

気泡混合軽量土の一軸圧縮強さに及ぼす半水石膏添加量の 影響とその内部構造—廃石膏ボードのリサイクリング—

亀井 健史¹⁾, 高嶋 純一²⁾

¹⁾ 島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

²⁾ 広成建設(株)

Effect of bassanite additions on unconfined compressive strength of foamed mixture lightweight soils and its microstructure — Recycling of waste plasterboard —

Takeshi KAMEI¹⁾ and Jun-ichi TAKASHIMA²⁾

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

²⁾ Kosei Construction Co., Ltd.

Abstract

Waste plasterboard is generated in vast quantities as a by product of demolition of buildings and houses. If waste plasterboard can be effectively utilized as a construction material, the problems of waste plasterboard disposal and shortage of natural resources for construction may be solved. Bassanite is produced by heating gypsum obtained from waste plasterboard, under conditions of 130°C or more. It is also environmentally friendly, due to its neutral nature. This paper describes the effect of bassanite additions on unconfined compressive strength of foamed mixture lightweight soils and its microstructure to promote waste plasterboard recycling. The effects of bassanite contents on stress-strain behavior of cement-stabilized soils are quantified. These properties make bassanite produced from waste plasterboard useful as geomaterial. The potential use of waste plasterboard can be refined with further research.

1. はじめに

近年、わが国の高度経済成長を支えてきた大量生産・大量消費に基づいた資源浪費型社会は大量廃棄をもたらす、廃棄物処理問題という大きな代償が現代社会に突きつけられている。実に毎年約4億2千万トンという膨大な量の産業廃棄物が発生しており、その多様化に伴う処理の困難化や不適正な処理が環境負荷の増大を引き起こしている。その中で建設系廃棄物は産業廃棄物全量の19% (2003年) を占めており¹⁾、建設分野は大量の廃棄物の発生源となっている。このような現状を踏まえると、建設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は早急に解決すべき重要な問題となっている。建設リサイクル法が1999年に施行されて以降、建設廃棄物・副産物のリサイクルは進んできているが、現在でもリサイクルされずに最終処分されている廃棄物も数多く存在している。そのような建設廃棄物の中でも、建築現場から排出される石膏ボード廃材(以



写真-1 廃石膏ボード

下、廃石膏ボード、写真-1)の処理に関する問題が近年大きくクローズアップされてきた。

廃石膏ボードの最終処分に関しては、1999年以前は安定型処分場で処理されていたが、廃石膏ボード由来の硫化水素ガス発生に伴う被害などが生じた。これは、廃石

石膏ボードを埋立て処分すると、廃石膏ボードに含まれる紙などの有機物が分解され、埋立て層内は還元状態となり、その際、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_4^{2-}) 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_2S) が発生するためである。そのため 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、新たな科学的知見により、紙を除去した後も廃石膏に含まれる糖類が硫化水素発生に寄与し、安定型最終処分場への埋立て処分を行った場合、高濃度の硫化水素ガスが発生する恐れがあることが明らかになったことから、廃石膏ボードから紙を除去したものについて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。なお、廃石膏の有効利用に関しては、各地方自治体に任されている。廃石膏ボード処分の問題がコストの問題だけでその廃棄処分が可能なら良いが、最終処分場の残余年数が 2004 年の時点で約 7 年程度と報告されており²⁾、その残存容量が逼迫していることから、その処分が益々困難になりつつある。このような現状を踏まえると、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。

石膏ボードから焼成された半水石膏（別名、焼石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$)）は、水を加えると水和反応を起こし二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 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地盤改良効果に役立つと考えられている。このような地盤工学的に優れた特性有する半水石膏を土工事に活かすべく、現場で大量の廃石膏から短時間に半水石膏を生成するシステムが開発されている³⁾。また、地盤材料としての適用性を実証するために、半水石膏を地盤材料の締固め時の添加材⁴⁾ やセメント安定処理土の添加材⁵⁾ としての特性が検討されており、大量に用いることによって、その一軸圧縮強さ改善の可能性が指摘されている。

そこで本研究では、廃石膏ボードの再資源化を促進させるために廃石膏の気泡混合軽量土への有効利用を試みている。まず、半水石膏をセメント質量に対して 0~20% の異なる 5 種類の添加率で添加した気泡混合軽量土を作

製し、品質管理基準などの観点からその適用性について検討している。また、作製した供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、半水石膏の添加がその一軸圧縮特性および内部構造に及ぼす影響について評価している。

2. 供試体作製方法および試験方法

2.1 供試体作製方法

本研究では、日本道路公団暫定配合表⁶⁾に基づき、K0-5 のエアミルクを作製した。また、半水石膏添加率 (B/C) として、0, 5, 10, 15, 20 % の 5 種類を設定している。なお B/C は、セメント重量に対する半水石膏重量の比を表している。なお、用いた半水石膏は、新潟ガーベッチ (株) 製のものである。

供試体の作製方法は、まず、固化材と混練水を混合してセメントスラリーを作る。つぎに起泡剤と希釈水を混ぜ、気泡を作製する。最終的に、セメントスラリーと発泡させた気泡をミキサーで混合することにより気泡混合軽量土が得られる。完成したエアミルクに所定の廃石膏ボード (写真-1) から再生した半水石膏を添加した後、気泡の消泡の状態を確認しながらソイルミキサーで均質に混ぜるように、3 分程度攪拌した。

試料は、空気量、フロー値、作製時の湿潤密度の項目について品質管理試験を行い、各項目の試験値が目標の範囲内であることを確認した。なお、本研究で用いた配合条件と品質管理試験の基準を表-1 に示す。試料とモールドの付着、および水分の流出を防ぐため、モールド ($\phi=50\text{mm}$, $H=100\text{mm}$) および OHP シートにシリコングリスを薄く塗布し、その OHP シートをモールド内側に貼り付けた。モールドに打設した試料は、ビニール袋で覆い、恒温室 ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) で 24 時間気中養生した。28 日経過した供試体は、両端面を成形し実験に用いた。

2.2 試験方法

本研究では、初期高温養生が気泡混合軽量土の強度・変形特性に及ぼす影響を評価するために、一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験は、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。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スを薄く塗

表-1 試料の配合条件と品質管理基準

JH 配合 種別	目標 一軸圧縮強さ q_u (MN/m^2)	配合条件						品質管理基準		
		水セメント比 (W/C)	セメント C (kg/m^3)	起泡剤 m_1 (kg/m^3)	希釈水 m_2 (kg/m^3)	混練水 m_3 (kg/m^3)	水量 W^* (kg/m^3)	湿潤密度 ρ_t (Mg/m^3)	フロー値 Flow (mm)	空気量 V_a (%)
K0-5	0.5	0.88	298	1.11	25.53	235	262	0.56±0.1	180±20	64.0±5

(* $W = m_1 + m_2 + m_3$)

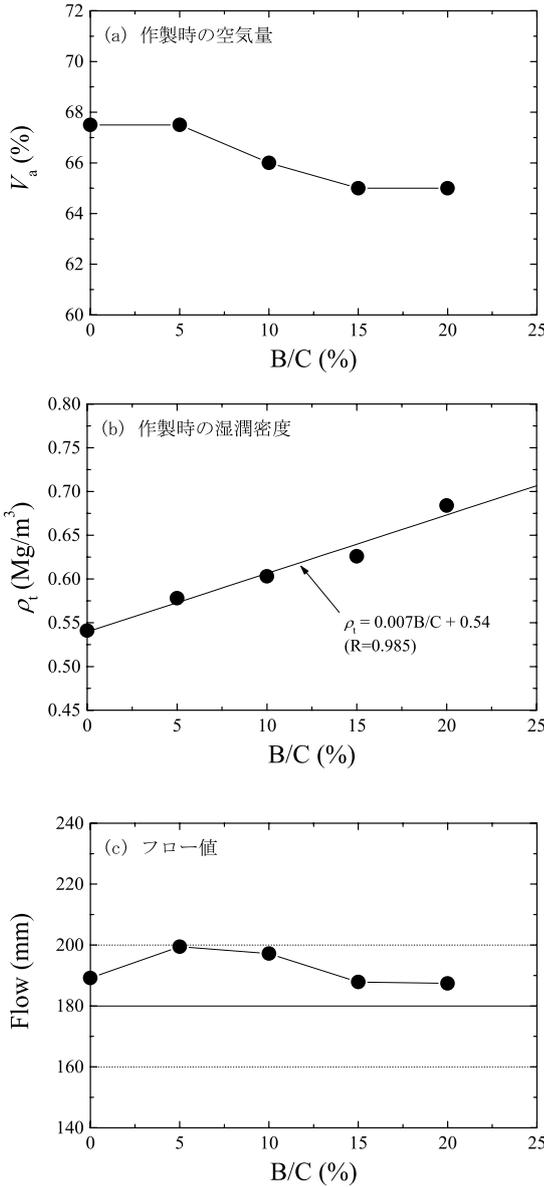


図-1 品質管理試験結果と B/C の関係

布した。試験後には、供試体上部、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。

3. 実験結果および考察

3.1 品質管理項目（空気量，湿潤密度，フロー値）と半水石膏添加率の関係

FCB 工法では、その軽量性と施工に伴う流動性を確保するために、品質を管理しなければならない。本節では、母材を使用していないエアミルクに対して半水石膏を添加することから、軽量性などの利点が失われている可能性がある。半水石膏を添加した気泡混合軽量土地盤の施工を、今後発展させていくためにも、半水石膏の添加に伴う品質管理項目の変化を把握しておくことが重要である。

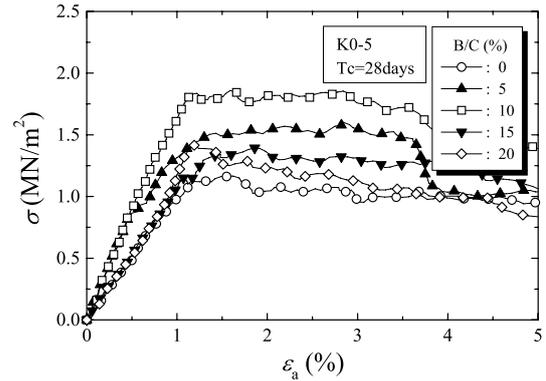


図-2 代表的な応力-ひずみ曲線

そこで、図-1 にその品質試験結果と半水石膏添加率 (B/C) の関係を示す。図-1 (a) は、供試体作製時の空気量 (V_a) と B/C の関係を示している。図より、 V_a 値は P/C の増加に伴い、減少していることがわかる。同様の結果が、W/C=0.71 および K0-3, K0-5, K0-10 の気泡混合軽量土に PET フレークを添加した既往の研究^{7), 8)} においても得られている。これらの原因としては、まず、添加する半水石膏の増加に伴い、試料全体の体積が増し、半水石膏量の増加分だけ比例的に V_a 値は減少したことが考えられる。また、攪拌時の気泡の消泡および半水石膏の吸水作用もその一要因であると考えられる。後者の場合は、半水石膏の添加前に形成されていた試料内の気泡に含まれている水分を、その吸水作用により吸収し、結果的に気泡を破壊しているものと考えられることから、とくに、B/C の増加に伴う V_a 値の減少に大きく影響しているものと推察できる。

図-1 (b) に、作製時の湿潤密度 (ρ_t) と B/C の関係を示す。図より ρ_t 値は、B/C の増加に伴って増加していることがわかる。また、その増加傾向は、直線近似によって表現できることが明らかとなった。この結果には B/C の増加に伴う V_a 値の減少傾向が大きく影響を及ぼしているものと考えられる。

フロー値 (Flow) と B/C の関係を図-1 (c) に示す。図の点線の範囲は、フロー値の基準値 180 ± 20 mm を表している。フロー値は、P/C の変化によらず、ほぼ一定の値を示し、いずれの P/C の場合も、品質管理基準値の範囲内であった。

これらの結果から、作製時の湿潤密度は若干増加したものの、実施レベルにおいて十分な軽量性を有していると考えられる。したがって、半水石膏を添加した気泡混合軽量土は、B/C=20%までの範囲において、有効利用できる可能性が示唆された。

3.2 応力-ひずみ曲線

図-2 に代表的な応力-ひずみ曲線を示す。いずれの半水石膏添加率 (B/C) の場合にも、軸ひずみの増加に伴い応力値が増加していき、応力-ひずみ曲線にピーク

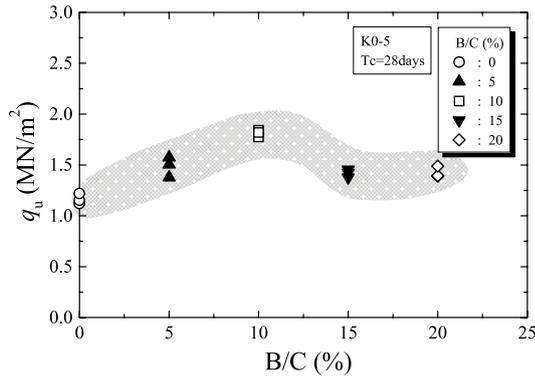


図-3 一軸圧縮強さと B/C の関係

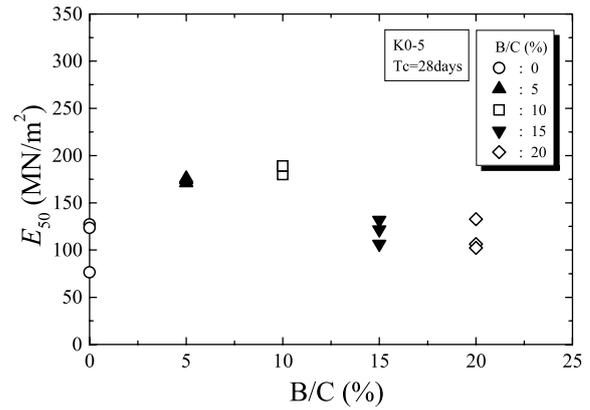
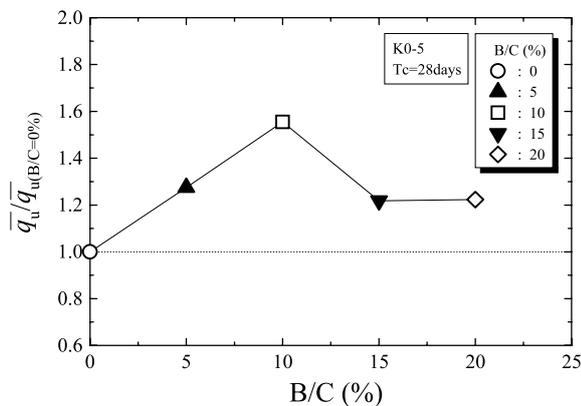
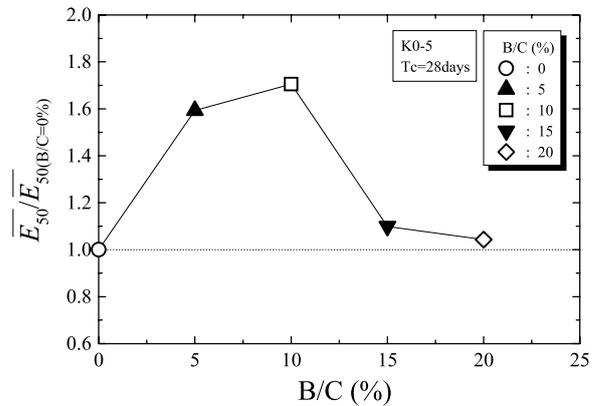


図-5 変形係数と B/C の関係

図-4 $q_u/q_{u(B/C=0\%)}$ と B/C の関係図-6 $E_{50}/E_{50(B/C=0\%)}$ と B/C の関係

が認められた後、応力値は、载荷の継続に伴い増減を繰り返しながら徐々にひずみ軟化する傾向を示している。今回得られた応力値のピーク後の挙動は、気泡混合軽量土の母材として軟岩⁹⁾や砂¹⁰⁾を用いた場合、さらには、PET フレークを添加した場合⁷⁾にも認められており、気泡混合軽量土特有のものと考えられる。

3.3 一軸圧縮強さ

半水石膏添加率 (B/C) の増加に伴う一軸圧縮強さ (q_u 値) の変化を検討するために、代表的な q_u 値と B/C の関係を図-3 に示す。図より、B/C の増加に伴い q_u 値は増加し、B/C=10%においてピークを迎えていることがわかる。また、ピークを過ぎた B/C=15%および B/C=20%の q_u 値はほぼ同程度であった。

このように q_u 値が最大となる、最適な B/C が存在する傾向は、W/C=0.71 の気泡混合軽量土に PET フレークを添加した既往の研究においても同様に認められており、養生日数 28 日 ($T_c=28days$) の場合には、P/C=10%において q_u 値が最大となり、P/C=0%の 1.1 倍程度となることが報告されている⁷⁾。同様に、流動化処理土に対し PET フレークを添加した研究においても、 q_u 値のピークは P/C=0%の 1.1~1.2 倍を示している¹¹⁾。

そこで、本研究から得られた q_u 値の平均値 (q_u) を B/C=0%の q_u 値の平均値 ($q_{u(B/C=0\%)}$) を用いて正規化した値と B/C の関係を図-4 に示し、B/C の変化に伴う q_u 値の変化を定量的に評価する。図より、 q_u 値のピークである B/C=10%において、1.5~1.6 倍程度の強度増加が認められている。また、 $q_u/q_{u(B/C=0\%)}$ 値のピークをすぎた B/C=15%および B/C=20%の場合においても、B/C=0%の q_u 値と比較して大きな値を示していることから、気泡混合軽量土に対して、半水石膏を適切に添加することにより強度増加が期待できる可能性が示唆された。

3.4 変形係数

図-5 に、変形係数 (E_{50}) と半水石膏添加率 (B/C) の関係を示す。図より、B/C=10%までは B/C の増加に伴い、 E_{50} 値も増加する傾向を示していることがわかる。また、B/C=15, 20%の場合には E_{50} 値がほぼ一定値となっていることから、本節から得られた E_{50} 値と B/C の関係は先述した q_u 値と B/C の関係と同様の傾向を示していることが明らかとなった。

ここで、 E_{50} 値と B/C の関係を定量的に評価するために、各 B/C 条件における E_{50} 値の平均値 (E_{50}) を B/C=0% の場合の平均 E_{50} 値 ($E_{50(B/C=0\%)}$) を用いて正規化した値

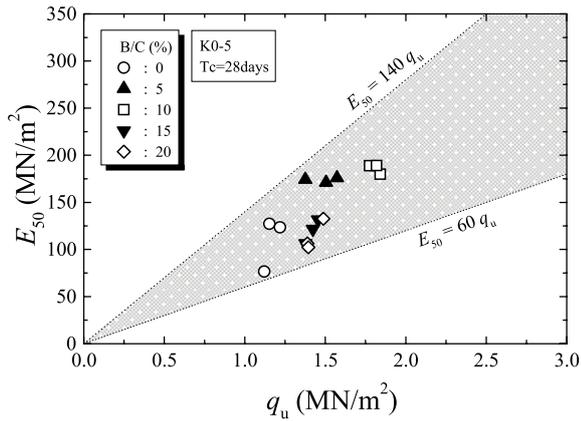


図-7 変形係数と一軸圧縮強さの関係

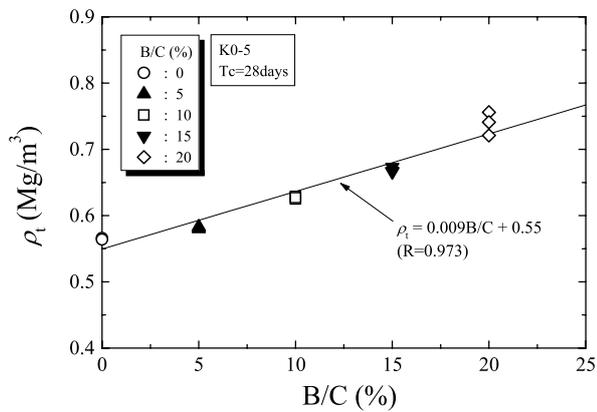


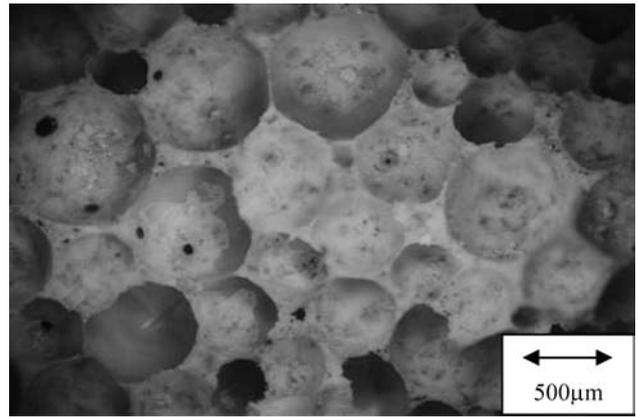
図-9 湿潤密度と B/C の関係

と B/C との関係を図-6 に示す。図より、B/C=10%においてピークが認められており、P/C=0%の場合の1.7倍程度の値を示していることがわかる。さらに、B/C=15%およびB/C=20%の場合においても、B/C=0%のE₅₀値を上回っていることから、気泡混合軽量土に半水石膏を添加することは、q_u値のみならず、変形特性も改善させる効果があるものと考えられる。

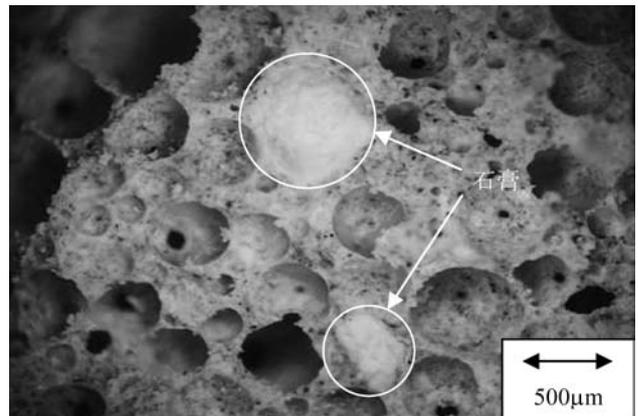
つぎに、E₅₀値と一軸圧縮強さ(q_u)の関係に着目する。一般的に、気泡混合軽量土の場合には、E₅₀値とq_u値の間に、高い相関関係があることが報告されている^{9), 10)}。例えば、横田・三嶋は、砂を母材とする気泡混合軽量土のE₅₀/q_u値は、100~200の範囲内となることを報告している¹²⁾。また、同様の結果が、W/C=0.71の気泡混合軽量土にPETフレークを添加した既往の研究からも得られている⁷⁾。そこで、本研究から得られたE₅₀値とq_u値の関係を図-7に示す。図より、B/Cの違いによらず、E₅₀値にはq_u値の増大に伴い、増加する傾向が認められた。E₅₀/q_u値は60~140の範囲内に分布しており、既往の研究と比較して、若干狭い範囲となった。

3.5 湿潤密度

先述したように、半水石膏の添加に伴って、作製時の



(a) B/S=0%



(b) B/S=20%

写真-2 半水石膏の添加が気泡混合軽量土の内部構造に及ぼす影響

湿潤密度は若干の増加傾向を示した。また、実際の施工においてはある程度の養生日数が経過した後の湿潤密度(ρ_t)を把握することも重要であるものと考えられる。そこで、一軸圧縮試験時(Tc=28days)のρ_t値と半水石膏添加率(B/C)の関係を図-8に示した。図より、作製時の場合と同様に、ρ_t値は、B/Cの増加に伴って直線的に増加していることがわかる。なお、その直線の傾きは作製時の場合と比較して、僅かに急になることが明らかとなった。

3.6 内部構造

半水石膏添加の有無が気泡混合軽量土の内部構造に及ぼす影響を明らかにするために、半水石膏添加率0%と20%における供試体断面のデジタルファインスコープ画像を写真-2に示す。まず、B/C=0%の内部構造は、供試体内に気泡が様に分布していることがわかる。一方、B/C=20%の内部構造においては、気泡の一部に石膏が入り込んでおり、その結果、湿潤密度が増加したものと考えられる。また、半水石膏は供試体のマトリクス部分(気泡の周囲を埋めるようにして存在している基質部分)にも取り込まれており、B/C=0%の場合と比較して、そのマ

トリクス部分に厚みがあることがわかる。先述したように、半水石膏には吸水作用があり、それに伴って硬化するという特徴を有している。その硬化作用により、半水石膏は周囲のマトリクス部分と一体化し、結果的に厚みのある、発達したマトリクス部分が形成されたものと考えられる。したがって、半水石膏の混入に伴って気泡混合軽量土の構造が密実化されることによって、その強度が改善したものと推察される。

以上のことから、半水石膏を添加した場合にも、 q_u 値の変化は、その内部構造に顕著に表れているため、その q_u 値を検討する際には、その内部構造を把握しておくことが重要であるといえる。また、最適な添加率が存在する可能性はあるものの、 $B/C=5 \sim 20\%$ の範囲ではいずれの添加率においても強度改善効果が認められたため、半水石膏の処分および建設用天然資材の不足問題を解決できる可能性は十分に示唆できた。したがって、気泡混合軽量土へ半水石膏を添加することは地盤工学的に有益であるものと考えられる。また、実施工においては、半水石膏の添加に伴う湿潤密度の増加と強度増加量のバランスを考慮し、その添加率を適切に選択することが重要であると考えられる。

4. 結論

本研究では、半水石膏をセメント重量に対して $0 \sim 20\%$ の異なる 5 種類の添加率で添加した気泡混合軽量土を作製し、品質管理基準などの観点からその適用性について検討するとともに、作製した供試体に対して一軸圧縮試験を実施した。以下に、本研究から得られた主要な結論を列記する。

- (1) 半水石膏を添加した気泡混合軽量土は、気泡混合軽量土の品質管理項目を十分に満たすとともに、その強度・変形特性も改善されていることから、気泡混合軽量土に対して半水石膏の有効利用の可能性が示唆された。
- (2) 養生 28 日の一軸圧縮強さに対して検討を行う場合、 10% 程度の半水石膏を添加することが適切である可能性が示された。
- (3) 半水石膏添加に伴う一軸圧縮特性の変化には、半水

石膏の吸水作用に伴う構造の密実化の影響が大きいことを、デジタルファインスコープによる内部構造観察により指摘した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、新潟ガービッジ(株)より廃石膏ボードから再生した半水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：建設業から排出される産業廃棄物排出量，<http://www.env.go.jp/council/03haiki/y0317-01/mat06.pdf>，2008.7.
- 2) 環境省：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/contents/data/es200321.xls>，2008.7.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 日本道路公団：気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針，pp.1-58, 1996.
- 7) 亀井健史，松尾和俊：フレック状の PET ボトルを利用した気泡混合軽量土の一軸圧縮特性，土木学会論文集，No. 764/III-67, pp.359-366, 2004.
- 8) 亀井健史，高嶋純一：フレック状 PET ボトルを添加した気泡混合軽量土の一軸圧縮強さと内部構造に及ぼす初期高温養生の影響，地盤と建設，Vol.24, No.1, pp.51-59, 2006.
- 9) 亀井健史，前川晴義，堀切保則「気泡混合軽量土への軟岩の有効利用」，土木構造・材料論文集，No.18, pp.177-184, 2002.
- 10) 亀井健史，前川晴義，堀切保則：気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす水セメント比と養生日数の影響，土木構造・材料論文集，No.18, pp.169-176, 2002.
- 11) 亀井健史，松尾和俊，志比利秀，小木曾みちる：流動化処理土へのフレック状 PET ボトルの有効利用，島根大学総合理工学部紀要シリーズ A, Vol.38, pp.9-16, 2004.
- 12) 横田聖哉，三嶋信雄：気泡混合軽量土を用いた人工地盤，土と基礎，Vol.44, No.5, pp.5-8, 1996.