

土石流による流体力の不確実性を考慮した砂防えん堤の信頼性設計に関する一考察

株式会社 異設計コンサルタント 正会員 ○有清 睦
 広島工業大学 フェロー会員 中山 隆弘

1. はじめに

構造物の信頼性設計では設計変数の不確実性を確率的に処理し、安全性が定量的に評価される。わが国では、まず 2007 年に港湾施設の技術上の基準¹⁾に信頼性設計が導入され、2017 年の 11 月には、道路橋示方書²⁾においても信頼性設計の考え方が取り入れられた。一方、土石流の発生から生命や財産を守る砂防えん堤については、社会的重要性が非常に大きいにも拘わらず、これまで外力、すなわち土石流による流体力の不確実性が考慮されることはほとんど無かったのが現状である^{3), 4)}。そのような状況に鑑み、本研究では土石流による流体力の不確実性と砂防えん堤の抵抗力の不確実性を考慮して砂防えん堤の安定性を定量的に評価し、砂防堰堤の信頼性設計に関する基礎的資料を提供する。

2. 土石流の流体力の不確実性評価

(1) 土石流ピーク流量

本研究では土石流の流体力の計算は参考文献 5)、6) に沿って行うが、土石流ピーク流量は参考文献 7) により評価した。図-1⁷⁾ はこれまでの土石流の観測データや現地調査および既往の成果を示したもので、参考文献 7) によれば、土石流ピーク流量と総流出量は式 (1) のような関係で与えられている。式中の係数 α は、図-1 から溪流の特徴によって 1.0~0.001 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) の範囲に分布しているものの、主として 0.1~0.01 の値をとるようである。

$$Q_{sp} = \alpha \cdot \Sigma Q^{0.833} \dots (1)$$

式中、 Q_{sp} は土石流ピーク流量 (m^3/s) で、 ΣQ は総流出量 (m^3) である。

この図からも分かるように、総流出量と土石流ピーク流量との関係を確定的に表すことは困難で、

キーワード 土石流, 不確実性, 信頼性設計

連絡先 〒743-0023 山口県光市光ヶ丘 5 番 1 号

T E L 0833-72-0112 株式会社 異設計コンサルタント

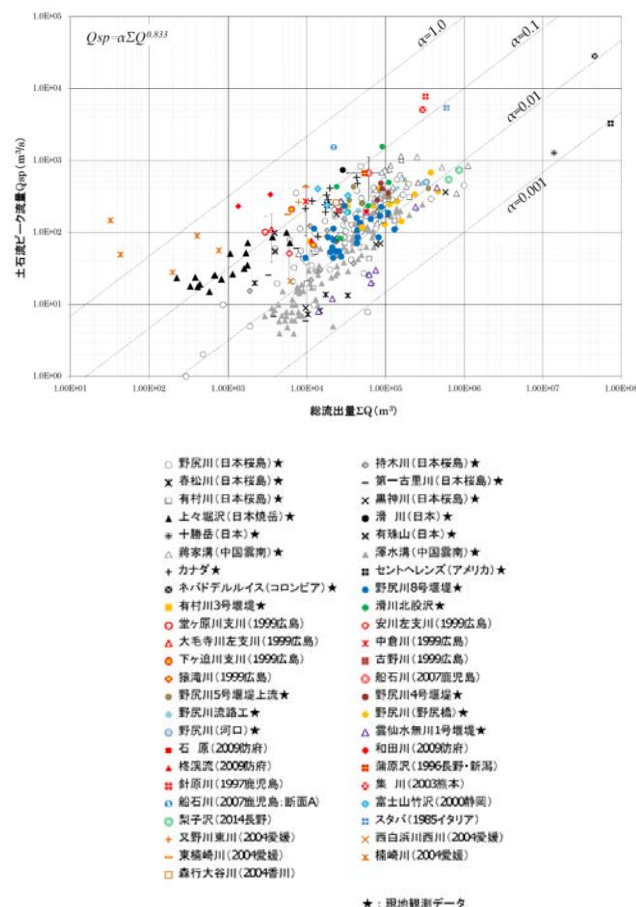


図-1 土石流ピーク流量と総流出量の関係⁷⁾

今回筆者らは、図中の広島と防府のデータのみに注目し、両者の関係を確率的に評価することとした。

まず式 (2) は、図-1 の広島と防府のデータを用いて最小二乗法によって求めた土石流ピーク流量の総流出量に関する回帰直線式である。

$$Q_{sp(H,H)} = 0.084 \cdot \Sigma Q^{0.833} \dots (2)$$

式中、 $Q_{sp(H,H)}$ は広島、防府のデータから得られる土石流ピーク流量 (m^3/s) で、添字の (H, H) は広島、防府のデータによるものであることを表している。

次に、図-2 は $\log(Q_{sp(H,H)})$ と $\log(Q_{sp})$ の関係を表

したもので、これより $\log(Q_{sp(H,H)})$ と $\log(Q_{sp})$ の関係を表したものが式 (3) である。ここでは詳細を省略するが、式 (3) の係数 0.777 は参考文献⁸⁾ の土石流ピーク流量 (Q_p) と総流出量 (Q_T) の関係から式 (4) を求めたうえで、係数 0.777 を式 (3) に用いて最小二乗法により切片を求めた。

$$\log(Q_{sp}^*) = 0.777 \cdot (Q_{sp(H,H)}) + 0.482 + \varepsilon_{Q_{sp}} \quad \dots \dots (3)$$

$$\log(Q_{sp}^*) = 0.777 \cdot (Q_{sp}) + 0.408 + \varepsilon \quad \dots \dots (4)$$

式中、 Q_{sp} は不確実性を考慮した土石流ピーク流量 (m^3/s) で添字の*は Q_{sp} (図-1 から読み取った値) と区別するために付している。 $\varepsilon_{Q_{sp}}$ は正規確率変数で、平均値は 0、標準偏差は 0.474 である。

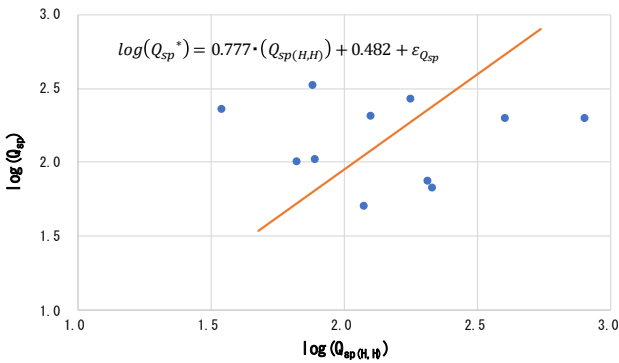


図-2 $\log(Q_{sp(H,H)})$ と $\log(Q_{sp})$ の関係

(2) 総流出量と土石流濃度の不確実性の評価

式 (4) は総流出量を表す式⁵⁾ である。

$$\Sigma Q = \frac{C_* \cdot V_{dqp}}{C_d} \quad \dots \dots (4)$$

式中、 ΣQ は総流出量、 V_{dqp} は 1 波の土石流により流出すると想定される土砂量(空隙込み) (m^3)、 C_d は土石流濃度 (ただし $0.3 \leq C_d \leq 0.9 \cdot C_*$)、 C_* は溪床堆積土砂の容積濃度 (0.6 程度) である。後述のケーススタディでは、 V_{dqp} は現地の溪流調査結果から得られる値であることから確定値とし、 C_* についても 0.6 の確定値とした。

式 (5) は土石流濃度 C_d を表す式である。

$$C_d = \frac{\rho \cdot \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad \dots \dots (5)$$

式中、 σ は礫の密度 ($2,600kg/m^3$ 程度)、 ρ は水の密度 ($1,200kg/m^3$ 程度)、 ϕ は溪床堆積土砂の内部

摩擦角 ($^\circ$)、 θ は溪床勾配 ($^\circ$) で、土石流ピーク流量を算出する際の溪床勾配は計画地点から概ね上流 200m の平均勾配である。

図-3 は、土石流の平均濃度と水路勾配との関係⁸⁾ を表したものである。これを見ると、式 (5) の周りばらつきがあり、不確実性を考慮することにした。

図-4 は、式 (5) と実験による図-3 の縦軸の値との関係を表したものである。この図より、式 (6) のように、式 (5) と実験値の不確実性を表す関係を表した。

$$C_d^* = 0.593 \cdot C_d + 0.133 + \varepsilon_{cd} \quad \dots \dots (6)$$

式中、 C_d^* は不確実性を考慮した土石流濃度、 ε_{cd} は、正規確率変数で平均 0、標準偏差 0.088 である。

また、後述のケーススタディでは σ 、 ρ 確定値とし θ についても溪流調査から得られるため確定値とした。ただし、 ϕ は $30^\circ \sim 40^\circ$ 程度であり一般に 35° が用いられるが、ここでは確率変数として平均値を 35° 、標準偏差については、 $30^\circ \sim 40^\circ$ が 2σ の範囲にあるものと仮定し、 $(35-30)/2=2.5$ とした。

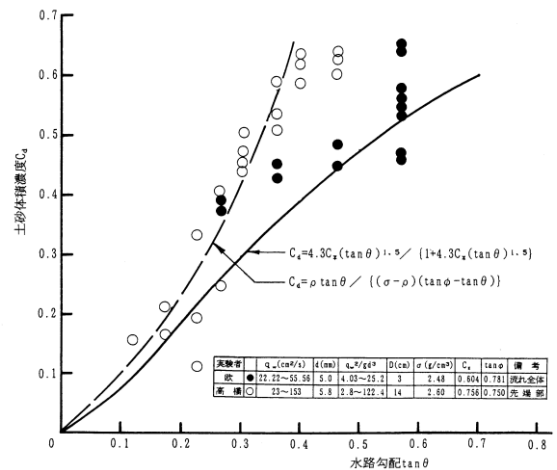


図-3 土石流の平均濃度と水路勾配の関係⁸⁾

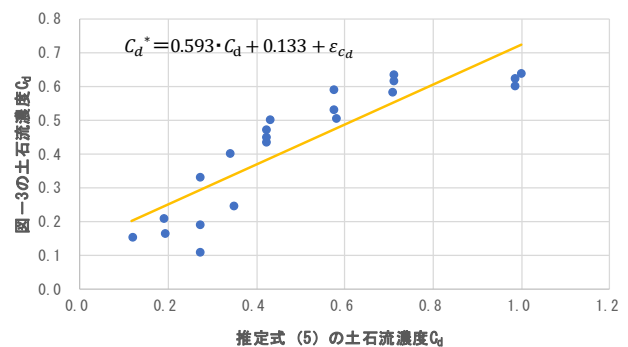


図-4 土石流濃度の推定式と実験値の関係

3. ケーススタディ

本論文では、不透過型砂防えん堤を対象とし、モンテカルロシミュレーションによって安定性の確率的評価を行なった。シミュレーション回数は、10000 回以上では結果に影響がないことを確認の上、10000 回とした。以下に計算条件を示す。

砂防えん堤の断面形状は、堤高：8.5m、天端幅：3.0m、下流側勾配：0.2、上流側勾配：0.25 とし、コンクリートの単位体積重量 22.56kN/m^3 とした。

この断面は、参考文献 5)、6) を参考に、滑動と転倒に対する安全率を満足するように決めた断面である。溪流の条件は現溪床勾配：1/4.8、溪流断面：底幅 4.4m、左岸勾配 1：6.3、右岸側勾配 1：1.6 である。また礫の単位体積重量を 25.5kN/m^3 で、水の単位体積重量を 11.77kN/m^3 とした。

さらに堆砂土については、砂礫の内部摩擦角を $35^\circ \sim 45^\circ$ として、平均値を 37° 、標準偏差 5° とした。えん堤の基礎底面は砂礫層として標準貫入試験による N 値の 10 倍を許容支持力度とみなして許容支持力度を求め、正規確率変数として平均値を 538kN/m^2 、標準偏差を 199kN/m^2 とした。また、この N 値から ϕ を式 (6)、すなわち

$$\phi = \sqrt{15N + 15} \quad \dots\dots (6)$$

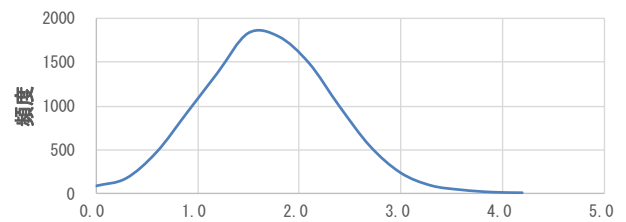
で求め、 $\tan \phi$ をえん堤の底面の滑動係数とした。 $\tan \phi$ は正規確率変数で平均値 0.945、標準偏差を 0.176 とした。ただし、0.6 を超える場合には 0.6 とした。また、地盤のせん断強度は無視した。

4. シミュレーションの結果

まず図-5 は最大鉛直応力度/許容支持力度の頻度分布を表したもので、最大鉛直応力度/許容支持力度が 1 より小さくなる確率（沈下確率）は 0.143 となった。

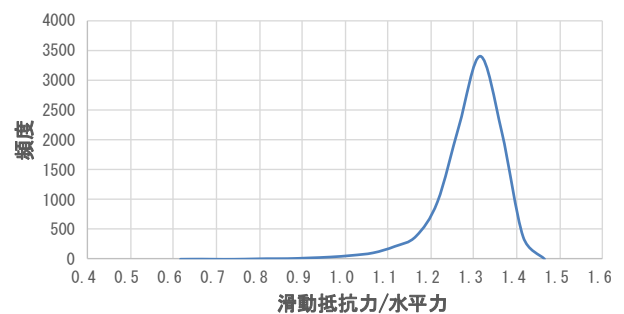
次に図-6 は滑動抵抗力/水平力の頻度分布を表したもので、滑動抵抗力/水平力が 1 より小さくなる確率（滑動確率）は 0.01 である。

図-7 は、砂防えん堤の底面幅の中央から荷重合力作用位置までの距離 (m) を e、底面幅を B としたときの $B/6 - e$ の頻度分布を表したもので、 $B/6 < e$ となる確率（転倒確率）は 0.231 である。



最大鉛直応力度/許容支持力度

図-5 最大鉛直応力度/許容支持力度の頻度分布



滑動抵抗力/水平力

図-6 滑動抵抗力/水平力の頻度分布

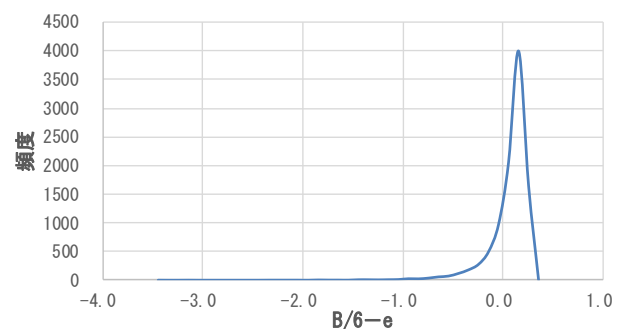


図-7 B/6-e の頻度分布

5. おわりに

本研究では、土石流の流体力の不確実性と、抵抗力の不確実性として砂防えん堤の地盤の N 値のばらつきを考慮してシミュレーションを行い、砂防えん堤の安定性を評価することを試みた。

今後は、透過型えん堤部材に対する信頼性設計を行い、各部材の安全性の定量的評価を行なっていく所存である。

謝辞

今回の研究では、溪流や地質に関して山口県より貴重な資料の提供をしていただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) (社) 日本港湾協会： 港湾の施設技術上の基準、
平成 19 年 7 月
- 2) (公社) 日本道路協会： 道路橋示方書、平成 29
年 11 月
- 3) 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 年砂
防学会研究発表概要集、pp. B-214-215
- 4) 飯塚幸司、石川信隆、香月 智、嶋丈示、水山
高久： 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 基
礎研究成果報告、平成 28 年度（2016 年 6 月
-2017 年 5 月）
- 5) 国土交通省 国土技術政策総合研究所： 砂防基
本計画策定（土石流・流木対策編）解説、平成
28 年 4 月
- 6) 国土交通省 国土技術政策総合研究所： 土石流・
流木対策設計技術指針 解説、平成 28 年 4 月
- 7) 池田暁彦、水山高久、桜井 亘、内田太郎、水
野秀明： 土石流ピーク流量の特性に関する考
察、平成 29 年度砂防学会研究発表会、
pp. 112-113
- 8) 欧 国強、小橋澄治、水山高久： 土石流ピーク
流量の推定、新砂防 Vol. 44 No. 4（177）、
1991. 11 月 pp. 24-29
- 9) 欧 国強、水山高久： 土石流平均濃度の予測、
新砂防 Vol. 47 No. 4（195）、1994. 11 月 pp. 9-13