

I-67

GAによる地盤物性値の逆解析および土留め挙動の予測解析について

室蘭工業大学 学生員 森 一功 室蘭工業大学 正 員 尾崎 詔
 北海学園大学 正 員 杉本博之 東急建設㈱ 正 員 酒井邦登
 東急建設㈱ 正 員 満尾 淳 東急建設㈱ 正 員 渋沢重彦

1. まえがき

近年、都市部の過密化が進むにつれて、残された空間として地下空間の高度利用が図られており、この地下空間創成技術の代表として開削工法が挙げられる。大規模・大深度の土留め構造物（以下、土留め）では、土留めの安全性を確保するとともに周辺構造物への影響を抑えることが要求されている。よって施工にあたっては、土留めの挙動をより早く、より正確に把握し、必要に応じて迅速に対処するという、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や荷重を推定する方法（土留め逆解析）については種々提案されているが、従来の一次の微係数の値を用いる数値計画法は適用が困難と言われており、また実際には試行錯誤によって行われることが多いようである¹⁾。筆者らは土留め逆解析に対し、離散的最適化問題に有効であるといわれるGA（遺伝的アルゴリズム）^{2) 3)}を適用し、その有効性について検討してきた^{4) 5) 6)}。本研究では、実際に施工された土留めを計算対象として逆解析を行い、また得られた結果を用いることにより、次段階での土留めの挙動予測のシミュレーションを行った。そして実測値との比較から、その実用への有効性について検討することを目的としている。

2. 情報化施工

2.1. 土留めの情報化施工

土留めは、一般には図-1に示すように、土圧・水圧を直接受ける土留め壁と、これを支持する切梁・腹起し等の支保工によって構成される仮設構造物である。設計にあたっては、施工ステップを忠実に表現しながら土留め壁の変形、応力を比較的精度良く解析できる弾塑性法（拡張法）⁷⁾が一般に広く用いられている。

しかし、解析条件が複雑なことから、解析条件の設定いかんで計算結果は大きく変化する。計算に用いられる地盤の物性値は、複雑な地層構成による土質のばらつきなどを考慮すると、正確に設定することは困難である。そのため土留めが大規模・大深度になるほど、その実際の挙動と予測した挙動とが異なるのは当然のこととされており、掘削に伴う土留めの挙動を、事前に正確に予測することは非常に困難である。しかも掘削が進むほど、施工の安全性・周辺への影響は深刻な問題となるため、各施工段階毎に、計測管理を行い、得られた測定値から土圧や地盤物性値を推定し、これをもとに次段階での土留めの挙動予測を行い、その結果を施工・設計に反映させる、という一連のサイクルを繰り返す情報化施工の重要性が高まっている。

2.2. 土留め逆解析

土留め逆解析とは、図-2のように土留めの現時点での計測値を再現

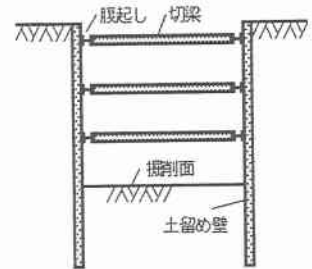


図-1 土留め

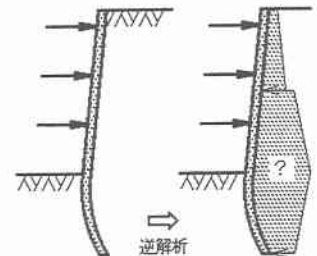


図-2 土留め逆解析

Prediction of behaviours on earth retaining wall for braced excavation based on inverse analysis using GA, by Kazunori MORI, Shinobu Ozaki, Hiroyuki SUGIMOTO, Kunito Sakai, Jun MITSUO and Shigehiko SHIBUSAWA.

逆解析によって推定値が求まると、これを次段階に適用して土留めの解析（予測解析）を行う。この際、本研究では逆解析で求められた推定値をそのまま用いるのではなく、掘削底面付近の静止土圧係数および水平地盤反力係数を変化させた予測解析を試みている。

本研究では土留めを、図-3のように、土留め壁を弾性ばりとして、切梁を弾性支承、掘削面側地盤を分布バネとするモデルを採用した。このモデルに、外力として有効主動土圧を作用させて土留め壁の変位を計算する。また有効主動土圧は、式(1)により算出した。

ここで、

ただし、 P_{ae} は有効主働土圧 (tf/m^2)、 P_a は主働土圧 (tf/m^2)、 P_o は静止土圧 (tf/m^2)、 K_a は主働土圧係数、 $\gamma_t \cdot Z$ は背面側鉛直圧力 (tf/m^2)、 p_w は背面側間隙水圧 (tf/m^2)、 K_o は静止土圧係数、 $\gamma_t \cdot Z'$ は掘削面側鉛直圧力 (tf/m^2)、 p_w' は掘削面側間隙水圧 (tf/m^2)、 c は土の粘着力 (tf/m^2)、 ϕ は土の内部摩擦角 ($^\circ$) である。

4. 土層のスライスと土留め逆解析の定式化

次に、土留め逆解析の定式化については、本研究では式(3)に示すような、土留め壁の水平変位を用いる式を目的関数とした。土留め壁の水平変位は、土留めの施工過程において、挿入式傾斜計などにより一般によく計測されるもので、図-4の・印に示されるような、任意に設定した測定点におけるたわみ角から算出される。

○目的関数：

○設計変数: $\{H, c(j), \phi(j), K_o(j')\}$ (4)

($j = 1 \sim n$, n :土層の数、 $j' = 1 \sim n'$, n' :掘削面側の土層の数)

ここで、 y_{ai} 、 y_{mi} はそれぞれ測定点 i での土留め壁の解析水平変位 (cm)、測定水平変位 (cm)、NPは測定点の数である。なお、本研究の数値計算例で用いた測定水平変位は、実際に土留めの施工を行った際に得られた実測値である。

図-3 土留めの解析モデル

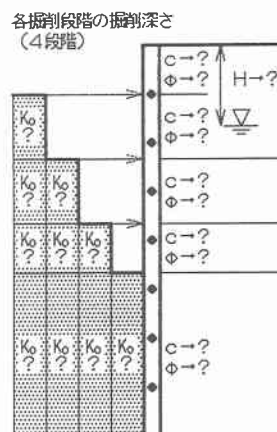


図-4 土層のスライス

4. 数値計算例

本研究で扱う数値計算の対象は、名古屋市内の地中連続壁（壁厚 600mm）工事である。この土留めは7段階にわたって掘削が行われ、最終掘削深さは19.19mである。各掘削段階での掘削深さもあわせて図-5に示している。図中の矢印は切梁位置を表し、数字は地表面からの深度(m)である。地層は2層で構成されるが土層のスライスをを行った結果、図の右のように、

第1層を7分割した。図中の γ 、 K_n は、それぞれ単位体積重量、水平地盤反力係数である。また
・印は土留め壁の水平変位の測定点であり、2mピッチとしている。数値計算は、まず1次～6次掘削の各段階において逆解析を行い、結果の妥当性について検討した。次に、次段階の土留めの挙動予測について検討するため、逆解析の結果を用いて2次～最終掘削の予測解析を行った。

4.1. 逆解析

設計変数の上・下限値、ピッチ等は表-1とした。ここで地下水位については、掘削に伴って下がる可能性があるため、取り得る範囲は次のように設定した。まず、1次掘削では設計時の値3.5mを基準にして上下限値を設定し逆解析を行う。その結果得られた値を次段階（2次掘削）の下限値にし、上限値は掘削深さに設定して、以下同様に行う。結果として、各掘削段階での地下水位の取り得る値は表-2となった。

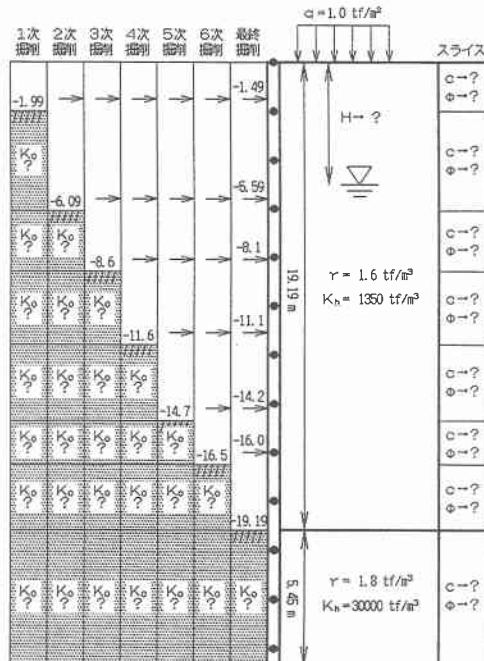


図-5 土留め概要図

表-1 設計変数の取り得る範囲

物理的意味	下限値	上限値	ピッチ	個数	G A bit 数
地下水位 (m)	表-2			8	3
粘着力 (tf/m ²)	0.00	7.50	0.50	16	4
内部摩擦角 (°)	5.00	42.50	2.50	16	4
静止土圧係数	0.50	4.00	0.50	8	3

表-2 地下水位の取り得る値

1次	2.90, 3.10, 3.30, 3.50, 3.70, 3.90, 4.10, 4.30
2次	3.50, 3.80, 4.10, 4.40, 4.80, 5.20, 5.60, 6.09
3次	3.50, 4.20, 4.90, 5.60, 6.30, 7.00, 7.80, 8.60
4次	4.20, 5.20, 6.20, 7.20, 8.30, 9.40, 10.50, 11.60
5次	5.20, 6.50, 7.80, 9.10, 10.50, 11.90, 13.30, 14.70
6次	9.10, 10.10, 11.10, 12.10, 13.20, 14.30, 15.40, 16.50

表-3 逆解析の結果得られた各設計変数の値

物理的意味		1次掘削	2次掘削	3次掘削	4次掘削	5次掘削	6次掘削	
地下水位H (m)		3.50	3.50	4.20	5.20	9.10	12.10	
粘着力c (tf/m ²)	1層	1	0.00	3.50	6.00	6.50	4.00	0.00
		2	1.00	5.00	4.50	5.00	6.00	1.50
		3	0.00	1.50	5.00	5.50	7.50	3.00
		4	1.50	0.00	1.00	7.50	7.00	3.00
		5	2.00	0.00	0.50	3.50	6.50	7.00
		6	3.00	4.50	0.50	0.50	5.50	5.50
		7	6.00	2.00	0.00	1.00	2.00	4.50
	2層	7.00	6.00	7.00	7.00	7.50	1.00	
内部摩擦角φ (°)	1層	1	40.00	5.00	10.00	17.50	27.50	10.00
		2	22.50	40.00	20.00	35.00	22.50	35.00
		3	5.00	25.00	15.00	40.00	5.00	5.00
		4	15.00	12.50	32.50	12.50	25.00	42.50
		5	7.50	7.50	7.50	17.50	22.50	40.00
		6	27.50	42.50	5.00	12.50	5.00	17.50
		7	30.00	22.50	5.00	7.50	5.00	7.50
	2層	22.50	7.50	35.00	10.00	10.00	20.00	
静止土圧係数K ₀	1層	2	2.50					
		3	0.50	1.00				
		4	1.50	2.50	3.50			
		5	4.00	0.50	0.50	0.50		
		6	3.00	2.00	0.50	1.00	4.00	
		7	3.50	1.50	0.50	0.50	0.50	1.50
		2層	1.50	0.50	2.00	3.50	0.50	2.50
	最小値/収束世代		1/6	42/43	72/76	28/35	20/36	47/51
解析回数		201	1189	1642	831	973	1093	
最小目的関数 (m)		0.0834	0.0810	0.0850	0.1300	0.0753	0.0817	

G Aの詳細については省略する⁸⁾が、G Aのパラメータは、設計変数のコーディングをバイナリコード、人口サイズ50、最大世代数 100、交叉方法は一点交叉、交叉の確率 60%、突然変異の確率5%とした。

逆解析の結果、得られた設計変数の値を表-3に示す。表中の、1層1~7とした項は、スライスによって7分割した土層を上から順に番号付けしたものである。また、これを土留め壁の水平変位の分布で表し、各掘削段階ごとに実測値と比較した結果を、図-6~11の左側に示す。逆解析の結果を「■」、実測値を「□」でプロットしている。また図の右側は、逆解析の結果を土圧分布で表し、設計時の土圧分布と比較した結果である。逆解析の結果を実線、設計値を破線で示した。なお両者の地下水位を、逆解析の結果は実線（右）で、設計値は破線（左）で示している。

4.2. 逆解析の結果と考察

まず、土留め壁の水平変位について見ると、いずれの掘削段階においても、逆解析の

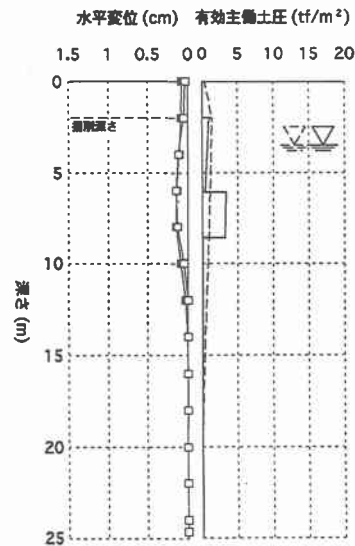
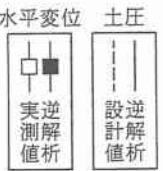


図-6 1次掘削逆解析

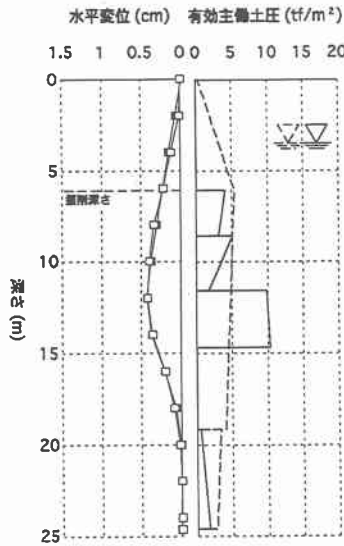


図-7 2次掘削逆解析

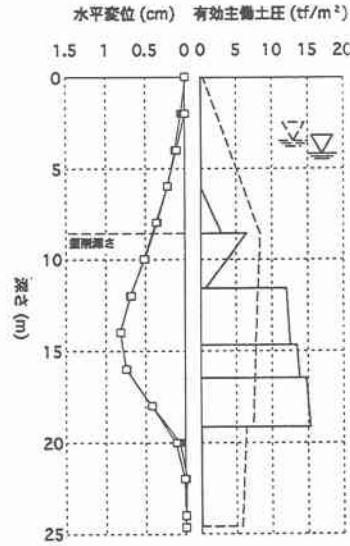


図-8 3次掘削逆解析

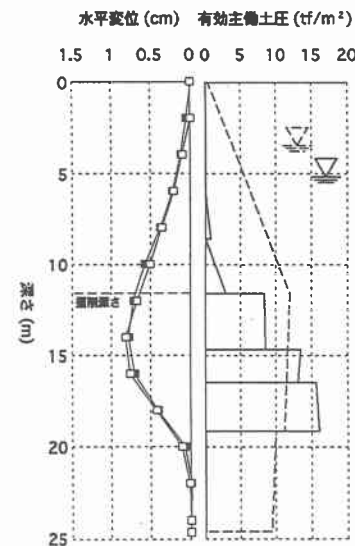


図-9 4次掘削逆解析

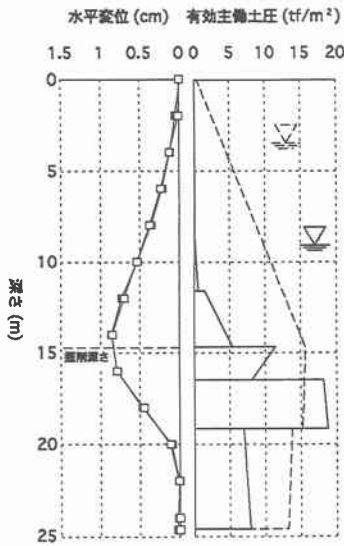


図-10 5次掘削逆解析

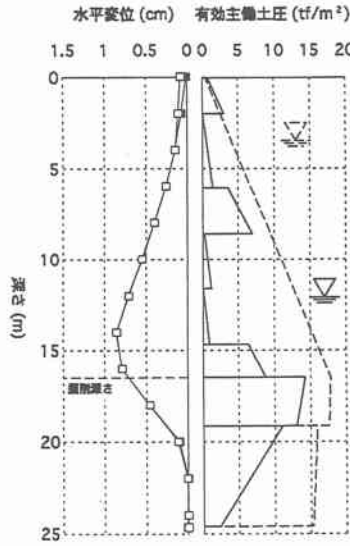


図-11 6次掘削逆解析

結果が実測値に非常に近い分布であることがわかる。よって土留めの実際の挙動をほぼ正確に再現できたと
 言え、結果は良好であった。また、土圧分布については、設計土圧に対して逆解析の結果は大きく異なり、
 特に掘削面より上では、逆解析の結果は設計土圧よりかなり小さい分布を示した。

次に、得られた設計変数の値を見ると、表-3に示されるように掘削段階によってかなり異なっているこ
 とがわかる。地下水位については、掘削に伴って下がっているのがわかり、また上限値や下限値に偏ってい
 ないことから、本計算で用いた地下水位の範囲の設定は有効と思われる。そして図6～11を見ると、掘削
 深さと得られた地下水位との位置関係が不自然ではないと思われることから、得られた値は実際の地下水位
 に近いのではないかと考えられる。しかし粘着力と内部摩擦角については、掘削段階毎に値がかなりばらつ
 き、また掘削に伴う規則性などは特に見られなかった。ただし静止土圧係数に関しては、地表面付近の土層
 の静止土圧係数は直前の掘削段階の静止土圧係数よりかなり大きくなる傾向が見られた。これは、実際の静

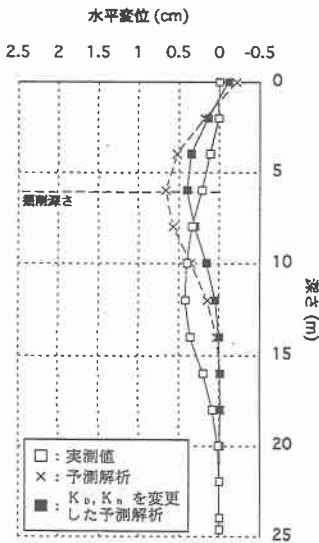


図-1 12 2次掘削予測解析

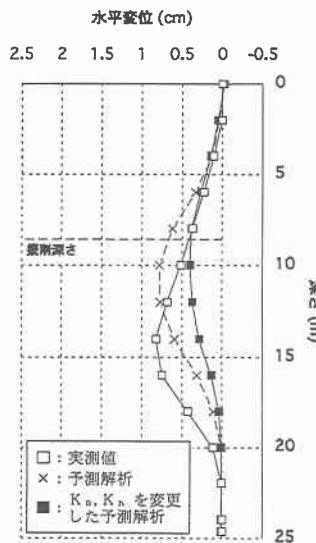


図-1 13 3次掘削予測解析

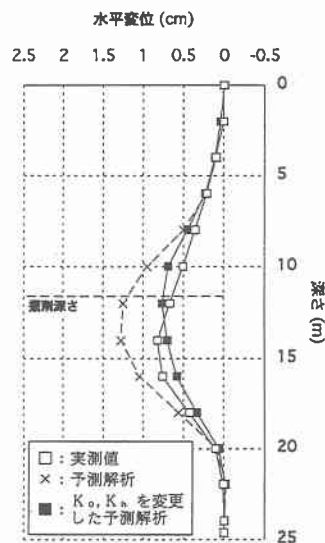


図-1 14 4次掘削予測解析

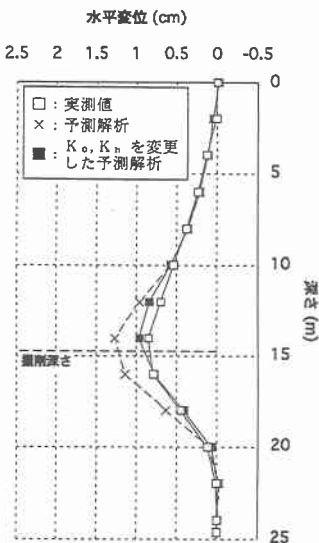


図-1 15 5次掘削予測解析

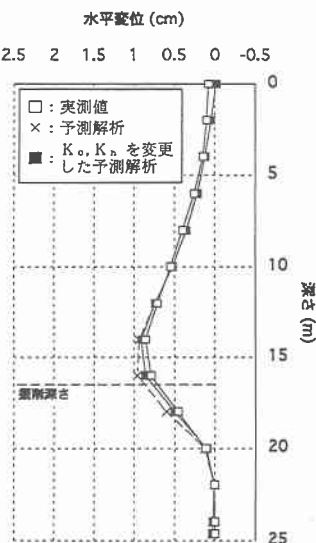


図-1 16 6次掘削予測解析

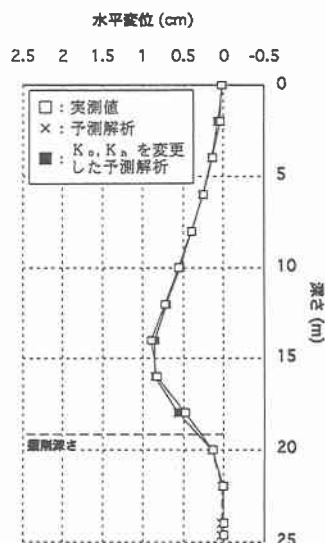


図-1 17 最終掘削予測解析

止土圧は掘削側の土被りに応じたものではなく、相当残留程度が大きいものと考えられる。

4.3. 予測解析の結果と考察

次に、次段階での土留めの予測解析について検討する。まず、表－3の値をそれぞれ次段階に適用し、2次～最終掘削時の予測解析を行った。その結果、土留め壁の水平変位は、図12～17の「×」でプロットした、破線が示す分布となった。これを、「□」でプロットした実測値の分布と比較すると、若干の誤差は見られるものの、全体的に見て予測解析の結果は実用上ほぼ問題のない精度であり、逆解析の結果を用いることにより、次段階の土留めの挙動を予測できたとと言える。

次に、予測解析の精度の向上を試みる。予測解析の結果を、現状よりもさらに実測値に近づけるには、解析を行ううえでの条件を変更する必要がある。ここで、逆解析の結果得られた設計変数からは、地表面付近の静止土圧係数が、前掘削段階よりも大きくなるという傾向が見られた。掘削面側最上層に注目すると平均して2倍程度大きいことから、予測解析時の静止土圧係数を最上層のみ2倍に変更して予測解析を行った。しかし結果はほとんど変わらなかったため、掘削底面以下の主動土圧だけでは予測精度はあまり上がらず、掘削面側地盤の水平地盤反力係数を変更する必要性のあることが確認された。そこで次に、静止土圧係数の変更に加えて、水平地盤反力係数が変位依存性を有していると考え、第1層水平地盤反力係数を設定値の2倍に変更して予測解析を行った。この結果、土留め壁の水平変位の分布は、図12～17の「■」でプロットした分布となった。図を見ると、2、3次掘削あたりでまだ若干の誤差はあるものの、全体的にかなり実測値に近づいたことがわかる。したがって、今後、水平地盤反力係数の変位依存性を確認するためにも、設計変数に水平地盤反力係数を加え、掘削段階の進捗との関係を調査する必要がある。

5. あとがき

本研究では、土留めの施工過程における土留め壁の水平変位の実測値を用いて、GAによる逆解析を行った結果の妥当性、また、逆解析の結果を用いた次段階での土留めの予測解析について検討してみた。その結果、逆解析については得られた土留め壁の水平変位が実測値に非常に近い分布となり、実際の土留めの挙動をほぼ完全に再現することができたとと言える。また、逆解析の結果得られた地下水位や地盤物性値を用いて次段階での予測解析シミュレーションを行った結果、多少の誤差はあるものの実用上はほぼ十分な精度であったと言える。よって、逆解析の結果を適用することにより次段階での土留めの挙動予測が行えたと言え、本手法は実用に向けて有効ではないかと考えられる。そして、さらに精度の高い予測解析結果を得るためには、予測時において何らかの条件の変更が必要と思われるが、本研究では静止土圧係数と水平地盤反力係数を変更した予測解析を試みた結果、土留め壁の水平変位は変更前よりも比較の実測値に近い分布となり、良好であった。また、今回の検討では掘削側地盤を弾性と仮定したため、施工の初期段階では掘削底面以深の変形予測精度があまり良くなかった。今後は弾塑性の地盤モデルについても検討を加える予定である。

参考文献

- 1) 土木学会建設マネジメント委員会・マネジメント技術小委員会：計測管理の現状と課題、1991.3
- 2) 杉本博之・鹿 汙麗・山本洋敬：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.
- 3) 杉本博之・山本洋敬・笹木敏信・満尾 淳：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.
- 4) 満尾 淳・渋谷重彦・酒井邦登・杉本博之・森 一功：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.
- 5) 森 一功・杉本博之・満尾 淳・渋谷重彦・酒井邦登：土留逆解析へのGA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、pp.168-173、1994.
- 6) 森 一功・杉本博之・酒井邦登・尾崎 昶：GAの土留逆解析への応用に関する基礎的研究、土木学会第49回年次学術講演会、1994.
- 7) 土木学会：トンネル標準示方書（開削編）・同解説、pp.86、1986.6
- 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.