

超微粒子セメント混合改良による砂地盤の遮水性向上の検証

堀田 崇由 北 島 明

概 要

超微粒子セメントとは粒径を4 μ m程度まで粉砕したセメントである。主な用途としては、その浸透性を期待して遮水性・強度増加を目的とした薬液注入工法で用いられ、砂地盤での適用が可能であることが確認されている。一方、砂質土は粘性土に比べて遮水性は低く、混合によるセメント改良を行っても堤体等の遮水材としては期待されない。本稿では超微粒子セメントを使用したセメント改良によって砂質土の遮水性を向上させることが可能かを検証した。

試験結果より、超微粒子セメントは普通セメントよりも高い改良効果があることが分かった。また、混合方法を工夫することで、過剰に強度は発現させずに透水係数を低下させることの可能性が示唆された。

Verification of the improvement in impervious soil material by mixing ultra-fine cement

Abstract

Ultra-fine cement is cement that has been crushed until its particle size is under approximately 4 μ m. It is mainly used in chemical grouting to improve imperviousness and strength thanks to its permeability, and its suitability for sandy soil has been confirmed. While sandy soil is less impervious than cohesive soil, there are no expectations for the potential of sandy soil as an impervious material, even mixed with improvement materials like cement. In this paper, we verify the effect of improving the imperviousness of sandy soil by mixing it with ultra-fine cement.

The results say, firstly, that ultra-fine cement is more effective than ordinary cement. Secondly, there is the possibility of decreasing the permeability without excessive strength through innovation in the mixing method.

キーワード: 超微粒子セメント、透水係数

§1. はじめに

1.1 超微粒子セメントとは

超微粒子セメントとは平均粒径を $4\mu\text{m}$ 程度まで粉碎したセメントであり、主にトンネル・ダム・貯水池等の湧水・漏水防止、軟弱地盤の補強、砂質地盤の液状化防止における薬液注入工法の注入材として用いられている。最大の特徴はその平均粒径の小ささゆえの、注入材としての優れた浸透性と迅速な強度発現である。通常、セメントを用いた薬液注入工法では透水係数が $1 \times 10^{-1} \text{m/s}$ 以上の礫質地盤や割裂を有する地盤を対象とするが、超微粒子セメントは $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ オーダーの細砂地盤に対しても注入が可能¹⁾である。

1.2 研究の背景と目的

一般に、砂質土材料を用いた土構造物は、粘性土を用いた場合に比べて締固めに適しており、乾燥密度・強度が大きくなるが、透水係数も大きくなる。セメント混合による改良を行うことで透水係数を小さくすることは可能であるが、強度増加を目的とした範囲の添加量では堤体等の遮水材としては満足できない。そのため、海岸・河川の堤防や調整池等で砂質土を使用する場合には遮水シート等を用いて遮水性を付加している²⁾。しかし、遮水シートの敷設は人力で作業をするため、多くの工期・人工を要する。

そこで、本稿では薬液注入による地盤改良において注入材として用いられている超微粒子セメントを、特殊な機材・重機を必要としない混合改良に用いることで、砂質土が遮水材としての機能を有することを室内実験により検証した。

§2. 試験方法

2.1 使用した試料・供試体

本稿では、透水係数が $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 程度の砂質材料を対象として改良効果を検証する。改良母材には豊浦標準砂（以下、豊浦砂）を用いた。過去の研究により豊浦砂の透水係数は $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ オーダーであることが分かっている³⁾。その他の物性値としては、土粒子密度 $\rho_s = 2.636 \text{ g/cm}^3$ で、細粒分含有率が 5% 以下の極めて粒径が揃った砂である。

試料は含水比を15%に調整した豊浦砂に、所定の添加量となるセメントを粉体で投入し、ミキサーで均質となるように混合している。透水試験に用いた供試体は直径75mm、高さ50mmでモールドに3層に分けてランマーで締固めて作製している。締固めエネルギーは締固

め試験における標準エネルギー $1.0Ec$ ($\approx 550\text{kJ/m}^2$)としている。また、同じ試料を用いて直径 50mm、高さ 100mm の供試体も同様の条件でいくつか作製し、透水試験の計測と同時に一軸圧縮試験を行っている。

試料の条件としては、セメントの種類を2種類(普通ポルトランドセメント、超微粒子セメント)、セメントの添加量を2種類($\Delta M_c = 100\text{kg/m}^3$, 150kg/m^3)で比較・検討している。超微粒子セメントには太平洋マテリアル株式会社のアロフィクス MC 使用し、分散剤にはアロフィクス MC 用の製品である MC ヘルパーを使用している。

2.2 試験装置・条件

図1に試験に使用した透水試験機の概略を示す。試験装置は三軸セルを用いており、任意の拘束圧力下での試験が可能となっている³⁾。本稿では全ての供試体に対して、50kPaの等方圧密下で試験を行っている。透水係数の計測は図1中のビュレットAの水をベデスタルを通じて供試体の下端から上向きに、さらにキャップからビュレットBに流して行く。両ビュレットの断面積 a が等しいため、透水係数は次式から求まる。

$$k = 2.303 \cdot h_s \cdot a \cdot \log_{10}(H_1 / H_2) / 2 \cdot A_s \cdot (t_2 - t_1)$$

供試体は2日間気中養生したものを試験機にセットし、1日かけて飽和化・圧密を行った後に養生日数3日の計測をしている。それ以降の計測は供試体を試験機内で養生し、所定の日数で行っている。試験結果は気温15℃での粘性係数に補正した k_{15} で整理している。

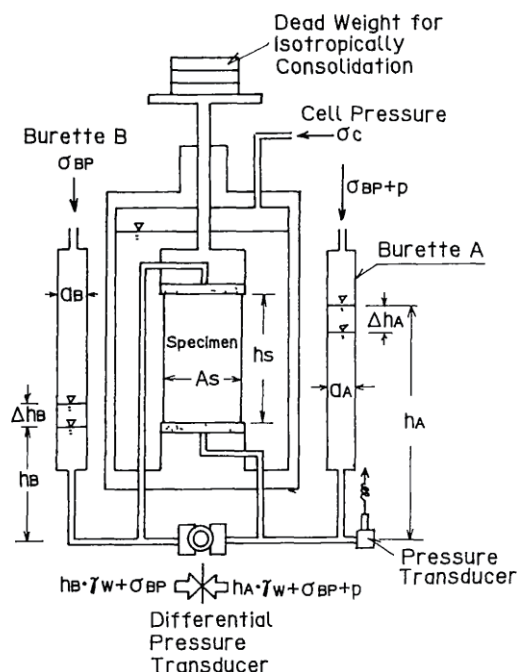


図1 三軸セルを用いた透水試験機概略図

§3. 試験結果・考察

3.1 透水係数

図2に固化材添加量 $\Delta M_c = 100 \text{ kg/m}^3$ の養生日数と透水係数の関係を示す。図より、養生日数3日、7日ともに超微粒子セメントの方が、普通セメントよりも透水係数が小さくなっていることが分かる。また、わずかながらではあるが、3日から7日の透水係数の低下率も超微粒子セメントの方が大きいことが伺える。しかしながら、7日での透水係数 k_{15} は普通セメントで $k_{15} = 6.46 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、超微粒子セメントで $k_{15} = 4.68 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ であり、有意な差とはいえず、固化材の種類による違いは小さい。

図3に固化材添加量 $\Delta M_c = 150 \text{ kg/m}^3$ の養生日数と透水係数の関係を示す。図より、養生日数3日では透水係数は同等であるが、7日では超微粒子セメントの方が、普通セメントよりも透水係数が小さくなっていることが分かる。養生日数7日における超微粒子セメント供試体での透水係数の低下率は顕著であり、透水係数 k_{15} は普通セメントで $k_{15} = 1.75 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、超微粒子セメントで $k_{15} = 8.58 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ となり、セメントによる違いが大きく現れている。

次に、図4に固化材添加量 ΔM_c と透水係数 k_{15} の関係を示す。図より、養生日数7日、 $\Delta M_c = 150 \text{ kg/m}^3$ での透水係数の低下が顕著であることが分かる。一方、 $\Delta M_c = 100 \text{ kg/m}^3$ では固化材の種類、養生日数による大きな差はないことから、超微粒子セメントによる透水係数低下に関する優位性は一定以上の添加量と養生日数が必要となることが分かる。固化材添加量と透水係数の関係を調べた他の文献^(例えば 4), 5)によると、固化材添加量の増加にともない、透水係数は低下し、低下の割合は粘性土より砂質土の方が大きい、 $\Delta M_c > 100 \text{ kg/m}^3$ ではそれほど大きく低下しないことが分かっている。しかし、本試験においては、 $\Delta M_c > 100 \text{ kg/m}^3$ かつ3日目以降に大きく透水係数が低下している。超微粒子セメントは粒径が小さく比表面積が大きいことから、セメントの水和反応速度が早いとされている。一方で試験に用いた超微粒子セメント(アロフィクス MC)は普通ポルトランドセメントに比べて SiO_2 の含有率が多く、 CaO の含有率が少ないことから、セメントの早強性に寄与する化合物の C_3S が少ないことが推定される。そのため、3日以降での傾向で差が生じたと考えられる。また、超微粒子セメントの本来の用途である薬液注入工法ではセメントを含水比 $w=300\sim 600\%$ 程度のスラリー状で使用するのに対し、本試験では現場における粉末での混合を想定し、豊浦砂に対する含水比で試料の配合を設定したため、セメント量に対する含水量は $\Delta M_c = 100 \text{ kg/m}^3$ では $w/c \approx 270\%$ 、

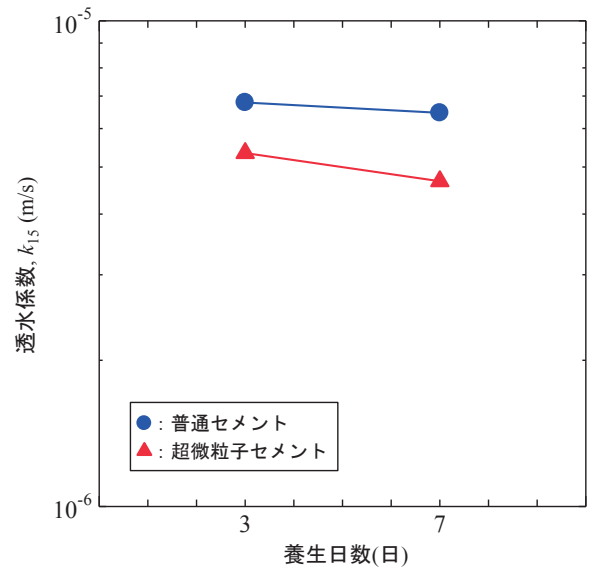


図2 養生日数と透水係数の関係 ($\Delta M_c = 100 \text{ kg/m}^3$)

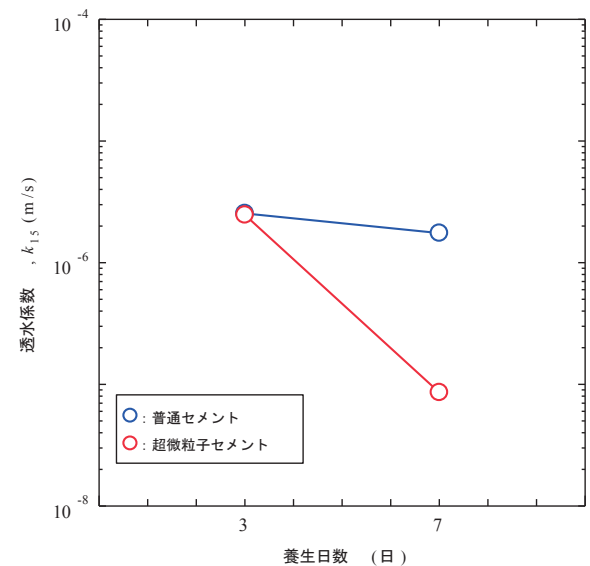


図3 養生日数と透水係数の関係 ($\Delta M_c = 150 \text{ kg/m}^3$)

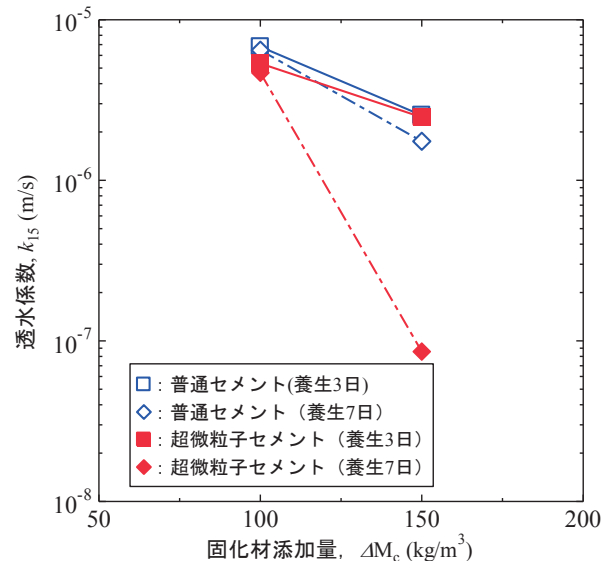


図4 固化材添加量と透水係数の関係

$\Delta M_c = 150 \text{ kg/m}^3$ では $w/c \approx 180\%$ となっている。一般にセメントの水和反応に必要な水の量は $w=40\sim 50\%$ 程度とされており、それ以上の加水は強度を低下させる要因となるのであるが、供試体内での流動性やセメントの反応性という点では、高含水比である $\Delta M_c = 150 \text{ kg/m}^3$ の方が有利であったと考えられる。これらの考察は供試体の間隙の大きさと固化材の粒子の大きさの関係が影響していることが考えられるが、固化材の粒子の大きさに着目した既往の研究成果は少なく、本稿における試験データでも推定の域を出ないため、更なる試験の実施と検討が必要である。

ここで、固化材の混合方法による影響が考えられたため、同じ配合量で先に水を固化材と混合し、スラリー化したものを乾燥した豊浦砂に添加する方法で供試体を作製した。 $\Delta M_c = 150 \text{ kg/m}^3$ における試験結果を図5に示す。図より、普通セメント、超微粒子セメントともにスラリー混合の方が透水係数は低下していることが分かる。また、養生日数の経過による透水係数の低下の傾きは混合方法によらず固化材の種類で同程度であることが伺える。このことから、混合方法は供試体作製初期の固化材の水和反応に大きく影響していることが分かる。具体的には、スラリー混合では固化材が水と完全に混ざった後に砂に添加されるため、未反応となることがなく、砂粒子に対する付着も均質になり、より間隙を埋めていることが推測される。

3.2 一軸圧縮強さ

図6に透水試験と同じ試料を用いて作製した供試体より求めた一軸圧縮強さ q_u と養生日数の関係を示す。一軸圧縮強さは透水係数と同様に、 $\Delta M_c = 100 \text{ kg/m}^3$ では固化材の種類による大きな差はみられないが、 $\Delta M_c = 100 \text{ kg/m}^3$ においては超微粒子セメントが養生7日で顕著に大きくなっている。次に図7に固化材添加量と一軸圧縮強さの関係を示す。透水係数と同様に、養生日数7日、 $\Delta M_c = 150 \text{ kg/m}^3$ での強度の増加が顕著である。

図8に固化材の混合方法の違う供試体の養生日数と一軸圧縮強さを比較した結果を示す。透水係数は普通セメント、超微粒子セメントともにスラリー混合の方が3日養生時点での改良効果が大きく表れ、その後の増加は混合方法によらなかったのに対して、一軸圧縮強さは3日養生時点では粉末混合、スラリー混合で大きな差はない。加えて、普通セメントでは7日養生強度も混合方法に差はなく、超微粒子セメントでは7日養生でスラリー混合での強度が大きくなっている。このことから、混合方法の違いは透水係数と強度で与える影響が異なることが考えられる。

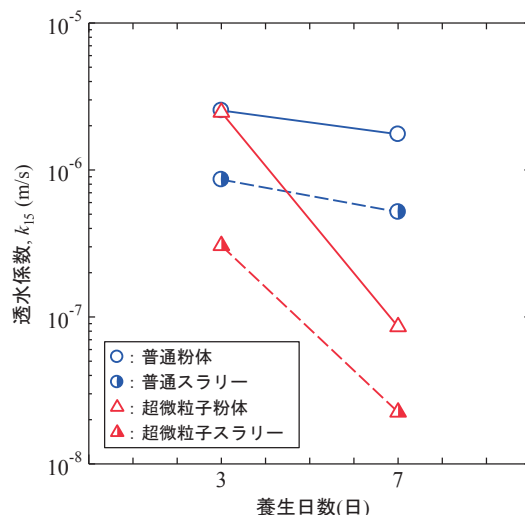


図5 養生日数と透水係数の関係
(固化材の混合方法による比較、 $\Delta M_c = 150 \text{ kg/m}^3$)

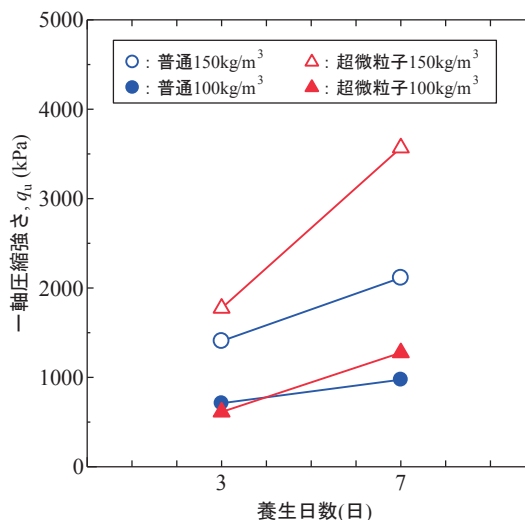


図6 養生日数と一軸圧縮強さの関係

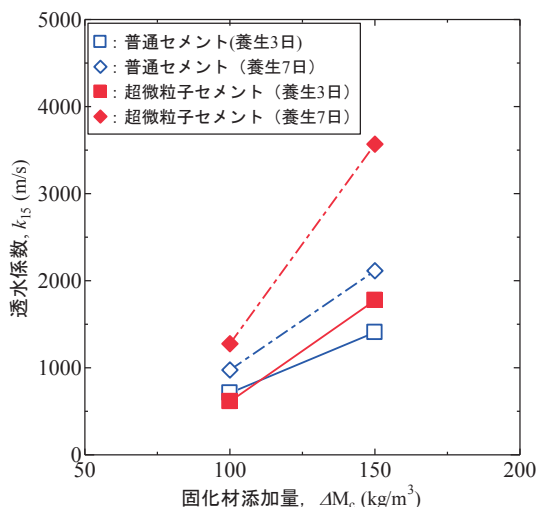


図7 固化材添加量と一軸圧縮強さの関係

図9に一軸圧縮強さと透水係数の関係を示す。いずれの条件においても一軸圧縮強さが増加にともなって透水係数が小さくなっていることが分かる。一方、超微粒子セメントの粉体混合の場合のみ、強度の増加にともなう透水係数の低下の傾きが異なっていることが分かる。これは、混合方法による透水係数への影響を先述した通り、スラリー混合では固化材がより均質に水和反応を起こし、砂粒子の間隙を埋めているという現象が普通セメントよりも超微粒子セメントの方が顕著であることが推測される。また、図5、図8の超微粒子セメントの混合方法による影響を勘案すると粉体混合では長期的な一軸圧縮強さが効果的に発揮されないことが考えられる。しかしながら、スラリー混合の7日養生の一軸圧縮強さは $q_u=4478\text{kPa}$ であり、改良土としては強度が大きすぎるため、改良方法を工夫することで強度の発現を制御しながら透水係数を低下させることができれば有意であり、この結果はそれが可能であることを示唆している。

3.3 供試体の間隙比

本稿における普通セメントと超微粒子セメントおよび混合方法による試験結果の比較は供試体における砂粒子で形成される骨格構造は同等であり、その間隙を埋める固化材の結合の状態によって透水係数及び一軸圧縮強さに差が生じるという前提のもとに行った。それを確認するために、間隙比で試験結果を整理した。図10に固化材添加量と間隙比の関係を示す。固化材の添加量が増加すると間隙比が小さくなっているが、これは土粒子の密度 $\rho_s=2.636\text{g/cm}^3$ 、普通セメントの密度 $\rho_c=3.15\text{g/cm}^3$ 、超微粒子セメントの密度 $\rho_{cs}=3.00\text{g/cm}^3$ なのに対して間隙比 $e=(\rho_s/\rho_a-1)$ の計算には豊浦砂の密度 $\rho_s=2.636\text{g/cm}^3$ を用いて計算をしているためである。その点を加味すると、砂粒子で形成される骨格構造は固化材の添加量、混合方法によらず、一定であることが確認できた。

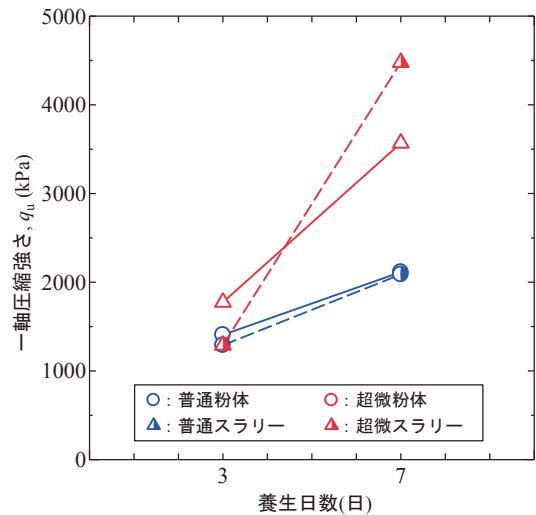


図8 養生日数と一軸圧縮強さの関係
(固化材の混合方法による比較、 $\Delta M_c=150\text{kg/m}^3$)

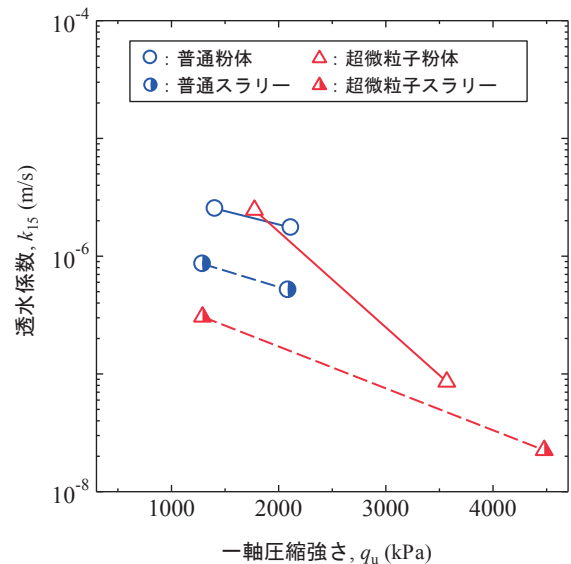


図9 一軸圧縮強さと透水係数の関係

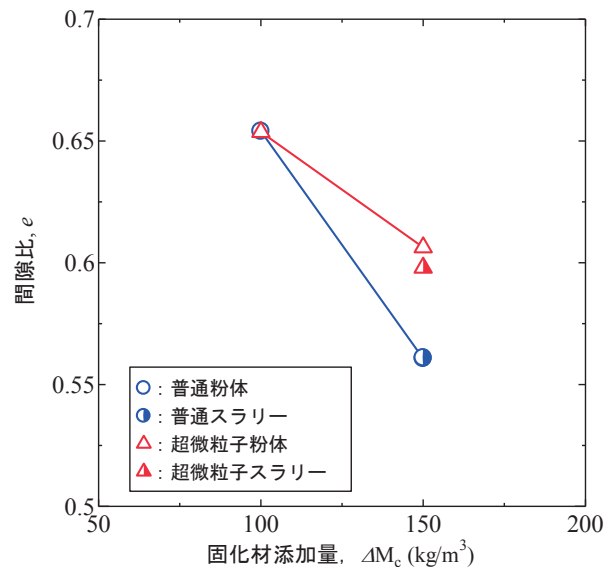


図10 供試体の間隙比

§4. まとめ

本論文では、砂質土に超微粒子セメントを混合することで、遮水性が向上し、透水係数を低下させることが可能であるかを室内透水試験により検討した。試験結果より得られた知見を以下に示す。

- 1) 固化材添加量 $4M_c$ が等しい場合、超微粒子セメントは普通セメントよりも透水係数の低下、一軸圧縮強さの増加において高い改良効果がある。
- 2) 固化材添加量 $4M_c \geq 150 \text{ kg/m}^3$ 、養生日数 7 日以降において超微粒子セメントの改良効果は顕著になる。
- 3) 透水係数はセメントの混合方法によって改良効果は異なり、粉体混合よりもスラリー混合の方が高い改良効果がある。
- 4) 一軸圧縮強さのセメントの混合方法によって改良効果は透水係数とは傾向が異なり、混合方法を工夫することで、過剰に強度は発現させずに透水係数を低下させることの可能性が示唆された。

以上に示したとおり、超微粒子セメントは普通セメントよりも高い改良効果があることが分かった。しかしながら、本稿における試験結果ではそのメカニズムの解明までは至っておらず、更なる試験データの蓄積と微視的構造の観察や化学的観点からの考察が必要となる。

参 考 文 献

- 1) 吉田了三、磯田英典、福山誠、渡辺将之：超微粒子セメントの細粒分質砂への浸透性向上に関する考察、太平洋セメント研究報告、第169号、pp.62-69、2014.
- 2) 福島伸二、小島 秋、北島 明：ベントナイトシートによる表面遮水壁型堤体における浸透量特性、第71回土木学会学術年次講演会、III-102、pp.203-204、2016.
- 3) 福島伸二、望月美登志、香川和夫：三軸セルを用いた深い地盤の透水性調査法、土木学会論文集、No.445 III-18、pp.127-133、1992.
- 4) 財団法人土木研究センター：陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル改訂版、pp.31-32、2004.
- 5) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第3版、第2章セメント系固化材による地盤改良の原理と改良土の特性、技報堂出版株式会社、pp.19-60、2003.

ひとこと

本稿における報告は、まだまだ基礎的なところに留まっている。改良した砂質土の透水係数に関する文献は意外と少なく、今後も研究を進め、泥沼にはまるか大成功を収めるか楽しみである。



堀田 崇由