

締固め粘性土の一軸圧縮特性に及ぼす廃石膏添加率の影響

Effect of Waste Gypsum Content of Unconfined Compressive Characteristics of Compacted Clay

志比利秀 Toshihide SHIBI (島根大学大学院総合理工学研究科)
 神庭崇彰 Takaaki KAMBA (島根大学大学院総合理工学研究科)
 亀井健史 Takeshi KAMEI (宮崎大学工学部)

近年、建設産業においても循環型社会の構築のために建設廃棄物の減量化・再資源化が進められ、非常に高い成果を上げつつあるが、再資源化があまり進んでいないものの一つとして廃石膏がある。そこで本研究では、廃石膏の地盤材料として有効利用を検討するため、セメントを少量添加し種々の廃石膏添加率で作製した締固め粘性土の一軸圧縮特性を検討している。その結果、廃石膏添加率の増加に伴い、粘性土の最適含水比は増加し、乾燥密度は低下することを示した。最適含水比付近で作製した締固め粘性土の一軸圧縮強さは、廃石膏添加率の増加に伴って低下する傾向を示すが、廃石膏添加率 5%の場合には顕著な強度低下は認められず軽量の地盤材料となることが明らかとなった。

キーワード：二水石膏，締固め土，一軸圧縮強さ

(IGC : D06, D09, T14)

1. はじめに

近年我が国においては、持続可能な社会を実現するために、新たに採取する天然資源と自然界に排出する廃棄物を最小化し、資源の循環的な利用を確保することによって、循環型社会の構築と自然環境の保全が進められてきている。このような取組みは従来の「大量生産・大量消費・大量廃棄」型の社会システムから資源の効率的な利用やリサイクルを進めることにより環境への負荷が少ない社会システムへの変換の意識が高まってきたからにほかならない。建設分野においても、廃棄物の排出の抑制および他産業に由来するものも含めた再生資材の利用の推進が求められている。その結果、建設廃棄物全体の再資源化率は 93.7%に達しており、非常に高い再資源化率を達成している¹⁾。しかしながら、建設廃棄物の中には依然として再資源化率の低い品目が残っており、廃石膏ボードもその一つである。

石膏ボードは、加工性、耐火性、遮音性に優れ、施工が比較的容易であるとともに、経済的にも低廉であることから、主に建築分野で壁や天井の内装下地材として普及してきた。しかしながら、戦後の住宅復興によって建築された建築物は、近年老朽化が進み、解体の必要性に迫られており、それに伴い廃石膏ボードの排出量は年々増加している。石膏ボード工業会によれば、廃石膏ボードの排出量は今後も増加し続け、2025年には2千万トンに達するものと推計されている²⁾。このような膨大な排出量をすべて石膏ボード原料として再利用することは容易ではなく、他のリサイクル用途の開発が急務となっている。

廃石膏ボードから分離された石膏は、硫酸塩還元菌とその基質となる有機物、滞留水が存在する中で還元状態に置かれることにより、硫酸塩還元菌による硫酸イオン

(SO_4^{2-})の還元によって非常に毒性の高い硫化水素(H_2S)を発生する可能性がある³⁾。このような危険を避けるため2006年以降、廃石膏ボードは、分離した紙と廃石膏ともに管理型処分することが義務付けられている⁴⁾。管理型処分は、従来の安定型処分と比較して処分費用が高いことに加え、我が国の管理型最終処分場の容量が逼迫しているという問題⁵⁾も相俟って、廃石膏の処分を取り巻く環境は非常に厳しい。このことから廃石膏のリサイクル市場の開発は重要な課題である。

このような状況の下、新たなリサイクル分野として廃石膏を地盤材料の添加材として用いる試みが行われつつある。その一つとして、廃石膏の土壌固化材としての有効利用が挙げられる。例えば、含水比が100%を超えるような高含水比の粘性土の地盤改良を想定し、廃石膏を加熱処理して得られた半水石膏をセメント安定処理土に添加した場合、半水石膏添加率がその一軸圧縮強さや耐久性に及ぼす影響が検討されており、少量添加すると一軸圧縮強さが低下するものの添加率を増大させていくことで低下した一軸圧縮強さが改善すること⁶⁾、乾湿繰り返しや凍結融解の繰り返しに対する強度低下はその一回目が顕著であり、繰り返し作用の影響は小さいこと^{7), 8)}などがあきらかになっている。また、締固め土の一軸圧縮特性に及ぼす半水石膏添加率の影響についても定量的な評価がなされており、半水石膏の締固め時の添加材としての有効利用の可能性についても検討されている^{9), 10)}。

廃石膏の地盤材料への有効利用に際しては、重金属等の不溶化技術の確立も重要となる。このような技術に関しては、例えば、半水石膏を高炉セメントB種を混合して固化させるとフッ素の溶出を抑制できること¹¹⁾、さらに石炭灰を混入することでその溶出濃度をさらに低減できること¹²⁾などが明らかになってきている。加えて、現場から得られた強度は室内試験結果と良く対応しており、

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いる¹³⁾。

一方で、廃石膏を加熱処理して得られた半水石膏は加水時に急速に硬化する性質を有しており、試料の混合から打設までの時間的猶予が少ない。このような観点を考慮し、まず廃石膏の有効利用先を拡大するため、締固め材料として適した砂試料に対して粉碎処理のみを施した廃石膏とセメントを添加した締固め土に着目し、その一軸圧縮特性に及ぼす廃石膏添加率の影響を明らかにし、その有効利用の可能性を示している¹⁴⁾。

本研究では、廃石膏の更なる有効利用拡大を進めるため、締固めには最適とは言えない粘性土に対して廃石膏とセメントを添加した締固め土供試体を作製し、その一軸圧縮試験を実施した。その結果、廃石膏添加率が粘性土の締固め特性およびその一軸圧縮強さに及ぼす影響を明らかにし、粘性土の締固めに際して廃石膏添加が有効であるかを検討している。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

本研究で用いた廃石膏は、建築資材の廃材として排出される廃石膏ボードを破碎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。その重量にして98.30%は二水石膏（硫酸カルシウム・二水和物（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ））からなっている¹⁵⁾。以下、廃石膏を二水石膏と呼ぶこととする。その二水石膏の物理特性を表-1に、そ

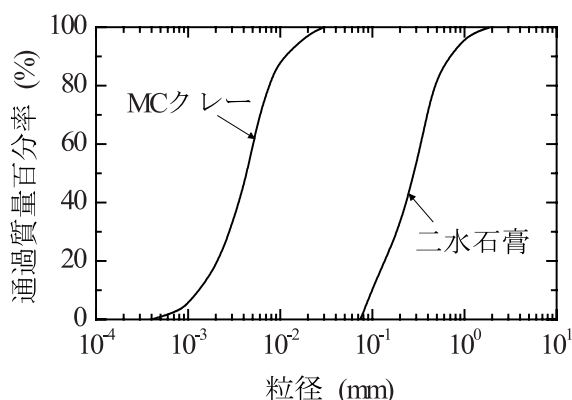


図-1 本研究に用いた試料の粒径加積曲線

の粒径加積曲線を図-1に示す。二水石膏（半水石膏の吸水硬化体）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、二水石膏を地盤材料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、表-2は、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。半水石膏は加水すると急速に硬化し二水石膏となることから、この結果は二水石膏の溶出試験結果と捉えても支障はないものと考えられる。表より、

表-1 二水石膏の基本物理特性

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'
2.320	0.100	0.180	0.280	0.300	3.00	1.08

表-2 土壤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 MCクレーの基本物理特性¹⁷⁾

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-4 高炉セメント B 種の品質

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	—	—

いずれの値も環境基準値を満足しており、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、溶出の抑制が図れることが報告されている^{11), 16)}。本研究の供試体作製においても重金属溶出を抑制するため、セメントを5%添加している(C/S=5%; C:高炉セメントB種の質量, S:MCクレーの乾燥質量)。

本研究では、母材となる粘性土として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。その物理特性を表-3¹⁷⁾に、その粒径加積曲線を図-1に示す。また、MCクレーの主要な化学成分はSiO₂とAl₂O₃であり、それぞれ68.1%, 24.8%を占めている¹⁷⁾。

安定材には、一般の土木施工にも多用されている高炉セメントB種を使用した。高炉セメントB種は、普通ポルトランドセメント比較してせん断強度が得やすく安価であることから、強度的にも経済的にも優れた安定材である。また、先述したように、重金属の固定化に貢献することも報告されている^{11), 16)}。高炉セメントB種の品質は、JIS R 5210で表-4¹⁸⁾のように定められており、その密度は3.04Mg/m³である¹⁹⁾。高炉セメントB種の主要な化学成分は、CaO(54.1%), SiO₂(26.3%), Al₂O₃(8.7%)であり、三成分の合計が全体の約90%を占めている¹⁸⁾。なお、セメントの過度の添加は、六価クロムの溶出が問題になることから注意が必要である。本研究では、MCクレーの乾燥質量の5%に相当するセメントを添加した。

任意の含水比を得るため、試料調整時に水が必要となるが、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。

2.2 実験方法

試料の配合条件は、粘性土に対する二水石膏添加率(G/S; G:二水石膏の質量)として0%, 5%, 10%, および20%の計4配合を設定するとともに、前述したように5%の高炉セメントB種を添加した。含水比の設定に関しては、各配合条件に対して高含水比状態から低含水比状態までの20~30通りの含水比を設定した。

供試体作製に関しては、鋳鉄製の二つ割りモールド(φ=50mm, H=100mm)を用いて、質量1.5kg, 落下高さ20cmのランマーを用いて、1層あたり12回で、3層に分けて突固めによる締固め(締固め仕事量: $E_c \approx 550\text{kJ/m}^3$)を行った。なお、この締固め仕事量の値は、JIS A 1210²⁰⁾およびJSF T 711²¹⁾の突き固め方法のA, B, すなわちStandard Proctor基準に相当する。また、試料の使用方法は、後述するように締固め試験後養生して一軸圧縮試験を行うため、非繰返し法を選択した。締固め試験後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モールドから丁寧に取外し、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、供試体をポリエチレン製の袋で覆い、恒温室(20±2℃)で28日間気中養生した。その後、所定の養生過程が終了した供試体に対して一軸圧

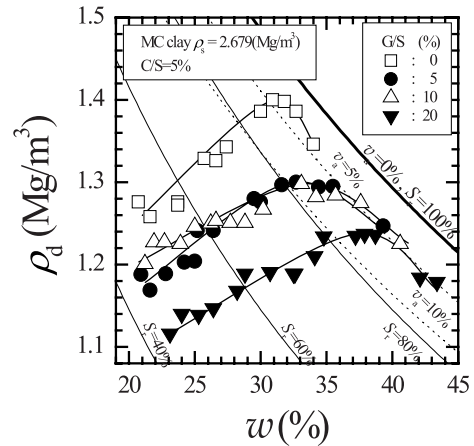


図-2 締固め曲線

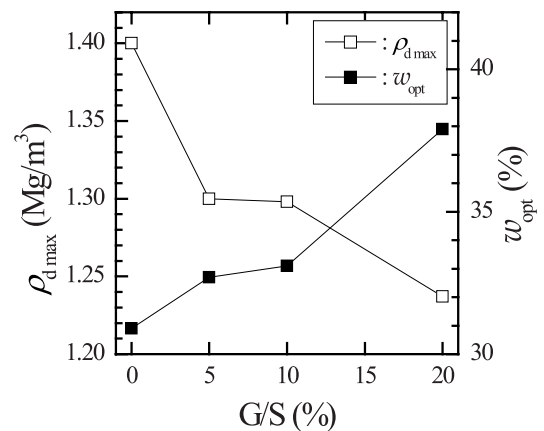


図-3 二水石膏添加率の違いが最大乾燥密度と最適含水比に及ぼす影響

縮試験を実施した。

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

3.1 締固め特性

二水石膏添加率(G/S=0~20%)の違いが、粘性土の締固め曲線に及ぼす影響について考察を行うために、C/S=5%のもとG/S=0, 5, 10, および20%に対して、含水比を種々に変化させて締固め粘性土を作成し、その締固め曲線を得た(図-2)。なお前述したように、各配合条件に対して、代表的な12~16点の値を選定し、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、飽和度一定曲線、および空気量一定曲線は、母材の土粒子密度を用いて作成した。

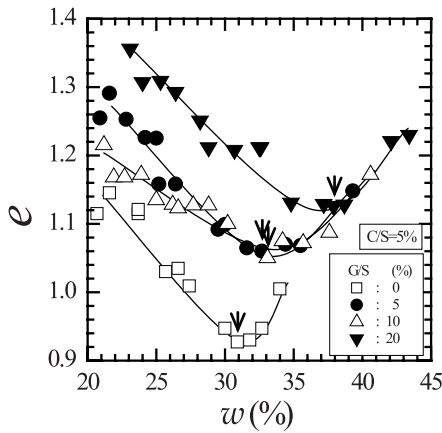


図-4 間隙比と含水比の関係

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。図より、締固め曲線は一般的に認められる山型の形状となることが確認できる。すなわち、乾燥密度は含水比の増加に伴い増加し、 $w = 31.0\%$ で最大 ($\rho_d = 1.400 \text{ Mg/m}^3$) となり、含水比がさらに増加すると減少に転じる。二水石膏を添加した場合は、締固め曲線の形状には大きな変化は認められないが、G/Sの増大に伴い、締固め曲線は右下に、すなわち高含水比-低乾燥密度側にシフトしている。

二水石膏添加に伴う締固め曲線の遷移をより明確に示すために、最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) と最適含水比 (w_{opt}) に着目する (図-3)。図より、G/Sが0%から20%まで増加すると、 w_{opt} 値は30.9%から37.9%まで増加し、一方 ρ_{dmax} 値は 1.400 Mg/m^3 から 1.237 Mg/m^3 まで低下することがわかる。G/Sの増加に伴って w_{opt} 値が増加する要因の一つとしては、二水石膏中の結晶水が含水比の一部として含まれている可能性が考えられる。二水石膏を半水石膏として製品化する場合には、通常 $130 \sim 150^\circ\text{C}$ 程度で十分に加熱するが、実際には 60°C 程度から徐々に結晶水が抜けて半水石膏化している²²⁾。したがって、含水比測定の際に 110°C で炉乾燥すると、結晶水の一部も蒸発している可能性が考えられる。この場合、G/Sの増加に伴って、試料中に占める二水石膏量が増加し、蒸発する結晶水量も増えるため、 w_{opt} 値が増加しているものと推察される。一方、G/S増加に伴う ρ_{dmax} 値の低下は、MCクレーから ρ_s 値の低い二水石膏への置き換えの効果が考えられる。また、上述したように含水比測定時に二水石膏中の結晶水の一部が蒸発しているならば、その影響も考えられる。

前掲した粒径加積曲線 (図-1) からわかるように、MCクレーと二水石膏はその粒度分布の範囲が異なっているため、締固めに際しては、より密な状態が得られやすいものと予想される。一般に ρ_d 値を持って土の詰まり具合を判定するが、 ρ_s 値が異なる場合には正確とは言えない。そこで、MCクレー、二水石膏、およびセメントの配合条件を考慮し、

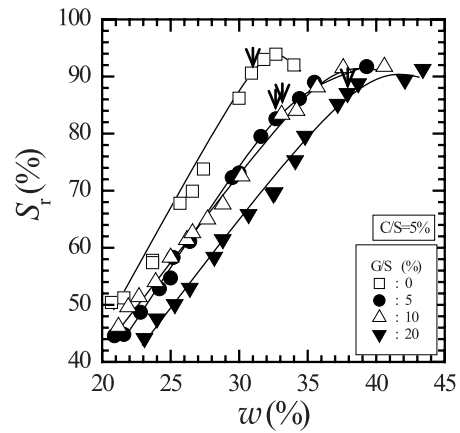


図-5 飽和度と含水比の関係

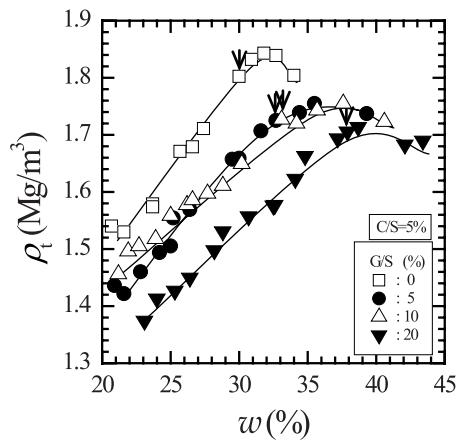


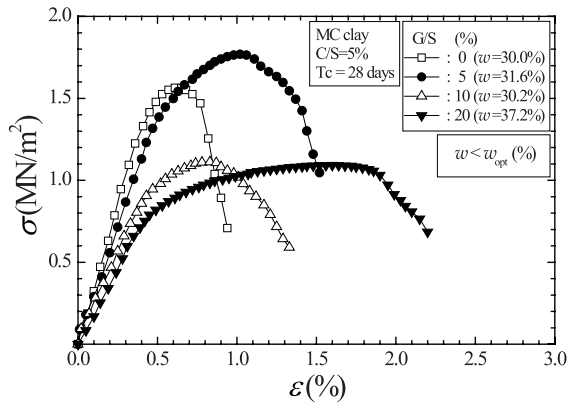
図-6 湿潤密度と含水比の関係

$$\bar{\rho}_s = \frac{1+G/S+C/S}{1/\rho_s(\text{soil})+(G/S)/\rho_s(\text{gypsum})+(C/S)/\rho_s(\text{cement})} \quad (1)$$

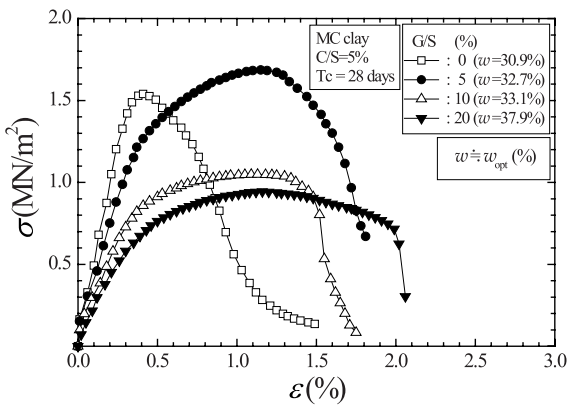
から平均的な土粒子密度 $\bar{\rho}_s$ 値を求めて間隙比 (e) を算定することとした。得られた e 値と w 値の関係を図-4 に示す。なお、最適含水比のデータには矢印 (↓) を付記している。図よりG/Sの違いによらず、 e 値は、 w 値の増加に伴って減少し、 w_{opt} 値付近で最小値となり、 w 値の更なる増加に伴って増加しており、その形状は締固め曲線を上下に返したような谷型となった。すなわち、最適含水比付近では、間隙が小さく、密になっていることが確認できる。次に二水石膏添加率の違いに着目すると、G/Sの増加に伴って、 e 値は上方にシフトしている。このことは、粒度分布が異なる二水石膏を添加したにも関わらず間隙が増大しており、前述した粒径加積曲線から得られた一般的な予想と異なっている。この結果は、測定された含水比に二水石膏中の結晶水の一部が含まれている可能性を示唆している。すなわち、測定された含水比に結晶水の一部が含まれているとすれば、乾燥密度を過小に見積もることとなり、その結果G/Sの増加に伴って e 値が増加したものと考えられる。

飽和度 (S_r) と w 値の関係を図-5 に示す。なお、最適

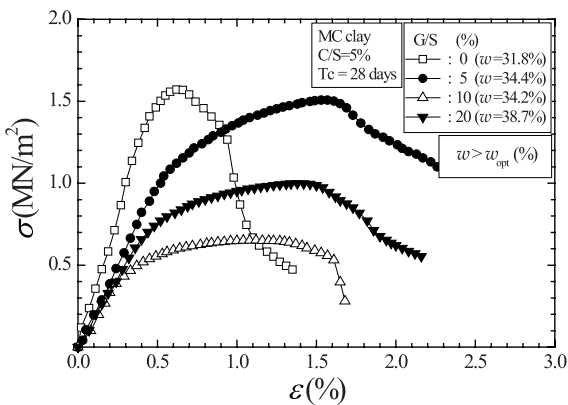
締固め粘性土の一軸圧縮特性に及ぼす廃石膏添加率の影響



(a) 乾燥側 ($w < w_{opt}$)



(b) 最適含水比 ($w = w_{opt}$)



(c) 湿潤側 ($w > w_{opt}$)

図-7 代表的な応力-ひずみ曲線

含水比のデータには矢印(↓)を付記している。G/Sの違いによらず、 S_r 値は乾燥側では w 値の増加に伴い直線的に増加していき、最適含水比を僅かに超えた含水比において最大値に達し、湿潤側ではその最大値を維持する傾向が認められた。

締固めた粘性土の湿潤密度(ρ_d)に着目する。図-6は ρ_d 値と w 値の関係を示している。なお、最適含水比のデータには矢印(↓)を付記した。G/Sの違いによらず、 ρ_d 値は乾燥側では、 w 値の増加に伴い直線的に増加し、

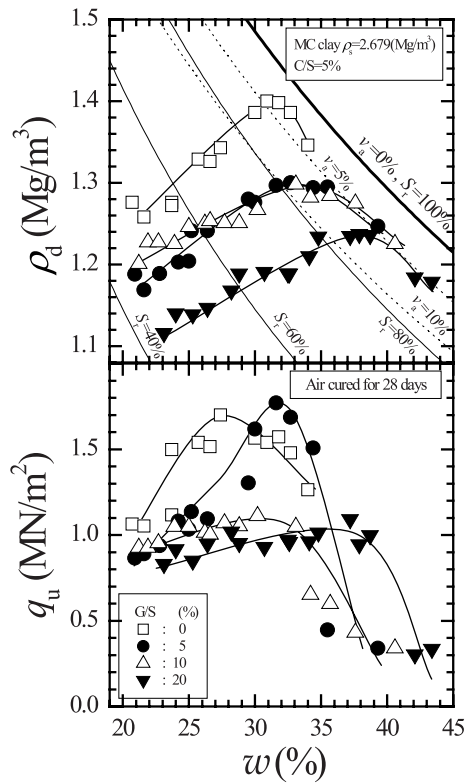


図-8 一軸圧縮強さと含水比の関係と締固め曲線

最適含水比付近ではほぼ最大値に達する。その最大値は二水石膏を添加した場合には、 $1.714 \sim 1.755 \text{ Mg/m}^3$ 程度あり、二水石膏を添加しない場合の 1.843 Mg/m^3 より低下している。これは、MCクレイから ρ_s 値の低い二水石膏への置き換えによる効果であろう。したがって、二水石膏を添加して締固めを行うことにより、僅かではあるが軽量化を図れる可能性がある。

3.2 応力-ひずみ曲線

種々の二水石膏添加率で作製した締固め粘性土供試体の代表的な応力-ひずみ曲線を図-7に示す。(a)は含水比が最適含水比より小さい乾燥側の供試体の場合の応力-ひずみ曲線を、(b)は最適含水比付近の含水比で締固めた試料の場合の応力-ひずみ曲線を、(c)は含水比が最適含水比より大きい湿潤側の供試体の応力-ひずみ曲線を示している。

図より、含水比の違いによらず、二水石膏を添加しない場合には、応力値はひずみ量の増加に伴って急激に増加していき、ひずみ量 0.4~0.6%程度において明瞭な最大値を経た後、急激に低下することがわかる。一方、二水石膏を添加した場合には、応力値が最大値近傍に達するとひずみ量が增大する傾向が認められ、破壊ひずみは0.8~1.9%程度と大きくなっている。したがって、二水石膏を添加することで、応力値が最大値近傍に達してもすぐに破壊には至らず、粘り強い材料となることがわかる。

3.3 一軸圧縮強さ

種々の二水石膏添加率を有する締固め粘性土の含水比

と一軸圧縮強さの関係を図-8に示す。締固め曲線との関係が理解しやすいように、締固め曲線も付記した。

まず、二水石膏を添加していないG/S=0%の場合に着目する。含水比が最適含水比より小さい乾燥側では、 q_u 値は w 値の増加に伴って増加し、最適含水比より多少小さな $w=27.4\%$ において最大値($q_u=1.70\text{MN/m}^2$)となった。含水比がさらに大きくなると q_u 値は僅かに減少し、最適含水比においては $q_u=1.54\text{MN/m}^2$ となり、最大の q_u 値より10%程度低下した。一方、含水比が最適含水比より大きい湿潤側では、 q_u 値は w 値の増加に伴い一貫して減少した。

つぎに、二水石膏を添加した場合に着目する。二水石膏を添加した場合、G/S=5%では q_u 値は w 値の増加に伴って増加していき最適含水比付近において最大値となっているが、G/S=10%、20%では w 値の増加に伴う q_u 値の顕著な増加は認められず緩やかな増加となっている。一方湿潤側では、二水石膏を添加していない場合と同様に w 値の増加に伴って q_u 値は急激に減少している。二水石膏を10%以上添加した場合の q_u 値は、添加しない場合と比較して顕著な低下が認められた。しかしながら、二水石膏を5%添加した場合には、 q_u 値の最大となる含水比が増加しているものの q_u 値の最大値には大きな違いは認められなかった。

最適含水比での一軸圧縮強さと二水石膏添加率の関係を図-9に示す。最適含水比付近の q_u 値はG/S=5%の場合に 1.69MN/m^2 、G/S=10%で 1.05MN/m^2 、G/S=20%で 0.94MN/m^2 となっている。すなわち、二水石膏を10%以上添加すると添加しない場合の6割程度まで強度が低下するが、二水石膏添加率を5%程度に抑えることにより顕著な強度低下を抑制することができる。前述したように二水石膏の添加は湿潤密度の低下をもたらすことから、5%程度の二水石膏を添加する場合には、強度に影響を及ぼすことなく軽量化を図ることが可能になる。

4. 結論

本研究より得られた主要な結論を以下に列記する。

- (1) 廃石膏添加率を増加させると、粘性土の締固め曲線は低乾燥密度・高含水比側にシフトすることが明らかになった。
- (2) 廃石膏を添加することにより、締固め粘性土の軽量化が可能である。
- (3) 廃石膏を大量に添加して作製された締固め粘性土の一軸圧縮強さは、添加しない場合と比較して低下する傾向が認められるが、添加率5%程度では顕著な低下を示さなかった。

以上のことから、粉碎処理した廃石膏はその添加率を5%程度に調整することにより、締固め粘性土に混入して利用することが十分可能であろう。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

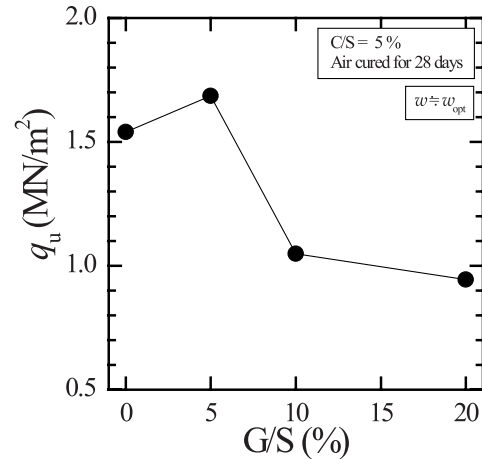


図-9 一軸圧縮強さと二水石膏添加率の関係 ($w \equiv w_{opt}$)

料や施工現場の環境によっては重金属が溶出する可能性は否定できない。したがって、実際に廃石膏を用いる際にはその都度重金属の溶出試験を実施し、その値が土壤環境基準値に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、日工(株)より粉碎処理した廃石膏を提供していただいた。また、本研究の一部は、(独)日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)No.21560520(代表者亀井健史)の補助を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成20年度建設副産物実態調査結果参考資料，国土交通省HP，報道・広報，報道発表資料，平成20年度建設副産物実態調査結果について，<http://www.mlit.go.jp/common/000121183.pdf>，2012.6.
- 2) (社)石膏ボード工業会：廃石膏ボードの対応策について，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>，2012.6.
- 3) 井上雄三：安定型最終処分場における高濃度硫化水素発生機構の解明ならびにその環境汚染防止対策に関する研究，国立環境研究所研究報告，第188号，pp.7-13，2005.
- 4) 環境省：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(通知)，環境省HP，廃棄物・リサイクル対策，廃棄物処理の現状，http://www.env.go.jp/recycle/waste/nt_060601001.pdf，2012.6.
- 5) 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21年度実績)」，環境省HP，廃棄物・リサイクル対策，廃棄物処理の現状，廃棄物処理に関する統計・状況，http://www.env.go.jp/recycle/waste/kyoninka/kyoninka_h21.pdf，2012.6.

- 6) 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.
- 7) Kamei, T., Ahmed, A. and Ugai, K.: The performance of soft clay soil stabilized with recycled gypsum in wet environment, *14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, No.308, 7p., 2011.
- 8) Kamei, T., Ahmed, A. and Shibi, T.: Freeze-thaw cycles on durability and strength of very soft clay soil stabilised with recycled bassanite, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.82, pp.124-129, 2012.
- 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, 志比利秀, 平野 将, 大島章寛, 松田哲夫, 伊藤哲男, 出口宗弘: 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—, 地盤と建設, Vol.29, No.1, pp.15-21, 2010.
- 11) 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.
- 12) 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—, Vol.5, No.3, pp.449-461, 2010.
- 13) 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, pp.975-990, 2011.
- 14) 志比利秀, 亀井健史, 神庭崇彰: 廃石膏を混入した締固め土の一軸圧縮特性, 地盤と建設, Vol.29, No.1, pp.47-53, 2011.
- 15) 亀井健史, 蓬萊秀人, 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—, Vol.3, No.2, pp.133-142, 2008.
- 16) 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.
- 17) 山陽クレー工業(株): MC クレー分析データ表, http://www1.ocn.ne.jp/~w-sanyou/HPpictures/clay_talc_kikaku.gif, 2012.6.
- 18) (財)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.
- 19) 例えば, 太平洋セメント: 高炉セメント, http://www.taiheiyo-cement.co.jp/service_product/cement/pdf/bbcement_v2.pdf, 2012.6.
- 20) (財)日本工業規格: JIS ハンドブック 12 土木 II, pp.678-681, 2002.
- 21) 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.
- 22) 亀井健史, 珠玖隆行: 締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.

(2012 年 6 月 25 日 受付)

