

信頼性設計に基づくロックフィルダムの すべり安定性評価に関する基礎的検討

(独) 土木研究所 正会員 ○坂本 博紀 正会員 佐藤 弘行
(独) 土木研究所 正会員 松井 謙二
(財) ダム技術センター 正会員 山口 嘉一

1. はじめに

近年、逼迫した国家財政事情から社会資本整備予算の縮減が要請されており、ロックフィルダムの設計および施工においても更なる合理化が求められている。著者らは、将来的なロックフィルダムの設計法の合理化を見据え、1991 年 6 月に策定された「フィルダムの耐震設計指針(案)」¹⁾(以下、「指針(案)」)を基に、近年の地震データを用いた震力係数¹⁾の見直しと併せてロック材料の設計せん断強度の設定方法を加えた新たな設計法(以下、「新設計法」)に関する検討を進めてきた^{2,3)}。本稿では、新設計法における材料安全率を信頼性設計に基づき設定するための基礎的検討として、震度法設計断面に対して、せん断強度の変動を考慮したモンテカルロシミュレーション(以下、「MCS」)を実施し、性能関数の基本統計量の比較・分析を行い、せん断強度と地震力の評価方法や堤高等の解析条件がすべり安定性評価に与える影響を検討した。

2. 解析方法

2.1 解析概要

震度法設計断面に対して、せん断強度の変動を考慮した MCS を実施し、試行毎の性能関数 Z について統計処理を行うことで算定される安全性指標等を評価した。この際、せん断強度の評価は Ab 法⁴⁾に、地震荷重の評価は修正震度法¹⁾に基づき設定した。それぞれの詳細については後述する。

MCS の各試行は試行円弧すべり解析で、基本的な解析方法は指針(案)に従うが、せん断強度および震力係数の設定を変更している。性能関数 Z は MCS の各試行における最小安全率発生円弧における起動モーメントを S 、抵抗モーメントを R として、 $Z=R/S-1$ で定義した。MCS の試行回数は予備検討の結果より Z の平均値 μ_z の 95%信頼区間の幅が μ_z の概ね 1%以内となる 10,000 回とした。

なお、変動を考慮したのはロック材料のせん断強度のみで

あり、ロック材料の密度、コア材料・フィルタ材料の強度および密度、地震力についての変動は考慮していない。

2.2 解析ケース

本稿では、表-1 に示す 2 種類のロック材料のモデルに対して堤高を 50m,100m,150m に変化させた計 6 ケースの MCS を実施した。また、各ケースで設計地盤震度 k_F を 3 種類(0.18, 0.16, 0.13)に変化させた解析を実施し、 k_F の影響についても検討した。なお、以下では簡略のため case A-1~A-3 を併せて「case A」、case B-1~B-3 を併せて「case B」と記載する。

震力係数は著者らの既往の研究²⁾において、堤高の 1 次関数として算出した値²⁾を用いた(表-2 参照)。

2.3 解析モデルと物性値

解析モデルは、中央土質遮水壁型ロックフィルダムモデルで、堤体のみをモデル化した。図-1 に堤高 100m のダムモデルを示す。他の堤高モデルについては、堤高に応じて比例した相似形モデルである。解析モデルの断面設計に用いたロック材料のせん断強度は、ロック材料 A は I ダム、ロック材料 B は M ダムの外部ロック材料の品質管理試験として実施された大型三軸圧縮試験の試験結果に基づき、粘着力 c を無視したうえで内部摩擦角 φ の最小値に適度な余裕を見込んで設定した。

MCS に用いた主な物性値を表-3 に示す。ロック材料のせん断強度の変動に関する統計基本量 μ_q, σ_q は、各材料の品質管理試験の三軸圧縮試験結果を統計処理して算定した。なおロック材料の密度は各材料の設計値を採用し、コア材料・フィルタ材料の物性については I ダムの設計値を採用した。

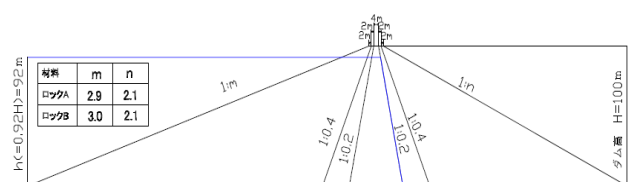


図-1 解析モデル(H=100m)

表-2 震力係数の設定値

y/H		堤高H(m)		
		50	100	150
k/kF I	0.0	2.670	2.430	2.190
k/kF II	0.4	1.750	1.470	1.200
k/kF III	1.0	1.090	0.890	0.690

表-3 解析物性値

材料名	標本数	材料重量		震度法			新設計法 (Ab法, kPa)												
		飽和重量 γ_{sat} (kN/m^3)	湿潤重量 γ_t (kN/m^3)	内部摩擦角 φ			平均値 μ_{eff}		標準偏差 σ_{eff}										
				設計値 (断面決定) ($^{\circ}$)			平均値 ($^{\circ}$)		標準偏差 ($^{\circ}$)		$\mu_d(\sigma_d) = A \cdot \sigma_d^6 + B \cdot \sigma_d^5 + C \cdot \sigma_d^4 + D \cdot \sigma_d^3 + E \cdot \sigma_d^2 + F \cdot \sigma_d + G$							σ_{σ_d} : 垂直応力	
A	b	A	B	C	D	R	F	G											
ロックA	13	20.8	20.0	40.00	41.94	0.45	3.026	0.837	-4.90E-16	1.95E-12	-3.06E-09	2.43E-06	-1.06E-03	0.290	1.915				
ロックB	8	21.6	19.6	39.00	42.04	1.00	2.226	0.878	-3.00E-16	1.21E-12	-1.95E-09	1.61E-06	-7.51E-04	0.209	3.333				
コア	-	20.6	20.3	36.00	36.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
フィルタ	-	21.1	20.4	37.00	37.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				

キーワード ロックフィルダム, すべり安定性, 信頼性設計

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 TEL029-879-6781 FAX029-879-6737

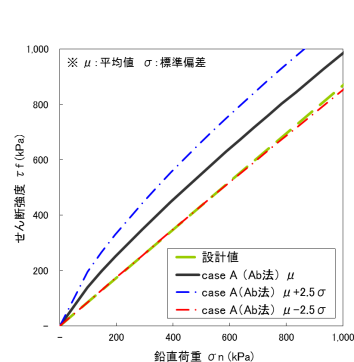


図-2 セン断強度の変動範囲 (ロック A)

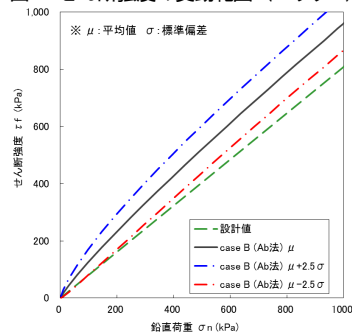


図-3 セン断強度の変動範囲 (ロック B)

2.4 セン断強度の変動の設定方法

MCS の各試行におけるロック材料のせん断強度は、Ab 法によるせん断強度 $\tau_{fAb} (=A\sigma^n)$ が正規乱数に従うと仮定し、 τ_{fAb} の平均値と標準偏差を用いて、試行毎に生成させた一様乱数を τ_{fAb} の正規乱数に変換した。せん断強度の変動の分布範囲は平均値を中心に標準偏差の ± 2.5 倍以内とし、この範囲を超える正規乱数が取得された場合は一様乱数の取得から再計算を行った。一様乱数の発生手法はメルセンヌ・ツイスタを採用した。case A, B のせん断強度の変動範囲を図-2, 3 に示す。

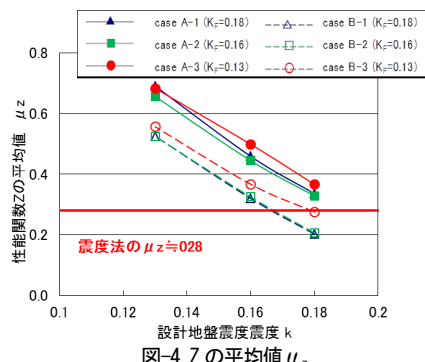
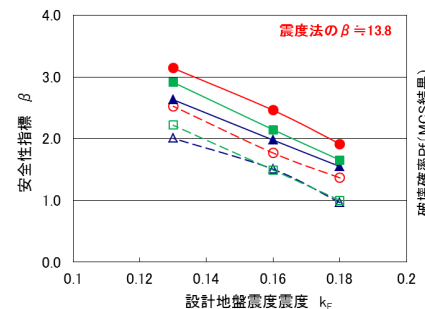
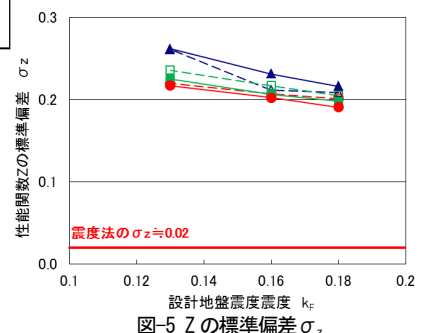
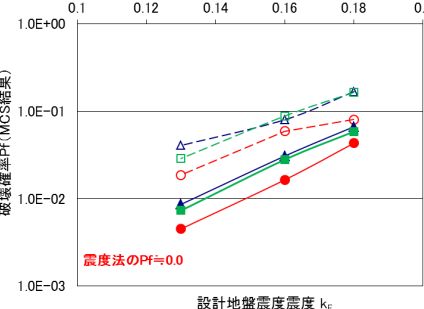
2.5 評価方法

今回の解析では MCS の各試行において、ロック材料のせん断強度はロックゾーン内で一様な値として解析を行ったが、本来はゾーン内でも空間的な変動を持つ。一般的に、ロック材料のせん断強度の空間的な変動を考慮する際に、自己相関係数を考慮しなければゾーン分割が細くなるほど安全性指標は大きくなるため⁴⁾、分割を一切行っていない今回の安全性指標の解析結果は空間的な変動を考慮した場合よりも過小に計算されている可能性がある。そこで、本検討では解析結果の評価は絶対値ではなく、解析条件の変化に伴う解析結果の相対的な変化とその要因分析に主眼をおいた。

3. 解析結果

解析結果を基に計算した各ケースの性能関数 Z の平均値 μ_z および標準偏差 σ_z 、安全性指標 $\beta (= \mu_z / \sigma_z)$ について図 4~6 に示す。また MCS 結果から得られる破壊確率 P_f の分布を図-7 に示す。 P_f は $Z < 0$ となる試行回数を全試行回数で除した値として計算した。なお、図-4~6 には参考値として、強度評価に $c-\phi$ 法 ($c=0$) を、地震力評価に震度法を用いた場合の MCS の解析結果も記載した (図中では「震度法」と記載)。また、凡例は図 4~7 で共通の凡例を利用している。

設計地盤震度 k_F が大きくなるほど地震荷重が大きくなるため μ_z と σ_z は低下する。この際、 μ_z の低下率に比べて σ_z の低下率が小さいため、 k_F の増加に伴い β は低下する。なお、今

図-4 Z の平均値 μ_z 図-6 安全性指標 β 図-5 Z の標準偏差 σ_z 図-7 破壊確率 P_f (MCS 結果)

回の検討の範囲では同一断面における破壊確率は 5~8 倍程度の範囲で変動した。

堤高と安全性指標・破壊確率の関係を見ると、堤高によって安全性指標と破壊確率は変化しており、ダム高が高いほど安全性指標は大きくなり、破壊確率は小さくなるという傾向がある。これは震力係数を堤高の関数として設定しており、堤高が小さいほど y/H に対して大きな震力係数を与えているためである。

また case A と case B を比較すると、case B のほうが安全性指標は小さく、破壊確率は高くなっている。表-3 より、ロック A とロック B の内部摩擦角はほぼ同程度であるが、Ab 法で評価した場合ロック A の方が初期の材料強度の立ち上がりが大きい (係数 A が大きい)。このことより、case A, B の安全性指標の違いは強度評価を $c-\phi$ 法 ($c=0$) から Ab 法に変更した場合の強度の上昇度合いに依存していると考えられる。

4. まとめ

設計材料および堤高を変化させた震度法設計断面に対して、せん断強度の変動を考慮した MCS を実施し、解析条件がすべり安定性に及ぼす影響について分析・評価した。この結果、震度法による設計断面はロック材料の強度特性および堤高によって安全性指標および破壊確率は大きく異なることを示した。

今後は新設計法において最低限確保すべき安全性指標や個別のダム毎に確保すべき材料安全率を設定するための検討を行う予定である。

参考文献

- 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，1991.6.
- 山口嘉一，大川孝士，佐藤弘行，坂本博紀：ロックフィルダムの堤高と震力係数の関係，第 46 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1053-1054, 2011.7.
- 坂本博紀，大川孝士，山口嘉一，佐藤弘行：修正震度法を用いたロックフィルダム設計法の基礎的研究，第 66 回土木学会年次講演会講演概要集，pp.693-694, 2011.9.
- 松尾稔：地盤工学信頼性設計の理念と実際 pp.110-113, 1984.1.