

(19) GAを用いた弾塑性土留逆解析手法の提案

BACK ANALYSIS FOR BEHAVIOUR OF EARTH RETAINING WALL USING GA

満尾 淳* 渋沢 重彦** 酒井 邦登***
Jun MITSUO Shigehiko SHIBUSAWA Kunito SAKAI
杉本 博之**** 森 一功*****
Hiroyuki SUGIMOTO Kazunori MORI

This paper describes the back analysis method for the behaviour of the earth retaining wall considering elasto-plastic behaviour of the ground during excavation, by using the horizontal displacement of the retaining wall as the observed values. This back analysis procedure is formulated by using a genetic algorithm (GA) which is much noticed as the optimization method for the design problem containing the discrete design valuables or having lots of local minimums. By using this method, effective active earth pressure acting on the retaining wall can be easily identified and the adequacy of this method was verified from the results of some numerical simulation using actual excavation data.

Key Words: back analysis, earth retaining wall, GA

1. まえがき

近年、都市区域における大規模土留掘削工事が多く行われるようになり、施工途中における土留構造物の安全性および近接構造物への影響を常に定量的に確認しながら、施工を進めることが重要な要素となっている。¹⁾ その試みの一つとして、各施工過程の計測結果より水平地盤反力係数等の物性値を推定（弾塑性土留逆解析）することによる、次施工段階の予測が行われてきているが、計測値である土留壁の水平変位あるいはたわみ角に対して未知数である物性値が敏感なことあるいは局所解が多く存在すること等から従来の数理計画法の適用が困難であった。

本研究では、多峰性関数問題や離散的最適化問題の解法として近年注目されてきているGA（遺伝的アルゴリズム）²⁾を応用し、土留壁の水平変位から土留壁に作用する有効主動土圧分布の同定を試みた結果、本手法の妥当性が検証されたのでここに報告する。

2. 土留構造物の設計と情報化施工

土留構造物は、図-1に示す様に主に土留壁・切梁・腹起しによって構成される仮設構造物であり、地下構造物あるいは建築物の建設の際に採用される。

*	東急建設	施工本部	土木設計部	(〒150 東京都渋谷区渋谷1-11-8)
**	東急建設	技術本部	土木技術部	(〒150 東京都渋谷区渋谷1-15-21)
***	工博	東急建設	技術本部	土木技術部 (〒150 東京都渋谷区渋谷1-15-21)
****	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)
*****		室蘭工業大学大学院	工学部建設システム工学科	(〒050 室蘭市水元町27-1)

土留構造物の設計は、通常は慣用計算法と呼ばれる手法を用いて、各企業体が提案する設計基準に従って行われる。しかし、大深度の土留構造物あるいは周辺に重要な近接構造物が存在する場合は、慣用計算法だけでは十分ではない。そのような場合に用いられる計算手法が弾塑性計算法であり、大規模な土留構造物の安全性あるいは近接構造物への影響を把握するために用いられる計算手法である。

弾塑性土留計算手法では、図-2³⁾に示すように、土留壁を連続梁、切梁を弾性支承、掘削底面下の地盤を分布バネとし、外力として有効主動土圧を作用させる。

掘削面側の地盤反力は、変形に比例して発生し、その値は有効受働土圧を上限とする。そして各掘削施工段階に対する計算を行い、土留壁に生じる水平変位・断面力あるいは切梁軸力に対する照査を行う。

ただし、各施工段階における土圧分布の評価、水圧の考え方あるいは掘削底面下の地盤分布バネの評価等、解析条件の設定が複雑であるという問題点があり、解析結果には不確実性を多く含んでいると考える必要がある。

したがって、土留構造物の規模が大型化するにしたがい、設計値(事前予測)と実測値が合わないケースが多くなってきており、安全性、経済性の面からも合理的な施工が困難となってきた。

施工の安全性を確保しつつ経済性を向上させるためには、施工が進行するにつれて、その実測結果から設計値を見直した上で(逆解析)、次施工に対する挙動予測を行い、施工へフィードバックさせることにより、常に構造物の安全性を確認する情報化施工が必要不可欠となる。

ただし、情報化施工を有効に作用させるためには、適切な計測項目の選定、逆解析の際の同定値の選定、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いえる。

図-3には情報化施工の一般的なフローを示す。

3. GAによる弾塑性土留逆解析手法の定式化

GAは自然淘汰と遺伝の仕組みを基礎とし、生物進化の過程を考えたとき、生物の持つ適応性に学ぼうという立場から考えられた最適化手法であり、目的関数の最小化の代わりに適応関数(fitness

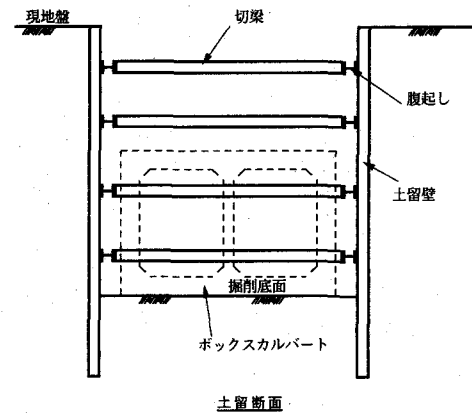


図-1 土留概要図

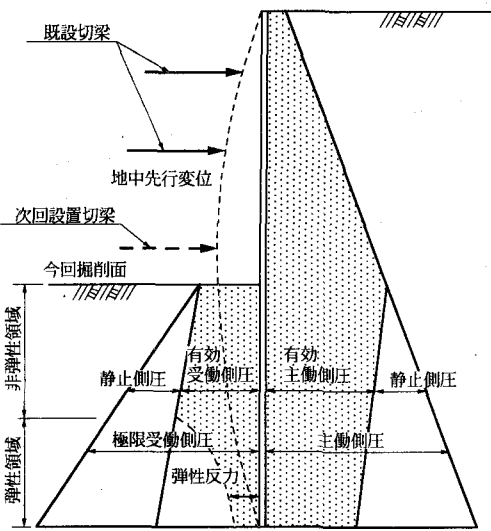
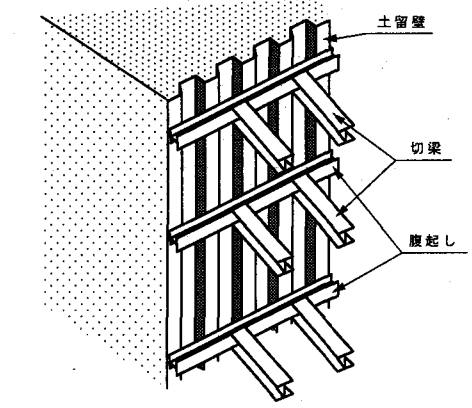


図-2 弾塑性計算法³⁾

function) の最大化を考える。具体的にはランダムに決定された初期世代に対して淘汰 (reproduction)、交叉 (crossover)、突然変異 (mutation) の3つの遺伝的オペレータを施すことにより、集団の適応度を最大化させようとするものである。GAの具体的なアルゴリズム⁴⁾ は以下に示すとおりである。

- ① 同定値となる設計変数を離散数として扱い、これと2進数、4進数あるいは10進数からなる線列と対応づける。
- ② N個 (人口数) の線列 (世代) に対して目的関数を計算し、これを適応関数に変換する。
- ③ 適応関数の値により、それぞれの線列の次世代への生存確率を決定する (淘汰)。
- ④ ランダムに選択された任意の2つの線列についてある確率 (Pc) で遺伝子の組み替えを行う (交叉)。
- ⑤ 同様に任意の1つの線列についてある確率 (Pm) で、線列の一部を任意の遺伝子に置換する (突然変異)。

②から⑤までのプロセスを、繰り返すことにより最も目的関数の小さい線列を探索する。設計変数としては、地盤物性値、地盤反力係数、土留壁の剛性、土圧分布等様々な変数が考えられるが、本研究では、土留壁に作用する有効主動土圧分布を同定することを目的として、設計変数としては図-4に示すように、各層における上端の土圧強度Pおよび各層の土圧勾配y_iを採用した。ここで、層境は、単に地層境だけではなく、各施工段階における掘削底面も含む。ただし、土圧論的に隣接する層の土圧強度が連続となると判断できる場合、すなわちm層下端の土圧強度と(m+1)層上端の土圧強度が等しい場合については、設計変数を一つ減じることができる。なお、受働土圧については、土圧式から求まる設計値を用いた。

また目的関数Oについては、土留壁の水平変位を用いて式 (1) のように設定した。ここでδ_{ai}は深さiでの解析水平変位、δ_{mi}は深さiでの計測水平変位を表す。図-5に簡単な解析の流れを示す。

$$O = \sum_{i=1}^n (\delta_{ai} - \delta_{mi})^2 \rightarrow \text{Min.} \quad (i = 1 \sim n) \dots\dots\dots (1)$$

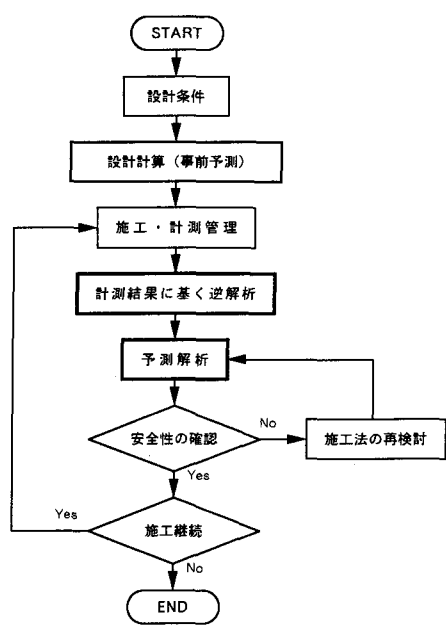


図-3 情報化施工のフロー

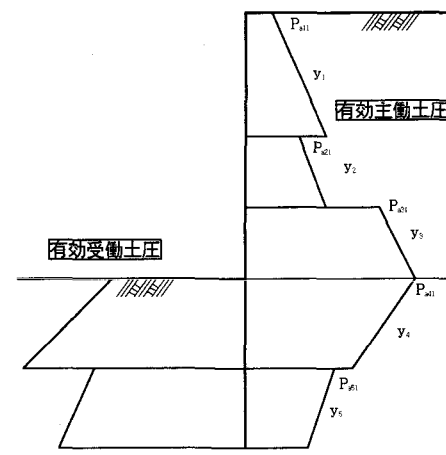


図-4 設計変数の設定

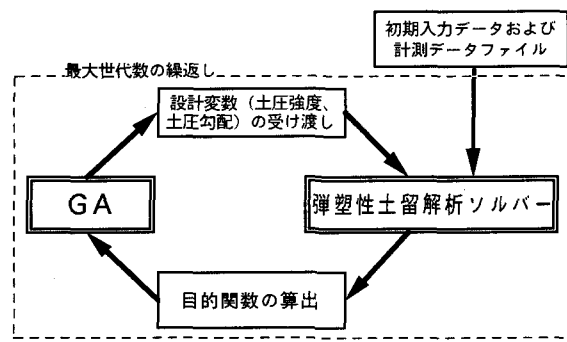


図-5 解析の流れ

4. 数値シミュレーション

ここでは図-6の(a)に示す3段切梁モデルを用いて、前述の手法の妥当性について検証を行った。掘削段階としては、4段階施工となるが、ここでは4次施工（最終段階）における有効主働土圧分布の同定を行った。解析手順としては、まず順解析を行い得られた各深さにおける水平変位を計測変位と見なし、逆解析プロセスにおける入力値とする。この時、計測ポイントとしては0.5m（31点）、1.0m（15点）、2.0m（8点）ピッチの3とおりを考えた。またGAパラメータとしては、設計変数は、2進数によりコーディングし、人口サイズ40、最大世代数30、 $P_c = 60\%$ 、 $P_m = 5\%$ 、交叉方法は一点交叉とした。図-6からわかるように第1層から第4層までは土圧強度が連続しているため、設計変数は、第1層、第5層上端の土圧強度および第1層から第5層までの土圧勾配の計7変数となる。表-1に各設計変数の上・下限値およびピッチを示す。なおこの時の線列長さ（2進数）は47であった。

表-1 設計変数のコーディング

設計変数 ランク	物理的意味	下限値	上限値	ピッチ
①	第1層上端土圧強度	0.00	3.15	0.05
②	第5層上端土圧強度	0.00	6.35	0.05
③	第1層土圧勾配	0.00	1.27	0.01
④	第2層土圧勾配	0.00	1.27	0.01
⑤	第3層土圧勾配	1.00	2.27	0.01
⑥	第4層土圧勾配	-0.63	0.00	0.01
⑦	第5層土圧勾配	-2.27	-1.00	0.01

図-6に同定された土圧分布およびこの土圧分布を用いて行った順解析結果を示す。

同定された土圧分布は第1層および第5層でややバラツキはあるものの、水平変位およびモーメント分布は正解値と非常に良く一致することがわかる。すなわち土圧に対して水平変位、モーメントの感度は比較的鈍く、このことは表-1で設定した設計変数のピッチをより広げることができることを示しており、大深度土留のように土圧強度が大きくその推定範囲が広い事例にも対応できると考えられる。また解析結果は計測ポイントの数の影響をほとんど受けず解析の安定性を示している。なお計算はHP9000（750）により行ったが、計算時間はどのケースについても約300秒程度であった。

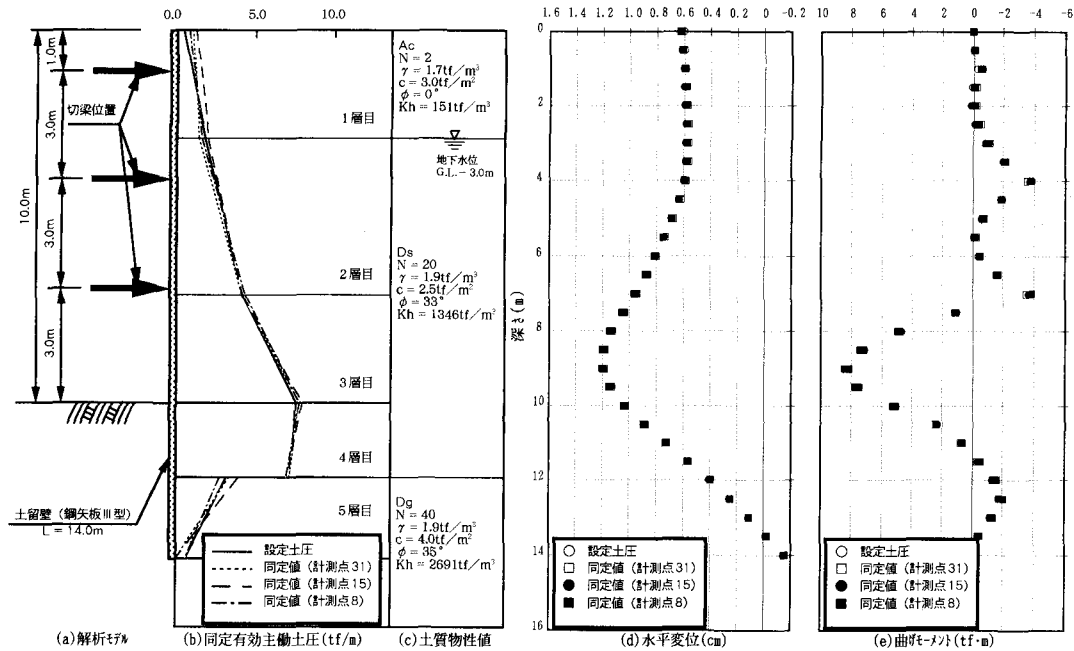


図-6 解析モデルおよび解析結果

5. 実測結果による逆解析

次に実測結果を用いて、上記の手法により逆解析を試みたので報告する。

工事概要図は、図-7に示すとおりアイランド工法で施工されており、最終掘削深さは、G.L.-15.61m、土留壁は延長28.0mのSMW（φ550、I-400×200、etc450）で施工されている。また切梁段数は4段となっているが、覆工桁を施工しているため、解析上ではG.L.-0.0mで0段切梁を考慮している。また計測値としては、挿入式傾斜計により測定されたたわみ角を積分することにより水平変位に換算し、これを計測値として用いており、深さ方向の測定間隔は2.0mである。GAパラメータは、設計変数は、数値シミュレーションと同様に、2進数によりコーディングし、人口サイズ40、最大世代数30、Pc = 60 %、交叉方法は一点交叉とした。ただし、突然変異確率Pmについては、数値シミュレーションでは正解土圧が既知であるため設計変数の設定範囲が狭いのに対して、本解析では、設定範囲を広く設定してあることを考慮して、局所解に陥ることを防ぐためPm = 20 %とした。表-2に設計変数の個数および2進数とした場合の線列長さを示す。図-8に逆解析により求められた土圧分布を示す。設計土質定数からランキン-レザール式により求められた土圧分布を点線であわせて示したが、全体的な傾向として逆解析により求められた土圧分布の方が、設計土圧よりも大きくなるのがわかる。特にそれは掘削底面下かつ低次施工の段階で顕著である。

表-2 設計変数の個数と線列長さ

施工次数	設計変数の個数	線列長さ (2進数)
一次施工	4	21
二次施工	10	47
三次施工	10	46
四次施工	12	57
五次施工	11	52

図-9には、逆解析により求められた土圧分布を用いて、順解析を行って得られた水平変位分布を示す。一次施工を除けば、実測値を比較的良好に表現しているといえる。

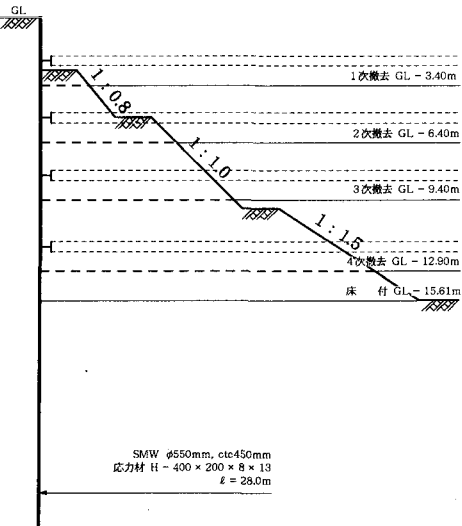
6. おわりに

弾塑性土留逆解析手法にGAを適用し、有効主動土圧の同定を行った結果、数値シミュレーションおよび実測結果を用いた解析ともに、土留壁に生じる水平変位をよく表現でき、本手法が有効であることが示された。

ただし、本手法を挙動予測まで発展させるためには、同定値として、粘着力、内部摩擦角、N値等の地盤の物性値あるいは地盤反力係数等についても考える必要がある。また目的関数についても計測値としてたわみ角、切梁軸力等も考慮して、本手法の適用性について検討したいと考えている。なお、本研究で用いた弾塑性土留解析プログラムは川田テクノシステム(株)によって開発されたものであることを明記しておく。

標高 TP(m)	深度 (m)	層厚 (m)	土 質		物 性 値
			種別	記号	
31.40	0.00				
		3.90	ローム	Lm	$\gamma_s = 1.5\text{t/m}^3$ $C = 3.0\text{t/m}^2$ $\phi = 15^\circ$ $E = 1400\text{t/m}^2$ $N = 8$
27.50	3.90				
▽	6.20				
		6.50	粘性土	Dtc	$\gamma_s = 1.6\text{t/m}^3$ $C = 5.0\text{t/m}^2$ $\phi = 0^\circ$ $E = 1000\text{t/m}^2$ $N = 5$
21.00	10.40				
		7.20	砂質土	Ds1	$\gamma_s = 1.9\text{t/m}^3$ $C = 1.0\text{t/m}^2$ $\phi = 35^\circ$ $E = 1700\text{t/m}^2$ $N = 10$
13.80	17.60				
		4.60	砂質土	Ds2	$\gamma_s = 1.9\text{t/m}^3$ $C = 0.0\text{t/m}^2$ $\phi = 35^\circ$ $E = 2700\text{t/m}^2$ $N = 25$
9.20	22.20				
			砂 礫	Dg	$\gamma_s = 2.0\text{t/m}^3$ $C = 0.0\text{t/m}^2$ $\phi = 40^\circ$ $E = 30000\text{t/m}^2$ $N = 50$

(a) 土質条件



(b) 断面図

図-7 解析断面および土質条件

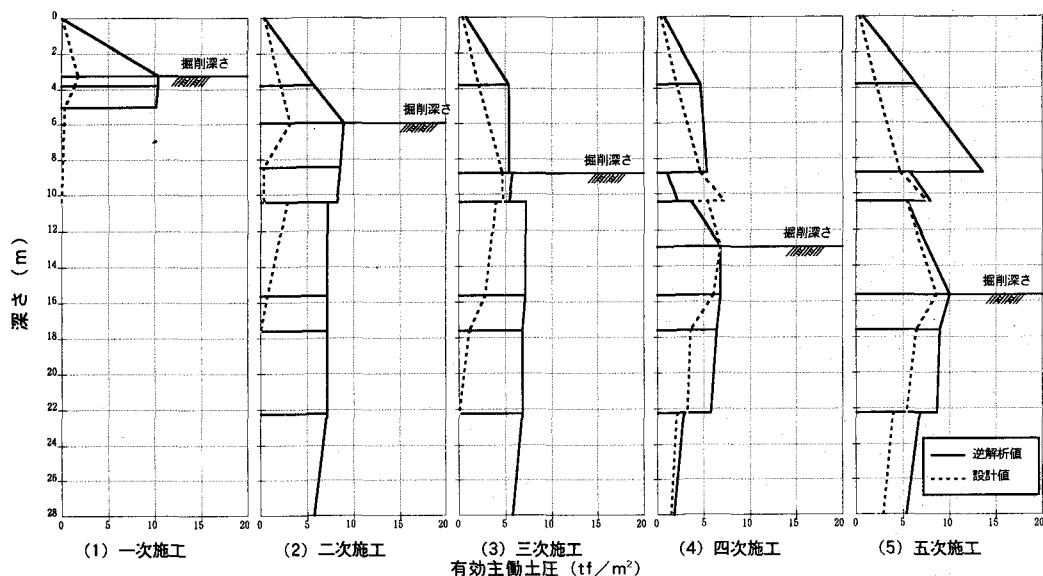


図-8 土圧分布の比較

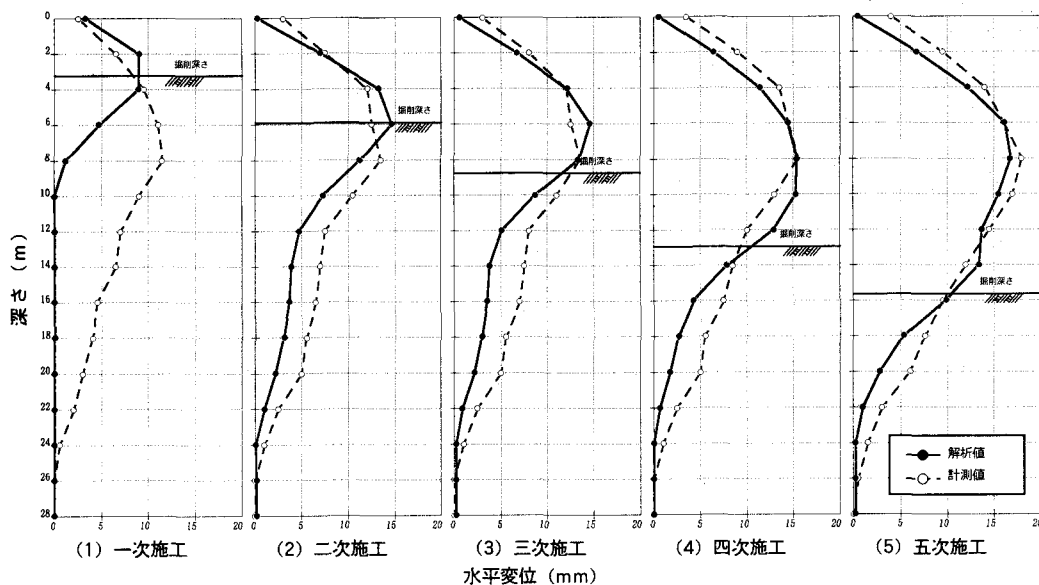


図-9 解析結果と計測値の比較 (水平変位)

【参考文献】

- 1) 本山省三、丸岡正夫：基礎設計における基準の背景と使い方 (5.掘削、土留めの設計)、土と基礎、土質工学会、1992.4、pp59-66
- 2) D. E. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- 3) 土木学会：トンネル標準示方書 (開削編)・同解説、1986.6、pp86
- 4) 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回年次大会学術講演会概要集、I-515、1992.9