

トンネル 特集

浅深度・大深度における泥土圧式シールド工法への適用

—ツインスクリュシールド工法の開発と実用化—

伊 東 憲・榮 毅 熾

泥土圧式シールド工法では高水圧下での施工の場合、排土装置であるスクリュコンベヤから掘削土砂が噴出し切羽土圧の制御ができなくなるといった問題点等があった。そこで、この問題点を解決するためにツインスクリュシールド工法を開発した。

本技術は、掘進速度が変化しても設定した切羽土圧になるようにツインスクリュが自動回転して切羽土圧を制御し、連続的な排土を可能にしたシステムである。このほか、ツインスクリュの回転数を計測することで掘削土量管理が可能であり、土砂を排土口から後方へ圧送する機能も備えている。

キーワード：トンネル，シールド工法，泥土圧式シールド，切羽土圧制御，大深度，浅深度，排土装置

内容，実験結果，実施工結果について報告する。

1. はじめに

近年，都市部においては人口集中による都市施設の需要拡大や都市機能の多様化等のため，地下の過密化が深刻な問題となり，コストダウンを前提とした大深度大断面の地下空間構築技術の開発が急務となっている。

都市部における地下空間の構築，そのうちトンネルの構築においては，シールド工法により施工を行うのが主流となっており，泥水式シールドと泥土圧式シールド工法に大別される。しかし泥土圧式シールド工法は，地下 30 m を超える大深度施工の実績はあまりなかった。

これは，大深度になると切羽が高水圧となり，排土装置であるスクリュコンベヤから掘削土砂を取込む際，掘削土や地下水が押出されてしまう噴発現象を起し，切羽土圧の制御ができなくなるといった問題があったからである。切羽土圧を制御できなくなることは，すなわち周辺の地盤を変状させることである。また，スクリュコンベヤの操作はシールド機オペレータが手動で行っていることから，人的な操作ミスもあった。

これらの問題を解決するため，大成建設株式会社と石川島播磨重工業株式会社は，1996 年からその原因であるスクリュコンベヤの構造，手動による操作の改善としてツインスクリュシールド工法（TS シールド工法）の開発を行った。

本報文では，ツインスクリュシールド工法の開発の

2. 開発概要

（1）開発の目的

本工法の開発の目的は，泥土圧式シールド工法を大深度に適用可能な新しい切羽安定制御技術を完成させることはもちろんであるが，大深度対応，近接施工対策や切羽土圧の安定にとどまらず浅深度まで対応可能な技術開発を行うことである。

（2）システムの説明

シールドトンネル施工時には，トンネル周辺地盤の乱れによる周辺への影響を防止することが重要となる。このためには，シールド掘進時に切羽部を適正な土圧に保持するとともに掘進延長に合った土量を掘削し排出することが必要である。

泥土圧式シールド工法では，スクリュコンベヤの回転数を調整して掘削土の排出量を制御することにより切羽土圧の管理を行う。しかしながら，切羽土圧がスクリュコンベヤの排土抵抗を上回った場合には，掘削土が切羽の圧力により押出されてくる。これを防止するため掘削土の排出は，排土ゲートの開度を調整して切羽土圧が変化しないように行っている。これらの作業は手動操作で行われる場合が多く，特にスクリュコンベヤからの噴発が激しい場合には，切羽土圧の制御が不能になる。

また，スクリュコンベヤは土砂との摩擦抵抗により

排土制御を行う機構であり、回転ロスが発生しやすい
うえ、スクリュ回転速度が排土量とリンクせず排土量
の把握が難しいという問題がある。

これらの問題を解決するため、スクリュコンベヤ本
体の土砂排出機構に密閉性を持たせた排土装置である
ツインスクリュを開発した。これを中央制御システム
に組込むことで、シールド掘進時の切羽土圧の自動制
御および掘削土砂量の管理を可能とした。ツインスク
リュシールドシステムは以下により構成される。

- ① 泥土圧式シールド機
- ② ツインスクリュ
- ③ 中央制御システム

すなわちツインスクリュシールドシステムとは、泥
土圧式シールド機にツインスクリュを装備し、中央制
御システムの集中制御により掘進管理を自動化し、切
羽土圧の制御および掘削土砂量の管理を行うものであ
る。

またツインスクリュの回転数を計測することで、掘
削土量管理も可能である。

特徴を以下に示す。

- ① 高水圧下、近接施工等での自動による切羽の安
定制御
- ② 土量管理が可能
- ③ 排土口から後方へ土砂を圧送可能

図-1 にシステム全体図を示す。

切羽土圧の制御は、あらかじめ土質データより算出
された適正な土圧に目標土圧を設定する。掘進管理で
は、切羽土圧をその目標土圧に保持することにより地
山の乱れを防止する。中央制御システムでは、リアル
タイムで送られてくるこれらのデータを用いて、ツイ

ンスクリュを自動回転させて切羽制御を可能にする。

(3) ツインスクリュの構造

ツインスクリュは、2本の軸付きスクリュコンベヤ
とそのケーシング、および駆動モータから構成されて
いる。2本の軸付きスクリュコンベヤは、フライト
(羽根)の厚みが異なる2本のスクリュを相互に逆方
向の螺旋にして組合せる構造としている。構造図を
図-2 に示す。

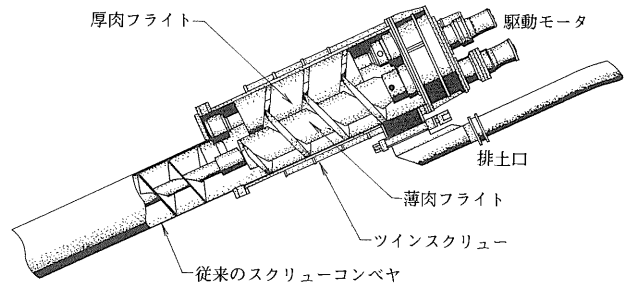


図-2 構造図

この機械的密閉構造により、ツインスクリュは低水
圧～高水圧に対して止水性能を発揮し、掘削土の排土
性能を連続的に行える。

3. 実証実験

(1) 実験概要

実証実験は、排土能力 100 m³/h のツインスクリュ
排土装置に対して、寸法で約 1/3 に縮小したモデル実
験装置 (排土能力 1.4 m³/h) を製作して行った。実
験装置の装置図を図-3 に、その諸元を表-1、全景
を写真-2 に示す。

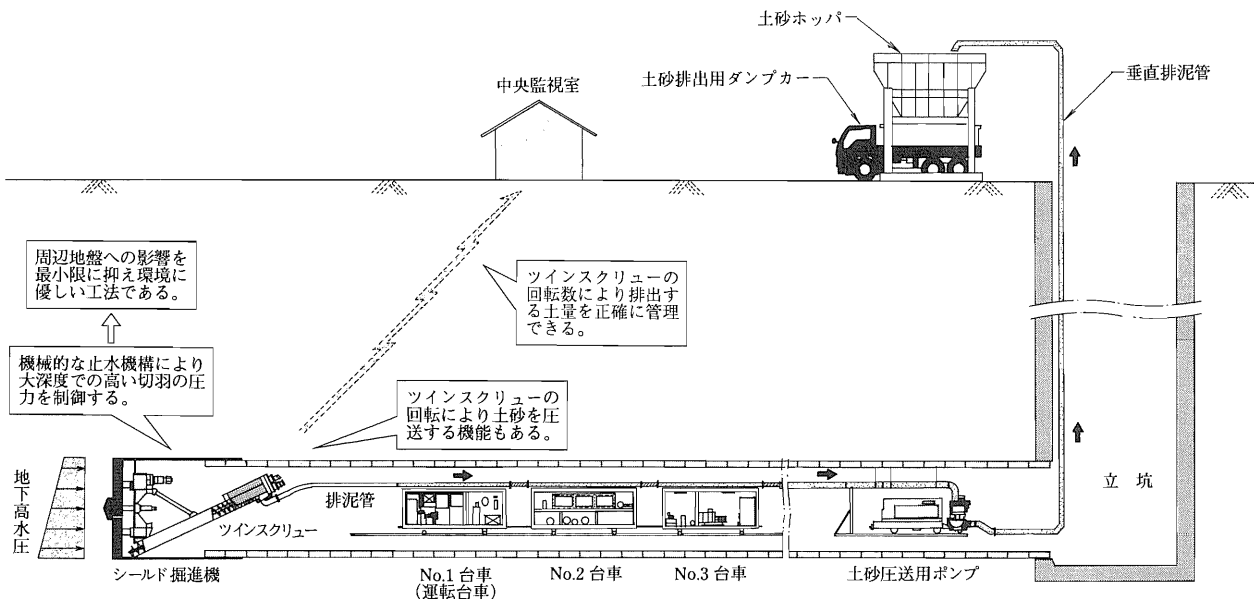


図-1 ツインスクリュシールド工法システム図

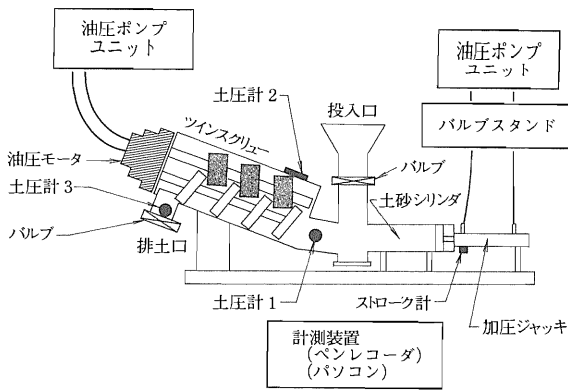


図-3 実験装置図

表-1 実験装置の諸元

輸送能力	1.4 m ³ /h
回転数	0~12 rpm
薄肉フライト径×フライトピッチ	φ199 mm×P 92 mm
厚肉フライト径×フライトピッチ	φ199 mm×P 92 mm
駆動トルク	12.2 kN·m

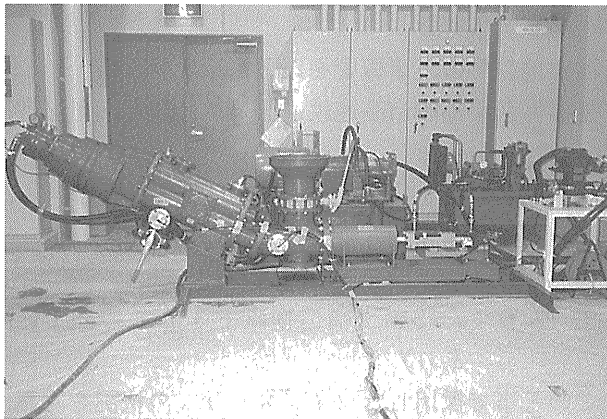


写真-2 実験装置全景

(2) 実験の方法

実験パラメータとして、試料の粒度分布、スランプ、切羽土圧、スクリュの回転数を変化させることにより、ツインスクリュ排土装置前後での土圧、スクリュの回転トルク、排土される土砂量の変化を計測した。また、2本のスクリュの羽根が噛込む部分の隙間や、羽根と回転軸との隙間が止水性に大きく影響するものと考え、その隙間を5 mm、3 mm および1 mm 以下と変化させて実験を行った。

実験に用いる泥土は、砂質泥土と砂礫泥土の2種類としスランプ10 cmと20 cmに調整して行った。切羽土圧は0.3, 0.6, 1.0 MPaの3種類、スクリュ回

表-2 実験条件一覧表

泥土種類	砂質泥土, 砂礫泥土
スランプ	20 cm, 10 cm
切羽土圧	0.3, 0.6, 1.0 MPa
スクリュ回転数	3, 6, 12 rpm
羽根の隙間	5 mm, 3 mm, 1 mm 以下

転数は3, 6, 12 rpmの3種類とした。表-2に実験条件一覧表を示す。

(3) 実験結果

(a) 高水圧切羽の安定制御

図-4に砂質泥土、スランプ20 cm、羽根の隙間1 mm以下という条件における切羽土圧の経時変化図を示す(凡例の1M-3は、切羽土圧1 MPa、スクリュ回転数3 rpmの条件を表す)。

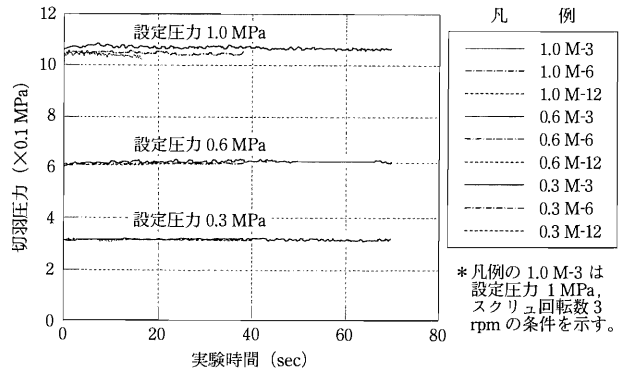


図-4 切羽土圧経時変化図(砂質泥土)

開発したツインスクリュ排土装置は、高水圧(1 MPa)という条件下において、設定した切羽土圧を安定制御しながら排土でき、また切羽土圧の大きさ、スクリュ回転数の影響をほとんど受けずに、切羽土圧を安定制御できる装置であることがわかった。スクリュ回転時の切羽土圧平均値に対して、瞬間的に低下する変動圧力は、各切羽土圧においても0.01~0.03 MPaという結果であった。また、スランプ10 cmの砂質泥土については、羽根の隙間3 mmという条件においても切羽土圧を同様に安定制御することができた。

砂礫泥土に関しては、羽根の隙間3 mm, 5 mmという条件においてもスランプの大きさに影響されず、切羽土圧を同様に安定制御することができた。

(b) 排土状況

実験における排土量と理論排土量(スクリュ1回転当りの土砂搬送容量と回転時間から計算)を比べた結果、このツインスクリュ排土装置の場合は、羽根の隙間が大きい場合、実際の排土量の方が多くなる傾向があるが、羽根の隙間を小さくすれば理論排土量と実際の排土量がほぼ一致し、スクリュ回転数に合った定量の排土が可能であることを確認した。

4. 実用化

粘性土地盤と砂礫地盤の工事での切羽土圧の制御、

土量管理の実績について以下に紹介する。

(1) 粘性土地盤での施工

(a) 工事概要

粘性土地盤の工事概要を以下に示す。

- 工事件名：平成 8 年度 23 号川越共同溝シールド
その 2 工事
- 工事概要：泥土圧式シールド，掘削外径 5.74 m，
延長 1,755 m
- 土質：沖積粘性土層， N 値=0~7
- 土被り：19~22 m

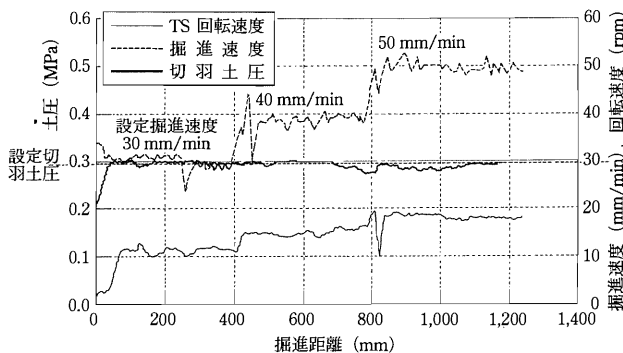
この工事で採用したツインスクリュの仕様を表—3に示す。

表—3 使用したツインスクリュの仕様

輸送能力	101.7 m ³ /h
回転数	0~23.5 rpm
薄肉フライト径×フライトピッチ	φ625 mm×P 450 mm
厚肉フライト径×フライトピッチ	φ395 mm×P 450 mm
駆動トルク	56.1 kN·m

(b) 切羽土圧の自動制御の実績

1 リング掘進中に掘進速度を 30, 40, 50 mm/min と強制的に変化させツインスクリュが自動制御できるか否かの確認を行った。データは掘進速度，切羽土圧とツインスクリュ回転速度の実測値とした。結果を図—5に示す。



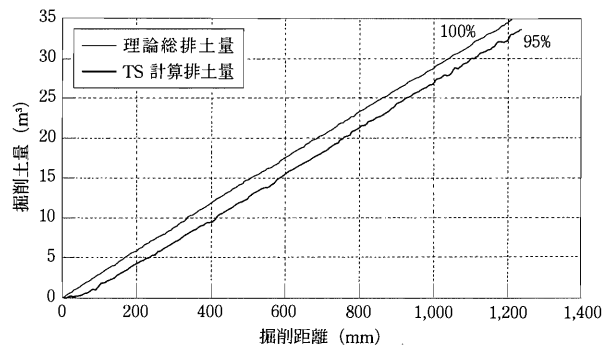
図—5 切羽土圧の自動制御の実績図

この結果，掘進速度が速くなるにつれてツインスクリュの回転数も自動的に高くなり，回転数の変化は速度の変化に追従していることが確認できた。また，このような速度の変化があっても，実測の切羽土圧は設定値の 0.3 MPa に制御できていた。

(c) 土量管理の実績

土量管理においても，同じく 1 リング掘進中のデータとし，掘進距離に応じた掘削土量の理論値（掘削土量に加泥材の注入量を加算した値）に対して，ツインスクリュの回転数から算出した土量値の比較を行った。

結果を図—6に示す。



図—6 掘削土量管理の実績図

理論総排土量を 100% とし比較すると，ツインスクリュ回転数から算出した総排土量は 95% と理論値に近い値となった。

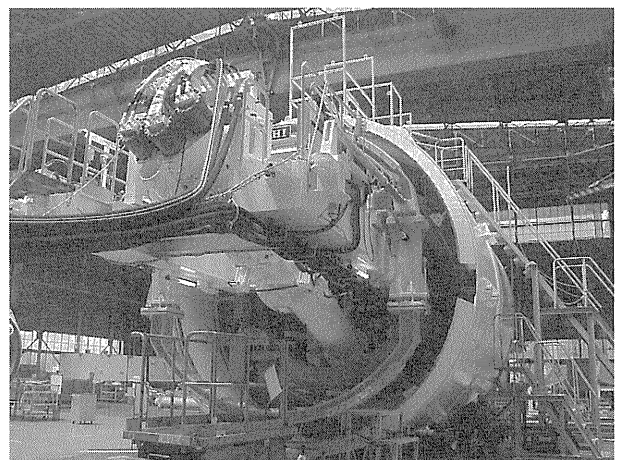
(2) 砂礫地盤での施工

(a) 工事概要

砂礫地盤での工事概要を以下に示す。

- 工事件名：福岡市高速鉄道 3 号線渡辺通南工区建設
工事
- 工事概要：泥土圧式シールド，掘削外径 5.44 m，
延長 756 m
- 土質：沖積砂礫層， N 値=10~30
- 土被り：7~9 m（構造物直下 3 m での施工区間あり）

この工事で採用したツインスクリュの状況を写真—3に，その仕様を表—4に示す。



写真—3 ツインスクリュを装備したシールド機

表—4 使用したツインスクリュの仕様

輸送能力	67 m ³ /h
回転数	0~23 rpm
薄肉フライト径×フライトピッチ	φ597 mm×P 324 mm
厚肉フライト径×フライトピッチ	φ387 mm×P 324 mm
駆動トルク	48.7 kN·m

(b) 切羽土圧の自動制御の実績

前工事と同様に、ツインスクリュが自動制御できるか否かの確認を行った。この時の掘進速度の変化は10, 15, 20 mm/minとした。その結果を図-7に示す。

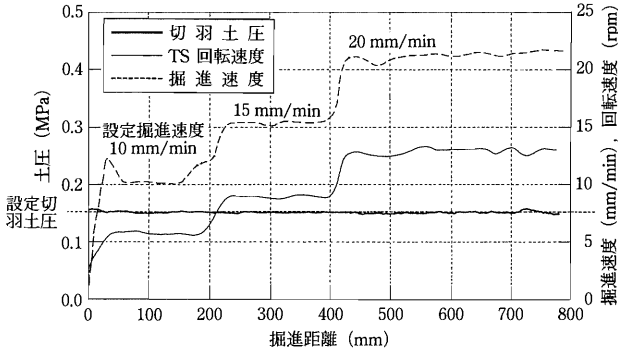


図-7 切羽土圧の自動制御の実績図

この結果、ツインスクリュ回転速度が掘進速度の変化に追従し、切羽土圧が設定値の0.15 MPaに制御できた。

(c) 土量管理の実績

土量管理においても、前工事と同様の確認を行った。その結果を図-8に示す。

理論総排土量（掘削土量に加泥材の注入量を加算し

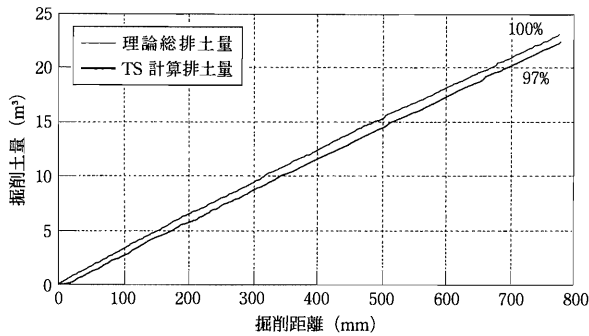


図-8 掘削土量管理の実績図

た値)を100%とし比較すると、ツインスクリュ回転数から算出した総排土量は97%と理論値に近い値となった。

5. おわりに

本システムは、粘性土および砂礫地盤での実施工により切羽土圧制御、掘削土量管理の性能が確認された。しかし、礫を多く含む地盤ではツインスクリュ内のフライトやケーシングの摩耗が想定されるため、現在摩耗に対する研究を進めている。この研究で耐久性を向上させ、ツインスクリュシールド工法を泥土圧シールドの一般工法に目指したい。

JCM A

《参考文献》

- 1) 栄 毅熾, 土橋 功, 北山仁志: 大深度土圧式シールドにおける切羽土圧制御装置の開発と実証実験, 建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp. 50-53, 1997年10月.
- 2) 土橋 功, 栄 毅熾, 広重典昭, 北山仁志: ツインスクリュによる大深度土圧式シールドシステムの実証, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第6部, pp. 152-153, 1999年9月.
- 3) 伊東 憲, 栄 毅熾, 中根 隆, 常松 優: ツインスクリュシールド工法による砂礫地盤での実証施工, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, 第6部, pp. 131-132, 2002年9月.

[筆者紹介]



伊東 憲 (いとう けん)
大成建設株式会社
技術センター
土木技術開発部
シールド・TBM工法開発室
課長代理



栄 毅熾 (さかえ たけし)
大成建設株式会社
技術センター
土木技術開発部
シールド・TBM工法開発室
部長