

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

中部電力(株)電力技術研究所 正会員○佐藤 正俊・上田 稔・近藤 寛通
名古屋工業大学 正会員 長谷部 宣男

1. まえがき

ダム等岩盤上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。この解析において岩盤の波動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 V_p （P波速度）を求める試験として弾性波探査、横坑やボーリング孔による速度検層等が実施されている。しかし、これらの試験から得られる値と実地震時の波動伝播速度の関係については必ずしも明確ではなく、解析に用いるべき波動伝播速度の設定等に大きな問題を残している。そこで、硬質岩盤を対象に地震観測記録から波動伝播速度 V_p を算出し、各種原位置試験結果との比較を行った。さらに岩盤の割れ目を模擬したモデル岩盤供試体を用いて、載荷試験や共振法、超音波法試験を実施し、その結果等から各種原位置試験結果の相違について考察を行った。

2. 観測記録による地震波伝播速度の算出

対象とする地点は、アーチダムサイト（I, J）と中空重力ダムサイト（K）である。地質はそれぞれ、チャート（古生代）、流紋岩（中生代）及び硬砂岩と粘板岩（古生代）であり、かなり堅硬な岩盤である。図-1に岩盤内の地震計設置位置（A, Bの2ヶ所）を示す。地震波がサイトに対してほぼ鉛直上方に伝播していると考えられる、震源距離が長い地震を解析対象地震とした。サイトごとに3～5波の地震を対象にし、それらは全て弱震であり、最大加速度の範囲は1～7gal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 とした。図-1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、 $V_p = \Delta H / \Delta T$ で算出した。また、A, B 2点の記録の相互相関係数を求め、そのピークの時間遅れ ΔT を用いて上式より速度を求めたが、概ね同様の値であった。

3. 地震波伝播速度と各種原位置試験結果

算出した地震波伝播速度 V_p を、各種原位置試験による波動伝播速度 V_p と比較して図-2に示す。なお各地点ごとの各種原位置試験の概要を表-1に、その説明図を図-3に示す。図-2では得られた値の範囲を四角形で囲んで示している。平均値で比較すると、地震波伝播速度 V_p に対し各種原位置試験による波動伝播速度 V_p は、1.3～2.4倍程度とかなり大きい。

4. モデル岩盤供試体試験

硬質岩盤の地震波伝播速度 V_p と各種原位置試験による波動伝播速度 V_p がかなり異なる理由について考察するため、岩盤の割れ目を模擬したモデル岩盤供試体を作製し、載荷試験、共振法、超音波法試験を行い、試験結果を比較することとした。

図-4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、I, J地点のボーリングコアを用いた圧縮試験より得られた弾性係数40万kgf/cm²程度とした。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、弾性係数がI, J地点の原位置岩盤の接線弾性係数（数万～15万kgf/cm²程度）となるようにした、割れ目の少ない供試体（供試体B）と、多い供試体（供試体A）（図-4）、割れ目のない供試体（供試体C）の3種類をそれぞれ3体作製した。静的圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線から接線弾性係数Eを求め、波動伝播速度 V_p を $V_p = \sqrt{E / \rho \cdot \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$ で算出した。ポアソン比 ν と密度 ρ は各供試体の実測値を用いた。

各試験法より得られた V_p と周波数の関係を図-5に示す。載荷試験は単調載荷であり、周波数は限りなくゼロに近い場合に相当する。割れ目のないC供試体では V_p は試験方法にかかわらず一定である。これに対し、割れ目を有するA, B供試体は、載荷試験、共振法はほぼ同程度であり、超音波法は速い結果となっている。

5. 地震波伝播速度と各種原位置試験結果の差異に関する考察

モデル岩盤供試体では、載荷試験と共振法による結果は周波数（共振法の最高周波数は 15kHz 程度）によらずほぼ一定である。また超音波法による結果も、平均的には周波数による差異はほとんどない。よって、地震観測記録や原位置各種試験結果から求めた波動伝播速度 V_p の差異は、周波数依存性によるものではないと考えられる。

地震波はダムサイト全体を振動させながら鉛直上方に伝播する。これに対し、坑（孔）間（壁）速度検層、屈折法弾性波探査は波動の発振源及び受信位置が点である。同様なことがモデル岩盤供試体試験においても言える。載荷試験は供試体全体が一様に圧縮変形している。共振法では共振時には、供試体が全体振動している。これに対し、超音波法試験は原位置における坑（孔）間（壁）速度検層や屈折法弾性波探査等と同じく、発信源及び受信位置が点である。上記より推察するに、割れ目を有する不連続体において、波動伝播が全体的な場合は、波動伝播は割れ目の影響を平均的に受けたものとなる。しかし、発振源及び受信位置が点である場合、波動伝播は部分的であり、割れ目の影響の受け方が、波動伝播が全体的な場合と異なり、速度の速い部分を伝播するものと考えられる。このため、地震波伝播速度 V_p に対し、ダウンホール法、坑（孔）間（壁）速度検層や屈折法弾性波探査結果の伝播速度はかなり速いと考えられる。

不均質な割れ目を有する硬質岩盤では、地震波伝播速度 V_p を求めるためには、鉛直方向に離れた位置に地震計を設置して地震観測を行い、その観測記録より算出する必要がある。

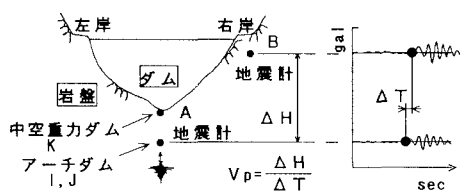


図-1 地震計設置位置と地震波伝播速度の算出方法（主要動のゼロクロス位置による方法）

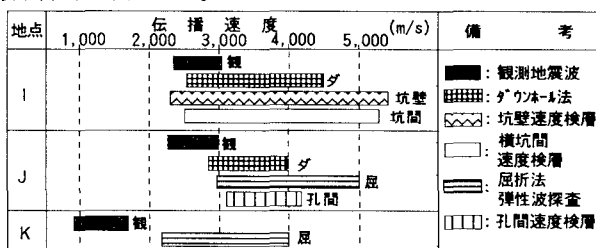


図-2 地震波伝播速度 V_p と各種原位置試験結果との比較

表-1 各種原位置試験の概要

地点	観測地震波	ダウホール法	坑(孔)間速度検層	坑壁速度検層	屈折法弾性波探査
I	5	鉛直ボーリング孔*1) 1	調査機坑間 11本	調査機坑壁 8本	
J	3	鉛直ボーリング孔*2) 1	鉛直ボーリング孔間 2本		8測線
K	3				21測線

*1) サスペンション法 *2) 板たたき法

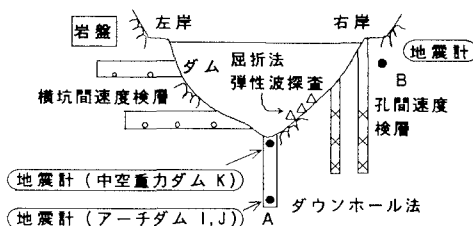
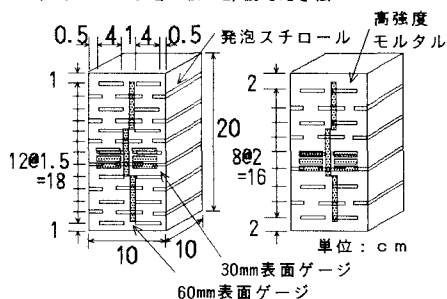


図-3 調査概要説明図



(a) 供試体 A (発泡スチロール量多) (b) 供試体 B (発泡スチロール量少)

図-4 モデル岩盤供試体

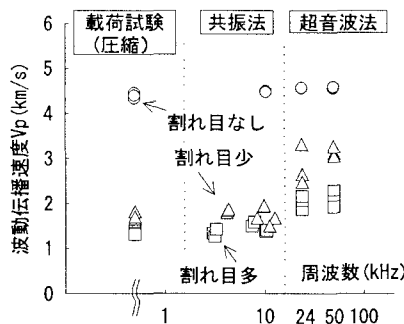


図-5 モデル岩盤供試体の各種試験の V_p と周波数の関係