

I-36

土留逆解析へのGAの応用に関する基礎的研究

室蘭工業大学 学生員 森 一功、正員 杉本博之
東急建設 正員 満尾 淳、渋谷重彦、酒井邦登

1. まえがき

わが国では国土が狭いという理由から、特に都市部では地下空間の有効利用が重要視されている。そのため現在まで多くの地下構造物が建設されており、またこれからも発達する交通網などに伴い、様々な地下構造物の建設工事が行われると思われる。しかし過密した都市部では、開削工法によって施工を行う場合、地下構造物が大規模であるほど、また掘削が大深度であるほど、土留構造物（以下、土留）の安全性と共に周辺構造物への影響が懸念される。よって掘削を進めるにあたって、施工中の土留の挙動をより早く、より正確に把握し、必要に応じて迅速に対処する事が重要である。これを計画的に行うためには、各施工段階ごとに、計測される土留の挙動から設計値を見直し、次段階での予測解析を行い、その結果を施工に反映させ、常に安全性を確認しながら施工を進める情報化施工が必要不可欠である。その中でも、計測値から地盤物性値を推定する（土留逆解析）手法については種々提案されている^{1) 2) 3)}が、従来の一次の微係数の値を用いる数値計画法では適用が困難といわれている。本研究は土留逆解析に対し、離散的最適化問題に有効であるといわれ、最近特に注目されているGA（遺伝的アルゴリズム）^{4) 5)}を適用し、その有効性、また種々考えられる目的関数、およびGAのパラメータについて検討する事を目的としている。

2. 情報化施工

土留は、土圧・水圧を直接受ける土留壁と、これを支持する切梁・腹起し等の土留支保工によって構成され、主に地下構造物の建設の際用いられる仮設構造物である。通常土留は、慣用計算法を用いて、各企業体が提案する基準に従い設計がなされる。また、土留が大規模・大深度であったり、周辺に重要な構造物が存在するなど、慣用計算法では十分といえない場合は、弾塑性計算法^{6) 7)}が用いられる。しかし、これらは複雑な地盤を、ある仮定のもとにモデル化して計算されるもので、土留は計算通りには挙動しないのが普通である。また、設計に用いる地盤の物性値はボーリングによって採取したサンプルによって決定されるものであり、複雑な地層構成による土質のばらつき等から、多くの不確実性を含んでいると考えられる。そのため土留が大規模・大深度であるほど掘削に伴う土留の挙動は事前に正確に予測する事は困難であり、設計段階（予測値）と施工段階（実測値）が合致しないケースが多くなっていく。よって掘削が進むほど施工の安全性・周辺への影響は深刻な問題となり、安全性・経済性において合理的な施工が困難となってくる。そのため各施工段階毎に、得られる実測値を分析して常に安全性を確認し、かつそれを施工・設計に反映させる情報化施工が必要不可欠となる。一般的な情報化施工の流れは図-1のようになっている。

この情報化施工の有効利用に際しては、適切な計測項目の設定、逆解

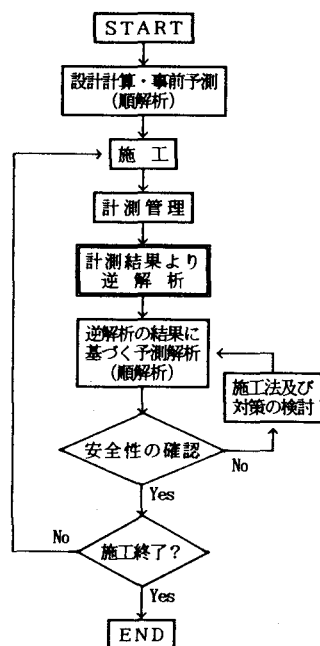


図-1 情報化施工の流れ

析の際の同定置の選定、逆解析手法、施工への反映方法等様々な問題点を内包しており、研究課題はまだ多いと考えられる。

本研究は、この情報化施工における逆解析手法にGAを用いる事を試み、GAの逆解析問題への応用の可能性、および種々のGAのパラメータの適当な値を検討する事を試みている。

3. 土留のモデル化と逆解析の定式化

(1) 土留の解析モデル

本研究は、逆解析の手法に重点を置いたものである。土留の解析は簡単なモデルを用いて行った。

図-2は、数値計算のための解析モデルである。土留壁は矩形断面の柱とし、下端は固定、切梁位置を単純支持としている。土留壁である柱には、式(1)を用いて算出した各層の有効主働土圧(tf/m²)を分布荷重(tf/m)として載荷し、柱の変位や応力を算出した。

$$P_{ae} = P_a - P_o \quad (1)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} P_a &= K_A (\gamma_t \cdot Z - p_w) - 2c \sqrt{K_A} + p_w \\ P_o &= K_o (\gamma_t \cdot Z' - p_w') + p_w' \\ K_A &= \tan^2(45^\circ - \phi/2), \quad K_o = 1 - \sin \phi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 P_{ae} は有効主働土圧(tf/m²)、 P_a は主働土圧(tf/m²)、 P_o は静止土圧(tf/m²)、 K_A 、 $\gamma_t \cdot Z$ 、 p_w はそれぞれ、主働土圧係数、背面側全鉛直圧力(tf/m²)、背面側間隙水圧(tf/m²)、 K_o 、 $\gamma_t \cdot Z'$ 、 p_w' はそれぞれ、静止土圧係数、掘削面側全鉛直圧力(tf/m²)、掘削面側間隙水圧(tf/m²)、 c は土の粘着力(tf/m²)、 ϕ は土の内部摩擦角(°)である。

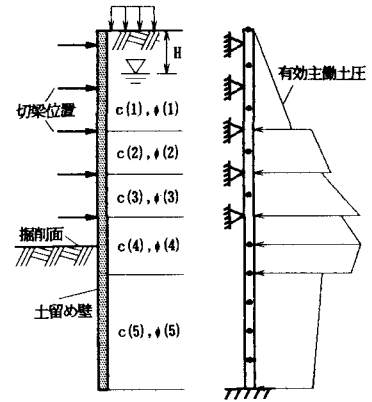


図-2 土留の解析モデル

(2) 土留逆解析の定式化

次に、土留逆解析の定式化について説明する。目的関数は種々考えられるが、本研究では、挿入式傾斜計およびひずみ計による計測値を前提とし、図-2に示すように、任意に設定した測定点(図中●印)における土留壁の水平変位量及び曲げモーメント値を用いて算出する事とし、以下の4種類の目的関数を用い、比較・検討を加える。

○目的関数：

$$\begin{aligned} \text{・水平変位量} & : \quad OBJ = \sqrt{\sum_{i=1}^{NP} (y_{ai} - y_{mi})^2} \rightarrow \min \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{・曲げモーメント値} & : \quad OBJ = \sqrt{\sum_{i=1}^{NP} (m_{ai} - m_{mi})^2} \rightarrow \min \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{・正規化した水平変位量} & : \quad OBJ = \sqrt{\sum_{i=1}^{NP} \left\{ \frac{y_{ai} - y_{mi}}{y_{mi}} \right\}^2} \rightarrow \min \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{・正規化した曲げモーメント値} & : \quad OBJ = \sqrt{\sum_{i=1}^{NP} \left\{ \frac{m_{ai} - m_{mi}}{m_{mi}} \right\}^2} \rightarrow \min \quad (6) \end{aligned}$$

$$\text{○設計変数: } \{H, c(j), \phi(j)\} \quad (j=1 \sim n, n: \text{土層の数}) \quad (7)$$

ここで、 y_{ai} 、 y_{mi} はそれぞれ*i*点での土留壁の解析水平変位(cm)、測定水平変位(cm)、 m_{ai} 、 m_{mi} は*i*点での土留壁の解析曲げモーメント(kgf·cm)、測定曲げモーメント(kgf·cm)、NPは測定点の数である。測定水平変位、曲げモーメントは、設計変数に正解値を与えた場合の値としている。

設計変数は、地下水位H(m)、および土層の地盤物性値のうち、粘着力*c*(tf/m²)と内部摩擦角*φ*(°)とし、土の単位体積重量*γ*(tf/m³)は既知としている。

4. 数値計算例

本研究の数値計算例について説明する。対象とした土留めモデルは、図-3、4に示す2種類の5層モデルとした。図中に示す地下水位・各土層の地盤物性値は正解値である。変位・応力の測定点は図-2で示したように掘削面より上では切梁位置の中間点、掘削面より下は2mピッチと設定した。設計変数の上・下限值、ピッチ等はそれぞれ表-1、2とした。G Aの詳細については省略する⁸⁾。検討するG Aのパラメータには、設計変数のコーディング、人口サイズ、交叉の確率、および突然変異の確率または箇所とし、これらに与えた値の種類を表-3に示した。表中、突然変異において、確率とは、従来の突然変異を行う確率、箇所とは、missing geneを変異させる箇所を表している。なお、最大世代数は100、交叉方法は一点交叉としている。

計算は表-3のすべての組み合わせについて行い、表-3に示すG Aのパラメータや目的関数に応じて、結果にどのような差があるかを調べるために、それぞれの種類別に計算結果を集計し、設計変数である地盤物性値の頻度分布で比較を行う事とした。また、計算の結果得られた物性値から各土層の中間点での有効主動土圧を算出し、物性値と土圧の2種類の頻度分布についても比較・検討を行っている。図-5～12は、モデル①の第4層の ϕ と4層中間（掘削面）での有効主動土圧の頻度分布、図-13～20は、モデル②の第4層 c と4層の間での土圧の頻度分布である。

表-1 土留モデル①の設計変数

設計 変数	物理的意味		下限値	上限値	ピッチ	個数	G bit A 数	正解値
1	地下水位 (m)		1.00	4.50	0.50	8	3	3.00
2	第1層	粘着力 (tf/m ²)	0.00	3.00	0.50	7	3	3.00
3		内部摩擦角 (°)	25.00	42.50	2.50	8	3	35.00
4	第2層	粘着力 (tf/m ²)	0.00	3.00	0.50	7	3	1.50
5	第3層	粘着力 (tf/m ²)	0.00	3.00	0.50	7	3	2.50
6	第4層	内部摩擦角 (°)	20.00	37.50	2.50	8	3	25.00
7	第5層	粘着力 (tf/m ²)	0.00	15.00	1.00	16	4	10.00
8		内部摩擦角 (°)	0.00	17.50	2.50	8	3	0.00

表-2 土留モデル②の設計変数

設計 変数	物理的意味		下限値	上限値	ピッチ	個数	G A bit 数	正解値
1	地下水位 (m)		1.00	4.50	0.50	8	3	3.00
2	第1層	内部摩擦角 (°)	20.00	37.50	2.50	8	3	20.00
3	第2層	粘着力 (tf/m ²)	0.00	3.00	0.50	7	3	1.50
4	第3層	内部摩擦角 (°)	20.00	37.50	2.50	8	3	25.00
5	第4層	粘着力 (tf/m ²)	0.00	3.00	0.50	7	3	2.50
6	第5層	粘着力 (tf/m ²)	0.00	15.00	1.00	16	4	8.00
7		内部摩擦角 (°)	0.00	17.50	2.50	8	3	10.00

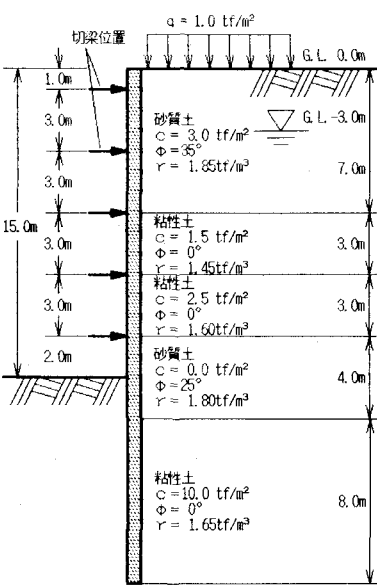


図-3 土留モデル①

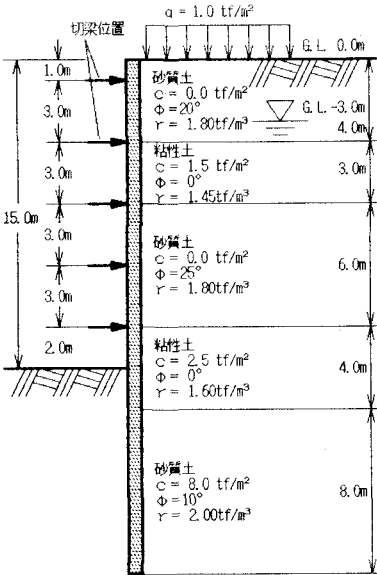


図-4 土留モデル②

表-3 パラメータの種類

コーディング	目的関数	人口サイズ	交叉確率 (%)	突然変異確率 (%)	箇所
バイナリコード グレイコード	1	40	40	0	1
	2	60	60	1	2
	3	80	70	5	3
	4	100	80	10	4
			90	30	5
			100	50	

(1) 土留モデル①の結果

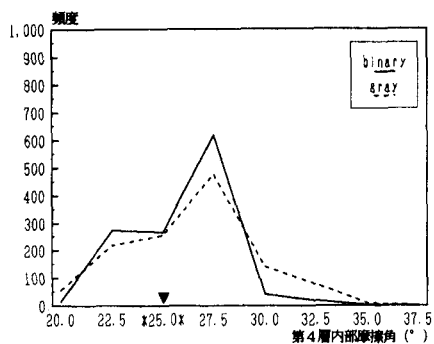


図-5 コーディングの比較: ϕ (4)

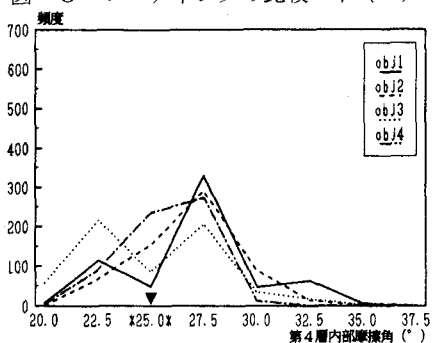


図-7 目的関数の比較: ϕ (4)

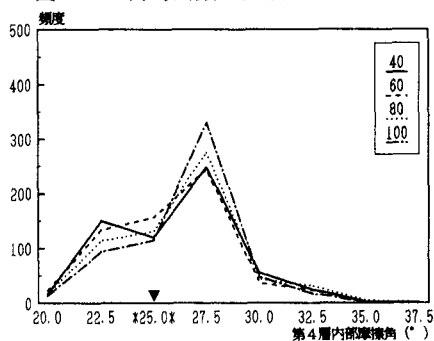


図-9 人口サイズの比較: ϕ (4)

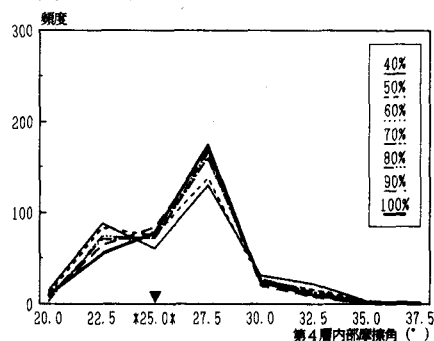


図-11 交叉確率の比較: ϕ (4)

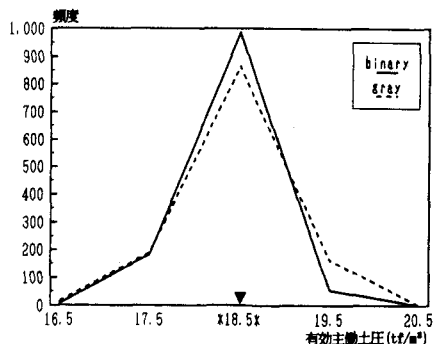


図-6 コーディングの比較: 有効主動土圧

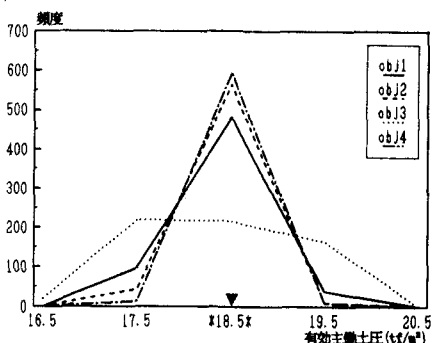


図-8 目的関数の比較: 有効主動土圧

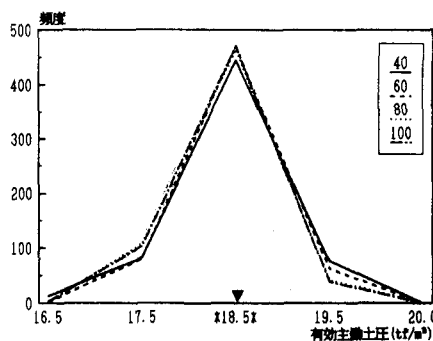


図-10 人口サイズの比較: 有効主動土圧

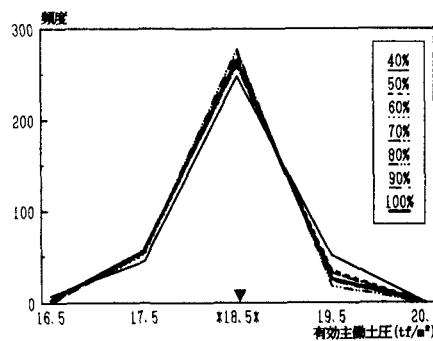


図-12 交叉確率の比較: 有効主動土圧

(2) 土留モデル②の結果

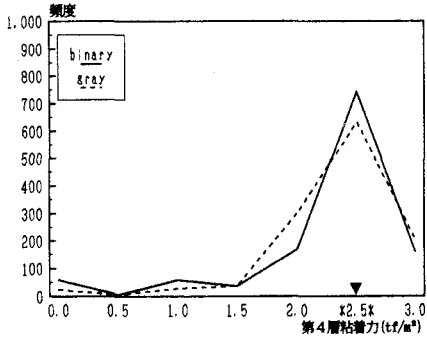


図-13 コーディングの比較：c(4)

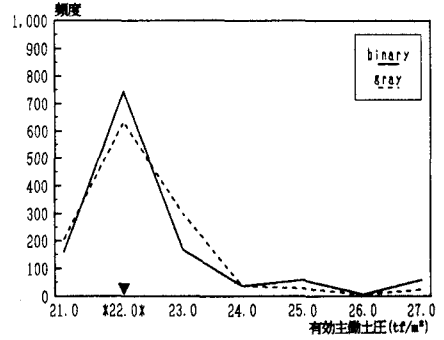


図-14 コーディングの比較：有効主働土圧

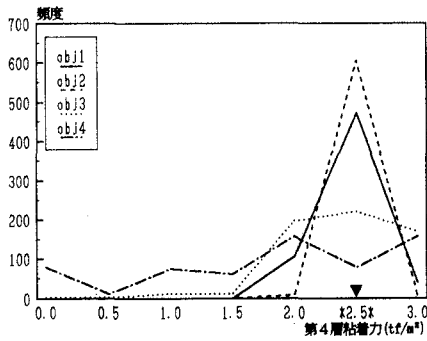


図-15 目的関数の比較：c(4)

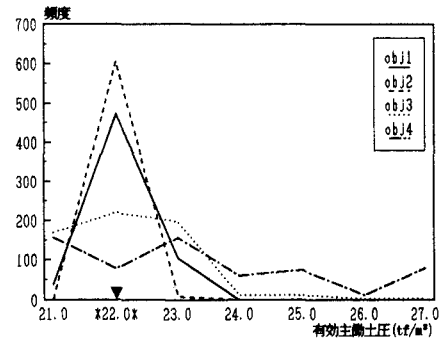


図-16 目的関数の比較：有効主働土圧

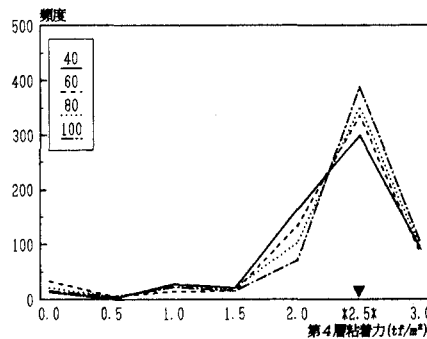


図-17 人口サイズの比較：c(4)

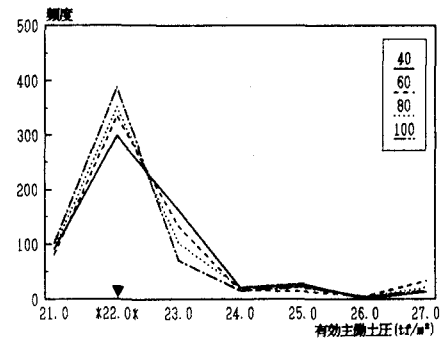


図-18 人口サイズの比較：有効主働土圧

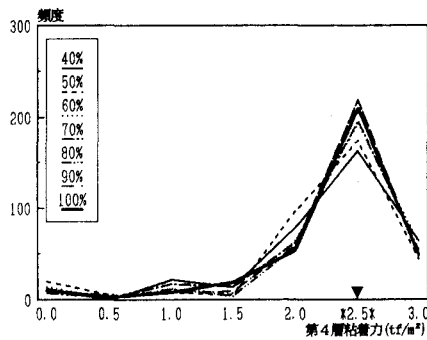


図-19 交叉確率の比較：c(4)

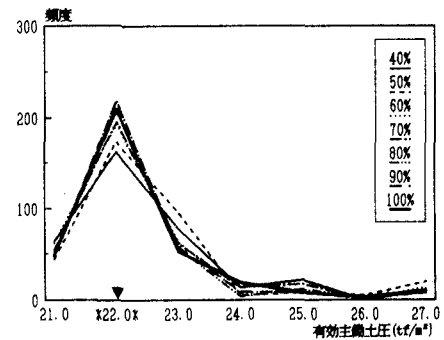


図-20 交叉確率の比較：有効主働土圧

紙面の制約により、突然変異の確率・箇所の比較は省略した。グラフの横軸上▼印で示した所が正解値である。土圧の頻度分布は $1.0(\text{tf}/\text{m}^2)$ 刻みで集計し、グラフは $17.5\sim 18.5$ の範囲内の数を目盛り 18.5 に示す、というように表している。なお、土圧の正解値はモデル①が $17.97(\text{tf}/\text{m}^2)$ 、②が $21.55(\text{tf}/\text{m}^2)$ である。

5. 考察

ここではまず、逆解析によって得られた結果の妥当性について考察してみる。計算結果を、設計変数である地盤物性値と、その値を用いて計算した有効主動土圧の、2種類の頻度分布によって調べてみた結果、物性値の頻度分布は、必ずしも正解値でピークとはならなかった。しかし、土圧の頻度分布は、正解値を含む位置でピークとなり、また分布がピークへ向かってかなり立ち上がっている事から、土圧で見た場合、計算結果は多くのケースでほぼ正解値となっていると言える。土留逆解析では実際に作用している土圧を知る事が目的であるので、結果は妥当であったと言える。

次に、GAのパラメータおよび目的関数について考察してみる。設計変数のコーディングは、バイナリコードの方がグレイコードよりも若干良いと言える。目的関数は、物性値の頻度分布を見るとそれほどでもないが、土圧の頻度分布で見ると、曲げモーメント値を用いる式(4)が比較的良く、正規化した水平変位量を用いる式(5)が悪いと言える。人口サイズについては、一番小さい40が最も悪く、大きい方が良いと言える。交叉の確率については、余り顕著な差が見られなかった。また掲載はしていないが突然変異の確率・箇所についてもパラメータの値による大きな差はなかった。

結局、土留逆解析のためのGAには、目的関数は式(4)を用い、設計変数はバイナリコードでコーディングし、人口サイズは100程度、交叉および突然変異の確率は、それぞれ標準的な60%、0.1%が適切ということになった。

6. あとがき

本研究では、土留逆解析手法としてGAの有効性、およびそのための目的関数の設定、GAのパラメータについて検討してみた。その結果、設計変数である地盤物性値は必ずしも正解値と一致しなかったが、物性値から土圧に置き換えた場合で見ると、ほぼ正解値あたりにあることがわかった。この事から、土留逆解析に対しGAは有効と考えられる。また目的関数は、本研究で用いた4式で少なからず違いが見られた。GAのパラメータについては、交叉の確率や突然変異の確率・箇所のように、種類による違いが余り見られないものがある事がわかった。今後はより実際的な問題に対する応用を踏まえ、土留めの解析法としてより正確に土留めの挙動を表せる弾塑性法を試みたいと考えている。

参考文献

- 1) 星谷・酒井：拡張カルマン・フィルターを使用した山留め側圧の推定、第21回土質工学研究発表会講演集、pp.1323-1324、1987。
- 2) 松本・内田：最適化手法による山留め予測解析システムの開発、第13回電算機利用に関するシンポジウム、pp.71-74、1988。
- 3) 斉藤・古賀・鎌田：拡張カルマンフィルター支援による山留め工事の計測管理手法、土木学会論文集、No.391/VI-8、pp.115-124、1988。
- 4) 杉本・鹿・山本：離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究、土木学会論文集、No.471/I-24、pp.67-76、1993。
- 5) 杉本・山本・笹木・満尾：GAによる仮設鋼矢板土留工の設計最適化に関する研究、土木学会論文集、No.474/VI-20、pp.105-114、1993。
- 6) 土木学会：トンネル標準示方書(開削編)・同解説、1986.6、pp86
- 7) 満尾・渋谷・酒井・杉本・森：GAを用いた弾塑性土留逆解析手法の提案、第3回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、pp.111-116、1993。
- 8) 杉本博之：GAの工業設計への応用にむけて、数理科学、No.353、1992。