

地盤改良材としての半水石膏使用の可能性 — 廃石膏ボードのリサイクリング —

亀井 健史¹⁾, 珠玖 隆行²⁾

¹⁾ 島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

²⁾ (株)大本組

The feasibility using bassanite as soil improvement materials — Recycling of waste plasterboard —

Takeshi KAMEI¹⁾, Takayuki SHUKU²⁾

¹⁾Department of Geoscience Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

²⁾Ohmoto-Gumi Co., Ltd.

Abstract

Industrial waste disposal is an increasing problem in recent years. Waste plasterboard is generated in vast quantities as a by product of demolition buildings and houses. If waste plasterboard can be effectively utilized as a construction material, the problems of waste plasterboard disposal and shortage of natural resources for construction may be solved. Bassanite produced by heating gypsum obtained from waste plasterboard, under conditions of 130°C or more. It is also environmentally friendly, due to its neutral nature. This paper describes the compaction properties and unconfined compressive strength of compacted bassanite produced from waste plasterboard. The effects of bassanite additions on stress-strain behavior of cement stabilized soils are quantitatively shown. The utilization of bassanite produced from waste plasterboard would help alleviate disposal problems, while reducing the demand for natural aggregates.

1. はじめに

高度経済成長期から展開されてきた大量生産・大量消費型の経済社会活動は、大きな恩恵をもたらしてきた。しかしながら、その社会は大量廃棄型の社会でもあり、物質循環の環を断ち、その健全な循環を阻害するという側面も有している。このような大量廃棄型の社会は、毎年国内で約4億1千万トンという膨大な量の廃棄物を発生させ、廃棄物等の多様化に伴う処理の困難化や不適正な処理による環境負荷の増大をもたらしている。

そのため、これまでの大量生産・大量消費社会に替わって、持続的な発展を指向する「循環型社会」という考えが提起されている。循環型社会とは、自然界から新たな資源を取り出すことを最小にし、すでに社会で使用されたものなどを再生資源として投入することにより、最終的に自然界へ廃棄されるものを最少とすることを基本とした社会である。平成12年6月には、循環型社会形成推進基本法(循環基本法)が制定され、循環型社会の形成に向けた取組みを推進する法的基盤は整備されている

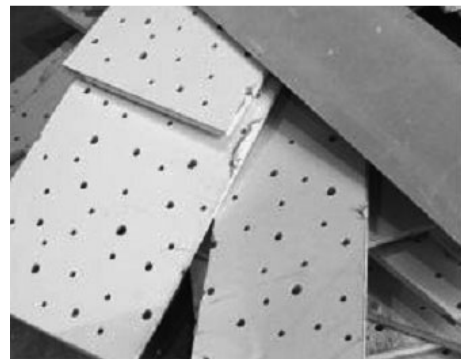


写真-1 廃石膏ボード

といえる。

一方、現代社会の産業の中でも建設産業は、わが国の資源利用量の約40%を資材として消費するとともに、産業廃棄物全体の最終処分量の20%程度を占めており、建設産業が環境に与える負荷は大きい。その建設廃棄物の中でも、近年、建築現場から排出される廃石膏ボード(写真-1)の処理が大きな問題となっている。

石膏ボードとは、石膏を芯材として両面を石膏ボード

用原紙で被覆成型した建築用内装材料で、耐火性、遮音性、寸法安定性、断熱性等の特長を有しており、経済的にも低廉なことから建築物の壁・天井に広く用いられている。先進工業国では多量に普及しており、国際的に最も使いやすい建築基礎資材となっているため、廃石膏ボードの生産量は年々増加している。その一方で、建築現場から発生する廃石膏ボードも年々増加しており、2005年では140万トンであった廃石膏ボード排出量は、2010年には、180万トンに急増すると推計されている¹⁾。

建築現場で発生する廃石膏ボードは、中間処理業者によって回収され、そのままの状態最終処分されていた。しかしながら、廃石膏ボードの埋立て層内で硫酸還元バクテリア（硫酸塩還元菌）が石膏中の硫酸イオンを還元することによって硫化水素ガスや硫化鉄などを含む黒い水を発生させることが明らかとなった。そのため「廃棄物の処理および清掃に関する法律」の一部改正（平成11年6月17日）によって、廃石膏ボードは中間処理業者によって回収され、紙と石膏に分離した後、紙は管理型最終処分場へ処分すること、石膏に関しては安定型最終処分することが義務付けられるようになった。さらに最近では、石膏ボードから分離した石膏のみを埋立てた埋立て層内においても、硫化水素が発生するという事例が日本各地で報告されたため、平成18年6月、環境省は、紙と分離された石膏単体についても管理型処分を義務づけるよう、各都道府県・各市町村に通知した。

このような安定型処分から管理型処分への移行や、住宅・社会資本の更新に伴う建設副産物排出量の増大がもたらす最終処分場の逼迫により、廃石膏ボードの処理費用は今後莫大なものになると考えられる。そのため、建築現場から排出される廃石膏ボードのリサイクル・再利用技術の開発が急務であり、また、この分野におけるリサイクルの推進は、循環型社会を形成する上でも非常に重要となる。

上記したような社会的背景の中、これまでに廃石膏ボードのリサイクル・有効利用が実施されはじめてきている。有効利用の用途としては、肥料・セメント原料等が挙げられるが、最近では、大量に消費できる分野であることや、わが国では建設資源が枯渇していることなどから、廃石膏の地盤改良材・地盤材料としての有効利用が注目されている。平成17年8月には、群馬県において廃石膏ボード再資源化研究委員会が設立され、さらに、平成18年3月には、国内で初めて廃石膏ボード再資源化情報交換会が開かれており、廃石膏ボード処理とその再資源化に関する取り組みがなされてきている。これまでの研究結果から、廃石膏ボードからは再分離された石膏を熱処理して得られる半水石膏に適量の水を加えて軟弱粘土、火山灰土、砂とそれぞれ混合すると、半水石膏の水和反応により硬化することが明らかとなっている²⁾。また、平成17年10月には、群馬県太田市内の県道工事におい

て半水石膏を地盤改良材として試験的にではあるが適用した例も報告されている³⁾。

一方、これまで産業廃棄物を地盤材料や地盤改良材としての有効利用が多数報告されている。例えば、亀井・松尾^{4)~6)}は火力発電所から発生する石炭灰の締固め材料としての適用性や気泡混合軽量土の母材としての適用性について検討している。また、亀井ら^{7), 8)}は、飲料用のPETボトルから得られるPETフレークの地盤材料としての有効利用に関しても報告している。このように、産業廃棄物の地盤材料としての有効利用は多数報告されているが、廃石膏ボードの地盤材料・地盤改良材としての有効利用に関してはまだ少なく、廃石膏を利用した地盤材料の力学特性を総合的・体系的な研究例は報告されていないのが現状である。今後、廃石膏ボードを大量に有効利用していくためにも、半水石膏に関する基礎的な研究を実施し、その設計体系を構築していくことが必要不可欠であると考えられる。

そこで本研究では、廃石膏ボードの再利用を推進するため、廃石膏ボードから再生した環境にやさしい半水石膏の締固め材料としての適用性、軟弱地盤改良材としての適用性および人工地盤築造時の母材としての適用性を検討している。

2. 石膏の基本特性

石膏とは、硫酸カルシウム (CaSO_4) の化学組成をもつ鉱物の総称であり、石膏ボードに用いられている石膏は、2分子の結晶水をもつことから二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) と呼ばれている。この二水石膏を加熱すると、60℃前後から結晶水の分子全体の3/2を失って半水石膏（別名、焼石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)）へと変化し始め、120℃～150℃程度で加熱することにより、最終的に安定した半水石膏が得られる（200℃以上の加熱で無水石膏 (CaSO_4)）。この半水石膏は、水を加えると水和反応を起こし二水石膏に変化するが、その際に短時間で硬化するという性質を有しており、このような硬化作用がもたらす地盤改良効果に期待できる（図-1）。また、半水石膏に添加物を粒子表面に吸着させることにより、硬化を遅延させることも可能である。さらに、石膏は中性無害であり、従来使

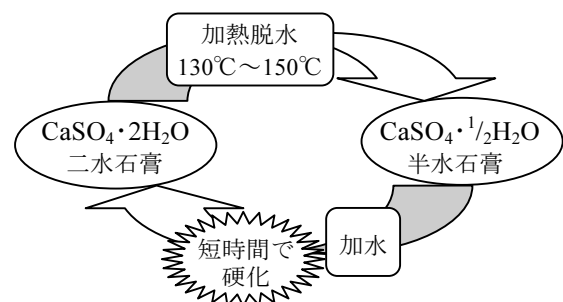


図-1 廃石膏の再生

用されてきた強アルカリの石灰やセメント系固化材に比べ、環境にやさしい固化材であるといえる。

一方、短所としては、加水に伴う凝結硬化の際にわずかに膨張する（約 0.35%、わずかな膨張で問題はない）。また、石膏の硬化体は水に対して弱く（水溶性）、石膏を地盤改良材として用いる場合には、雨水・地下水の影響で石膏中の重金属（ヒ素 (As)、鉛 (Pb)、カドミウム (Cd)）が溶出する可能性が懸念される。そのため、耐水性または撥水性の添加物を混合し、耐水性を向上させ重金属等の溶出を抑制する必要がある。

3. 廃石膏ボードの処理フロー

建設・建築現場で排出された廃石膏ボードは、中間処理業者によって紙と石膏に分離され、一部は肥料やセメント原料にリサイクルされているものの、そのほとんどが産業廃棄物として最終処分されている。しかしながら最近では、半水石膏を地盤改良材として大量に有効利用できる可能性が指摘されている。このため紙と分離し細粒化した廃石膏を半水石膏化する加熱処理装置等が開発されてきており、これまでの最終処分主体の処理フローに替わる新しい処理フローの構築が期待されている（図-2⁹⁾）。なお、廃石膏ボードから分離される紙は現在処分場で焼却されているが、今後は、①紙を炭化して環境用資材として利用する、②紙を盛土補強材にすることなど、広範な用途が考えられている。本研究は、廃石膏ボードを 100%資源化することを最終目標にした研究の一部であり、環境面からの重要性だけでなく、新しい産業の育成の面からも重要である。再資源化という言葉通り、半

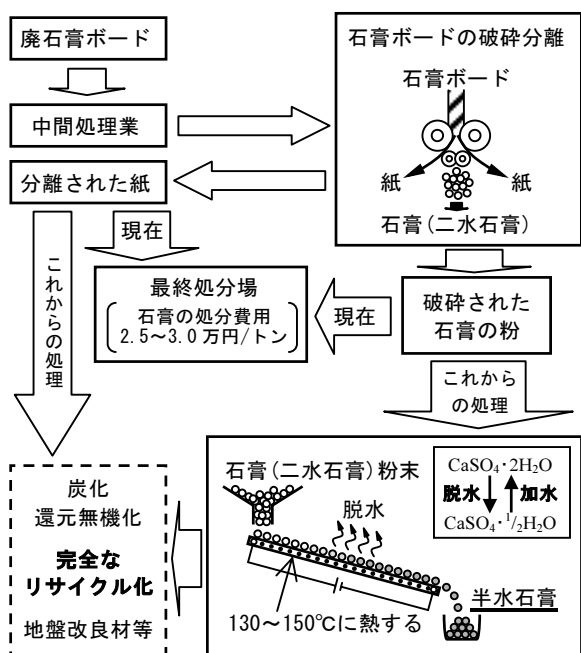


図-2 廃石膏ボードの新しい処理フロー⁹⁾

水石膏は材料としての価値が創出され、この廃石膏ボードの再資源化事業が完成すると、年間 500 億円規模の産業になると試算される。

4. 試料および実験方法

4.1 試料 (締固め)

半水石膏は、廃石膏ボードを破碎分離し、破碎された石膏（二水石膏）を加熱処理することによって得られたもの（(株)新潟ガーベッチ製）を用いた（写真-2）。前述したように、石膏を地盤材料として用いる場合には、重金属の溶出に注意する必要がある。そこで、本試料に対して、土壤汚染に係る環境基準に対する重金属の溶出試験を実施した。その結果、各項目ともに環境基準値を十分に下回っており、環境に悪影響を及ぼす可能性は非常に小さいことが確認された。なお、主な重金属に対する溶出試験結果を表-1 に示す。つぎに砂試料は、JIS R 5201¹⁰⁾において、セメントの強さ試験用モルタルに使用するよう規定されている砂である標準砂 (Standard Sand) を使用した。標準砂は、山口県豊浦郡豊浦町産の天然珪砂から雑物を除去した豊浦標準砂と呼ばれ、標準網ふるい 300 μ m 残分が 1%以下、106 μ m 残分が 95%以上に粒度調整されている¹¹⁾。また、粘土試料には、一軸圧縮強さに及ぼすセメントの種類の違いによる影響が明瞭に現れるように、成分調整された MC クレーを使用した。MC クレーは、天然のろう石を精製して得られる鉱物の粉末



写真-2 半水石膏

表-1 土壤の汚染に係る環境基準に対する主な重金属の溶出試験結果

項目	石膏 [mg/l]	石膏 (セメント10%) [mg/l]	環境基準値 [mg/l]	分析方法
カドミウム	<0.005	<0.005	<0.01	JIS K 0102.55.2
鉛	<0.005	<0.005	<0.01	JIS K 0102.54.2
砒素	<0.005	<0.005	<0.01	JIS K 0102.61.3
六価クロム	0.025	<0.02	<0.05	JIS K 0102.65.2.1

である。その構成鉱物は、パイロフィライト、カオリナイト、セリサイトである¹²⁾。各試料の粒径加積曲線と基本物理特性をそれぞれ図-3、表-2 に示す。本研究では、締固め時の安定材として、普通ポルトランドセメントを使用している。このセメントは、土木・建設工事に多く使用されており、セメント全生産量の大半を占め、長短

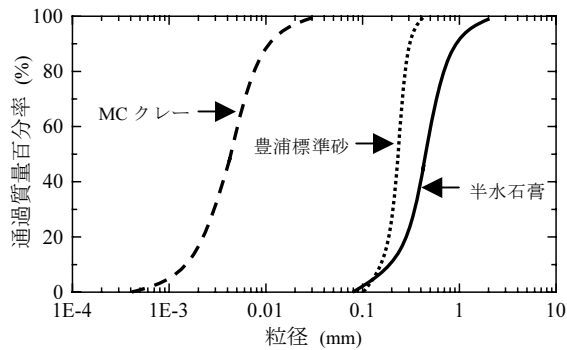


図-3 各試料の粒径加積曲線

表-2 各試料の基本物理特性

	ρ_s (Mg/m^3)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'
標準砂	2.650	0.125	0.180	0.235	0.260	2.08	0.997
MC クレー	2.679	0.001	0.003	0.004	0.005	4.16	1.160
半水石膏	2.640	0.220	0.370	0.500	0.600	2.73	1.040

期においてバランスのとれた強度を発現する。また、含水比を操作するため、試料調整時に水が必要となる。一般に現場での施工においては、河川水などを用いるが、河川水を用いたとき、化学変化などの成分変動が生じ、強度発現に悪影響を及ぼす可能性がある。したがって、本研究では正確な半水石膏の特性を検討するために不純物の混入していない蒸留水を使用した。

4.2 試料 (セメント安定処理土)

半水石膏は、締固めと同様の新潟ガービッチ (株) 製の粉末状のものを用いた。安定材としては、土木・建築工事に多く使用されており、セメント安定処理土の安定材としても多用されている普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種の 2 種類のセメントを使用した。普通ポルトランドセメントは、セメント全生産量の大半を占め、長期間においてバランスのとれた強度を発現するセメントである。一方、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、粉砕した混合セメントである。普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種の品質は、JIS R 5210 で表-3¹³⁾ のように定められている。また、両セメントの化学成分を表-4 に示す。いずれのセメントも、CaO, SiO₂, Al₂O₃ の 3 成分の合計が全体の 90% であり、主要な成分であることがわかる。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。その物理化学的性質をそれぞれ表-5、表-6 に示す。また、安定処理土の作製に使用する混練水には、水質の違いによる強度発現への影響が最も少ないと考えられる蒸留水を用いた。

先述したように、石膏の硬化体には水溶性があり、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

表-3 普通ポルトランドセメント・高炉セメント B 種の品質¹³⁾

種類	品質	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 (%)	強熟減量 (%)	全アルカリ (%)	塩化物イオン (%)
			始発 (min)	終結 (h)		3日	7日	28日					
普通ポルトランドセメント	2500 以上	60 以上	10 以下	良	12.5 以上	22.5 以上	42.5 以上	5.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	0.75 以下	0.02 以下	
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-4 普通ポルトランドセメント・高炉セメント B 種の化学成分¹³⁾

セメントの種類	lg.loss	insol	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
普通ポルトランドセメント	0.8	0.1	21.8	5.1	3.0	63.8	1.7	2.0	0.32	0.50	0.65	0.34	0.11	0.16	0.007
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-5 MC クレーの物理特性¹²⁾

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-6 MC クレーの化学成分¹²⁾

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	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

がある。そのため、半水石膏を地盤改良材として用いる場合にも重金属の溶出に十分な注意を払う必要がある。そこで本研究では、セメントを単純に強度発現促進のためだけでなく、その固化作用に注目し、石膏からの溶出が懸念される重金属を固化させ溶出を抑制させることも目的として使用している。また、セメントの過度の添加による六価クロムの溶出も懸念されることから、セメントの添加量を比較的低位に設定した。

4. 3 供試体の作製方法（締固め）

供試体作製に際しては、鋳鉄製の二つ割りモールド（ $\phi=50\text{mm}$, $H=100\text{mm}$ ）を用いて、3層に分けて突固めによる締固めを行った。JIS A 1210¹⁰および JSF T 711¹⁴の Standard Proctor ($E_c \approx 0.55\text{J}/\text{cm}^2$) (E_c : compactive effort) の締固め仕事量を用いて締固め試験を実施した。試料の使用法は、粒子破碎の影響が小さな非繰返し法を選択した。したがって本研究では突固めによる土の締固め試験法の b 法（乾燥—非繰返し法）によって供試体を作製した。作製した試料は、その後気中で 28 日間養生した後一軸圧縮試験に用いることとする。

配合条件は、普通ポルトランドセメントの添加率 (C/S) を 5% と一定値に固定し、標準砂と MC クレーそれぞれに半水石膏添加率 (B/S) を 0, 5, 10, 15, 20% まで変化させた。セメントの使用目的としては、一般的には地盤の固化や強度発現促進が挙げられ、実際の施工現場での使用される頻度は高い。しかしながら使用するにあたっては、コストの増大（経済的な面）、環境汚染（六価クロムの問題）等があるため、多量に使用することは適切でない場合がある。そこで本研究では、セメントを比較的小さな添加量とし、セメントを単純に強度発現促進のためだけでなく、その重金属等の物質固定能力に着目し、石膏からの溶出が予測される重金属の溶出を抑制させることを目的として使用している。

4. 4 供試体の作製方法（セメント安定処理土）

セメント安定処理土は、土とセメントの混合後に締固めを行う方法と、締固めを行わない方法に大別される。締固めを行う工法は、路盤、路床および盛土などを目的とした浅層地盤を対象としている。一方、締固めを行わない工法は、高含水比であり、かつ多量の安定材の添加を必要とする粘性土の改良を目的として、浅層・深層地盤の両方を対象としている¹⁵⁾。

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に¹⁵⁾ 準じて、各セメント種類に対してセメント安定処理土供試体を作製した。配合条件は、自然含水比 120% の粘性土を安定処理することを考え、W/S を 1.2 とし、土セメント比 (C/S) を 5%, 10% とした。また、半水石膏添加率 (B/S) を 0%, 5%, 10%, 15%, 20% と変化させた計 20 配合を設定した。先述したように、石膏の

硬化体は水に弱く（水溶性）、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。そこで本研究では、セメントを単純に強度発現促進のためだけでなく、その固化作用に注目し、石膏からの溶出が予測される重金属を固化させ溶出を抑制させることを目的とした使用した。また、セメントの過度の添加による六価クロムの溶出も懸念されることから、本研究では比較的セメントの添加量 (C/S) を低位に設定した。

供試体作製方法を以下に説明する。まず、6 割程度の混練水と粘土試料である MC クレーを混ぜ、ソイルミキサーで攪拌した。その間に、普通ポルトランドセメントと残り 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試験、生比重測定を行った後、鋳鉄製のモールド（ $\phi=50\text{mm}$, $H=100\text{mm}$ ）に 8 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、両端面を成形し、供試体をポリエチレン製のケースに入れ、再び恒温室で所定の養生期間（ $T_c = 28$ 日）まで気中養生した。所定の養生日数を経過した供試体は、両端面を成形し、一軸圧縮試験に用いた。

4. 5 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 $1\%/\text{min}$ 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。

5. 実験結果および考察

5.1 半水石膏の締固め材料としての適用性

本節では、半水石膏の締固め材料としての有効性について検討するために実施した、締固め試験の結果を示す。

i) 締固め曲線

図-4 は、豊浦標準砂、MC クレー、半水石膏それぞれを一定の締固め仕事量で突固めた場合の締固め曲線を示している。なお、各試料の締固め曲線の作成には、各条件において 3 つの供試体から得られた結果を比較し、代表的なものを選定しプロットした。

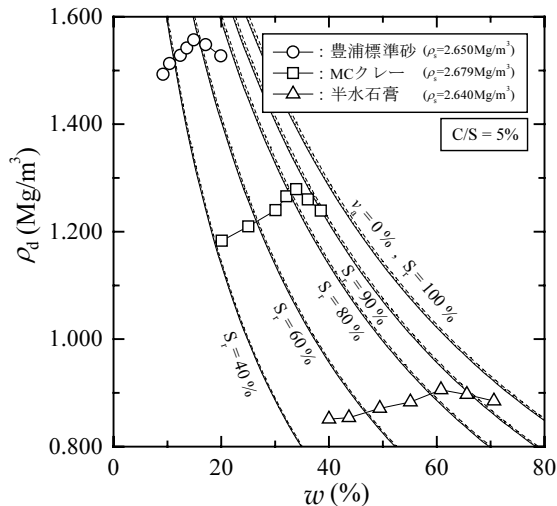


図-4 各試料の締固め曲線

まず、豊浦標準砂の締固め曲線に着目すると、乾燥密度 (ρ_d) は、含水比 (w) が小さな範囲では w 値の増加に伴ってほぼ直線的に増加している。 w 値がさらに増加すると、最適含水比 ($w_{opt}=14.9\%$) に達し、最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) は 1.557Mg/m^3 であった。 w 値が w_{opt} 値を超える場合には、 w 値の僅かな増加に伴い ρ_d 値は急激に低下している。つぎに、MC クレーの締固め曲線に着目すると、 ρ_d 値は w 値の増加に伴って徐々に増加し、最適含水比 ($w_{opt}=33.9\%$) 近傍に達すると ρ_d 値は急激に増加している。そのときの ρ_{dmax} 値は 1.279Mg/m^3 であった。 ρ_d 値は、 w 値のさらなる増加に伴い急激に低下する。したがって、MC クレーの締固め曲線は一般的な粘土の締固め曲線の傾向を示すことがわかる。一方、半水石膏の締固め曲線に着目すると、 ρ_d 値は w 値が大きくなるのに伴いほぼ一定の勾配で緩やかに増加し、最適含水比 ($w_{opt}=60.8\%$) で ρ_{dmax} 値は 0.906Mg/m^3 となった。また、 $w > w_{opt}$ の場合には、 ρ_d 値は緩やかに減少した。

各試料の締固め曲線を比較すると、各締固め曲線はそれぞれのゼロ空気間隙曲線に沿っていることがわかる。また、各試料の粒径が異なっているため、各試料間の w_{opt} 値や ρ_{dmax} 値には大きな差が認められた。とくに、半水石膏は、他の2試料の締固め曲線と比べより平型でなめらかな締固め曲線となった。各 w_{opt} 値、 ρ_{dmax} 値を比較すると、半水石膏の w_{opt} 値は3試料の中では最も高い値であり、 ρ_{dmax} 値は最も低い値であった。半水石膏の w_{opt} 値が他の2試料のそれよりも大きな値を示した要因としては、半水石膏の自然含水比が高いこと、および、その吸水性の高さに起因して配合水が半水石膏粒子に吸収された可能性が考えられる。一方、半水石膏の ρ_{dmax} 値が他の2試料のそれよりも小さな値を示した要因としては、含水比が他の2試料のそれよりも大きいことが主要因として考えられる。

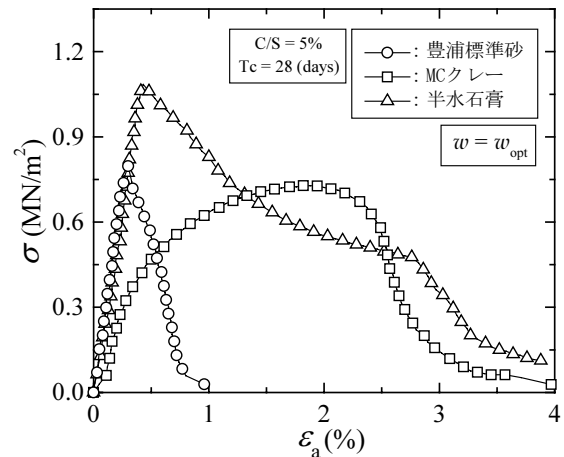


図-5 各試料の応力-ひずみ曲線

ii) 応力-ひずみ曲線

締固め材料の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響を明らかにするために、 w_{opt} 値の条件下で突固めた各供試体の応力-ひずみ曲線の関係に着目し比較検討をする(図-5)。なお、各試料の応力-ひずみ曲線は、各条件において3つの供試体から得られた結果を比較し、代表的なものを選定している。

まず、豊浦標準砂の応力-ひずみ関係に着目すると、応力値 (σ) は軸ひずみ (ϵ_a) の増加に伴って顕著な立ち上がりを示し、0.3%程度でピーク値に達する。応力-ひずみ曲線にピークが認められた後、 σ 値は荷重の継続に伴い、急激に減少した。つぎに、MC クレーの応力-ひずみ関係に着目すると、豊浦標準砂に比べ荷重初期には、 σ 値は ϵ_a 値の増加に伴い緩やかに増加する傾向にある。また、応力-ひずみ曲線のピークは、明瞭に認められず、ピーク強度を過ぎた後は応力値が徐々に減少する傾向が認められ、最終的には急激に低下した。一方、半水石膏の応力-ひずみ関係に着目すると、応力-ひずみ曲線は、荷重初期にはひずみの増加に伴い σ 値が急激に増加し、応力-ひずみ曲線のピークは豊浦標準砂と同様に明瞭に認められた。さらに荷重が継続しピーク強度を過ぎると、 σ 値は多少低下するが、軸ひずみ3%程度までは比較的大きな σ 値を維持している。このことから、締固めた半水石膏は粘り強い材料であることがわかる。

3試料を比較すると、最適含水比での一軸圧縮強さ (q_u) は半水石膏が最も大きく、豊浦標準砂、MC クレーの順に小さくなった。また、変形係数 (E_{50}) においてもこれと同様の傾向が認められた。この要因としては、半水石膏の吸水による固化作用、および、一般的に砂には粘土のような粘着性がなく、粒径が比較的大きく空隙比が大きいため、水を多く含むことにより粒子同士の結びつきが弱くなることが挙げられ、 q_u 値および E_{50} 値に影響を及ぼしているものと考えられる。

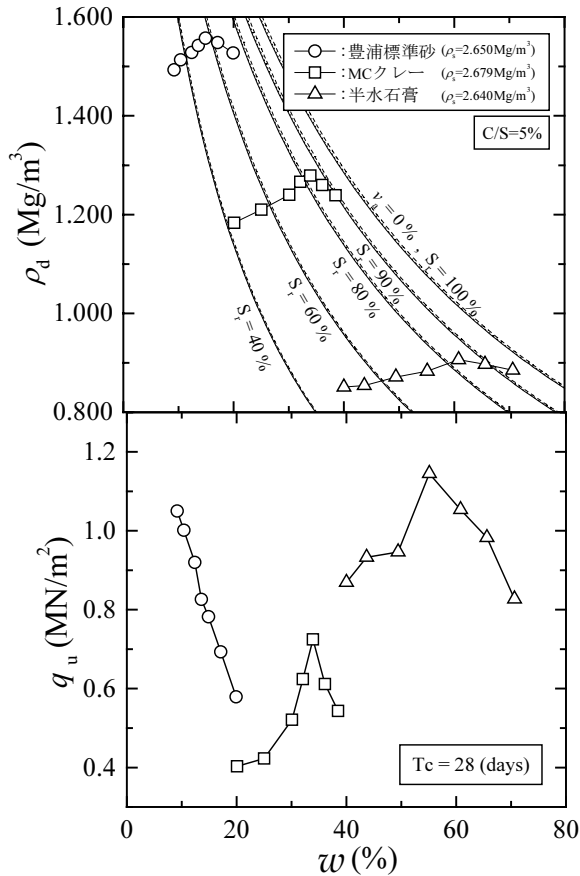


図-6 一軸圧縮強さと含水比の関係

iii) 含水比と一軸圧縮強さの関係

締固め材料の違いが締固め曲線および含水比と一軸圧縮強さ (q_u) の関係に及ぼす影響について考察を行う (図-6)。なお、各試料ともに3つの供試体から得られた結果の中から代表的な値を示すものを選定している。

まず、豊浦標準砂の含水比と一軸圧縮強さの関係に着目すると、 w 値の増加に伴い w_{opt} 値に関係なく q_u 値は直線的に減少しており、 w 値が低いほど q_u 値が高い値を示す傾向にあることがわかる。つぎに、MC クレーの含水比と一軸圧縮強さの関係に着目すると、 q_u 値は w 値の増加に伴って増加し、 w_{opt} 値において q_{umax} 値となり、 $w > w_{opt}$ の場合には減少に転じた。一方、半水石膏の含水比と一軸圧縮強さの関係に着目すると、 w 値の増加に伴い q_u 値は増加し、 w_{opt} 値の約9割の w 値 ($w=55.1\%$) において q_u 値は急激に増大し q_{umax} 値となった。 w 値がさらに増加すると、 w_{opt} 値に関係なく q_u 値は低下した。各材料を比較すると、 q_{umax} 値は半水石膏が最も大きく、次いで、豊浦標準砂、MC クレーの順に小さくなった。また、豊浦標準砂の場合には、 w 値が低いほど q_u 値が高い値を示す傾向にあった。一般的な土を締固めた場合、 q_u 値は、 w 値の増加に伴って徐々に増加し、 w_{opt} 値より僅かに小さな w 値において最大値となる¹⁶⁾。しかしながら、豊浦

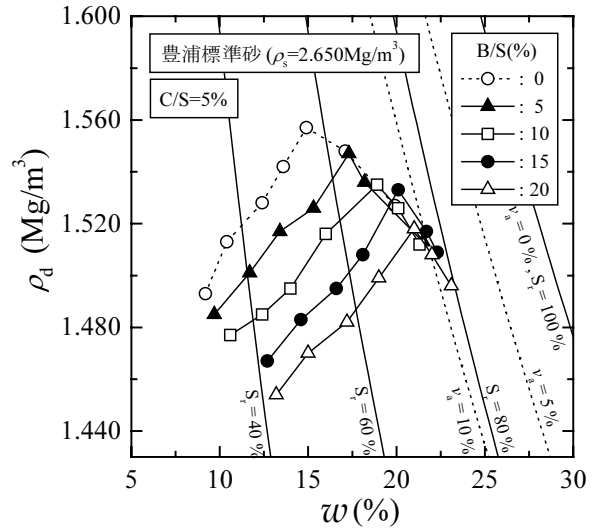


図-7 半水石膏添加率の違いが豊浦標準砂の締固め曲線に及ぼす影響

標準砂の場合には、このような関係は認められず、 w 値の増加に伴い w_{opt} 値に関係なく q_u 値は減少する傾向となった。以上のことにより、締固め材料の違いは、 w 値と q_u 値の関係に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

各締固め材料の w_{opt} 値における q_u 値を比較すると、応力-ひずみ関係 (図-5) でも示したように、半水石膏の q_u 値が最も大きく、また、締固め曲線より、 ρ_{dmax} は半水石膏が最も小さな値を示すことがわかる。これらの結果は、半水石膏は他の締固め材料と比較して、軽量でかつ強度が大きく、締固め材料として十分適用可能な材料であることを示唆している。

5.2 半水石膏の締固め時の地盤改良材としての適用性

本節では、半水石膏の地盤改良材としての有効性について検討するために実施した、豊浦標準砂とMCクレーに種々の添加率で半水石膏を添加して突固めた締固め試験の結果を示す。

i) 締固め曲線

半水石膏添加率 ($B/S=0\sim 20\%$) の違いが、豊浦標準砂およびMCクレーの締固め曲線に及ぼす影響について考察を行う (図-7, 図-8)。なお、図中には各配合につき3回試験を実施した結果から代表的なものを選定してプロットしており、以下に示す図においても同様とする。

まず、半水石膏を添加しない場合 ($B/S=0\%$) の豊浦標準砂の締固め曲線 (図-7 点線) に着目すると、乾燥密度 (ρ_d) は、含水比 (w) の増加に伴ってほぼ直線的に増加し、最適含水比 (w_{opt}) に達したときの最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) は 1.557Mg/m^3 であった。また、 w 値が w_{opt} を超えた後、 ρ_d 値は急激に低下していることがわかる。つぎに、半水石膏を添加した ($B/S=5\sim 20\%$) 各締固め曲線

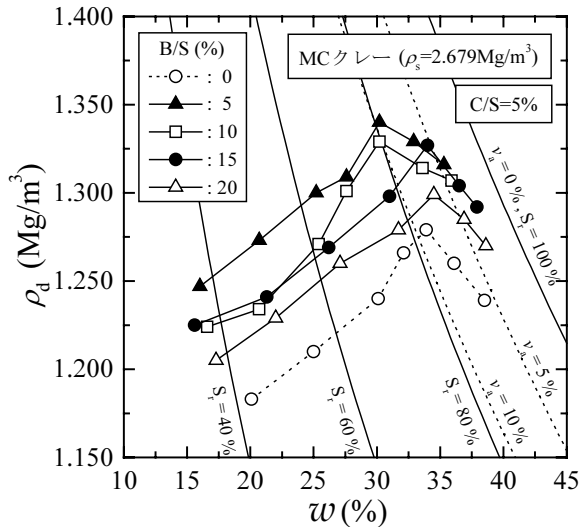


図-8 半水石膏添加率の違いが MC クレーの締固め曲線に及ぼす影響

(図-7 実線)に着目すると, B/S の違いによらず B/S=0%と同様に, ρ_d 値は w 値の増加に伴い直線的に増加し, $w > w_{opt}$ になると急激に減少している. また, B/S の違いによる締固め曲線への影響に関しては, B/S の増加に伴い, 図の右下側, すなわち高含水比-低乾燥密度側にシフトしていく傾向が認められた. B/S=20%に着目すると, B/S=0%と比較して ρ_{dmax} 値は 0.04Mg/m^3 程度小さな値を示し, w_{opt} 値は 6.0% 程度大きな値を示した. この要因としては, 半水石膏には吸水性があり, B/S の増加に伴い配合含水比が増大するため, w 値が増加し ρ_d 値は減少するものと考えられる.

一方, 半水石膏を種々の添加率で MC クレーに添加して突固めた場合の締固め曲線は図-8 となった. まず, 半水石膏を添加していない場合の締固め曲線に着目すると, 乾燥密度 (ρ_d) は, 含水比 (w) が小さな範囲では w 値の増加に伴って緩やかに増加している. さらに w 値が増加し, 最適含水比 ($w_{opt}=33.9\%$) 近傍に達すると, ρ_d 値は急激に増加し, ρ_{dmax} 値は 1.279Mg/m^3 となった. また, w 値が w_{opt} 値を超える場合, ρ_d 値は急激に低下していることがわかる. 一方, 半水石膏を添加した MC クレーの締固め曲線は, B/S の違いによらず, B/S=0%の場合と同様, ρ_d 値は w 値の増加に伴って徐々に増加している. w 値がさらに増大し w_{opt} 近傍に達すると, ρ_d 値は急激に増加し, $w > w_{opt}$ では ρ_d 値は急激に低下した. しかしながら, 豊浦標準砂への添加の場合 (図-7) とは異なり, B/S=0%から B/S=5%にかけての締固め曲線においては, 図の左上側, すなわち, 低含水比-高乾燥密度側にシフトする結果となった. なお, B/S=5~20%の締固め曲線は, 豊浦標準砂の場合と同様に, 図の右下側 (高含水比-低乾燥密度側) にシフトしていく傾向が認められた.

半水石膏添加率が w_{opt} 値および ρ_{dmax} 値に及ぼす影響に

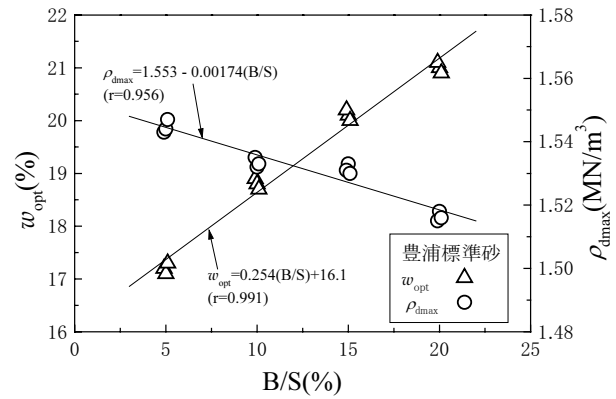


図-9 半水石膏添加率と最大乾燥密度・最適含水比の関係 (豊浦標準砂)

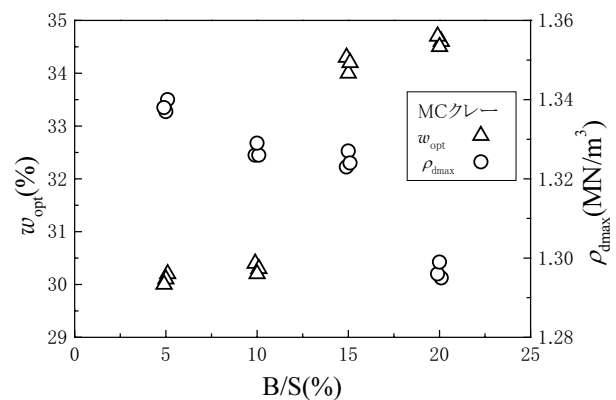


図-10 半水石膏添加率と最大乾燥密度・最適含水比の関係 (MC クレー)

注目する. 図-9 は豊浦標準砂の場合であり, 図-10 は MC クレーの場合である. 図より, 豊浦標準砂では B/S の増加に伴って, w_{opt} 値は直線的に増加し, ρ_{dmax} 値は直線的に減少した. 一方, MC クレーでは, 豊浦標準砂のように直線的な関係は得られなかったが, B/S の増加に伴って, w_{opt} 値は増加し, ρ_{dmax} 値は減少する傾向が認められた. このような関係が得られた要因として, 添加した半水石膏の吸水に伴う w 値の増加が考えられる. すなわち, B/S の増加に伴い半水石膏が吸収する水分量が増えるため, その結果 ρ_d 値が減少したものと推察される.

ii) 応力-ひずみ曲線

つぎに, 半水石膏添加率の違いが, 締固めた各試料の最適含水比における一軸圧縮特性に及ぼす影響について検討する. 図-11 は, 豊浦標準砂に半水石膏を種々の添加率 (B/S=0~20%) で添加して最適含水比で締固めた場合の応力-ひずみ曲線を示している. まず B/S=0%の応力-ひずみ曲線に着目すると, 応力値 (σ) は軸ひずみ (ϵ_a) の増加に伴って顕著な立ち上がりを示し, ϵ_a 値が 0.3% 程度でピークに達する. 応力-ひずみ曲線にピークが認められた後, σ 値は载荷の継続に伴い急激に減少

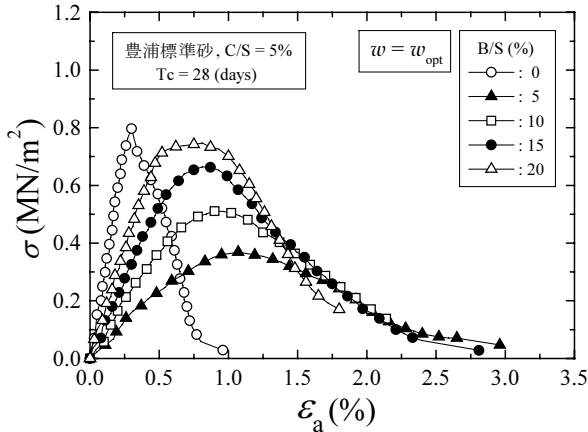


図-11 半水石膏添加率の違いが最適含水比における応力-ひずみ曲線に及ぼす影響 (豊浦標準砂)

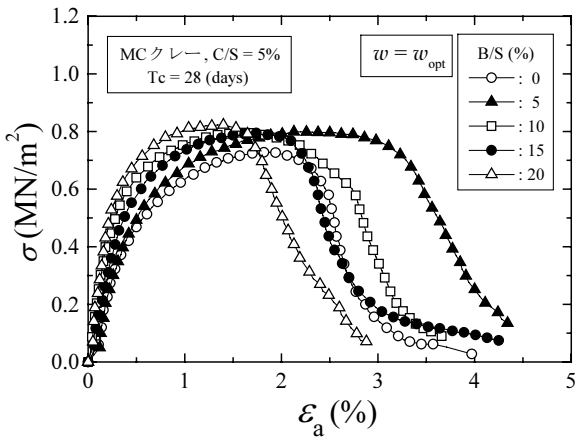


図-12 半水石膏添加率の違いが最適含水比における応力-ひずみ関係に及ぼす影響 (MCクレイ)

している。一方、半水石膏を添加した結果に着目すると、 $B/S=5\%$ の場合、 σ 値は ε_a 値の増加に伴って緩やかに増加し、 ε_a 値が1.2%程度でピーク値に達する。応力-ひずみ曲線のピーク後、 ε_a 値の増加に伴って σ 値は緩やかに減少していくことがわかる。また、 $B/S=5\%$ の一軸圧縮強さ(q_u)と変形係数(E_{50})は、 $B/S=0\%$ のそれらと比較して減少している。しかしながら、さらに B/S を増加させると、応力-ひずみ曲線は上方にシフトしていき(q_u 値と E_{50} 値の増加)、 $B/S=20\%$ で $B/S=0\%$ と同程度の q_u 値を示した。

つぎに、MCクレイに半水石膏を種々の添加率($B/S=0\sim 20\%$)で添加して最適含水比で締固めた試料の応力-ひずみ曲線(図-12)に着目する。 B/S の違いによらず、 σ 値は ε_a 値の増加に伴って増加していくが、応力-ひずみ曲線の明瞭なピークは認められないことがわかる。ピークに達した σ 値は、更なる ε_a 値の増加に伴っても維持されていることから、半水石膏を添加することで、粘り強い材料になることがわかる。また、 B/S の増加に伴い q_u 値と E_{50} 値は増加していく傾向にある。以上の結果は、

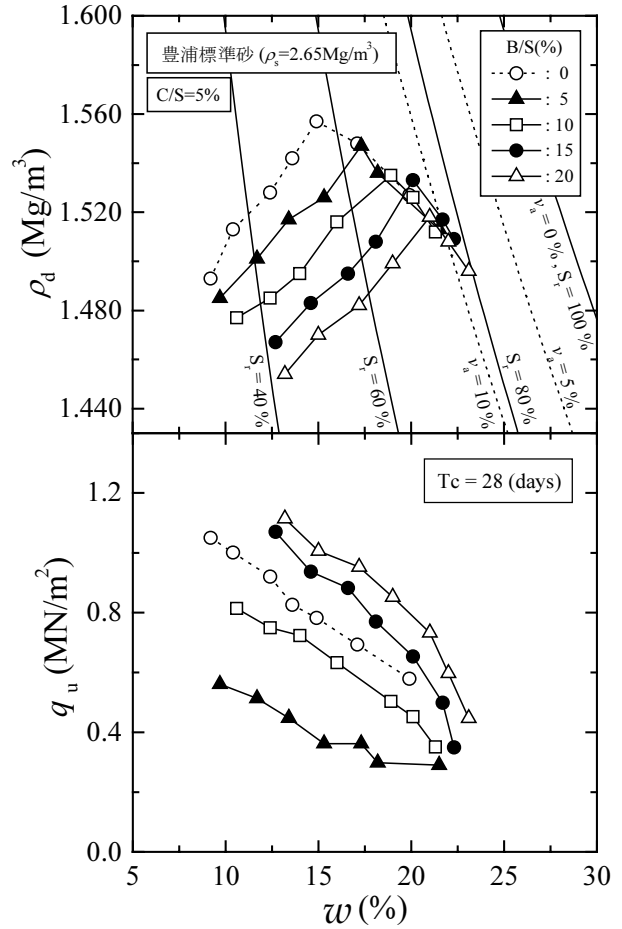


図-13 半水石膏添加率が豊浦標準砂の締固め特性と一軸圧縮強さに及ぼす影響

半水石膏を大量に添加することによって、 q_u 値と E_{50} を効率よく増加できる可能性を示唆している。

iii) 含水比と一軸圧縮強さの関係

B/S の違いが、締固め曲線と一軸圧縮強さの関係に及ぼす影響について考察を行う。

まず、豊浦標準砂に添加した場合の結果に着目する(図-13)と、 $B/S=0\%$ の場合、 q_u 値は、 w 値の増加に伴って直線的に減少し、最も小さな w 値で最大になった。このような傾向は、一般的な土の締固め特性と強度特性の関係に一致しない。先述したように、一般的な土を締固めた場合、 q_u 値は、 w 値の増加に伴って徐々に増加し、 w_{opt} 値より僅かに小さな w 値において最大値となる¹⁶⁾。一方、半水石膏を添加した $B/S=5\%$ の結果に着目すると、 q_u 値は、含水比(w)の増加に伴って直線的に減少し、 $B/S=0\%$ と同様の傾向を示すものの、強度-含水比線は $B/S=0\%$ よりも下方にシフトし、傾きも僅かに緩勾配となった。また、 q_u 値は、 w 値の違いによらず、 $B/S=0\%$ の場合と比較して 0.4MN/m^2 程度小さな値を示す。しかしながら、 $B/S=5\%$ 以上の添加によって、強度-含水比線は右側上方にシフトしていき、その傾きも急勾配になっていくこ

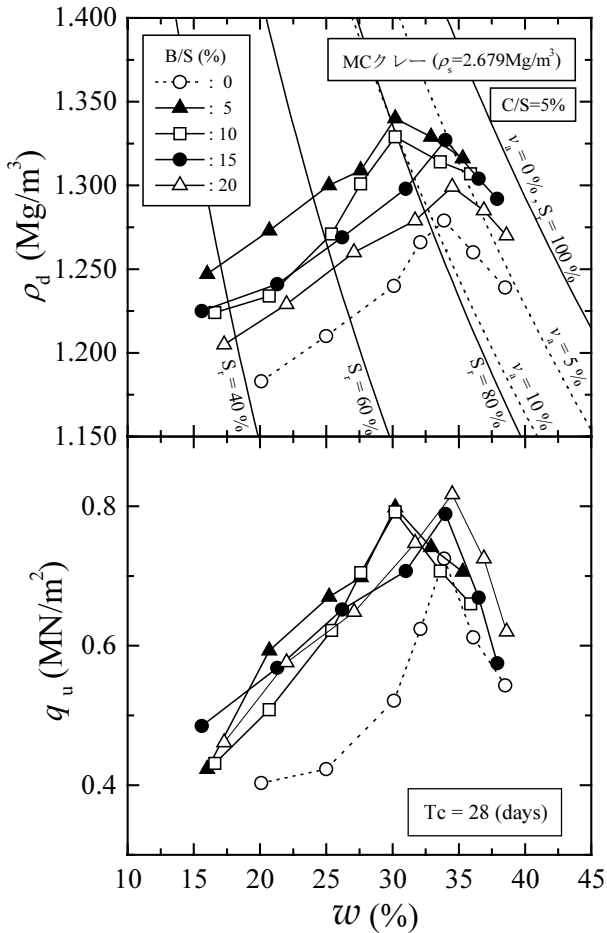


図-14 半水石膏添加率が MC クレーの締固め特性と一軸圧縮強さに及ぼす影響

とがわかる。さらに、各 B/S の最大乾燥密度を有する最適含水比での q_u 値は、B/S の増加に伴って直線的に増加している。また、含水比の違いによらず、B/S=15%以上で、 q_u 値は B/S=0% の q_u 値よりも大きな値を示した。以上のことから、さらに多くの半水石膏を添加することによって、より大きな q_u 値が得られるものと推察される。

一方、図-14 は、B/S の違いが MC クレーの締固め曲線と q_u 値の関係に及ぼす影響を示している。まず、B/S=0%の結果に着目すると、 q_u 値は、 w 値の小さな範囲では w 値の増加に伴って徐々に増加している。 w 値がさらに増加し、 w_{opt} 近傍に達すると q_u 値は急激に増加し、 w_{opt} (=33.9%) において q_{umax} 値となった。それ以降、 w 値の増加に伴い q_u 値は急激に減少する傾向を示した。このような傾向は、一般的な土を締固めた場合とほぼ一致するものである。つぎに、半水石膏を添加した場合に着目すると、B/S の違いによらず、 w_{opt} 値において q_{umax} 値となり、一軸圧縮強さと含水比の間には、B/S=0%で認められた傾向と同様な傾向が認められる。また、強度-含水比線は、B/S=5%で上方にシフトし、添加率の増大に伴って、僅かに右側にシフトしていくことがわかる。こ

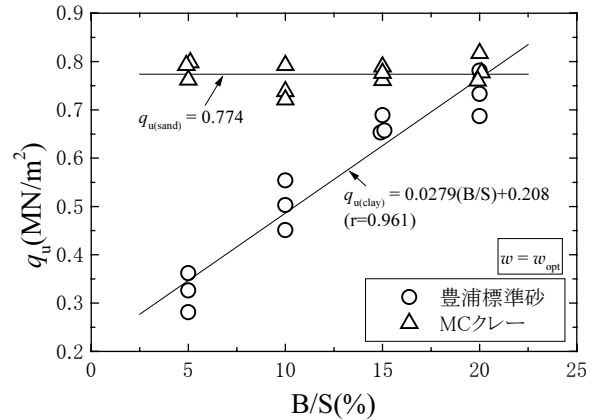


図-15 最適含水比における半水石膏添加率と一軸圧縮強さの関係

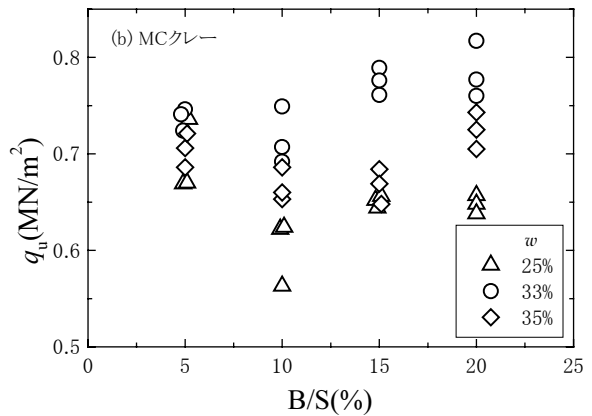
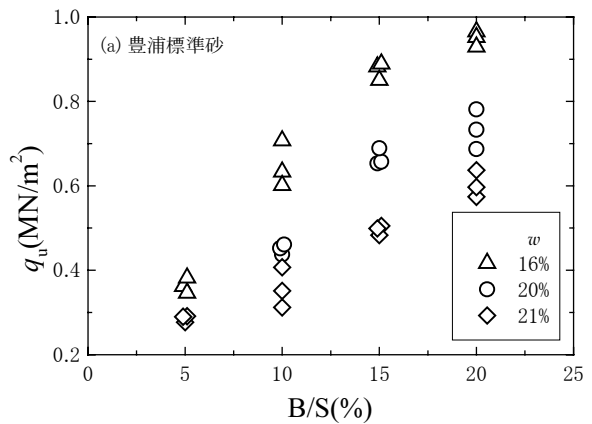


図-16 種々の含水比における半水石膏添加率と一軸圧縮強さの関係

のことは、MC クレーに半水石膏を添加するによって、 q_u 値を増加できることを示している。

半水石膏添加率と一軸圧縮強さの関係をより定量的に比較するために、特定の含水比条件下での B/S と q_u の関係に着目する。まず、図-15 は、最適含水比において得られた B/S と q_u の関係である。図より、豊浦標準砂に半水石膏を添加した場合には、B/S の増加に伴って q_u 値は直線的に増加する傾向を示した。このことは、B/S をさ

らに増加させることによって、より大きな q_u 値が得られる可能性を示唆している。一方、MC クレーの場合には、B/S の増加に伴う q_u 値の増加傾向はほとんど認められず、 q_u 値はほぼ一定値を示すことがわかる。しかしながら、B/S=0%での q_u 値が 0.7MN/m^2 程度であることを考えると、半水石膏を添加することにより q_u 値が改善されることがわかる。

一方、図-16 は適当な含水比での B/S と q_u の関係を示している。まず、豊浦標準砂の結果（図-16 (a)）に着目すると、それぞれの含水比において q_u 値は B/S の増加に伴い増加していることが明らかとなった。また、各 B/S では、 w 値の低下に伴い q_u 値が増加していることもわかる。しかしながら、MC クレーに半水石膏を添加した場合（図-16 (b)）には、 w 値の低下に伴い、 q_u 値が増加する傾向は認められるものの、 q_u 値と B/S の間に明瞭な関係を認めることはできなかった。

5.3 半水石膏のセメント安定処理土への適用性

本節では、廃石膏ボードから再生した半水石膏を種々の添加率で添加したセメント安定処理土の一軸圧縮試験結果を示す。また、普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種のセメント種類の違いが、半水石膏を添加したセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす影響についても述べることにする。

i) 応力-ひずみ曲線

半水石膏混入率 (B/S) の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響を示す（図-17）。(a) は普通ポルトランドセメント、(b) は高炉セメント B 種の結果であり、ここでは C/S=10%の結果のみ示した。

まず、普通ポルトランドセメントの結果（図-17 (a)）に着目すると、いずれの B/S においても応力値は軸ひずみの増加に伴って顕著な立ち上がりを示している。ここで、B/S=0%の応力-ひずみ曲線に着目すると、軸ひずみ量 1.0%~2.5%程度においてピーク値に達し、その後軸ひずみ量の増大に伴って応力値は徐々に減少していき、ひずみ軟化挙動を示すことがわかる。一方、半水石膏を混入した場合の応力-ひずみ関係に着目すると、B/S=5~20%のいずれの試料においても応力-ひずみ曲線に明瞭なピークは認められず、軸ひずみ 1.5%~5%までほぼ一定の応力値を示していることがわかる。ひずみが 5.0%以上になると、徐々に応力値が減少した。このことは、半水石膏を添加することによって、粘り強い地盤材料となることを示している。また、一軸圧縮強さ (q_u) は、B/S=5%の場合は B/S=0%と比較して僅かに低下するものの、B/S のさらなる増加に伴い徐々に増加しており、B/S=20%で 120kN/m^2 程度を示した。

つぎに、高炉セメント B 種の結果（図-17 (b)）に着目する。普通ポルトランドセメントの結果と同様に、B/S

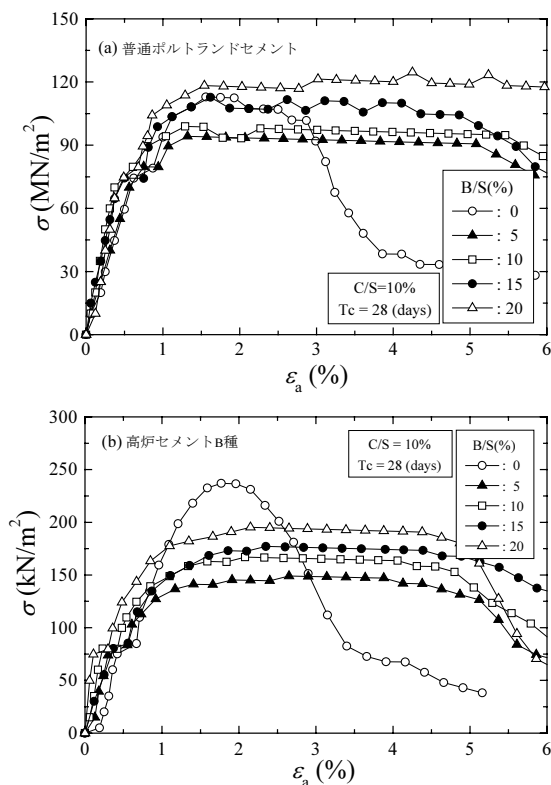


図-17 半水石膏混入率の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響

=0%の応力-ひずみ曲線には、 q_u 値の明瞭なピークが存在し、ピーク後は軸ひずみ量の増大に伴って急激に応力値が減少していくことがわかる。また、半水石膏を混入した場合の応力-ひずみ曲線も普通ポルトランドセメントの結果と同様に、B/S=5~20%のいずれの試料においても明瞭なピークが認められず、ひずみ量が 1.5%~5%までほぼ一定の応力値を示し、さらに 5.0~6.0%に達すると徐々に応力値が減少していった。したがって、このような半水石膏の混入に伴う応力-ひずみ関係の変化は、セメント種類の違いによらず認められることがわかる。

また、両セメントの応力-ひずみ関係を比較すると、高炉セメント B 種を用いた場合の q_u 値は、普通ポルトランドセメントを用いた場合の q_u 値の約 1.5 倍程度になることが明らかとなった。このような傾向は、B/S の違いによらず認められる。また、同様な傾向が C/S=5%の応力-ひずみ曲線においても認められたことを付記しておく。

ii) 一軸圧縮強さ

セメントの種類の違いが、半水石膏混入率 (B/S) と一軸圧縮強さ (q_u) (Tc=28 日) の関係に及ぼす影響を図-18 に示す。(a)、(b) はそれぞれ C/S=5%、10%の結果である。まず、図-18 (a) の普通ポルトランドセメントの結果に着目すると、B/S=0%の q_u 値と B/S=5%の q_u 値はほぼ同程度の値を示しているが、その後の B/S の増加に伴って、 q_u 値が緩やかに増加し、B/S=20%で q_u =

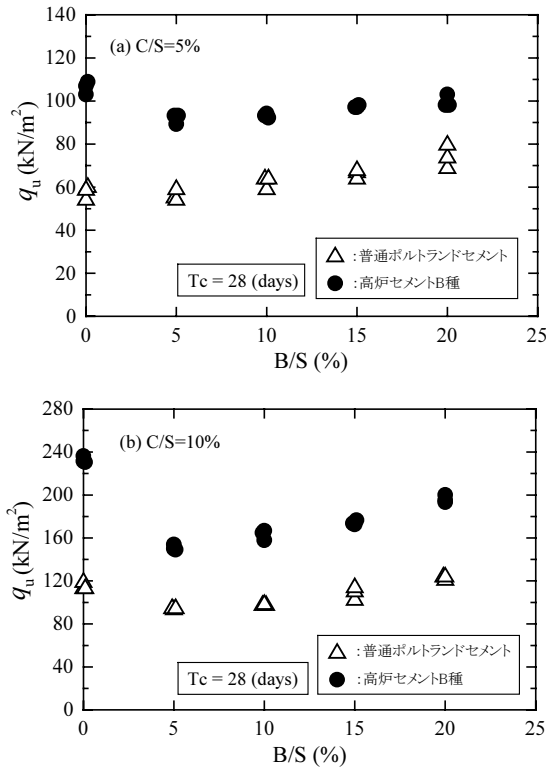


図-18 セメント種類の違いが一軸圧縮強さに及ぼす影響 (B/S=0%~20%)

70kN/m²程度を示す。一方、高炉セメント B 種の結果では、B/S=0%の q_u 値は 105kN/m²程度を示すものの、B/S=5%では q_u 値が 1 割程度減少していることがわかる。しかしながら、B/S のさらなる増加に伴い q_u 値が緩やかに増加し、B/S=20%で B/S=0%の q_u 値とほぼ同程度の値を示した。セメント種類の違いが q_u 値に及ぼす影響に着目すると、B/S の違いによらず高炉セメント B 種が普通ポルトランドセメントの 1.5 倍程度を示した。

一方、C/S=10%での比較結果 (図-18 (b)) に着目すると、両セメントともに B/S=5%では B/S=0%と比較して q_u 値が小さくなるが、B/S のさらなる増加に伴い q_u 値が緩やかに増加していくことがわかる。なお、高炉セメント B 種の場合には、B/S=5%における q_u 値の低下が顕著であった。セメント種類の違いによる q_u 値の違いに着目すると、高炉セメント B 種の q_u 値は普通ポルトランドセメントの q_u 値と比較して、B/S=0%で 2 倍程度、B/S=5~20%で 1.5 倍程度を示した。また、(a) と (b) の比較により、C/S=5%から 10%になることで、 q_u 値は 2 倍程度増加することがわかる。

以上のことから、C/S や B/S の違いによらず高炉セメント B 種を用いた場合の q_u 値は、普通ポルトランドセメントを用いた場合の q_u 値の約 1.5 倍程度になることが明らかとなった。このような傾向は、半水石膏を混入しないセメント安定処理土にも認められる傾向である¹⁷⁾。以上の結果から、半水石膏を混入したセメント安定処理土

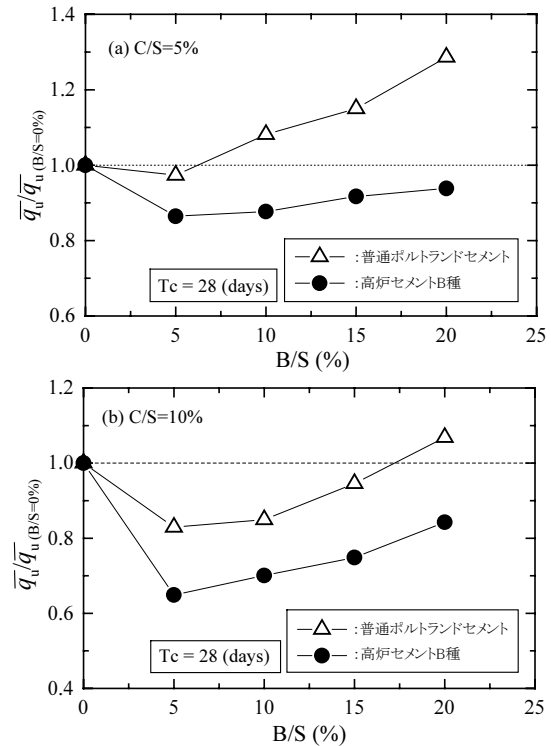


図-19 セメント種類の違いが $\bar{q}_u/\bar{q}_{u(B/S=0\%)}$ に及ぼす影響 (B/S=0%~20%)

に用いるセメント種類としては、高炉セメント B 種が力学的特性の観点から有意であるものと推察される。

つぎに、半水石膏混入に伴う q_u 値の変化を定量的に評価するために、各 B/S の q_u 値の平均値 (\bar{q}_u) を B/S=0%の q_u 値の平均値 ($\bar{q}_{u(B/S=0\%)}$) を用いて正規化した値と B/S の関係を図-19 に示す。(a) は C/S=5%の結果であり、(b) は C/S=10%の結果である。まず、C/S=5%の結果に着目すると、普通ポルトランドセメントは、B/S=0%と B/S=5%がほぼ同程度の $\bar{q}_u/\bar{q}_{u(B/S=0\%)}$ を示すものの、B/S のさらなる増大により、 q_u 値が増加していることがわかる。一方、高炉セメント B 種の結果は、いずれの混入率においても B/S=5%の $\bar{q}_u/\bar{q}_{u(B/S=0\%)}$ が B/S=0%よりも小さな値を示したが、B/S の増加に伴って $\bar{q}_u/\bar{q}_{u(B/S=0\%)}$ が緩やかに増加していくことがわかる。

さらに、C/S=10%の結果においても、セメント種類の違いによらず C/S=5%の結果と同様に、B/S=5%で一旦強度低下し、B/S のさらなる増大によって $\bar{q}_u/\bar{q}_{u(B/S=0\%)}$ が増加している。なお、C/S=5%の普通ポルトランドセメントの結果のみ、他の結果と異なった傾向を示しているが、これは、この配合における一軸圧縮強さが絶対的に小さいためであると考えられる。

図より、セメント種類や C/S の違いによらず、B/S=5%で一旦強度低下するものの、B/S がさらに増大すると、 q_u 値が緩やかに増加していることがわかる。このことは、軟弱地盤を安定処理する際に、より多くの半水石膏を混

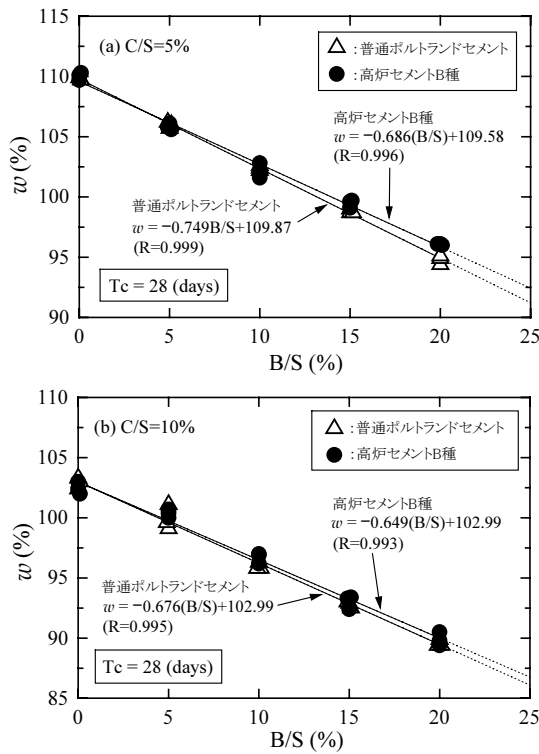


図-20 半水石膏混入率の違いが含水比に及ぼす影響 (セメント種類の違いによる比較)

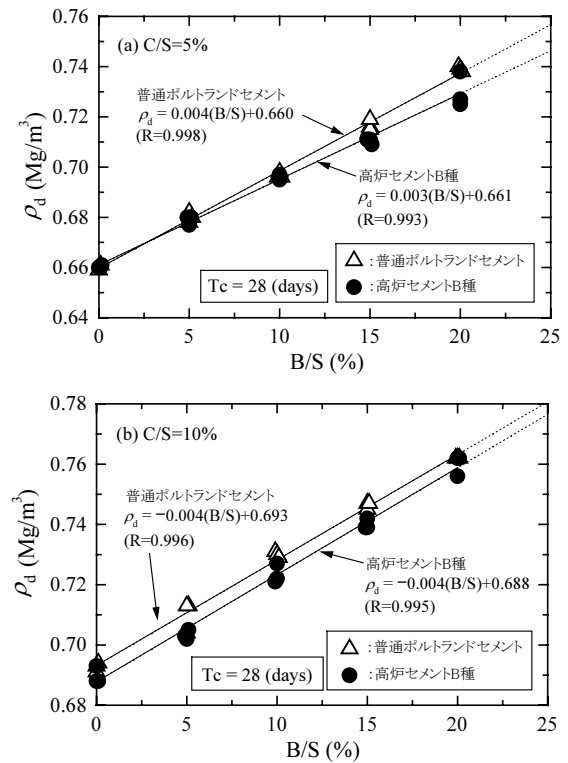


図-21 半水石膏混入率の違いが乾燥密度に及ぼす影響 (セメント種類の違いによる比較)

入していくことによって、 q_u 値を改善できる可能性を示唆している。また、C/S やセメント種類の違いによらず、B/S=5%でB/S=0%よりも q_u 値が僅かに減少し、その後のB/Sの増加に伴い q_u 値も緩やかに増加している。

一方、半水石膏混入による強度低下の主要因としては、石膏の混入によってセメントの水和反応が阻害されていることが考えられる。セメントを構成しているクリンカー鉱物の一つにアルミネート相(C₃A)があるが、このアルミネート相は、水との反応が急激で瞬時に多量の熱を放出し硬化するという性質を有している。通常、このような水和熱を抑制するために、セメントの製造過程において、凝結調整剤として石膏が添加されている¹⁸⁾。本研究で混入した半水石膏も、セメントの製造過程で用いられているように凝結調整剤として働き、アルミネート相の硬化を過剰に抑制したため、強度減少を引き起こしたものと推察される。

iii) 含水比

図-20に、セメント種類の違いが半水石膏混入率(B/S)に対する含水比(w)の変化に及ぼす影響を示す。(a)はC/S=5%の結果、(b)はC/S=10%の結果である。まず、C/S=5%(図-20(a))に着目すると、 w 値はセメント種類の違いによらずB/Sの増加に伴って直線的に減少し、B/S=0%で103%程度であった w 値はB/S=20%で90%程度まで減少している。また、セメント種類の違い

によらず、 w 値とB/Sの間には非常に高い相関性が認められた。一方、C/S=10%の結果(図-20(b))においても(a)と同様に、B/Sの増加に伴い直線的に w 値が減少することがわかる。このB/Sの増加に伴う w 値の減少は、セメントの種類やC/Sの違いによらず認められた。この要因としては、B/Sが増加するのに伴い、半水石膏を含む土粒子の全体量が増加するために w 値が減少することや半水石膏の吸水作用によって水分量が減少することが考えられる。また、図-20(a),(b)から、セメント種類の違いによる w 値の違いは顕著に認められず、両セメントともにほぼ同程度の w 値を示すことがわかる。

ここで、図-19で認められた、B/S=5%以上の添加に伴う q_u 値の増加は、半水石膏の混入に伴う含水比の低下が主要因となっているものと推察される。このような結果から、半水石膏は非常に高含水比の地盤改良において有効であるとともに、廃石膏を大量に消費できるものと考えられる。

iv) 乾燥密度

図-21は、半水石膏混入率の違いが乾燥密度(ρ_d)に及ぼす影響について、セメント種類の違いの比較を示したものである。(a)はC/S=5%の結果、(b)はC/S=10%の結果である。まず、C/S=5%の結果(図-21(a))に着目すると、 ρ_d 値はB/S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性が認められる。一

方, $C/S=10\%$ の結果(図-21 (b))においても(a)と同様に, B/S の増加に伴い直線的に ρ_d 値が減少している. この原因としては, B/S の増加に伴い w 値が減少することから, 半水石膏混入によって土粒子の全体量が絶対的に増加していることや, 半水石膏の吸水作用による水分量の減少により, 相対的に土粒子が増加していることが考えられる.

また, 図-21 (a), (b) から, ρ_d 値に関して, 普通ポルトランドセメントが高炉セメントB種よりも僅かに大きな結果を示した. この原因としては, 普通ポルトランドセメントの比重が, 高炉セメントB種と比較して僅かに大きいことが考えられる.

なお, 図-18, 図-19において, $B/S=5\%$ での q_u 値の減少は, 半水石膏が凝結調整剤として働き, アルミネート相の硬化を過剰に抑制したものと考察した. 一方, B/S のさらなる増加に伴う q_u 値の増加は, 図-20, 図-21の結果より, 含水比の低下および乾燥密度の増加によるものと考えられる. なお, セメント種類の違いや C/S の違いによらず, $B/S=5\%$ 程度が, 半水石膏の凝結調整剤としての働きによる強度減少よりも含水比の低下や乾燥密度の増加による強度増加が上回る変曲点になるものと推察される.

6. 結論

本研究では, 廃石膏ボードから再生した半水石膏を用いた新しい地盤材料の力学的性質を解明し, 半水石膏の地盤材料あるいは地盤改良材としての適用性と有効性について検討した. 本研究より得られた主要な結論を以下に列記する.

- 1) 半水石膏の締固め曲線は, 砂質土および粘性土と同様に, 最適含水比までは含水比の増大に伴い乾燥密度は増大し, その最適含水比は, 豊浦標準砂やMCクレーと比較して高く, かつ, 乾燥密度は小さいことを明らかにした.
- 2) 最適含水比-最大乾燥密度において締固めた半水石膏, 豊浦標準砂, MCクレーの一軸圧縮強さを比較した結果, 半水石膏の一軸圧縮強さが最大となることを明らかにした.
- 3) 半水石膏添加率の増大に伴って, 豊浦標準砂の締固め曲線は低乾燥密度・高含水比側にシフトし, MCクレーの締固め曲線は, 高乾燥密度・低含水比側にシフトすることが明らかとなった.
- 4) 締固め母材や含水比の違いによらず, 半水石膏添加率の増大に伴って, 一軸圧縮強さ, 残留強度が増大することを示した.
- 5) 締固めた豊浦標準砂の一軸圧縮強さは, 半水石膏添加率の違いによらず, 含水比の増加に伴って減少し, 両

者に高い相関関係が認められた.

- 6) セメント種類・セメント添加率の違いによらず, 半水石膏混入率の増加に伴い, セメント安定処理土の一軸圧縮強さ, 残留強度が増大することを示した.
- 7) セメント種類・セメント添加率の違いによらず, 半水石膏混入率の増大に伴ってセメント安定処理土の含水比は減少するとともに乾燥密度が増大することを示した. また, 含水比と乾燥密度は, 半水石膏混入率と極めて高い相関性を持つことが明らかとなった.
- 8) セメント添加率, および半水石膏混入率の違いによらず, 高炉セメントB種を用いた場合の一軸圧縮強さは, 普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも大きな値を示した.

以上のことから, 廃石膏ボードから再生した半水石膏は, 締固め材料や地盤改良材として十分に適用できる可能性がある程度明らかとなった. 現在わが国における産業廃棄物処分場の容量不足や環境負荷の少ない循環型社会志向の高まりなどの背景を考えると, 半水石膏のような環境にやさしい材料を積極的に有効利用していくことは, 極めて重要であると考え. 今後は, 試験条件を種々に変化した実験を多数実施し, 廃石膏ボードから再生した半水石膏の再利用に関する体系化と実務に適用可能な設計体系を構築していきたいと考えている.

参考文献

- 1) (社)石膏ボード工業会: <http://www.gypsumboard-a.or.jp/>.
- 2) 鶴飼恵三: 石膏ボード廃材から再生された石膏粉末の地盤改良材としての有効性, 群馬大学地域共同センター報告書, 10p., 2005.
- 3) 廃石膏ボード再資源化研究会: 廃石膏ボード再資源化・情報交換会, 講演レジメ集, 2006.
- 4) 亀井健史, 松尾和俊, 志比利秀, “締固めた石炭灰の一軸圧縮特性に及ぼすセメント添加量の影響: 土木学会論文集, No.778/III-69, pp.183-193, 2004.
- 5) 亀井健史, 松尾和俊: 気泡混合軽量土への石炭灰の有効利用, 土木学会論文集, No.764/III-67, pp.247-254, 2004.
- 6) 亀井健史, 松尾和俊, 前川晴義, 志比利秀: 石炭灰を混合した気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす初期高温養生の影響, 土木構造・材料論文集, No.20, pp.111-118, 2004.
- 7) 亀井健史, 松尾和俊: フレック状PETボトルを利用した気泡混合軽量土の一軸圧縮特性, 土木学会論文集, No.764/III-67, pp.359-366, 2004.
- 8) 亀井健史, 松尾和俊, 志比利秀, 小木曾みちる: 流動化処理土へのフレック状PETボトルの有効利用, 島根大学総合理工学部紀要シリーズA, No.38, pp.9-16, 2004.
- 9) 高橋和敏, 樋口邦弘, 鶴飼恵三・後藤両市: 廃石膏ボードを使用した地盤改良の試み, 第2回地盤工学会関東支部研究発表会発表講演集, pp.39-41, 2005.
- 10) (財)日本工業規格, JIS ハンドブック 12 土木II, pp.678-681, 2002.
- 11) 豊浦硅石鉱業(株): <http://www4.ocn.ne.jp/~toyoura/>.
- 12) 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>).
- 13) 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.194, 2002.
- 14) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，第5編 安定化試験，突固めによる土の締固め試験， pp.201-210, 1990.
 - 15) 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， pp.225-262, 1990.
 - 16) Seed, H. and Chan, C. K.:Structured and strength characteristics of compacted clays, ASCE, Vol.85, No.SM5, pp.87-125, 1959.
 - 17) 亀井健史，大本和樹，松尾和俊：セメント種類の違いがセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす影響，島根大学総合理工学部紀要シリーズ A, No.37, pp.29-35, 2003.
 - 18) 太平洋セメント (株):<http://www.taiheiyo-cement.co.jp/> .