

裏込め注入材が混入しても硬化しにくく止水・圧送性能の高い新型テールグリースの開発

(株)大林組 正会員 ○星野 智紀
正会員 山元 寛哲
正会員 三浦 俊彦
JX エネルギー(株) 正会員 荒井 孝
正会員 泉 徹

1. はじめに

昨今のシールドトンネルは、大深度、大断面、長距離化するとともに、急曲線施工、海底直下、河川横断など、特殊な条件下での施工が増えている。特に高水压下でのシールド掘進にあたっては、シールド掘進時のトンネル内の作業員に対する安全性や作業の施工性を確保するため、シールド機のテールシールでの確実な止水が必要とされる。このテールシールは、シールド機テール部の内面に、柔軟性を有するワイヤブラシを複数段設置して、ブラシ内およびブラシ間にテールグリースを充填して、セグメントとの隙間を止水するのが一般的である（図-1）。しかし昨今の工事では、テールシール内に裏込め注入材が浸入してブラシ内で固結し、ブラシの柔軟性が失われてテールシールの止水性が低下したり、固結した裏込め注入材とセグメントとの競りにより、セグメントの損傷やシールド掘進推力の異常な増大を引き起こすケースが散見されている。その防止策として、裏込め注入材が混入しても硬化しにくく、テールシール内での固結を抑制できるテールグリースは従来から存在したが、止水性や充填時のポンプ圧送性、および経済性といった面で、改善の余地があった。そこで、(株)大林組と JX エネルギー(株)は、テールグリースに関する共同研究開発を行ない、テールシール内に裏込め注入材が混入しても硬化を遅延させるテールグリースを新たに開発した。このテールグリースは、従来品より優れた止水性とポンプ圧送性を有し、経済的にも優れる。本稿では、当グリースの開発までの経緯と製品の特長、現在国内外に流通している従来品との比較検証結果、さらに実際のシールド現場での実証試験の結果について報告する。

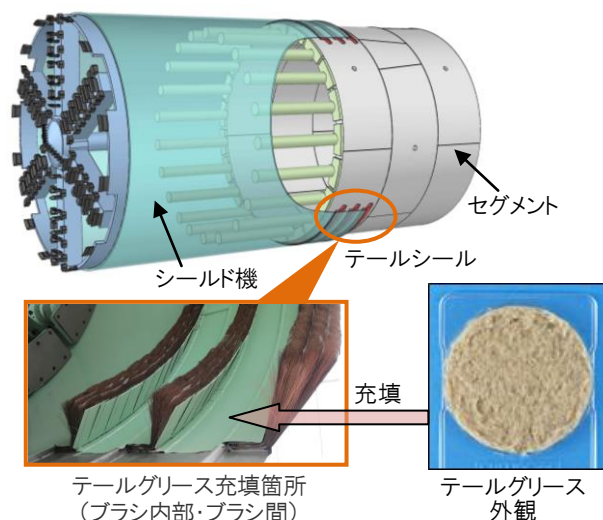


図-1 テールシール詳細

2. 裏込め注入材での硬化に対する材料の工夫

テールグリース内の成分に、セメントの凝結・硬化を遅らせる物質を取り入れ、裏込め注入材がテールシール内に侵入した際に硬化を遅延させる機能を付与する。セメントの凝結・硬化を遅延させる物質としては、無機系ではフッ化物、ほう酸類、りん酸塩、亜鉛、鉛、銅酸化物などが公知となっている。また、有機系では糖類、カルボン酸塩、ケト酸塩、アルコール類など多くの化合物が公知となっており、含有する水酸基（-OH）やカルボキシル基（-COOH）がセメントと結び付くことで水和反応を遅らせると考えられており、取り扱いも比較的容易である。

今回の開発ではこの技術を適用し、裏込め注入材が混入しても硬化しにくい性能を有する配合とした。

表-1 主なセメントの凝結・硬化遅延剤

無機系	有機系
フッ化物	糖類
ほう酸類	カルボン酸塩
りん酸塩	ケト酸塩
亜鉛化合物	アルコール類
鉛化合物	リグニンスルホン酸
銅酸化物	

キーワード シールド工法，テールシール，テールグリース，硬化遅延，止水性，ポンプ圧送性

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティB棟 (株)大林組

3. 製品概要および従来品との比較

今回開発品と国内市場に出回っている従来品（国内製，3 種類）の性状および主成分の分析比較結果を 表-2 に示す．従来品①と②は，性状の相違は認められず，③はちょう度，密度ともに①と②よりも小さい．また，含有する繊維物と粉粒体の種類は，①と②はセルロース系繊維物と炭酸カルシウム系粉粒体，③はポリエステル系繊維物とタルク系粉粒体である．

これに対し，今回開発品は，従来品③と同種の繊維物，粉粒体に硬化遅延剤を配合し，圧送性を考慮してちょう度を 240 とし，さらに密度を小さくした．

表-2 今回開発品と従来品の比較

グリース		従来品			開発品
		①	②	③	
ちょう度※1(25℃)		270	270	240	240
密度(25℃, g/cm ³)		1.28	1.28	1.20	1.10
主成分	鉱油	○	○	○	○
	ポリマー	○	○	○	○
	繊維物	A	A	B	B
	粉粒体	C	C	D	D

A：セルロース系繊維物 B：ポリエステル系繊維物

C：炭酸カルシウム系粉粒体 D：タルク系粉粒体

※1 硬さを表す指標．小さいほど硬く，大きいほど軟らかい．
ちょう度の測定方法は，図-3 を参照．

4. 開発品の性能

(1) 裏込め注入材の硬化を遅延させる性能

前述の今回開発品を含めた 4 製品について，裏込め注入材とグリースを混合し（図-2），混合後のちょう度の経時変化を測定した（図-3）．測定結果を 図-4 に示す．裏込め注入材混合直後，従来品①と②のちょう度は混合前と比較して 100 程度上昇し軟化する傾向が見られたが，従来品③と今回開発品はほとんど変化しなかった．その後，①は急激に硬化し，24 時間後には圧送可能な目安（ちょう度 150 程度以上）を下回った．②と③は，1 時間後までは①に比べ緩やかに硬化しているが，24 時間後では①と同様に圧送可能な目安を下回った．

一方，今回開発品はいずれの従来品よりも硬化する程度が緩やかであり，24 時間後も圧送可能なちょう度を確保していた．また，それ以降も完全には固結せず，ちょう度 50 程度（爪先が貫入する程度）を確保していた．

以上より，今回開発品は，一部従来品のように裏込め注入材と触れた直後に軟化することなく，テール内部への裏込め注入材のさらなる浸入を防止するとともに，シールド掘進中や長期停止後においても裏込め注入材によるグリースの硬化を遅延させ，掘進時の推力の増大やセグメントの破損リスクを低減できると考えられる．

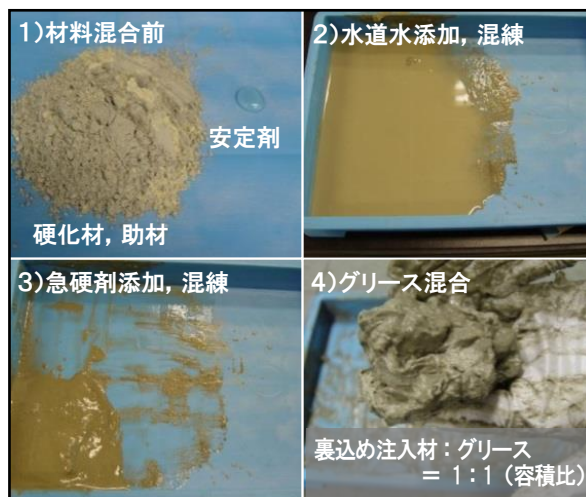


図-2 裏込め注入材とグリースの混合方法

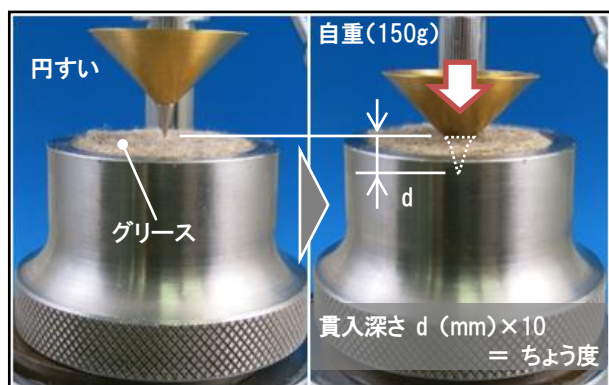


図-3 ちょう度測定方法（JIS K 2220）

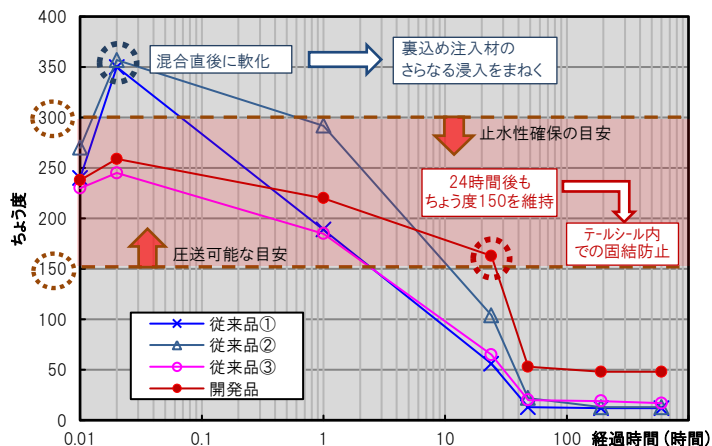


図-4 裏込め注入材混合後のちょう度変化

(2) 止水性能

テールグリースの止水性能を評価する方法として、金網を用いた実験室レベルの耐水圧性能実験方法が過去に報告されており¹⁾、今回はこれを参考とした。試験方法は、下面に16個の排出孔が開けられた圧力容器の底面に金網(20メッシュ)を敷き、容器の半分(高さ35mm)までグリースを詰め込み、一定圧がかかるように高さ10mm程度の水を入れて密封する。その後、圧力容器を圧力調整用のニードルバルブを有する専用の配管を用いて圧縮空気ボンベと接続し、圧力容器の上部から圧縮空気により段階的に圧力を作用させ(0.5MPa → 1.0MPa → 1.5MPa → 2.0MPa → 3.5MPa)、各圧力で3分間保持し、圧力容器下部からの水の流出の有無およびグリース流出量を測定した(図-5)。

測定の結果、0.5MPa程度の水压では、いずれの製品においても流出量の差は見られないが、1.0MPaの水压から従来品①と②、従来品③と今回開発品の流出量に差が見られ始めた。さらに2.0MPa、3.5MPaでは流出量の差がさらに広がる傾向にあった。この結果、従来品③と今回開発品は、厳しい水压環境下でも優れた止水性を発揮し、さらに従来品①、②と比較して、水压抵抗性を有することが分かった。(表-3)。

(3) 圧送性能

①試験室における圧送性能試験

テールグリースは、シールド掘進時にシールド機の後方台車に設置された高粘度液専用のグリース給脂ポンプにより、シールド機テール部に配管を通じて圧送される。圧送距離はシールド機のサイズにより異なり、小・中口径シールド機では約20m、大口径シールド機では50m以上になる事もある。また、グリース使用量もシールド機のサイズにより異なり、大口径シールド機では小口径シールド機に比べて大量のグリースの圧送が要求される。テールグリースを圧送する際の負荷に応じてグリース給脂ポンプとエアーコンプレッサーの容量を選定する必要がある。選定の際に、テールグリースの圧送負荷を把握する事は重要である。

大口径シールドと小口径シールドの条件の差を想定して、圧送試験は2ケース実施した(表-4)。試験方法は、エアー駆動式のグリースポンプを用いてテールグリースを圧送し、ポンプ部での圧力(元圧)と吐出部での圧力(吐出圧)を記録する(図-6)。ホース吐出口手前にはバルブを設置し、吐出量を調節しながら圧力と吐出量を記録し、圧力損失との関係を求めた。

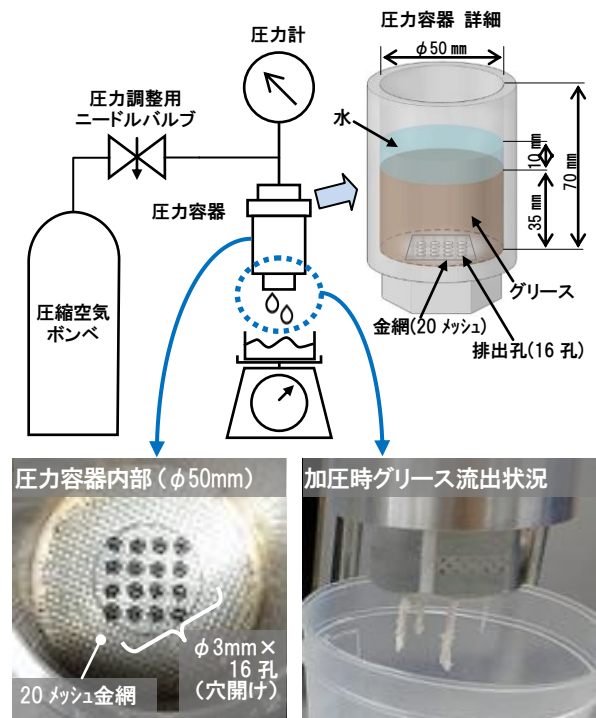


図-5 耐水圧性能試験

表-3 耐水圧性能試験結果

グリース種類		従来品			開発品
		①	②	③	
水の流出		なし	なし	なし	なし
グリース 流出量 (g)	0.5MPa	8	7	8	8
	1.0MPa	14	15	10	11
	2.0MPa	18	21	12	12
	3.5MPa	19	22	13	13

表-4 グリース圧送試験条件

試験ケース	ケース-1	ケース-2
想定シールド断面	小・中口径	大口径
使用ポンプ	Lincorn#2024	Lincorn#2077
- 寸法(高さ)	1,380mm	2,400mm
- 空気圧	最大 0.3MPa	最大 0.5MPa
- 最大吐出量	2.4L/分	4.0L/分
- グリース缶仕様	ペール缶	ドラム缶
- 圧力比	24 : 1	44 : 1
油圧ホース径	1 インチ	2 インチ
油圧ホース長	20m	50m

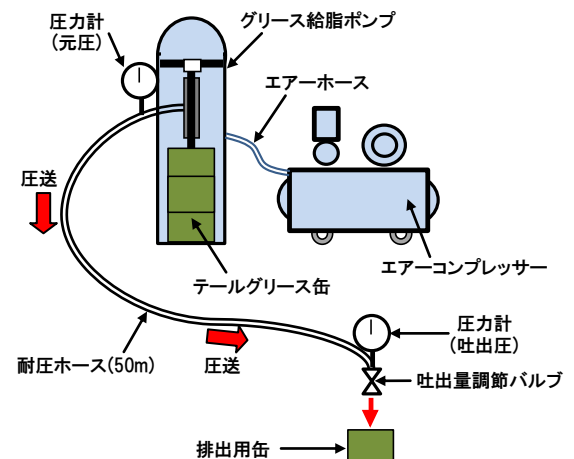


図-6 グリース圧送試験(ケース-2)

試験対象は、従来品①と今回開発品の2種類のテールグリースとし、圧送性能を比較した。その結果、今回開発品は同量のグリースを圧送しようとする際の圧力損失が従来品①よりも小さく（ケース-1 では-11%，ケース-2 では-19%），優れたポンプ圧送性を有することがわかった（図-7，8）。

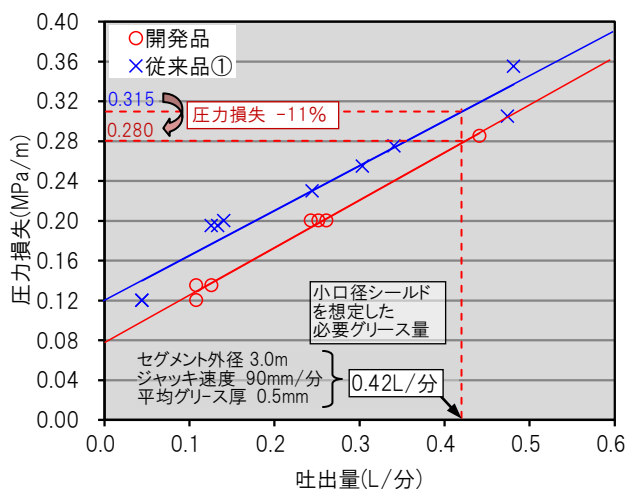


図-7 グリース圧送試験結果(ケース-1)

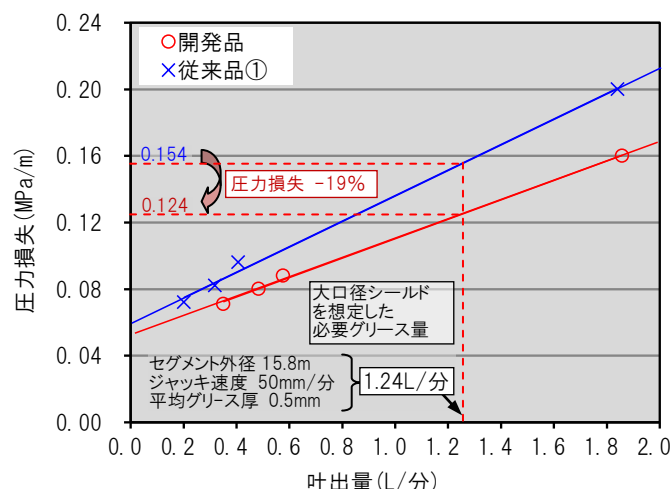


図-8 グリース圧送試験結果(ケース-2)

②シールドマシン実機を使用した圧送性能試験

次に、現場での実証試験で使用予定のシールド機（外径φ3,240mm）のテール部を用いて、国内製の従来品①～③および今回開発品に、海外製4種類を加えた計8種類（表-5）のテールグリースを対象に、大林組機械工場にてテールグリース圧送性能試験を行った（図-9）。現場での使用状況に合わせて、現場で使用するものと同等のエアコンプレッサーと圧送ポンプ、2インチ配管、および3/4インチのシールド機内配管を用いてテールグリースを圧送した。測定項目はポンプ部での送り圧、シールド機テール部の吐出口手前での吐出圧、両圧力から算出する圧力損失およびグリース流量とした。圧送ポンプ（エア駆動）での打込み回数20回を1回の試験とし、これを5回繰り返して、その平均値を試験結果として採用した。

試験結果を図-10，11に示す。国内製と海外製を比較すると、国内製は流量が大きく圧送時の圧力損失が小さい傾向が見られる。一方、海外製はばらつきがあるものの流量が小さく圧力損失が大きい傾向にあり、国内製の方が圧送性能は優位であることがわかった。国内製の中でも今回開発品は、流量が他の国内製品と同等の上、圧力損失がもっとも小さく、良好な圧送性能を有することがわかった。各製品のちょう度（硬さの指標）と圧力損失および流量の関係には、明確な相関性は見られなかった。

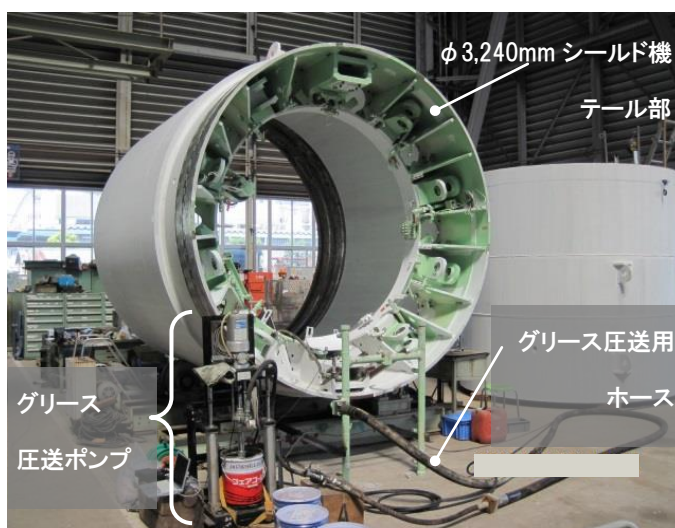


図-9 圧送性能試験実施状況

表-5 耐水圧性能試験結果

グリース種類	国内製			
	①	②	③	開発品
グリース外観				
比重	1.28	1.28	1.20	1.10
ちょう度	270	270	240	240
流量(L/分)	2.342	2.420	1.890	2.189
圧力損失(MPa/m)	0.237	0.245	0.262	0.202

グリース種類	海外製			
	④	⑤	⑥	⑦
グリース外観				
比重	1.30	1.67	1.50	1.30
ちょう度	235	250	210	260
流量(L/分)	1.968	1.013	0.466	1.267
圧力損失(MPa/m)	0.226	0.257	0.320	0.242

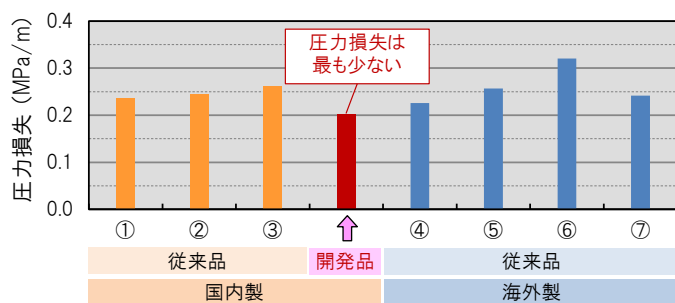


図-10 グリース圧送試験結果(圧力損失)

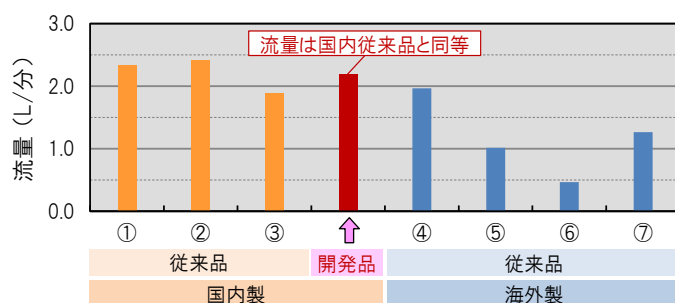


図-11 グリース圧送試験結果(流量)

5. 現場での実証試験

(1) 実験方法

前述のちょう度試験、止水性能試験および圧送性能の試験結果を踏まえ、実際のシールド工事現場において実証実験を行った。実験対象工事は、延長約2.8km、土被り約14mの泥水式シールド工事で、テールグリース圧送性能試験に用いたシールド機を使用した(表-6)。

シールド路線のうち、前半の約1.5kmの区間においては今回開発品のテールグリースを使用し、後半の約1.3kmの区間では、前述の圧送性能試験で使用した従来品②(他社製品、裏込め注入材で硬化しにくいテールグリース)を使用し、両者のポンプ圧送性能と止水性能について比較検証した。シールド路線における掘削対象土質や土被り、および地下水压は、全線にわたってほぼ均一であり、2種類のテールグリースの性能を比較・検証するのに適した現場条件と言える。

圧送性能を確認する指標としては、掘進中に毎リング計測・記録されるシールド機内でのテールグリース注入圧(機内分配弁における圧力)を採用した。止水性能については、毎番の掘進作業終了後の坑内測量実施中にシールド機テール部から浸入し、テール部に溜まった地下水量と時間を実測し、これをもとに換算した時間当り漏水量とした。

(2) 実験結果

実験結果として、テールグリース注入圧の推移を図-12に、漏水量の推移を図-13に示す。

注入圧については、従来品を使用した後半区間の平均値が0.28MPaであったのに対し、今回開発品を使用した前半区間の平均値は0.22MPaと約20%低い注入圧となっている。つまり、今回開発品は、従来品に比べて圧送ポンプや配管への負荷を軽減でき、

表-6 実証実験対象工事の概要

施工延長	2,760m
工 法	泥水式シールド工法
シールド外径	φ 3,240mm
土 質	沖積砂質土・粘性土
土被り	13.8～14.4m

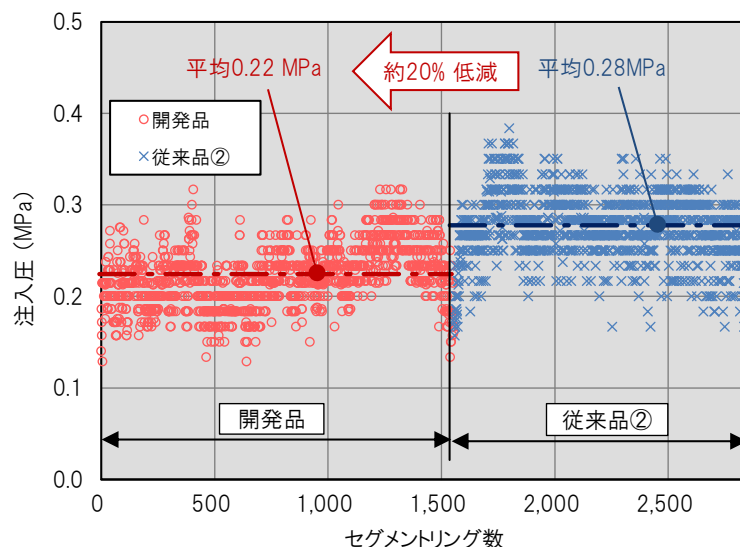


図-12 グリース注入圧の推移

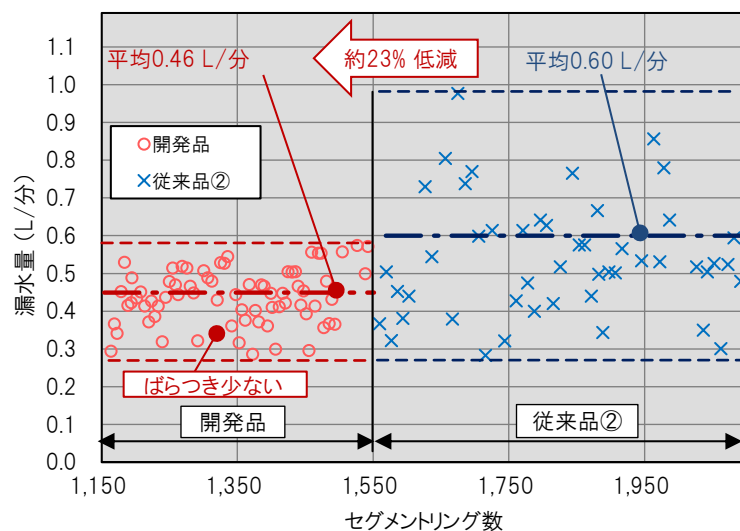


図-13 漏水量の推移

圧送性に優れることがわかった。

漏水量については、従来品での平均値 0.60L/分に対し、今回開発品では 0.46L/分と約 23%低減し、また、最大値では 0.99L/分に対して、0.58L/分と約 41%低減している。さらに、計測値のばらつきも少なく、掘進中のシールド機テール部の止水性を安定的に確保できることが分かった。以上の現場での実証試験結果は、実験室および機械工場での試験結果を裏付けるものとなった。

6. まとめ

シールド機のテールシールに求められる最も重要な性能は、シールド機の掘進時に変化するテールクリアランスに対応する柔軟性と、トンネル内部への地下水の流入を防止する止水性である。トンネル内に地下水が流入した場合、その中で作業に従事する作業員の人命が危険にさらされることになるため、その危険を排除しなければならない。今回新たに開発したテールグリースは裏込め注入材混入時の硬化遅延効果を有し、優れた止水性能と圧送性能を有することを、実験室レベルの試験から実現場における実証試験を通じて確認することができた。今後、さらなる難条件でのシールド工事が増加し、それに対応した品質対策と安全対策が求められると考えられる中、本製品を広く展開することで、セグメントの損傷防止や掘進作業中の安全性、施工性の確保および向上に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 山村・小室・前川・飯島：超高水圧用テールシールの開発実験，土木学会 第 46 回年次学術講演会（平成 3 年 9 月）
- 2) 泉・内海・荒井・山元・星野：裏込め注入材で硬化しにくく止水・圧送性能のよい新型テールグリースの開発(その 1)，土木学会 第 71 回年次学術講演会(平成 28 年 9 月)
- 3) 山元・星野・泉・内海・荒井：裏込め注入材で硬化しにくく止水・圧送性能のよい新型テールグリースの開発(その 2)，土木学会 第 71 回年次学術講演会(平成 28 年 9 月)