

間隙比に着目した自然砂混合した高炉水砕スラグの液状化特性

九州大学大学院 学○王韋雯 正 石藏良平

九州大学大学院 F 安福規之 学 坂田智美

1.はじめに

高炉水砕スラグは鉄鉄の製造過程において生成される副産物であり、粒度及び土粒子密度等の物理的性質が安定している他、強度・透水性に優れかつ軽量である¹⁾。また、水との接触環境において硬化する「潜在水硬性」を有する。高炉水砕スラグの有効利用率は高いが、これまでセメント材料として主に用いられ、地盤改良材としての利用が非常に少ない。そのため、地盤工学の分野において利用の促進が期待されている。

本研究では、高炉水砕スラグを低置換のサンドコンパクションパイル(SCP)工法の地盤改良材として適用することを目指している。図1に示すように、水砕スラグの未硬化時の優れた透水性よりドレーン機能が発揮され、周辺地盤の圧密促進が期待できる。未硬化の高炉水砕スラグは粒状体であることから、硬化にいたるまでの期間は液状化の発生が懸念される。特に、ドレーン機能を確保し、硬化遅延を期待するためには、自然砂を混合することが想定され、その際の高炉水砕スラグの液状化抵抗を検討する必要がある。本研究では、未硬化の高炉水砕スラグに着目し、非排水繰返しせん断試験を行い、自然砂の混合割合が高炉水砕スラグの液状化抵抗に及ぼす影響について考察を行った。

2.試料と実験条件

本研究では三軸条件下における非排水繰返しせん断試験を行った。試料には、大分にある製鐵所で2015年に製造された高炉水砕スラグを用いた。自然砂には今回、水砕スラグと粒度分布の異なる豊浦砂を用いた。供試体は事前真空脱気した試料を直径5cm、高さ10cmのモールドに相対密度 $Dr=80\%$ となるように水中落下法で作製した。実験条件を表1に示す。締固めを伴うSCP工法では、砂杭を打設する時に粒子破碎が生じるため、本研究では試料を破碎してから実験した。破碎方法は締固めA-a法に従い繰返し3回行った。また、施工時に豊浦砂の混合による粒子破碎量の増加を想定して、豊浦砂と水砕スラグを混合してから破碎を行った。表2に密度及び最大・最小密度を示す。図2に各試料の粒径加積曲線を示す。繰返し载荷は三軸圧縮試験装置を用い、100kPaで等方圧密後、非排水条件下で正弦波繰返し载荷(周波数:0.1Hz)を行った。また、二重負圧法によって供試体のB値は0.95以上を確保した。

3.実験結果

本研究では両振幅軸ひずみDAが5%に達したときを破壊(液状化)と定義して整理を行った。

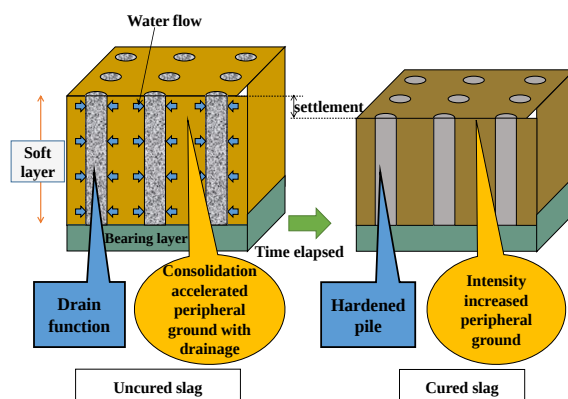


図1 SCP工法への適用の概念図

表1 実験条件

Grain size of samples	Relative Density Dr	Mixing rate of Toyoura sand (%)	Confining pressure σ'_0 (kPa)	Cyclic shear stress ratio
Crushed	80%	0,10,30,50,70,100	100	0.1-0.4

表2 土粒子密度および最大・最小間隙比

	soil particle density ρ_s (g/cm ³)	maximum void ratio e_{max}	minimum void ratio e_{min}
Toyouira sand	2.65	0.98	0.61
GBFS	2.65	1.61	1.05
GBFS (crushed)	2.66	1.28	0.80
mixed sample (mixing rate of Toyoura sand: 10%)	2.64	1.19	0.74
mixed sample (mixing rate of Toyoura sand: 30%)	2.64	1.09	0.66
mixed sample (mixing rate of Toyoura sand: 50%)	2.65	1.03	0.63
mixed sample (mixing rate of Toyoura sand: 70%)	2.62	0.96	0.62

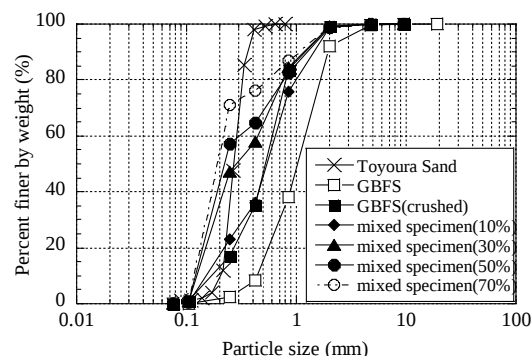


図2 粒径加積曲線

図 3 に初期間隙比と豊浦砂混合比の関係を示す。豊浦砂混合比は混合試料総体積に対する豊浦砂体積の比率である。初期間隙比は試料をモールドに入れた直後の間隙比で、 e_0 とした。初期間隙比 e_0 は豊浦砂の混合の増加に伴い、小さくなった。図中には、各豊浦砂混合比に対して同一エネルギーで締め固めた際の間隙比の実験結果も併記する。実験供試体と同様に豊浦砂の混合比の増加に伴い、間隙比は減少する傾向を示している。図中の直線は、粒子同士の相互干渉が生じないと仮定した条件での、母材（高炉水砕スラグ）側から見た理想的な間隙比直線である²⁾。豊浦砂混合比が大きくなるにつれ直線から離れ、理想的な値との差が大きくなる。

図 4 に結果の一例として豊浦砂混合率が 50% の供試体(破碎、 $Dr=80\%$)の記録波形を示す。 σ_d が小さい場合は、過剰間隙水圧比は繰返し载荷によって徐々に増加し、最終的にほぼ 1.0 に達した。それとともに、軸ひずみ ε_a も緩やかに生じた。 σ_d が大きい場合は、過剰間隙水圧比の急増とともに軸ひずみ ε_a も急激に生じた。

図 5 は各条件における液状化曲線を示している。水砕スラグは豊浦砂と同様に繰返しせん断によって液状化が生じた。水砕スラグは豊浦砂の液状化強度曲線より上方に位置した。今回の実験では、豊浦砂の混合率が 70% の際に、最も初期間隙比 e_0 は、小さな値となったが、混合率 50% の供試体の液状化強度曲線が最も上方に位置した。これは高炉水砕スラグへの豊浦砂混合率の増加に伴い、土粒子間の間隙比が小さくなったことに加え、豊浦砂よりも水砕スラグの強度特性が支配的になったことが要因と考えられる。

4.まとめ

本研究では、高炉水砕スラグを地盤改良材に適用することを想定し、豊浦砂の混合割合が水砕スラグの液状化抵抗に与える影響についての基礎的な検討を行った。得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 同一相対密度の供試体で比較すると、高炉水砕スラグは豊浦砂よりも液状化強度が大きい。
- 2) 高炉水砕スラグに豊浦砂を混合することにより、相対密度が同じであっても液状化抵抗に対して最適な混合割合が存在することを示した。今回の場合、それは 50% であった。

自然砂混合した高炉水砕スラグの液状化特性について、より一般性のある結果を得るため、今後は、図 6 に示すような水砕スラグと類似する粒度分布を持つ海砂を用いて同様の実験を実施し、間隙比を最小にする最適混合率等の提案を行う予定である。

【謝辞】本文の作成にあたり、実験環境で支援頂きました笠間清伸准教授、実験においてご指導頂きました八尋祐一技術専門職員と中島通夫技術協力スタッフに感謝の意を表します。

【参考文献】1) (社)地盤工学会：高炉水砕スラグの地盤工学的利用促進に関する研究委員会報告書，2010. 2) 高田和法，小澤一雅：粒子の相互干渉を考慮した 2 粒度粒子の間隙比算定モデル，ダム工学，pp. 34-42, 1995

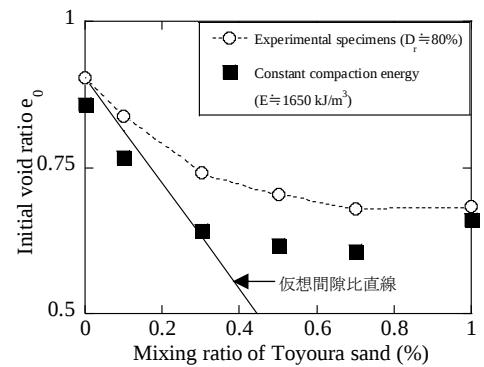


図 3 初期間隙比と豊浦砂混合比の関係

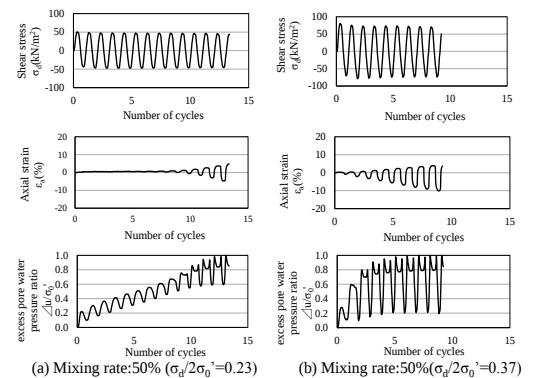


図 4 記録波形

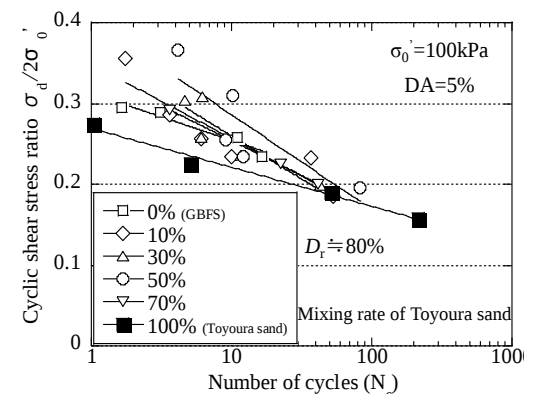


図 5 液状化強度曲線

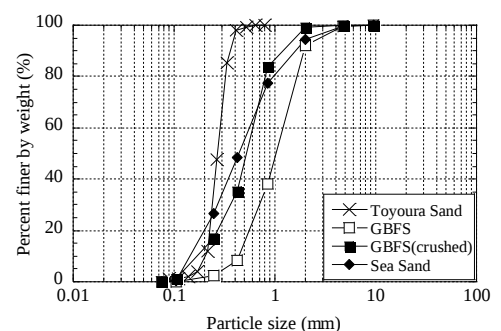


図 6 粒度加積曲線(海砂)