

拡大縮小シールド工法の開発

DEVELOPMENT OF EXPANDABLE AND SHRINKABLE SHIELD METHOD

阿曾利光* 細井元規**

Toshimitu Aso and Motonori Hosoi

The construction extension is normally 1.5km through 2.0km in the shield tunnel with the small diameter for the electric power and gas purposes so far since the material transporting cars may not pass each other in the tunnel. When the long distance tunnel with small diameter is planned, the shaft needs to be constructed every 2.0km or the tunnel with the large diameter is introduced leading to the increase of the construction cost.

In order to reduce the construction cost compared with the conventional method, the authors have developed the expandable and shrinkable shield method in the arbitrary point along the tunnel.

Key word : shield method, cost, expandable and shrinkable shield method

1. まえがき

大深度地下の公共的使用に関する特別措置法が平成12年5月に成立し平成13年4月から施行された。この法案により今後、大深度地下でのライフライン整備の増加、またシールド技術を活用した様々な構造物の開発が見込まれている。

大深度地下でのライフラインの整備では、当面、直径2～3mの電力・ガス用小口径のシールドトンネルの建設が先行し、今後、多方向への建設かつ、より長距離化が予想される。小口径シールドの場合、掘削時の資材運搬軌条が単線敷設となり資材運搬台車のすれ違いができないため、長距離になるほど掘削効率が下がり、一般的に掘削距離は1.5km～2.0kmが限度であった。

したがって、小口径の長距離トンネルを築造する場合、従来は地上からの資材搬入のため2kmごとに立坑を築造したり、複線軌条が敷設可能な大断面で全線掘削したりする方法がとられてきたが、いずれもコストアップの要因となっている。

そこで、従来工法よりコストダウンができ、任意の場所でトンネル断面の拡大が可能であり、所定の延長の拡大断面築造後、元の断面に戻ることでできるシールド工法（Expandable and Shrinkable shield method、以下 ES-Tube 工法という。）を開発した。本工法の開発にあたり大きく分けて、表-1に示す技術課題が考えられ、各種実験を行っている。

ここでは、表-1に示す技術課題のうち地山保持機構、止水機構に関する実験結果について報告する。

キーワード：シールド工法、コスト、拡大縮小シールド工法

*正会員 清水建設土木本部、**清水建設土木本部

表-1 技術課題

技術課題	拡大準備	拡大掘進
拡大（縮小）機構	○	—
地山保持機構	○	—
止水機構	○	○
カッター機構	○	○
拡大セグメント構造	—	○

2. 工法の概要

本工法は通常掘進のシールド機カッタ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を伸張り、拡大断面に合わせた先行掘削を行う。余掘り部分には地山の崩落防止を目的として開発した地山保持材を充填する。拡大準備としてシールド機テール部が拡大位置に到達するまで地山保持材を充填しながら掘進を行う。所定位置に到達後、シールド機拡大機構でシールド機胴体の両側部を張出し拡大したシールド機内で拡大セグメントを組立てる。拡大部掘進は一般のシールド工法と同じく、拡大セグメント長さ分の掘進と拡大セグメント組立を繰り返す。所定長さの拡大掘進終了後、シールド機縮小機構でシールド機胴体の両側部を元の位置に戻し、再び通常掘進を行う。現開発段階では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。

深度50mの大深度に施工延長10kmの長距離小口径シールドを計画した場合、2kmおきにシールド部を拡幅する本工法では、2kmおきに立坑を構築する場合や全線拡大断面で掘削する在来工法に比べて工費を20%以上削減できる。

工法の概要図を図-1に示す。

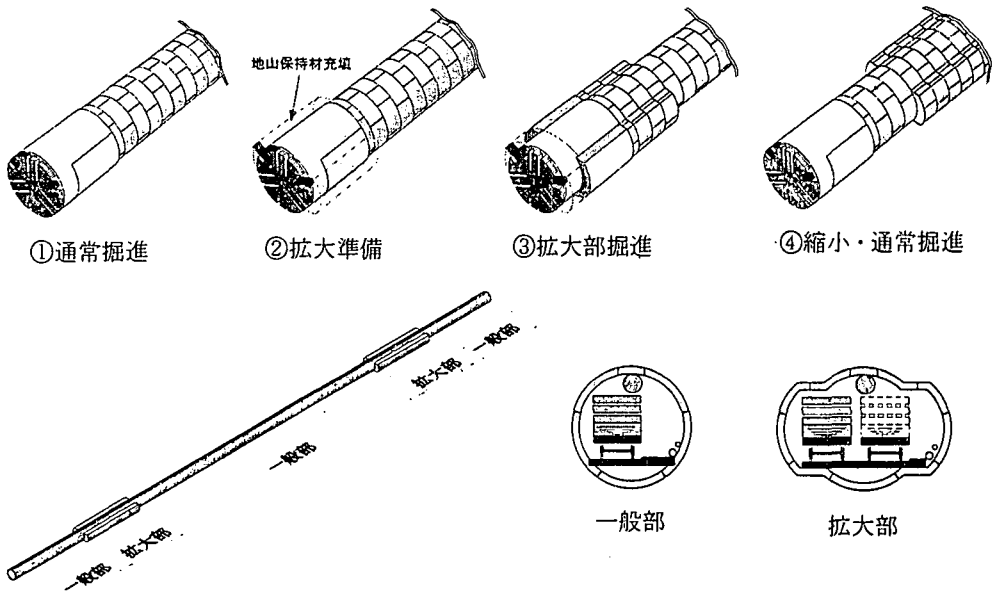


図-1 ES-Tube 工法概要図

3. 経済比較

表-2 に工法別経済比較表を示す。ただし、地山条件によって比率は前後する。

立坑間隔を長距離（10km）、大深度（土被り 50m）に設定した場合、ES-Tube 工法を基準に考えると全線拡幅する場合、主にセグメント製作費および残土処分費で約 2 割コストアップとなる。立坑部から資材搬入する場合、2km おきに立坑を築造すると立坑が 6 ヶ所になり ES-Tube 工法に比べて約 4 割コストアップとなる。凍結工法を用いてトンネル断面を拡幅する場合、凍結工法にコストがかかり、約 2 倍のコストアップとなる。

以上より、ES-Tube 工法は従来の工法と比較して最も経済的であると考えられる。

表-2 工法別経済比較表（立坑間隔：10km、土被り：50m）

	①ES-Tube 工法	②全線拡幅
工 法 概 略 図		
数 量	① 立坑：2 ヶ所 ② シールド掘削：10km （拡幅部：50m×6 回=300m） ③ シールド拡大縮小：各 6 回 ④ シールド機（φ2600）：1 台	① 立坑：2 ヶ所 ② シールド掘削：10km ③ シールド拡大縮小：なし ④ シールド機（φ3600）：1 台
比 率	1.0	1.2 （セグメント+残土処分）分 UP
	③資材搬入用立坑設置	④拡大工法（大深度のため凍結工法）
工 法 概 略 図		
数 量	① 立坑：6 ヶ所（2km おき） ② シールド掘削：10km ③ シールド拡大縮小：なし ④ シールド機（φ2600）：1 台	① 立坑：2 ヶ所 ② シールド機：10km ③ シールド拡大縮小：なし ④ シールド機（φ2600）：1 台 ⑤ 拡幅部凍結：50m×6 回=300m
比 率	1.4 （立坑）分 UP	1.9 （地盤改良）分 UP

4. 地山保持機構実験

4.1 地山保持機構概略

本工法は、拡大断面に合わせてシールド機に装備した伸縮カッターでシールド機胴体の両側部を張出すまで先行掘削を行う。シールド機胴体の両側部を張出すまで大きな余掘り部ができ、この余掘り部での地山の崩落の危険が考えられる。そこで、地山保持機構として伸縮カッターによる先行掘削によってできた余掘り部の地山の崩落防止を目的として掘進と同時に注入する充填材を開発した。（以下、地山保持材という。）

今回開発した地山保持材に要求される性能は、以下の3点である。

- ① 空洞への充填性がよく、ポンプ圧送・機内取込みが容易にできる流動性を有する。
- ② 地山の崩落を防止し、切羽部に廻りにくい自立性を有する。
- ③ 長期的に安定した性状を保つ経時保持性を有する。

4.2 水中打設実験

開発した地山保持材が要求される性能を満足することを確認するため水中打設実験を行った。同実験は圧送ポンプで水を満たした水槽に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する。表-3に配合表を示す。

地山保持材打設には一軸スクリーポンプを用いた。打設方法は、地山保持材を一軸スクリーポンプに取付けたホッパーに投入後、25mのホース内を圧送して水を満たした水槽に打設する。

図-2に水中打設実験概要図を、写真-1に水中打設状況を示す。

また、ポンプにホースを50m接続し圧送性能の確認を行った。

表-3 配合表

単位量 (kN/m ³)		
水	特殊粘土	高分子系混和材
9.13	2.18	0.0295

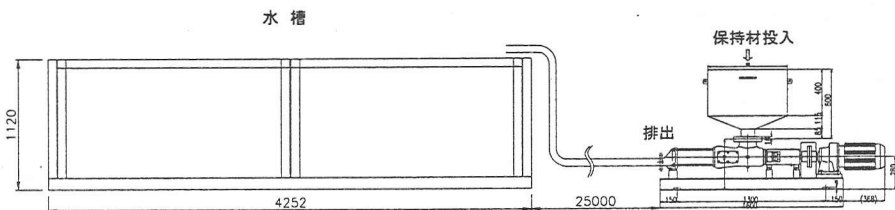


図-2 水中打設実験概要

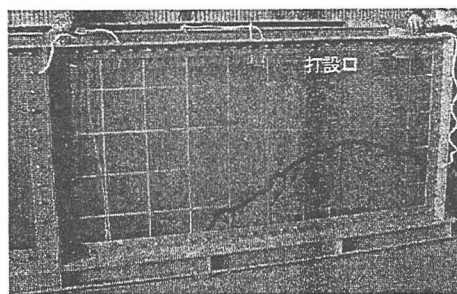


写真-1 水中打設状況

4・3 地山保持材性状試験項目

地山保持材の性状を確認するために以下の試験を行った。

① 崩落防止試験

φ50mm のボール（比重:2.4、3.6）を材料表面に置き、沈降量を測定する。このボールが完全に地山保持材の中に沈降しなければ、地山の崩落を防止できると判断する。（図・3）

ボールの比重は土粒子の比重を 2.7 として 2.7 に近いボール（2.4）と比較するため比重の大きいもの（3.6）を使用する。

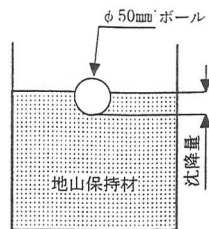


図-3 崩落防止試験

② ポケットベーン試験

地山保持材の自立性、コンシステンシーの評価をベーン試験にて行う。

$$\tau = \frac{M_{\max}}{\pi \left(\frac{D^2 H}{2} + \frac{D^3}{6} \right)}$$

τ : せん断強さ (N/mm²)

$M_{\max}$: 最大回転モーメント (N・mm)

D : ベーンの幅〔直径〕 (mm)

H : ベーンの高さ (mm)

③ アクリル二段箱試験

上段と下段の箱の間がアクリルの板で遮断されており、上段に珪砂、下段に地山保持材を入れて遮断板を抜き、地山保持材への砂の食い込み状況を観察する。（図・4）

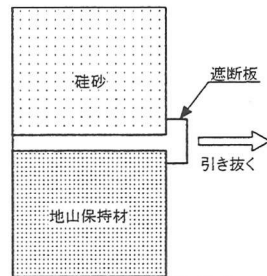


図-4 アクリル二段箱試験

④ 押し抜きせん断試験

φ15cm のモールドにφ5cm の開口を設けた蓋をセットし、錘を順次载荷する。開口部から地山保持材が抜けて蓋がスムーズに沈み込むまで錘を載せることにより、地山保持材の取込みやすさを確認する。（写真・2）

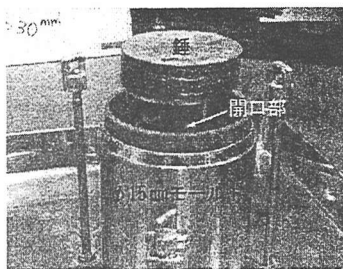


写真-2 押し抜きせん断試験

4・4 試験結果

表・4、5に試験結果を示す。表・4は水中打設せず混練後経時測定したものを示しており、表・5は水槽に打設し水槽から取出したものの経時測定をしたものを示している。

- ①ポンプ圧送性については25m、50mのポンプ圧送ができることを確認した。
- ②地山崩落防止については、材齢0日後における崩落防止試験において水中打設前と水中打設直後と比較すると、水中打設した直後にボールの沈降が増加していることから若干柔らかくなったと思われる。これは、他の試験からも言えることでポケットベーン試験では水中打設直後は、試験機で測定不能であり、押し抜きせん断試験では水中打設前と水中打設直後と比較すると錘が約10kg減っている。しかし、崩落防止の判断基準と考えているボールが水中に打設した直後沈降しないことおよびアクリル二段箱試験で明確な境界面が存在することから、地山の崩落を防止できると考える。
- ③期安定性については、材齢が7日、28日になってもどの試験においても、地山保持材の性能に変化がなく、長期的に安定した性状を保つことがわかった。

実際の工事においては、地山による拘束圧の影響が考えられる。今回の実験では、拘束圧の影響は検討していないが無拘束状態のせん断強度特性から十分要求性能を満たすと考える。また、土圧による地山保持材の脱水性については、地山保持材の性状から脱水しにくいと考える。

表・4 地山保持材試験結果

材 齢	0 日	7 日	28 日
崩落防止試験	$\rho = 2.4$ 1/4 沈降	$\rho = 2.4$ 1/3 沈降	$\rho = 2.4$ 1/4 沈降
	$\rho = 3.6$ 1/4 沈降	$\rho = 3.6$ 1/2 沈降	$\rho = 3.6$ 1/3 沈降
ポケットベーン試験	0.0014 N/mm ²	0.0012 N/mm ²	0.0010 N/mm ²
アクリル 2 段箱試験	境界有り	境界有り	境界有り
押し抜きせん断試験	19kg	22kg	22kg

表・5 地山保持材試験結果（水中打設後）

材 齢	0 日	7 日	28 日
崩落防止試験	$\rho = 2.4$ 1/2 沈降	$\rho = 2.4$ 1/2 沈降	$\rho = 2.4$ 1/2 沈降
	$\rho = 3.6$ 3/4 沈降	$\rho = 3.6$ 2/3 沈降	$\rho = 3.6$ 1/2 沈降
ポケットベーン試験	測定不能	0.0010 N/mm ²	測定不能
アクリル 2 段箱試験	境界有り	境界有り	境界有り
押し抜きせん断試験	9kg	10kg	5kg

5. 止水機構実験

5・1 目的

本工法における拡幅部の止水機構は従来機にない機構であり、シールとシールを当てることにより止水を行うため拡幅時の確実な止水性能が重要になってくる。そこで、拡幅部のスケールモデルを作製し、実際に水圧をかけた状態で拡幅部を摺動させ止水性能の確認を行った。

スケールモデルによる止水実験の前にシールとシールによる止水機構であるためシールの形状、性質を選定するための諸試験を行ったが、ここではスケールモデルによる止水実験について報告する。

5.2 止水試験装置

止水試験装置はシールド機外部を想定した水タンクとその中を摺動するシールド機拡幅部、拡幅部を押出すジャッキから構成し、拡幅ストロークは最大 200mm である。タンク内は大深度を想定して最大 0.6MPa まで加圧することができ、その水圧はタンク上部、中部、下部の 3 ヶ所に設置した水圧計で確認する。図-5、写真-3 に止水実験装置を示す。

本工法におけるシールド機拡幅部の止水機構は主に 3 種類のシール材の組合わせから成り立っている。図-6 にシール配置図を示す。シール①はマシン側に固定設置されるシールであり、拡幅部の上下および前部を止水するため 1 本につながれている。シール②は拡幅部の後部を止水し、摺動側であるため他のシールよりも材質を固めにした。シール③はセグメント側に固定設置される。

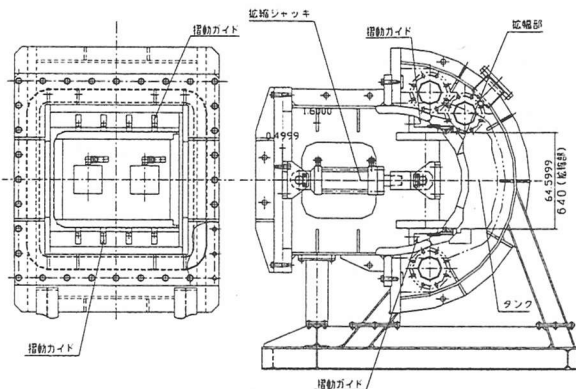


図-5 止水実験装置

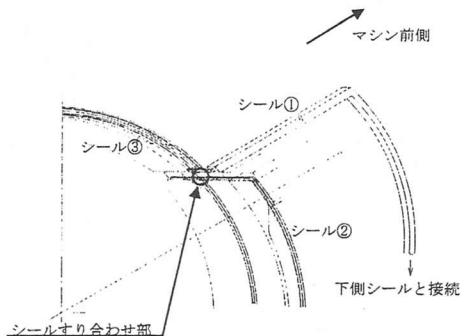
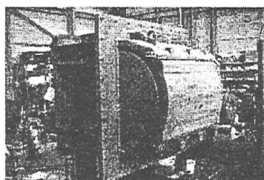
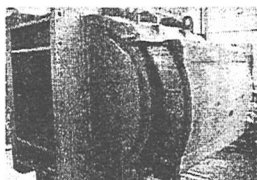


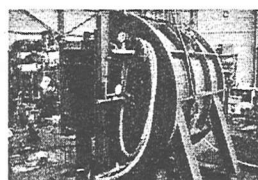
図-6 シール配置図



縮小時



拡大時



タンク設置

写真-3 止水実験装置

5.3 試験概要

本試験は、タンク内に水を入れタンク内を 0.6MPa まで加圧し、漏水の有無を目視にて確認する。確認する状態は静止状態（拡幅状態、縮小状態）と拡縮動作中の 2 水準である。拡縮スピードは 20mm/min、10mm/min の 2 水準で止水シールの耐久性を確認するため摺動回数を 50 回とした。

5.4 試験結果

表-6、7 に試験結果をしめす。

- ① 静止状態において拡幅状態、縮小状態ともに 0.6MPa まで加圧しても漏水は確認されなかった。
- ② 拡縮動作中において拡縮スピード 20mm/min、10mm/min の 2 水準ともに漏水は確認されなかった。

③ 摺動回数 50 回までは拡張スピード 20mm/min、10mm/min の 2 水準ともに漏水が確認されなかったことより今回の止水シールの耐久性は十分あると考えられる。

以上より、本工法の 3 種類のシールによる止水機構は 0.6MPa まで止水できることが確認でき、大深度においても十分止水できることがわかった。

表-6 静止状態

圧力 0.6MPa	漏水の有無
拡張状態	無
縮小状態	無

表-7 拡張動作中

圧力 0.6MPa	漏水の有無
ジャッキスピード 10mm	無
ジャッキスピード 20mm	無

6. あとがき

任意の場所でトンネル断面の拡大が可能であり、所定の延長の拡大断面築造後、元の断面に戻ることができ、従来工法よりもコストダウンができる ES-Tube 工法を開発した。本工法における大きな課題である伸縮カッターによる余掘り部の地山保持機構と拡張時の止水機構については今回の実験において確認できた。今後、残りの課題については実験等を行い確認していき、実証実験も行う予定である。

7. 参考文献

- 1) 今田 徹：大深度地下利用制度の意義と課題，地下空間シンポジウム 論文・報告集「第 4 巻」，pp.1～7，1999.1