

# 相対密度の違いによるフェロニッケルスラグの材料特性及び破碎性

福岡大学大学院 学生会員 ○福味 尊

福岡大学工学部 正会員 佐藤 研一 藤川 拓朗 古賀 千佳嗣

**1.はじめに** 非鉄金属スラグは非鉄金属製造の副産物として大量に発生している。現在、セメントの原料や砂の代替材等と天然資源の代替として利用が進んでいる。非鉄金属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状の副産物であり、年間で約 300 万トンも生成される<sup>1)</sup>。このスラグを有効利用していく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もつながる。現在では、土木用資材としても再利用されているものの<sup>2)</sup>、未だ有効利用が進んでいない副産物である。そこで本研究では、FNS の天然砂と類似した物理的な性状に着目し、現在、建設資材として大量消費されている天然砂の使用量削減及び FNS のさらなる有効利用を目的として、地盤工学的な材料特性の把握を行っている。本報告では、排水単調せん断試験によって得られた、FNS の材料強度・変形特性及び粒子破碎性についての報告をする。



写真-1 FNS

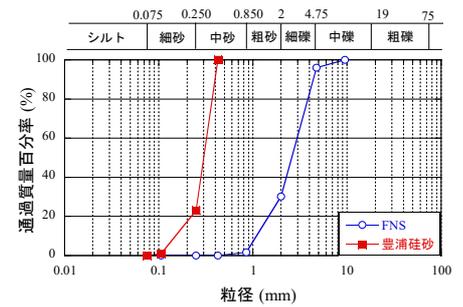


図-1 粒径加積曲線

表-1 物理特性

土質試料	土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	最大間隙比 $e_{\text{max}}$	最小間隙比 $e_{\text{min}}$	均等係数 $U_c$	曲率係数 $U_c'$
FNS	2.970	0.946	0.644	2.308	1.026
豊浦硅砂	2.646	0.679	0.612	1.882	1.243

## 2. 実験概要

**2-1 実験に用いた試料** 土質材料には水砕粒状化した FNS を用いた。写真-1にFNSの外観図を示す。図-1に粒径加積曲線及び表-1に物理特性を示す。

また、比較材料として豊浦硅砂を同時に示す。環境庁告示第 46 号法から得られた溶出試験結果より、pH=9.20、そして土壤環境基準を超える量の六価クロム( $\text{Cr}^{6+}$ )、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ている。

**2-2 実験条件及び実験方法** FNS の基本的なせん断特性及びスラグ粒子の破碎性を調べるために排水単調せん断試験を行った。実験条件は、密度の管理のもと  $\text{Dr} \approx 40\%$ 、 $60\%$ 、 $80\%$ の相対密度となるよう空中落下法により作製した。単調せん断試験では、せん断速度を  $0.17\%/\text{min}$  とし、軸ひずみが  $15\%$ に達したところで実験終了とした。

## 3. 実験結果及び考察

### 3-1 排水単調せん断試験

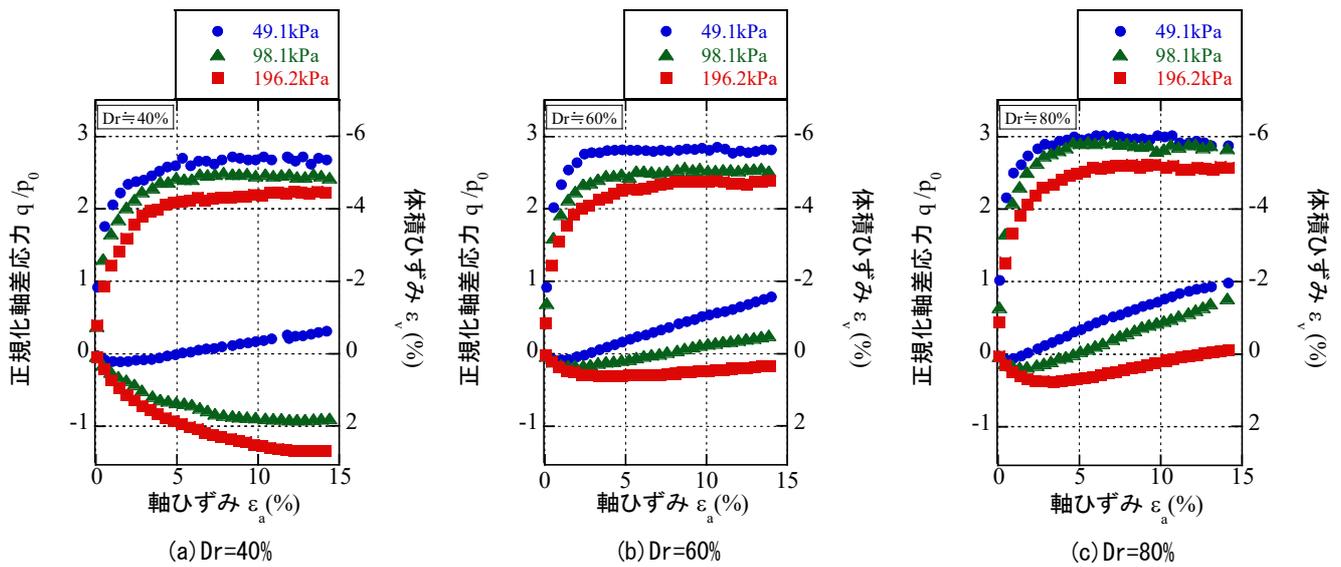


図-2 排水単調せん断試験結果

キーワード フェロニッケルスラグ, 破碎性, 三軸圧縮せん断試験

連絡先 〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1 福岡大学工学部 TEL092-871-6631(ext. 6464)

図-2 に各相対密度における排水単調せん断試験結果を示す。ここで、軸差応力は、各拘束圧で正規化軸差応力を用いている。FNS のせん断挙動は、各供試体密度においても拘束圧の増加に伴い、せん断変形に伴う軸差応力が低下していることが分かる。また、 $Dr=40$ 、 $60\%$ においては、せん断変形に伴って明確なピーク強度は現れず、残留強度を示している。一方、体積ひずみは、供試体密度の増加に伴い、収縮傾向から膨張傾向に転じている。さらに、同一密度下においては、拘束圧の増加に伴い、収縮傾向が強くなり、一般的な砂質材料は逆の挙動を示していることが分かる。このようなせん断挙動は、破碎材料に良く見られ、FNS がせん断中に粒子の破碎を生じることにより現れていると推察される。そこで、図-3 に  $Dr=80\%$ の破壊時におけるモールの応力円を示す。ただし、ピーク強度が確認できない場合については、軸ひずみが15%時点の軸差応力を用いている。図中には $\sigma_c=50\text{kPa}$ のモール円における破壊包絡線を示しているが、拘束圧の増加に伴い、包絡線とモール円が接点を持たず、破壊時のモール円が次第に小さくなっている。これは、せん断に伴い、スラグ粒子が破碎し、強度低下を起こしていることが要因と考えられる。

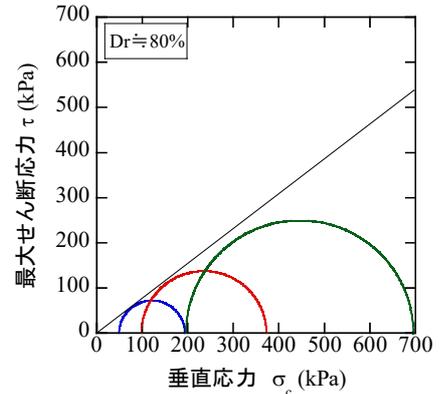


図-3 破壊時モールの応力円 ( $Dr=80\%$ )

**3-2 粒子破碎の影響と評価** 排水単調せん断試験の結果から

FNS の粒子破碎が懸念されるため、終了後に粒度試験を行い、粒子破碎量を求めた。ここでは、粒子破碎量を Marsal<sup>3)</sup>の方法により数量化にして粒子破碎率の評価を行った。まず、図-4 に同一拘束圧 $\sigma_c=196.2\text{kPa}$ におけるせん断前後における粒度分布を示す。グラフからせん断試験前に比べると粒径加積曲線が左側にシフトしており、せん断前は主に中砂から中礫で構成されていた粒子がより細かくなり粒径幅が広がっていることが分かる。また、相対密度の増加に伴い粒子破碎率が増加していることも分かる。図-5 に拘束圧と粒子破碎率の関係を示す。拘束圧の増加に伴い破碎率も増加傾向を示している。また、相対密度が大きくなるにつれて、粒子破碎量が増加していることが分かる。また、安河内ら<sup>4)</sup>は沖縄砂及び一般廃棄物溶融スラグの破碎率を求めており、試験結果を表-2 に示している。FNS は沖縄砂より破碎率は大きいものの、一般廃棄物溶融スラグに比べると破碎率が低いことが明らかとなった。このようにせん断に伴って粒子破碎が起こる原因として、FNS 粒子が多孔質で角ばりがあることから、せん断中に起こる粒子同士の接触部の欠損したことが原因として考えられる。このため、FNS のせん断中に生じる粒子破碎は、インターロッキング効果に影響を及ぼすことが推察される<sup>5)</sup>。

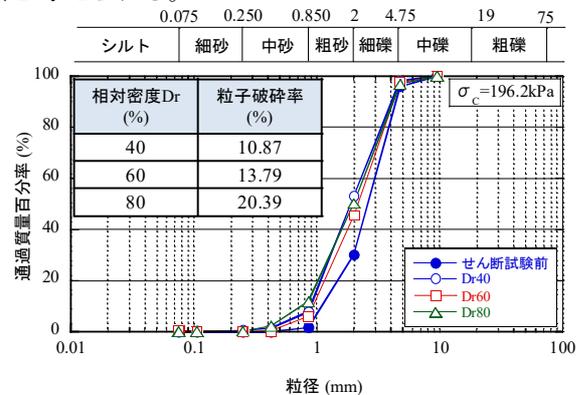


図-4 せん断試験後の粒度分布

4 まとめ 1) 排水単調せん断試験より FNS の強度変形特性は、拘束圧と供試体密度の影響を受けることが明らかになった。2)同一密度における粒子破碎率は、拘束圧の増加に対して小さい。しかし、FNS の粒子破碎は、密度の変化に対して顕著であり、特に密な場合( $Dr=80\%$ )において大きいことが示された。今後は、FNS の土木資材としての適用範囲を広げるために透水性等の評価や高拘束圧下における粒子破碎挙動についても検討予定である。

表-2 粒子破碎率<sup>4)</sup>

相対密度Dr (%)	試料名	
	一般廃棄物溶融スラグ	沖縄砂
	粒子破碎率 $B_M$	
40	24.57	7.36
60	23.08	5.74
80	21.38	6.36

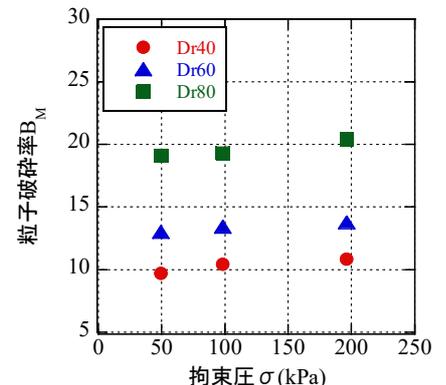


図-5 拘束圧と粒子破碎率の関係

謝辞：今回実験に用いた FNS は、(株)日向製錬所から提供して頂きました。記して、関係各位に心より感謝申し上げます。

【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)石井武美：粒子破碎の表示尺度の持つ物理的意義, 土質工学会論文報告集, Vol.29, No.4, pp.155-164, 1989.12. 4)安河内聡：破碎性地盤材料の圧縮・せん断特性に及ぼす密度と拘束圧の影響, 平成18年度修士論文 5)兵動正幸ら：破碎性土の定常状態と液状化強度, 土木学会論文集, No.554/III-37, 197-209, 1996.12.