

硬質岩盤サイトの地震波伝播速度と 原位置試験による波動伝播速度の比較

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 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

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

ダムなどの岩盤上や地下空洞などの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速度検層等がある。しかし、これらの試験から得られる波動伝播速度と実地震時の波動伝播速度の関係については明確ではない。そこで、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速度検層による波動伝播速度との比較を行った。その結果、両者には差異があり、その違いの程度は割れ目の量の多少により異なることが明らかとなった。

Key Words : hard rock mass, seismic wave velocity, seismic prospecting, field test, crack

1. まえがき

ダムなどの岩盤上や地下空洞などの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、構造物と岩盤の連成応答解析が実施される。この際構造物の挙動を正確にとらえるためには、岩盤の波動伝播速度を的確に評価する必要がある。例えば著者の一人らは、アーチダムの起振実験¹⁾や実地震の応答シミュレーション解析²⁾を行っている。その解析において、用いる岩盤物性の値が的確でないと、良好なシミュレーション結果が得られない。

岩盤の波動伝播速度を求める原位置試験として、弾性波探査やボーリング孔におけ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、波動の発振源が点であり、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用い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。これらは、実地震時の波動伝播速度と原位置試験から得られる波動伝播速度の関係が必ずしも明確でないことによる。この理由は、硬質岩盤

の地震波伝播速度が求められ、原位置試験結果との比較がなされた例がほとんどないためと考えられる。さらにその比較を行うためには、硬質岩盤では割れ目の影響により、原位置試験の試験位置によるばらつきが大きいので、広い範囲を対象とした試験結果が必要であることが考えられる。実際に硬質岩盤で地震波伝播速度に関する検討を行っている例は、同一サイトについての文献³⁾が見当たる程度で、原位置試験結果との比較も同じ文献でPS検層との比較がなされている程度である。文献4),5)では、硬質岩盤内の鉛直アレー観測によって得られた地震波形の走時は、地震計を設置したボーリング孔を用いて実施したPS検層による波動伝播時間に、ほぼ一致すると貴重な報告がなされている。しかし、上記文献で対象としているサイトは、硬質岩盤ではあるものの、割れ目が非常に少ないサイトであり、一般的に割れ目が存在する硬質岩盤サイトでの地震波伝播速度と原位置試験による波動伝播速度の関係については不明である。

そこで本研究は、割れ目の量が異なるいくつかの硬質岩盤サイトにおいて地震観測を行い、その記録から地震波伝播速度を算出する。一方、比較的広範な範囲を対象として原位置試験を行い、原位置試験による波動伝播速度と地震波伝播速度との比較を行う。そして、それらの差異について明らかにするとともに、その理由について考察する。

表-1 地震観測と地震波伝播速度を算出した地震の概要

地点	地震計設置位置	A, B間の 標高差 ΔH (m)	地震波収録 チャリック 周波数(Hz)	伝播速度算出 地震波数	震源距離 の範囲 (km)	最大加速度 の範囲 (gal)
G	A:鉛直ホ-リソク孔内-200m B:鉛直ホ-リソク孔内 -70m	130	200	8	60~93	1~28
H	A:鉛直ホ-リソク孔内-660m B:鉛直ホ-リソク孔内-250m	410	200	8	70~174	1~28
I	A:ダム河床部 鉛直ホ-リソク孔内 -50m B:調査横坑内	147	200	8	20~130	1~3
J	A:ダム河床部 鉛直ホ-リソク孔内 -50m B:調査横坑内	137	200	8	22~114	1~4
K	A:ダム底部監査廊 B:調査横坑内	67	200	4	44~85	1~22
L	A:ダム底部監査廊 B:調査横坑内	30	アナログ収録	8	37~148	1~11
N	A:鉛直ホ-リソク孔内 -47m B:鉛直ホ-リソク孔内 -25m	22	2000	3	54~78	1~4

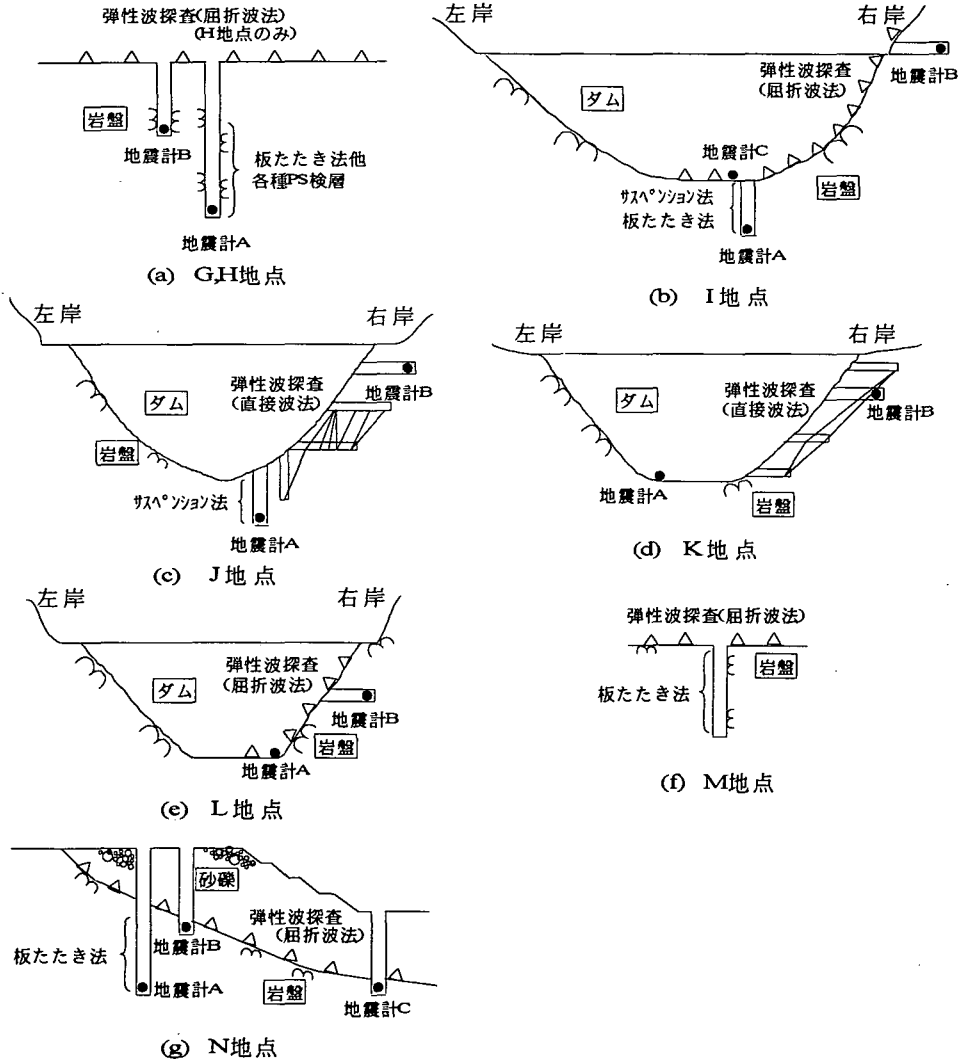


図-1 地震計設置位置と原位置試験の概要説明図

表-2 原位置試験の概要

地点	板たたき法	サスペンション法	弾性波探査 (屈折波法)	弾性波探査 (直接波法)
G	鉛直ホーリング孔130m ^{*1}	————	————	————
H	鉛直ホーリング孔410m ^{*2}	————	地震計を設置した ホーリング孔付近の1測線	————
I	鉛直ホーリング孔50m	鉛直ホーリング孔50m	ダムサイト右岸部全域を対象、 測線はダム軸に平行	————
J	————	鉛直ホーリング孔50m	————	調査横坑間の7測線、測線長は35m 鉛直ホーリング孔と調査横坑間1測線、 測線長は35m
K	————	————	————	調査横坑間の4測線、測線長は50、90m
L	————	————	ダムサイト右岸部全域を対象、 測線はダム軸に平行	————
M	鉛直ホーリング孔30m	————	板たたき法を実施した ホーリング孔付近で直交する 2測線	————
N	鉛直ホーリング孔22m	————	地震計を設置した ホーリング孔付近で直交する 2測線	————

*1 他の起振方法(S波:バネ式, P波:発破)でも実施, 文献9)

*2 他の起振方法(S波:バネ式, S大砲, P波:発破, 重錘落下, エアガン)でも実施, 文献10)

2. 対象地点と地震観測及び原位置試験の概要

(1) 地震観測の概要

本研究で対象とする地震観測地点は、7地点である。対象地点の地震観測の概要を表-1に、その説明図を図-1に示す。G, H 地点は、鉛直アレー観測が行われている⁹⁾、前述の文献⁹⁾⁷⁾で対象としている地点である。両地点はそれぞれ長さ950mと330mの鉛直ボーリング孔内で地震観測が実施されている(図-1(a)参照)。I, J, K, Lの4地点は、中部電力(株)のダムサイトである。I, J両地点は、ダム高100m以上のアーチダムサイトで、岩盤は全体的にかなり堅硬である。ダム河床部より岩盤内約50mの位置(地震計A)と右岸上部標高に位置する調査横坑内(地震計B)で地震観測を実施している(図-1(b), (c)参照)。なお、I地点では、ダムの最底部でも地震観測(地震計C)を行っている。K, L地点は中空重力ダムサイトでダムの底部(地震計A)と右岸上部標高に位置する調査横坑内(地震計B)で地震観測を実施している(図-1(d), (e)参照)。N地点は山間丘陵地の変電所敷地で、鉛直アレー観測を行っている地点である(図-1(g)参照)。

地震波収録のサンプリング周波数は、L, N地点を除いて200Hzである。地震計A, Bの設置位置の標高差が小さいL, N地点については、L地点がアナログ収録、N地点は他地点の10倍の2000Hzのサンプリングで収録を行っ

ている。なお、対象地点の地質と年代は図-4の上欄に示している。

(2) 原位置試験の概要

原位置試験の概要を表-2に、その説明図を図-1に示す。地震計Aを設置しているボーリング孔で板たたき法(I, N地点)、サスペンション法(I, J地点)によるPS検層を実施した(図-1(b), (c), (g)参照)。G, H地点でも、地震計Aを設置しているボーリング孔で、板たたき法他、各種PS検層が実施されている(図-1(a)参照)⁹⁾¹⁰⁾。M地点は山間丘陵地の変電所敷地で、地震観測は行っていないが、ボーリング孔を用いて板たたき法を実施した地点である(図-1(f)参照)。弾性波探査は、J, K地点ではダムサイト調査横坑間で直接波法を実施している。図-1(c), (d)には調査横坑のおおよその位置と測線を示す。残りのサイトのうちG地点を除く全サイト(H, I, L, M, N地点)で地表面から屈折波法を実施している(図-1(a), (b), (e), (f), (g)参照)。

3. 地震観測記録による地震波伝播速度の算出

(1) 対象地震

地震波伝播速度の算出に用いた地震の概要を表-1に示す。I, J, L地点では現在までに、G, H地点では1985年までに観測された地震波⁹⁾の内、サイトごとに8波を対象

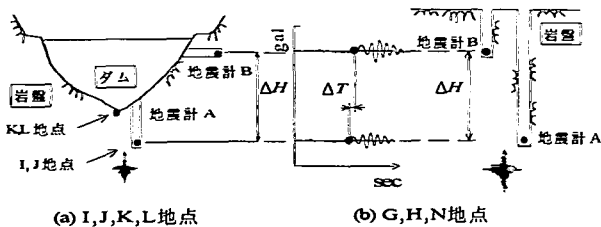


図-2 地震波伝播速度の算出方法

にした。ただし地震観測期間が短いK地点は4波、N地点は3波である。これらの地震は全て弱震であり、最大加速度は1~28galである。

サイトに対してほぼ鉛直上方に伝播している地震波を対象とするために、震源距離が長い地震を選び解析対象地震とした。I地点では、地震計AとBの観測記録の他に、地震計AとCの観測記録からも(図-1(b)参照)、S波伝播速度の算出を行ったが、ほぼ同じ値が得られた。N地点では、地震計Aから50m程度離れた地震計Aと同一の標高の位置で地震観測(地震計C)を行っており(図-1(g)参照)、地震計AとCで地震波の到達時刻が同一の地震波を対象地震とした。以上より、I,N地点では地震波伝播速度算出の対象とした地震波は、サイトに対し鉛直方向に伝播していることを確認している。また、J地点では震源距離が10km前後の地震がいくつか観測されており、それらに対しても地震波伝播速度算出を行ったが、表-1で示した対象地震(比較的遠方の震源)から得られた地震波伝播速度とはかなり異なる値であった。

(2)算出方法

地震波伝播速度を算出するに先立ち、算出方法について検討を行った。検討対象としたのは、次の3つの方法である。

a)主要動のゼロクロスする時刻の時間差より算出する方法

図-2に示すように、A,B地点で観測した地震波の主要動の立ち上がりのゼロクロスする時刻の時間差 ΔT と観測点間の鉛直距離 ΔH より、P波及びS波の地震波伝播速度 V_p, V_s を

$$V_p, V_s = \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad (1)$$

で算出した。主要動の立ち上がりのゼロクロス位置の時刻を用いたのは、ダム振動の影響や地層間の反射

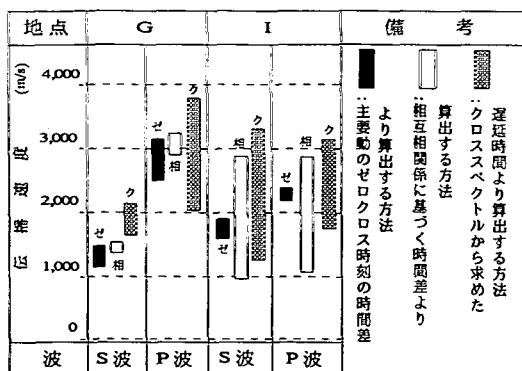


図-3 地震波伝播速度算出の方法と結果

波の影響が小さいと考えられるからである。サイトに対して鉛直上方に伝播していると考えられる地震波を対象としているので、鉛直動より求めた速度を V_p 、水平動より求めた速度を V_s とした。なお、水平動は水平方向2成分の内、最大加速度が大きい方向の記録を用いた。

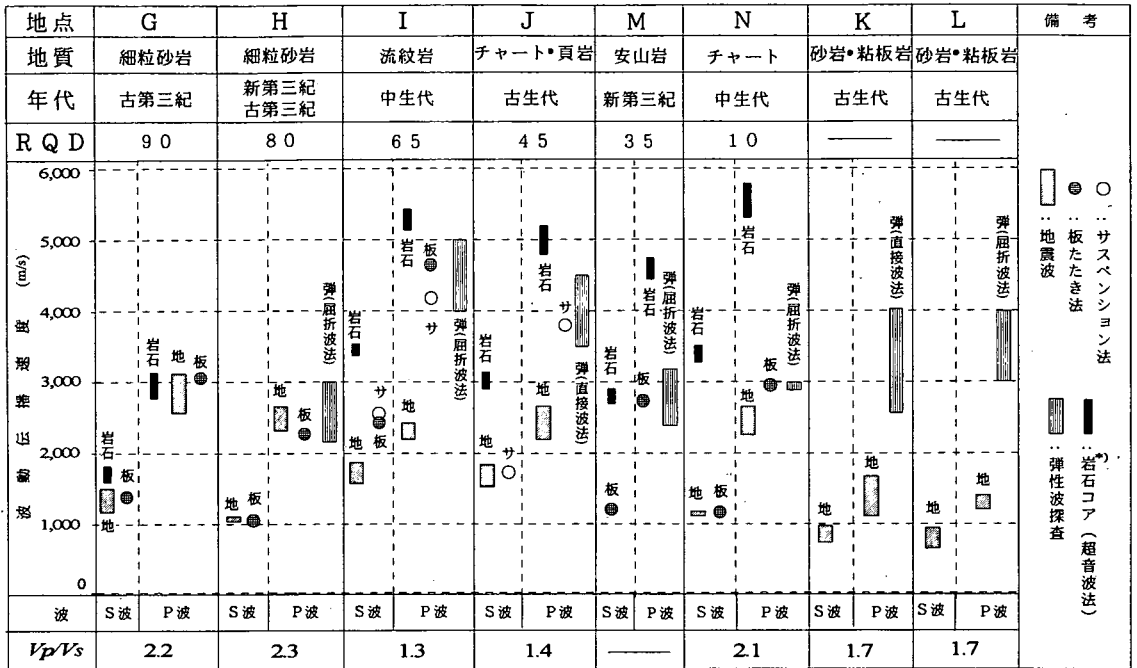
b)相互相関係数に基づく時間差より算出する方法

A, B 2点の記録のクロススペクトルを逆フーリエ変換して相互相関係数を求め、そのピークの時間遅れ ΔT より速度を式(1)で算出した。解析には、ダムの振動の影響や地表面での反射波の影響が小さいと考えられる、主要動の立ち上がりのゼロクロスする時刻の前後の1秒間の記録を用いた。

c)クロススペクトルから求めた遅延時間より算出する方法

A, B 2点の記録をフーリエ変換し、パワーの卓越する周波数(ダムサイトでは、ダムの固有振動数に近いものを除く)に対して、クロススペクトルの位相遅延時間 ΔT を求め、速度を式(1)より算出した。解析対象時間はb)と同じである。

以上3つの方法で、G,I両地点に対し地震波伝播速度を算出した結果を図-3に示す。まずG地点についてみる。 V_p, V_s とも上記a), b)の方法による結果が概ね一致するのに対して、c)の方法による値は、 V_s はa), b)の方法による値より大きく、 V_p は値のばらつきが大きいことがわかる。G地点の V_s は文献(4), (5)で算出されており、その値と上記a), b)の方法により得られた値は、ほぼ一致している。次にI地点では、 V_p, V_s ともa)の方法に比べb), c)の方法による値はばらつきがかなり大きくなっている。これは、地震計A, Bの記録にダムの振動の影響が含まれているためと思われる。以上の算出方法の違いによる地震波伝播速度の結果を考慮して、本研究ではa)の方法で、地震波伝播速度を算出することとした。



*P波速度は試験結果、S波速度はP波速度と実測のポアソン比を用いて弾性波動論より算出した値ただし、G地点はS波の超音波法による試験結果

図-4 地震波伝播速度と原位置試験による波動伝播速度の比較

(3)地震波伝播速度の算出結果

図-4に算出したP波、S波の地震波伝播速度を、得られた範囲の値で示している。V_p、V_sのばらつきの大きさは、平均値に対しV_sは数10~150m/s程度、V_pは100~300m/s程度で、このばらつきについて考察する。この大きさは、地震観測記録より地震波伝播速度を求める際の主要動の立ち上がりゼロクロスする時刻の時間差に換算すると、データサンプリング間隔(サンプリング周波数200Hzの場合 1/200秒、表-1参照)程度に相当する大きさである。筆者らは上記a)の方法でダムコンクリートの地震波伝播速度の算出を行っている¹¹⁾。その際の算出結果のばらつきは、データサンプリング間隔(1/200秒)の1/5程度で、データの読み取り誤差のばらつき程度であった。これに比べると今回の岩盤の地震波伝播速度のばらつきは大きい。岩盤の場合、割れ目による波動の減衰や、地震動の卓越振動方向と割れ目の関係などの不均質さの影響がそれぞれの地震ごとに違い、この影響も算出結果のばらつきに含まれていると思われる。

(4)地震波伝播速度を算出した振動のひずみレベル 算出した地震波伝播速度は、すべて弱震による振動

を対象として得られたものである。本節ではこの振動によるひずみの大きさについて考察する。

地震波伝播速度を、主要動の立ち上がりのゼロクロスする時刻から求めたので、対象としている振動はゼロクロス部の最初の1山程度の振動である。その加速度のピーク値はサイトにかかわらず、また水平動、鉛直動とも0.5gal程度以下である。地震による振動は厳密には正弦波ではないが、いま振幅が0.5galの正弦振動として水平動によるせん断ひずみを求めると10¹~10²μのオーダーである(算出式は文献11)を参照)。この算出において、岩盤のV_sは、地震観測記録より求めた地震波伝播速度であり、周波数は主要動のゼロクロス部の1山の周波数程度である1~10Hzとしている。鉛直動によるひずみも同様に求められ、その値は水平動と同じ10¹~10²μのオーダーである。

著者らは、I地点で採取した岩塊より切り出した岩盤ブロック(図-7(a)参照)や、モデル岩盤(ボーリングコアより切り出した単一割れ目を供試体の中央に配置し、その周囲をモルタルで作製した供試体)を対象に、一軸圧縮試験を行っている¹²⁾。それによれば、5μ程度以下の微小ひずみ振幅では、応力-変形曲線は、線形で可逆的で弾性係数は一定である。対象としている地

震による振動のひずみは、上記の試験の応力-変形曲線が線形であるひずみよりも、1オーダー以上小さい。また6章で図-4により説明するが、割れ目が非常に少ないG, H地点では、地震波伝播速度と微小な振動の波動を用いる弾性波探査や板たたき法他、各種PS検層による波動伝播速度はほぼ一致している。これらのことから、本研究で算出した地震波伝播速度は、ひずみの大きさに依存しない微小なひずみ領域に対する値と考えられる。

4. 原位置試験による波動伝播速度

(1) PS検層や弾性波探査(直接波法, 屈折波法)による波動伝播速度

原位置試験により得られた波動伝播速度をP波, S波の各速度ごとに比較して図-4に示す。図中の弾性波探査の結果は、得られた値の範囲を示している。板たたき法(G, H, I, N地点), サスペンション法(I, J地点)による波動伝播速度はいずれも、地震計Aを設置したボーリング孔で実施した結果である。地震波伝播速度との比較を行うため、G, H, N地点の板たたき法による結果は地震計A, Bの、I地点の板たたき法やサスペンション法による結果は、地震計A, Cの設置位置標高間の試験結果である。弾性波探査による V_p は、調査横坑間で実施した直接波法(J, K地点)や、サイト地表面から実施した屈折波法(H, I, M, N, L地点)による最高速度帯の結果で、いずれも岩盤内深部に対する値である。図-4には、地震観測を行っていないM地点の原位置試験結果も示してある。

弾性波探査による V_p と板たたき法やサスペンション法による V_p は、サイト(G, H, J, M, N)にかかわらず概ね一致している。サイトIでの板たたき法とサスペンション法には違いがあるが、その差は弾性波探査の結果の範囲に入っている(I地点の板たたき法とサスペンション法の V_p の差については次節で考察する)。以下このことを考察してみる。

筆者らは、割れ目の配列を単純化したモデル岩盤や岩盤ブロックを対象に、超音波法試験を行い、超音波法のような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迂回した基質部であることを述べた¹³⁾。板たたき法、サスペンション法、弾性波探査(直接波法, 屈折波法)も点振源であり、その波動伝播経路は超音波法と同様に、割れ目を迂回した基質部であると考えられる。また、板たたき法、サスペンション法、弾性波探査(直接波法, 屈折波

法)における波の周波数はそれぞれ、60~100Hz, 3000~5000Hz, 数100Hz程度とかなり異なる。そこで、次に基質部に相当する岩石コアを用いて、波動伝播速度のひずみ速度や周波数への依存性について検討してみる。

図-5は、地震計Aを設置したI, J, M, N地点のボーリング孔のコアの割れ目がほぼない部分より作製した円柱形の岩石コア供試体を対象に行った動的圧縮試験や、超音波法(54kHz)¹⁴⁾により得た V_p を示す。動的圧縮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-6に載荷パターンを示す。一定振幅(0.125kgf/cm² (0.0123 N/mm²))の正弦波の周波数を変化させ(0.01, 0.1, 1, 5Hzの4通り), 載荷速度を変えて試験した。縦ひずみの計測は、供試体の軸に平行かつ対称な位置の2つの線上に、供試体高さの1/2を中心にひずみゲージを貼り付けて行った。動的圧縮試験の V_p は、試験で得られた応力-ひずみ曲線から動弾性係数 E を求め、等方弾性体の波動論により次式で算出した。

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

ここに、 ρ は密度であり、実測値を用いた。 ν はポアソン比で、供試体高さの1/2の円周上に貼った2枚のひずみゲージにより計測した横ひずみと、前述の縦ひずみの比より算出した。各地点の ρ, ν を図-5中に示す。図-5の横軸には、ひずみ速度をとり周波数も併記している。超音波法のひずみ速度の算出方法は文献11)で述べた方法である。超音波法のひずみ速度や周波数は、動的圧縮試験に比べてかなり大きいにもかかわらず、動的圧縮試験、超音波法により得られた V_p の差は小さい。つまり基本的に岩石コアのように、比較的均質な材料と見なせる場合は、 V_p のひずみ速度や周波数の依存は非常に小さいと思われる。大久保ら¹⁵⁾も硬岩の岩石コアの動弾性係数に、ひずみ速度依存性がないことを示している。

以上より、板たたき法、サスペンション法、弾性波探査(直接波法, 屈折波法)に用いられる波の周波数は、かなり異なるにもかかわらず、ほぼ同程度の V_p が得られるのは、これらの試験法は点振源による波動を用い、その波動伝播経路は割れ目を迂回した基質部であり、上記の岩石コアの試験より、その基質部の波動伝播速度は、ひずみ速度や周波数にほとんど依存しないためと考えられる。

(2) 板たたき法とサスペンション法による波動伝播速度の比較

I地点で、地震計Aを設置したボーリング孔を用いて

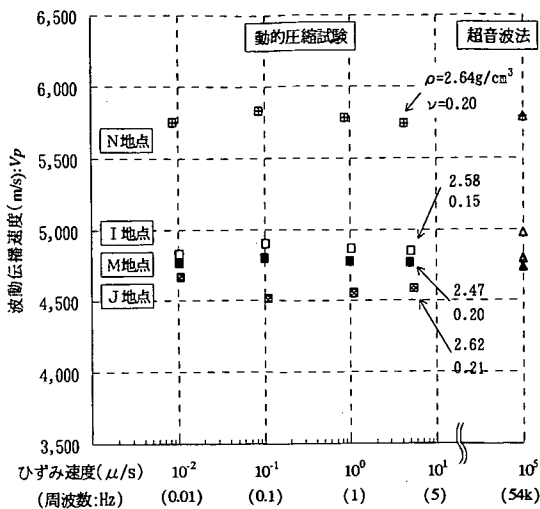


図-5 岩石コアの動的圧縮試験や超音波法の V_p とひずみ速度の関係

行った板たたき法とサスペンション法による V_s は、ほぼ一致している。しかし、 V_p には差異が認められ、サスペンション法による V_p の方が小さい。この理由について考察する。板たたき法は、ボーリング孔口よりある程度離れた地表面に発振点があり、受振点はボーリング孔内にある。従って波動の伝播経路は岩盤内である。一方サスペンション法は、発振点、受振点ともボーリング孔内にある。従ってその波動伝播経路は孔壁に近い。よって両方法の波動伝播経路は厳密には同じではない。しかし、 V_s がほぼ一致していることから、波動伝播経路が異なっていることが、その理由ではないと考えられる。弾性体の棒と無限体を伝播する波動の V_s は一致するが、 V_p は自由面の影響により、棒のほうが無限体より遅い。このことから推察するに、サスペンション法による V_p が、板たたき法による V_p に比べて遅いのは、サスペンション法の波動伝播経路が孔壁に近く、サスペンション法実施時にボーリング孔内は水で満たされているが、硬質岩盤の V_p は、水の V_p に比べてかなり大きく、孔壁が自由面の状態に近いことの影響であるためと思われる。

5. 各サイトの割れ目の量に関する考察

硬質岩盤の波動伝播速度は、硬質岩盤を特徴付ける割れ目の影響を受けていると予想される。次章で地震波伝播速度と原位置試験による波動伝播速度の比較を行うが、その前に各サイトの割れ目の量の多少について検討する。

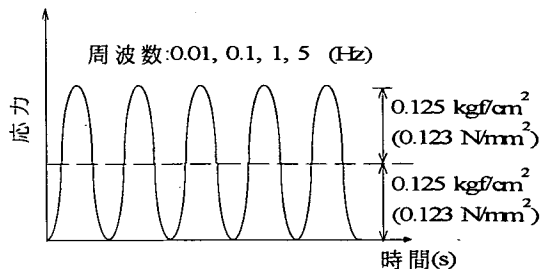


図-6 载荷パターン

(1) 岩盤ブロックとモデル岩盤の超音波試験結果

岩盤ブロックやモデル岩盤の試験結果¹³⁾から、割れ目の多少と超音波法によって得られる V_p との関係についてみる。

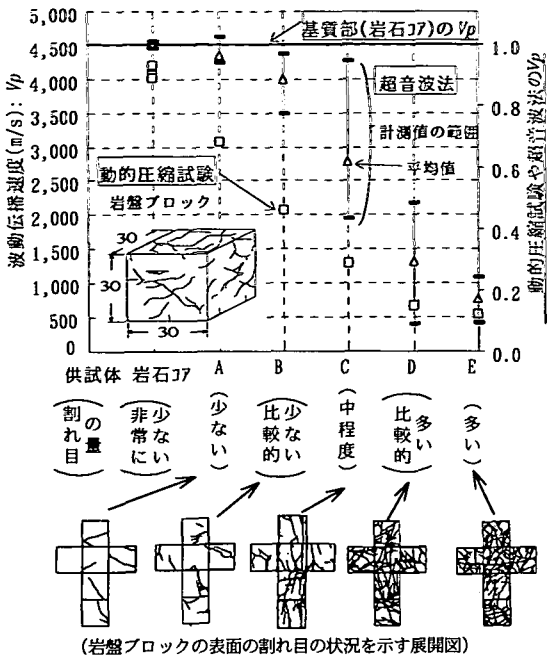
図-7(a)はI地点の割れ目を有する岩塊より切り出した岩盤ブロックの、超音波法による V_p を示す。超音波法の発信点と受信点は、供試体の両端面での中心と4隅の5カ所で、供試体の高さを波動伝播経路の長さとして V_p を求めた。図にはその5カ所の計測値の範囲と平均値(△印)を示す。左欄から割れ目が少ない順で、岩石コアも含め割れ目の量が異なる6種類の供試体の結果を示している。岩石コアの V_p は岩盤ブロックの基質部の V_p に相当する。割れ目の量が中間の供試体C,Dで V_p のばらつきが大きくなっているが、供試体A,Eでの V_p のばらつきは小さい。これは割れ目が少ない供試体Aや多い供試体Eでは、発振点と受信点間の割れ目の量が測定位置によらず同程度であるが、割れ目の量が中間の供試体C,Dでは、測定位置による割れ目の量の差異が大きいためと考えられる。

図-8(a)は、割れ目の配列を単純化したモデル岩盤の超音波法による V_p である。モデル岩盤は基質部を高強度モルタルで、割れ目を発泡スチロールで作製している。超音波法の発信点と受信点は、供試体の両端面の中心の1カ所とした。左欄から割れ目の列数が少ない順で、6種類の供試体の結果を示している。割れ目なしの供試体の V_p は基質部の V_p である。

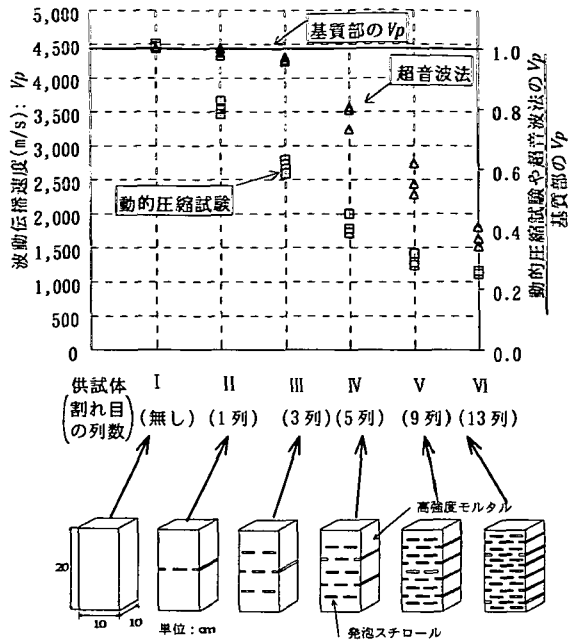
図-7(a),8(a)によれば、岩盤ブロック、モデル岩盤とも割れ目が少ない供試体ほど、超音波法による V_p は速く、基質部の超音波法による V_p との差が小さく、逆に割れ目が多くなると差が大きくなるのがわかる。

(2) 各サイトの割れ目の量の多少

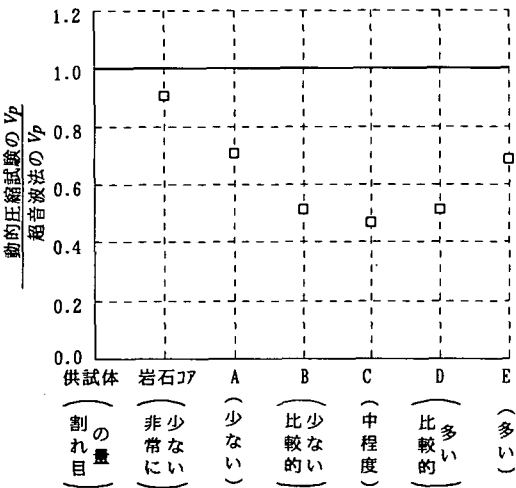
図-4に各サイトの地震計Aを設置したボーリング孔のRQD(本研究では、ボーリングコアの内、長さ10cm以上のコアの積算長が、ボーリング長さに対して占める百分率と定義する)を示す。左からRQDが大きい順、



(a) 動的圧縮試験と超音波法の V_p の比較

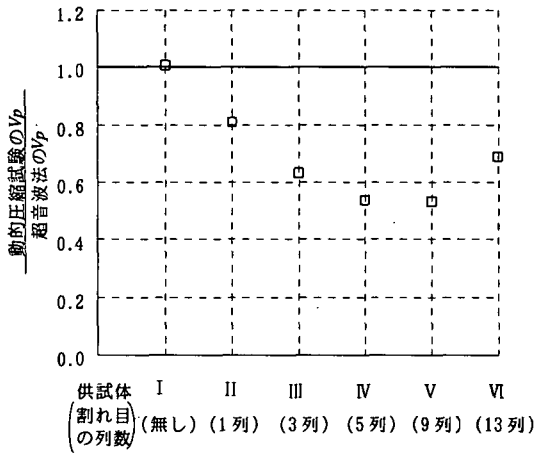


(a) 動的圧縮試験と超音波法の V_p の比較



(b) 動的圧縮試験の V_p と超音波法の V_p の比

図-7 岩盤ブロックの試験結果



(b) 動的圧縮試験の V_p と超音波法の V_p の比

図-8 モデル岩盤の試験結果

即ち割れ目が少ない順であり、右側に示したサイト程割れ目が多い。ただし、K, L 地点はRQD が得られていないので、右端の2欄に示している。

図-4 には、地震計 A を設置したボーリング孔のコアより作製した岩石コア(3~5 体)の超音波法(G, I, J, M, N 地点)による V_p も示す。硬質岩盤の基質部に相当する岩石コアの弾性係数は、数万~100 kgf/cm^2 程度(数千~10 N/mm^2 程度)である^{10)~18)}。本研究で対象として

いる地点の岩石コアの弾性係数を超音波法による V_p より求めると、G 地点が 20 万 kgf/cm^2 (2 万 N/mm^2)、I, J, M, N 地点が 45 万~80 万 kgf/cm^2 程度(4 万~8 万 N/mm^2 程度)である。岩石コアの V_p と板たたき法、サスペンション法、弾性波探査による V_p (以下弾性波探査等による V_p と呼ぶ)を比較すると、割れ目が非常に少ない G 地点では、両者はほぼ一致している。そして I, J, M, N の順に両者の差が大きくなっていく。

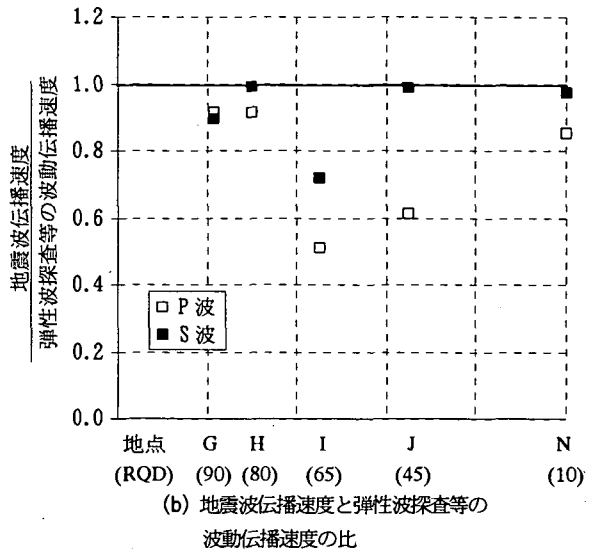
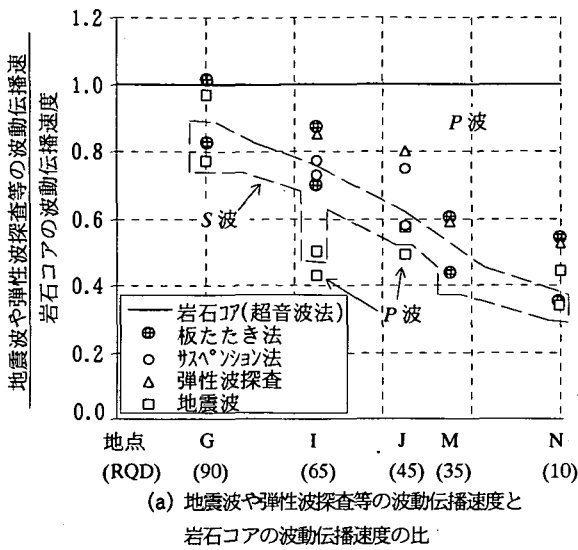


図-9 地震波や原位置試験による結果

この関係をそれぞれの地点の岩石コアの V_p (平均値) に対する、弾性波探査等により得られた V_p (値の範囲の中間値) の比で示したのが図-9(a)である。横軸には RQD をとっている。この図と図-7(a), 8(a)の超音波法による V_p (図-7(a), 8(a)の右側の縦軸には、基質部の V_p に対する比を示す) はよく似ており、割れ目の量が多くなると、弾性波探査等による V_p の岩石コアの V_p に対する比が小さくなるのがわかる。図-7(a), 8(a)がそれぞれ同一の基質部の V_p を基準にした比であるのに対し、図-9(a)は、各地点での岩質の異なる岩石コアの V_p を基準にした比である。このことから、図-7(a), 8(a)と図-9(a)に示される結果は、基質部の性質によるものでなく、割れ目の量の多少によるものと考えられる。

図-9(a)には、図-4 の岩石コアの V_s (超音波法により得られた V_p と、実測したポアソン比より等方弾性体の波動論での V_s と V_p の関係式を用いて求めた値、ただし G 地点は S 波の超音波法による試験結果) と、板たたき法、サスペンション法による V_s のそれぞれの平均値の比を、図中に点線で囲って示す。 V_p の場合と同様、岩石コアの V_s を基準にした板たたき法やサスペンション法による V_s も、RQD の大小と良好な対応を示し、割れ目の量が多くなると小さくなっている。

このように、異なるサイトにもかかわらず、P 波 S 波ともに、岩石コアと弾性波探査等による波動伝播速度の比と、RQD は良好な対応を示す。これは割れ目の状態(割れ目の方向、割れ目の開口幅や割れ目の凹凸の状態等)は、サイトごとにかなり相違があると思われるが、4 章(1)で述べたとおり弾性波探査等による波動

の伝播経路は割れ目を迂回した基質部であるため、割れ目の状態の影響が小さいためと考えられる。

以上より、RQD の大きい順に左から示した図-4 は、右側に示したサイト程割れ目が多い岩盤と言える。

6. 地震波伝播速度と原位置試験による波動伝播速度の比較

(1) P 波伝播速度の比較

図-4 に示すように、地震波伝播速度と弾性波探査等の V_p は、サイトにより大きく異なっている。割れ目が非常に少ない G, H 地点では、それらの V_p はほぼ一致している。割れ目の最も多い N 地点では両者の差は小さい。しかし、割れ目の量が中間の I, J 地点では、その差が大きくなっている。つまり、地震波伝播速度の V_p は、弾性波探査等の V_p よりも小さく、違いの程度は割れ目の多少による。これらのことを、図-7(a), 8(a)に示した超音波法及び以下に述べる動的圧縮試験の結果を基に考察してみる。

図-7(a), 8(a)には、4 章(1)で述べた岩石コアの動的圧縮試験と同じ载荷パターンで行った岩盤ブロック及びモデル岩盤の試験結果¹⁹⁾も示している。図-7(a)には 0.1Hz の場合の結果を示す。なお、岩盤ブロックの V_p のひずみ速度依存性は割れ目の多い供試体ほど大きく、試験を行った周波数の範囲 (0.01~5Hz) では 5~20%程度である¹⁹⁾。図-5の I 地点の結果が図-7(a)の岩石コアにあたる。割れ目が最も少ない、割れ目が 1 列のモデル岩盤供試体 I や岩盤ブロック供試体 A では、超音波法の V_p (Δ 印) と動的圧縮試験の V_p (\square 印) の差は、

より割れ目が多い供試体（供試体 B, 供試体Ⅲ）に比べて小さくなっている。そして、モデル岩盤の割れ目がない供試体 I では、超音波法による V_p と動的圧縮試験による V_p は一致し、岩石コアでもほぼ一致している。このことは図-5に示した岩石コアの試験結果と同じである。ただし岩石コアには小さいものの差異が認められるのは、岩石コアに存在する小さな割れ目や不均質さのためと考えられる。一方割れ目の量が非常に多い岩盤ブロック供試体 E, モデル岩盤供試体Ⅵでは、超音波法と動的圧縮試験のそれぞれの V_p の差は小さくなっている。そして、割れ目の量が中間である岩盤ブロック供試体 B, C, D, モデル岩盤供試体Ⅲ, IV, V では、両者の V_p の差が大きくなっている。

前述の地震波伝播速度と弾性波探査等による V_p の差の程度と割れ目の量の関係は、岩盤ブロックやモデル岩盤での動的圧縮試験と超音波法による V_p の差の程度と割れ目の量の関係と似ている。この点をより分かり易くするために、図-7(b), 8(b)にそれぞれ岩盤ブロック, モデル岩盤の動的圧縮試験の V_p (平均値)の超音波法の V_p (平均値)に対する比を、そして図-9(b)には図-4を基に、P波の地震波伝播速度(値の範囲の中間値)の弾性波探査等による V_p (値の範囲の中間値)に対する比(□印)を示す。これらの図はいずれもよく似ており、割れ目が少ないか多いと比が大きくなり、その中間の割れ目の量で比が小さくなっている。

文献 13)で考察し、4章(1)でも少し述べたが、超音波法は、発振源が点振源で、その波動の伝播経路は割れ目を迂回する基質部であり、割れ目により減衰されなかった波動が計測されている。割れ目の多少により計測される波動伝播時間が違い、求められる V_p が違ってくる(図-7(a), 8(a)参照)。これに対し、弾性波探査等による波動伝播も発振源が点振源で、その波動伝播経路は割れ目を迂回した基質部であり、超音波法と同じである(図-9(a)参照)。一方地震波の伝播は、動的圧縮試験が供試体全体の振動であると同様に、サイトの全体的振動である。つまり、動的圧縮試験や地震波より求められる V_p は、それぞれ割れ目を含んだ供試体全体やサイト全体の V_p である。このため、図-7(b), 図-8(b)と図-9(b)は、よく似た結果が得られると考えられる。

超音波法と動的圧縮試験による V_p による違いや、弾性波探査等と地震波の V_p による違いは、それぞれの計測が、割れ目を迂回した波動の計測と割れ目全体を含んだ計測で両者は本質的に違い、求められる V_p に割れ目が及ぼす影響が異なるためと考えられる。割れ目がない均質体では、このような違いは生じない。

基質部を伝播する速度(岩石コアの V_p)は速く、このことが弾性波探査等の V_p が、地震波のそれより速く

なっている(図-9(a), (b)参照)理由である。また、割れ目の量がかかなり多くなると、両者の差は小さくなる(図-9(b)参照)。これは、割れ目が多くなると波動は割れ目を迂回するため、伝播経路が長くなり(測定される波動伝播時間が長くなり)求められる V_p が小さくなるためと考えられる。例えば割れ目の多いN地点では、その岩石コアの V_p は非常に大きい、それに比べ弾性波探査等による V_p は小さい。つまり計測された波動は、長い経路を伝播してきたものと考えられる。

(2)S波伝播速度の比較

図-9(a)には、岩石コアの V_s と地震波の V_s (値の範囲の中間値)の比も示す。また図-9(b)には、地震波の V_s (値の範囲の中間値)と板たたき法やサスペンション法による V_s (平均値)の比(■印)も示す。以下、図-4, 9(a), (b)の結果を用いてS波の伝播速度について考察してみる。

地震波と板たたき法やサスペンション法による V_s は、割れ目が非常に少ないG, H地点でも、また割れ目の多いN地点でもほぼ一致している。J地点のサスペンション法を行った計測区間(図-1(c)参照)は、地震波を計測した区間(地震計A, B間)と同じではないにもかかわらず、地震波とサスペンション法による V_s は一致している。地震波伝播速度の算出の対象範囲に当たる広い範囲を対象とした弾性波探査(図-1(c)参照)とサスペンション法による V_p が同程度であることを考えると、J地点でのサスペンション法による V_s が、地震波の V_s と大体一致すると言える。ただし地震波と弾性波探査等による V_p に最も大きな差があるI地点では、 V_s にも違いがある。I地点の地震波の V_s は、地震計A, B(図-1(b)参照)の地震観測記録から求めた値である。これに対し、サスペンション法や板たたき法を実施したボーリング孔の地震計Aと地震計C(図-1(b)参照)の地震記録から求めた V_s は、幾分ばらつきが大きいものの地震計A, Bの記録から求めた値とほぼ同じであった。このことは、I地点では地震波とサスペンション法や板たたき法による V_s の違いが計測区間の違いによるものではなく、別の理由によることを意味している。またその V_s の違いの程度は、 V_p の差に比べて小さい。以上、 V_s は V_p と異なり地震波伝播速度と板たたき法やサスペンション法による V_s が一致する場合もあること、一致しない場合でも、その差は V_p に比べて小さいことがわかる。次に、地震波と弾性波探査等によるP波の波動伝播速度の差異が大きい割れ目の量が中間の場合(I, J地点)に対して、両者の差異に割れ目が及ぼす影響を考察する。図-9(a)で、岩石コアの波動伝播速度に対する速度の比の低下度合いから、割れ目の影響をみてみる。弾性波探査等では V_s の低下の方が V_p のそれより大きいことから、弾性波探査

等の波動伝播速度に与える割れ目の影響は、 V_s の方が V_p よりも大きい。地震波では V_p の低下の方が V_s のそれより大きいことから、地震波伝播速度に与える割れ目の影響は、 V_s よりも V_p の方が大きい。そして、地震波と弾性波探査等の波動伝播速度の差は、 V_s の方が V_p よりも小さい。図-9(b)の地震波と弾性波探査等の波動伝播速度の比でも、 V_s の比が V_p の比より1に近い。即ち、地震波と弾性波探査等の波動伝播速度の差異に割れ目が及ぼす影響は、S波の方がP波よりも小さい。

(3)地震波のP波とS波の伝播速度の比

地震波の V_p と V_s のそれぞれの平均値の比を、図-4の最下欄に示す。それを、RQDが得られているサイトに対して図示したのが、図-10である。 $V_p/V_s = 1.3 \sim 2.3$ である。割れ目が非常に少ないG, H地点や、割れ目が多いN地点の V_p/V_s が大きい。その中間の割れ目の量であるI, J地点では $V_p/V_s = 1.3 \sim 1.4$ で、 V_s に比べて V_p がかなり小さい。RQDは不明であるが、K, L地点の V_p/V_s は1.7である。

いま、等方弾性体の波動論の関係式を用いて、 $V_p/V_s = 1.3 \sim 2.3$ に対するポアソン比の範囲を求めると、 $-0.20 \sim 0.38$ である。この値の範囲は、通常硬質岩盤に対して用いられる値(硬質岩盤の場合、原位置平板載荷試験による弾性係数の算出では0.2が用いられることが多い¹⁸⁾)に比べて、かなり広範囲である。しかも小さい方の値は負で、このことは、必ずしも岩盤を等方と見なせない場合があることを示している。対象としたサイトの岩石コアのポアソン比は0.15~0.21(図-5に掲載した各地点の岩石コアのポアソン比を参照)で、その場合の V_p/V_s を等方弾性体の波動論の関係式を用いて求めると1.55~1.65で、これを図-10中に示す。岩石コアの V_p/V_s は、地点にかかわらず同程度である。

V_p/V_s が地点により異なり、かなり広い範囲をとるのは、岩石コアの波動伝播速度に対して、岩盤の割れ目による地震波伝播速度の低下度合が、I, J地点ではS波よりもP波に対して大きく、G, N地点ではP波よりもS波に対して大きいためである(図-9(a)参照)。岩盤の場合、割れ目の量、割れ目の方向と振動方向の関係などにより、S波とP波ではその波動伝播速度に及ぼす割れ目の影響の程度がそれぞれ異なるため、地点により V_p/V_s の比にかなりの違いが生じるものと考えられる。

7. 結論

割れ目の量が異なるいくつかの硬質岩盤サイトを対象に、地震観測ならびに弾性波探査試験やボーリング孔におけるPS検層を行った。そして地震観測記録よりP波、S波の地震波伝播速度を求め、原位置試験により得

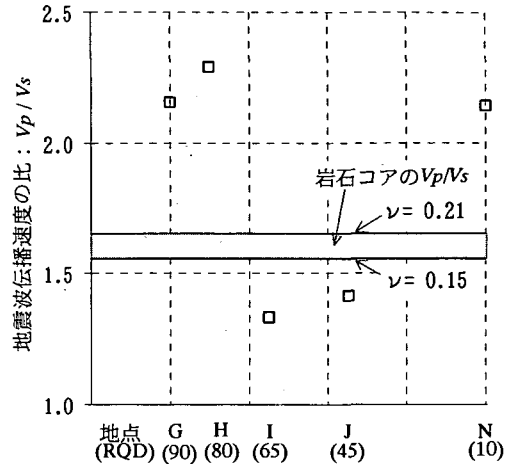


図-10 P波とS波の地震伝播速度の比 (V_p/V_s)

られた波動伝播速度との比較を行った。その結果、硬質岩盤は割れ目の影響により、地震波伝播速度と原位置試験による波動伝播速度には差異があり、その違いの程度は割れ目の量によって異なることが明らかになった。以下に、本研究で得られた主要な成果をまとめる。

(1) 板たたき法、サスペンション法、弾性波探査による V_p (以下弾性波探査等による V_p と呼ぶ)は、どの方法においても概ね一致する。これは、これらの試験法により計測される波動の伝播経路は、割れ目を迂回した基質部であり、硬質岩盤の基質部には必ずみ速度や周波数の依存性がないためと考えられる。

(2) 弾性波探査等による V_p の岩盤の基質部である岩石コアの超音波法による V_p に対する比が小さい程、割れ目が多い岩盤である。この比の大きさとボーリングコアのRQDの大小は、サイトが異なるにもかかわらず良好な対応を示した。このことは、岩石コアの V_s (超音波法による V_p と実測したポアソン比より等方弾性体の波動論の関係式を用いて求めた値)と、板たたき法やサスペンション法による V_s の比に対しても同様であった(図-9(a))。従ってこれらの比により、対象とするサイトの割れ目の多少の程度を知ることができる。

なお、岩石コアと弾性波探査等による V_p の比と割れ目の量の関係は、岩盤ブロック(図-7(a))やモデル岩盤(図-8(a))での、基質部の V_p と超音波法による V_p の比と割れ目の量の関係に、よく似たものであった。

(3) 弾性波探査等の波動は、基質部を伝播する波動であり、従って、求められる波動伝播速度に対し、割れ目の量が大きな影響要因である。一方、地震波の波動は、割れ目を含んだ岩盤全体における波動であるため、求められる波動伝播速度は、割れ目の量のみならず、

割れ目の方向や開口幅等、割れ目の状態の影響も受ける。このため、弾性波探査等と地震波による波動伝播速度に違い(図-9(a))が生じていると考えられる。

(4) 地震波と弾性波探査等による V_p の関係は、割れ目が非常に少ない岩盤(G, H地点)では、両者の V_p はほぼ一致する。しかし一般的には、岩盤の割れ目の多少により大きく異なり(I, J地点)、割れ目が多くなると(N地点)またその差が小さくなる(図-9(b))。従って、一般に弾性波探査等より求める V_p を、P波の地震波伝播速度として用いることはできない。

なお、地震波と弾性波探査等による V_p の比と割れ目の量の関係は、岩盤ブロック(図-7(b))やモデル岩盤(図-8(b))での、動的圧縮試験と超音波法による V_p の比と割れ目の量の関係に、よく似たものであった。

(5) 地震波と板たたき法やサスペンション法による V_s は、割れ目が非常に少ない岩盤(G, H地点)では一致する。さらに地震波と弾性波探査等による V_p に差異がある地点(J, N地点)でも、 V_s は一致する。ただし地震波と弾性波探査等による V_p に最も大きな差がある地点(I地点)では、地震波とサスペンション法や板たたき法による V_s とは、差が見られる。しかしその程度は、地震波と弾性波探査等による V_p との差に比べて小さい(図-9(b))。地震波と弾性波探査等による波動伝播速度の差異に割れ目が及ぼす影響は、S波の方がP波よりも小さい。

(6) 本研究で対象としたサイト岩盤の地震波伝播速度の V_p と V_s の比は、 $V_p/V_s = 1.3 \sim 2.3$ で、割れ目が非常に少ない岩盤(G, H地点)や、割れ目が多い岩盤(N地点)の V_p/V_s が大きく、その中間の割れ目の量の岩盤(I, J地点)では、 V_p/V_s が小さかった(図-9)。このように、地点により V_p/V_s にかなりの違いが生じている。これは、岩盤には割れ目が存在し、割れ目の量、割れ目の方向と振動方向の関係などにより、S波とP波では、その波動伝播速度に及ぼす割れ目の影響の程度が、それぞれ異なるためと考えられる。

本研究では、7地点の硬質岩盤サイトの地震波伝播速度を求め、原位置試験による波動伝播速度との比較を行った。しかし、硬質岩盤を対象に地震波伝播速度が算出された例は、非常に少ない。今後より多くのサイトに対し、本研究で行ったようなデータの比較を行うとともにその蓄積がなされ、割れ目を有する硬質岩盤の、地震波や原位置試験による波動伝播速度についてより明確にされることが望まれる。

参考文献

- 1) 上田稔, 奥田宏明, 塩尻弘雄, 田村重四郎: アーチダムの起振実験シミュレーション, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.203-212, 1994.
- 2) 恒川和久, 上田稔, 近藤寛通, 田村重四郎, 塩尻弘雄: アーチダムの起振実験で実測した動水圧のシミュレーション, 第23回地震工学研究発表会講演概要, pp.513-516, 1995.
- 3) 上田稔, 近藤寛通, 恒川和久: アーチダムの弱地震応答シミュレーションと岩盤物性の設定について, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第1部(B), pp.1664-1665, 1995.
- 4) 武村雅之, 池浦友則他: 堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第446号, pp.1-11, 1993.
- 5) 高橋克也, 武村雅之他: 鉛直アレー観測記録を用いた2観測点の地震波の伝播特性(その17)上下動の生成について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.391-392, 1991.
- 6) 栗田哲, 和泉正哲他: 鉛直アレー観測記録を用いた2観測点の地震波の伝播特性(その1)相互相関係数に基づく時間遅れ構造, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.411-412, 1986.
- 7) 岩下敬三, 和泉正哲他: 鉛直アレー観測記録を用いた2観測点の地震波の伝播特性(その2)クロススペクトルの位相特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.413-414, 1986.
- 8) (財)震災予防協会: 強震動アレー観測記録データベース解説資料集, pp.B-320-51-72, 1992.
- 9) 嶋悦三, 太田外気晴他: 鉛直アレー地震観測による地震動特性に関する研究(その3)地盤の減衰調査, 日本建築学会梗概集, pp.641-642, 1983.
- 10) 飯塚節夫, 太田外気晴, 足立憲彦, 高橋克也他: 富岡1,000m地震観測孔における検層結果, 物理探査第39巻第2号, pp.79-94, 1986.
- 11) 佐藤正俊, 上田稔, 長谷部宣男, 梅原秀哲: ダムコンクリートの地震時の動弾性係数に関する研究, 土木学会論文集, No.564/V-35, 1997.
- 12) 浅野浩史, 長谷部宣男, 佐藤正俊, 上田稔, 近藤寛通: 硬質岩盤の弾性係数の振幅レベル依存性について, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第3部(A), pp.810-811, 1996.
- 13) 佐藤正俊, 上田稔, 長谷部宣男, 近藤寛通: 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, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.75-87, 1997.
- 14) 土質工学会編: 岩の調査と試験, pp.388-395, 1989.
- 15) 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.
- 16) 土木学会編: 土木技術者のための岩盤力学, 2章, pp.59, 1966.
- 17) 土質工学会編: 岩の工学的性質と設計・施工への応用, pp.196-199, 1974.

18) Franklin, J.A., Dusseault, M.B. : *Rock Engineering*, p.296, 1989.

19) 土木学会：原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針—解説と設計への適用—, pp.11-12, 1983.

(1996. 4.10 受付)

COMPARISON AMONG WAVE VELOCITIES FROM SEISMIC OBSERVATION WAVES AND FIELD TESTS FOR HARD ROCK MASS

Masatoshi SATO, Minoru UEDA, Norio HASEBE and Hiromichi KONDO

Seismic wave velocities of hard rock mass are very important property because they influence earthquake responses of dams and underground caves. Therefore several types of seismic prospecting have been carried out to obtain wave velocities. In this study, seismic wave velocities are evaluated from data of observed seismic waves and are compared with wave velocities obtained from field tests for hard rock mass with cracks. The differences are found among them and the reasons of the differences are investigated from the point of the density of cracks in the hard rock mass.