

土石流流体力のばらつきを考慮した砂防堰堤の転倒安定性の照査法について

防衛大学校名誉教授 フェロー会員○石川信隆
 砂防鋼構造物研究会 山口聖勝 飯塚幸司
 (一財)砂防・地すべり技術センター 嶋 丈示

1. 緒言

土石流は、通常不確定であり、近年想定外の降雨によって大規模な土石流が発生し、多くの人命を奪い構造物を破壊してきた。現行設計法では、砂防堰堤がどのくらいの安全性を保持しているのか不明である。そこで、土石流の不確定性を考慮した転倒安定性照査法を提案する。すなわち、本論文は、極めて大きい土石流流体力のばらつき（平均値と標準偏差）を考慮した砂防堰堤の転倒安定性の照査法を基礎的に試みたものである。

2. 構造物の安全照査法の考え方

まず、土石流を受ける構造物の安全性の確率は、次式で表わされる¹⁾。

$$P[X \geq 0] = P[X = R - S \geq 0] \quad (1)$$

ただし、 X : 安全性の余裕度（正規確率変数）

R : 構造物の抵抗力（正規確率変数）

S : 土石流外力（正規確率変数）

すなわち、 $X \geq 0$ の場合が安全、 $X < 0$ の場合は不安全、 $X = 0$ の場合はボーダーラインとなる。

3. 転倒照査方法

(1) 外力(土石流) S を土石流流体力による外力モーメント M_s （正規確率変数）とし、その平均値 μ_s および標準偏差 σ_s を求める。この際、平均値は従来の確定論から求める。一方の標準偏差は、原則としてデータ収集による確率分布より求める。

(2) 砂防堰堤の抵抗力 R は、抵抗モーメント M_R （正規確率変数）とし、その平均値 μ_R および標準偏差 σ_R をそれぞれ従来の確定論および確率分布データから求める。

(3) よって、転倒安定照査式は、式(1)より

$$P[X \geq 0] = P[X = M_R / F - M_s \geq 0] \quad (2)$$

ただし、 F :安全率で、ここでは $F=1.0$

(4) 次に、安定性の余裕度 X の平均値 μ_x および標準偏差 σ_x は、 S および R とも正規確率変数とすると、以下の式で表わされる。

$$\mu_x = \mu_R - \mu_s \quad (3) \quad \sigma_x = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2} \quad (4)$$

(5) よって、 X の正規確率変数が0を上回る確率は、以下の標準化変換を行い、図-1の標準正規分布 Z より安定性の確率が求められる。

$$Z = \frac{X - \mu_x}{\sigma_x} \quad (5)$$

すなわち、 $X=0$ を式(5)に代入して Z_0 を求め、 $Z_0 \geq 0 (X \geq 0)$ の確率を算出すればよいことになる。

キーワード 土石流のばらつき、砂防堰堤、転倒安定性、極めて大きい土石流流体力

連絡先 〒238-0022 横須賀市公郷町 6-20-68 TEL.046-852-3546 E-mail:cgishikawa@m4.dion.ne.jp

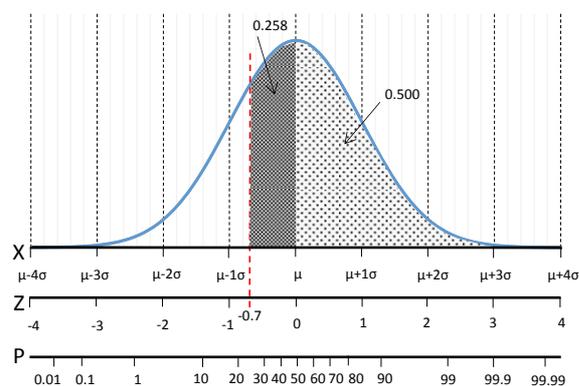


図-1 正規分布 X と標準正規分布 Z

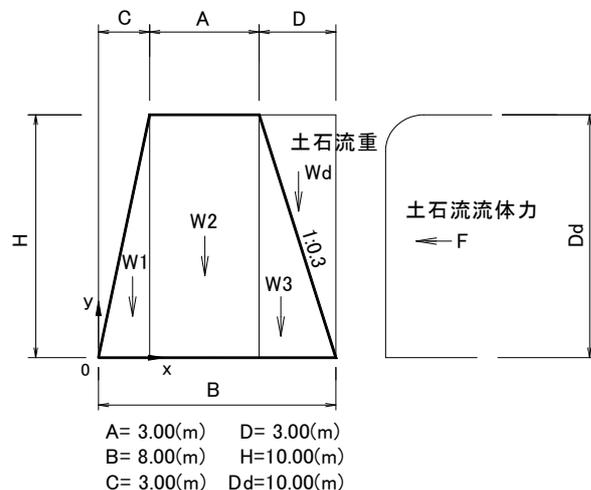


図-2 砂防堰堤の形状と土石流流体力

4. 計算例

いま図-2 に示すような砂防堰堤の規模に比べ流動深が大きい土石流が直撃することにより、砂防堰堤に極めて大きな土石流流体力（堆砂地が空の場合）が作用した²⁾ 場合の転倒安定性の確率を求める。

まず、極めて大きい土石流流体力 F の平均値は、表-1 より $F_{\mu} = 1202 \text{ kN/m}$ と求められる。

次に、その土石流流体力の標準偏差は、ここでは、例えば以下の値を仮定する。

$$F_{\sigma} = 100 \text{ kN/m}$$

よって、外力モーメントの平均値と標準偏差は、

$$\mu_S = 1202 \times 5 \text{ m} = 6010 \text{ kNm/m},$$

$$\sigma_S = 100 \times 5 \text{ m} = 500 \text{ kNm/m}$$

一方抵抗モーメント R の平均値は、表-2 より

$$\mu_R = 6367.7 \text{ kNm/m}$$

標準偏差は、ここでは便宜上

$$\sigma_R = 100 \text{ kNm/m}$$

よって、安全余裕度 X は正規確率変数として

$$\mu_X = \mu_R - \mu_S$$

$$= 6367.7 - 6010 = 357.7 \text{ kNm/m}$$

$$\sigma_X = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} = \sqrt{100^2 + 500^2} = 510 \text{ kNm/m}$$

ここで、以下の標準化変換を行う。

$$Z = \frac{X - \mu_X}{\sigma_X}$$

よって、安定性の確率は、 $P(X=R-S>0)$ すなわち、X の正規分布のうち、正規確率変数が 0 より大きい確率を計算することになり、これは図-1 の標準正規分布より、以下のように求められる。

$$X=0 \text{ の時、} Z = (0 - 357.7) / 510 = -0.7$$

すなわち、Z=-0.7 から Z=0 までの確率は、標準正規分布表より P=0.2587 となる。また Z=0 から Z=∞ までの確率は、標準正規分布の半分であるので P=0.50 である。よって、転倒安定性の確率は、P=0.7587 つまり、約 76% となる。

以上より、土石流荷重のばらつきを考慮した転倒安定性の照査が可能となった..

次に、土石流のばらつき（標準偏差）を平均値の 5%,10%,20%,30% と変化させたところ、図-3 のようにばらつきが大きくなるほど、転倒安定性の確率が低下することが分かった。

5. 結言 本法は、土石流のばらつきを考慮した転倒安定性の照査法を基礎的に提案したもので、滑動、地盤支持力などの安定性の条件にも適用可能である。今後土石流のばらつき（標準偏差）のデータの収集が必要であり、確率分布関数を調べる必要がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：事例に学ぶ建築リスク入門，技法堂，2009年。
- 2) 田村毅，嶋丈示，池田暁彦：深層崩壊を考慮した砂防施設設計のあり方に関する研究，平成26年度砂防技術研究所報、一般財団法人 砂防・地すべり技術センター，2015年3月。

表-1 土石流流体力の算定

土石流流体力の算定		
1) 粗度係数	$\alpha =$	0.10
2) 土石流の単位体積重量	$\rho d =$	15.89 (kN/m ³)
3) 重力加速度	$g =$	9.81 (m/s ²)
4) 土石流の水深	$Dd =$	10.00 (m)
5) 土石流の流速	$U =$	8.61 (m/sec)
6) 土石流流体力	$F = \alpha \cdot (\rho d/g) \cdot Dd \cdot U^2 =$	1202.00 (kN/m)

表-2 抵抗モーメントと外力モーメント

鉛直外力								
荷重の種類	記号	計 算 式		鉛直力 V (kN/m)	アーム長 x (m)	モーメント Mr (kN・m/m)		
自 重	W1	0.5 ×	2.00 ×	10.00 ×	22.56	225.60	1.33	300.05
	W2	3.00 ×	10.00 ×	22.56	676.80	3.50	2368.80	
	W3	0.5 ×	3.00 ×	10.00 ×	22.56	338.40	6.00	2030.40
土石流重	Wd	0.5 ×	3.00 ×	10.00 ×	15.89	238.35	7.00	1668.45
合 計						1479.15		6367.70
水平外力								
荷重の種類	記号	計 算 式		水平力 P (kN/m)	アーム長 y (m)	モーメント Mo (kN・m/m)		
土石流流体力	F			1202.00	5.00	6010.00		
合 計				1202.00		6010.00		

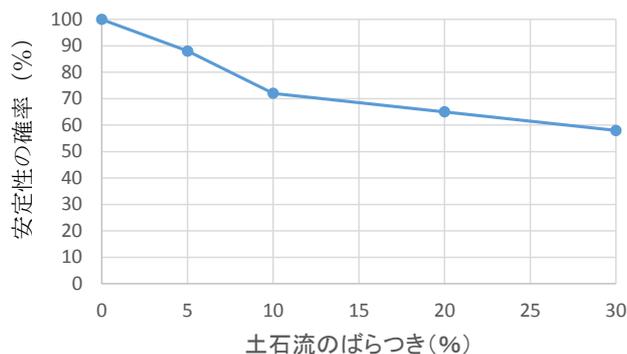


図-3 土石流のばらつきによる安定性の変化