

未固結地山に対する注入工法の検討と 高浸透特殊水ガラス系懸濁型注入材の開発

佐藤 一成¹・山本 拓治²・小泉 悠³・梅下 浩樹⁴・栗田 学⁵

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:satohis@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:yamataku@kajima.com

³鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:koizumyu@kajima.com

⁴鹿島建設株式会社 土木営業本部営業部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11 鹿島赤坂別館)

E-mail:umeshita@kajima.com

⁵正会員 鹿島建設株式会社 東京土木支店 (〒107-8477 東京都港区元赤坂1-3-8)

E-mail:kurita@kajima.com

未固結地山や崖錐層に代表される自立性の乏しい砂地山でのトンネル工事では崩落防止を目的とした先受け工法や切羽補強工が計画される。このようなトンネルを安全かつ急速に施工するためには、地山に適した注入材の選定と、注入材を均質に注入できる施工システムの開発、及び注入時間を短縮できる設備が不可欠である。本稿では乾燥流砂による天端・切羽崩落が起きやすいトンネル工事での注入工法の検討と、検討を行ったトンネルよりも悪い地質に適合する新しい注入材の開発を行った。注入内管を部屋分けすることで細粒分を含む密な地山に均質な改良を行うことができた。新しい注入材は細粒分を含む砂地盤でも均質に改良でき、高い早期強度を発現できた。

Key Words :grouting, grouting method, grout agents, water-glass grout, auxiliary method, uncemented deposit

1. はじめに

圏央道山口トンネルの地質は乾燥流砂が発生しやすい自立性の乏しい未固結の砂質土であったため、崩落防止を目的とした先受け工法や切羽補強工法が計画されていた。また、圏央道の早期開通のために、急速施工の達成が望まれていた。このような地質のトンネルを、安全かつ急速に施工するためには、地山に適した注入材の選定と、その注入材を均質に注入できる施工システムの開発、及び注入時間を短縮できる設備の開発が必要であった。

注入材は筆者ら¹⁾²⁾が開発した溶液型と懸濁型の特殊水ガラス系注入材のうち、同種の地質を有する隣接のトンネルで有効性が認められていた溶液型注入材を使用した。従来の注入システムは1室1バルブから3室3バルブの施工³⁾が一般的であったが、本工事では、1鋼管内に4セットの注入管をセットし、各注入範囲間をパッカ

ーで分けをした4室4バルブ同時注入(図-1参照)を実現することにより、施工時間の短縮を目指した。

また、山口トンネルより湧水や空隙が多いトンネルでの施工においては、特殊水ガラス系注入材以上のホモゲル強度、浸透性、逸走制御が注入材の要求性能として求められると思われる。筆者ら¹⁾²⁾が開発した特殊水ガラス系注入材のうち、溶液型注入材では浸透性を確保できるが、ホモゲル強度が要求性能を満たさず、懸濁型注入材ではホモゲル強度を確保できるが、浸透性を満たすことが困難であると考えられる。そこで、懸濁型注入材の配合を変更することで、浸透性と改良範囲の改良した高浸透特殊水ガラス系懸濁型注入材の開発を目指した。

本報告では、圏央道山口トンネルで採用した注入工法の室内試験での検討とその実績を報告するとともに、高浸透特殊水ガラス系懸濁型注入材の開発成果について報告する。

表-1 試験地盤ケース

ケース	隔壁	室数・バルブ数	注入地盤の飽和度
1	有	3室3バルブ	48%
2	無	1室3バルブ	48%
3	有	3室3バルブ	100%



図-1 4室同時注入インサートホース

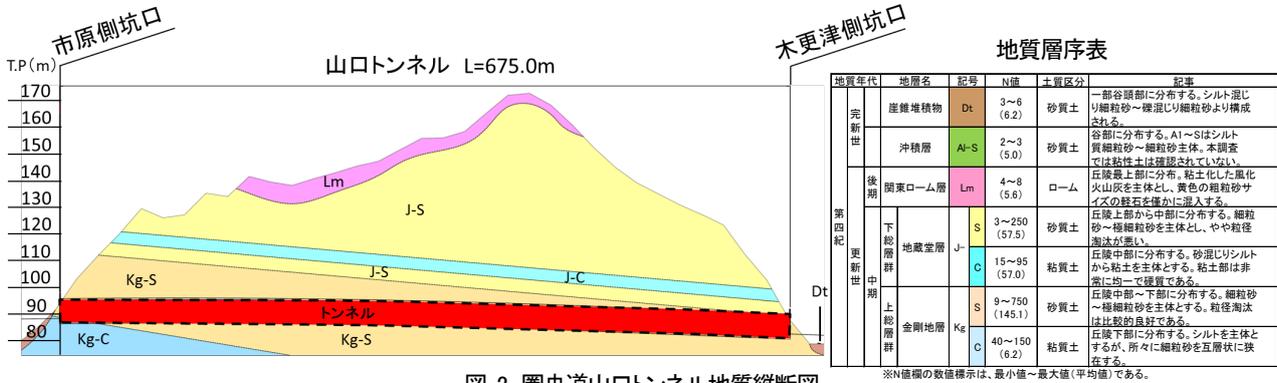


図-2 圏央道山口トンネル地質縦断面図

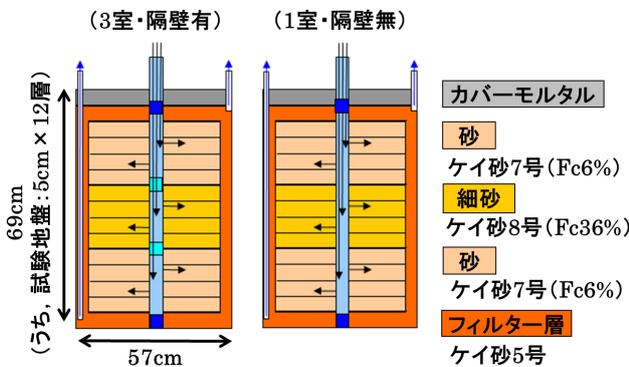


図-3 試験地盤

表-2 注入材の標準配合

A液	B液	強度	ゲルタイム
特殊水ガラス:500ℓ	有機硬化剤:100ℓ	材齢1日でサンドゲル 1N/mm ²	8~45分 3分程度にも調整可
	調整剤:0~30ℓ		
	水:370~400ℓ		

2. 地質状況

図-2に山口トンネルの地質縦断面図を示す。地質はトンネル切羽部および天端は砂質土であり、細粒~極細粒の密な砂層である。その物性は、細粒分質砂[Sf]（細粒分23~35%）、細粒分まじり砂[S-F]（細粒分7%、均等係数2未満）で、比較的均質な砂である。地下水位はトンネル底盤レベルにあり、大量の湧水は考えられないが、地下水位より上の砂層は、トンネル掘削により、乾燥流砂による天端・切羽崩落が起きやすい地質であった。地質調査結果では、含水比は12.2%であり、乾燥流砂を引き起こす指標である15%以下であった。地山の粒度より推定された透水係数は、細粒分質砂[Sf]で $1.1 \sim 4.0 \times 10^{-4}$ (cm/s)、細粒分まじり砂[S-F]で $1.4 \sim 3.0 \times 10^{-3}$ (cm/s)であった。

3. 注入工法の検討

- (1) 室内注入試験
 - a) 試験方法

4室4バルブ同時注入が注入材の改良範囲に及ぼす影響の検討を、隔壁の有無と、注入地盤の飽和度をパラメータとし、試験地盤への改良効果を評価した。注入試験のケースを表-1に示す。室内試験は、図-3に示すような3次元注入試験装置を用いた。なお、現場では4室4バルブの注入が行われるが、試験設備の都合上、室内試験では3室3バルブと1室3バルブの試験を行った。試験地盤は山口トンネル現場の条件を想定し、天端地盤の細粒分含有率とほぼ等しい東北ケイ砂7号と、トンネル断面の細粒分含有率に等しい東北ケイ砂8号を試料として用いた。不均質な地盤を再現するため、図-3に示すように、上下層に7号砂を、中間層により細かな8号砂を配置した。含水比は、流砂を引き起こしやすい15%の不飽和地盤と、飽和地盤とした。トンネル断面から天端地盤の間隙比が0.81~0.846であったので、室内試験では0.82とした。注入材は特殊水ガラス系溶液型注入材を用い、ゲル化時間は注入時間+10分の30分とし、調整剤の分量を決定した。注入材の標準配合と混合後の物性を表-2に示す。

b) 試験結果

試験結果を図-4に示す。隔壁を設けたケース1の改良出来形は、中間層部分で改良径が多少小さくなったものの、ケース2に比較してより均等な円柱状に近くなった。ケース2の改良体は、中間層部分の改良径が小さく、上層部分の改良径は設計改良径を上回った。これは、細粒分の多い中間層に浸透しなかったグラウトが、隔壁が無いために上方へ回り、上部のバルブから吐出されたものと考えられる。また、ケース3では、他の2ケースに比べさらに円柱状に近い形になった。以上のことから、飽和地盤の方が不飽和地盤より、均質な改良が可能となることがわかり、さらに、隔壁を設けることで不均質な改良が緩和されることが分かった。

(2) 施工実績

施工実績支保パターン図を図-5、図-6に示す。注入は4台の注入ポンプを2セット使用した。4台同時注入インサートホースを使用することで、均一な改良体を早期に造成し、確実な改良体のラップを確保できた。改良体の形状はフェノールフタレイン溶液を噴霧し反応を確認した。改良体の強度は、土壌硬度計にて $1\text{N}/\text{mm}^2$ 以上を確認した。また、注入時間は合計8台の注入ポンプを使用することで急速施工を達成した。

注入式長尺先受工の施工総本数は3,840本、長尺GFRP鏡ボルトの施工総本数は874本、補助工法における総注入量は計画注入量の1.2倍の $4,794\text{ km}^3$ であった。工事では、注入式長尺先受工の鋼管間からの抜落ちは発生せず、鋼管下の抜落ちも非常に少なく確実な注入により、切羽の天端崩落を防止できた。

4. 高浸透特殊水ガラス系懸濁型注入材の開発

筆者¹⁾らが以前に開発した特殊水ガラス系懸濁型注入材（以下、従来の注入材）では、対象トンネルより悪い地質条件のトンネルでは注入が困難であると考えられたため、高浸透で早期強度が確保される特殊水ガラス系懸濁型注入材（以下、新規注入材）の開発を行った。

(1) 新規注入材の材料特性

新規注入材は、特殊水ガラスと筆者ら⁴⁾が開発した極超微粒子セメント注入材を体積比1対1で混合することで作製した。図-7に極超微粒子セメント注入材の粒度分布を示す。開発した注入材は遅延剤の量を調整することで、所定のゲル化時間を得ることができ、ゲル化時間を調整することが可能である。表-3に従来の注入材と新規注入材の標準配合と混合後の物性を示す。

(2) 新規注入材の浸透性能評価

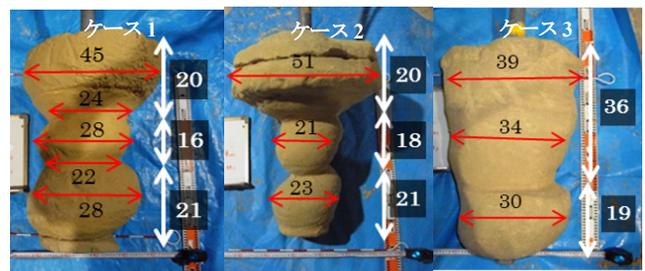


図-4 室内注入試験改良体出来形（単位 cm）

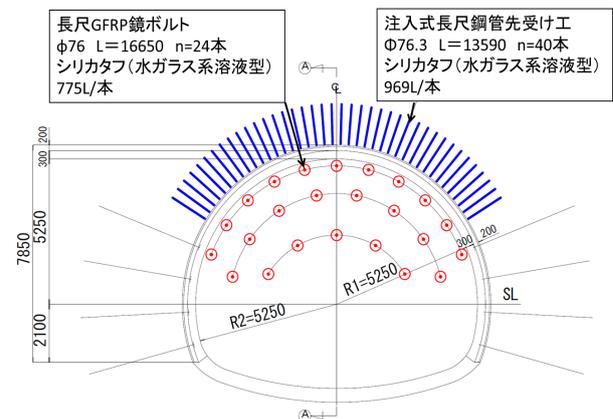


図-5 支保パターン断面図

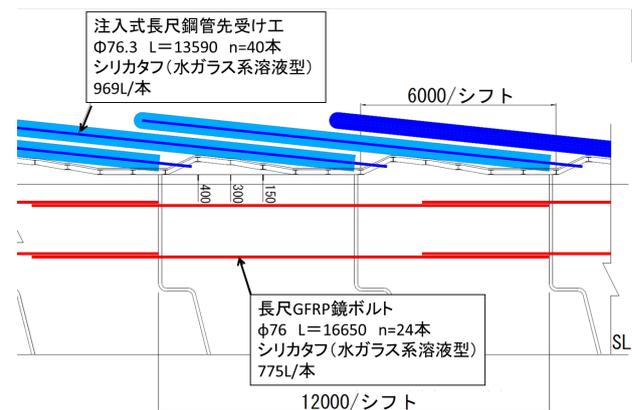


図-6 支保パターン縦断面図

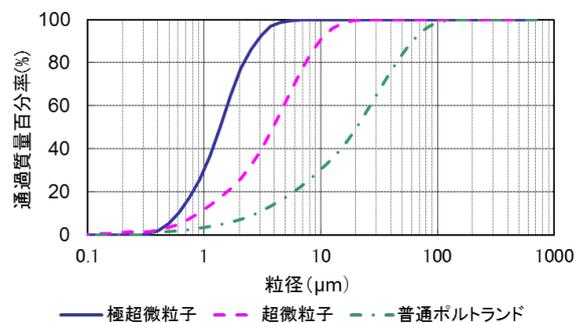


図-7 注入材の粒度分布

新規注入材の浸透性を評価するため、室内1次元注入試験⁵⁾を実施した。また、従来の注入材との浸透性能の比較も合わせて実施した。

a) 試験方法

室内1次元注入試験の概略図を図-8に示す。試験地盤は東北ケイ砂7号（細粒分含有率は6%）からなる。試験地盤は内径50mm、長さ1000mmの亚克力円筒に、間隙率43%（相対密度78%）となるように層厚ずつ試料を投入し、ランマーを25mm用いて突き固めることで作製した。亚克力円筒の上下にフィルター層を25mmずつ設けて、試験地盤の長さを950mmとした。本試験で用いた試験地盤の透水係数は $6.0 \times 10^{-3} \sim 9.0 \times 10^{-3}$ (cm/s)となった。試験地盤を完全に飽和させた後、新規注入材を作液し、試験地盤の限界圧力0.35MPaで筒底部より1ショットで注入した。また、比較のため、従来の注入材についても同様に試験を行った。注入時各注入材のゲル化時間は18分±2分とし、調整剤の分量を決定した。注入量は試験地盤の間隙体積に相当する808mlとし、試験終了の条件は、①上部から排出される間隙水量が注入量に達した時、②上部から排出される水量が1 (ml/min)となった場合とした。注入後1時間後、浸透部分を目視で確認後、浸透長さを測定した。また、注入から1時間後に試験地盤を亚克力から脱型してサンプリングし、注入から3時間後に一軸圧縮試験強度試験を行った。

表-3 各注入材の標準配合

	A液	B液	強度	ゲルタイム
新規注入材	特殊水ガラス 500ℓ	極超微粒子セメント 158kg程度	材齢1日のホモゲル 0.5N/mm ² ~1.5N/mm ²	4~20分 30秒程度にも調整可
		分散剤 4.7kg程度		
		遅延剤 10ℓ程度		
		水 432ℓ程度		
従来の注入材	特殊水ガラス 500ℓ	超微粒子セメント 250kg程度	材齢1日のホモゲル 0.5N/mm ² ~1.5N/mm ²	4~10分 30秒程度にも調整可
		分散剤 2.5kg程度		
		遅延剤 10ℓ程度		
		水 404ℓ程度		

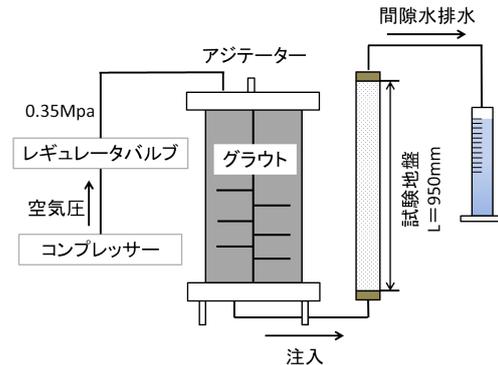


図-8 室内1次元注入試験概略図

b) 試験結果

浸透長は新規注入材が56cm、従来の注入材は38cmであった。新規注入材の方が18cmほど長く浸透した。次に、一軸圧縮強度試験の結果を図-9に示す。図-9より、注入部からの距離が同じ供試体の場合、新規注入材のほうが従来の注入材よりも改良強度が高いことがわかった。

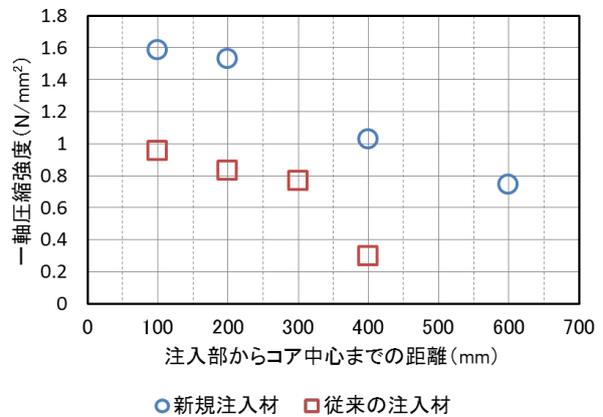


図-9 室内1次元注入試験改良強度

(3) 新規注入材の改良効果の評価

室内3次元注入試験⁵⁾は注入材の改良形状を含めた浸透特性の評価が可能である。また、改良体から採取したコアの一軸圧縮強度試験を行うことで、改良効果を評価することが出来る。そこで、室内3次元注入試験にて新規注入材と従来の注入材の改良形状と改良効果を評価した。

a) 試験方法

室内3次元注入試験の概略図を図-10に示す。試験地盤は室内1次元注入試験で使用した、東北ケイ砂7号を試料として作製した。試験地盤の作製方法は内径533mm、高さ690mmのドラム缶に層厚50mm分に相当する試料を順に投下し、ドラム缶の周囲を打撃し振動を与えながら水締めすることで間隙率43%に調整した。ドラム缶の上下には粗砂からなるフィルター層を

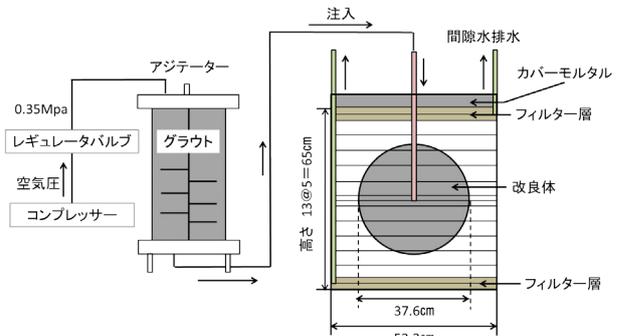


図-10 室内3次元注入試験概略図

50mm ずつ設け、排水用の塩ビ管を同層に上下各 2 本挿入した。各注入材のゲル化時間は 18 分±2 分とし、調整剤の分量を決定した。試験地盤への注入は限界圧力 0.35MPa、1 ショットで注入した。設計注入量は 120 とし、試験地盤の間隙率 43%より、改良体の設計改良直径は 37.6cm と算定される。試験終了の条件は、①設計注入量 120 を注入し終えた場合、②塩ビ管より間隙水の排水がなくなった場合とした。注入から 1 時間後、試験地盤から改良体を掘り出し、XYZ 方向の改良径および重量を測定した。その後、コアサンプリングを行い、注入から 3 時間後と 24 時間後に一軸圧縮強度試験を行い、改良体の早期強度を計測した。

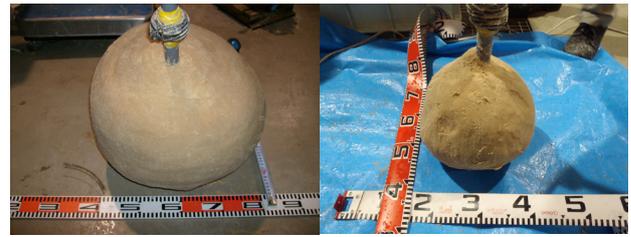


図-11 改良形状

(左：新規注入材、右：従来の注入材)

表-4 室内 3 次元注入試験実績

	長さ(cm)			重量(kg)	直径(cm)	改良体積(cm ³)	注入量(ℓ)
	X	Y	Z				
設計値	37.6	37.6	37.6	-	37.6	27833	-
新規注入材	40	39	39	60	39	31863	12
従来の注入材	24	22	24	17	23	6652	4

b) 試験結果

改良体の形状を図-11 に示す。新規注入材は設計通りに注入でき、球状改良体になった。従来の注入材は改良体の形状こそ球状だが、設計注入量の 33%程度の注入量に留まり、改良体の形状も新規注入材のものよりも小さい。表-4 に室内 3 次元注入試験の実績をまとめた。新規注入材の改良体は従来の注入材よりも 1.7 倍大きい改良体が作製できた。改良体の 3 時間と 24 時間強度の結果を図-12 に示す。新規注入材は注入孔からコア中心までの位置に近いものは 1N/mm²、24 時間強度は 3N/mm²を超えた。改良強度は 3 時間強度、24 時間強度とも注入孔から離れると低下する傾向があった。従来の注入材は 3 時間強度も 24 時間強度も 0.5N/mm²程度であった。以上のことから、新規注入材は従来の注入材よりも改良強度が高く、地盤に対する浸透性が高いことがわかった。

5. まとめ

本検討では未固結地山に代表されるような砂地山を対象とした注入工法の検討と新規注入材の開発を行った。

注入工法に関する検討では、現場の地山条件を模擬した細粒分含有率が異なる 3 層の試験地盤に対して、3 室 3 バルブ同時注入を行った。結果として 3 室 3 バルブ同時注入が 1 室 3 バルブの時よりも、均質な改良体を得ることができた。

施工実績では 4 室 4 バルブ同時注入を行うことで、改良体強度 1N/mm²以上で鋼管間の抜け落ちもなく、切羽の天端崩落を防止できかつ、急速施工を達成した。

新規注入材の開発では、極超微粒子セメントを用いた注入材を開発した。新規注入材は細粒分を含む砂地盤でも設計通りに注入でき、従来の注入材よりも浸透し、改良体の早期強度も高いことがわかった。

本報告が今後の工事の参考となれば幸いである。

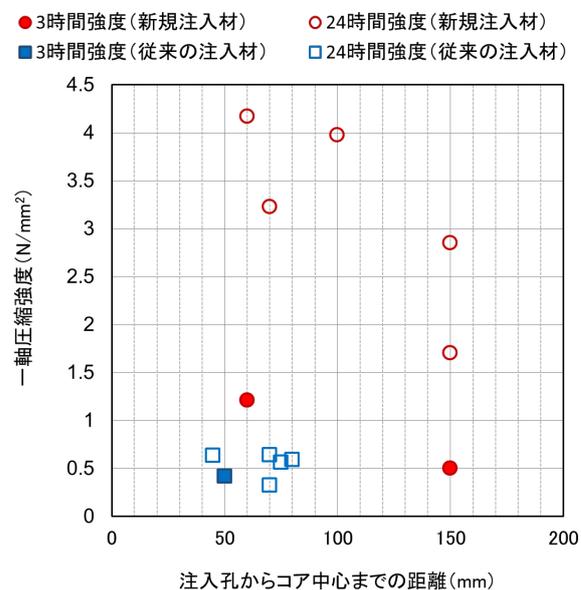


図-12 室内 3 次元注入試験改良強度

参考文献

- 1) 山本, 日比谷, 伊達, 関, 下田: トンネル先受け工法に用いる新しい注入材の検討, 第 36 回地盤工学研究発表会, pp1921-1922, 2001
- 2) 若狭, 寺嶋, 稲葉: 含水未固結地山におけるトンネル掘削, トンネル工学報告集第 16 巻, pp.171-178, 2006
- 3) 賀川, 和泉: 未固結砂地盤での確実な注入方式の確立, トンネル工学報告集第 21 巻, pp.43-50, 2011
- 4) 金沢智彦他. (2010). 極超微粒子注入材による地盤注入工法の開発-材料特性-. 土木学会第 65 回年次学術講演.
- 5) 小泉悠他. (2012). 極超微粒子セメント注入材による砂質土地盤への注入工法の開発. Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 61, No. 1, pp. 52-57, Jan. 2012.

(2013. 9. 2 受付)

The study on new grouting method and development of ultrafine grouting material to excavate tunnels under unconsolidated ground conditions.

Issei SATO, Takuji YAMAMOTO, Yu KOIZUMI, Hiroki UMESHITA, Manabu KURITA

Tunnel reinforcements such as long forepoling bolts and facebolts have been installed to excavate tunnels safely and rapidly under unconsolidated ground conditions. In order to let them work more efficiently, it is necessary to select grout material appropriate for the surrounding ground and inject it uniformly and quickly. This paper gives the outline of a new grouting method which enables the grout to be injected more uniformly and its application to actual tunnel excavation in substantially dry sand. The new grout blend is subsequently introduced, which can permeate into worse geological conditions than the applied ground. As a result, partitions in a grouting internal pipe enables the grout to be injected uniformly into sand containing fines. The new grout blend was able to be injected into sand containing fines and showed high development of early age strength.