

土石流荷重の設計作用モデルに関する一考察

防衛大学校 ○学生会員 片出 亮, 金子智成 正会員 香月 智

1. 緒言

平成 19 年に改訂された土石流・流木対策設計技術指針¹⁾には、砂防堰堤設計においてリダンダンシーを考慮する必要性が唱われている。一方、阿地ら²⁾は、鋼製枠砂防堰堤の崩壊事例を基に、土石流の偏りが構造物に及ぼす影響について考察している。この際、土石流が堰堤袖部まで作用する可能性を無視することができないことや、作用位置やその大きさが不確定であることを指摘している。そのうえで、このような土石流荷重を考慮すると、河川横断方向に均一な荷重が作用する場合に比して、崩壊事例に似た破壊を予測させる解析結果が得られることを示している。これより、土石流荷重には作用点の偏りがあり、その偏りが構造物の安全性評価に大きな影響を及ぼすものと指摘している。

そこで、本研究では土石流荷重の偏りを考慮することができるとともに、現行設計に比してリダンダンシーを高められる改良型設計作用モデルについて提案し、その有用性を考察する。

2. 提案設計作用モデル

今後の堰堤設計には、前述のような土石流荷重の不確定性に対応できるリダンダンシーの大きな構造設計が望まれるものと考えられる。この際、構造のリダンダンシーを評価するには確率評価して設計を行う必要があるが、実用面からは簡便な設計作用モデルの工夫によって課題を克服できる手法の開発が望まれる。そこで、本研究では道路橋設計に用いられる L 荷重のコンセプトを準用して、図-1 のような設計作用モデルを提案する。現行設計との違いは次の 2 点である。

① 現行土石流荷重の作用範囲を袖部上端まで作用させるものとする。(F 荷重)

② 土石流荷重の作用位置の不確定性を表現するため、F 荷重に加えて、水通し幅でその作用位置が堰堤軸方向に自由に移動する荷重を作用させる。(U 荷重)

なお、作用位置は部材ごとに応力が最大となる最悪荷重によって決定される。その大きさは、

$$q_U = \alpha_U q_F \quad (8)$$

ここで、 α_U : U 荷重係数（堰堤の重要度などを考慮して設計すべきものであるが、本研究では 1.0 とした）、

q_U, q_F : 単位面積あたりの U 荷重および F 荷重。

なお、 q_F については現行設計荷重と次式の関係があるものとする。

$$q_F = \xi \cdot q_D \quad (9)$$

ここで、 q_D : 現行設計における単位面積あたりの土石流流体圧荷重、 ξ : 現行設計に対する F 荷重の係数。

3. 提案設計作用モデルの検討

3.1 フルストレス設計

設計荷重の影響分析のため、各設計作用モデルに対してフルストレス設計を行う。この際、設計荷重条件

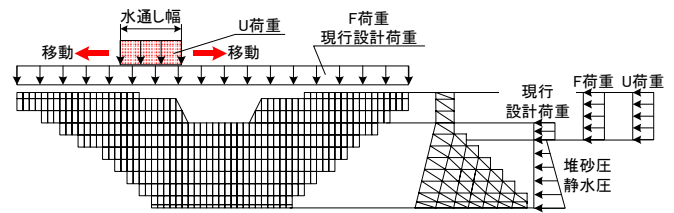


図-1 提案手法

表-1 設計土石流荷重条件

	設計値		
	現行設計	F 荷重	F+U 荷重
土石流流速	6.25m/s		
土石流水深	2.5m	7.5m	
F 荷重流体圧	70.6kN/m ²		
U 荷重流体圧	0.0kN/m ²	0.0kN/m ²	70.6kN/m ²

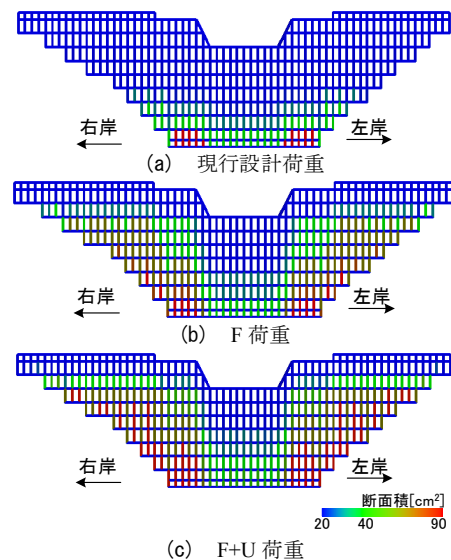


図-2 フルストレス設計

表-2 総鋼材量

	総鋼材量		
	体積[m ³]	重量[ton]	比率
現堰堤	42.9	336.8	1.00
現行設計荷重	28.4	222.7	0.66
F 荷重	30.9	242.6	0.72
F+U 荷重	34.6	271.3	0.80

は、表-1 のように設定した。図-2 は、得られたフルストレス設計の結果を前壁面部材について示したものであり、現設計の柱材に使用している鋼材（断面面積 39.65cm²）を概ね緑色で示した。これに対して青色は減少傾向を、赤色は増加傾向を示している。表-2 には全構造部材の使用鋼材量を示している。現設計が 42.9m³であるのに対し、現行設計作用によるフルストレス設計では 28.4m³と 66%まで減少している。F 荷重、F+U 荷重モデルの総鋼材量は 30.9m³、34.6m³であり、F+U 荷重モデルによるものが最も鋼材量が大きくなるが、現設計に対しては 80%とむしろ減少していることがわかる。

3.2 信頼性解析

各設計作用モデルによる設計結果の安全性向上効果を簡易な信頼性解析によって評価する。土石流荷重モデルは図-3に示すもので、土石流が作用する中心位置の左右に正規確率分布関数の形状を有する分布モデルとした。この際、鋼材および土石流荷重の各確率分布は表-3に示すものとした。

図-4にモンテカルロ法によって得られる各設計結果の同時降伏部材数 n_f の発生頻度分布を $n_f \leq 200$ について示す。図-4(a)に比して図-4(b)は明瞭に発生頻度が増えているが、図-4(c), (d)では現設計よりも小さな総鋼材量であるにもかかわらず、現設計よりもいずれの降伏部材数においても発生頻度は減少していることがわかる。これに伴い、表-4のように弾性限界に対する破壊確率 P_e も小さくなる。

ところで、構造のリダンダンシーを評価するには、構造全体の崩壊確率を求める必要があるが、弾塑性解析や塑性解析をモンテカルロ法と組み合わせると計算負担が大きくなる。そのため、本研究では降伏部材数と構造崩壊確率との関係を図-5に示すような、降伏部材数 n_i 本を説明変数とするロジットモデルで表現した次式で仮定した。

$$p_F(n_i) = \frac{\exp(b_0 + b_1 n_i)}{1 + \exp(b_0 + b_1 n_i)} \quad (10)$$

ここで、 $p_F(n_i)$ ： n_i 本の部材により構造システムが崩壊する確率、 b_0, b_1 ：定数（それぞれ-8.5, 0.5とした）。よって、図-4に示した降伏部材発生頻度との積算により、対象構造物の崩壊確率を次式により定義した。

$$P_{sf} = \sum_{i=1}^n p_F(n_i) \cdot p_H(n_i) \quad (11)$$

ここで、 P_{sf} ：構造システムの崩壊確率、 $p_H(n_i)$ ：降伏部材数 n_i 本の発生確率（図-4）、 n ：降伏部材数。

そのうえで、構造物の冗長性指標を次式によって求めた¹⁰⁾。

$$R = P_{sf} / P_e \quad (12)$$

ここで、 R ：冗長性指標。

この計算結果を表-4に示す。現行設計作用モデルによるフルストレス設計の冗長性指標は現設計よりも小さな冗長性となる。一方、F荷重モデル設計およびF+U荷重モデル設計の冗長性指標は1.22および1.25となり、現設計に比べ大きな冗長性となることがわかる。

4. 結論

本研究は、土石流荷重の最悪荷重を考慮できる提案設計作用モデルを用いることを提案した。これにより、脆弱部材を補強して構造信頼性を向上させることが可能となるだけでなく、構造システムの冗長性をも向上させることが可能となることがわかった。

参考文献

- 1) 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）及び同解説」「土石流・流木対策設計技術指針及び同解説」、社団法人 全国治水砂防協会、2007.11。
- 2) 阿地将史，金子智成，香月智：土石流荷重の非対称性が鋼製砕砂防堰堤に及ぼす影響，第35回土木学会関東支部

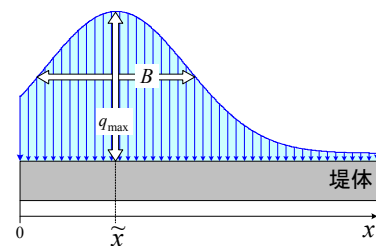


図-3 信頼性解析図

表-3 確率変数

	分布形状	平均値	変動係数
土石流流速 [v]	対数正規	6.27m/s	0.50
集中度 [B]	対数正規	20.0m	0.25
中心位置 [$\bar{x}$]	正規分布	33.0m	0.25
降伏応力 [σ_s]	正規分布	330.0N/mm ²	0.05

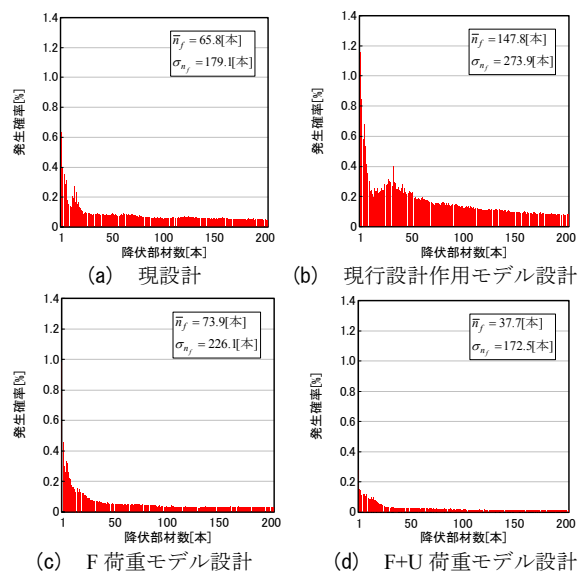


図-4 降伏部材数発生頻度分布

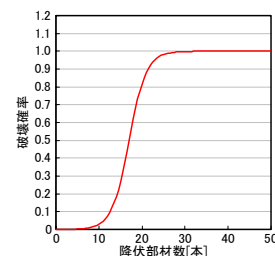


図-5 フラジリティー曲線

表-4 冗長性指標

	現設計	現行設計 荷重モデル	F 荷重 モデル設計	F+U 荷重 モデル設計
P_e (β_e)	0.282 (0.58)	0.579 (-0.20)	0.236 (0.72)	0.116 (1.19)
P_p (β_p)	0.236 (0.72)	0.502 (-0.01)	0.193 (0.87)	0.093 (1.32)
R	1.19	1.15	1.22	1.25

P_e, β_e ：構造破壊確率および信頼性指標

- 技術研究発表会, I-058, 2008.3.
- 3) D. M. Frangopol, M. Iizuka, and K. Yoshida: Redundancy Measures for Design and Evaluation of Structural Systems, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, Vol.114, Issue 4, pp.285-290, Nov. 1992.