

# 軟弱地盤におけるパイプルーフ施工に伴う地盤変位の計測と解析

岡部 安治<sup>1</sup>・小宮 一仁<sup>2</sup>・赤木 寛一<sup>3</sup>・高橋 博樹<sup>4</sup>・宇井 仁将<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 尼崎築港株式会社 代表取締役社長 (〒150-0013 渋谷区恵比寿一丁目24-14)

E-mail: y\_okabe@amachiku.co.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 千葉工業大学工学部教授 (〒275-8588 習志野市津田沼二丁目17-1)

<sup>3</sup>フェロー 工博 早稲田大学理工学術院教授 (〒169-8555 新宿区大久保三丁目4-1)

<sup>4</sup>学生員 工修 千葉工業大学大学院博士後期課程 (〒275-8588 習志野市津田沼二丁目17-1)

<sup>5</sup>学生員 千葉工業大学大学院博士前期課程 (〒275-8588 習志野市津田沼二丁目17-1)

2009年3月20日に西九条駅－大阪難波駅間が延伸開業した阪神なんば線は、西九条駅から高架で大阪環状線と安治川を越えると、西九条交差点の手前で地下に入り大阪難波駅まで地下線である。地下線のうち、阪神高速16号港線と地下鉄中央線の高架橋をアンダーパスする西九条交差点下のトンネル工事では、掘削時の地盤変状防止のために、パイプルーフ工法を併用した工事が行われた。本報告では、西九条交差点下トンネル工事において用いられたパイプルーフ施工に伴う地盤変位の計測結果とパイプの掘進過程を考慮した3次元有限要素法解析結果に基づき、軟弱地盤におけるパイプルーフ施工に伴う地盤変位を明らかにした。

**Key Words :** pipe lining method, displacement, measurement, finite element method, soft ground, tunnel

## 1. まえがき

古くから主に山岳トンネル工事では、トンネル掘削時の地盤崩壊の防止や地盤変位の低減を目的としてパイプルーフ工法が用いられている。近年では、都市部の軟弱地盤においてもパイプルーフ工法を併用するトンネル工事が増加している。山岳トンネル工事におけるパイプルーフ工事では、パイプルーフ施工時の地盤変位が問題とされることは少なかった。しかし、都市部の軟弱地盤におけるトンネル工事では、工事に伴う周辺地盤の変状を小さくし、既設構造物に工事の影響が及ばないようにすることが重要である。このため、都市部の軟弱地盤における工事では、パイプルーフが地表面あるいは既設構造物に近い位置に設置される場合は、パイプルーフ施工時の地盤変位を小さくする必要がある。そこで、軟弱地盤におけるパイプルーフ施工に伴う地盤変位の程度と発生要因を明らかにする必要がある。

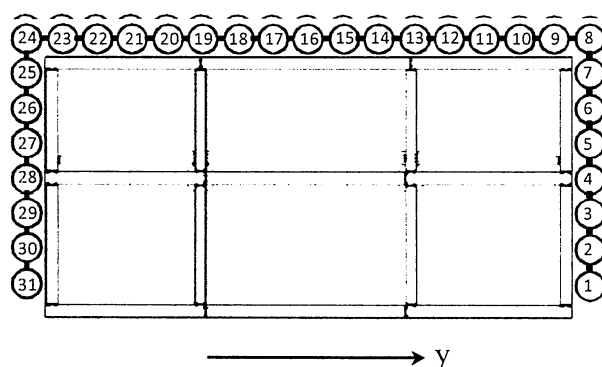
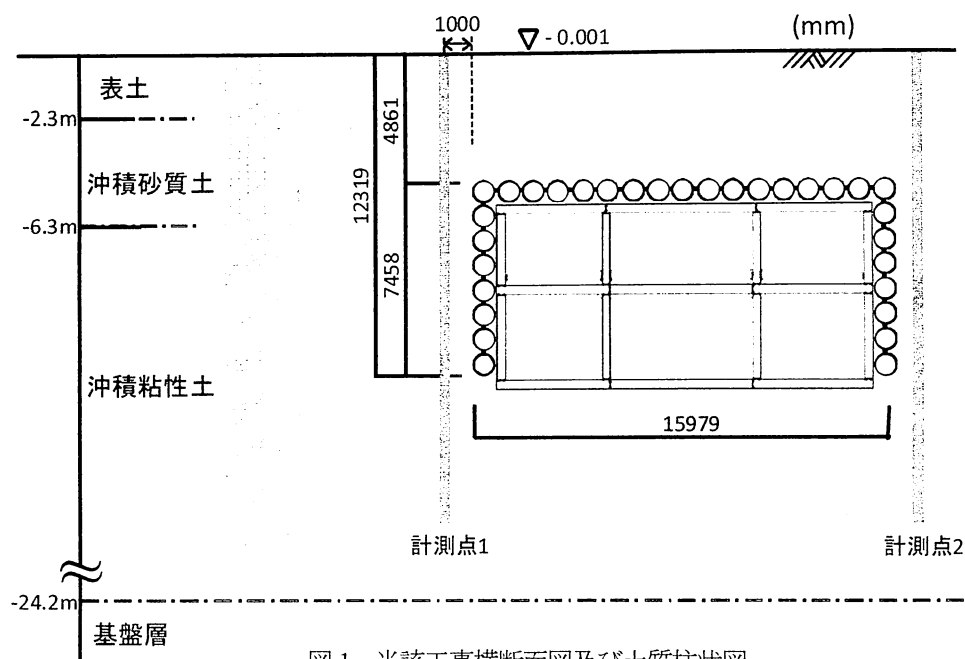
本研究では、阪神なんば線西九条交差点下のトンネル工事において、パイプルーフ施工時の地盤変位を複数の深さで計測した。また、パイプルーフ工事の施工過程を考慮した3次元有限要素法解析を実施した。これら現場

計測結果と解析結果から、軟弱地盤におけるパイプルーフ施工に伴う地盤変位の特徴と発生要因について考察した。

## 2. 工事及び地盤変位計測の概要

2009年3月20日に西九条駅－大阪難波駅間が延伸開業した阪神なんば線は、西九条駅から高架で大阪環状線と安治川を越えると西九条交差点の手前で地下に入り大阪難波駅まで地下線である。地下線のうち西九条交差点の南側に位置する九条駅から大阪難波駅までの各駅間のトンネルはシールド工法で建設された。そして、阪神高速16号港線と地下鉄中央線の高架橋をアンダーパスする西九条交差点下のトンネル工事では、土被りが浅く直上構造物などへの影響を考慮し掘削時の地盤変状防止のためのパイプルーフ工法と薬液注入による地盤改良が用いられた。

工事区間の横断面図と土質柱状図を図-1に示す。図-1のように、パイプルーフ施工地点の土質は沖積砂質土層と沖積粘性土層で構成されるN値0～10の軟弱地盤である。



当該工事では、門型のパイプルーフ工法が用いられた。パイプルーフの施工にあたっては、水平部分パイプと鉛直パイプ上半分の範囲を薬液注入により地盤改良した。パイプは、水平部分パイプを先行して挿入し、続いて垂直部分のパイプを挿入した。パイプの全長は39 mである。それぞれのパイプ挿入完了後、パイプと地盤の間の隙間を埋めるため裏込め注入が施工された。門の上部に当たる水平部分パイプは人力により掘り進められ、側部に当たる鉛直部分パイプは、スクリーオーガーによる掘削とジャッキ推力による推進を組合わせた機械施工が行われた。人力で掘削された水平部分パイプの周辺地盤挙動には大きなばらつきが見られ、また推力などのデータが得られなかったため、本研究では垂直部分パイプにおける地盤変位を対象とする。

当該工事では、パイプ推進に伴う地盤変位を計測するため、パイプ発進地点から約10 m の地点に図-1に示すような計測点1と計測点2を設けた。それぞれの計測点には、水平変位計を地表面及びGL-2m、GL-4m、GL-6m、GL-

8m, GL-10m, GL-12m, GL-14m, GL-16m, GL-18m, GL-20m, GL-22m, GL-25m, GL-28m, GL-32mに設置した。また沈下計を地表面及びGL-2m, GL-5m, GL-9m, GL-12m, GL-18m, GL-32mに設置し、沈下計とあわせて3次元の地盤変位を計測した。なお、GL-32mの計測変位を基準変位 (=0mm) とした。

水平部分パイプを挿入後、表-1に示すスケジュールで鉛直部分パイプの推進が行われた。パイプ番号は、図-2のとおりである。計測点1側と計測点2側の同じ深さにある2本の鉛直部分パイプは、ほぼ同時に施工された。同じ深さの2本のパイプの推進開始日と推進完了日が若干異なるのは、地盤内の障害物除去や休日等のためである。

パイプルーフの施工精度は、一般的には施工長に対して1/500とされている。当該工事の場合、施工精度1/500

表-1 鉛直部分パイプルーフの施工順序

|                       | パイ<br>プ<br>番<br>号 | 推<br>進<br>開<br>始<br>日 | 推<br>進<br>完<br>了<br>日 |                       | パイ<br>プ<br>番<br>号 | 推<br>進<br>開<br>始<br>日 | 推<br>進<br>完<br>了<br>日 |
|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| 計<br>測<br>点<br>1<br>側 | 24                | 4/26                  | 5/4                   | 計<br>測<br>点<br>2<br>側 | 8                 | 4/26                  | 5/10                  |
|                       | 25                | 5/8                   | 5/14                  |                       | 7                 | 5/11                  | 5/15                  |
|                       | 26                | 5/19                  | 5/21                  |                       | 6                 | 5/19                  | 5/22                  |
|                       | 27                | 5/23                  | 5/26                  |                       | 5                 | 5/23                  | 5/27                  |
|                       | 28                | 5/28                  | 5/30                  |                       | 4                 | 5/28                  | 6/2                   |
|                       | 29                | 6/5                   | 6/7                   |                       | 3                 | 6/5                   | 6/8                   |
|                       | 30                | 6/10                  | 6/13                  |                       | 2                 | 6/10                  | 6/14                  |
|                       | 31                | 6/15                  | 6/18                  |                       | 1                 | 6/15                  | 6/19                  |

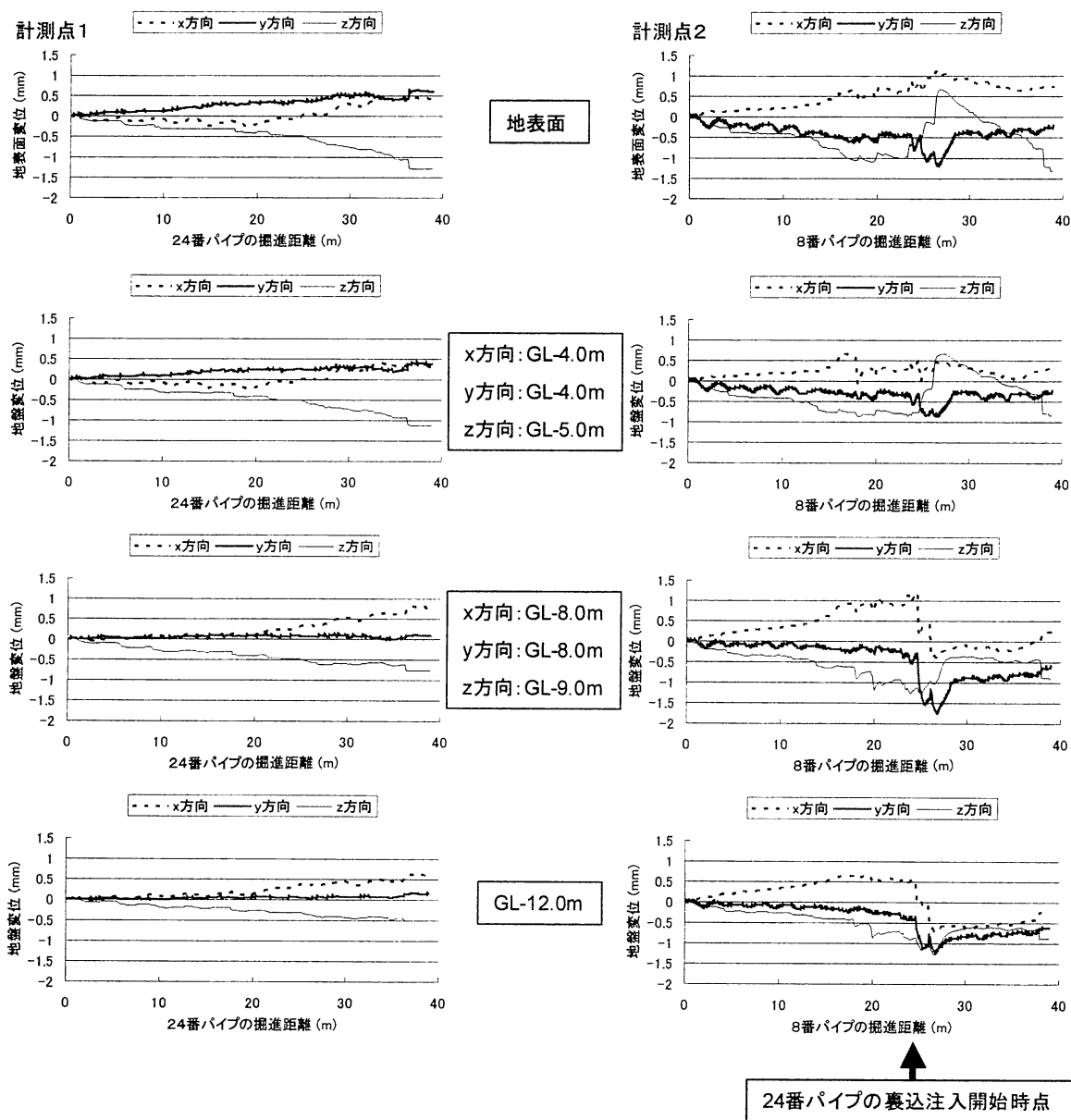


図-3 地盤変位計測結果（24番パイプ及び8番パイプ推進時）

とすると施工誤差の許容値は約75mmとなるが、近接する地下埋設物への影響等を考慮し50mmを管理値とした。

### 3. パイプ推進に伴う地盤変位の計測結果

図-3は、24番パイプと8番パイプ掘進に伴う、地表面、GL-4m、GL-8m、GL-12mの水平方向の地盤変位と、地表面、GL-5m、GL-9m、GL-12mの鉛直方向の地盤変位の計測結果である。水平変位は、パイプ推進方向をx方向の正、パイプ推進方向に直交する図-2に示す矢印方向（計測点1側→計測点2側）をy方向の正とした。鉛直変位は、鉛直上向きをz方向の正とした。

図から、パイプ推進に伴う地盤変位には次のような特徴が見られた。

(1)パイプ推進方向（x方向）の水平変位は、概ねパイプの推進方向に発生するいわゆる押し気味の変位である。しかし、計測点1における24番パイプ接近時には、パイプ推進方向とは逆方向の引き気味の変位が見られ、切羽における圧力バランスの影響を受けることがわかる。

(2)水平方向（y方向）変位は、パイプに向かう方向に発生する。パイプと地盤の間の隙間の発生による応力解放が一因であると考えられる。

(3)パイプ推進に伴い地盤沈下が発生する。

(4)当該工事では、パイプ推進に伴う地盤変位は、管理値に比べ極めて小さい値に抑えられた。

(5)24番パイプの裏込め注入による地盤変位は、24番パイプから離れた計測点2にも及ぶ。裏込め注入による地盤変位はパイプ推進に伴う地盤変位に比べて大きい。

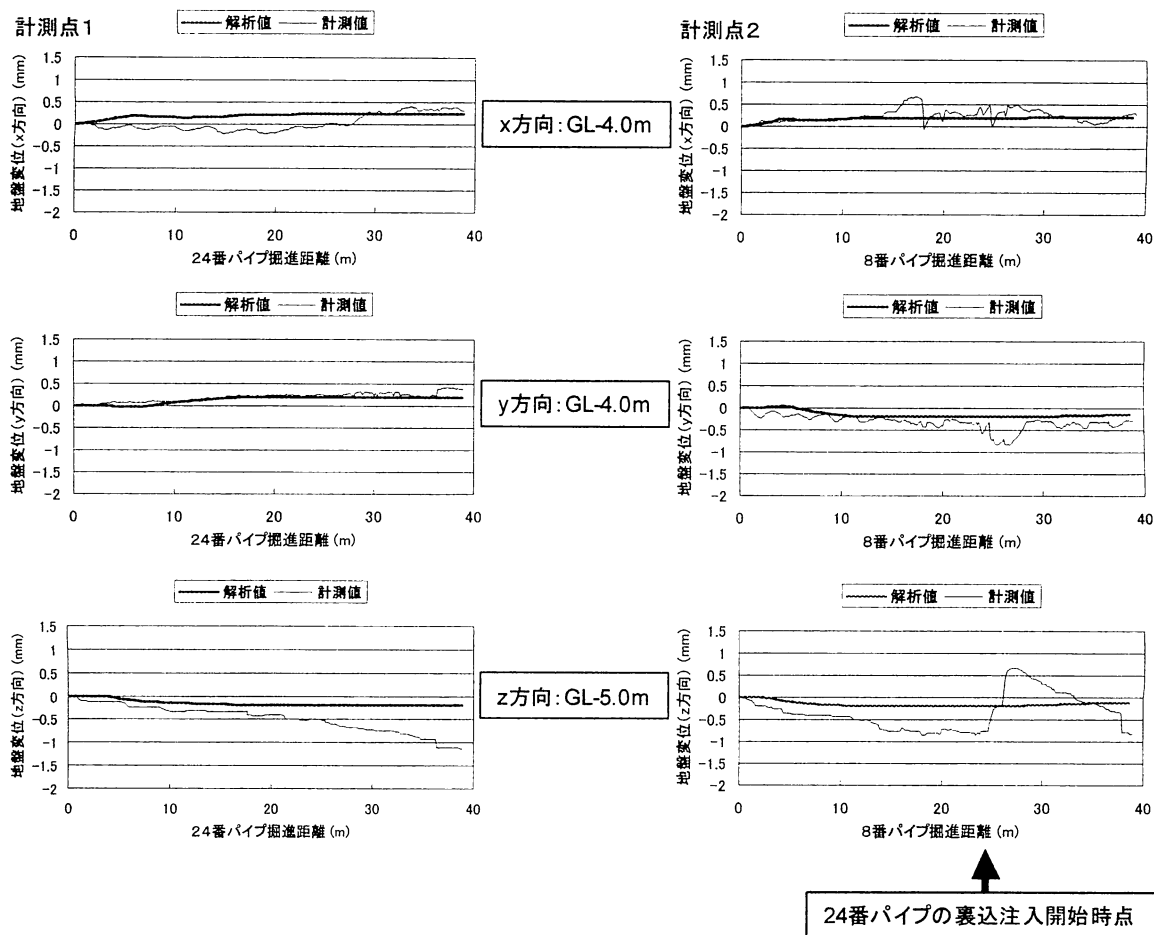


図-4 解析結果と計測値の比較 (24番パイプ及び8番パイプ推進時)

#### 4. パイプ推進に伴う地盤変位の3次元有限要素法解析

小宮<sup>1)</sup>が開発したシールド工の逐次解析モデルを推進工事に適応<sup>2)</sup>させた3次元有限要素法プログラムを用いて、当該工事のパイプ推進工程を再現した数値解析を実施した。解析では、工事と同じパイプ推進力を外力とし、切羽における掘削は、小宮<sup>1)</sup>が提案した掘削要素と有限要素の再分割を用いる方法によって解いた。

パイプと地盤の間には、グッドマン型のジョイント要素を配置し推進時の摩擦抵抗を考慮した。

解析に用いたパラメータは表-2に示すとおりである。現場では、圧密降伏応力等の地盤の応力履歴が得られなかったため、地盤、パイプ、掘削要素は等方弾性体とした。地盤の弾性係数とポアソン比はN値等から決定した。地盤の密度は現場で採取した土試料の含水比と土粒子の密度から決定した。掘削要素のパラメータは、パイプ推進速度が実施工と一致するように定めた。

図-4は、24番パイプと8番パイプ推進に伴う、パイプに最も近い計測点(水平GL4m、鉛直GL5.5)の地盤変位の解析値と計測値の比較を示したものである。

x,y,z方向とも、解析値と計測値は同じ方向の変位を示

している。しかし、計測点1のx方向変位において、パイプ接近時の解析値と計測値の変位の方向が逆になっている。これは、全てのパイプ推進において、解析では切羽における土圧バランスを押し気味に設定して掘削を行ったのに対し、実際の工事では当該地点における掘削土量が大きかったため切羽の土圧バランスが引き気味になったためと考えられる。また、このような切羽における土圧バランスにより、地盤を推しながら掘削した解析で得られた地盤沈下量が計測値に比べて小さくなっている。

パイプ推進完了後の裏込め注入の解析を行っていないため、裏込め注入による地盤変位は解析では再現されていない。

表-2 解析パラメータ

|         | 弾性係数                       | ポアソン比    | 密度                      |
|---------|----------------------------|----------|-------------------------|
| 表土      | 1000 kN/m <sup>2</sup>     | 0.333    | 1.67 ton/m <sup>3</sup> |
| 沖積砂質土層  | 554 kN/m <sup>2</sup>      | 0.400    | 1.67 ton/m <sup>3</sup> |
| 沖積粘性土層  | 460 kN/m <sup>2</sup>      | 0.450    | 1.67 ton/m <sup>3</sup> |
| 地盤改良層   | 1400 kN/m <sup>2</sup>     | 0.400    | 1.67 ton/m <sup>3</sup> |
| パイプ     | 45000000 kN/m <sup>2</sup> | 0.290    | 1.67 ton/m <sup>3</sup> |
| 掘削要素    | 560 kN/m <sup>2</sup>      | 0.330    | 1.79 ton/m <sup>3</sup> |
|         | x方向剛性                      | y方向剛性    | z方向剛性                   |
| ジョイント要素 | 200 kN/m                   | 200 kN/m | 200 kN/m                |

## 5. 結論

本報告では、パイプルーフ施工に伴う地盤変位の計測結果とパイプの掘進過程を考慮した3次元有限要素法解析結果に基づき、軟弱地盤におけるパイプ推進に伴う地盤変位の特徴を明らかにし、地盤変位の発生要因について基礎的な考察を行った。本報告で得られた知見は以下のとおりである。

(1) パイプ推進に伴う地盤変位は、切羽における土圧バランス、パイプと地盤の間の摩擦、パイプと地盤の間のボイド発生及び裏込め注入等によって発生する。これらの地盤変位発生メカニズムは、シールド工事や推進工事のそれに類似している。

(2) パイプ推進過程を考慮した有限要素法により、パイプ推進に伴う地盤変位を定量的に解析可能である。

(3) 当該工事では、適切な施工、施工管理及び地盤改良により、パイプ推進に伴う地盤変位は管理値に比べ極めて小さい値に抑えられた。

謝辞：本研究の現場計測では、阪神電鉄株式会社常務取締役 木戸洋二氏、株式会社奥村組関西支社 中山学博士（現在 独立行政法人防災科学技術研究所兵庫最新工学研究センターに所属）より多大なる協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) K. Komiya et al. : Finite element modeling of excavation and advancement processes of a shield tunneling machine, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.4, pp.37-52, 1999.
- 2) 露崎, 小宮, 渡邊 : 有限要素法による推進工法のモデル化について, *土木学会第59回年次学術講演会*, pp.761-762, 2004.

## MEASUREMENTS AND ANALYSES OF GROUND BEHAVIOUR DUE TO THE PIPE LINING CONSTRUCTION WORK IN SOFT GROUND

Yasuharu OKABE, Kazuhito KOMIYA, Hirokazu AKAGI,  
Hiroki TAKAHASHI and Hiromasa UI

Three dimensional ground displacements during the pile lining construction work was measured in the field in order to investigate the effect of the construction processes on the ground responses. In the pile lining method, a steel pile is driven forward by applying mechanical jack forces and excavating the soil in front of the pile with boring machine and the ground displacements was mainly caused by these pile lining operations. Three dimensional FEM analyses considering the processes of the pile lining construction work were conducted and the numerical results of the ground behaviour were compared with the field measurements.