

半径の異なる三連型シールドの止水実験について

IMPROVEMENT OF CUT-OFF AT THE TUNNEL ENTRANCE OF THE THREE-CENTERED SHIELD TUNNEL

松田輝雄¹⁾・久多羅木吉治²⁾・大石敬司¹⁾・歳森國臣³⁾

Teruo MATSUDA、Yoshiharu KUTARAGI、Keiji OISHI and Kuniomi TOSHIMORI

There are four hollow parts in the cross section of the three-centered shield tunnel and the rubber gasket for cut-off of water at the tunnel entrance is pulled up around these parts because of the tension in the gasket.

Application of the rubber tube which is expanded by pumping up and press the gasket against the skin plate of tunnel structure has been attempted in order to improve the waterproofing performance of the gasket and the model test has been carried out to examine the performance of the method.

Key Words : three-centered shield、entrance of tunnel、cut-off

1. はじめに

近年、地下構造物が輻輳する地下空間を有効利用するとともに、トンネルを合理的に構築する手段として、二連型、三連型の複円形シールド工法が鉄道、共同溝、下水道といった用途に採用されている。

帝都高速度交通営団においても、駅間の複線トンネル用シールド機を駅部トンネル用三連型シールド機の一部として利用する「着脱式泥水三連型駅シールド工法」を開発し、7号線白金台二工区に採用している。

本工法に関する技術的課題に対しては、これまでに機械、および施工面から多岐にわたる研究開発を行ってきた。本編では、これらのうち発進坑口の止水方策に関して実施した実験とその結果について報告するものである。

2. 発進坑口の止水に対する技術的課題

発進坑口のエントランスパッキンは、通常の円形部ではセンター方向へ締め付ける力により止水性を確保することができる。しかし、三連型シールドは、図-1に示すように4カ所のカモメ部（くびれ部）を有しており、ここでパッキンが円周方向に引っ張られ、外側に浮き上がってしまい止水効果を発揮できない。

また、これまでの泥水式複円形シールドでは、シールド機スキンプレートが完全にエントランスパッキンを通過し、発進坑口の補強ができるまでの間、地下水

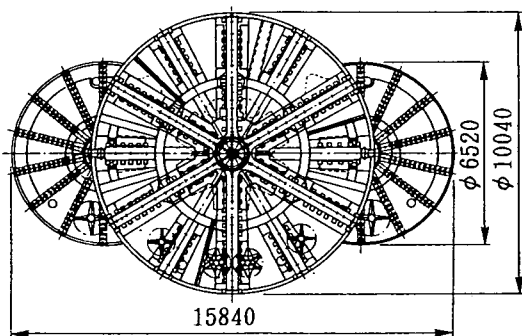


図-1 着脱式泥水三連型駅シールド断面形状

- 1) 正会員 帝都高速度交通営団
- 2) フェロー 帝都高速度交通営団
- 3) 熊谷・青木建設工事共同企業体

の流入を防止できるよう、シールド機長+αの範囲の地盤改良が行われている。しかし、本工事では坑口補強ができる前に切羽が地盤改良範囲を抜けてしまうため、所定の泥水圧で切羽を保持する必要がある、三連型シールドのエントランスパッキンとしては従来にない高い止水性が要求され、耐圧止水性能を実験により検証する必要があった。

3. 発進坑口の止水対応策

本シールドではカモメ部においてエントランスパッキンが外側に浮き上がってしまうほか、カモメ部のテールスキンプレート板厚が円形部に比較して厚くなっている。このため、坑口とセグメントのクリアランスは、表-1に示すように最大340mmとなり、従来にない対策が必要となる。

従来のエントランスパッキンは、シールド機通過時、およびセグメント転移時に止水性を確保する役割を有しているが、本工事においては、前述したクリアランスが大きいという課題があるため、エントランスパッキンによる止水効果はシールド機通過時のみ期待することとした。なお、セグメント転移時には、図-3に示すようにエントランスパッキンがシールド機スキンプレートを抜けてセグメントに転移する直前に、坑口押さえ鉄板を取り付け、この鉄板とエントランスパッキン、およびセグメント外周面に囲まれた範囲に裏込め注入材等を充填し、完全に止水を図るという対策を採用することとした。

ここで、シールド機通過時にエントランスパッキンによりカモメ部の止水性を確保する方策として、以下に示す3種類の止水方法について実験・検討を行った。

1) 楕円形坑口方法（実験A）

シールド機カモメ部に発泡ポリエチレン等の材料を貼付けることで、カモメ部をなくし、シールド機断面を楕円形状とする。エントランスパッキン材は従来のゴムパッキンとする。（図-4）

2) チューブパッキン方法（実験B）

坑口形状はシールド機と同様にカモメ型とし、エントランスパッキン材にチューブパッキンを使用する。チューブパッキンの加圧膨張力でシールド機のカモメ部に接地させて止水する。

3) ゴムパッキンとチューブパッキンの併用方法（実験C）

坑口形状はシールド機と同様にカモメ型とし、エントランスパッキン材にゴムパッキンとチューブパッキンを併用する。チューブパッキンの加圧膨張力でゴムパッキンを押しえつけカモメ部を止水する。（図-5）

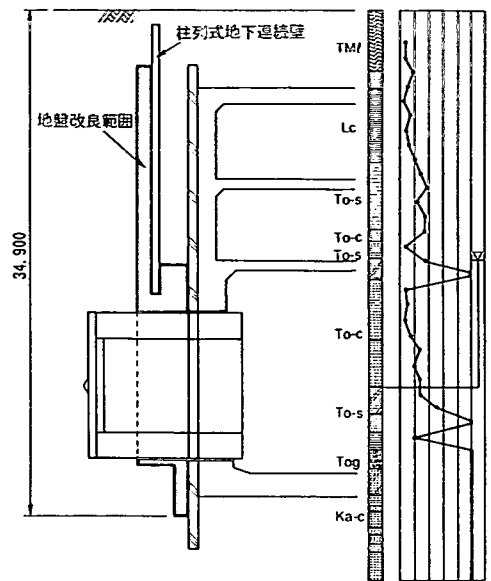


図-2 発進部縦断面図

表-1 クリアランス比較表

	坑口とシールド	坑口とセグメント
一般部	150mm	270mm
カモメ部	150mm	340mm

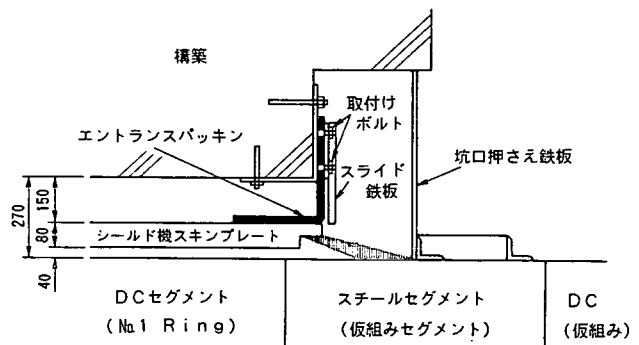


図-3 テール通過後坑口止水概念図

4. 実験概要

1)実験装置

実験装置は、図-6に示すような坑口とシールド機を模擬した二重管とし、その縮尺は実機の1/3とした。内筒管の曲率は、上部は複線断面（中央円）とホーム部断面（側円）のそれぞれの曲率を、下部は複線断面の曲率を模擬した形状とした。

また、シールド機（内筒管）と坑口（外筒管）のクリアランス部を泥水で加圧できるものとし、シールド機と坑口の位置関係を上下左右に20mm偏心できるような構造とした。

パッキン材には、各実験とも全周に押さえ金具を取り付けた。実験B、Cで使用したチューブパッキンにはコンプレッサーによりエアーを送り込み、加圧して膨らませた。

2)実験内容

実験で使用する泥水は粘土（栃木産 #300）、ベントナイト（群馬産 #250）、および清水を用い、実施工で使用される泥水と同等の比重1.2になるよう配合した。表-2に泥水の配合を示す。また、泥水圧力は、実施工での計画泥水圧の1.5倍となる2.5～3.0kgf/cm²程度まで載荷し、圧力変化や漏水の状況、チューブ圧力などを計測した。

なお、外筒管に対して内筒管は固定した状態で実験を行った。

また、実験Aについては本実験に先立ち、基礎実験として一軸圧縮試験器を用い、発泡ポリエチレンの応力-歪み特性を把握するとともに、加圧装置を用い発泡材料自体の非通水性、および発泡材と鉄板面の止水性を確認する耐圧止水材料確認実験を行った。

5. 実験結果

1)実験A（楕円形坑口方法）

1-1)耐圧止水材料確認実験（基礎実験）

試験材料は発泡倍率10、15、25、60倍の4種類の独立気泡型発泡材料を用いて行った。なお、発泡材料をシールド機に装着して施工を行う際の現実性を考慮した場合に、材料の圧縮変形は、坑口とシールド機とのクリアランスが150mmであることより、最大でも10%程度が望ましいとされる。よって、加圧試験は発泡材料を10%の歪み状態で耐圧容器に設置し、実施工で計画されている切羽泥水圧1.5kgf/cm²の約1.5倍となる2.5kgf/cm²以上での耐圧

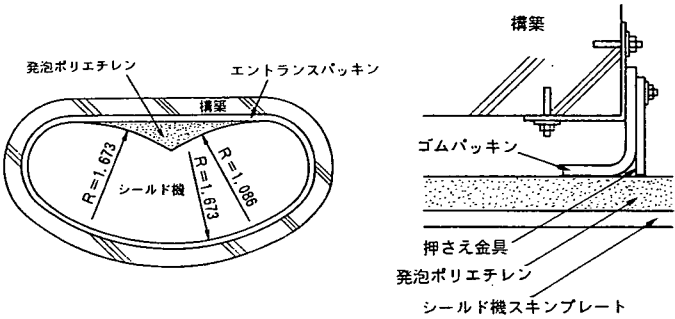


図-4 楕円形坑口方法概念図

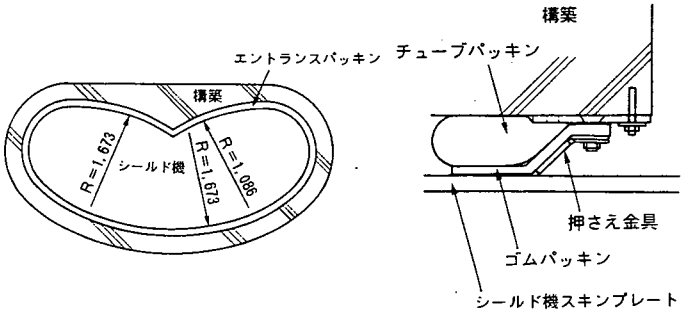


図-5 ゴムパッキンとチューブパッキンの併用方法概念図

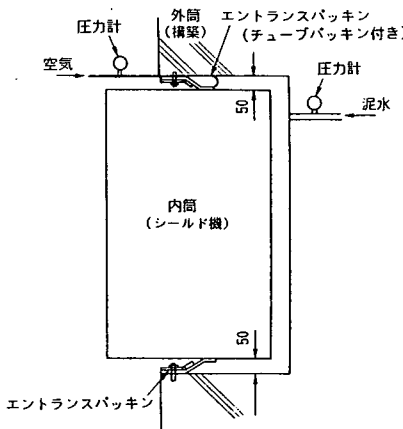


図-6 実験装置概要

表-2 泥水配合（1m³当たり）

清水	粘土	ベントナイト	合計重量
866.0kg	301.0kg	33.0kg	1,200kg

能力の確認を行った。

一軸圧縮試験の結果より得られた応力-歪み曲線を図-7に示す。実験結果より、比較的歪みの小さい発泡倍率10倍と15倍の材料の10%の歪みを与える応力は、それぞれ2.55kgf/cm²と2.05kgf/cm²となることが確認された。

加圧試験は一軸圧縮試験の結果より、歪みが最も小さい発泡倍率10倍の材料と、次に小さい15倍の材料を用いて行った。実験結果を表-3に示す。実験結果より、発泡倍率10倍と15倍の材料の耐水圧値は、それぞれ2.8kgf/cm²と2.5kgf/cm²となり、計画泥水圧以上の圧力に対して非通水性、止水性、および耐圧性を有していることが確認された。

1-2) 本実験

基礎実験の結果から非通水性、止水性、および耐圧性に優れた材料である独立気泡型の発泡倍率10倍、15倍の2種類を用い本実験を行った。実験結果の一例を図-8、9に示す。この結果によれば、発泡倍率10倍の材料は偏心の有無にかかわらず、2.8kgf/cm²の加圧に耐えることができ、止水性も良好であった。しかし、発泡倍率15倍の材料では、偏心無しの場合で、2.3kgf/cm²の加圧でカモメ部中央のパッキンが裏返り、泥水圧を保持することが不可能となった。これは、加圧することにより、カモメ部に設置した発泡材料が圧縮され、発泡材料と押さえ金具との間に間隙が生じ、その部分からエントランスパッキンが突出して、裏返ったものである。

なお、他の方向に偏心させたケースでも、ほぼ同様の結果となった。

2) 実験B (チューブパッキン方法)

偏心なしの場合の実験結果を図-10に、内筒管を下方向に20mm(カモメ部のクリアランス大)偏心させた場合の実験結果を図-11に示す。この結果では、偏心の有無にかかわらず、泥水圧力3.0kgf/cm²、チューブ圧力3.4~3.7kgf/cm²で、漏水もなく、減圧傾向もみられなかった。また、チューブ圧力を手動により減圧したところ、チューブ

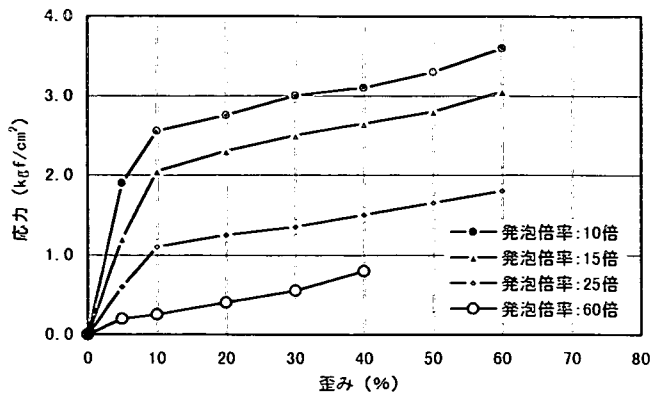


図-7 発泡材料の応力-歪み曲線

表-3 加圧試験結果

	材 料	
	独立気泡型発泡ポリエチレン	
発泡倍率 (倍)	10	15
歪み (%)	10	
最大加圧値 (kgf/cm ²)	2.8	2.5

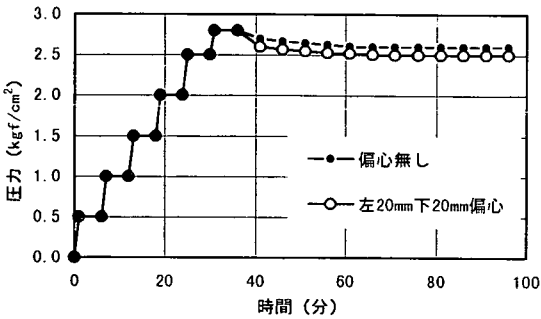


図-8 実験A結果 (発泡倍率:10倍)

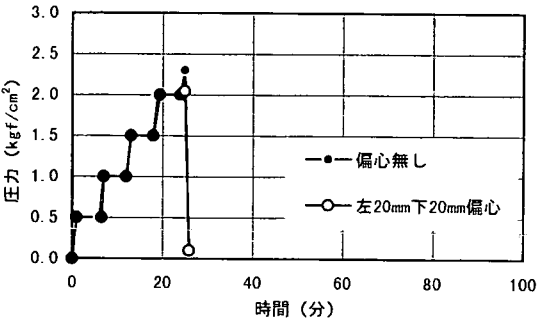


図-9 実験A結果 (発泡倍率:15倍)

圧力と泥水圧力が等しくなった 2.0kgf/cm^2 で漏水が始まった。

他の方向に偏心させたケースでも、ほぼ同様の結果となった。

3) 実験C (ゴムパッキンとチューブパッキンの併用方法)

偏心なしの場合の実験結果を図-12に、内筒管を下方向に20mm (カモメ部のクリアランス大) 偏心させた場合の実験結果を図-13に示す。この結果では、偏心の有無にかかわらず、チューブ圧力と泥水圧力の差圧が約 1.0kgf/cm^2 以下では、カモメ部からの漏水がみられたが、差圧を約 1.0kgf/cm^2 以上とすることで漏水が止まった。その後、チューブ圧力を 4.0kgf/cm^2 、泥水圧力を 3.0kgf/cm^2 まで上昇させ、約1時間放置したが、漏水はなく、減圧傾向もみられなかった。

なお、実験B、Cで使用したチューブパッキン (厚さ約2mm) の大気中における耐圧性能試験を行ったところ、泥水中では 4.0kgf/cm^2 まで耐圧性能を有していたものが、約 2.0kgf/cm^2 でパーストした。これは、泥水中ではチューブパッキンが泥水による押さえ効果で膨張を拘束されているためと考えられる。また、このチューブパッキンを二重 (厚さ約4mm) にして、大気中の耐圧性能試験を行った結果では約 6.0kgf/cm^2 の圧力まで耐え得ることが確認された。

4) 実験結果のまとめ

各実験より以下の点が明らかになった。

- ① 各方法とも実施工での計画泥水圧の1.5倍の 2.5kgf/cm^2 以上でも止水性を確保することは可能である。
- ② 各方法とも偏心による止水性能には大きな差はない。
- ③ 実験Aでは発泡倍率15倍以上の材料では止水性を確保することは困難である。
- ④ 実験B、Cでは泥水圧力の変動に対し、チューブ圧力は追従する。
- ⑤ 実験B、Cではチューブパッキンは大気中での耐圧性能より大きな圧力に耐え得る。
- ⑥ 実験B、Cではカモメ部にスポンジを貼り付けることは止水性の向上に有効である。

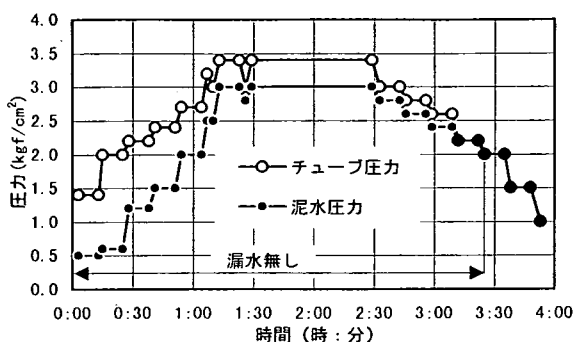


図-10 実験B結果 (偏心無し)

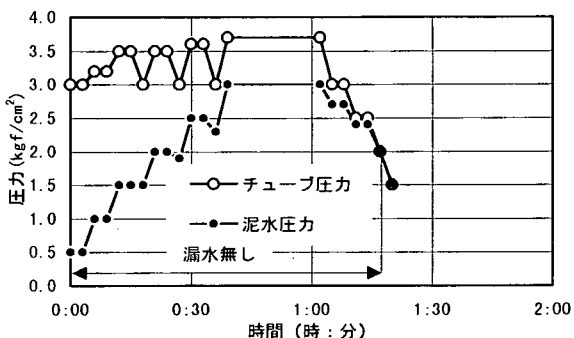


図-11 実験B結果 (偏心下20mm)

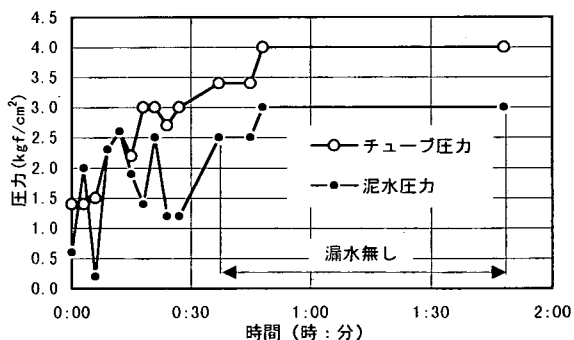


図-12 実験C結果 (偏心無し)

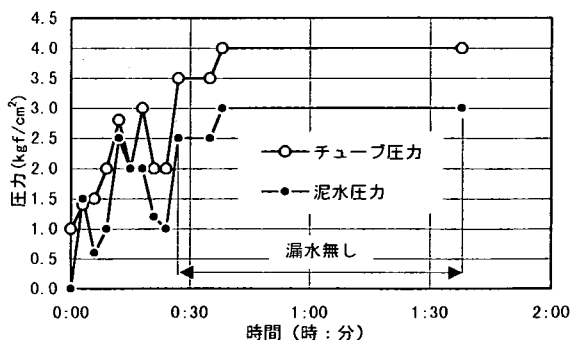


図-13 実験C結果 (偏心下20mm)

6. 結論

今回半径の異なる三連型シールドの施工に当たり、発進坑口の止水対策を決定するための基礎資料とすることを目的に、各種の実験・検討を実施し、カモメ部の止水性を確保するエントランスの構造について把握することができた。

実験結果より、各方法とも実施工での計画泥水圧の1.5倍の2.5kgf/cm²以上でも止水性を確保することは可能であることが確認されたが、実施工では以下の理由によりゴムパッキンとチューブパッキンの併用方法を採用することとした。

①楕円形坑口方法は、排泥管の閉塞などにより、万が一計画泥水圧力以上の圧力が作用した場合、発泡材料が圧縮されエントランスパッキンが裏返る可能性がある。

②チューブパッキン方法は、シールド機とチューブパッキン、および押さえ金具とチューブパッキンとの接触面に養生を要する。

③チューブパッキン方法は、不慮のトラブルが発生した場合、対応が困難である。

なお、止水に対する安全率をより高めるため、以下の対策を併用することとした。

①チューブ自体の耐圧性能を高めるため、二重のチューブパッキンを使用する。

②確実な止水性を期するために、ゴムパッキンとチューブパッキンを2段装備する。

③シールド機本体にスポンジを貼り付け、特にカモメ部における止水性の向上を図る。

現在、本工事は三連型シールドの発進準備段階であるが、今後の実施工においてこの実験結果を確認し、半径の異なる三連型シールドの坑口止水方策を確立していく予定である。

【参考文献】

- 1) 助川 禎・中島 信・船水 武美・小林 光：ランニングシールド機活用の3連型駅シールド工法、土木学会第47回年次学術講演会、pp200～201、1992.9
- 2) 助川 禎：駅間シールド機を使用した着脱式泥水三連型駅シールド工法の開発、土木学会論文集 No. 498 /VI-24、pp. 49～55、1994.9
- 3) 助川 禎・中島 信・藤木 育雄・中村 信義・佐古 井耕三：泥水式シールドの揺動掘進に関する実験的研究、トンネル工学研究発表会論文・報告集 第3巻 pp225～232、1993.11
- 4) 猪瀬 二郎・西林 聖武・藤木 育雄・橋本 美武：三円形泥水式シールドの掘削土砂回収に関する実験的研究、土木学会論文集 No. 540/VI-31、pp. 59～68、1996.6
- 5) 清水 満・佐藤 武志：世界初のMFシールドの施工、トンネルと地下、pp31～38、1989.1
- 6) 葛野 恒夫・高崎 肇・植林 俊光・山田 功：大阪城の北を抜くMFシールドの施工計画、トンネルと地下、pp35～44、1994.11