

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リング —

Strength-deformation Characteristics After Soaking of Cement Stabilized Soils Containing
Bassanite – Recycling of Waste Plasterboard –

亀井健史 Takeshi KAMEI (島根大学大学院総合理工学研究科)
小川靖弘 Yasuhiro OGAWA (島根大学大学院総合理工学研究科)
志比利秀 Toshihide SHIBI (島根大学総合理工学部)

近年、廃棄処分が困難になりつつある石膏ボード廃材を地盤材料として有効利用しようとする試み
が実施されている。しかしながら、廃石膏ボードからリサイクルされた半水石膏を混入したセメント
安定処理土を水浸条件下で養生すると強度が 1~2 割程度低下することが明らかとなってきた。実施
工においては、気中養生を行っても雨水等の影響で水浸条件下となることも考えられる。そこで本研
究では、気中養生後の水浸が半水石膏を混入したセメント安定処理土の強度変形特性に及ぼす影響を
明らかにすることとした。その結果、気中養生後の水浸は、半水石膏を混入したセメント安定処理土
の強度変形特性に大きな影響を及ぼさないことが明らかとなった。

キーワード：一軸圧縮強さ、応力-ひずみ曲線、セメント安定処理土、半水石膏 (IGC : K06, T14)

1. はじめに

近年廃棄物処分場の容量不足さらには不法投棄の増
加など産業廃棄物に関する種々の問題が社会問題と
なっている。例えば、廃石膏ボード (写真-1) の不適
切な処分に伴う硫化水素ガス発生に伴う被害などが生
じている。これは、廃石膏ボードを埋め立て処分する
と、廃石膏ボードに含まれる紙などの有機物が分解さ
れ、埋立て層内は還元状態となり、その際、有機物の
分解産物である有機酸を栄養源とする硫酸塩還元菌に
石膏が代謝され、石膏中の硫酸イオン (SO_4^{2-}) が還元
されることによって、非常に毒性の高い硫化水素ガス
(H_2S) が発生するためである。このような背景から、
廃石膏ボードの処分方法が安定型処分場への埋め立て
処分から、紙と石膏を分離した上で廃石膏は管理型処
分場への埋め立て処分へと変更されている。さらに、
廃石膏ボードの処分量は年々増加していることに加え、
管理型処分場の残余期間は 2011 年度までと非常に逼
迫していることから¹⁾、廃石膏の処分が益々困難にな
りつつある。

土木建設工事は、対象物の土木構造物が他の生産物
と比較して大規模であることから、大量の材料が必要
となる。しかしながら、良質の砂利の不足から、建設
工事においては、慢性的な地盤材料不足な状態にある。
このような現状を踏まえると、土木建設分野は、廃石
膏の有効利用先として最も適した分野の一つと考えら
れる。すなわち、廃石膏から再生された半水石膏を地
盤材料として用いることができれば、地盤材料不足を
解消し、廃棄が困難な廃石膏を大量に有効利用できる
可能性が広がる。

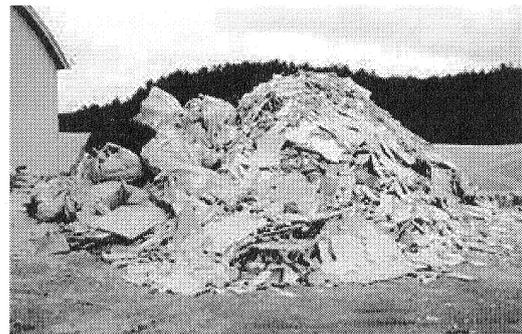


写真-1 廃石膏ボード

セメント安定処理工法は、セメントの固化作用によ
って土の安定化をはかるもので、他の工法より比較的
短期間に地盤の強度を増加できる。セメント安定処理
土の強度変形特性に及ぼす配合条件および養生日数の
関係についても、定量的に評価されている^{2), 3)}。また、
近年リサイクルされずに大量に廃棄されているPETボ
トルをフレック状に裁断して流動性の高いセメント安
定処理土に混入して新しい地盤材料を創造しようとい
う試み⁴⁾も実施されており、セメント安定処理工法は
産業廃棄物を有効利用できる受け皿としても期待でき
る。

そこで近年、廃石膏ボードを地盤材料として有効利
用しようとする研究が行われるようになってきた。廃
石膏ボードを地盤に用いる際には、まず石膏ボードを
粉碎分離・加熱処理し、水硬性を有する半水石膏を作
製する。このような一連の半水石膏生成システムに関
する研究が行われている⁵⁾。得られた半水石膏は、例
えば地盤を締固める際の地盤改良材として、有効利用
可能か検討されている。その結果、粘土に半水石膏を

混入することによって、強度が顕著に改善されることが報告されている⁶⁾。また、半水石膏の軟弱地盤改良材としての有効性についても検討されており、セメント安定処理土に5%の半水石膏を混入した場合には、一軸圧縮強さが35%程度低下するものの、半水石膏添加率の増加に伴って直線的に一軸圧縮強さが増大する傾向が得られており(20%の半水石膏混入によって強度低下が20%程度にまで改善)、半水石膏添加率をさらに増加させることで、強度が増加する可能性が指摘されている⁷⁾。一方、水中養生が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に及ぼす影響も検討されている⁸⁾。図-1は、打設後28日間気中養生した場合と打設後28日間水中で養生した場合の半水石膏添加率と一軸圧縮強さの関係を示している。なお、B/Sは半水石膏添加率、C/Sはセメント添加率、W/Sは水比を表しており、後述する本研究での定義と同じである。図から、水中養生された場合の一軸圧縮強さは、気中養生された場合と比較して2割程度低下することがわかる。実施工においては、気中養生を行っても、雨水等の影響で水浸条件下となることも考えられる。したがって、半水石膏を混入したセメント安定処理土を気中養生した場合においても、水浸がその強度変形特性に及ぼす影響を明らかにしておくことが重要となる。

本研究では、半水石膏を混入したセメント安定処理土供試体を28日間気中養生し1日および7日間水浸させた後、一軸圧縮試験を行うことにより、その強度変

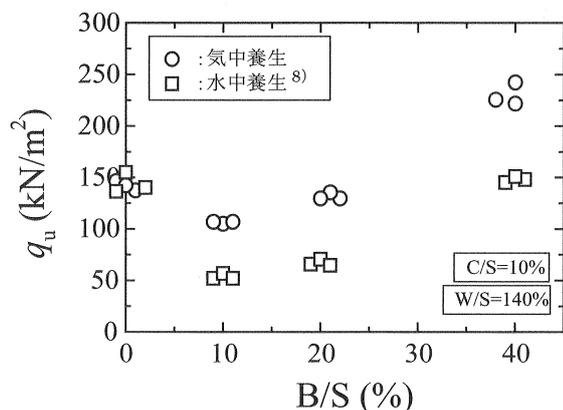


図-1 養生条件の違いが半水石膏を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さに及ぼす影響⁸⁾

形特性を明らかにしている。さらに、気中養生した場合の一軸圧縮試験結果と比較することにより、気中養生後の水浸がその強度変形特性に及ぼす影響を定量的に明らかにしている。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

まず、混入する半水石膏は、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を用いた⁵⁾。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-1⁵⁾に示す。石膏の硬化体は水溶性を有しており、長期間水中に置かれると石膏中の重金属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、重金属の溶出に十分な注意を払う必要がある。なお、今回用い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。つぎに、安定材としては、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。高炉セメントB種は、高炉スラグとポルトランドセメントクリンカーに、少量の石膏を加えて粉碎した混合セメントである。高炉セメントB種の品質は、JIS R 5210で表-2⁹⁾のように定められて

表-1 半水石膏の基本物理特性⁵⁾

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

表-2 高炉セメントB種の品質⁹⁾

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⁹⁾

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¹⁰⁾

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¹⁰⁾

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

いる。また、その化学成分を表-3⁹⁾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を固着させ、その溶出を抑制させる効果が期待できる。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に設定した。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-4¹⁰⁾、表-5¹⁰⁾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

本研究で使用するセメント安定処理土供試体は、安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法¹¹⁾に準じて作製された。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し、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±2℃)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、さらに1日および7日間水浸させた。水中から取り出した供試体は、表面の水滴を拭き取り、両端面を成形した後、一軸圧縮試験に用いた。

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強度・変形特性を評価するために、一軸圧縮試験を行った。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%/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。

3. 実験結果および考察

3.1 応力-ひずみ曲線

28日気中養生後の水浸が半水石膏を混入したセメント安定処理土の応力-ひずみ曲線に及ぼす影響について検討する(図-2)。まず、基本となる気中養生のみの場合に注目する。半水石膏を混入しない場合の応力-ひずみ曲線は、軸ひずみ量の増加に伴い応力値が急激に増加し、軸ひずみ量2%程度で最大値140kN/m²程度に達している。しかしながら、さらに軸ひずみ量が増加すると応力値が急激に低下することがわかる。一方、半水石膏を混入した場合の応力-ひずみ曲線は、軸ひずみ量が小さい範囲では混入しない場合と同様に軸ひずみ量の増加に伴い応力値が急激に増加しているが、応力値が最大値付近では明瞭なピークが確認できず、最大値に達した後もその値をしばらく維持する傾

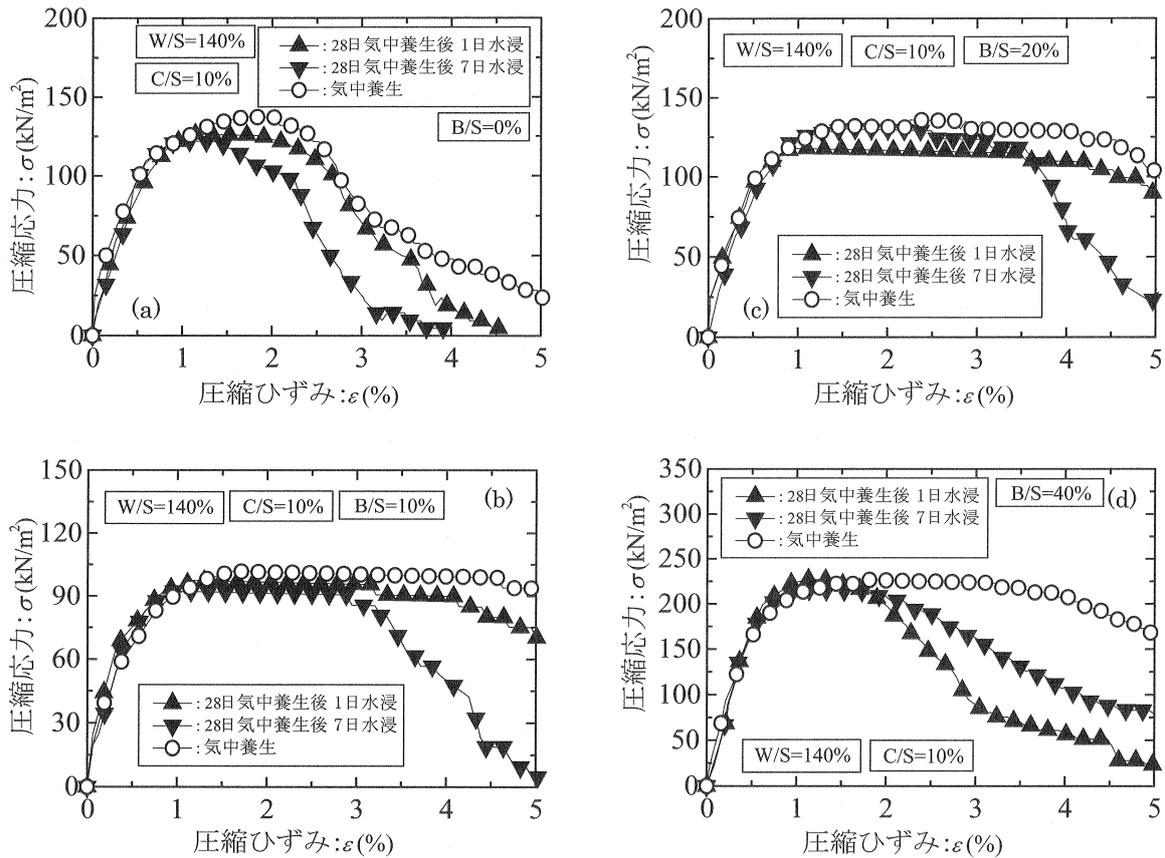


図-2 半水石膏を混入したセメント安定処理土を気中養生後に水浸させた場合の代表的な応力—ひずみ曲線

向が認められ、粘り強い材料となっていることがわかる。半水石膏を混入することで材料にこのような粘り強さが生じることは、既往の研究でも指摘されている^{5), 7), 8)}。つぎに水浸を行った場合に着目すると、その応力値のピークや初期の傾きには明瞭な違いは認められない。また、応力値がピークに達した後も圧縮ひずみ2~3%程度まで応力値を維持していることから、水浸を受けても、半水石膏混入時に認められる特有の粘り強さが発揮されることが明らかとなった。

3.2 一軸圧縮強さ

28日気中養生後の水浸が一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係に及ぼす影響を図-3に示す。まず、気中養生のみの一軸圧縮強さに着目すると、半水石膏を添加しない場合は、140kN/m²程度あるが、半水石膏を10%混入すると100kN/m²程度まで低下するものの、さらに半水石膏添加率を増加させると徐々に増加し、半水石膏添加率40%においては、230kN/m²程度まで増加している。一方、気中養生後水浸した場合の一軸圧縮強さは、気中養生のみの場合と比較して大きな違いが認められず、半水石膏添加率を増加させることで大きな一軸圧縮強さが得られることが明らかとなった。廃石膏を大量にリサイクルする必要性を考慮すると、40%を超えるような半水石膏添加率を設定することも可能であろう。なお、少量の半水石膏混入に伴って強

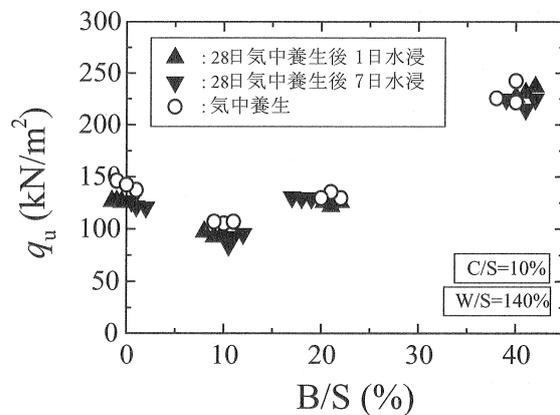


図-3 一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係

度が低下する主要因としては、セメント製造過程で凝結調整剤として石膏が使用されていることと関係があるものと考えている。すなわち、セメントを構成しているクリンカー鉱物の一つのアルミネート相(C₃A)の硬化を過剰に抑制している可能性が指摘できる。一方、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主要因としては、半水石膏量とエトリンサイト生成量との間に密接な関係があると現在考えている。

比較検討を行いやすいように、 $\bar{q}_u(\text{気中養生後水浸})/\bar{q}_u(\text{気中養生})$ と半水石膏添加率の関係を図-4に示す。図より、気中養生後水浸した場合の一軸圧縮強さは、気中養生のみの場合と比較して、半水石膏添加率が0~10%程

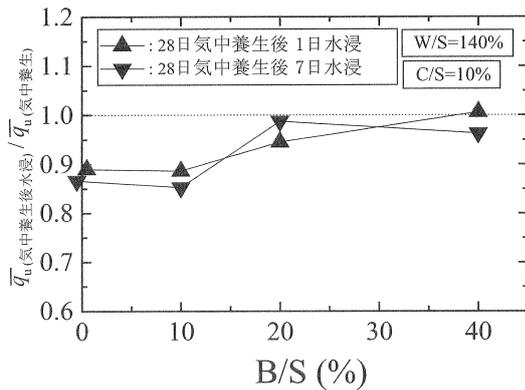


図-4 $\bar{q}_u(\text{気中養生後水浸})/\bar{q}_u(\text{気中養生})$ と半水石膏添加率の関係

度では1割程度低下しているが、半水石膏添加率が20～40%程度ではほとんど低下が認められていない。半水石膏を用いたセメント安定処理土を水中養生した場合の一軸圧縮強さは、気中養生した場合と比較して2割程度低下するとの報告⁸⁾があるが、本結果から気中養生後の水浸は一軸圧縮強さに大きな影響を及ぼさないことが明らかとなった。これは28日間の気中養生の間にセメントや半水石膏の固化作用によって構造がすでに形成されており、その後の水浸がセメント安定処理土の構造形成に影響を及ぼさなかったためと考えられる。

3.3 乾燥密度

半水石膏を混入したセメント安定処理土の乾燥密度と半水石膏添加率の関係に及ぼす気中養生後の水浸の影響を検討する(図-5)。図より、乾燥密度は、養生後の水浸の有無によらずほとんど同じ値であり、半水石膏添加率の増加に伴って直線的に増加している。一般に乾燥密度が高いほど強度が大きくなる傾向があることから、この結果は、半水石膏を添加した場合においては、図-3で示した半水石膏添加率の増大に伴い一軸圧縮強さが増加する関係と対応しているものと考えられる。

3.4 含水比

半水石膏を混入したセメント安定処理土の含水比と半水石膏添加率の関係に及ぼす気中養生後の水浸の影響を図-6に示す。含水比は、気中養生後水浸させることによって、僅かに増加する傾向が認められるが、有意な差ではなく、気中養生後の水浸の有無によらず半水石膏添加率の増加に伴って直線的に減少している。図-5を詳細に見ると、気中養生後水浸した場合の乾燥密度が気中養生のみの場合と比較して僅かに小さな値となっているが、これはこのような水浸に伴う含水比の僅かな増加によるものと考えられる。しかしながら、その差が有意なものではないことから、一軸圧縮強さに明瞭な違いが現れなかったものと考えられる。

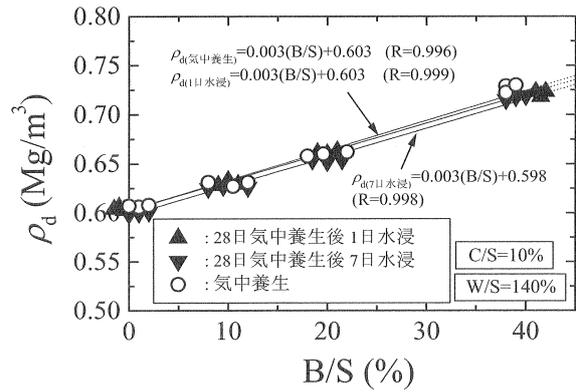


図-5 一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係

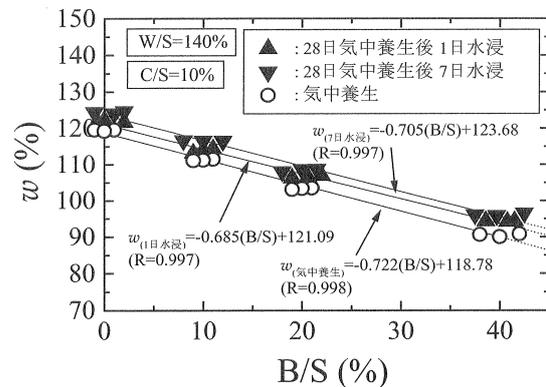


図-6 一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係

4. 結論

本研究では、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を28日間気中養生した後に水浸させた場合の強度変形特性を明らかにした。得られた主要な結論を以下に述べる。

- (1) 気中養生後水浸させた場合においても、半水石膏を混入したセメント安定処理土の応力—ひずみ曲線は、応力値が最大値に達した後も急激な応力低下が認められず、圧縮ひずみ2～3%程度まで応力値がほぼ一定値を示すことから、粘り強い材料となっていることが明らかとなった。
- (2) 28日間気中養生した後に水浸させた場合には、半水石膏添加率の違いによらず、その一軸圧縮強さは水浸前と同程度の値を維持することが明らかとなった。
- (3) 乾燥密度と含水比は、28日気中養生後の水浸の影響をほとんど受けないことを示した。

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。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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>
- 2) 亀井健史，大本和樹，志比利秀，松尾和俊：セメント安定処理土の強度変形特性，島根大学総合理工学部紀要シリーズ A，Vol.36，pp.17-24，2002.
- 3) 亀井健史，大本和樹，志比利秀，松尾和俊：セメント安定処理土の一軸圧縮強さに及ぼす配合条件の影響，島根大学総合理工学部紀要シリーズ A，Vol.36，pp.9-15，2002.
- 4) 亀井健史，松尾和俊，志比利秀：フレーク状ペットボトルを利用した流動化処理土の一軸圧縮特性，土木構造・材料論文集，No.21，pp.89-96，2005.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 山陽クレー工業（株）：MC クレー分析データ表，<http://www17.ocn.ne.jp/~cray/sanyo.html>.
- 11) 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.

(2008年6月30日 受付)