

ツインスクリュシールド工法の実用化

伊東 憲¹・栄 毅熾¹・中根 隆²

¹正会員 大成建設株式会社 土木技術開発部（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町334-1）

²石川島播磨重工業株式会社 油機・シールドプロジェクト外部（〒478-8650 愛知県知多市北浜町11-1）

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ア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う問題点等があった。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：泥土圧式シールド、切羽土圧の安定制御、大深度、浅深度、排土装置

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。なかでも泥土圧式シールド工法は、地下 30m 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アから掘削土砂を取込む際、掘削土や地下水が押し出されてしまう噴発現象を起こし、切羽土圧の制御ができなくなるという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、スクリュコンベア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アの構造・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。

本論文では、ツインスクリュシールド工法の開発

の内容、実験結果、実施工結果について報告する。

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で、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、スクリュコンベア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ア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し出されてくる。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ア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、スクリュコンベア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上、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、スクリュコンベア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み込むことで、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。

- 泥土圧式シールド機
- ツインスクリュ
- 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。

- 高水圧下、近接施工等での自動による切羽の安定制御。
- 土量管理が可能。
- 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アとそのケーシング、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アは、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み合わせる構造としている。

構造図と写真を図-2、写真-1 に示す。この機械的密閉構造により、ツインスクリュは低～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。

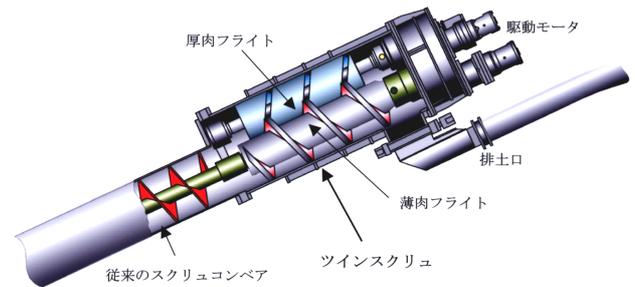


図-2 構造図

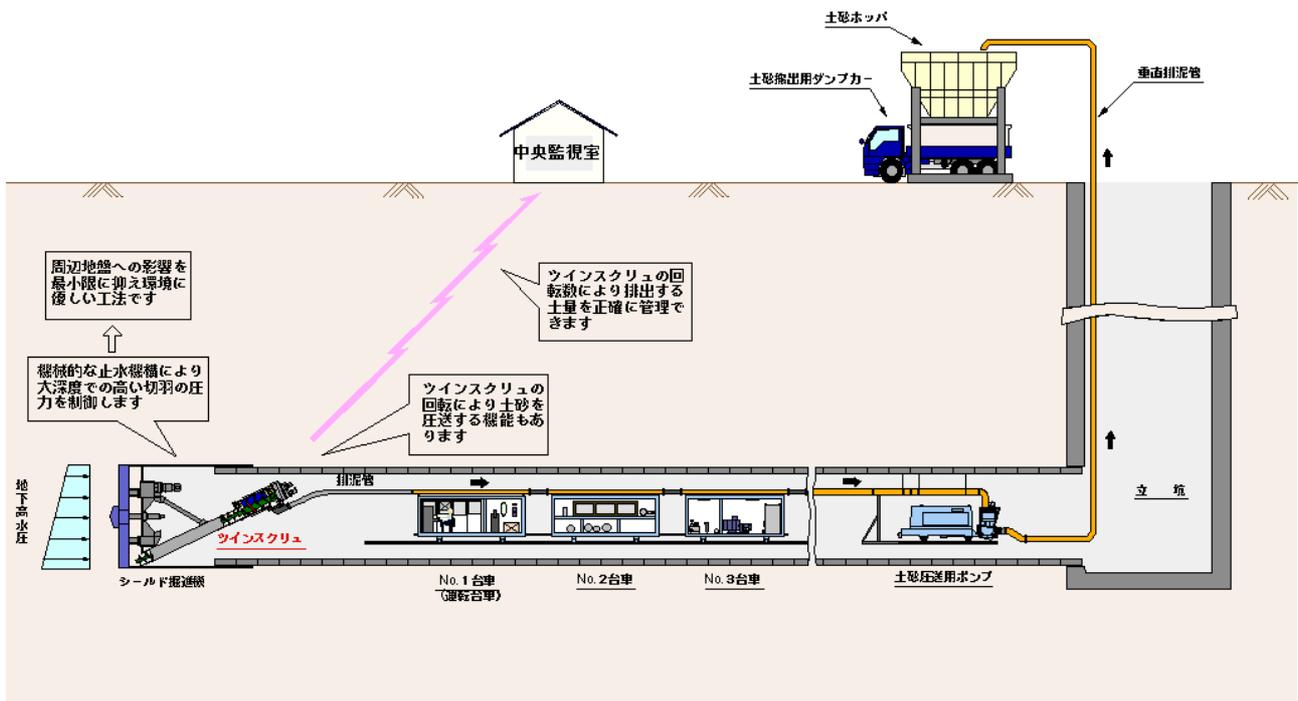


図-1 ツインスクリュシールド工法システム図

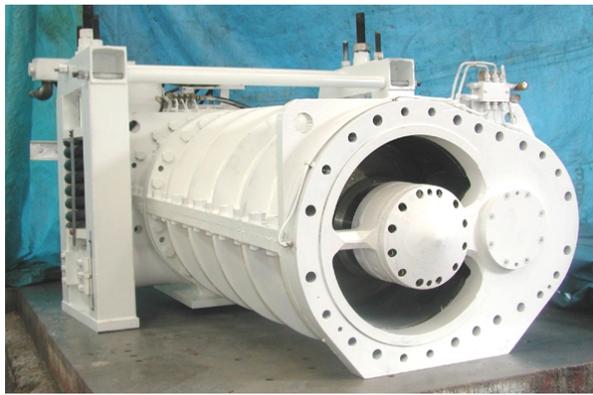


写真-1 ツインスクリュ本体

3. 実証実験

開発段階において、高水圧での切羽土圧制御の確認実験について紹介する。

(1) 実験概要

実証実験は、排土能力 $100\text{m}^3/\text{h}$ 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 $1.4\text{m}^3/\text{h}$ ）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、全景写真を写真-2 に示す。

実験装置は、切羽土圧を発生させるための土砂シリンダと加圧ジャッキ、ツインスクリュ本体、駆動用油圧モータ、油圧ポンプユニット、投入口ゲート、排土口ゲート及び、土圧計・ストローク計などの計測装置から構成される。

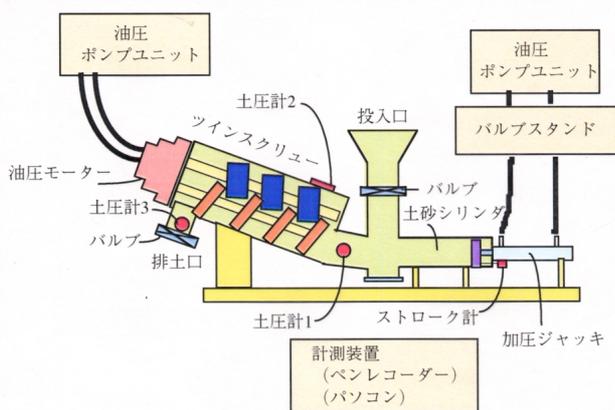


図-3 実験装置図

表-1 実験装置の諸元

輸送能力	$1.4\text{m}^3/\text{h}$
回転数	0~12rpm
薄肉フライ径×フライピッチ	$\phi 199\text{mm} \times \text{P}92\text{mm}$
厚肉フライ径×フライピッチ	$\phi 199\text{mm} \times \text{P}92\text{mm}$
駆動トルク	12.2kN-m

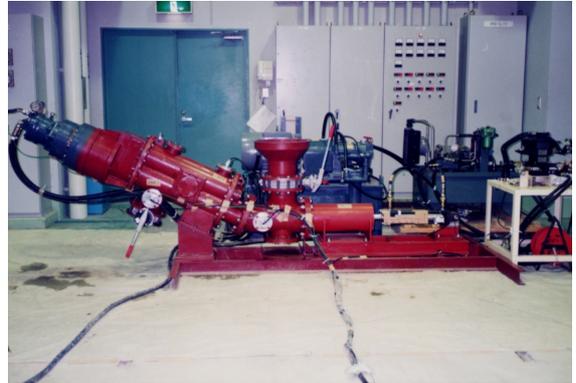


写真-2 実験装置全景

(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、スクリュウ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、スクリュウの回転トルク、排土される土砂量の変化を計測した。また、2本のスクリュウの羽根が噛み込む部分の隙間や、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5mm、3mm、及び1mm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、泥土の配合は「泥土加圧シールド工法協会」の作泥土材の必要・不要の境界線の粒度分布を基本に決定した。実験では、水量の加減によりスランプ10cmと20cmに調整して行った。切羽土圧は0.3、0.6、1.0MPaの3種類、スクリュウ回転数は3、6、12rpmの3種類とした。表-2に実験条件一覧表を示す。

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	20cm、10cm
切羽土圧	0.3、0.6、1.0MPa
スクリュウ回転数	3、6、12rpm
羽根の隙間	5mm、3mm、1mm以下

また、実験方法は以下の手順を繰り返して行った。

土砂シリンダ内に泥土が充満するよう、内部振動機を用いて投入口より泥土を投入。

投入口のバルブを閉め、排土口バルブ全開、スクリー回転停止した状態で設定切羽土圧を作用。

設定土圧を確認。スクリーを所定の回転速度で回転させ排土。

油圧ジャッキのストロークエンド直前で、スクリー回転停止。設定土圧維持確認。

(3) 実験結果

a) 高水圧切羽の安定制御

図-4 に砂質泥土、スランブ 20cm、羽根の隙間 1mm 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 1MPa、スクリー回転数 3rpm の条件を表す。)

開発したツインスクリー排土装置は、高水圧(1MPa)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、スクリー回転数の影響をほとんど受けずに、切羽圧を安定制御できる装置であることがわかった。スクリー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 0.01~0.03MPa という結果であった。また、スランブ 10cm の砂質泥土については、羽根の隙間 3mm 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。

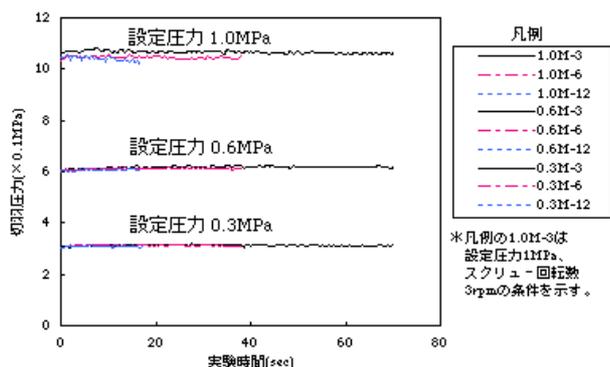


図-4 切羽土圧経時変化図(砂質泥土)

図-5 に砂礫泥土、スランブ 20cm、羽根の隙間 3mm という条件における切羽土圧の経時変化図を示す。砂礫泥土の場合においても、スクリーの回転と同時に設定した切羽土圧はやや変動するも

の、砂質泥土とほぼ同様の結果が得られた。切羽土圧平均値に対して低下する変動圧力は 0.02~0.05 MPa であった。また、砂礫泥土に関しては、羽根の隙間 5mm という条件においてもスランブ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。

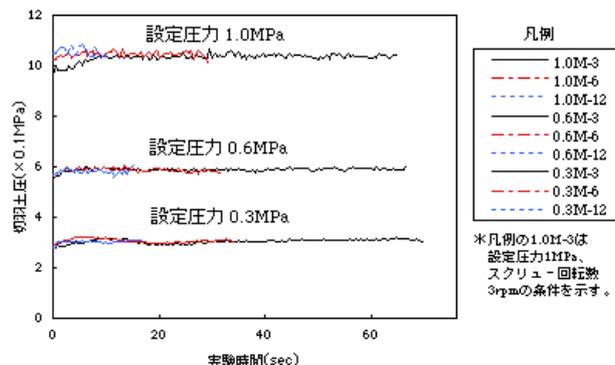


図-5 切羽土圧経時変化図(砂礫泥土)

b) 排土状況

掘進における排土量の管理は、一般的にスクリーの回転数とその排土量が比例するものとして管理するが、実際にはスクリー内部での共回りや、噴発などにより正確な排土量を把握することは難しい。実験における排土量と理論排土量(スクリー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、このツインスクリー排土装置の場合は、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、スクリー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. 実証施工と実用化

比較的土被りの深い粘性土地盤で実証施工を行い、その後、土被りの浅い砂礫地盤の工事で採用され、初めて実用化された。その工事ごとに切羽土圧の制御、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

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

工事場所：三重県三重郡川越町宮前

発注者 : 旧建設省中部地方建設局三重工事事務所
 施工者 : 大成・ベクテル特定建設工事共同企業体
 工事期間 : 平成 9 年 3 月 13 日
 ~ 平成 11 年 3 月 30 日

工事概要 : 泥土圧式 シールド掘削外径 5.74m ,
 延長 1,755m

土質 : 沖積粘性土層 N 値 0~7

土被り : 19~22m

この工事で採用したツインスクリュの状況写真を
 写真-3 に、その仕様を表-3 に示す。



写真-3 ツインスクリュにて掘削状況

表-3 使用したツインスクリュの仕様

輸送能力	101.7m ³ /h
回転数	0~23.5rpm
薄肉フライト径×フライトピッチ	φ 625mm×P450mm
厚肉フライト径×フライトピッチ	φ 395mm×P450mm
駆動トルク	56.1kN-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/分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-6 に示す。

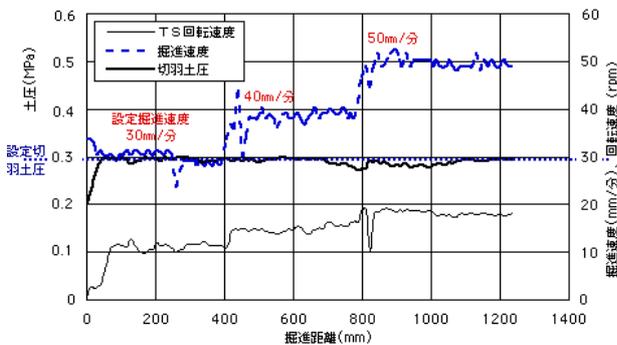


図-6 切羽土圧の自動制御の実績図

この結果、掘進速度が早くなるにつれ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 0.3MPa 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-7 に、また 130 リング分の排土率の結果を図-8 に示す。

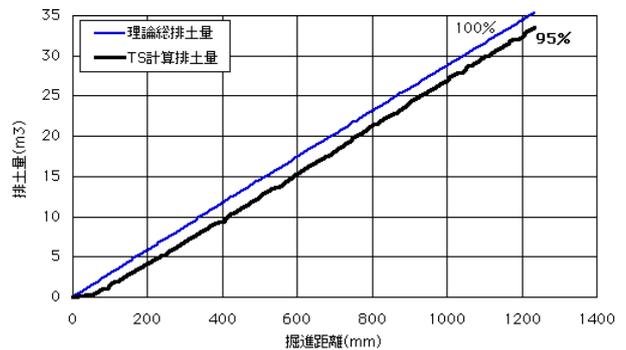


図-7 掘削土量管理の実績図

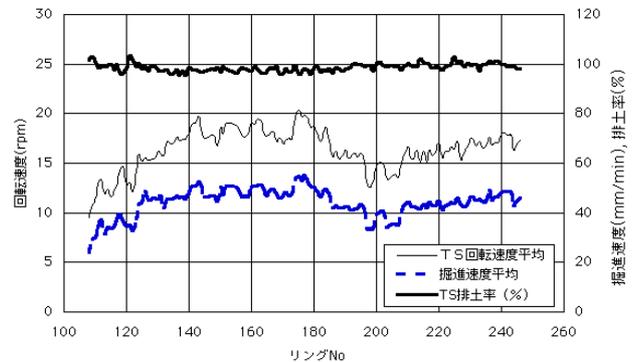


図-8 排土率の実績図

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。

排土率の方も、全体的に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

工事件名 : 福岡市高速鉄道 3 号線渡辺通南工区建設
 工事

工事場所 : 福岡市中央区白金一丁目 2 番地

~ 中央区渡辺通二丁目 1 番地

発注者 : 福岡市交通局
 施工者 : 大成建設・竹中土木建設工事共同企業体
 工事期間 : 平成 8 年 12 月 12 日
 ~ 平成 15 年 2 月 28 日
 工事概要 : 泥土圧式シールド 掘削外径 5.44m ,
 延長 756m
 土質 : 沖積砂礫層 N 値 10~30
 土被り : 7~9m
 (構造物直下 3m 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写真を
 写真-4 に、その仕様を表-4 に示す。



写真-4 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	0~23rpm
薄肉フライト径×フライトピッチ	φ 597mm×P324mm
厚肉フライト径×フライトピッチ	φ 387mm×P324mm
駆動トルク	48.7kN-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の確認を行った。この時の掘進速度の変化は 10, 15, 20 mm/分とした。その結果を図-9 に示す。

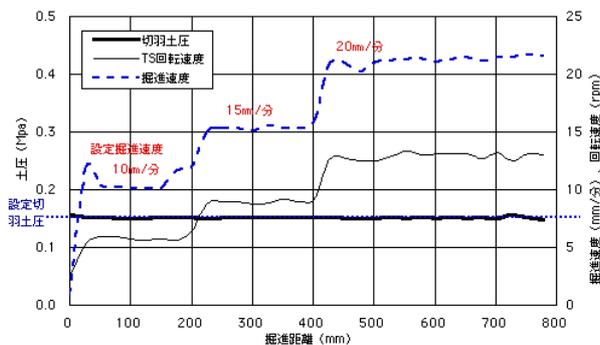


図-9 切羽土圧の自動制御の実績図

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 0.15MPa 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-10 に示す。

理論総排土量 (掘削土量に泥材の注入量を加算した値) 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。

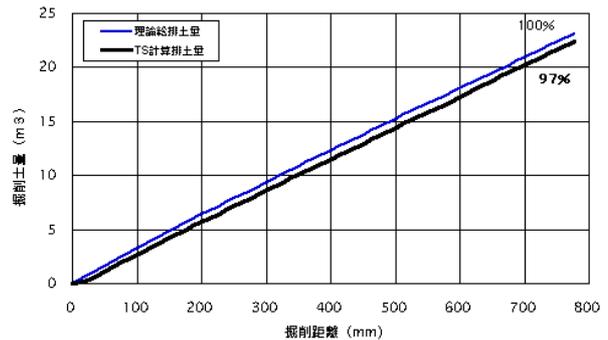


図-10 掘削土量管理の実績図

5 . おわりに

本システムは、粘性土及び砂礫地盤での実証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磨耗が想定されるため、現在磨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。

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, pp50~53, 1997年。
- 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, pp152~153, 1999年。
- 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, pp131~132, 2002年。