

# 充填式シールド急曲線工法の開発

## Development of the Construction Method by Grouting a Filling Material into Overbreak of Sharp Curves in the Shield Tunnel

小林 正典*	伊藤 謙一郎***
Masanori Kobayashi	Kenichiro Ito
町田 能章**	大川 隆司***
Yoshiyuki Machida	Ryuji Okawa
大江 郁夫****	磯 頼光*****
Ikuo Oe	Yorimitsu Iso

### 要 約

シールドトンネルの急曲線施工では、余掘りによる地山の緩み防止と、シールド推進に対する地盤反力の確保のために、地上からもしくは機内から地盤を改良する必要がある。しかし、地上からの作業では周辺環境に与える影響が大きく、機内注入では工期、工費が増大するという問題がある。このような問題を解決するために、余掘り部およびテールボイド部にシールド機内とセグメントの裏込め注入孔から硬化しない充填材を掘進と同時に注入し、地山の緩みを防止する「充填式シールド急曲線工法」を財団法人下水道新技術推進機構と共同で開発した。本報では、工法の概要および実工事への適用結果について述べる。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工法概要
- § 3. 実工事への適用
- § 4. おわりに

### § 1. はじめに

シールドトンネルにおいて地山の自立性が乏しい急曲線部を施工する場合、余掘り部の緩み防止のため、一般的には薬液注入などの補助工法が採用されている。しかし、近年はプラント用ヤードの確保が難しく、また施工にあたっては作業帯が交通障害となるとともに、夜間作業では騒音などが懸念されることから、路上作業となる補助工法に対して周辺住民の理解を得ることが困難となっている。一方、シールド機内から薬液注入を行う場合には、注入時に掘進を停止する必要があるなど施工効率

が悪く、工期の延長、工費の増額という問題が発生する。

これらの問題を解決する施工法として、急曲線区間の余掘り部とテールボイド部に充填材を注入することによって地山の緩みを防止し、袋付きセグメントで推進反力を確保する「充填式シールド急曲線工法」を開発し、平成11年度までに3件の実施工を行った。本工法はシールド機内およびトンネル坑内からの作業で、掘進と同時に施工を行うため、路上作業を省略することができ、また工期に与える影響も少ない。なお、本工法は財団法人下水道新技術推進機構と共同研究で（平成10、11年度）開発したものである。

本報告では、工法の概要と施工事例について述べる。

### § 2. 工法の概要

本工法は機内からの作業であるため、地上からの地盤改良の施工が困難な状況において特に有効である。ただし、袋付きセグメントによって推進反力を地山に伝達することから、シールド推力に対する地盤反力は確保できるものの、余掘り部の地山の自立性に乏しいような土質において適用可能な工法である。

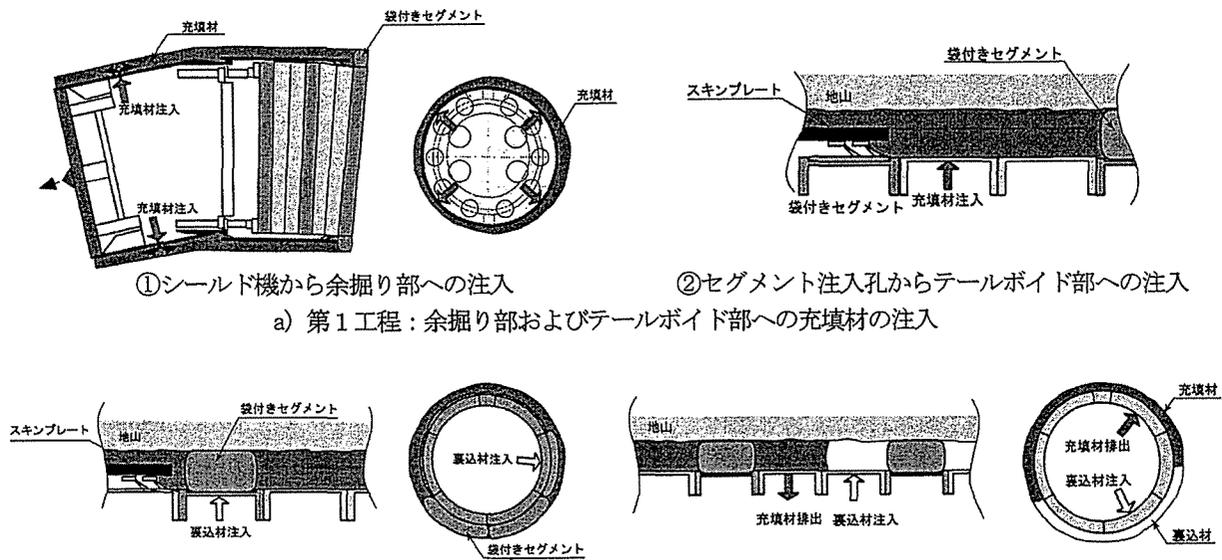
\* 技術研究所技術研究部土木技術研究課

\*\* 東北（支）花巻（出）

\*\*\* 技術（支）愛宕（出）

\*\*\*\* 土木設計部土木設計課

\*\*\*\*\* 機械部機械課



①シールド機から余掘り部への注入 ②セグメント注入孔からテールボイド部への注入

a) 第1工程：余掘り部およびテールボイド部への充填材の注入

b) 第2工程：袋付きセグメントへの裏込め材の注入 c) 第3工程：袋付きセグメント間の充填材を裏込め材に置換

図-1 充填式シールド急曲線工法の施工概要

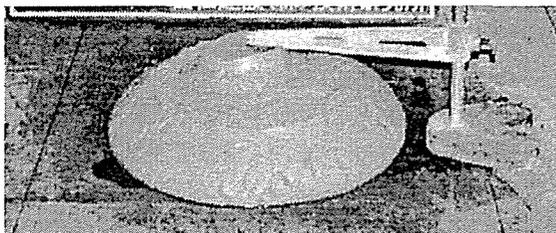


写真-1 充填材

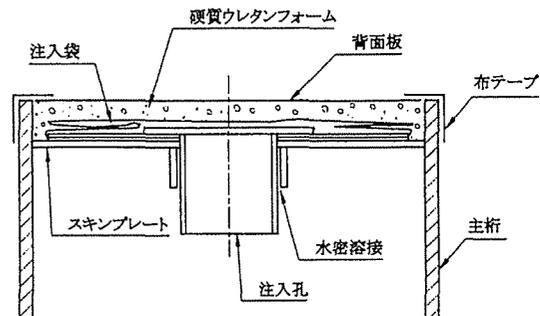


図-2 袋付きセグメントの概要

## 2-1 施工手順

本工法の施工手順は以下のとおりである。

- (1) 余掘り部およびテールボイド部への充填材の注入  
急曲線区間の余掘り部への充填材の注入は、掘進と同時にシールド機内から行い、テールボイド部への充填材の注入は、セグメント注入孔から行う。
- (2) 袋付きセグメントへの裏込め材の注入  
推進反力を地山へ伝達させるために、袋付きセグメントを使用する。注入袋へは凝固時間の短い裏込め材を袋付きセグメントがテールを抜けた時点で注入する。
- (3) 袋付きセグメント間の充填材を裏込め材に置換  
充填材は硬化しないため、長期的な地山の安定を図るために袋付きセグメント間にある充填材を裏込め材と置換する。

## 2-2 本工法の特徴

本工法は、以下に示すような特徴がある。

- ① 路上作業がないため、周辺環境への影響が少ない。
- ② 充填材の注入は掘進と同時注入のため、掘進工程に影響がない。
- ③ 袋付きセグメントにより地山と密着し、早期に安定するため、ジャッキ推力によるセグメントの軸方向の変位が小さくなる。

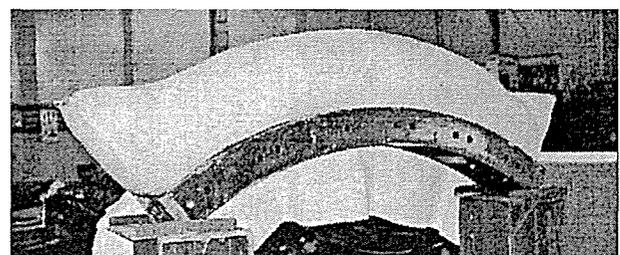


写真-2 袋付きセグメント（裏込め材注入後）

## 2-3 充填材

本工法における充填材の機能は以下のとおりである。

- ① 急曲線区間の余掘り部の地山の緩みを防止すること。
  - ② 砂礫層では、礫の肌落ち（落下）を防止すること。
  - ③ シールド機の推進に支障とならないこと。
  - ④ 裏込め材の注入に伴い、トンネル坑内に排出しやすく置換性がよいこと。
- これらの機能を満足するために必要な充填材の特性は、以下のとおりである。
- ① シールド機の推進に影響を与えないよう、硬化しないこと。

表-1 急曲線補助工法の工事費比較例<sup>1)</sup>

項目	薬液注工	機内注工	充填式シールド急曲線工法	備考
注工	50	58	21	
注工関連工	50	0	0	路面覆工, 道路復旧等
マシン改造	0	10	2	注入孔装備
セグメント仕様変更	0	13	45	袋付きセグメント
工程延伸に伴う経費	0	36	0	
工事費計	100	117	68	

注：数値は薬液注工工事費計に対する比率を示す。

- ② 余掘り部とテールボイドに空隙を生じないように、また、裏込め材との置換にあたり坑内への排出が容易なように流動性を有すること。
- ③ 地下水等で希釈されないこと。
- ④ 適当な比重を有すること（比重が高ければ山留め効果が上がるが、ポンプ負荷は逆に増大する。また、置換にあたっては裏込め材より低比重が望ましい）。
- ⑤ 礫の肌落ちを防止するよう、充填材は適当なせん断強さを有すること。

2-4 袋付きセグメント

(1) 概要

袋付きセグメント（図-2、写真-2参照）は、セグメント背面に注入袋を装着したもので、シールド機テールを離脱後、注入袋に凝固時間の短い裏込め材を充填することにより、以下の項目を可能とする。

- ① セグメントを素早く地山に固定させ、ジャッキ推力の反力を得ることができる。
- ② 地山の肌落ちおよび緩みによる地盤沈下を防止するために余掘り部を速やかに裏込め材で充填する必要があるが、大きな余掘り部に対しても裏込め材が切羽に回り込む恐れがない。

(2) 袋付きセグメントの設置間隔

袋付きセグメントの最大設置間隔は、地盤変状の影響、裏込め材の置換性から決める。

2-5 本工法の経済性

本工法の経済性は、立地条件や曲線数、曲線長、施工位置などによって変わるため一概には言えないが、参考として、港区虎ノ門三丁目、愛宕二丁目付近再構築工事（§3.参照）での算定結果例を表-1に示す。急曲線区間の全てにおいて地上から薬液注入を実施した場合に比べて約3割のコスト縮減となった。

§3. 実工事への適用

本工法の施工実績は泥土圧シールドで2件、泥水式シールドで1件あるが、本報告では最初の施工となった「港区虎ノ門三丁目、愛宕二丁目付近再構築工事」での施工実績について述べる。

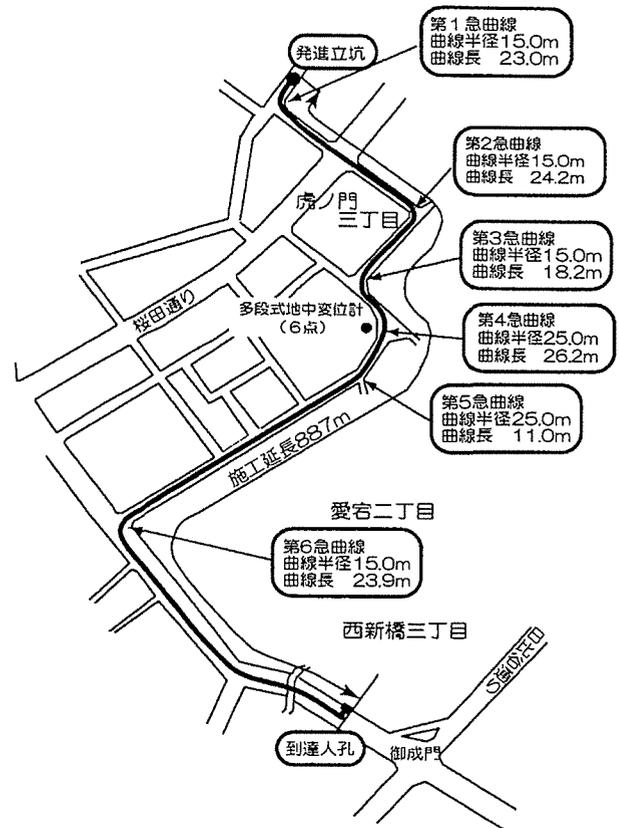


図-3 平面図

3-1 工事概要

工事名：港区虎ノ門三丁目、愛宕二丁目付近再構築工事  
 発注者：東京都下水道局

シールド形式：泥土圧シールド

シールド外径：φ3,690mm

セグメント外径：φ3,550mm

覆工厚：125mm

仕上り内径：φ2,800mm

トンネル延長：887mm

土被り：15~19m

地下水位：GL-6m

土質条件：粘性土、礫

充填式シールド急曲線工法施工区間：

第1急曲線：曲線半径15m、曲線長23.0m

第2急曲線：曲線半径15m、曲線長24.2m

第3急曲線：曲線半径15m、曲線長18.2m

第4急曲線：曲線半径25m、曲線長26.2m

表一 2 充填材特性試験結果

試験項目			試験結果		
1.流動性 (自立性)	A.テーブル試験	フロー値	直後	13.5 cm×13.5 cm	
	B.スランプ試験	スランプ値	直後	18 cm	
	C.ミニスランプ試験	スランプ値	直後	6 cm	
	D.フォールン貫入試験	貫入値	直後	12.9 mm	
			3日後	13.6 mm	
	E.球体沈降試験	沈降値	30分後	2.8 cm	
			1日後	2.9 cm	
2日後			3.0 cm		
3日後			3.0 cm		
F.ポケットベーン試験	せん断強さ	直後	0.32 kN/m <sup>2</sup>		
2.付着性	G.付着抵抗測定試験	混合直後	荷重	9.98 N	
			抵抗	0.40 kN/m <sup>2</sup>	
	3日間放置後	荷重	9.70 N		
		抵抗	0.38 kN/m <sup>2</sup>		
3.安定性	H.希釈試験	サンプルが水に流れ出す状態		OK	
		水の濁り	直後	OK	
			3日後	OK	
	I.API規格試験	脱水量	混合直後		51 cm <sup>3</sup>
			3日後		49 cm <sup>3</sup>
			J.ブリーディング試験	ブリーディング量	1日後
	2日後				0.5 cm
3日後		0.5 cm			

第5急曲線：曲線半径25m，曲線長11.0m

第6急曲線：曲線半径15m，曲線長23.9m

急曲線部セグメントの幅，使用比率：

R=15m区間 B=300mm 袋付：標準=1：2

R=25m区間 B=300mm 袋付：標準=1：4

3-2 充填材の選定

充填材には2-3 充填材で述べたような特性が必要である。今回は事前に「粘土鉱物+増粘材」系の材料10種類について表一2に示すような試験を実施した。

テーブルフロー試験，スランプ試験およびミニスランプ試験は主に充填材の流動性を判断する目的で実施した。充填材は余掘り部に速やかに充填され，また，裏込め材との置換ができる程度の流動性が必要である。

球体沈降試験とフォールコーン試験およびポケットベーン試験は充填材が地山の肌落ちを防止できる自立性(せん断強さ)を有するものを選定する目的で実施した。球体沈降試験は独自に考案した試験で，礫に見立てた球体(アルミナボール，φ50mm，比重3.6)を充填材の表面に静置し，沈降量を測定するものである。フォールコーン試験は本来土の液性限界を求める試験であるが，今回の試験ではコーンの貫入量の大小から充填材の自立性を判断した。ポケットベーン試験はロッド先端に取り付

表一 3 充填材の配合 (m<sup>3</sup>当たり)

主材		助材		比重
吸水性粘土鉱物 (kg)	水 (kg)	増粘材 (kg)		
313	863	4.7		1.18

けた十字翼(ベーン)を充填材の中に圧入し，緩速で回転せん断するときの最大抵抗値(トルク値)をダイヤル式の見盛盤の置針で読みとり，充填材のせん断強さに換算する。

球体沈降試験における球体の沈降量と充填材のせん断強さ(粘着力)の関係を次のように推定する。球体の密度をρ<sub>1</sub>，直径をD，沈降量をH，付着抵抗深さをh，付着抵抗直径をd<sub>1</sub>，球体支持直径をd<sub>2</sub>，充填材の密度をρ<sub>2</sub>，充填材の粘着力cとし，球体に作用する球体重量W，浮力U，付着抵抗力F，支持力Qの力の釣り合いを(1)式のように考える。

$$W - U = F + Q \quad (1)$$

$$\text{ここに、} W = 1/6 \times \pi \times D^3 \times \rho_1$$

$$U = 1/6 \times \pi \times H^3 \times (3D - 2H) \times \rho_2$$

$$F = \pi \times d_1 \times h \times c$$

$$Q = qA = 2c \times 1/4 \times \pi \times (d_2)^2$$

礫の脱落防止に必要な充填材の選定をする際，球体の

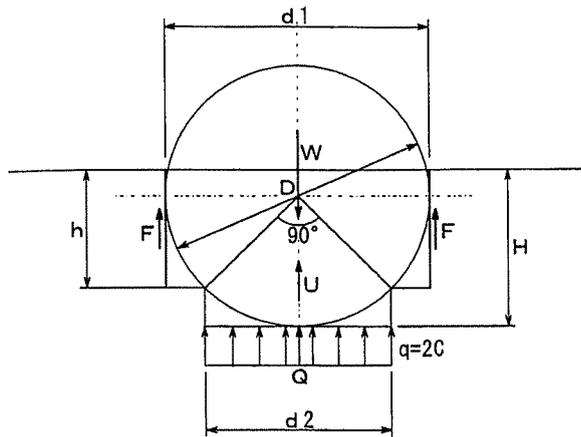


図-4 球体沈降試験図

1/2程度が充填材中に沈降した状態を保持できる充填材の比重、粘着力の値を基準値として採用する。図-4に球体沈降試験図、図-5に球体の沈降量と充填材の粘着力の関係を示す。

球体沈降試験結果より、充填材の粘着力は0.3~0.6 kN/m<sup>2</sup>程度が適切である。

充填材の付着抵抗がシールド機の推進に支障にならないことを確認するために、付着試験を実施した。この試験も独自に考案した試験で、充填材中に鉄パイプを埋め込み、荷重計で引き抜き抵抗力を測定する。

ブリーディング試験、希釈試験およびAPI規格試験は充填材の安定性を判断する目的で実施した。

これらの中から、今回は「吸水性粘土鉱物+高分子増粘材」を用いることとした、表-2に実際に使用した充填材の試験結果を示す。また、使用した充填材の配合を表-3に示す。

### 3-3 充填材の計画注入量

シールド機（本工事ではマシン前胴部）からの充填材の計画注入量は、加圧による地山への圧入、切羽への回り込み等を考慮し、計画余掘り量の130%とし、セグメントからの計画注入量はテールボイド量の100%とした。

### 3-4 施工設備

本工事での充填材注入設備は、曲線部の立坑からの位置、曲線箇所数、充填材の注入量を考慮して図-6に示すようなものとした。

地上のプラントで練った充填材の主材（泥水状）を圧送ポンプでトンネル坑内に送り、後方台車で助材（高分子増粘材）と混合した後に、注入ポンプで余掘り部およびテールボイド部に注入する。

### 3-5 施工管理の方法

#### (1) 充填材の品質管理

充填材の現場での品質管理は、作業性を考慮して、ミ

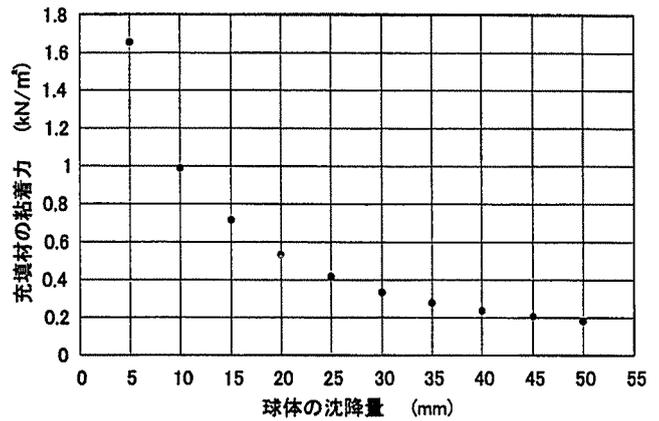


図-5 球体沈降量と充填材の粘着力の関係

表-4 充填材の管理基準値

試験名	管理基準値
ミニスランプ試験	5.0±1.5 cm
ポケットベーン試験	0.3~0.6 kN/m <sup>2</sup>

ニスランプ試験とポケットベーン試験により行った。

充填材の品質については表-4に示す基準値を設定して管理した。

#### (2) 充填材の注入管理

充填材の注入管理は圧力センサーを注入孔付近に設置し圧力管理を行った。

### 3-6 施工結果

充填材の平均注入量は、計画注入量に対して、余掘り部で147%、テールボイドで102%であった。

坑内測量により、平面線形が保たれていることが確認され、袋付きセグメントが有用であることが分かった。

第4急曲線部において、多段式地中変位計により鉛直変位を計測した。その結果、最大隆起量1.37mm、最大沈下量0.57mmと地中変位は非常に小さかった。なお、他の曲線部における路面沈下量は最大3mmであり、地盤の緩みが防止されていることが確認された。

### 3-7 その他の適用事例

上記の工事の他に、2つの工事で本工法を適用している。いずれも地山の緩みや沈下が防止でき、良好な施工結果であった。以下に、工事概要のみを示す。

#### (1) 港区虎ノ門三、五丁目付近再構築工事

- 発注者：東京都下水道局
- シールド形式：泥土圧シールド
- シールド外径：φ 3,290mm
- セグメント外径：φ 3,150mm
- 覆工厚：125mm
- 仕上り内径：φ 2,400mm

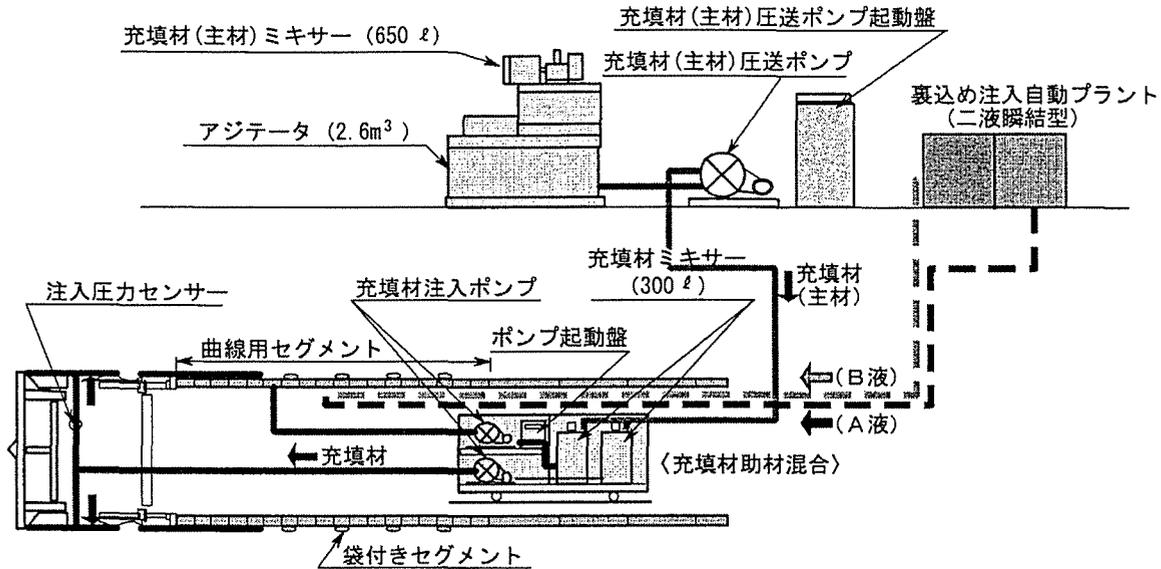


図-6 充填材と裏込め材の注入設備

トンネル延長：437mm

土 被 り：9～11m

地下水位：GL-7m

土質条件：砂質土

充填式シールド急曲線工法施工区間：

第1急曲線：曲線半径50m，曲線長20.1m

第2急曲線：曲線半径20m，曲線長18.2m

急曲線部セグメントの幅，使用比率：

R=20m区間 B=300mm 袋付：標準=1：3

R=50m区間 B=500mm 袋付：標準=1：2

第1急曲線：曲線半径15m，曲線長15.3m

地下鉄丸の内線併走部（直線）：28.1m

第2急曲線：曲線半径15m，曲線長23.9m

下部シールド

第3急曲線：曲線半径30m，曲線長16.0m

第4急曲線：曲線半径30m，曲線長17.0m

第5急曲線：曲線半径15m，曲線長11.8m

急曲線部セグメントの幅，使用比率：

R=15m区間 B=300mm 袋付：標準=1：2

R=30m区間 B=300mm 袋付：標準=1：2

(2) 南台幹線その2工事

発注者：東京都下水道局

シールド形式：泥水式シールド（H&Vシールド）

シールド外径：上部シールドφ3,290mm

下部シールドφ2,890mm

セグメント外径：上部シールドφ3,150mm

下部シールドφ2,750mm

覆工厚：上部シールド125mm

下部シールド125mm

仕上り内径：上部シールドφ2,400mm

下部シールドφ2,000mm

トンネル延長：上部シールド728mm

下部シールド923mm

（H&V施工区間は154m）

土 被 り：24m

地下水位：GL-9m

土質条件：細砂，シルト質細砂，礫混り細砂

充填式シールド急曲線工法施工区間：

上部シールド

§4. おわりに

充填式シールド急曲線工法は，急曲線施工における路上作業を伴わない地山の緩み防止工として，周辺環境は もちろん日進量に影響を与えないことを目標に開発された工法である．3件の実証施工により，施工性および経済性において本工法の有効性が確認された．今後は本工法のより合理的な設計・施工法を確立するために，施工実績を増やし，データを蓄積していく必要がある．

最後に，本工法の設計・施工にあたってご指導，ご助言を戴いた関係各位に深く感謝致します．

参考文献

- 1) 本重信宏，折田一智，渡邊 徹：充填式シールド急曲線工法の開発に関する共同研究，第36回下水道研究発表会講演集，pp. 324-326，1999.