

大地震時の構造継目の影響を考慮した アーチダムの耐震性の評価

有賀 義明¹・曹 増延²・渡辺 啓行³

¹ 工修 電源開発(株) 新エネルギー・技術開発部 茅ヶ崎研究センター (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

² Ph.D. (株) 開発計算センター 科学システム部 (〒135-8451 東京都江東区深川2-2-18)

³ 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255)

The objective of the study is to prospect the present seismic assessment method of the arch dams. Hence, the behaviors of an arch dam subjected to strong earthquakes have been investigated with 3-dimensional numerical analysis. The vertical contraction joints and perimeter joints were taken into the analytic model with a sort of 3-D iso-parametric interface element. The interactions between dam and reservoir, dam and foundation, and that between foundation and free field are simulated with a comprehensive coupled method. This paper mainly discusses the effects of the contraction joints and gives a glance at the interaction of dam-reservoir. It has been pointed out that the behaviors of these joints will affect the responses of the dam significantly, especially on the tensile stresses.

Key Word : arch dam, 3D numerical analysis, contraction joint, coupled dam reservoir, interaction

1. はじめに

一般にコンクリートダムには構造継目が設けられており、大地震時にはマクロ的にもミクロ的にも力学的な非連続性が無視できない。1971年のSan Fernando地震後、Pacoimaダムでは、ダム天端の継目の残留開き量が約1cmもあり、堤体と基礎の接続部では大きなすべり変位も観察され、アーチダムの構造継目がダムの挙動に対して支配的な影響を与えたことが報告されている。それ以降、現場観測、模型実験及び数値解析などにより地震時アーチダムの構造継目の挙動並びにダムの地震応答に対する影響について研究^{1)~6)}が行われた。これらの研究により貴重な成果が蓄積され、ダム工学の発展に多くの貢献がなされた。数値解析研究においては、ジョイント要素などのモデル化手法が徐々に発展してきており、地震時の継目の挙動を表現することができるようになってきた。しかし、これまで構造継目を考慮した数値解析では、重要な動水圧荷重を付加質量法で考慮するのがほとんどであった。付加質量法では、一般的に安全側の耐震性評価⁷⁾に至ると言われているが、耐震性の高度化の視点から考えると良い方法とは言えない。特に継目を考慮した解析では荷重の不適切な評価により全く異なる結果を招く可能性があり、厳密なダム-貯水池の連成解析

手法を用いた解析が必要であると考えられる。そこで、本研究では、強い地震動を受けたアーチダムの耐震性評価の高度化を目的として、既設アーチダムを評価対象にし、三次元動的解析により堤体の構造継目を考慮した場合の耐震性について検討した。三次元動的解析では、ダムと貯水の相互作用については、厳密な理論に従って定式化した貯水モデルにより考慮した。ダムと基礎地盤の相互作用については、半無限自由地盤モデルを導入し、半無限自由地盤へのエネルギーの逸散並びに自由地盤の運動による基礎岩盤応答への影響を考慮した。ここで、本研究の一部である「継目の影響を考慮したアーチダムの耐震性の評価」についての概要を紹介する。

2. 研究手法

本研究では、三次元解析手法により、ダム堤体を連続体とした解析と構造継目を考慮した解析との比較を行った。解析に用いるプログラムは三次元ダム-貯水池-基礎地盤の連成系を取扱うUNIVERSEである。この連成系の解析理論については、文献⁷⁾に譲り、ここでは主に構造継目をモデル化する三次元接触面要素の理論概要を述べる。

この接触面要素は厚さ0のアイソパラメトリック要素

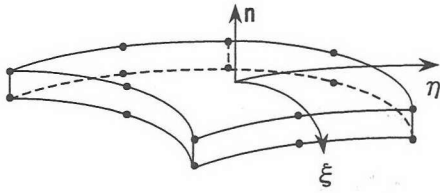


図-1 厚さ0の接触面要素

(図-1に示す)であり、四角形要素のみならず、三角形及び線状(二次元の場合)要素としても使える。さらに接触面の滑動および貯水池の節点との連成も考慮している。三次元アイソパラメトリックソリッド要素と同様な考え方により、要素面内の任意点の座標及び変形は次式の形状関数を用いて要素の構成節点の値から求められる。

$$\begin{cases} N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(\xi\xi_i + \eta\eta_i - 1) & \text{corner} \\ N = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 + \eta\eta_i) & \xi_i = 0 \\ N_i = \frac{1}{2}(1 - \eta^2)(1 + \xi\xi_i) & \eta_i = 0 \end{cases} \quad (1)$$

また、要素面内の任意点の応力 $\{\sigma\}$ と変位 $\{u\}$ は次の関係により求める。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_\xi \\ \sigma_\eta \\ \sigma_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_\xi & 0 & 0 \\ 0 & K_\eta & 0 \\ 0 & 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_\xi \\ u_\eta \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (2)$$

K_i は図-1に示す方向の剛性係数であり、図-2に示す特性を有する。即ち、法面の法線方向に、グラウト材料の引張強度 κ 及び静的応力 σ_0 の和を超過した引張応力が生じた時剥離が発生する。2回目以後の剥離に対する抵抗は静的応力のみである。せん断すべりについては、Mohr-Coulomb式を用いたせん断強度と接触面内のベクトル方向せん断応力の関係により判定する。

貯水池と連成した場合、接触面の同じ位置の2節点に貯水池の一つの節点に対応する。図-3にはその対応関係を示し、次の式で連成条件を表す。

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{(V_A + V_B)}{2} & \text{速度条件} \\ P_C = F_A = F_B & \text{圧力条件} \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 ϕ, n, V_A, V_B は順に貯水波動のポテンシャル関数、ダムと貯水との接触面の法線方向、ダムにおけるA点とB点の速度である。 P_C, F_A, F_B は貯水池メッシュのC点の動水圧、ダムのA点とB点の面荷重と意味する。

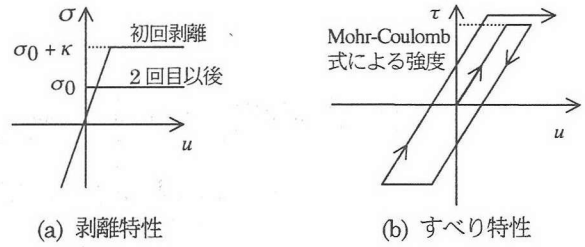


図-2 接触面要素の特性

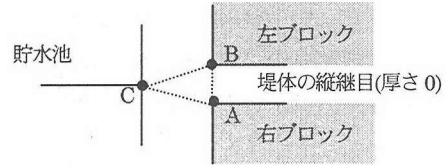


図-3 接触面要素と貯水池の連成関係(平面図)

表-1 解析に用いる物性値

モデル	せん断剛性 G (N/mm ²)	密度 ρ (g/cm ³)	ポアソン比 ν	減衰定数 H (%)
ダム	10500	2.40	0.20	5
基礎地盤	10000	2.60	0.25	5
自由地盤	10000	2.60	0.25	5

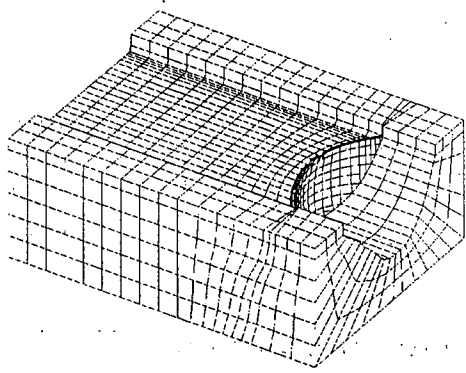
表-2 継目の物性値

項目	縦継目	周辺継目
法面方向剛性(N/mm ²)	剥離時	10 ⁻³
	接触時	2×10 ⁹
せん断剛性(N/mm ²)	1×10 ⁹	1×10 ⁹
引張強度(N/mm ²)	0.0	0.0
摩擦角(度)	50.0	50.0
減衰定数(%)	1	10

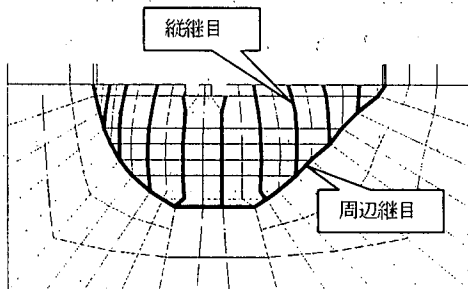
3. 検討条件

本研究で評価対象とした実ダムは、高さ116.5 m、堤頂長約311 m、非対称コンクリート放物線アーチダムである。最大底幅と堤高の比が0.186で、薄型であり、クレストの直線長と堤高の比が2.37で、比較的狭い谷に建設されている。

このダム、貯水池、基礎岩盤の連成系を解析対象とし、図-4(a)に示す三次元解析モデルを作成した。図-4(b)に示す位置に堤体ブロック間の縦継目及び堤体と岩盤間の周辺継目を設定し、三次元アイソパラメトリック接触面要素によりモデル化した。1997年3月16日にダム付近で発生したM5.8の地震の際の地震応答観測結果及びその後の地震再現解析に基づき表-1に示す物性値を同定した。また、継目の物性については、表-2に示す値を用い、グラウト材料の引張強度を0と仮定した。



(a) 3次元解析モデル



(b) 継目の位置

図4 ダム-貯水池-基礎地盤連成系の解析モデル

継目の地震時挙動は、常時の応力状態に依存するので、ダムの地震時挙動を正しく予測するために、ダムの常時状態を精度よく把握する必要がある。そこで、ここでは継目を考慮しない時と考慮した時のダムの常時状態を比較した。

解析手順は、まず、貯水池の空虚及び地震発生時の水位状態におけるダムの常時応力を解析する。そして、兵庫県南部地震の際に一庫ダムで観測された地震動を最大加速度振幅を500 Galと基準化した強い地震の想定波を用いて地震応答解析を行う。図-5にはダム底面で想定した地震動を示す。この波をダム底面から解析モデルの底面に引戻し、そしてモデル底面に対して加振する。

境界条件について、貯水池の底面と上流端はエネルギー逸散条件^[8]として、基礎岩盤の側方では仮想仕事原理に基づく粘性境界^[9]を用い、基礎底面では剛基盤として加振面とする。

4. ダムの常時状態

貯水池の空虚時並びに地震発生時水位のそれぞれに関して、継目を考慮しないケースと継目を考慮したケースの比較を行った。ここで例として、その結果の一部を述

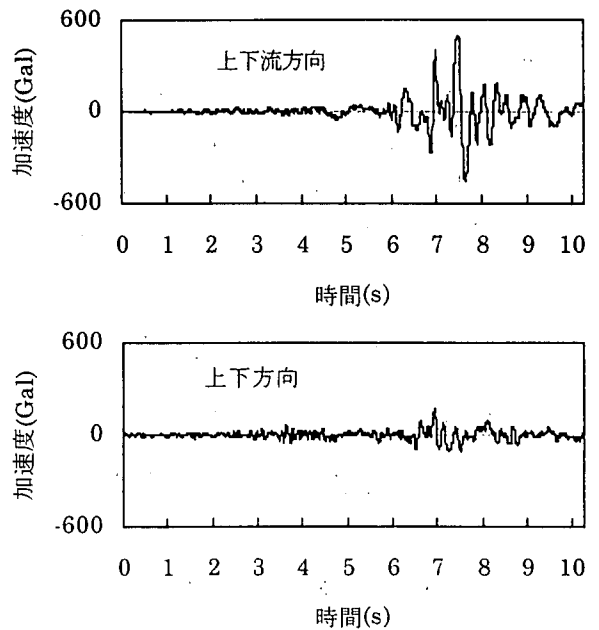


図5 一庫波を最大加速度振幅を500 Galとした入力地震動

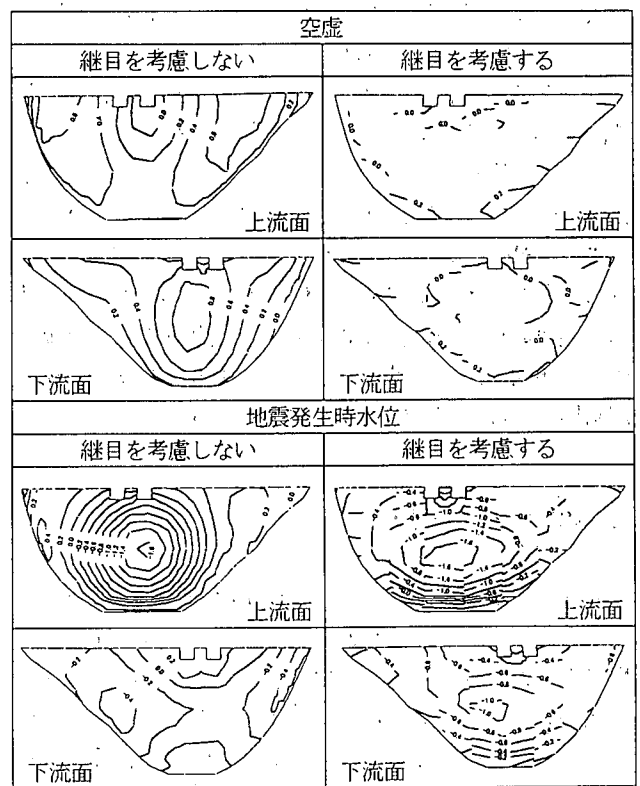


図6 空虚及び地震発生時水位で接線方向応力分布 (N/mm²)

べる。

図-6には貯水池の空虚時並びに地震発生時水位の上下流面における接線方向の応力分布を示す。空虚時の継目を考慮しない場合、上下流面ともに接線方向に引張応力が生じている。これに対して、継目を考慮した場合、

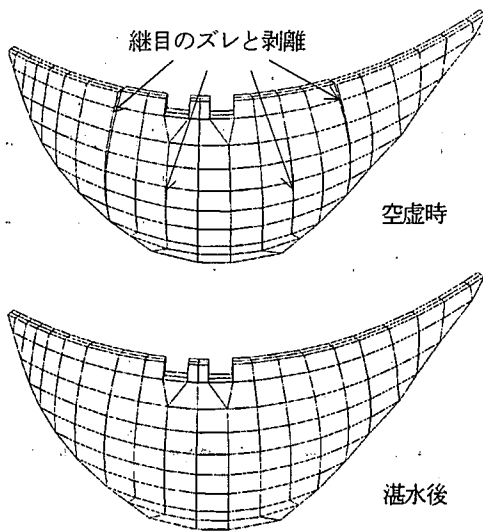


図-7 空虚時と貯水時ダムブロック間の相対変位

この方向の引張応力はほとんど生じない。湛水時、継目を考慮しない場合と比べて上下流面ともに圧縮応力が若干大きくなっている。またこれらの応力分布から継目の存在により応力の不連続性が見られる。鉛直応力については、継目を考慮しない時と考慮した時とで、最大応力値には大きな差はないが、継目を考慮すると、鉛直応力がほぼ鉛直位置に依存する。継目を考慮しない時は基礎との隣接部付近では鉛直応力の変化が比較的大きい。

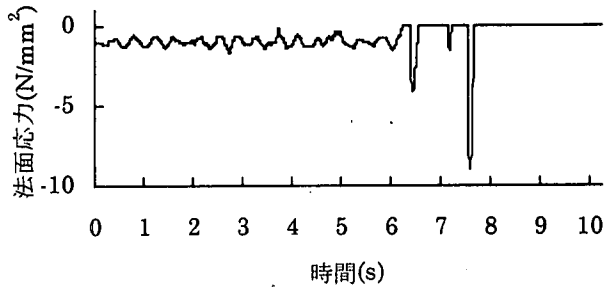
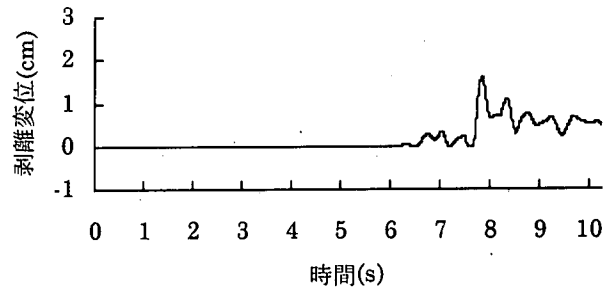
また、図-7には継目をモデル化した場合、空虚時から湛水後まで堤体の変位図の変化を示す。空虚時では、堤体の幾何形状及び自重によりブロック間のズレと剥離が生じる傾向がある。湛水後は水圧の作用によって、継目が密接して堤体が一体となる傾向になる。

5.大地震に対する応答

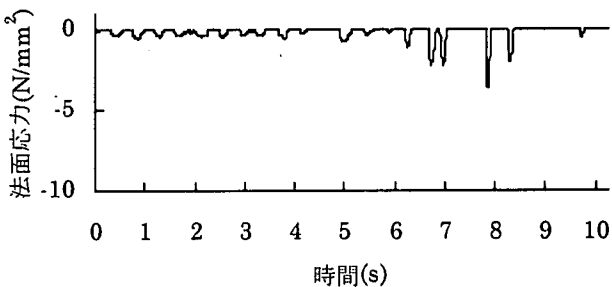
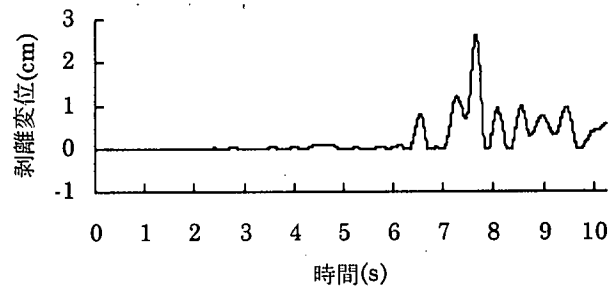
図-5 に示す地震動をダムの上流面最低端の振動として三次元的に解析モデルの底面に引戻し、得られた入力岩盤面の地震動を用いて加振した。ここで、堤体ブロック間の継目及び周辺継目の挙動並びに継目を考慮した解析と従来の堤体を連続体とした解析の比較に着目して考察する。

(1) 継目の挙動

継目の挙動については、例として図-8にクレスト中央の縦継目及びダム最低端の周辺継目の接触面法線方向の挙動を示す。クレスト中央では最大約1.6cm、ダムの底面では最大約2.6cmの剥離が生じたことがわかる。ダム底面の流側が静的な水圧に作用され、地震発生前に既に微小な引張応力の常時状態になっていたため、地震時比



(a) クレスト中央堤体ブロック間の相対挙動



(b) ダム上流面最低端と基礎との相対挙動

図-8 クレスト中央及びダム底面継目の挙動

較的大きな剥離変位が生じた。ダムの止水材料に対してこの程度の相対変位は許容できないが、実ダムにはブロック間及び周辺継目では鉄筋が設けられているので、実際の相対変位はこの解析結果より小さいと考えられる。

(2) 堤体の挙動

表-3には堤体の地震応答の最大値をまとめた。その内、引張応力と圧縮応答の最大応答値の分布を図-9と図-10に示す。また、クレスト中央の接線方向の応力時刻歴の例を図-11に示す。

継目を考慮しない場合と比べると、継目を考慮した場合、堤体の引張応力応答がはるかに小さくなったことが

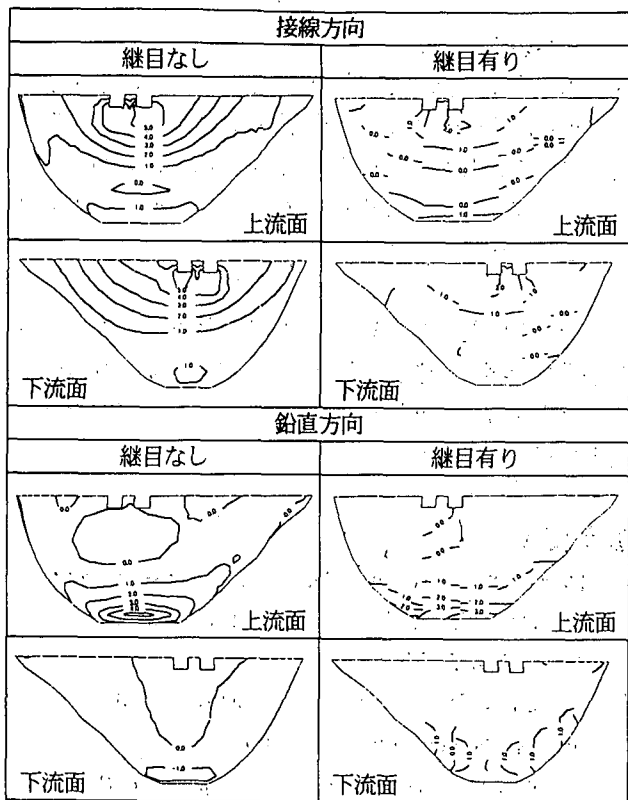


図-9 堤体の最大引張応力分布

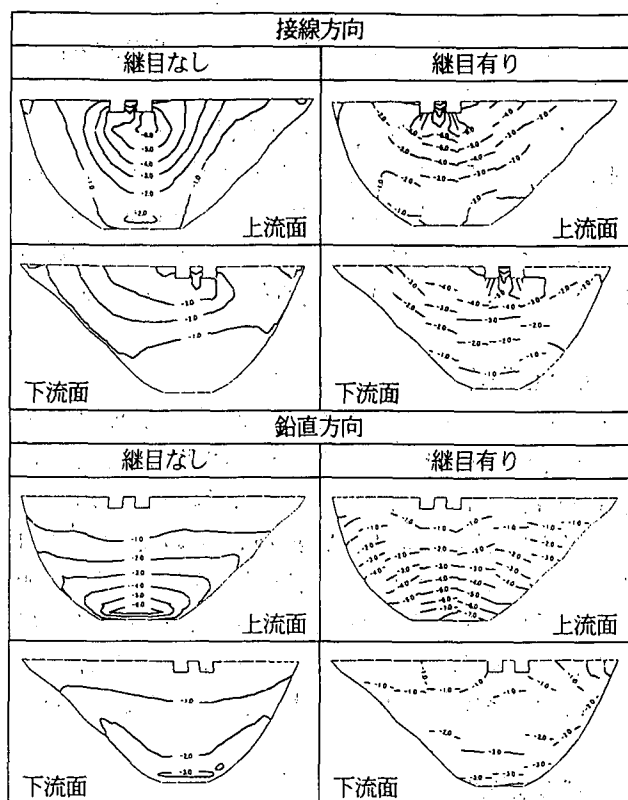


図-10 堤体の最大圧縮応力分布

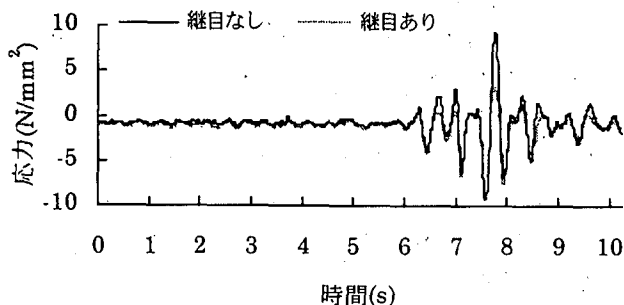


図-11 クレスト中央の接線方向応力応答

わかった。接線方向の引張応力は、継目を考慮しない時 9.32N/mm^2 であり、コンクリートの引張強度を大幅に上回った。これに対して、継目を考慮した場合は、接線方向の引張応力は 3.17N/mm^2 であり、約三分の一に減少した。周辺継目が存在しているため、鉛直応力応答もある程度小さくなった。圧縮応力については、継目を考慮しない時と比べ、逆に接線方向も鉛直方向も若干大きくなった。これは継目が開くときの応力の再配分によるものと考えられる。ひずみ応答を考察すると、応力応答と類似な変化傾向が見られた。最大引張ひずみ値は、継目を考慮しない時接線方向で 3.99×10^{-4} であり、普通のコンクリートの極限值を大幅に超過したが、継目を考慮した時は鉛直方向で 1.92×10^{-4} となった。

最大変位は継目を考慮した場合約2割程度大きくなっ

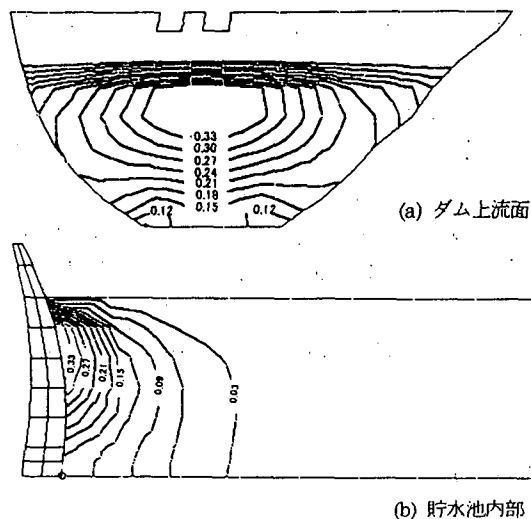


図-12 ダム上流面及び貯水池内部の動水圧分布

表-3 大地震時の解析結果のまとめ

項目	方向	継目無	継目有
最大引張応力 (N/mm^2)	接線	9.32	3.17
	鉛直	6.76	4.05
最大圧縮応力 (N/mm^2)	接線	9.14	10.59
	鉛直	7.48	8.64
最大引張歪 ($\times 10^{-4}$)	接線	3.99	1.67
	鉛直	2.28	1.92
最大圧縮歪 ($\times 10^{-4}$)	接線	3.25	3.58
	鉛直	2.77	2.93
最大加速度 (Gal)	上下流	3027	3080
最大変位 (cm)	上下流	11.99	14.23

た。しかし、今回の事例では加速度応答の明確な変化は見られなかった。

応力とひずみの分布図の形状が継目の存在によりある程度変化したこともわかった。継目を考慮しないと、接線方向の応力とひずみは大体ダム中央域に集中し、継目を考慮すると、よりよい分布が見られた。これは継目による応力分布への望ましい影響であると考えられる。

(3) 動水圧挙動

図-12 にダム上流面及び貯水池の上下流方向断面で生じた動水圧の分布を示す。ダム上流面では最大動水圧は 0.37N/mm^2 に達しており、しかも水面より $1/3$ の深さ位置で発生している。従来、Westergaard の式に基づく付加質量法により動水圧荷重の影響を考慮しているが、明らかに妥当性が欠けていると考える。これは主にダムの柔性及び貯水池境界からのエネルギー逸散並びに相互作用の影響を考慮するか否かによる違いであると考えられる。

(4) 耐震性評価

ダム底面で最大加速度振幅 500Gal という大地震を想定した場合でも継目を考慮した解析では堤体に生じる最大引張応力は約 3.2N/mm^2 であり、しかも瞬時的なもので比較的小さい範囲内に限られている。従って、クラックが生じる可能性はあるが、ダムの全体的な崩壊には至らないと考えられる。アーチ方向の最大引張応力は上下流面のクレスト中央付近で、鉛直方向の最大引張応力は上下流面の最低端付近で生じることから、もしクラックが発生するとすれば、その方向は、クレスト中央付近で縦方向、上下流面の最低端付近で水平方向であると予測される。引張ひずみ応答から、同じような損傷傾向が見られた。最大圧縮応力は 10.59N/mm^2 であり、圧縮側の安全性は十分あると考えられる。

6. まとめ

以上の結果から次のようなことが言及できる。

- ① 大地震の場合、構造継目の存在がアーチダムの地震応答に対して顕著な影響を与える。この影響を考慮しない解析では堤体の応力応答を適正に評価できない。
- ② 最大加速度振幅 500Gal の地震を想定した場合、クレスト中央付近の小さい範囲で縦方向に、クラウンの上下流面の低端で水平方向にクラックか亀裂が発生する可能性があるが、堤体の全体的な崩壊には至らないと考えられる。
- ③ 地震時の動水圧荷重の考慮方法については、従来の付加質量法はダム耐震設計の高度化視点から考えると不適切であり、厳密な連成解析手法を用いるこ

とが必要である。

- ④ 本研究で開発した接触面要素並びにこの貯水池モデルはアーチダムの耐震性評価に大変有効である。
- ⑤ アーチダムは構造継目が存在するので、大地震時にコンクリートの非線形性より継目の非線型性が卓越するものと推定される。

今後の課題として、ダムの地震応答観測とともに継目の挙動も計測する必要がある。観測結果より継目のモデル化手法、特に継目の物性値の設定についての合理化、高度化が必要である。

参考文献

- [1] Hansen K.D., Roehm L.H.: "The response of concrete dams to earthquake". Water Power and Dam Construction 1979; 31(4): 27-31
- [2] Clough R. W.: "Nonlinear mechanisms in the seismic response of arch dams", International research conference on earthquake engineering, Skopje, Yugoslavia, 1980
- [3] Dowling M.J., Hall J.F.: "Non-linear seismic analysis of arch dams", J. Engrg., Mech., 115(4), 768-789, 1989
- [4] Fenves G.L., Mojtahedi S., Reimer R.B.: "Parameter study of joint opening effects on earthquake response on arch dams", Report No. UCB/EERC-92/05 Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1992
- [5] Chen H.Q., Yeh C.Y.: "Joint opening of arch dam during earthquake, Experimental and analytical results", Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research, Beijing, China, 1996
- [6] Watanabe H., Razavi S.: "Effects on joint opening and material nonlinearity on the seismic response of a concrete arch dam", 12th world Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Jan., 2000
- [7] 電源開発(株): "UNIVERSE, A Program for 3-D Static & Dynamic Analysis of Dams, 1999
- [8] H. Watanabe, Z. Cao: "Upstream Boundary of Reservoir in Dynamic Analysis", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.124, pg.468-470, April 1998
- [9] Fusanori Miura, Hiroshi Okinaka: "Dynamic Analysis Method for 3-D Soil - Structure Interaction Systems With the Viscous Boundary Based on the Principle of Virtual Work", Journal of JSCE, Vol.404, April, 1989