両端面のそれぞれの中心が発信点と受信点)の結果と同じである。このことは, 受信点で計測される初動は, 切断部を避けた最短経路を伝播した波動であることを示している。

図-14で V_a と V_m の差は, 割れ目が多い程大きい。一方 V_b は, 割れ目が少ない程 V_m との差が大きく, V_a と逆の傾向であり, 割れ目が13列の場合は V_m とほぼ同じである。これは割れ目が1列の供試体II以外では, 必ずしも割れ目を避けた最短経路を伝播した波動が初動として計測されるわけではなく, 割れ目が多い程, 割れ目から離れた最短経路より長い経路を伝播した波動が受信点の初動として計測されることを示している。以下にこの理由について考察する。

谷本ら¹¹⁾は先の弾性波伝播実験において, 切断部の大きさを変化させて, 受信点で計測される初動の振幅を調べている。それによれば, 切断部がある大きさ以下であれば振幅は変化しないが, 切断部がある大きさ以上になると, 振幅の減衰がかなり大きく

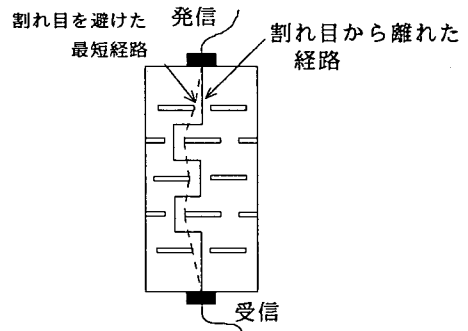


図-13 モデル岩盤の超音波法試験で仮定した波動伝播経路

なることを示している。このことは, 波動伝播経路と割れ目の離間距離がある大きさ以下になると, その経路を伝播する波動の減衰がかなり大きいことを意味している。いまモデル岩盤供試体の場合の振幅の減衰の程度を概算してみる。波動伝播経路としては, 割れ目から最も離れた割れ目と割れ目の中間である場合を考える(図-13実線を参照)。モデル岩盤供試体の割れ目の厚さは3mmで, 水平面内の割れ目の間隔は1cmである。いま谷本ら¹¹⁾の実験結果を参考に, 割れ目1列当たりの振幅の減衰比を0.5程度とすると, モデル岩盤IVの割れ目は5列なので, 受信点で計測される波の振幅の減衰比は $0.5^5=0.03$ と小さい。割れ目のごく近くを伝播経路とする場合, 振幅の減衰比はさらに小さい。また割れ目の列数が多い供試体V, VIでの減衰はさらに大きく, 振幅の減衰比は非常に小さくなる。よって割れ目が多い程,

割れ目の近くを伝播する波動は減衰が大きいので、割れ目から離れたより長い経路を伝播する波動が受信点で初動として計測されることになる。図-14は、受信点で初動として計測される波動の基質部を伝播する経路の長さが、供試体Ⅲは図-13の点線で表わされる割れ目を避けた最短経路より幾分長く、供試体Ⅳは図-13の実線と点線で表される経路の中間の長さであり、供試体Ⅵは図-13の実線で表される経路の長さに近いことを示している。

6. 岩盤ブロックの各種試験法による波動伝播速度とそれらの違いに関する考察

前章までの検討を基に、岩盤ブロックの各種試験法によって得られた V_p とそれらの違いについて考察する。

(1) 動的圧縮試験や共振法による波動伝播速度

共振法によって得られた V_p と動的圧縮試験による V_p の違いは、4章(3)で述べたとおり、ひずみ速度依存性のみでは説明できない。モデル岩盤の V_p は、波長に対する割れ目の間隔の比 d/λ に依存し、動的圧縮試験と共振法による V_p の差は、 d/λ が大きいほど大きいことを示した。一方、岩盤ブロックの動的圧縮試験と共振法による V_p の差は、供試体B, C, D, Eでは割れ目が少ない供試体ほど大きい。これは、岩盤ブロックの場合、不規則な割れ目を有し、割れ目の配列が単純化されたモデル岩盤のように d/λ を定めることはできないが、しかし岩盤ブロックの場合も、波長に対する割れ目の間隔の比(割れ目の密度)の影響を受け、割れ目が少ない程、波長に対する割れ目の間隔の比が大きいので、その影響の程度が大きくなるためと考えられる。ただし割れ目が少ない供試体Aでは、動的圧縮試験と共振法による V_p の差は供試体Bより小さく、割れ目の量がある程度以下になると、波長に対する割れ目の間隔の比の影響が小さくなる。そして割れ目が非常に少ないと考えられる岩石コア供試体では、動的圧縮試験と共振法による値はほぼ同じである。

(2) 超音波法による波動伝播速度

岩盤ブロックの超音波法により受信側で最初に測定される波動も、モデル岩盤の場合と同じで、割れ目を避けた基質部を伝播した波動であると考えられる。岩盤ブロック供試体の超音波法による V_p も、モデル岩盤の場合と同様に、割れ目が少ない程大きくなっているのも、このことを裏付けている。岩盤ブロックの発信側と受信側で加速度の計測を行い、振幅の減衰を調べた。振幅の発信側に対する受信側の比は、5計測点の平均で、岩石コア、供試体A, B, C, D, Eの順に1/3, 1/10, 1/40, 1/200, 1/1200, 1/6000程度で、割れ目の量によってかなり異なる。このことから、割れ目が多い供試体程、割れ目の近くを伝播する波動の減衰はかなり大きいものと推

測される。同一の供試体でも超音波法による V_p は計測位置により異なり、結果は省略するが、 V_p が大きい場合程減衰の程度は小さく、割れ目の少ない経路を伝播したのと考えられる。さらに割れ目の量が中程度の供試体Cとそれより割れ目が少ない供試体A, Bの超音波法による V_p の最大値は、岩石コア供試体の超音波法による V_p と同程度である。これはモデル岩盤の割れ目が1列あるいは3列の供試体Ⅱ, Ⅲの場合と同様である。このことは割れ目が少ない場合は、割れ目の近くを通る経路でも波動の減衰は小さいことを示している。

以上より、超音波法による試験では、基質部を伝播した波動が計測される。割れ目が少ない場合は、割れ目による波動の減衰が小さいので、割れ目の近くを通る最短経路に近い経路を、割れ目が多くなるにつれて、割れ目の近くを伝播する波動は減衰が大きいため、割れ目から離れたより長い経路を伝播する波動が、受信点で計測される。よって超音波法によって得られる V_p は、実際に受信点で計測される経路の伝播経路の長さを λ 、発信点と受信点間の直線距離を L とすると、基質部の速度 V_m が一定の場合、 $V_p = V_m L / \lambda$ である。

超音波法の V_p は、動的圧縮試験や共振法の V_p に比べ大きい。これは動的圧縮試験や共振法は、割れ目を含んだ供試体の全体的な振動であるのに対して、超音波法は、割れ目を避けた基質部の波動伝播による結果であり、 V_p に対する割れ目の影響の受け方が異なるためである。超音波法の V_p と動的圧縮試験や共振法の V_p の差は、割れ目が少ない程大きい(図-9供試体B, C, D参照)。これは、割れ目が少ないと、波動が割れ目を迂回する頻度が少い上に、割れ目の近くを伝播する波動が減衰しないので、受信点で初動として計測される波動の波動伝播経路の長さ λ が短くなり、 $V_p (=V_m L / \lambda)$ が大きく求められるからである。ただし割れ目の量がある程度以下になると、割れ目の影響そのものが小さくなり、その差は小さくなる(図-9岩石コアと供試体A参照)。また割れ目が多くなると、超音波法の V_p の動的圧縮試験や共振法の V_p との差は小さくなる(図-9供試体E参照)。これは、波動伝播経路の長さ λ が長くなり、 V_p が小さく求められるからである。

3章(4)で述べたとおり、岩盤ブロックの基質部の動弾性係数にひずみ速度依存性がほとんどない。よって、基質部を伝播する波動による超音波法の V_p には、ひずみ速度依存性の影響はないと言える。岩石コアの超音波法による結果に、周波数依存性がほとんどないいくつかの試験結果³⁾も、このことを裏付けている。

7. 結論

本研究では、割れ目を有する硬質岩盤ブロックを対象に、動的圧縮試験、共振法、超音波法を行い、

微小ひずみ領域での変形性と波動伝播速度について研究した。割れ目の影響を調べるため、割れ目の量が異なるいくつもの供試体に対し試験を行った。本研究より、硬質岩盤はその割れ目の存在により、その他の地盤材料と異なる微小ひずみ領域での変形性や波動伝播特性を有することが明らかになった。主要な成果をまとめると次のとおりである。

- (1) 微小ひずみ領域において、載荷時の応力-ひずみ曲線は直線性を示す(図-6参照)。その応力範囲は割れ目の少ない場合ほど広く、割れ目の多い場合はひずみで数10 μ 以下である。除荷時の応力-ひずみ曲線は、割れ目が少ない場合は載荷時と同じ直線であるが、割れ目が多い場合には下に凸の曲線である。
- (2) 載荷時の応力-ひずみ曲線が直線性を示すひずみの範囲において、載荷時、除荷時とも応力-ひずみ曲線に繰り返し載荷の影響はない(図-7参照)。
- (3) 荷重載荷速度が速くなると、応力-ひずみ曲線は、載荷時の直線性を示す範囲が広くなるとともに、除荷時の曲線は、直線に近くなる。
- (4) 各種試験法より求められる波動伝播速度を比較すると、動的圧縮試験による値に比べ共振法による値は大きく、超音波法による値はさらに大きい。この各種試験法による波動伝播速度の差の程度は、割れ目の量によって異なる(図-9参照)。割れ目が非常に少ない供試体(岩石コア)及び割れ目が多い供試体では、各種試験法による波動伝播速度の差は小さい。それに比べ、中間の割れ目の量を有する供試体の波動伝播速度の差は大きく、割れ目が少ない程度差の程度が大きい。割れ目の配列を単純化したモデル岩盤供試体でも、同様の結果であることを示した。
- (5) 微小ひずみ領域での、動的載荷試験や共振法での供試体の全体的振動から求まる波動伝播速度と、超音波法での点振源による基質部を伝播する波動より求まるそれとでは、性質的に大きく異なる。
- (6) 全体的振動の場合、波動伝播速度はひずみ速度に依存し、波長に対する割れ目の間隔の比の影響を受ける。波動伝播速度のひずみ速度依存性はひずみ速度が0.5~100 μ /s程度の範囲では、5~20%程度であり、割れ目が多い程その程度は大きい(図-9参照)。波長に対する割れ目の間隔の影響は、割れ目の間隔が大きくなる、割れ目が少ない場合程大きい(図-12参照)。ただし割れ目の量がある程度以下になると、その影響は小さくなる。
- (7) 点振源による波動伝播の場合、その波動伝播経路は、割れ目を避けた基質部である。波動伝播速度は全体的振動に比べて速く、その差の程度は割れ目が少ない程大きい。これは、割れ目が少ない程、割れ目を迂回する頻度が少なくなる上に、割れ目の近

くを伝播する波動が減衰せずに初動として測定されることから、波動伝播経路が短くなるためである。ただし割れ目の量がある程度以下になると、その差は小さくなる。一方割れ目が多いと波動伝播経路が長くなり、計測される波動伝播速度は遅くなる。また基質部の波動伝播速度には、ひずみ速度依存性がないことから、点振源による波動伝播速度にひずみ速度依存性はない。

参考文献

- 1) Tatsuoka, F. and Shibuya, S.: Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory Tests, *Report of the Institute of Industrial Science the University of Tokyo*, Vol.37, No.1, 1992.
- 2) 土質工学会編:「地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性-試験法・調査法および結果の適用-」に関する国内シンポジウム発表論文集, 1993.
- 3) Lama, R. D, Vutukuri, V. S. (増田秀夫・田中荘一訳): 岩の力学的性質II-岩石・岩盤技術者のためのハンドブック 試験に関する技術と結果-1, pp. 208-221, 1992.
- 4) 土質工学会編: 岩の工学的性質と設計・施工への応用, pp. 230-236, 1988.
- 5) 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.
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 基準編, pp. 303-313, 1991.
- 7) 大久保誠介, 西松裕一他: 湿潤状態での岩石の一軸圧縮強度の載荷速度依存性, 材料, Vol.41, No.463, pp.403-409, 1992.
- 8) 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.
- 9) 土木学会: コンクリートの力学特性に関する調査研究報告書, 第7章, コンクリートライブラリー69, pp.70-71, 1991.
- 10) 畑野正: 衝撃荷重によるコンクリートの挙動, 土木学会論文集, No.73, pp.28-34, 1971.
- 11) 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.

(1996. 2.7 受付)

DEFORMATION CHARACTERISTICS AND WAVE VELOCITIES OF HARD ROCK BLOCK WITH CRACKS AT LOW STRAIN LEVELS

Masatoshi SATO, Minoru UEDA, Norio HASEBE and Hiromichi KONDO

Dynamic loading tests are carried out for test specimens of hard rock blocks with cracks. Stress-strain relations at low strain levels are observed and their deformation characteristics are studied. Wave velocities evaluated from dynamic loading tests are compared with those due to resonance method and ultrasonic method. There are some differences among these wave velocities and their relations varies according to the density of cracks in the specimens of hard rock blocks. Strain rate dependency of wave velocity and the effect of the distance between cracks and routes of wave propagation on wave velocity are investigated.