

GAによる仮設鋼矢板土留工の設計最適化に関する研究

杉本博之*・山本洋敬**・笹木敏信***・
満尾 淳***

土留・締切工として最も良く用いられている仮設鋼矢板土留工の設計を、多目的離散的最適化問題として定式化し、その問題にGAを応用する設計法を提案した。設計変数は、切梁の設置位置とし、それを施工の精度を考慮して離散的な量とした。目的関数は、総工費最小、各部材の応力度に関する余裕が最大、および切梁の鉛直間隔が最大という3種類の関数を考慮した。また、縦断方向の土層・土質の変化にも対応できるように考慮した。いくつかの設計計算例により、本研究の手法の実用性を説明している。

Key Words : retaining wall structures, discrete multi-objective design, GA, growth operator, longitudinal change of geologic conditions

1. まえがき

一般に構造設計の最適性を検証する手法は、古くから様々な分野で応用されてきており、多くの実績を挙げている。しかし、土木工学の分野に限った場合、このような最適化手法は、橋梁の設計など一部の構造物への適用に限られ、他の土木構造物、土木施設に対して実用化された例は比較的少ない。その理由としては以下のようなことが考えられる。

- ① 土木構造の設計は、既製部材の組合せ等離散的な要因を含むことが多く、関数の1次の微係数を用いる従来の数値計画法の適用が困難な場合が少なくない。
- ② 目的関数の設定すなわち最適性の評価を行うための指標の設定が困難な場合がある。

著者らは、近年離散的最適化問題の手法として注目を集めている遺伝的アルゴリズム(GA)を用いることにより、一般的な土木仮設構造物である土留・締切工の設計最適化に関する研究を進めてきており、GAを土木構造物の設計に適用することの妥当性を検討している。

土留・締切工は、開削トンネル・立坑・建築根切りなど、建設分野で頻繁に使用される仮設構造物である。これらの設計は、各公共企業体が定める設計基準に沿って設計が行われ、設計者は設計フローにしたがって、各部材の応力照査を行い、使用部材の組合せ・配置等を決定する。

実際の設計では、部材寸法・配置などは現場条件等の施工性あるいは経済性を勘案した上で、設計者の知識・経験に基づいて初期設定され、トライアルアンドエラー

によって最終的に決定される。したがって、各部材は応力的に余裕のある配置・組合せになっているが、その最適性について照査されることは皆無といってよい。しかし、設計および施工の合理化を考えるならば、採用している設計が経済的・力学的な最適解に対してどのような位置にあるかを知ることが重要である。

筆者らは、土留・締切工の中で最も良く用いられる仮設鋼矢板土留工を取り上げ、目的関数として総工費に着目して単一目的的最適化問題としてその最適化に関する研究を進めてきた^{1)~3)}。しかし、仮設構造物の設計は、①同程度の総工費であれば、各部材の応力度の余裕は多い方がよいのではないかと考えられること、②作業性を考えれば、切梁、腹起しはその間隔を広く配置した方が好ましいこと、③施工に要する総工費はできるだけ安価であること、といった条件が考えられるので、これらをすべて考慮した目的関数の設定が必要となる。さらに、実際に施工を行う場所は縦断方向で土質条件が様々な変化しているため、縦断方向の条件の変化にも対応できる目的関数の設定が必要となる。

そこで本研究では、仮設鋼矢板土留工の設計を多目的離散的最適化問題としてとらえ、部材の応力度の余裕、施工性の向上、および経済性を同時に評価することのできる目的関数を設定し、さらに縦断方向に変化する土質条件を考慮できる、より実際の設計最適化プログラムの開発を試みたので、2,3の計算例と共にここに報告するものである。

2. 仮設鋼矢板土留工の設計

仮設鋼矢板土留工は、河川の締切工事や地下構造物の構築などに頻繁に用いられる工法である。

この構造は、掘削深さが15m以下で、変形量を求める必要がないものについては、一般に慣用法と呼ばれる方法により設計される。

* 正会員 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)

** 学生会員 室蘭工業大学大学院工学研究科博士前期課程建設システム工学専攻

*** 正会員 東急建設株式会社施工本部土木部土木設計部

慣用法による一般的な仮設鋼矢板土留工の設計は、鋼矢板からなる土留壁の設計と切梁・腹起しからなる支保工の設計に分けられる。

具体的には土留壁の設計は、作用土圧・水圧に対して土留壁が転倒しない根入れ長（掘削底面以下の土留壁の長さ）と外力に耐え得る断面を決定するものである。土留壁断面の計算は、支保工で拘束された区間を単純梁として作用土圧に対する断面力を求め、応力計算を行う。

支保工の設計は、土留壁・支保工断面が応力的に有利になる位置を探し、その位置で作用する土圧・水圧・温度応力などの外力に対して支保工部材の断面を決定するものである。支保工に作用する断面力は、下方分担法により支保工に働く主動土圧・水圧による荷重を配分して求められる。

これらのように、土留壁の計算は支保工で拘束された区間を単純梁とし、また支保工の計算は下方分担法を用いて計算するため、この構造系は静定構造とみなすことができる。つまり、水平および鉛直方向の切梁配置さえ決めれば各部材に作用する断面力が決まることになり、土留壁長および各部材の使用断面は、切梁配置に対して従属的に決定できる。

以上のような慣用的な設計法に対し、仮設鋼矢板土留工の切梁配置の決定に最適化手法を用いる設計法を、本研究では提案するものである。

なお、仮設鋼矢板土留工の解析法、使用鋼材の設置位置に関する規定、許容応力度の計算、応力度の照査式などは首都高速道路公団の「仮設構造物設計基準」⁹⁾に準拠している。

3. 仮設鋼矢板土留工の離散的最適設計

(1) 最適設計の考え方

掘削深さが15.0 m以下の場合の仮設鋼矢板土留工の計算には、前記のように下方分担法が用いられる。このため、切梁設置位置さえ決めれば、部材の断面に関係なく各部材の設計断面力が計算され、土留壁（本研究では鋼矢板）の長さ、および定められた応力に関する条件を満足する断面は自動的に決定されることになる。

この時、各部材の断面は、集成部材ではなくそれぞれ既製の鋼材の中から選択されるのが一般である。仮設鋼矢板土留工の総工費は、全損料と施工費の和として算出されるが、これらはどちらも後記のように使用される鋼材の重量と密接な関係がある。そのため、総工費は切梁設置位置に関して非連続な関係を持つことになる。

切梁設置位置は、任意の値を取り得る（連続量）が、実際の施工の精度を考えると、余り細かい単位の値はほとんど意味がないと考えられる。実際的には、たかだか20 cm刻みの値が出れば十分ではないかと考えられる。

結局、本研究の仮設鋼矢板土留工の設計問題は、設計

変数が離散量で、その目的関数が設計変数に関して非連続な関数から構成される無制約の離散的最適化問題として理解される。

このような問題に対して、1次の微係数を用いる従来の数理計画法は、その適用が困難で、かなり人為的な工夫を必要とした^{1),2)}。しかし、最近注目されているGAは、このような離散的要因を持つ設計問題に適していると考えられるので、本研究では、このGAの応用を試みた。

当初は、上記の総工費のみを目的関数として研究が進められた。この設計問題は、切梁の鉛直および水平方向の設置位置の組合せ最適化問題となるが、いくつかの計算例で、同一の総工費の値に対して複数の組合せがあることがわかった。その複数の組合せは、当然応力に関する照査式はすべて満足しているが、余裕が少ない状態で満足している場合と余裕を持って満足している場合とがあり、更に、切梁の鉛直方向の間隔がばらばらな場合と、ほぼ同じ間隔の場合があることがわかった。

同程度の総工費であれば、部材の応力度の余裕が大きい方が望ましく、また、切梁の間隔もできるだけ広い方が、施工性を考えると好ましい。

そこで、総工費最小化、応力度の余裕最大化、更に切梁間隔最大化のそれぞれを目的関数として、複数の目的関数を有する最適化問題⁹⁾として新しく定式化した。

更に、施工区間が長い場合は、縦断方向に土層・土質条件が変化するのが一般的である。その場合は、切梁の鉛直方向の位置は全区間同一とし、他の値は、各土質条件毎の値を用いるとして、縦断方向の土層・土質条件の変化も考慮して目的関数を設定した。

以下に、本研究の最適化問題、および各目的関数を説明する。

(2) 離散的最適化問題の定式化

本研究の多目的離散的最適化問題は、次のように表すことができる。

$$\text{目的関数: } P = P_1 + P_2 + P_3 \longrightarrow \min \dots \dots \dots (1)$$

制約条件: なし

$$\text{上下限值: } I_i^{\min} \leq I_i \leq I_i^{\max} \quad (i=1 \sim n+1) \dots \dots \dots (2)$$

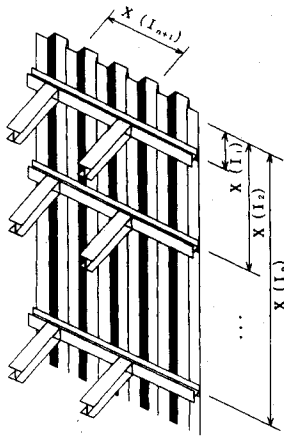
$$\text{設計変数: } \{I\} = \{I_1, I_2, \dots, I_{n+1}\} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 P は設計の複数の工学的価値を定量化する目的関数、 P_1 は総工費に関する目的関数、 P_2 は応力度の余裕に関する目的関数、 P_3 は施工性に関する目的関数である。これらの詳細は、次節以降で説明される。 n は切梁段数、 I_i は設計変数 i の値であり、 I_i^{\max} 、 I_i^{\min} はそれぞれ設計変数 I_i の上下限值である。

本研究の目的関数としては、式(1)の3項目を考慮した。実際には、掘削終了後に構築する構造物の形状や切梁解体時の安全性なども切梁配置に影響すると考えられるが、こからは必要があれば設計変数のコーディングあ

表一 切梁・腹起しの使用断面

H形鋼の種類	断面積 (cm ²)	単位重量 (kg/cm)	断面2次半径 (cm)		断面係数 (cm ³)
			(強軸)	(弱軸)	
① H-200	63.53	0.499	8.62	5.02	472
② H-250	92.18	0.724	10.8	6.29	867
③ H-300	119.8	0.940	13.1	7.51	1360
④ H-350	173.9	1.370	15.2	8.84	2300
⑤ H-400	218.7	1.720	17.5	10.1	3330



図一 n段切梁における設計変数

表二 鋼矢板の使用断面

鋼矢板の種類	一枚当りの断面積 (cm ²)	壁幅1m当りの重量 (kg/m)	壁幅1m当りの断面係数 (cm ³ /m)
①FSP-II	61.18	120	874
②FSP-III	76.42	150	1340
③FSP-IV	96.99	190	2270
④FSP-VL	138.0	210	3150

るいは P_2 の中に含めて考えることができるので、目的関数としては式(1)の3項目で十分であり、実用的と考えられる。

設計変数 $I_i (i=1 \sim n)$ は切梁鉛直位置、 I_{n+1} は水平間隔であり、0 cm から 20 cm 刻みの実数値に、その値の少ない順につけたランク (整数値) に対応する。

図一に示した切梁鉛直位置、あるいは水平間隔と設計変数との関係は次式で表される。

$$X(I_i) = 0.2 \cdot (I_i - 1) \quad (m) \quad \dots \quad (4)$$

切梁、腹起し、および鋼矢板に用いる既製の鋼材は、表一、2⁴⁾ に示す断面の中から、応力に関する照査式を満足するものの中で、最も断面積が少ないものを選択して使用することにした。

本研究で用いた、各部材の応力度に関する照査式は、以下ようになる。

まず、 k 段目の切梁の照査式 g_{1k} は次式である。

$$g_{1k} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcv}}{\sigma_{bagv}(1 - \sigma_c/\sigma_{eay})} - 1 \leq 0 \quad \dots \quad (5)$$

ここで、 σ_c は切梁の作用軸圧縮応力度、 σ_{bcv} は切梁の作用曲げ圧縮応力度、 σ_{caz} は許容軸方向圧縮応力度、 σ_{bagv} は許容曲げ圧縮応力度、 σ_{eay} はオイラー座屈応力度であり、単位はすべて kgf/cm^2 である。

次に、 k 段目の腹起しの照査式 g_{2k} は次式である。

$$g_{2k} = \frac{\sigma_{bcv}}{\sigma_{bagv}} - 1 \leq 0 \quad \dots \quad (6)$$

ここで、 σ_{bcv} (kgf/cm^2) は腹起しの作用曲げ圧縮応力度である。

最後に、鋼矢板の照査式 g_3 は次式である。

$$g_3 = \frac{M}{2700 \cdot Z} - 1 \leq 0 \quad \dots \quad (7)$$

ここで、 M ($\text{kgf} \cdot \text{m}$) は鋼矢板の最大曲げモーメントで、作用土圧に対して鋼矢板の支保工で拘束された区間を単純梁と仮定することにより計算される。 Z (cm^3/m) は

鋼矢板の壁幅 1 m 当りの断面係数である。

(3) 総工費に関する目的関数

縦断方向を考慮した仮設鋼矢板土留工の総工費は、次式で計算されるものとした。

$$C(\{I\}) = C_1[X(\{I\})] + C_2[X(\{I\})] \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 C_1 は全損量、 C_2 は施工費であり、それぞれ次式で計算される。

$$C_1 = \sum_{j=1}^{NS} L_j \cdot \left\{ UH \cdot \left(\sum_{i=1}^n (WK_{ij} + WH_{ij}) + WY_i \right) \cdot IDAY + UE \cdot WY_i \right\} \dots \dots \dots (9)$$

$$C_2 = \sum_{j=1}^{NS} L_j \cdot \left\{ UY \cdot YL_j + \sum_{i=1}^n (US \cdot UZ^{(i-1)} \cdot (WK_{ij} + WH_{ij})) \right\} \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 NS は土質データ採用区間の数、 L_j は土質データ採用区間 j の施工延長 (m) である。 WK_{ij} 、 WH_{ij} 、 WY_i はそれぞれ土質データ採用区間 j における、 i 段目の切梁重量 (tf)、 i 段目の腹起し重量 (tf)、および鋼矢板重量 (tf) である。 $IDAY$ は損料算定日数 (日)、 UH は 1 日 1 tf 当りの損料、 UE は 1 tf 当りの鋼矢板整備費である。 YL_j は区間 j の鋼矢板延長 (m)、 UY は延長 1 m 当り鋼矢板施工費、 US は 1 tf 当りの支保工施工費で一段下がる毎に施工費は UZ 倍となる。

本研究では、式(8)の総工費を次式を用いて無次元化し、経済性を評価する目的関数 P_1 として使用した。

$$P_1 = w_1 \frac{C(\{I\}) - C_{00}}{C_0 - C_{00}} \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 $C(\{I\})$ は組合せ $\{I\}$ の総工費の値、 C_0 は基準とした総工費の値で、図一2の状態に切梁を設置(水平間隔は下限値)した時の総工費である。多目的計画法における希求水準⁵⁾に対応する C_{00} は、ここでは $0.7 \cdot C_0$ とした。 w は、目的関数 P_1 の重み係数で、本研究では 2 としている。

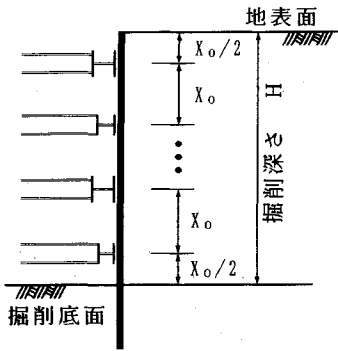


図-2 基準総工費の計算のための配置

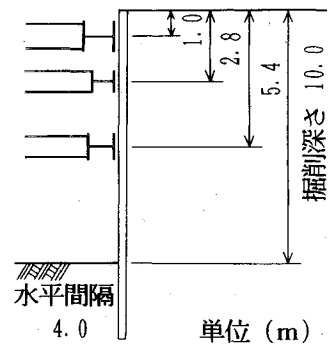


図-3 3段切梁

(4) 応力度の余裕に関する目的関数

応力度の余裕に関する目的関数 P_2 は、次式のように定義した。

$$P_2 = -w_2 \cdot \max_{k=1 \sim n} (g_{jk}, -0.05) \dots\dots\dots (12 \cdot a)$$

ここで、 w_2 は目的関数 P_2 の重み係数で、本研究では次式で与えることにした。

$$w_2 = 4.8 \cdot \xi + 0.2 \dots\dots\dots (12 \cdot b)$$

応力度余裕係数 ξ は、部材の応力度の余裕を、設計者がどの程度重視するかによって与えるパラメータで、0～1に任意の値が設定される。0であればほとんど重視されなく、1が入れば w_2 は5になるのでかなり重視されることになる。

g_{jk} は、式(5)～(7)の各部材の応力度の照査式の値である。この値の下限値を -0.05 にしているのは、総工費に関する目的関数 P_1 が増加しても、 P_2 の極端な減少により、目的関数 P が見かけ上減少するようなことを避けるためである。

(5) 施工性に関する目的関数

施工性に関する目的関数 P_3 は、切梁の鉛直間隔ができるだけ広い方が良くと考え、次のように定義した。

$$P_3 = -\eta \cdot \min_{k=1}^{n-1} \frac{X(I_{k+1}) - X(I_k)}{X_0} \dots\dots\dots (13)$$

施工性係数 η は、目的関数 P_3 の重み係数である。前節の ξ と同様に、式(13)の施工性を設計者がどの程度重視するかにより 0～1の値が設定される。0であれば無視され、1であればかなり重視されることになる。

X_0 は、(3)で説明された、基準総工費を計算する時に用いられた切梁間隔(図-2)の値である。

(6) 重み係数について

本研究は、前記のように当初、目的関数を1目的とし、式(8)のコストのみを考慮した¹⁾。その結果、後記の表-3に一例を示したように、同一のコストに対して多数の部材配置の組合せがあることがわかった。これらの中から、更により良い設計を決定するために、式(1)のように多目的として定式化する必要性が出てきたわけであ

る。

各重み係数の設定は、基本的にコストミニマムの設計を求めることを第1とし、補助的に他の2つの目的関数を判断資料として用いるように配慮した。つまり、安全性あるいは施工性を重視した結果、経済性が大きく犠牲になることはないように、多くの数値計算の結果、 $w_1 = 2$ 、あるいは式(12・a)、式(12・b)、及び式(13)が設定されたものである。

ただし、実用に際しては、これらについての修正、改良の余地はあると考えられる。

4. GAの概要

GA(遺伝的アルゴリズム)は、ダーウィンの自然淘汰説を簡単な数理モデルに置き換え、最適化手法として用いるものである。特に、離散的な要因を含む最適化問題の解法として注目されており、本研究でもその適用を試みた。

詳細⁷⁾は省略し、本研究に関係する部分のみ以下に説明する。

(1) 切梁位置のコーディング

GAにおいては、ある組合せにおける個々の設計変数の値を2進数で表し、それを並べて1つの線列が形成される。線列は一般に多数形成されるが、その数 N を人口サイズという。線列は1つの設計、人口サイズは設計の数に対応する。

例えば、図-3に示す3段切梁の配置を2進数でコーディングすると次のようになる。ここでは、それぞれの設計変数のランクに対応する2進数は6桁で表した。

$$X\{I\} = \{1.0 \ 2.8 \ 5.4 \ 4.0\} \dots\dots\dots (14)$$

$$= \{6 \ 15 \ 28 \ 21\} \dots\dots\dots (15)$$

$$= \{000110 \ 001111 \ 011100 \ 010101\} \dots\dots (16)$$

式(14)は、切梁設置位置の組合せ、式(15)は切梁設置位置の組合せを設計変数のランクの組合せに変換したものの、式(16)は設計変数のランクの組合せを2進数で表したものであり、これが線列となる。

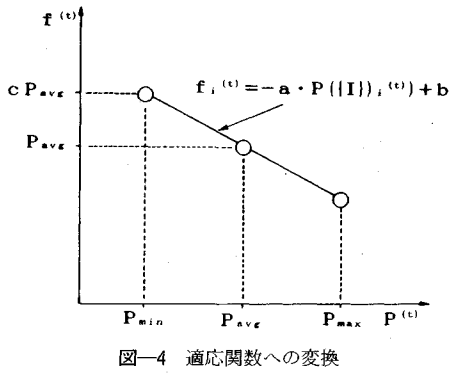


図-4 適応関数への変換

(2) 適応関数

GAにおいては、線列の適応度最大を目的として、適応度を表す適応関数（本研究では式(17)）の最大化が図られる。

本研究においては、式(1)が適応度を表す関数と考えられるが、これは最小化される関数なので、適応関数に変換する必要がある。変換方法は様々な方法があるが、本研究では、次式を用いて変換した^{8),9)}。

$$f_i^{(t)} = -a \cdot P(\{I\}_i^{(t)}) + b \quad (i=1 \sim N) \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 $P(\{I\}_i^{(t)})$ は第 t 世代における i 番目の線列の目的関数式(1)の値、 $f_i^{(t)}$ はその適応関数の値である。係数 a, b は次式で表される。

$$a = \frac{P_{avg}(c-1)}{P_{avg} - P_{min}}, \quad b = \frac{P_{avg}(cP_{avg} - P_{min})}{P_{avg} - P_{min}} \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 P_{avg}, P_{min} はそれぞれ、各世代における目的関数の平均値と最小値、 c は適応関数の最大値をコントロールするパラメータで本研究では $c=1.5$ とした。

式(17)を図-4に示した。この変換法は、最適化の初期には各線列の適応関数の値のばらつきを $c \cdot P_{avg}$ まで抑えて局所的な解に収束することを防ぎ、最適化の後期には適応関数の値のばらつきを $c \cdot P_{avg}$ まで大きくし収束を早める効果がある。

(3) 基本オペレータ

繁殖・淘汰、交叉、突然変異をGAでは基本オペレータという。これらの内、繁殖・淘汰と交叉について簡単に説明する。

繁殖・淘汰は、適応関数の値に応じて、次世代に残す線列を選択する過程をいう。本研究では、 N 個の適応関数の確率により繁殖・淘汰^{*1)}を行った。つまり、適

*1) GAにおいては、 N 個の線列が交配プールに保存されて、次の交叉が行われる。その N 個の線列を選択する手続きを繁殖・淘汰という。これは、各線列の適応関数の値の相対的な関係により確率的に行われる。例えば、適応関数の値の相対的な関係によりルーレットの回転面を分割して線列を選ぶようなものである。当然、適応関数の値が大きい線列は多数残す(繁殖)ことになり、小さい線列は残らない(淘汰)場合も出てくる。

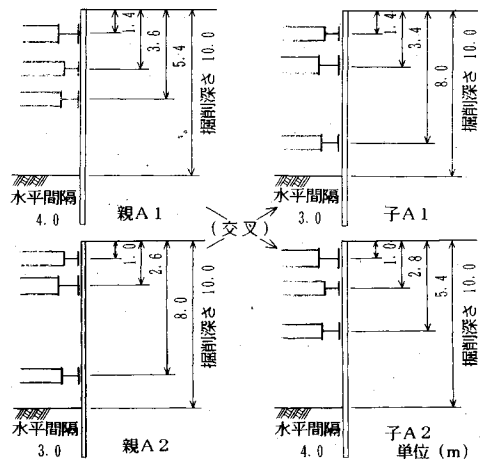


図-5 3段切梁の交叉の例

応関数の値が大きい線列は次世代に複数残る可能性が高く、適応関数の値が小さい線列は、次世代に残る可能性は少ないことになる。

次世代に残された線列は、交叉により新しい線列を生成することになる。本研究の交叉法を説明すると、以下のようになる。

まず、次世代に残された線列群からランダムに2個の線列を選択する。この選択された線列に対して、交叉確率 $P_c^{*2)}$ により交叉を行うかどうかを決定する。交叉を行わない場合は、2つの線列は変化させないで次の世代にそのまま伝える。交叉を行う場合は、どのビット^{*3)}間で切断するかを一樣乱数を発生して決定し、その位置以降のビットを入れ替える。例として、図-5に示す親A1と親A2の交叉を説明する。

親A1, 親A2の切梁設置位置の組合せを設計変数のランクの組合せに置き換えたもの、2進数でコーディングしたものを示すと次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{親A1} &= \{1.4 \quad 3.6 \quad 5.4 \quad 4.0\} \\ &= \{8 \quad 19 \quad 28 \quad 21\} \\ &= \{001000 \quad 010011 \quad 011100 \quad 010101\} \dots\dots (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{親A2} &= \{1.0 \quad 2.6 \quad 8.0 \quad 3.0\} \\ &= \{6 \quad 14 \quad 41 \quad 16\} \\ &= \{000110 \quad 001110 \quad 101001 \quad 010000\} \dots\dots (20) \end{aligned}$$

これらの親A1と親A2が交叉することになり、左から10番目と11番目のビットの間で交叉が行われたとすると、交叉後の線列は次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{子A1} &= \{001000 \quad 010010 \quad 101001 \quad 010000\} \dots\dots (21) \\ \text{子A2} &= \{000110 \quad 001111 \quad 011100 \quad 010101\} \dots\dots (22) \end{aligned}$$

これらを設計変数のランクの組合せ、切梁設置位置の

*2) 例えば、交叉確率が60%ということは、2つの線列が交配プールから任意に選ばれた後、 $[0,1)$ の一樣乱数を発生させ、その値 α が $0 \leq \alpha \leq 0.6$ であれば交叉を行い、 $0.6 < \alpha < 1$ であれば交叉を行わないことを意味する。

*3) 線列上の0,1の数字をビットという。

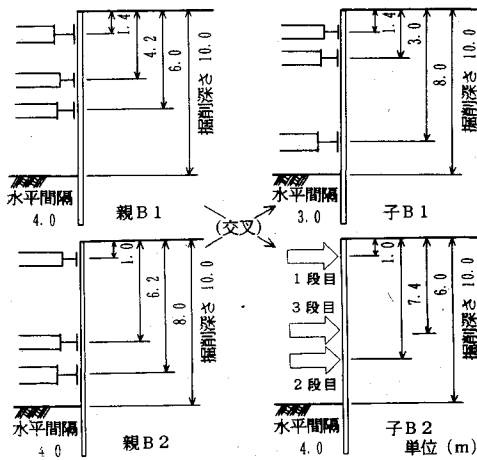


図-6 交叉により矛盾が生じる例

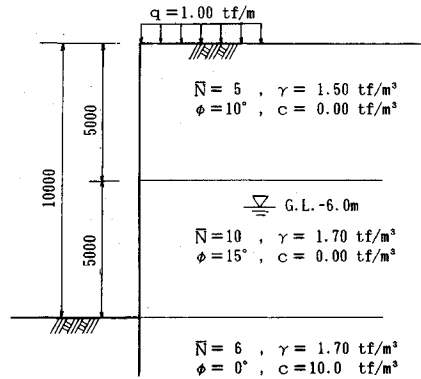


図-7 3段切梁モデル

組合せに直すと次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{子A1} &= \{ 8 \quad 18 \quad 41 \quad 16 \} \\ &= \{ 1.4 \quad 3.4 \quad 8.0 \quad 3.0 \} \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{子A2} &= \{ 6 \quad 15 \quad 28 \quad 21 \} \\ &= \{ 1.0 \quad 2.8 \quad 5.4 \quad 4.0 \} \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

これらの関係を図-5に示した。

(4) 生長オペレータ

交叉の手続きは、上記のように非常に単純であるが、場合によっては、上下の切梁の設置位置の関係に矛盾が生じることがある。

矛盾を生じる例を、図-6に示した。

この場合、親 B1 と親 B2 の線列は、次式のように表される。

$$\begin{aligned} \text{親B1} &= \{ 1.4 \quad 4.2 \quad 6.0 \quad 4.0 \} \\ &= \{ 8 \quad 22 \quad 31 \quad 21 \} \\ &= \{ 001000 \quad 010110 \quad 011111 \quad 010101 \} \dots\dots (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{親B2} &= \{ 1.0 \quad 6.2 \quad 8.0 \quad 3.0 \} \\ &= \{ 6 \quad 32 \quad 41 \quad 16 \} \\ &= \{ 000110 \quad 100000 \quad 101001 \quad 010000 \} \dots\dots (26) \end{aligned}$$

ここで、左から 9 番目と 10 番目の間で交叉が行われるとすると交叉後の線列、設計変数のランクの組合せ、切梁設置位置の組合せは次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{子B1} &= \{ 001000 \quad 010000 \quad 101001 \quad 010000 \} \\ &= \{ 8 \quad 16 \quad 41 \quad 16 \} \\ &= \{ 1.4 \quad 3.0 \quad 8.0 \quad 3.0 \} \dots\dots\dots (27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{子B2} &= \{ 000110 \quad 100110 \quad 011111 \quad 010101 \} \\ &= \{ 6 \quad 38 \quad 31 \quad 21 \} \\ &= \{ 1.0 \quad 7.4 \quad 6.0 \quad 4.0 \} \dots\dots\dots (28) \end{aligned}$$

図-6に示すように、子 B1 については問題がない。しかし子 B2 については、2 段目と 3 段目で切梁設置位置が入れ替わっており、このままでは設計ができない。

このような場合に、以下に説明する生長というオペ

レータを用いて設計を修正した。

生長オペレータは、線列の極端なランダム性を若干改良するために、問題に応じた非常に簡単な論理により線列を修正する手続き¹⁰⁾の総称である。

本研究で用いる生長の手続きは次のようになる。

まず、交叉により得られた線列の内、切梁設置位置に関して矛盾が生じているものについて、切梁設置深さを小さい順に並び換える。この配置が、最小間隔等切梁の鉛直方向の設置位置に関する条件をまだ満足していない場合は、条件を満足するように切梁設置深さを新たに、かつランダムに生成しなおす。

この様にして生成された設計を設計変数のランクの組合せに変換し、2進数にコーディングする。

上例の子 B2 の場合で、この生長オペレータを説明すると以下のようなになる。

まず、子 B2 の切梁設置深さを、小さい順に並べ換えると次のようになる。

$$\text{子B2} = \{ 1.0 \quad 6.0 \quad 7.4 \quad 4.0 \} \dots\dots\dots (29)$$

この結果は、切梁設置位置に関する条件を満足しているので、修正された設計となるが、もしどこかに条件を満足しない関係があれば、式(29)とは無関係に、条件を満足する切梁設置位置を新たに作成することになる。

5. 設計計算例

本研究では、3. で説明した最適化問題を、4. で説明した GA を用いて解く仮設鋼矢板土留工の汎用的な設計手法を開発しプログラムを作成した。その手法を用いた 2, 3 の計算例を以下に説明する。

(1) では、応力度余裕係数 ξ の効果、(2) では施工性係数 η の効果、(3) では縦断方向の土層の変化を考慮した場合の設計例について説明する。

(1) 応力度余裕係数の効果

ここでは、図-7に示す 3 段切梁モデルで、応力度余裕係数 ξ の効果を検討する。

土質条件は 3 層地盤とし、掘削深さ 10.0 m、地下水

表一3 3段切梁の36ケースの最適解

	$X(1_s)$	$X(2_s)$	$X(3_s)$	$X(4_s)$		$X(1_s)$	$X(2_s)$	$X(3_s)$	$X(4_s)$
1	0.0	2.4	5.4	4.0	19	0.8	2.8	5.5	4.0
2	0.0	2.6	5.4	4.0	20	0.8	2.8	5.6	4.0
3	0.0	2.8	5.4	4.0	21	1.0	2.4	5.4	4.0
4	0.0	2.8	5.6	4.0	22	1.0	2.6	5.4	4.0
5	0.2	2.4	5.4	4.0	23	1.0	2.8	5.4	4.0
6	0.2	2.6	5.4	4.0	24	1.0	2.8	5.6	4.0
7	0.2	2.8	5.4	4.0	25	1.2	2.4	5.4	4.0
8	0.2	2.8	5.6	4.0	26	1.2	2.6	5.4	4.0
9	0.4	2.4	5.4	4.0	27	1.2	2.8	5.4	4.0
10	0.4	2.6	5.4	4.0	28	1.2	2.8	5.6	4.0
11	0.4	2.8	5.4	4.0	29	1.4	2.4	5.4	4.0
12	0.4	2.8	5.6	4.0	30	1.4	2.6	5.4	4.0
13	0.6	2.4	5.4	4.0	31	1.4	2.8	5.4	4.0
14	0.6	2.6	5.4	4.0	32	1.4	2.8	5.6	4.0
15	0.6	2.8	5.4	4.0	33	1.5	2.4	5.4	4.0
16	0.6	2.8	5.6	4.0	34	1.5	2.6	5.4	4.0
17	0.8	2.4	5.4	4.0	35	1.5	2.8	5.4	4.0
18	0.8	2.6	5.4	4.0	36	1.5	2.8	5.6	4.0

表一4 使用鋼材の応力度の照査式の値

設計番号	①	②	③	④	
(2段目, 3段目)	(2.4m, 5.4m)	(2.6m, 5.4m)	(2.8m, 5.4m)	(2.8m, 5.6m)	
切梁	g11	-0.0666	-0.0365	-0.0064 ●	-0.0061 ●
	g12	-0.1043	-0.1341	-0.1638	-0.1338
	g13	-0.0131	-0.0131 ●	-0.0131	-0.0445
腹起し	g21	-0.3698	-0.3311	-0.2923	-0.2919
	g22	-0.0361	-0.1003	-0.1646	-0.0997
	g23	-0.0601	-0.0601	-0.0601	-0.1001
鋼矢板	g3	-0.0004 ●	-0.0170	-0.0170	-0.0489

位 G.L. -6.0 m とした。

総工費のみに注目した場合、この問題は、最適な切梁配置の組合せが36ケースある問題である。表一3に、その36ケースの組合せを示した。表一4は、表一3に示した36ケースの内、1段目が1.0mの時の4ケースにおける各部材の応力度の照査式 g_{1k} , g_{2k} , g_{3k} の値を示したものである。●は応力度の余裕が最も少ない断面を示す。表に示すように、同じ総工費に対する切梁配置でも、設計②は比較的応力度に余裕があり、他の設計は余裕が少ないのがわかる。

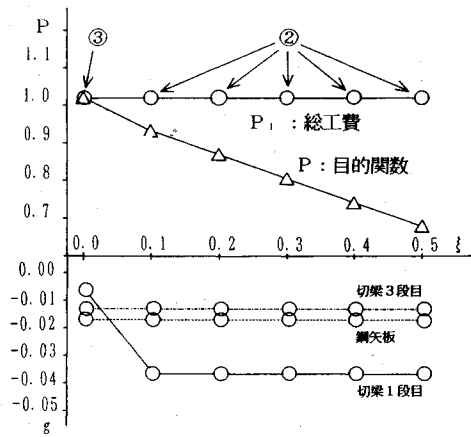
この問題に対し、式(12・b)の応力度余裕係数 ξ の値を種々変えて計算してみた。その結果を図一8に示す。横軸が ξ であり、図の上半分には式(1)の目的関数 $P(\Delta)$ と式(11)の無次元化した総工費 P_1 (○で示す) を、下半分には、アクティブな照査式の値を示している。図に示すように、 ξ が0.0の時には、表一4の設計③を選んでいるが、 ξ が0.1以上では設計②を選択し、同コストで応力的に余裕のある設計を確実に選択していることがわかる。

(2) 施工性係数の効果

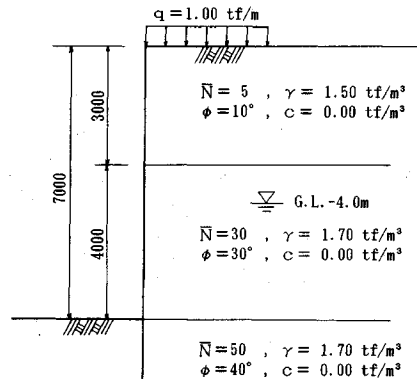
図一9の2段切梁モデル、および図一7の3段切梁モデルを例に取り、施工性係数 η の効果を検討する。

2段切梁モデルの計算結果を図一10に示した。左図が η が0.0の結果であり、右図が0.4の時の結果である。この場合、どちらも総工費は同じであるが、 η に大きな値を設定することにより、1段目と2段目の切梁の鉛直間隔が2.8mから3.6mに増加した。切梁水平間隔は3.2mであった。

3段切梁モデルの計算結果を図一11に示した。この場合は、 η の値は0.0, 0.4, 0.8としたが、上の例と同様に、



図一8 3段切梁モデルの ξ の値による設計の変化



図一9 2段切梁モデル

総工費は同じでありながら、切梁鉛直間隔の最小値は2.2m, 2.4m, 2.4mと、最大値は、2.6m, 2.6m, 2.8mと増加した。

切梁水平間隔は、4.0mであった。

図一11の結果は、最下段切梁位置から根切りまでの間隔が長くなっているが、これは、このモデルが、掘削底面以下が粘着力の高い粘土であることと、5~10mまでが土圧の小くなる砂層であることにより、切梁配置は矢板のランクを上げない程度に、できるだけ上方に配置して、1段・2段目切梁が負担する土圧を小さくしてコストの低減を図った結果だと考えられる。

なお、これらの図において、①~③は切梁および腹起しの断面を示し、①は表一1のH-250、②はH-300、③はH-350である。

また、矢板断面はすべて表一2のFSP-IIであった。

(3) 縦断方向の土層条件の変化を考慮した場合

今まで説明した設計例は、すべて、1つの土質断面に対する結果であった。しかし、実際の施工現場では、縦断方向に土層条件が変化する場合も考えられ、1つの断面の最適解で全体を設計するわけにはいかない。

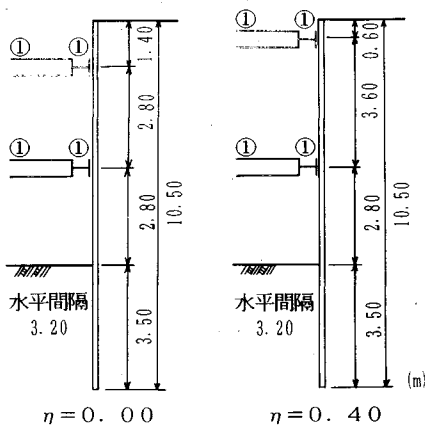


図-10 2段切梁モデルのηの値による設計の変化

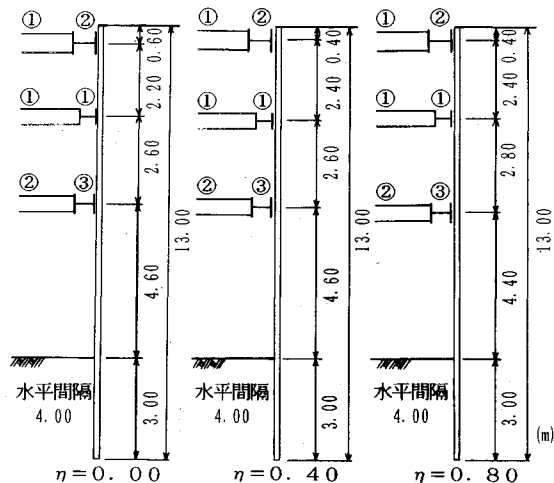


図-11 3段切梁モデルのηの値による設計の変化

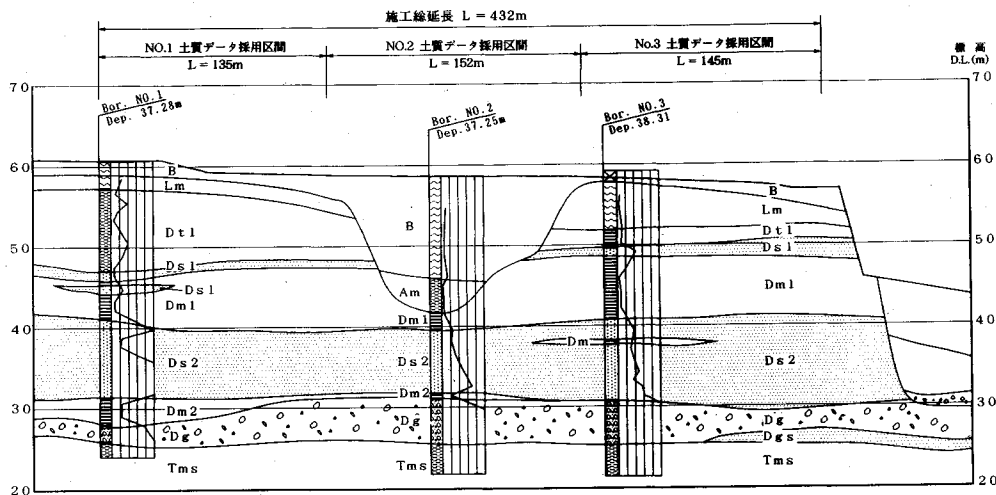


図-12 縦断方向の土層条件の全体図

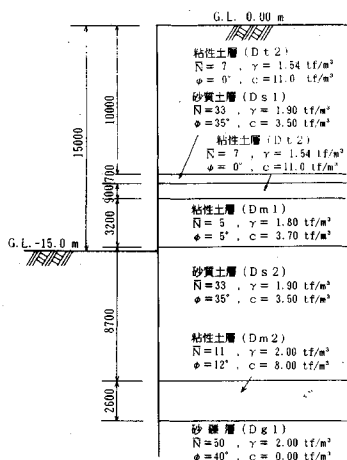


図-13 NO.1土質データ

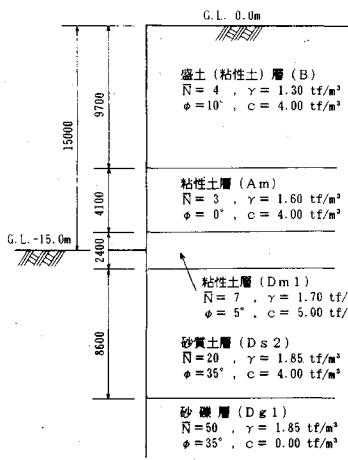


図-14 NO.2土質データ

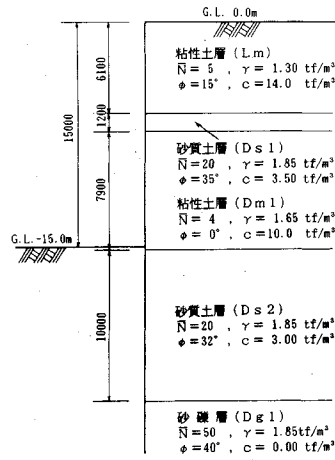


図-15 NO.3土質データ

表—5 縦断方向の土層条件の変化を考慮した計算結果

	NO.1 土質データ採用区間				NO.2 土質データ採用区間				NO.3 土質データ採用区間				NO.1の工費 NO.2の工費 NO.3の工費 +) 総工費 (x10 ⁴)	
	設計 変数	切梁 断面	腹起し 断面	矢板断面 矢板長	設計 変数	切梁 断面	腹起し 断面	矢板断面 矢板長	設計 変数	切梁 断面	腹起し 断面	矢板断面 矢板長		
等分割1	X ₁	1.40 ^m	H-300	H-300	FSP-V _L	1.40 ^m	H-350	H-350	FSP-V _L	1.40 ^m	H-300	H-350	FSP-V _L	8785 10398 9885 +) 29068
	X ₂	5.63 ^m	H-350	H-350		5.63 ^m	H-350	H-400		5.63 ^m	H-350	H-350		
	X ₃	9.38 ^m	H-350	H-350	18.00 ^m	9.38 ^m	H-350	H-400	18.00 ^m	9.38 ^m	H-350	H-350	18.00 ^m	
	X ₄	13.1 ^m	H-300	H-300		13.1 ^m	H-350	H-350		13.1 ^m	H-350	H-350		
	X _b	2.60 ^m												
等分割2	X ₁	1.40 ^m	H-350	H-350	FSP-V _L	1.40 ^m	H-350	H-350	FSP-V _L	1.40 ^m	H-350	H-350	FSP-V _L	9143 10294 9820 +) 29257
	X ₂	5.63 ^m	H-350	H-400		5.63 ^m	H-350	H-400		5.63 ^m	H-350	H-400		
	X ₃	9.38 ^m	H-350	H-400	18.00 ^m	9.38 ^m	H-350	H-400	18.00 ^m	9.38 ^m	H-350	H-400	18.00 ^m	
	X ₄	13.1 ^m	H-350	H-350		13.1 ^m	H-350	H-350		13.1 ^m	H-350	H-350		
	X _b	3.00 ^m												
最適	X ₁	1.40 ^m	H-300	H-350	FSP-IV	1.40 ^m	H-350	H-350	FSP-V _L	1.40 ^m	H-350	H-350	FSP-IV	NO.1 8575 NO.2 8853 NO.3 9039 10103 9999 10177 +)9846 +)9572 +)9386 28524 28424 28602
	X ₂	5.80 ^m	H-350	H-350		6.60 ^m	H-350	H-400		6.20 ^m	H-350	H-400		
	X ₃	9.40 ^m	H-300	H-300	18.00 ^m	10.0 ^m	H-300	H-300	18.50 ^m	9.60 ^m	H-350	H-350	18.00 ^m	
	X ₄	11.6 ^m	H-350	H-350		11.6 ^m	H-350	H-400		12.0 ^m	H-350	H-400		
	X _b	2.60 ^m			3.00 ^m			3.20 ^m						
最適 (縦断)	X ₁	1.40 ^m	H-350	H-350	FSP-IV	1.40 ^m	H-350	H-350	FSP-V _L	1.40 ^m	H-350	H-350	FSP-IV	8632 10068 +) 9449 28149
	X ₂	6.40 ^m	H-350	H-400		6.40 ^m	H-350	H-400		6.40 ^m	H-350	H-350		
	X ₃	9.80 ^m	H-300	H-350	18.00 ^m	9.80 ^m	H-300	H-350	18.50 ^m	9.80 ^m	H-300	H-300	18.00 ^m	
	X ₄	11.8 ^m	H-350	H-400		11.8 ^m	H-350	H-400		11.8 ^m	H-350	H-350		
	X _b	2.60 ^m			3.00 ^m			3.00 ^m						

本研究においては、縦断方向の土層条件の変化を考慮する場合、切梁の設置深さのみを縦断方向で統一し、他の切梁水平間隔、矢板長、各部材の使用鋼材などは、各土質区間毎に変化させて使用するようになっている。

式(8)~(13)はそのような条件を考慮している。

縦断方向の土層条件の変化を考慮する設計計算例の縦断方向の土質データ図、および各土質データ採用区間の土質条件を図12~15に示した。

それぞれの土質データ採用区間の土質条件について、NO.1土質データ採用区間は7層地盤、NO.2、NO.3土質データ採用区間では5層地盤であり、掘削深さを15.0m、地下水位はG.L. -0.0m、すなわち地表面としている。この問題では、応力度余裕係数ξ、施工性係数ηは0.0とし、施工段数は4段として設計した。

表-5に、縦断方向の土層条件の変化を考慮した場合のいくつかの計算結果を示した。

X_kはk段目の切梁深さ、X_bは切梁水平間隔を表している。表には、それぞれの土質データ採用区間の切梁、腹起し、鋼矢板の必要断面と矢板長、および最右欄に、式(8)で計算される各区間の工費とそれらの和の総工費の値を表している。

表中、[等分割1]と[等分割2]は、比較のために計算した例で、それぞれ、切梁水平間隔が2.6mと3.0mの時、切梁深さを等間隔に設置した時の設計の結果を示している。それぞれ総工費は、290680000、292570000となった。切梁水平間隔が広い方が工費が大きくなっているのは、選択している部材断面との関係による。

[最適(区間毎)]は、ある土質データ採用区間の切梁配置の最適値を、すべての区間に利用した場合の結果で、各区間の最適値、および、ある区間の最適値をすべての区間に利用した場合の総工費の値を示している。総工費

の値は、区間1の最適値を全区間に使用した場合は、285240000、区間2の最適値を全区間に使用した場合は284240000、区間3の最適値を全区間に使用した場合は286020000となった。

[最適(縦断)]は、縦断方向の土層条件の変化を考慮した計算結果で、表に示すように総工費は281490000となり、すべての総工費の中で最も少ない。等分割に対しておおよそ1000万、区間毎の最適解を用いた場合に対して300万~400万程少ない結果となっている。この結果は、相対的には2~3%と少ない差であるが、絶対量としては少なくはないと考えられる。

6. 結論及びあとがき

土留・締切工の中で最も良く用いられる仮設鋼矢板土留工の設計を、多目的離散的最適化問題として定式化し、その解法としてGA(遺伝的アルゴリズム)を用いることを提案して、それらの考え方、理論をいくつかの設計計算例と共に説明した。

本研究で得られた事項を箇条書きにすると、以下のようになる。

(1) 掘削深さ15m以下の仮設鋼矢板土留工の総工費が、切梁設置位置に関して非連続な関数になり、また施工の精度を考慮すると、切梁設置位置は実質的には離散的な値となること、および、同程度の総工費であれば、各部材の応力度の余裕は大きい方が良いこと、また、切梁の鉛直方向の間隔は、施工性を考慮するとできるだけ広い方が良いことなどを考慮して、仮設鋼矢板土留工の設計を、多目的離散的最適化問題として定義した。

この時、土層・土質が縦断方向に変化することも考慮して総工費等の定式化を行った。

(2) この多目的離散的最適化問題の解法として、

GAを用いることを試みた。本研究の解法として、1次の微係数を用いる数値計画法の適用は困難と考えられるが、GAは容易に応用することができた。

GAの応用に際しては、単純GAを若干改良し、生長というオペレータを、仮設鋼矢板土留工の設計のために用いて良好な結果を得ることができた。

(3) 多目的離散的最適化問題の定式化において、応力度の余裕と施工性に関する目的関数には、重み係数を設定し、その量は、応力度余裕係数と施工性係数というパラメータを介して、設計者の意志が反映できるようにした。それらのパラメータの値の範囲は0~1の間の値であり、直観的に理解しやすく、設計の自由度を増すことが期待できる。

(4) これらの理論および手法は、汎用的なプログラムとしてパソコン上で操作できるように作成されており、実用的であると考えられる。

(5) 数値計算の結果、応力度余裕係数および施工性係数の有効性を確認することができ、また、縦断方向の土層・土質条件の変化を考慮した設計計算例では、比較のために計算した例よりかなり少ない総工費の設計を得ることができた。

(6) 本論文は、慣用法を用いる範囲の鋼矢板土留工を対象としているので、構造系を単純梁と考えた。弾塑性法を考慮しなければならない場合は、連続梁となるが、GAの応用に関しては基本的には同じであり、本論文の方法は問題なく適用できる。

参考文献

- 1) 笹木敏信・満尾淳・亀廻井寿明・杉本博之：仮設鋼矢板締切工の設計最適化に関する研究，第2回システム最適化に関するシンポジウム，土木学会，pp.193~198，1991.
- 2) J. Mitsuo, T. Sasaki, H. Sugimoto: Application of optimization to the design of retaining wall systems, Structural Optimization, Proceedings of the Korea-Japan Joint Seminar in Korea, pp.201~210, 1992.
- 3) 山本洋敬・杉本博之・笹木敏信・満尾淳：GAによる仮設鋼矢板締切工の設計，土木学会第47回年次学術講演会，pp.1204~1205，1992.
- 4) 首都高速道路厚生会：首都高速道路・仮設構造物設計基準，1990.
- 5) 田村坦之編：大規模システム—モデリング・制御・意思決定—，昭晃堂，1986.
- 6) 亀廻井寿明・杉本博之・中山弘隆：構造最適設計のための改良型満足化トレードオフ法に関する研究，土木学会論文集，No.441/I-18，pp.117~126，1992.
- 7) D.E. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- 8) 杉本博之・鹿汗麗：トラス構造物の離散的最適化問題へのGAの応用に関する基礎的研究，計測自動制御学会第10回システム工学部会研究会資料，1992.
- 9) 鹿汗麗・杉本博之：GAの高難度最適化問題への応用に関する基礎的研究，土木学会北海道支部論文報告集，第48号，pp.105~110，1992.
- 10) 杉本博之：GAの工業設計への応用にむけて，数理科学，No.353，NOVEMBER，pp.45~59，1992.

(1992.11.9 受付)

ON DESIGN OPTIMIZATION OF RETAINING WALL STRUCTURES BY GENETIC ALGORITHM

Hiroyuki SUGIMOTO, Hiroyuki YAMAMOTO, Toshinobu SASAKI and Jun MITSUO

The design optimization of the retaining wall structures is studied by using GA. The design variables of this design problem are the vertical positions of the waling beams and the horizontal interval of the cross beams. These are continuous variables essentially, but are treated as discrete variables in this paper. As the ready-made steel products are used for the structural members, the construction cost, which is one of the objective functions of this study, is discontinuous with respect to the design variables. The basic requirements for these types of the structures are not only the construction cost, but also the structural security and the workability. So the design problem is formulated as discrete multi-objective design problem, and the modified GA is tried to applied to this problem. Several numerical design problems are solved and the results show the utility of the method of this paper.