

止水目的で用いる地盤注入材の 性能評価に関する実験検討

石井 裕泰¹・西田 与志雄²・松山 雄司³・笹原 茂生⁴

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1）

E-mail: hiroyasu.ishii@sakura.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1）

E-mail: nishida@ce.taisei.co.jp

³正会員 富士化学株式会社 テクニカルセンター（〒509-9132 岐阜県中津川市茄子川中垣外 1683-1880）

E-mail: y-matsuyama@fuji-chemical.jp

⁴正会員 富士化学株式会社 テクニカルセンター（〒509-9132 岐阜県中津川市茄子川中垣外 1683-1880）

E-mail: s-sasahara@fuji-chemical.jp

地下掘削工事や各種トンネル工事など，地下工事の大規模・大深度化が進む中，様々な地盤リスクに対処する地盤改良工法の重要性が高まっている．そこで著者らは，大規模出水の兆候として通水状態にある地盤での適用を前提に，溶液型瞬結タイプ薬液の止水性能に関する検討にあたった．本報では，まず，地盤注入工法を対象とした既往の実験検討形態を概観した上で，性能比較を目的に考案した模型実験手法を提示する．次に示す実験検討では，水，市販薬液，および低温条件での適用に配慮した試作薬液を注入材として用いた実験結果を通して，模型実験での挙動，低温条件下で両薬液に認められた差異を解説する．あわせて，性能比較指標として実験で得られた通水排水速度変化に着目し，止水性能の定量比較にあつての有効性・活用性を明示する．

Key Words: ground improvement, underground excavation, geotechnical risks, water seepage

1. はじめに

シールドトンネルの発進・到達時や地中切り上げ時に遭遇するトラブルの代表例として，砂質地盤にて生じる異常出水・土砂流失が挙げられる¹⁾．その事前対策として，薬液注入や高圧噴射攪拌，あるいは地盤凍結により透水性の低減と地盤の強化が図られるが，地盤の不均一性により効果の欠損を残すことは避けられない．その結果，異常出水・土砂流出の兆候として小規模出水が生じ，その対処法としてモルタル打設，泥水打設，地盤注入工法等が適用されている^{2) 3) 4)}．

一方，近年の都心部インフラ整備と地下開発技術の進展により，深度40mを超える大土被り・高水压下で大規模かつ複雑な地下構造物を施工する事例が増加傾向にある^{5) 6)}．この種の工事で異常出水・土砂流出が生じればトラブル規模と周辺地上部への影響度が多大になることから，出水対処法にはより高い確実性と信頼度が求められることになる．

以上の背景の中，著者らは上記対処法のうち，注入後，数秒～数十秒でゲル化する溶液型瞬結タイプの注入材に着目し，出水対処で用いる場合の性能評価，適否判断について検討した．本報では，まず，地盤注入材を対象とした既往の室内実験法を概観し，本検討に際しての実験形態を検討する．次に，考案した一次元水流条件で止水状況を調査する実験方法について，そのシステム概要，条件設定根拠を解説する．続く実験結果と考察では，地盤凍結の欠損部での出水を念頭にした低温条件も考慮した実験結果を提示の上，性能評価指標を提案し，その有効性・活用性を明示する．

2. 実験形態

(1) 既往の注入・浸透実験

地盤注入材の施工過程や改良効果を検討する注入・浸透実験に関しては，本報で扱う溶液型瞬結タイプとともに

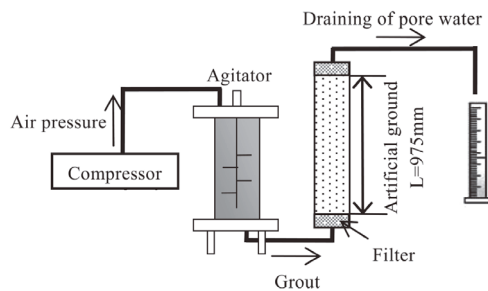


図-1 一次元浸透実験の例⁸⁾

に、ゲル化時間が数十分以上の緩結タイプ、さらにはセメントミルクに代表される懸濁型注入材を対象に、「一次元モデル」、「三次元モデル」に大別して検討がなされている。

a) 一次元モデル

実際の施工過程を、室内で最も単純化した形態にて検討する方法として一次元浸透実験が用いられる^{7) 8)}。溶液型緩結タイプを対象とした場合には、数時間にわたる浸透時間で生じる移流・拡散の影響を、懸濁型注入材に対しては、懸濁分の目詰まりや脱水の影響を考慮し浸透可能距離の検証に供される。また、達成改良強度の検証のため、実験後に養生期間を経て一次元浸透部から切り出される固化改良体は、一軸圧縮強度試験などで利用される要素供試体として活用される。その実験方法は標準化されるに至っていないが、図-1に示す通り一般的には直径 50mm、長さ 1,000mm 程度の円柱容器に模型地盤を準備し、注入材は下部から上方に目標範囲までの浸透や目詰まりによる閉塞が生じるまで圧入供給される。ただし本形態は、1 液にまとめられた薬液を相応の時間をかけて供給する前提になっており、本報が扱う瞬結タイプにはそのまま適用はできない。要素供試体作製の代替法としては、ラインミキサーを併用し注入材を混合後速やかに砂質土の空隙に供給する図-2の方法が、地盤工学会による試験基準「JGS 0911：薬液注入による安定処理土の供試体作製方法」において参考法として示されている。

b) 三次元モデル

上記一次元モデルに比べて、三次元モデルはより忠実に実際の注入形態を再現したものとなり、改良メカニズムや注入固化体形状の調査を検討する方法として古くから用いられている^{9) 10) 11)}。室内検討においては、円形土槽やドラム缶内に設置した模型地盤を対象に注入材を細径の注入管を通して供給し、球形を理想としたサンドゲル固化体を形成する。上記一次元実験と同様に溶液型緩結タイプを対象とした検討が多くを占めるが、森ら¹²⁾は、本報が検討対象とする瞬結タイプを対象に、構成材料 2 液を個別にセットし、地盤内への圧入供給直前で混合する図-3のシステムにより実験検討にあたった。その結果、地盤内に浸透した注入材は先行してゲル化した部分を穿

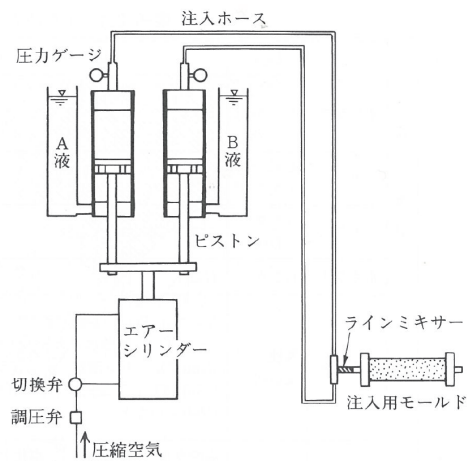


図-2 瞬結タイプ薬液を用いる場合の装置の例 (JGS0911 より引用)

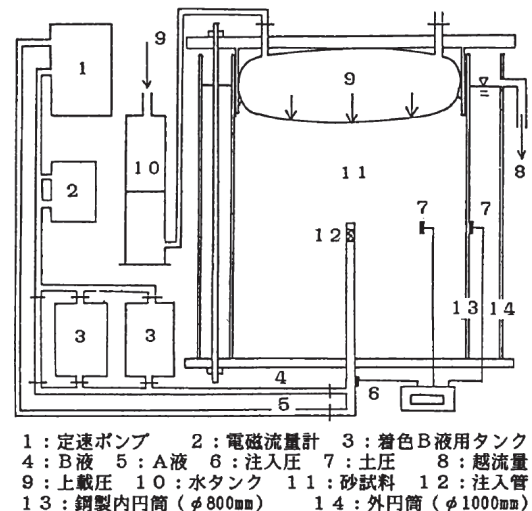


図-3 瞬結タイプを対象とした三次元注入実験装置⁹⁾

孔した上で浸透することを繰り返しながら地盤内に広がること、対象土の透水性が大きければ注入当初の一定期間にわたり球形の固化体が形成できること、その後は注入材は割裂しながら広がり固結体は板状に形成されることを明らかにした。

(2) 基本形態の検討

出水対処で用いる場合の止水性能に着目した実験方法の具体化にあたっては、まず、方針として以下を検討の前提に定めた。

- ・ 実験では、実際の使用状況を簡易に再現するため、間隙水に一定速度の水流が生じた状態に注入材を供給する。
- ・ 止水の進展を水流測定により直接的に把握し、性能評価指標として活用する。
- ・ 試験法の一般化と汎用化に配慮し、既往の注入・浸透実験で採用された方式を可能な限り踏襲し、実験

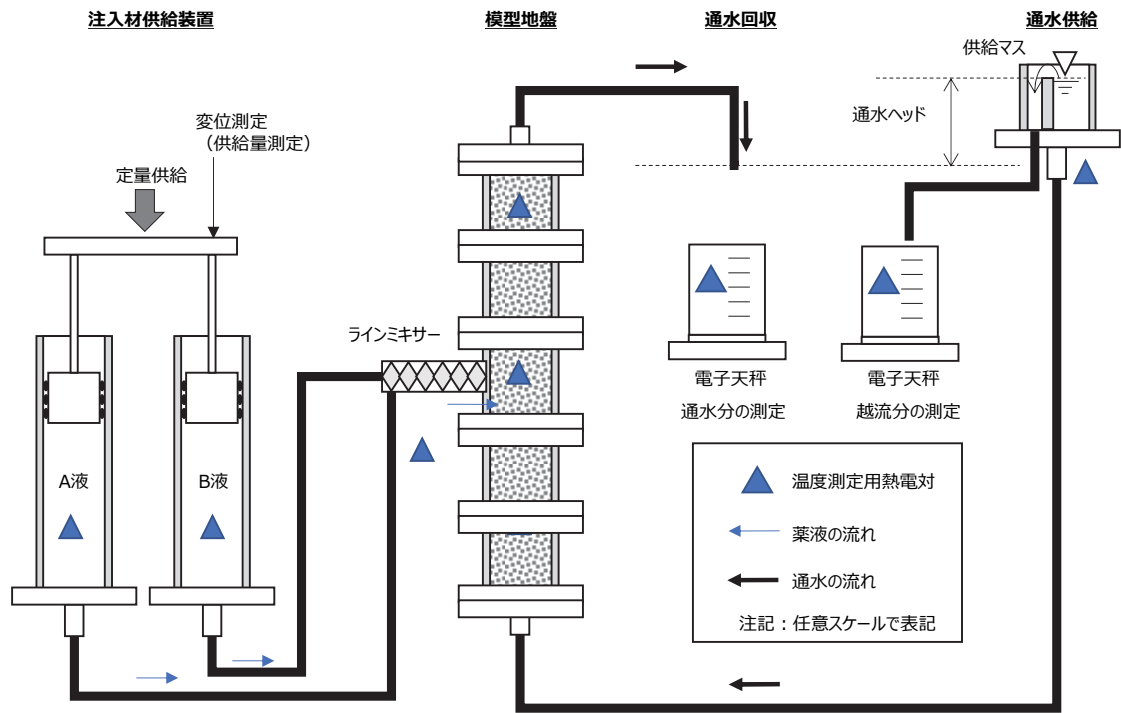


図4 実験システム

条件の再現が容易な単純な機構・構造を採用する。

その上で、前述の既往の検討を参照し、模型地盤は直径 50mm、長さ 1,000mm の円柱容器（図-1 参照）内に設置し、注入材はピストンによる押し出しとラインミキサーにより混合する方式（図-2、図-3 参照）で供給することとした。

3. 実験方法

(1) 実験システム

本報の検討で考案した実験システムを図4、写真-1、写真-2 に示す。注入対象の模型地盤は、直径 50mm、長さ 1,000mm の円筒形で、実験観察と解体作業の容易さを考慮して長さ 200mm に分割した透明塩化ビニル管を縦列に接続した。容器下方から上方にはヘッド差により一定水流を確保した上で、排出水量を経時的に重量測定して止水性能の発揮度合いを把握することとした。この時、供給側でヘッドを固定するために設けた供給マスには、蛇口の開口は固定して直接水道水を供給し続け、実際の流入量の変化の把握、さらには浸透状況の理解につなげるべく越流分を重量測定した。注入材の供給箇所は模型地盤の中心高さに設けた。既往の検討に準じて注入材供給箇所を模型地盤下層端部にしなかった理由は、注入材の逆流により通水経路を閉塞し、模型地盤内での止水効果を適切に評価できなくなることを回避するためである。注入材は 2 液を等量混合する瞬結タイプの溶液型配合



写真-1 実験システム全景



写真-2 ラインミキサーと模型地盤

を利用することから、A・B 両液を個々の円筒容器に準備の上、载荷試験装置（(株)エー・アンド・ディ製、テンシロン万能試験機）を活用して後述する注入材の供給

速度に準じた変位制御にてピストンを押し出し等量供給した。ホースを介して注入材を供給するにあたり、模型地盤への流入直前にラインミキサー（(株)ノリタケカンパニーリミテド、樹脂製ノズル）で混合する機構を設けた。

(2) 使用材料

a) 模型地盤

模型地盤材料は、実験時の通水状況と止水性能の発揮度合いに影響し、実験結果を左右することになる。仮に具体の適用箇所を対象とした適用性や効果の検証を目的とした場合には、現地の材料を用いることが不可欠となる。一方、本試験は通水状況下で用いられる注入材が有する止水性能の検証を目的としていることから、特定現場で入手できる材料は用いずに、a)通水速度を通水ヘッドの調整である程度自由に設定できること、b)試験に際して入手が容易であること、を念頭にした。以上に基づき、模型地盤材料にはφ5～10mmのコンクリート用粗骨材を用いることとした。

b) 注入材

本検討で用いた地盤注入材を表-1に示す。いずれも溶液型薬液に分類されるもので、市販薬液に対して試作薬液は低温状態での止水注入を想定し調整材や促進材を添加している。構成材料の違いはあるが、両者の硬化材の

表-1 検討対象薬液（1,000Lあたり）

配合重量 (kg)		市販薬液	試作薬液
A 液 (500L)	主材	118.4	118.3
	硬化材	33.6	20.9
	促進材	-	18.6
	水	390.1	383.4
B 液 (500L)	主材	177.2	177.0
	調整材	-	36.5
	水	365.1	336.2
合計		1084.4	1090.9

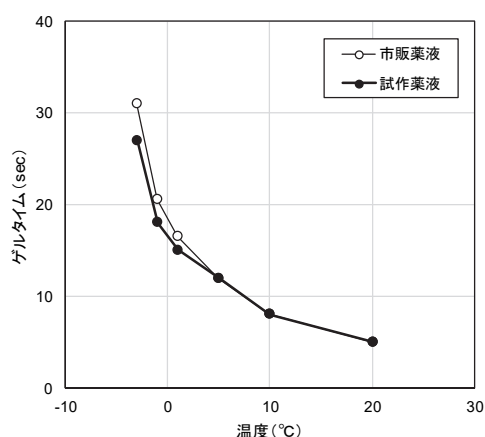


図-5 使用注入材の温度とゲルタイムの関係

含有量や密度は、概ね等価となっている。

地盤注入材に関して一般的に提示される特性値として、両薬液が備える温度とゲルタイムの関係を図-5に示す。5℃以下では2秒程度の差異が見られるものの、試作薬液に添加した促進材や調整材はゲルタイムにはほとんど影響せず、両配合の特性は概ね一致したものと判断される。

以上の基本特性に基づけば、比較選定した両配合については、主材濃度や密度などの物理特性とゲルタイムが該当する化学特性については同等とみなされ、性能ベースでの明確な相違を見出すには至らない。

(3) 実験条件・手順

a) 間隙水の通水条件

通水条件の設定については、まず、薬液注入活用に関する下記実態を念頭に置いた。すなわち、止水目的に地盤凍結工法を用いる場合、地下水流が目安として1m/dayを超えると凍土の成長が阻害されるため、流速を緩和させる補助工法として溶液型瞬結タイプを用いた薬液注入工法が採用される¹³⁾。そこで、上記目安値を十分に超過した上で、実験条件としての簡潔・明瞭さを備える条件として、全長1,000mmの模型地盤容器の間隙を3分かけて間隙水が通過する設定とした。従って、見かけの通水速度を $1,000\text{mm}/3\text{ mins}=33\text{cm/min}$ (480m/day) と定め、通水排水量の設定値を $33\text{cm/min} \times 2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 3.14 \times 0.45(\text{間隙比相当値})=291\text{cm}^3/\text{min}$ として、事前に通水供給と排水部のヘッド差を調整し約30mmに固定した。

b) 注入材の供給条件

上記市販・試作薬液について、20℃の室温状態に加えて、実験に先立ち注入材を0℃未満に冷却した条件を加えた全4ケースを実施した。後者については、実施工時での適用条件との対応で厳密性は欠けるものの、地盤凍結工法との併用適用で注入材が冷却される場合を念頭に置く。

また、注入材の供給速度は、実験条件としての簡潔・明瞭さのみを考慮して、上記通水と等量として供給装置を制御した。

c) 実験手順

実験形態の確認を意図して注入材に水を用いた場合を

表-2 実験条件

Case	温度	注入材	備考
0	室温	水	実験形態の確認
1		市販薬液	温度・薬液による比較
2		試作薬液	
3	低温	市販薬液	
4		試作薬液	

含めた表-2に示す条件に対して、下記の手順で実験を行った。

- 手順 i 実験システムをセットする。低温条件の場合は、供給装置に収納された A 液、B 液を塩氷水囊で約-5℃に冷却する。
- 手順 ii 通水を開始する。
- 手順 iii 定常状態にあることを確認の上、注入材の供給を開始する。
- 手順 iv 試験方法の確認のため、注入材に水を用いた Case0 では、3 分間供給を継続する。
- 手順 v 注入材に薬液を用いた Case1~4 では、一定速度で注入材を供給する間、通水排水量が徐々に減少の様子を目視観察し、排水量がなくなった時点、あるいは少量排水の定常状態に落ち着いたことを確認できた時点で注入材の供給を停止する。

以上の手順により、Case1~4 における注入材の供給時間は、後述のように最大 1.5 分となった。

4. 実験結果と考察

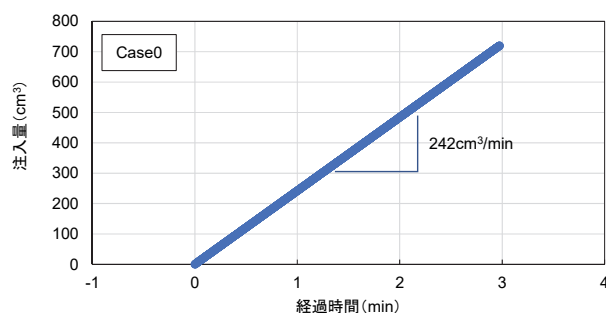
(1) 水を供給した場合 (Case0)

図-6 に、注入材として水を供給した Case0 で記録した (a)注入量、(b)越流・通水排水量、および(b)より換算した排水速度の経時変化を示す。これらの結果からは、ゲル化を伴わない注入材の供給に伴う現象は以下のように解釈される。

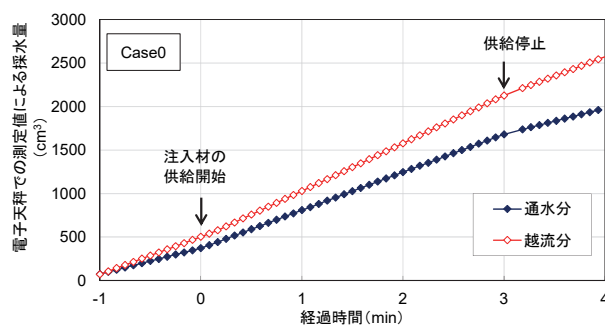
- ・ 注入材の供給開始に伴い、通水分排水速度が増加する。通水分排水速度の増分 ($142\text{cm}^3/\text{min}$, (c)図中表記参照) は、実績の注入速度 ($242\text{cm}^3/\text{min}$, (a)図中表記参照) に対して 60%程度に留まる。
- ・ 越流分排水速度も注入材の供給開始に伴い増加する ($118\text{cm}^3/\text{min}$, (c)図中表記参照)。すなわち、注入材の供給が抵抗となり、模型地盤への通水流入量が減少した。
- ・ 供給開始後は定常状態に落ち着き、3 分の継続時間を通して概ね一定の排水量を保持した。通水分排水速度の増分 ($142\text{cm}^3/\text{min}$) と越流分排水速度の増分 ($118\text{cm}^3/\text{min}$) の和 ($260\text{cm}^3/\text{min}$) は、注入速度 ($242\text{cm}^3/\text{min}$) に近い水準となった。

(2) 薬液を供給した場合 (Case1~4)

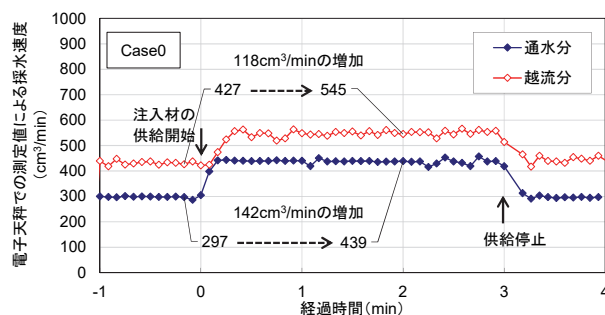
注入材として市販薬液、試作薬液を用いた結果、いずれも供給開始から数 10 秒で、写真-3 に示すように、供給箇所を中心に薬液が白濁し模型地盤の間隙内でゲル化を確認した。目視観察において白濁は、まず供給口位置から上方 100mm 程度の範囲で進展し、その後、供給口



(a) 注入量



(b) 排水量



(c) 排水速度

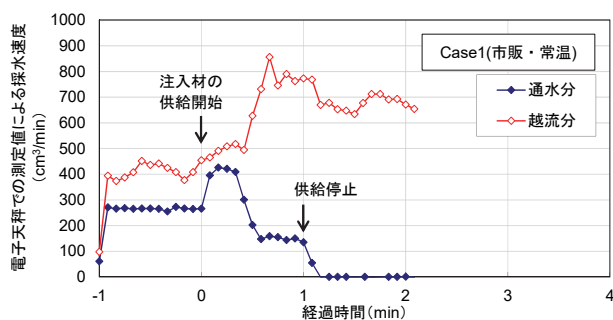
図-6 注入量・排水速度の経時変化 (Case0)



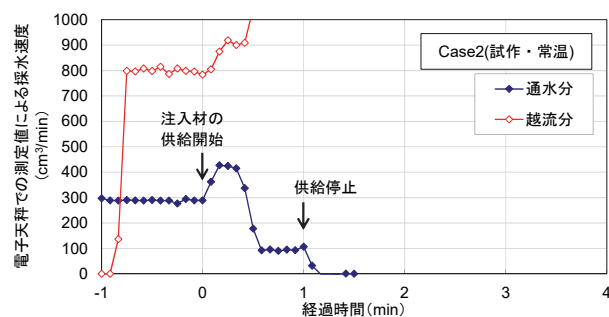
写真-3 ゲル化状況

下方に 50~100mm の領域に広がる傾向を見せた。

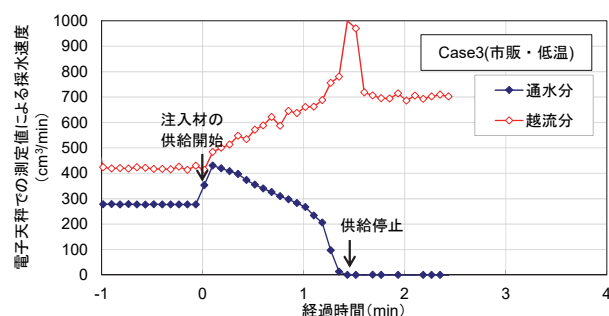
図-7 に、前述の図-6(c)と同様の記録として Case1~4 で記録した排水速度の経時変化を示す。いずれのケースでも、注入材供給開始直後は Case0 と同様に通水分排水量



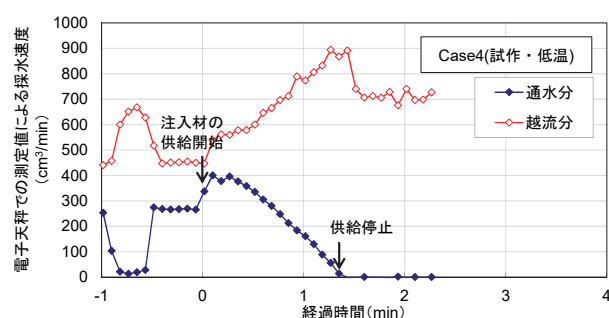
(a) Case1 (市販薬液・常温)



(b) Case2 (試作薬液・常温)



(c) Case3 (市販薬液・低温)



(d) Case4 (試作薬液・低温)

図-7 排水速度の経時変化 (Case1~4)

の増加が一時的に生じたが、その後はゲル形成の効果として低下する傾向を示した。常温条件でのCase1, 2については、供給開始から20秒程度後から、急激に排水量が減る様子を目視と測定データで確認した。結果として注入材の供給を停止したタイミングは、常温条件である

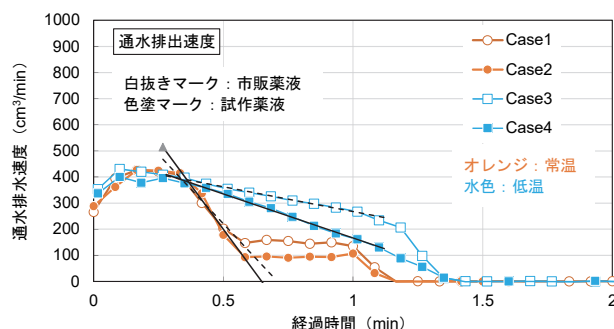


図-8 排水速度の経時変化

表-3 排水速度変化率の比較

	市販薬液	試作薬液	試作市販
常温 ($\text{cm}^3/\text{min}/\text{min}$)	-1,060	-1,351	1.27
低温 ($\text{cm}^3/\text{min}/\text{min}$)	-190	-337	1.77

Case1, 2は両薬液とも供給開始後1分、低温条件では止水効果の発揮が相対的に緩慢となり、Case3の市販薬液では1分30秒、Case4の試作薬液では1分20秒となった。

一方、越流分の変化については、注入材の供給開始に先立ち、排水速度の水準や安定性が十分に保たれていないことを示している。上記観察を大きく変える要因にはならないと考えられるが、試験方法の統一化や分析データとしての活用を念頭に置けば、通水供給方法に改善余地が認められる。

(3) 止水性能の評価

上記観察を通しては、止水性能の評価指標として通水分排水速度の活用が有力視される。そこで、まず、Case1~4の結果を図-8に集約した。本結果から以下のことが言える。

- ・ 常温条件では、市販薬液、試作薬液の区別なくほぼ同じ傾向で通水量が低下した。
- ・ 低温条件では、両薬液で排水速度の低下速度に明らかな違いが見られ、試作薬液が相対的に止水性能に勝る。

本図で確認できる排水速度の変化は、薬液性能を表す指標として活用性が見いだせる。そこで、図中に付記するとおり排水速度が線形的に減少する区間で近似線を描き、その勾配を排水速度変化率として表-3に抽出した。本指標に基づけば、本報で示した実験条件下での目安として、試作薬液は市販薬液に比べて常温で1.3倍程度、低温で1.8倍程度の効率で止水効果を発揮できると表現できる。

5. おわりに

本取り組みでは一次元通水条件で止水状況を調査する試験法を考案し、複数の注入材を用いた実験を行い、

- ・ 実際の適用形態を単純化した試験方法により、止水性能を反映する指標として排水速度変化の利用が有力視されること、
- ・ 本指標の活用により、現状、薬液間での性能比較として引用される温度とゲルタイムの関係に対して、より明瞭な性能比較を見込めること、

を示した。一方で、今後の活用と普及に向けては下記が課題に挙げられる。

- ・ 通水量の保持をはじめ、統一条件での実施を確実にする試験方法・手順の改善。
- ・ 個々で異なる適用条件下で利用される注入材に対して、提案指標の有効性・汎用性の検証。
- ・ 必要に応じて試験方法・評価指標の見直し、再検討。

引き続き、大規模化・複雑化の傾向にある我が国の地下掘削や各種トンネル工事を念頭に、リスク低減技術としての検討を推進する所存である。

参考文献

- 1) 小泉淳：大深度地下利用に関する技術的課題，土木学会論文集，No.588/VI-38，1-20，1998.
- 2) 塩谷智弘，上新原公治：地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤の特性と対応技術 2. シールド工事におけるトラブル事例とその対応，地盤工学会誌，Vol.62，No.4，pp.54-61，2014.
- 3) 長山喜則，水嶋浩治，高橋祐史：地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤の特性と対応技術 4. 開削工事におけるトラブル事例とその対応，地盤工学会誌，Vol.62，No.6，pp.37-44，2014.
- 4) 戸部暢，加藤哲治：地下水流の影響を受ける厚みのある凍土壁の凍結閉塞について，土木学会論文集，No.547/III-36，pp.75-86，1996.
- 5) 並川賢治：中央環状品川線の事業概要，基礎工，Vol.43，No.3，pp.14-17，2015.
- 6) 柴田芳雄，加藤健治，杉井淳一：東京外かく環状道路（関越～東名）の事業概要，基礎工，Vol.47，No.7，pp.22-24，2019.
- 7) 林健太郎，善功企，山崎浩之：溶液型薬液による浸透注入時の移流分散現象，土木学会論文集，No.771/III-68，pp.11-20，2004.
- 8) 小泉悠，田中俊行，竹内仁哉，金沢智彦，西垣誠：超微粒子セメント注入材による砂質地盤への注入工法の開発，材料，Vol.61，No.1，pp.52-57，2012.
- 9) 森麟，田村昌仁，平野学：ゲル化時間の長い薬液の砂質地盤における注入形態とその支配条件，土木学会論文集，No.338/III-8，pp.131-140，1987.
- 10) 崔亢吉，風間基樹，柳沢栄司：薬液注入条件による砂の固結形状の変化，土木学会論文集，No.582/III-41，pp.109-123，1997.
- 11) 林健太郎，山崎浩之，善功企：溶液型薬液注入工法の施工管理方法に起因する改良土の強度低下メカニズム，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.70，No.4，pp.387-394，2014.
- 12) 森麟，田村昌仁，原口賢一：ゲル化時間の短い急結・瞬結性薬液の砂質地盤における注入固化形態とその支配条件，土木学会論文集，No.406/III-11，pp.157-166，1989.
- 13) 凍土分科会：凍土の知識 -人工凍土壁の技術-，日本雪氷学会誌「雪氷」，Vol.76，No.2，pp.179-192，2014.

(2019. 8. 9 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON PERFORMANCE-BASED ESTIMATION OF CHEMICAL GROUTING IMPLIMENTED FOR WATER STOPPAGE

Hiroyasu ISHII, Yoshio NISHIDA, Yuji MATSUYAMA and Shigeo SASAHARA

Since excavations and tunnelings are recently larger and deeper in urban underground developments, damages induced by geohazards tend to be more significant than those met in ordinary scale constructions. Accordingly, ground improvement techniques should be more usable and reliable against geotechnically hazardous troubles. Focusing on excess water flow as a typical problem in practical works and chemical grouting as a possible countermeasure for it, the authors developed a laboratory testing method by which performance of chemical grouting is schematically demonstrated. In this paper, conventional testing methods for chemical grouting are firstly reviewed and the new testing method is secondarily introduced and explained. Therdly, testing conditions and results are shown to discuss the results obtained by using a commercially available chemical grout as well as newly proposed one by the authors. The results clarified the difference of the mutual grout performance especially under a low temperature condition, inferring that the testing method is effective to estimate grout performance under implementation with ground freezings technique. Consequently, it is demonstrated that an index based on change in experimentally observed water seepage is effective to clarify the difference of chemical grout performances when implemented for water stoppage.