

土留め弾塑性解析における一考察

A STUDY ON EARTH RETAINING STRUCTURE ANALYSIS BY ELASTO-PLASTIC METHOD

藤本明生*・長谷幸一**・松本正三***

Akio FUJIMOTO, Kouichi NAGAYA and Shozo MATSUMOTO

The Elasto-Plastic method, which simulates the behavior of earth retaining structures at excavation well, has been in practical use for their design and site measurement. Taking the complex behavior of the structures into account, however, we see some room for improvement. We have extended the method so as to include in the model distributed springs for initial displacement and have developed a computer code for the extended method. In the process to examine it, we confirmed that it simulates such construction procedures as soil improvements, inverted linings and back fillings well, and that its accuracy meets with practical requirement.

Keywords : Earth Retaining Structure Analysis, Elasto-Plastic Method, Soil Improvement, Inverted Lining, Back Filling

1. まえがき

都市の地下空間を有効に利用するため、開削工法・シールド工法による市街地での工事が増えている。そのような中で、最近の土留め工事においては、構造物の大型化・複雑化が進むとともに、軟弱地盤での施工や近接施工が多くなり、土留めの設計・施工を難しくしている。

土留めの設計・解析技術は、慣用設計法、弾塑性法、および有限要素法に大別できる。弾塑性法は、山肩の方法¹⁾や中村・中沢の方法²⁾、さらにこれらの改良モデルなどが提案されており、掘削時の土留めの挙動を比較的よく表現できる方法として、設計や計測管理に多く用いられる。しかし、現在の複雑化した土留め工事をすべてうまく表現できるものではなく、いくつかの改善の余地があると考えられる。たとえば、掘削途上で地盤の受働抵抗を増強したときや、逆巻きによる土留め支保効果の評価など、土留め壁の変位が発生した後に構造系に付加する分布ばね支承のモデル化が問題となろう。

本論文では、土留め弾塑性法に関して、①弾性支承上の一次元梁モデルにおいて、分布ばね支承の先行変位を考慮した基礎理論式を示し、②先行変位に対応する荷重（先行変位相当荷重と称する）を処理するプログラム³⁾を用いて、③掘削途上の地盤改良、逆巻き工法、埋め戻しの3ケースを対象に検証する。

* 正会員 ㈱間組 土木本部設計部

** 正会員 ㈱間組 情報システム部

*** 正会員 川田テクノシステム㈱開発部

2. 先行変位を考慮した分布ばね支承モデルの提案

2・1 従来モデルの適用性

(a) 土留め弾塑性解析におけるニーズ

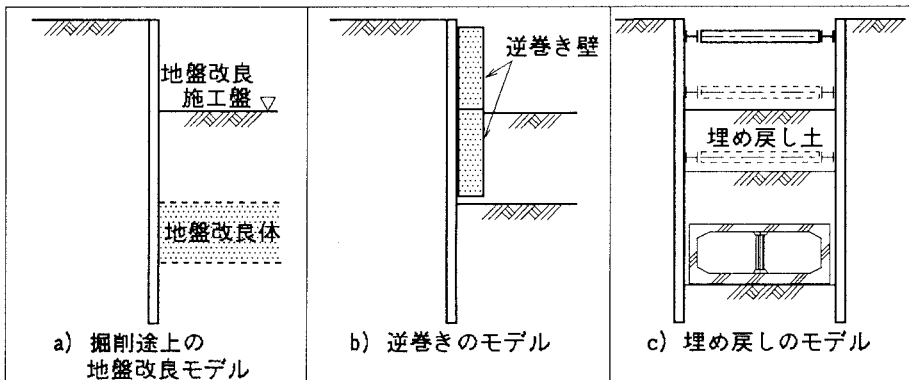
前述のように土留め工事が大型化・複雑化するにつれて、以下に示す土留め掘削時の挙動に対して、土留め弾塑性解析のニーズが顕在化している。

- ① 土留め変位の抑制対策として、掘削途上で地盤を改良したときの土留め挙動（図－1 a)参照）
- ② 逆巻きコンクリートにより土留めを支承する場合の土留め挙動（図－1 b)参照）
- ③ 大規模な開削工事中において、埋め戻し時の土留め挙動（図－1 c)参照）

(b) 従来モデルにおける課題

上記の現象は、弾塑性解析モデルの構造系において分布ばね支承のばね値の増加（または、ばね支承の追加）としてモデル化するのが適当であると考えられる。これらのばね支承は、土留め壁の変位が発生した後に支承として作用するようにモデル化する必要がある。

これまで、分布ばね支承の先行変位の概念が確立されていなかったため、上記の現象を表現するために、仮想掘削状態を定義して弾塑性法の重ね合わせによりモデル化⁴⁾したり、分布ばね支承と等価な集中ばね支承に置き換えてモデル化⁵⁾していた。このため、土留めの設計・解析が煩雑なものとなっているといえよう。



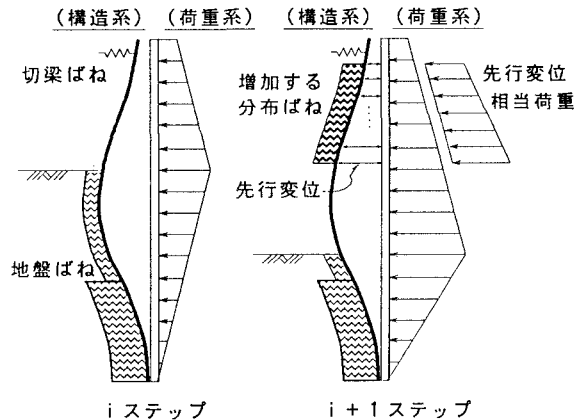
図－1 土留め弾塑性解析のニーズ

2・2 解析モデルと基礎理論式

(a) 解析モデル

解析モデルの概要を図－2に示す。提案する解析モデルは弾塑性法（拡張法）²⁾を基本にし、新たに構造系に加わる分布ばねに対して、仮想荷重（2・2(b)で詳述）によりその先行変位を考慮するものである。基本的な仮定は以下のとおりである。

- ① 土留め壁の根入れは有限長とし、先端支持条件はピン、固定、または、自由とする。
- ② 掘削底面以下の受働抵抗は、土留め壁の変位に比例し、かつ、有効受働土圧を越えない。



図－2 解析モデルの概要

- ③ 切梁は弾性支承とし、切梁設置時に発生している先行変位を考慮する。
- ④ 掘削途上から増強される地盤反力係数は、弾性分布ばね支承のばね値の増加として評価し、ばね値の増加前に発生している地中先行変位を考慮する。仮定②により、地盤の塑性域を考慮する。
- ⑤ 逆巻き壁は弾性分布ばね支承を構造系に追加することで評価し、逆巻き壁の打設前に発生している土留め壁の先行変位を考慮する。
- ⑥ 埋め戻し土は弾性分布ばね支承を構造系に追加することで評価し、埋め戻し前に発生している土留め壁の先行変位を考慮する。なお、仮定②により埋め戻し土の塑性域を考慮することもできる。

(b) 基礎理論式の誘導

弾性分布ばね支承上の一次元梁の基礎微分方程式は式(1)で示される。

$$EI \frac{d^4 u_x}{dx^4} + K \cdot u_x = p_x \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 EI : 梁の曲げ剛性
 K : 弾性分布ばね支承のばね値
 u_x : x における変位
 p_x : x における荷重強度
 x : 部材端から着目点までの距離

以下に、先行変位を考慮した分布ばね支承上の梁の基礎微分方程式を説明する。

まず、ばね k_1 に支承された梁に荷重 p_{x0} を載荷し、変位 u_{x0} が生じた状態を考える (図-3 a)参照)。この変位状態を保ったまま k_1 と並列に、ばね k_2 を付加する (図-3 b)参照)。このとき、ばね k_2 は、変位が先行変位 u_{x0} より大きくなると弾性反力を生じるものとする、荷重が p_x に増加し変位 u_x が生じた状態のばね支承の弾性反力 $\Sigma k u$ は、式(2)(3)で示される。

$$\Sigma k u = k_1 u_x + k_2 (u_x - u_{x0}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Sigma k u = K \cdot u_x - \Delta K \cdot u_{x0} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 K : 増加後のばね値 ($= k_1 + k_2$)
 ΔK : ばね値の増分 ($= k_2$)

式(1)において左辺第2項のかわりに式(3)の $\Sigma k u$ を適用すると、

$$EI \frac{d^4 u_x}{dx^4} + K \cdot u_x - \Delta K \cdot u_{x0} = p_x \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、式(4)の左辺第3項は定数項なので右辺に移項し荷重系に入れると、先行変位を考慮した弾性支承上の梁の基礎方程式(5)が導かれる。なお、式(5)の右辺第2項は、ばね ΔK の先行変位を考慮するために構造系に仮想的に載荷する荷重であり、先行変位相当荷重と称することにする。

$$EI \frac{d^4 u_x}{dx^4} + K \cdot u_x = p_x + \Delta K \cdot u_{x0} \quad \dots\dots\dots (5)$$

(c) 掘削解析への適用

先行変位を考慮した分布ばねモデルを土留め弾塑性解析に適用すると、掘削底面以下の地盤の塑性域の判定条件は次式で示される。

$$\Sigma k u \geq p_{pe} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\Sigma k u$: 先行変位を考慮した分布ばね支承の弾性反力 (式(3)参照)
 p_{pe} : 有効受働土圧

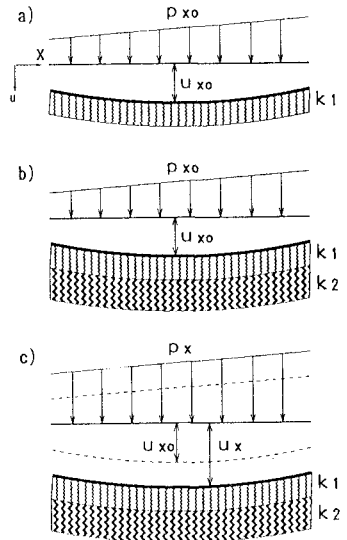


図-3 分布ばね支承の先行変位概念

なお図-3のモデルにおいて、 $k_1 = 0$ の場合は逆巻き壁・埋め戻し土のモデルに相当し、 $k_1 \neq 0$ の場合は掘削途上で地盤反力係数を増強するモデルなどに相当する。

3. 解析理論の検証

前章で述べた基礎理論式に基づいて先行変位相当荷重を処理するプログラムを開発し、実工事への適用性を以下の3例について検証した。

3・1 掘削途上で地盤改良を行う土留め解析

(a) 検証の手順と条件

検証に用いた工事の土留め概要と地盤定数を、図-4に示す。当工事は、GL.-6.5mまで掘削した後に、土留めの安定化を図るために根入れ部を地盤改良した例である。検証は、有効主動側圧が根入れ先端でゼロになるモデルを用いて、次のステップで実施した。

ステップ-1：一次掘削（一般の解析）

ステップ-2：地盤改良の効果をばね値の増加として評価した掘削の解析（二次掘削）

ステップ-1で発生する先行変位を考慮するため、GL.-12.5～16.5mに土留め変位に応じて先行変位相当荷重を载荷している。

(b) 検証結果

土留め変形および二次掘削による土留め変位増分の、解析値と実測値の比較を図-5に示す。二次掘削での変形は、地盤改良体付近に極小値が発生しており、改良体が有効に作用したことを解析でもうまく表現できているといえる。また、解析において、二次掘削にともなう地盤改良体の反力の増加は約20tf/mであり、土圧計による実測値（15～18tf/m）とほぼ一致している。

3・2 逆巻きRC支保による土留め解析

(a) 検証の手順と条件

検証に用いた工事の土留め概要を図-6に示す。当工事は、軟弱な沖積世地盤での立坑工事であり、土留め変位抑制のために、鋼製切梁と逆巻きRC梁・RC内壁を併用して支保した例である。検証は、土木学会の側圧モデル⁷⁾を用いて行った。

図-7に解析ステップを示す。なお、RC梁とRC内壁を先行変位を考慮した分布ばねにモデル

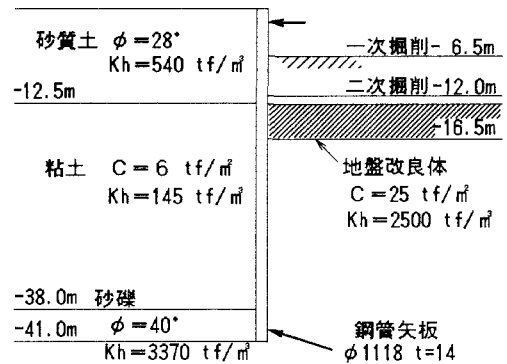
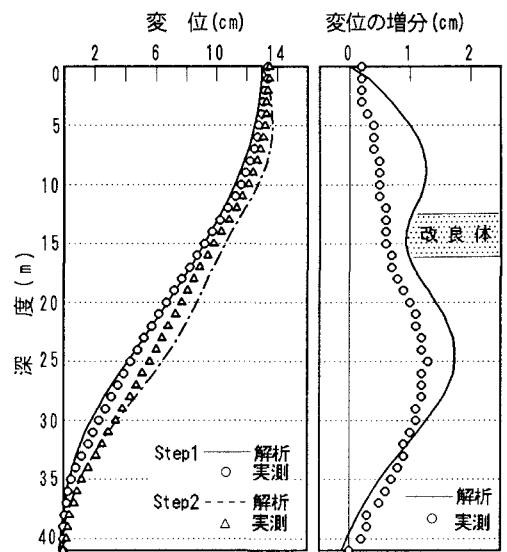


図-4 土留め概要（地盤改良モデル）



a) 土留め変形 b) 土留め変位増分

図-5 検証結果（地盤改良モデル）

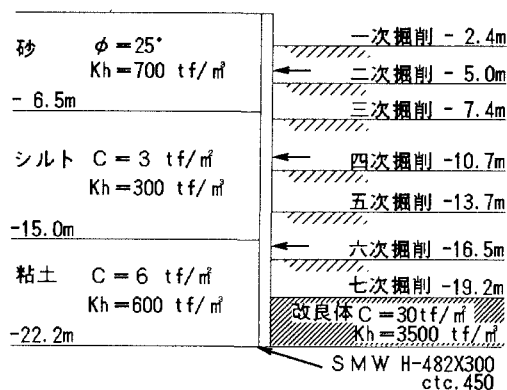


図-6 土留め概要（逆巻きモデル）

化している。逆巻きのばねの評価方法については参考文献6)を参照されたい。

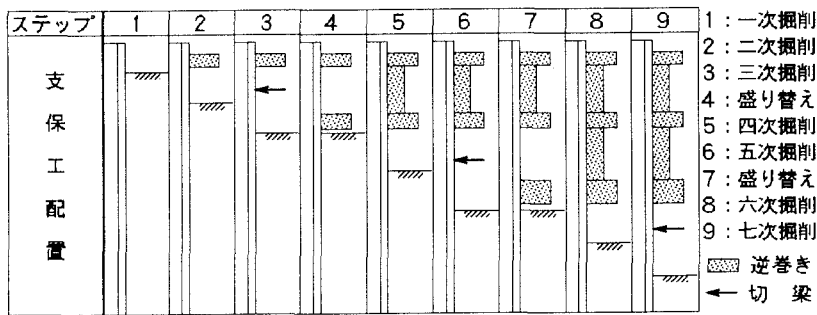


図-7 解析ステップ

(b) 検証結果

解析値と実測値の比較を図-8に示す。図-8 a)はステップ-3, 6, 8の土留め変形を示すもので、解析値と実測値はよく一致している。図-8 b)はRC梁打設後の掘削による土留め挙動をみるために、ステップ-1と3, 4と6, および7と8の土留め変位増分を示したものである。

これよりRC梁の位置で変位抑制効果が強く、以降の掘削による変位増分が微小であることがわかる。このことから本解析モデルは、逆巻き工法の挙動をうまく表現しているものと考えられる。

3・3 埋め戻し時の土留め解析

(a) 検証の手順と条件

土留め概要を図-9に示す。検証は、土木学会の側圧モデルを用いて、次のステップで実施した。

ステップ-1～10：一般的な掘削・盛替え
(8, 7段切梁撤去)

ステップ-11～13：埋め戻し土を分布ばね

支承として評価した埋め戻し(6～3段切梁撤去)の解析。

埋め戻しのステップにおける有効主動側圧は最終掘削時と同じとし、埋め戻した土の先行変位を考慮した分布ばねとして構造系に逐次追加し、切梁を撤去する。なお、埋め戻し土の塑性域は考慮していない。

(b) 検証結果

図-10は、ステップ-11～13の変位の解析値と実測値を、ステップ-10からの増分として表したものである。これをみると、埋め戻し時の土留め挙動をおおむね表現できることがわかる。

4. あとがき

土留め解析では、地盤条件、施工条件や土留め構造による条件を適切にモデル化することが重要であり、今後ますます高度化する土留め施工技术に対しては、以下のように対応していくことが望まれる。

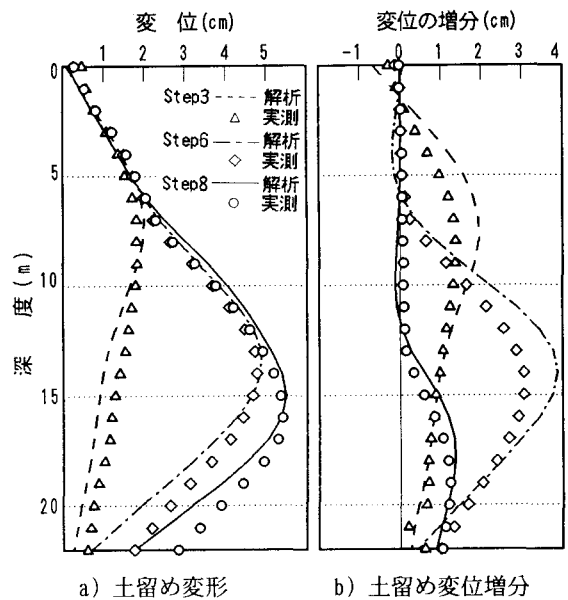


図-8 検証結果 (逆巻きモデル)

- ・実際に発生するであろう挙動を、事前に可能な限り正確に予測すること。
- ・施工途中において、設計・解析との差異を明確にして適切な処置を施すこと。

前者については、複雑化した施工手順や土留め構造を弾塑性法においてモデル化する手法の開発や、地盤の非線形性を考慮したFEM解析による検討が必要と考える。後者については、現場計測と逆解析・予測解析を一括して行う情報化施工技術が重要となろう。

本論文では土留め解析手法のうちの弾塑性法を拡張し、先行変位を考慮できる分布ばね支承モデルを処理するプログラムを開発して検証を行った。その結果、本モデルは地盤改良、逆巻き、埋め戻しといった施工方法を、実用可能な精度で表現することができた。今後は、本モデルの検証を進めるとともに、土留め解析をさらに効率的に行うために、逆巻き壁を剛性の増加として評価する手法などの研究を進める予定である。

最後に、本報告が同様の問題を含む土留め設計の参考になれば幸いである。

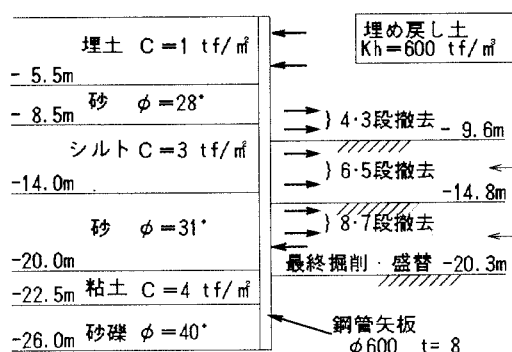


図-9 土留め概要 (埋め戻しモデル)

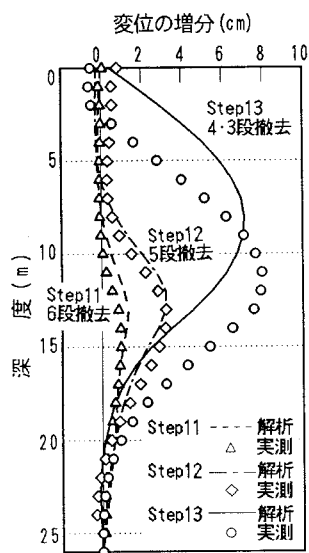


図-10 検証結果 (埋め戻しモデル)

5. 参考文献

- 1) 山肩邦男・吉田洋次・秋野矩之：掘削工事における切ばり土留め機構の理論的考察，土と基礎，Vol. 17, No. 9, pp. 33～45, 1969. 9.
- 2) 中村兵次・中沢 章：掘削工事における土留め壁応力解析，土質工学会論文報告集，Vol. 12, No. 4, pp. 95～103, 1972. 12.
- 3) 松本正三・藤本明生：土留め弾塑性解析システムの開発，土木学会第16回土木情報システムシンポジウム，pp. 65～68, 1991. 10.
- 4) 谷内信久・天野文夫・笹川信一・長谷幸一：鋼管矢板タイロッド控杭式土留め工の挙動について（その2），土木学会第44回年次学術講演会講演概要集Ⅲ，pp. 920～921, 1989. 10.
- 5) 滝 英治・西野健三・藤本明生・田中秀明：RCばりによる土留め支保について，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集Ⅲ，pp. 498～499, 1988. 10.
- 6) 田中秀明・藤本明生：逆巻き工法による土留めの計測および解析結果について，土木学会第44回年次学術講演会講演概要集Ⅲ，pp. 912～913, 1989. 10.
- 7) 土木学会：トンネル標準示方書（開削編）・同解説，p. 86, 1986. 6.