

九州共立大学工学部 正 員 ○三原 徹治
防衛大学校土木工学教室 学生員 北小路雅倫
" 正 員 石川 信隆

1. 緒言 従来のコンクリートを主体とした治山構造物に代わって、昭和43年頃より鋼材の特徴を生かした鋼製砂防ダムが数多く使用されるようになってきた。特に一層の高さが2~4m程度の枠構造を積層し、その内部に中詰材として砂れきを充填する構造物（枠構造物）は、施工が非常に容易であるため、谷頭部における土石流発生防止や溪岸溪床の浸食防止などに適した構造物として注目されている。しかしながら、土砂の移動形態が土石流となることが予想されることから、設計条件に土石流による荷重を考慮すること、また鋼材の弾塑性領域まで考慮した設計法の適用性について未だ問題点が残っている¹⁾。土石流による荷重については、その性質が依然不確定であるが、大同²⁾は実験による土石流の衝突速度から静的最大荷重を予測する式を提案している。本研究では、この静的最大荷重を設計荷重としたうえで、感度解析を用いた一般化最適性

規準法³⁾による最適弾塑性設計法を開発し、鋼材の弾塑性領域まで考慮した鋼製砂防樁構造物の設計について基礎的な検討を行った。すなわち、砂防構造物の諸元が与えられた段階において、土石流に対し①樁構造物が塑性崩壊しない、②変形を許容変形以内にするとする制約条件のもとで、樁構造物の総重量を最小にするように最適な部材断面を決定するというものである。

2. 設計条件 (1)砂防構造物のモデル化：ここでは、積層化された枠構造物が力学的に軸力が卓越する形状であることからトラス構造として図-1のようにモデル化する。ここに、数字は節点番号、○数字はリンキングされた設計変数番号を示す。また、枠構造物の抵抗能力については中詰材の力と変形の関係が不明確であることから枠組材のみにより外力に抵抗するものとし、中詰材は主としてその重量により構造物の安定性に寄与するものとした。(2)荷重条件：大同の予測式²⁾による静的最大荷重(枠組間隔を2.0m,土石流速度4.0mとしたときの静的最大荷重14.2t/m²)を等分布荷重 q として、また中詰材圧を堤体の高さ方向に分布する分布荷重 q' ($q' = \rho_K h'$,ただし、

ρ は中詰材の単位体積重量 (1.8 t/m^3), K_n は静止土圧係数 (0.4), h' は天端からの距離) としてそれぞれ作用させ (図-2(a))、これらを等価な節点荷重に置換した (図-2(b))。(3) 許容変位量: 砂防構造物の許容変位量は、構造物の重要性和その規模により、表-1のように区分されている¹⁾。ここに、 h は堤体高さ、 u_h は許容水平変位である。ここで

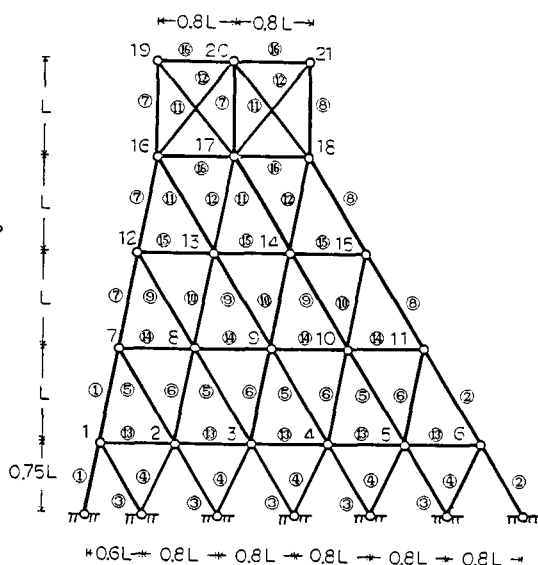


圖-1 構造形式

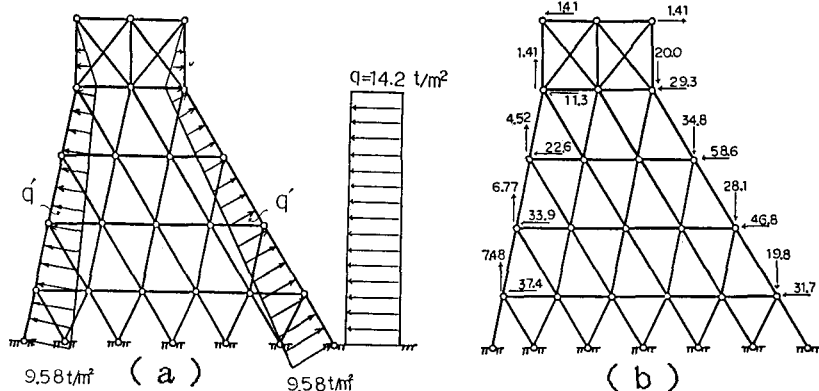


图-2 载荷形式

は、許容変形値が主として中詰材の弾塑性挙動による限界状態に基づいて設定されていることから、枠組材に弾塑性状態を許す本設計法においても準用できるものと考えられるので、設計条件Aの場合を想定し、 $u_a=2.0\text{cm}$ ($u_a/h \approx 0.2\%$)を用いた。

3. 設計基本式 終局荷重レベルにおいて構造物が塑性崩壊することなく、その最大変位が定められた許容変位以下であるよう制約したうえで、構造体積 V を最小にするような各断面量 A_i を決定する最適弾塑性設計問題は式(1)のように表される。ここに、 V は全構造体積、 A_i は設計変数、 u_j は j 番目の節点の弾塑性水平変位、 u_a は許容弾塑性変位 ($=2.0\text{cm}$)、 α_m は m 番目の塑性崩壊モードの塑性崩壊荷重係数、 α_0 は設計荷重係数である。ただし、 j, i は節点変位および設計変数の番号を示す記号、 m は塑性崩壊モードの番号を示す記号、 M は設計において考慮する塑性崩壊モードの総数である。

式(1)において設計変数 A_i の逆数 X_i を新たな設計変数とし、弾塑性節点変位 u_j と塑性崩壊荷重係数 α_m を既知点 X_i^0 まわりにテーラー展開の1次近似をとれば、式(2)に示すような近似設計問題が得られる。ここに、肩字 0 は既知な値を示し、 a_i は設計変数 X_i に対応する係数、 d_j は仮想荷重 b_j が作用したときの仮想弾性変位ベクトル、 C は適合マトリックス、 k は集合剛性マトリックス、 N は降伏面における単位法線マトリックス、 λ は塑性乗数ベクトルであり、肩字 $T, -1$ はそれぞれ転置および逆マトリックスを示す。式(2)は既知点 X_i^0 における構造解析値と感度係数が得られれば、双対法による最適化アルゴリズム³⁾で解くことができ、構造解析、感度解析および最適化を明確に区分したコンパクトな最適化計算が可能である。本法の特色は、相補掃出し法によるホロノミック弾塑性解析と式(3)、(4)に示すような解析的に感度係数を求める感度解析式を用いたことである。ただし、 u は弾塑性変位ベクトル、 k_i, K_i はそれぞれ設計変数 X_i のみに関与する集合剛性マトリックスおよび全体剛性マトリックス、 R_i は設計変数 X_i にのみ関与する塑性容量ベクトルである。

4. 設計結果 式(2)を用い、最小断面積を 10.0cm^2 として最適弾塑性設計を行うと、表-2に示す設計結果が得られる。併記した現行の設計法(静水圧を設計荷重とする許容応力度設計法)による設計値の一例と比較すると、構造体積 V はほぼ同程度でありながら、保有崩壊荷重係数 α および最大終局

変位 $u_{\max}$ はいずれも本法による設計値の方が有利な設計になっていることがわかる。

5. 結言 通常、大規模な土石流の発生確率は低く、このような極限の状態においては、構造物の変形性能を十分に利用したうえで、砂防構造物としての機能を保持する設計がより望ましいものと考えられる。したがって、本研究で開発したような最適弾塑性設計法は将来有用となるものと思われる。

参考文献 1)砂防・地すべり技術センター鋼製砂防構造物研究会:鋼製砂防構造物に関する研究, pp.3~21, 昭和58年12月。2)大同:土石流が構造物に作用する衝撃力, 第2回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集, pp.71~76, 1986。3)Grierson D.E.:Computer-Automated Design of Structures, Lecture Notes in National Defense Academy, 1986。

表-1 設計条件と許容変位 $u_a/h(\%)$

設計条件		$u_a/h(\%)$
A	堤体高さ10m以上かつ重要度が高い場合	0.1 ~ 0.5
B	堤体高さ10m未満あるいは一般の重要度の場合	1.0 ~ 2.0

$$\text{目的関数: } V(A_i) \rightarrow \min \quad (1a)$$

$$\text{制約条件: } u_j(A_i) \leq u_a \quad (j=1, 2, \dots, 21) \quad (1b)$$

$$\alpha_m(A_i) \geq \alpha_0 \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (1c)$$

$$\text{目的関数: } V = \sum_{i=1}^{16} \frac{a_i}{X_i} \rightarrow \min \quad (2a)$$

$$\text{制約条件: } \sum_{j=1}^{16} d_{0ij} X_i \leq u'_{aj} \quad (j=1, 2, \dots, 21) \quad (2b)$$

$$\sum_{i=1}^{16} p_{0im} X_i \geq \alpha'_{0m} \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (2c)$$

$$\text{ただし、} \quad d_{0ij} = \left(\frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right)^0, \quad p_{0im} = \left(\frac{\partial \alpha_m}{\partial X_i} \right)^0, \\ u'_{aj} = u_a - (d_{0j}^T C^T k N \lambda)^0, \\ \alpha'_{0m} = \alpha_0 - 2 \alpha_m^0$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial X_i} = \frac{1}{X_i} (d_j^T K_i u - d_j^T C^T k_i N \lambda) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial X_i} = \frac{1}{X_i} (R_i)^T \lambda \quad (4)$$

表-2 設計値の比較

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	V	α
	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}	A_{16}		$u_{\max}$
本 法	53.1	90.8	13.4	31.9	16.3	62.8	10.0	43.8	41.9	1.01
	18.2	40.5	15.6	23.3	10.0	10.0	14.3	10.0		1.99
現行の設計法	35.9	49.4	13.1	34.8	27.9	20.7	20.7	68.7	43.9	0.66
	10.0	20.7	10.0	20.7	36.3	36.3	30.3	30.3		3.26

$$A_i \geq 10.0(\text{cm}^2), V(\times 10^4 \text{cm}^3), u_{\max}(\text{cm})$$