

低置換 SCP 工法への適用に向けた粒子破碎を想定した高炉水砕スラグの強度特性

九州大学工学部 学 ○中山修一朗

九州大学大学院 正 石蔵良平 F 安福規之

正 アデル・アロウイシー 学 永田真也

1. はじめに

近年、世界的な人口の増加や都市化に伴い砂の需要が増加している。また、環境保全のための規制強化によって日本国内の砂採取量が減少している。そのため将来的にサンドコンパクションパイル (SCP) 工法の材料としての砂の確保が困難となる可能性が考えられる。一方、高炉水砕スラグは、鉄鋼製造工程において副産物として生成され、熔融スラグを急冷してできる砂状のスラグであり、2019 年度実績で約 1910 万トン生産されている¹⁾。高炉水砕スラグは潜在水硬性を有しており時間の経過とともに硬化して高い強度を発揮する。このことから、図 1 に示すように砂の代替材として、未硬化時の高透水性と硬化後の高強度に着目した低置換 SCP 工法への適用により、粘性土地盤における複合地盤としての改良効果に加え、杭のドレーン効果を利用した圧密による強度増加が期待できる。しかし、スラグ単体で用いた場合、杭の打設に伴う粒子の破碎によって硬化の反応が促進され、透水性が急激に低下することが課題となっている²⁾。そこで粒子破碎を想定し、スラグに高炉スラグ微粉末を混合することでその強度特性の検証を行った既往の研究³⁾を踏まえ、本研究では、粒子破碎によるスラグの硬化への影響をより詳細に調べるために、高炉スラグ微粉末の質量混合率を変更（既往の研究：5, 7, 10%、本研究：5, 10, 15, 20%）することでその強度特性の変化について検証を行った。加えて、硬化の制御を目的として海砂を混合することで、強度特性にどのような差異が見られるのかについても検証を行うこととする。なお本報告では高炉スラグ微粉末を混合した試料の結果のみを示す。

2. 実験方法

実験は表 1 の条件で行うこととする。質量混合率（全体の質量に対する混合材料の割合）を設定し、その分だけ混合材料を高炉水砕スラグと混合したうえで、SCP 工法における粒子破碎を想定して A-a 法による締固めを 3 回行う。図 2 に各試料の粒度分布を示す。破碎した試料の方が、粒度分布は若干図の左側に移動していることが分かる。その後直径 5cm、高さ 10cm のプラスチックモールドに試料を 3 層に分けて入れ、各層 50 回ずつ木槌で叩くことにより、SCP 工法における杭の打設の状況を簡易的に再現して供試体を作製した。また、スラグにアルカリ刺激剤として水酸化カルシウムを添加すると、スラグの水和反応が促進される⁴⁾ことから、供試体は水酸化カルシウム水溶液内で養生し、硬化の促進を図った。28 日間養生を行ったのち供試体を引き上げ、拘束圧を 50kPa、100kPa、150kPa として CD 試験（載荷速度は毎分 1mm）を実施した。なお、未養生（養生 0 日）の供試体についても

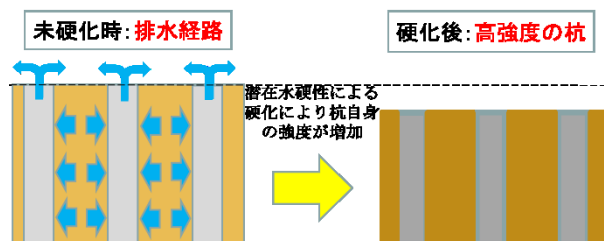


図 1. スラグの低置換 SCP 工法への適用イメージ

表 1. 実験条件

混合材料	質量混合率	養生日数
高炉スラグ微粉末	0, 5, 10, 15, 20%	0.28 日
海砂	0, 10, 30%	

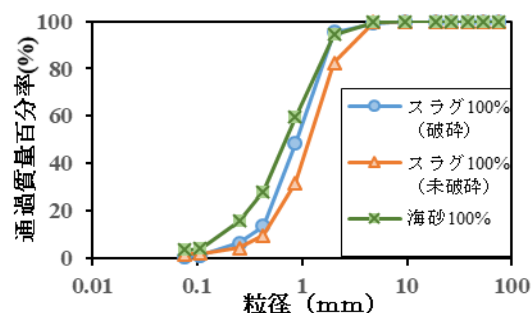


図 2. 各試料の粒度分布



写真 1. 三軸圧縮試験機

同様に試験を行った。写真1に試験で用いた三軸圧縮試験機を示す。軸ひずみが15%またはピーク荷重に達したときの応力値の記録から、最大・最小主応力を読み取り、モールの応力円を描いた。その後、拘束圧がそれぞれ50,100kPa、50,150kPa、100,150kPaの時のモール円の共通接線を引いて、円と線の接点を直線で近似することにより粘着力 C_d と内部摩擦角 ϕ_d を求めた。図3は軸差応力—軸ひずみ曲線の例を示す。拘束圧が大きいほど軸差応力は大きくなっている。図4は体積ひずみ—軸ひずみ関係の例を示す。体積ひずみの測定精度を超えたことでデータが細かく上下していると考えられるため、得られたデータを6次の多項式曲線(図中の点線)で近似したものも示した。拘束圧が大きいほど、体積が収縮側に移動していることが分かる。ただし、荷重が大きく三軸圧縮試験機で計測できない試料に関しては一軸圧縮試験によって強度を求めた。

3. 実験結果と考察

図5に最大軸差応力と高炉スラグ微粉末の質量混合率との関係を示す。養生を行わなかった試料(養生0日)では、質量混合率の増加に伴う明確な軸差応力の増加は見られなかった。一方、28日間養生を行った試料では高炉水砕スラグ微粉末の質量混合率が大きくなるほど軸差応力が大きくなる傾向が見られた。これは粒子の破碎を想定した微粉末の混合により、空隙に微粉末が入り込み、スラグ単体と比べて各粒子間で接触している点の数や表面積が増大したことで、粒子間の水和反応が急激に促進されたことが原因として考えられる。また、スラグのみ(質量混合率0%)の試料の軸差応力がそれほど大きくならなかった理由としては、28日養生を行っても硬化が十分に進行しておらず、供試体が一部崩壊した状態で試験を行ったことが原因として考えられる。図6,7に粘着力 C_d 、内部摩擦角 ϕ_d と養生日数の関係を高炉スラグ微粉末の質量混合率ごとに示す。いずれも微粉末の添加によって値が大きくなっており、これも硬化の反応の促進によるものと考えられる。

4. まとめ

高炉スラグ微粉末の混合割合が大きくなるにつれて強度が急激に増加していることから、粒子の破碎によってスラグの硬化反応が促進されることを確認した。今後は硬化の抑制を目的とした、自然砂を混合した試料や長期の養生を行った試料の強度特性の変化についても検討を行っていく予定である。

【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三軸試験の実施にあたり、技術指導、支援をいただきました。心から感謝申し上げます。

【参考文献】1)鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報,2019

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 CVol.62 No.4, 858-869, 2006. 12

3)CHE KU AISYIFA 他：高炉水砕スラグの強度特性の経時変化に及ぼす自然砂および高炉スラグ微粉末混合の影響,卒業論文,2020

4)徳光直樹,石井誠人：高炉スラグ微粉末の水和反応,秋田高専研究紀要第35号, 71-75, 2000

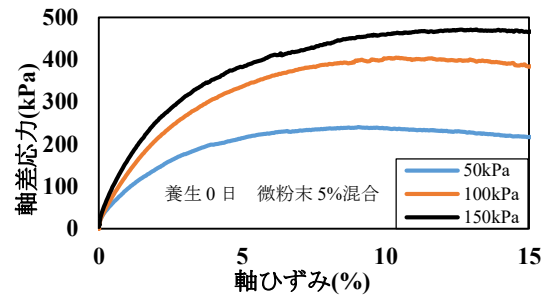


図3. 軸差応力—軸ひずみ曲線の例

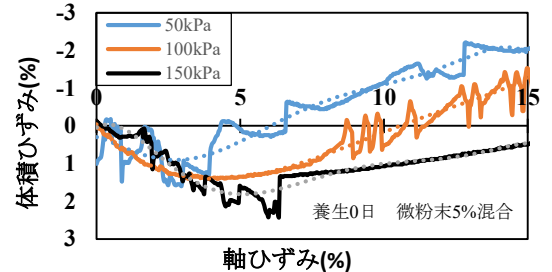


図4. 体積ひずみ—軸ひずみ関係の例

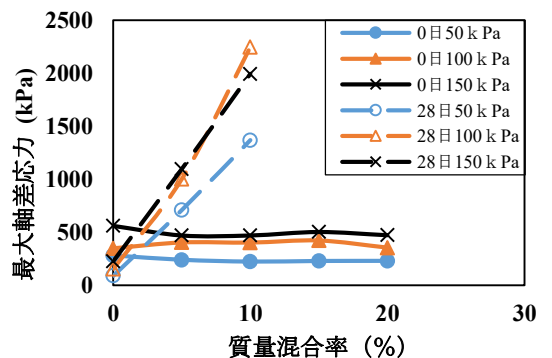


図5. 最大軸差応力と高炉スラグ微粉末の質量混合率の関係

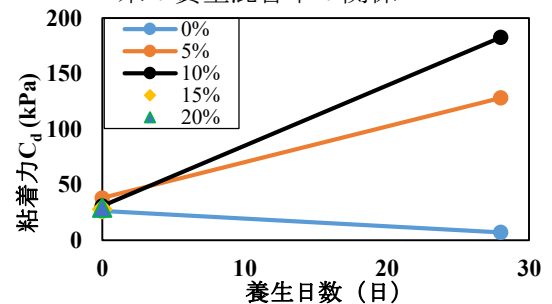


図6. 粘着力と養生日数の関係

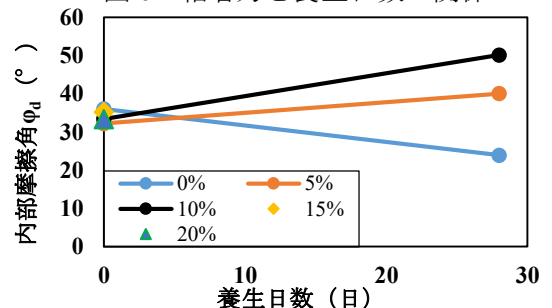


図7. 内部摩擦角と養生日数の関係