

微粒フェロニッケルスラグの土工材料としての有効利用に関する研究

(その 1) 室内非水浸 CBR 特性に関する検討

立命館大学	学生会員	○蜂谷 興起	前田建設工業（株）	フェロー会員	石黒 健
日本冶金工業（株）	非会員	館農 昇	日本冶金工業（株）	正会員	安田 智弘
立命館大学	フェロー会員	建山 和由	立命館大学	正会員	横山 隆明

1. はじめに

日本冶金工業（株）大江山製造所では、ステンレス製品の原料であるフェロニッケルを製錬しており、その際に発生する微粒スラグ（BFNS）の土工材料としての有効利用の可能性を模索している。既報¹⁾では、BFNS の室内 1Ec 締固め試料を用いた種々の力学試験を実施し、シルト相当の粒径にしては高い強度を示すことを報告した。本研究では、乾燥密度と含水比の組み合わせを種々に変えた供試体を用いて室内非水浸 CBR 特性を調べ、一般的な土との比較を試みると共に、その強度発現メカニズムを定性的に検討した結果を報告する。

2. 試験内容

実験で用いた材料の粒度特性を図-1 に示す。BFNS は、製造所内で発生する材料の粒度範囲を併記したが、工場生産のため一般的な土に比べ粒度のばらつきは小さい。図中には、龍岡²⁾ が非水浸 CBR 特性を調べた砂質ロームの粒度を併記したが、BFNS はこれに比べて細粒側の粒度となる。実験では、乾燥密度を 5 点（含水比 25% のみ 3 点）、含水比を 5 点変えた合計 23 の供試体の非水浸 CBR を計測した。また、光学顕微鏡による粒子の観察やテンシオメータによるサクシオン測定、粒子の多孔質性を調べるための煮沸時間を変えた土粒子の密度試験を行い、強度発現メカニズムを検討した。

3. 室内非水浸 CBR 試験結果

非水浸 CBR コンター作成結果を図-2 に示す。BFNS、砂質ローム共に、適切な含水比と高密度下では高い CBR 値が得られ、飽和度が高くなると CBR 値が減少する傾向は似ているが、同じ密度、含水比で比較すると、BFNS の非水浸 CBR は、粗粒側で粒度良好な砂質ロームと比べ、相当高い値を示した。BFNS の比重は 3.045 と一般の土よりも大きいため、これを同一間隙比と飽和度で比較した結果が図-3 である。同一の間隙比では、BFNS の非水浸 CBR が砂質ロームに比べてより明らかに大きな値を示した。図-4 は飽和度が非水浸 CBR に及ぼす影響を整理した結果である。両材料共に、飽和度が 40%~60% 付近に CBR を最大化する最適領域が存在し、80% を超えると CBR 値が激減する。さらに BFNS は、間隙比が小さく高密度であるほど最適飽和度が増加する傾向がみられた。

4. BFNS の強度発現メカニズムの検討

単粒でシルト質である BFNS の非水浸 CBR が、砂粒径で粒度良好な砂質ロームよりも大きい理由を粒子自体の強度が高いこと以外に幾つかの要因を想定し、追加実験を行った。図-4 に示した最適な飽和度は、CBR 値に及ぼすサクシオンの影響を想起させる。BFNS は非塑性かつ粒径が小さく、接点数が多いため、サクシオンによる内部拘束圧が大きくなり、高い CBR 値を示すと推察した。

4-1. 光学顕微鏡による観察

図-5 に光学顕微鏡で撮影した BFNS 粒子写真を示す（倍率 1000 倍、3D 処理を実施）。粒子表面には無数の凹凸や深い溝

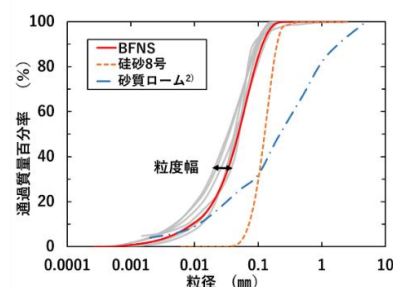


図-1. 試験材料の粒度特性

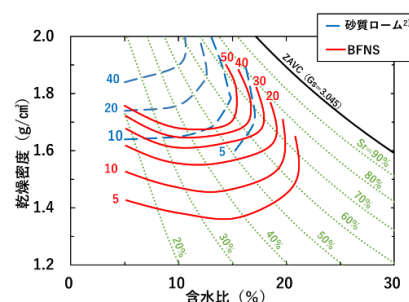


図-2. 非水浸 CBR コンター

キーワード フェロニッケルスラグ, CBR 試験, 飽和度, サクシオン

連絡先 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1 立命館大学びわこ・くさつキャンパス TEL077-561-2617

がみられ、一般的な土とは異なる。BFNS の製造過程では、Ni 鉱石が半溶融状態（約 1200℃）となった後、水冷することでエンスタタイトと呼ばれる端面の発達した柱状の結晶が形成される。メタル分を抽出する際、これをボールミルで粉砕する工程を経るため、結晶粒は機械的に粉砕され、部分的に鋭利な形状を有す粒子となる。BFNS の特異な表面形状は、この製造過程が関与していると思われる。この著しい粒子表面粗度は粒子同士の摩擦抵抗や粒子接点間のサクシオンを発生させ、これらが相乗して高い強度を発現する可能性がある。

4-2. BFNS のサクシオン測定および多孔質性の検討

サクシオン測定結果を図-6 に示す。直径 15 cm、高さ 12.5 cm のモールドに BFNS を詰め、中心にテンシオメータ（埋設深さ 10 cm）を設置して計測した。供試体は、層数を 3 層、1 層当りの突き固め回数を 9 回とし、含水比を 5 点変えて作成した。なお、図中に（その 2）で報告する現場転圧ヤードにおける実測値を併記したが、その値は室内よりもやや高い。図中に同一の密度・含水比で測定した硅砂 8 号（図-1 中に粒度を併記。平均粒径が砂質ロームに近い）の結果を併記した。BFNS のサクシオンは硅砂 8 号に比べて大きな値を示すが、サクシオンが最大となる飽和度は 30% 付近と図-4 と一致せず、今回は硅砂 8 号との定性的な比較のみであるが、今後、密度と含水比を CBR と同様に变えてサクシオンを測定し、図-2 のようなサクシオンのコンターを求めていきたい。

多孔質な土粒子は、煮沸時間によって土粒子密度が変化する³⁾。図-5 に示した粒子表面を有する BFNS では、これがどの程度変化するかを調べた結果が図-7 である。BFNS の土粒子密度は煮沸時間と共に増加するが、図中に併記した一般の土の結果³⁾ と比べ、その変化の度合いは異なり、粒子の多孔質性や粗度が一般の土と異なると思われる。図中に図-6 のサクシオン計測結果を同一経過時間で併記した。図-6 に 24 時間後のサクシオン値を示したが、その値は図-7 のような経時変化を示す。土粒子密度とサクシオンの経時変化の傾向が酷似しており、粒子の微細な凹凸や溝の内部の気泡が徐々に抜ける現象と、この部分にサクシオンが経時的に形成される現象が表裏一体のように感じられる。

5. まとめ

BFNS は、単粒でシルト粒径であるにも関わらず、より粗粒側で粒度良好な土よりも高い非水浸 CBR 値を示した。その強度発現メカニズムは土粒子自体が硬いことに加え、製錬過程で形成された粒子表面の複雑な粗度が高強度の粒子構造を形成することや高いサクシオンを形成する可能性が示唆された。今後、図-2 と同様の座標上でサクシオンのコンターを求めると共に、龍岡²⁾ に倣い、水浸 CBR 特性の把握を試みる所存である。

【参考文献】

- 1) 石黒ら：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，第 73 回学会年次学術講演会，2018
- 2) 龍岡文夫：地盤工学・技術ノート，盛土の締固め 1～20 回，雑誌「基礎工」，2013 年 7 月号～2015 年 2 月号
- 3) 石原聖子ら：土粒子の密度試験における煮沸時間の影響検討，全地連「技術フォーラム 2016」熊本，2016. 9

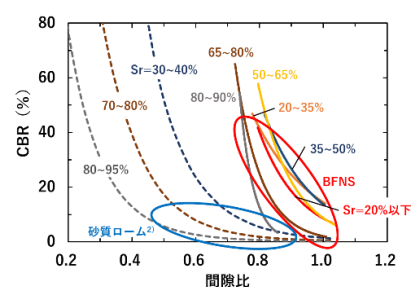


図-3. CBR-間隙比関係

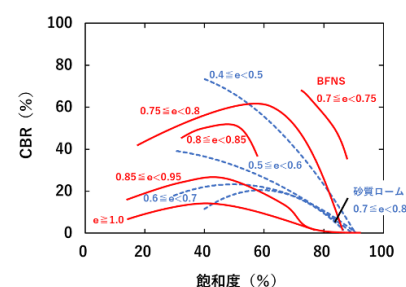


図-4. CBR-飽和度関係



図-5. BFNS の顕微鏡写真

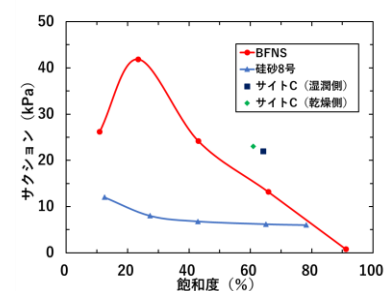


図-6. サクシオン測定結果

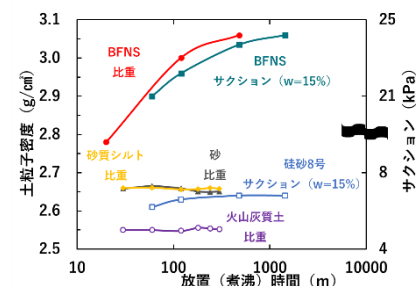


図-7. 土粒子密度とサクシオンの時間変化