

## 1-2 コンパクトシールド工法の開発と実証工事

建設部設計調整課 高久 節夫

### 1. 開発目的

コンパクトシールド工法は、東京都における下水道再構築事業を円滑に推進することと、建設コスト縮減・工期の短縮・環境負荷等の低減を図る目的で、開発された。

### 2. 開発と実証

この開発は、東京都下水道サービス（株）を中心に民間5者が開発し、実施に当たって、当局の建設部が実施している特定課題検討会「コンパクトシールド工法に関する検討会」で、さらなる技術的検討を行ない「台東区三筋二丁目、鳥越二丁目付近再構築工事」で実証を行なった。

### 3. 技術的特徴

#### 3.1 覆工構造体

コンパクトシールド工法に用いる4分割3ヒンジ構造の溝付きインバート二次覆工一体型セグメントは覆工構造体として、次のような特徴を有している。

##### ① 二次覆工一体型セグメント

下水道シールドトンネルの覆工は、従来、耐食性を考え、構造部材である一次覆工（セグメント）と防食層である二次覆工（一般に現場打ちコンクリート）とから構成されている。主要枝線は汚水と雨水を収容する合流管であるため、二次覆工を省略することはできない。このため、二次覆工厚さの縮小について検討を行なった。

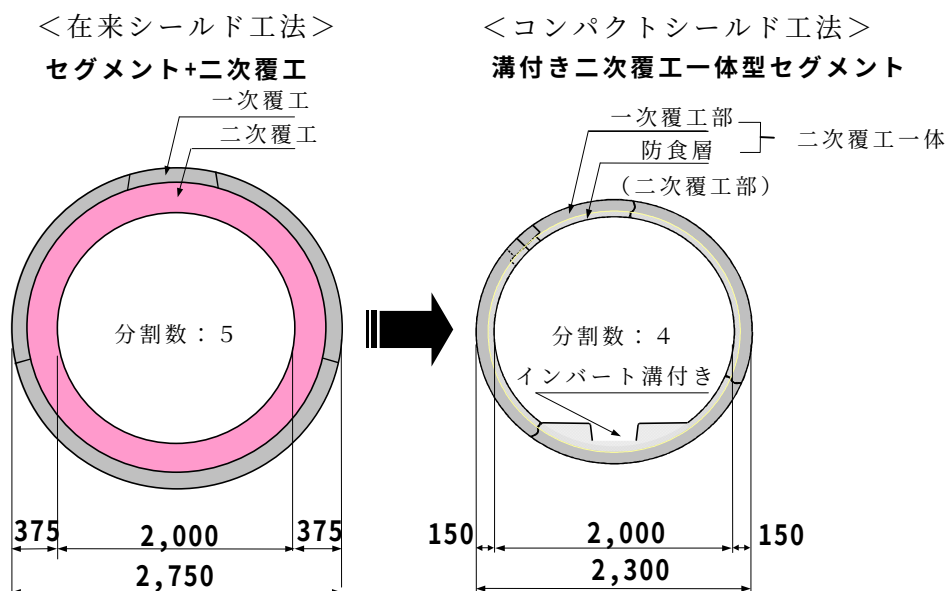


図1 従来シールド工法とコンパクトシールド工法

本工法の対象口径における二次覆工厚は、コンクリートの現場打設の施工性や一次覆工の蛇行修正余裕等を考慮して200～250mmと定められている。そこで、二次覆工をセグメントに一体化させることにより、二次覆工厚を縮小し、掘削断面の縮小を図った。（図1）

これにより、二次覆工工程を省略することができ、工期短縮効果が得られることになった。

## ② 4分割3ヒンジ構造とピン挿入型継手

再構築主要枝線の埋設位置は比較的浅く、対象地盤条件は、軟弱粘性土あるいは緩い砂質土が主体となる。さらに、密集市街地に建設されるため、近接施工による影響が避けられない。

これらのことを考慮して、トンネルの構造的な安定性とコスト縮減の立場から、安定度の高い「3ヒンジ静定構造」を導入した。(図3) この結果、セグメント継手はヒンジ構造の継手となり、力学的には発生断面力が増える(曲げモーメント; 約10%、軸力; 約30%) こととなるが、本工法の対象とする口径では断面力の絶対値が小さく、圧縮応力度で約10%増加する一方、引っ張り応力度は約3%減少し、設計上の影響は少ない。さらに、継手は軸圧縮力のみ伝達する突合せ構造になり、他の応力が作用しないため、継手の止水処理も容易(図2)で、コストの低減効果も期待できる。総合的には、合理性が得られるものと判断した。

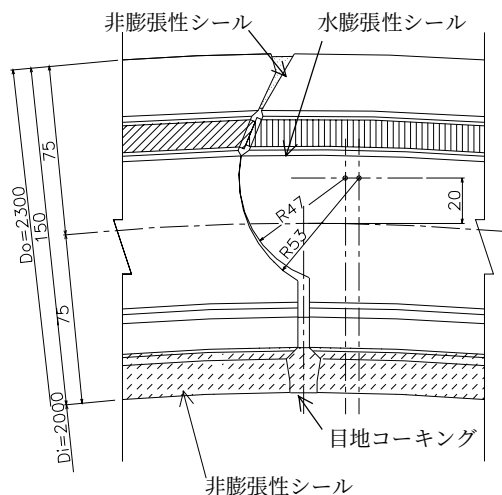
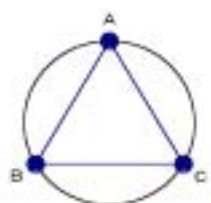
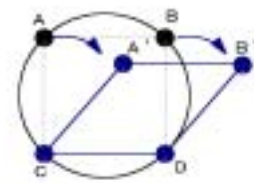


図2 ナックル継手

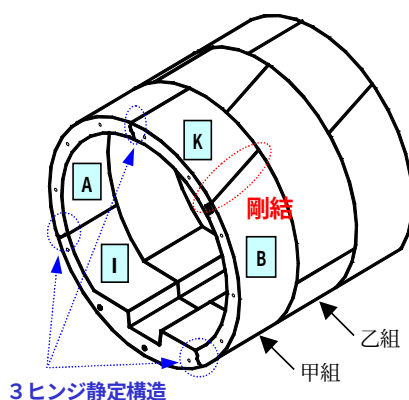
なお、3ヒンジ構造とする場合、セグメントの分割数は3が理想的である。しかし、本工法では二次覆工を一体化するため覆工厚さを極端に薄くすることができず、シールドテール内でリングを閉合組立する施工上の問題に対処するため、4分割とし、剛結部を1カ所設けた。



3ヒンジ (内的静定)



多ヒンジ (内的不安定)



3ヒンジ静定構造



図3 3ヒンジ静定構造 図4 4分割3ヒンジとC型嵌合継 写真1 ピン挿入型継

以上より、セグメントは4分割3ヒンジ構造とし、セグメント間継手はヒンジ3カ所にナックル継手を、1カ所の剛結部は新しく開発したC形嵌合継手構造を採用し、セグメントリングは、いも継ぎを避けて甲組、次は乙組と千鳥組とした。(図4) リング継手については、内面の平滑性が高まるよう、当局と民間が共同開発したピン挿入型(写真1)を採

用した。

### ③ 溝付きインバート構造

本セグメントの溝付きインバートの平坦部は、維持管理時の点検作業足場として活用するとともに、将来の点検・維持管理を効率化させる機能を新設管渠に付加させることは、管渠のライフサイクル全般にわたった耐久性向上を確保することにもなる。

なお、本セグメントは、施工でやむなく蛇行が発生し、修正が必要な場合は、インバートに設けた溝を利用して、安価な材料で、容易に勾配の調整が可能である。(図5)

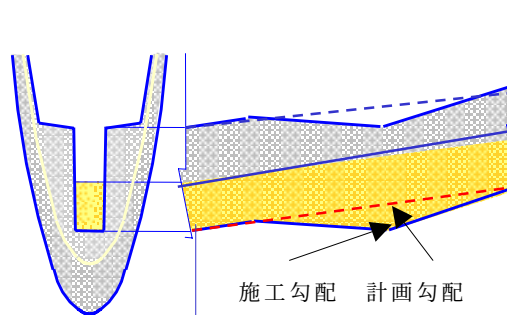


図5 インバート部詳細(縦断面)

### ④ ナックル継手と内圧作用

下水道管渠では異常降雨時に短期的に内圧が作用する状態や、近接施工の影響によって一時的に荷重のバランスが崩れる状態が想定される。4分割3ヒンジ構造のセグメントは外圧に対しては安定した構造であるが、これらの荷重状態におけるリング挙動については不明である。そこで、これらの影響を把握するため、外荷重および内圧を作用させたリング載荷試験を実施した。

供試体は前述した本工事のセグメント(外径2,300mm、厚さ150mm、幅1,000mm)と同じもので、それを2リング千鳥組にした。図6に試験装置の概要を示す。試験装置は、軸力、鉛直荷重および内圧載荷装置から構成されている。内圧はセグメントの内側に設置した反力リングの間に直接注水し、加圧することにより作用させた。

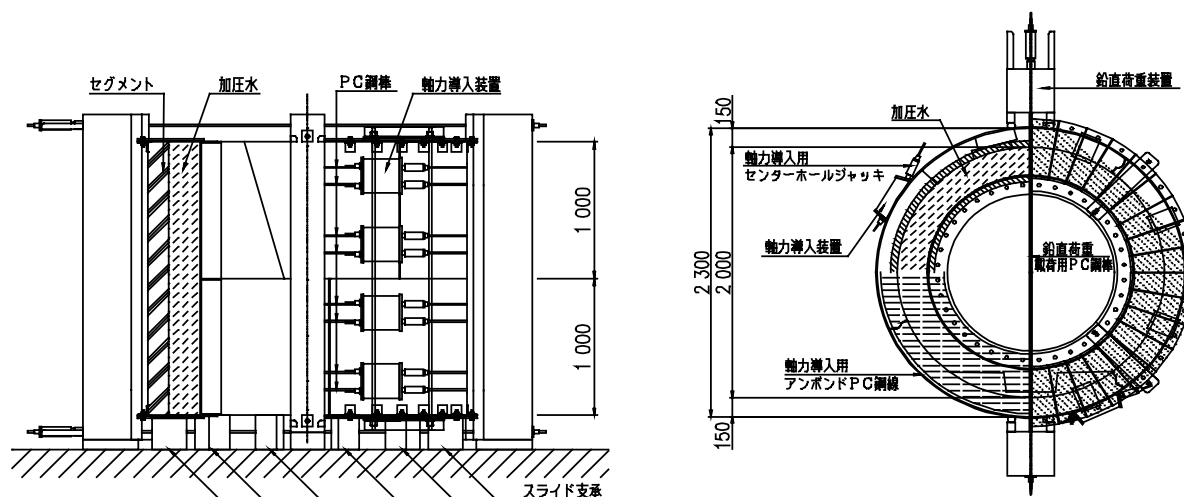


図6 内圧載荷試験概要

載荷ケースは表1に示す7ケースとした。軸力と鉛直荷重を加え、本工事の試設計条件による正および負の最大曲げモーメントを発生させた状態で、内圧レベルを変化させた。内圧レベルは以下の2種類とした。

- ・ ケース①、③：本工事の管頂高の水頭差相当の内圧  
17. 5kN/m<sup>2</sup>

- ・ ケース②、④：土被り相当の内圧（異常降雨により地表面まで冠水した状態を想定）  
66.8kN/m<sup>2</sup>

載荷ケース⑤はケース②の状態から内圧のみを土被りの1.5倍相当まで増加させ、載荷ケース⑥、⑦はケース②の状態から鉛直荷重および内圧を一定に保持し、軸力のみを徐々に除荷している。なお、これら載荷荷重の値は、モーメント分布を再現する鉛直荷重および軸力分布を再現する導入軸力の組合せとして、事前のシミュレーション解析により求めている。

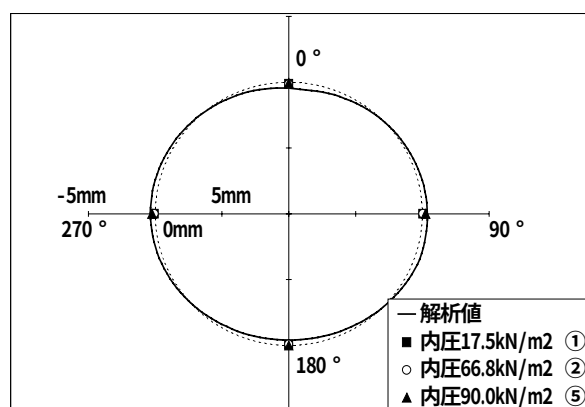
図7に試設計荷重作用時（載荷ケース①～⑤）のリング変位量を示す。計測値は各ケースともに解析値に比べ小さい値（最大0.3mm程度）となっており、変位の分布傾向は解析値とよく一致している。

図8に載荷ケース④における鉛直荷重とナックル継手の回転角の一例を示す。載荷ケース④では249kNの軸力を導入後、鉛直荷重を69.0kNまで載荷し、その状態で内水圧を静水圧から土被り相当荷重まで加圧している。ナックル継手回転角は鉛直荷重に比例して増加し、最終的には載荷ケース④の解析値と同程度の値を示している。図7、8より、内圧作用時においてもナックル継手は正常なヒンジとして挙動することがわかる。

図9に軸力と各継手部の目開き量を示す。試設計荷重が作用する載荷ケース②（軸力が最小、土被り相当）から鉛直荷重を一定として軸力のみを除荷していき、クラウン部の軸力ゼロの状態（載荷ケース⑥）を経て、管頂部AK間のヒンジ部軸力がゼロ（載荷ケース⑦）を下回った後、ナックル継手部から漏水が確認された。また、載荷ケース⑤（軸力が最小、土被りの1.5倍相当の内圧）が作用しても漏水は確認されなかった。これらの結果から、ナックル継手は十分な止水性能を有すると考えられる。

表1 内圧載荷試験：載荷ケース

| CASE | 導入軸力   | 鉛直荷重   | 内圧                   | 内圧による軸引張力 | 備考                   |
|------|--------|--------|----------------------|-----------|----------------------|
|      | (kN/m) | (kN/m) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m)    |                      |
| ①    | 86.5   | 27.75  | 17.5                 | 18.8      | 試設計の正の最大曲げモーメント発生時相当 |
| ②    | 86.5   | 27.75  | 66.8                 | 71.8      |                      |
| ③    | 124.5  | 34.50  | 17.5                 | 18.8      | 試設計の負の最大曲げモーメント発生時相当 |
| ④    | 124.5  | 34.50  | 66.8                 | 71.8      |                      |
| ⑤    | 86.5   | 27.75  | 90.0                 | 96.8      | 土被りの1.5倍相当の内圧        |
| ⑥    | 77.5   | 27.75  | 66.8                 | 71.8      | クラウン部の軸力がゼロ          |
| ⑦    | 63.5   | 27.75  | 66.8                 | 71.8      | AK間ヒンジ部の軸力がゼロ        |



（正曲げ，下段）

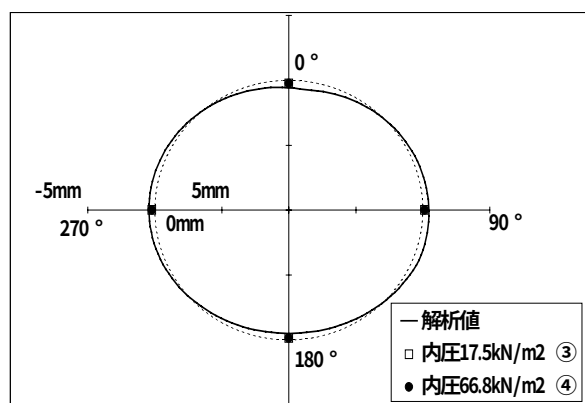


図7 リング変位量（負曲げ，下段）

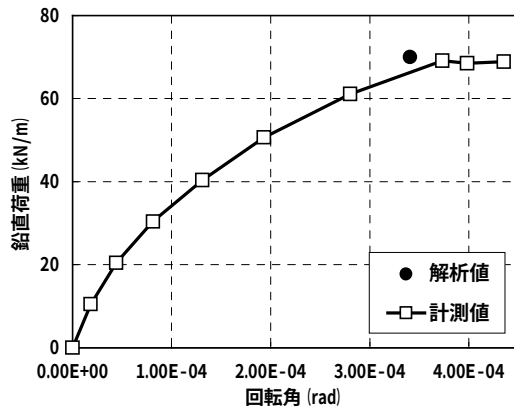


図 8 ナックル継手回転角（A K 間，下段）

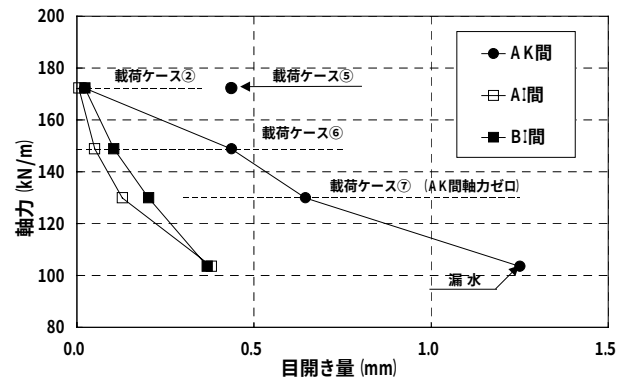


図 9 各ナックル継手目開き

外荷重および内圧を作用させたリング載荷試験により、以下のことが確認された。

- ・ 通常想定されないような厳しい荷重状態(土被り相当の内圧が作用する管路において土被りの約 6 割が近接施工により掘削された状態に相当)においても 3 ヒンジ構造としての挙動を示す。
- ・ 土被りの 1.5 倍相当の内圧が作用した状態（試設計の土被りは 6 m であるから、地表から 3 m 水位が上昇した状態）や管頂部の軸力がゼロになった場合においても、ナックル継手の止水性は確保される。

### 3.2 後方設備内包型 3 分割シールド機

従来のシールド機は、後方に駆動装置等の後方設備を有するため、分割数が少なく、かつ、二次覆工分 50mm 厚くなるセグメントを搬送できない。コンパクトシールド工法は、後方設備を 3 分割のユニットに内包して、このセグメントが搬送可能となっている。

また、3 分割の全体延長は長くなるが、各ユニットは容易に接合・分離できる構造であり、各ユニット長は短い。

このため、発進・到達用の立坑長が短くなると共に、機械の回収が容易となり、複数回の転用使用ができる構造となっている。（図 10）

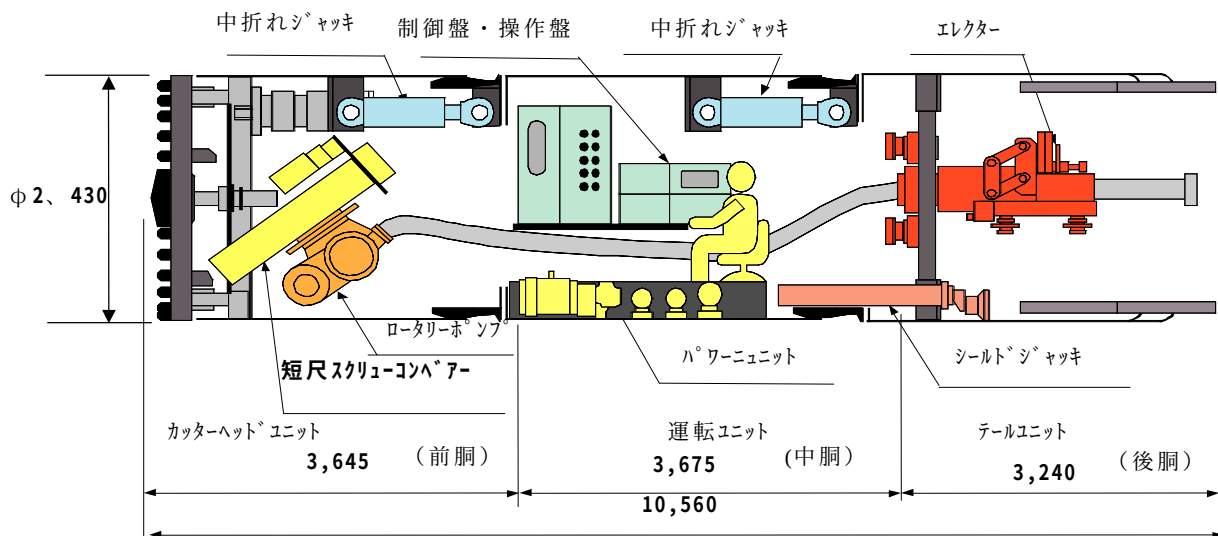


図 10 後方設備内包型 3 分割シールド



### 3.3 ガイドローラー付きタイヤ式搬送設備

溝付きインバート二次覆工一体型セグメントの底部には、溝を挟んで平坦な部分が形成される。

このインバート溝をガイドとして活用できる無操舵のタイヤ式搬送設備を使用する。この方法は、従来行なわれてきたレール及び枕木の敷設撤去が無くなるとともに坑内施工環境が向上し、かつ、コスト縮減にもなっている。(写真2)



写真2 ガイドローラー付き搬送設備

## 4. 実証工事

### 4.1 工事概要

本工法の技術的特徴及び経済性を「台東区三筋二丁目、鳥越二丁目付近再構築工事」で実証した。本工事は同地域の浸水軽減および老朽化対策を目的として、面整備に必要な再構築主要枝線を先行築造した。仕上り内径φ2,000mm、路線延長1,280mである。(図1.1)土被りは約5～6m、縦断勾配0.15～1.4%で、平面線形は急曲線(R=30m)を2箇所含む。また、シールド通過位置の地層は、上部有楽町層の砂質系シルト層(N=5～10)が主であった。

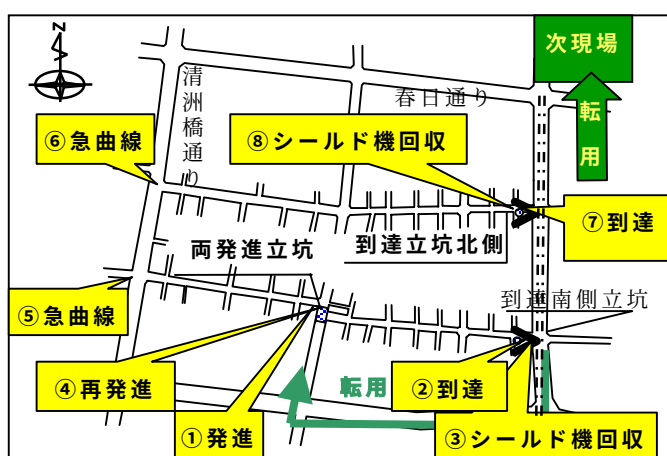


図1.1 路線平面図と施工順序

### 4.2 施工実績

シールドは平成14年1月に発進し、同年5月に南線を終了した。南線到達立坑でシールド機を引き上げ、発進立坑に再投入し、引き続き北線の急曲線(R=30m)2箇所(写真3)を含む約1,000mを掘進して、15年2月に終了した。掘削終了後、次の転用先の現場「江東区大島四・五丁目付近再構築工事」で使用するため、当局の指定する所で3月末までに修繕を完了した。

この工事から、以下のメリットを確認している。

- ・ 発進立坑の大きさは、従来の標準泥土圧シールド工法と比較して約3割縮小できた。
- ・ 狭隘な立坑内にもかかわらず、仮発進に伴う諸設備の投入や段取替えなどは容易で、かつ、安全に実施できた。
- ・ 初期掘進及び掘進中は後方台車や軌条が無いので、立坑内が整然としており、作業環境と安全性が向上した。また、推進反力の計測を実施し、当該現場における初期掘進長は搬送台車がすべて坑内に入る距離(30m)を確保すれば十分であることが確認できた。



写真3 急曲線(R=30)施工状況

- ・到達立坑でのシールド機の回収は、内径 5,200 mmの小さな立坑から搬出でき、3分割構造のメリットが実証できた。
- ・本掘進の実績は昼夜連続施工で平均 8 リングであり、その施工精度は基準値（基準高：±50mm、水平線変位：左右 150mm）以内に収まる良好な結果が得られた。

## 5. まとめ

コンパクトシールド工法は覆工構造体、シールド機械、坑内搬送設備等に大きな特徴がある。

だが、この工法の使用により、セグメンリング間の目地コーキング、内面平滑性を高めるため、継手ボックス及び裏込め注入孔のモルタル充填法等に新たな技術開発の必要性が生じた。

今後、これらの技術開発が本工法の成熟と低コスト化に不可欠な要因になると思われる。