

自然砂混合した高炉水砕スラグの未硬化時の液状化強度特性

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

高炉水砕スラグは銑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、豊浦砂と佐賀産の海砂を用いた。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、自然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、図3に各試料の粒径加積曲線を示す。水砕スラグの粒度は豊浦砂と異なっているが、海砂と類似している。繰返し載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載荷(周波数:0.1Hz)を行った。また、二酸化炭素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。

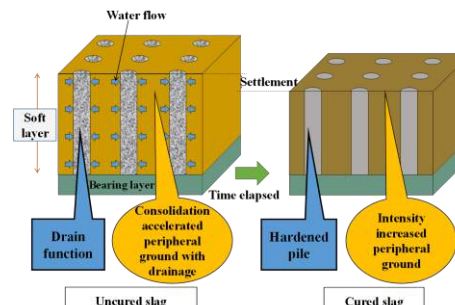


図1 SCP工法への適用の概念図

表1 実験条件

Grain size of samples	Relative Density Dr	Mixing rate of Natural 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

	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}
Toyoura sand	2.65	0.98	0.61
GBFS (crushed)	2.66	1.28	0.80
mixed sample (Toyoura sand mixing rate: 10%)	2.64	1.19	0.74
mixed sample (Toyoura sand mixing rate: 30%)	2.64	1.09	0.66
mixed sample (Toyoura sand mixing rate: 50%)	2.65	1.03	0.63
mixed sample (Toyoura sand mixing rate: 70%)	2.62	0.96	0.62
Sea sand	2.66	0.86	0.53
mixed sample (Sea sand mixing rate: 10%)	2.66	1.24	0.78
mixed sample (Sea sand mixing rate: 30%)	2.66	1.18	0.74
mixed sample (Sea sand mixing rate: 50%)	2.60	1.02	0.61

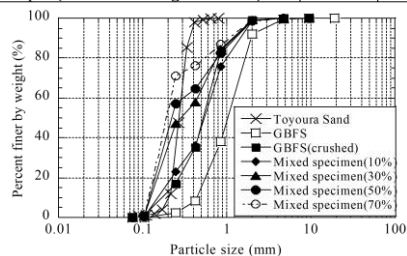


図2 粒径加積曲線(豊浦砂混合)

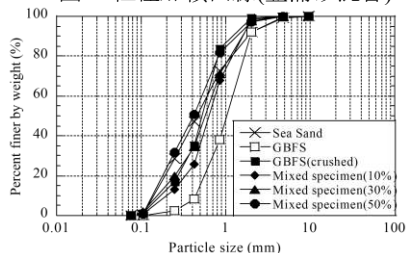


図3 粒径加積曲線(海砂混合)

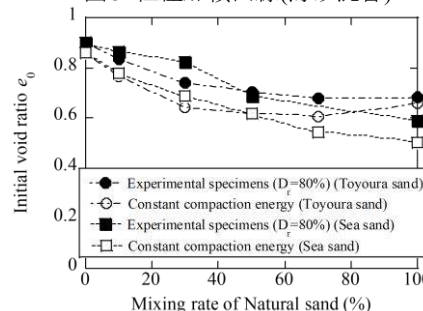


図4 初期間隙比と自然砂混合率の関係

図4に初期間隙比と自然砂混合率の関係を示す。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。自然砂混合供試体の e_0 は混合の増加に伴い、小さくなった。図中には同一エネルギー($E \approx 1650 \text{ kJ/m}^3$)で締固めた際の間隙比の実験結果も併記する。実験供試体と同様な傾向を示している。

図5、図6は豊浦砂、海砂混合供試体の液状化曲線を示している。高炉水砕スラグは豊浦砂よりは液状化強度が大きい、海砂よりは液状化強度が小さい。高炉水砕スラグに自然砂を混合することにより、未硬化の時、最適な混合割合が存在することが実験により明らかになった。豊浦砂混合の場合、それは50%であり、海砂の混合の場合、それは30%であった。これは高炉水砕スラグへの自然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、自然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。

図7、図8は深さ20mの地盤に杭を打設する際の F_L 値法を使う液状化判定の結果を示している。 F_L 値法というのは、設計指針等で定める方法で、液状化に抵抗する強さ、想定した水平震度等で地震によって地盤に発生する力と比較し、液状化が発生する、しないを判定する方法であり、以下の式で表すことができる²⁾。 F_L は1以下であれば液状化の可能性があると判断する。

$$F_L = R/L$$

ここで、 F_L ：液状化に対する抵抗率、 R ：動的せん断強度比、 L ：地震時せん断強度比。

未硬化の時、海砂混合率が30%の場合は液状化の危険度が一番低いことが示されている。

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、自然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検討を行った。その結果、未硬化の時、海砂混合率が30%の時に液状化強度が最大値を示すことが明らかになった。今後、この現象の理由について、さらに検討する必要がある。また、実施工においては、時間の経過とともに硬化することから、自然砂混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、硬化途中の供試体に対しても検討する予定である。

【謝辞】本研究の一部は、科学研究費補助金(課題番号 JP 15K18114)の支援を得て実施したものです。また、実験において中島通夫技術協力スタッフにご指導頂きました。ここに記して厚く謝意を表します。

【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) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp.38-39,1990.2

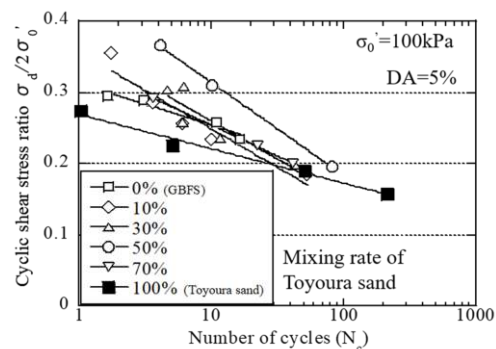


図5 液状化強度曲線(豊浦砂混合)

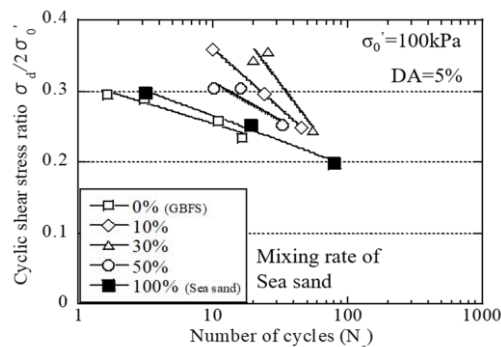


図6 液状化強度曲線(海砂混合)

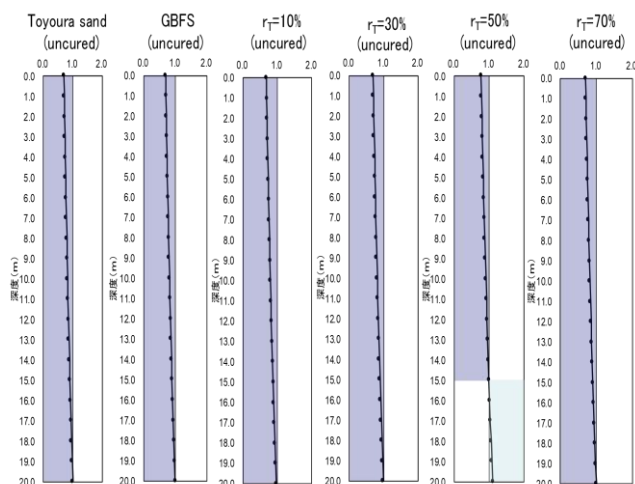


図7 F_L 分布(豊浦砂混合)

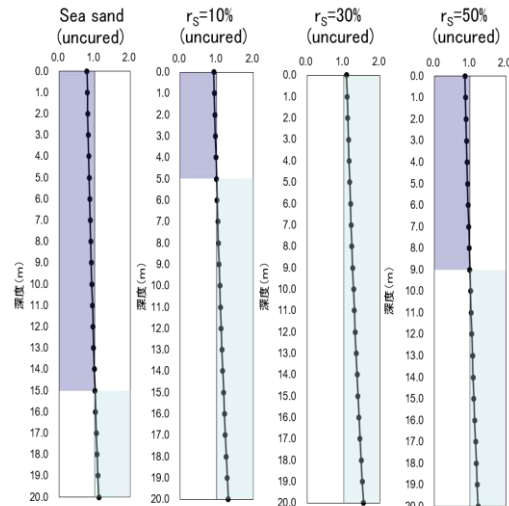


図8 F_L 分布(海砂混合)