

報 文 2

裏込め注入材混入時硬化遅延型テールグリース「シールロックCR」の開発

中央技術研究所 潤滑油研究所 グリース・冷凍機油グループ いずみ とおる
泉 徹



1. はじめに

トンネルは、鉄道、道路、上水道、下水道、電力、ガス、共同溝、地下河川、地下貯留管等、さまざまな用途で使用されており、我々が快適な生活を送るためには欠くことのできない土木構造物である。トンネルの工法には、シールド工法、山岳工法、開削工法、沈埋工法等の種類がある。このうち、シールド工法は、周囲の地盤への影響が小さく、地面を掘り返す必要もない。そのため、軟弱地盤や人口密集地ではシールド工法を採用することが多い。

シールド工法の安全性は、東京湾アクアトンネル（直径14.4m、最大水深60m、全長9.6km、1997年開通）、中央環状品川線シールドトンネル（北行）（直径12.5m、最大土被り46m、全長8.0km、2015年開通）等、これまでに行われてきた数多くのトンネル工事の積み重ねによって高められてきたが、昨今では、工事の大深度化・長距離化・大断面化・高速施工等と施工条件は一段と厳しさを増している。特に、大深度化では高い地下水圧下での掘進が強いられるため、坑内作業の安全性を確保するためにシールドマシンのテール部で使用されるテールグリースの止水性能が重要である。

本報では、裏込め注入材によるテールグリースの止水性能への悪影響を低減し、これまで以上に安定した止水性能を維持することのできる「シールロックCR」を新たに開発したので、その詳細を報告する。

2. シールド工法におけるテールグリースの役割

2.1 シールド工法とは

シールド工法とはシールドマシンによりトンネルを掘進する工法である。シールドマシンの概略図を図1に示す。シールド工法の掘進の流れは次の通りである。まず、シールドマシンの掘削面にあるカッタヘッドを回転させて地山を削り、シールドジャッキでマシン後方にあるセグメントを押すときの反力でマシンを前進させていく。このとき、マシンが前進するとマシン円周部の後方にはマシン外径とセグメント外径の差から空間が生じる。この空間は、地山の圧力均衡を保ち崩落事故や地盤沈下を防ぐ観点から、裏込め注入材と呼ばれるセメントを主成分とする物質で充填さ

れる。次にジャッキが伸びきったら、ジャッキを縮めてセグメントを組み立てていく。一周セグメントを組み上げたら、再びカッタヘッドを回転させ、ジャッキを伸ばしてマシンを前進させることでトンネルを築き上げていく。

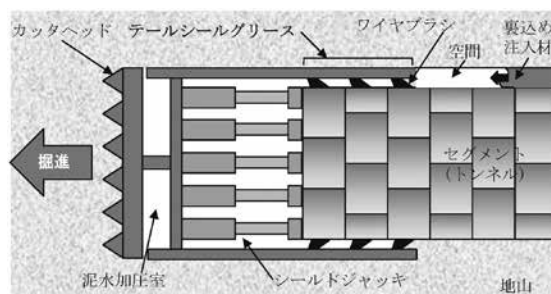


図1 シールドマシンの概略図¹⁾

2.2 テールグリースの役割

シールド工法は比較的地下水の多い地質で積極的に用いられる工法であり、シールドマシン内部の作業の安全の確保や地山の圧力バランス維持の観点から、シールドマシン内部への地下水の浸入を防ぐことが重要である。図2にシールドマシンテール部の拡大図を示す。

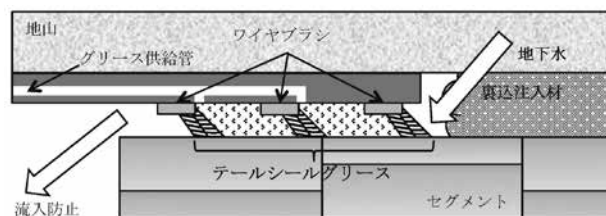


図2 シールドマシンテール部の拡大図¹⁾

シールドマシンテール部には、マシン径や工区の地下水量などに応じて、シールドマシン円周方向に複数段の柔軟性を有するワイヤブラシが取り付けられており²⁾、これがセグメントと接する構造をしている。テールグリースは、このワイヤブラシとセグメントで囲まれた空間を埋めてシールドマシンテール部/セグメント間をシールし、シールドマシン内部への地下水の浸入を防ぐ役割を担っている。

ワイヤブラシのすぐ後方には裏込め注入材が充填される。裏込め注入材は充填後すぐに硬化する性質を持つため、通常はブラシに裏込め注入材が触れることのないよう、土圧や地下水圧、グリース吐出圧とバランスをとりながら充填していく。しかしながら、土圧や地下水圧は掘進する中で刻々と変化していくため、しばしば圧力バランスが崩れ、ブラシ間に裏込め注入材が混入してしまうことがある。裏込め注入材がワイヤブラシ間へ混入すると、周りのグリースとともに硬化し、ワイヤブラシ間で固着し、ワイヤブラシの柔軟性を損ねる場合がある。その状態でシールドマシンを動かすと、テール部の止水性能が低下したり、セグメントを破損させてしまう可能性があり、実際にそうした破損事例が報告されている³⁾。そうした事態に陥ると、ブラシあるいはセグメント交換による工期の遅れが生じるだけでなく、止水性能低下による漏水事故など、工事の安全性に対しても悪影響を与える。

上述の事態を避ける方法の一つとして、テールグリースに裏込め注入材の硬化遅延性能を付与することが考えられる。すなわち、テールグリース自体に裏込め注入材混入時の硬化を遅らせる機能を持たせることができれば、万が一裏込め注入材がブラシ間に混入してしまっても、ワイヤブラシやセグメントが固着するのを抑制することができ、止水性能の低下やセグメントを破損させるリスクを低減させることができる。

そこで、従来のテールグリースに求められる性能に加え、硬化遅延性能を付与したテールグリースを(株)大林組殿と開発することとした。

3. テールグリースの要求性能

主な要求性能は止水性能、圧送性能、硬化遅延性能の3つである。

3.1 止水性能

テールグリースの最も基本的かつ重要な性能は、シールドマシン内部への地下水の浸入を防ぐ止水性能である。特に、大深度工区では水圧が高く、国内では地下水圧が0.8MPaを超える現場での工事実績も報告されており、このような高い水圧が加わっても地下水を浸入させないことが重要となる。

3.2 圧送性能

テールグリースは、専用の給脂ポンプを用いてドラムやペールからワイヤブラシ間へ長い配管を通して圧送されるため、給脂ポンプでの圧送性能も重要な性能の一つとなる。

3.3 裏込め注入材混入時の硬化遅延性能

シールド工事の現場においては装置の不具合や資材の配送トラブル等により、長時間工事が停止する事態がしばしば発生する。こうした事態が発生した後でもスムーズに

工事を再開するには、テールグリースに裏込め注入材が混入しても、給脂ポンプからテールグリースを継続的に圧送することにより、硬化前にテール部外に押し出すことができる程度の柔らかさを維持する必要がある。また、安定した止水性能を維持するとの観点から、裏込め注入材混入直後に生じるテールグリースの著しい流動性の上昇は避けるべきであり、ある程度の硬さを保つことも必要である。したがって、グリースに裏込め注入材が混入した際に、適度な範囲の硬さを一定時間維持することが重要である。

4. 硬化遅延型テールグリースの開発

4.1 従来品の硬化遅延性能

硬化遅延性能は、図3に示すようにグリースと裏込め注入材を1対1の割合で混合し、一定時間静置した後のちよう度を測定し評価した。ちよう度とはグリースの硬さを表す数値である。測定器の概略を図4に示す。試料(グリース)を規定の容器に入れ、表面を平らにした試料の上に規定円錐を落とし、5秒間に沈んだ深さ(mm)を10倍した数値で表す。ちよう度の数値が大きいほど軟らかく、数値が小さいほど硬いことを意味する。目標ちよう度範囲は、グリースと裏込め注入材を混入した後に24時間以上150～300を維持することとした。

従来品の時間毎のちよう度測定結果を図5に示す。従来品①、②では、裏込め注入材混合直後にちよう度が大きく増加し目標ちよう度を超え、裏込め注入材の更なる混入を招き、止水性能を低下させる恐れがある。また、24時間経過後には従来品①～③ともに目標ちよう度を下回り、ブラシを破損させる懸念がある。

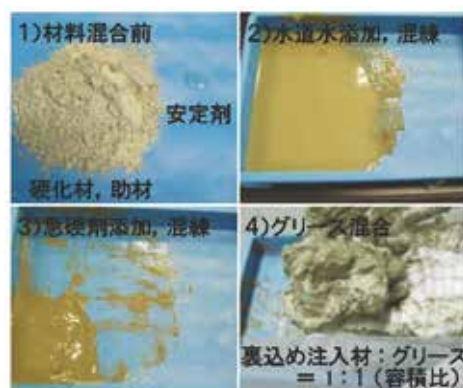


図3 テールグリースと裏込め注入材混合の様子⁴⁾

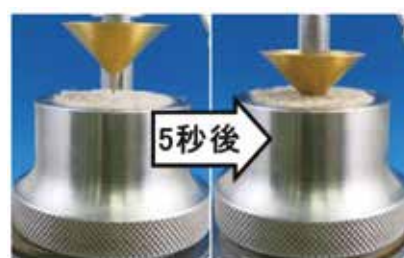


図4 ちよう度測定方法 (JIS K2220)

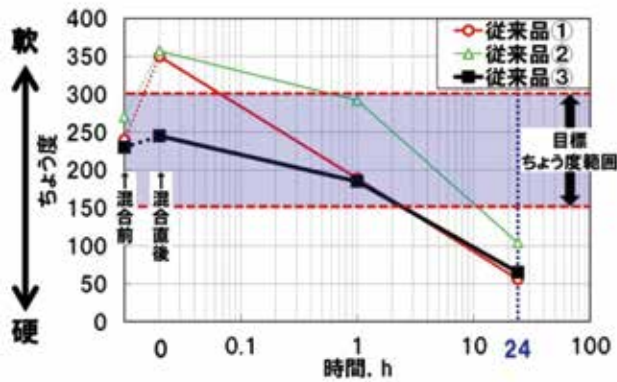


図5 従来品の硬化遅延性能⁴⁾

4.2 従来品の組成分析

従来品の組成分析結果を表1に示す。表1に示すように、従来品の基本構成はいずれも基油、ポリマー、繊維、粉粒体が配合されている。また、従来品①、②については、その他の成分として、エステルが配合されていることがわかった。

エステル配合の効果を確認するため、従来品③にエステルを配合し、硬化遅延性能を評価したところ(図6参照)、エステルを配合すると裏込め注入材混合直後にちよう度が増加し、軟化が認められた。エステル配合により裏込め注入材混合直後にちよう度が増加するメカニズムは解明できていないが、エステルがちよう度の増加に何らかの影響を及ぼしていることは明確である。

表1 従来品の組成分析結果⁴⁾

グリース	従来品①	従来品②	従来品③	
ちよう度	240	270	230	
主成分	鉱油	○	○	○
	ポリマー	○	○	○
	繊維物	セルロール系	セルロース系	ポリエステル系
	粉粒体	CaCO ₃ 系	CaCO ₃ 系	タルク系
その他成分	エステル	エステル	—	
タイプ	通常型	硬化遅延型	通常型	

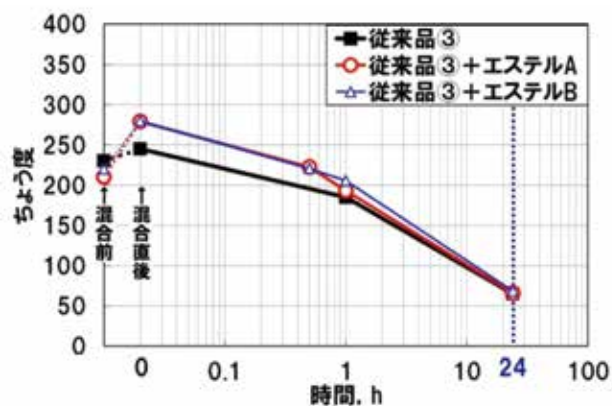


図6 従来品③にエステルを添加したときの硬化遅延性能

4.3 セメント硬化遅延材の適用

裏込め注入材の主成分はセメントであることから、セメントの硬化遅延材が裏込め注入材の硬化遅延材としても有効であると考えられる。

セメントの硬化メカニズムを図7に示す。まず、セメントと水を混合すると、セメントからAl、Ca、Fe、Si等の金属イオンが水へ溶出する。溶出した金属イオンは水と反応し、水和物を形成する。この水和反応が進行し、セメント粒子間を満たすことでセメントは硬化する⁵⁾。セメントの硬化遅延材としては、無機系ではフッ化物・ほう酸類・りん酸塩・亜鉛・鉛・銅酸化物等、有機系ではカルボン酸塩・ケト酸塩・糖類・アルコール類等、多くの化合物が公知となっている。

このうち、糖・アルコール類は入手性がよく、取り扱いも容易である。糖・アルコール類による硬化遅延性能の発現メカニズムの一例を紹介する。まず、糖・アルコールをセメントに添加すると、糖・アルコールがセメントから溶出してきた金属イオンと錯体を形成し、ゲル化してセメント粒子に吸着する。こうしてできたゲルが水和反応を阻害し、セメントの硬化が妨げられる。しかしながら、時間が経過すると、糖・アルコール成分がセメント粒子表面から消失していく。糖・アルコール成分がセメント粒子表面から消失していくメカニズムは未だ明らかとなっていないが、糖・アルコールがセメント粒子周辺から消失することでセメントの金属イオンの水和が起こりセメントが硬化し始める^{6) .7) .8) .9)}。

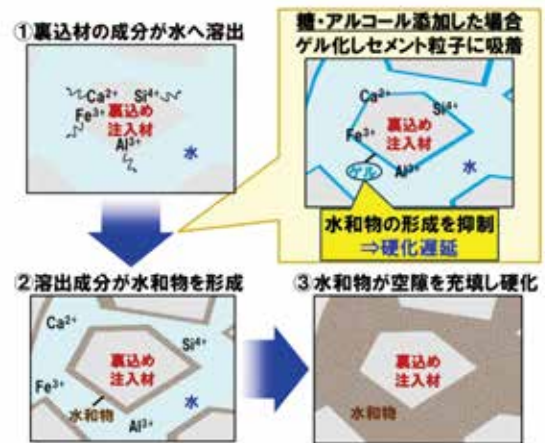


図7 セメントの硬化メカニズムおよび糖・アルコールによる硬化遅延メカニズム^{6) .7) .8) .9)}

実際に、従来品③に糖・アルコール類を添加し、裏込め注入材混合時の硬化遅延性能を評価したところ、図8に示すとおり、裏込め注入材混合時に良好な硬化遅延性能が発現することがわかった。

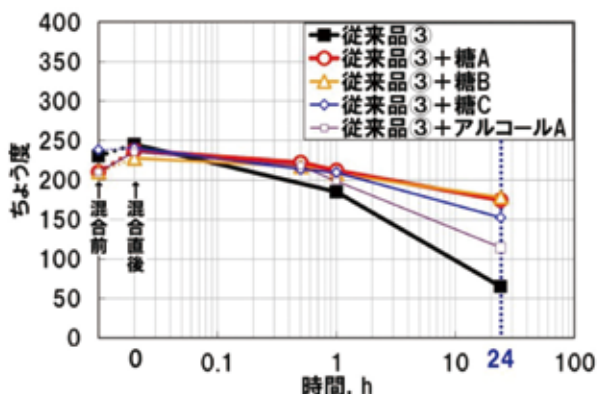


図8 従来品③に糖・アルコールを添加したときの硬化遅延性能

4. 4 開発品の性能

以上の検討結果から入手性や価格なども勘案し、開発品の配合を決定し、各種要求性能を評価した。

(1) 硬化遅延性能

開発品の裏込め注入材混合時の硬化遅延性能を図9に示す。開発品は24時間を経過しても目標のちょう度範囲を満足した。

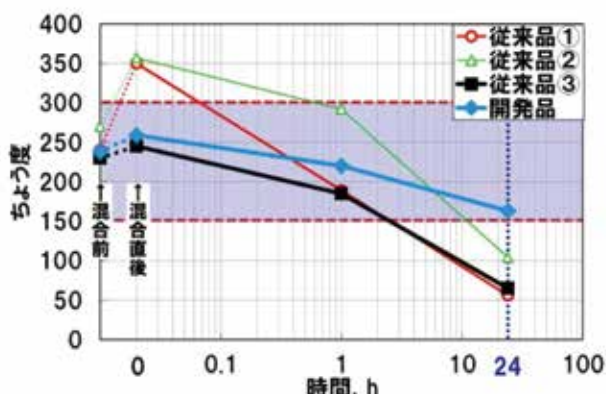
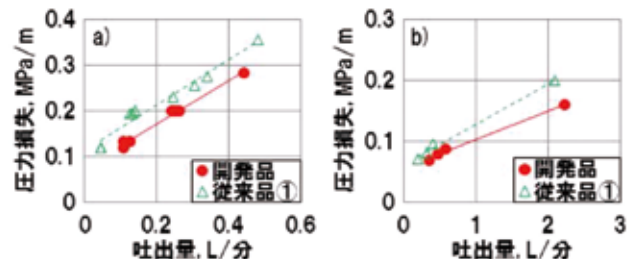


図9 開発品の裏込め注入材混合時の硬化遅延性能⁴⁾

(2) 圧送性能

圧送性能は、小・中口径、大口径のそれぞれのシールド工事現場で一般に使用されるテールグリース圧送用ポンプであるリンカーン製 #2024、#2077 に所定のホース (φ1 インチ×20m、φ2 インチ×50m) を接続して圧力損失を測定した。図10に示すように、何れの条件においても開発品の圧力損失は従来品①よりも低かった。圧力損失が低いほど圧送性能に優れることから、開発品は従来品①と同等以上の優れた圧送性能を有していることが確認された。



a) 小・中口径想定 (ポンプ: #2024、ホース: φ1 インチ×20m)
b) 大口径想定 (ポンプ: #2077、ホース: φ2 インチ×50m)

図10 開発品と従来品①のポンプ圧送性能⁴⁾

(3) 止水性能

止水性能は、図11に示す圧力容器内にグリースを高さ35mmまで充填した上に高さ10mm程度水を入れて密封し、圧縮空気により圧力を加え (0.5MPa → 1MPa → 2MPa → 3.5MPa、それぞれ3分間静置)、漏水の有無の確認およびグリース流出量を測定した。結果を表2に示す。開発品は従来品と同様に最大圧力3.5MPaでも漏水が無く、十分な止水性能を有していることが確認された。

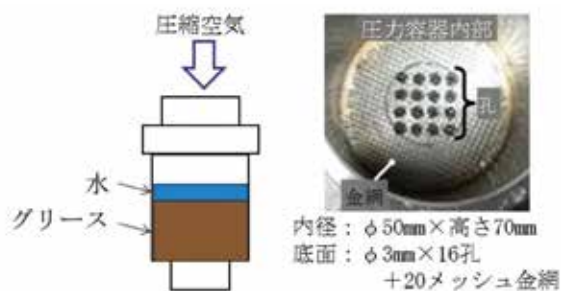


図11 止水性能評価用圧力容器の概略図と容器内部の写真

表2 止水性能評価結果⁴⁾

グリース	従来品①	従来品②	従来品③	開発品
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
	1.0MPa	14	15	11
	2.0MPa	18	21	12
	3.5MPa	19	22	13

5. まとめ

テールグリースに、裏込め注入材混合時に硬化遅延性能を発現する新たな機能を付与した「硬化遅延型テールグリース」の開発を通じて、次のことを明らかにした。

- (1) エステル含有テールグリースと裏込め注入材を混合すると、ちょう度が増加し、グリースが軟化する。
- (2) 糖・アルコール類は裏込め注入材混入時の硬化を遅延させる効果を有する。

(1)、(2)の知見を活用して、硬化遅延性能、止水性能、圧送性能を満足する配合を開発した。本開発品は、(株)大林組殿のご協力により、実際のシールド現場における実用性能も従来品②と同等以上であることが確認され、本年9月に「シールロックCR」として発売された。

今後、「シールロックCR」が市場で広く使用され、施工条件の厳しさを増す多くのシールド工事現場の安全性向上に貢献できれば幸いである。

－ 参考文献 －

- 1) 荒井孝；トライボロジスト（シールドマシン用テールシールグリース），61, 5（2016）
- 2) 吉田正利；日石レビュー（シールド掘進機用テールパッキンについて），35, 1, 21（1993）
- 3) 有山毅，五十嵐寛昌，今立文雄，吉村宗男，貝沼憲男；トンネル工学研究論文（高耐久性新型テールシールの開発），7, 39, 313（1997）
- 4) 泉徹，内海孝之，荒井孝，山元寛哲，星野智紀；平成28年度土木学会全国大会第71回年次学術講演会（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），VI-831（2016）
- 5) 太平洋セメント株式会社HP（研究・技術開発＞セメント資料館＞セメント基礎知識＞セメントの固まる原理について）
- 6) N. L. Thomas and J. D. Birchall；Cement and Concrete Research（THE RETARDING ACTION OF SUGARS ON CEMENT HYDRATION），13, 830（1983）
- 7) Feraidon F. Ataie, Maria C. G. Juenger, Sarah C. Taylor-Lange, Kyle A. Riding；Cement and Concrete Research（Comparison of the retarding mechanisms of zinc oxide and sucrose on cement hydration and interactions with supplementary cementitious materials），72,128-126（2015）
- 8) 中川健太郎；第37回土木学会関東支部技術研究発表会（糖添加がソイルセメントの遅延効果に及ぼす影響），III-36（2010）
- 9) 株式会社コンクリート新聞社HP（WEBマガジンe-コンクリート＞コンクリート+1＞第13回 凝結遅延剤と水和熱抑制剤）