

中部電力 電力技術研究所 正会員 ○上田 稔・近藤 寛通
 中電工事 技術コンサルタント部 正会員 恒川 和久

1. まえがき アーチダムの地震時の安全性をより合理的に評価するには、ダムの動的挙動を正確に把握する必要がある。ダムの動的挙動が、解析により十分な信頼度をもって把握できるかは、実ダムに対して、実験や実地震に対する応答シミュレーションを行って確認することが必要である。しかしダムの実地震応答シミュレーションは、現状では弱震レベルでも成功例は極めてまれである。著者らは先にAアーチダムの起振実験¹⁾や弱地震²⁾に対する応答のシミュレーションを試みる中で、実測値に基づく詳細な検討を行い、良好なシミュレーション結果を得るとともに、用いるべき解析モデル、物性値の評価について示した^{1), 2)}。本研究はこれに引き続き、信頼度の高いアーチダムの地震応答解析に役立てるため、別のBアーチダムを対象に弱地震の応答シミュレーションを試み、岩盤物性の設定について考察したものである。なお既にBアーチダムの起振実験シミュレーションについては良好な結果を得ている³⁾。

2. 解析の手法と概要 用いた解析コードについては、文献(1)を参照されたい。図-1に、ダム(C,D)及びダムサイト岩盤(A,B)での地震計の設置位置を示す。解析では、C点の観測記録をもとにダムの記録(D点)のシミュレーションを試みる。C点の記録には、ダムの影響がかなりあると考えられる。そこでまず伝達関数をもとに、C点の記録を再現できる岩盤境界への入力地震波を求める。次にそれに対しダムの応答(D点)を求め、観測記録との比較を行う。

3. 解析モデルと物性値 解析モデルを図-2に示す。メッシュサイズは10Hzの波に対してダム、岩盤、貯水部とも10分割程度の大きさである。物性値を表-1に示す。ダムコンクリートのVsは、地震時のひずみ速度の範囲ではひずみ速度依存性はそれ程大きくなく、静的圧縮試験の弾性係数より算出すれば、ほぼ妥当な値が得られる⁴⁾。表-1の値は静的圧縮試験（材令2年）の弾性係数より求めた値である。この値は後述する岩盤のVsを求めた方法で、図-2のC,D点の観測地震波より求めた値とほぼ一致した。貯水位は地震時の水位である。

4. 岩盤の解析条件 地震動は、震源距離が72km、最大加速度はダム基部岩盤で4gal程度、ダム天端で45gal程度である。地震波の伝播速度について観測記録より検討した。岩盤のVsを、観測した水平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、 $V_s = \Delta H / \Delta T$ で算出した（図-1）。得られたVsは1700m/sである。一方、鉛直動に対して同様に求めた値は2700m/sであった。岩盤境界における水平動2成分をS波、鉛直動はP波とみなし、鉛直方向にそれぞれの波動伝播速度($V_s = 1700\text{m/s}$, $V_p = 2700\text{m/s}$)による空間的位相差をもって岩盤境界に入力するものとする。岩盤は軸対称異方性体としてモデル化する。その理由は後述する。岩盤の鉛直面内せん断剛性は、起振実験シミュレーション解析³⁾でダムの固有周波数がとらえられた値で、 $G_{zr} = 7.4\text{万kgf/cm}^2$ である。この値は、上記Vsを用いて $G_{zr} = \rho V_s^2$ より求めた値でもある。岩盤を等方弾性体とした場合 G_{zr} に対してEは17万kgf/cm²程度となるが、その場合の解析結果は良好なものでなかった（図-4）。そこで軸方向剛性を、ダムサイト横坑内での平板載荷試験より得

表-1 物性値

	波動伝播速度 (m/sec)	剛性 (kgf/cm ²)	動ポアソン比 ν_d	単位体積重量 (t/m ³)
ダム	$V_s = 2,460$	$E = 370,000$	0.20	2.5
岩盤	$V_s = 1,700$ $V_p = 2,700$	$E = E_r = E_z = 85,000$ $G_{zr} = 74,000$ $G_{rr} = 31,000$	$\nu_{zr} = \nu_{rz} = 0.40$ $\nu_{rr} = 0.37$	2.5
貯水池	水中音速(m/sec)		1,400	
	インピーダンス比		4.7(地山), 1.0(貯水)	

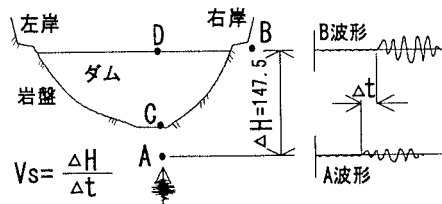


図-1 地震計設置位置と観測地震波からのVsの算定法

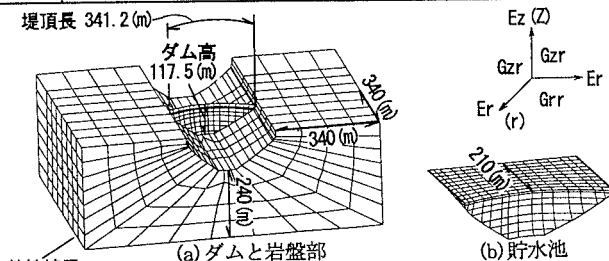


図-2 解析モデル

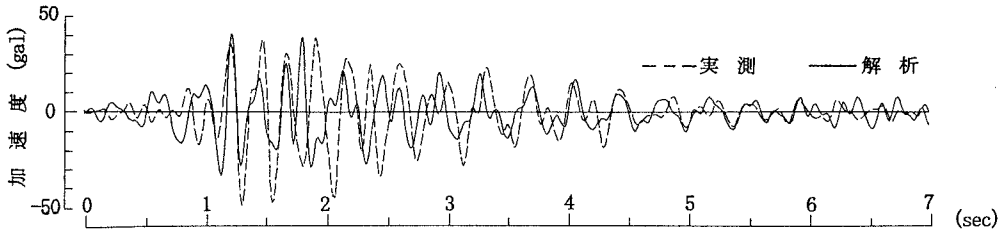


図-3 ダム(D点)の加速度時刻歴波形の実測と解析との比較(岩盤を軸対称異方性体とした場合)

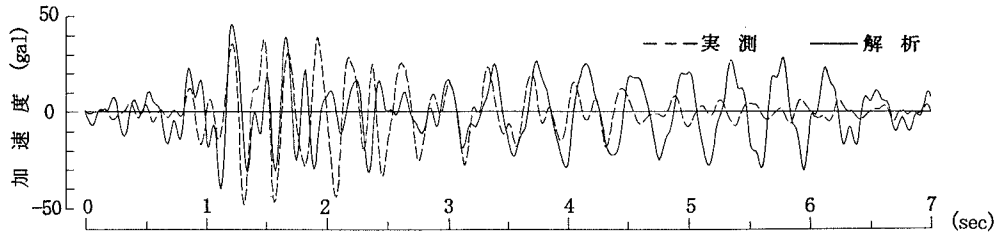


図-4 ダム(D点)の加速度時刻歴波形の実測と解析との比較(岩盤を等方性体とした場合)

られた接線弾性係数(以下 E_t と略す)を踏まえて設定することとした。しかし地震時の岩盤に対して用いるべき剛性は、載荷、除荷のくり返しによる動的弾性係数である。これに対し E_t は載荷時の静的弾性係数であること、平板載荷試験の除荷時には、載荷時に比べてかなり急勾配の除荷曲線が得られる点を考慮して、軸方向剛性を E_t より大きい範囲でいくつか変えて解析した。ポアソン比は剛性と波動伝播速度が弾性体としての関係を満足するように与えた。最も良好な結果を得たのが、軸方向剛性を E_t の1.3倍程度である $E=8.5$ 万 kgf/cm^2 とした場合であった。上述のことは先のAアーチダムの場合²⁾も同様であった。

5. 解析結果と考察 D点の上下流方向の加速度時刻歴波形を、岩盤を軸対称異方性体とした場合を図-3に、等方弾性体とした場合を図-4に実測と解析を対比して示す。図-4に比べ図-3の方が良好な結果である。図-3の概ね良好な結果が得られたときの岩盤物性のうち、 V_s 、 V_p と G_{zr} は、通常硬質岩盤で設定される0.25程度のポアソン比を仮定し、等方弾性体に対し弾性波動論により関係づけられる値に概ねなっている。しかし E はそれらに比べてかなり小さい。以下にこの理由について考察する。 V_s 、 V_p は、ダムから離れた岩盤境界に入力される地震波の伝播速度である。岩盤中の観測点A、Bはダムから50m以上離れており、求めた V_s 、 V_p はダムから離れた位置での岩盤の波動伝播速度と考えられる。ダム着岩部付近岩盤には、ダム自重や水圧等による応力が生じる。100m級のアーチダムの場合、ダム下流端の鉛直方向応力は、最大で60 kgf/cm^2 程度とかなり大きい。地震時にダム着岩部付近岩盤には、上記静的荷重による応力を中心値として、振動レベルに応じた応力が発生する。著者らの実験によれば、岩盤の剛性は載荷応力の中心値と振幅レベルによりかなり異なる⁵⁾。よってより厳密には、岩盤の位置ごとに設定すべき剛性は異なる。しかし解析では岩盤を均質体としている。そこで重要なのは、ダムの応答に大きく影響するダム着岩部付近岩盤の剛性である。このダム着岩部付近岩盤と、位相速度 V_p が設定されるダムから離れた岩盤境界では、応力状態がかなり異なり、上記のような物性の設定が必要であったと判断される。本研究では上記のような物性設定を可能とするため、物性設定の自由度が高い、軸対象異方性体として岩盤をモデル化した。一方 G_{zr} は、ダムの固有周波数がとらえられていることから、 $G_{zr} = \rho V_s^2$ で求めた G_{zr} が、ダム着岩部付近岩盤の平均的なせん断剛性を与えていると判断される。地震時には水平面内にせん断応力が発生する。この水平面内にダム自重や水圧等により発生するダム着岩部付近岩盤のせん断応力は、上記鉛直方向応力と異なりかなり小さく、位相速度 V_s が設定される岩盤境界での値との差異も小さい。このため $G_{zr} = \rho V_s^2$ により、ダム着岩部付近岩盤に与えるべき妥当なせん断剛性が得られたと考えられる。以上、アーチダムの地震応答シミュレーションでは、岩盤物性を的確に設定することが重要である。今後は別の実地震に対するシミュレーションが期待される。また強震に対する岩盤の剛性や波動伝播速度については、今後の重要な課題である。

参考文献 1)上田稔・奥田宏明他：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，No501/1-29，pp. 203-212，1994。 2)上田稔・塩尻弘雄・恒川和久他：アーチダムの弱地震応答シミュレーション，土木学会年講概要集，pp. 872-873，1994。 3)上田稔・恒川和久他：アーチダム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，1995。 4)佐藤正俊・上田稔他：コンクリートダムの地震時波動伝播速度について，土木学会年講概要集，pp. 318-319，1993。 5)佐藤正俊・上田稔他：硬質岩盤の動的剛性の応力振幅依存性について，本年度土木学会年講概要集第3部門