

フェロニッケルスラグの非排水単調及び繰返しせん断特性

福岡大学工学部 学生会員 福味 尊 古賀 新太郎
福岡大学工学部 正会員 佐藤 研一 藤川 拓朗 古賀 千佳嗣
株式会社日向製錬所 亀井 一成

1.はじめに 非鉄スラグの一種であるフェロニッケルスラグ(以下、FNS)は、ステンレス鋼や特殊鋼の製造に用いられるフェロニッケルを製錬する際の砂上の副産物であり、年産約 300 万トン生成されている¹⁾。このスラグを有効利用することは、再資源化のみならずフェロニッケルの安定的な供給につながる。現在、サンドコンパクションパイル材等の土木用材料等²⁾として再利用されているものの、フェロニッケルの安定的な供給のためにも付加価値の高い積極的な利活用が望まれている³⁾。そこで本研究では、FNS の天然砂と類似した性質をもつ特徴に着目し、代替材として利用することで天然砂の使用量の削減を目的としている。

そこで本報告では、FNS の非排水単調せん断試験及び非排水繰返しせん断試験により、FNS 材料の基本的な液状化特性を明らかにした結果について報告する。

表-1 物理特性及び強度定数

土質試料	FNS	豊浦硅砂
土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.970	2.646
最大間隙比 e_{max}	0.986	0.984
最小間隙比 e_{min}	0.679	0.612
粘着力 $c'(\text{kPa})$	8.0	0
内部摩擦角 $\phi'(^{\circ})$	32	36



写真-1 FNS

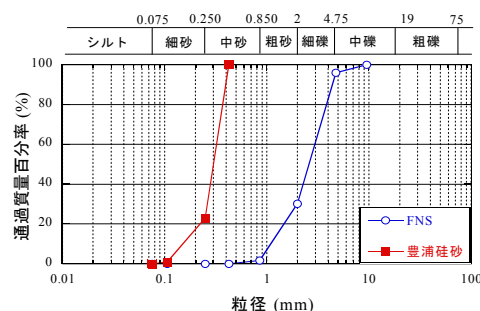


図-1 粒径加積曲線

表-2 溶出試験結果

試料名	pH	T-Cr	Cr ⁶⁺	Cd	Pb	B
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
フェロニッケルスラグ	9.20	0.04	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

2.実験概要
2-1 実験に用いた試料 実験には、水砕粒状化した FNS(写真-1)と豊浦硅砂を用いた。表-1 に試料の物理特性及び強度定数、図-1 に粒径加積曲線を示す。表-2 に環境庁告示第 46 号法から得られた溶出試験結果を示す。これにより、土壤環境基準を超える量の六価クロム(Cr⁶⁺)、カドミウム(Cd)、鉛(Pb)、ホウ素(B)は検出されないことを確認した。

2-2 実験条件及び実験方法 今回は FNS の基本的なせん断特性を調べるために非排水単調せん断試験及び非排水繰返しせん断試験を行った。供試体は直径 7.5cm、高さ 15cm のモールド内に、中密な地盤を模擬した $Dr \approx 60\%$ の乾燥密度となるよう空中落下法により作製した。単調せん断試験は、せん断速度を 0.17%/min とし、軸ひずみが 15%に達したところで実験終了とした。非排水繰返しせん断試験は、正弦波の応力制御により載荷速度 0.1Hz で行った。なお、液状化の判定は両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ に達した時とした。また、全条件において供試体の B 値は 0.96 以上であることを確認している。

3. 実験結果

3-1 非排水単調せん断特性 図-2 に豊浦硅砂及び FNS の有効応力経路図を示す。FNS は豊浦硅砂に比べ、圧縮側ではせん断初期から膨張傾向が強く現われ、変相線に達した後は、その傾向が小さくなっている。また、伸張側においても豊浦硅砂に比べ収縮傾向が小さいことが分かる。図-3 に軸差応力と軸ひずみの関係を示す。

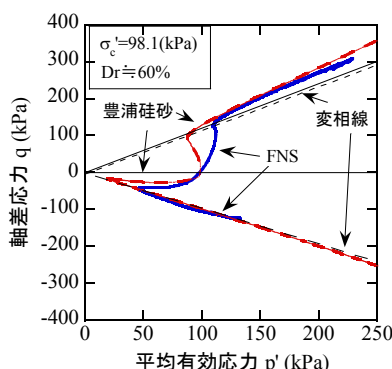


図-2 有効応力経路図

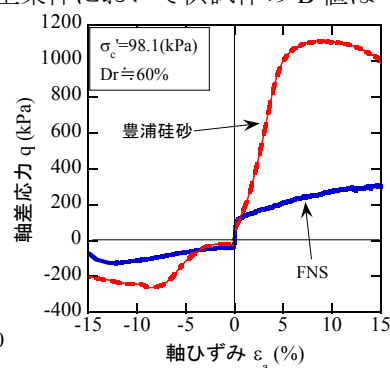


図-3 軸差応力と軸ひずみの関係

FNS は軸ひずみの増加に伴いゆっくりと軸差応力が増加する傾向を示している。これに対し、豊浦硅砂はせん断初期にピーク強度を示した後、急激な軸差応力の増加を示していることが分かる。これは、FNS の粒径幅の違いとせん断中に発生する粒子破碎によるダイレタンシー特性の影響がせん断挙動に現われたと考えられる。

3-2 非排水繰返しせん断特性 図-4, 5に豊浦硅砂及びFNSの繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c=0.15$ における有効応力経路図及び軸差応力と軸ひずみの関係を示す。図中には非排水単調せん断試験から得られた変相線も示している。FNSに着目すると、繰返しせん断初期から膨張傾向を示し、繰返しせん断に伴い有効応力が徐々に低下し、引張側で変相線に達した後、緩やかに液状化に至っていることが分かる。また、FNSの繰返しせん断変形については、流動的な変形を生じた豊浦硅砂と比較すると流動的な変形はせず、軸ひずみの発生幅が大きいこと分かる。これは、豊浦硅砂が変相線に達した後サイクリックモビリティを生じ、剛性を取り戻す効果が顕著に出ているのに対し、FNSでは変相線に達した後の剛性の回復力が小さいためであると考えられる。図-6に最大過剰間隙水圧比と繰返し回数の関係を示す。FNSの過剰間隙水圧の発生は、せん断初期に緩慢な挙動を示しながら上昇し、 $u/p'_c=0.6$ 付近から最大過剰間隙水圧比の上昇率が大きくなり、液状化に至っている。図-7に両振幅軸ひずみと繰返し回数の関係を示す。豊浦硅砂軸ひずみの発生挙動は、過剰間隙水圧比が $u/p'_c=0.6$ 付近に達し一気に液状化すると同時に流動的な変形が生じ、大きなひずみが発生している。これに対し、FNSは同一繰返し応力比であるにも関わらず、両振幅軸ひずみ発生挙動は緩慢であり、急激な変形が生じないことが特徴的である。図-8に両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ に達した時点点を液状化と判定し、その時の繰返し応力比と繰返し回数を用いて表した液状化強度曲線を示す。図中には、大平ら⁴⁾が行った、自硬性のある高炉水砕スラグ(養生0日)の結果も示している。繰返し回数20回に着目すると、豊浦硅砂に比べ、非鉄系のFNSは大きな液状化強度を有している材料であることが分かる。したがって、FNSはサンドコンパクションの材料としての利用において優位性のある材料と言える。

4. まとめ 1)FNSの非排水単調せん断挙動は、同一密度の豊浦硅砂と比較すると軸差応力、有効応力経路においてかなり異なる挙動を示した。これは、各材料の粒子形状と粒径幅、さらにはせん断中の粒子破碎の影響が考えられる。FNSのせん断に伴う粒子破碎挙動に関して今後しっかりと検討する必要がある。2)非排水繰返しせん断試験よりFNSは豊浦硅砂と類似した挙動をもつものの、粒径幅の広いFNSの方が液状化に至るまでの繰返し抵抗あり、一般的な砂より大きな液状化強度を有していることが示された。

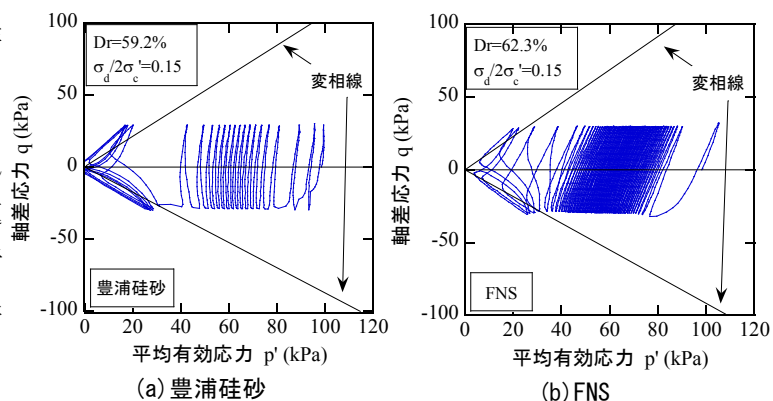


図-4 有効応力経路図

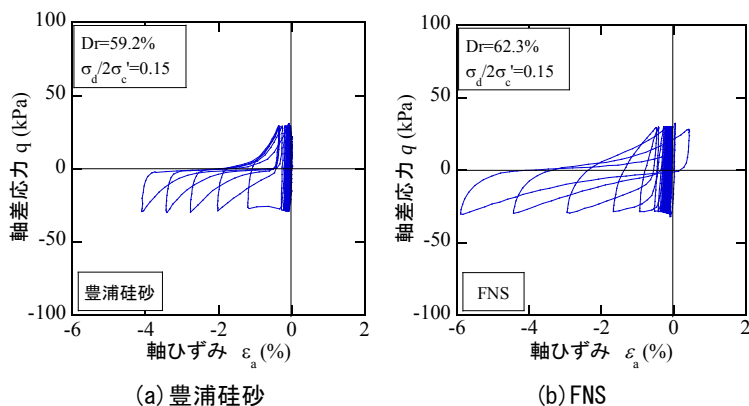


図-5 軸差応力と軸ひずみの関係

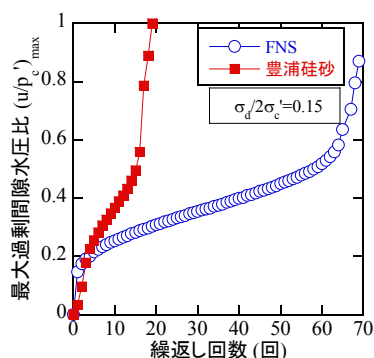


図-6 最大過剰間隙水圧比と繰返し回数の関係

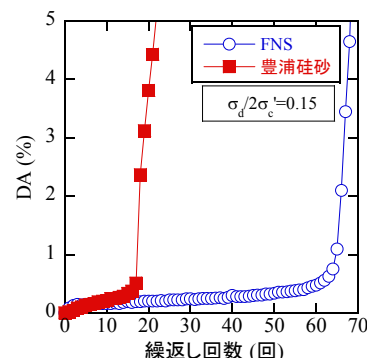


図-7 両振幅軸ひずみと繰返し回数の関係

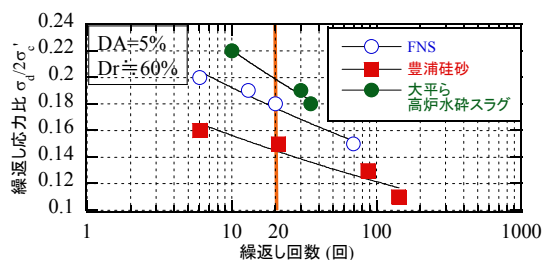


図-8 液状化強度曲線

【参考文献】1)日本鉱業協会スラグ委員会 <http://www.kogyo-kyokai.gr.jp/> 2)財団法人沿岸技術センター：港湾・空港工事における非鉄スラグ利用技術マニュアル(案), pp42-51, 2012.3. 3)庄嶋芳卓ら：土質安定処理材としてのフェロニッケルスラグ微粉末の適用に関する研究, 農業農村工学会論文集, No.288, pp.65-75, 2013.12. 4)大平尚美ら：硬化過程にある高炉水砕スラグの液状化抵抗に関する研究, 土木学会第58回年次学術講演会, No.111-087, pp173-174, 2003.9.