

対話型最適設計法を用いた鋼製砂防ダムの設計に関する研究

防衛大学校 ○坊原 尚記 防衛大学校 香月 智
 防衛大学校 白石 博文 砂防鋼構造物研究会 中野 博志
 防衛大学校 梶田 幸秀 砂防鋼構造物研究会 肥後野孝倫

1. 緒言

斜面崩壊源頭部に近い上流部における土石流を減勢するため、写真-1 に示すような上流域狭窄部における鋼製砂防ダムの建設が検討されている。この際、資材運搬が困難な地域であるため基礎工の規模を小さくする必要があり、すなわち、地山との接続部における引抜き力が建設コストに影響するため、鋼材量費と同時に引抜き力を低減できる設計が検討されている。そこで本研究は、対話型最適設計支援システムを用いて地山との接続部材に発生する引抜き力と鋼材量低減を同時に満足する最適化について検討したものである。

2. 解析手法

2.1. 解析モデル

図-1 に解析の基本モデルを示す。基本モデルで使用した鋼管は直径500mm、肉厚9mmであり、各段の袖部材と地山との角度を60度とした。本解析では構造物の対称性を利用し、図-1 に示すモデルの左半分のみを要素分割した（節点数75、部材数120）。また、荷重については表-1 の条件より分布荷重を図-2 に示すとおり上流側部材にのみ与えた。

次に、部材断面に発生する最大応力は次式により求めた。

$$\sigma_{i-max} = \frac{N_i}{A_i} \pm \sqrt{\left(\frac{M_{1i} D}{I} \frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{M_{2i} D}{I} \frac{D}{2}\right)^2} \quad (1)$$

ここで、 σ_{i-max} : 最大応力、 N_i : 軸力、 A_i : 部材断面積、 M_{1i} 、 M_{2i} : 第1軸、第2軸周りの曲げモーメント、 D : 鋼管の直径、 I : 断面2次モーメント。

2.2. 最適化手法

本研究の目的関数を、式(2)に示すものとし、遺伝的アルゴリズムを用い、最適形状および部材断面を探索する。

$$Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^k l_i s_i - V} C_i + \frac{1}{\sum_{i=1}^l |F_i - F| C_i} \rightarrow \max \quad (2)$$

ここで、 V : 所望する砂防ダムの体積、 C_i : ペナルティ係数、 l_i : 部材*i*の部材長、 s_i : 部材*i*の断面積、 k : 部材総数、 F : 所望する袖部材の引抜き力、 F_i : 地山に接する袖部材の軸力、 l : 地山に接する袖部材数。

制約条件である式(3)~(5)について、罰金法の考えに基づいて、目的関数に加算した。

$$L_i / D_{max} \leq 1.5 \quad (3)$$

$$\sigma_i - \sigma_{ac} > 0 \quad (4)$$

$$\sigma_i - \sigma_{at} < 0 \quad (5)$$

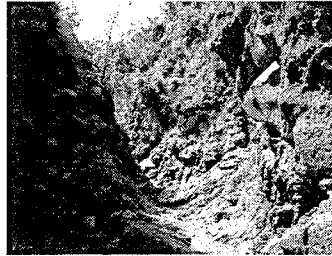


写真-1 狭窄部

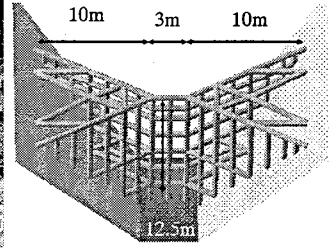


図-1 基本モデル(初期形状)

表-1 設計条件

項目	数値
側面勾配	54°
溪床勾配	14°
平均溪床幅	4.0m
堤体高	12.5m
土石流の水深	0.62m
土石流の流速	3.6m/s
土石流単位体積重量	19kN/m ³
土圧係数	0.3
堆積土砂単位体積重量	15.3kN/m ³
最大礫径	1.4m

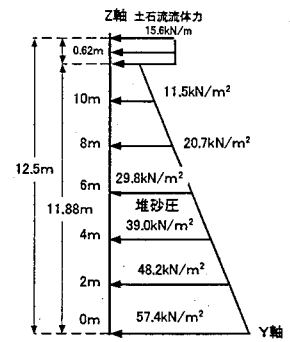


図-2 荷重分布図

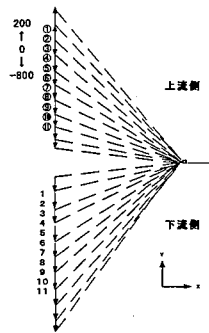


図-3 節点候補位置(Y軸)

表-2 基本モデルの結果

各項目	数値	
鋼管径(mm)	500	
肉厚(mm)	9	
体積(m ³)	6.8	
最大引抜き力(kN)	横材	385kN(6段目)
	縦材	15kN
最大複合応力(N/mm ²)	圧縮	-48.6
	引張	70.8

ここで、 σ_{ac} : 部材の圧縮許容応力 (-185N/mm²)、 σ_{at} : 部材の引張許容応力 (185N/mm²)、 σ_i : 部材*i*の複合応力。

式(3)は各スリット間の間隔は巨礫の最大粒径の1.5倍以下²⁾であることを表し、式(4)(5)は各部材の複合応力は許容応力以内であることを表す。なお、許容応力度 σ_{ac} の算定において座屈強度に対する変更は逐次に人間系によって計算して与えた。

設計変数については、42種類の断面候補および上・下流側ともに11種類の節点位置候補とした。図-3に地山との接続位置を節点位置候補として示す。また、鉛直方向は最上段を除き上下に0cm、30cm、60cm移動させる位置候補を与えた。

3. 設計計算結果

3.1. 初期形状に対する構造解析

直径500mm,肉厚9mmの鋼管を用いて図-1に示す形状を基本モデルとして,構造解析した結果を表-2に示す.最大複合応力は許容応力以下となり,6段目に最大引抜き力385kNが発生している.

3.2. 最適化プロセス

まず最適形状をGAにより探索した.表-3に要求値を与える.なお,GT,LTはそれぞれ要求値より”大きく”または”小さく”ならないことを望むことを示し,SLについては要求値より小さい値でかつ要求値付近であることを”強く”要求することを示す.GAが選択したモデルの応答値を表-4,形状を図-4に示す.表より体積,引抜き力については基本モデルと比較し,それぞれ31%,83%減少している.図より河川流れ方向は上流側の部材が8m下流側に移動したが下流側部材については移動しなかった.また鉛直方向においても各段共に移動しなかった.

次に,GAの選択した形状を基に,人間系により形状修正を行う.具体的には,斜材の部材長は3m以上,節点間距離の小さい2節点は1節点,部材間隔の小さい煩雑な部材は1本にまとめた.人間系による再設計後の形状を図-5に,構造解析結果を表-5に示す.表より体積については部材数を減らしたため再設計前より0.6m³減少したが引抜き力については再設計前より約4kN増加している.

この形状を検索初期値としてGAにより再度最適化を実施した.表-6に与えた要求,表-7にGAが選択したモデルの応答値,GAが選択したモデルの形状を図-6に示す.表より体積については基本モデルと比較すると41%減少し,引抜き力については全て圧縮力となった.

次に設計者は図より上流側と下流側の節点が非常に近い形状となったため2部材を一元化して解析を行ったが,5,6段目の地山に接する部材が許容応力を超えたため許容応力を満足する鋼管径に変更した.その結果を表-8に示す.表より体積については62%減少した.

4. 結言

本研究では,対話型最適設計支援システムを用いることにより,GAが選定した形状に対し,設計者の創造性による修正を加味することにより組み合わせ数 5×10^{45} 通りという膨大な候補の中から,約15時間で設計者の要求を満足する形状を見つけ出すことを示した.この結果,人間系だけの設計と比較し体積については最大62%,引抜き力についてはすべて圧縮力に変える設計となっている.

参考文献

- 1) 長屋秀和, 黒木勇人, 香月智: 対話型トラス構造物の対話型最適設計法への遺伝的アルゴリズムの応用, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.433-442, 1999.3.
- 2) 深和岳人, 香月智, 石川信隆, 山田正: 3次元個別要素法によるオープン型鋼製砂防堰堤の土石流捕捉効果解析, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.97-112, 2003.7.

表-4 応答値(1回目)

各項目	数値	
鋼管径(mm)	406	
肉厚(mm)	7.9	
体積(m ³)	4.7	
最大引抜き力(kN)	65	
最大複合応力(N/mm ²)	圧縮	-174
	引張	108
上流側のスリット間隔(m)	2.1	

表-3 要求値(1回目)

要求	体積	
	LT	3.4m ³
	SL	2.1m
	引抜き力(地山に接する全ての袖部材)	LT 0kN
最大複合応力	圧縮側 GT -185N/mm ²	引張側 LT 185N/mm ²

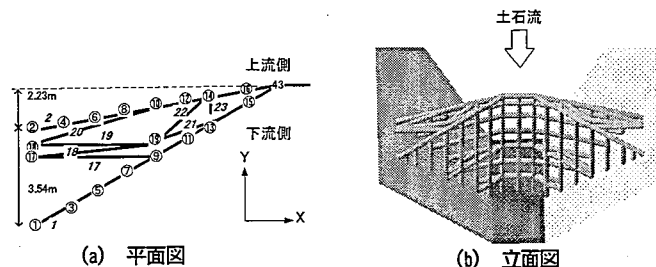


図-4 探索1回目の形状

表-5 解析値(再設計1回目)

各項目	数値	
鋼管径(mm)	406	
肉厚(mm)	7.9	
体積(m ³)	4.1	
最大引抜き力(kN)	69	
最大複合応力(N/mm ²)	圧縮	-168
	引張	99
上流側のスリット間隔(m)	2.1	

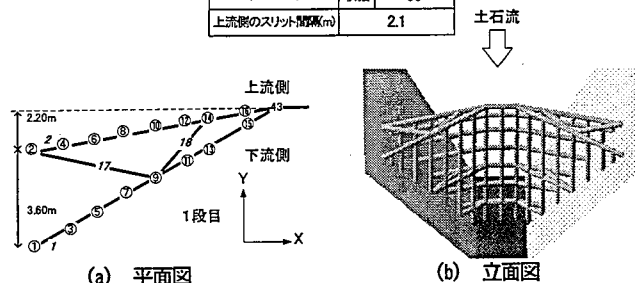


図-5 再設計第1回目の形状

表-7 応答値(2回目)

各項目	数値	
鋼管径(mm)	406	
肉厚(mm)	7.9	
体積(m ³)	4.0	
最大引抜き力(kN)	-89	
最大複合応力(N/mm ²)	圧縮	-175
	引張	81
上流側のスリット間隔(m)	2.1	

表-3 要求値(2回目)

要求	体積	
	SL	3.6m ³
	SL	2.1m
	引抜き力(地山に接する全ての袖部材)	LT 0kN
最大複合応力	圧縮側 GT -185N/mm ²	引張側 LT 185N/mm ²

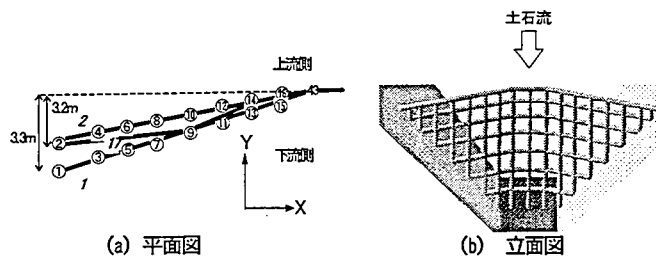


図-6 探索2回目の形状

表-8 解析値(再設計2回目)

各項目	数値		
鋼管径(mm)	406.4	457.2	500
肉厚(mm)	7.9	12.7	12
体積(m ³)	2.6		
最大引抜き力(kN)	-200		
最大複合応力(N/mm ²)	圧縮	-183	
	引張	102	
上流側のスリット間隔(m)	2.1		