

論 文

# 都心部での非開削切掘り施工の計測結果と解析に関する一考察

岩波 基<sup>1</sup>・大澤 拓洋<sup>2</sup>

<sup>1</sup>環境都市工学科 (Department of Civil Engineering, Nagaoka National College of Technology)

<sup>2</sup>教育研究技術支援センター (Technical Support Center for Education and Research, Nagaoka National College of Technology)

## A STUDY ON MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF NON-OPEN CUT CONSTRUCTION IN TOKYO

Motoi IWANAMI<sup>1</sup>, Takuhiro OHSAWA<sup>2</sup>

### Abstract

Tokyo Metro Co., Ltd. constructed the No.13 subway line 8.9km long between Ikebukuro and Shibuya, and it was open for traffic in this June. This line's deepest point is between Zoshigaya station and Nishi-Waseda station, so we constructed a pumping station which was located at a crossing with heavy traffic and was at a depth of 33m with high water pressure. Considering these conditions, we chose a non-open construction of a pumping station by PSS-Arch Method.

This paper shows and argues about the results of measurements of segments, curved steel pipes and support structures, and confirms an assumption obtained from measurements by 2D-FEM.

**Key Words :** *shield tunnel ,non-open cut construction ,curved steel pipes, measurements*

### 1. はじめに

東京メトロでは、2001年より地下鉄副都心線池袋～渋谷間8.9kmの建設に着手し、本年6月に開業を迎えた。本線では、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を計画した。

中間ポンプ室構築箇所は、交通量の激しい都道部交差点直下であり、かつ、土被りは約33mで、トンネル直上にはNTT洞道や東電シールドが輻輳する。このような施工条件から、シールドトンネル内から先行アーチ支保工（以後、曲線パイプルーフと称す）を施工し、非開削工法でポンプ室を構築する施工方法（PSS-Arch工法）を採用した。

PSS-Arch工法は、延長663mのめがね形状道路ト

ンネルでの施工実績があり、その技術的優位性が確認されているが、本工事では、PSS-Arch工法を洪積粘性土層、洪積砂質土層での地下鉄トンネル間の切掘りに適用した。

施工中、セグメントや曲線パイプルーフ、変形防止鋼材の挙動を確認するために計測<sup>1)</sup>を実施した。また、FEM解析や多リングはり・ばねモデルで解析を行った結果と比較し、特に曲線パイプルーフに対する設計法に対する知見を得ている<sup>2)</sup>。本論文では、曲線パイプルーフだけでなく、セグメントや変形防止鋼材も含め、構造物全体に対する計測結果について、その特徴をまとめる。また、地盤物性値などをパラメーターとして、二次元FEMで解析を行い、構造物に生じた現象を再現し、構造物に対する載荷メカニズムを検討する。

## 2. 施工方法の概要

### (1) 中間ポンプ室の仕様

中間ポンプ室は、図-1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（鋼製セグメント、厚さ270mm、外径φ6,600mm、リング幅1,600mm）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、中床版を有する2階構造となっている。

### (2) 施工手順

施工手順を図-2により説明する。

①地下水対策工法として、地上からのディープウェル工法とトンネル内からのウェルポイント工法とを併用し、シールドトンネル下端の高さまで地下水位を下げた。

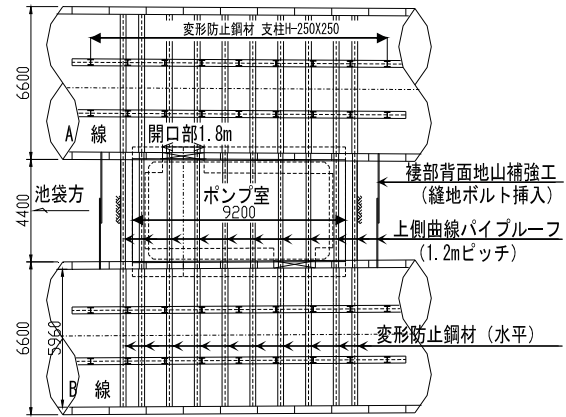
また、掘削時に、土砂をともなった地下水の流入やはだ落ちが発生するのを防止するため、セグメント背面全周と曲線パイプルーフ外周部にトンネル内から地盤改良工（低圧浸透注入工法）を実施した。改良厚さは、下側曲線パイプルーフは約2.5m、上側曲線パイプルーフ部は約1.5mとした。

②パイプルーフに用いた鋼材は、□-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。掘削のため、鋼管の先端にウォータージェットとバキューム装置を装備した。また、セグメント内の変形防止工として鋼材（H-250×250）をパイプルーフと同じ1.2mピッチで設置した。図-1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、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を、縫地ボルトで補強し、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。開口部は図-1のように、A線に1箇所設け、幅は1.8mとした。また、

平面図



断面図

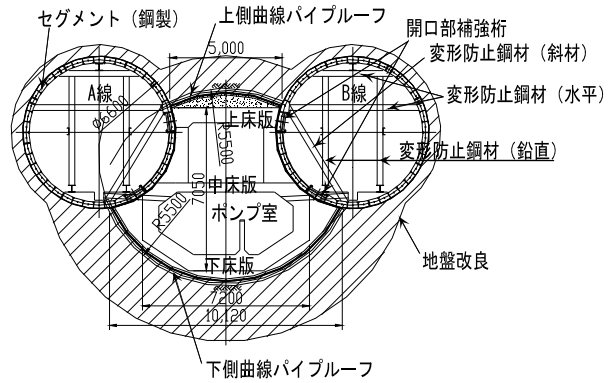
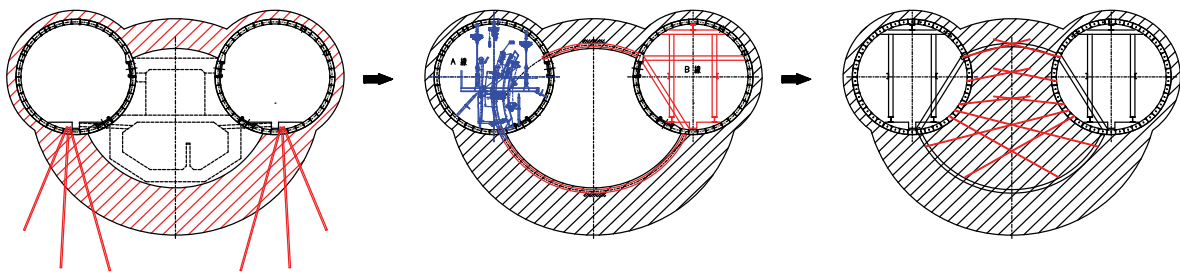


図-1 中間ポンプ室施工概要図

① 地盤改良・地下水位低下工法

② 曲がり鋼管先行挿入、セグメント変形防止支保工

③ 棲部補強工（縫地ボルト）



④ 上半一次掘削・上床逆巻き

⑤ 上半二次掘削・中床、壁逆巻き

⑥ 下半掘削

⑦ ポンプ室構築

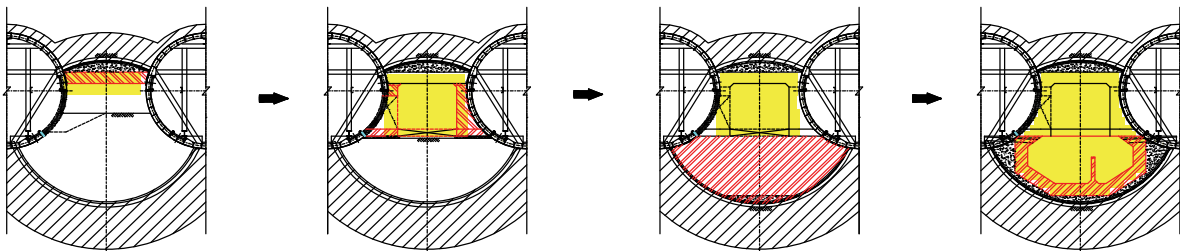


図-2 中間ポンプ室施工順序図（進行方向新宿方面）

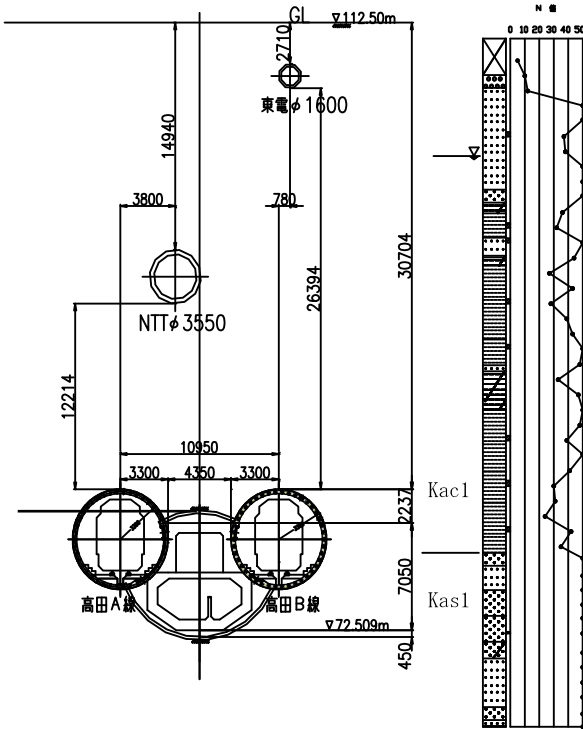


図-3 地質条件概要図

掘削後、上床版を打設し、上床版と曲線パイプルーフの間は、間詰のため、自己充填性に優れた高流動コンクリートを打設した。

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) 施工条件・地質条件

当中間ポンプ室は、交通量が多い明治通り直下に構築される。地中では、上部にNTT洞道や東電シールドが併走する（図-3参照）。

トンネル掘削箇所は、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。ポンプ室上半は、上総層粘性土層（Kac1）が存在しポンプ室下半側は上総層砂質土層（Kas1）となっている。

Kac1層ではN値30以上、Kas1層ではN値50以上が期待でき、比較的堅固な地盤であった。Kac1、Kas1の各層の物性値を表-1に示す。

土被りはポンプ室天端で約33mであり、地下水は被圧され掘削底版で約0.32MPaであった。ポンプ室の施工では、掘削中、土砂を伴った湧水が発生することが最も懸念されたため、切掘り施工前にディープウェル工法、ウェルポイント工法を実施して地下水位をシールド下端まで下げている。

表-1 地盤物性値一覧表

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>

## 3. 計測工

### (1) 計測項目

ポンプ室の施工の影響を確認するため、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、ひずみの計測を実施した。計測位置や測点数は、図-4と表-2のとおりであり、詳細は以下で説明する。また、計測したひずみ値は、セグメントの開口部撤去を行う直前を初期値とし、その後の変化を示している。

#### a) 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、角型鋼管の中央上下面にひずみゲージを貼り付けた。曲線パイプルーフは、ひずみゲージを貼り付けたまま掘進・挿入を行うため、上下各3本のパイプルーフで測定し、ひずみデータの採取状況が良好であるものを採用した。

#### b) 変形防止鋼材

セグメント内に設置した変形防止鋼材のひずみを計測する。変形防止鋼材は1断面で計測し、鉛直方向2本、水平方向の下側1本、斜材1本のひずみを計測した。変形防止鋼材は、軸力が卓越すると考えられたため、軸力測定を目的に、ひずみゲージをウェブに貼り付けた。

#### c) 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、円周全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鋼製セグメントの主桁内周側と外周側の両方にひずみゲージを配置した。また、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。

### (2) 計測結果

図-5に曲線パイプルーフの曲げモーメントと軸力、図-6に変形防止鋼材の軸力、図-7にセグメントの曲げモーメントと軸力の計測結果をそれぞれ示す。各グラフでの施工段階は、表-3に示すように、初期値のほか、①上半一次掘削後、②上半二次掘削後、③上半三次掘削後、④下半掘削後、⑤完成時の5つのステップでの実測値である。また、鋼材およびセグ

メントの軸力と曲げモーメントは1m幅あたりの値に換算している。それぞれの計測の結果，確認できた事項を以下にまとめる。

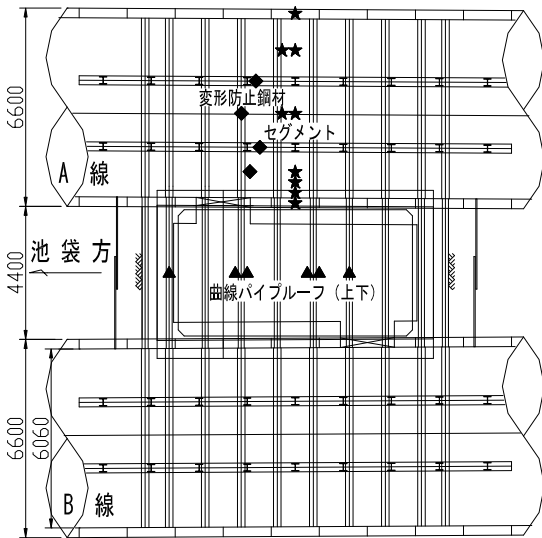
a) 曲線パイプルーフ (図-5)

- ・上側曲線パイプルーフには，②上床二次掘削完了後まで，500kN/m程度の軸力が生じているが，その後は若干軸圧縮力が低減している。
- ・下側曲線パイプルーフの軸力は，各施工段階を通じて微小な値のままでほとんど変化がみられない。

b) 変形防止鋼材 (図-6)

- ・変形防止鋼材のうち，水平と鉛直1（地山側）の軸力は，各施工段階を通じて微小な値のままでほとんど変化がない。
- ・鉛直2と斜材は，各施工段階を通じて徐々に軸圧縮力が大きくなっている。

平面図



断面図

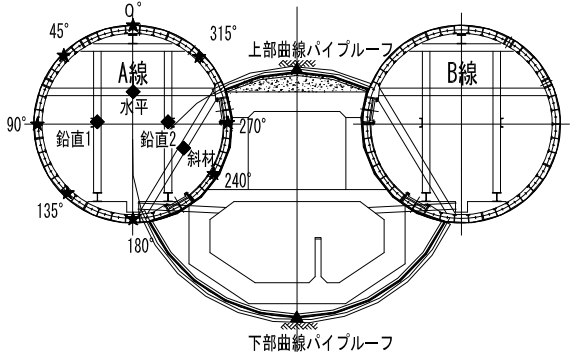


図-4 計測位置図

表-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

c) セグメント (図-7)

- ・0°～135°の範囲は，すべての施工段階を通じて，曲げモーメント，軸力ともに，ほとんど変化が見られない。
- ・180°と315°では，施工段階①から施工が進むにつれて，軸力が常に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。
- ・240°と270°では，施工段階①または②までの間，軸力が圧縮側に変化し，施工段階③で大きく引張方

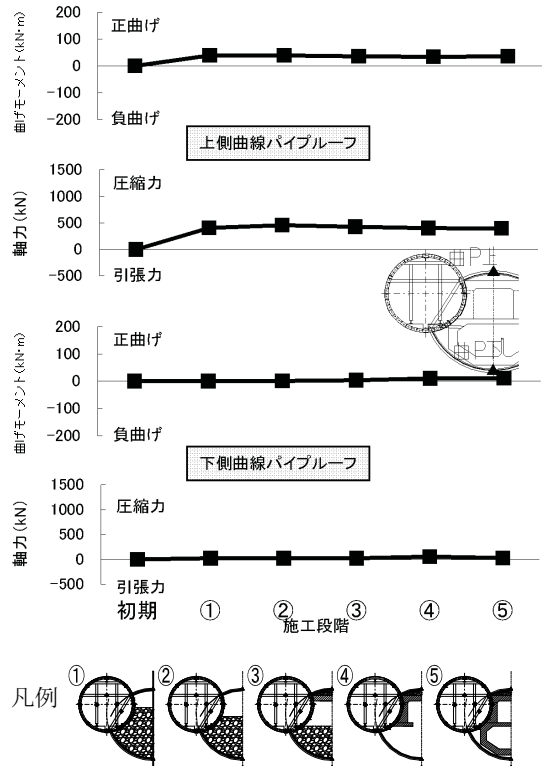


図-5 曲線パイプルーフ (曲げモーメント，軸力)

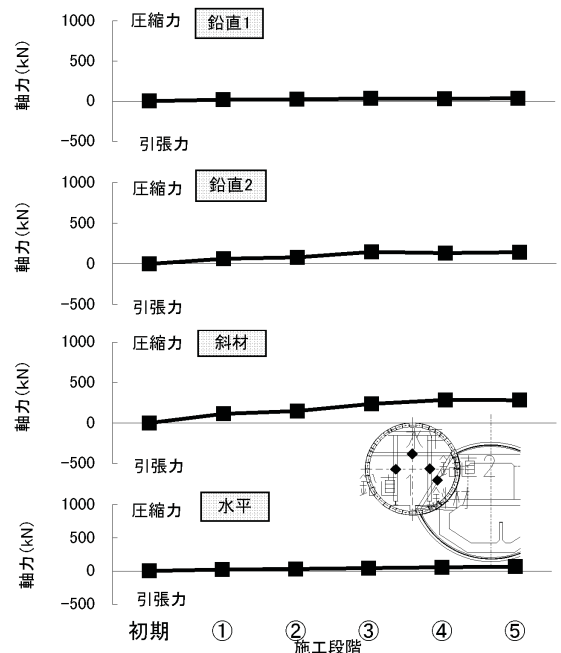


図-6 変形防止鋼材 (軸力)

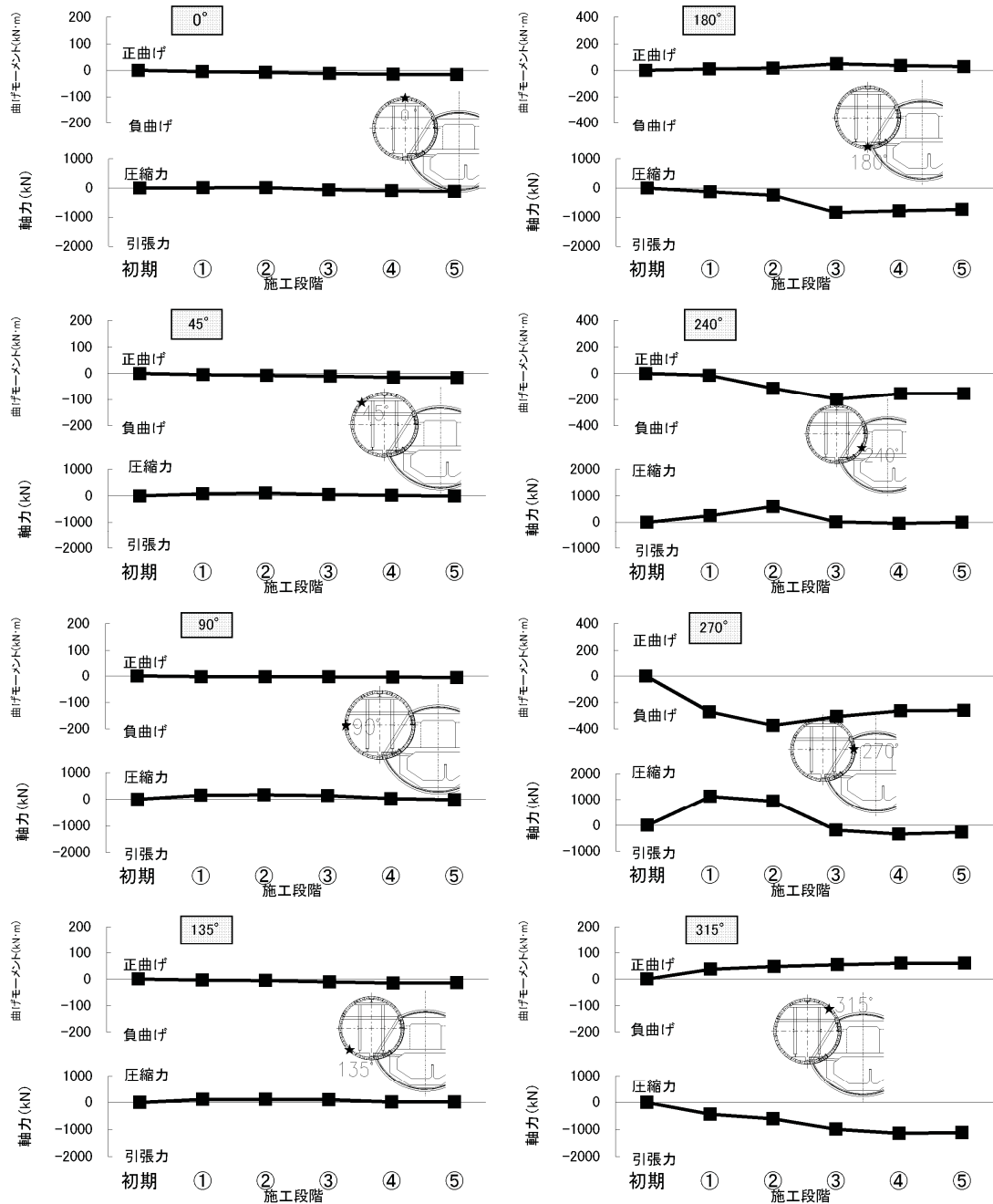


図-7 セグメント (軸力と曲げモーメント)

向に変化している。また、曲げモーメントは施工段階①～③の間、負曲げ側に変化している。

- ・全体に施工段階④、⑤では、軸力、曲げモーメントともに変化が小さい。

#### 4. 施工結果に対する考察

(1) 各部材に対する考察

a) 曲線パイプルーフ (図-5)

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、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軸力の変化が見えない。このことから、下側曲線パイプルーフに作用する鉛直上向き荷重と水平荷重は微小であると推測される。

b) 変形防止鋼材 (図-6)

表-3 着目した施工段階の説明

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	

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、施工段階①から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、地山拘束から解放されたセグメント（ポンプ室側）に変わって、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したことを示している。

c)セグメント (図-7)

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。この状態は変形防止鋼材の鉛直1（地山側）と水平も同様であり、ポンプ室掘削にともなうセグメントへの地山の主働的な荷重の作用がほとんどなかった可能性がある。

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°) と外側 (180°, 315°) とでは傾向が異なる。

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、セグメントがポンプ室内に、はらみ出す現象が起っており、負曲げが卓越している。また、背面地山が先に掘削される270° は、240° に比べて先に軸力が解放されており、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。

また、セグメント240°、270° と変形防止鋼材（斜材）の軸力の経時変化 (図-8) によると、曲線パイプルーフ間のセグメントと変形防止鋼材（斜材）のひずみは同時に変化しており、背面が掘削された後に軸力が解放され、その一部が変形防止鋼材に伝達されていることを示している。

一方、曲線パイプルーフ外側の180° と315° では、施工段階を通じてシールド施工時より軸力が小さく、その値は引張側に変化している。また、曲げモーメントはポンプ室内で負曲げが増加していることもあり、正曲げ側に変化している。

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。これはポンプ室の構築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。

(2)計測結果のまとめ

以上の計測結果から、今回の施工においては、以下

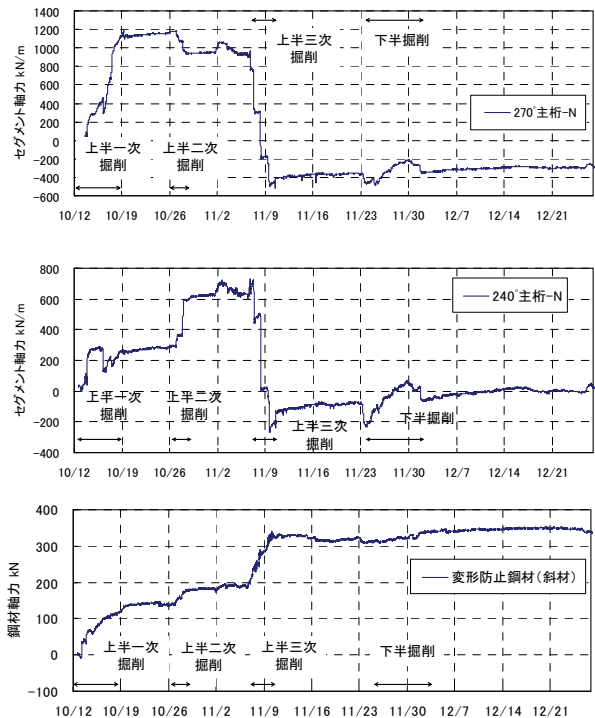


図-8 軸力の経時変化

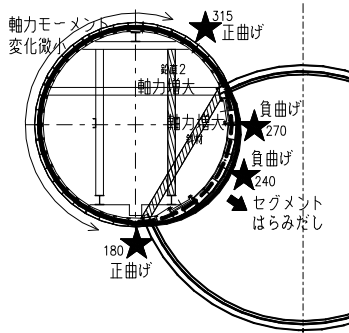


図-9 セグメント他の変形モード (模式図)

の挙動が生じていたものと考える。

- ・上半掘削では、背面が掘削された位置のセグメントの軸力が解放され、ポンプ室側のセグメントがポンプ室構築に、はらみ出している。(図-9) 一方、地山側のセグメントと変形防止鋼材の水平と鉛直1はほとんど変形しておらず、地山の主働的な土圧が作用していない可能性がある。

- ・曲線パイプルーフ間のセグメントは、背面地山が掘削されると軸力が解放され、その一部が変形防止鋼材(斜材)に伝達されている。

- ・下半掘削で、下側曲線パイプルーフ内部の土砂を除去しても下側曲線パイプルーフを含めたすべての部材にほとんど影響がみられないことから、周辺地盤は堅固で自立性が高く、土砂による側面や下面からの主働的な土圧はきわめて小さいと考えられる。

## 5. 二次元FEM解析

### (1) 解析の目的と条件

前章で確認したセグメント、曲線パイプルーフ、変形防止鋼材の挙動を解析によって表現することを試みる。ポンプ室部切上げのため、地山を掘削したことにより、セグメントの軸力の解放やセグメントのはらみ出しといった現象が生じた想定されるが、これらの現象は、モデルに対し、荷重を载荷して断面力や変形を算出するはりばねモデルでは扱うこ

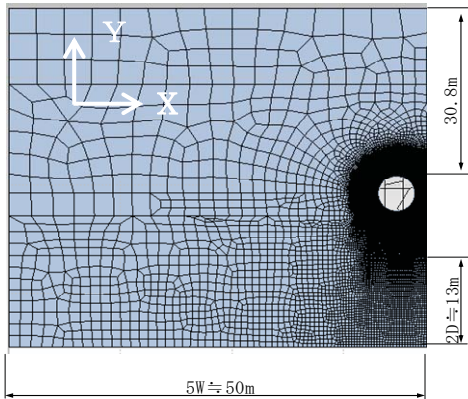


図-10 二次元 FEM 解析モデル

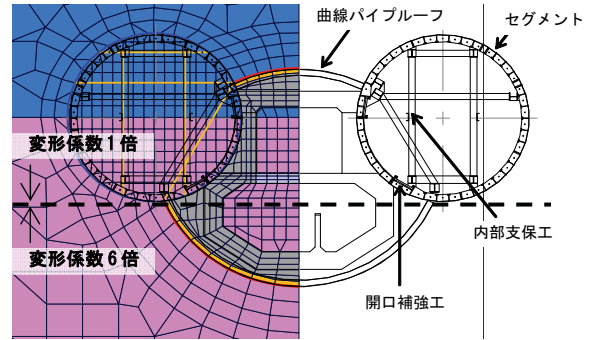


図-11 二次元FEM解析モデル (拡大図)

とが難しい。そこで、二次元FEM解析を行い、その地山の物性値を適切に変更することにより、実施工で発生した現象のメカニズムに対する知見を深める。解析は、図-10, 11に示すように、実際のポンプ室断面の半分を取り出したモデルを使用した。

本モデルでは、全土被りを考慮し、水平方向に掘削幅の約5倍、下方方向にトンネル径の約2倍の解析領域とし、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。

#### a) 地山の物性値

解析では地盤は弾性とし、地山の物性値は表-4の値を使用する。また、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ほうが計測値に一致することが経験的に知られている。

このため、除荷時の変形係数として载荷時の3倍の値を使用した事例3) になった。また、Janbuらは有限深さの地盤において、根入れを有する長方形基礎の三次元弾性解析の結果から、見かけの変形係数は約2倍となる。そこで、除荷時の変形係数の考え方を加味し、上側の6倍の変形係数を適用した。

#### b) 部材の物性値

表-5～8に、構築コンクリート、セグメント、H鋼、曲線パイプルーフの物性値をまとめる。

曲線パイプルーフは、□-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、パイプルーフはFEM解析では、鋼管と中詰材の合成構造とし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、曲げモーメントは鋼管のみで受け持つものとし

表-4 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

た。なお、B線側との接合部は溶接によって接合しているが、鋼管の側面と背面は溶接することができないことを考慮して、曲線パイプルーフの最も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表-8の1/10の大きさとした。

c) 解析ステップ

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、掘削にともなう解放率は、掘削直後に40%、吹付け後に60%とした。

6. 解析結果と計測値の比較

(1) 解析結果

上記の方法で解析した結果と実測値を比較する。解析値は図-13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し、実測値と比較する。

a) 曲線パイプルーフ (図-12)

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

表-5 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	3.4×10 <sup>6</sup>	0.2
ポンプ室躯体	24	2.5×10 <sup>7</sup>	0.2
ポンプ室躯体 中床版開口部 開口比:8.0/9.4	24	2.5×10 <sup>7</sup>	0.2

表-6 セグメントの物性値 (1.6m 幅)

	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> )	2.1×10 <sup>8</sup>	
ポアソン比ν	0.3	
断面積A (m <sup>2</sup> )	2.533×10 <sup>-2</sup>	1.583×10 <sup>-2</sup>
断面二次モーメントI (m <sup>4</sup> )	1.982×10 <sup>-4</sup>	1.239×10 <sup>-4</sup>

表-7 H鋼の物性値 (H-250×250@1.2m)

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

表-8 曲線パイプルーフ鋼管の物性値 (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>

し、曲げモーメントと軸力ともに、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、水平荷重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。

b) 変形防止鋼材 (図-14)

変形防止鋼材に発生した軸力は、施工段階①~③で、解析結果も実測値も増加する傾向にある。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、斜材と鉛直1の軸力が大きく圧縮側に変化しており、実測値と異なっている。

c) セグメント (図-13)

セグメント地山側 (0~135°) は、実測値、解析値ともに小さい。ただし、施工段階④「下半掘削」の

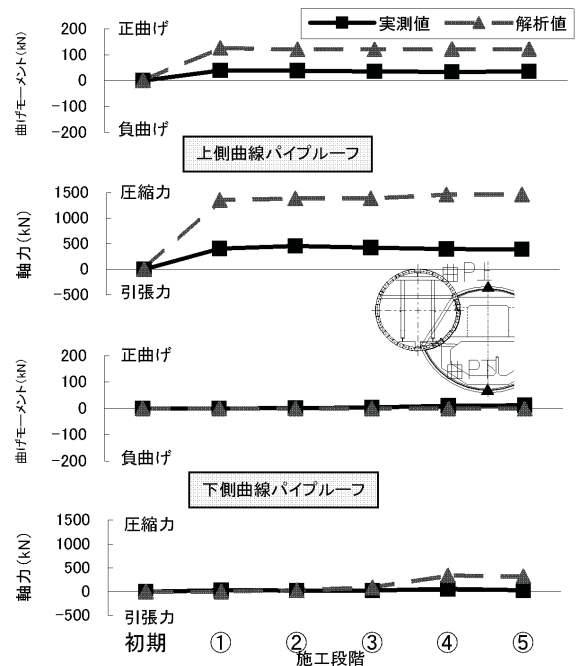


図-12 曲線パイプルーフ (実測値と解析値)



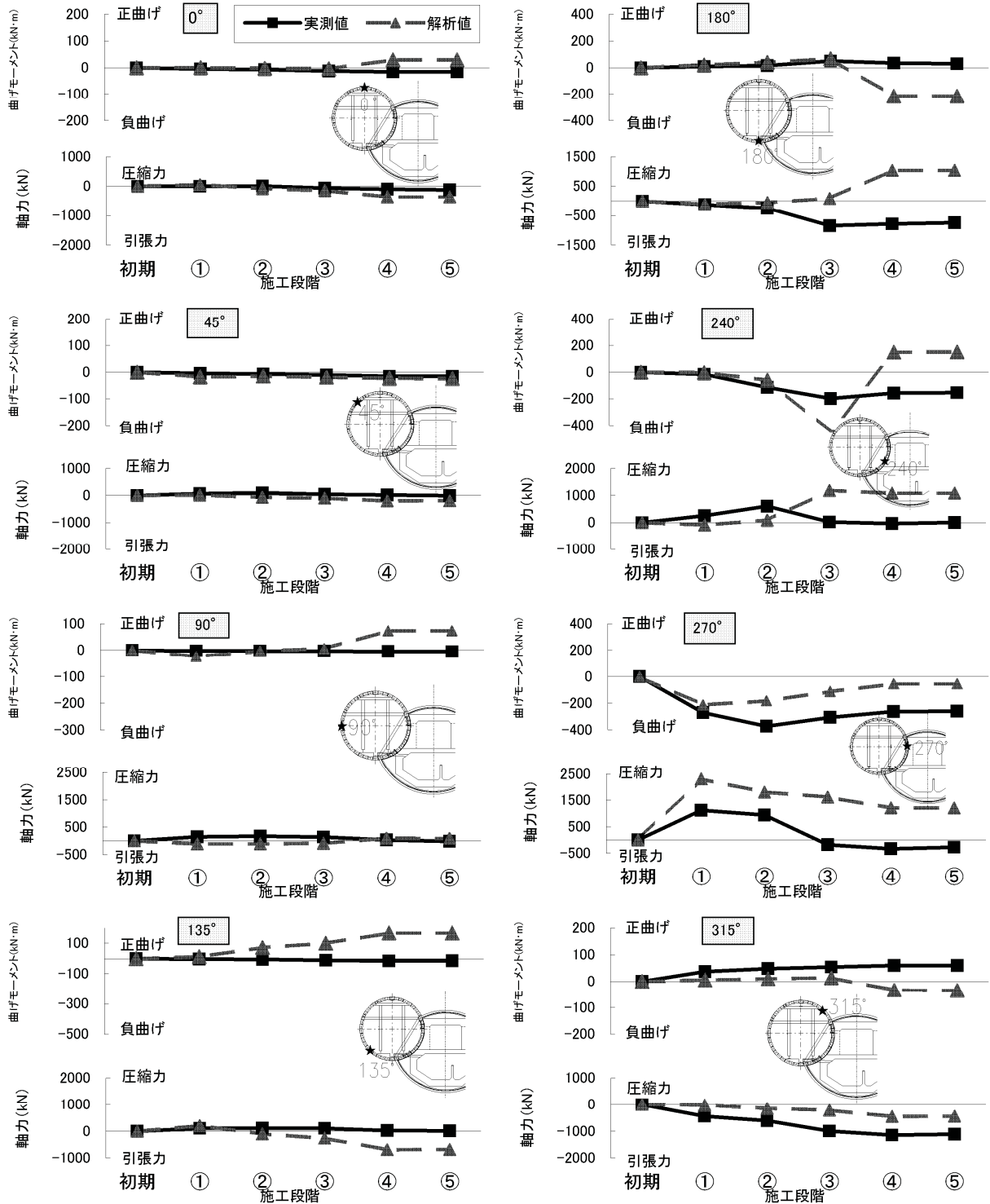


図-13 セグメント (実測値と解析値)

際に、90°、135°の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、セグメントポンプ室側(180~315°)に注目する。施工段階①~③は、比較的に実測値と解析値の整合性が良い。しかし施工段階④で、解析値が180°で負曲げに、240°で正曲げに変化しており、ほとんど変化のなかった実測値と異なる動きとなっている。これは、解析では下半掘削による荷重の受

け替えとリバウンドの影響が考慮されたが、実測値ではこれらの影響が非常に小さかったためと思われる。

また、セグメント270°では、断面力の変化の幅は異なるものの、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、施工の進行に伴って逆の変化が生じる傾向が解析でも確認できた。(2)解析結果に対する考察

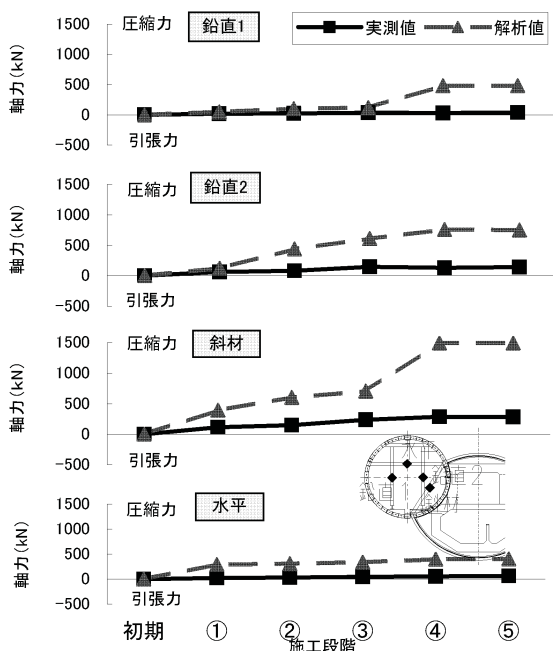


図-14 変形防止鋼材（実測値と解析値）

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が、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。解析では全土圧が作用しているが、実際には緩み土圧程度がポンプ室断面部材（セグメント、曲線パイプルーフ、変形防止鋼材を含めたもの）に作用し、周辺地盤で支保される荷重の割合が大きいと推定される。

・施工段階④「下半掘削」の解析では、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。この結果、下側曲線パイプルーフの曲げモーメントは解析、実測の両方でほとんど変化がなく、よく一致している。しかし、水平荷重の受け替えやリバウンドに伴う上向き荷重に対し、解析では下側曲線パイプルーフとセグメント90°～240°の断面力に変動が見られた。実測では、この変化はほとんどなく、今回の施工では水平荷重やリバウンドによるポンプ室断面部材への影響は小さかったと想定される。

## 7. 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。

・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。しかし、対象とした地盤が十分堅固であり、トンネルに実際に作用した「鉛直下向

き荷重」、「水平荷重」、「下部地盤のリバウンド」による影響は、解析値で考えていたよりも小さく、これが、実測値と計測値の差となったと考えられる。

・過去の事例では、大きなリバウンドや全土圧が作用したトンネルの事例も見られる。このため、「鉛直下向き荷重」、「水平荷重」、「下部地盤のリバウンド」による影響を低減した設計を安易に行うことはできないが、引き続き施工事例について検討し、合理的な設計法を目指す必要がある。

・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、計測による挙動を解析で再現できた。

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。

今後も都市部における非開削工法による地下空間切掘げは、社会的要請が高いと考えられ、これらの工法に関する知見の蓄積と設計法検討が求められている。非開削工法による地下空間切掘げは、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。

## 参考文献

- 1) 荻野 竹敏, 村松 泰ほか：地下鉄13号線(副都心線)中間ポンプ室(その2)(PSS-Arch工法の計測結果のまとめ), 第62回年次学術講演会講演概要集, pp6-012, 2007.
- 2) 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, pp.93-103, 2007.
- 3) 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, pp.353-360, 1992.
- 4) 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.

(2009. 1. 20 受付)