

論文 可塑性を有するトンネル覆工背面空洞注入材の材料特性に関する研究

坂本 淳*¹・領家 邦泰*²・新藤 竹文*³・石井 宏明*⁴

要旨：本研究では、所定の空間のみ限定注入することが可能で、水に対する分離抵抗性も十分な可塑性注入材として、特殊な材料を使用せずセメント系固化材やベントナイト系可塑性材など汎用的な材料から構成される可塑性注入材を開発した。各種試験結果より、本注入材中の可塑性材混合比率を適切に設定することにより、所要の可塑性を付与し、静水に対する十分な材料分離抵抗性を得られることが明らかとなった。さらに、硬化後の収縮が少なく、 1.5N/mm^2 以上の圧縮強度を確保することが可能な、可塑性材混合比率や水セメント比等の最適な配合条件を選定した。

キーワード：トンネル覆工背面空洞，可塑性，注入材

1. はじめに

矢板工法により建設されたトンネルでは、その覆工背面に空洞が存在することが多いとされている¹⁾。この空洞は建設当時の施工法や長期間にわたる地下水による背面地山の浸食等により、トンネル天端部を中心として存在するものと考えられており²⁾、このような空洞が存在するとトンネル構造の安定上問題となることから、その補修工法として、各種注入材料により覆工背面の空洞を注入し、覆工と地山を一体化させる裏込め注入工法が一般に採用されている。

同工法における注入材としては、従来エアモルタルが多く適用されていたが、地山の亀裂や覆工のひび割れなどへ漏出し易いために材料損失が発生し易いこと、湧水に対する材料分離抵抗性が低いことなどから、近年は所定の空間のみ限定注入することが可能で、水に対する分離抵抗性も十分な可塑性注入材の開発が近年盛んに行われている³⁾。

本論文は、特殊な材料を使用せずセメント系固化材やベントナイト系可塑性材など汎用的な材料から構成される可塑性注入材について、可塑

材の混合比率、水セメント比などの配合条件と注入材の品質の関係について、室内試験により検討した結果をまとめたものである。

2. 室内配合検討試験の概要

2.1 配合および使用材料

本研究で対象とした可塑性注入材の検討配合を表-1に、使用材料の品質を表-2に示す。

本注入材は3種の材料(A~C材)から構成されており、実施時にはこれら3種の材料を別々にトンネル坑外で製造・圧送し、注入箇所直前でスタティックミキサにより管内混合することを想定している(図-1)。したがって、坑内に搬入する機材数量が既往の同種注入材²⁾、³⁾の場合に比べてかなり軽減できること、表-2に示すように特殊な材料を使用せずに汎用的な材料を使用していること等を特徴とする。各材料の構成は、以下のとおりである。

A材は、水、セメント系固化材、および分散剤から成るセメントペースト材である。B材は、水、ベントナイト系可塑性材、けい酸ナトリウム系可塑性材から成る可塑性材である。ベントナイト

*1 大成建設(株) 土木技術研究所 工修 (正会員)

*2 大成建設(株) 土木技術部 工博

*3 大成建設(株) 土木技術研究所 工博 (正会員)

*4 立花マテリアル(株) 横浜出張所

系可塑材，けい酸ナトリウム系可塑材は共に本注入材の可塑性を高める役割がある。C材は，水，起泡剤から成る気泡材であり，本注入材の単位容積質量を調整するために添加されている。

表-1に示すように，本研究ではB材（可塑材）の混合容積比率，水セメント比を検討要因として，フレッシュ時，および硬化後の品質を検討した。対象とした配合の単位容積質量は，1.05～1.45ton/m³程度の範囲である。

配合 No. 1～5 は B 材の混入率を検討要因としたため，A～C 材各々1m³を構成する材料の配合（単位量）は全ての配合で同等となるように設定し，このように設定された A～C 材を，同表に示す各容積比率で混合したものを可塑性注入材配合とした。配合 No. 6～12 は水セメント比を検討要因とし，A～C 材各々を構成する材料の単位量や，各材の混合比率は任意の設定とした。なお，水セメント比の算出にあたっては，表-2に示す W_A，W_B，W_C の合計に溶液系の混和剤 AD1～AD3 を加えた値を本注入材の単位水量 W とし，これを C で除した値とした。

2.2 試験方法

(1) フレッシュ時の品質確認試験

トンネル覆工背面空洞への注入材には，フレッシュ時は限定された空間のみ注入可能な可塑性，水に対する分離抵抗性等の特性が求められる。このため，本研究ではフレッシュ時の品質確認試験として，表-3に示す項目を実施した。各試験項目における目標値は，既往の研究³⁾を参考に定めた。以下に各試験方法の概要を示す。

表-1 検討配合表

配合 No.	主な検討要因	単位容積質量 (t/m ³)	W/C (%)	各材の容積比率 (A材:B材:C材)
1	基準配合	1.116	164	30:50:20
2	B材の容積比率	1.427	89	55:35:10
3		1.199	116	40:40:20
4		1.342	115	45:45:10
5		1.260	155	35:55:10
6		W/C	1.229	105
7	1.168		129	40:40:20
8	1.082		136	50:25:25
9	1.388		152	60:40:0
10	1.093		182	30:50:20
11	1.305		211	45:55:0
12	1.055		214	36:44:20

注1) A材=セメントペースト材，
B材=可塑材，C材=気泡材

注2) 配合No. 1～5は，A材～C材各々1m³を構成する材料の単位量を全ての配合について同等とした。

注3) $W/C = (W_A + W_B + W_C + AD1 + AD2 + AD3) / C \times 100 (\%)$ として算出（記号は表-2を参照）

表-2 使用材料の品質

材名	構成材料名	記号	品質
A材	水	W _A	水道水
	セメント系固化材	C	密度3.16g/cm ³ ， 比表面積3,300cm ² /g
	分散剤	AD1	主成分：変性リグニンと ナリルン酸化合物の 複合体， 密度1.27g/cm ³
B材	水	W _B	水道水
	ポルトランド系可塑材	B	主成分：モンリウム， 密度2.50g/cm ³
	けい酸ナトリウム系可塑剤	AD2	密度1.36g/cm ³
C材	水	W _C	水道水
	起泡剤	AD3	主成分：加水分解蛋白質， 密度1.14g/cm ³

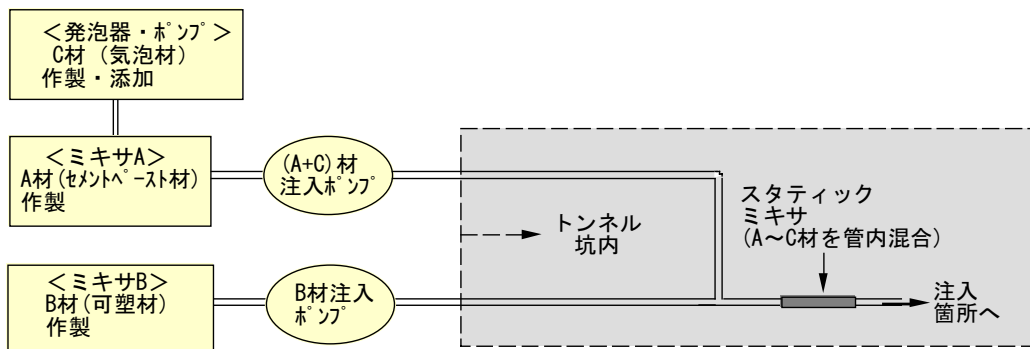


図-1 実施工における本注入材の製造・注入システム概念図

本注入材の可塑性は、以下に示すフロー試験により評価した。JHS A 313（日本道路公団試験方法 エアモルタル及びエアミルクの試験方法）規格のフローコーン（φ80×80mm）に試料を詰め、JIS R 5201 規格のフローテーブル上でコーンを抜き取り、フローテーブルによる 15 回打撃前後のフロー値を測定した。

単位容積質量は、容積約 400cc の計量容器に試料を詰めて質量を測定し、試料の質量を容器の容積で除した値とした。

さらに、本注入材の静水中における材料分離抵抗性を評価するため、以下に示す水中不分離性試験を行った。すなわち、容積約 40 リットルの箱型容器内に水道水約 26 リットルを張り、試料を詰めた前記のフローコーンをそのまま水中で抜き取った。フローコーン除去直後、30 分後、および 60 分後に容器内の水を 100cc 程度採取し、JIS K 0101 に準拠した pH および濁度の測定を行い、水質の変化を確認した。

(2) 硬化後の品質確認試験

硬化後の品質確認試験として、表-3に示すように圧縮強度試験、収縮率試験を実施した。

圧縮強度試験については、供試体の大きさをφ50×100mmとし、気中で供試体を作製し、型枠脱型後は温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室内で封かん養生する方法を、本試験の供試体作製・養生方法の標準とした。圧縮強度の測定は、インストロン型強度試験機により、材齢28日の時点で行った。

これに対し、湧水が存在する空洞内に注入する場合を想定し、供試体を水中で打ち込んだ場合の強度発現性についても検討した。供試体の水中作製については、以下の手順で行った。まず、φ50×100mm型枠内に水を張り、その水中に手押し式ポンプに接続されたビニールホース（延長約1m）を型枠底版部まで挿入した。次に、ホースを介してポンプにより試料を型枠内へ注入し、供試体を作製した。この際には、型枠内の水と試料を混合させないために、ホース先端が常に試料中にあるように注意しながら徐々に

表-3 試験項目および目標値

確認時期	試験項目	目標値
フレッシュ時	フロー試験	15回打撃前φ：80～120mm 15回打撃後φ：170～210mm
	単位容積質量試験	1.1～1.4ton/m ³
	水中不分離性試験	浸積開始から60分後の時点で、浸積水のpHおよび濁度に顕著な変化の無いこと
硬化後	圧縮強度試験	材齢28日：1.5N/mm ² 以上
	収縮率試験	材齢28日：1%以下

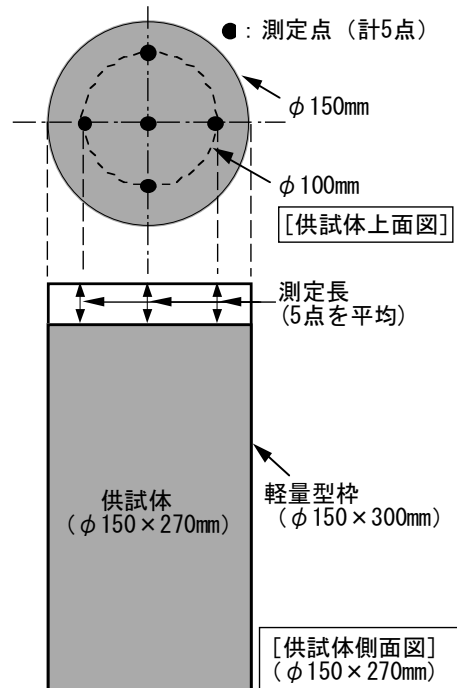


図-2 収縮率試験概要図

ホースを引き上げて、型枠内に試料を詰めた。水中作製した供試体も、脱型後は封かん養生とした。

次に、本注入材の収縮特性を把握するため、収縮率試験を以下に示す手順で行った。φ150×300mmの軽量型枠内に試料を高さ270mm程度まで詰め、図-2に示す試料表面上の測点（計5点）について、型枠上端から試料上面までの長さを打設直後に測定して、これを基長とした。基長測定後は、供試体上面をビニールシートにより密閉して供試体の乾燥を防ぎ、温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室内に静置した。材齢4時

間、1, 7, 28 日の時点で、同様の要領で型枠上端から試料表面までの長さ測定を各測点について行い、基長に対する長さの変化率を収縮率として求めた。

3. 室内配合検討試験結果

3.1 可塑性 (B 材) の混合比率と可塑性注入材の品質について

(1) フレッシュ時の品質確認試験結果

可塑性 (B 材) の混合比率を検討した配合 No. 1～5 について、フロー試験を行った結果を図-3 に示す。同図に示すように、どの配合についても 15 回打撃前後のフロー値は目標値をほぼ満足する結果であった。また、予想どおり、可塑性 (B 材) の混合比率が多いほど 15 回打撃前のフロー値は小さくなる傾向がみられた。15 回打撃後のフロー値は、さらにその傾向が強まり、可塑性混合比率 35% の場合に比べて混合比率 55% の場合は、フロー値が 37mm 小さい結果となった。また、15 回打撃前後のフロー差についても、可塑性混合比率 35% の場合が 100mm であるのに対し、混合比率 55% の場合は 82mm であった。以上の結果より、可塑性の混合比率が多いほど可塑性は高まる傾向にあり、可塑性の混合比率を 45～55% に設定すると 15 回打撃前フローは 100mm 程度、15 回打撃後フローは 180mm 程度の適度な可塑性を得られることが分った。

次に、配合 No. 1, 3, 5 の水中不分離性試験結果を図-4 に示す。同図は、硬化前の試料を浸積した水の水質 (pH, 濁度) を測定した結果について、浸積直後を基準 (100%) とし、浸積開始から 1 時間後の水質変化を比率で表したものである。

pH は可塑性の混合比率に関わらず、浸積開始から 1 時間後でも変化していない。濁度変化率については、可塑性混合比率に依存する傾向がみられた。すなわち、可塑性混合比率が 50% 以上の場合には浸積開始から 1 時間後でもほとんど変化していないが、可塑性混合比率 40% の場合 (配合 No. 3) は、浸積開始時に比べて 1 時間

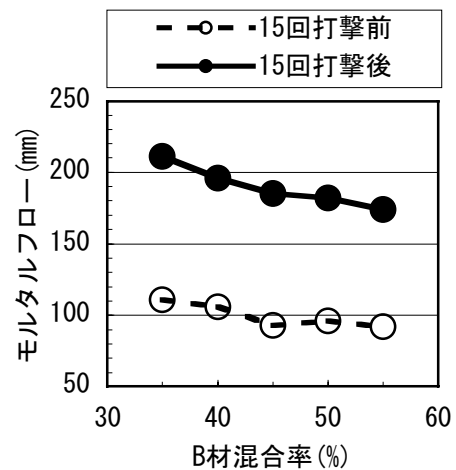


図-3 B 材混合率とフロー値の関係

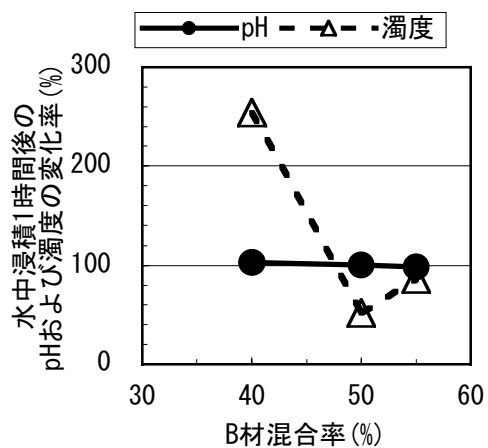


図-4 B 材混合率と水質 (pH および濁度) 変化率の関係

後では 2.5 倍程度の濁度であった。しかし、この場合でも目視では濁りの変化がほとんど認められず、絶対値としても 1 度 (カオリン) 程度の値であった。

したがって、本検討で対象とした配合については、いずれの場合も静水に対する材料分離抵抗性は十分であると思われる。

(2) 硬化後の品質確認試験結果

配合 No. 1～5 について、収縮率試験を行った結果を図-5 に示す。可塑性混合比率 35% の場合 (配合 No. 2) には収縮率が 1.7% であるのに対し、混合比率 40% 以上の場合にはばらつきがあるものの、概ね 1% 前後であった。同図に示すように、材齢 1 日の時点で収縮はほぼ終了し

ており、本注入材の収縮は主に初期硬化時の自己収縮によるものと考えられる。このため、セメントペースト材である A 材の混合比率が多いほど、すなわち可塑性混合比率が少ないほど、収縮率は大きくなる傾向があるものと考えられる。

3.2 水セメント比と可塑性注入材の硬化後の品質について

水セメント比と硬化後の品質の関係について、検討した結果を以下に示す。

図-6 に、配合 No. 1~7, 10 に関する、水セメント比と材齢 28 日の時点の収縮率の関係を示す。水セメント比 100% 以上の場合は収縮率が 0.9~1.3% の範囲にあるのに対し、水セメント比 89% である配合 No. 2 は、他に比べて収縮率が大きい結果であった。本注入材の収縮特性は、前記のように A 材の自己収縮特性に大きく依存するものと考えられることから、水セメント比が小さいほど、あるいは単位セメント量が多いほど、本試験結果のように収縮率は大きくなるものと考えられる。

図-7 は、表-1 に示す全配合に関する水セメント比と材齢 28 日の圧縮強度（気中作製・封かん養生）の関係を示すものである。本研究で対象とした配合の範囲では、1.2~8.5N/mm² の幅広い範囲の圧縮強度が得られており、目標強度（1.5N/mm² 以上）をほぼ満足する結果であった。また、水セメント比と材齢 28 日の圧縮強度には相関性がみられた。

この結果より、本注入材では水セメント比を 90~210% の範囲で適切に設定することにより、1~9N/mm² 程度の範囲で所要の圧縮強度を確保することができるものと考えられる。ただし、水セメント比が小さいほど収縮率は大きくなる傾向にあるため、当然のことながら強度性能以外の諸性能も考慮して水セメント比等の配合条件を適切に設定する必要がある。したがって、本研究で目標とした収縮率 1% 程度、圧縮強度 1.5N/mm² 以上を確保するには、水セメント比は 130~170% 程度、可塑性（B 材）の混合比率を

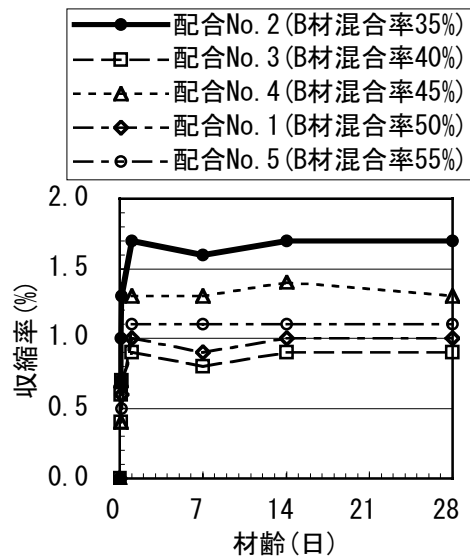


図-5 B 材混合比率と収縮率経時変化の関係

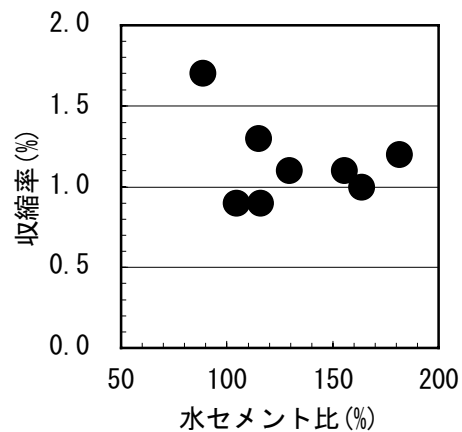


図-6 水セメント比と収縮率の関係

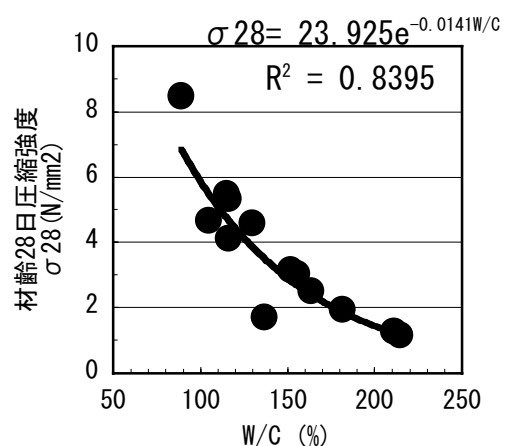


図-7 水セメント比と圧縮強度の関係

40～55%程度の範囲とすれば良いものと考えられる。

図-8は、水セメント比の異なる配合 No. 1, 3, 5, 10 について、供試体を 2.2 に示す気中、水中の二方法により作製し、封かん養生した場合の材齢 28 日圧縮強度を比較したものである。同図に示すように、配合 No. 3 を除き、水中打設による強度低下はほとんどみられていない。配合 No. 3 は、他の配合に比べて可塑性 (B 材) の混合比率が小さく、図-4 に示すように水に対する分離抵抗性がやや低いために、水中打設による強度低下が生じたものと考えられる。したがって、本注入材を湧水のある空洞へ注入する際には、可塑性混合比率を高くするなど適切な配合設定を行い、今回採用した供試体の水中作製方法のように、片押しで圧入する等、水と注入材が極力混合しないような注入方法を採ることにより、強度低下をほとんど生じることなく水中注入が可能なものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、セメント系固化材やベントナイト系可塑性材料など汎用的な材料から構成される可塑性注入材について、可塑性の混合比率、水セメント比などの配合条件と注入材の品質の関係について、室内試験により検討した。本研究の範囲で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 本注入材では可塑性 (B 材) の混合比率を 45～55% に設定すると 15 回打撃前フローは 100mm 程度、15 回打撃後フローは 180mm 程度の適度な可塑性を得られることが分った。
- (2) 可塑性 (B 材) の混合比率を 35～55% の範囲で設定した場合には、静水に対して安定した材料分離抵抗性が得られる。
- (3) 本研究で開発した注入材は、水セメント比を 90～210% の範囲で適切に設定することにより、1～9N/mm² 程度の範囲で所要の圧縮強度を確保することができる。
- (4) 本研究で開発した注入材の収縮特性は、セメントペースト材 (A 材) の自己収縮性に依

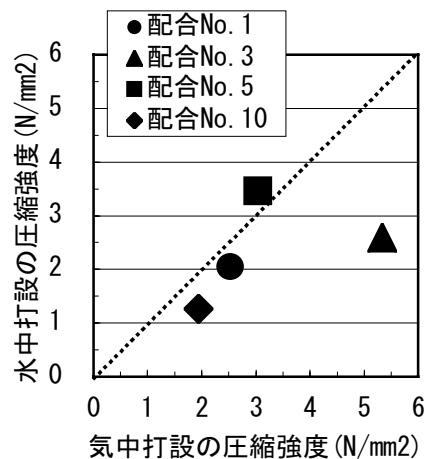


図-8 気中打設と水中打設の圧縮強度比較

存するため、セメントペースト材の混合比率が多いほど、あるいは水セメント比が大きいほど、収縮率は大きくなる。このため、収縮率 1%程度、圧縮強度 1.5N/mm² 以上を確保するには、水セメント比を 130～170%程度、可塑性 (B 材) 混入率を 40～55%程度の範囲とすれば良い。

以上より、本研究の範囲で表-3 に示す目標品質を満たす配合としては、配合 No. 1 が最も適切なものと考えられる。今後は本注入材のポンプ圧送性や、大規模空間への注入性状などを実施工レベルの実験を行って検証し、本注入材の実用化を図る予定である。

参考文献

- 1) 城間博道：JH におけるトンネル覆工の補修—補修基準と事例—，土木施工臨時増刊第 3 号，Vol. 41，pp. 40-43，2000
- 2) 室田和夫，河野重行：ポリマーセメント系材料による既設トンネル空洞充填工法，土木学会誌，Vol. 87，pp. 56-58，2002. 4
- 3) 大嶋健二，伊藤哲男，城間博道：トンネル覆工背面に用いる空洞注入材の材料特性について，日本道路会議論文集，Vol. 24，pp. 190-191，2001