

アーチダム地震観測記録などから求めた減衰定数

上田 稔¹・塩尻弘雄²・横井幹仁³・恒川和久³

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

³正会員 工修 中電工事(株)技術コンサルタント部(〒455 名古屋市港区遠若町 3-7-1)

コンクリートダムの減衰は、ダムの地震応答に及ぼす最も重要な値の一つにもかかわらず、十分明確になっていないのが実状である。そこで本研究は、2つのアーチダムを対象に起振実験や地震観測の記録をもとに、ダムの振動レベルと減衰定数の大きさについて検討した。その結果 5gal 程度以下の弱振動レベルでのダムの減衰定数は、貯水位にかかわらず 1.0~1.5%程度であることや、10gal 程度以上の振動レベルから振動レベルが大きくなる程減衰定数が大きくなり、200gal 程度の振動で減衰定数は 7%程度であることを示す。

Key Words : arch dam, damping ratio, half power method, seismic observation wave, forced vibration test

1. まえがき

コンクリートダムの減衰は、ダムの地震応答に及ぼす最も重要な値の一つにもかかわらず、十分明確になっていないのが実状である。起振実験の共振曲線から $1/\sqrt{2}$ 法により減衰を求めている例は多く見られるが^{1),2)}、その他の減衰に関する検討はあまりなされていないようである。コンクリートダムの減衰は、弱振動時にはコンクリートそのものの内部減衰の大きさ程度で小さな値だが、ある程度以上の振動レベルからはダムのブロックジョイントによる構造減衰が加わり、強振時にはかなり大きな値が期待できると考えられる。

そこで本研究は、2つのアーチダムを対象に起振実験や地震観測の記録をもとに、ダムの振動レベルと減衰定数の大きさについて検討するものである。対象とするアーチダムは、Iダム(ダム高 107.5m, 堤頂長 341.5m)とJダム(ダム高 130m, 堤頂長 275m)である。

2. 起振実験に基づく減衰定数の検討

(1) 起振実験の概要

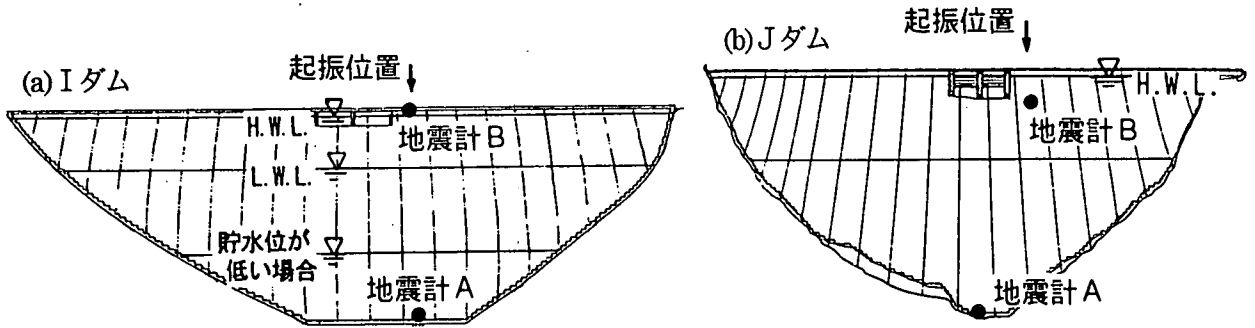
Iダムの起振実験は、湛水開始直後の貯水位が低い場合(H.W.L.から 70m 下がりて空虚に近い)、L.W.L.(H.W.L.から 26.5m 下がり)の場合と H.W.L.の場合の3回実施した。起振実験実施時の貯水位を図-1のダム上流面に示す。起振位置はダム天端中央の洪水吐きを避けた位置である(図-1(a))。起振方向はダム天端水平アーチの半径方向(概ねダムの上下流方向)である。起振機は2組の不平衡重錘起振装置の機械的な同期反転により、一方向の正弦波起振力を発生させるものである。起振機を2台設置し、それを同時に運転し

た。対象とする周波数は 1~10Hz ある。起振力は 2~10Hz が 20tonf で一定、2Hz 以下は周波数ごとに装置の最大起振力で起振した。低周波になる程起振力が小さく、1Hz では約 5tonf である。ただし貯水位にかかわらず、ダム天端の加速度を同程度とするため、貯水位が低い場合は起振機は1台とした。即ち起振力は上記の半分である。振動計はサーボ型の速度計でアーチ半径方向の変位を測定した。計測周波数のきざみは、固有振動数付近は固有振動数と応答のピーク値を正確にとるために、0.01Hz と細かくした。このきざみは起振機の周波数制御上の限界値である。固有振動数付近以外は 0.1~0.2Hz 程度のきざみである。1次の固有振動数でのダム天端の加速度は、貯水位により多少異なるが、3~5gal 程度である。

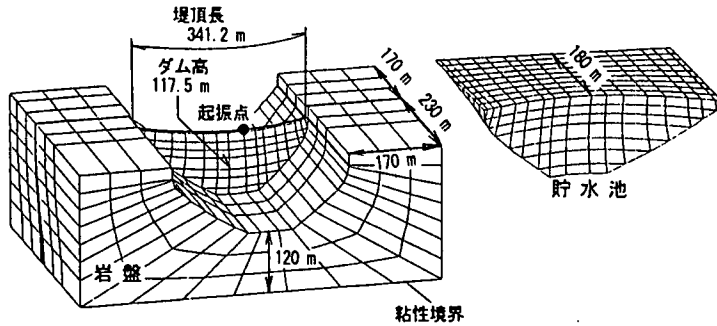
Jダムの起振実験は、電力中央研究所が実施したもので³⁾、貯水位は H.W.L.である。1次の固有振動数でのダム天端の加速度は、5gal 程度である。

(2) 起振実験で得た共振曲線のシミュレーション解析による内部減衰の検討

著者らは、I、J両ダムの起振実験の応答シミュレーション解析を行い良好な結果を得ている^{4),5),6)}。図-2にIダムの解析モデルを示す。解析は、ダム-岩盤-貯水の連成を考慮した3次元有限要素解析である。図-3にIダムの起振点の変位の共振曲線のシミュレーション結果を貯水位ごとに示す。実測と解析は良好な一致を示している。解析領域の広さやメッシュサイズについて詳細に検討した上で、ダムコンクリートと岩盤の動弾性係数は、それぞれ標高差のある2ヶ所の地震観測記録から求めた波動伝播速度による値(このようにして求めたダムコンクリートの動弾性係数は、静的圧縮



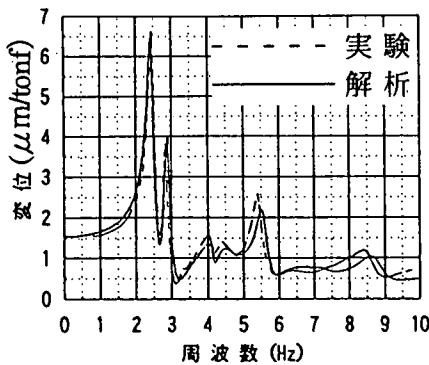
図一 起振実験実施時の貯水位と地震計設置位置



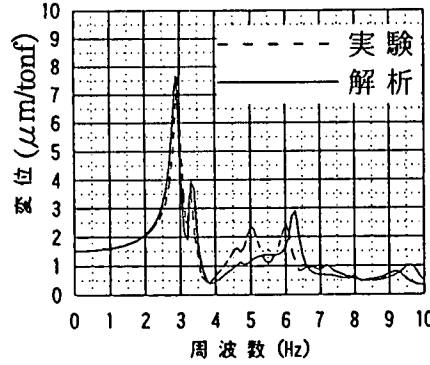
図二 起振実験シミュレーション解析のモデル (Iダム)

表一 起振実験に基づく減衰定数の検討結果

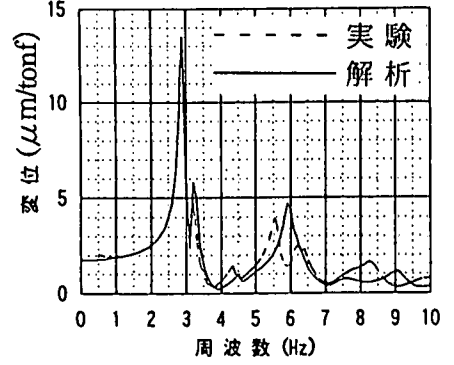
減衰	I ダム			J ダム
	H.W.L.	L.W.L.	貯水位が空虚に近い場合 (H.W.L.-70m)	H.W.L.
①共振曲線より $1/\sqrt{2}$ 法で求めた減衰	3.5 ^⑤	3.5 ^⑤	2.5 ^⑤	3.3
②貯水への逸散分+貯水の付加質量としての影響分 ②=⑤-⑥	1.0	1.0	0	-
③共振曲線のシミュレーション解析による内部減衰	1.0	1.0	1.0	1.5
④岩盤への逸散分 ④=①-②-③	1.5	1.5	1.5	-



(a)H.W.L.時



(b)L.W.L.時



(c)貯水位が低い場合

図三 起振点の変位の共振曲線のシミュレーション結果 (Iダム)

試験から求めた弾性係数と一致する η)を用いると、実測の固有振動数がほぼとらえられる。そして変位の共振曲線のピークの実測値と解析値が一致するダムの内部減衰定数を求めると、Iダムは貯水位にかかわらず1%程度、Jダムは1.5%程度であった(表一)。なおこの解析において、岩盤に与える減衰定数の影響は非常に小さいことを確認している。

Iダムの起振実験では、貯水位がL.W.L.(H.W.L.から26.5m下がり)の場合に、起振力を20tonfの他に2tonfと、0.1tonfに変えて起振したが、単位起振力あたりの共振曲線に差異は認められなかった。このことより、ここに得られた内部減衰定数は、ダムの応答が線形である弱振動に対する値と判断される。

(3)共振曲線による貯水や岩盤への逸散減衰に関する検討

Iダムの天端の応答変位の共振曲線の1次の固有振動数を与える山に対して、 $1/\sqrt{2}$ 法により求めた減衰を表一に示す。貯水位ごとに、ダム天端のいくつかの位置で得られた減衰の平均である。この減衰には、貯水や岩盤への逸散分などが含まれている。貯水位がH.W.L.とL.W.L.の場合が同程度で、貯水位が低い場合はこれより1%程度小さい。よって、この貯水位が高い場合と低い場合の差の1%程度が、貯水への逸散分と貯水の付加質量としての影響分となる(表一)。 $1/\sqrt{2}$ 法により求めた減衰から、貯水位がH.W.L.とL.W.L.の場合は内部減衰及び貯水への逸散分と貯水の付加質量としての影響分を除いた、貯水位が低い場合は内部減衰を除いた1.5%程度が岩盤への逸散分となる(表一)。

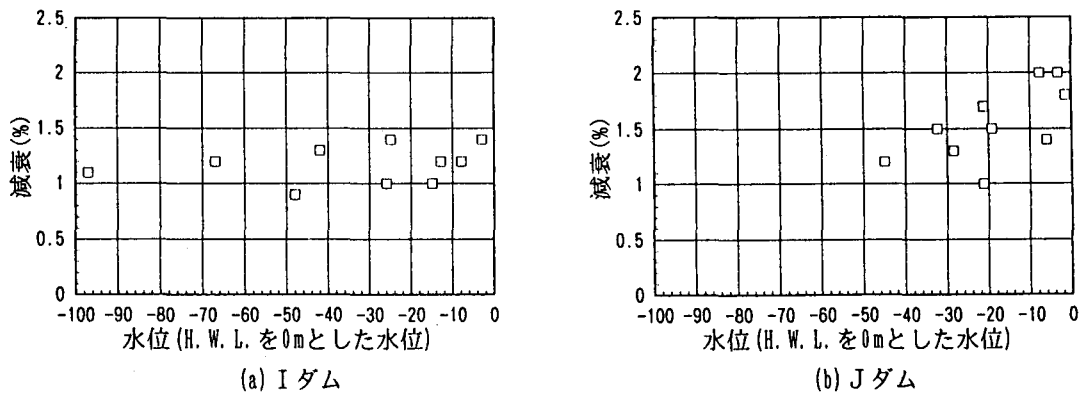


図-4 減衰定数と貯水位の関係

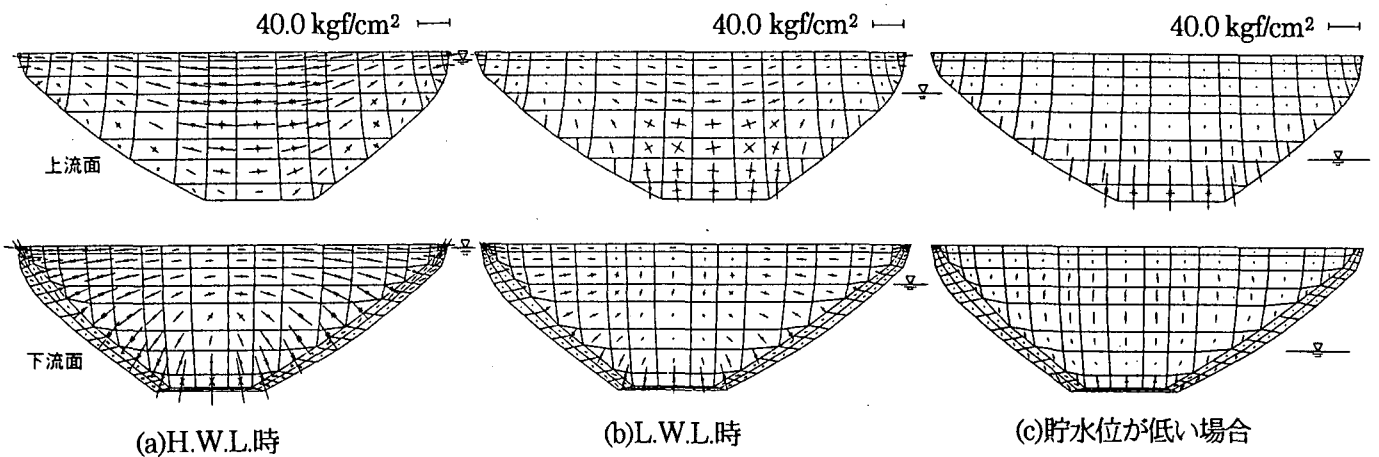


図-5 ダム上下流面の静的応力 (Iダム)

3. 地震観測記録に基づく減衰定数の検討

(1) 地震観測の概要と地震観測記録に基づく減衰定数の算出方法

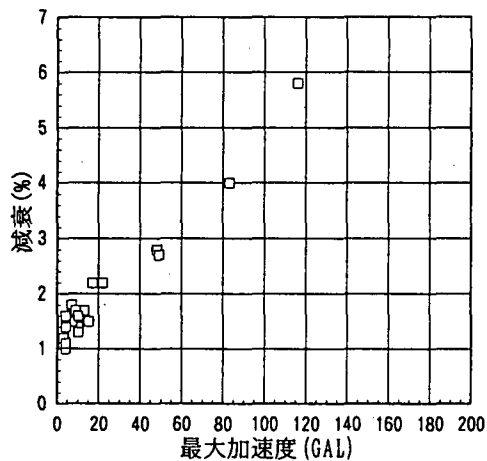
図-1 に示すとおり、ダム上部と最低部に加速度計を設置し地震観測を行った。地震波収録のサンプリング周波数は、200Hzである。減衰はダム最低部(地震計 A)に対するダム上部(地震計 B)の加速度波形のフーリエスペクトル比から、1次の固有振動数を与える山に対して、 $1/\sqrt{2}$ 法で算出した。対象とした加速度波形の継続時間は5秒である。

(2) 貯水位と弱振動時の減衰定数

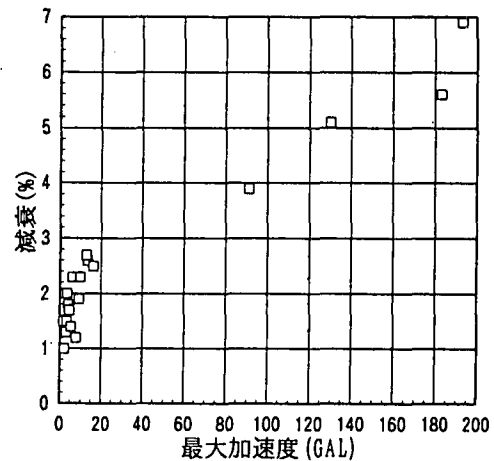
図-4 に、ダム上部(地震計 B)の最大加速度が 5gal 以下の場合の記録を用いて求めた、減衰定数と貯水位の関係を示す。減衰定数は幾分ばらつきがあるものの、貯水位にかかわらず概ね一定である。減衰定数はIダムで0.9~1.4%、Jダムで1.0~2.0%である。この値は、上述した起振実験のシミュレーション解析から求められた内部減衰定数と同程度である。このことに加え、図-2の解析モデルを用いて地震応答解析を行い、地震観測記録から減衰を求めたのと同様に、ダム最低部に対

するダム上部の加速度フーリエスペクトル比から求めた減衰定数は、解析においてダムに与えた内部減衰定数と一致した。これは貯水位がある場合も空虚の場合も同様であった。以上のことから、地震観測記録よりダム最低部に対するダム上部の加速度フーリエスペクトル比から求めた減衰は、貯水や岩盤への逸散分を含まない、ダムの減衰定数を与えると判断される。ただし貯水がある場合には、貯水への逸散分と貯水の付加質量による影響分がキャンセルされている可能性がある。

図-5 は、Iダムの上流面と下流面の静的応力をダム-貯水-岩盤の連成解析により求めたものである。貯水位は起振実験を行った水位である。荷重はダムの自重と水圧である。貯水位が H.W.L.ではダムの天端付近は上下流面とも水平方向圧縮力が作用している。しかし、L.W.L.では非常に小さな圧縮力である。貯水位が低い場合では、広い範囲にわたって水平方向圧縮力がほとんどゼロの状態である。この解析結果から貯水位が異なるとダムのジョイント部の水平アーチ方向の軸圧縮力も大きく異なることがわかる。しかし、最大加速度が 5gal 程度以下の弱振動では、貯水位にかかわらずジョイントキーが接触したままの状態のため、減衰定数が一定になると考えられる。2章(2)で述べたが、起



(a) Iダム



(b) Jダム

図一6 減衰定数と最大加速度の関係

振実験で起振力を変えても得られる共振曲線に差異が認められなかったのもこのことを裏付けている。

(3) 振動レベルと減衰定数

図一6に、減衰定数とダム上部(地震計 B)の最大加速度の関係を示す。この最大加速度は減衰定数を求めるのに対象とした 5 秒間の範囲での最大加速度である。最大加速度が 10 gal 程度を越えると、最大加速度が大きくなる程減衰定数が大きくなることがわかる。比較的強震時のダムの固有振動数を求めると、弱振時の固有振動数に比べ低振動数側にある⁵⁾。この点も考えあわせると、最大加速度が大きくなる程減衰定数が大きくなるのは、振動レベルが大きくなるとジョイントキーの接触面で滑りが生じる箇所があるためと思われる。I、J 両ダムとも最大加速度と減衰定数の関係は同程度で、Jダムでは 200gal 程度で 7%程度の減衰である。

4. まとめ

2 つのアーチダムを対象に起振実験や地震観測の記録から、振動レベルとダムの減衰定数の関係について検討した。本研究による主要な成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 今回の検討の範囲においては、ダム最低部に対するダム上部の加速度フーリエスペクトル比から求めた減衰は、貯水や岩盤への逸散分を含まないダムの減衰定数を与えると判断された。
- (2) 5gal 程度以下の弱振動レベルでのダムの減衰定数は、貯水位にかかわらず 1.0~1.5%程度である。これは起振実験のシミュレーション解析や地震観測記録から求められた値で、いずれによっても同程度であった。

- (3) 10 gal 程度以上の振動レベルからジョイントキーの影響が現れ、振動レベルが大きくなる程減衰定数が大きくなり、200gal 程度の振動で減衰定数は 7%程度であることを示した。

なおよび強振時にはジョイントキーの接触面の滑りの他に、ジョイントキーの離接による振動エネルギーの減衰が生じるため、減衰はかなり大きくなるものと予想される。今後は本研究で示した方法により、いくつかの重力ダム、アーチダムの強震時の減衰が求められることが期待される。

参考文献

- 1) 岡本舜三：耐震工学，オーム社，pp.357, 1971.
- 2) Hall, F.J. : The Dynamic and Earthquake Behaviour of Concrete Dams-Review of Experimental Behaviour and Observation Evidence, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.7, No.2, pp.58-121, 1988.
- 3) 増子芳夫・高橋忠・国生剛治：高根第 1 アーチダムの動特性，電力中央研究所報告，1972.
- 4) 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集，pp.513-516, 1995.
- 5) 上田稔・佐藤正俊・近藤寛通・恒川和久・塩尻弘雄：アーチダムの地震観測記録などから求めた固有振動数について，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 1 部，pp.178-179, 1996.
- 6) 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.
- 7) 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.