

シールドメカニカル接合の試験施工

TEST CONSTRUCTION ON MECHANICAL SHIELD DOCKING

吉村宗男*・田中益弘**・堀田共志一*・上木泰裕*

Muneo YOSHIMURA, Masuhiro TANAKA, Toshikazu SATTA, and Yasuhiro UEKI

The mechanical shield docking is a system where a cutter face of one shield machine is fit into skin plate of another shield machine of which cutter face is gone back. The cut off of water is performed with two seals which are tube seal and sand seal. Test construction of the mechanical shield docking was conducted at the arrival shaft of Yazawagawa shield project for Tokyo Metropolitan Government Bureau of Sewerage.

From the test results, it was found that the amount of water leakage was less than 2.5 l/min and this mechanical shield docking showed a good performance.

Key Words: Test construction, mechanical shield docking, cutter face, tube seal

1. はじめに

長距離シールドトンネルを施工するために必要な地中接合工は、従来凍結工法並びに薬液注入工法といった補助工法を用いてきたが、接合用シールド機の製作、シールド機相対位置検知の確立による高い接合精度とチューブシールによる止水機構の確証により、補助工法を用いることなく安全かつ漏水のない高品質のトンネル地中接合工法を開発し、その試験施工を行った。

この報文は開発したシールドメカニカル接合工法と、その試験施工の概要について報告するものである。

2. シールドメカニカル接合工法の概要

今回開発したメカニカル接合は、シールド機械のカッターディスク（貫入型シールド機）を相手側シールド機（受入型シールド機）内に貫入させ、接合部のスキンプレートとカッターディスク間をシールで止水するものである。

その接合フローを図-1に示す。今回開発したメカニカル接合用シールド機の基本特徴を整理すると以下のとおりである。

* 鹿島建設株式会社 土木技術本部

** 鹿島建設株式会社 技術研究所

① 貫入型シールド機

シールド機外径より小さいカッターディスクを有し、このカッターディスクを受入型シールド機へ貫入させる。

② 受入型シールド機

シールド機外径より小さいカッターディスクを有し、接合時にはこのカッターディスクをシールド機内に摺動後退させ、貫入型シールド機の貫入スペースを確保する。

③ 止水機構

貫入型シールド機のスキンプレートとカッターディスク間の止水は図-2に示す土砂シールで、また受入型スキンプレートと貫入させたカッターディスク間の止水は、受入型スキンプレート内に組み入れたチューブシールを膨らますことにより行う。さらに止水をより確実にするため、シール部の僅かな間隙に充填材を注入する止水材注入、及び排泥装置を設ける。なお、カッターディスクへのチューブシールの密着性を良くし掘削による摩耗を防ぐため、カッターディスク面をハードフェーシング加工する。また接合部の洗浄のため、貫入型、受入型シールド機にジェット水噴射装置を設ける。

3. 試験施工の概要

試験施工は東京都下水道局谷沢川雨水幹線工事（仕上がり内径4.75m、延長1,160m）の到達立坑を使って行った。

すなわち、図-3に示す貫入型シールド機仕様を有する泥土圧式シールド機を、受入型シールド機に想定した模擬シールド機を到達立坑に設けて接合したものである。

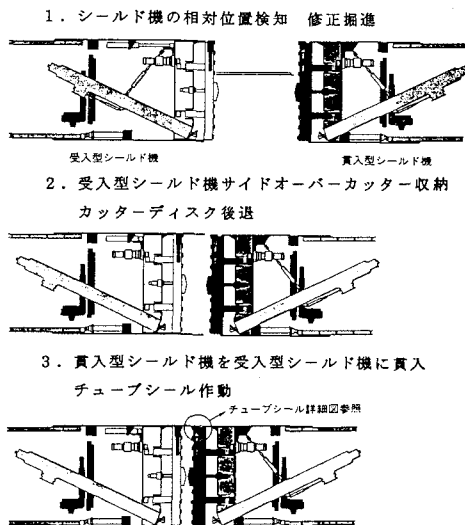


図-1 接合フロー

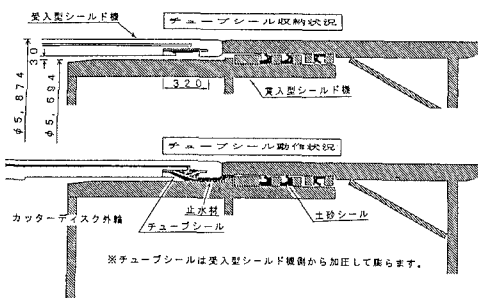


図-2 チューブシール形状・シール機構

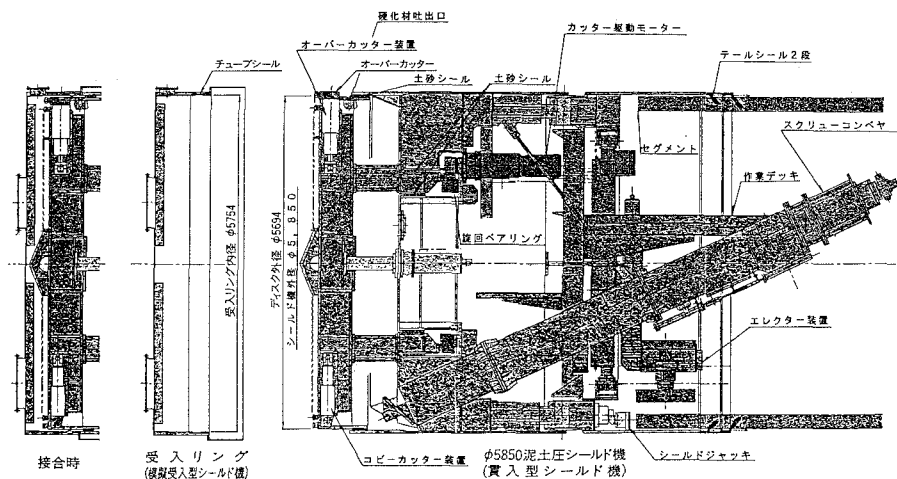


図-3 シールド機全体組立図

シールド機の仕様は次のようになる。

① 貫入型シールド機とサイドオーバーカッター

貫入型シールド機は図-4に示す世田谷区玉川台から上野賀間の約1.2kmを掘進するため、掘削量95mmの最外周カッター（サイドオーバーカッター）を4基取り付け（シールド機外径 $\phi 5,850\text{mm}$ に比較して、カッターディスク外径 $\phi 5,694\text{mm}$ が小さい）。このカッタービットは通常シールド機の最外周ビットと同等品（E5相当の超硬チップ・SKC24のビット合金）である。またサイドオーバーカッターのロッド軸も、カッター回転トルクが1基に集中しても変形しない強度としている。

② 受入型模擬シールド機

図-3に示すように、受入型模擬シールド機は接合地点まで掘進後にカッターディスクを後退し、チューブシールを露出した状態を想定して、到達立坑に取り付けた。

③ 止水機構

(a) チューブシール

チューブシールはカッターディスク外縁への密着を保つリップ部と、このリップをスキンプレートから押し出して密着性を高めるための補助ゴム膜から成り立っており、その材質は次に示すとおりである。

リップ→合成ゴム（NBR）＋平鋼板 補助ゴム膜→合成ゴム（NBR）＋ナイロン繊維。

今回使用したNBR（ニトリルゴム）は、アクリルニトリル量が36～42%程度とニトリル量の高い（圧縮永久ひずみが小さく、引張強さの大きい）ものを使用した。チューブシールの耐圧力は最高 15kgf/cm^2 程度であり、リップを作動する時は、シール部に作用する圧力より 1.5kgf/cm^2 程度プラスした圧力水を補助ゴム膜に供給すればよい。

(b) 土砂シール

土砂シールは、シールドカッターディスクやスクリーコンベヤの軸受けシールとして多くの実績を持つもので、その材質は耐油性や耐摩耗性を考慮して、チューブシールと同じNBRを使用した。

(c) 補助設備

・接合部洗浄のため、貫入型、受入型シールド機のそれぞれにジェットノズルを3か所設けた。

・止水の補助機能として、貫入型シールド機に4基の止水材注入及び排泥装置を設けた。

・貫入型シールド機のカッターディスク面を、厚さ5mmのハードフェーシング加工とした。

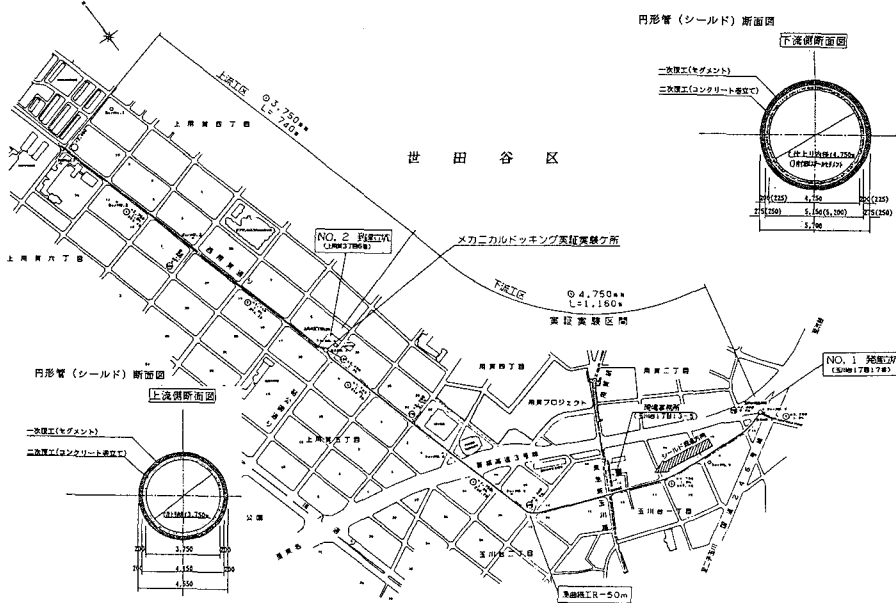
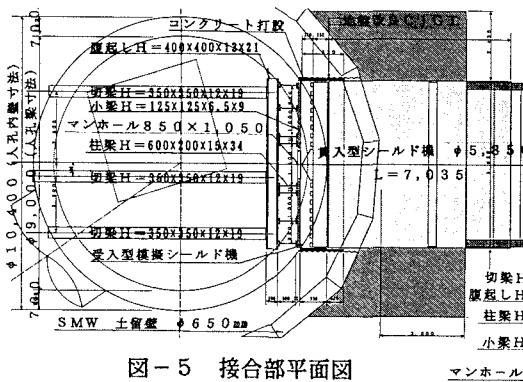


図-4 平面図

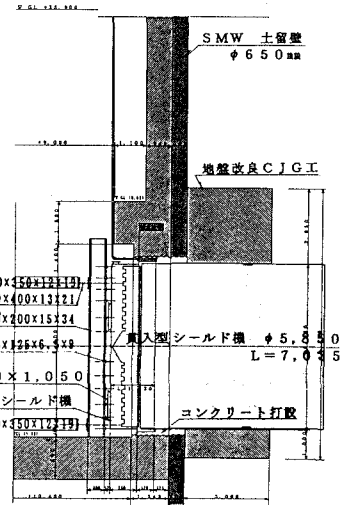
表－１ 実証試験施工の作業手順

① 接 合 準 備 工	② シールド掘進	③ 接 合 工	④ 片 付 ・ 検 査
(1) (到達立坑作業) 1. 上掘工区作業中止 (コンクリート巻立て) 2. 作業床解体工 3. 立坑下清掃工 4. 到達位置測量工 5. 概コンクリート新り工 (30%完了している) 6. 模擬シールド掘削工 (チューブ取付アンカー等で固定) (土圧計を取り付ける) 7. 反力受設置工 (小梁、柱梁、腰起し、切梁材取付) 8. 作業床復旧工 9. 隣間コンクリート打設 (模擬シールド機と機体の隙間) 10. 到達機切工 (SMW 500H鋼切筋) 11. 接合部充填完工	(2) (マシン相対位置確認) 1. チェックボーリング工 接合 117m, 317m 手前で実施 2. シールド掘進工－① 測量 接合30m手前で蛇行修正 3. シールド掘進工－② 測量 接合15m手前で蛇行修正 4. シールド掘進工－③ 測量 接合7m手前よりコピーカッター使用 5. シールド掘進工－④ 測量 コピーカッター、サイドオーバーカッター後退 接合地点より120cm手前 6. 接合確認工 (距離、センター) 7. 掘進、接合地点にて掘進停止 (5cm手前) 8. 接合精度確認工 (距離、センター)	(3) (立坑・坑内作業) 1. カッター回転チャンパー内 土砂排出 (水を噴出し、攪拌しながら掘進) 2. 接合面清掃 (模擬シールド機チューブ面及び貫入型シールド機カッター外周面をジェット水により清掃する ファイアスコープで確認) 3. カッター回転停止 4. 接合面まで推進 (1～3cm) ジェット水使用 ファイアスコープで確認 5. チューブシール作動 (立坑側より行う) 6. 一次止水テスト (切羽外周より注水する) 7. 止水材注入工 (OH) 8. 切羽外周より注水(二次止水テスト 注水量2.5kg/l/㎡) 9. チャンパー内漏水確認	(4) (接合部確認工) 1. 模擬シールド機内土砂片付 2. チューブシール状況確認 3. 反力受解体工 4. 模擬シールド機解体工 (前面のみ解体) 5. カッタースポーク状況確認 土砂シール # 止水注入範囲 # 接合変位 # カッターディスク # 6. シールド機解体準備 7. シールド機解体工 8. 接合面切断熱による状況確認 9. シールド機解体完了

3.1試験施工の
目的
試験施工
では以下の
項目につい
て検証した。



図－５ 接合部平面図



図－６ 接合部断面図

- (a)掘削性の検証 ・掘削径を拡大する機構（サイドオーバーカッター）による1,160mの掘進性能。
・接合前のサイドオーバーカッターの収縮。
- (b)シールド機相対位置の確認 ・チェックボーリング（垂直ボーリング）実施により、シールド機の相対位置。
- (c)止水機構の検討 ・1,160mの掘進による土砂シールの止水性能。
・チューブシールの作動による止水性能。
- (d)補助機能の検証 ・ジェット水噴射装置による、接合部の洗浄効果。
・シール部周辺の僅かな間隙に止水材を充填し、万全な止水性能。

3.2試験施工

実証試験施工の作業手順を表－１に示す。

(a)接合準備工

受入型模擬シールド機は、貫入型シールド機到達部に固定し、 2.5kgf/cm^2 の推力に耐えうるよう支保工材を図-5、6に示すように配置した。到達立坑構築と受入型模擬シールド機との隙間には、立坑の鉄筋から受入型模擬シールド機を固定した後、コンクリートを打設した。その後、到達部SMWのH形鋼材を切断し鏡切を行い、貫入時の地山の崩壊を防ぐため、受入型模擬シールド機内の接合部に水を填充した。

(b)シールド掘進

マシン相対位置の確認は、接合手前117mと317mの2ヵ所でチェックボーリング（垂直ボーリング）を行い、地上部の基線と坑内の基線との関係を光波測量により行った。シールド機の掘進管理は、シールド機の基線に対する誤差が30mmを越えると判断した場合に、コピーカッターを使用し修正を行い、接合手前48.6mからのR-120m（CL=34.3m）までに、基線に対する誤差が30mmを大きく越えることがないようにした。一方、サイドオーバーカッターは接合手前1.2mで収縮させ、測量の頻度を接合手前25mから1回/2Rに増し、接合手前5cmまで掘進を行った。

(c)接合工と止水テスト

貫入型シールド機のチャンバー内の土砂は、加水しながら攪拌し搬出した。一方、チューブシールの密着面は接合手前40cmより、貫入型及び受入型模擬シールド機双方ともジェット水噴射装置によって、貫入型シールド機が接合するまでジェット水を噴出し、接合した後も15分程度洗浄を続けた。なお洗浄状況の確認は、受入型模擬シールド機内の水を排水し、ハッチから機内に入り、受入型模擬シールド機と貫入型シールド機のカッターフェイスとの隙間が30mm程度と少ないため、ファイバースコープによって行った。チューブシールの作動後、止水テストを実施した。実際の接合法では、チューブシール作動後に止水材の注入を続けて行なうのであるが、今回の実証実験ではチューブシールのみの止水効果を検証する意味で、チューブシール作動後、受入型シールド機内の水を排水し、漏水量を計量することとした（一次止水テスト）。止水材料としては、チューブシールが十分作動しなかった場合を考えて、セメント系固化材とチューブシールのバックアップ材としてOH（822N）を選定した。セメント系固化材としては、止水性、強度を有し、ブリージングが少なく流動性の良いものを、またOH（822N）は土砂への浸透性が良く、固化時間の長いものを選んだ。セメント系固化材とOH（822N）は、モデル実験（実機の接合状態を約1/4にモデル化したもの、写真-1）によってあらかじめ特性を把握し、一次止水テストによる漏水状況によって使い分けることとした。止水材の注入は貫入型シールド機側から行い、特にOH注入の際はゲルタイムを長くするため、あらかじめ水によって冷やしたOHと水を1ショットにてグラウトポンプ（吐出圧力： 35kgf/cm^2 、吐出量：10～36ℓ/min）を使用し注入した。二次止水テストは一次止水テスト同様、受入型模擬シールド機内の水を抜き、漏水量を計量した。

3.3試験施工結果

試験施工により、以下のことが確認できた。

(a)シールド機相対位置

シールド機相対位置の確認は、チェックボーリング（垂直ボーリング）2ヵ所により行った。その結果、地上部の基線と坑内の基線との誤差は、坑内基線が地上部の基線に対し右へ6mmであった。また接合までのシールド機相対位置誤差は表-2に示すようであった。

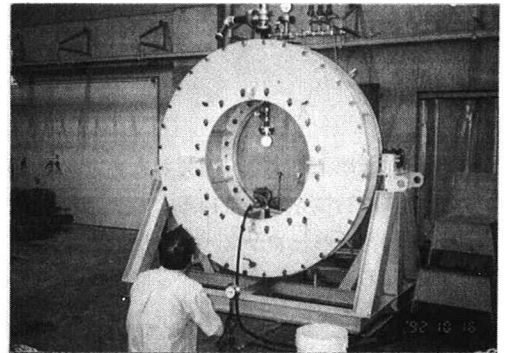


写真-1 実験装置

表-2 シールド機相対位置誤差量

接合までの距離		2.5m	1.5m	7m	2m	1m	0.5m	0m
シールド機	上下	±1.2	±1.6	±1.5	±1.0	±.7	±.5	±.4
	縦横	左右	右2.2	右1.1	右.4	左.1	左.7	右1.左3

基線誤差はR-120mまでに修正し、シールド機誤差も徐々に少なくなるよう掘進した。その結果、最終接合精度は、相対誤差5mm、角度誤差0.03°であった。

(b) サイドオーバーカッターの収縮

サイドオーバーカッターは掘進中の摩耗もわずかであり、その性能を十分発揮できた。接合時のカッター収縮は縮小力22tfによって行ったが、4基のうち1基が完全には収縮しなかった。これはサイドオーバーカッターのシリンダー周りにコラムによる改良粘土が付着したものであり、サイドオーバーカッター取付部の形状を変えることで対応できることがわかった。

(c) ジェット水噴射装置の洗浄効果

ジェット水噴射装置によるチューブシール密着箇所の洗浄効果は、ファイバースコープによる写真-2に見られるようにかなり効果のあることが認められた。

(d) 止水機構の検証

ファイバースコープによるチューブシールの作動状況を写真-3に示す。チューブシールの作動は補助ゴム膜からの漏水もなく、完全に近い形で機械的に行うことが出来た。補助ゴム膜の圧力保持は、24時間の後でも0.2kgf/cm²程度の減少であり、かなり高いことが認められた。また一次止水テストの結果、漏水量は2.5ℓ/min程度であり、チューブシール及び土砂シールが止水性の高い止水機構であることが実証された。

(e) 止水材の注入効果

一次止水テストの結果、2.5ℓ/min程度の漏水のため止水材は土砂への浸透性の良いOH(822N)を使用し、シール部周辺の僅かな隙間に300ℓ程度注入を行った。4時間の養生後の二次止水テストの結果、漏水量は3cm³/min程度であり、チューブシールの補助機能として止水材を充填することで、万全な止水機構となった。

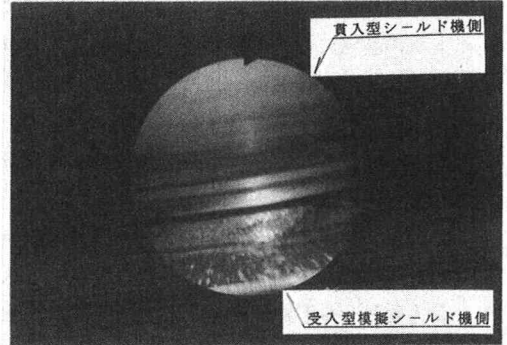


写真-2 洗浄確認

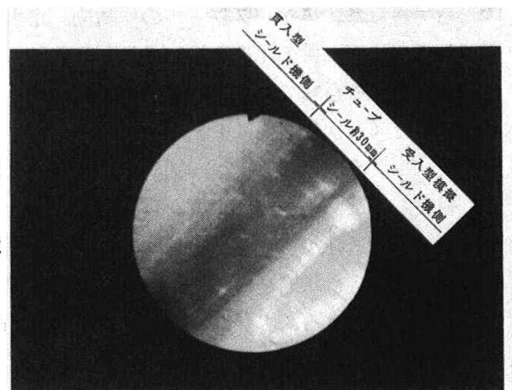


写真-3 チューブシール作動状況

4. おわりに

今回の試験施工により、開発したメカニカル接合工法の性能を検証することができた。今回開発した接合工法は以下の特徴を有している。

- ① サイドオーバーカッターの突出量が少なく、耐久性に優れている。
- ② 使用するシールド機の種類を問わない。
- ③ 異機種同士（例えば泥水/土圧）の接合もできる。
- ④ 接合するシールド機の外径は同径、異径を問わない。
- ⑤ 通常型シールド機との違いは以下の点である。

- ・貫入型カッターディスク
- ・受入型カッターディスク、カッターディスクスライド装置

なお、今回のメカニカル接合の開発は川崎重工との共同によるものである。