

◆ 報文 ◆

締め固めたロック材料の強度安全率

山口嘉一* 松浦 旬**

1. はじめに

ロックフィルダム堤体のすべり破壊に対する安定性は、一般的に円弧すべり解析により検討されている。この安定計算において、重要な入力物性値となるロック材料のせん断強度の設計値は、一般に大型三軸圧縮試験により得られた試験値に適切な余裕、つまり強度安全率を見込んで決定されている¹⁾。しかし、この強度安全率について、これまで必ずしも統一的な値が設定されてこなかった。ここでは、最も一般的なモール・クーロンの破壊規準に基づくロック材料のせん断強度について、従来の設計値決定法における強度安全率の算定を行うとともに、その特徴について考察する。また、本来拘束圧依存性を持つロック材料のせん断強度の特性をより良く表現していると考える曲線破壊規準に基づくせん断強度について、従来の設計値決定法と等価な強度安全率の算定を試みる。

2. 強度安全率

2.1 せん断強度式

ロック材料のせん断強度 τ_f は垂直応力 σ_n の関数で表される。ここではせん断強度を表す式として以下の 2 式を用いて検討する。

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

$$\tau_f = A \sigma_n^b \quad (2)$$

ここに、

τ_f : せん断強度

σ_n : せん断面に作用する有効垂直応力

c : 粘着力

ϕ : 内部摩擦角

A, b : 強度定数

式(1)は、一般的な土のせん断強度式である。 c と ϕ は、三軸圧縮試験結果により求めることが一般的である。排水性の良い粗粒材料に関しては $c = 0$ で、 ϕ のみが存在すると考えられているが、

よく締め固められたロック材料の場合は粒子のかみ合わせの影響で見かけの c が現れる。この際、設計値としては式(3)に示されるように、 $c = 0$ とし¹⁾ ϕ に適切な余裕 $\Delta\phi$ を見込むのが一般的である。一方、式(2)は、 $\sigma_n = 0$ の時に $\tau_f = 0$ となり、かつ曲線状の破壊規準を表現したもので、せん断強度を内部摩擦角一係数のみで表現した場合、拘束圧の増加とともに内部摩擦角が減少するという特徴を有するロック材料のせん断強度式としては最も適切なものひとつと考えられる^{2),3),4)}。また、式(2)に適切な余裕を見込んだせん断強度は式(4)で表現される。

$$\tau_{fd} = \sigma_n \tan(\phi - \Delta\phi) \quad (3)$$

$$\tau_{fd} = A_d \sigma_n^b \quad (4)$$

ここに、

τ_{fd} : 設計破壊せん断応力

A_d : 設計強度定数

2.2 既設ダムのロック材料の内部摩擦角

いま、既設ダムのロック材料について、式(1)に基づいてせん断強度を求めた場合の内部摩擦角の試験値 ϕ と設計値 $(\phi - \Delta\phi)$ の比較を図-1に示す。この図より $\Delta\phi = 0 \sim 2^\circ$ 程度、特に $\Delta\phi = 0 \sim 1^\circ$ 程度としている事例が多いことがわかる。なお、設計値の方が試験値より若干大きい点が一つあるが、これは $c = 0$ にすることにより設計応力

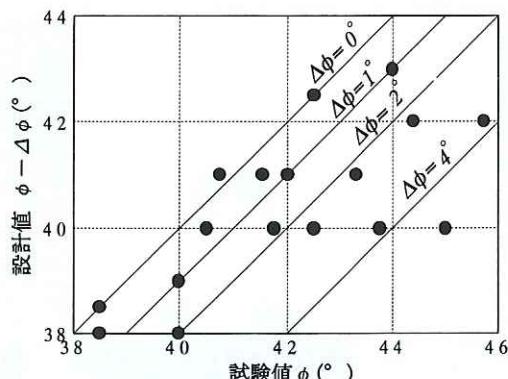


図-1 ロック材料の内部摩擦角の試験値と設計値

範囲内で設計せん断強度が試験値に対して十分な余裕をとれることを確認したうえでの工学的判断によるものと考える。

2.3 強度安全率の定義

図-2, 3 に示すように、ある σ_n における破壊時せん断応力の試験値 τ_f の設計値 τ_{fd} に対する比を強度安全率と定義し、式(1)と式(2)のせん断強度式について、以下のように表現する。

$$SF_s(c, \phi) = \frac{\tau_f}{\tau_{fd}} = \frac{(c + \sigma_n \tan \phi)}{\sigma_n \tan(\phi - \Delta\phi)} \quad (5)$$

$$SF_s(A, b) = \frac{\tau_f}{\tau_{fd}} = \frac{A \sigma_n^b}{A_d \sigma_n^b} \quad (6)$$

ここに、 $SF_s(c, \phi)$, $SF_s(A, b)$ は、それぞれ式(1), (2)を用いた場合の強度安全率である。

$c = 0$ として粘着力は本来ないとみなす現行のロック材料設計強度の決定方法により、三軸圧縮試験結果からモール・クーロンの破壊規準に基づいて決定した (c, ϕ) に強度安全率を見込んでいくことになる。しかし、見かけの粘着力が存在すると、図-2 中に示すように、低拘束圧域での強度を相対的にかなり過小評価していることがわかる。一方、式(6)からも明らかかなように曲線破壊基準によると、拘束圧によらず一定の強度安全率を与えることが可能である。

2.4 モール・クーロン破壊規準に基づく強度

安全率の算出と考察

ロック材料の強度安全率 $SF_s(c, \phi)$ を実際の三軸圧縮試験結果を用いて算出してみる。選定した試験値を図-4 に示す。図中のデータは、松本・渡辺⁵⁾が多くのロック材料について実施した三軸圧縮試験結果である。この図より、 ϕ がロック材としては平均的な $41 \sim 42^\circ$ 程度とほぼ等しいが、 c が $0 \sim 200 \text{kN/m}^2$ の範囲で広く分布する 4 種類を選定した (mat.1 ~ mat.4)。選定した 4 種類のロック材料の強度定数の試験値と設計値を表-1 に示す。なお、各材料の設計値としては、前出の既設のダムにおける事例を勘案したうえで $c = 0$ で、 $\Delta\phi$ は $\phi - \Delta\phi$ の小数点以下の値例えれば 41.98° の場合だと 0.98° とした設計値①、さらに 1° および 2° 低減させた設計値②および③を設定した。この 4 種類の材料について、式(5)に基づいて算出した①に関する σ_n

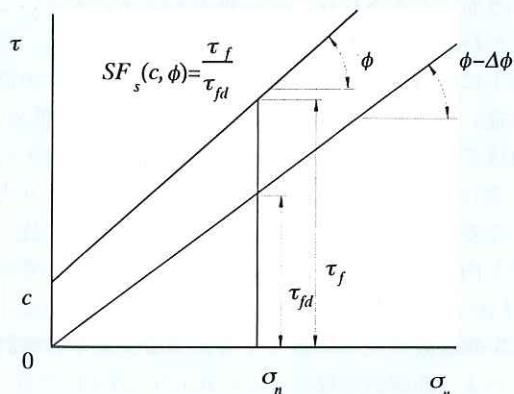


図-2 モール・クーロンの破壊規準に基づく強度安全率の定義 $SF_s(c, \phi)$

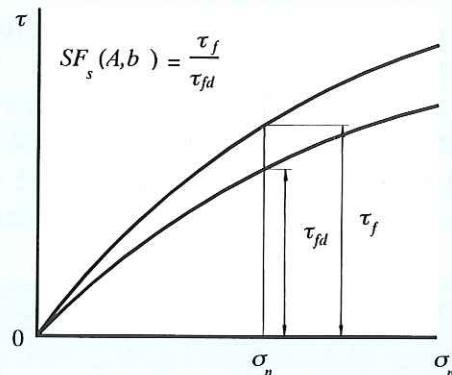


図-3 曲線破壊規準に基づく強度安全率の定義 $SF_s(A, b)$

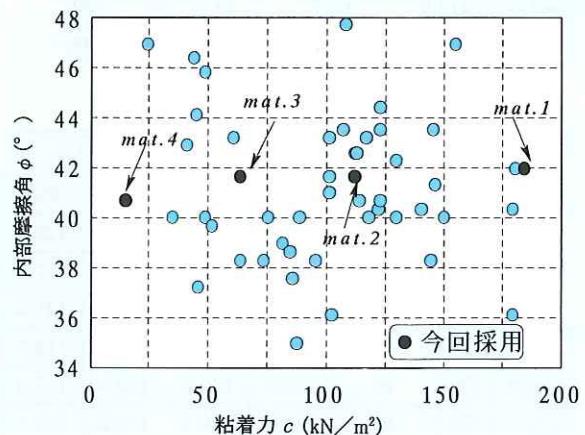


図-4 ロック材料と三軸試験結果 (c, ϕ)

と強度安全率 $SF_s(c, \phi)$ の関係を図-5 に示す。また、表-2 には、①、②および③における $\sigma_n = 98, 196, 490, 980, 1960 \text{kN/m}^2$ の際の $SF_s(c, \phi)$ の具体的な値を示す。これらの図表より σ_n の増加、特に σ_n が数百 kN/m^2 までの低い領域における

る増加による $SF_s(c, \phi)$ の低減が非常に大きいことがわかる。一方、 σ_n が大きくなると $SF_s(c, \phi)$ は 1 に漸近していくことがわかる。また、 c の値の違いが $SF_s(c, \phi)$ に与える影響が、特に低 σ_n 領域で大きいことがわかる。一方、同材料、同 σ_n における $SF_s(c, \phi)$ は設計値①と③であまり大きな差がなく、設計時に $c = 0$ とすることに比べると内部摩擦角の低減における 2~3° 程度の差が $SF_s(c, \phi)$ に与える影響は小さいことがわかる。

2.5 曲線破壊規準に基づく等価強度安全率の検討

いま、曲線破壊規準による式(2)、式(4)のロック材料のせん断強度評価および設計値決定方法の方がモール・クーロンの破壊規準よりも実際のロック材料のせん断強度特性をより適切に反映していると考えられる。さらに、式(5)と式(6)の強度安全率式の比較からも明らかなように、モール・クーロン破壊規準の場合の $SF_s(c, \phi)$ が σ_n の関数であるのに対して、曲線破壊規準の場合の $SF_s(A, b)$ は σ_n によらない一定値になるという利点を有している。しかし一方で、実際の設計で

表-1 今回採用した試験値と設計値

材料番号	試験値		設計値 $\phi - \Delta\phi$ (°)		
	ϕ (°)	c (kN/m ²)	①	②	③
mat.1	41.98	184.2	41	40	39
mat.2	41.66	111.7	41	40	39
mat.3	41.66	63.7	41	40	39
mat.4	40.69	14.7	40	39	38

表-2 σ_n と $SF_s(c, \phi)$ の関係

材料番号	設計値	$\phi - \Delta\phi$ (°)	σ_n (kN/m ²)				
			98	196	490	980	1960
mat.1	①	41	313.6	207.8	144.1	122.5	111.7
	②	40	324.4	214.6	150.9	127.4	115.6
	③	39	336.1	222.5	154.8	131.3	120.5
mat.2	①	41	228.3	164.6	126.4	112.7	106.8
	②	40	237.2	170.5	132.3	117.6	110.7
	③	39	246.0	176.4	135.2	121.5	131.3
mat.3	①	41	173.5	137.2	114.7	107.8	103.9
	②	40	179.3	142.1	119.6	111.7	107.8
	③	39	186.2	147.0	123.5	115.6	111.7
mat.4	①	40	117.6	108.8	103.9	101.9	100.9
	②	39	122.5	112.7	107.8	105.8	104.9
	③	38	126.4	117.6	111.7	109.8	108.8

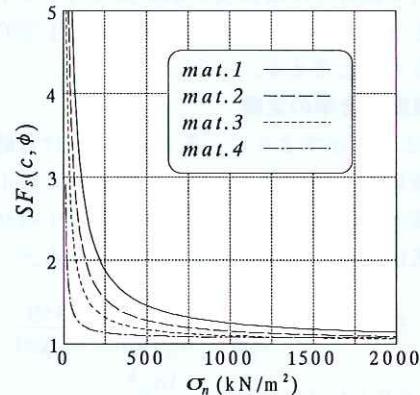
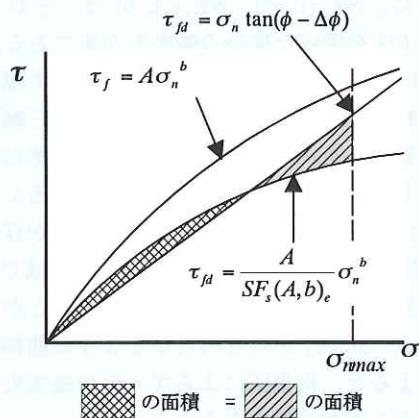
図-5 設計に関する σ_n と $SF_s(A, b)$ の関係

図-6 等価強度安全率の定義

は $SF_s(A, b)$ を適切に設定する必要がある。そこで現行のロックフィルダムの設計法における式(1)、式(3)に基づくせん断強度評価および設計値決定方法を加味した $SF_s(A, b)$ の試算を試みる。

具体的には、せん断強度式としては式(2)、式(4)を用いるが、現行設計法における強度設計値決定法を考慮した等価な設計強度定数 A_{de} 、つまり強度安全率 $SF_s(A, b) (= A/A_{de})$ を与えることを考える。ここでは、式(6)からも明らかなように σ_n によらず一定値である等価強度安全率 $SF_s(A, b)_e$ を、図-6に示すように、対象ダムの堤高に応じた σ_n の範囲内 ($0 \leq \sigma_n \leq \sigma_{nmax}$) における $\tau_f = A_{de}\sigma_n^b$ と $\tau_f = \sigma_n \tan(\phi - \Delta\phi)$ の積分値が等しくなる値と定義する。つまり、 $SF_s(A, b)_e$

は次式により求めることができる。本来、強度安全率の設定については、最終的な目的であるすべり安定解析における地震荷重の与え方、すべり安全率が最小になるすべり面深度なども含めた総合的な検討を行うべきであると考えるが、ここではせん断強度式にのみ着目した試算であることに留意されたい。

$$SF_s(A, b)_e = \frac{\int_0^{\sigma_{n \max}} (A\sigma_n^b) d\sigma_n}{\int_0^{\sigma_{n \max}} \sigma \tan(\phi - \Delta\phi) d\sigma_n} = \frac{2A}{b+1} \cdot \frac{\sigma_{n \max}^{b-1}}{\tan(\phi - \Delta\phi)} \left(= \frac{A}{A_{de}} \right) \quad (7)$$

曲線破壊規準を用いた場合の等価強度安全率 $SF_s(A, b)_e$ は式 (7) として求めることができたが、式形からも明らかなように $SF_s(A, b)_e$ は対象ダムの堤高により変化する $\sigma_{n \max}$ の関数となっている。そのため、対象ダムの $SF_s(A, b)_e$ を算定するためには $\sigma_{n \max}$ の値を与えなければならない。ここでは、以下の考え方から $\sigma_{n \max}$ を決定する。

まず、対象ダムの最大拘束圧 $\sigma_{3 \max}$ を次式により算出する。これは、ロック材料の三軸圧縮試験における最大拘束圧を決定する際にもしばしば適用される考え方である。

$$\sigma_{3 \max} = \alpha \kappa \sigma_v = \alpha \kappa \gamma_t H \quad (8)$$

ここに、

κ : 側圧係数

σ_v : 鉛直応力

H : 堤高

γ_t : 単位体積重量

α : 鉛直応力低減係数

今回の検討ではロック材料の一般的な設計値、建設時の実測挙動などを考慮したうえで以下の値を用いる。

$$\gamma_t = 19.6 \times 10^{-3} \text{ kN/m}^3$$

$$\kappa = 0.5$$

$$\alpha = 0.75$$

さらに、ロック材料の曲線破壊規準に基づく強度定数 A, b を求める過程で σ_n と σ_3 の関係を得る。いま、例として今回の検討で用いている 4 種

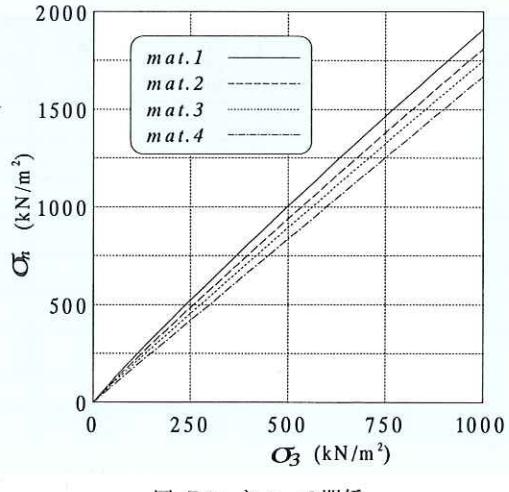


図-7 σ_3 と σ_n の関係

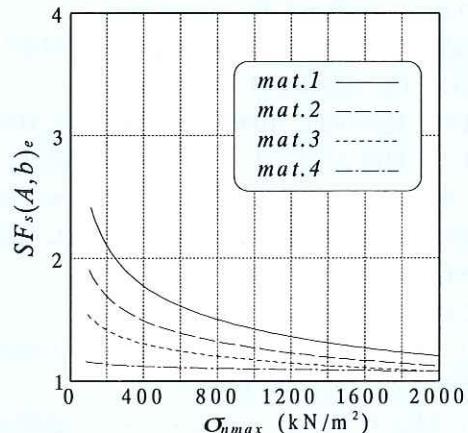


図-8 $\sigma_{n \max}$ と計算値①に対応した $SF_s(A, b)_e$ の関係

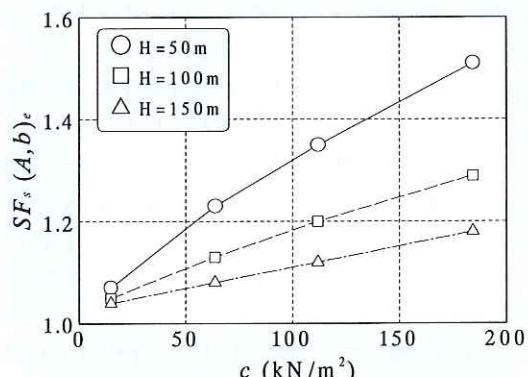


図-9 c と設計値①に対応した $SF_s(A, b)_e$ の関係

類のロック材料の三軸圧縮試験結果について算出した σ_3 と σ_n の関係を図-7 に示す。

以上の流れに従うと、ダムの堤高を式 (8) に

表-2 σ_n と $SF_s(c, \phi)$ の関係

堤高 (m)	$\sigma_{3\max}$ (kN/m ²)	設計 値	$\phi - \Delta\phi$ (°)	$SF_s(A, b)_e$				
				mat.1	mat.2	mat.3	mat.4	平均
50	368	①	41	1.51	1.35	1.23	1.07	1.29
		②	40	1.57	1.39	1.27	1.11	1.34
		③	39	1.63	1.45	1.32	1.15	1.39
100	735	①	41	1.29	1.20	1.13	1.05	1.17
		②	40	1.34	1.24	1.17	1.09	1.21
		③	39	1.39	1.28	1.22	1.13	1.26
150	1,103	①	41	1.18	1.12	1.08	1.04	1.11
		②	40	1.22	1.16	1.12	1.08	1.15
		③	39	1.27	1.20	1.16	1.12	1.19

代入して $\sigma_{3\max}$ を求め、それをロック材料の三軸圧縮試験結果から求めた図-7の関係から、対象ダムの $\sigma_{n\max}$ を算出することができる。

4 試験値について $\sigma_{n\max}$ と設計値①に対応した $SF_s(A, b)_e$ の関係を図-8に示す。

また、堤高 50m、100m および 150m に対応した4つの材料の $SF_s(A, b)_e$ の具体値を表-3に示す。さらに、4つの材料のモール・クーロン破壊規準に基づいて得た粘着力 c と設計値①に対応した $SF_s(A, b)_e$ の関係を図-9に示す。

これらの図表から以下のことがわかる。

- (1) $SF_s(A, b)_e$ は $\sigma_{n\max}$ の増加、つまり堤高が高くなるにつれて減少する。
- (2) $SF_s(A, b)_e$ は、モール・クーロン破壊規準に基づいて得た c が大きいほど大きくなる。
- (3) 同材料、同 σ_n (堤高) では $\Delta\phi$ における 2° の違い (設計値①と③の差) による $SF_s(A, b)_e$ の差は 1割以下と、あまり大きくない。
- (4) 材料ごとに $SF_s(A, b)_e$ は変化する値ではあるが、堤高 50m の場合に $SF_s(A, b)_e$ は 1.07~1.51 (平均 1.29)、100m の場合で 1.05~1.29 (平均 1.17)、150m の場合で 1.04~1.18 (平均 1.11) となる。堤高が高くなるにつれ $SF_s(A, b)_e$ は小さくなるが、堤高 50~150m の範囲ではその差はあまり大きくないといえる。また、これら3つの堤高での $SF_s(A, b)_e$ の平均は 1.18 となる。このことから、現行設計法におけるロック材料の設計強度値の決定方法を考慮したうえで曲線破壊規準の強度定数に対する等価な安全率 $SF_s(A, b)_e$ を材料、堤高によらず設定する場合は 1.2 程度の値となる。

3.まとめ

締め固めたロック材料の強度安全率に関する検討から得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 現行設計法においては、ロック材料のせん断強度はモール・クーロンの破壊規準に基づき評価され、設計値としては見かけの粘着力 $c = 0$ 、内部摩擦角 ϕ に適切な余裕 $\Delta\phi$ を見込むが、既設ダムの事例では $\Delta\phi$ としては 0~2° 程度、特に 0~1° としている事例が多い。
- (2) 現行のロック材料・強度の設計値の決定方法に従うと、拘束圧、つまりすべり面の深さが大きくなるに従って材料強度安全率は大きく減少する。
- (3) 一方、曲線破壊規準に従うと、ロック材料の破壊規準としてモール・クーロン破壊規準より実際のせん断強度特性を適切に表現していることに加えて、拘束圧によらず一定の材料強度安全率を与えることができる。
- (4) 曲線破壊規準によるロック材料のせん断強度評価を前提とし、かつ現行の強度設計値決定方法も考慮して、等価な材料強度安全率を算定した結果、約 1.2 という値を得た。

本研究では、ロックフィルダムの設計にかかわる安全性の余裕を、ロック材料の強度安全率という観点から検討した。今後は、本研究で得られた成果を基に、震度法¹⁾ および修正震度法⁶⁾ に基づくロックフィルダムの円弧すべり安定解析を行い、材料安全率とすべり安定解析における安全率との関係について分析する予定である。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修：改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説、設計編 [I] , 山海堂, pp.224-225, 1997年10月.
- 2) de Mello, V. F. B. : Reflections on Design Decisions of Practical Significance to Embankment Dams, Geotechnique, Vol.27, No.3, pp.279-355, 1977.
- 3) Charles, J. A. and Watts, K. S. : The Influence of Confining Pressure on the Shear Strength of Compacted Rockfill, Geotechnique, Vol.30, No.4, pp.353-367, 1980.
- 4) Yoshida, H. Toyoda, M. and Yamaguchi, Y. : Evaluation of Shear Strength of Rockfill Materials Considering the Effect of Confining Pressure, Proc. First U.S.-Japan Workshop on Advanced Research on Earthquake Engineering for Dams, pp.181-192, 1996.
- 5) 松本徳久・渡辺和夫：ロック材料のせん断強度、土と基礎, Vol.35-12, pp.49-54, 1987年12月.
- 6) 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年6月.

山口嘉一*



松浦 旬**



建設省土木研究所ダム部
フィルダム研究室長, 工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

同フィルダム研究室
研究員
Jun MATSUURA