

都心部での非開削切掘り施工時の 挙動に関する研究

岩波 基¹・西村高明²・大石敬司²・梶山雅生³

¹正会員 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町888)

miwanami@nagaoka-ct.ac.jp

²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)

³正会員 (株)熊谷組 本社 土木事業本部 (〒162-0825 東京都新宿区津久戸町2-1)

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、FEM解析や多リングはり・ばねモデルで解析を行い、構造物に生じた現象の再現を試みた。その結果、トンネル横断方向をモデル化した解析だけでは、構造物の挙動を表現できないとの知見が得られた。これらの知見のもとに、本論文はトンネル縦断面についても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、構造物に対する载荷メカニズムを検討するものである。

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、地下鉄副都心線池袋～渋谷間8.9kmの建設を行った。この中で、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地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、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する非開削工法(PSS-Arch工法)を採用した。

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¹⁾を実施し、その特徴をまとめた。さらに、トンネル横断方向をモデル化した2次元FEM解析や多リングはり・ばねモデルで解析を行い、構造物に生じた現象を再現することを試みた。その結果、通常のFEM解析だけでは、構造物に対する载荷メカニズムを表現できないという知見を得た²⁾。そこで、

本論文では、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し、構造物に対する载荷メカニズムを検討したものである。

2. 施工方法の概要

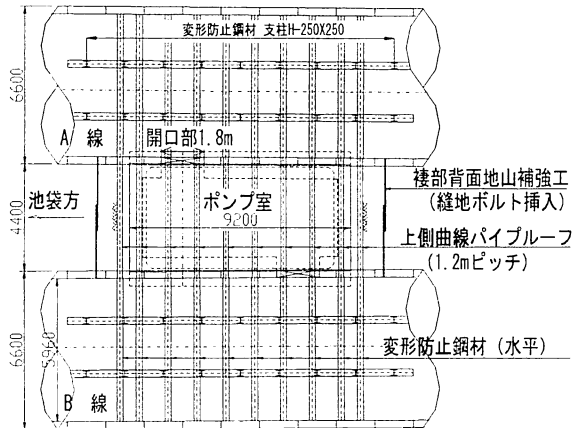
(1) 中間ポンプ室の仕様

中間ポンプ室の構造を図-1に示す。中間ポンプ室は、幅7.2m、高さ7.05mで中床版を有した2階構造であり、約4.4mの離隔をもった2本の単線トンネルの間に設置された。単線トンネルは、曲線パイプルーフや変形防止鋼材の設置を考え、鋼製セグメントとしており、厚さ270mm、外径φ6,600mmであり、リング幅は一般部と同じ1,600mmである。

(2) 施工手順

施工手順を図-2を用いて概説する。

平面図



断面図

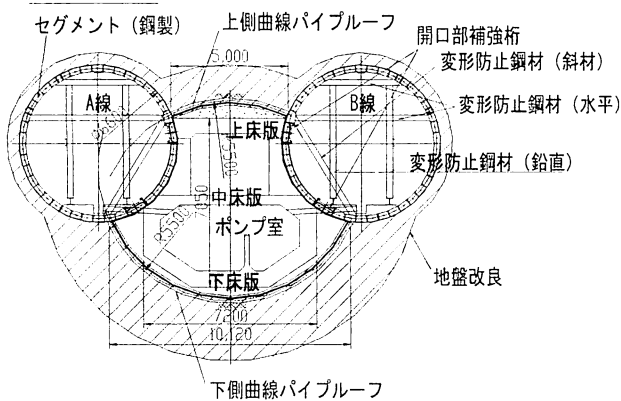


図-1 中間ポンプ室の施工概要

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、掘削時の地下水の流入を防止した。セグメント背面全周の改良厚さは1.0m、曲線パイプルーフ外周部の改良厚さは3.0m、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である。

②曲線パイプルーフ（□-250×250の角型鋼管）をA線坑内から、約1.2mピッチで挿入した。掘削は、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で行っており、一時的に切羽の土圧は解放される。曲線パイプルーフの設置後、変形防止鋼材（H-250×250）をパイプルーフと同じ1.2mピッチで設置した。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、安定化をはかった。

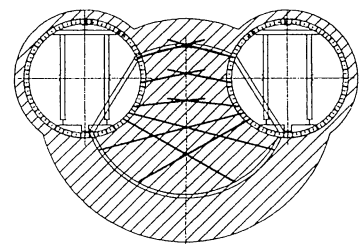
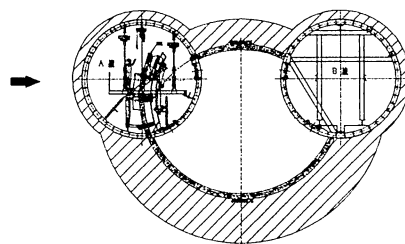
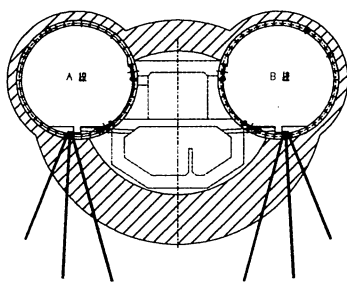
④セグメント開口部から斜め上向きに掘り進み、上半を掘削した。開口部は図-1のように、A線に1箇所設け、幅は1.8mである。また、掘削後、上床版を打設し、上床版と曲線パイプルーフの間は、コンクリートで充填した。

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。

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

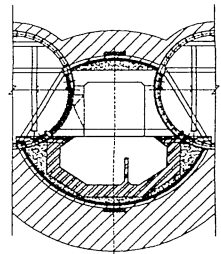
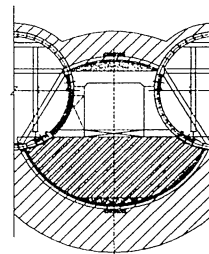
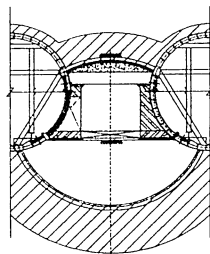
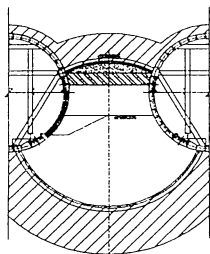


図-2 中間ポンプ室の施工順序（進行方向：新宿方面）

- 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下床版とポンプ室の側壁を逆巻きで打設した。

(3) 地質条件・施工条件

トンネルの掘削箇所は、第4紀更新世洪積層上総層群の砂質土層（Kas1）と粘性土層（Kac1）が互層となって堆積している（図-3）。ポンプ室の上半は、上総層粘性土層（Kac1）、ポンプ室の下半は上総層砂質土（Kas1）が存在する。Kac1とKas1の各層の物性値を表-1に示す。土被りはポンプ室の天端で約33m、地下水圧は掘削底版で約0.32MPaであった。

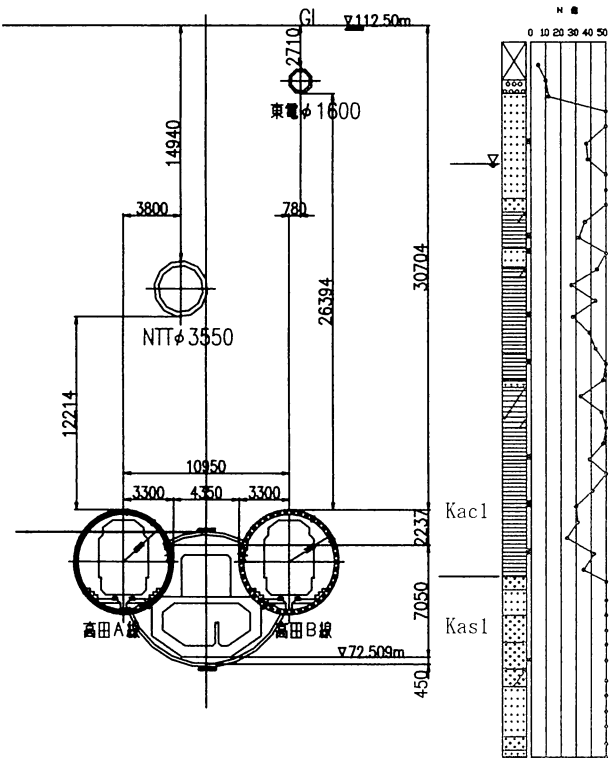


図-3 地質条件の概要

表-1 地盤の物性値

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

3. 計測工の概要

(1) 計測項目

掘削時の構造物への影響を確認するため、セグメント、曲線パイプルーフと変形防止鋼材のひずみ計測を行った。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の撤去を行う直前の値とした。なお、変位については計測が行えなかった。

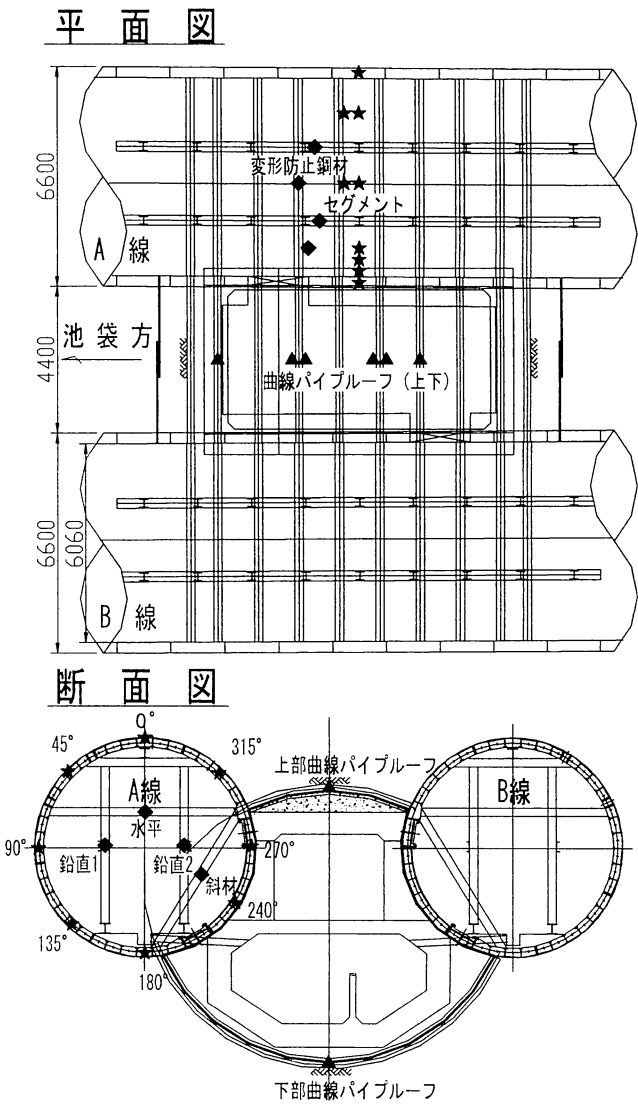


図-4 計測位置

表-2 計測項目

	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

a) 曲線パイプルーフ

曲線パイプルーフでは、鋼管の中央上下面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、ひずみゲージを貼り付けたまま掘進・挿入を行うため、測定のできないゲージも存在した。このため、上下各3本のパイプルーフにゲージを貼り付けたが、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

変形防止鋼材は鉛直方向に2箇所、水平方向の下側では1箇所、斜材で1箇所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、天端から半時計回りに9箇所で行った。計測は210°と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鋼製セグメントの主桁の内周側と外周側の両方にひずみゲージを配置した。また、セグメントの計測は、A線坑内で行い、ポンプ室の掘進方向の中央の1断面で実施した。

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	

(2) 計測結果の概要

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下半掘削後の4つのステップの施工段階に着目し、部位ごとの計測値の変化をまとめて以下に記す。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。

a) 曲線パイプルーフ

上側曲線パイプルーフには、②上床二次掘削完了後まで、微少な曲げモーメントと500kN/m程度の軸圧縮力が生じているが、その後はほとんど変化がない。

一方、下側曲線パイプルーフは軸圧縮力のみが生じ、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

変形防止鋼材のうち、水平と地山側の鉛直材（以後、鉛直1と称す）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が、ポンプ室側の鉛直材（以後、鉛直2と称す）と斜材は徐々に軸圧縮力が大きくなっている。

c) セグメント

0～135°の範囲は、すべての施工段階で、曲げモーメント、軸力ともに、ほとんど変化が見られない。

一方、180°と315°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变化し、曲げモーメントは、正曲げ側に増加している。

240°と270°では、施工段階①または②までの間、軸力が圧縮側に变化し、施工段階③の上半三次掘削で大きく引張方向に変化している。また、曲げモーメントは施工段階①～③の上半掘削の間、負曲げ側に变化している。

全体に施工段階④では、軸力、曲げモーメントともに変化が小さい。

(3) 計測結果のまとめ

計測結果から以下の事項が推定される。

- ・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ている。一方、地山側のセグメントと変形防止鋼材は、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。
- ・下半掘削では、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なく、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。

4. 解析

(1) 解析の方針

計測結果から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。

前報³⁾ではトンネル周辺の地山の物性値を変更する解析上の工夫を行ったが、構造物の実際の挙動を再現することが困難であった。また、下側曲線パイプルーフの幅が10.12mであるのに対してポンプ室の延長が9.4mであり、トンネル方向のアーチ効果が解析上で無視できないものと考えられる。そこで、前報で実施したトンネル横断面の2次元FEM解析を行う前に、ポンプ室をトンネル掘進方向と平行な断面でモデル化した2次元FEM解析を行い、掘削応力解放率を算出し、横断面2次元FEM解析に適用することとした。なお、トンネル掘進方向の2次元FEM解析で、土圧を受ける鋼管の挙動を表現するため、鋼管を支持するばねを骨組み解析を用いて算出した。解析の手順を図-6に示す。

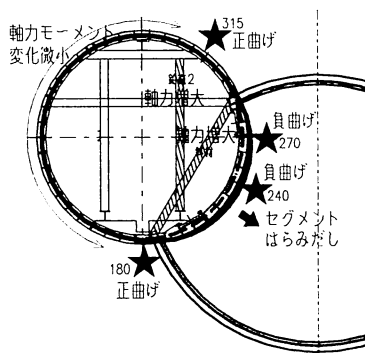


図-5 セグメント他の変形モードの概念

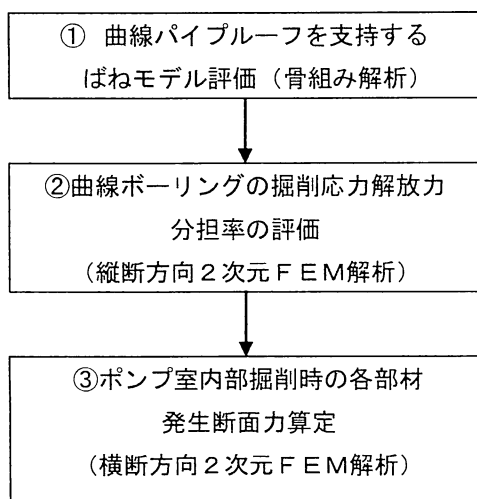


図-6 解析の手順

① 曲線パイプルーフを支持するばねモデルの評価

上下の曲線パイプルーフをそれぞれヒンジアーチとし

てモデル化し、土圧相当の分布荷重を載荷して中央部の変位を算出する。そして、変位と分布荷重から各曲線パイプルーフ中央部のばね定数を算定する。

② 曲線パイプルーフがポンプ室の掘削によって生じる解放力の一部を分担する割合の評価

ポンプ室中央のトンネル掘進方向断面を2次元FEM解析のモデルで評価し、自重の載荷による初期応力発生時、曲線パイプルーフの施工時、鋼管および①で算定したばねモデル設置時そしてポンプ室内部の掘削時の4段階の施工ステップで解析を行う。次に、施工完了時の曲線パイプルーフ周辺における鉛直方向の地盤応力度と初期応力度との比率から、曲線パイプルーフがポンプ室の掘削によって生じる解放力の一部を分担する割合（以後、掘削解放力分担率と称す）を求める。この値を、トンネル横断方向の2次元FEM解析に掘削解放率として用いる。解放率の合計は100%にならないことで、地山のアーチ効果等を表現することを試みる。

③ ポンプ室内部の掘削時の各部材に発生する断面力の算定

②で算定した解放率を用いてトンネル横断方向2次元FEM解析を実施し、各施工ステップの曲線パイプルーフ、セグメントおよび変形防止鋼材の断面力を算定する。

(2) 解析条件

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載荷時の3倍の値を使用した事例にならった。また、前報の結果³⁾も比較して記載するので、変形係数を6倍した値も記する。

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鋼および曲線パイプルーフの物性値をそれぞれ示す。ポンプ室躯体の開口部のコンクリートは、9.4mのうち8.0mが開口であることを考慮してヤング係数を1.4/9.4に低減した。セグメントの物性値は設計に用いた値を採用し、変形防止鋼材にはH-250×250の公称値を用いた。

表-4 地山の物性値

	単位体積重量 γ (kN/m ³)	変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	側方土圧係数 ^{*)}
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') ^{**)}	18	225,900	0.35	0.54
上総層砂質土 (Kas1'') ^{***)}	18	451,800	0.35	0.54

^{*)}側方土圧係数 $=\nu/(1-\nu)$

^{**)} FEM解析におけるKas1'の変形係数は、Kas1の3倍とする。

^{***)} 前報の解析ではKas1''の変形係数をKas1の6倍とした。

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した。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た。

表-5 構築コンクリートの物性値

項目	設計基準強度 (N/mm ²)	ヤング係数E (kN/m ²)	ポアソン比
吹付けコンクリート	18	3.4×10^6	0.2
ポンプ室躯体	24	2.5×10^7	0.2
ポンプ室躯体 中床版開口部 開口比:8.0/9.4	24	2.1×10^6	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	—
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}	1.583×10^{-2}
断面二次モーメントI（m ⁴ ）	1.982×10^{-4}	1.239×10^{-4}

表-7 H鋼の物性値（H-250×250@1.2m）

		1本あたり	1m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}	7.619×10^{-3}
断面二次モーメントI	(m ⁴)	1.070×10^{-4}	8.917×10^{-5}

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
合成の 構造とし ての 物性値	ヤング係数E	(kN/m ²)	4.583×10^7
	断面積A	(m ²)	5.191×10^{-2}
	断面二次モーメントI	(m ⁴)	3.089×10^{-4}
照 査 用 物 性 値	軸力Nの分配率	鋼管	0.623
		中詰	0.377
	鋼管の断面積As	(m ²)	7.056×10^{-3}
	中詰コンクリートの断面積Ac	(m ²)	4.485×10^{-2}

(3) 曲線パイプルーフを支持するばねモデルの評価

曲線パイプルーフの施工による地盤応力状態に関する検討を行うために、ポンプ室をトンネル掘進方向と平行な断面でモデル化した2次元FEM解析を行う。その時、曲線パイプルーフの挙動を適正に評価するための鋼管を支持するばねが必要となる。そこで、図-6において太線で囲んだ上側曲線パイプルーフと下側曲線パイプルーフをそれぞれヒンジアーチの骨組構造でモデル化して、ばね定数を算出する。曲線パイプルーフの細長比は上側も下側も大きいので、両端をヒンジ拘束とした。なお、曲線パイプルーフは□-250×250×9の角形鋼管にコンクリートを中詰めした表-8の合成構造として求めた物性値を用いた。

a) 上側曲線パイプルーフ

図-6の上側曲線パイプルーフを図-7のようにモデル化し、図-8のように全土被り相当の鉛直応力度の鋼管ピッチ1.2m分である328 kN/mを载荷した。図-9に示したように、中央部の変位が6.515mmであった。この結果から、ばね定数は1本あたり50,290kN/mと評価した。

b) 下側曲線パイプルーフ

図-6の下側曲線パイプルーフを図-10のようにモデル化し、図-11のように鉛直力427 kN/mと水平力214 kN/mとを载荷した。その結果、図-12に示したように、中央部が4.332mm変位した。このことから、ばね定数は1本あたり9,857kN/mと評価した。

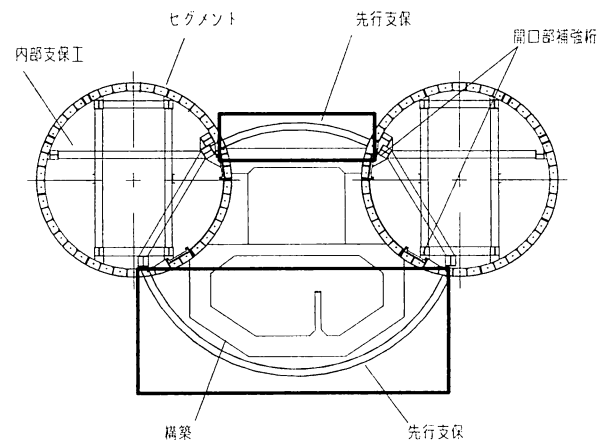


図-6 検討の対象とした先行支保工

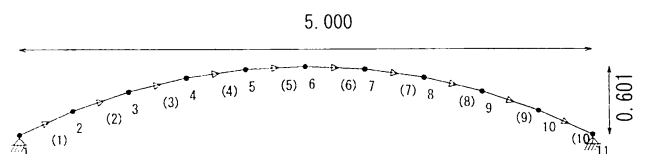


図-7 上側の先行支保工の骨組みモデル

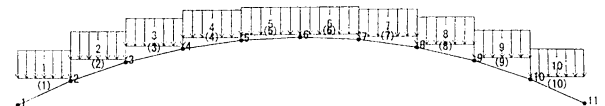


図-8 作用荷重

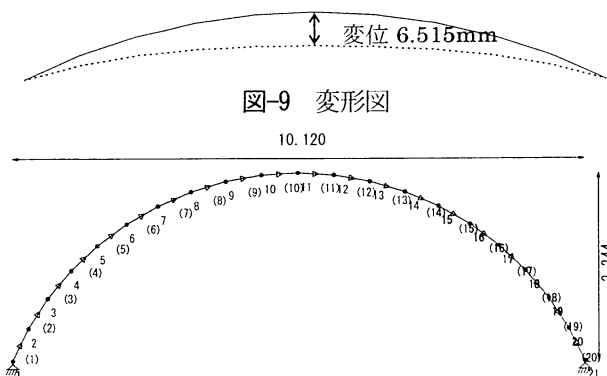


図-9 変形図

図-10 下側の先行支保工の骨組みモデル

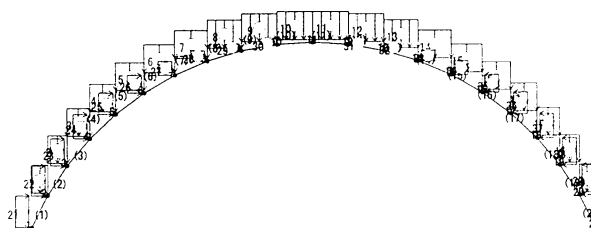


図-11 作用荷重

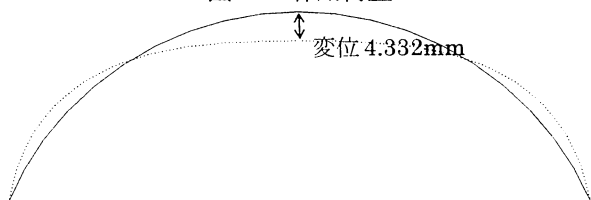


図-12 変形図

(4) 曲線パイプルーフの掘削解放力分担率の評価

ポンプ室中央のトンネル掘進方向の断面を図-13, 14のようにモデル化し、施工完了時の曲線パイプルーフ周辺における鉛直方向の地盤応力度と初期応力度との比率で曲線パイプルーフの掘削解放力分担率を算定した。トンネル横断方向の解析位置が図-15に示したパイプの位置である。下側曲線パイプルーフ鋼管周辺のモデルを図-15に示した。鋼管ははりでモデル化し、はりの各節点を固定点とばねで結んだ。

解析領域は、ポンプ室の上方には全土被り、水平方向にはポンプ室の掘削幅9.4mの約3倍、ポンプ室の下方にはポンプ室の掘削幅としている。境界条件は下端が水平方向と鉛直方向に固定、左右端は水平方向に固定、鉛直方向に自由とした。また、地盤条件は表-4の値を用い、除荷時には通常の k_{asl} の変形係数の3倍の値を、 k_{asl} の変形係数として用いた。鋼管ははり部材でモデル化し、厚さ9mmの鋼板の規格値を用いた。

図-13のように曲線パイプルーフの部分の地山を掘削した後、鋼管を設置し、この鋼管を(3)で求めたばねモデルで支持した。なお、ポンプ室内部の掘削は上下とも鋼管に接している地山を掘削した場合のみとした。

a) 上側曲線パイプルーフ

図-16に上側曲線パイプルーフ周辺地山における自重

解析後の初期応力状態とポンプ室の掘削後の鋼管周辺における鉛直応力度分布を比較して示す。なお、計測している鋼管に着目し、鋼管中心から両側に600mmずつ応力度の分布を図-16に示した。初期応力状態と掘削後の鋼管周辺における鉛直応力度の平均値を算出し、鋼管とポ

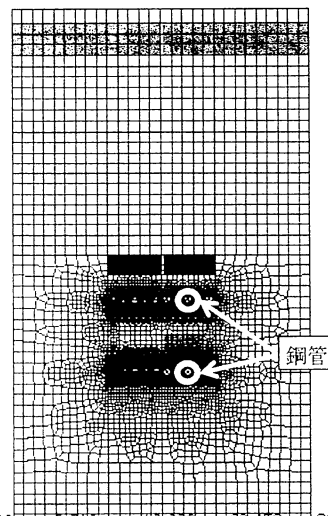


図-13 解析モデル (先行支保工の設置時)

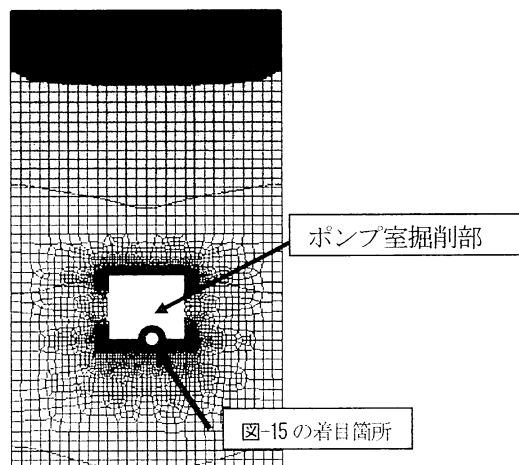


図-14 解析モデル (ポンプ室の掘削時)

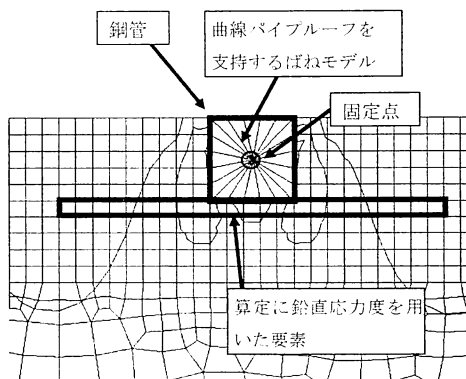


図-15 解析モデル (詳細)

ンプ室の掘削により解放される土圧のうち鋼管に作用する比率を α で示す。 α は式(1)に示すとおりである。

$$\alpha = \frac{\overline{\sigma_{iv}}}{\sigma_{0v}} \quad \dots \dots (1)$$

ただし、 σ_{0v} は初期鉛直応力度、
 $\overline{\sigma_{iv}}$ は掘削後の鉛直応力度の平均値

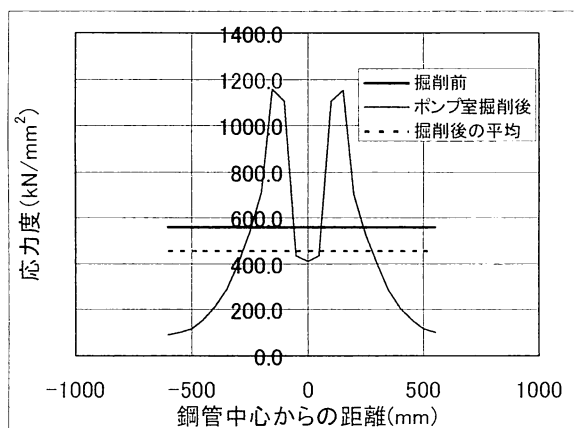


図-16 上側先行支保工における初期と掘削後との鉛直応力度の比較

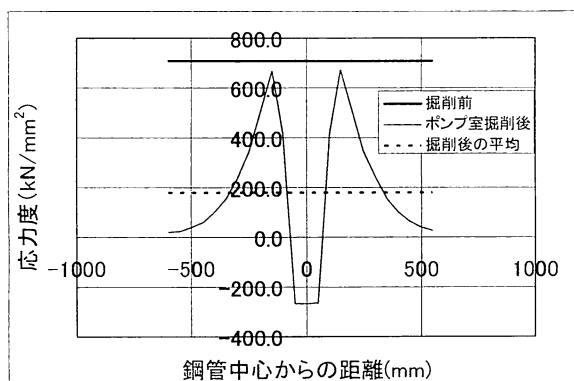


図-17 下側曲線パイプルーフにおける初期と掘削後との鉛直応力度の比較

以上の結果から初期鉛直応力度 σ_{0v} が559.9kN/m²で、掘削後の鉛直応力度の平均値 $\overline{\sigma_{iv}}$ が454.5kN/m²となり、上側曲線パイプルーフに作用する掘削解放力の分担率 α は81%となった。

b) 下側曲線パイプルーフ

図-17に下側曲線パイプルーフ周辺地山の初期応力状態と掘削後の鋼管周辺における鉛直応力度分布を比較して示す。この結果、初期鉛直応力度 σ_{0v} が709.0kN/m²で、掘削後の鉛直応力度の平均値 $\overline{\sigma_{iv}}$ が180.3kN/m²となり、下側曲線パイプルーフに作用する掘削解放力の分担率 α は25%となった。

(5) ポンプ室の内部掘削時の各部材に発生する断面力の算定

計測結果から確認したセグメント、曲線パイプルーフ

そして変形防止鋼材の挙動を、(4)で求めた解放率を用い、トンネル横断面方向の2次元FEM解析モデルによる解析によって表現することを試みる。

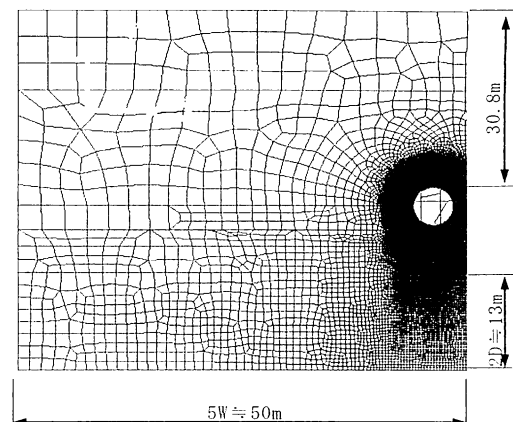


図-18 横断方向2次元FEM解析モデル

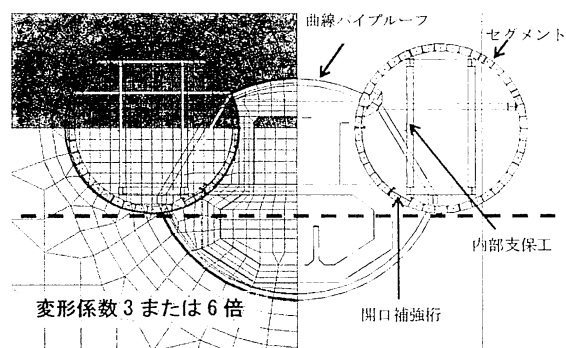


図-19 横断方向FEM解析モデル(拡大図)

a) 解析モデル

解析モデルを図-18, 19に示す。なお、図では寸法や支保工を記入するため半断面で示したが、解析は全断面で行っている。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、下方向にトンネル径の約2倍を解析領域とし、境界条件は下端がX,Y方向に固定、左右端はX方向に固定、Y方向に自由とした。

b) 解析ケース

解析ケースを表-9に示す。前報³⁾の解析条件と比較して、曲線パイプルーフの施工の影響を考慮したケースと、さらに、変形防止鋼材およびセグメントの曲げ剛性を1/10に低下させたケースについて解析を実施した。変形防止鋼材およびセグメントの曲げ剛性を1/10に低下させたのは、セグメント継手や変形防止鋼材がボルトおよび溶接により接合されていることと、図-4からわかるようにセグメント、変形防止鋼材および曲線パイプルーフの計測位置が異なっているため、各部位の挙動を再現するためには材料の剛性を低減する必要があるためである。ただし、1/10という値については、多くの部材から構成

されて、主桁と支保工が同じ断面にない複雑な本構造の剛性を適切に評価することが困難であるため明確な根拠はない。

表-9 解析ケース

	掘削高より下地盤剛性	鋼管の解放力分担率	内部支保工・セグメントの剛性
case1	6倍	無視	低下なし
case2	3倍	考慮	低下なし
case3	3倍	考慮	低下考慮(1/10)

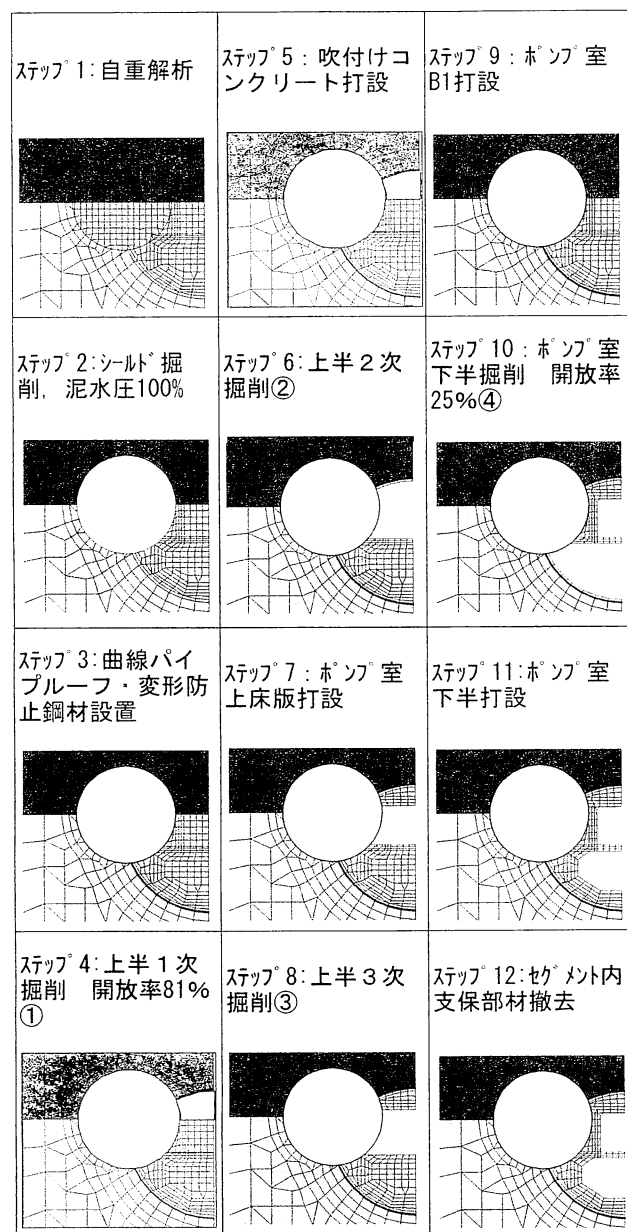


図-20 解析ステップ

c) 解析ステップ

図-20にFEMの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、「(4)曲線パイプルーフの掘削解放力分担率の評価」の結果に基づき、上半の1次掘削では掘削解放分担率を81%に、下半の掘削では分担率を25%とし、その他の掘削では、分担率はすべて100%として解析を実施した。

5. 計測値と解析値との比較

(1) 解析結果

上記の方法で解析した値と実測値とを比較する。解析

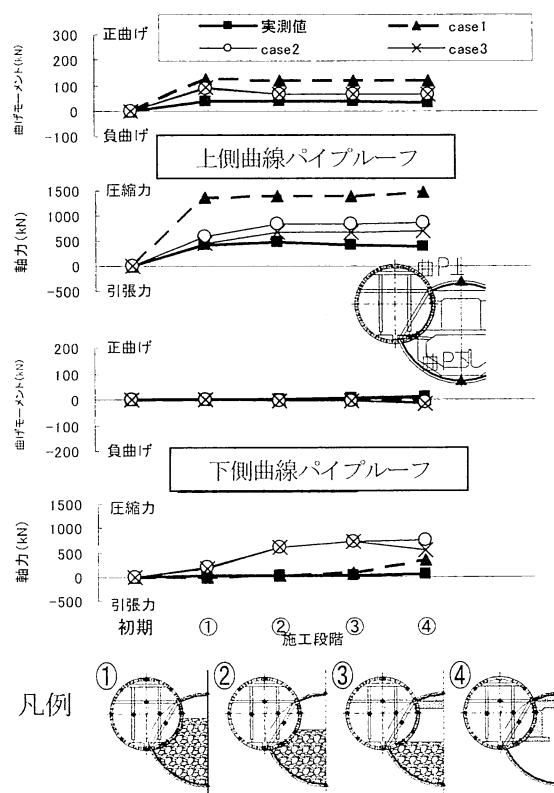


図-21 実測値と解析値との比較（曲線パイプルーフ）

値は、図-20のステップ4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値を初期値からの変化量で示して、実測値と比較する。

a) 曲線パイプルーフ

図-21に上下曲線パイプルーフにおける曲げモーメントと軸力の解析値と実測値とを比較して示す。

上側曲線パイプルーフの軸力は、施工段階①「上半の一次掘削」でcase2とcase3の解析値が実測値とほぼ一致するが、その後、実際には生じていない水平荷重によって解析値が圧縮力が実測値より大きな値となっている。これに対して、case1の解析値はすべての施工段階で実測値の3～4倍となった。上側曲線パイプルーフの曲げモーメントについては、実測値も解析値も施工段階①「上半の一次掘削」で正曲げ側に変化し、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、case2と3の解析値は、実測値よりやや大きい値となり、case1の解析値は実測値より3～4倍の値となった。case2と3の解析値の曲げモーメントが計測値より大きいのは、図-23に示すようなセグメントのはらみだしによる上側曲線パイプルーフ端部の曲げモーメントが解析では表現できなかったためと考えている。

下側曲線パイプルーフの軸力については、case1の解析値が施工段階④「下半掘削」で軸力の解析値が圧縮側

に変化している点を除いて、実測値とよく一致している。これに対して、case2とcase3の解析値では施工段階②「上半の2次掘削」以降、軸力は大きく生じている結果となった。case1で下側地盤を実測の6倍の変形係数にしていることが実挙動を表現していると考えられるが、地盤工学的知見からこの現象を説明することは現状では

困難である。また、case2とcase3の解析においては、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ブ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。また、地盤の解放力を低減するより地盤剛性を大きくする方が断面力への影響が大きい。

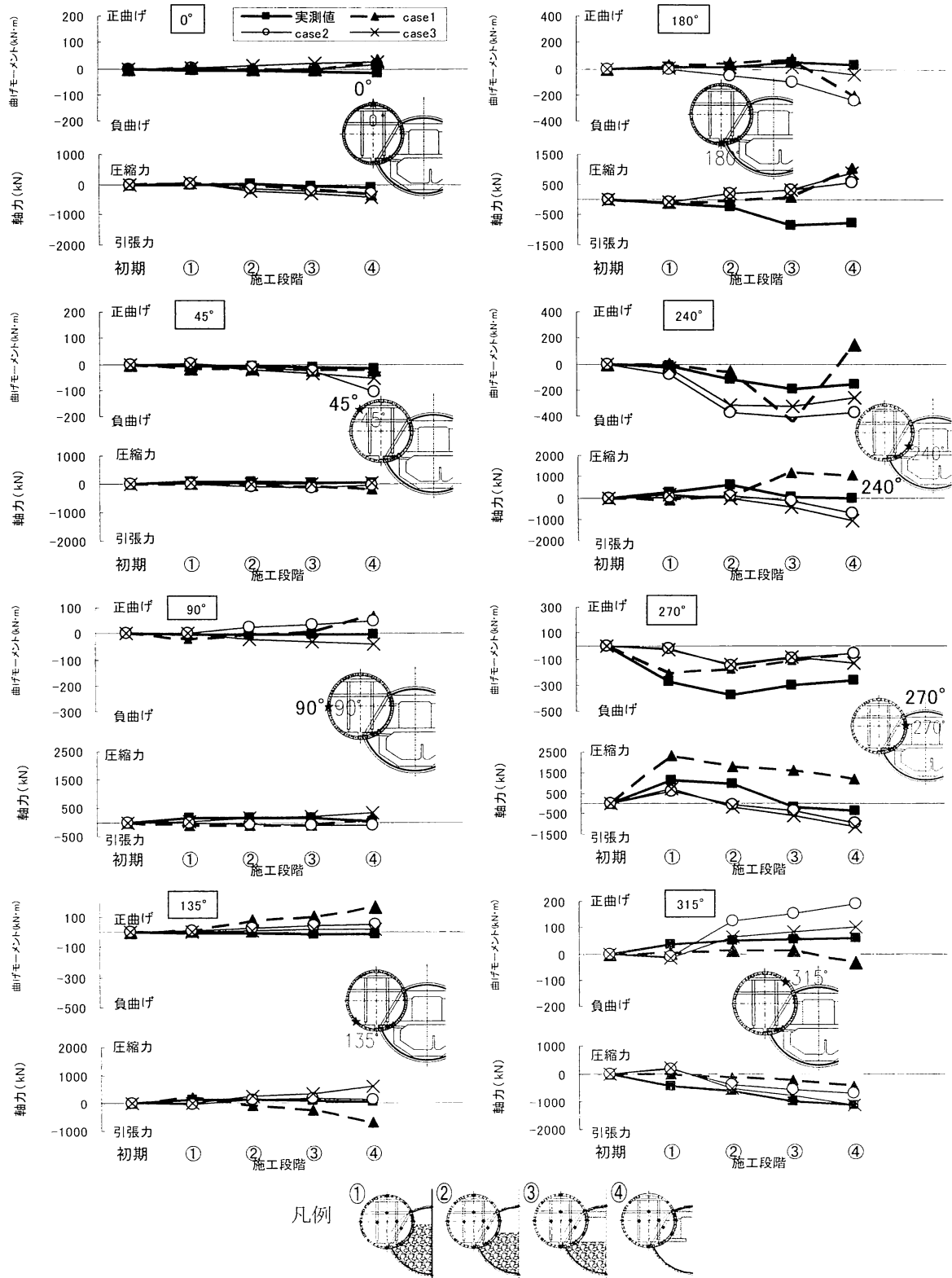


図-22 実測値と解析値との比較 (セグメント)

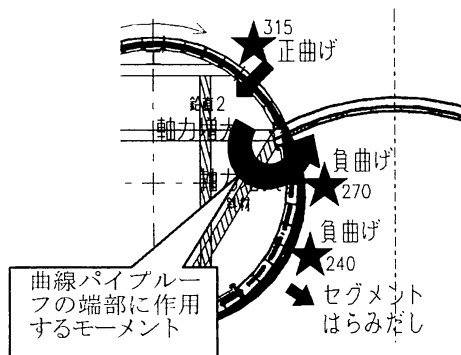


図-23 上側曲線パイプループの端部モーメントの発生モード

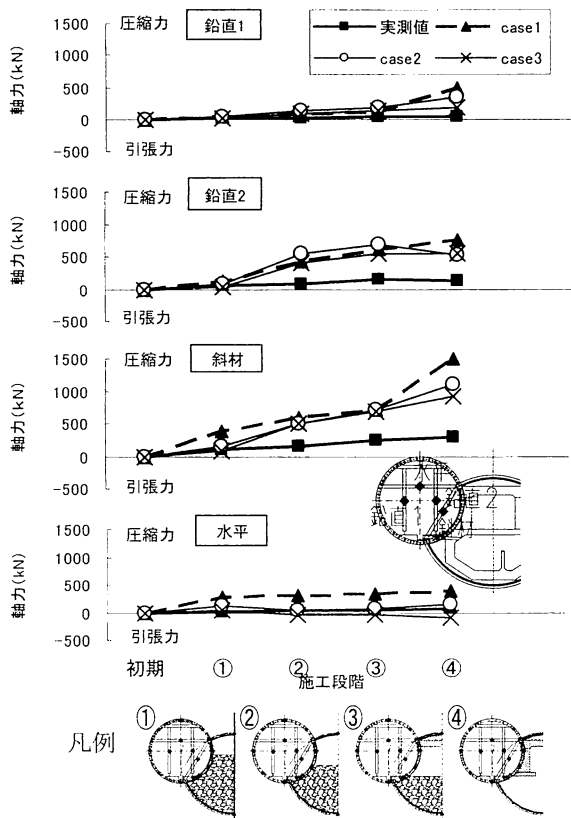


図-24 実測値と解析値との比較 (変形防止鋼材)

b) セグメント

セグメントの地山側 ($0 \sim 135^\circ$) は、実測値、解析値ともに小さいが、ほぼ一致している。ただし、 90° ではcase2とcase3の曲げモーメントの解析値が、施工段階②「上半の2次掘削」以降、リバウンドによる影響で実測値との差が生じている。セグメントポンプ室側の 240° と 270° では、case2とcase3における軸力の解析値は、比較的実測値と一致している。施工段階①と②ではやや差があるが、③以降の変化量はよく一致している。これに対して、case1の解析値は実測値と違いが大きく、その差が④まで残る結果となっている。これは、施工段階①で、上側のパイプループに生じた軸圧縮力を斜材と水平材が、解析では実際よりも大きな

力を支持しているため、はらみ出しの挙動が小さくなったためであると考えている。

240° と 270° の曲げモーメントでは、case2とcase3の解析値は、施工段階①と②で、はらみだしによる影響が表現できず、計測値より小さい値となっているが、③と④での変化はよく一致している。曲げモーメントでもcase1の解析値と実測値の挙動が異なっている。

315° では、軸力についてはすべての解析値と実測値とがほぼ一致しているが、曲げモーメントでは、すべての解析値が実測値とで差がある。

180° ではすべての解析値が負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変化となっている。これは、解析では下半の掘削による荷重の受け替えとリバウンドの影響が断面力に反映したが、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。

c) 変形防止鋼材

変形防止鋼材の鉛直1に発生した軸力は、施工段階①～③で、解析結果と実測結果の傾向がよく一致している。しかし、施工段階④の値は、計測値が増加しないの対して、すべての解析値が増加している。

鉛直2と斜材の解析値はすべてのケースで、施工段階②以後、実測値の3～4倍となっている。ただし、施工段階①ではcase2とcase3の軸力の解析値と計測値は一致している。

また、施工段階④「下半の掘削」時に、case1とcase2の解析値で、斜材と鉛直1の軸力が圧縮側に变化しており、実測値と異なっている。

水平では、case2とcase3の軸力の解析値と計測値は一致している。case1の値だけが大きかった。

実測値は、ほとんど変化のなかったが、解析値では変化が大きいものが多く異なる動きとなっている。これは、解析値は、下半の掘削による荷重の受け替えとリバウンドの影響があるが、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。

(2) 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「上半の1次掘削」で、曲線パイプループと変形防止鋼材の軸力において、case2とcase3の解析値と実測値がよく一致している。このことから、本論文で述べた方法で曲線パイプループが分担する上半の1次掘削時の土圧を表現でき、解放率の算定方法が適切であったと考える。
- 水平荷重の受け替えやリバウンドにともなう上向き荷重による構造物の挙動は、トンネル縦断方向の事前解析を行う解析方法よりも、掘削下部地盤の変形

係数を初期剛性の6倍にして行った解析結果の方が実測値に近い値を示した。

- ・ボルトおよび溶接による接合箇所を有することと計測位置の断面が異なっていることを考慮して、セグメントの曲げ剛性と変形防止鋼材の剛性を低下させると、上側曲線パイプルーフ、セグメントおよび変形防止鋼材の挙動を比較的よく再現できる。
- ・実測値と解析値とに差がある原因として、掘削位置よりも上側の地盤剛性や鉛直荷重の影響は小さいと考えている。また、地下水低下の影響は、計測中に変化がほとんどないので、本解析では影響がないと考えても良い。さらに、他の要因についても検討していく必要があると考えている。

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。

- ・曲線パイプルーフの構築時の横断方向の応力解放による影響とトンネル掘進方向のアーチ効果を考慮して、上方から曲線パイプルーフに作用する土圧を推定するため、「①曲線パイプルーフを支持するばねモデルの評価」と「②曲線パイプルーフの掘削解放力分担率の評価」を行った。その結果、得られた掘削解放率を用いてトンネル横断方向の2次元FEM解析のモデルに用いることにより、3次元的な効果を反映した計算が可能となった。
- ・セグメントや変形防止鋼材に発生する断面力は、掘削による周辺地山の変位・変形によって生じるものである。さらに、ボルトおよび溶接による鋼材の接合部や計測位置の断面が異なることによる影響で変形を吸収するので、実際に発生する断面力は解析値より小さくなると考えられる。したがって、掘削する地盤が十分硬い場合には、構造物に作用する「水平荷重」や「下部地盤のリバウンド」は、解析値で考えていたよりも小さい。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、「鉛直下向きの荷重」、「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。

- ・本解析では、根拠がないままセグメントの曲げ剛性および変形防止鋼材の軸剛性を低下させたが、変形モードを十分に考慮した上で、適正な剛性低下量の設定方法を検討していく予定である。また、本構造物の载荷メカニズムについては3次元効果をさらに明確にする必要があると考える。

今後、都市部では、周辺交通への影響や騒音の軽減という課題に対応するために、非開削工法による地下空間切上げに対する社会的要請がさらに高まるものと考えられ、これらの工法に関する知見の蓄積と設計法の検討が求められている。非開削工法による地下空間の切上げは、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：本論文のまとめるにあたって貴重なご意見をくださった早稲田大学 小泉 淳先生、日本シビックコンサルタント（株） 斉藤正幸氏に深甚なる謝意を表します。

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，6-012，2007。
- 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) 千代 啓三, 辻 雅行ほか：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

A STUDY ON BEHAVIOR OF THE STRUCTURES AND THE SURROUNDING GROUND APPLIED NON-OPEN CUT METHOD IN THE METROPOLITAN AREA

Motoi IWANAMI, Takaaki NISHIMURA, Keiji OISHI and Masaki KAZIYAMA

The pumping station was designed at the deepest point in the whole route of the Fukutoshin line. PSS-Arch method was applied to it, in which we insert curved pipe roofs and then excavate inner area.

We measured segments, curved pipe roofs and internal supports during construction and picked out features of their behaviors. Furthermore, we tried to reproduce phenomena by 2-dimensional FEM analysis and beam-spring model. As a result, we come to a conclusion that 2-dimensional cross section analysis couldn't explain them completely. So, this paper investigated 2-dimensional longitudinal section FEM analyses to estimate released forces and a load carrying mechanism to structures.