

(143) 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

中電工事関係技術コンサルタント部 ○恒川和久

中部電力㈱電力技術研究所

上田 稔・近藤寛通

日本大学

田村重四郎・塩尻弘雄

1. まえがき

著者らは、信頼度の高いアーチダムの地震応答解析を可能とすべく、中部電力㈱所有の高根アーチダムを対象に、起振実験¹⁾や弱地震²⁾応答のシミュレーション解析を、実測による裏付けのある物性値を用いて行い、ある程度の成功をおさめている。そして用いるべき解析モデルや物性値の設定方法について明らかにしている^{1), 2)}。これに対し、本研究の目的の一つは、別のアーチダムを対象にシミュレーション解析を行い、上記成果について検証することである。

本研究のもう一つの目的は、動水圧研究に関わる問題について、起振実験により実証的に検証することである。地震時にダムに作用する動水圧については、いくつかの理論的、実験的研究がなされている。しかし、実際に動水圧に影響を与えるダムの変形性を考慮しての研究は少ない。さらに、実測値に基づく実証的研究はほとんどなされていない。実ダムの地震時動水圧の測定としては、新潟地震における田子倉ダムの記録が残されているのみである³⁾。その他には、実ダムの起振実験での測定例⁴⁾、アーチダムの模型振動実験の測定例⁵⁾がある程度である。起振実験で動水圧の実測がされ、解析結果との比較がなされているのは、アメリカの研究者による、Monticello Dam, Morrow Point Dam, Xiang Hong Dam, Quan Shui Dam の例が見当たる程度である^{4), 5)}が、必ずしも良好なシミュレーション結果が得られているとは言い難い。

著者の一人(田村)と中部電力㈱は、動水圧計を開発した。上述のような実ダムにおける動水圧の研究の現況に対し、本研究では開発した動水圧計により、起振実験での動水圧の実測を行った。そして計測動水圧の共振曲線や分布形状のシミュレーション解析を試み、開発した動水圧計の信頼性と、ダムと貯水の連成解析を行う解析コードの有効性について検証する。

2. 対象ダムと起振実験の概要

(1) 対象ダム 対象とするアーチダムは、中部電力㈱所有の川浦アーチダムで、ダム高107.5m、堤頂長341.2m、堤体積40万 m^3 である。ダムサイトの地質は、中生代白亜紀の流紋岩を主とし一部ひん岩の貫入が認められる。

(2) 起振実験の概要 起振位置はダムの天端中央の洪水吐を避けた位置である(図-1)。起振方向はアーチ半径方向である。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、可能な限り大きな起振力を与えるようにした。対象とする周波数は1~10Hzである。起振力は2~10Hzが20ton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で約5tonである。なお1Hzより小さい周波数では安定した起振を行うことができなかった。振動計はダム天端上と、キャットウォークを利用してダム下流面に設置し、アーチ半径方向の変位を測定した。図-2は、起振機を設置したブロックの振動計設置位置を横断面図に示したものである。計測周波数のきざみは、固有周波数付近は0.01Hzである。このきざみは測定上の限界値である。固有周波数付近以外は0.1~0.2Hz程度のきざみである。

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)、L.W.L.時(H.W.L.から26.5m下がり)とH.W.L.時の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。本報告では、このうちH.W.L.

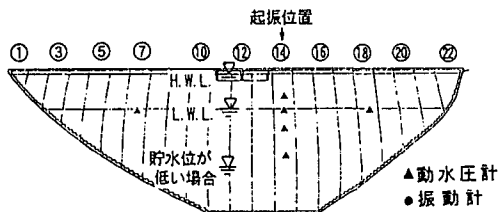


図-1 起振実験実施時の貯水位と動水圧計設置位置(上流面)



図-2 起振機位置横断面図

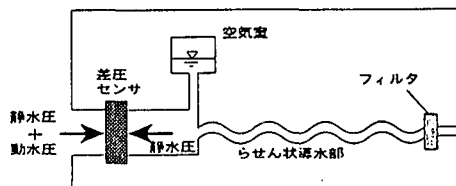


図-3 動水圧計の原理

時の結果について示す。

3. 動水圧計

動水圧計の設置位置を図-1のダム上流面に示す。起振位置のブロックに鉛直方向に4ヶ所と（図-2の横断面図にもその設置位置を示す）、水平方向の分布をみるために、別のブロックのL.W.L.より1.5m下がりの位置に2ヶ所の計6ヶ所である。動水圧計の本体は動水圧導入部、静水圧導入部、差圧センサ（半導体圧力センサ）および増幅回路を組み込んだ構造である。原理は、差圧センサの前面の動水圧導入部に動水圧＋静水圧を作用させ、背面の静水圧導入部に静水圧のみを作用させて、その差圧として動水圧を検出する（図-3）。静水圧導入部は、フィルタ、細いらせん状の導水路、空気室から成る。静水圧導入部では動水圧のうち、短周期成分はフィルタと細いらせん状の導水路を通すことで吸収させ、長周期成分は空気室によって平衡させている。室内にて、正弦波形動水圧に対する性能確認試験を実施している。

4. 解析手法と解析モデル

解析手法については文献(1)、(6)を参照されたい。高根アーチダムの起振実験シミュレーション解析¹⁾により、その妥当性が明らかになった解析モデルと物性値の設定方法を採用した。解析モデルを図-4に、物性値を表-1に示す。

(1) ダム ダムコンクリートのS波伝播速度（以下 V_s と略す）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⁷⁾。表-1の値は、材令2年で実施した静的圧縮試験より求めた値である。対象とするダムコンクリートの弾性係数は、材令1年余りで収束する。これに対し、起振実験実施時（H.W.L.時）のダムコンクリートの材令は、最も若い最上部で、2年2ヶ月である。後述する岩盤の V_s を求めるのと同じ方法で、標高差のある2ヶ所（図-5のC、D点）の観測地震波よりダムコンクリートの V_s を求めたが、この値は上記のダムコンクリートの静的圧縮試験の低応力部の弾性係数より求めた値とほぼ一致していた。

(2) 岩盤 岩盤の物性について検討したことを述べる。ダムサイトの標高差のある2ヶ所（図-5のA、B点）で地震観測を行うこととした。岩盤の V_s 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 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-5）。主要動の立ち上がりのゼロクロス位置としたのは、ダムや谷地形の影響が小さいと考えられるからである。得られた岩盤の V_s は1700m/s程度である。この波動伝播速度と岩盤の密度を $\rho = 2.5 \text{ t/m}^3$ として、 $G = \rho V_s^2$ によりせん断剛性を求めた。なお本ダムサイトのような硬質岩盤の場合、地震観測記録より求めた地震波伝播速度は、横坑（孔）間速度検層、屈折法弾性波探査で得られる値に比べてかなり小さい。

(3) 貯水池 地山と接する境界のインピーダンス比は、地山を岩盤で代表させて設定した値である。これは高根アーチダムのシミュレーション解析¹⁾において、貯水が直接に接するのは地山表面の表土層であるが、貯水池周辺を岩盤で代表させた場合に良好なシミュレーション結果が得られたことに基づいている。

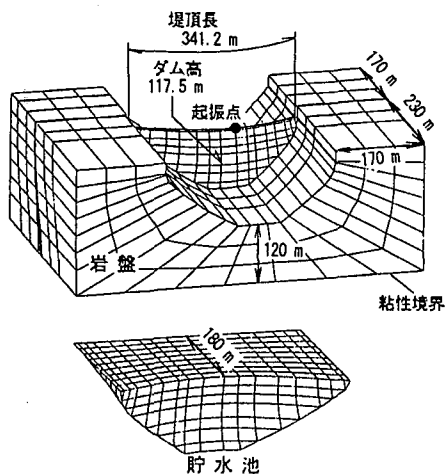


図-4 解析モデル

表-1 解析に用いた物性値

	波動伝 播速度 (m/sec)	動弾性 係 数 (kgf/cm ²)	動ポア ソン比	単位体 積重量 (t/m ³)	減衰定数 (%)
ダム	2,460	370,000	0.20	2.5	1.0
岩 盤	1,700	184,000	0.25	2.5	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)		

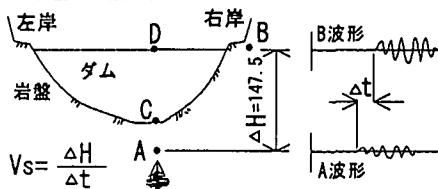
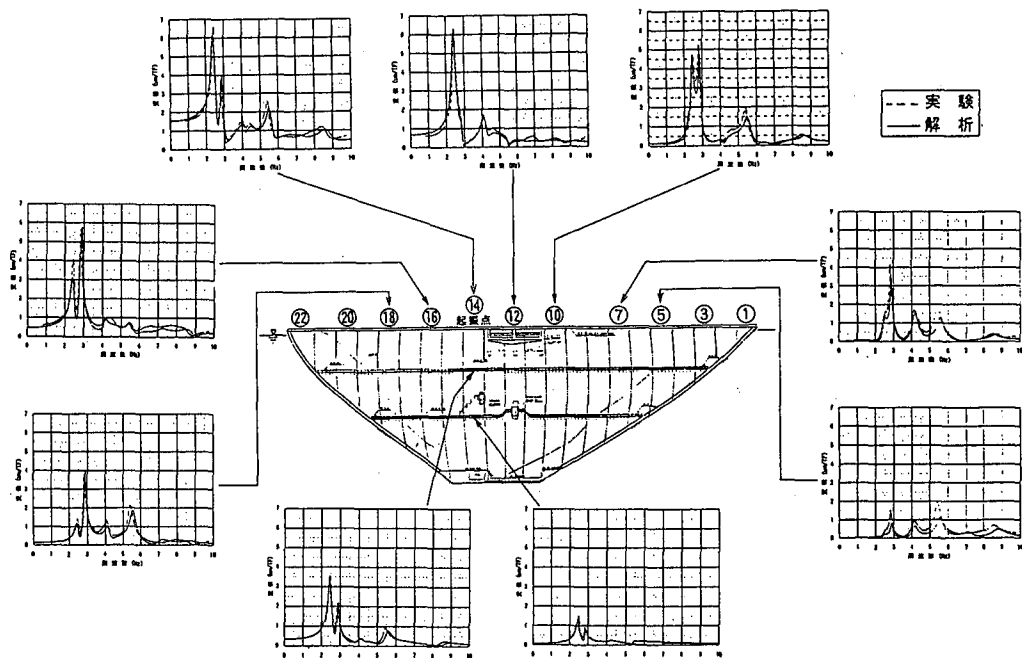
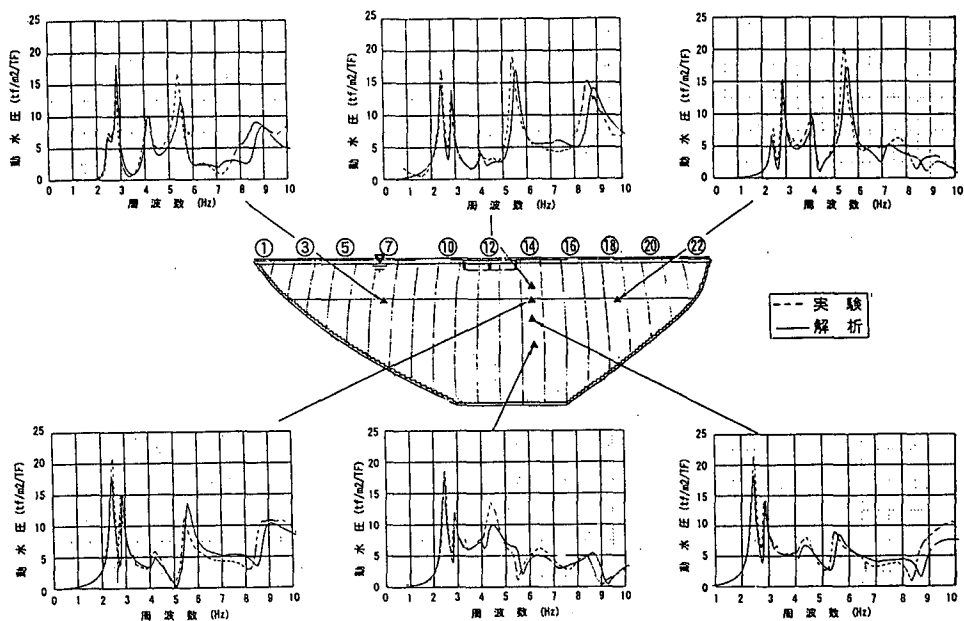


図-5 地震計設置位置と観測記録より地震波伝播速度を求める方法



図一六 変位の共振曲線の実測と解析の比較 (H. W. L. 時)



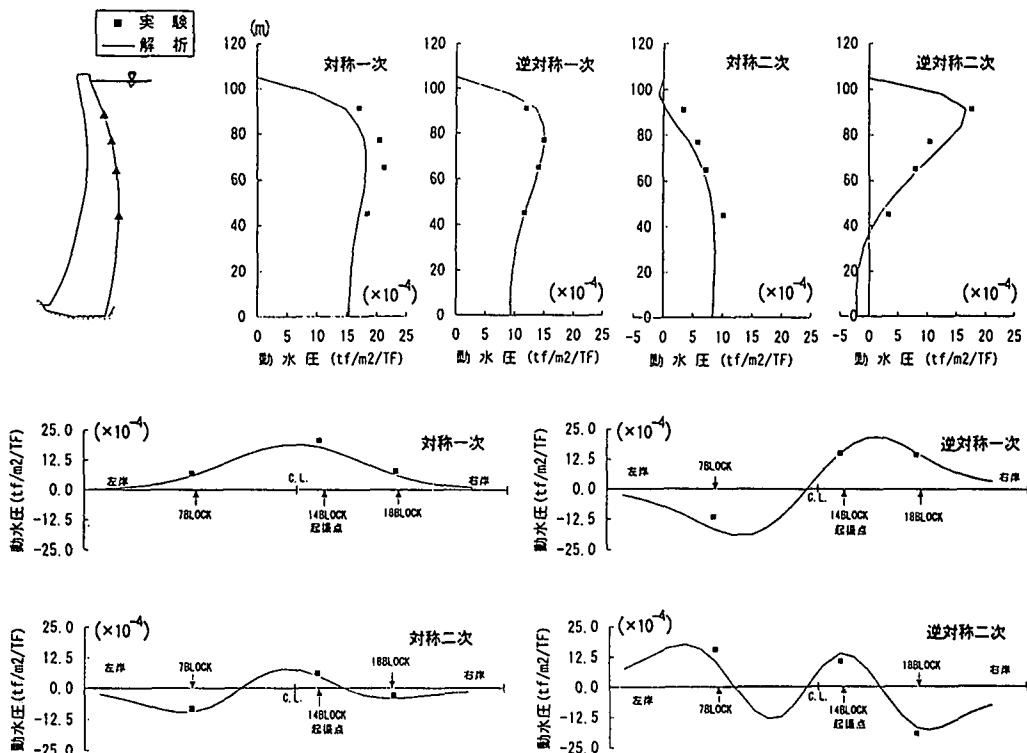
図一七 動水圧の共振曲線の実測と解析の比較 (H. W. L. 時)

5. 起振実験で得た変位とシミュレーションで得た変位の比較

ダム天端と起振位置ブロックの主要点で、起振実験により得た変位の共振曲線とシミュレーション解析の結果を、図一六に示す。実測と解析は、計測位置にかかわらずダム全体にわたり良好な一致を示している。図は略すが、振動形状についても良好なシミュレーション結果を得ている。

6. 起振実験で得た動水圧とシミュレーションで得た動水圧の比較

起振実験により得た動水圧の共振曲線とシミュレーション解析の結果を、図一七に示す。実測と解析は、動水



図一八 動水圧の分布形状の実測と解析の比較 (H. W. L. 時)

圧計の位置にかかわらず良好な一致を示している。図一八には、実験ならびにシミュレーション解析で得られた動水圧分布を示す。上段に起振位置ブロック鉛直方向、下段に水平方向の分布を、一次と二次の振動形状に対して示す。いずれの場合も、実測と解析はほぼ一致している。

7. 結語

本研究の主要成果をまとめると次のとおりである。

(1) 起振実験において変位の測定に加え、動水圧の実測を行った。そして動水圧の共振曲線や分布形状、変位の共振曲線や振動形状のシミュレーション解析を行い、良好な結果が得られた。(2) ここで用いた解析モデルや物性値の設定方法は、先に行った高根アーチダムの起振実験シミュレーション解析により得られた成果を踏まえたものである。解析モデルや物性値の設定方法の妥当性が、今回のシミュレーション解析からも確認された。(3) 開発した動水圧計の信頼性、ならびに解析に用いた貯水の圧縮性を考慮してのダムと貯水の連成解析コードの有効性が確認された。これにより今後、地震時のダムの動水圧の観測が可能となり、ダムの変形性を考慮しての動水圧に関する実証的研究の発展が期待される。

参考文献

- 1) 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. 501/1-29, pp. 203-212, 1994.
- 2) 上田稔・奥田宏明・塩尻弘雄・恒川和久：アーチダムの弱地震応答シミュレーション，土木学会年報概要集，pp. 872-873, 1994.
- 3) Okamoto, S.: Introduction to Earthquake Engineering, University of Tokyo Press, 1973.
- 4) Hall, F. J.: The Dynamic and Earthquake Behaviour of Concrete Dams - Review of Experimental Behaviour and Observational Evidence, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 58-121, 1988.
- 5) Duron, H. Z. and Hall, F. J.: Experimental and Finite Element Studies of the Forced Vibration Response of Morrow Point Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, pp. 1021-1039, 1988.
- 6) 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.
- 7) 佐藤正俊・上田稔・奥田宏明・近藤久雄：コンクリートダムの地震時波動伝播速度について，土木学会年報概要集，pp. 318-319, 1993.