

対話型最適設計法を援用した鋼製砂防えん堤の試設計

Study on Interactive Optimal Design of Steel Dam Supported by GA

坊原 尚記*・白石 博文**・梶田 幸秀***・香月 智****・肥後野 孝倫*****・嶋 丈示*****

Naoki BOHARA, Hirobumi SHIRAISHI, Yukihide KAJITA, Satoshi KATSUKI, Takanori HIGONO and Joji SHIMA

* 防衛大学校 建設環境工学科 研究科前期課程学生 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

**修(工) 防衛大学校 建設環境工学科 研究科後期課程学生 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

***博(工) 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 助教授 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

****工博 防衛大学校 建設環境工学科 教授 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

***** 砂防鋼構造物研究会 (〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-7-5 砂防会館)

***** (財)砂防・地すべり技術センター (〒102-0074 東京都千代田区九段南 4-8-21 山脇ビル)

This paper presents an investigation on the design procedure of steel check dam in the gorge point using the interactive optimal design method. The design of check dam at the gorge point is a new design situation for Sabo engineers, so the optimal shape structure has to be found without so much detail constraints or conventional knowledge. In order to discover an optimal shape of steel frame structure under new design back ground, the interactive optimal design can be utilized as a supporting device for giving a human designer a hint of design direction. The design example treated in this study shows very clearly that the supporting potential of proposed interactive optimal design method is high and useful.

Key words : interactive optimal design method, genetic algorithm, gorge point, steel dam, multiobjective design

1. 緒 言

砂防えん堤は、河川内の土砂移動を抑制するために建設されていたが、近年は土石流災害対策機能が重視される傾向がある¹⁾。これは、人口構成の変化に伴って、一部の居住地域が山腹扇状地に拡大したこと等により、土石流災害が頻発しているためである²⁾。一方、通常時の流砂を止めることによる環境破壊も指摘されるようになり³⁾、近年は、写真-1に示すような鋼管の骨組構造の砂防えん堤⁴⁾を建設することが多い。これは、間隙を設けることにより、通常流水時は土砂を下流に流す機能を有しながら、土石流時には先頭部にある巨礫を隙間に詰まらせることにより、土石流を止める機能を付加したものである。写真-1は、前谷川に設置された砂防えん堤であるが、平成16年7月の台風10号時の土石流を効果的に捕捉している。

ところで、従来このような構造物は、比較的居住地域に近い下流域において建設される傾向があった。しかし、平成9年の針原川の土石流災害とほぼ同様な形態で平成15年の水俣川の災害⁵⁾が発生したため、この傾向に変化が生じている。この2つの災害では、土石流の原因となる崩壊地源頭部に被災地が近接しており、川幅が広がった直後に居住地域がある。また、崩壊土砂量が大いいため下流域の数箇所の砂防えん堤だけではとても要求に

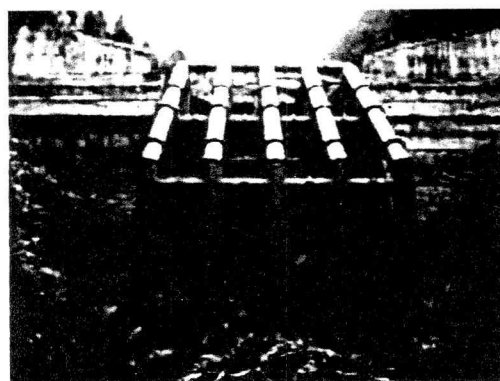


写真-1 前谷川鋼製砂防えん堤

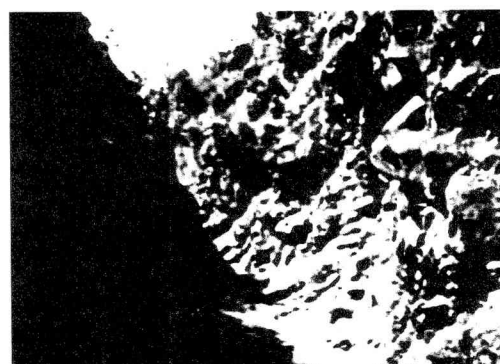


写真-2 狭窄部の例

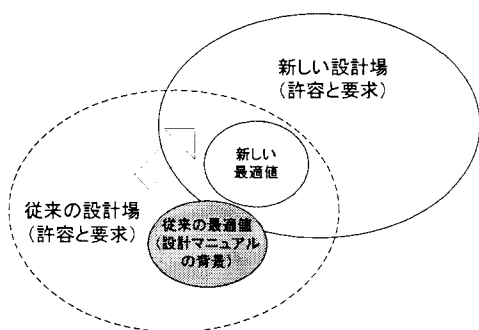


図-1 設計空間の遷移概念図

応じる捕捉土砂量を確保できない。このため、従来は資材運搬が困難であることや、地域ごとに異なる設計条件となり、標準化が難しかったために避けられていた、山地源頭部から扇状地に至る間にある狭窄部に、砂防えん堤を建設する必要性が高まってきた。狭窄部は、写真-2に示すように急傾斜で谷が深く切り込んでいる。このため、土石流の流速は従来の設計条件より大きくなり、土石流の水深が深く、その流体力が大きいが予想される。一方で、その混相流の状態については不確定な部分が多い。すなわち、過去に鋼製砂防えん堤がその設計要領を確立するために行ってきた、建設と改良の繰り返しが再度たどる必要があると考えられる。唯一、現時点で明らかかなことは、従来のように底面のみに反力を期待する構造では基礎工事の規模が膨大になり、山間地における資材運搬能力から考えて、実現性に乏しいということである。このため、側壁からも反力をとることが考えられており、その際にも基礎になるべく引抜き力が生じない方が、基礎工事所要が小さく好ましいと考えられる。

さて、この状況を近年注目されつつある性能設計的観点⁹⁾から眺めると、図-1に示すように、従来培ってきた設計法を支えてきた設計場が大きく遷移することに相当する。設計マニュアル等で明示しているか否かに関わらず、本来、設計作業においては、多目的な要求を考慮しなければならない。しかし、従来の設計マニュアルでは、そのほとんどの事象は暗黙知として計算方法に紐込まれている。この設計の基本的な条件（許容空間や要求）が変化した時には、より大域的な検討が必要とされるが、技術者の人的労力の制約もあり、従来型の試行錯誤法では望ましい結論を得ない可能性がある。このような問題解決のために、最適化ツールを用いることが提案されている⁷⁾。例えば、杉本⁸⁾は、離散的最適設計法を示しており、斎藤ら⁹⁾は、ニューラルネットワークを多目標最適化手法に応用している。また三原・千々岩¹⁰⁾は、解特性に着目した離散的最適塑性設計法に関して分析している。ところで、長屋ら¹¹⁾は、現場の設計における多目的な目的関数を予め特定することは困難であるとの見地から、目的関数や制約条件を対話的に与えて、遺伝的アルゴリズム(GA)¹²⁾によって逆解析を行う、骨組構造の対話型最適設計法を提案している。

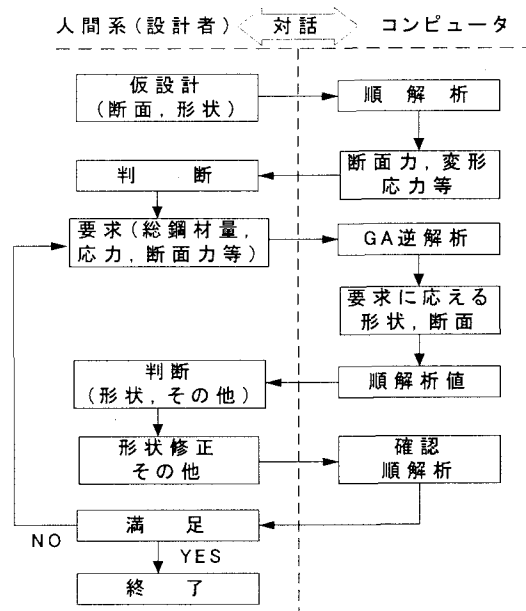


図-2 対話型最適設計の手順

本研究は、対話プロセスの中に技術者が発見的に潜在要望を見出す可能性に期待して、前述の狭窄部における新構造形式の砂防えん堤設計に取り組んだ成果について報告するものである。

2. 対話型最適設計と GA 支援システム

2.1 対話型最適設計

図-2 に本研究で述べる対話型最適設計の手順を示す。ここで、対話型とは人間系には感性的な「好みや包括的判断力」を期待しつつ、コンピュータには高速な数値検索力を期待してこの二者間において要求、検索および修正を対話的にやり、最終的に人間系によって最も望ましいと考える解を発見するシステムである。具体的には、(1) まず、人間系で適当な形状部材を与えた仮設計を行い、コンピュータで順解析を行う。ここで順解析とは、通常の3次元弾性骨組構造解析のことであり、出力として構造に生ずる変位、変形、断面力、応力および総鋼材量が出力される。(2) 得られた出力を人間系によって判断し、出力に対する要望を後述する要領で入力し、コンピュータに逆解析させる。(3) コンピュータは、与えられた検索条件内で最も要求に応える設計（形状、部材断面）を検索し、その最適値の順解析結果とともに、人間系に返す。(4) コンピュータの検索結果は時として、施工性や実現性もしくは美観的に受け入れられないものを検索することがある。逆に、人間系では気付かなかった発想を秘めた設計¹³⁾を示してくる場合もある。これらを包括的に判断し、人間系によって修正する方が効率的な修正を施し

NO.	EXTENSION	TORSION	TENSION
	TORQUE	TENS-STRESS	
4	() 9.393E-01 () 0.000E+00 () 2.759E+04		
	() 0.000E+00 () 2.500E+03		

(a) 順解析出力

NO.	EXTENSION	TORSION	TENSION
	TORQUE	TENS-STRESS	
4	() 9.393E-01 () 0.000E+00 () 2.759E+04		
	() 0.000E+00 (HL) 1.400E+03		

(b) 要求記入

図-3 対話型 GA への要求例(部材 4 の場合)

表-1 要求区分と記号

記号	要求区分
SE	要求値付近であることを‘強く’要求
SL	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
SG	要求値より大きい値でかつ要求値付近であることを‘強く’要求
HE	要求値付近であることを‘望む’
HL	要求値より小さい値でかつ要求値付近であることを‘望む’
HG	要求値より大きい値でかつ要求値付近であることを‘望む’
GT	要求値より小さくならないことを‘望む’
LT	要求値より大きくならないことを‘望む’
ブランク	希望値なし

たうで、続けて検索する場合には(2)からを繰り返す。そうでなければ、微修正結果の順解析を行い、設計基準等でルール化された制約条件を、満足することを確認して設計を終了する。

2.2 対話型遺伝的アルゴリズム(対話型 GA)

対話型遺伝的アルゴリズムは、前述の対話型最適設計を支援できるように工夫した遺伝的アルゴリズムであり、検索エンジンには、クローン排除、相関性をコントロールしたエリート保存戦略など¹⁴⁾を用いている。ここでは、対話性や工学的な設計変数の与え方について述べる。

本研究で取り扱う設計問題をあえて定式化すると次式のようにになる。

$$\text{Objective } V = \sum_{i=1}^m l_i A_i \rightarrow \min \quad (1-a)$$

$$R_N \rightarrow \min \quad (1-b)$$

$$\text{Subjective } \sigma_j \leq \sigma_{ja} \quad j = 1, \dots, n \quad (1-c)$$

$$w_k \leq w_{ka} \quad k = 1, \dots, l \quad (1-d)$$

$$g_{\text{other}} \leq g_{\text{other}-a} \quad (1-e)$$

ここで、 V : 総鋼材量、 l_i, A_i : i 部材の長さ、と断面積、 m : 部材数、 R_N : 地山に接する部材の引抜き力、 σ_j, σ_{ja} : j 部材応力とその許容値、 n : 応力制約数、 w_k, w_{ka} : 鋼管の間隔とその許容値、 l : 間隔制約数、

表-2 断面諸元遺伝子コーディング指定例

(a) 遺伝子コーディング

部材断面	遺伝子番号	参照リスト
1	3	1
2	4	1
3	4	1
4	5	2

(b) 断面リスト

リスト番号	番号	断面積	断面2次モーメント (1軸)	断面2次モーメント (2軸)	ねじ剛性	断面縁数
1	1	99	1.96×10^4	1.96×10^4	1.96×10^4	9.67×10^2
	2	112	2.22×10^4	2.22×10^4	1.96×10^4	1.09×10^3
	3	119	2.33×10^4	2.33×10^4	1.96×10^4	1.15×10^3
2	1	139	1.48×10^4	1.48×10^4	1.96×10^4	1.67×10^3
	2	184	5.48×10^4	5.48×10^4	1.96×10^4	2.19×10^3
	3	214	6.32×10^4	6.32×10^4	1.96×10^4	2.53×10^3

表-3 座標移動量遺伝子コーディング指定例

(a) 遺伝子コーディング

節点番号	遺伝子	参照リスト
3-X	1	1
3-Y	2	3
4-X	1	2
4-Z	3	1

(b) 移動量リスト

リスト番号	番号	移動量
1	1	0
	2	1
	3	2
2	1	0
	2	2
	3	4
3	1	0
	2	3
	3	6

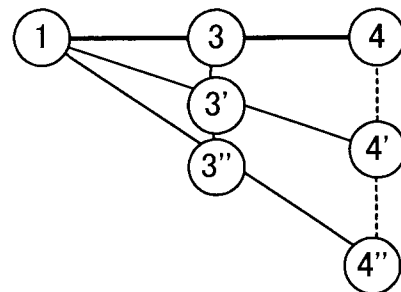


図-4 相関性を有する節点移動と形状

$g_{\text{other}}, g_{\text{other}-a}$: 数式化が困難な制約とその許容値。

この数式化が困難な制約とは、「部材が重なる」あるいは「接合が不経済」などという類のものであり、プログラム化には煩雑であるが、実務設計では無視できないものである。式(1)で表される原問題をなるべく柔軟に反映するとともに、コンピュータ化が適切でない部分は、人間系に任せることを前提として提案 GA システムは、図-3、表-1 のような要求方法を採用している。

図-3(a)は、順解析の表示例である。ここでは、部材「4」の部材力や応力が表示されている。設計者がこの解析値に対して、部材「4」の応力を「1400 以下でありながら、出来るだけ 1400 に近い値が望ましい」と思った場合には図-3(b)に示すように「(HL)1400」と記入する。このような要求を与えることができる項目は、①節点位置座標、②部材長、③変位、④変形、⑤ひずみ、⑥断面力、⑦軸力、⑧総鋼材量と多岐にわたっている。また要求区分は表-1 に示すように、①指定値付近にあること、②そ

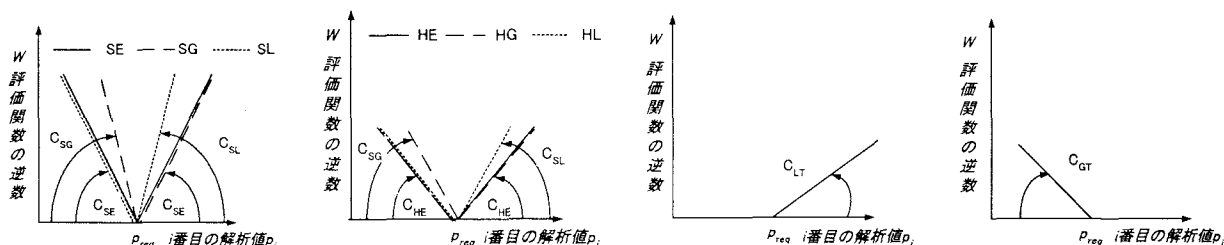


図-5 要求区分と記号

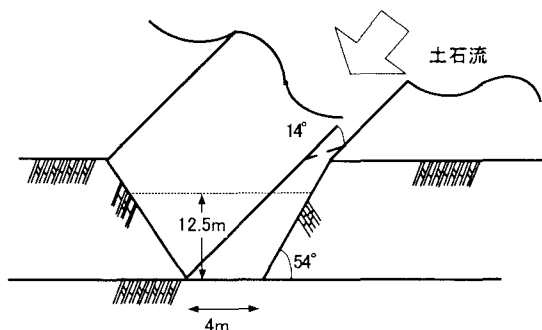


図-6 狭窄部の条件

れより大きい (小さい), ③強く要求するのか望ましい程度で要求するのかの組み合わせで8種類の要求の指定方法がある。

一方, 設計変数の指定については, 遺伝子との関連性によって指定する. 表-2.3にその例を示す. まず, 部材断面の選択については, 候補となる部材の断面候補リストを表-2(b)のように準備する. この際, 大断面な部材群等の区分に基づき, リストを数種類準備しておく. その上で各部材の選択方法を表-2(a)のように指定する. この例では, 部材「1」の断面諸元は, リスト番号「1」の部材表から選択し, どの部材番号のものを選ぶかは, 遺伝子の「3」番目に指定した遺伝子列で決定されることを示している. また部材「2」と「3」は, 同じ遺伝子番号で同じリストを指定しているため, 部材「2」と「3」は常に, 同じ部材断面が指定されるように工夫できる. このような指定により, 構造の対称性を保ちたい時や隣接部材を統一断面にしたい時などの要求が, 容易に指定できる. ちなみに, この例では部材「4」は, 遺伝子も他のものと異なり, リスト番号も異なる. これは, 他の部材とまったく無関係に部材断面が決定され, 例えばリスト「2」の部材が小断面, もしくは鋼種の異なるものとするにより, 不都合な部材が選択されることを防ぐことができる. 表-3には, 節点位置座標の指定例を示す. 初期形状の各節点位置からの移動量をGAに選択させることによって, 形状を変化させることができる. 表-3(a)のように各節点の x, y, z 方向に独立した選択を可能としている. 一方で, 表-3(a)の例では第3節点の x 方向と第4節点の x 方向では同一遺伝子を指定しながらも, 参照リストは別のものを指定している. このように指定

表-4 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

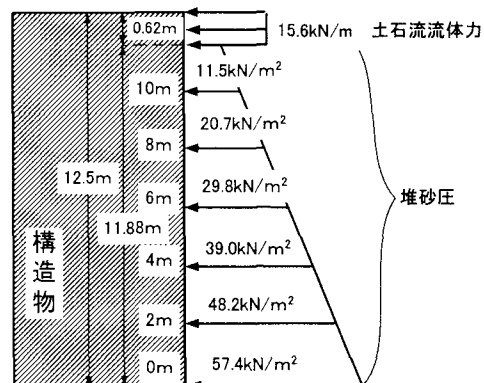


図-7 荷重分布

すると, 形状を図-4に示すように相関性を有して変化させることができる.

さて, このような仕組みを与えると, 一組の遺伝子列に対して一組の形状と断面を有する骨組構造が設計できる. この設計に対して順解析を行うと, その解析値が得られ, 次式の評価関数を最大化するようGAの検索を行う.

$$Z = \frac{1}{W} \rightarrow \max \quad (2-a)$$

$$\text{where } W = \sum_{i=1}^k \left(\frac{p_i - p_{\text{req}-i}}{S_i} \right) \times C_i \quad (2-b)$$

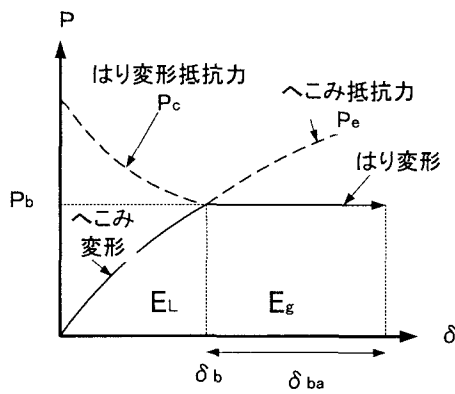
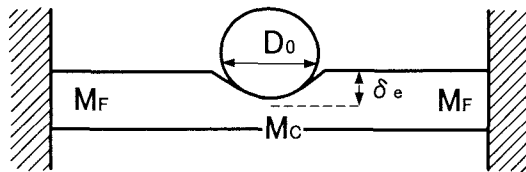
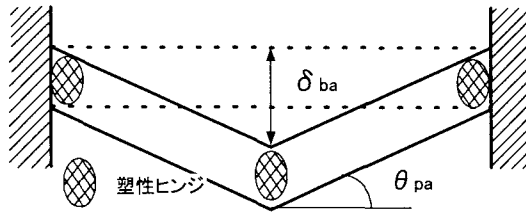


図-8 抵抗力と吸収エネルギー



(a) はり変形前



(b) はりの塑性変形後

図-9 巨礫衝突に対する検討モデル

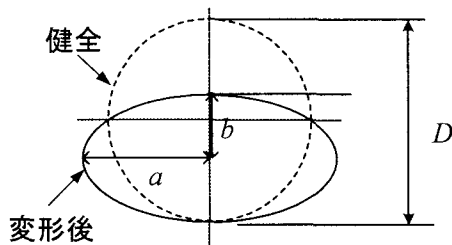


図-10 楕円形モデル

ここで、 Z, W : 目的関数とその逆数、 $p_i, p_{req-i} : i$ 番目の解析値と要求値、 S_i : パラメータ p_i の標準的数値オーダーを除することにより 10^0 オーダーに既定化する定数、 C_i : 罰金係数、 k : 要求総数。

この罰金係数 C_i については図-5 に示すように表-1 で示した区分に対応して、強く望む場合には大きな数値 (C_{SL}, C_{SG}, C_{SE}) を、望ましい場合 ($C_{HL}, C_{HG}, C_{LT}, C_{GT}, C_{HE}$) にはやや緩やかな値を与える。すなわち図-5 に示すように任意の設計パラメータ p_i が希望値 p_{req-i} から離れるにしたがって、目的関数の逆数 W が大きくなる。よって、最適化問題の式(1)の目的関数と制約条件は、式(2)

では制約条件式が $(p_i - p_{req-i})$ として取り込まれており、それぞれの非達成度の線形和として非制約型一目的関数問題に変換されている。なお、式(1-e)に示した数式表現が困難な要求の一部（同一断面であって欲しい等）は、遺伝子コーディングによって配慮できるようになっている。

3. 従来設計

3.1 基本条件

ここでは、提案する対話型最適設計についての知識を有しない技術者によって行われた設計結果¹⁵⁾について述べる。まず、設計に用いられた狭窄部の条件は、図-6 に示すもので、溪床幅が 4m で側壁が 54°の斜面で囲まれたものとする。溪床勾配は 14°で、土石流の流下速度 3.6m/s、水深を 0.62m とする¹⁶⁾。その他の設計基本条件是表-4 に示す。

3.2 設計荷重および許容値

設計に用いた荷重条件および許容値は鋼製砂防構造物設計便覧⁴⁾による。便覧によると、いくつかの荷重条件下で許容応力度設計が行われるが、経験的に断面決定を支配する条件は、①「土石流流体力+堆砂圧荷重」下の許容応力と、②巨礫衝突に対する吸収エネルギー検定の2つであることが知られている。なお、③付随条件として鋼管間隙は最大巨礫径の 1.5 倍以下でなければならない。これは、土石流時に効率よく巨礫を捕捉する条件である。

まず、「土石流流体力+堆砂圧荷重」は図-7 に示すもので、土石流時に逐次に閉塞された土砂による圧力が堤頂部より 0.62m 下まで達しているものとし、上部 0.62m については、土石流の流体力が作用するものとした場合の等価な静水圧である。なお、堆砂圧および土石流流体力の算定式は次式による。

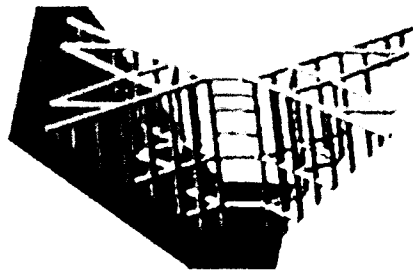
$$p_s = c_e \times \{ \rho_d \times h + \rho_e \times h_e \} \quad (3)$$

$$p_d = \frac{\rho_d}{g} \times h U^2 \quad (4)$$

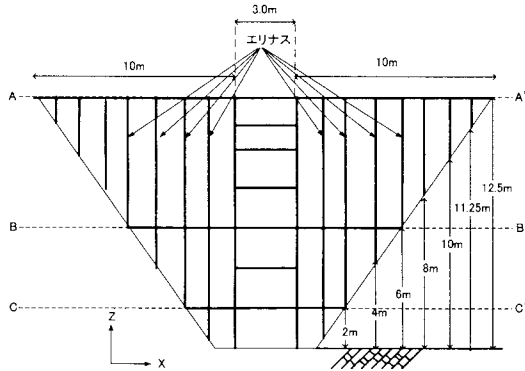
ここで、 p_s : 単位面積当たりの土石堆砂圧(kN/m²)、 c_e : 体積土砂の土圧係数、 ρ_d : 土石流の単位体積重量(kN/m³)、 h : 土石流の波高(m)、 ρ_e : 体積土砂の単位堆積重量(kN/m³)、 h_e : 堆積土砂の深さ(m)、 p_d : 単位幅当たりの土石流流体力(kN/m)、 g : 重力加速度(9.8m/s²)、 U : 土石流の平均流速(m/s)。

設計は、この荷重条件条件下において、許容応力を満足していることが求められる。

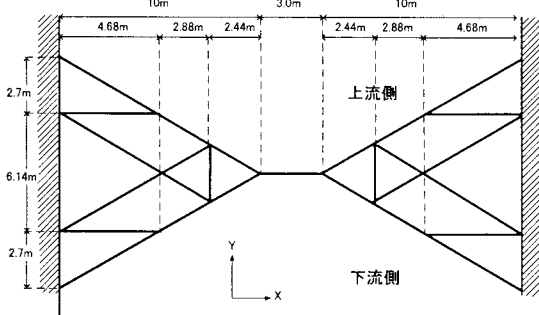
$$\sigma_{i-\max} \leq \sigma_{ia} \quad (5-a)$$



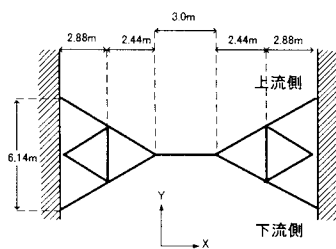
(a) 立体図



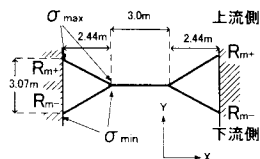
(b) 正面図(x-z)



(c) 平面図(A-A')



(d) 平面図(B-B')



(e) 平面図(C-C')

図-11 従来設計結果

$$\sigma_{i-\max} = \frac{N_i}{A_i} \pm \sqrt{\left(\frac{M_{1i}}{I_i} \frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{M_{2i}}{I_i} \frac{D}{2}\right)^2} \quad (5-b)$$

ここで、 $\sigma_{i-\max}$: 最大応力、 σ_{ia} : 座屈を考慮した許容応力、 N_i : i 部材の軸力、 A_i : i 部材の断面積、 M_{1i} 、 M_{2i} : 断面の第1軸、第2軸回りの曲げモーメント、 I_i : i 部材の断面2次モーメント。

表-5 従来設計諸元

各項目		数値
使用鋼管	鋼管径(mm)	500
	肉厚(mm)	9
材質		STK490
体積(m ³)		6.1
支点部反力(kN)	R _{m-}	532(水平方向)
	R _{m+}	352(水平方向)
最大複合応力(N/mm ²)	圧縮	-181
	引張	167

続いて、巨礫衝突に対する吸収エネルギーに対する安全性は、次式によって検討される。

$$E_R \leq E_L + E_g \quad (6)$$

ここで、 $E_R (= 0.5mv^2)$: 巨礫の運動エネルギー、 m : 巨礫の質量、 v : 巨礫の衝突速度(=土石流流速)、 E_L : 鋼管のへこみ変形による吸収エネルギー容量、 E_g : 鋼管のはり変形による吸収エネルギー容量。

ここで、へこみ変形による抵抗力と吸収エネルギーは、修正エリナス式⁴⁾によって求められる。

$$P_e = \frac{1}{4} \times K \times \sigma_{y,d} \times t^2 \left(\frac{\delta_e}{D} \right)^{0.8} \quad (7-a)$$

$$K = 161 \left(\frac{D_0}{D} \right)^{0.11} \quad (7-b)$$

$$E_L = \int_0^{\delta_e} P_e d\delta_e = \frac{161}{4} \left(\frac{D_0}{D} \right)^{0.11} \times \sigma_{y,d} \times t^2 \left\{ \frac{1}{1.8} \left(\frac{\delta_e^{1.8}}{D^{0.8}} \right) \right\} \quad (7-c)$$

ここで、 P_e : へこみ変形抵抗力、 $\sigma_{y,d}$: ひずみ速度を考慮した降伏応力、 t : 鋼管肉厚、 δ_e : 鋼管のへこみ変形量、 D : 鋼管の変形前直径、 δ_e : 最大へこみ量。

なお、最大へこみ変形量については、図-8に示すようにへこみ変形がはり変形へ移行するバランス点によって与えられる。この基本的な構造モデルは、図-9に示す両端固定ばりであり、巨礫によってへこみ変形した中央点の断面を図-10のように楕円形に仮定したうえで、中央点および両端が全塑性した場合の抵抗力 P_c が、へこみ変形によって増加する P_e とクロスオーバーする荷重 P_b を求める。

$$P_b = P_c = P_e \quad (8)$$

$$P_c = \frac{4}{l_b} (M_F + M_C) \quad (9)$$

ここで、 l_b : はり長さ、 M_F : はり端部健全断面の塑性モーメント、 M_C : 中央点(へこみ後)の全塑性モーメント。

$$M_F = D^2 \times \sigma_{y,d} \times t \quad (10)$$

$$M_C = \frac{4}{3} \times \sigma_{y,d} \times \{ a \times b^2 - (a-b) \times (b-t)^2 \} \quad (11)$$

ここで、 a, b : 楕円形の長径と短径、 $\sigma_{y,d}$: 鋼管材料の動的降伏応力度(1.0~1.2) σ_d 、 σ_d : 静的降伏応力度。

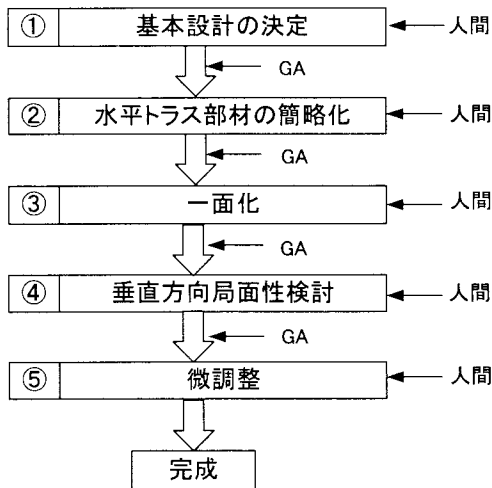


図-12 対話型最適設計の経緯

図-8,9 に示すように、バランス荷重 P_b に達するとへこみ変形は進行せず、はり変形のみによる吸収エネルギーが生ずるものと仮定する。よってはり変形による吸収エネルギー容量は次式となる。

$$E_g = P_b \times \delta_{ba} \quad (12-a)$$

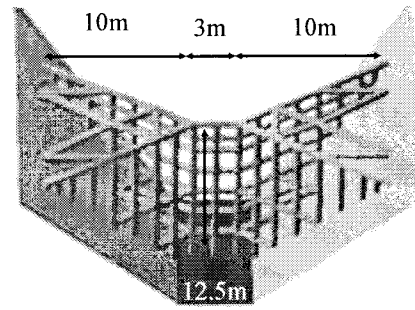
$$\delta_{ba} = \frac{l_b}{2} \theta_{pa} \quad (12-b)$$

$$\theta_{pa} = \frac{1.355}{D/t} \quad (12-c)$$

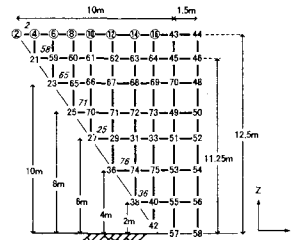
ここで、 θ_{pa} : 許容塑性変形角、 $\delta_{ba} : \theta_{pa}$ から決定されるはり変形の許容値⁴⁾。

3.3 設計結果とその特徴

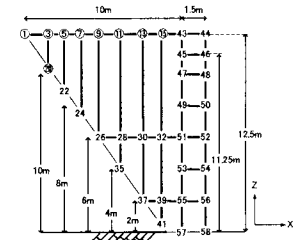
図-11 に従来設計結果の例を示す。また、表-5 に主要諸元を示す。使用鋼管は外径 500mm、肉厚 9mm (材質 STK490) が採用されている。これは現在広く使用されている実績を重視した結果と思われる。水平形状は、図-11(c) に示すように、中央部 3m は一面で両側に向かってトラス状の骨組が、上・下流側に広がる形状となっている。垂直部材は中央部の 3m ではなく、両端に向かって、上下流面ともに 1.17, 1.22, 1.44m 間隔に配置されている。この中央の 3m はコンクリート砂防えん堤のスリットに相当するものであり、基本的にここを流砂が通過するものと考えているため、ここを開口部と呼ぶ。また、水平方向には、図-11(b) に示すように下端から 2m, 6m, 12.5m に水平材が設けられている。また、中央の開口部には下端から 2m, 4m, 6m, 8m, 10m, 11.25m に計 7 本の水平材が設置されている。よって最大間隔は、中央開口部水平材間隔の 2m であり、これは最大礫径の 1.42 倍となっている。この設計の使用鋼材量は、表-5 に示すように 6.1m³(48ton) となっている。この構造に対して、図-7 に示す荷重を与えて応力を求めると、図-11(e) の $\sigma_{\max}$ に示す位置において、167N/mm² となり、 $\sigma_{\min}$ は 181N/mm² となる。これは許容応力 ±185N/mm² に対してほぼフルストレスな設計となる。また反力は図



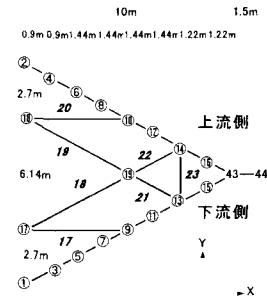
(a) 立体図



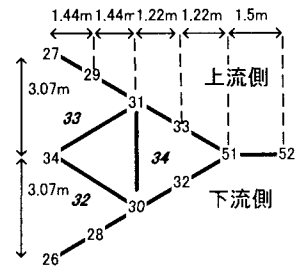
(b) 正面図 (上流側)



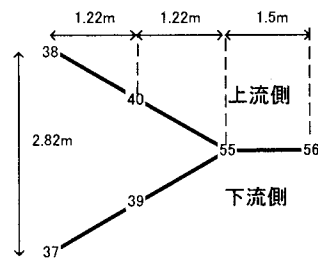
(c) 正面図 (下流側)



(d) 平面図 (1段目)



(e) 平面図 (5段目)



(f) 平面図 (7段目)

図-13 基本モデル

表-6 設計結果 (基本モデル)

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 385
	縦材 15
最大複合応力 (N/mm ²)	圧縮 -49
	引張 71

-11(e) に R_{m+} 、 R_{m-} で示した部分に生じており、それぞれに圧縮力 532kN と引張り 352kN が生じている。さら

表-7 部材断面候補

外径 (mm)	肉厚 (mm)	断面積 (cm ²)	断面2次モーメント (cm ⁴)	外径 (mm)	肉厚 (mm)	断面積 (cm ²)	断面2次モーメント (cm ⁴)
406.4	7.9	98.9	1.96×10^4	508	14.0	217.3	6.63×10^4
	9.0	112.4	2.22×10^4		16.0	247.3	7.49×10^4
	9.5	118.5	2.33×10^4		19.0	291.9	8.74×10^4
	12.0	148.7	2.89×10^4		22.0	335.9	9.94×10^4
	12.7	157.1	3.05×10^4		9.0	155.5	5.88×10^4
	16.0	196.2	3.05×10^4		12.0	206.1	7.71×10^4
457.2	9.0	126.7	3.18×10^4	558.8	16.0	272.8	10.1×10^4
	9.5	133.6	3.35×10^4		19.0	322.2	11.8×10^4
	12.0	187.8	4.16×10^4		22.0	371.0	13.4×10^4
	12.7	177.3	4.38×10^4		9.0	167.1	7.30×10^4
	16.0	221.8	5.40×10^4		12.0	221.7	9.58×10^4
	19.0	261.6	6.29×10^4		14.0	257.7	11.1×10^4
500	9.0	138.8	4.18×10^4	600	16.0	293.8	12.5×10^4
	12.0	184.0	5.48×10^4		9.0	169.8	7.66×10^4
	14.0	213.0	6.32×10^4		9.5	179.1	8.06×10^4
	16.0	241.8	7.29×10^4		12.0	225.3	10.1×10^4
	19.0	281.6	8.29×10^4		12.7	238.2	10.6×10^4
	22.0	331.0	13.4×10^4		14.0	267.7	11.1×10^4
508	7.9	124.1	3.88×10^4	609.6	16.0	293.8	12.5×10^4
	9.0	141.1	4.39×10^4		9.0	169.8	7.66×10^4
	9.5	148.8	4.62×10^4		9.5	179.1	8.06×10^4
	12.0	187.0	5.75×10^4		12.0	225.3	10.1×10^4
	12.7	197.6	6.06×10^4		12.7	238.2	10.6×10^4
	16.0	241.8	7.29×10^4		14.0	267.7	11.1×10^4

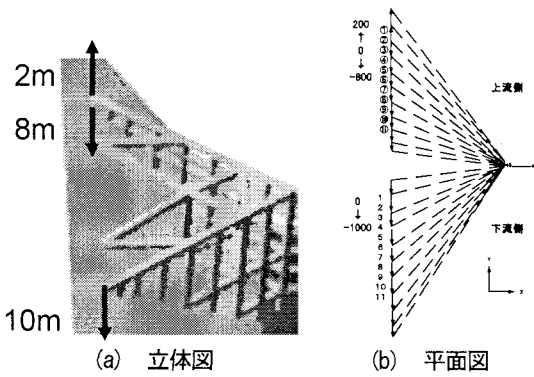


図-14 節点候補位置

に、使用部材では、図-11(b)中にエリナスで示した部材が最も巨礫衝突に対して、大きな変形となり $E_L = 140kNm$ 、 $E_g = 80kNm$ であり、 $E_R (= \frac{1}{2}mv^2) = 2.28kNm$ に対して $138kNm$ 余裕がある。

4. 対話型最適設計結果

4.1 対話過程要約

対話型設計は、このような実砂防構造物の設計経験が全くない学生(第一著者)によって行われた。以下にその過程を詳述するが、対話型設計の経過を要約すると、図-12に示すようになった。すなわち、

- (1) 従来設計結果を参考に基本設計を仮定し、GAにより第1回目の最適化を図る。
- (2) 得られた形状について概観したうえで、端部の水平トラス構造の簡略化を図り、再度GA探索を行う。
- (3) 得られた結果を判断し、上・下流二面構造をやめて一面構造に修正する。
- (4) 得られた形状が水平方向にアーチ形状になっていることにヒントを得て、垂直方向にも形状検討できるようGA決定を補正して検討を行う。
- (5) 最終的に得られた形状について曲面の円滑化を図る微調整を行った上で、設計条件を満足していることを確認し、設計を終了した。

表-8 GAパラメータ

項目	数値
シュミレーション世代数	100
基本線列人口サイズ	100
エリート集団サイズ	20
交叉確率(%)	70
突然変異率(%)	5
エリート交叉率(%)	30
臨界相関係数	0.95
要求	体積 LT $3.4m^3$
	上流側のスリット間隔 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 $185N/mm^2$

表-9 第2回設計要求値

要求	体積	SL $3.6m^3$
	上流側のスリット間隔	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 $185N/mm^2$

4.2 基本設計と検索条件

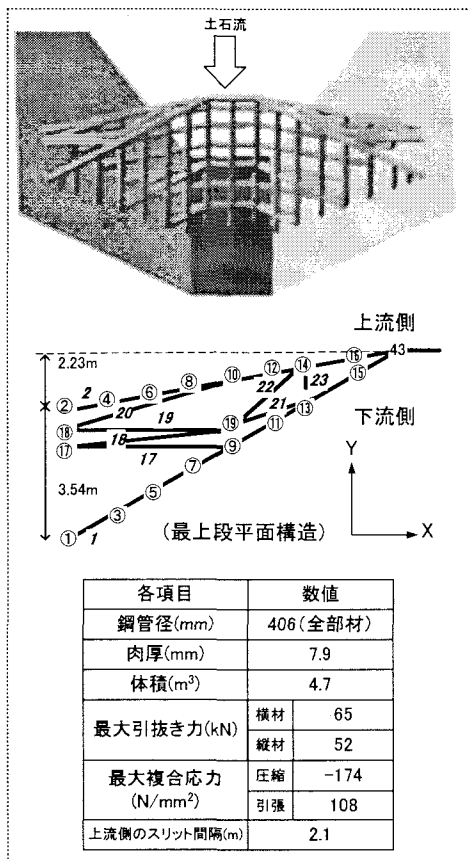
(1) 基本設計

最適設計を開始する基本設計は、図-11で示した従来設計でもよいが、水平部材の間隔に関する選択自由度が少ないと考えて、部材数を増やした図-13のものをを用いた。ちなみに、垂直部材の間隔よりも水平部材による間隔の方が土石流阻止に有効であることも知られている¹⁷⁾。この設計の諸元は、表-6に示すものであり、総鋼材量は $6.8m^3(53ton)$ と従来設計よりも大きくなるが、最大応力は引張 $71N/mm^2$ 、圧縮 $49N/mm^2$ と小さく、横材に発生する最大引抜き力も、 $385kN$ と従来設計よりも小さい。

(2) 設計変数

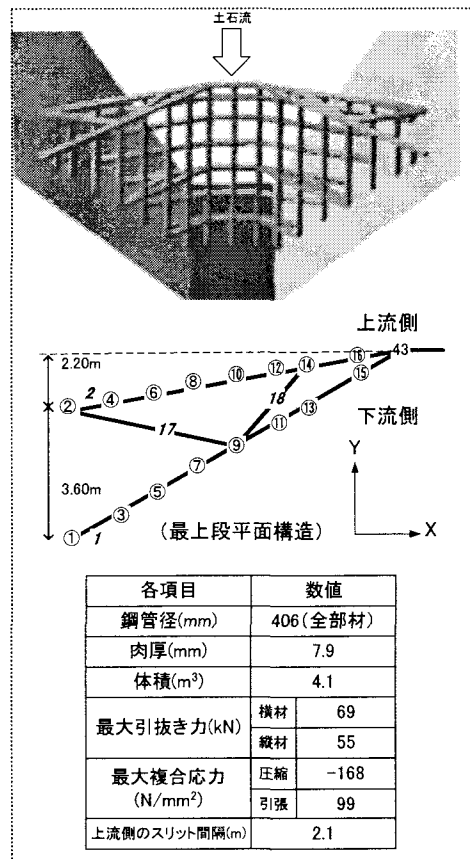
設計変数として与える鋼管の候補は表-7に示す径 $40.6cm \sim 60.9cm$ の42種類である。なお、解析は水平方向の左右対称性を考慮して解析を行うので、自動的に鋼管の対称性は考慮されている。また、施工性等の観点から、連続する垂直材は同一断面に、表-2で示した方法によりグルーピングを行っている。形状については、図-14に示すように水平トラス構造の上下流端の角度が、11種類に変化するよう候補を与えた。なお、この場合には、上端水平トラスの形状変化に伴って、常に垂直材は垂直であるよう全体形状は保たれる。また、上・下流側の連続する水平材の直線性も保たれる。この決定によって設計候補数は 2×10^{27} となり、極めて膨大である。

GAのパラメータ諸元決定は表-8に示すものであり、100個体で100世代まで探索する。要求事項は総体積を $3.4m^3$ 以下とし、支点の引抜き力が $0kN$ となることを要求する。その他は、一般設計に求められる要求条件を与えた。なお、この設計変数の範囲については実務者の情報を得て実行可能範囲の中から設定した。



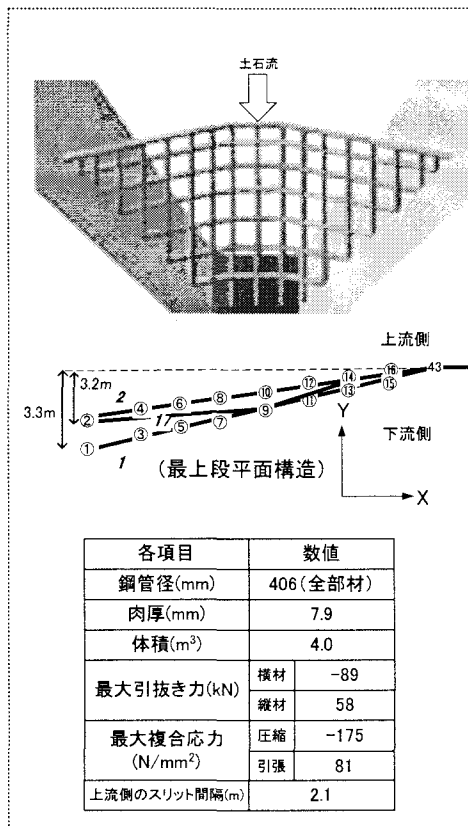
(a) GA 設計結果

人間系修正



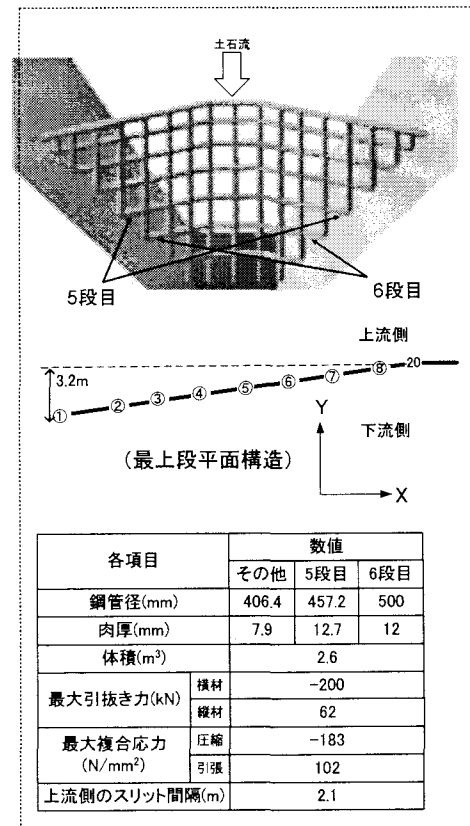
(b) 人間系による修正後

図-15 1回目 GA 探索と修正



(a) GA 設計結果

人間系修正



(b) 人間系による修正後

図-16 2回目 GA 探索と修正

表-10 第3回設計要求値

要求	体 積	SL 3.0m ³
	上流側のスリット間隔	SL 2.1m
	引抜き力(地山に接する全ての部材)	LT 0kN
	最大複合応力	圧縮側 GT -185N/mm ² 引張側 LT 185N/mm ²

表-11 修正エリナス式による断面照査

各項目	数値
鋼管径	406mm
肉厚	7.9mm
礫衝突によるへこみ量	29mm
鋼管の吸収できるへこみ量	380mm
局所変形のみによる吸収エネルギー E_L	230kN・m
はり変形のみによる吸収エネルギー E_g	32kN・m
巨礫運動エネルギー $ER=(1/2mv^2)$	2.3kN・m

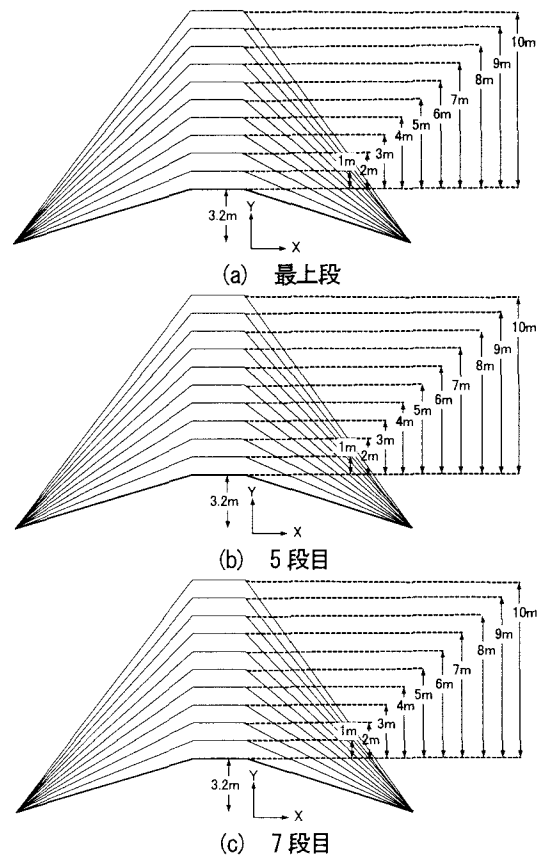
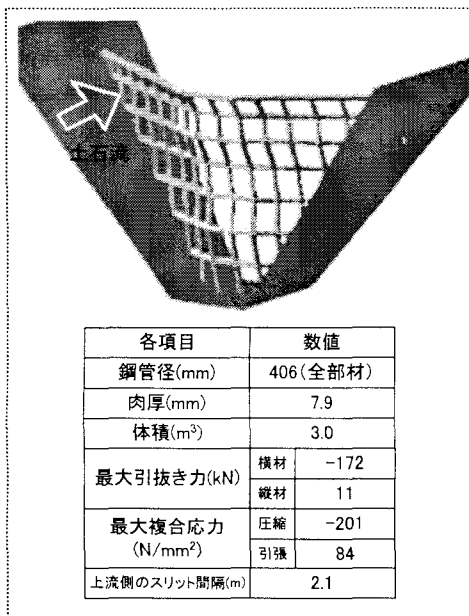
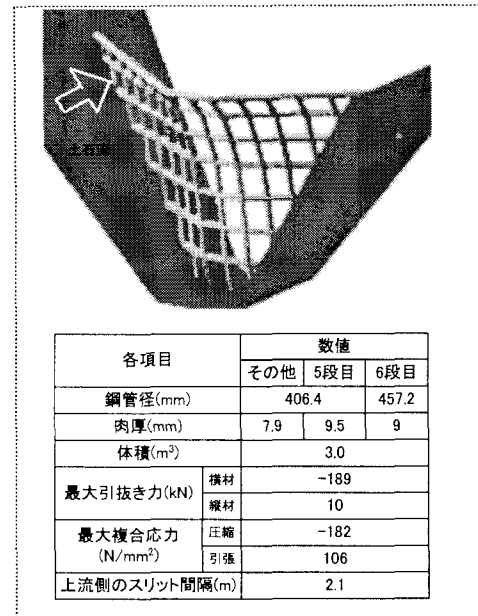


図-17 設計変数候補



(a) GA 設計結果



(b) 人間系による修正後

図-18 3回目 GA 探索と修正

4.3 対話設計1回目

図-15(a)に1回目のGAによる最適設計結果を示す。総鋼材量は4.7m³と基本設計の31%減量しており水平方向の形状が細身で、上流側に若干突き出すような形状となっている。また、引抜き力も65kNと基本設計よりも

小さくなっている。ここで、最上段の水平骨組構造を見ると、斜材が乱雑に配置されており、力学的な合理性を感じさせない。これらの内部部材の軸力を確かめると非常に小さく、力の流れが乱れていることがわかる。そこで、人間系によって図-15(b)のように水平骨組構造の斜材を簡素化した骨組形状に修正した。ちなみに、このようなトポロジーな設計変更は、GAに組み込むには高度

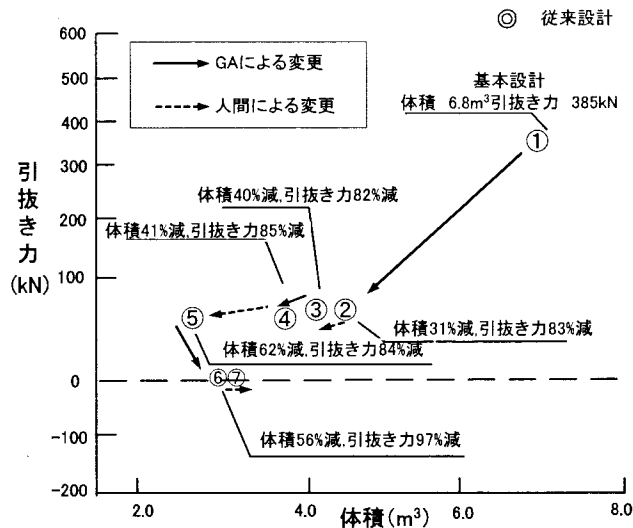


図-19 体積と引抜き力(縦材・横材)の関係

な技術が必要であるが、人間系にはやさしい操作であり、対話型最適設計の利点がある。その上で、表-9 に示す要求のもと、再度 GA 探索を行った。

4.4 対話設計 2 回目

図-16 に第 2 回目の GA による探設計結果を示す。総鋼材量は 4.0m^3 と、さらに 0.1m^3 の減量がなされており、引抜き力は -89kN と圧縮力に変わっている。その水平面形状を見ると、さらに上・下流面が近接して、ほぼ一面に重なるようになっており、事実上このような結合は不可能である。また、中央部が上流側に突き出したアーチ形状に近づいている。このことはアーチ形状の有意性を示唆しているに気づかされた設計者(学生)は、図-16(b)のように一面のアーチ形状に形状を修正した。すると、全鋼材量は 2.6m^3 と 62% 減量でき、部材に発生する最大引抜き力も -200kN と圧縮になっている。なお、地山に接する 5・6 段目の横材は許容応力を超えたため、許容応力を満足する直近上位の鋼管径に変更した。

4.5 対話設計 3 回目

図-16 の設計結果を眺めると、基本的にアーチ形状が反力の引抜き力低減に効率が高く、一方で、底面における支点反力に引抜き力が残っていることがわかる。底面においても少しでも引抜き力が小さくなれば、基礎工の要求性能が低減される。そこで前段階まで垂直方向の形状を直線として固定していたことを、曲面的な形状が探索できるよう図-17 に示すような形状候補に改めて与え、表-10 に示す要求のもと、再度 GA 探索を実施した。

その結果、図-18(a) に示す形状が得られた。総鋼材量は 3.0m^3 と 0.4m^3 増加している。ただし、形状はやや凹凸があり、形状の滑らかさに欠けているので、人間系によって図-18(b)のように修正した。これにより、鋼材量は保ったうえで、垂直材の支点反力も 10kN の引抜き力に軽減した最適値が得られる。なお、地山に接する 5・6 段

目の横材は許容応力を超えたため、許容応力を満足する直近上位の鋼管径に変更した。

最後に GA の選択した断面を修正エリナス式で照査した。解析結果を表-11 に示す。表より最小断面においても十分巨礫の運動エネルギーを吸収できることがわかる。

4.6 体積と引抜き力の関係

図-19 に基本設計から最終設計までの設計過程において、体積および引抜き力が改善されていく過程を示す。ここで、引抜き力については①～③までは横材に発生する引き抜き力を示しており、④以降については縦部材に発生する引抜き力を示している。基本設計①～②への過程で引抜き力の減少が最も著しい。その後の②～⑤までは GA や人間系の相互の努力によって鋼材量の軽減が著しい。これは、トポロジーな骨組み構造の変更に人間系が関与したからである。最終的に、最適構造モデル(⑦)においては従来の技術者による設計に比して、体積で 56%、引抜き力で 97% 減少した解が得られる。なお、この最適設計と途中の設計(⑤)では、垂直材の引抜き力と総体積がトレードオフの関係となっており、また曲面形状によって施工の難度が高まることも考えられる。このため、どちらが現場の状況により良く適合するかについてはケースバイケースとなる。

5. 結 言

本研究では最適化手法に遺伝的アルゴリズムを用い、これに対話型の最適設計支援システムを導入し、短時間で設計者の要求に近い最適形状を得ることが可能な最適設計を、狭窄部における鋼製砂防えん堤に対して行ったものである。GA を援用すると、 2×10^{27} という膨大な組み合わせ数の中で最適値の検索がなされるので、鋼材量において 56% も軽減した設計を見つけ出すことができる。また、人間系を関与させることによって発見的にトポロジーな設計骨組構造変更を実行させることができる。

今回得られた最適形状は、常識的に経済的とされるアーチえん堤の形状を模したものとなったが、対話的に設計する過程において、熟練された構造力学的知識を有しないものであっても、「要求性能」を意識しつつ設計すると、そのような解を見出す発見性および設計結果に対する説明力を育てる効果もあるようである。なお、本研究で求められた設計結果はある特定の要求条件下の最適値であることは付言しておく。

なお、ここで使用したツールは、手作りのため使用利便性が劣るなどの問題があるので、今後改良の必要がある。また、最適化に伴って現行設計基準では評価できない新しい検討事項も生ずる場合があり、その点については今後の検討事項である。

参考文献

- 1) 塚本良則, 小橋澄治: 新砂防工学, 朝倉書店, pp.84-88, 2002.10.
- 2) 塚本良則, 小橋澄治: 新砂防工学, 朝倉書店, pp.12-16, 2002.10.
- 3) 北海道新聞函館版: 調査報道記事, 2003.8.30.
- 4) (財)砂防・地すべり技術センター 鋼製砂防構造物委員会: 鋼製砂防構造物設計便覧, 平成 13 年
- 5) 高橋保: 土石流の機構と対策, 近未来社, pp.324-327, 2004.9.
- 6) 鹿島建設土木設計本部: 耐震設計法 性能設計 新・土木設計の要点, 鹿島出版会, 2003.8.
- 7) 土木学会構造工学委員会: 合意形成・評価手法に関する研究小委員会報告書, 2003.12.
- 8) 杉本博之: 近似の概念を利用したトラス構造物の離散的最適設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.432/I-16, pp.79-88, 1991.7.
- 9) 斎藤進, 堀井健一郎, 依田照彦: 多目標最適化手法へのニューラルネットワークの応用, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.277-289, 1996.4.
- 10) 三原徹治, 千々岩浩巳: 解特性に着目した離散的 2 目的最適塑性設計法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.559-568, 1994.3.
- 11) 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.
- 12) 吉田均, 杉本博之: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997.9.
- 13) Pritter Adriaans, Dolf Zantinge (山本英子, 梅村恭司訳): データマイニング, 共立出版, 1998.6.
- 14) 長屋秀和, 香月智, 佐藤紘志, 諏訪政雄: 多様性エリート保存戦略とクローン排除戦略による遺伝的アルゴリズムの特性に関する考察, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.333-344, 2000.3.
- 15) 中野博志, 小野源一郎, 肥後野孝倫, 石川信隆, 嶋丈示: 狭窄部を利用した鋼製砂防えん堤の形状に関する一考察, 平成 16 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.356-357, 2004.5.
- 16) 建設省土木研究所: 土石流対策技術指針(案)に基づく設計例, 平成 2 年
- 17) 水野秀明, 水山高久, 南哲行, 倉岡千郎: 個別要素法を用いた鋼管製透過性砂防ダムの土石流捕捉効果に関するシミュレーション解析, 砂防学会誌, Vol.52, No.6, pp.4-11, 2000.3.

(2005 年 4 月 15 日受付)