

土石流中の礫のばらつきを考慮した砂防堰堤の安全性評価

砂防鋼構造物研究会 ○飯塚幸司 石川信隆  
 防衛大学校 香月 智  
 (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. 緒言

近年、極めて大きな土石流が発生する事象が多くなり、砂防堰堤が破壊する事例が報告されている。構造物が被害を受ける要因の一つは、荷重のもつ不確定性にあり、また抵抗力側の不確定性も損傷を起こす原因となる。昨年著者ら<sup>1)</sup>は、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について検討を試みたが、今回は、土石流中の礫のばらつきを考慮した砂防堰堤袖部のせん断破壊について安全性照査を試みるものである。まず確率変数が正規分布に従う場合と対数正規分布に従う場合について検討し、次に、礫衝突力のみ、流体力のみ、さらに、礫衝突力と流体力が同時に作用したときの破壊確率を算定した。

2. 確定論と確率論による設計法の違い

確定論による現行設計法は、「計画規模の土石流外力 $S$ に対して砂防堰堤の抵抗力 $R$ を超えないように安全率を用いて設計する」。しかし、「どんな外力でも絶対に壊れない砂防構造物」は存在しない。指針<sup>2)</sup>で定めた設計用荷重に対する安全性を保証しているに過ぎない。設計用荷重を超えた場合の安全性は不明である。これに対して、確率論による設計法は、「土石流外力 $S$ に対して、砂防堰堤の抵抗力 $R$ を超える破壊確率が5%」と定義する。

3. 性能関数の定義

土石流外力を $S$ 、砂防堰堤の抵抗力 $R$ をとすると、性能関数は $Z = R - S$ と定義し、 $Z > 0$ のとき安全であり、 $Z \leq 0$ のとき破壊と定義する。すなわち、 $Z \leq 0$ となる確率が破壊確率 $P_f$ である。外力 $S$ と抵抗力 $R$ がともに正規確率変数 $\sigma_Z$ のとき、性能関数 $Z$ も正規確率変数になり、性能関数の平均値 $\bar{Z}$ と標準偏差 $\sigma_Z$ は、次式で表される<sup>3), 4), 5)</sup>。

$$\bar{Z} = \bar{R} - \bar{S}, \quad \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1a, 1b)$$

ここに、 $\bar{R}, \bar{S}$ : 抵抗力と外力の平均値、 $\sigma_R, \sigma_S$ : 抵抗力と外力の標準偏差。

3.1 信頼性指標

また、信頼性指標 $\beta$ は、図-1に示すように破壊をもたらす破壊点( $Z = 0$ )から平均値がどの程度離れているかを示す尺度である。すなわち、 $\bar{Z}$ が $\sigma_Z$ の何倍の位置にあるかを、 $\beta$ で示すことにより、安全性余裕の目安になる。 $\beta$ が大きいほど、破壊確率 $P_f$ は小さくなる。

$$\beta = \frac{\bar{Z}}{\sigma_Z} = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad P_f = 1 - \phi(\beta) \quad (2a, 2b)$$

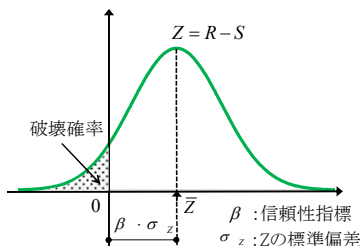


図-1 安全性指標の定義

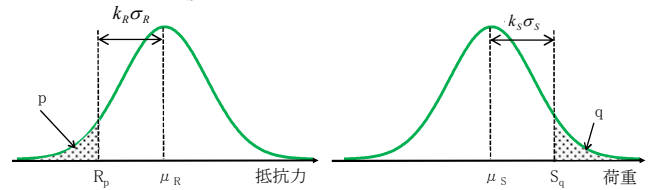
3.2 外力と抵抗値の特性値

ここで、抵抗値はなるべく低目に、外力はなるべく高目にした特性値 $R_p, S_q$ を用いる。

$$R_p = \bar{R} - k_R \sigma_R = \bar{R}(1 - k_R V_R),$$

$$S_q = \bar{S} + k_S \sigma_S = \bar{S}(1 + k_S V_S) \quad (3a, 3b)$$

ただし、 $k_R, k_S$ は平均値と特性値を関係づける係数で、 $R_p$ の非超過確率と $S_q$ の超過確率が共に0.01(1/100 確率)のとき、 $k_R = k_S = 2.32$ となる。



(a) Rの特性値 $R_p$  (b) Sの特性値 $S_q$   
 図-2 特性値の定義

4. 対数正規分布の場合

4.1 荷重が1個の場合

$R$ と $S$ が独立で、ともに図-3のような対数正規分布に従う場合、正領域のみで定義されるので実用的(荷重は正のみ)である。このとき安全性指標は次のように表現される<sup>3), 4)</sup>。

$$\beta = \frac{\bar{Z}}{\sigma_Z} = \frac{\ln(\bar{R}/\bar{S})}{\sqrt{V_R^2 + V_S^2}} \quad (3a)$$

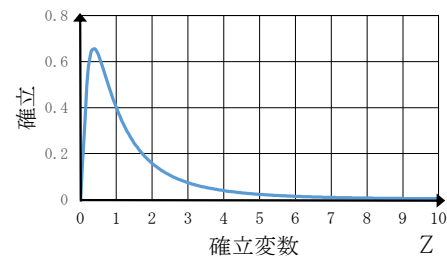


図-3 対数正規分布

4.2 対数正規分布の荷重が2個の場合

礫荷重と流体力が独立で、ともに対数分布に従う場合の安全性指標は、次のようになる<sup>4)</sup>。

$$\beta = \frac{\ln\{\bar{R}/(\bar{S}_1 + \bar{S}_2)\}}{\sqrt{V_R^2 + V_{S1}^2 + V_{S2}^2}} \quad (3b)$$

5. 砂防堰堤袖部のせん断破壊に関する安全性照査

5.1 礫衝撃力のみ作用する場合

図-4のようなコンクリート砂防堰堤袖部の場合、礫衝撃力のみ作用するときの破壊確率を求める。

(1) 抵抗力  $R$  は,

$$\begin{aligned}\bar{R} &= f \sum V + \tau_c L + \tau_s A_s \\ &= 0.8 \times 574.1 + 392 \times 3.0 + 99,960 \times 0.0011613 \\ &= 1751 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

ただし,  $f$ : 摩擦係数,  $\sum V$ : 袖部の重量,  $\tau_c$ : コンクリートのせん断強度(ここでは  $40 \text{ t/m}^2 = 392 \text{ kN/m}^2$  を用いた<sup>6)</sup>),  $\tau_s$ : 鉄筋のせん断強度(ここでは  $10200 \text{ t/m}^2 = 99960 \text{ kN/m}^2$  を用いた),  $A_s$ : 鉄筋断面積(ただし, 単位  $\text{m}^2/\text{m}$ )  
ここで, 変動係数  $V_R = 0.2$  とすると, 抵抗力の標準偏差は

$$\sigma_R = 0.2 \times 1751 = 350.2 \text{ kN/m}$$

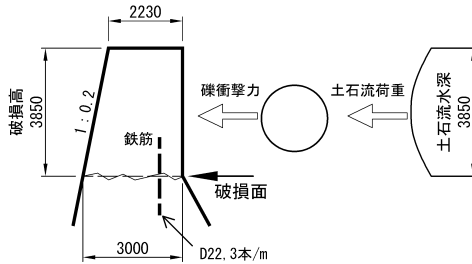


図-4 コンクリート堰堤の袖部<sup>1), 6)</sup>

(2) 外力の礫衝撃力  $S$  として, ここでは針原川調査報告書<sup>6)</sup>の衝撃力を特性値  $S_p$  (100 年再現確率とすると  $k_s = 2.32$ ) として用いる.

$$S_p = \bar{S}(1 + k_s V_s) = 887.9 \text{ kN/m}$$

変動係数  $V_s = 1.0$  とすると,  $k_s = 2.32$  であるので  
 $3.32\bar{S} = 887.9 \text{ kN/m}$

よって, 衝撃力の平均値は  $\bar{S} = 267.4 \text{ kN/m}$   
標準偏差は  $\sigma_s = 267.4 \text{ kN/m}$

(3) 安全性指標  $\beta$  は

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}} = \frac{1751 - 275}{\sqrt{350^2 + 275^2}} = \frac{1476}{440} = 3.35$$

$$\varphi(\beta) = 0.5 + 0.4996 = 0.9996$$

$$P_f = 1 - \varphi(\beta) = 0.0004$$

すなわち, 礫衝撃力による安全性余裕度は 99.96%, 破壊確率は 0.04% となる.

## 5.2 礫衝撃力を対数正規分布とした場合

式(3)より

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{\bar{Z}}{\sigma_z} = \frac{\ln(\bar{R}/\bar{S})}{\sqrt{V_R^2 + V_s^2}} = \frac{\ln(1751/267)}{\sqrt{0.2^2 + 1.0^2}} \\ &= \frac{1.88}{1.02} = 1.84\end{aligned}$$

$$\varphi(\beta) = 0.5 + 0.467 = 0.967, \quad P_f = 0.033$$

よって, 対数正規分布の場合, 破壊確率は 3.3% となり, 破壊確率はやや大きくなった.

## 5.3 流体力のみ作用する場合

災害時の最大流体力が  $S_{p2} = 1960 \text{ kN/m}$  と推定<sup>6)</sup>されているので, これを 200 年確率とすると,  $k_{s2} = 2.57$  となるので, これより平均値を求める.

$$S_{p2} = \bar{S}_2(1 + k_{s2} V_{s2}) = 1960 \text{ kN/m}$$

流体力の変動係数を  $V_{s2} = 1.0$  とすると,

$$\bar{S}_2 = 549 \text{ kN/m}, \quad \sigma_{s2} = 549 \text{ kN/m}$$

対数正規分布とすると,

$$\beta = \frac{\ln(\bar{R}/\bar{S}_2)}{\sqrt{V_R^2 + V_{s2}^2}} = \frac{\ln(1751/549)}{\sqrt{0.2^2 + 1.0^2}} = \frac{1.15}{1.02} = 1.14$$

$$\varphi(\beta) = 0.5 + 0.373 = 0.873$$

$$P_f = 1 - \varphi(\beta) = 0.127$$

流体力のみ作用する場合は, 破壊確率は 12.7% となり, 針原川では流体力による破壊確率が大きくなった.

## 5.4 礫衝撃力と流体力が同時に作用する場合

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{\ln\{\bar{R}/(\bar{S}_1 + \bar{S}_2)\}}{\sqrt{V_R^2 + V_{s1}^2 + V_{s2}^2}} \\ &= \frac{\ln\{1751/(267 + 549)\}}{\sqrt{0.2^2 + 1.0^2 + 1.0^2}} = \frac{0.76}{1.43} = 0.53\end{aligned}$$

$$\varphi(\beta) = 0.5 + 0.202 = 0.702$$

$$P_f = 1 - \varphi(\beta) = 0.298$$

礫衝撃力と流体力が同時に作用した場合, 破壊確率は 29.8% となり, 当然ながら 2 つの荷重が同時に作用した場合の破壊確率は大きくなった.

## 6. 結言

本研究は, 安全性指標を用いて砂防堰堤袖部のせん断破壊に関する安全性照査に適用したもので, 今後, 信頼性設計を砂防構造物へ適用していくには, 礫径や流速の確率分布や, 特性値や変動係数の与え方などについて検討していく必要がある.

(参考文献)

- 飯塚幸司, 石川信隆, 嶋丈示, 水山高久: 土石流流体力の不確定性を考慮した砂防堰堤袖部の安全性照査に関する一考察, 平成 28 年度砂防学会研究発表概要集, pB-214-215
- 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説, 2016 年 4 月
- 星谷勝, 石井清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 昭和 61 年.
- 大塚久哲: 信頼性露論と性能設計, 大塚社会基盤総合研究所, 樞歌書房, 2016 年
- 土木学会: 構造工学シリーズ 22 防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計 基準体系の指針, 平成 25 年
- 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