

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）
経時的強度発現のメカニズムに関する検討

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

1. はじめに

日本冶金工業（株）大江山製造所では、ステンレス鋼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。これまでに、BFNS が良好な締固め特性や室内非水浸 CBR 特性を示す要因について、複雑な粒子表面構造に起因するサクシオンが影響している可能性について述べた報告¹⁾や、BFNS 造成地盤の経時的な強度増加に関する報告²⁾を行った。これらの報告を受け、本研究では、BFNS の経時的強度発現のメカニズムについて検討した結果を報告する。

2. 検討内容

BFNS の経時的な強度発現機構を解明するために、比表面積の計測や連続加圧式保水性試験、走査型電子顕微鏡（SEM）による粒子表面構造の観察を実施し、複雑な粒子構造とサクシオンの関係について考察した。安田ら³⁾が報告した汎用土工機械による転圧試験ヤードを残置し、現地の継続的なサクシオンの計測や、3.5 か月、8.5 か月経過後の換算 CBR、地盤反力係数の測定を実施し、現場における BFNS の強度増加を確認した。これらの実験結果から、想定される BFNS の強度増加メカニズムについて考察した。

3. BFNS の粒子構造と保水特性に関する考察

3-1. 比表面積の測定による BFNS の粒子表面構造に関する考察

表-1 に BFNS の気体吸着法による比表面積の測定結果を示す。当初、微細な空隙を測定可能な Kr ガスを用いたが、空隙が多すぎて測定が収束せず、より大きな空隙計測用の通常の N₂ ガスに変更した。よって、実際の比表面積はこれよりも大きな値となる可能性がある。表中には、宇野ら⁴⁾がガラスビーズ、豊浦砂、長良川シルトの比表面積を測定した結果を併記した。また、図-1 に試験に使用した材料の粒度分布を示す。図中には後述する畠山ら⁵⁾が連続加圧式保水性試験を行った材料の粒度も併記した。BFNS は、微細な空隙まで測定できていないにもかかわらず、比表面積は 6 万 cm²/g を超えておりガラスビーズや豊浦砂と比較すると相当大きな値を示している。宇野らが特殊な例として取り上げた長良川シルトは比表面積が 7 万 cm²/g を超えるが、粒度分布で比較すると BFNS よりもかなり細粒側にあり、BFNS がこれと同等な比表面積を有している事は注目に値する。

3-2. 連続加圧式保水性試験によるサクシオン測定

図-2 に連続加圧式保水性試験⁵⁾によるサクシオンの測定結果を示す。図中には蜂谷ら¹⁾の室内サクシオン測定結果や後述する BFNS 転圧地盤の現地サクシオン測定データ範囲を併記しており、これらは本室内試験結果と概ね一致する。BFNS のサクシオンは豊浦砂と比較すると 1 桁大きい値を示し、BFNS よりも細粒な DL クレーに近い（DL クレーと異なり、含水比が 30% を越えてもサクシオンが保持されていることにも注目）。前述の比表面積測定（BFNS ≒ 長良川シルト）と本結果（BFNS ≒ DL クレー）より、BFNS はシルト粒径でありながらより細粒な微粒シルトと同等な表面構造とこれに起因するサクシオンを有するようである。畠山ら⁵⁾は図中の広島まさ土のサクシオンが低含水比領域でかなり大きくなる理由として表面構造の複雑性を挙げ、SEM による観察によりこれを裏付けている。そこで BFNS について同様の検討を試みる。

3-3. 光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡による粒子表面の観察

図-3(a)、3(b)に、光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡で撮影した BFNS と珪砂 9 号の粒子表面の写真（図-3(a)：倍率 3000 倍、図-3(b)：5000 倍）を示す。3D 処理した図-3(a)で粒度の近い珪砂 9 号と比較すると両者の違いは明瞭であり、BFNS には粒子表面に多数の複雑な凹凸が観察される。図-3(b)の SEM 写真で比較すると、BFNS の表面にはさらに小さな空隙が認められ、その大きさは

表-1.比表面積の測定結果

試料名称	比表面積 (cm ² /g)
ガラスビーズ	752
豊浦砂	7392
長良川シルト	74101
BFNS	61900

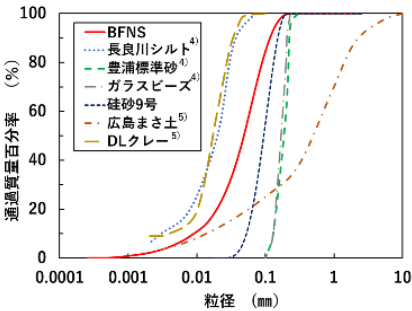


図-1. 試験材料の粒度分布

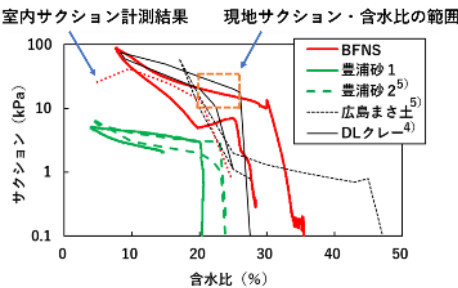


図-2. 連続加圧式保水性試験によるサクシオン測定結果

キーワード フェロニッケルスラグ，比表面積，サクシオン，CBR，地盤反力係数

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

ミクロン単位と極めて小さい。このような微細な空隙に水分が取り込まれることにより、シルト粒径かつ高含水比領域においても、高いサクシオンを發揮したものと推察される。

4. 現地 BFNS 転圧地盤におけるサクシオン計測と強度確認結果

現地 BFNS 転圧地盤³⁾において経時的なサクシオン計測を実施した結果を24 時間降水量と共に図-4 に示す。テンシオメータ（写真）設置後、降雨の発生と停止に伴い何度も増減を繰り返しながらサクシオンが次第に増加する傾向が見て取れる。サクシオンの最大値は 40kPa 近い値を示し、前述の室内試験結果とも矛盾しない。このような降雨の繰返しに伴うサクシオン

（粒子接点での内部拘束力）の増減が粒子間や粒子の微細な空隙内部への水分の移動を徐々に助長させている可能性がある。これは BFNS の高い吸水性や比較的高含水比、高飽和度状態においても高い強度を保持すること

（既報¹⁾²⁾）に対応しているように思われる。また、BFNS が現地で経年的に強度増加を示す²⁾事についても経過年数と共に降雨の繰返し回数が増加し、微細孔への水分の取り込みが次第に助長された結果と解釈する事も可能かもしれない。この BFNS 転圧地盤の経時的な強度変化を調べた結果を表-2 及び図-5 に示す。転圧直後、3.5 か月、8.5 か月経過後に乾燥密度と含水比（RI 法）、CBR（キャスポルによる換算値）、小型 FWD による地盤反力係数 K_{30} を調べた。3.5 か月経過後、降雨浸透による含水比増加と乾燥密度の低下（理由は不明）に伴い、いったん CBR 値が低下したが、8.5 か月経過後には乾燥密度は転圧直後と同程度、含水比は高いにも関わらず、CBR 値が転圧直後よりも増加し、地盤反力係数 K_{30} は約 1.7 倍に増加した。キャスポルにより計測した CBR 値には計測点による違いが明瞭に現れ、図-5 に示すように転圧ヤードの南側から北側に向けて徐々に CBR 値が増加している傾向が観察された。前述の降雨繰返しに伴うサクシオンの増加が降雨浸透の発生仕方に対応して面的に次第に進展していくような現象を想起させるが、そのメカニズムは現時点では不明である。なお、8.5 か月経過後の盛土では BFNS の硬い塊が幾つか観察され、これは 3.5 か月経過後の盛土には見られなかった。このような現象はここまで述べたサクシオンとメニスカスに起因する単なる物理的現象だけでは説明し得ないようにも思われる。例えば界面工学

の分野では、疎水性の粒子表面や細孔中における特異な水分子の存在形態（中嶋⁶⁾）や粒子表面に円錐状の表面突起物が接触している状況での水膜による粒子付着力（井伊谷⁷⁾）の研究等があり、今後、これらの成果の助けも借りながら長期強度増加メカニズムの検討を進める所存である。なお、本サイトは既報²⁾の海岸沈殿池の中に設置されており、降雨以外に沈殿池からの水の侵入を避け得ない。現在（その2）で造成した振動ローラ転圧地盤において同様の計測を実施中であり、今後このサイトでデータを継続取得していく予定である。

【参考文献】

1) 蜂谷興起ら：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検討（その1）室内非水浸 CBR 試験に関する検討，第74回年次学術講演会，2019
2) 石黒健ら：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検討（その3）現地造成地盤の諸物性に関する検討，第74回年次学術講演会，2019
3) 安田智弘ら：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検討（その2）汎用土工機械による現場転圧特性に関する検討，第74回年次学術講演会，2019
4) 宇野尚雄ら：比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察，土木学会論文集，No. 469，Ⅲ-13，pp. 25-34，1993. 6
5) 畠山正則ら：連続加圧方式による保水性試験装置の開発，応用地質技術年報，No34，pp. 23-54，2015
6) 中嶋悟：物質表面の構造化された水の物理化学的性質，表面科学，Vol. 30，No. 3，pp. 140-147，2009
7) 井伊谷鋼一ら：水膜による粒子付着力の近似計算，材料，第16巻，第164号，pp. 352-357，1967

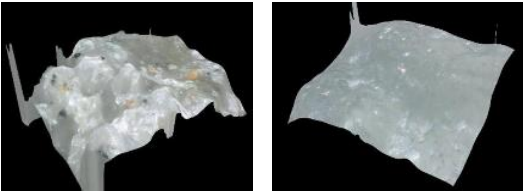


図-3(a). BFNS と珪砂 9 号の光学顕微鏡写真（3000 倍）

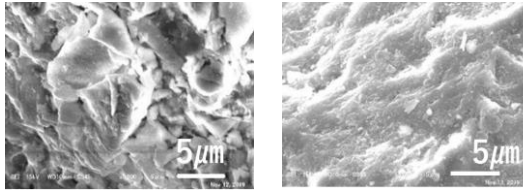


図-3(b). BFNS と珪砂 9 号の電子顕微鏡写真（5000 倍）

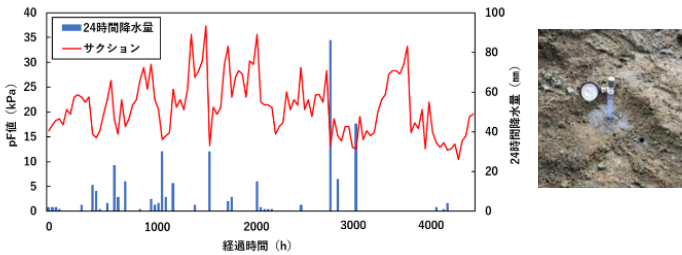


図-4. 汎用土工機械転圧ヤードの経時的なサクシオン変化

表-2. 汎用土工機械転圧ヤードの経時的な諸物性の変化

経過時間（月）	乾燥密度（g/cm ³ ）	含水比（%）	CBR（%）	地盤反力係数 K_{30} （MN/m ² ）
0	1.426	19.6	19.3	81.6
3.5	1.345	25.5	14.1	—
8.5	1.452	23.2	26.8	138.9

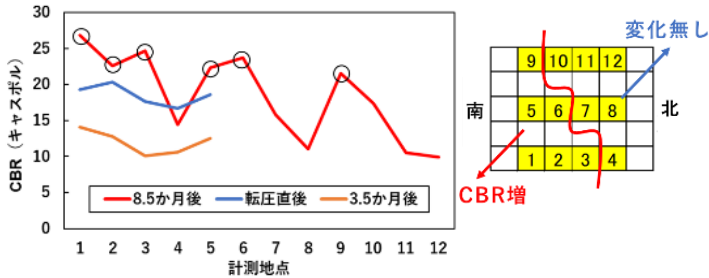


図-5. 汎用土工機械転圧ヤードの経時的な換算 CBR 値の変化