

## 養生日数の違いが廃石膏を添加した締固め粘性土の一軸圧縮特性に及ぼす影響

Effect of Curing Days on Unconfined Compressive Characteristics of Compacted Clay  
Containing Recycled Gypsum

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 (㈱日さく)  
亀井健史 Takeshi KAMEI (宮崎大学工学部)

近年廃石膏を再利用するために、地盤への添加材として有効利用しようとする試みが実施されている。その結果、廃石膏を添加した締固め粘性土は十分な養生を行うことで、改良土としてみても十分なせん断強さが期待できることが報告されているが、一方で施工効率を考えるなら養生初期のせん断特性を把握することが重要となる。そこで本研究では、廃石膏と少量のセメントを添加した締固め粘性土の一軸圧縮特性に及ぼす養生日数の影響を検討している。その結果、廃石膏を添加した締固め粘性土の3日間程度の養生初期の一軸圧縮強さは、廃石膏を添加しない場合と比較しても、有意な強度低下は認められない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，養生日数 (IGC : D06, D09, T14)

## 1. はじめに

近年、廃石膏ボードの有効利用の必要性が急務となっている。これは、近年廃石膏ボードの排出量が増大していること<sup>1)</sup>、廃石膏ボードから分離された石膏を埋め立て処分することで非常に毒性の高い硫化水素(H<sub>2</sub>S)を発生する可能性があること<sup>2)</sup>、最終処分場用地に限りがあること<sup>3)</sup>、持続可能な社会の実現のために循環型社会の構築が進められていることなどの種々の社会的な、および環境的な要請によるものである。

大量に発生している廃石膏の有効利用方法の一つとして、地盤材料への添加材としての利用の可能性が検討されてきている。まず、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が重要となる。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<sup>4)</sup>、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<sup>5)</sup>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<sup>6)</sup>。

つぎにその適用工法に着目すると、高含水比な地盤を対象としたセメント安定処理土への適用と、比較的低含水比な条件下での締固め土への適用に区分される。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、半水石膏(加熱処理した廃石膏)を添加したセメント安定処理土の強度特性が検討されている。一軸圧縮特性については、半水石膏を少量添加することによって、僅かに強度低下が認められるものの添加率を増大させるのに伴って強度改善が認められることが報告されている<sup>7)</sup>。また三軸圧縮せん断試験の結果に基づけば、

半水石膏を混入したセメント安定処理土の内部摩擦角は、半水石膏添加率の5~20%の範囲では、その影響をほとんど受けず、有効応力での内部摩擦角は23~26°、全応力での内部摩擦角が12~16°とほぼ一定となることが報告されている<sup>8)</sup>。さらにその耐久性についても検討されており、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<sup>9),10)</sup>などが明らかになっている。一方、半水石膏を添加した締固め土の一軸圧縮特性についても検討されており、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が報告されている<sup>11),12)</sup>。

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するとともに、廃石膏の有効利用先を拡大するため、粘性土試料を対象に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調査している。その結果、廃石膏を添加することにより、養生28日での一軸圧縮強さは3~4割程度低下するものの、最適含水比付近で締め固めることによって1MN/m<sup>2</sup>程度の強度が得られることを明らかにし、十分な強度を有していることが示している<sup>13)</sup>。しかしながら長期の養生を経れば十分な強度が得られるとしても、施工効率を考えれば、短期の養生期間での強度特性が重要となろう。

本研究では、粘性土に対して廃石膏とセメントを添加した締固め供試体を作製し、種々の養生期間を与えた後、一軸圧縮試験に供した。その結果、養生期間が廃石膏を添加した締固め粘性土の一軸圧縮強さに及ぼす影響を明らかにしている。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

本研究では廃石膏として、建築廃材として排出される廃石膏ボードを紙と廃石膏に分離し、その廃石膏を細粒化したものを用いている。得られた廃石膏は、重量にして98.3%を二水石膏(硫酸カルシウム・二水和物(CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O))が占めている<sup>14)</sup>。以下、この廃石膏を二水石膏と呼ぶこととする。二水石膏の物理特性を表-1に、その粒径加積曲線を図-1に示す。二水石膏は水溶性を有していることから、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。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、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<sup>4), 15)</sup>。

本研究で用いる母材は、粘性土として成分調整された工業製品のMCクレー(カオリン)とした。その物理特性を表-3<sup>16)</sup>に、その粒径加積曲線を図-1に示す。MCクレーの主要な化学成分はSiO<sub>2</sub>とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>であり、それぞれ68.1%、24.8%を占めている<sup>16)</sup>。

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

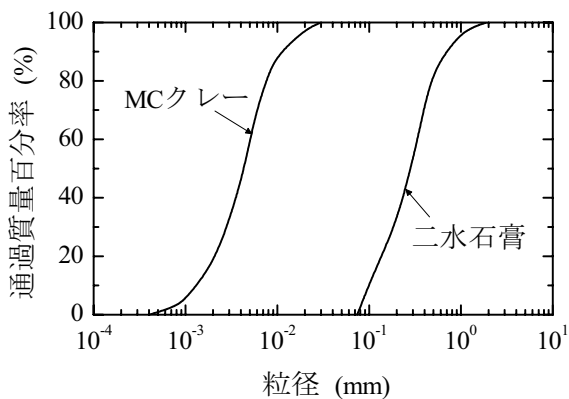


図-1 本研究に用いた試料の粒径加積曲線

ルトランドセメントと比較してせん断強さ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できることも報告されている<sup>4), 15)</sup>。高炉セメントB種の品質は、JIS R 5210で表-4<sup>17)</sup>のように定められており、その密度は3.04Mg/m<sup>3</sup>である<sup>18)</sup>。高炉セメントB種の主要な化学成分は、CaO(54.1%)、SiO<sub>2</sub>(26.3%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(8.7%)であり、三成分の合計が全体の約90%を占めている<sup>17)</sup>。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

表-1 二水石膏の基本物理特性

$\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$D_{10}$ (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<sup>16)</sup>

$\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$w_L$ (%)	$w_p$ (%)	$I_p$	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<sup>17)</sup>

種類	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	凝結		安定性	圧縮強さ(MN/m <sup>2</sup> )			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	—	—

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 (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、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

本研究では、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 配合を設定した。また、前述したように 5% の高炉セメント B 種を添加した。試料の調整に関しては、あらかじめ試料土に先述した配合に対応するセメントおよび二水石膏を添加し、手混ぜにより十分に混合した。その後、霧吹きを用いて散水することにより、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含水比を変えて試料を調整し、試料と水とが十分に馴染むまで再び手混ぜにより混合した。なお、二水石膏には半水石膏のように瞬時に吸水硬化する性質はない。

供試体作製に関しては、鋳鉄製の二つ割りモールド ( $\phi=50\text{mm}$ ,  $H=100\text{mm}$ ) と、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 1210<sup>19)</sup> および JSF T 711<sup>20)</sup> 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 ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) で気中養生した。養生期間の経過に伴う強度特性の改善を調査するため、養生日数として 3 日, 7 日, 14 日, 21 日, 28 日を設定した。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

二水石膏添加率の違いが粘性土の締固め曲線に及ぼす影響を明らかにするために、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製し、その締固め曲線を得た (図-2)。ま

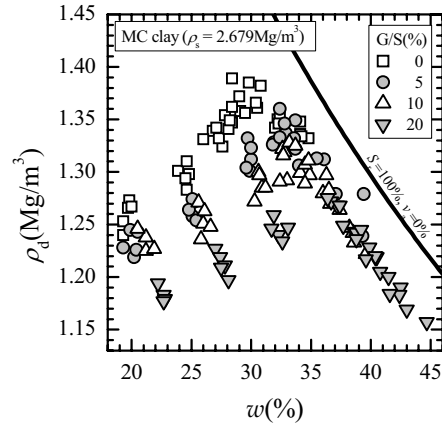


図-2 締固め曲線

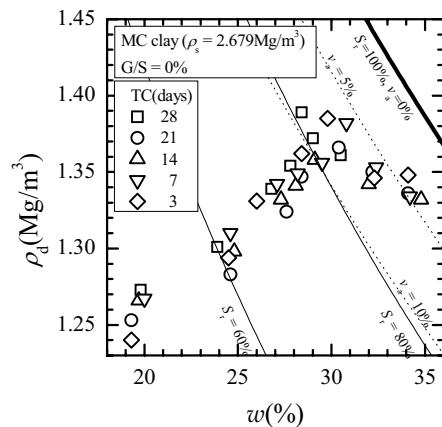


図-3 各養生条件に用いた乾燥密度と含水比 (G/S=0%)

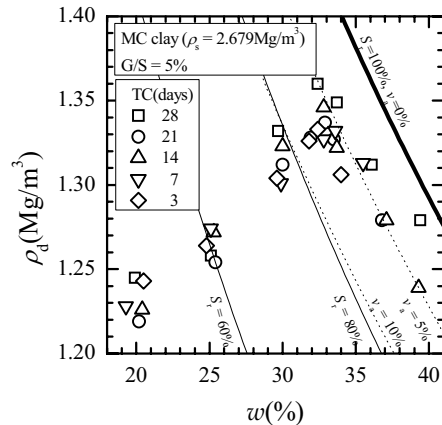


図-4 各養生条件に用いた乾燥密度と含水比 (G/S=5%)

た、この図に示されたゼロ空気間隙曲線は、母材の土粒子密度を用いて作成した。

得られた締固め曲線は、二水石膏添加率によらず、山形の形状となっており、通常の土の締固めの場合と同様の形状となった。二水石膏を添加しない場合には、最大乾燥密度 ( $\rho_{dmax}$ ) が  $1.37\text{Mg/m}^3$  程度で最適含水比 ( $w_{opt}$ ) が 30% 程度の値を示している。二水石膏添加率を増加させていくと、締固め曲線の頂点は右下方向へ遷移している。すなわち、G/S の増加に伴って、最大乾燥密度は徐々に

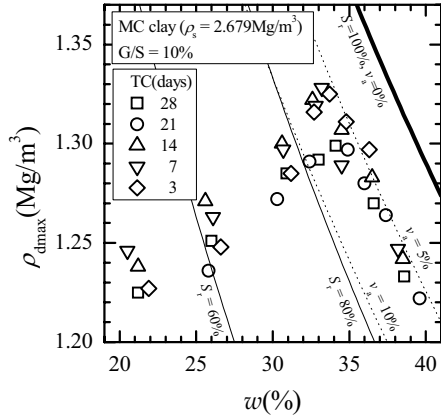


図-5 各養生条件に用いた乾燥密度と含水比 (G/S=10%)

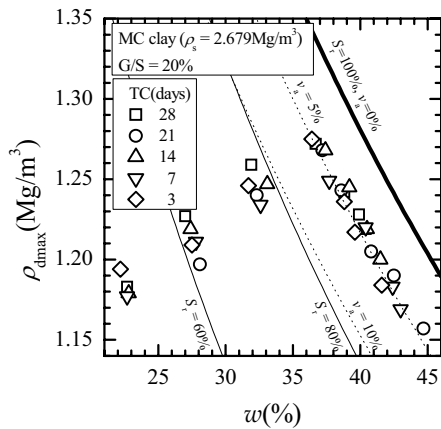


図-6 各養生条件に用いた乾燥密度と含水比 (G/S=20%)

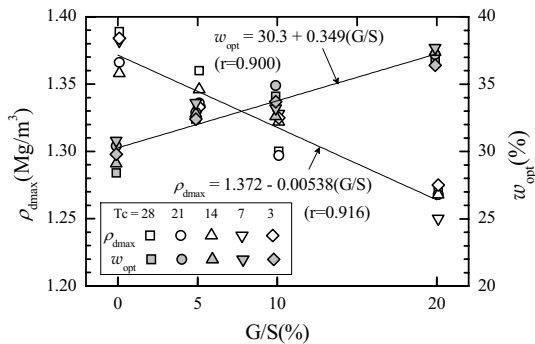


図-7 最大乾燥密度および最適含水比と二水石膏添加率の関係

低下し、G/S=20%に達すると1.27Mg/m<sup>3</sup>程度に、最適含水比は徐々に増加し、G/S=20%において37%程度となった。得られた締固め供試体は、養生日数を変えて一軸圧縮試験に供した。図-3～図-6にそれぞれG/S=0～20%の乾燥密度と含水比の関係を示す。なお、データは養生日数ごとにプロットした。図より、各養生日数に対して使用した試料間の差は、G/S=10%の乾燥側において多少ばらつきが認められるものの、全体的に誤差は少ない。したがって試料間の違いは少ないものと考えた。

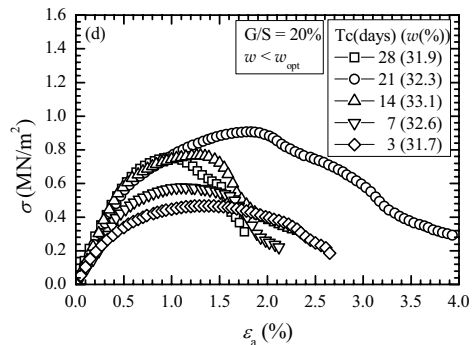
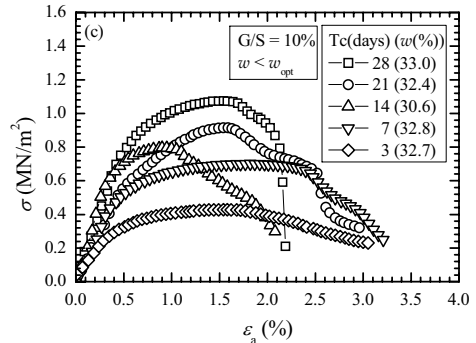
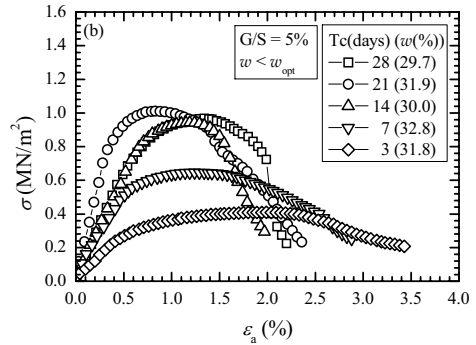
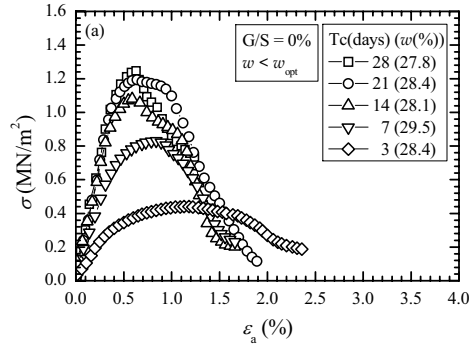


図-8 応力-ひずみ関係に及ぼす養生日数の影響 (乾燥側:  $w < w_{opt}$ )

次に最大乾燥密度および最適含水比と二水石膏添加率の関係に着目する(図-7)。図より、二水石膏添加率の増加に伴い、乾燥密度は直線的に減少し、最適含水比は直線的に増加する傾向を示すことがわかる。それぞれの関係は、高い相関を有しており図中に示すように直線近似できる。二水石膏を130～150℃程度で加熱することにより半水石膏が得られるが、実際には60℃程度から徐々に結晶水が抜けて半水石膏化することが報告されている



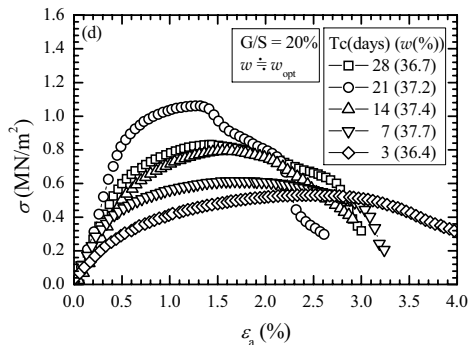
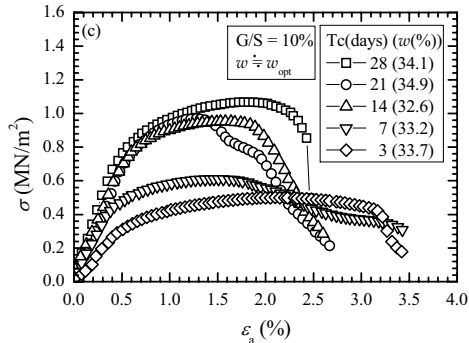
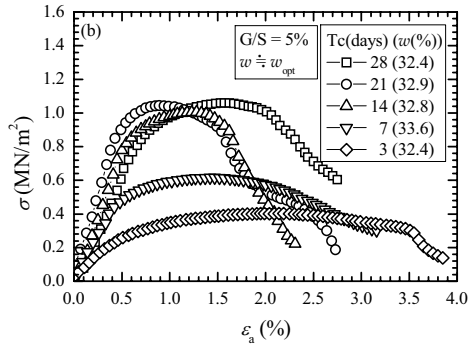
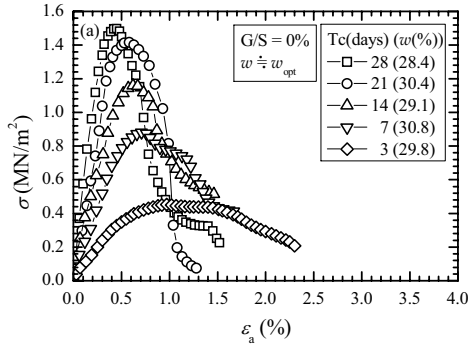


図-9 応力-ひずみ関係に及ぼす養生日数の影響  
(最適含水比近傍:  $w = w_{opt}$ )

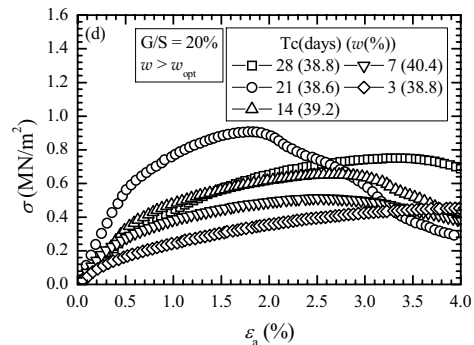
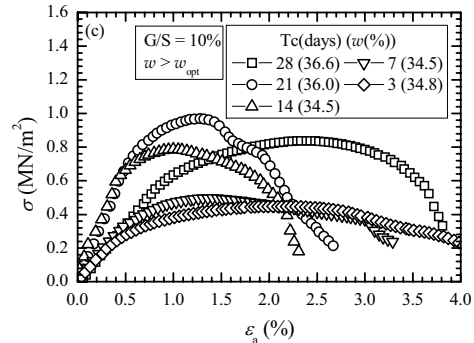
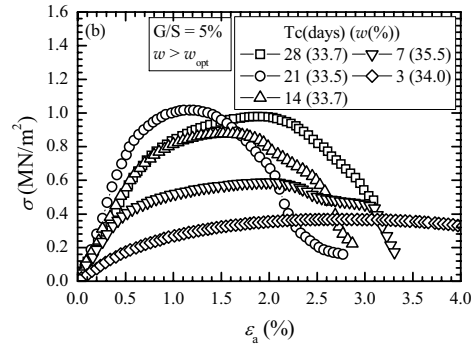
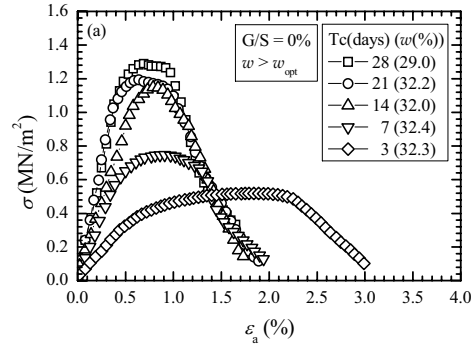


図-10 応力-ひずみ関係に及ぼす養生日数の影響  
(湿潤側:  $w > w_{opt}$ )

21). 含水比測定の際に 110°C で炉乾燥を行うが、その際常温では固層として存在する結晶水の一部も蒸発している可能性が考えられる。このような仮定に従うなら、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、 $w_{opt}$  値が増加する可能性が指摘される。一方、G/S 増加に伴う  $\rho_{dmax}$  値の低下は、MC クレーから  $\rho_s$  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。

### 3.2 応力-ひずみ曲線

応力-ひずみ関係に及ぼす養生期間の影響を検討する。図-8 は含水比が最適含水比より小さい乾燥側の供試体の応力-ひずみ曲線を、図-9 は最適含水比付近の含水比で締固めた供試体の応力-ひずみ曲線を、図-10 は含水

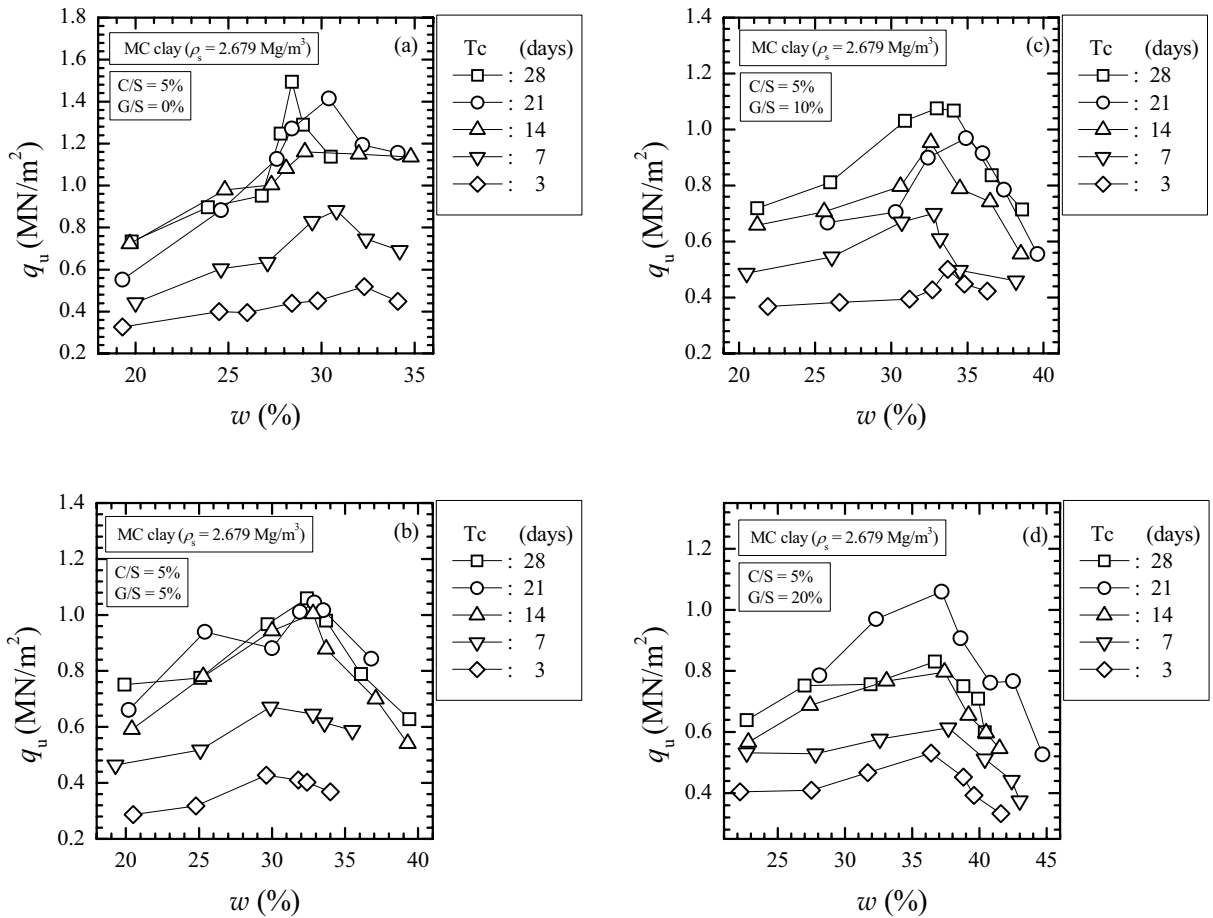


図-11 一軸圧縮強さと含水比の関係に及ぼす養生日数の影響

比が最適含水比より大きい湿潤側の供試体の応力-ひずみ曲線を表している。現場においては締固め度による管理として85~95%以上の想定することおよび、今回作成できた供試体の含水比を鑑み、最適含水比から2%程度小さな含水比を乾燥側、2%程度大きな含水比を湿潤側として採用した。なお、各図(a)~(d)は、それぞれ  $G/S=0, 5, 10, 20\%$ の場合に対応している。

図より、いずれの二水石膏添加率においても養生日数が増加するに伴って、応力-ひずみ曲線の初期勾配および最大の応力値が増加し、応力値がピークの際の軸ひずみ量が小さくなる傾向を示す。とくに二水石膏を添加しない場合には応力-ひずみ曲線は、軸ひずみの増加に伴って、応力値が急激に増大しピークに達した後、応力値が急落する傾向が強い。一方、二水石膏を添加した場合には、応力値がピークに達した後も多少応力値を維持する傾向、すなわち材料の靱性が向上する効果が認められる。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。なお、21日と28日の結果の応力値ピークを比較すると、21日の応力値の方が高いものが散見するが、これは、養生日数が21日を超えてくると明瞭な強度増加を示さなくなることに加え、限られた供試体作製数においては全く同じ含水比の試料の作成が困難であるため、供試体間のバラツキが顕著に反映

されることなどの影響と考えられる。

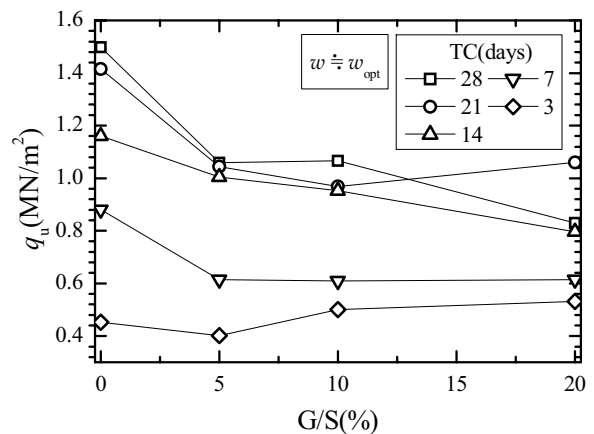


図-12 一軸圧縮強さに及ぼす二水石膏添加率の影響 (最適含水比近傍:  $w \doteq w_{opt}$ )

二水石膏を添加した締固め粘性土の応力-ひずみ曲線に及ぼす含水比の影響に着目する。含水比の小さな乾燥側では、湿潤側と比較すると、応力-ひずみ曲線の初期勾配が比較的大きく、ピークに達した後の応力値が比較的速やかに低下する傾向が認められた。しかしながら、今回想定したような実現場で適応可能な範囲においては、

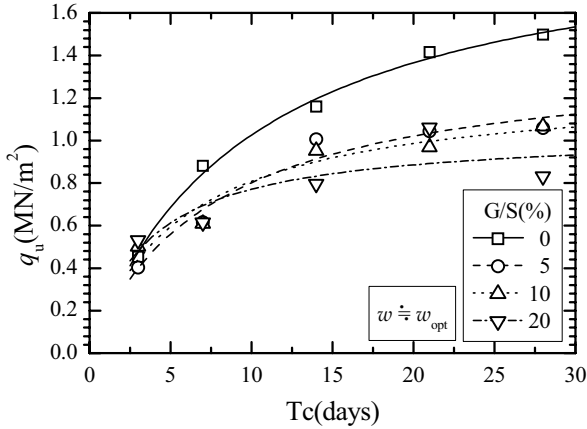


図-13 一軸圧縮強さに及ぼす養生日数の影響  
(最適含水比近傍:  $w \doteq w_{opt}$ )

含水比の変化に伴う応力-ひずみ曲線の影響は非常に小さいことがわかる。

### 3.3 一軸圧縮強さ

種々の二水石膏添加率で締め固めた粘性土の一軸圧縮強さと含水比の関係に及ぼす養生日数の影響を図-11に示す。なお、図(a)~(d)は、それぞれ G/S=0, 5, 10, 20% の場合に対応している。

いずれの二水石膏添加率においても、養生初期（養生3日）において一軸圧縮強さは最適含水比近傍において僅かに大きな値を示している。養生日数の経過に伴い、一軸圧縮強さが改善されていくとともに、最適含水比近傍で一軸圧縮強さが最大となる傾向が顕著となる。なお養生日数が21日を超えると、一軸圧縮強さの顕著な改善が認められなくなった。

最適含水比近傍で締め固めた粘性土の一軸圧縮強さに及ぼす二水石膏添加率の影響を各養生日数で整理した(図-12)。養生28日の一軸圧縮強さは、二水石膏を添加することによって、添加しない場合と比較して4割から5割程度小さな一軸圧縮強さとなるが0.8~1.1MN/m<sup>2</sup>程度の値を示しており、良質土に匹敵する一軸圧縮強さ<sup>22)</sup>を有していることがわかる。一方で、養生3日程度の養生初期においては、二水石膏を添加しても強度低下は認められない。

二水石膏添加率の違いが最適含水比で締め固めた粘性土の一軸圧縮強さと養生日数の関係に及ぼす影響を図-13に示す。一軸圧縮強さは養生日数の経過に伴って、養生初期は急激に、その後は徐々に改善している。二水石膏を添加した場合には、養生日数14日以降の強度増進があまり認められなかったが、前述したように0.8~1.1MN/m<sup>2</sup>程度にまで達することがわかる。一方で、養生初期の強度改善は二水石膏を添加しない場合とほぼ同等であった。なお、養生日数3日以上範囲において、各二水石膏添加率での養生日数の経過に伴う一軸圧縮強さの変化の関係を双曲線近似により求めると、表-5となった。G/S=20%の結果は多少精度が悪いものの、その他

表-5 一軸圧縮強さと養生日数の関係

G/S(%)	関係式	G/S(%)	関係式
0	$q_u = \frac{2.041T_c}{9.900 + T_c}$	10	$q_u = \frac{1.263T_c}{5.628 + T_c}$
5	$q_u = \frac{1.407T_c}{7.569 + T_c}$	20	$q_u = \frac{1.040T_c}{3.491 + T_c}$

のG/Sの結果は相関係数が0.9を超えており十分な予測が可能である。

## 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) 二水石膏添加率を増加させると、粘性土の締め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) 二水石膏を添加することにより、養生28日での一軸圧縮強さは、添加しない場合と比較して多少低下するものの、良質な土程度の強度を有することが明らかとなった。
- (3) 二水石膏を添加しても、養生初期の一軸圧縮強さには低下が認められず、施工効率には影響しない。

以上のことから、粘性土の締め固めに際して、粉碎処理した廃石膏を5~20%程度添加しても、良質な地盤材料として使用可能であろう。廃棄する場合には難の多い廃石膏を地盤材料として有効利用できれば、建設分野による循環型社会形成への多大な貢献にも繋がる。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。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：廃石膏ボードハンドブック 環境編、石膏ボード工業会 HP、石膏ボードのリサイクルについて、[http://www.gypsumboard-a.or.jp/pdf/Environment\\_P195-208.pdf](http://www.gypsumboard-a.or.jp/pdf/Environment_P195-208.pdf), 2013.6.
- 2) 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.
- 3) 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22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](http://www.env.go.jp/recycle/waste/kyoninka/kyoninka_h21.pdf), 2013.6.
- 4) 亀井健史, 蓬莱秀人: 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.
  - 5) 亀井健史, 蓬莱秀人, 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化—, Vol.5, No.3, pp.449-461, 2010.
  - 6) 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.
  - 7) 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.
  - 8) 矢島寿一, 村岡卓也, 武藤 優, 亀井健史: 半水石膏を混入したセメント安定処理土のせん断特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.3, pp.331-339.
  - 9) 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.
  - 10) 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.
  - 11) 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.
  - 12) 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.
  - 13) 志比利秀, 神庭崇彰, 亀井健史: 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, 地盤と建設, Vol.30, No.1, pp.47-53, 2012.
  - 14) 亀井健史, 蓬莱秀人, 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.
  - 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) 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](http://www1.ocn.ne.jp/~w-sanyou/HPpictures/clay_talc_kikaku.gif), 2013.6.
  - 17) (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.
  - 18) 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](http://www.taiheiyo-cement.co.jp/service_product/cement/pdf/bbcement_v2.pdf), 2013.6.
  - 19) (財) 日本工業規格: JIS ハンドブック 12 土木 II, pp.678-681, 2002.
  - 20) 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.
  - 21) 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.
  - 22) 地盤工学会 軽量土工法編集委員会: 軽量土工法, 1.2 地盤の軽量土と軽量化技術, pp.5-13, 2005.

(2013 年 6 月 24 日 受付)