

# 先行アーチ支保工を用いた非開削切り広げ施工における計測結果と解析に関する一考察

森 章\* 梶山雅生\*\* 岩崎 肇\*\* 清水直博\*\*\* 池谷明信\*\* 岩波 基\*\*\*\*

地下鉄副都心線高田 A 線工区では、単線トンネル間を非開削で切り広げ、交通量の多い交差点直下に中間ポンプ室を構築した。施工はアーチ支保工を先行して設置した後にその内側を掘削し、その後、ポンプ室躯体を逆巻きで構築する方法を採用した。本論文では、施工時の曲線パイプルーフやセグメントなどのひずみ測定結果についてまとめ、二次元 FEM 解析の結果と比較するとともに、構造物に対する荷重メカニズムを検討する。

キーワード：非開削切り広げ、PSS-Arch 工法、曲線パイプルーフ、ひずみ計測

## 1. はじめに

東京地下鉄（株）において建設された地下鉄副都心線は、和光市～渋谷間 20.2km（うち、池袋～渋谷間 8.9km を新たに建設）を結ぶ地下鉄新線であり、2008 年 6 月に開通を迎えた。地下鉄副都心線の全路線では、雑司が谷駅と西早稲田駅間の中間地点付近が最深部となることから、この地点にポンプ室を構築することが計画された。

中間ポンプ室施工箇所は、交通量の激しい都道部交差点直下であり、かつ、土被りが約 33m と大きい。このため、開削工法による施工は施工性、経済性、道路環境の観点から採用が困難であり、地下鉄トンネル間に PSS-Arch 工法<sup>1)</sup>を適用することにより、非開削工法でポンプ室を構築する方法を採用した。

本報文では、施工方法とともに、セグメント、曲線パイプルーフ、変形防止鋼材の挙動を確認するために実施した計測工について説明し、その挙動を表現するために実施した解析を通じて、施工中に生じた各部材への荷重メカニズムに関する知見を深めるものである。

## 2. 施工概要

### 2.1 施工条件と地質条件

ポンプ室施工位置は、交通量の多い明治通り直下である。地中では、Fig.1 に示すように、トンネル上部を NTT とう道や東電シールドが併走する。

ポンプ室施工位置の地質に注目すると、表土が薄く堆積している下に、第 4 紀更新世洪積層上総層群砂質土層 (Kas1) と粘性土層 (Kac1) が互層となって堆積している。Table 1 に示すように、Kac1 層は N 値 30 以上、Kas1 層は N 値 50 以上が平均的に期待できる比較的堅固な地盤であった。

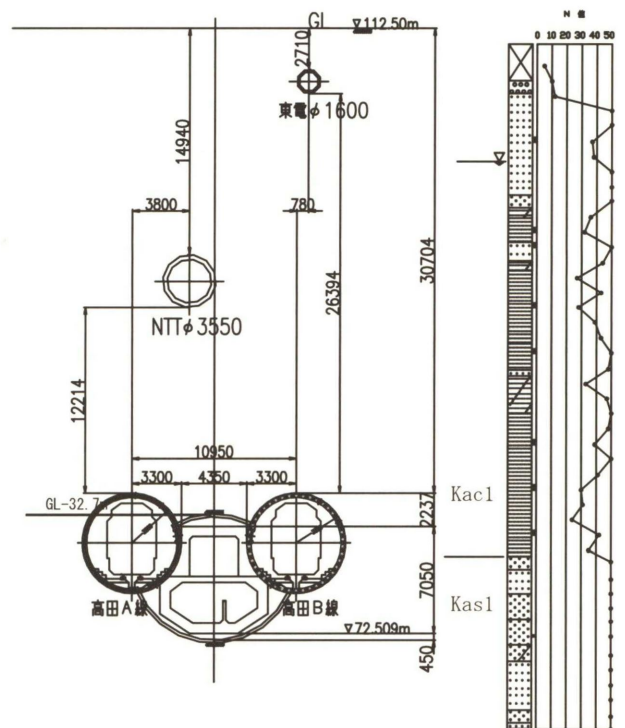


Fig.1 地質条件概要図

Table 1 地盤物性地一覽表

項目	単位	上総層粘性土 (Kac1)	上総層砂質土 (Kas1)
N 値	—	30~50	50以上
単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	17	18
粘着力	kN/m <sup>2</sup>	260	0
内部摩擦角	°	0	42
変形係数	kN/m <sup>2</sup>	54,400	75,300
透水係数	cm/sec	—	1×10 <sup>-3</sup>

\* 首都圏支店 土木事業部 第二営業統括部  
 \*\* 首都圏支店 土木事業部 13 号線西早稲田作業所  
 \*\*\* 首都圏支店 土木事業部 吉の浦シールド作業所  
 \*\*\*\* 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授

## 2.2 ポンプ室の仕様

中間ポンプ室は、Fig.2 に示すように、約 4.4m の間隔を有する2本の単線トンネル(鋼製、厚さ270mm、外径φ6,600mm)の間に構築される。ポンプ室は延長9.2m、幅7.2m、高さ7.05mで中床版を有しており2階構造となっている。

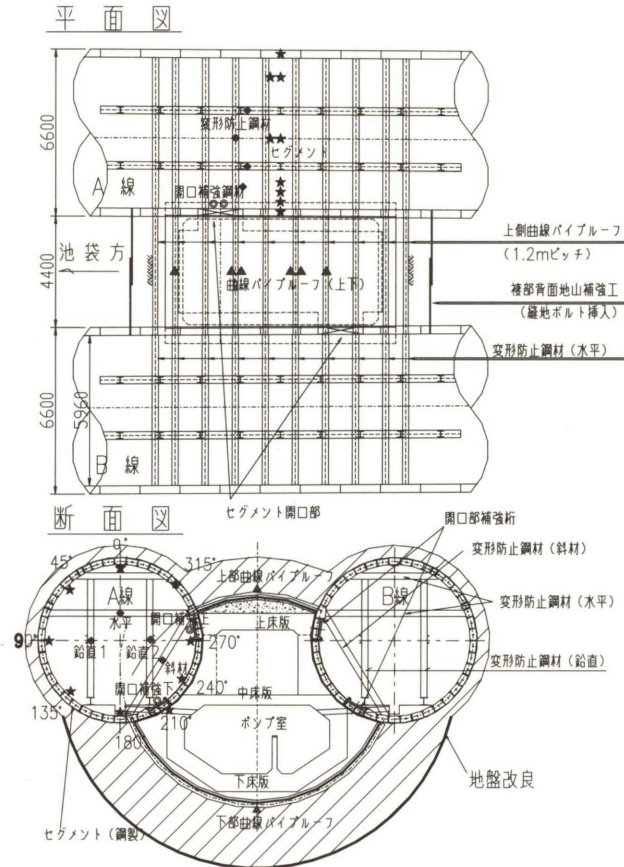


Fig.2 中間ポンプ室概要図

## 2.3 施工手順

施工手順は以下のとおりである<sup>2)</sup>。

① 地下水対策工法として、ディープウェル工法とウェルポイント工法を併用し、シールドトンネル下端の高さまで地下水位を下げた。また、掘削時に、土砂をともなった地下水の流入やはだ落ちが発生するのを防止するため、セグメント背面全周と曲線パイプルーフ外周部にトンネル内から地盤改良工(低圧浸透注入工法)を実施した。改良厚さは、下側曲線パイプルーフ部は約2.5m、上側曲線パイプルーフ部は約1.5mとした。

② パイプルーフの鋼材は、□-250×250の角型鋼管で、専用の推進装置をA線坑内に設置し、約1.2mピッチで挿入した。先端にウォータージェット併用刃口推進装置を取り付け、バキュームで排土した。また、セグメント内の変形防止工として鋼材をパイプルーフと同じピッチで設置した。Fig.2のように変形防止鋼材は、鉛直方向支保工2本、水平方向支保工2本、斜材1本で、この他にセグメント開口部箇所に、トンネル掘進方向の補強桁を配置した。

③ 中間ポンプ室のトンネル掘進方向の棲部は、縫地ボルトで地盤を補強することにより、安定化をはかった。

④ セグメントを一部撤去して開口部をつくり、斜め上向きに掘り進み、上半を掘削した。掘削後、上床版を打設した。

⑤ 上半二次掘削を行い、側壁と中床版を逆巻きで打設した。

⑥ 下半掘削を行い、掘削直後に吹付けコンクリート(厚さ100mm)を施工した。

⑦ 下床版とポンプ室側壁を逆巻きで打設した。

## 3. 計測工

計測工はポンプ室施工時の各部材の挙動を確認する目的で、セグメント、曲線パイプルーフ、変形防止鋼材にひずみゲージを貼り付けて実施した<sup>3)</sup>。計測位置や測点数を、Fig.2, Table 2に示す。

Table 2 計測項目一覧表

	測定項目	断面	箇所
★セグメント	曲げモーメント 軸力	1	9
▲曲線パイプルーフ	曲げモーメント 軸力	3	1箇所 (中央)
◆変形防止鋼材	軸力	1	4

計測したひずみは、セグメントの開口部撤去を行う直前を初期値とする。

### (1) 曲線パイプルーフ

曲線パイプルーフの軸力と曲げモーメントを測定できるように、角型鋼管の上下にひずみゲージを貼り付けた。ひずみゲージを貼り付けたまま掘進・挿入を行うため、3断面で測定し、ひずみデータの採取状況が良好なものを採用した。

### (2) 変形防止鋼材

変形防止鋼材は1断面のみを対象とし、鉛直方向2本、水平方向1本、斜材1本で軸力を計測した。

### (3) セグメント

セグメントの計測は、210°と240°を除いて45°ピッチとし、全円周9箇所で行った。各測点では、軸力と曲げモーメントを算出できるようにひずみゲージを配置した。セグメントのひずみ計測は、A線坑内の1断面のみで実施した。

## 4. 解析モデルの作成

### 4.1 解析の目的と条件

セグメント、曲線パイプルーフ、変形防止鋼材への荷重の载荷メカニズムに対する知見を深めるため、

各部材の挙動を解析で表現することとした。解析は、Fig. 3, 4に示すように、二次元FEM解析により行い、水平方向に掘削幅の約5倍、下方向に約2倍の解析領域とする。境界条件は、下端がX,Y方向固定、左右端はX方向固定、Y方向自由とした。

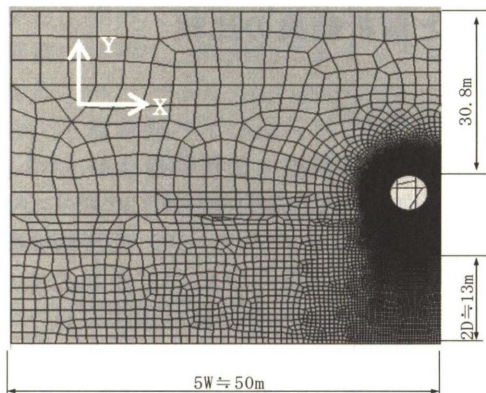


Fig. 3 二次元 FEM 解析モデル

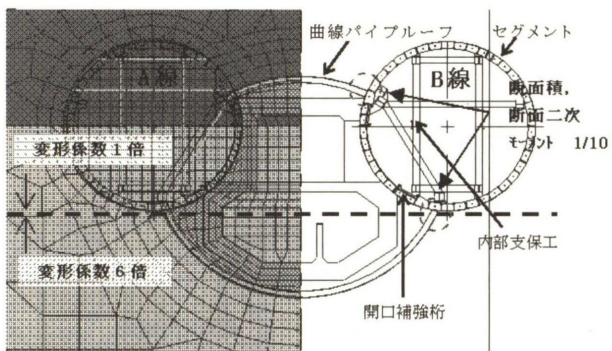


Fig. 4 二次元 FEM 解析モデル (拡大図)

#### 4.1.1 地山の物性値

解析は、地山は変形量実測値が大きくないことから、弾性解析とし、地盤の物性値はTable 3に示す値を使用した。ここで、シールドトンネル下端以深の地盤の変形係数は、上側の6倍とした。

Table 3 地山の物性値

	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	変形係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	側方 土圧係数 <sup>1)</sup>
上総層粘性土 (Kac1)	17	54,400	0.35	0.54
上総層砂質土 (Kas1)	18	75,300	0.35	0.54
上総層砂質土 (Kas1') <sup>2)</sup>	18	451,800	0.35	0.54

1) 側方土圧係数 =  $\nu / (1 - \nu)$

2) Kas1' の変形係数は、Kas1の6倍とする

これは、一般にリバウンドを生じる地盤では、変形係数を大きくした方が実測値に一致することが経験的に知られており、除荷時の変形係数として載荷時の3倍の値を使用した事例<sup>4)</sup>と、変形係数に対する三次元効果を加味して決定した。三次元効果は、Fig. 5のように、有限深さ地盤中の根入れを有する長方形基礎の平均沈下量が、今回の施工条件（掘削幅 B=7.2m, 奥行 L=9.2m, 掘削地盤深さ D=40.0mであるこ

とから、L/B=1.28m, D/B=5.56) では、約0.5倍となることから見かけの変形係数をさらに2倍し、上側地盤の6倍の変形係数を適用した<sup>5)</sup>。

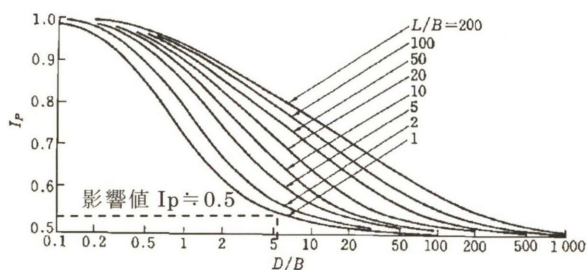


Fig. 5 根入れを有する長方形基礎に関する影響値 (根入れ深さに関する影響値)

#### 4.1.2 その他部材の物性値

Table 4~7に、構築コンクリート、セグメント、H鋼、曲線パイプの物性値をまとめる。

曲線パイプは、 $\square$ -250×250 (厚み9mm) の角パイプを使用し、挿入後、鋼管内に中詰コンクリートを打設する。そこで、パイプは、FEM解析では、鋼管と中詰材の合成物性値を使用した。応力照査時には、軸力は鋼管と中詰材で分担し、曲げモーメントには鋼管のみで受け持つものとした。

Table 4 構築コンクリートの物性値

項目	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	変形係数E (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比
吹付けコンクリート	18	$3.4 \times 10^6$	0.2
ポンプ室躯体	24	$2.5 \times 10^7$	0.2
ポンプ室躯体 中床版開口部 開口比:8.0/9.4	24	$2.5 \times 10^7$	0.2

Table 5 セグメントの物性値

	1リングあたり	1mあたり
セグメント外径 (m)	6.600	—
セグメント幅 (m)	1.600	—
セグメント高さ (mm)	270	—
変形係数 (kN/m <sup>2</sup> )	$2.1 \times 10^8$	
ポアソン比 $\nu$	0.3	
断面積A (m <sup>2</sup> )	$2.533 \times 10^{-2}$	$1.583 \times 10^{-2}$
断面二次モーメントI (m <sup>4</sup> )	$1.141 \times 10^{-3}$	$7.133 \times 10^{-4}$

Table 6 H鋼の物性値 (1.2mピッチ)

	1本あたり	1mあたり
変形係数E (kN/m <sup>2</sup> )	$2.1 \times 10^8$	
ポアソン比	0.3	
断面積A (m <sup>2</sup> )	$9.143 \times 10^{-3}$	$7.619 \times 10^{-3}$
断面二次モーメントI (m <sup>4</sup> )	$1.070 \times 10^{-4}$	$8.917 \times 10^{-5}$

なお、B線側（パイプ到着側）との接合部は溶接することができないことを考慮して、曲線パイプの最もB線側に位置する要素の断面積と断面二次モーメントをTable 7の1/10の大きさとした。

Table 7 曲線パイプルーフの物性値 (1.2mピッチ)

		1mあたり	
合成物性値	変形係数E	(kN/m <sup>2</sup> )	4.583×10 <sup>7</sup>
	断面積A	(m <sup>2</sup> )	5.191×10 <sup>-2</sup>
	断面二次モーメントI	(m <sup>4</sup> )	3.089×10 <sup>-4</sup>
照査用物性値	軸力Nの分配率	鋼管	0.623
		中詰	0.377
	鋼管断面積As	(m <sup>2</sup> )	7.056×10 <sup>-3</sup>
	鋼管断面係数Zs	(m <sup>3</sup> )	5.392×10 <sup>-4</sup>
	中詰断面積Ac	(m <sup>2</sup> )	4.485×10 <sup>-2</sup>

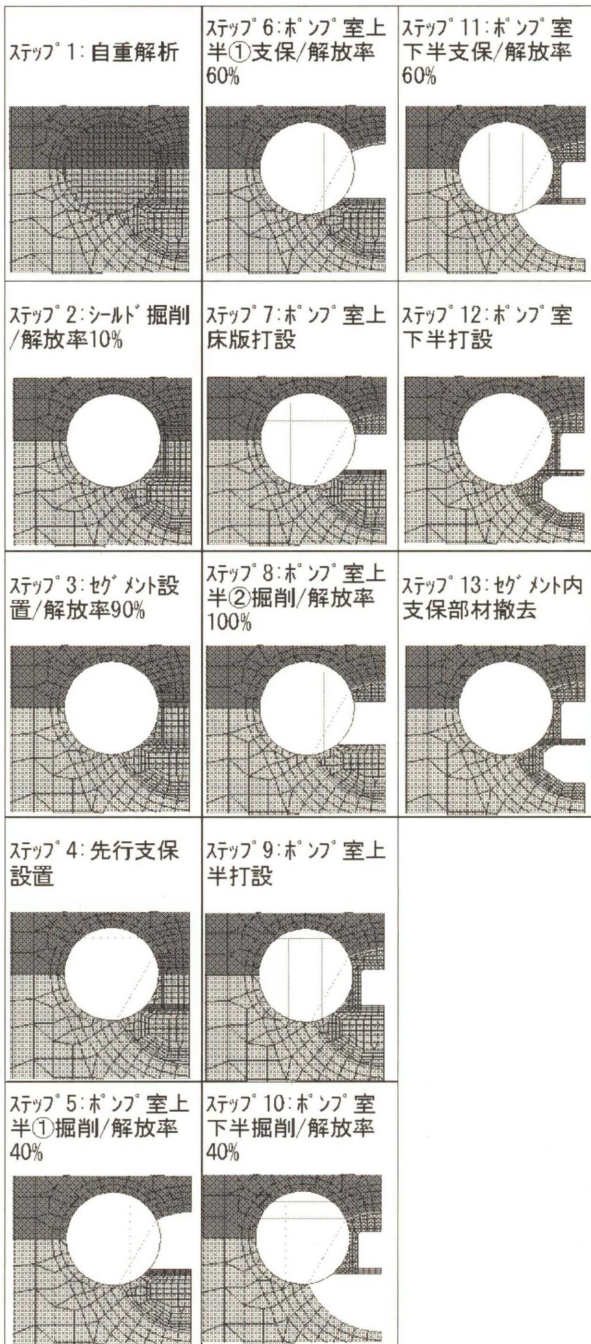


Fig. 6 FEM 解析ステップ

#### 4.1.3 解析ステップ

Fig. 6に、FEM解析ステップを示す。解析は実際の

施工手順にあわせ、上半掘削、上床版打設、側壁打設、下半掘削などの施工ステップ順に解析を行う。また、掘削にともない、掘削直後に40%、吹付け後に残りの60%を解放する。

## 5. 計測と解析結果の比較

### 5.1 計測結果

計測結果と解析結果は、初期値のほか、Table 8に示す5つの施工ステップ完了時の値で比較する。また、Fig. 7, 8, 10に、曲線パイプルーフ、変形防止鋼材、セグメントの各施工ステップにおける軸力または曲げモーメントの計測値と解析値を示す。以下で各部分に関する考察を行う。

Table 8 施工ステップ表

施工段階	状態図
①上半一次掘削 天端～-2.0m  セグメント開口部設置 上半一次掘削 パイプサポート間土留	
②上半二次掘削 -2.0～-3.0m (上床版打設前)  上半二次掘削 パイプサポート間土留	
③上半三次掘削 -3.0～-5.0 (中床版打設前)  上床版打設 上半三次掘削	
④下半掘削  側壁・中床スラブ打設 下半掘削・吹付け	
⑤完成時  ポンプ室構築工 中床スラブ開口部打設 背面埋め戻し	

#### (1) 曲線パイプルーフ

上側曲線パイプルーフは、施工段階①「上半一次掘削」開始直後に正曲げモーメントと軸圧縮力が作用している。これは、上側曲線パイプルーフに対し、

鉛直下向きの荷重が作用したためと考えられ、発生した正曲げモーメント50kN・mが発生するために必要な分布荷重を逆算すると、土被り6m程度に相当する。

また、施工段階②「上半二次掘削」以降は、曲げモーメント、軸力ともにほとんど変化がない、このことから上側パイプルーフが分担する水平荷重は、鉛直荷重に比べて、相対的にあまり大きくないと考えられる。

一方、下側曲線パイプルーフには、すべての施工ステップを通じて軸力の変化が見られず、下側曲線パイプルーフに作用する鉛直上向き荷重と側方荷重は微小である。

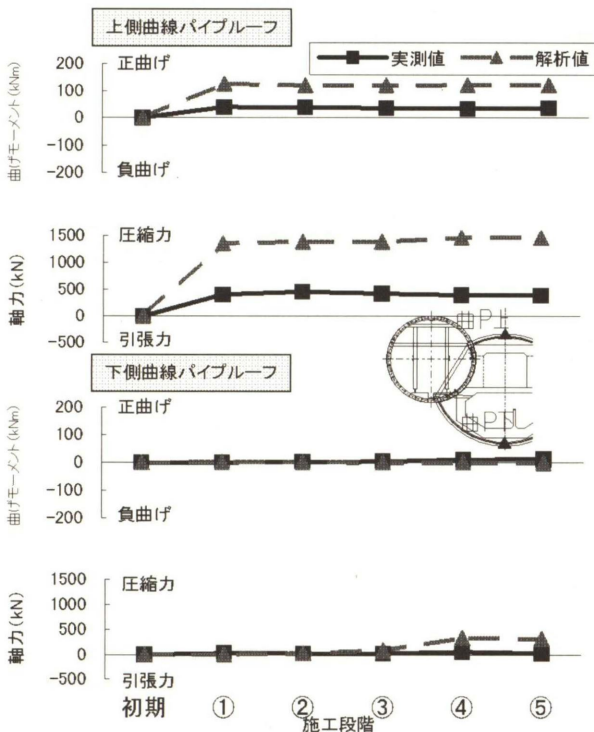


Fig. 7 曲線パイプルーフ (実測値と解析値)

(2) 変形防止鋼材

変形防止鋼材のうち、鉛直1 (地山側) と水平には各施工段階を通じて軸力に変化がないのに対し、鉛直2 (ポンプ室側) と斜材には、200~300kN/m程度の軸圧縮力が発生し、かつ、施工が進むにつれて徐々に軸圧縮力が増加している。このことは、背面の土砂を除去され、軸圧縮力が解放されたセグメントに代わって、鉛直2と斜材が上側曲線パイプルーフの軸圧縮力を伝達する割合が、施工が進むにつれて増加することを示している。

(3) セグメント

セグメント地山側(0~135°)は、曲げモーメント、軸力の両方に大きな変化がない。したがって、地山側のセグメントに作用する荷重の変化が地山との摩擦力に比べて小さかった可能性が考えられる。

一方、セグメントポンプ室側(180~315°)は、施工段階①~③の間で、軸圧縮力、曲げモーメントの

変化が確認されており、パイプルーフ内側(240°, 270°)とパイプルーフ外側(180°, 315°)では傾向が異なる。

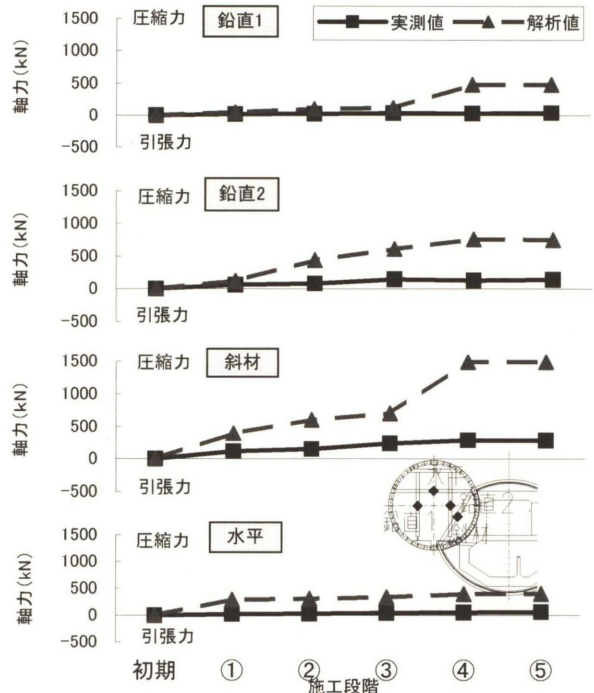


Fig. 8 変形防止鋼材 (実測値と解析値)

曲線パイプルーフ内側の240°と270°では、地山による反力が失われたため、セグメントがポンプ室内にはらみだす現象が起こっており、負曲げが卓越している。また、軸力は施工段階に応じて、地山の拘束が残っている間は圧縮側に、解放された後は引張側に変化しているものと考えられる。

一方、曲線パイプルーフ外側の180°と315°では、施工段階を通じて軸力が解放され、軸力は引張側に変化している。また、曲げモーメントは正曲げ側に变化している。

施工段階④~⑤では、セグメントの軸力、曲げモーメントにほとんど変化が見られない。これはポンプ室構築のコンクリートにセグメントが拘束され変形が発生していないためと考えられる。

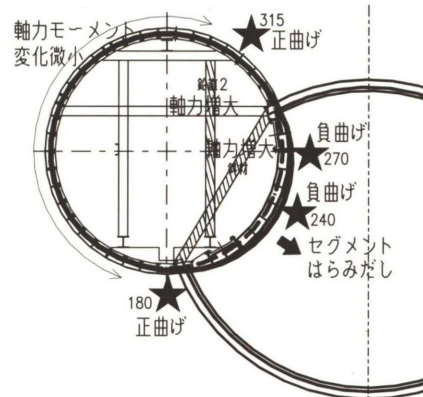


Fig. 9 セグメントほかの変形モード (模式図)

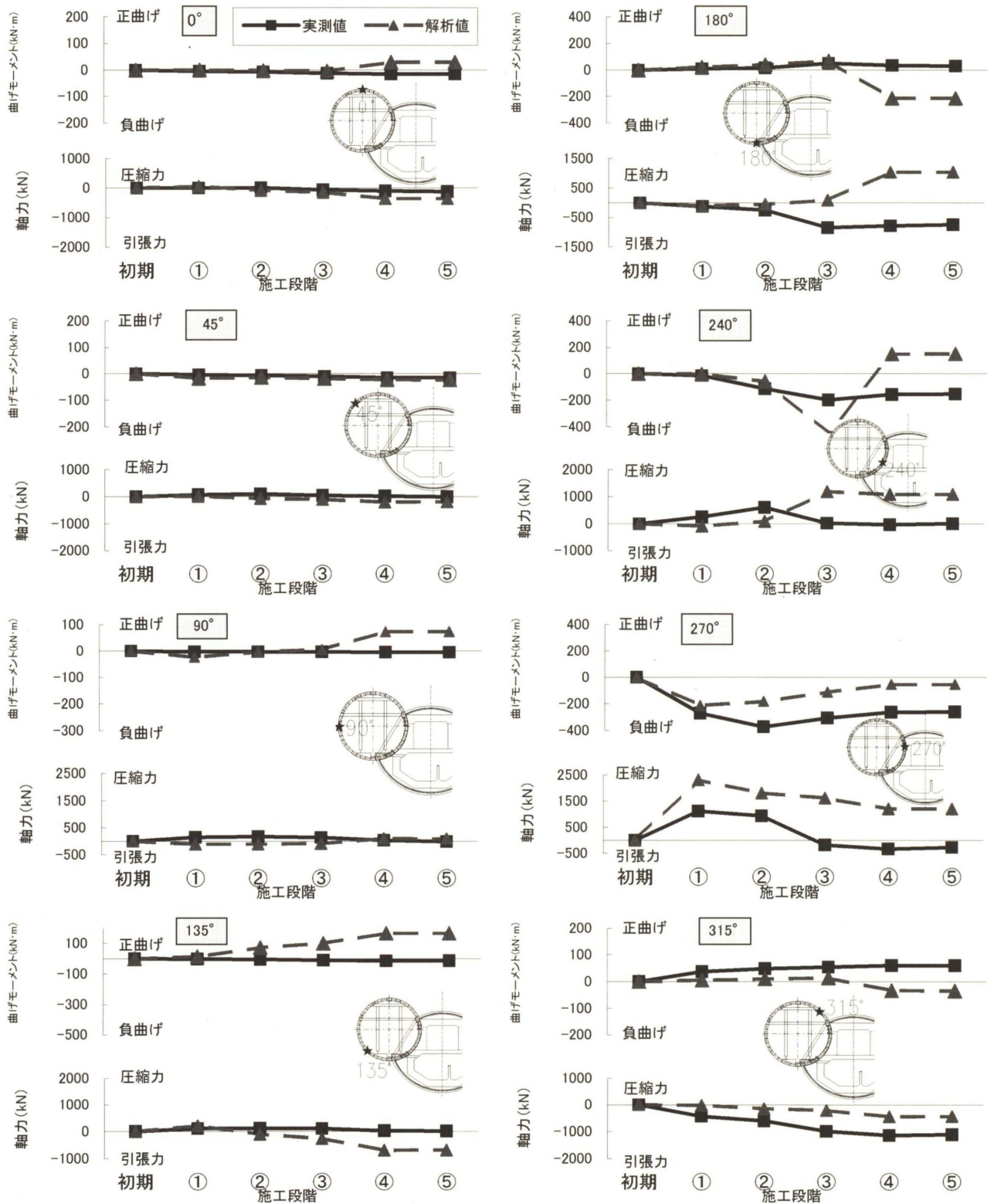


Fig. 10 セグメント (実測値と解析値)

## 5.2 解析結果

解析値は、Fig. 6のステップ4で計算された値を初期値とし、各施工段階での値は初期値からの変化量を示す。

### (1) 曲線パイプルーフ

上側曲線パイプルーフの解析値と実測値は、施工

段階①「上半一次掘削」で、曲げモーメントが正曲げ側に、軸力が圧縮側に変化し、その後、顕著な変化が見られないという点で傾向が一致している。ただし、曲げモーメントと軸力は、ともに、解析値が実測値の3~4倍となっている。

一方、下側曲線パイプルーフは、施工段階④「下半掘削」で、軸力の解析値が圧縮側に変化している。これは、解析値では下半掘削により、側方土圧や下方地盤のリバウンドによる荷重が曲線パイプルーフに作用したためであるが、実測値ではこのような変化は確認できない。

#### (2) 変形防止鋼材

変形防止鋼材に発生した軸力は、施工段階①～③までは、解析結果と実測結果の傾向が良く一致している。しかし、実測値に比べ、解析値の方が大きく、施工段階③の値は、鉛直1、鉛直2、斜材で解析値が実測値の3～4倍となっている。

また、施工段階④「下半掘削」時に、解析では、斜材と鉛直1の軸力が大きく圧縮側に変化している。しかし、実測ではほとんどこのような変化は見られない。

#### (3) セグメント

セグメント地山側(0～135°)では、実測値と解析値は、ともに、ポンプ室側(180～315°)に比べて値が小さいという点で一致している。

ただし、施工段階④「下半掘削」の際に、90°、135°の実測値ではほとんど変化がないにも関わらず、解析値で曲げモーメントが正曲げ方向に変化している。

次に、セグメント180°と315°では、セグメント軸力の実測値が解放され、曲げモーメントが正曲げに変化する現象が解析で十分に表現できず、実測値の絶対値が解析値よりも大きくなっている。また、180°の解析結果では、実測値と異なり、施工段階④「下半掘削」で曲げモーメントが負曲げになり、軸力が圧縮側に変化している。

セグメント240°では、施工段階①、②では解析値と実測値はよく一致しているが、解析値の曲げモーメントと軸力が施工段階③と④で大きく変化しており、この変化は実測値では見られない。また、セグメント270°では、絶対値は異なるものの、施工段階①で、曲げモーメントが負曲げ側に、軸力が圧縮側に変化し、施工の進行にともなって逆の変化が生じる傾向が解析でも確認できる。

### 5.3 解析結果に対する考察

解析値と実測値を比較した結果について、考察する。

- 施工段階①～③「上半掘削」では、解析値と実測値の傾向はよく一致している。しかし、曲線パイプルーフと変形防止鋼材では、ともに解析値が実測値の3～4倍の大きさになっている。これは、解析で作用した鉛直下向き荷重が、実際に作用した荷重の3～4倍であった可能性を示している。
- 施工段階④「下半掘削」の解析では、下側曲線パイプルーフにリバウンドによる荷重が作用する。下

部地盤が洪積砂質土層で堅固な地盤であるため、解析では下部地盤の変形係数を6倍にしてリバウンドの影響を抑えた。実測値はリバウンドの影響が極めて微小であり、解析値と若干の差が見られた。

- セグメントポンプ室側(180～315°)の曲げモーメントや軸力は、解析値、実測値ともに変化が大きい。また、施工段階③以降で解析値は、実測値と大きな差がある箇所があり、型枠のはらみ出しが十分再現できていない。
- セグメント180°と240°では、セグメント背面が掘削されると、実測値では、軸力が解放され、曲げモーメントが負曲げに変化する傾向が見られるが、解析値では、軸力が圧縮側に変化する傾向が見られ、断面力の傾向に違いが見られる。

### 6. まとめ

本研究により得られた知見と課題を以下にまとめる。

- 計測の結果から、セグメントや曲線パイプルーフ、変形防止鋼材には、ポンプ室内の地山を掘削したことによるセグメント軸力の解放やセグメントのはらみ出しによる変形が生じたと推定される。
  - 上側曲線パイプルーフの曲げモーメント計測値から、両端固定梁の簡易なモデルを想定し逆計算すると、セグメントや曲線パイプルーフに作用する鉛直下向き荷重は、土被りで6m程度の土圧となる。したがって、同様規模の工事では、曲線パイプルーフに作用する土圧を緩み土圧で算定することができると思われる。
  - 二次元FEM解析で施工過程を再現したところ、解析値と実測値の傾向は、概ね一致しており、今回の解析で、各ステップ、各部材の断面力の変化を表現することができた。
  - 解析では、上側曲線パイプルーフと変形防止鋼材に作用する鉛直下向き荷重が実測値の3～4倍に評価されている。FEM解析では、掘削によって解放された応力の多くが支保部材で受け持たれているが、実施工では地山に受け持たれている割合が大きいと推定される。
  - 過去の事例を参考にポンプ室下側地盤の変形係数を6倍として解析した。実測値ではほとんどリバウンドの影響が見られないため、軸力や曲げモーメントに若干の差が見られるが、解析結果は安全側の評価となっている。
  - 今回の解析は二次元モデルで行ったが、実際は三次元効果やセグメントに設けた開口部の影響が強いものと想定される。このため、今後、これらの影響も検討する必要がある。
- 以上のように、実施工でのセグメント、支保工、

曲線パイプルーフの変状に関する知見を深めた。また、二次元 FEM 解析により、計測結果をかなり精度良く再現できた。

今後、実施工での挙動をさらに精度よく再現するため、鉛直荷重の地山と支保工の分担割合や地盤のリバウンドの影響についてさらに検討したい。また、ポンプ室の延長が 9.2m と短く、ポンプ室妻部やセグメント開口部、開口部補強などのトンネル軸方向の部材の影響を考慮するため、三次元解析を行い、その影響を検討したい。

都市部における非開削工法による地下空間切り広げは、社会的要請が高く、工法に関する知見の蓄積と設計法の確立が求められている。非開削工法による地下空間切り広げは、モデルが複雑であり、発生する断面力を正確に推定することは難しいが、より合理的な設計法の策定が可能となるように本研究を推進していく予定である。

## 謝辞

本報文中で取り扱った中間ポンプ室の施工をはじめ、地下鉄副都心線高田 A 工区土木工事では、発注者である東京地下鉄（株）の辻雅行元早稲田工事事務所長をはじめ、多くの皆様のご指導、ご助言のもと、無事、トンネル区間の施工を完了することができました。また、中間ポンプ室の計画と計測データの集積・解析を通じ、メトロ開発（株）、日本シビック

コンサルタント（株）の皆様にも多大なご協力をいただきました。さらに、本報文の解析に関し、長岡高等工業専門学校 大澤拓洋氏にも多大なご尽力を賜りました。

この場をお借りして、お世話になった皆様に心より感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 高橋裕之, 田中志人, 岩永茂治, 中北昭浩: めがねトンネルの中央導坑を利用した先行アーチ支保一金沢環状道路涌波トンネル, トンネルと地下, 第 37 巻 6 号, pp405-413, 2006.6
- 2) 辻 雅之, 村松 泰ほか: 地下 40m の単線シールド間に曲線パイプルーフでポンプ室を構築—東京メトロ副都心線高田 A 線工区一, トンネルと地下, 第 38 巻 5 号, pp323-331, 2007.
- 3) 辻 雅之, 村松 泰ほか: 都心部における非開削地下空間施工法の仮設計に関する一考察, トンネル工学論文集, 第 17 巻, pp93-103, 2007.
- 4) 酒井邦登, ほか: 営業線直下大規模開削工事に伴う軌道仮受け工の挙動解析について, 土木学会第 10 回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集, PP353-360, 1992
- 5) 土質工学会編: 土質基礎工学ライブラリー 7 土と基礎実用数式・図表の解説, 土質工学会 1987.

---

## A Study on Measurements and Analysis of Non-Open Cut Construction Method using Pre-Supporting System

Akira MORI, Masao KAJIYAMA, Hajime IWASAKI, Naohiro SHIMIZU, Akinobu IKETANI and Motoi IWANAMI

### Abstract

In the work section of Takada A line of Fukutoshin Subway Line, we constructed a pumping station by non-open cut method under an intersection with heavy traffic. We installed arch type supporting members before excavating the inside of them as the pumping station space and then placed concrete of the pumping station by applying the Pre-Supporting Arch method. In this paper, the author reports the results of strain measurements, comparing with 2d-FEM Analysis, and considered a loading mechanism to structural members.

Keywords: non-open cut method, Pre-Supporting System-Arch Method, curved steel pipe, measurements of strain

---