

乾湿繰り返し作用が半水石膏を混入した 締固め土の一軸圧縮特性に及ぼす影響

亀井 健史¹⁾, 志比 利秀²⁾, 日野 淳二³⁾,

松田 哲夫⁴⁾, 伊藤 哲男⁵⁾, 出口 宗浩⁵⁾

¹⁾宮崎大学工学部 土木環境工学科

²⁾島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

³⁾大鉄工業(株)

⁴⁾元西日本高速道路(株)

⁵⁾西日本高速道路(株)

Effects of wetting and drying repetitions on unconfined compressive characteristics of compacted sands utilizing bassanite

Takeshi KAMEI¹⁾, Toshihide SHIBI²⁾, Junji HINO³⁾, Tetsuo MATSUDA⁴⁾, Tetsuo ITO⁵⁾, and Munehiro DEGUCHI⁵⁾

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Miyazaki University

²⁾Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

³⁾Daitetsu Kogyo Co., Ltd.

⁴⁾Former West Nippon Expressway Co. Ltd.

⁵⁾West Nippon Expressway Co. Ltd.

Abstract

This paper presents the effect of weathering conditions on unconfined compressive characteristics of compacted sand mixed with recycled bassanite that was derived from waste plasterboard. The weathering conditions in this paper referred to wetting and drying repetitions. Sand-bassanite mixtures compacted at optimum water content and at water content of dry of optimum, were cured for 28 days. The strengths of cured sand-bassanite mixtures were determined by unconfined compression tests after 0, 1, and 3 wetting and drying repetitions. The effects of wetting and drying repetitions on stress-strain behavior of compacted sand-bassanite mixtures are quantified. As a result, for sand-bassanite mixtures compacted at optimum water content, the unconfined compressive strength of mixtures with wetting and drying repetitions is little changed from those without repetitions. For sand-bassanite mixtures compacted at water content of dry of optimum, however, the unconfined compressive strength of mixtures with wetting and drying repetitions becomes about 90% of those without repetitions. The first cycle of wetting and drying repetitions decreases the unconfined compressive strengths of compacted sand-bassanite mixtures by 5-10%, but further repetitions hardly decrease them.

1. はじめに

建設産業は、資材としてわが国の資源利用量の約40%近くを消費している。その大量消費に伴って排出される産業廃棄物量は、わが国全体の最終処分量の約20%近くを占めており¹⁾、建設産業が環境に及ぼす負荷は非常に大きい。その建設産業廃棄物の中でも、近年、建設現場

から大量に排出される石膏ボード廃材（以下、廃石膏ボード（写真-1））の処理が大きな問題となってきている。

石膏ボードは、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、他の建材と比較して、耐火性、遮音性、断熱性、施工性に優れた特性を有するとともに、経済的にも非常に低廉である。このような理由から、主に壁や天井などの建築内装材として



写真-1 山積みされた廃石膏ボード

広く普及しており、年間約 4.4 億 m^2 の石膏ボードが国内で生産されている²⁾。一方、廃石膏ボードの排出に関しては、石膏ボードの生産量を反映し、2013 年には 199 万トンに達する見込みである³⁾。

廃石膏ボードは、その他の建設系廃棄物と同様に解体時の分別・選別の困難性、リサイクル市場の不足等から、産業廃棄物として扱われ、中間処理業者によって回収された後、そのままの状態最終処分されてきた。しかしながら、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の存在と硫酸還元菌などの土中細菌アトゲンとが関与し、非常に毒性の高い硫化水素ガス (H_2S) や硫化鉄などを含む黒い水を発生させる可能性が明らかとなった。そのため「廃棄物の処理及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、石膏は安定型最終処分場に、紙は管理型最終処分場に処分することが義務付けられた。現在では、付着していた紙以外の有機物の存在によっても廃石膏から硫化水素ガスを発生させる恐れがあるとの知見から、「廃石膏ボードから付着している紙を除去したものの取扱いについて」（平成 18 年 6 月 1 日）によって、廃石膏も管理型最終処分場に処分することが義務付けられている。この管理型処分場は、一般の安定型処分場と比較して廃棄コストが高いことに加え、平成 17 年度の時点では最終処分場をすべて併せてもその残余年数が 7.7 年と試算されていることからその残存容量が逼迫しているという問題もある⁴⁾。今後も廃石膏ボード排出量の増加が見込まれていることに加え、廃石膏の処分が困難になることも予想されることから、廃石膏ボードを大量に再利用できるリサイクル分野の開発が急務であると考えられる。これまでに廃石膏ボードのセメント原料や肥料原料等への有効利用が試みられているが⁵⁾、近年では廃石膏を大量に再利用できる用途として地盤材料、地盤改良材としての有効利用が注目されてきている。例えば、廃石膏ボードを粉砕・焼成して得られる半水石膏は、適量の水とともに軟弱粘土等に添加すると硬化することが室内実

験で確認されている⁶⁾。また、石膏は中性無害で、従来使用されてきた強アルカリ性の消石灰や六価クロムの溶出が懸念されるセメント系固化剤と比較して、環境に優しい材料であるという側面も有している。なお、半水石膏の適用に関しても、石膏に含まれているフッ素の溶出量が土壌環境基準を満たさないことが考えられるが、高炉セメント B 種と半水石膏の組み合わせで生成されるエトリングイトに、フッ素の溶出を抑制させる効果があることが近年明らかにされてきており⁷⁾、廃石膏を地盤の改良材として使用するための環境の特性も明らかになりつつある。

廃石膏ボードを地盤材料・地盤改良材として再資源化した場合の力学的な特性に関する研究も進められている。例えば、半水石膏単体を締め固めた場合には、最大乾燥密度が小さいにも関わらず比較的高い一軸圧縮強さが得られることが明らかとなっている⁸⁾。また、砂や粘土を締め固める際の地盤改良材として半水石膏の有効性についても検討されており、特に粘土に混入した場合には、明瞭な強度改善が認められることが報告されている⁹⁾。さらに、半水石膏を添加した締め固め土を水中養生した場合についても検討がなされている。その結果、半水石膏を添加した砂試料は、最適含水比より僅かに乾燥側の含水比で締め固めると水浸に伴う強度低下が小さくなることが報告されており¹⁰⁾、水が締め固め土及ぼす影響には注意が必要であると推察される。

しかしながら、気中養生された締め固め地盤も、雨水等の影響で、繰り返し水浸の影響を受けることが考えられる。したがって、半水石膏を混入した締め固め土を気中養生した場合においても、乾湿の繰り返しと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、砂試料に少量のセメントと種々の添加率で廃石膏から再生した半水石膏を混入して締め固めを行い、28 日間気中で養生させて作製した供試体に対し、乾湿繰り返しを 0 回、1 回、3 回作用させた後、一軸圧縮試験を実施した。その結果、半水石膏を混入した締め固め土の一軸圧縮特性に及ぼす乾湿繰り返しの影響について検討している。

2. 石膏の基本的特性

石膏は、結晶水の数により「二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: 硫酸カルシウム 2 水和物)」、「半水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$: 硫酸カルシウム 1/2 水和物)」、「無水石膏 (CaSO_4 : 硫酸カルシウム)」の 3 種類に大別され、更に半水石膏は α 型と β 型に、無水石膏は、III 型、II 型、I 型に細分することができる。また、無水石膏の III 型には α 型と β 型が存在することも確認されている¹¹⁾。

二水石膏は、自然界では非常に安定で、化学的には水とほとんど反応しない。この二水石膏を $130 \sim 180^\circ\text{C}$ の温度管理の下、加熱処理（脱水反応）することにより、水

表-1 本研究で用いた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'}
豊浦珪砂	2.650	0.125	0.180	0.235	0.260	2.08	0.997
半水石膏	2.640	0.220	0.370	0.500	0.600	2.73	1.040

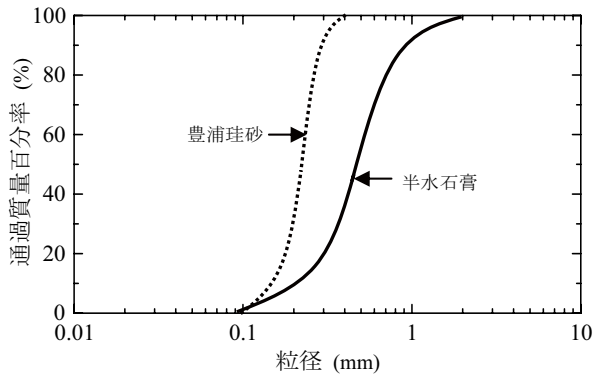
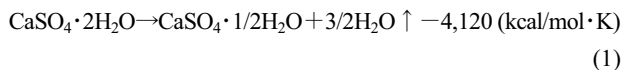


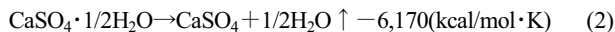
図-1 半水石膏および豊浦珪砂の粒径加積曲線

硬性の半水石膏（硫酸カルシウム 1/2 水和物）が生成される。その熱化学式¹¹⁾を以下に示す。



なお、右辺のマイナス表示は吸熱反応を表している。

半水石膏には、先述したように α 型と β 型が存在しているが、 α 型は緻密な構造で粒子密度が高く、水硬時の強度が β 型よりも大きいことなどから医療用等に用いられている。一方、 β 型は、ポーラス状の空隙があることから粒子密度が α 型よりも小さく、石膏ボード等の建築資材として利用されている。これら半水石膏を180℃以上で加熱処理することにより、結晶水の取れた無水石膏（硫酸カルシウム）が生成される。その熱化学式¹¹⁾を以下に示す。



無水石膏には、先述したようにⅢ型、Ⅱ型、Ⅰ型が存在し、Ⅲ型の無水石膏は更に α 型と β 型に分類することができる。Ⅲ型の無水石膏は、180～350℃の範囲で加熱することにより生成し、空気中の湿気を吸って半水石膏に戻る。Ⅱ型の無水石膏は350～1000℃の範囲で加熱することにより得られ、加水しても半水に戻らないことから別名不活性無水石膏と呼ばれている。Ⅰ型の高温無水石膏は、1100℃以上の加熱により生成される¹¹⁾。

3. 試料

今回使用したリサイクルされた廃石膏は、半水石膏生

表-2 土壤環境基準に関する溶出試験結果

項目	測定値 石膏のみ [mg/l]	測定値 セメント10%添加 [mg/l]	環境基準値 [mg/l]
カドミウム	<0.005	<0.005	<0.01
全シアン	不検出	不検出	不検出
有機燐	不検出	不検出	不検出
鉛	<0.005	<0.005	<0.01
六価クロム	0.025	<0.02	<0.05
砒素	<0.005	0.005	<0.01
総水銀	<0.0003	<0.0003	<0.0005
PCB	不検出	不検出	不検出
ジクロロメタン	<0.0005	<0.0005	<0.02
四塩化炭素	<0.0005	<0.0005	<0.002
1,2-ジクロロエタン	<0.0005	<0.0005	<0.004
1,1-ジクロロエチレン	<0.0005	<0.0005	<0.02
シス-1,2-ジクロロエチレン	<0.0005	<0.0005	<0.04
1,1,1-トリクロロエタン	<0.0005	<0.0005	<1
1,1,2-トリクロロエタン	<0.0005	<0.0005	<0.006
トリクロロエチレン	<0.0005	<0.0005	<0.03
テトラクロロエチレン	<0.0005	<0.0005	<0.01
1,3-ジクロロプロペン	<0.0005	<0.0005	<0.002
チウラム	<0.0005	<0.003	<0.006
シマジン	<0.0003	<0.0003	<0.003
チオベンカルブ	不検出	不検出	<0.02
ベンゼン	<0.0005	<0.0005	<0.01
セレン	<0.0005	<0.0005	<0.01
ふっ素	<0.0005	<0.0005	<0.8
ほう素	<0.0005	<0.0005	<1

産システム¹²⁾を用いて廃石膏ボードから再生された石膏を用いている。このシステムでは、廃石膏ボードから紙を取り外し、粉砕、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と無水石膏がそれぞれ76.5%と11.0%程度を占め、常温で安定な二水石膏が12.5%程度含まれた石膏を得ることができる。本研究では、再生された石膏の大部分が半水石膏であることから、この石膏を半水石膏と呼ぶこととする。半水石膏は、先述したように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-1に、その粒径加積曲線を図-1に示す。なお、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

表-3 高炉セメント B 種の品質¹⁴⁾

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-4 高炉セメント B 種の化学成分¹⁴⁾

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

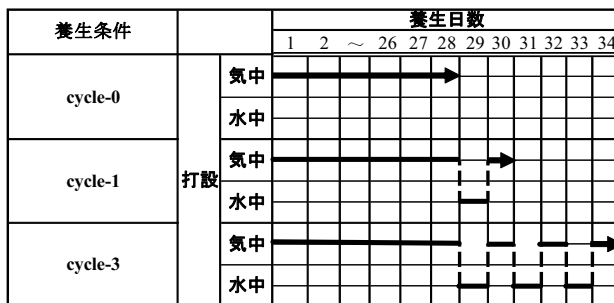


図-2 乾湿繰り返しスケジュール

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、環境基準値の範囲内にあることを確認している。表-2 は、半水石膏に対する溶出試験結果である。

砂試料には、わが国の土木建設分野で最も代表的な砂の一つである豊浦珪砂（旧豊浦標準砂）を使用した。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¹³⁾。砂の基本物理特性を表-1 に、その粒径加積曲線を図-1 に示す。

安定材としては、高炉セメント B 種を試料に対し、一定量（砂に対して 5%、C/S=5%）添加した。高炉セメント B 種の品質は、JIS R 5210 で表 3¹⁴⁾ のように定められている。また、その化学成分を表 4¹⁴⁾ に示す。表より、CaO、SiO₂、Al₂O₃ の三成分の合計が全体の約 90%を占めており、主要な成分であることがわかる。セメントを添加した理由としては、セメントには強度発現促進および固化作用という性質があることから、土に少量のセメントを添加することによって強度発現の促進が図れることもあるが、先述したような半水石膏からの溶出が懸念される重金属を固定化させ、溶出を抑制できる¹⁵⁾と考えたためである。なお、セメントを多量に用いると、環境基準以上の六価クロムを溶出させる可能性が考えられるため、比較的小さな添加量に設定した。溶出試験結果は、

半水石膏に 10%のセメントを添加した場合（表-2）においても半水石膏のみの場合と同程度もしくはそれ以下の値が得られている。

含水比を操作するため、試料調整時に水が必要となる。本研究では半水石膏の地盤改良材としての基本的な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. 供試体作製方法および実験方法

4. 1 供試体作製方法

供試体作製に際しては、鋳鉄製の二つ割りモールド（ $\phi=50$ mm、H=100mm）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 1210¹⁶⁾および JSF T 711¹⁷⁾の Standard Proctor ($E_c \approx 0.55$ J/cm², 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。半水石膏は加水すると二水化するため、試料の使用法は非繰り返し法を選択した。配合条件は高炉セメント B 種の添加率 (C/S) を 5%と一定に固定し、半水石膏を添加しない場合 (B/S=0%) と半水石膏を 10%添加した場合 (B/S=10%) の 2 通りを対象とした。

締固め試験の際にはモールド上面の余分な試料を利用して、締固め時の含水比を測定した。突き固めた供試体は、モールドごとポリプロピレン製ボックス内に静置してフタをすするとともに、恒温室 (20 \pm 2 $^{\circ}$ 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、供試体の直径、高さおよび質量を測定して、湿潤密度を求めた。その後、ポリエチレン製の袋で被い、所定の養生期間 28 日まで気中養生した。

乾湿繰り返しは、上記の方法で供試体を作製・養生した後に実施した。乾湿繰り返しの 1 サイクルは、24 時間の水浸とその後の 24 時間の気中養生からなり¹⁸⁾、サイクル数は、1 回、3 回を設定した（図-2）。なお、水中から取り出したときは、供試体表面の水を軽く拭き取り、その後ポリエチレン製の袋で覆って静置した。

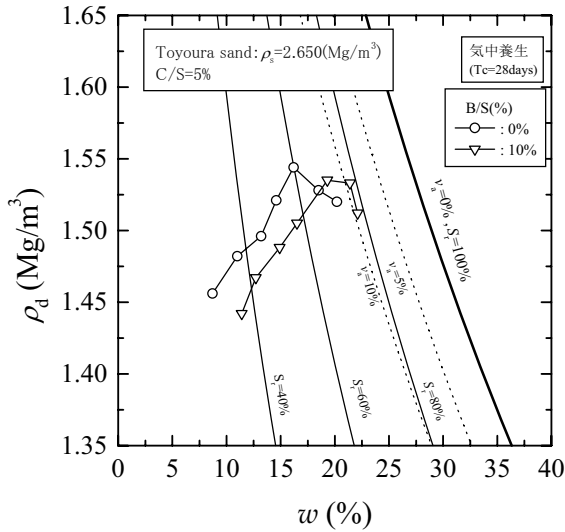


図-3 半水石膏添加率が豊浦標準砂の締固め曲線に及ぼす影響 (B/S=0%,10%)

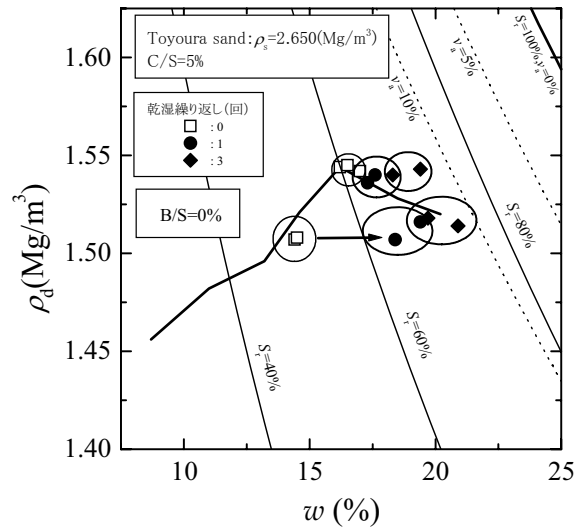


図-4 乾湿作用が半水石膏を混入した締固め土の乾燥密度と含水比に及ぼす影響 (B/S=0%)

4. 2 実験方法

本研究では、半水石膏を混入した締固め土の強度・変形特性に及ぼす乾湿作用の影響を評価するために、上記条件で作製し養生した締固め土に対して、所定の乾湿繰り返しを作用させた後、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、一軸圧縮装置の上下加圧板の表面にシリコングリースを薄く塗布した。試験終了後、供試体の上部、中部、下部の含水比を測定し、結果の整理には、その平均値を用いた。

5. 実験結果および考察

豊浦珪砂および豊浦珪砂に 10%の半水石膏を混入した試料の締固め曲線を図-3 に示す。まず、半水石膏を混入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 の小さい範囲では w 値の増加に伴ってほぼ直線的に増加している。一方、 w 値が最適含水比 ($w_{opt}=16.2\%$) を超える場合には、 w 値の僅かな増加に伴い ρ_d 値は急激に低下した。締固め曲線のこのような関係は半水石膏を混入した場合も認められた。また、半水石膏添加率の増加に伴い、最適含水比は増加し、最大乾燥密度は低下する傾向が認められた。

つぎに最適含水比および最適含水比より 2%程度乾燥側で締め固めた試料に対して乾湿繰り返し作用させた場合の含水比と乾燥密度の遷移に着目する。半水石膏を混入しない場合の結果を図-4 に、半水石膏を混入した場合の結果を図-5 に示す。半水石膏を混入しない締固め土の結果に着目する (図-4) と、最適含水比付近で締め固め

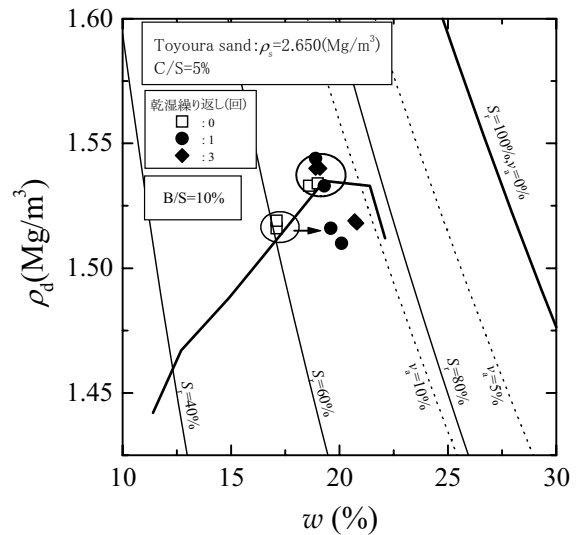


図-5 乾湿作用が半水石膏を混入した締固め土の乾燥密度と含水比に及ぼす影響 (B/S=10%)

た場合も乾燥側で締め固めた場合も、乾湿作用の繰り返し回数の増加に伴って含水比が増加するものの、乾燥密度の変化はほとんど認められていない。とくに乾燥側で締め固めた供試体の含水比は乾湿繰り返しの 1 回目において急激に増加しているのがわかる。このことは、乾燥側で締め固めた供試体は、最適含水比で締め固めた供試体比較して空隙が多く、水の浸透する余地が大きかったためと考えられる。なお、含水比が最適含水比か乾燥側であるかの違いによらず、3 回の乾湿作用を繰り返した段階で締固め土の空気量は 12%程度まで減少していることがわかる。

一方、半水石膏を混入した締固め土の結果 (図-5) では、最適含水比で締め固めた供試体の含水比は、乾湿繰

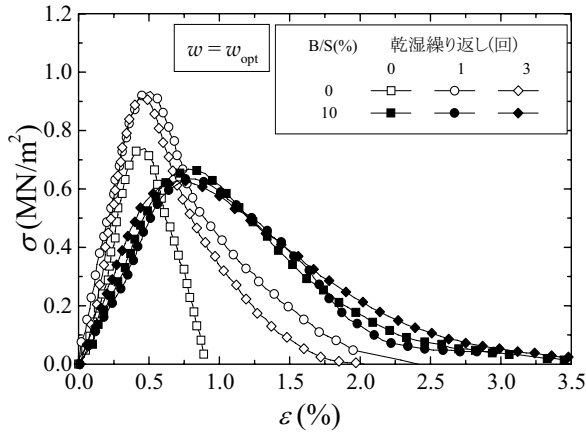


図-6 乾湿作用が代表的な応力—ひずみ曲線に及ぼす影響 (B/S=0%, B/S=10%, $w=w_{opt}$)

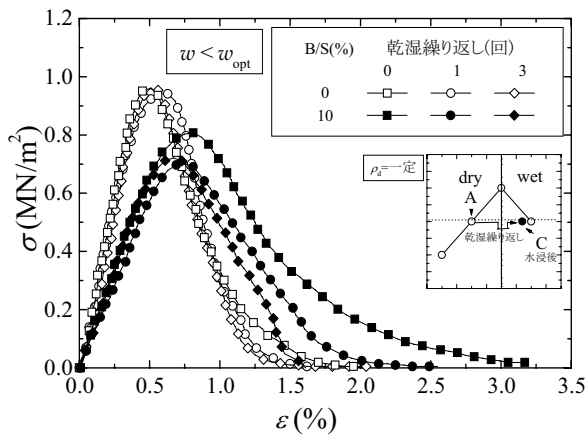


図-7 乾湿作用が代表的な応力—ひずみ曲線に及ぼす影響 (B/S=0%, B/S=10%, $w < w_{opt}$)

り返しに伴う増加があまり認められなかった。また、乾燥密度はほとんど変化していない。乾燥側で締め固めた場合には、1 回目の乾湿作用によって含水比が多少増加するものの、更なる乾湿繰り返しによっては顕著な増加は認められなかった。乾燥密度に関しては、最適含水比で締め固めた場合と同様に、変化はほとんど認められなかった。乾湿作用を3 回繰り返したときの含水比と乾燥密度に着目すると、最適含水比および乾燥側の含水比で締め固めた供試体ともに空気量12%程度まで減少していることがわかる。半水石膏を混入した場合は、混入しない場合と比較して最適含水比が増加し、その結果初期の空気量が低くなり、一方で飽和度は高くなっている。そのため、水の浸入が妨げられ、含水比があまり増加しなかったものと推察される。

一軸圧縮試験の結果に着目する。半水石膏混入の有無によって、乾湿作用が応力—ひずみ関係に及ぼす影響を図-6、図-7に示す。図-6は最適含水比で締め固めた供試体の代表的な応力—ひずみ関係であり、図-7は乾燥側で締め固めた供試体の代表的な応力—ひずみ関係である。

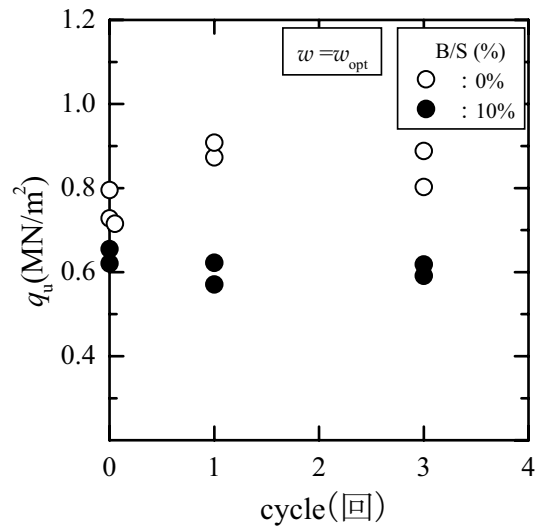


図-8 乾湿作用が一軸圧縮強さに及ぼす影響 ($w=w_{opt}$)

半水石膏を混入せず最適含水比で締め固めた場合に着目すると、応力—ひずみ曲線は、まず軸ひずみ量の増加に伴って応力値が急激に増加していき、軸ひずみ量0.5%程度で最大値に達した。応力値が最大値に達した後、軸ひずみ量のさらなる増加に伴って応力値が急激に減少した。乾湿繰り返しを作用させた場合も応力—ひずみ曲線は同様の傾向を示した。なお、乾湿繰り返しを受けた供試体の最大応力値は、乾湿作用を受けない供試体より多少大きな値となった。一方、半水石膏を10%混入した場合には、半水石膏を混入しない場合と比較して応力—ひずみ曲線の初期の傾きが小さく、最大応力値もわずかに小さな値となった。乾湿繰り返しを作用させた場合には最大応力値が僅かに低下した。

つぎに乾燥側で締め固めた供試体の応力—ひずみ関係に着目する。乾燥側で締め固めた場合にも、半水石膏混入の有無に関わらず、応力—ひずみ—曲線は、最適含水比で締め固めた場合と同様、応力値の明瞭なピークを有した。その最大応力値は最適含水比で締め固めたものより大きな値となった。乾湿繰り返しを作用させた場合には、半水石膏を混入しない供試体の最大応力値は、ほとんど変化が認められなかった。一方、半水石膏を混入した場合には、乾湿繰り返しによって僅かに最大応力値が低下した。

乾湿繰り返しが一軸圧縮強さ (q_u) に及ぼす影響を検討する。図-8、図-9は一軸圧縮強さと乾湿繰り返し回数との関係を示している。図-8は最適含水比で締め固めた供試体の結果であり、図-9は乾燥側で締め固めた供試体の結果を示している。まず、半水石膏を混入せず、最適含水比付近で締め固めた供試体の一軸圧縮強さに強さに着目する。28 日間気中養生行った直後の q_u 値は 0.7~0.8 MN/m² 程度を示しているが、乾湿作用を1 回与えた場合の q_u 値は 0.9MN/m² 程度に増加していた。また、乾湿作

用を3回繰り返した場合の q_u 値も、 $0.8\sim 0.9\text{MN/m}^2$ 程度と乾湿作用を繰り返す前の q_u 値と同程度かそれより大きな値を示した。一方で、半水石膏を混入して最適含水比付近で締め固めた供試体の q_u 値は、乾湿作用を与えない状態で $0.6\sim 0.65\text{MN/m}^2$ 程度であったが、乾湿作用を1回与えた場合には 0.6MN/m^2 程度となり、乾湿作用を3回繰り返した場合も 0.6MN/m^2 程度を維持した。

つぎに、最適含水比より僅かに乾燥側で締め固めた供試体の一軸圧縮強さに着目する。半水石膏を混入しない場合には、乾湿作用を与えていない場合の q_u 値は $0.9\sim 0.95\text{MN/m}^2$ 程度を示しており、乾湿作用を繰り返し与えても q_u 値はほとんど変化しなかった。一方、半水石膏を混入した場合には、乾湿繰り返しを与えない場合の q_u 値は 0.8MN/m^2 程度であったが、1回の乾湿作用を与えるると 0.7MN/m^2 程度に低下した。しかしながら、3回の乾湿作用を与えても 0.7MN/m^2 程度を維持している。

したがって、半水石膏を混入した締固め土は、乾湿作用によって、 $5\sim 10\%$ 程度強度が低下するものの、乾湿を繰り返してもそれ以上の強度低下は認められないことが明らかとなった。また、図-8と図-9を比較すると、最適含水比付近で締め固めることによって、乾湿作用に伴う強度低下を低減できることがわかる。

6. 結論

本研究では、半水石膏を用いた締固め土の一軸圧縮特性に及ぼす乾湿繰り返し作用の影響を検討した。本研究により得られた主要な結論を以下に述べる。

- (1) 半水石膏を混入した締固め土は、乾湿繰り返し1回目に $5\sim 10\%$ 程度の強度低下を示すが、2回目以降の乾湿繰り返しに対しては、強度低下はほとんど生じない。
- (2) 最適含水比付近で締め固めることで、最適含水比より乾燥側の含水比で締め固める場合より、乾湿繰り返しによる強度低下の影響を改善できることが明らかとなった。

したがって、半水石膏を混入した締固め土は乾湿作用によって僅かに強度が低下することから、実施工においては、このことに留意する必要がある。また、強度が低下するメカニズムに関しては未だ明らかになっていないことから、乾湿繰り返し前後の締固め土の内部構造を観察するなど更なる検討を行って、強度低下のメカニズムを明らかにしていく必要がある。

参考文献

- 1) 環境省：環境統計集 3.18 産業廃棄物の業種別廃棄量，<http://www.env.go.jp/doc/toukei/data/09ex318.xls>，2010.8.
- 2) (社)石膏ボード工業会：石膏ボード製品の生産推移，<http://www.gypsumboard-a.or.jp/6-1-03.pdf>，2010.8.
- 3) (社)石膏ボード工業会：石膏ボード排出量の推計，http://www.gypsumboard-a.or.jp/haishutsuryou_sukei.shtml，

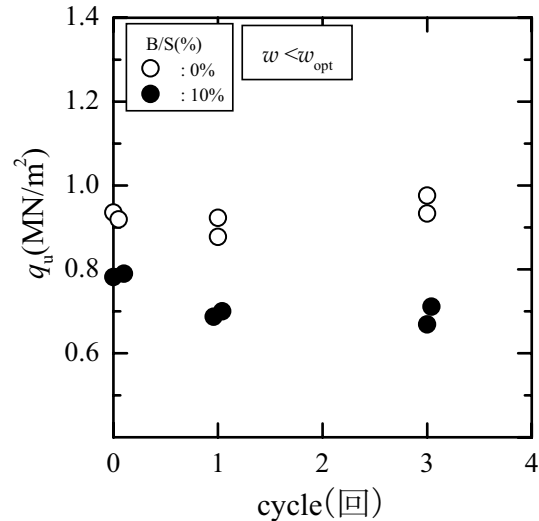


図-9 乾湿作用が一軸圧縮強さに及ぼす影響 ($w < w_{opt}$)

- 2010.8.
- 4) 環境省：環境統計集 3.21 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/data/09ex321.xls>，2010.8.
- 5) 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，pp.11-12，2003.
- 6) 鶴飼恵三：群馬大学地域共同センター報告書－石膏ボードから再生された石膏粉末の地盤改良材としての有効性，11p，2005.
- 7) 亀井健史，蓬萊秀人：フッ素汚染土壌の高炉セメントB種による不溶化技術の開発，地盤工学ジャーナル Vol.4, No.1, pp.91-98，2009.
- 8) 亀井健史，珠玖隆行：締め固めた半水石膏の一軸圧縮強さ，土木構造・材料論文集，No.24, pp.116-121，2008.
- 9) 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.
- 10) 亀井健史，小林立樹，志比利秀，松田哲夫，大内浩之：半水石膏を利用した締固め土の強度特性に及ぼす養生条件の影響，土木構造・材料論文集，No.25, pp.138-145，2009.
- 11) 無機マテリアル学会：セメント・セッコウ・石灰ハンドブック，pp.138-143，1996.
- 12) 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.
- 13) 豊浦硅石鉱業（株）：<http://www4.ocn.ne.jp/~toyoura/>.
- 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），p.202，2002.
- 15) 地盤工学会 土壌・地下水汚染の調査・予測・対策編集委員会：土壌・地下水汚染の調査・予測・対策，5.2 重金属等による汚染対策技術，地盤工学会，pp.165-185，2002.
- 16) 財団法人 日本工業規格：JIS ハンドブック 12 土木II，pp.678-681，2002.
- 17) 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め固め試験，pp.201-210，1990.
- 18) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：NEXCO 試験方法 第1編 土質関係試験方法，pp.23-25，2009.