

土質安定処理材としてのフェロニッケルスラグ微粉末の
適用に関する研究

庄 嶋 芳 卓

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	5
1.3 論文および研究の構成	8
第 1 章の参考文献	12
第 2 章 既往の技術・研究	16
2.1 概説	16
2.2 産業副産物による地盤材料・舗装材料へのリサイクル技術の現状	18
2.2.1 産業副産物の定義	18
2.2.2 非鉄金属スラグのリサイクル技術	18
2.2.3 石炭灰のリサイクル技術	20
2.2.4 鉄鋼スラグのリサイクル技術	22
2.2.5 酸化鉄のリサイクル技術	22
2.2.6 一般廃棄物溶融固化物のリサイクル技術	23
2.2.7 下水汚泥溶融固化物のリサイクル技術	24
2.3 産業副産物の再利用に関する課題	26
2.3.1 産業副産物の環境安全性	26
2.3.2 再利用時の品質	32
2.3.3 経済性の比較	35
2.4 Fe石灰に関する既往の研究および課題	36
2.4.1 力学特性	36

2.4.2	Fe石灰処理土の反応性	36
2.5	特殊土（まさ土および黒ぼく）の特性および課題	39
2.5.1	まさ土の特性および課題	39
2.5.2	黒ぼくの特性および課題	40
2.6	まとめ	43
	第2章の参考文献	45
第3章	改良材の検討	50
3.1	概説	51
3.2	締固めによる改良材の工学的性質の評価	52
3.2.1	FNS石灰の締固め特性	52
3.2.2	Fe石灰の締固め特性	55
3.3	改良材の一軸圧縮試験による強度分析	56
3.3.1	試験概要	56
3.3.2	最適含水比時の改良材の強度発現効果の比較	56
3.3.3	水分量の影響による改良材の強度発現効果の比較	58
3.4	走査電子顕微鏡（SEM）による微視的構造の観察	60
3.5	まとめ	89
	第3章の参考文献	90
第4章	地盤改良材の特殊土への適用	91
4.1	概説	91
4.2	地盤改良土の一軸圧縮強度特性	93
4.2.1	試験概要	93
4.2.2	FNS石灰の添加による改良材の強度発現効果の比較	93
4.2.3	Fe石灰の添加による改良材の強度発現効果の比較	99

4.3	一軸圧縮試験における応力-ひずみ挙動	102
4.3.1	試験概要	102
4.3.2	FNS 石灰の添加による改良土の応力-ひずみ挙動	102
4.3.3	Fe石灰の添加による改良土の応力-ひずみ挙動	105
4.3.4	改良土の変形係数	107
4.3.5	改良土の乾燥密度	109
4.4	走査電子顕微鏡 (SEM) による微視的構造の観察	111
4.5	六価クロム溶出に関する環境安全性評価	128
4.6	まとめ	130
	第4章の参考文献	132
第5章	路床土の安定処理材としての適用	133
5.1	概説	133
5.2	CBR 試験による路床土の安定処理材としての材料評価	134
5.2.1	試験試料	134
5.2.2	試験概要	134
5.2.3	CBR による路床土としての支持力評価	135
5.2.3	吸水膨張試験による処理土の膨張比	141
5.3	コーン指数試験による改良土のトラフィカビリティの評価	146
5.3.1	土質区分による有効利用の判断	147
5.3.2	試験概要	147
5.3.2	安定処理材添加によるトラフィカビリティの改善	150
5.4	環境安全性に関する評価	153
5.5	経済性評価	156
5.5.1	普通道路における経済性の評価	156

5.5.2 農道における経済性の評価	161
5.6 まとめ	164
第5章の参考文献	166
第6章 総括	167
6.1 結論	167
6.2 今後の課題と展望	171
謝辞	172

Application of Fine Powder Ferrous Nickel Slag as Materials of Soil Stabilization

Yoshitaka SHOJIMA

In recent years, the civil engineering field has been required to curb consumption and minimize waste of resources, while making positive use of construction and other industrial by-products, with the aim of establishing a recycling-based society and reducing costs. Manuals have already been made for the recycling of construction by-products and these have facilitated high recycling rates. In contrast, manuals fail to exist for the recycling of many other industrial by-products. For example, new applications of nonferrous metal slag lag far behind those of steel slag. In the nonferrous metal slag category, ferronickel slag aggregate (FNS) is a by-product of the smelting of ferronickel, and it already conforms to Japanese Industrial Standards (JIS) for use as a concrete aggregate. However, the majority of non-standardized fine powder (FNS fine powder) has no practical use and is simply stockpiled.

The aim of this research was to promote the practical use of FNS fine powder and evaluate the suitability of FNS fine powder as a soil stabilizer. Firstly, a soil stabilizing agent (FNS lime) was created by mixing in hydrated lime. FNS lime was then mixed with soil unique to the Kyushu region, and evaluated for its effectiveness as a stabilizer and also for its economic efficiency.

Moreover, in tandem with the above evaluations, this research also focused on iron oxide fine powder (Fe fine powder), which is a by-product of dust collected from steelworks, and similar evaluations were made. In addition, Fe fine powder has traditionally been used mainly in the Kyushu region as a stabilizer mixed with hydrated lime (Fe lime). However, its stabilization effects are yet to be determined.

The above research results confirm the suitability of FNS lime and Fe lime as stabilizing agents, and have revealed the optimum combinations for strength enhancement. Furthermore, it was also possible to confirm that use of these materials in the preparation of subgrade reduced costs and improved environmental safety.

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

世界的に循環資源の価値が高まる近年においては、資源の新たな採取や環境への負荷を可能な限り少なくした循環型社会の形成がますます必要となってきている。我が国でも、循環型社会を構築するために資源採取、生産、流通、消費、廃棄などの社会経済活動を通じ、廃棄物などの発生抑制や循環資源の利用などの取り組みが行われている。特に、第 2 次循環型社会形成推進基本法（平成 20 年 3 月閣議決定）では、発生抑制、再利用、再生利用、処分などの各対策がバランス良く進展した循環型社会の形成を図るために、「入口」、「循環」、「出口」に関する指標の目標を次のように設定¹⁾している。まず、入口である資源生産性（＝天然資源等投入量）の平成 27 年度の目標は約 42 万円/トンであり、平成 12 年度（＝24.8 万円/トン）から概ね 60%の向上となる。つぎに、循環利用率の平成 27 年度の目標は約 14～15%であり、これは平成 12 年度（＝約 10%）から概ね 40～50%の向上となる。また、出口である最終処分量（＝廃棄物の埋立量）の平成 27 年度の目標は約 2,300 万トンであり、これは平成 12 年度（＝約 5,600 万トン）から概ね 60%減となる。これらの目標値を達成するために、我が国では、循環型社会に向けた最終処分量の減少とともに、より効率的な資源利用を行う必要性が一層求められている。

循環型社会の形成を推進する上で、リサイクル材料の利用に関する主な法令として次のようなものが定められている。

1. 廃棄物をどのように処分するのかという観点で捉えている「廃棄物の処理及び清

掃に関する法律（廃棄物処理法，1970年12月）」および「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律（海防法，1970年12月）」

2. 廃棄物を再生資源として積極的に利用して廃棄物の発生をいかに抑制するのかという観点で捉えている「資源の有効な利用の促進に関する法律（リサイクル法，1991年4月）」

3. 建設廃棄物の発生抑制，分別解体及び再資源化等の促進を規定する個別規定法である「建設工事に係る資源の再資源化等に関する法律（建設リサイクル法，2000年5月）」

4. 国や公共団体等にリサイクル製品等の調達を推進させるものであり，公共工事における材料等の調達についても対象となっている「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律（グリーン購入法，2000年5月）」

グリーン購入法の公共工事の特定調達品目（分野）²⁾には，建設工事に伴い副次的に得られる物品で再生資源および廃棄物の一部を含む建設副産物（再生加熱アスファルト混合物や再生骨材など）や産業活動に伴って発生し廃物として取り扱わない産業副産物（高炉スラグ骨材やフェロニッケルスラグ骨材など）が数多く含まれている。したがって，これらの建設副産物や産業副産物を積極的に活用することにより，天然資源の消費抑制や建設コストの低減を図ることが望まれている^{3) ~15)}。

建設副産物を活用する技術開発については，「総合技術開発プロジェクト」（国土交通省）において様々な取り組みがなされ，技術マニュアル¹⁶⁾や品質基準等が示されるとともに，技術開発が進められている。一方，産業副産物についても道路やコンクリート用材として，JIS化^{17) ~22)}が図られているものも多く，各地方整備局や国土技術政策総合研究所，各地方自治体等²³⁾の取り組みにおいて，いくつかの用途で現地実証実験等を経て利用マニュアル等²⁴⁾が示されている。

建設副産物のリサイクル率については、コンクリート塊及びアスファルト・コンクリート塊が平成 20 年度の実績²⁵⁾で 95%、建設発生木材は 90%など高水準な材料が多い。しかしながら、産業副産物のリサイクル率については、石炭灰が 98%²⁶⁾（平成 16 年および平成 19 年に省令が改正され電気事業から発生する石炭灰を海等の公用に供する水面へ埋め立てる場合、リサイクルとして認められリサイクル率が上昇）、鉄鋼スラグが 98%¹⁶⁾など高水準な材料がある一方、非鉄金属スラグ（銅スラグ・フェロアロイスラグなど）が 87%²⁷⁾、下水汚泥融解固化物が 78%²⁸⁾と向上の余地が残されているものもある。

非鉄金属スラグのうち、代表的な非鉄金属スラグには、ステンレス鋼の製造に用いられるフェロニッケルの製錬で生成するフェロニッケルスラグ（以下、FNSと称す）、銅の製錬で生成する銅スラグ（以下、CuSと称す）、亜鉛の製錬で生成する亜鉛スラグがある。なお、フェロニッケル・銅・亜鉛それぞれ 1tを製錬する際に生成するスラグは 8.5t、2.0t、0.3tである²⁹⁾。現在、我が国における非鉄金属スラグの生産量は、FNS が 255 万トン/年、CuSが 270 万トン/年、亜鉛スラグが 20 万トン/年であり、その大半を近畿以西が占めている（表-1.1.1³⁰⁾）。

表-1.1.1 非鉄金属スラグの生産量

地域別生産量(千トン/年)

地 域	フェロニッケルスラグ	銅スラグ	亜鉛スラグ
北海道	0	0	0
東北	1350	450	80
関東	0	0	0
北陸	0	0	0
中部	0	0	0
近畿	450	0	55
中国	0	400	0
四国	0	1150	0
九州	750	700	65
計	2550	2700	200

非鉄金属スラグは、表-1.1.2³¹⁾ に示すようにコンクリート用骨材、道路用材料や土木用材料以外にも、ブラスト材（研磨材）やセメント原料に再生利用されている。また、最近では東北の震災復興に必要な骨材の代替品³²⁾ や堤防の液状化対策における地盤改良材としてCuSで年間約 38,000t、FNSで年間約 20,000tの再生利用が実施されており、災害関連の工事案件増加に伴い更にCuSやFNSの再生利用量の増加が見込まれている。しかしながら、このような再生利用において、例えばFNSは土木用材料等に再生利用されているが、それらはJIS A 5011-2 の粒度範囲のものに限られており、JIS規格の最小区分である 5-0.3mmの粒度範囲より微粉末のFNSは、一部でブラスト材として再生利用されるものの、多くの場合、使い道がなくストックされているのが現状である。またFNSは、非鉄金属スラグの中でも天然砂（一般に、 Al_2O_3 や SiO_2 を含有する）と同様に、主成分として MgO 、 SiO_2 、 FeO などの軽金属を多く含有していることから、建設分野を主体に骨材やより付加価値の高い利活用について積極的な取り組みが望まれている。

表-1.1.2 非鉄金属スラグの用途

非鉄スラグの用途(千トン/年)

用途	フェロニッケルスラグ	銅スラグ	亜鉛スラグ
コンクリート用骨材	200	200	0
道路用材料	800	0	0
土工用材料	950	350	55
ブラスト材	50	650	0
セメント原料	0	1500	100
造滓材	400	0	0
その他	150	0	0
最終処分	0	0	45
計	2550	2700	200

1.2 研究の目的

本研究では、リサイクル率が低い材料の1つである非鉄金属スラグに着目し、これらの材料のリサイクル率を高めることで、経済産業省の定める3R (Reduce・Reuse・Recycle) 対策を更に推進していくことを目指す。非鉄金属スラグに着目したのは、資源の再生利用だけでなく、非鉄金属の安定供給のためにも重要な課題であると考えた結果である。

非鉄金属スラグの再生利用方法としては特殊土に対する土質改良材としての適用について取り上げ、対象とする非鉄金属スラグはFNS微粉末とした。FNS微粉末を研究対象とした理由は、第1に、FNS微粉末が土粒子の間隙に充填することにより図-1.2.1に示す粒度調整効果（粒度改善効果）が高まり、軟弱な土質に対する改良効果（強度増進効果）が望めると考えられたからである。次に、FNSは水硬性などの特徴はないが、第2章で述べるとおりシリカ（ SiO_2 ）を主成分とする非鉄金属であるため、消石灰（ Ca(OH)_2 ）を混合することで、図-1.2.2に示すような SiO_2 と Ca(OH)_2 によるポズラン反応による改良効果の相乗作用が期待できると考えたからである。また、第2章で述べるとおり、FNSは有害な化学物質の外部への溶出が環境安全品質基準値以下で、環境への悪影響がないこともFNS微粉末を土質改良材として研究対象とした理由である。

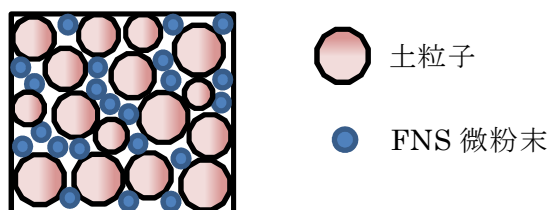


図-1.2.1 粒度調整効果量（粒度改善効果）

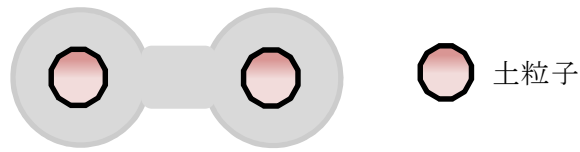


図-1.2.2 ポゾラン反応（カルシウム化合物の生成）

ここで、特殊土について、地盤工学では従来より、高有機質土、関東ローム、まさ土およびしらすの4種類を特殊土として取り扱っている³³⁾。高有機質土とは植物性有機物を主体とした泥炭と黒泥、関東ロームとは火山灰性噴出物から成る火山灰質粘性土、まさ土とは花崗岩質岩石が風化した残積土や崩積土、しらすとは火砕流堆積物の非溶結部分から成る白砂である。これらの特殊土のうち、高有機質土は植物性有機物を主体とする土のため、JISやJGS（地盤工学会基準）による物理試験方法の中で適用できないか適用しても工学的に無意味な試験方法も多い。また、しらすは主に九州南部地域の始良カルデラを噴出源としているため分布地域が限定的である。本研究では、FNS微粉末の安定処理材としての有効性を確認するため、その対象土としてまさ土および関東ロームと同じ火山灰質粘性土で、関東ロームほど地域性もなく日本の国土の地表面積の約16%³⁴⁾を占める黒ぼくに注目した。

以上より、FNS微粉末の再生利用量を高めるため、これまでほとんど再利用されてこなかったFNS微粉末を、過去の研究^{35,36)}や実績とは違う安定処理材として利活用させることを目的とし、特殊土に対する改良効果を判断するために、以下の目標を設定し研究した。

1. FNS微粉末単体だけでは不足するセメンテーションを補うため、FNS微粉末の主成分がシリカ（ SiO_2 ）であることを考えると、 Ca(OH)_2 との反応（ポゾラン反応）による改良効果（強度増進効果）が期待できることから消石灰を混合した改良材（以下、FNS石灰と称す）の力学および工学特性を把握する。

2. FNS石灰を特殊土（まさ土，黒ぼく）に混合することで，地盤改良材としての有効性や安全性を判断する．

3. FNS石灰を路床に存在する黒ぼくに混合することを想定した場合，路床安定処理材としての有効性，環境安全性や経済性を評価する．

なお，本研究ではFNSの有用性を評価する上での比較対象として，微粉酸化鉄を適用することにした．微粉酸化鉄は，製鉄所の溶鉱炉や転炉部の集塵ダストとして発生する産業副産物で従来から消石灰と混合した土質安定処理材（以下，Fe石灰と称す）として，九州地方を中心に利活用されている³⁷⁾．Fe石灰による安定処理は，酸性土壌に鉄分を添加することで，土壌から流亡しがちな交換性塩基を補足し，石灰の反応性を高めると考えられ，実績を重ねることで強度発現性が立証された技術である．そこで，本研究の主目的であるFNS石灰の地盤改良材や路床安定処理材としての改良効果や環境安全性，経済性の評価とともに，Fe石灰の改良効果についても併せて評価し，比較検討を実施する．

1.3 論文および研究の構成

本論文は、図-1.3.1 に示すとおり全 6 章から構成されている。まず、「産業副産物による地盤材料・舗装材料へのリサイクル技術の現状、および産業副産物の再利用に関する課題（第 1 章～第 2 章）」を明らかにした上で、それらの問題解決の 1 案として「産業副産物の 1 つであるフェロニッケルスラグの微粉末と消石灰の混合物（FNS 石灰）の改良材としての評価および対象用土に対する強度発現性および環境安全性、経済性について Fe 石灰との比較検証（第 3 章～第 5 章）」を行っている。さらに、これらの成果を総括した上で、「フェロニッケルスラグの微粉末の地盤改良材への適用とその展望」を述べている。以下に各章ごとの要旨を述べる。

第 1 章 序論

世界的に循環資源の価値が高まる近年においては、資源の新たな採取や環境への負荷を可能な限り少なくした循環型社会の形成がますます必要となってきている。非鉄金属スラグは産業副産物の 1 つであり、非鉄金属スラグのリサイクルは、再生利用のみならず、非鉄金属の安定供給のためにも大いに望まれている。

本章では、産業副産物の再生利用に関する現況、非鉄金属スラグ、特に FNS 微粉末（以下、FNS 粉）の我が国の特殊土に対する地盤改良材として、再生利用の必要性を述べるとともに「研究の背景と目的」および「論文の構成」について概説した。

第 2 章 既往の技術・研究

建設副産物および産業副産物等のリサイクル材料は、これまでに建設資材として技術開発が進められている。それらの活用実績などを基にした開発用途は、コンクリート用骨材、舗装材料や中詰材など多岐にわたっている。

本章では、まず、産業副産物による地盤材料・舗装材料へのリサイクル技術を中心

とした再生利用の現状と既往の研究を整理し、今後の産業副産物の再生利用に関する課題を示した。次に、地盤改良材として用いられているFe石灰についての既往の研究について整理し、Fe石灰の改良過程のメカニズムを解明するための課題についても整理した。

また、特殊土である「まさ土」および「黒ぼく」の特性や課題、石灰（消石灰）などの安定処理材（固化材）との反応性についても整理した。

第3章 改良材の検討

一般に、土質改良材は、道路の盛土・路床・路盤、鉄道の盛土路盤、空港の路床改良、港湾の地盤改良、建物の基礎工事、河川の改修、住宅造成など広い分野で用いられ、改良目的も多岐にわたっている。改良材の選択には、改良材の対象となる土質、改良目的、施工方法だけでなく、強度発現性、六価クロム溶出抑制などの環境面、経済性についても考慮すべきである。

本章では、FNSの微粉末単体だけでは不足するセメンテーション効果を補うため、まず、六価クロム溶出試験の対象外である消石灰（以下、石灰）をFNS粉に混合した材料が改良材としての有効性を発揮できるか否かについて、締固めおよび強度特性の視点から検討した。その結果、土に混合した場合に強度発現効果を期待できるFNS粉と石灰との配合割合を明らかにした。また、FNS石灰の微視的構造について、SEM（走査電子顕微鏡）を用いた観察を実施し、FNS微粉末と石灰との結合性についても検討した。さらに、微粉酸化鉄（以下、Fe粉）についても同様の検討や観察を行い、これまで経験や実績によってのみ裏付けされていたFe石灰について、その改良過程のメカニズムを明らかにした。

第4章 地盤改良材の特殊土への適用

本章では、第3章で明らかとなった強度発現効果が期待できる配合割合を有する

FNS石灰あるいはFe石灰を用い、「まさ土」および「黒ぼく」に添加した場合の改良効果を確認するため一軸圧縮試験を実施した。その結果、FNS石灰とFe石灰の特殊土に対する地盤改良材としての有効性を確認し、適用効果が最も発揮される添加割合などについても明らかにした。また、六価クロム溶出に関する環境安全性評価を実施し、FNS石灰やFe石灰を添加した改良土は土壤環境基準に適合していることを確認した。

第5章 路床土の安定処理材としての適用

道路路床の工事では、現地材料の有効利用を図るために化学的安定処理（セメント安定処理や石灰安定処理）が利用されている。従来は、良質土で置き換えられ、捨て土として処理されていた軟弱な路床土が、固化材による改良の普及によって、置換工法に比べて捨て土が大幅に抑制されるようになり、舗装厚の低減も図られている。

本章では、化学的安定処理では効果があまり期待できない軟弱な路床土（設計CBR<3）の例として黒ぼくを取り上げ、FNS石灰およびFe石灰を添加することにより、これらが路床改良材としての改良効果を発揮することを明らかにした。さらに、これらの路床改良材による構築路床を設けた舗装構成案による経済性比較や環境安全性についても評価し、FNS石灰は、経済性環境安全性の面から良好な改良材であることを明確にした。

第6章 総括

本章では、各章から得られた結果を概括したうえで、フェロニッケルスラグの微粉末の地盤改良材への適用とその展望と課題について言及した。

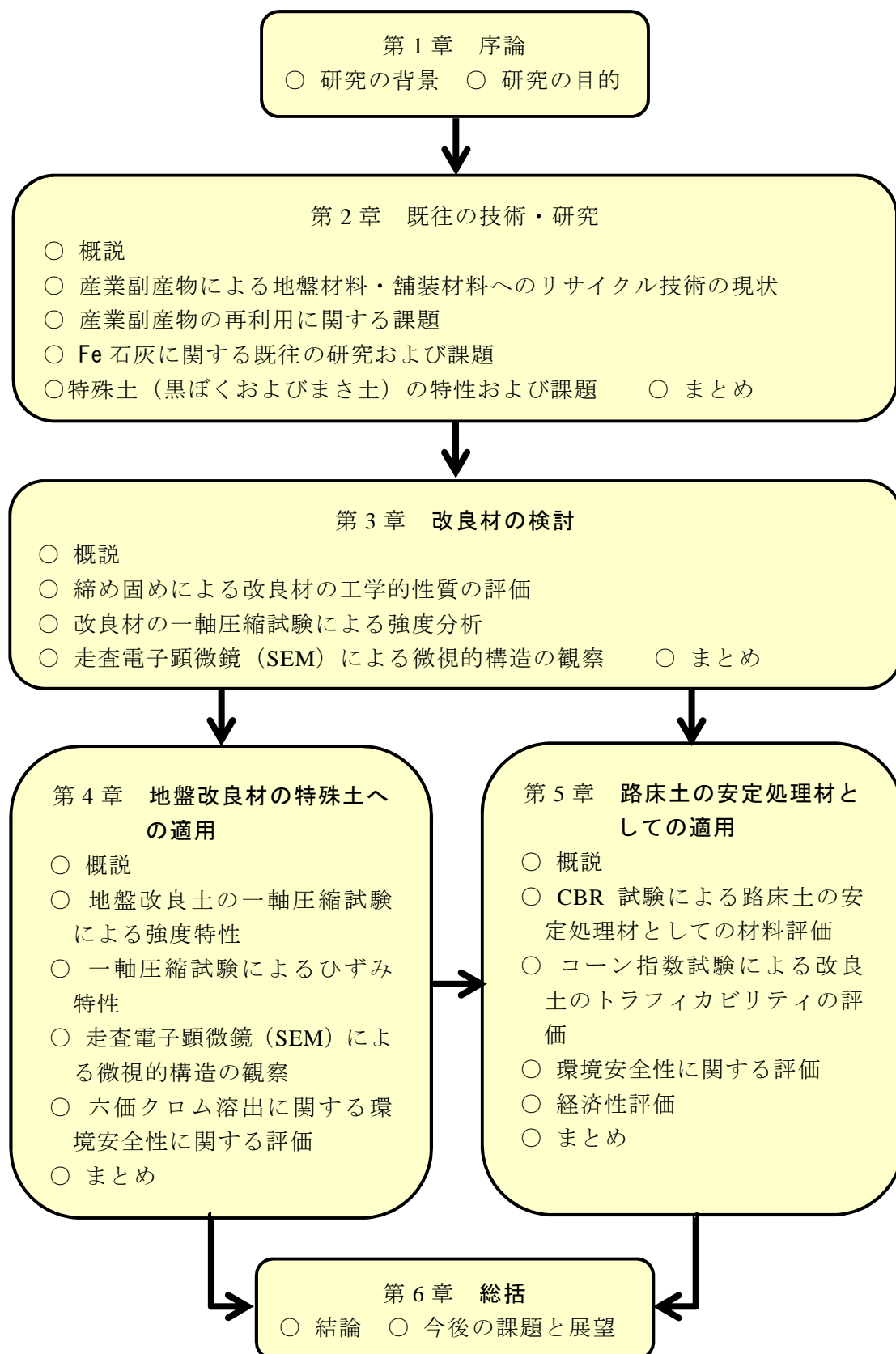


図-1.3.1 本研究および論文の構成図

第1章の参考文献

- 1) 環境省：環境白書 循環型社会白書／生物多様性白書（平成25年度版）：p173：
2013.6.28
- 2) （公財）日本環境協会：GREEN STATION,
http://www.greenstation.net/green_tekigo.html
- 3) 須永誠：建設産業副産物の地盤工学的有効利用 1.講座を始めるにあたって，土と基礎，Vol.53，No.4，pp.45-46，
- 4) 伊藤正秀：建設産業副産物の地盤工学的有効利用 2.道路での利用，土と基礎，Vol.53，No.4，pp.47-50，2005.4
- 5) 村田修，関根悦夫：建設産業副産物の地盤工学的有効利用 3.鉄道での利用，土と基礎，Vol.53，No.4，pp.51-54，2005.4
- 6) 菊池喜昭：建設産業副産物の地盤工学的有効利用 4.港湾・空港での利用，土と基礎，Vol.53，No.5，pp.45-48，2005.5
- 7) 宮田清綱：建設産業副産物の地盤工学的有効利用 5.自治体港での利用，土と基礎，Vol.53，No.5，pp.49-52，2005.5
- 8) 小橋秀俊，大下武志，菊池喜昭，森啓年：建設産業副産物の地盤工学的有効利用 6.発生土（建設発生土，建設汚泥），土と基礎，Vol.53，No.6，pp.59-66，2005.6
- 9) 関根悦夫，池田利明：建設産業副産物の地盤工学的有効利用 7.コンクリート塊，土と基礎，Vol.53，No.7，pp.45-50，2005.7
- 10) 脇坂安彦、明嵐政司、西崎 到、新田弘之、富山禎仁、岡本誠一郎：他産業リサイクル材料の利用技術に関する研究，研究成果・技術情報，12. 循環型社会形成のためのリサイクル建設技術の開発，（独）土木研究所，2008

- 11) 西崎到、新田弘之：溶融スラグ等の舗装への適用性評価に関する研究（１），研究成果・技術情報，12. 循環型社会形成のためのリサイクル建設技術の開発，(独) 土木研究所，2008
- 12) 久保和幸，佐々木巖：溶融スラグ等の舗装への適用性評価に関する研究（２），研究成果・技術情報，12. 循環型社会形成のためのリサイクル建設技術の開発，(独) 土木研究所，2008
- 13) 須永誠：産業副産物のリサイクルの現状と課題，地質と調査，土木春秋社，通算 135 号，pp.1-2，2013.3
- 14) 菊池喜昭：建設・産業副産物の地盤材料へのリサイクル技術の現状，地質と調査，土木春秋社，通算 135 号，pp.3-6，2013.3
- 15) 木幡行宏：地盤材料としての石炭灰有効利用の現状と課題，地質と調査，土木春秋社，通算 135 号，pp.11-14，2013.3
- 16) 港湾・空港等リサイクル推進協議会，国土交通省：港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針，2004.3（2012.3 改訂）
- 17) 日本工業標準調査会：コンクリート用スラグ骨材-第 1 部（高炉スラグ骨材），JIS A 5011-1，2013
- 18) 日本工業標準調査会：コンクリート用スラグ骨材-第 2 部（フェロニッケルスラグ骨材），JIS A 5011-2，2003
- 19) 日本工業標準調査会：コンクリート用スラグ骨材-第 3 部（銅スラグ骨材），JIS A 5011-3，2003
- 20) 日本工業標準調査会：道路用鉄鋼スラグ，JIS A 5015，2013
- 21) 日本工業標準調査会：一般廃棄物，下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材，JIS A 5031，2010

- 22) 日本工業標準調査会：一般廃棄物，下水汚泥又はそれらの焼却灰を熔融固化した道路用熔融スラグ，JIS A 5032，2010
- 23) 鳥取県県土整備部ホームページ：フェロニッケルスラグ活用促進事業，
http://db.pref.tottori.jp/yosan/22Yosan_Koukai.nsf
- 24) (財)沿岸技術研究センター：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），2012.3
- 25) 国土交通省ホームページ：平成 20 年建設副産物実態調査について
http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo20_hh_000012.html
- 26) 國友宏俊：我が国の石炭灰リサイクルの現状と今後の方向＝2009 年石炭灰有効利用シンポジウム＝，資源エネルギー庁，2009.12
- 27) (株)三菱総合研究所：産業分類別の副産物（産業廃棄物・有価発生物）の発生状況等に関する調査（平成 23 年度実績）報告書，p.21，2013.3
- 28) (一社)産業環境管理協会：リサイクルデータブック 2013，p.19，2013.4
- 29) 大太平洋金属株式会社ホームページ：2009 年 3 月期 決算説明会【別冊】
<http://www.pacific-metals.co.jp/file/news/20091106072852-1.pdf>
- 30) 日本鋳業協会：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）について，2012.10.31
- 31) 日本鋳業協会：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）について，2012.10.31
- 32) 政策総合研究所：総合提案誌「日本の新技術・新工法」，2013.8.25
- 33) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説 第一回改訂版，p.727，2004.10.8
- 34) 加藤芳朗：黒ボク土 URBAN KUBOTA，(株)クボタ，No.13，p.12，2012.10.31
- 35) 秋山淳，山本泰彦：フェロニッケルスラグ微粉末のアルカリシリカ反応抑制効

果, コンクリート工学年次論文報告集 9-1, p.603, 1987

36) 吉田公, 井上正一, 黒田保, 中村秀人: フェロニッケルスラグ微粉末を用いた
高流動コンクリートの性質, コンクリート工学年次論文報告集Vol.22 No.2, p.883,
2000

37) 阿部頼政, 井清, 溝口孝義: Fe石灰工法の発展と展開, 舗装 Vol.28 No.9, pp.16-22,
1993.9

第2章 既往の技術・研究

2.1 概説

建設副産物および産業副産物等のリサイクル材料は図-2.1.1のように大別され、建設資材として技術開発が進められている。それらの活用実績等を基にした開発用途は、コンクリート用材、路盤・盛土材、アスファルト舗装材、地盤改良材、中詰材など多岐にわたっており、その詳細は表-2.1.1に示すとおりである。

本章では、産業副産物による地盤材料・舗装材料へのリサイクル技術を中心とした再生利用の現状と、今後の産業副産物の再生利用に関する課題を明示した上で、特に前章で記した非鉄金属スラグの再生利用に関する重要性について概説する。

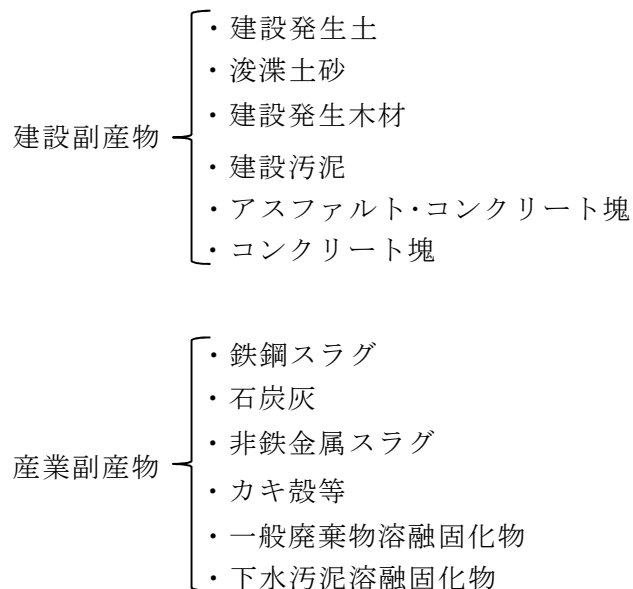


図-2.1.1 建設副産物および産業副産物の大別¹⁾

表-2.1.1.1 リサイクル材の利用技術の状況²⁾

対象材料	用途	コングリート		舗装工		土木	裏込	基礎工	本体工	パート・パレット 及び サブパット	サブ・コンパクション ハイブリッド工法	深層混合 処理	その他		発生要因、分類等
		コングリート 用材	盛土材	踏盤 盛土材	路盤材								As舗装 骨材	盛土・ 覆土材	
建設 副 産 物	建設発生土	-	◎	-	-	◎	◎ <改良土>	-	◎ <砂質系>	◎ <砂質系>	◎ <砂質系>	-	-	-	建設工事から発生する土砂で、 おおむねそのまゝの状態です。 材料として利用できます。
	浚渫土砂	-	◎	-	-	◎	◎ <改良土>	-	◎ <砂質系>	◎ <砂質系>	◎ <砂質系>	-	-	-	港湾、河川等の浚渫に伴って 発生する土砂で、砂質系と粘性系 に分類される。
	アスファルト コンクリート塊	x	△	◎	◎	△	-	-	-	-	-	-	-	-	舗装のはぎ取りあるいは削り 取りによって発生するアスファルト がら。
	コンクリート塊	○ ⁺	○	◎	◎	○	△	△	△	△	○	-	-	-	工作物の除去によって生ずる コンクリートの破片
建設汚泥	建設発生木材	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	木造家屋解体材、 機木副産物等
	建設汚泥	-	○	△	△	◎	-	-	△	△	△	-	-	-	シート工事、垂打打ち工法等の 細粒工事から発生する泥土で、自硬 性付定、非自硬性に分類される
産 業 副 産 物 等	鉄 鋼 ス ラ グ	高炉炉冷スラグ	◎	◎	◎	-	△	-	△	△	△	-	-	-	鉄鋼を生成する際に発生する 高炉スラグを徐々に冷却破砕 したもの。
		高炉水砕スラグ	◎	◎	◎	◎	◎	◎	-	△	△	△	-	-	鉄鋼を生成する際に発生する 高炉スラグを水で急速に冷却破砕 したもの。
	製鋼スラグ	○ ⁺	○	◎	◎	◎	△	-	△	△	◎	-	-	◎	鉄鋼やスクラップから鋼を製造 する際に発生するスラグを破砕 したもの。
	石 炭 灰	◎	○ ⁺	○ ⁺	○ ⁺	-	○	-	x	△ (建設物)	○ (建設物)	○ ⁺	-	-	火力発電所から発生する 石灰質の石炭灰のうち、電気集塵機等 で集められるもの。
非 鉄 金 属	クリンカー アッシュ	△	○	○	○	△	-	-	x	△	○	-	-	-	火力発電から発生する石灰 灰のうち、炉底に貯まるもの。
	銅スラグ	◎	x	x	x	-	-	-	○ ⁺	△	○	-	-	-	銅を精錬する際に発生する スラグを破砕したもの。
カ キ 殻 等	フェロニッケル スラグ	◎	△	△	△	△	-	-	○ ⁺	△	△	-	-	-	フェロニッケル精錬する際に 発生するスラグをばいした もの。
	カキ殻等	x	-	-	-	-	-	-	-	○ (砂混合)	○ (砂混合)	-	-	○	食品加工場でカキをむき身 出荷した際に残る貝殻。
	一般廃棄物溶融固化物	○ ⁺	△	○ ⁺	○ ⁺	△	-	-	x	-	-	-	-	-	都市ゴミを焼却した灰を溶融 固化したもの。
下水汚泥溶融固化物	○ ⁺	△	○ ⁺	○ ⁺	△	-	-	x	-	-	-	-	-	下水汚泥を溶融固化したもの。	

凡 例
◎：すでに当該用途を指定した品質基準が設けられ、利用が可能。
○：利用実績が多いもの又は○に加えて利用マニユアル案等が整備されているもの。
△：利用可能性はあるが、既存材料からは判定できず、今後の検討を要するもの。
x：現段階では利用は難しいと考えられるもの。
()：適用可能なリサイクル材の品質を示す。
< >：用途を示す。

2.2 産業副産物による地盤材料・舗装材料へのリサイクル技術の現状

本節では、産業副産物の定義および表-2.1.1 に示した個々の産業副産物の地盤材料や舗装材料へのリサイクル技術を中心に、産業副産物のリサイクルの現状について述べる。

2.2.1 産業副産物の定義

「産業副産物」には、鉄鋼スラグ、石炭灰や非鉄金属スラグ等があり、これらを有用物としてコンクリート用材、路盤材、土木材等に用いる場合は、廃棄物処理法上の廃棄物の対象にあたらない。なお、本論文では、一般産業から排出される副産物ではないが、一般廃棄物の焼却灰や下水汚泥の減容化及び再資源化を目的として熔融・固化し、固化物とする技術開発が進められていることから、これについても産業副産物等に含める。

2.2.2 非鉄金属スラグのリサイクル技術

非鉄金属スラグは、非鉄金属の製造所により副産物として生産されている。精錬所は全国各地に分散しているため、非鉄金属スラグを使用する際は非鉄金属スラグの特性だけでなく、精錬所から使用場所への運搬方法も考慮する必要がある。

フェロニッケルスラグ（以下、FNSと記す）は、フェロニッケル製錬の際に電気炉またはロータリーキルンで発生するスラグであり、図-2.2.1 に示すようにニッケル鉍石 485 万トン（年間）の製錬に際しフェロニッケル 38 万トンの生成に対し 6.5 倍の 255 万トンが生成される³⁾。現在は、国内 3 製錬所（青森県・京都府・宮崎県）⁴⁾ で製造されている。FNSは、密度が大きいという特徴を有し、その性状は天然材に近く、水硬性も認められない。このような特徴からコンクリート用骨材、本体工中詰材、地

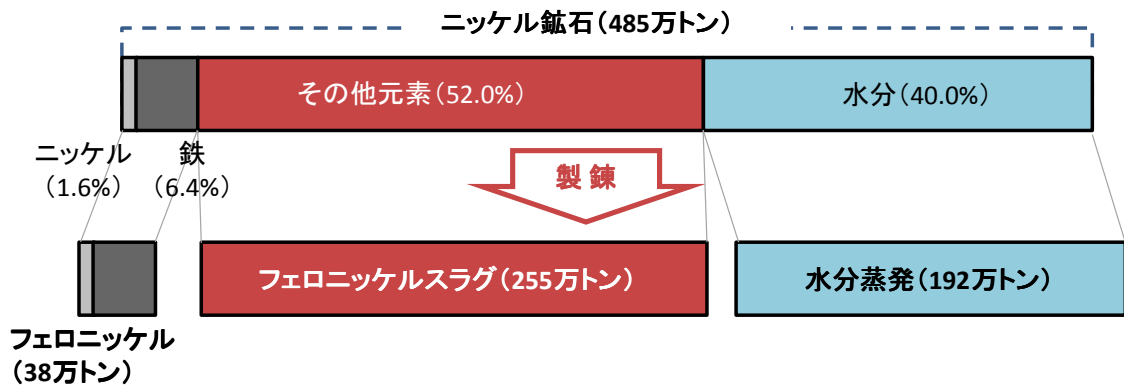


図-2.2.1 ニッケル鉱石のフロー

表-2.2.1 FNSの化学成分⁵⁾

SiO ₂	MgO	FeO	CaO	その他 (Al ₂ O ₃ ,S,Ni等)
53.6%	31.7%	6.7%	2.4%	5.6%

盤改良工（サンドコンパクションパイル工法）などの地盤材料，路床盛土材やアスファルト混合物用骨材などの舗装工材料として利用されている．コンクリート用細骨材としては，JIS化（JIS A 5011-2）され，無筋および鉄筋コンクリート構造物に用いられている．なお，FNS細骨材は，一般のコンクリートの品質を考慮して 50%程度までの混合割合を標準とし，消波ブロック等の重量コンクリートへは単独もしくは高い混合割合で用いる場合もある．しかしながら，この場合にブリーディングの増大等の問題を生じやすく，コンクリートの配合や施設等の特別な注意が必要となる⁶⁾．

また，FNSは表-2.2.1 に示すようにシリカ（SiO₂），マグネシア（MgO）を主成分として，CaO，FeO，Al₂O₃などを含有し，極めて安定な結晶構造である非鉄金属スラグである．

銅スラグは，銅精錬の際に銅精鉱を処理する溶錬炉で発生するスラグである．現在は，国内 5 製錬所（福島県・岡山県 2 カ所・愛媛県・大分県）⁷⁾ で製造されている．

表-2.2.2 銅スラグの化学成分⁸⁾

FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃ ,
41～54%	29～37%	1～8%	2～6%

銅スラグは、密度が大きく粒度は砂と同等であり、水硬性もほとんどない。このような特徴からコンクリート用骨材、本体工中詰材、地盤改良工（サンドコンパクションパイル工法）などの地盤材料、アスファルト混合物用骨材などの舗装工材料として利用されている。またFNS同様にコンクリート用細骨材としては、JIS化（JIS A 5011-3）されている。

鉛スラグは、亜鉛製錬の際の乾式の亜鉛製錬設備である熔鋳炉、半熔鋳炉で発生するスラグである。現在は、国内3製錬所（青森県・兵庫県・福岡県）⁴⁾で製造されている。亜鉛スラグは、密度が大きいという特徴を有し、その性状は天然材に近く、水硬性もほとんどない。このような特徴から本体工中詰材などの地盤材料として利用されている。

また、銅スラグは表-2.2.2に示すように鉄（FeO）、シリカ（SiO₂）を主成分として、CaO、Al₂O₃などを含有している非鉄金属スラグである。

2.2.3 石炭灰のリサイクル技術

石炭には5～30%程度の灰分が含有する⁹⁾ため、石炭火力発電所で微粉炭を燃焼した後その残渣として石炭灰が発生する。発生源としては電気事業と一般産業自家発電用ボイラー等があげられる。石炭灰は「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」（建設リサイクル法）における指定副産物に指定されている。（電力供給量1億2千万kW/年以上の電気事業⁹⁾）

石炭灰は、集塵装置で集められたフライアッシュとボイラー底部で回収される溶結

状の石炭灰を砕いたクリンカーアッシュに大別され⁹⁾、フライアッシュはコンクリート用材やスラリー化させて裏込め材に、クリンカーアッシュは下層路盤材（舗装設計施工指針¹⁰⁾や舗装施工便覧¹¹⁾に規定）に再生利用されている。ここで図-2.2.1に石炭灰の発生工程を示す。

平成23年度における石炭灰発生量は1,157万トンであり、再生利用量は1,137万トン（98%）¹²⁾であった。残り20万トンが埋め立て処分されている。平成23年度の有効利用量（率）を分野別で見ると、セメント・コンクリート関連分野が約763万トン（67.1%）と最も高く、地盤改良材、土木工事事業、電力工事事業、路盤材やアスコン材などの土木分野が約155万トン（13.6%）、建築分野が約37万トン（3.3%）となっている。セメント製造においては粘土代替としての利用が多いが、近年はセメントの需要の低下などで、受入れ限度量に達するところもあり、業界全体としても上限に近づきつつある。その対策として、建設分野で活用することが期待され、利用技術の開発¹³⁾も熱心に行われている。

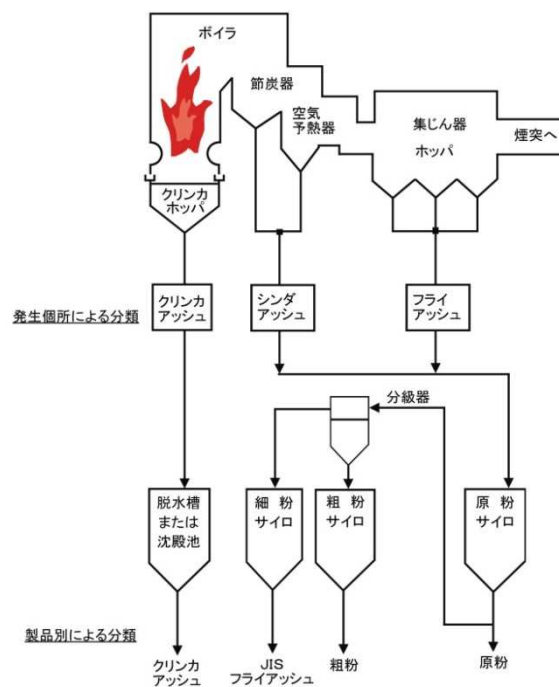


図-2.2.2 石炭灰の発生工程⁶⁾

2.2.4 鉄鋼スラグのリサイクル技術

鉄鋼スラグは製鉄業から発生する高温の溶融スラグが冷えて固化したもので、炉の違いにより幾つかの種類のスラグに分類される。鉄鋼スラグは鉄鋼1トンの生産に対して約355kg算出される。平成24年度の生成量は約3,800万トン¹⁴⁾である。

製鉄業及び製鋼・圧延業は「資源の有効な利用の促進に関する法律」（資源有効利用促進法）において特定省資源業種に指定され、スラグの利用促進等に取り組むことが求められている。平成24年度における再生利用量は1,362万トン¹⁵⁾（内261万トンは再利用（スラグリサイクル））であり、約20万トンは埋め立て処分されている。

平成24年度の有効利用量（率）を分野別でみると、土木・港湾工事等が471万トン（34.6%）と最も高く、路盤材やアスコン材などの道路用が約416万トン（30.5%）、セメント用が約55万トン（4.0%）、地盤改良材が約45万トン（3.3%）となっている。

2.2.5 酸化鉄のリサイクル技術

製鉄所において製鉄時に副生される粉塵ダスト（酸化鉄）のリサイクル技術には、消石灰75%と酸化鉄の微粉末25%からなるFe石灰¹⁶⁾がある。このFe石灰は路床安定処理材として商品化されており、Fe石灰を用土（まさ土、シラスや山ズリ）と混合し、安定処理したFe石灰処理土によって軟弱な路床を構築した舗装は、その良好な供用性および耐久性が認められ、適用実績も伸び北部九州を中心に一般的に用いられる材料として定着し、国土交通省九州地方整備局の「土木工事設計要領 第Ⅲ編 道路編」に記載¹⁷⁾されている。なお、Fe石灰処理土を用いるFe石灰工法については、井¹⁸⁾により多くの部分が解明されているが、路床安定処理材であるFe石灰についてはほとんど触れられていない。なお、Fe石灰に用いられている粉塵ダスト（酸化鉄）は、新日鐵住金株式会社小倉製鉄所の焼結ダスト（表-2.2.3）を使用している。

表-2.2.3 微粉酸化鉄の化学的組成（試料名：焼結ダスト）¹⁹⁾

Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	その他
94.92	1.02	0.48	0.27	3.31

2.2.6 一般廃棄物溶融固化物のリサイクル技術

一般廃棄物溶融固化物は一般廃棄物の焼却灰を加熱し、概ね 1200℃以上の高温条件下で有機物を燃焼させるとともに、無機物を溶融した後に冷却してガラス質の固化物とする技術である。これは重金属の溶出防止及びダイオキシン類の分解・削減に極めて有効とされて、最終処分場負荷の低減を目的に開発された技術²⁰⁾である。

溶融固化処理方式は、廃棄物を焼却灰にしてからその焼却残渣を溶融する方法と、廃棄物を生のまま直接溶融する方法に大別される。前者の焼却残渣溶融方式は、灯油やコークス等の燃料を燃焼した熱で溶融する燃料燃焼方式と、電気から得られた熱エネルギーにより溶融する電気方式に区分される。一方、後者の方式はガス化溶融方式と呼ばれ、廃棄物中の有機物等を無酸素状態でガス化し、次いで無機物を高温で溶融する方式である。なお、ガス化溶融の方法には、これを一つの炉で行う方式と分離した炉で行う方式がある

溶融固化物の性状は鉄鋼スラグ等と同様に水砕処理されたものは通常 5mm以下の砂状を呈し、空冷したものはこぶし大の塊をなしているため、破碎処理され任意の粒度に調整される。

今後のJIS化を目指した標準情報（TR）であるTR A 0016（一般廃棄物，下水汚泥等の溶融固化物を用いたコンクリート用細骨材），TR A 0017（一般廃棄物，下水汚泥等の溶融固化物を用いた道路用骨材）において、溶融固化物の用途は、コンクリート用細骨材，路盤材（路床材，下層路盤材，上層路盤材等），加熱アスファルト混合物用骨

材としている。

2.2.7 下水汚泥溶融固化物のリサイクル技術

下水汚泥溶融固化物は、下水汚泥の溶融汚泥固形物中の有機分が分解したあとの無機物を、1,200℃以上の高温で融解して、その融液を徐冷して固化物（スラグ）とする技術²¹⁾である。溶融処理の方式には、表面溶融炉、旋回溶融炉、コークスベッド式溶融炉等さまざまな方法が用いられている。

スラグを冷却方法で区分すれば、急冷スラグ（水砕スラグ、風砕スラグ）、徐冷スラグ（空冷スラグ）、結晶化スラグ等に分けられる。急冷スラグは、融液を水などの冷却媒体と直接または間接的に接触させて、急速に冷却して得られる（水砕と呼ばれる）スラグで、一般にガラス質で細粒状または砂状である。徐冷スラグは、融液をコンベアまたは容器に受けて大気中または保温室で冷却させる方式で、急冷スラグに比べて形状が大きいので、粗骨材を製造する目的で採用される。徐冷スラグは、ふるい分けして粒度調整をしたり、再破碎してスラグ砂に加工されたりする場合もある。徐冷の際に温度管理を行って冷却速度を調整しなければ、ガラス化したスラグとなる。

結晶化スラグは、スラグ成分を結晶化させるために特別に装置を作り、冷却速度をコントロールしながら結晶化する工程を取り入れて製造される。結晶化されたスラグは単に徐冷されたスラグに比べて、骨材の物理的品質が改善され、骨材の硫酸ナトリウムによる安定性試験・すりへり減量試験・コンクリートに使用した時の凍結融解試験等の結果が、天然の砕石を使用したのと同等以上の品質を示す。

下水汚泥溶融固化物のリサイクル材としての利用に関しては、一般廃棄物溶融固化物の場合と同様に今後のJIS化を目指したTRが策定されている。また、溶融固化物の用途は、コンクリート用細骨材、路盤材（下層路盤材、上層路盤材等）、路床材、加熱アスファルト混合物用骨材としている。

なお、スラグの発生量は一般の都市ゴミ焼却灰などの場合と同じと考えられ、すなわち、1トンの焼却灰から0.65トンのスラグが製造される²²⁾。

2.3 産業副産物の再生利用に関する課題

本節では、産業副産物を再生利用する際に直面する課題である環境安全性、品質および経済性について述べる。

2.3.1 産業副産物の環境安全性

鉄鋼スラグ類の環境安全性は、一般に、2005年にJIS化された「スラグ類の化学物質試験方法（JIS K 0058-1,-2）（環境JIS法）」に準じ、溶出試験値と含有量試験値はいずれの項目も土壌環境基準や土壌汚染対策法で定める基準値以下でなければならない。

一方、2012年に経済産業省から「コンクリート用骨材又は道路用等のスラグ類に化学物質評価方法を導入する指針に関する検討会総合報告書」²³⁾が発刊されている。この報告書では、真の循環型社会を実現するには、鉄鋼スラグ、非鉄金属スラグ、廃棄物溶融スラグ（一般廃棄物融解固化物・下水汚泥融解固化物）などの、産業副産物や廃棄物を由来とする建設系循環資材の利用の推進が必要不可欠であるとしている。そのためには循環資材に対する信頼を将来にわたってより安定なものにしなければならない。特に循環資材は環境安全性においても配慮すべき化学物質を含む場合があるため、資材としての安定した品質管理とともに、環境安全性に配慮する品質の管理を確実に行う必要があるとしている。また、これらの循環資材の環境安全性評価においては、現状では土壌汚染対策法²⁴⁾における考え方が準用されているが、循環資材と土壌は、形態や性状、置かれている環境条件、人との接触可能性等が大きく異なり、両者を同列で評価することは適切ではない。

そこで、産業副産物の1つで本研究のテーマ（1.2 研究の目的参照）であるFNSを含めた代表的な非鉄金属スラグの環境安全性については、これまでにいくつかの研究が

行われてきた。横山ら²⁵⁾、秋山ら²⁶⁾はコンクリート用FNS細骨材のアルカリシリカ反応に着目している。横山らは、化学法では無害でないと判定されるFNSについて、FNSの化学法による溶解シリカ量とモルタルバーによる膨張量の関係には相関性が見られるとしたことで、モルタルバーによる試験（溶解シリカ量が150mmol/L程度以下）においてFNSは無害と判定できるとしている。秋山らは、FNS微粉末をセメントの一部として置き換えることで、他の反応性骨材によるアルカリシリカ反応を抑制する効果があるとしている。加納ら^{27)・28)}は、非鉄金属スラグ（FNSおよび銅スラグ）単体における含有量試験（環境省告示第19号 JIS K 0058-2 準拠）および溶出量試験（環境省告示第18号 JIS K 0058-1 準拠）を行い土壌汚染対策法の判定基準値と比較し、非鉄金属スラグの環境安全性を判断している。その結果、溶出量についてはともに基準値を十分満足する結果が得られているが、含有量については銅スラグでヒ素と鉛がわずかに基準値を上回り、非鉄金属スラグを道路用骨材として用いる際、特に銅スラグの環境安全性に留意した検証を事前に行う必要があるとしている。また、非鉄金属スラグを道路用骨材として再生利用した場合の周辺土壌への影響についても着目しており、走行実験前後の周辺土壌と路上体積粉塵の含有量試験および溶出試験を実施している。その結果、銅スラグ単体では含有量試験で基準値を超えて検出されていたヒ素や鉛が道路用骨材として再生利用した場合に低減され、再生骨材・再生合材・再生路盤材として再生利用することは土壌汚染対策法の含有量および溶出量基準を十分に満足することが確認されている。ただし、FNSは周辺土壌への影響は全くないことを確認している。

2.3.1.1 フェロニッケルスラグ

FNSに関して、安全品質基準に設定された化学物質について、JIS K 0058-1 による溶出量試験を行った結果の一例を表-2.3.1 に、環境安全品質基準に設定された化学物質

について、JIS K 0058-2 に基づく含有量試験値の一例を表-2.3.2 に示す。これより、すべての場合において、一般用途および港湾用途の基準値未満または定量限界未満で問題なく使用することが可能であるため、FNSの使用は環境安全面について問題ない。

表-2.3.1 FNS 溶出量試験結果²⁹⁾ (mg/L)

製造所区分	A社	B社	C社	D社	E社	基準値	基準値
骨材種類	FNS5-0.3	FNS 1.2	FNS5-0.3	CS20	CS40	(一般用途)	(港湾用途)
カドミウム	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.003	≦0.009
鉛	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
六価クロム	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	≦0.05	≦0.15
ひ素	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	≦0.0005	≦0.0015
セレン	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
ほう素	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	≦1.0	≦20
ふっ素	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	0.3	≦0.8	≦15

表-2.3.2 FNS 含有量試験結果²⁹⁾ (mg/kg)

製造所区分	A	B	C			基準値
骨材種類	FNS5-0.3	FNS 1.2	FNS5-0.3	CS20	CS40	(一般用途)
カドミウム	<15	<15	<15	<15	<15	≦150
鉛	<15	<15	<15	<15	<15	≦150
六価クロム	<25	<25	<25	<25	<25	≦250
ひ素	<15	<15	<15	<15	<15	≦150
水銀	<1	<1	<1	<1	<1	≦15
セレン	<15	<15	<15	<15	<15	≦150
ほう素	<400	<400	<400	<400	<400	≦4,000
ふっ素	<400	<400	<400	<400	<400	≦4,000

2.3.1.2 銅スラグ

銅スラグに関して、環境安全品質基準に設定された化学物質について、JIS K 0058-1による溶出量試験を行った結果の一例を表-2.3.3 に示す。これより、すべての場合において、一般用途および港湾用途の基準値未満または定量限界未満となっている。

また、JIS K 0058-2に基づく含有量試験値の一例を表-2.3.4 に示す。これより、六価クロム、水銀、ほう素、ふっ素は定量限界未満であったが、ひ素と鉛は、一般用途における基準値より高くなっている。さらに、溶出液のpHに関する銅スラグのシリアルバッチ試験結果の一例を表-2.3.5 に示す。これより、pHの値は弱アルカリ性を示し、試験を繰り返したことによるpHの変化は認められていない。

以上のことから、含有量に関する基準が適用されない港湾用途においてはそのまま使用することができるが、一般用途として使用する場合は、他材料との混合利用が前提となる。

表-2.3.3 銅スラグ溶出量試験結果³⁰⁾ (mg/L)

製造所区分	A社	B社	C社	D社	E社	基準値	基準値
骨材種類	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	(一般用途)	(港湾用途)
カドミウム	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	≦0.003	≦0.009
鉛	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
六価クロム	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	≦0.05	≦0.15
ひ素	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	≦0.0005	≦0.0015
セレン	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
ほう素	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	≦1.0	≦20
ふっ素	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	≦0.8	≦15

表-2.3.4 銅スラグ含有量試験結果³⁰⁾ (mg/kg)

製造所区分	A社	B社	C社	D社	E社	基準値
骨材種類	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	(一般用途)
カドミウム	34	<15	<15	<15	<15	≦150
鉛	630	940	230	200	440	≦150
六価クロム	<25	<25	<25	<25	<25	≦250
ひ素	<270	50	390	250	230	≦150
水銀	<1	<1	<1	<1	<1	≦15
セレン	<15	<15	<15	<15	<15	≦150
ほう素	<400	<400	<400	<400	<400	≦4,000
ふっ素	<400	<400	<400	<400	<400	≦4,000

表-2.3.5 銅スラグの海水でのシリアルバッチ試験結果³⁰⁾

出荷有姿	A社		B社		C社		D社	
	pH	EC (mS/m)	pH	EC (mS/m)	pH	EC (mS/m)	pH	EC (mS/m)
溶媒：海水								
1回目	8.1	4880	8.1	4790	8.1	4940	8.2	4960
2回目	8.1	4780	8.2	4790	8.1	4840	8.2	4820
3回目	7.9	4710	8.0	4850	8.0	4730	8.0	4770
4回目	8.0	4800	8.0	4890	8.0	4770	8.1	4830
5回目	8.0	4850	8.1	4940	8.1	4900	8.1	4850
6回目	8.0	4920	8.0	4940	8.1	5060	8.1	5000

2.3.1.3 亜鉛スラグ

亜鉛スラグに関して、環境安全品質基準に設定された化学物質について、JIS K 0058-1 による溶出量試験を行った結果の一例を表-2.3.6 に示す。これより、すべての場合において、港湾用途の基準値未満となっている。

また、JIS K 0058-2 に基づく含有量試験値の一例を表-2.3.7 に示す。カドミウム、六価クロム、水銀、ほう素、ふっ素は定量限界未満であったが、ひ素と鉛は、一般用途における基準値より高くなっている。

以上のことから、含有量に関する基準が適用されない港湾用途においてはそのまま使用することができるが、一般用途として使用する場合は、他材料との混合利用が前提となる。

表-2.3.6 亜鉛スラグ溶出量試験結果³¹⁾

分析対象	カドミウム	鉛	六価クロム	ひ素	水銀	セレン	ふっ素	ほう素
溶出量 (mg/L)	<0.001	<0.005	<0.01	0.02	<0.0005	<0.005	0.20	<0.1
環境安全基準 (港湾用途)	≦0.009	≦0.03	≦0.15	≦0.03	≦0.0015	≦0.03	≦15	≦20

表-2.3.7 亜鉛スラグ含有量試験結果³¹⁾

分析対象	単位	カドミウム	鉛	六価クロム	ひ素	水銀	セレン	ほう素	ふっ素
含有量	(mg/kg)	<1	150	<1	550	<0.1	<1	840	360
基準値		≦150	≦150	≦250	≦150	≦15	≦150	≦4000	≦4000

2.3.2 再生利用時の品質

産業副産物のリサイクル材料の再生利用時の品質は、再生利用の用途に応じた基準を満足する必要がある。再生利用の用途は前述（表-2.1.1）したとおり多岐にわたっている。利用技術の現況は、用途別に、すでにJISや利用手引書類で品質基準等が設けられている材料もあるが、基準等の整備が必要な材料が多く存在している。

その中でも、非鉄金属スラグの品質基準は、対象となる用途（コンクリート用材、路盤・盛土材、アスファルト舗装材、地盤改良材、中詰材など）に応じてそれぞれ項目が規定されている。規定項目の例としては、コンクリート用材の場合は骨材密度やアルカリシリカ反応、路盤・盛土材やアスファルト舗装材の場合は絶乾比重、吸水率およびすりへり減量、地盤改良材や中詰材の場合はせん断抵抗性などがある。ただし、いずれの用途においても、粒度がおおよそ0.3mm以上のものについてであり、それより小さい細粒分（微粉末）についてはほとんど対象とされていない。

特に、地盤改良材としてサンドコンパクションパイルのドレーン材として用いられる場合は、透水性が大きいことが求められるため、微粉末の部分が取り除かれている。

この他、非鉄金属スラグの地盤改良材として構造物基礎地盤の支持力不足を補うための置換材としての利用などがあるが、土と混合することにより土質を安定処理する化学的な地盤改良材としての適用は現段階では行われておらず、これからの再生利用の分野であり、特に、微粉末の可否の検証が必要である。

非鉄金属スラグのコンクリート用材の施工実績例として図-2.3.1 に、フェロニッケルスラグの地盤改良材の施工実績例として図-2.3.2 に、銅スラグの地盤改良材の施工実績例を図-2.3.3 に示す

また、非鉄金属スラグは工場製品であるため、同じ工場内で製造された非鉄金属スラグについては性質の違いに大きな差はないが、工場が異なる場合は、基本的な性質

が大きく異なってくることがある³²⁾。これは、工場が異なれば、図-2.3.4 に示すフェロニッケルスラグの例³³⁾のように粒度にばらつきが生じることが大きな要因と考えられる。これに対し、JIS規格外の微粉末は、工場が異なる場合であっても粒径にほとんど違いがないため基本的な性質が大きく異なるとは考えにくく、一定の品質が確保できる材料であるといえる。



図-2.3.1 非鉄金属スラグのコンクリート材としての施工実績例

(左) 種類：銅スラグ，目的：消波ブロック，施工場所：福島県いわき市³⁴⁾

(右) 種類：フェロニッケルスラグ，目的：中詰材，施工場所：宮崎県細島港³⁵⁾



図-2.3.2 フェロニッケルスラグの地盤改良材としての施工実績例

(左) 目的：3,000KL C重油タンク基礎，施工場所：青森県八戸市³⁶⁾

(右) 目的：北上川液状化対策，施工場所：青森県八戸市³⁷⁾



図-2.3.3 銅スラグの地盤改良材としての施工実績例

(左) サンドコンパクションパイル材，施工場所：岡山県倉敷市³⁸⁾

(右) サンドドレーン材，施工場所：岡山県倉敷市³⁹⁾

2.3.3 経済性の比較

JISで規格化されているFNSなどが含まれているクラッシュラン鉄鋼スラグの1m³当りの公表価格を表-2.3.8 に示す。この表から、生産地（青森県・兵庫県・大分県）とそれ以外の地域では輸送コストがかかるなどの理由から価格差が生じている。

しかし、規格化されずストックされているFNSなどの非鉄金属スラグの微粉末は、現在、利用価値が少ない材料であることからほとんど流通されておらず価格が設定されていない。すなわちこれらの材料は、輸送コストを計上する必要はあるが無料での取引が可能な材料である。

そこで、JIS化されていない非鉄金属スラグを再生利用するには、供給量の保持、販売ルートやストック場所を確立するだけでなく、非鉄金属スラグで代替することによるコスト削減効果を把握することも重要な要素であると考えられる。

表-2.3.8 クラッシュラン鉄鋼スラグの1m³当りの公表価格^{40) ~ 42)}

地区	クラッシュラン鉄鋼スラグ	地区	クラッシュラン鉄鋼スラグ
函館	2,300	八戸	2,300
鹿嶋	2,500	千葉	2,100
成田	3,100	東京	2,500
横浜	2,400	名古屋	2,000
神戸	1,900	北九州	2,250
大分	1,550		

2.4 Fe石灰に関する既往の研究および課題

本節では、FNSの有用性を評価する上で、比較の対象としてとりあげた微粉酸化鉄と消石灰を混合した土質安定処理材のFe石灰に関する既往の研究について述べる。

2.4.1 力学特性

鬼崎⁴³⁾は、砕石工場で産する最大粒径30mmの切込砕石に山土30%混入した土にFe石灰を添加したFe石灰処理土のCBR試験を実施している。その結果、CBR値が最も高い添加率は、7%であることが確認されている。

井¹⁸⁾は、まさ土にFe石灰を添加したFe石灰処理土とまさ土に消石灰を添加した石灰安定処理土の力学特性を比較するために、一軸圧縮試験、曲げ試験、繰返し三軸圧縮試験を実施している。その結果、一軸圧縮試験や曲げ試験などの静的な力学試験では、最適添加率においてFe石灰処理土の方がやや高い強度を示し、破壊時点の変位量は小さい値を示す傾向があることが確認されている。また、静的な応力に対しては、低い圧縮応力が繰返し作用する場合において、Fe石灰処理土の方が高い M_r （レジリエントモデュラス：舗装材の材料定数）を示す特性が確認されている。

いずれの報告もFe石灰とまさ土を混合したFe石灰処理土についての力学特性の検討であり、土を介さない場合のFe石灰やまさ土以外の土に混合したFe石灰処理土についての力学特性は検討されていない。

2.4.2 Fe石灰処理土の反応性

井¹⁸⁾は、まさ土のFe石灰処理土に対し走査電子顕微鏡（SEM）を用いた微視的構造の観察を実施し、土粒子間隙におけるFe石灰の反応性について定性的な解明を実施している。その結果、Fe石灰処理土では、養生7日を経過した時点から薄片状の結晶

物が確認され、養生 28 日では結晶物の形状に変化は見られないが、経時的に反応が進んだことによって結晶物の量が増大し、土粒子間に多く生成していることを確認している（写真-2.4.1～写真-2.4.3）。

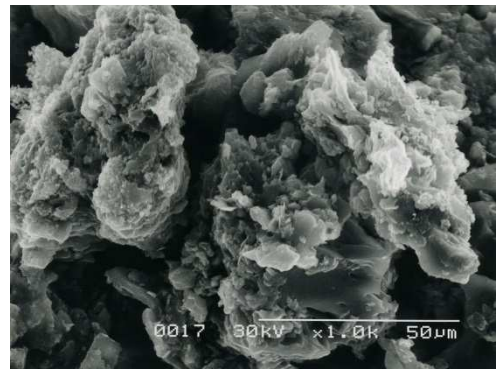
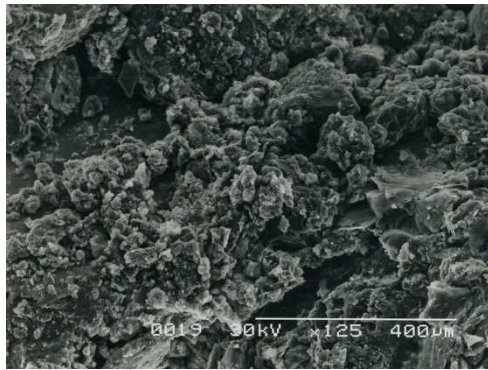


写真-2.4.1 Fe 石灰処理土の混合直後の SEM 画像（倍率(左)125 倍，(右)1000 倍）

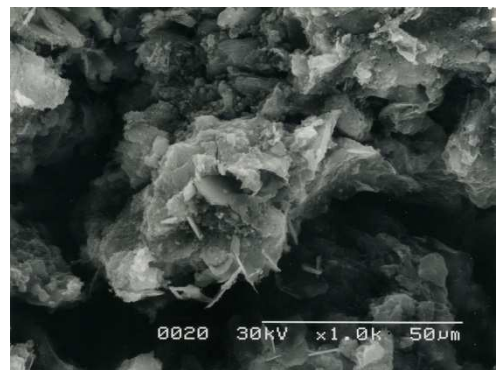
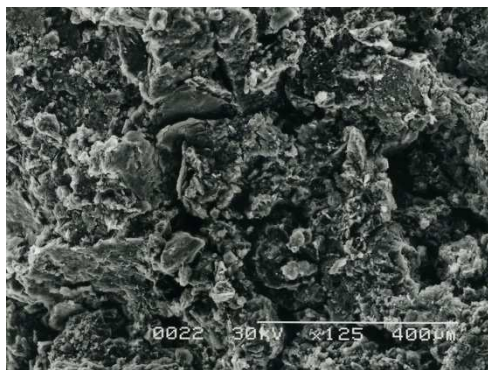


写真-2.4.2 Fe 石灰処理土の養生 7 日の SEM 画像（倍率(左)125 倍，(右)1000 倍）

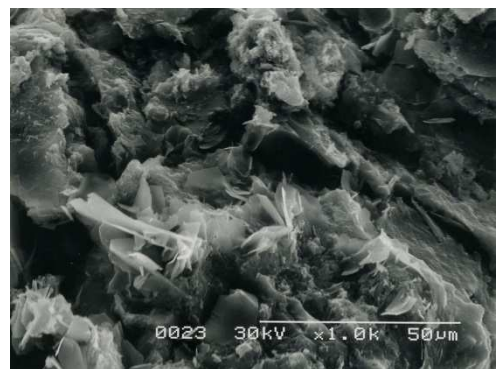
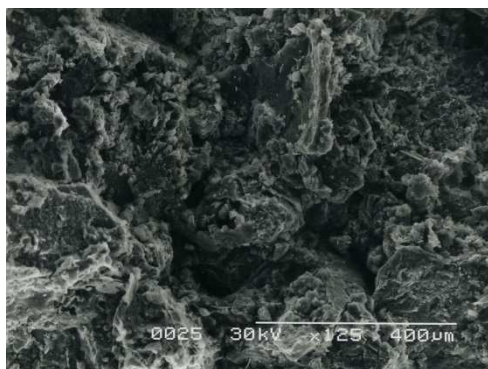


写真-2.4.3 Fe 石灰処理土の養生 28 日の SEM 画像（倍率(左)125 倍，(右)1000 倍）

しかし、この報告は、現在市販されているFe石灰（Fe：消石灰＝25：75）を最適な添加量でまさ土に混合したFe石灰処理土のSEMによる観察結果であり、Feと石灰の割合が変化することによるFe石灰処理土の反応やまさ土以外の土によるFe石灰の反応については実験されていない。

2.5 特殊土（まさ土および黒ぼく）の特性および課題

本節では、FNSを石灰と混合し地盤改良材や路床土に対する安定処理材としての有用性を評価する上で、対象とする特殊土（まさ土および黒ぼく）の特性や課題に関し既往の研究や実績について述べる。

2.5.1 まさ土の特性および課題

まさ土は、花崗岩質岩石が風化してその場所に残留している残積土あるいはこれと同質の崩積土であり、様々な風化層を形成し、不均質な風化状態のものが多いため、多種多様な性質を有する。

地質岩石学的観点からみると西日本に分布する花崗岩類は、瀬戸内海、近畿や九州北部に分布する領家型花崗岩類と広島、岡山や六甲中部に分布する白亜紀型(広島型)花崗岩類の2つのグループに分けられる。その主な特徴を表-2.5.1に示す。

表-2.5.1 花崗岩の区別とまさ土の特性⁴⁴⁾

	領家型花崗岩類	白亜紀型（広島型）花崗岩類
岩質の特徴	花崗浅緑岩で、石英は少なく長石は斜長石を主とする。黒雲母や角閃石が多い。SiO ₂ が65～70%でFe,Mgが多い。	花崗岩で、石英が多く、正長石が主である。黒雲母は少なく角閃石はまれである。SiO ₂ が70～75%でFe,Mgは少ない。
まさ土の特徴	比較的粘性が大で、粘着力はあるが透水性は小さい。	粘着力は少なく、透水性は大きい。表面浸食を受けやすい。

まさ土は、粒径、塑性指数や自然含水比（7～11%）におけるCBR値（少なくとも10以上）などで盛土材や路床材の条件を満足していることから西日本を中心に多く採用されている。しかしながら、まさ土は転圧や締固めなどの外力が作用したとき土粒子

破碎が生じ弱体化し、また水による影響を受け易い特徴がある。非水浸と水浸の違いによる締固めたまさ土のCBR試験結果を図-2.5.1 に示す。まさ土のCBR値は、水浸により著しく低下することが確認されている。

そこで、これらの対策案として、まさ土を消石灰で安定処理する試みが行われているが実用化には至っていない。なお、石灰とまさ土のような砂質土では炭酸化反応が有効であることから、生石灰ではなく炭酸化反応が起こる消石灰が用いられている⁴⁵⁾。

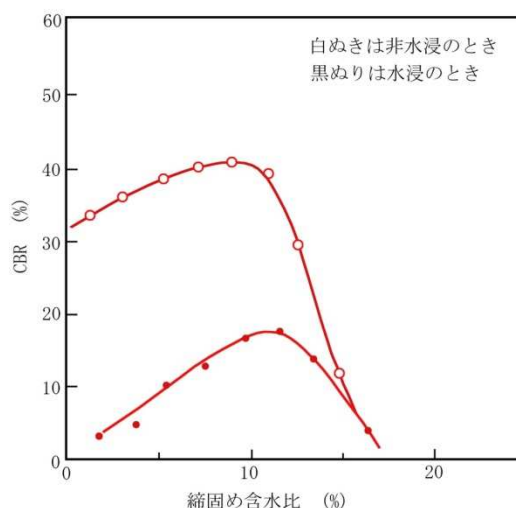


図-2.5.1 締固めたまさ土の CBR 値⁴⁶⁾

2.5.2 黒ぼくの特性および課題

黒ぼくは、軟弱な路床土として火山灰質粘性土で日本の国土の地表面積の約 16% (図-2.5.2) を占める。黒ぼくは、洪積世から沖積世にかけて噴出された降下火山灰が、特殊な条件の風化過程を経て次のように出来たものである。母岩としての降下火山灰は、微粒子であり、これらの堆積層は透水性が大きい。降下火山灰の堆積層は、湿潤温暖なモンスーン地帯で、著しく風化を受け、その際に火山灰中の火山ガラスや斜長石から、珪酸やアルミ成分が溶脱され、これらから、モノ珪酸 (Si(OH)_4) およ

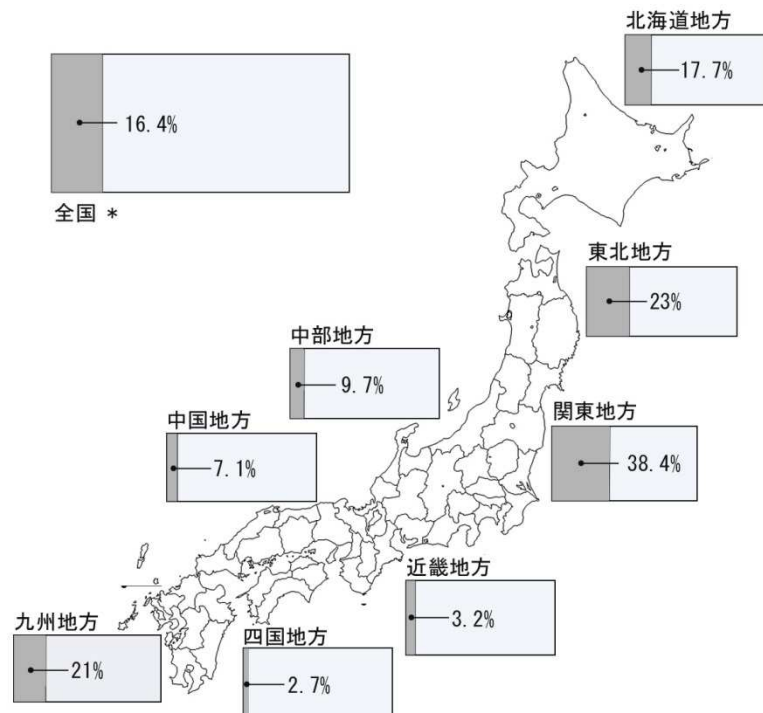


表-2.5.2 黒ぼくの分布⁴⁷⁾

び水酸化アルミニウム ($\text{Al}(\text{OH})_2$) が生成され、さらに、これらが風化液中で等電沈殿をして、アロフェンが生成される。生成されたアロフェンは、十分な時間の経過によって結晶化が進み、カオリン鉱物へ移行する。一方、地表では、草木類（すすき、しば、ちがや等）が繁茂し、有機物を供給すると同時に、火山灰中より、植物蛋白石の形で珪酸を固定し、供給された有機物は、時間の経過とともに腐植化し、アロフェンや R_2O_2 、特に Al_2O_3 と結びついて集積する。黒ぼくは、この腐植が集積して黒くなった部分である⁴⁸⁾。

黒ぼくが堆積した地盤は軟弱であり、地山におけるセメンテーション（粒子間の空隙を SiO_2 などで充填することによる結合）がさほど強くないため地山強度も低く、また黒ぼくを盛土材料として用いる場合には、トラフィカビリティと転圧効果の確保が

難しく、安定した盛土築造が困難である。そのため、黒ぼくを盛土材料や路床材料に採用する際は、安定処理などを講じるなどの対策³⁾が必要とされている⁴⁹⁾。

しかしながら、従来、多くの化学的安定処理工法が試みられ、特に、最も経済的と見なされる設計系安定処理材による工法は、多く試みられてきたが、期待された効果は得られず、一般の軟弱土に比べ相当多量の安定処理材の投入が必要であり、経済的に制約されることも多い⁵⁰⁾。

神谷⁵¹⁾らは、黒ぼくにセメントおよび生石灰を安定処理材として添加した場合の一軸圧縮強さやCBR値による強度比較を行っている。その結果、黒ぼくにいずれの安定処理材を添加しても改良効果は発現しているが、強度は水浸することで経時ともに減少傾向にあることが確認されている。また、当時の下部路床に必要なCBR値

(CBR=5%)を満足するには、添加率10%以上の高率が必要とされている。

久保田⁵²⁾らは、黒ぼくにセメント、生石灰および消石灰を安定処理材として添加した場合の一軸圧縮強さによる長期強度の比較を行っている。その結果、石灰系の安定処理材を黒ぼくに添加することで、その物性を変え土質の改善に十分効果を発揮するとともに、長期養生に及ぼす効果は、セメント>消石灰>生石灰と結論づけている。

しかし、いずれの報告も、黒ぼくに石灰系安定処理材を添加した処理土の一軸圧縮強さ(qu)は0.9~3kg/cm²程度であり、CBR値は4%程度であることから、石灰系安定処理材を添加した黒ぼくが路床構築材(一般的にCBR=6%以上)や路盤材(下層路盤材7kg/cm²以上)として適用するに至っていない。

2.6 まとめ

現在，建設副産物および産業副産物等のリサイクル材料の開発用途は，コンクリート用材，路床盛土材，アスファルト舗装材，中詰材など多岐にわたっている．港湾区域に拠点を構える製鉄工場や発電所から産出される多量のスラグや石炭灰などの産業副産物は，立地条件の良さから港湾工事のコンクリート用材として，簡単な加工を施して信頼性の高い材料に変え，再生利用されている．このように産業副産物をコンクリート用骨材として再生利用する技術は既にJIS化され，産業副産物のJIS化は，このほかにも道路の路盤ならびに加熱アスファルト混合物用の材料にも及んでいる．特に非鉄金属スラグ（FNSや銅スラグ）は，非鉄金属スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針として発刊もされている．

また，非鉄金属スラグのリサイクル材料はJIS規格の粒度範囲のものに限られており，その最小区分より微粉末の材料のほとんどは，一部で再生利用されるものの，多くの場合，使い道がなくストックされている．また，非鉄金属スラグは工場製品であるため，工場が異なった場合，基本的な性質に大きな差異が生じることもあるが，JIS規格外の微粉末では，工場が異なる場合であっても粒径にほとんど違いがないため基本的な性質が大きく異なるとは考えにくく，一定の品質が確保できる材料であるといえる．

具体的な技術的課題は，ストックされている非鉄金属スラグ，特にニッケル鉱石 485 万トン（年間）の製錬に際しフェロニッケル 38 万トンの生成に対し，6.5 倍の 255 万トンが生成されるFNSの微粉末の再生利用などへの対応策である．ここでFNSは，環境安全品質の基準が存在していないため，代替的に熔融スラグ骨材を対象にしたJIS A 5031 やJIS A 5032 のコンクリート用および道路用（アスファルト骨材と路盤材）の基準が用いられている．その結果，単体においては，基準値を満足しない場合もあるこ

とが確認されており、他材料と混合利用などする対応が必要となるケースがある。なお、FNSは水硬性などの特徴がないことから、他材料と混合利用する際はセメンテーション効果を有する材料が必要となる。FNSの微粉末の再生利用については、単に再生利用が可能な材料で良いというだけでなく、性質の異なる材料であっても利用性を高める必要があるため、材料自体でなく他材料と混合後、用途に応じた基準を満足し、環境安全品質や経済性についても考慮することが必要不可欠となる。

特殊土の1つで砂質系のまさ土は、粒径、塑性指数や自然含水比（7～11%）におけるCBR値（少なくとも10以上）などで盛土材や路床材の条件を満足していることから西日本を中心に多く採用されているが、転圧や締固めなどの外力が作用したとき土粒子破碎が生じ弱体化し、また水による影響を受け易い特徴がある。そこで、これらの対策案として、まさ土を消石灰で安定処理する試みが行われているが実用化には至っていない。

また、特殊土の1つで粘性系の黒ぼくは、地盤が軟弱であり、地山におけるセメンテーション（粒子間の空隙を SiO_2 などで充填することによる結合）がさほど強くないため地山強度も低い。黒ぼくを盛土材料として用いる場合は、トラフィカビリティと転圧効果の確保が難しく、安定した盛土築造が困難である。そのため、黒ぼくを盛土材料や路床材料に採用する際は、安定処理などを講じるなどの対策が必要であるが期待された効果は得られず、一般の軟弱土に比べ相当多量の安定処理材の投入が必要であり、経済性が高価になることが多い。

そこで、これらの特殊土に対する課題を満足するとともに、経済性や安全性についても考慮した土質改良材が必要である。

第 2 章の参考文献

- 1) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針， p.1-3， 2004.3.25
- 2) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針， p.1-5， 2004.3.25
- 3) 大太平洋金属株式会社ホームページ：2009年3月期 決算説明会【別冊】
<http://www.pacific-metals.co.jp/file/news/20091106072852-1.pdf>
- 4) (財)沿岸技術研究センター：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）， p.33， 2012.3
- 5) (財)沿岸技術研究センター：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）， p.43， 2012.3
- 6) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針， pp.3-15， 2004.3.25
- 7) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針， p.33， 2004.3.25
- 8) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針， p.35， 2004.3.25
- 9) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針， p.2-69， 2004.3.25
- 10) (社)日本道路協会：舗装設計施工指針（平成18年版）， p.233， 2006.2.24
- 11) (社)日本道路協会：舗装施工便覧（平成18年版）， p.53， 2006.2.24

- 12) (財) 石炭エネルギーセンター：石炭の利用状況，
<http://www.jcoal.or.jp/coalash/ash02.html>
- 13) (財) 石炭エネルギーセンター：石炭の利用状況，港湾工事における石炭灰混
合材料の有効利用ガイドライン，2011
- 14) (株) 三菱総合研究所：産業分類別の副産物（産業廃棄物・有価発生物）の発
生状況等に関する調査（平成23年度実績）報告書，p.77，2013.3
- 15) 鐵鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報（平成24年度実績），p.10，2013.7
- 16) 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，p34，
1970.6.20
- 17) 九州地方整備局：土木工事設計要項 第Ⅲ編 道路編，p.1-128，2011.7
- 18) 井 真宏：Fe石灰安定処理工法の開発と応用，2006.4
- 19) 阿部頼政，井清，溝口孝義：Fe石灰工法の発展と展開，舗装 Vol.28 No.9，pp.16-22，
1993.9
- 20) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技
術指針，p.2-96，2004.3.25
- 21) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技
術指針，p.2-99，2004.3.25
- 22) 独立行政法人 土木研究所：建設工事における他産業リサイクル材料利用技術
マニュアル，pp.21-22
- 23) 独立行政法人 国立環境研究所：コンクリート用骨材又は道路用等のスラグ類
に化学物質評価方法を導入する指針に関する検討会 総合報告書，2012.3
- 24) 環境省：土壌汚染対策，2013.4（改正）

- 25) 横山昌寛, 小林正几: フェロニッケルスラグのアルカリ骨材反応試験について, コンクリート工学年次論文報告集 11-1, pp.111-116, 1989
- 26) 秋山淳, 山本泰彦: フェロニッケルスラグ微粉末のアルカリシリカ反応抑制効果, コンクリート工学年次論文報告集 9-1, p.603, 1987
- 27) 加納陽輔, 秋葉正一, 栗谷川裕造, 栗栖一之, 久保和幸: 非鉄金属スラグの道路用骨材としての適用性に関する研究, 土木学会論文集G Vol.65 No.2, pp.130-142, 2009.6
- 28) 加納陽輔, 秋葉正一, 栗谷川裕造, 栗栖一之: 非鉄金属スラグのアスファルト混合物用細骨材としての利用について, 土木学会舗装工学論文集 Vol.12, pp.115-122, 2007
- 29) (財) 沿岸技術研究センター: 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), p.44, 2012.3
- 30) (財) 沿岸技術研究センター: 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), pp.37-38, 2012.3
- 31) (財) 沿岸技術研究センター: 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), pp.53-54, 2012.3
- 32) (財) 沿岸技術研究センター: 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), p1, 2012.3
- 33) (財) 沿岸技術研究センター: 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), p45, 2012.3
- 34) 港湾・空港等リサイクル推進協議会: 港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針, 参考資料-32, 2004.3.25

- 35) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針，参考資料-36，2004.3.25
- 36) 大太平洋金属株式会社 ホームページ，
<http://www.pacific-metals.co.jp/file/news/20130726083504-1.pdf>
- 37) 日本鉱業協会 ホームページ，
[http://www.kogyo-kyokai.gr.jp/image/C5ECCBCCA5D1A5CDA5EB\(B9C1CFD1CDD1C5D3\).pdf](http://www.kogyo-kyokai.gr.jp/image/C5ECCBCCA5D1A5CDA5EB(B9C1CFD1CDD1C5D3).pdf)
- 38) (財) 沿岸技術研究センター：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)， p152， 2012.3
- 39) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針，参考資料-34，2004.3.25
- 40) (財) 経済調査会：積算資料， p.191， 2013.6
- 41) (財) 建設物価調査会：建設物価， p.135， 2013.6
- 42) 青森県 農林水産部 林政課：農林土木事業基礎データ表 (資材単価)，
<http://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/nourin/noson/files/130410kouhyoutanka.pdf>
- 43) 鬼崎敏彦：国道207号舗装補修 (軟弱路床改良) 工事について，みち No.34， pp.26-34， 1984.6
- 44) 土質工学会：土質基礎工学ライブラリー10 日本の特殊土， p.90， 1988.10
- 45) 土質工学会：土質基礎工学ライブラリー10 日本の特殊土， p.129， 1988.10
- 46) (社) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説， p.1014， 2009.
- 47) 加藤芳郎：URBAN KUBOTA， (株) クボタ， No.13， p.12. 1976.7
- 48) 九州大学出版会：九州・沖縄の特殊土， p.93， 1983.7
- 49) 九州大学出版会：九州・沖縄の特殊土， pp.96-97， 1983.7

- 50) 九州大学出版会：九州・沖縄の特殊土， p97， 1983.7
- 51) 神谷貞吉，鈴木襲吉，神谷宏：黒ボクの安定処理について－試験による所見，土と基礎 No.19， pp.15-20， 1971.1
- 52) 久保田敬一，藤村尚，三嶋信雄：黒ボクの安定処理に関する実験報告，土と基礎 No.25， pp.25-30， 1977.1

第3章 改良材の検討

3.1 概説

改良材とは、土と混合し土の性質を改良する材料である。改良材には、土を化学的に安定処理する安定材、また吸水あるいは乾燥・粒度調整などにより物理的に改良する土質改良材等がある。土質改良材は、道路の盛土・路床・路盤、鉄道の盛土路盤、空港の路床改良、港湾の地盤改良、建物の基礎工事、河川の改修、住宅造成など広い分野で用いられ、改良目的も多岐にわたっている。改良材の選択¹⁾には、改良材の対象となる土質、改良目的、施工方法だけでなく、強度発現性、六価クロム溶出抑制などの環境面、経済性についても考慮しておく必要がある。表-3.1.1は改良材選択の目

表-3.1.1 各種改良材の選択の目安²⁾

固化材		セメント系 固化材	普通セメント	高炉セメント	石灰系 固化材	生石灰
土質分類・ 性状	砂質土	○	○	○	△	△
	粘性土	◎	○	○	◎	◎
	火山灰質粘性土	◎	○	△	◎	◎
	有機質土	◎	△	○	○	○
	高有機質土	◎	×	△	△	△
	含水比が液性限界以下	○	○	○	○	○
	含水比が液性限界以上	○	△	△	△	△
混合	スラリー状での使用	○	○	○	×	×
	粉体状での粘性土との混合性	△	△	△	○	○
効果	運搬等のための早期改質	△	△	△	○	◎
	初期強度	○	△	△	○	△
	長期強度	○	○	○	○	○

※◎：最適 ○：適 △：やや適 ×：不適

安の一例である。

一方、前章までに述べたように、多くの産業副産物が港湾や地盤、道路などに再利用されているのに対し、未だJIS規格や指針などが確立していない非鉄金属スラグ、特にフェロニッケルスラグの微粉末（以下、FNS粉）は、用途がなくストックされているのが現状である。

本章では、FNS粉の微粉末単体だけでは不足するセメンテーション効果³⁾を補うため、粘性土（火山灰質粘性土）に改良効果があり、六価クロム溶出試験の対象外である消石灰（以下、石灰）をFNS粉に混合した材料（以下、FNS石灰）が改良材としての有効性を発揮できるか否かについて検討した。それとともに、FNS石灰の微視的構造の観察を行い産業副産物の微粉末と石灰との結合性についても検討した。また、微粉酸化鉄（以下、Fe粉）についても同様の検討や観察を行い、これまで経験や実績によってのみ裏付けされていたFe石灰について、その改良過程のメカニズムを明らかにした⁴⁾。

3.2 締固めによる改良材の工学的性質の評価

本節では、産業副産物の微粉末（FNS粉およびFe粉）の改良材としての適用の可否を検討するにあたり、微粉末単体での物理的性質を確認するとともに、FNS粉およびFe粉に石灰を混合したFNS石灰およびFe石灰の力学特性や工学的性質について検討した。

3.2.1 FNS石灰の締固め特性

一般にFNSは、表-3.2.1に示すようにシリカ（ SiO_2 ）、マグネシア（ MgO ）を主成分として、 CaO 、 FeO 、 Al_2O_3 などを含有し、極めて安定な結晶構造である非鉄金属スラグである。本実験に使用したFNS粉は、表-3.2.2に示すとおりでありFNSと化学成分についてほとんど変わらない材料である。

なお、石灰については、日本工業規格工業用石灰（JIS R 9001）⁵⁾の特号の消石灰を使用した。図-3.2.1にこれらの材料の粒径加積曲線を、表-3.2.2にそれぞれの密度を示す。

表-3.2.1 FNS粉の化学成分

SiO_2	MgO	FeO	CaO	その他（ $\text{Al}_2\text{O}_3, \text{S}, \text{Ni}$ 等）
53.6%	31.7%	6.7%	2.4%	5.6%

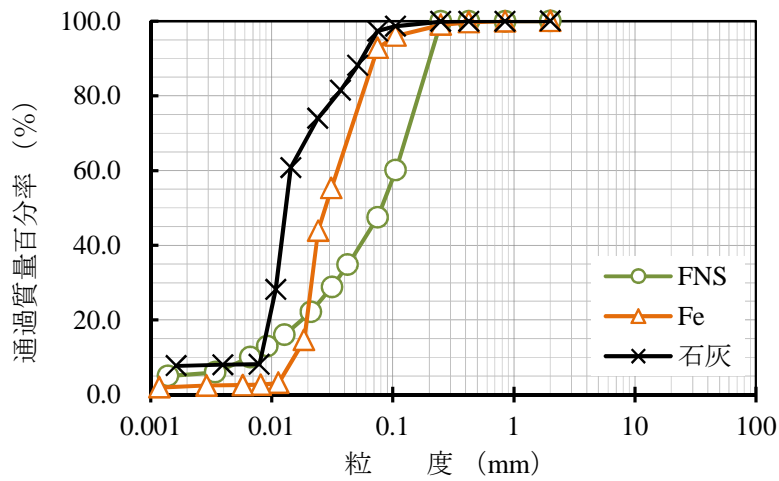


図-3.2.1 FNS粉・Fe粉・石灰の粒径加積曲線

表-3.2.2 使用材料の密度

FNS粉	Fe粉	石灰
3.004g/cm ³	4.009g/cm ³	2.611g/cm ³

微粉末の混合割合が締固め特性に与える影響を把握するために、突固めによる締固め試験 (JIS A 1210)⁶⁾ のE-c法により明らかにした。FNS粉と石灰との混合割合は、乾燥重量比で 20%、40%、60%、80%の 4 パターンを設定した (以下、例えばFNSが 20%で石灰が 80%の場合の混合物は、FNS20+石灰 80 と表記)。なお、実験は、この 4 パターンに加え、比較として石灰 100%も行い、合計 5 パターンで実施した。

図-3.2.2 は、締固め試験より求めたFNS石灰の締固め曲線である。これより、FNS粉の混合割合が大きくなると締固め曲線の傾向が左上がりになっており、FNS石灰の微粉末の混合割合が多いほど乾燥密度は増え、最適含水比は減ることが確認できた。これは、石灰に比べ密度が高いFNS粉が増すことによる結果と考えられる。

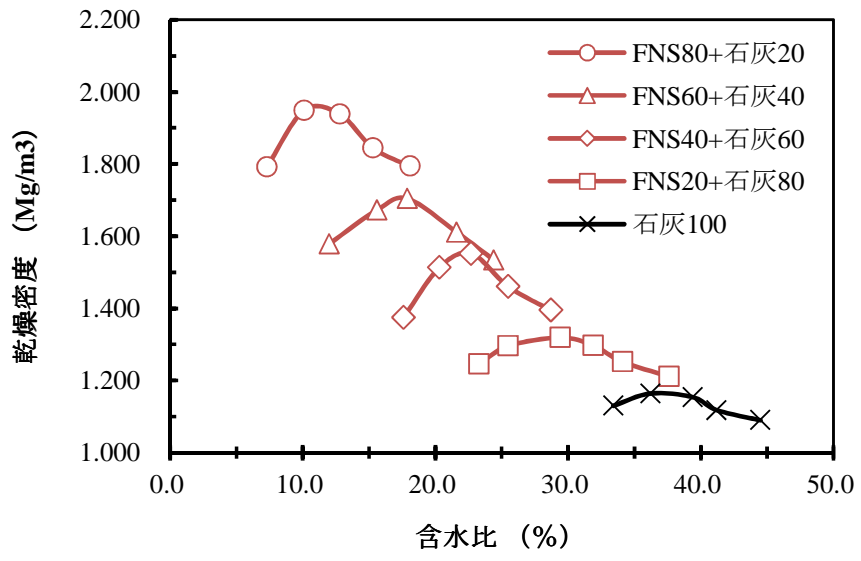


図-3.2.2 FNS石灰の締固め曲線

3.2.2 Fe石灰の締固め特性

本実験で使用したFe粉は九州地区の製鉄所の溶鉱炉や転炉部で発生する集塵ダストで Fe_2O_3 、 Al_2O_3 を成分とした粒径が $1/1000\text{mm}$ 以下の微粉酸化鉄を試料とした。なお、石灰については、FNS石灰同様の消石灰を使用し、前述した図-3.2.1にこれらの材料の粒径加積曲線を、表-3.2.1に密度を示す。また、本実験の配合割合などの条件は、前述したFNS石灰同様の5パターンとした。

図-3.2.3は、締固め試験より求めたFe石灰の締固め曲線である。石灰に比べ密度が高いFe粉が増すことでFNS石灰同様の傾向が見られた。

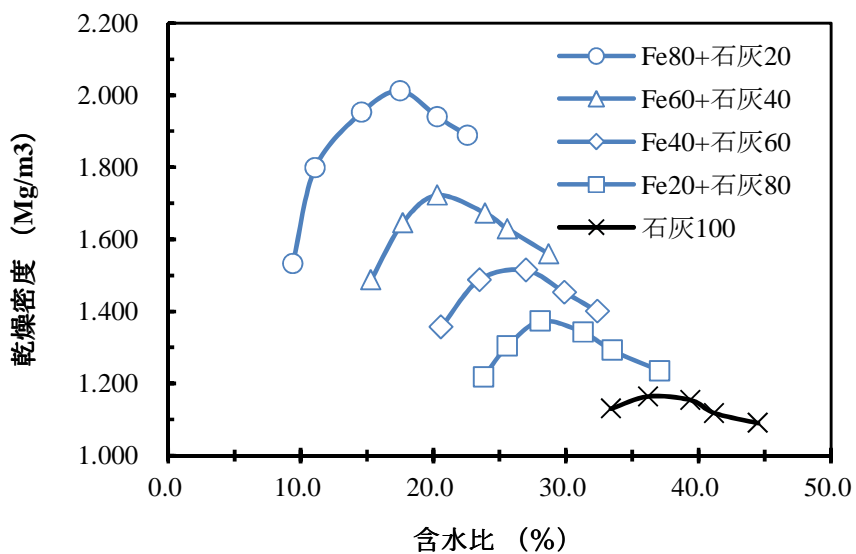


図-3.2.3 Fe石灰の締固め曲線

3.3 改良材の一軸圧縮試験による強度分析

本節では、一軸圧縮試験の結果から産業副産物の微粉末が強度特性に与える影響と、微粉末と石灰の最適な混合割合について検討した。

3.3.1 試験概要

一軸圧縮試験は、JIS A 1216⁷⁾ に準拠してφ50mm×100mmの試験供試体を作製し実施した。なお、供試体は締固め試験結果における最適含水比および最大乾燥密度となるように作製した。試験条件として、養生日数は、0日（供試体作製後20時間）、7日（6日室内養生、1日水浸養生）および28日（7日養生の4サイクル）とし、養生温度は、室内・水浸ともに20±3℃とした。なお、養生方法は舗装調査・試験法便覧⁸⁾の安定処理混合物の一軸圧縮試験法を参考に室内養生および水浸養生を決定した。また、強度特性は一般に水分量で大きく影響を受けることも予想されるため、水分量を変化させた場合の一軸圧縮試験も行った。

3.3.2 最適含水比時の改良材の強度発現効果の比較

最適含水比（以下、 w_{opt} ）において、FNS石灰の一軸圧縮強さを図-3.3.1に、Fe石灰の一軸圧縮強さを図-3.3.2に示す。材齢0日と材齢7日を比較するとFNS粉の割合が多い場合には、材齢7日強度が材齢0日強度より低い傾向が見受けられた。これは、反応が進んでいく過程で水浸させたことで水による影響を受け軟弱化し、また石灰（ Ca(OH)_2 ）に対してFNS粉に含有するシリカ（ SiO_2 ）とポゾラン反応による硬化が早期に発揮されなかったことが原因と考えられる。つぎに、材齢28日の強度は、FNS粉と石灰の割合に関係なく、石灰100とは反対に材齢0日および材齢7日に比べ高くなり、FNS石灰は長期にわたり強度発現効果が発揮できることが確認できた。また、

FNS粉と石灰の割合に対する強度発現の傾向は、FNS40+石灰 60 をピークに凸型となり、最適な混合割合が存在することがわかった。

一方、Fe石灰の場合の強度は、材齢に関わらずFe粉の割合が少なくなるとともに低下している。また養生日数で比較すると、FNS石灰同様、材齢 28 日の強度が最も高く、さらにFe粉の割合が多いものほどその傾向は顕著となり、Fe粉の混合割合が高いほど長期の強度発現効果が期待できる結果となった。

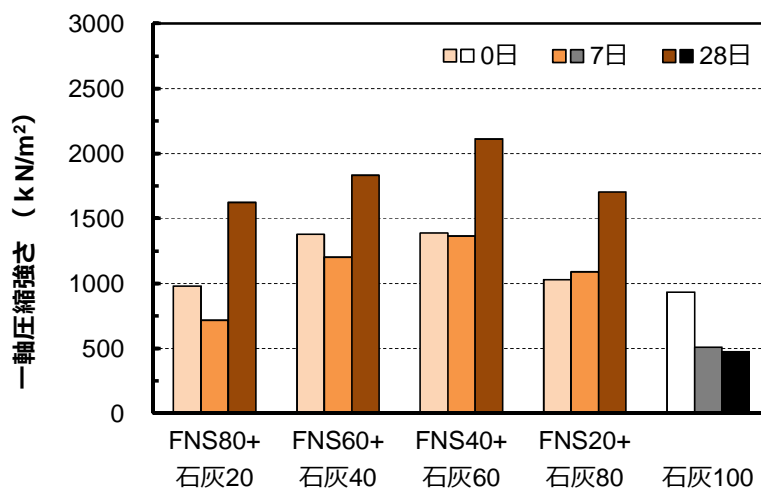


図-3.3.1 FNS石灰の最適含水比における一軸圧縮強さ

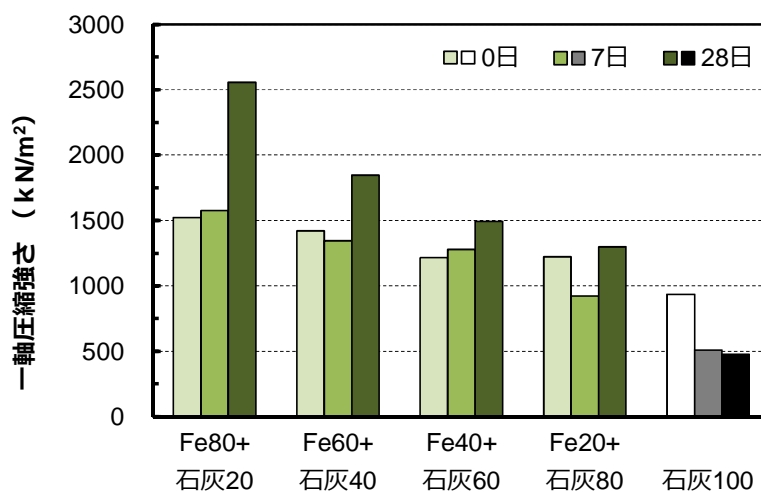


図-3.3.2 Fe石灰の最適含水比における一軸圧縮強さ

3.3.3 水分量の影響による改良材の強度発現効果の比較

w_{opt} の一軸圧縮強さが最も高かったFNS40+石灰 60 およびFNSの割合を減らしたFNS20+石灰 80 において、 $w_{opt}-6\%$ 、 $w_{opt}-3\%$ 、 w_{opt} および $w_{opt}+3\%$ で、締固め特性の確認時と同じエネルギーで作製した供試体による一軸圧縮強さを図-3.3.3 に示す。FNSの混合割合に関係なく $w_{opt}+3\%$ の一軸圧縮強さは、他の含水比の場合に比べ弱い値を示し、 $w_{opt}-3\%$ および w_{opt} の材齢 28 日の一軸圧縮強さは、材齢 0 日に比べ大きく強度増進が見られた。また、FNS40+石灰 60 の方が一軸圧縮強さは大きくなった。このことから、FNS石灰の強度発現が最も発揮されるのは、含水比が概ね w_{opt} であり、混合割合はFNS40+石灰 60 であることが確認できた。

FNS石灰と同じ混合割合のFe石灰における $w_{opt}-3\%$ 、 w_{opt} 、 $w_{opt}+3\%$ および $w_{opt}+6\%$ の一軸圧縮強さを図-3.3.4 に示す。 $w_{opt}-3\%$ および w_{opt} の一軸圧縮強さは、材齢 0 日と材齢 28 日を比べると強度増進が見られたが、 w_{opt} より高い含水比での一軸圧縮強さは、減少傾向が見られた。なお、これらの傾向は、Fe粉の割合が多いほど顕著となった。このことから、Fe石灰の強度発現が最も発揮されるのは、FNS石灰同様、含水比が w_{opt} から w_{opt} より乾燥側であることが確認できた。

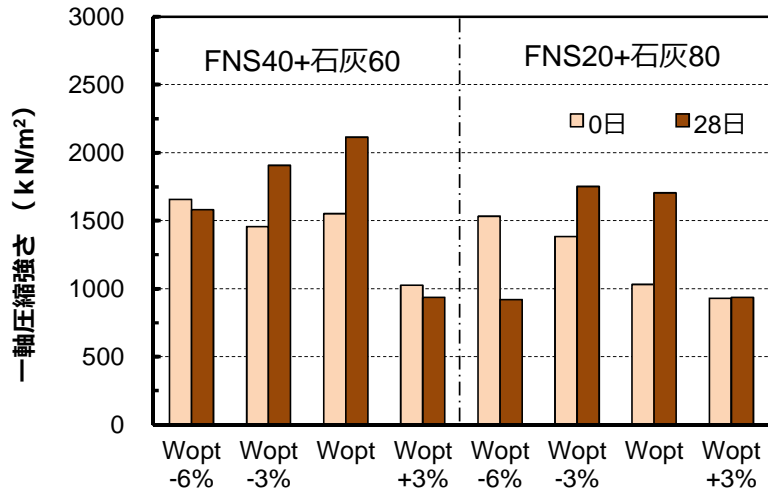


図-3.3.3 水分量を変化させたFNS石灰の一軸圧縮強さ

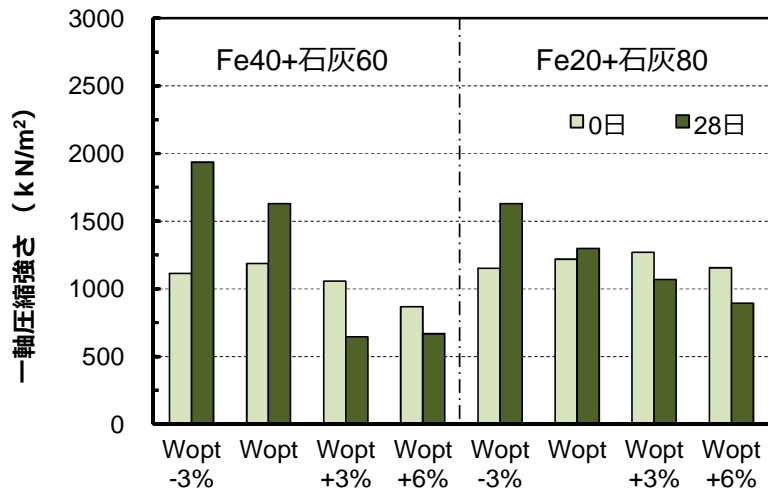


図-3.3.4 水分量を変化させたFe石灰の一軸圧縮強さ

3.4 走査電子顕微鏡（SEM）による微視的構造の観察

本節では、走査電子顕微鏡（SEM）によりFNS石灰およびFe石灰の微視的構造の観察を行うことで産業副産物の微粉末と石灰との結合性について検討した。SEMは試料表面から発生する二次電子により走査像を形成する装置で、手軽に試料表面の微細な形態や含まれる元素の情報を得る方法の手段として利用される。土木分野ではコンクリートの形態観察において多く用いられており、ポゾラン反応による硬化⁹⁾による硬化過程や針状結晶の生成形成の観察などに用いられている。

SEM用のサンプルは、前節と同一条件で締固め養生した供試体を電気炉を60℃に設定して緩やかに乾燥させた後、およそ1辺5mmの立方体に成形し作製した。観察時の加速電圧は15kVとした。SEMは日本電子株式会社製の卓上走査電子顕微鏡JCM-6000を用いた。

写真-3.4.1～写真-3.4.7は W_{opt} および水分量を変化させた場合の材齢0日、写真-3.4.8～写真-3.4.14は W_{opt} および水分量を変化させた場合の材齢7日、写真-3.4.15～写真-3.4.21は W_{opt} および水分量を変化させた場合の材齢28日におけるFNS石灰、Fe石灰および石灰単体におけるSEM画像（以下、画像と称す）を示す。

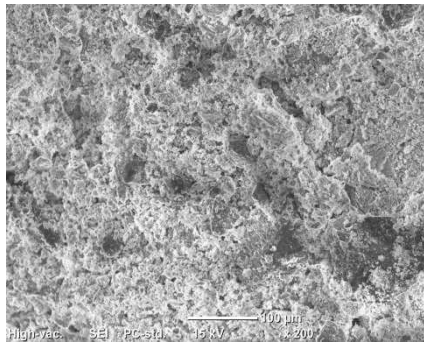
材齢0日では、含水量に関わらず、FNS粉、Fe粉や石灰の粒子が点在しているのが見受けられる。特に、1000倍や2000倍の倍率の画像で、それらが容易に確認できる（写真-3.4.1～写真-3.4.7）。

材齢7日のFNS石灰では、FNS粉の少ないFNS40+石灰60やFNS20+石灰80で材齢0日に比べ細かい粒子が少なくなり、粒子間での結合が見られ粒子間隙が狭くなる様子が確認できる（写真-3.4.8(c)および(d)）。また、FNS粉の多いFNS石灰では、粒子間での結合が見られず、材齢0日と同様、粒子の点在が見受けられる。

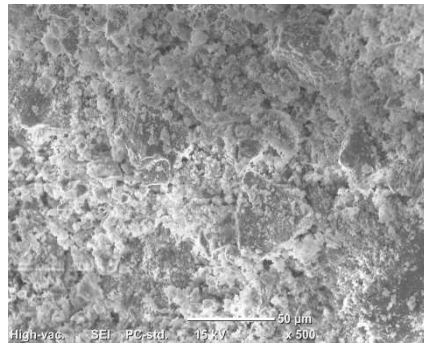
材齢 7 日のFe石灰については、FNS石灰同様、Fe粉の少ないFe40+石灰 60 やFe20+石灰 80 で材齢 0 日に比べ細かい粒子が少なくなり、粒子間での結合が見られ粒子間隙が狭くなる様子が確認できる（写真-3.4.8 (c) および (d)）。また、Fe粉の多いFe石灰では、粒子間での結合が見られず、材齢 0 日と同様、粒子の点在が見受けられる（写真-3.4.13 (c) および写真-3.4.14 (c)）。

材齢 28 日のFNS石灰では、含水量に関わらず粒子が結合し粒子間隙が狭くなりゲル状になっていることが確認できた。特に、写真-3.4.15, 写真-3.4.18, 写真-3.4.19 の画像で、それらが容易に確認できる。また、材齢 28 日のFe石灰は、Fe粉の比較的少ないFe20+石灰 80, Fe40+石灰 60 やFe60+石灰 40 において、粒子間隔はFNS石灰に比べ広い印象を受け、Fe粉の多いFe80+石灰 20 では、広範囲でゲル状になった粒子の結合が確認できた（写真-3.4.16 (a)）。

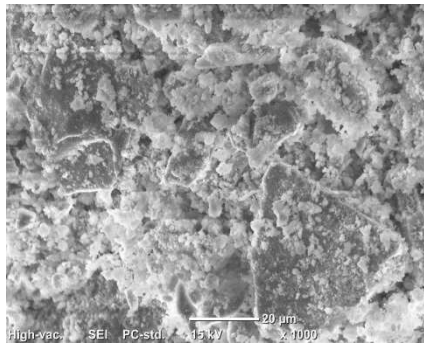
これらの画像より、FNS石灰およびFe石灰ともに石灰の割合が比較的多い場合は材齢 7 日で、石灰の割合が少ない場合においても経時的に反応が進行し材齢 28 日で粒子が結合し粒子間隙が狭くなりゲル状になっていることが確認できた。これは、FNS粉に含まれているシリカ (SiO_2) と石灰に含まれている ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) が化学的に結合するポゾラン反応によるものと考えられる。前節で材齢 7 日に比べ材齢 28 日で一軸圧縮強さが増進した要因は、このポゾラン反応によるものと考えられる。



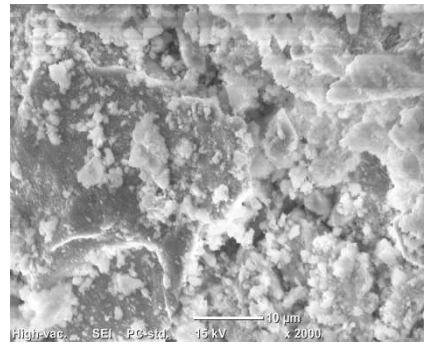
200 倍



500 倍

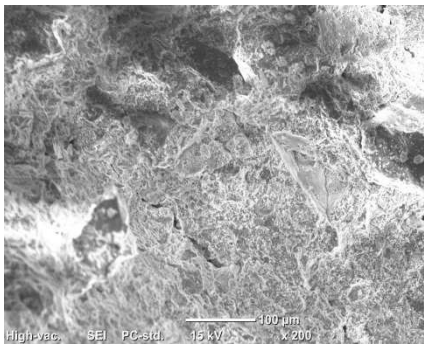


1000 倍

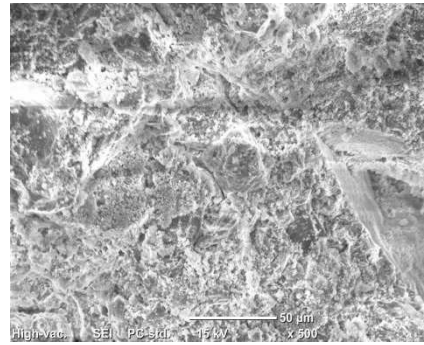


2000 倍

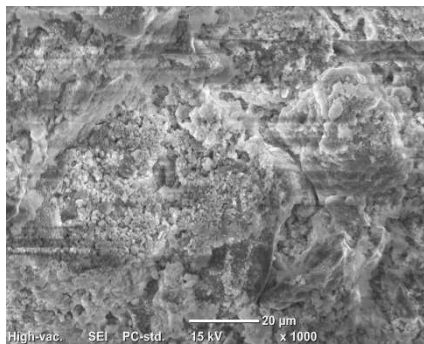
写真-3.4.1 (a) FNS80+石灰20 (w_{opt} ・材齡0日)



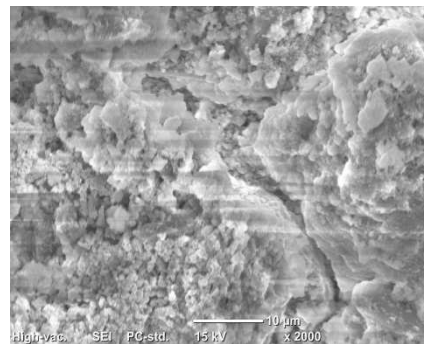
200 倍



500 倍

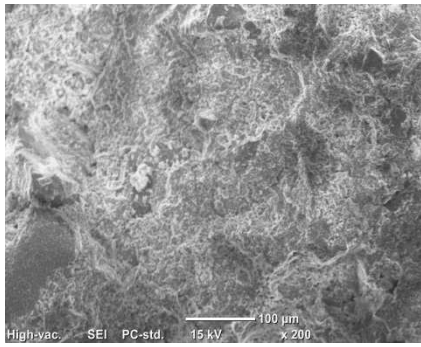


1000 倍

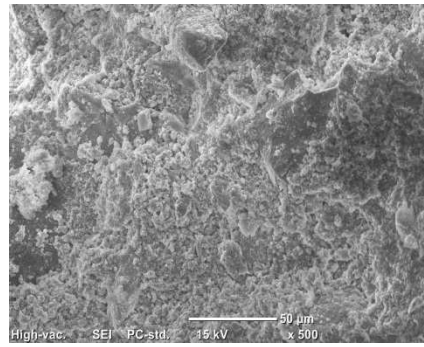


2000 倍

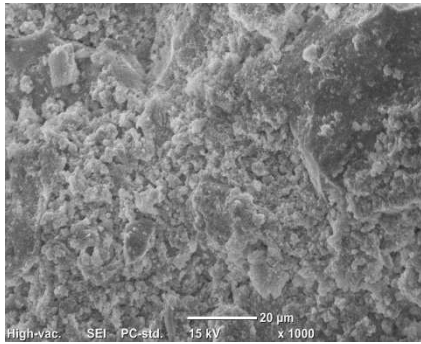
写真-3.4.1 (b) FNS60+石灰40 (w_{opt} ・材齡0日)



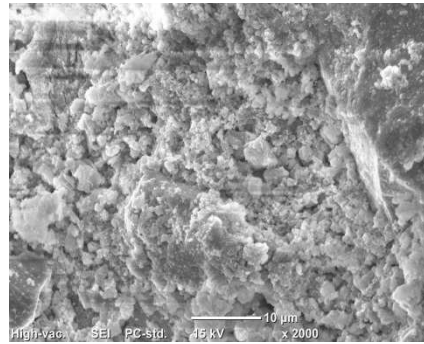
200 倍



500 倍

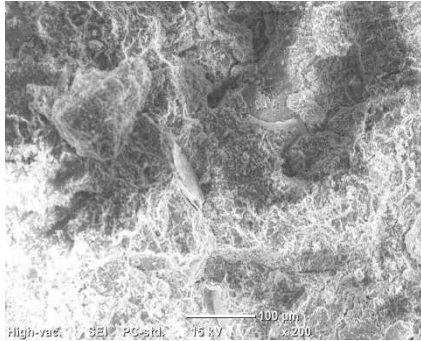


1000 倍

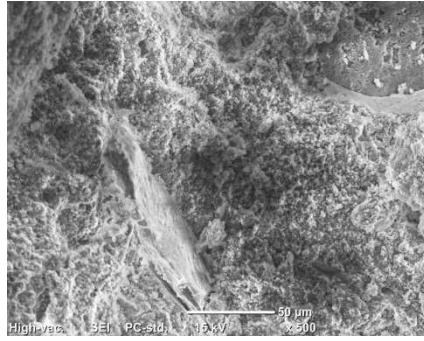


2000 倍

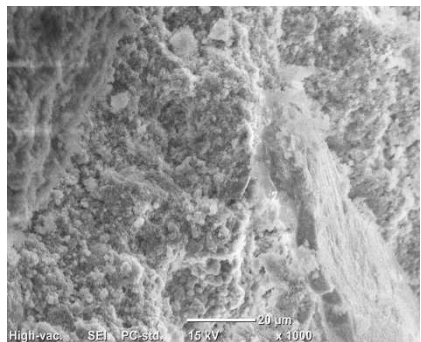
写真-3.4.1 (c) FNS40+石灰60 (w_{opt} ・材齡0日)



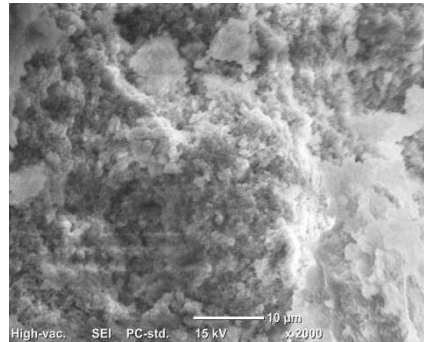
200 倍



500 倍

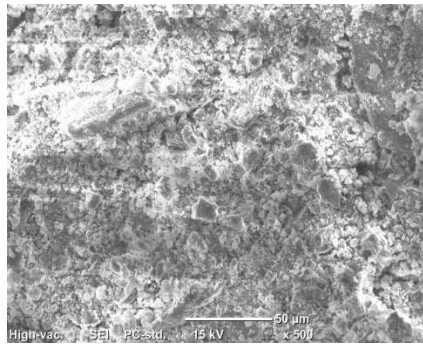


1000 倍

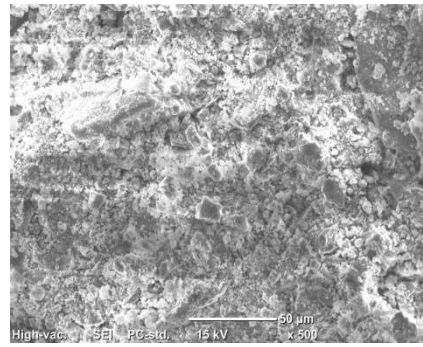


2000 倍

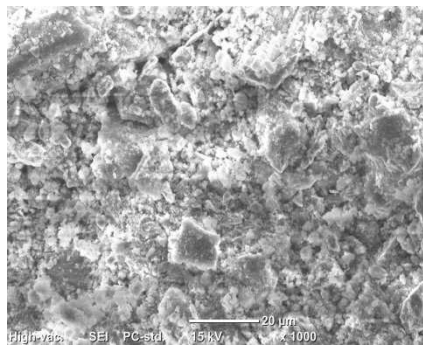
写真-3.4.1 (d) FNS20+石灰80 (w_{opt} ・材齡0日)



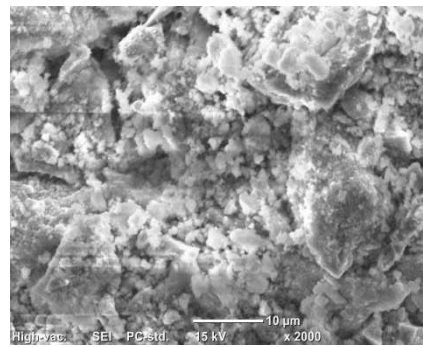
200 倍



500 倍

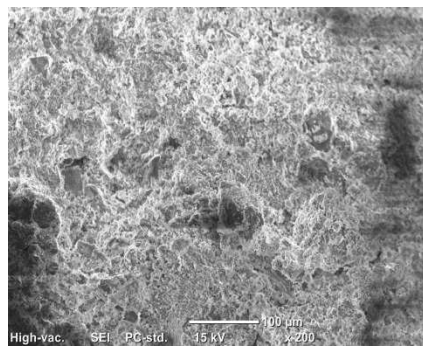


1000 倍

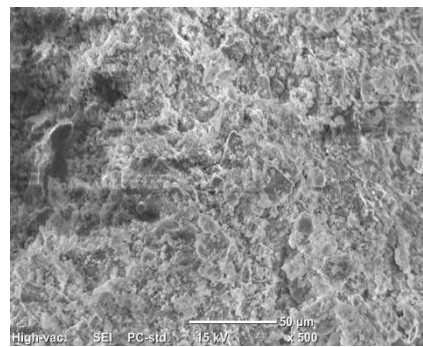


2000 倍

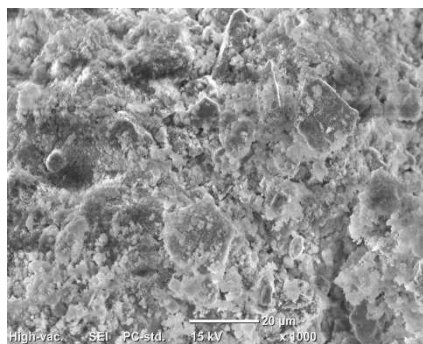
写真-3.4.2 (a) Fe80+石灰20 (w_{opt}・材齡0日)



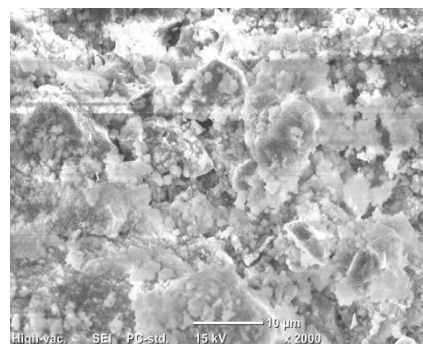
200 倍



500 倍

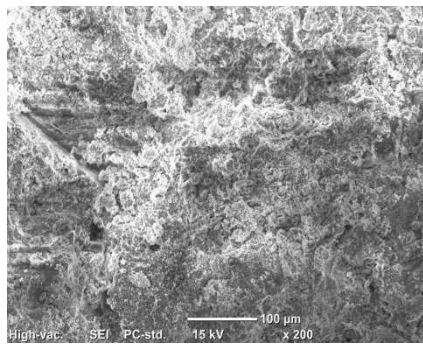


1000 倍

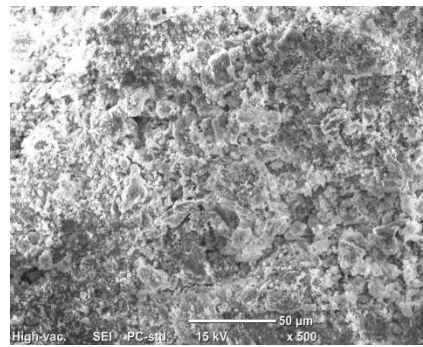


2000 倍

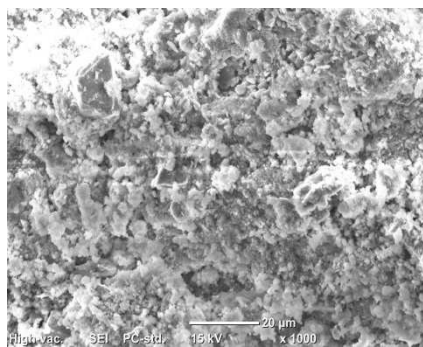
写真-3.4.2 (b) Fe60+石灰40 (w_{opt}・材齡0日)



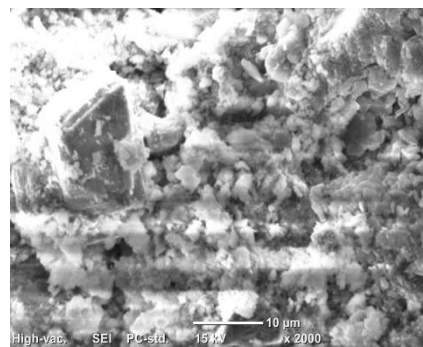
200 倍



500 倍

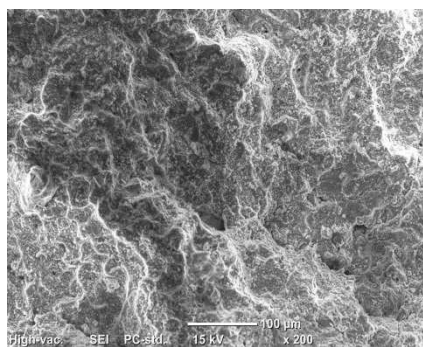


1000 倍

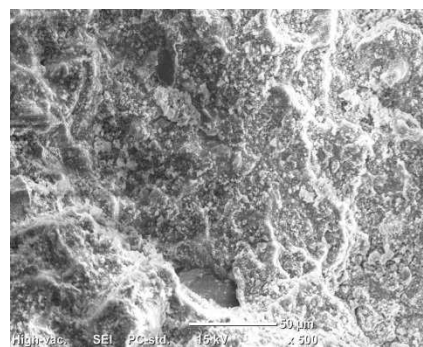


2000 倍

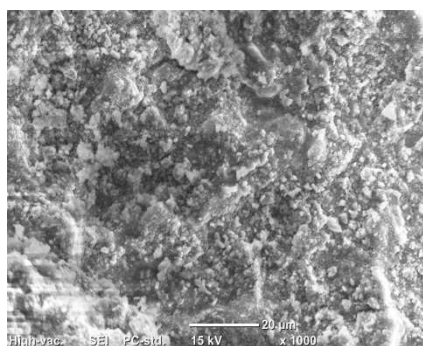
写真-3.4.2 (c) Fe40+石灰60 (w_{opt} ・材齡0日)



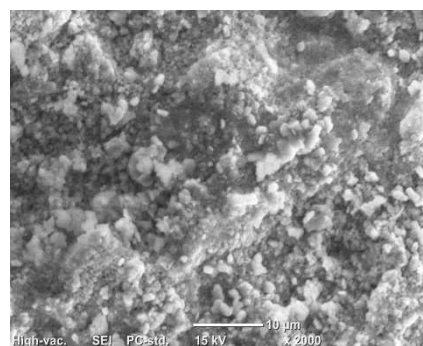
200 倍



500 倍

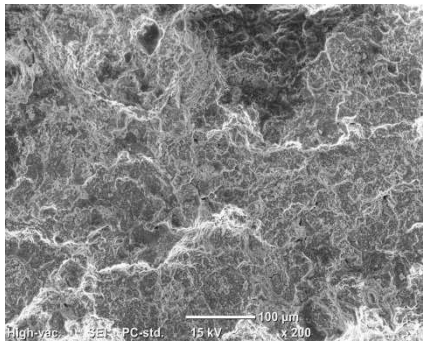


1000 倍

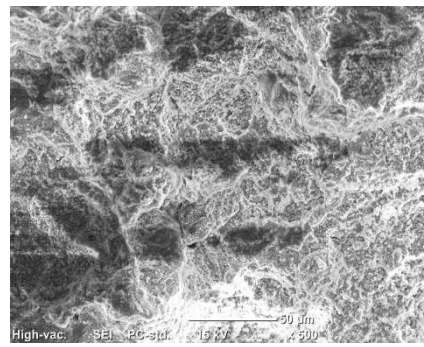


2000 倍

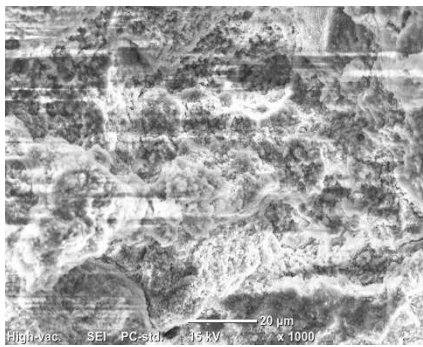
写真-3.4.2 (d) Fe20+石灰80 (w_{opt} ・材齡0日)



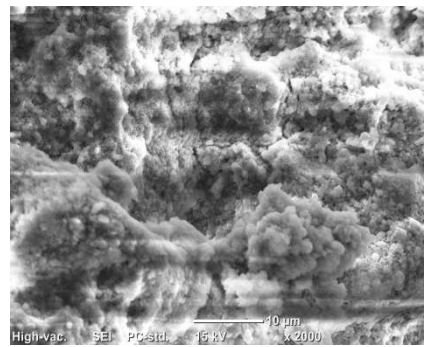
200 倍



500 倍

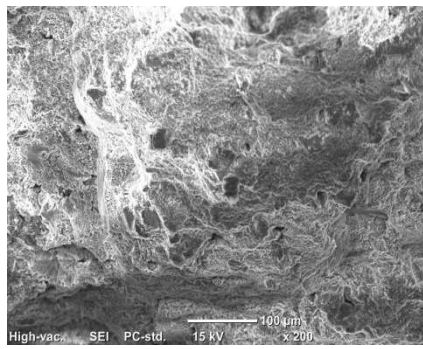


1000 倍

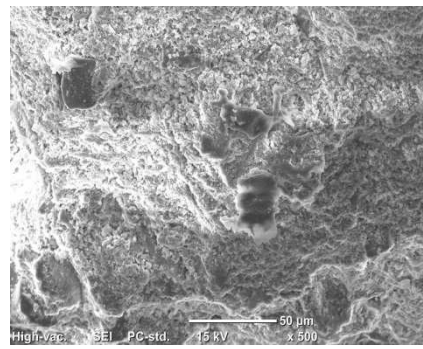


2000 倍

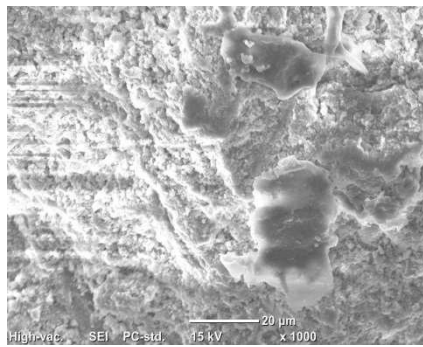
写真-3.4.3 石灰100 (w_{opt}・材齡0日)



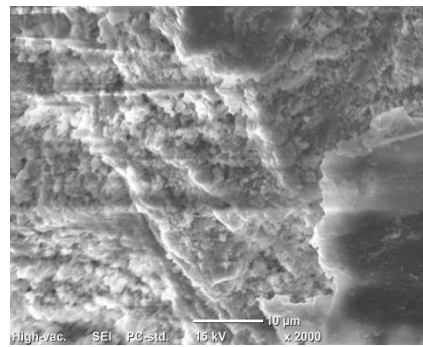
200 倍



500 倍

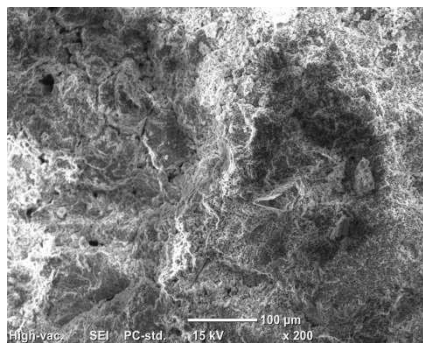


1000 倍

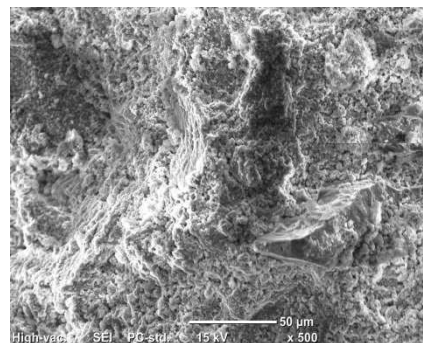


2000 倍

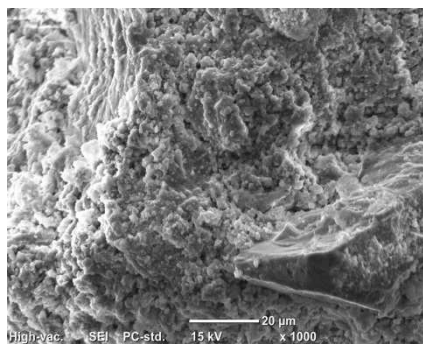
写真-3.4.4 (c) FNS40+石灰60 ($w_{opt} = 3\%$ · 材齡0日)



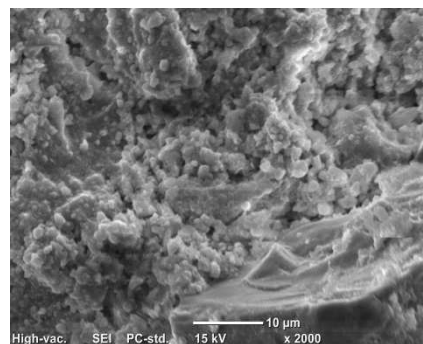
200 倍



500 倍

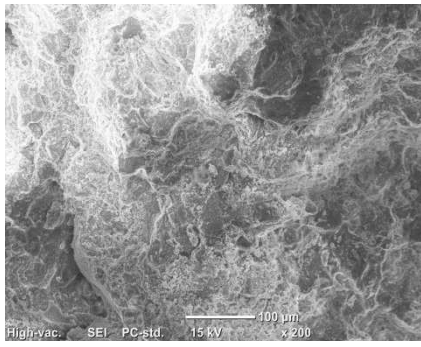


1000 倍

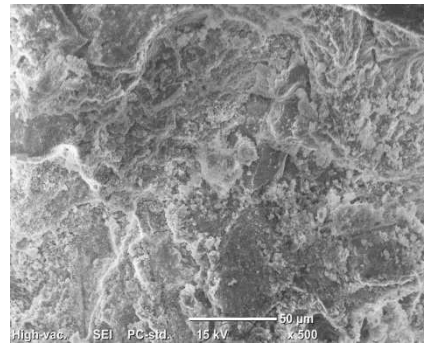


2000 倍

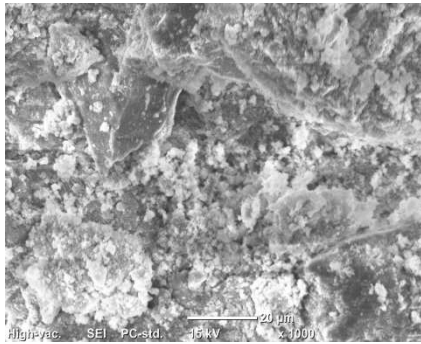
写真-3.4.4 (d) FNS20+石灰80 ($w_{opt} = 3\%$ · 材齡0日)



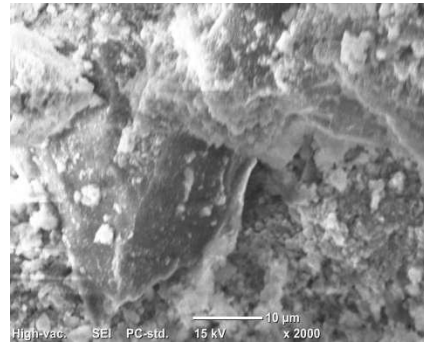
200 倍



500 倍

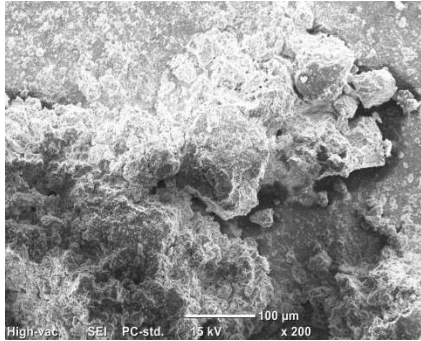


1000 倍

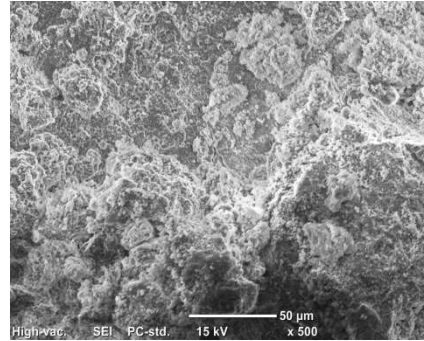


2000 倍

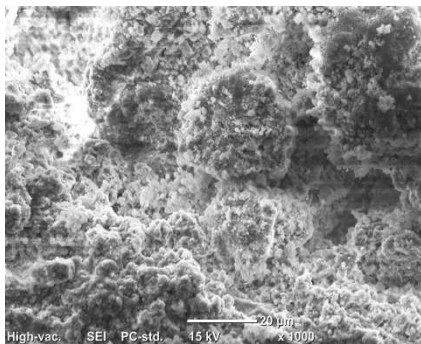
写真-3.4.5 (c) FNS40+石灰60 ($w_{opt} + 3\%$ ・材齡0日)



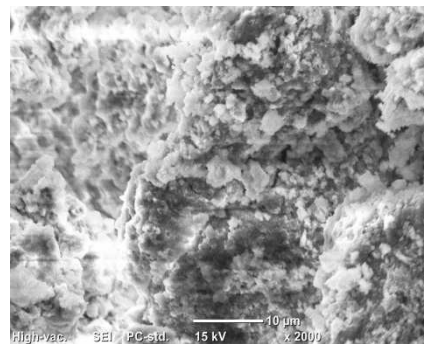
200 倍



500 倍

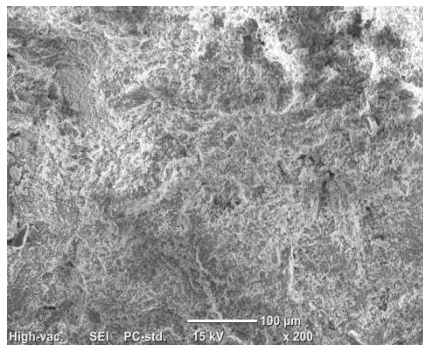


1000 倍

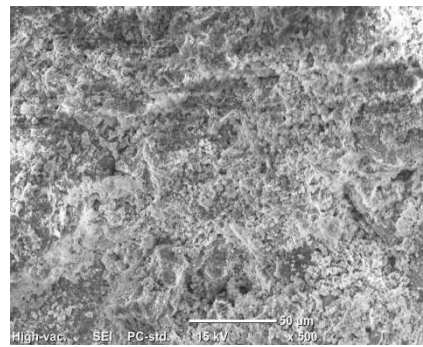


2000 倍

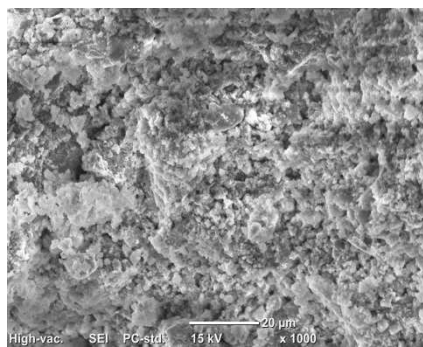
写真-3.4.5 (d) FNS20+石灰80 ($w_{opt} + 3\%$ ・材齡0日)



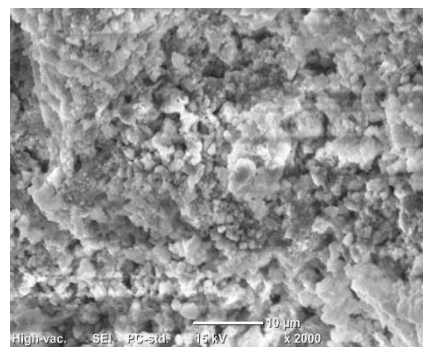
200 倍



500 倍

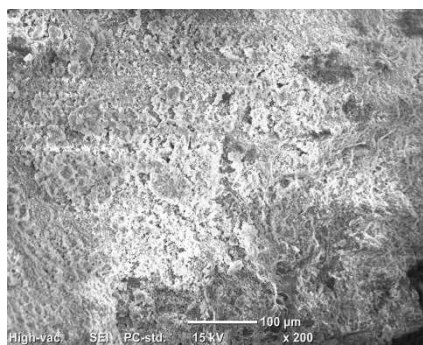


1000 倍

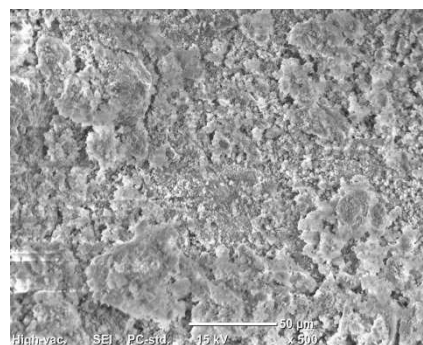


2000 倍

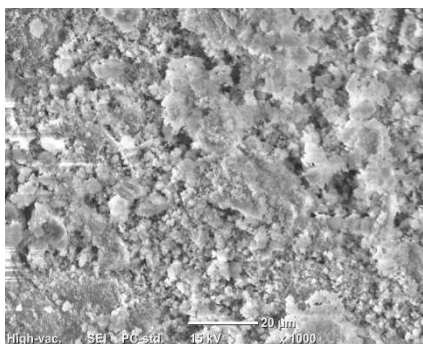
写真-3.4.6 (c) Fe40+石灰60 ($w_{opt}=3\%$ ・材齡0日)



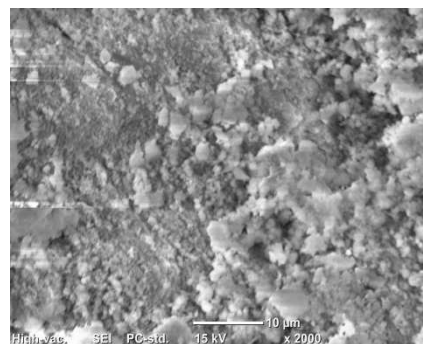
200 倍



500 倍

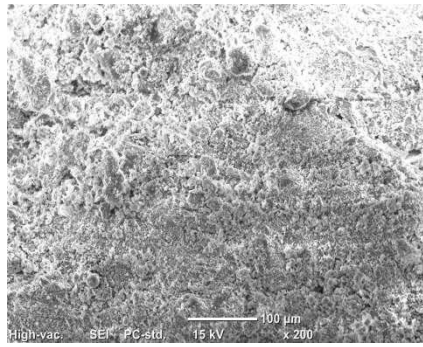


1000 倍

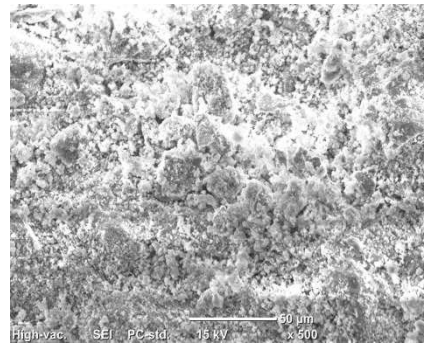


2000 倍

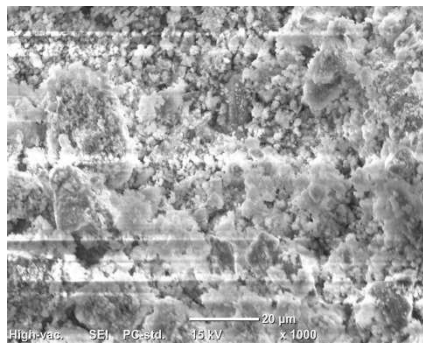
写真-3.4.6 (d) Fe20+石灰80 ($w_{opt}=3\%$ ・材齡0日)



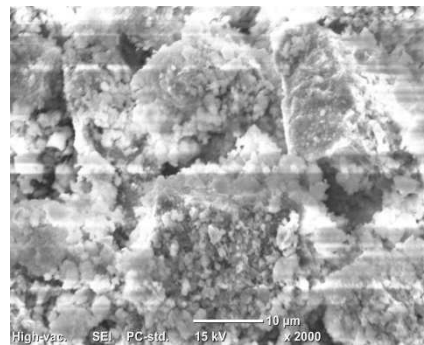
200 倍



500 倍

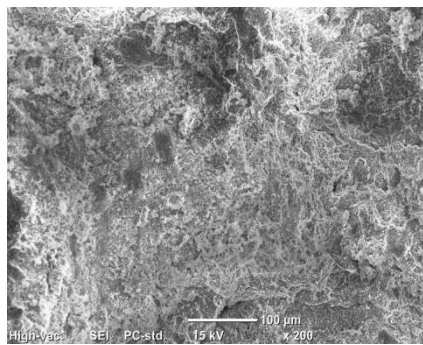


1000 倍

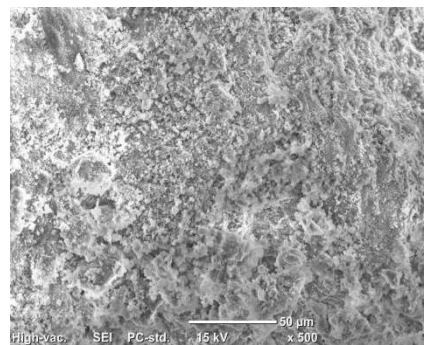


2000 倍

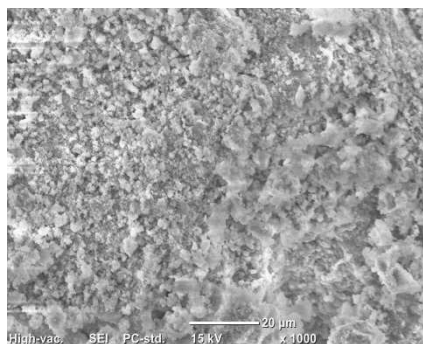
写真-3.4.7 (c) Fe40+石灰60 ($w_{opt}+3\%$ ・材齡0日)



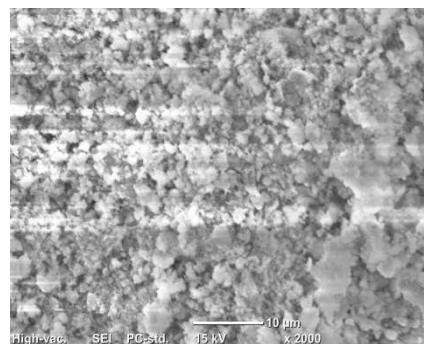
200 倍



500 倍

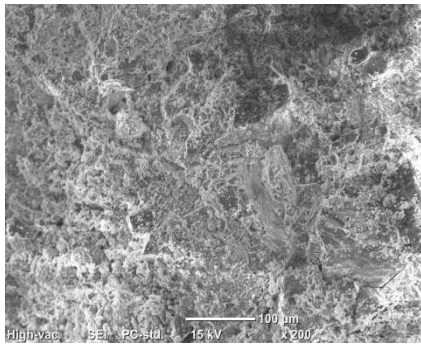


1000 倍

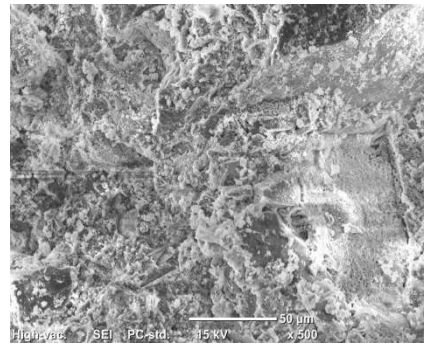


2000 倍

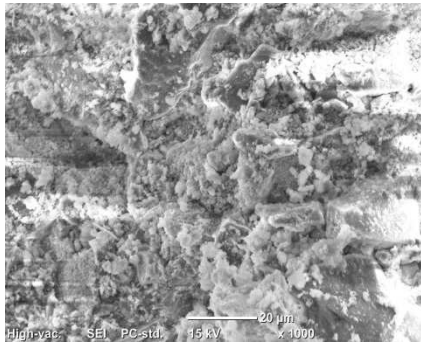
写真-3.4.7 (d) Fe20+石灰80 ($w_{opt}+3\%$ ・材齡0日)



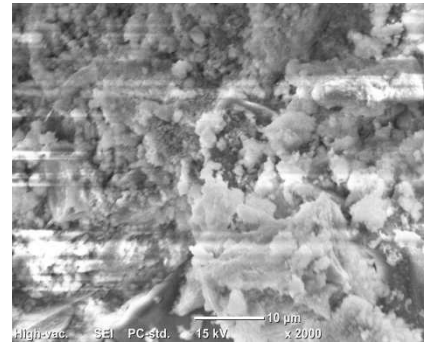
200 倍



500 倍

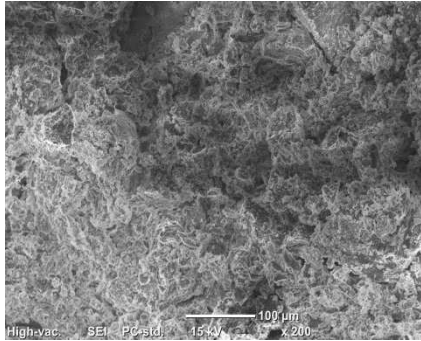


1000 倍

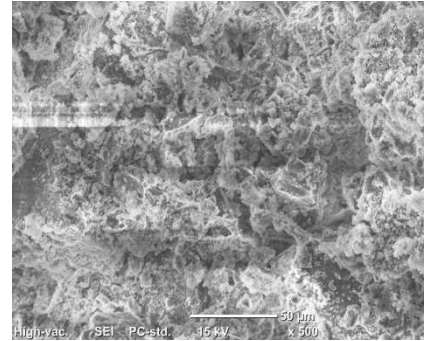


2000 倍

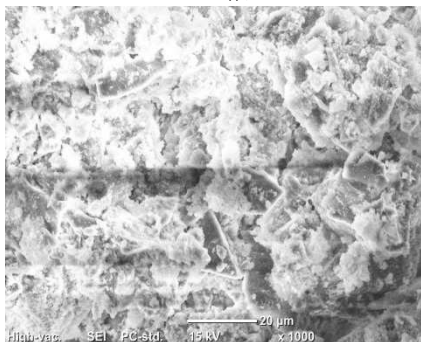
写真-3.4.8 (a) FNS80+石灰20 (w_{opt} ・材齡7日)



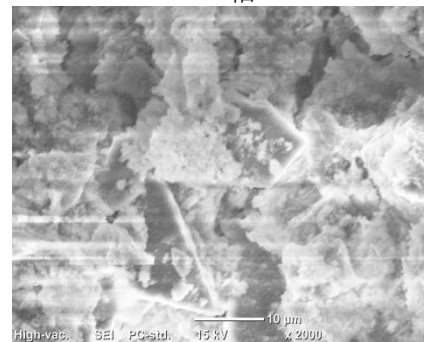
200 倍



500 倍

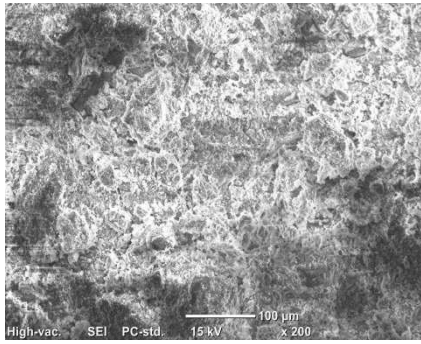


1000 倍

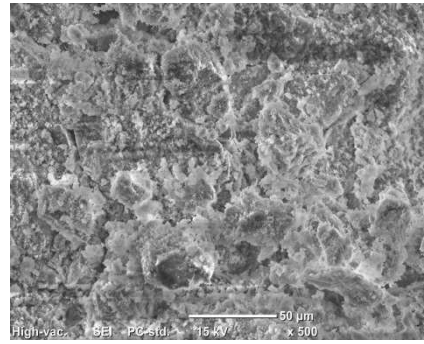


2000 倍

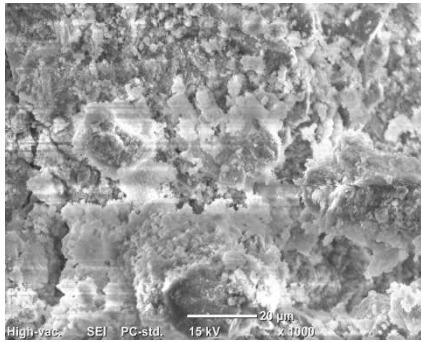
写真-3.4.8 (b) FNS60+石灰40 (w_{opt} ・材齡7日)



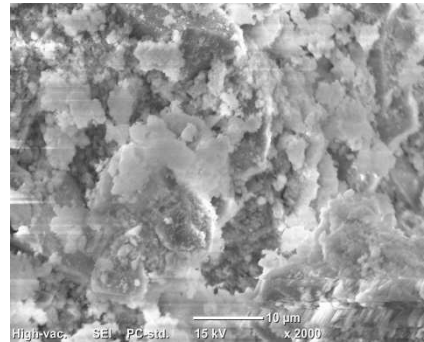
200 倍



500 倍

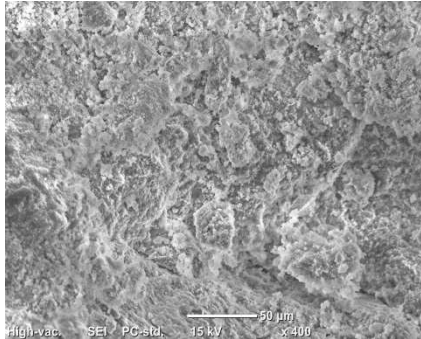


1000 倍

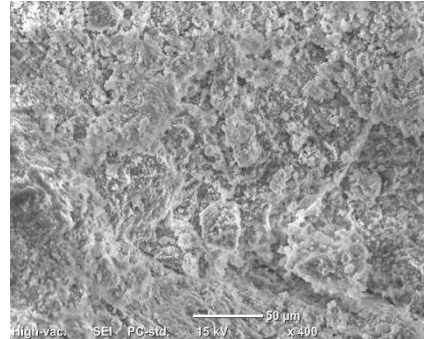


2000 倍

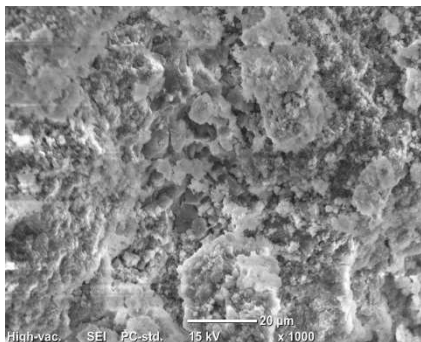
写真-3.4.8 (c) FNS40+石灰60 (w_{opt} ・材齡7日)



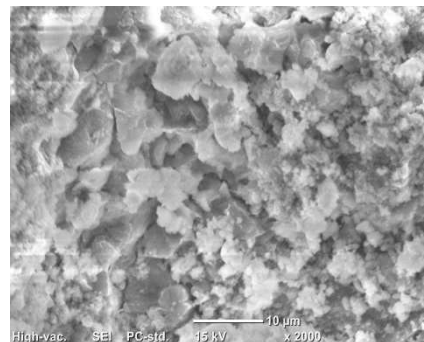
200 倍



500 倍

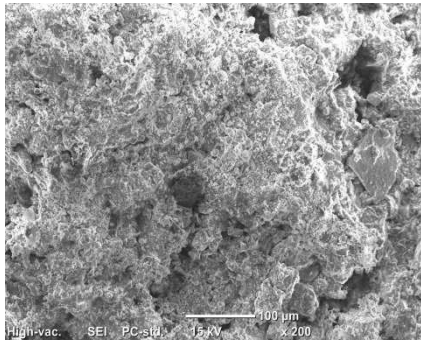


1000 倍

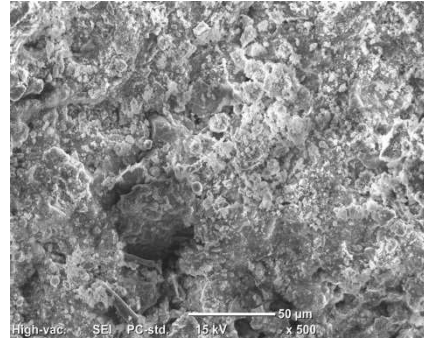


2000 倍

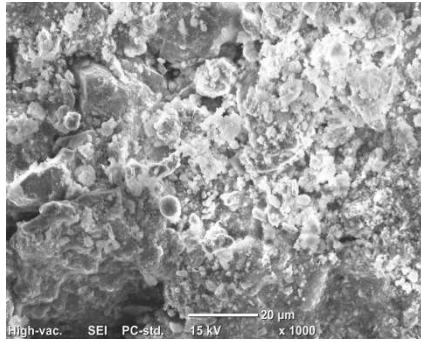
写真-3.4.8 (d) FNS20+石灰80 (w_{opt} ・材齡7日)



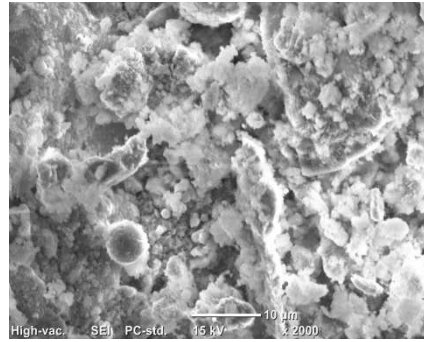
200 倍



500 倍

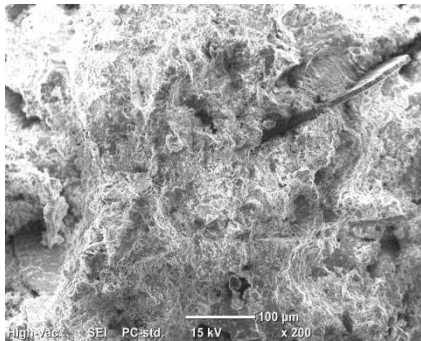


1000 倍

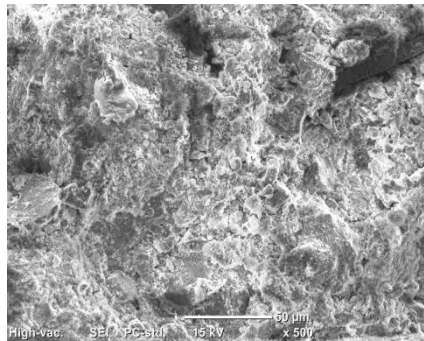


2000 倍

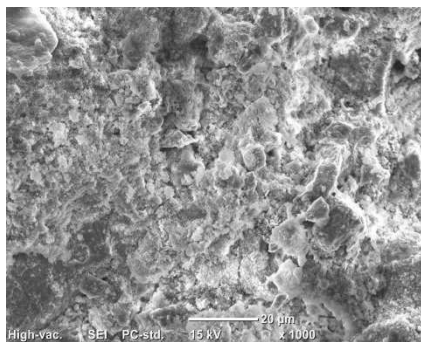
写真-3.4.9 (a) Fe80+石灰20 (w_{opt} ・材齡7日)



200 倍



500 倍

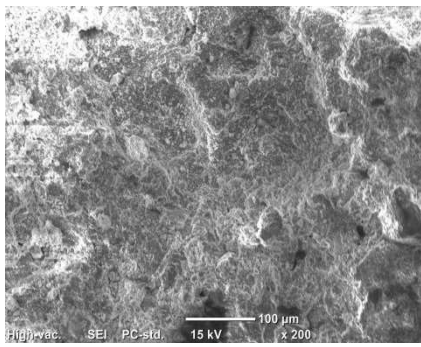


1000 倍

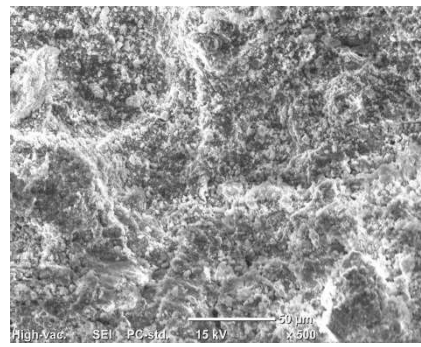


2000 倍

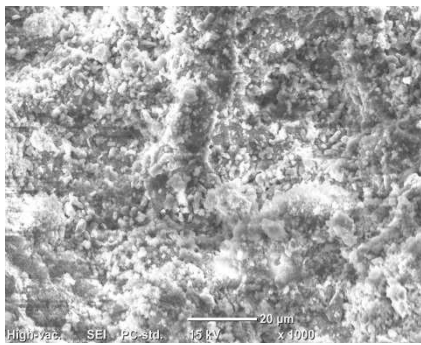
写真-3.4.9 (b) Fe60+石灰40 (w_{opt} ・材齡7日)



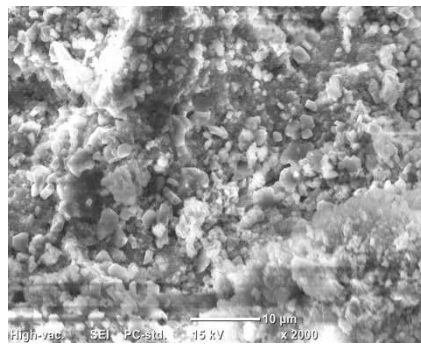
200 倍



500 倍

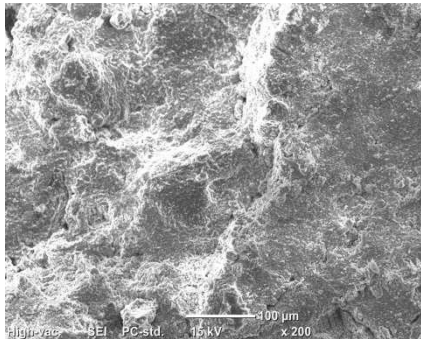


1000 倍

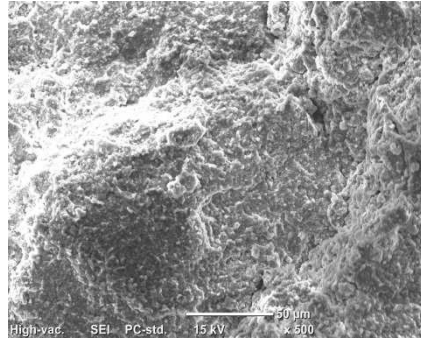


2000 倍

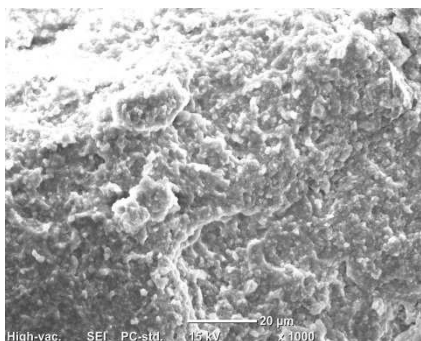
写真-3.4.9 (c) Fe40+石灰60 (w_{opt} ・材齡7日)



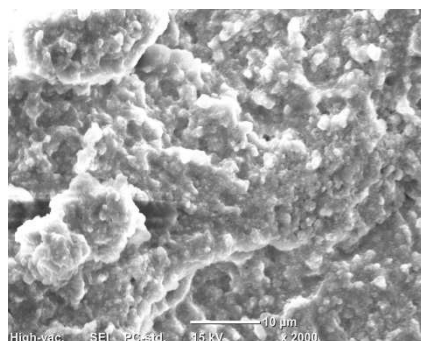
200 倍



500 倍

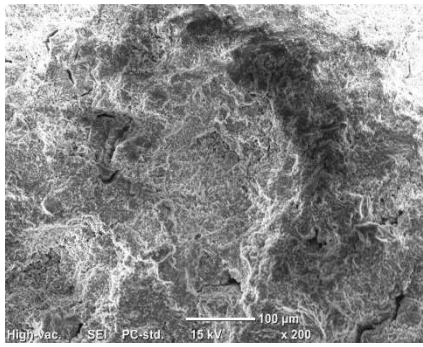


1000 倍

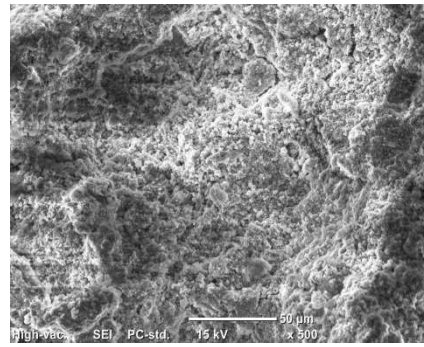


2000 倍

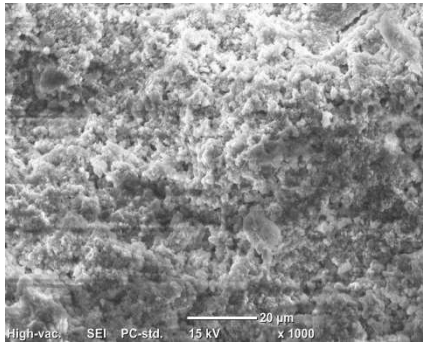
写真-3.4.9 (d) Fe20+石灰80 (w_{opt} ・材齡7日)



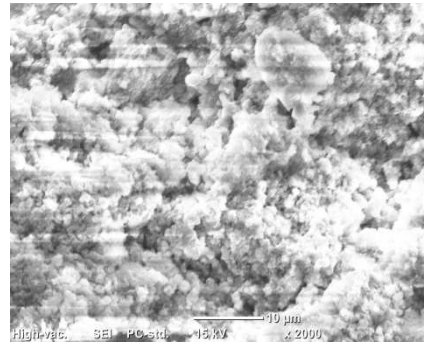
200 倍



500 倍

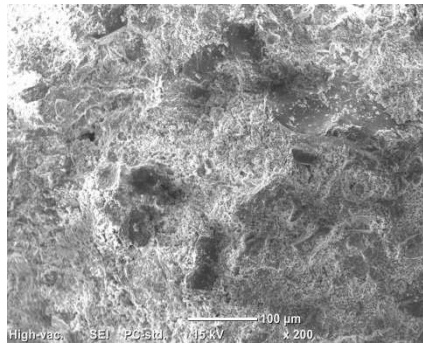


1000 倍

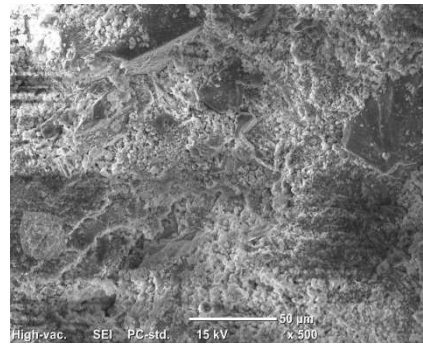


2000 倍

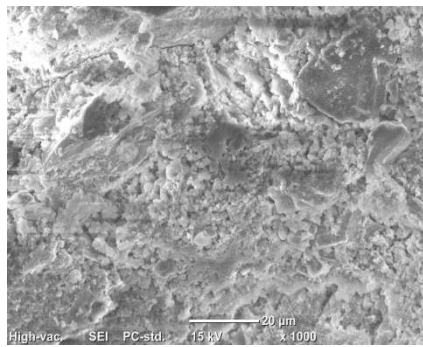
写真-3. 4. 10 石灰100 (w_{opt}・材齡7日)



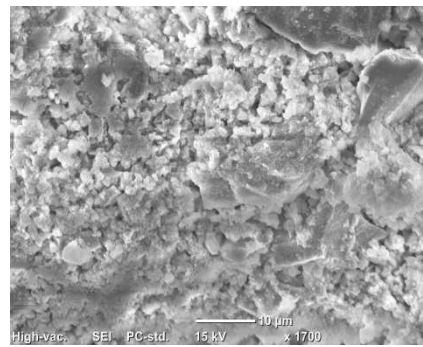
200 倍



500 倍

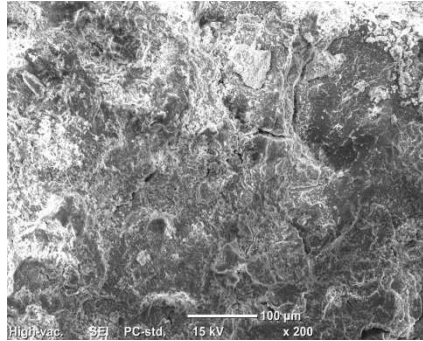


1000 倍

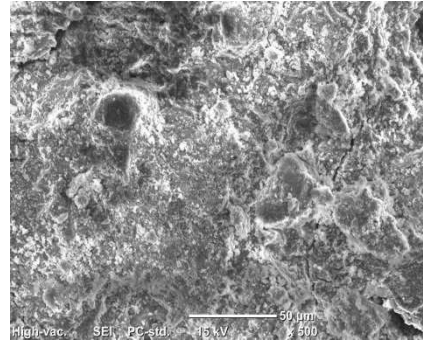


2000 倍

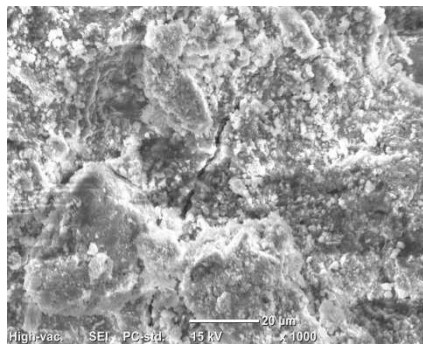
写真-3.4.11 (c) FNS40+石灰60 ($w_{opt}=3\%$ ・材齡7日)



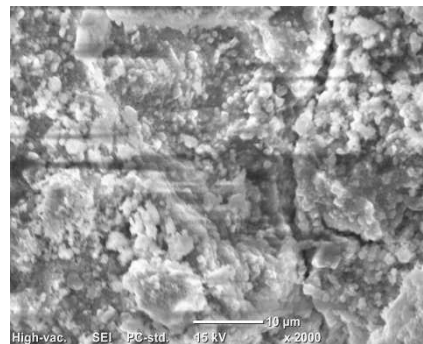
200 倍



500 倍

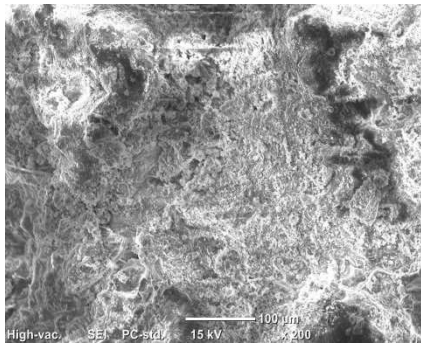


1000 倍

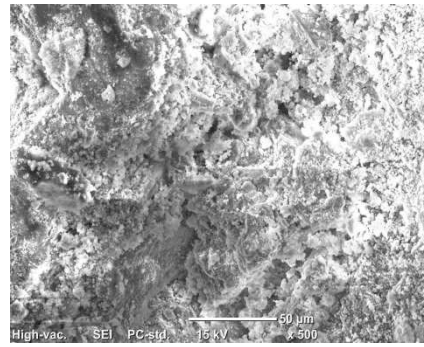


2000 倍

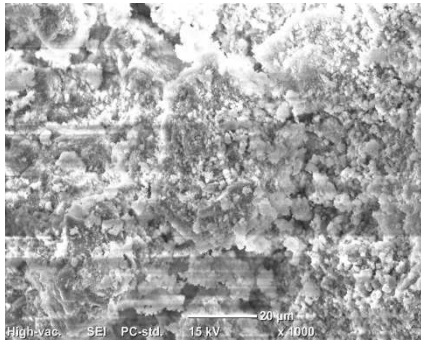
写真-3.4.11 (d) FNS20+石灰80 ($w_{opt}=3\%$ ・材齡7日)



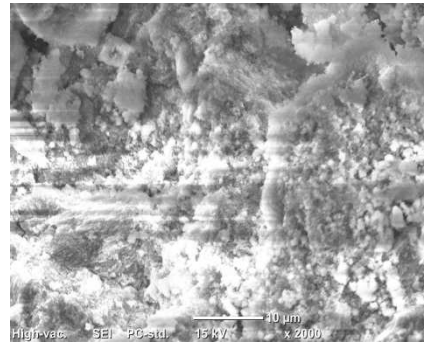
200 倍



500 倍

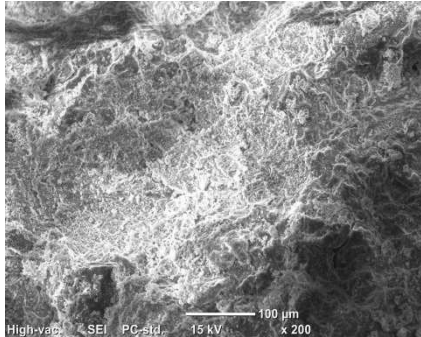


1000 倍

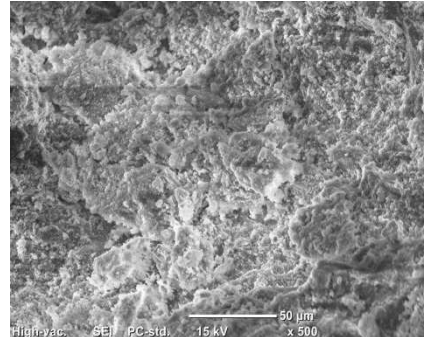


2000 倍

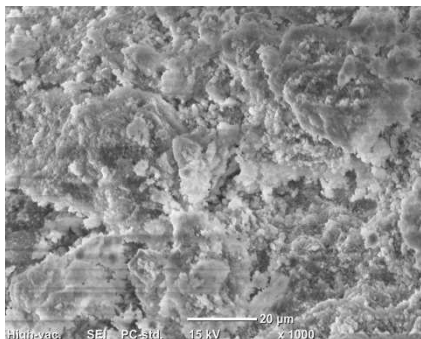
写真-3.4.12 (c) FNS40+石灰60 ($w_{opt}+3\%$ ・材齡7日)



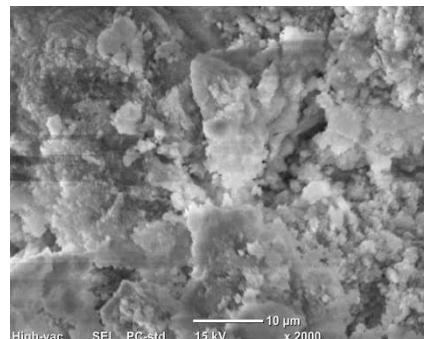
200 倍



500 倍

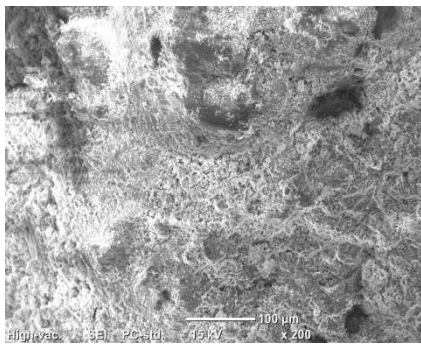


1000 倍

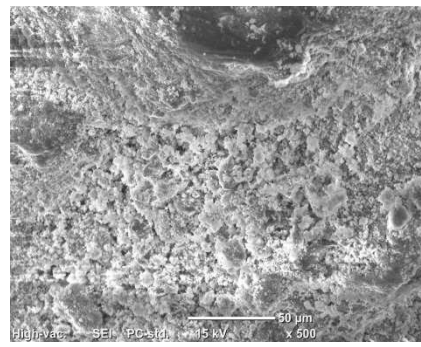


2000 倍

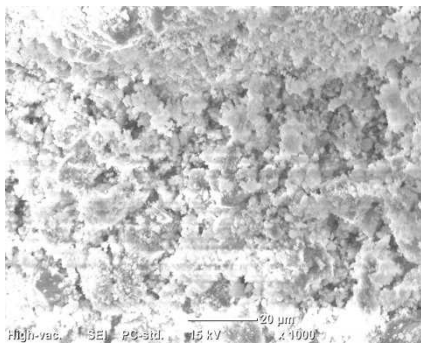
写真-3.4.12 (d) FNS20+石灰80 ($w_{opt}+3\%$ ・材齡7日)



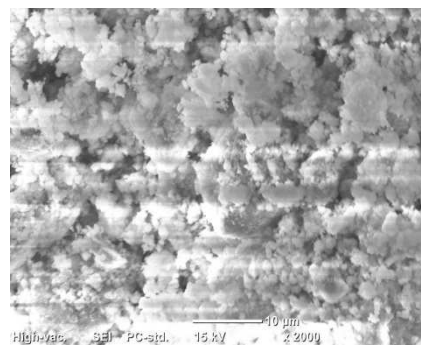
200 倍



500 倍

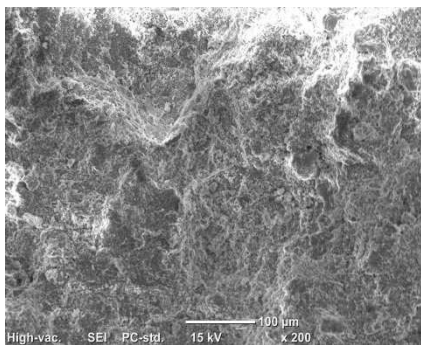


1000 倍

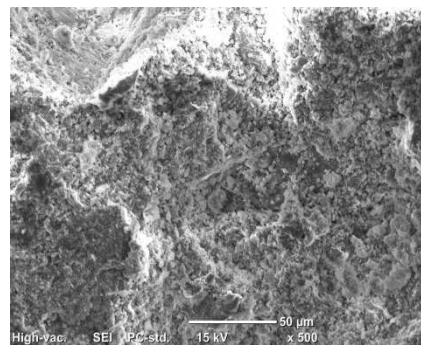


2000 倍

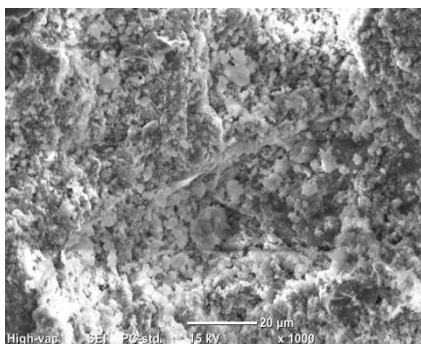
写真-3.4.13 (c) Fe40+石灰60 ($w_{opt}=3\%$ ・材齡7日)



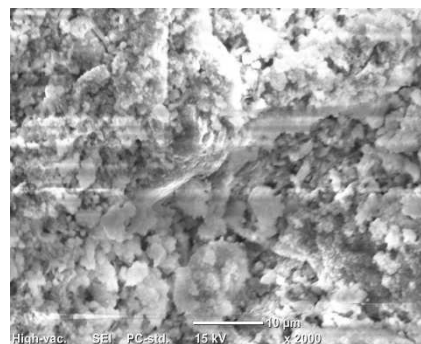
200 倍



500 倍

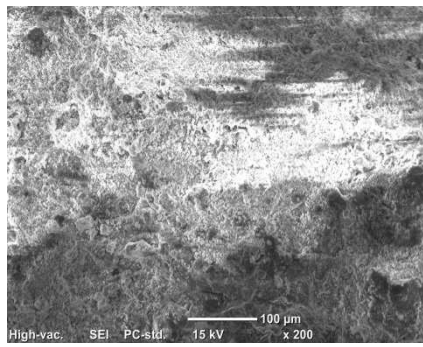


1000 倍

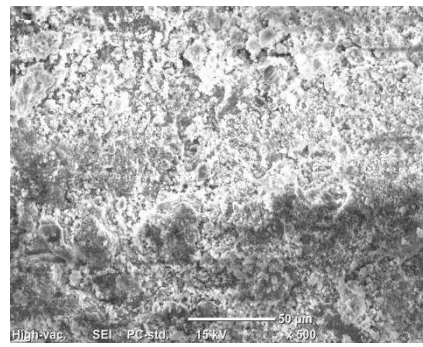


2000 倍

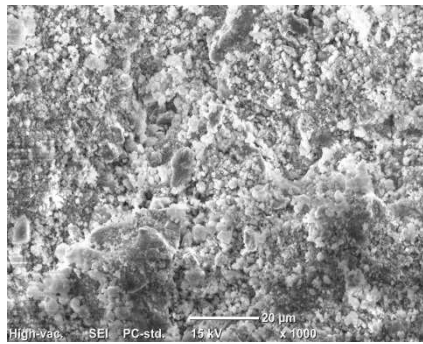
写真-3.4.13 (d) Fe20+石灰80 ($w_{opt}=3\%$ ・材齡7日)



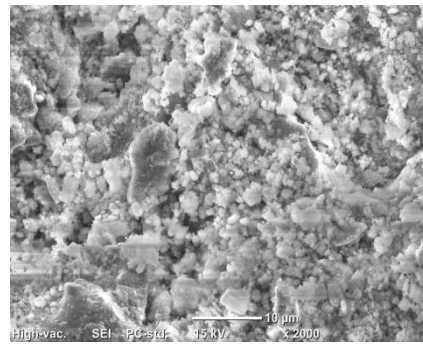
200 倍



500 倍

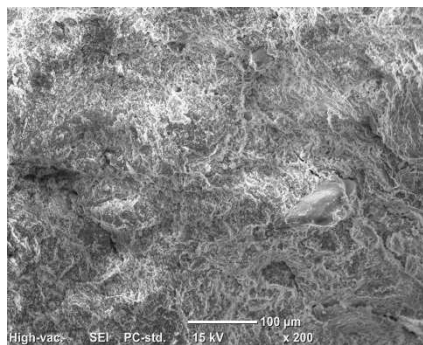


1000 倍

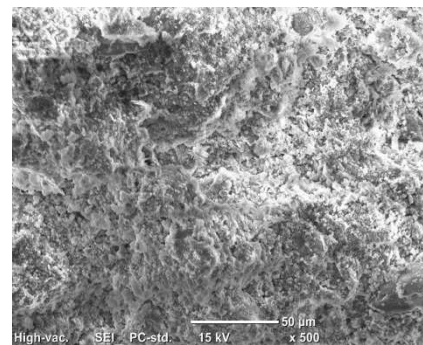


2000 倍

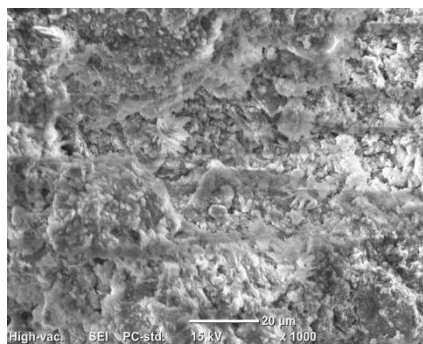
写真-3. 4. 14 (c) Fe40+石灰60 ($w_{opt} + 3\%$ · 材齡7日)



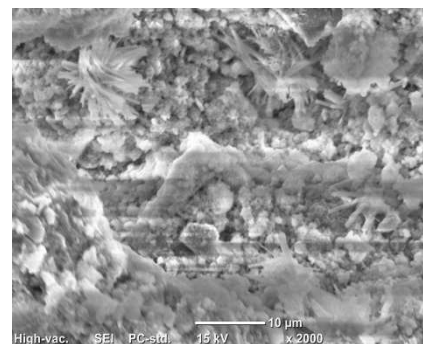
200 倍



500 倍

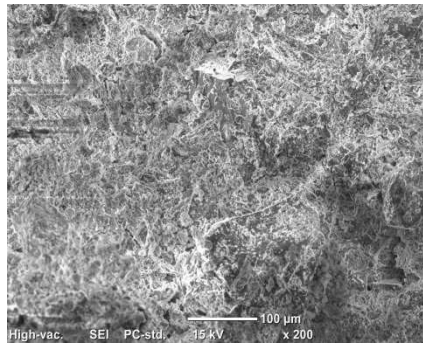


1000 倍

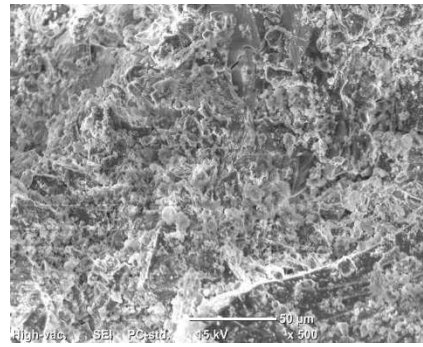


2000 倍

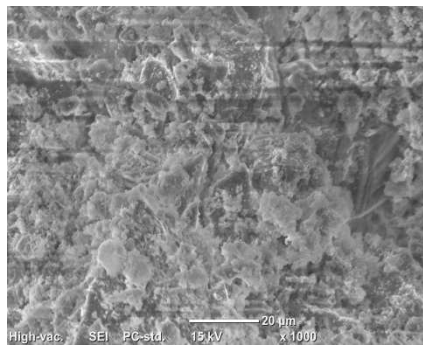
写真-3. 4. 14 (d) Fe20+石灰80 ($w_{opt} + 3\%$ · 材齡7日)



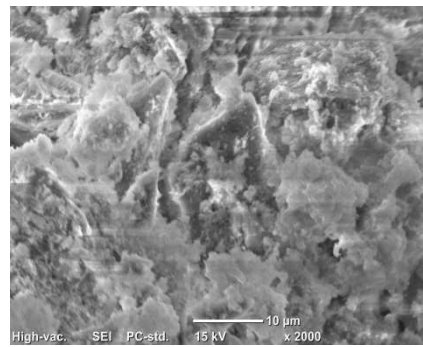
200 倍



500 倍

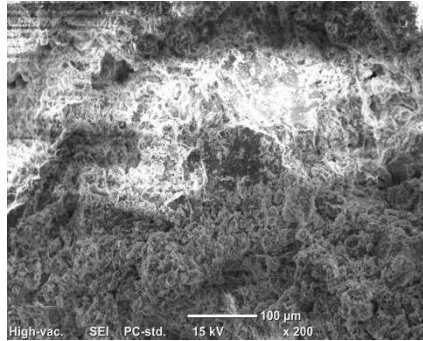


1000 倍

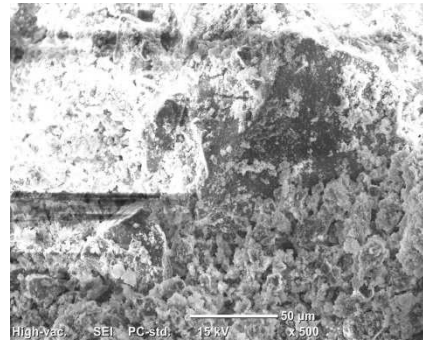


2000 倍

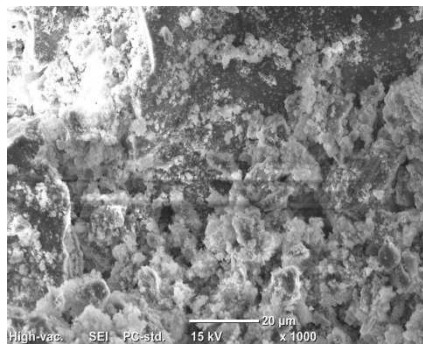
写真-3.4.15 (a) FNS80+石灰20 (w_{opt} ・材齡28日)



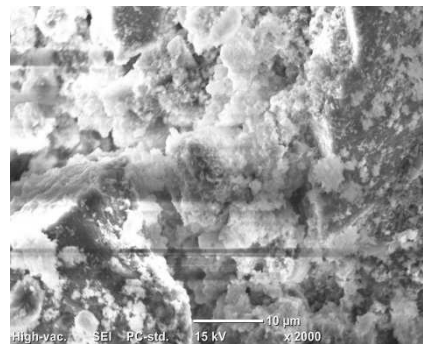
200 倍



500 倍

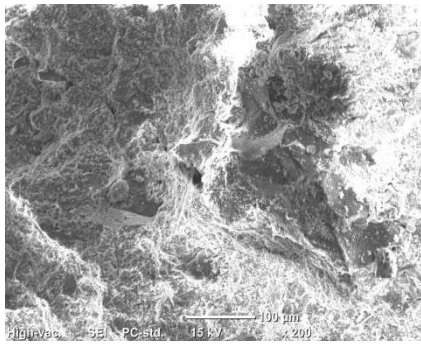


1000 倍

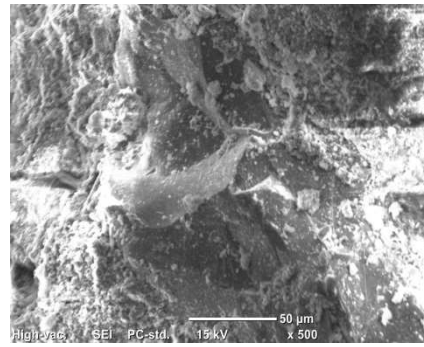


2000 倍

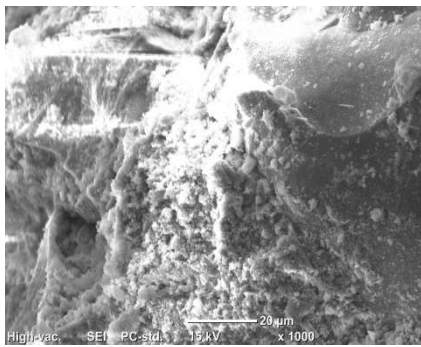
写真-3.4.15 (b) FNS60+石灰40 (w_{opt} ・材齡28日)



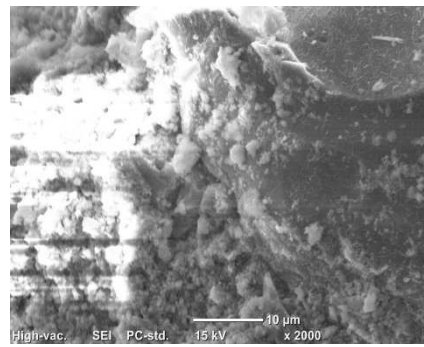
200 倍



500 倍

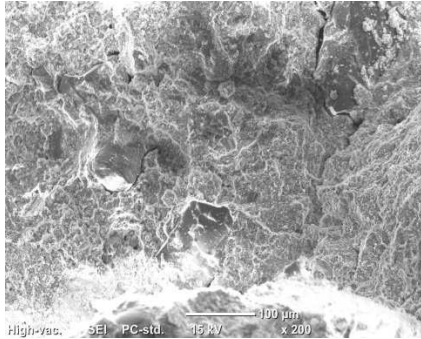


1000 倍

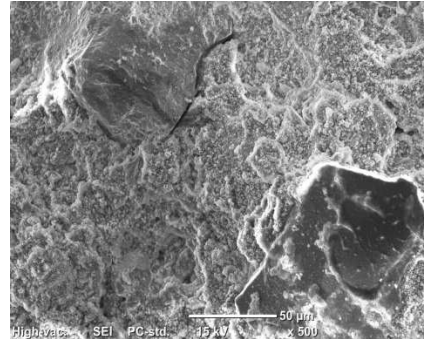


2000 倍

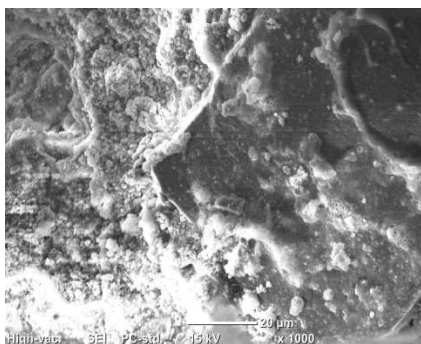
写真-3.4.15 (c) FNS40+石灰60 (w_{opt} ・材齡28日)



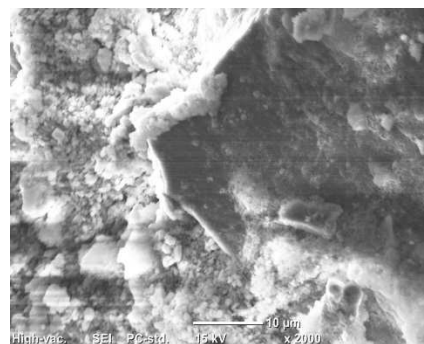
200 倍



500 倍

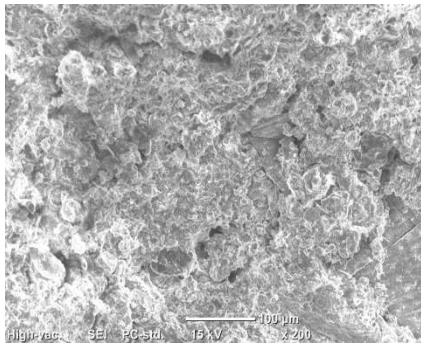


1000 倍

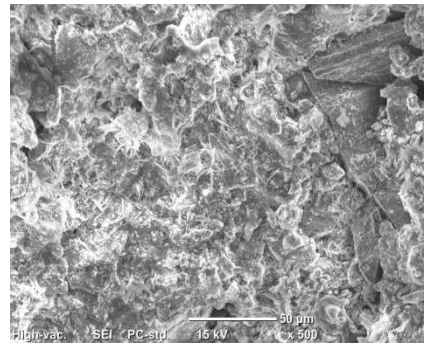


2000 倍

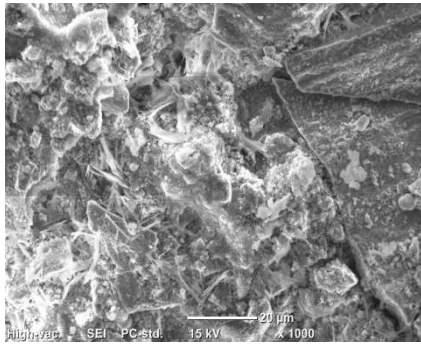
写真-3.4.15 (d) FNS20+石灰80 (w_{opt} ・材齡28日)



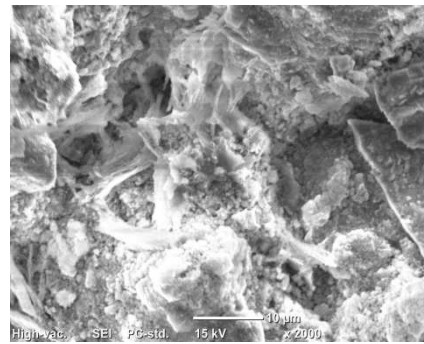
200 倍



500 倍

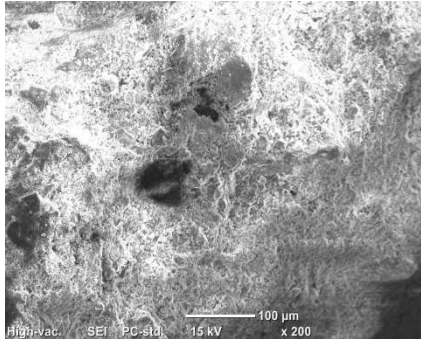


1000 倍

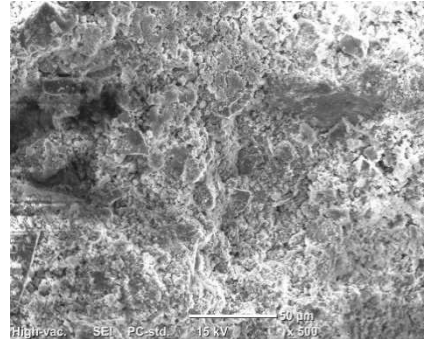


2000 倍

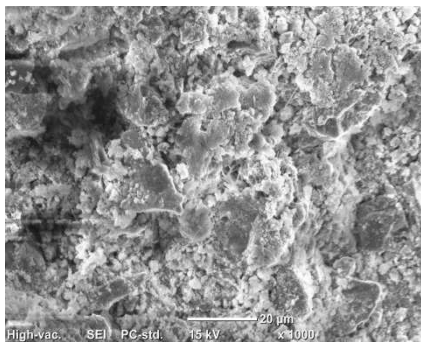
写真-3.4.16 (a) Fe80+石灰20 (w_{opt} ・材齡28日)



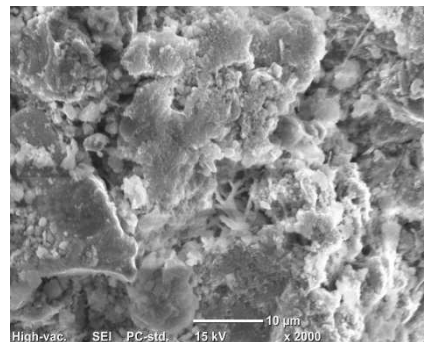
200 倍



500 倍

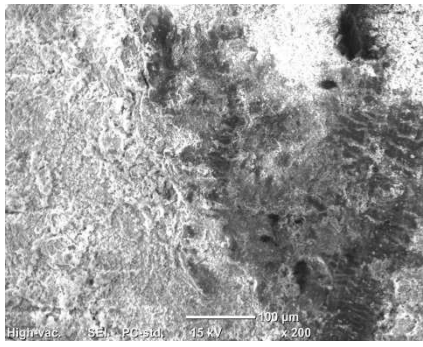


1000 倍

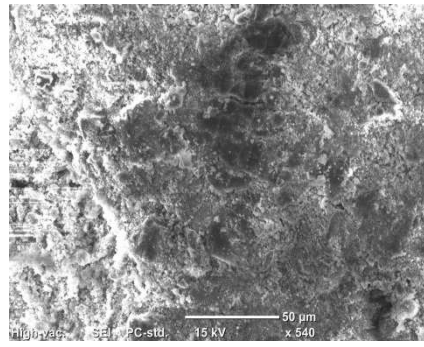


2000 倍

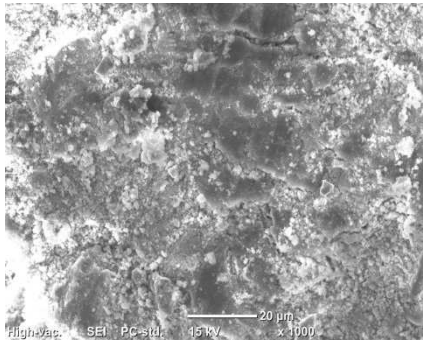
写真-3.4.16 (b) Fe60+石灰40 (w_{opt} ・材齡28日)



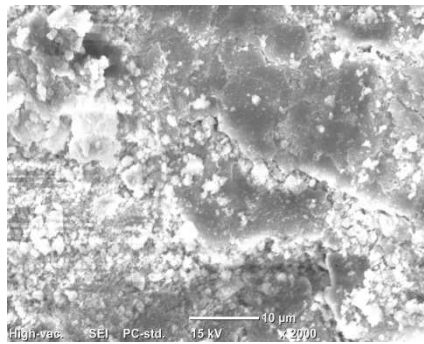
200 倍



500 倍

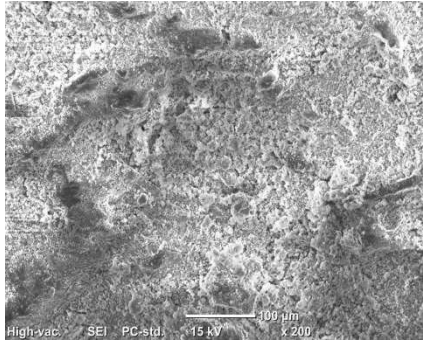


1000 倍

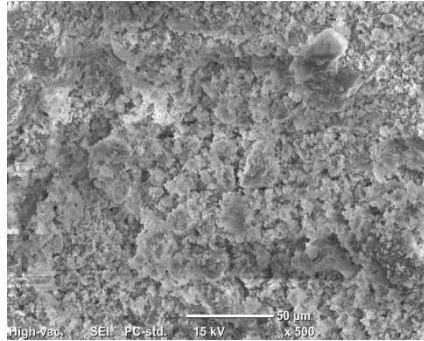


2000 倍

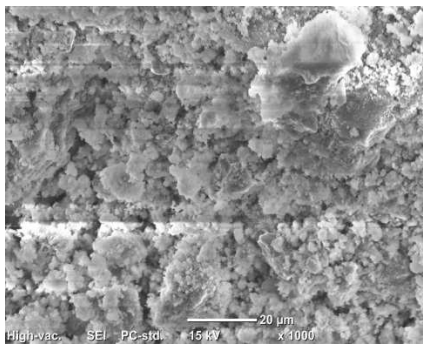
写真-3.4.16 (c) Fe40+石灰60 (w_{opt}・材齡28日)



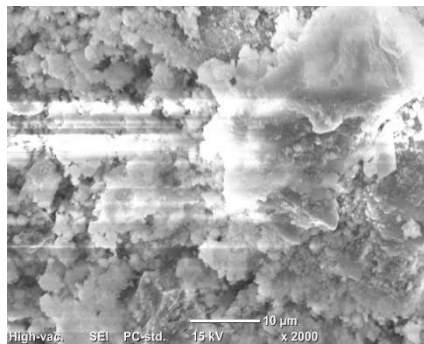
200 倍



500 倍

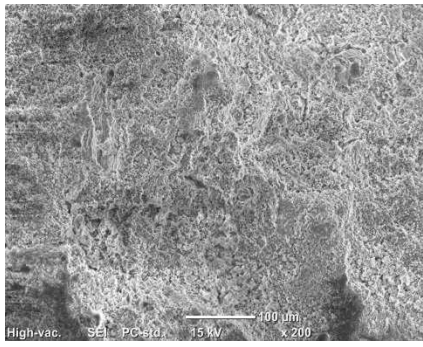


1000 倍

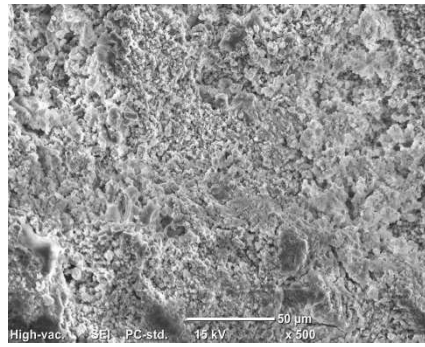


2000 倍

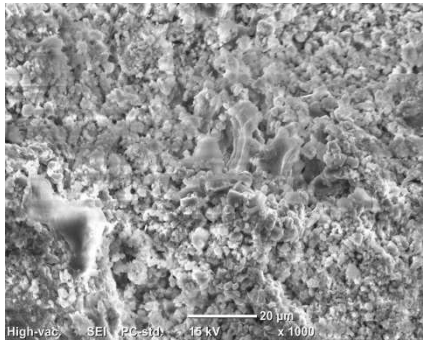
写真-3.4.16 (d) Fe20+石灰80 (w_{opt}・材齡28日)



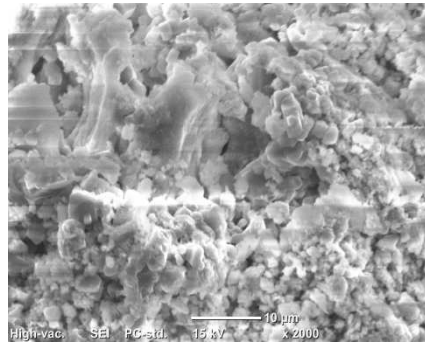
200 倍



500 倍

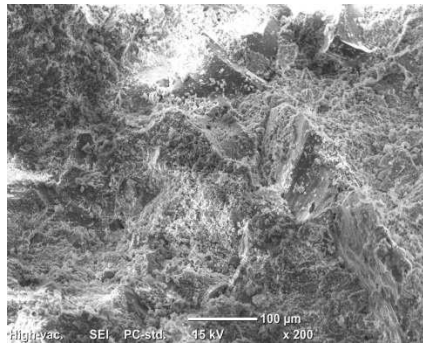


1000 倍

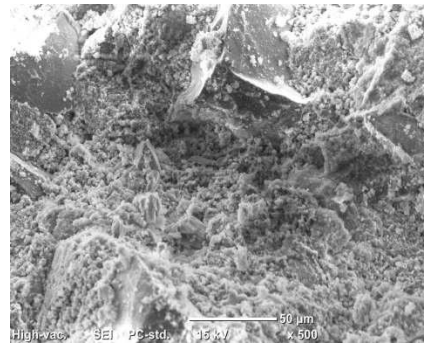


2000 倍

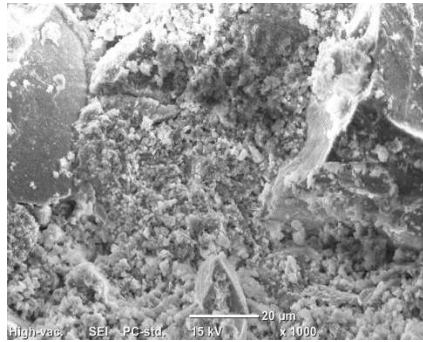
写真-3.4.17 石灰100 (w_{opt} ・材齡28日)



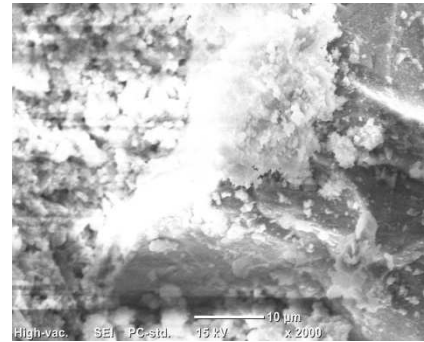
200 倍



500 倍

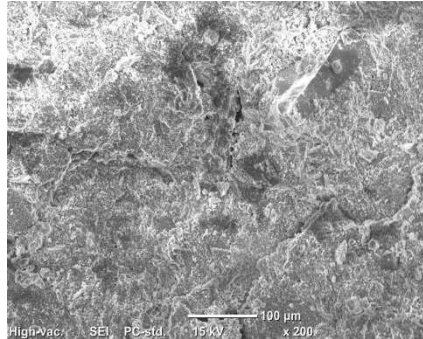


1000 倍

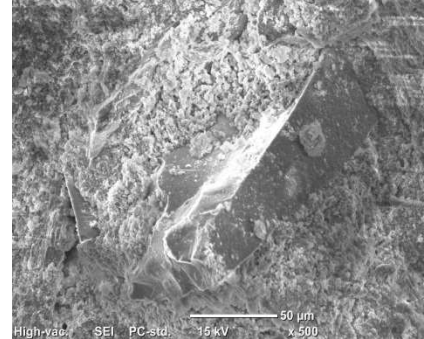


2000 倍

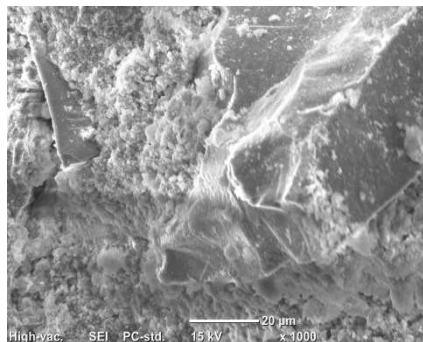
写真-3.4.18 (c) FNS40+石灰60 ($w_{opt}=3\%$ ・材齡28日)



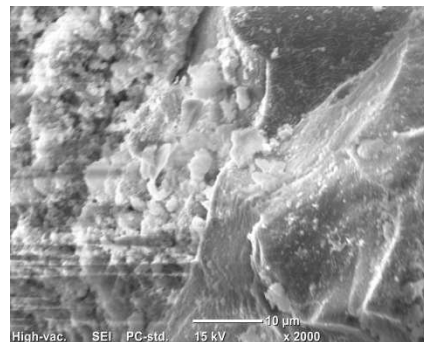
200 倍



500 倍

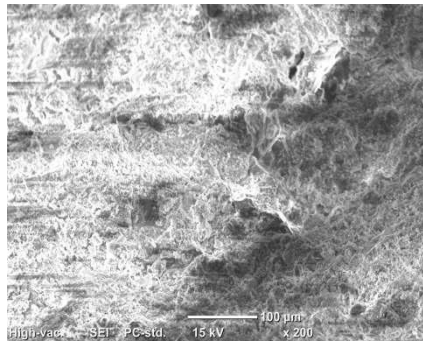


1000 倍

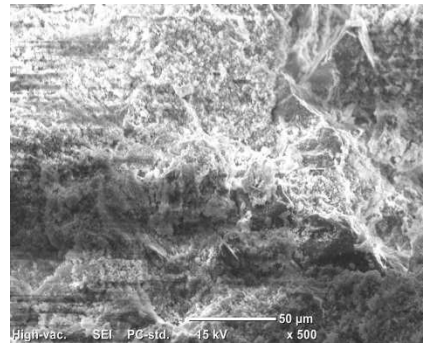


2000 倍

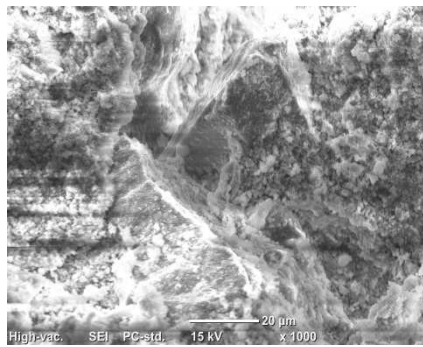
写真-3.4.18 (d) FNS20+石灰80 ($w_{opt}=3\%$ ・材齡28日)



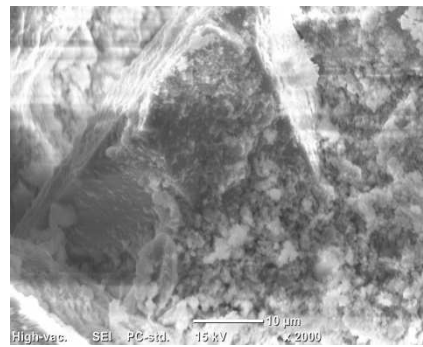
200 倍



500 倍

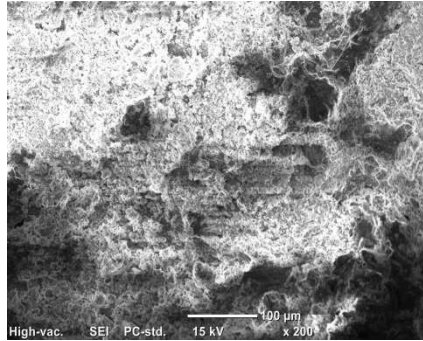


1000 倍

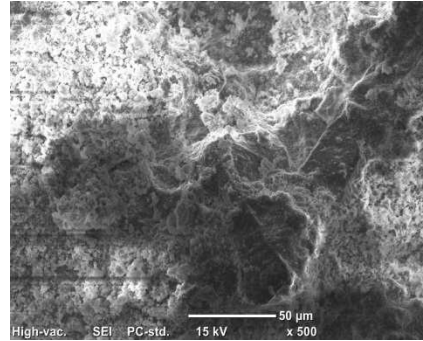


2000 倍

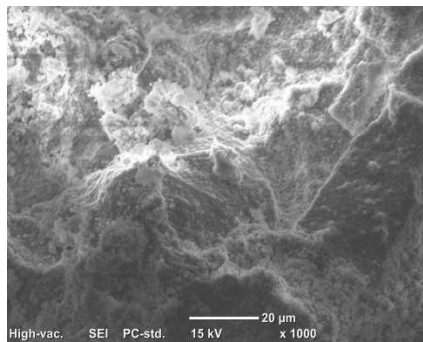
写真-3.4.19 (c) FNS40+石灰60 ($w_{opt} + 3\%$ · 材齡28日)



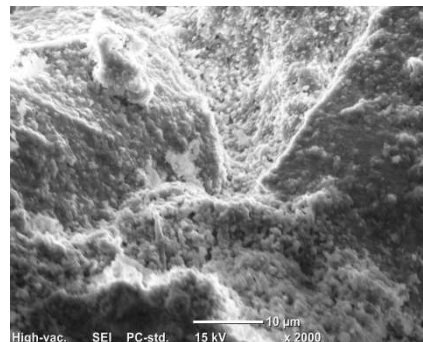
200 倍



500 倍

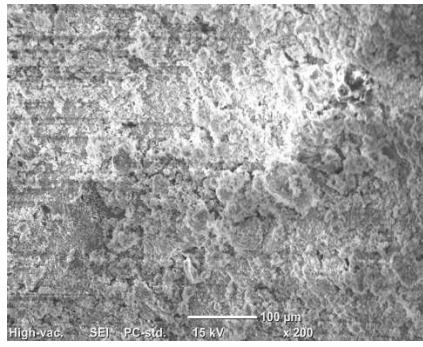


1000 倍

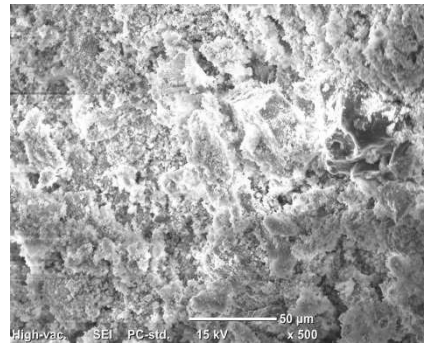


2000 倍

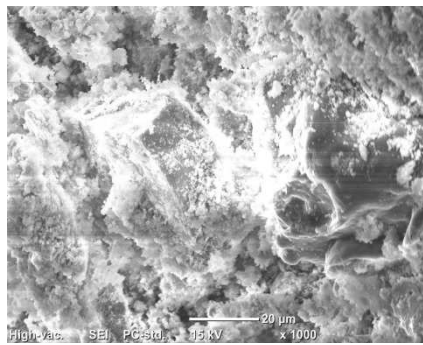
写真-3.4.19 (d) FNS20+石灰80 ($w_{opt} + 3\%$ · 材齡28日)



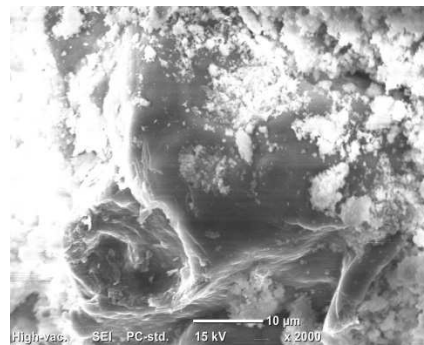
200 倍



500 倍

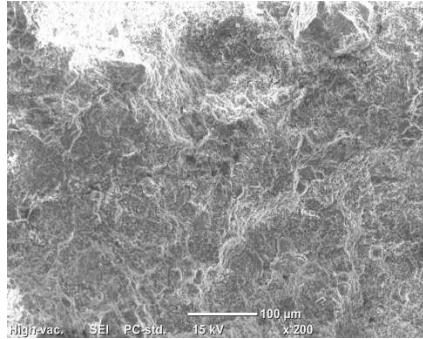


1000 倍

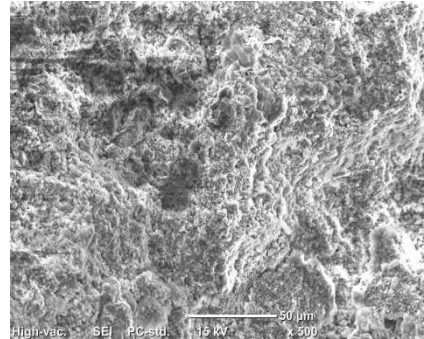


2000 倍

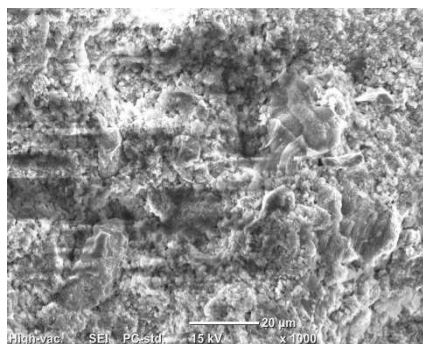
写真-3.4.20 (c) Fe40+石灰60 ($w_{opt} = 3\%$ · 材齡28日)



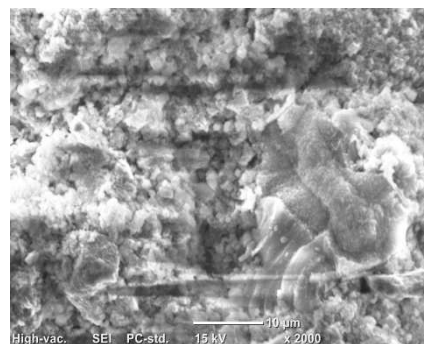
200 倍



500 倍

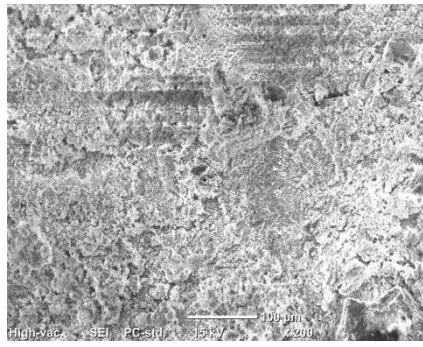


1000 倍

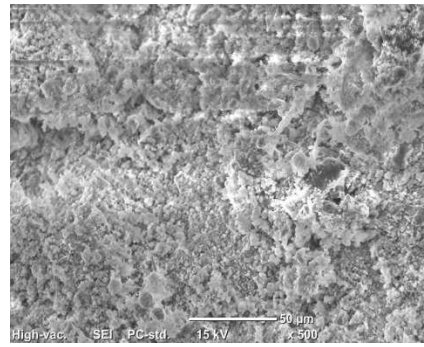


2000 倍

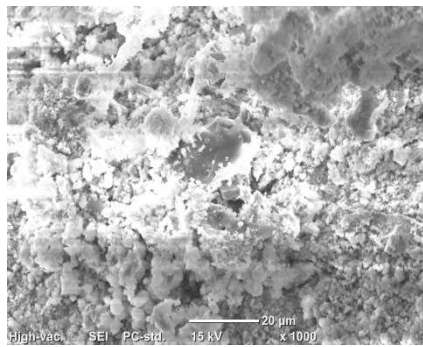
写真-3.4.20 (d) Fe20+石灰80 ($w_{opt} = 3\%$ · 材齡28日)



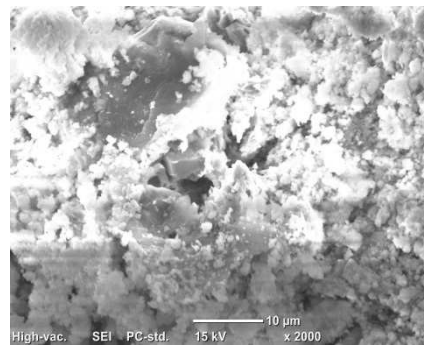
200 倍



500 倍

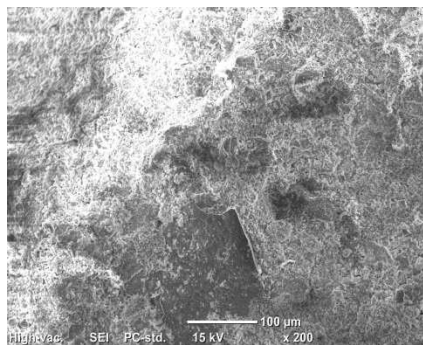


1000 倍

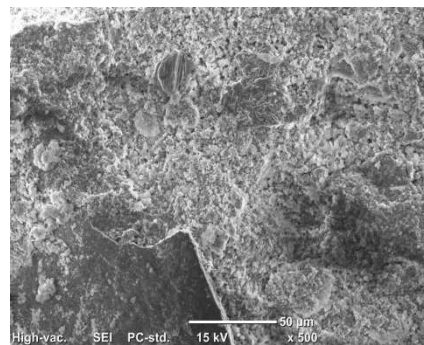


2000 倍

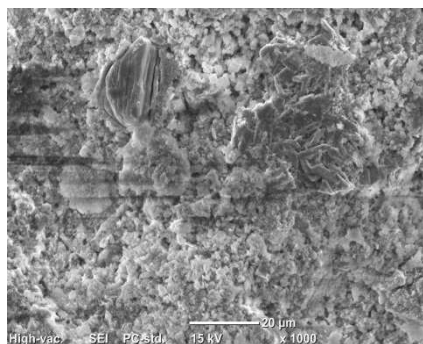
写真-3. 4. 21 (c) Fe40+石灰60 ($w_{opt}+3\%$ ・材齡28日)



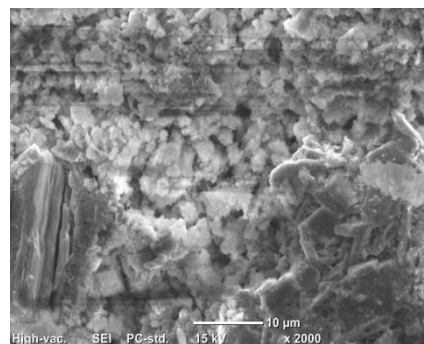
200 倍



500 倍



1000 倍



2000 倍

写真-3. 4. 21 (d) Fe20+石灰80 ($w_{opt}+3\%$ ・材齡28日)

3.5 まとめ

本章で取りまとめた結果は、以下のとおりである。

- 1) FNS粉およびFe粉ともに石灰との混合割合が多いほど乾燥密度は大きくなり、最適含水比は低くなることが確認できた。
- 2) FNS粉と石灰の混合は、最適含水比において締固めることで長期にわたり強度発現効果が発揮でき、FNS粉と石灰の割合に対する強度発現の傾向は、FNS40+石灰 60 をピークに凸型となった。また、Fe粉と石灰の混合は、最適含水比においてFeの混合割合が高いほど長期の強度発現効果が期待できた。
- 3) FNS石灰およびFe石灰ともに強度発現が最も発揮される含水比は、最適含水比あるいは最適含水比より乾燥側であった。
- 4) SEM画像より、FNS石灰およびFe石灰ともに養生日数の増加にともない粒子間の間隔が小さくなった。これは、FNS粉に含まれているシリカ (SiO_2) と石灰に含まれている (Ca(OH)_2) が化学的に結合するポズラン反応によるものと考えられる。

第3章の参考文献

- 1) (社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル[第4版], p10, 1212.10
- 2) 九州大学出版会：九州・沖縄の特殊土, pp.96-97, 1983.7
- 3) 九州大学出版会：九州・沖縄の特殊土, p97, 1983.7
- 4) 庄嶋芳卓, 秋葉正一, 加納陽輔, 井 真宏：産業副産物の微粉末を用いた路床改良材に関する研究, 土木学会論文集E1 (舗装工学), Vol.68, No.3, pp. I_89～ I_95, 2012.12
- 5) 加藤芳郎：URBAN KUBOTA, (株)クボタ, No.13, p.12. 1976.7
- 6) (社)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 [二分冊の1], p.393, 2009.11
- 7) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧 [第4分冊], pp.155-161, 2007
- 8) 土質工学会：土質試験法 (第2回改訂版), p.318, 1979
- 9) 日本石灰協会：石灰による地盤改良マニュアル, pp.24-25, 2009. 12

第4章 地盤改良材の特殊土への適用

4.1 概説

本章では、前章にて示した強度発現効果が最も期待できると判断された混合割合のFNS石灰およびFe石灰を用いて、両者が地盤改良材として適用可能か否かを検討することを目的に、特殊土である「まさ土」および「黒ぼく」の改良効果について一軸圧縮試験を実施した結果を述べる^{1),2)}。また、FNS石灰と特殊土との間で生成すると考えられる反応生成物の生成量や形態などを視覚的に捉えることを目的に、SEMによる観察結果についても述べる^{1),2)}。

一軸圧縮試験は、前章で検討した混合割合（FNS20+石灰 80, FNS40+石灰 60, Fe20+石灰 80 およびFe40+石灰 60）のFNS石灰およびFe石灰を使用して行った。この混合割合を採用した理由は、前章にて検討した結果、最適含水比におけるFNS40+石灰 60の強度発現効果が最も高かったこと、および九州地方で現在用いられているFe石灰の混合割合がFe粉 25%で石灰 75%とであり、FNSおよびFeの混合割合が40%と比較する上で適した混合割合と判断したことによる。

また、試料土は、第2章に特徴を記した「まさ土」および「黒ぼく」としたの理由より選定した。まず、まさ土は、花崗岩質岩石が風化してその場所に残留している残積土あるいはこれと同質の崩積土であり、様々な風化層を形成し、不均質な風化状態のものが多いため、多種多様な性質を有する。つぎに、黒ぼくは、軟弱な路床土として火山灰質粘性土で日本の国土の地表面積の約16%（図-4.1.1）を占める。黒ぼくが堆積した地盤は軟弱であり、地山におけるセメンテーションがさほど強くないため地

山強度も低く，また黒ぼくを盛土材料として用いる場合には，トラフィカビリティと転圧効果の確保が難しく，安定した盛土築造が困難である．そのため，黒ぼくを盛土材料や路床材料に採用する際は，安定処理などを講じるなどの対策³⁾が必要とされている．しかしながら，従来，多くの化学的安定処理工法が試みられてきたにも関わらず，期待された効果は得られず，一般の軟弱土に比べ相当多量の安定処理材の投入が必要であり，経済的に制約されることも多い⁴⁾．

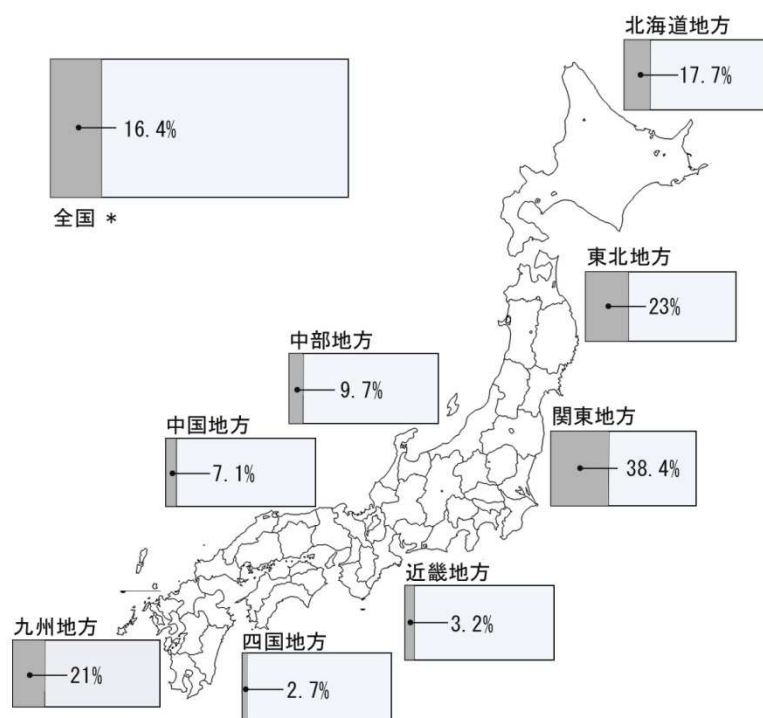


表-4.1.1 黒ぼくの分布⁵⁾

4.2 地盤改良土の一軸圧縮強度特性

本節では、FNS石灰とFe石灰が地盤改良材として適用可能か否かを検討することを目的に、それぞれをまさ土および黒ぼくに添加した混合処理土の強度特性を把握するために行った一軸圧縮試験の結果を述べる。なお、土質材料は、福岡県久山町で採取した「まさ土」および熊本県阿蘇町で採取した「黒ぼく」とし、他の使用材料とともに図-4.2.1 に粒径加積曲線を示す。また、まさ土の自然含水比は 10.0%であり、黒ぼくの自然含水比は 163.0%であった。

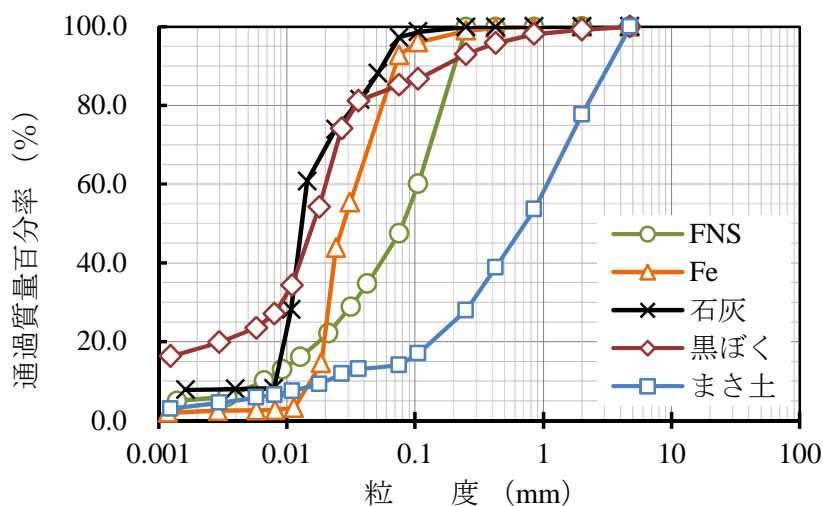


図-4.2.1 使用材料の粒径加積曲線

4.2.1 試験概要

混合割合は、まさ土の場合、乾燥試料質量に対する質量比で 7%、15%、30%、50% および 70%の 5 種類を、黒ぼくの場合、事前混合において黒ぼくに対し改良材の混合量が大きく均一な混合が困難であった 70%の混合は実施せず、乾燥試料質量に対する質量比で 7%、15%、30%、および 50%の 4 種類を設定した。なお、まさ土については、

事前にJIS A 1210 に準じて締固め試験を実施して最適含水比 (w_{opt}) および最大乾燥密度を求め、 w_{opt} は自然含水比と同じく 10.0%で最大乾燥密度は 1.984g/cm^3 であった。

混合処理土の供試体は、まさ土の締固め試験結果より混合土の含水比が 10%となるように調整し、 $\phi 50\text{mm}\times 100\text{mm}$ モールド内でまさ土の乾燥密度が 1.984g/cm^3 (最大乾燥密度) となる締固め層数および突き固め回数 (8 回/3 層) を求め、その突き固め方法により作製した。また、黒ぼくについては、混合土の含水比が 163.0% (自然含水比) となるように調整し、まさ土と同じ突き固め条件 (8 回/3 層) として作製した。なお供試体個数は、それぞれの場合で 3 個とし、試験結果は、それらの平均値を採用した。

一般に安定処理土の配合設計では締固めが可能な場合とそうでない場合とで添加量の決定の仕方が異なると述べられている⁶⁾。特に、締固めが困難で土を乾燥処理することが難しい高含水の火山灰質粘性土や粘土分を多量に含む細粒土などは、自然含水比の状態で添加量を検討し、強度発現が最も期待できる配合割合を決定するとしている。本実験ではこのようなケースを考慮して、同一含水比および同一の締固め方法における強度発現の違いを調べることにした。なお、養生日数は、0 日 (供試体作製後 20 時間)、7 日 (6 日室内養生、1 日水浸養生) および 28 日 (7 日養生の 4 サイクル) とし、養生温度は室内・水浸ともに $20\pm 3^\circ\text{C}$ とした。なお、室内・水浸養生方法は、舗装調査・試験法便覧⁷⁾に記載されている安定処理混合物の一軸圧縮試験法を参考に設定した。

ここで、本論文中、FNS石灰とまさ土との処理土をFNS石灰処理土 (まさ土)、Fe石灰とまさ土との処理土をFe石灰処理土 (まさ土) とし、同様に、FNS石灰およびFe石灰と黒ぼくとの処理土の場合は、FNS石灰処理土 (黒ぼく) およびFe石灰処理土 (黒ぼく) と表記する。

4.2.2 FNS 石灰の添加による改良材の強度発現効果の比較

FNS石灰の添加量を変化させたFNS石灰処理土（まさ土）の一軸圧縮強さを図-4.2.1 および図-4.2.2 に、FNS石灰処理土（黒ぼく）の一軸圧縮強さを図-4.2.3 および図-4.2.4 に示す。

図-4.2.2 および図-4.2.3 によると、FNS石灰処理土（まさ土）の一軸圧縮強さは、まさ土単体の場合に比べ2倍以上高くなり、FNS石灰が地盤改良材として適用できる改良材であることが確認できた。また、まさ土に添加するFNS石灰の添加量が50%以上の場合は、材齢7日が材齢0日に比べ一軸圧縮強さが低くなる傾向が見受けられた。これは、材齢7日の場合は、反応が進んでいく過程で水浸養生したことが原因と考えられ、吸水に伴う強度低下が著しいことを示している。つぎにFNS石灰添加量の増加による同一材料における強度発現の傾向は、ある添加量をピークに凸型の傾向がある。すなわち、材齢7日および28日でそれぞれ添加量50%、30%および7~15%でピークとなった。養生日数が増すごとにピークは少ない添加量になり、材齢28日において概ね7~15%がピークとなった。なお、図-4.2.2 および図-4.2.3 における材齢28日の強度は、本実験の範囲内において、FNS粉と消石灰の割合に関わらず同程度となった。

なお、FNS石灰の添加量が70%の供試体に関しては、材齢28日において円柱形状を保持できる供試体の作製が困難であったため実験結果から除外している。

図-4.2.4 および図-4.2.5 によると、FNS石灰処理土（黒ぼく）の一軸圧縮強さは、黒ぼく単体の場合に比べ非常に高く、特に添加量が多くなる程その傾向は顕著となり、FNS石灰が黒ぼくに対しても地盤改良材として適用可能であることが確認できた。また、黒ぼくに対するFNS石灰の添加量が比較的多い場合は、材齢の増加に伴い一軸圧縮強さが低下する傾向が見られた。そのため、材齢28日までに加えて材齢91日を追

加して実験した。その結果、石灰の割合が比較的多いFNS40+石灰 60 のFNS石灰添加量 50%、FNS20+石灰 80 のFNS石灰添加量 30%や 50%の一軸圧縮強さは、材齢 28 日までは低下していたが、材齢 91 日では材齢 28 日とほぼ同程度の強度を示した。これは、水浸を繰り返すことで石灰による短期の反応原理であるイオン交換反応が阻害されたことで一軸圧縮強さが低下したものの、それ以降はポゾラン反応による硬化とともに長期的に安定したためと考えられる。

以上のことより、FNS石灰を特殊土へ添加することで、まさ土については概ね 15%以下の添加量、黒ぼくについては概ね 30%以上の添加量で、無添加のものに比べると非常に高い改良効果が期待できることが確認できた。

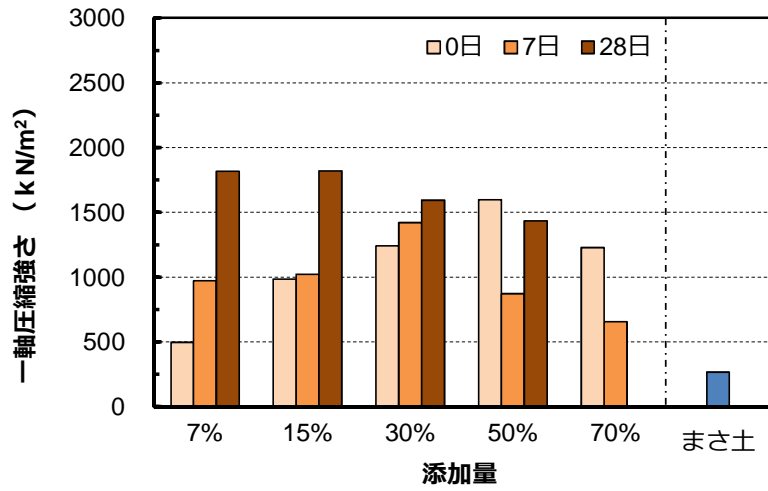


図-4.2.2 FNS石灰処理土（まき土）の一軸圧縮強さ（FNS20+石灰 80）

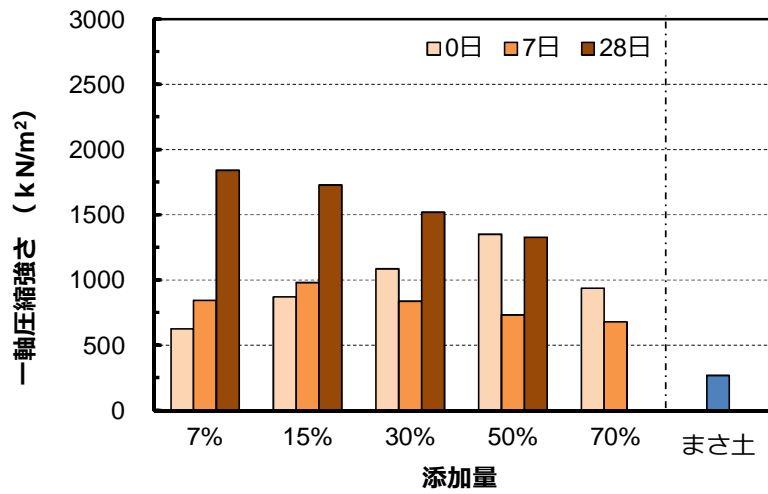


図-4.2.3 FNS石灰処理土（まき土）の一軸圧縮強さ（FNS40+石灰 60）

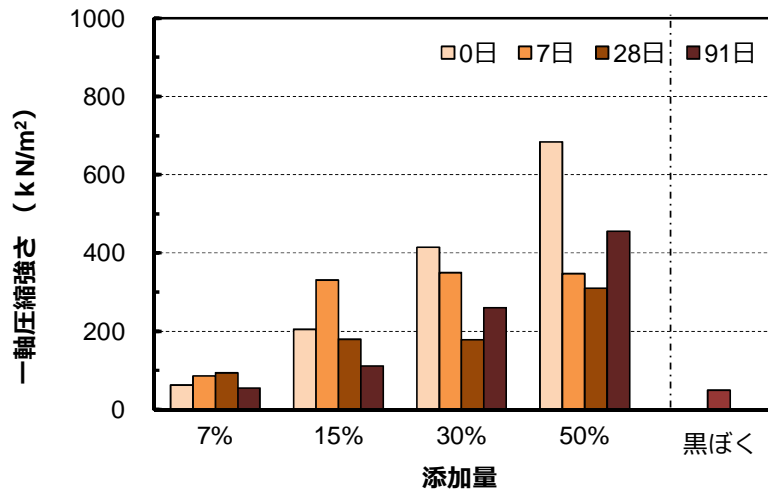


図-4.2.4 FNS石灰処理土（黒ぼく）の一軸圧縮強さ（FNS20+石灰 80）

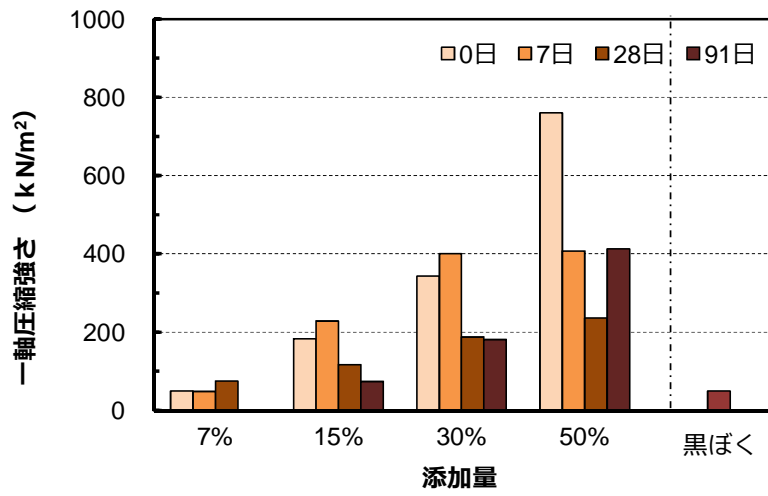


図-4.2.5 FNS石灰処理土（黒ぼく）の一軸圧縮強さ（FNS40+石灰 60）

4.2.3 Fe石灰の添加による改良材の強度発現効果の比較

Fe石灰の添加量を変化させたFe石灰処理土（まさ土）の一軸圧縮強さを図-4.2.6 および図-4.2.7に示す。これより、一軸圧縮強さは、FNS石灰処理土（まさ土）と同様の傾向が見られ、同一材齢における添加量の増加に対する強度発現の傾向は、養生日数が増すごとに、最も強度発現効果のある添加量が低くなり、材齢28日において概ね7～15%が最も強度発現効果のある添加量となった。この結果が示すような、養生日数の増加に伴い少ない添加量でピーク強度を得られるという詳細な理由については不明な点が多いが、硬化過程がポズラン反応による硬化によるものであれば、ポズラン反応による硬化は水分量や養生温度の違いにも影響されると云われていることから⁸⁾、今後これらを含めた説明が必要と考える。

Fe石灰処理土（黒ぼく）の一軸圧縮強さを図-4.2.8 および図-4.2.9に示す。黒ぼくにFe石灰を添加した供試体の一軸圧縮強さは、FNS石灰処理土（まさ土）と同様の傾向が見られ、いくつかの添加パターンにおいて、材齢が増加するにしたがい低下する傾向が見られた。そこで、材齢28日までに加えて材齢91日を追加して実験したが、その結果、15%以下の添加量の少ない場合を除き、材齢91日では材齢28日とほぼ同程度の強度を示した。この結果、黒ぼくのような粘性の高い土に地盤改良材を加えた処理土は、初期の強度発現効果は高く、浸水による影響を受けたとしてもその後の長期的な強度発現効果は持続することが確認できた。

以上の結果、FNS石灰を特殊土へ添加した場合と同様に、Fe石灰を特殊土へ添加することで、まさ土は概ね15%以下の添加量、黒ぼくは概ね30%以上の添加量で無添加のものに比べ非常に高い改良効果が確認できた。また、同一条件でFNS石灰あるいはFe石灰を特殊土へ添加した場合の一軸圧縮強度は、改良材間に有意な差はなく、どちらも同程度の強度発現効果となっていることが確認された。

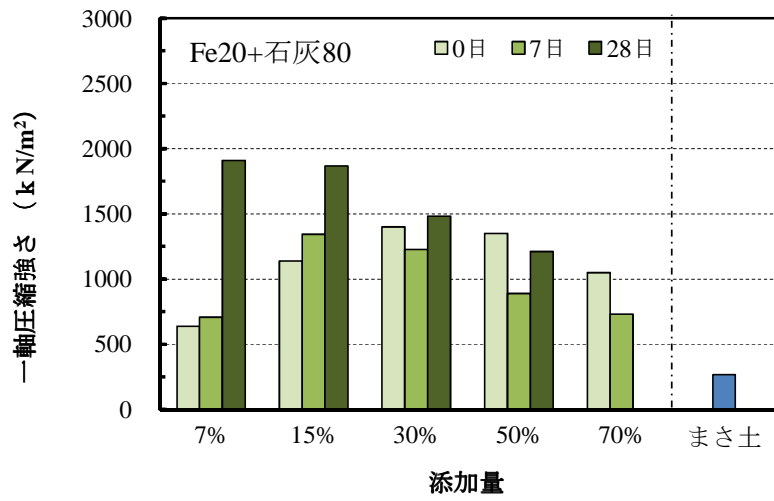


図-4.2.6 Fe石灰処理土（まさ土）の一軸圧縮強さ（Fe20+石灰80）

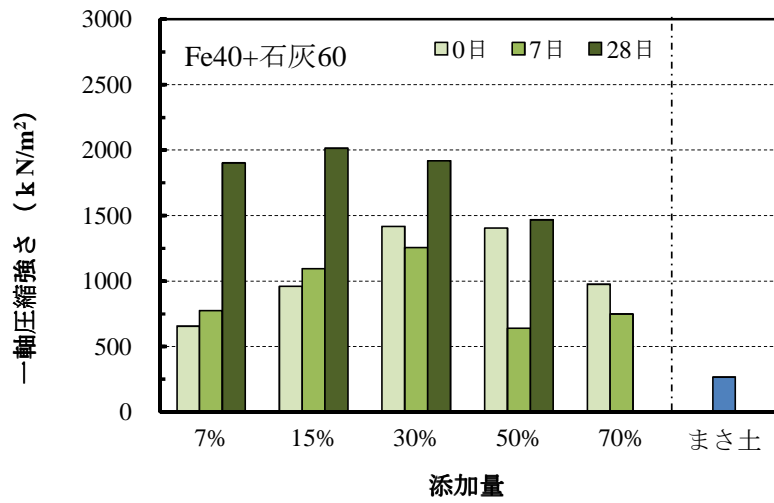


図-4.2.7 Fe石灰処理土（まさ土）の一軸圧縮強さ（Fe40+石灰60）

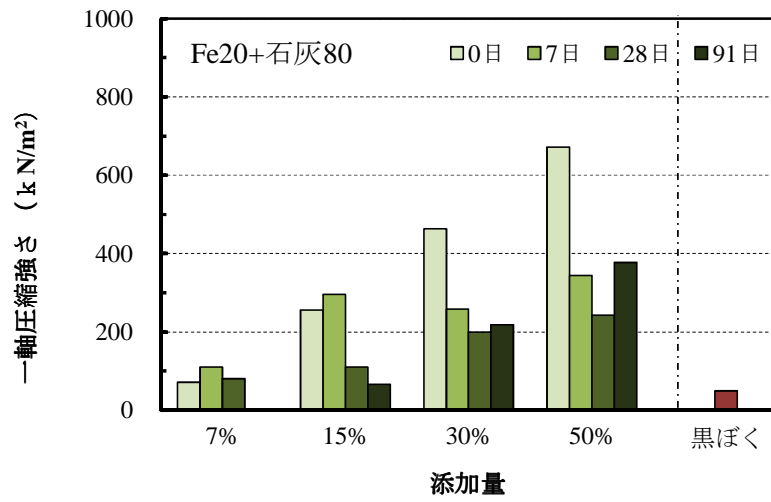


図-4.2.8 Fe石灰処理土（黒ぼく）の一軸圧縮強さ（Fe20+石灰80）

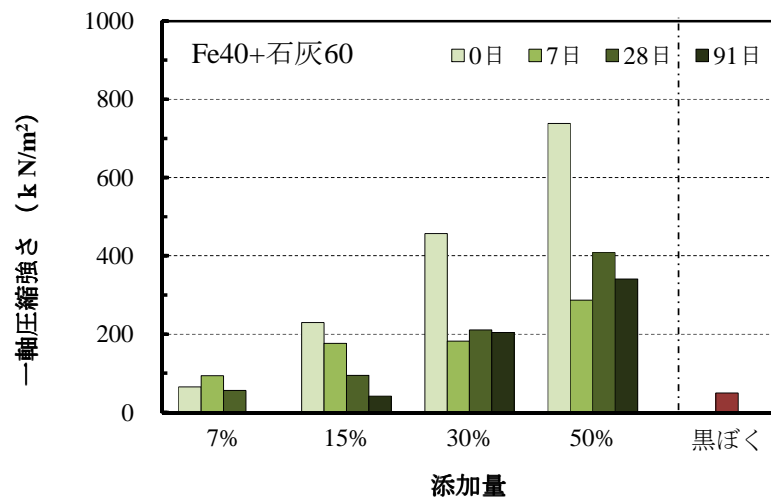


図-4.2.9 Fe石灰処理土（黒ぼく）の一軸圧縮強さ（Fe40+石灰60）

4.3 一軸圧縮試験における応力-ひずみ挙動

一般に、自然地盤から採取した乱さない粘性土に対して、一軸圧縮試験により得られた一軸圧縮強さが妥当な値か否かを判断する場合には、定量的な強度結果だけでなく、応力-ひずみ曲線の形なども大いに考慮する必要がある⁹⁾と云われているように、本節では改良土の脆性を評価するために、前節で実施した一軸圧縮試験結果から得られる応力-ひずみ挙動について検討を行った。

4.3.1 試験概要

前節の結果を基に、「まさ土」を用土にした処理土に比べ一軸圧縮強さが小さかった「黒ぼく」を対象用土とした場合で検討を実施した。

4.3.2 FNS石灰の添加による改良土の応力-ひずみ挙動

FNS石灰処理土（黒ぼく）の材齢 91 日における応力-ひずみ曲線を図-4.3.1～図-4.3.4 に示す。これらにより、FNS粉の混合割合や添加量によって応力-ひずみの形が大きく変わることが確認できた。FNS石灰処理土（黒ぼく）における破壊時の圧縮ひずみは、FNS80+石灰 20 を除きFNS石灰の添加量が 30%以上の場合で、それ以外のFNS粉の混合割合やFNS石灰の添加量におけるFNS石灰処理土（黒ぼく）、また石灰単体による石灰処理土（黒ぼく）の場合に比べ小さくなる傾向が見られた。また、FNS石灰処理土（黒ぼく）の最大圧縮応力については、FNS80+石灰 20 を除きFNS石灰の添加量が 30%以上の場合で、それ以外のFNS粉の混合割合やFNS石灰の添加量におけるFNS石灰処理土（黒ぼく）、また石灰単体による石灰処理土（黒ぼく）の場合に比べ強くなる傾向が見られた。このらの結果、FNS石灰の添加は改良土の剛性を高める効果が期待できる。

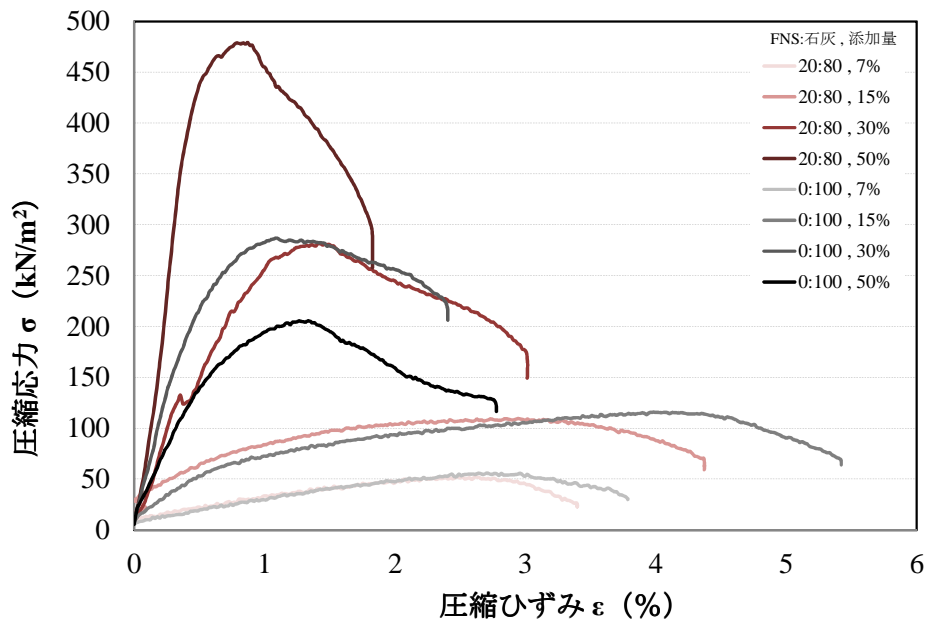


図-4.3.1 FNS石灰処理土（黒ぼく）FNS20+石灰 80 の圧縮応力曲線

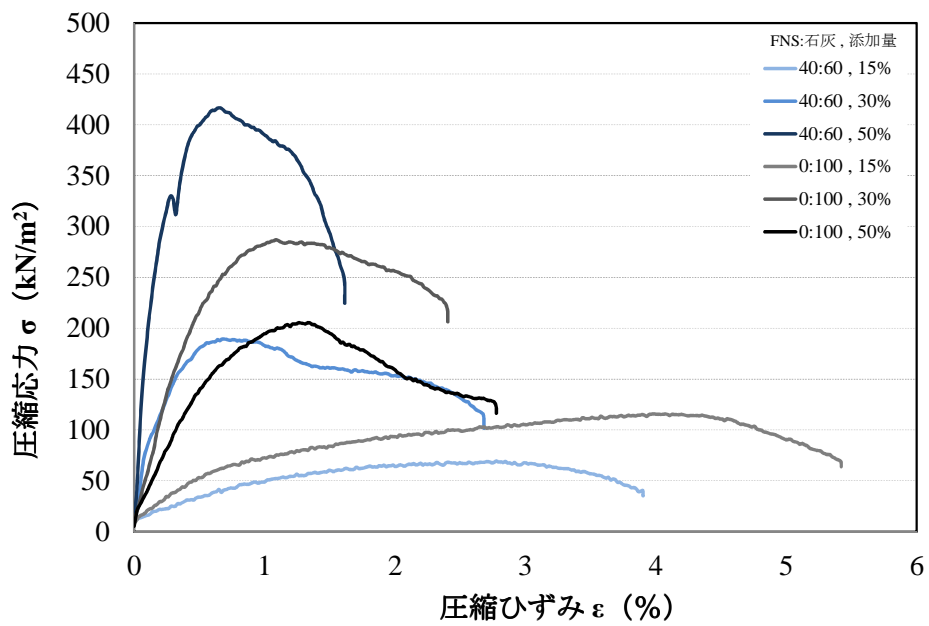


図-4.3.2 FNS石灰処理土（黒ぼく）FNS40+石灰 60 の圧縮応力曲線

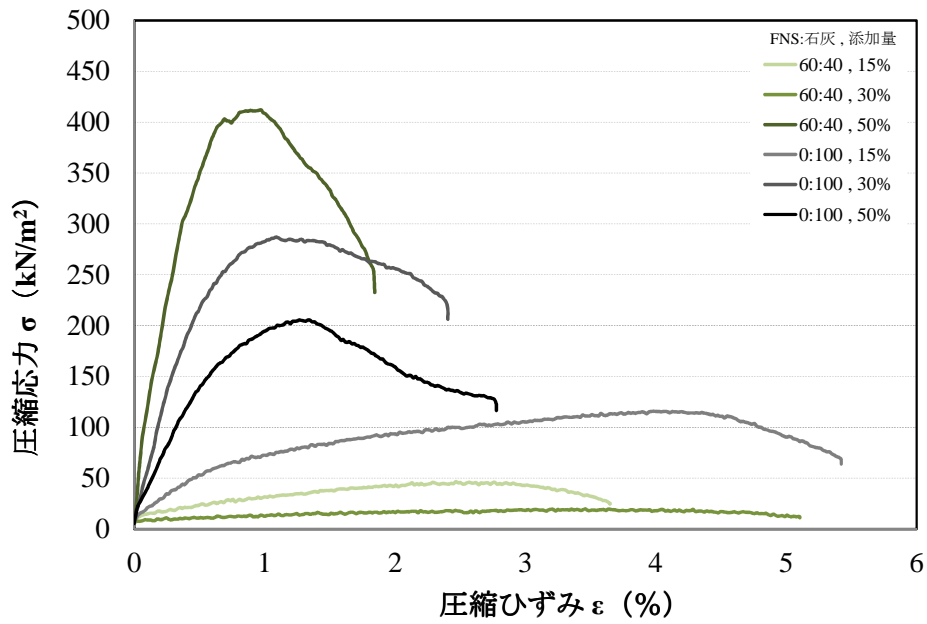


図-4.3.3 FNS石灰処理土（黒ぼく）FNS60+石灰 40 の圧縮応力曲線

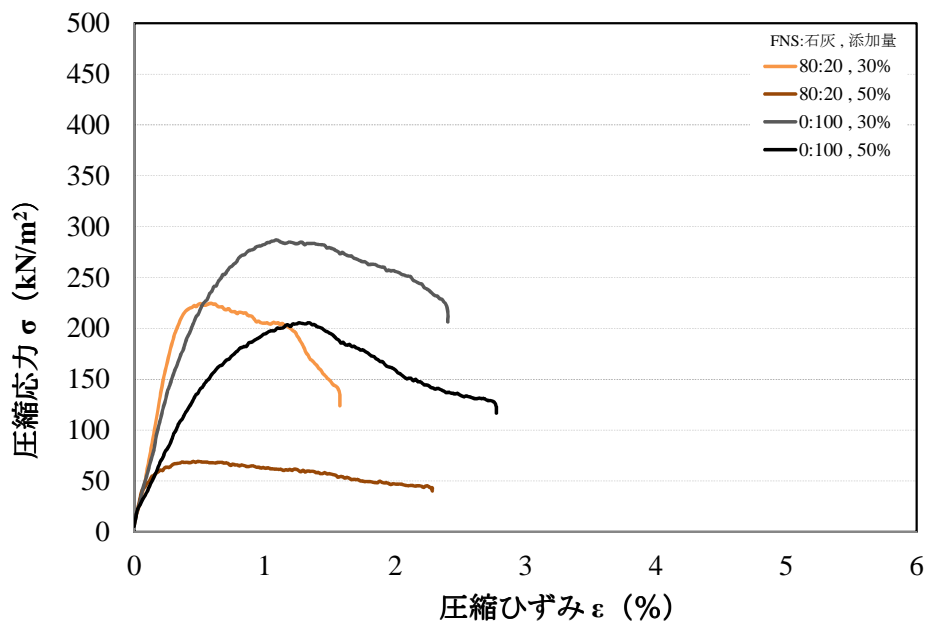


図-4.3.4 FNS石灰処理土（黒ぼく）FNS80+石灰 20 の圧縮応力曲線

4.3.3 Fe石灰の添加による改良土の応力-ひずみ挙動

Fe石灰処理土（黒ぼく）の材齢 91 日における応力-ひずみ曲線を図-4.3.5～図-4.3.8 に示す。これらの図から、Fe粉の混合割合や添加量によって応力-ひずみの形が大きく変わることが確認できた。Fe石灰処理土（黒ぼく）における破壊時の圧縮ひずみは、石灰単体による石灰処理土（黒ぼく）の場合に比べ小さくなる傾向が見られた。また、FNS石灰処理土（黒ぼく）の最大圧縮応力については、石灰単体による石灰処理土（黒ぼく）の場合に比べ高くなる傾向が見られた。これらの結果、FNS石灰の添加は改良土の剛性を高める効果が期待できる。

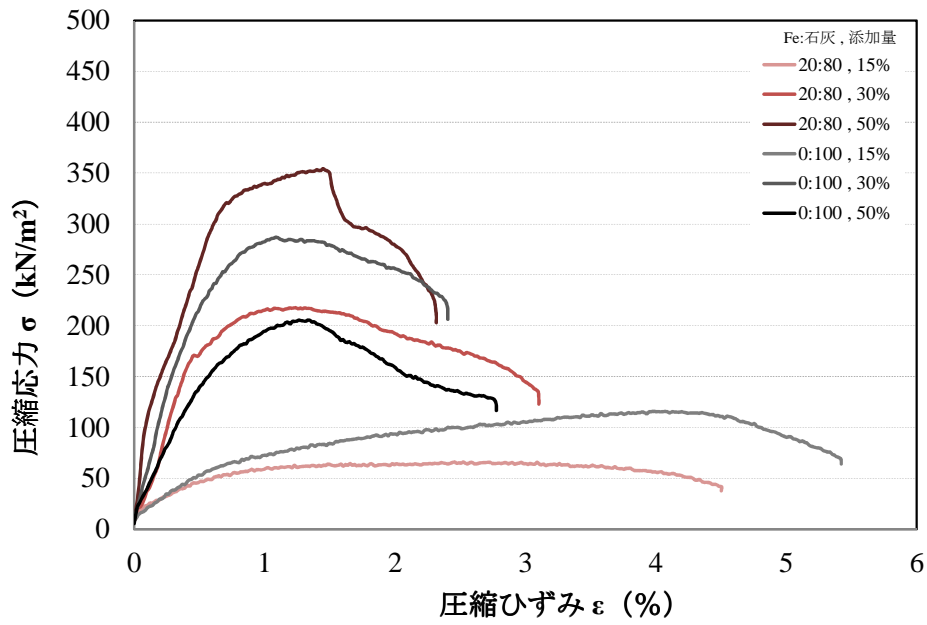


図-4.3.5 Fe石灰処理土（黒ぼく）Fe20+石灰 80 の圧縮応力曲線

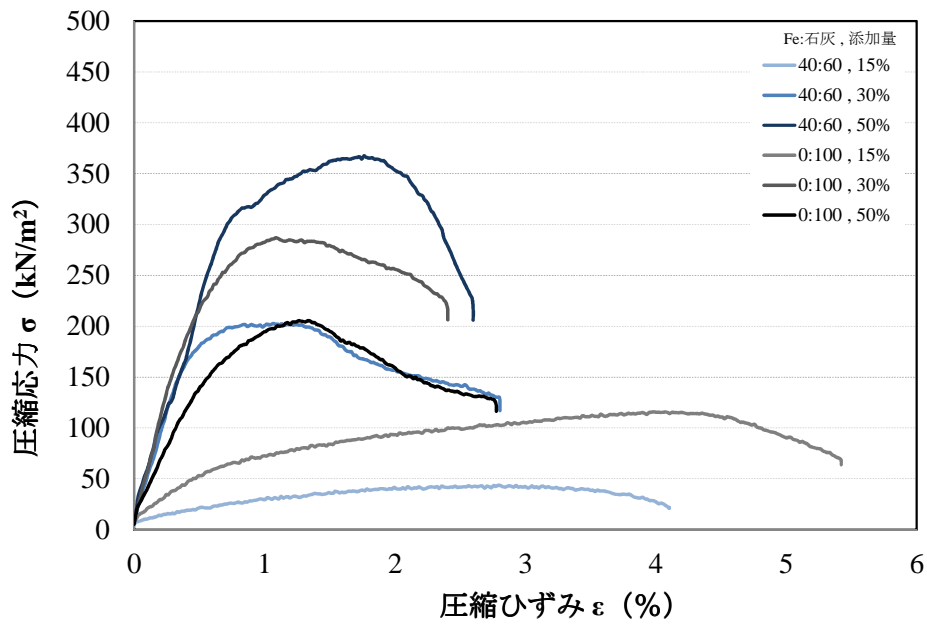


図-4.3.6 Fe石灰処理土（黒ぼく）Fe40+石灰 60 の圧縮応力曲線

4.3.4 改良土の変形係数

材齢 91 日における FNS 石灰処理土（黒ぼく）の変形係数（ E_{50} ）¹⁰⁾を 図-4.3.7 に、Fe 石灰処理土（黒ぼく）の変形係数（ E_{50} ）を 図-4.3.8 に示す。

FNS 石灰処理土（黒ぼく）の変形係数は、FNS 粉の混合割合に関係なく FNS 石灰の添加量の増加に伴い大きくなる傾向が見られ、FNS40+石灰 60 の添加量 50%が最も高い値となった。また、FNS 石灰処理土（黒ぼく）の変形係数が石灰単体処理土のそれと比べ非常に高いことから、FNS 石灰の添加は改良土の剛性を高める効果があると期待できる。一方、Fe 石灰処理土（黒ぼく）の変形係数は、Fe 粉の混合割合や Fe 石灰の添加量の違いによる傾向が明らかでない。また、Fe 石灰処理土（黒ぼく）の変形係数が石灰単体処理土のそれと比べほとんど変わらないことから、Fe 石灰添加が剛性効果を高める特徴的な傾向は認められていない。

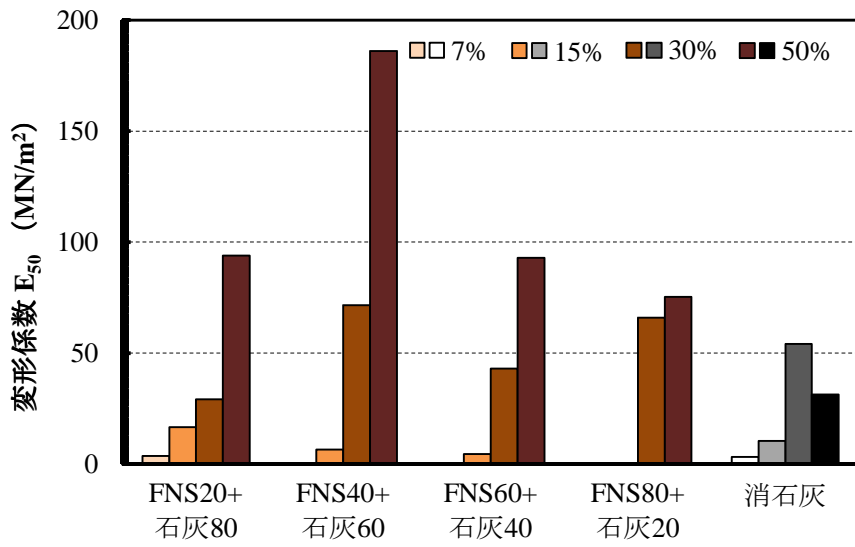


図-4.3.7 FNS石灰処理土（黒ぼく）の変形係数

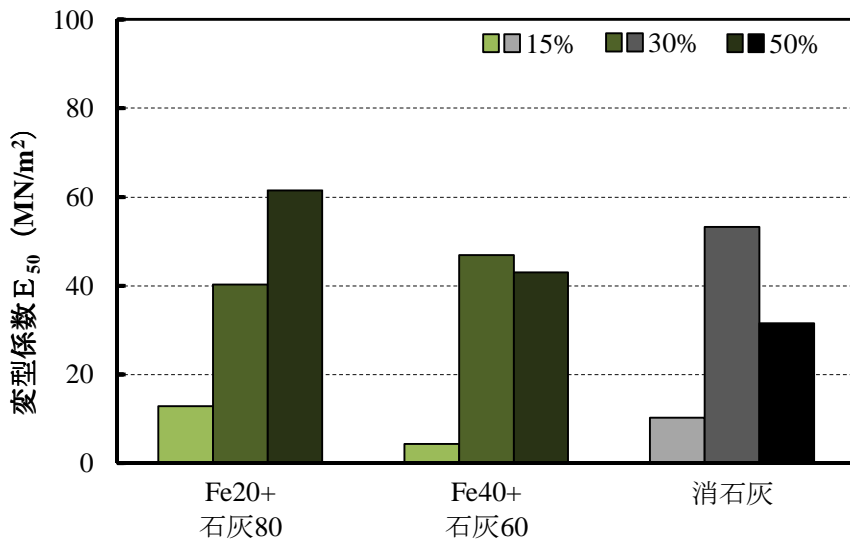


図-4.3.8 Fe石灰処理土（黒ぼく）の変形係数

4.3.5 改良土の乾燥密度

FNS石灰処理土（黒ぼく）の乾燥密度を図-4.3.9に、Fe石灰処理土（黒ぼく）の乾燥密度を図-4.3.10に示す。

FNS石灰処理土（黒ぼく）の乾燥密度は、FNS粉の混合割合やFNS石灰の添加量に関係なく、黒ぼくに比べ高くなる傾向が見られた。これは、FNS粉が土粒子の間に充填したことによるものと考えられる。このことで、粒度調整効果（粒度改善効果）が高まり、4.2項で述べたFNS石灰を黒ぼくに添加することで一軸圧縮強さを高めた要因の1つであると考えられる。特に、今回の実験で行った最大添加量50%における乾燥密度が他の添加量の場合に比べ高く、4.2項で述べた一軸圧縮強さと同様の傾向が確認できた。

一方、Fe石灰処理土（黒ぼく）の乾燥密度についても、Fe粉の混合割合やFe石灰の添加量に関係なく、黒ぼくに比べ高くなる傾向が見られたことで、Fe粉が土粒子の間に充填したことによるものと考えられる。このことで、Fe石灰処理土（黒ぼく）もFNS石灰処理土（黒ぼく）同様、粒度調整効果（粒度改善効果）が高まり、4.2項で述べたFe石灰を黒ぼくに添加することで一軸圧縮強さを高めた要因の1つであると考えられる。

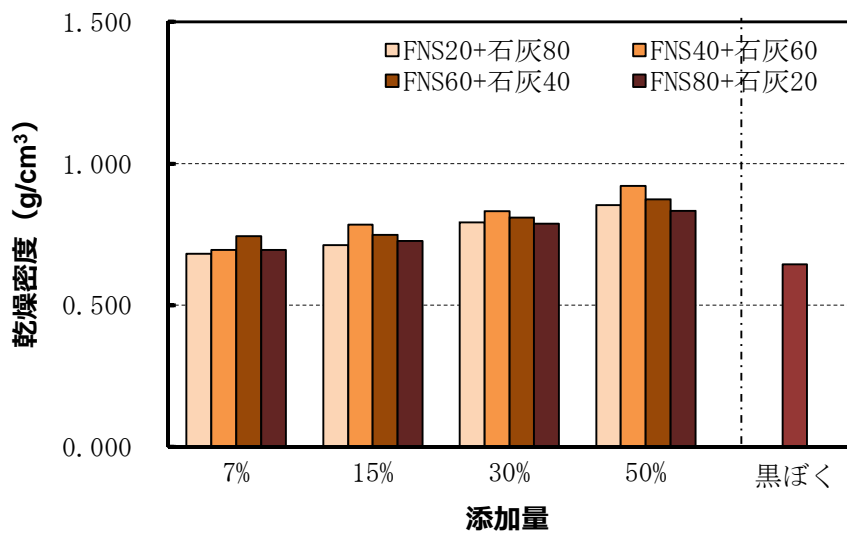


図-4.3.9 FNS石灰処理土（黒ぼく）の乾燥密度

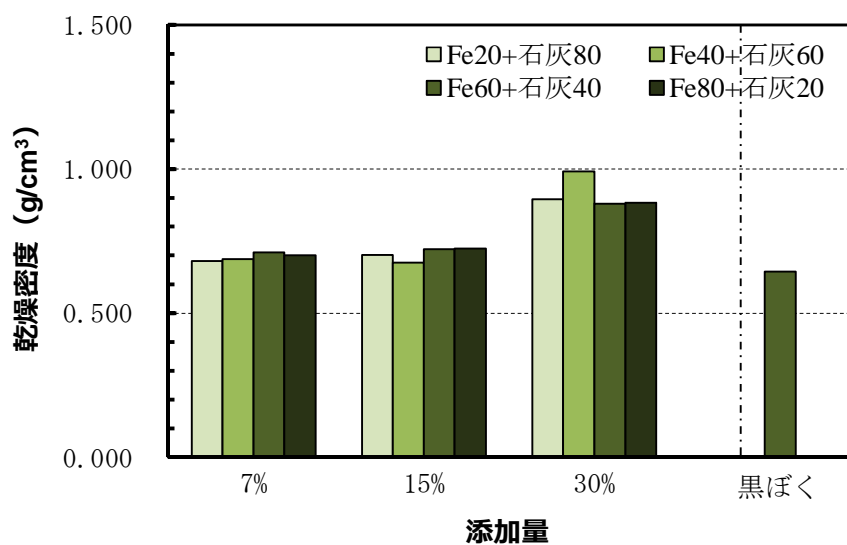


図-4.3.10 Fe石灰処理土（黒ぼく）の乾燥密度

4.4 走査電子顕微鏡 (SEM) による微視的構造の観察

本節では、走査電子顕微鏡 (SEM) によるFNS石灰処理土の微視的構造の観察をFNS粉の添加割合や材齢の違いによる変化とともに、現在販売されているFe25+石灰 75 のFe石灰処理土や石灰単体処理土と比較し、土粒子の結合性について確認した。

写真-4.4.1(a)~(d)はFNS粉と石灰の割合を変化させたFNS石灰処理土(まさ土)の材齢0日の各倍率におけるSEM画像(以下、画像と称す)であり、写真-4.4.2(a)~(d)は、FNS粉と石灰の割合を変化させたFNS石灰処理土(黒ぼく)の材齢0日の各倍率における画像である。また、写真-4.4.3はFe石灰処理土(黒ぼく)で、写真-4.4.4は石灰単体処理土(黒ぼく)の材齢0日の各倍率における画像である。同様に、写真-4.4.5(a)~(d)および写真-4.4.9(a)~(d)はFNS石灰処理土(まさ土)の材齢7日および材齢28日の画像であり、写真-4.4.6(a)~(d)および写真-4.4.10(a)~(d)はFNS石灰処理土(黒ぼく)の材齢7日および材齢28日の画像である。写真-4.4.7および写真-4.4.11はFe石灰処理土(黒ぼく)の材齢7日および材齢28日の画像で、写真-4.4.8および写真-4.4.12は石灰単体処理土(黒ぼく)の材齢7日および材齢28日の画像である。

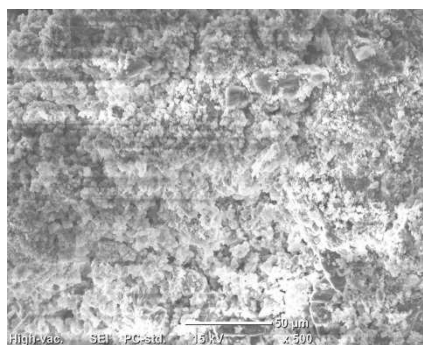
写真-4.4.1(a)~(d)によると、材齢0日でFNS石灰処理土(まさ土)において粒子のみ確認できた。写真-4.4.2(a)~(d)によると、材齢0日では、石灰量が比較的少ないFNS60+石灰40およびFNS80+石灰20のFNS石灰処理土(黒ぼく)において粒子しか確認できなかったが、FNS20+石灰80およびFNS40+石灰60のFNS石灰処理土(黒ぼく)において、土粒子間隙が若干狭く、土粒子の結合が確認できた。写真-4.4.3により、石灰単体では針状結晶の生成反応作製が確認できた。

写真-4.4.5(a)~(d)によると、FNS石灰処理土(まさ土)の材齢7日における画像は、材齢0日の画像とほとんど同じで、若干ではあるが土粒子の結合が確認できた。写真

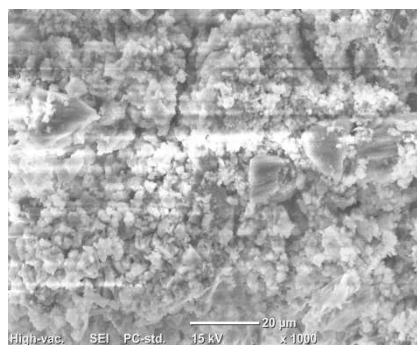
-4.4.6(a)～(d)では、FNS60+石灰 40 およびFNS80+石灰 20 のFNS石灰処理土（黒ぼく）において、材齢 0 日での粒子の結合は確認できなかったが、材齢 7 日には粒子の結合が確認でき、FNS20+石灰 80 およびFNS40+石灰 60 のFNS石灰処理土（黒ぼく）においては、結晶物が材齢 0 日に比べ土粒子間の間隙がさらに狭くなり、粒子の結合が進んでいることが確認できた。また、写真-4.4.8 では、石灰単体処理土（黒ぼく）において、FNS石灰処理土（黒ぼく）やFe石灰処理土（黒ぼく）に比べ土粒子間の間隙が大きいことが確認できた。

写真-4.4.9(a)～(d)および写真-4.4.10(a)～(d)によると、FNS石灰処理土（まさ土・黒ぼく）において、土粒子間の間隙が少なくなっている様子が確認できた。また、写真-4.4.8 および写真-4.4.9 によると、Fe石灰処理土（黒ぼく）および石灰単体処理土（黒ぼく）では、土粒子間の間隙が少なく粒子の結合が確認できた。

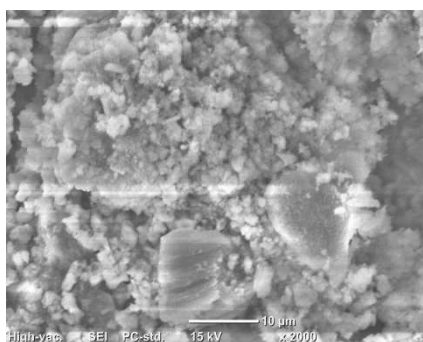
以上のことより、FNS石灰処理土（まさ土・黒ぼく）は、まさ土や黒ぼくに含まれているシリカ (SiO_2) に加えFNS微粉末に含まれているシリカ (SiO_2) と石灰 (Ca(OH)_2) によるポズラン反応で土粒子が結合することで土粒子間隙が狭くなり、硬化の活性化を有していることが定性的ではあるが確認できた。特に、材齢日数の増加とともにその傾向は高い。また同様の結果がFe石灰処理土（黒ぼく）や石灰単体処理土（黒ぼく）についても確認できた。



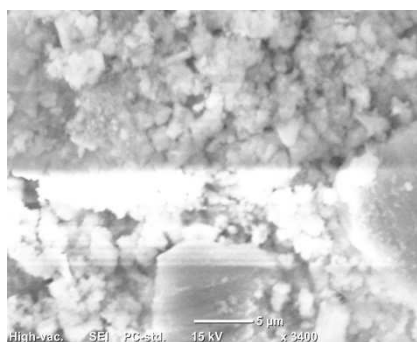
500 倍



1000 倍

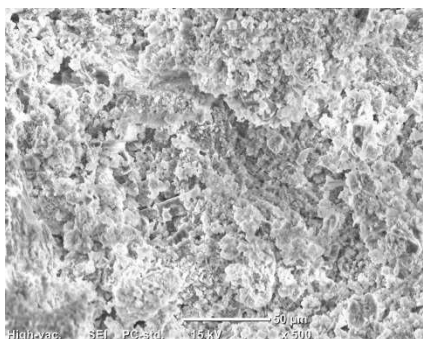


2000 倍

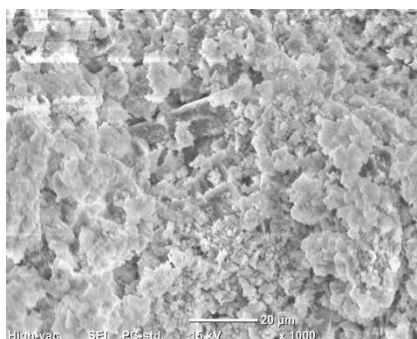


3400 倍

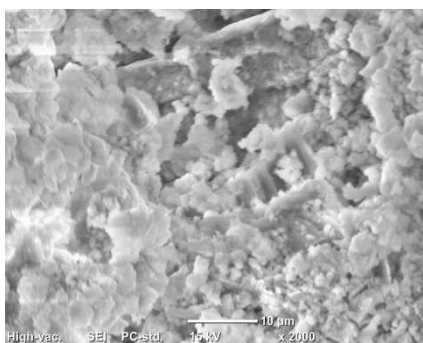
写真-4.4.1 (a) FNS石灰処理土（まさ土）の画像（FNS20+石灰80）（材齢0日）



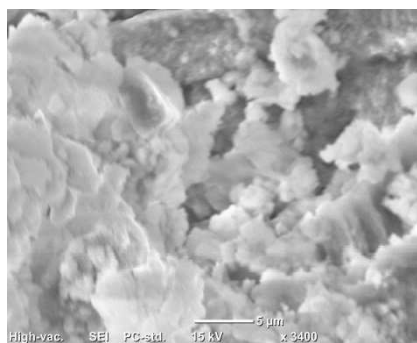
500 倍



1000 倍

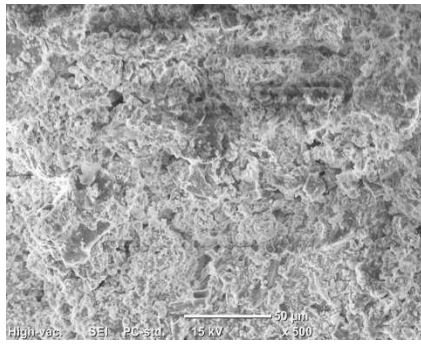


2000 倍

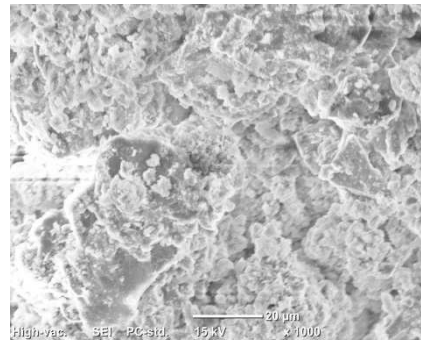


3400 倍

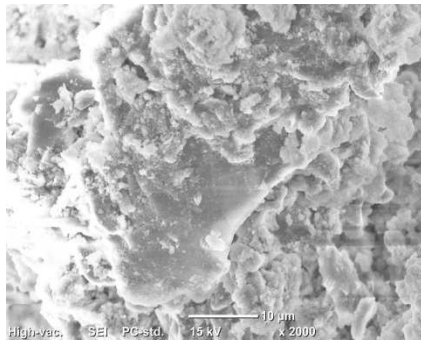
写真-4.4.1 (b) FNS石灰処理土（まさ土）の画像（FNS40+石灰60）（材齢0日）



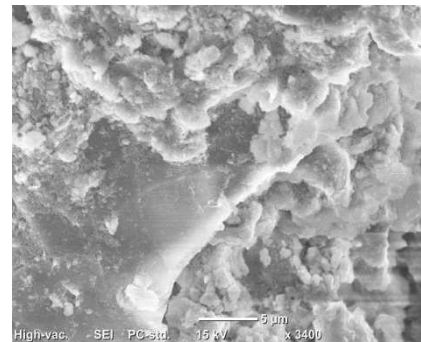
500 倍



1000 倍

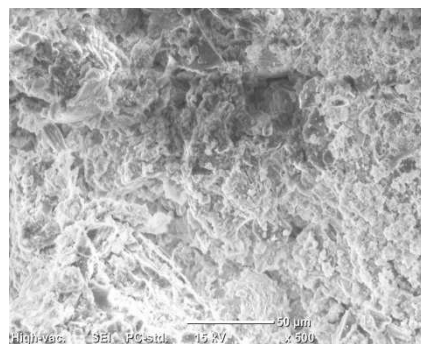


2000 倍

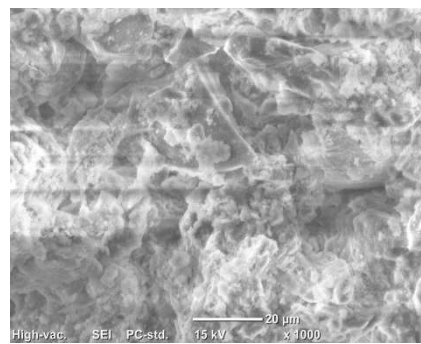


3400 倍

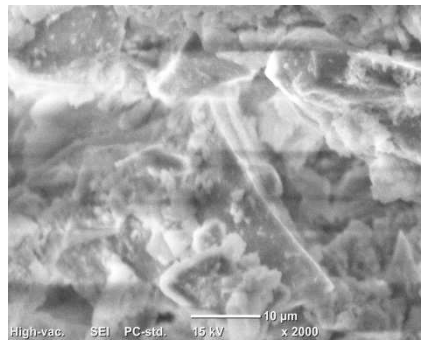
写真-4.4.1 (c) FNS石灰処理土（まさ土）の画像（FNS60+石灰40）（材齢0日）（材齢0日）



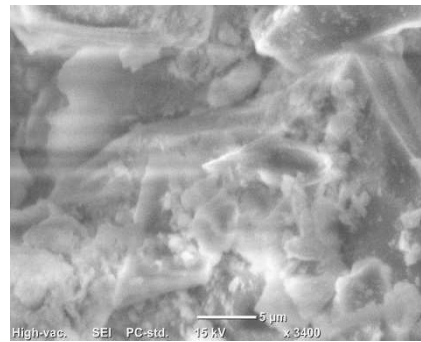
500 倍



1000 倍

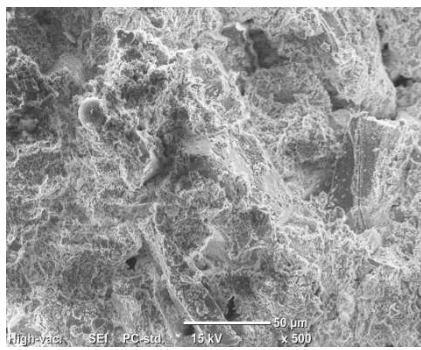


2000 倍

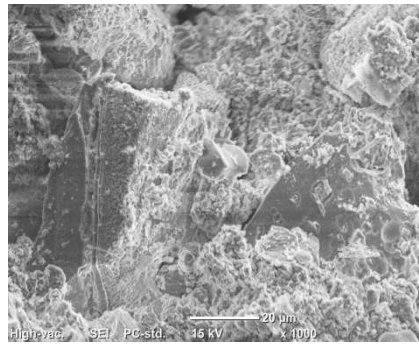


3400 倍

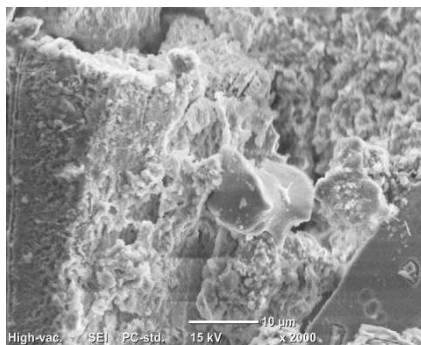
写真-4.4.1 (d) FNS石灰処理土（まさ土）の画像（FNS80+石灰20）（材齢0日）



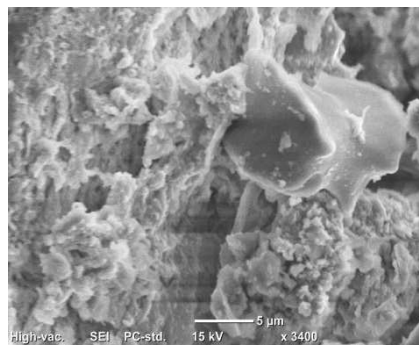
500 倍



1000 倍

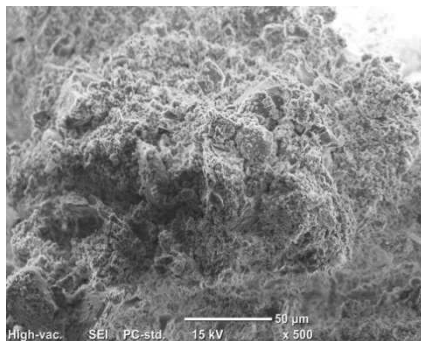


2000 倍

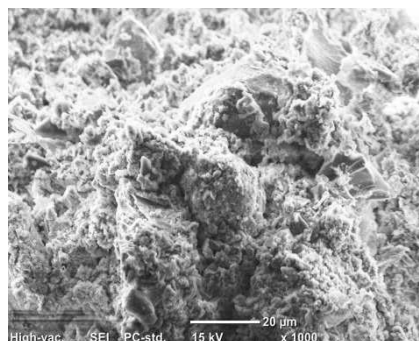


3400 倍

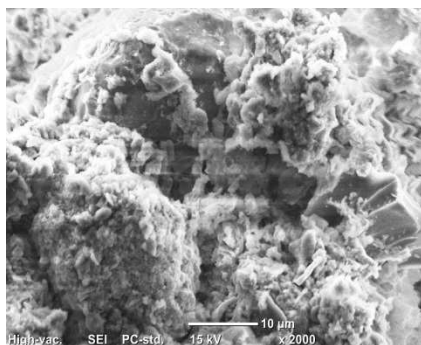
写真-4.4.2 (a) FNS石灰処理土（黒ぼく）の画像（FNS20+石灰80）（材齢0日）



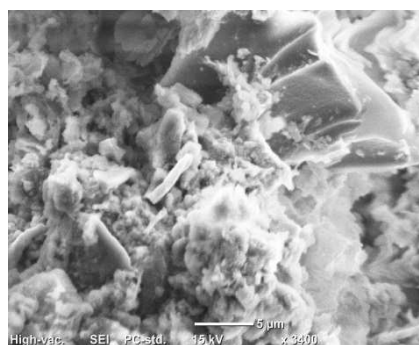
500 倍



1000 倍

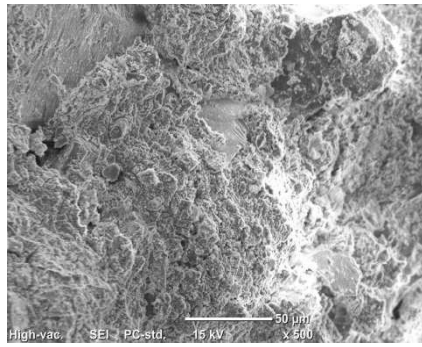


2000 倍

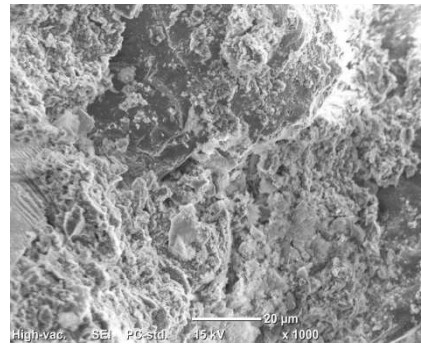


3400 倍

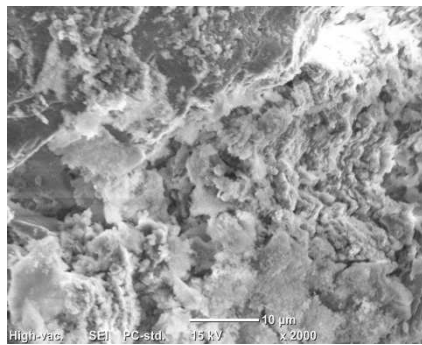
写真-4.4.2 (b) FNS石灰処理土（黒ぼく）の画像（FNS40+石灰60）（材齢0日）



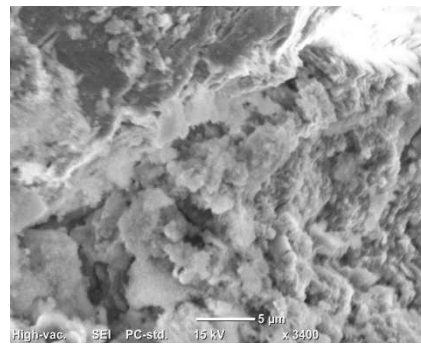
500 倍



1000 倍

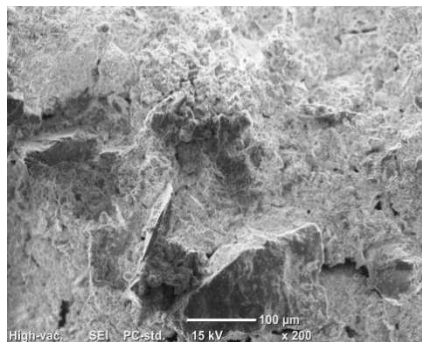


2000 倍

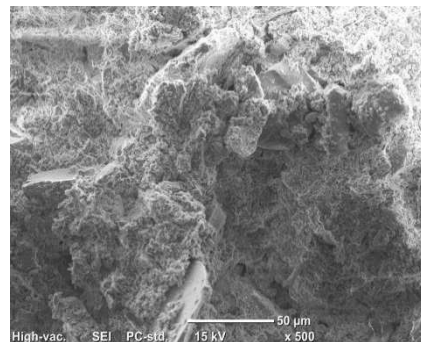


3400 倍

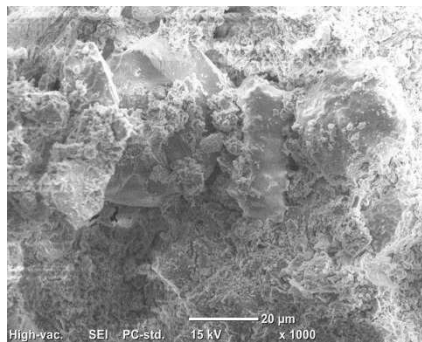
写真-4.4.2 (c) FNS石灰処理土（黒ぼく）の画像（FNS60+石灰40）（材齢0日）（材齢0日）



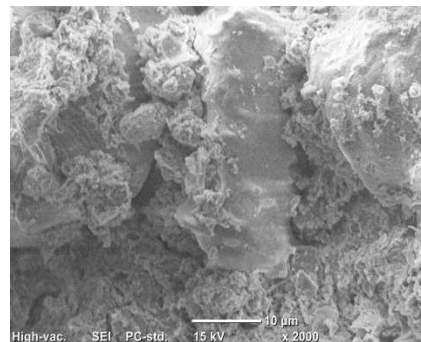
500 倍



1000 倍

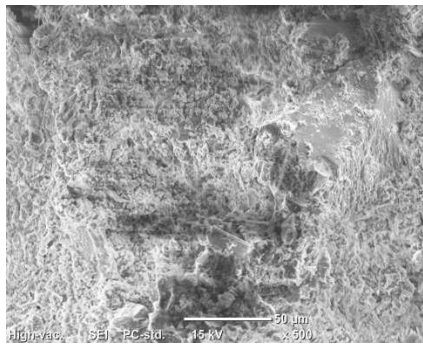


2000 倍

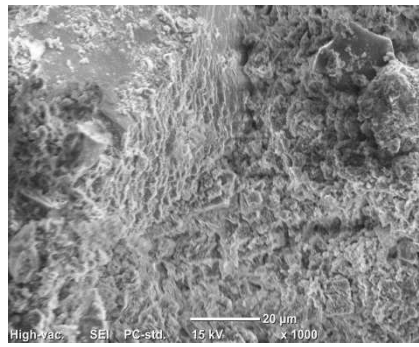


3400 倍

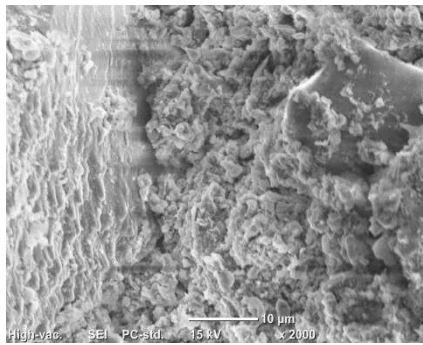
写真-4.4.2 (d) FNS石灰処理土（黒ぼく）の画像（FNS80+石灰20）（材齢0日）



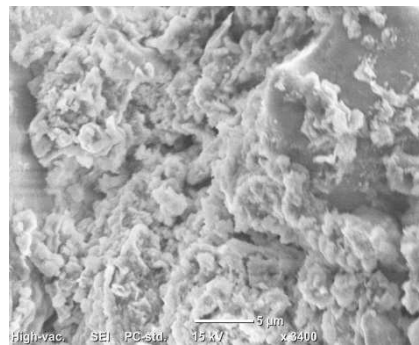
500 倍



1000 倍

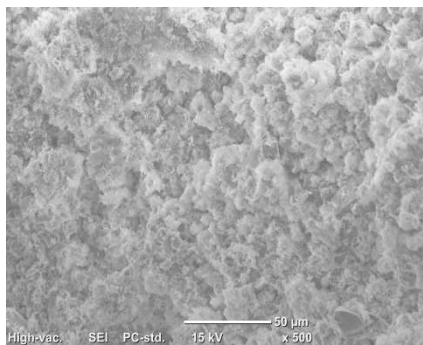


2000 倍

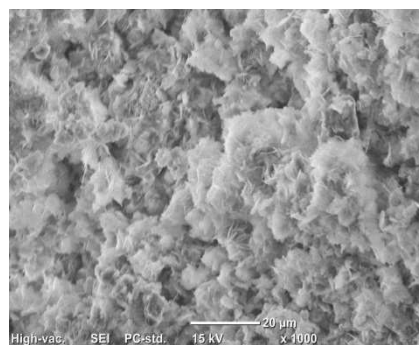


3400 倍

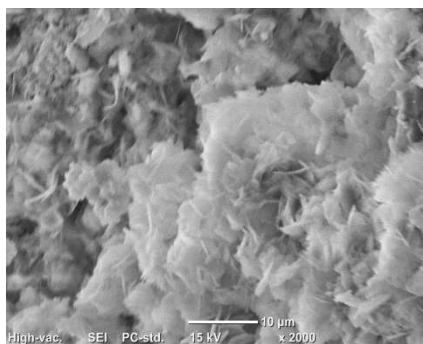
写真-4.4.3 Fe石灰処理土（黒ぼく）の画像（材齢0日）



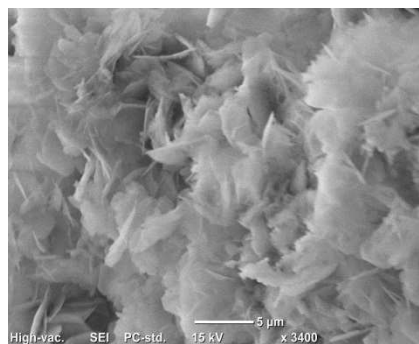
500 倍



1000 倍

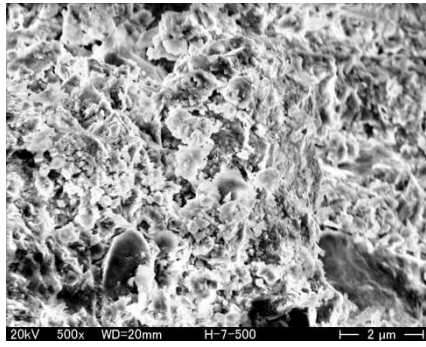


2000 倍

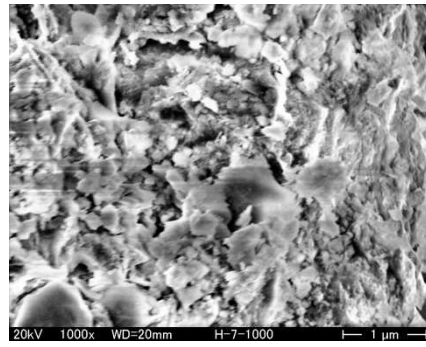


3400 倍

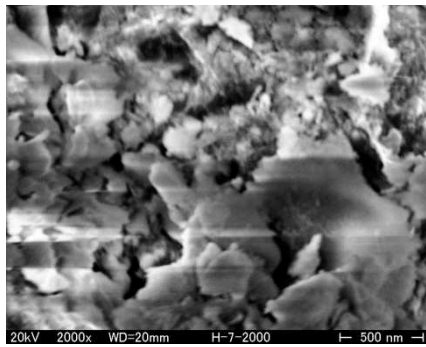
写真-4.4.4 石灰単体処理土（黒ぼく）の画像（材齢0日）



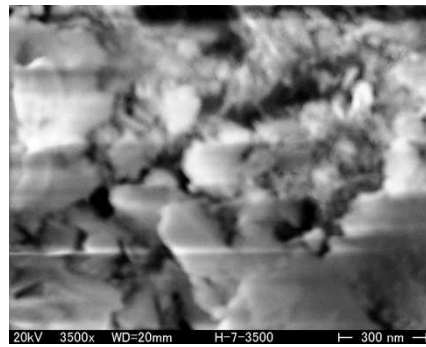
500 倍



1000 倍

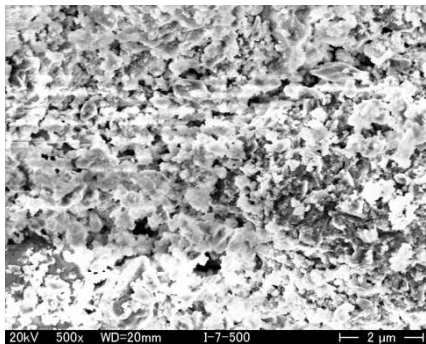


2000 倍

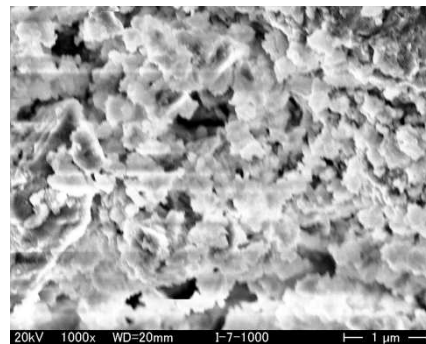


3500 倍

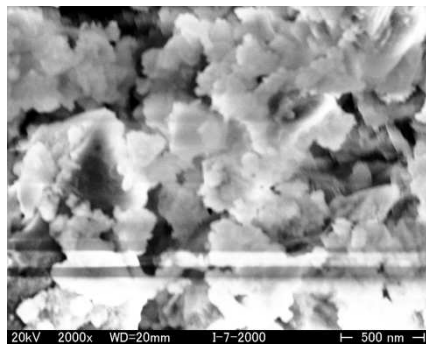
写真-4.4.5 (a) FNS石灰処理土（まさ土）の画像（FNS20+石灰80）（材齢7日）



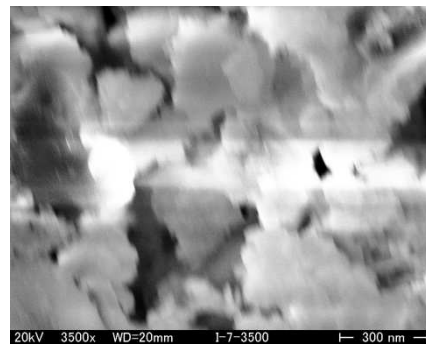
500 倍



1000 倍

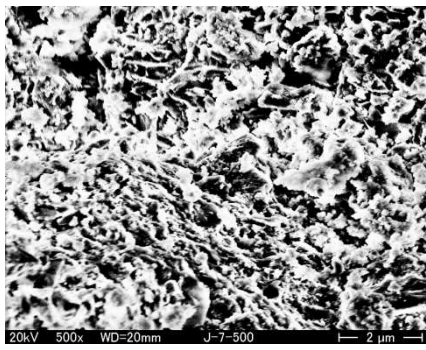


2000 倍

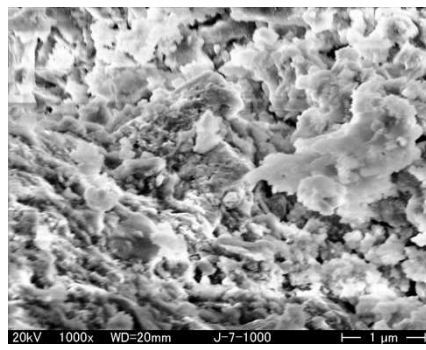


3500 倍

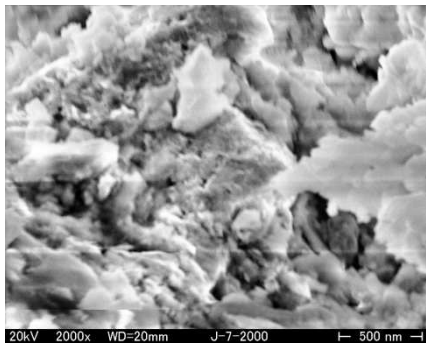
写真-4.4.5 (b) FNS石灰処理土（まさ土）の画像（FNS40+石灰60）（材齢7日）



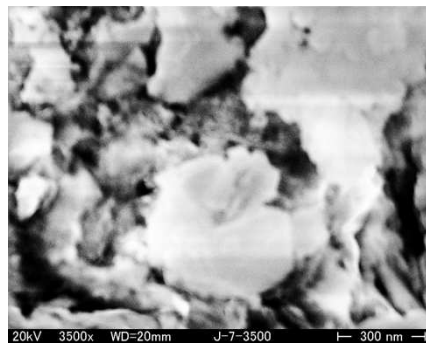
500 倍



1000 倍

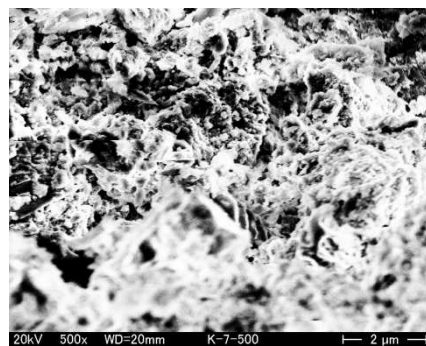


2000 倍

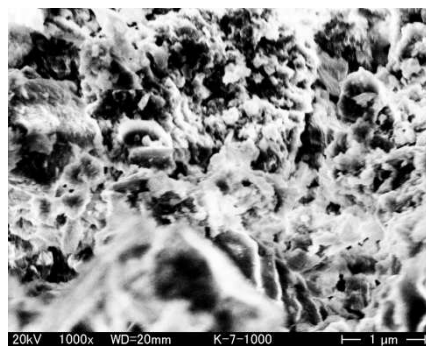


3500 倍

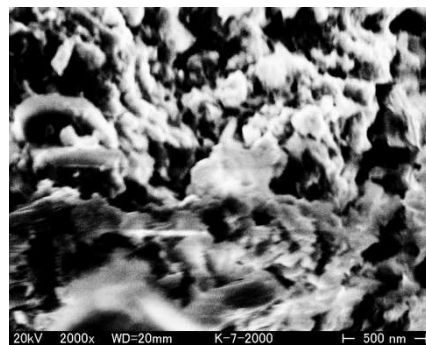
写真-4.4.5 (c) FNS石灰処理土（まさ土）の画像（FNS60+石灰40）（材齢7日）



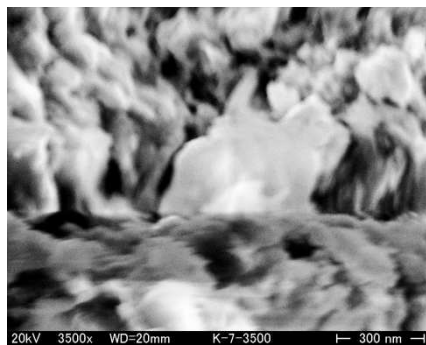
500 倍



1000 倍

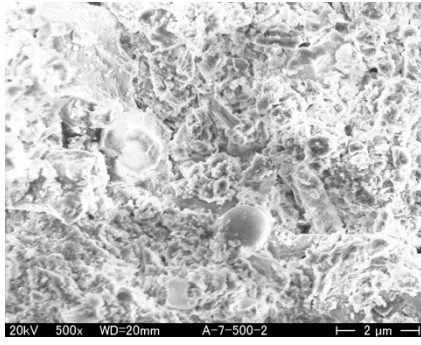


2000 倍

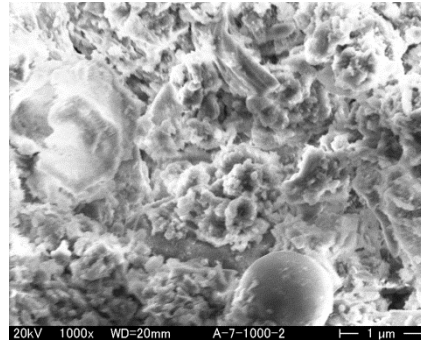


3500 倍

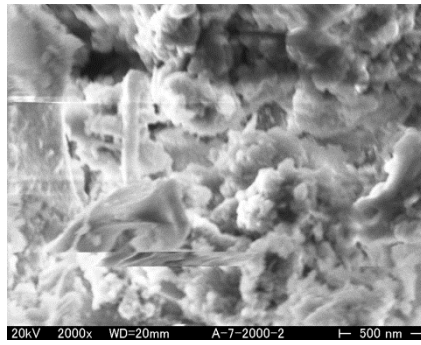
写真-4.4.5 (d) FNS石灰処理土（まさ土）の画像（FNS80+石灰20）（材齢7日）



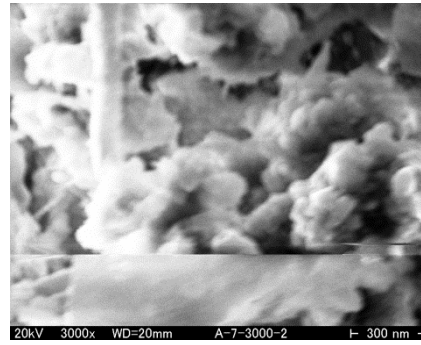
500 倍



1000 倍

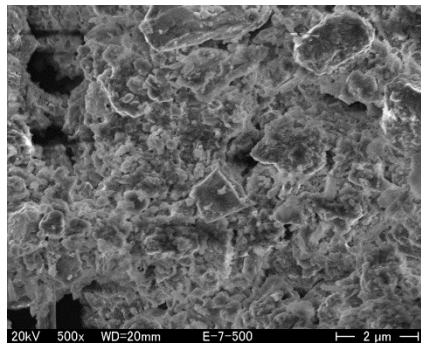


2000 倍

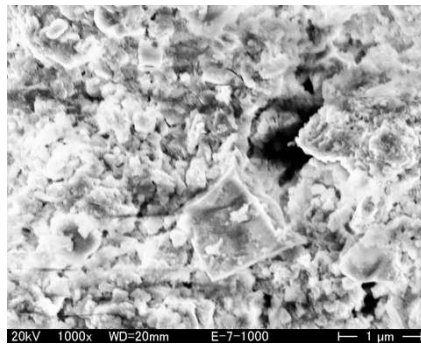


3500 倍

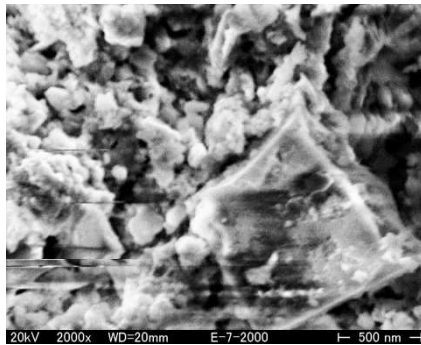
写真-4.4.6 (a) FNS石灰処理土（黒ぼく）の画像（FNS20+石灰80）（材齢7日）



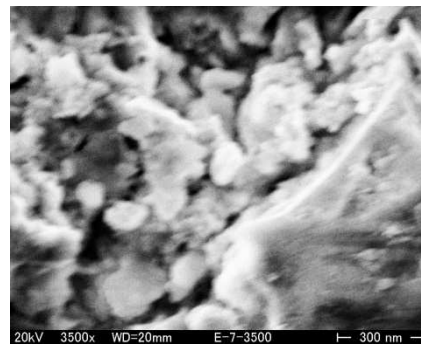
500 倍



1000 倍

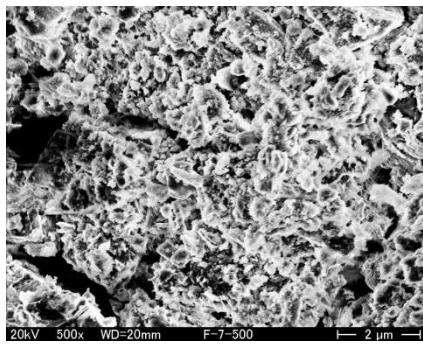


2000 倍

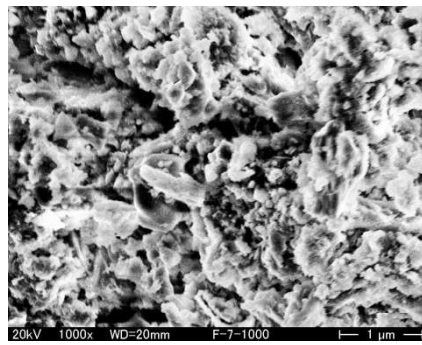


3500 倍

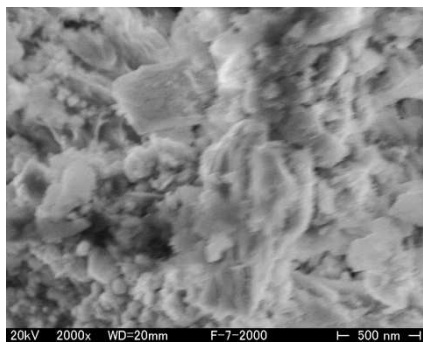
写真-4.4.6 (b) FNS石灰処理土（黒ぼく）の画像（FNS40+石灰60）（材齢7日）



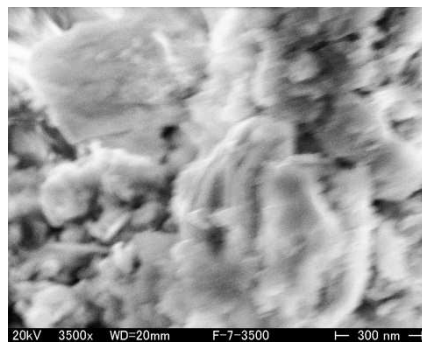
500 倍



1000 倍

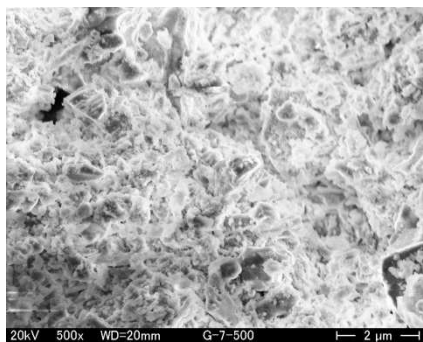


2000 倍

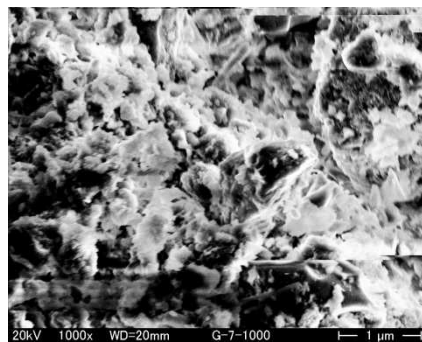


3500 倍

写真-4.4.6 (c) FNS石灰処理土（黒ぼく）の画像（FNS60+石灰40）（材齢7日）



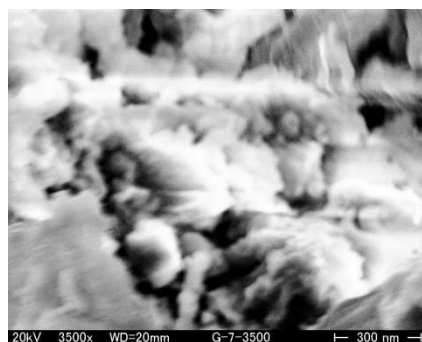
500 倍



1000 倍

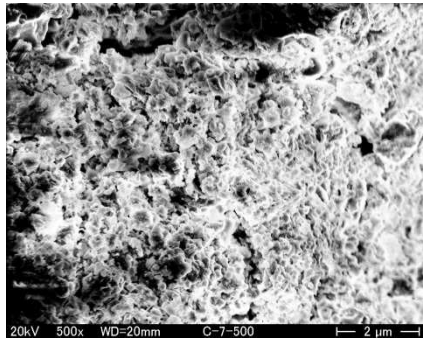


2000 倍

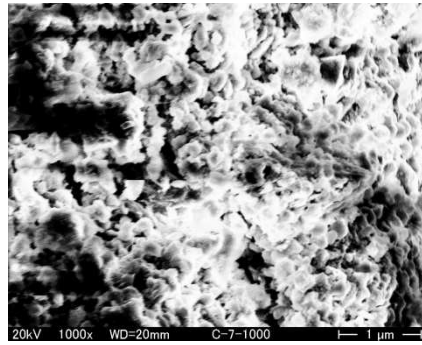


3500 倍

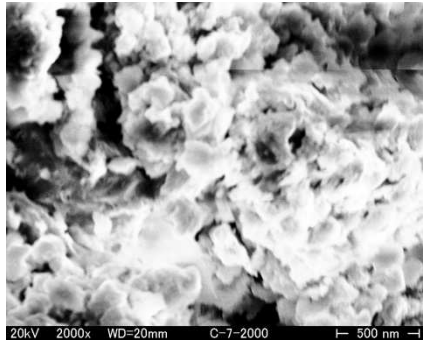
写真-4.4.6 (d) FNS石灰処理土（黒ぼく）の画像（FNS80+石灰20）（材齢7日）



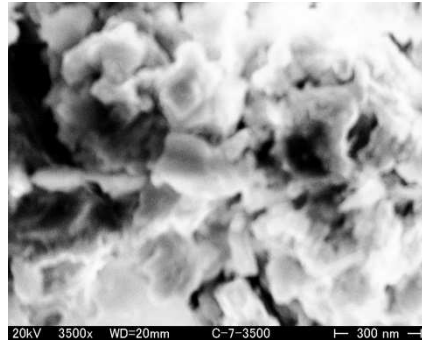
500 倍



1000 倍

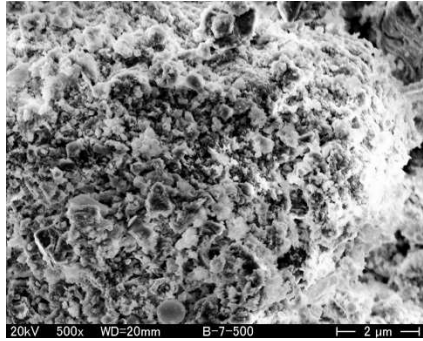


2000 倍

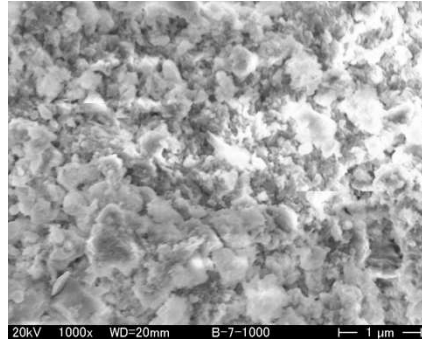


3500 倍

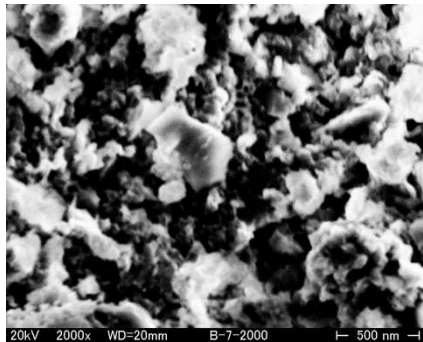
写真-4.4.7 Fe石灰処理土(黒ぼく)の画像 (材齢7日)



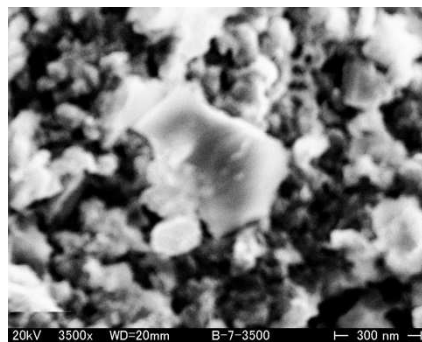
500 倍



1000 倍

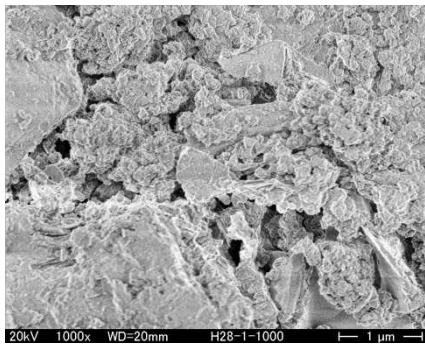


2000 倍

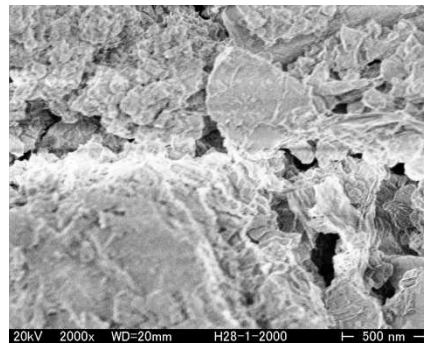


3500 倍

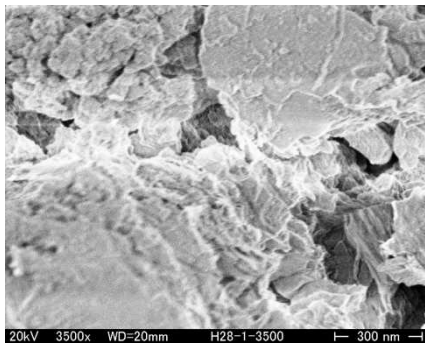
写真-4.4.8 石灰単体処理土(黒ぼく)の画像 (材齢7日)



1000 倍

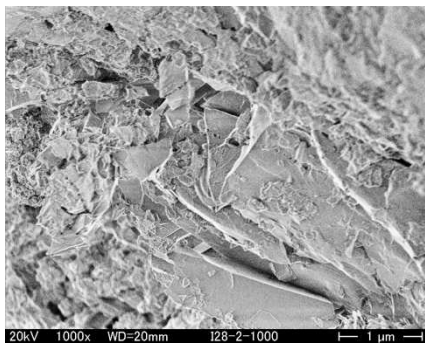


2000 倍

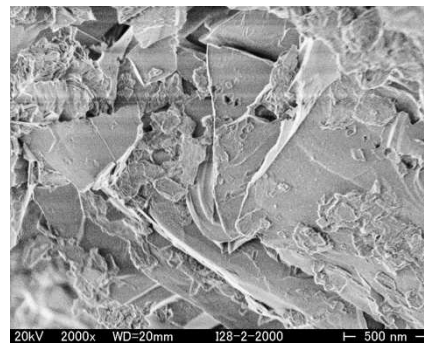


3500 倍

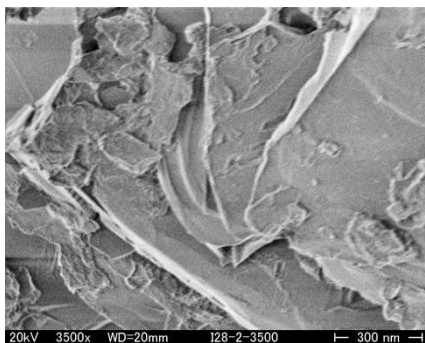
写真-4.4.9 (a) FNS石灰処理土（まさ土）の画像（FNS20+石灰80）（材齢28日）



1000 倍

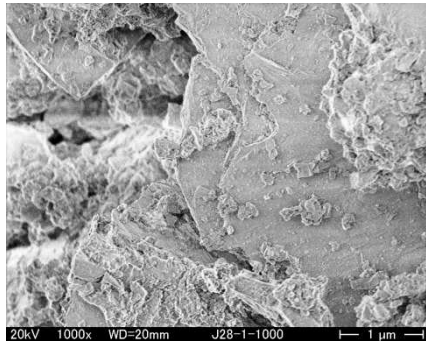


2000 倍

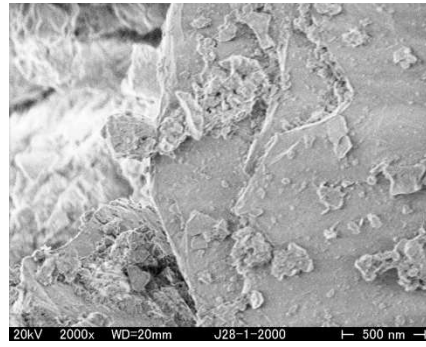


3500 倍

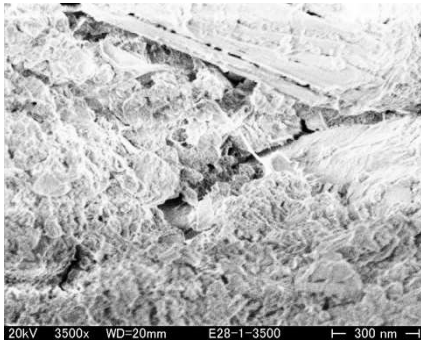
写真-4.4.9 (b) FNS石灰処理土（まさ土）の画像（FNS40+石灰60）（材齢28日）



1000 倍

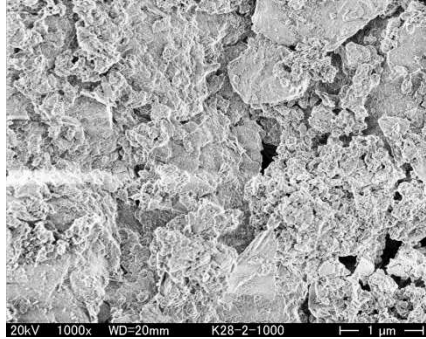


2000 倍

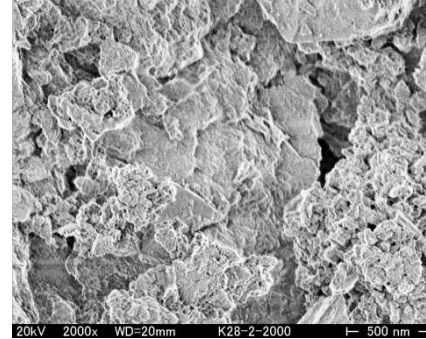


3500 倍

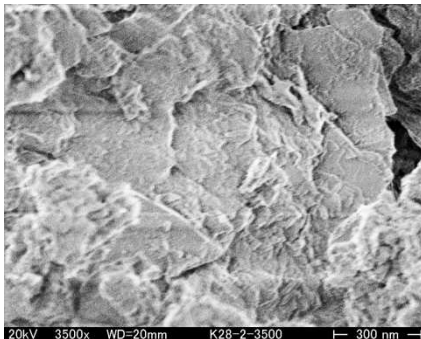
写真-4.4.9 (c) FNS石灰処理土（まさ土）の画像（FNS60+石灰40）（材齢28日）



1000 倍

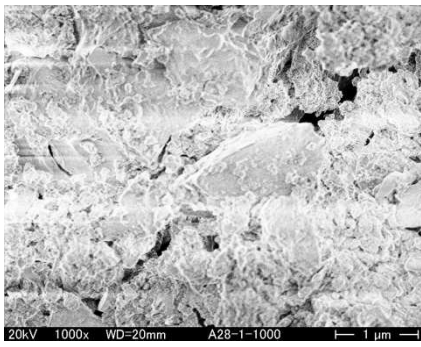


2000 倍

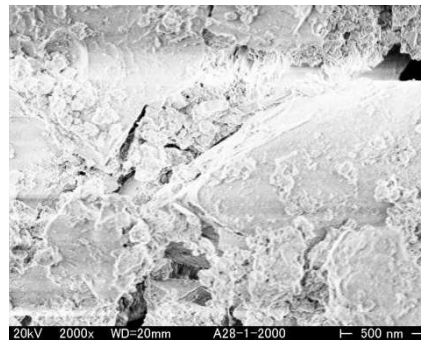


3500 倍

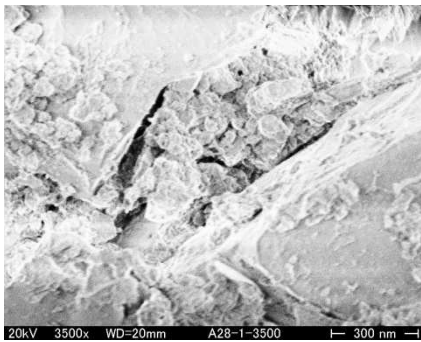
写真-4.4.9 (d) FNS石灰処理土（まさ土）の画像（FNS80+石灰20）（材齢28日）



1000 倍

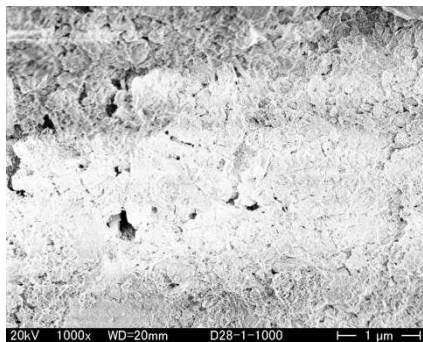


2000 倍

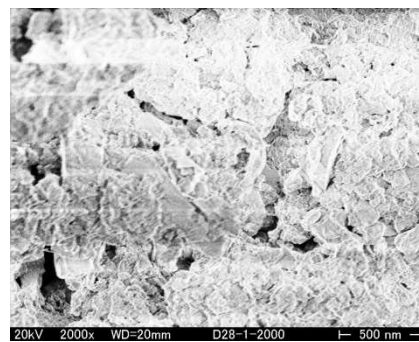


3500 倍

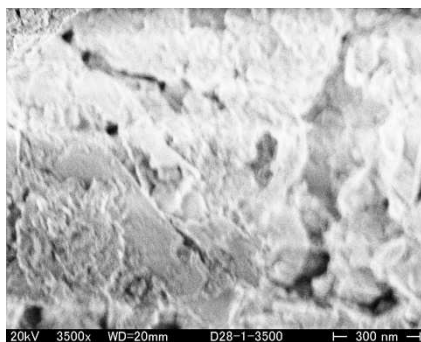
写真-4.4.10 (a) FNS石灰処理土（黒ぼく）の画像（FNS20+石灰80）（材齢28日）



1000 倍

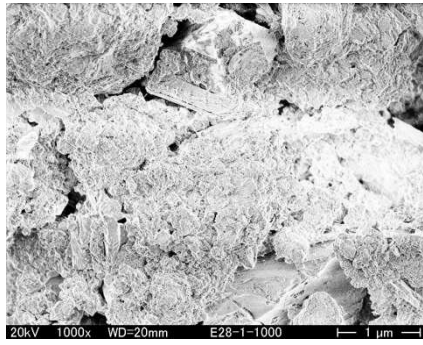


2000 倍

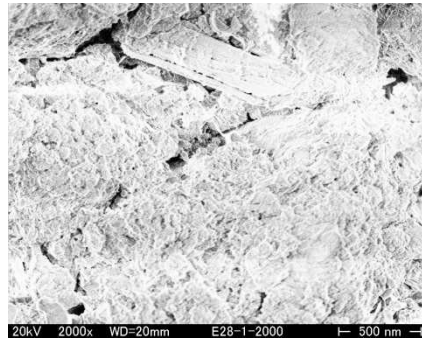


3500 倍

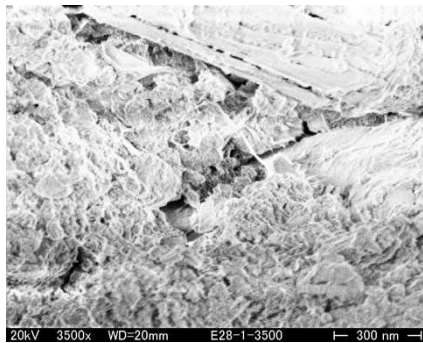
写真-4.4.10 (b) FNS石灰処理土（黒ぼく）の画像（FNS40+石灰60）（材齢28日）



1000 倍

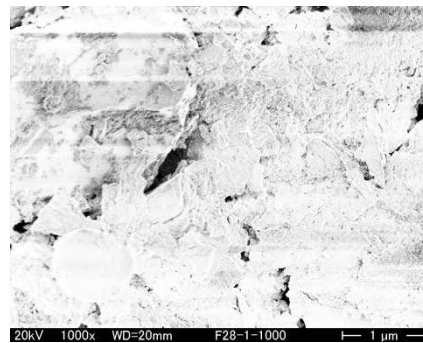


2000 倍

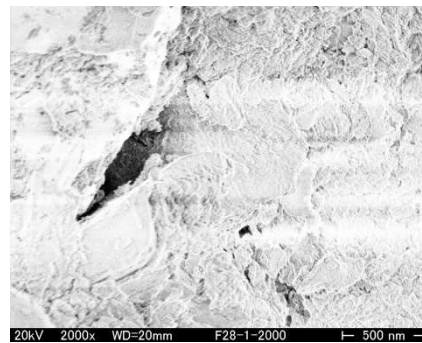


3500 倍

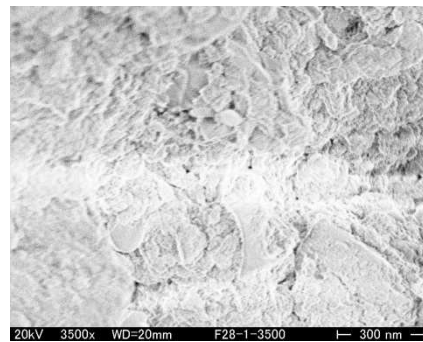
写真-4. 4. 10 (c) FNS石灰処理土（黒ぼく）の画像（FNS60+石灰40）（材齢28日）



1000 倍

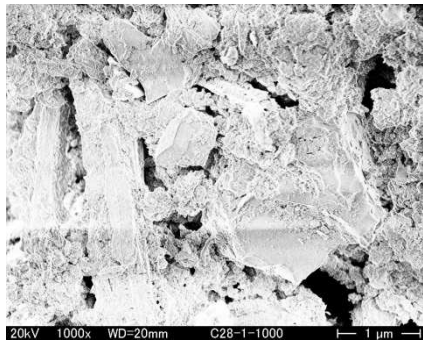


2000 倍

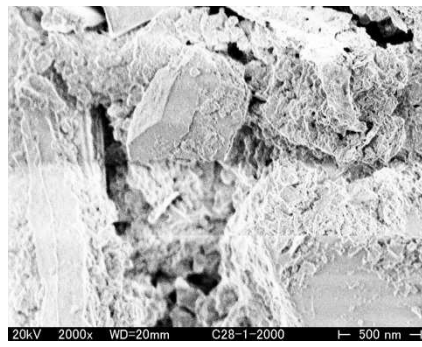


3500 倍

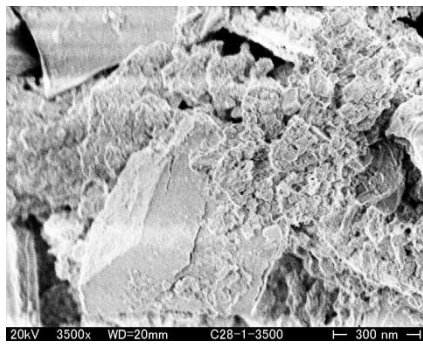
写真-4. 4. 10 (d) FNS石灰処理土（黒ぼく）の画像（FNS80+石灰20）（材齢28日）



1000 倍

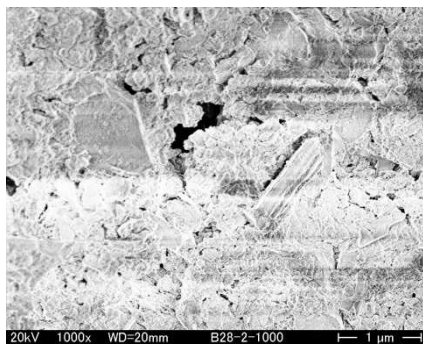


2000 倍

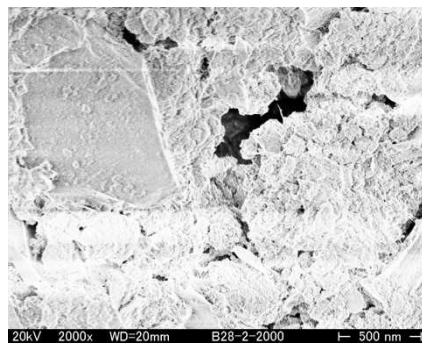


3500 倍

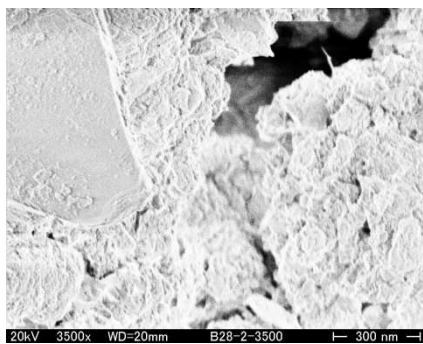
写真-4.4.11 Fe石灰処理土（黒ぼく）の画像（材齢28日）



1000 倍



2000 倍



3500 倍

写真-4.4.12 石灰単体処理土（黒ぼく）の画像（材齢28日）

4.5 六価クロム溶出に関する環境安全性評価

セメントおよびセメント系安定材を使用した安定処理土は「セメント及びセメント系固化材を使用した改良土の六価クロム溶出試験要領（案）」（国土交通省・平成 13 年 4 月）にもとづき、六価クロムの溶出量が土壤環境基準（旧環境庁・平成 3 年 8 月）に適合していることの確認が必要とされている。同要領（案）では、セメント及びセメント系固化材として、セメントを含有成分とする固化材と限定されているが、石灰系固化材も含まれている。このことを踏まえ、FNS 粉の添加割合を変化させた FNS 石灰処理土（黒ぼく）および FNS 石灰処理土（まさ土）のほか Fe 石灰処理土、石灰単体処理土についても六価クロムの溶出量の確認を行った。その結果を表-4.5.1 に示す。これより、調査対象の処理土は、すべてにおいて六価クロムの溶出に関する土壤環境基準を十分満足しており、調査対象の安定材は六価クロムについて問題ない材料であることが確認できた。

表-4.5.1 六価クロムの溶出量

計 量 の 対 象	単 位	計 量 の 結 果	規 格 値
FNS石灰処理土(黒ぼく)(FNS80+石灰20)	mg/L	0.02未満	0.05以下
FNS石灰処理土(黒ぼく)(FNS60+石灰40)	mg/L	0.02未満	0.05以下
FNS石灰処理土(黒ぼく)(FNS40+石灰60)	mg/L	0.02未満	0.05以下
FNS石灰処理土(黒ぼく)(FNS20+石灰80)	mg/L	0.02未満	0.05以下
FNS石灰処理土(まさ土)(FNS80+石灰20)	mg/L	0.02未満	0.05以下
FNS石灰処理土(まさ土)(FNS60+石灰40)	mg/L	0.02未満	0.05以下
FNS石灰処理土(まさ土)(FNS40+石灰60)	mg/L	0.02未満	0.05以下
FNS石灰処理土(まさ土)(FNS20+石灰80)	mg/L	0.02未満	0.05以下
Fe石灰処理土(まさ土)(Fe25+石灰75)	mg/L	0.02未満	0.05以下
Fe石灰処理土(黒ぼく)(FNS80+石灰20)	mg/L	0.02未満	0.05以下
Fe石灰処理土(黒ぼく)(FNS60+石灰40)	mg/L	0.02未満	0.05以下
Fe石灰処理土(黒ぼく)(FNS40+石灰60)	mg/L	0.02未満	0.05以下
Fe石灰処理土(黒ぼく)(FNS20+石灰80)	mg/L	0.02未満	0.05以下
Fe石灰処理土(まさ土)(FNS80+石灰20)	mg/L	0.02未満	0.05以下
Fe石灰処理土(まさ土)(FNS60+石灰40)	mg/L	0.02未満	0.05以下
Fe石灰処理土(まさ土)(FNS40+石灰60)	mg/L	0.02未満	0.05以下
Fe石灰処理土(まさ土)(FNS20+石灰80)	mg/L	0.02未満	0.05以下
石灰単体処理土(黒ぼく)	mg/L	0.02未満	0.05以下

4.6 まとめ

本章で得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) FNS石灰を特殊土へ添加することで、まさ土については概ね 15%以下の添加量、黒ぼくについては概ね 30%以上の添加量で非常に高い改良効果が期待できることが確認できた。
- 2) 同一条件でFNS石灰あるいはFe石灰を特殊土（まさ土・黒ぼく）へ添加した場合の一軸圧縮強度は、改良材間で有意な差はなく、どちらも同程度の強度発現効果となっていることが確認できた。
- 3) FNS石灰処理土（黒ぼく）およびFe石灰処理土（黒ぼく）の破壊時の圧縮ひずみは、地盤改良材の添加量が増加するとともに小さくなる傾向が確認された。また、最大圧縮応力については、地盤改良材の添加量が増加するとともに強くなる傾向が確認された。
- 4) FNS石灰処理土（黒ぼく）の変形係数は、石灰単体処理土（黒ぼく）やFe石灰処理土（黒ぼく）のそれとは異なり高い値となった。特に、FNS石灰の添加量が多いほどその傾向が強く、FNS石灰には土の剛性を高める効果があると期待できた。
- 5) FNS石灰処理土（黒ぼく・まさ土）の乾燥密度は、黒ぼくに比べ高い値となり、粒度調整効果（粒度改善効果）が高まったと考えられる。また、最大添加量 50%における乾燥密度が他の添加量の場合に比べ高く、一軸圧縮強さと同様の傾向が確認できた。
- 6) FNS石灰処理土（まさ土・黒ぼく）は、材齢日数の増加とともにまさ土や黒ぼくに含まれているシリカ（ SiO_2 ）に加えFNS微粉末に含まれているシリカ（ SiO_2 ）と石灰（ Ca(OH)_2 ）によるポズラン反応が定性的ではあるが確認できた。また同様の

結果がFe石灰処理土（黒ぼく）や石灰単体処理土（黒ぼく）についても確認できた。

- 7) FNS石灰処理土（まさ土・黒ぼく）およびFe石灰（まさ土・黒ぼく）は、すべてにおいて六価クロムの溶出に関する土壤環境基準を十分満足しており、調査対象の安定材は六価クロムについて問題ない材料であることが確認できた。

第4章の参考文献

- 1) 庄嶋芳卓, 秋葉正一, 加納陽輔, 井 真宏: 産業副産物の微粉末を用いた路床改良材に関する研究, 土木学会論文集E1 (舗装工学), Vol.68, No.3, pp. I_89~ I_95, 2012.12
- 2) 庄嶋芳卓, 秋葉正一, 加納陽輔: フェロニッケルスラグ微粉末の土質安定処理材としての強度特性および経済比較, 農業農村工学会論文集第288号, 第81巻, 第5号, 2013.12
- 3) 九州大学出版会: 九州・沖縄の特殊土, pp.96-97, 1983.7
- 4) 九州大学出版会: 九州・沖縄の特殊土, p97, 1983.7
- 5) 加藤芳郎: URBAN KUBOTA, (株)クボタ, No.13, p.12. 1976.7
- 6) (社)地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, pp.418-425, 2009.
- 7) (社)日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧 [第4分冊], pp.155-161, 2007.
- 8) 本田 悟, 椎葉大和: フライアッシュのポゾラン反応速度および細孔構造がモルタルの初期強度発現性に及ぼす影響, 日本建築学会九州支部研究報告, 第42号, pp.9-12, 2002.
- 9) (社)地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, pp.546-547, 2009.
- 10) (社)地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, p.548, 2009.

第5章 路床土の安定処理材としての適用

5.1 概説

道路の路床・路盤の工事では、現地材料の有効利用を図るために固化処理（セメント安定処理や石灰安定処理）が利用されていることが多い。特に従来は捨土され良質土で置き換えられていた軟弱な路床土に対する固化材による改良が普通に実施されるようになっている。軟弱地盤などで、現状の設計CBRが舗装計画交通量と道路の構成から求めた目標となる設計CBRより小さい場合は路床改良を行う必要があり¹⁾、その際、対象土が粘土や有機質土となるケースがほとんどで固化材による改良を行うことが多くなる。この場合、良質土による置換工法に比べて建設残土の発生を大幅に抑制できるとともに、舗装厚の低減を図ることができる。

本章では、FNS石灰を軟弱な路床（設計CBR<3）の改良材として適用した場合、その適否を判断する目的で、FNS石灰を添加した黒ぼくの路床土としての改良効果を検討するとともに、Fe石灰による同様の実験を行い、それらの比較検討を行った²⁾。また、地盤改良材により路床を改良した場合の舗装構築について、経済性や環境安全性に関する評価も実施した²⁾。

5.2 CBR試験による路床土の安定処理材としての材料評価

舗装の支持力には，大別すると路床の支持力，路床を含めた路盤の支持力，舗装全層としての支持力がある．中でも路床の支持力は，舗装の構造設計を行ううえで非常に重要であり，粘性土から粗粒土を含む礫質土に至るほとんどの土に適用できる³⁾ CBR試験が広く用いられている．

本節では，まさ土（花崗岩風化残積土）および黒ぼく（火山灰質粘性土）にFNS石灰およびFe石灰を添加することによる強度発現効果をCBR試験により確認し，FNS石灰およびFe石灰に対する路床土の安定処理材としての評価を実施した．

5.2.1 試験試料

本試験における路床改良材は，FNS粉およびFe粉と石灰の割合が 20 : 80，40 : 60，60 : 40，80 : 20 のFNS石灰およびFe石灰のほか，比較のための石灰単体を使用した．ここで，まさ土に対するFNS石灰およびFe石灰の添加割合については，前章の結果を参考に高い改良効果が確認できた質量比 15%および7%の2パターンとし，黒ぼくに対する添加割合については，改良材が混合後に残らない状態になるよう質量比 50%を上限に，30%，15%および7%の4パターンとした．ただし，FNS粉はストックされているためほぼ無償で入手できるのに対し，Fe粉は石灰に比べ若干高価なため，経済性を考慮しFe石灰の添加率 50%については検討の対象外とした．

5.2.2 試験概要

支持力改善効果については，CBR試験によって評価した．CBR試験は，地盤工学会基準のJGS 0811⁴⁾に準拠した．試験結果は，供試体3個の平均値を採用した．ただし，養生日数については，初期および長期挙動の把握を目的にJGS 0811に記載されている

10 日に加えて、0 日（供試体作製後 20 時間）および 30 日（基準の 10 日養生の 3 サイクル基準）も併せて実施した。

5.2.3 CBRによる路床土としての支持力評価

まさ土にFNS石灰を添加したFNS石灰処理土（まさ土）のCBR値を図-5.2.1 に示す。これより、FNS石灰を添加することで、CBR値は高い値を示すことが確認された。また同図には、石灰単体を添加したときのCBR値も併記しているが、添加率 7% のFNS20+石灰 80 およびFNS40+石灰 60 のFNS石灰処理土（まさ土）のCBR値は、石灰単体と比較しても材齢日数に関わらずほぼ同値となった。このことから、FNS粉の添加割合が少ないFNS石灰は、セメンテーション効果がないFNSを添加しているにも関わらず、石灰単体と遜色なくCBR値を高める効果があることが確認できた。なお、まさ土単体でのCBR値は 20.8%であった。

また、一部の添加割合では、材齢 30 日で材齢 10 日に比べCBR値が減少している。これは、石灰の添加量が少ないこともあり、石灰によるポゾラン反応が早期に終了したためと考えられる。

まさ土にFe石灰を混合したFe石灰処理土（まさ土）のCBR値を図-5.2.2 に示す。同図でもFe石灰の添加によりCBR値が高い値を示すことが確認された。添加率 7% のFe石灰処理土（まさ土）のCBR値は、Fe80+石灰 20 を除き石灰単体と比較しても材齢日数に関わらずほぼ同値となった。このことから、Fe石灰についてもFNS石灰と同様にCBR値を高める効果があることが確認できた。また、Fe80+石灰 20 のFe石灰処理土（まさ土）についても、FNS石灰処理土（まさ土）と同様の理由から材齢 30 日で材齢 10 日に比べCBR値の減少が見られる。

一方、黒ぼくにFNS石灰を混合したFNS石灰処理土（黒ぼく）のCBR値を図-5.2.3 に、Fe石灰を混合したFe石灰処理土（黒ぼく）のCBR値を図-5.2.4 に示す。なお、黒ぼく

単体でのCBR値は0.2%であった。

図-5.2.3より、FNS石灰および石灰を黒ぼくに添加することでCBR値は高い値を示した。特に、石灰の割合の多いFNS20+石灰 80 とFNS40+石灰 60 および石灰単体において、材齢10日あるいは30日で、添加量が30%以上の場合での強度発現効果が高いことが確認できた。また、「第4章 4.4 走査電子顕微鏡(SEM)による微視的構造の観測」において、写真-4.4.10(a)～(d)に示したように、結晶物が大きいFNS石灰処理土（黒ぼく）ほどCBR値が高くなる傾向が見られることから、CBR値と結晶物の大きさには相関性が存在する可能性があるかと推察される。

軟弱な路床を安定処理により構築する舗装設計では、目標となる設計CBR以上に改良する。一般に舗装における目標設計CBRは、3以上8以下である（目標設計CBR8以上に構築した場合、改良厚が厚くなり経済面で不利になる）ことから、本試験で用いた黒ぼくを設計CBR8以上に改良できたFNS石灰は、路床安定処理材として十分な効果が発揮できると考えられる。また、図-5.2.4より、Fe石灰についてもFNS石灰と同様の傾向が見られた。

FNS石灰およびFe石灰の強度発現性を比較した場合、まず、FNS石灰における強度発現性の比較的高い添加量の結果（例えば、CBR値が概ね5%以上となる結果）では、材齢10日以降に極めて高い強度増加が認められ、材齢10日および30日でのCBR値はほぼ同程度である。一方、Fe石灰における強度発現性の比較的高い添加量の結果（例えば、CBR値が概ね5%以上となる結果）では、FNS石灰添加同様、材齢10日以降に極めて高い強度増加が認められるが、材齢10日および30日でのCBR値は材齢が増す毎に強度発現効果が顕著となる。これは、Fe石灰は路床安定処理材としての改良効果を有するが、粘性の強い土に対して遅効性があることを示していると考えられる。

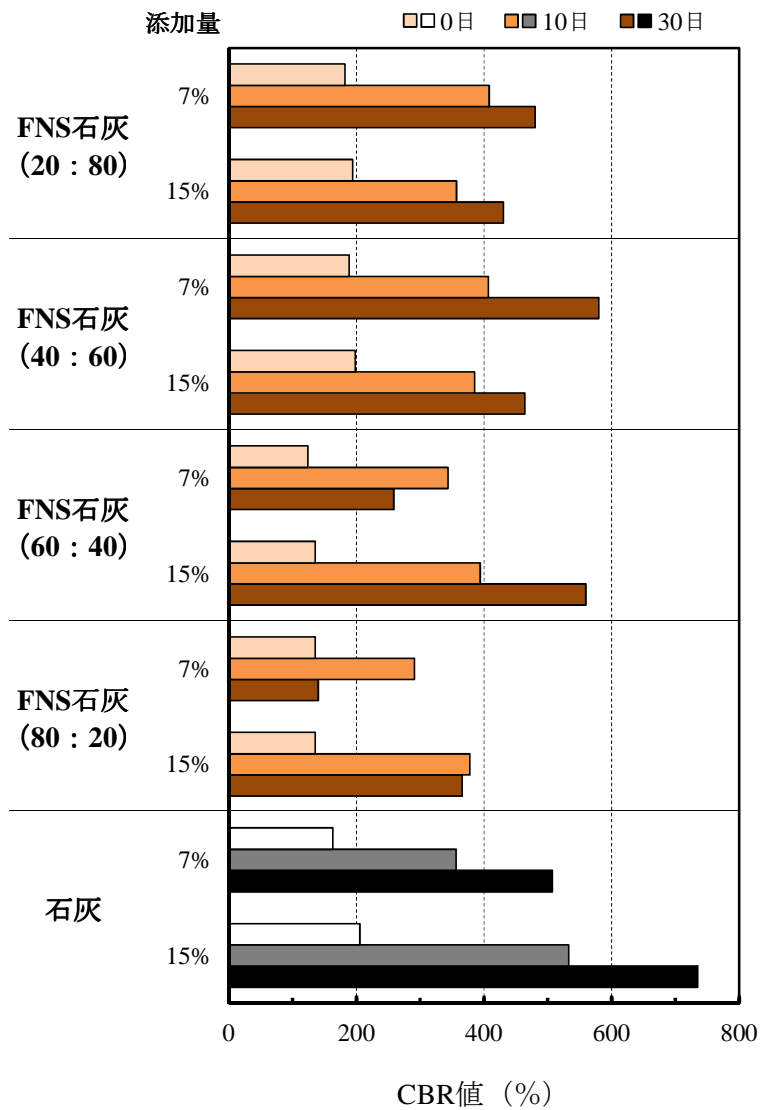


図-5.2.1 FNS石灰処理土（まさ土）のCBR値

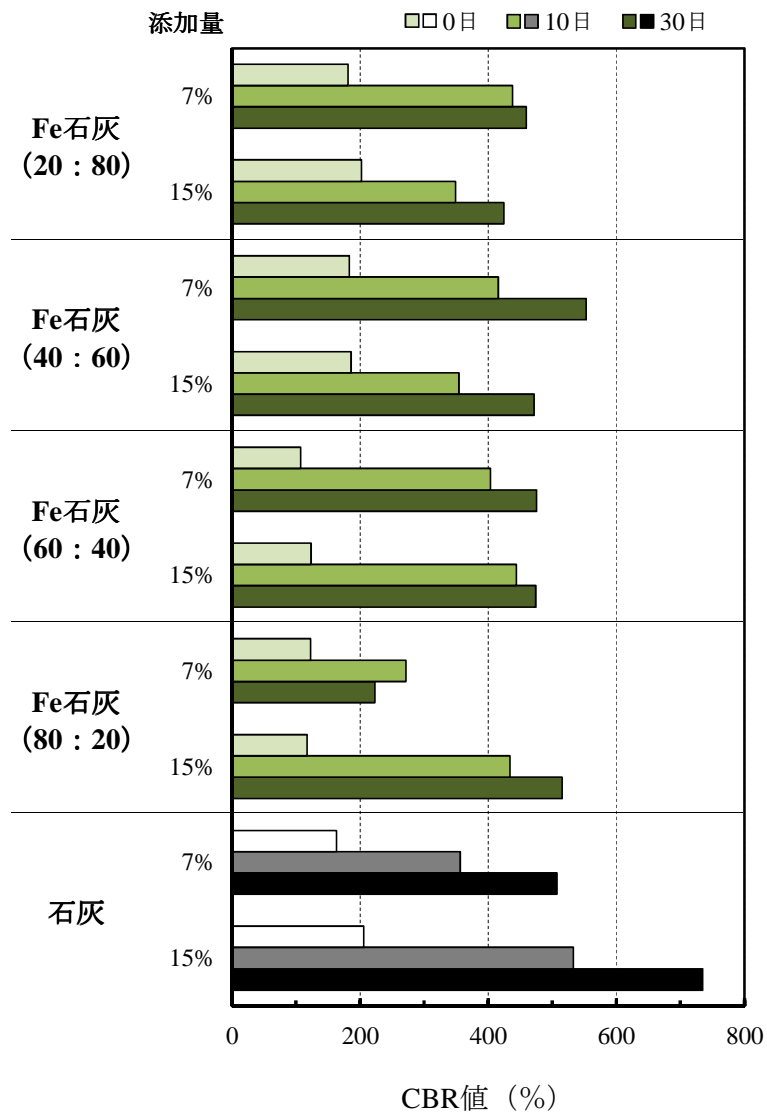


図-5.2.2 Fe石灰処理土（まさ土）のCBR値

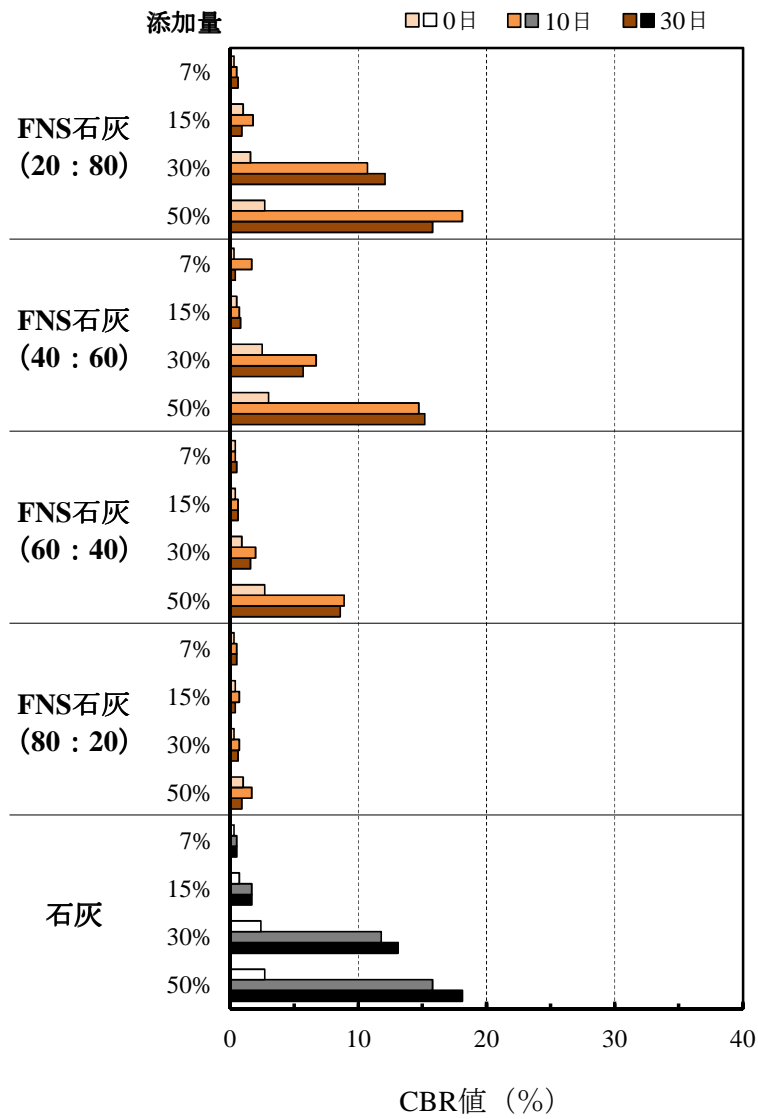


図-5.2.3 FNS石灰処理土（黒ぼく）のCBR値

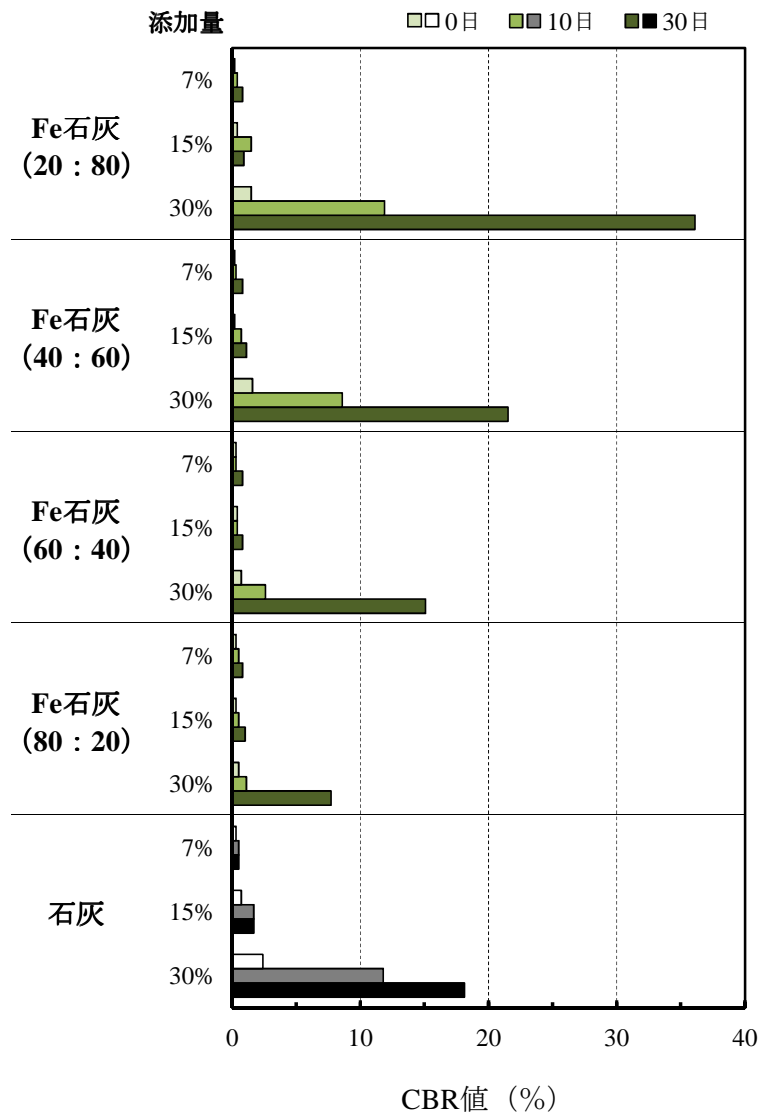


図-5.2.4 Fe石灰処理土（黒ぼく）のCBR値

5.2.3 吸水膨張試験による処理土の膨張比

FNS石灰処理土（まさ土）の吸水膨張比を図-5.2.5 に、Fe石灰処理土（まさ土）の吸水膨張比を図-5.2.6 に示す。これより、FNS粉およびFe粉と石灰の割合の違い、あるいはまさ土への改良材の添加量の違いにより、若干の膨張または収縮を生じるが、膨張比はすべてで 1%以下であり、改良材添加によって締固められた改良土の吸水膨張はほとんど生じないことが確認された。

FNS石灰処理土（黒ぼく）の吸水膨張比を図-5.2.7 に、Fe石灰処理土（黒ぼく）の吸水膨張比をを図-5.2.8 に示す。これより、FNS粉およびFe粉と石灰の割合の違い、あるいは黒ぼくへの改良材の添加量の違いにより、若干の膨張または収縮を生じるが、膨張比はすべてで 1%以下であり、改良材添加によって締固められた改良土の吸水膨張はほとんど生じないことが確認された。

以上より、路床が良好な状態を示す膨張比⁵⁾ 以内であることを示しており、FNS石灰およびFe石灰は、土質の性状に係わらず吸水膨張の面から良好な路床の状態に改良または保持できる改良材であることが確認できた。

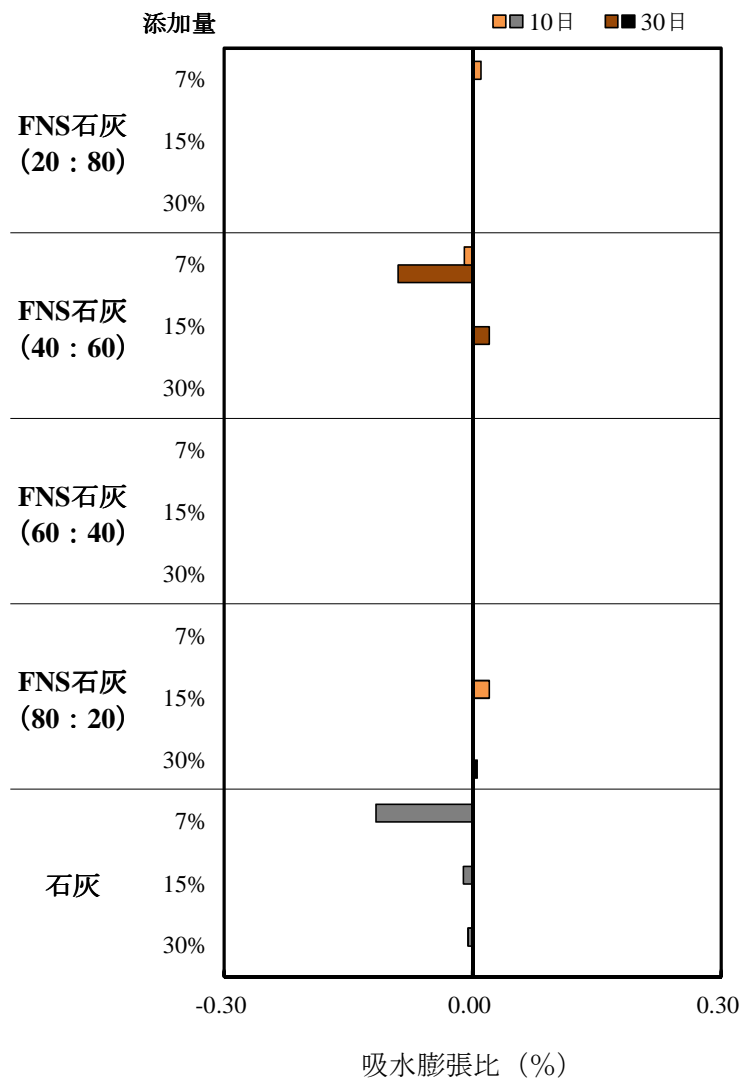


図-5.2.5 FNS石灰処理土（まさ土）の吸水膨張比

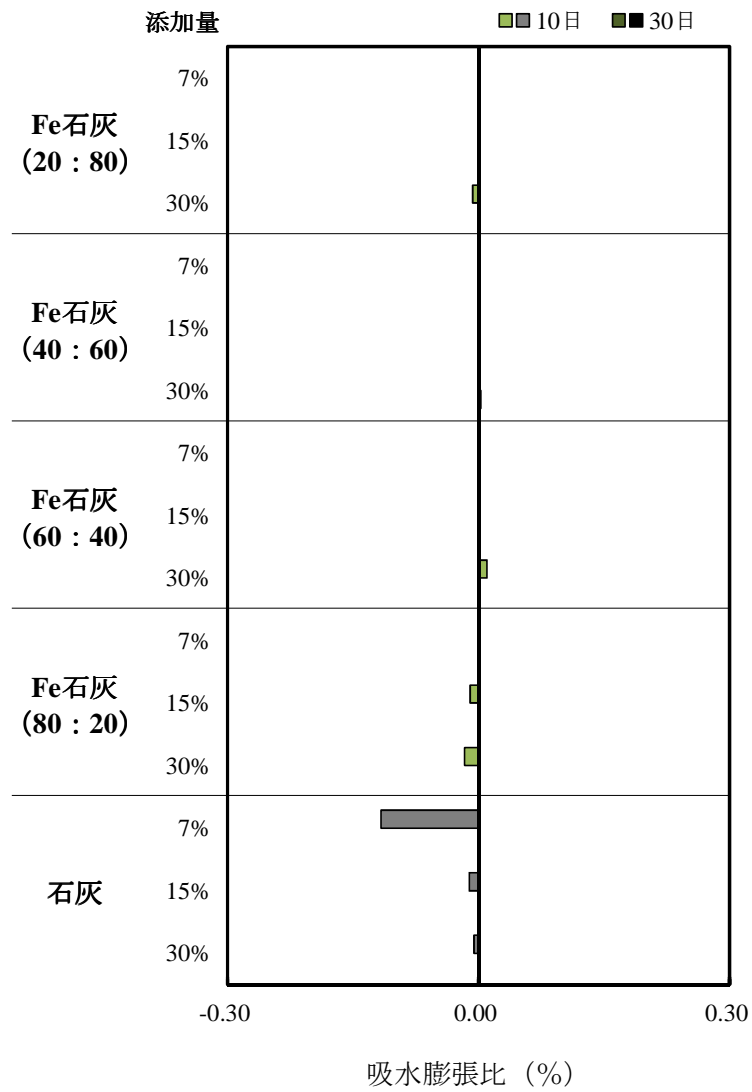


図-5.2.6 Fe石灰処理土（まさ土）の吸水膨張比

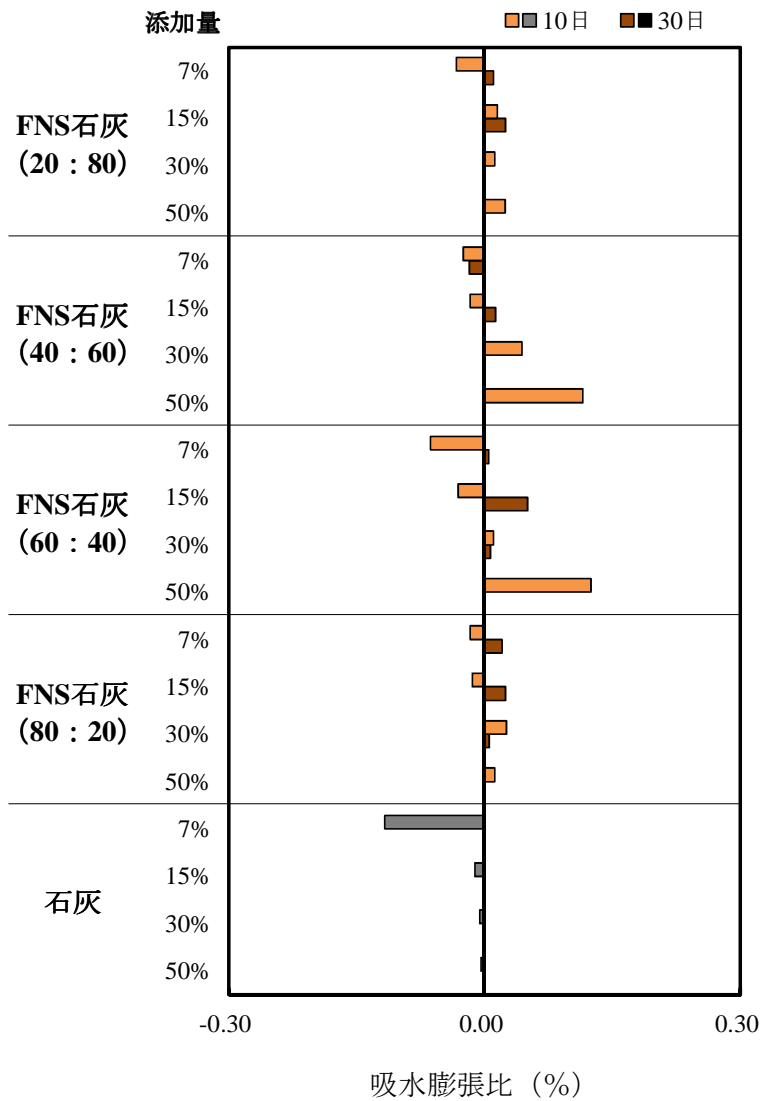


図-5. 2. 7 FNS石灰処理土（黒ぼく）の吸水膨張比

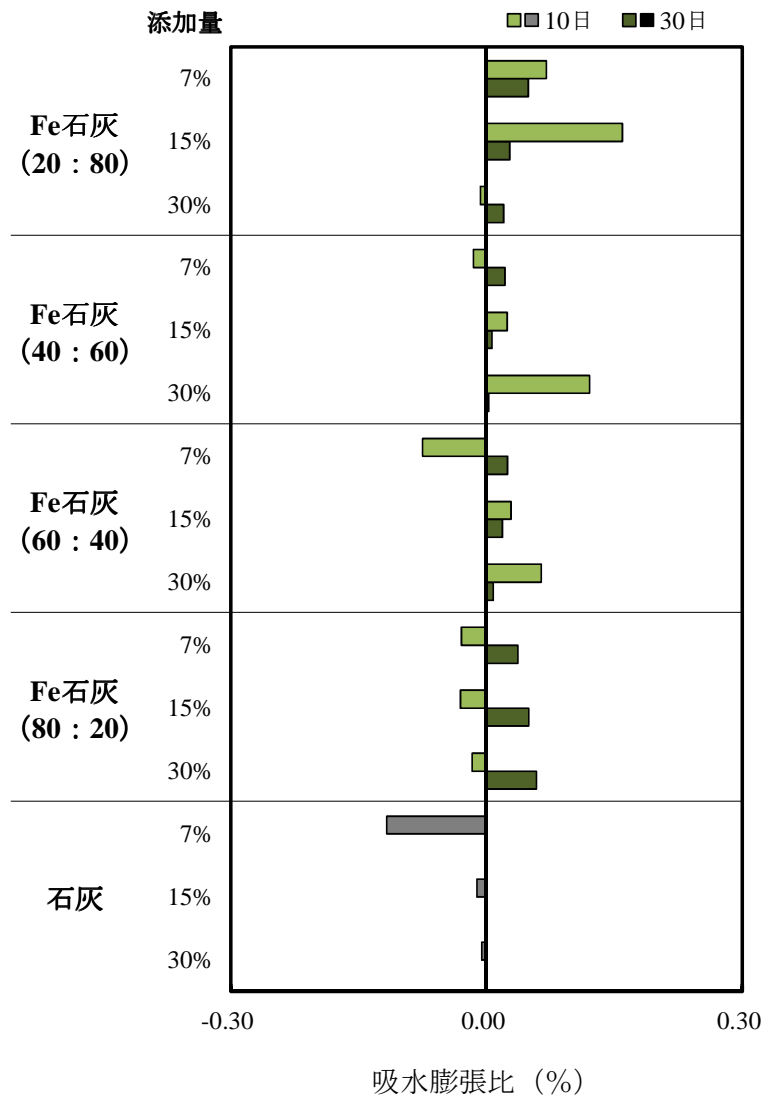


図-5.2.8 Fe石灰処理土（黒ぼく）の吸水膨張比

5.3 コーン指数試験による改良土のトラフィカビリティの評価

黒ぼくや関東ロームのような火山灰質粘性土は、土工工事の施工におけるブルドーザなどの施工機械のトラフィカビリティ低下が著しいため、トラフィカビリティ確保を目的とした地盤改良が多く行われている。なお、トラフィカビリティの深度範囲は、施工機械は履帯（キャタピラー）式のものが多いことから、比較的浅い深度と考えられており⁶⁾、トラフィカビリティの目標強度の決定には、表層地盤の土の強さを直接かつ簡便に測定できるコーン指数試験が多く用いられている。

本節では、FNS石灰処理土（黒ぼく）およびFe石灰処理土（黒ぼく）のコーン指数を表-5.3.1に示す建設機械の走行に必要とされるコーン指数と比較検討し、FNS石灰およびFe石灰が土工工事に必要なトラフィカビリティ確保が可能な安定処理材であるか否かを判断した。また、建設現場から発生する土の有効利用を図ることを目的として、コーン指数よりFNS石灰処理土およびFe石灰処理土の各種用途に対する有効性についても併せて明らかにした。

表-5.3.1 建設機械の走行に必要なコーン指数⁷⁾

建設機械の種類	コーン指数 q_c (kN/m ²)	建設機械の接地圧 (kN/m ²)
超湿地ブルドーザ	200 以上	15 ~ 23
湿地ブルドーザ	300 以上	22 ~ 43
普通ブルドーザ (15t 級程度)	500 以上	50 ~ 60
普通ブルドーザ (21t 級程度)	700 以上	60 ~ 100
スクレープドーザ	600 以上 (超湿地型は 400 以上)	41 ~ 56(27)
被けん引式スクレーパー (小型)	700 以上	130 ~ 140
自走式スクレーパー (小型)	1000 以上	400 ~ 450
ダンプトラック	1200 以上	350 ~ 550

5.3.1 土質区分による有効利用の判断

「再生資源の利用の促進に関する法律」(平成3年10月)を受け、国土交通省では、建設現場から発生する土の有効活用促進を目的とした「建設発生土利用技術マニュアル」⁸⁾を発刊しており、その中で、発生土をその性状によって区分し、それに応じた適用用途を定めている。表-5.3.2は同マニュアル記載の「土質区分基準」で、表-5.3.3はその適用用途の評価基準である。ここで、発生土の土質区分は、地盤材料の工学的分類とともに、締固めた土のコーン指数が用いられている。また、安定処理を行った場合には、改良後の性状で判定することとしている。

5.3.2 試験概要

締固めた土のコーン指数試験(JIS A 1228)は、CBR試験と並行して行うことからNEXCOの試験方法⁹⁾を参考に、CBR試験終了後の供試体について、貫入を行った面と反対の面で実施した。試験結果は、供試体上面の直径を3等分する2点で行い、試験結果は供試体3個×2点の計6回の平均値とした。養生日数については、本試験をCBR試験終了後に行った関係上、CBR試験と同じである。なお、本節ではまさ土に関する検討を実施しなかった。これは、まさ土が前節で確認したCBR値により、まさ土自体で十分なトラフィカビリティの確保が可能で、第1種建設発生土以上の土と判断したことによる。

表-5.3.2 土質区分基準¹⁰⁾

区分 (国土交通省令)	細区分	コーン 指数 qc KN/m ²	土質材料の工学的分類		備考	
			大分類	中分類 土質 {記号}	含水比 (地山) Wn (%)	掘削方法
第1種建設発生土 砂、礫及びこれら に準ずるもの	第1種	—	礫質土	礫 {G}, 砂礫 {GS}	—	排水に 考慮する が、降水、 浸出地下 水等によ り含水比 が増加す ると予想 される場 合は、2ラ ンク下の 区分とす る。 水中掘 削等によ る場合は、 2ランク 下の区分 とする。
	第1種改良土		砂質土	砂 {S}, 礫質砂 {SG}	—	
第2種建設発生土 砂質土、礫質土 及びこれらに準 ずるもの	第2a種	800 以上	人工材料	改良土 {I}	—	
	第2b種		礫質土	細粒分まじり礫 {GF}	—	
	第2種改良土		砂質土	細粒分まじり砂 {SF}	—	
第3種建設発生土 通常の施工性が 確保される 粘性土及びこれ に準ずるもの	第3a種	400 以上	人工材料	改良土 {I}	—	
	第3b種		砂質土	細粒分まじり砂 {SF}	—	
	第3種改良土		粘性土	シルト {M}、粘土 {C}	40%程度	
第4種建設発生土 粘性土及びこれ に準ずるもの (第3種発生土 を除く)	第4b種	200 以上	火山灰質粘性土	火山灰質粘性土 {V}	—	
			有機質土	有機質土 {O}	40~80%程度	
			人工材料	改良土 {I}	—	
	第4種改良土		砂質土	細粒分まじり砂 {SF}	—	
泥 土	泥土 b	200 未満	粘性土	シルト {M}、粘土 {C}	80%程度以上	
			火山灰質粘性土	火山灰質粘性土 {V}	—	
			有機質土	有機質土 {O}	80%程度以上	
	泥土 a		砂質土	細粒分まじり砂 {SF}	—	
	泥土 c		高有機質土	高有機質土 {Pt}	—	

表-5.3.3 適用用途基準¹¹⁾

区分	土質区分	工作物の埋戻し 土木構造物の裏込め	建築物の埋戻し	道路用盛土		河川築堤		土地造成		鉄道盛土	空港盛土	水面埋立
				路床	路体	高規格堤防	一般堤防	住宅造成	公園緑地造成			
第1種建設発生土	第1種	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎
	第1種改良土											
第2種建設発生土	第2a種	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	第2b種											
	第2種改良土											
第3種建設発生土	第3a種	○	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	第3b種											
	第3種改良土											
第4種建設発生土	第4a種	○		○						○		
	第4b種	△	○	△	○	○	○	○	○	△	○	◎
	第4種改良土	△		△						△		
泥土	泥土a	△	○	△	○	○	○	○	○	△	○	○
	泥土b	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	○
	泥土c	x	x	x	△	x	x	x	△	x	x	△

◎：そのまま使用可能なもの。

○：適切な土質改良（含水比低下、粒度調整、機能付加・補強、安定処理等）を行えば使用可能なもの。

△：評価が○なものと比較して、土質改良にコストおよび時間がより必要な物もの。

x：改良土との混合などを行わない限り土質改良を行っても使用が不適なもの。

5.3.3 安定処理材添加によるトラフィカビリティの改善

FNS石灰処理土（黒ぼく）のコーン指数を図-5.3.1に示す。同図より、FNS石灰および石灰を黒ぼくに添加することでコーン指数は、黒ぼく単体（ $q_c=120\text{kN/m}^2$ ）に比べ、高い値を示すことが確認された。特に、石灰の割合の多いFNS20+石灰 80、FNS40+石灰 60のFNS石灰および石灰単体で、添加量が30%以上の場合、高い値が顕著に確認された。

Fe石灰処理土（黒ぼく）のコーン指数を図-5.3.2に示す。Fe石灰についてもFNS石灰と同様の傾向が見られた。これより、FNS石灰およびFe石灰ともに、石灰の割合が多く添加量30%以上の場合、ダンプトラックの走行に必要なコーン指数（表-5.3.1）である 1200kN/m^2 を満足しており、トラフィカビリティの向上を図れる改良材であることが確認できた。

また、FNS石灰およびFe石灰ともに土質区分では泥土に区分される黒ぼくを第2種建設発生土以上に改良できたことで、発生土の有効利用を図れる改良材であることも併せて確認できた。

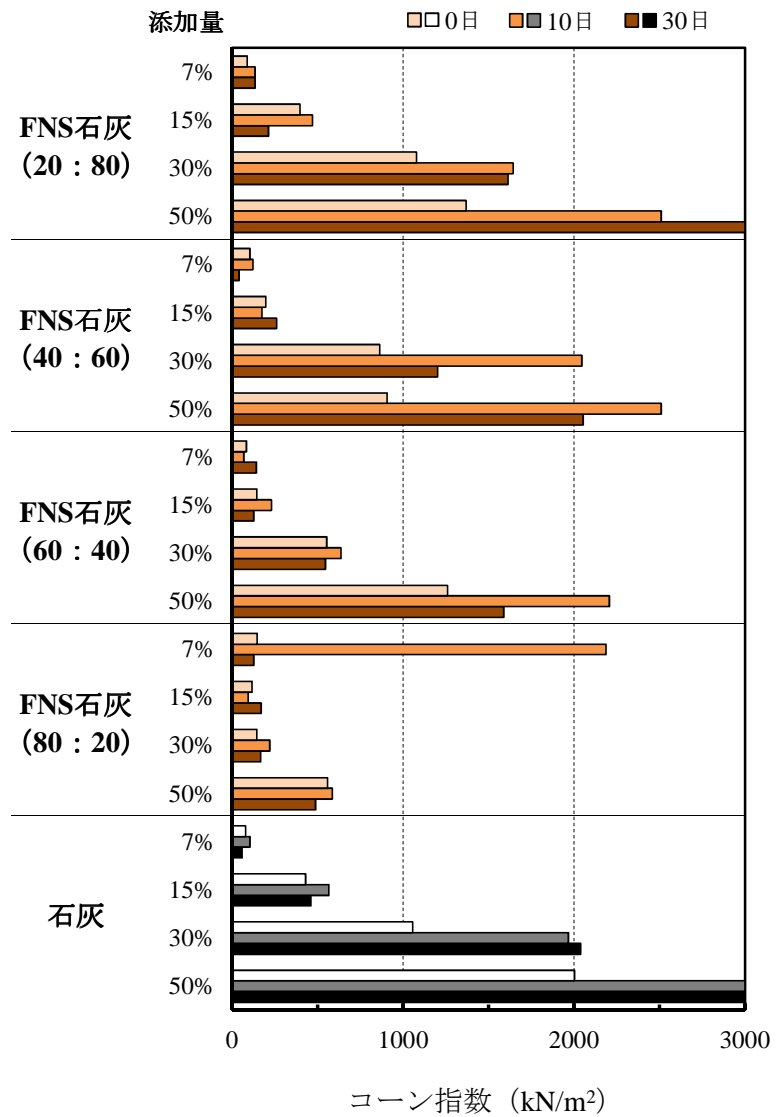


図-5.3.1 FNS石灰処理土（黒ぼく）のコーン指数

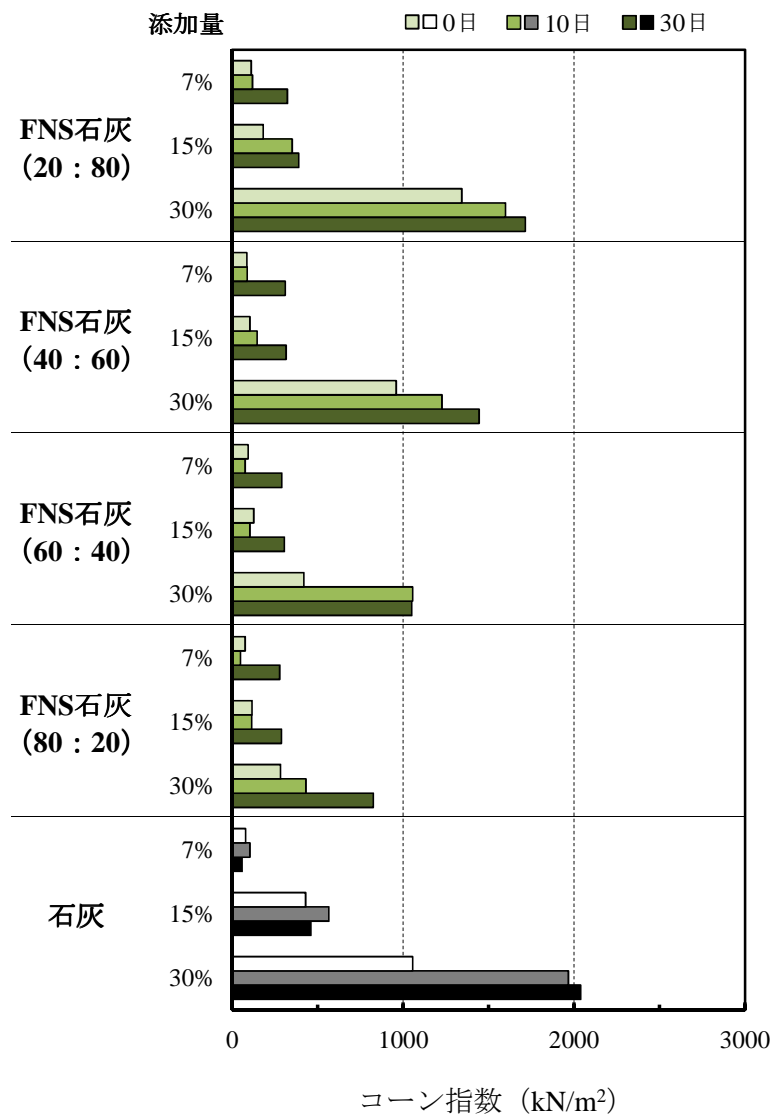


図-5.3.2 Fe石灰処理土（黒ぼく）のコーン指数

5.4 環境安全性に関する評価

本節では、FNS石灰処理土（黒ぼく）の環境安全性に関する調査として環境省告示第18号JIS K 0058-1に準拠した溶出試験を実施することで安全性の確認を行った。また、現在販売されているFe₂₅+石灰75のFe石灰処理土（黒ぼく）や石灰単体処理土（黒ぼく）の安全性についても併せて実施した。

表-5.4.1にFNS石灰処理土（黒ぼく）、表-5.4.2にFe石灰処理土（黒ぼく）、表-5.4.3に石灰単体処理土（黒ぼく）のそれぞれの溶出試験結果を示す。これらにより、調査対象の処理土がともに検出限界未満であり、土壌汚染対策法の基準値を十分下回っていることで、調査対象の処理土は環境安全性に問題がないことが確認できた。

表-5.4.1 FNS石灰処理土（黒ぼく）の溶出量

計量の対象	単位	計量の結果	計量の手法	基準値
カドミウム及びその化合物	mg/L	0.001未満	JIS K 0102 55.3	≦0.01
六価クロム化合物	mg/L	0.02未満	JIS K 0102 65.2.1	≦0.05
シアン化合物	mg/L	0.1未満	昭和46年 環告59号 付表1	不検出
水銀及びその化合物	mg/L	0.0005未満	昭和46年 環告59号 付表1及び 昭和49年 環告64号 付表3	≦0.0005
アルキル水銀	mg/L	0.0005未満	JIS K 0102 67.4	不検出
セレン及びその化合物	mg/L	0.001	JIS K 0102 54.3	≦0.01
鉛及びその化合物	mg/L	0.008	JIS K 0102 61.4	≦0.01
砒素及びその化合物	mg/L	0.001	JIS K 0102 67.4	≦0.01
フッ素及びその化合物	mg/L	0.2未満	JIS K 0102 34.1	≦0.8
ほう素およびその化合物	mg/L	0.02未満	JIS K 0102 47.3	≦1

表-5.4.2 Fe石灰処理土（黒ぼく）の溶出量

計量の対象	単位	計量の結果	計量の手法	基準値
カドミウム及びその化合物	mg/L	0.001未満	JIS K 0102 55.3	≦0.01
六価クロム化合物	mg/L	0.02未満	JIS K 0102 65.2.1	≦0.05
シアン化合物	mg/L	0.1未満	昭和46年 環告59号 付表1	不検出
水銀及びその化合物	mg/L	0.0005未満	昭和46年 環告59号 付表1及び 昭和49年 環告64号 付表3	≦0.0005
アルキル水銀	mg/L	0.0005未満	JIS K 0102 67.4	不検出
セレン及びその化合物	mg/L	0.006	JIS K 0102 54.3	≦0.01
鉛及びその化合物	mg/L	0.005未満	JIS K 0102 61.4	≦0.01
砒素及びその化合物	mg/L	0.009	JIS K 0102 67.4	≦0.01
フッ素及びその化合物	mg/L	0.2未満	JIS K 0102 34.1	≦0.8
ほう素およびその化合物	mg/L	0.02未満	JIS K 0102 47.3	≦1

表-5.4.3 石灰単体処理土（黒ぼく）の溶出量

計量の対象	単位	計量の結果	計量の手法	基準値
カドミウム及びその化合物	mg/L	0.001未満	JIS K 0102 55.3	≦0.01
六価クロム化合物	mg/L	0.02未満	JIS K 0102 65.2.1	≦0.05
シアン化合物	mg/L	0.1未満	昭和46年 環告59号 付表1	不検出
水銀及びその化合物	mg/L	0.0005未満	昭和46年 環告59号 付表1及び 昭和49年 環告64号 付表3	≦0.0005
アルキル水銀	mg/L	0.0005未満	JIS K 0102 67.4	不検出
セレン及びその化合物	mg/L	0.008	JIS K 0102 54.3	≦0.01
鉛及びその化合物	mg/L	0.005未満	JIS K 0102 61.4	≦0.01
砒素及びその化合物	mg/L	0.008	JIS K 0102 67.4	≦0.01
フッ素及びその化合物	mg/L	0.2未満	JIS K 0102 34.1	≦0.8
ほう素およびその化合物	mg/L	0.02未満	JIS K 0102 47.3	≦1

5.5 経済性評価

前節までで、FNS石灰の黒ぼくに対する路床安定材としての改良効果および環境安全性の確認ができた。

本節では、「舗装設計施工指針」¹²⁾「舗装設計便覧」¹³⁾ および土地改良事業計画設計基準設計に基づく「農道」¹⁴⁾を参考にしたモデルケースを用いて、FNS石灰を軟弱な路床土（設計CBR<3）の安定処理材として適用した場合の経済性について、一般的に用いられる置換工法（良質土の修正CBR20以上）と比較検討を行った。また、FNS石灰同様、路床安定材としての改良効果が確認できたFe石灰を用いた場合も比較検討を行った。

5.5.1 普通道路における経済性の評価

モデルケースとして「舗装設計施工指針」「舗装設計便覧」で示されている交通量区分N₃（舗装計画交通量40以上100未満 台/日・方向）およびN₆（舗装計画交通量1,000以上3,000未満 台/日・方向）において、路床のCBRが1.0%の場合を対象とし、FNS石灰とFe石灰の安定処理材を適用したときの目標設計CBR3または4における舗装構成を想定した。ここで、交通量区分を2パターン想定したのは、交通量の違いが経済性に影響を与えると考えたためである。

交通量区分N₃についての舗装構成例を図-5.5.1に、交通量区分N₆についての舗装構成例を図-5.5.2に示した。さらに、その場合の直接工事費を表-5.5.1および表-5.5.2に示した。ここで、表-5.5.1および表-5.5.2に示した改良材の材料単価は、FNS粉については最終処分される材料であるため0円/t、Fe粉は21,000円/t（工場渡し）、石灰は17,000円/t（工場渡し）としてそれぞれの割合に応じて算出した金額である。なお、修正CBR20の良質土の材料単価は熊本県阿蘇地区の1,800円/m³¹⁵⁾を用いた。

これらの比較検討により、FNS石灰を黒ぼくに対する路床安定材として使用した場合、良質土による置き換えや石灰を路床安定材として使用した場合に比べ、現地土の再利用による残土量の低減が図られたとともに経済的にも安価な舗装構成案が提案可能となった。特に、FNS20+石灰 80 で、添加量が 30%の場合が安価となりコスト面において最良な効果が得られた。

交通量 / N₃ 信頼度 / 90% 設計期間 / 10年 設計CBR 3

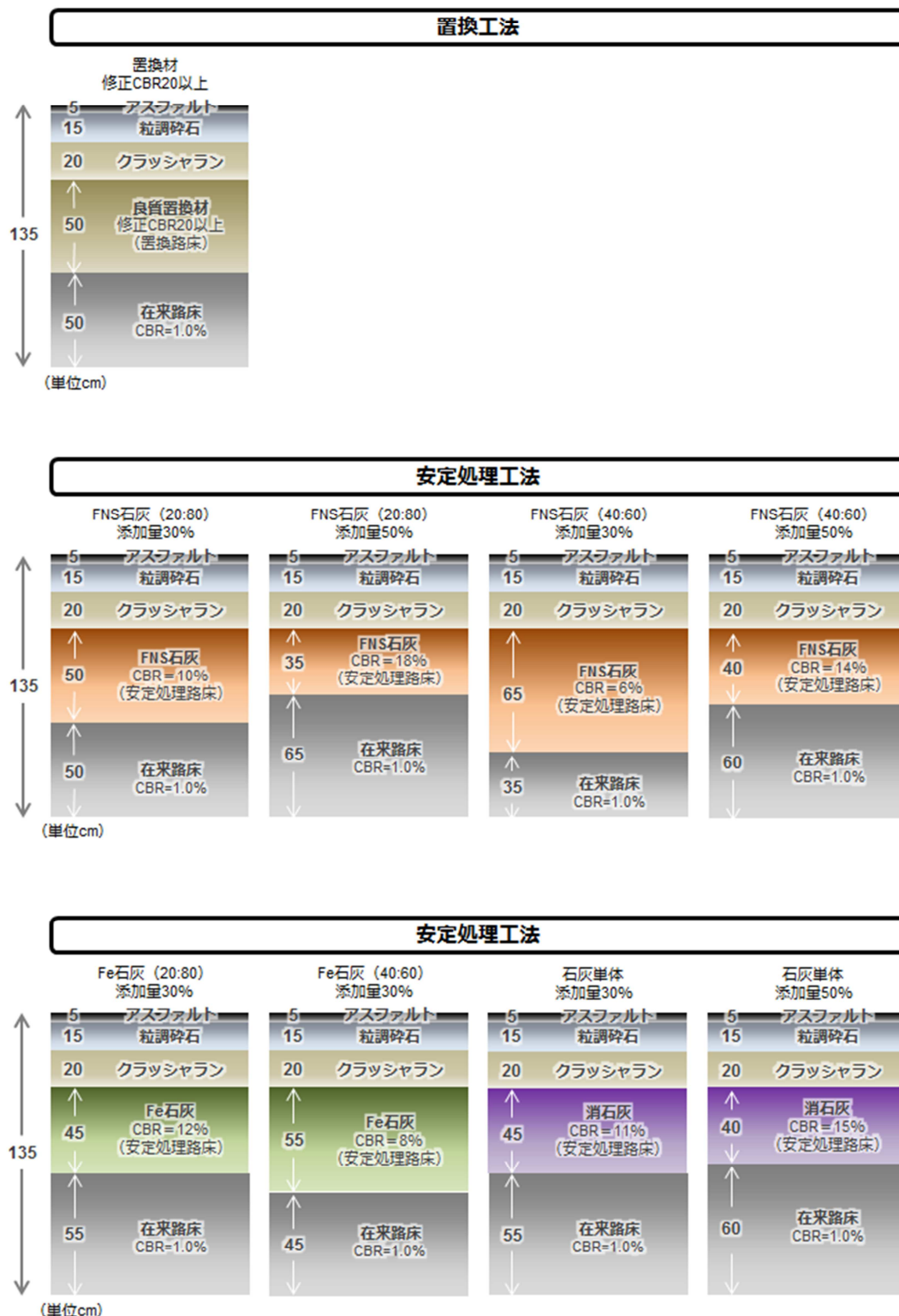


図-5.5.1 交通量区分 N₃ における舗装構成例

交通量 / N_6 信頼度 / 90% 設計期間 / 10年 設計CBR 4

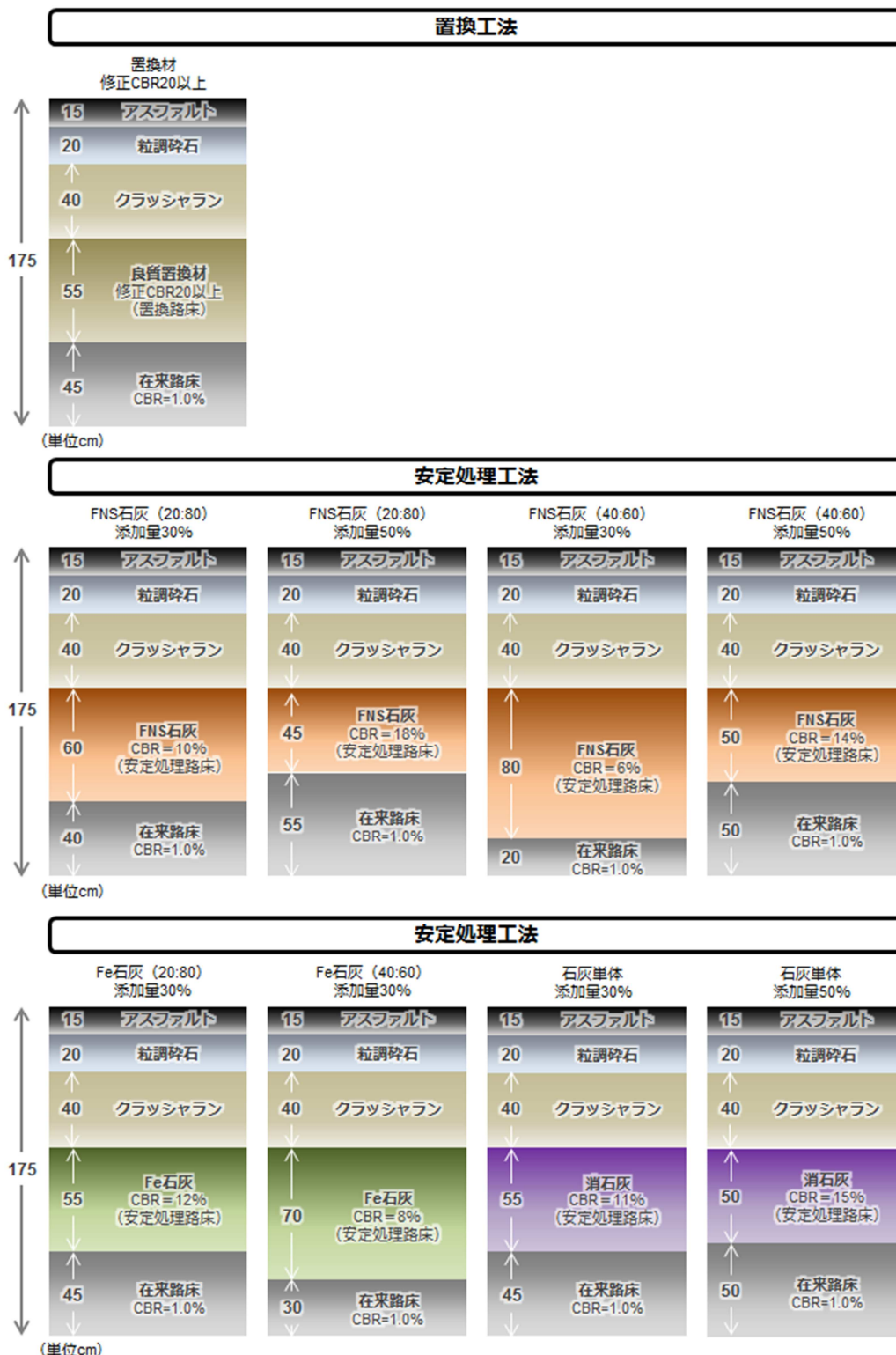


図-5.5.2 交通量区分 N_6 における舗装構成例

表-5.5.1 交通量区分N₃における直接工事費

交通量：N ₃ 信頼度90% 設計期間：10年 設計CBR3											
直接工事費 (円/m ²)	表層		上層路盤		下層路盤		構築路床		掘削積込運搬処分		合計
	厚み (cm)	円/m ²	厚み (cm)	円/m ²	厚み (cm)	円/m ²	厚み (cm)	円/m ²	厚み (cm)	円/m ²	
良質置換材 1,800円/m ³ 修正CBR20以上	5	1744	15	683	20	810	50	1316	90	4487	9040
FNS石灰 (20 : 80) (13,600円/t) 添加量30% CBR=10%	5	1744	15	683	20	810	50	3030	40	1996	8263
FNS石灰 (20 : 80) (13,600円/t) 添加量50% CBR=18%	5	1744	15	683	20	810	35	3428	40	1996	8661
FNS石灰 (40 : 60) (10,200円/t) 添加量30% CBR=6%	5	1744	15	683	20	810	65	3157	40	1996	8390
FNS石灰 (40 : 60) (10,200円/t) 添加量50% CBR=14%	5	1744	15	683	20	810	40	3030	40	1996	8263
Fe石灰 (20 : 80) (17,800円/t) 添加量30% CBR=12%	5	1744	15	683	20	810	45	3455	40	1996	8688
Fe石灰 (40 : 60) (18,800円/t) 添加量30% CBR=8%	5	1744	15	683	20	810	55	4080	40	1996	9313
消石灰単体 (17,000円/t) 添加量30% CBR=11%	5	1744	15	683	20	810	55	3915	40	1996	9148
消石灰単体 (17,000円/t) 添加量30% CBR=15%	5	1744	15	683	20	810	50	5605	40	1996	10838

表-5.5.2 交通量区分N₆における直接工事費

交通量：N ₆ 信頼度90% 設計期間：10年 設計CBR4											
直接工事費 (円/m ²)	表層		上層路盤		下層路盤		構築路床		掘削積込運搬処分		合計
	厚み (cm)	円/m ²	厚み (cm)	円/m ²	厚み (cm)	円/m ²	厚み (cm)	円/m ²	厚み (cm)	円/m ²	
良質置換材 1,800円/m ³ 修正CBR20以上	15	4975	20	1010	40	1619	55	1446	130	6483	15533
FNS石灰 (20 : 80) (13,600円/t) 添加量30% CBR=10%	15	4975	20	1010	40	1619	60	3507	75	3739	14850
FNS石灰 (20 : 80) (13,600円/t) 添加量50% CBR=18%	15	4975	20	1010	40	1619	45	4224	75	3739	15567
FNS石灰 (40 : 60) (10,200円/t) 添加量30% CBR=6%	15	4975	20	1010	40	1619	80	3694	75	3739	15037
FNS石灰 (40 : 60) (10,200円/t) 添加量50% CBR=14%	15	4975	20	1010	40	1619	50	3626	75	3739	14969
消石灰単体 (17,000円/t) 添加量30% CBR=11%	15	4975	20	1010	40	1619	55	3915	75	3739	15258
消石灰単体 (17,000円/t) 添加量30% CBR=15%	15	4975	20	1010	40	1619	50	5605	75	3739	16948

5.5.2 農道における経済性の評価

ここでは、モデルケースとして「農道」で示されている交通区分 I-1 交通において、路床のCBRが 0.2%の場合を対象とし、FNS石灰とFe石灰の安定処理材を適用したときの目標設計CBR4 における舗装構成例を図-5.5.3 に、その場合の直接工事費を表-5.5.3 に示した。改良材の材料単価等の条件については、前節と同じとした。

これらの比較検討により、FNS石灰処理土（黒ぼく）を路床安定材として使用した場合、良質土による置き換えや石灰を路床安定材として使用した場合に比べ、現地土の再利用による残土量の低減を図ることができ経済的にも安価な舗装構成案が提案可能となった。特に、FNS40+石灰 60 で、添加量が 30%の場合、改良厚は厚くなるものの最も安価となりコスト面において最良な効果が得られた。

交通量 / I-1 信頼度 / 90% 設計期間 / 10年 設計CBR 4

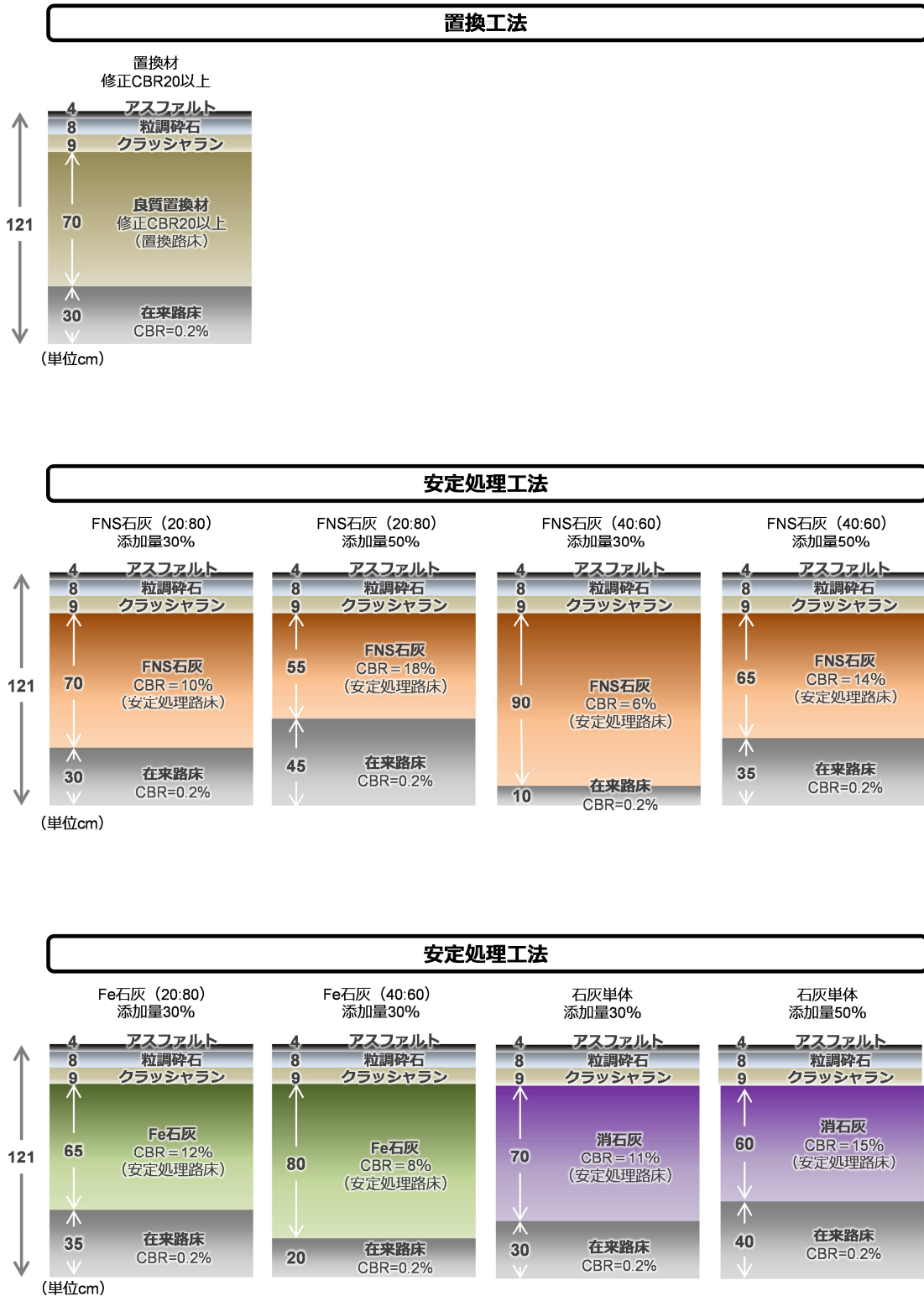


図-5.5.3 交通量区分 I-1 における舗装構成例

表-5.5.3 交通量区分 I-1 における直接工事

交通量：I-1 信頼度90% 設計期間：10年 設計CBR4											
直接工事費 (円/m ²)	表層		上層路盤		下層路盤		構築路床		掘削積込運搬処分		合計
	厚み (cm)	円/m ²	厚み (cm)	円/m ²	厚み (cm)	円/m ²	厚み (cm)	円/m ²	厚み (cm)	円/m ²	
良質置換材 1,800円/m ³ 修正CBR20以上	4	1455	8	442	9	445	70	1820	91	3454	7616
FNS石灰 (20 : 80) (13,600円/t) 添加量30% CBR=10%	4	1455	8	442	9	445	70	4150	21	896	7388
FNS石灰 (20 : 80) (13,600円/t) 添加量50% CBR=18%	4	1455	8	442	9	445	55	5004	21	896	8242
FNS石灰 (40 : 60) (10,200円/t) 添加量30% CBR=6%	4	1455	8	442	9	445	90	4031	21	896	7269
FNS石灰 (40 : 60) (10,200円/t) 添加量50% CBR=14%	4	1455	8	442	9	445	65	4688	21	896	7926
Fe石灰 (40 : 60) (17,800円/t) 添加量30% CBR=12%	4	1455	8	442	9	445	65	4871	21	896	8109
Fe石灰 (40 : 60) (17,800円/t) 添加量30% CBR=8%	4	1455	8	442	9	445	80	5807	21	896	9045
消石灰単体 (17,000円/t) 添加量30% CBR=11%	4	1455	8	442	9	445	70	4968	21	896	8206
消石灰単体 (17,000円/t) 添加量30% CBR=15%	4	1455	8	442	9	445	60	6577	21	896	9815

5.6 まとめ

本章で得られた結論をまとめると以下のとおりである。

- 1) FNS石灰あるいはFe石灰をまさ土や黒ぼくに添加することでCBR値を高めることができ、また、地下水の影響等による吸水膨張については全く影響がないことを確認した。
- 2) 化学的安定処理があまり期待できない黒ぼくに、FNS石灰あるいはFe石灰を添加することでCBR値を高めることができ、これらの材料の路床改良材としての有用性を示唆した。特に、添加量 30%におけるFNS石灰処理土（黒ぼく）のFNS20+石灰 80 は、産業副産物で最終処分されるFNSを路床改良材の一部として再利用できることを明らかにした。
- 3) 材齢 10 日の添加量 30%におけるFNS石灰処理土（黒ぼく）のFNS20+石灰 80 およびFNS40+石灰 60 におけるコーン指数が、 1200kN/m^2 以上を示したことから、石灰より安価なFNS石灰を用いることでトラフィカビリティを向上させることが確認できた。
- 4) FNS石灰あるいはFe石灰を黒ぼくやまさ土に添加した処理土は、土壤汚染対策法（溶出量）の基準値を満足した。したがって、FNS石灰およびFe石灰ともに環境安全性の高い改良材であることが確認できた。
- 5) 普通道路や農道の舗装において、一般的に安定処理で改良することが困難な黒ぼくに対し、FNS石灰を用いて安価に改良することができ、現地において残土量の低減を図ることができる改良工法であることを明らかにした。なお、この条件のもと、最も経済性に優れたFNS粉の混合割合とFNS石灰の添加率は、軽交通の場合で

FNS40+石灰 60 の添加率は 30%であり，重交通の場合でFNS20+石灰 80 の添加率は 30%であった．

第5章の参考文献

- 1) (社)セメント協会:セメント系固化材による地盤改良マニュアル[第4版], p10, 2012.10
- 2) 庄嶋芳卓, 秋葉正一, 加納陽輔:フェロニッケルスラグ微粉末の土質安定処理材としての強度特性および経済比較, 農業農村工学会論文集第288号, 第81巻, 第5号, 2013.12
- 3) (社)地盤工学会:地盤材料試験の方法と解説 [二分冊の1], p.393, 2009.11
- 4) (社)日本道路協会:舗装調査・試験法便覧 [第4分冊], pp.155-161, 2007
- 5) 土質工学会編 (1979):土質試験法 (第2回改訂版), p.318, 1979
- 6) 日本石灰協会:石灰による地盤改良マニュアル, p.105, 2012.11
- 7) (社)日本道路協会:道路土工要綱, p.287, 2009.6
- 8) (財)土木研究センター:建設発生土利用技術マニュアル, 1994, 同 (第3版), 2004
- 9) NEXCO 総研:試験方法, 第1編 土質関係試験方法, pp.89-90, 2007.8
- 10) (財)土木研究センター:建設発生土利用技術マニュアル (第3版), p.28, 2004
- 11) (財)土木研究センター:建設発生土利用技術マニュアル (第3版), p.36, 2004
- 12) (社)日本道路協会:舗装設計施工指針, pp.46-87, 2006.2
- 13) (社)日本道路協会:舗装設計便覧, pp.60-108, 2006.2
- 14) 農業土木学会:土地改良事業計画設計基準設計「農道」, pp.311-360, 2005.3
- 15) 熊本県庁ホームページ:土木・建築工事積算基準等の公表, 土木部建設資材等単価, <http://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/attachment/75519.pdf>

第6章 総括

6.1 結論

世界的に循環資源の価値が高まる近年においては、資源の新たな採取や環境への負荷を可能な限り少なくした循環型社会の形成がますます必要となってきている。我が国でも、循環型社会を構築するために資源採取、生産、流通、消費、廃棄などの社会経済活動を通じ、廃棄物などの発生抑制や循環資源の利用などの取り組みが行われている。

建設副産物を活用する技術開発については、「総合技術開発プロジェクト」（国土交通省）において様々な取り組みがなされ、技術マニュアルや品質基準等が示されるとともに、技術開発が進められている。一方、産業副産物についても道路やコンクリート用材として、JIS化が図られているものも多く、各地方整備局や国土技術政策総合研究所、各地方自治体等の取り組みにおいて、いくつかの用途で現地実証実験等を経て利用マニュアル等が示されている。しかし、産業副産物のリサイクル率については、石炭灰など高水準な材料がある一方、非鉄金属スラグや下水汚泥融解固化物など向上の余地が残されているものもある。

本研究では、資源の再生利用だけでなく、非鉄金属の安定供給のためにも重要な課題であると勘案した結果、リサイクル率が低い材料の1つである非鉄金属スラグのリサイクル率を高めることを目指し、非鉄金属スラグの安定処理材として利活用させることを目的に、フェロニッケルスラグ微粉末を適用した特殊土に対する改良効果について評価したものである。

第3章で得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) FNS粉およびFe粉ともに石灰との混合割合が多いほど乾燥密度は大きくなり、最適含水比は低くなることが確認できた。
- 2) FNS粉と石灰の混合は、最適含水比において締固めることで長期にわたり強度発現効果が発揮でき、FNS粉と石灰の割合に対する強度発現の傾向は、FNS40+石灰60をピークに凸型となった。また、Fe粉と石灰の混合は、最適含水比においてFeの混合割合が高いほど長期の強度発現効果が期待できた。
- 3) FNS石灰およびFe石灰ともに強度発現が最も発揮される含水比は、最適含水比あるいは最適含水比より乾燥側であった。
- 4) SEM画像より、FNS石灰およびFe石灰ともに養生日数の増加にともない粒子間の間隔が小さくなった。これは、FNS粉に含まれているシリカ (SiO_2) と石灰に含まれている ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) が化学的に結合するポズラン反応によるものと考えられる。

第4章で得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) FNS石灰を特殊土へ添加することで、まさ土については概ね15%以下の添加量、黒ぼくについては概ね30%以上の添加量で非常に高い改良効果が期待できることが確認できた。
- 2) 同一条件でFNS石灰あるいはFe石灰を特殊土（まさ土・黒ぼく）へ添加した場合の一軸圧縮強度は、改良材間で有意性の差はなく、どちらも同程度の強度発現効果となっていることが確認できた。
- 3) FNS石灰処理土（黒ぼく）およびFe石灰処理土（黒ぼく）の破壊時の圧縮ひずみは、地盤改良材の添加量が増加するとともに小さくなる傾向が確認された。また、最大圧縮応力については、地盤改良材の添加量が増加するとともに強くなる傾向が確認された。

- 4) FNS石灰処理土（黒ぼく）の変形係数は、石灰単体処理土（黒ぼく）やFe石灰処理土（黒ぼく）のそれとは異なり高い値となった。特に、FNS石灰の添加量が多いほどその傾向が強くなり、FNS石灰には土の剛性を高める効果があると期待できた。
- 5) FNS石灰処理土（黒ぼく・まさ土）の乾燥密度は、黒ぼくに比べ高い値となり、粒度調整効果（粒度改善効果）が高まったと考えられる。また、最大添加量50%における乾燥密度が他の添加量の場合に比べ高く、一軸圧縮強さと同様の傾向が確認できた。
- 6) FNS石灰処理土（まさ土・黒ぼく）は、材齢日数の増加とともにまさ土や黒ぼくに含まれているシリカ（ SiO_2 ）に加えFNS微粉末に含まれているシリカ（ SiO_2 ）と石灰（ Ca(OH)_2 ）によるポズラン反応が定性的ではあるが確認できた。また同様の結果がFe石灰処理土（黒ぼく）や石灰単体処理土（黒ぼく）についても確認できた。
- 7) FNS石灰処理土（まさ土・黒ぼく）およびFe石灰（まさ土・黒ぼく）は、すべてにおいて六価クロムの溶出に関する土壤環境基準を十分満足しており、調査対象の安定材は六価クロムについて問題ない材料であることが確認できた。

第5章で得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) FNS石灰あるいはFe石灰をまさ土や黒ぼくに添加することでCBR値を高めることができ、また、地下水の影響等による吸水膨張については全く影響がないことが確認された。
- 2) 化学的安定処理に対しあまり期待できない黒ぼくに、FNS石灰あるいはFe石灰を添加することでCBR値を高めることができ、これらの材料が路床改良材としての有用性を示唆した。特に、添加量30%におけるFNS石灰処理土（黒ぼく）のFNS20+石灰80は、産業副産物で最終処分されるFNSを路床改良材の一部として再利用できることを明らかにした。

- 3) 材齢 10 日の添加量 30%におけるFNS石灰処理土（黒ぼく）のFNS20+石灰 80 およびFNS40+石灰 60 におけるコーン指数が、 1200kN/m^2 以上を示したことから、石灰より安価なFNS石灰を用いることでトラフィカビリティを向上させることが確認できた。
- 4) FNS石灰あるいはFe石灰を黒ぼくやまさ土に添加した処理土は、土壤汚染対策法（溶出量）の基準値を満足した。したがって、FNS石灰およびFe石灰ともに環境安全性の高い改良材であることが確認できた。
- 5) 普通道路や農道の舗装において、一般的に安定処理で改良することが困難な黒ぼくに対し、FNS石灰を用いて安価に改良することができ、現地において残土量の低減を図ることができる改良工法であることを明らかにした。なお、この条件のもと、最も経済性に優れたFNS粉の混合割合とFNS石灰の添加率は、軽交通の場合でFNS40+石灰 60 の添加率は 30%であり、重交通の場合でFNS20+石灰 80 の添加率は 30%であった。

6.2 今後の課題と展望

本論文では、非鉄金属スラグの微粉末その中でも特にフェロニッケルスラグの微粉末の地盤改良材への再生利用に関する新しい知見を得ることができた。しかし、一方で残された課題もあり、今後これまで以上に非鉄金属スラグの再生利用を促進させていくには、更なる研究や実証実験が必要となる。今後の課題を以下に示す。

- 1) FNS石灰あるいはFe石灰を高含水比の浚渫土砂などにも混合し、これらの改良材の適用可能な土質範囲を見つける必要がある。
- 2) FNS石灰処理土（まさ土・黒ぼく）やFe石灰処理土（まさ土・黒ぼく）に対してX線回析や示差分析を行い、FNS石灰やFe石灰の添加による化学変化についてよりミクロ的な視点から解析を行う必要がある。
- 3) 本研究で行った室内試験だけに留まらず試験ヤードや試験舗装などでの効果発現についても検証する必要があると考えている。

今後の更なる 3R 社会に向け、非鉄金属スラグ微粉末が地盤改良材としての再生利用だけでなく、他の分野への再生利用技術の開発や取り組みに活用され、広く普及していくことを期待する。

謝辞

本論文の審査ならびに多数の貴重なご教示とご指導いただきました，日本大学生産工学部土木工学科教授 秋葉正一博士，同教授 伊藤義也博士，同教授 鵜澤正美博士，同教授 三田地利之博士には謹んで感謝の意を表します．また，秋葉教授には本研究を取りまとめるにあたり，ご指導，ご鞭撻を賜り，深く感謝いたします．さらに，これまでの研究，試験において様々なご助言をいただいた日本大学生産工学部土木工学科助教 加納陽輔博士には厚くお礼申し上げるとともに，日本大学生産工学部土木工学科土質・道路工学研究室の皆様には様々な場面でご協力いただきましたことを感謝いたします．

株式会社エフイ石灰技術研究所取締役の井 真宏博士や所長の古在武久博士をはじめとする社員の方々のご支援とご協力に深く感謝申し上げます．また，本研究の原料（フェロニッケルスラグ）および参考資料を提供していただいた日本鉱業協会ならびに日本冶金工業株式会社には，紙面を借りてお礼申し上げます．

最後に，心置きなく研究に専念できるよう支えてくれた妻 晴子，今まで暖かく見守ってくれた父 健と母 民子に対し，心から深く感謝の意を表します．