

フェロニッケルスラグの有効利用に関する基礎的検討 (その2) 土工材料としての基本力学特性について

前田建設工業(株) フェロ-会員 ○石黒 健 前田建設工業(株) 正会員 山本 達生
 日本冶金工業(株) 非会員 館農 昇 日本冶金工業(株) 非会員 安田 智弘
 立命館大学 フェロ-会員 建山 和由 立命館大学 正会員 横山 隆明

1. はじめに

前報¹⁾では、フェロニッケルスラグの環境安全性に関し、国内基準で想定していないような過酷な条件下においても有害物質の溶出に対して高い安全性を有することを示した。本報文では、この結果を前提とし、本スラグを土工材料として見た場合の基本力学特性を調べ、有効利用の可能性を検討する。日本冶金工業(株)大江山製造所では砂粒径のナスサンド(以下、FNS)と微粒状のファインサンド(以下、BFNS)の2種類のフェロニッケルスラグが発生しており、各々の材料、及び両者を製造所の発生比率(FNS:BFNS=83:17重量比)で混合し、粒度調整を図った場合(以下、混合材)の3ケースを対象として各種力学試験を実施した。

2. 力学試験に用いた材料と試験内容

実験に用いた3種類の材料の基本物理特性を表1に、粒度曲線を図1に示す。FNSは細砂～中砂、BFNSはシルト、混合材はシルト混り砂に相当する。鉱石の製錬過程で発生した緻密・硬質な材料であるため¹⁾、いづれも非塑性で土粒子比重が3以上と大きい。実験方法、実験条件及び主な実験結果の一覧を表2に示す。

表1 材料の基本物理特性

	FNS	BFNS	混合材
土粒子密度 (g/cm ³)	3.081	3.045	3.074
平均粒径D ₅₀ (mm)	0.331	0.036	0.228
細粒分含有率Fc(%)	7.6	86	22.4
均等係数U _c	3.99	6.65	8.89
自然含水比w _n * (%)	5.1	21.3	7.9
塑性指数I _p			NP (非塑性)

* 製造所出荷時の含水比に相当

3. 試験結果および考察

3材料の締固め試験結果(1Ec)を図2に示す(図中にBFNSの既往試験結果を併記したが、再現性は高い)。BFNS、FNS、混合材の順番に締固め曲線が左上に移動し、締固め密度の向上が見られる。混合材ではFNSの間隙をBFNSが間詰めること、均等係数の増加等が本結果をもたらしたものと考えられる。

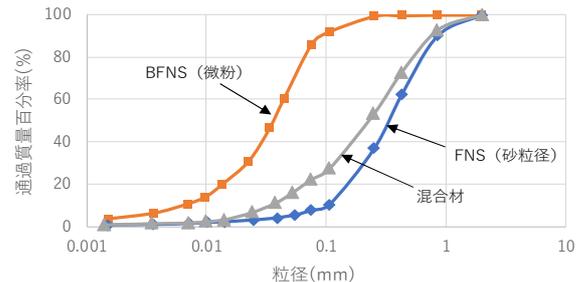


図1 実験に用いた材料の粒度特性

図3、図4は、この締固め供試体を用いて行ったCBR試験とコーン試験の結果を示す(NEXCO試験法に準拠。既往実験結果も併記)。

図より、CBRやコーン指数が乾燥密度と含水比の影響を受けて大きく変化すること、図2と同様、物性のピーク値をもたらす含水比がBFNS、FNS、混合材の順番に乾燥側に移行することなどが見て取れる。最適含水比付近のCBR値は概ね50を超え(非水浸条件)、コーン指数はダンプトラック走行が可能な1200kN/m²を遙かに上回るなど、締固め密度と含水比を適切に管理すれば、3材料ともに土工材料として十分な強度を発揮しうることが伺われる(両物性値のピークをもたらす含水比は図中に矢印で示した自然含水比付近、もしくは湿潤側にあり、出荷含水比そのまま、もしくは現場で若干加水することで物性の改善を図ることが可能となる)。砂粒径のFNSに比べ微粒のBFNSや混合材のCBRやコーン指数が大きめにしていることは興味深く、今後そのメカニズム(粒径効果や粒子接

点数の影響、含水比の影響等)の解明を試みたい。図5は、等体積一面せん断時のストレスパスを3材料で比較した結果を示す(1Ecの90%密度、自然含水比状態

表2 実験方法、実験条件及び実験結果の一覧

		試験方法	試験条件	FNS	BFNS	混合材
締固め特性	最大乾燥密度 (g/cm ³)	JISA1210	B-c法 (1Ec, φ15cmモールド)	1.82	1.624	1.945
	最適含水比w _{opt} (%)			18.5	21.1	14.5
強度変形特性	CBR値	JISA1211-NEXCO試験法条件に準拠 (非水浸条件で実施)	B-c法、w _{opt} 付近の値を記載	49.9	51.2	63
	コーン指数(kN/m ²)			3050	7360	5309
	見掛けのφ' (度) 注)			JGS0560 定体積一面せん断	D90密度、w _n で締固め	39.7
透水特性	透水係数(m/sec)	JISA1218	D90密度、w _n で締固め、変水位法			1.58×10 ⁻⁵

注) 最大上載荷重 (σ = 300kN/m²) におけるピークせん断応力時の割線勾配からc'=0と仮定して便宜的に算出

キーワード フェロニッケルスラグ, 締固め・強度・支持力・透水特性, 粒度調整
 連絡先 〒101-0064 東京都練馬区旭町 1-39-16 Tel.03-3977-2242

で供試体を作製). BFNS, FNS, 混合材の順番に破壊包絡線が上昇し, 便宜的に求めた見掛けの内部摩擦角 ϕ' (表 2 欄外の注書き参照) も同様に増加している. 混合材における ϕ' の値はかなり大きい, ストレスパスには過圧密土特有の正のダイレイタンシー挙動が顕著に見られ, 液状化強度なども相当高いものと予想される. 以上の締固め, CBR, コーン指数, ϕ' に対する材料粒度や含水比の影響の仕方はかなり複雑であり, 今後の検討課題と考える. 表 2 中には 3 材料の透水試験結果を記載した (供試体作製条件は一面せん断と同様). FNS と BFNS は透水係数が 1 オーダー異なり, 混合材は FNS に近い値を示す. BFNS は, 同一粒径のシルトに対する Creager の推定値 ($10^{-7}m/s$ オーダー) に比べ, 排水性はむしろ良好といえる結果を示している.

4. おわりに

一連の基本力学試験の結果より, FNS, BFNS のいずれも, 締固め密度と含水比を適切に管理することで土工材料として十分な力学特性 (締固め, 強度, 支持力, 透水) を発揮することが確認された. 2 材料を製造所の発生比率で混合した材料は, 粒度調整効果が顕著に発揮され, 力学特性が大きく改善されることも明らかとなった. CBR やコーン指数のデータは, 従来の土質材料とはやや異なる傾向を示しているようにも思われる. 半熔融状態の製錬という生成過程を鑑み, 今後, 今回得られた力学特性のメカニズム検証のために微視的考察を含めた検討を進めていきたい. 併せて, 大江山製造所 BFNS 堆積場の現地力学特性の調査を進めていく予定である.

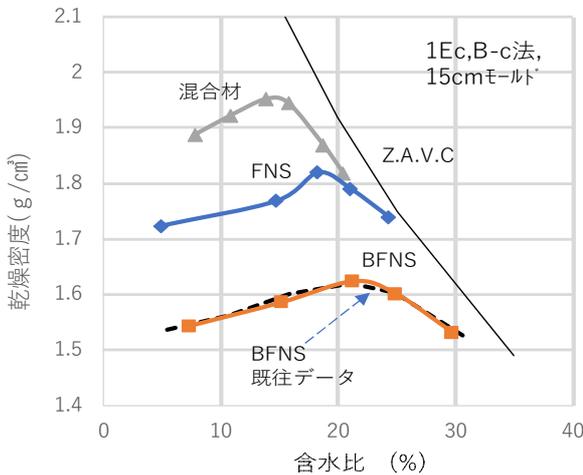


図2 締固め曲線の比較結果

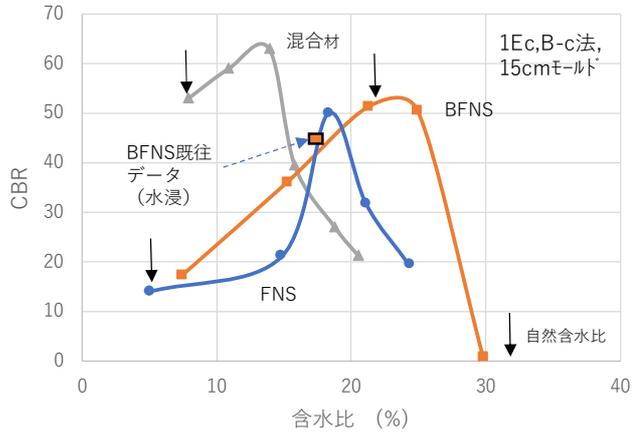


図3 CBRの比較結果

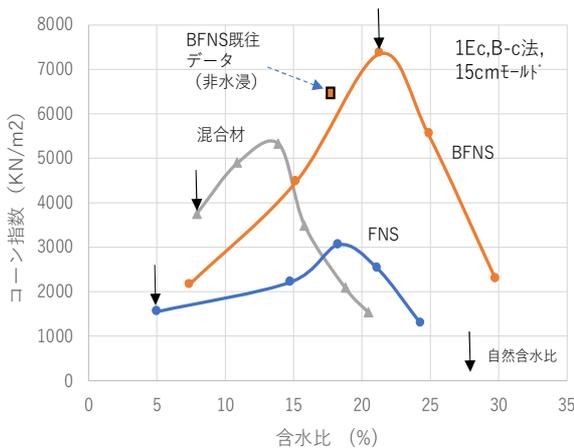


図4 コーン指数の比較結果

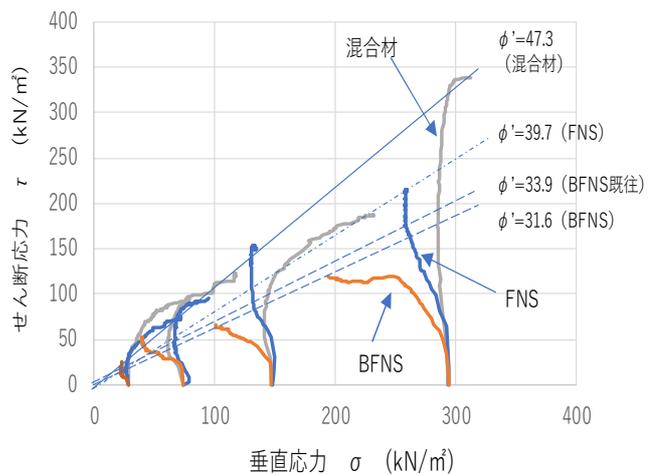


図5 等体積一面せん断試験時のストレスパス

【参考文献】

- 1) 山本等, フェロニッケルスラグの有効利用に関する基礎的検討 (その 1) 環境安全性について, 第 73 回学会年次学術講演会投稿中, 2018.