

ツインスクリュシールド工法の耐久性向上技術の開発

ーツインスクリュの磨耗防止対策ー

伊東 憲・栄 毅熾*¹

Keywords : shield tunneling method, chamber-pressure control, great depth, shallow, wear

シールド工法, 切羽土圧制御, 大深度, 浅深度, 摩耗

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出す際、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。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。しかし、砂礫地盤等で長期間使用するとツインスクリュ内部に磨耗が生じることが分かった。また磨耗の進行によってはツインスクリュのもつ切羽土圧の制御ができなくなることも考えられるため、今回磨耗防止対策の開発を行った。

本論文では、ツインスクリュシールド工法の概要と磨耗防止に関する研究開発の結果について報告する。

2. ツインスクリュシールド工法

2.1 本工法の内容

本工法は、泥土圧式シールド工法において掘進速度が変化しても、設定した目標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するものである。

システムは、泥土圧式シールド機、ツインスクリュ、中央制御システムにより構成される。

すなわち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削管理を自動化し、切羽土圧の安定制御を可能にした。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が可能
- ・ 土量管理が可能
- ・ 排土口から後方へ掘削土砂を圧送可能

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管理土圧を設定することで行う。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土圧制御を可能にする。

図-1 にシステムの概要図を示す。

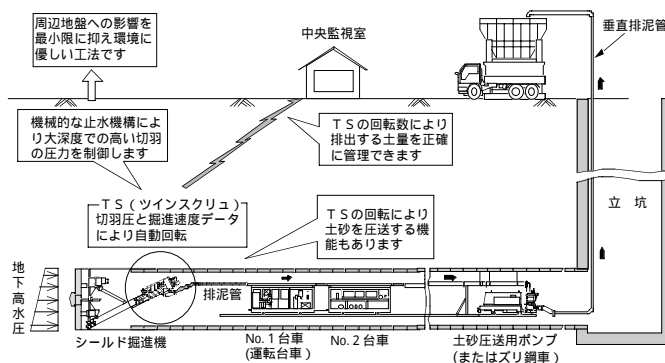


図-1 システム概要図

Schematic diagram of system

ツインスクリュ本体は、2本の軸付きスクリュコンベ

* 1 大成ユーレック株式会社

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本の軸付きスクリーコンベアは、フライト（羽根）の厚みが異なる2本のスクリーを相互に逆方向にして組み合わせた構造としている。この機械的密閉構造により、ツインスクリーは低～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 ツインスクリー本体の概要図を示す。

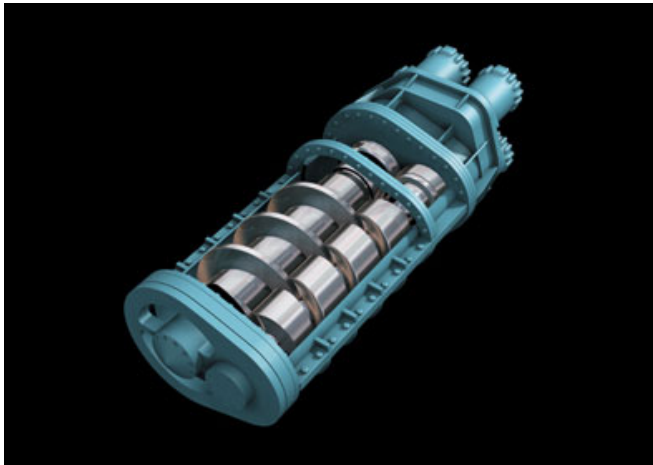


図-2 ツインスクリー概要図
Twin-screw conveyor

2.2 本工法の実績

本工法は、粘性地盤と砂礫地盤の2つの工事で、すでに実用化し、それぞれの工事で良好な切羽土圧の制御と掘削土量管理の適用が確認された。その1つの例として砂礫地盤での結果について紹介する。図-3に自動制御の結果を示す。この図は、1リング掘進中に掘進速度を10、15、20mm/分と強制的に変化させツインスクリーが自動制御できるか否かの確認を行った際の結果である。測定データは掘進速度、切羽土圧及びツインスクリー回転速度の実測値である。

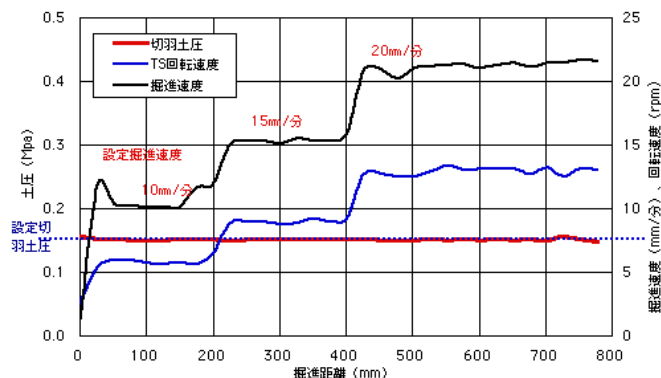


図-3 切羽土圧の制御結果

Results of the chamber-pressure control

この結果から、掘進速度が早くなるにつれツインスク

リー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、測定した切羽土圧は、設定切羽土圧の0.15MPaに制御できていることが分かる。

土量管理においては、同じく1リング掘進中のデータとし、掘進距離に応じた理論値を算出した値に対して、ツインスクリーの回転数から算出した土量値の比較を行った。図-4に掘削土量管理の結果を示す。

理論総排土量を100%とし比較すると、ツインスクリーの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ている。

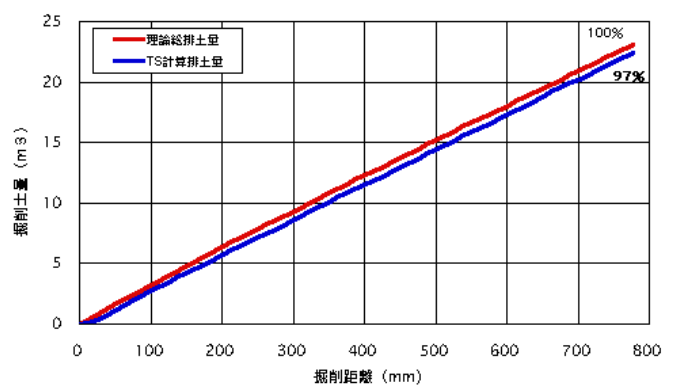


図-4 掘削土量管理の結果

Results of controlling excavation volume

3. 開発の内容

3.1 開発の目的

開発の目的は、ツインスクリーの噛み込みが原因と考えられる磨耗についての防止策を検討することである。

製作時のツインスクリーには、フライトとケーシング、フライトとフライトの隙間が0.5mmあり、この隙間に含水量の多い泥土が入り込んだ際に水分が圧力差により先に通過し、細かい砂分がこのすき間に入り込むため、噛み込みが発生すると考えられる。

よって対策としては、製作完了後の隙間をゼロにすることである。

現時点では磨耗対策として高周波焼入も行っているが、磨耗は発生している。

そこで、今回新たにゴム性のシール材を組み合わせたフライトを製作して、隙間をゼロにすることを試みた。

3.2 開発工程

主な項目についての実施工程を表-1に示す。

シール材の選定を行うため3つの要素実験を行い、実験結果に基づいてシール材を選定後、実機と同様のツイ

ンスクリュを用いて性能確認実験を行い、評価することとした。

表-1 研究工程表

Schedule of the research

項目	年度 月	平成14年度											
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月			
シール材の検討(要素実験)			要素実験										
シール材の製作													
フライトの製作													
ケーシング補修													
シール材取付け(実験機組立て)													
試運転、調整													
性能確認実験													
まとめ													

置はアクロン磨耗実験機を使用した。その実験状況を写真-1に示す。

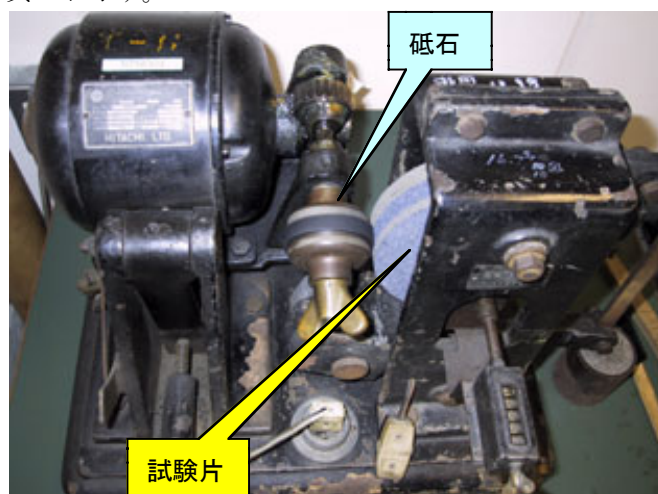


写真-1 実験状況

Experiment conditions

4. 要素実験

4. 1 要素実験の目的

要素実験は、主にツインスクリュに組み合わせるシール材と接着剤を選定するために行うものである。

シール材は回転するツインスクリュのフライト部に取り付けるため、回転や泥土通過に伴う磨耗と土水圧による止水性を備え、さらに固さと弾力性を合わせ持ったものでなくてはならない。

接着剤は、シール材であるゴム製品とフライト部である鋼材を接着する役割を持ち、回転や衝撃に耐えるものを選定する必要がある。上記の目的のもと以下の実験を行った。

- ・シール材の選定〈アクロン磨耗実験〉
- ・接着剤の選定〈接着剤選定実験(引張り実験)〉
- ・抵抗によるシール材の形状選定
〈シール材形状選定実験(摺動摩擦抵抗測定実験)〉

4. 2 アクロン磨耗実験

4. 2. 1 実験概要

ゴムシール試験片と砥石とを回転させ、単位回転数(1000回転)あたりの試験片の磨耗量(容積)を測定し、最も磨耗量の少ないゴムシールを選定する。

今回は2種類のゴムを試料に選定し比較検討した。

4. 2. 2 実験器具

試験片は、材質の異なるゴム A、B とし、参考としてツインスクリュの部材に使用されているクロムモリブデン鋼(SMC440)、一般構造用圧延鋼(SS400)についても実験した。試験片の大きさは直径φ63.5mm、厚さ12.7mm、中心孔φ12.7mm(リング片)とし、実験装

4. 2. 3 実験の結果

実験結果を図-5に示す。この図よりゴム A の磨耗量が少なく、なかでも硬度 b が最も小さい値であることがわかる。硬度の高い順序に、c→b→a である。磨耗量の少ないものは硬度中間の b である。

ゴムはカーボンと軟化剤(油)の含有量の関係で性質が変わるとされている。カーボンが増えると硬度が高くなり、軟化剤(油)の含有量が増えると弾力性が高くなる。従ってこれらの配合のバランスによって b が最も磨耗量が少なくなると考えられる。

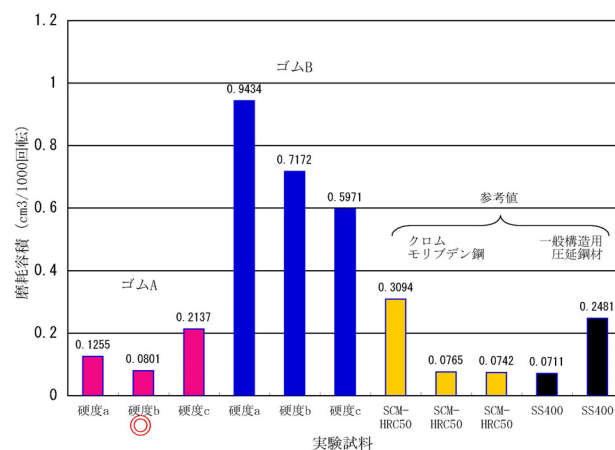


図-5 実験結果

Results of the experiment

4. 3 接着剤選定実験(引張り実験)

4. 3. 1 実験概要

アクロン磨耗実験で選定したゴム A (硬度 b) を図-6のように2枚の鋼板で挟み、ゴム製品と鋼材を接着剤で取付けて引張り試験を行い、接着強度を評価した。

評価の基準は、ツインスクリュ回転に伴うトルク以上の強度を必要とするものとした。

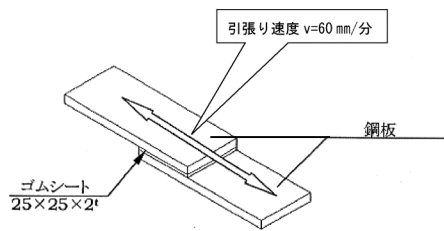


図-6 実験概略図
Experiment outline figure

4. 3. 2 実験器具

試験片はゴム A（硬度 b）（25mm×25mm×2mm）、金具は鋼板（SS400）、実験装置は引張り試験機（オートグラフ AGS-20kNG）を用いた。その状況を写真-2 に示す。

尚、接着剤はゴム製品と鋼材が接着しやすいものを 4 種類選定した。その種類を表-2 に示す。

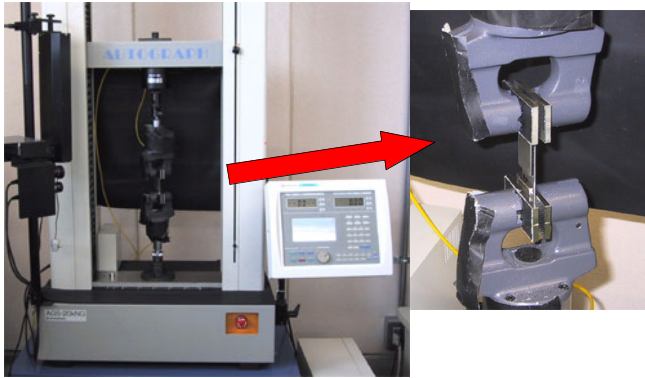


写真-2 実験状況
Experiment conditions

表-2 接着剤の種類
Kinds of the adhesive

接着剤	分 類	接着方法	養生時間
A	弾性接着剤	2液混合。専用ヘラにて塗布、10分放置後接着。	24時間以上
B	粘着接着剤	1液型。専用ヘラにて塗布、10分放置後接着。	
C	エポキシ樹脂系	2液混合。専用ヘラにて塗布、10分放置後接着。	
D	シアノアクリレート系	1液型。薄く全面に行き渡るように塗布し、そのまま接着。	

4. 3. 3 実験の結果

引張り実験の結果を荷重と伸びの関係図として図-7 に示す。この結果から接着剤 D（シアノアクリレート系）が最も大きい荷重に耐え、ゴムの伸び量が大きいことから接着強度が強いことがわかる。またツインスクリュの回転による荷重を今回の実験条件で考慮すると 330N になることから、2 倍以上の強度が発生していることがわかる。

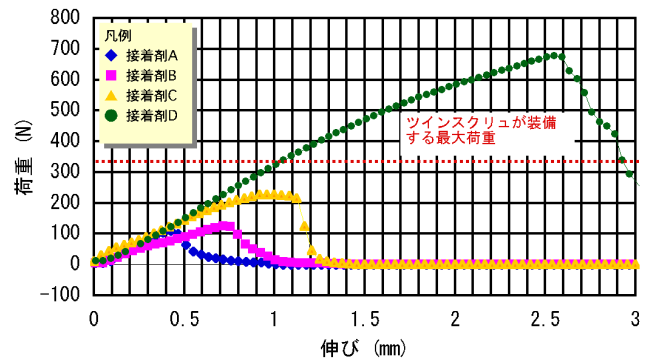


図-7 実験結果
Results of the experiment

実験後の試験片をみると接着剤 D 以外は完全にゴムシール材と鋼板が接着部からきれいに剥離しているが、接着剤 D は、接着剤に一部ゴムシール材が残る状態も観察され、接着力の強さが分かった。

今回の実験結果により接着剤 D が最も適していると評価することができる。

4. 4 シール材形状選定実験（摺動摩擦抵抗測定実験）

4. 4. 1 実験概要

要素実験の最終段階として摩擦抵抗が少なく、ツインスクリュのケーシングとフライットの隙間をゼロにできるシール材の形状を選定するために、形状の異なるシール材を用意し、ツインスクリュフライットがケーシングのなかで回転する要素を取り入れた実験装置を使用した。装置の構造を図-8 に示す。

回転軸と一体化になった円盤にゴムを設置し、これを円柱状のケーシングに設置し、回転させた時の抵抗値を測定した。実験パラメーターとしてグリス有無、ケーシング内の水压を 0、0.5、1.0MPa と変化させた。

また、この実験では目視によるシール材の水密性効果の確認も行った。

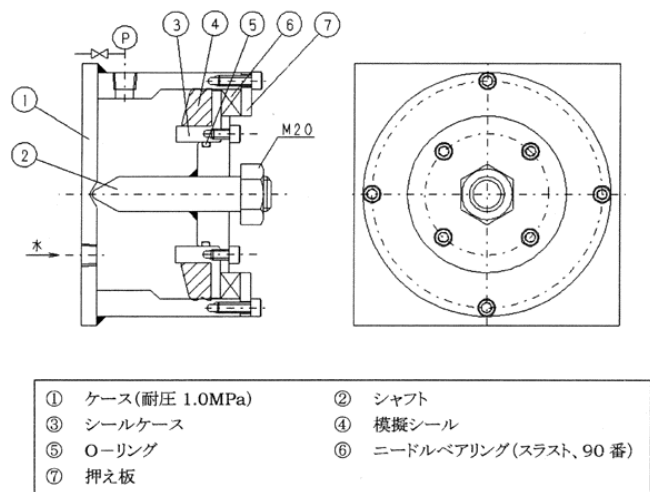


図-8 実験装置
Experiment device

4. 4. 2 実験器具

試験片は、実際にツインスクリュに取り付ける大きさと同じ断面のものを厚肉用と薄肉用に分けて製作した。

シール材先端部に突起の山を設ける構造とした。また材質はゴム A (硬度 b)、円盤との接着は接着剤 D を使用した。回転時の摩擦抵抗を計測するためにトルクレンチ (レンジ 0~1000 kg-cm) を使用した。例として薄肉フライト部のシール材の構造を図-9 に示す。

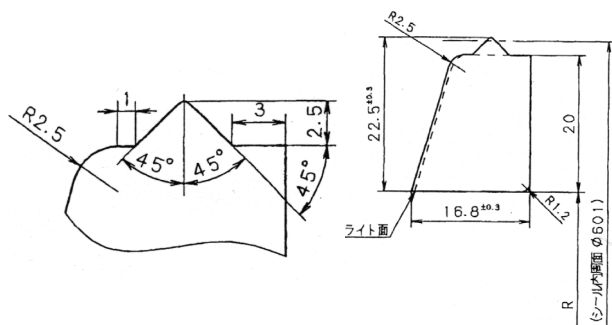


図-9 シール構造図
Structure figure of seal

4. 4. 3 実験の結果

上記のシール材で、回転時の摩擦抵抗の測定を行った。その結果を図-10 に示す。薄肉・厚肉用共グリスの有無に関わらずツインスクリュの装備トルク値以下となった。

また目視による水密効果の確認ができたため、今回の実験で使用した形状のシール材を採用することとした。

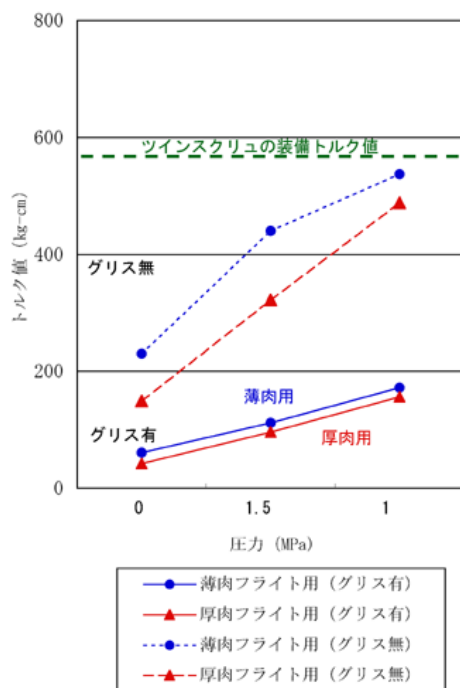


図-10 実験結果
Results of the experiment

5. シール付きツインスクリュの製作

SS400 の丸鋼を NC 旋盤で切削し、フライトを製作した。このフライトの両先端部分にシールゴム設置用の溝を切削し、要素実験で選定したゴムシール材を接着剤で固定した。この時の状況と完成時実験機を写真-3 と写真-4 に、実験機の仕様を表-3 に示す。

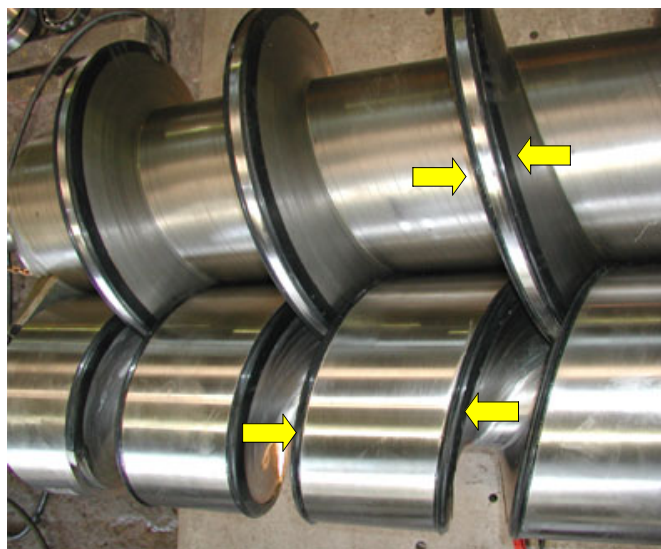


写真-3 シール材設置状況
Establishment conditions of seal

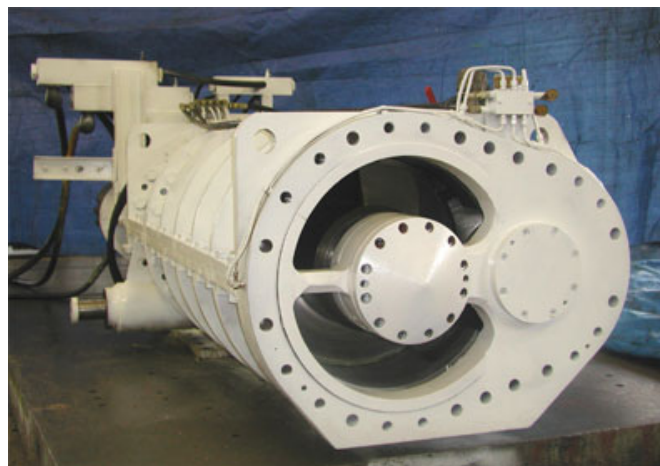


写真-4 実験機 (ツインスクリュ)
Experiment machine

表-3 実験機の仕様
Experiment machine specifications

輸送能力	67m³/h
回転数	0~23rpm
薄肉フライト径×フライトピッチ	φ597mm×P324mm
厚肉フライト径×フライトピッチ	φ387mm×P324mm
駆動トルク	48.7kN-m

6. 性能確認実験

6. 1 性能実験の目的

シール材をフライトに組込ませることで、ツインスクリー回転時に噛み込みを起こさず安定した排土ができるか、耐磨耗性能を有するかの2点を、噛み込み回数と実験後の磨耗調査にて評価した。

6. 2 実験方法

実験の方法は、実際の切羽土圧を想定しスクイズポンプで砂礫泥土（細礫含有、スランプ 20 c m, バインダー分 25%程度）をツインスクリー取込側に圧送、ツインスクリーの回転により吐出側からスクイズポンプ側へリターンさせ連続排土を行い、ツインスクリーの作動油圧の状況から噛み込みの状況を確認した。泥土の性状と実験状況を写真-5、写真-6に示す。



写真-5 泥土の性状
Nature of the mud



写真-6 実験状況
Experiment conditions

6. 3 実験結果

実験結果を図-11に示す。噛み込みが生じたと考えられる作動油圧の異常上昇（12MPa程度）はなく連続運転を行うことができた。

また実験後（総排土量 1,000m³完了後）の磨耗調査の結果から、フライト、ケーシング、シールの磨耗は見られなかった。

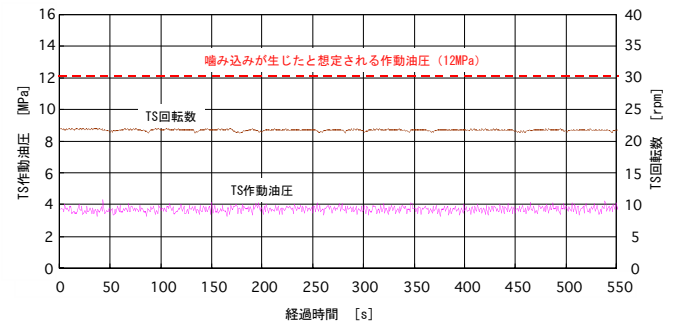


図-11 実験結果
Results of the experiment

7. おわりに

今回の研究開発の目的であるツインスクリーの磨耗防止対策は、砂礫泥土（細礫含有）においてツインスクリーフライトの両先端部にシール材をフライトの一部として組み込ませたことで、完成することができた。この成果をもとに、今後ツインスクリーシールド工法が現場で採用される際は、土質条件、施工延長等に応じてシール付フライトの使用について検討し、採用を勧めていく。

しかし、碎石を用いて中礫以上の礫を含有する砂礫泥土においても実験を行ったが、シール材の欠損が部分的にみられた。そのため、今後礫に対する磨耗対策を別途開発し、ツインスクリーシールド工法をあらゆる地盤で対応可能な、耐久性の高い技術に仕上げていく予定である。

参考文献

- 1) 河本武士他, TS シールドシステムの砂礫への適応性の検討, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, VI-58, 2000.
- 2) 伊東憲他, ツインスクリー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, VI-66, 2002.