

拡大・縮小シールド工法の開発

—ES Tube 工法—

阿 曾 利 光 ・ 田 中 大 三 ・ 細 井 元 規

トンネルの任意の場所で断面の拡大が可能であり、拡大断面築造後、元の断面に戻ることでできる拡大・縮小シールド工法 (Expandable and Shrinkable Shield Method, 以下 ES-Tube 工法という) を開発した。本工法は、シールドトンネルにおいてライフラインなどの接続・分岐あるいは保守のため部分的に断面の拡大が必要な場合に有効である。深度 50 m で施工延長 10 km の小口径シールドを計画した場合、本工法で 2 km 毎に拡大する場合と、2 km 毎に立坑を構築または全線拡大断面で掘削する場合に比べ約 20% 以上、工費を削減できる。

キーワード：トンネル、シールド工法、断面、拡大、拡幅、縮小、小口径、長距離、地山保持

1. はじめに

大深度地下の公共的使用に関する特別措置法が平成 13 年から施行された。この法案により今後、大深度地下長距離シールドの増加が見込まれるが、大深度・長距離シールドトンネルにおいてはトンネルの用途から分岐部や接続部およびメンテナンスのためのスペースを確保するために、部分的にシールドの口径を拡大して構築する場合がある。また、ライフラインなどの小口径長距離シールドトンネルは施工上資材搬出入や換気設備設置などのために一定間隔で拡大断面を必要とする。

現在のシールド工事でシールドトンネルを部分的に拡大する場合、当該位置に立坑を構築するか薬液注入や凍結工法等の補助工法を用いることが一般的である。しかし、大深度地下の場合、立坑の建設や補助工法に多大な費用と工期を要し、しかも立坑の建設位置が限定され用地確保が困難である。また場合によっては、全線拡大径でシールドトンネルを掘ることがあるが、無駄な掘削部分が多く工事費が増加する。

このようなことから経済的なトンネル築造にはトンネル掘進中の任意の位置で拡大断面を築造する技術が望まれており、拡大・縮小シールド工法 (名称「ES-Tube 工法」、Expandable and Shrinkable Shield Method の略) を開発した。本報文ではこの「ES-Tube 工法」(以下、工法と省略) の開発の概要について報告する。

2. 工法の概要

本工法は掘削しながらシールドトンネル断面を任意の位置で拡大し、また任意の位置で元の断面に戻れ、さらに拡大・縮小が何回でも可能である。図-1 にトンネル断面拡大状況図を、図-2 に工法の概要図を示す。

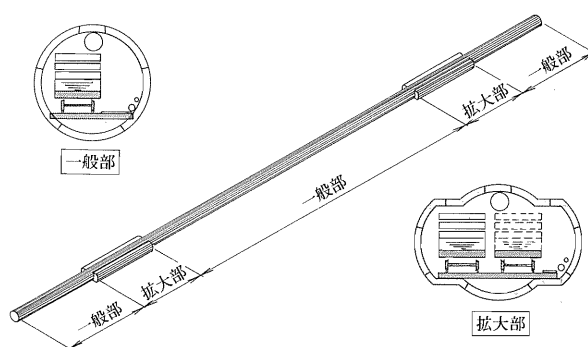


図-1 トンネル断面拡大状況

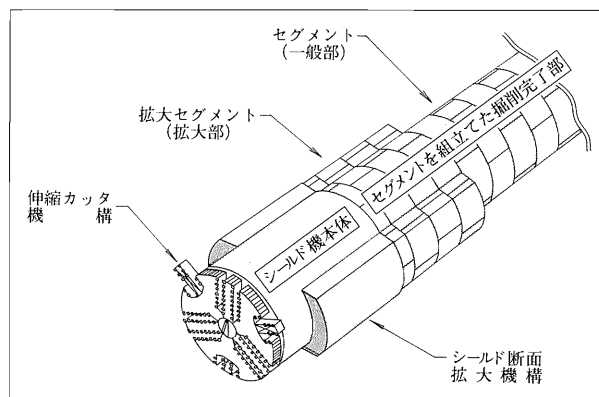


図-2 ES-Tube 工法の概要図

本工法のシールドトンネル断面を拡大する方法はシールド機の一部を張出し、拡大したシールド機の中なかで拡大セグメントを組立てる。一般部は円形セグメントを組立てながら掘進し、拡大時は伸縮カッターで拡大断面を先行掘削後、シールド機内部で拡大用部材を組立て一度に拡大する。

3. 工法の特徴

ES-Tube 工法の主たる特徴を以下に列記する。

- ① シールド径が最大で 1.5 倍程度まで両側部を拡幅

できる。

- ② 何回でも拡大・縮小が可能のため経済的である。深度 50 m の大深度にセグメント内径 2.2 m, 施工延長 10 km の長距離小口径シールドを計画した場合, 在来の 2 km 毎に立坑を構築や全線拡大断面で掘削する工法に比べ, 本工法で 2 km 毎にトンネル断面を拡大する工費は約 20% 以上削減できる。
- ③ 従来の補助工法を用いた拡大工法と比べ約 10% 工期が短くなる。
- ④ 機内から機械的に拡大・縮小を行うため, 拡大作業が安全に行える。
- ⑤ 拡大部をそのままシールドや推進の発進基地として利用でき, 立坑を造らずにトンネル分岐が可能である。

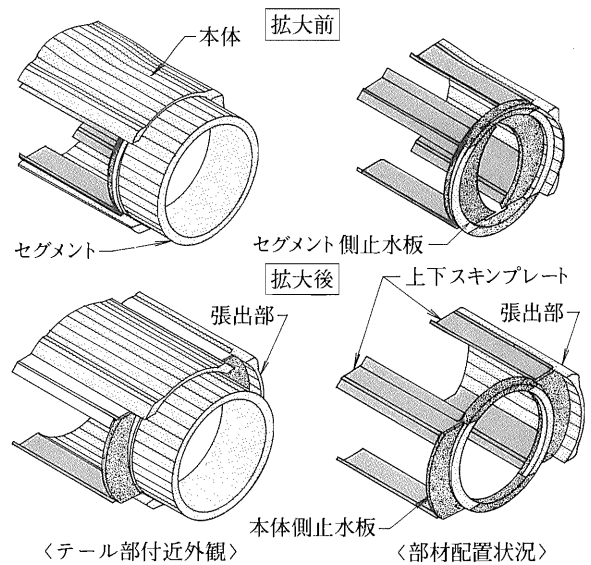


図-4 拡大用部材

4. シールド機の拡大構造と拡大手順

シールド機の一部を張出す方法は, シールド機を張出し可能な構造として, この張出し部に拡大用部材を組立ててシールド機を拡大する。以下にシールド機の拡大用構造と拡大手順について述べる。

(1) シールド機の拡大構造

一般部掘進時のシールド機は張出し部と本体を添接板(ガセットプレート)とボルトで固定している。図-3 に一般部掘進時のシールド機断面図を示す。

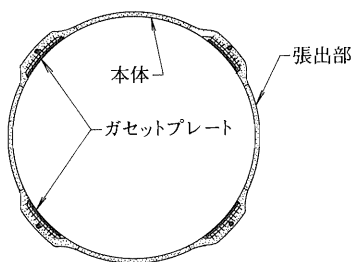


図-3 張出し部固定部材

(2) 拡大用部材

拡大用部材はシールド機張出し部の天井や床に相当する上下スキンプレートと張出し後部妻材の止水板からなる。

上下スキンプレートはシールド機張出し部に固定して張出す。止水板は本体側止水板とセグメント側止水板の 2 枚から構成され, 本体側止水板はシールド機張出し部に仮固定して張出し, セグメント側止水板はセグメントに固定する。

図-4 に拡大用部材の配置を示す。

(3) 拡大手順

工法の拡大手順は以下のとおりである。

- ① 一般部を掘進したシールド機のカット部分が拡大位置に到達後, シールド機に装備した伸縮カッターを伸張し, 拡大断面に合わせた先行掘削を行う(図-5)。

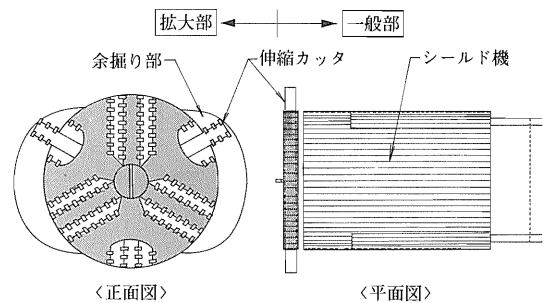


図-5

- ② 先行掘削の余掘り部分には地山の崩落防止を目的として開発した充填材(以下, 地山保持材と言う)をシールド機内から注入し, シールド機側部全体が地山保持材で充填された拡大断面となるまで掘進を行う(図-6)。

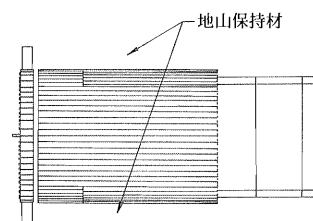


図-6

- ③ 拡大準備としての掘進終了後, シールド機後端で

セグメントに設置した仮止水装置を作動し止水を行う（図-7）。

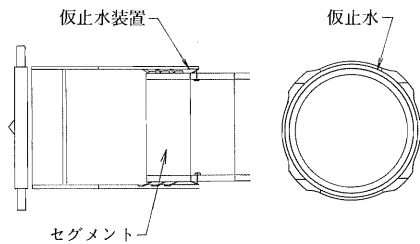


図-7

- ④ シールド機テール部のセグメントを撤去する（図-8）。

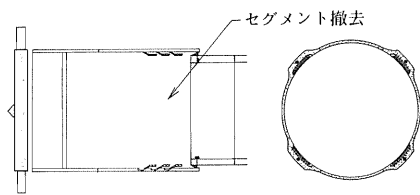


図-8

- ⑤ 拡大時のシールド機テール部変形防止のためテール部内に仮支柱を設置し、シールド機本体と張出し部を固定しているガセットプレートを取外す（図-9）。

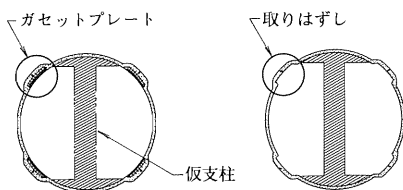


図-9

- ⑥ 拡大用部材（上下スキンプレートと2枚の止水板）を設置する（図-10）。

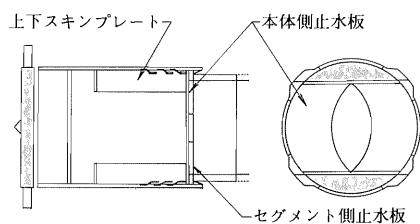


図-10

- ⑦ 張出しジャッキを設置後、ジャッキを伸張し、地山保持材を取込みながらシールド機を拡大する（図-11）。拡大後、上下スキンプレートとシールド機本体を固定する。
- ⑧ 拡大したシールド機内で拡大セグメントを組立てて拡大部掘進を行う。止水板はセグメントの一部となり、拡大部掘進時にシールド機から分離する。本

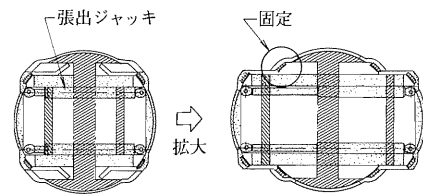


図-11

体側セグメントは拡大セグメントの妻材となり拡大セグメント後部からの土砂の侵入を防ぐ。また、張出し部分のシールドジャッキ推力を受けるため、拡大セグメント組立て時に推力受けピースを同時に組立てる。推力受けに必要なリング数以後のピースは取外し転用する。φ2.6 mのシールド機に必要な推力受けは6リングである。図-12に推力受けピースを示す。

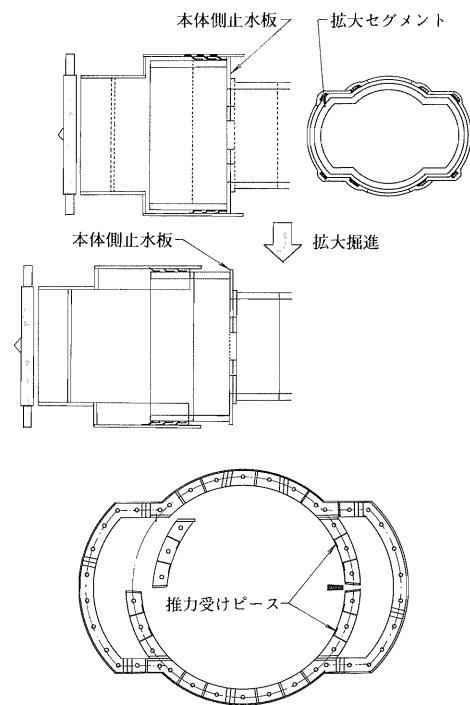


図-12 推力受けピース

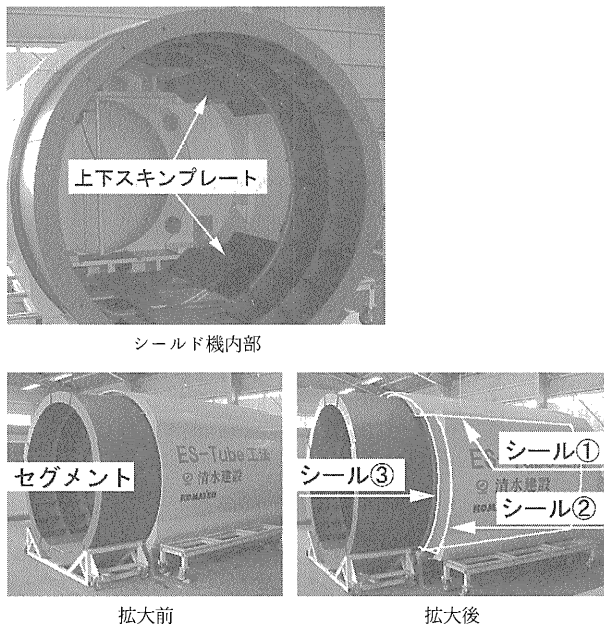
5. 工法の実証および実験

本工法の実用化に向け、実物大の木製模型の製作、シールド機張出し部シール機構の止水性能実験、シールド機拡大時の地山保持材の開発および当材料の性能実験など、一連の実験・実証を行い、施工の信頼性を確認し工法を実用化した。

(1) 実物大木製模型

実物大の木製模型を製作して、張出し部周囲の止水シール設置位置の検討、拡大用部材の組立ておよび拡張作業

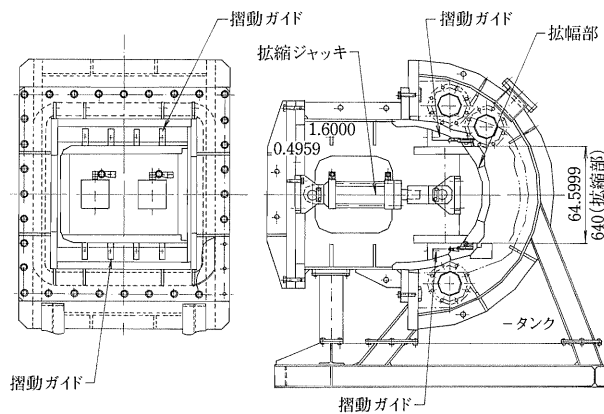
を行い、工法の妥当性を確認した（写真一）。



写真一 実物大木製模型

(2) 止水機構の開発

シールド機張出し部の止水機構は、従来機にない機構のため、水圧 0.6 MPa（水深 60 m の水圧）に耐えるシール機構およびシール材を開発した。大深度を想定したシールド機張出し部の止水実験装置を製作し、実験によりその止水性能を確認した。



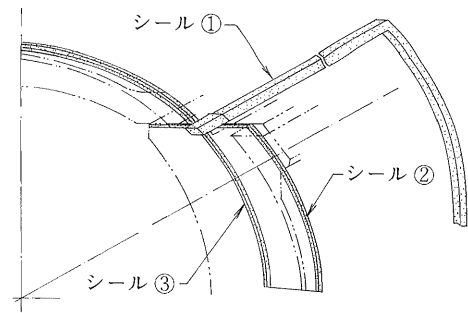
図一三 止水実験装置

(a) 止水シールの配置

シールド機拡大時の止水構造は主に天然ゴム製の 3 本の止水シールで構成する。写真一に拡大後と図一四にシールド機斜め後部から見たシール配置図を示す。

シール①はシールド機張出し部の上下と前部を止水する。張出し部周囲に「コ」の字型に配置し、シールド機本体に固定する。

シール②は張出し後部を止水する。拡大用部材の本体



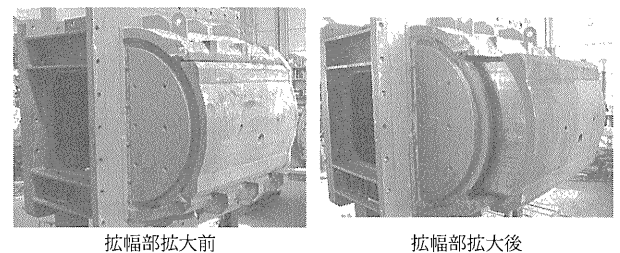
図一四 シール配置図

側止水板に取付け、拡大時はシール①、シール③と摺動する。

シール③は本体側止水板とセグメント間の止水を行う。セグメント側止水板に取付け拡大時は固定されている。

(b) 止水実験

止水実験装置は摺動可能な張出し部と張出し部全体を覆う水タンクからなる。止水実験は 0.6 MPa まで加圧したタンク内で、張出し部の摺動を 50 回行い、摺動時の漏水の有無を目視で確認した。



写真二 止水実験装置

(c) 止水実験結果

シール①～③の交点などから噴出やにじみを生じたが、シール形状、硬度などを改良することにより、水圧 0.6 MPa において漏水を無くすことができ、大深度における当シール機構の有効性が確認できた。

(3) 地山保持材の開発

本工法は伸縮カッターで先行掘削した余掘り部に、掘進と同時にシールド機内から地山保持材を注入する。この地山保持材に要求される性能として以下の項目が挙げられる。

- ① 伸縮カッターで掘削した余掘り部への充填性および注入用ポンプによる圧送性がよく、またシールド機拡大時の機内取込みが容易にできるという流動性を有する。
- ② 余掘り部の地山を一時的に保持し、シールド機前面に廻りにくい自立性を有する。
- ③ 性質は経時安定性を有する。

開発した地山保持材はプリン状で、比重は 1.13 であり、表—1 に示した材料を混練りし造成する。

表—1 地山保持材の配合表

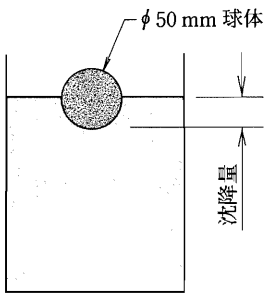
単位量 (kg/m ³)		
水	特殊粘土	高分子系混和材
913	218	2.95

地山保持材の地山保持性能などを様々な実験により確認した。以下に代表的な実験について述べる。

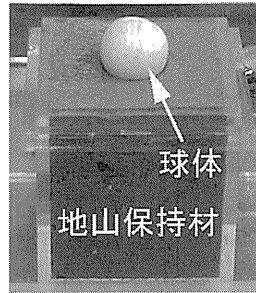
(a) 球体沈降試験

φ50 mm の球体を材料表面に置き沈降量を測定する。試験に使用する球体の比重は土粒子の比重 (2.7) に近い 2.4 と、比重の大きい 3.6 の球体を使用した。

この球体が沈降しなければ、充填した余掘り部地山の緩みが防止でき、地山の保持が可能と判断できる。



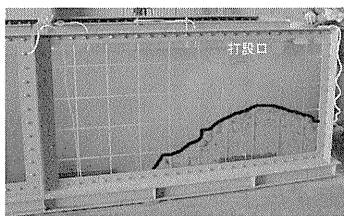
図—15 球体沈降試験



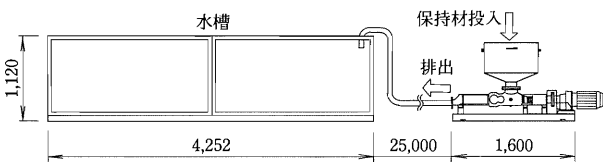
写真—3 試験状況

(b) 水中打設実験

実験は水を満たした水槽に圧送ポンプで地山保持材を打設し、水中における地山保持材の流動性、打設後の地山保持材の性状を確認した。



写真—4 水中打設状況



図—16 水中打設実験概要

(c) 押抜きせん断試験

シールド機の拡大時には余掘り部の地山保持材を機内

に取込む。実験により地山保持材の取込みやすさを確認した。実験は φ15 cm のモールドに地山保持材を詰め、φ5 cm の開口部を設けた蓋をセットする。この開口部から地山保持材が抜けて蓋がスムーズに沈みこむまで錘を載荷して、この時の重量を圧力に換算した。



写真—5 押抜きせん断試験

(d) 試験結果

地山保持材の経時安定性を確認するため造成後空中に放置した材料と水中に打設した材料を使用し、造成当日と 7 日後、28 日後に球体沈降試験と押抜きせん断試験を行った。表—2、表—3 に試験結果を示す。

表—2 空中保存の試験結果

材 齢	0 日	7 日	28 日
球体沈降試験	1/4 沈降 1/4 沈降	1/3 沈降 1/2 沈降	1/4 沈降 1/3 沈降
押抜き・せん断試験	12 kPa (190 N)	14 kPa (220 N)	14 kPa (220 N)

表—3 水中打設後空中保存の試験結果

材 齢	0 日	7 日	28 日
球体沈降試験	1/2 沈降 3/4 沈降	1/2 沈降 2/3 沈降	1/2 沈降 1/2 沈降
押抜き・せん断試験	5 kPa (90 N)	6 kPa (100 N)	3 kPa (50 N)

注) 球体沈降試験結果の上段は比重 2.4、下段は比重 3.6 の球体を載せた時の球体沈降量

空中保存と水中打設後の材料を比較すると、水中打設後の材料は軟化しているが球体は沈降せず、また材齢による変化は少ない。押抜きせん断試験の値はシールド機拡幅力 (1 MPa 以上) に比べ十分小さく、取込みに支障はないと判断できる。

試験結果から地山保持材の地山保持能力、取込み性、経時安定性を確認できた。

これらの実験の他、長距離圧送実験やシールド機前部と余掘り部を模した装置による注入動向実験などを行い、地山保持材のポンプ圧送性、充填性や自立性を確認した。

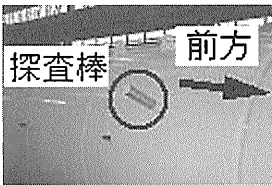
6. 実証実験

実機に伸縮カッタを装備し実証実験を行った。実験は伸縮カッタで拡大掘削を行い余掘り部に地山保持材を注入し、以下の項目を確認した。

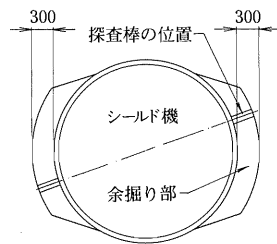
- ① 拡大断面掘進時のシールド機挙動
- ② 拡大掘削断面の確認
- ③ 地山保持材注入作業の実証
- ④ 地山保持性能の確認

(1) 実験方法

シールド機が実験区間に到達後、伸縮カッタを伸張し拡大断面を掘削する。余掘り量は30 cmとした。拡大断面掘進と同時に伸縮カッタ後部にある注入孔から地山保持材を余掘り部に注入する。拡大掘削断面の確認は伸縮カッタに装備したストローク計のデータによるカッタ軌跡とシールド機に装備した探査棒で確認した（写真—6、図—17）。



写真—6 探査棒



図—17 探査棒位置図

シールド機の挙動は拡大断面掘進中ジャイロなどの自動測量値を常時監視した。地山保持材は坑内を台車で運搬し、シールド機より280 m手前から、中継ポンプも含め2台のスクイーズポンプで圧送した。

(2) 実験結果

拡大掘進時にシールド機のローリングを懸念したが、掘進中のシールド機のローリング値、ピッチング値、方位値の変化は一般部掘進時と同様でありシールド機の制御に支障はなかった。拡大断面測定値は所定値の300 mmに対し±10 mmの範囲内であった。また地表の沈下は生じなかった。

7. 終わりに

ES-Tube 工法における大きな技術的課題である伸縮カッタによる余掘り部の地山保持機構や拡張時の止水機構、さらには、施工時における信頼性を、一連の実験や実証によって確認できた。今後は大断面への適用の検討とともに機会があれば実工事に使用し、工法の普及を図りたいと考えている。

J C M A

【筆者紹介】



阿曾 利光 (あそ としみつ)
清水建設株式会社
土木事業本部
技術開発部
課長



田中 大三 (たなか だいぞう)
清水建設株式会社
土木事業本部
技術第4部
課長



細井 元規 (ほそい もとのり)
清水建設株式会社
土木事業本部
技術第4部