

# I-437 アーチダムの弱地震応答シミュレーション

中部電力 電力技術研究所 正会員 ○上田 稔・奥田 宏明  
 日本大学 理工学部 正会員 塩尻 弘雄  
 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については、現状では弱地震レベルでも成功例は極めてまれである。この原因としては、渓谷における巨大なダムへの入力地震動の設定が困難なことから、ダム-岩盤-貯水の三次元連成問題で解析が大規模であり、解析モデルや動的物性など解析条件がかなり複雑であるためと考えられる。著者らは先に起振実験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<sup>1)・2)</sup>。本研究はこの成果に基づき、次のステップとして、弱地震に対するアーチダムの地震応答シミュレーションを試みたものである。

**2. 解析の手法と概要** 用いた解析コードは、既開発の解析コードTEADHI<sup>3)</sup>が、岩盤境界を固定とし、ダム-岩盤部の振動モードの周波数応答を貯水との相互作用を考慮して求め、重ね合わせる方法であった点を改め、粘性境界<sup>4)</sup>を導入したものである。貯水は圧縮性を考慮している。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。観測記録は10Hz以上をカットしたものを対象とする。メッシュサイズは10Hzの波に対してダムは10分割以上、岩盤部、貯水部は8~9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、地震時のダム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<sup>5)</sup>。表-1の値は静的圧縮試験（材令360日）の弾性係数より求めた値である。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ダムコンクリートのVsを求めたが、この値は上記の値とほぼ一致した。貯水池のインピーダンス比とレーリー減衰の比例定数は、起振実験のシミュレーション解析<sup>1)</sup>より得られた値である。貯水位は地震時の水位である。

**4. 地震動に関する検討と岩盤の解析条件** 地震動は、震源距離が70km、最大加速度はダム基部岩盤で2gal程度、ダム天端付近で7gal程度である。地震波の伝播

速度や到来方向について観測記録より検討した。岩盤のVsを、観測した水平動の主要動の立ち上がりのゼロクロスする時刻の時間差 $\Delta T$ と観測点間の鉛直距離 $\Delta H$ より、 $V_s = \Delta H / \Delta T$ で算出した（図-1）。得られたVsは1600m/secである。この値はA点の地震計を設置した鉛直ボーリング孔(50m)で実施したS波検層による値とほぼ一致した。このことは地震波が鉛直

表-1 物 性 値

|       | 波動伝播速度<br>(m/sec) | 剛 性<br>(t/m <sup>2</sup> )                     | 動ポアソン比<br>$\nu_d$ | 単位体積重量<br>$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> ) |
|-------|-------------------|------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------|
| ダ ム   | $V_s=2460$        | $E=3.7 \times 10^6$                            | 0.20              | 2.50                                   |
| 岩 盤   | 水平動<br>$V_s=1600$ | $G=6.5 \times 10^5$<br>( $E=1.6 \times 10^6$ ) | 0.25              | 2.50                                   |
|       | 鉛直動<br>$V_p=2500$ | $E=7.5 \times 10^5$                            | 0.40              | 2.50                                   |
| 貯 水 池 | 水中音速 (m/sec)      |                                                | 1400              |                                        |
|       | インピーダンス比 $\beta$  |                                                | 側 面               | 5.0                                    |
|       |                   |                                                | 上 流 面             | 1.0                                    |

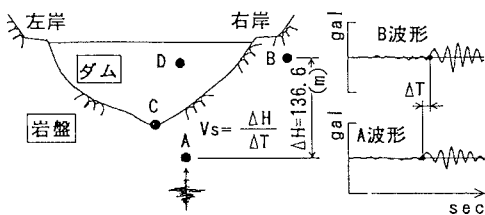


図-1 地震計設置位置と  
観測地震波からのVsの算定法

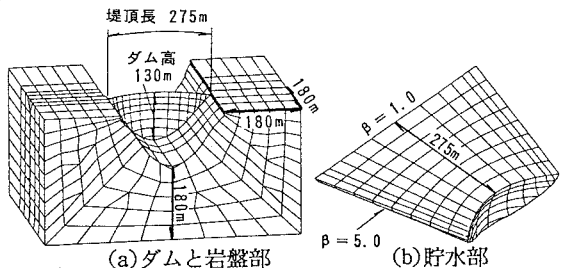


図-2 解析モデル

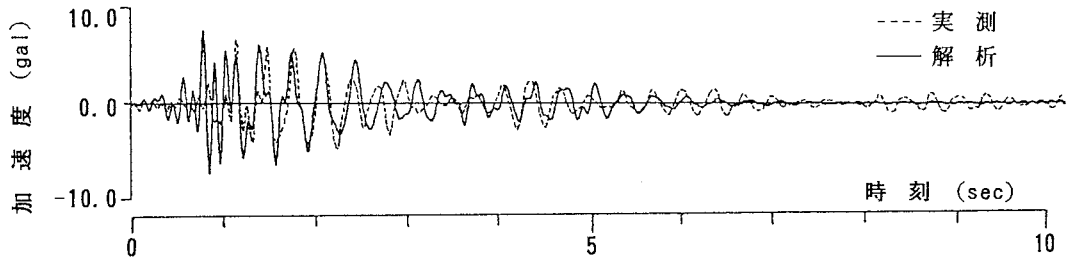


図-3 ダム(D点)の加速度時刻歴の実測と解析の比較

上方に伝播していることを示す。さらにA, B 2点の水平動の記録をフーリエ変換し、パワーの卓越する周波数に対して、2点間の位相差から求めた $V_s$ は上記値と一致した。一方、鉛直動に対して同様に2点間の位相差から求めた値は2500m/sであった。以上の検討結果を踏まえて、岩盤の解析条件を設定した。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( $V_s=1600\text{m/s}$ ,  $V_p=2500\text{m/s}$ )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。岩盤の物性は、水平動に対しては岩盤のせん断剛性を、起振実験シミュレーション

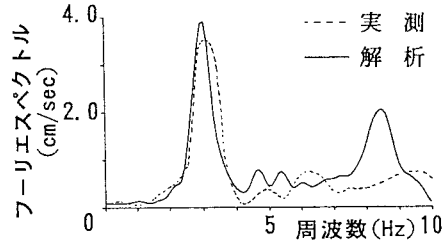


図-4 ダム(D点)の加速度フーリエスペクトルの実測と解析の比較

解析<sup>2)</sup>においてダムの固有周波数がとらえられた値として、 $G=6.5\text{万kg/cm}^2$  ( $E=16\text{万kg/cm}^2$ ) とする。鉛直方向に伝播するP波によるダムの応答には、岩盤の鉛直方向の剛性が大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで鉛直動に対する解析の剛性を、ダムサイト横坑内で、鉛直方向载荷の平板载荷試験より得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、载荷、除荷のくり返しによる動的弾性係数である。これに対し  $E_t$  は载荷時の静的弾性係数であること、平板载荷試験の除荷時には、载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、鉛直動に対する剛性を、 $E_t$  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、鉛直動に対する剛性を  $E_t$  の1.3倍程度である  $E=7.5\text{万kg/cm}^2$  とした場合であった。

**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図-3に、加速度フーリエスペクトルを図-4に示す。時刻歴波形は0~1secあたりを除き、振幅の大きさ、ゼロクロスする位置ともほぼ実測と解析は良好な一致を示している。1secあたりに実測に比べて大きな値が得られ、これがスペクトルの8~9Hzであいが良くないのに対応していると思われる。この点は今後別の地震に対するシミュレーションを試みる中での課題としたい。割れ目を有する岩盤の厳密なモデル化は容易ではない。よって岩盤を等方弾性体とするが、水平動と鉛直動それぞれに対しダムの挙動に大きな影響を与える物性値を、現場の観測記録や試験結果と起振実験シミュレーション解析に基づいた値でとらえたため、良好なシミュレーション結果が得られたと考えられる。剛性あるいは波動伝播速度の一方から、弾性波動論に基づきポアソン比を与えてもう一方の値を設定した解析も行ったが、ダムの応答は正確にとらえられなかった。剛性と波動伝播速度の両方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、別ダムに対するシミュレーションが期待される。また一般の地震応答解析におけ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・恒川和久他：アーチダムの起振実験シミュレーションと岩盤貯水との連成解析モデルの構築，地震工学研究発表会講演概要集，pp. 567-570, 1993. 2) 上田稔・恒川和久他：アーチダムの三次元起振実験シミュレーション，土木学会年次学術講演概要集，pp. 320-321, 1993. 3) 塩尻弘雄：水と岩盤との相互作用を考慮した構造物の地震応答解析法の研究，電力中央研究所報告，1987. 4) 三浦房紀・沖中宏志：仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物—地盤系の動的解析手法，土木学会論文集，No. 404/I-11, pp. 395-403, 1989. 5) 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，土木学会年次学術講演概要集，pp. 318-319, 1993.