

新しいセグメント用シール材の基礎的研究

BASIC RESEARCH ON NEW MATERIALS FOR SEGMENT SEALS

藤木育雄¹⁾・木下賢二²⁾・秋山信次³⁾・小松幸雄⁴⁾

Ikuro FUJIKI, Kenji KINOSITA, Shinji AKIYAMA, and Yukio KOMATU

In recent years, many urban tunnels have been built at greater depths than tunnels built in the past.

This has resulted in a greater need for tunnels to have improved water cut-off capability.

Nowadays water-expand seal materials are mainly used for segments of shield tunnels.

Nevertheless, we have not yet achieved long-term stability and endurance, in terms of water cut-off effect, as a result of using these seals.

We developed new segment seal materials by combining bentonite with asphalt or petrolatum. These have been tested to investigate their suitability as segment seal material to see if they are equal to or higher in performance than the usual segment seals.

Key Words : Bentonite, segment-seal, water cut-off, long-term stability, endurance

1. はじめに

我が国におけるセグメントシール材は黎明期の未加硫ブチルゴム系シール材から複合系シール材、水膨張系シール材へと推移してきた。なかでも水膨張系シール材は様々な改良がなされ、最近の高い止水効果を得ている。しかし、その止水メカニズムは完全に解明されているわけではなく、長期的な材料劣化による止水効果の低下、長期応力緩和や膨張圧力低下等の課題も残されている。従来のシール材の材料はゴムや樹脂等の有機高分子であるため、耐久性の改善には限界があると考えられる。また、長期及び超長期の耐久性、止水性の実績がないのが現状である。

著者らは天然の鉱産物であるベントナイトの長期安定性、止水性及び経済性に着目し、新たにベントナイト系セグメントシール材の開発を行った。ベントナイトは、長期的に変質・劣化しにくい土質材料であり、他の土質材料と比べ高い膨潤性とそれにとまう自己シール性および難透水性を有している。また、既往の研究からも止水性と長期安定性に優れた材料であることが実証されている¹⁾。その止水理論はベントナイトの難透水性および自己シール性や投錨効果と呼ばれる間隙を充填する性質によると考えられている。

これらのことから、ベントナイトは原子力発電所から排出される放射性廃棄物処分の埋め戻し材として有力な材料候補となっている。

従来も定形品のベントナイト系シール材はあったが、セグメントシール材への利用を考えた場合、目開きに対する追従性や施工性に問題があった。そこで今回開発したベントナイト系止水材はベントナイトとアスファルトまたは石油ワックス系材料を複合することにより前記問題の解決を図った。

1) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部 設計部 設計第二課

2) 正会員 同 上

3) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部 技術開発担当

4) 正会員 同 上

2. ベントナイト系シール材

(1) ベントナイト系シール材の概要

今回開発したシール材は、Na型ベントナイトと改質・アスファルト又はベトロラタムを複合したものである。Na型ベントナイトとは、交換性陽イオンが主にNa⁺イオンのベントナイトであり、止水性、膨潤性に富むベントナイトである。本研究で使用したベントナイトは、山形県月布産のベントナイトである。表－1に使用したベントナイトの基本的性質を示す。

ベントナイト単独では、定形品として使用することは困難である。また、膨潤したベントナイトは粘性土特有の可塑性を有し、強度が不足するため間隙が大きい場合高水圧に耐えきれず、押し出されてしまう。さらに、ある程度以上の流速を持つ水と接すると膨潤部が流失するといった問題があり、セグメントシール材として用いるには、地下水圧などに耐える強度と耐流失性能が要求される。したがって、耐久性や膨潤性、自己シール性といったベントナイトの特徴を維持しつつ、施工時や供用時に要求される強度を有し、流失を防止できる材料の研究開発が重要な課題となる。

そこで、柔軟性と粘着性及び水密性から、アスファルト系材料および石油ワックス系材料に着目し、ベントナイトに改質アスファルトを添加したベントナイトアスファルト複合材料（以下ABと記す）およびベントナイトにベトロラタムを添加したベントナイトベトロラタム複合材料（以下PBと記す）をセグメントシール材として、その適用性を室内試験により評価することとした。

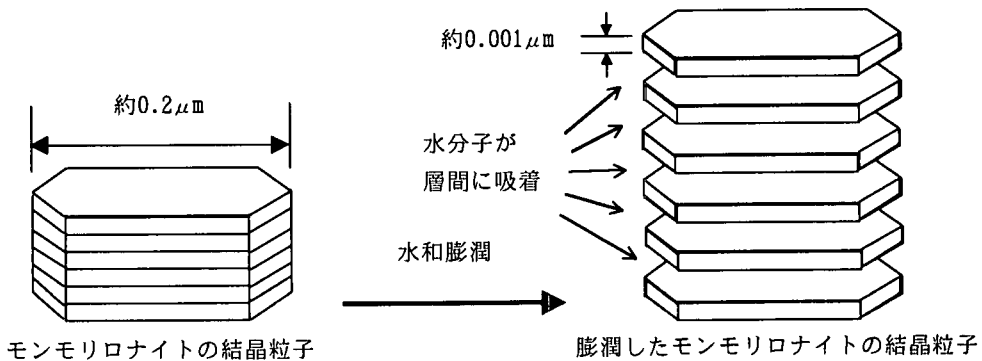
これらの材料に着目した理由は以下による。

アスファルトは高い水密性、柔軟性、耐衝撃性、粘着性等の特徴を有しているため、古くから道路の舗装、水理構造物や地下構造物の防水に利用されている。耐候性や耐油性に問題があると報告されているが、遺跡などの発掘調査から一般の地下環境下においては優れた耐久性を有していると考えられる。

石油系ワックスは、化学的に不活性であり、土中の環境因子やバクテリア等による分解・劣化に耐える物質である。なかでもベトロラタムは常温で半固体であり、アスファルトと同じく水密性や柔軟性、粘着性を有し、薄く柔軟な布に含浸させたテープが防食テープや絶縁テープあるいは防水テープとして広く利用されている。

タイプ	Na型ベントナイト
土粒子の密度	27N/m ³
液性限界	300%
膨潤力	19ml/0.02N
pH	10.1
陽イオン交換容量	60.7meq/1N
44μm以下含有率	90.4%
モンモリロナイト含有率	50%
脱水温度	109℃
脱OH温度	687℃

表－1 使用したベントナイトの基本的性質



図－1 モンモリロナイトの概念図

(2) ベントナイト系シーリング材の止水原理

従来の水膨張系シーリング材の止水理論は、弾性反発力及び膨張圧による接面応力が作用水圧を上回り密封するというバッキン理論であるとされている²⁾。しかし、超長期の材質の劣化については実績が無く、要求性能をどの程度の期間維持できるかはさらに検討する必要がある。これに対し、AB及びPBは地中環境において地質学的な長期間にわたって安定であった天然材料で構成されているため、時間の経過に伴う材質の劣化は非常に小さいと考えられる。また、著者らはAB及びPBの止水原理を次のように考察している。

AB及びPBは、ベントナイト粒子とそのベントナイト粒子のまわりを包み込むような形態で存在する石油系材料とから構成されている。アスファルト及びペトロラタムは材料そのものの透水係数が十分に小さいため、水みちとなる間隙はセグメントとの境界面に存在する。施工時に十分に圧縮されていれば、石油系材料の粘着力だけである程度の止水効果が発揮されるが、圧縮が不十分な場合やセグメントの変動により目開きが生じた場合には、境界面に水が侵入してくる。侵入水がベントナイト粒子と接触すると、ベントナイトは水分を吸収し膨潤を始めるとともにまわりの石油系材料を押し広げ、間隙を次第に充填していく。この間隙に充填していく性質をベントナイト

の自己シーリング性と呼び、その指標として膨潤圧が測定されている³⁾。図-2に藤原ら(1991)が測定した膨潤圧の測定例を示す。

図-1に示した様に、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトは、粒子径が100~1,000nmと非常に小さいため、微細な間隙にも充填していき、投錨効果を発揮する。また、モンモリロナイトの結晶粒子は形状異方性の大きいカード状の形状をしているため⁴⁾、目詰効果も発揮され、作用水圧が高い場合においても水の移動を拘束する。AB・PBの止水性発揮の原理は、このようなベントナイトの膨潤現象に依存していると考えられる。

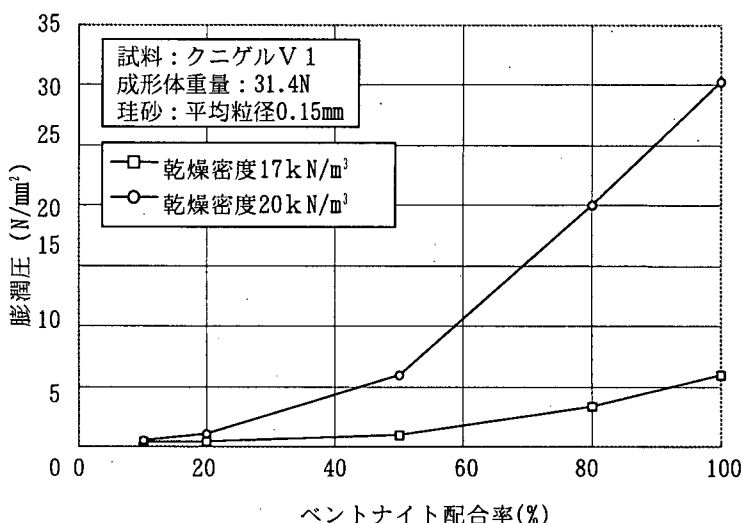


図-2 ベントナイトの配合率と膨潤圧の関係

3. 試験概要

ABおよびPBのセグメント用シーリング材としての性能を検討する目的で、透水性、膨潤性、及び止水性に関する基本物性を室内試験により確認した。以下にその概要について述べる。

(1) 要求品質

セグメントシーリング材は、セグメント目開き時における追従性、膨潤性、自己シーリング性、さらに耐久性、長期安定性等が求められる。

著者らは、深度50m以浅のトンネルに使用するセグメント用シーリング材を想定し、耐水圧の目標を500kN/m²以上とした。

膨潤性は、セグメントの目開きに追従し、間隙を充填する必要があることから、体積比で2倍以上を目標に設定した。また、透水係数は工学的に遮水材と見なされる 10^{-1} cm/s以下とした。

(2) 試験供試体

供試体はセグメントシール材として一般的な矩形断面を持つ定形品とした。供試体の形状を図-3に示す。

A BおよびP Bは、改質アスファルトおよびベトロラムの溶融温度以上に加熱しながら充分混合し、所定の形状に成形した。なお、P Bは溶融状態で不織布に含浸させ、一体化した。

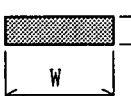
断面形状	No.	寸法H×W(mm)
	1, 3	3.8×20
	2, 4	4.0×20
	5, 6	3.6×20

図-3 供試体断面形状

(3) 試験項目と方法

試験項目は、透水性試験（JIS A 1218に準拠）、膨潤性試験（JIS K 6258に準拠）、止水性試験および長期止水性試験である。

①透水性試験は、図-4に示す透水試験装置を用いて行った。膨潤状態での透水係数を求めるため、試験供試体上部に供試体厚さと等しい間隙を保持し、14日間膨潤させた後通水を開始した。

②膨潤性試験は、試験用液体として水道水（導電率：200μS/cm）を用い、全面浸漬試験により膨潤倍率を測定した。

③止水性試験は、図-5に示すシール溝を設けた2枚の鋼性円盤（図-6に示す）を止水試験装置とし、そのシール溝に供試体を設置し、ボルトの締め付けにより供試体を圧縮した後、加圧ポンプにより最大1,000kN/m²まで水压を漸次増加させて、漏水の有無を目視により確認した。漏水時の作用水压を圧力計により計測し、耐水压性と見なした。

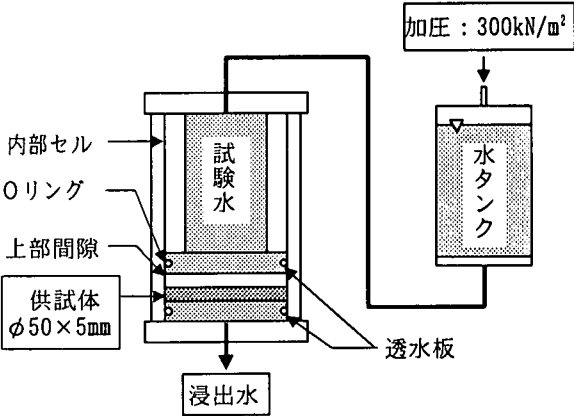


図-4 透水試験装置概要

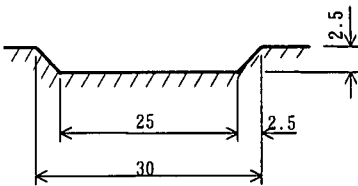


図-5 シール溝断面形状詳細

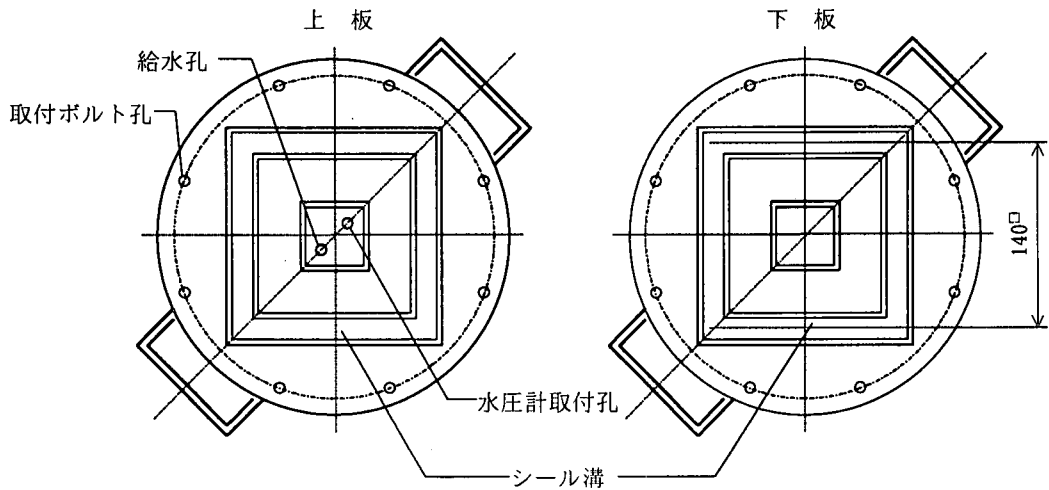


図-6 止水試験装置

④長期止水試験の方法として、小泉、小林（1992）は供試体に加熱促進処理を行い、アレニウスの式を用いて、想定されるトンネル環境温度における寿命時間を外挿で推定する方法を報告している⁵⁾。今回著者らは、同様に加熱促進処理を行い、一定時間ごとの耐水圧性を測定した。耐水圧性は、止水性試験と同様に室温条件下で加圧を行い、漏水時の作用水圧を耐水圧性と見なした。なお、加熱促進処理の設定温度は80℃とし、試験装置は止水試験装置と同様のものを用いた。また、比較のため水膨張系シール材も同様に加熱促進処理を行い、耐水圧性を測定した。

4. 試験結果及び考察

(1) 透水性試験

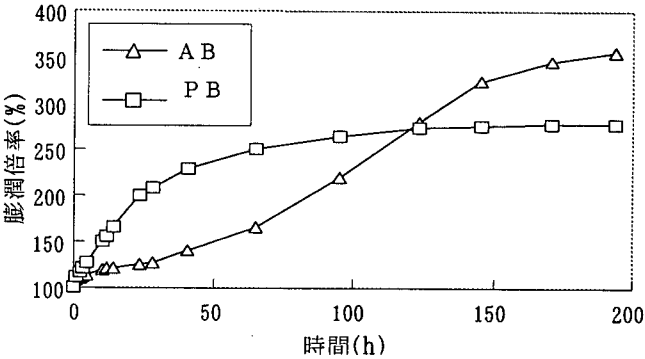
透水性試験結果を表－3に示す。A B、P Bともに透水係数は 10^{-10} cm/sオーダーであり、200%に膨潤した状態でも十分に止水性能を満足することが確認できた。

供試体	測定時間(s)	透水量(cm ³)	透水係数(cm/s)
A B	864,000	12.0	1.18×10^{-10}
P B	864,000	12.9	1.27×10^{-10}

表－3 透水性試験結果

(2) 膨潤性試験

膨潤性試験結果を図－7に示す。A BとP Bに膨潤挙動の差があるが、これは複合材料の強度差によるものと考えられる。また、最大膨潤倍率の差は、複合材料中に占めるベントナイト配合率の違いによるものと判断される。膨潤倍率が200%を超えるのは、A Bでは80時間後、P Bでは24時間後である。膨潤速度と最大膨潤倍率は、セグメントの施工状況を考慮し、今後検討していく予定である。



図－7 膨潤性試験結果

(3) 止水性試験

短期状態の止水性試験の結果を表－4に示す。設置直後の耐水圧性は圧縮率に大きく影響を受け、20%以上の圧縮歪量をシール材が受けていれば、1,000kN/m²以上の作用水圧に耐えられることが分かった。これは、ベントナイトが膨潤する前の石油系材料の粘着効果が耐水圧性に作用しているものと考えられる。また、いずれの条件においても5日後の結果は500kN/m²を上回っている。これはA B・P Bの膨潤性による耐水圧性の向上と考えられ、A B・P Bの止水性は十分目標を満足するものであった。

種類	供試体No. 寸 法 (mm)	目開き (mm)	圧縮率 (%)	耐水圧性 直後－5日後 ($\times 100\text{kN/m}^2$)
A B	No.1 3.8 $\times$ 20 2枚	0	34.2	漏水なし
		1	21.1	漏水なし
		2	7.9	2.5－8.8
	No.2 4 $\times$ 20 2枚	1	25.0	漏水なし
		2	12.5	3.9－漏水なし
		3	0	0.5－5.9
P B	No.3 3.8 $\times$ 20 2枚	0	34.2	漏水なし
		1	21.1	漏水なし
		2	7.9	1.5－7.4
	No.4 4 $\times$ 20 2枚	1	25.0	漏水なし
		2	12.5	2.9－漏水なし
		3	0	0－5.4

表－4 止水性試験結果

(4) 長期止水試験

加熱促進処理における長期止水試験の結果を表－5に示す。A Bは試験開始7日以降膨潤による止水効果が発揮され、試験終了まで漏水は発生しなかった。P Bも7日以降耐水圧性にはほとんど変化がなく、安定していた。比較の水膨張系シール材は試験開始28日以降耐水圧性の低下が確認された。

今回は、加熱促進処理の設定温度が80℃のみのため、単純にトンネル環境温度における経過時間に置き換えることはできず、シール材劣化の進展速度の定量的な予測はできなかったが、長期安定性の一部を確認することはできた。現在、目開きを大きく設定し、同様の長期止水試験を計測中である。また、今後は設定温度の条件を変えて試験を行い、トンネル内推定温度での劣化の進展状況を定量的に推定を行う予定である。

供試体 No.	寸法 (mm)	目開き (mm)	耐水圧性(×100kN/m ²)								
			直後	7日後	14日後	21日後	28日後	35日後	42日後	49日後	56日後
A B No.5	3.6×20 2枚	1	5.4	漏水 なし	漏水 なし	漏水 なし	漏水 なし	漏水 なし	漏水 なし	漏水 なし	漏水 なし
P B No.6	3.6×20 2枚	1	4.2	7.4	7.4	7.3	6.9	7.1	7.1	7.2	7.1
水膨張系 シール材	2.5×20	1	8.2	漏水	漏水	漏水	9.6	7.3	5.4	5.2	4.9
	5.0×20			なし	なし	なし					

表－5 長期止水試験結果

5. まとめ

セグメント用シール材の止水効果に関わる長期安定性の向上を目的として、ベントナイトと石油系材料を複合することにより、新しいセグメント用シール材を提案した。その透水性、膨潤性、止水性及び長期止水性に関する基本物性について室内試験を行った。その結果から、次の所見が得られた。

①透水係数は2倍に膨潤した状況において 10^{-10} cm/sオーダーであり、止水材として十分である。

②膨潤倍率は最大で2倍以上であり、目開きに対し追従性を有している。

③施工時の圧縮を20%以上受けていれば、初期の止水性を確保できる。

④止水効果は従来の水膨張系シール材と同等以上であり、その長期安定性が期待できる。

今回報告したベントナイト系シール材は、これまでとは違った止水原理により、長期的に安定した止水性の維持が期待できる。今後は、さらに長期安定性の確認を検討すると共に、信頼性の高いシール材の改良を行っていく所存である。

謝辞：最後に、試験実施に当たり協力を頂いたクニミネ工業(株)の関係各位に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 石井卓、中島均、三谷泰浩：ベントナイト混合土の透水係数の長期変化に関する研究の現状、粘土科学、第36巻、第4号、pp.210-223、1997.
- 2) 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、Vol.25、No.6、1994.9.
- 3) 藤原愛、伊藤洋、伊藤雅和、大谷洋之、鈴木啓三：ベントナイトの膨潤圧測定、土質工学と粘土科学の接点をさぐる共創シンポジウム、1991.
- 4) クニミネ工業(株)：ベントナイト関連資料、1994.7.
- 5) 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、Vol.23、No.5、1992.6.