

砂防鋼構造物研究会 ○飯塚幸司 石川信隆
 (一財)砂防・地すべり技術センター 嶋 丈示
 政策研究大学院大学 水山高久

1. はじめに

近年、集中豪雨によって計画規模を上回る土石流が発生し、コンクリート砂防堰堤の袖部がしばしば破壊される事例が見受けられる。現行の許容応力度設計法では、計画規模を上回る土石流が作用した場合、砂防堰堤がどのくらいの安全性を保持しているか不明である。同時に、土石流は自然作用であるため計画規模を下回ることもあれば上回ることもあり土石流の荷重モデルの再現性には不確定性を考慮する必要がある。

そこで、本研究では、土石流流体力の不確定性（平均値と標準偏差）を考慮した砂防堰堤袖部のせん断破壊について検討を試みるものである。ここでは、針原川土石流災害時の例を参考にして砂防堰堤袖部のせん断破壊について確率論的な観点から基礎的な検討を行った。すなわち、土石流の不確定性を考える場合、(1)土石流流量を発生確率分布で表わす場合（設計流体力荷重を平均値とする方法）と(2)極めて大きい土石流が堰堤に作用するときの衝突を確率分布で表わす場合（衝突確率分布を考えて極限値を平均値とする方法）の考え方があがるが、ここでは後者の考え方を採用した。

2. 砂防堰堤袖部のせん断破壊の照査法の考え方

まず、土石流を受ける砂防堰堤袖部のせん断破壊の安全性の確率は、次式で表わされる¹⁾。

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

ただし、 X : 砂防堰堤袖部の安全性の余裕度、 R : 砂防堰堤袖部のせん断抵抗力、 S : 土石流流体力、 n : 安全率（ここでは $n=1.0$ とする）。

すなわち、 $X \geq 0$ の場合が安全（せん断破壊は生じない）、 $X < 0$ の場合は不安全（せん断破壊が生じる）、 $X = 0$ の場合はボーダーラインとなる。

ここで、

$$R = f \sum V + \tau \times l + \tau_s \times A_s \quad (2)$$

$$S = F = \alpha \frac{\rho_d}{g} h U^2 \quad (3)$$

ただし、

- f : コンクリートの摩擦係数、 V : 袖部の鉛直力、
- τ : コンクリートのせん断強度、
- l : せん断強度抵抗長さ、 τ_s : 鉄筋のせん断強度、
- A_s : 鉄筋の断面積、 F : 土石流流体力

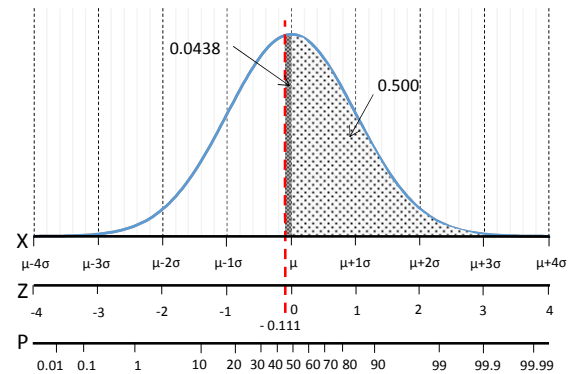
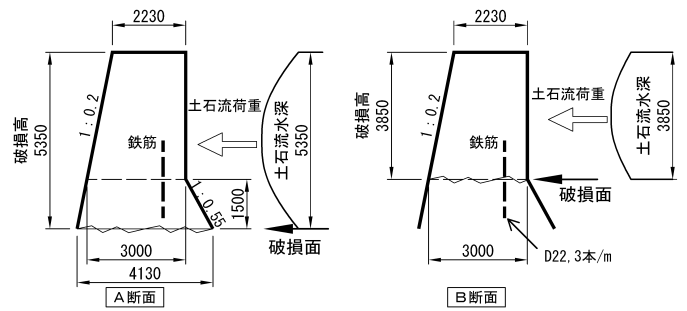


図-1 正規分布 X と標準正規分布 Z



(a) 破損面が鉄筋なし (b) 破損面が鉄筋あり

図-2 砂防堰堤袖部

3. 計算方法

- (1) 土石流流体力 S ($=F$) は正規確率変数とし、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が、ここでは仮定した値を用いる。
- (2) 砂防堰堤袖部のせん断抵抗力 R も正規確率変数とし、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) 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 とともに正規確率変数とすると、以下の式で表わされる。

$$\mu_X = \mu_R - \mu_S \quad \sigma_X = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (5)$$

(4) 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。

$$Z = \frac{X - \mu_X}{\sigma_X} \quad (6)$$

すなわち、 $X=0$ を式(6) 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。

4. 針原川土石流災害を受けた砂防堰堤袖部のせん断破壊に対する安全性照査例

図-2 のような砂防堰堤袖部²⁾ (針原川) に土石流荷重が作用したとき、袖部がせん断破壊するかどうかを土石流のばらつき(標準偏差)を考慮して安全性を調べる。

4.1 破損面が A 断面の場合

文献 2) より、最大土石流流体力 1901 kN/m であるので、 $\mu_S = 1901$ kN/m とおく。 (7)

ここで、標準偏差を平均値の 30% と仮定 ($\sigma_S = 0.3\mu_S$) すると、標準偏差は $\sigma_S = 570.3$ kN/m

一方、抵抗力 $R = f \sum V + \tau \times \ell + \tau_S \times A_S = 0.8 \times 354.5 + 392 \times 4.13 = 1903$ kN/m = μ_R (平均値) (8)

ここで、標準偏差を平均抵抗力に対し 5% と仮定すると、 $\sigma_R = \mu_R \times 0.05 = 95.1$ kN/m (9)

安全余裕度 X の平均値と標準偏差は、 R および S とともに正規確率変数とすると、以下のように求められる。

$$\mu_X = \mu_R - \mu_S = 2.0 \text{ kN/m} \quad \sigma_X = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} = 578.2 \text{ kN/m} \quad (10)$$

ここで、式(6)の標準化変換を行う。すなわち、式(6)に $X=0$ を代入して 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。

$X=0$ のとき、 $Z_0 = -0.0035$ となり、この値から $Z=0$ までの確率は、標準正規分布表より 0.0(0.0%)。

一方、 $Z=0$ から ∞ までの確率は面積の半分であるので 50% であるので、両者を合わせて (50+0.0=50.0%)

A 断面 (鉄筋なし) の場合のせん断破壊が生じない安全性の確率は 50.0% である。つまり、せん断破壊する確率も 50% である。

4.2 破損面が B 断面の場合

文献 2) より、最大外力 $S=F=1694$ kN/m。

標準偏差を平均外力に対し 30% と仮定すると、 $\sigma_S = 508.2$ kN/m (11)

抵抗力 $R = f \sum V + \tau \times \ell + \tau_S \times A_S = 0.8 \times 574.1 + 392 \times 3.0 + 99960 \times 0.00116 = 1751$ kN/m = μ_R (12)

ここでは、平均抵抗力に対し 5% と仮定すると、 $\sigma_R = \mu_R \times 0.05 = 87.6$ kN/m (13)

安全余裕度 X の平均値と標準偏差は、 R および S とともに正規確率変数とすると、以下のように求められる。

$$\mu_X = \mu_R - \mu_S = 57.0 \text{ kN/m} \quad \sigma_X = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} = 515.7 \text{ kN/m} \quad (14)$$

ここで、式(6)の標準化変換を行う。すなわち、式(6)に $X=0$ を代入して Z_0 を求め、 $Z_0 \geq 0 (X \geq 0)$ の確率を算出する。 $X=0$ のとき、 $Z_0 = -0.111$ となり、この値から $Z=0$ までの確率は、標準正規分布表から 0.0438 つまり 4.4% となる。 $Z=0$ から ∞ までの確率は面積の半分であるので 50%。よって、B 断面 (鉄筋あり) の場合のせん断破壊が生じない安全性の確率は約 54.4% である(図-1)。なお、鉄筋量をやや増やす、つまり D22 の 3 本を 4 本、5 本に増やすと、せん断破壊に対する安全性の確率がそれぞれ約 64.1%、72.3% に増大することが認められた。

以上より、土石流荷重の不確定性 (ばらつき) を考慮した砂防堰堤袖部のせん断破壊の安全性の照査が可能となった。

5. 結言

本法は、一計算として土石流流体力の不確定性を考慮した砂防堰堤袖部のせん断破壊の安全性照査法を基礎的に考察したもので、転倒、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。今後土石流の不確定性 (標準偏差) に関する分析を行い、信頼性・妥当性を向上させたい。

参考文献

- 1) 石川信隆, 山口聖勝, 飯塚幸司, 嶋丈示: 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, 土木学会関東支部研究発表集, 2016 年 3 月.
- 2) 針原川土石流検討委員会, 針原川土石流検討委員会報告書, 平成 10 年 5 月