

間隙水の移動を考慮した海砂混合高炉水砕スラグの長期透水特性

九州大学大学院 学 O 中山修一朗
 正 石藏良平 F 安福規之
 正 アデル・アロウイシー

1.はじめに

近年の世界的な都市化に伴う砂需要の急増や、砂資源の過剰採取による環境問題の発生¹⁾など、持続可能な砂資源の利用が求められる中、地盤改良の分野における砂の代替材として期待されるのが高炉水砕スラグ（以下、スラグ）である。この材料は銑鉄の製造過程で生成され、水和反応により硬化が進む潜在水硬性を有する。本研究では低置換サンドコンパクションパイル（SCP）工法へのスラグの適用を想定し、図1のような排水・圧密促進による強度増加と、スラグ硬化後の杭・地盤の複合地盤としての改良効果を期待している。しかし、スラグ単体で用いた場合に杭打設で材料が破碎、細粒化して水和反応が促進されることで、施工後6ヶ月で 10^{-9} m/s程度の透水係数となり、透水性が著しく低下することが課題である²⁾。そこで本研究では、スラグに硬化遅延を期待した海砂を混合し、実環境を想定した条件で透水試験を行った既往の研究^{3,4)}を、更に継続的に実施して長期的なスラグ材料の透水特性について検証を行った。そしてその結果より、硬化に影響する要素や、砂杭と同等の透水性能（ 10^{-4} ~ 10^{-5} m/s程度）を実現できる最適な材料配合について考察を行った。なお、本概要では一部抜粋した条件の結果のみを示す。

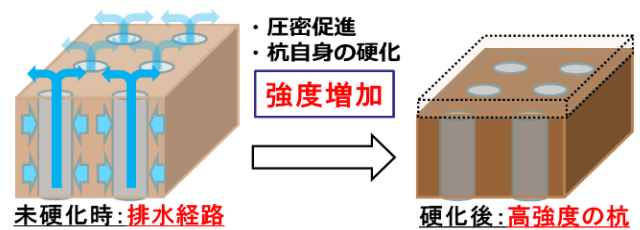


図1 低置換 SCP 工法への適用イメージ

2.実験概要

各試料の質量混合率（全体の質量に対する材料の割合）を図2に示す。

実験は1~5の配合をベースに実施した。各試料は混合後、A-a法による締固めを行って作製した。また一部の条件で、杭打設後のスラグの細粒化を再現するため、既往のデータ²⁾に基づき高炉スラグ微粉末（以下、微粉末）を3~10%の割合で混合した。透水試験は、一定期間静水中で養生する滞留養生条件と、排水時の間隙水移動を考慮して、通水しながら養生する通水養生条件を設定した。滞留養生条件の試験装置を図3に示す。この条件では、まず円筒状型枠（直径

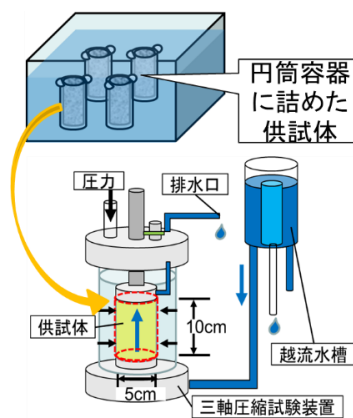


図3 試験装置(滞留養生条件)

5cm、高さ10cm)に試料を3層に分けて入れ、各層50回ずつ木槌で叩いて詰めて供試体を作製した。その後、水道水を入れた容器中に、供試体を沈め養生した。そして所定の期間ごとに取り出し、横方向の変位を防ぐため三軸試験機に設置して拘束圧20kPaをかけた状態で透水試験を実施した。一方、通水養生条件の試験装置を図4に示す。この条件でも滞留養生条件と同様の方法で試料を投入し供試体を作製した。この供試体に対し、排水方向を考慮して底部から上向きに通水し試験を行った。越流水槽の水面と取水口の高低差 Δh は、間隙水移動の影響を調査するため、杭沈下量のデータ⁵⁾を基に6.5,15,30cm（動水勾配 $i=0.65,1.5,3.0$ ）とし、浸透力を変化させた条件に設定した。

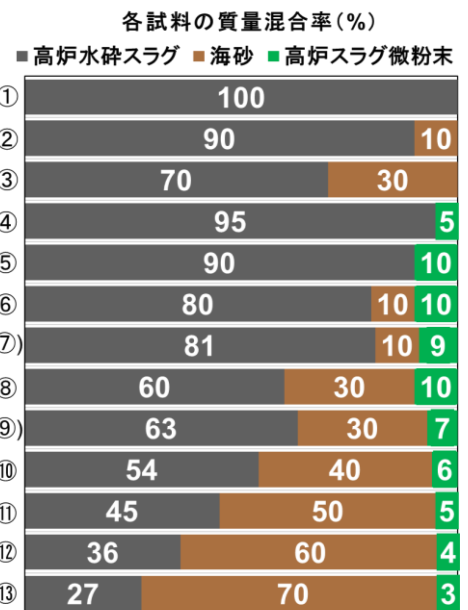


図2 供試体の実験条件

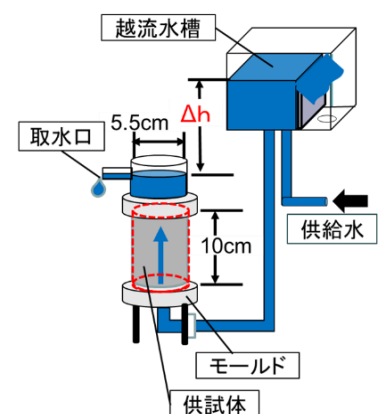


図4 試験装置(通水養生条件)

3.実験結果と考察

図5~8に滞留養生条件と、動水勾配 $i=0.65, 1.5$ の通水養生条件の各供試体の透水係数と養生日数の関係を示す。図5はスラグ単体供試体の結果である。通水の有無で透水係数の変化に差が見られ、間隙水移動がスラグの硬化を阻害したと考えられる。図6は海砂のみ混合した供試体の結果である。図5と異なり、通水の有無によらず大きな透水係数の変化は見られず、海砂混合による硬化遅延の影響が考えられる。次に、図7は微粉末のみを混合した供試体の結果である。こちらは通水のない滞留養生条件で明確な透水性の低下が見られ、細粒分がスラグの硬化に大きく影響している。一方通水のある状態では実現場のような大きな透水性低下は確認できなかった。浸透により細粒分が抜け出した可能性も考えられるが、この影響については $i=0.65$ の結果の継続的な計測等を通して詳細な検証を行う。海砂による硬化抑制と、細粒分による硬化促進の結果を踏まえ、図8に海砂と微粉末を併せて混合した供試体の結果を示す。滞留養生条件では短期的には透水性が低下したが、図7と比較して長期的な低下は抑えられている。図9は海砂混合率を更に高めた滞留養生の供試体の結果を示しており、海砂を40%以上混合した時、短期的な透水性低下が抑えられている傾向が見られる。これより、海砂混合によって潜在水硬性による硬化を抑制できる可能性がある。一方間隙水移動の影響については、図7と同様、継続して検証を行っていく。

4.まとめ

実環境を再現した状況でのスラグ材料の透水特性について継続的に調査した。全体的に、通水した場合で透水性があまり変化しなかったことから、間隙水移動はスラグの硬化に対して大きな影響があると考えられる。また、滞留養生条件の結果より、海砂混合によってスラグの透水性低下をある程度抑えられる可能性を確認した。特に海砂が40%以上含まれる条件で、目安となる $10^{-5}m/s$ 程度の透水性が確保されており、今後も継続して計測し、詳細な検証を行う予定である。【謝辞】本研究の一部は鉄鋼スラグ協会の支援を得て実施した。また、技術協力スタッフの中島通夫氏には試験装置の作製及び透水試験の実施にあたり支援・技術指導をいただいた。ここに記して謝意を表す。【参考文献】(1) UNEP Sand and Sustainability:10 strategic recommendations to avert a crisis, (2) 篠崎晴彦・松田博・坂井悦郎・小野幸一郎・鈴木操・中川雅夫: 高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.4, pp.858-869, 2006.12, (3) 石川優揮人・中山修一朗・石蔵良平・安福規之: 低置換 SCP 工法への適用に向けた海砂・スラグ微粉末混合高炉水砕スラグの透水特性に関する研究, 令和3年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.329-330, 2022.3, (4) 中山修一朗・石蔵良平・安福規

之・アデル アロウイシー: 間隙水の移動と細粒分に着目した高炉水砕スラグの透水特性の経時変化, 第15回地盤改良シンポジウム論文集, pp.319-322, 2022.12, (5) 松田博, 来山尚義, 高宮晃一, 村上剛敏, 中野恭夫, 高炉水砕スラグの地盤改良材としての適用性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.764, III-67, pp.85-99, 2004. 6

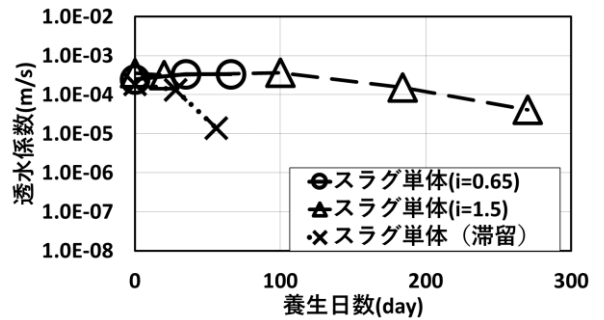


図5 透水係数の経時変化 (スラグ単体)

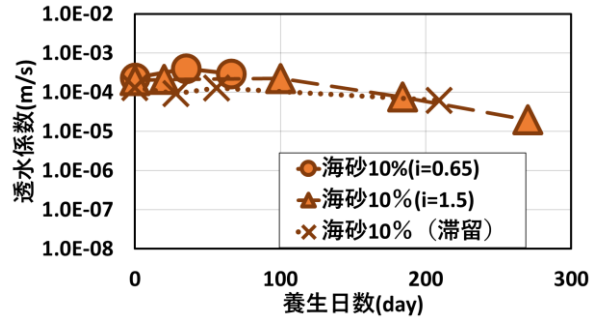


図6 透水係数の経時変化 (海砂混合)

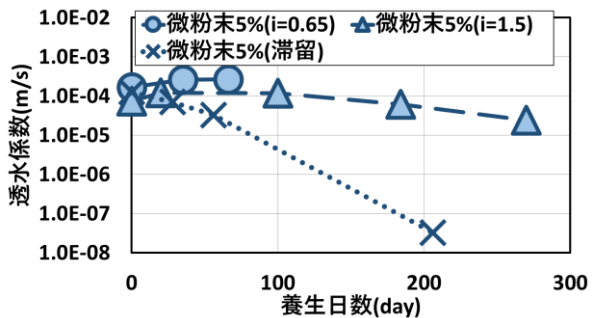


図7 透水係数の経時変化 (微粉末混合)

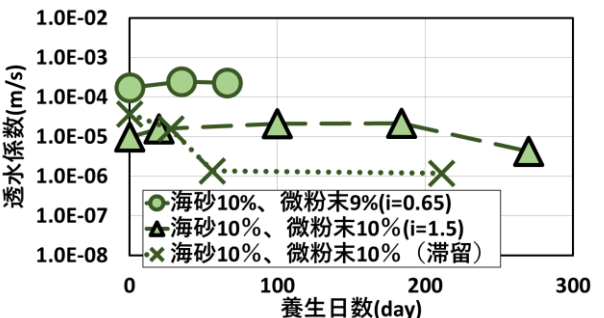


図8 透水係数の経時変化 (海砂、微粉末混合)

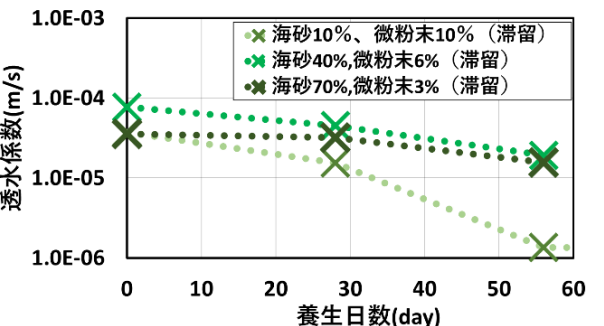


図9 透水係数の経時変化 (海砂、微粉末混合)