

# 小口径鋼矢板円形立坑築造方法

## Development of a Method for Constructing a Small-diameter Circular Shaft using Steel Sheet Piles

木下茂樹\* 川嶋英介\*\* 庄司和矢\*\*\* 中野愛之\*\*\*\*

### 要 旨

中・大口径推進工法や中・小口径シールド工法における立坑を構築する場合、掘進機の全長等の関係から□9.0m程度の矩形立坑、もしくはφ9.0m程度の鋼製圧入ケーソンが採用されるケースが多い。しかし近年、「環境負荷低減」、「コスト縮減」、「工期短縮」といった社会的ニーズに応えるため、安価で新しい立坑構築方法が必要となってきた。本研究では、矩形より構造的に優位である円形立坑を、「鋼矢板で」、「安価に構築する」ことを目的として、小口径鋼矢板円形立坑の築造方法を開発した。また、鋼矢板の打設方法には、都市部における立坑築造を前提に環境負荷低減が図れる圧入工法を採用し、さらに立坑施工中の土留めの変位、および円形支保工の応力を計測することで、設計法の妥当性・安全性について確認した。

キーワード：円形立坑、鋼矢板、小口径、油圧圧入機

### 1. まえがき

近年、都市部での通信・ライフライン等の地下インフラ整備事業が積極的に推進されており、その主役を担うシールド・推進工法によるトンネル築造には、発進・到達立坑が必要となる。特に、中・大口径推進工法やシールド工法において立坑を構築する場合は、掘進機の全長等の関係から□9.0m程度の矩形立坑、もしくはφ9.0m程度の鋼製圧入ケーソンが採用されるケースが多い。

一方、立坑の施工においては、環境負荷低減、コスト縮減、工期短縮といった社会的ニーズも高まっており、それらに応える新しい立坑構築方法が必要となってきた。

本研究では、構造の優位性から立坑形状を円形とすること、コスト縮減の観点から山留め材に鋼矢板を使用すること、環境負荷低減の観点から鋼矢板の打設には油圧圧入工法(写真-1)を採用することをコンセプトとして立坑築造工法の開発を進めた。

以下に、開発の経緯、実施工への適用事例、計測工による設計の妥当性の検証結果を示す。



写真-1 鋼矢板の円形打設

### 2. 施工方法の開発経緯

#### 2.1 角度補正プレートの開発

鋼矢板セクションの嵌合性能からメーカーが推奨する継手回転角度の限界は6°であるため、鋼矢板円形立坑の直径はφ7.64m(図-2)までの省面積化が可能である。しかし、通常の圧入機による施工では、油圧圧入機(サイレントパイラー)の機械的性能から、反力把持部の開口幅に制限があり、施工可能な円形打設の最小直径をφ16m(図-1)としている。そこで、油圧圧入機の反力把持部が、鋼矢板の継手角度に追従できるように角度を補正する治具の開発を進めた<sup>4)</sup>。

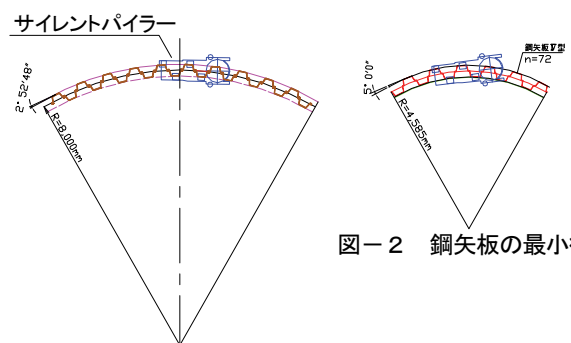


図-1 圧入工法での最小径

図-2 鋼矢板の最小径

治具(以下、「角度補正プレート(図-3)」とする)は、くさび形状とし、鋼製の削り出し加工で製作した。

\*東日本支社土木技術部 \*\*東日本支社土木第2部 \*\*\*東日本支社土木第1部 \*\*\*\*名古屋支店土木部

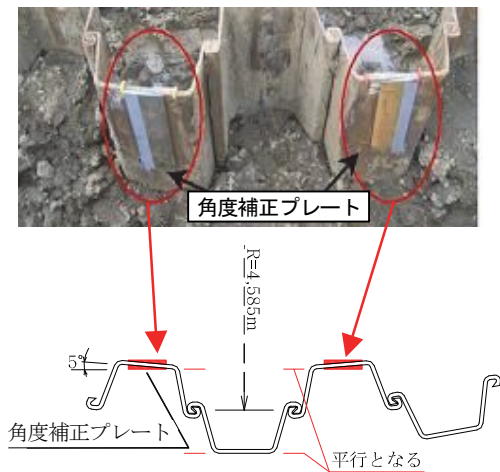


図-3 角度補正プレート

また、実施工を計画している円形立坑の直径が9.17m（鋼矢板72枚）であることから、5°（360°/72枚）の補正角を持たせた。

2.2 施工管理手法の確立

円形打設では、各鋼矢板が角度を持って打設されるため、1つ前に打設した鋼矢板の精度（向き・倒れ）が、次施工の鋼矢板の打設位置・方向に影響する。よって、施工精度は1打設ごとに座標による確認が必要となり、リアルタイムの測量管理が要求される。そこで、本工法では、NATMトンネル等の測量に使用する座標管理レーザー照射技術（写真-2）を取り入れ、打設位置管理・出来形管理手法に応用した。

座標管理では、あらかじめ設置した基準点を使ってレーザートランシットに後方交会法で機械座標を与え、すべての鋼矢板の位置を入力したコンピュータと連動させた。この方法で、狭い作業ヤードでもレーザートランシットを任意の場所に設置できるとともに、打設した鋼矢板の測量結果は、進行・半径方向の位置をコンピュータで自動演算することにより、その場で瞬時に確認ができる。



写真-2 測量管理状況

2.3 試験ヤードにおける実験施工

実施工に先立ち、角度補正プレートを用いて施工実験

を実施し、曲線造形・応力状態を確認した。油圧圧入機は、既打設の鋼矢板を反力として新たな鋼矢板を打設する方法を採用しているため、反力となる鋼矢板の荷重分布をひずみゲージで計測した（図-4、5）。打設位置から1枚目、2枚目、3枚目、4枚目の荷重分布は角度補正プレートを採用した状態でそれぞれ圧入荷重の80%、40%、-20%、0%となり、圧入荷重を超える過重負担、および圧入荷重と反力の不均衡は発生しなかった（図-6）。

このことから、角度補正プレートに起因する反力把持部の滑動等の不具合は発生しないと判断した。また、反力の分布が概ね直線的で圧入荷重によらず変化しないといった結果から、弾性域であれば作用荷重と反力分布の関係は上記の比率になると推定され、実施工時の反力分布、角度補正プレートの耐久性の確認に応用できる。

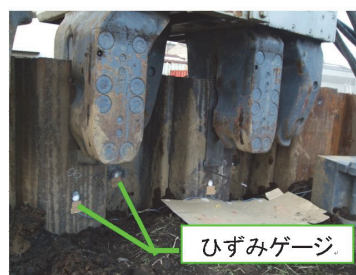


図-4 ひずみゲージによる応力計測

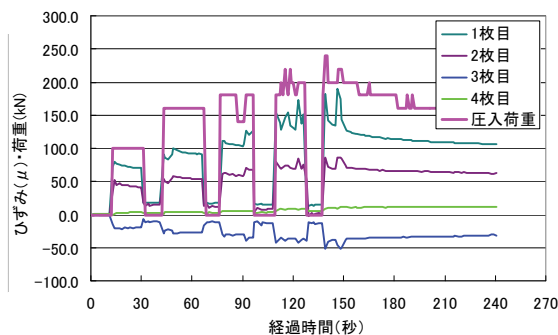


図-5 鋼矢板の荷重-時間関係

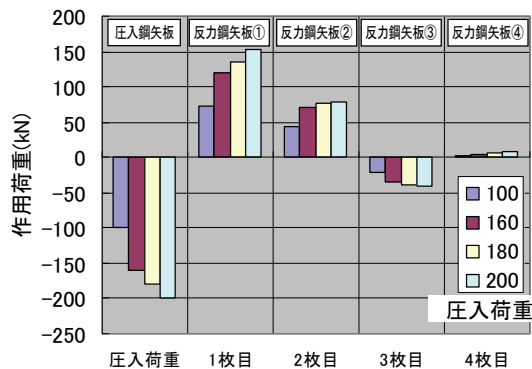


図-6 鋼矢板の荷重-反力分布関係

### 3. 設計方法

#### 3.1 リング支保工の設計手法

後述する実施工の条件で設計した立坑の構造図を図-9に示す。土留め設計には一般的な弾塑性法を用いたが、支保工は3分割されたH-300のリング支保工であり、確立された設計法がないため、『ライナープレート設計・施工マニュアル』<sup>1)</sup>に準拠した設計法を採用した。これは、リング支保工に半径の1%相当の初期たわみを与え、土留め設計で計算される支保工反力を等分布荷重としてリング周囲から加えたときの軸力、および曲げモーメントに対する安全性を照査するものである<sup>5)</sup>。図-7に土留め設計のモデル、図-8にリング支保工の設計モデルをそれぞれ示す。

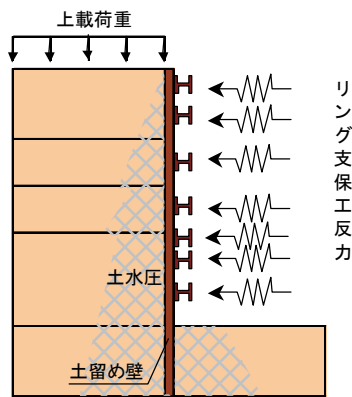


図-7 土留め設計のモデル

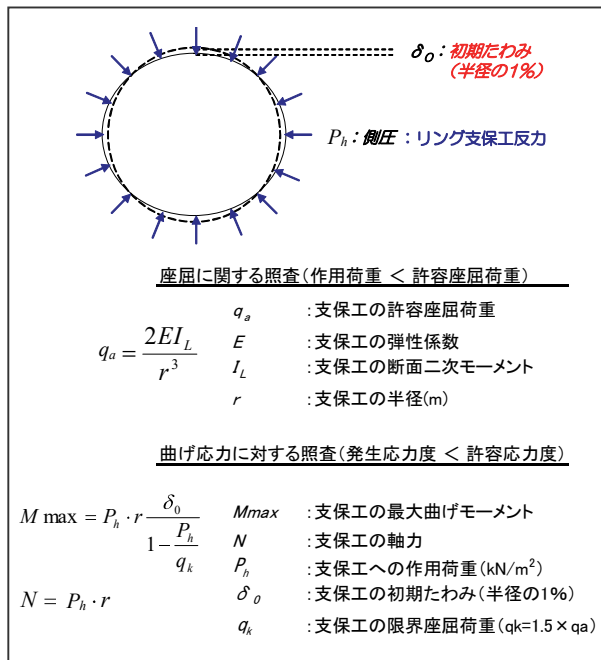


図-8 リング支保工設計モデル

#### 3.2 施工時の計測方法

##### a. 変位計測

立坑から800mm離れた位置に埋設したコアチューブ

内に埋設型傾斜計を設置し、地盤の水平変位を鉛直深度で1~2mおきに計測した。また、計測値と土留め壁の距離から、土留め壁平面の水平変位を推定した<sup>3)</sup>。

##### b. 応力計測

各リング支保工(H鋼)の円周方向応力を、ひずみゲージを用いて計測した。ゲージは分割された各支保工の中心に設置し、1箇所あたりフランジ下側の内面2箇所、1リングあたり合計6点とした。計測はリング支保工の設置直後(掘削前)から開始した。

### 4. 本工法の実施工適用

#### 4.1 工事諸元

本工法を、電力洞道シールド工事の発進立坑(直径φ9.17m、深さ17.7m)に採用し、工法の成り立ち(工程・精度・工費等)を確認した。表-1に工事概要を、図-9に円形立坑の構造図をそれぞれ示す。

表-1 工事概要

工事名	飯倉芝公園管路新設工事
工事概要	シールドトンネルφ2.6m、L=440m 発進立坑(円形)1箇所、連係立坑1箇所、 既設連係2箇所
立坑形状	円形鋼矢板:IV型φ9.17m、 H=17.7m 円形腹越しH300-7段

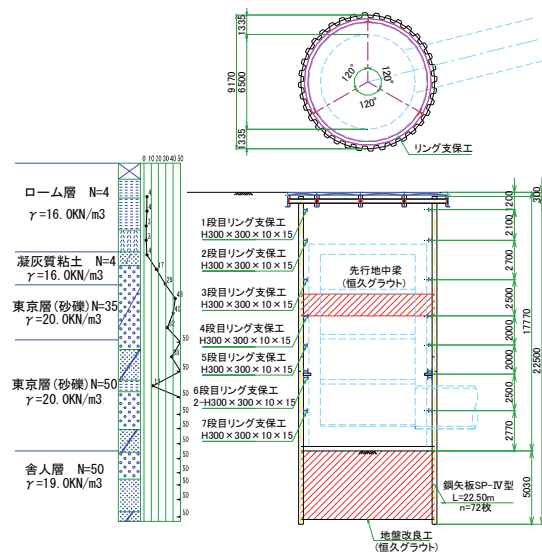


図-9 円形立坑構造図

#### 4.2 施工結果

##### a. 鋼矢板打設歩掛り

角度補正プレートを用いて鋼矢板(IV型、L=22.5m、72枚、図-9)を打設した。油圧圧入機は、GL-10.5m以深にN値50以上の東京礫層が存在する地盤条件であったため、硬質地盤クリア工法を採用している。施工

結果として、円形打設は通常の直線打設に対し歩掛りの低下も無く（平均 4 枚/日）、効率的に施工できている。

b. 鋼矢板打設精度

長い鋼矢板の打設では、鋼矢板の向きや倒れが、地中の鋼矢板の内空精度に大きく影響する<sup>2)</sup>ため、打設精度管理が重要となる。特に円形立坑では、最終的な締め切りにおける周長の調整も必要となり、鋼矢板の位置・傾斜を常に確認しながら慎重な施工を行った。図-10、図-11 はそれぞれ、打設時と掘削終了時の鋼矢板の内空出来形を示している。

5.1 で後述する計測結果で、掘削中の地中地盤変位が最大でも 1.5mm しか確認されていないことから、出来形は純然な打設精度と捉えられる。図で「打設時に傾斜計で予測した床付け部の内空精度（図-10）」が、「掘削後の出来形が約 100mm 内空側に変形している（図-11）」理由として、GL-8.5m 以深の東京礫層通過時に鋼矢板の逃げが発生したと考えられる。しかしながら、結果として内空出来形を管理値内に納めることが出来ている。

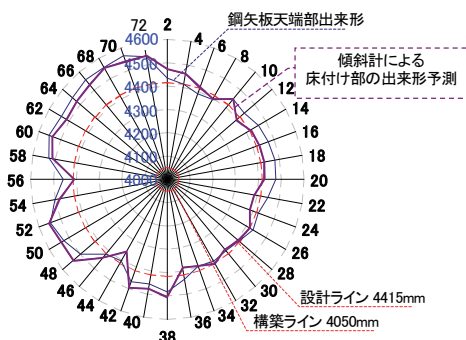


図-10 打設時の鋼矢板出来形

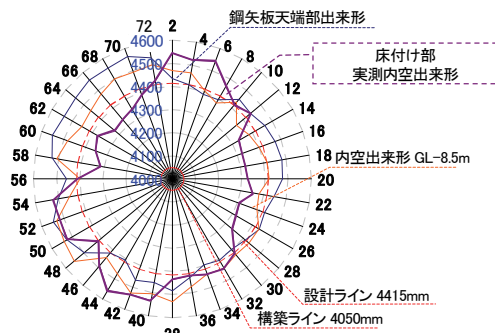


図-11 掘削後の鋼矢板出来形



写真-3 円形打設状況（上空写真）

c. 工費

本工法は、汎用性のある油圧圧入機と鋼矢板による低コストの施工が特徴である。参考に当該工事の立坑を、鋼製ケーシング圧入工法で施工した場合と本工事の施工結果を比較したところ、直接工事費で約 25% のコスト削減となった。これは、鋼矢板円形打設のうち約 2/3 が常設作業帯内で施工できたことと、工程調整の結果、残りの鋼矢板の打設を休日に拡幅作業帯内で連続施工できたことによる施工の合理化も寄与している。

d. 安全性

安全性に関しては、試験施工の結果から、角度補正プレートに以下の工夫を施し（写真-4、5）、セット時の挟まれ等の災害を防止できている。

- i. 角度補正プレートのハンドルを取り外しができる構造とした
- ii. 角度補正プレート下部にマグネットを取り付け、セット位置を保持する構造とした

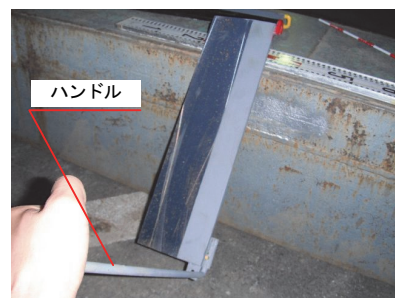
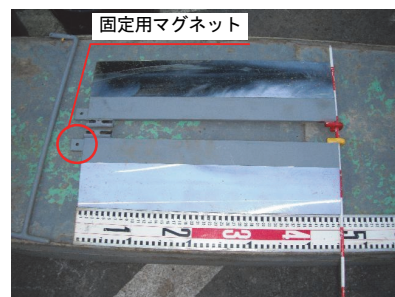


写真-4 角度補正プレートの工夫



写真-5 角度補正プレートのセット

5. 計測結果と設計の妥当性

5.1 リング支保工の応力計測結果

a. リング支保工応力（深度方向）

リング支保工に発生した軸応力の深度方向の分布を図-12、図-13に示す。

ここで設計値とは、現場近傍における既往のボーリングデータ等を参照した物性値を用いて当初の設計時に弾塑性法で計算したものである。これに対し再計算値とは、以下の2点について設計条件を現場での調査結果に整合させたケースである。

- i. 地下水位：近傍の観測井戸による計測から当初設計より3m0低く設定した
- ii. 地盤改良部剛性：底盤改良部の変形係数測定から原地盤と同等に設定した

また、剛性3倍、5倍については、再計算値の条件に加え、鋼矢板の断面係数をそれぞれ3倍、5倍としたケースで計算している。

実測値は、設計値を二段目以降ですべて下回っており、また、支保工の全数で許容応力度が210(N/mm<sup>2</sup>)以下であることから、構造上の安全を確保できている。なお、実測値と設計値では、応力値の大きさ、ならびに分布性状について大きく異なる結果となった。そこで、円形打設の効果を勘案し、土留め剛性を向上させた計算結果に着目すると、実測値に近い分布を示しており、特に剛性5倍のケースが近似できた。

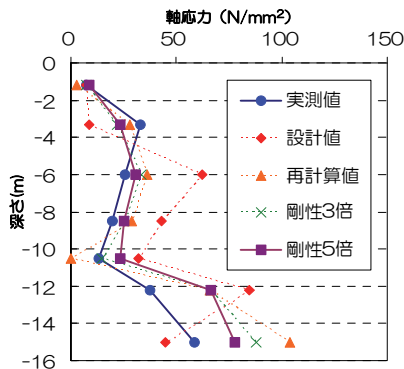


図-12 リング支保工軸応力分布（掘削完了後）

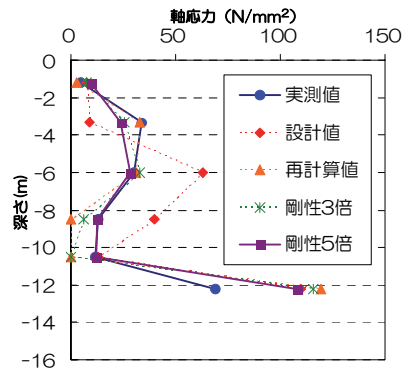


図-13 リング支保工軸応力分布（最下段梁撤去後）

b. リング支保工応力（円周方向）

リング支保工の曲げ応力の実測値については、各測点で同一リング内の円周方向にばらつきが生じた（図-14）。

一方で、各測点における軸応力と、それに対する曲げ応力の関係に着目したのが、図-15である。軸応力に対する曲げ応力の比は最大で80%となっており、傾向として軸応力の増加に伴い曲げ応力の占める割合は低下している。また、支保工設計に支配的となる6、7段リングでは、軸応力に対する曲げ応力の比が40%以下となっていることは、前述のリング支保工の設計における初期たわみの大きさとして1%以下に相当する（図-16）。実際の初期たわみを立坑内に設置した直後に計測すると0.2%程度と小さいが、荷重や形状の不均一性等によって生じる曲げ応力相当を見込んで設計する場合、リング支保工の初期たわみを1%として設計する方法は概ね妥当と思われる。

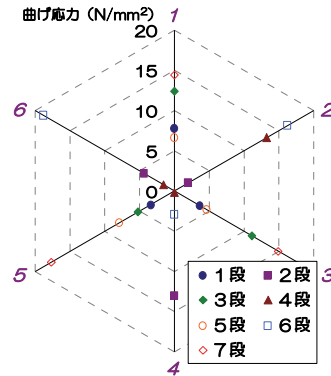


図-14 支保工応力分布（円周方向）

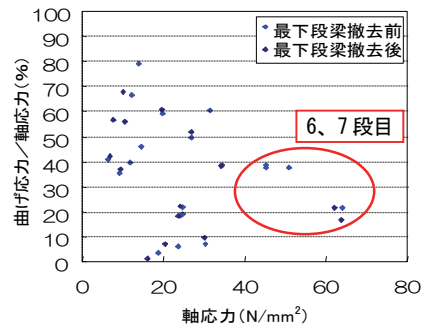


図-15 曲げ応力 / 軸応力比

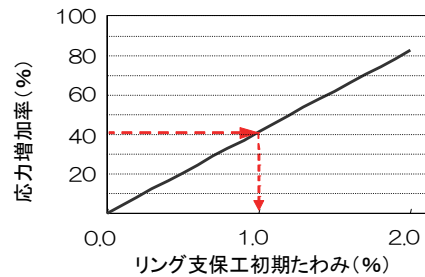


図-16 初期たわみと応力増加率

### 5.2 土留め壁の変位計測結果

土留め変位の設計値および計測結果を図-17に示す。これを見ると支保工応力と同様に、実測値は設計値を大きく下回っていることがわかる。また、5.1 a. i、iiと同様に、土質条件や地下水位を見直し土留めの剛性を上げて再計算した場合、上部の変位分布は近似するものの、GL-12.0m から-21m にかけてのピーク位置における変位の違いは大きい。

一方、土留めの打設がオーガ併用の硬質地盤クリア工法であることから、地盤に先行緩みが生じていることを考慮すると、傾斜計の実測値は土留め下部の変位を的確に捉えていない可能性が高いと判断できる。このため、7段目リング支保工撤去の際、撤去位置 (GL-15.0m) における鋼矢板の内径の変位を直接測定した結果 (表-2) を各解析値と比較した。この結果、土留めの剛性を3倍とした場合の変位とほぼ一致した。

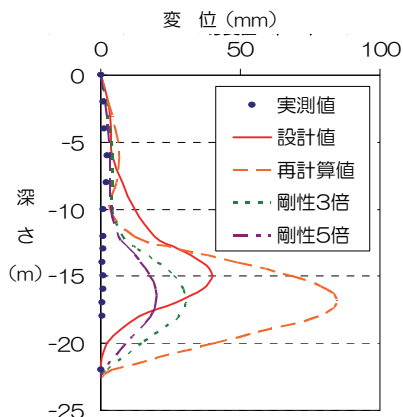


図-17 土留めの変位 (掘削完了後)

表-2 7段目リング撤去時の土留めの変位

7段目支保工	変位量 [mm]
実測値 (直接計測)	8.0
設計値	7.8
再計算値	30.2
再計算値 [剛性3倍]	8.9
再計算値 [剛性5倍]	5.1

### 5.3 計測結果と設計の妥当性に関する考察

リング支保工の応力計測、および土留めの変位計測の結果から、下記のことが明らかになった。

- i. 実測値は解析値を大きく下回ったことから、今回の設計法は充分安全側となっている
- ii. リング支保工については、実際の設置精度とは合致しないが、荷重や形状の不確定性を考慮して、初期たわみを1%として設計することは妥当である
- iii. 支保工応力、土留め変位の実測値と解析値の比較から、土留めについては鋼矢板の円形打設によるリング効果が期待でき、今後の実績を積み重ね、よ

り多くのデータを収集することにより、見かけ上の剛性の増加を予測することができると考える

## 6. あとがき

都心部で小口径円形立坑を合理的に築造する方法について、施工方法および設計方法の確立と実施工への適用を行い、工法が成立することを確認した。

鋼矢板の円形圧入に関しては、角度補正プレートの採用によって所要の施工精度を確保しつつ、工費の縮減・工期短縮が図れることが確認できた。なお、実施工から、

- i. 角度補正プレート挿入時の安全性の向上
- ii. 打設精度のさらなる向上
- iii. リング支保工製作コストの低減 (転用可能な構造)

が課題として挙げられる。今後は実績を積み重ねて課題を克服し、工法の高度化を図る。

次に、計測による設計法の確立に関しては、リング支保工の応力、土留め変位の両側面からアプローチし、円形である構造上の優位性から、実測値は解析値を大きく下回る結果を得ている。具体的な成果としては、リング支保工は、ライナープレートと同様に、半径の1%相当の初期たわみを考慮する方法により安全に設計できること、土留め壁の見かけ上の剛性の増加が期待できることが挙げられる。

以上より、鋼矢板による小口径円形立坑の有用性は極めて高く、推進・シールド工事の立坑への適用拡大による工期・工事費の削減が期待できる。今後は、さらなる施工方法、設計方法の合理化を進めていきたい。

本研究を行うにあたり、発注者である東京電力株式会社をはじめとする関係機関の方々にご指導・ご協力を頂きましたことに、深謝いたします。

### 【参考文献】

- 1) コルゲート・ライナー技術協会、「ライナープレート設計・施工マニュアル」、2000.6
- 2) 福岡正巳、「新四ツ木橋事故調査報告」、土と基礎、No.153、1970.11
- 3) 近接施工技術総覧編集委員会、「近接施工技術総覧」、産業技術サービスセンター
- 4) 木下茂樹、中野愛之、高瀬正司、前原健治、「鋼矢板による小口径円形立坑 (その1)」、第66回土木学会年次学術講演会、2011.9
- 5) 前原健治、高瀬正司、庄司和矢、根来将司、「鋼矢板による小口径円形立坑 (その2)」、第66回土木学会年次学術講演会、2011.9