

# プレストレスを導入した シールドトンネル用セグメントの開発と施工

## —P&PCセグメント—

杉本雅人・田中正樹・安田正樹

近年、鉄道や共同溝、洞道のみならず下水道の分野でも建設費削減の見地から、二次覆工を省略するシールド工事も検討されるようになってきた。本報文は、まず、今回開発した二次覆工省略に対応しやすいプレストレスを導入したセグメント（P & PC セグメント）の概要と特長について述べ、次に、実施工を行った2例の工事概要と施工結果について述べるものである。

キーワード：シールドトンネル、プレストレス、二次覆工省略、X アンカー

### 1. はじめに

シールド工法は、様々な分野のトンネル構築方法として用いられ、都市部のような軟弱地盤では代表的な工法である。近年、建設費削減の見地から、二次覆工を省略するシールド工事も検討されている。従来、鉄道、洞道、共同溝のように流下物がなく、すり減りや腐食に対する懸念が少ないものについては二次覆工が省略されたシールド工事も多くあるが、下水道のように常に流下物を伴い、すり減り防止、防食、勾配補正などのために二次覆工が必要とされていたものでも、施工技術の進歩や新しいセグメントの開発などによって、二次覆工を省略することが可能となり、施工例も増加してきた。これらは、下水道の中でも雨水幹線のように流下物が水と土に限られるもので採用されているようであり、汚水が流れ、硫化物イオンが発生しやすい汚水幹線ではまだ採用が見送られていることも多い。

本報文は、プレストレスを導入したセグメント（P & PC セグメント）の概要、特長および二次覆工を省略したものを含む2例の施工結果について報告するものである。

### 2. P & PC セグメントの概要

#### (1) 工法の概要

P & PC セグメントは、工場で製作されたコン

クリート製セグメントを従来のシールド工法同様、シールド機後方で1リング組立て、あらかじめセグメント内に埋込んであるシース中にPC鋼材を挿入し、緊張・定着することで一つのリングを形成する新しいタイプのシールドトンネル用セグメントである。

本セグメントの特徴として、以下のことが挙げられる。

- ① 緊張時にPC鋼材とシースとの間に作用する摩擦力を軽減するために、摩擦ロスの小さいアンボンドPC鋼より線を採用している。このことにより、セグメントリング1周当たり1箇所緊張・定着でも十分なプレストレスを導入することが可能となった。
- ② 緊張側と固定側が一体となった鑄鉄製一体型定着体（X アンカー）を採用している。この定着体をセグメント製作時にあらかじめコンクリート中に埋込んでおいて使用することで、従来のアンカープレート等を使用した場合に発生する支圧応力がほとんどなくなるため、定着部の補強鉄筋が不要となり、さらに緊張の作業性も向上する。
- ③ セグメントは、シールドジャッキによりすでに組上がった後方のセグメントに押付けながら組立てる。継手部にボルト等を使用しないが、緊張・定着後は、単独1リングで安定した構造となる。

写真-1にXアンカー、鉄筋およびポリエチレンシースの配置状況を示す。

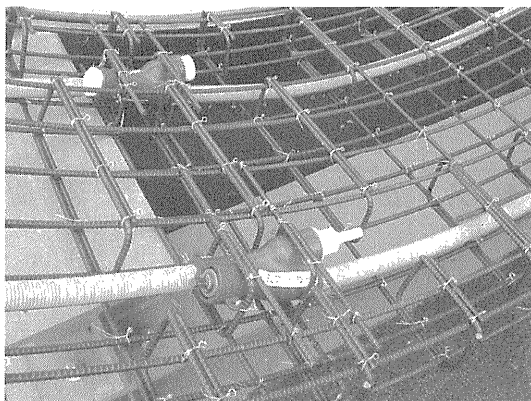


写真-1 Xアンカー、鉄筋およびポリエチレンシースの配置

## (2) 工法の特長

P & PC セグメントは、シールドトンネルを構築する部材として、以下に示す特長を有している。

- ① セグメントリングをPC構造とすることにより、ひび割れのない、真円性、止水性、耐久性に優れたセグメントとなる。継手部にボルト等の金物を省略すること、鉄筋の簡素化が図れること、および二次覆工の省略や部材厚の低減によるシールドトンネル外径の縮小により、全体的な建設費の縮減が可能となる。
- ② セグメント間やリング間の継手ボルト類の締結が不要となり、施工性が向上する。
- ③ 金物類を表面に露出させず、止水性が高く、内面も平滑であることから二次覆工の省略に高い適応性がある。
- ④ 高い内水圧が作用するトンネルでも、内水圧に見合ったプレストレスを導入することで、コンクリート断面を全圧縮に保つことも可能であるため、構造的な安定性と止水性が確保される。

図-1にP&PCセグメントの概要を示す。

## (3) 設計手法

P & PC セグメントの設計は、荷重および断面力の算定を従来の鉄筋コンクリート製セグメントに準じて許容応力度法を用いて行う<sup>1)</sup>。

このセグメントの最大の特徴であるプレストレスは、土木学会「コンクリート標準示方書-設計

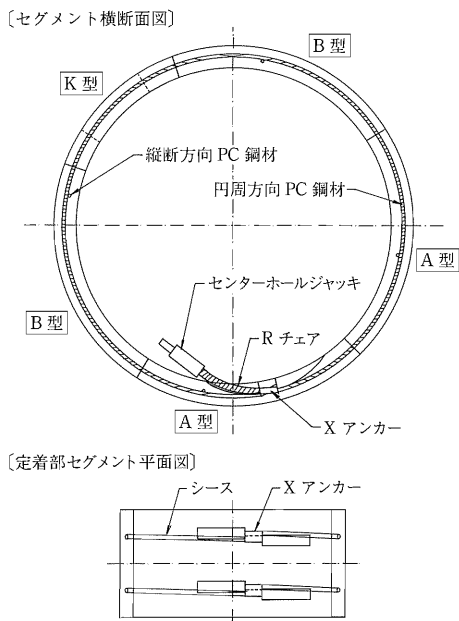


図-1 P & PC セグメントの概要

編-」に準拠して計算する<sup>2)</sup>。設計導入プレストレスは、以下に示す損失等を考慮して算定する。

- ① 曲率を持たせて配置した場合(円形等)の素線外側に発生する曲げ応力を差引く
- ② PC鋼より線とポリエチレンシースの摩擦ロス
- ③ くさび定着のセットロス
- ④ コンクリートのクリープ、乾燥収縮
- ⑤ PC鋼より線のリラクゼーション

セグメント主断面の設計は、設計プレストレスをセグメント部材に作用する軸圧縮力とし、荷重によって生じる軸力と足し合わせて設計軸力とする。この設計軸力と荷重によって生じる曲げモーメントを用いて複鉄筋長方形断面として、コンクリート、鉄筋に生じる応力度を計算し照査する。

セグメント継手の設計は、継手面が突き合わせとプレストレスによる締結であるため、主断面と同様にプレストレスを軸力として、荷重による軸力、曲げモーメントと合わせて、そのつり合い条件から継手面に作用する最大圧縮応力度を計算し照査する<sup>3)</sup>。

### 3. 施工機器

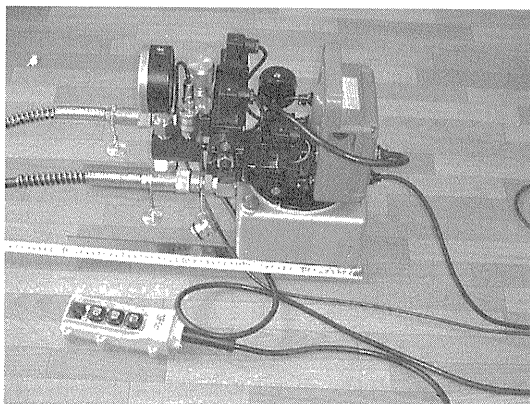
P & PC セグメントを施工する際に使用した機器を以下に示す。

#### (1) 電動油圧ポンプ

油圧ポンプは、小型の電動式油圧ポンプを製作し、緊張位置の間近で作業できるように設置した。また、操作も簡素化を図り、押しボタン式のペンダントスイッチを使用し、リミッタを装備して過緊張を防止した。写真—2 に電動油圧ポンプを示す。

#### (2) 緊張ジャッキ

緊張ジャッキは、所定の緊張力が導入可能かつ軽量なものが必要となる。今回は、市販の 200 kN、ストローク 100 mm のセンターホールジャッキを



写真—2 電動油圧ポンプ

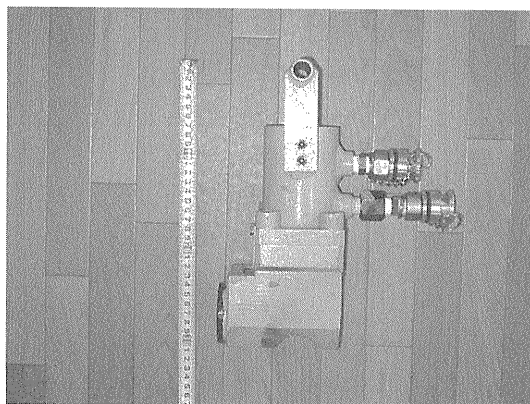


写真—3 緊張ジャッキ

使用した。ストロークが小さいため 2 度引きが必要であったが、1 本当たり 10 秒程度のロスしかなかった。写真—3 に緊張ジャッキを示す。

#### (3) PC 鋼より線切断機

PC 鋼より線を切断するために、専用の小型切断機を製作し、使用した。また、操作の簡素化を図り、油圧ポンプは緊張ジャッキとの切替えバルブを設け、兼用で使用した。写真—4 に PC 鋼より線切断機を示す。



写真—4 PC 鋼より線切断機

### 4. 施工例 (1)

#### (1) 工事概要

- ・工事名称：寝屋川流域下水道八尾枚岡幹線（第 4 工区）下水道管渠築造工事
- ・発注者：大阪府東部流域下水道事務所
- ・施工者：住友建設株式会社
- ・シールド機外径： $\phi 3,690$  mm
- ・トンネル内径： $\phi 2,800$  mm
- ・トンネル延長：1,183 m
- ・掘削工法：泥土圧式シールド工法
- ・土被り：10~11 m
- ・管底勾配：0.9%
- ・P & PC セグメント施工区間：204 m

#### (2) セグメントの仕様

- ・セグメント外径：3,550 mm

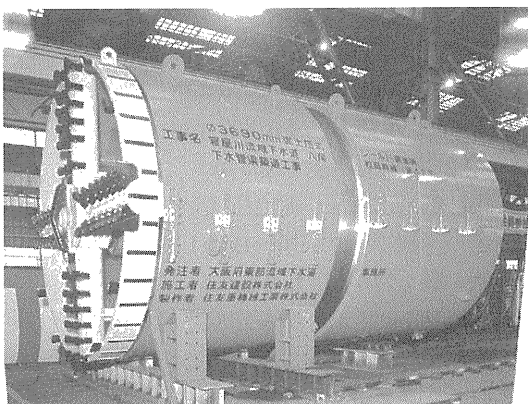
- セグメント内径：3,250 mm
- セグメント桁高：150 mm
- セグメント幅：1,000 mm
- 分割数：5分割
- P C 鋼材：アンボンド PC 鋼より線  
1 T 12.7 mm  
円周方向 2 本，縦断方向 4 本
- 鉄筋：SD 345  
主鉄筋，D 10×10 本 2 段
- コンクリート：設計基準強度，50 N/mm<sup>2</sup>

### (3) シールド機

- 本体：泥土圧式シールド
- 機長：5,900 mm
- 総推進力：12 MN
- 推進速度：50 mm/min
- カッタ装置：センターシャフト式  
最大トルク 1,015 kN・m
- エレクタ装置：回転速度 1.5 rpm
- スクリューコンベヤ：軸付きスクリュー式  
排土能力 47 m<sup>3</sup>/hr

P&PC セグメントは，組立て用ボルト等を一切使用しないため，セグメントピースはシールドジャッキで固定しながら組立てる方法をとる。したがって，安全装置として天端部セグメントの落下防止対策として以下の押上げ装置を装備した。

- 押上げ装置：27 kN，100 mmst
  - スライド装置：27 kN，550 mmst
- シールド機の外観を写真—5 に示す。



写真—5 シールド機外観 (1)

表—1 内空寸法計測結果

セグメント種別	内空寸法誤差の平均値 (mm)	
	鉛直方向	水平方向
P & PC セグメント	-3.0	0.0
鋼製セグメント	-6.0	10.0
RC セグメント	-4.0	6.0

### (4) 施工結果

#### (a) 真円度

P & PC セグメントは，円周方向にプレストレスを導入することにより真円度が向上する。そのことにより，施工精度が向上し，シール材もその機能を十分に発揮できるため，止水性も向上する。

内空寸法の計測結果を表—1 に示す。

内空寸法の計測結果より，P&PC セグメントはボルト締結式の鋼製セグメントや RC セグメントに比べて真円性が向上することが確認された。

#### (b) 施工性

セグメントの組立てサイクルは，セグメント組立て，PC 鋼より線挿入，緊張定着，切断となるが，合計約 40 分程度であった。そのうち鋼線挿入は約 30 秒/本，緊張・定着は 2 分/本程度で行うことができた。

P & PC セグメントの施工では，前記したとおり緊張作業が伴い，通常の鉄筋コンクリート製セグメントに比べて組立て工程が増加することになるが，最大日進量は，16 m を達成し，従来の標準セグメントと同等の施工サイクルを確立することができた。これは，ボルトの締結作業と緊張作業が同等のサイクルであったと考えられ，シールド径が大きくなれば，標準セグメントはボルトの本



写真—6 施工完了区間 (1)

数が増加するが、P & PC セグメントの緊張作業はそれほど変化がないため、口径が大きくなると施工性の点で有利になると考える。

写真—6 に施工完了区間全景を示す。

### 5. 施工例 (2)

#### (1) 工事概要

- ・工事名称：北部処理区下野谷幹線下水道整備工事
- ・発注者：横浜市下水道局
- ・施工者：日本国土・日本鋼管工事・松尾建設共同企業体
- ・シールド機外径： $\phi$  2,880 mm
- ・トンネル内径： $\phi$  2,350 mm (二次覆工省略)  
 $\phi$  2,000 mm (二次覆工あり)
- ・トンネル延長：420 m
- ・掘削工法：泥水加圧式シールド工法
- ・土被り：15~16 m
- ・管底勾配：1.0‰, 1.1‰
- ・P & PC セグメント施工区間：247 m

#### (2) セグメントの仕様

- ・セグメント外径：2,750 mm
- ・セグメント内径：2,350 mm
- ・セグメント桁高：200 mm
- ・セグメント幅：1,000 mm
- ・分割数：5分割
- ・P C 鋼材：アンボンド PC 鋼より線  
1 T 12.7 mm  
円周方向 2 本, 縦断方向 4 本
- ・鉄筋：SD 345  
主鉄筋 D 10×8 本 2 段
- ・コンクリート：設計基準強度 50 N/mm<sup>2</sup>

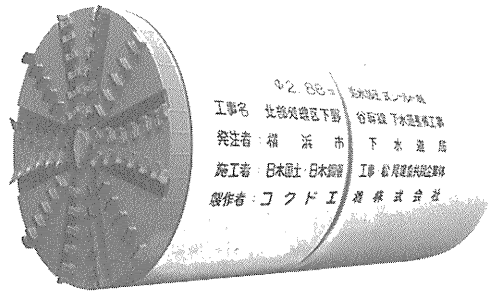
#### (3) シールド機

- ・本体：泥水加圧式シールド
- ・機長：5,405 mm
- ・総推進力：8 MN
- ・推進速度：61 mm/min

- ・カット装置：中間ビーム支持  
最大トルク 730 kN・m
- ・エレクトラ装置：回転速度 1.5 rpm
- ・アジテータ：羽根径  $\phi$  700 mm  
回転数 66.4 rpm  
トルク 2,000 Nm

施工例 (1) と同様に落下防止の安全対策として押上げ装置を装備した。

- ・押上げ装置：10 kN, 100 mmst
  - ・スライド装置：28 kN, 550 mmst
- シールド機の外観を写真—7 に示す。



写真—7 シールド機外観 (2)

#### (4) 施工結果

##### (a) 真円度

内空寸法の計測結果を表—2 に示す。

表—2 内空寸法計測結果

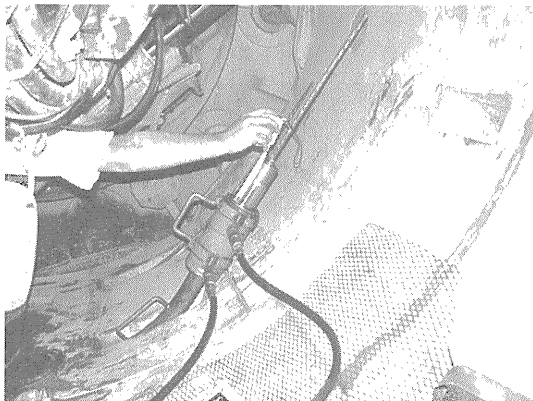
セグメント種別	内空寸法誤差の平均値 (mm)	
	鉛直方向	水平方向
P & PC セグメント	1.9	0.2
鋼製セグメント	-3.5	-6.5

内空寸法の計測結果より、施工例 (1) と同様に P & PC セグメントの真円性が向上することが確認された。また、本施工は、二次覆工省略部の施工であることから、止水性も重要な要素となるが、目視による確認では継手間からの漏水はなかった。

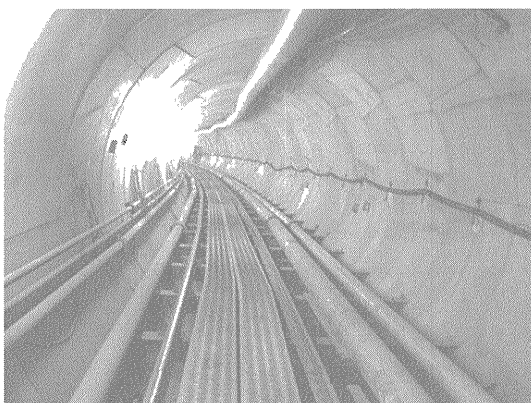
##### (b) 施工性

セグメントの組立てサイクルは、合計約 35~40 分程度であった。緊張作業は施工例 (1) に示したとおりであった。

本施工では、内径 2,350 mm 程度の小口径でも最大日進量 14 m を達成することができた。



写真—8 緊張状況



写真—9 施工完了区間 (2)

写真—8 に緊張状況を、写真—9 に施工完了区間全景を示す。

## 6. おわりに

P & PC セグメントの施工実績も3件となり、そのうち二次覆工を省略したものが1件である。前記した2例の施工を終え、P&PCセグメントの良好な施工性、真円性を再確認することができた。また、二次覆工を省略することに対しても、

セグメント内部の切欠き部が少なく、止水性もよいことから、高い適応性を示すことができたものと考えている。今後は、プレストレスの有効性を生かしたうえで、構造や施工方法のさらなる合理化を図っていく所存である。

なお、本技術は、住友建設(株)、東亜建設工業(株)、日本国土開発(株)、住建コンクリート工業(株)が共同で開発したものである。

最後に、本工法の開発、施工に当たり、御指導、御協力頂いた関係各位に深く感謝の意を表す次第である。

### 《参考文献》

- 1) (社) 土木学会トンネル標準示方書, p.39 (1996)
- 2) (社) 土木学会コンクリート標準示方書, pp.129-132 (1996)
- 3) 西川・山口・安田・杉本・近藤: PCセグメントの設計手法と基本性能について, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集, 第7巻報告(45), pp.285-290 (1997)

### 【筆者紹介】

杉本 雅人(すぎもと まさと)  
日本国土開発株式会社  
施工本部  
土木部  
技術設計 G



田中 正樹(たなか まさき)  
住友建設株式会社  
土木本部  
機械部  
部長



安田 正樹(やすだ まさき)  
東亜建設工業株式会社  
土木本部  
設計部  
第三課

