

二水石膏添加が締固め土の締固め特性と CBR 値に及ぼす影響 － 廃石膏ボードの有効利用 －

Effect of Gypsum Addition on Compaction Characteristics and CBR Value of Compacted Sand － Utilization of Waste Plasterboard －

志比利秀 Toshihide SHIBI (島根大学総合理工学部)
亀井健史 Takeshi KAMEI (宮崎大学工学部)

近年、廃石膏ボード排出量の増大と最終処分場の残余量の逼迫に伴い、廃石膏は埋立て処分に代わる新たなリサイクル市場の開拓が緊急の課題となっている。一方、土工事においては、良質な地盤材料の枯渇化といった問題も指摘されている。そこで本研究では、廃石膏の路床土への有効利用を想定し、砂に少量のセメントを添加した試料に廃石膏ボードを粉砕処理した二水石膏を種々の添加率で混合して締固めを行い、3日気中4日水中養生した供試体に対して CBR 試験を実施した。その結果、二水石膏添加率はその締固め特性および CBR 値に及ぼす影響を明らかにしており、再利用の必要性に迫られている廃石膏が路床土の混合材料として適用可能か検討している。

キーワード：二水石膏，締固め土，CBR

(IGC : D06, D09, T14)

1. はじめに

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、加工性、耐火性、遮音性に優れ、安価であることから、戦後の住宅復興需要に支えられて我が国に広く普及してきており、その後も一貫してその生産量を増大させてきた¹⁾。その原料石膏は、火力発電所等からの排煙脱硫石膏等の国内副産石膏を主とし、被覆用のダンボールには新聞紙等の回収古紙が使用することから、廃棄物の少量化に繋がり、地球に優しい材料と考えられてきた。

近年、戦後に建設された石膏ボードを内装材に利用した家屋の解体の増加に伴い、石膏ボードの廃棄物(以下、廃石膏ボード)の排出量が増大してきており、石膏ボード工業会は2009年には約104万トンであった排出量は、2025年には約200万トンを超え、2038年には約300万トンに達すると推計している¹⁾。この廃石膏ボードを埋立て処分すると、廃石膏ボードに含まれる紙などの有機物が分解されて還元状態となる場合が多く、このとき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が発生することがある。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処分費用が高いことに加え、最終処分場をすべて併せてもその残余年数は少ないという問題²⁾もある。したがって、廃石膏の埋立て処分に代わる新たな有効利用方法を模索する必要がある。

社会基盤整備に欠かせない土工事においては、その工

事の規模が非常に大きいことから土砂等の大量の天然資源を必要とするが、近年は良質な地盤材料が枯渇してきており、その安定供給は社会基盤の発展においても非常に重要である。

このような現状のもと、近年では、廃石膏ボードを石膏と紙に分離し、分離された廃石膏を粉砕加熱処理することによって、吸水すると極めて短時間で硬化する性質を有する半水石膏を生成し、これを地盤改良材として有効利用しようとする試みがなされている。例えば、半水石膏の軟弱地盤改良材としての有効性について検討されており、セメント安定処理土に半水石膏を混入した場合には、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ことが明らかにされている³⁾。また、砂や粘土を締め固める際の半水石膏の地盤改良材としての有効性についても検討されており、とくに砂に少量のセメントを添加した試料に半水石膏を添加して締め固めた供試体は、半水石膏添加率の増加に伴って最大乾燥密度が低下するとともに最適含水比が増加することが明らかとなった⁴⁾。一軸圧縮強さについては、半水石膏添加率10%程度までは減少するものの、10%を超える半水石膏添加率の場合には改善することが報告されている⁴⁾。

一方、半水石膏を添加して締め固めた後、3日気中4日水中養生した砂供試体の一軸圧縮特性について検討されており、同じ配合条件で7日間気中養生した場合の一軸圧縮強さと比較すれば減少が認められるものの、半水石膏を添加しない場合の一軸圧縮強さと比較するならば一軸圧縮強さが改善されることが報告されている⁵⁾。しかしながら、半水石膏の吸水に伴って急速に硬化する性質は、施工現場において半水石膏を地盤に添加する場合は非常に有利であるが、近くに設置したプラントで混合後現地にダンプ等で搬送する場合には、搬送中に固化してしまうことがあり、施工が困難となるという問題がある。

廃石膏を地盤材料として適用する場合には、重金属等の溶出の懸念があることから、その不溶化技術が重要となる。例えば、半水石膏に高炉セメント B 種を混合して固化させることによりフッ素の溶出を抑えられること⁶⁾や石炭灰をも混入することでその溶出濃度をさらに低減できること⁷⁾が報告されている。さらに、室内試験と現場から得られた強度の対応性が良く、その溶出試験結果も環境基準を満足することが報告されており、学際的な面から半水石膏の地盤改良材としての有効性が指摘されている⁸⁾。

そこで本研究では、廃石膏に粉砕処理のみを施した、吸水に伴う急速な硬化を示さない二水石膏の状態で砂試料に添加して締固めた供試体を作成し、CBR 試験を実施した。その結果、二水石膏添加が締固め曲線およびその CBR 値に及ぼす影響を明らかにしており、廃石膏の路床土としての適応性について検討している。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

本研究で用いた二水石膏（硫酸カルシウム・二水和物（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ））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、石膏部分を細粒化したものである。二水石膏の物理特性を表-1 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、二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。表-2 は、廃石膏から製造された半水石膏に対する主な重金属の溶出試験結果を示している。この結果は、半水石膏に対する溶出試験結果であるが、半水石膏は吸水すると急速に二水石膏化することから、二水石膏の溶出試験とも考えることができる。表より、いずれの項目も環境基準値を十分に満足しており、環境への負荷は小さいことがわかる。また、試料に少量のセメントを添加することで、溶出が懸念される重金属を固定化させ、溶出が抑制できる^{6), 7), 9)}。本研究では、この重金属溶出の抑制効果を考慮し、セメントを 5% 添加している。したがって、二水石膏を用いた場合も環境基準値は満足できるものと考えている。

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。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¹⁰⁾。豊浦珪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。本研究では二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、強度特性や廃石膏からの重金属の溶出抑制効果^{6), 7), 9)}、経済性を考慮し、高炉セメント B 種を

表-1 二水石膏の物理特性

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'
2.320	0.100	0.180	0.280	0.300	3.00	1.08

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 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
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
フッ素	<0.0005	<0.0005	<0.8
ホウ素	<0.0005	<0.0005	<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

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。

2.2 実験方法

試料の配合条件は、豊浦珪砂に対する二水石膏の添加率 (G/S; G: 二水石膏) として、0%, 5%, 10%, および 20% の 4 配合を設定するとともに、前述したように高炉セメント B 種を 5% 添加することとした。含水比の設定に際しては、各配合条件に対して、高含水比状態から低含水比状態へと 5~10 通り程度の含水比を設定した。

供試体作製に際しては、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: $E_c \approx 1800\text{kJ}/\text{m}^3$ ）によって締固めを行った^{11), 12)}。なお、試料は、添加した少量のセメントが水和反応するため、繰り返し利用することが困難である。したがって、本研究では非繰返し法を

選択した。締固め後、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。締め固められた供試体は、モールドごとにポリエチレン製の袋で被い、恒温室（ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）で3日間養生した後、袋から取り出し、4日間の吸水膨張試験に供した^{11), 12)}。吸水膨張試験が終了した供試体は、水を除いて15分間静置させた後、貫入試験に用いた。

本研究では、二水石膏を添加した締固め土の CBR 値を得るために貫入試験¹¹⁾を行った。貫入試験は、1mm/minの速さで貫入するように変位を制御した。また、強度・変形特性に及ぼす端面摩擦の影響を軽減するために、貫入ピストンの端面にシリコングリスを薄く塗布した。試験後には、供試体表面から0.5cm程度の深さの位置から試料を採取して含水比を測定し、試験時の含水比とした。

3. 実験結果および考察

図-1は、豊浦珪砂に二水石膏を0%、5%、10%、および20%添加した締固め土の締固め曲線を示している。なお、各二水石膏添加率に対して7~12通りの含水比で供試体を作成しており、図には代表的な値として6~8通りの結果を選定し、プロットしている。また、この図に示されたゼロ空気間隙曲線（ $S_r=100\%$, $v_a=0\%$ ）、飽和度一定曲線（ $S_r=\text{const.}$ ）、および空気量一定曲線（ $v_a=\text{const.}$ ）は、豊浦珪砂の土粒子密度を用いて作成した。

まず、二水石膏を添加していない $G/S=0\%$ の場合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、 $w = 14.0\%$ 程度で最大の乾燥密度（ $\rho_{d\text{max}} = 1.600 \text{ Mg/m}^3$ 程度）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。二水石膏を添加した場合も同様の傾向が認められ、 $G/S=5\%$ では最適含水比が14.2%で最大乾燥密度が1.615 Mg/m^3 程度、 $G/S=10\%$ では最適含水比が14.3%で最大乾燥密度が1.645 Mg/m^3 程度、 $G/S=20\%$ では最適含水比が16.6%で最大乾燥密度が1.640 Mg/m^3 程度となった。このような二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-2に示す。図より、二水石膏添加率が10%程度までは、最大乾燥密度が1.600 Mg/m^3 から1.645 Mg/m^3 へと大きく増加するものの、最適含水比には顕著な増加は認められていない。一方、二水石膏添加率を10%から20%へと増加させた場合には、最大乾燥密度は大きくならないものの、最適含水比が急増している。この一因としては、二水石膏が豊浦珪砂と比較して多少幅広い粒径を有していることと比較的軽量であることが関係している（表-1、表-3）。すなわち、二水石膏添加率が少ない場合は、砂のみの場合の間隙に二水石膏が入り込むことにより、より密な構造が出来上がる。しかしながら、二水石膏添加率が増加すると、間隙を埋める作用に加えて、豊浦珪砂と比較的軽量の二水石膏の置換の割合が増加し、乾燥密度の増加が抑制されるためと考えられる。

既往の研究において、締固め仕事量が異なると最適含

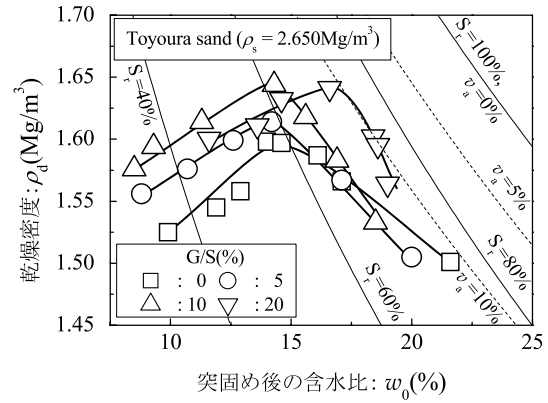


図-1 締固め曲線

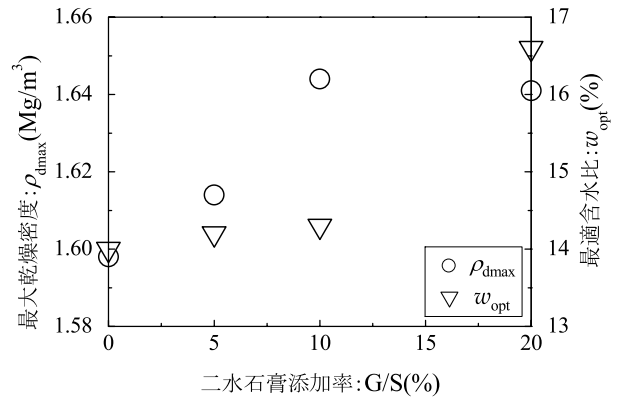


図-2 二水石膏添加率が最大乾燥密度と最適含水比に及ぼす影響

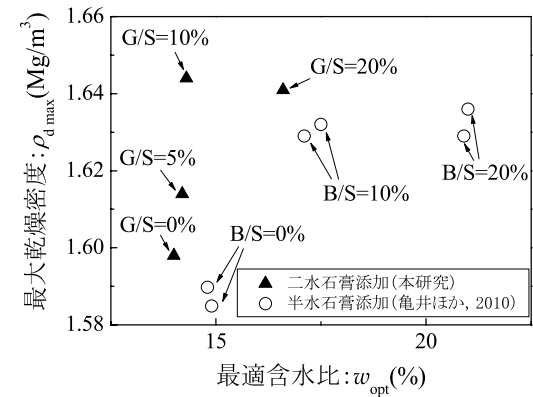


図-3 最大乾燥密度と最適含水比の関係

水比と最大乾燥密度の関係が変化する可能性が指摘されている⁵⁾。そこで、添加した材料は半水石膏であるが、本研究と等しい締固め仕事量で締め固めた場合の最適含水比と最大乾燥密度の関係と本研究の結果を比較する（図-3）。ここで、B/S（B：二水石膏）は半水石膏添加率を表す。なお、半水石膏は吸水に伴い二水石膏に転化する。図-3からわかるように、両者の変化は定性的には似ており、石膏添加率の増加に伴い乾燥密度が増加するが、添加率が20%に達すると乾燥密度の値に変化がほとんど認められなくなった。一方、最適含水比も石膏添加率の増加に伴い増加する傾向が認められるが、二水石膏

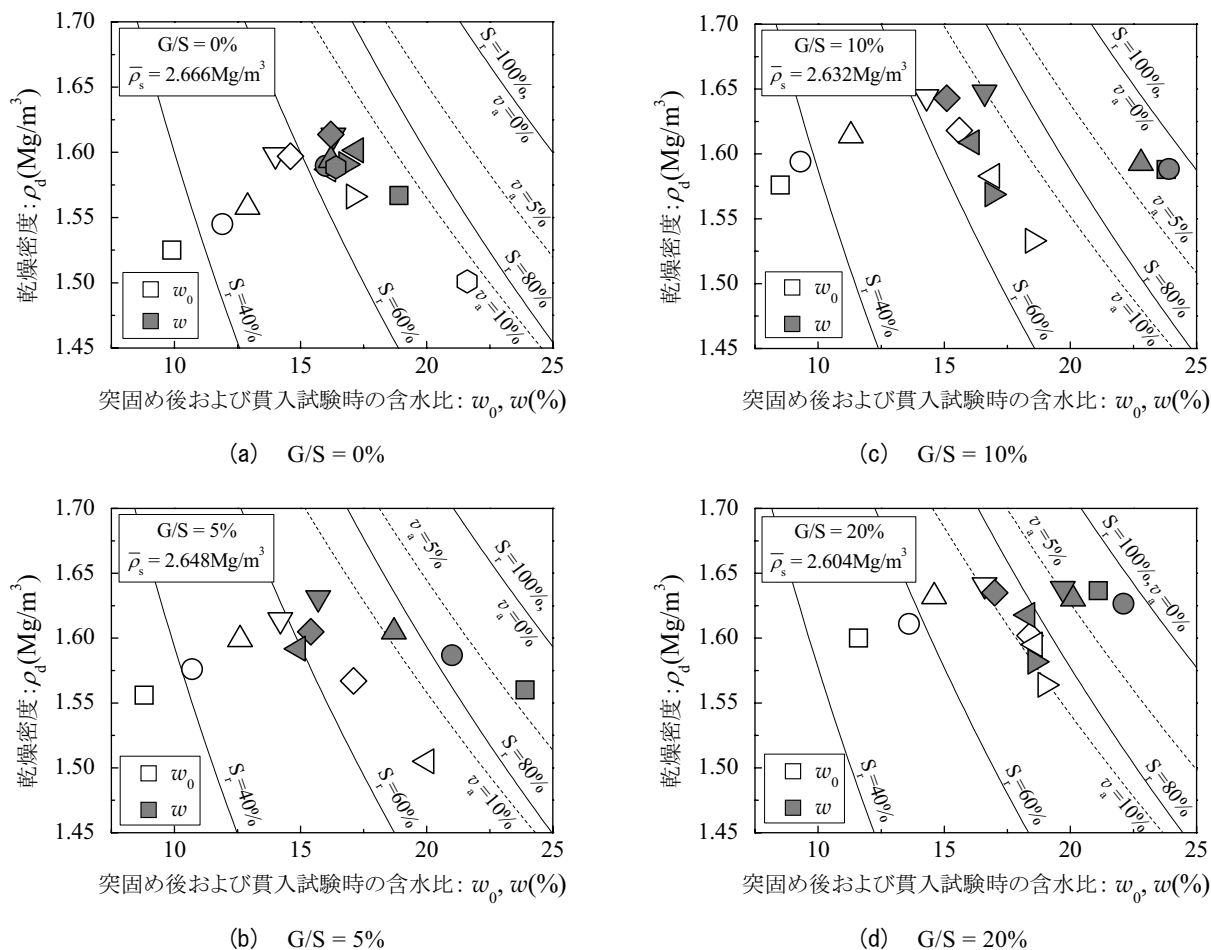


図-4 水浸が種々の二水石膏添加率で締め固めた供試体の締め固め曲線に及ぼす影響

を添加したものは、半水石膏を添加したものと比較して増加量が少なかった。これは、半水石膏は吸水硬化の特性を有しているが、二水石膏はこのような性質を有していないためであると考えられる。

本研究では、締め固め土の長期の安定性を考慮するために、吸水膨張試験^{11), 12)}を実施している。したがって、水浸の影響により貫入試験を実施するときには供試体の乾燥密度や含水比が変化している場合がある。そこで、突固め後および貫入試験時の含水比に対する乾燥密度を図-4に示す。各供試体の突き固め後の結果と貫入試験時の結果を対応させるために、対応する結果には同一の形状の記号を用いた。なお、各図のゼロ空気間隙曲線、ゼロ空気間隙曲線、飽和度一定曲線、および空気量一定曲線は、二水石膏の添加率を考慮した平均的な土粒子密度を用いて作成した。3日気中4日水中養生に伴って、乾燥密度に僅かに増加する傾向が認められた。含水比に着目すると、いずれの配合比においても突固め時に含水比が最適含水比より大きい湿潤側においては、含水比があまり変化しない、もしくはわずかに減少して最適含水比に近づく傾向を示している。一方、突固め時に含水比が最適含水比より小さい乾燥側においては、水浸に伴って含水比が大きく増加し、突固め時の湿潤側の含水比より大きくなる傾向を示した。また、含水比の変化をより明瞭に示すために、突き固め後の含水比と貫入試験時の含

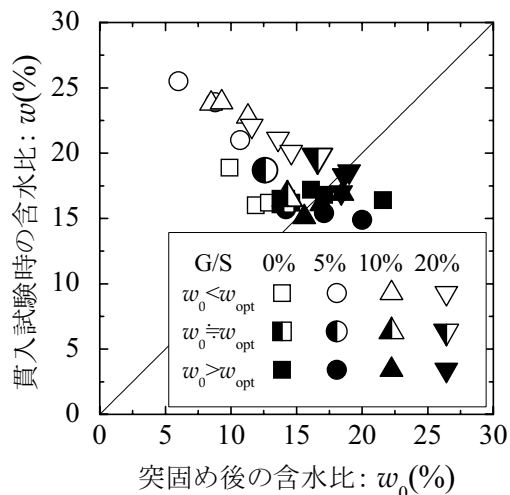


図-5 吸水膨張試験に伴う含水比の変化

水比の関係を図-5に示す。図より湿潤側および最適含水比付近で締め固めた供試体の含水比は変化が少ないのに対して、乾燥側で締め固めた供試体の含水比が著しく増加していることがわかる。一般に締め固めた土供試体を水浸により飽和させると、低含水比で締め固めた場合にはその強度を著しく低下させる¹³⁾。したがって、乾燥側で締め固めた場合には水浸に伴って空隙内に水が浸透し

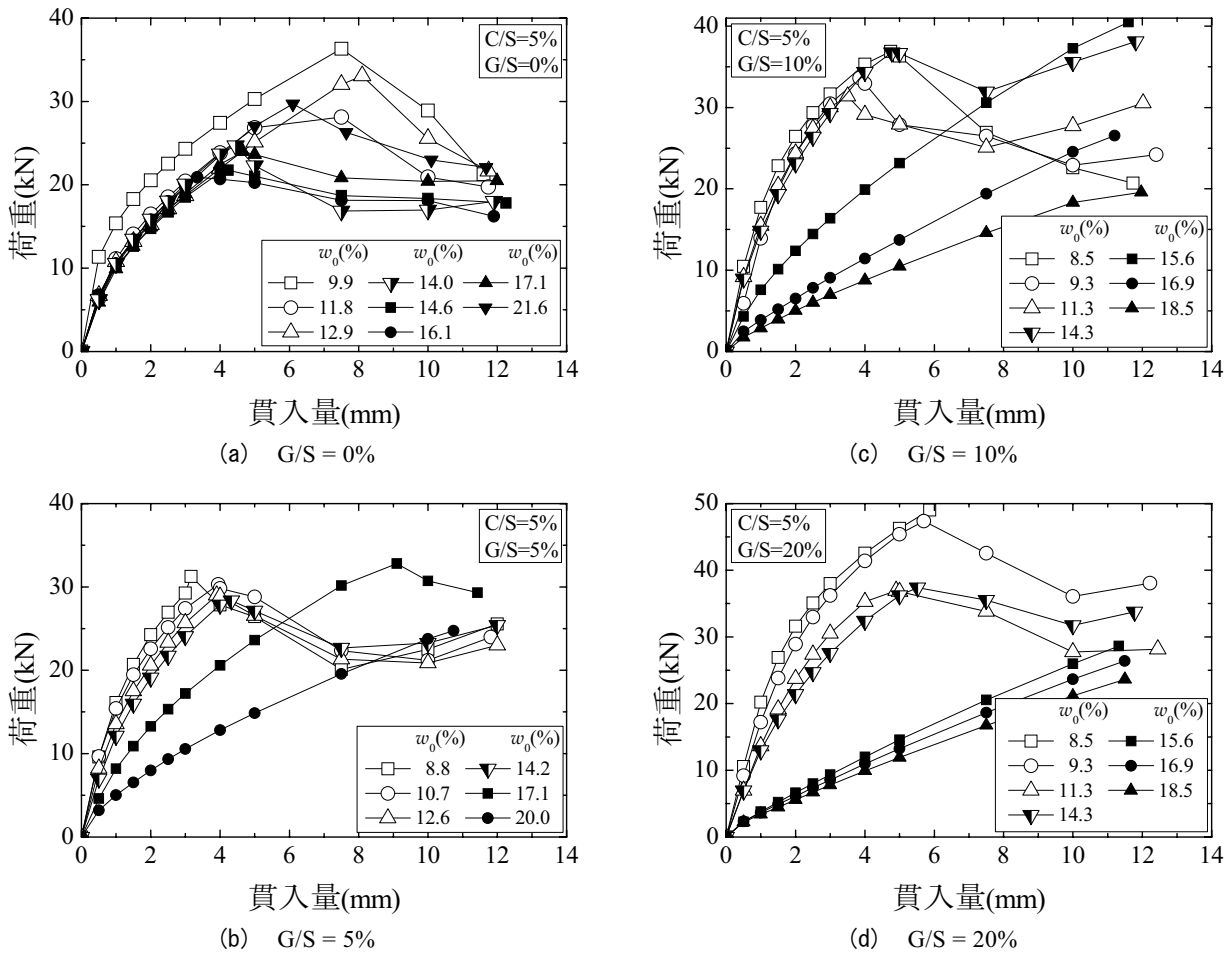


図-6 種々の二水石膏添加率で締め固めた供試体の荷重-貫入量曲線

含水比が増加することから注意する必要があるかもしれない。

次に種々の添加率で二水石膏を混合して締め固めた供試体の貫入試験の結果を図-6に示す。まず、二水石膏を添加していない場合の結果(図-6(a))に着目すると、突固め後の含水比の違いによらず、载荷初期では貫入量の増加に伴い荷重値が急激に増加しており、変形に対する抵抗性が大きいことがわかる。しかしながら、貫入量が1mm程度を超えると荷重-貫入量曲線の傾きが若干小さくなる傾向が認められる。荷重値は、貫入量4mm~8mm程度において最大値を示し、さらに貫入を続けると荷重値は低下した。最大の荷重値は、乾燥側で締め固めた供試体から得られた結果が湿潤側で締め固めた場合より大きくなる傾向が認められた。

つぎに、二水石膏を添加した場合の結果に着目すると、含水比が最適含水比より小さい乾燥側、および最適含水比近傍で締め固めた供試体の荷重-貫入量曲線は、载荷初期の傾きが大きく、貫入量2.5mmの標準荷重に当たる13.4kNの荷重が作用しても1mm程度の貫入量しか生じないのに対して、含水比が最適含水比より大きい湿潤側で締め固めた供試体の場合には傾きが非常に小さく、13.4kNの荷重で2~7mmもの貫入量が発生することがわかる。一方、最大の荷重値は、湿潤側でも乾燥側や最適含水比近傍と同程度もしくはそれを上回る荷重値が得ら

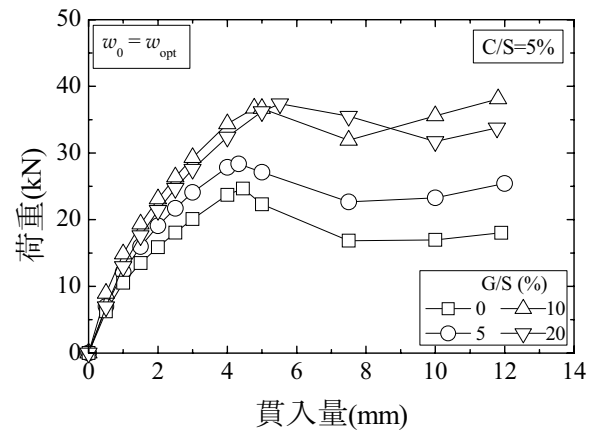


図-7 二水石膏添加率の違いが最適含水比で締め固めた供試体の荷重-貫入量曲線に及ぼす影響

れる場合が認められるが、その時の貫入量は10mm程度を超える値となっており変形量が非常に大きいので注意を要する。したがって、二水石膏を添加する場合には、突固め後の含水比の違いが荷重-貫入量曲線の特性に大きな影響を及ぼすことから、施工時の含水比の管理が非常に重要となる。

最適含水比で締め固めた供試体の荷重-貫入量曲線に着目すると(図-7)、その傾きは载荷初期に非常に大きく、貫入量の増加に伴って徐々に小さくなり、4~6mm

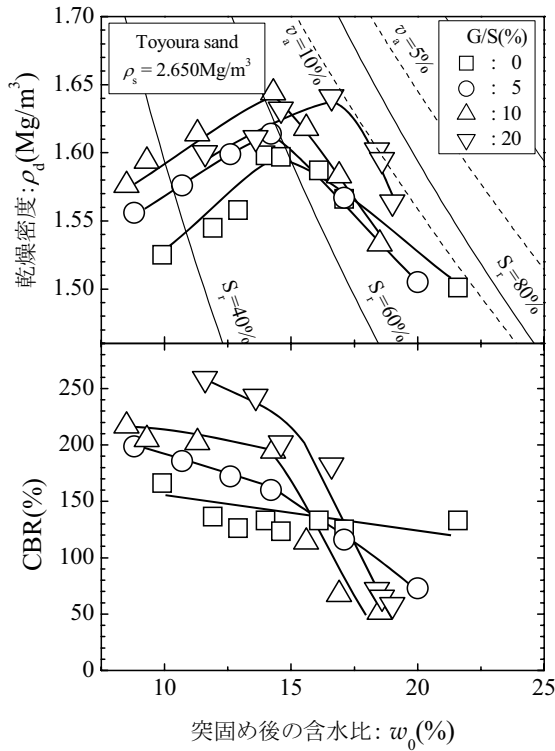


図-8 締固め曲線と CBR 値と突固め後の含水比の関係

程度の貫入量において荷重値のピークを迎えることがわかる。また、ピークの荷重値は二水石膏添加率が大きくなるほど大きな値を示した。CBR 値は、貫入量 2.5mm と 5.0mm での荷重強さを各標準荷重で除した値を百分率で表示し（それぞれ CBR_{2.5} と CBR_{5.0} とする）、CBR_{2.5} > CBR_{5.0} の場合は CBR_{2.5} を採用し、CBR_{2.5} < CBR_{5.0} の場合には再試験をして同じ結果を得た場合は CBR_{5.0} を採用するとしている。これは、貫入量 2.5mm の CBR 値に重要性をみており、より小さな変形領域の変形抵抗性を重要視しているからに他ならない。この観点から荷重-貫入量曲線を評価すると、二水石膏を添加して最適含水比で締め固めた地盤材料（図-7）は、貫入初期に荷重値が急激に増加しており優れた地盤材料といえる。

CBR 値と突き固め後の含水比の関係を図-8 に示す。締固め曲線との関係がわかりやすいように、締固め曲線も付記した。図より、まず二水石膏を添加しない場合に着目すると、CBR 値は突き固め後の含水比の影響をあまり受けず、130%程度を示している。つぎに二水石膏を添加した場合の CBR 値は、含水比が最適含水比より小さい乾燥側では、含水比の増加に伴いわずかな減少が認められる程度であるが、含水比が最適含水比より大きい湿潤側では、含水比の増加に伴い急激に低下していることがわかる。二水石膏添加率が CBR 値に及ぼす影響に着目すると二水石膏添加率が增加するのに伴って、乾燥側では CBR 値が増大する。一方、湿潤側では、二水石膏を添加した場合の CBR 値は、添加しない場合の CBR 値より小さくなった。このことから、二水石膏を添加する場合には締固め時の含水比の管理が非常に重要であることが

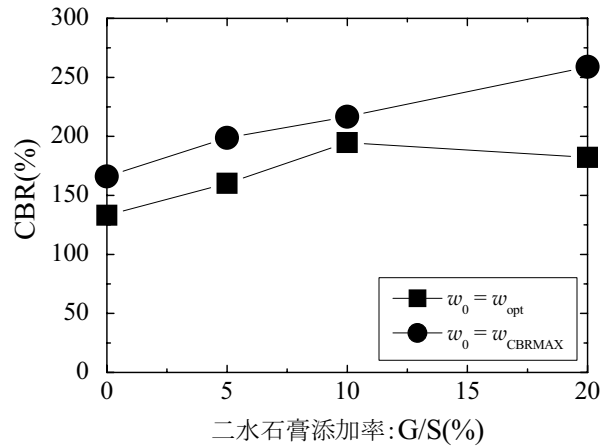


図-9 CBR 値と二水石膏添加率の関係

わかる。締め固める際には最適含水比程度もしくは最適含水比より小さな含水比（本研究で用いた母材では 12% 程度まで）で締め固めることで、二水石膏は路床土の混合材料として十分に有効利用できる。なお、本研究では、4 日間の水浸した場合の貫入試験しか実施していないので、水浸に伴う CBR 値の変化については不明である。しかしながら、水浸の影響、すなわち間隙中に水が浸透し飽和度が上昇したとしても乾燥側の CBR 値は十分に大きいことを付言する。

図-9 に CBR 値と二水石膏添加率の関係を示す。図より、最適含水比で締め固めた場合には CBR 値は二水石膏添加率の増加に伴って増加する傾向を示しているが、二水石膏添加率が 10% から 20% に増加する際に明瞭な CBR 値の増加は認められなかった。なお、最大の CBR 値が得られるような乾燥側の含水比を用いた場合には、二水石膏添加率の増加に伴って、CBR は増加する傾向を示した。

4. 結論

本研究では、現在廃棄処分が難しく有効利用先の開拓に迫られている廃石膏が路床土の混合材として適用可能かを検討するために、種々の二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を作成し、その締固め特性や CBR 値に及ぼす二水石膏添加率の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) 二水石膏を添加することで最大乾燥密度が増加し、構造が密に詰まった良質の地盤材料となることが明らかとなった。
- (2) 最適含水比もしくはそれより小さな乾燥側の含水比で締め固めた場合（豊浦珪砂の場合には含水比が 12% 程度から最適含水比の範囲において）、二水石膏添加した締固め土の CBR 値は、二水石膏添加率の増加に伴い増加し、十分大きな値が得られることが明らかとなった。

以上のことから、廃石膏を粉砕処理した二水石膏を路床土の混合材料として有効利用できる可能性が示唆された。廃石膏を一度に大量使用可能な土木建設分野で消費できれば、石膏の廃棄処分量を大きく減らすことが可能となり、循環型社会の構築に非常に有益であろう。なお、本研究では重金属等の溶出試験を満足しているが、使用する地盤材料や施工現場の環境によっては重金属等が溶出する可能性もある。したがって、実際に廃石膏を用いる際には、そのつど重金属等の溶出試験を実施し、その値が土壤環境基準値を満足するか確認することが必要不可欠である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、島根大学元学生榎谷直子氏には、実験および結果の整理に多大なるご協力をいただいた。また、日工(株)より粉砕処理した廃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：廃石膏ボードの対策について、石膏ボード工業会 HP，環境問題への取組，<http://www.gypsumboard-a.or.jp/countermeasure.pdf>，2011.6.
- 2) 環境省：産業廃棄物処理施設の設置，産業廃棄物処理業の許可等に関する状況（平成20年度実績），環境省 HP，廃棄物・リサイクル対策，破棄物処理の現状，廃棄物処理に関する統計・状況，http://www.env.go.jp/recycle/waste/kyoninka/kyoninka_h20.pdf，2011.6.
- 3) 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.
- 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，志比利秀，平野 将，大島章寛，松田哲夫，伊藤哲男，出口宗浩：養生条件の違い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—，地盤と建設，Vol.28，No.1，pp.15-21，2010.
- 6) 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.
- 7) 亀井健史，蓬萊秀人，鶴飼恵三：半水石膏・石炭灰・高炉セメント B 種を用いた安定処理土中のフッ素・六価クロム・ホウ素の不溶化—廃石膏のリサイクル—，地盤工学ジャーナル，Vol.5，No.3，pp.449-461，2010.
- 8) Ahmed, A., Ugai, K., and Kamei, T.: Laboratory and field evaluations of recycled gypsum as a stabilizer agent in embankment construction, *Soils and Foundations*, Vol.51, No.6, 2011(to be published).
- 9) 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.
- 10) (株)豊浦硅石鉱業：<http://www4.ocn.ne.jp/~toyoura/>，2011.6.
- 11) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，第5編 安定化試験，CBR 試験，pp.219-235，1990.
- 12) 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.
- 13) 地盤工学会：土質基礎工学ライブラリー36 土の締固めと管理，pp.20-21，1991.

(2011年6月27日 受付)

