

弾塑性解析を用いたケーブル式透過型砂防堰堤の耐荷性能評価

防衛大学校 学生会員 ○ 宮原 邑太 正会員 堀口 俊行
株式会社エスイー 正会員 竹家 宏治 非会員 萬徳 昌昭

1. 緒言

日本は、国土の7割が山地丘陵地であり、近年の局地的な豪雨による土砂災害が多く発生している。また、全国の土石流危険渓流のうち、流域面積5 ha (0.05 km²)以下の小規模な渓流は全体の約35%を占めている。このような流域面積が小さく、常時流水が無い渓流を無流水渓流（もしくは小規模渓流）と呼ぶ¹⁾。平成30年7月豪雨での広島災害では、土石流の人的被害のあった渓流の7割が無流水渓流であったことから、2021年より、国土交通省の砂防計画論として無流水渓流の対策構造物の設置が進められている。

無流水渓流を対象とした地区は、谷出口が民家等に隣接していることが多く、大型機材の搬入が困難なことが多い²⁾。そのため、施工の容易性が、対策構造物に求められている。そこで、無流水渓流の対策構造物として現場での施工時間を短縮し、工場で施工したものを搬入することで設置可能なケーブル式の透過型堰堤（以下、ケーブル式堰堤と呼称する。）が提案されている。これは、既存の堰堤のようなコンクリート基礎の部分を少なくし、ケーブルによって堤体を保持する構造である。そのため、大規模な地盤の掘削を必要としない。また、土石流捕捉時には、堤体が滑動し土石流の衝撃力を緩和させることができると考えられる。しかし、このような滑動を許容する構造についての検討例はなく、滑動現象を許容する構造物の安定計算はではできないため、設計段階において弾塑性解析における性能照査を進めていく必要がある。

そこで本研究は、現行の土石流設計荷重³⁾を用いて弾塑性解析を行い、土石流流体力をパラメータとして作用荷重を大きくすることで各部材の応答を検討するものである。

2. 解析の概要

解析は、動的な弾塑性解析プログラムを使用した⁴⁾。これは、陽解法を用いることで、複雑な逆行列を用いず、時々刻々接点の状態を計算し、大変形問題を解くことができる。

図-1に、構造モデルを示す。構造の底面はy,z軸方向は固定されており、x軸方向に自由度を持つ。ここでは、摩擦の影響は考慮していない。高さ3.5 m、幅10.5 m、奥行き3.0 mである。横材間隔は想定する最大礫径1.0 mの半分の間隔で配置している。構造は、326個の節点と433個の弾塑性要素によりモデル化した。表-1に構造部材の諸元を示す。捕捉面の横材のみ鋼管(STK400)、その他の縦材等の部材はH鋼(SS400)の諸元を用いた。ケーブルは、上段ケーブルをPCケーブルのF100T、下段ケーブルをF40Tとして配置した。

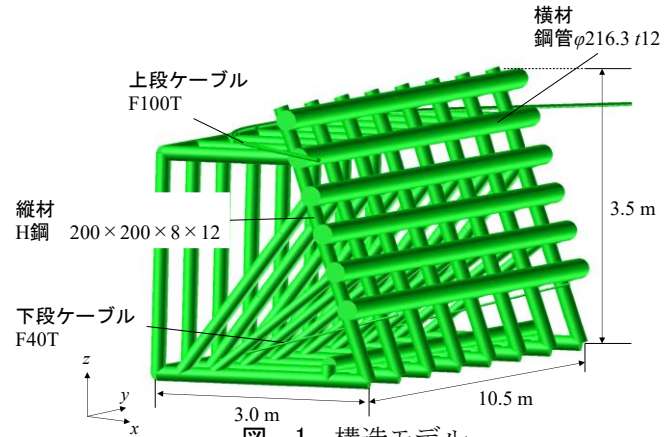


図-1 構造モデル

表-1 部材諸元

	鋼管 φ216.3 t12	H鋼 200×200×8×12	上段ケーブル F100T	下段ケーブル F40T
断面積 A(mm ²)	7.7×10 ³	6.4×10 ³	5.2×10 ²	2.1×10 ²
ヤング率 E(N/mm ²)	2.1×10 ⁵	2.1×10 ⁵	1.9×10 ⁵	1.9×10 ⁵
断面2次モーメント I(mm ⁴)	6.7×10 ⁷	4.6×10 ⁷		
降伏張力 N _y (N)	1.8×10 ⁶	1.6×10 ⁶	8.3×10 ⁵	3.3×10 ⁵
最大張力 N _a (N)	3.1×10 ⁶	2.5×10 ⁶	9.7×10 ⁵	3.9×10 ⁵
降伏モーメント M _y (N・mm)	1.5×10 ⁸	1.1×10 ⁸		
最大モーメント M _a (N・mm)	2.5×10 ⁸	1.8×10 ⁸		
伸び δ(%)	0.21	0.21	0.07	0.07

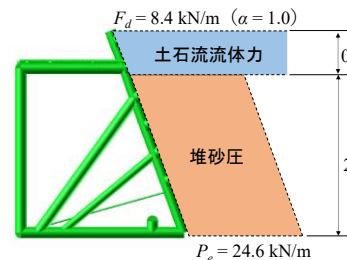


図-2 荷重分布モデル

表-2 渓流諸元

渓床勾配 θ	11.3
計画流出土砂量 V _d (m ³)	1000
一波の土石流により流出する土砂量 V _{dep} (m ³)	1000
流れの幅 B _{ds} (m)	10.5
土石流ピーク流量 Q _{sp} (m ³ /s)	17.5
土石流水深 D _d (m)	0.44
土石流流速 U(m/s)	2.6

図-2に、荷重分布モデルを示す。現行設計⁴⁾に従い、表-2に示す渓流諸元にに基づき算出した。設計荷重は、土石流流体力の作用部分を堰堤頂部に固定して、土石流流体力以下には、高さに応じた堆砂圧を与えるものである。本解析では、土石流流体力の大きさを荷重係数αによって漸増させ、部材の応答を確認した。

3. 解析結果

図-3に、荷重係数に応じた構造モデルの応答を示す。α = 1.0において、すべての部材が弾性域内にある。荷重係数αを漸増させていくと、α = 5.3で下段ケーブルが降伏している。この時点で、下段ケーブル以外の部材は全て弾性域内にある。続いて、α = 6.9において下段

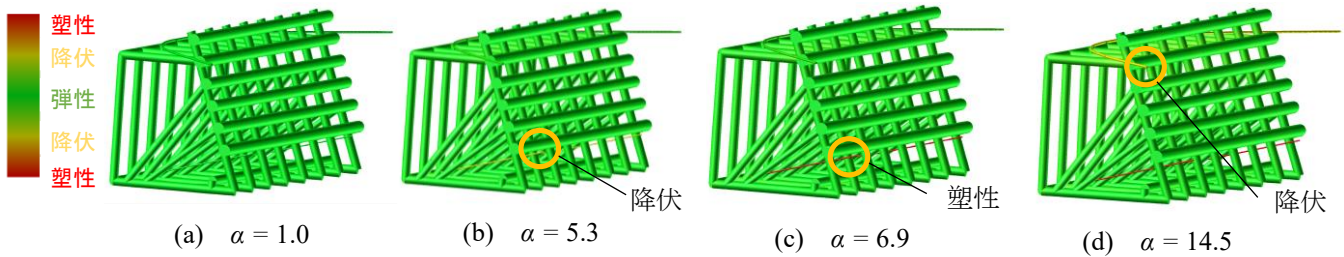


図-3 荷重係数に応じた構造モデルの応答

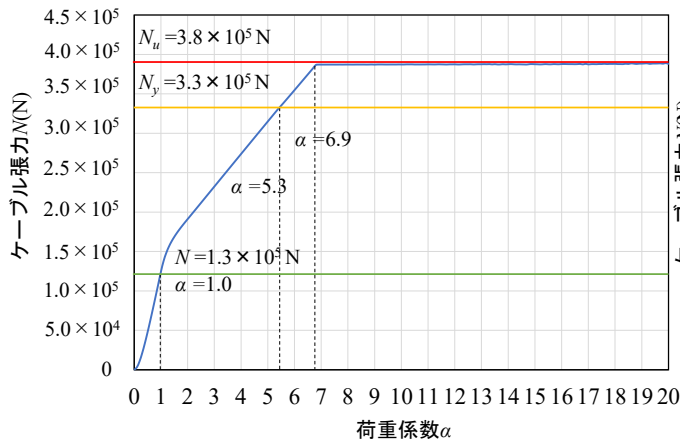


図-4 張力～荷重係数関係（下段ケーブル F40T）

ケーブルが塑性化した。この時点においても下段ケーブル以外の部材は弾性域内にあり、この構造の崩壊は下段ケーブルの破断により生ずるものと考えられる。

図-4 に、下段ケーブルのケーブル張力 N と荷重係数 α の関係を示す。荷重係数 $\alpha = 1.0$ において、ケーブル張力 $N = 1.3 \times 10^5 \text{ N}$ であり、降伏張力 $N_y = 3.3 \times 10^5 \text{ N}$ の約 40% の値である。つまり、現行設計においてケーブルは安全である。荷重係数 $\alpha = 5.3$ で降伏し、塑性化するの $\alpha = 6.9$ であるため、今回のモデルでは、ケーブルにかなりの余裕がある。ここで、荷重係数 $\alpha = 1.0$ までとそれ以降では、グラフの傾きが異なるが、これは、当初は堆砂圧と土石流流体力が同じ増分で作用していくが、 $\alpha = 1.0$ 以降は、土石流流体力のみ増加するためである。

図-5 に、上段ケーブルのケーブル張力 N と荷重係数 α の関係を示す。荷重係数 $\alpha = 1.0$ において、ケーブル張力 $N = 5.8 \times 10^4 \text{ N}$ であり、降伏張力 $N_y = 8.3 \times 10^5 \text{ N}$ の約 7% の値である。また、その他の縦材、横材もこの時点では降伏モーメントの 3% 程の曲げモーメントしか生じていない。 $\alpha = 6.9$ においては下段ケーブルが塑性化するため上段ケーブルが負担する荷重が増加している。上段ケーブルは $\alpha = 14.5$ の時点で降伏し、この時の横材に生ずる曲げモーメントは $M = 1.2 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{mm}$ で降伏モーメント $M_y = 1.5 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}$ の 8%、縦材に生ずる曲げモーメントは $M = 5.11 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{mm}$ で降伏モーメント $M_y = 1.1 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}$ の 46% であり、縦材に生じる曲げモーメントの方が大きい。上段ケーブルが塑性化するの $\alpha = 17.5$ の時点である。ここで、 $\alpha = 15.8$ の時点で下段ケーブルが限界の伸びに達しており、上段ケーブルが塑性化する前に下段ケーブルの破断が生じることがわかる。

以上より、ケーブル式堰堤は下段ケーブル、上段ケー

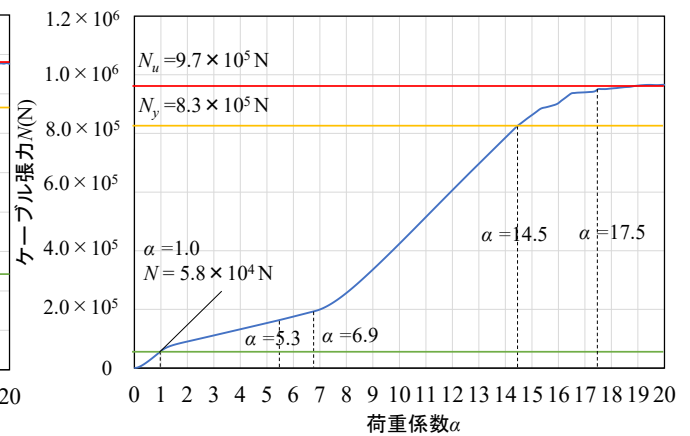


図-5 張力～荷重係数関係（上段ケーブル F100T）

ブル、縦材、横材の順に塑性域に達するものと考えられる。しかし、機能面を考慮すると、横材が先に変形することが望ましく⁴⁾、最適な設計のためには、使用部材について検討していく必要がある。また、ケーブルが主要な部材となっているため、本構造は柔な構造物ととらえ、エネルギーにより設計することの検討が必要である。

4. 結 言

本研究は、弾塑性解析によりケーブル式堰堤の部材応答を照査し、最適な性能評価手法を検討したものである。得られた成果を以下にまとめる。

- 1) ケーブル式堰堤は、現行の設計荷重に耐えられる構造体であると考えられる。
- 2) ケーブル式堰堤の部材は、ケーブル、縦材、横材の順に塑性域に達するものと考えられる。
- 3) 本解析では、摩擦を考慮していない簡易なモデルとなっているため、今後は摩擦を考慮に入れた検討をしていく。

参考文献

- 1) 国土交通省・国土保全局砂防部：無流水溪流対策に係る技術的留意事項（施工案），2022。
- 2) 植野利康，綱川浩章，有澤俊治，小川光生，秋田尚孝，小石芳郎，佐藤敏明，矢野孝樹：狭隘箇所における新たな砂防堰堤整備方法の提案，砂防学会誌，Vol.72, No.5, p.67-73, 2020。
- 3) 財団法人鋼製砂防構造物委員会：新編・鋼製砂防構造物設計便覧，ニッセイエプロ，2021。
- 4) 小松喜治，堀口俊行，香月智：鋼製透過型砂防堰堤の二段階設計に対応する補強効果解析，土木学会論文集 A2 分冊（応用力学）特集号，（応用力学論文集 Vol.22），I_361-I_370, 2019.2。