

土留め解析手法に関する研究

——新土留め解析プログラム (ERSA)——

土 屋 幸三郎 平 尾 淳 一
(本社 技術本部 土木技術第一部)
徳 永 正 博 芳 賀 孝 成
(本社 電子計算センター)

Study on Earth-Retaining Structure Analysis

——The New Program of Earth-Retaining Structure Analysis (ERSA)——

Kozaburo Tsuchiya Jun-ichi Hirao
Masahiro Tokunaga Takashige Haga

Abstract

In order to improve accuracy in design of earth-retaining structures the authors proposed a program on earth-retaining structure analysis considering preload of struts and initial tension of earth anchors. In this paper the basic concepts of the analytical method and the result of examination of the practicability are introduced. The behavior of the structure was calculated with changing preload in homogeneous ground models of sand and clay, and the characteristic behaviors of the structure were investigated. If the preload is about 60% as strong as the external force, i.e., lateral pressure, it is effective for decreasing deformation and bending moment of the structure. However, it is found that too much preload caused the merit of the preload method to be lost in soft clay ground because it greatly alters bending moment distribution of the structure.

概 要

筆者らは、土留め設計の精度を確保するために、切ばりプレロード荷重やアースアンカー初期緊張荷重による土留め壁の挙動を適切に評価できる土留め解析プログラムを開発した。本文は、当解析手法の基本的な考え方、およびその実用性の検討結果について紹介するものである。また、砂と粘土の均一モデル地盤の2ケースを想定し、プレロード荷重の導入量を変化させた場合の土留め壁の挙動を解析的に求め、プレロード工法における土留め壁の挙動の特徴について検討している。解析結果によると、砂地盤および粘土地盤ともに外力、すなわち、側圧の60%程度のプレロード荷重であれば、壁体変形や曲げモーメントの低減に対してかなり効果的であることが判明した。しかし、軟らかい粘土地盤で過大なプレロード荷重を導入すると、曲げモーメントの分布形状が大きく変化し、プレロード工法のメリットが失われることがわかった。

1. まえがき

土留め掘削工事の大型化や深層化が進むにつれ、掘削中の周辺地盤および隣接構造物への影響が施工上大きな問題となってきた。そこで、最近の土留め工事では、土留め壁の変形をできるだけ小さく抑えるために切ばりプレロード工法を採用する例が多い。また、土木分野では、アースアンカーによる大規模な土留め工事も増加する傾向にある。しかし、弾塑性拡張法に代表される通常の土留め解析手法では、切ばりのプレロード荷重およびアースアンカーの初期緊張荷重などを考慮することは難しい。

このため、便宜上、支点バネの剛性を変更することなどで対処しているのが現状である。本文では、これらの荷重による土留め壁の挙動を適切に評価するために開発した土留め解析プログラムの基本的な考え方について紹介し、切ばりプレロード工法を採用した2工事場での土留め壁の応力および変形の実測値と、当解析手法を用いて算出した計算値の比較を行ない、当解析手法の適用性について検討している。また、プレロード導入の効果を明らかにする目的で、砂および粘土の2ケースについて均

一モデル地盤を想定しプレロード荷重の大きさを变化させた際の土留め壁の挙動を解析している。

2. 解析手法の概要

当解析手法は、骨組構造解析と同様の手法である変位法による2次元解析を基本としている。図-1は、当解析手法における基本構造モデルを示したものである。土留め壁は有限の節点を有するはり要素とし、各節点には地盤バネを設定している。また、その任意の節点には、架構条件により切ばりバネ、下端バネ、摩擦バネ、回転バネを設けることができる。以下、当解析手法の特徴であるこれら種々のバネ（地盤バネ、切ばりバネ、下端バネ、摩擦バネ、回転バネ）について説明する。

2.1. 地盤バネ (k_{sy})

地盤バネは、土留め壁の変位 (δ) によって生ずる地盤反力を評価するバネであり、土留め壁の各節点に設ける。この地盤バネは一般的な土留め解析手法では掘削面以深にのみ設定されるが、当解析手法では掘削面以浅の背面側地盤にも設定し、切ばりプレロード導入時などに発生する背面側地盤の反力も考慮できる。

①掘削面以浅の背面側の地盤バネ 土留め壁の変形に伴う背面側側圧の挙動は、通常、図-2の模式図に示すように表わされる。当解析手法では、この背面側側圧を図-3に示すようにモデル化している。すなわち、土留め壁が背面側へ変位する場合の地盤反力は初期側圧 (P_i) から背面側地盤の受働側圧 ($P'p$) まで変位の大きさに比例して増加し、それ以降変位が進行しても受働側圧の一定値をとるものとしている。一方、土留め壁が掘削側へ変位する場合の地盤反力は、初期側圧から背面側地盤の主働側圧 (P_A) まで変位の大きさに比例して減少し、それ以降変位が進行しても主働側圧の一定値をとるものとしている。また、切ばりプレロード工法などでは、各施工段階で掘削時およびプレロード導入時にそれぞれ土留め壁は、掘削側および背面側に変位すると予想される。そこで、ある段階で地盤反力が主働もしくは受働側圧の限界値に達した場合、図-3の破線で示したように地盤の塑性変位も考慮できるようにした。

②掘削面以深の地盤バネ この地盤バネの考え方は弾塑性法などの通常の土留め解析法で用いられているバネとほぼ同様で、土留め壁の変位と地盤反力の関係を図-4に示す。当解析手法におけるこのバネの特徴は、切ばりプレロードなどによって土留め壁が背面側に変位することも考えられるので、背面側地盤の受働側圧 (P_p) を考慮し、これを地盤反力の限界値としたことと、掘削面以浅の地盤バネと同様に図-4の破線で示すように地盤の塑性変位も考慮できるようにしたことである。

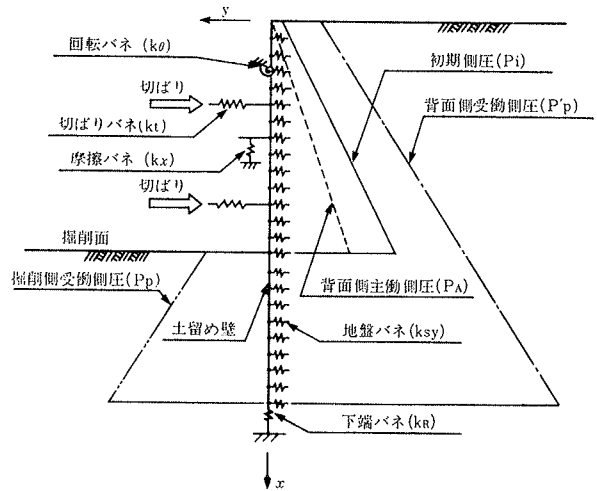


図-1 解析手法における基本構造モデル

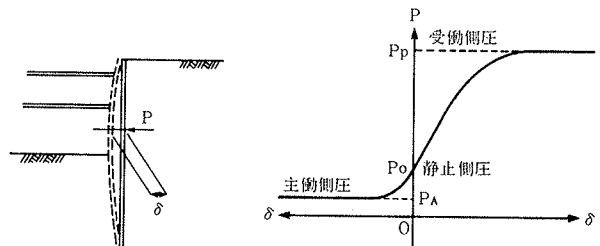


図-2 背面側側圧の挙動の模式図

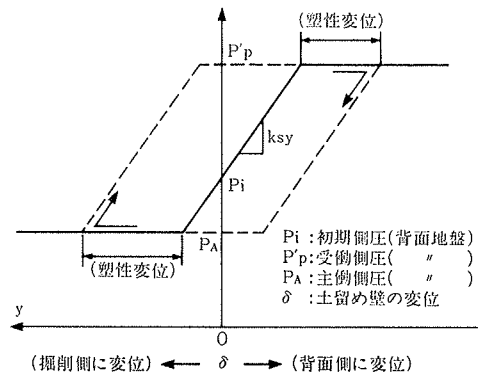


図-3 掘削面以浅の背面側の地盤バネ

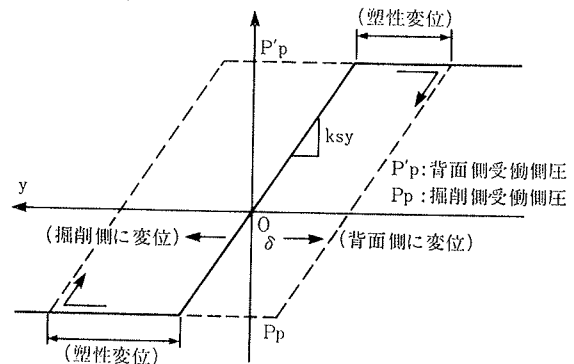


図-4 掘削面以深の地盤バネ

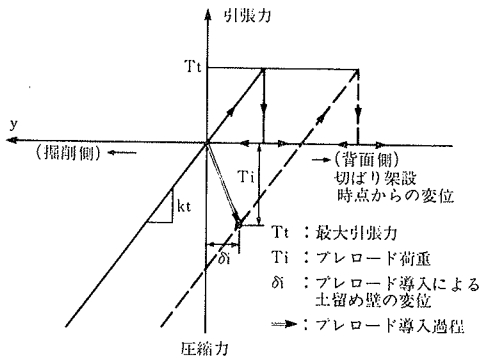


図-5 切ばりバネ

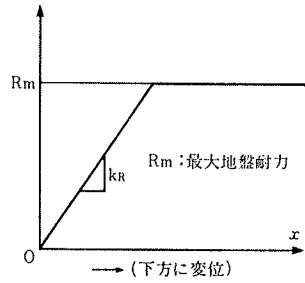


図-6 下端バネ

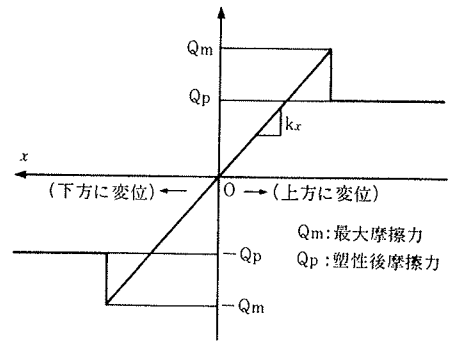


図-7 摩擦バネ

2.2. 切ばりバネ (kt)

切ばりバネは、土留め壁の支保工、すなわち、切ばりなどの弾性支承を評価するバネであり、架構条件により任意の節点に設定する。図-5は、土留め壁の変位と切ばりバネ反力の関係を切ばり架設時点から示したものであり、バネ反力は土留め壁の変位に比例して変化する。また、切ばりが引張力を負担する場合は限界値（最大引張力 T_t ）を設定し、その限界値に達した以降は切ばりがはずれたとみなして切ばりのバネ反力を0にしている。なお、プレロード荷重を導入したときの土留め壁の変位と切ばりバネ反力の関係は、図-5の破線に示している。

2.3. 下端バネ (k_R) および摩擦バネ (k_x)

逆打ち工法における逆打ち部の自重や、地下鉄の土留め工事などにおける路面覆工荷重などが土留め壁に作用したときの土留め壁と地盤の摩擦力および先端支持力などを評価するバネである。図-6および図-7は、それぞれ下端バネおよび摩擦バネの反力と土留め壁の変位の関係を示したものであり、これらのバネにも図中に示す

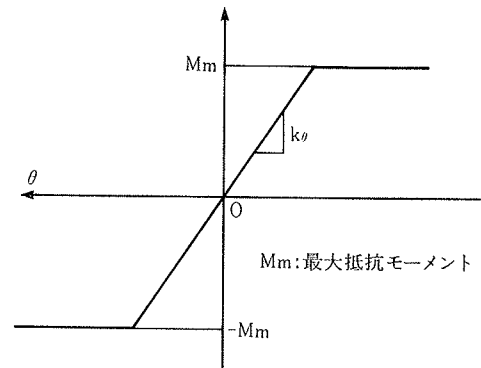


図-8 回転バネ

ように限界値を設けている。

2.4. 回転バネ (k_θ)

土留め壁の各節点における回転拘束状態を評価するバネである。図-8は、土留め壁のタワミ角 (θ) と曲げモーメント (M) の関係を示したものであり、曲げモーメントはタワミ角に比例して最大抵抗モーメント (M_m) まで変化し、それ以降タワミ角が増加しても最大抵抗モーメ

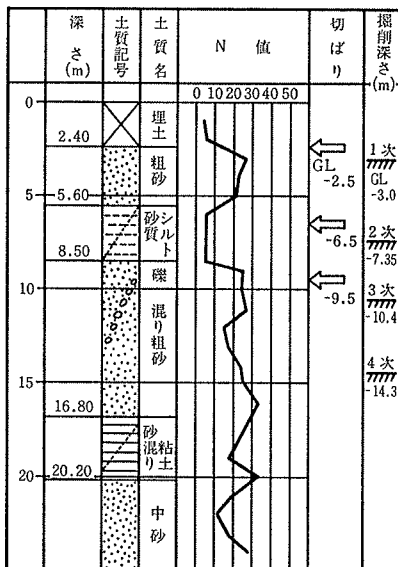


図-9 土質柱状図 (実測例A)

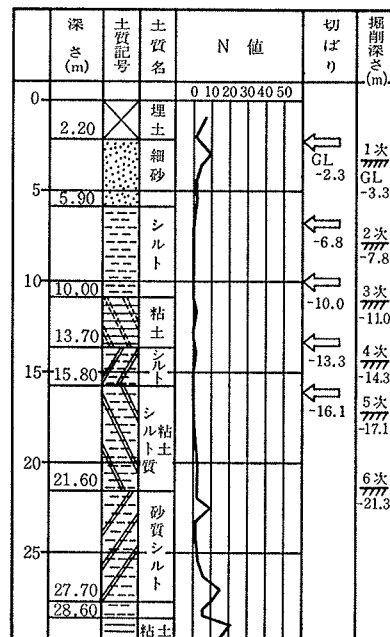


図-10 土質柱状図 (実測例B)

ントの一定値をとるものとしている。

3. 解析手法の検証

実測例Aは、福岡市内の工事場におけるもので、図-9に示すようにN値20前後の中位の相対密度を示す粗砂を主体とした砂質系の地盤となっている。土留め壁は厚さ600mmのRC土留め壁であり、掘削深さは14.3mである。切ばりプレロード荷重は各段とも50~60tf/本で、単位幅あたりの荷重に換算すると8.3~10.0tf/mである。

実測例Bの工事場は、東京都江東区に所在し、図-10に示すように地表面から深さ26m前後まではN値0~10の粘土層が主体の地盤となっている。土留め壁は厚さ800mmのRC土留め壁で、掘削深さは25.1mである。切ばりプレロード荷重は40~80tf/本(5.6~11.1tf/m)である。

図-11および図-12は、両実測例の各掘削時における土留め壁の変位と曲げモーメントについて実測値と当解析手法による計算値とを比較したものである。両者とも地盤の塑性変位を考慮し、実測側圧を外力として計算を行なっている。なお、地盤のバネ定数は、実測例Aでは横方向載荷試験結果、実測例BではN値からそれぞれ推定した値を用いている。実測例Aは砂地盤、また実測例Bでは粘土地盤であるが、図-11および図-12から明らかかなように両例とも実測値と計算値は比較的良好一致しているといえよう。

4. 切ばりプレロード工法における土留め壁挙動の解析

切ばりのプレロード荷重を変化させた場合の土留め壁の挙動の特徴を把握するため、当解析手法を用いて砂および粘土の均一モデル地盤の土留め解析を行なった。解析モデルとして砂地盤はN値30程度の硬い洪積砂層を、粘土地盤はN値2程度の軟らかい沖積粘土層をそれぞれ想定し、土質定数は表-1に示すように設定した。

地盤	γ_t (tf/m ³)	c (tf/m ²)	ϕ (deg.)	ksy (tf/m ²)
砂	1.8	0.0	40	2000
粘土	1.5	3.0	0	200

表-1 モデル地盤の土質定数

また、外力としての側圧と土留め架構は、図-13に示すように与えており、側圧は砂および粘土地盤ともに同

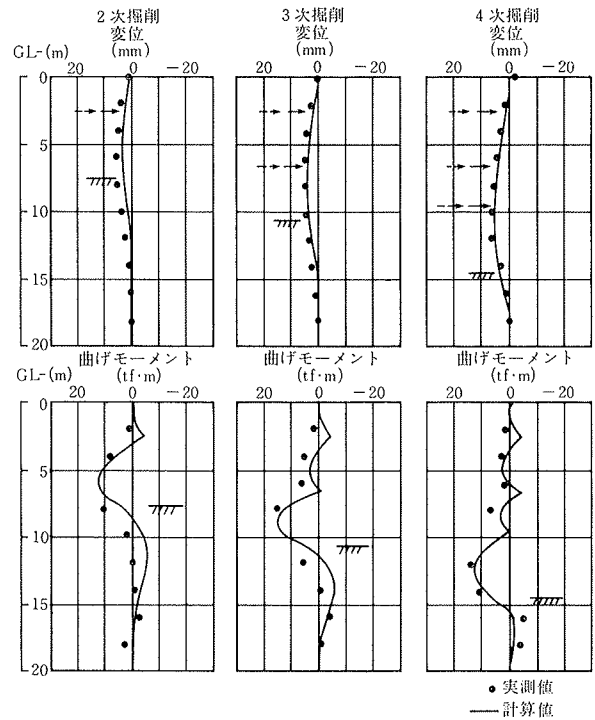


図-11 土留め壁の変位と曲げモーメント (実測例A)

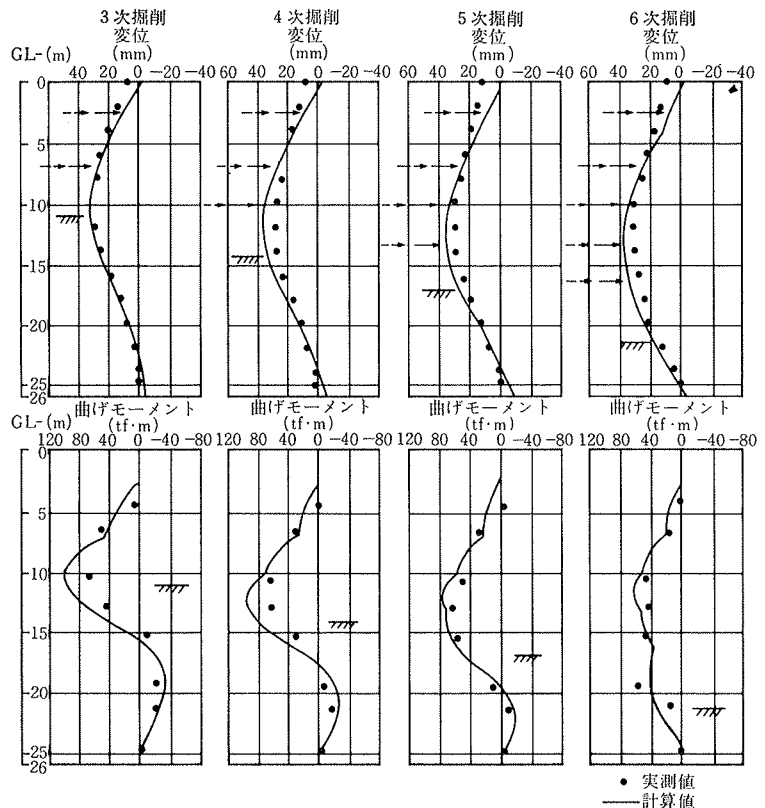


図-12 土留め壁の変位と曲げモーメント (実測例B)

一の分布とした。プレロード荷重は各段とも側圧から下方分担法によって求めた軸力の、0、30、60、100%相当の値とした。図-14および図-15は、それぞれ砂および粘土地盤における土留め壁の変位と曲げモーメントの計

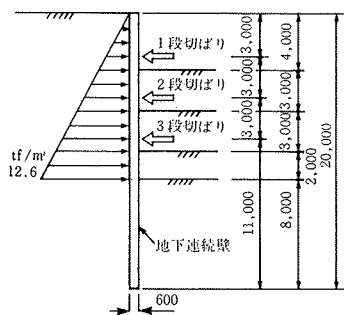


図-13 モデル地盤の架構図

算結果である。両図から明らかなように、砂地盤に比べて粘土地盤の方がプレロード荷重による土留め壁の変位および曲げモーメントへの影響が大きい。図-16は、プレロード導入率を横軸にとり、縦軸にプレロードを導入しない場合の土留め壁の最大曲げモーメント(M_{max_0})とプレロードを導入した場合の最大曲げモーメント(M_{max})の比を表わしたものである。この図より、砂および粘土地盤ともに最大曲げモーメントは、プレロード導入率60%のときが最も小さくなり、プレロード導入の効果は顕著となる。図-17および図-18は、それぞれ砂および粘土地盤における土留め壁の曲げモーメントの⊕側最大曲げモーメント($+M_{max}$)と⊖側最大曲げモーメント($-M_{max}$)を各工程段階ごとに示したものである。これらの図より、プレロード導入は変形および⊕側曲げモーメントを小さく抑えることには効果的であると言えるが、過大なプレロード荷重の導入は⊖側曲げモーメントを大きく発生させることになり、結果的には危険となる。特に軟らかい粘土地盤ではこの傾向が著しく、プレロード荷重を決める際にはこの点について十分な注意と検討が必要であろう。

5. あとがき

筆者らが新しく開発した土留め解析プログラム(ERSA)では、土留め壁の挙動をできるだけ実状に近づけるために、従来の土留め解析プログラム(NEW-OWSなど)で適切に評価することのできなかつた切ばりのプレロード荷重、逆打ち工法での鉛直荷重や回転拘束などを考慮している。そのため、インプット定数は従来の解析プログラムに比べて多くなっ

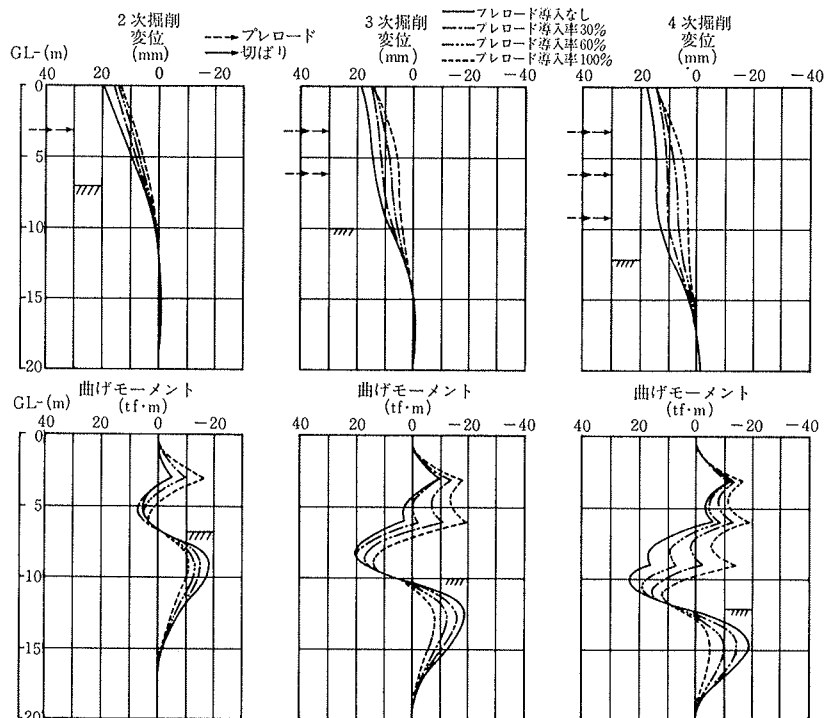


図-14 土留め壁の変位と曲げモーメント (砂地盤)

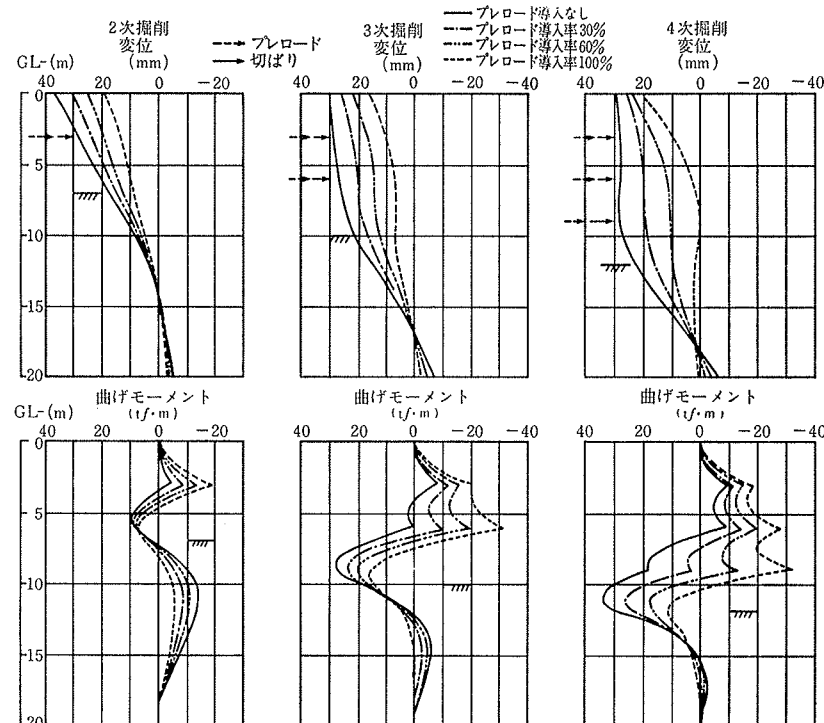


図-15 土留め壁の変位と曲げモーメント (粘土地盤)

ており、当解析プログラムを用いる場合、まず、インプット定数のとり方について十分検討する必要がある。本文では、切ばりプレロード工法を採用した2実測例で当解析プログラムの検証を行ない、比較的よい結果を得ている。当解析プログラムの精度を向上させるためには、

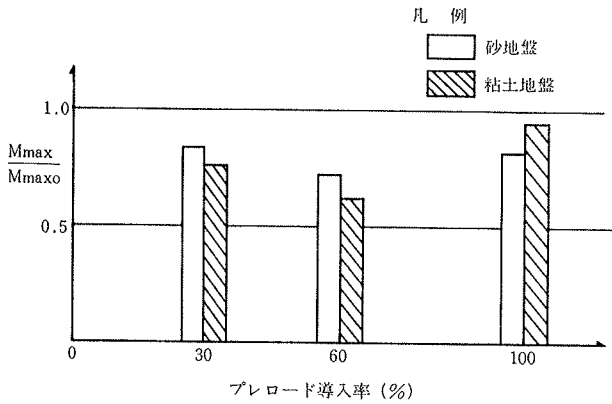


図-16 M_{max}/M_{max0} とプレロード導入率

今後、数多くの実測例を収集して検討を重ね、インプット定数の定量的な評価が可能となるよう研究を進めていきたい。

謝辞

当解析プログラムを開発するにあたり御指導・御協力をいただいた土質基礎研究室 宮崎祐助室長代理、森脇登夫夫研究員に、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 金谷, 芳賀, 宮崎, 土屋: 山留めの計測管理, 第14回土質工学研究発表会発表講演集, (昭和54), pp. 1447~1452
- 2) 金谷, 宮崎, 土屋: RC 山留め壁に作用する側圧, 第17回土質工学研究発表会発表講演集, (昭和57), pp. 873~880
- 3) 芳賀, 土屋: アースアンカーによる大深度掘削時の土留め壁の挙動, 第18回土質工学研究発表会発表講演集, (昭和58), pp. 1113~1114
- 4) 岸田, 芳賀, 大井田, 糸田川, 土屋: 切ばりプレロードによる土留め壁の挙動について, 第18回土質工学研究発表会発表講演集, (昭和58), pp. 1107~1108

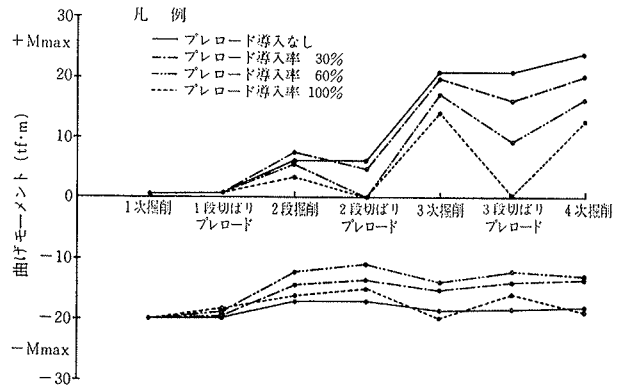


図-17 各工程段階における土留め壁の曲げモーメント (砂地盤)

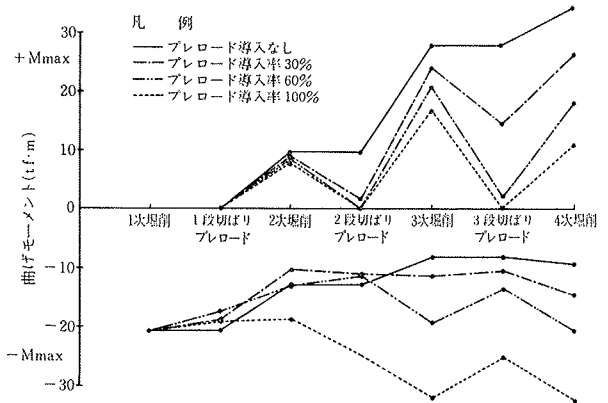


図-18 各工程段階における土留め壁の曲げモーメント (粘土地盤)

- 5) 土屋, 芳賀, 平尾, 徳永: 切ばりプレロードを考慮した土留め解析手法に関する研究(その1), 第19回土質工学研究発表会発表講演集, (昭和59), pp. 1129~1130
- 6) 平尾, 芳賀, 土屋: 切ばりプレロードを考慮した土留め解析手法に関する研究(その2), 第19回土質工学研究発表会発表講演集, (昭和59), pp. 1131~1132