鋼製砂防堰堤のリダンダンシーを高める設計用荷重モデル

防衛大学校　建設環境工学科　○片出　亮，香月　智
（財）砂防・地すべり技術センター　嶋　丈示

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謳われている．一方，著者ら[2)]は，鋼製枠砂防堰堤の崩壊事例を基に，土石流が堰堤袖部まで作用する可能性を無視できないことや，作用位置とその大きさには不確定性が存在することを指摘した．さらに，これらの不確定性を有する土石流荷重は，堰堤軸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ことを示した．

そこで本研究は，土石流荷重の偏りに抗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ものである．

2.　提案設計作用モデル

構造のリダンダンシーを高めるには確率評価に基づく設計を行う必要があるが，計算コストの面から実現性に乏しく，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各部材にとって最悪状態となるように作用させる．（U 荷重）

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

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．

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

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る．現設計の柱材に使用している鋼材（断面積 39.65cm^2）を基準として，細線は現設計断面に比して減少傾向を，太線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 42.9m^3 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 28.4m^3 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 30.9m^3，34.6m^3 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．

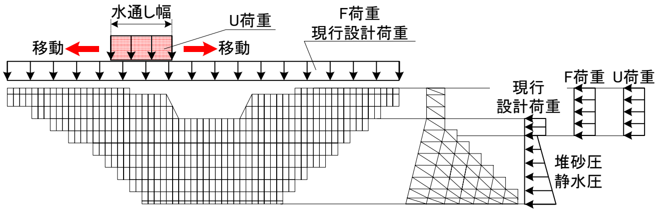
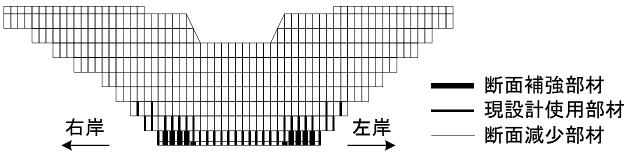


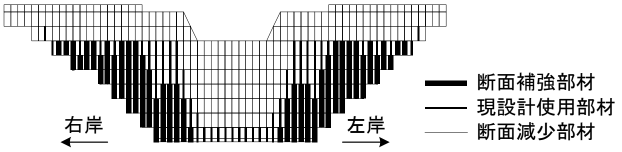
図-1　提案手法

表-1　設計土石流荷重条件

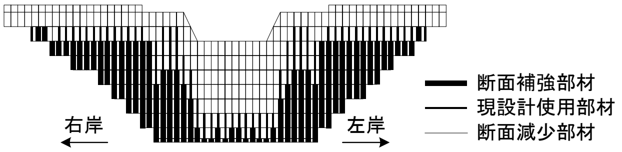
	設計値		
	現行設計	F 荷重	F+U 荷重
土石流流速	6.25m/s		
土石流水深	2.5m	7.5m	
F 荷重流体圧	70.6kN/m^2		
U 荷重流体圧	0.0kN/m^2	0.0kN/m^2	70.6kN/m^2



(a)　現行設計荷重



(b)　F 荷重



(c)　F+U 荷重

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

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 にモンテカルロシミュレーション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) では現設計よりも総鋼材量が小さくなるにもかかわらず，現設計よりも降伏部材数の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．しかし，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．

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

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．

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

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，構造物のリダンダンシー指標を次式によって求めた[10]．

$$R = P_e / P_{sf} \tag{12}$$

ここで， R ：リダンダンシー指標．

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リダンダンシー指標は現設計よりも小さなリダンダンシーとなる．一方，F 荷重モデル設計および F+U 荷重モデル設計のリダンダンシー指標は 1.22 および 1.25 となり，現設計に比べてリダンダンシーが大きくなることがわかる．

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，構造システムのリダンダンシーも向上させることが可能となることがわかった．

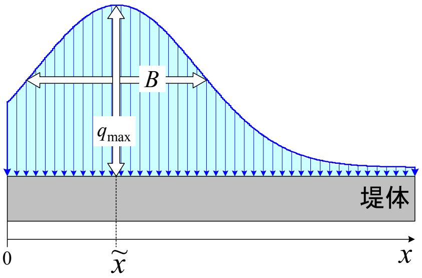
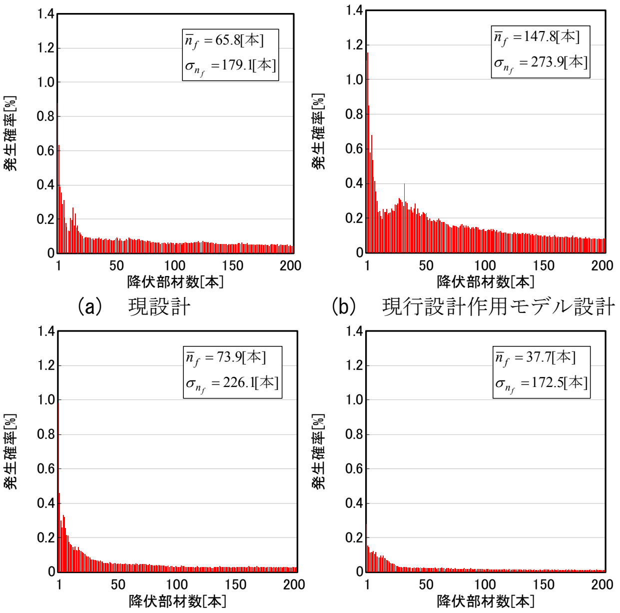


図-3　信頼性解析図

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 [$\tilde{x}$]	正規分布	33.0m	0.25
降伏応力 [σ_y]	正規分布	330.0N/mm^2	0.05



(a)　現設計　(b)　現行設計作用モデル設計
(c)　F 荷重モデル設計　(d)　F+U 荷重モデル設計

図-4　降伏部材数発生頻度分布

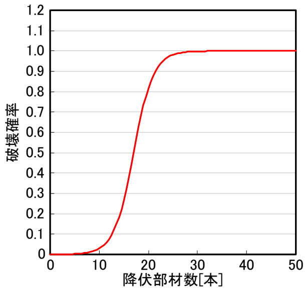


図-5　フラジリティー曲線

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	0.282	0.579	0.236	0.116
(β_e)	(0.58)	(-0.20)	(0.72)	(1.19)
P_{sf}	0.236	0.502	0.193	0.093
(β_{sf})	(0.72)	(-0.01)	(0.87)	(1.32)
R	1.19	1.15	1.22	1.25

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) 片出亮，金子智成，香月智，嶋丈示：鋼製枠砂防堰堤設計における土石流の偏りが安全性に及ぼす影響，平成 20 年度砂防学会研究発表会概要集, O2-10, pp.76-77, 2008.5.

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.