

トンネル覆工背面新充填材料の開発

橋 大介 河野 重行 佐藤 孝士 澤田 正雄 宮瀬 文裕
(技術研究所) (土木本部) (技術研究所) (土木本部) (土木東京支店)

Development of a New Backfilling Grouting Material Applied for Rehabilitation of Aged Tunnels

by Daisuke Tachibana, Shigeyuki Kohno, Takashi Sato, Masao Sawada and Fumihiro Miyase

Abstract

There are several voids in the ground behind lining concrete of aged tunnels. This induces the structural instability. It is necessary that these voids are filled with a backfilling grouting material to improve the stability of the tunnels. Conventional grouting materials have some problems, e.g. its high cost, and the difficulty in injection into targeted portions. We have developed a new grouting material to solve these problems. This grouting material consists of cement, bentonite, high water absorbent polymer, set accelerating agent and water. This paper reports on the design concept of this material, fundamental properties, the results of field experiments, and the applications to actual aged tunnels.

概要

トンネル覆工背面には、施工時および施工後に発生した空洞が存在することがあり、トンネルの構造安定上、問題になることがある。このような空洞には裏込め充填材料を充填してトンネルの安定化を図るが、従来の充填材料では所定の空洞への充填が困難であったり、材料コストが高いといった問題点があった。今回開発した新充填材料は、セメント、ベントナイト、高吸水性樹脂などを使用し、単位ベントナイト量および単位水量を顕著に多くしたのが使用材料および配合上の特徴である。本論文では、新充填材料の設計・施工のコンセプト、基本性能、施工実験結果ならびに実際の鉄道トンネル補修工事に適用した結果を述べ、新充填材料の使用により良好な品質が得られることを示した。

§ 1. はじめに

既設の鉄道、道路、導水路トンネルでは、施工時および施工後に発生した空洞が覆工背面に存在することがある。このようなケースでは、偏土圧などの影響により、覆工コンクリートにひび割れを誘発したり、あるいはコンクリートの剥落を招いたり、トンネルの構造安定上、問題になることがある。このような問題を未然に防止するために、この空洞に裏込め充填材料を充填して、トンネルの安定化を図る必要がある。従来の裏込め充填材料としてはエアモルタルやウレタン樹脂などがあるが、所定の空洞への充填が困難であったり、材料コストが高すぎるなどの欠点がある。これらの欠点を解決するために、新充填材料の開発が必要と考えられた。本開発では、このような状況に鑑み、経済性と高品質を兼ね備えた裏込め充填材料を新たに製造することを実験・検討した。

本論文では、新充填材料の設計・施工のコンセプト

ト、使用材料および配合、基本性能を述べるとともに、良好な品質を確保できることが明らかになった施工実験結果と実際のトンネルに適用した結果について示す。

§ 2. 新裏込め充填材料の設計・施工のコンセプト

2.1 裏込め充填材料の要求性能

既設トンネル覆工背面には、図-1や写真-1に示すような空洞が存在する場合がある。トンネル覆工背面などに適用する裏込め充填材料が具備すべき要求性能としては、①側方への流動やクラックなどへの逸脱が少なく空洞部天端まで注入（以下、限定注入という）が容易であること、②湧水などの水に対する材料分離抵抗性が高いこと、③充填材として十分な強度（ $f_c = 1 \sim 2 \text{ N/mm}^2$ 程度以上）を有すること、④既設覆工への負荷低減のため、軽量（密度1.3～1.6 g/

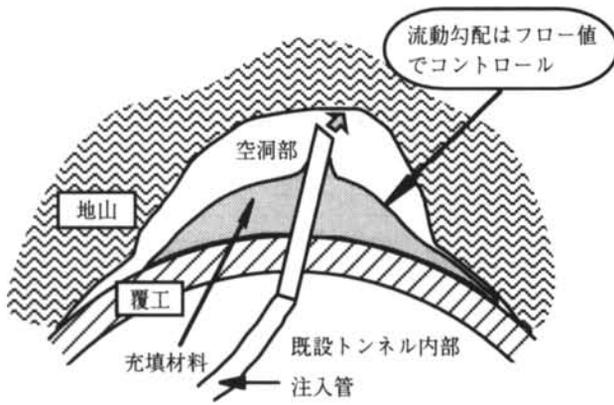


図-1 トンネル覆工背面空洞部裏込め充填



写真-1 既設導水路トンネルの空洞部

cm³程度以下)であること、⑤ 施工・品質管理が容易であること、⑥ 設備規模が小さくてすむこと、⑦ 材料コストが安価で経済的であることなどである。従来から使用されているエアモルタルでは①、②の事項や圧送充填時のエアの消失などが問題となり、またウレタン樹脂では⑦の事項や覆工にかかる圧力の管理の難しさなどが問題となり、いずれの材料においても必ずしも十分な性能を有しているとは言えない。今回開発する新充填材料では、①～⑦の事項をバランスよく満足することが重要になると考えられ、この材料設計コンセプトにしたがって開発を進めた。

2.2 新裏込め充填材料の使用材料と配合の考え方

本裏込め充填材料の使用材料は、各種室内配合実験結果から、セメント、ベントナイト、高吸水性樹脂、急結剤および水とした。セメントの役割は、十分な強度の確保であり、標準的には普通ポルトランドセメントを使用する。高い膨潤性とこれを用いた充填材料のフレッシュ性状に着目して選定したベントナイトの役割は、軽量化、限定注入性や材料分離抵抗性の向上である。ベントナイトは国内産および海外産のものなど

各種あるが、その選定に当たっては、後述するように、単に膨潤度のみで決まるものではなく、充填材のフレッシュおよび硬化性状、さらには経済性なども踏まえて選定される。高吸水性樹脂および急結剤は、ベントナイトの役割を少ない混和量で補助するとともに、施工性、初期物性さらには硬化後の物性の改善のために使用される。なお、充填材は高いアルカリ性を呈するため、高吸水性樹脂は耐アルカリ性の高いものを選定することになる。

配合上の特徴は、モルタルにおける細骨材の代わりにベントナイトを200～350 kg/m³程度と多量に使用することにより、単位水量を750～800 kg/m³程度、水セメント比を200%程度以上と大きくできることである。

2.3 施工上の留意点

本充填材料は微粉末材料のみで構成されており、粘性が高いことから、特に練混ぜ、圧送に用いるミキサやポンプなどの製造・施工機械の仕様に十分な注意を払う必要がある。すなわち、ミキサに関しては、コンクリートやモルタルを練り混ぜる通常のミキサでは短時間で均一に練り混ぜることは困難であり、回転数が大きくかつ対流作用などによって練混ぜが可能なタイプのものが必要になる。さらに、排出口からの排出も困難になるため、ミキサ底部の構造にも配慮が必要になる。また、ポンプに関しても、通常エアモルタルの圧送に使用するスクイーズポンプでの圧送は、圧送距離が長くなると困難になる。圧送距離が長い場合や施工速度を上げたい場合などは、ピストンタイプなどのポンプの選定が必要になる。以上のように、適切な製造・施工機械を選定することなどに配慮が必要になる。

また、本充填材はベントナイト、高吸水性樹脂、急結剤を使用することから、練混ぜ方法、練混ぜ水の水质、施工時の気温、ベントナイトの品質(粒度や鉱物組成)の変動などにより、フレッシュおよび硬化性状に顕著な影響を与えることが考えられる。とりわけ工業製品でないベントナイトに関しては、銘柄が同じものでも、品質変動の幅が大きいと考えられる。このため、充填材の所定の品質を確保するためには、現地での試験練り、ベントナイトの受入れ品質基準などが必要になる。

§ 3. 室内実験

3.1 使用材料および配合

室内実験は、新たに開発する充填材料の基本物性を

材料	種類	成分/物性など
セメント	普通	密度=3.16 g/cm ³ , 比表面積=3250 cm ² /g
ベントナイト	HA	群馬県産, 絶乾密度=2.60 g/cm ³ , 水分=6.0%, 74 μmふるい残渣=20.3%, 膨潤度=3.9 g/g
	AK	群馬県産, 絶乾密度=2.60 g/cm ³ , 水分=6.3%, 63 μmふるい残渣=6.0%, 膨潤度=5.4 g/g
	AS	群馬県産, 絶乾密度=2.60 g/cm ³ , 水分=7.7%, 53 μmふるい残渣=6.9%, 膨潤度=6.6 g/g
	CH5	福岡県産, 絶乾密度=2.61 g/cm ³ , 水分=10.7%, 53 μmふるい残渣=10%以下, 膨潤度=4.5 g/g
	CH8	福岡県産, 絶乾密度=2.60 g/cm ³ , 水分=9.8%, 53 μmふるい残渣=10%以下, 膨潤度=7.5 g/g
混和材料	高吸水性樹脂	変性アクリル系架橋重合体
	急結剤	粉末珪酸ソーダ

注) ベントナイトに関しては、品質管理試験など(図-5および図-9)において表以外のものも一部用いている。

表-1 使用材料

配合No.	単位量 (kg/m ³)				
	水 W	セメント C	ベントナイト B	混和材料 Ad	
				高吸水性樹脂 P	急結剤 A
①	752	180	222	0	0
	834	350	410	6.3	14.0
②	765	300	350	2.8	5.6

注) 配合No.①は室内実験で用いた配合の範囲を示し、配合No.②は施工実験および実施工で用いた示方配合の一例を示したものである。

表-2 配合の範囲と示方配合例

把握することを目的として実施した。使用材料は、表-1に示すとおりである。ベントナイトの品質の相違は充填材のフレッシュおよび硬化物性に顕著に影響を及ぼすと考えられたため、産地または品質の異なる5種類のベントナイト(国内産)を選定して使用した。なお、ベントナイトは、表中に示すように、6%以上の水分を含有した状態で出荷されている製品を使用した。ベントナイト自体は、大気中で水分を吸水することはほとんどなく、かつ密閉されたサイロ貯蔵か袋詰めのため、出荷時からの水分変動はほとんどないと考えられる。

充填材の配合は、要求性能やベントナイトの品質な

どによって大幅に変化する。実験で用いた配合の範囲と代表的な示方配合例を表-2に示す。なおベントナイトの水分は、ベントナイトを使用したこの種の充填材の配合設計方法と同様に、配合設計上はこれを無視し、単位水量の補正などは行っていない。

3.2 実験方法と実験項目

適切な使用材料および配合を選定するために、フレッシュ性状、硬化物性およびベントナイトの受入れ品質基準に関して実験を実施した。

充填材のフレッシュ性状に関しては、フロー試験、目視観察および水中での材料分離抵抗性試験などによって評価した。

充填材の硬化物性は、圧縮強度試験および乾燥収縮試験によって評価した。充填材は覆工背面と地山の間に注入されるため、地下水などによって湿潤状態が保持され、乾燥状態になることはほとんどないと考えられる。しかしながら、単位水量が顕著に多いこの種の充填材は乾燥した場合のひび割れ発生に伴う劣化が大きくなることもあり、乾燥収縮試験によりその特性を把握しておく必要があった。そこで実験1では、単位セメント量の影響と高吸水性樹脂使用の効果把握するために、4種類の配合の供試体を用いて乾燥によるひび割れ発生状況の観察を行った。実験2では、乾燥による長期間の収縮量と質量減少量の測定を行った。供試体寸法は4×4×16cmであり、材齢28日まで標準養生を行い、収縮量はダイヤルゲージ法により測定した。乾燥条件に関しては、実験1では、温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室内暴露とした。また実験2では、換気送風が直接供試体にあたらないように養生し、乾燥条件を緩やかにした温度20℃、相対湿度80%の養生室内暴露とした。

次にベントナイトの受入れ品質基準を定めるために、ベントナイトのファンネル粘度、22 μmふるい通過率およびメチレンブルー吸着量と所定の配合条件下での充填材のフロー値との関係を試験により検討した。ベントナイトのファンネル粘度試験は、ファンネル粘性計を使用して、日本ベントナイト工業会標準試験方法に準拠して行なった¹⁾。また、メチレンブルー吸着量試験は、ピロリン酸法によって行なった²⁾。

なお、練混ぜには、ホバートミキサを使用した。ベントナイトは、あらかじめ膨潤させて使用することも可能であるが、実施工時の施工条件、施工性などを踏まえて、粉体のまま使用した。

3.3 フレッシュ性状

ベントナイトの種類がフロー値に及ぼす影響を図-2に示す。産地の異なるHA、AK、AS産のべ

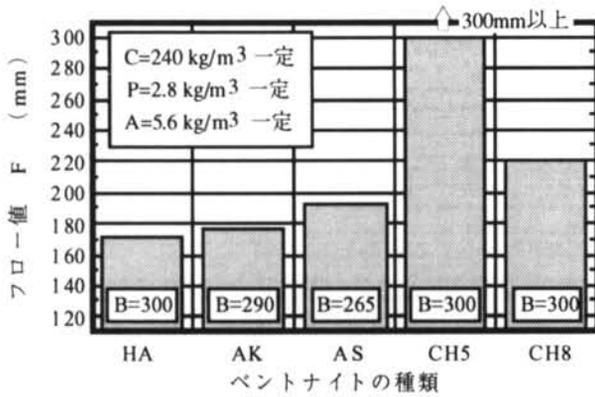


図-2 各種ベントナイトとフロー値の関係

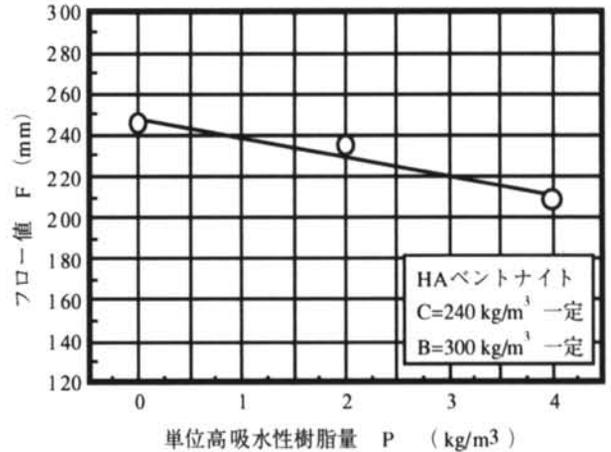


図-4 単位高吸水性樹脂量とフロー値の関係

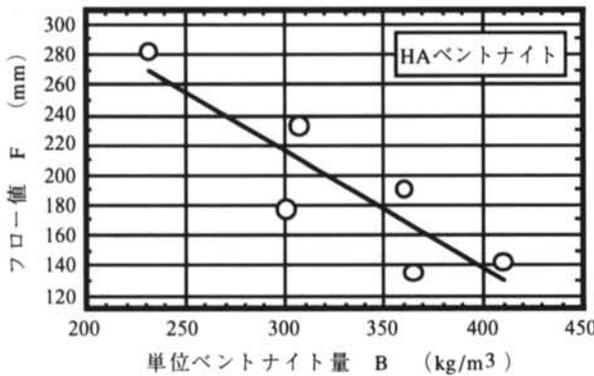


図-3 単位ベントナイト量とフロー値の関係

ントナイトは、表-1に示したように、その膨潤度に大きな差があり、同等のフロー値を得るための単位ベントナイト量 B (kg/m^3) にかなりの差を生ずると考えられたが、大きな相違は認められなかった。一方、CH5およびCH8のベントナイトは、HAより膨潤度は大きいにもかかわらず、フロー値が顕著に大きくなった。すなわち、CH5を用いた配合ではフロー値が300mmを超え、同一配合条件下でHAを用いた場合に比較して、フロー値が130mm程度以上大きくなった。このことは、CH5ベントナイトを用い、所定のフロー値を確保しようとした場合、単位ベントナイト量が増大し、経済的でなくなることを意味する。このような結果になったのは、ベントナイトの鉱物組成の相違やベントナイト層間に含まれるNaイオン量やCaイオン量の相違などによって、アルカリ水溶液中（充填材中）での膨潤度に差が生じたためと考えられる。

HAベントナイトを用い、単位ベントナイト量とフロー値の関係を求めると、図-3のとおりになる。単位ベントナイト量とフロー値との間には相関性が認められ、単位ベントナイト量 10kg/m^3 の増減でフロー値が約8mm変化するようである。すなわち、施工時のフロー値の変動は、単位ベントナイト量の増減で制御

することができる。

図-4は、単位高吸水性樹脂量とフロー値の関係を示したものである。同図から明らかなように、単位量の増減によるフロー値の変化量は約9mm/kgとなり、ベントナイトの10倍程度の値になった。したがって単位水量の増減によるフロー値の変動をベントナイトより少ない使用量で補正することができ、充填材の軽量化や使用材料の減容化などを容易にすることができると考えられる。高吸水性樹脂の高い吸水特性は、浸透圧(解離により高分子鎖中に残されたアニオンの相互反発によってもたらされる高分子鎖網目の拡幅)によるものである。本実験で使用した高吸水性樹脂の吸液倍率(試料1gに対する吸液量g)は、イオン交換水で200g/g程度であるが、カルシウムなどのイオンを含んだ水溶液中では30g/g程度まで低下する。充填材中での高吸水性樹脂の吸液倍率も後者の値前後まで低下していると推測され、充填材中での吸液倍率を上げることができれば、単位量の増減によるフロー値の変化量をさらに大きくすることができると考えられる。

フロー試験状況を写真-2に示す。フローコーン引き抜き直後の試料はほとんどコーンの原形を留めているが、フローテーブル落下後の試料は大きく流動・変形していることがわかる。このフレッシュ性状は、身近な例でいうとマヨネーズのような性状を示すと言える。すなわち、外力が作用しない状況下では原形を保持し、わずかな力で容易に変形する性状を示している。このことから、本充填材は限定注入に適していると言える。

写真-3は、トンネル覆工背面への充填を模擬して、水を張った水槽内に矩形開口部を有するプラスチック容器を設置し、水槽底面からモノポンプを用いて充填材を圧送した状況を示している。充填材は、



写真-2 新充填材料のフレッシュ性状

開口部底部から上方へ向かって先に圧送された充填材を押し退け、開口部形状を保ちながら押し出されたが、水槽内の水はほとんど懸濁していなかった。また、充填材は容器天端部までいきわたっていた。このことから、材料分離抵抗性や充填性が良好であると言える。水中でのこのような性状は、フロー値が200mm程度まで維持されていた。

図-5は、今回採用した試験方法（JIS R 5201で規定されているモルタルのフロー試験方法、以下フローテーブル法という）によって測定したフロー値とエアモルタルなどで従来から用いられている方法（日本道路公団試験方法 JHS313で規定されている方法、以下シリンダー法という）によって測定したフロー値を比較したものである。両者の間には、良好な相関性が認められた。フローテーブル法によるフロー値は、シリンダー法によるフロー値より、概ね20～60mm大きくなった。水中での材料分離抵抗性が小さく、懸濁しやすいエアモルタルでは、設計時のフロー値（シリンダー法）を180mm程度に規定しており、この値はテーブルフロー法では200mm程度に相当すると推測される。

本充填材の設計フロー値は、上述した水中への圧送状況およびエアモルタルの設計フロー値を踏まえ、

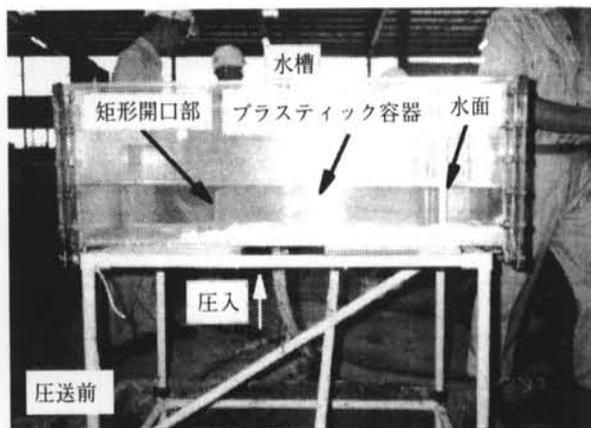


写真-3 水中への圧送状況

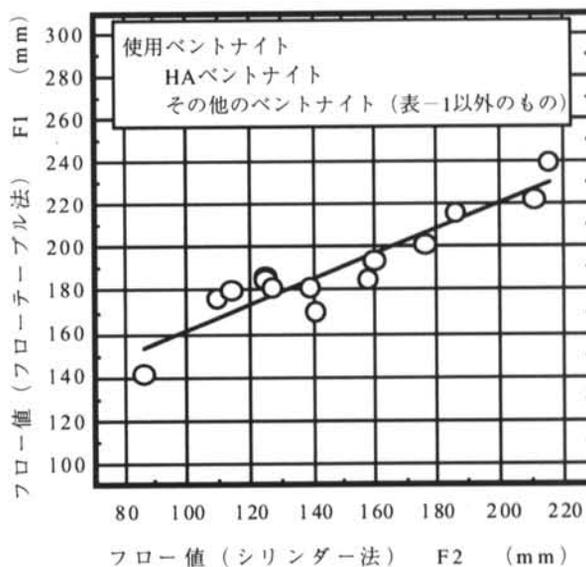


図-5 フロー値の比較

180mm（フローテーブル法）に設定した。なお、材料分離抵抗性を評価する他の方法としてブリーディング試験（JSCE-F522）があり、この設計フロー値を有する充填材を使用して同試験を実施した。充填材配合は、水量 $W=803\text{kg/m}^3$ 、セメント $C=240\text{kg/m}^3$ 、HAベントナイト $B=300\text{kg/m}^3$ 、高吸水性樹脂 $P=2.8\text{kg/m}^3$ 、急

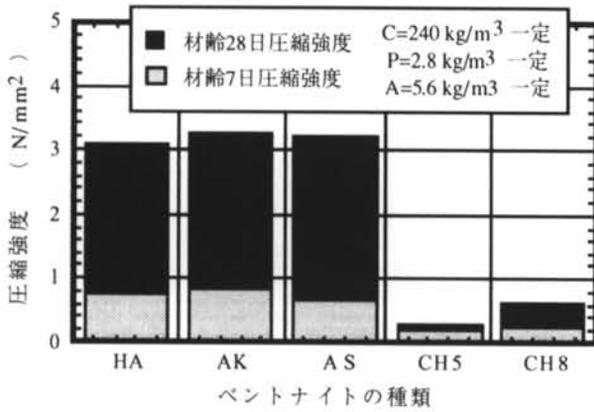


図-6 各種ベントナイトを用いた充填材の圧縮強度

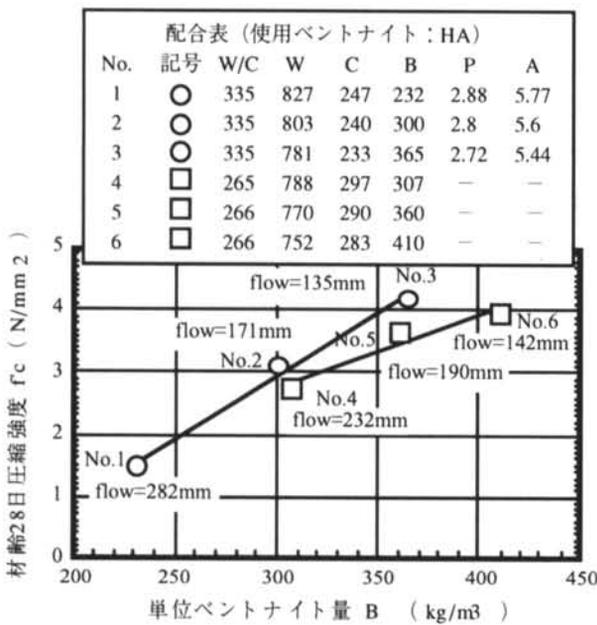


図-7 単位ベントナイト量と圧縮強度の関係

結剤 5.6kg/m³としたが、3時間経過時のブリーディング率および最終ブリーディング率はともに0.0%になり、ブリーディングはほとんど発生しなかった。このことは、材料分離抵抗性が高く、充填材圧入後のブリーディングによる容積減少(充填不足)を防止できるものと考えられる。

3.4 圧縮強度

図-2に示した条件下で供試体を作製し、各種ベントナイトを用いた充填材の圧縮強度試験を実施した結果、図-6に示すとおりになった。HA, AK, ASベントナイトを使用した場合、ほぼ同一の強度が得られ、材齢28日で3N/mm²程度であった。一方、CH5, CH8ベントナイトを使用した場合、強度は顕著に低くなり、材齢28日で1N/mm²以下になった。CH5, CH8ベ

ントナイトは、強度発現の観点から、充填材料用としては不向きと考えられる。

図-7に単位ベントナイト量と圧縮強度の関係を示す。水セメント比を各々335%または266%一定とした配合条件下において、単位ベントナイト量が増加するに伴い圧縮強度も増加する傾向を示した。このことは、モルタル・コンクリートの圧縮強度がセメント水比のみで概ね決まることと大きく異なる点である。これは、ベントナイト粒子間に練混ぜ水がどの程度保水されるかの差(充填材のフロー値の差)などに起因すると考えられる。したがって、圧縮強度の管理の目安として、施工時にベントナイトの品質変動によりフロー値が大きくなった場合、強度が低下している可能性があるかと推測できると考えられる。

充填材のフレッシュ性状および圧縮強度試験結果から、ベントナイトの選定にあたっては、経済的に所定の品質を確保できるものを試験練りによって判定する必要があると言える。ベントナイトの単価は、製造コストや輸送コストなどで決まる。HAベントナイト、AKベントナイト、ASベントナイトでは産地が近接していることから、単価の優劣はほぼ製造コストで決まり、単価はHA < AK < ASの順になっている。したがって、フレッシュおよび硬化性状、経済性から、後述する施工性実験および実施工では、HAベントナイトを使用した。

3.5 乾燥の影響

乾燥収縮実験1の結果を写真-4に示す。これは、恒温恒湿室で約3週間暴露した後の供試体のひび割れ発生状況を示したものである。いずれの供試体も乾燥材齢1~3日程度で乾燥収縮量が増大し、ひび割れを生じた。ひび割れ幅やひび割れ本数は、配合条件により相違が認められ、単位セメント量を180kg/m³から240, 350kg/m³と多くすることでひび割れ幅が小さくなり、ひび割れ本数も少なくなった(写真 配合No.28, No.23, No.24)。また、高吸水性樹脂を使用しなかった配合(写真 配合No.29)では、単位セメント量が330kg/m³であったが、ひび割れ幅が大きく、ひび割れ本数も多くなった。一般に単位水量の多いこの種の充填材では、乾燥により、ひび割れを生じたり、充填材自体が崩壊する性状を示す。本充填材では、単位セメント量を経済性や充填材密度の許す範囲内で極力多くすることや吸水して比較的大きな粒径になる高吸水性樹脂を混和することによって、乾燥によるひび割れの発生や充填材自体の崩壊を抑制できると考えられる。

乾燥収縮実験2では、図-8に示すように、乾燥収縮量と質量減少量を測定した。乾燥収縮量は乾燥材齢に伴って増加し、材齢1年で約13000 × 10⁻⁶まで進行



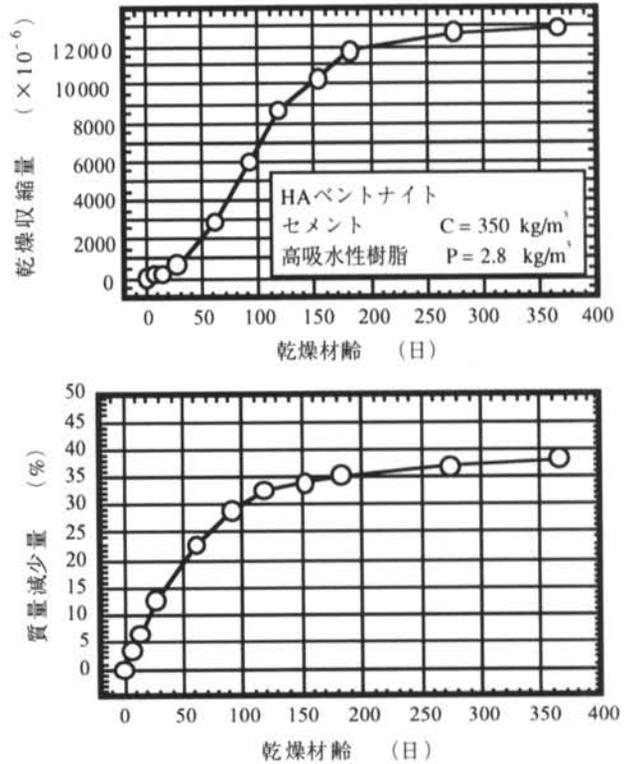
写真一 4 乾燥によるひび割れ発生状況

した。材齢1年における質量減少量は38%になり、硬化した充填材 1m^3 から約 540kg/m^3 の水分が逸散したことになる。このように乾燥による収縮量と質量減少量が顕著に大きくなったが、乾燥条件を緩やかにしたことで、実験1で認められたようなひび割れは全く発生していなかった。

3.6 品質管理方法(ベントナイトの受入れ品質基準)

ベントナイトの品質管理試験結果を図一9に示す。ファンネル粘度、 $22\mu\text{m}$ ふるい通過率およびメチレンブルー吸着量と充填材のフロー値との関係は、ファンネル粘度が大きくなるほど、 $22\mu\text{m}$ ふるい通過率が大きくなるほど、メチレンブルー吸着量が多くなるほど充填材のフロー値が小さくなる傾向を示すもの、ばらつきは大きかった。また、同じ産地のHAベントナイトを使用した場合においても、ロットや出荷時期の相違により、ファンネル粘度、 $22\mu\text{m}$ ふるい通過率およびメチレンブルー吸着量といった物性値が変動して、フロー値が大きくなることも明らかになった。

ベントナイトの品質管理試験方法としては、十分とは言えないが、試験の簡便性、しきい値の設定が比較的容易であるなどの理由から、ファンネル粘度試験を



図一 8 乾燥収縮量と質量減少量

採用することにした。同配合条件下で、HAベントナイトを使用し、フロー値を $180 \pm 25\text{mm}$ で管理する場合(フロー値の最大値を 205mm とする場合)、HAベントナイトのファンネル粘度を29秒以上に設定すれば、フロー値が 205mm を超えることはほとんどなくなると考えられる。一方、ファンネル粘度の上限値をどこに定めるかは、本データからは推測しがたい。仮にファンネル粘度の管理幅を品質管理が可能な2秒に設定すると、ファンネル粘度の管理値は 30 ± 1 秒になる。

§ 4. 施工性実験

4.1 実験概要

練混ぜ性能やポンプ圧送性などの施工性を確認するために、以下に示す方法で実験・検討した。

配合は、あらかじめ設定した示方配合を補正して現場配合とし、水 760kg/m^3 、セメント 297kg/m^3 、ベントナイト 356kg/m^3 、高吸水性樹脂 3.2kg/m^3 および急結剤 6.3kg/m^3 とした。実施工で想定される条件を考慮した上で、 $4\text{m}^3/\text{h}$ 程度の施工能力を確保することとして、図一10に示す設備でポンプ圧送試験を実施した。充填材の製造はバッチ当り 0.22m^3 を6バッチとし、練混ぜ時間は4分間とした。また、材料の投入順序は、

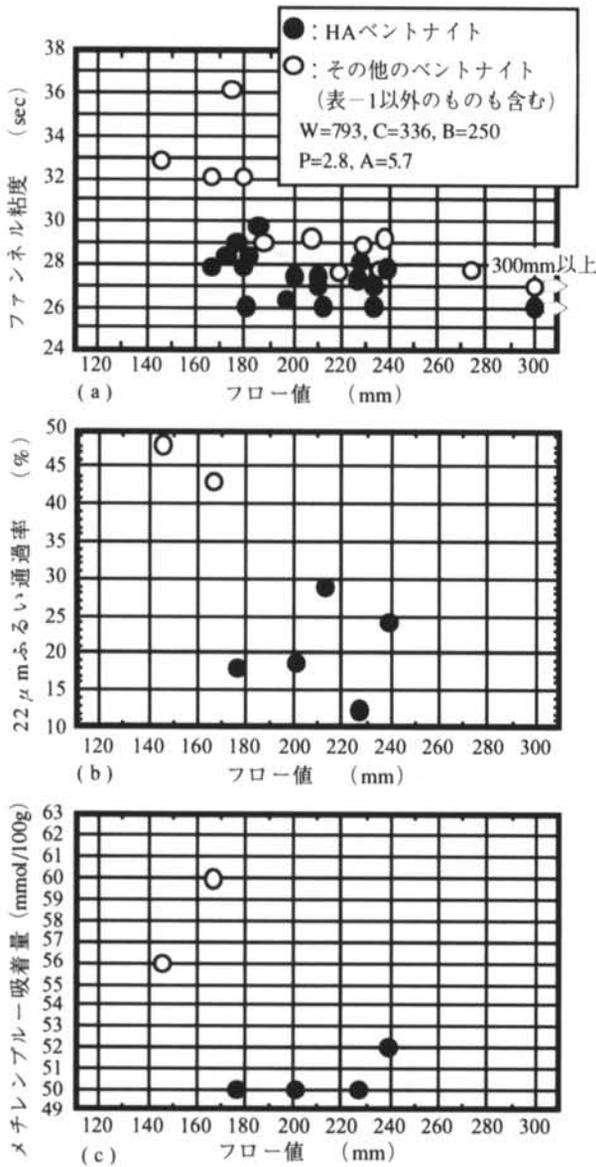


図-9 ベントナイトの品質管理試験結果

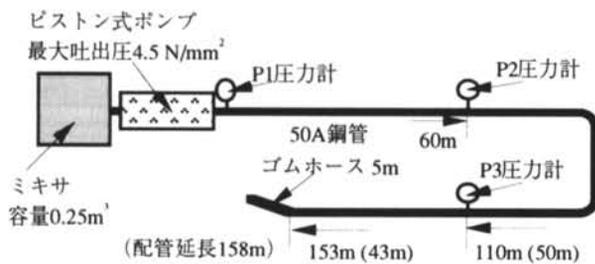


図-10 ポンプ圧送実験

各材料の分散・混合が容易で施工手間が少なくなることを考慮して、ミキサに水を投入した後、セメント、ベントナイト、混和材料の順とした。

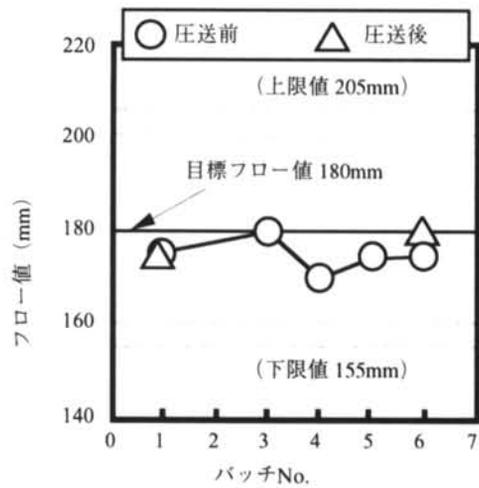


図-11 フロー試験結果

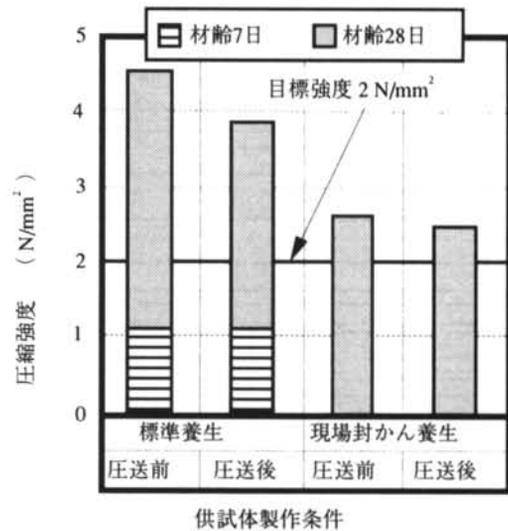


図-12 圧縮強度試験結果

実験項目は、フロー値、圧縮強度、ポンプ圧送に伴う管内圧力損失と圧送速度とした。

4.2 実験結果と考察

図-11にフロー試験結果を示す。フロー値は、圧送性、流動勾配、充填性、材料分離抵抗性などと密接な関係があり、小さすぎると圧送負荷の増大や充填性の低下を招き、大きすぎると限定注入が困難になったり、材料分離抵抗性が低下する。本充填材の場合、施工条件などによっても異なるが、180 mm前後のフロー値が最適と考えられ、管理値を180±25mmとした。試験結果によると、得られたフロー値は、170～180 mmの値になり、ばらつきは小さく、良好な性状を示すものであった。また、圧送前後のフロー値にはほとんど変化が認められなかった。

図-12は、圧縮強度試験結果を示したものである。



写真-5 バッチ式ミキサによる充填材製造状況

供試体作製条件のいかんにかかわらず、材齢28日圧縮強度はいずれも 2 N/mm^2 以上を確保していた。平均外気温 8°C で現場封かん養生した供試体の圧縮強度は、標準養生供試体の圧縮強度の約60%程度と小さくなること、圧送後の強度は、圧送前の強度と比較して、5~15%程度小さくなることなどが明らかになった。なお、充填材の単位容積質量は、圧送前で 1.45 g/cm^3 で圧送後で 1.43 g/cm^3 とほぼ同等の値になった。

次に練混ぜ性能であるが、均一な練上り状態になるのを目視観察したところ、今回使用したミキサ（通常のエアモルタルなどを練り混ぜるミキサMMP-ASの改良タイプ）では、4分間の練混ぜで団塊などのない均一な充填材の製造が可能であることが明らかになった。このことから、施工能力としては、ミキサを2槽備えた設備にすることで、約 $5\text{ m}^3/\text{h}$ の製造能力を確保できるものと考えられる。

ピストン式ポンプ（FG-20HC）を用いた管内圧力損失に関しては、吐出量約 $6.6\text{ m}^3/\text{h}$ 時において、P1~P2の区間では $0.12\sim 0.13 \times 10^1\text{ N/mm}^2/\text{m}$ 、P2~P3の区間では $0.14\sim 0.16 \times 10^1\text{ N/mm}^2/\text{m}$ になった。また、最大圧力は、P1圧力計で 2.4 N/mm^2 であった。圧送の可否の判定はポンプの最大圧力のみには依存するものではないが、本充填材を200m圧送する場合、少なくとも最大吐出圧 $3\sim 4\text{ N/mm}^2$ 以上の能力のあるポンプが必要になるということが明らかになった。

§ 5. バッチ式設備による実施工

5.1 施工および品質管理の概要

本充填材は、1998年2月にJR西日本舞鶴線の4本のトンネルに初めて採用された。当該トンネルは、建設から約90年を経過したものであり、覆工はレンガ構造である。このため、充填による覆工への影響を最

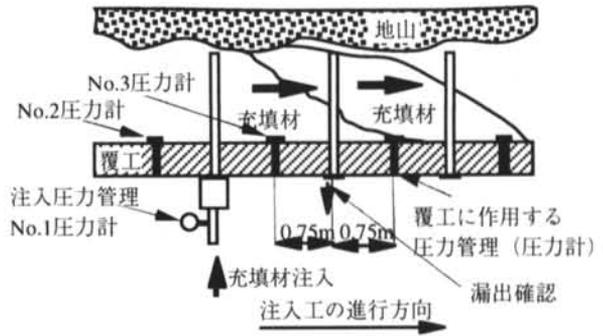


図-13 圧力測定方法



写真-6 施工状況

小とし、かつ空隙を確実に充填することが求められた。

使用材料、配合、フレッシュおよび硬化後の要求品質は、前述した施工性実験と同一である。

充填材製造・運搬の設備ならびに方法としては、①バッチ式ミキサ、水タンク、アジテータ、ポンプおよび使用材料を全てあるいは一部を坑内に持ち込んで製造・運搬する方法、②坑外に①の全ての設備を設置して注入箇所まで圧送する方法、③坑外にセメントサイロ、ベントナイトサイロ、粉体混合ミキサ、混和剤水溶液作液タンクなどを設置し、粉体貯蔵タンク、混和剤水溶液貯蔵タンク、粉体搬送ポンプ、連続練りミキサ（スパイラルピンミキサなど）、アジテータ、ポンプ（小型スクイーズポンプなど）、制御盤などで構成される車上プラントにより坑内で製造・運搬する方法などがある。一般的には②の方法が最も採用されるケースが多いが、③のような方法は、施工時間が短く、施工数量の多い（トンネル延長の長い）鉄道トンネルの充填工事には最適な方法と言える。本工事では、写真-5に示すように、一般的な方法である②の方法により施工した。なお、材料の投入順序は、施工実験と同じである。

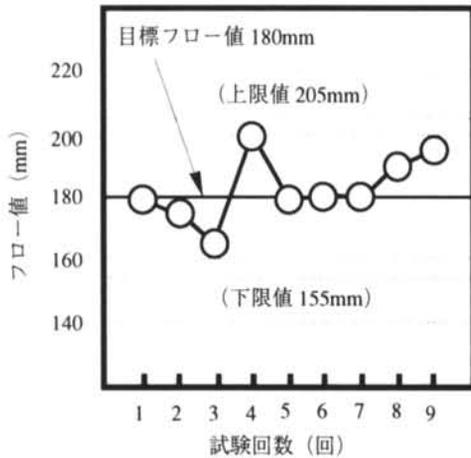


図-14 フロー試験結果

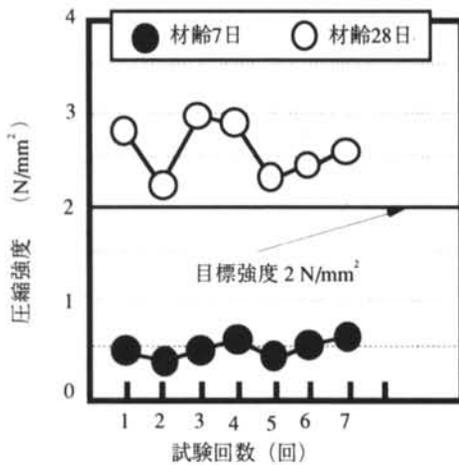


図-15 圧縮強度試験結果

品質管理項目は、フロー値、材齢28日圧縮強度、注入圧力および覆工に作用する圧力とした。圧力の測定方法は図-13に示すとおりであり、注入管口元のNo.1圧力計と注入管前後の覆工背面に設置した圧力計によって行った。注入圧の管理値は、トンネル覆工に過大な圧力が作用しないように、これまでの施工実績を踏まえ、 0.2 N/mm^2 とした。施工状況を写真-6に示す。

5.2 品質管理試験結果

フロー値の品質管理試験結果を図-14に示す。フロー値の平均値は183mm、変動係数は5.8%であり、所定の品質を確保することができた。

圧縮強度試験結果を図-15に示す。材齢28日圧縮強度は目標強度 2 N/mm^2 を全て満足する結果になった。圧縮強度の平均値は 2.6 N/mm^2 、変動係数は11.1%であった。

圧力測定結果を図-16に示す。覆工に作用する圧

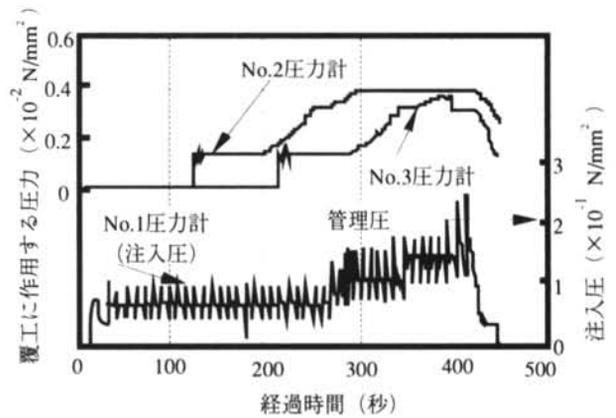


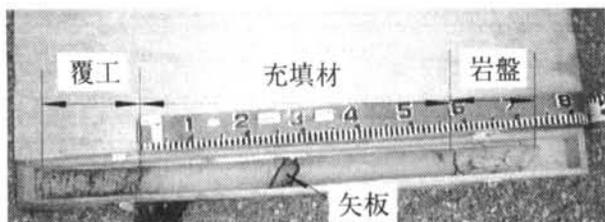
図-16 圧力測定結果



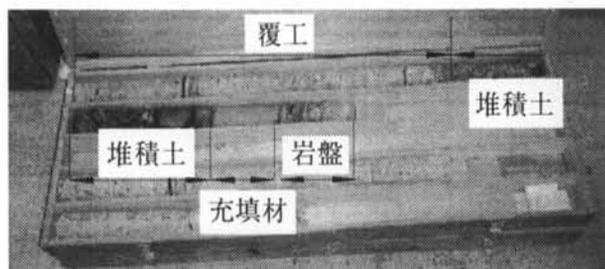
写真-7 覆工間隙からのエアモルタルの漏洩

力は、注入にしたがって手前側のNo.2圧力計の圧力が増加し、その後充填材の側方への流動によって圧力が安定した。さらに注入が進み充填材がNo.3圧力計設置位置まで到達すると、No.3圧力計の圧力が増加するとともに、充填材を押し出す反力によってNo.2圧力計の圧力も再び増加した。その後、圧力が安定し始めた400秒付近で注入管口元圧力計No.1の圧力が 0.2 N/mm^2 の管理値に達したため、注入を終了した。注入中、隣りの注入孔より充填材の漏出が観察され、注入管設置位置から判断して、空隙を確実に充填できたものと考えられる。また、覆工に作用した最大圧力は $0.4 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$ 程度であった。

施工中の目視観察によれば、漏水個所の水は注入が進行しても懸濁することは全くなく、注入に伴って漏水が止まる傾向が認められた。これは本充填材の材料分離抵抗性が高いことや止水性が高いことを示すものである。またエアモルタルの施工では、写真-7に見られるような覆工間隙からの材料の漏洩が頻繁に生じるが、本充填材ではこのような漏洩は全く発生しなかった。すなわち、本充填材は、限定注入性が高いので、充填材漏洩の復旧手間や漏洩防止のための補助工



天端部コア



肩部コア

写真-8 チェックボーリングによるコア採取

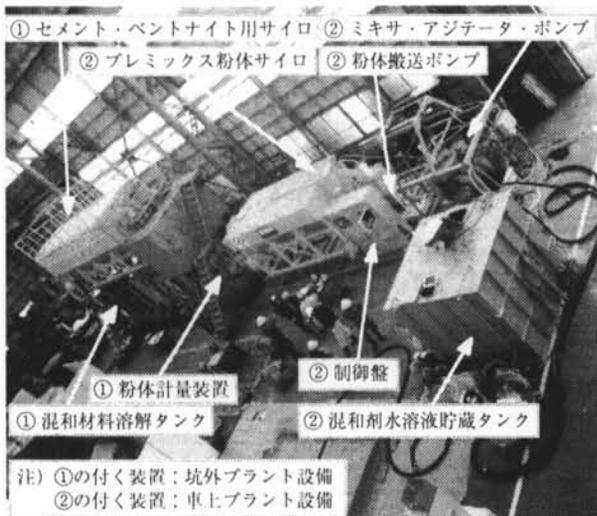


写真-9 連続自動打設システム全景

法の採用が不要となり、生産性が上がると考えられる。

補修工事終了後、トンネル事業者立会いのもと、施工個所のチェックボーリングを行い、写真-8に示すようなコアを採取して充填性を確認した。その結果、充填材コアには欠損部は見られず、覆工天端部においても、充填材が地山部に密着した状態で充填されていることが確認された。

§ 6. 連続自動打設システムの開発

施工時間が短く、施工数量の多い鉄道トンネルの充



写真-10 連続自動打設システムによる施工

No.	発注時期	事業者名	用途	トンネル名
1	1998年2月	JR西日本	鉄道(在来線)	第一真倉
2	1998年2月	JR西日本	鉄道(在来線)	第二真倉
3	1998年3月	JR西日本	鉄道(在来線)	第一黒谷
4	1998年3月	JR西日本	鉄道(在来線)	第二黒谷
5	1998年8月	建設省	道路	三国
6	1998年9月	JR西日本	鉄道(在来線)	第二外波
7	1998年10月	山梨県企業局	導水路	琴川発電所
8	1998年11月	東京電力	廃坑充填	鬼怒川旧水路
9	1998年11月	東京電力	導水路	栗山発電所
10	1999年3月	JR西日本	鉄道(新幹線)	—
11	1999年3月	建設省	道路	高松
12	1999年6月	日本道路公団	高速道路	日本坂
13	1999年8月	JR北海道	鉄道(在来線)	神居
14	1999年10月	東京電力	導水路	鬼怒川発電所
15	2000年1月	群馬県企業局	導水路	相俣ダム
16	2000年3月	山梨県企業局	導水路	小屋敷発電所
17	2000年3月	JR東海	鉄道(新幹線)	第一高尾山
18	2000年3月	新潟県	道路	薬師
19	2000年3月	建設省	道路	和南津
20	2000年3月	建設省	道路	三国
21	2000年3月	建設省	道路	新笹子
22	2000年3月	建設省	道路	老ノ坂
23	2000年4月	長野県	道路	奈川渡

表-3 施工実績

填工事では、バッチ式ミキサを使用したシステムでは、大量の材料計量・投入を人力に頼ることになるので、生産性が低下すると考えられる。そこで、写真-

9に示すような連続自動打設システムを開発した。付帯設備は前述したとおりであり、本システムの場合、充填材製造能力は $5.5\text{m}^3/\text{h}$ 、最大積載量で 12m^3 の充填材製造が可能になる。

本システムは、写真-10に示すように、既にトンネル延長の長い鉄道トンネル補修工事に適用されており、従来のバッチ式設備による充填材の製造と比較して、以下に示す効果が得られた。

すなわち、得られた効果としては、①人力による材料の計量・投入を必要としないため、2～3人/日の人工（労務）を低減できた、②作業員は材料の計量・投入という重労働から開放され、身体疲労が軽減された、③同システムが完全密閉方式なので、材料の計量・投入・練混ぜ時に粉塵が発生せず、作業環境が改善されたなどである。

なお、バッチ式設備および連続自動打設システムによる同工法の施工実績を表-3に示す（2000年5月時点）。

§ 7. まとめ

トンネル覆工背面などの空洞部に充填する新しい裏込め充填材を開発した。同充填材は、セメント、ベントナイト、高吸水性樹脂などを使用し、単位ベントナイト量および単位水量を顕著に多くしたのが使用材料および配合上の特徴である。本充填材を用いて、室内実験および施工性実験を実施した。その結果、本充填材は、エアモルタルなどの従来の充填材で問題とされていた限定注入性や湧水などに対する材料分離抵抗性などを改善できることが明らかになった。現在までに、鉄道トンネル、道路トンネル、導水路トンネルなどに幅広く適用し、所要の品質を満足する結果が得られている。今後はさらに、品質、生産性、経済性の向上に向けて開発・改善を行う予定である。

謝辞

本開発は、(財) 鉄道総合技術研究所、ラサ工業(株)、(株) 日本触媒、清水建設(株)の4社共同研究によって実施されたものである。ご協力をいただいた関係者各位に謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 日本ベントナイト工業会：日本ベントナイト工業会標準試験方法 (JBAS-108-77)、ベントナイト (粉状) の清水泥水試験方法, pp.1～4, 1977
- 2) 日本鑄物協会・東海支部 無機砂型研究会：生型材料の評価方法、生型用ベントナイト (粉状) のメチレンブルー吸着量試験方法, pp.146～147, 1982