

水浸条件が半水石膏を添加した締固め土の強度変形特性に及ぼす影響 — 廃石膏ボードのリサイクル —

Effects of Soaked Condition on Strength-Deformation Characteristics of Compacted Soil
Adding Bassanite - Recycling of Waste Plasterboard -

亀井健史	Takeshi KAMEI	(宮崎大学工学部)
志比利秀	Toshihide SHIBI	(島根大学総合理工学部)
平野 将	Masashi HIRANO	(国土交通省中国地方整備局)
大島章寛	Akihiro OHSHIMA	(島根大学大学院総合理工学研究科)
松田哲夫	Tetsuo MATSUDA	((元)西日本高速道路(株))
伊藤哲男	Tetsuo ITO	(西日本高速道路(株))
出口宗浩	Munehiro DEGUCHI	(西日本高速道路(株))

近年、廃石膏ボード処分量の増大に伴うその処分コストの増加や最終処分場の残余容量の逼迫等、廃石膏処分に関する種々の問題が発生してきている。一方、路床土の設計では CBR 試験が行われるが、CBR 試験では一軸圧縮試験と比較して多くの試料が必要である。本研究では、廃石膏の路床土への有効利用を想定し、種々の半水石膏添加率で調整した試料の締固めを行い、7日気中養生および CBR 試験と同等の3日気中4日水中養生で作製した供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、半水石膏添加率や養生条件の違いがその強度変形特性に及ぼす影響を明らかにした。また、本実験結果と CBR 試験結果とを比較し、廃石膏から再生した半水石膏の路床土改良材としての有効性を検討している。

キーワード: 半水石膏, 締固め土, 養生条件, 強度変形特性 (IGC: D06, D09, T14)

1. はじめに

廃石膏ボードを埋め立て処分すると、非常に毒性の高い硫化水素ガス (H_2S) が発生することがある。実際に、過去の安定型処分場や、不法投棄などによって高濃度の硫化水素が発生しているという報告例もある。これは、廃石膏ボードを埋め立て処分する際に、廃石膏ボードに含まれる紙などの有機物が分解され、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起因する。廃石膏の埋め立て処分にはこのような危険が伴うことから、環境省は平成 19 年 4 月、これまでの安定型処分を全面禁止とし、廃石膏ボードは紙と石膏に分離した後、ともに管理型処分場に廃棄することが義務付けられた。この管理型処分場は、一般の安定型処分場と比較してコストが高いことに加え、最終処分場をすべて併せてもその残余年数は少なく、非常に逼迫しているという問題もある。一方、石膏ボードは、加工性、耐火性、遮音性に優れ、安価であることから、主に壁や天井の内装下地材として広く利用されている。それに伴って廃石膏ボードの排出量も年々増加してきており、石膏ボード工業会は 2007 年には約 152 万トンであった排出量は、2013 年には約 200 万トンに急増すると推計している¹⁾。したがって、廃石膏の埋立て処分に代わる新たな用途開発が重要となっている。

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 3/2 分子の結晶水を失って半水石膏 (別名、焼石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)) へ変化しはじめ、120℃~150℃程度で加熱することにより、最終的にその大半が半水石膏となる (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いる。廃石膏ボードから紙と分離して得られる廃石膏も同様の性質を有していることから、このような硬化作用が地盤改良効果に期待できる。また、石膏は中性無害であり、従来使用されてきた強アルカリの石炭やセメント系固化材に比べ、環境にやさしい固化材といえる。

このような背景から近年、締固めでの地盤改良材として半水石膏の利用が検討されており、砂に添加して締め固めた場合には少量の添加では強度が低下するものの添加率を増大させることによって強度が増加すること、特に粘土に添加した場合には添加率によらず強度改善が認められることが報告されている²⁾。また、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も明らかとなった³⁾。一方、半水石膏を添加して砂試料を締固める際に石炭灰も混入することによって、半水石膏添加率が少ない場合でも強度増加が得られるとの報告もある⁴⁾。

さらに、半水石膏を添加した締固め土を 28 日間水中養生した場合の一軸圧縮強さについて検討されており、その一軸圧縮強さは 28 日間気中養生した場合と比較して 2 割から 5 割程度低下することが報告されている⁵⁾。

しかしながら、この研究では、気中養生する期間を設けず締固め後すぐに水浸させており、かなり厳しい条件と考えられる。安定処理土の突固めによる供試体作製においては、土構造物を構成している安定処理土が長年月の間に降水や地下水などの影響を受けると想定して、通常は空気養生してから水浸養生を行う⁶⁾。路床土を対象としたCBR試験では、セメントを添加する場合には、3日気中4日水浸養生がなされている⁷⁾。

そこで本研究では、種々の半水石膏添加率で調整した締固め土を3日気中4日水中養生した供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、半水石膏添加率はその強度変形特性に及ぼす影響を明らかにしている。なお、重金属の溶出を抑制するために高炉セメントB種を僅かに添加している。また7日気中養生した供試体に対しても一軸圧縮試験を行い、両者を比較することによって水浸条件が一軸圧縮特性に及ぼす影響を定量的に評価している。さらに既往のCBR試験結果との比較検討も行った。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

半水石膏（硫酸カルシウム・1/2水和物（ $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ））は、建築資材の廃材として排出される廃石膏ボードを破砕分離機で紙と石膏に分離した後、石膏部分（硫酸カルシウム・2水和物（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ））を細粒化し、約130~150℃で加熱処理したものであり、一般的には焼石膏と呼ばれている。本研究では、日工（株）で生産された粉末状のものをを用いた⁸⁾。半水石膏の物理特性を表-1⁸⁾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（ヒ素（As）、鉛（Pb）、カドミウム（Cd）、六価クロム（Cr(VI)）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、重金属の溶出に十分な注意を払う必要がある。なお、本研究で用いた半水石膏に対する主な重金属（ヒ素（As）、鉛（Pb）、カドミウム（Cd）、六価クロム（Cr(VI)））の溶出試験結果を表-2に示す。今回用いた半水石膏の溶出試験結果は環境基準値を十分に下回っており環境への負荷が小さいことがわかる。半水石膏添加率（B/S；B：半水石膏，S：豊浦珪砂）は、後述する砂に対して0%、10%、20%の3配合を設定した。

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。この砂は、標準網ふるい300 μm 残分が1%以下、106 μm 残分が95%以上に粒度調整されている⁹⁾。砂の基本物理特性を表-3に示す。また、任意の含水比を得るため、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が混入していない蒸留水を使用した。

本研究では、廃石膏からの重金属の溶出抑制効果¹⁰⁾や強度特性、経済性を考慮し、高炉セメントB種を安定材として試料に添加することとした。なお、セメントを

表-1 半水石膏の物理特性⁸⁾

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	1.04

表-2 土壌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（半水石膏）

項目	測定値 [mg/ℓ]	環境基準値 [mg/ℓ]	分析方法
カドミウム	<0.005	<0.01	JIS K 0102 55.2
鉛	<0.005	<0.01	JIS K 0102 54.2
砒素	<0.005	<0.01	JIS K 0102 61.3
六価クロム	0.025	<0.05	JIS K 0102 65.2.1

表-3 豊浦珪砂の物理特性

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'
2.650	0.125	0.180	0.235	0.260	2.08	0.997

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、添加量は少量（砂に対して5%、C/S=5%；C：高炉セメントB種，S：豊浦珪砂）に止めた。溶出試験結果は、半水石膏に5%のセメントを添加した場合においても半水石膏のみの場合（表-2）と同程度もしくはそれ以下の値が得られている。

2.2 実験方法

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、半水石膏添加率(B/S)は0%、10%、および20%の3配合を対象とした。半水石膏は加水すると二水化するため、試料の使用方法は非繰返し法を選択した。供試体作製に際しては、鑄鉄製の二つ割りモールド（ $\phi=50\text{mm}$ ， $H=100\text{mm}$ ）を用いて、1.5kgランマー、落下高さ20cmで、3層、40回/層の突固めによる締固め（締固め仕事量： $E_c \approx 1800\text{kJ}/\text{m}^3$ ）を行った。なお、この締固め仕事量は、路床の設計に用いる設計CBR試験で用いられる締固め仕事量と同等の値である。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。突き固めた供試体を丁寧にモールドから取外し、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、供試体を3日気中4日水中養生、あるいは7日気中養生を行った。なお、気中養生の際は、供試体をポリエチレン製の袋で被い、恒温室（20

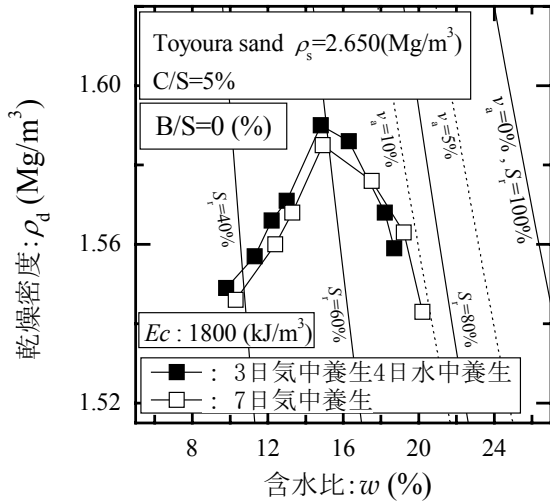


図-1 締固め曲線 (B/S = 0%)

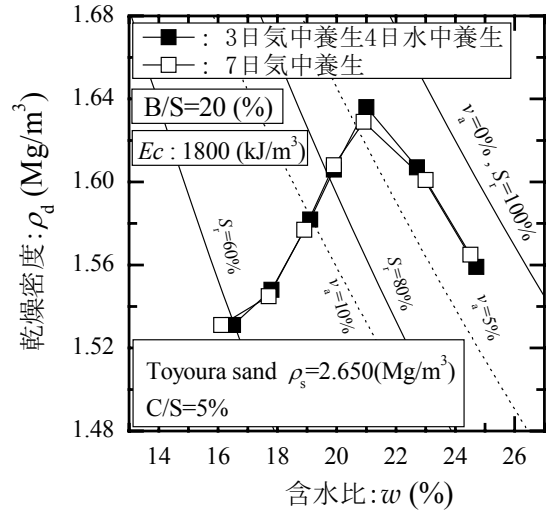


図-3 締固め曲線 (B/S = 20%)

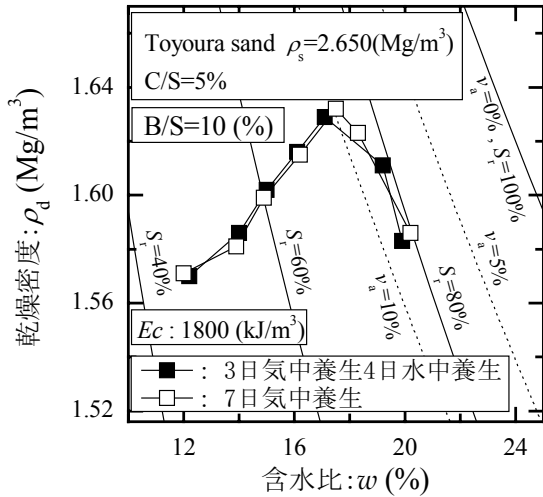


図-2 締固め曲線 (B/S = 10%)

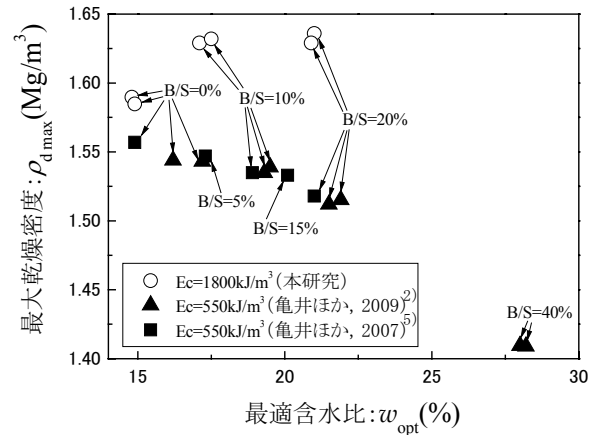


図-4 最大乾燥密度と最適含水比の関係

±2℃) に静置した。

所定の養生過程が終了した供試体に対して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、その平均値を試験時の含水比とした。

3. 実験結果および考察

図-1, 2, 3 は、それぞれ豊浦珪砂に半水石膏を 0%, 10%, 20% 添加した締固め土の締固め曲線を示している。なお、図には 1 つの配合条件につき 12~15 点の実験結果から 7~8 点の代表的な値を選定し、プロットしている。白抜きのプロット(□)が 3 日気中養生 4 日水中養生に用いた試料の締固め曲線であり、黒のプロット(■)が 7 日気中養生に用いた試料の結果である。図より、各養生条

件用に作製した試料の含水比と乾燥密度の値は、多くが同程度の値を示しており、得られた締め固め曲線はほぼ一致している。このことから各養生条件に用いられる作製時の締固め土は、ほぼ同様の状態であったと考えられる。

まず、B/S=0%の場合での締固め曲線に着目すると(図-1)、含水比の増加に伴い乾燥密度が増加していき、 $w = 15.0\%$ 程度で最大の乾燥密度 ($\rho_d = 1.585 \sim 1.590 \text{ Mg/m}^3$) に達する。乾燥密度は含水比の更なる増加に伴って減少に転じている。他の半水石膏添加率(図-2, 図-3)においても同様の变化傾向が認められ、B/S=10%の場合の最適含水比は 17.0~17.5%で最大乾燥密度が 1.630 Mg/m^3 程度、B/S=20%の場合には最適含水比が 21.0%程度で最大乾燥密度が $1.630 \sim 1.635 \text{ Mg/m}^3$ 程度となった。このような半水石膏添加率の増加に伴う最適含水比と最大乾燥密度の関係を図-4 に示す。図より、半水石膏添加率の増加に伴い、最適含水比が増加し、最大乾燥密度が増加する傾向が認められる。既往の研究では半水石膏添加率の増加に伴って、含水比は増加するものの、最大乾燥密度は低下するとの報告^{2) 5)}があるが、その研究では締め固め仕事量は 550 kJ/m^3 であり、本研究の締め固め仕事量

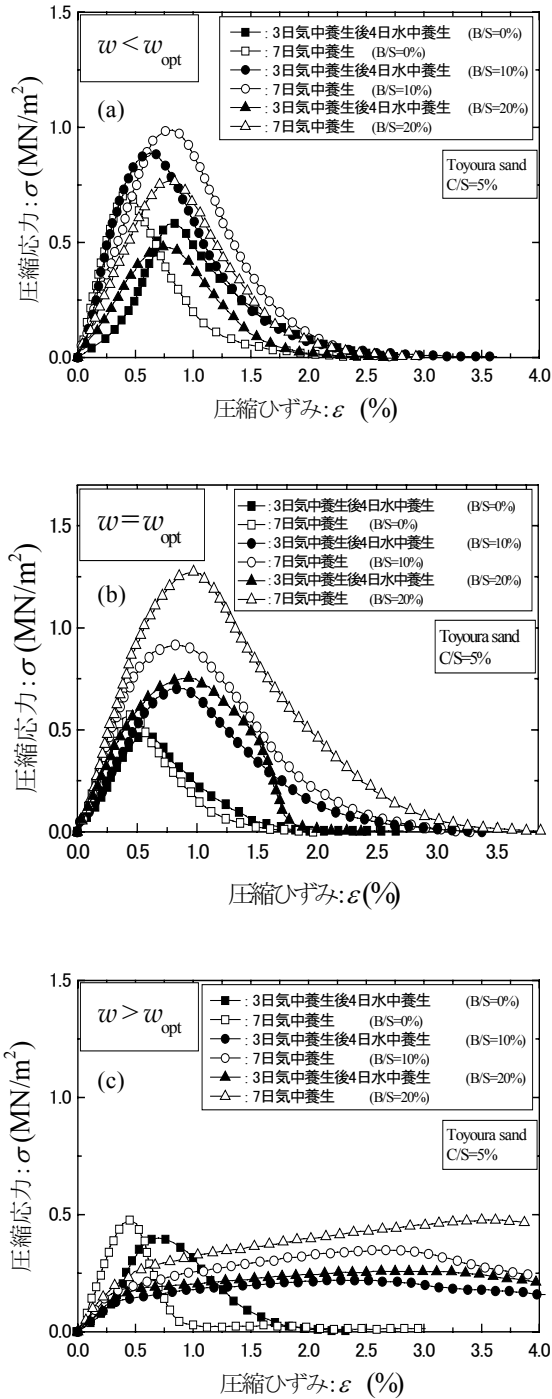


図-5 代表的な応力-ひずみ曲線

(1800kJ/m³)よりも小さい。したがって、締固め仕事量が異なる場合には、半水石膏添加に伴う最適含水比と最大乾燥密度の関係が変化する可能性が考えられる。

つぎに、半水石膏を添加して締め固めた試料の代表的な応力-ひずみ曲線を図-5に示す。(a)は含水比が最適含水比より小さい乾燥側の試料の場合であり、(b)は最適含水比付近で締め固めた試料の結果、(c)は含水比が最適含水比より大きい湿潤側で締め固めた試料の結果である。まず、いずれの含水比およびいずれの配合条件においても、7日気中養生した試料と比較して、3日気中4日水中養生した試料のピーク値が小さいことがわかる。

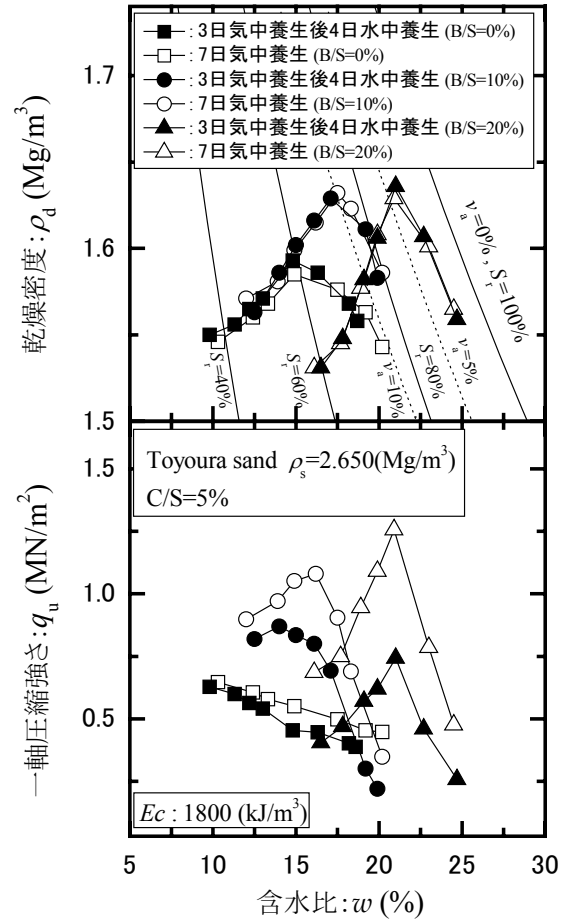


図-6 一軸圧縮強さと含水比の関係と締め固め曲線

すなわち、水浸の影響によって一軸圧縮強さが低下することがわかる。応力-ひずみの挙動に着目すると、まず、半水石膏を添加しない試料、および最適含水比以下の含水比で締め固めた試料の場合には、応力値はひずみの増大に伴って徐々に増加し、最大値に達する。ひずみの更なる増大に伴い、応力値は急激に低下している。一方、最適含水比より大きな含水比で締め固めた試料の応力-ひずみ曲線は、ひずみの増大に伴い応力値は徐々に増加していき、3~4%程度のひずみまで明瞭なピークが認められず、応力値が最大応力値近傍を維持した。半水石膏をセメント安定処理土に混入した場合も、応力値が最大応力値近傍を維持するような粘り強さが確認されている¹⁾が、締め固め土の場合には湿潤側で締め固めた場合にのみ確認されることがわかる。

締め固め時の含水比と一軸圧縮強さの関係に着目する(図-6)。図より、半水石膏を添加しない場合には、一軸圧縮強さは、養生方法の違いによらず含水比の増加に伴ってほぼ直線的に低下している。一方、半水石膏を添加した場合の一軸圧縮強さは、乾燥側では含水比の増加に伴って徐々に増加していき、最適含水比もしくはそれより僅かに小さな含水比において最大値となるものの、含水比を更に増加させると急激に低下した。つぎに水中養生に伴う強度低下(図中、同程度の含水比における白抜きプロット(□)と黒のプロット(■)の差)に着目すると、

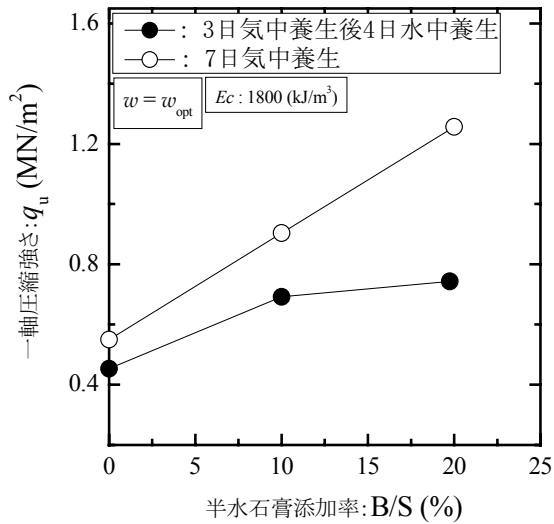


図-7 最適含水比での一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係に及ぼす養生条件の影響

半水石膏を添加していない場合には、一軸圧縮強さは低下量が大きなところで 0.1MN/m^2 程度低下している。一方、 $B/S = 10\%$ の場合には一軸圧縮強さは最大 0.3MN/m^2 程度、 $B/S = 20\%$ の場合には最大で 0.5MN/m^2 程度低下した。したがって、半水石膏を添加した締固め土の一軸圧縮強さは、水浸の影響を受けやすく注意が必要であることが示唆される。このことは、最適含水比における一軸圧縮強さに着目しても良くわかる。図-7に最適含水比での一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係に及ぼす養生条件の影響を示す。図より、気中養生した場合には、一軸圧縮強さは半水石膏添加率の増加に伴い直線的に増加する傾向を示しているが、3日気中4日水中養生した場合には、半水石膏添加率の増加に伴う一軸圧縮強さの増加率は、気中養生した場合と比較して小さい。このことから、半水石膏添加率の増加に伴って、水浸に伴う強度低下の影響を受けやすくなることが示される。しかしながら、水浸の影響を受けたとしても、得られる一軸圧縮強さは半水石膏を添加しない場合よりも大きい事から、あらかじめ強度低下を考慮することによって、強度改善が可能であることがわかる。とくに、図-6からもわかるように、高い含水比を有する砂地盤の場合には、半水石膏を添加することによってその最適含水比を高含水比側に遷移させることが可能となり、一軸圧縮強さを改善できることから非常に有効であると考えられる。

3日気中4日水中養生に伴う含水比の変化に着目し、一軸圧縮試験時の含水比と乾燥密度および一軸圧縮強さの関係を図-8~10に示す。なお、各図白抜きプロット(□)は、3日気中4日水中養生した試料の一軸圧縮強さを締固め時の含水比で整理した関係であり、黒のプロット(■)は、3日気中4日水中養生した試料の一軸圧縮強さを一軸圧縮試験時の含水比で整理した関係を示している。半水石膏添加率の違いによらず、湿潤側で締め固めた場合には、水中養生に伴って含水比に僅かな増加が認められる程度であった。乾燥側で締め固めて水中養生し

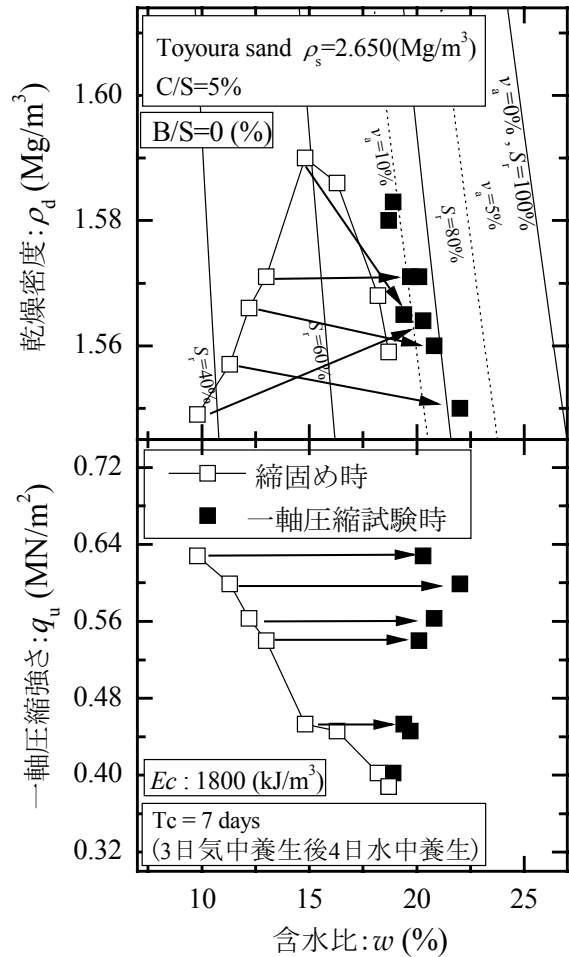


図-8 一軸圧縮試験時の含水比と乾燥密度および一軸圧縮強さの関係 (B/S = 0%)

た場合には、含水比は著しく増加しており、湿潤側で締め固めて水中養生した場合と同程度の値となった。すなわち、湿潤側で締め固めても、乾燥側で締め固めても、水中養生後は得られる乾燥密度と含水比の関係は同様な結果となることがわかる。また、図-6においても示したように、乾燥側の含水比で締め固めた供試体の一軸圧縮強さは、半水石膏を混入しない場合には締固め時の含水比が減少するのに伴って増加するが、半水石膏を混入した場合には最適含水比もしくはそれより僅かに小さな含水比において最大値となり、含水比が減少するのに伴って減少する。水浸に伴うこのような含水比と一軸圧縮強さの変化を踏まえて、一軸圧縮試験時の含水比と一軸圧縮強さの関係に着目すると、半水石膏を混入しない場合には一軸圧縮強さは含水比の増加に伴って増加する傾向を示すが、半水石膏を混入した場合には含水比の増加に伴って一軸圧縮強さが減少することがわかる。一方、湿潤側で締め固めて水中養生した場合と比較して、乾燥側で締め固めて水中養生した場合の一軸圧縮強さは大きな値が得られている。このような強度の違いは、両者の構造の違いが一要因として考えられる。すなわち、乾燥側および湿潤側で締め固めた際に形成される構造が異なっており、水中養生においても構造の違いが維持されたことが推察される。今後は SEM 等を用いて、締固めに伴っ

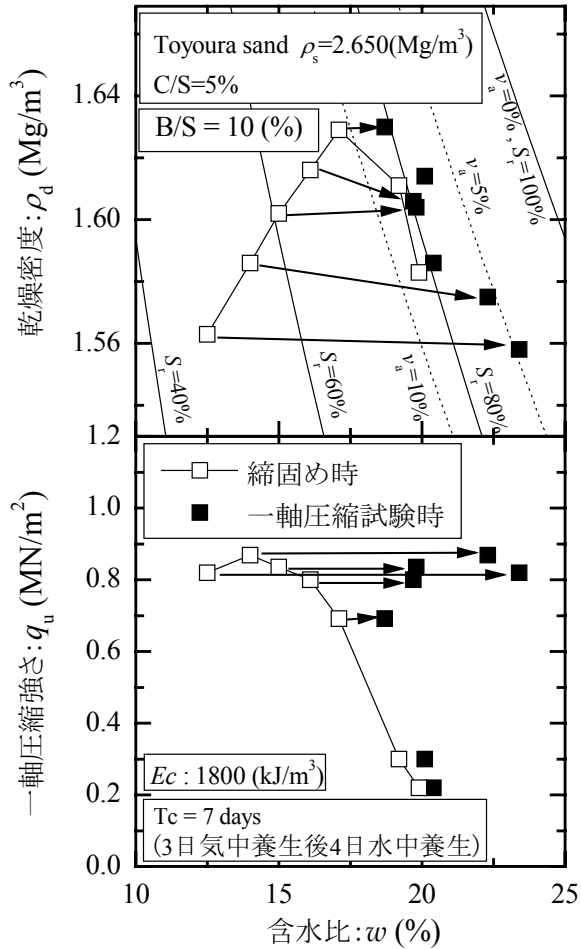


図-9 一軸圧縮試験時の含水比と乾燥密度および一軸圧縮強さの関係 (B/S = 10%)

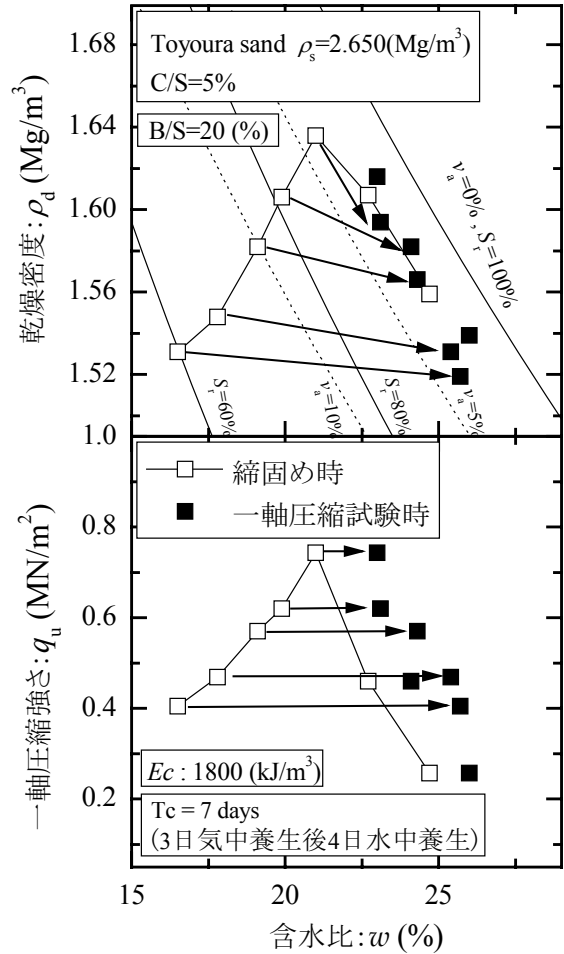


図-10 一軸圧縮試験時の含水比と乾燥密度および一軸圧縮強さの関係 (B/S = 20%)

て形成される内部構造を確認し、強度発現のメカニズムを明らかにする必要がある。

舗装の設計のために路床の設計CBR値が用いられるが、このときの締固め仕事量と本研究で用いた締固め仕事量は等しい。既往のCBR試験結果と本研究の結果との比較を試みる。なお、CBR試験用供試体は、鋼製のモールド ($\phi=150\text{mm}$, スペーサーディスク挿入時の容量 $2209 \pm 26\text{cm}^3$) を用いて、4.5kgランマー、落下高さ 45cmで3層、67回/層の突固めによる方法 (締固め仕事量: $E_c \approx 1800\text{kJ/m}^3$) によって締固められている。まず、一軸圧縮試験用供試体から得られた締固め曲線とCBR試験用供試体から得られた締固め曲線の比較を行う (図-11)。図より、半水石膏を添加しない場合には、両者の間に明瞭な違いは認められないが、半水石膏を添加した場合には、CBR試験用供試体から得られた結果と比較して、一軸圧縮試験用供試体から得られた最適含水比は増加し、最大乾燥密度は減少する傾向が認められた。このような変化の一要因として、ランマー1回の落下による仕事量の違いが考えられる。すなわちCBR試験用のランマーは質量 4.5kg、落下高さ 45cmと、一軸圧縮試験用供試体の場合 (質量 1.5kg、落下高さ 20cm) と比較して大きく、一回の落下で加わる仕事量が大きいため、比較的軟らかい半

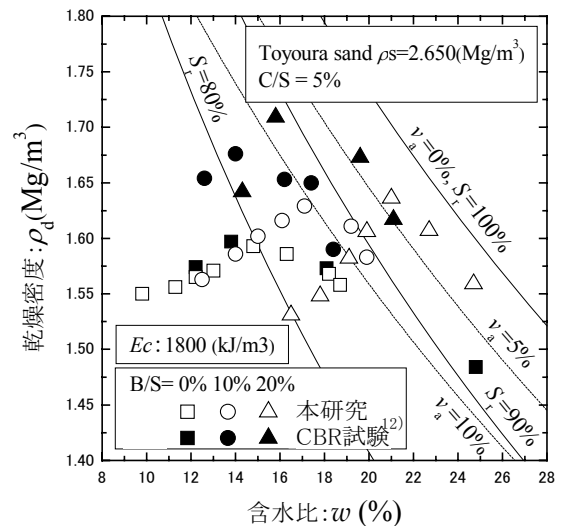


図-11 一軸圧縮試験用供試体および CBR 試験用供試体から得られた締固め曲線

水石膏を間隙に充填させる効果が大きかったものと推察される。その結果、間隙から空気と水が排出され最適含水比が低下し、最大乾燥密度が増加したものと考えられる。

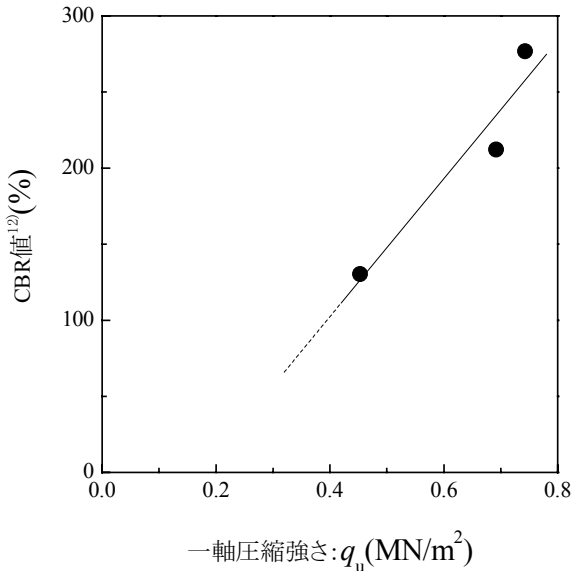


図-12 最適含水比での一軸圧縮強さと CBR 値の関係

つぎに、半水石膏添加率を変えて最適含水比で締め固めた試料の q_u 値とCBR値の関係を図-12に示す。図より、 q_u 値の増加に伴ってCBR値も増加する傾向が認められる。しかし、データ数が少ないのでその関係を提示するまでには至らなかった。今後は更にデータの集積を進めることで、 q_u 値とCBR値の間に明瞭な関係が得られれば、 q_u 値からCBR値を簡便に予測することが可能となるかもしれない。

4. 結論

本研究では、種々の半水石膏添加率で調整した締固め土を3日気中4日水中養生した供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、半水石膏添加率がその強度変形特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、7日気中養生した試料に対しても一軸圧縮試験を行い、両者を比較することによって水浸条件が一軸圧縮特性に及ぼす影響を定量的に評価した。本研究で得られた主要な結論を以下に列記する。

- (1) 半水石膏添加した締固め土の一軸圧縮強さは、水浸の影響を受けやすく、半水石膏添加率の増加に伴って水浸に伴う強度低下が顕著となった。しかしながら、水浸に伴う強度低下をあらかじめ考慮すれば、半水石膏を添加することで強度改善できることが明らかとなった。とくに高い含水比を有する場合の一軸圧縮強さの改善に半水石膏の添加が有効であろう。
- (2) 半水石膏を添加した場合には、締固めエネルギーや締固め方法の違いで得られる最大乾燥密度と最適含水比の関係が変化する可能性があるので注意を要する。また、一軸圧縮強さ q_u 値の増加に伴いCBR値も増加する傾向が認められた。

以上のことから、廃石膏から再生した半水石膏の路床土改良材としての有効性を示唆している。また、今後は

異なる配合条件下での一軸圧縮試験結果とCBR試験結果のデータの集積を進めることで、一軸圧縮強さ q_u 値とCBR値との間に明瞭な関係が得られることが推定できる。一軸圧縮強さとCBR値の間に明瞭な関係が得られれば、試料を大量に使用し比較的手間がかかるCBR試験を実施する代わりに、一軸圧縮強さからCBR値の簡便な推定値を得ることが可能となり、地盤工学的に非常に有益であろう。

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) (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_suikei.shtml，2010.6.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 亀井健史，大島章寛，志比利秀：半水石膏と石灰灰を添加した締固め土の一軸圧縮特性，地盤と建設，Vol.27，No.1，pp.97-104，2009.
- 5) 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.
- 6) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，第5編 安定化試験，安定処理土の突固めによる供試体作製，pp.236-245，1990.
- 7) 日本道路協会：舗装設計便覧，pp.60-84，2006.
- 8) 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.
- 9) (株)豊浦硅石鉱業：<http://www4.ocn.ne.jp/~toyoura/>，2009.6.
- 10) 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.
- 11) 例えば，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.
- 12) 塚本真希：廃石膏ボードから再生した半水石膏を利用した締固め土の CBR 値，島根大学総合理工学部地球資源環境学科卒業論文，59p.，2010.

(2010年6月28日 受付)

