

山岳トンネルにおける注入式ファアポーリング 用ウレタンの材料特性に関する基礎的研究

肥後満朗*・牧 宏久**・
古川浩平***・中川浩二***

トンネル先受工としてのウレタン注入式ファアポーリングに通常使用されているウレタン注入材2種類について、実施工での施工性および地山改良効果に着目した各種室内試験を実施し、以下の知見を得た。①ウレタン注入材は発泡現象が急激であるとともに、施工性を左右する粘性やライズタイムは温度に大きく左右される。②改良効果については、強度の発現が早く、圧縮強度のみならず引張強度や引張接着強度が大きい。

Key Words: NATM, forepoling, urethane, rising time, viscosity

1. はじめに

山岳トンネルにおいて、掘削方式に発破を用いるような硬岩では、支保工を施工するまでの間、掘削面の自立が得られる場合が多いが、未固結地山や断層破碎帯などでは、支保工を施工するまでの間、または支保工の強度が発現して地山を支保することが可能になるまでの間、掘削面が自立できず切羽先端や切羽面が崩壊したり、地山を大きく緩ませることがある。このような問題点に対する対策としては、従来はトンネル断面を分割して小さい掘削断面で掘削することにより地山を安定化させる方法(例えば、サイロットNATMや多段ベンチ工法など)が採用されるケースが多かった。しかし掘削断面を小さくすることは、大型機械の使用を困難とし施工性を損ない、それに加えて断面閉合が遅れることから地山を大きく緩ませるといふ欠点がある。

そこで、最近の傾向としては、切羽の安定化のための各種補助工法を用いることでできるだけ大きい掘削断面で掘削する傾向にある¹⁾。このような背景には、各種補助工法の開発が進み、地質条件や施工条件に応じて様々な補助工法が実用化されたことが重要な役割を果たしていると思われる。補助工法のなかでも切羽前方の地山の緩みを抑制し崩落を防止する先受工が最近特に著しく開発が進み、様々なグレードのものが実用化されている。例えば、従来は通常のもルタル充填式のロックボルトを切羽の斜め前方に配置する簡易な方式(設計図書等では単に“ファアポーリング”と記載されるケースが多い)が一般的であったが、比較的剛性の大きいパイプを同様な方法で施工する方式(AGF²⁾、トレビチューブ工法³⁾など)やジェットグラウトでトンネル前方の地山にアーチ

状にもルタル杭を施工する方式(ロジンジェット⁴⁾など)なども用いられるようになってきている。

ウレタン注入式ファアポーリングはこれら先受工の一種で、1982年頃から国内でも採用されるようになり、最近では年間100件以上もの施工実績がみられる⁵⁾。この工法は、ボルトの剛性よりもむしろ注入材の地山改良効果による安定化に期待し、固結体強度が大きくかつ発泡するという特性をもつウレタンを使用するところに特徴があると思われる。この工法では通常薬液注入工に用いる注入材(セメント、水ガラスなど)と特性が大きく異なる注入材(ウレタン)を用いて地盤改良効果に期待することから、地山の条件に応じてどのような物性をもつ注入材をどのような方法で注入するかによって、その効果は大きく異なることが予想される。ところが、ウレタン注入工に関する筆者らの文献調査では先受工にウレタン注入式ファアポーリングを用いたという報告は多数ある⁶⁾ものの、新しく開発されたウレタン注入材の物性や試験注入結果および安全性の試験の報告は数例認められるだけであり⁷⁻⁹⁾、ウレタン注入式ファアポーリングの計画・施工のために有用と思われる諸点について、体系化された研究はほとんどなされていないようである。

本研究では、ウレタン注入式ファアポーリングの計画・施工を合理的に行うためには、現在使用されているウレタン注入材の各種物性を把握することがまず必要と考え、反応前と反応硬化後の各種物性に関する室内試験を実施した。注入工の施工性や注入状況はA、B2液(A:ポリオールまたは珪酸ソーダ成分、B:イソシアネート成分、以下A液、B液と呼ぶ)の反応硬化前や硬化過程での物性に左右され、改良効果は反応硬化後の物性に左右されると考えられる。このことから、本研究においては各種試験結果を“施工性”および“改良効果”に2分して検討を加えたものである。

* 正会員 (株)間組 土木統括本部技術・設計第二部
(〒107 東京都港区北青山2-5-8)

** 工博 第一工業製薬(株) 建設施工業剤研究部

*** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

2. 研究対象の注入材について

(1) 注入材の特性

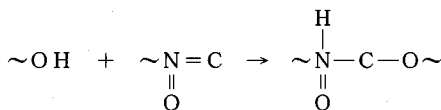
ウレタン注入式ファアポーリングの注入材は、従来はイソシアネートおよびポリオールをそれぞれ主剤とする2種類の薬液を、1.5ショット(2種類の薬液を別々にタンクからパイプで送り、地山への注入直前に混合する方法)で注入し反応させるもの(タイプa)が一般的であったが¹⁰⁾、最近では薬液の価格低減と浸透性の改善および難燃化を主目的としてイソシアネートと水ガラスをそれぞれ主剤として、1.5ショットで注入するもの(タイプb)も開発され実用化されている¹¹⁾。また、平成4年2月に日本道路公団より注入材の安全性の確認と作業上の留意事項に関するガイドラインが出され¹⁰⁾、注入材は毒物・劇薬となる物質や国で定めた有害物質を含まないものに限定されるとともに、その適用範囲は工事の安全等を確保できない場合の応急処置として位置づけられている。

ここでは、今後の実施工における使用を念頭におき、ガイドラインに沿って注入材の中から上記タイプaの注入材として使用実績の多い注入材S(以下注入材Sと呼ぶ)を、また両タイプの注入材の特性を比較するためにタイプbの注入材として注入材R(以下注入材Rと呼ぶ)の2種類を取り上げた。それぞれの注入材の特性は、表-1に示すように水ガラス等通常の薬液注入工の注入材に比較して、粘性が大きいこと(比較的粘度の大きい懸濁液型水ガラス系薬液でも5~10mpa・sである¹²⁾)および硬化過程で発泡することが大きな特徴である。また、注入材SおよびRは、トンネル坑内での火災に配慮して難燃性(JIS K7201 高分子可燃性試験方法での酸素指数26以上)のものになっている。

(2) 注入材Sの反応

A液・B液の反応硬化時における基本的な化学反応機構としては、以下に示すようなものと考えられる。

- ① ポリオールとポリイソシアネートの反応によるウレタン結合の生成



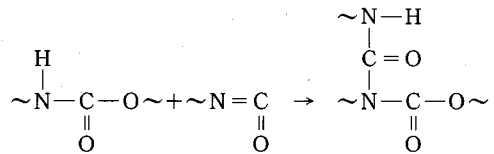
(ポリオール) (ポリイソシアネート) (ウレタン結合)

- ② ウレタン結合とポリイソシアネートの反応によるアロファネート結合の生成

表-1 使用注入材の特性

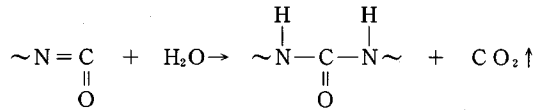
	注入材 S		注入材 R	
	A 液	B 液	A 液	B 液
組成	特殊ポリオール 架橋剤 発泡剤 触媒	ポリイソシアネート 難燃剤	珪酸ソーダ 特殊改質材 触媒	特殊プレポリマー 粘度低下剤
一般性状	微白濁液体	褐色液体	微白濁液体	褐色液体
粘度(mpa・s/25℃)	120±30	150±30	110±30	160±30
比重(20/4℃)	1.08±0.03	1.26±0.03	1.45±0.03	1.23±0.03
配合(重量比)	A/B=1/0.9~1.1		A/B=1/0.9~1.1	
ライズタイム(秒/20℃)	70±15		45±15	
酸素指数※	27.0		28.5	

※JIS K 7201



(ウレタン結合) (ポリイソシアネート) (アロファネート結合)
(三次元構造)

- ③ ポリイソシアネートと水との反応による炭酸ガスの発生



(ポリイソシアネート) (水) (尿素結合) (炭酸ガス)

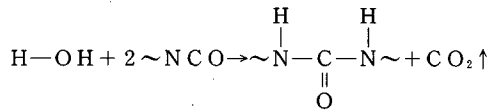
- ④ 発泡硬化反応機構

上記①, ②, ③のウレタン結合, 尿素結合, アロファネート架橋等を骨格とする樹脂化反応に, ③の反応式で示した炭酸ガスを取り込み, 三次元構造の発泡固結体が地山中に形成されると考えられる。

(3) 注入材Rの反応

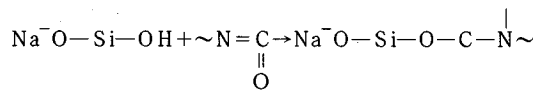
反応硬化時における基本的な化学反応機構としては次式が考えられる。

- ① 特殊珪酸ソーダ溶液中の水分と特殊ポリイソシアネートの反応による尿素結合の生成



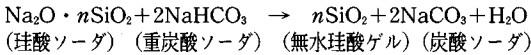
(水) (ポリイソシアネート) (尿素結合) (炭酸ガス)

- ② 特殊珪酸ソーダ溶液中のシラノール基と特殊ポリイソシアネートの反応によるウレタン珪素複合結合の生成



(珪酸ソーダ) (ポリイソシアネート) (ウレタン珪素複合結合)

③ 特殊珪酸ソーダと炭酸ガスの反応で生成した重炭酸ソーダによる不溶性ゲル（無水珪酸ゲル）の生成



④ 発泡硬化反応機構

上記①の反応により生じた炭酸ガスおよび反応熱による A 液中の発泡剤の気化と①, ②, ③の複合樹脂化反応(尿素結合, ウレタン珪素複合結合, 無水珪酸ゲル)とのバランスをコントロールすることにより, 三次元構造の発泡固結体が地山内に形成されると考えられる。

3. 施工性に着目した室内試験

(1) 試験の目的

ウレタン注入式ファポーリングの注入方法は, 一般的には図-1に示した方法で施工される。A, Bの2液は, それぞれ注入ポンプで加圧され延長20~30mの注入ホース内を通して口元付近で合流し, 静止ミキサーで混合されたものが, 注入パイプ内を通り注入孔から地山へ注入されることになる。注入が確実に行なわれるためには, 所定の物性を保持した注入材が注入パイプ周辺地山の亀裂や土粒子間などの間隙に注入されて固結することが必要になる。ところが, 先に述べたように他の一般的な薬液注入工における注入材に比較して反応前の粘性が大きく, 管内抵抗やミキサー抵抗が大きいことに加え, 2液が反応により発泡することから, 注入材の物性は反応後の経過時間によって大きく変化する。従って, 適切な注入圧力の設定など施工に関するノウハウの確立が必要と思われる。また, 材料温度によっても粘性や発泡の状況は影響を受ける。実際の施工においては, 例えば低温下においては材料を加熱したり, 触媒(反応促進剤)の添加等により粘性やライズタイム(本論文では, A, Bの2液を混合してからほぼ発泡が完了するまでの時間をライズタイムと呼ぶ)を調整しているが, その調整は試行錯誤的であり作業員の経験や技量に頼っている。また, 適切な粘性やライズタイムを設定する手掛かりは特に明らかにされておらず, 注入圧や注入量の状況から, 実用的に注入可能な範囲になるように作業員の感覚で設定していると思われる。このような現状から, 実施工において逸走してしまい適切な効果が得られなかったとか, ホースの閉塞などの各種トラブルも発生しているようである¹⁹⁾。

ここでは, ウレタン注入工の施工性に関して大きな要因を占めると考えられる粘性やライズタイム, 浸透性および発泡状況に関して室内試験を実施し, ウレタン注入材の硬化前の物性を把握し, 施工方法などを検討する上で有効な情報を得ることを目的とした。

なお, 本章での試験データは煩雑さをさけるために,

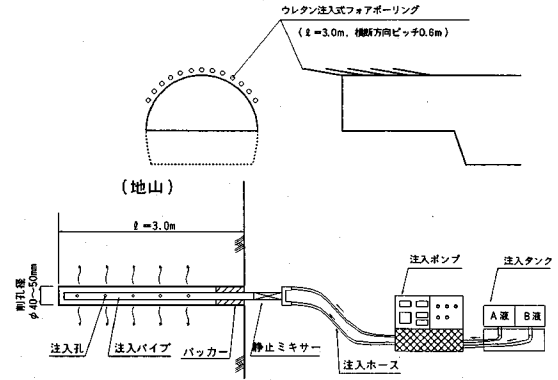


図-1 一般的なウレタン注入式ファポーリングの注入方法とパターン

代表的と思われる実験ケースを示す。

(2) 粘性およびライズタイム

a) 試験方法

粘度の試験方法は, JIS K1603の単一円筒回転粘度計(JIS K6833)を用いる方法によった。ライズタイムは2液が混合されてから地山内の節理などに浸透する時間を与え, この時間以降においては注入材は硬化し移動がないと考えられることから, 注入改良範囲などを左右すると考えられる。このライズタイムについては, 以下の手順で試験した。

- ① ポリカップ(2l)にA液を100g採取し, 所定の温度に調整する。
- ② ①の2lポリカップの中に, 所定の温度に調整したB液100gを素早く添加し, 10秒間攪拌後発泡の完了までの時間をストップウォッチで測定し, 攪拌完了後から発泡完了までの時間をライズタイムとする。

b) 試験結果と考察

図-2に示したものは, 液温を10℃から30℃に変化させたときの注入材S, RのA液とB液の単体について粘度の試験結果である。注入材S, Rとも液温が低下すると粘度が大きくなる傾向があり, 20℃での粘度と比較すると, 10℃では約1.7~2.0倍, 30℃では約0.6~0.75倍と大きな差がある。

図-3は5℃から30℃までの液温において, 先の述べた方法でライズタイムを測定した結果である。注入材S, Rともに温度が低くなるとライズタイムは長くなり, 逆に温度上昇により短くなる。20℃での値と比較すると, 10℃では約1.4~1.5倍, 30℃では約0.7倍となっている。

図-4は液温を5℃から30℃の範囲で一定に保ち, 触媒(反応促進剤)の添加量を変化させてライズタイムを測定した結果で, 触媒の添加量を増やすとライズタイムは短くなり, 特に液温が低い場合に注入材Sにおいてそ

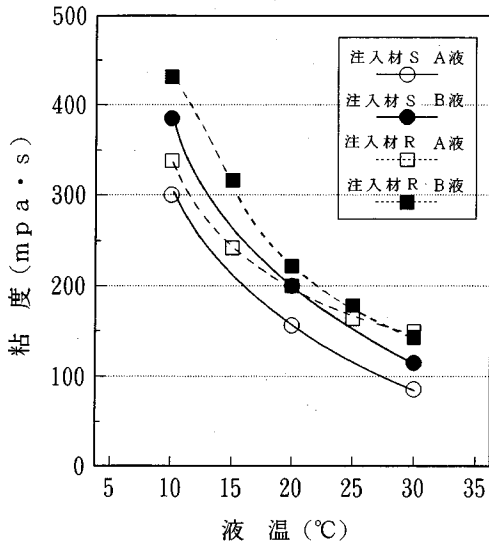


図-2 注入材の液温と粘度の関係

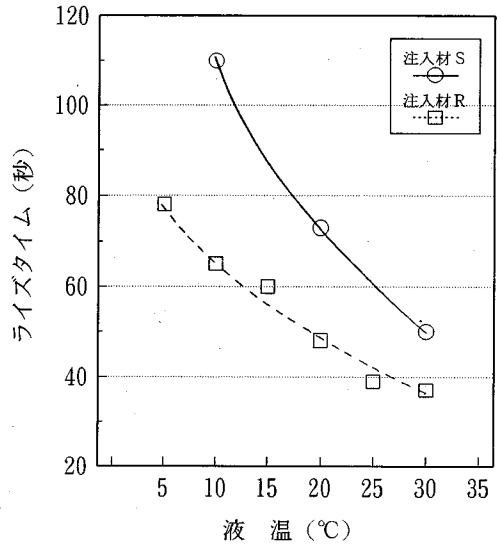


図-3 液温とライズタイムの関係

の影響は大きい。

注入材の粘性によって適切な注入圧の設定や注入状況は大きく異なると思われるが、この粘性は液温に左右される。これらの試験結果は外気温の影響を受ける坑口付近等においては液温を管理することが非常に重要であることを示している。また、発泡が完了するライズタイム以降においては、地山中の注入材の移動はないと考えられることから、注入材の粘性と同様ライズタイムも注入状況を大きく左右すると考えられる。よって、坑口等において坑内温度が低く、液温を所定の温度に上げることが困難な場合には、触媒を添加することでライズタイムを調整することが有効であることを示している。

(3) 浸透性とぬれ性

地山への注入材の浸透性については、A液、B液が混合されてからライズタイムに至るまでの混合液の浸透性でもって評価すべきである。ところが、混合直後から混合液の特性は時間とともに変化するのみならず、表-1に示したように、両注入材はライズタイムが20°Cで70秒および45秒と短い。このように短時間で、かつ時間とともに変化する混合液の浸透性を試験することが困難であることから、ここでは混合液の浸透性はゲル化までのA液およびB液の浸透性と正の相関があると考え、A液およびB液の単体が砂の中を浸透する速度を測定し、両注入材の浸透性の目安として評価することにした。試験方法としては、7号けい砂約160ml(重量200g)を落下充填したメスシリンダーの上部から、注入材のA液およびB液各々40mlを単体で流し込み、所定の時間毎(10, 30, 60, 90分)に、注入材が浸透した体積を測定した。なお、写真-1に示すように、あらかじめメスシリン

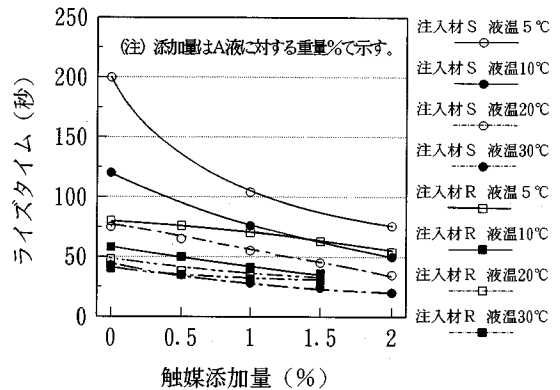


図-4 液温と触媒添加量を変化させた場合のライズタイム

ダー底部までポリエチレンチューブ(内径4mm)を配置し、エア抜き孔とした。この試験方法では、土粒子間の比較的大きい間隙への浸透性だけが評価されることから、次により細かい土粒子への浸透性を評価すべく、界面張力に左右されると思われるぬれ性についても試験した。試験方法は、表面を研磨した硬質砂岩上にA液、B液を各々1ml滴下し、注入材の広がりをもノギスで測定し広がり面積を算出した。

表-2, 3に結果を示す。これらの表に示すように、注入材Rの方が砂の中を浸透する速度が約1.2~1.3倍早く、かつぬれ性についても広がり面積が約1.5倍と優れている。これらの結果から、透水性が小さい地山および浸透注入を目的とした注入では、相対的に注入材Rの方が有利になると考えられる。

表-2 浸透性試験結果 (単位 ml)

経過時間	注入材 S			注入材 R			R/S
	A液	B液	A+B	A液	B液	A+B	A+B
10分	28	20	48	31	25	56	1.18
20分	47	36	83	58	46	104	1.24
30分	66	53	119	85	69	154	1.29
40分	81	65	146	101	82	183	1.25

表-3 めれ性試験結果 (単位: cm³)

	A 液	B 液
注入材 S	38.5	44.2
注入材 R	70.8	50.2
R/S (A, B液の合計)	$(70.8+50.2) \div (38.5+44.2) = 1.46$	

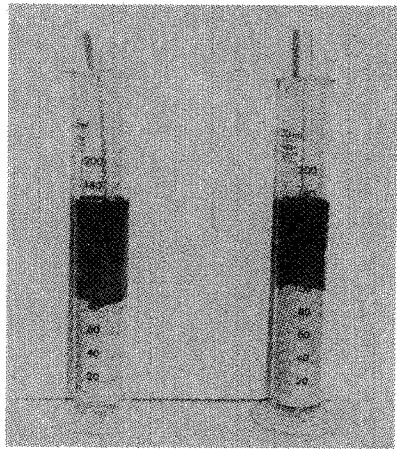


写真-1 浸透性試験状況 (左: 注入材 R, 右: 注入材 S)

(4) 反応硬化時の体積変化

液温 20° の条件下で、注入材 S および R の 2 液 200g を各々 2 l のポリカップ内で混合攪拌し、自由発泡の条件下で体積変化を測定した。

この結果を図-5 に示す。図-5 を見れば分かるように注入材 S は 8 倍、R は 6 倍の発泡倍率で発泡を完了しているが、発泡開始から発泡が完了するまでの時間が各々 16 秒および 8 秒とすこぶる短い。

注入のメカニズムを単純に考えると、注入材が地山の亀裂や間隙に注入されて、所定の範囲に到達してはじめて発泡硬化するように設定できれば、注入材が遠くへ逸走したり、坑内へリークすることなく、所定の範囲を改良することができることになる。ウレタン注入材は、(1) で述べたように注入材の粘性が大きいこと、そして図-5 に示したように急激に発泡して短時間で発泡が完了し硬化するという特性を持つ。そのため、遠くへ逸走しにくく、注入材として優れた材料と考えられる。加えてこの特性から、トンネル切羽で一般的な薬液注入工で用いるようなバルクヘッドを必要とせず、比較的高圧での注入を可能にし、また間隙が大きい礫層などの注入も可能にしていると考えられる。

4. 改良効果に着目した室内試験

(1) 試験の目的

ウレタン注入式ファアポーリングによる地山の改良効果として多くのことが考えられるが、ここでは以下に示す 4 種の改良効果に関して試験を行った。

ウレタン注入式ファアポーリングを用いたトンネル掘削においては、図-1 に示したようにせいぜい数 m 程度の注入パイプで注入材を注入し、注入完了後すぐに掘削作業を開始するのが一般的な施工サイクルである。従って、できるだけ早く注入材の強度が発現することが望ま

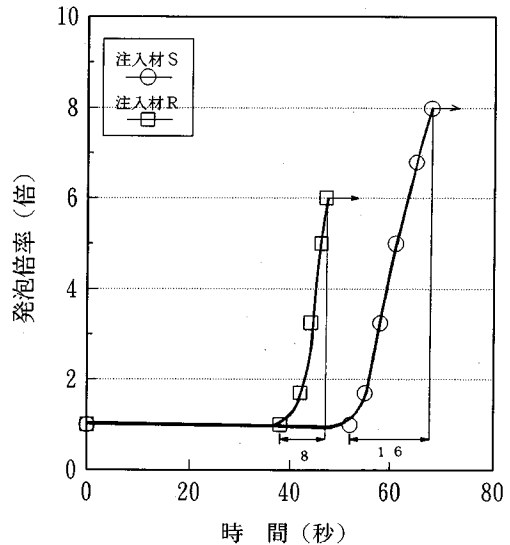


図-5 反応硬化時の体積変化

しい。また、表-1 に示したように粘性の大きい材料 2 液を混合攪拌して注入することから、現地における注入ポンプのコントロール精度によっては、A 液・B 液の配合比率が変化することも予想される。配合比率の変化によって、硬化後の物性が著しく変化することは好ましくない。これらの確認のために、サンドゲルの圧縮強度の経時変化や配合比率を変化させたホモゲルの強度を試験した。

次に、実施工での地山への注入状況を観察すると、例えば礫層の大きな間隙への注入のようなケースでは、目視で数 mm 径の気泡が確認できるような発泡状況が確認されるし、粘性土への注入では気泡を目視で確認することができないという具合に、対象とする地山や施工方法、特に注入圧力によって地山へ注入されたウレタン固

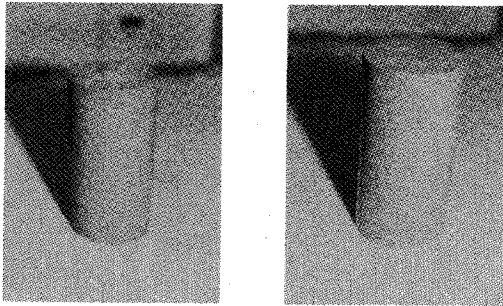


写真-2 サンドゲル供試体 (左: 注入材 S, 右: 注入材 R)

結体の発泡状況は大きく異なるようである。よって、発泡倍率と固結体の物性の関係を把握することも重要である。

第3に、ウレタン注入工が止水や地山補強を目的にして仮設以外で使用されているケースもあり(例えばトンネル背面の空洞充填工や膨張性地山での補強対策など)このようなケースでは耐久性が必要になる。ここでは、発泡倍率の異なるホモゲルの強度試験や熱水浸水後の強度試験を実施し耐久性を調査した。

第4として、亀裂の発達した地山や礫層等に注入されたウレタン注入材は、岩片を相互に接着させるとともに多少の地山変位に追随しながら崩落を防止しているようである。このような崩落防止のメカニズムのためには、ウレタン固結体に変位に追随可能な靱性が要求されるし引張強度や接着強度も必要になる。ここでは、一軸圧縮試験や引張試験および岩石との接着強度試験を実施し、これらの特性について検討した。

(2) 材令および配合比率と強度との関係

一般的な薬液注入工においては、例えば「注入の設計施工指針¹⁰⁾」によると、土質条件、注入材の種類、注入目的、および注入方式に応じて、20~42%の注入率(設計注入範囲に占める注入材の割合)が標準的なものとして示されている。ここでは、これらの値を参考に7号けい砂と注入材SおよびRを、重量比で各々3:1(砂の単位体積重量1.5gf/cm³、注入材を1.17gf/cm³とし発泡を無視すると注入率30%に相当する)および1.5:1(注入材の単位体積重量を1.34gf/cm³とし同じく発泡を無視すると注入率43%に相当する)で混合攪拌したものをφ5cm×10cm モールドに流し込み、0.5時間経過後に脱型し、一軸圧縮試験を実施した(写真-2参照)。なお、両注入材の配合(7号けい砂:注入材)が異なっているのは、注入材Rは浸透性が大きいことから注入材を多くしないと流動性が得にくく、均一なサンドゲルの作成が困難だったことによる。図-6に示すように強度のバラツキはあるものの、両注入材とも材令0.5時間で28日強度とほぼ同程度の強度を示している。このことから、

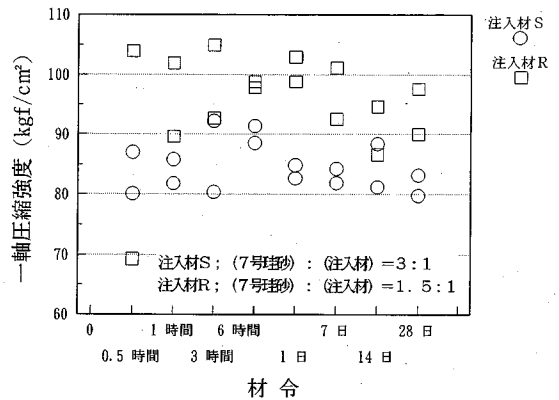


図-6 材令とサンドゲル一軸圧縮強度の関係

通常のトンネルの施工サイクルにおいては、注入後トンネルの掘削を開始するまでに約1時間以上は経過している状況を考慮すれば、ウレタン注入材は掘削時にはすでに最終的な強度を示していると評価できる。また、注入材SとRの強度を比較すると、注入材の割合が大きい注入材Rの方が、10数%強度が大きい結果となっているが、実験精度および配合の差を考慮すると、両者とも同程度の強度と考えるのが妥当と思われる。その値は、80~100kgf/cm²と考えられる。

次に、注入ポンプのコントロール精度によってA液・B液の配合比率が異なった場合の強度特性を把握する目的で試験を実施した。この場合、サンドゲルでは実験精度から、図-6に示したように強度のバラツキが大きい傾向があるため、ホモゲルで一軸圧縮強度を試験した。なお、配合比率については、注入材SおよびRのA液、B液を重量比で0.50から1.30まで段階的に変化させた。

図-7に示すように、配合比1:1の場合の強度と比較すると、配合比0.50~1.30の強度は注入材Sについては、1.42~0.79の範囲で変化し、注入材Rについては1.17~0.87の範囲で変化しており、いずれの注入材においても、B液の量が多いと強度が大きくなる傾向にある。両注入材の配合の変化に伴う強度の変化傾向は良く似ており、現場における実施工の立場からはその変化状況は同程度といえよう。また、実施工における注入ポンプの精度検討を現地で行ったところ、配合比の精度は10%以下であることが認められた。一般的な配合比がこのようなバラツキの範囲であれば、実用上注入ポンプの精度に伴う注入固結体の強度変化はほとんど問題にならないと考えられる。

(3) 発泡倍率と強度の関係および耐久性について

地山中に注入された注入材の発泡状況は、地山の間隙の状況や注入方法等によって異なると思われるが、断層付近での実施工において、注入材の約4倍の発泡倍率が

表-4 ホモゲルの一軸圧縮強度試験結果
(熱水温度: 80±1°C)

注入材の種類	発泡倍率	材令1時間の強度 (kgf/cm ²)		7日間熱水浸水後の強度 (kgf/cm ²)		σ _i		
		試験結果		試験結果				
		1	2	1	2			
注入材 S	2.4	1	60.2	61.0	1	55.7	59.8	0.98
		2	64.8		2	60.9		
		3	60.9		3	62.4		
		4	55.4		4	60.0		
		5	63.8		5	59.6		
	3.8	1	38.1	37.9	1	35.6	35.1	0.93
		2	36.9		2	35.0		
		3	40.7		3	34.2		
		4	37.7		4	33.0		
		5	36.0		5	37.5		
注入材 R	2.6	1	69.3	65.5	1	68.5	66.8	1.02
		2	63.5		2	64.6		
		3	65.5		3	66.3		
		4	61.8		4	64.4		
		5	67.7		5	70.0		
	4.2	1	25.8	23.5	1	23.3	24.2	1.03
		2	21.8		2	23.5		
		3	21.3		3	25.7		
		4	24.7		4	22.7		
		5	23.7		5	25.7		

(注) 注入材 S (自由発泡倍率 8 倍, 供試体発泡倍率 3~4 倍)
注入材 R (自由発泡倍率 6 倍, 供試体発泡倍率 2~3 倍)

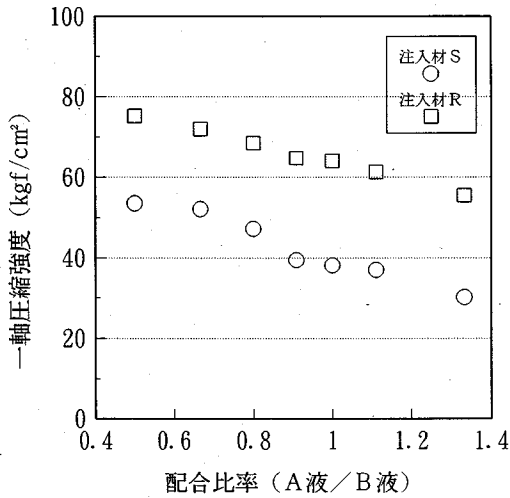


図-7 配合比率を変化させた場合のホモゲル強度

測定されていた¹⁵⁾。このような事例を参考に、発泡倍率 2.5 倍及び 4 倍を目標にして鋼製モールド中の注入材の量を調整 (注入材が 2.5 あるいは 4 倍に膨張したときに鋼製モールドの容積と等しくなるように注入材を入れる) し、φ5cm×10cm のホモゲルテストピースを作成し、材令 1 時間で一軸圧縮強度を測定した。実際の発泡倍率は、供試体の体積および重量を測定し求めた。また、同様に作成したテストピースを 80±1° の熱水に 7 日間浸水状態に保ち、その後一軸圧縮試験を実施した。これは、ウレタン注入材の耐久性の目安を得るための促進試験として行ったものである。表-4 に示すように、約 2.5 倍の発泡倍率に比較して約 4 倍発泡倍率では強度が半減している。また、熱水に浸水させた供試体においては、注入材 S および R のいずれも強度の変化は小さい。

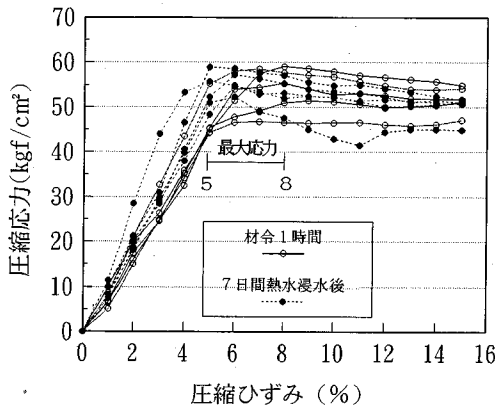
実施工においては、地山の間隙や亀裂の大きさなど注入対象物の条件と、注入量や注入圧などの施工方法および用いる注入材の発泡特性と温度など多くの要因によって注入固結体の発泡倍率は異なることになり、その強度は発泡倍率によって、大きく左右されることが予想される。ウレタン注入式ファアポーリング工法は、現在では仮設工法として用いられている。しかし、表-4 に示したように熱水浸水による強度低下が認められないことから耐久性にも優れた材料であると考えられる。このことから、ウレタンを用いた工法が仮設以外でも使用される可能性が期待できる。例えば、トンネル本体構造物の支持力増強を目的に、ウレタン注入工法が使用されている例もある¹⁶⁾。

(4) 引張強度および接着強度について

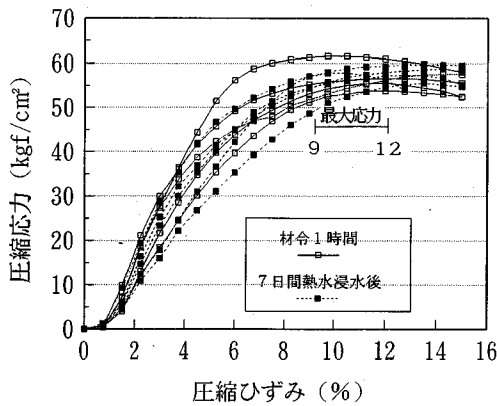
表-4 で示した一軸圧縮強度試験において、圧縮ひず

みが 15% に至るまでのひずみと応力を測定した。これらの一部を図-8 に示すが、注入材 S ではひずみが 5~8% 程度、注入材 R では 9~12% 程度で最大応力を示し、注入材 S では応力~ひずみ関係が明らかな折れ曲がりを出すのに比べて特に注入材 R では滑らかな曲線となっている。両注入材とも少なくともひずみ 15% 程度までの応力低下はほとんどみられない。また、熱水に 7 日間浸水した供試体も材令 1 時間のケースと大差ない応力~ひずみ関係を示している。このように靱性が大きいことから、ファアポーリングとしてのウレタン注入材は、切羽天端の地山変化に追従し崩落を防止することに寄与しているものと考えられる。

次に、発泡倍率 2.0~4.2 の範囲の注入材について写真-3 に示すように、厚さ 1~10mm の供試体を作成し、引張試験機のチャック間距離を 4cm にセットし引張試験を実施した (写真-4 参照)。なお、引張速度は 5mm/分 で一定とした (JIS A 6021)。その結果を図-9 に示す。この図より発泡倍率が大きくなるとともに引張強度は低下する傾向が見られる。また、図-10 は最大引張強度時における伸びの測定結果である。伸び率は、両注入材とも発泡倍率に関係なく、注入材 S では 3~8%、注入材 R では 3~6% と、注入材 S は、R より大きい値を示



(a) 注入材S



(b) 注入材R

図-8 ホモゲルの一軸圧縮試験例

している。これらの結果から亀裂が発達した地山でキープブロックを安定化させるために、引張強度や伸びに対する追随性が必要になるケースにおいては、相対的に注入材Sのほうが優れているとも評価されよう。

(1)でも述べたように、亀裂や層理面および片理面などの不連続面および未固結地山の岩片と接着して崩落を防止するのもウレタン注入式ファアポーリングの注入材に求められる重要な特性と考えられる。このような接着力を把握する目的で試験を行った。ここでは被着体として硬質砂岩（一軸圧縮強度 $q_u=2200\text{kgf/cm}^2$ 程度）、花崗岩（ $q_u=1400\text{kgf/cm}^2$ 程度）、および粘板岩（ $q_u=200\text{kgf/cm}^2$ 程度）の3種類の岩石を整形研磨したものを作成し、表面に注入材SおよびRを厚さ2mmになるように塗布し供試体を作成した（写真-5参照）。発泡開始前に鋼製アタッチメントを装着し、材令3時間で鉛直方向に引張力を加え引張接着試験を行なった（写真-6参照）。また、注入材の厚さによる引張接着強度の変化を把握する目的で、ウレタン塗布直後にアタッチメントをこすりつけるように接着させ注入材の厚さをほぼゼロとし

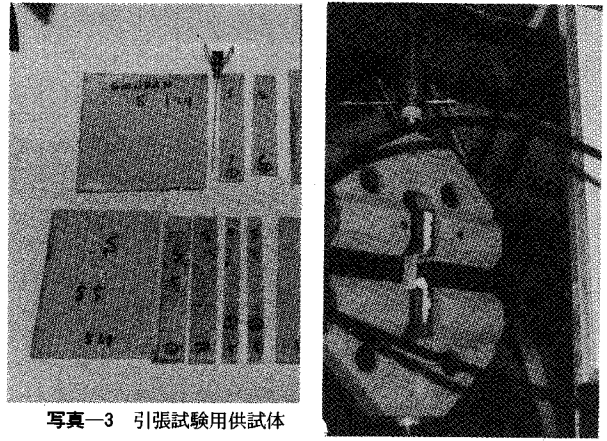


写真-3 引張試験用供試体

写真-4 引張試験装置

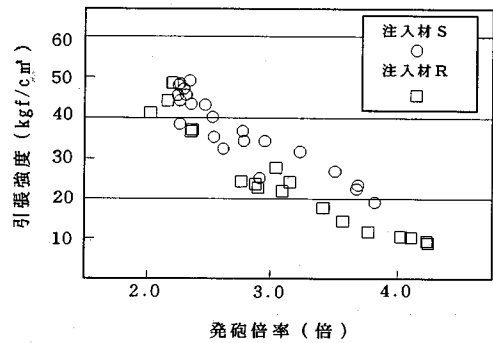


図-9 発泡倍率と引張強度

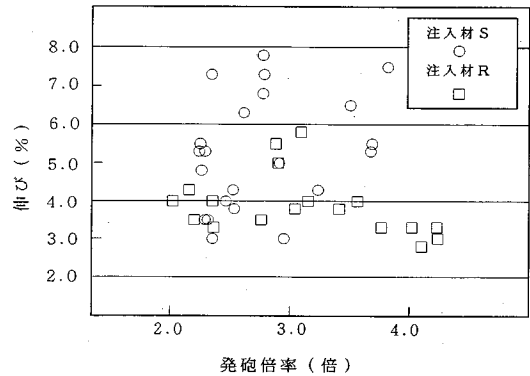


図-10 発泡倍率と伸び率

て、同様な引張接着試験を実施した。なお、接着面積は $4\text{cm} \times 4\text{cm} = 16\text{cm}^2$ で、引張スピードは先に述べた引張試験と同様5mm/分とした。

試験結果は図-11に示すように、被接着体である岩石の種類によって大きく異なる結果となった。粘板岩を被着体としたケースにおいては、破壊のほとんどが被着体の破壊（図-11においては“材料破壊”と区分している）であり、注入材の厚さにかかわらず被着体の強度に接着力が左右されている。硬質砂岩や花崗岩を被着体とした

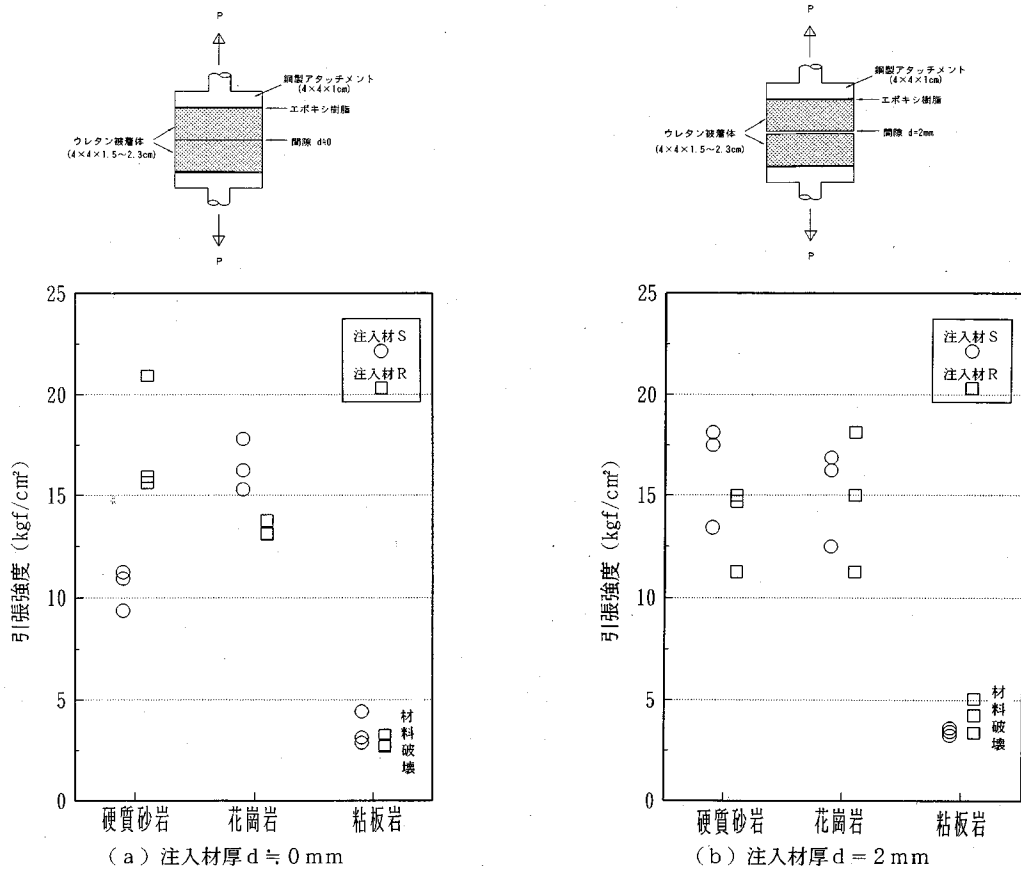


図-11 ウレタン注入材の引張接着強度

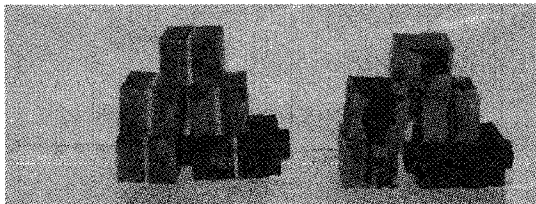


写真-5 引張接着試験供試体 (左: $t=2$ mm, 右: $t=0$ mm)

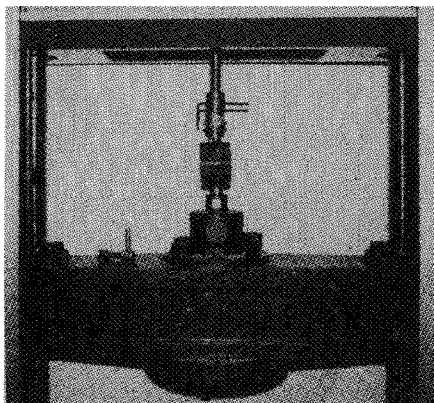


写真-6 引張接着試験状況

場合、注入材の種類にかかわらず $10 \sim 20 \text{ kgf/cm}^2$ の高い引張接着力が得られている。

5. まとめ

ウレタン注入材の各種試験によって、ウレタン注入工の計画や施工に関して以下に示すような有用な知見が得られた。これらの特性を踏まえて注入材の選定や施工方法に配慮することが必要と思われる。また、今後のウレタン注入材の開発においても、その方向を検討するうえで有用なデータになると考えられる。

① 施工性について

- ・注入材 S, R とも、粘性やライズタイムなどの注入の施工性を左右する物性が温度によって大きく変化する。よって、坑口のように外気温に左右される作業条件下においては液温の管理が重要であるが、液温を所定の温度に保持することが困難な場合においては触媒によってライズタイムをある程度調整することが可能である。

- ・発泡現象は急激であり、発泡開始から終了までが $8 \sim 16$ 秒と短い。このような特性がリークや遠方までの逸走を防止しバルクヘッドなしでトンネル切羽での注入を可能にしていると考えられる。

② 改良効果について

・材令 30 分間で 4 週強度と同程度の強度が発現しており、ファアポーリングのように早期強度が必要な注入工においては有効である。

・注入材 S, R とも A 液の配合割合が大きくなると強度が低下するが、30%程度の配合誤差が生じてても実用上の必要強度は確保できるものと考えられる。

・発泡倍率によって、固結体の強度は大きく変化することから、地山中の発泡状況を知ることが重要である。

・7 日間の熱水 (80±1℃) 浸水後においてもほとんど強度低下が認められないことから、耐久性が必要な仮設以外の注入工においても使用できる可能性がある。

・圧縮強度のみならず、引張強度や引張接着強度が大きく、岩石相互を接着させる機能が大きい。そのためトンネル天端崩落に対して有効な注入材であるといえる。

参 考 文 献

- 1) 例えば、(社)日本トンネル技術協会：第 7 回山岳トンネル技術シンポジウム—NATM の補助工法—p. 2, 1987 年 6 月 26 日。
- 2) 岩永茂治・吉田進・佐藤義和：被りの浅い崖錐堆積層下での AGF 施工, (社)日本トンネル技術協会, 第 32 回施工体験発表会, pp. 37~42, 1993 年 12 月。
- 3) 春中紘一・伊藤邦彦：テレビチューブ工法の施工概要について, (社)日本トンネル技術協会, 第 32 回施工体験発表会, pp. 31~36, 1993 年 12 月。
- 4) 例えば、篠崎秀敏・肥後満朗・寺内伸・荒木田憲：供用線に近接した大断面トンネル施工, (社)日本トンネル技術協会, 第 32 回施工体験発表会, pp. 13~18, 1993 年 12 月。
- 5) ジェオフロンテ研究会：ウレタン注入式ファアパイリング技術資料, p. 51, 1992 年 11 月。
- 6) 例えば、井上定昭・山田憲夫：崩壊性地山における坑口施工, トンネルと地下, pp. 7~16, 1983 年 12 月。
- 7) 川地武・久保博・坂下智子：ウレタン系硬化剤を用いたグラウト材の研究 (その 1) —ウレタン系硬化材とセメントの混合系の物性—土木学会第 47 回年次学術講演会, 第 IV 部門, pp. 402~403, 1992 年。
- 8) 志賀孝和・居相好信・藤沢薫・宇田信也・小柳博：高浸透性ウレタン圧入式ファアパイリングの開発, 土木学会第 48 回年次学術講演会, 第 IV 部門, pp. 98~99, 1993 年。
- 9) 守屋進・片脇清：ウレタン注入材の安全性に関する試験, (社)日本道路協会, 第 20 回日本道路会議, 一般論文集, pp. 260~261, 1993 年。
- 10) 日本道路公団, (財)国土開発技術研究センター：山岳トンネル工法におけるウレタン注入の安全管理に関するガイドライン, pp. 1~2, 1992 年 2 月。
- 11) 例えば、Maurice Jones : Taking wise precautions, Tunnels & Tunnelling, P58, September 1992.
- 12) 土質工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで, pp. 55~56, 1985 年 12 月。
- 13) 例えば、土木工学社：山岳トンネルの新技術, p. 108, 1991 年 11 月。
- 14) (社)日本鉄道施設協会：注入の設計施工指針, pp. 36, 37, 1987 年 1 月。
- 15) 土木工学社：山岳トンネルの新技術, p. 111, 1991 年 11 月。
- 16) 唐沢尚紀・岩村 巖・後藤有志・山路茂樹：重交通道路下のトンネルをバイブルーフで拡幅, トンネルと地下, pp. 45~51, 1994 年 3 月。

(1994.3.24 受付)

A BASIC STUDY ON CHARACTERISTICS OF URETHANE MATERIAL FOR GROUT FOREPOLING APPLIED FOR TUNNELLING

Mitsuaki HIGO, Hirohisa MAKI, Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

Considering actual applicability and effectiveness at the site, two different urethane grout materials currently used forepoling were tested in a laboratory. And following test results were obtained :

- ①Urethan materials are effervesced after grouting, and its cohesiveness and rising time which influence on workability ara affected by temperature.
- ②Concerning reinforcement of ground, quick reinforcing effect is achieved, and not only compressive strength but also tensile strength and adhesive tensile strength of material after grouting are found enough.