



複合リサイクル材料を添加したセメント安定処理土の強度変形特性とその内部構造

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-06-21 キーワード (Ja): キーワード (En): unconfined compressive strength, basanite, coal ash, furnace slag, internal structure 作成者: 古川, 芹菜, 亀井, 健史, Furukawa, Serina, Kamei, Takeshi メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10458/5574

複合リサイクル材料を添加したセメント安定処理土の強度変形特性とその内部構造

古川 芹菜^{a)}・亀井 健史^{b)}

Strength-Deformation Characteristics and Internal Structures of Cement-Stabilized Soils Mixed with Composite Recycled Materials

Serina FURUKAWA, Takeshi KAMEI

Abstract

This paper describes the development of new ground improvement materials, based on the formation of ettringite, for basanite using waste and recycled materials. For this purpose, recycled basanite was mixed with coal ash, blast furnace slag and furnace cement type-B in different proportions to obtain the optimal production for ettringite based on their chemical responses. The unconfined compressive strength of cement-stabilized soil increases with increasing the suggested composite recycled materials addition ratio. Based on the observation of internal structure using a scanning electron microscope (SEM), ettringite occurrence is related to the strength increase of cement-stabilized soil. Well-developed ettringite could be seen in the case of higher composite recycled materials addition ratios.

Keywords: unconfined compressive strength, basanite, coal ash, furnace slag, internal structure

1. はじめに

わが国は 1960 年代に高度経済成長を遂げ、大量生産、大量消費、大量廃棄を繰り返す資源浪費型社会となった。このような社会システムは天然資源の枯渇、産業廃棄物の増加、最終処分場の容量不足などの社会問題を顕在化させており、問題解決のためにも資源循環型社会の形成を急ぐ必要がある。とくに建設分野は、産業廃棄物の年間排出量のおよそ 2 割を占めており、リサイクルが進みにくい分野であるため不法投棄などの不適正処理が多発している。一方で、近年良質な地盤材料が慢性的に不足しており、産業廃棄物を地盤改良材として有効かつ大量に利用することが可能であれば、資源循環型社会の形成に大きく貢献できると考えられる。

近年建設分野においては、廃棄物処理法や建設リサイクル法など循環型社会形成に向けた法律が制定・改定され、資源の有効利用を促す法的基盤が整えられてきている。しかしながら、リサイクル体制や技術が十分に確立されていないことから、リサイクルが進んでいない廃棄物も存在する。代表的な例として石膏ボードの廃棄物（以下、廃石膏ボード）がある。廃石膏ボードは耐火性、遮音性、施工性に優れ安価であることから戦後日本に広く普及し、日本家屋の耐用年数である 30 年を過ぎた今大量に排出されており、今後は排出量が大幅に増加し年間 200 万トンを超えると推計されている¹⁾。石膏ボードは水が存在する嫌気的な環境で放置すると有毒な硫化水素 (H₂S) が発生するため、

管理型最終処分場に処分することが法律で厳しく義務付けられているが、管理型の最終処分場は残余容量も少なく逼迫しているため、受け入れ自体を禁じている自治体も存在する。このように、廃石膏ボードのリサイクル技術の開発が急務とされる中、廃石膏ボードから分離した石膏（二水石膏）を加熱することで得られる半水石膏の、水和により極めて短時間で硬化するという性質を利用し、地盤材料として有効利用するための研究が実施されており、その力学的特性は既に明らかにされている^{2)~4)}。

また、石炭灰も資源有効利用促進法で対象となっている産業廃棄物である。主に石炭焼き火力発電所の副産物として生成され、その発生量は国内で年間 1,000 万トンを超えている⁵⁾。福島における原発事故以来、石炭焼き火力発電所の再稼働や新規建設が進んでおり、石炭消費量の増加により石炭灰の発生量はより増加するものと予測される。一方、石炭灰のリサイクルに関しては早くから研究がなされていたため、現在の有効利用率は 97%と高く、そのうちの 68%がセメント混和材として利用されており、石炭灰のリサイクルはセメント生産業に依存している状態にある⁶⁾。しかしながら、セメント生産量は減少しつつあるため、今後更に増加する石炭灰の新たなリサイクル分野を確立することは急務と言える。

このような社会情勢のなか、種々の産業廃棄物を複合的に地盤改良材として適用する実験が多数実施されている。亀井らが行った既往の研究^{7)~9)}では、半水石膏と石炭灰をセメント安定処理土へ混入した場合の強度変形特性、乾湿繰返しおよび凍結融解作用の影響について検討している。半水石膏と石炭灰の添加率が増加するほど、セメント安定

a) 土木環境工学専攻大学院生

b) 社会環境システム工学科教授

表 1. カオリンの物理特性と化学成分¹³⁾

Physical properties				Physical compositions			Chemical compositions (%)							
ρ_s (g/cm ³)	w _L (%)	w _P (%)	PI	Sand	Silt	Clay	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
2.679	73.1	36.7	36.4	0.0	35.3	64.7	68.1	24.8	0.14	0.15	0.02	0.02	1.54	0.56

表 2. 高炉セメント B 種の品質¹⁴⁾

Specific surface area (cm ² /g)	Mechanical properties						Chemical properties (%)				
	Setting		Stability	Compressive strength (MN/m ²)			MgO	SO ₃	Ig. Loss	Total alkali	Cl ⁻
	Initial (min)	Final (h)		1 day	7 days	28 days					
≥3000	≥60	≤10	Good	≥10.0	≥17.5	≥42.5	≤6.0	≤4.0	≤3.0	-	-

表 3. 高炉セメント B 種の化学成分¹⁴⁾

Pattern	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O	TiO	P ₂ O	MnO	Cl	Ig. loss	Insol.
Content (%)	26.30	8.70	1.90	54.10	3.70	2.00	0.26	0.42	0.54	0.69	0.08	0.28	0.01	0.80	0.20

処理土の乾燥密度の増加と含水比の低下が確認され、それに伴って一軸圧縮強さも増加するという結果が得られている。あわせて内部構造の観察を行った結果、エトリンガイトが長く成長することが明らかにされている。エトリンガイトとは、セメント水和時に生成する水和物であり、供試体内部に針状結晶として析出される。エトリンガイトが、半水石膏中に含まれるフッ素の不溶化に最も有効であるとの研究結果¹⁰⁾から Kamei et al.¹¹⁾は、廃石膏ボードから製造した半水石膏に対して石炭灰と高炉スラグのそれぞれが含有するアルミナ (Al₂O₃) と酸化カルシウム (CaO) の割合から、化学当量的にエトリンガイトが最大に生成される各産業廃棄物の質量比を検討した。その配合設計に基づき、半水石膏と石炭灰、および高炉スラグを混合したものを、複合リサイクル材料としている。

本研究では高含水比の軟弱粘性土を対象として、化学当量的にエトリンガイトが最大量生成される割合で半水石膏、石炭灰、高炉スラグが混合された複合リサイクル材料を極少量の高炉セメント B 種とともに混入したセメント安定処理土供試体を作成し、その強度特性について定量的に評価している。また走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて供試体内部を観察し、内部構造と強度特性との関連性についても検討することで、産業廃棄物を有効利用した地盤材料の有用性について考察している。

2. 実験に用いた試料

2.1 セメント安定処理土

本研究では、粘土試料として成分調製された工業製品であるカオリンを使用した。その物理特性および化学成分を表 1¹³⁾に示す。

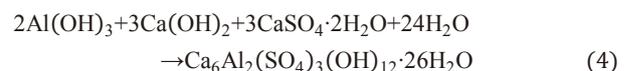
安定材には、高炉セメント B 種を使用した。高炉セメント B 種は普通ポルトランドセメントと比較して、経済面、環境面のみならず強度特性においても優れた地盤安定材である。高炉セメント B 種の品質は、JIS R 5210 で表

2¹⁴⁾ のように定められている。また、その化学成分を表 3¹⁴⁾に示す。表より、CaO、SiO₂、Al₂O₃ の 3 成分の合計が全体の約 90%を占めており、主要な成分であることがわかる。セメントを過度に添加すると六価クロムの溶出が懸念されることから、セメントの添加率を比較的 low に設定した。なお、土壌に含まれるアルミナ (Al₂O₃) や酸化カルシウム (CaO) などの鉱物がエトリンガイト生成の外乱要素とならないように、合成材料のみを母体として高炉セメント B 種の添加量を変化させる実験では、合成材料単独では水と反応せず、アルカリ刺激剤として高炉セメント B 種を少量添加することでポズラン反応を推進させることが、エトリンガイト生成に有効であることを明らかにしている¹¹⁾。

供試体の作成時に使用する混練水には、水質の違いによる強度発現の影響が最も少ないと考えられる蒸留水を使用した。

2.2 複合リサイクル材料の作製¹²⁾

半水石膏と石炭灰の添加に伴う強度と耐久性の増加の主要因として、セメント水和物の一種である針状結晶のエトリンガイト (Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂·26H₂O) の構造発達報告されている⁷⁻⁹⁾。エトリンガイト生成の化学反応式は次のように表される。



これらの化学反応式から明らかなように、Al₂O₃、CaO、半水石膏の化学当量比 (mol 比) が Al₂O₃ : CaO : CaSO₄ · 1/2H₂O = 1:3:3 の場合にエトリンガイトが効率良く生成される。このモル比に基づき、各物質の質量比と石炭灰、

表 4. 複合リサイクル材料の基本物理特性

ρ_s (Mg/m^3)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	Coefficient of uniformity (U_c)	Coefficient of curvature (U_c')
2.67	0.026	0.042	0.062	0.073	2.81	0.929

高炉スラグ、半水石膏中に含まれる Al_2O_3 、 CaO 、 $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ の割合から、エトリンガイトが効率的に生成される質量比 1:2.26:2.55 を求め、この比率で 3 種類の廃棄物を混合したものを複合リサイクル材料としている。本研究では同試料を上記のセメント安定処理土へ混入した。表 4 に複合リサイクル材料の基本物理特性を示す。

3. 供試体の作成方法および試験方法

3.1 供試体の作成方法

本研究では、高含水比かつ多量の安定剤の添加を必要とする粘性土の改良を目的としているため、安定処理土の締固めを行わない供試体作成方法¹³⁾に準じて、セメント安定処理土供試体を作成した。配合条件は、超軟弱粘性土を想定し、水土比 (W/S, S は土の乾燥重量を表す) を 140%、セメント添加率 (C/S) を 5% と 2.5% の二種類に設定した。複合材料 (Admixture) 添加率 (A/S, A は複合材料の重量を表す) は、0%、10%、20%、40% の 4 配合とした。

供試体作成方法を以下に説明する。まず、設定した水土比に対応する混練水の 6 割程度を MC クレーに混ぜ、5 分間ソイルミキサーで攪拌する。その間にセメントと残りの 4 割程度の混練水を混ぜセメントスラリーを作成し、攪拌した粘土試料と混合して 3 分間ミキサーで攪拌した。その後、複合材料を投入し、均質に混ざるように 3 分間再度ミキサーで攪拌した。完成した試料は、含水比および湿潤密度の測定後、鋳鉄製のモールド ($\phi=50\text{mm}$, $H=100\text{mm}$) に 5 層程度に分けて打設した。その際、試料を均質にするために層ごとにゴムハンマーを用いてモールドに打撃を加え、打設時に含まれる気泡を除去した。モールドに打設した試料は、ポリエチレン製の袋で被い、恒温室 ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) で 24 時間養生した。その後、モールドから試料を取り出し、再びポリエチレン製の袋で被い、所定の養生期間 ($T_c=28$ 日) まで再び恒温室で気中養生した。所定の養生期間を経た供試体は、両端面を成形し、一軸圧縮試験および内部構造の観察に用いた。

3.2 実験方法

本研究では、複合リサイクル材料を混入したセメント安定処理土の強度変形特性とその内部構造の関係を明らかにするために、一軸圧縮試験および走査型電子顕微鏡 (SEM) による微視的観察を行った。まず、一軸圧縮試験は、ひずみ制御方式で行い、せん断時のひずみ速度は $1\%/\text{min}$ とした。強度変形特性に及ぼす端面摩擦の影響を軽減するため、上下加圧版の表面にシリコングリースを薄く塗布した。試験後、供試体の上部、中部、下部の含水比

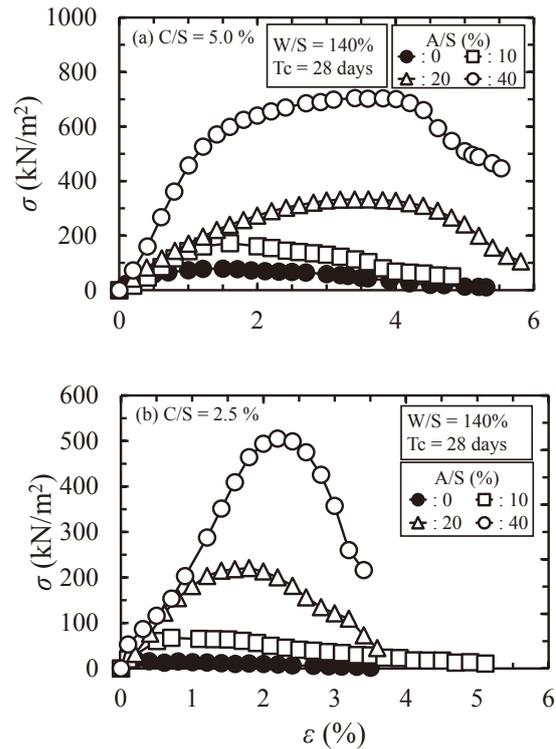


図 1. 複合リサイクル材料を混入したセメント安定処理

を測定し、その平均値を供試体の含水比とした。つぎに SEM による内部構造の観察には、一軸圧縮試験後に含水比を測定した後の乾燥した試料を用いた。

4. 実験結果および考察

4.1 応力-ひずみ曲線

図 1 に複合リサイクル材料を混入したセメント安定処理土の代表的な応力-ひずみ曲線を示す。まず、セメント添加率 (C/S) が 5.0% の場合の応力-ひずみ曲線に着目する (図 1(a))。複合リサイクル材料添加率 (A/S) が 0% の場合には、軸ひずみ量 1.5% において 80kN/m^2 程度のピーク応力値を示し、軸ひずみ量がさらに増加すると応力値は徐々に減少している。一方、複合リサイクル材料を添加した場合には、添加率の増加に伴いピーク応力値が増加する傾向にあり、A/S=40% の場合のピーク応力値は、複合リサイクル材料を添加しない場合の約 9 倍の値を示した。

つぎに C/S=2.5% の場合に着目する (図 1(b))。複合リサイクル材料を添加しない場合には、軸ひずみ量 0.8% においてピーク応力値 15kN/m^2 に達した後、軸ひずみ量の更なる増加に伴って、応力値は徐々に低下している。一方、複合リサイクル材料を添加した結果に着目すると、複合リサイクル材料添加率の増加に伴うピーク応力値の増加が確認でき、C/S=5% の場合と同様の傾向が得られた。

応力-ひずみ曲線の初期の傾きである変形係数に着目する。セメント添加率の違いによらず、複合リサイクル材料添加率の増加に伴って、応力-ひずみ曲線の初期の傾き

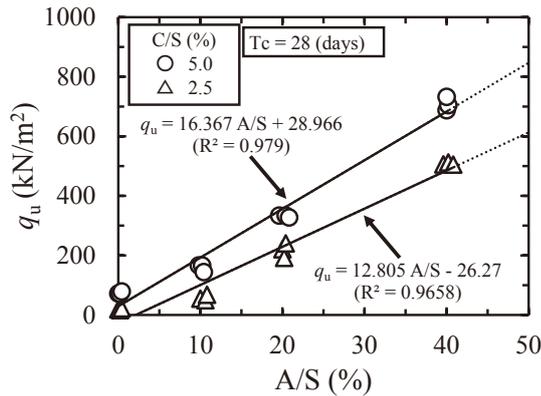


図2. 一軸圧縮強さと複合リサイクル材料添加率の関係

は大きくなり、変形抵抗が増加することがわかる。A/S=40%の場合には、その変形抵抗の改善は顕著である。したがって、変形抵抗性の面からも、複合リサイクル材料が地盤工学的に優れた材料となる可能性を示唆した。

4.2 一軸圧縮強さ

図2に一軸圧縮強さ (q_u) と複合リサイクル材料添加率 (A/S) の関係を示す。C/S=5%の場合には、複合リサイクル材料の添加率の増加に伴って q_u 値が直線的に増加する結果となった。A/S=40%の場合には、複合リサイクル材料を添加しない場合のおよそ10倍の値を示し、強度は大幅に改善された。一方、セメント添加率を2.5%と減らすことで強度は低下するが、C/S=5%の場合と同じ増加傾向を示した。また、C/S=2.5%かつA/S=20%および40%の場合の q_u 値はC/S=5%かつA/S=10%および20%の場合と同等かそれ以上の強度が得られていることから、複合リサイクル材料の添加率を増加させることで、セメント量の減少による強度低下を抑制できることがわかる。なお、セメント安定処理土の一軸圧縮強さは養生初期に急激に増加し、養生期間の経過に伴ってその増加傾向が緩やかになる双曲線近似が可能である¹⁵⁾。したがって、本材料の長期強度も同様の強度増加傾向となるものと推察できる。

4.3 乾燥密度

複合リサイクル材料を混入したセメント安定処理土の乾燥密度 (ρ_d) と複合リサイクル材料添加率 (A/S) の関係を図3に示す。乾燥密度は、複合リサイクル材料添加率の増加に伴って直線的に増加しており、両者の間には非常に高い相関関係が認められる。この原因としては、混入された合成材料が固相に対応しており、相対的に固体部分の重量が増加していることが考えられる。なお、セメント添加率が2.5%かつ複合リサイクル材料添加率40%のセメント安定処理土とセメント添加率5%かつ複合リサイクル材料添加率20%のセメント安定処理土は同程度の固相を有していると考えられ、実際乾燥密度は同程度の値を有しているが、前者の q_u 値は、後者の q_u 値より6割程度大きな

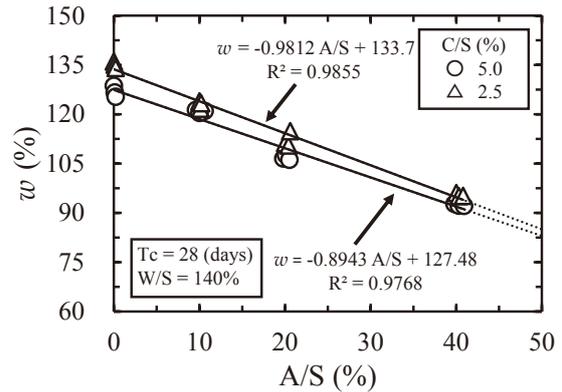


図3. 乾燥密度と複合リサイクル材料添加率の関係

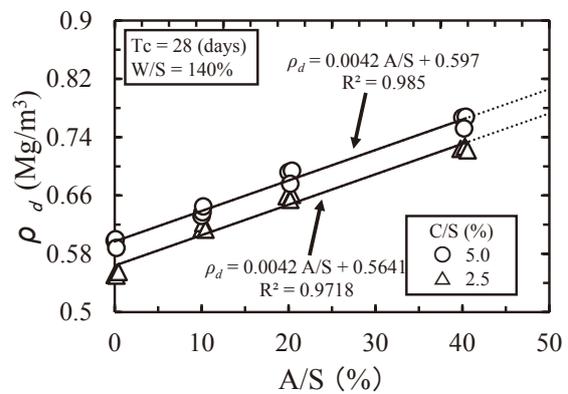


図4. 含水比と複合リサイクル材料添加率の関係

値となっている。したがって、乾燥密度の増加という物理的な影響以外にも何らかの強度増加の要因が挙げられる。

4.4 含水比

複合リサイクル材料を混入したセメント安定処理土の含水比 (w) と複合リサイクル材料添加率 (A/S) の関係を図4に示す。含水比はセメント添加率の違いに関係なく複合リサイクル材料添加率の増加に伴って直線的に減少している。これは、試料中に含まれる固相 (MC クレー、高炉セメント B 種、半水石膏、石灰炭、高炉スラグ) の重量が増加することによって、水部分が占める重量が相対的に低下したことが原因と考えられる。このような含水比の低下は、乾燥密度の増加と密接に関係しており、結果的に強度増加に繋がっていることが想定できる。

4.5 内部構造

上記の結果から、複合リサイクル材料の混入によって強度変形特性が改善され、工学的に優れた材料であることが示された。本研究では、このような物理的な影響以外の強度増加の要因について検討するため、走査型電子顕微鏡 (SEM) を使用して供試体内部の構造を観察した。図5にセメント添加率 (C/S) が5%、図6にC/S=2.5%の場合のセメント安定処理土の内部構造のSEM画像を示す。図

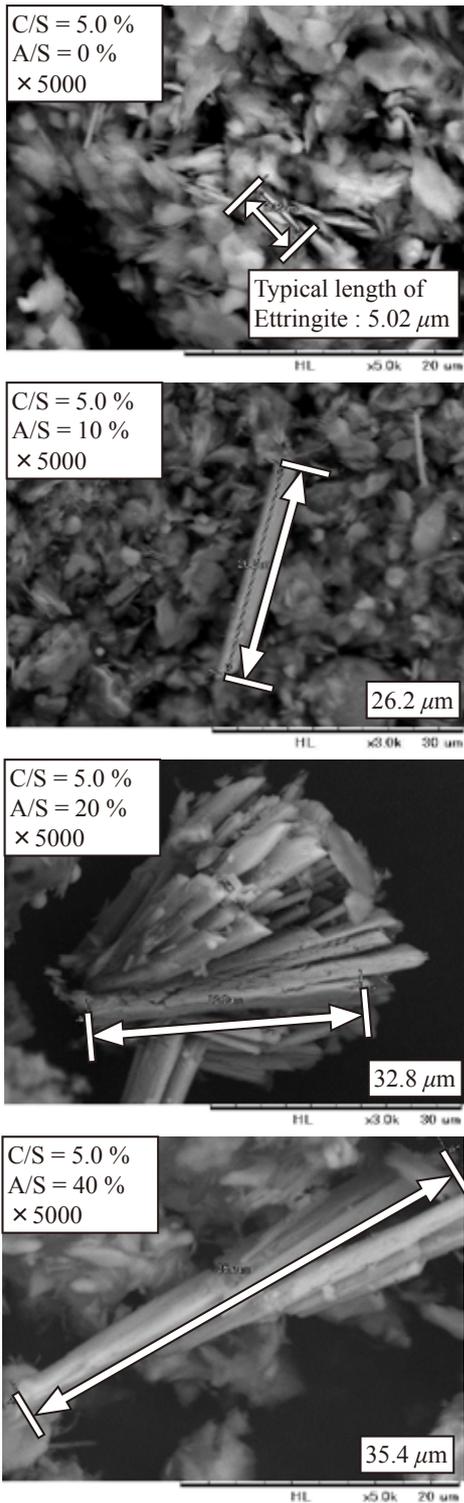


図 5. セメント安定処理土の内部構造 (5,000 倍)
(C/S=5%)

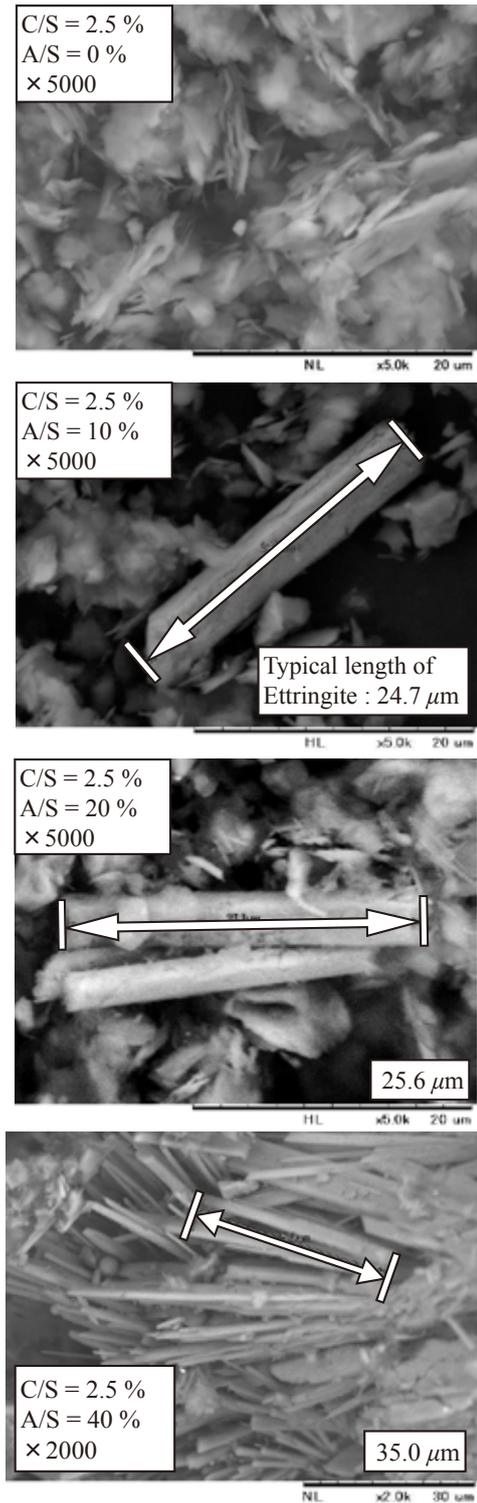


図 6. セメント安定処理土の内部構造 (5,000 倍)
(C/S=2.5%)

より、すべての供試体において針状の結晶構造を持つエトリンガイトが生成されている。複合リサイクル材料添加率の増加に伴ってエトリンガイトは長く成長し、A/S=40%の場合には複合リサイクル材料を添加しない場合の 6 倍以上の長さで成長していた。一方で、C/S=2.5%の場合には、A/S=0%においてエトリンガイトを観察できなかった。し

かしながら、複合リサイクル材料を添加することで発達したエトリンガイトが観察されるようになり、C/S=5%の場合と同様に複合リサイクル材料添加率の増加に伴ってエトリンガイトが長くなる結果となった。また、C/S=2.5%の場合には、C/S=5%の場合と比較して、エトリンガイトは短くなる傾向にあるが、その差は小さい。このような複

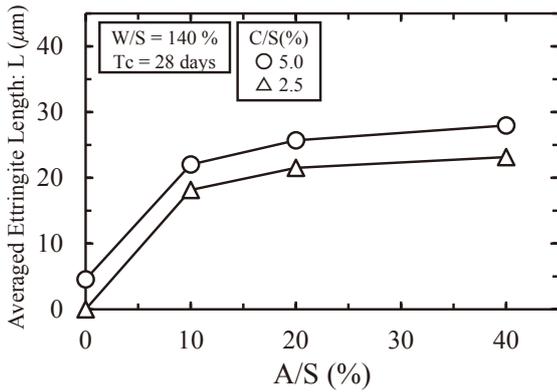


図 7. エトリンガイト長さ と複合リサイクル材料添加率の関係

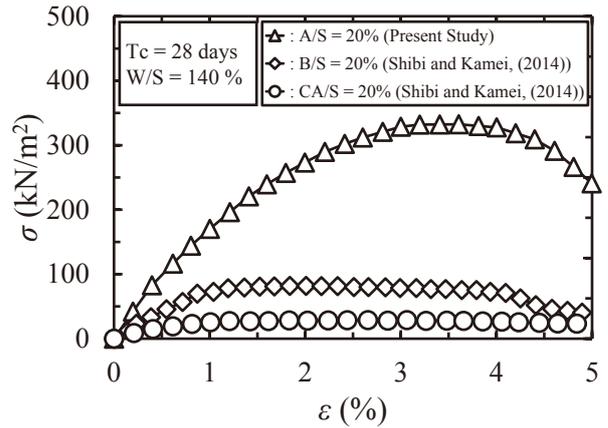


図 9. 複合リサイクル材料・半水石膏・石炭灰を混入したセメント安定処理土の応力-ひずみ曲線

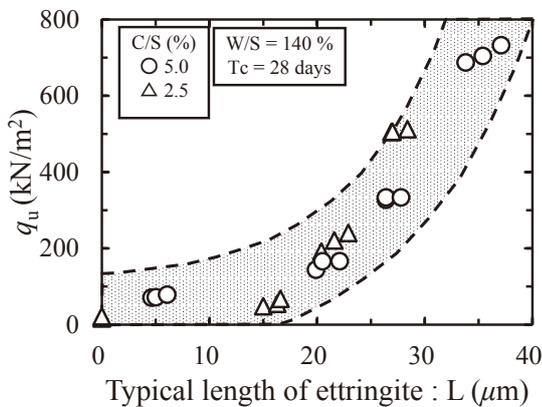


図 8. 一軸圧縮強さとエトリンガイト長さの関係

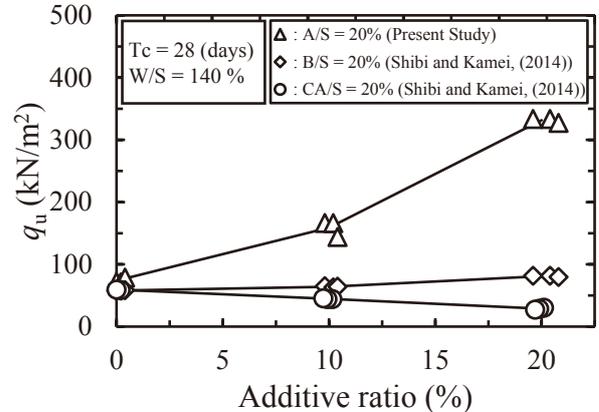


図 10. 一軸圧縮強さと各種材料の添加率の関係

合リサイクル材料添加率増加に伴うエトリンガイト長さの変化を定量的に表すために、図 7 にエトリンガイト長さ と複合リサイクル材料添加率の関係を示す。セメント添加率 (C/S) が 2.5% の場合には、C/S=5% の場合よりも 5 μ m ほどエトリンガイトは短くなるがその差は小さく、セメント添加率の違いによらず同じ増加傾向を示している。

つぎに一軸圧縮強さ (q_u) と複合リサイクル材料添加率の関係を図 8 に示す。C/S=2.5% の場合であっても C/S=5.0% の場合と同程度の長さを持つエトリンガイトが生成されており、生成されるエトリンガイトが長いほど q_u 値が大幅に増加していることが確認できる。

以上のことから、エトリンガイトが最も効率よく生成される割合で半水石膏、石炭灰および高炉スラグを混合した複合リサイクル材料をセメント安定処理土へ適用することによって、生成されるエトリンガイトを非常に長く発達させることが可能となる。そして、これらが絡み合った緻密な構造を形成させ、このような緻密な構造がせん断時の土粒子間のすべりを抑制した結果、セメント安定処理土の q_u 値が増加したものと考えられる。したがって、 q_u 値とエトリンガイト生成の間には密接な関係があることが推察される。さらに C/S=2.5% の場合であっても、複合リサイクル材料の添加率を増加させることで、C/S=5% の場合と

同等の長さを持つエトリンガイトを生成することが可能であるため、実地盤に適用する際にセメント資材の節減が可能である。

4.6 複合リサイクル材料・半水石膏・石炭灰を混入したセメント安定処理土の比較

図 9 に複合リサイクル材料 (A)、半水石膏 (B)、石炭灰 (CA) のそれぞれを 20% 混入したセメント安定処理土の代表的な応力-ひずみ曲線を示す。なお、半水石膏単体および石炭灰単体をセメント安定処理土へ混入した実験結果は Shibi and Kamei (2014)⁹⁾ を引用している。半水石膏のみを添加した場合には、石炭灰のみを添加した場合のピーク応力値と比較して 2 倍程度増加している。さらに複合リサイクル材料を添加した場合には、半水石膏のみを添加した場合の 4 倍程度のピーク応力値が得られた。また、応力-ひずみ曲線の初期の傾きである変形係数に注目すると、石炭灰、半水石膏、複合リサイクル材料の順に変形抵抗が増加することがわかる。

つぎに複合リサイクル材料 (A)、半水石膏 (B)、石炭灰 (CA) のそれぞれを混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さ (q_u) と添加率の関係を、図 10 に示す。石炭灰のみを添加した場合には、添加前の q_u 値よりも減少し、

添加率の増加に伴ってさらに減少する傾向を示した。半水石膏のみを添加した場合には、 q_u 値の大きな改善は認められないが、添加率の増加に伴って増加する傾向にある。複合リサイクル材料を添加した場合には半水石膏のみを添加した場合と比較して、 q_u 値の大幅な改善が認められ、添加率 10% の場合においては 2.5 倍、さらに 20% の場合には約 4 倍の q_u 値を示した。

このように、地盤材料として産業廃棄物を個々に使用する場合と、混合して使用する場合とでは強度特性に大きな変化が現れることが明らかとなり、複合リサイクル材料の地盤工学的有用性が示唆される結果となった。

5. 結論

本研究では、エトリンサイト生成量に着目した複合リサイクル材料を混入したセメント安定処理土の強度特性を明らかにした。また、SEM を用いて得られた供試体の内部構造を観察し、その内部構造と強度変形特性の関係についても定量的に検討した。得られた主要な結論を以下に列記する。

- (1) 複合リサイクル材料を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さ (q_u) は、複合リサイクル材料添加率 (A/S) の増加に伴って直線的に増加する。この主要な要因として、含水比の低下に伴う乾燥密度の増加と、複合リサイクル材料添加に伴うエトリンサイトの構造発達が大きく寄与していることを実証した。
- (2) セメント添加率 (C/S) の違いによらず、複合リサイクル材料添加率の増加に伴い、エトリンサイト長さは同じ増加傾向を示し、エトリンサイトの成長に伴い q_u 値が増加した。
- (3) C/S=2.5% の場合には、複合リサイクル材料の添加率を増加させることで C/S=5% の場合と同等かそれ以上の長さのエトリンサイトが生成されていることから、複合リサイクル材料はセメント資材の節減が可能な、環境に優しい地盤材料であることが明らかとなった。
- (4) 廃石膏や石炭灰に代表されるリサイクル材料単体でセメント安定処理土へ混入しても、強度特性の大きな改善は認められないが、それらを複合的に混入することで q_u 値を大幅に改善することが可能である。

以上のことから、3 種類の産業廃棄物をエトリンサイトが化学当量的に最大量生成される割合で混合した複合リサイクル材料が、高含水比の軟弱粘性土地盤の地盤改良材として十分適用可能であり、環境と産業の両分野に大きく貢献できることを示唆した。現在、複合リサイクル材料を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さに与える凍結融解作用や乾湿繰返し作用の影響についても、研究をさらに進めている。今後、積極的に複合リサイクル材料を利用していくためにも、これらの実験から得られた結果をもとに、実務に適用可能な設計体系を構築する必要がある。

参考文献

- 1) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部産業廃棄物課: 廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務調査報告書, 環境省, 2-8, 2013.
- 2) 亀井 健史, 珠玖 隆行: 廃石膏ボードから再生した半水石膏を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さ, 地盤工学ジャーナル, 2(3), 237-244, 2007.
- 3) T. Kamei, A. Ahmed, T. Shibi: Effect of freeze-thaw cycles on durability and strength of very soft clay soil stabilised with recycled Bassanite. *Journal of Cold Regions Science and Technology*, 82, 124-129, 2012.
- 4) T. Kamei, A. Ahmed, K. Ugai: Durability of soft clay soil stabilized with recycled bassanite and furnace cement mixture. *Journal of Soils and Foundations*, 53(1), 155-165, 2013.
- 5) 財団法人 石炭エネルギーセンター: 石炭灰の発生状況, 石炭灰発生量データ (平成 7 年度~平成 24 年度), http://www.jcoal.or.jp/coalash7_24.pdf, 2012.
- 6) 財団法人 石炭エネルギーセンター: 石炭灰の利用状況, 平成 24 年度石炭灰の有効利用分野別内訳, <http://www.jcoal.or.jp/uchiwake24.pdf>, 2012.
- 7) 亀井 健史, 小川 靖弘, 志比 利秀: 半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の強度変形特性とその内部構造—ハイブリッド型地盤材料の創出—, 地盤工学ジャーナル, 5(1), 35-43, 2009.
- 8) T. Kamei, A. Ahmed, T. Shibi: The use of recycled basanite and coal ash to enhance the strength of very soft clay. *Journal of Construction and Building Materials*, 38(1), 224-235, 2013.
- 9) T. Shibi, T. Kamei: Effect of freeze-thaw cycles on the strength and physical properties of cement-stabilised soil containing recycled basanite and coal ash, *Cold Regions Science and Technology*, 106-107, 36-45, 2014.
- 10) 亀井 健史, 蓬萊 秀人, 鶴飼 恵三: 半水石膏・石炭灰・高炉セメント B 種を用いた安定処理土中のフッ素・六価クロム・ホウ素の不溶化—廃石膏ボードのリサイクル化—, 地盤工学ジャーナル, 5(3), 449-461, 2010.
- 11) T. Kamei, A. Ahmed, H. Horai, and K. Ugai: A novel solidification technique for fluorine-contaminated basanite using waste materials in ground improvement applications, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, DOI 10.1007/210163-014-0251-0, 2014.
- 12) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 安定処理土の締固めをしない供試体作製, 255-262, 1990.
- 13) 山陽クレイ工業 (株): クレー・ダルク・カオリン規格表, <http://www1.ocn.ne.jp/~wsanyou/HPpictures/clay.talc.kaolin.pdf>, 2013.5.
- 14) 財団法人 日本規格協会: JIS ハンドブック 10 生コンクリート (第一版), pp.202, 2002.
- 15) 亀井 健史, 小川 靖弘, 志比 利秀: 半水石膏を利用したセメント安定処理土の一軸圧縮強さに及ぼす養生期間の影響—廃石膏ボードの有効利用—, 地盤工学ジャーナル, 4(1), 99-105, 2009.