

地盤工学材料としての高炉水砕スラグの再硬化特性

山口大学大学院 学正会員 ○正木理久 非会員 和田正寛
学正会員 新舎良典 正会員 松田博
正会員 石蔵良平

1. はじめに

銑鉄の製造過程で生産される高炉水砕スラグは、自然砂と比較して軽量性、高強度、透水性に優れている。また、水和反応により硬化する「潜在水硬性」を有している。さらに、工場で生産されるため、均一で安定して供給される。これらの点から、高炉水砕スラグは単なるリサイクル材料ではなく土木材料としての有効利用が期待されている。また、高炉水砕スラグは硬化により有用な非液状化材料としても注目されており、すでに硬化に伴うせん断特性について研究されているものの、硬化した高炉水砕スラグのせん断後の水硬性については検討されていない。そのため液状化後の地盤が非液状化材料として有用であるかについては課題が残る。そこで、硬化した高炉水砕スラグのせん断後の水硬性について明確にすることを目的とし、非排水繰返し三軸試験及び単調せん断試験を行い、再硬化特性について検討を行った。

2. 試験方法

高炉水砕スラグの土粒子の密度、最大・最小間隙比および粒径加積曲線を表1および図1に示す。比較のため豊浦砂・玄海砂についても併記する。供試体は、直径5cm、高さ10cmのプラスチックモールドに $Dr=80\%$ となるように詰めて作製した。供試体は、養生温度を 80°C とし海水中にて密閉したケースで養生を行った。繰返し载荷は三軸圧縮試験装置を用い、 100kPa で圧密後、非排水条件下で正弦波繰返し载荷（周期：10秒）を行った。なお、液状化における破壊の定義は両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ とした。静的三軸圧縮試験（CD）は、拘束圧 50kPa 、 100kPa 、 150kPa 、ひずみ速度 $0.3\%/\text{min}$ で行った。また、二酸化炭素（ CO_2 ）を用いた二重負圧法を用い供試体の $B>0.95$ を確保した。再硬化特性について検討するため、養生した供試体をせん断後、ふるいにかけ上記と同様の手順で、再養生後、せん断を行った。図2に再養生時の供試体の粒度分布を示す。

3. 試験結果

図3は、養生日数とpHの関係を示している。同図より、養生日数の増加に伴い、pHが上昇していることがわかる。高炉水砕スラグは、pHの溶出により水硬性が発現するため、再養生時にも強度発現していることが同図よりわかる。

表1 土粒子密度と最大・最小間隙比

	$\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	$e_{\max}$	$e_{\min}$
豊浦砂	2.646	0.999	0.623
玄海砂	2.678	0.827	0.516
高炉水砕スラグ2004	2.643	1.510	1.033

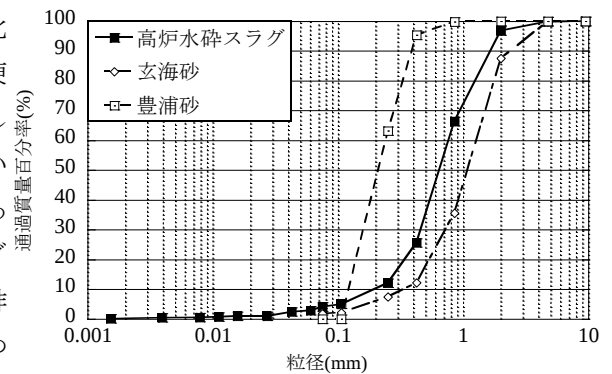


図1 粒径加積曲線

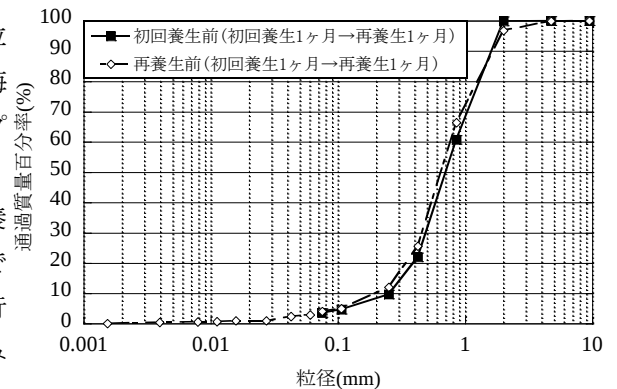


図2 再養生時の高炉水砕スラグの粒度分布

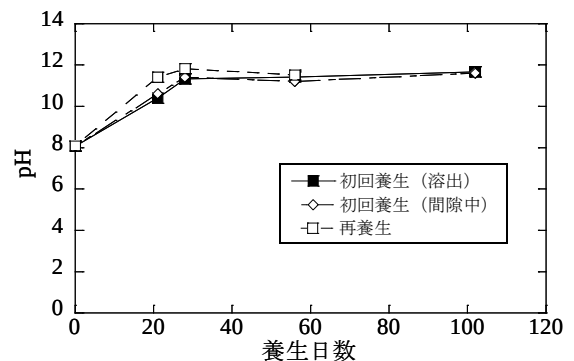


図3 養生日数とpHの関係

図4は初回養生を1ヵ月行った供試体について、静的三軸圧縮試験を行い、応力比および体積ひずみと軸ひずみの関係でまとめたものである。拘束圧の増加とともに、応力比が減少していることから、粒子破碎していると考えられる。

図5は、高温海水中にて養生した高炉水砕スラグ供試体を用いて静的三軸圧縮試験を行いせん断抵抗角および粘着力と養生日数の関係でまとめたものである。同図より、高炉水砕スラグのせん断抵抗角には大きな変化は見られないが35°以上となっている。また、粘着力は養生日数の経過に伴い増加していることがわかる。

図6は高温海水中（80℃）で1ヵ月（28日）養生した供試体を用いて繰返し三軸試験を行った結果であり、繰返しせん断応力、軸ひずみ、過剰間隙水圧の結果を示している。応力比 $\sigma_d/2\sigma'_0=0.415$ のもと $N_c=20.9$ 回で破壊に至っている。同図より過剰間隙水圧は載荷直後に急激に増加し安定している。その後は徐々に減少していることがわかる。

図7は初回養生および再養生した高炉水砕スラグ供試体（ $Dr \approx 80\%$ ）について繰返し三軸試験を行った結果を、繰返し応力振幅比と繰返し載荷回数の関係でまとめたもので、実線が初回養生、破線が再養生の試験結果である。また、未硬化高炉水砕スラグ供試体の結果も併せて示している。まず、初回養生では、未硬化と1ヶ月養生（28日）の液状化強度比は $R_{20}=0.290$ 、 $R_{20}=0.415$ 程度と高温海水養生1ヶ月で大幅に増加している。これは、常温（20℃）での海水養生6ヶ月（168日）と同等の強度であり¹⁾、高温で養生すると短期間で強度増加することが確認できた。また、2ヶ月養生（56日）の供試体、4ヶ月養生（112日）の供試体では、それぞれ $R_{20}=0.469$ 、 $R_{20}=0.541$ が得られ、養生日数の経過に伴い強度増加している。また、いずれの再養生時の養生日数においても強度増加が確認でき、一度硬化した高炉水砕スラグは、せん断後も水硬性を保持することがわかった。

4. まとめ

本研究では、硬化した高炉水砕スラグのせん断後における再硬化特性について検討を行った。その結果、一度硬化した高炉水砕スラグは、せん断後も水硬性を有しており、粒子同士が接触していれば再硬化することがわかった。

【謝辞】

本研究の一部は科研費（23560993）の助成を受けたものである。

【参考文献】

- 1) 篠崎晴彦, 松田博, 白元珍: 高炉水砕スラグの硬化に伴う繰返しせん断強度特性の変化, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, pp.175-180, 2008.

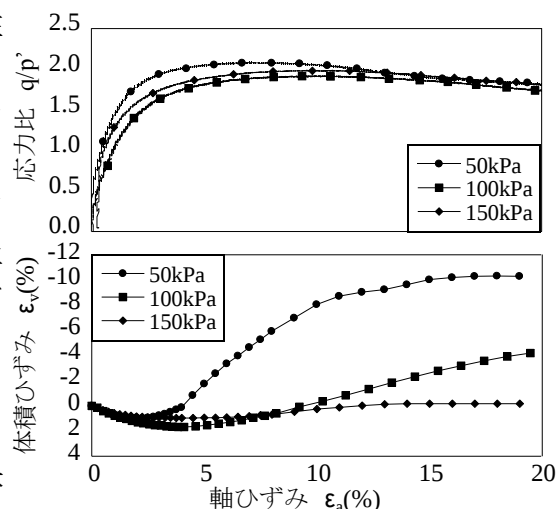


図4 応力比および体積ひずみと軸ひずみの関係

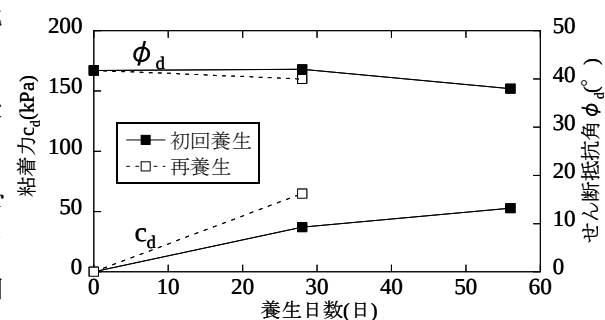


図5 せん断抵抗角および粘着力の経時変化

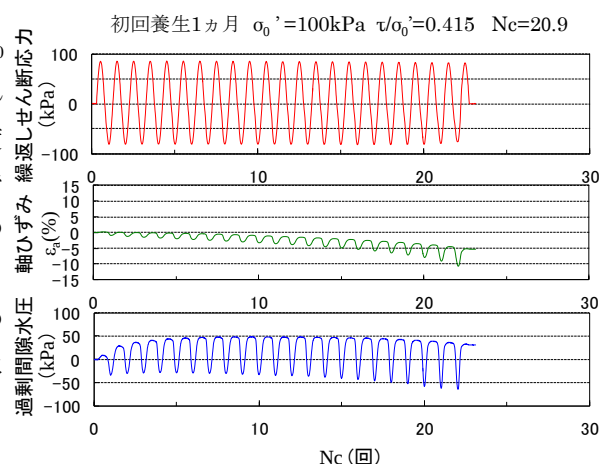


図6 再養生した供試体の記録波形

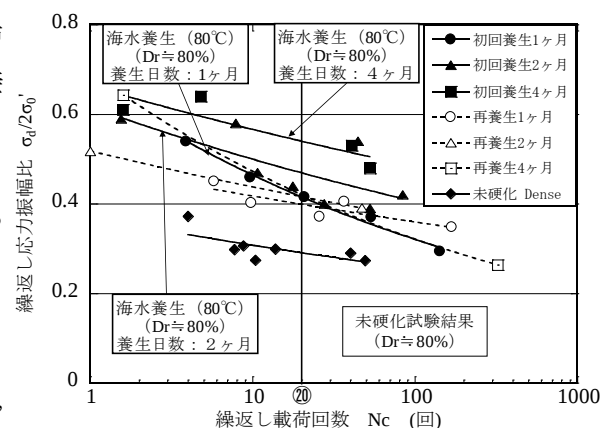


図7 液状化強度曲線