

鋼製透過型砂防堰堤のリダンダンシー、ロバストネス、レジリエンスの定量的評価に関する一考察

(一財) 砂防・地すべり技術センター ○嶋 丈示
 日鉄建材株式会社 國領ひろし
 九州大学大学院 園田佳巨
 防衛大学校名誉教授 石川信隆

1. はじめに

近年、計画規模を大きく上回る大規模土石流（以下、レベルII荷重という）や、支川からの流入による予期しない偏心した土石流（以下、偏心载荷）などにより、鋼製透過型砂防堰堤（以下、鋼製堰堤という）が損傷を受ける事例が発生している。一方、土石流・流木対策設計技術指針では、鋼製堰堤はできるだけリダンダンシー（冗長性）の高い構造とすることが推奨されているものの、その評価法については明確に示されていない。

そこで、本研究では構造物の安全性照査の観点から、鋼製堰堤としてのリダンダンシー、ロバストネス、レジリエンスを定義し、その定量的評価法を提案するものである。

2. リダンダンシーの定量的評価

リダンダンシーは、一般に「冗長性」、「余剰」を意味し、構造力学の観点からは不静定構造物の概念や降伏耐力から終局耐力までの余裕度 R をリダンダンシーの尺度の 1 つとみなしている。そこで、ここでは「降伏耐力から終局耐力までの距離」、つまり余剰耐力を鋼製堰堤のリダンダンシーと定義し、次式により算定するものとする。

$$RS = \frac{\alpha_u}{\alpha_y} \quad (1)$$

ただし、 RS ：リダンダンシーを評価する指標（Reserved Strength）で RS 値が大きければリダンダンシーが大きいと評価する、 α_u ：終局耐力係数（ $=F_u/F_0$ ）、 F_u ：終局耐力、 F_0 ：初期耐力（構造物の最大弾性耐力）、 α_y ：降伏耐力係数（ $=F_y/F_0$ ）、 F_y ：降伏耐力。ここでは、Connor ら²⁾の研究を参考に、余剰耐力の余裕度の目安を $RS \geq 1.3$ に設定した。

図-1 に示す 3 つの鋼製堰堤モデル（いずれも鋼製高 $H=8.0$ m）に対し、堰堤上部に土石流流体力（波高 $h_d=1.5$ m）を作用させて弾塑性解析（Push-over analysis）を行うと、図-2 のような耐力係数-頂部変位関係が得られる。ここで、式(1)により RS 値を算出し、リダンダンシーを評価すると表-1 のようになる。これより、 RS 値は Type 1 を除き、 $RS \geq 1.3$ を満足していることがわかる。

3. ロバストネスの定量的評価

ロバストネスは、「頑強性」、「強靱性」等と呼称され、ある系が外乱の変化に対しても設計条件を満足する性質とされている³⁾。すなわち、作用する外力や材料の不確実性や変動（ばらつき）があっても、構造物としての機能および耐荷性能を保持し続けることができる能力をいう。ここでは、外力の変動（ばらつき）をパラメータとして、土石流の载荷方向（偏心角度 θ ）に着目し、「正面载荷と偏心载荷の終局耐

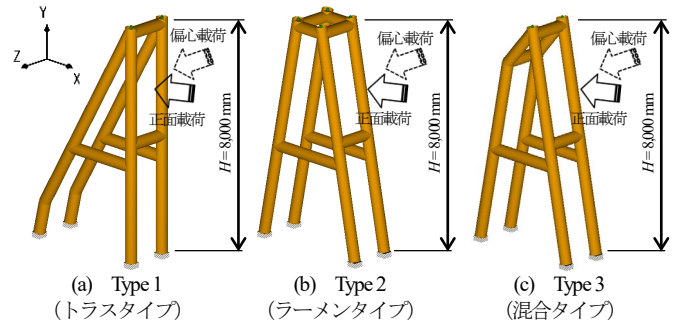


図-1 鋼製堰堤の解析モデルと作用荷重（正面载荷と偏心载荷）

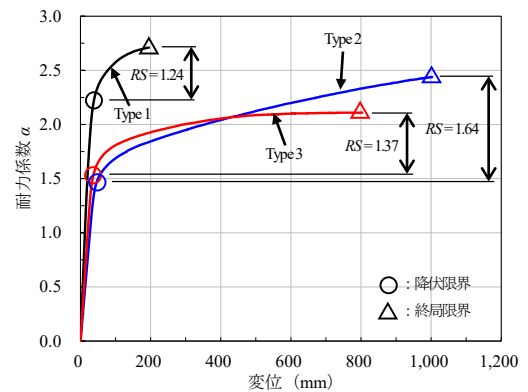


図-2 正面载荷における耐力係数-頂部水平変位関係（リダンダンシー評価）

表-1 リダンダンシーの定量的評価

項目	Type 1	Type 2	Type 3
降伏耐力係数 α_y	2.19	1.48	1.54
終局耐力係数 α_u	2.71	2.43	2.11
リダンダンシー評価 $RS = \alpha_u/\alpha_y$	1.24	1.65	1.37

力係数の距離」、つまり耐力低下率を鋼製堰堤のロバストネスと定義し、次式により算定するものとする。

$$RB = \frac{\alpha_{u\theta}}{\alpha_{u0}} \quad (2)$$

ただし、 RB ：ロバストネスを評価する指標（Robustness）で、 RB 値が大きければロバストネスが大きいと評価する、 $\alpha_{u\theta}$ ：偏心载荷による終局耐力係数、 α_{u0} ：正面载荷による終局耐力係数。なお、 RB 値の閾値は Connor ら²⁾の研究を参考に、 $RB \geq 0.5$ に設定した。

図-3 は、3 つの鋼製堰堤モデルに対し、正面および偏心载荷（偏心角度 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ）について弾塑性解析を行った結果を耐力係数-頂部変位関係で示したもので、偏心角度が大きくなると終局耐力が低下することがわかる。ここで、式(2)による RB 値を算出すると表-2 のようになる。これより、Type 1 の偏心角度 30° および 45° の RB 値は、ロバストネスの閾値 ($RB \geq 0.5$) を満足していないことがわかる。

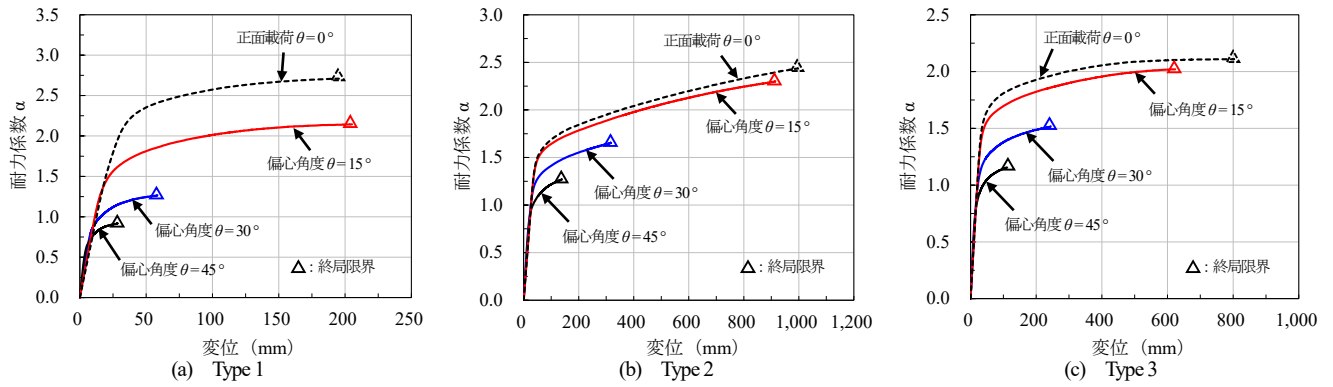


図-3 正面荷重と偏心荷重の耐力係数-変位関係 (ロバストネス評価)

表-2 ロバストネスの定量的評価

偏心角度 θ (°)	Type 1				Type 2				Type 3			
	0	15	30	45	0	15	30	45	0	15	30	45
終局耐力係数 α_u	2.71	2.15	1.27	0.92	2.43	2.31	1.66	1.27	2.11	2.02	1.52	1.16
ロバストネス評価 $RB = \alpha_u/\alpha_u$	1.00	0.79	0.47	0.34	1.00	0.95	0.68	0.52	1.00	0.96	0.72	0.55

表-3 レジリエンスの定量的評価

偏心角度 θ (°)	Type 1				Type 2				Type 3			
	0	15	30	45	0	15	30	45	0	15	30	45
硬化係数 $r = K_2/K_1$	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.04	0.01	0.01	0.03	0.04
降伏耐力係数 α_y	2.19	1.51	0.91	0.69	1.48	1.43	1.15	0.89	1.54	1.39	1.04	0.76
応答塑性率 $\mu_r = \delta_u/\delta_y$ 式(4)	2.15	3.91	9.03	13.8	4.05	4.29	6.08	9.10	3.82	4.52	7.30	11.8
終局塑性率 $\mu_u = \delta_u/\delta_y$	5.46	9.09	5.31	4.21	21.3	20.1	9.49	6.15	18.9	19.6	10.1	7.51
ロバストネス評価 $DM = \mu_u/\mu_r$	2.54	2.32	0.59	0.30	5.28	4.72	1.56	0.68	4.96	4.35	1.39	0.63

4. レジリエンスの定量的評価

レジリエンスは、「回復力」、「復元力」等を意味し、靱性（壊れにくさ）と延性（しなやかさ）の性質の双方を内包している状態をいう³⁾。ここでは、構造物の安全性の観点からレベルII荷重が作用しても脆性的に破壊しない変形の粘り強さを鋼製堰堤のレジリエンスと定義する。すなわち、レベルII荷重が作用した場合の鋼製堰堤の応答変位から終局変位までの変形性能の余裕度、つまり図-4に示すような「応答塑性率から終局塑性率までの距離」を鋼製堰堤のレジリエンスと定義し、次式により求めるものとする。

$$DM = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{\mu_u}{\mu_r} \quad (3)$$

ただし、 DM : レジリエンスを評価する指標 (Ductility Margin), δ_u : 終局変位, δ_r : 応答変位, δ_y : 降伏変位, μ_u : 終局塑性率 ($=\delta_u/\delta_y$), μ_r : 応答塑性率 ($=\delta_r/\delta_y$)。ここでは、レジリエンスの目安をリダンダンシーと同様に $DM \geq 1.3$ に設定した。

なお、応答塑性率 μ_r は、図-4のエネルギー一定則⁴⁾から次式により求められる。

$$\mu_r = \frac{1}{r} \left\{ r - 1 + \sqrt{1 - r + r \left(\frac{\alpha_e}{\alpha_y} \right)^2} \right\} \quad (4)$$

ただし、 r : 硬化係数, α_e : レベルII荷重が作用した場合の弾性耐力係数 (ここでは4.0と仮定)。

表-3に、各タイプの正面および偏心荷重 (偏心角度 15°, 30°, 45°) について、式(3)により DM 値を算定した結果を示す。これより、Type 1の偏心角度 30°および45°, Type 2とType 3の偏心角度 45°以外は、レジリエンスの目安 ($DM \geq 1.3$) を満足することが認められた。

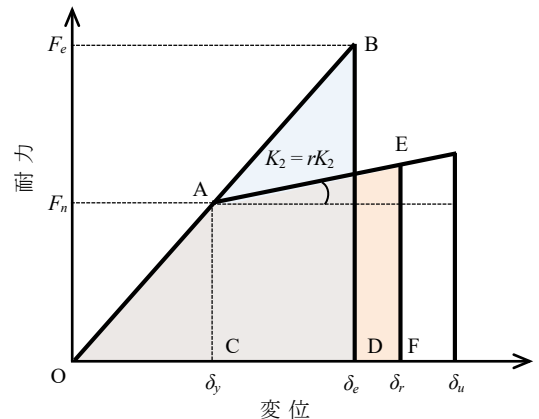


図-4 エネルギー一定則⁴⁾

3. おわりに

本研究では、鋼製堰堤としてのリダンダンシー、ロバストネス、レジリエンスの定義および評価法について提案し、提案手法を用いることにより、それぞれの定量的評価が可能であることを示した。本評価法により、今後、強靱な鋼製堰堤の構築に役立てば幸いである。ただし、レベルII荷重の設計外力としての定量的評価については、今後、検討する必要があると考える。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 建築構造設計における冗長性とロバスト性, 応用力学シリーズ12, 2013.
- 2) Connor, R. J. et al.: Inspection and Management of Bridges with Fracture-Critical Details, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP SYNTHESIS 354, 2005.
- 3) 日本建築学会: 建物のレジリエンスとBCPレベル指標検討特別調査委員会報告, 2020.
- 4) 大成建設株式会社土木本部土木設計部: 耐震設計の基本, インデックス社, 2009.