

アンダーピニング工事における 構造物の挙動

Behavior of structure during Underpinning

矢萩秀一¹・大石敬司¹・藤木育雄²・清水幸範³・小泉淳⁴

Shuichi Yahagi, Keiji Oishi, Ikuo Fujiki, Yukinori Shimizu, and Atsushi Koizumi

¹正会員 東京地下鉄株式会社 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

²正会員 メトロ開発株式会社 (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町11-9)

³正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1)

E-mail: Yukinori.Shimizu @tk.pacific.co.jp

⁴正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

In Japan's urban area, the speedy expansion of the economy has resulted in excessive concentration of people and structures. The underground space is not an exception as the densely located traffic lines e.g. railway, highway and lifelines e.g. water, gas, electricity, telecommunication under current roads from high to medium ground levels have created a saturated hollow state to these levels. The construction of the Tokyo metro 13th line is an example where there are a number of hindrances, caused by existing structures, and thus underpinning constructions are applied. This paper focus on clarifying the behavior of existing structure by inversely analyzing the data observed in several medium sized sewages during the construction of the Tokyo Metro 13th line.

Key Words : *underpinning, behavior forecasting analysis, inversely analyzing, pipe-roof method, measuring data*

1. はじめに

わが国の都市部の地下は、鉄道や道路などの交通施設、および上下水道、電力、通信、ガスなどのライフライン施設が道路下に輻輳しており、中浅程度の深度まですでに飽和している状態にある。このため、道路下に新たな地下施設を建設する場合には、既存の地下鉄道や大口径の下水幹線などとの競合が生じることも少なくない。

東京メトロ13号線建設工事も例外ではなく、電力幹線、通信幹線、下水幹線、丸ノ内線、千代田線、半蔵門線、銀座線などが13号線の路線上に位置しており、これらをアンダーピニングする必要があった¹⁾。

アンダーピニングにおいて、最も重要なことは、既設構造物の機能の維持と安全性の確保である。このため、既設構造物や地盤の挙動を事前に予測すること、施工時に既設構造物や地盤の挙動を計測して、その計測データを施工管理に逐次反映さ

せることなどが重要である。

しかしながら、これらの場合、構造物の本体の変形特性や地盤の変形特性などの不明確な要因の影響により、予測値と実測値とがあまりよい一致を示さないことも少なくない。

これらの事象を鑑み、本報告では、13号線建設工事のうち新宿七丁目駅(仮称)におけるパイプルーフ工による間接防護方式のアンダーピニングをとりあげ、周囲の地盤とパイプルーフとの挙動に着目した逆解析を行い、この結果からパイプルーフ工によるアンダーピニングの挙動予測手法についての考察を行う。

2. 工事概要と当初の挙動予測の概要^{2), 3)}

(1) 工事概要と土質概要

新宿七丁目駅は、掘削深さ約40m、掘削延長約407m、掘削幅約16.5mの範囲に4層2径間、3層2径間、および2層2径間の開削トンネルを構築

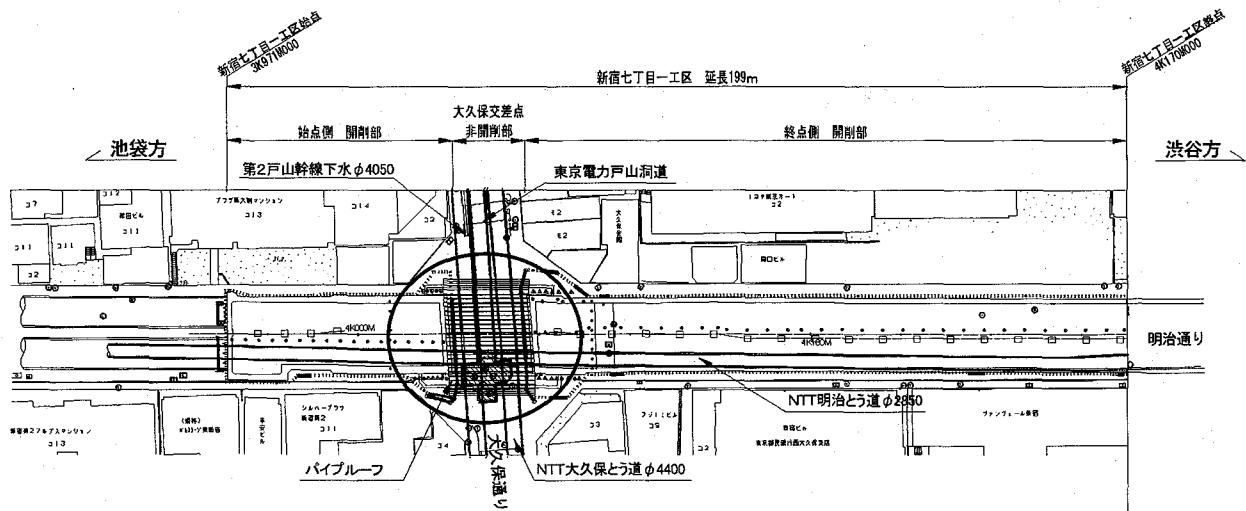
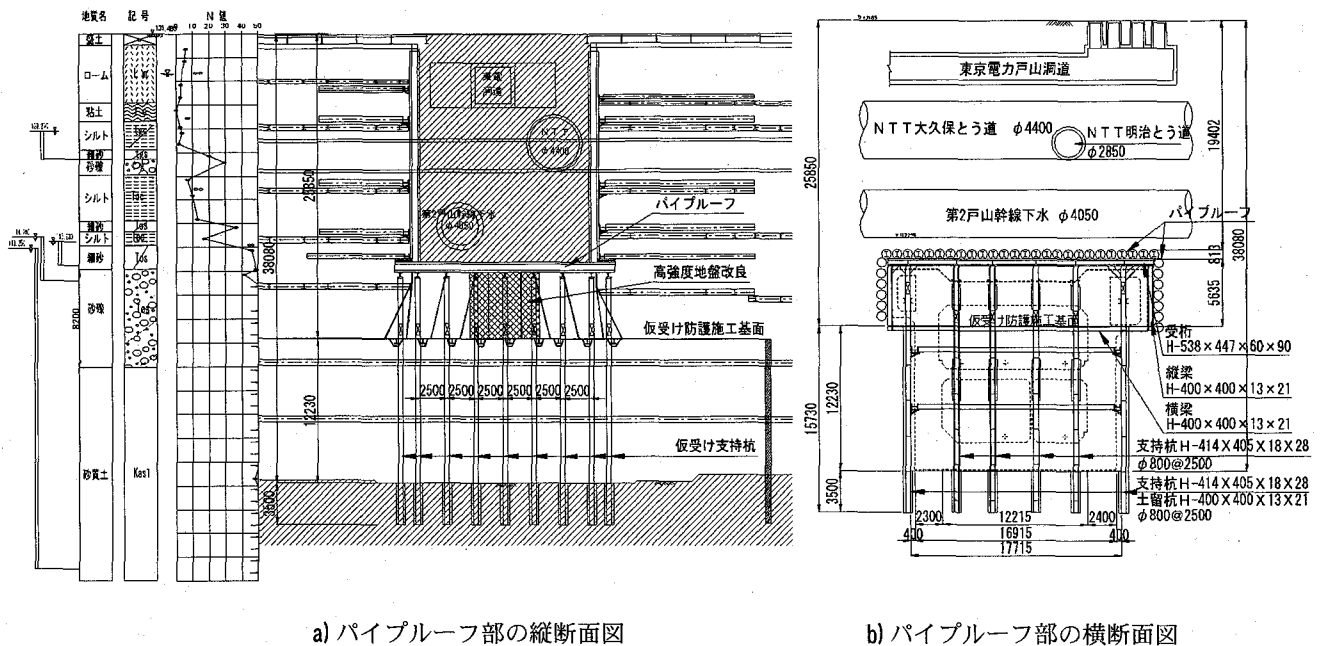


図-1 新宿七丁目駅池袋方付近平面図



a) パイプルーフ部の縦断面図

b) パイプルーフ部の横断面図

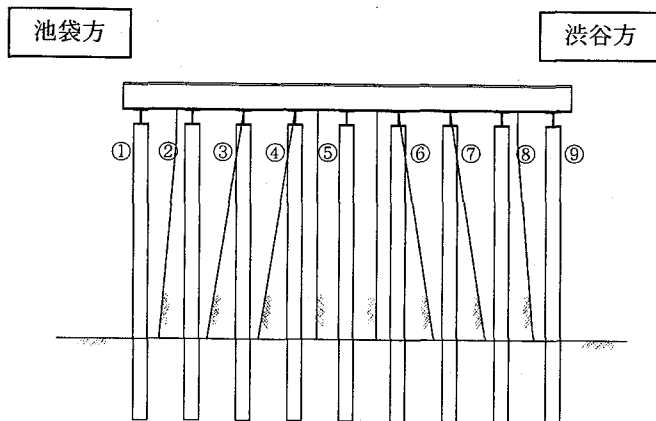
図-2 パイプルーフ部の縦断面図と横断面図

する工事である。

このうち、明治通りと大久保通りとが交差する大久保交差点下には、東電洞道、NTTとう道、第二戸山幹線下水などの大規模なライフライン施設が埋設されている。これらの埋設物を吊り防護して、地上から掘削を行い開削トンネルを構築するのは困難なことから、交差点部においてはパイプルーフ工による間接防護方式のアンダーピニングを実施し、開削トンネルを構築する計画とした。図-1と図-2に、パイプルーフ部の平面図、縦断面図、横断面図をそれぞれ示す。

アンダーピニングの施工手順は、まず、大久保交差点の両側を掘削し立坑を築造する。立坑内か

ら外径φ812mm、肉厚 $t=22$ mmのパイプルーフを合計で39本打設する。パイプルーフ内には、パイプルーフの曲げ剛性を向上する目的で、H-488×300×11×18の芯材を挿入しモルタルを充填する。次に、パイプルーフにより門型に防護された地山を、高さ5.6m、奥行き2.5mずつ掘削し、支持杭H-414×405×18×28の打設、受桁H-538×447×60×90の架設、縦ばりH-400×400×13×21の架設、横ばりH-400×400×13×21の架設を行う。以降、掘削、支持杭の打設、支保工の架設を順次繰り返して大久保交差点を完全に受け替える。なお、掘削は工期短縮の観点から、渋谷方および池袋方の両方から行っている。図-3に掘削とプレロ



- STEP1: 1通り, 9通りプレロード
 STEP2: 8通り掘削
 STEP3-1: 8通り支保工架設, プレロード
 STEP3-2: 7通り, 2通り掘削
 STEP4-1: 2通り支保工架設, プレロード
 STEP4-2: 3通り掘削
 STEP5-1: 7通り支保工架設, プレロード
 STEP5-2: 6通り掘削
 STEP6-1: 3通り支保工架設, プレロード
 STEP6-2: 4通り掘削
 STEP7: 6通り支保工架設, プレロード
 STEP8-1: 4通り支保工架設, プレロード
 STEP8-2: 5通り掘削
 STEP9: 5通り支保工架設, プレロード

図-3 掘削とプレロードの施工順序

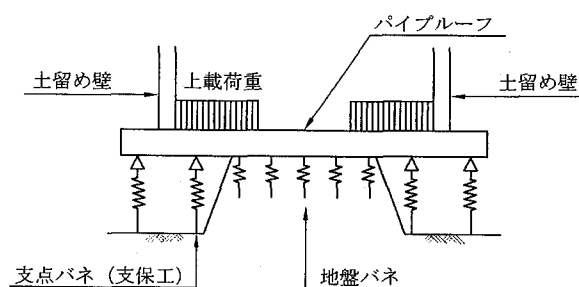


図-4 挙動予測モデルの概念図

ードの施工順序を示す。

土質は、地表より表土、N値=4程度の関東ローム層、N値=15~30程度の段丘礫層、N値=50程度の東京礫層、N値=50以上の上総層が順に分布しており、パイプルーフの周辺は良好な地山である。

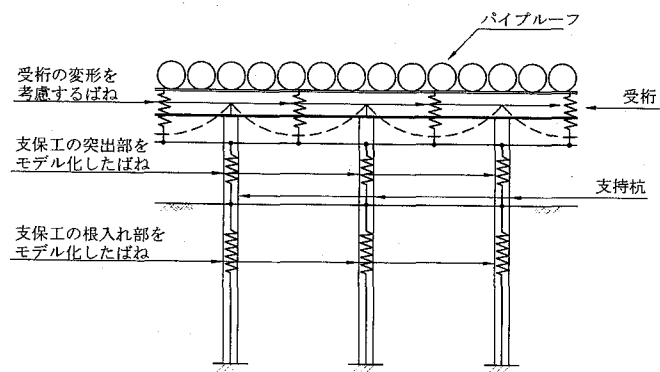


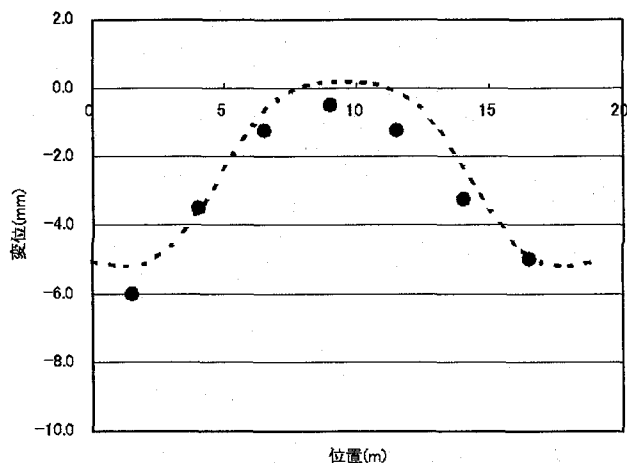
図-5 支保工をモデル化したばねの概念図

表-1 当初の挙動予測に用いた諸元

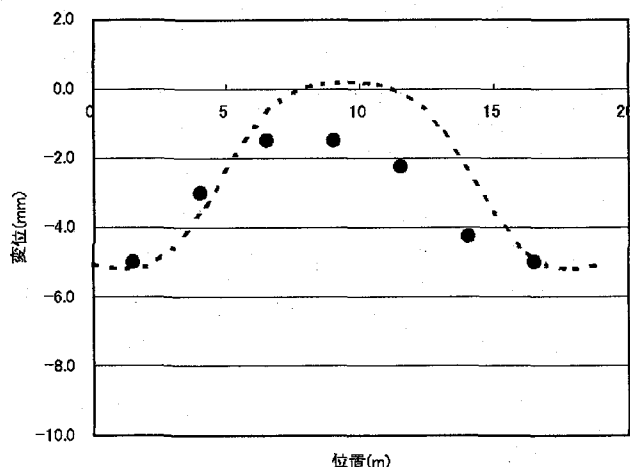
荷重(土被りに相当する土の全重量)	325kN/m ²
パイプルーフの断面二次モーメント I_p	4.28×10^{-3} m ⁴ /本
芯材の断面二次モーメント I_s	6.89×10^{-4} m ⁴ /本
中詰めモルタルの断面二次モーメント I_c	1.65×10^{-2} m ⁴ /本
解析に用いる曲げ剛性 $Es(I_p + I_s) + 0.4EcI_c$	6.34×10^{-3} m ⁴ /m
支保工のばねのばね定数	9.38×10^4 kN/m/m
地盤反力係数	4.07×10^5 kN/m ³
地盤反力係数 (高強度薬液注入部)	5.82×10^5 kN/m ³

(2) 当初の挙動予測の概要

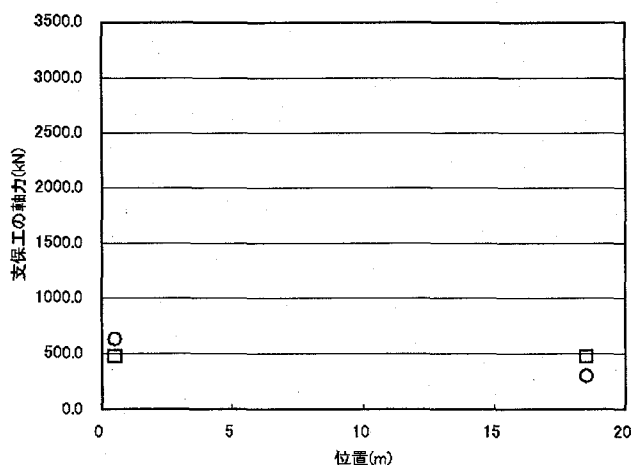
本工事の設計では、パイプルーフの挙動を、図-4に示すような、パイプルーフをはり、支保工と地盤とをばねでモデル化した弾塑性床上のはりモデルを用いて予測している。荷重は、埋設物の重量を考慮した土被りに相当する土の全重量がパイプルーフの背面に作用するものとして評価している。また、はりの剛性はパイプルーフとパイプルーフ内に設置する芯材および中詰めモルタルとの剛性を考慮して評価している。支保工をモデル化したばねのばね定数は、図-5に示すように支保工本体の変形特性、地盤の変形特性、および受桁の変形特性を考慮して算定している。地盤をモデル



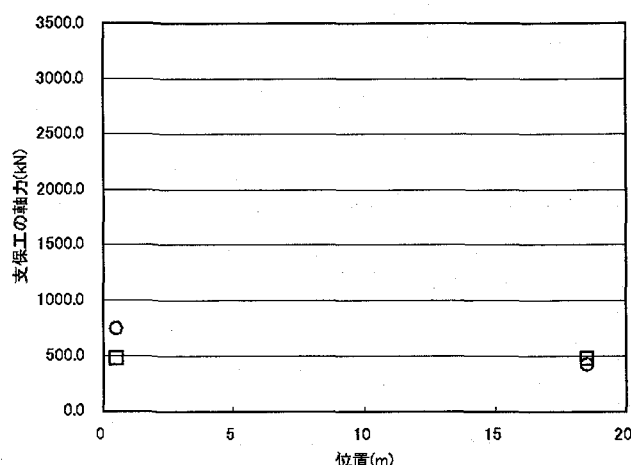
a) 中央部の変位



b) 端部の変位



c) 中央部の支保工の軸力



d) 端部の支保工の軸力

● : 変位の実測値 - - - : 変位の予測値
○ : 軸力の実測値 □ : 軸力の予測値

図-6 STEP2におけるパイプルーフ縦断方向の実測値と予測値との比較

化したばねのばね定数は、地盤の変形特性と、斜面上の直接基礎の極限支持力とを考慮して、鉄道構造物等設計標準・同解説^{4,5)}などを参考に地盤が弾塑性挙動を示すものとして算定している。表-1に当初の挙動予測に用いられた諸元を示す。

3. 実測値と当初の予測値との比較

実測値と当初の予測値との比較は、パイプルーフ下の地山が比較的残っているSTEP2と、パイプルーフ下の掘削や支保工の架設が進行し、地山の中央部のみが残っている状態であるSTEP6-2を例としてとりあげ行うこととする。図-6は、

STEP2におけるパイプルーフの縦断方向の変位と支保工に生じる軸力との実測値と予測値とを、図-7は、STEP6-2におけるそれらを、パイプルーフ横断方向の中央部と端部のそれぞれについて示したものである。図中、黒丸は変位の実測値を、破線は変位の予測値を、白丸は軸力の実測値を、白四角は軸力の予測値を示している。

図-6より、パイプルーフ下の地山が比較的残っているSTEP2においては、変位、支保工の軸力ともに実測値と予測値とがよい一致を示しているものの、中央部より端部の方が、比較的大きな変位や軸力を生じていることがわかる。これは、パイプルーフの変形とともに、パイプルーフ背面の地

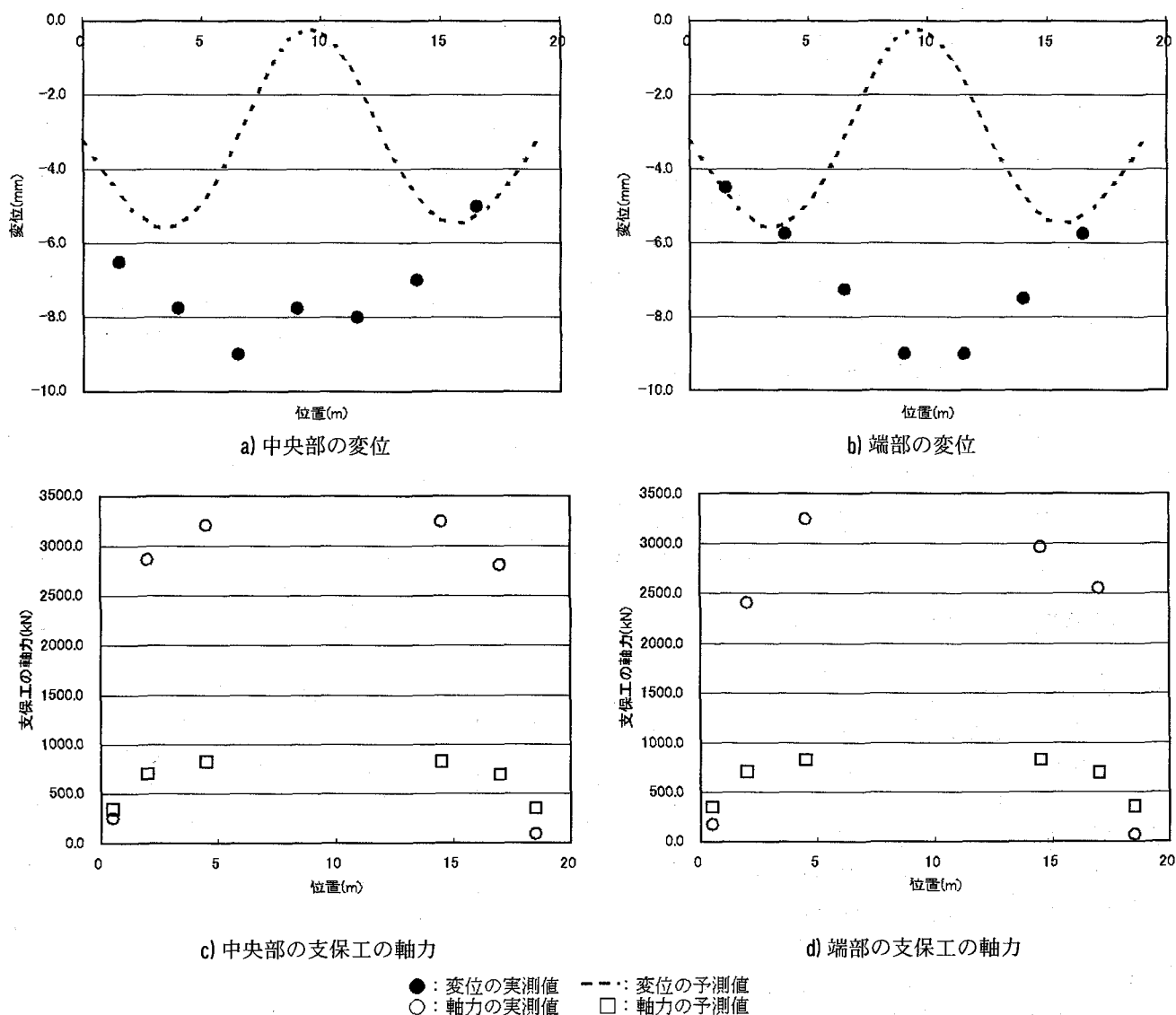


図-7 STEP6-2におけるパイプルーフ縦断方向の実測値と予測値との比較

山が応力の再配分を生じ、パイプルーフ横断面の端部付近の地山応力が大きくなったものと推察できる。このことは、パイプルーフの挙動予測において、パイプルーフ背面の土荷重はたんにその自重として評価するのみではなく、パイプルーフと地山との相互作用の問題として評価できうることを示唆している。

図-7より、パイプルーフ下を大きく掘削したSTEP6-2においては、変位、支保工の軸力ともに、実測値と予測値とがあまりよい一致を示していないことがわかる。パイプルーフ横断方向の端部の方が比較的大きな変位を生じるのはSTEP2と同様の傾向である。しかしながら、地山が残っているパイプルーフ縦断方向の④通りから⑦通り付近では、変位の実測値が下方に凸の形状となるモー

ドを示しているのに対して、その予測値は上方に凸の形状となるモードを示している。これは、図-4に示す挙動予測モデルにおいて、地盤の反力を過大に評価していることによると考えられる。したがって、パイプルーフ下の地盤を大きく掘削した段階を対象にパイプルーフの挙動を予測する場合には、地盤の反力を直接基礎の反力として評価するのみではなく、それを適切に低減して評価するのがよいと推察できる。以上を踏まえて、次節では、図-4に示すような挙動予測モデルを用いて、実測値と符合するように逆解析を行い、パイプルーフ背面の土荷重とパイプルーフ下方の地盤反力の評価方法について考察する。

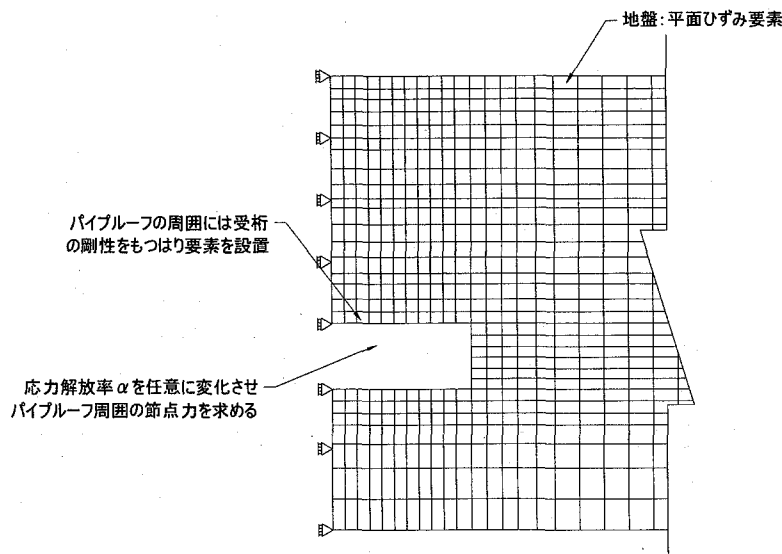


図-8 パイプルーフの横断面を軸対象でモデル化した有限要素モデルの概念図

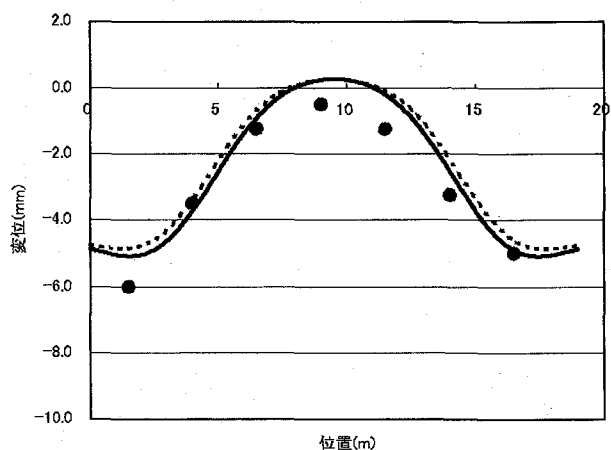
4. 挙動予測モデルに関する考察

実測値と予測値との比較から、パイプルーフの背面に作用する土荷重は、パイプルーフと地盤との相互作用を考慮して評価できること、パイプルーフの下方を大きく掘削する場合には地盤反力を適切に評価する必要があることがわかった。本節では、まず、前者の課題に対して弾性有限要素法解析を用い、パイプルーフと地盤との相互作用について考察する。次に、後者の課題に対して、地盤反力係数をパラメーターとした逆解析を行い地盤反力の評価方法について考察する。

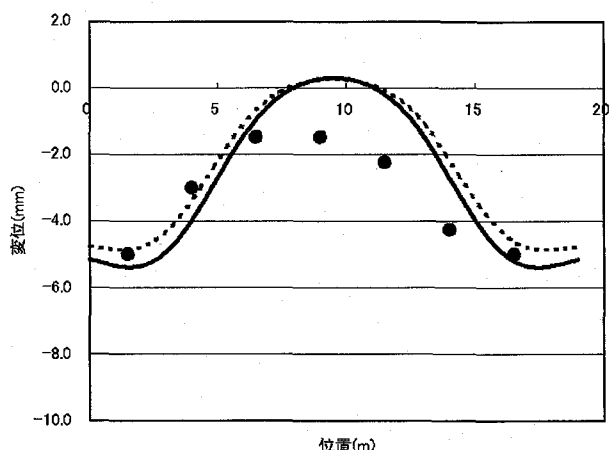
(1) パイプルーフ背面の荷重の評価について

パイプルーフに変形が生じると、その上方の地盤は土のアーチング効果を発揮し、パイプルーフに作用する土圧は変形の大きい中央部で低減するものと考えることができる。このような土の主働的挙動と設計用の土圧の低減を評価する方法として、過去の計測結果と工学的判断とから設計用の土圧を低減する方法、地盤をばねでモデル化しその主働的な挙動をばねの伸張力として考慮することで設計用の土圧を部分的に低減する方法⁶⁾などが考えられる。本報告では、便宜上、これを弾性有限要素法解析により評価することとする。

すなわち、図-8に示すようなパイプルーフ横断方向の有限要素モデルにおいて、掘削解放率 α を任意に変化させ、パイプルーフ中央部の挙動予測に用いる設計用の荷重とパイプルーフ端部の挙動予測に用いる設計用の荷重とを求めるものである。これらの設計用の荷重の算定にあたっては、有限



a) 中央部の変位



b) 端部の変位

●: 変位の実測値 - - - : 当初の変位の予測値
—: 有限要素法解析の結果を考慮した予測値

図-9 STEP2におけるパイプルーフ縦断方向の変位の実測値と予測値との比較

要素法により求まる変位の解析値と弾塑性床上的のはりモデルにより求まる変位の解析値の平均とが近似するまで解析を繰り返すこととした。

有限要素法解析は、軸対象のハーフモデルを用いて実施した。地盤を平面ひずみ要素でモデル化し、パイプルーフ部には受桁の剛性をもつはり要素を設置することとした。

一例として、STEP2を対象に行った解析の結果を記すと、繰り返し計算の結果、パイプルーフの変位は平均で3mm、これに相当する見かけの掘削解放率 α は8%である。この場合のパイプルーフ中央部の設計用の荷重は284kN/m²、端部のそれは300kN/m²程度である。また、図-9は、この値をもとに解析した予測値と実測値とを比較したものである。図中、黒丸は実測値を、破線は当初の予測値を、実線は有限要素法解析の結果を反映した予測値をそれぞれ示している。これより、本手法による予測値は、実測値と比較的よい符合を示しており、パイプルーフ横断方向の中央部および端部のそれぞれの挙動を、比較的よく表現していることがわかる。しかしながら、地山が残っている領域については、予測値は実測値より小さくなっている。これは、STEP6-2を対象とした当初の挙動予測と同様に地盤反力の評価に関する課題の影響によるものと考えられる。次節では、この地盤反力の評価について考察を加える。

(2) 地盤反力の評価について

一般に、パイプルーフの挙動を予測する場合には、地盤反力係数を鉄道構造物等設計標準・同解説^{4), 5)}などを参考に求め、これを経験的に1/2～1/3程度に低減することが多い。これは、パイプルーフ下の地山の片側もしくは両側を掘削するため、地盤反力は通常の場合と比較して低減するとの工学的な判断によるものと推察する。なお、本事例の場合、当初の挙動予測では、パイプルーフ下の地山の地盤反力係数を直接基礎の設計鉛直地盤反力係数として算定している。これを踏まえて、本節ではパイプルーフ下が大きく掘削されているSTEP6-2を対象に、地盤反力係数をパラメーターとする逆解析を行い、本事例のような比較的良好な地山中のパイプルーフの挙動予測における地盤反力係数について検討する。

a) 地盤反力係数の算定式

地盤反力係数は、鉄道構造物等設計標準・同解説^{4), 5)}に示される次式を用いて算定することにした。

直接基礎として評価する場合

$$k_v = f_{rk} (2.3\alpha E_0 B_v^{-1/2})$$

ここに、

k_v : 砂質土の場合の設計鉛直地盤反力係数

f_{rk} : 地盤抵抗係数

α : E_0 の算定方法に対する補正係数

E_0 : 地盤の変形係数

B_v : 基礎底面の換算幅(当初の挙動予測では、トンネル標準示方書⁷⁾を参考に10mとしている)

土留壁の根入れ部として評価する場合

$$k_h = 0.24\alpha \cdot E_0$$

ここに、

k_h : 土留壁の変形を計算する際に用いる水平地盤反力係数

α : E_0 の算定方法に対する補正係数

E_0 : 地盤の変形係数

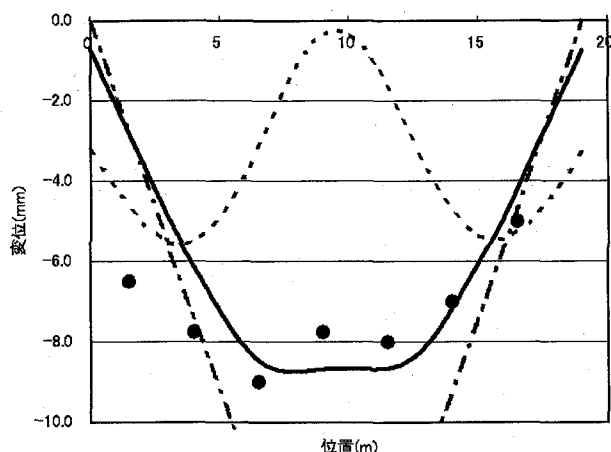
b) 逆解析の結果と考察

STEP2とSTEP6-2を対象に、地盤反力係数をパラメーターとして行った逆解析の結果を、図-10に示す。ここでもとにした地盤反力係数は、当初の挙動予測に準じてパイプルーフ下の地盤反力係数を直接基礎の設計鉛直地盤反力係数として評価したものである。図中、黒丸は実測値を、破線は当初の予測値を、実線は地盤反力係数を5%に低減した場合の予測値を、一点鎖線は地盤反力係数を2.5%に低減した場合の予測値をそれぞれあらわしたものである。

図-10より、本事例の場合、地盤反力係数を5%程度までに低減すると、変位の予測値のモードは下に凸の形状となり実測値を比較的よく表現していることがわかる。①通りや⑨通りなどの開削部に比較的近い部分においては、予測値は実測値より小さくなっている。これは、パイプルーフの剛性により端部が跳ね上がる挙動を示したものと考える。

図-11は、縦軸に逆解析による変位の最大値を、横軸に逆解析に用いる地盤反力係数と当初の地盤反力係数との比を、片対数グラフとして示したものである。

これより、パイプルーフ縦断方向の中央部の変位の実測値8mmに予測値を符合させるためには、地盤反力係数を5.4%程度までに低減する必要がある。



—: 地盤反力係数を5%に低減した場合の予測値
 - - -: 地盤反力係数を2.5%に低減した場合の予測値
 図-10 STEP6-2の変位の実測値と予測との比較

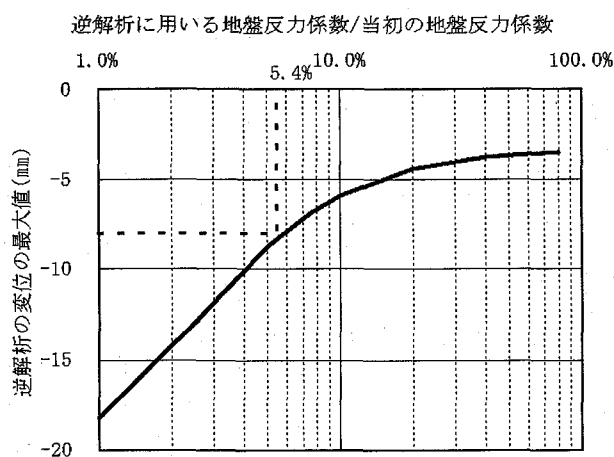


図-11 地盤反力係数の低減と変位の予測値との関係

あることがわかる。

この逆解析のもととした地盤反力係数は、パイプルーフ下の地山の地盤反力係数を直接基礎の設計鉛直地盤反力係数として評価したものである。これを土留壁の根入れ部の水平地盤反力係数として評価する場合には、33%程度の低減であり、このことは一般の挙動予測計算で地盤反力係数を1/2～1/3程度に経験的に低減することが妥当であることを示しているものとする。

5. おわりに

以上より、本事例のような良好な地盤中の間接防護方式のアンダーピニングにおいて、パイプルーフの挙動予測を実施する場合の見解は次のとおりである。

・パイプルーフ背面に作用する土荷重は、弾性有限要素法解析を用い、パイプルーフと地盤との相互作用を考慮して算定するのが合理的である。

・地盤反力係数は、パイプルーフの変形量、パイプルーフ下の地山の残っている範囲、地山がパイプルーフを支持している期間などを相互に考慮して定める必要があるが、地盤反力係数を低減することで、ある程度の精度の予測値が得られる。この場合の地盤反力係数は、本事例の場合、土留壁の根入れ部の水平地盤反力係数として評価する方がよりよい結果が得られる。

13号線建設工事では、この他にも直接防護方式のアンダーピニングを数多く行っている。このような直接防護方式のアンダーピニングの挙動予測についても、地盤の変形特性、構造物本体の変形特性などの評価に課題があると考えている。これらの計測結果についても、別の機会に報告したいと考えている。

謝辞：本報告をまとめるにあたり、貴重なご意見をいただいた新アンダーピニング工法等研究会の委員である中央復建コンサルタンツ(株)杉嶋敏夫氏、鈴木和重氏、(株)復建エンジニアリング川村栄一郎氏、佐藤工業(株)森下全人氏、早川淳一氏、(株)間組名倉浩氏、宮下英子氏、また挙動予測計算に助力いただいた高野洋一氏に深謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 例えば、岡田龍二、小山浩史：総重量5000tfの地下鉄丸ノ内線を受ける、トンネルと地下、vol.36, No.9, pp.66-75, 2005.9.
- 2) 鴻池・青木あすなろ・白石建設工事共同企業体、早稲田工事事務所：13号線新宿七丁目一工区土木工事、大久保交差点施工計画書、2004.10.
- 3) 鴻池・青木あすなろ・白石建設工事共同企業体：13号線七丁目一工区、パイプルーフ仮受け防護検討、2004.10.
- 4) 国土交通省鉄道局・鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説、基礎構造物・抗土圧構造物、2000.6.
- 5) 国土交通省鉄道局・鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説、開削トンネル、2001.3.
- 6) 例えば、土木学会：トンネル標準示方書、シールド工法・同解説、2006.7.
- 7) 土木学会：トンネル標準示方書、開削工法・同解説、2006.7.