

施工時荷重等を考慮したセグメントシール材 の基礎実験と止水効果

THE BASIC EXPERIMENTS ABOUT SEALING MATERIAL FOR SEGMENTS

TAKING INTO ACCOUNT OF CONSTRUCTION LOADS AND WATER STOPPAGE EFFECTS.

浦沢義彦*・一色信正**・北村昌文***

Yoshihiko URASAWA, Nobumasa ISSHIKI, Masafumi KITAMURA.

Sealing material for segments is one of the most important elements in terms of quality to ensure water stoppage in shield tunnels. With recent demand to rationalize secondary lining, the material takes on importance accordingly. Distinct method as to selection of what material to use has not been established but depended upon individual engineers judgment. We carried out basic experiments thereby selected suitable material, dimension and size. The experiments were conducted in circumstances as similar as possible to factual circumstances, taking into account of construction and its loads.

Key words : sealing material, water stoppage capacity, construction load.

1. まえがき

洞道工事における品質確保の要因の一つにセグメントからの止水があげられる。その対策として、セグメント本体の品質（クラック、かけの防止）はもとより、継手部におけるシール材の品質も重要な要素となってくる。近年では、トンネル断面の大型化はもとより、高水圧への対応、さらには、二次覆工の省略等への要求から、ますます一次覆工における止水性向上へのニーズが高まってきているのが現状である。

本報告は、土被りが20m程度でN値30～50の滞水成田砂層に位置するシールドトンネルについて、施工前にシール材の基礎実験を実施してシール材の材質を選定するとともに、その施工法と評価について行ったものである。

2. シール材実験の目的と内容

2・1 実験の目的

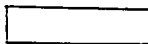
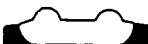
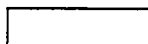
-
- * 東京電力株式会社 建設部
 - ** 東京電力株式会社 地中線建設所
 - *** 前田建設工業株式会社

シール材の材質については、昭和55年頃まではブチル系が中心であったが、その後は水膨潤系が主流を占めるようになってきた。この水膨潤系にはウレタン系と高分子系の2種類があり、現在では数社のメーカーが市場商品化しており、それぞれ一長一短がある。しかし、このシール材選定の方法には特に明確な手法がなく、それぞれの技術者の判断に委ねられているのが実情である。

このような意において、過去の実績を踏まえるとともに、具体的なシュミレーションと実験を行ってシール材の材質、形状および溝の形状を決定していくための実験を行った。今回対象としたシール材の大きさは汎用タイプと東京湾横断道路の仕様の中間に位置するものであり、実績は比較的少ない。

なお、一般的で実績のあるメーカー5社の形状、物性等について表-1に、その写真を写真-1に示す。

表-1 一般的で実績のあるシール材の比較

	サンプル A		サンプル B		サンプル C		サンプル D		サンプル E	
										
ベースゴム	天 然 ゴ ム		クロロプレンゴム		クロロプレンゴム		水 膨 張 性 ウレタンゴム		クロロプレンゴム +天然ゴム	
膨潤材材質	水 膨 張 弾 性 ポリウレタン		特殊変成吸水性 ポリマー		特殊水膨潤性樹脂 + ウレタンプレポリマー				吸水性ポリウレタン + 特殊変成吸水性樹脂	
比 重	1.18	1.10	1.4	—	1.25	1.10	1.10	1.04	1.12	—
硬 度	28±5	15±5	40~55	10以上	45	15	44	42	35	13
引 張 強 さ (kg f/cm ²)	35以上	20以上	30以上	20以上	65	35	4以上	15以上	75	43
伸び (%)	550以上	300以上	600以上	250以上	600	450	1000以上	800以上	750	570

2・2 実験の内容

(1) 実験のフロー

実験は、形状効果を数値的に把握する事前実験、基本物性を確認する一次実験、施工性を考慮した耐水圧性能を確認する二次実験と3段階に分けて実施した。

実験フローを図-1に示す。

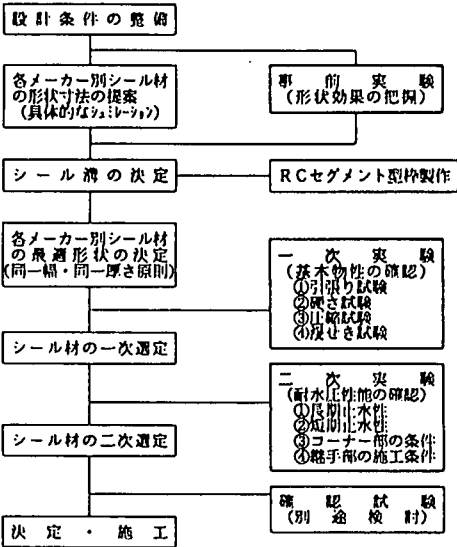


図-1 実験のフロー

(2) 実験項目

①事前実験

シール材の厚さ・幅を因子として、これらの組合せにおける性能実験を行うことにより、幅・厚みの影響度を推定する実験を実施した。性能を表す特性値としては、耐水圧すなわち止水性能とし、裏込注入圧を想定した、要求品質5 kgf/cm²を確保するための最適水準を想定した。表-2に実験一覧示す。

表-2 事前実験の計画

因 子	記号	第1水準	第2水準
シール幅	A	従来幅 (20mm)	今回推奨幅 (30mm)
シール厚さ	B	従来厚さ (3~5mm)	今回推奨幅 (5mm前後)

②一次実験

主として、基本物性に重点を置いた実験であり、その供試体としては初期状態のものはもとより、劣化促進させたものや繰返し荷重をかけた試験体を用い、初期状態からの劣化具合を把握した。表-3に一次実験の内容を示す。

表-3 一次実験の計画

	供 試 体 条 件			試 験 条 件
	初 期	劣 化 促 進	繰 返 し 荷 重	
引張り試験	○	○	△	試験片の切断時に至るまでの荷重
硬さ試験	○	○	△	
圧縮試験	○	○	○	目開き量0mmの状態までの圧縮力
浸せき試験	○	○	○	浸せき期間60日後の質量および体積変化率

なお、△については通常の試験片と異なるため、その結果は参考扱いとする。
劣化促進条件： 劣化条件70℃にて、劣化期間年間を想定。
繰返し荷重： 原則として、目開き0mmに至までの荷重を50回繰返す。
浸せき日数： 通常30日で100%近く影響するが、余裕をみて60日に設定。

③二次実験

主として、耐水圧性能を確認するための実験であり、その試験条件は施工上考えられる目開き、目違いやコーナー部および継手部の施工条件を考慮して行った。表-4に二次実験の内容を示す。

表-4 二次実験計画

種 別	供 試 体 条 件	試 験 条 件	備 考
耐水圧試験	長期止水性	水圧2kgf/cm ² 、試験期間30日 劣化促進および繰返し荷重を考慮 (目開き2mm、目違い4mm)	目開き2mm、目違い4mmについては東京電力㈱の品質管理基準に準拠する
	短期止水性	目開き2mm、目違い4mmの時の最大耐水圧	
	コーナー部の条件	コーナー部の施工条件の相違による最大耐水圧 (目開き2mm)	コーナー部の施工条件として ①浮きを想定 ②浮きを防止(直角貼り)
	継手部の条件	継手部の施工条件の相違による最大耐水圧 (目開き2mm)	継手部の施工条件として ①L字貼り(コーナー部) ②突き合せ(直線部) ③2重重ね貼り(コーナー部)
セグメント組立て時の圧入抵抗試験		圧入量50mm/分×1分	ジャッキ能力の最大値

(3) 実験レベルについて

実験に用いた供試体のうち劣化促進における想定耐用年数および繰返し回数については、以下のよう
に考え決定した。

- ①耐用年数……トンネルおよびセグメント本体の耐用年数と同じ年月。ただし、実験においては $70^{\circ}\text{C}\times 1\text{日}$ を1年と換算する促進状態を考慮して、トンネル本体²⁾の耐用年数50年より50日間の劣化促進とした。
- ②繰返し回数……施工時における推力の伝播距離から求まるジャッキ反力を受ける回数、または、耐用年数期間中におけるある値以上の地震力による繰返し回数のうち、両者の多い方。なお、地震力については、想定した地震波に対して地震動のエネルギーが等価となる矩形の³⁾包絡関数より求めた。

3. 実験結果とその評価

3・1 事前実験

耐水圧性能は圧縮率とほぼ正比例の関係があることから、圧縮率を代用特性として耐水圧性能を評価した。図-2に試験結果の一例を示す。

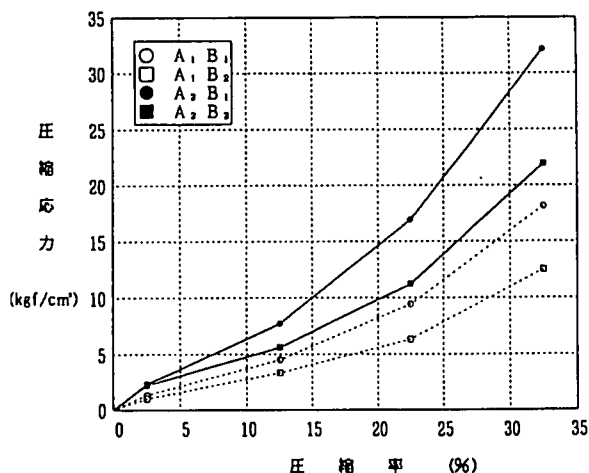


図-2 事前実験結果の一例

実験結果から以下の項目が判明した。

- ①圧縮率が増加すると、圧縮応力は増加し、下に凸の形状（増加の割合が増える）を示している。
- ②圧縮率を一定とした場合シール幅（A）についてはいずれの製品、水準でも幅が広くなると圧縮応力は増加する。しかし、シール厚（B）については製品、水準によって結果が異なるが厚い方が圧縮応力は低下する傾向を示している。
- ③交互作用は、誤差から比べると大きく有意となっている箇所もあるが、主効果（AまたはB）と比べてはるかに小さく、実用上無視できる値であると判断できる。

シール材の幅の効果については定量的に把握でき、どの圧縮率の水準においても幅が広い方が耐水圧性能が高いことは判明した。しかし、厚みについては必ずしも厚い方が耐水圧性能が高いわけではなく、材質や圧縮率のレベルによって相異がでてくる。これは、今回の実験が便宜上シール溝を考慮しておらず、溝のないフラットな平板フランジを用いたことに起因すると考えられた。すなわち、シール材のようにポアソン比 ν が0.5程度の材料は、高さ方向に応力を受けても横方向の拘束がない限り応力が横に分散し有効な直応力が伝わらないからである。このことは、有限要素法の解析結果でも明らかとなった。以上より、シール材におけるシール溝の効果というものが重要であることがわかる。

3・2 一次実験

劣化促進、繰返し荷重の両試験体とも、初期のデータと比べてなんらかの変化を示しており、物性的には、劣化していると判断できる。両者を比較した場合、前者の方が変化の割合が大きい。これは、後者が物理的な変化であるのに対し、前者が化学的な変化を受けていることによると考えられる。このことから、実際の使用に当たっては、長期の耐久性は確認しておく必要がある。

なお、劣化促進の一部のデータで硬さ、引張強さが増加しているのがみられた。これは、この製品に熱を加えることはまだ生成過程にあることから、加硫が進み強度が増加したのではないかと推定できることから、熱を加えて劣化促進を評価することに多少の疑問点が残る。

3・3 二次実験

長期および短期の止水性についてはどの試験体、製品とも十分な止水性は確保できていると判断できる。

コーナー部および継手部の止水性試験結果によると、膨潤後の初期の段階では、シール材の浮きや重ねなどの施工不良を想定したケースの方が止水性能は劣っているが、十分な膨潤が得られた時点では両者に差は見られていない。このことは、多少施工不良が生じても十分なラップ部が取られていれば止水性能そのものには、差がないといえるが、施工の不良はセグメント組立精度に影響を及ぼすことは必至であり、しいては止水性能に影響を及ぼすため、ある程度の貼り付け精度は必要である。

組立時の圧入抵抗試験では、潤滑油を付けた方が明らかに抵抗値が小さく、シール材の変形も少いことから、必ず実施した方が良い事項である。

表－5 シール材の選定結果

メーカー名	シール材基本形状			最大圧縮率 σmax %	*1止水性能		形状寸法
	溝底幅 W mm	厚さ T mm	体積 V mm ³		*2圧入抵抗 σ mm	*3耐水圧 kg/cm ²	
S ₁ 社 Aタイプ	30	3.5	105	33	2.1	6.0	
		H=6.0 h=4.5	172				
S ₂ 社 Bタイプ	30	3.5	105	33	2.0	5.0	
		上底20 下底30	183				

4．実験結果の実施工への展開

4・1 シール材の選定

以上の実験を通して本工事で採用したシール材の材質ならびに形状寸法を表－5に示す。

4・2 施工方法

今回採用したシール材は、反ジャッキ面の主シールが7mmと厚いためコーナー部においては予め直角に加工した製品を用い、図－5に示したように、L貼りを基本とした貼り方で施工した。主シールと受シールの突き合わさるコーナー部においては、カバーシールで防護するとともに、Kセグメントの挿入面では、挿入抵抗によるシール材の剥離やはがれ、ずれを防止する目的で滑材を塗布した。さらに、内周側には緩衝材（PEテープ）を貼って、セグメントのかけ防止対策とした。

なお、一部の区間100リングにおいては、同じ材質、寸法において、継手のないシームレスタイプを試験的に採用した。

ジャッキ面シールと
反ジャッキ面シールのコーナー部接合方法

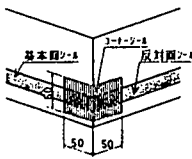


図-4 シール材の施工法概念図

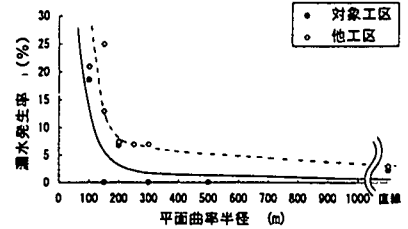


図-5 線形別漏水発生状況

4・3 防水効果

図-5に示すように、すべての原因で発生する漏水の発生率を線形別に他工区と比較すると、漏水の発生率も抑えられていることがわかった。さらには、漏水箇所全体に対してシール溝からの漏水の割合は少なく、その原因の推定としては、一部許容値2mmを越えた目開きによるものと思われることから、シール材の不備によるものは皆無であったと考える。しかし、これら目開きの大きい箇所では多少の漏水がみられていることから、カーブ区間や軟弱地盤地域において大きな目開きや目違いが発生されると予想される区間においては、シール材の要求品質に対するグレードを再検討する必要があると考えられる。

5. あとがき

今回実施したシール材の実験は、①形状効果、②基本物性、③止水性の3点に着目して実施してきたが、これらの実験に使用した供試体の条件も従来おこなわれてきた常態のもののみならず、施工履歴や施工条件というものをとりいれ、より現実に近い形で実験を行った点に特徴がある。特に、劣化促進や繰返し荷重を考慮した供試体も採用し、さらに、その設定にはコンクリートの耐久性や地震力、ジャッキ反力という考えを取り入れた点においては特筆すべき点であると考えている。

これらの実験通じて得られた結果を実施工に反映し、初期の目的を十分に達することができたと考えている。特に、シール溝の形状の設計が重要であることは十分実証された。これらの結果を通じて、今後ますます増大するであろう一次覆工における耐水性の向上という要求に対し、十分対応できるものと確信している。

最後に、紙面の都合上詳細なデータを省かせて頂いた点にお詫びをするとともに、本実験に対して御協力、御指導をして下さった関係各位ならびにシール材メーカーの関係者に対し、誌上を借りて感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- * 1) 促進劣化と自然劣化の相関関係：米国バンバービルト社研究所アメリカ化学会編
- * 2) 鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方：1991-5、(社)日本コンクリート工学協会
- * 3) 設計用入力地震動作成手法技術指針(案)：1994-3、建設省建築研究所