

## 半水石膏と石炭灰を混入した締固め土の一軸圧縮特性

## Unconfined Compressive Characteristics of Compacted Soil Adding Bassanite and Coal Ash

亀井健史 Takeshi KAMEI (宮崎大学工学部)  
大島章寛 Akihiro OHSHIMA (島根大学大学院総合理工学研究科)  
志比利秀 Toshihide SHIBI (島根大学総合理工学部)

わが国では火力発電所から発生する石炭灰の発生量が今後も増大することは確実な状況と考えられている。また、廃石膏ボードもその処分困難性から再利用の拡大が急務となっている。そこで本研究では、その両方を用いた地盤材料を創造し、その地盤工学的特性を明らかとしようとしている。具体的には、石炭灰と半水石膏を種々の配合条件で添加した試料に対し、突固めによる締固め試験を行い、締固め特性とその強度特性の関係を定量的に評価した。その結果、いずれの半水石膏添加率においても石炭灰を混入することにより、一軸圧縮強さは増加する傾向が認められ、石炭灰と半水石膏を地盤改良材として利用することは大変有益であることが示唆された。

キーワード： 締固め土、石炭灰、半水石膏、一軸圧縮特性 (IGC : D06, D09, T14)

## 1. はじめに

わが国における今後の電力需要は、内需を中心とした安定的な経済成長、経済社会や国民生活の高度化等を反映して、中長期的には着実に増加していくものと考えられる。近年では資源の有限性や環境問題といった諸問題が深刻化しており、これらの問題に対処できる発電方法として、二酸化炭素を全く排出せずに大量の電力を供給可能で使用した燃料を再利用できる原子力発電、自然環境を利用した風力発電や太陽光発電の普及が期待されている。しかしながら、原子力発電では近隣住民の安全確保に関する問題が、自然環境を利用した発電方法では天候などの自然条件に左右され安定性に欠けるといった欠点があり、これらの発電方法の早期普及は困難な状況である。したがって、未だにわが国の発電量は火力発電が最も多く、その中でも石炭を燃料とした火力発電の占める割合は大きい<sup>1)</sup>。わが国は世界最大の石炭輸入国の一つであり、今後も発電所の増設および発電量の拡大が見込まれることから、石炭灰の発生量が増大することは確実な状況と考えられている。

石炭灰は、コンクリート混和材としての利用が早くから進められてきた。その結果、現在ではセメント・コンクリート分野を中心に9割以上が有効利用されている<sup>2)</sup>。しかしながら、わが国におけるセメント生産量は、近年減少傾向にあり<sup>3)</sup>、今後もセメント分野で従来のような需要を見込むことは難しい状況にある。したがって、今後見込まれる石炭灰の発生量増加に対処するためには、その他の分野での利用拡大が必要と考えられ、道路路盤材や、地盤改良材といった大量利用可能性な土木分野での有効利用が期待されている。

これまで、石炭灰の締固め特性について検討した研究例として、鳥居ほか<sup>4)</sup>は締固めた石炭灰の強度発現が、石炭灰中に含有されている遊離石灰および無水石膏に起

因するものであり、これらの水溶性成分が間隙水中に溶出する過程で石炭灰の粒子表面においてエトリングタイトの生成反応が進行することを報告している。佐野ほか<sup>5)</sup>は締固めた石炭灰供試体に対して実験を行い、石炭灰中の酸化カルシウム含有率が多いほど一軸圧縮強さは大きくなるものの、体積変化率も大きくなることを示した。また、亀井ほか<sup>6)</sup>は石炭灰単体を用いた締固めにおいて、締固め仕事量の違いが一軸圧縮強さに及ぼす影響を明らかにし、石炭灰の締固め特性とその力学的特性の関係を定量的に評価している。

一方、産業廃棄物を地盤改良材として有効利用した例として石膏ボードが挙げられる。石膏ボードとは、石膏を芯材とし、その両面を厚紙で覆って平らな板状にした建築材料であり、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。そのため、わが国における石膏ボードの生産販売数量は年々増加しており、現在では、年間約500万トンが国内で生産されている<sup>7)</sup>。しかしながら、建築現場から排出される廃石膏ボードも年々増加しており、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<sup>8)</sup>。

廃石膏ボードを埋め立て処分すると、廃石膏ボードに含まれる紙などの有機物が分解され、埋め立て層内は還元状態となる場合がある。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<sub>4</sub><sup>2-</sup>)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(H<sub>2</sub>S)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。さらに近年、付着している紙を取り除いた石膏を安定型処分場へ埋め立て処分を行った場合でも、高濃度の硫化水素ガスが発生する恐れがあるという

表 - 1 石炭灰の物理特性<sup>6)</sup>

$\rho_s$ ( $\text{Mg/m}^3$ )	$w_L$ (%)	$w_P$ (%)	$I_P$	砂分 (%)	シルト (%)	粘土分 (%)
2.170	NP	NP	NP	6.9	73.1	22.0

ことが明らかになった。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。今後も廃石膏ボードの排出量は増加することに加え、廃石膏の処分が困難になることも予想される。

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℃前後から結晶水の分子全体の 3/2 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、最終的に安定した半水石膏が得られる（200℃以上の加熱で無水石膏 ( $\text{CaSO}_4$ )）。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おり、このような硬化作用がもたらす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。

これまでに廃石膏を地盤改良材として有効利用するための研究例として、亀井ほか<sup>9)</sup>は廃石膏ボードから再生した半水石膏の締固め特性を明らかにし、締固め特性と強度特性の関係を定量的に評価した。また、亀井・珠玖<sup>10)</sup>は廃石膏ボードから再生した半水石膏をセメント安定処理土に適用することの有効性を示し、更にセメントの種類の違いが一軸圧縮特性に及ぼす影響について定量的に評価した。

このように、石炭灰および半水石膏を地盤改良材として単独で有効利用した研究例はいくつかなきされている。しかしながら、この両者を用いた地盤材料の力学的特性については未解明である。また、半水石膏を添加する際に安定処理材として高炉セメント B 種を添加することによってエトリンサイト生成量が増加し、その生成量は  $\text{Al}_2\text{O}_3$  量に支配されていることが報告されている<sup>11)</sup>。このエトリンサイトの生成が強度発現につながるものと考えられることから、半水石膏を地盤改良材として用いる場合に  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を多く含む石炭灰をさらに添加することにより、エトリンサイト生成量の増加が予想されることから、強度発現の更なる改善が期待できる。

そこで本研究では、半水石膏および石炭灰を添加した

表 - 2 石炭灰の化学成分<sup>6)</sup>

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$
66.9	22.4	4.28	1.96	1.16	0.29	0.39	0.86

表 - 3 半水石膏の物理特性<sup>13)</sup>

$\rho_s$ ( $\text{Mg/m}^3$ )	$D_{10}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	均等係数 $U_c$	曲率係数 $U_c'$
2.640	0.220	0.370	0.500	0.600	2.73	1.04

場合の力学的性質を把握しておくことは重要であると考え、石炭灰と半水石膏を種々の配合条件下で添加した試料に対し、突き固めによる締固め試験を行い、その締固め特性を明らかにした。また、その際得られた供試体に対して一軸圧縮試験を実施することにより、締固め特性とその強度特性の関係も定量的に評価した。

## 2. 試料および実験方法

### 2.1 試料

本研究では、中国電力株式会社三隅火力発電所から産出したフライアッシュ（以下、石炭灰）を使用した。表 - 1 は、本研究で使用した石炭灰の物理的特性を示している。粒径は 75 $\mu\text{m}$  以下が 80～90%を占めており、粒度による土の分類では、シルトに分類される。表 - 2 は、石炭灰の化学成分を示している。石炭灰の主成分は、二酸化珪素 ( $\text{SiO}_2$ ) および酸化アルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) であり、酸化鉄 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) や酸化カルシウム (CaO) など若干含んでいる。石炭灰は、 $\text{SiO}_2$  と  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を主な組成とするポゾラン（天然物および人工のシリカ質混合材）が水酸化カルシウム ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) と常温でゆっくり反応し、不溶性で硬化するシリカ質化合物を生成するポゾラン反応を有する材料である。このポゾラン反応には、セメント粒子と石炭灰粒子の反応と、石炭灰粒子同士の反応とがある。また、セメント水和時に  $\text{SO}_4^{2-}$  と  $\text{H}_2\text{O}$  が存在する場合、アルミネート相（アルミン酸カルシウム水和物： $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ）とこれらが反応し、針状結晶のエトリンサイトを析出する。このエトリンサイトはそれ自体で強度を発現し、セメント硬化体を膨張させる性質がある<sup>12)</sup>。

混入する半水石膏（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碎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、

表 - 4 高炉セメント B 種の品質<sup>14)</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	—	—

表 - 5 高炉セメント B 種の化学成分<sup>15)</sup>

セメントの種類	Ig.loss (強熱減量)	Insol. (不溶残分)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	R <sub>2</sub> O	TiO	P <sub>2</sub> O	MnO	Cl
高炉セメント B 種	0.8	0.2	26.3	8.7	1.9	54.1	3.7	2.0	0.26	0.42	0.54	0.69	0.08	0.28	0.007

表 - 6 豊浦標準砂の物理特性

$\rho_s$ (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 $U_c'$
2.650	0.125	0.180	0.235	0.260	2.08	0.997

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<sup>13)</sup>。半水石膏の物理特性を表 - 3<sup>13)</sup>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、本研究では半水石膏と石炭灰を混合することで、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量を石炭灰からも補充し、石膏のみを添加した場合より、さらにエトリンガイトが生成されやすくなるという効果も期待している。

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と比較して一軸圧縮強さを得やすいこと、および安価であることなどから経済的にも優れた安定材である。高炉セメント B 種の品質は、JIS R 5210で表 - 4<sup>14)</sup>のように定められている。また、その化学成分を表 - 5<sup>15)</sup>に示す。本研究では、セメントの強度発現促進効果のみならず、とくにその固化作用にも着目しており、先述したように、石膏からの溶出が懸念される重金属を固化させ溶出を抑制させる効果に期待している<sup>16)</sup>。また、セメントを過度に添加する場合には六価クロムの溶出が懸念されることから、セメントの添加量を比較的軽く設定した。

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標準砂を用いた。その物理特性を表 - 6に示す。なお、豊浦標準砂は標準網ふるい 300  $\mu$ m 残分

が 1%以下、106  $\mu$ m 残分が 95%以上に粒度調整されている<sup>17)</sup>。

また、含水比を操作するため、試料調整時に水が必要となる。本研究には正確な締固め特性および一軸圧縮強度を検討するために強度発現に悪影響を及ぼす可能性が少ない蒸留水を使用した。

## 2.2 実験方法

供試体作製に際しては、鋳鉄製の二つ割りモールド( $\phi=50$ mm, H=100mm)を用いて、3層に分けて突固めによる締固めを行った。JIS A 1210<sup>18)</sup>および JSF T 711<sup>19)</sup>の Standard Proctor ( $Ec \approx 0.55$ J/cm<sup>2</sup>  $Ec$ : compactive effort)の締固め仕事量を用いて締固め試験を実施した。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。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、石炭灰添加率(F/S)および半水石膏添加率(B/S)はそれぞれ 0%, 10%, 20%の 3 配合を対象とした。

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、気中で 28 日間養生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、その供試体の含水比とした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 締固め曲線および一軸圧縮強さ

図 - 1, 2, 3 は、それぞれ豊浦標準砂に半水石膏を 0%, 10%, 20%添加した締固め土の締固め曲線および一軸圧縮強さに石炭灰添加率の違いが及ぼす影響を示している。

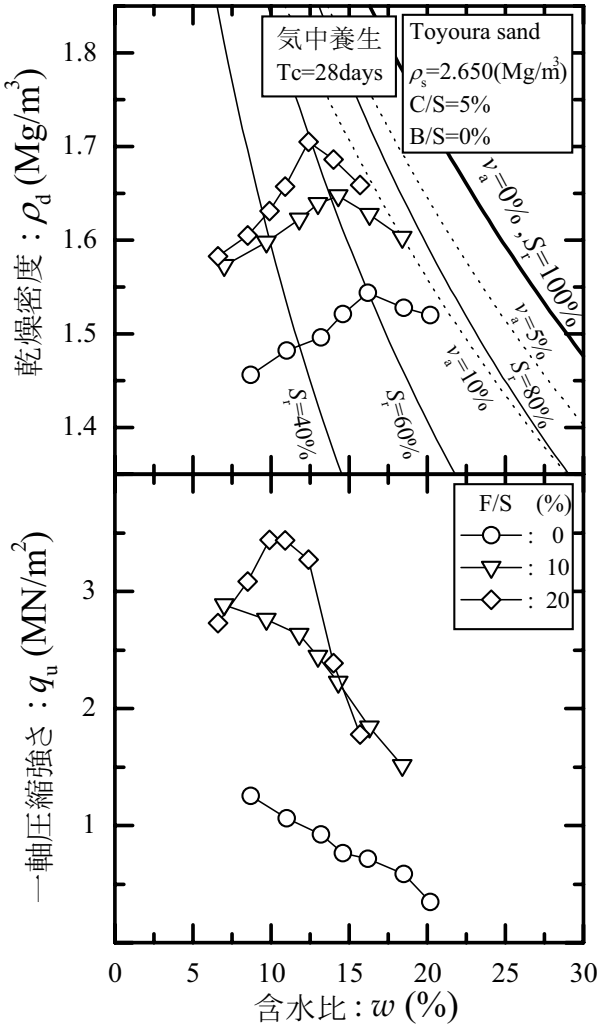


図 - 1 石炭灰添加率の違いが締固め曲線と一軸圧縮強さに及ぼす影響 (B/S=0%)

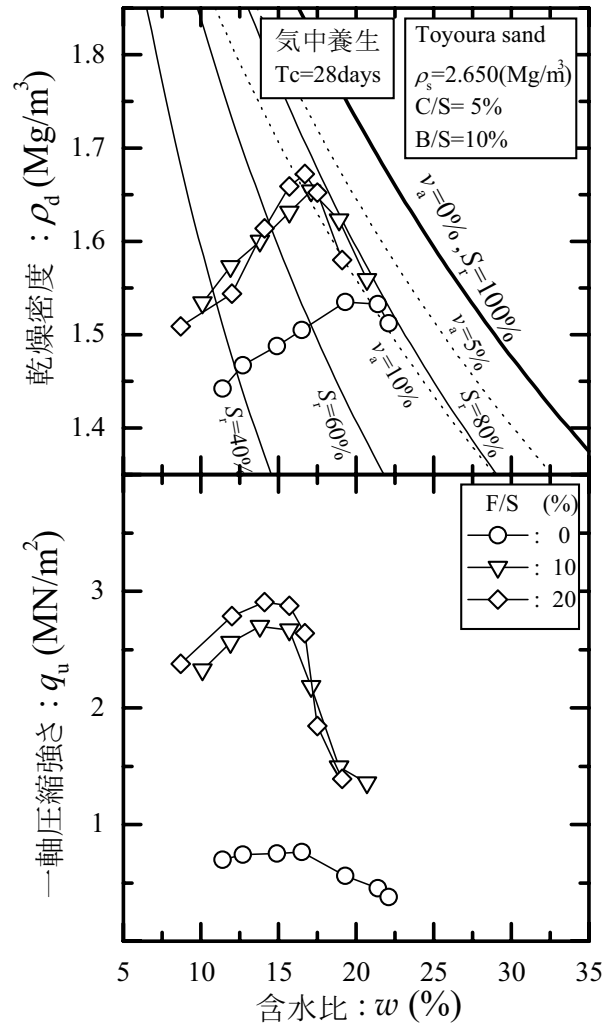


図 - 2 石炭灰添加率の違いが締固め曲線と一軸圧縮強さに及ぼす影響 (B/S=10%)

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。

まず、B/S=0%の場合における種々の石炭灰添加率に対する締固め曲線に着目すると(図-1)、石炭灰添加率の増加に伴い、締固め曲線は低含水比—高乾燥密度側にシフトする傾向が認められた。これは、豊浦標準砂に粒度が比較的小さな石炭灰を添加することによって、幅広い粒度分布を有することとなり、その間隙が減少する。その結果、含水比が低下し、乾燥密度が増加したものと考えられる。また、含水比と一軸圧縮強さの関係に着目すると、F/S=0%、10%の場合では含水比の増加に伴い一軸圧縮強さは直線的に減少し続けた。このような締固め特性と強度の関係は一般的な土の場合とは異なっているが、豊浦標準砂に少量の半水石膏を添加し、締固めた場合にも同様の傾向が認められている<sup>9)</sup>。一方、F/S=20%の場合には、含水比の増加に伴い一軸圧縮強さは増加し、含水比が最適含水比の約8割の値において一軸圧縮強さは最大値となった。含水比の更なる増加に伴って一軸圧縮強さは急激に減少していき、締固め特性と強度の関係は

一般的な締固め土と同様の傾向を示した。

つぎに半水石膏を添加した場合における種々の石炭灰添加率に対する締固め曲線に着目すると(図-2, 3)、B/S=0%の場合と同様に石炭灰添加率の増加に伴い、締固め曲線は低含水比—高乾燥密度側にシフトする傾向が認められた。しかしながら、B/S=0%には石炭灰添加率の増加に伴い、締固め曲線が左上にシフトしたのに対し、半水石膏を添加した場合にはF/S=10%と20%の締固め曲線の間には、大きな変化は認められなかった。これは、土試料の粒度分布がB/S=0%の場合に比べてあまり変化しなかったためと考えられる。一方、含水比と一軸圧縮強さの関係に着目すると、今回対象としたいずれの配合条件においても含水比の増加に伴い一軸圧縮強さは増加していき、最適含水比付近において最大強度となった後、更なる含水比の増加に伴い強度は急激に低下した。また、石炭灰添加率の違いに着目すると、石炭灰添加率の増加に伴い強度—含水比線は上方にシフトした。

以上のことから豊浦標準砂に石炭灰および半水石膏をある程度添加することにより含水比と強度の関係は一般



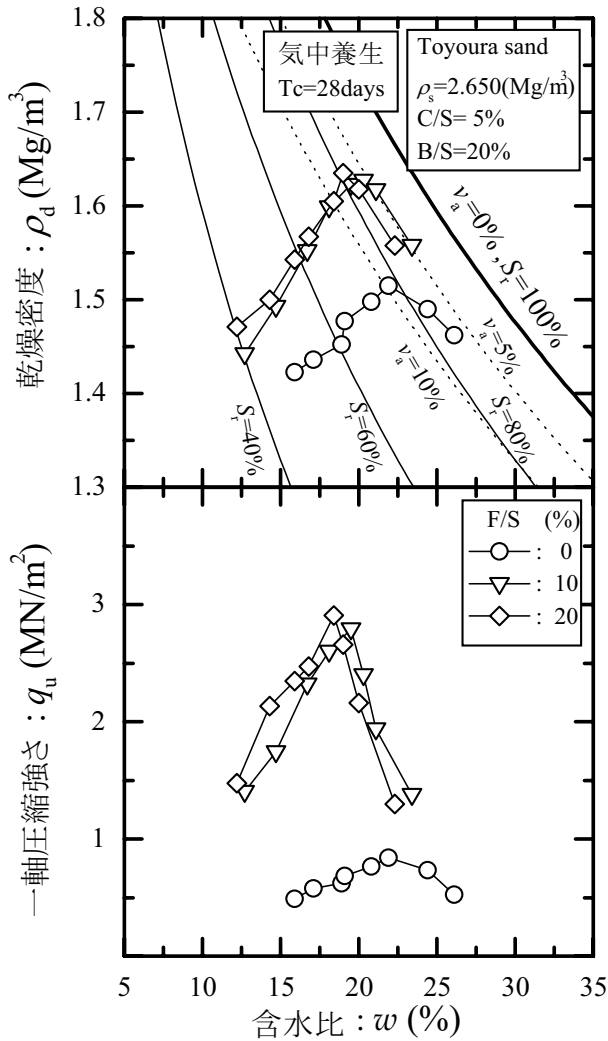


図 - 3 石炭灰添加率の違いが締固め曲線と一軸圧縮強さに及ぼす影響 (B/S=20%)

的な締固め土と同様な傾向を示すようになることがわかる。

### 3.2 応力 - ひずみ曲線

図 - 4, 5, 6 はそれぞれ  $w=0.85w_{opt}$ ,  $w_{opt}$ ,  $1.15w_{opt}$  で試料を締固めた場合における石炭灰添加率の違いが応力 - ひずみ曲線に及ぼす影響を示しており、各図の(a), (b), (c)はそれぞれ半水石膏を 0%, 10%, 20% 添加した場合を示している。

いずれの応力 - ひずみ曲線においても載荷直後には、応力値はひずみ量の増加に伴い急激に増加した。この傾向は石炭灰添加率の増加に伴ってより顕著に認められた。最適含水比および乾燥側の含水比においては、応力値はそのピークを過ぎると圧縮ひずみの増加に伴って急激に低下した。その傾向は、低含水比の場合により顕著に認められた。一方湿潤側では、応力値はそのピークを過ぎると、圧縮ひずみの増加に伴い応力値は徐々に低下した。また、石炭灰添加率の増加に伴い、いずれの含水比においてもピーク強度は増加する傾向にあったが、 $F/S=20\%$ ,

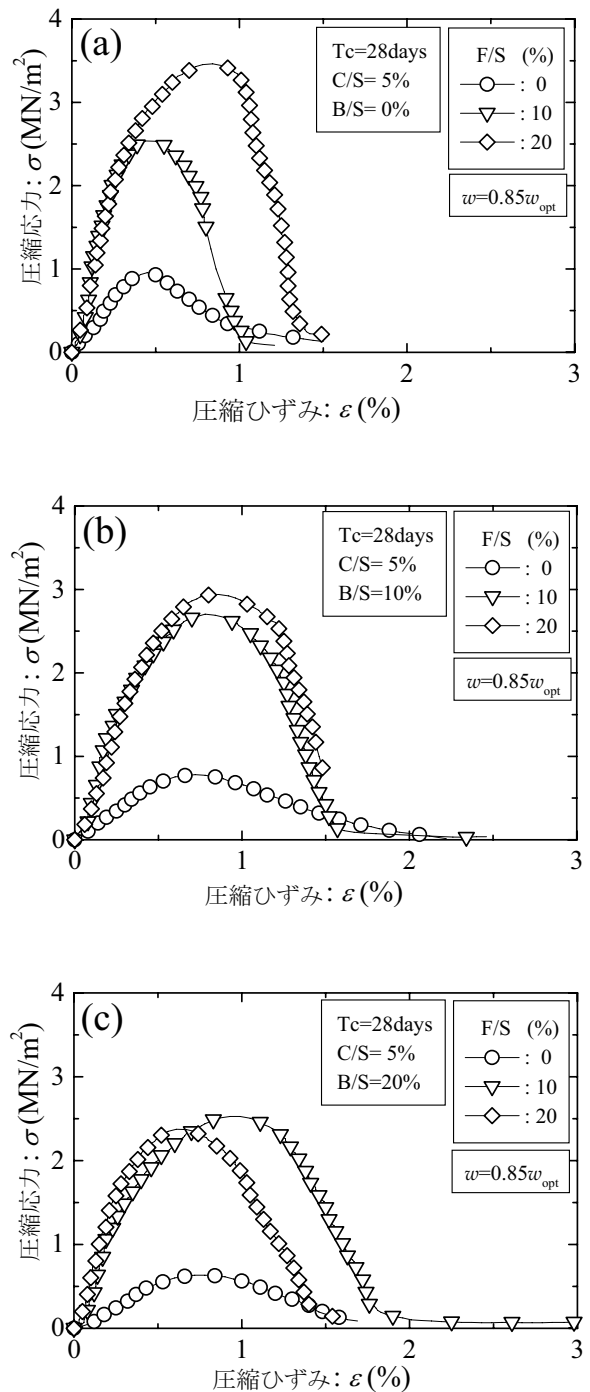


図 - 4 石炭灰添加率の違いが応力-ひずみ曲線におよぼす影響 (乾燥側)

$B/S=20\%$ における乾燥側および湿潤側では  $F/S=10\%$ の応力値の方が高い値を示した。半水石膏を添加しない場合においては石炭灰添加率の増加に伴い、いずれの含水比においても応力値のピークは増大した(図 - 4~6(a))。一方、半水石膏を添加した場合は、いずれの含水比においても石炭灰を添加することにより応力値のピークは増大したが、石炭灰の添加率を増やしても応力 - ひずみ曲線には大きな変化は認められなかった(図 - 4~6(b), (c))。また、半水石膏を添加するほど、応力値のピーク後の応

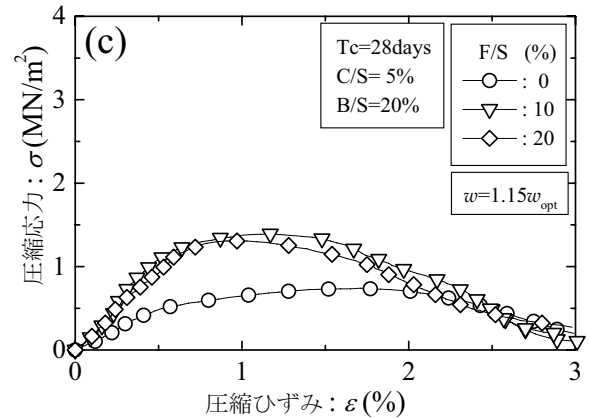
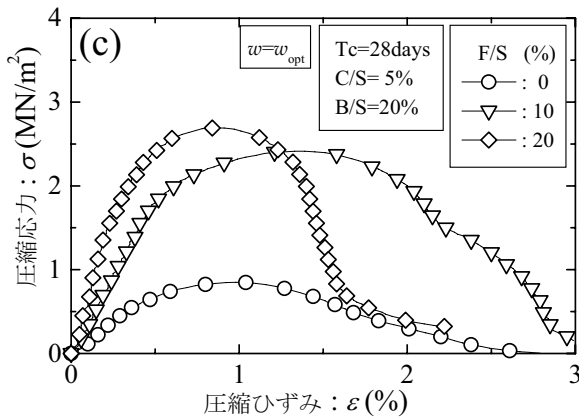
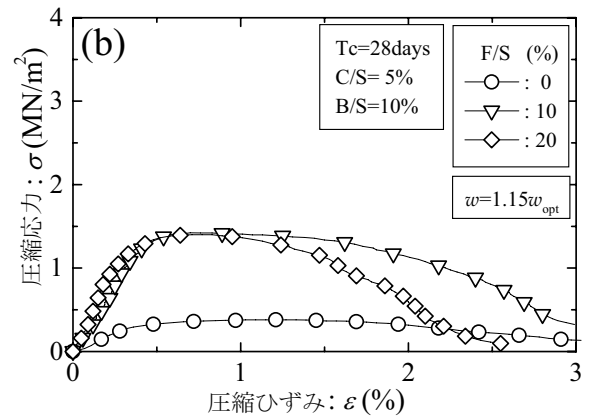
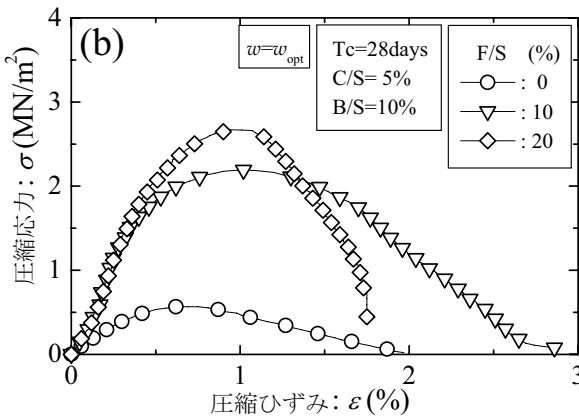
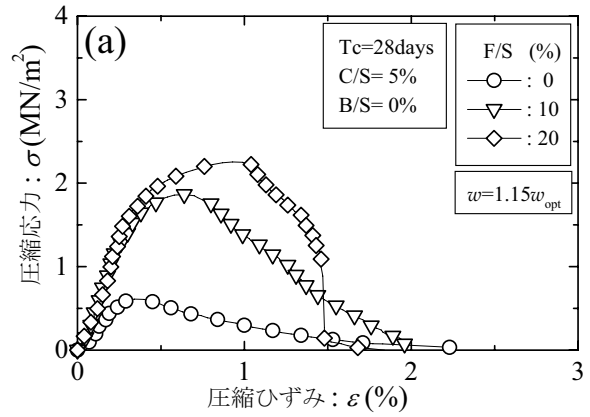
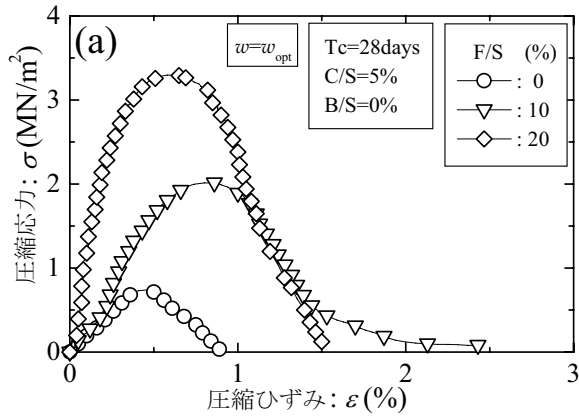


図 - 5 石炭灰添加率の違いが応力-ひずみ曲線におよぼす影響（最適含水比）

図 - 6 石炭灰添加率の違いが応力-ひずみ曲線におよぼす影響（湿潤側）

力値は緩やかに低下していく傾向が認められた。

### 3.3 石炭灰添加率と一軸圧縮強さの関係

まず図 - 7 に着目すると、B/S=0%では、石炭灰添加量の増加に伴い、 $q_u$  値は増加する傾向が認められる。一方、B/S=10%の場合においては、F/S=0%から F/S=10%に増加させると、 $q_u$  値が B/S=0%の場合と同程度増大するものの、石炭灰添加率を更に増加させた場合には、 $q_u$  値の増加量は B/S=0%の場合ほど顕著には認められなかった。この傾向は B/S=20%においても同様であった。以上の結

果より、いずれの半水石膏添加率でも、石炭灰を添加することにより、最適含水比における  $q_u$  値と  $q_{umax}$  値は増加する傾向が認められた。この強度増加の要因として、石炭灰添加率の増加に伴うエトリンガイト生成量の増大が考えられる。

つぎに、図 - 8 に着目すると、いずれの石炭灰添加率においても B/S=10%の  $q_u$  値は B/S=0%の  $q_u$  値より多少減少したものの、B/S=20%では  $q_u$  値が僅かに増加した。

なお、この少量の半水石膏混入に伴って強度が低下する主要因としては、セメント製造過程で凝結調整剤とし

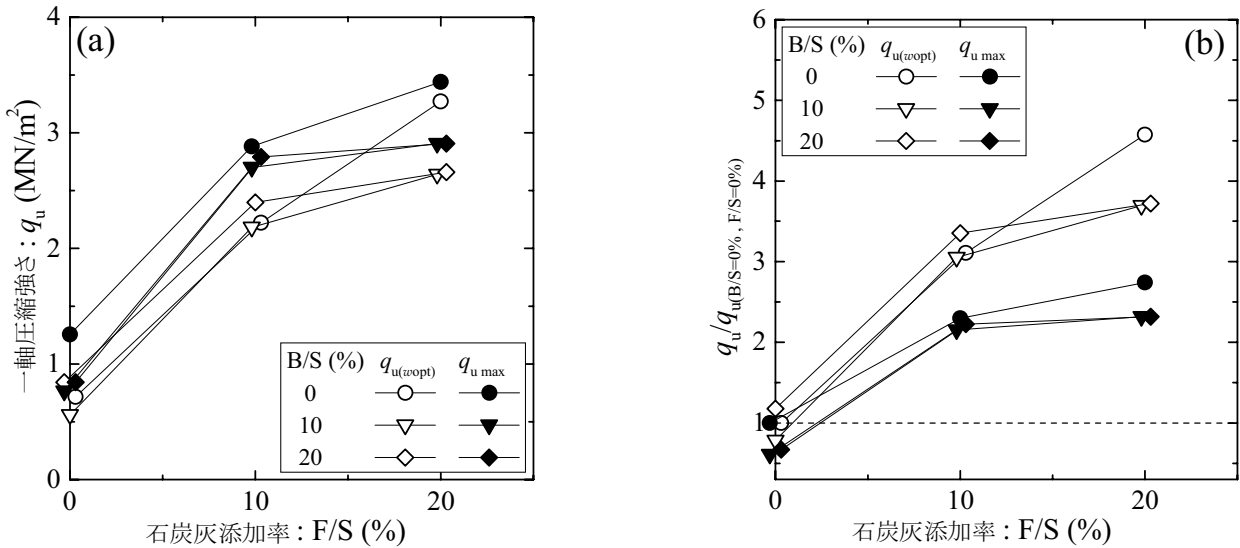


図 - 7 石炭灰添加率が一軸圧縮強さに及ぼす影響

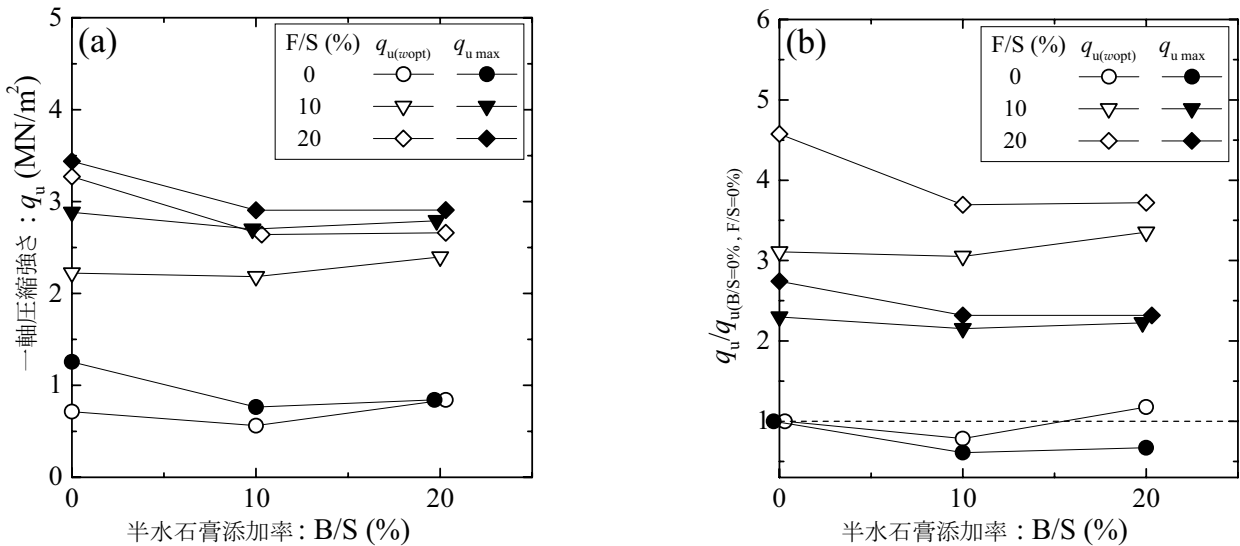


図 - 8 半水石膏添加率が一軸圧縮強さに及ぼす影響

て石膏が使用されていることと関係があるものと考えられる。すなわち、セメントを構成しているクリンカー鉱物の一つのアルミネート相 (C<sub>3</sub>A) の硬化を過剰に抑制している可能性が指摘できる。一方、半水石膏添加率の増加に伴って、一軸圧縮強さが増加した主要因としては、半水石膏量とエトリンガイト生成量との密接な関係があるものと考えられる。この仮説を実証するため、今後は X線回析によるエトリンガイト生成量の評価や走査型電子顕微鏡を用いたその内部構造の観察を行っていく必要がある。

以上のことから、半水石膏に加えて石炭灰を添加することによって、締固め土の一軸圧縮強さは著しく改善することが明らかとなった。したがって、半水石膏と石炭灰を地盤改良材として利用することにより、地盤の強度を改善するとともに、リサイクルの必要性に迫られている半水石膏を大量に有効利用できる可能性が示唆される。

#### 4. 結論

本研究では石炭灰と半水石膏を種々の割合で添加した締固め土の締固め特性と一軸圧縮特性を定量的に評価した。以下に本研究において得られた結論を列記する。

- (1) 石炭灰と半水石膏を種々の割合で添加した締固め土の締固め曲線は、石炭灰添加率の増加に伴い最大乾燥密度は増加し、最適含水比は減少する傾向を示した。なお、半水石膏を添加した場合における F/S=10% と 20% の締固め曲線の間には大きな変化が認められなかった。
- (2) 締固め試験から得られた供試体に対して一軸圧縮試験を実施した結果、B/S=0% においては F/S=0%、10% の場合、含水比の増加に伴い一軸圧縮強さは直線的に減少したが、その他の配合条件下では最適含水比付近で締固めた供試体において最大となった。
- (3) 半水石膏を添加した締固め土の一軸圧縮強さは、半

水石膏を10%混入すると多少減少するものの、さらに半水石膏添加率を増大させることによって、増加する傾向が認められた。さらに石炭灰を添加する場合には、著しい強度改善が得られることが明らかとなった。

以上の結論より、リサイクルの必要性に迫られている半水石膏を地盤改良材として利用する際、同時に石炭灰を添加することによって優れた強度改善が得られることから、両者を地盤改良材として用いることは地盤工学的にも半水石膏のリサイクルの面からも大変有益であると考えられる。今後、これらの産業廃棄物を用いて種々の条件で実験を行うことにより、実務に適応可能であることが明らかとなれば、わが国の目指す資源循環型社会の構築に大きく貢献できることが期待される。

#### 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。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) 電気事業連合会：電源別発電電力量の実績および見通し，電気事業連合会 HP，[http://www.fepc.or.jp/present/jigyoku/japan/sw\\_index\\_02/index.html](http://www.fepc.or.jp/present/jigyoku/japan/sw_index_02/index.html)，2009.6.
- 2) (財)石炭エネルギーセンター：平成19年度石炭灰の有効利用分野内訳，(財)石炭エネルギーセンターHP，石炭灰実態調査，石炭灰の利用状況，<http://www.jcoal.or.jp/coalash/pdf/CoalAshH19utilization1.pdf>，2009.6.
- 3) (社)セメント協会：2009年度セメント需要見通し，セメント協会 HP，統計データベース，[http://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh5\\_0900.pdf](http://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh5_0900.pdf)，2009.6.
- 4) 鳥居和之，川村満紀，榎場重正：締固めた石炭灰における反応生成物と強度に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.65-74，1986.
- 5) 佐野博昭，山田幹雄，太田実，山本三千昭：養生条件の違いが締固めた石炭灰供試体の一軸圧縮強さおよび体積変化率に及ぼす影響，土木学会論文集，No.463/III-22，pp.45-53，1993.
- 6) 亀井健史，松尾和俊，志比利秀：締固めた石炭灰の一軸圧縮特性に及ぼすセメント添加量の影響，土木学会論文集，No.778/III-69，pp.183-193，2004.
- 7) 廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する検討委員会：石膏ボードのリサイクルの推進に関する検討調査，環境省，p.9，2003.
- 8) (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/>，2009.6.
- 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・珠玖隆行：軟弱地盤改良材としての反す石膏の利用—廃石膏ボードの有効利用—，地盤と建設，Vol.25，No.1，pp.33-40，2007.
- 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) 環境技術協会，日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック(第3版)，pp. I -19- I -36，pp. II -1- II -4，2000.
- 13) 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.
- 14) (財)日本規格協会：JISハンドブック 10 生コンクリート(第1版)，p.194，2002.
- 15) セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル(第2版)，pp.1-48，1985.
- 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) (株)豊浦硅石鉱業：<http://www4.ocn.ne.jp/~toyoura/>，2009.6.
- 18) 財団法人 日本工業規格：JISハンドブック 12 土木II，pp.678-681，2002.
- 19) 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.

(2009年6月29日 受付)