

都市部での非開削切掘工法における仮設鋼材の挙動再現に関する試み

岩波 基¹・中澤智博²・大石敬司³

¹正会員 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 (〒940-8532 長岡市西片貝町888番地)
E-mail:mianawami@nagaoka-ct.ac.jp

²学生会員 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒940-8532 長岡市西片貝町888番地)
E-mail:ac22834y@st. nagaoka-ct.ac.jp

³正会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部改良建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

東京地下鉄副都心線では、路線の最深部にポンプ室を構築した。ポンプ室の構築では、トンネル内からの曲線パイプルーフを施工した後、非開削工法で切り広げる工法(PSS-Arch工法)を採用した。

施工中、セグメントや曲線パイプルーフ、変形防止鋼材の計測を実施し、その特徴をまとめた。さらに、トンネル断面方向だけでなく、トンネル縦断方向についても2次元FEM解析を行い、曲線パイプルーフに作用する掘削解放力を推定して構造物に生じた現象を再現することを試みた。その結果、2次元FEM解析だけでは、構造物に対する載荷メカニズムを表現できないという知見を得た。これらの知見のもとに、本論文は3次元FEM解析で、掘削時に曲線パイプルーフと地盤の境界面に生じる剥離や滑りを考慮し、曲線パイプルーフや変形防止鋼材等の仮設鋼材の掘削時挙動の再現を試みたものである。

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

1. はじめに

東京地下鉄(株)では、地下鉄副都心線の路線延長全体で最深部となる雑司が谷駅と西早稲田駅間の中間点付近にポンプ室を構築した。

中間ポンプ室は、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とう道や東電シールドが輻輳するという厳しい条件下での施工が求められた。このため、まずディープウェルにて地下水位をポンプ室の深度まで下げた上で、シールドトンネル内から曲線パイプルーフを地盤内に先行して挿入し、これを支保工として内部を掘削し、非開削で切り広げる工法(PSS-Arch工法)を採用した。

荻野¹⁾らは、施工にあたり、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を実施した結果をまとめ、その特徴について考察を加えた。辻ら²⁾は、上下の曲線パイプルーフに着目し、骨組み解析を用いて、ポンプ室部掘削時にそれらへ作用した解放力を逆算した。また、千代ら³⁾は、2次元FEM解析モデルを用いて、地盤がリバウンド時に剛性が異なることと解放する箇所と深さによる形状効果を考慮してポンプ室以深の地盤剛性を6倍にすることで解析値が計測値に近づ

くことを報告している。さらに、岩波ら⁴⁾は、トンネル断面方向だけでなく、トンネル縦断方向についても2次元FEM解析を行い、曲線パイプルーフに作用する掘削解放力を推定して構造物に生じた現象を再現することを試みた。それらの結果、2次元FEM解析だけではトンネル方向への応力分散が表現できないために、ポンプ室部の掘削時における仮設鋼材とシールドセグメントに生じる挙動とそれら構造物に対する載荷メカニズムを表現できないという知見を得た。そこで、本論文は、トンネル方向への応力分担を詳細に表現し得る3次元FEM解析モデルを用いてポンプ室の掘削ステップを再現した解析を行うとともに、梁要素で表現した曲線パイプルーフと地盤の境界面にばね要素を入れて、境界面における剥離と滑りを考慮する3次元FEM解析モデルにおいても解析を実施して構造物に生じた現象を再現し、曲線パイプルーフや変形防止鋼材等の仮設鋼材の掘削時挙動とそれら構造物に作用する荷重を再現することを試みたものである。

2. 施工方法の概要

(1) 中間ポンプ室の仕様

図-1は中間ポンプ室の構造を示した平面図と断面図で

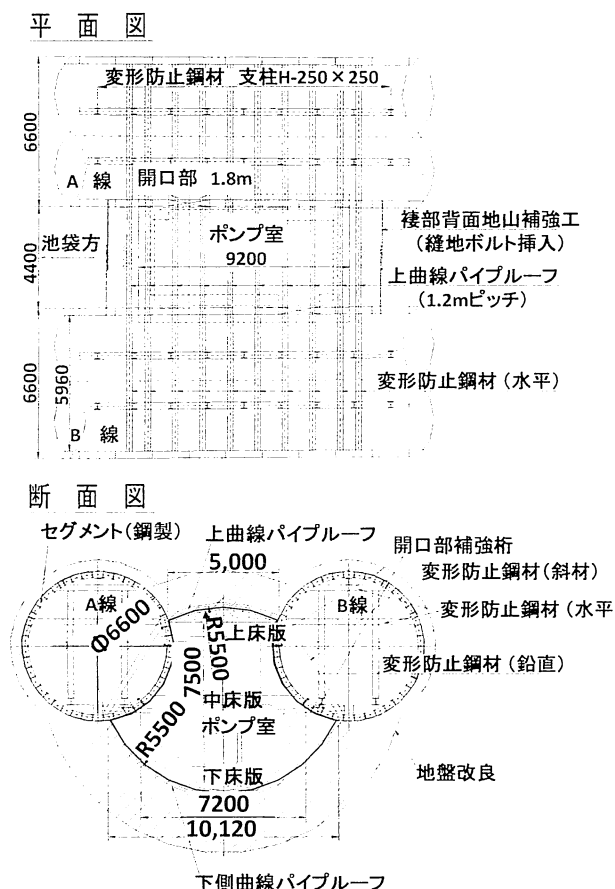


図-1 中間ポンプ室施工概要図

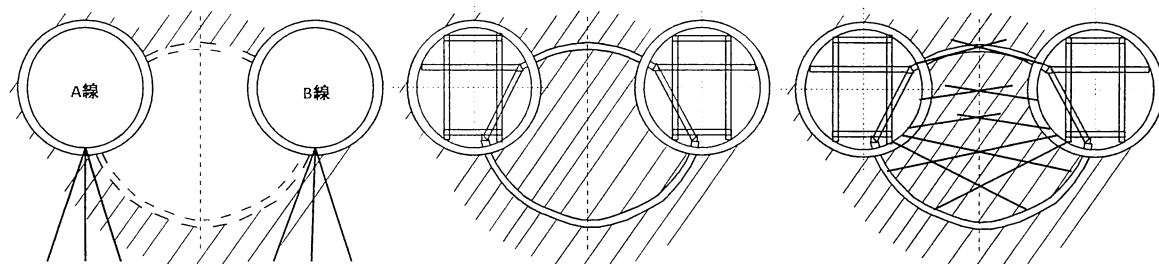
72m、高さの外寸が7.05mで中床版を有した2層からなる構造である。このポンプ室が、隔離が約4.4mである2本の単線シールドトンネルの間に設置された。シールドトンネルは、曲線パイプルーフや変形防止鋼材の設置を考え、鋼製セグメントで構築されており、セグメントの外径がφ6,600mmで、厚さが270mmであり、リング幅は一般部と同じ1,600mmである。

(2) 施工手順

図-2は施工の手順の概要を図にしたものである。図-2の①から⑦の手順にしたがって施工の方法を以下に述べる。

- ①ディープウェル工法とウェルポイント工法を併用し、トンネル下端の高さまで地下水位を下げた。また、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、ポンプ室を掘削する際に地下水が流入することを防止した。セグメント背面の全周の改良厚さは1.0m、下側曲線パイプルーフの外側は約2.5m、上側曲線パイプルーフ外側が約1.5mである。
- ②□-250×250の角型鋼管を用いた曲線パイプルーフをA線の坑内から、約1.2mピッチで挿入した。穿孔は、鋼管の先端に装備したウォータージェットとバキューム装置を採用して行っており、そのため、一時的に曲線パイプルーフ先端の切羽は土圧が解放される。曲線パイプルーフの設置後、シールドトンネル内にH-250×250による変形防止鋼材をパイプルーフと同じ1.2mピッチで設置した。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本で構成されて

- 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1次掘削・上吹付コンクリート ⑤上半2、3次掘削・中床、壁逆巻き

- ⑥下半掘削

- ⑦ポンプ室構築

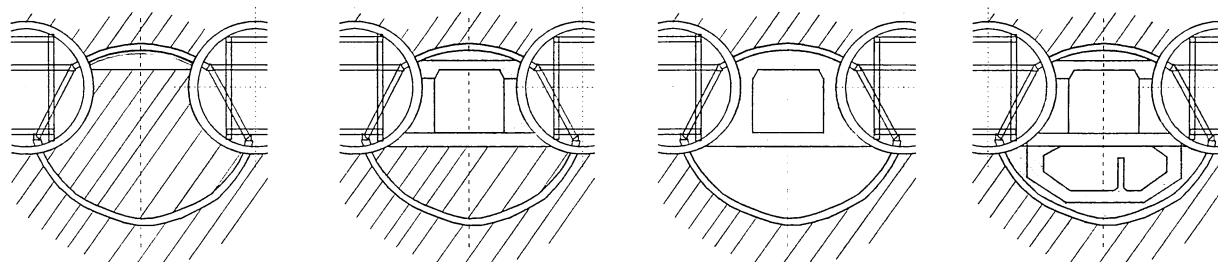


図-2 中間ポンプ室施工順序図（進行方向新宿方面）

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 ³	17	18
粘着力	kN/m ²	260	0
内部摩擦角	°	0	42
変形係数	kN/m ²	54,400	75,300
透水係数	cm/sec	—	1×10^{-3}

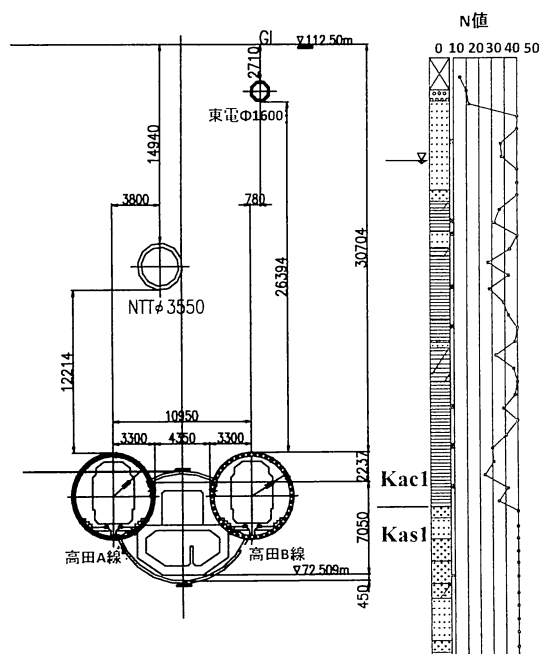


図-3 地質条件概要図

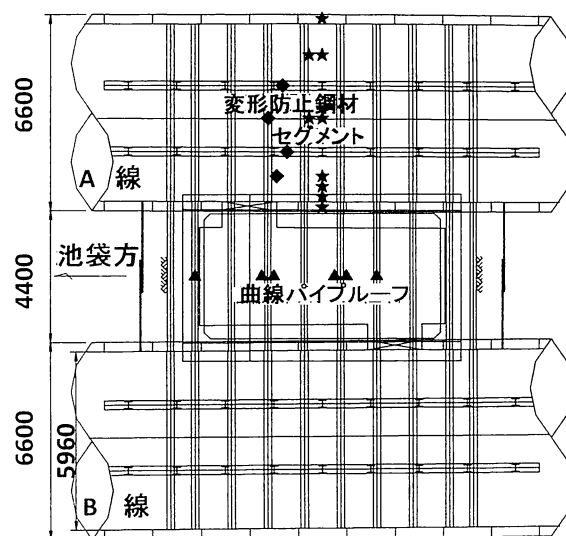
いる (図-1) . 曲線パイプルーフ内の地盤を掘削するために、セグメント開口部を設置する。開口部には、トンネル掘進方向の補強桁を配置した。

- 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、地盤を安定させた。
- ④セグメント開口部から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線のセグメントに1箇所設けた。開口の大きさは約1.8m四方である。また、掘削後、厚さ100mmの吹付けコンクリートを施工した。
- ⑤上半二次掘削を行い、上床版を打設し、上床版と曲線パイプルーフの間は、コンクリートで充填した。その後、上半三次掘削を行い、側壁と中床版を逆巻きで打設した。
- ⑥下半掘削を行い、掘削直後に厚さ100mmの吹付けコンクリートを施工した。
- ⑦下床版とポンプ室側壁を逆巻きで打設した。

(3) 地質条件および施工条件

図-3に示すようにトンネル掘削箇所は、第4紀更新世

平面図



断面図

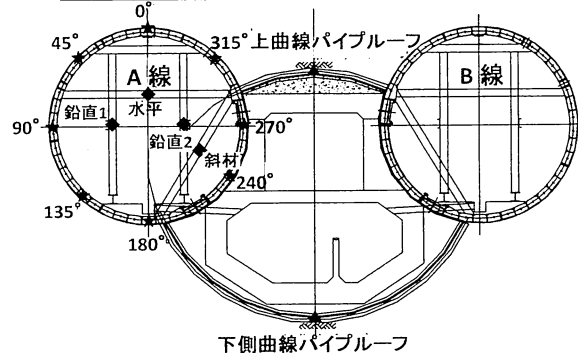


図-4 計測位置図

表-2 計測項目一覧表

		計測項目	断面	箇所
★	セグメント	曲げモーメント 軸力	1	8
▲	曲線パイプルーフ	曲げモーメント 軸力	3	1 (中央)
◆	変形防止鋼材	軸力	1	4

洪積層上総層群砂質土層 (以後、Kas1と称す) と粘性土層 (以後、Kac1と称す) が互層となって堆積している。ポンプ室上半は、Kac1内に、ポンプ室下半側はKas1内に構築した。表-1はKac1とKas1の各層の物性値をまとめたものである。

土被りはポンプ室天端で約33m、地下水圧は掘削底版で約0.32MPaであった。

3. 計測工の概要

掘削時の安全を確保することと構造物への影響を確認することを目的として、セグメント、曲線パイプルーフおよび変形防止鋼材のひずみについて計測を行った。

ここでは計測を実施した項目等の概要について記す。計測位置や測点数は、図-4と表-2のとおりである。また、計測したひずみ値の初期値は、セグメントの開口部撤去を行う直前の値とした。

a) 曲線パイプルーフ

曲線パイプルーフでは、図-4のように鋼管の中央部にひずみゲージを貼り付け、軸力と曲げモーメントを測定した。曲線パイプルーフは、ひずみデータの採取状況が良好なトンネル進行方向中央部のものを採用した。

b) 変形防止鋼材

変形防止鋼材は鉛直方向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、軸力のみ測定した。

c) セグメント

セグメントの計測は、天端から半時計回りに8箇所を実施した。計測は240°を除いて45°ピッチであり、各測点では、軸力と曲げモーメントを算出するためにひずみゲージを配置した。また、セグメントの計測は、A線坑内で行い、トンネル方向のポンプ室中央のI断面で実施した。

4. 解析

(1) 解析の方針

計測結果より確認したセグメント、曲線パイプルーフおよび変形防止鋼材の挙動を再現することを試みる。

千代ら³⁾は、ポンプ室以深の地盤の剛性を工夫し、岩波ら⁴⁾は、曲線パイプルーフに作用する掘削解放力を推定して構造物に生じた現象を再現することを試みたが、2次元FEM解析だけでは、トンネル方向への応力分散が表現できないために、ポンプ室部の掘削時における構造物の挙動を表現することが困難であることが分かった。そこで、本論文では、まず、3次元FEM解析モデルを用いてトンネル掘削、ポンプ室部の掘削そしてポンプ室打設までの施工手順を忠実に再現した弾性解析(以後、ばね無しと称す)を実施することとした。また、4次掘削において下曲線パイプルーフと地盤とにズレが生じる可能性があると考えられた。そこで、3次元FEM解析モデル採用に加えて曲線パイプルーフと地盤の間にばね要素を入れて非線形解析(以後、ばね有りと称す)のケースを行うこととした。なお、曲線パイプルーフと地盤の境界面に直角方向にはノンテンションとなり、境界面内のせん断方向には地盤と同程度の剛性と強度を有する挙動を再現できるばね要素の物性値を採用した。

(2) 解析のコード

今回の3次元モデルの解析コードには、施工手順を忠実に再現することと非線形ばね要素を採用でき、さらに

表-3 地山の物性値

		上総層粘性土 (Kac1)	上総層砂質土 (Kas1)	上総層砂質土 (Kas1')*
単位体積重量 γ	kN/m ³	17	18	18
変形係数 E	kN/m ²	54,400	75,300	225,900
ポアソン比 ν		0.35	0.35	0.35
粘着力 C	kN/m ²	260	0	0
内部摩擦角	°	0	42	42

表-4 構築コンクリートの物性値

	ヤング係数E (kN/m ²)	ポアソン比
吹付けコンクリート	3.4×10^6	0.2
ポンプ室躯体	2.5×10^7	

表-5 セグメントの物性値

		1リングあたり
セグメント外形	(m)	6.600
セグメント幅	(m)	1.600
セグメント高さ	(mm)	270
ヤング係数	(kN/m ²)	2.1×10^8
ポアソン比 ν		0.3
断面積A	(m ²)	2.533×10^{-2}
断面二次モーメントI	(m ⁴)	1.982×10^{-4}

表-6 H鋼の物性値 (H-250×250)

		1本あたり
ヤング係数E	(kN/m ²)	2.1×10^8
ポアソン比		0.3
断面積A	(m ²)	9.143×10^{-3}
断面二次モーメント	(m ⁴)	1.070×10^{-4}

表-7 曲線パイプルーフ鋼管の物性値

		1本あたり
ヤング係数E	(kN/m ²)	5.500×10^7
断面積A	(m ²)	6.229×10^{-2}
断面二次モーメント	(m ⁴)	3.707×10^{-4}

表-8 ばね要素の物性値

		Kac1	Kas1	Kas1'
軸圧縮方向ばね定数	(kN/m)	1.0×10^6		
せん断方向ばね定数	(kN/m)	19584	27108	81324
粘着力	(kN/m ²)	260	0	
内部摩擦角	(°)	0	42	

約10万の節点の解析モデルを効率よく解析するために、複数のCPUを有するパソコンで並列解析が実行できるSoil+ Staticを採用した。

(3) 解析条件

a) 地盤の物性値

解析では地盤は弾性とし、地盤の物性値は表-3の値を

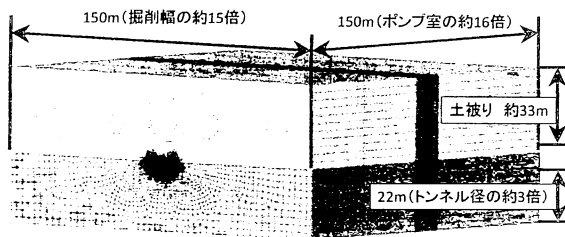


図-5 解析モデル全体図

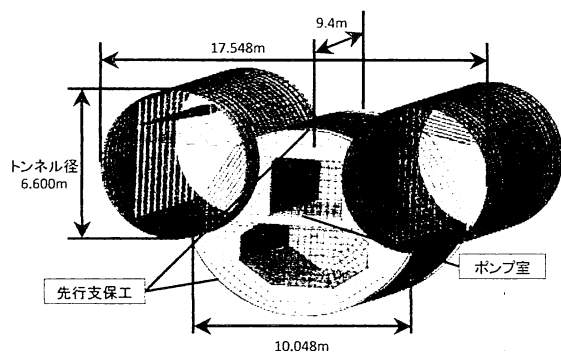


図-6 解析モデル（ポンプ室中心図）

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。ここでは、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⁹⁾に準じて、変形係数を3倍とした。なお、薬液注入は洪積地盤では変形係数への影響が小さいことと改良範囲が狭いことから地山の物性値に考慮しなかった。

棲部の地盤も薬液注入によってのみ補強されていたため、解析においては地山として評価した。

b) 部材の物性値

表4～8は、構築コンクリート、セグメント、変形防止鋼材のH鋼および曲線パイプルーフの鋼管の物性値をそれぞれ示したものである。

セグメントの物性値は、1.6m幅当たりの設計に用いた物性値を3本の主桁へ等分に振り分けた1主桁当たりの値である。また、変形防止鋼材はH-250×250の公称値を用いた。

曲線パイプルーフは、 $\square$ -250×250の鋼管で厚み $t=9\text{mm}$ のものを使用し、挿入後に鋼管内を中詰めコンクリートで充填した。そこで、曲線パイプルーフはFEM解析では、鋼管とコンクリートの合成構造として求めた物性値を使用した。計測ひずみより断面力を算出する際には、軸力は鋼管と中詰めコンクリートで分担し、曲げモーメントは鋼管のみで受け持つものとした。

曲線パイプルーフと地盤の間のばね要素は、両者の境界面に直角方向にはノンテンションで圧縮方向には剛性をほぼ無限大にした。曲線パイプルーフの要素が地盤の要素の中に入り込むのを防ぐため圧縮方向の剛性を大き

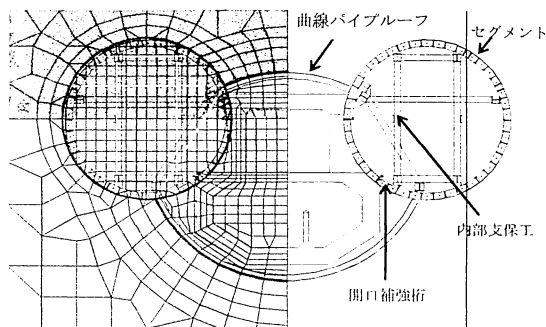


図-7 解析モデル（横断面詳細図）

段階1:自重解析	段階6:上半2次掘削	段階11:下吹付けコンクリート打設
段階2:シールド掘削、泥水圧	段階7:ポンプ室上床版打設	段階12:ポンプ室下半打設
段階3:曲線パイプルーフ、変形防止鋼材設置	段階8:上半3次掘削	段階13:セグメント内支保部材撤去、中床版打設
段階4:上半1次掘削	段階9:ポンプ室B1側壁中床版打設	
段階5:上吹付けコンクリート打設	段階10:ポンプ室下半掘削	

図-8 解析段階

くした。また、境界面内のせん断方向には表-9に示すように地盤と同程度の剛性と強度を有するものとした。

c) 解析モデル

図-5～7は、今回使用した3次元解析モデルを示した図である。なお、全体図では分かり難いので、図-6で、ポンプ室とトンネルを取り出して示した。さらに、図-7は、横断面で表記して曲線パイプルーフ、セグメント、変形防止鋼材そして開口補強桁の位置を示すために全体

表-9 着目した施工段階の説明

step 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め	
step 2:上半2次掘削 -2.0～-3.0 (上床版打設前)	
上半2次掘削 パイプサポート間土留め	
step 3:上半三次掘削 -3.0～-5.0 (中床版打設前)	
上床版打設 上半3次掘削	
step 4:下半掘削	
側壁・中床スラブ打設 下半掘削	

モデルから抽出した図である。

図-5で分かるように、解析領域は縦と横にポンプ室の幅の約15倍とし、鉛直方向には全土被りに、下方領域としては、ポンプ室下端からモデル底面までの距離をシールドトンネル外径の約3倍とした。

地盤要素と吹付けコンクリートはソリッド要素で表現し、曲線パイプルーフと変形防止鋼材は梁要素で表現した。また、セグメントは主桁を梁要素で、主桁間をつなぐスキンプレートは厚さ9mmのシェル要素で表現した。なお、縦桁はモデル化しなかった。セグメントとポンプ室コンクリートは剛結としてモデル化した。

境界条件は、下端でX、Y、Zの3方向を拘束し、側面では面に直角方向のみを拘束した。

そして、節点が224634点、230928要素からなるモデルを使用して解析を行った。

d) 解析段階

図-8は、FEM解析段階を示したものである。解析は、実際の施工手順にあわせ、上半の掘削、上床版の打設、側壁の打設、下半の掘削などの施工ステップ順に行う。また、今回の全ての掘削で、応力解放率は100%として解析を実施した。

5. 計測値と解析値との比較

実測値とばね無しの解析値、ばね有りの解析値を比較

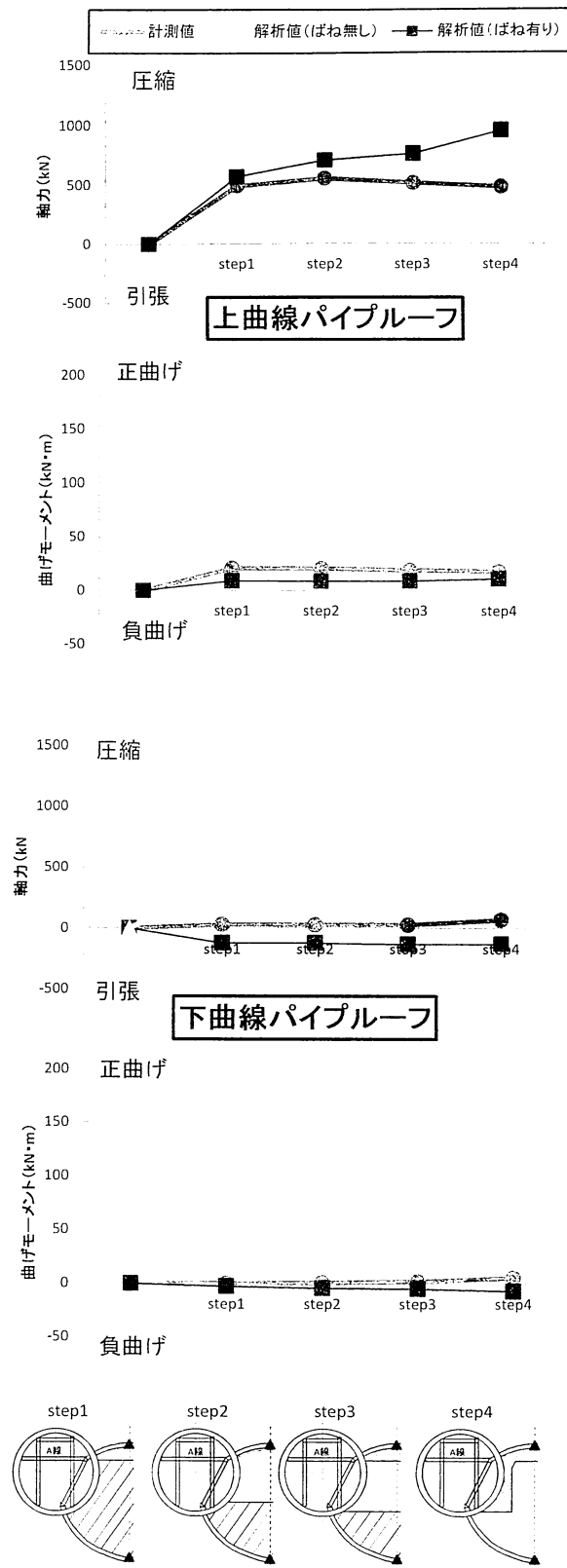


図-9 計測値と解析値との比較（曲線パイプルーフ）

する。図-8の段階3で計算された値を初期値とし、上半の1～3次掘削および下半の掘削の各施工段階での解析値から初期値を差し引いた値を今回の解析値とする。なお、着目する施工段階は、表-9に示したように施工段階4の上半1次掘削時をstep1、施工段階6の上半2次掘削時をstep2、施工段階8の上半3次掘削時をstep3、施工段階10の下半掘削時をstep4とする。

(1) 曲線パイプルーフ

図-9は、上下曲線パイプルーフにおける軸力の計測値と解析値とを比較したものである。

上側曲線パイプルーフの軸力は、step1の「上半の一次掘削」で、ばね有りの解析値が計測値とほぼ一致した。しかし、その後、計測値はほぼ同じ値であるのに対して、洪積砂層で一度シールド掘削によって応力解放を地盤が経験しているために、実際には生じていないと考えられる水平方向の解放力によってばね有りの解析値は増加し、計測値より大きな値となっている。つまり、実際の現象では、ポンプ室側の地山を掘削しても、その解放力でセグメントがポンプ室側に移動しないためではないかと推測される。セグメントが移動していないことは測量からも確認されている。一方、ばね無しの解析値は、step1から計測値の2倍に近い値となり、その後はstep2～4まではほとんど値が一定で各stepで計測値より大きな値であった。これは地盤と上曲線パイプルーフが剛結合でモデル化されているため掘削解放力が上曲線パイプルーフに直接作用するため、地山の分担分が少ないためではないかと推測される。

上側曲線パイプルーフの曲げモーメントは、全stepで計測値とばね有りの解析値は両方とも $20\text{kN}\cdot\text{m}$ 以下の小さい値であったが、計測値の方がやや大きかった。ばね無しの解析値は全stepで計測値の約7倍の値となった。

下側曲線パイプルーフの軸力については、計測値は全てのstepで 100kN 以下の軸圧縮力の値であるのに対して、ばね無しの解析値は計測値の10倍の軸圧縮力となり、stepが進むにつれて増加していった。これは、ポンプ室掘削による下方地盤のリバウンドを実際より大きく評価しているためであると考えられる。

また、ばね有りの解析値はstep1から約 120kN の軸引張力となった。下曲線パイプルーフと地盤とを繋ぐばね要素が引張力を伝えないように設定したため、step1で生じた引張力で地盤とは剥離して動いたためと考えられる。下側曲線パイプルーフの曲げモーメントは、計測値も2つの解析値も全てのstepで小さな値となりほぼ一致した。

(2) セグメント

図-10は、セグメントの全8箇所における軸力と曲げモーメントの計測値と解析値とを比較したものである。セグメントの地山側（ $0^\circ \sim 135^\circ$ ）は、計測値、解析値ともに小さい値であるが、ほぼ一致している。

セグメントのポンプ室側の 240° では、軸力は計測値がstep1で圧縮となっているのに対して、解析値のstep1ではばね無しもばね有りも引張の軸力となっている。これは、一次掘削でポンプ室内の地盤が解放されて鉛直方向に伸びる挙動を解析では実際よりも大きく評価したためではないかと考えられる。しかし、step2では計測値も2

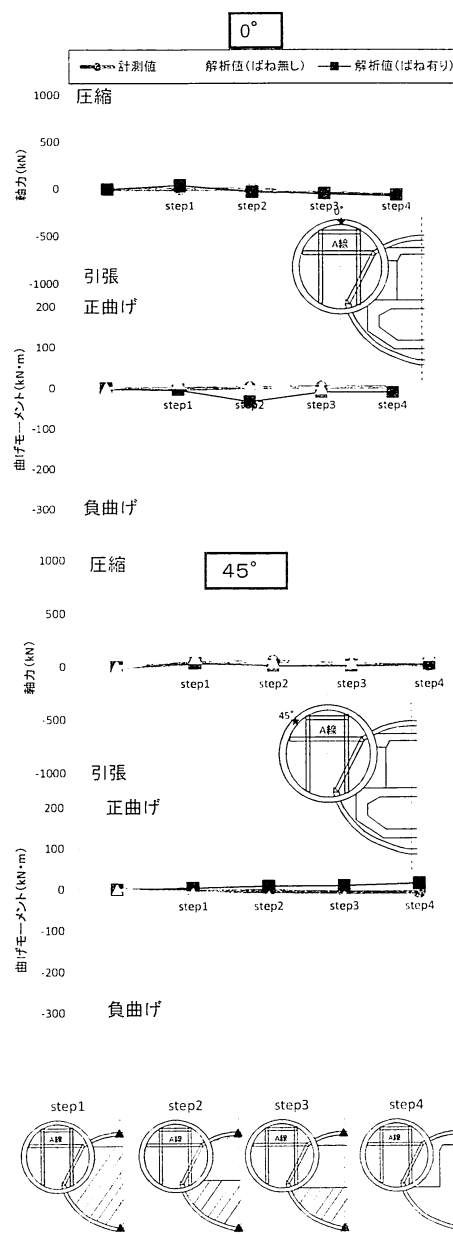


図-10 計測値と解析値との比較（セグメント）その1

つの解析値も圧縮となり値もほぼ一致している。その後、軸力が減少していく点でも計測値と解析値がほぼ一致している。一方、曲げモーメントについては、計測値と2つの解析値が負の値となり外曲げのはらみだしを示す値となった。このうちばね無しの解析値が計測値に近い値となった。これに対して、ばね有りの解析値は全てのstepで計測値より小さい値となった。これは、下曲線パイプルーフが引っ張られたために、セグメントの 240° 位置には正の曲げモーメントを生じさせる挙動が生じたことによると考えられる。

セグメントのポンプ室側の 270° では、step1とstep2における軸力の2つの解析値は、比較的計測値と一致している。しかし、計測値はstep3とstep4では軸引張力が生じているが、解析値は両方とも減少したものの圧縮の値で

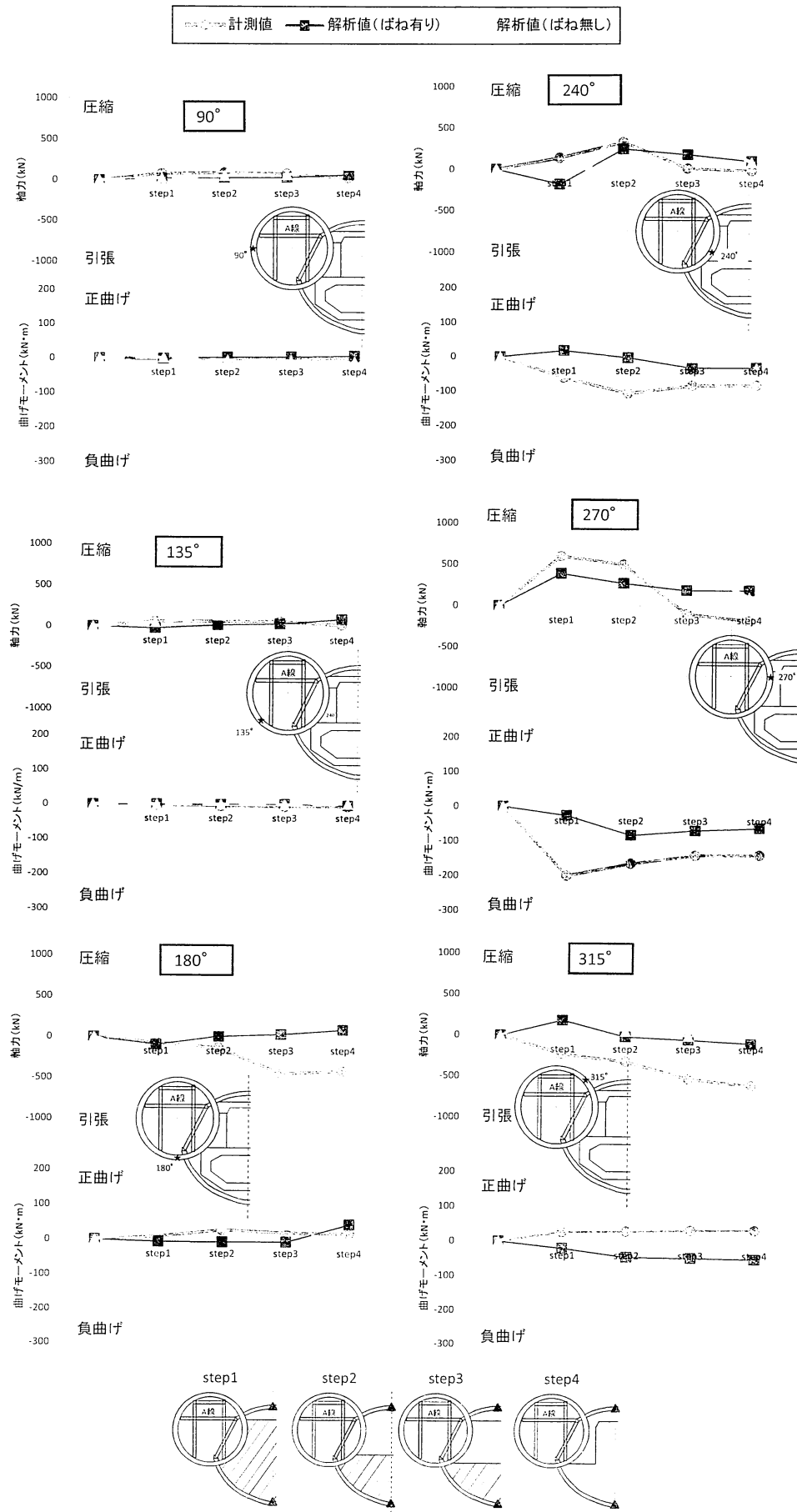


図-10 計測値と解析値との比較 (セグメント) その2

あった。これは、ポンプ室の下半を掘削した解放力を解析では実際よりも大きく見ているためであると推測される。セグメントのポンプ室側の270°での曲げモーメントは、step1で-200kN・mと負の値となり外曲げのはらみだしを示す値となりその後もほぼ同様の値であったが、ばね有りの解析値は負の値ではあったが計測値の約半分の値であった。これは、上曲線パイプルーフがばね有りの軸力の解析値がstep2以降も増加していることに因ると考えられる。また、ばね無しの解析値は全stepで正の曲げモーメントが生じ、step2では約200kN・mであった。この原因として、ばね無しの解析では上曲線パイプルーフに大きな曲げモーメントが生じていた影響であると思われる。

315°では、軸力については計測値が全てのstepで引張なのに対して解析では2種類の値とも全stepで小さいが正であった。曲げモーメントでは、計測値はstep1で小さいが正の曲げモーメントが生じた後のstepでは一定の値であった。ばね無しの解析値は計測値と傾向は似ていたが約2倍の値となった。また、ばね有りの解析値は計測値と正負を逆にしてほぼ同様の値と傾向であった。したがって315°のセグメントは上床版を打設後は値の変化がないと考えられる。

180°では計測値と2つの解析値の軸力がstep1とstep2では小さな値であったが、計測値の軸力はstep3とstep4で400kN以上の引張力が生じた。しかし、2つの解析ではstep3とstep4で圧縮の値となった。この差は180°付近の接合部は構造が複雑であるため詳細なモデル化ができなかったために生じたものと考えられる。

(3) 変形防止鋼材

図-11は、変形防止鋼材の鉛直部材1と鉛直部材2、斜材、水平部材の軸力の計測値と2つの解析値とを比較したものである。鉛直部材1の軸力は、全てのstepで計測値も2つの解析値もほぼ0であった。

鉛直部材2ではstep1～step3で計測値とばね有りの解析値は小さな値であるが増加していく傾向と値がほぼ一致した。しかし、step4で計測値がさらに増加したのに対してばね有りの解析の軸力は0となった。ばね無しの解析値は傾向がばね有りと似ていたが、step1～step3で計測値の約2倍の値となり、step4で軸圧縮力が0となった。これは、4次掘削によるリバウンドを解析では実際よりも大きく見ているためであると考えられる。斜材は計測値では軸圧縮力がstep1で140kN生じ、掘削が進むにつれて増加してstep4では300kN以上となった。これに対して、2つの解析値も掘削ごとに軸圧縮力が大きくなる傾向が一致したが、1000kNを超える大きな軸圧縮力であり、値には大きな差を生じた。斜材の設置は施工が困難であった。また、プレロードを導入していなかった。そのため、な

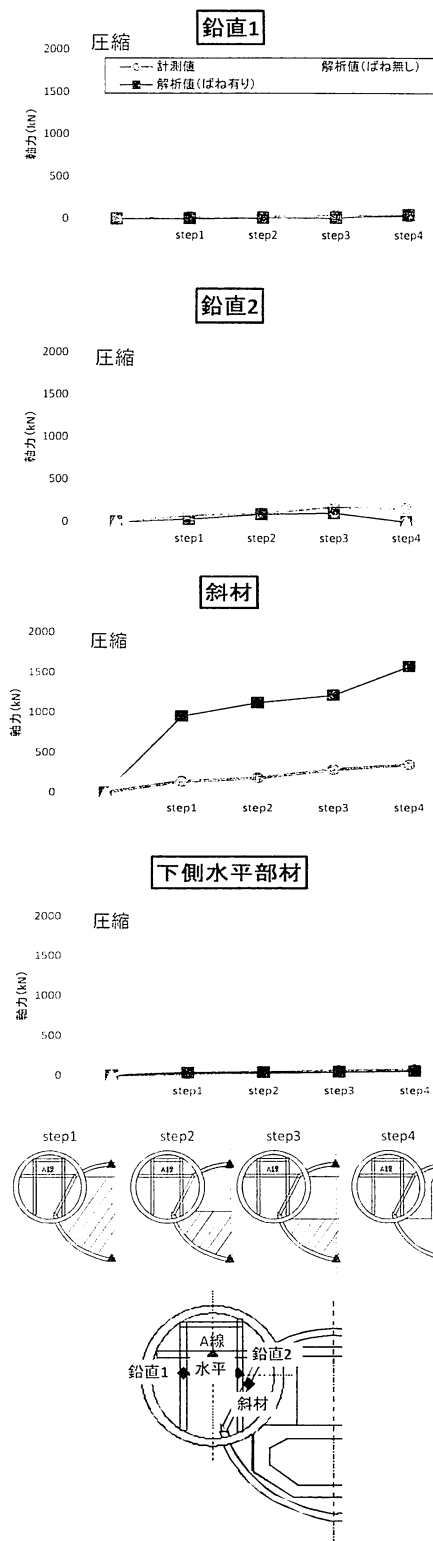


図-11 計測値と解析値との比較（変形防止鋼材）

じみで変形した分だけ軸力が小さくなったものと考えられる。水平部材の軸力は全てのstepで計測値とばね有りの解析値が100kN未満の小さな軸圧縮力であったが良く一致している。これに対して、ばね無しの解析による軸圧縮力は全てのstepで300kNの軸圧縮力となった。ばね無しの解析では、上曲線パイプルーフの軸力において計測

値より解析値が2倍であった．そのため水平部材にもその分力が解析上作用したためであると思われる．

6. 考 察

計測値と解析値とを比較した結果について，考察する．

- ・施工step1の「上半の1次掘削」で，上曲線パイプルーフの軸力において，ばね無しの解析値が計測値より約2倍大きな値となったが，それに対してばね有りの解析値では，計測値とよく一致している．このことから，本工事では上曲線パイプルーフに作用する掘削解放力は，3次元効果を考慮して応力分散だけでなく，地山と曲線パイプルーフの結ぶばね要素の非線形性を考慮することが必要であると考えられる．それによって，ばね有りの解析結果の程度に地盤が掘削解放力を分担する可能性があると考えられる．以上の点から，上曲線パイプルーフの設計において全土被りの掘削解放力を作用させる必要は無い可能性があると思われる．また，step2～step4の解析値を実際の挙動に近づけるためには，地盤の非線形性の考慮やモデル化をさらに詳細にすることが必要である可能性がある．
- ・下曲線パイプルーフにおいて，計測値の軸力がほとんど生じていない．また，ばね有りの解析でポンプ室以深の地盤のリバウンドに下曲線パイプルーフが抵抗せず，他の変形防止鋼材やセグメントに生じた断面力が計測値と近い値を示したことが多い．以上のことから，掘削に伴うポンプ室以深の地盤のリバウンドによる影響は施工前に想定していたものよりも小さいと考えられる．したがって，ポンプ室以深の地盤の剛性を大きくして解析を行うことで解析値が現実の挙動を表現できるようになると考えられる．
- ・斜材の軸圧縮力は，2つの解析値が計測値の4～5倍となった．これは，曲線パイプルーフや変形防止鋼材には，ボルトおよび溶接による接合箇所を有していることと斜材の設置においてプレロードを導入することが出来なかったためになじみによる変位が生じたことによる可能性がある．したがって，解析においてそれを考慮した曲げ剛性と軸剛性の設定が必要であったと考えられる．つまり，変形防止鋼材の剛性を低減して解析することで，解析値が現実の挙動を表現できるようになると考えられる．
- ・今回実施したばね有りの解析では，上曲線パイプルーフが受けた掘削解放力のほとんどを斜材が受けて，下曲線パイプルーフが水平方向に引っ張られることで，下曲線パイプルーフに軸引張力が生じたものと考えら

れる．実際には，斜材の軸力が解析の20%程度であり，セグメントや周辺地盤に伝達しているものと考えられる．したがって，解析値で実際の挙動を表現するためには，変形防止鋼材の物性値を低減する方向で見直し，ばね有りの解析を行うことが必要であると考えられる．

7. おわりに

本研究により得られた知見と課題を以下にまとめる．

- ・計測結果とばね無しの解析結果が大きくかい離しているのに対して，ばね有りの解析結果は近いものになっていることから，本工事での掘削解放力の低減は3次元効果だけでは表現できないことが分かった．しかし，掘削解放力の地盤が分担する割合が大きえばね有りの解析によって掘削解放力を表現できることが分かった．
- ・ばね有りの解析から掘削に伴うポンプ室以深の地盤のリバウンドによる影響は施工前に想定していたものよりも小さい．したがって，ポンプ室以深の地盤の剛性を大きくして解析を行うことで実挙動に近い表現が可能であることが分かった．
- ・解析値が実際の挙動を表現するためには，曲線パイプルーフや変形防止鋼材の物性値を見直すことが有効であると思われる．

今後も実挙動を再現できる解析を目指して研究を進める予定である．また，その成果をこの非開削工法の設計手法に生かしていきたい．

参考文献

- 1) 荻野 竹敏，村松 泰，本村 高志，梶山 雅生：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，6-012，2007．
- 2) 辻 雅之，村松 泰，梶山 雅生，岩崎 肇，岩波基：都心部における非開削地下空間施工法の仮設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) 千代 啓三，辻 雅行，村松 泰，梶山 雅生，岩波基：都心部での非開削切上げ施工の計測結果と解析に関する一考察，トンネル工学論文集，第 18 巻，pp. 89-110，2008．11．
- 4) 岩波 基，西村 高明，大石 敬司，梶山 雅生：都心部での非開削切上げ施工時の挙動に関する研究，トンネル工学論文集，第 19 巻，pp87-98，2009．11．
- 5) 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．

ATTEMPT TO SIMULATE THE BEHAVIOR OF TEMPORARY STEEL MEMBERS IN THE NON-OPEN CUT ENLARGEMENT METHOD USED IN AN URBAN DISTRICT

Motoi IWANAMI, Tomohiro NAKAZAWA and Keiji OISHI

In the deepest part of the route of the Tokyo Metro Fukutoshin Line, a pumping station was constructed. In this construction, a curved pipe roof was placed from inside the shield tunnel and the space under the roof was enlarged. This non-open cut method is called Pre-Supporting System Arch (PSS-Arch).

During construction, sectional forces induced in the segments, curved pipe roof and anti-deformation steel members were measured. The measured sectional forces were smaller than those assumed in the design.