

## 廃石膏を混入した締固め土の一軸圧縮特性

## Unconfined Compressive Characteristics of Compacted Sand Admixed with Waste Gypsum

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)  
神庭崇彰 Takaaki KAMBA (島根大学大学院総合理工学研究科)

循環型社会への転換の必要性から、廃石膏は埋立て処分に代わる新たなリサイクル事業の開拓が急務となっている。廃石膏ボードから再生した半水石膏は、その吸水硬化作用から軟弱地盤改良に適しているが、近接生産工場であらかじめ含水比を調整して地盤材料と混合する場合、急速硬化するために現場施工には適さない。本研究では、廃石膏の締固め材料への有効利用を考え、廃石膏から得られた吸水硬化作用を有さない二水石膏と少量のセメントを砂に混合して締固め試験を実施し、二水石膏添加率の違いが締固め特性に及ぼす影響を明らかにしている。さらに28日間気中養生した締固め土の一軸圧縮特性を評価し、廃石膏の締固め材料としての適用性を検討している。

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、わが国の経済社会システムにおいて限りある資源を有効利用するという環境意識に注目が集まっている。従来、わが国の経済社会システムは、資源やエネルギーを利用する上で大量生産、大量消費、大量廃棄を行うシステム形態をとってきた。しかし、このようなシステム形態は、経済発展が進む中で産業廃棄物の最終処分場の用地残数の減少、廃棄物不法投棄の増加、環境汚染の問題などの廃棄物処理に関する問題を抱えることになった。今日、このような社会問題を受け、従来の社会システムの見直しや生産から廃棄までのプロセス、再利用計画の構築、環境面の制約などにも適切に対処できるような「資源循環型社会」の構築が進められている。

わが国の産業の中で、建設産業は毎年約7,600万トンの廃棄物を排出しており、建設廃棄物が産業廃棄物に占める割合は大きい<sup>1)</sup>。このような状況に対応するため、建設産業界は環境に対する具体的な行動指針を打ち出し、ISO14001を視野に「環境創造産業」への転換に取り組む必要がある<sup>2)</sup>。また、「建設産業環境行動ビジョン」の具体的な行動指針として、建設副産物への新たな取り組みの在り方が求められるようになった。その中でも近年は、建設現場から排出される石膏ボード廃材（以下、廃石膏ボード）の処理に関する問題が指摘されるようになってきた。

石膏ボードは、1920年代から建築基礎資材として使用され始めており、石膏を芯材としてその両面を石膏ボード用原紙で覆って板状に成型した建築用内装材である。加工性、耐火性、遮音性に優れ、低廉なことから主に壁や天井の内装下地材として使用されている。近年では石膏ボードを用いた建築物の老朽化に伴って、解体の必要性に迫られており、廃石膏ボードの排出量は年々増加し

ている。石膏ボード工業会は、建設現場から排出される廃石膏ボードの排出量が2010年には約109万トンであると報告しており、2030年には約241万トンに急増すると推計している<sup>3)</sup>。

従来、廃石膏ボードの処分に関しては、廃石膏ボードを紙と石膏に分離し、石膏は安定型処分、紙は管理型処分されてきた。しかしながら、石膏を安定型処分すると埋立て層内において、他の有機物が栄養源となり、硫酸塩還元菌による硫酸イオン(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)の還元によって硫化水素(H<sub>2</sub>S)の発生が懸念される<sup>4)</sup>。これを受けて2007年4月から、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た。一方、管理型処分を行う場合でも最終処分場の残余年数がほとんどない状態であるという問題から、廃石膏ボードの処分は深刻な状況である。したがって、「資源循環型社会」の形成のためにも廃石膏ボードの埋立て処分に替わる新たなリサイクル市場の開発は重要な課題である。

廃石膏を地盤材料として用いるためには、重金属等の溶出量が土壌の環境基準を満足することが重要である。実際、石膏を添加した際にフッ素の溶出量が土壌の環境基準を越えてしまうことが考えられることから、高炉セメントB種を用いた対策技術に関する研究がなされており、フッ素を初めとして六価クロムやホウ素の溶出量を環境基準以下に満足できることが報告されている<sup>5), 6)</sup>。このような環境に配慮した研究成果に基づいて、廃石膏を用いた地盤材料の強度特性に関する研究がなされている。例えば、廃石膏から生成した半水石膏を豊浦砂やMCクレーに地盤改良材として混合し締め固めた供試体を作成するとともに一軸圧縮強試験を実施し、その締固め特性や一軸圧縮強さの定量的な評価がなされており、半水石膏の地盤改良材としての有効利用の可能性について検討されている<sup>7)</sup>。

半水石膏の地盤改良材としての有効性を明らかにするために、廃石膏を用いた地盤の強度特性と地盤環境面からみた重金属等の溶出量に関する研究も行われており、その結果、室内実験と現場との強度の対応性が良いことや重金属等の溶出量も環境基準値を満足することが報告されている<sup>8)</sup>。

既往の研究では、廃石膏から生成した半水石膏を用いたものが多いが、廃石膏から生成した二水石膏にも地盤材料として優れた点が考えられる。すなわち、半水石膏は廃石膏ボードから紙と分離・破碎した後、加熱・脱水を行う手間を要しているが、二水石膏は紙と分離・破碎のみの工程であるため、半水石膏より低コストとなる。また、半水石膏は短時間で硬化するので工事現場での生産が必要となるが、二水石膏は加水時に急速に硬化する性質を有していないため、近接生産工場で大量に生産し、運搬して施工に用いることが可能となる。以上の点から、二水石膏が地盤材料として有効利用が可能であることが明らかとなれば、経済社会システムにおいては非常に有益であるとともに、有効利用の必要性に迫られている廃石膏を大量に用いることが可能となり、循環型社会の形成においても非常に有益である。

そこで本研究では、現在廃棄処分が非常に困難な状況にある廃石膏を地盤材料として有効利用するために、廃石膏を粉碎処理して得られた二水石膏と少量のセメントを砂試料に混合して締め固めた供試体を作成し、一軸圧縮試験を実施した。その結果、二水石膏添加率の違いが締め固め特性や一軸圧縮特性に及ぼす影響を評価し、廃石膏の締め固め材料としての適用性を検討している。

## 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。この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-1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。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、溶出の抑制が図れることが報告されている<sup>5), 6), 9)</sup>。本研究の供試体作製においても重金属溶出の抑制を考慮し、セメントを5%添加している。したがっ

表-1 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		環境基準値 〔mg/l〕
	石膏のみ 〔mg/l〕	石膏にセメントを 10%添加 〔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	<0.2	<0.2	<0.8
ホウ素	<0.1	<0.1	<1

表-2 各試料の基本物理特性

(a) 二水石膏の物理特性

$\rho_s$ ( $\text{Mg/m}^3$ )	$D_{10}$ (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

(b) 豊浦珪砂の物理特性

$\rho_s$ ( $\text{Mg/m}^3$ )	$D_{10}$ (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

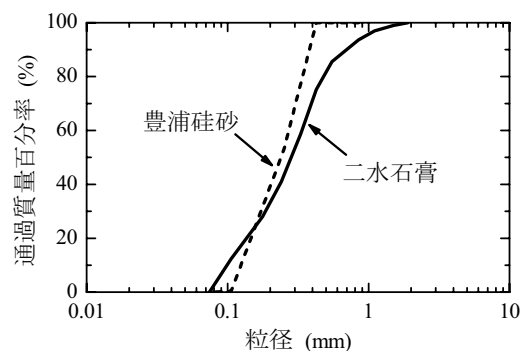


図-1 各試料の粒径加積曲線

て、二水石膏を用いた場合でも、環境基準値は満足できるものと考えている。本研究では、粉末状の二水石膏（廃石膏）を用いた。その二水石膏の物理特性を表-2(a)に、その粒径加積曲線を図-1に示す。

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  $300\mu\text{m}$  残分が1%以下、 $106\mu\text{m}$  残

分が95%以上に粒度調整されている<sup>10)</sup>。豊浦珪砂の物理特性を表-2(b)に示し、その粒径加積曲線を図-1に併記する。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。

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<sup>5), 6), 9)</sup>、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)に止めている。

## 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添加率(G/S; G:二水石膏)として0%, 5%, 10%, および20%の計4配合を設定するとともに、前述したように高炉セメントB種を5%添加している。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12~19通り程度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( $\phi=50\text{mm}$ ,  $H=100\text{mm}$ )を用いて、1.5kgランマー、落下高さ20cmで、3層、12回/層の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、この締固め仕事量は、JIS A 1210<sup>11)</sup> および JSF T 711<sup>12)</sup> の Standard Proctor 基準に基づいた。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、締め固められた供試体をポリエチレン製の袋で覆い、恒温室(20±2℃)で28日間空气中養生した。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 締固め曲線

二水石膏添加率(G/S=0~20%)の違いが、豊浦珪砂に5%の高炉セメントB種を添加した処理土の締固め曲線に及ぼす影響について考察を行う。図-2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、前述したように1つの配合条件につき含水比を変えて12~19点の実験を行

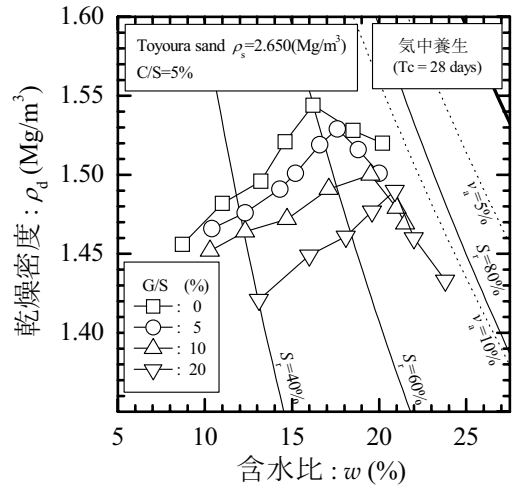


図-2 締固め曲線

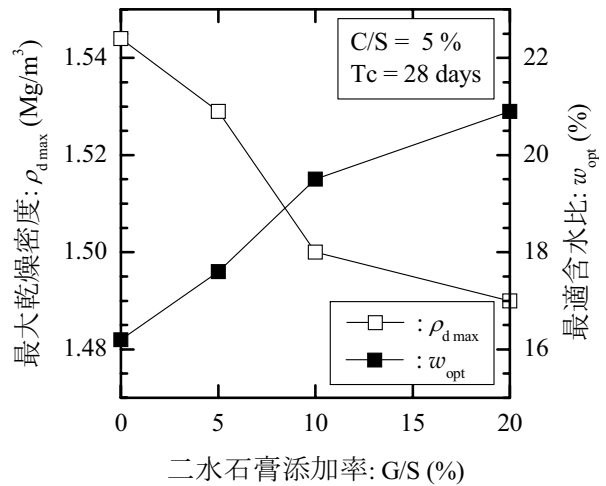


図-3 二水石膏添加率の違いにおける最大乾燥密度と最適含水比の関係

い、その中から隣接データ(含水比や二水石膏添加率の変化)との兼ね合いや含水比の間隔を考慮して代表的な7~8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( $S_r=100\%$ ,  $v_a=0\%$ )、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、含水比の増加に伴い乾燥密度が増加していき、 $w = 16.0\%$ 程度で最大の乾燥密度( $\rho_d = 1.544 \text{ Mg/m}^3$ )に達する。乾燥密度は含水比のさらなる増加に伴って減少している。また、他の二水石膏添加率においても同様の变化傾向が認められ、G/S=5%の場合の最適含水比は17.6%で、最大乾燥密度が1.529  $\text{Mg/m}^3$ 程度、G/S=10%の場合には最適含水比は19.5%で、最大乾燥密度が1.500  $\text{Mg/m}^3$ 程度、G/S=20%の場合の最適含水比は20.9%で、最大乾燥密度が1.490  $\text{Mg/m}^3$ 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より明瞭に示すために図-3を作成した。図より二水石膏添加率の増加に伴い、最適含

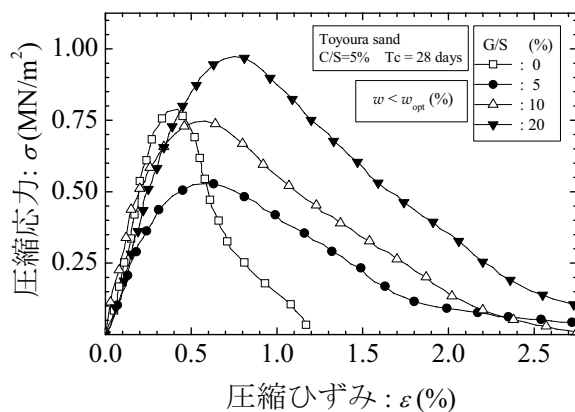
水比が直線的に増加している。このような結果は、我が国のように降雨が多く、自然含水比が比較的高い地域においては、二水石膏添加率を増加させることによって最適含水比を自然含水比に近づけたり、最適含水比を自然含水比より大きくしたりすることが可能となる。一方、最大乾燥密度は、最適含水比とは対照的に  $1.545 \text{ Mg/m}^3$  から  $1.490 \text{ Mg/m}^3$  程度まで一貫して減少している。これは、二水石膏が豊浦砂と比較して土粒子密度が小さく、幅広い粒径を有していることと関係していると考えられる。すなわち、二水石膏添加率の増加に伴って、砂粒子と比較的軽量の二水石膏が置換されることによって乾燥密度が低下しているものと推察される。また、二水石膏には比較的小きな粒径の粒子が含まれているが、その結果、二水石膏添加率の増加に伴って比表面積が増加し、最適含水比が大きくなるものと考えられる。

### 3.2 応力-ひずみ曲線

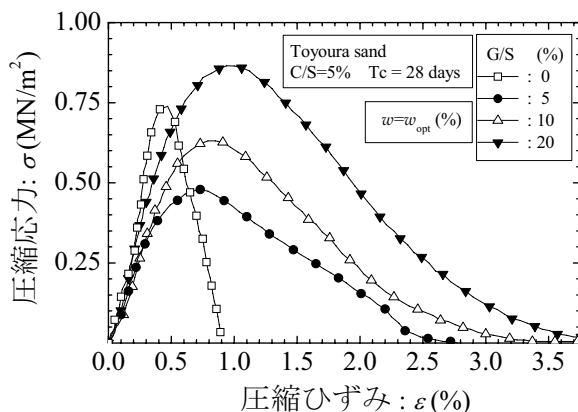
種々の二水石膏添加率で締め固めた供試体の代表的な応力-ひずみ曲線を図-4に示す。(a)は作製時の含水比が最適含水比より小さい乾燥側の供試体の場合であり、一般に最大強度が得られるとされる最適含水比の0.95倍の含水比における応力-ひずみ曲線を、(b)は最適含水比付近の含水比で締め固めた試料の場合の応力-ひずみ曲線を、(c)は作製時の含水比が最適含水比より大きい湿潤側の供試体の場合であり、最適含水比の1.05倍の含水比での応力-ひずみ曲線を示している。

まず、乾燥側の含水比で締め固めた供試体の応力-ひずみ曲線に着目する。二水石膏を添加していない  $G/S=0\%$  の場合には、応力値 ( $\sigma$ ) はひずみ量 ( $\varepsilon$ ) の増加に伴って顕著な立ち上がりを示し、 $\varepsilon$  値が  $0.5\%$  程度でピークに達し、そのピーク値は  $0.789 \text{ MN/m}^2$  となった。ピークを過ぎると  $\sigma$  値は荷重の継続に伴い、急激に減少している。つぎに、二水石膏を添加した場合の応力-ひずみ曲線に着目すると、 $G/S=5\%$  の場合には、 $\sigma$  値は  $\varepsilon$  値の増加に伴って増加し、 $\varepsilon$  値が  $0.7\%$  程度でピークに達しており、その値は  $0.528 \text{ MN/m}^2$  と二水石膏を添加していない場合より小さな値となった。一方、ピーク後の  $\sigma$  値の減少に関しては、二水石膏を添加していない場合と比較して緩やかとなった。 $G/S$  をさらに増加させると、応力-ひずみ曲線のピークは、徐々に上方へシフトしていく傾向が認められ、そのピーク値は  $G/S=10\%$  で  $0.747 \text{ MN/m}^2$  となり、とくに  $G/S=20\%$  の場合には、 $G/S=0\%$  のピーク値より大きな  $0.973 \text{ MN/m}^2$  を示した。

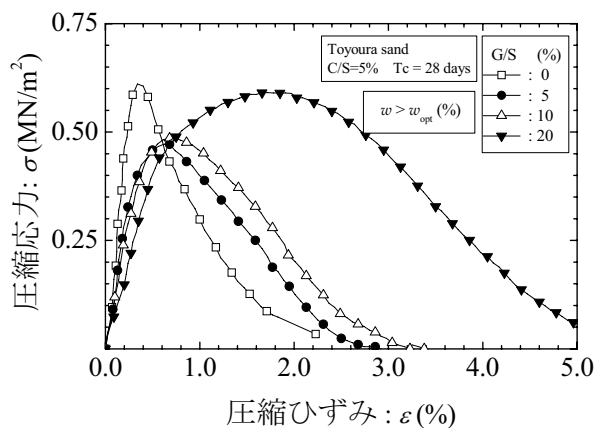
つぎに、二水石膏添加率の違いが最適含水比付近で締め固めた供試体の応力-ひずみ曲線に及ぼす影響に着目する。最適含水比付近で締め固めた場合も、乾燥側の含水比で締め固めた場合と同様な傾向が得られた。すなわち、二水石膏を添加しない場合には、荷重直後に  $\varepsilon$  値の増加に伴って  $\sigma$  値が急激に増加してピークに達するものの、さらなる荷重の継続に伴って  $\sigma$  値は急激に減少している。一方、二水石膏を添加した場合の  $\sigma$  値は、荷重直後に  $\varepsilon$  値の増加に伴って急激に増加してピークに達した



(a) 乾燥側における応力-ひずみ曲線 ( $w \doteq 0.95w_{opt}$ )



(b) 最適含水比における応力-ひずみ曲線 ( $w \doteq w_{opt}$ )



(c) 湿潤側における応力-ひずみ曲線 ( $w \doteq 1.05w_{opt}$ )

図-4 代表的な応力-ひずみ曲線

後で減少に転じるが、その減少傾向は比較的緩やかとなった。また、二水石膏を添加することでピークの  $\sigma$  値は、添加しない場合と比較して一度減少するものの、添加率を増加させることでピークの  $\sigma$  値は徐々に増加し、 $G/S=20\%$  の場合には  $G/S=0\%$  の場合より大きな値となった。

湿潤側の含水比で締め固めた供試体の応力-ひずみ曲線も、乾燥側や最適含水比付近の含水比で締め固めた

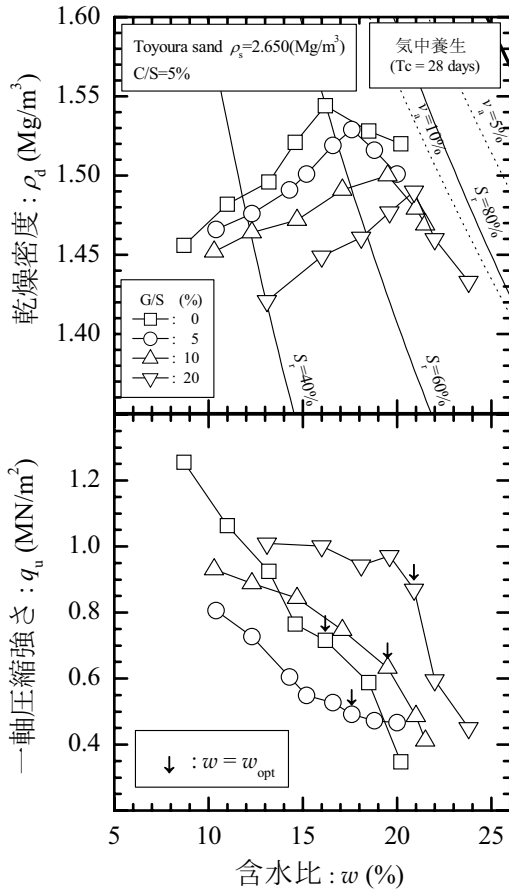


図-5 一軸圧縮強さと作製時の含水比の関係およびその締め固め曲線

場合と同様の傾向を示しているが、二水石膏添加に伴う応力-ひずみ曲線のピーク値に若干の違いが認められる。すなわち、湿潤側で締め固めた場合には、二水石膏の添加に伴ってピークの $\sigma$ 値がいったん減少し、添加率を増加させることで徐々に回復するが、二水石膏を20%添加しても二水石膏を添加しない場合と同程度の $\sigma$ 値しか得られておらず、明瞭な改善は得られなかった。このような結果から、二水石膏を添加した締め固め土の強度特性は、一般の土を締め固めた強度特性と同様に乾燥側で最大強度が認められる傾向を示した。

### 3.3 作製時の含水比および二水石膏添加率が一軸圧縮強さに及ぼす影響

二水石膏添加率の違いが作製時の含水比と一軸圧縮強さに及ぼす影響について考察を行う。一軸圧縮強さの値と含水比の関係を図-5に示す。締め固め曲線との関係が分かりやすいように、締め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%の場合に着目すると、 $q_u$ 値は $w$ 値の減少に伴って直線的に増加しており、最大の $q_u$ 値は最も小さな含水比で得られた。つぎに二水石膏を添加した場合に着目すると、G/S=5%の場合の $q_u$ 値はG/S=0%と同様に、 $w$ 値の減少に伴って直線的に増加しているが、G/S=10%の場合には $w$ 値の減少に伴う $q_u$ 値の増加傾向は $w < w_{opt}$ の範囲で緩やかになった。

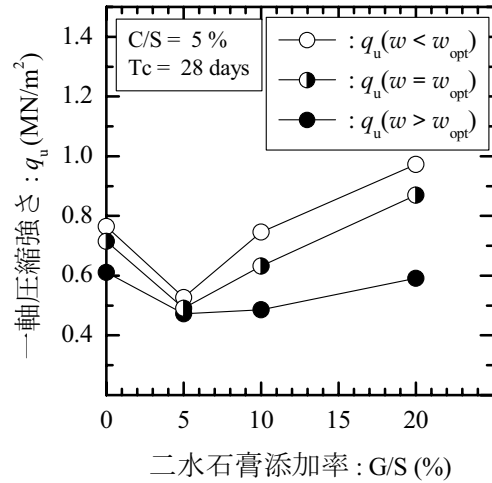


図-6 各含水比における一軸圧縮強さと二水石膏添加率の関係

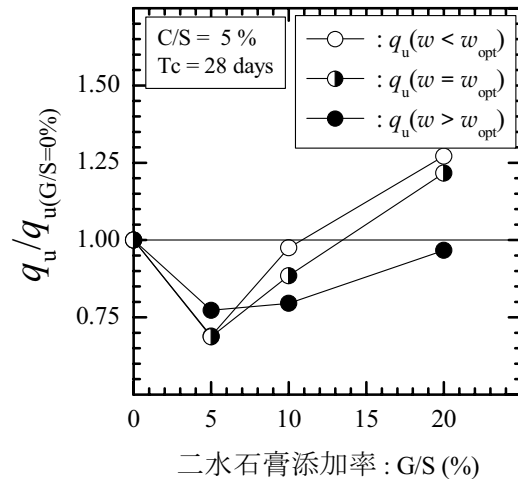


図-7 各含水比における一軸圧縮強さと二水石膏添加率の関係 (正規化)

換言するならば、 $q_u$ 値の改善は最適含水比近傍で得られやすいといえる。G/S=20%の場合にはその傾向が顕著になり、含水比が最適含水比より小さい乾燥側では、 $w$ 値が変化しても $q_u$ 値はほとんど変化しないが、含水比が最適含水比より大きな湿潤側では $w$ 値の僅かな増加で $q_u$ 値は急激に低下した。この最適含水比近傍で $q_u$ 値が著しく改善する一因としては、二水石膏が豊浦珪砂と比較して幅広い粒径を有していることがあげられる。すなわち、二水石膏添加に伴い幅広い粒径分布となることにより、供試体内の間隙が減少し、密な構造が形成され、締め固めに適した最適含水比近傍において $q_u$ 値がとくに改善したものと考えられる。したがって、二水石膏を20%混合し、乾燥側において得られる $1\text{MN/m}^2$ 近くの一軸圧縮強さを期待する場合には、含水比が湿潤側にならないように含水比の管理に気を付ける必要がある。

各含水比での $q_u$ 値の大きさに着目すると、非常に高い

含水比の場合を除いて、いずれの含水比においても G/S=5% の場合の  $q_u$  値は、G/S=0% の  $q_u$  値よりも低下している。一方、二水石膏添加率を増加させると  $q_u$  値は増加し、G/S=10% において G/S=0% の場合と同程度の値を示し、G/S=20% となると G/S=0% の場合より大きくなることが明らかとなった。このような結果は、二水石膏を 20% 程度添加することによって、仮に自然含水比が湿潤側であっても一軸圧縮強さを改善できることを示している。

種々の含水状態、すなわち最適含水比、最適含水比より小さな乾燥側、および最適含水比より大きな湿潤側の含水比で締め固めた供試体の一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) と二水石膏添加率の関係を図-6 に示す。まず、最適含水比付近で締め固めた場合に注目すると、 $q_u$  値は、G/S=0% で 0.739 MN/m<sup>2</sup> であったものが、G/S=5% で 0.479 MN/m<sup>2</sup> といった減少するものの、さらに添加率を増加させ G/S=10% とすると 0.631 MN/m<sup>2</sup> まで回復し、とくに G/S=20% においては 0.865 MN/m<sup>2</sup> となり、二水石膏を添加しない場合より大きな値を有することがわかる。乾燥側においても、定性的には最適含水比付近で締め固めた場合と同様の結果が得られた。一方、湿潤側においては、添加率を 5% から 20% に増加させた場合の  $q_u$  値の増加傾向が小さくなった。

このような二水石膏添加率の違いに伴う  $q_u$  値の変化傾向をより明瞭に示すために、各含水比状態において、二水石膏を添加しない場合の  $q_u$  値で各二水石膏添加率の場合の  $q_u$  値を正規化した結果を図-7 に示す。図より、最適含水比付近および乾燥側の含水比で締め固めた場合には、 $q_u$  値は二水石膏を 5% 添加することで 3 割程度低下するが、二水石膏添加率のさらなる増加に伴い、ほぼ直線的に増加し始め G/S=20% において二水石膏を添加しない場合と比較して 2~3 割程度改善することがわかる。一方湿潤側の場合には、G/S=5% の場合、低下率が 2 割程度と比較的小さいが、二水石膏添加率を増加させても  $q_u$  値の改善は乏しく、G/S=20% 程度で二水石膏を添加しない場合と同程度の  $q_u$  値が得られた。以上のことから、二水石膏を 5%~10% 程度混合して締め固めると、一軸圧縮強さを低下させることがわかる。二水石膏を添加して締め固める場合には、20% 程度の二水石膏を添加するとともに、最適含水比と同程度かそれより僅かに小さな含水比で締め固めることが重要である。

石膏はセメント水和反応時にアルミネート相の硬化を抑制するという特性を有しており、この特性を利用してセメント製造の際に凝結調整剤として石膏が使用されている<sup>13)</sup>。このような特性によって、二水石膏を少量混合した場合の一軸圧縮強さが、混合していない場合と比較して発揮されなかったものと考えられる。しかしながら、二水石膏添加率をさらに増加させることで、前述したように幅広い粒径分布を有するようになり土骨格部分が相対的に増加して密な構造が作られ、その結果、一軸圧縮強さが増加に転じたものと推察される。

#### 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) 二水石膏を添加すると、豊浦珪砂に 5% の高炉セメント B 種を添加した処理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から、最適含水比が大きく比較的軽量の地盤材料となることが示された。
- 2) 豊浦珪砂処理土に二水石膏を 20% 混合して締め固めると、二水石膏を混合しない場合と比較して一軸圧縮強さが改善することが明らかとなった。とくに最適含水比程度もしくは最適含水比より小さな含水比で締め固めた場合の一軸圧縮強さの改善は顕著であった。

以上のことから、廃石膏を粉砕処理した二水石膏は、地盤材料として十分適応可能であると考えられる。また、二水石膏はその性質上、半水石膏と比較して低コストの運用が可能であるため、現場施工の条件、状態に応じて使い分けることが可能である。なお、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があることから、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。本研究では廃石膏の再利用先の開拓が急務であることから良好な締め固め特性が得られやすいと考えられる砂試料を対象としたが、今後は締め固めに不向きな粘性土等への有効利用を検討していくとともに、環境に配慮した設計体系を構築していきたいと考えている。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、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) 環境省：産業廃棄物の排出及び処理状況等（平成 20 年度実績）、環境省 HP、廃棄物・リサイクル対策、廃棄処理の現状、廃棄物処理に関する統計・状況、[http://www.env.go.jp/recycle/waste/sangyo/sangyo\\_h20.pdf](http://www.env.go.jp/recycle/waste/sangyo/sangyo_h20.pdf), 2011.6.
- 2) 国土交通省：建設リサイクル推進懇談会提言、国土交通省 HP、政策・仕事、総合政策、リサイクル、建設リサイクルの基本方針、[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/recyclehou/recycle\\_kihon/6\\_1.htm](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/recyclehou/recycle_kihon/6_1.htm), 2011.6.
- 3) (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>, 2011.6.
- 4) 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

廃石膏を混入した締固め土の一軸圧縮特性

- 関する研究, 国立環境研究所研究報告, 第 188 号, pp.7-13, 2005.
- 5) 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.
- 6) 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化—, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.3, pp.449-461, 2010.
- 7) 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.
- 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) (財)日本工業規格:「JIS ハンドブック 12 土木Ⅱ」, pp.678-681, 2002.
- 12) 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.
- 13) 岡田 清, 明石外世樹, 小柳 洽: 新編 土木材料学, p.92, 1987.

(2011 年 6 月 27 日 受付)

