

微粒フェロニッケルスラグの土質改良材としての適用性について

AN APPLICATION OF THE FINE PARTS OF FERRO-NICKEL SLAG TO MATERIAL OF SOIL STABILIZATION

山本 達生*・小口 深志**・高橋 和夫***・松森 豊己****

by Tatsuo YAMAMOTO, Fukashi OGUCHI, Kazuo TAKAHASHI and Toyomi MATSUMORI

1. はじめに

ニッケル鉱石を製錬する過程でフェロニッケルスラグ(以下、FNS と略す)と称されるスラグが副産物として発生する(図-1 参照)。

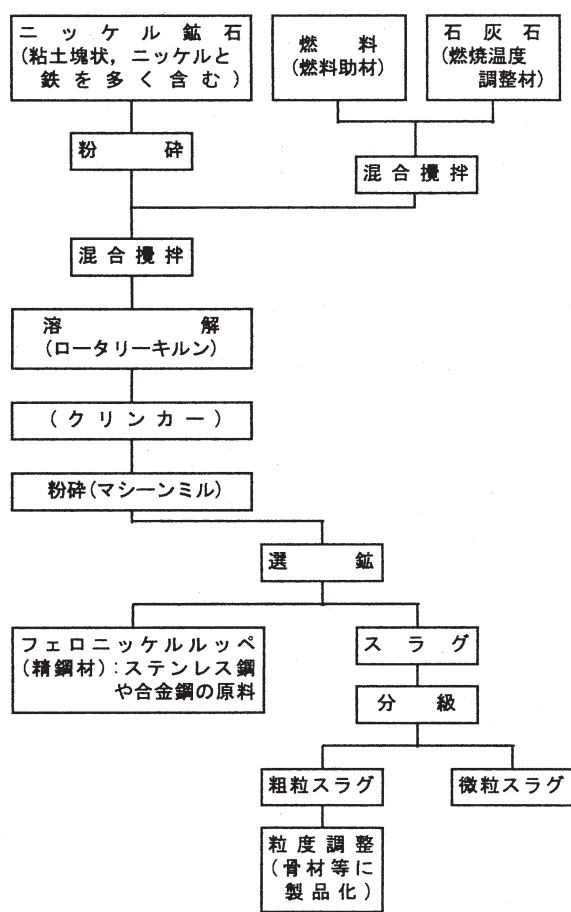


図-1 FNS の生産工程

この FNS を機械的に粉砕して製造される粗粒状のもの(以下、S-FNS と称す)については、コンクリート用骨材として JIS(A 5011)に規定され、有効利用が図られている。しかしながら、S-FNS を製造する過程で副次的に

* 前田建設工業(株) 技術研究所 化学研究室 研究員 (〒179 東京都練馬区旭町 1-39-16)

** 同上 副室長

*** 同上 室長

**** 日本冶金工業(株) 大江山製造所 製造部長 (〒629-22 京都府宮津市宇須津 413)

発生する、粒径が小さく微粒状のもの(以下、B-FNS と称す)については、有効利用の検討を行っている段階である。

一方、建設現場から発生する含水比が高く、粘土分を多く含むためにそのままでは利用できないような土(以下、建設不良土と称する)は、従来より、産業廃棄物として安定型、もしくは管理型の埋立処分場にて処理・処分されてきた¹⁾。しかしながら、近年では、処分場の受け入れ難や、処理費用の高騰等から、建設不良土を土質材料として使用できる土(以下、有用土と称する)に改良し、有効利用しようとする動きがある。さらに、リサイクル法²⁾の施行により、建設現場から発生する廃棄物を、建設副産物の再生資源として有効利用することが義務付けられたことから、建設不良土を有効利用する必要が生じてきた。

今回、B-FNS は、ポゾラン反応性を有していると推測されたため、建設不良土の土質改良材として有効利用できるのではないかと考えた。このため、室内実験により土質改良材としての適用性についての検討を行った。なお、本報告書においては、石灰やセメント等の材料を『固化材』と称し、固化材の使用量低減や、土質改良効果を高めるために固化材に添加する材料を『固化助材』と称することにする。

2. B-FNS の諸特性

今回の実験に使用した FNS は、ニッケル鉱石等の原料を「ロータリーキルン」により半熔融状態で製錬するため、副産物であるスラグの再結晶化が進み、天然の鉱物とほとんど変わらない非常に安定した性状を有するスラグとして産出される³⁾。また、鉱物組成は、Enstatite($MgO \cdot SiO_2$)、Forsterite($2MgO \cdot SiO_2$)および、少量の Quartz(SiO_2)である。アルカリ骨材反応は、骨材中の反応性 Si とセメント中のアルカリとの化学反応である⁴⁾が、S-FNS は、コンクリート用骨材として使用しても、アルカリ骨材反応を呈さないことが確認されている⁵⁾。

ここで、表-1 に B-FNS の基本的な物性値を、表-2 には、化学組成を示す。これより、B-FNS は、以下に示す特徴を有していた。

B-FNS は、コンシステンシー特性が非塑性であるこ

とから、砂質土としての性質を有するという特徴がある。

また、B-FNS の粒径は普通ポルトランドセメントと同程度であり、S-FNS に対して比表面積が非常に大きいことから、表面活性が高い材料であると考えられる。

表-1 B-FNS の基本的な物性

| 土粒子の密度 (g/cm ³) | | 3.10~3.14 |
|-----------------------------|---------------------|-----------|
| 粒 度 特 性 | 礫分 (2000 μm以上) (%) | 0.000 |
| | 砂分 (75~2000 μm) (%) | 1.625 |
| | シルト分 (5~76 μm) (%) | 85.125 |
| | 粘土分 (5 μm以下) (%) | 13.250 |
| コンシ テン シー 特 性 | 液性限界 wL (%) | NP |
| | 塑性限界 wp (%) | NP |
| | 塑性指数 Ip (%) | NP |

表-2 B-FNS の化学組成

| 成分名 | 重量% |
|--------------------------------|------|
| SiO ₂ | 53.4 |
| FeO | 8.1 |
| Al ₂ O ₃ | 2.3 |
| CaO | 5.4 |
| MgO | 28.7 |

3. 試験方法

3.1 試験概要

B-FNS の土質改良材への適用性を検討するために、まず始めに、B-FNS のポズラン反応性の確認実験を行った。ポズラン反応とは、土中のシリカ(SiO₂)、および、アルミナ(Al₂O₃)が石灰等に由来する Ca イオンと反応することにより、珪酸石灰系水和物(CSH 系水和物)等を生成するため、これらが結合材となって強度を与えるようになる反応のことである。この反応は、きわめて長期にわたって進行し、材令につれて生じる強度の増進と十分な耐久性の維持が図られる主要因となっているといわれている⁶⁾。

ここで、セメントが水和反応により固化する場合、材令 28 日以降の固化強度増加は少ないことが知られている。ポズラン反応により固化強度が増加していく場合、セメントが固化する場合とは異なり、材令 28 日以降も固化強度は大きく増加していく傾向がある。つまり、ポズラン反応は、長期にわたり、徐々に固化強度が発現していくような固化反応であるといえる。このため、強度試験は、1,7,28,91 日材令で土質工学会の「土の一軸圧縮試験 JSF T 511-1990」に準拠した方法で行なった。

さらに、供試材料の一軸圧縮強さが増加する主因がポズラン反応であるとするれば、走査型電子顕微鏡(以下、SEM と略す)にて供試材料中に CSH 系化合物の生成が確認される。また、CSH 系化合物は、供試材料中の間隙構造を細分化していくため、供試材料の細孔径分布は材令とともに小さくなる。このため、ポズラン反応性確

認実験のうち、代表的なケースにおいては、一軸圧縮試験後の試料の断面の微細構造を SEM で観察し、さらに、細孔径分布を水銀圧入式のポロシメーターにより測定することとした。

また、市販粘土であるカオリンや、ベントナイトに B-FNS を添加することによる土質改良効果を把握するための実験も合わせて行った。

3.2 配合試験ケース

配合試験は、容量 20ℓ のホバート型ミキサーを用い、土質工学会の「安定処理土の締め固めをしない供試体作製 JSF T 821-1990」に準拠した方法で行った。今回の実験では、B-FNS のポズラン反応性を確認するために、B-FNS-消石灰(LH)-水で構成される材料のうち、B-FNS と LH の配合比を数種類変化させたケース、および、B-FNS を供試土に添加することによる土質改良効果を把握するため、供試材料に添加する B-FNS と固化材の添加率を数種類変化させたケース、合わせて 40 ケースの配合実験を実施した。配合の概要を表-3 に示す。

表-3 試験ケース概要

| 供試材料 | 含水比 [%] | 固化材 | 固化助材 | ケース数 | 備考 |
|--------|---------|------|-------|------|---|
| B-FNS | 25 | LH | - | 4 | |
| カオリン | 30 | LH | B-FNS | 6 | LH : 消石灰 NP : 普通ポルトランドセメント SF20: 高含水土用固化材 |
| カオリン | 50 | NP | B-FNS | 6 | |
| カオリン | 200 | SF20 | B-FNS | 6 | |
| ベントナイト | 300 | LH | B-FNS | 6 | |
| ベントナイト | 500 | NP | B-FNS | 6 | |
| ベントナイト | 1400 | SF20 | B-FNS | 6 | |

3.3 供試土の種類

本実験では、標準的な粘土として、市販のカオリン(KAO)、ベントナイト(BT)を実験にそれぞれ供した。各々の供試土の物性を表-4 に示す。

表-4 供試材料の物性

| 名称 (採取場所) | | カオリン | ベントナイト |
|-----------------------------|---------------------|------|--------|
| 略 称 | | KAO | BT |
| 土粒子の密度 (g/cm ³) | | 2.73 | 2.64 |
| 粒 度 特 性 | 礫分 (2mm以上) (%) | 0 | 0 |
| | 砂分 (75~2000 μm) (%) | 0 | 0 |
| | シルト分 (5~75 μm) (%) | 44 | 59 |
| | 粘土分 (5 μm以下) (%) | 56 | 41 |
| コンシ テン シー 特 性 | 液性限界 Wl (%) | 51 | 370 |
| | 塑性限界 W (%) | 28 | 45 |
| | 塑性指数 I (%) | 23 | 325 |
| 強熱減量 (%) | | 3.7 | 0.06 |

カオリンは、コンシステンシー特性に示されるように比較的塑性指数の低い材料であるため、一般的にポズラン反応性が低いとされている粘土である。このため、

B-FNS を添加したことによる効果が顕著に発現する供試材料であると思われる。一方、ベントナイトは、カオリンとは対象的で、塑性指数が非常に高いために、ポズラン反応性が高いとされる粘土である。

3.4 供試土の含水比調整

土により液性を呈する含水状態が異なる。そこで、市販粘土については、粉体粘土を所定量の水道水で混合攪拌し、液性限界以下、液性限界付近、液性限界以上に含水比を調整して実験に供した。これは、供試材料の含水状態を一般の建設残土に近い残土状(半固体)、そして泥土状(塑性)、泥水状(液体)と区分することを目的としている。カオリン、ベントナイトの含水比と含水状態の関係を表-5に示す。

表-5 供試土の含水比調整区分

| 供試材料 | 含水比 [30%] | 区分 |
|--------|-----------|----------|
| カリン | 30 | 残土状(半固形) |
| カリン | 50 | 泥土状(塑性) |
| カリン | 200 | 泥水状(液体) |
| ベントナイト | 300 | 残土状(半固形) |
| ベントナイト | 500 | 泥土状(塑性) |
| ベントナイト | 1400 | 泥水状(液体) |

3.5 固化材

前掲の表-2 に示すように、B-FNS のカルシウム含有量は 5.4%と少ないために、そのままでは土質改良材として適用できる可能性が小さい。このため、B-FNS を固化助材とし、固化材とともに使用することにより、B-FNS の固化助材への適用性の検討を行うこととした。

固化材には、消石灰(LH)、普通ポルトランドセメント(NP)のほかに複合系固化材である高含水土用固化材(SF20)の 3 種類の実験に供した。供試土の含水状態に応じて、残土状に含水比調整した供試土には LH を、泥土状のものには NP を、さらに、泥水状のものには SF20 を、それぞれ使用することとした。各種材料の化学成分を表-6に示す。

表-6 固化材の化学組成

| 名称(略称) | 消石灰(LH) | 普通ポルトランドセメント(NP) | 高含水土用固化材(SF20) |
|--------------------------------|---------|------------------|----------------|
| 化学組成比 (%) | | | |
| SiO ₂ | } 0.34 | 22.0 | 15.1 |
| FeO | | 2.9 | 2.1 |
| Al ₂ O ₃ | | 5.1 | 7.8 |
| CaO | * 72.98 | 63.7 | 54.4 |
| MgO | 1.87 | 1.5 | 0.9 |
| CO ₂ | 0.84 | | |
| SO ₃ | - | 2.0 | 17.8 |

*:水酸化カルシウムを生石灰換算で表示

4 試験結果

4.1 ポズラン反応性の確認

B-FNS は反応性 Si に起因するポズラン反応性を有していると考えられるため、まず始めに B-FNS-消石灰-水で構成される材料により、ポズラン反応性の確認を行った。

配合を表-7 に示し、供試材料の一軸圧縮強さの経時変化を図-2 に示す。

表-7 配合表

| Case No. | 配合比(w/w%) | | |
|----------|-----------|------|------|
| | FNS | LH | 水 |
| Case-1 | 25.0 | 50.0 | 25.0 |
| Case-2 | 37.5 | 37.5 | 25.0 |
| Case-3 | 50.0 | 25.0 | 25.0 |
| Case-4 | 75.0 | 0.0 | 25.0 |

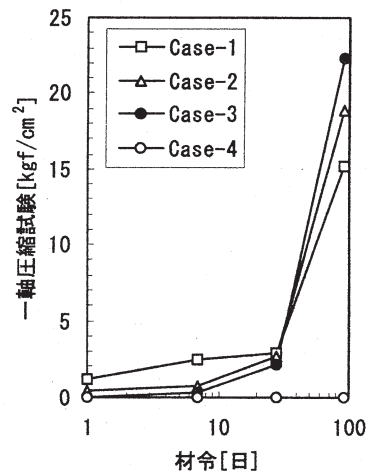


図-2 材令と一軸圧縮強さの関係

これによると、Case-4 においては、供試材料の固化強度の増加は認められなかった。したがって、B-FNS には自硬性はないと判断された。Case-1~3 においては、材令に伴って一軸圧縮強さの増加が認められ、B-FNS が多い配合ほど固化強度が大きくなった。また、供試材料の一軸圧縮強さは、材令が中~長期の間で飛躍的増加した。ポズラン反応は長期に亘り徐々に進行していく反応であり、Case-1~3 において固化強度が発現した主因はポズラン反応によるものと推測された。

代表的なケースとして実施した Case-3 の 91 日材令における SEM 観察写真を図-3 に示す。これによると、消石灰-水、あるいは、B-FNS-水で構成される供試材料では認められなかった CSH 系化合物と思われる針状結晶の生成が確認された。

また、同じく代表的なケースとして実施した Case-3 の細孔径分布測定結果を図-4 に示す。これによると、材令の進行とともに、0.1 μm 付近のピークは大きくなり、1 μm 付近のピークは小さくなる傾向が認められ

た。このことは、SEM 観察写真にて確認された針状結晶が、供試材料中の空隙構造を細分化しているためであると考えられる。なお、消石灰-水、あるいは、B-FNS-水で構成される材料では、供試材料中の空隙構造が細分化していく傾向は認められなかった。

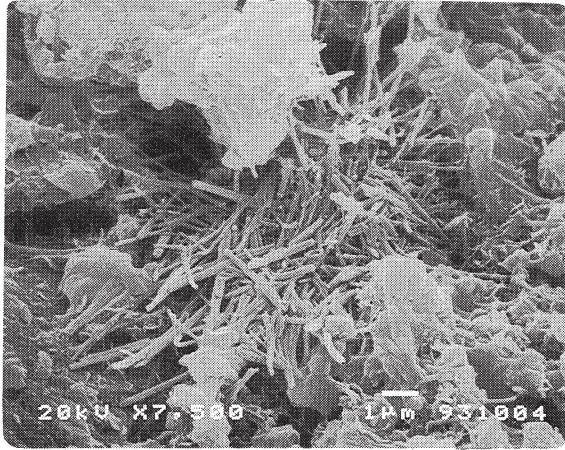


図-3 SEM 観察写真

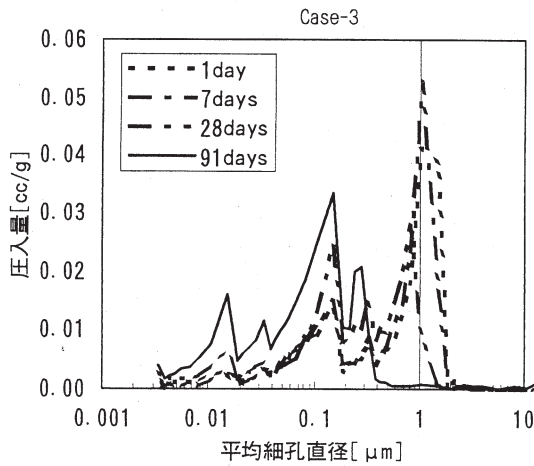


図-4 細孔径分布測定結果

以上の SEM 観察、細孔径分布測定の結果から、B-FNS がポゾラン反応性を有していることが示唆された。

4.2 カオリンに対する固化強度発現特性

代表的なケースとして、カオリンを使用して残土状(半固体)に含水比調整した供試材料に、B-FNS を 0.0w/w%, LH を 3.0w/w%, また、B-FNS を 1.5w/w%, LH を 3.0w/w%, さらに、B-FNS を 3.0w/w%, LH を 3.0w/w% 添加したケースの材令と一軸圧縮強さの関係を図-5 に示す。

これより、材令にともない一軸圧縮強さが増加する傾向が認められ、B-FNS が多い配合ほど長期材令における固化強度は大きくなった。これは、B-FNS-消石灰-水で構成される材料による配合試験と同様の傾向を示す結果となった。

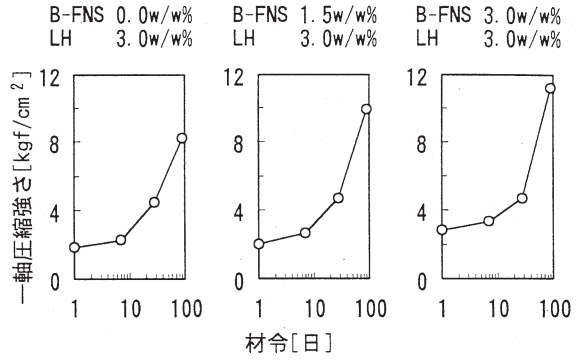


図-5 材令と一軸圧縮強さの関係

材令 91 日における一軸圧縮強さと固化材、および、固化助材の添加量との関係を図-6 に示す。

これによれば、LH 等の固化材の添加量が多いほど、土の改良強度は大きくなり、B-FNS の添加率が大きくなるほど固化強度の増大に寄与することがわかる。

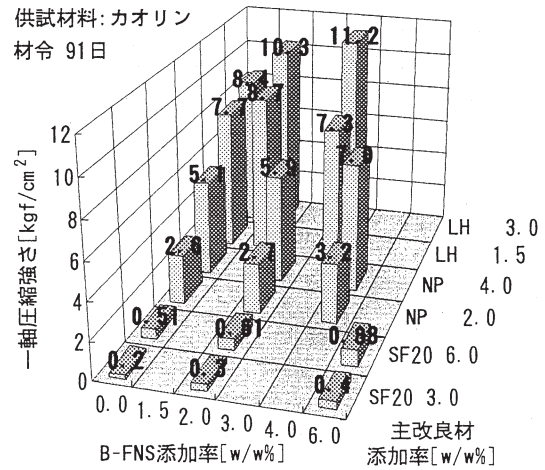


図-6 配合と一軸圧縮強さの関係

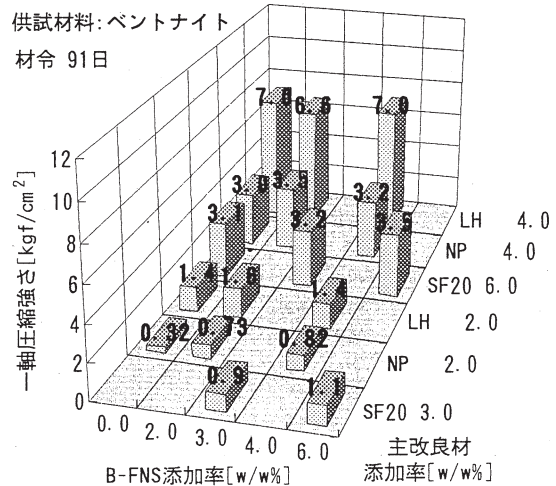


図-7 配合と一軸圧縮強さの関係

4.3 ベントナイトに対する固化強度発現特性

ベントナイトを供試材料として行った配合試験の、91日材令における一軸圧縮強さと、固化材および固化助材の添加量の関係を図-7に示す。

これによると、ベントナイトの供試材料に、B-FNSを添加する効果はほとんど認められなかった。これは、B-FNSに比べてベントナイトの方がポゾラン反応に対する寄与の程度が格段に大きいいため、B-FNSを供試材料に添加することによる効果が明確に発現しなかったことによるものであると考えられる。

5. 結論

今回実施した土質改良材としての実験的な検討により以下に示すことが明らかとなった。

- ① B-FNSはポゾラン反応性を有していることが判明した。
- ② カオリンのようにポゾラン反応性が小さとされている粘土に対しては、B-FNSを数%添加することにより土質改良効果が向上した。
- ③ ベントナイトのようにポゾラン反応性が大きいとされている粘土に対しては、B-FNSを数%添加しても土質改良効果の向上は認められなかった。

6. おわりに

本報告は、フェロニッケルスラグの微粒分(B-FNS)を土質改良材として利用する目的のもとに行った基礎実験をとりまとめたものであり、ポゾラン反応性とカオリンの土質改良に際しての固化助材としての効果が認められた。ただし、今回は、実際の建設不良土に対するB-FNSの固化助材としての検討は行わなかった。B-FNSを固化助材として使用した場合、ベントナイトのように活性の大きな土には顕著な効果は認められなかったが、建設不良土はベントナイトに比べ、それほど活性が大きいわけではない。今後は、実際の建設現場から発生する不良土を用いて、B-FNSを固化助材として使用した場合の効果を確認する必要がある、本報告がその基礎資料として利用できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 菅原 正考,堀内 俊治,北村 明洋,青木 芳春,原田 宏康:建設残土・汚泥の脱水処理について(その2),土木学会第48回年次学術講演会,PP654~655,平成5年
- 2) 建設省建設経済局建設業課・事業調整官室:建設副産物適正処理推進要綱の解説,PP94~96,平成5年2月
- 3) コンクリート用フェロニッケルスラグ細骨材研究委員会,日本鉱業協会:コンクリート用フェロニッケルスラグ細骨材の研究,P26,平成3年10月
- 4) 中部セメントコンクリート研究会:コンクリート構造

物のアルカリ骨材反応,P5,平成2年11月

- 5) 日本鉱業協会ニッケル委員会:フェロニッケルスラグ利用研究委員会報告書,PP66~72,平成5年2月
- 6) 日本石灰協会土質安定処理工法委員会:石灰による土質安定処理工法,P7,昭和45年6月

(1995年9月5日受付)