

高水圧が作用するセグメントシール材の止水設計法に関する一考察

東海旅客鉄道(株) 正会員 ○永井 陽

東海旅客鉄道(株) 正会員 木股 浩孝

東海旅客鉄道(株)

田森 賢太郎

東海旅客鉄道(株)

前田 健太郎

1. はじめに

中央新幹線のシールドトンネルでは二次覆工を省略することから、セグメントの継手面の止水性確保は極めて重要である。近年用いられるシール材は水膨張性シール材が主流で、その品質規格や仕様は東京湾アクアラインの事例を参考としたものが多い。しかし、作用水圧がアクアラインでは最大で 0.6MPa 程度であったのに対し、中央新幹線では 1.0MPa を超えることから、従来のシール材の適用可能性については改めて確認する必要がある。また、水膨張性シール材の経年劣化や長期的な止水性能の低下の懸念を踏まえた評価を行う必要がある。これらの観点から、中央新幹線の大深度、高水圧シールドトンネルに用いるシール材について検討した。本稿は、このうちシール材の止水性能と耐久性に関して報告する。

2. シール材の構造概要

シール材の構造概要は表-1 のとおりである。
シール材は継手面の両側に設けたシール溝に全周貼りし、地山側と内面側の 2 段設置する。材質はいずれもクロロブレンゴム系で、形状率は 1.0～1.2、シール材とシール溝の断面積比は 87.7～95.4%、目開き 0mm の状態の圧縮率は 40.0% (B 工区を除く) および 38.2% (B 工区) となっている。

3. 止水性能の検討

シール材を用いた止水設計法は、参考文献¹⁾によると右に示す 2 つの方法が提案されている。このうち、**方法①**のガスケット係数の値は 0.5～1.0 に設定されるとあるが、試験によりガスケット係数を算定したところ、一部工区でこれを外れるケースがあった。このことから、既往の研究²⁾に基づき、**方法②**を参考にすることとした。なお、設計目開き量、目違い量はセグメントの組立て精度向上を踏まえ、近年の事例を参考に施工時 2mm、供用時 3mm に設定した。止水性能の確認として、以下の試験を行った。

(1) 耐水圧試験

シール材に水圧を作用できる装置に設計目開き量、目違い量を再現したうえで、設計水圧に対して耐水圧性能を有していることを確認した。

試験の結果、全工区で合格基準を満足することを確認した。

(2) 補正係数試験

方法②で初期接面応力に乘じる γ_s , ρ , μ については、個々に設定するのではなく、シール材補正係数： γ_T という係数で一括りにして整理した (**式-1**, **2**)。試験はシール材に水圧を作用できる装置で設計目開き量を再現し、水圧を 0.1MPa ずつ上げながら漏水を確認するまで加圧した。このときの漏水直前の作用水圧を最大耐水圧とした。

試験の結果を図-3 に示す。シール材補正係数は施工時で 1.7～3.1、供用時で 2.8～4.5 となった。今後この結果を

キーワード シールド, セグメント, シール材, 止水, 高水圧

連絡先 〒450-6101 愛知県名古屋市中村区名駅一丁目 1 番 4 号 JR セントラルビル 中央新幹線建設部 TEL 052-856-2805

表-1 各工区におけるシール材の構造概要

A 工区	B 工区	C 工区
D 工区	E 工区	F 工区
:水膨張性ゴム :非膨張性ゴム :低膨張性ゴム		

$P_s > \gamma \times P_w$...方法①
ここで、
 P_s : シール材の接面応力 (MPa)
 γ : ガスケット係数
 P_w : 設計水圧 (MPa)

$P_w \leq \sigma = \sigma_0 \times \gamma_s \times \rho \times \mu$...方法②
ここで、
 P_w : 設計水圧 (MPa)
 Σ : シール材の接面応力 (MPa)
 σ_0 : シール材の初期接面応力 (MPa)
 γ_s : シール材の寸法、硬さのバラツキを考慮した材料係数
 ρ : 応力緩和と水膨張力を考慮した接面応力の有効率
 μ : 自封作用による接面応力の増加率

$P_w \leq \sigma = \sigma_0 \times \gamma_T \times F$...式-1
 $\gamma_T = P_w' / \sigma_0$...式-2
ここで、
 P_w : 設計水圧 (MPa)
 σ : シール材の接面応力 (MPa)
 σ_0 : シール材の初期接面応力 (MPa)
 γ_T : シール材補正係数
 P_w' : 最大耐水圧 (MPa)
 F : 材料のバラつきや補正係数試験の実験方法等を考慮した安全率

活用すれば、初期接面応力を測定することで止水試験を実施せずにその止水性能を推定することができ、設計を合理化できる可能性がある。

4. 耐久性の検討

シールドトンネルの設計耐用年数を100年とし、素材自体の耐久性および止水性能の耐久性について、以下の試験により確認した。このほか、吸水性材料の溶出懸念については、体積変化率および質量変化率を規定することで耐久性への信頼性を高めるものとした。

(1) 熱劣化試験

アレニウスの理論に基づく熱劣化試験により素材自体の寿命の推定することで、耐久性を検討した。推定寿命を伸び減少率50%とし、試験から求めた近似曲線に実使用の温度帯を代入した結果が100年以上であれば合格とした。

試験の結果、全工区で合格基準を満足した。

(2) 応力緩和試験

接面応力が長期にわたり安定して確保できるかどうかの確認試験を行うことで、止水性能の耐久性を検討した。接面応力の測定結果から安全側に求めた近似曲線を外挿し、100年後の接面応力が供用時の設計水圧以上であれば合格とした。

試験の結果を図-4に示す。1年以上にわたる測定により接面応力の経時変化を確認し、全ての工区において合格基準を満足した。また、A工区、C工区およびF工区は、170日～230日に接面応力のピークが確認された。これらは複合構造であるため、水膨張の方向を厚さ方向に拘束することで接面応力にピークが現れるが、やがて全体の応力バランスが均一化されることで応力緩和が見られたものと推察される。一方で、D工区およびE工区は単一構造であること、B工区は複合構造ではあるが、圧縮率が38.2%（目開き3mmで10.9%）と比較的小さいことから、ピークが発現しなかったものと推察される。なお、C工区のピーク発現が比較的遅い理由としては、シール材が厚く、水の浸透に時間を要したものと推察される。

5. まとめ

試験結果より、中央新幹線の大深度シールドトンネルに用いるシール材は、十分な止水性能および耐久性を有することが確認された。一方で、耐久性については本試験結果のみから推定した100年後の接面応力による評価だけでなく、材料の劣化傾向を安全側に仮定し、耐用年数を推定する方法について継続して検討を行っていく必要があると思

われる。具体的には、材料メーカーが保有する相当な長期間の応力緩和試験データの活用や、素材自体の耐久性の評価基準である伸び減少率を応力緩和試験の結果を踏まえて設定する方法などである。そして、今後、各工区のシールドマシンが順次発進するが、引き続きデータの蓄積を進め、新たな知見が得られた場合には、随時見直しを図ってゆくことが重要と考える。

参考文献

1) 土木学会：セグメントの設計【改訂版】，トンネル・ライブラリー第23号，2010年。2) 大塚，塩治，小林，小泉：シールド工事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，土木学会論文集，VI-47，2000年。

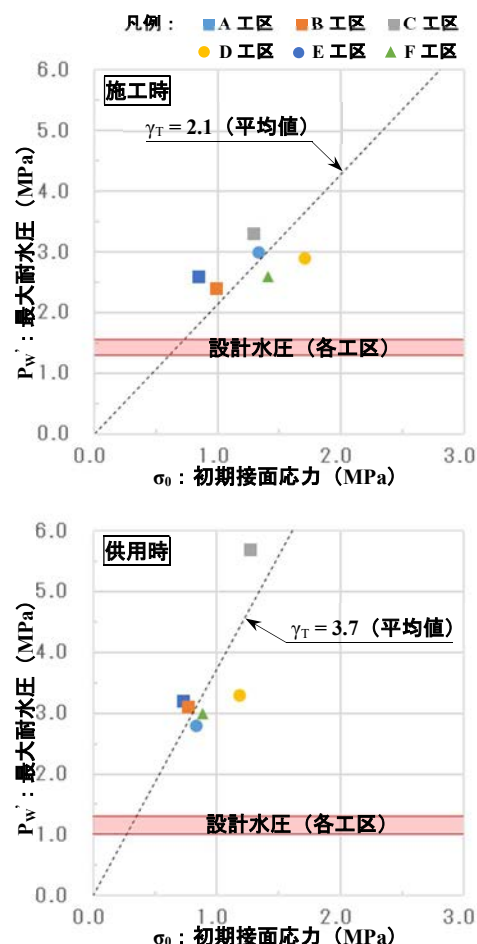


図-3 補正係数試験結果

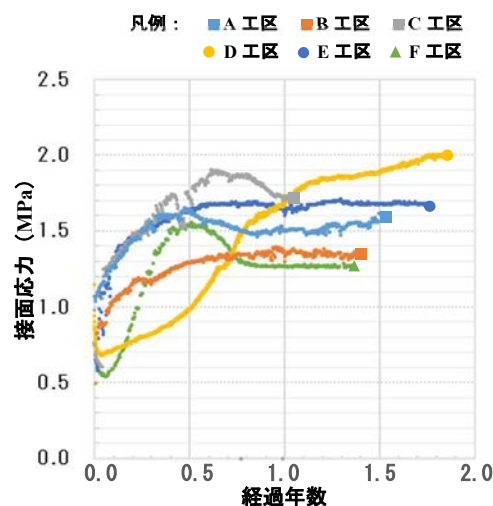


図-4 応力緩和試験結果