

# 充填式シールド急曲線工法の 開発に関する調査研究

## 1. 研究の目的

シールドの急曲線施工ではコピーカッタで曲線内側の余掘りを行うため、余掘り部の緩みを防止する目的で、一般に地上あるいは機内より薬液注入工法等の補助工法が必要となる。

しかし、近年では路上作業を伴う補助工法は、作業帯による交通障害、夜間作業による騒音等のため周辺住民の理解を得られず、施工が困難になっている。一方、機内注入では所定の急曲線を掘進する際、数回の掘進停止、注入作業を繰り返す必要があり、工期の延長、工費の増大という問題が発生する。

特に下水道シールドでは市街地の狭隘な交差点下での急曲線施工が多く、今後も再構築工事を中心にこのような事態の増加が懸念される。

本工法は「路上作業から解放され周辺環境に悪影響を与えない、日進量の低下がない、線形の確保が確実にできる、コスト削減効果がある」ことを開発目標に提案された技術である。

本研究では、本工法の実用化に向けての基礎的検討を行い、実証施工を通じて得られた結果をまとめ、技術マニュアルを作成した。

## 2. 研究体制

本研究は、西松建設株式会社との共同研究により実施した。

## 3. 研究成果

### 3.1 工法の概要

本工法は、従来裏込め注入まで空隙となっていた余掘り部に、シールド機内から可塑性の充填材を掘進と同時に注入することによって地山の安定を図る工法である。

本工法の施工手順を、図-1に示す。

- ① 第一工程  
掘進と同時に空隙部（余掘り部およびテールボイド）に充填材を注入する。
- ② 第二工程  
袋付きセグメントがテールを抜けた時点で注入袋へ凝固時間の短い裏込め材を注入し、推力の地山への伝達を図る。
- ③ 第三工程  
袋付きセグメント間の充填材を裏込め材と置換する。

### 3.2 開発検討項目

検討項目を以下に示す。

- ① 適用範囲の検討  
地盤条件、曲線半径
- ② 充填材の開発
  - ・充填材に必要な機能の整理
  - ・機能を満たす材料の選定、試験方法の確立、配合設計

- ③ 袋付きセグメントの設置間隔
  - ④ 実証施工
    - ・上記の各項目の検証
    - ・充填材の注入率、充填材の置換率の把握
    - ・効果の確認
- 急曲線区間の出来型、地盤変位、掘進への影響、コスト縮減効果

### 3.3 本工法の適用範囲

本工法を採用し、安全かつコスト縮減効果の高い施工を行うための要因は様々なものが考えられるが、中でも曲線半径および土質が重要な目安になる。

#### (1) 曲線半径

建設省下水道工事積算基準では「曲線半径60m未満については、セグメントの形状、シールド機の構造等を考慮すること」と記述されていることから、適用の目安を半径60m以下に設定した。

ただし、シールドの径や施工条件によってはこの限りではない。

#### (2) 土質

本工法は自立性の乏しい地山に適用すると、余掘り部の緩み防止効果大きい。

ただし、袋付きセグメントを介してシールドの推進力が地山に作用するため、これに耐えられるだけの地耐力が必要である。

以上を考慮して、本工法の適用範囲の目安を、現

段階では以下のように設定した。

- ・締まった砂質土 (N $\geq$ 30)
- ・硬い粘性土 (N $\geq$ 8)

なお、余掘り部の掘削と同時に流砂現象が生じる地山等は、本工法の適用外である。

### 3.4 充填材

#### (1) 充填材の機能

充填材には地山の緩みを防止し、シールド機の推進の支障とならず、裏込め材による置換性のよいものを選定する。

この目的のために充填材に要求される機能は、以下のとおりである。

- ① 余掘り部の地山の緩みを防止できる。
- ② 礫の肌落ち（落下）を防止できる。
- ③ シールド機の推進に支障とならない。
- ④ 裏込め材との置換性がよい。

#### (2) 充填材の特性

上記の各機能を満足するために必要となる充填材の特性は以下の通りである。

##### ① 流動性

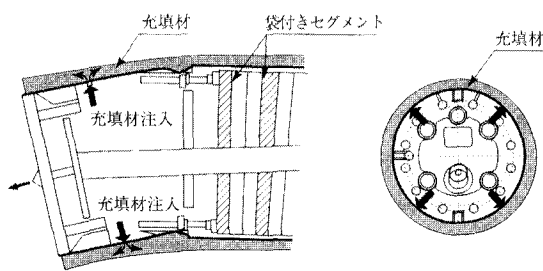
余掘り部、テールボイドに速やかに充填され、また裏込め材との置換排出が容易なように、適度な流動性を有すること。

##### ② 自立性

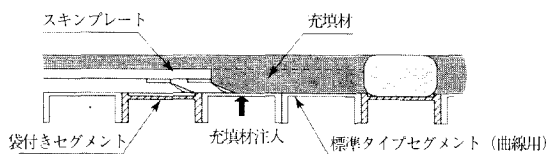
余掘り部の地山の緩み防止、特に礫の肌落ち防止

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

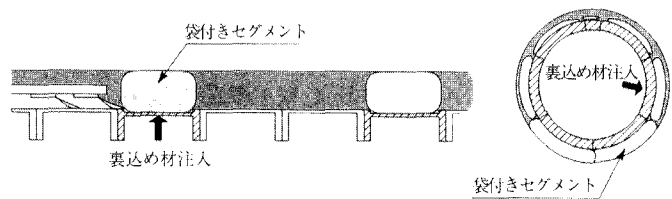
(1) シールド機から余掘り部に充填材を注入



(2) セグメント注入孔からテールボイド部に充填材を注入



第2工程：袋付きセグメントへの裏込め材の注入



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

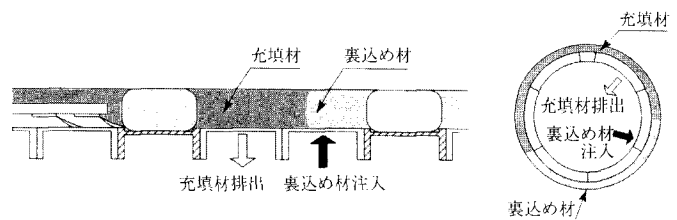


図-1 施工手順

のため、適当なせん断強さを有すること。

- ③ 付着性  
付着抵抗がシールド機の推進に悪影響を与えないこと。
- ④ 未硬化性  
充填直後から裏込め材との置換排出までの間、硬化しないこと。
- ⑤ 物理的な安定性  
地下水等で希釈されないこと。
- ⑥ 比重  
適当な比重を有すること。比重が高いと山留め効果が上がるが、ポンプの負荷が大きくなる。また、裏込め材との置換排出のためには低比重が望ましい。

(3) 充填材の試験

充填材に必要な機能を確認するため、表-1に示す試験を行った。なお、充填材の機能と特性および

表-1 充填材試験項目

特性	試験項目	測定項目	測定時期
流動性	テーブルフロー試験	フロー値	直後
	スランプ試験	スランプ値	直後
自立性	フォールコーン貫入試験	貫入値	直後, 3日後
	球体沈降試験	球体沈下量	直後, 1日, 2日, 3日
	ポケットベーン試験	トルク値	直後
付着性	付着試験	引き抜き抵抗	直後, 3日後
安定性	希釈試験	目視(分離)	直後, 3日後
	API規格試験	状態(濁り) 脱水量	直後, 3日後
	ブリーディング試験	ブリーディ	1日, 2日, 3日

充填材の機能

特性および試験

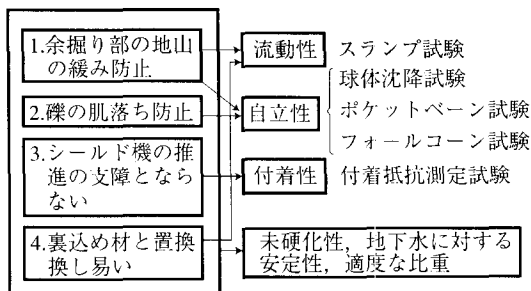


図-2 機能と特性, 試験の関係

試験の関係を図-2に示す。

- ① 流動性の試験  
スランプ試験およびテーブルフロー試験により、流動性の評価を行った。
- ② 自立性(せん断力)の試験  
球体沈降試験, フォールコーン試験, ポケットベーン試験により、自立性の評価を行った。  
これらは充填材の粘着力を直接あるいは間接的に測定する試験である。  
この内球体沈降試験は、充填材の自立性を評価するために独自に考案した試験であり、礫に見たてたアルミナボール(比重3.6, φ50mm)をビーカーに満たした充填材の上に静置し、球体が沈下する状態から目視で自立性の判断を行うのに利用している。また、沈下量から、後述の方法で充填材の粘着力を算出できる。  
なお、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、本研究ではコーン貫入量の大小から充填材の自立性を判定するのに使用した。

- ③ 付着性の試験  
充填材中に鉄パイプを埋め込み、引き抜き抵抗を荷重計で測定する。充填材の付着抵抗測定用に考案した試験である。
- ④ 安定性の試験  
充填直後から裏込め材との置換までの間、性質が急変しないことを確認する試験で、希釈試験では目視により、API規格試験、ブリーディング試験では脱水量の測定により安定性を判断する。

(4) 充填材の選定

充填材は、土圧式シールドの添加材として一般に広く使用されているベントナイト等の粘土鉱物系添加材と増粘材との組み合わせとし、10種類の試料について表-1の試験を行った。

その結果、結晶構造が繊維状であり、0.4~1.5nmの空隙を有するため水分を取り込みやすい粘土鉱物と有機合成ポリマー増粘材との組み合わせを選定した。

(5) 充填材の管理基準値および配合

充填材の機能の中で、礫の肌落ち防止は特に重要なものである。ただし充填材はせん断強度のみでなく適度な流動性を有することが必要であり、この判断基準として「球体沈降試験で球体の1/2程度が沈降した状態を保持できる」状態を目安に管理基準値

を設定した。

球体の沈降量Hを測定すれば、充填材の粘着力cは以下のようにして算出できる。

球体の密度を $\rho_1$ 、充填材の密度を $\rho_2$ とし、球体に作用する力の釣り合いを下式のように考える。

$$W-U=F+Q$$

ここに、

W：球体重量

$$W=1/6 \times \pi \times D^3 \times \rho_1$$

U：浮力

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

F：付着抵抗力

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

Q：支持力

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

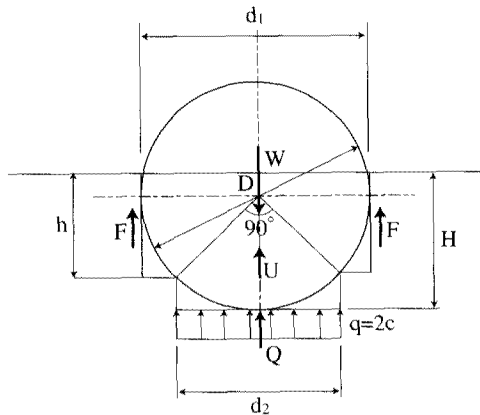


図-3 球体沈降試験

沈降量と粘着力の関係を、図-4に示す。図から充填材の粘着力は0.3~0.6kN/m<sup>2</sup>程度が適切である。

球体が1/2沈下した状態での充填材の自立性、流動性に関する試験結果を整理し、管理基準値を表-2のように設定した。

なお、充填材の配合例を表-3に示す。

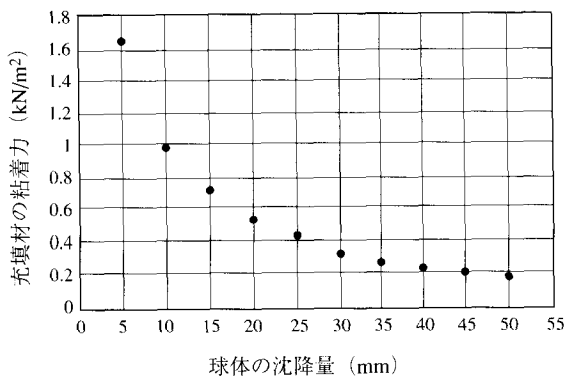


図-4 沈降量と粘着力の関係

表-2 充填材の管理基準の例

特性	特性値	
流動性	スランプ	15~20cm
自立性	せん断強さ	0.3~0.6kN/m <sup>2</sup>
	コーン貫入量	15±3mm

表-3 充填材の配合例

	主材		助材 (増粘材)	充填材
	粘土 鉱物	水		
配合	313kg	863kg	4.7kg	(比重)
比重	2.36	1.0	0.9 ~1.05	1.18

### 3.5 袋付きセグメント

#### (1) 構造

袋付きセグメントは図-5に示すように鋼製セグメントの背面に注入袋を装備したものである。袋に裏込め材を注入した状況を写真-1に示す。

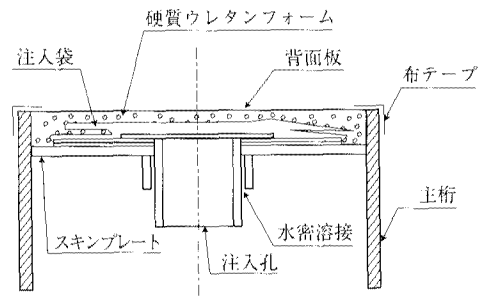


図-5 袋付きセグメント断面形状

写真-1 袋付きセグメント



#### (2) 設置目的

設置目的は以下の通りである。

- ① セグメントと地山を早期に密着させることで急曲線部の線形を確保する。
- ② 充填材、裏込め材の回り込みを防止し、各々を所定の位置に確実に注入する。
- ③ 充填材と裏込め材の置換を確実にを行う。

(3) 設置間隔

袋付きセグメントの設置間隔は、以下の事項を考慮して解析および経験的に設定する。

- ① 偏心したジャッキ推力などの施工時荷重に対するセグメントの安全性
- ② 地盤変状や近接構造物への影響
- ③ 裏込め材と充填材の置換効率

3.6 施工実績

本工法は3工事で実績があり、そのうち2件が泥土圧式シールド、1件が泥水式シールドである。工事概要を表-4に示す。

また「港区虎ノ門三丁目、愛宕二丁目付近再構築工事」「港区虎ノ門三～五丁目付近再構築工事」の平面図を図-6に示す。前者の第4急曲線部に設置した地中変位計の計測断面を図-7に示す。

(1) 充填材の配合および品質管理

充填材の配合および品質管理基準値は3工事とも同様であり、配合については表-3を基準とし、品質は表-2の基準値により管理した。

なお、裏込め材には可塑性モルタル（比重1.23）を使用した。

(2) 充填材の注入量と注入率

充填材の注入量は、加圧による地山への圧入、切羽への回り込み等を考慮して設定する。

表-4 施工実績概要

工事名	港区虎ノ門三丁目、愛宕二丁目付近再構築	港区虎ノ門三～五丁目付近再構築	南台幹線その2
シールド型式	泥土圧式	泥土圧式	泥水式縦2連分岐式
シールド外径	φ3,690mm	φ3,290mm	上部φ3,290mm 下部φ2,890mm
延長	887m	437m	共通区間 154m 上部 574m 下部 769m
上被り	19m	10m	24m
地盤条件	土質 互層粘性土 N=10~20 砂礫 N≥50	砂質土 N=20~30	細砂、礫混り細砂 N=50
	地下水位	GL-6m	GL-7m
急曲線	R=15m×4 R=25m×2	R=20m×1 R=50m×1	上: R=15m×2 下: R=15m×1 R=30m×2

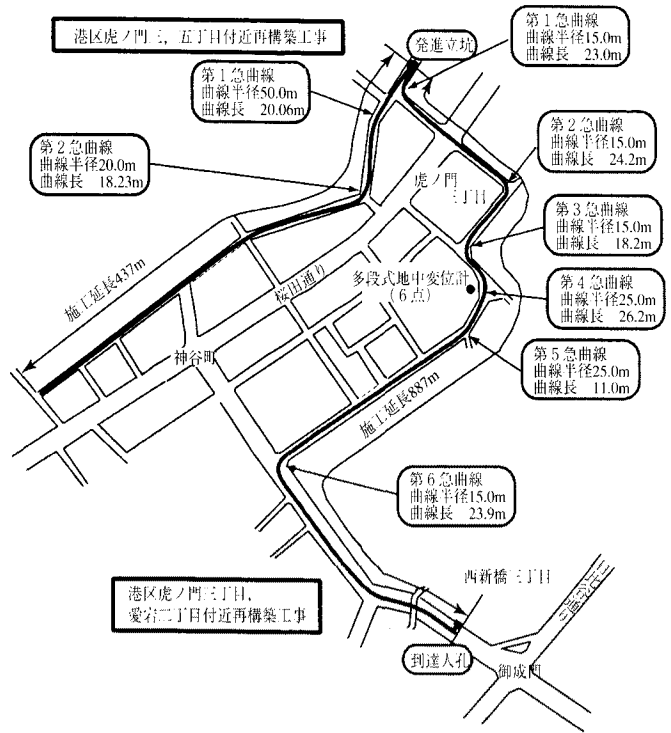


図-6 平面図  
(虎ノ門、愛宕再構築および虎ノ門再構築)

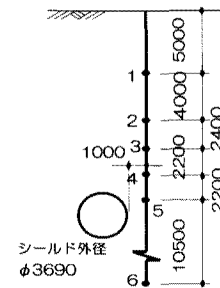


図-7 地中変位計測断面

施工実績ではシールド機内からの注入量は計画余掘り量の130vol%、セグメント注入孔からテルポイドへの注入量は計画空隙量の100vol%程度であった。

(3) 充填材と裏込め材との置換

裏込め材は計画余掘り量に対して必要量を注入し、かつ適切な注入圧で管理したが、施工実績では充填材の置換率は実注入量に対し平均70vol%程度であった。

(4) 本工法による効果の確認

① 急曲線区間の出来型

急曲線部の推進では、セグメントリング間の

目開きは見られず、坑内測量の結果からも平面線形が確保されており、袋付きセグメントの効果が確認された。

なお、袋付きセグメントは、各工事とも概ね3～5リングに1個の割合で使用しており、設置間隔は600～1200mmであった。

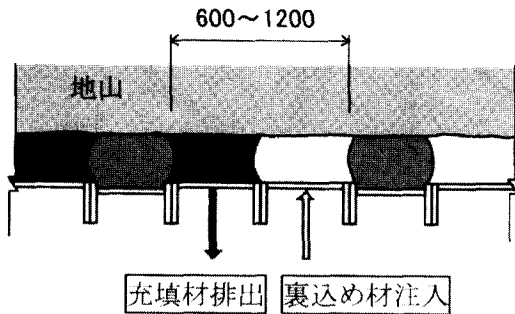


図-8 袋付きセグメントの設置間隔

② 地盤変位

虎ノ門三丁目、愛宕二丁目付近再構築工事の第4急曲線部（曲線半径R=25m）において、図-7に示す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（共に測点1）と地盤変状は小さかった。

路面沈下量は直線部の1～2mmに対し、曲線部は最大で3mmであり、地盤の緩みを防止できたことが確認された。

③ 掘進への影響

従来のシールド工法に対して坑内作業員2名、坑外作業員1名の増員となるが、充填材の注入・置換による掘進への影響はなく、3工事とも従来工法と同等の日進量であった。

④ コスト縮減効果

袋付きセグメントの費用がかかるが、路上作業を伴わないため道路復旧、交通保安対策経費が不要となり、3工事の試算では、路上からの薬液注入工事に対して最大で約30%のコスト縮

減効果が得られた。

## 4. マニュアルの構成

研究成果をまとめ、技術マニュアルを作成した。

資料編には本編の記述を補足する事項、本工法と従来の薬液注入工法との経済比較を行う際に考慮すべき事項等を記載した。

本編

第1章 総論

第2章 設計

第1節 設計手順

第2節 調査計画

第3節 充填材

第4節 セグメント

第5節 袋付きセグメント

第6節 充填材注入位置

第7節 裏込め材

第3章 施工および施工管理

第1節 施工

第2節 施工管理

積算資料

参考資料

## 5. まとめ

本工法は、路上作業を伴わずに行えるシールド急曲線防護工であり、周辺環境への影響がなく、さらに機内注入のような掘進と注入作業の段取り替えを不要とすることを目標に開発した工法である。

実証施工現場では交通障害や夜間の騒音等による住民からの苦情は皆無であり、施工性、経済性に関して本工法の有効性が確認されたと考えている。

今後は、さらに合理的な設計・施工法を確立し、本工法の適用範囲を拡大していくため、実績データを蓄積して行く必要がある。

●研究担当者

研究第二部長	篠田	康弘
技術部技術課長	本重	信宏
技術部研究員	中西	祐啓
研究第二部研究員	小林	卓矢
研究第二部研究員	曾我	誠意

●この研究に関する問い合わせ先は

研究第二部長	中里	卓治
技術部技術課長	本重	信宏
研究第二部研究員	曾我	誠意
研究第二部研究員	田中	孝