

Ⅲ-11 コンクリートダム設計性能規定化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 15～平 17

担当チーム：ダム構造物チーム

研究担当者：山口嘉一、佐々木隆、佐藤弘行
金縄健一

【要旨】

土木構造物の設計は、信頼性設計の考え方を基本とした部分安全係数設計法が標準となりつつある。コンクリートダム設計においても、強度評価、荷重の組み合わせなどの一部に部分安全係数に相当する安全率を導入した設計法を採用している国もあるが、我が国のコンクリートダム設計ではいまだ許容応力度設計法を採用しており、限界状態を考えた合理的な解析や新技術の導入が行いにくい状況にある。このため、今後予想される河川施設等構造令の改定を見据えて、信頼性設計について研究を進めておく必要がある。

本研究では、重力式コンクリートダム設計に関わる主たる荷重と材料強度の実績値を収集・分析することによって、その平均値およびばらつき量を検討した。それらの荷重・材料強度を確率変数として取り扱い、1次信頼性理論による信頼性解析を実施し、現行設計法で設計された重力式コンクリートダムの信頼性指標の傾向を分析した。さらに、信頼性解析から得られた各荷重、材料強度の影響度（感度係数）を考慮して部分安全係数を試算した。また、梁理論とFEMによる応力評価値を比較することにより、解析係数に関しても検討を行った。

キーワード：重力式コンクリートダム、1次信頼性理論、信頼性指標、感度係数、部分安全係数

1. はじめに

土木構造物における設計基準は、信頼性設計の考え方を基本とした部分安全係数設計法への移行が進められつつある。日本のコンクリートダム設計ではいまだ許容応力度法を採用しており、具体の限界状態を考え性能規定に基づいた照査・設計が導入されていないのが現状である。また海外においても、強度評価、荷重の組み合わせなどの一部に部分安全係数に相当する安全率を導入しているだけである。一方、近年の大地震の頻発を背景に、2005年3月に、国土交通省によりレベル2地震動に対するダムの耐震性能を照査する指針（案）¹⁾が策定された。この指針（案）では、限界状態および性能規定の考え方が導入されたものの、信頼性設計の考え方は含まれていない。今後、レベル2地震動への対応を含めて、重力式コンクリートダム設計に信頼性設計の考え方を導入することが必要であると考えられる。

現行の設計法においては、滑動、転倒およびコンクリートの圧縮破壊に関する安全性を確認することとなっている。滑動については、断面全体としての安全性を確認することを基本としているが、軟質な岩盤上で

のコンクリートダムの建設事例が多くなっている昨今では、ダムの全体的な滑動のみならず、局所的なせん断についての安全性の重要性は増していると考えられる。また、地震によるコンクリートダムの被害を想定した場合には、コンクリート堤体の圧縮に対してではなく、引張に対する安全性が重要であると考えられる。

本研究では、現行の設計法での安全性評価指標に加えて、堤趾部の局所的せん断と堤体上流面の鉛直引張応力についても安全性指標を設定し、1次信頼性理論による信頼性解析結果に基づいて、部分安全係数の算出²⁾を試みた。

2. 岩盤強度がダムの全体的滑動と局所せん断に対する安全性に与える影響の定性的な検討

2.1 検討概要

現行設計法³⁾においては、ダムの全体的（剛体的）滑動に対する安全性を確保するとともに、参考的に堤趾部の水平方向の局所的なせん断安全性を確認することとなっている。しかし、特に堤趾部に弱層が存在するなどの設計上重要な懸念事項がなければ、全体的滑動に対する安全性を確保していれば、水平方向の局所的なせん断安全性はほぼ確保できると考えられている。

ここでは、ダム全体の滑動安全性と局所的せん断安全性の関係、および岩盤強度定数（せん断強度と内部摩擦係数）がそれらの安全性に及ぼす関係を定性的に把握することを目的として、モンテカルロシミュレーションを実施した。

2.2 検討手法

解析モデルは、図-1 に示すように堤高 100m で上流面勾配が異なる 3 種類の重力式コンクリートダムを設定した。現行設計基準³⁾では、重力式コンクリートダムの安定条件として(1)外力の合力が堤体水平断面の Middle Third に入ること、(2)Henny の式でせん断摩擦安全率が 4 以上あること、(3)堤体中に生ずる応力が許容応力度を超えないことがあげられている。(3)の条件については一般に堤高 150m 以上のダムでなければ問題となることはないことから、本研究においては現行設計基準の(1)、(2)を満足する設計定数を設定し、基礎岩盤の強度を変動させて安定性の検討を行った。解析にあたっては、重力式コンクリートダムを対象としたモンテカルロシミュレーション解析プログラム「CADAM」⁴⁾を用いた。解析モデルの計算条件を表-1 に示す。堤体に作用する荷重としては、自重、静水圧、地震時動水圧、地震時慣性力、揚圧力を考慮した。揚圧力については排水孔を考慮しないものとして設定した。表-1 に示す基礎岩盤強度は、各モデルにおいてせん断摩擦安全率 4 となる値である。

検討を行う強度は、基礎岩盤せん断強度、内部摩擦係数とし、これらの入力パラメータの諸元を表-2 に示す。計算ケースは、入力パラメータの変動の大きさによる安定計算結果への影響を確認するために、変動係数（標準偏差/平均値）10%、20%、30%の 3 種類を設定した。なお、各解析モデルでの底面の強度分布は同様と考えている。せん断強度、内部摩擦係数はそれぞれ完全独立のパラメータとして考え、どちらか 1 つのパラメータのみばらつきを考慮した。なお、材料強度試験結果のばらつきを考慮して、せん断強度および内部摩擦係数の設計値を決定した場合を想定し、表-2 の平均値は設計値（表-1 に示した値）と標準偏差の和として設定した。試行回数は 50,000 回として解析を行った。

2.3 検討結果

モンテカルロシミュレーションで発生させたモデル 2 におけるせん断強度の確率密度分布の例を図-2 に、それに対応した Henny 式による堤体全体のせん断摩擦

安全率の確率密度分布を図-3 に示す。同様に、モデル 2 における内部摩擦係数の確率密度分布を図-4 に、それに対応したせん断摩擦安全率の確率密度分布を図-5 に示す。なお、確率密度関数のピークが、変動係数が高くなるにつれて高くなるのは、入力値の平均値を設計値と標準偏差の和としているためである。せん断強度をばらつかせた場合に安全率 4 を下回る確率をまとめたグラフを図-6 に、内部摩擦係数をばらつかせた場合に安全率 4 を下回る確率をまとめたグラフを図-7 に示す。図-6 および図-7 より、上流面勾配が急傾斜、つまり底面幅の狭いモデルほど安全率 4 を下回る確率が増大する傾向が見られる。変動係数が小さいほど、その傾向は顕著である。

次に、微視的なダムの安定性検討として、局所せん断摩擦安全率の検討を行う。重力式コンクリートダムにおいて、局所せん断摩擦安全率が問題となるのは堤趾部であることから、解析により求められた堤趾部応力を、水平方向の応力値と任意の方向における最小の応力値に分解し、それぞれの応力値から水平方向の局所せん断摩擦安全率、最小局所せん断摩擦安全率⁵⁾を

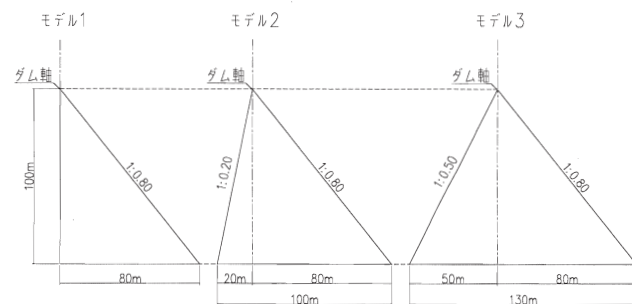


図-1 解析モデル

表-1 計算条件

| | | |
|--------------------------------|--------------------|-------|
| 単位容積質量 (kg/m ³) | 水 | 1,000 |
| | コンクリート | 2,300 |
| | 堆泥(水中) | - |
| 堆泥圧係数 | | - |
| 揚圧力係数 | | 0.333 |
| 基礎岩盤 内部摩擦係数 | | 1.0 |
| 基礎岩盤 せん断強度(kN/m ²) | せん断摩擦安全率4.0を満たす最小値 | |
| 設計震度 | 0.15 | |
| 貯水位 | ダム高-10.0m | |

表-2 入力パラメータ諸元

| 検討項目 | 単位 | モデル | 変動係数 | 平均値 | 標準偏差 | 備考 |
|--------|-----|--------|------|-------|------|------------------|
| せん断強度 | kPa | モデル1 | 10% | 2,230 | 200 | 正規分布 設計値=2030 |
| | | | 20% | 2,430 | 400 | |
| | | | 30% | 2,630 | 600 | |
| | | モデル2 | 10% | 1,640 | 150 | 正規分布 設計値=1490 |
| | | | 20% | 1,790 | 300 | |
| | | | 30% | 1,940 | 450 | |
| | | モデル3 | 10% | 1,080 | 100 | 正規分布 設計値=980 |
| | | | 20% | 1,180 | 200 | |
| | | | 30% | 1,280 | 300 | |
| 内部摩擦係数 | - | モデル1~3 | 10% | 1.10 | 0.10 | 正規分布 設計値=1.0 |
| | | | 20% | 1.20 | 0.20 | |
| | | | 30% | 1.30 | 0.30 | |

算出した。

水平方向の局所せん断摩擦安全率の算出結果例として、モデル2におけるせん断強度の変動係数と水平方向の局所せん断摩擦安全率の関係を図-8に示す。また、安全率2を下回る確率に着目して、変動係数ごとにまとめたグラフを図-9に示す。図-9より底面幅の広いダムほど安全率2を下回る確率が增大するが、その傾向はせん断強度の変動係数が大きいほど顕著になる。

最小局所せん断摩擦安全率の例として、モデル2におけるせん断強度のばらつきと最小局所せん断摩擦安全率の関係を図-10に示す。また、安全率1.5を下回る確率に着目して、変動係数ごとにまとめたグラフを図-11に示す。最小局所せん断摩擦安全率についても水平方向同様に底面幅の広いダムほど安全率1.5を下回る確率が增大するが、その傾向はせん断強度の変動係数には大きく影響されない。

本検討の結果をまとめると以下のようである。

(1)Henny式による堤体全体のせん断安全率の検討においては、底面幅の狭いダムは、底面幅の広いダムに比べて、せん断強度、内部摩擦係数のばらつきの影響を受けやすく、底面幅の広いダムは底面幅の狭いダムに比べて安全余裕度が高い。

(2)局所安全率の検討においては、底面幅の広いダムの方が安全余裕度が低い、水平方向のせん断安全率と最小方向のせん断安全率で、せん断強度、内部摩擦係数のばらつきの影響度が異なる。

これらの結果から、材料強度のばらつきを考慮して部分係数を設定していく際には、堤体全体および局所的なせん断安全性のバランスを十分考える必要があることがわかる。

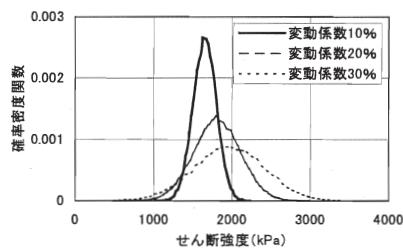


図-2 せん断強度の確率密度関数 (モデル2)

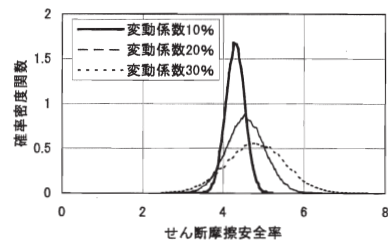


図-3 せん断摩擦安全率の確率密度関数 (モデル2、せん断強度)

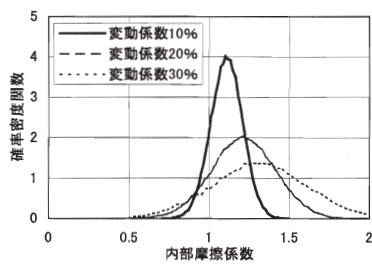


図-4 内部摩擦係数の確率密度関数 (モデル2)

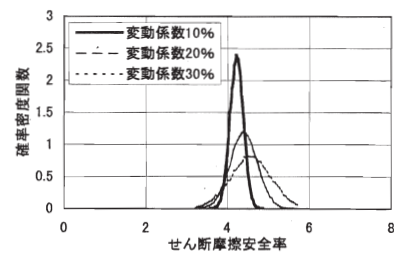


図-5 せん断摩擦安全率の確率密度関数 (モデル2、内部摩擦係数)

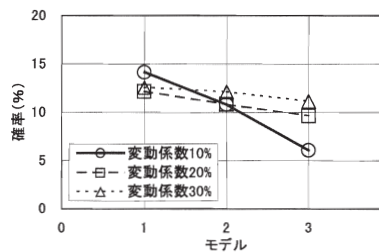


図-6 安全率4を下回る確率 (せん断強度)

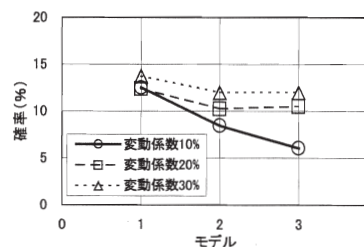


図-7 安全率4を下回る確率 (内部摩擦係数)

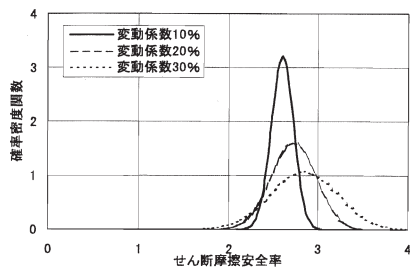


図-8 水平方向の局所せん断摩擦安全率の確率密度関数 (モデル2、せん断強度)

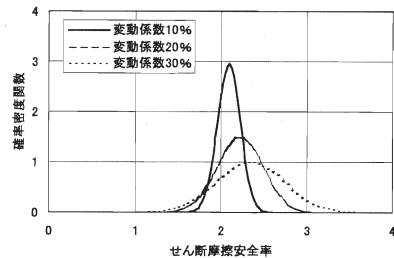


図-10 最小局所せん断摩擦安全率の確率密度関数 (モデル2、せん断強度)

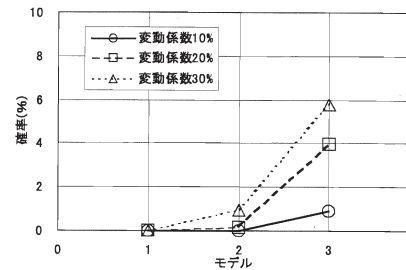


図-9 水平方向の局所せん断摩擦安全率2を下回る確率 (せん断強度)

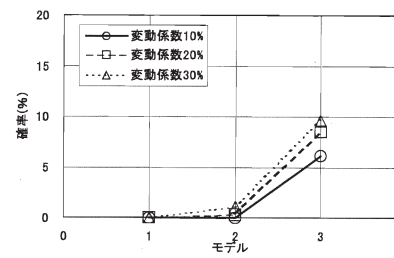


図-11 最小局所せん断摩擦安全率1.5を下回る確率 (せん断強度)

3. 荷重および強度の確率分布

3.1 概要

信頼性設計法の構築にあたっては、荷重や強度等を確率統計的な変数として、その変動特性を考慮する必要がある。そこで、コンクリートダム設計に関わる荷重および強度の確率分布を調査した。

3.2 調査対象および整理方法

今回確率分布を考慮した荷重および強度の設計因子は以下の5項目である。

- (1) コンクリートの単位容積重量
- (2) コンクリートの引張強度
- (3) 岩盤のせん断強度
- (4) 岩盤の内部摩擦係数
- (5) 揚圧力係数

なお、現行設計法では、震度法による耐震設計を用いており、その震度の値が3種の震度帯ごとに定められている。限界状態を設定しての性能設計を検討して行くにあたっては、地震動荷重も再考する必要がある。大規模地震を想定した地震動については、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)」¹⁾において、レベル2地震動として定義されている。このレベル2地震動については、堤体の損傷が生じることを前提とした上で、所要の耐震性能を満足することとなっている。一方、本研究で検討しているような損傷が生じるか否かを検討する際には、レベル1地震動の設定が必

要となる。しかし、ダムのレベル1地震動の規模についての議論は未だ十分なされてきておらず、その設定については今後検討していく必要がある。そこで、本検討においては、地震力は変動する変数とは捉えず、震度を用いた静的外力として考慮することとした。

5項目の荷重および強度の確率分布は、以下に示す考え方で、実ダムの工事誌および参考文献を基に設定する。

各確率分布の整理方法を以下に示す。

(1) コンクリートの単位容積重量

実ダム9基の工事誌に掲載されている品質管理試験結果におけるコンクリート単位容積重量試験値を用いた。これらから、各ダムで変動係数を算出した。単位容積重量の平均値については、河川砂防技術基準(案)設計編 [I]⁶⁾より標準的な値である22.56kN/m³とし、求めた変動係数(平均値)と平均値から、標準偏差を設定した。

(2) コンクリートの引張強度

コンクリートの引張強度の値は、実ダム9基の工事誌に掲載されている品質管理試験結果におけるコンクリートの圧縮強度試験値から、コンクリート標準示方書構造性能照査編⁷⁾を参考に下記式より算出した。

$$f_{tk} = 0.23 f'_{ck}{}^{2/3} \quad \dots (1)$$

ここに、 f_{tk} :引張強度、 f'_{ck} :圧縮強度。

(3) 岩盤のせん断強度

岩盤のせん断強度は、岩級ごとに整理された実ダム（CM 級、CH 級あわせて 192 基）のせん断強度⁸⁾を基に評価した。CH 級と CM 級のそれぞれの岩級に対するせん断強度試験値から、それらの平均値、標準偏差を算出した。なお、確率分布の評価に使用したデータ数は、CH 級 550 個、CM 級 813 個である。

(4) 岩盤の内部摩擦係数

岩盤の内部摩擦係数は、工事誌等から得られた実ダム 50 基の設計値に基づいて、岩級ごと（CH 級、CM 級）の平均値および標準偏差を求めた。

(5) 揚圧力係数

揚圧力係数は、全孔一斉閉塞にて測定を行った実ダム 9 基の揚圧力係数を基に評価した。なお、全孔一斉閉塞での計測値は、基礎排水孔を閉じていない状態と比較して、揚圧力が高い状態になる。富田ら⁹⁾では、数値解析的検討により、閉塞無しの揚圧力水頭と全孔閉塞の揚圧力水頭を比較しており、その結果からみると、閉塞無しの揚圧力水頭と全孔閉塞の揚圧力水頭の 1 ブロック断面平均は 0.35 程度である。そこで、全孔一斉閉塞での測定値に係数 0.35 を乗じて、堤体底面に作用する揚圧力と考える。

3.3 荷重および強度の確率分布の検討結果

(1) コンクリートの単位容積重量

変動係数は実ダムの工事誌を参考に、コンクリート単位容積重量試験値の変動係数の平均値から 0.8% とした。なお、前述のように、コンクリートの単位容積重量の確率分布の平均値は、河川砂防技術基準（案）設計編 [I] より標準的な値である 22.56kN/m³ とした。

(2) コンクリートの引張強度

各実ダムのコンクリート引張強度（圧縮強度から推定した値）の確率分布の平均値の全体平均値から、平均値を 2.52MPa と設定した。変動係数は、実ダムのコンクリート引張強度の確率分布の変動係数の平均値から、4.4% と設定した。

(3) 岩盤のせん断強度

岩盤のせん断強度の確率分布の平均値は、森ら⁸⁾を参考に、岩級ごとに整理された実ダムのせん断強度の平均値を用い、CM 級岩盤 2.08MPa、CH 級岩盤 3.29MPa と設定し、変動係数は、CM 級 45.4%、CH 級岩盤 38.8% と設定した。図-12、13 に岩級ごとのせん断強度の確率分布を示す。

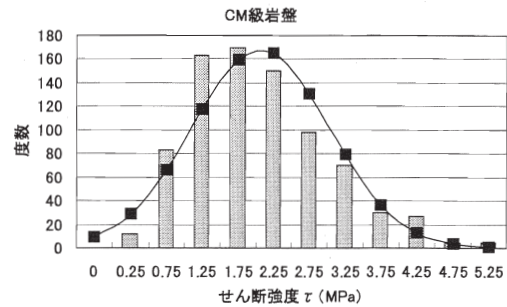


図-12 CM 級岩盤のせん断強度の確率分布

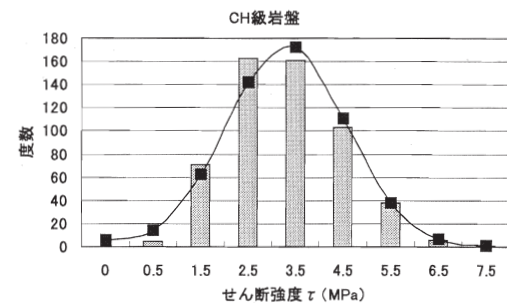


図-13 CH 級岩盤のせん断強度の確率分布

(4) 岩盤の内部摩擦係数

岩盤の内部摩擦係数の確率分布の平均値は、実ダムの設計値の平均値から、CM 級 1.0、CH 級 1.1 と設定した。変動係数は、CM 級 13.1%、CH 級 13.1% と設定した。

(5) 揚圧力係数

揚圧力係数の確率分布の平均値は、全孔一斉閉塞にて測定を行ったダムの揚圧力係数の平均値は 0.39 であった。これに、前述の換算係数 0.35 を乗じて、基礎排水孔を開放している状態での揚圧力に対応した揚圧力係数を $0.39 \times 0.35 = 0.14$ と設定した。変動係数は、全孔一斉閉塞にて測定を行ったダムの揚圧力係数の変動係数の平均値から 40.9% と設定した。

4. 部分安全係数の検討

4.1 対象とする安全性着目項目とそれらに対応した性能関数の設定

前述のように、現行設計基準³⁾では、重力式コンクリートダムの安定条件として(1)外力の合力が堤体水平断面の Middle Third に入ること、(2)Henny の式でせん断摩擦安全率が 4 以上あること、(3)堤体中に生ずる応力が許容応力度を超えないことがあげられている。

(3)については、堤体内に発生する圧縮応力がコンクリートの許容応力（安全率4）以内であることを確認している。さらに、堤趾部における局所的なせん断破壊についても確認する場合がある。

近年、大きな地震動に対するダム安全性を検討する事例が増加してきている。その場合には、堤体上流面に引張応力が発生し、その応力と堤体材料であるコンクリートの引張強度を比較することで、耐震安全性を検討する必要がある¹⁾。一方、大きな地震動を考慮したとしても、堤体内の圧縮応力はコンクリートの圧縮強度に比較してかなりの余裕があり、現行設計法で設計されたダムは、圧縮破壊に対して大きな安全率を考慮していることで、間接的に地震時における引張破壊の安全性を確保されているというように考えることもできる。しかし、性能設計を考えていく上では、より実際の破壊を直接的に考慮することが必要である。

上述のようなことから、本研究においては、(1)滑動に対する安全性、(2)転倒に対する安全性の2種類の外的安定性と、(3)堤体上流端での鉛直引張応力に対する安全性、(4)堤趾部での水平方向の局所的なせん断に対する安全性（以後、水平局所せん断に対する安全性と呼ぶ。）、(5)堤趾部での任意方向の局所的なせん断に対する安全性（これは、堤趾部における局所せん断の安全率の最小値で、任意方向局所せん断に対する安全性と呼ぶ）の計5項目に着目して、重力式コンクリートダムの信頼性指標を検討する。(4)と(5)は、ともに堤趾部の局所的なせん断破壊に対する安全性の項目であり、現行設計法の中では一般的に(4)の水平方向の安全性を検討することが多い。ただし、岩盤が弱い場合には、任意の方向の安全性、つまり堤趾部での支持力について検討することの重要性も指摘されている²⁾ことから設定したものである。

これら5つの安全性着目項目における性能関数 Z （ $Z=R-S$ 、 R は強度、 S は強度効果）を以下のように設定する。

(1) 滑動に対する性能関数

$$Z = \tau_0 L + fV - H \quad \dots (2)$$

τ_0 : 岩盤のせん断強度

f : 岩盤の内部摩擦係数

L : せん断面の長さ

V : 単位幅のせん断面に作用する垂直力

H : 単位幅のせん断面に作用するせん断力

(2) 転倒に対する性能関数

$$Z = M_R - M_T \quad \dots (3)$$

M_R : 堤趾部における抵抗モーメント

M_T : 堤趾部における転倒モーメント

(3) 堤体上流端での鉛直引張応力に対する性能関数

$$Z = ft - \sigma \quad \dots (4)$$

ft : コンクリートの引張強度

σ : 堤体底面上流端での鉛直方向の直応力（引張を正）

(4) 堤趾部での水平方向の局所的なせん断に対する性能関数

$$Z = \tau_0 + f\sigma_D - \tau_D \quad \dots (5)$$

τ_D : 堤趾部の水平方向のせん断応力

σ_D : 堤趾部の鉛直方向の直応力（圧縮を正）

(5) 堤趾部での任意方向の局所的なせん断に対する性能関数

$$Z = \sqrt{\tau_0 + f\sigma_1\tau_0} - \frac{\sigma_1}{2} \quad \dots (6)$$

σ_1 : 堤趾部の圧縮側主応力（圧縮を正）

なお、(4)の堤趾部での水平方向の局所的なせん断に対する性能関数は、梁理論で堤体応力を評価する場合、以下のように書きかえることができる。

$$Z = \tau_0 + (f - n)\sigma_D \quad \dots (7)$$

以後、「堤体上流端での鉛直引張応力」を「上流端鉛直応力」、「堤趾部での水平方向の局所的なせん断」を「水平局所せん断」と呼ぶ。また、「堤趾部での任意方向の局所的なせん断に対する性能関数」は、堤趾部における局所せん断に対する安全率の最小値（いわゆる最小局所せん断安全率）に対応していることから、「堤趾部での任意方向の局所的なせん断」を「最小局所せん断」と呼ぶこととする。

性能関数の値を検討する際には、堤体に発生する応力を求める必要があるが、重力式コンクリートダムの断面設計で一般的に用いている梁理論に基づいて算出する。なお、フィレットを有するダムにおいては、形状によっては底面よりもフィレット取り付け部での応力が大きくなることもあるが、ここではフィレットの有無によらず上流端鉛直応力は堤体底面での値で評価した。

4.2 対象とする堤体形状の設定（断面設計）

検討を行うモデルは、岩級を固定した状態で、堤高と各性能関数の関係の把握を目的に設定する。

確率分布を考慮する設計定数については、3章で得

られた荷重および強度の平均値を使用して設定する。ただし、岩盤のせん断強度、揚圧力係数については平均値を使用すると一般的なダム形状に比較して大きな断面となるため、岩盤のせん断強度は既存ダムの設計値の平均値を使用した。また、揚圧力係数については現行設計法³⁾での下限値である0.2として設定した。また、確率分布を考慮しない設計定数については、「河川砂防技術基準(案)」⁶⁾に記されている標準的な値を使用した。表-3に対象ダムの断面決定に用いた設計定数をまとめて示す。

基本的な断面決定の手順は、以下の通りとした。

①堤高が低いモデルでは上流面を鉛直とし、安定条件を満たす下流面勾配を設定する。この場合の安定条件は Middle Third の条件が最も厳しくなる。

②堤高が高くなると、Middle Third の条件で決まる基本三角形では滑動(せん断)に対する安全性(Henny式による安全率)が厳しくなることから、フィレットを設けて滑動(せん断)抵抗性を高めたモデルを設定する。

③フィレット有りモデルの下流面勾配は1:0.8、フィレット勾配は1:0.6で固定し、フィレット高を変えることで、Henny式による安全率(滑動安全率)4以上、上流端に引張方向の鉛直応力が発生しない形状を設定する。

表-3に示した設計定数を用い、上記の手順で決定したダム形状を表-4に示す。岩級CM級に対して、35m~150mの6形状、岩級CH級に対して50m~150mの5形状を設定した。

4.3 信頼性指標、感度係数、部分安全係数の算出方法

4.2で設定した堤体モデルを対象として、表-5に示す設計因子を、正規確率分布に従う確率変数と考えて、2次モーメント法(FOSM法に該当)および1次ガウス法(AFOSMに該当)を用いて、5つの性能関数について信頼性指標 β ($\beta = \mu_Z / \sigma_Z$, μ_Z :性能関数Zの平均値、 σ_Z :性能関数Zの標準偏差)の算出を行う。2次モーメント法は、性能関数の平均値周りの線形化近似による方法、1次ガウス法は破壊点周り(性能関数値=0)の線形化近による方法で、後者の1次ガウス法の精度が高いとされる。また、1次ガウス法の場合には、各確率変数が信頼性指標に及ぼす影響度を表す感度係数を同時に求めることができる。

レベル1信頼性理論に基づく部分係数法による設計では、以下に示す式を満たすように設計を行うものである。

表-3 断面決定用設計定数

| 項目 | 設定値 | |
|---------------|------------------------|---------|
| コンクリートの単位容積重量 | 22.56kN/m ³ | |
| 水の単位容積重量 | 9.81kN/m ³ | |
| 水中での堆泥単位容積重量 | 10.79kN/m ³ | |
| コンクリートの引張強度 | 2.52MPa | |
| 岩盤のせん断強度 | CH | 2.24MPa |
| | CM | 1.48MPa |
| | CL | 0.64MPa |
| 岩盤の内部摩擦係数 | CH | 1.1 |
| | CM | 1.0 |
| | CL | 0.8 |
| 揚圧力係数 | 0.20 | |
| 泥圧係数 | 0.5 | |
| 設計震度 | 0.12 | |

表-4 ダム形状の諸元

| 諸元 | CM級 | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 35.00 | 50.00 | 75.00 | 100.00 | 125.00 | 150.00 |
| 堤高(m) | 35.00 | 50.00 | 75.00 | 100.00 | 125.00 | 150.00 |
| 下流面勾配 | 1:0.72 | 1:0.75 | 1:0.80 | 1:0.80 | 1:0.80 | 1:0.80 |
| 貯水位(m)(堤高-5m) | 30.00 | 45.00 | 70.00 | 95.00 | 120.00 | 120.00 |
| 堆砂位(m)(水深の1/3) | 10.00 | 15.00 | 23.33 | 31.67 | 40.00 | 48.33 |
| フィレット取付標高(m) | - | - | 6.00 | 40.00 | 83.00 | 132.00 |
| フィレット勾配 | - | - | 1:0.60 | 1:0.60 | 1:0.60 | 1:0.60 |
| ドレーン位置(堤体上流端より) | 5.00 | 5.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| 諸元 | CH級 | | | | | |
| | 50.00 | 75.00 | 100.00 | 125.00 | 150.00 | |
| 堤高(m) | 50.00 | 75.00 | 100.00 | 125.00 | 150.00 | |
| 下流面勾配 | 1:0.75 | 1:0.78 | 1:0.79 | 1:0.80 | 1:0.80 | |
| 貯水位(m)(堤高-5m) | 45.00 | 70.00 | 95.00 | 120.00 | 145.00 | |
| 堆砂位(m)(水深の1/3) | 15.00 | 15.00 | 31.67 | 40.00 | 48.33 | |
| フィレット取付標高(m) | - | - | - | 21.00 | 53.00 | |
| フィレット勾配 | - | - | - | 1:0.60 | 1:0.60 | |
| ドレーン位置(堤体上流端より) | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 10.00 | 10.00 | |

表-5 確率変数の諸元

| 諸元 | 性能関数算出時に考慮する設計因子 | | | | 平均値 | 標準偏差 | 変動係数 |
|---------------|------------------|----|---------|----------|------------------------|-----------------------|-------|
| | 滑動 | 転倒 | 上流端鉛直応力 | 下流端局所せん断 | | | |
| コンクリートの単位容積重量 | ○ | ○ | ○ | ○ | 22.56kN/m ³ | 0.18kN/m ³ | 0.8% |
| コンクリートの引張強度 | × | × | ○ | × | 2.52MPa | 0.11MPa | 4.4% |
| 岩盤のせん断強度 | CH | ○ | × | ○ | 3.29MPa | 1.28MPa | 38.8% |
| | CM | ○ | × | × | 2.08MPa | 0.94MPa | 45.4% |
| 岩盤の内部摩擦係数 | CH | ○ | × | × | 1.1 | 0.15 | 13.1% |
| | CM | ○ | × | × | 1.0 | 0.14 | 13.1% |
| 揚圧力係数 | ○ | ○ | ○ | ○ | 0.14 | 0.06 | 40.9% |

$$\sum \gamma_{X_R} R_X \geq \sum \gamma_{X_S} S_X \quad \dots (8)$$

ここで、 γ_{X_R} γ_{X_S} はそれぞれ各種 R_X (強度)、 S_X (荷重効果) に対する部分係数である。

上述までの方法で算出された信頼性指標の値を参考に、目標信頼性指標を設定(仮定)して、以下の式によって、レベル1信頼性設計法における部分係数 γ_X ²⁾ を試算した。

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_0 V_X) B_X \quad \dots (9)$$

ここで、 β_0 は目標信頼性指標、 α_X は感度係数、 V_X 、

B_X はそれぞれ確率変数 X の変動係数と平均値の偏り (平均値/特性値) である。

なお、モデルダムの断面設計においては、震度法による耐震設計用の設計震度 k を 0.12 (強震帯相当) としている。しかし、この震度の値は、堤体の上部が地震時には大きく振動するという挙動を考慮していない。よって、現行設計法では、地震力そのものとしては小さめに評価しているものの、大きな安全率との組み合わせで、全体としての整合性を図っていると考えることができる。ここでは、設計震度の大きさが信頼性指標に与える影響を考察する目的で、以下のような考え方で、堤体の地震時挙動を考慮した震度を設定し、その値を用いての信頼性指標の算出も行った。

「フィルダムの耐震設計指針 (案)」¹⁰⁾ では、強震帯の地盤震度として 0.18 を設定している。これを地盤震度 (地盤加速度) として考え、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 (修正震度とは、堤体の標高に対応した震度分布を有する。)¹¹⁾ の考え方を用いて、堤体の上部が大きく振動することを考慮した等価な一様震度を以下のようにして計算した。

重力式コンクリートダムの修正震度法では、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した下式のように設定した。

$$(k_n) = \theta \times (H_n)^{2.0} \times Sa(1/f, h) / g \quad \dots (10)$$

ここに、 (k_n) は修正震度、 (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、 g は重力加速度、 θ は堤体の 1 次固有振動形に対応した刺激係数である。

本報告では、直角三角形形状 (上流面鉛直、下流面勾配 1:0.8) の重力式コンクリートダム堤体を想定し、水平方向変位の最大値を 1 とした固有振動形ベクトルに対応した値として θ の値を 2.86 とした。また、ダムサイトで計測された地震動の分析¹⁰⁾ によると、堤体の減衰定数を 10% では、0~0.5Hz 間の固有振動数に対して地盤加速度の 3 倍程度の応答を示すことから、 $Sa(1/f, h) / g = (0.18g \times 3) / g = 0.54 \quad \dots (11)$ となる。

上記で設定される修正震度が作用することによって、上流面鉛直の直角三角形形状の重力式コンクリートダム堤体に発生する慣性力によるモーメントから、等価となる一様震度 k' を計算すると、以下ようになる。

$$\begin{aligned} k' &= 3/10 \cdot \theta \cdot (Sa(1/f, h) / g) \\ &= 3/10 \times 2.86 \times 0.54 = 0.463 \quad \dots (12) \end{aligned}$$

そこで、現行設計法における強震帯の震度 $k = 0.12$ に加え、この堤体の応答を考慮した等価一様震度 $k' = 0.46$ も用いて検討を行う。

4.4 部分安全係数の算出結果

4.4.1 信頼性指標と感度係数

信頼性指標については、2 次モーメント法と 1 次ガウス法による方法で求めた。設定した 11 個のモデルダム (表 4 参照) に対する信頼性指標 β_1 、 β_2 および感度係数の算出結果 (震度 $k=0.12$ の場合) を表 6 に示す。表中、 β_1 は 2 次モーメント法による信頼性指標、 β_2 は 1 次ガウス法による信頼性指標である。2 次モーメント法による β_1 と 1 次ガウス法による β_2 は、ほぼ同じような値となっている。なお、信頼性指標の値が大きいほど、破壊確率が小さいことを示しており、信頼性指標が大きい転倒と上流端鉛直応力は、破壊確率が極端に低いことを示している。

図-14 に信頼性指標 β_2 を、図-15 に感度係数 α を、それぞれ堤高との関係で示す。滑動、水平局所せん断、最小局所せん断に対する信頼性指標は、フィレットが有るダムと無いダムで傾向が変わらず、堤高の増加に伴って増加、あるいは減少している。フィレットがある場合、現行設計法における Henny の安全率 (滑動安全率) は同じ値であるのかかわらず、堤高が大きくなると滑動に対する信頼性指標が大きい、つまり安全性が高くなっていることがわかる。一方、最小局所せん断安全率に対する信頼性指標は堤高とともに低下している。このことより、現行設計法ではフィレットによって主に Henny の安全率 (滑動安全性) を高めているが、堤高が高いダムの場合には、滑動に対する安全性の観点からは、フィレットを小さくできる可能性が示唆される。しかし、一方、堤趾部での局所的なせん断破壊に対する安全性については、堤高が大きいダムでは注意が必要であることがわかる。

転倒や上流端鉛直応力に対する信頼性指標については、フィレットの有無により傾向が異なっている。フィレットが有るダムでは、堤高が増加する（つまりフィレットが大きくなる）につれて、転倒および上流端鉛直応力に対する信頼性指標が大きくなっている。これは、フィレットは Henny 式で示される滑动安全性の向上を目的として付されるが、このフィレットにより堤体が増厚され、転倒や応力の面で有利になるからである。フィレットが無いダムの場合、堤高が大きくなるにつれて、上流端鉛直応力の信頼性指標が小さくなっている。このことより、フィレットが無いダムでは堤高の増加に伴って上流側の引張破壊に留意すべきであることが示唆される。

感度係数の傾向については、基礎岩盤の岩級、および堤体モデルによる差は小さく、性能関数ごとに明確な特徴を有する。感度係数が、正值の場合にはその確率変数が増加した場合に性能関数の値が高まる方向であることを示し、その絶対値の大きさが性能関数の値

に与える影響が大きいことを示す。また、各確率変数の感度係数の2乗和は、各性能関数に対して1となっている。滑动に対しては、圧倒的にせん断強度 τ_0 の感度係数の割合が大きく、続いて内部摩擦係数 f であり、堤高が大きくなると内部摩擦係数の感度係数 α が若干大きくなっている。転倒に対しては、堤体の単位容積重量よりも揚圧力係数 U_p が圧倒的に影響が大きいことがわかる。上流端鉛直応力については、引張強度 f_t の感度係数の割合が大きいが、揚圧力係数の影響も大きく、その傾向は堤高が大きいかほど大きい。最小局所せん断については、滑动の場合と同じように、 τ_0 の感度係数の割合が大きいかという傾向を有している。ここでは示していないが、水平局所せん断についても同様な傾向である。

図-16には信頼性指標間の関係を示す。滑动に対する信頼性指標と最小局所安全率の信頼性指標の間には、正の相関が見られない。つまり、両方の破壊モードを、別々に考慮することが必要であることを示すものであ

表-6 信頼性指標と感度係数（設計震度 $k=0.12$ ）

| 性能関数の対象 | | CM級 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|---------|
| | | 堤高(m) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 35 | | | 50 | | | 75 | | | 100 | | | 125 | | | 150 | | |
| 確率変数 | β_1 | β_2 | α | β_1 | β_2 | α | β_1 | β_2 | α | β_1 | β_2 | α | β_1 | β_2 | α | β_1 | β_2 | α | |
| 滑动 | Wc | 2.310 | 2.302 | 0.0029 | 2.340 | 2.331 | 0.0041 | 2.420 | 2.409 | 0.0057 | 2.670 | 2.641 | 0.0067 | 2.960 | 2.897 | 0.0083 | 2.409 | 3.167 | 0.0101 |
| | τ_0 | | | 0.9986 | | | 0.9971 | | | 0.9936 | | | 0.9874 | | | 0.9778 | | | 0.9645 |
| | f | | | 0.0513 | | | 0.0747 | | | 0.1107 | | | 0.1560 | | | 0.2065 | | | 0.2609 |
| | U_p | | | -0.0092 | | | -0.0137 | | | -0.0210 | | | -0.0277 | | | -0.0337 | | | -0.0387 |
| | f_t | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| 転倒 | Wc | 16.330 | 16.332 | 0.2642 | 16.060 | 16.056 | 0.2567 | 16.200 | 16.204 | 0.2235 | 19.930 | 19.934 | 0.1815 | 22.890 | 22.887 | 0.1839 | 2.409 | 25.266 | 0.1982 |
| | τ_0 | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| | f | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| | U_p | | | -0.9645 | | | -0.9665 | | | -0.9747 | | | -0.9834 | | | -0.9829 | | | -0.9802 |
| | f_t | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| 上流端鉛直応力 | Wc | 22.550 | 22.550 | 0.0465 | 21.980 | 21.981 | 0.0652 | 21.330 | 21.329 | 0.0774 | 22.940 | 22.937 | 0.0630 | 24.630 | 24.6319 | 0.0694 | 2.409 | 26.584 | 0.0824 |
| | τ_0 | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| | f | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| | U_p | | | -0.2173 | | | -0.3094 | | | -0.4556 | | | -0.5534 | | | -0.6263 | | | -0.6832 |
| | f_t | | | 0.9750 | | | 0.9487 | | | 0.8868 | | | 0.8305 | | | 0.7765 | | | 0.7255 |
| 水平局所せん断 | Wc | 2.400 | 2.399 | 0.0003 | 2.450 | 2.447 | 0.0003 | 2.450 | 2.454 | 0.0004 | 2.480 | 2.485 | 0.0009 | 2.520 | 2.515 | 0.0011 | 2.409 | 2.541 | 0.0012 |
| | τ_0 | | | 0.9951 | | | 0.9895 | | | 0.9797 | | | 0.9725 | | | 0.9632 | | | 0.9530 |
| | f | | | 0.0987 | | | 0.1442 | | | 0.2004 | | | 0.2328 | | | 0.2687 | | | 0.3029 |
| | U_p | | | 0.0018 | | | 0.0020 | | | 0.0021 | | | 0.0021 | | | 0.0020 | | | 0.0017 |
| | f_t | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| 最小局所せん断 | Wc | 2.110 | 1.983 | -0.0007 | 2.020 | 1.875 | -0.0008 | 1.860 | 1.715 | -0.0016 | 1.770 | 1.629 | -0.0034 | 1.660 | 1.532 | -0.0045 | 2.409 | 1.438 | -0.0055 |
| | τ_0 | | | 0.9990 | | | 0.9976 | | | 0.9976 | | | 0.9971 | | | 0.9966 | | | 0.9960 |
| | f | | | 0.0450 | | | 0.0562 | | | 0.0693 | | | 0.0756 | | | 0.0823 | | | 0.0885 |
| | U_p | | | -0.0047 | | | -0.0054 | | | -0.0077 | | | -0.0082 | | | -0.0080 | | | -0.0076 |
| | f_t | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |

| 性能関数の対象 | | CH級 | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|---------|
| | | 堤高(m) | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 50 | | | 75 | | | 100 | | | 125 | | | 150 | | |
| 確率変数 | β_1 | β_2 | α | β_1 | β_2 | α | β_1 | β_2 | α | β_1 | β_2 | α | β_1 | β_2 | α | |
| 滑动 | Wc | 2.700 | 2.697 | 0.0034 | 2.770 | 2.754 | 0.0050 | 2.830 | 2.805 | 0.0065 | 2.980 | 2.944 | 0.0072 | 3.180 | 3.122 | 0.0080 |
| | τ_0 | | | 0.9982 | | | 0.9958 | | | 0.9925 | | | 0.9882 | | | 0.9822 |
| | f | | | 0.0589 | | | 0.0896 | | | 0.1200 | | | 0.1502 | | | 0.1847 |
| | U_p | | | -0.0111 | | | -0.0170 | | | -0.0228 | | | -0.0282 | | | -0.0332 |
| | f_t | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| 転倒 | Wc | 16.060 | 16.056 | 0.2567 | 16.370 | 16.371 | 0.2550 | 16.470 | 16.474 | 0.2558 | 17.690 | 17.693 | 0.2049 | 22.020 | 20.024 | 0.1854 |
| | τ_0 | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| | f | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| | U_p | | | -0.9665 | | | -0.9669 | | | -0.9667 | | | -0.9788 | | | -0.9827 |
| | f_t | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| 上流端鉛直応力 | Wc | 21.980 | 21.9806 | 0.0652 | 21.040 | 21.041 | 0.0931 | 19.790 | 19.789 | 0.1164 | 19.960 | 19.960 | 0.0944 | 21.070 | 21.071 | 0.0840 |
| | τ_0 | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| | f | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| | U_p | | | -0.3094 | | | -0.4341 | | | -0.5321 | | | -0.6378 | | | -0.6949 |
| | f_t | | | 0.9487 | | | 0.8961 | | | 0.8387 | | | 0.7644 | | | 0.7142 |
| 水平局所せん断 | Wc | 2.820 | 2.81944 | 0.0003 | 2.900 | 2.896 | 0.0004 | 2.970 | 2.973 | 0.0004 | 3.000 | 2.997 | 0.0010 | 3.030 | 3.028 | 0.0013 |
| | τ_0 | | | 0.9935 | | | 0.9854 | | | 0.9738 | | | 0.9666 | | | 0.9599 |
| | f | | | 0.1139 | | | 0.1702 | | | 0.2272 | | | 0.2562 | | | 0.2805 |
| | U_p | | | 0.0022 | | | 0.0023 | | | 0.0022 | | | 0.0030 | | | 0.0028 |
| | f_t | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |
| 最小局所せん断 | Wc | 2.500 | 2.339 | -0.0006 | 2.400 | 2.21102 | -0.0007 | 2.270 | 2.080 | -0.0008 | 2.200 | 2.007 | -0.0020 | 2.130 | 1.949 | -0.0029 |
| | τ_0 | | | 0.9992 | | | 0.9986 | | | 0.9981 | | | 0.9978 | | | 0.9975 |
| | f | | | 0.0410 | | | 0.0518 | | | 0.0614 | | | 0.0663 | | | 0.0700 |
| | U_p | | | -0.0039 | | | -0.0042 | | | -0.0042 | | | -0.0061 | | | -0.0060 |
| | f_t | | | - | | | - | | | - | | | - | | | - |

る。転倒と上流端鉛直応力の信頼性指標については、フィレットがある場合には正の相関が見られるが、フィレットがない場合には相関が明確でない。滑動と転倒の信頼性指標の間には、フィレットの有無によらず正の相関が見られる。

図-17には設計震度の影響を示す。横軸は堤高、縦軸は震度 $k=0.46$ に対する信頼性指標を震度 $k=0.12$ に対する信頼性指標で除した値である。この図によると、転倒と上流端鉛直応力について、震度の影響が大きいことがわかる。また、その傾向は、フィレットがないダムで顕著である。

さらに、引張強度 f_t の値が上流端鉛直応力に与える影響を調べるため、引張強度 f_t の平均値を減じて信頼性指標を算出した。図-18にコンクリートの引張強度が、上流端鉛直応力の信頼性指標に与える影響を示す。この図で、横軸は、コンクリートの引張応力 f_t の平均値の低減割合(標準偏差も同じ割合で減じた)であり、縦軸は元々の f_t 値に対する信頼性指標に対する割合を示している。この図からわかるように、引張強度 f_t の平均値が、上流端鉛直応力に対する信頼性指標に与える影響が非常に大きい。今回、引張強度の基本値は、通常の重力式コンクリートダムの実積値をもとに設定した。しかし、近年では、良好な骨材用原石山が少なくなっており、骨材の品質によっては従来に比較して、低い強度のコンクリートを用いることもあり得る。そのような場合には、上流端鉛直応力についても注意が必要である。

4.4.2 部分係数の試算結果

今回設定したモデルダムにより、既存の重力式コンクリートダムの実態を十分に代表できてはいないが、今回求めた信頼性指標(表-7参照)のうち最低値を目標信頼性指標として、ここでは設定する。これは、現行設計法で設計されたダムが、これまでにダム本体に関わる重大な被害を生じた例がないため、各性能に対して最低値を設定することに支障がないと考えられるからである。なお、構造全体としての破壊と局所的な破壊では、安全性の有する意味合いが異なると考え、全体破壊と局所破壊に対しては、異なる信頼性指標値

を設定する。

構造全体的な外的安定性を示す指標としては、今回、滑動と転倒を設定した。それらに関する最低値は、約 2.3 (CM 級、堤高 35m の滑動に対する信頼性指標値) である。また、局所的な内的安全性を示す指標としては、上流端鉛直応力と堤趾部の水平局所せん断と最小局所せん断を設定した。それらに関する最低値は、約 1.4 (CM 級、堤高 150m の最小局所せん断安全率に対する信頼性指標値) である。そこで、滑動、転倒に対しては目標信頼性指標を 2.3 に、上流端鉛直応力、水平局所せん断と最小局所せん断に対しては目標信頼性指標を 1.4 に設定する。

また、特性値に関しては、部分係数法による設計を想定した考え方は定まっていない。そこで、ここでは、以下のような考え方で、特性値を設定した。

W_c : 一般的な設計値である 22.56kN/m^3

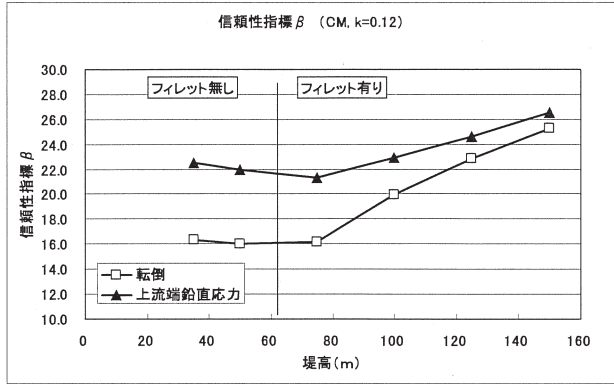
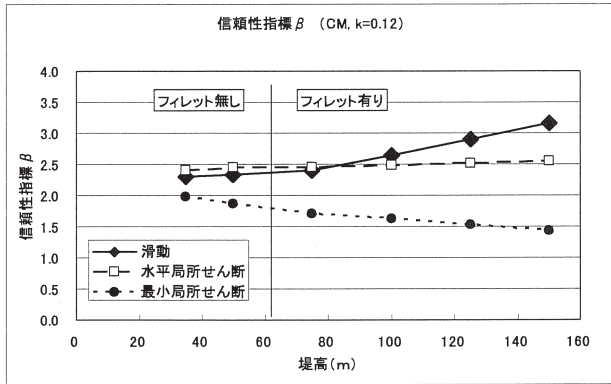
τ_0 : 現在 4 点以上の試験での最低値を設定することが一般的であることを勘案し、 $(1-V)\mu$ (V : 変動係数、 μ : 平均値) で計算 (CH 級の物性を利用)

f : 平均値 μ (CH 級の物性を利用)

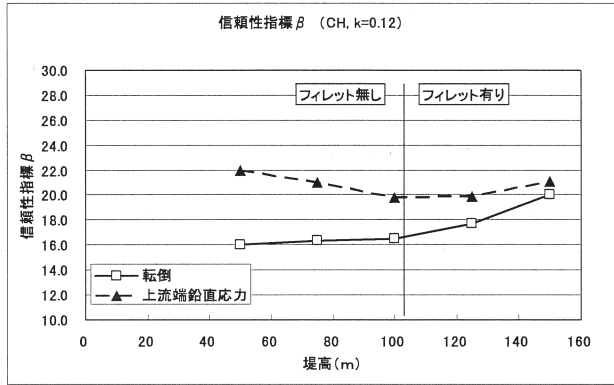
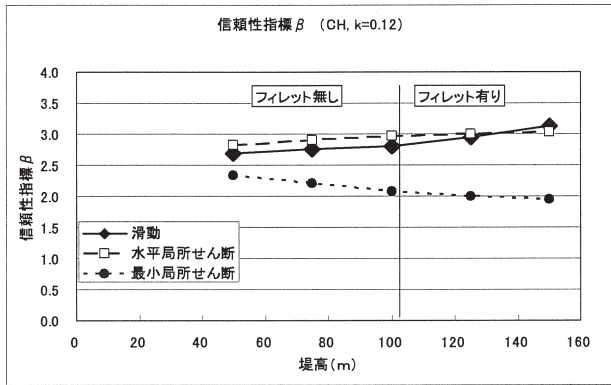
U_p : 一般的な値である 0.2

f_t : コンクリート標準示方書⁷⁾での強度の特性値の設定方法を参考に、 $(1-1.64V)\mu$ で計算

上記の設定に基づいて部分係数を試算した結果を、表-7に示す。部分係数は、滑動に対しては、 τ_0 の感度係数が大きいことを反映して、非常に低い部分係数 (0.18) となっている。それに比較すると、同じ滑動 (せん断破壊) に対する安全性に関する、水平局所せん断および最小局所せん断では τ_0 の部分係数は 0.7 程度となっている。滑動に対しては、揚圧力係数の部分係数が 1.42 と大きくなっている。上流端鉛直応力については、感度係数によると引張強度 f_t の影響が大きい。部分係数としてはそれほど大きな値とはなっていない。ただし、これは、目標信頼性指標を比較的小さな値としたこと、および変動係数が小さいことに起因する。

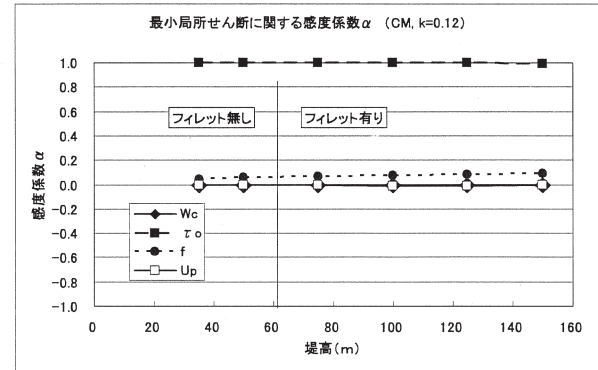
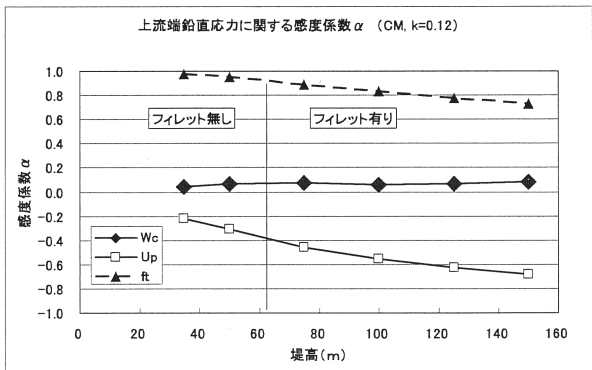
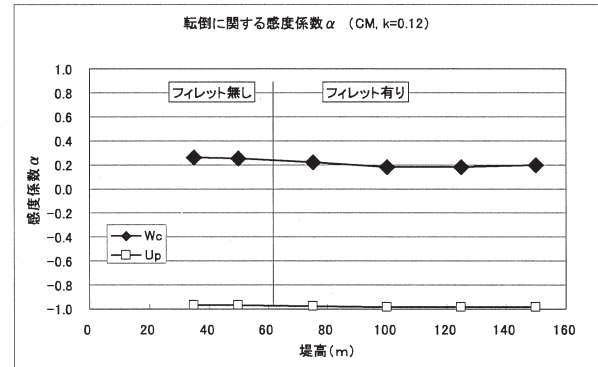
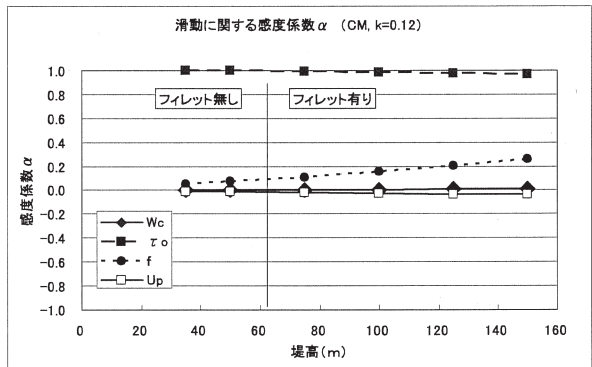


(1) CM 級



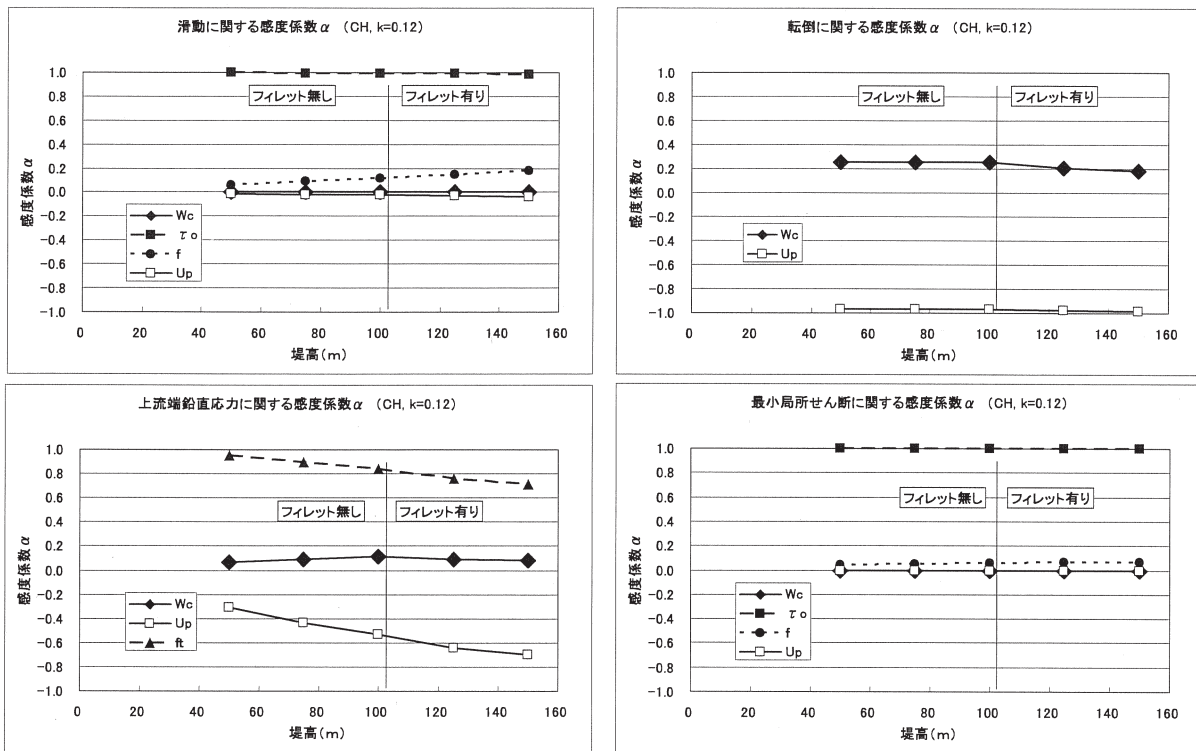
(2) CH 級

図-14 信頼性指標

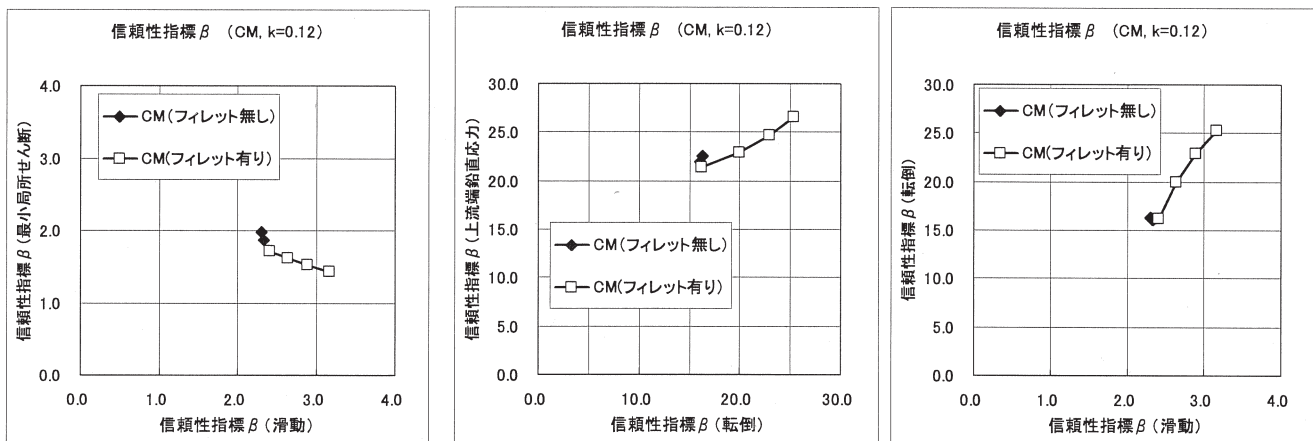


(1) CM 級

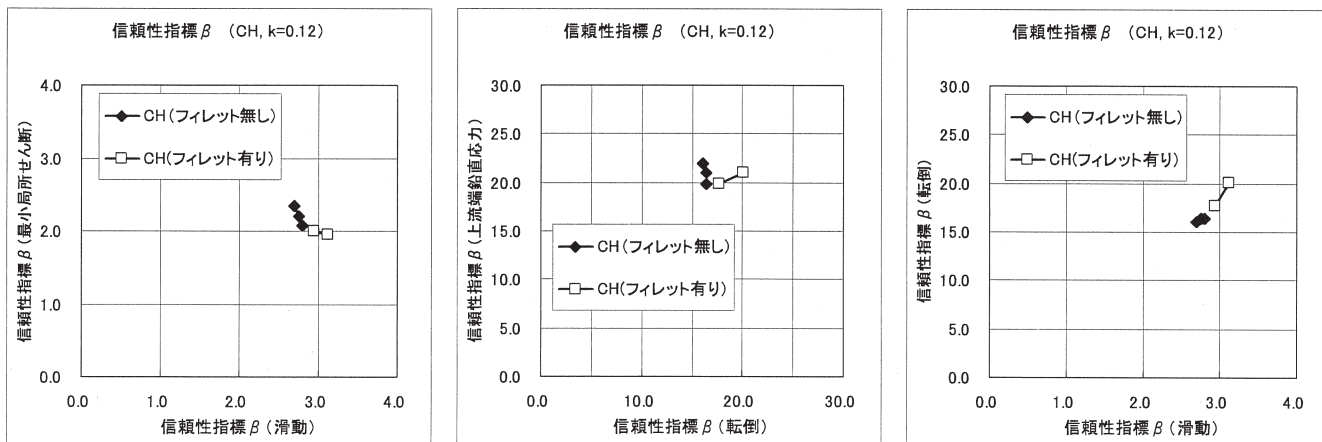
図-15 感度係数



(2) CH級
図-15 感度係数

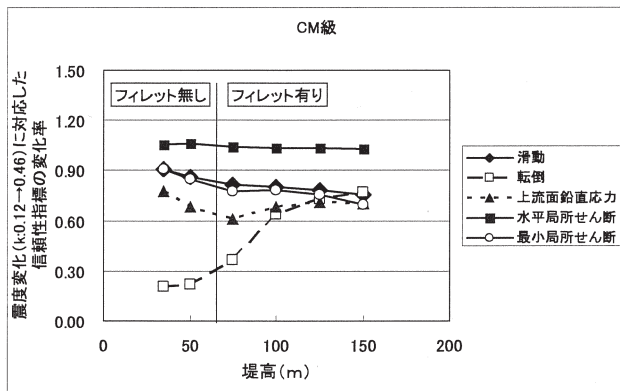


(1) CM級

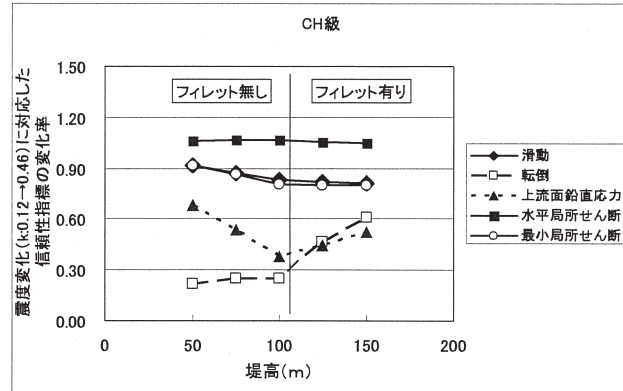


(2) CH級

図-16 信頼性指標間の関係 (CH級)



(1) CM級



(2) CH級

図-17 設計震度の影響

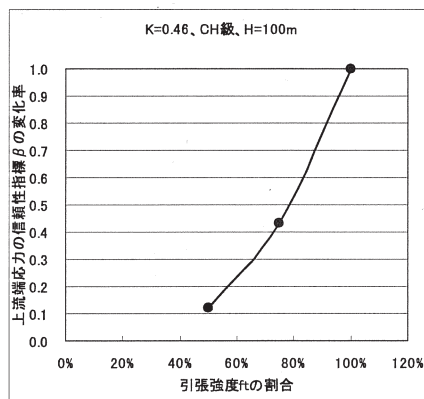


図-18 コンクリートの引張強度の影響

表-7 部分係数の試算結果

| 性能関数の対象 | β_0 | 確率変数 | α | μ | σ | μ' | $V(=\mu/\sigma)$ | $B(=\mu/\mu')$ | γ |
|---------|-----------|----------|----------|-------|----------|--------|------------------|----------------|----------|
| 滑動 | 2.300 | W_c | 0.0065 | 0.023 | 0.000 | 0.023 | 0.008 | 1.001 | 1.00 |
| | | τ_0 | 0.9925 | 3.290 | 1.280 | 2.010 | 0.389 | 1.637 | 0.18 |
| | | f | 0.1200 | 1.000 | 0.140 | 1.000 | 0.140 | 1.000 | 0.96 |
| | | U_p | -0.0228 | 0.150 | 0.060 | 0.200 | 0.400 | 0.750 | 0.77 |
| | | f_t | - | 2.520 | 0.110 | 2.340 | 0.044 | 1.077 | - |
| 転倒 | 2.300 | W_c | 0.2558 | 0.023 | 0.000 | 0.023 | 0.008 | 1.000 | 1.00 |
| | | τ_0 | - | 3.290 | 1.280 | 2.010 | 0.389 | 1.637 | - |
| | | f | - | 1.000 | 0.140 | 1.000 | 0.140 | 1.000 | - |
| | | U_p | -0.9667 | 0.150 | 0.060 | 0.200 | 0.400 | 0.750 | 1.42 |
| | | f_t | - | 2.520 | 0.110 | 2.340 | 0.044 | 1.077 | - |
| 上流端鉛直応力 | 1.400 | W_c | 0.1164 | 0.023 | 0.000 | 0.023 | 0.008 | 1.000 | 1.00 |
| | | τ_0 | - | 3.290 | 1.280 | 2.010 | 0.389 | 1.637 | - |
| | | f | - | 1.000 | 0.140 | 1.000 | 0.140 | 1.000 | - |
| | | U_p | -0.5321 | 0.150 | 0.060 | 0.200 | 0.400 | 0.750 | 0.97 |
| | | f_t | 0.8387 | 2.520 | 0.110 | 2.340 | 0.044 | 1.077 | 1.02 |
| 水平局所せん断 | 1.400 | W_c | 0.0004 | 0.023 | 0.000 | 0.023 | 0.008 | 1.000 | 1.00 |
| | | τ_0 | 0.9738 | 3.290 | 1.280 | 2.010 | 0.389 | 1.637 | 0.77 |
| | | f | 0.2272 | 1.000 | 0.140 | 1.000 | 0.140 | 1.000 | 0.96 |
| | | U_p | 0.0022 | 0.150 | 0.060 | 0.200 | 0.400 | 0.750 | 0.75 |
| | | f_t | - | 2.520 | 0.110 | 2.340 | 0.044 | 1.077 | - |
| 最小局所せん断 | 1.400 | W_c | -0.0008 | 0.023 | 0.000 | 0.023 | 0.008 | 1.000 | 1.00 |
| | | τ_0 | 0.9981 | 3.290 | 1.280 | 2.010 | 0.389 | 1.637 | 0.75 |
| | | f | 0.0614 | 1.000 | 0.140 | 1.000 | 0.140 | 1.000 | 0.99 |
| | | U_p | -0.0042 | 0.150 | 0.060 | 0.200 | 0.400 | 0.750 | 0.75 |
| | | f_t | - | 2.520 | 0.110 | 2.340 | 0.044 | 1.077 | - |

β_0 : 目標信頼性指標
 α : 各確率変数の感度係数
 μ : 各確率変数の平均値
 σ : 各確率変数の標準偏差
 μ' : 各確率変数の特性値

V : 各確率変数の変動係数
 B : 各確率変数の平均値の偏り(平均値と特性値の比)
 γ : 各確率変数の部分係数

岩盤強度(平均値、標準偏差)は、CH級の値を参照

5. 応力算出法による影響の検討

5.1 概要

4章における部分係数の算出においては、現行設計法で一般に用いられている梁理論による堤体応力算出法を用いている。従来でも、岩盤強度の一部に比較的弱い部分が存在する場合など、詳細な応力評価を行うために、FEM（有限要素法）が用いられることがあった。また、近年、耐震性能の照査での応力評価に、FEMを用いる事例が多くなってきている。

いま、性能設計（信頼性設計）では、荷重、強度、応力とともに、できるだけ正確な評価を行えることが望ましい。そこで、ここでは、梁理論による応力値とFEMによる応力値を比較して、応力に対する解析係数（解析法に起因する部分係数）について基本的な検討を実施した。

5.2 解析対象と検討方法

解析の対象としたダム形状は、図-19に示したとおり、堤高100mのダムで、フィレットの高さを3種類設定した。また基礎岩盤もモデル化し、その弾性係数を3種類設定した。なお、FEMでの要素寸法は、約2mと5mの2種類を設定した。また、荷重としては、鉛直力の代表として自重を、水平力の代表として静水圧を考慮した。

モデルの材料物性は以下の通りである。

- ・ 堤体：弾性係数 30,000MPa、ポアソン比 0.2、
単位容積質量 2300kg/m³
- ・ 岩盤：弾性係数 (Er)60,000MPa、30,000MPa、
15,000MPa、ポアソン比 0.3、
単位体積質量 0kg/m³

5.3 検討結果

まず、要素寸法の影響を見るために、梁理論による応力値と要素寸法2種類に対する応力値 (Er=15,000MP のケース)を比較して図-20に示した。なお、FEMによる解析による応力値としては、ダム底部上流端と下流端に位置する節点は応力の特異点となるため、その節点を含む一番端の要素ではなく、その次に端に近い要素の応力値を用いている。図によると、フィレットが無い場合（図ではフィレット高さ 0m）に要素寸法が細かい方が応力が大きく、また梁理論による応力と比較しても大きい。しかし、フィレットが大きい場合や下流端応力については要素寸法による顕著な差がなく、また梁理論での応力と近い。

次に、岩盤の弾性係数の影響を見るために、梁理論による応力値と弾性係数3種類に対する応力値（要素寸法2mのケース）を比較して図-20に示した。岩盤の弾性係数は、自重による上流端応力への影響が大きく、岩盤が柔らかいほど大きい。そして、フィレットが無い場合には、梁理論による応力よりもFEMによる応力が大きい。

以上のように、荷重、応力の評価点、ダム形状（フィレットの大きさ）、岩盤の弾性係数によって、それぞれ、梁理論による応力と有限要素法の応力の関係、また有限要素寸法が与える影響は異なっている。今回の解析においては、要素寸法が2mで岩盤の弾性係数Erが15,000MPaの場合に、応力が大きく出ている。そこで、梁理論による応力値と要素寸法2m・Er=15,000MPaでのFEMによる応力値の割合を表-8に示す。これを見ると、梁理論では、FEMでの半分程度の応力となる場合があることがわかる。表中ほぼ0となる数値があるが、これは梁理論、FEMとの算出された応力値が比較的小さい場合である。よって、もし要素寸法2mでの応力評価値を基準とするなら、梁理論による応力で設計を行う荷重は、解析係数2程度を勘案する必要があることとなる。今回は、基礎的な検討と位置づけ、荷重の種類を2種類として、かつ堤体形状も限定して検討を行った。そのため、今後は、他の荷重、また荷重の組み合わせ、堤体形状等、応力に影響がある因子を考慮に入れて、このような解析係数の値を検討する必要がある。

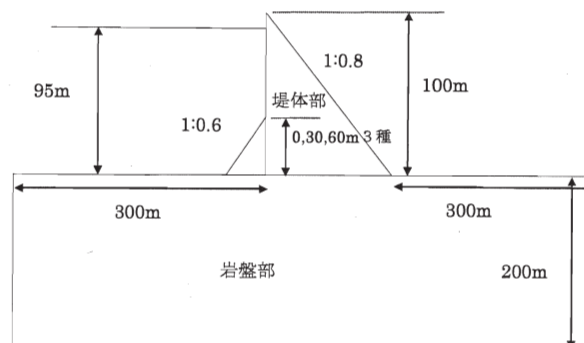
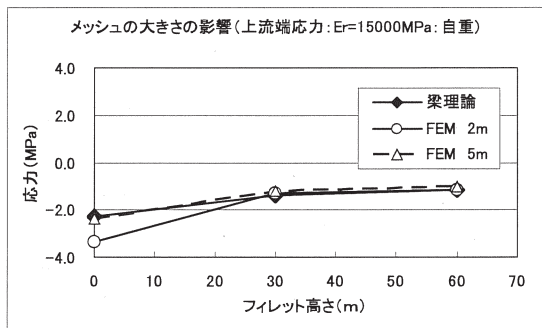


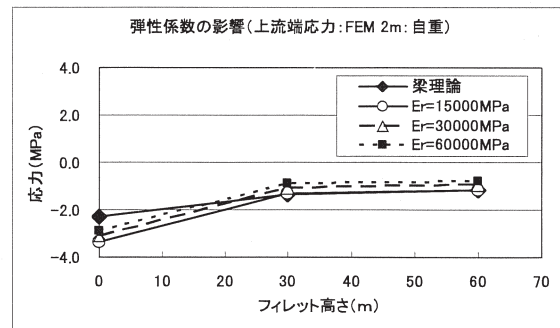
図-19 FEMでの解析モデル

図-8 梁理論による応力/FEMによる応力（要素寸法2m）

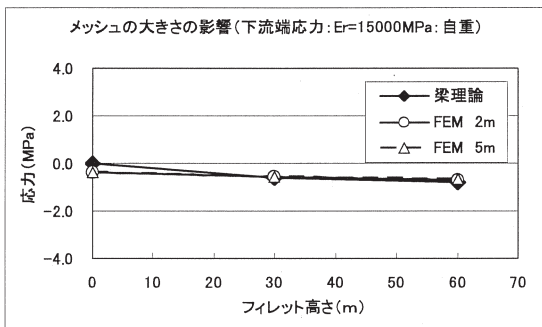
| フィレット高さ(m) | 自重による応力 | | 静水圧による応力 | |
|------------|---------|------|----------|------|
| | 上流端 | 下流端 | 上流端 | 下流端 |
| 0 | 0.67 | 0.00 | 0.50 | 1.44 |
| 30 | 1.05 | 1.06 | 0.57 | 1.05 |
| 60 | 1.01 | 1.18 | -0.03 | 0.85 |



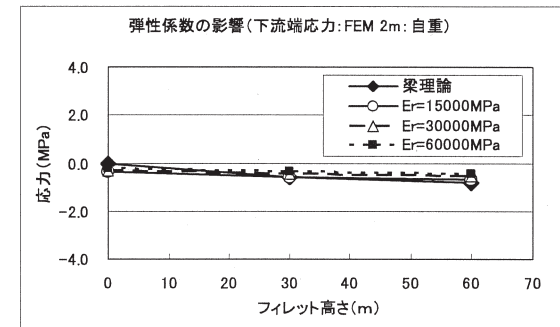
(1) 自重による上流端応力



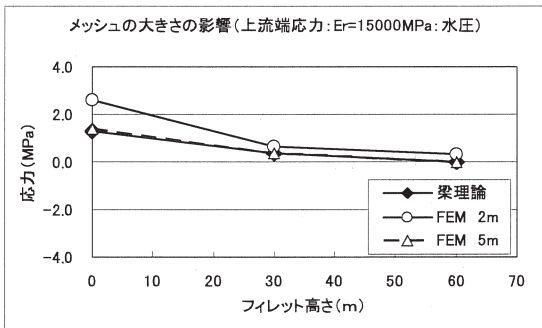
(1) 自重による上流端応力



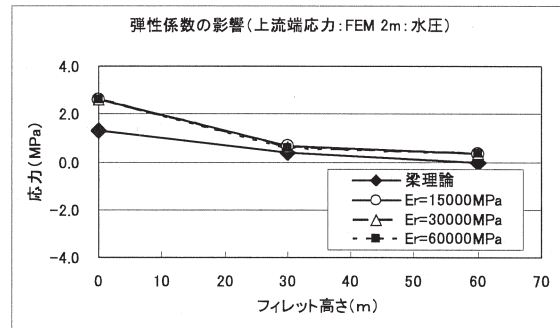
(2) 自重による下流端応力



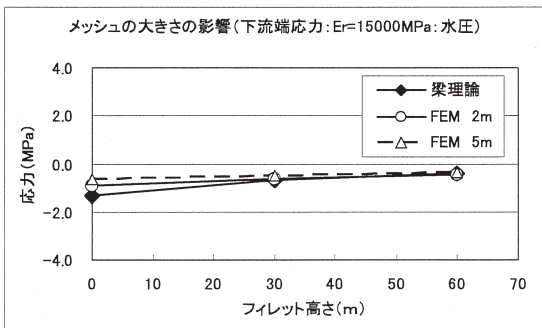
(2) 自重による下流端応力



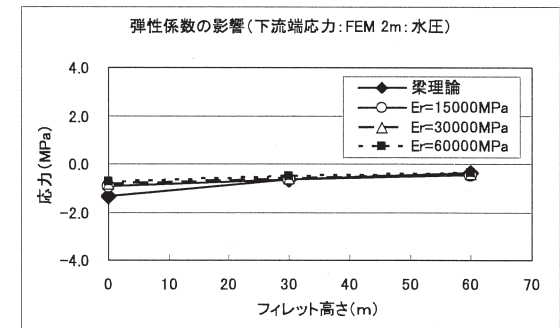
(3) 水圧による上流端応力



(3) 水圧による上流端応力



(4) 水圧による下流端応力



(4) 水圧による下流端応力

図-20 要素寸法の影響

図-21 岩盤の弾性係数の影響

6. まとめ

本研究では、重力式コンクリートダム設計に関わる荷重・強度の確率分布を既存ダムの実績値等をもとに設定し、滑動、転倒、上流端鉛直応力、堤趾部局所せん断（水平方向、任意方向）の5個の安全性着目項目ごとに、レベル2信頼性解析を実施して信頼性指標・感度係数を算出した。さらに、それらの結果を用い、目標信頼性指標を仮定して、レベル1信頼性設計に用いる荷重・強度の部分係数を試算した。また、梁理論とFEMでの応力値の比較を通し、解析係数（解析方法に対応した部分係数）について検討を行った。

また、検討過程から得られた信頼性指標・感度係数から、着目項目ごとの安全性（信頼性指標）と堤体形状との関係を明らかにし、また着目指標毎に安全性に影響を有する設計因子を明らかにすることができた。

今回の検討では、5つの安全性着目項目を設定し、全体的安全性と局所的安全性を共に考慮したレベル1信頼性設計の基本的構成を示すことができた。今後、各設計因子の確率分布の精度を高め、目標信頼性指標をより合理的に行い、またレベル1信頼性設計における地震作用の導入方法を検討した上で改めて部分係数を評価することが必要であると考え、その場合にも、本研究で示した一連の考え方を利用して実施することが可能である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 吉岡 健、長尾 毅：「重力式防波堤の外的安定に関するレベル1信頼性設計法の提案」、国土技術政策総合研究所報告、第20号、2005.3
- 3) (財)国土技術センター編：「改訂 解説・河川管理施設等構造令」、社団法人日本河川協会、2000.1
- 4) Martin Leclerc, Pierre Léjéer and René Tiwani：「CADAM User's Manual」、2001.4
- 5) 永山 功：「重力式コンクリートダムの構造設計における安全率についての考察」、ダム技術、No.32、pp.43-54、1989.8
- 6) 建設省河川局監修：「改訂新版建設省河川砂防技術基準（案）設計編[I]」、社団法人日本河川協会、1997.10
- 7) 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
- 8) 森 良樹、阿南修司、佐々木靖人、脇坂安彦：「ダム基礎岩盤の岩盤分類と力学的特性値との相関」、ダム技術、No.220、pp.29-41、2005.1
- 9) 富田尚樹、山口嘉一、佐々木隆、小堀俊秀：重力式コンクリートダムの揚圧力計測による安全管理の合理化に関する検討、土木技術資料、Vol.47、No.9、pp.40-45、2005.1
- 10) 建設省河川局開発課監修：「フィルダムの耐震設計指針（案）」、(財)国土開発技術研究センター、1991.3
- 11) 永山 功、田中 靖、村岡基晴：「コンクリートダムの耐震設計法に関する考察」、土木技術資料、Vol.29、No.9、pp.15-20、1987.9