

アーチダムの動的特性に見られる 振動レベル依存性とジョイント部の影響

豊田幸宏¹・上田稔²・恒川和久³・塩尻弘雄⁴

¹正会員 工修 電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²正会員 工博 中部電力株式会社 電力技術研究所 (〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山20-1)

³正会員 工修 株式会社シーテック 技術コンサルタント部 (〒455-0054 名古屋市港区遠若町3-7-1)

⁴正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

ダムの固有振動数や減衰定数は、ダムの地震応答に及ぼす重要な値である。既設アーチダムを対象に、ジョイント部における非線形挙動ならびに貯水と岩盤の相互作用を考慮できる3次元有限要素モデルを用いて、ダムの動的特性に見られる振動レベル依存性を数値解析的に把握し、比較的強振動時の減衰定数を具体的に示す。貯水位とダムの固有振動数ならびに減衰定数の関係に着目し、比較的強振動時には弱振動時に比べて、固有振動数が低振動数側になる場合のあることや、ダムの減衰定数が増加する場合があります、これらがジョイント部における非線形挙動の影響によるものであることを述べる。

Key Words : arch dam, resonant frequency, damping factor, water level, acceleration level, contraction joint

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、レベル II 相当の地震動に対する既設ダムの安全性に関する議論が高まっている¹⁾。既設ダムの合理的な耐震性評価手法を確立するためには、地震時におけるダムの動的挙動を明らかにすることが重要である。このため、地震観測や起振実験等の現場計測や、有限要素モデルを用いた線形動的応答解析等、従来から数多くの実験的あるいは数値解析的検討がなされてきた²⁾。著者らは、既設のコンクリートダムを対象に、計測値との詳細な比較・検討に基づき、信頼度の高いシミュレーション解析を行う際に用いるべきダム、岩盤ならびに貯水部のモデリング手法について明らかにしてきた^{3)~5)}。また、地震観測や起振実験等の計測記録に基づき、アーチダムの固有振動数や減衰定数が、ダムの振動レベルの大きさによって変化する傾向にあることを把握し、その現象が、ダムの横継目（以下、ジョイントと記す）部における非線形挙動による可能性のあることを指摘した⁶⁾。しかしながら、解析上重要なパラメータであるダムや岩盤の減衰定数に関する検討は、著者らの検討以外は^{6)~8)}、起振実験や弱震時の記録に基づくものがほとんどであり、レベル II 対応の地震応答解析において用いるべき減衰定数については、ダムサイトにおける強震記録の事例も極めて乏しいことから、未だ明確でない。

本報は、既設アーチダムを対象に、ジョイント部の非線形挙動ならびに貯水と岩盤の相互作用を考慮できる3次元有限要素モデルを用いて、ダムの固有振動数や減衰定数に見られる振動レベル依存性を数

値解析的に把握し、比較的強振動時の減衰定数を示したものである。さらに、本報では、振動レベルをパラメータとした貯水位とダムの固有振動数ならびに減衰定数の関係に着目し、数値解析結果に基づき、ジョイント部における非線形挙動がダムの動的特性に及ぼす影響についても言及する。

2. ジョイント部の非線形挙動を考慮したダムの動的解析手法の概要

(1) 解析対象

解析対象は、図-1に示すIアーチダム（ダム高107.5m、堤頂部341.2m、堤体積40万m³、1993年竣工）である。同ダムでは、湛水開始後、貯水位の上昇に合わせて、図-1に示すごとく3つの貯水位にて、起振実験が実施されるとともに、現在に至るまで、地震観測が常時行われてきた。ここでは、常時満水位（以下、HWLと記す）を含む、いくつかの貯水位の状態をそれぞれ模擬した解析モデルを作成し、ダムの動的特性について検討した。

(2) 解析モデル

本解析モデルは、ダム、岩盤ならびに貯水の連成を考慮した3次元有限要素モデルである（図-2）。本解析モデルには、ジョイント部における非線形挙動を模擬するために、図-3に示すような非線形特性を有する3次元ジョイント要素が用いられている。本解析モデルは、ジョイント要素を除き、すべて線形弾性の有限要素から構成される。本解析モデルに

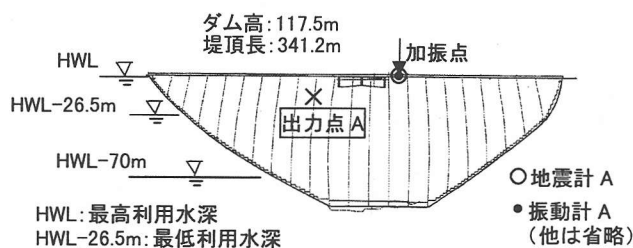


図-1 アーチダムの上流面展開図と貯水位

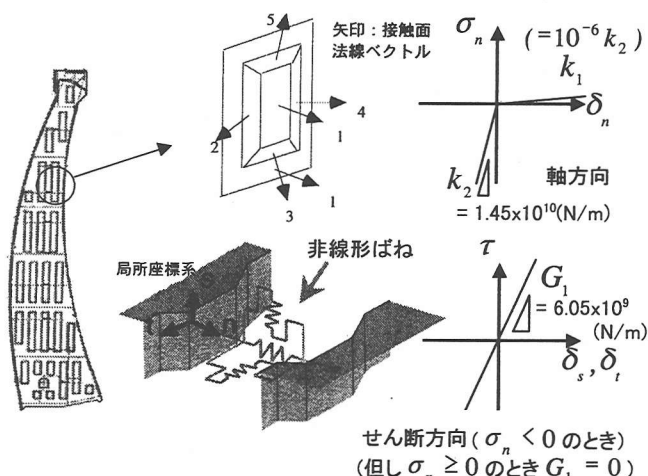


図-3 ジョイント部の解析モデル

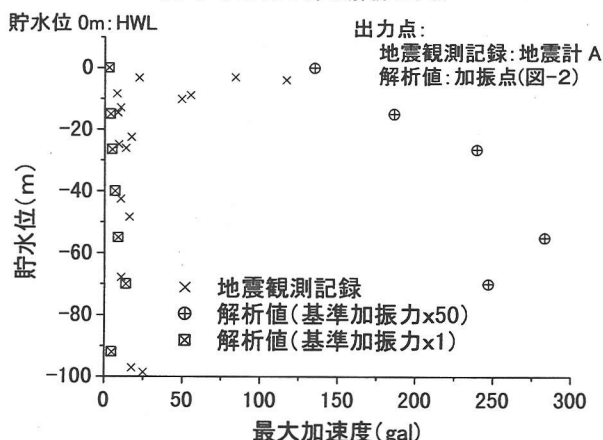


図-4 固有振動数を算出した地震観測記録等の最大加速度応答値とその時の貯水位

用いた物性値を表1にまとめて示す。

なお、本解析モデルによれば、貯水位がHWLやHWLから70m低い貯水位（以下、HWL-70mと記す）等の場合に実施された起振実験の結果を良好に再現できることは、既報⁹⁾にて確認されている。

(3) 解析方法

本解析では、起振実験における実際の加振点位置に相当するダム天端の節点に正弦波を入力し（加振方向は上下流方向のみ）、変位応答値が定常になるまで時刻歴応答解析（時間刻み幅：0.01秒）を実施した。入力波として用いた正弦波については、振動数を最小で0.01Hzの刻みで変えたものを複数作成した。今回は、起振実験の条件に相当する入力波を基準加振波（振幅200kN）として、その振幅を整数倍したものを用いて、解析を実施した。時刻歴応答解析より得られた各振動数における定常変位応答値から、

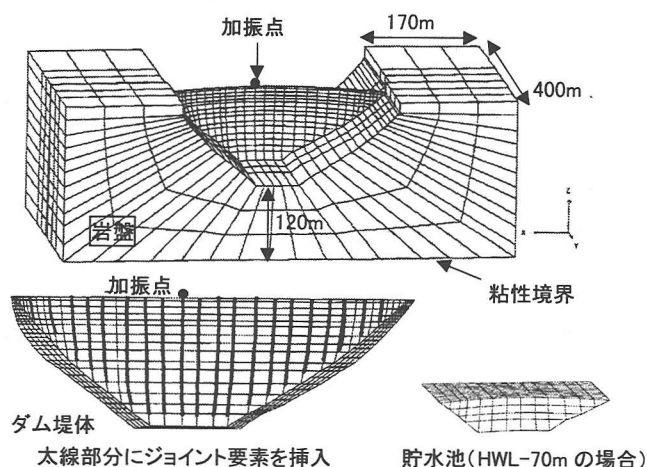


図-2 解析モデルのメッシュ分割図

表-1 解析に使用した物性値

	波動伝播速度 (m/sec)	動弾性係数 (GPa)	動ポアソン比	単位体積重量 (Kg/m ³)	減衰定数 (%)
ダム	2,460	37.24	0.20	2.5×10 ³	1.0
岩盤	1,700	18.03	0.25	2.5×10 ³	1.0
貯水池	水中音速 (m/sec)		1,400		
	インピーダンス比		5.3 (地山), 1.0 (貯水)		

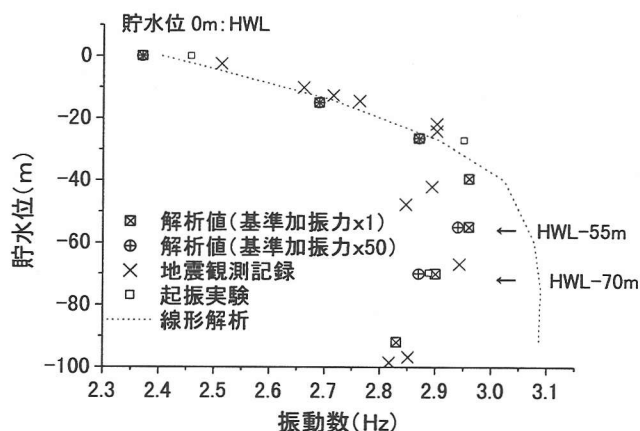


図-5 貯水位とダムの固有振動数の関係

変位共振曲線を作成し、その極大値を共振点と見なすことにより、ダムの固有振動数を同定した。

なお、本解析では、予め静的解析を実施し、貯水の静水圧により発生する初期応力を考慮したが、温度応力は考慮していない。また、建設工程からジョイントの開閉に関係するダム軸方向の応力には自重は影響しないため、それについても考慮していない。

3. 解析結果

(1) 貯水位と固有振動数の関係に見られる振動レベル依存性

図-4に、貯水位と、共振点における入力波の最大加速度応答値（変位応答値から換算した値）の関係を、図-5に貯水位と固有振動数の関係を示す。ここでは、対称1次モードを対象としているが、両

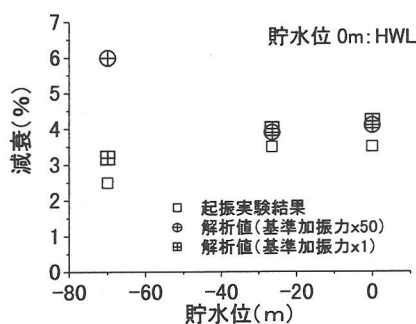


図-6 貯水位とダムの減衰定数の関係

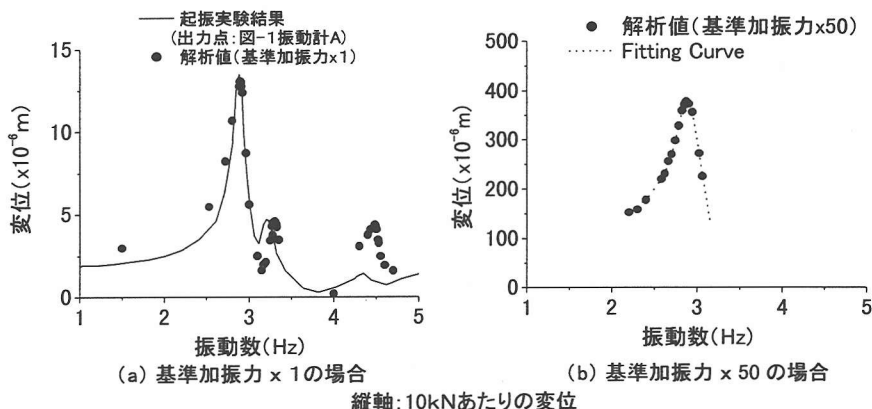


図-7 加振点位置の変位共振曲線の例(貯水位:HWL-70 の場合)

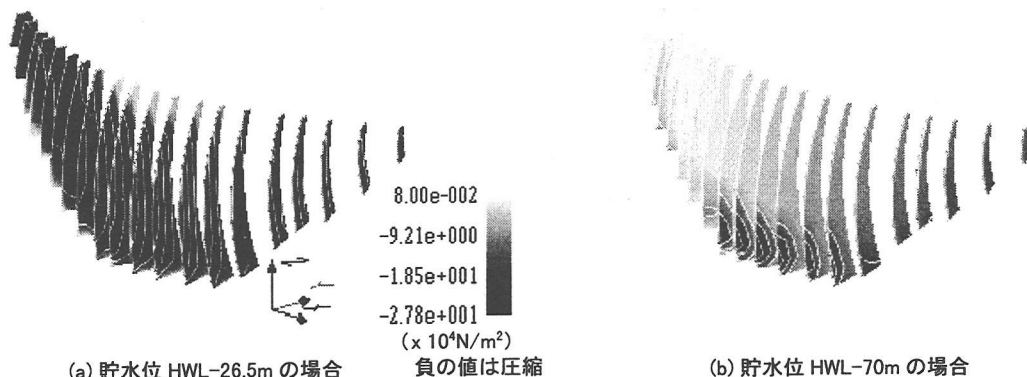


図-8 ジョイント部に発生したダム軸方向の応力コンター図(基準加振力×50 の場合)

者には、既報⁶⁾に示した計測結果や解析結果も併せて示す。同図によれば、貯水位がHWL、HWL-15mならびにHWL-26.5mでは、10gal程度の弱振動から、150～250gal程度(1gal=0.01m/sec²)の比較的強振動の場合に至るまで、固有振動数に変化は見られない。一方、HWL-55mやHWL-70mでは、250gal程度の比較的強振動の場合、固有振動数が、弱振動時に比べて低振動数側の値になっていることがわかる。今回の結果は、別のJアーチダムを対象とした著者らの実験的検討⁷⁾にて、ある貯水位以下になると、比較的強振動時(180gal程度)には弱振動時に比べ固有振動数が低振動数側になったとの結果と、定性的には、類似した結果が得られたと言える。

(2) 貯水位と減衰定数の関係に見られる振動レベル依存性

図-6に貯水位と減衰定数の関係を示す。同図の減衰定数は、解析から求めた変位共振曲線において(図-7)、対称1次モードに対応する共振峰にハーフパワー法を適用して算出した値である。図-6には、基準加振力の1倍とその50倍(以下、基準加振力×1、基準加振力×50と記す)の場合と併せて、起振実験より得られた変位共振曲線に基づき算出した減衰もプロットした。基準加振力×50の場合に着目してみると、貯水位がHWL、HWL-26.5mの時、減衰定数は、基準加振力×1の場合とほぼ同じ値であるが、貯水位がHWL-70mになると、6%程度に増加していることがわかる。HWL-70mでは、明らかに実験結果や基準加振力×1の場合よりも減衰は大きくなって

おり、ハーフパワー法を用いた算出の際の誤差とは考えられない。予め解析モデルに与えた減衰は1%であるから、振動レベルが大きくなったことによって、別の減衰効果が現れたと言える。この点も含め、本章で得られた結果に対して、次章にて考察を加えることにする。

4. ダムの動的特性に及ぼすジョイント部の状態変化の影響

(1) 貯水位が高い場合のジョイント部の状態変化

図-8(a)にジョイント部におけるダム軸方向の応力コンター図の例として、貯水位がHWL-26.5m、基準加振力×50の場合を示す。同図は、対称1次モードにて定常応答している状態で、加振点が上流側に最大変位したときの時間断面をとったものである。同図によれば、ほぼジョイント部全域において、ダム軸方向に圧縮力(図中の色の濃い部分)が作用していることがわかる。このことから判断すると、今回の振動レベルの範囲では、ダム軸方向の圧縮力の作用により、ジョイント部では、ほぼ全域が閉合した状態になり、振動レベルに違いはあってもダムは線形挙動を示し、固有振動数や減衰定数がほとんど変わらなかったと考えられる。貯水位がHWLやHWL-15mの場合でも、同様な理由によりダムの動的特性に振動レベル依存性が現れなかったものと考えられる。

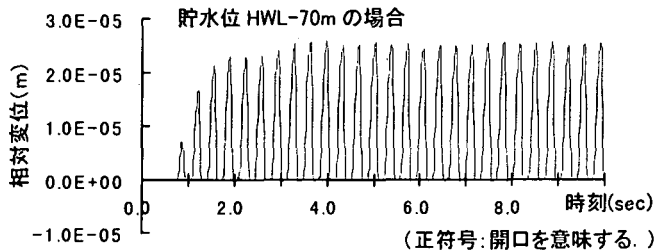


図-9 ジョイント部に発生したダム軸方向の相対変位の時刻歴波形(出力点 A: 図-1 参照)の例

(2) 貯水位が低い場合のジョイント部の状態変化

図-8 (b) に、貯水位が HWL-70m、基準加振力 $\times 50$ の場合の応力コンター図を、図-9 に、ジョイント部におけるダム軸方向の相対変位時刻歴応答波形の例を示す。図-8 (b) によれば、ジョイント部のほぼ全域亘って、圧縮力はほとんどゼロであることがわかる。解析結果の数値を見ると、引張力の作用している領域も認められ、このような状態変化は、弱振動時にも認められた⁹⁾。これが、前出の図-5において、ダムの固有振動数が、線形解析値よりも低振動数側となった要因であるが、引張力が作用する領域の範囲は、弱振動時の方が小さかった。

以上より次ぎのことが考えられる。即ち、今回の解析では、ダム天端の加速度応答値が 250gal 程度の比較的強振動時には、ダム軸方向の圧縮力が、ほぼゼロとなる領域が広範囲に生じ、それに伴い、ジョイント部に開口変位の生じる領域が発生する。このような状態変化が現れる範囲は、振動レベルの大きい方がより広範囲となり、その結果、ダム全体の等価剛性がより低下し、その結果、固有振動数が、比較的強振動時には、弱振動時に比べ低振動数側になったものと考えられる。

図-9 によれば、ジョイント部では、接触面の開口と閉口が繰り返されており、このことが振動エネルギーの消散を生じさせ、その結果、ダムの内部構造減衰を増加させるものと考えられる。比較的強振動時の方が、ジョイント部に開口変位の生じる範囲が広がるため、弱振動時に比べて、より大きな減衰をもたらしたと考えられる。但し、今回得られた 6% の減衰には、岩盤や貯水への逸散等の影響も含まれていると考えられるが、それぞれがどの程度寄与しているのかについては、今後の課題としたい。

ジョイント部における状態変化が現れはじめる貯水位や振動レベルは、ダムやジョイント部の構造形式やダムアバット沿いの岩盤の剛性等の違いにより、差違が生じると思われるが、上記のような状態変化は、アーチダムの一般的な特性であると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本検討の主要な成果は以下のとおりである。

- (1) アーチダムでは、ある貯水位以下になると、比較的強振動時に、ダムの固有振動数は、弱振動時に比べて低振動数側になり、減衰定数は、弱振動時に比べて増大する。今回対象とした I

アーチダムでは、常時満水位より 70m 低い貯水位の状態では、ダム天端において 250gal 程度の比較的強振動時に 6% 程度の減衰定数が得られた。

- (2) ダムの固有振動数や減衰定数に、振動レベル依存性が現れるのは、貯水位及び振動レベルの差違により、ジョイント部におけるダム軸方向圧縮力の発生する範囲が変化するためである。つまり、ジョイント部に開口変位の生じる領域が発生・拡大することにより、ジョイント部が完全に閉じている場合に比べ、ダム全体の等価剛性が低下したり、ジョイント部における振動エネルギーがより消散することにより、動的特性に振動レベル依存性が現れる。

ダムサイトにレベル II 相当の地震動が発生した場合には、貯水位が常時満水位付近であっても、実際のダムのジョイント部では、開口・閉口だけでなく接触面の摩擦による減衰効果が生じると考えられる。さらにはコンクリートや着岩部近傍の岩盤材料自体の履歴減衰等も生じうることから、ダム全体の減衰はかなり大きくなると考えられ、アーチダムの耐震安全性が高まることが期待される。本解析モデルは、実際のジョイント部における非線形挙動をかなり単純化したものであるが、解析モデルの精緻化のためにも、強地震記録の取得・公開が望まれる。

参考文献

- 1) 通商産業省資源エネルギー庁、社団法人電力土木技術協会：ダム耐震設計高度化調査報告書（平成8年度），1997年3月。
- 2) John F. Hall: The dynamic and earthquake behaviour of concrete dams: review of experimental behaviour and observational evidence, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.7, pp. 58-121, 1988.
- 3) 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年10月。
- 4) 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, pp. 43-55, 1997年5月。
- 5) 上田 稔，田村重四郎，塩尻弘雄，近藤寛通：アーチダムの起振実験で計測した動水圧と変位のシミュレーション，土木学会論文集，No. 605/I-45, pp. 15-28, 1998年10月。
- 6) 上田 稔，豊田幸宏，塩尻弘雄，佐藤正俊：アーチダムの観測記録から求めた固有振動数とブロックジョイントの影響，土木学会論文集，No. 654/I-52, pp. 207-221, 2000年7月。
- 7) 上田 稔，塩尻弘雄，横井幹仁，恒川和久：アーチダムの地震観測記録などから求めた減衰定数，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 825-828, 1997年7月。
- 8) 塩尻弘雄，上田 稔：ダム-岩盤-貯水の連成を考慮した重力式ダムの三次元地震応答シミュレーション，土木学会論文集，No. 640/I-50, pp. 177-192, 2000年1月。
- 9) 豊田幸宏，上田 稔：現場計測データに基づくアーチダム-岩盤-貯水系の3次元時刻歴応答解析法の適用性検討，電力中央研究所研究報告，U00025, 2000年12月。

(2001. 5. 25 受付)