

38. シールド機テール部の止水機構

鹿島建設㈱：永森 邦博、五十嵐 寛昌
*猪又 勝美

1. はじめに

近年のシールド工事においては、都市部の過密化の進展に伴う地中構造物の輻輳化、立坑用地の確保難、河川・海域等の横断による長距離化とならんで大深度化する傾向にあり、これらの課題に対応したシールド工法のニーズが高まっている。それらのうち、高水圧下での長距離掘進対応技術としてのテールシールについては、現在はワイヤーブラシ式テールシールに高粘性グリスを充填したものが主流である。しかし、急曲線部でのシールの反転、シール部またはテールシール間への裏込注入材等の侵入・固結によるテールシールの損傷等が発生する工事例が多く、シールド工事の大深度化・長距離化を図る上では、テールシール部の耐久性向上が大きな課題となっている。

今回、新たにワイヤーブラシを発砲ウレタンで包み込むことにより、裏込注入材がブラシに侵入することを防ぐと共に、耐久性・止水性を大幅に向上させることができる高耐久性新型テールシールを開発した。また、グリスに代わり、油を使用しないエコフレンドリーな成分と優れた流動性を持つ充填材も合わせて開発した。本報では、この新タイプのテールシールと充填材を現場に適用し、シールド機の止水システムを再構築したので、その概要と結果について報告する。

2. 高耐久性新型テールシール

(1)開発の背景

1) テールシールの種類

テールシールは、現在、ワイヤーブラシ式に繊維を混入させたグリスを注入する方法が多用されている。(表-1 参照)

近年、シールド工事の大深度化・長距離化から、テールシールの材質・形状等の改良・工夫が行われ、実工事への適用が図られるようになった。

表-1 テールシールの種類と変遷過程

年 代	シールド傾向	テールシールの種類と想定性能
1965		布、綿等の随時補給による止水
1970		ゴムシール(平形、リップ形、中空形)
1975	掘進距離増加	ゴム+ワイヤーブラシ併用
1980		ワイヤーブラシ方式
1985	急曲線高水圧	〃 繊維入りグリス、給脂方式導入
1990	長距離対応	〃 ブラシ耐久性向上 [掘進距離：2～2.5 km]
1995	超長距離対応	〃 強化型 [掘進距離：5～6 km]

※マシンメーカー（コマツ）技術資料を一部修正

2) 従来型ワイヤーブラシ式テールシールの問題点

これまでの工事の実績から、従来型ワイヤーブラシ式テールシール（以下、従来型テールシールという）の損傷過程を推定すると次のとおりである。

- ①急曲線または過度なマシン操作によるテールクリアランスの偏り

- ②シールド機の後退（以下バックングという）によるテールシールの反転または裏込注入材の流入
- ③テールブラシおよび外側保護板取り付け部への裏込注入材固結
- ④テールプレートとセグメントの競りによる押し付け・せん断による固結テールシールの塑性変形
- ⑤内外保護板の脱落、ブラシの脱落

従来型テールシールで上記の損傷の発生を防ぐためにはグリスを発進前・掘進中に綿密に注入すること、テールクリアランスを綿密に管理して掘進することが必要であるが、既往の施工条件を超えた高水圧・長距離施工に対しては、従来型テールシールでは耐水圧性・長距離耐久性の面で懸念があり、テールシール自体の高耐久化が望まれる。

3) 新型テールシールの開発コンセプト

高耐久性の新型テールシールとして、前記の従来型テールシールの損傷要因としての裏込注入材の侵入固結の防止対策を主目的に、ワイヤーブラシの素線間をグリ素に代わって安定した材料で充填固結させた構造とする。ブラシ素線間の充填材の選定に当たっては、次の条件を考慮した。

- ①圧縮により体積が減少すること（圧縮時に圧縮と直角方向に膨張しないこと）
- ②セグメントへ過度の押し付け力を与えないこと
- ③常温で注入・成形できること
- ④泥水や裏込注入材・油等に対して、安定であること
- ⑤不燃性であること

として、ゴム状弾性高分子の一種である発泡ポリウレタンを選定した。

(2) テールシール要素試験

新型テールシールの基本性能を把握するために、1ピース幅(10cm)又は3ピース幅(30cm)の供試体を作成して要素試験を行い、従来型テールシールとの性能比較を行った。

1) 試験項目

要素試験の試験項目は、表-2に示すとおりである。

ここで、セグメントへの反力は、大きすぎるとセグメントにクラックや欠けが生じることが懸念されるため、外径4m程度のRCセグメントを対象に3次元FEMによる応力解析で照査し、新型テールシールの管理値として、要素試験における反力を3kN/ピース以下に設定した。

2) 試験結果

セグメントへの反力は、新型・従来型ともに、クリアランスが大きい時に小さく、クリアランスが小さくなると急激に大きくなる傾向があり、新型は従来型に比べて、反力が大きくより高い止水性を確保できることがわかった。なお、新型の反力は上述のように設定した管理値内に収まっており、セグメントへの影響は問題ない値である。表-2に併記したとおり、新型テールシールは従来型に比べて、基本性能が優れていることがわかった。

表-2 要素試験の試験項目と結果

試験項目	試験結果	
	新型テールシール	従来型テールシール
止水性	クリアランス 50mm、 泥水圧 0.92MPa で漏水無し	クリアランス 50mm、 泥水圧 0.29MPa で漏水多し
セグメントへの反力	クリアランス 10mm で 1570N クリアランス 100mm で 100N	クリアランス 10mm で 590N クリアランス 100mm で 10N
耐バックキング性	バックキングによる ワイヤーの捲れ無し	バックキングによる ワイヤーの捲れ有り
耐摩耗性	摺動距離 2.5km で 重量 0.03%減少	摺動距離 2.5km で 重量 0.13%減少
耐アルカリ性	6ヶ月経過後、外観及び 反力に変化無し	実施せず

(3) テールシール大型円筒模型実験

実験装置の製作に当たり、テールシールおよびクリアランスについては外径 4～5 m 程度の実機に用いられている標準的なものを実寸で採用し、実験装置の径は約 2 m (約 1/2) に縮小した。

1) 実験装置

実験装置は、図-1 に示す 2 重円筒形状になっており、外管がシールドテール部、内管がセグメントに相当する。テールシールは 3 段設置し、最終段 (3 段目) のテールシールの後方から液体圧 (水・泥水・裏込注
入材など) による、今回の

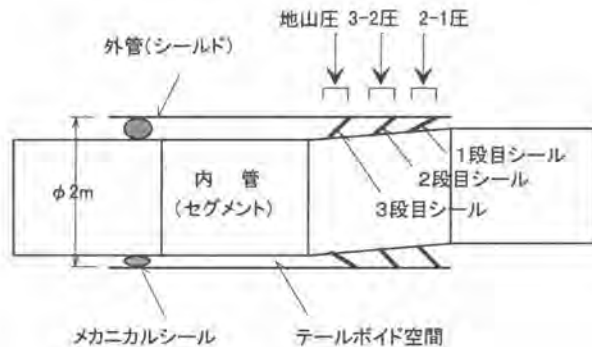


図-1 実験装置模式図

実験では泥水圧を使用 (以下、地山圧と称する) を作用させる構造とした。

また、内管は油圧ジャッキにより、軸方向に摺動できるようにしてあり、シールド掘進時のテールシールとセグメントの相対移動を再現できる。内管には、直線施工時のクリアランスの偏りを再現するための平行偏心管と曲線施工時のクリアランスの偏りを再現するための斜め偏心管の 2 種類があり、それぞれセグメントの面取り (円周方向に深さ 9mm の溝を設置) およびピース間目違い (軸方向に厚さ 4.5mm のフラットバーを設置) を模擬した。テールシールは、1・2 段目が長さ 200mm、3 段目が長さ 250mm である。外管のテールシール間及びテールボイド部には、圧力計 (3ヶ所) ならびにグリス給脂孔 (円周方向 4ヶ所) 等を設置している。

2) 実験ケースならびに実験方法

実験ケースは、表-3 に示す 4 ケースである。今回の実験におけるクリアランスは、

表-3 大型模型実験ケース

テールシールの種類	内管種類	
	平行偏心管	斜め偏心管
新型 (グリス有)	ケース 1	ケース 3
従来型 (グリス有)	ケース 2	ケース 4

平行偏心の場合：最小6mm

最大44mm、斜め偏心の場合：摺動開始時25mm均等、摺動終了時最少3mm最大47mmである。1つの実験ケースは、一連の6種類の実験条件からなり、その方法は表-4に示すとおりである。

表-4 実験方法

実験1	静止状態で、地山圧0.5MPaを作用させ、保持する。漏水が多い場合にはグリス供給量を増加させる。
実験2	上記実験1と同様に、地山圧1.0MPaを作用させる。
実験3	地山圧を解放し、再度地山圧0.5MPaを作用させ、保持する。内管を30mm/分の速度で約1000mm正摺動させる。この間、グリスを連続給脂する。
実験4	地山圧を解放し、内管を逆方向に摺動させる。
実験5	地山圧1.0MPaにし、実験3と同様に正摺動させる。
実験6	地山圧を解放した後、再度地山圧0.5MPaを作用させ実験4と同様にバックング摺動させる。

3) 実験結果

(a) 漏水量

漏水量の測定結果を、図-2に示す。この図から、地山圧0.5MPaの場合には、新型と従来型とを比較すると漏水量に大きな差はないが、地山圧1.0MPaの場合には、新型の方が漏水量が少なくなっていることがわかる。この傾向は平行偏心・斜め偏心のいずれの場合にも同じといえる。また、

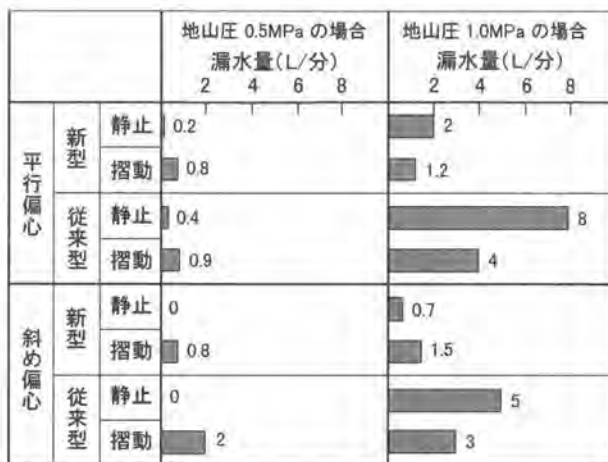


図-2 漏水量測定結果

地山圧1.0MPaの場合において静止時よりも摺動実験時の方が漏水量が少なくなっている。この原因は明確にはわからないが、実験の順番が静止0.5MPa⇒静止1.0MPa⇒摺動0.5MPa⇒バックング0MPa⇒摺動1.0MPa⇒バックング0.5MPaであり、この間連続的にグリスを供給しているため、静止時にはグリスが流入し難い箇所に、摺動によってグリスがいきなり止水領域が形成され、止水性が向上したものと考えることができる。

(b) バックング摺動によるシール反転

実験6(地山圧0.5MPaでバックング)において、従来型テールシールは、200~300mm程度バックングさせた時点で、クリアランスが最大の位置で1段目シールが反転した。新型テールシールの場合、反転は生じなかった。

(4) 実験まとめ

新型テールシールはワイヤーブラシと発泡ウレタンとの複合構造であるため、シール1段当たりの止水性能に優れている。一方、従来型テールシールは、ワイヤーブラシとその中に充填されたグリスがー

体になって圧力に抵抗するため、グリスの十分な供給が必要である。地山圧 0.5MPa 程度の場合には、従来型シールでもある程度の止水性を確保することが可能であるが、地山圧 1.0MPa になると、従来型テールシールに比べ新型テールシールの方が格段に止水性能に優れている。また、バックキングに対しても、新型テールシールはウレタンにより円周方向に連続体となっているため、従来型に比べて優れているといえる。

なお、新型テールシールの開発は、東京電力㈱と共同で行ったものである。

3. テールシール充填材注入システム

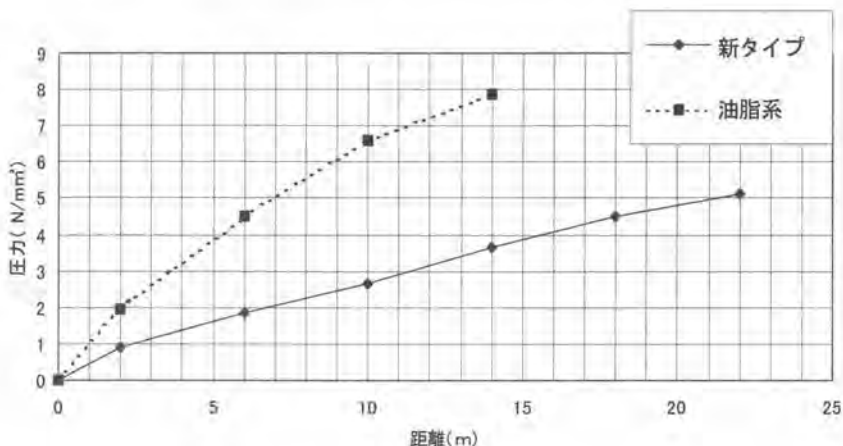
(1) 新タイプの充填材の特徴

テールシール充填材（以下充填材という）は、シール部またはテールシール間に充填して機内への漏水を防止している。現在多用されている充填材は、油脂系のグリスを主成分としたものである。油脂系のグリスのように高粘性で経時変化（固化しない）が少ないものが十分に充填されていれば止水性に問題はないが、充填性が悪いと裏込注入材等の侵入・固結からテールシールの損傷等が発生することがある。また、油脂系のグリスは、火気による事故の可能性がある他、衣類・足場などに付着すると、なかなか落ちにくい特性がある。

新タイプの充填材は、ノンオイルで、しかも、油脂系の長所である高粘性で付着力があるという特性は生かしつつ、ポンプ圧送時の圧力損失を低減でき、充填性に富むような材料として開発した。

主な特徴を下記に示す。

- ①油脂類が含まれていないので、火気による事故防止になる。
- ②注入中はポンプ圧送時に受ける圧力と流体移動に伴う練り返し効果により、低粘度で流動性に富み、注入後は高粘性になり止水効果を発揮する。



図—3 油脂系と新タイプの圧力損失比較（配管15A）

- ③衣類等に付着しても水で洗い落とせる。作業足場に付着しても水洗いすることにより容易に除去できるので、滑って転倒することも防止できる。
- ④ポンプ圧送時の圧力損失を低減できるので、圧送可能距離が延長する他、集中配管による注入が可能になる。
- ⑤油脂系よりコストダウンすることができる。
- ⑥掘進速度に合わせた、連続注入が容易になり、自動注入システム化が行える。

(2) 新タイプの充填材の仕様

- ①種類：ハンドリングに合わせ、初期充填用と補給用があり、補給用は一般用と高粘性の2種類を開発した。
- ②成分：珪酸塩鉱物を主成分とし、材料の安定性と粘結強化を図るためのポリマー、目詰め効果のあるファイバーが含まれている。
- ③比重：1.07～1.14
- ④燃焼性：難燃性（自己消火性）。消防法に示す危険物ではない。
- ⑤環境安全性：毒物および劇物取締法に該当する物質は含まれていない。

(3) 連続注入システムの開発

連続注入システムは、シールド掘進中に消費される充填材に見合う量を常時供給するためのシステムである。これまでは、吐出圧を優先して注入ポンプ選定をしていたため、必要供給量に対してポンプの吐出量能力が大きいことが多く、掘進開始後、必要量注入すると途中で供給しない間欠注入で対応してきた。このため、テールクリアランスが変化し注入が必要な時などに供給ができていないことも想定された。これに対して、連続注入システムは、総注入量はこれまでと同じで常時充填材を供給することが可能で、シールド機内注入用電動バルブを自動で切り替え注入口1ヶ所毎から供給する。充填材は、新タイプでも油脂系のどちらでも本システムで容易に管理ができるが、連続注入には、単価が安く、圧力損失が小さい新タイプの方が適している。

本システムは、エア式ポンプのピストン回数を磁気センサーで感知して所定量に見合う量を制御することができる。また、シールド掘進信号と裏込注入信号から、自動演算して供給することも可能である。

4. あとがき

新型テールシールはワイヤーブラシと発泡ウレタンとの複合構造であるため、従来型シールに比べ単体としての止水性能に優れ、さらに長期的な耐久性も優れているといえる。また、新タイプのテールシール材を連続注入することにより、曲線または過度のシールド機方向操作によるテールクリアランスの偏りが生じた場合にも、充填材の補充が可能となり、裏込注入材や地下水の侵入を防止することで、テールシールの耐久性・止水性を格段と向上することができる。現在、これらのテールシール止水機構を現場で適用し、良好な結果が得られている。