

複雑な掘削断面の土留め架構の挙動について

BEHAVIOR OF THE EARTH-RETAINING STRUCTURE FOR THE MULTI-LEVEL EXCAVATION

大野 宏紀^{*}・中澤 貴志^{**}

HIROKI ONO, TAKASHI NAKAZAWA

The work is the construction of the storage line which connects HIKARIGAOKA terminal station of Tokyo Metropolitan Subway NO.12 Line to TAKAMATSU coach yard. Due to the characteristics of the storage line such as the complicatedly varying cross sections with the multi-level excavation, various unknown factors were foreseen during the planning stage. In order to evaluate the safety of the retaining system field monitoring was carried out; the behavior of the retaining structure was measured and the results were used to control the excavation work of the next stage. This report describes the behavior of the earth-retaining structure for the multi-level excavation.

KEYWORDS: multi-level excavation, field monitoring system, earth-retaining structure
subway

1. まえがき

当工事は、都営地下鉄12号線の光が丘駅と高松車庫を結ぶ出入庫線を建設するものである。建設計画は、出入庫線部特有の構造から構築断面が複雑に変化し、掘削もこれに伴って複雑な小段部を含む断面となっており、設計・施工上さまざまな不確定要素が予測された。施工にあたり、土留め架構等の安全性を事前に評価することが難しいと考えられたため、これらの挙動を把握し、施工に反映させながら工事を安全に進めるために計測施工を導入した。その結果、安全に工事を完了することができた。

本報告は、複雑な小段部を含む掘削断面の土留め架構の挙動について述べたものである。

2. 概要

2.1 地質概要

当工事区域の地層構成を図-1に示す。掘削断面の地層は、G.L-7mまでは N=2~3の関東ローム層(Lm) G.L-7m~12mは N=18~30の透水性の高い武蔵野レキ層(Mg) G.L-12m~15mは N=5~10の砂層と粘性土層の互層である東京層(Toc,s) G.L-15m~29mは N=30~50の非常によく締まった東京レキ層(Togc,s)である。掘削断面下の地層は、Tog層とその下層のN=25~50の江戸川層(Eds,g,c)である。SMW壁下端部(G.L-43m付近)の地層は透水性の低いシルト層(Edc)である。

* 東京都交通局高速電車建設本部練馬建設事務所

** 五洋建設(株)東京支店土木事業部技術部

2.2 工事概要

a) 計画概要

複雑に変化する構築断面に対し、掘削残土を極力少なくするために小段を含む土留めを計画した。土留め壁は完全止水壁とするため不透水層まで根入れするSMW壁とし、小段部の土留め壁は、中間杭を兼ねた親杭横矢板壁とした。複雑な掘削断面のため、一般的な土留め架構の挙動と異なっていると考えられたので、計測による施工管理を実施することとした。

標準掘削断面を図-2に示す。

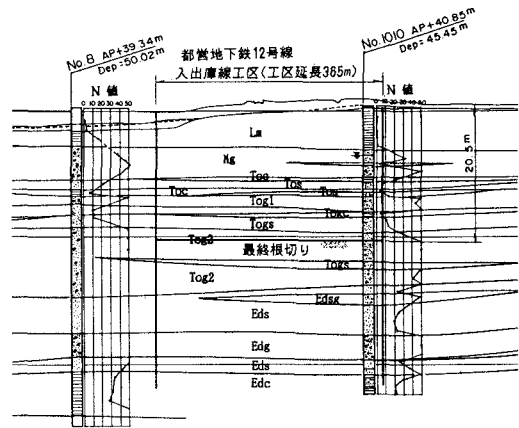


図-1 地層構成図

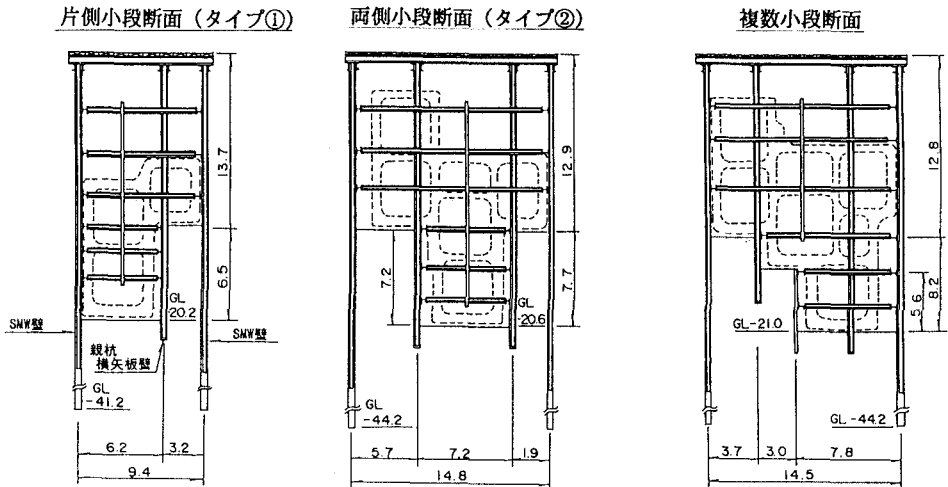


図-2 標準掘削断面

b) 主要仮設仕様

路線形状： 延長 $L=365\text{m}$ 、最小曲線半径 $R=80\text{m}$ 、最大勾配 $i=42\%$

土留め工： SMW工

SMW杭 $L=44\text{m}$ ($\phi 550$)

鋼杭 $L=18.0\text{m}\sim 28.5\text{m}$ ($H-250\times 250\times 9\times 14$, etc 450)

親杭横矢板工 鋼杭 $L=14.5\text{m}\sim 22.0\text{m}$ ($H-300\times 300\times 10\times 15$, etc 1000)

支保工(6段) 切梁 ($H-300\times 300\times 10\times 15$)

腹起し ($H-300\times 300\times 10\times 15\sim H-400\times 400\times 13\times 21$)

掘削工： 掘削土量 $68,121\text{m}^3$ 、掘削幅 $B=9.0\text{m}\sim 15.3\text{m}$ 、掘削深さ $H=13.5\text{m}\sim 21.0\text{m}$

3. 計測計画

3.1 計測項目

計測断面は、掘削や施工工程を考慮し、掘削断面延長が長い2断面(タイプ①, タイプ②)とした。計測は、以下に示す項目について実施した。

- ・土留め関係 SMW壁の芯材応力, 変形 親杭の応力, 変形 切梁軸力, 温度
- ・地盤関係 周辺地盤の地表面沈下, 地盤内水平鉛直変位 地下水位

3.2 計測管理

施工に伴い土留め架構がどのような状態にあるかを評価するために管理基準値を設定し、一次及び二次管

理基準値を各部材の許容耐力の80%・100%とした。計測値が一次管理基準値を越えた場合、計測値の経時的挙動に注意し、必要に応じて予測解析を行い、対策工が必要か否かを判断しながら慎重に施工を行う。また、二次管理値を越えた場合は、工事を中断し山留め架構全体に異常が生じていないかの調査、検討を行い、対策工を施すものとした。

4. 計測結果
SMW土留め壁の変形・曲げモーメントと切梁軸力の挙動について述べる。

4.1 タイプ①の場合
変形分布図を図-3に、床付け時の曲げモーメントを図-4に、切梁軸力の経時変化を図-5に示す。

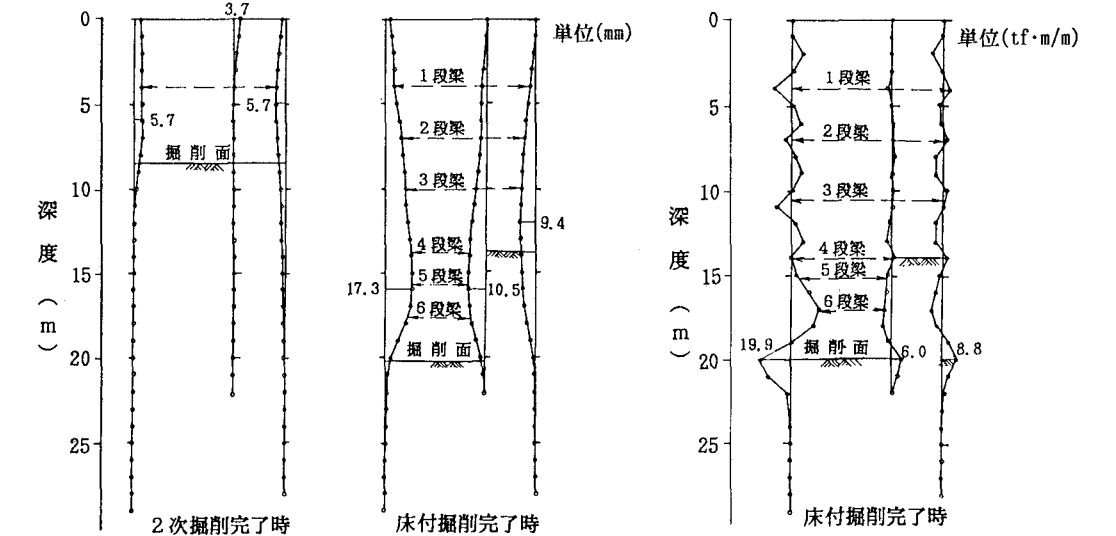


図-3 壁体変形分布図(タイプ①)

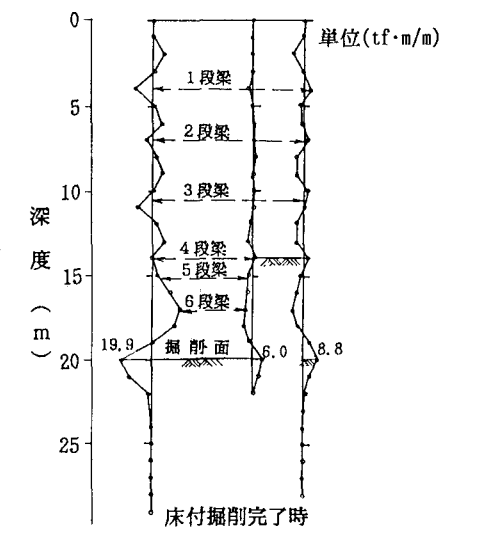


図-4 壁体曲げモーメント図(タイプ①)

a) 変形は、小段部より上の掘削時においては、左右の変形は対称となっているが、小段部以下の掘削時においては、小段部のない左側の変形量が急激に大きくなり左右の変形量のバランスが崩れて、非対称な変形形状となった。小段部側の変形量が小さくなったのは、小段部地山のせん断抵抗や小段部土留め壁の曲げ剛性によるものと推察される。

b) 曲げモーメントは、最大曲げモーメントが6次掘削完了時で20.4tf・m/mと十分余裕のある状態であった。なお、SMW壁の曲げ耐力 $M_a=34.9\text{tf}\cdot\text{m/m}$ ，

小段部土留め壁の曲げ耐力 $M_a=23.9\text{tf}\cdot\text{m/m}$ である。床付け時でみると小段部より上の架設位置ではモーメントの変曲点があり、これは切梁が支点となっているためである。一方、小段部以下では明確な変曲点がない状態であった。これは、床付け以深の東京礫層($N>50$)が、小段部掘削開始時より、地中梁として働き、小段部側圧を分担したことが一因と推察される。

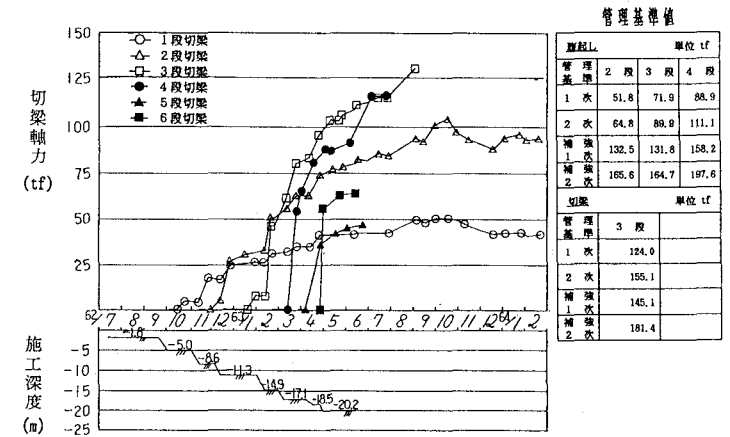


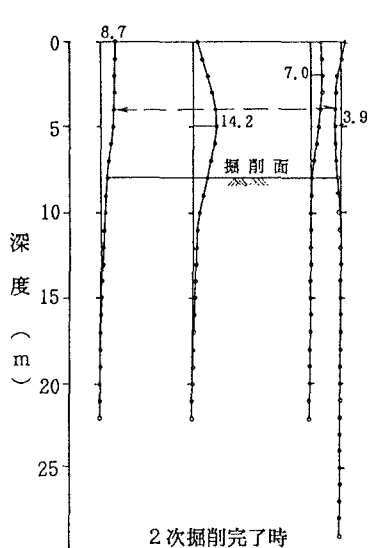
図-5 切梁軸力経時変化図(タイプ①)

c) 切梁軸力は、小段部以上の切梁に軸力分担が多くなり、小段部以下の掘削時に、その直上部の2、3段腹起しが一次管理基準値を越える状況となったため、予測解析等による検討の結果、スチフナー等による腹起しの補強を行うこととした。

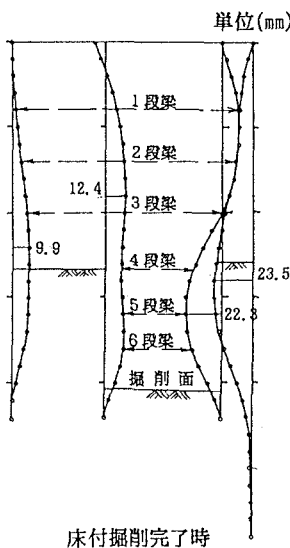
切梁撤去時にも4段腹起し、3段切梁の軸力が一次管理基準値に達したため、検討を行った結果、腹起しは、スチフナーで、切梁は、座屈長を短くすることにより補強を行った。

4.2 タイプ②の場合

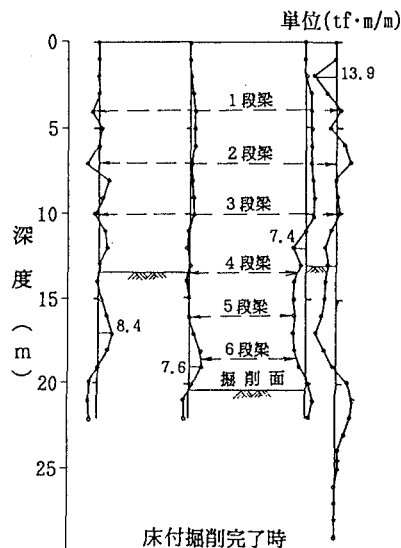
変形分布図を図-6に、床付け時の曲げモーメントを図-7に示す。



2次掘削完了時



床付掘削完了時



床付掘削完了時

図-6 壁体変形分布図(タイプ②)

図-7 壁体曲げモーメント図(タイプ②)

a) 変形は、小段部より上の掘削時においても、左側の変形量は右側の変形量より大きく、やや左右非対称な変形形状となった。これは、掘削手順が左側の地山から掘削しており、なおかつタイプ①に比べて開削幅が大きいこと等の施工条件が、土留め壁の変形に影響を与えたものと思われる。

小段部以下の掘削時においては、小段幅の狭い右側の変形量が急激に大きくなり左右の変形量のバランスが崩れて非対称な変形形状となった。これは、小段幅の差異による地山のせん断抵抗の差等で、小段部壁体としての剛性が異なるためと推察される。

b) 曲げモーメントは、十分余裕のある状態であった。床付け時でみると、タイプ①の場合と同様の結果を示していた。

c) 切梁軸力は、掘削時においては、タイプ①の場合と同様の傾向を示し補強対策を施したが、撤去時には、腹起し等の補強をするにいたらなかった。

5. FEMによる地盤解析

タイプ①について、周辺地盤を含めた土留め架構の掘削に伴う挙動をFEMにより解析を行った。

5.1 モデル化の概要

- ・地盤モデルは、二次元弾性モデル、土留め壁は、フレームモデルを用いる。
- ・SMW壁の曲げ剛性は、計測値による実剛性を用いる。
- ・切梁は、架設時のゆるみ等を考慮した剛性(バネ値)を用いる。
- ・土留め壁と地山との不連続面に、ジョイント要素を用いる。
- ・掘削に伴う応力解放によって生じる掘削面のリバウンド量を仮定する。

以上のようなモデル化を行い、施工ステップにしたがい、解析を行った。

5.2 解析結果

図-8に、壁体変形の実測値と解析値の比較を、図-9に、背面地盤の変形の実測値と解析値の比較を、図-10に、壁体曲げモーメントの実測値と解析値の比較を示す。壁体変形については、左右非対称な性状をよく表しており、最大変形量とその発生位置が実測値とよく一致している。背面地盤変形についても、土留め壁背面直近部(1.4m位置)を除いて、概ね一致している。壁体曲げモーメントについては、定量的には十分な精度で再現できなかったが、定性的には、左右非対称な分布形状を再現できた。したがって、当解析モデルは、当断面と類似の土留め架構の事前検討の目安として有用であると思われる。

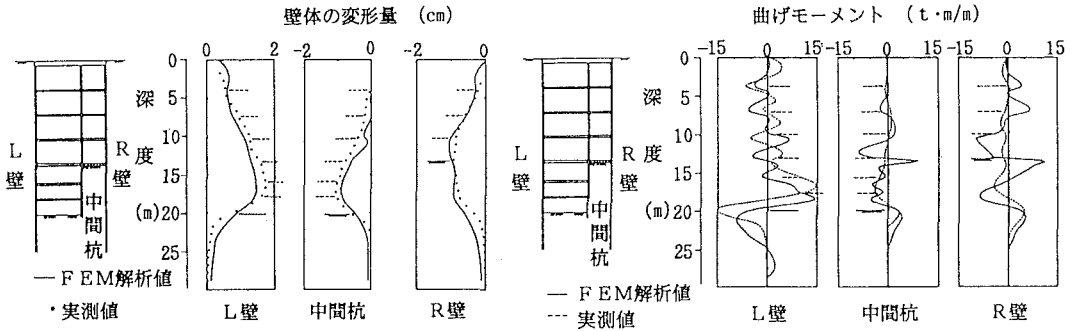


図-8 壁体変形の実測値と解析値の比較 (タイプ①, 床付け掘削完了時) 図-10 壁体曲げモーメントの実測値と解析値の比較 (タイプ①, 床付け掘削完了時)

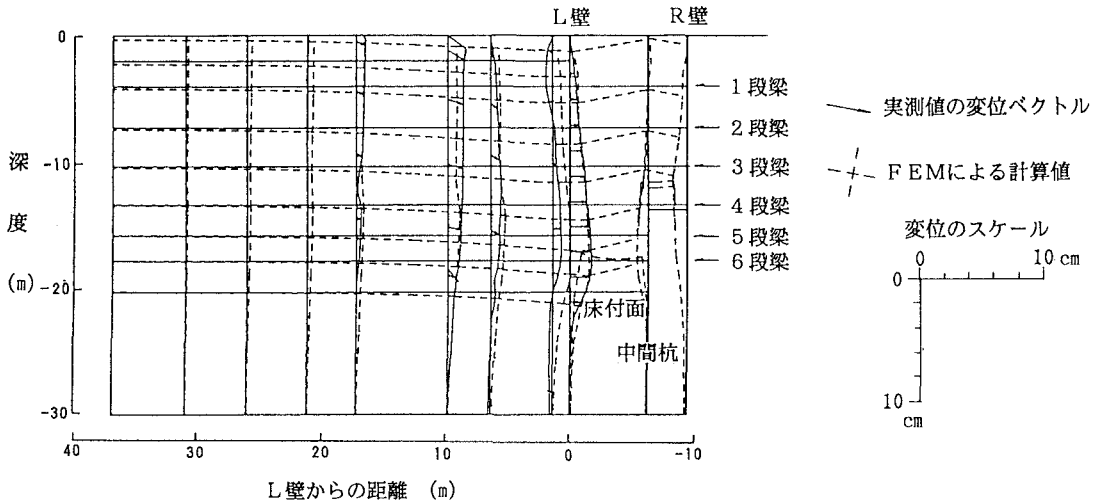


図-9 背面地盤変形の実測値と解析値の比較 (タイプ①, 床付け掘削完了時)

6. まとめ

今回の施工結果より、小段部を有する左右非対称な掘削断面の土留め架構の挙動について、いくつかの知見が得られたので以下に述べる。

a) SMW壁の変形

各掘削段階におけるSMW壁の小段頂部変形経過を図-11に示す。いずれの壁体も小段部掘削時には小段部がないか、小段部が狭い側の変形量が大きくなり、左右の変形のバランスが崩れ、非対称な変形形状となった。また、小段部掘削に入ると、いずれの壁体も急に変形するが、掘削が進むにつれて、小段幅1.9mの壁体の変形量は、急増する状態となったが、その他のケースは、変形量が収束する傾向にあった。

このことから、左右非対称な変形状となるのは、小段部の剛性（小段部地山のせん断抵抗と小段部土留め壁の剛性）に起因するものと推察される。

また、小段幅0m～5.7mの範囲での施工においては、小段幅1.9mの場合の変形量が最も大きく、3.2mを越えると変形量は減少する結果となった。このことから、当工事では、SMW壁の変形を抑制できる剛性を期待する小段幅は、少なくとも3.2m以上必要であると考えられる。

b) 切梁の軸力

図-12に、掘削段階毎の切梁軸力分布を示す。

一般的な開削工事では、N段目の切梁を架設した段階でN段目より上の切梁の軸力は安定して一定の値に落ちつくといわれているが、当工事では、小段部の掘削が進むにつれて小段部上方の切梁（3,4段切梁）の軸力が増加し、最大値を示す結果となった。山口等¹⁾の文献によると、砂地盤の掘削で、切梁等の有効な固定点があり、固定点以下で変形を許した場合、固定点では、アーチ作用によって土圧の集中が起こり、固定点以下では土圧が減少する、いわゆる土圧の再配分が生じるとしている。当工事は小段部の地山が変形を許す状況にあり、3,4段切梁へ軸力が集中した一因は、土圧の再配分も関与しているものと推察される。

c) SMW壁の曲げモーメント

床付け掘削完了時の曲げモーメントでみると、小段部から上の切梁の架設位置（4段切梁まで）ではモーメントの変曲点があり、切梁が支点となっているが、小段部の5,6段切梁の架設位置では明確な変曲点が見られず、切梁が支点として有効に作用しなかった。このことは、前記のごとく、床付け以深の東京隙層による地中梁の効果や、土圧の再配分等により小段部の切梁が、有効な支点とならなかったものと推察される。

以上、掘削過程を通して、切梁の軸力は余裕のないものとなったが、事前に懸念されていたSMW壁、中間杭の変形と曲げモーメントについては、十分に余裕のある状態であった。また、施工状況を検討し、モデル化に留意すれば、FEM解析を事前検討の目安として用いることができると思われる。

7. おわりに

計測施工を導入することにより、土留め架構の挙動が把握でき、これらの情報を施工に反映させながら工事を安全に進めることができた。また、左右非対称な掘削断面の土留め架構の挙動を定量的に表すためには今後の実績データの蓄積や研究が待たれる。

最後に、当工事の施工にあたり、ご指導、ご協力をいただいた関係各位の皆様には厚くお礼申し上げます。

8. 参考文献 1) 山口柏樹：土質力学、技報堂

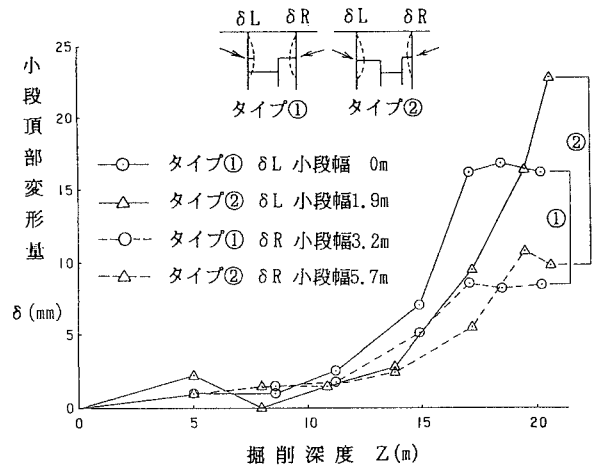


図-11 各掘削段階におけるSMW壁の小段頂部変形経過

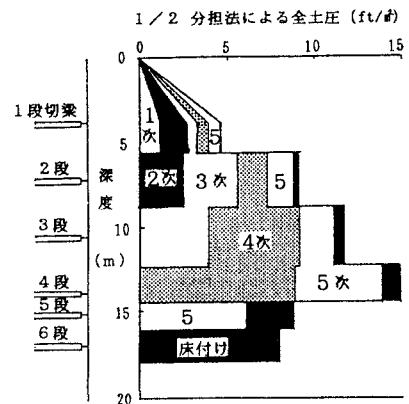


図-12 掘削段階毎の切梁軸力分布