

締固めエネルギーに着目した自然砂混合した高炉水砕スラグの液状化強度特性

九州大学大学院 学 ○永田 真也 正 石藏 良平 F 安福 規之

1.はじめに

高炉水砕スラグは鉄鋼の製造過程で生成される副産物である。年間約 2000 万トン生産されており、鉄鋼スラグ（徐冷スラグ，スラグ，転炉系スラグ，電気炉系スラグ）のうち、51.3%を占める¹⁾。セメント材料として利用されることがほとんどであり、地盤改良材としての利用が少ないのが現状である。高炉水砕スラグは水和反応により硬化する潜在水硬性を有するため、時間の経過とともに硬化する。本研究では未硬化時の高透水性と硬化後の高強度に期待して、低置換サンドコンパクションパイル工法（以下、低置換 SCP 工法）への適用を目指している。図-1 に示すように未硬化時には透水性を活かして排水経路となり圧密を促進し、硬化後には杭自体の高強度化が期待できる。しかし、実際の試験施工では打設後約 6 ヶ月で急激な透水性の低下が確認され、高炉水砕スラグ単体での施工が難しいことが明らかになっている²⁾。また、高炉水砕スラグは粒状体であることから硬化に至る過程で液状化する可能性がある。そこで排水機能の確保と硬化の遅延を期待して自然砂と混合することを想定した。本研究では、液状化強度に対する自然砂の最適混合割合を考察するため、締固めエネルギー一定下において、未硬化時の高炉水砕スラグと自然砂の混合割合が液状化強度特性に与える影響について検討を行った。

2. 試料の物理特性

試料は高炉水砕スラグと自然砂（豊浦砂）を用意し、任意の質量混合割合で混合し実験を行った。以下に示す割合はすべて質量比とする。試料の混合割合は高炉水砕スラグに対して、豊浦砂を 0%（高炉水砕スラグのみ）、10%、30%、50%、70%、100%（豊浦砂のみ）とした。実際に現場で打設される際に、高炉水砕スラグに粒子破碎が生じることを想定した破碎試料についても検討した。したがって用意する試料は各混合割合の試料 6 種類を破碎したものと、未破碎のもの計 12 種類用意した。試料の破碎方法は締固め A-a 法に従い繰返し 3 回行った ($E \simeq 1650 \text{kJ/m}^3$)。図-2 には代表的な混合試料の粒径加積曲線を示す。粒径加積曲線は豊浦砂の混合割合が増加するにつれて左に移動している。また、試料を破碎することで曲線が左に移動している。表-1 に混合試料の物理的性質を示す。図-3 には最大・最小密度試験により求めた各混合試料の最大間隙比および最小間隙比、初期間隙比を示す。豊浦砂の割合が増加するにつれ、未破碎試料と破碎試料はともに間隙比の変化が小さくなっている。また破碎試料の方が、混合割合の小さい条件では最大最小間隙比の差が大きいが、混合割合の増加に伴いその差が同等となっている。したがって、自然砂を混合するほど破碎の程度が間隙比に与える影響が小さくなっている。

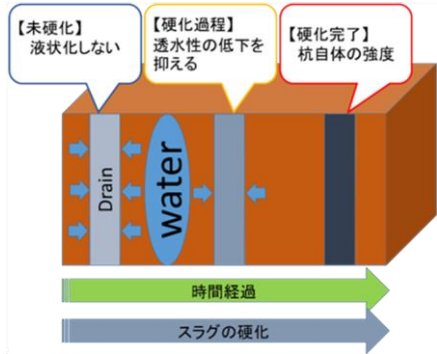


図-1 低置換 SCP 工法の適用簡略図

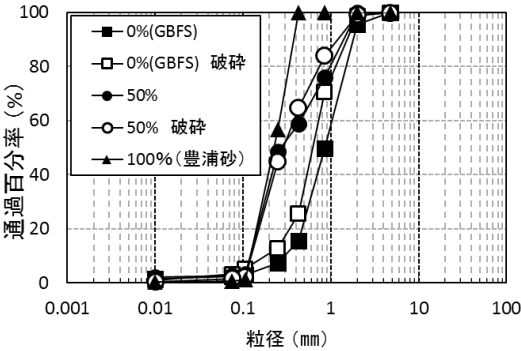


図-2 水砕スラグ混合試料の粒径加積曲線

表-1 水砕スラグ混合試料の物理的性質

豊浦砂混合割合	$e_{\max}$	$e_{\min}$	D_{50}	U_c
未破碎試料				
0%(GBFS)	1.96	1.50	0.86	3.7
10%	1.74	1.28	0.61	4.8
30%	1.51	0.92	0.36	3.7
50%	1.15	0.84	0.29	2.8
70%	0.96	0.70	0.21	1.9
100%(豊浦砂)	0.93	0.60	0.19	1.7
破碎試料				
0%(GBFS)	1.66	1.32	0.85	3.7
10%	1.55	1.13	0.8	5.4
30%	1.26	0.87	0.56	5.2
50%	1.15	0.78	0.27	3.5
70%	0.94	0.62	0.25	2.4
100%(豊浦砂)	0.92	0.62	0.23	2.0

キーワード 高炉水砕スラグ 液状化 スラグ 三軸試験 締固め

連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地 WEST2 号館 1108-2 TEL 092-802-3382

3. 実験概要

供試体は、混合試料を空中落下法にて作製した。高さ 10cm、直径 5cm のプラスチックモールドに同一締固めエネルギーで試料をつめた。同一締固めエネルギー下での供試体作製方法としては、試料を 3 層に分けていれ、各層ごとに 50 回木槌で叩いた。今回、相対密度をそろえるのではなく³⁾、実際の打設現場を想定して締固めエネルギーを一定にして供試体を作製した。飽和度においては、二酸化炭素法を用いて B 値を 0.95 以上確保した。実験方法としては、三軸試験装置を用いて 100kPa で等方圧密の後、周波数 0.1Hz の正弦波で繰返し载荷を行った。両振幅軸ひずみ DA が 5%に達した時を液状化と定義し、液状化するまで繰返し载荷を行った。

4. 実験結果と考察

図-4 および 5 に豊浦砂混合試料についての代表的な液状化強度曲線を示す。ここで、繰返し载荷回数 20 回の時の繰返し応力振幅比を R_{20} と定義した。未破碎試料および破碎試料のいずれにおいても豊浦砂混合率 70%の試料において R_{20} が最大となり、液状化強度曲線は最も上方に位置した。本研究で実施した実験条件では、最も液状化強度が大きくなる最適混合割合は豊浦砂混合割合 70%となった。また、液状化強度に対する最適混合割合を検討するため、間隙比に着目した指標として OMR(Optimum Mixing Ratio)を定義した³⁾。

$$OMR = \frac{e_0}{e_{max} - e_{min}} \quad (1)$$

OMR は初期間隙が小さくなるほど、また、最大・最小間隙比の差が大きくなるほど小さくなる。図-6 に OMR および R_{20} と豊浦砂混合割合の関係を示す。破碎試料の場合、OMR の値が小さくなると液状化強度が大きくなっており、相関が見られたが、未破碎試料では相関が見られなかった。

5. まとめ

本研究では、同一締固めエネルギーに着目し、未硬化時の自然砂混合した高炉水砕スラグの液状化強度について検討した。未硬化時には液状化強度が大きくなる最適な自然砂混合割合が存在し、今回実施した実験条件では、粒子破碎の有無に関わらず、混合割合 70%であった。また、OMR を指標として用いることで、液状化強度が大きくなる混合割合を評価できる可能性を示した。今後は硬化過程、硬化後における最適な自然砂混合割合について検討していく予定である。

【参考文献】1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報，鉄鋼スラグ協会，2015.7.

2) 篠崎晴彦 他：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, pp858~869, 2006.12 3) 王韋ブン 他：第 53 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.863~864, 2018.7.

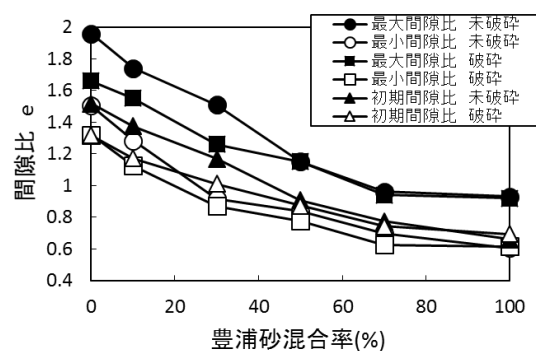


図-3 水砕スラグ混合試料の間隙比

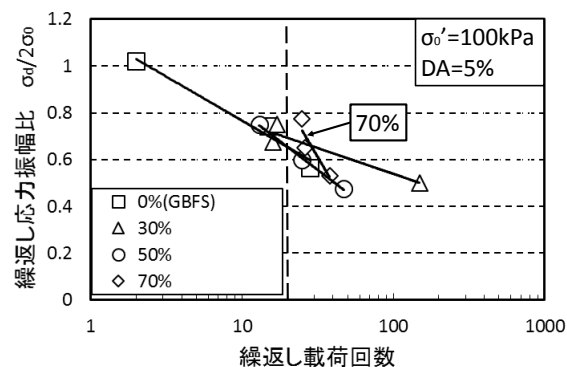


図-4 未破碎試料の液状化曲線

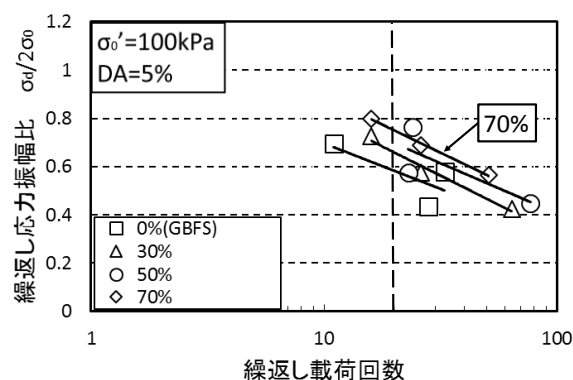


図-5 破碎試料の液状化曲線

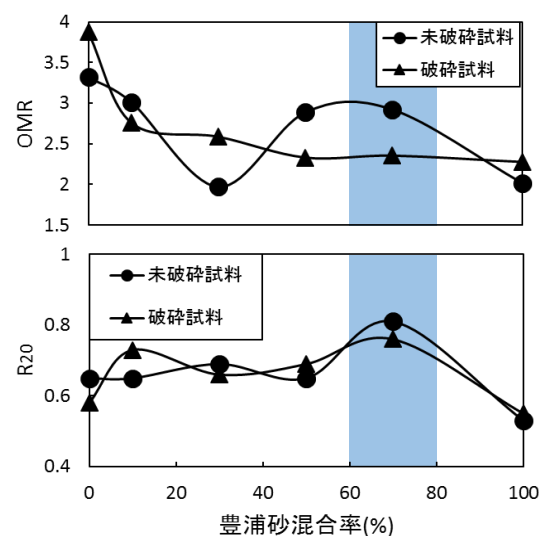


図-6 自然砂混合割合と OMR および R_{20}