

異なる初期高温養生履歴が フレーク状 PET ボトルを混入した気泡混合軽量土の 一軸圧縮強さとその内部構造に及ぼす影響

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⁾島根大学大学院総合理工学研究科 地球資源環境学専攻

Influences of Initial High Temperature Curing Histories on Unconfined Compressive Strength and Microstructure of Foamed Mixture Lightweight Soil Containing Flaky Polyethylene Terephthalate Bottles

Takeshi KAMEI¹⁾ and Jun-Ichi TAKASHIMA²⁾

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

²⁾*Department of Geoscience,
Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Graduate School of Shimane University*

Abstract

Lightweight soil technology has been widely used in construction projects to solve soft ground problems. The major advantages offered by this technology are reduced foundation soil improvement costs and reduced construction time due to the reduced loading on the ground. Previous work, however, has shown the maximum temperature inside field test bodies reaches about 90°C. On the other hand, industrial waste disposal is an increasing problem. It is, therefore, becoming increasingly important for technology and engineering design to be utilized effectively for industrial waste disposal. PET (Polyethylene Terephthalate) bottles are now generated in vast quantities due to increased consumption of drinking water. If PET bottles can be effectively utilized as a construction material, the problems of PET bottle disposal and shortage of natural resources for construction may be solved. This paper describes the influences of initial high temperature curing histories on unconfined compressive strength and microstructure of foamed mixture lightweight soil containing flaky PET bottle waste to promote PET bottle recycling. Comparisons are made between foamed mixture lightweight soil and foamed mixture lightweight soil mixed with flaky PET waste. The effects of flaky PET on stress-strain behavior of foamed mixture lightweight soils are quantitatively demonstrated. These properties make flaky PET bottle waste useful as a construction material. The potential use of flaky PET waste can be refined with further research. Observation of internal structures suggests that decrease in unconfined compressive strength with increased initial curing temperature is attributable to structural change induced by heating, in which small uniformly distributed air bubbles become connected to each other and form large cavities.

1. はじめに

気泡混合軽量土工法(Foamed Cement Banking Method: 以下, FCB 工法とする)は, 使用目的に応じた流動性や単位体積重量, 強度を選択できるという特長を有していることから, 盛土などによる上載荷重の低減, 土圧の低減, 空洞の充填, および振動・騒音の低減といった効果が期待され, 各地で施工されている¹⁾. また, 近年その軽量性に着目して, 人工浮島建設や屋上緑化などにも気泡混合軽量土が適

用されており, その効果として, 生物生息空間の創出や水質浄化, ヒートアイランド現象・大気汚染の抑制などが期待できると考えられている²⁾. このような気泡混合軽量土の特長は, 環境負荷低減という現代社会のニーズにも応えることができる.

このように FCB 工法は, 主に長所ばかりが目立っているが, 打設時には, 水和反応に伴う発熱作用と気泡による断熱効果により, 内部温度が上昇しやすく, 外気温に収束するまでの時間も長期になるという問題点も指摘され

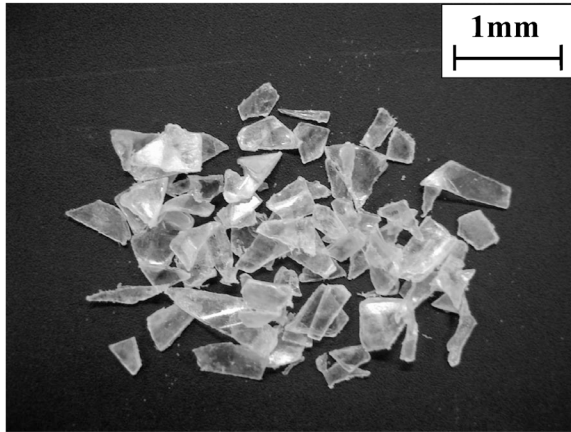


写真-1 PET フレーク

ている。気泡混合軽量土内部の温度は打設直後から約1日の間で60~90℃程度まで急激に上昇し、さらにその高温状態が長期にわたり持続する事例が報告されている^{3)~5)}。そして、このような高温の水和熱が、気泡混合軽量土地盤の強度・変形特性に悪影響を及ぼす主要因となる可能性も指摘され始めている⁴⁾。

一方、これからの我が国には、今まで廃棄処理されてきた廃棄物や副産物等を再資源化し、有効に再利用していくことが求められている。それによって、これまでの大量生産・大量消費・大量廃棄社会を改め、循環型社会を形成することができれば、人間が環境に与えている種々の影響の軽減に繋がり、環境問題を改善できる可能性がある。

このような社会動向の中、近年のリサイクル分野においてとくに注目されているのが、便利なプラスチック容器として、非常に身近なものとなっているPETボトルである。軽くて丈夫、安全で衛生的、リキャップ性などの特長から、その生産量は世界的に増加している。それを受けて、我が国では、PETボトルにも適用される「容器包装リサイクル法」が1997年に制定された。それ以降、我が国のPETボトル回収率は一貫して増加し、2005年度には、63.7%を達成している。これは前年度を1.4%上回り、これまでどおり世界最高水準をキープしている⁶⁾。

その反面、今後もPETボトルの生産量が伸び続けることが予測されており、分別収集量が向上しても、その再利用分野の不足が懸念されているのが現状である。そこで、建設用天然資材の不足問題解決の観点から、このPETボトルを地盤材料として利用することができれば、極めて有意義であると考えられる。

近年では流動化処理土および気泡混合軽量土に対して、使用するセメント重量の10~15%程度のフレーク状のPETボトル(PETフレーク)を混入することにより、それらの一軸圧縮強さはともに増大するとの報告例がある^{7) 8)}。しかしながら、気泡混合軽量土の場合には、前述したように、打設地盤内部において高温の水和熱が発生するという問題点がある。そして、そのような高温履歴が、PETフレ

ークを添加した気泡混合軽量土の力学特性にどのような影響を及ぼすのかは未解明であり、今後のPETボトル有効利用分野拡大の観点からも、定量的な把握が急務であると考えられる。

そのような現状から、近年著者らは初期高温養生を比較的簡便にモデル化した温度履歴における20~90℃の初期養生温度が、PETフレークを添加した気泡混合軽量土に対して、どのような影響を及ぼすかを検討した⁹⁾。その結果から、養生温度60℃までは、PETフレークの添加に伴う強度改善効果が得られたが、80℃以上の高温を受けた場合には、その効果は認められないことを明らかとした。

しかしながら、実際の打設現場においては、気泡混合軽量土地盤内部の温度が徐々に上昇することが明らかになっている¹⁰⁾。また、打設後の温度履歴に即して、打設後24時間で段階的に初期養生温度を与えた研究例において、80℃以上の高温を受けた場合には、20℃で養生した場合の一軸圧縮強さの5割から6割程度にまで減少することが報告されている¹¹⁾。さらに、このような強度減少の割合は、現場から採取されたポーリングコア試料から得られた実験結果と一致している。したがって、打設時に発生する高温履歴が、気泡混合軽量土の強度特性に及ぼす影響を詳細に検討する際には、打設後24時間で段階的に上昇させる初期高温養生履歴を与えて評価する必要があるものと考えられる。

そこで本研究では、打設現場に即した初期高温養生履歴がPETフレークを添加した気泡混合軽量土の一軸圧縮強さに及ぼす影響を検討するため、PETフレークをセメント重量に対して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に対して、20~90℃の異なる5種類の初期養生温度を打設後24時間で段階的に与え、その後20℃の温度条件下で養生した。そして、養生日数28日経過した供試体に対して、一軸圧縮試験を実施した。なお、養生温度の上昇により、供試体の体積が膨張するものと考えられることから、それに伴う乾燥密度の変化を抑制したクローズドシステム条件の下で行った。また、初期養生温度およびPETフレーク添加率の違いが供試体の内部構造に及ぼす影響などを観察するとともに、初期高温養生履歴の違いが一軸圧縮強さおよび内部構造に及ぼす影響についても検討している。

2. 試料および試験方法

2.1 PET フレーク

PETボトルの原料は、ポリエチレンテレフタレート(polyethylene terephthalate)と呼ばれる樹脂である。本研究では、PETボトルからの処理過程が比較的少なく、地盤材料として用いやすいことから、フレーク状に粉砕したPETフレーク(写真-1)を使用した。PETフレークの切断

面は鋭利になっており、薄片状をしている。表-1は、PETボトル再商品化製品の主要な品質基準値¹²⁾を示している。なお、図-1は、PETフレークのふるい分析による粒径加積曲線を示している。これは、ふるい分析を4回行い、その結果をもとに作成したものである。図より、4回実施した粒径加積曲線はほぼ一致していることから、PETフレークの大きさの分布にはバラツキが少ないことがわかる。

2.2 供試体作製方法

本研究では、日本道路公団暫定配合表³⁾に基づき、3種類の配合条件(K0-3, K0-5, K0-10)のエアミルクを作製した。また、PETフレーク添加率(P/C)として、0, 5, 10, 15, 20%の5種類を設定している。なおP/Cは、セメント重量に対するPETフレーク重量の比を表している。

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

表-1 PETボトル再商品化製品の主要な品質基準

| 規格項目 | 基準値 |
|--------|---------------|
| 比重 | 1.350 ~ 1.390 |
| カットサイズ | 8mm φ スクリーン |
| 水分率 | 0.6% 以下 |
| 異物混合率 | 1300ppm 以下 |

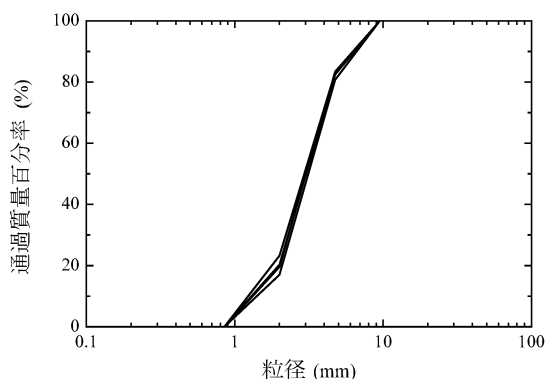


図-1 PETフレークの粒径加積曲線

が得られる。完成したエアミルクに所定のPETフレーク添加した後、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ざるように、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-2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(φ=50mm, H=100mm)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、作製した試料をそのモールドに打設した。その後、温度上昇による供試体の体積膨張を抑制するために、モールドに蓋をした(クローズドシステム)後に、全体をビニール袋で覆った。

本研究では、初期養生温度履歴の違いがPETフレークを添加した気泡混合軽量土の一軸圧縮強さとその内部構造に及ぼす影響について考察するため、2パターンの養生条件を設定した(図-2(a), (b))。case I(図-2(a))は既往の研究⁹⁾において採用され、初期高温養生を比較的簡便にモデル化した養生温度履歴であり、case II(図-2(b))は本研究で採用し、打設現場で計測された初期養生温度履歴をシミュレートした温度履歴である。打設後24時間の温度履歴において、case Iは打設後急激に、case IIは打設後段階的に20~90℃の初期養生温度(Tic)まで温度を上昇させている。

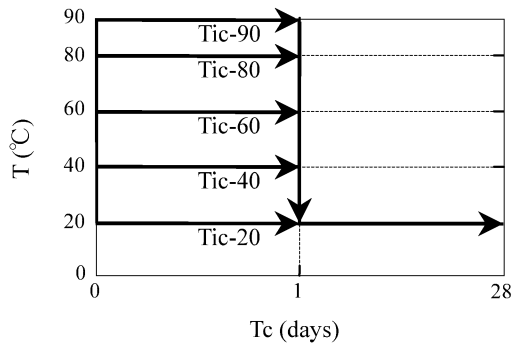
なお、いずれの温度履歴も養生2日目から28日目までは20℃一定条件で養生させている。この理由としては、既往の研究例において、打設後28日の間、高温で養生させた場合¹⁰⁾と、打設後24時間のみ高温を与えた場合¹³⁾の強度減少が同程度であったことから、気泡混合軽量土の一軸圧縮強さには、打設後24時間の温度履歴が大きな影響を及ぼす一方で、その後の養生温度履歴が及ぼす影響は小さいものと推察できることを考慮したためである。

養生条件にしたがって打設後24時間(Tc=1day)を乾燥炉内で養生させた後、モールドから供試体を取り出し、両端面を成形した。その後、供試体をプラスチック製の円筒型容器に入れ、恒温室(20±2℃)で養生した。実験には、28日間(Tc=28days)気中養生した供試体を用いた。

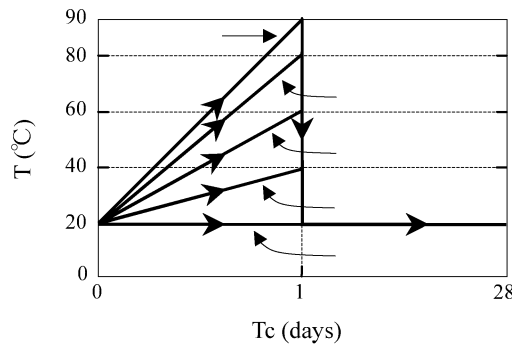
表-2 試料の配合条件と品質管理基準

| 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_1 (Mg/m ³) | フロー値 Flow (mm) | 空気量 Va (%) |
| K0-3 | 0.3 | 0.92 | 268 | 1.15 | 26.45 | 219 | 247 | 0.52±0.1 | | 66.5±5 |
| K0-5 | 0.5 | 0.88 | 298 | 1.11 | 25.53 | 235 | 262 | 0.56±0.1 | 180±20 | 64.0±5 |
| K0-10 | 1.0 | 0.82 | 353 | 1.03 | 23.69 | 264 | 289 | 0.64±0.1 | | 59.5±5 |

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



(a) case I (既往の研究⁹⁾)



(b) case II (本研究)

図-2 養生条件

2.3 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 PET フレーク添加率の関係

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、空気量 (V_a)、作製時の湿潤密度 (ρ_t)、フロー値 (Flow) の3点において品質を管理しなければならない。既往の研究では、 $W/C=0.71$ ⁸⁾および K0-3, K0-5, K0-10⁹⁾の気泡混合軽量土において、PET フレークを添加した場合にも品質管理項目の基準値を満たしうることが示唆され

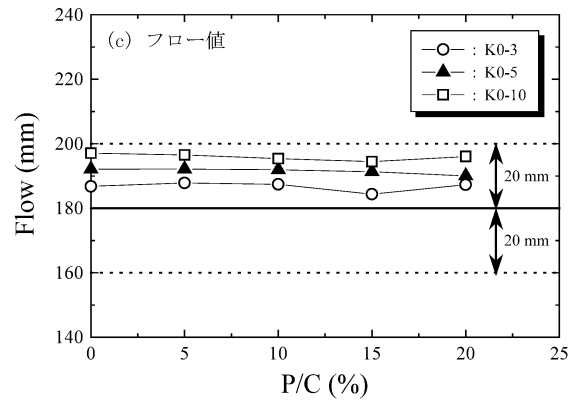
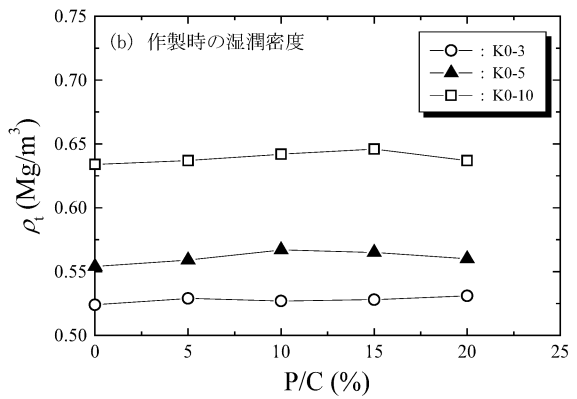
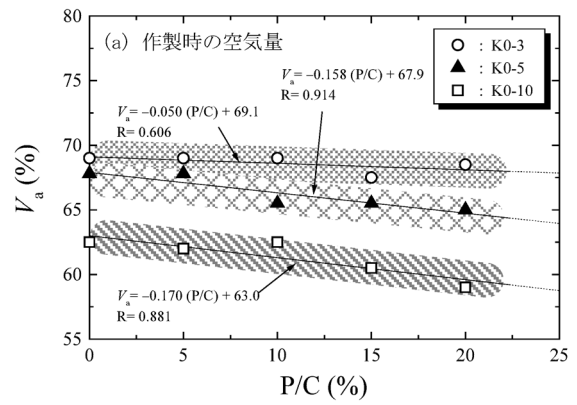


図-6 品質管理試験結果と P/C の関係

ている。しかしながら、研究例が少ないため、本研究においても PET フレークの添加に伴う品質管理項目の変化傾向を把握し、施工に際して確認すべき情報を得る必要がある。

まず図-6 (a) に、 V_a 値と PET フレーク添加率 (P/C) の関係を示す。図より K0-3, K0-5, K0-10 とともに、 V_a 値は P/C の増加に伴い減少しており、その傾向は直線近似によって表現可能である。つぎに、 ρ_t 値と P/C の関係を図-6 (b) に示す。図より ρ_t 値は、K0-3, K0-5, K0-10 とともに、P/C の増加に伴って、若干増加傾向にあるが、各配合とも、

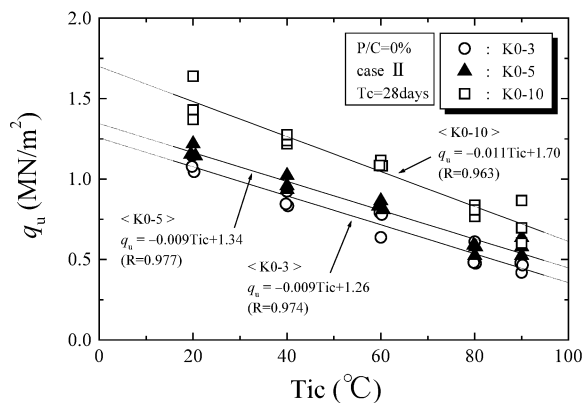


図-3 一軸圧縮強さと初期養生温度の関係 (P/C=0%, case II)

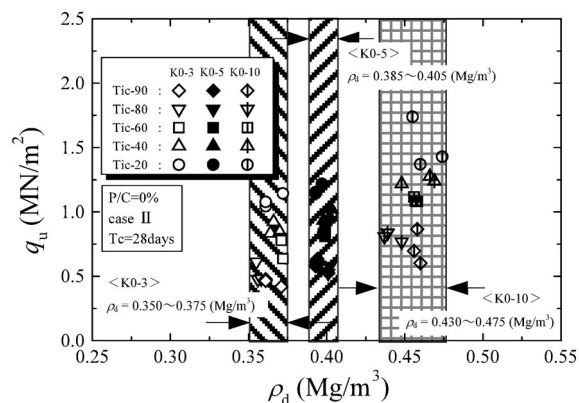


図-5 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係 (P/C=0%, case II)

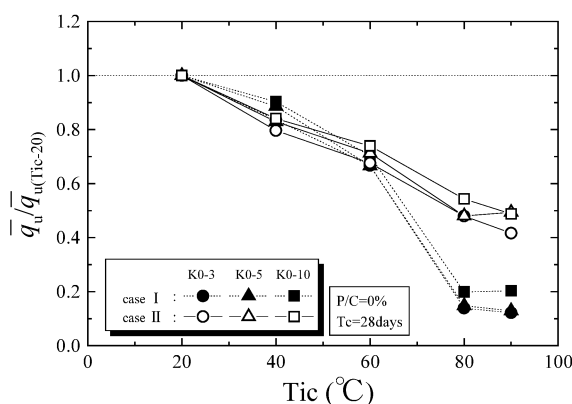


図-4 $\bar{q}_u/q_{u(Tic=20)}$ と初期養生温度の関係 (P/C=0%)

表-2 に示す品質管理基準の範囲を満たしており、軽量性を十分に保っていることがわかる。さらに、フロー値においても、P/C の変化によらず、ほぼ一定の値を示しており、いずれの P/C の場合も、品質管理基準値の範囲内におさまることが明らかとなった (図-6 (c))。

各品質管理項目と P/C の関係について、同様の結果が W/C=0.71⁸⁾および K0-3, K0-5, K0-10⁹⁾の気泡混合軽量土に対し PET フレックを添加した既往の研究においても認められている。すなわち、PET フレックを添加した気泡混合軽量土は、P/C=20%までの範囲において、品質管理項目の基準値を十分に満たしうるものと考えられる。

3.2 一軸圧縮強さに及ぼす初期高温養生の影響

まず、PET フレックを添加しない場合において、初期高温養生が気泡混合軽量土の一軸圧縮強さに及ぼす影響について検討する。

図-3 は、打設現場の初期養生温度履歴に即した温度履歴である case II を与えた場合の供試体から得られた、一軸圧縮強さ (q_u) と初期養生温度 (Tic) の関係を示している。図より、目標一軸圧縮強さの大小にしたがい、K0-3, K0-5,

K0-10 の順に q_u 値は大きくなっていることがわかる。また、配合条件の違いによらず、Tic の上昇に伴い q_u 値は直線的に減少していくことがわかる。

つぎに、各 Tic の q_u 値の平均値 (\bar{q}_u) を Tic-20 の q_u 値の平均値 ($\bar{q}_{u(Tic=20)}$) を用いて正規化した値と Tic の関係を図-4 に示す。この図において、初期高温養生履歴の違いが Tic の変化に伴う q_u 値の変化に及ぼす影響を比較するために、初期高温養生を比較的簡便にモデル化した温度履歴である case I と、本研究において採用した温度履歴である case II を与えた場合から得られた結果を定量的に評価する。

図より、既往の研究⁹⁾において採用されていた case I の場合に注目すると、K0-3, K0-5, K0-10 とともに、Tic の上昇に伴い q_u 値は減少する傾向にあり、Tic-60 の q_u 値は Tic-20 の q_u 値の 7 割程度であるが、さらに Tic が上昇した Tic-80 以上の q_u 値は、Tic-20 の 2 割程度まで減少していることがわかる。一方、case II の場合においても同様に、配合条件の違いによらず、Tic の上昇に伴い q_u 値は減少し、Tic-60 の q_u 値は Tic-20 の 7 割程度を示している。しかしながら、さらに Tic が上昇した Tic-90 の場合には、Tic-20 の q_u 値の 4~5 割程度となっている。このような強度減少の割合は、現場から採取されたボーリングコア試料から得られた実験結果¹¹⁾とほぼ同程度である。これらの結果から、case I と case II について、Tic の上昇に伴う q_u 値の減少量を比較した場合には、Tic-80 以上においてその差が大きくなることが明らかとなった。

3.3 内部構造に及ぼす初期高温養生の影響

気泡混合軽量土の一軸圧縮強さ (q_u) はその乾燥密度 (ρ_d) に依存するところが大きく、一般的に、 ρ_d 値の増大に伴い q_u 値も増加するという傾向が認められている^{8), 14)}。すなわち、 q_u 値はその ρ_d 値を用いることにより推定可能であると考えられる。しかしながら、クローズシステム条件下、気泡混合軽量土に高温履歴を与えた種々の研究例におけ

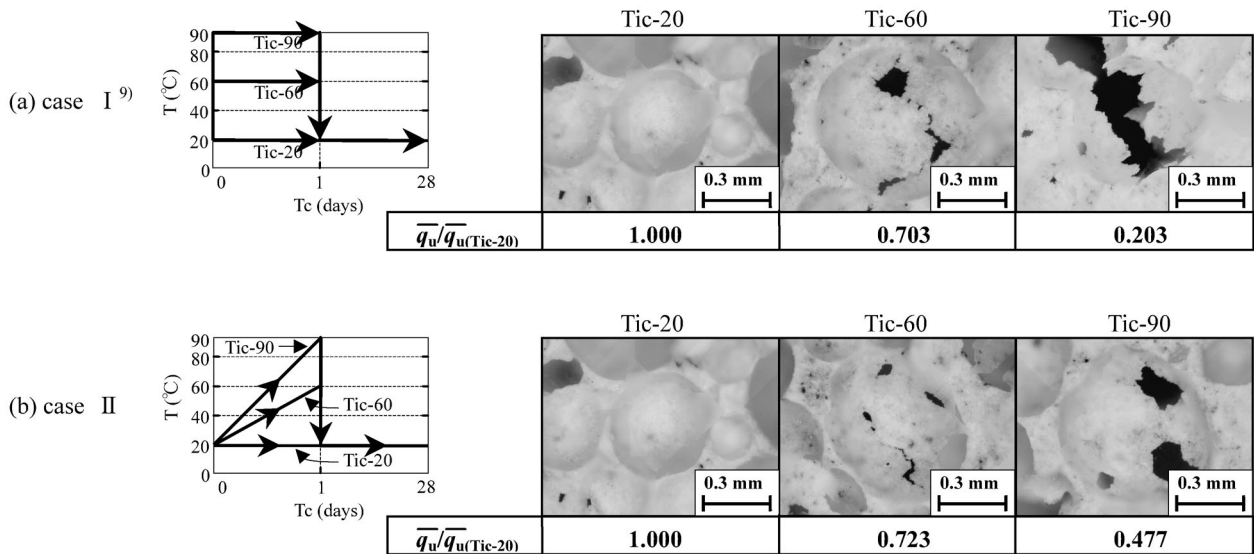


写真-2 初期高温養生を与えた気泡混合軽量土の内部構造 (K0-10 · P/C=0%)

る q_u 値と ρ_d 値の関係では、 ρ_d 値が同程度であるにも関わらず、 q_u 値に大きなバラツキが認められることが報告されている^{9), 11), 13)}。高温養生による強度減少の直接的な原因が ρ_d 値ではないことから、これらの研究では、内部構造に着目し、温度上昇に伴う内部構造の変化(気泡の大きさや形状)が、強度減少を引き起こしているものと推察している。

ここで、図-5 に case II の初期高温養生履歴を与えた場合の q_u 値と ρ_d 値の関係を示す。なお、図中のハッチは、各配合条件から得られた ρ_d 値の範囲を示している。図より、いずれの配合条件においても、 ρ_d 値が同程度であるにも関わらず、 q_u 値には大きなバラツキが認められている。すなわち、上述した研究と同様に、本研究での高温養生による強度減少には、温度上昇に伴う内部構造の変化が起因しているものと考えられる。

そこで、写真-2 に case I (写真-2(a)) および case II (写真-2(b)) を与えた気泡混合軽量土の内部構造を示す。なお、写真はデジタルファインスコープにより、K0-10 の供試体を撮影したものである。

まず、初期高温養生を比較的簡便にモデル化した温度履歴である、case I を与えた既往の研究⁹⁾の場合の内部構造を観察する。Tic-20 と比較して、強度がその 7 割程度である Tic-60 の気泡に着目すると、気泡間の壁であるマトリクス部分(気泡の周囲を埋めるようにして存在している基質部分)が薄くなり、やぶれて、奥側の気泡と繋がっている箇所が存在していることがわかる。そして、このような気泡は、Tic-20 の 2 割程度の強度である Tic-90 においても同様に確認でき、気泡間の壁がやぶれてできた穴は、Tic-60 と比較して、さらに大きく、奥まで貫通していることがわかる。

つぎに、本研究において採用した、打設現場の初期養生

温度履歴に即した温度履歴である case II を与えた場合の内部構造を観察する。case I の場合と同様、Tic の上昇に伴って、気泡間の壁がやぶれてできた穴は大きくなっていくことがわかる。

養生温度の上昇に伴う気泡内部圧力の上昇は、気泡の膨張を引き起こすものと考えられる。しかしながら、本研究ではクローズドシステム条件下で実験を行っているため、気泡の膨張に伴う供試体全体の体積膨張は起こらない。すなわち、増大した気泡の体積分だけマトリクス部分が収縮するものと考えられる。したがって、気泡間の壁であるマトリクス部分が薄くなることで気泡に穴が開き、その結果、それぞれの気泡が多方向の気泡と繋がることで、所定の強度を発揮できない、脆い構造ができてしまうと推察できる。

ここで、case I と case II の内部構造について比較を試みる。case I の場合と同程度の強度減少を示している case II の Tic-60 に着目すると、気泡に認められる穴の大きさおよび気泡間の壁のやぶれ方は、case I の場合と類似している。しかしながら、Tic-20 の 5 割程度の強度である case II の Tic-90 では、case I の場合の Tic-90 と比較して、その穴が小さく、連結していないことがわかる。これらの写真から、初期高温養生履歴の違いによる強度差は、内部構造に顕著に反映されていることが明らかとなった。

3.4 初期高温養生およびPETフレークの添加が一軸圧縮強さに及ぼす影響

これまで、初期高温養生履歴の違いが気泡混合軽量土の一軸圧縮強さとその内部構造に及ぼす影響を明らかにしてきた。そして、これ以後は、PETフレークを添加した場合の気泡混合軽量土の一軸圧縮強さとその内部構造に対して、与える初期高温養生履歴の違いが及ぼす影響を考察

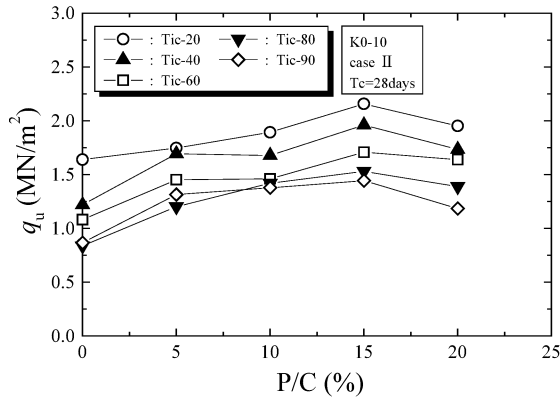


図-7 代表的な一軸圧縮強さと PET フレーク添加率の関係 (K0-10, case II)

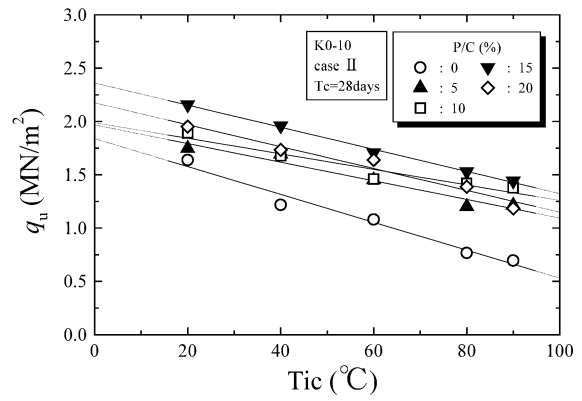


図-9 代表的な一軸圧縮強さと初期養生温度の関係 (K0-10, case II)

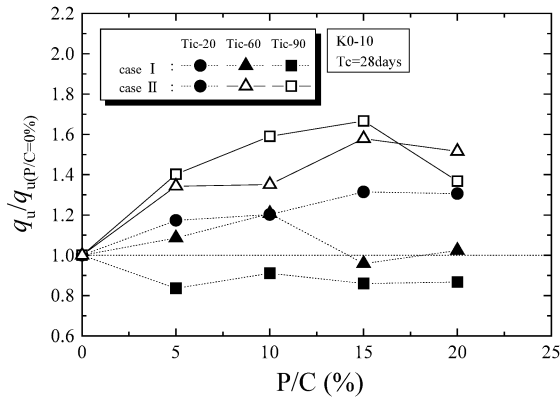


図-8 $q_u/q_{u(P/C=0\%)}$ と PET フレーク添加率の関係 (K0-10)

する。

PET フレーク添加率 (P/C) の増加に伴う一軸圧縮強さ (q_u) の変化を検討するために、case II を与えた K0-10 における代表的な q_u 値と P/C の関係を図-7 に示す。図より、P/C の違いによらず、初期養生温度 (Tic) の上昇に伴い q_u 値は減少することがわかる。また、いずれの Tic の場合にも、 q_u 値は P/C の増加に伴って増加し、P/C=15%においてピークが認められている。PET フレークを添加した気泡混合軽量土に case I を与えた既往の研究⁹⁾においても P/C=10~15%程度において q_u 値が最大となることが報告されていることから、最適な P/C は初期高温養生履歴の違いによらず、P/C=10~15%程度となる可能性が示唆された。

ここで、Tic および初期高温養生履歴の違いが、 q_u 値と P/C の関係に及ぼす影響を定量的に評価するために、各 Tic の q_u 値を P/C=0% の場合の q_u 値を用いて正規化した値 ($q_u/q_{u(P/C=0\%)}$) と P/C との関係を図-8 に示す。図より、Tic-20 の場合は、 q_u 値が最大となる P/C=15%において、P/C=0% の 1.3 倍程度の強度増加を示している。ここで、case I を与えた場合の $q_u/q_{u(P/C=0\%)}$ 値と P/C に着目すると、Tic-60 では P/C の増加に伴って q_u 値は増加するが、Tic-90 の場合に

表-3 代表的な一軸圧縮強さと初期養生温度の関係式一覧

| P/C(%) | 関係式 | 相関係数 |
|--------|-----------------------------------|-------|
| 0 | $q_u = -0.013 \text{ Tic} + 1.84$ | 0.986 |
| 5 | $q_u = -0.009 \text{ Tic} + 1.97$ | 0.974 |
| 10 | $q_u = -0.007 \text{ Tic} + 1.99$ | 0.964 |
| 15 | $q_u = -0.010 \text{ Tic} + 2.36$ | 0.998 |
| 20 | $q_u = -0.010 \text{ Tic} + 2.17$ | 0.981 |

は PET フレーク添加に伴う強度増加が認められていないことがわかる。しかしながら、より打設現場の温度履歴に即している case II の場合には、Tic-60、Tic-90 とともに、P/C=15%において、P/C=0%の 1.6~1.7 倍程度の q_u 値となっており、顕著な強度改善効果が認められた。

case II を与えた場合において認められる、このような強度改善効果を詳細に検討するために、図-9 に、case II の温度履歴を与えた K0-10 の代表的な q_u 値と Tic の関係を示す。図より、P/C の違いによらず、Tic の上昇に伴い、その q_u 値は直線的に減少していることがわかる。また、表-3 には図-9 において直線近似した関係式を示している。この関係式に着目すると、P/C=0%と比較して、P/C=5~20%の関係式の傾きが緩やかであることがわかる。このことから、PET フレークを添加した気泡混合軽量土は、添加していない場合と比較して、温度上昇に伴う強度減少量を抑えることができるものと考えられる。これは、添加する PET フレーク量の増加に伴いマトリクス全体における PET フレークの割合が増加することから、養生温度上昇がもたらす悪影響を顕著に受けるエアミルク部分が比例的に減少し、その結果、供試体全体として強度減少抑制の効果を発揮しているものと推察できる。

さらに、初期高温養生履歴の違いが、正規化した q_u 値と Tic の関係に及ぼす影響を明らかにするために、case I および case II を与えた、P/C=0%と 10%のデータを図-10 において比較する。図より、case I を与えた P/C=0%の場

合に着目すると, Tic の上昇に伴い $q_u/q_{u(P/C=0\%)}$ 値は減少していき, Tic-80 以上では Tic-20 の場合の 2 割程度を示していることがわかる. この傾向は P/C=10% の場合においても認められたが, Tic-80 以上の $q_u/q_{u(P/C=0\%)}$ 値は P/C=0% の場合と比較して小さくなっていることから, case I の場合には PET フレークの添加が一軸圧縮強さに悪影響を及ぼしているものと考えられる.

一方, 打設現場の初期養生温度履歴に即した温度履歴である case II の, Tic-80 以上を与えた場合に着目すると, P/C=0% の場合の q_u 値は Tic-20 の場合の 5 割程度を示しているのに対し, P/C=10% の場合には Tic-20 の 7~8 割程度の強度を維持していることがわかる. 打設現場に即している case II の初期高温養生履歴において, Tic-80 以上の高温を与えた場合にも, PET フレーク添加に伴う顕著な強度改善効果が認められたことから, 打設時に温度が上昇することが予測される気泡混合軽量土へ PET フレークを添加することは, 地盤工学的に有益であるものと考えられる.

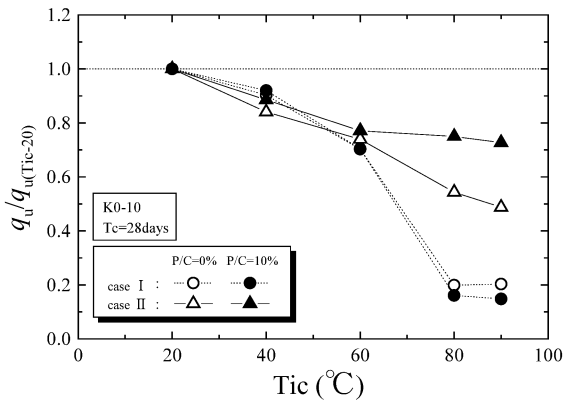


図-10 $q_u/q_{u(Tic=20)}$ と初期養生温度の関係 (K0-10・P/C=0,10%)

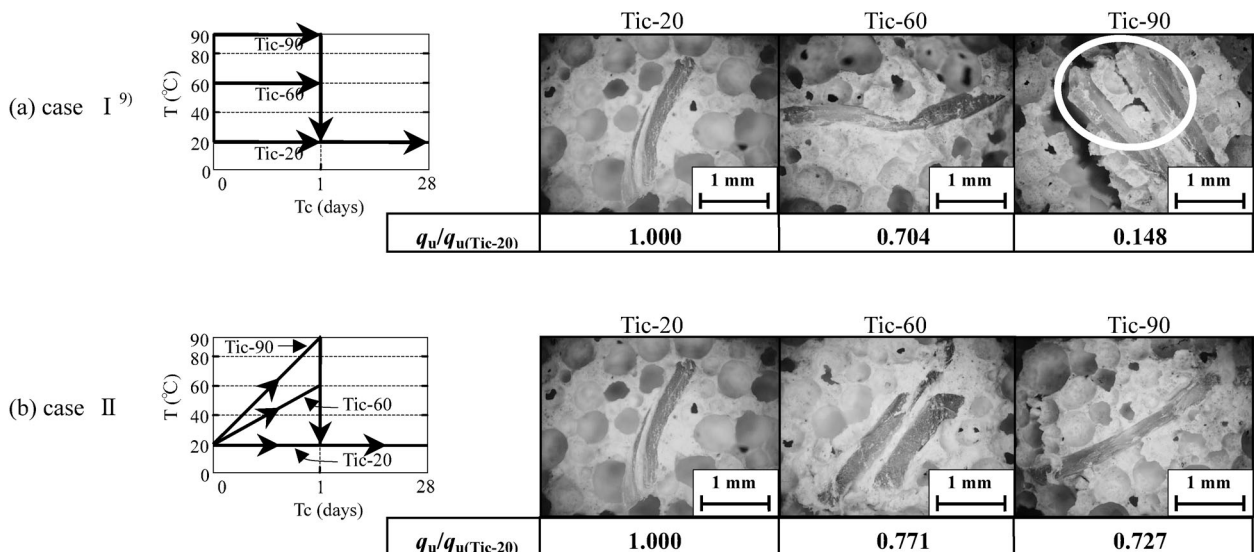


写真-3 初期高温履歴の違いが PET フレークを添加した気泡混合軽量土の内部構造に及ぼす影響 (K0-10・P/C=10%)

3.5 初期高温養生およびPET フレークの添加が内部構造に及ぼす影響

PET フレークを添加した気泡混合軽量土に case I の初期養生温度履歴を与えた既往の研究⁹⁾では, PET フレークの分布およびマトリクスとの接着状態が, その強度に大きな影響を及ぼしていることを, デジタルファインスコープでの観察により明らかにしている. 本研究では, 打設現場に即した case II の温度履歴を供試体を与えることにより, 気泡混合軽量土への PET フレーク添加の効果を改めて示唆しているため, Tic の上昇に伴う内部構造の変化を再検討する必要があるものと考えられる.

写真-3 には, 初期高温養生を比較的簡便にモデル化した温度履歴である case I (写真-3(a)) と, 打設現場の初期養生温度履歴に即した温度履歴である case II (写真-3(b)) を与えた気泡混合軽量土の内部構造を示している. なお, これらの写真はデジタルファインスコープを用いて撮影した K0-10・P/C=10% の供試体の内部構造である.

まず, 本研究で明らかにしてきた気泡混合軽量土への PET フレーク添加の効果を, case II を与えた場合の内部構造 (写真-3(b)) に着目し, 検討する.

先述したように, 本研究において採用した case II を与えた場合には, いずれの Tic においても, PET フレークの添加により, その一軸圧縮強さが改善されることが明らかになった. この主要因としては, PET フレークの, せん断補強材としての効果が考えられる. case II の写真からもわかるように, PET フレークは供試体内部で様々な方向に分布している. すなわち, どの方向にせん断面が入っても, PET フレークがせん断補強材となりうるものと考えられる. また, Tic の違いによらず, PET フレークがマトリクス部分と一体になっていることがわかる. これらの写真か

ら、マトリクス部分の変形は PET フレックに拘束されているものと推察できる。このように、気泡混合軽量土に及ぼす PET フレック添加の効果は、その内部構造のメカニズムを把握することにより解明できた。

つぎに、初期高温養生履歴の違いが PET フレックを添加した気泡混合軽量土に及ぼす影響について検討する。

case I の温度履歴を与えた場合 (写真-3(a)) に着目すると、Tic-20 および Tic-20 の q_u 値の 7 割程度を發揮している Tic-60 の内部構造からは、添加した PET フレックの周囲全てが供試体のマトリクス部分と接着していることがわかる。しかしながら、Tic-20 の場合の 1.5 割程度の q_u 値である Tic-90 の内部構造においては、PET フレックとマトリクスの間に隙間ができ、PET フレック全体が接着していない様子が確認できる。

一方、case II の場合 (写真-3(b)) では、Tic-20、60 の場合と同様、Tic-90 の内部構造においても、供試体のマトリクス内に PET フレックがとりこまれていることがわかる。これは、case I の Tic-20 および Tic-60 の内部構造と類似しており、その $q_u/q_{u(Tic-20)}$ 値を比較してもほぼ同程度であることがわかる。すなわち、PET フレックを添加した気泡混合軽量土における q_u 値の変化には、その内部構造の変化が大きな影響を及ぼすものと考えられることから、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。

4. まとめ

本研究では、打設現場に即した初期高温養生履歴がフレック状の PET ボトルを添加した気泡混合軽量土の一軸圧縮強さとその内部構造に及ぼす影響を検討した。また、初期高温養生を比較的簡便にモデル化した温度履歴を与えた場合と比較することにより、初期高温養生履歴の違いが PET フレックを添加した気泡混合軽量土の一軸圧縮強さとその内部構造に及ぼす影響についても指摘した。以下に、本研究から得られた主要な結論を列記する。

- (1) 初期高温養生履歴および初期養生温度の違いによらず、セメントに対して PET フレックを 10~15%程度添加することにより、その一軸圧縮強さが最も改善されることがわかった。
- (2) 気泡混合軽量土に PET フレックを添加することにより、温度上昇に伴う強度減少量を抑えることができる可能性を示唆した。
- (3) 初期高温養生履歴の違いにより、PET フレックを添加した気泡混合軽量土の温度上昇に伴う強度減少量が異なることを明らかにした。またそれには、供試体内部における PET フレックの分布およびマトリクス部分との接着状態が、大きな影響を及ぼしていることを、デジタルファインスコープでの観察により指摘した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、日本合繊㈱より PET フレックを提供していただいた。また、本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)No.17560444(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) 三嶋信雄, 益村公人: FCB 工法—気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法—, pp.1-10, 理工図書, 2000.
- 2) 地盤工学会: 軽量土工法, 地盤工学会, pp.1-20, 2005.
- 3) 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.
- 4) 大久保元正, 菊池信夫, 小浪岳治: 気泡混合土と一体化する壁面材の安定性について, 軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム発表論文集, pp.203-206, 2000.
- 5) Goto,T., Chaen,T., Suzuki,N., Kakimoto,Y., Kasai,J., Matsuo,T.: Effects of the temperature rise on strength development of foam mixed mortar or cement milk in embankment, Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials, pp.91-96, 2002.
- 6) PET ボトルリサイクル推進協議会: PET ボトルリサイクル年次報告書 2006 年度版, pp.1-23, 2006.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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 (掲載予定).
- 10) 前川晴義, 亀井健史, 山崎裕之, 松田哲夫, 北川勝明: 養生温度の違いが気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす影響, 第 48 回地盤工学シンポジウム平成 15 年度論文集, pp.53-60, 2003.
- 11) 亀井健史, 高嶋純一: 高温養生履歴が気泡混合軽量土の一軸圧縮強さとその内部構造に及ぼす影響, 応用地質, 第 47 巻第 4 号, pp.208-217, 2006.
- 12) 財団法人 日本規格協会: 再生ポリエチレンテレフレート (PET) 成形材料試験方法 TR K001:2000, JIS ハンドブック 54 リサイクル(第 1 版), pp.169-176, 2002.
- 13) 亀井健史, 高嶋純一: 定体積条件下で初期高温養生を受けた気泡混合軽量土の一軸圧縮強さ, 地盤と建設, Vol.23, No.1, pp.51-58, 2005.
- 14) 亀井健史, 前川晴義, 堀切保則: 気泡作製時間の違いが気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす影響, 地盤と建設, Vol.20, No.1, pp.27-33, 2002.

