

# 水膨張シール材の長期的な 耐久性の評価について

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 東京電力株式会社 送変電建設部 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

<sup>2</sup>正会員 東京電力株式会社 地中送変電建設センター (〒108-0023 東京都港区芝浦 4-19-1)

<sup>3</sup>正会員 日本シビックコンサルタント株式会社 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 早稲田大学理工学部土木工学科 (〒162-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

シールドトンネルの止水性を確保するための水膨張シール材が開発されたのは1980年代前半である。実施工の結果から止水に対するこのシール材の有効性が確認されて20年近く経過しているが、長期的な耐久性については十分に評価されていないのが現状である。このため、シール材の耐久性試験方法や水膨張シール材の良否を判定する標準的な基準も定まっていないため、従来の工事の経験や実験に基づきシール材を選定しているのが実情である。本研究は、シール材に要求される機能に着目して、耐久性の評価項目を設定したものであり、これに基づいて、その試験方法を提案するとともに、現状における水膨張シール材の長期耐久性性能を評価したものである。

**Key Words** : hydrophilic sealing material, shield tunnel, water-tightness, long-term durability

## 1. はじめに

シールドトンネルの止水性を確保する上で、セグメントにおける継手部の止水は最も重要であり、継手面に施すシール工には高い信頼性が要求される。

一般に、シールドトンネルのシール工には定形品の水膨張シール材が用いられることが多く、その止水効果は室内試験<sup>1)</sup>により確認されており、実施工においても概ね良好な成果が得られている<sup>2)</sup>。

水膨張シール材が使用され始めたのは、1980年代後半であり、実績としてはまだ20年程度と短く、長期的な耐久性については評価されていない。また、長期耐久性を評価するための試験方法や、水膨張シール材の良否を判定する標準的な基準も定まっていないため、従来の工事の経験や実験に基づきシール材を選定しているのが実状である。

本研究は、シール材に要求される機能に着目して、耐久性の評価項目を設定した上で、これに基づきその長期耐久性を評価できる試験方法を提案し、現状における水膨張シール材の長期耐久性性能を評価したものである。

## 2. ゴム材の耐久性に関する既往の研究

### (1) 非膨張性のゴム材

各種合成ゴムが市場に取り入れられてからまだ日が浅く、実際にそれらの長期耐久性に関する研究報告<sup>3), 4), 5), 6)</sup>はわずかである。

英国のNRPRA (Natural Rubber Producer's Research Association) が天然ゴムの製品寿命について行った調査結果によると、パイプラインの継手に使用したリング状伸縮継手(ソケット型パッキン)は、使用条件が土中で汚水にさらされるという苛酷な場合でも、104年後の調査時点で、未だにゴム弾性体として十分使用に耐える状態であったと報告されている<sup>3)</sup>。

また、英国のI. C. I 社が自社の老化防止剤の性能実証を目的に行った自然劣化試験結果によれば、オゾン紫外線の雰囲気中の自然暴露下にもかかわらず、35年後に41%の強度が保持されていたことが報告されている<sup>4)</sup>。35年後に41%と聞くと強度の保持率がずいぶん低率であるという印象を受けるが、この当時、老化防止剤を配合していない標準品の強度の保持率が5%であったことを考慮すれば、この事例はゴムの配合の手法、特に老化防止剤を

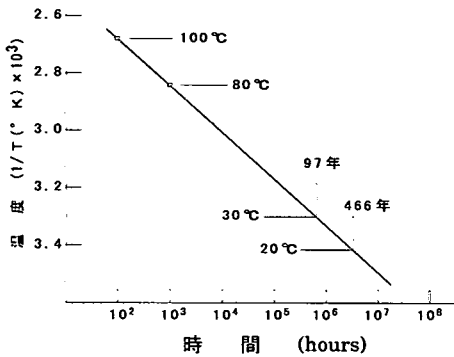


図-1 温度促進試験による耐久性評価例(1)

用いることで著しく長期耐久性が確保できた事例であると考えられる。今日もこの老化防止剤はゴム材料の耐久性の確保に必要な不可欠なものとなっている。

国内における最近の研究事例としては、主要なゴム材料に対する15年間の自然老化試験の報告<sup>5)</sup>がある。これによれば、その中でクロロプレンゴムの耐久性が良好であることが確認されている。また、橋梁用のゴム支承の20年近い使用実績から、クロロプレンゴムによるゴム支承の寿命を推定し、寿命は85~200年と結論付けている報告<sup>6)</sup>もある。

## (2) 水膨張シール材

水膨張シール材の耐久性に関しては、温度促進試験を行い、化学反応速度論に基づく評価法のひとつであるアレニウス法を用いて、想定されるトンネル環境温度における寿命時間(耐用年数, 以下耐用年数と記す)を外挿により推定した試験結果を図-1に示す。

これはシール材メーカーが実施した社内試験の例である。この試験は高温状態でのシール材の引張試験を温度をパラメータとして数ケース行い、引張強度が初期値の1/2になるまでの時間と試験温度との関係を示したものである。この報告例では引張強度が1/2になる時間をそのシール材の耐用年数と仮定しており、試験結果をもとにシール材の耐用年数を推定している。その結果として、シール材の耐用年数は数10年~数千1000年という評価を与えている。また、図-2はシール材の圧縮試験を高温水に浸漬した状態で数ケース行い、上記と同様に試験時の圧縮応力が1/2になるまでの時間を耐用年数と仮定し、そのときの試験温度と時間をプロットしたものである<sup>7)</sup>。トンネル内の環境温度を20℃と仮定すると、水膨張シール材の耐用年数はおおむね50~100年程度になると推定している。しかし、試験に用いたサンプルは1種類であり、種類の多い水

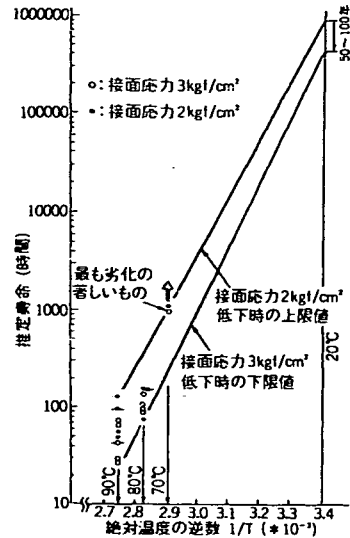


図-2 温度促進試験による耐久性評価例(2)

膨張シール材を網羅しているとはいいがたい。

温度促進によるシール材の耐用年数の推定以外に、シール材の耐久性試験の実施例として、耐カビ性や耐放射性に関する試験報告もある。

## 3. シールドトンネルに求められる水膨張シール材の耐久性性能

セグメントの継手の止水に用いられる水膨張シール材の耐久性の予測方法および評価方法は、現状では定まったものがない。

一般にゴム材の耐久性の評価因子としては、以下のような項目が考えられる。

- ①耐候性
- ②耐熱性
- ③耐オゾン性
- ④耐薬品性(耐酸性・耐アルカリ性・耐海水性など)
- ⑤耐生物性(微生物、昆虫による食害など)
- ⑥耐動的疲労性
- ⑦耐乾湿疲労性
- ⑧耐電氣的耐久性(耐アーク性など)
- ⑨耐水性・耐湿性
- ⑩応力緩和特性
- ⑪膨張圧の経年保持特性

シール材は、いったんセグメントのシール溝に貼付けられ、トンネルに組込まれると、光やオゾンの影響を受けることなく、ほぼ一定のひずみ状態および一定の温度条件下で使用されることになる。したがって、耐候性、耐乾湿疲労性、耐湿性、耐オゾン性などに対しては、比較的穏やかな環境条件下で使

表-1 シール材の耐久性に求められる要求品質と代用特性

要求品質	代用特性	耐候性	耐熱性	耐オゾン性	耐酸性	耐アルカリ性	耐海水性	耐生物性	耐動的疲労性	耐乾燥疲労性	耐アーク性	耐水性・耐湿性	応力緩和特性	膨張圧の経年保持特性
セグメント組立て前に地上で貼付けても光やオゾン等によりシール材の弾性が失われない。		◎		◎						◎				
ジャッキ推力が作用しても塑性化しない。								◎						
施工中トンネル内面に漏水させない。		△				○	○				△	○	◎	△
目開き、目違いが生じても地下水をトンネル内面に漏水させない。						△	○					○	○	○
供用時地下水をトンネル内面に漏水させない。					△	△	△	△	△	△		○	◎	◎
地下水に常時接触していてもシール材の膨張剤等の溶出がない。												○	○	◎
裏込注入材のアルカリ分による膨張剤等の溶出がない。						○							◎	◎
地下水に塩分が含まれていてもシール材の膨張剤等の溶出がない。							◎					○	◎	◎
地下水圧の変動があっても漏水させない。												○	○	○
地震等によりトンネルが動いても漏水させない。									○				○	○
近接施工によりトンネルが動いても漏水させない。												○	○	◎
ケーブル熱等によりトンネル内温度が上昇しても塑性化しない。			○										○	○
地中内の生物などによって分解されない。								◎					△	△

註)◎:強い関連性がある, ○:関連性がある, △:弱い関連性がある

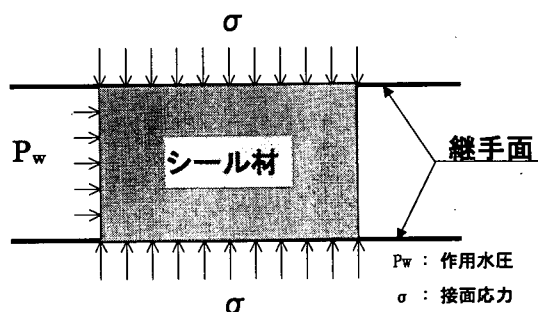


図-3 (1) シール材の密封の原理

用されることになる。また、下水道や導水路などのように、トンネル内を水が流れる場合でも、コーキング材または二次覆工などにより、シール材はこれらの水に直接接触することはないため耐摩耗性、耐ガス性、耐薬品性ならびに耐浸食性などに対しても穏やかな環境条件下で使用されることになる。しかし、最近では経済性の観点から、二次覆工が省略される傾向にあるため、トンネルの用途に応じて耐熱性や耐薬品性などに対して検討しなければならない場合もでてきている。

本研究では実際にシール材に要求される機能に着目してその耐久性の評価項目を決定した。表-1は、シール材により止水性を確保するために必要な要求品質とその特性を整理した品質表である。

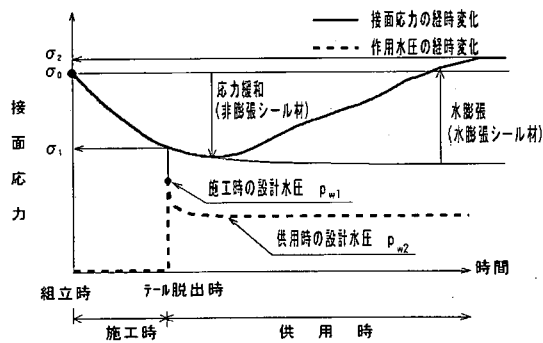


図-3 (2) 接面応力の経時変化と設計の対象時期の概念図

なお、シール材による止水の考え方は、図-3 (1) に示す密封の原理 (パッキング理論) に基づいており、シール材による止水の必要条件は、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  $\sigma$  (以下、接面応力という) が作用水圧  $P_w$  以上となることである。この考え方の妥当性はシール材の止水試験により確認されている<sup>2), 8)</sup>。

図-3 (2) は、水膨張シール材における接面応力ならびに作用水圧の経時変化を示したものである。シール材における接面応力の変化を概念的に述べ

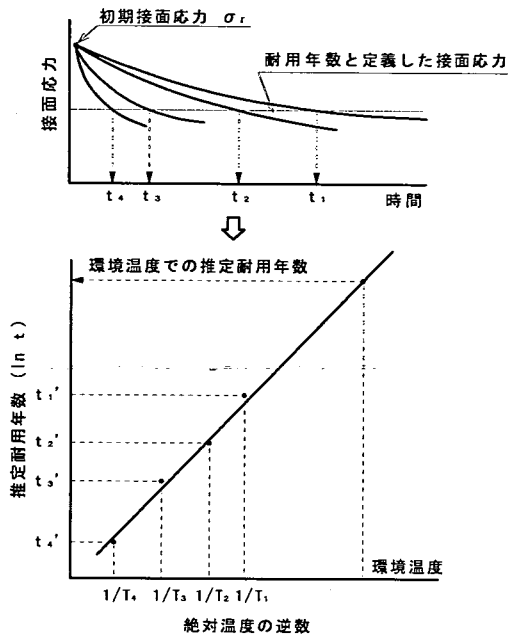


図-4 温度促進試験によるシール材の耐用年数の推定

ると、①セグメントの組立て時においてシール溝内に圧縮され封入されることで界面応力が発生する。②時間の経過とともにゴム自身の応力緩和により界面応力は低下する。③非膨張シール材の場合は、そのまま界面応力が漸減するが、水膨張シール材の場合、時間とともに地下水を吸水し膨張する。④膨張することによって界面応力を増加させ、応力緩和を抑制し、界面応力の低下を穏やかにする。結果として、界面応力を長期的に保持できることになる。

以上のことから、本研究では耐久性を最も良く評価できる特性として、表-1に示す応力緩和特性と膨張圧の経年保持特性とを選んだ。

これは、膨張圧の発現に伴う応力緩和の抑制効果によって界面応力(応力緩和+膨張圧)の低下が長年にわたって小さければ耐久性は良いと判断できると考えたからである。

#### (1) 温度促進試験による界面応力の経時変化

一般にゴムやプラスチックなどの耐用年数を予測する場合には、アレニウス(S. A. Arrhenius)の法則がよく用いられる。アレニウスの法則による耐用年数の予測は、一般に化学反応速度論的耐用年数推定法を用いて行われる。これは、化学反応の速度と絶対温度(T)との関係を示した次式で表される。

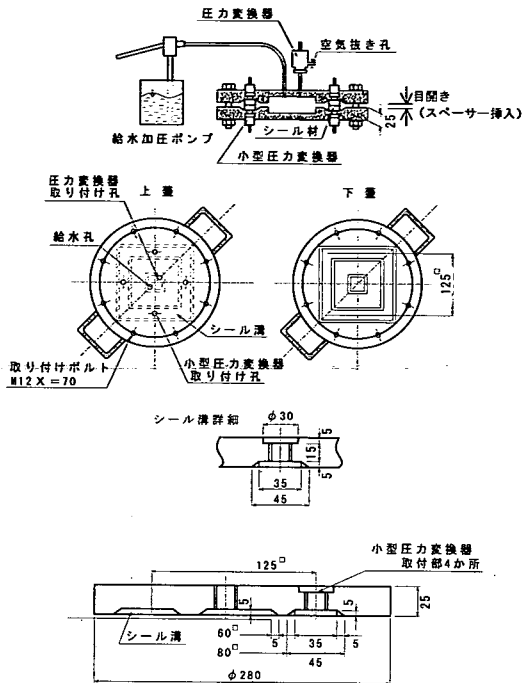


図-5 止水試験装置

$$\ln t = a + b \left( \frac{1}{T} \right) \quad (1)$$

( a, b は定数 )

式(1)は、数ケースの温度における時間 t を測定すれば図-4に示すように  $\ln t$  と  $1/T$  との間の直線関係が得られ、温度と耐用年数との関係が推定できることを示している。

#### (2) 温度促進試験による耐用年数の推定

温度促進試験は 図-5に示すような鋼製の円盤を用い、シール材を所定の界面応力で締め付けて所定の温度に設定した恒温水槽内に浸漬し、界面応力の低下を小型圧力変換器により測定する方法で行った。すなわち、図-4に示したように温度を変化させて所定の界面応力に達するのに要する時間を測定し、トンネルの使用環境下において耐用年数と判断される時間を外挿で推定するものである。試験には市販の水膨張シール材と、これと比較する目的で用いたクロロプレンゴムの非膨張シール材とを用いた。シール材の形状寸法および物理特性は表-2に示すとおりである。なお、ここでのシール材の耐用年数は、温度促進試験においてゴム材料の強度に対する耐用年数を推定する際によく用いられる定義を流用し、「界面応力が初期界面応力の 50%

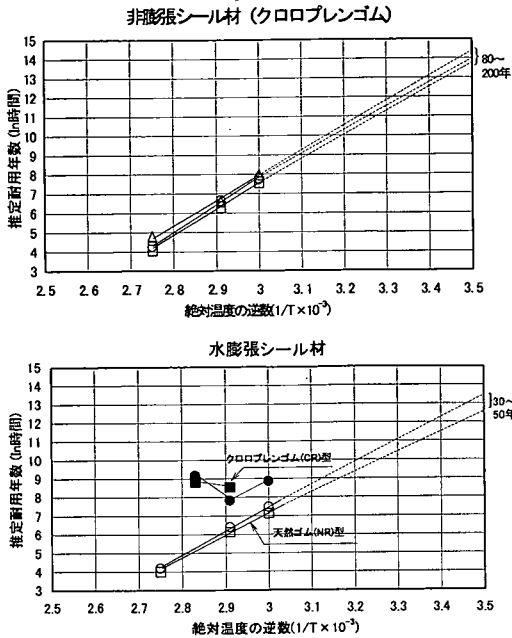


図-6 絶対温度の逆数と推定耐用年数との関係

に低下するのに要する時間」とした。

試験結果は図-6に示すとおりである。

図-6の実線は平均値の範囲を示したものであり、この図から非膨張シール材として選定したクロロプレンゴムは、劣化時間と温度とが直線関係にありアレニウスの法則が成立し、シール材の耐用年数は本試験の定義では最低でも約80年と推定できることがわかる。

一方、水膨張シール材では、シール材の種類によって劣化時間と温度とは必ずしも直線関係にない。水膨張シール材でも基材が天然ゴムの場合、非膨張のクロロプレンゴムと同様に劣化時間と温度とが直線関係にあり、この場合の水膨張シール材の耐用年数は約50年と推定できることがわかる。

水膨張シール材は、天然ゴムやクロロプレンゴムなどの基材に、各種添加剤(老化防止剤など)や膨張材を配合したものである。したがって、温度促進試験の結果が非膨張シール材として選定したクロロプレンゴムと同様の傾向を示さないのは、膨張材の材質による影響、すなわち劣化を促進するため80℃~90℃と比較的高温で行ったことが、膨張材の種類や配合状況によって、膨張性能を十分に発揮できない原因になったものと推察される。

したがって、水膨張シール材の種類によっては、高温による温度促進試験ではその耐久性が評価できない可能性があることから、本研究における耐久性試験は20℃の常温で実施することとした。

表-2 試験に使用する水膨張シール材

	シール材A	シール材E	シール材G	シール材H	シール材I
形状率	1.0 1.5 1.75	1.5	1.0 1.5 1.75	1.5	1.5
基材	NR	CR	CR	CR	CR
膨張材	水膨張 ポリアルケン	特殊吸水性 樹脂系	特殊吸水性 樹脂系	ウレタン型 INP	特殊吸水性 樹脂系
硬度 (JISA)	27±5	51	50±5	40±5	50±5
引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	3.0以上	2.8	4.0以上	3.0以上	3.0以上
伸び (%)	500以上	720%	600以上	400以上	-

	シール材B	シール材C	シール材D	シール材J	シール材F
形状率	1.0 1.5 1.75	1.0 1.5 1.75	1.0 1.5 1.75	1.5	1.5
基材	CR+SBR	CR+NR+SBR	SBR	SBR	ウレタン ゴム単体
膨張材	特殊吸水性 樹脂系	特殊吸水性 樹脂系	特殊吸水性 樹脂系	特殊吸水性 樹脂系	
硬度 (JISA)	38~41	45±5	43~45	40±10~ 50±10	44
引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	5.2~9.5	6.0以上	7.5~7.8	0.8~9.0 以上	0.4以上
伸び (%)	560~650	600以上	800~850	300~600 以上	1000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

#### 4. 耐久性試験

水膨張シール材の耐久性を評価するために、シール材の応力緩和試験を長期にわたり実施し、水膨張シール材の応力緩和による接面応力の減少率と時間との関係を求め、長期の供用期間における接面応力の保持性を推定することとした。

##### (1) 試験概要

###### a) 試験パラメータ

試験には、体積膨張率3~4倍の市販材料からなる矩形の水膨張単体シール材10種類を用いた。

試験に用いたシール材の基本物性は、表-2に示すとおりである。シール材の形状率<sup>2)</sup> ( $S=a/2h$  ここで、 $a$ :シール材幅、 $h$ :変形前のシール材の総厚)は、実際に多く使われている範囲を考慮し1.0, 1.5, 1.75とした。また、目開き量(セグメントの継手部におけるセグメント相互間の開口量)は施工実績調査結果<sup>2)</sup>から0mm, 1mm, 3mmとした。

図-7は、試験に用いた矩形シール材の寸法と目開き量の組合せ、筆者らの提案式<sup>2)</sup>によって推定した矩形シール材の応力-ひずみ関係を示したものである。また、試験は水膨張圧による接面応力の保持程度を確認するため、水膨張シール材を水浸漬した場合(以下、水中と略する)としない場合(以下、気中と略する)の2ケースを行った。

###### b) 試験方法

試験は、図-8に示すシール溝を設けた鋼製治具

形状率 $S=a/2h$	シール材寸法(=) 目開き量(=)			シール材種類
	幅:a	総厚:b	0 1 3	
1.00	20	10	○	A, B, C, D, G
1.50	30	10	○ ○ ○	目開き0, 3mm: A, B, C, D, G 目開き1mm: A, B, C, D, E, F, G, H, I, J
1.75	35	10	○	A, B, C, D, G

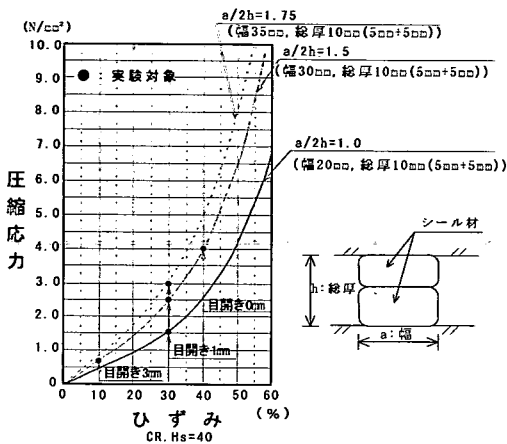


図-7 試験に用いた供試体の応力ひずみ関係の推定と試験パラメータ

にシール材を装着し、20℃の恒温室内で行った。目開きは鋼製治具に、所定厚（1mm、3mm）のスペーサーを挿入した後、上下の治具がスペーサーに密着するまで圧力を加え、ボルト締めによってその状態を固定した。

## (2) 水膨張シール材の膨張圧の推定

シール材の接面応力がシール材とシール溝との空隙や、シール材の大きさに影響を受けることについては既に文献2)で述べたとおりであるが、シール材別に形状率と目開きが同じ条件で、水中と気中の違いによる接面応力の経時変化を整理した一例を図-9に示す。これを見ると、同一経過時間において、水中での接面応力と気中での接面応力との差が水膨張圧を示すものと推定できる。図-10は水膨張圧の経時変化を整理したものである。シール材A, B, F, Gはともに、目開き量3mmでは水膨張圧は小さいかほとんど期待できないことがわかる。また、目開き0mmと1mmとで水膨張圧の大きさを比較すると、目開き量が0mmの方がはるかに膨張圧は大きく、目開き1mmの2~4倍であると推定できる。したがって、水膨張圧により長期にわたり接面応力の保持を期待するためには目開き量を抑制する必要があることがわかる。

水膨張圧の発現は、シール材の種類によって異なり、シール材Gを除いて水に浸漬して約600日から800日後にそのピークを迎える傾向が認められた。

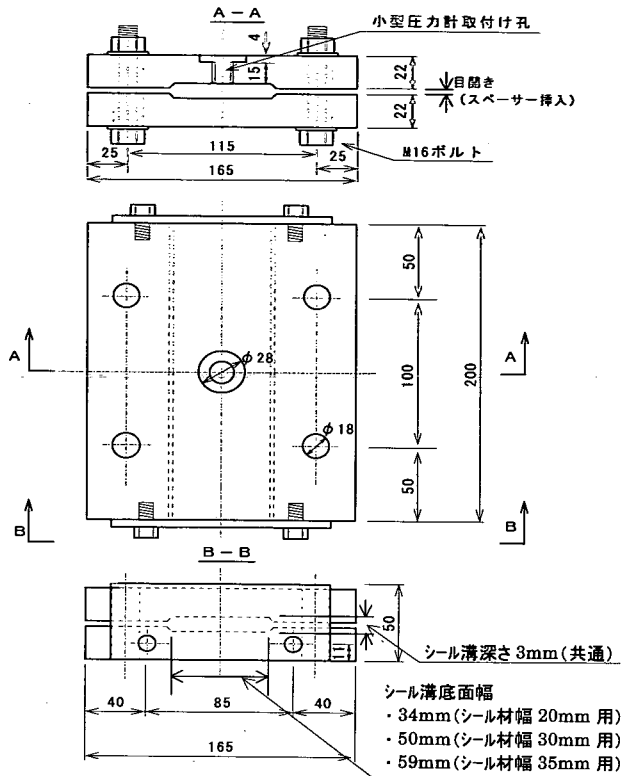


図-8 試験治具

## (3) 水膨張シール材の耐用年数の評価

水浸漬した水膨張シール材を基材別、膨張材別、目開き量別に接面応力が経過日数とともにどのように変化するかを比較するためには、初期条件を統一する必要がある。図-9では、初期接面応力が目開き量やシール材の材質によって各々異なることから、ここでは、接面応力の有効率（ $\rho_2$ ）の経時変化で整理することとした。接面応力の有効率は任意の経過時間  $t$  における接面応力  $\sigma_t$  と初期接面応力  $\sigma_0$  との比（ $\sigma_t/\sigma_0$ ）を表している。すなわち、 $t = 0$  の初期状態では接面応力の有効率は  $\sigma_t/\sigma_0 = 1.0$  である。この接面応力の有効率が時間の経過とともに大きくなれば接面応力の低下はないことを示しており、止水性能から見た耐久性は優れていることになる。一方、接面応力の有効率が低下する傾向であれば、将来シール材の接面応力  $\sigma_t$  が初期接面応力  $\sigma_0$  を下回ることが予想され、シール材に要求される止水性能を満足しないことになる。したがって、本研究では、試験開始後に  $\sigma_t/\sigma_0 = 1.0$  となった時点を実験開始後と定義し、耐久性を評価することとした。

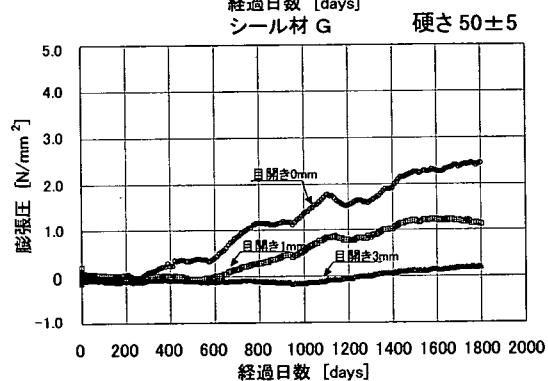
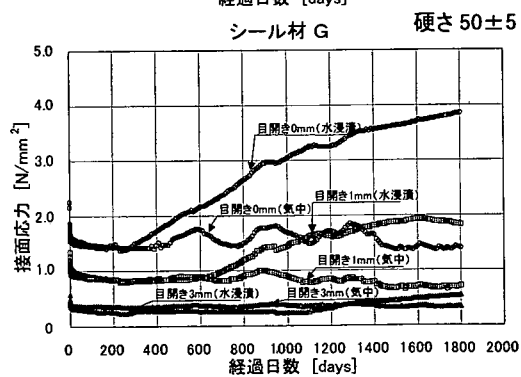
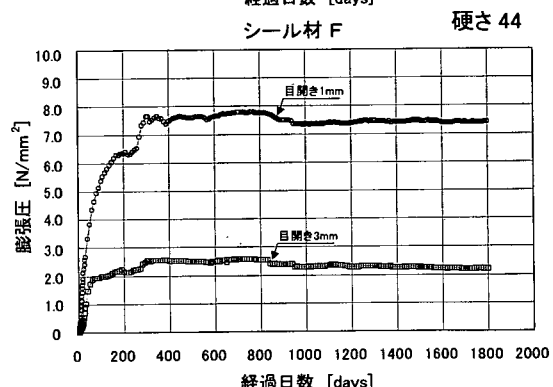
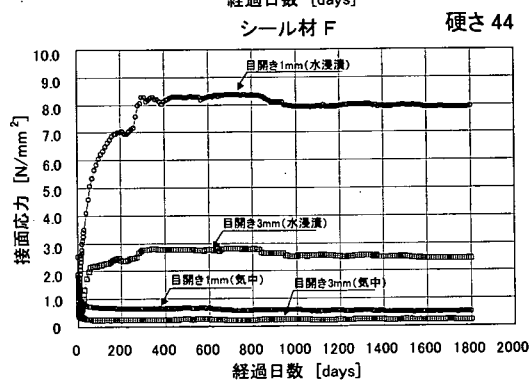
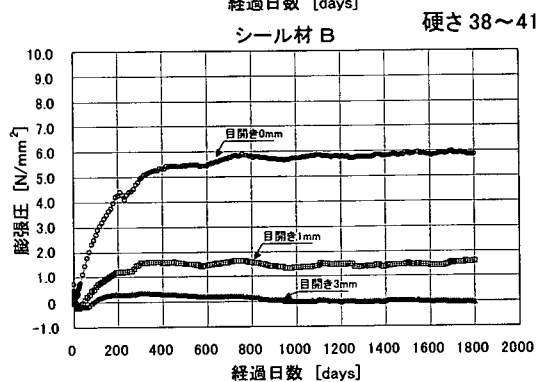
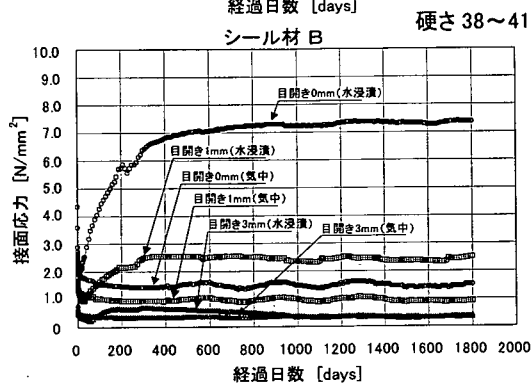
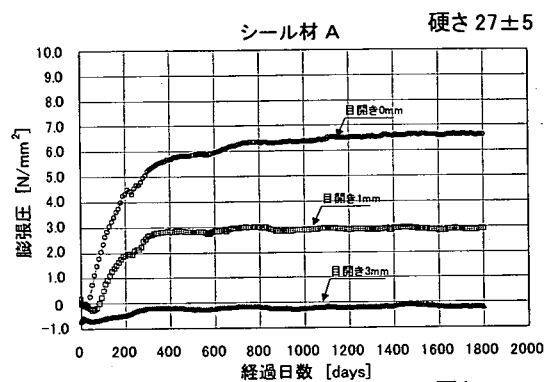
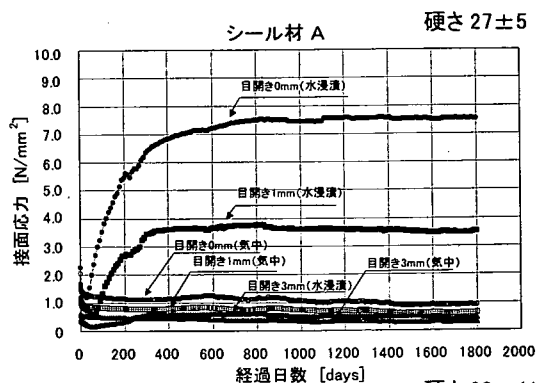


図-9 接面応力の経時変化 (形状率 S=1.5)

図-10 膨張圧の経時変化 (形状率 S=1.5)

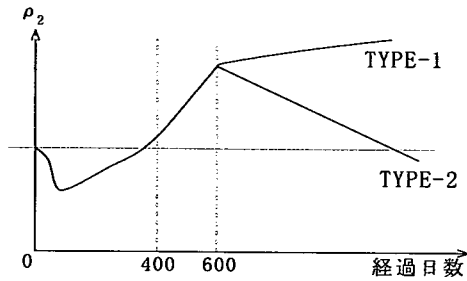


図-11 水膨張シール材の水浸漬日数と接面応力の有効率  $\rho_2$  の関係模式図

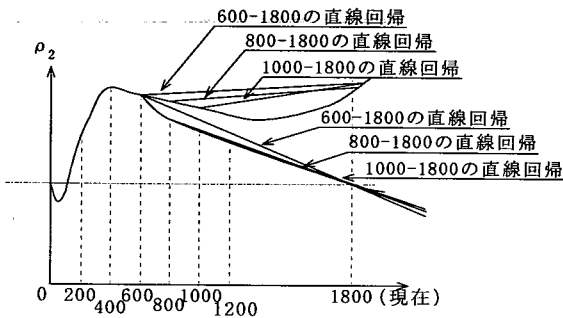


図-12 有効率の推定の模式図

図-11 は、水膨張シール材の水浸漬日数と接面応力の有効率  $\rho_2$  の関係を示した模式図である。試験に用いた水膨張シール材では、これらの関係は傾向的にみて、大きく2つに大別できる。1つは、接面応力が応力緩和により一度減少するが、その後膨張圧により上昇することで有効率が上昇または維持される傾向にあるシール材(TYPE-1)である。もう1つは、TYPE-1と同様に、一度有効率が減少するが、その後有効率が上昇し、ある時点で再び有効率が減少する傾向にあるシール材(TYPE-2)である。

これらのことから、長期的な接面応力の有効率の推定は、試験開始から600日以降における有効率を直線回帰することで求めた。すなわち、図-12に示すように、試験後600, 800, 1000, 1200, 1400日と試験期間の1800日のデータをそれぞれ直線回帰した結果を基に、接面応力の有効率が上昇傾向にある場合は、回帰直線の傾きが小さいケース、接面応力の有効率が下降している場合は、回帰直線の傾きが大きいケースを代表値として評価することとした。

なお、600日以降を直線回帰による評価の対象としたのは、図-10に示すとおり、膨張圧の発現がこれ以降に顕著であり、殆どのデータがほぼ直線とみなされることによる。また、ここでは、密封の原理による止水設計<sup>2)</sup>において、止水性を確保するためには作用水圧を下回らないようにシール材の初期接面応力  $\sigma_0$  を設計することから設定した「接面

応力が水膨張後に再び初期接面応力まで低下するのに要する時間」と定義した場合で評価することとしたが、参考として、温度促進試験においてゴム材料の強度に対する耐用年数を推定する際によく用いられる定義と同様に、耐用年数を「接面応力が初期接面応力の50%に低下するのに要する時間」と定義した場合の値も表記した。結果は以下に示すとおりである。

表-3は、形状率1.5で実施した全てのデータを用いて接面応力の有効率の経年変化を基材別に整理したものである。このうち、網掛けをしてあるものが、耐用年数の推定に用いた代表値である。なお、表中の括弧内に有効率と低下率の求め方を示した。

表-4は、この代表値を用いて、経年後の接面応力の有効率と耐用年数とを評価したものである。この表から、天然ゴムおよびウレタン系の水膨張シール材の耐用年数は30年程度と推定される。これは、図-6に示した基材が天然ゴム系の水膨張シール材の推定耐用年数と同程度の値を示している。また、CR+ $\alpha$ 系は数年と推定できる。一方、CR系やSBR系の水膨張シール材は現時点で接面応力が低下傾向に無く、耐用年数の評価は困難である。

表-5は、経年後の接面応力の有効率と耐用年数を表-3と同様に形状率1.5の全データを用いて膨張材別に整理したものである。本試験に用いた水膨張シール材中の膨張材は、特殊吸水性樹脂系とウレタン系に大別される。表-5からウレタン系の水膨張シール材の耐用年数は十数年と推定されるが、特殊吸水性樹脂系水膨張シール材は、現時点で接面応力が低下傾向に無く現時点での耐用年数の推定は困難である。

表-6は、表-3と同様に形状率1.5の全データを用いて接面応力の有効率の経年変化と耐用年数を目開き量別の平均値で整理したものである。これを見ると目開き量が多いほど接面応力の低下率は大きくなることから、シール材の耐久性を確保するためには、目開き量は少ない方がよいことがわかる。したがって、セグメントの組立て精度を向上させることが、漏水の防止だけでなく、水膨張シール材の耐久性を確保する観点からも重要と考えられる。

図-13は、図-6に示した高温での温度促進試験結果(水膨張シール材)に、表-4の「接面応力が初期接面応力の50%に低下するのに要する時間」で定義したときの耐用年数をプロットしたものである(シール材E, Gについては接面応力が低下傾向に無く耐用年数の推定は困難であることから、プロットから除いた)。



表-3 基材別による接面応力の有効率の推定

基材	有効率(日数)	有効率	低下率(×10 <sup>-5</sup> )
天然ゴム (シール材A)	600日後	2.48	-12.4
	800日後	2.43	-8.8
	1000日後	2.35	-4.1
	1200日後	2.37	-5.1
	1400日後	2.30	-1.2
CR系 (シール材 E, G, H, I の平均値)	600日後	0.92	+13.7
	800日後	0.92	+14.0
	1000日後	0.87	+17.0
	1200日後	0.86	+17.9
	1400日後	0.79	+22.0
CR+α系 (シール材 B, C の平均値)	600日後	1.16	-9.8
	800日後	1.11	-6.6
	1000日後	1.09	-5.1
	1200日後	1.17	-9.9
	1400日後	1.11	-6.6
SBR系 (シール材 D, J の平均値)	600日後	0.91	+10.2
	800日後	0.95	+7.2
	1000日後	0.94	+7.9
	1200日後	0.93	+8.5
	1400日後	0.90	+10.5
ウレタン系 (シール材F)	600日後	3.18	-17.0
	800日後	3.06	-8.9
	1000日後	2.93	-0.5
	1200日後	2.90	+1.4
	1400日後	2.74	+10.5

表-4 基材別の接面応力の有効率の経年変化と耐用年数(水浸漬)

基 材	天然ゴム	CR系	CR+α系	SBR系	ウレタン系
600日後の接面応力の有効率	2.48	0.92	1.16	0.95	3.18
低下率	-12.4	+13.7	-9.8	+7.2	-17.0
30年後の接面応力の有効率	1.12	2.42	0.09	1.74	1.32
50年後の接面応力の有効率	0.22	3.42	-0.63	2.26	0.08
100年後の接面応力の有効率	-2.05	5.92	-2.42	3.58	-3.03
耐用年数	初期接面応力と同じになる時期 3 3年後	*2	5 年後	*2	3 5 年後
年 数	初期接面応力の1/2になる時期 4 3 年後	*2	1 8 年後	*2	4 3 年後

\*1 800日後の接面応力の有効率  
\*2 現時点で接面応力が低下傾向に無く耐用年数の推定は困難

これによれば、天然ゴムを基材とするシール材Aについては、温度促進試験による推定耐用年数と本研究において常温(20℃)で実施した耐久性試験から得られた耐用年数はほぼ一致していることがわかる。また、基材がクロロプレン(CR系、CR+α系)の場合、80℃(1/2.9×10<sup>-3</sup>)以下の温度のみで外挿した推定耐用年数に対して、常温(20℃)で実施した耐久性試験から得られた耐用年数は安全側の結果を与えている。

表-5 膨張材別の接面応力の有効率の経年変化と耐用年数(水浸漬)

膨張材別	600日後の接面応力の有効率	低下率(×10 <sup>-5</sup> )	30年後の接面応力の有効率	50年後の接面応力の有効率	100年後の接面応力の有効率	耐用年数	
						初期接面応力と同じになる時期	初期接面応力の1/2になる時期
特殊水性樹脂系(B, C, D, E, G, J, Iの平均値)	0.93	+18.0	2.87	4.17	7.41	*	*
ウレタン系(H, Fの平均値)	2.57	-25.0	-0.13	-1.93	-6.43	17年後	23年後

\* 現時点で接面応力が低下傾向に無く耐用年数の推定は困難

表-6 目開き量(圧縮率)別の接面応力の有効率の経年変化と耐用年数(水浸漬)

目開き量(圧縮率)	600日後の接面応力の有効率	低下率(×10 <sup>-5</sup> )	30年後の接面応力の有効率	50年度の接面応力の有効率	100年後の接面応力の有効率	耐用年数	
						初期接面応力と同じになる時期	初期接面応力の1/2になる時期
0mm -40%	1.61	+16.4	3.41	4.6	7.6	* 97年後	* 222年後
1mm -30%	1.39	-1.1	1.27	1.19	0.99	97年後	222年後
3mm -10%	1.1	-6.4	0.4	-0.07	-1.24	43年後	26年後

\* 現時点で接面応力が低下傾向に無く耐用年数の推定は困難

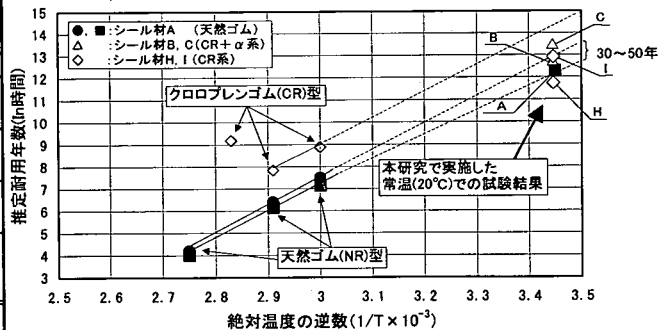


図-13 絶対湿度の逆数と推定耐用年数との関係

## 5. 結論

シール材に要求される機能に着目して水膨張シール材の耐久性を評価した。本研究で実施した常温(20℃)での試験結果から確認できた事項は以下のとおりである。

① ゴム材料の耐久性評価に対して実施している温度促進試験を水膨張シール材に適用する場合は、水膨張シール材を構成する基材、膨張材等の耐熱性を考慮し、適切な試験温度を設定する必要がある。

② 複数の基材・膨張材の組合せからなる水膨張シール材の長期耐久性を統一的に評価する場合は、膨

張材の材質の詳細がノウハウであり非公開となっている現状を勘案すれば、試験に長期間を必要とするものの、トンネル内環境に応じた常温での耐久性試験が有効である。

③本研究で行った常温での耐久性試験結果によれば、天然ゴムやウレタン系を基材とする矩形の水膨張シール材は、少なくとも30年程度は初期界面応力以上の界面応力を保持できる。また、その他の材料を基材とするものについても、初期界面応力に設計水圧、供用年数等を考慮した余裕を見込むことや、シール材形状を工夫すること等によって同等の止水性能を確保することが可能であると考えられる。

## 6. おわりに

今回試験を行ったシール材を使用したシールドトンネルはすでに十数年程度を経ているが、止水性に問題は生じていない。したがって、今後開発が予定される水膨張シール材については本試験と同様な方法で耐久性を評価できる。

しかし、本研究で示した試験方法では耐久性を評価するのに多大な時間が必要となる。研究開発が日進月歩で進んでいる水膨張シール材の耐久性を評価するには、実用的であるとは言いがたいため、より短期間で評価できる試験方法を確立する必要があると思われる。

今後は、本研究に述べた試験方法の実用化を図るために、膨張性能を十分に発揮できる温度を実際に試験で確認し、その結果をもとに、比較的短期間で、水膨張シール材の耐久性を評価できる温度促進試験方法を確立していきたいと考えている。なお、本研究で用いた実験供試体は、現在も引き続き観察中

であることを付記する。

## 参考文献

- 1)和佐勇治郎, 阿部廣二, 吉田幸司, 野本寿, 新藤敏郎: 防水性向上に対する研究(その1) 東京湾横断道路シールドトンネル, トンネルと地下, 第23巻, 9号, pp.45-51, 1992年9月.
- 2)大塚正博, 塩治幸男, 小林亨, 小泉淳: シールド工事中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, 土木学会論文集, No.651/VI-47, pp. 61-79, 2000年6月.
- 3)W.E. Dukley: パイプとパイプラインに使ったゴムの寿命, ゴム, 12, 6, pp.325-pp.327, 1965.
- 4)耐久性を考慮したゴムの配合例, 工業材料, 16, [8], 1968.
- 5) (社) 日本ゴム協会: 長期自然老化と人工促進老化との対比に関する報告書, 日本ゴム技術委員会, 1985年3月.
- 6)宇佐美民雄, 渡邊正夫, 橘田敏之, 米浜光郎, 林邦明, 長野悦子: ゴム支承の経年変化と静的特性, 日本ゴム協会誌, 第54巻, 第3号, 1981年.
- 7)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(その2), トンネルと地下, 第23巻, 5号, pp.43-51, 1992年5月.
- 8)大塚正博, 富所達哉, 塩治幸男: 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.

(2001. 6. 19 受付)

## EVALUATION OF LONG-TERM DURABILITY OF HYDROPHILIC SEALING MATERIALS USED FOR SHIELD TUNNELS

Masahiro OHTSUKA, Yukio ENYA, Toru KOBAYASHI and Atsushi KOIZUMI

Water swelling sealant developed in the early 1980s, has been used in actual construction projects for about 20 years as an effective material to ensure water-tightness of shield tunnels. Its long-term durability, however, has not yet been evaluated. Standardized durability test methods and quality evaluation standards for materials of this kind are not available at present. In this study, the authors focused on the functions required for sealant materials and established items for evaluating their durability. In addition, a durability test method, that takes into consideration such evaluation items, was devised and the long-term durability of hydrophilic sealing materials currently used was evaluated.