

## フレーク状 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

## Effects of Initial High Temperature Curing on Unconfined Compressive Strength and Microstructure of Foamed Mixture Lightweight Soil Adding Flaky PET Bottles

亀井健史 Takeshi KAMEI (島根大学総合理工学部)

高嶋純一 Jun-Ichi TAKASHIMA (島根大学大学院総合理工学研究科)

本研究では、再利用の拡大が急務とされている PET ボトルをフレーク状にし、そのフレーク状 PET ボトルを添加した気泡混合軽量土の一軸圧縮強さとその内部構造に及ぼす初期高温養生履歴の影響について検討している。その結果、PET フレーク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し、かつ一軸圧縮強さも改善されることが明らかとなった。また、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かった。さらに、デジタルファインスコープでの観察により、供試体内部における PET フレークの分布状態およびマトリクス部分との接着状態が、PET フレークを添加した気泡混合軽量土の強度に大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。

キーワード：一軸圧縮強さ、温度効果、軽量土、PET ボトル

(IGC : D06, M05)

## 1. はじめに

近年、軽量盛土工法に用いられる軽量盛土材として、気泡混合軽量土を使用した、気泡混合軽量土工法 (Foamed Cement Banking Method: 以下、FCB 工法とする) の施工実績が増加している<sup>1)</sup>。気泡混合軽量土は、セメント・地盤材料 (砂や粘土、粘性土など) ・水および起泡剤からなり、それらの配合を適宜調整することによって、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。

これらの特長から、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<sup>2)~4)</sup>。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<sup>5)</sup>。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。

良い点ばかりが注目されている FCB 工法であるが、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<sup>1), 6), 7)</sup>。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<sup>6)</sup>。

高温養生の影響を受けた場合の気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に関する研究として、オープンシステム条件 (温度上昇による供試体の体積膨張を許した条件)、クローズドシステム条件 (温度上昇に伴う供試体の体積膨張を抑制した条件) とともに 80℃ 以上の初期養生温度を受けた供試体の一軸圧縮強さは、通常の養生温度一定条件 (20℃) から得られる一軸圧縮強さの 20% 程度しか得られないことが報告されている<sup>8), 9)</sup>。そのため、養生温度一定条件 (20℃) 下で行った室内試験結果を設計強度と用いると、一軸圧縮強さを過大評価している可能性があるといえる。

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、我が国の環境問題の軽減に繋がり、人間が環境に与えている種々の影響を軽減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、2004 年度には、アメリカやヨーロッパの 2 倍以上である 62.3% を達成しており、世界でも最高水準となっている<sup>10)</sup>。

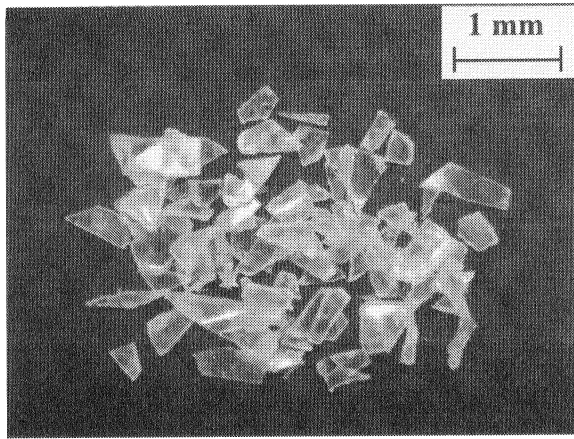


写真-1 PET フレーク

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	8mmφスクリーン
水分率	0.6% 以下
異物混合率	1300ppm 以下

しかしながら、回収されていない PET ボトルに関しては、埋め立てや焼却によって処分されているのが現状である。そこで、PET ボトルの処分および建設用天然資材の不足問題解決の観点から、この廃棄されている 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、その一軸圧縮強さはともに増大するとの報告例がある<sup>11), 12)</sup>。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。

そこで本研究では、初期高温養生が 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、温度上昇に伴う供試体の体積膨張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し、内部構造と一軸圧縮強さの関係についても検討している。

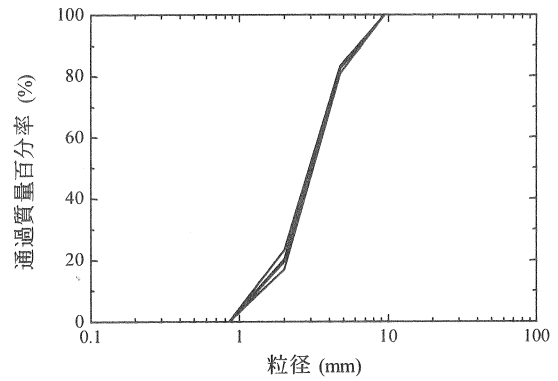


図-1 PET フレークの粒径加積曲線

## 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 ボトルを比較的処理過程が少なく、地盤材料として使いやすい点などを考慮し、フレーク状に粉碎した PET フレーク (写真-1) を使用した。PET フレークは、PET ボトルをフレーク状に砕いたもので、そ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<sup>13)</sup>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 フレークの大きさにはバラツキがないことがわかる。

### 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<sup>1)</sup>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。その作製方法は、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。本研究では、5 種類の P/C (0, 5, 10, 15, 20 (%)) を設定しており、完成したエアミルクに添加した後、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。ここで、P/C を PET フレークの添加率と呼び、セメント重量に対する PET フレーク重量の比を表す。

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、

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 <sup>2</sup> )	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 <sup>3</sup> )	起泡剤 $m_1$ (kg/m <sup>3</sup> )	希釈水 $m_2$ (kg/m <sup>3</sup> )	混練水 $m_3$ (kg/m <sup>3</sup> )	水量 $W^*$ (kg/m <sup>3</sup> )	湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	フロー値 Flow (mm)	空気量 $V_a$ (%)
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

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

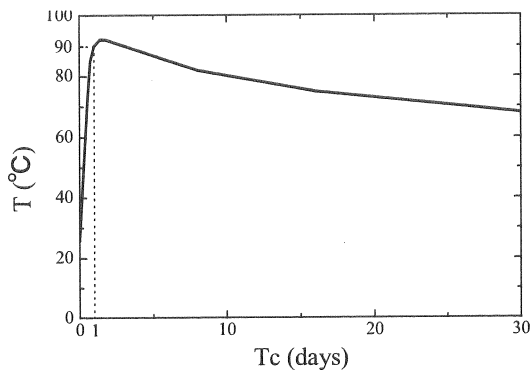


図-2 FCB 打設現場における地盤内部の温度計測結果<sup>14)</sup>

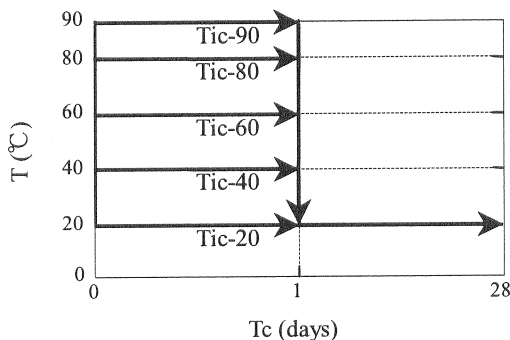


図-3 養生条件

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。

ここで、図-2 に既往の研究において報告されている、実際の FCB 打設現場から得られた地盤内部の温度計測結果を示す<sup>14)</sup>。図より、内部温度は打設直後から約1日の間に、常温から90℃程度まで急激に上昇している。この研究では、打設後28日の間、高温で養生させた場合の気泡混合軽量土の一軸圧縮強さも検討されており、養生初期に80℃以上の高温を受けた供試体の一軸圧縮強さは、通常の養生温度一定条件(20℃)から得られる一軸圧縮強さの25%程度しか得られないことが報告されている。同程度の強度減少が、先述した打設後24時間のみ初期養生温度(Tic)を与えた研究においても得られている<sup>8)</sup>。すなわち、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考えられる。試験の簡便化も考慮して本研究では、図-3の養生条件に従って、乾燥炉内で20~90℃のTicを与えた。

打設後24時間(Tc=1day)を経過した時点でモールドから供試体を取り出し、両端面を成形した後に供試体をプラスチック製の円筒型容器に入れた。その後、恒温室(20±2℃)で養生し、28日間(Tc=28days)気中養生した供試体を実験に用いた。

### 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、品質を管理しなければならない。本研究では、母材を使用していない3種類のエアミルクに対してPETフレーク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。PETフレーク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、PETフレーク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。

そこで、図-4にその品質試験結果とPETフレーク添加率(P/C)の関係を示す。図-4(a)は、供試体作製時の空気量( $V_a$ )とP/Cの関係を示しており、図より、K0-3, K0-5, K0-10ともに、 $V_a$ 値はP/Cの増加に伴い、減少していることがわかる。また、その減少傾向は、直線近似によって表現できることが明らかとなった。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

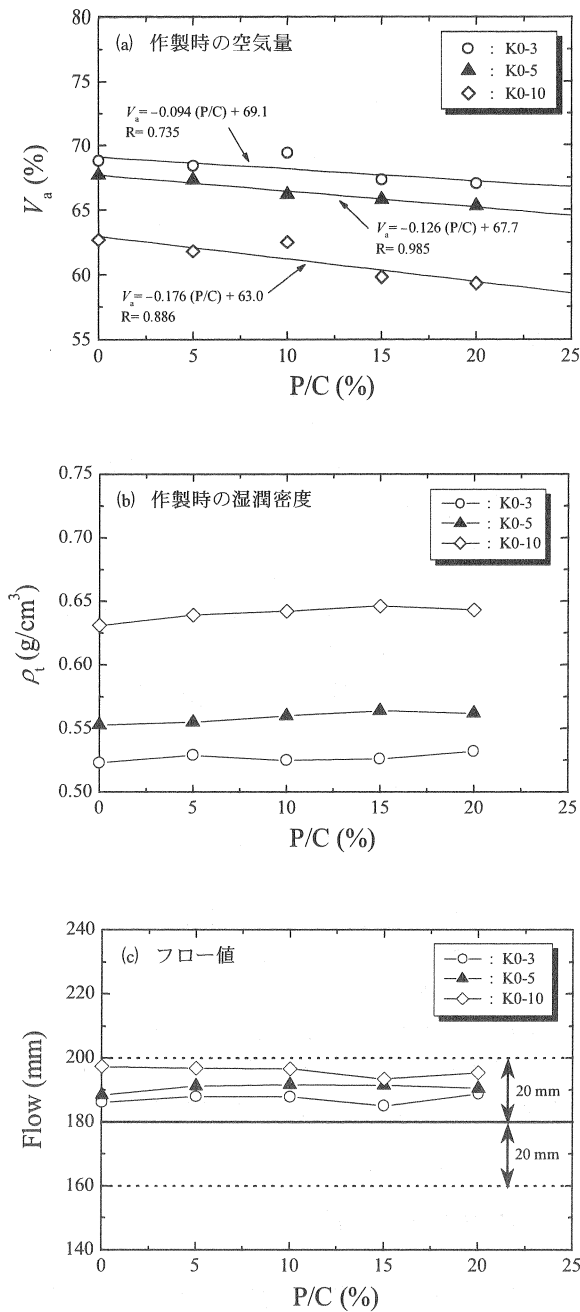


図-4 品質管理試験結果と P/C の関係

した既往の研究からも得られている<sup>12)</sup>。これらの原因としては、添加する PET フレーク量の増加に伴い、試料全体の体積が増し、PET フレーク量の増加分だけ比例的に  $V_a$  値は減少したものと考えられる。また、攪拌時の気泡の消泡の影響も考えられることから、PET フレークを添加した場合の実施工においては、攪拌時間にも留意する必要がある。

図-4 (b) に、作製時の湿潤密度 ( $\rho$ ) と P/C の関係を示す。図より  $\rho$  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ことがわかる。しかしながら、各配合とも、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明

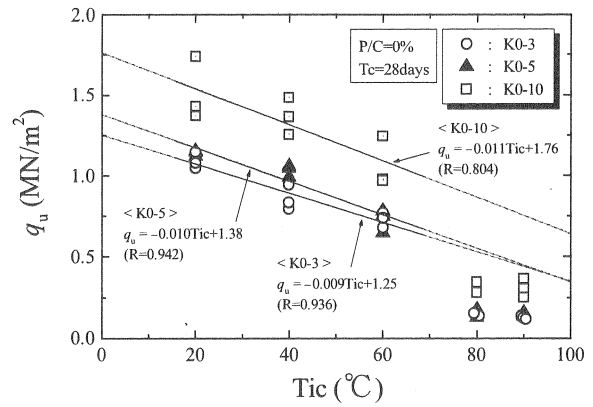


図-5 一軸圧縮強さと初期養生温度の関係 (P/C=0%)

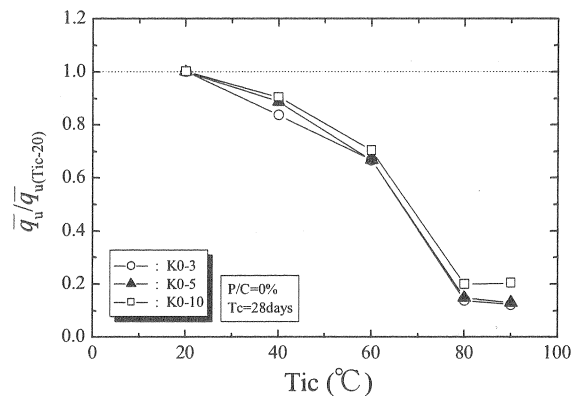


図-6  $\bar{q}_u / q_u(Tic=20)$  と初期養生温度の関係 (P/C=0%)

らかとなった。

フロー値 (Flow) と P/C の関係を図-4 (c) に示す。図の点線の範囲は、フロー値の基準値  $180 \pm 20$  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にあった。

これらの結果から、PET フレー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ていることが確認できた。すなわち、気泡混合軽量土に対する PET フレークの有効利用の可能性が示唆された。

### 3.2 一軸圧縮強さに及ぼす初期高温養生の影響

まず、PET フレー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-5 は、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、配合条件の違いによらず、Tic-20 から Tic-60 までは、Tic の上昇に伴い  $q_u$  値は直線的に減少していき、Tic-80 以上では  $q_u$  値はほぼ一定値を示している。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

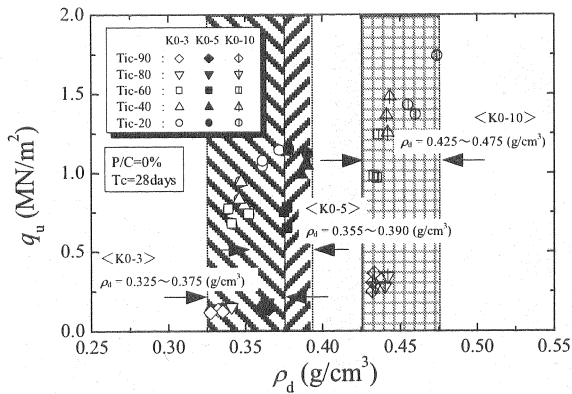


図-7 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係 (P/C=0%)

を図-6 に示し、Tic の変化に伴う  $q_u$  値の変化を定量的に評価する。図より、配合条件の違いによらず、Tic の上昇に伴い、 $q_u$  値は減少する傾向にある。K0-3, K0-5, K0-10 とともに、Tic-60 の場合には、その  $q_u$  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 以上の場合には、Tic-20 の  $q_u$  値の 2 割以下となった。配合条件の違いによらず、Tic が 80℃ 以上の場合において、温度上昇に伴う強度減少が著しくなることは、先述したオープンシステム、クローズドシステムの両条件下において、打設後 1 日の間初期高温養生させた既往の研究<sup>8), 9)</sup>からも得られている。このことから、気泡混合軽量土を打設する場合には、打設に伴う地盤内部の高温状態がその強度をかなり減少させることから、打設時には温度管理を慎重に行う必要があることが重要であるといえる。

### 3.3 内部構造に及ぼす初期高温養生の影響

前述したような、温度上昇に伴う強度減少の原因を考察する。気泡混合軽量土の一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) はその乾燥密度 ( $\rho_d$ ) の値に依存するところが大きく、一般的に、 $\rho_d$  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<sup>12), 15)</sup>。すなわち、 $q_u$  値はその  $\rho_d$  値を用いることにより推定可能であると考えられる。ここで、本研究から得られた  $q_u$  値と  $\rho_d$  値の関係を図-7 に示す。なお、図中のハッチは、各配合条件から得られた  $\rho_d$  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、 $\rho_d$  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。同様の結果が、実際の気泡混合軽量土打設地盤から採取したボーリングコア試料や、クローズドシステム条件下、打設後 1 日の間初期高温養生を与えた気泡混合軽量土供試体からも得られている<sup>9)</sup>。したがって、クローズドシステム条件下にあると考えられる施工現場において、水和熱による高温履歴を受けた気泡混合軽量土の  $q_u$  値は、その  $\rho_d$  値から推定できないものと考えられる。

高温養生による強度減少の直接的な原因が  $\rho_d$  値ではないことから、前述した研究では、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<sup>9)</sup>。本

研究では、温度上昇に伴う気泡混合軽量土供試体の内部構造をさらに詳細に検討するために、デジタルファインスコープを使用して観察した。写真-2 は、種々の初期養生温度 (Tic) を与えた供試体の断面の写真で、上から横断面、縦断面、倍率 100 倍で観察した縦断面、倍率 300 倍で観察した縦断面を示している。

まず、供試体の横断面に着目する。Tic-20 と比較して、Tic-20 の  $q_u$  値の 7 割以上を発揮している Tic-40 と Tic-60 までは、その横断面に大きな変化は認められず、いずれの Tic の場合も細かな気泡が均一に分布している。しかしながら、Tic-20 の 2 割以下の強度しか発揮できていない Tic-80 および Tic-90 の横断面に着目すると、気泡径は大きく、その構造は粗くなっていることがわかる。縦断面の場合も同様に、Tic-60 から Tic-80 の間でその構造は大きく変化し、Tic-80 および Tic-90 の縦断面には、気泡同士が繋がって、細長く、大きな空隙が形成されている箇所が多く存在していることが明らかとなった。

つぎに、デジタルファインスコープを使用して撮影した倍率 100 倍の写真を見ると、縦断面での観察と同様に、強度減少が著しい Tic-80 において、その内部構造が大きく変化していることがわかる。Tic-80 および Tic-90 では、クローズドシステム条件下で打設後 1 日の間一定の Tic を与えた既往の研究<sup>9)</sup>と同様に、気泡同士の連結が認められた。このような気泡の連結は供試体のいたる所で確認でき、その連結方向は様々であった。

さらに、養生温度の上昇に伴う内部構造の変化をより微視的に観察するために、倍率 300 倍の写真において、各 Tic を与えた供試体の気泡 1 つを対象にし、観察した。縦断面および 100 倍での写真において、Tic-20 と比較してほぼ変化がないように観察できた 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明らかとなった。このような気泡は、Tic-80 および 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。

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。

### 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、初期高温養生が気泡混合軽量土の一軸圧縮

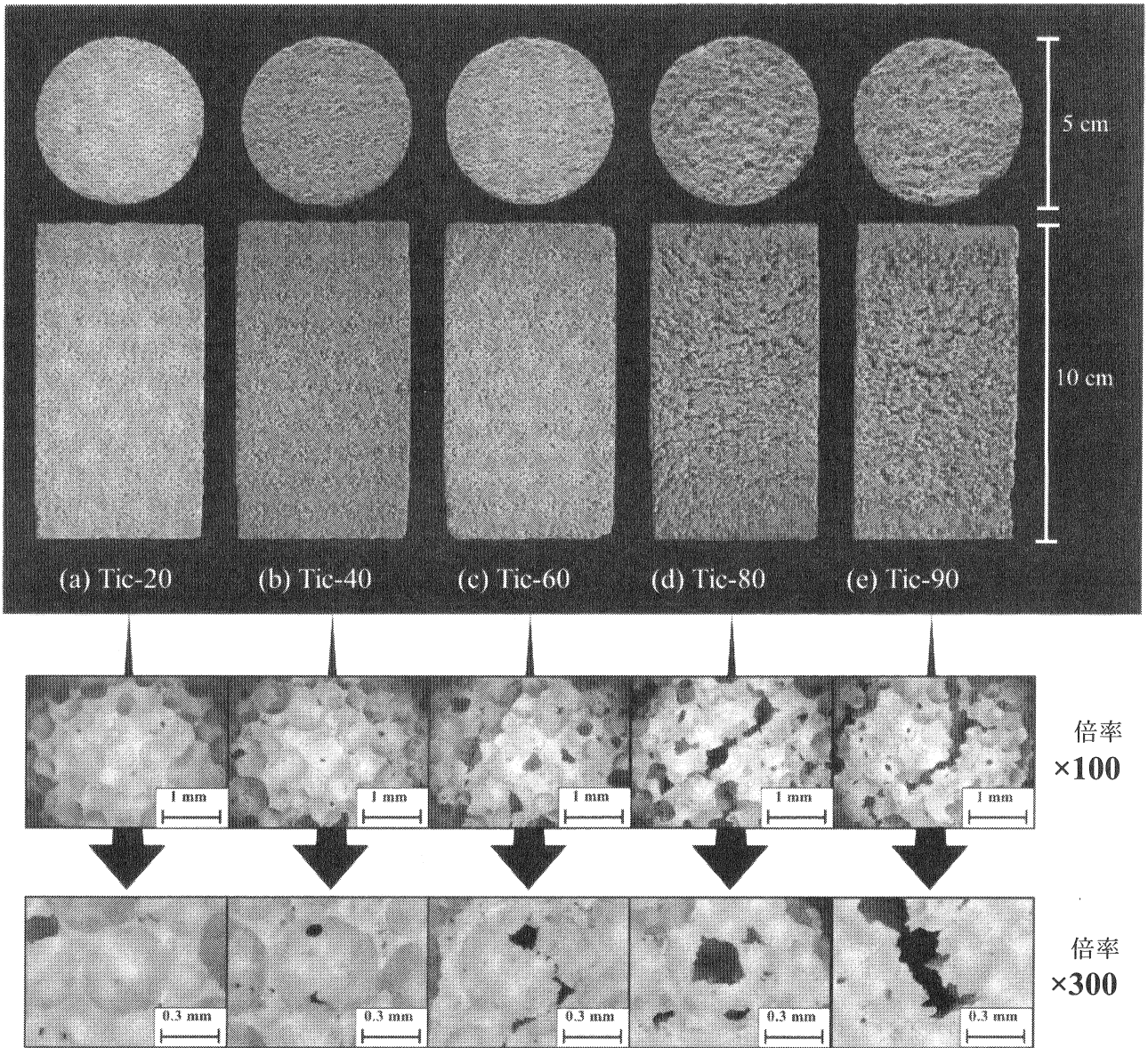


写真-2 初期高温養生を与えた気泡混合軽量土の内部構造 (K0-10)

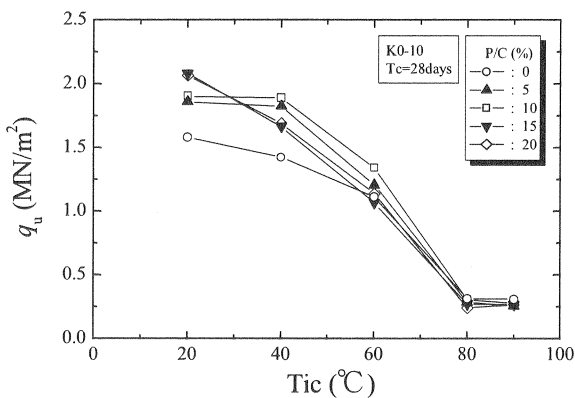


図-8 代表的な一軸圧縮強さと初期養生温度の関係 (K0-10)

強さに及ぼす影響を、その内部構造変化の観点から検討してきた。そして、ここからは、そのような高温養生の

影響に対し、PET フレークの添加がどのような効果をもたらすのかに着目する。なお、K0-3 および K0-5 においても同様の傾向が得られていることから、これ以後の図および写真は K0-10 のみのデータを用いている。

図-8 に、代表的な一軸圧縮強さ( $q_u$ )と初期養生温度(Tic)の関係を示す。図より、いずれの PET フレーク添加率(P/C)の場合も、Tic の上昇に伴い、その  $q_u$  値は減少していることがわかる。また、Tic-80 以上の高温条件下で養生させた場合の  $q_u$  値は、P/C の違いによらずほぼ同程度であった。

つぎに、P/C の増加に伴う  $q_u$  値の変化を検討するために、代表的な  $q_u$  値と P/C の関係を図-9 に示す。図より、P/C の違いによらず、Tic の上昇に伴い  $q_u$  値は減少することがわかる。ここで、Tic 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と P/C との関係を図-10 に示す。図より、Tic-20, 40, 60 の場

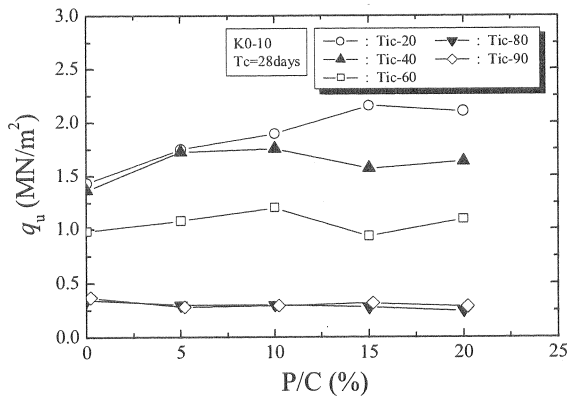


図-9 代表的な一軸圧縮強さと PET フレーク添加率の関係 (K0-10)

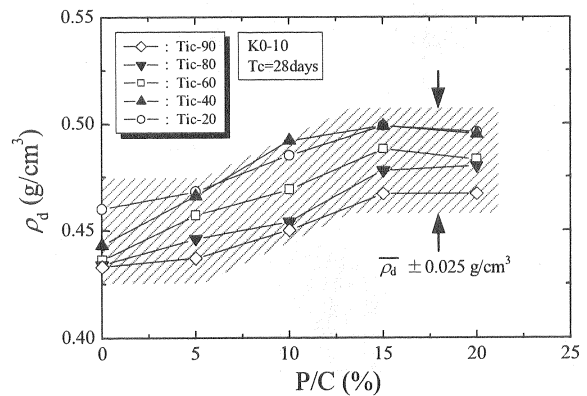


図-11 代表的な乾燥密度と PET フレーク添加率の関係 (K0-10)

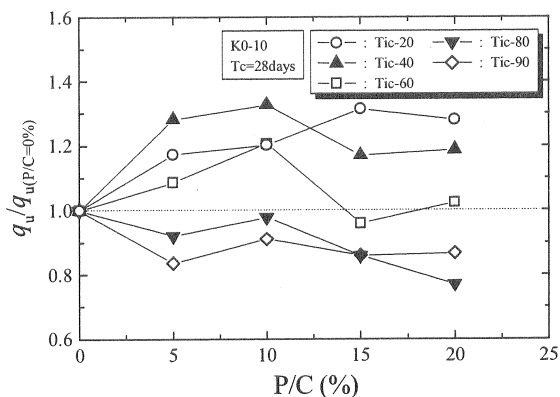


図-10  $q_u/q_{u(P/C=0\%)}$ と PET フレーク添加率の関係 (K0-10)

合の  $q_u$  値は、P/C の増加に伴って増加し、Tic-40 および Tic-60 の場合は P/C=10%で、Tic-20 の場合は P/C=15%においてピークが認められている。このように  $q_u$  値が最大となる、最適な P/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 (Tc=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<sup>12)</sup>。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<sup>11)</sup>。本研究においては、Tic-20 および Tic-40 における  $q_u$  値のピークはともに、P/C=0%の 1.3 倍程度となり、Tic-60 の場合には 1.2 倍となった。この結果から、60℃までの初期高温養生に対しては、PET フレークの適切な添加により、強度改善効果が得られる可能性が示唆された。

しかしながら、Tic-80 および Tic-90 を与えた場合の  $q_u$  値に着目すると、いずれの P/C 条件においても、P/C=0%の場合の  $q_u$  値を僅かに下回る傾向が認められた。この結果は、養生温度が 80℃以上になると PET フレークの添加が逆効果になることを意味している。したがって、PET

フレークを添加した気泡混合軽量土においても、その打設時には、温度上昇に対して十分な対処をすることが重要であると考えられる。

### 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

前述したように、気泡混合軽量土を 80℃以上で初期高温養生させた場合には、PET フレーク添加率 (P/C) の増加に伴い一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) は減少することが明らかとなった。そこで、このような強度減少の原因として考えられる、乾燥密度 ( $\rho_d$ ) の変化を考察する。

図-11 には、本研究から得られた代表的な  $\rho_d$  値と P/C の関係を示す。図より、初期養生温度 (Tic) の違いによらず、P/C の増加に伴い、 $\rho_d$  値は僅かに増加していき、P/C=15%以上ではほぼ一定値となっている。一般的に、気泡混合軽量土の強度減少には、その  $\rho_d$  値の減少を要因に考える場合が多い。しかしながら本研究では、P/C の増加に伴い、若干ではあるが  $\rho_d$  値が増大しているにも関わらず、80℃以上の高温条件下で養生した場合の  $q_u$  値は減少している。一方、図より、P/C の違いによらず、 $\rho_d$  値は Tic の上昇に伴い減少する傾向が認められる。しかしながら、その範囲は  $\pm 0.025 \text{ g/cm}^3$  内に収まっており、その変化は僅かであることから、Tic の上昇に伴う  $\rho_d$  値の減少が、その  $q_u$  値に及ぼす影響も、極めて小さいものと考えられる。

そして、同様の結果が、クローズドシステム条件下で高温養生している既往の研究においても認められており、その主要因としては、供試体に与えた高温履歴がその内部構造に変化を及ぼすことが指摘されている。本研究では、高温養生の影響のみならず、PET フレークを添加している影響も考えられることから、供試体の内部構造を詳細に検討する必要がある。

そこで、写真-3 に、種々の Tic を与えた、P/C=10%の気泡混合軽量土の内部構造を示す。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倍率 100 倍のものである。写真より、Tic-20、40、および Tic-20

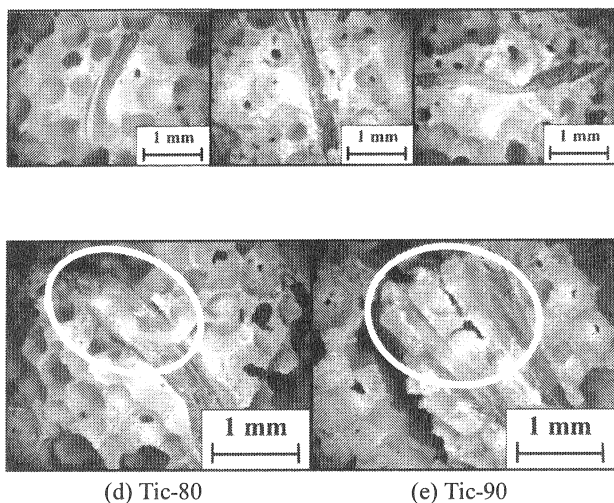


写真-3 PET フレークを添加した気泡混合軽量土の内部構造に及ぼす初期高温養生の影響 (K0-10,P/C=10%)

の  $q_u$  値の 7 割程度を発揮している Tic-60 の場合には、添加した PET フレー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。このことから、マトリクス部分が PET フレークと一体となり、マトリクス部分の変形が PET フレークに拘束されていることが推察できる。さらに、PET フレークは供試体内部において様々な方向に分布していることから、どの方向にせん断面が入っても、PET フレークが抵抗材となりうる。このようなメカニズムが供試体の強度増加の一要因と考えられる。

しかしながら、Tic-80 および Tic-90 を与えた供試体の内部構造に着目すると、PET フレークとマトリクス間に隙間ができ、PET フレーク全体が接着していない様子が確認できる。80℃以上の Tic を与えた場合には、先述したように、マトリクス部分が薄くなり、気泡に穴が開き連結することで、所定の強度を発揮できない内部構造を形成していることが考えられる。PET フレークを添加した場合も同様に、マトリクス部分が薄く、PET フレークを支えることができるだけの構造が形成されていないと推察できる。また、PET フレーク自体は、粘着力および固結作用を有していないため、PET フレークが壁となり、供試体の構造の形成を遮断していることも、強度減少の一要因であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、フレーク状の 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初期高温養生の影響を検討した。以下に、本研究から得られた主要な結論を列記する。

(1) PET フレーク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し、かつ一軸圧縮強さも改善されていることから、気泡混合軽量

土に対して PET フレークの有効利用が可能であることを示唆した。

- (2) 20℃で養生させた場合には、セメントに対して PET フレークを 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。
- (3) 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かった。また、デジタルファインスコープでの観察により、供試体内部における PET フレークの分布状態およびマトリクス部分との接着状態が、PET フレークを添加した気泡混合軽量土の強度に大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。

本研究において、80℃以上の初期養生温度を与えた場合には、PET フレークの添加により気泡混合軽量土の一軸圧縮強さは僅かに減少した。しかしながら、高温履歴を受ける場合においても、気泡混合軽量土内に PET フレークを混入できることは確認できたため、PET ボトル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、打設時の温度上昇に対して十分な対処をすることにより、強度増加も期待できることから、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。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、日本合繊(株)より PET フレー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) 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。
- 2) 久楽勝行：軽量盛土工法の特徴とその適用，基礎工，Vol.22，No.10，pp.2-9，1994。
- 3) 安原一哉，土田 孝，小橋秀俊：軽量地盤材料の物性評価と適用，2.地盤の軽量化技術と軽量土の物性，土と基礎，Vol.49，No.3，pp.56-58，2001。
- 4) 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。
- 5) 地盤工学会：軽量土工法，地盤工学会，pp.1-20，2005。
- 6) 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。
- 7) 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.
- 8) 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初期養生温度の影響, 地盤と建設, Vol.20, No.1, pp.35-42, 2002.
  - 9) 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.
  - 10) 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 2005 年度版, pp.1-21, 2005.
  - 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ーク状 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) 亀井健史, 松尾和俊: フレーク状の 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.
  - 13) 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.
  - 14) 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.
  - 15) 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.

(2006. 6. 30 受付)