

# シールド工用セグメントの水膨張シール材 による止水設計法について

大塚正博<sup>1</sup>・塩冶幸男<sup>2</sup>・小林亨<sup>3</sup>・小泉淳<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京電力(株) 地中送変電建設所 副所長 (〒108-0023 東京都港区芝浦4丁目19番1号)

<sup>2</sup>正会員 東京電力(株) 地中送変電建設所 課長 (〒108-0023 東京都港区芝浦4丁目19番1号)

<sup>3</sup>正会員 日本シビックコンサルタント(株) 技術本部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

<sup>4</sup>正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

シールドトンネルの漏水は、トンネル本体の劣化ばかりでなく、トンネル周辺地山の劣化も引き起こすことから、漏水の処理にかかるランニングコストもさることながら、トンネルの耐久性を考える上でも重要な問題となっている。トンネル内への漏水が発生する箇所は、そのほとんどがセグメントの継手部であり、継手面に貼付するシール材の選定が、トンネルの防水には特に重要である。しかしシール材の材質や形状寸法等の選定は、従来からの経験や実績に基づき行なわれてきたのが実情であり、止水設計法と呼ばれるようなものは現状では確立されていない。本研究は現在もっとも多く使用されている水膨張シール材を対象に各種の止水試験を行い、その結果から密封の原理(パッキン理論)に基づくシール材の止水設計法を提案するものである。

*Key Words: sealing material, shield tunnel, water-tightness, leakage test, selfsealing, packing*

## 1. はじめに

近年、都市部においては、構造物の林立、交通網の過密化などにより、公共事業を行う上で長期間地上を占有することが困難となってきている。新たに都市整備のための公共施設を敷設するためには、地下空間にその場所を探さなければならないが、地下の比較的浅い部分にはすでに地下鉄、下水道、電力・通信などの施設が輻輳しており、利用できる空間も深層化の傾向にある。このような状況から、都市部におけるトンネル工事はますます増加し、それに用いられるシールド工法はとりわけ重要な施工法となってきている。また、都市部のトンネル建設においては、環境アセスメント、ならびに施設の維持管理の両面からトンネルの防水が特に重要な課題であり、従来、種々の防水対策が実施されてきた。特に最近ではトンネルの建設位置が深層化する傾向にあることから、防水材の性能も高水圧に対応できるものが要求されるようになってきている。

都市トンネルの漏水は、一般に自然流下で坑外に排出できないため、何らかの方法で集水し立坑などからポンプアップして坑外へ排出せざるを得ない。この場合、長期にわたってのランニングコストもさ

ることながら、一般に漏水量は年とともに増加する傾向があるため、トンネル覆工全体の腐食や周辺地山の劣化という問題を引き起こす可能性が高い。一方、このような漏水は、都市部の地下水流に影響を与えるため、今後は環境問題としても厳しく規制されることが予想される。

シールドトンネルの一次覆工は、図-1に示すように裏込め注入層およびセグメントから構成されている。漏水の発生経路はこのうちセグメント継手およびリング継手からに限定される。シールドトンネルの防水は大きく3つに分けることができる。

- ①セグメントの背面側、すなわち地山側に位置する裏込め注入材による防水
- ②セグメントの継手面に施す防水
- ③トンネルの内側に施す二次覆工、または一次覆工と二次覆工との間の防水

①の裏込め注入は、シールドのテールボイドやシールド掘進によって生じた乱れ範囲を適切な材料を用いてできるだけ速やかに、かつ十分に充填し、地盤沈下の防止やトンネルに作用する土圧の均等化を図ることを主目的として実施されている。掘削対象地山が比較的強固で空隙を長時間保持できる場合は問題ないが、軟弱地盤やゆるい砂質地盤では

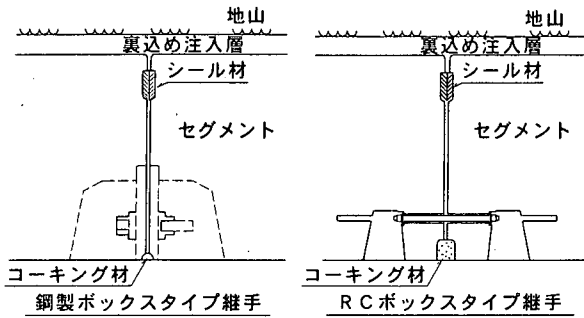


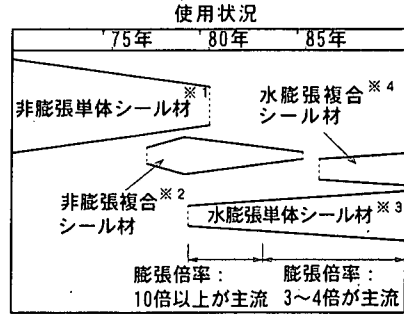
図-1 シールドトンネルの覆工断面図

肌落ちや小規模な土砂の崩落等が生じる。これがトンネルに偏圧を作用させ、セグメントの継手には目開き（セグメントの継手部におけるセグメント相互間の開口）および目違い（セグメントの継手部におけるセグメント相互間のトンネル径方向のずれ）が生じて漏水を引き起こす要因となる。裏込め注入材が背面によく回り、一定厚さの層を形成するならば、このような偏圧によって生じる漏水を防止するだけでなく、それ自体が防水層としての役割を果たすことが期待できるが、その施工技術には今のところまだ不安がある。また、最近では地山と一次覆工との間に防水シートを施し完全止水を行うことが試みられているが、経済性の面や施工性の面で課題があり、今後の開発動向によるところが大きい。

③の二次覆工それ自体を防水層と考える方法は、最近までもっとも一般的であった。二次覆工は、トンネル構造体の一部として設計されることはまれであり、一般には蛇行修正、防蝕、内装、セグメントの補強などと並んでトンネル防水が重要な役割として位置づけられている。二次覆工からの漏水は、二次覆工の乾燥収縮によって発生するひびわれを通して、また、二次覆工の打継目を通して、一次覆工で完全に止水できなかった水が浸透することから発生するものである。ひびわれを完全に防止し、打継目も防水上の弱点とならないような適切な処置が行われれば二次覆工は防水工として有効であるが、今のところは困難である。また、最近では、コスト削減策として二次覆工の省略が着目されてきている。このような状況から止水を目的とした二次覆工はそのコスト対効果が明確でないこともあって、省略される傾向にある。

一方、東京電力㈱が過去に実施したシールドトンネルの漏水実態調査結果によれば、漏水個所のほとんどはセグメントの継手面であるとの結果を得ており、このことは②のセグメントの継手面に施す防水がいかに重要であることを示している。

セグメントの継手面には一般に定形のシール材が



※1：未加硫ブチルゴム

※2：

粘着材：未加硫ブチルゴム

芯材：合成ゴム

※3：クロロプレンゴム+高吸水性ポリマー

※4：水膨張単体シール材+クロロプレンゴム

図-2 国内におけるシール材の使用経緯

用いられているが、その材質の選定は、従来の工事による経験から水膨張シール材を使用する例が多く、シール材による止水設計法についての力学的かつ系統的な研究はほとんど見られない。

本研究は著者らが中心となって実施してきた止水実験の結果を念頭に、密封の原理（パッキン理論）に基づくシール材の止水設計法を提案するものである。

## 2. シール材の材質および形状寸法

### (1) シール材の使用実績の変遷

一般に継手面からの止水対策には定形のシール材が使用されている。国内においてセグメントに用いられているシール材は、材質によって大きく分類すると、次のようになる。

- ①非膨張単体シール材（例えば、未加硫ブチルゴムだけのシール材）
- ②非膨張複合シール材（例えば、クロロプレンゴムを芯材にし、未加硫ブチルゴムを粘着材として組み合わせさせたシール材）
- ③水膨張単体シール材（例えば、クロロプレンゴムに高吸水性ポリマーを混合した均質材料のシール材）
- ④水膨張複合シール材（例えば、水膨張単体シール材とクロロプレンゴムとを組み合わせさせたシール材）

これらのシール材の使用経緯は、図-2に示すように未加硫ブチルゴムに代表される非膨張単体シール材、非膨張複合シール材から水膨張シール材へと変遷してきている。表-1は本研究の実験から得られたシール材の基礎物性の一例を示したもので

表-1 シール材の基礎物性の実験結果

項目	硬さ <sup>※3</sup> Hs	引張強さ kN/m <sup>2</sup>	伸び %	圧縮力 (kN/m <sup>2</sup> )			圧縮永久 ひずみ %	接着強度		
				20%	30%	50%		0 <sup>h</sup>	72 <sup>h</sup>	
未加硫 ブチルゴム	10	830	1000	50	90	200	—	41	38	
加硫 ブチルゴム	69	7000	380	860	2710	8390	41	49	54	
クロロブレン ゴム	69	7000	220	1070	1950	6440	57	27	23	
水膨潤 シール材	A 材	24	1230	730	150	220	660	100	47 <sup>※1</sup>	46 <sup>※1</sup>
	B 材	42	12200	810	420	580	1400	84	18	8
	C 材	52	2380	790	1110	1780	4140	34	130 <sup>※1</sup>	6 <sup>※1</sup>
	D 材	27	2870	670	270	400	1110	82	36	— <sup>※2</sup>
	E 材	19	490	590	110	190	470	97	61	27

※1 : シール材の破壊 (接着強度 単位(N/25mm))  
 ※2 : シール材と接着剤の界面剥離のため測定不能  
 ※3 : JIS K6301 スプリング硬さ試験で測定した

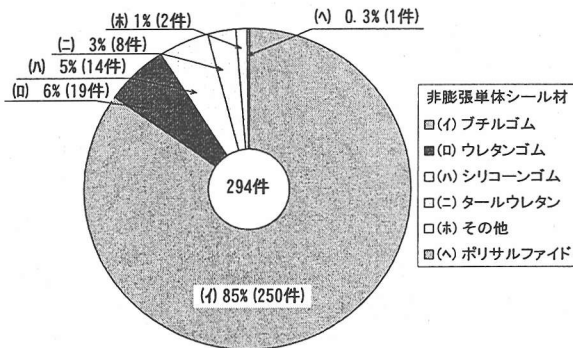


図-3 シール材の使用実績

ある。シール材によってその物性が大きく異なることがわかる。

日本にシールド工法が導入された当初、セグメント継手面には、コーキング溝に鉛を詰め込んだり、木材を挟んだりという防水対策が施されていた。1970年代にはいと、未加硫ブチルゴムを素材とする非膨張単体シール材が、継手目地の隙間をシール材体積で塞ぐとともに、その粘着性にも期待するという考えで一般的に使用されるようになった。図-3は、本研究において建設会社35社に依頼したアンケートにより1975年から5年間に首都圏で建設されたシールドトンネル294件におけるシール材の使用実績を示したものである。これによるとシール材の選定の傾向は非膨張単体シール材のうちブチルゴム系のものが全体の85%を占めていたことがわかる<sup>1)</sup>。しかし、ブチルゴムを用いたシール材では、十分な止水効果は得られなかった。これはシール材が弾力性に欠けるため、シールドが掘進する際のジャッキの繰り返し推力に対して十分な抵抗力がなく、図-4に示すようにシール溝で保護されていない部分が薄く延ばされ塑性変形を起こし、この塑性部分が水みちとなって止水効果が極端に

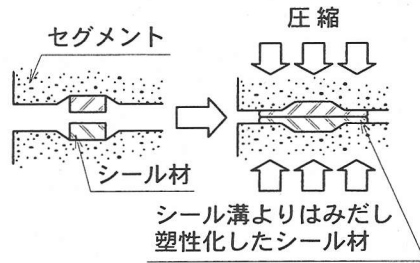


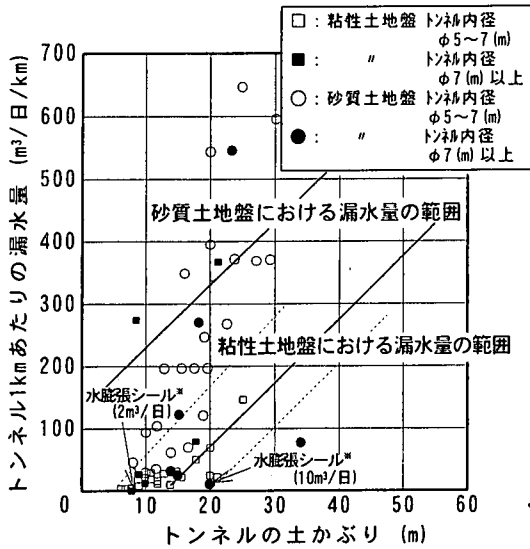
図-4 シール材の塑性変形

低減するためである。

また、Kセグメントのセグメント継手面には、そこに作用する軸力によって付加的なせん断力が発生するが、塑性化してシール溝からはみ出したシール材は継手面の摩擦係数を極端に低下させ、これがKセグメントの脱落の原因となり得ることが実験から指摘されている。さらに、このシール材の特徴である粘着性から、セグメント組立て時にシール溝からのシール材のはみ出しや脱落が多く見られた。したがって、その使用はある程度限定され、近年では高い水圧が作用するトンネルでは使用されず、作用水圧が低いトンネルでのみ使用される状況にある。

1980年の前後には、弾力性に富む加硫したブチルゴムやクロロブレンゴムなどの合成ゴムを芯材に挿入し、それを未加硫ブチルゴムで覆ったものが開発された。これは、このシール材が圧縮されることにより生じる弾性反発力と従来の未加硫ブチルゴムの粘着性とを同時に期待したものであったが、シール材自身の厚みが大きく、セグメントの組立て時に脱落が生じたり、シール材の弾性反発力が大きくセグメントの端部が欠けるなど、組立て精度や施工性に難点があり、現在ではあまり使用されていない。

1980年当初には、これらのシール材に代わってセグメント継手面の止水材として水膨張シール材が使われ始めた。この水膨張シール材は、水を吸収して自己膨張を起こすが、その体積はシール溝の容積により拘束されるため、これによって膨張圧力が生じ、これで水圧に抵抗して、水の浸入を防ごうとするものである。図-5は、トンネルの土被りと漏水量との関係を整理したものである。これによると、地盤条件によっても異なるが、水膨張シール材を用いたトンネルでは、漏水量は、2~10m<sup>3</sup>/日/km程度となり<sup>2)</sup>、格段に止水性が向上していることが確認されている。1980年の後半からは各工事での使用実績も急速に増えて、最近のシールド工事で用いられるシール材の大部分をこの水膨張シール材が



※) 水膨張シール材のデータはここに示した2例のみで、その他はすべて非膨張シール材のデータである。

図-5 トンネルの土かぶりとトンネル1kmあたりの漏水量との関係

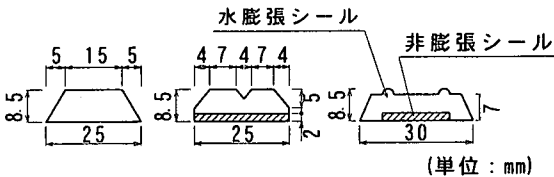


図-6 矩形以外のシール材の形状の例

占めてきている。

開発当初の水膨張シール材は、体積膨張倍率が10~20倍のものが使用され、膨張機能に大きく期待して止水するという考えであった。しかし吸水性樹脂などの膨張材料の種類や膨張剤と基材との架橋の有無によって差はあるものの、膨張剤の溶出等による膨張圧の性能低下によって長期的な止水性が保持できないことや、特に鋼製セグメントでは主桁と継手板がその膨張圧に負けて面外変形を起こすことなどから、現在では水膨張シール材の膨張倍率は3~4程度程度のものの使用が主流となっている。

水膨張シール材の形状は開発当初には矩形形状が多用されていた。また、当時は水圧が作用した時点でシール材が水を吸収し体積膨張することで止水を行うという考えで使用されたため、シール材の厚さはシール溝の中に納まるようにしていた。このため、セグメントリングが地山に出て、シール材が吸収膨張するまでの間は、漏水が発生することが多かった。その後、シール材の止水機能は、シール材

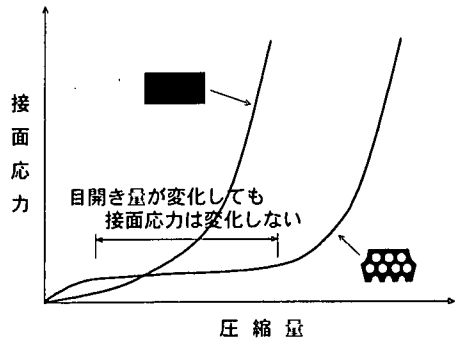


図-7 ゴムガスケット形状の違いによる圧縮特性

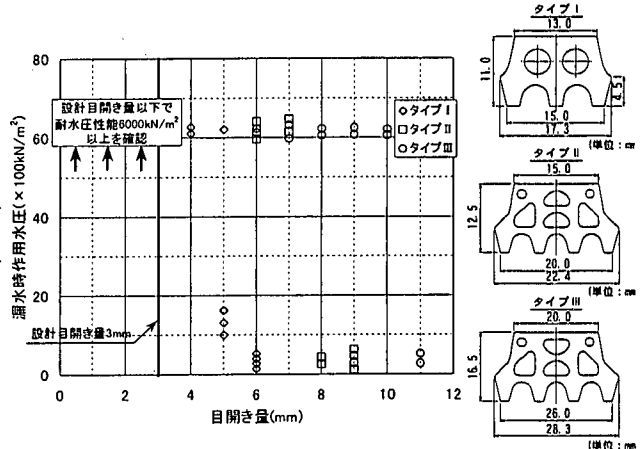


図-8 ガスケットにおける目開き量と漏水時作用水圧との関係

が圧縮されることにより発生する反発力に依存するという概念<sup>3)</sup>が紹介されたことで、シール材の形状は継手部の締結時に、その締付け力によって生じる反発力を大きくするために、図-6に示すように矩形以外に多種のものが提案され、シール材の厚さは施工時においても止水性能が確保できるようにシール溝から突出するようになってきている。

一方、ヨーロッパでは、ゴムガスケットが多用されている。その止水効果は、ゴムの弾性反発力に期待するものであり、材質としては、CR(クロロプレンゴム)、SBR(スチレンブタジエンラバー)やEPDM(エチレンプロピレンジエンモノマー)などが使用されている。これらの材料は止水材としてすでに数十年の実績がある。しかしながら、水膨張シール材に比較して厚みの大きいものが必要となるため、国内での非膨張複合シール材と同様にセグメントの組立て性が低下したり、ガスケット自身の弾性反発力によってセグメント継手端部が損傷する例が見られた。このため最近では、ガスケットの断面に孔を設け反発力を低減することにより改善を図っている<sup>4)</sup>。図-7はゴムガスケットの形状の違いによ

るガスケットの圧縮量と弾性反発力との関係を示した図である。断面内に孔を設けたガスケットでは一定の変形量（圧縮量）までは弾性反発力（界面応力）が増加しないことがわかる。これは、セグメント継手部の目開きがある程度変化してもシール材の弾性反発力を一定のままで制御できることを示している。この結果、セグメント端部に過度の応力が発生せず、欠けなどが防止できるようになったことから使用実績は増えている。国内でもほぞ付きセグメントなどで使用されつつある。図-8はガスケットの止水試験結果の一例である。実験に使用したガスケットは設計目開き量 3mm を想定したほぞ付きセグメント用のものである。この図からわかるように設計目開き量 3mm 以下では 6000kN/m<sup>2</sup> 以上の耐水圧性能が確認され、通常のトンネルの深さに対しては十分に止水性が確保される。しかし、設計目開き以上の目開きが生じた場合には止水性能が急激に低下することから、ガスケットによる止水は施工性に大きく依存していることがわかる。したがって、ガスケットをシールドトンネルの止水材として使用する場合には、組立て精度等の施工性を十分に検討した上で使用すべきである。

## (2) 水膨張シール材の種類<sup>5)</sup>

水膨張シール材は、一般に天然ゴムやクロロプレンゴムなどの合成ゴムの原料中に加硫剤、老化防止剤、補強性充填剤、軟化剤などの各種添加剤を添加するとともに吸水性材料を配合し、三次元の網目構造とした弾性ゴム架橋体である。吸水性材料には、分水中に親水基としてイオン性基、非イオン性基などの官能基を含んだ吸水性高分子材料と非イオン性親水基のみを含んだ吸水性ウレタン材料などが使われる。

水膨張シール材は、一般に使用される材料や架橋構造などにより、吸水性高分子材料系、ウレタン材料系に大別される。なお、ウレタン材料系には、さらに材料単一のものとはゴム原料中にウレタン材を混合しているものがある。

吸水機能の面から見ると、吸水性高分子材料系は、水との親和力が大きいため吸水能力が高いが、塩水などの電解質水溶液のもとでは、吸水能力は抑えられる。一方ウレタン材料系は、イオン性基を持たないため水質の影響は受けない反面、水との親和力が小さい。このため吸水能力は前者に比較して小さいといわれている。

## (3) 水膨張シール材の膨張のメカニズム

水膨張シール材は、親水基による浸透圧の作用により吸水膨張することで膨張を開始する。この時、

ゴム分子の三次元網目構造は伸張し、そこで発生する弾性反発力と吸水膨張力とが釣り合う。水膨張シール材はこれにより有限な膨張弾性を有することになる。その基本的な止水のメカニズムは、吸水膨張する能力を潜在的に期待することにより、シール溝に囲まれた有限の間隙下において高い膨張圧を発生させ、それにより止水を行うものである。したがって、拘束のない間隙下では、膨張圧を発生させることができず、シール材自身が単に吸水し、体積膨張による自由変形を起こすだけであるため、止水に必要な膨張圧を発生させるためには、シール材自身の強さやその形状を維持させることも重要である。

## 3. シール材による止水設計の考え方

### (1) 既往の考え方<sup>6)</sup>

前述したように、シール材の使用経緯は、未加硫ブチルゴムに代表される非膨張単体シール材や、非膨張複合シール材から水膨張シール材へと変遷してきている。しかし、このようなシール材の使用の変遷は理論に裏付けされたものとは言い難く、現場における実際の経験や施工者側の使い勝手のよさなどに依存してきた。

従来、使用実績の大部分を占めた未加硫ブチルゴムを素材とする非膨張シール材は、継手目地の隙間をシール材体積で塞ぐとともに、その粘着性にも期待するというものであった。この当時のシール材の形状寸法は、特に止水試験を実施することもなく施工者側の経験により選定されていた。したがって、シール材のみでは十分な止水性の確保は困難であった。また、当時はシール材で防水するという認識が低く、最終的に二次覆工で止水するという考え方が主流であった。すなわち、トンネルの防水は二次覆工の大きな役割のひとつとして位置づけられていた。しかし、二次覆工には乾燥収縮や、トンネル完成後の荷重変動によってひび割れが発生し、これらのひび割れや、二次覆工の打継目を通して、一次覆工で完全に止水できなかった水が浸入し、トンネル内面への漏水が起きてしまう。これらのひび割れや打継目は補修などを行えば、短期的には止水効果が期待できるものの、完成後数年から10数年程度経過したトンネルでは再び同じ位置から漏水しているケースが多く見られる。

最近使用されている水膨張シール材は、水を吸収させることにより、一定の容積内でシール材の体積を増加させ、これによって生じる膨張圧力で水圧に対抗して漏水を防ぐものであるが、各現場での使用実績を見ると、使用するシール材の形状寸法などは、

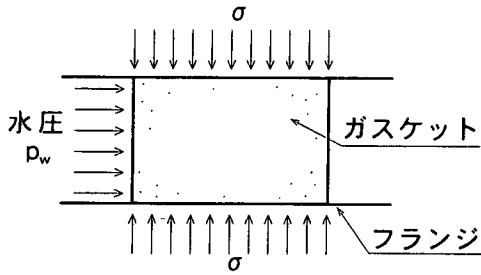


図-9 ガスケットの密封の原理

経験に基づき選定し、状況に応じてその止水試験を行って止水性を確認するというケースがほとんどで、止水のメカニズムを取り入れた設計は行われていない。

いずれにせよ従来はシール材に対する明確な設計法はなく、経験を重視してその材質や形状寸法を定めるのが一般的であった。

## (2) 提案する考え方<sup>7),8)</sup>

筆者らは、セグメント用シール材は JIS B 0116「配管：パッキンおよびガスケット用語」に示されているガスケットに相当するという認識から、シール材による止水の考え方は、基本的に図-9に示す密封の原理（パッキン理論）に基づくものと考えた。この原理は、シール材が圧縮されることによりセグメント継手面のシール材に発生する応力（以後、**界面応力**という）が作用水圧以上であれば漏水は生じないが、**界面応力**が作用水圧より小さければ、その接触面から漏水が発生するという考え方である。すなわち、シール材による止水の必要条件は、**界面応力** $\sigma$ が作用水圧 $p_w$ 以上となることである。

**界面応力** $\sigma$ は、シール材が圧縮されることによりセグメント継手面に発生する応力であるが、この応力はシール材の圧縮試験により得られる**圧縮ひずみ**と**圧縮応力**の関係により求めることができる。したがって、シール材の設計は、作用する設計水圧、シール材の**圧縮ひずみ**と**圧縮応力**との関係、ならびに継手の**締結力**によりシール材に導入される**圧縮ひずみ**が設定できれば、シール材の止水試験を実施することなく、机上で行うことができる。

ここでは、この考え方の妥当性を評価するために**界面応力**と漏水時の**作用水圧**との関係を、以下に示す止水実験により確認した<sup>9),10)</sup>。

## 4. シール材による止水性能確認試験

### (1) 試験概要

シールドトンネルは、図-10に示すようにセグ

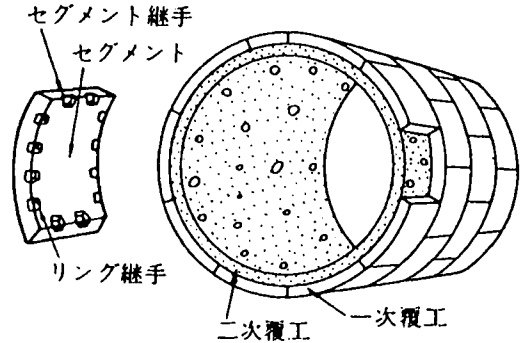


図-10 シールドトンネル覆工の概要

メントと呼ばれるプレキャスト部材をボルトなどを用いた継手で締結し構築する。このとき、セグメントの製作精度、組立て精度、外荷重などにより、セグメント継手部には目開きおよび目違いが生じる。図-11は昭和56年から昭和62年にかけて東京電力(株)が実施したシールドトンネルのセグメント継手面およびリング継手面の目開き量および目違い量に対する実態調査結果を整理したものである。調査対象としたトンネルの詳細は、表-2に示すとおりである。これによると、トンネル内縁側で測定されたセグメント継手間の目開き量は2mm以下であり、これから継手ボルトが許容応力度に達するときのシール溝位置における目開き量を幾何学的に求めると、継手部が正の曲げモーメントを受ける場合には、セグメント外縁端を回転中心として、また、負の曲げモーメントを受ける場合は、セグメント内縁端を回転中心として、それぞれ0.7mm以下、1mm以下と推定される。一方、リング継手間の目開き量は最大2mmとなっている。トンネル軸方向を考えるとリング継手は曲げモーメントよりも軸引張力を受けるものと思われ、シール溝位置での目開き量は2mm程度以下と推定される。一方、目違い量は最大でも3~5mm程度であり、これはボルトとボルトホールとの間のクリアランス分が組立て誤差として生じたものと考えられる。これらの値は、提案するシール材における設計条件を決定する際の参考値となる。また、シール材の設計条件はセグメントの構造設計から定まる継手変形なども加味して決定する必要がある。

このような目開き、目違いが生じた場合にもシールドトンネルの止水性を確保する必要があることから、セグメントの継手面には、シール材が貼り付けられるが、シール材の形状や寸法は、その設計方法がない現状では、経験的に幅20~30mm、厚さは3~5mm程度の矩形のものが多く使用されている。以下に述べるシール材の止水性能確認試験は、

表-2 調査したシールド工事の概要

施工時期	S56 ~ S62	
地質	レキ層, 砂層, シルト層	
土被り	10 m ~ 23 m	
トンネル延長	1056.5 m	
セグメント	外径	φ6600 mm
	高さ	300 mm
Kセグメントの形状	軸方向挿入型Kセグメント	
シール材	水膨張シール材	

表-3 止水試験のパラメーター

シール材厚さ	シール材幅 (mm)	シール溝深さ (mm)	目違い量 (mm)	界面応力 (kN/m <sup>2</sup> )
1水準	3水準	3水準	4水準	4水準
8mm × 2段	20	0	0	100
	30	2.3	10	200
	50	5.0	20	400
			30	600

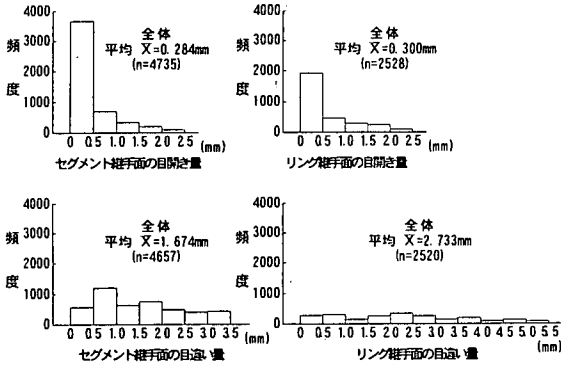


図-11 シールドトンネルの施工実績（目開き量、目違い量）調査

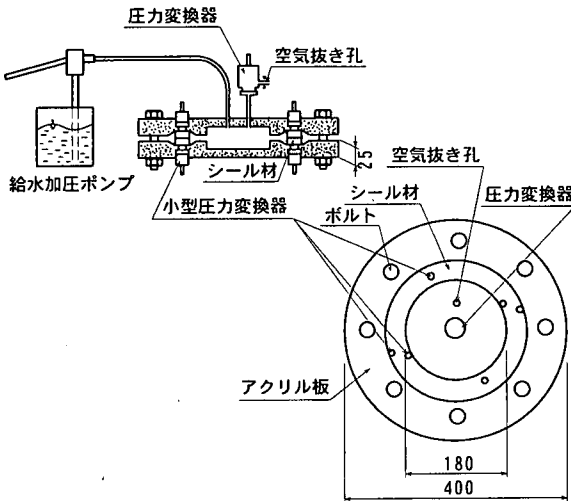
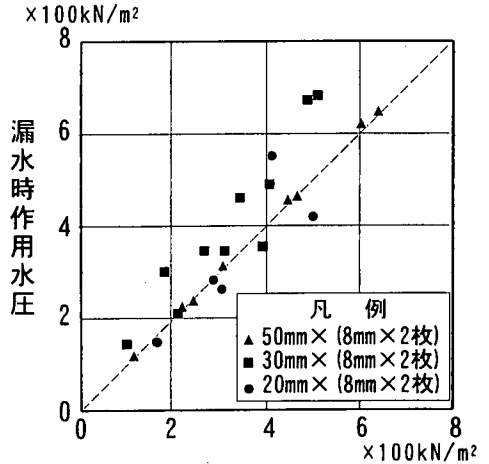


図-12 止水試験装置（単位：mm）

これらのことを考慮して行ったものである。

試験方法は、図-12に示すような2つの透明なアクリル製の円盤の間にシール材をはさみ、ボルトを締付けることにより所定の界面応力までシール材を圧縮した後、加圧ポンプにより水圧を漸増させて漏水の有無を目視により確認するものである。シール材の界面応力は、あらかじめシール溝に埋め込まれた小型圧力変換器で測定した。なお、試験は作用水圧と界面応力との関係を確認する目的である。



漏水箇所の界面応力

図-13 シール溝がない場合の漏水時の作用水圧と漏水箇所の界面応力との関係

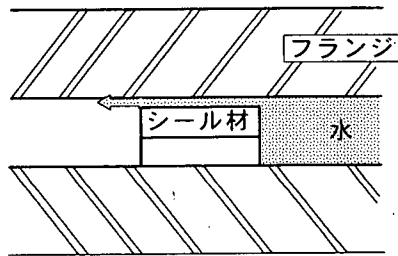


図-14 漏水経路の概念図

とから、時間とともに水を吸収して膨張するシール材の膨張の影響による止水効果を排除するために、本試験では非膨張性のシール材としてクロロプレンゴムのものを使用した。

また、試験ではシール材の円周方向の継目が止水上の弱点とならないように、一体成形した継目のないシール材を用いた。

この止水試験は、シール材による止水のメカニズムを確認することを目的としたものであるから、表-3に示すようにシール材の幅、シール溝の有無、セグメント組立て時の施工誤差などにより継手面に生じる目違い量および界面応力をパラメータと

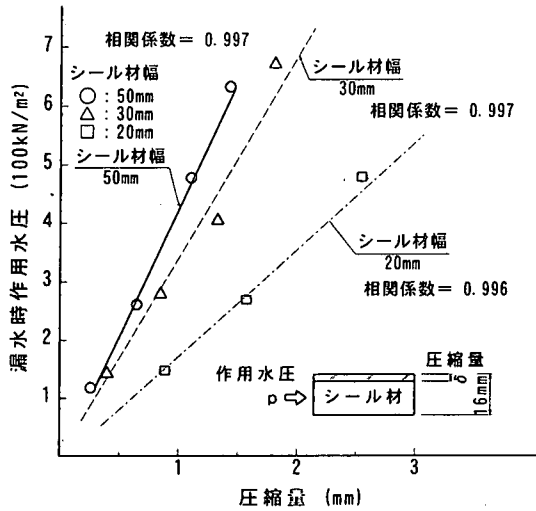


図-15 シール材の幅の違いによる漏水時の作用水圧と圧縮量との関係

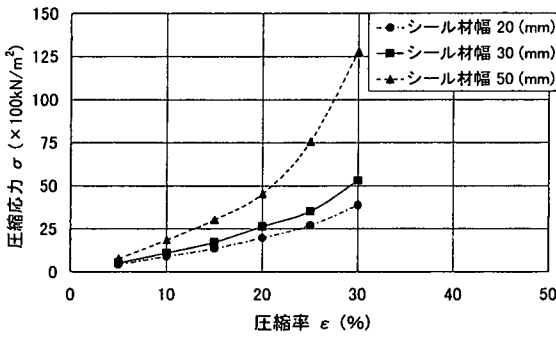


図-16 シール材の幅の違いによる圧縮応力と圧縮率との関係

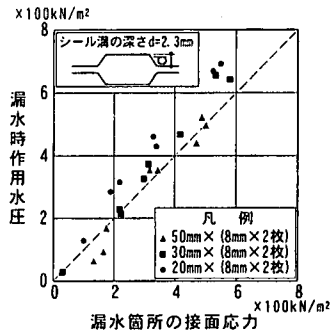
して行った。なお、シール材の幅が50mmのものは、通常用いられるような幅ではないが、目違い量による影響を検討するために特に加えたものである。また、シール溝の深さは国内では通常2.3~2.5mm程度であるが、ここではシール溝が深い場合でも密封の原理が成立するかどうかを確認するために、これを5.0mmとした場合も行っている。界面応力は、前述したようにシール材が圧縮されることで発生するため、これをパラメータにすることで目開き量の違いによるシール材の止水を評価することとした。

(2) シール溝がない場合の止水試験結果

シール溝がない場合の漏水時の作用水圧と漏水個所の界面応力との関係を示した図が図-13である。

この図から、シール材の幅に関係なく、作用水圧

クロロプレングム：シール溝の深さ 2.3mm



クロロプレングム：シール溝の深さ 5.0mm

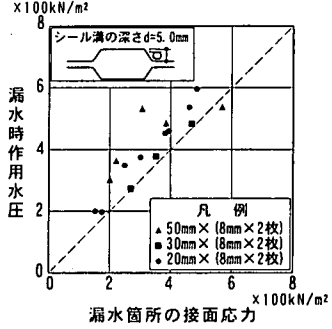


図-17 シール溝がある場合の漏水時の作用水圧と漏水個所界面応力との関係

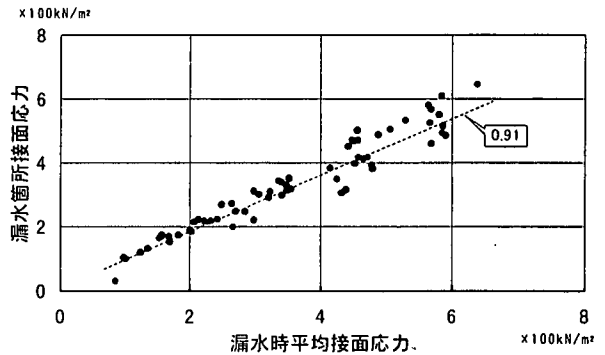


図-18 (1) 漏水時平均界面応力と漏水箇所界面応力の関係

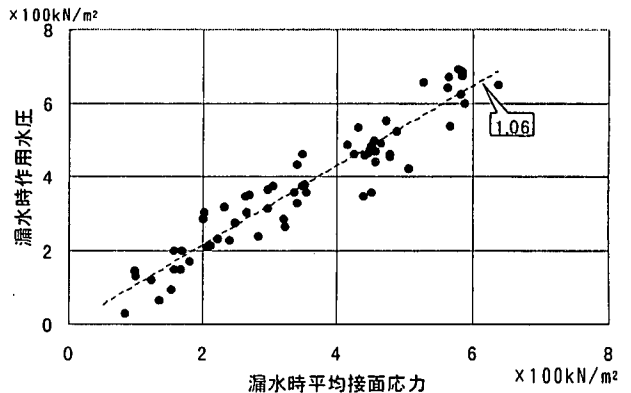


図-18 (2) 漏水時平均界面応力と漏水時作用水圧の関係



クロロプレングム：シール溝の深さ 2.3mm

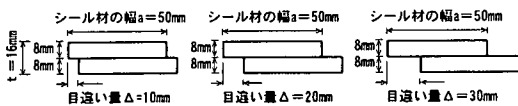
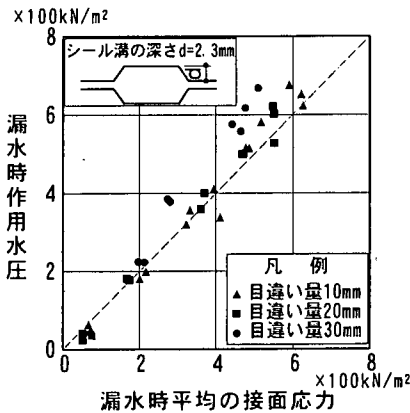


図-19 目違いを生じた場合の漏水時の作用水圧と漏水時の平均界面応力との関係

がシール材の界面応力を上回ると漏水が起こることが確認された。また、作用水圧が界面応力を上回ったときの漏水経路は、図-14 に示すようにシール材間ではなく、シール材とフランジとの接触面であることも確認された。これらのことから止水条件として想定した水圧が界面応力を越えると漏水が発生するという密封の原理が成立していることが、明らかになった。

また、図-15 は本試験の結果をシール材の幅の違いによる圧縮量と漏水時の界面応力との関係で整理したものである。圧縮量はシール材が所定の界面応力に達したときのシール材を貼り付けたアクリル板の隙間を隙間ゲージで測定したものである。経験的にシール材の幅が大きい方が止水効果が高いと言われていたが、この図から、シール材の厚みが一定で圧縮量が同じであれば、シール材の幅が広い方が止水効果が高まることが確認された。図-16 は止水試験に用いたシール材の圧縮試験結果である。同じ圧縮率であればシール材の幅が大きい方が圧縮応力は大きいことがわかる。

このように同じ材質でも、応力 $\sigma$ ～ひずみ $\varepsilon$ 関係が異なるのはゴム材特有のものであり、既往の研究<sup>1)</sup>においてもゴム材の厚さと幅の比率によって影響を受けると指摘されている。これについては、初期界面応力の推定の項で詳述する。

(3) シール溝がある場合の止水試験結果

実際のセグメントにはシール溝が存在し、そこにシール材が貼り付けられる。図-17 はシール溝の

深さが2.3mmおよび5.0mmの場合の止水試験の結果から漏水時の作用水圧と漏水個所の界面応力との関係を示したものである。いずれの場合も、作用水圧が界面応力を上回ったときに漏水が発生していることが確認された。したがって、シール溝がある場合においても密封の原理が成り立っていることがわかった。またすべての試験ケースにおいて最終的な漏水個所はシール材とシール溝との接触面であることを目視により確認した。

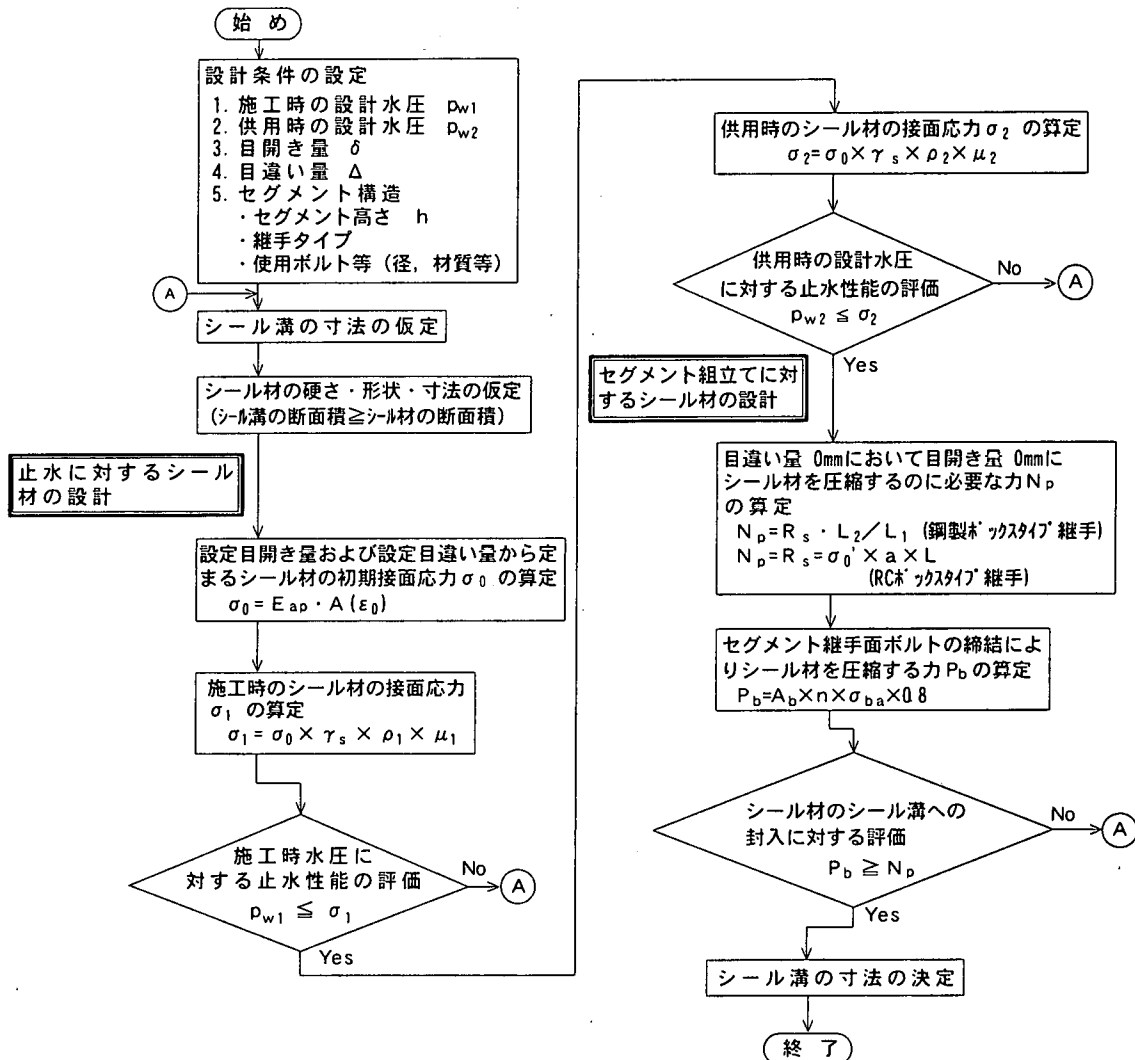
一般に現場等で、シール材の止水性能を確認する場合には、鋼製またはコンクリート製の止水試験装置を用いている。そのため、漏水箇所を特定することができないことが予想される。そこで、漏水時の平均的な界面応力と漏水時作用水圧の関係から止水試験結果を整理することとした。

図-18 は、図-13 および図-17 の試験結果における漏水時平均界面応力と漏水個所界面応力の関係を示したものである。なお、平均界面応力は、試験装置に取り付けた小型圧力変換器6個の平均値である。

図-18 (1) の漏水時平均界面応力と漏水個所界面応力の関係を直線回帰すると、その傾きは0.91となり、漏水時平均界面応力の方が若干漏水個所界面応力を上回ることがわかる。一方、図-18 (2) に示した作用水圧と漏水時の平均界面応力との関係を直線回帰したときの傾きは1.06となった。また、実際の現場で使用されているシール材は、一般に作用水圧に対して設計された界面応力は2～3倍の安全率を有しており、さらに本論文で提案した設計法において、長期の自封作用効果は無視しているなど、かなり安全側の立場をとっている。これらのことから、漏水時の作用水圧は漏水時の平均界面応力で評価しても良いものと判断した。

(4) 目違いを与えた場合の止水試験結果

通常セグメントの組立てにはボルトが使用されるが、組立時の施工性がらボルトクリアランスとして3mm～5mm程度が必要となる。したがって、実施工においてはセグメントの組立て具合により、このボルトクリアランスの分だけ目違いが生じる可能性がある。その場合には、シール材は目違いが生じた分だけずれた状態で組み込まれることになる。試験では、目違いが生じた場合でも漏水時の作用水圧と漏水時のシール材の界面応力との関係、すなわち密封の原理が成立するかどうかを確認するため、通常考えられる最大目違い量10mmのほかに、目違い量20mm、30mmの場合についても止水試験を行った。これらの目違い量は、シール材をその分だけ強制的にずれた状態で組み込むことにより評価した。図-



- $E_{ap}$  : 体積非圧縮性を仮定した場合にひずみの平均の見掛けのヤング率
- $A(\epsilon_0)$  : シール材の圧縮ひずみ
- $\gamma_s$  : シール材の硬さ、形状、寸法のバラツキを考慮した材料係数
- $\rho_1$  : 施工時の応力緩和を考慮した界面応力の有効率
- $\rho_2$  : 供用時の応力緩和と水膨張を考慮した界面応力の有効率
- $\mu_1$  : 自封作用による界面応力の増加率（施工時）
- $\mu_2$  : 自封作用による界面応力の増加率（供用時）
- $R_s$  : セグメント継手面に貼付したシール材に発生する反発力
- $L_1$  : コーキング溝を考慮したセグメント下縁よりボルト中心までの距離
- $L_2$  : コーキング溝を考慮したセグメント下縁よりシール材中心までの距離
- $\sigma_0'$  : 目開き量および目違い量が 0mm から定まるシール材の初期界面応力
- $a$  : シール材の幅
- $L$  : セグメント継手面に貼付したシール材の長さ
- $A_b$  : ボルトの有効断面積
- $n$  : ボルト本数
- $\sigma_{ba}$  : ボルトの許容引張応力度

図-20 シール材の設計フロー

表-4 試験に使用した水膨張シール材

	A社	B社	C社	D社	E社
基材	NR	CR+SBR	CR+NR+SBR	SBR	CR
膨張材	水膨張 ポリウレタン	特殊吸収性 樹脂系	特殊吸収性 樹脂系	特殊吸収性 樹脂系	特殊吸収性 樹脂系
硬度 (JISA)	27 ± 5	38 ~ 41	45 ± 5	43 ~ 45	51
引張強さ (kN/m <sup>2</sup> )	3000 以上	5200 ~ 9500	6000 以上	7500 ~ 7800	2800
伸び (%)	500 以上	560 ~ 650	600 以上	800 ~ 850	720 %

	F社	G社	H社	I社	J社
基材	ウレタンゴム単体	CR	CR	CR	SBR
膨張材	特殊吸収性 樹脂系	特殊吸収性 樹脂系	ウレタン型 I N P	特殊吸収性 樹脂系	特殊吸収性 樹脂系
硬度 (JISA)	44	50 ± 5	40 ± 5	50 ± 5	40 ± 10 ~ 50 ± 10
引張強さ (kN/m <sup>2</sup> )	400 以上	4000 以上	3000 以上	3000 以上	800 ~ 900 以上
伸び (%)	1000 以上	600 以上	400 以上	400 以上	300 ~ 600 以上

CR : クロロプレンゴム  
NR : 天然ゴム  
SBR : スチレンブタジエンゴム

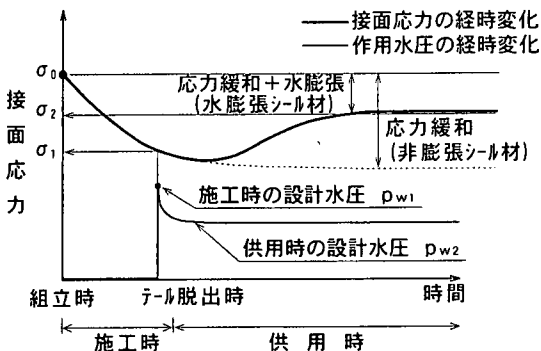


図-21 接面応力の経時変化と設計の対象期間の概念図

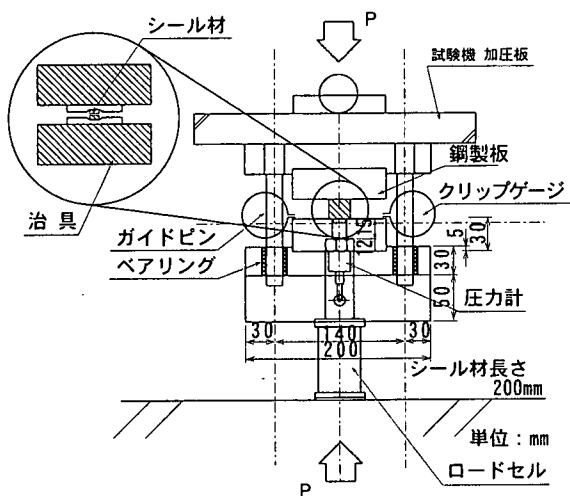


図-22 圧縮試験装置

19 は目違い量を与えた場合の止水試験結果を示したものであるが、この場合においても、作用水圧が接面応力を上回ったときに漏水が生じることが確認できた。

## 5. シール材による止水設計法の提案

### (1) 止水設計法の提案

試験結果を漏水時の作用水圧と漏水個所の接面応力との関係から整理した結果、漏水時には、「作用水圧 ≥ 接面応力」の関係になることを確認した。したがって、シール材に発生する接面応力が算出できれば、所定の設計水圧に対し十分な止水性を有するシール材を密封の原理に基づく力学的根拠によって設計できることがわかった。

これをもとに、図-20 に示すような設計フローに基づくシール材の設計法を提案する。シール材の設計は、止水に対する設計とセグメント組立てに対

する設計からなっている。

このうちセグメントの組立てに対するシール材の設計は、ボルトの締付け力により、シール材がシール溝内に封入できることを条件としている。これはセグメントの組立てを考えずにシール材の設計を行うと、シール材がシール溝内に収まらず、大きなジャッキ推力を受けて塑性化したり、精度の良い組立てができず大きな目開きや目違いを生じ、それが漏水につながることもあるためである。

### (2) 止水に対するシール材の設計<sup>10)</sup>

図-21 は接面応力ならびに作用水圧の経時変化と設計の対象時期との関係を示す概念図である。シール材の接面応力は、セグメントの組立て時にシール材がシール溝内に圧縮され封入されることで発生する。その後ゴム自身の応力緩和により時間の経過とともに接面応力は低下する。非膨張のシール材の場合にはそのまま接面応力は漸減するが、水膨張シール材の場合には、時間とともに水を吸収することで、接面応力は増加または一定に保持され、非膨張シール材に比較して、接面応力の漸減は緩やかになる。このことは、水膨張シール材は供用中も長期にわたって止水性を確保できることを示している。

シール材には、施工時はもとより、トンネルの長期にわたる供用時においても十分な止水性能を確保する必要があることから、その設計は施工時と供用時に分けて行うこととした。施工時において通常設計水圧が最大となるのはテール脱出時であることから、施工時の設計の対象となるのはテール脱出時である。

これらの設計対象となる時期における接面応力と作用水圧に対する止水条件は以下のとおりである。

#### ① 施工時

$$p_w \leq \sigma_1 = \sigma_0 \times \gamma_s \times \rho_1 \times \mu_1 \quad (1a)$$

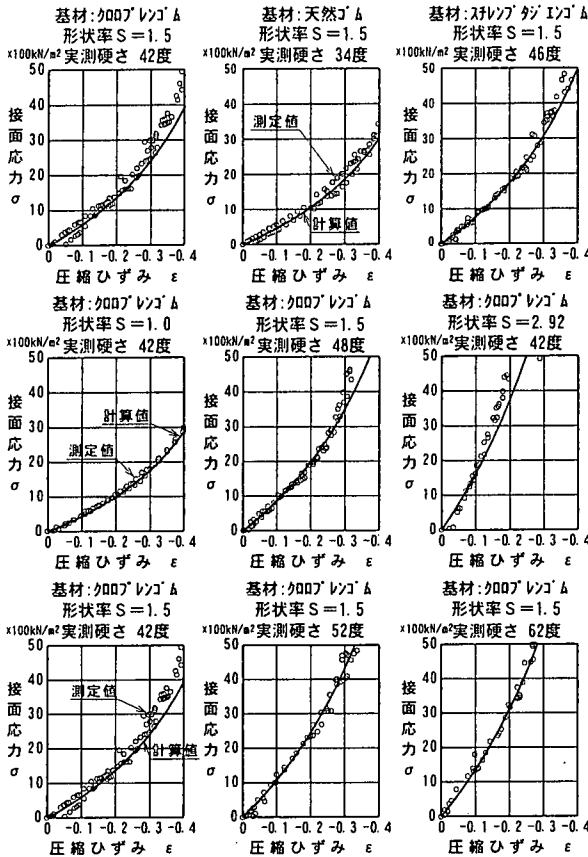


図-23 材質の違いによるシール材の圧縮試験結果と式(2)による算定結果との比較

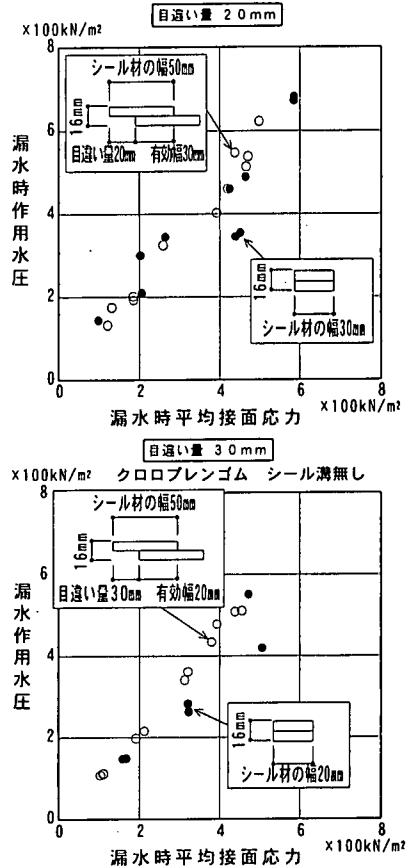


図-24 目違いの有無による漏水時の作用水圧と漏水時の平均接面応力との比較

② 供用時

$$p_{w2} \leq \sigma_2 = \sigma_0 \times \gamma_s \times \rho_2 \times \mu_2 \quad (1b)$$

ここで、

$\gamma_s$  : シール材の寸法、硬さのバラツキを考慮した材料係数

$p_{w1}$  : 施工時の設計水圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$p_{w2}$  : 供用時の設計水圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma_0$  : 目開き量、および目違い量を考慮したシール材の初期接面応力 (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma_1$  : 施工時のシール材の接面応力 (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma_2$  : 供用時のシール材の接面応力 (kN/m<sup>2</sup>)

$\rho_1$  : 施工時の応力緩和を考慮した接面応力の有効率

$\rho_2$  : 供用時の応力緩和と水膨張力を考慮した接面応力の有効率

$\mu_1$  : 自封作用による接面応力の増加率 (施工時)

$\mu_2$  : 自封作用による接面応力の増加率 (供用時)

である。

なお、設計に用いる初期接面応力は、施工時および供用時の目開き量、目違い量を、施工実績や構造計算で推定した値を考慮して設定する必要がある。

また、この止水設計を用いることで今まで経験的に設定されていたシール溝幅や、深さならびにシール溝設置位置を、理論的に設定することが可能となる。

a) 初期接面応力  $\sigma_0$

シール材の設計は、シール材の接面応力が推定できれば、止水試験を実施しなくとも理論的に行うことができる。既往の研究<sup>3), 11)</sup>によると、非膨張の矩形のゴム材における初期接面応力は以下の式で推定することができる。

$$\sigma_0 = Eap \cdot A(\epsilon_0) \quad (2)$$

$$A(\epsilon_0) = [(1 + \epsilon_0) - (1 + \epsilon_0)^{-2}] / 3$$

$$Eap = (4 + 3.290 \cdot S^2) \cdot G$$

$$S = a / 2t$$

ここに、

$a$  : シール材の幅 (mm)

$t$  : シール材の変形前の総厚 (mm)

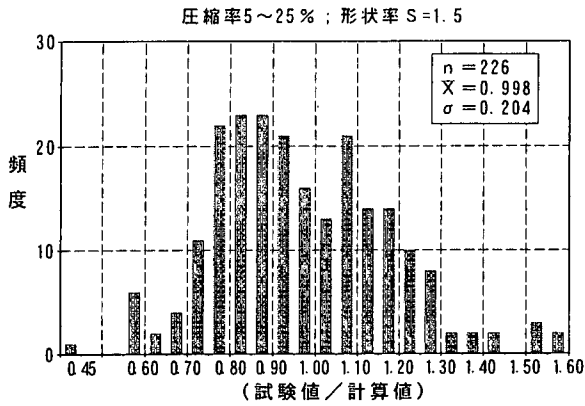


図-25 (1) シール材の硬さおよびシール材の寸法のバラツキを考慮した接面応力の試験値と計算値との比の頻度分布図

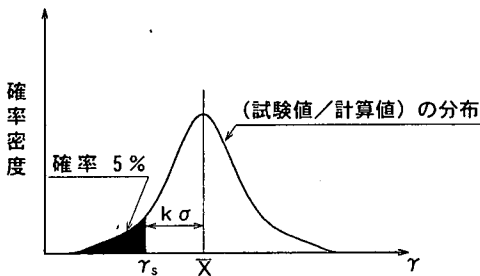


図-25 (2) 試験値と計算値との比の確率密度分布説明図

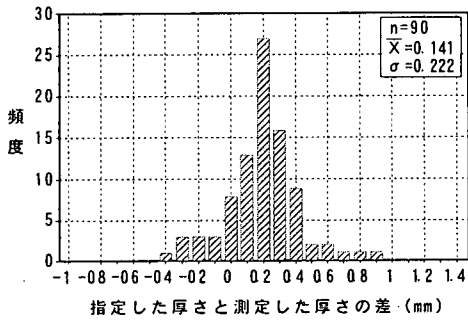


図-26 指定した厚さと納入されたシール材を測定した厚さとの差のヒストグラム

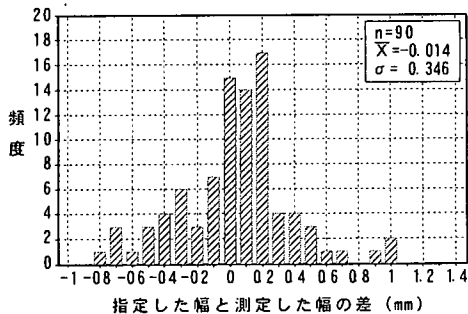


図-27 指定した幅と納入されたシール材を測定した幅との差のヒストグラム

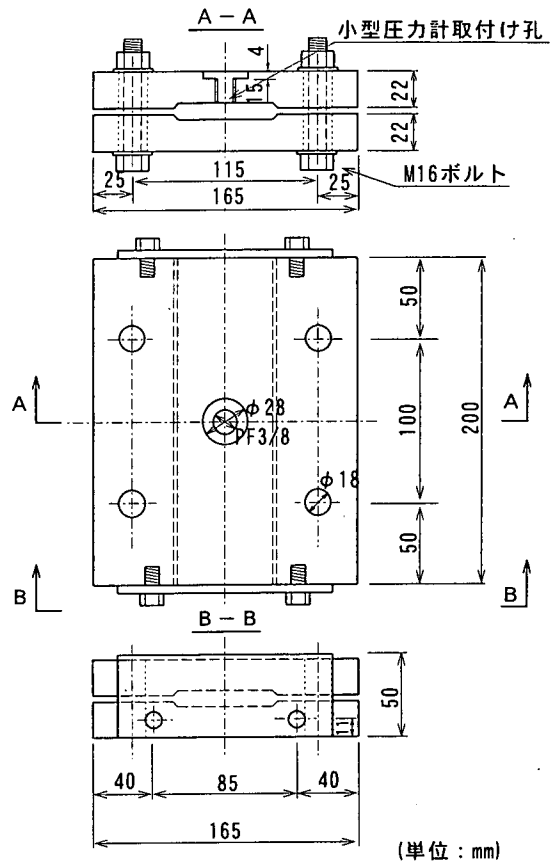


図-28 応力緩和試験装置

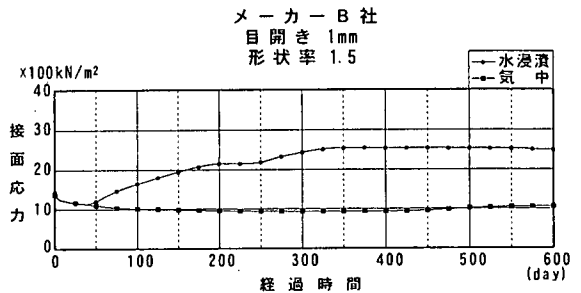


図-29 応力緩和試験 (例)

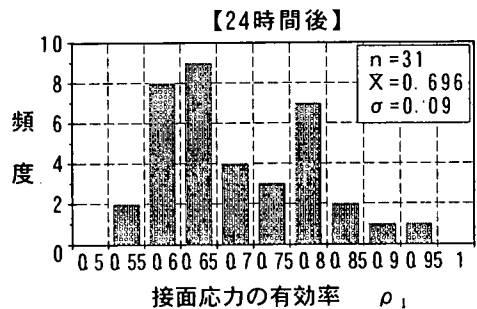


図-30 接面応力の有効率の分布

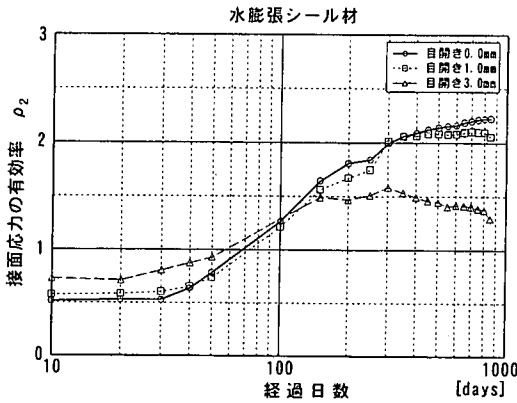


図-31 シール材の有効率の経時変化

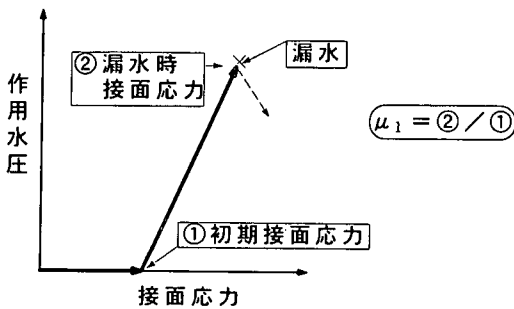


図-32 界面応力と作用水圧との関係の模式図

$E_{ap}$  : 体積の非圧縮性を仮定した場合の見かけのヤング率 ( $\text{kN/m}^2$ )

$\epsilon_0$  : シール材の圧縮ひずみ (圧縮が負)  
 $\epsilon_0 = -(t - 2d - \delta) / t$

$d$  : シール溝の深さ (mm)

$\delta$  : 設定目開き量

$G$  : シール材の横弾性係数 ( $\text{kN/m}^2$ )

$G = \alpha \cdot H_s / (100 - H_s)$

$H_s$  : シール材の硬さ

$\alpha$  : 硬さが 50 を示すゴムのせん断弾性係数

クロロプレンゴム (CR) :  $\alpha = 715$  ( $\text{kN/m}^2$ )

天然ゴム (NR) :  $\alpha = 745$  ( $\text{kN/m}^2$ )

スチレンブタジエンゴム

(SBR) :  $\alpha = 680$  ( $\text{kN/m}^2$ )

$S$  : シール材の形状率

である。

水膨張シール材は、前述したように天然ゴムやクロロプレンゴム、スチレンブタジエンゴムなどの合成ゴムを基材としているものが多い。そこで、図-22 に示す圧縮試験装置を用いて、表-4 に示した市販のシール材を対象にその材質、寸法 (形状率)、硬さをパラメーターにして圧縮特性曲線を求め、式 (2) による計算式と測定値とを比較した。その結果

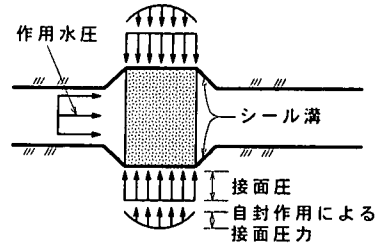


図-33 シール溝による自封作用

の一例を図-23 に示す。図中の実線は、硬さが 50 を示すゴムのせん断弾性率  $\alpha$ 、実測した硬さ  $H_s$ 、および形状率  $S$  を式 (2) に代入して求めたシール材の界面応力  $\sigma$  と圧縮ひずみ  $\epsilon$  との関係である。計算値は圧縮ひずみが 30% 程度までは圧縮試験結果をよく説明しており、水膨張シール材についても本式を用いて初期界面応力を推定できることがわかる。

また、セグメント組立て時には、目違いが生じるが、この際の初期界面応力の推定においても、シール材の形状率  $S$  を考慮すれば、式 (2) を用いてよいことが、目違い量を変えて実施した止水試験で確認できた。図-24 はその結果を示したものである。図中の●印は目違いが無い場合の止水試験結果であり、○印は、目違いが生じた場合にラップしているシール材の幅が目違いを生じていないシール材の幅と同じ幅になるようにした場合の止水試験結果である。この試験において漏水時の作用水圧と漏水時の界面応力との関係は両者ともほぼ一致し、母平均の差の検定から両者に有意な差は認められなかった。したがって、式 (2) で形状率を求める際のシール材の幅は、シール材の幅  $a$  から設計で設定する目違い量  $\Delta$  を差し引いたシール材の有効幅  $a_0$  を用いればよいと推定できる。

#### b) 材料係数 $\gamma_s$

実際に現場で使用されるシール材は硬さおよび寸法にばらつきがあり、それらは界面応力に影響を与える。図-25 (1) は、式 (2) に指定した硬さおよびシール材寸法を代入して求められる界面応力の計算値と、実際に納入されたシール材の圧縮試験結果から得られた界面応力試験値との比の頻度分布を示したものである。なお、この比較に用いたシール材の硬さと寸法の管理値は、メーカーがシール材を出荷する時の管理値および界面応力の確保の観点から以下のとおりとした。

指定した硬さ、厚さ、幅のそれぞれに対して、

硬さ :  $-5 \sim +5$

厚さ :  $0 \text{ mm} \sim +0.5 \text{ mm}$

幅 :  $-0.5 \text{ mm} \sim 0 \text{ mm}$

図-26 は実際に納入されたシール材の寸法検査

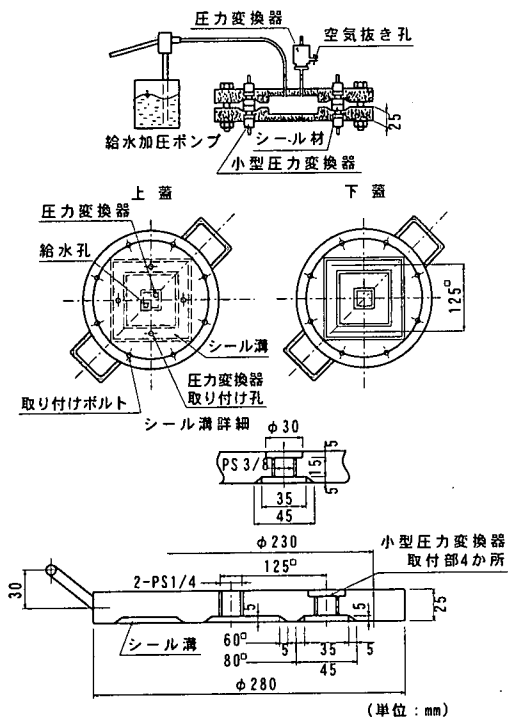


図-34 止水試験装置

結果から、指定したシール材の厚さと測定したシール材厚さとの差を示したヒストグラムである。図中の分布を正規分布とみなした時の両側 90%信頼区間の上下限値はそれぞれ+0.5mm、-0.22mmであるが、止水上所定の界面応力を確保するためにはシール材の厚さは指定した厚さより厚い必要があることから±0～+0.5mmと設定した。

図-27 はシール材の幅についての同様な図である。

図中の分布を正規分布と見なした時の両側 90%信頼区間の上下限値はそれぞれ+0.5mm、-0.58mmであるが、シール材の幅は広がるとシール材の貼付け時にシール溝の幅からはみ出し施工面で組立て精度に悪影響を与えるので厚さとは逆に-0.5～0mmと設定することとした。

シール材の幅および厚さが同時に管理値の最大となる場合についてシール材の断面積を計算するとシール溝の断面積内におさまらない場合が生じ、施工面で組立て精度等に不都合を生じるため、シール材の断面積での制限も管理値として加えた。これが断面積比である。これらのシール材の寸法のばらつきを考慮し、界面応力の試験値と計算値との比(試験値/計算値)の分布を正規分布としたときの片側 95%信頼区間の下限値から、その係数κは1.64となり材料係数γ<sub>s</sub>は0.65となった。なお、断面積比というのはシール材の実断面積をシール

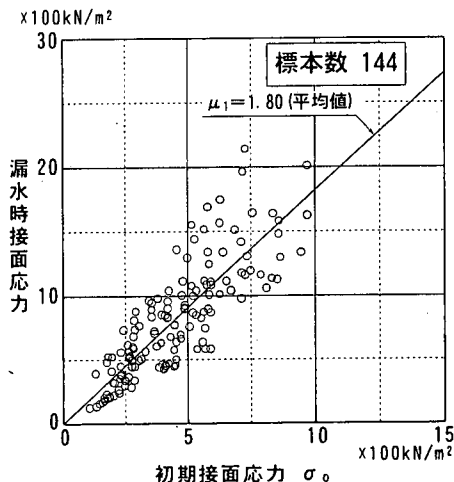


図-35 初期の界面応力と漏水時の界面応力との関係

材の指定した寸法から計算される断面積で除した値である。

### c) シール材応力の有効率 $\rho_1$ , $\rho_2$

図-21 に示したように、シール材として用いられるゴム材料は、一般に応力緩和特性を有している。シール材による止水設計を行うには、この界面応力が経時的にどのように変化するかを確認する必要がある。そこでシール材の長期的な応力緩和特性を把握するために、図-28 に示すような、小型圧力変換器を設置した装置を用いてその試験を行った。試験に使用した市販のシール材は表-4 に示したとおりである。試験は水膨張圧による界面応力の保持の程度を確認する目的で、水膨張シール材を水浸漬した場合としない場合について、目開き量をパラメーターにして行った。図-29 は応力緩和試験結果の代表例を示したものである。この図から、水膨張シール材は、水に接触してからある程度経過しないとその膨張圧が期待できないことが確認される。

施工時の応力緩和の設計上の評価は、シールド工事のサイクルタイムを考慮して、応力緩和試験の24時間後の界面応力によることとした。なお、界面応力の算定には、シール材の膨張特性が水に接触してからある程度時間が経過しないと発揮されないことから、膨張圧を期待しないこととした。図-30 は、水浸漬しない場合の応力緩和試験における界面応力の有効率  $\rho_1$  の頻度分布を整理したものである。施工時における界面応力の有効率  $\rho_1$  (24時間経過後の界面応力/初期界面応力) は、その分布を、正規分布と見なした時の片側 95%の信頼区間の下限値で推定すると、 $\rho_1 = 0.696 - 0.09 \times 1.64 = 0.548 = 0.55$  となった。

図-31 は約 1000 日間水浸漬した場合の応力緩和

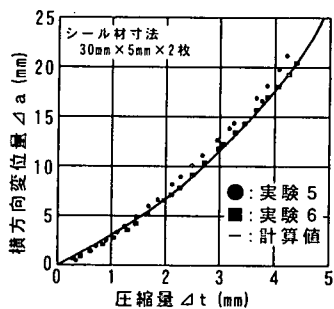
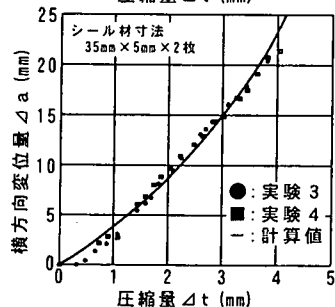
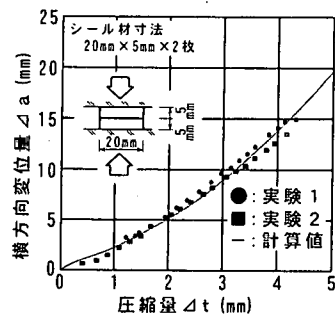


図-36 シール材の圧縮量と横方向の変位量との関係

試験結果を整理したものである。この試験での有効率  $\rho_2$  は目開き量別にそれぞれ平均値で整理した。有効率  $\rho_2$  は任意の経過時間における界面応力と初期界面応力との比を表している。この図を参考に、供用時の設計に用いる界面応力の有効率  $\rho_2$  は、目開き量を変えた場合の下限値に、若干の余裕を加えて 1.0 とした。

d) 自封作用による界面応力の増加率  $\mu_1, \mu_2$

シール材の界面応力は、水圧が作用することにより、図-32 に示す模式図のように初期界面応力より漏水時の界面応力が上昇することが止水試験により確認された。この界面応力の増加は、密封の原理（パッキン理論）で言われている自封作用（Self sealing）<sup>7)</sup> と同様の現象によるものと考えられる。これは図-33 に示すようにシール材は溝で仕切られているために、作用水圧が上昇するとそれにつれて界面応力も増加し止水効果が高まるというものである。

この自封作用による界面応力の有効率  $\mu_1$  は、止

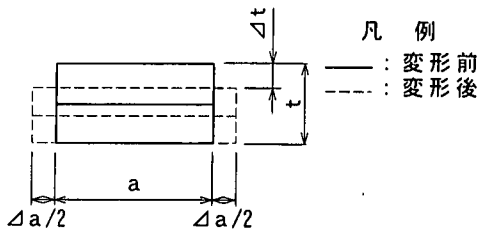


図-37 シール材の圧縮変形の概念図

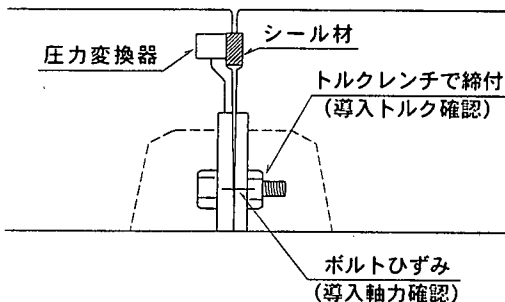
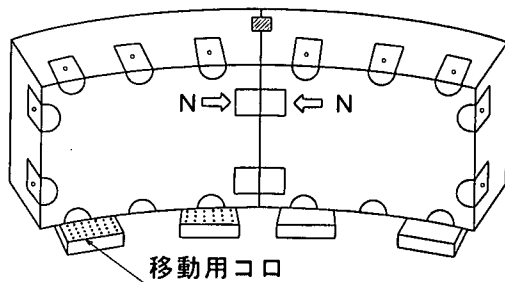


図-38 試験方法の概要図

水試験を行って求めた。止水試験は、図-34 に示すようにシール溝を施した鋼製の円盤の間にシール材を挿入し、ボルトの締付けにより所定の目開き量までシール材を圧縮し、その後、加圧ポンプにより水圧を漸次増加させて漏水の有無を目視により確認するものである。界面応力はシール溝に組込まれた小型圧力変換器により測定した。この止水試験に用いたシール材は、表-4 に示した水膨張単体シール材 10 種類と、非膨張単体シール材としてクロロプレンゴムのもの 1 種類の計 11 種類で、その形状は矩形のものを選定した。

図-35 は止水試験結果から初期界面応力と漏水時の界面応力との関係を示したものである。この図から、施工時の自封作用による界面応力の有効率  $\mu_1$  は、水膨張シール材が本来保有している水膨張性能による界面応力の増加を期待しないため、それらの最小自乗法による平均値 1.8 を設計に用いる有効率  $\mu_1$  と定めた。一方、長期にわたる界面応力の増加については、現状では推定するデータがないため、供用時の設計では自封作用による界面応力の



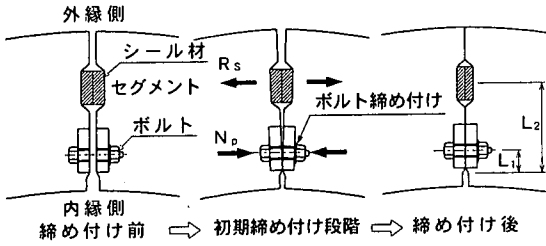


図-39 ボルトの締め付け力による目開きの変化の模式図 (鋼製ボックスタイプの継手)

増加は考慮しないこととし、その有効率は $\mu_2=1.0$ とした。

### (3) セグメントの組立てに対する設計<sup>9)</sup>

シール材の形状、寸法、硬さを選定する際に、その止水性のみではなく施工性の面からの検討も行う必要がある。接面応力が大きいほど止水に対する安全率は高くなるため、止水性の面からのみシール材を選定すると、シール材の接面応力を確保するために、シール材の厚さや幅が大きくなり、シール材の断面積が増加することになる。しかし、シール材の断面積があまり大きくなるとセグメント組立ての際にそれがシール溝内に収まらず、組立て精度に悪影響を及ぼす可能性が考えられる。シールドトンネルの止水性を十分に確保するためには継手部の目開きや目違いを小さくするように、組立ての精度を高めることが必要である。そこで、シール溝に完全に封入することが可能なシール材の形状、寸法、硬さを検討するために以下の実験を行った。

#### a) シール材の変形特性試験

圧縮されたシール材の変形を確認するため、図-22 に示した圧縮試験装置を用いて、シール材の圧縮量とシール材の横方向の変位量とを測定した。シール材の圧縮量および横方向の変位量は、それぞれ高感度変位計、非接触型の変位計を用いて測定した。シール材は厚さ 5mm、幅 20mm、30mm、35mm の矩形断面のものを用いそれぞれ 2 回づつ行った。なお、実験に用いたシール材の長さは予備試験を行い、平面ひずみとなる条件を満足する長さとして 20cm とした。また、シール材の圧縮面は鋼製治具の表面と直接接触させたまま圧縮できるようにした。

シール材の圧縮量と横方向の変位量との関係は、図-37 に示すとおりである。図中の●印および、■印は各シール材の幅ごとに行った 2 回の試験結果を示している。また、図中の実線は計算値であり、シール材の変形前後の断面積は同一であると仮定した場合の、圧縮量 $\Delta t$ と横方向の変位量 $\Delta a$ との関係を式 (3a) から求めたものである。

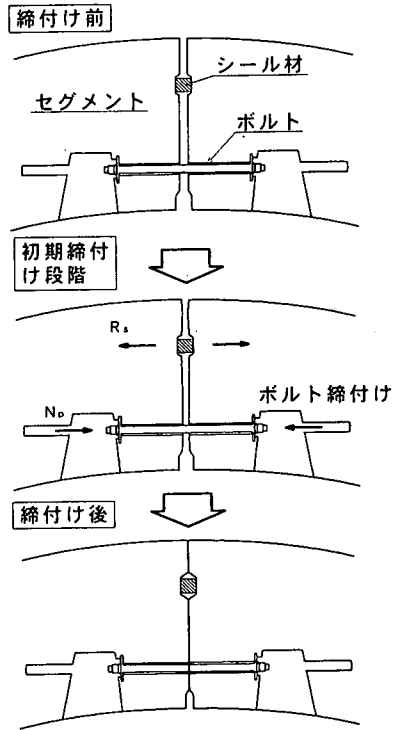


図-40 ボルトの締め付け力による目開きの変化の模式図 (RCボックスタイプの継手)

$$a \cdot t = (a + \Delta a) \cdot (t - \Delta t) \quad (3a)$$

ここに、

$a$  : シール材の幅

$t$  : 目地間にあるシール材の変形前の総厚 (2枚分)

$\Delta a$  : シール材の横方向の変位量 (幅方向の変位量)

$\Delta t$  : シール材の圧縮量

である。

計算値は試験結果によく一致しており、圧縮されたシール材の横方向の変位量は、式 (3a) で算定できることがわかる。また、セグメントの組立て精度に悪影響を与えないためには、目開き 0mm まで圧縮されたシール材が、シール溝の空間に封入される必要があることから、式 (3b) および式 (3c) を満足させる必要がある。

$$\Delta a + a < b \quad (3b)$$

$$\text{シール材の断面積} \leq \text{シール溝の断面積} \quad (3c)$$

なお、 $b$  はシール溝の幅である。

#### b) 組立て時にシール材を封入できる条件

シール材をシール溝内に封入するためには、シール材の形状寸法は、式 (3a)、(3b)、(3c) を満足するように定める必要がある。シール材を完全にシール溝内に封入するためには、シール材がそれにより発

生ずる界面応力を越える力がシール材の位置で必要になる。セグメントの組立て時にシール材を封入する力は一般にボルトによる締め付け力であることから、式(4a)を満足させればシール材をシール溝に封入できる。

$$P_b \geq N_p \quad (4a)$$

ここで、

$N_p$  : セグメントの継手面に貼付けたシール材をシール溝内に封入するのに必要な力(N)

$P_b$  : セグメントの継手面に配置したボルトの締め付け力の総和(N)

$$P_b = A_b \times n \times \sigma_{ba} \times 0.8$$

$A_b$  : ボルトの有効断面積 (mm<sup>2</sup>)

$n$  : ボルトの本数 (本)

$\sigma_{ba}$  : ボルトの許容引張応力度 (kN/mm<sup>2</sup>)

である。

ボルトの締め付け力がどのようにシール材の圧縮力として伝達されるかを明確にするために、鉄筋コンクリート製(RC)セグメントを対象として、継手の形式が異なる鋼製ボックスタイプ継手とRCボックスタイプ継手について実物セグメントを用いた組立て試験を行った<sup>4)</sup>。試験方法は図-38に示すようにAセグメント2ピースを縦に設置し、支承部は1ピースを移動可能な状態にしておき、ボルトの締め付け力により他方のセグメントを引き寄せせるものである。

鋼製ボックスタイプの継手の場合、図-39に示すようにボルトの初期締め付け段階で、コーキング溝の上縁端が接触し、その後ボルト締め付け力の増加とともにコーキング溝の上縁端を中心にシール材が圧縮される。したがって、シール材に発生する反発力 $R_s$ と、シール材を封入するのに必要な力 $N_p$ とは、コーキング溝の上縁端を回転中心として釣り合っていると推定できる。

一方、RCボックスタイプの継手の場合、図-40に示すように継手面が平行のまま近づき、ボルトの締め付け力の増加に伴い、目開き量が漸減した。したがって、 $R_s$ と $N_p$ は等しいと考えてもよさそうである。

これらのことから、シール材を封入するのに必要な力 $N_p$ は以下のように算定することとした。

①鋼製ボックスタイプの継手

$$N_p = R_s \cdot L_2 / L_1 \quad (4b)$$

②RCボックスタイプの継手

$$N_p = R_s \quad (4c)$$

ここに、

$R_s$  : セグメントの継手面に貼り付けたシール材に発生する反発力(N)

$$R_s = \sigma_0' \times a \times L$$

$\sigma_0'$  : 目開き、目違い量を0mmとした場合のシール材の初期界面応力

$a$  : シール材の幅(mm)

$L$  : 継手面に貼り付けたシール材の長さ(mm)

$L_1$  : コーキング溝を考慮したセグメント下端よりボルト中心までの距離(mm)

$L_2$  : コーキング溝を考慮したセグメント下端よりシール材中心までの距離(mm)

である。

## 6. 結論

本研究は、力学的根拠に基づくシール材の設計法を提案したものである。本研究で得られた結論を列挙すると以下のとおりとなる。

- 1) シール材による止水設計は、密封の原理に基づき行うことができる。その止水の条件は、シール材の界面応力 $\sigma_0 \geq$ 作用水圧 $P_w$ である。
- 2) 矩形シール材であれば、シール材の材質、硬さを設定することで、シール材の圧縮特性が計算でき、作用水圧、セグメント組立て時における目開き量、目違い量を設定すれば、シール材の初期界面応力 $\sigma_0$ は机上で推定できる。したがって従来のように止水試験を実施せずにその止水性能が推定できる。
- 3) 水圧が作用するとシール溝によりシール材の変形が抑制され、界面応力は初期の値より増加する、いわゆる自封作用が働き、シール材による止水性能を向上させる。本研究では、この増加率を設計上、施工時には $\mu_1 = 1.8$ 、供用時には $\mu_2 = 1.0$ と定めた。
- 4) 水膨張シール材の界面応力は応力緩和により低下する。本研究では、設計上、施工時の応力緩和を考慮した界面応力の有効率を $\rho_1 = 0.55$ と定めた。また、供用時においては、水膨張シール材の特有の膨張圧により、応力緩和による界面応力の低下は施工時に比べて緩和されるため、界面応力の有効率を $\rho_2 = 1.00$ とした。
- 5) 十分な止水性を確保するためには、施工面からも検討しなければならない。すなわち、セグメントの組立て精度を向上させ、目開き、目違いを少なくすることが必要である。そのためには、シール材をシール溝に密封しなければならない。その条件は、シール材の断面積 $\leq$ シール溝の断

面積であること、ボルトの締付け力はシール材の位置でシール材を目開き 0mm まで圧縮するときには発生する反発力より大きくなければならないことである。

## 7. おわりに

本研究は、シールドトンネルのコストダウンの一環として二次覆工を省略することを前提としたシール材の合理的設計法を提案したものであり、水膨張シール材が使用され始めた 1980 年から研究を始め、約 20 年にわたる成果をまとめたものである。

現在、東京電力(株)においては、シールド工事に用いられるセグメントのシール材の設計に本研究で述べた設計法を用いている。実際の工事への適用結果をみるとおおむね良好な止水状況が得られており、水膨張シール材の開発によってシールド洞道の止水性は格段に向上している。今後は、水膨張シール材による止水性能についてより詳細な検討を加え、特にその耐久性に関しては、シール材の力学特性ならびに長期的なトンネルの変形などの観点から検討を行って、より合理的で信頼性のあるシール材による止水設計法の確立を目指したいと考えている。

謝辞：本研究をまとめるにあたって御指導、御意見を賜った東京都立大学山本稔名誉教授ならびに関係官公庁、企業者の皆様に深く御礼申し上げます。次第である。

## 参考文献

1) 増田瑛、石嶋傑：シールド工事の実態調査、電力土木

No. 175, pp. 85~95, 1981 年 11 月。

- 2) 小泉淳、小林亨：最近のシールドトンネルにおける防水技術(3)、トンネルと地下、第 23 巻、6 号、pp. 37~40, 1992 年 6 月。
- 3) 貝沼憲男、小林亨：高水密セグメント継手に関する実験的研究、第 38 回土木学会年次講演会概要集、1983 年 9 月。
- 4) 滝本孝哉、小林亨、小泉淳：都市トンネルにおける止水技術の現状と課題、トンネルと地下、第 25 巻、4 号、pp. 51~56, 1994 年 4 月。
- 5) 寺内道義：シールドトンネル防水材と耐久性、第 12 回土木建築材料講演会講演要旨集、pp. 34~41, 1993 年 5 月。
- 6) 小泉淳、小林亨：最近のシールドトンネルにおける防水技術(2)、トンネルと地下、第 23 巻、5 号、pp. 43~51, 1992 年 5 月。
- 7) 岩波繁蔵、近森徳重：パッキン技術便覧、産業図書(株)、pp. 275~277, 1981 年 2 月。
- 8) 岩崎二郎：ガスケット入門、高分子文庫 19、(株)高分子刊行会、pp. 163~168, 1982 年 2 月。
- 9) 大塚正博、富所達哉、塩冶幸男：セグメントシール材による止水設計の考え方、トンネルと地下、第 25 巻、9 号、pp. 21~29, 1994 年 9 月。
- 10) 花見和則、岡留孝一、大塚正博：セグメントシール材による止水設計の提案、トンネルと地下、第 29 巻、7 号、pp. 53~59, 1998 年 7 月。
- 11) (社)日本鉄道車両工業会：改訂防振ゴム、(株)現代工学社、pp. 95~98, 1980 年 8 月。

(1999. 2. 2 受付)

## SEGMENT WATERPROOFING DESIGN USING HYDROTITE SEAL IN SHIELD TUNNELING

Masahiro OHTSUKA, Yukio ENYA, Toru KOBAYASHI and Atsushi KOIZUMI

Groundwater leakage in shield tunneling causes deterioration of not only the tunnel but also the surrounding earth formation. Therefore, groundwater leakage is an important question when tunnels are considered in view of their durability though the leakage maintenance requires an investment of money. Because the water leakage occurs at segment joints in most cases, a selection of segment sealing materials plays an important part in tunnel waterproofing. So far, the selection of the seals, forms and measurements has been determined by experience and actual results. Thus, design for the waterproofing is yet to be standardized. In this report, various waterproofing tests using hydrotite seals which are most widely used are presented. Based on the test results, a proposal of the waterproofing design based on packing principles is also presented in this report.