

半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の 応力-ひずみ関係のモデル化

志比 利秀¹⁾, 亀井 健史²⁾

¹⁾島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

²⁾宮崎大学工学部 土木環境工学科

Modeling of stress-strain relation of cement-stabilized soil utilizing bassanite and coal ash

Toshihide SHIBI¹⁾ and Takeshi KAMEI²⁾

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

²⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Miyazaki University

Abstract

This paper presents the stress-strain relation of cement-stabilized soil utilizing bassanite and coal ash. A relation that consists of two hyperbolic models was applied to stress strain relation of cement-stabilized soil admixed with bassanite and coal ash. The material parameters of cement-stabilized soil were estimated by bassanite and coal ash contents. Comparisons were made between the experimental data and the model simulations, to verify the applicability of results obtained from the proposed model and the estimated parameters. Reasonable agreement was obtained between the observed and the simulated results of stress-strain relation of cement-stabilized soil admixed with bassanite and coal ash.

1. はじめに

2007 年度に建設業が排出した産業廃棄物量は産業廃棄物全量の 18.4%を占めており¹⁾, 建設業は大量の廃棄物の発生源の一つとなっている。

解体系の石膏ボード廃材(以下廃石膏ボード)は, 1999 年以前は, 最終処分する場合には安定型処分場で処理されていたが, 1999 年以降は石膏と紙とに分離し, 廃石膏は安定型処分, 紙は管理型処分(安定型処分の約 3 倍近くのコストが必要)するように義務付けられた。さらに 2007 年 4 月からは, 廃石膏も管理型処分するように義務付けられ, その廃棄処分が経済的な面から問題となってきた。また, 管理型処分場の残余年数が 2007 年の時点で約 8.5 年程度と残存容量が逼迫しており²⁾, その処分が困難となる可能性も考えられる。このような現状から, 廃石膏ボードのリサイクル技術の開発とその有効利用は, 現代社会が早急に解決すべき問題となっている。

2009 年度の石炭灰の排出量は 1095 万トンに達しており³⁾, その多くはセメント分野において有効利用が進められている。その石炭灰の有効利用については, 2004 年度以降改善が進み, 2009 年度には 97.4%に達し非常に高い水準となっている。しかしながら, 電気事業から発生

する石炭灰のリサイクルの考え方については, 2004 年および 2007 年に見直しが実施され, 公有水面(海等の公用に供する水面)への埋め立てがリサイクルとして認められるようになった⁴⁾。このような考え方の変化によるリサイクルの改善も考えられる。近年は, セメント生産量の減少に伴って, セメント分野における石炭灰受け入れ量の減少の可能性も推測され, 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な土木分野での有効利用が期待されている。

このような現状から, 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⁵⁾。また, 軟弱地盤の改良を想定し, 石炭灰と半水石膏を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮特性についても検討されており, 半水石膏に加えて石炭灰も添加することにより, 半水石膏のみを少量添加した場合に発生する強度低下を抑制できることが報告されている⁶⁾。さらに, 半水石膏と石炭灰を混入したセメント安定処理土は, 重金属の溶出量を著しく低減できることも報告されている⁷⁾。最近

では、廃石膏と廃プラスチックを混合した地盤材料の研究^{8), 9)}をはじめ、廃石膏を用いた地盤の強度特性¹⁰⁾⁻¹³⁾や地盤環境面からみた重金属等の溶出量^{12), 13)}などについても検討されている。

廃石膏や石炭灰などの産業廃棄物を用いた土構造物の変形・破壊状態を予測するためには、材料的な非線形性を考慮した力学モデルが必要となる。そこで本研究では、半水石膏添加率と石炭灰添加率を種々に変化させた配合条件で作製された供試体の一軸圧縮試験結果を用いて応力-ひずみ関係のモデル化に必要なパラメータを決定し、双曲線モデルによって近似する方法を用いて、半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の応力-ひずみ関係のモデル化を試みる。

2. 双曲線モデルによる応力-ひずみ関係のモデル化

セメント安定処理土の応力-ひずみ曲線は、軸ひずみの増加に伴い応力値が急激に増大してピーク値に達した。応力値は、さらなる軸ひずみの増加に伴って徐々に減少していき、最終的にはほぼ一定値になることが多い。一方で半水石膏や石炭灰を添加した場合には応力値がピークに達した後も、軸ひずみ量が数%にわたって応力値は明瞭な低下をあまり示さず、応力-ひずみ関係にいわゆる“粘り強さ”が認められる。そこで本研究では、半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の応力-ひずみ曲線をモデル化するために、図-1の破線に示すような二つの双曲線モデルにより近似する方法^{14)~16)}を用いることとする。

この方法では、軸差応力(q)-軸ひずみ(ϵ_a)関係において最大軸差応力(q_{peak})となる破壊ひずみ(ϵ_f)までは、次式を用いて近似する。

$$q = \frac{q_{max} E_i \epsilon_a}{q_{max} + E_i \epsilon_a} \quad (0 < \epsilon_a < \epsilon_f) \quad (1)$$

ここで、 E_i は変形係数を表している。また、 q_{max} は応力-ひずみ関係から外挿して得られる軸差応力を表し、次式で求められる。

$$q_{max} = \frac{q_{peak} E_i \epsilon_f}{E_i \epsilon_f - q_{peak}} \quad (2)$$

一方、破壊ひずみ以降の応力-ひずみ関係は、次式で表される。

$$q = q_{peak} - \frac{(q_{peak} - q_{res}) E_{res} (\epsilon_a - \epsilon_f)}{(q_{peak} - q_{res}) + E_{res} (\epsilon_a - \epsilon_f)} \quad (\epsilon_a > \epsilon_f) \quad (3)$$

ここで、 E_{res} は軟化時の変形係数を、 q_{res} は残留軸差応力を表している。本研究では、実務の設計においては一軸圧縮試験結果が用いられることが多いことやモデルを簡略化するため、一軸圧縮試験結果に限定して応力-ひず

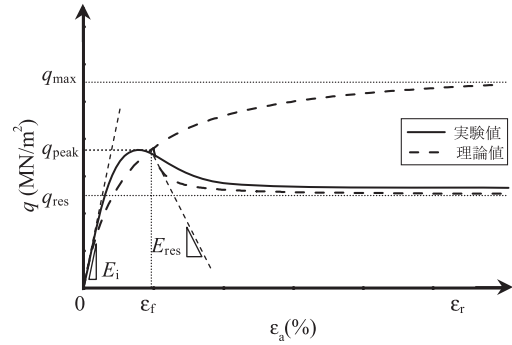


図-1 双曲線モデルによる軸差応力-ひずみ関係のモデル化

み関係をモデル化する。したがって、軸差応力(q)を軸差応力(σ)に、最大軸差応力(q_{peak})を一軸圧縮強さ(q_u)に、変形係数(E_i)を変形係数(E_{50})に置き換えることとする。半水石膏や石炭灰を添加したセメント安定処理土はピーク後の応力値の低下が認められないので、 $E_{res} = 0$ 、 $q_{res} = q_u$ としてモデル化するものとする。

以上のように、5つの入力物性値 q_u 値、 E_{50} 値、 ϵ_f 値、 q_{res} 値、 E_{res} 値を得ることにより、応力-ひずみ関係を求めることが可能となる。

3. 試料および実験方法

本研究では、安定処理土の締め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¹⁷⁾、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、半水石膏粉末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($\phi=50\text{mm}$, $H=100\text{mm}$)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（ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）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、28日間空中養生した。

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。なお、各配合条件と養生条件において、それぞれ5供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、得られた値の中から代表的な3つ実験値を採用した。

4. 実験結果および応力-ひずみ曲線のモデル化

一軸圧縮試験から得られた一軸圧縮強さ(q_u)、破壊ひずみ(ϵ_f)および変形係数(E_{50})と半水石膏添加率の関係を図-2～図-4に示す。

まず、一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係に着目すると、石炭灰を添加しない場合(F/S=0%)には、半水石膏を少量添加することによって q_u 値が僅かに低下するものの、B/Sの増加に伴って q_u 値は徐々に改善されている。一方、F/Sが10~20%の場合には、B/Sが0%から5%へと増加すると q_u 値が急増し、さらなるB/Sの増加に伴って q_u 値が徐々に増加している。

つぎに破壊ひずみ(ϵ_f)とB/Sの関係に着目する。 ϵ_f 値は、半水石膏を添加すると急増するものの、B/Sを増大させていくと徐々に減少しており、半水石膏添加の有無で ϵ_f 値の変化傾向が急変していることがわかる。このような急変は変形係数においても認められる。すなわち、変形係数は、半水石膏を少量添加すると減少する傾向を示すが、半水石膏添加率を増大させることにより徐々に大きくなっている。

いずれの図からも半水石膏添加率(B/S)が0%の場合と、半水石膏添加率が5~20%の場合で、パラメータの変化傾向が異なることがわかる。したがって、半水石膏の添加の有無が材料の構造に大きな変化を及ぼしているものと考えられる。また、図-2に認められたように、半水石膏と石炭灰の両者を添加することにより一軸圧縮強さが急増することから、石炭灰のみ添加した場合と半水石膏と石炭灰を添加した場合を同様に捕らえることも難しい。したがって、パラメータの推定には、半水石膏のみを添加した場合、石炭灰のみを添加した場合、そして半

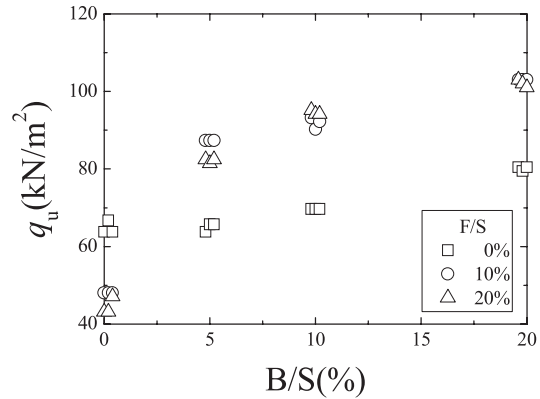


図-2 一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係

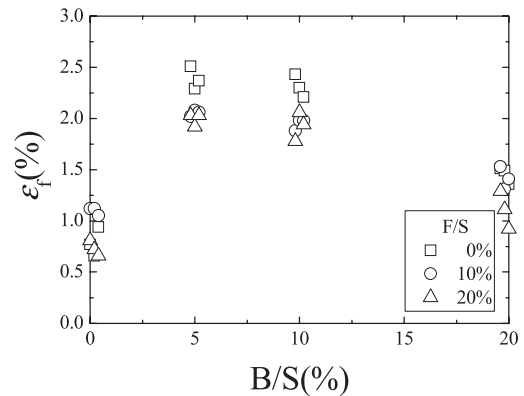


図-3 破壊ひずみと半水石膏添加率の関係

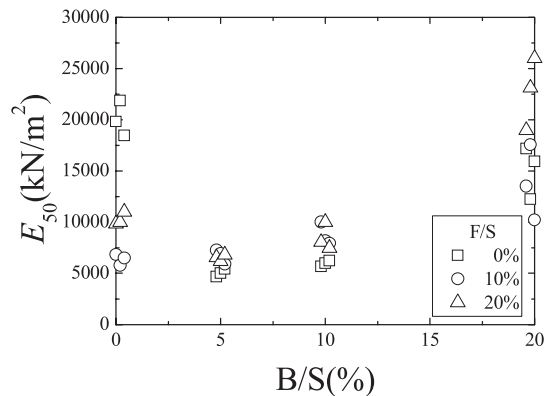


図-4 変形係数と半水石膏添加率の関係

水石膏と石炭灰を添加した場合の3通りに分類して検討することが適当である。

図-5～図-7は、半水石膏と石炭灰の両者を添加した場合について、半水石膏添加率と石炭灰添加率をパラメータとして得られた一軸圧縮強さ、破壊ひずみおよび変形係数に関する線形重回帰モデルを示しており、得られた重回帰式を表-1に示す。重相関係数は、0.870~0.960と非常に高いことから、各パラメータを十分な精度で推定可能である。これらの関係を用いて、2つの双曲線モデルにより応力ひずみ曲線のモデル化を行い、図-8の応力

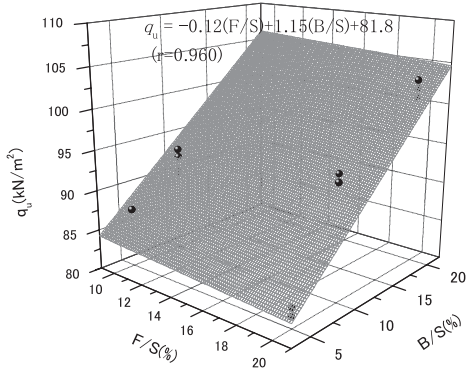


図-5 半水石膏添加率および石炭灰添加率が一軸圧縮強さに及ぼす影響

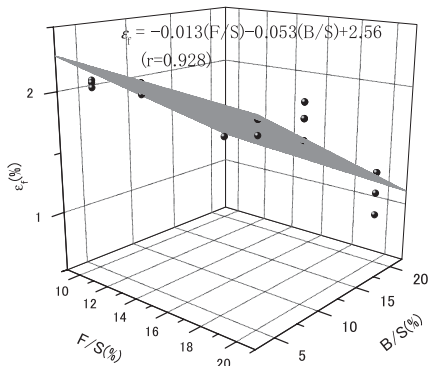


図-6 半水石膏添加率および石炭灰添加率が破壊ひずみに及ぼす影響

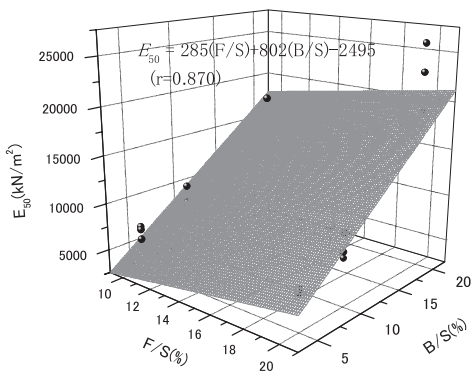


図-7 半水石膏添加率および石炭灰添加率が変形係数に及ぼす影響

ひずみ曲線を得た。図より、応力がピークに達する直前の部分は、軸ひずみ量を過大評価する傾向が認められるが、応力のピーク値とそのときの軸ひずみ量、荷重直後の応力-ひずみ曲線の傾き等のパラメータを設定した部分は非常に良く一致しており、半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の応力-ひずみ曲線のある程度シミュレートできていることがわかる。

表-1 一軸圧縮強さ、破壊ひずみおよび変形係数に関する重回帰式

$q_u = -0.12(F/S) + 1.15(B/S) + 81.8$	$(r = 0.960)$
$\epsilon_f = -0.013(F/S) - 0.053(B/S) + 2.56$	$(r = 0.928)$
$E_{50} = 285(F/S) + 802(B/S) - 2495$	$(r = 0.870)$

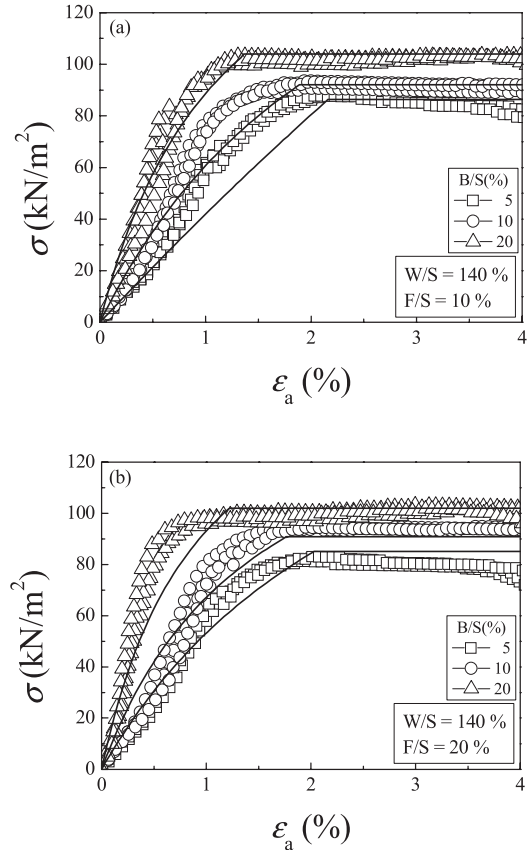


図-8 半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の応力-ひずみ関係とその双曲線モデル

つぎに、半水石膏のみ、および石炭灰のみを添加した場合のセメント安定処理土の応力-ひずみ曲線のモデル化について検討してみる。この場合の一軸圧縮強さ、破壊ひずみ、および変形係数と各添加率との関係を示すと、図-9～図-11 が得られる。図から、半水石膏添加率および石炭灰添加率を用いた一軸圧縮強さ、破壊ひずみ、および変形係数の回帰直線を求めると、表-2 の通りとなる。 q_u 値と F/S の関係式の相関係数が 0.567 と多少低いものの、他の関係式の相関係数はいずれも 0.85 以上と高い相関性を有していることがわかる。これらの関係を用いて、2つの双曲線モデルにより応力ひずみ曲線のモデル化を行った(図-12)。石炭灰を添加した場合には、ピークの応力値が軸ひずみ量 2~3%程度までしか維持されないため、ここで提案した応力-ひずみ関係は大きな軸ひずみ量の範囲ではモデル化できていない。したがって、石炭灰のみを添加する場合には、軸ひずみ量 2~3%程度まで

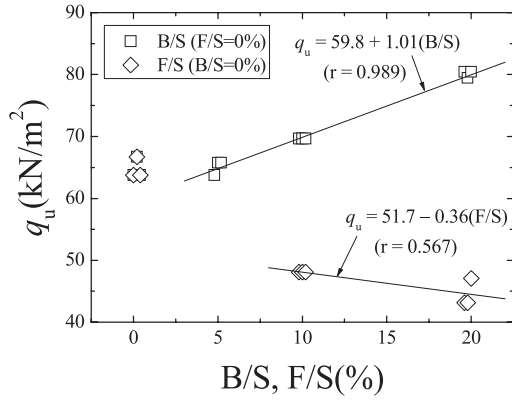


図-9 半水石膏あるいは石炭灰のみを添加した場合の一軸圧縮強さと添加率の関係

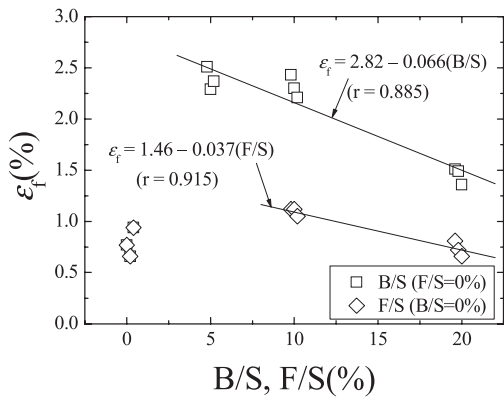


図-10 半水石膏あるいは石炭灰のみを添加した場合の破壊ひずみと添加率の関係

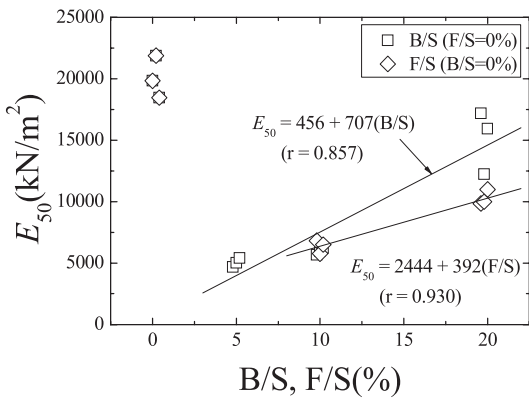


図-11 半水石膏あるいは石炭灰のみを添加した場合の変形係数と添加率の関係

の範囲に限定すべきである。また、半水石膏と石炭灰を添加した場合と同様、応力がピークに達する直前では、軸ひずみ量を過大評価する傾向が認められるものの、応力-ひずみ曲線のある程度シミュレートできていることがわかる。

表-2 一軸圧縮強さ、破壊ひずみおよび変形係数に関する回帰式

$q_u = 59.8 + 1.01(B/S)$	($r = 0.989$)
$\epsilon_f = 2.82 - 0.066(B/S)$	($r = 0.885$)
$E_{50} = 456 + 707(B/S)$	($r = 0.857$)
$q_u = 51.7 - 0.36(F/S)$	($r = 0.567$)
$\epsilon_f = 1.46 - 0.037(F/S)$	($r = 0.915$)
$E_{50} = 2444 + 392(F/S)$	($r = 0.930$)

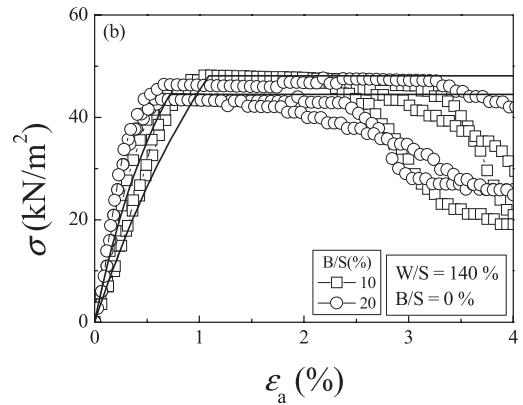
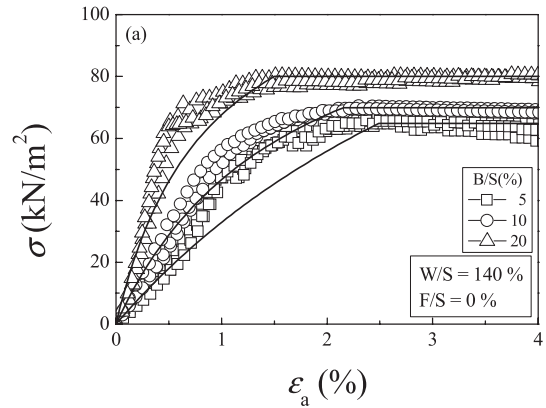


図-12 半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の応力-ひずみ関係とその双曲線モデル

5. 結論

双曲線モデルを用いて半水石膏と石炭灰を用いたセメント安定処理土の応力-ひずみ曲線をモデル化した。その結果、配合条件から決定した物性値を双曲線モデルに用いることにより、半水石膏と石炭灰を用いたセメント安定処理土の応力-ひずみ関係を比較的高い精度でモデル化できることを実証した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(株)日本海技術コンサルタンツ 大島章寛氏には、実験および結果の整理に多大なるご協力をいただいた。また、日工(株)より半水石膏を提供していただいた。

さらに、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：環境統計集 3.18 産業廃棄物の業種別廃棄量, <http://www.env.go.jp/doc/toukei/data/10ex318.xls>, 2011.9.
- 2) 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.
- 3) (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.
- 4) 國友宏俊：我が国の石炭灰リサイクルの現状と今後の方向, <http://www.enecho.meti.go.jp/policy/coal/date1/6.pdf>, 2010.
- 5) 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.
- 6) 志比利秀, 大島章寛, 亀井健史：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, 島根大学総合理工学部紀要シリーズ A, Vol.45, 2011(掲載予定).
- 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.: 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 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) プラダンテージ, 濃添泰成：発泡ビーズ系軽量混合土の構成式, 第33回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.121-122, 1998.
- 15) 矢島寿一, 荻迫栄治, 鶴ヶ崎和博, 規矩大義, 安原一哉：過圧密土としての軽量土の構成式とその適用性(その1)—双曲線モデル—, 過圧密粘土および過圧密地盤の力学シンポジウム発表論文集, pp.1-6, 2000.
- 16) 亀井健史, 志比利秀, 高嶋純一：初期高温養生を受けた気泡混合軽量土の応力ひずみ関係に関するモデルシミュレーション, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.2, pp.65-72, 2007.
- 17) 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.