

高耐久性新型テールシールの基本性能試験

FUNDAMENTAL EFFICIENCY TESTS OF HIGH DURABILITY NEW TAIL-END-SEALING SYSTEM
FOR SHIELD TUNNELING MACHINE

有泉 毅*・貝沼 憲男*・吉村 宗男**・今立 文雄***・五十嵐寛昌***

Takeru ARIIZUMI, Norio KAINUMA, Munco YOSHIMURA, Fumio IMADATE, Hiromasa IGARASHI

Shield tunneling method has been widely applied to the construction of underground structures in urban area and a demand for long distance tunneling under high underground water pressure is growing recently.

To deal with the demand, a tail-end-sealing system of shield tunneling machine is treated in this report among other technology developments. We have designed a high durability new tail-end-sealing system which is made by filling up ordinary wire brush with poly urethane form, and a series of fundamental efficiency tests has been carried out.

As a result, it was clarified that the new tail-end-sealing system has higher sealing performance and higher durability than the ordinary wire brush type tail seal.

Key words : shield machine, tail seal, model test, durability, tail clearance

1. まえがき

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既設地中構造物の輻輳化、立坑用地の確保難、河川・海域等の横断により長距離化ならびに大深度化する傾向にある。また、工期短縮のための高速施工化も指向する傾向にあり、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。そこで現在、東京電力㈱では、高水圧下での長距離掘進および高速施工を目標としたシールド機の開発を進めている¹⁾。

これらの課題のうち、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、現在ワイヤーブラシ式テールシールが主流であるが、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、テールシール自体の耐久性向上が期待される。

本編では、テールシールの損傷する要因として前記の裏込注入材等の侵入・固結を防止し、テールシール自体の弾性を長期的に維持できる新型テールシールを開発し、実規模大の大型円筒試験装置によって止水性等の基本性能を確認したので報告するものである。

* 正会員 東京電力(株)電力技術研究所 構造研究室

** 正会員 鹿島建設(株)土木技術本部 技術部 ***正会員 鹿島建設(株)技術研究所 第二研究部

2. 高耐久性新型テールシールの開発の

背景について

1) テールシールの種類

テールシールは、冒頭に記載したように、現在は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^{2)～5)}。

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
S 4 0		布、綿等の随時補給による止水
S 4 5		ゴムシール(平形、リップ形、中空形)
S 5 0	掘進距離増加	ゴム+ワイヤーブラシ併用
S 5 5		ワイヤーブラシ方式
S 6 0	急曲線高水圧対応	〃 繊維入りグリス、給脂システム導入 [耐水圧；10kgf/cm ²]
H 2	長距離対応	〃 ブラシ耐久性向上 [掘進距離；2～2.5km]
H 7	超長距離対応	〃 強化型 [掘進距離；5～6km]

※マシンメーカー（コマツ）技術資料を一部修正

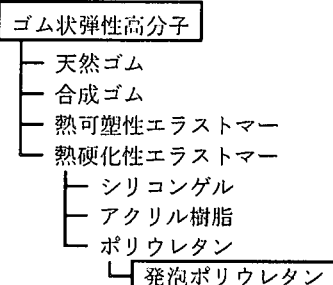
2) 従来型ワイヤーブラシ式テールシールの問題点

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。すなわち、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（以下バックキングという）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、損傷を未然に防止するグリス量等を定量化するのは現状では困難であり、また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・長距離耐久性について懸念され、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スに代わって安定した材料で充填固結させた構造とした。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。すなわち、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つ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、として図－1に示す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。



図－1 ゴム状弾性高分子の分類

3. 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⁶⁾。

1) 試験項目

要素試験の試験項目ならびに試験方法は、表－2及び図－2、3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

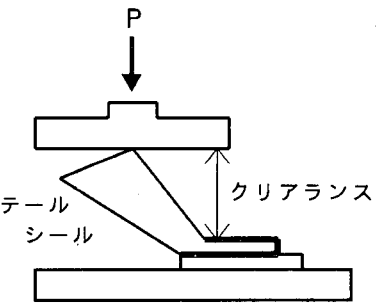
め、外径4 m程度のRCセグメントを対象に3次元FEMによる応力解析で照査し、新型テールシールの管理値として、要素試験における反力を300kgf／1ピース以下に設定した。

2) 試験結果

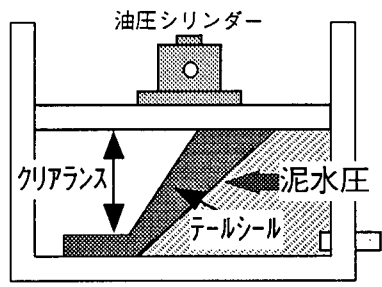
セグメントへの反力は、新型・従来型ともに、クリアランスが大きい時に小さく、クリアランスが小さくなると急激に大きくなる傾向があり、新型は従来型に比べて、反力が大きくより高い止水性を確保できることがわかった。なお、新型の反力は上述のように設定した管理値内に収まっており、セグメントへの影響は問題ない値である。化学的安定性・止水性・耐磨耗性・耐バックキング性の試験結果の概要は、表－2に併記したとおりであり、新型テールシールは従来型に比べて、基本性能が優れていることがわかった。

表－2 要素試験の方法と結果の概要

試験項目	方 法		試 験 結 果		
	名 称	概 要	測定条件	新 型シール	従来型シール
セグメントへの反力	荷重試験	所定のクリアランスにするための荷重を測定	クリアランス 10mm クリアランス 100mm	160kgf 10kgf	60kgf 1kgf
化学的安定性	浸せき試験	飽和石灰溶液及び水道水に一定期間浸せき後、荷重試験	6ヶ月経過後 荷重試験	外観及び反力に変化なし	実施せず
止水性	水圧試験	所定のクリアランスにて背面から泥水圧を作用させ、漏水量を測定	3ビ-7幅の供試体で試験 クリアランス50mm	圧力9.4 kgf/cm ² で漏水なし	圧力3.0kgf/cm ² で漏水多い
耐磨耗性	磨耗試験	研磨砥石上を摺動させ、重量変化を測定	摺動距離2.5km	重量減少0.03%	重量減少0.13%
耐バックキング性	バックキング試験	研磨砥石上を逆方向に摺動させ、観察	内側保護板をはずして摺動	変化なし	ワイヤの捲れが発生



図－2 荷重試験装置概要図



図－3 水圧試験装置概要図

4. 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、テールシール及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－4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)及びピース間目違い(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。

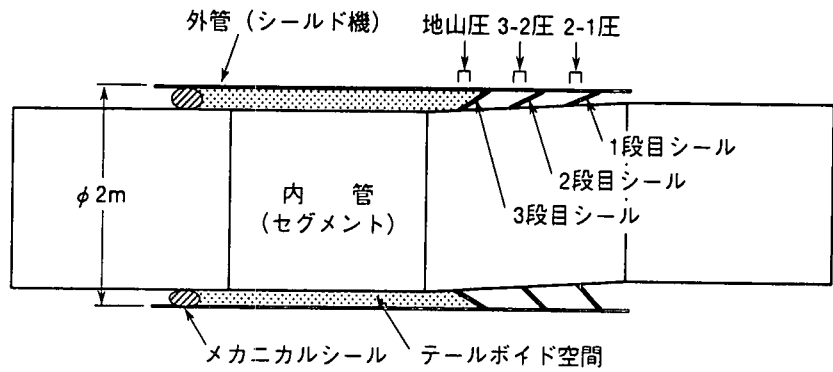


図-4(a) 実験装置模式図

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、図-4(b)に示すように、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、その手順は表-4に示すとおりである。

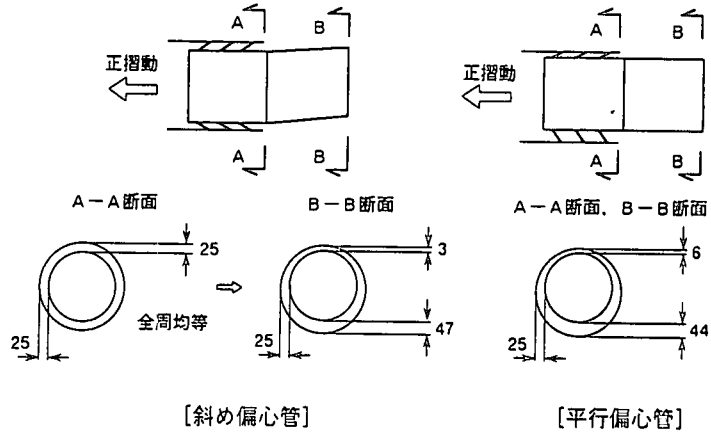


図-4(b) 実験装置のクリアランス変化模式図

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

表-4 実験方法

実験1	静止状態で、地山圧 5 kgf/cm ² 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 10 kgf/cm ² を作用させる。
実験3	地山圧を解放し、再度地山圧 5 kgf/cm ² を作用させ、保持する。内管を 30 mm/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 10 kgf/cm ² 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 5 kgf/cm ² 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) 漏水量について

漏水量の測定結果を、図-5、6に示す。これらの図から、地山圧 5 kgf/cm²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 10 kgf/cm²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-6によると、地山圧10kgf/cm²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5kgf/cm²⇒静止10kgf/cm²⇒摺動5kgf/cm²⇒バックング0kgf/cm²⇒摺動10kgf/cm²⇒バックング5kgf/cm²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について

実験6(地山圧5kgf/cm²でバックング)において、従来型シールは、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。新型シールの場合は、反転は生じなかった。

(c)テールシール間の圧力について

ケース3・4の実験5のテールシール間の圧力測定結果を、図-7に示す。地山圧10kgf/cm²に対し、ケース3(新型)の場合には、3段目シールと2段目シールの間の圧力(以下、3-2圧と称する)は6~7kgf/cm²程度、2段目シールと1段目シールの間の圧力(以下、2-1圧と称する)は3~4kgf/cm²程度と圧力差が生じているが、ケース4(従来型)では、地山圧・3-2圧・2-1圧ともにほぼ10kgf/cm²を示している。従来型では、これまで新型の実験結果のように各シール間で差圧が生じ、シール各段で圧力をほぼ均等に負担していると考えられていたが、シール段毎の圧力差は観察されなかった。

このことから、新型シールは各段のシール自体が圧力に対して抵抗し止水効果を発揮していること、これに対して従来

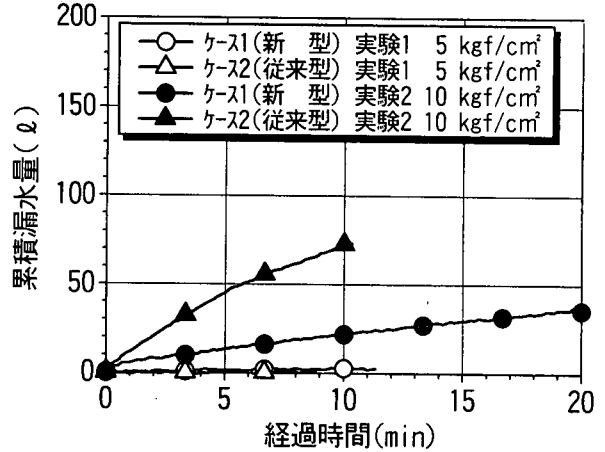


図-5(a) 静止状態での漏水量経時変化

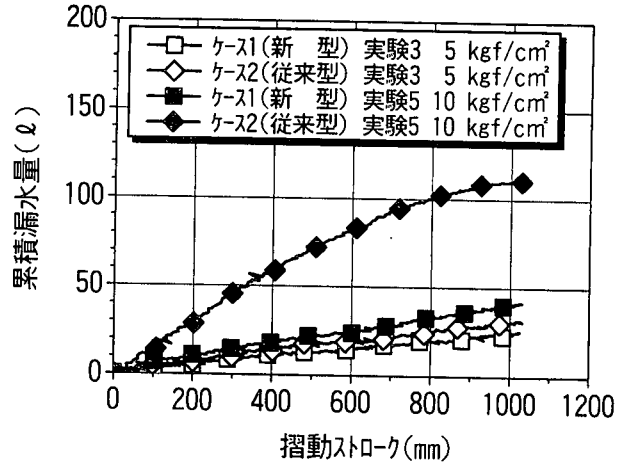


図-5(b) 正摺動での漏水量ストローク変化

		地山圧 5kgf/cm ² の場合 漏水量 (ℓ/分)				地山圧 10kgf/cm ² の場合 漏水量 (ℓ/分)			
		2	4	6	8	2	4	6	8
平行偏心	新型	静止	0.2			2			
		摺動	0.8			1.2			
	従来型	静止	0.4			8			
		摺動	0.9			4			
斜め偏心	新型	静止	0			0.7			
		摺動	0.8			1.5			
	従来型	静止	0			5			
		摺動	2			3			

図-6 漏水量測定結果のまとめ

型シールは3段のワイヤーブラシとその中に充填されたグリスが一体になって圧力に抵抗しているといえる。

5. 考察

新型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一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 5 kgf/cm^2 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 10 kgf/cm^2 になると、従来型シールに比べ新型シールの方が格段に止水性能に優れている。また、パッキングに対しても、新型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ことならびにシール間で差圧が生じ各段で圧力負担が小さいため、従来型に比べて優れているといえる。また、従来型シールは、グリスを大量に供給することによって止水性が発揮されるので、グリス供給が不足する場合においては、漏水量が多くなるため、裏込注入材等の浸入量が増加し、耐久性が損なわれるものと考えられる。新型シールにおいても、グリスを供給することにより、セグメントの目違い等による圧力変動を緩和する効果ならびにシールとセグメントとの接触面での潤滑効果が期待され、長期的観点からはグリス供給が望ましいと考えられる。

6. 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、また長期的な耐久性も優れているといえる。また、新型シールは、ウレタン注入による費用増はあるが、従来よりグリス供給量を低減することができ経済性にも優れているといえる。今後は、さらに種々の実験条件についての実験を実施するとともに、実施工に適用していく所存である。

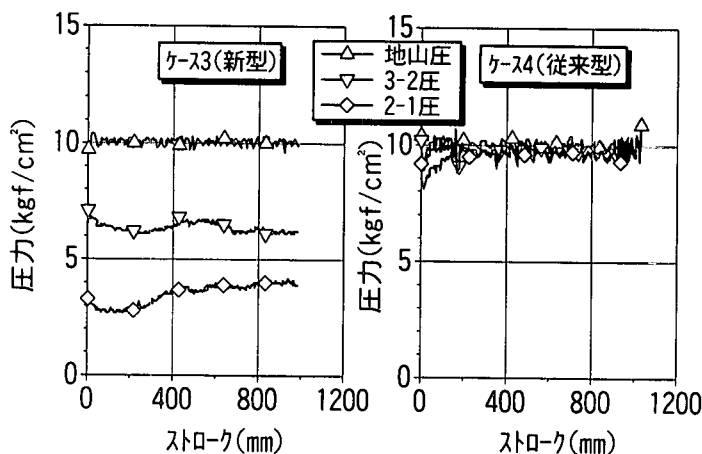


図-7 テールシール間圧力の測定結果

[参考文献]

- 1) 貝沼憲男 他：長距離・急速施工への対応技術の動向、建設機械、pp. 32～36、1994. 8
- 2) 馬場和徳 他：超高水圧対抗型シールド工法の開発と実績、土圧系シールドの”可能性と問題点”(プロジェクトリサーチ)、pp. 65～80、1987. 12
- 3) 脇田恒夫：高水圧下におけるテールパッキング及びセグメント継手部の止水性について、特殊条件下のシールド工法(プロジェクトリサーチ)、pp. 17～34、1986. 3
- 4) 松田賢二：泥水シールド工法によるメタンガス含有砂層の長距離掘進、土木クォータリー、No. 85、pp. 52～74、1989. 12
- 5) 岸孝雄 他：大都市の地下70mを貫く50万Vのトンネル、トンネルと地下、pp. 29～35、1996. 9
- 6) 今立文雄 他：新型テールシール(ウレタン注入型)の開発、土木学会第51回年次学術講演会、pp. 392～393、1996. 9