

土圧式シールドにおける高水圧切羽制御装置の 開発と実証実験

DEVELOPMENT AND VERIFICATION TEST OF FACE HIGH-WATER-PRESSURE CONTROL EQUIPMENT IN THE MUD PRESSURIZED SHIELD METHOD

栄 毅熾¹⁾・北山 仁志²⁾・土橋 功¹⁾

Takeshi SAKAE, Hitoshi KITAYAMA, Isao DOBASHI

In the mud pressurized shield method, water blows out under high water pressure, and stable control of pressure at the face becomes impossible. Technologies have been developed to cut off water by sand plug zones, addition of chemicals, etc., but have not yet fully solved the problem.

In order to solve the problem, we developed the Twin-screw conveyor. This equipment cuts off water by fitting together the helical paddles of two screw conveyors, and mechanically controls the pressure at the face. In this study, a prototype was manufactured for the test, which confirmed tremor-free, stable control at the face under a water pressure of 10kgf/cm², and efficient soil removal through the number of screw rotations.

Key Words : the mud pressurized shield method, high water pressure, blow-out of water, twin-screw conveyor, sand plug zone

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、工法の種類としては、泥水式シールド工法と土圧式シールド工法に大別される。この2つの工法をコストの面で比較した場合、設備が小規模で、用地が狭くても施工できる土圧式シールド工法が有利である。しかしながら土圧式シールド工法は、地下30mを越える深度ではほとんど実績がない。これは、大深度となると切羽が高水圧となり、その排土機構であるスクリーコンベア内部を掘削土や地下水が押し出されてしまうという噴発現象により、切羽の圧力を安定制御できなくなるためである。この欠点を補うために、スクリーコンベアの長尺化によるサンドプラグゾーンの形成技術や、薬品添加による止水性の向上を図る技術が開発されているが、十分に高水圧に対処し得ないのが現状である。

本文では、経済性の面からも今後ますます増加するであろうと予測される土圧式シールド工法を大深度に適用でき得るように開発した切羽圧制御装置「ツインスクリー排土装置」（以降TS排土装置と呼ぶ）の構造概要を述べるとともに、その止水機能及び排土能力の有効性を確認するために行った実証実験の結果について報告する。

1) 正会員 大成建設(株)技術本部 技術開発第二部

2) 石川島播磨重工業(株)油機・シールド事業部

2. 切羽圧制御装置の構造概要

図－１に、掘削外径φ 5.0 mクラスで、掘削スピード毎分 5cmを条件に想定した T S 排土装置（排土能力 100m³/h）の構造図と概略仕様を示す。

この T S 排土装置は、2 本の軸付きスクリーコンベアの羽根（1 つは従来の薄肉の羽根、もう 1 つは薄肉の羽根の 1 ピッチ分の隙間に適当なクリアランスを持って収まるように厚肉化した羽根）を相互に逆方向の螺旋にして、噛み込ませる構造とすることで止水機構を設け、それぞれの羽根を逆回転させることにより土砂の移動を強制しながら連続して排土できるものである。この装置内部には連続した空間がなく、厚肉の羽根によって仕切られた密閉室を移動させながら、機械的に排土するため、高い切羽水圧の条件下においても、脈動のない安定した切羽圧の制御と、スクリーウの回転数による効率の良い排土が可能となる。

3. 実験概要

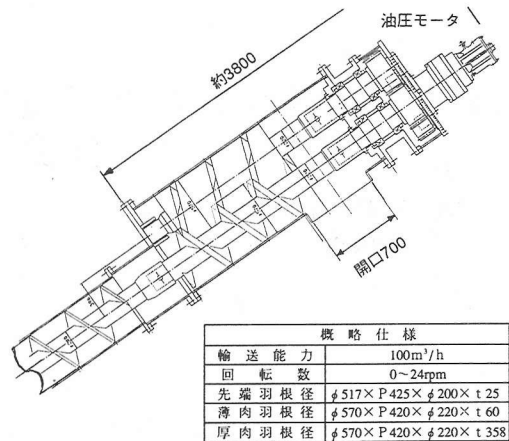
実験の目的は、T S 排土装置が、高水圧切羽に対して安定制御可能であること、掘進スピードに対して定量の排土が可能であることを実証するとともに、各土質試料に対して、羽根の噛み込み等によるスクリーウの回転トルクを確認することにある。

3.1 実験装置の構成

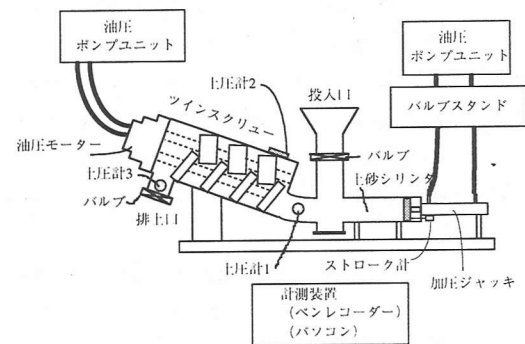
実証実験は、先に述べた排土能力 100m³/h の T S 排土装置に対して、寸法で約 1/3 に縮小したモデル実験装置（排土能力 1.4 m³/h）を製作して行った。

実験装置図を図－２に、実験装置の全景写真を写真－１に、実験装置の諸元を表－１に示す。

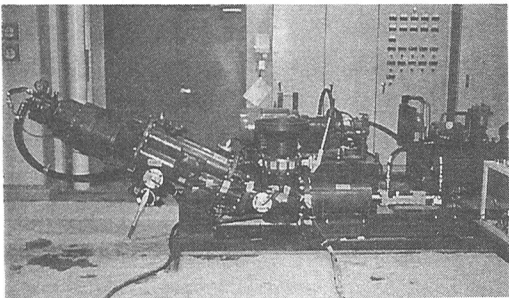
実験装置は、切羽土圧を発生させるための土砂シリンダと加圧ジャッキ、ツインスクリーウ本体、駆動用油圧モーター、油圧ポンプユニット、投入口ゲート、排土口ゲート及び、土圧計・ストローク計などの計測装置から構成される。加圧ジャッキはコントロールバルブの操作により設定土圧を任意に調整でき、排土により移動するストロークに追従できるものとした。また、駆動トルクは幅広い実験パラメータに対応できるように最大トルク 1,248kgfm の大容量とした。



図－１ T S 排土装置構造図（想定）



図－２ 実験装置図



写真－１ 実験装置全景写真

表－１ 実験装置の諸元

T S 排土装置	
輸 送 能 力	1.4m ³ /h (12rpm時)
回 転 数	0~12rpm
薄肉羽根径	φ 199×P 92×φ 85×t 16×4 P
厚肉羽根径(1)	φ 193×P 92×φ 85×t 66×2.5 P
厚肉羽根径(2)	φ 199×P 92×φ 85×t 70×3.5 P
モータートルク	max1,248kgfm (210kgf/cm ²)
加 圧 装 置	
土砂シリンダ	φ 200mm×300mm
油圧シリンダ	φ 80mm×300st (140kgf/cm ²)

3.2 実験方法

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、スクリーウの回転数を変化させることにより、T S排土装置前後での土圧、スクリーウの回転トルク、排土される土砂量の変化を計測した。また、2本のスクリー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。表-2にスランプ15cm時の基本配合を示す。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3、6、10kgf/cm²の3種類、スクリーウ回転数は3、6、12rpmの3種類とした。表-3に実験条件一覧表を示す。

表-2 実験泥土の基本配合（スランプ15cm）

泥土種類	基本配合(kg/m ³)					最大粒径 (mm)	含水比 (%)	見掛比重 (t/m ³)
	ベントナイト	粘土	砂	碎石	水			
砂質泥土	5.8	416.0	1245.4	—	358.8	2.0	28.7	1.93
砂礫泥土	5.8	457.6	639.6	758.7	294.8	20	20.0	2.12

また、実験方法は、以下の手順を繰り返して行った。

- ①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。
- ②投入口のバルブを閉め、排土口バルブ全開、スクリーウ回転停止した状態で設定切羽土圧を作用。
- ③設定土圧を確認。スクリーウを所定の回転速度で回転させ排土。
- ④油圧ジャッキのストロークエンド直前で、スクリーウ一回転停止。設定土圧維持確認。

表-3 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	3、6、10 kgf/cm ²
スクリーウ回転数	3、6、12 rpm
羽根の隙間	5mm、3mm、1mm以下

4. 実験結果

4.1 高水圧切羽の安定制御について

図-3に砂質泥土、スランプ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10k-3は、切羽土圧10kgf/cm²、スクリーウ回転数3rpmの条件を表す。)開発したT S排土装置は、高水圧(10kgf/cm²)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、スクリーウ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。スクリーウ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0.1~0.3kgf/cm²という結果であった。また、スランプ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。

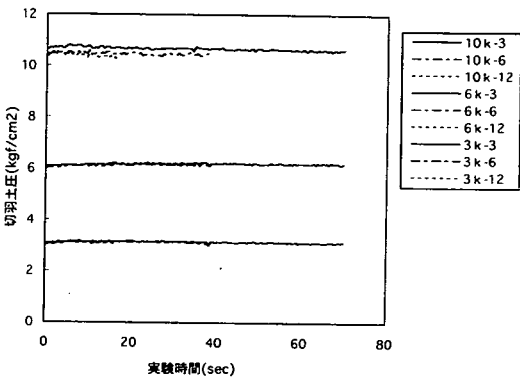


図-3 切羽土圧経時変化図（砂質泥土）

図-4に砂礫泥土、スランプ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、スクリーウ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 $0.2 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 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。

4.2 排土状況について

掘進における排土量の管理は、一般的にスクリーア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、実際にはスクリーア内部での共回りや、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（スクリーア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TS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、スクリーア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。

4.3 スクリーア回転トルクについて

図-5に砂礫泥土、スランプ 20cm 、羽根の隙間 3mm での各スクリーア回転数における平均トルク及び最大トルクと切羽土圧の関係を示す。平均トルクは、スクリーア回転数との間には顕著な関係が見られないが、切羽土圧が大きくなると比例して大きな値となる傾向があり、切羽土圧 10 kgf/cm^2 では約 $320 \sim 350\text{kgfm}$ であった。この値は同じ条件の砂質泥土の実験結果の平均トルク 150kgfm に比べて約 2.3 倍大きくなっている。また、最大トルクは平均トルクの約 $1.6 \sim 2$ 倍であった。これらの結果は、羽根の噛み込み構造と泥土の粒度分布が複雑に関係していると考えられるが、実験前と実験後の試料の粒度試験結果から、TS排土装置は礫を破碎していることを確認した。

また、実験中にはトルクオーバーでスクリーア回転が停止するようなことはなかったが、故意に礫を噛み込ませ、スクリーアを停止させた実験においては、逆回転により容易に噛み込みを解除することができた。

5. おわりに

今回の実験により、TS排土装置は高水圧という条件においても、切羽土圧を脈動させることなくまた、泥土種類、スクリーア回転数に影響されずに安定制御できる装置であることを実証するとともに、泥土の粒度分布がスクリーア回転トルクに大きく影響すること、羽根の隙間を調節することにより効率的な排土ができる装置であることを確認した。また、これらの結果よりTS排土装置の実用化に目処をつけることができた。今後は、この装置を大深度の土圧式シールドに積極適用して、実工事でその能力・経済性・安全性を実証していく。

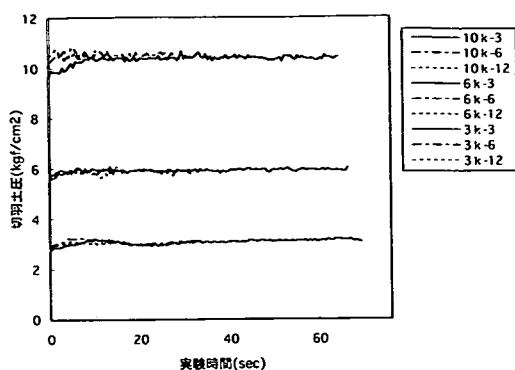


図-4 切羽土圧経時変化図（砂礫泥土）

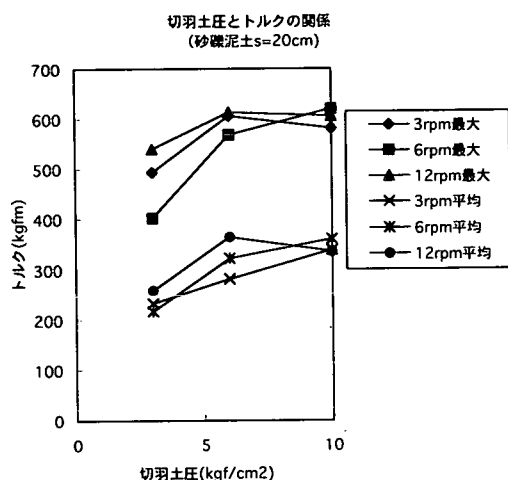


図-5 切羽土圧とトルクの関係