

半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の 一軸圧縮特性に及ぼす乾湿繰り返し作用の影響

志比 利秀¹⁾, 大島 章寛²⁾, 亀井 健史³⁾

¹⁾島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

²⁾㈱日本海技術コンサルタント

³⁾宮崎大学工学部 土木環境工学科

Effects of wetting and drying cycles on unconfined compressive characteristics of cement-stabilized soils utilizing bassanite and coal ash

Toshihide SHIBI¹⁾, Akihiro OHSHIMA²⁾ and Takeshi KAMEI³⁾

¹⁾Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

²⁾Nihonkai Technology Consultants, Inc.

³⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Miyazaki University

Abstract

This paper describes the effect of wetting and drying cycles on unconfined compressive characteristics of cement-stabilized soils utilizing bassanite and coal ash. As a result, the unconfined compressive strength of cement-stabilized soil utilizing bassanite and coal ash can be represented as a hyperbolic relationship between unconfined compressive strength and curing period. The unconfined compressive strength of cement-stabilized soil increased with increasing bassanite-soil ratio when cement-stabilized soil was admixed with coal ash, although the unconfined compressive strength of cement-stabilized soil slightly decreased when cement-stabilized soil was admixed with a little bassanite. When cement-stabilized soils were subjected to wetting and drying cycles, the unconfined compressive strength of cement-stabilized soil admixed with bassanite and coal ash dropped by 10%. Bassanite produced from waste plasterboard becomes more useful as improver by using it with coal ash even if improved soils are exposed to wetting and drying cycles.

1. はじめに

近年、廃棄物処分場の容量不足や不法投棄の増加などの産業廃棄物に関する種々の社会問題が指摘されている。このような社会問題を解決するためには、生産から再利用に至るまでを包括的にとらえ、環境負荷の少ない資源循環型社会を構築することが急務となる。

わが国の産業において、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¹⁾。とくに建築分野は使用される材料の種類が多く、解体段階で不純物の混入が避けがたいこと等からリサイクルが進みにくい分野であると考えられている。そのため、建設系廃棄物のリサイクルを推進していくことは、わが国の循環型社会構築のためになすべき重要な課題の一つである。

その建設系廃棄物の中でも、近年、建築現場から排出される石膏ボード廃材の処理が大きな問題となっている。石膏ボード工業会によると、2009 年に約 104 万トンであった廃石膏ボードの排出量は、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されている²⁾。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の存在と硫酸還元菌などの土中細菌とが関与し、非常に毒性の高い硫化水素ガス (H_2S) が発生する可能性がある。それに伴って、現在では、廃石膏ボードは紙と廃石膏に分離した後、廃石膏、紙ともに管理型処分場に廃棄することが義務付けられている。この管理型処分場は、一般の安定型処分場と比較して廃棄コストが高いことに加え、平成 19 年度の時点では最終処分場をすべて併せてもその残余年数が 8.5 年と試算されていることからその残存容量が逼迫し

表-1 半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'}
2.640	0.220	0.370	0.500	0.600	2.73	1.040

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

ているという問題もある³⁾。今後も廃石膏ボードの排出量が増加するとの推計に加え、廃石膏の処分が困難になることも予想されることから、廃石膏ボードを大量に再利用できるリサイクル分野が必要であると考えられる。

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が、わが国におけるセメント生産量は近年減少傾向にあり⁴⁾、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。平成21年度の石炭灰の排出量は1095万トンに達しており⁵⁾、セメント分野に代わるその他の分野で石炭灰の利用拡大が必要と考えられる。その中でも、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。

石炭灰と廃石膏の両者を用いた地盤材料の研究は比較的少ない。石炭灰と廃石膏から生成した半水石膏を混入した締固め土の力学的特性について研究されており、廃石膏と固化材のみを添加した場合より、廃石膏と固化材に加えて石炭灰も混入することによって一軸圧縮特性が改善されることが報告されている⁶⁾。また、半水石膏を混入したセメント安定処理土に石炭灰も加えることによって、重金属の溶出量を著しく低減できることが報告されている⁷⁾。しかしながら、セメント安定処理土に半水石膏と石炭灰を混入した場合の力学的特性については未解明である。なお、廃石膏を地盤材料に用いようとする研究は、最近盛んに行われており、その有用性が明らかにされつつある⁸⁾⁻¹³⁾。

表-3 石炭灰の物理特性¹⁴⁾

ρ_s (Mg/m ³)	w _L (%)	w _P (%)	I _P	砂分 (%)	シルト (%)	粘土分 (%)
2.170	NP	NP	NP	6.9	71.1	22.0

表-4 MC クレーの物理特性¹⁰⁾

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

本研究では、半水石膏と石炭灰を混入したセメント安定処理土供試体を異なる養生日数で作製して一軸圧縮試験を実施し、養生日数の経過に伴う一軸圧縮強さの増加傾向を調べる。さらに、養生28日を経た半水石膏と石炭灰を混入したセメント安定処理土に乾湿繰り返しを与え、その一軸圧縮強さに及ぼす乾湿繰り返し作用の影響を明らかにする。

2. 試料

本研究で用いた半水石膏(硫酸カルシウム・1/2水和物(CaSO₄・1/2H₂O))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(硫酸カルシウム・2水和物(CaSO₄・2H₂O))を細粒化し、約130~150°Cで加熱処理したもので、日工(株)で生産された粉末状のものをを用いた。その物理特性を表-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。半水石膏に対する主な重金属の溶出試験結果を表-2に示す。

石炭灰に関しては、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-3¹⁴⁾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75μm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。石炭灰の主成分はSiO₂(66.9%)およびAl₂O₃(22.4%)であり、Fe₂O₃やCaOなども若干含んでいる¹⁴⁾。石炭灰は、SiO₂とAl₂O₃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(Ca(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SO₄²⁻とH₂Oが存在する場合、アルミネート相(アル

表-5 高炉セメント B 種の品質¹⁸⁾

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	—	—

ミン酸カルシウム水和物：3CaO・Al₂O₃・6H₂O）とこれらが反応し、針状結晶のエトリンガイトを析出する。このエトリンガ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¹⁵⁾。

本研究では、母材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-4¹⁰⁾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¹⁶⁾。

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、強度的にも経済的にも優れた安定材である。また、既往の研究から、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¹⁷⁾ 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⁾ も報告されている。高炉セメント B 種の品質は、JIS R 5210 で表-5¹⁸⁾ のように定められている。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⁾。セメントを過度に添加すると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 low に設定した。

3. 供試体作製方法および実験方法

3.1 供試体作製方法

本研究では、安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法に準じて、セメント安定処理土供試体を作製した。配合条件は、超軟弱粘性土を安定処理することを想定して水土比 (W/S, S は土の乾燥重量を、W は水の重量を表す) を 140% とし¹⁹⁾、セメント添加率 (C/S, C はセメントの重量を表す) を 5% とした。また、今回対象とした土に半水石膏を混入した際にモールドに打設可能かを検討した上で、半水石膏添加率 (B/S) として 0%、5%、10%、20% の 4 配合を、石炭灰添加率 (F/S) として 0%、10%、20% の 3 配合を設定した。

供試体作製方法を以下に説明する。まず設定した水土比に対応する混練水の 6 割程度を、粘土試料である MC クレーに混ぜ、ソイルミキサーで 5 分程度攪拌した。その間に、セメントと残り 4 割程度の混練水を混ぜ、ミキ

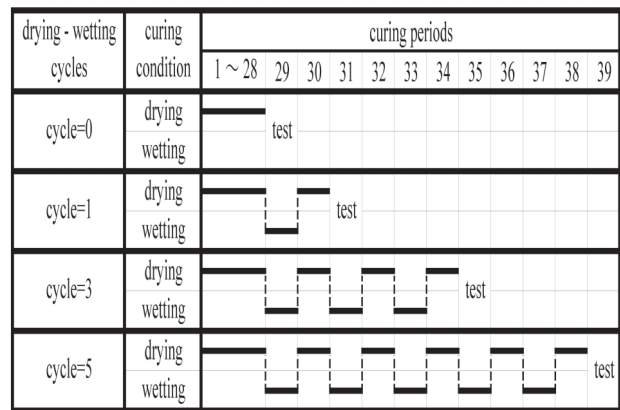


図-1 乾湿繰り返しスケジュール

サーで攪拌した粘土試料と混合し、さらにその試料をミキサーで 3 分程度攪拌した。その後、半水石膏粉末と石炭灰を粘土スラリー中に混入し、混合物がスラリー中で均質に混ざるように再度ミキサーで 1 分程度攪拌した。完成した供試体は、含水比と湿潤密度の測定を行った後、鋳鉄製のモールド (φ=50mm, H=100mm) に 5 層程度に分けて打設した。その際、供試体とモールドの付着、および水分の流出を防ぐため、モールドにシリコングリースを薄く塗布するとともに、シリコングリースを薄く塗布した OHP シートをモールド内側に貼り付けた。また、均質な供試体を得るため、層ごとにゴムハンマーを用いてモールドに打撃を加え、打設時に含まれる気泡を除去した。モールドに打設した供試体は、ポリエチレン製の袋で被い、恒温室 (20±2℃) で 24 時間養生した。その後、モールドから供試体を取り出し、両端面を成形し、再びポリエチレン製の袋で被い、所定の養生期間 (1, 3, 7, 28 日) まで気中養生した。

乾湿繰り返しは、供試体を上記の方法で作製し、28 日間養生した後に作用させた。乾湿繰り返しの 1 サイクルは、24 時間の水浸とその後の 24 時間の気中養生からなるものとし²⁰⁾、サイクル数は、0 回、1 回、3 回、および 5 回を設定した (図-1)。なお、水中から取り出したときは、供試体表面の水を軽く拭き取り、その後ポリエチレン製の袋で覆って静置した。

3.2 実験方法

本研究では、半水石膏と石炭灰を混入したセメント安定処理土の強度・変形特性を評価するために、一軸圧縮

試験を行った。一軸圧縮試験は、三軸圧縮試験より簡便で、試験時間が比較的短く、地盤工学の設計に多く用いられている。使用した試験装置は、ひずみ制御式圧縮装置、荷重計、変位計から構成される一軸圧縮試験装置である。軸圧縮速度は、JGS 0511 に基づいて 1%/min とした。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、一軸圧縮装置の上下加圧板の表面にシリコングリースを薄く塗布した。試験後には、供試体の上部、中部および下部の含水比を測定し、結果の整理には、その平均値を用いた。

4. 実験結果および考察

はじめに、種々の添加率で半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土を気中養生した場合について、養生日数の経過に伴って一軸圧縮強さがどのように増加するかを明らかにする(図-2)。まず、いずれの半水石膏添加率(B/S)、石炭灰添加率(F/S)においても、養生7日程度までの養生初期において一軸圧縮強さ(q_u)が急激に増大していき、養生7日の q_u 値は、養生28日の q_u 値の6割~8割程度に達している。このように養生初期に急激に一軸圧縮強さが増大し、しだいに増加傾向が緩やかになる特性は、既往のセメント安定処理土の一軸圧縮強さと養生日数の関係においても得られており、その関係は双曲線近似できることが報告されている²¹⁾。本研究でも、得られたデータを基にその関係式を求めたので、図中に示した。図より、関係式が実験結果を非常に良く表現していることがわかる。

半水石膏添加率の違いが一軸圧縮強さと養生日数の関係に及ぼす影響に着目する。石炭灰を添加していない場合(図-2(a))には、B/Sが10%より小さな配合では、ほとんど違いが認められないのに対して、B/S=20%では、養生初期の一軸圧縮強さの増加が顕著となる。一方で、石炭灰を添加した場合(図-2(b), (c))には、B/S=20%の場合ほど顕著でないが、B/Sが5~10%程度でも養生初期の一軸圧縮強さの増加傾向が大きくなり、その結果養生28日の一軸圧縮強さが半水石膏を添加しない場合の2倍近くとなっている。したがって、セメント安定処理土に、半水石膏だけでなく石炭灰も添加することによって、セメント安定処理土の一軸圧縮強さは大きく改善できることが明らかとなった。

つぎに、種々の添加率で半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土を気中養生した場合およびその後乾湿繰り返しを1回、3回、5回行った場合の代表的な応力-ひずみ曲線を図-3に示す。

石炭灰および半水石膏を混入しない場合(図-3(a), F/S=0%, B/S=0%)に着目する。応力-ひずみ曲線は、乾湿繰り返しを行わない場合、载荷に伴って応力値は急激に増加し軸ひずみ量0.5%程度で最大値に達する。応力

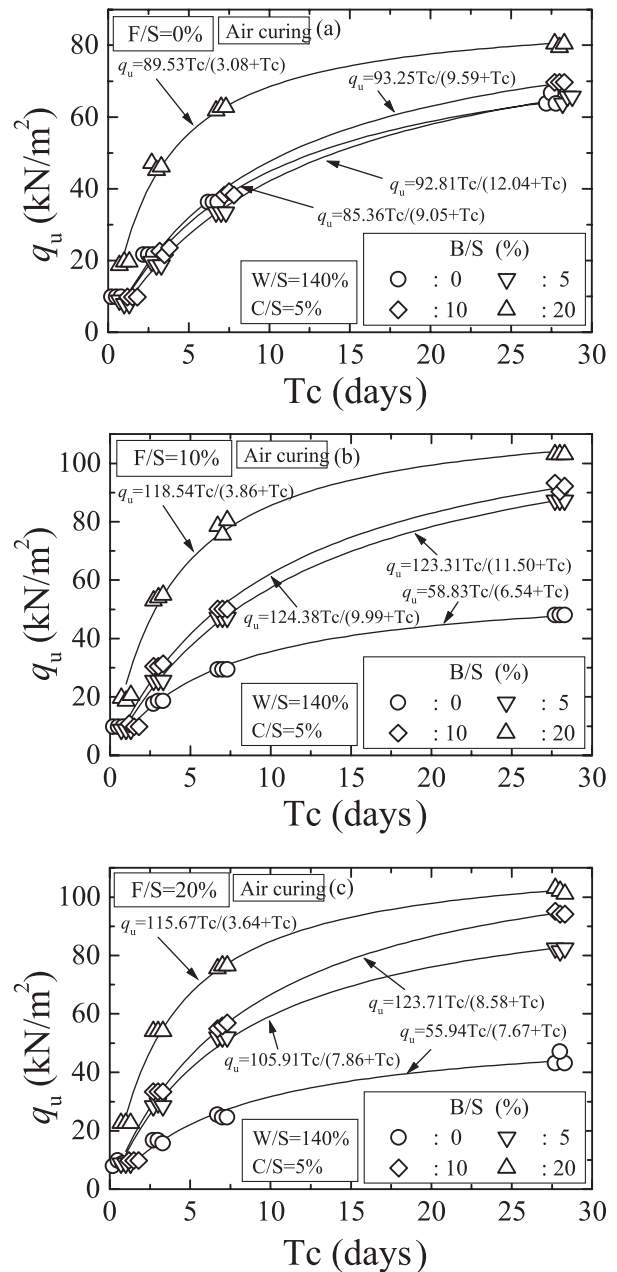


図-2 養生日数の経過が一軸圧縮強さに及ぼす影響

値がピークに達した後は、軸ひずみ量の増加に伴って応力値は徐々に減少した。乾湿繰り返し作用を受けた場合に注目すると、応力のピーク値には顕著な低下は認められないが、応力-ひずみ曲線の初期の勾配に多少小さくなる傾向が認められる。その結果、破壊ひずみも大きくなる傾向を示した。したがって、乾湿繰り返し作用によって変形抵抗が多少低下することがわかる。応力値がピークに達した後は、応力値は徐々に低下する傾向を示している。

石炭灰だけを添加した場合(図-3(b), (c), F/S=10%, 20%, B/S=0%)に着目する。応力-ひずみ曲線は、石炭灰を添加しない場合と同様に载荷に伴って応力値が増加し、応力値のピークを過ぎた後は軸ひずみ量の増加に伴

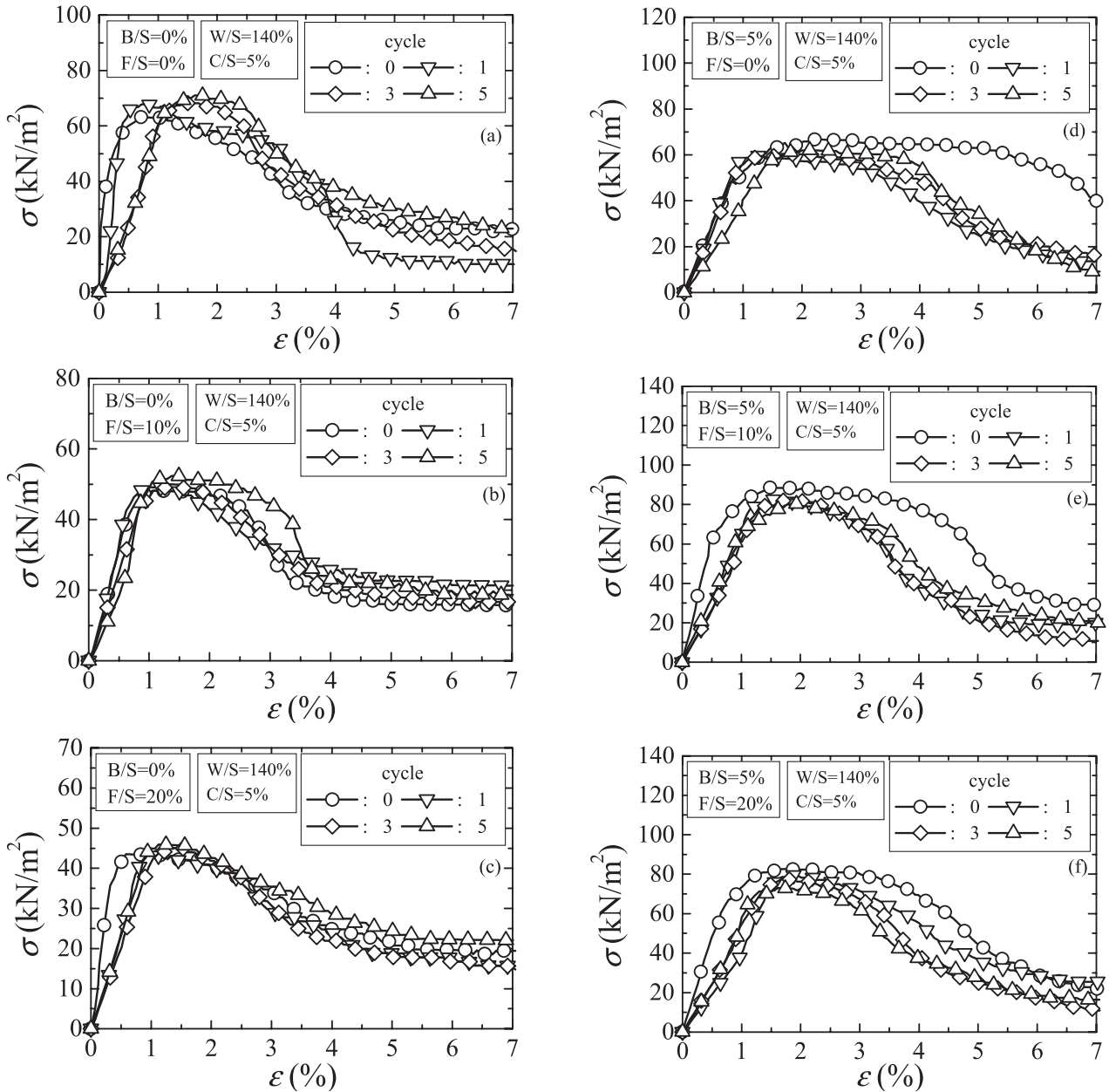


図-3 乾湿繰り返し作用を与えた場合の代表的な応力-ひずみ関係

って応力値は徐々に低下した。また、ピークの荷重については、石炭灰を添加しない場合と比較すると石炭灰添加率が増加するのに伴って低下する傾向を示した。つぎに、乾湿繰り返し作用を与えた場合に注目すると、応力のピーク値には明瞭な違いが認められなかったが、応力-ひずみ曲線の初期の勾配は多少低下する傾向を示した。

半水石膏だけを添加した場合 (図-3 (d), (g), (j), F/S=0%, B/S=5~20%) に着目する。応力値は荷重に伴って急激に増加していき、ピークに達した後もそのピーク値を維持する傾向が認められる。したがって、粘り強い材料であることがわかる。B/S=5%での応力のピーク値は、B/S=0%の場合と比較して僅かに低下しているが、B/S=10%, 20%と添加率が増加するのに伴って応力値は増加する傾向を示した。乾湿繰り返し作用が応力-ひずみ

み曲線に及ぼす影響に着目すると、乾湿繰り返し回数の増加に伴って応力のピーク値が多少低下した。また、応力-ひずみ曲線の初期の勾配も僅かに減少した。

石炭灰と半水石膏の両方を添加した場合の応力-ひずみ曲線は、荷重に伴って応力値が急激に増加していき、最大値に達した後もその応力値を維持する傾向が認められた。また、石炭灰と半水石膏の両者を添加することによって応力のピーク値は増大する傾向を示した。乾湿繰り返し作用が応力-ひずみ曲線に及ぼす影響に着目すると、応力-ひずみ曲線の初期の勾配が僅かに減少する傾向が認められる。また、応力のピーク値も乾湿繰り返し回数の増加に伴って低下している。さらに、応力値がピークに達した後も、応力値はそのピーク値をある程度維持するもの、軸ひずみ量が 3%程度になると急激に低下

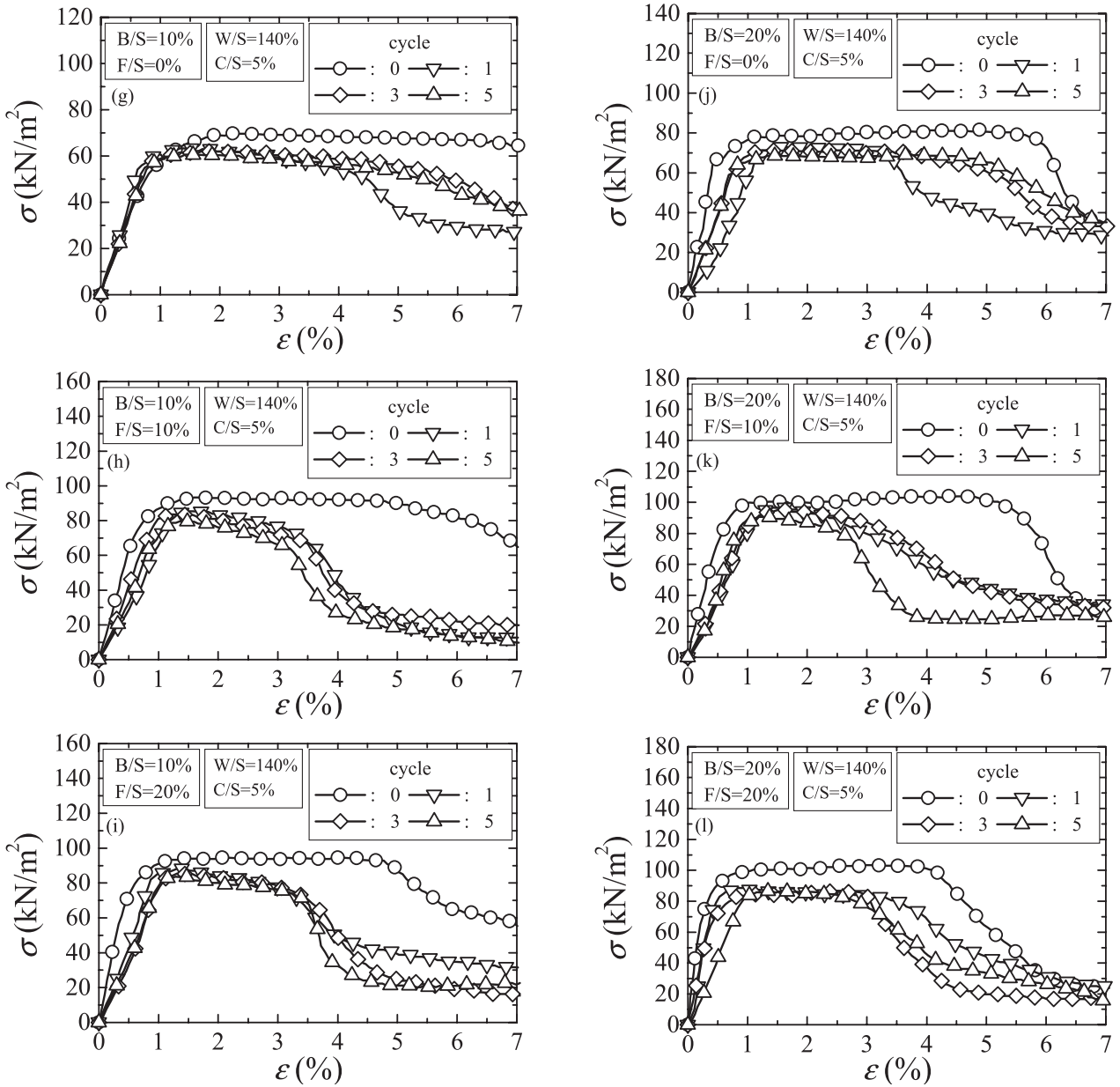


図-3 乾湿繰り返し作用を与えた場合の代表的な応力—ひずみ関係

した。以上のことから、石炭灰と半水石膏の両者を添加することで、ピーク応力値は増加するものの、乾湿繰り返し作用の影響を受ける場合にはピーク強度が僅かに低下するとともに、材料の粘り強さが多少失われることが明らかとなった。

種々の石炭灰添加率における一軸圧縮強さ (q_u) と半水石膏添加率の関係を図-4 に示す。まず、石炭灰を添加しない場合 (図-4 (a)) に着目する。 q_u 値は半水石膏添加率 (B/S) が 0% の場合 65kN/m^2 を示しているが、半水石膏を少量添加しても明瞭な増加は認められない。さらに半水石膏添加率の増加させると、 q_u 値は徐々に増加し、 B/S=20% において 80kN/m^2 に達した。一般に石膏は、セメントの凝結遅延材として用いられている。このような石膏の特性が半水石膏を少量添加した場合に一軸圧縮強

さの改善が認められない、あるいは低下してしまう一因と考えられる。乾湿繰り返し作用を与えた場合に着目すると、半水石膏を添加しない場合には、 q_u 値に明瞭な低下が認められないが、半水石膏を添加した場合には乾湿繰り返し作用によって q_u 値が $10\sim 20\text{kN/m}^2$ 程度低下した。すなわち、半水石膏のみを添加することでセメント安定処理土の q_u 値は増加するが、乾湿繰り返し作用を受けると半水石膏添加に伴う q_u 値の増加の効果を打ち消してしまうことがわかる。

つぎに図-4 (a) ~ (c) において、 B/S=0% の結果に着目する。石炭灰のみを添加した場合には石炭灰添加率の増加に伴って、 q_u 値が低下している。この現象の一因としては、石炭灰添加率の増加に伴って試料全体に占めるセメントの割合が減少したことが考えられる。一方で、石炭

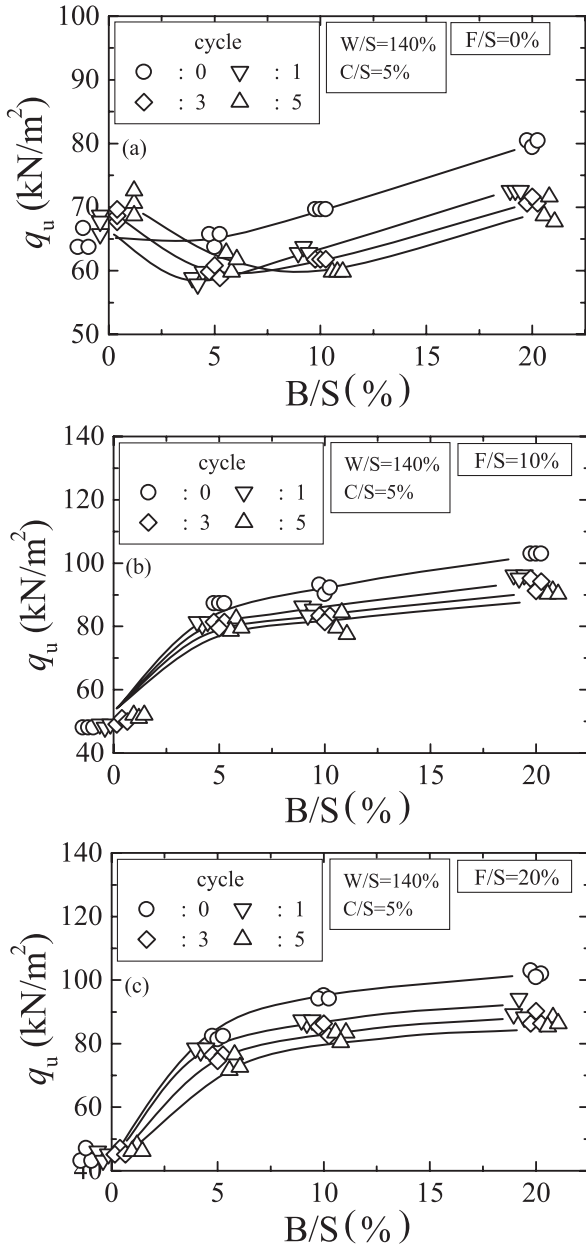


図-4 種々の石炭灰添加率における一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係

灰のみを添加した場合の q_u 値は乾湿繰り返し作用の影響は受けないことが示唆される。

石炭灰と半水石膏の両者を添加した場合に着目すると、その q_u 値は 80kN/m^2 以上となっており、両者を添加しない場合の q_u 値 (65kN/m^2) より大きな値となっている。また、 q_u 値は B/S あるいは F/S の増加に伴って増加する傾向を示した。一方、乾湿繰り返し作用によって q_u 値は多少低下しているが、いずれも両者を添加しない場合の q_u 値より大きな値を維持している。したがって、乾湿繰り返し作用を受ける環境においても、石炭灰と半水石膏の両者を添加することで一軸圧縮強さを改善できることが明らかとなった。

半水石膏添加率の増加に伴って一軸圧縮強さが増加し

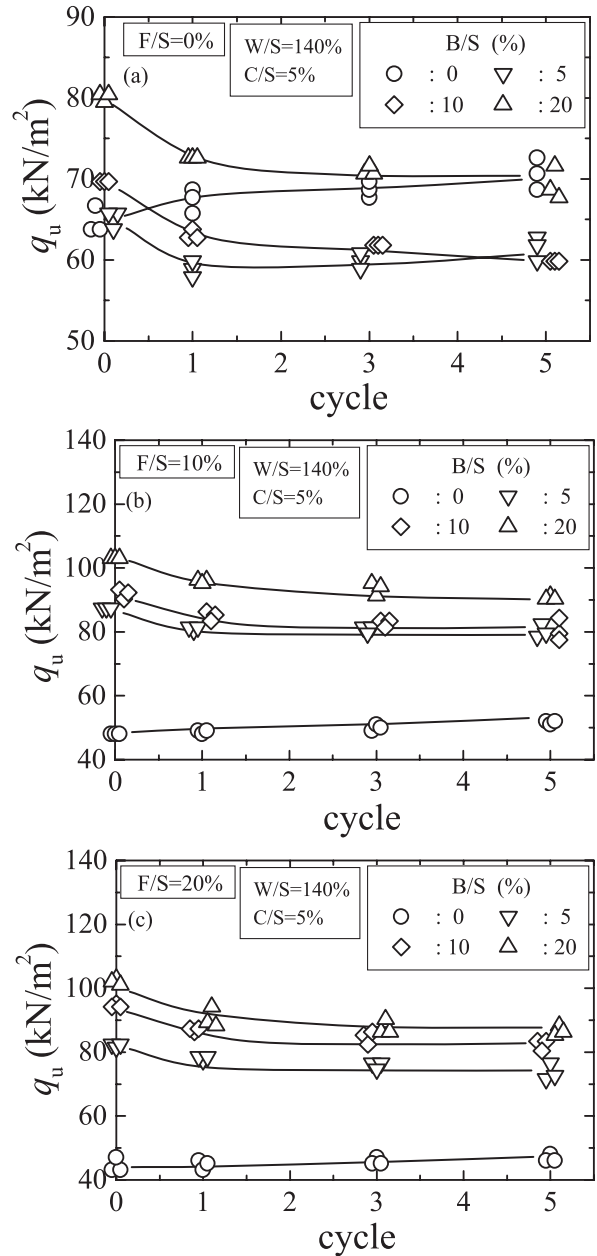


図-5 一軸圧縮強さと乾湿繰り返し回数の関係

た主要因としては、半水石膏量の増加に伴うエトリンサイト生成量の増加が考えられる。エトリンサイト ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) とは、セメント水和時に、セメント中のアルミネート相(アルミン酸三カルシウム, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) が硫酸カルシウム (CaSO_4 , 石膏) と反応して生成される針状結晶の水和物である。この針状結晶は、絡み合って構造が緻密になり、しっかりと結合している。このことから、セメント安定処理土に半水石膏を添加した際の強度改善効果や図-2 に認められたような粘り強さといった特徴を有することが説明できると考えられる。また、石炭灰はエトリンサイト生成に必要とされるアルミナ (Al_2O_3) を豊富(22.4%)に含んでいることから、半水石膏に加えて石炭灰も添加することによって、

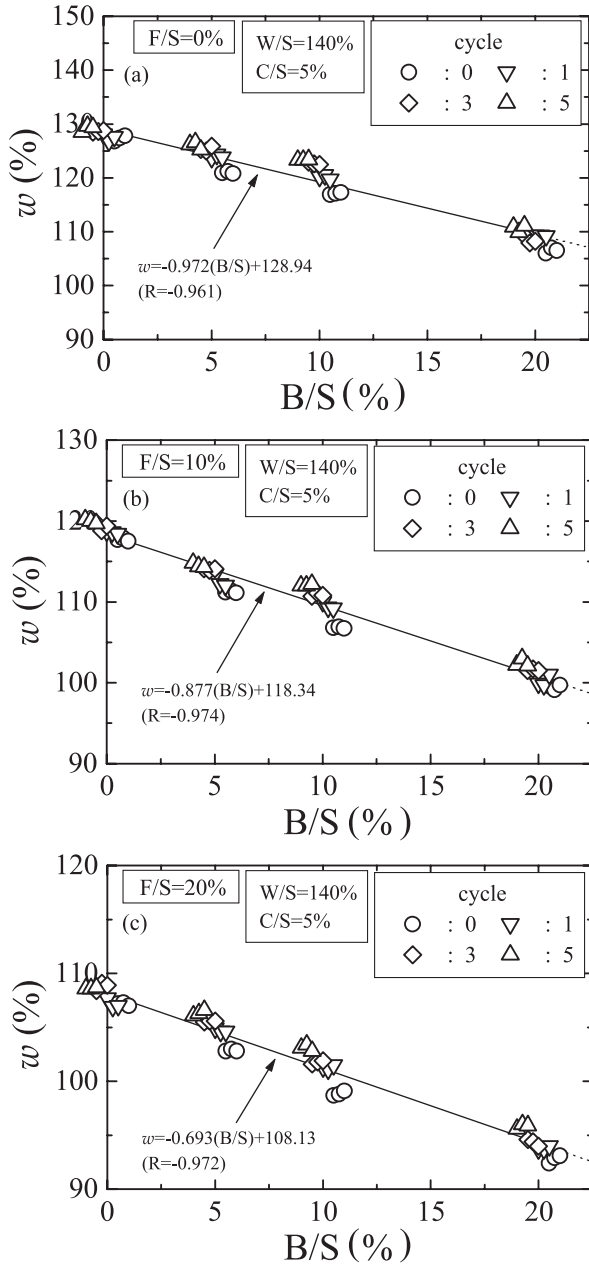


図-6 種々の石炭灰添加率における含水比と半水石膏添加率の関係

さらなる強度改善が得られたものと推察される。

図-5 に種々の配合条件で作成した場合の一軸圧縮強さと乾湿繰り返し回数との関係を示す。図から、図-3 で述べた乾湿繰り返し回数が一軸圧縮強さ及ぼす影響がより明瞭に読み取れる。すなわち、石炭灰のみを添加した場合 ($B/S=0\%$) には、乾湿繰り返し作用の影響をほとんど受けず、 q_u 値はほぼ一定値であるのに対して、半水石膏のみを添加した場合 ($F/S=0\%$) には、乾湿繰り返し作用の影響を受け、 q_u 値が 1 割程度低下していることがわかる。さらに、 q_u 値の低下は、1 回目の乾湿作用で発生しており、さらなる乾湿繰り返し作用によってはほとんど生じていない。石炭灰と半水石膏の両者を添加した場合も q_u 値が 1 割程度低下したが、その強度低下は 1 回目の

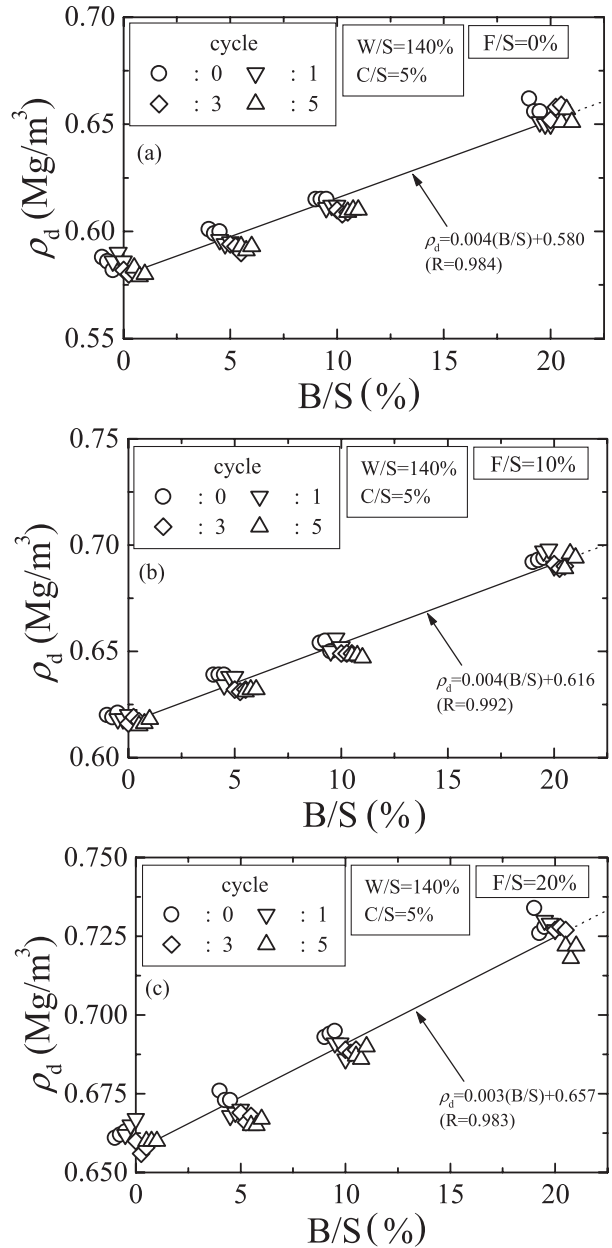


図-7 種々の石炭灰添加率における乾燥密度と半水石膏添加率の関係

乾湿作用によるものであった。

種々の石炭灰添加率における含水比と半水石膏添加率の関係を図-6 に示す。図より、いずれの石炭灰添加率の場合にも、半水石膏添加率が増加するのに伴って含水比が直線的に減少している。これは配合条件による影響と考えられる。また、いずれの半水石膏添加率や石炭灰添加率においても、乾湿繰り返しを行った場合の含水比は、乾湿繰り返しを行わない場合と比較して僅かに大きな値となった。これは、供試体を水浸状態にしたことで、供試体が吸水したためであると考えられる。しかしながら、配合条件の違いが及ぼす影響と比較するとその影響は小さい。

図-7 は乾燥密度と半水石膏添加率の関係を示してい

る。図より、いずれの石炭灰添加率においても、半水石膏添加率が増加するのに伴って、乾燥密度が直線的に増加している。半水石膏や石炭灰を混入することで、供試体中に占める固相（MC クレー、セメント、半水石膏、石炭灰）部分の増加と空隙の減少に伴って、乾燥密度が増加したものと考えられる。一般に乾燥密度が高いほど土構造が密となり、強度が大きくなる傾向があることから、このような半水石膏添加率の増加に伴う乾燥密度の増加が、セメント安定処理土の強度増加に繋がっているものと考えられる。

一方、乾湿繰り返し回数を増やすと乾燥密度は僅かに低下しているが、半水石膏添加率や石炭灰添加率の違いが乾燥密度に及ぼす影響と比較すると小さいことがわかる。したがって、乾湿繰り返し作用による強度の低下の要因は乾燥密度から明らかにするのは難しい。今後は、乾湿繰り返し作用を受けた供試体の内部構造を観察するなどして、内部構造の変化を明らかにする必要がある。

5. 結論

本研究では、半水石膏と石炭灰を用いたセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす乾湿繰り返し作用の影響を検討した。本研究から得られた主要な結論を以下に述べる。

- (1) 半水石膏に加えて石炭灰も混入することによって、セメント安定処理土の養生初期の強度が改善されることが明らかとなった。
- (2) 半水石膏と石炭灰を混入することで、半水石膏のみを添加した場合よりも大きな強度増加が得られることが明らかとなった。また、半水石膏を少量添加した場合に発生する強度の低下を抑制できる。
- (3) 半水石膏と石炭灰を混入したセメント安定処理土は、乾湿繰り返し作用によって1割程度の強度低下が生じるが、強度低下が生じるのは乾湿繰り返し1回目であり、2回目以降の乾湿繰り返しに対しては、顕著な強度低下は生じない。

以上のことから、セメント安定処理工法による軟弱地盤の改良において、半水石膏と石炭灰の両者を添加することは地盤改良に有効であることが明らかとなった。

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) 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)について, http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=16960&hou_id=13377, 2011.9.

- 2) (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, 環境問題への取り組み, <http://www.gypsumboard-a.or.jp/countermeasure.pdf>, 2011.9.
- 3) 環境省: 環境統計集 3.21 産業廃棄物許可件数と最終処分場残存年数の推移, <http://www.env.go.jp/doc/toukei/data/10ex321.xls>, 2011.9.
- 4) (社)セメント協会: 2011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/ih5_1000.pdf, 2011.9.
- 5) (社)石炭エネルギーセンター, 石炭灰発生量データ(平成7年度~平成21年度), http://www.jcoal.or.jp/coalash/pdf/CoalAsh_H21productiondata.pdf, 2011.9.
- 6) 亀井健史, 大島章寛, 志比利秀: 半水石膏と石炭灰を混入した締固め土の一軸圧縮特性, 地盤と建設, Vol.27, No.1, pp.97-104, 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化-, 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.: Application of plasterboard and waste plastic trays to enhance the performance of sandy gypsum waste soil, *Ground Improvement and Geosynthetics. Geotechnical Special Technical Publication*, American Society of Civil Engineers, No.207, pp.165-173, 2010.
- 9) Ahmed, A., Ugai, K., and Kamei, T.: Durability of fine grained soil stabilized with gypsum waste plasterboard, *Proceedings of the 6th, International Congress on Environmental Geotechnics*, New Delhi, India, Vol.2, pp.1469-1477, 2010.
- 10) Ahmed, A., Ugai, K., and Kamei, T.: Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement, *International Journal of Construction and Building Materials*, Vol.25, No.1, pp.208-217, 2011.
- 11) Ahmed, A., Ugai, K., and Kamei, T.: Environmental evaluation for clayey soil stabilized with gypsum waste plasterboard in Japan, *Advances in Unsaturated Soil, Geo-Hazard, and Geo-Environmental Engineering, Geotechnical Special Technical Publication*, American Society of Civil Engineers, No.217, pp.9-17, 2011.
- 12) 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.2, pp.331-339, 2011.
- 13) Ahmed, A., Ugai, K., and Kamei, T.: Laboratory and field evaluations of recycled gypsum as a stabilized agent in embankment construction. *Soils and Foundations*, Vol.51, No.6, (to be published).
- 14) 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.
- 15) 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.
 - 16) 山陽クレー工業 (株): MC クレー分析データ表, <http://www17.ocn.ne.jp/~cray/sanyo.html>.
 - 17) 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.
 - 18) 財団法人 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) Nakase, A. and Kamei, T.: In situ void ratio, strength and overburden pressure anomalies in seabed clays, *Proc. IUTAM Symposium on Seabed Mechanics*, pp.9-14, 1984.
 - 20) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: NEXCO 試験方法 第1編 土質関係試験方法, pp.23-25, 2009.
 - 21) 亀井健史, 大本和樹, 志比利秀, 松尾和俊: セメント安定処理土の強度変形特性, 島根大学総合理工学部紀要シリーズ A, Vol.36, pp.17-24, 2002.