

施工縦ジョイント部の剛性を考慮した アーチダムの起振実験シミュレーション

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 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-11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名古屋市長区大高町字北関山20-1)

³正会員 工修 中電工事株式会社 (〒455名古屋市長区遠若町3-7-1)

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

既存アーチダムの地震時安全性を合理的に評価するためには、ダムの動的解析法をより高度化することが重要である。本報告は、ダム堤体の施工縦ジョイント部の非線形性を考慮できるよう新たに開発した解析プログラムの妥当性を、実ダムの起振実験結果との比較から検証し、ダム堤体の動特性に及ぼすジョイント部の影響を数値的に把握したものである。周波数応答特性に関し、実験値と解析値の比較がなされ、本プログラムの適用性が明らかにされ、ジョイント部の剛性の影響により、堤体を連続体とした線形解析モデルに比べ、ダムの固有振動数が実測値に近づく傾向のあることが把握された。

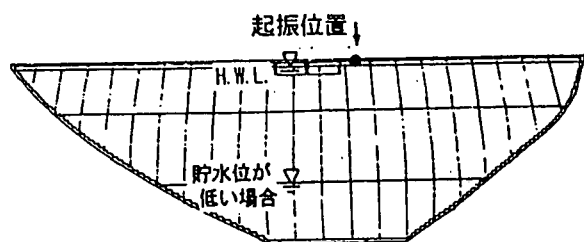
Key Words : existing arch dam, contraction joint, field forced vibration test, finite element method, dynamic response properties

1. はじめに

先の阪神淡路大震災を契機に、現行の「震度法」によって設計されたダムの耐震性について改めて検討がなされ、十分な耐震性を有していることが確認された。しかしながら、ダムは大量の水を貯留する大型重要構造物であるため、その安全性については、今後とも十分な配慮を高める必要があり、ダムサイトの地震動特性や堤体材料の動特性を明らかにし、ダムの動的解析法および耐震性評価法をより高度化する必要性が指摘されている¹⁾。

アーチダムを対象とした動的解析法に関しては、堤体全体を一体構造とする3次元有限要素モデルを用いた、起振実験のシミュレーション解析や地震応答解析が実施され、実験による検証を重ねて実用化と精度の向上が図られてきた。しかしながら、強震時におけるアーチダムの動特性を正確に把握し、合理的な設計に資するためには、施工縦ジョイント部における離接、滑動等の非線形性を考慮した地震応答解析技術を確立することが重要である。

これまでに著者らは、ジョイント部の非線形挙動を考慮できる新たな3次元岩盤—堤体—貯水連成解析プログラムの開発を行い、堤体を連続体とした線形解析モデルによる時刻歴応答解析を実施し、実測値との比較から線形範囲の解析精度について検証を行ってきた^{2),3)}。また、既存アーチダムの起振実験



図—1 起振点位置と貯水位条件 (Iアーチダム)

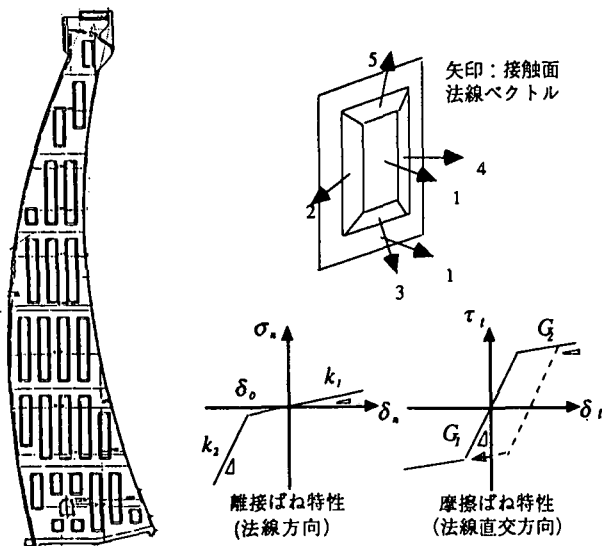
や地震観測記録等から得られたダムの固有振動数について検討を加え、貯水位が低い場合や強震時にアーチダムの応答が施工縦ジョイント部の非線形挙動の影響を受けている可能性のあることを指摘した⁴⁾。

本報告は、上記解析プログラムを用い、ダム堤体における施工縦ジョイント部の非線形性を考慮した時刻歴応答解析を実施し、実ダムの起振実験との比較から、解析法の妥当性について検証した結果について述べ、併せ、アーチダム応答に及ぼす縦ジョイント部の影響を数値解析的に検討した結果について記したものである。

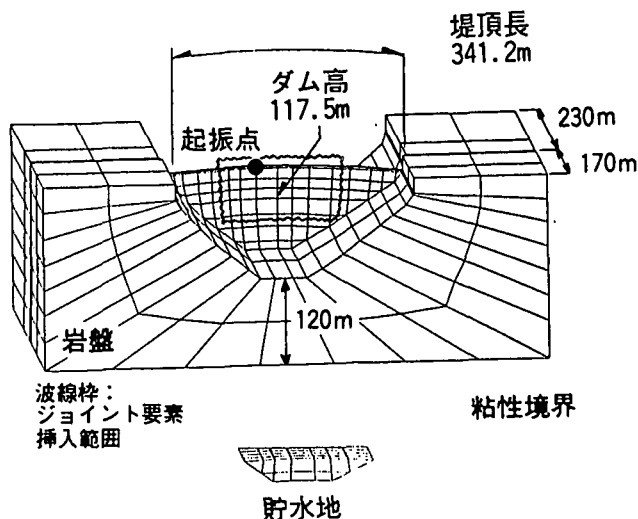
2. 解析概要

(1) 解析対象

対象としたアーチダムは、図—1に示すIアーチダム(ダム高107.5m、堤頂長341.2m、堤体積40万 m^3)とし、同ダムにて実施された一連の起振実験の



図一2 ジョイント要素非線形ばね特性



図一3 解析モデル

内、貯水位が満水位から70m低い場合に実施された実験について、シミュレーション解析を実施した。

(2)解析プログラムの概要

本解析プログラムは、有限要素法に基づく3次元岩盤一堤体一貯水連成地震応答解析プログラムである。本プログラムは、ダム堤体・岩盤や貯水のモデル化に使用する3次元ソリッド要素や流体要素、粘性境界要素等の他、施工縦ジョイント部の非線形性を考慮できる3次元ジョイント要素を備えている。また、岩盤部の材料異方性や地震入力時におけるダムアバット沿いでの位相差を考慮できる解析機能も有している。3次元ジョイント要素は、実ダムの施工ジョイントキー部の接触面を考慮し(図一2)、5方向の接触面に対して離接特性と摩擦滑り特性を非線形ばねで模擬するものである。接触面鉛直方向応力と相対変位量の関係は、離接ばねによってモデル化され、図一2に示すようにギャップ幅を考慮したテンションカットオフ型のばね特性を有する。また、摩擦滑りに関するばね特性は、同図に示すようなバイリニア型の骨格曲線で表され、ヒステリシス特性を持つものとする。

(3)解析モデル

解析モデルメッシュを図一3に、解析に使用した物性値を表一1に示す。同表に示す物性値は、実測値と合うよう、恣意的に設定された値ではなく、ダムサイトで実施した観測や試験結果をもとに決定されたものである。また、メッシュ分割数や解析対象とする岩盤部領域の大きさ等については、既報⁹⁾により実測値との比較から検証されたモデル化手法に従ったものである。ダムや岩盤に与えた減衰定数に

表一1 解析に使用した物性値

	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	380,000	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)		

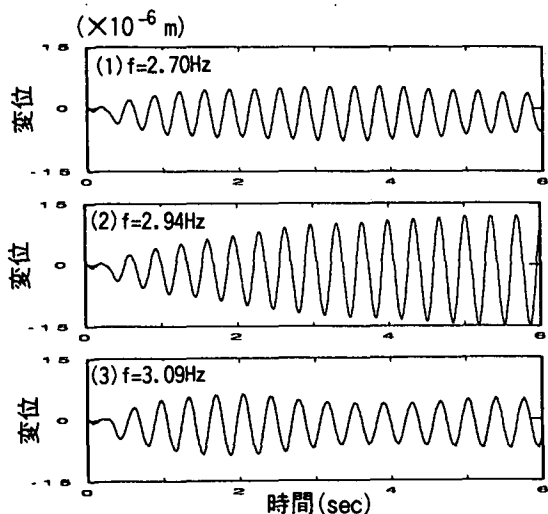
ついては、実測測の共振曲線からハーフパワー法を用い算出したモード減衰を基に設定したレーレー減衰を用いた。

ジョイント要素は、図一3に示す波線枠で囲った部分のソリッド要素間に挿入した。これは、今回の起振実験が、堤体天端アーチ中央付近での点加振であるため、着岩部近傍のジョイント部が堤体の応答に及ぼす影響は少ないと考えたことによる。ジョイント要素のばね剛性については、グラウト材の弾性係数が、ダムコンクリートの1/5程度であること、グラウト充填箇所のダム軸方向厚さが5mm程度であることから、フックの法則に基づき決定した。

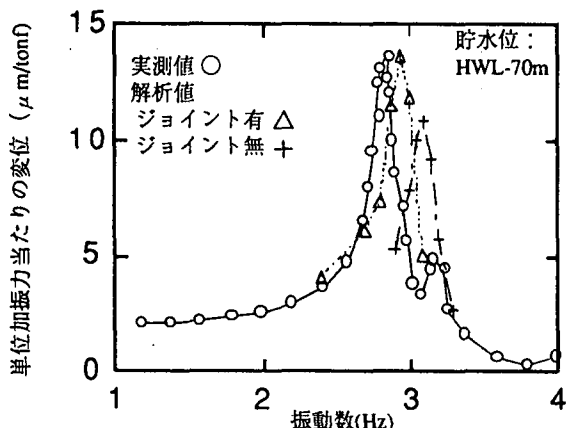
なお、解析結果に及ぼすジョイント部の有無の影響を把握するために、図一3、表一1と同じメッシュ分割、物性値であるが、ジョイント要素を挿入せず、ダム堤体を連続体とした線形解析モデルも作成した。

(4)解析方法

ダムの起振実験シミュレーションには、線形周波数応答解析法が従来からよく用いられているが、本解析モデルには、非線形ばね特性をもつジョイント要素が存在するため、この手法を用いることができない。このため、ここでは、周波数の異なる正弦波を入力波とした時刻歴応答解析を、起振点位置における応答値が定常になるまで実施し、周波数応答曲



図一4 時刻歴応答解析結果の例：起振点位置



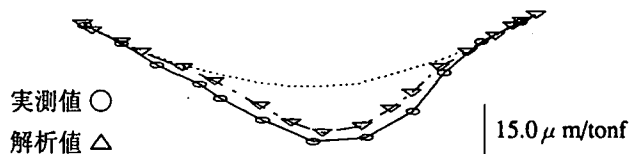
図一5 起振点位置における上下流方向変位の共振曲線：実測値と解析値の比較

線を得た。線形解析モデルについても同様な解析方法を用い、ジョイント要素を挿入したモデルとの比較を行った。

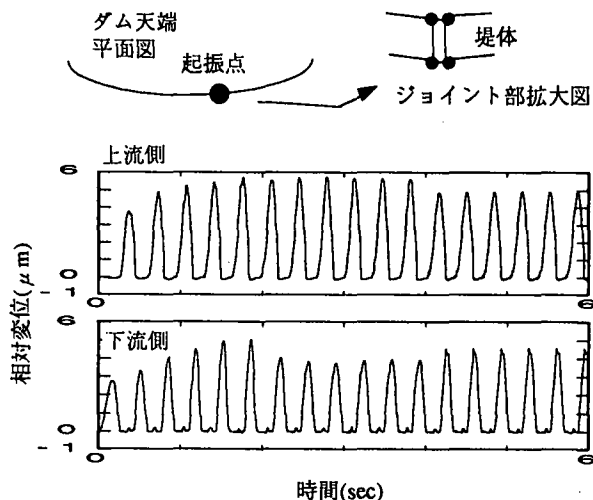
なお、今回の解析では、貯水位が極めて低い条件のダム応答を対象としていることから、貯水静水圧による、ダム堤体に発生する初期応力は、考慮しないことにした。

3. 解析結果および考察

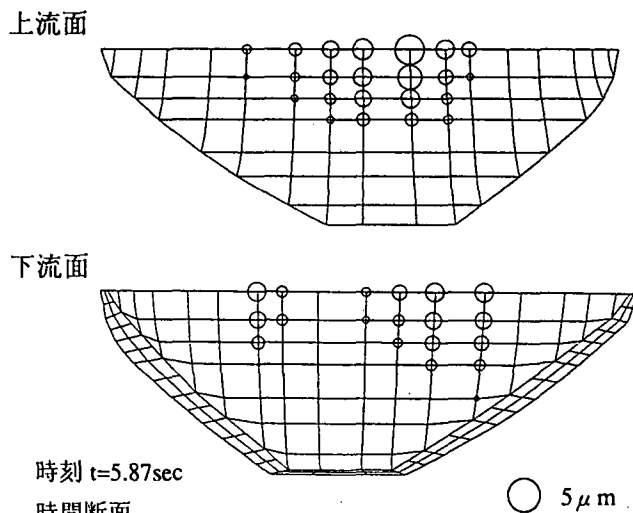
図一4に、正弦波入力に対する起振点位置でのダム半径方向変位時刻歴波形の例を示す。図一5に、時刻歴応答解析より求めた定常応答値を、起振点位置にて実測された共振曲線図にプロットしたものを示す。また、図一5には、線形解析モデルから得られた結果も併せ示す。これらによれば、ジョイント要素を挿入した解析モデルの方が、線形解析モデルに比べ、固有振動数ならびに応答振幅値に関し、実測値に近い値を与えていることがわかる。図一6にジョイント要素を挿入したモデルより得られた振動



図一6 対称1次振動形状（ダム天端平面図）

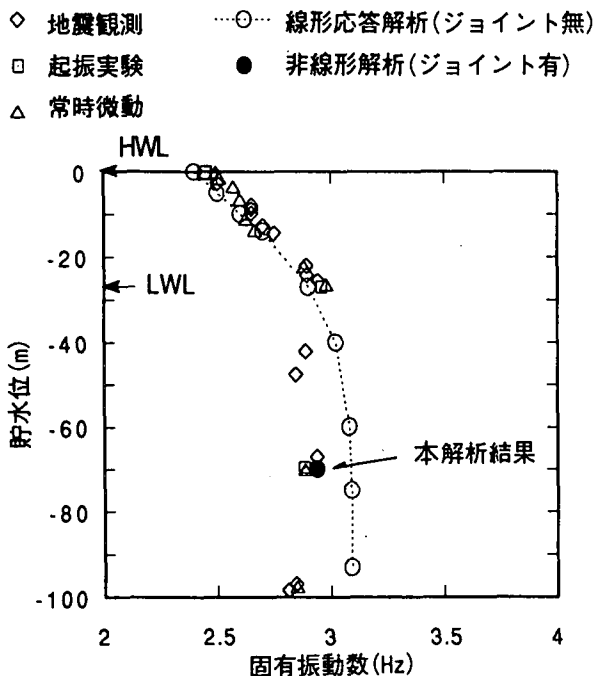


図一7 ジョイント部のアーチ水平方向相対変位時刻歴：起振点位置上下流面



図一8 堤体上下流面におけるジョイント部の相対変位

形状の例を、実測値と併せ示す。同図によれば、解析値は、実測の対称1次振動形状を概ねシミュレートしていることがわかる。図一7に、対称1次モード共振点におけるジョイント部アーチ水平方向の相対変位時刻歴波形の例を示す。図一8に、ジョイント部相対応答変位に関し、図一7における時刻 $t=5.87\text{sec}$ 時の時間断面を、堤体上流面ならびに下流面それぞれについて示す。同時刻は、堤体の起振点が、図一6に示すごとく上流側に最も大きく変位した時に対応する。これらによれば、堤体の上流面側では、起振点位置において最大の相対変位が生じ、起振点位置から離れるにつれて相対変位量も減少していることがわかる。一方、下流面側では、起振点位置に



図—9 ダムの固有振動数と貯水位の関係

においてほとんど相対変位が生じておらず、起振点位置から離れるにつれてジョイント部の相対変位が大きくなっていることがわかる。また、上流面側、下流面側ともに、ジョイント要素が挿入されているのにもかかわらず、ほとんど相対変位が生じていない箇所も存在していることがわかる。これは、起振力が小さいためであることは明らかである。なお、起振点が、下流側に最も大きく変位した時には、堤体上流面、下流面いずれも図—8の相対変位量に比べると1/100以下のオーダーとなり、ほとんど相対変位が発生していない結果となった。

以上より、ジョイント要素を挿入したモデルが、線形解析モデルより実測値に近い値となったのは、堤体コンクリート部に比べ低い剛性を有するジョイント部の非線形ばねが、振動形状が時々刻々変化することに応じて応答することにより、堤体全体の等価剛性が低下したためと考えられる。

4. ダムの動的応答に及ぼすジョイント部の影響

図—9に貯水位と堤体の固有振動数の関係を示す。同図には、今回の解析結果と既報⁴⁾に示された、Iアーチダムにて実施された一連の起振実験や地震観測記録等のデータ、さらには種々の貯水位条件に対応した線形解析モデルによる解析値も併せ示している。同図によれば、貯水位が高い場合(HWL付近)には、実測値と線形解析モデルによる値はほぼ一致しているが、貯水位がLWL(HWL-26.5m)以下になると、線形モデルによる解析値は、実測値より明らかに高

い。上述のように、貯水位がHWL-70mの場合には、今回の解析結果は、線形解析値に比べ実測値に近い。

上記現象は、堤体に発生している水平アーチ方向の圧縮力が水位低下に伴い減少したことで、水位低下に伴う堤体の付加質量が減少したことが重畳したものであると考えられる。つまり、LWL付近までは、水平アーチ方向の圧縮力が作用していることにより堤体全体は一体構造として振る舞い、水位低下に伴う堤体の付加質量の変動が支配的となるため、固有振動数が上昇するものと考えられる。水位がさらに低くなった場合には、水平アーチ方向の圧縮力が減少し、ジョイント部が緩み、ジョイント部の剛性の影響により、堤体全体の剛性の変化が支配的となるため、固有振動数が低下したのと考えられる。

5. まとめ

アーチダム堤体の施工縦ジョイント部の剛性を考慮した解析モデルにより、Iダムの貯水位が低い場合における周波数応答特性をよくシミュレートすることができ、ジョイント部の非線形挙動を考慮した強震時シミュレーション解析に対する本解析プログラムの適用性が確認できた。また、ダムの固有振動数に関して、ジョイント部を無視した線形解析モデルに比べ、実測値に近づく傾向にあることがわかり、ダム全体の等価な剛性がジョイント部の剛性の影響をうけて低下していることを数値解析的に把握した。

参考文献

- 1)ダムの耐震性に関する評価検討委員会報告書(委員長: 田村重四郎), 平成7年11月
- 2)豊田幸宏, 上田稔, 近藤寛通, 恒川和久, 塩尻弘雄: 3次元有限要素解析コードによるアーチダムの起振実験過渡応答シミュレーション, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集I-B, 平成8年9月
- 3)恒川和久, 上田稔, 近藤寛通, 恒川和久, 塩尻弘雄: アーチダム起振実験での変位と動水圧の時刻歴線形応答解析, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集I-B, pp.176-177, 平成8年9月
- 4)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, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集, 平成8年9月
- 5)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, 1994.