論文　地震応答解析における重力式コンクリートダム堤体モデル化が動的応答に及ぼす影響

西内　達雄[*1]

要旨：重力式コンクリートダムの 2 次元および 3 次元地震応答解析により，堤体モデル化の違いが動的応答に及ぼす影響を把握した。同じ堤高のダムでも 2 次元モデルと 3 次元モデルでは，堤体の振動モードに起因して，2 次元モデルでは堤体頂部の損傷が顕著となるが，3 次元モデルでは高標高の堤体岩着部での損傷が顕著となる。そして，同じ入力地震動に対して 3 次元モデルの方が 2 次元モデルよりも損傷は軽微となる。3 次元モデルにおいて堤体横継目の影響は小さく，堤体を連続構造として扱う線形解析と大差ない。以上より，設計等で扱う 2 次元による堤体モデル化は安全側の評価結果を与えることが示された。

キーワード：重力式コンクリートダム，地震応答解析，耐震性能照査，解析モデル

1. はじめに

日本国内におけるダムの耐震設計は，1976 年制定の「河川管理施設等構造令」[1)]に基づき，地震力を震度法により考慮する方法で行われてきた。この震度法で設計されたダムは，1995 年の兵庫県南部地震を初めとする既往の地震でも大きな損傷を受けたことはなく，震度法による耐震設計がなされたダムは十分な耐震性を有していることが確認されている。しかし，兵庫県南部地震以降の地震観測網整備により，兵庫県南部地震を上回る地震動が観測されるようになってきたこと，大規模地震に対する土木構造物の安全性に対する社会的関心が高まってきたことなどを受けて，2005 年 3 月に国土交通省から「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説」[2)]（以下，国交省指針案と称す）が通知され，直轄ダムに対して試行されている。国交省指針案はダムの耐震性能を合理的に説明できる技術指針として位置づけられ，その最大の特徴は，レベル 2 地震動（当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動）という大きな外力に対して，ダム本体の損傷をある程度許容するとしている点である。国交省指針案では，ダムへの要求性能として，当該地点で考えられるレベル 2 地震動に対して，「地震時に損傷が生じたとしても，ダムの貯水機能が維持されるとともに，生じた損傷が修復可能な範囲にとどまること」の 2 点を設定している。

国交省指針案は，試行期間を経た後に本格運用されることが予定されており，国交省指針案に沿い照査を進める上では，現状の有限要素解析法に基づく地震応答解析手法や解析仮定，モデル化方法などの特徴や課題を把握し，具体的に進めていく際の手引きとなる資料を整備しておくことは重要である。それと同時に，解析結果は解析条件や仮定，モデル化方法等に依存するため，これらを理解した上で適切な評価を実施する必要がある。このため本検討では，国内電力会社が保有する既設ダム約 300 基強のうち，その大半を占める重力式コンクリートダム（約 250 基）を対象として，地震応答解析における堤体モデル化の違いが応答加速度や発生応力等の動的応答に関する解析結果に及ぼす影響を把握した。これにより，合理的なダムの耐震性能照査を進める上での基礎資料とした。

2. 解析概要

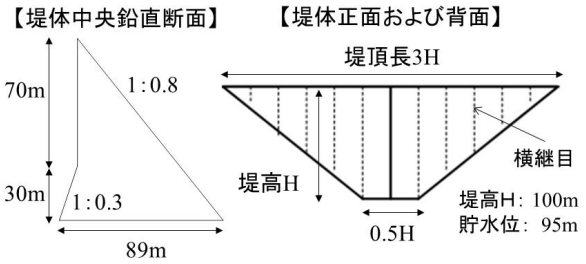
2.1 解析手法と解析モデル

(1) 解析手法

解析手法は有限要素法による堤体と基礎岩盤（周辺地山含む），貯水連成モデルでの時刻歴地震応答解析である。解析は，汎用解析コード「ABAQUS（ver.6.5-6）」を用いて，貯水部は水要素（流体要素）で扱った。

(2) 解析モデル

解析では，ダムの設計などで標準的に用いられる 2 次元モデルと，実態に即した応答を示す詳細な方法と考えられる 3 次元モデルを用いた。解析で用いた重力式コンクリートダム堤体断面は全てのモデルで共通とした。

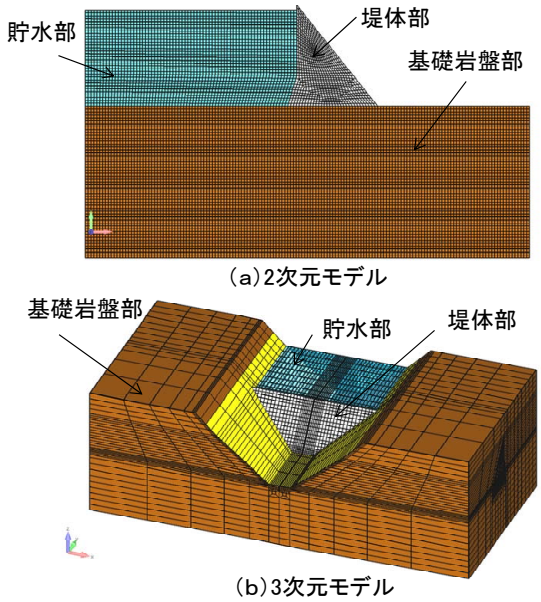


図－1　堤体断面等の諸元

その諸元としては図－1 に示すとおり，堤高 100m，上流面に高さ 30m で勾配 1:0.3 のフィレットを有し，堤

*1　（一財）電力中央研究所　地球工学研究所構造工学領域上席研究員　工博　(正会員)

体の下流面勾配は 1:0.8 である。この形状諸元は，佐久間ダム（電源開発，堤高 155.5m）や有峰ダム（北陸電力，堤高 140m）など電力会社の代表的なダムの堤体断面 [3] を参考に定めたものである。3 次元モデルでのダム形状としては，堤頂長を堤高の 3.0 倍，堤体底面の左右岸ダム軸方向長を堤高の 0.5 倍とした。堤体の横継目を考慮したモデルでは，ダム軸方向に約 15m 間隔でそれを設けた。モデル化領域は，上下流方向は堤体を中心に堤高の約 4.5 倍，左右岸ダム軸方向は堤体を中心に堤頂長の約 3.0 倍，基礎岩盤深さ方向は堤高の約 3.0 倍の領域とした。解析に用いた要素分割を**図－２**に示す。



（a）2次元モデル

（b）3次元モデル

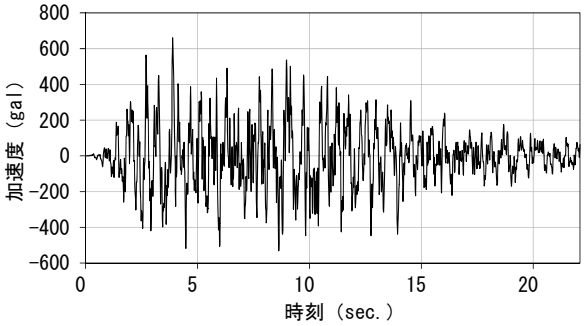
図－２　解析に用いた要素分割

(3) 境界条件

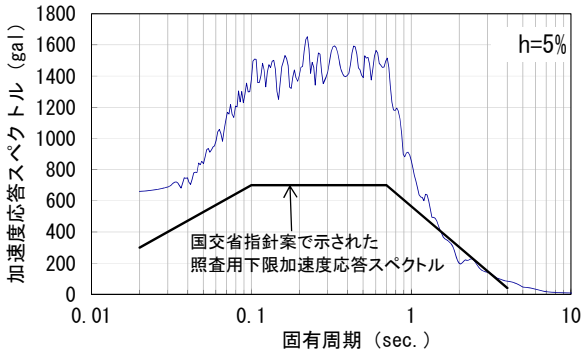
解析モデルの境界条件として，固有値解析では基礎岩盤の底面および側面を完全拘束した。上下流方向入力の地震応答解析では，基礎岩盤の側面を水平面ローラー支承，底面を鉛直拘束，水平面ローラー支承とした。

2.2 地震動

地震動は，まず国交省指針案の方法に準拠して，波形振幅は照査用下限加速度応答スペクトルで規定し，ランダム位相を用いて作成した。次に，地震動の最大加速度が 660gal となるように振幅調整した波形を作成して，これを解析で用いた。これは，別途実施した地震応答解析結果から堤体の損傷が軽微であったためである。作成した地震動の加速度時刻歴波形，加速度応答スペクトルを**図－３**に示す。解析では，解放基盤位置（堤体より下流の河床部）で作成した地震動が再現されるように解析モデル底面に地震動の伝達特性を用いて引き戻ししている。地震動の入力方向は 2 次元解析および 3 次元解析とも上下流の 1 方向とした。



（a）加速度時刻歴波形



（b）加速度応答スペクトル

図－３　地震動波形

2.3 荷重条件と物性値

(1) 荷重条件

荷重条件として，常時荷重は貯水の静水圧，揚圧力，堆泥圧，自重を，地震時荷重は貯水の動水圧と地震動を考慮した。荷重条件の算定に用いる係数，定数は河川管理施設等構造令もしくはダム設計基準 [4] に準拠した。以下に，主な荷重条件の詳細を記す。

貯水位は堤体天端より 5m 低い標高と仮定して，静水圧は堤体上流面に対して直交方向の面圧として作用させた。

揚圧力分布は，堤体底面の上流端を 1/3 水頭，下流端を 0 水頭とする三角形分布で作用させた。

堆泥高さは貯水位の約 1/3 である 30m と仮定して，堤体上流面に対して直交方向の面圧として作用させた。

動水圧は解析コード「ABAQUS」の音響要素（水要素）により考慮した。すなわち，堤体-貯水間および貯水-基礎岩盤間の界面には，水圧を伝達する音響インターフェース要素を設けた。ただし，貯水境界面でのインピーダンス比は考慮しておらず，非圧縮性流体として完全反射の条件 [5] である。

(2) 物性値

解析に用いた物性値を下記に記す。

堤体の単位体積重量は 2.3t/m^3，基礎岩盤の単位体積重量 2.6t/m^3 とした。いずれの値も一般値である。

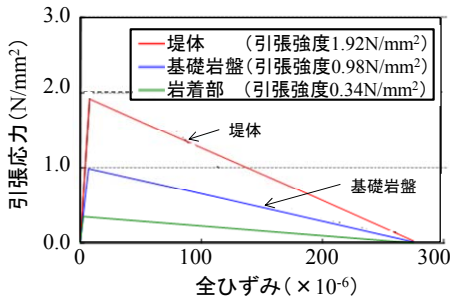
堤体の動弾性係数は 2.5×10^4N/mm^2，基礎岩盤の動弾性係数は 1.5×10^4N/mm^2 とした。いずれの値も，重力ダ

ムのコンクリート配合や C_M 級基礎岩盤での一般値を想定[6]したものである。

減衰はレイリー減衰で設定した。レイリー減衰の設定に際し，まず，堤体-基礎岩盤-貯水連成モデルで固有値解析を実施して，堤体の 1 次と 2 次の固有振動数を把握した。次に，堤体の 1 次と 2 次の固有振動数で所定の減衰となるようにレイリー減衰定数（質量比例減衰 α，剛性比例減衰 β）を設定した。所定の減衰としては，既往解析事例[7),8)]を参考に，堤体および基礎岩盤とも 5%を基本とした。

(3) 材料の非線形性

非線形解析では，堤体と基礎岩盤，堤体岩着部に対して**図－４**に示すように，引張破壊以降の応力開放をひずみ依存で定義するモデルを適用した。基礎岩盤では亀裂の開口やせん断破壊が支配的と考えられるが，ここでは簡便に堤体と同じに扱うこととした。設定した引張強度は，堤体は一般値の 1.92 N/mm^2 を，基礎岩盤は C_M 級岩盤のせん断強度の下限値[6]として 0.98N/mm^2 を，堤体岩着部は関連研究[9]を参考に 0.34N/mm^2 とした。そして，このモデルを用いた非線形解析での破壊を損傷と称した。3 次元モデルでの堤体の横継目は，引張に対してはノーテンション，せん断に対してはクーロン則（せん断強度 1.0N/mm^2，内部摩擦係数 0.733）で定義[9]した。



図－４　材料の非線形性（引張領域）

解析ケースを**表－１**に示す。

表－１　解析ケースとモデル化条件

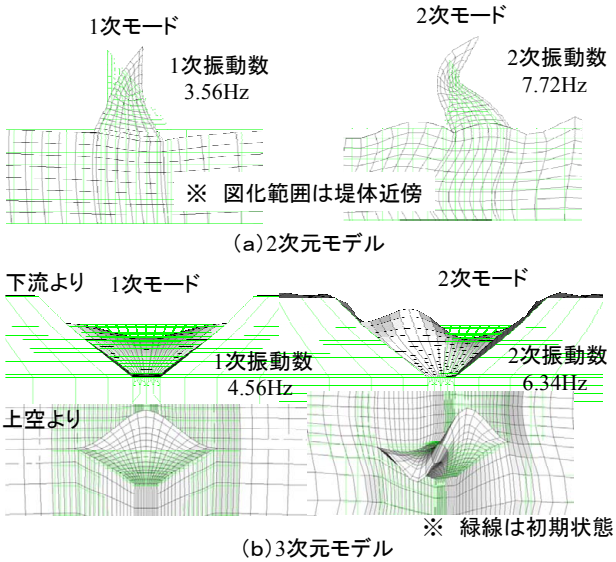
No.	解析モデル	非線形性の考慮箇所
1	2次元モデル	なし（線形）
2		堤体、岩着部
3		堤体、岩着部、岩盤
4	3次元モデル	なし（線形）
5		堤体、岩着部
6		堤体、岩着部、岩盤
7		堤体横継目

3. 堤体の固有値解析結果

堤体の振動モードと刺激係数に着目して，2 次元モデルと 3 次元モデルの固有値解析から得た 1 次および 2 次振動数と振動モードを**図－５**に示す。

2 次元モデルと比べて，3 次元モデルでの堤体の 1 次振動数は高振動数となっている。3 次元モデルでは堤体を支持する岩盤領域が 2 次元モデルよりも広範囲となるため，見かけ上の岩盤部の拘束効果が大きくなった影響と考えられる。3 次元モデルでは，1 次振動数と 2 次振動数は近接し，両者の差は 2 次元モデルよりも小さくなっている。そして，2 次元モデルと 3 次元モデルでは堤体の 2 次振動モード形状が異なることがわかる。2 次元モデルでの 2 次振動モードに対応する 3 次元モデルでの振動モードは，堤体ダム軸方向が対称 1 次形あるいは逆対称 1 次形と推測されるが，実施した固有値解析の結果からは確認できなかった。本解析はモデルダムであり，実際のダムの固有振動数や振動モードと比較できないが，地震観測記録より得られた堤高と固有振動数との関係式[10)]によると，概ね 3 次元モデルでの結果が実態に即していると推測される。

以上より，固有振動数と振動モードが解析モデルの違いで異なることから，解析モデルや解析条件が安全側の条件設定であることを確認しておくとともに，常時微動計測や地震観測等により対象ダムの振動特性を把握しておくことは重要と考えられる。



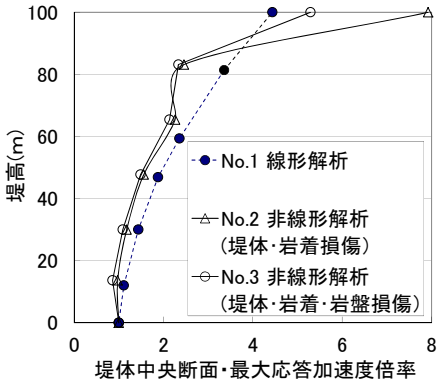
図－５　固有値解析における固有振動数と振動モード

4. 堤体応答の解析結果

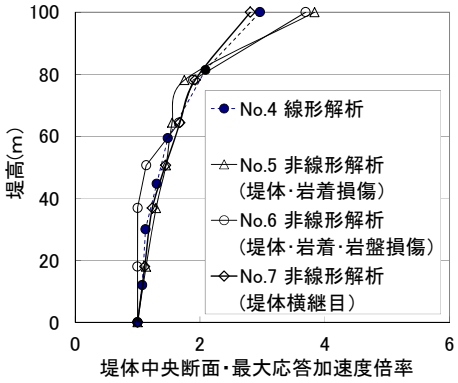
2 次元モデル, 3 次元モデルとも堤体部で上下流方向に最大応答を示す中央断面で，全時刻歴を通して各堤体標高での最大応答加速度（上下流方向）を，堤体底面の入力方向の最大応答値で正規化した最大応答加速度倍率の分布で整理した。

最大応答加速度倍率の分布のうち，2 次元モデルの結

果を図－６に，3 次元モデルの結果を図－７に示す。



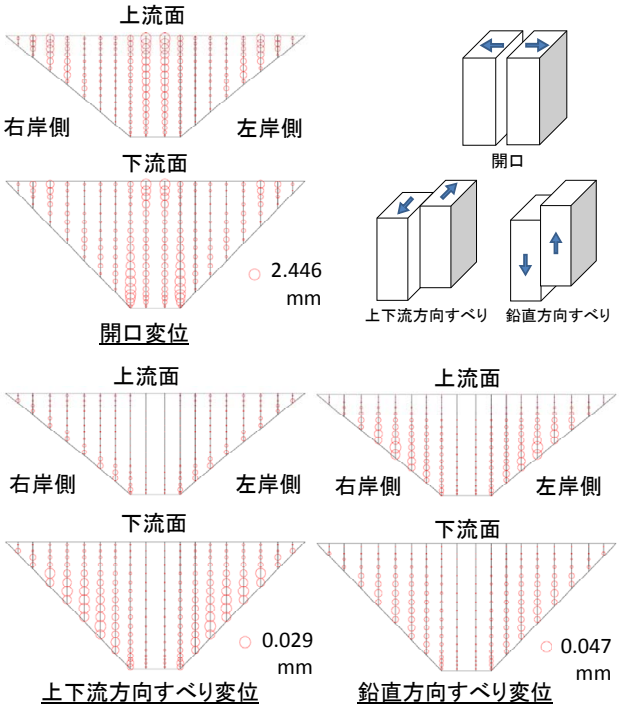
図－６　2 次元モデルでの堤体最大応答加速度倍率分布



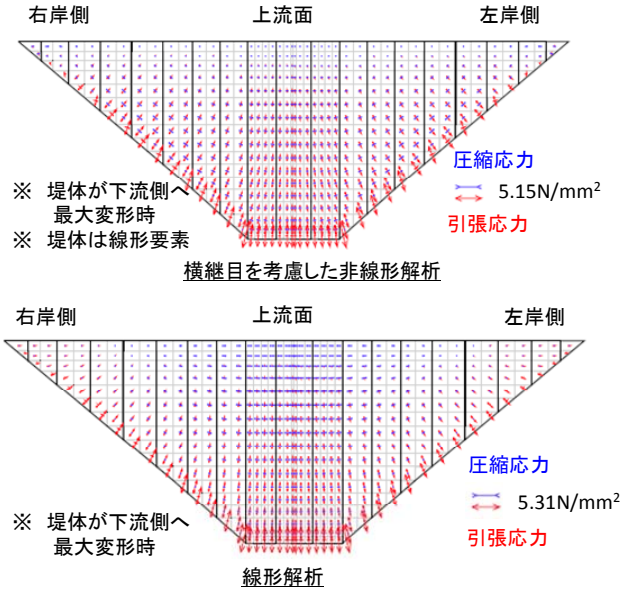
図－７　3 次元モデルでの堤体最大応答加速度倍率分布

損傷を考慮した非線形解析と線形解析を比較すると，2 次元モデルおよび 3 次元モデルとも，堤高 80m を越える堤体高標高部を除けば堤体の最大応答加速度倍率には大差ないことがわかる。堤体高標高部では，その近辺で損傷が生じたことに起因して，堤体天端での最大応答加速度倍率は非線形解析の方が線形解析よりも大きくなっている。非線形解析での損傷状況については後述する。

横継目の非線形性を考慮した 3 次元モデルについては線形解析と同程度の結果で大差ない。これは，図－８に示すように，地震時に横継目で生じた堤体ブロック間の変位は開口が支配的であり，すべり変位は小さいため，堤体全体が比較的連続構造として応答しているためと考えられる。堤体の主応力分布についても，図－９に示すように，高標高部の横継目でダム軸方向圧縮応力が解放されていることを除くと大差なかった。また，損傷を考慮した非線形解析のうち，堤体と基礎岩盤，岩着部での損傷を考慮した方が，堤体と岩着部のみで損傷を考慮した場合よりも最大応答加速度倍率は若干小さくなる。これは，岩盤の損傷を考慮すると，堤体を支える基礎岩盤の支承としての拘束効果が小さくなり，堤体応答が低減されるためと考えられる。



図－８　堤体横継目の変位分布解析結果（経験最大値）



図－９　堤体主応力分布における堤体横継目の影響

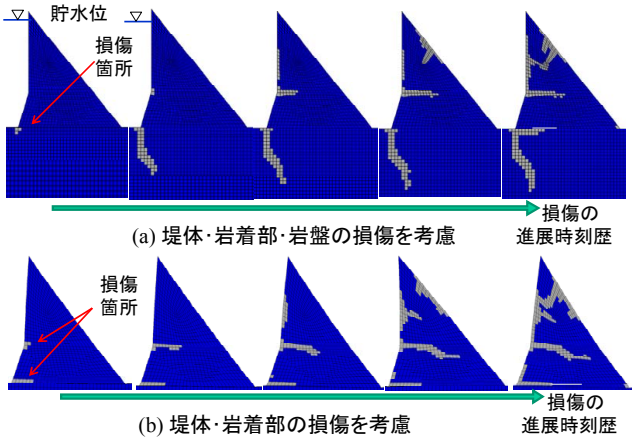
最大応答加速度倍率については 2 次元モデルの方が 3 次元モデルよりも大きい。これは，3 次元モデルでは堤体側方のダム軸方向の左右両岸岩盤による地震時荷重の負担（変形拘束）の影響が卓越し，2 次元モデルでの平面ひずみ状態よりも変位が小さくなるためと考えられる。このことは，堤体の発生応力や損傷状況を比較した場合に，2 次元モデルよりも 3 次元モデルの方が発生応力は小さく，損傷も軽微となることを意味していると考えられる。

解析で得られた堤体の最大応答加速度倍率について，

ダムでの観測記録と比較して考察する。日本国内のダムで観測された強震記録を分析した松本らの論文[10]によると，重力式コンクリートダムの上下流方向に対する堤体の最大応答加速度倍率は概ね 4 と報告されている。本解析では，堤体や基礎岩盤に損傷が発生しうる大規模な入力地震動を扱ったケースであり，観測記録と単純な比較はできないが，2 次元および 3 次元モデルでの線形解析では最大応答加速度倍率は 3～5 を示し，強震記録の分析結果と同程度の値であることから，概ね地震時の堤体応答を解析では再現していると推測される。

5. 損傷状況の解析結果

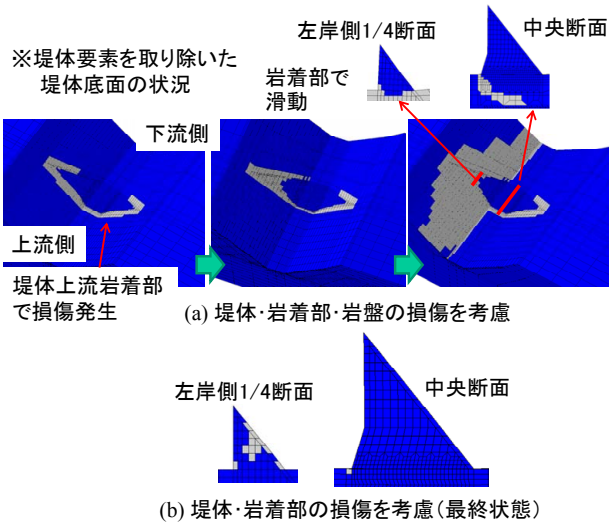
2 次元モデルでの損傷の進展状況を**図－１０**に示す。ここでの損傷とは，前述した通り非線形解析での堤体と基礎岩盤，岩着部での引張破壊のことを意味し，損傷の長さに着目して損傷の貫通が堤体安定性における限界状態（終局状態）と考えた。堤体と基礎岩盤，岩着部での損傷を考慮したケースでは，まず，堤体岩着部の上流端近傍で損傷が発生し，基礎岩盤の深部へと進展した。この損傷はある深度まで到達すると，その後は進展せず，基礎岩盤内で上下流方向に損傷が連続するすべり面は形成されなかった。また，堤体岩着部の上流端近傍での損傷は，岩着部に沿って下流方向にも進展した。さらに，堤体上流面の中段標高にあるフィレット付根近傍でも損傷が発生し，そこから堤体内の水平方向に損傷は進展した。堤体頂部での損傷は，最終的に堤体断面を貫通し，分断する損傷となった。



図－１０　2 次元モデルでの損傷進展状況

一方，基礎岩盤の損傷は考慮せず，堤体と岩着部での損傷のみを考慮したケースでは，基礎岩盤の損傷を考慮したケースと比べて，堤体と岩着部での損傷領域は広範囲となるが，損傷部位は変わらないことがわかる。基礎岩盤が損傷しないことで，その周辺に発生した引張応力が他に分散され，その影響で岩着近傍とフィレット付根近傍での損傷が広範囲になったと考えられる。終局状態が堤体頂部の分断であることは同じである。

3 次元モデルでの損傷の進展状況を**図－１１**に示す。堤体と基礎岩盤，岩着部での損傷を考慮したケースでは，まず，堤体底面の上流端岩着近傍で，ほぼダム軸方向の全長にわたって損傷が発生した。次に，堤体左岸側の底面岩着部が損傷し，左岸側岩盤の表層も損傷が発生した。この時点で堤体中央断面や左岸側 1/4 断面では堤体内部に顕著な損傷はない。これ以降，堤体岩着近傍の浅い基礎岩盤内での損傷が進展して，最終的にそれが上下流方向に貫通，連続化して終局状態に達した。



図－１１　3 次元モデルでの損傷進展状況

このような損傷状況は非線形解析特有の現象であり，左右岸方向で対称位置ではない箇所に局所的な損傷が発生したことで，それ以降の損傷の進展に関する対称性が崩れたため生じた現象と考えられる。本解析条件のように，堤体に比して岩着部や基礎岩盤の引張強度が小さい 3 次元解析では，堤体内部よりも岩着部や基礎岩盤での損傷が顕著になると考えられる。

一方，基礎岩盤の損傷は考慮せず，堤体と岩着部での損傷のみを考慮したケースでは，堤体は損傷し，その損傷領域も岩着部や基礎岩盤での損傷を考慮したケースよりも大きいが，損傷は上下流方向に貫通せず終局状態には達しなかった。これは，基礎岩盤で損傷が生じた場合，堤体や岩着部の応力は緩和されて，そこでの損傷は軽微となるが，本解析では基礎岩盤を損傷させないため，堤体や岩着部の応力が相対的に増大したためと考えられる。

同じ入力地震動に対して 2 次元モデルと 3 次元モデルで損傷状況の違いを把握するため，基礎岩盤の損傷を考慮しないケース同士で比較した（**図－１０**，**図－１１**参照）。2 次元モデルでは損傷が堤体を貫通して終局状態に達するが，3 次元モデルでは損傷は貫通せず，堤体は終

局状態に達しないことがわかる。前述の堤体応答倍率の比較からも，3 次元モデルは 2 次元モデルよりも応答倍率は小さく，堤体の発生応力も相対的に小さくなると推測される。

従来知見[7),8)]によると，2 次元モデルは 3 次元モデルに比べて地震時応答を大きく評価することが明らかとなっており，設計や耐震性能照査において 2 次元モデルによる堤体断面として扱うことは概ね安全側の評価結果を与えるものであると考えられる。

一方で，本解析結果から 2 次元モデルと 3 次元モデルでは損傷状況が異なることや，**図－１１**で示された 3 次元モデルでの損傷の非対称性などが想定され，それらへの留意が必要と考えられる。例えば 2 次元モデルで評価断面を複数設定して，3 次元モデルでの解析から得られる加速度や変位等の結果を用いて，2 次元モデルの評価断面に対する詳細検討を行うなどである。

近年，想定すべき地震動レベルが益々大きくなる傾向にあり，地震動の作用方向や位相特性，継続時間などが堤体安定性に与える影響について，より詳細に検討する必要が生じてきた。このような状況を考えると，従来からの 2 次元モデルによる解析の範疇では評価が不十分と考えられることも予想される。その場合，2 次元モデルでの解析に加えて，より実態に即した 3 次元モデルでの解析を実施することや，前述した 2 次元モデルでの評価断面を複数設定して，擬似的に 3 次元モデルを考慮する解析など工夫が必要になってくると推測される。

6. まとめ

重力式コンクリートダムの 2 次元および 3 次元地震応答解析により，堤体モデル化の違いが動的応答に及ぼす影響を把握した。得られた主な結論を以下に示す。

(1) 同じ堤高のダムでも，2 次元と 3 次元のモデル化の違いにより，固有値解析から得られる堤体の固有振動数，振動モードは異なる。

(2) 2 次元と 3 次元のモデル化の違いにより，堤体の応答加速度，損傷の発生箇所および領域は異なる。2 次元モデルでは堤体頂部の損傷が顕著となるが，3 次元モデルでは堤体高標高の岩着部での損傷が顕著となる。

(3) 同じ入力地震動に対しては，3 次元モデルの方が 2 次元モデルよりも損傷は軽微となり，2 次元による堤体のモデル化は安全側の評価結果を与えることが確認できた。

従来ダムの設計では，堤体の横継目で区切られたブロックを対象として 2 次元断面での検討が主として行われてきた。昨今，大規模地震に対するダムの耐震性能照査が必要とされ，2 次元断面による照査では必ずしも性能が満足されない事態も想定されるようになり，3 次元モデルや非線形解析など精緻な方法での照査が求められるようになってきた。本検討結果は限られた解析条件に基づき得られた結論であり，今後は堤体形状や入力地震動の特性，解析物性など他の要因の影響も加味して，合理的な耐震性能照査の方法に資する基礎資料としたい。

参考文献

1) 日本河川協会：解説・河川管理施設等構造令，1950.3
2) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説，http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/daml2/，2005.3
3) 電力土木技術協会：水力技術百年史，1992.6
4) 日本大ダム会議：ダム設計基準（第 2 次改訂），1978.8
5) 塩尻弘雄：地震時のダムへの動水圧について，大ダム No.99，pp.71-85，1982.3
6) 堤菊池宏吉：地質工学概論，土木工学社，1990.3
7) 塩尻弘雄，上田稔：ダムー岩盤ー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, 2000.1
8) 塩尻弘雄，上田稔：ダムー岩盤ー貯水の連成を考慮した一庫重力式コンクリートダムの兵庫県南部地震応答シミュレーション解析，ダム工学 Vol.8, No.2, pp.85-92，1998.
9) 西内達雄：重力式コンクリートダムの耐震性能評価技術の高度化（その１）模型実験と地震応答解析による損傷評価，電力中央研究所研究報告 N11025，2012.3
10) 松本徳久，大町達夫，安田成夫，山口嘉一，佐々木隆，倉橋宏：ダムで観測された強震記録の解析，大ダム，No.193，pp.88-94，2005.10