

半水石膏添加がセメント安定処理土の一軸圧縮強さと内部構造に及ぼす影響

Influences of Bassanite Addition on Unconfined Compressive Strength and Microstructure of Cement Stabilized Soils

亀井健史 Takeshi KAMEI (宮崎大学工学部)
小川靖弘 Yasuhiro OGAWA (日本工営株)
志比利秀 Toshihide SHIBI (島根大学総合理工学部)
松田哲夫 Tetsuo MATSUDA (西日本高速道路株)

現代社会における産業活動や人間生活に起因する産業廃棄物の大量排出が処分場の容量不足や有害物質の発生等の問題を引き起こしていることから、産業廃棄物を有効利用した循環型社会を構築することが急務となっている。近年、産業廃棄物の一つである廃石膏ボードの地盤改良材としての適用性に関する研究が数多く行われており、ひずみ軟化現象が認められないことや強度発現が早いことから、優れた地盤改良材となり得る可能性が示唆されている。本研究では、半水石膏を添加したセメント安定処理土の一軸圧縮強さとその内部構造の関係を明らかにするため、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて供試体の微視的観察を行い、一軸圧縮強さと内部構造の関係について考察した。その結果、一軸圧縮強さとエトリンガイトの生成との間に密接な関係があることが推察された。

キーワード：一軸圧縮強さ、セメント安定処理土、内部構造、半水石膏 (IGC : K06, T14)

1. はじめに

国土が狭く、資源の少ない我が国は、大量生産・大量消費・大量廃棄に基づいた資源浪費型社会から、資源循環型社会へと社会構造を改めるべき時期に来ている。しかしながら、平成 20 年 12 月に発表された我が国における平成 18 年度の産業廃棄物最終処分量は、約 2200 万トンと未だ莫大な量となっており¹⁾、最終処分場の残余容量が逼迫していることから²⁾、産業廃棄物の更なるリサイクルを推し進める必要がある。近年、このような産業廃棄物の中でも、建設現場から排出される石膏ボード廃材 (以下、廃石膏ボード) の処理に関する問題が指摘されるようになってきた³⁾。

石膏ボードは耐火性や施工性に優れ、経済的にも低廉であることから建築用内装材として広く利用されている。しかしながら、家屋の解体時等に発生する廃石膏ボードのリサイクルはそれほど進んでおらず、その大部分が管理型処分場に最終処分されているのが現状で、新たなリサイクル市場の開拓が期待されている。

そこで近年、廃石膏ボードから再生した半水石膏を地盤改良材として有効利用しようとする研究が行われている^{4)~9)}。その結果、半水石膏のセメント安定処理土への添加材としての利用に関して^{5)~9)}は、半水石膏を大量に混入する場合には、半水石膏添加率の増加に伴って吸水硬化の影響が認められるようになり一軸圧縮強さが増加することや、ひずみ軟化現象が認められない工学的に優れた材料となることが明らかとなっていった。また高含水比の軟弱粘性土地盤をセメント安定処理した場合には、半水石膏の大量消費が可能であ

ることに加え、強度増加も期待できることから、半水石膏の有効利用と地盤の強度変形特性の改善の両観点から非常に有益であることが示唆されている。しかしながら、5%~10%程度と少量の半水石膏を混入させた場合の一軸圧縮強さはセメントのみを添加した場合と比較して4~6割程度の強度低下が認められる。乾燥密度や含水比に代表される物理的性質は、半水石膏添加率の増大に伴いそれぞれ単調減少、単調増加している。このことから、現状では、少量の半水石膏添加時の強度低下とその後の強度増加の要因については、よくわかっていないといえる。

そこで本研究では、まず半水石膏を混入したセメント安定処理土供試体を作製し、得られた供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、その一軸圧縮特性の再確認を行った。その後、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて、セメント安定処理土内部の微視的観察を行い、供試体の内部構造と一軸圧縮強さの関係について考察している。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

本研究で使用した半水石膏は、半水石膏生産システムを用いて廃石膏から生産された粉末状のものである⁶⁾。半水石膏生産システムでは、廃石膏ボードから紙を取り除き、粉碎、加熱処理 (130~180℃) することによって、吸水硬化の特性を有する半水石膏 (CaSO₄·1/2H₂O : 硫酸カルシウム 1/2 水和物) と無水

石膏 (CaSO₄: 硫酸カルシウム) がそれぞれ 76.5%と 11.0%程度含まれ、常温で安定な二水石膏 (CaSO₄・2H₂O: 硫酸カルシウム二水和物) が 12.5%程度含まれた石膏を生産できる。得られた石膏は、一部無水石膏や二水石膏を含んでいるが、その4分の3を半水石膏が占めているので、ここでは半水石膏と呼ぶこととする。半水石膏は、加水すると二水石膏へと転化するため、加水の不必要な物理試験を行った。その物理特性を表-1⁶⁾に示す。粒度試験は3回実施し、その平均値を用いた。また、半水石膏の(土粒子)密度 ρ_s に関しては、半水石膏が吸水硬化し二水石膏へと変化するために通常の土質試験からは求められないので、文献等から得られる値¹⁰⁾を用いることとした。石膏の硬化体は水溶性を有していることから、長期間水中に置かれると石膏中の重金属等が溶出する可能性がある。したがって、半水石膏を地盤改良材として用いる場合には、重金属等の溶出に十分な注意を払わなければならない。なお、本研究で使用した半水石膏の重金属の溶出量は、環境基準値を下回ることを確認している。

表-1 半水石膏の基本物理特性^{6), 10)}

ρ_s (Mg/m ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	均等係数 U _c	曲率係数 U _{c'}
2.640	0.220	0.370	0.500	0.600	2.73	1.040

安定材には、強度特性や経済性を考慮して高炉セメント B 種を使用した。その品質は、JIS R 5210 で表-2¹¹⁾のように定められている。また、その化学成分を表-3¹¹⁾に示す。表より、CaO, SiO₂, Al₂O₃の三成分の合計が全体の約90%を占め、主要な成分であることがわかる。セメントには固化作用があるため、石膏からの溶出が懸念される重金属等を固着させ、その溶出を抑制させる効果が期待できる。とくに高炉セメント B 種に多く含まれる Al₂O₃成分は、CaO や半水石膏と反応し、近年土壌環境汚染において問題となっているフッ素イオンを取り込むことができるエトリンガイトを生成することから、環境の面からも優れている¹²⁾。一方で、セメントからは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低位で設定した。

粘土試料には成分調整された工業製品である MC クレー (カオリン) を使用した。その物理特性および化学成分をそれぞれ表-4¹³⁾、表-5¹³⁾に示す。また、安定処理土の作製に使用する混練水に蒸留水を用いることによって、水質の違いによる強度発現への影響を極力排除した。

2.2 供試体の作製方法

本研究では、安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法¹⁴⁾に準じて、セメント安定処理土供試体を作製した。配合条件は、含水比 140%の軟弱粘性土(すなわち、水土比 (W/S, S は土の乾燥重量を表す) が 140%)を安定処理する場合を想定し、セメント添加率 (C/S) を 10%とした。また、今回対象とした粘土試

表-2 高炉セメント B 種の品質¹¹⁾

品質 種類	比表面積 (cm ² /g)	凝結		安定性	圧縮強さ(MN/m ²)			酸化マグネシウム (%)	三酸化硫黄 (%)	強熱減量 (%)	全アルカリ (%)	塩化物イオン (%)
		始発 (min)	終結 (h)		3日	7日	28日					
高炉セメント B 種	3000 以上	60 以上	10 以下	良	10.0 以上	17.5 以上	42.5 以上	6.0 以下	4.0 以下	3.0 以下	—	—

表-3 高炉セメント B 種の化学成分¹¹⁾

セメントの種類	Ig loss (強熱減量)	Insol. (不溶残分)	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
高炉セメント B 種	0.8	0.2	26.3	8.7	1.9	54.1	3.7	2.0	0.26	0.42	0.54	0.69	0.08	0.28	0.007

表-4 MC クレーの物理特性¹³⁾

ρ_s (Mg/m ³)	w _L (%)	w _p (%)	I _p	砂分 (%)	シルト (%)	粘土分 (%)
2.679	73.1	36.7	36.4	0.0	35.3	64.7

表-5 MC クレーの化学成分¹³⁾

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
68.1	24.8	0.14	0.15	0.02	0.02	1.54	0.56

料に対して半水石膏を混入した際にモールドに打設可能かを検討するとともに、既往の研究成果^{5)~9)}を考慮して、半水石膏混入率 (B/S) として、0%, 10%, 20%, 40%の4配合を設定した。

供試体作製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、粘土試料であるMCクレーに混ぜ、ソイルミキサーで攪拌した。その間に、セメントと残り4割程度の混練水を混ぜ、ミキサーで攪拌した粘土試料と混合し、さらにその試料をミキサーで攪拌した。その後、半水石膏粉末を粘土スラリー中に混入し、半水石膏粉末がスラリー中で均質に混ざるように再度ミキサーで攪拌した。完成した試料は含水比、湿潤密度の測定を行った後、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各層を打設するごとにゴムハンマーを用いてモールドに打撃を加えることにより、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、モールドから供試体を取り出し、供試体を所定の養生期間 ($T_c = 28$ 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。

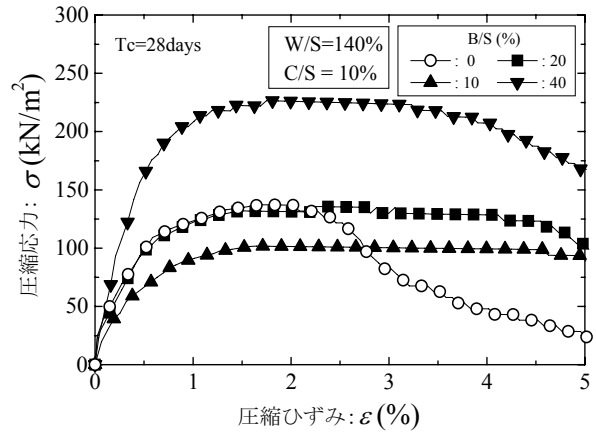
2.3 実験方法

本研究では、廃石膏ボードから得られた半水石膏粉末を利用したセメント安定処理土の一軸圧縮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、せん断時の圧縮ひずみ速度は $1\%/\text{min}$ 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、下部の含水比を測定し、その平均値を供試体の含水比とした。なお、同一配合に対して4回以上の実験を実施するとともに、他の配合条件の結果との関係も考慮して各配合に対して3つのデータを採用した。つぎに SEM による内部構造の観察には、液体窒素で凍結させた状態で割り、真空凍結乾燥させた後に観察面を金でコーティングした試料を用いた。

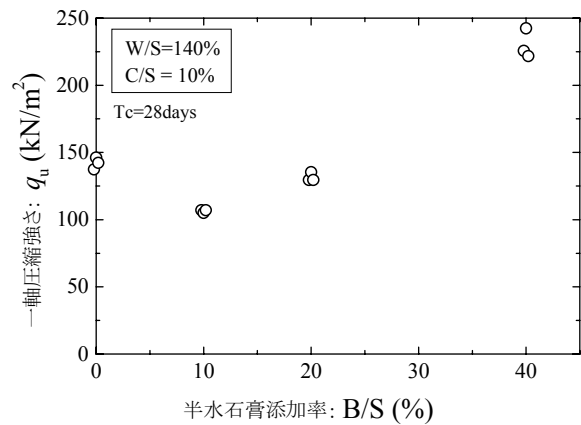
3. 実験結果および考察

3.1 一軸圧縮試験

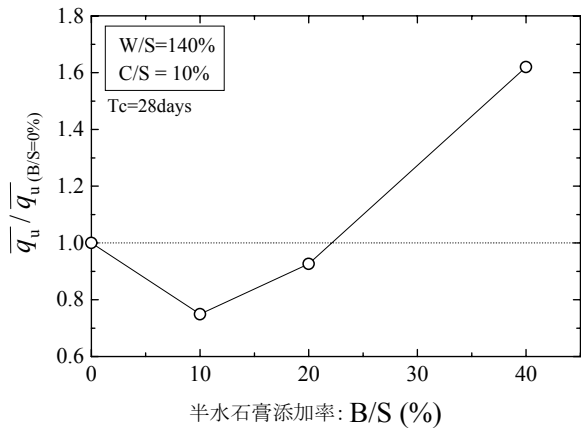
半水石膏を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮試験結果を図-1に示す。図-1 (a) は対象とした配合条件の結果を総合的に判断して選定した各配合条件の代表的な応力-ひずみ曲線を示している。セメントのみを添加した場合 (B/S=0%) では、圧縮応力値がピー



(a) 代表的な応力-ひずみ曲線



(b) 一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係



(c) $\bar{q}_u/\bar{q}_u(B/S=0\%)$ と半水石膏添加率の関係

図-1 半水石膏を添加したセメント安定処理土の一軸圧縮試験結果

クに達した後、圧縮ひずみ量の増加に伴って徐々に圧縮応力値が低下している。一方、半水石膏を混入させた場合では、いずれの試料においても圧縮応力値に明瞭なピーク値は認められず、圧縮応力値は、圧縮ひずみ量3~4%程度までその最大値近傍の値を維持していることから、粘り強い材料であることがわかる。図-1 (b), (c) に一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係、 $\bar{q}_u/\bar{q}_u(B/S=0\%)$ と半水石膏添加率の関係を示す。両図よ

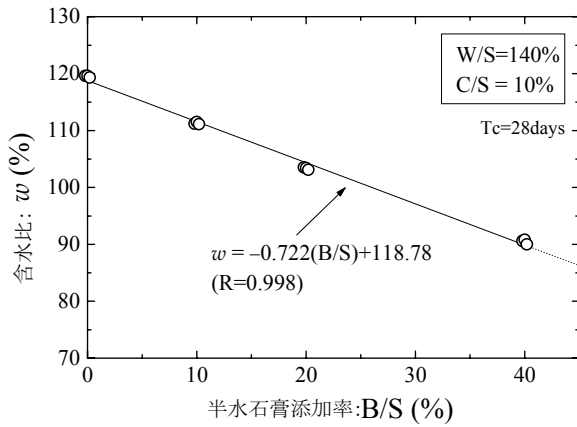


図-2 含水比と半水石膏添加率の関係

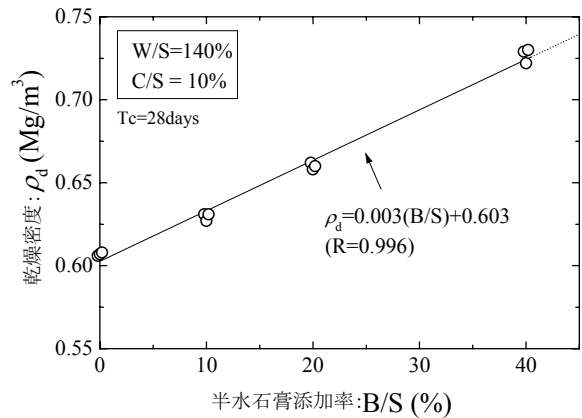


図-3 乾燥密度と半水石膏添加率の関係

り少量の半水石膏を混入した際 (B/S=10%) には 3 割程度の強度低下が認められる。しかしながら、それより大きな半水石膏添加率では半水石膏添加率の増大に伴って一軸圧縮強さは増加している。とくに半水石膏添加率 40% の一軸圧縮強さは、セメントのみを添加した試料と比較して約 1.6 倍となり、強度が改善した。既往の研究⁶⁾においても、一軸圧縮強さは、半水石膏を添加しない場合に 180kN/m²程度 (B/S=0%) 有しており、少量の半水石膏を添加すると 80kN/m²程度 (B/S=10%) まで減少するものの、さらに添加率を増大させると徐々に改善し、B/S=40% においては 200kN/m²程度に達すると報告されている。本研究の結果は既往の研究結果⁶⁾との間に定量的な違いは認められるものの少量の半水石膏添加に伴って一軸圧縮強さが低下すること、添加率を増大させることで一軸圧縮強さが改善できる可能性が示唆されることなど、定性的には同様の結果が得られた。

図-2 に半水石膏添加率の増加に伴う含水比の変化を示す。図より、半水石膏添加率の増加に伴って含水比が直線的に低下しており、両者の間には非常に高い相関関係が認められる。半水石膏の混入に伴う含水比低下の要因としては、試料中の固相部分 (MC クレー、セメント、半水石膏) の割合の増加によって水部分が占める割合が相対的に低下したためと考えられる。なお、本研究から得られた結果は、既往の研究結果⁶⁾と定量的にほとんど一致した。

乾燥密度と半水石膏添加率の関係を図-3 に示す。乾燥密度は半水石膏添加率の増加に伴って直線的に増加している。これは、混入された半水石膏が試料中では固相に対応することに起因していると考えられる。乾燥密度の増加は、構造が密になることに対応するので、強度は増加するものと推察される。しかしながら、一軸圧縮強さは、半水石膏添加率の増加に伴って一様に増加していない。なお、本研究から得られた結果と既往の研究結果⁶⁾との間には、定量的に違いはほとんど認められなかった。

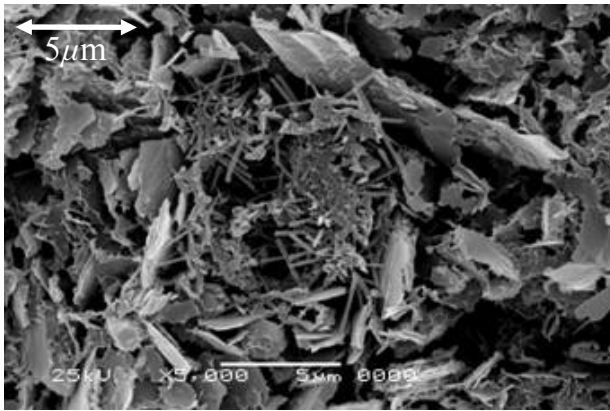
以上のように、本研究から得られた一軸圧縮試験結

果は、既往の研究結果^{5)~9)}と定量的に僅かに異なる部分も認められるが、定性的には同様であった。すなわち、含水比や乾燥密度といった物理的特性が半水石膏添加率に伴ってそれぞれ単調減少、単調増加しているのに対し、少量の半水石膏を添加した場合に一軸圧縮強さが多少低下するものの、さらに添加率を増加させることによって一軸圧縮強さが増大する結果となった。既往の研究^{5)~9)}では、このような結果は半水石膏添加に伴って内部構造が変化していると推察している。具体的には、少量の半水石膏添加時に q_u 値が低下した原因の一つとして、石膏が凝結調整剤として作用し、アルミネート相の硬化を過度に抑制した可能性を指摘しており、半水石膏添加率の増加に伴って一軸圧縮強さが増加したのは、エトリンガイトの生成によるものと推測している^{5)~9)}。本研究では、既往の研究でなされた推察が妥当であると考え、次に半水石膏添加率の違いがセメント安定処理土の内部構造に及ぼす影響について考察することとする。

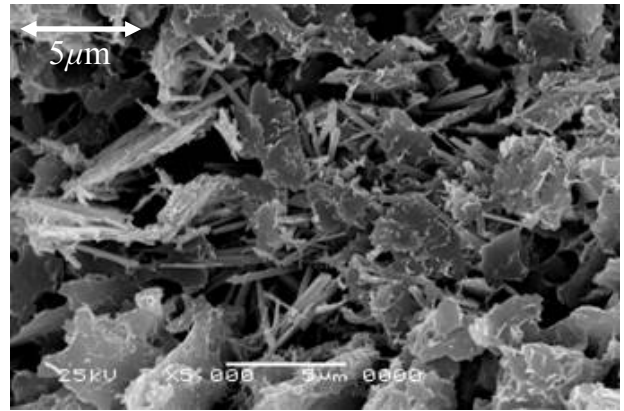
3.2 半水石膏を添加したセメント安定処理土の内部構造

本研究では、半水石膏添加率の違いがセメント安定処理土の内部構造に及ぼす影響を明らかにするために、走査型電子顕微鏡 (SEM) を使用して種々の半水石膏添加率におけるセメント安定処理土供試体の微視的観察を行った。

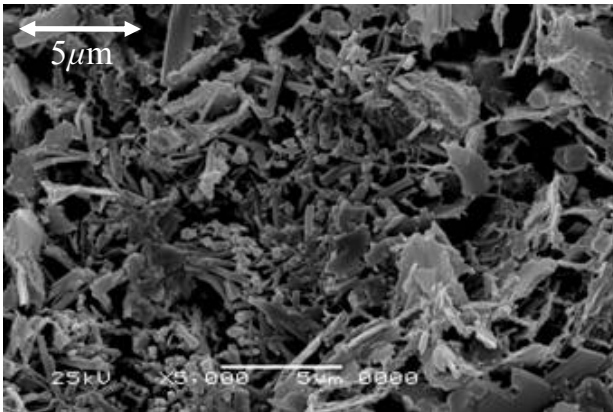
半水石膏を混入したセメント安定処理土の各配合条件における代表的な内部構造 (5000 倍) を写真-1 に示す。いずれの半水石膏添加率においてもセメントの水和物である針状のエトリンガイト ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) が生成されており、互いに絡まっている様子を確認することができる。半水石膏添加率 0~20% の内部構造 (写真-1 (a)~(c)) には、小さくて細かいエトリンガイトが生成されているが、半水石膏添加率の違いによる明瞭な違いは認められない。一方、半水石膏添加率 40% の場合の内部構造 (写真-1 (d)) に



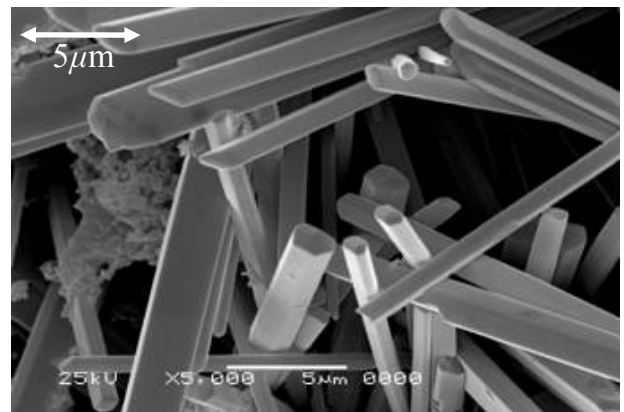
(a) B/S=0%



(c) B/S=20%



(b) B/S=10%



(d) B/S=40%

写真-1 半水石膏を混入したセメント安定処理土のSEM画像（5000倍）

は、断面の直径が $2\mu\text{m}$ 程度の非常に発達したエトリンガイトが認められる。このような内部構造の違いが、一軸圧縮強さに影響を及ぼしていると考えられる。図-1(b)において $B/S=0\sim 20\%$ の q_u 値と $B/S=40\%$ の q_u 値を比較した場合、 $B/S=0\sim 20\%$ では顕著な強度増加が認められないが、 $B/S=40\%$ の一軸圧縮強さは非常に大きな値となっていることから、 q_u 値と半水石膏の混入に伴うエトリンガイトの生成量の間には密接な関係があるものと推察される。

4. 結論

本研究では、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて半水石膏を添加したセメント安定処理土供試体の内部構造を観察し、内部構造の違いと一軸圧縮強さの関係について考察を行った。その結果、半水石膏を添加したセメント安定処理土において、セメント水和物である針状のエトリンガイトを確認することができ、長くて太い発達したエトリンガイトが生成されている場合に一軸圧縮強さが著しく増加していること明らかにした。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、日工（株）より半水石

膏を提供していただいた。また、内部構造の観察の際には、（独）港湾空港技術研究所地盤・構造部土質研究チームにおいて走査型電子顕微鏡を使用させていただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：報道発表資料，産業廃棄物の排出及び処理状況等(平成18年度実績)について，<http://www.env.go.jp/press/index.php>，2009.6.
- 2) 環境省：産業廃棄物許可件数と最終処分場残存年数の推移，<http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/data/es200321.xls>，2009.6.
- 3) 廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する検討委員会：廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する検討調査，環境省，36p.，2003.
- 4) 亀井健史，加藤孝明，珠玖隆行：半水石膏の地盤改良材としての有効利用—廃石膏ボードの再利用—，地盤工学ジャーナル，Vol.2，No.3，pp.245-252，2007.
- 5) 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，Vol.2，No.3，pp.237-244，2007.
- 6) 蓬萊秀人，亀井健史，小川靖弘，志比利秀：半水石膏生産システムの開発とその地盤工学的意義—廃石膏ボードの再生—，地盤工学ジャーナル，Vol.3，No.2，pp.133-142，2008.
- 7) 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水浸条件下における一

- 軸圧縮特性—廃石膏ボードの有効利用—, 土木構造・材料論文集, No.24, pp.122-128, 2008.
- 8) 亀井健史, 小川靖弘, 志比利秀: 半水石膏を混入したセメント安定処理土の水浸後の強度変形特性—廃石膏ボードのリサイクルリグレー, 地盤と建設, Vol.26, No.1, 2008 (印刷中).
 - 9) 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特性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, Vol.4, No.1, pp.99-105, 2009.
 - 10) 例えば, サイエンス石膏(株): α 型半水石膏と β 型半水石膏, <http://www.san-esugypsum.co.jp/arufabet.html>, 2009.10.
 - 11) 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), p.202, 2002.
 - 12) 亀井健史, 蓬萊秀人: 高炉セメント B 種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.91-98, 2009.
 - 13) 山陽クレイ工業 (株): MC クレー分析データ表, <http://www17.ocn.ne.jp/~cray/sanyo.html>, 2009.6.
 - 14) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 第5編 安定化試験, 安定処理土の締固めをしない供試体作製, pp.255-262, 1990.

(2009年6月29日 受付)