

◆ 特集：既設ダム有効利用のための技術開発 ◆

重力式コンクリートダムの合理的な嵩上げ設計手法

佐々木 隆* 山口嘉一** 金縄健一*** 高藤 啓****

1. はじめに

ダムおよび貯水池は、古来より時代の要請に応じて改修・増強などの再開発がなされ、活用され続けてきている財産である。そして、近代的な工法により建設された大規模ダムにおいても運用が数十年間に及ぶものが現れてきていることから、国土交通省所管の多目的ダムにおいても、再開発事業が増加する傾向にある。

本報文では、既設ダムの再開発のうち、重力式コンクリートダム有効利用法に着目し、合理的な嵩上げ設計手法について検討を行った結果を報告する。重力式コンクリートダムの嵩上げ設計には、梁理論を用いて垣谷が提案した「嵩上げ公式」¹⁾が一般に用いられる。これにより設計された嵩上げダムに関しては、有限要素法解析により応力状態を詳細に評価した場合、安定性に関する大きな問題がないとされている²⁾。しかし、今後、嵩上げ事例の増加あるいは嵩上げ規模の拡大が想定されることから、嵩上げダムの設計合理化を図ることが必要と考えられている。

2. 合理化検討方法

2.1 検討内容

現在、嵩上げダムの設計は、梁理論に基づいた「嵩上げ公式」を用いて、上流端の鉛直応力が引張とならないように下流面勾配を決定している。「嵩上げ公式」を用いた場合の荷重条件は、図-1に示すように嵩上げ前の旧堤体に作用する荷重は静水圧のみとし、嵩上げによって新たに加わる荷重は静水圧（嵩上げによる増分）、地震時動水圧、地震時慣性力、堤体自重および揚圧力としている。しかし、嵩上げ前の旧堤体には自重と揚圧力が作用しており、図-2に示すような実際の荷重条件とは異なった仮定をしている。そのため、「嵩上げ公式」によって求めた断面形状が、条件によっては同じ堤高の新規ダムを設計する場合に比べて下流面勾配が著しく緩くなる場合がある。そこで、上述のような荷重条件の影響も考慮に入れ、嵩上

げダムの下流面勾配の設計合理化について検討を行う。

新設ダム、これと同じ堤高で同じ下流面勾配を採用した嵩上げダムとは、堤体に作用している力の剛体的な釣合い状態は同じとなる。その点から考えた場合、堤体の全体的安定性（転倒、滑動）に関して言えば、嵩上げダムでも新設ダムと同じ下流面勾配を採用できる可能性がある。しかし、上流端に引張応力が発生した場合には、底面に亀裂が発生してその部分に作用する揚圧力が上昇する可能性がある。海外における重力式コンクリートダムの設計方法³⁾では、底面に発生する亀裂を許容した断面設計がなされる場合がある。実際の断面設計において、底面における亀裂の発生を許容するか否かについては、多くの議論を要する課題であるが、ここではこの点について踏み込んだ検討を実施する。

そこで、以下の方法により嵩上げダムの下流面勾配を決定することを考える。図-2に示す実際の荷重条件で、堤体底面での応力分布を梁理論を用いて算出する。この図では、上流面が垂直なダムを対象としている。引張応力が発生した箇所には亀裂発生を想定し（コンクリートと岩盤の接合面の引張強度は考慮しない）、亀裂内には上流端に作用している静水圧と同じ揚圧力（揚圧力係数 = 1.0）を考慮し、亀裂の下流側先端で鉛直応力が0（ゼロ）となるまで亀裂を順次進展させて繰り返し計算を行う。亀裂の先端での鉛直応力が0（ゼロ）となった状態で、考慮している荷重の底面内での作用位置の上流端からの距離が、底面幅の2/3以下の場合には下流面勾配をさらに急にし、荷重の作用位置がちょうど上流端から底面幅の2/3になった時の勾配を嵩上げダムの下流面勾配に採用する。これは、海外での重力式コンクリートダムの設計法のように、上流側での引張破壊による亀裂発生を許容するものとし、さらに、転倒に対する全体的安定性を荷重の底面内での作用位置が堤体底面幅の中央1/3の範囲に入っているという「ミドルサードの条件」で判定するという考えである。図-3に、断面決定フローを示す。

本研究では、まず、①「嵩上げ公式」に用いら

Rationalized Design Method of Heightening of Concrete Gravity Dams

れている荷重条件 (図-1参照) により下流面勾配を決定した嵩上げダム、②嵩上げ前の旧堤体の自重および揚圧力は旧堤体に作用する荷重条件 (図-2参照) に変更し「嵩上げ公式」を準用した際に上流端の鉛直応力が0 (ゼロ) となるように下流面勾配を決定した嵩上げダム、③亀裂発生を許容し、転倒に対する安定性をミドルサードの条件で判定し下流面勾配を決定した嵩上げダム、④嵩上げ後の堤高と同じ堤高の現行法で設計された新設ダムの4種類のダムを設定し、堤体断面決定時の堤体安定性について比較検討を行う。

次に、②嵩上げ前の旧堤体の自重および揚圧力は旧堤体に作用する荷重条件 (図-2参照) に変更し「嵩上げ公式」を準用した際に上流端の鉛直応力が0 (ゼロ) となるように下流面勾配を決定した嵩上げダム、③亀裂発生を許容し、転倒に対する安定性をミドルサードの条件で判定し下流面勾配を決定した嵩上げダム、④嵩上げ後の堤高と同じ堤高の現行法で設計された新設ダムの3種類のダムに、大きな地震動が作用した時の堤体安定性について比較検討する。各々のダムに大きな地震動を作用させ、ダムの断面設計の際に満たされるべき三つの条件、(1) 転倒しない、(2) 滑動しない、(3) 材料強度を超える応力が発生しない、に着目して、上記方法により下流面勾配を決定した嵩上げダムが、新設ダムと同等あるいはそれ以上の安定性を有していることを確認して、嵩上げダムの合理的な下流面勾配の設計手法について提案を行う。

大きな地震動 (地震力) が作用した際の堤体応答については、重力式コンクリートダムに対して提案されている修正震度法を用いて評価することとした。以下、修正震度法について簡単に説明する4),5)。

修正震度法とは、構造物およびその基礎の地震応答特性をもとに設計震度の大きさおよび分布を定めて行う計算方法である。震度法では高さ方向に震度は一定であるが、重力式コンクリートダムの修正震度法では地震時の堤体応答を考慮して高さ方向に震度を大きくする分布を与えることが提案されている。本研究では、堤体の1次固有振動形を高さの2.0乗に比例すると近似し、高さ方向の震度分布を式 (1) のように設定した。

$$(k_n) = \beta \times (H_n)^{2.0} \times Sa(1/f, h) / g \quad (1)$$

ここに、 (k_n) は震度、 (H_n) は無次元化高さ (底面からの高さ/堤高)、 $Sa(1/f, h)$ は加速度応答スペクトル、 f は堤体の1次固有振動数、 h は減衰定

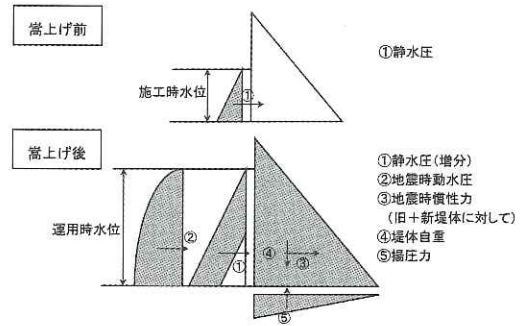


図-1 一般に用いられる荷重条件

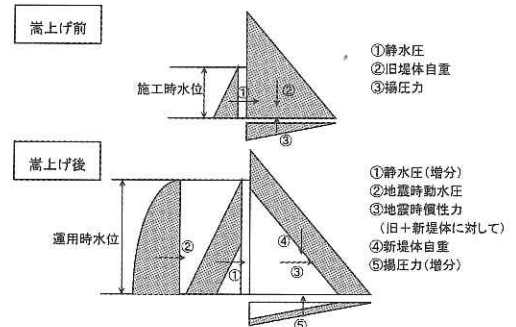


図-2 実際の荷重条件

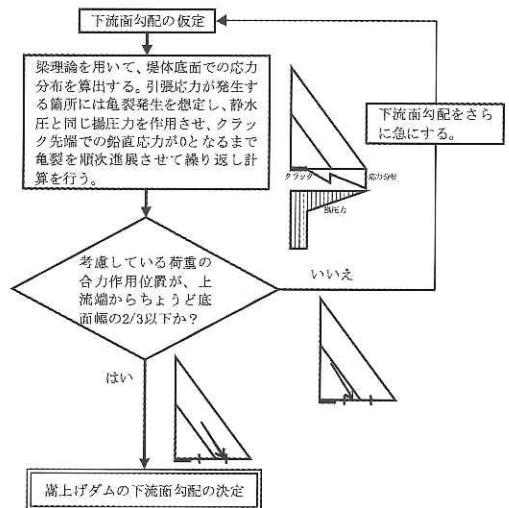


図-3 底面亀裂許容時の断面決定フロー

数、 g は重力加速度、 β は堤体の1次固有振動形に対応した刺激係数である。また、式 (1) に示した震度分布に対応した動水圧の分布は式 (2) で表される。

$$\{P\} = [P_w] \times \beta \times \{u\} \times Sa(1/f, h) \quad (2)$$

ここに、 $\{P\}$ は動水圧、 $[Pw]$ は動水圧マトリクス(参考文献5)参照)、 $\{u\}$ は堤体の1次固有振動形である。

2.2 堤体断面決定時の堤体安定性の検討条件

本検討においては梁理論により堤体底面の応力算出を行なった。堤体の形状は、上流面が鉛直の直角三角形形状とし、解析モデルを図-4に示す。考慮した荷重は、静水圧、自重、地震時慣性力、地震時動水圧、揚圧力である。

表-1に、モデルケースについて示す。Model1は現在の嵩上げダムの設計に用いられている荷重条件(図-1参照)での「嵩上げ公式」により下流面勾配を決定した嵩上げダム、Model2は嵩上げ前の旧堤体の自重は旧堤体に作用する荷重条件(図-2参照)に変更し「嵩上げ公式」を準用した際に上流端の鉛直応力が0(ゼロ)となるように下流面勾配を決定した嵩上げダム、Model3は亀裂発生を許容し、転倒に対する安定性をミドルサードの条件で判定し下流面勾配を決定した嵩上げダム、Model4は嵩上げ後の堤高と同じ堤高の現行法で設計された新設ダムである。表-1に示す各ケースの下流面勾配を決定する際の設計条件を表-2に示す。地震力は設計震度0.10の震度法で考慮し、動水圧はWestergaardの式により考慮した。揚圧力について、上流端で揚圧力係数0.33、下流端で0の三角形分布とした。岩盤強度について、Model3に設計震度0.10の震度法にて地震力を考慮した際、せん断に対するHenny式安全率が4.0となるよう岩盤のせん断強度と内部摩擦角を1.91MPaと45度に設定した。

2.3 大地震動を考慮した堤体安定性の検討条件

表-1に示すModel2、Model3およびModel4を用いて、地震力を修正震度法にて考慮し、堤体底面に発生する応力を算出した。荷重条件は、図-2に示す実際の荷重条件で考慮し、揚圧力について、上流端で揚圧力係数0.33、下流端で0の三角形分布とした。地震力については、加速度応答スペクトル $Sa(1/f, h)$ の値は700galとした。なお、2005年3月から試行が開始された『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)』⁶⁾に、地震の震源となる活断層が地表面に現れていない場合を想定して、最低限考慮すべき水平地震動を加速度応答スペクトルとして設定した「照査用下限加速度応答スペクトル」が定められている。その照査用下限加速度応答スペクトルは、減衰定数5%で周期0.1から0.7秒の間で700galであり、それと対応するように $Sa(1/f, h)$ の値を設定したものである。また、水平方向の最大値を1とした1次固有

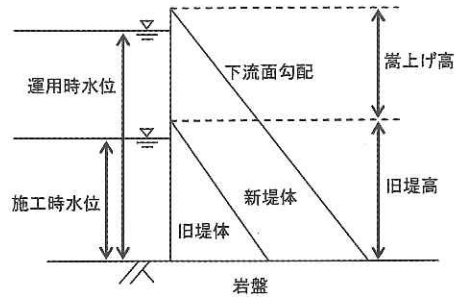


図-4 解析モデル

表-1 モデルケース

Model	旧堤高 (m)	旧下流面勾配	新堤高 (m)	下流面勾配	施工時水位 (m)	運用時水位 (m)
Model1 (嵩上げ公式)	70	0.737	90	0.855	56	85
Model2 (実際の荷重条件)	70	0.737	90	0.808	56	85
Model3 (亀裂許容)	70	0.737	90	0.792	56	85
Model4 (新設ダム)	-	-	90	0.756	-	85

表-2 設計条件

単位体積質量 (g/cm ³)	2.3
設計震度	0.10
動水圧	Westergaard式による分布
揚圧力係数	上流端：0.33 下流端：0の直線分布
基礎岩盤強度	せん断強度 $\tau_0 = 1.91\text{MPa}$ 内部摩擦角 $\phi = 45^\circ$

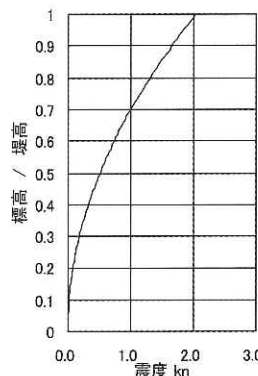


図-5 震度分布

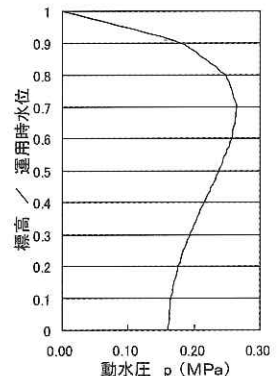


図-6 動水圧分布

振動形ベクトルに対応した値として β の値を2.86とした。設定した震度分布を図-5に、動水圧分布を図-6に示す。岩盤強度については、前項と同様とした。また、Model3について断面決定時には上流端より亀裂が発生することを許容すると

したが、後述するように、地震力が作用しない通常時には堤体底面に亀裂を発生させる引張応力は発生しないので、ここでの検討では亀裂は発生しおらず健全な状態を初期状態として評価した。

3. 合理化設計の検討結果

3.1 堤体断面決定の堤体安定性の検討結果

図-7は、堤体断面決定時の堤体底面での応力分布を、Model1からModel4について示したものである。また、各ケースについて、堤体底面内での荷重作用位置の上流端からの距離も併記している。亀裂発生を許容し、転倒に対する安定性を「ミドルサードの条件」で判定し下流面勾配を決定するModel3については、上流端から4.33mの位置まで亀裂が発生することとなり、亀裂の下流側先端での鉛直応力は0（ゼロ）となっている。図より、Model3を除いた嵩上げダムについては、旧堤体底部では新設ダムより大きな圧縮応力が発生し、一方新堤体底部では新設ダムより小さな圧縮応力となっていることがわかる。

なお、図-8はModel3について、地震力を考慮しない通常時の堤体底面での応力分布を示したものである。この図より、地震力が作用しない通常時においては、堤体底面上流端での鉛直応力は圧縮となり、亀裂は発生しないと見える。

表-3は、Model1からModel4の荷重の作用位置を示したものである。荷重の作用位置については、荷重の作用位置の上流端からの距離と、上流側を正とした荷重の作用位置の下流端からの距離の堤体底面幅に対する割合の2通りについて示す。表より、Model3とModel4については、荷重の作用位置が下流端から堤体底面幅のちょうど1/3にあり、Model1とModel2については、下流端から堤体底面幅の1/3の位置より上流側にあることがわかる。

表-4は、Model1からModel4について、せん断に対するHenny式安全率を示したものである。Model3については、亀裂発生箇所についてはせん断抵抗力を期待しないこととし、次式によりHenny式安全率を算出した。

$$f_s = \frac{f * V + \tau_0 * (B - B_{cr})}{H} \quad (3)$$

ここで、 f_s ：せん断に対するHenny式安全率、 f ：内部摩擦係数、 V ：ダムに作用する垂直力、 τ_0 ：純せん断強度、 B ：堤体底面幅、 B_{cr} ：堤体底面上流端に発生した亀裂の水平方向長さ、 H ：ダムに作用する水平力である。表より、Model1および

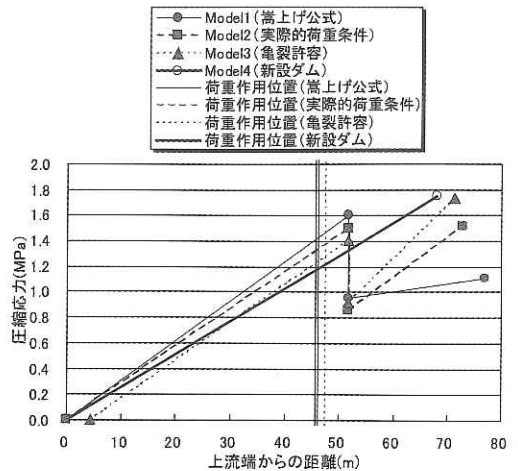


図-7 堤体底面での鉛直応力

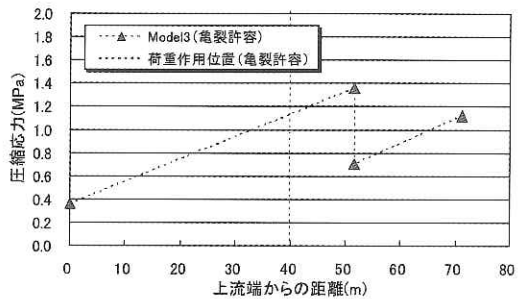


図-8 堤体底面での鉛直応力 (Model3の通常時)

表-3 荷重の作用位置

Model	Model1 (嵩上げ公式)	Model2 (実際の荷重条件)	Model3 (亀裂許容)	Model4 (新設ダム)
荷重作用位置の上流端からの距離(m)	46.1	45.7	47.5	45.4
荷重作用位置の下流端からの距離の底面幅に対する割合(%)	40.1	37.2	33.3	33.3

表-4 せん断に対するHenny式安全率

Model	Model1 (嵩上げ公式)	Model2 (実際の荷重条件)	Model3 (亀裂許容)	Model4 (新設ダム)
せん断に対するHenny式安全率	4.52	4.31	4.00	4.08

Model2については、Model4よりもHenny式安全率が上がり、Model3については、Model4より少し下がることがわかる。

表-5は、Model1からModel4について、最大引張応力および最大圧縮応力を示したものである。最大引張応力は、堤体底面上流端にて鉛直方向に発生すると仮定し、最大圧縮応力は、堤体底面下流端にて下流面に平行な方向で発生すると仮定し、

次式により算出した。

$$\sigma = (1 + n^2) * \sigma_D \quad (4)$$

ここで、 σ ：下流端での最大圧縮応力、 n ：下流面勾配、 σ_D ：下流端での鉛直応力である。なお、Model3の最大引張応力については、底面上流端に発生する亀裂の下流側先端にて鉛直方向に発生すると仮定した。表より、最大引張応力についてはどのケースも0.0MPaとなっていることがわかる。また、最大圧縮応力については、Model3ではModel4と比較して大きな圧縮応力が発生しているが、ダム用コンクリートの圧縮強度を勘案すると安定性を評価する際に有意な差でないといえる。

梁理論を用いた数値解析の結果、堤体の安定性について、亀裂を許容したModel3は下流面勾配がより大きいModel1およびModel2と比較すると低いものの、新設ダムであるModel4と比較した場合の堤体の安定性の差が小さい。

3.2 大地震動を考慮した堤体安定性の検討結果

図-9は、実際の荷重条件を用いて下流面勾配を決定した嵩上げダムのModel2、亀裂発生を許容し下流面勾配を決定した嵩上げのModel3および新設ダムのModel4について、上流端からの距離と堤体底面の鉛直応力の関係を示したものである。また、堤体底面内での荷重作用位置の上流端からの距離も併記している。図より、嵩上げダム堤体底部と新設ダム堤体底部での発生応力値には違いがあり、その差は、嵩上げダムの旧堤体底部より新堤体底部で大きくなっていることがわかる。また、上流端付近で発生する引張応力は嵩上げダムが新設ダムより小さくなり、下流端付近で発生する圧縮応力についても嵩上げダムの方が小さくなっていることがわかる。

表-6は、Model2、Model3およびModel4について、合力の作用位置および転倒安全率を示したものである。荷重の作用位置については、荷重の作用位置の上流端からの距離と、荷重の作用位置の下流端からの距離（上流側を正とした値）の堤体底面幅に対する割合の2通りについて示す。転倒安全率については、次式により算出した。

$$f_T = \frac{M_R}{M_T} \quad (5)$$

ここで、 f_T ：転倒安全率、 M_R ：自重および揚圧力による下流端周りのモーメント、 M_T ：静水圧、地震時動水圧および地震時慣性力による下流端周りのモーメントである。表より、嵩上げダムで

るModel2およびModel3が、新設ダムであるModel4と比較して荷重の作用位置が下流端に近いことがわかる。また、転倒安全率もModel2およびModel3がModel4より大きいことがわかる。なお、ここで転倒安全率が1.0より小さくなっているが、地震中瞬間的に1.0より小さくなる場合があるということであり、ダム堤体がすぐさま転倒するということを意味するものではない。

表-7は、Model2、Model3およびModel4のせん断に対するHenny式安全率を示したものである。表より、嵩上げダムであるModel2およびModel3が、新設ダムであるModel4と比較してHenny式安全率が大きいことがわかる。

表-8は、Model2、Model3およびModel4の最大引張応力および最大圧縮応力を示したものである。表より、最大引張応力について、新設ダムであるModel4が嵩上げダムであるModel2およびModel3より大きい引張応力が発生しており、最大圧縮応力についても、新設ダムで大きな圧縮応力が発生していることがわかる。

以上より、嵩上げ前の旧堤体の自重および揚圧力は旧堤体に作用する実際の荷重条件を用いて、上流端の鉛直応力が0（ゼロ）となるように下流面勾配を決定した嵩上げダムは、新設ダムと同等以上の安定性を有していることが確認できた。また、亀裂発生を許容し、転倒に対する安定性をミドルサードの条件で判定する方法により下流面勾

表-5 最大発生応力

Model	Model1 (嵩上げ公式)	Model2 (実際の荷重条件)	Model3 (亀裂許容)	Model4 (新設ダム)
堤体底面上流端での最大引張応力(MPa)	0.00	0.00	0.00	0.00
堤体底面下流端での最大圧縮応力(MPa)	1.91	2.50	2.82	2.75

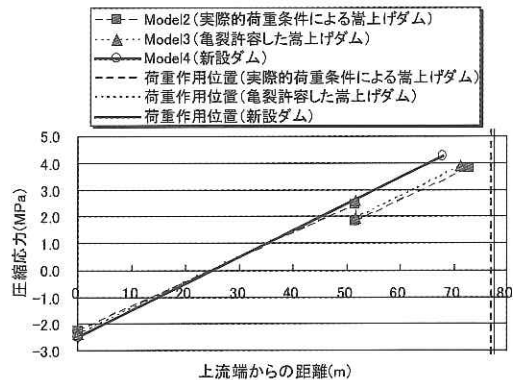


図-9 堤体底面での鉛直応力

配を決定した嵩上げダムについても、亀裂発生を許容しない場合と比較すると余裕度は減少するものの、新設ダムと同等の安定性を有していることが確認できた。

4. 結論

本報文での検討より、以下のことが明らかになった。

現在の嵩上げダムの設計に用いられている荷重条件をより実際の荷重条件に変更し、堤体底面の上流端の鉛直応力が0（ゼロ）となるように嵩上げダムの下流面勾配を決定しても、大きな地震動を考慮した際には新設ダムと同等あるいはそれ以上の安定性を有していることが確認できた。これより、実際の荷重作用方法を嵩上げダムの設計で採用することが合理的であるといえる。

さらに、上流側での引張破壊による亀裂発生を許容し、転倒しない条件を荷重の底面内での作用位置が堤体底面幅の中央1/3の範囲に入っているという「ミドルサードの条件」のみで判定する手法により嵩上げダムの下流面勾配を決定した場合、大きな地震動を考慮した際には新設ダムと同等あるいはそれ以上の安定性を有していることが確認できた。これより、このような底面亀裂を許容する考え方を採用して、嵩上げダムの下流面勾配をより合理的に設計する方法も考えられる。

参考文献

- 1) 垣谷正道：嵩上げ堰堤の安定計算について、日本発送電工、第1202号、1946
- 2) 水野光章・安田成夫：コンクリートダムの嵩上げに関する研究、建設省土木研究所資料、第1663号、1981. 2
- 3) US Army Corps of Engineers: Gravity Dam Design, EM 1110-2-2200, June 1995
- 4) 永山 功、田中 靖、村岡基晴：コンクリートダム

表-6 荷重の作用位置

Model	Model2 (実際の荷重条件)	Model3 (亀裂許容)	Model4 (新設ダム)
荷重作用位置の上流端からの距離(m)	77.1	77.2	77.7
荷重作用位置の下流端からの距離の底面幅に対する割合(%)	-6.0	-8.3	-14.2
転倒安全率	0.92	0.89	0.82

表-7 せん断に対する Henny 式安全率

Model	Model2 (実際の荷重条件)	Model3 (亀裂許容)	Model4 (新設ダム)
せん断に対する Henny 式安全率	2.46	2.42	2.35

表-8 最大発生応力

Model	Model2 (実際の荷重条件)	Model3 (亀裂許容)	Model4 (新設ダム)
堤体底面上流端での最大引張応力(MPa)	2.27	2.39	2.50
堤体底面下流端での最大圧縮応力(MPa)	6.25	6.32	6.68

の耐震設計法に関する考察、土木技術資料, Vol. 29, No. 9, 1987. 9

- 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, 1987. 3
- 6) 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

佐々木 隆*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループダム構造物チーム総括主任研究員, 工修
Takashi SASAKI

山口嘉一**



独立行政法人土木研究所つくば中央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

金縄健一***



国土交通省河川局河川計画課河川情報対策室河川情報係長（前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループダム構造物チーム研究員）
Kenichi KANENAWA

高藤 啓****



(株)建設技術研究所九州支社ダム部（前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループダム構造物チーム交流研究員, 工修）
Kei TAKAFUJI