

◆特集：大規模地震に対するダムの耐震性能照査◆

レベル2地震動に対する重力式コンクリートダムの耐震性能照査

山口嘉一* 佐々木 隆** 金縄健一*** 佐野貴之****

1. はじめに

現在、日本のダムの耐震設計は、河川管理施設等構造令¹⁾に基づき簡便な震度法により行われている。震度法により設計されたダムは、過去の大地震によって重大な被害を受けていないことから、その耐震性は十分に高いものと判断されている。

一方、1995年の兵庫県南部地震、2000年の鳥取県西部地震のような大地震の発生を契機に、重要構造物であるダムにおいては、レベル2地震動に対する所要の耐震性能を確保することが強く求められている。そこで、国土交通省河川局は2005年3月に「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)」²⁾(以下、指針(案)と呼ぶ)をまとめた。

本報では、その指針(案)で示された規定に沿って、大規模地震に対する重力式コンクリートダム本体の耐震性能のうち貯水機能維持の照査手法の考え方を示し、モデルダムに対する具体的検討事例について報告する。

2. 耐震性能照査の流れ

指針(案)において、ダム本体の耐震性能の照査は、ダム本体に損傷が生じたとしても、その貯水機能が維持されることをダムの構造特性に応じた適切な地震応答解析により確認するとともに、生じた損傷が修復可能な範囲にとどまることを確認することにより行うこととされている。コンクリートダムの場合、想定される主たる損傷形態は、堤体内に引張亀裂が発生することである³⁾。

重力式コンクリートダム本体の耐震性能照査の流れを図-1に示す。個々のダムサイトにおいて設定されたレベル2地震動⁴⁾を用いて、線形動的解析を行う。その結果、ダム本体に損傷が生じるおそれがある場合は、さらに損傷過程(引張亀裂の発生)を考慮した地震応答解析を実施し、耐震性能を評価する。その際、ダム本体に発生する引張亀裂の評価方法が必要となる。

引張亀裂の発生を考慮した地震応答解析の結果、仮に解析上、引張亀裂が堤体を上下流方向に連続

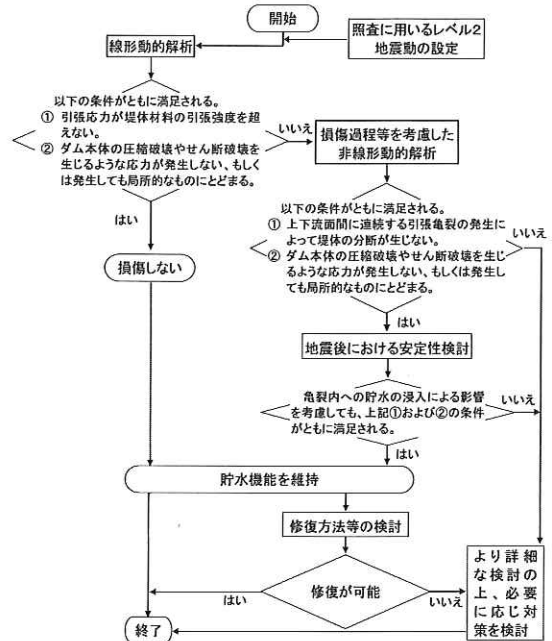


図-1 重力式コンクリートダム本体の耐震性能の照査の流れ

する場合であっても、その上部の堤体ブロック全体が不安定化しなければ、貯水の制御できない流出は生じず、ダムの貯水機能は維持されと考えられる。しかし、引張亀裂の進展範囲については解析上の推定精度に一定の限界がある。そこで、安全側の判断として、引張亀裂の発生によって堤体の分断が生じなければ、重力式コンクリートダムは貯水機能を維持できると考えることができる。また、地震時にダム本体に引張亀裂が生じるおそれがある場合、地震後に亀裂内に浸入する貯水の影響によりダム本体を分断しないことを確認する必要がある。

3. 解析モデルと解析概要

3.1 解析モデルの設定

重力式コンクリートダム堤体は、ダム軸方向を横断するような横継目によって幅15m程度のブロックごとに分割されていることから、設計においては2次元断面でその構造安定性を確認している。そこで、耐震性能照査においても、基本的には2

Evaluation of Seismic Performance of Concrete Gravity Dams due to Level 2 Earthquake Motions

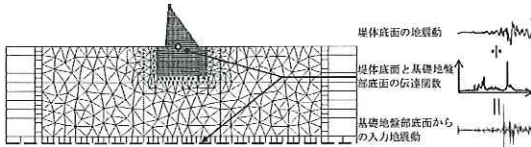


図-2 ダム堤体および基礎地盤のモデルと伝達関数を利用した地震動の引戻計算方法

次元断面で検討を行うことができると考えられ、その際には、地震時に最も厳しい条件になると予想される最大断面等を対象とする必要がある。

堤体の地震時応答には基礎地盤の変形性が影響を与えることから、図-2に示したように、堤体に加えて基礎地盤もあわせてモデル化するのがよい。基礎地盤部の境界条件は、領域外への地震動伝播を考慮し、エネルギー逸散が適切に考慮できるものが望ましい。なお、堤体のみをモデル化した場合、解析上堤体内の発生応力は比較的大きくなる傾向がある。

地震時動水圧は、貯水を圧縮性流体として取り扱ってその影響を考慮するのがよいが、実用的には、貯水を非圧縮性流体とみなして付加質量マトリクス等により考慮する方法も採りうる⁵⁾。

コンクリートダム堤体内の引張破壊を数値解析において表現する方法の主なものとして、離散型ひび割れモデルと分布型ひび割れモデル (Smearred crack model) がある。両者に得失はあるものの、重力式コンクリートダムの地震時応答解析では、予めクラックが入る場所を設定する必要がない分布型ひび割れモデルを用いた事例が多くみられる⁶⁾。

3.2 材料物性の設定

コンクリートダム本体の照査解析においては、堤体コンクリートの単位体積質量、弾性係数、ポアソン比、基礎地盤の単位体積質量、弾性係数、ポアソン比の設定が必要になる。また、堤体コンクリートの引張損傷を考慮する際には、引張軟化特性に関する定数 (引張軟化開始応力、破壊エネルギー、引張軟化式) の設定が必要になる。いずれの材料においても、実際の材料物性値に基づいて設定することが必要であり、調査・設計時および施工管理時の資料を参照する必要がある。

一般にコンクリートダムにおいては圧縮強度が設計時の指標となっていることから、設計時に引張強度に関するデータが得られていない場合が多く、引張軟化に関わる定数はほとんど得られていない。そこで、照査解析に当たっては、既に得られているコンクリート材料物性値との関連性を基に、直接得られていない材料物性値を推定し、解析に

用いる方法がとりうる。

基礎地盤部の材料物性のうち弾性係数については、設計時の変形試験結果として得られていることが多いが、変形試験結果は一般に比較的浅い部分の基礎地盤の変形性を反映したものである。動的解析において深部の基礎地盤までモデル化し、基礎地盤内の地震波の伝播を考慮する場合には、基礎地盤部の弾性係数の設定において弾性波探査結果を利用することが適切である。

また、コンクリートダム本体の照査においては、堤体コンクリートおよび基礎地盤の減衰定数を設定することが必要になる。動的解析における減衰特性には、材料物性としての減衰特性 (材料減衰) のほか、それ以外の減衰効果 (逸散減衰等) も含むことになる。そのため、解析モデルに基礎地盤を考慮するか否か、基礎地盤外側にエネルギー吸収境界を考慮するか否か、構造の3次元性を考慮するか否か、などの解析モデルの特徴に応じて設定すべき減衰定数は変わることになる⁷⁾。よって、減衰定数は、ダムで観測された実測地震動を用いた動的解析を行い、ダムの挙動を再現できるように設定することが適切である。照査を行うダムにおいて適切な実測記録が無い場合には、同種のダム形状、同種の解析条件で実施した他ダムの解析事例を参考に、減衰定数を設定することが良い。

4. 照査に用いる入力地震動の設定

当該ダムに最も大きな影響を及ぼす可能性のある地震を選定し、その地震によってダム地点において発生すると推定される地震動の加速度時刻歴波形をダムの耐震性能照査に用いる。

基礎地盤部についてもモデル化する場合は、堤体底面において、ダム地点において設定された照査用地震動が作用するような地震動を解析モデルの基礎地盤部底面から入力する。そのような地震動は、解析モデルにおける堤体底面と基礎地盤部底面との伝達関数を利用して、ダム地点において設定された照査用地震動を基に求めることができる (図-2参照)。なお、堤体のみをモデル化する場合、照査用地震動を堤体底面から直接入力することとなる。

5. 地震応答解析によるダム本体の耐震性能の照査

2、3、4章に示したような考え方に則り、具体的に重力式コンクリートダムを対象とした2次元地震応答解析を実施した例を以下に示す。

5.1 線形動的解析

(1) 解析条件等

上流面にフィレットを有しない堤高58.5mのダム形状を参考に、図-3に示す2次元有限要素(平面ひずみ要素)解析モデルを作成した。解析に用いた堤体および基礎地盤の材料物性を表-1に示す。ここで、堤体コンクリートおよび基礎地盤の弾性係数、減衰定数については、あるダムでの実測地震時挙動を良く再現できた物性値の組合せを用いた。なお、貯水は非圧縮性流体と仮定し付加質量マトリクスによりその影響を考慮した。また、基礎地盤部底面および側面の境界条件は粘性境界とした。揚圧力は考慮していない。

図-4に示す加速度時刻歴波形を照査用地震動とし、堤体底面において、図-4に示す加速度時刻歴波形となるように調整した入力加速度を基礎地盤部底面から入力した。本事例では、本節の線形解析のほか、次節の非線形解析も含めて、解析用プログラムとして汎用有限要素解析コード“DIANA”を用いた。

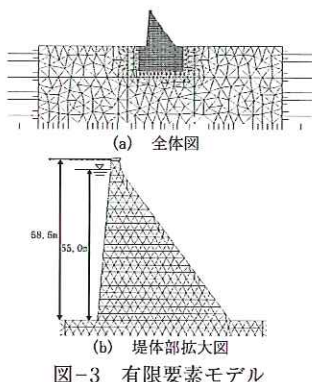


図-3 有限要素モデル

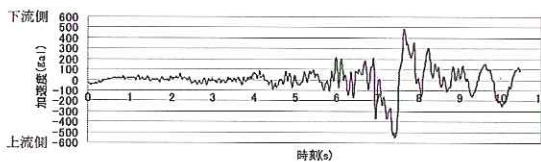


図-4 照査に用いたレベル2地震動の加速度時刻歴波形

表-1 堤体および基礎地盤の物性

	堤体コンクリート	基礎地盤
弾性係数 E (MPa)	34,000	55,000
ポアソン比	0.2	0.3
単位容積質量 ρ (kg/m^3)	2,300	2,300
減衰定数 (%)	10 (レイリー減衰1,3次)	10 (レイリー減衰1,3次)
せん断強度 τ_0 (MPa)	-	1.18
摩擦係数 f	-	1.0

(2) 解析結果とその評価

堤体コンクリートの損傷過程を考慮しない線形動的解析の結果から、ダム本体における損傷発生の可能性を以下の2条件により判断する。

- ①引張応力が堤体材料の引張強度を超えない。(引張破壊が生じない。)
- ②ダム本体の圧縮破壊やせん断破壊を生じるような応力が発生しない、もしくは発生しても局所的なものにとどまる。

①引張破壊に対する照査

ダム堤体内に最も大きな応力が発生する可能性のある時刻(ダム堤体の天端が上流側または下流側に最も変位する時刻)における堤体内の発生応力のうち、引張側主応力の分布を図-5に示す。同図より、本ダムでは、天端の下流側への最大変位時に、堤体底面上流端において最大7.74MPaの引張応力が発生している。ダムコンクリートの静的な引張強度を2.5MPaとすると、この応力は堤体材料の引張強度を超えるものであるため、堤体の当該箇所付近に引張亀裂が生じる可能性がある。

②圧縮破壊およびせん断破壊に対する照査

・圧縮破壊に対する照査
堤体内に最も大きな応力が発生する可能性のある時刻(ダム堤体の天端が上流側または下流側に最も変位する時刻)における堤体内の発生応力のうち、圧縮側主応力の分布を図-6に示す。同図より、本ダムでは、天端の下流側への最大変位時に、堤体底面下流端において最大5.96MPaの圧縮応力が発生している。しかし、ダムコンクリートの圧縮強度を25.0MPaとすると、発生圧縮応力は

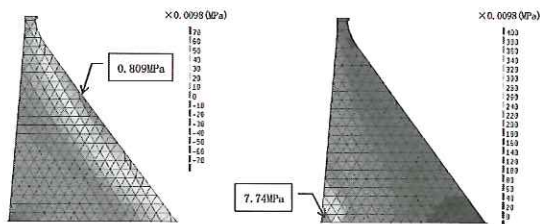


図-5 引張側主応力分布(線形動的解析)

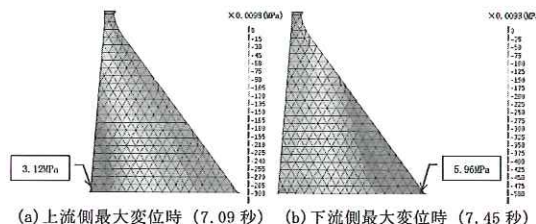


図-6 圧縮側主応力分布(線形動的解析)

圧縮強度と比較してかなり小さく、圧縮破壊が生じるおそれはないと考えられる。

・せん断破壊に対する照査

特にせん断破壊に対する安全性を確認する必要があると考えられるダム堤体と基礎地盤の境界を対象として、線形動的解析の結果算定されるせん断応力、垂直応力の時刻歴から、式(1)により局所せん断摩擦安全率を求めた。なお、発生応力としてはダム堤体側で代表し、強度としては岩盤試験から得られる強度を用いた。

$$f_s = \frac{\tau_0 + f \times \sigma}{\tau} \quad (1)$$

ここに、 f_s ：局所せん断摩擦安全率、 τ ：せん断面に作用するせん断応力、 τ_0 ：せん断面のせん断強度、 f ：せん断摩擦係数、 σ ：せん断面に作用する垂直応力である。

底面内でその最小値が生じる時刻における局所せん断摩擦安全率の分布を図-7に示す。堤体底面上流端から底敷長の1/4程度までは局所せん断摩擦安全率が1.0を下回っており、この範囲ではせん断破壊が生じるおそれがあることがわかる。これは、線形動的解析の結果、底面付近に大きな引張応力が算定されていることが原因と考えられる。

(3) 線形動的解析による照査結果のまとめ
線形動的解析による検討の結果、本ダムでは地震時に材料の強度を超える引張応力等が発生することから、ダム本体に損傷が生じるおそれがあると判断される。よって、引き続き堤体コンクリートの引張破壊による損傷過程を考慮した地震応答解析による照査を行う必要があると判断される。

5.2 損傷過程を考慮した地震応答解析
(引張損傷を考慮した非線形動的解析)

(1) 解析条件
解析モデル形状、基本的な材料物性および入力地震動は5.1と同様である。

堤体コンクリートの引張損傷による亀裂の発生については、分布型ひび割れモデルを用いて評価し、コンクリートの引張損傷に関わる材料物性は、

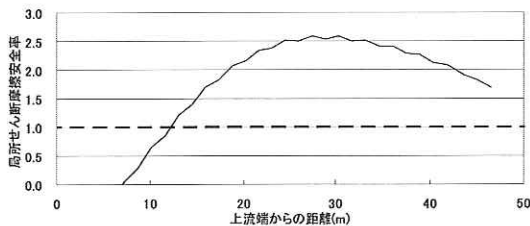


図-7 堤体底面における局所せん断摩擦安全率分布 (線形動的解析、7.45秒)

表-2のように設定した。一軸引張強度については、動的載荷時には静的載荷時よりも強度が増加するという知見もある⁸⁾が、ここでは一般的なダム用コンクリート静的荷重条件下での強度として設定した。破壊エネルギーについては、コンクリート標準示方書⁹⁾にも圧縮強度を基に設定する方法が示されているが、ダム用コンクリートでは一般コンクリートよりも破壊エネルギーがかなり大きいという実験結果が得られているため、粗骨材最大寸法150mmのダム用コンクリートのくさび挿入型試験の結果¹⁰⁾を参考にして300N/mと設定した。動的載荷時には破壊エネルギーも増加することが期待される¹⁰⁾が、分散ひび割れモデルによる解析において引張軟化曲線を単直線で近似する場合には耐力が大きめに評価される傾向があるため、動的載荷割増は考慮していない。なお、亀裂発生後、瞬時に貯水が亀裂内に浸入することにより間隙水圧の上昇が生じることはないとして、地震継続中の亀裂内における揚圧力の発生は考慮しない。

(2) 解析結果とその評価

分布型ひび割れモデルを用いて引張破壊による損傷過程を考慮した非線形動的解析の結果から、ダム本体に生じる損傷が限定的なものにとどまることを以下の2条件により確認する。

- ① 上下流面間に連続する引張亀裂の発生によって堤体の分断が生じない。
- ② ダム本体の圧縮破壊やせん断破壊を生じするような応力が発生しない、もしくは発生しても局所的なものにとどまる。

① 引張亀裂に対する照査

分布型ひび割れモデルを用いて引張破壊による損傷過程を考慮した非線形動的解析により得られた地震終了時における最終的な引張亀裂の発生範囲を図-8に示す。色付き要素が最終的に引張亀裂が発生した要素である。同図より、堤体に引張応力に起因する引張亀裂が堤体底部から生じる可能性があることがわかる。しかし、堤体を上下流方向に貫通するような引張亀裂が生じていないことから、上下流面間に連続する引張亀裂の発生によって堤体の分断が生じるおそれはないと考えられる。

② 圧縮破壊およびせん断破壊に対する照査

・圧縮破壊に対する照査

表-2 コンクリートの引張損傷に関わる材料物性

項目	設定値
引張軟化式	単直線近似
一軸引張強度 f_t (一軸引張軟化開始応力)(MPa)	2.5
破壊エネルギー G_f (N/m)	300

ダム堤体内に最も大きな応力が発生する可能性のある時刻（ダム堤体の天端が上流側または下流側に最も変位する時刻）における堤体内の発生応力のうち、圧縮側主応力の分布を図-9に示す。同図より、本ダムでは、天端の下流側への最大変位時に、堤体底面下流端において最大6.45MPaの圧縮応力が発生している。しかし、ダムコンクリートの圧縮強度を25.0MPaとすると、発生圧縮応力は圧縮強度と比較してかなり小さく、圧縮破壊が生じるおそれはないと考えられる。

・せん断破壊に対する照査

特にせん断破壊に対する安全性を確認する必要があると考えられるダム堤体と基礎地盤の境界を対象として、局所せん断摩擦安全率を求めた。底面内でその最小値が生じる時刻における局所せん断摩擦安全率の分布を図-10に示す。引張亀裂が発生していない堤体底面部位で局所せん断摩擦安全率が1.0を下回っていないことから、その箇所では、せん断破壊が生じるおそれはないと考えられる。

(3) 引張亀裂の発生を考慮した非線形動的解析による照査結果のまとめ

損傷過程を考慮した地震応答解析による検討の結果から、本ダムでは地震時において堤体の一部に引張亀裂が発生する可能性があるが、その範囲は堤体を上下流面間に連続するものとならないこと、また圧縮破壊やせん断破壊は発生しないことから、地震時に損傷を生じてもダムの貯水機能は維持されると判断される。

ただし、引張亀裂が生じるおそれがあることか

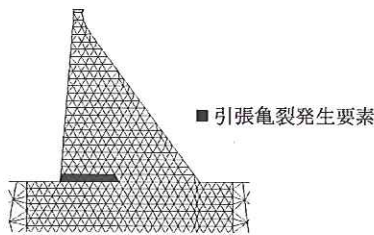


図-8 最終的な引張亀裂発生範囲
(引張破壊による損傷過程を考慮した非線形動的解析)

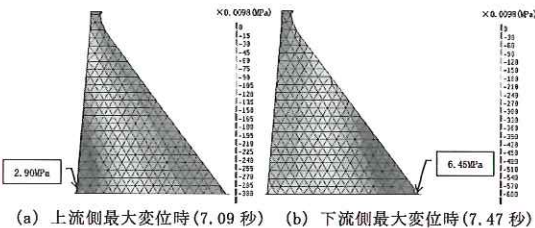


図-9 圧縮側主応力分布
(引張破壊による損傷過程を考慮した非線形動的解析)

ら、地震後に亀裂内に貯水が浸入した場合の影響についてさらに確認することとする。

5.3 地震後の安定性検討

(1) 検討方法

地震時に生じた引張亀裂が、地震後に亀裂内に浸入した貯水の影響で進展するかどうかを調べるため、5.2の検討による解析の結果得られた引張亀裂の発生範囲において、貯水による静水圧に相当する揚圧力を作用させ、堤体自重と静水圧を荷重として考慮した静的解析を実施した。図-11に亀裂内水圧荷節点位置を示す。なお、水圧は図-11に示すように引張亀裂の進展方向と直角方向に作用すると考え、引張亀裂が発生した要素と発生していない要素の境界節点上に水圧に相当する力を点荷重として載荷した。

(2) 検討結果とその評価

引張亀裂に貯水位に相当する全水圧を作用させ、自重と静水圧を荷重として考慮し静的解析を実施した。その結果から、地震後もダム本体に生じる損傷が限定的なものにとどまることを5.2と同様の2条件により確認する。

①引張亀裂に対する照査

地震時に生じた引張亀裂範囲の周辺に引張亀裂を発生させる引張応力は生じず、図-12に示すように引張亀裂発生範囲は地震時の引張亀裂発生範囲から拡大していない。すなわち、地震時に生じた引張亀裂が地震後の貯水の浸入によって進展するおそれはないと考えられる。

②圧縮破壊およびせん断破壊に対する照査

圧縮破壊およびせん断破壊については、5.2と同様の方法により、破壊が生じるおそれがないことを別途確認した。

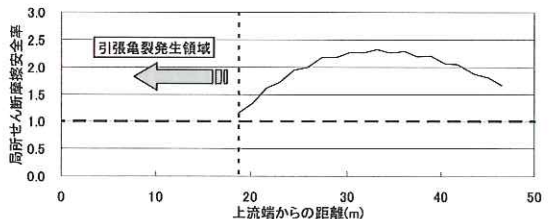


図-10 堤体底面における局所せん断摩擦安全率分布
(引張破壊による損傷過程を考慮した非線形動的解析、7.46秒)

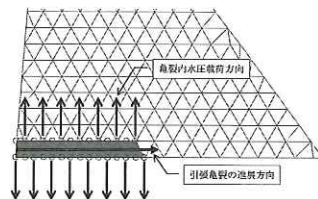


図-11 亀裂内水圧荷節点位置 (丸印節点)

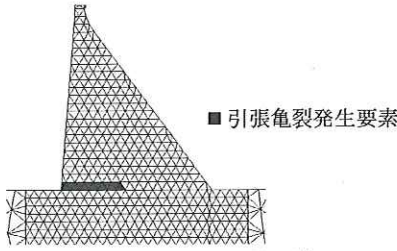


図-12 地震後の引張亀裂範囲

(3) 地震後の安定性検討結果のまとめ

地震後の安定性検討の結果から、本ダムでは地震時に堤体の一部に発生した引張亀裂内に地震後貯水が浸入しても、その亀裂が拡大するおそれはないと判断される。

5.4 地震応答解析による照査結果のまとめ

以上の照査結果を総合すると、本ダムではレベル2地震動を考慮した場合、地震時に堤体の一部（堤体底面上流端付近）に引張亀裂が発生する可能性がある。しかしながら、その範囲は堤体を上下流面間に分断するおそれはないこと、また圧縮破壊やせん断破壊は生じないことから、生じる損傷は限定的なものにとどまると考えられる。したがって、本ダムではレベル2地震動に対してもダムの貯水機能は維持されると判断される。

6. おわりに

指針（案）の規定に則り、重力式コンクリートダムの耐震性能照査の手順について、具体的数値解析事例を用いて紹介した。本報では、上流面にフィレットがない重力式コンクリートダムの耐震性能照査の事例について紹介したが、大規模地震時に想定される堤体コンクリートへの引張亀裂は、堤体形状によりその発生箇所に特徴があることがわかっている³⁾。具体的には、重力式コンクリートダムは地震時には堤体底部と上流面の勾配変化点付近に引張亀裂が発生しやすい。また、地震加速

度の大きさ、地震波の種類、あるいはコンクリートの引張強度によっては、下流面にも引張亀裂が発生する可能性がある。ダムの損傷過程を考慮した地震応答解析技術については、日進月歩の発展が見られるが、今後も精度向上の努力を必要とされている。そこで、実務上の留意点として、数値解析結果の評価にあたっては、精度の限界を考慮し、数値を過信することなく、本報の考え方を踏まえた適切な技術的判断を行うことが必要である。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター：改定解説・河川管理施設等構造令, 2004.1
- 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）, 2005.3
- 3) 佐々木 隆、金繩健一、山口嘉一：大規模地震時における重力式コンクリートダムのクラック進展に関する数値解析の検討、土木技術資料、第45巻、第6号、pp.60-67、2003.6
- 4) 安田成夫、金銅将史、佐野貴之、松本徳久：ダムの耐震性能照査に用いるレベル2地震動の設定方法、土木技術資料 Vol.47 No.6、pp.34-39、2005.6
- 5) 永山 功、自閑茂治：重力ダムの動的挙動特性とその簡易設計法、大ダム、No.119、pp.14-34、1987.3
- 6) 例として、張宏遠、大町達夫：重力式コンクリートダム—貯水系の地震時クラック解析のためのFE-BE手法、ダム工学、Vol.11 No.4、pp.266-274、2001.12
- 7) 有賀義明、曹 増延、渡邊啓行：強震時の非線形性を考慮したコンクリート重力式ダムの耐震性の評価について、大ダム、No.175、pp.103-111、2001
- 8) 永山 功、佐々木 隆、波多野政博：載荷速度がコンクリートの引張強度に及ぼす影響、ダム技術、No.148、pp.25-30、1999.1
- 9) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕, 2002.3
- 10) 堀井秀之、内田善久、柏柳正之、木全宏之、岡田武二：コンクリートダム耐力評価のための引張軟化特性の検討、電力土木、No.286、pp.113-119、2000.3

山口嘉一*



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム 上席研究員、工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

佐々木 隆**



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム 主任研究員
Takashi SASAKI

金繩健一***



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム 研究員
Ken-ichi KANENAWA

佐野貴之****



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室 研究員
Takayuki SANŌ