

気泡混合軽量土の一軸圧縮強さに及ぼす高温養生の影響と その内部構造

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

Effects of High Temperature Curing on Unconfined Compressive Strength of Foamed Mixture Lightweight Soil and Its Soil Structure

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 embankment technology is increasingly being accepted for use in construction projects to solve soft ground problems. The most important 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 has shown the maximum temperature inside field test bodies ranged from 80~100°C, and the unconfined compressive strength of core samples of foamed mixture lightweight soils did not reach the design strength. At this time, we have focused on the effects of temperature increase of fill induced by cement hydration on the unconfined compressive strength of foamed mixture lightweight soils at a construction site. This paper describes the influences of high temperature curing on unconfined compressive strength and structure of foamed mixture lightweight soil at constant volume. We found that unconfined compressive strength decreases significantly from 20 to 90°C. The unconfined compressive strength cured for 28 days at high curing temperature (80 to 90°C) is about 50~60% that of specimens cured at 20°C. The influences of high temperature curing on the structure of foamed mixture lightweight soil at constant volume are also investigated.

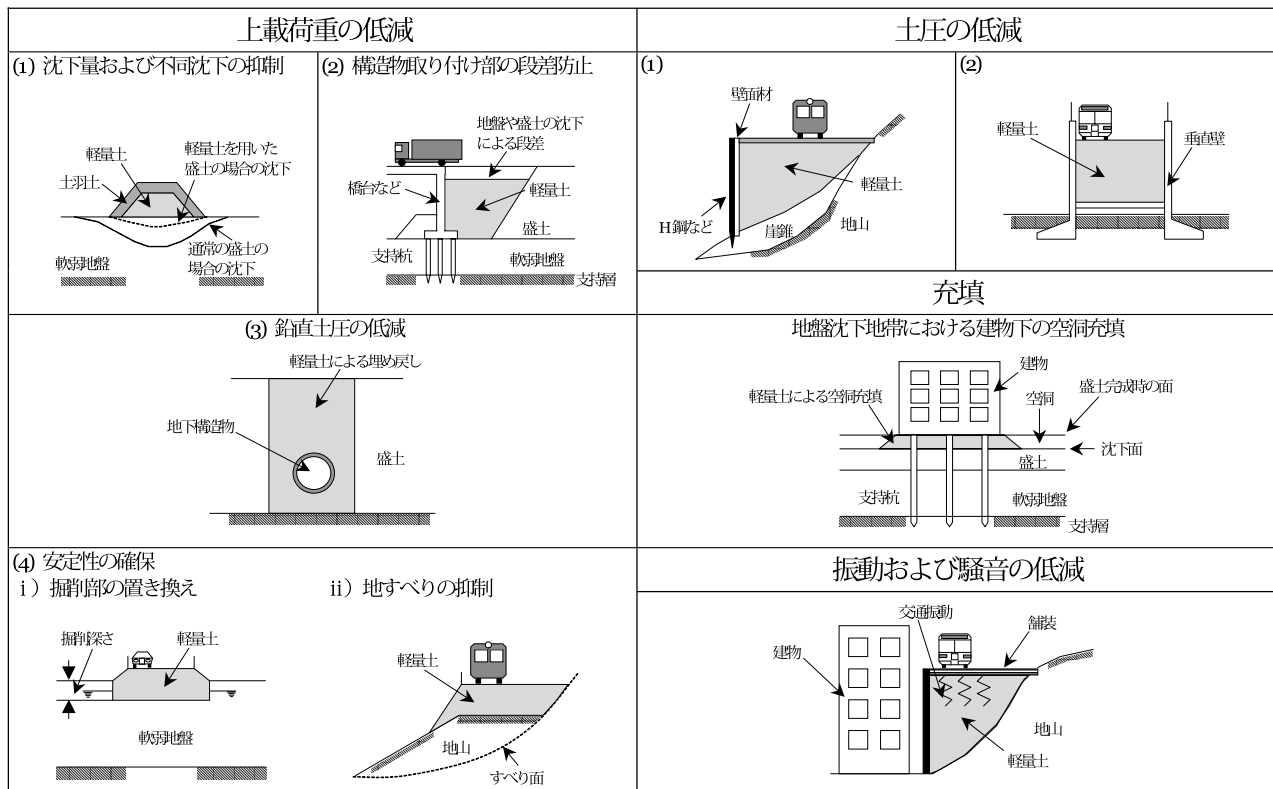
1. はじめに

軟弱地盤上に土構造物を築造する場合、地盤の側方流動や沈下、支持力不足などの問題が発生する。これらの対策方法として、従来は軟弱地盤の改良や強化などが中心であった。しかしながら近年では、より経済的であり、施工面においても有意な土構造物の自重を軽くする軽量盛土工法が広く利用されるようになってきた。中でも、気泡混合軽量土工法(Foamed Cement Banking Method: 以下、FCB工法とする)が注目されており、その施工例は近年確実に増加している^{1)~3)}。FCB工法は、セメント・地盤材料(砂や粘土、粘性土など)・水および起泡剤を使用することから、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徴がある。さらに、硬化後は自立するため、用地幅に制

限がある場合などには、鉛直盛土の施工も可能となる。これらの適用事例を図-1に示す。

また、気泡混合軽量土は、前記のような地盤工学的特徴のほかに、現地発生材などを母材として利用できる特徴を有している⁴⁾。この特徴に着目して、近年では、産業廃棄物を気泡混合軽量土に有効利用した研究もなされている。例えば、近年発生量が年々増加し有効利用が急務となっている石炭灰^{5),6)}や再利用分野の不足が懸念されているPETボトル⁷⁾は、両者とも地盤工学的に優れた地盤材料となりうる可能性が報告されている。このような、これまでの地盤材料以外の産業廃棄物などを新たな地盤材料として混入した人工地盤の施工が可能というFCB工法は、循環型社会の構築において極めて有意であると考えられる。

良い点ばかりが注目されているFCB工法であるが、一度に大量の気泡混合軽量土を打設する場合には、水和反応

図-1 軽量土の適用事例^{2), 3)}

に伴う発熱作用と気泡による断熱効果により、内部において急激に温度が上昇するという問題点も指摘されている。その発熱温度は、打設直後から 24 時間程度で 60~90℃程度に達することが報告されている^{1), 8), 9)}。また、このような高温の熱の発生が、気泡混合軽量土の強度・変形特性に大きな影響を及ぼす可能性も徐々に明らかとなってきている⁸⁾。

気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす養生温度の影響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^{10), 11)}。また、このような結果は、オープンシステム条件下で石炭灰を混入した場合においても同様に認められている⁶⁾。これらの報告例から、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。

しかしながら、上述したいずれの研究においても、気泡混合軽量土打設直後から一定の高温条件を 24 時間与え続けているが、実際の打設現場において、FCB 内部の温度は徐々に上昇している⁹⁾。以上の点から、実際の FCB 打設現場から得られた温度変化に即した温度履歴を与えた供試体の一軸圧縮特性を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、クローズドシステム条件下、打設

直後から打設後 24 時間までの間で、段階的に 20~90℃の異なる 5 種類の初期養生温度まで上昇させ、その後 20℃の温度条件下で養生し、養生日数 28 日経過した供試体に対し、一軸圧縮試験を実施した。その結果から、現場で計測された高温履歴が、気泡混合軽量土の一軸圧縮強さに及ぼす影響を定量的に取りまとめている。また、初期養生温度の違いが供試体の内部構造(気泡の大きさや形状)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。

2. FCB 打設現場におけるボーリング調査例

これまで、気泡混合軽量土の養生温度に関する研究は数多く実施されてきたが、室内実験において検討される場合がほとんどであった。そこで、前川ほか⁹⁾は、実際の FCB 打設現場における気泡混合軽量土の諸性質を調べるために、2 箇所でボーリング調査を行い(図-2)、得られたボーリングコア試料(養生日数 28 日以上経過)に対して一軸圧縮試験を実施している。また、FCB 打設後の地盤内部の温度状況を調べるために温度計測も行っている。その結果から、実際の FCB 打設現場において、気泡混合軽量土地盤が発揮できている強度について検討する。図-3 に、ボーリングコア試料の一軸圧縮強さ(q_u)と乾燥密度(ρ_d)の関係を示す。図より、現場で採取したボーリングコア試料の q_u 値には大きなバラツキが認められた。また、全ボーリングコア試料から得られた q_u 値の平均値($q_u=0.83 \text{ MN/m}^2$)は、

表-1 試料の配合条件と品質管理基準

JH 配合 種別	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 (g/cm ³)	フロー値 Flow (mm)	空気量 V _a (%)
K0-3	0.92	268	1.15	26.45	219	247	0.52±0.1	180±20	66.5±5
K0-10	0.82	353	1.03	23.69	264	289	0.64±0.1		59.5±5

(* W = m₁+m₂+m₃)

(a) オープンシステム (b) クローズドシステム

写真-2 養生中の気泡混合軽量土

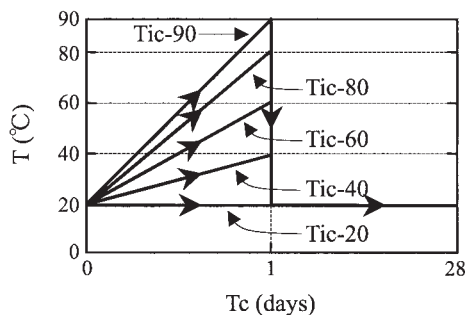


図-5 養生条件

生初期の温度を急激に 90℃まで上昇させた場合の供試体を示している。実際の打設現場では、試料が写真のように膨張することはないと考えられることから、本研究では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(写真-2(b))。つぎに、全体をビニール袋で覆い、図-5の養生条件に従って乾燥炉内で異なる5種類の初期養生温度(20~90℃)まで段階的に上昇させた。なお、モールドに蓋をすることにより試料が溢れ出ることがなく、供試体の体積を一定に保つことができた。打設後24時間(Tc=1day)が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。

3.2 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

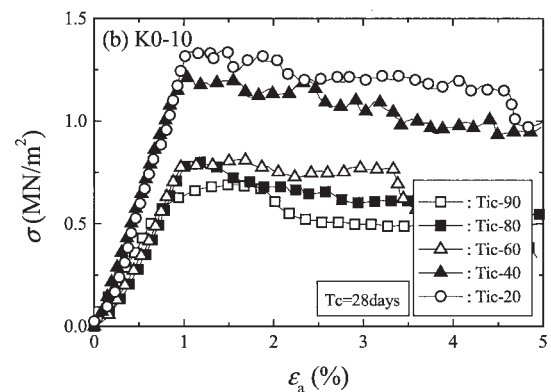
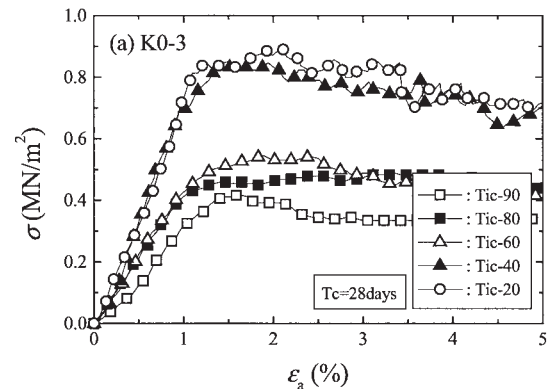


図-6 代表的な応力-ひずみ曲線

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。なお、各配合条件と養生条件において、それぞれ4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2供試体を実験値として選択した。

4. 実験結果および考察

4.1 応力-ひずみ曲線

K0-3 と K0-10 の一軸圧縮試験から得られた代表的な応力-ひずみ曲線を図-6(a), (b)に示す。まず図-6(a)に着目

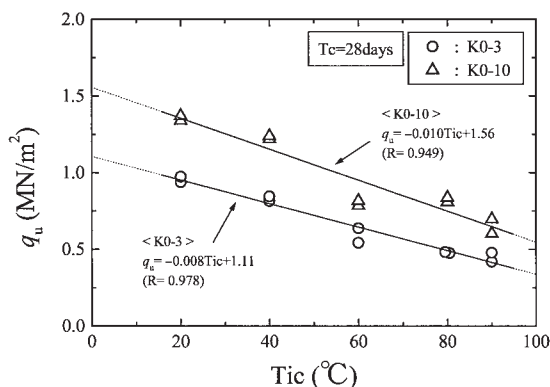


図-7 一軸圧縮強さと初期養生温度の関係

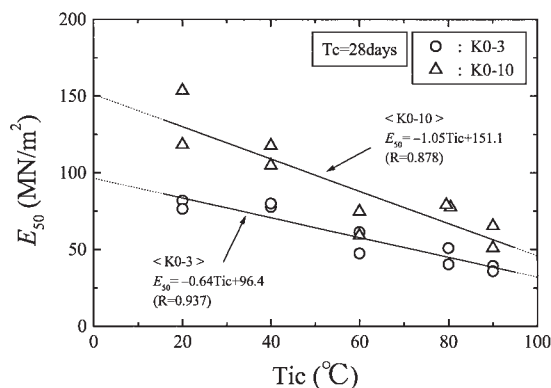


図-9 変形係数と初期養生温度の関係

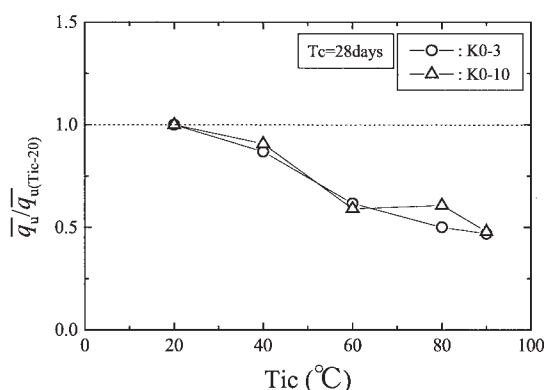


図-8 $\bar{q}_u / \bar{q}_u(Tic=20)$ と初期養生温度の関係

すると、応力-ひずみ曲線は軸ひずみ(ϵ_a)の増加に伴い顕著な立ち上がりを示し、1.5~2.4%程度においてピークに達する。応力値は、ピークが認められた後、载荷の継続に伴い、徐々に減少していく傾向が認められた。また、Ticの上昇に伴い、一軸圧縮強さ(q_u)と変形係数(E_{50})は減少する傾向にあるが、破壊ひずみ(ϵ_f)とTicの間には、明瞭な関係は認められなかった。

K0-10の場合の応力-ひずみ曲線も、応力値は異なるもののK0-3の場合と同様な変化傾向を示している。K0-3と同様に、 q_u 値と E_{50} 値はともに、Ticの上昇に伴い減少する傾向にあるが、 ϵ_f 値とTicの間には明瞭な関係は認められなかった。また、K0-10の q_u 値や E_{50} 値の値はその配合条件の違いからK0-3より大きな値を示している。

4.2 一軸圧縮強さ

一軸圧縮強さ(q_u)と初期養生温度(Tic)の関係を図-7に示す。図より、K0-3、K0-10ともに、Ticの上昇に伴い、 q_u 値はほぼ直線的に減少していくことがわかる。また、K0-10の q_u 値は先述したように、K0-3より大きな値を示している。

つぎに図-8において、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の関係を示すことにより、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、K0-10ともにTic=40の場合には、その q_u 値はTic=20の q_u 値の9割程度であるが、さらにTicが上昇したTic=90の場合には、Tic=20の q_u 値の5割程度となっている。K0-3の場合は、Tic=80においてすでにTic=20の q_u 値の5割程度しか発揮できていないことがわかる。したがって、Tic=20と比較してTic=80以上の供試体から得られた強度減少の割合は、先述したような現位置から得られたポーリングコア試料から得られた q_u 値の最大値を用いて正規化した q_u 値の平均値の割合とほぼ同程度であることが明らかとなった。

しかしながら、打設後1日の間一定のTicを与え、その後20°Cで養生させた既往の研究においては、Tic=80以上を与えた場合、その q_u 値はTic=20の q_u 値の2割程度しか発揮していないことが報告されている¹¹⁾。本研究ではTic=80以上の場合の q_u 値はTic=20の場合の5割程度となっており、打設後24時間経過後の養生温度は同じにも関わらず、高温養生に伴う強度減少に大きな差が認められる。このことは、気泡混合軽量土の内部構造(気泡の大きさや形状など)が温度上昇履歴と密接な関係を示しており、このような関係はセメントの水和反応とも関係していることが推定できる。すなわち、供試体の内部構造ができるまでのセメントの水和反応の進行状況と、温度上昇に伴う気泡の大きさや形状などが大きくその後の強度・変形特性に影響を及ぼしているものと考えられる。

4.3 変形係数

変形係数(E_{50})と初期養生温度(Tic)の関係を図-9に示す。図より、K0-3、K0-10ともに、Ticが上昇するにつれ、 E_{50} 値はほぼ直線的に減少することが確認できた。また、K0-3と比較すると、先述したようにK0-10の E_{50} 値はその配合条件の違いから大きな値を示していることがわかる。

図-10に E_{50} 値と q_u 値の関係を示す。図より、Ticの

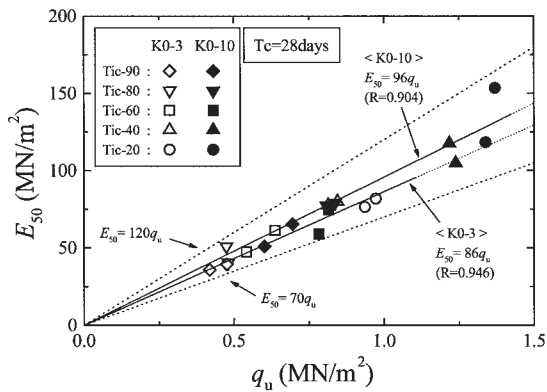


図-10 変形係数と一軸圧縮強さの関係

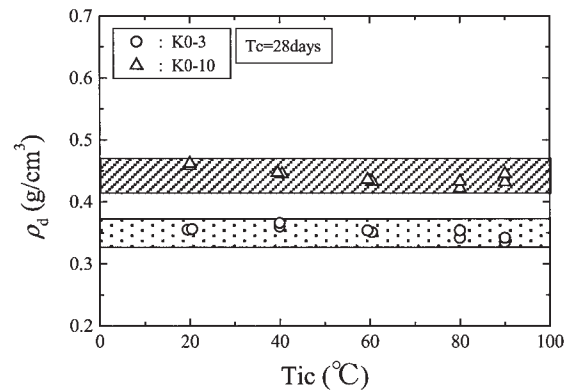


図-12 乾燥密度と初期養生温度の関係

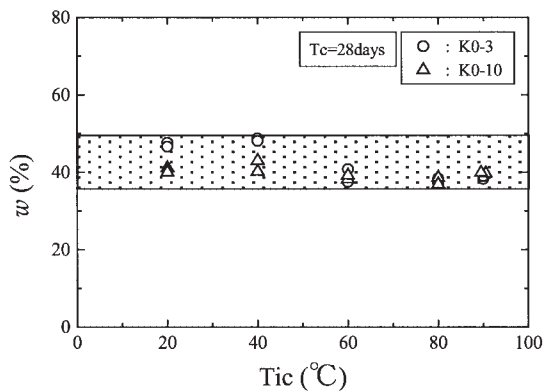


図-11 含水比と初期養生温度の関係

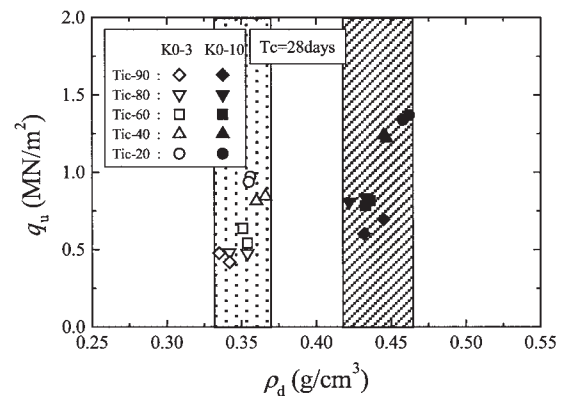


図-13 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

違いによらず、 q_u 値が大きな供試体ほど E_{50} 値も大きくなる傾向を示していることがわかる。また、 E_{50}/q_u 値は、70~120 の範囲にあり、配合条件の違いによらず、 E_{50} 値と q_u 値は良い相関を示している。

気泡混合軽量土の E_{50} 値と q_u 値の間には、すでに高い相関関係があることが報告されている。例えば、横田、三嶋¹³⁾は、砂を母材とする気泡混合軽量土の E_{50}/q_u 値は、100~200 の範囲内となることを報告している。一方、気泡混合軽量土を高温養生させた例として、クローズシステム条件下で供試体に打設直後から 24 時間、一定の Tic を与え続けた場合の E_{50}/q_u 値は 80~400 の範囲にあり、常温で養生した既往の研究の結果よりも広い範囲を示すことが報告されている¹¹⁾。しかしながら、本研究から得られた E_{50}/q_u 値の範囲はこのような既往の報告例と比較して、かなり狭い範囲に分布していることがわかる。その原因としては、既往の報告例よりも本研究から得られた実験値のバラツキの少なさが挙げられる。

4.4 含水比

含水比 (w) と初期養生温度 (Tic) の関係について検討する。打設後 1 日の間一定の Tic を与え、その後 20°C で養生させた既往の研究において、 w 値は Tic の上昇に伴い、直

線的に減少することが報告されている¹¹⁾。しかしながら、本研究から得られた w 値と Tic の関係 (図-11) に着目すると、K0-3、K0-10 とともに Tic の上昇によらず、 w 値はほぼ一定値であることがわかる。これは、養生初期に温度が徐々に上昇することから、水分が蒸発するよりも先に供試体内の水和反応が進行していることによるものと考えられる。

4.5 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

図-12 に、乾燥密度 (ρ_d) と初期養生温度 (Tic) の関係を示す。図より、Tic の違いによらず、設計強度の大きな配合である K0-10 の ρ_d 値は、K0-3 の ρ_d 値と比較して大きな値を示すことがわかる。また、K0-3、K0-10 とともに、Tic の上昇によらず ρ_d 値はほぼ一定値を示している。このことから、本研究から得られた結果は、クローズシステム条件の効果を満足しているものと考えられる。そこで、打設後 1 日の間一定の Tic を与え、その後 20°C で養生させた既往の研究¹¹⁾との比較を試みる。初期の養生温度上昇が急激である場合の ρ_d 値と Tic の関係においても、Tic の上昇によらず ρ_d 値はほぼ一定値であった。しかしながら、その ρ_d 値の範囲を比較すると、本研究の場合は、K0-3、K0-10 とともに僅かに狭くなっていることが明らかとなった。この

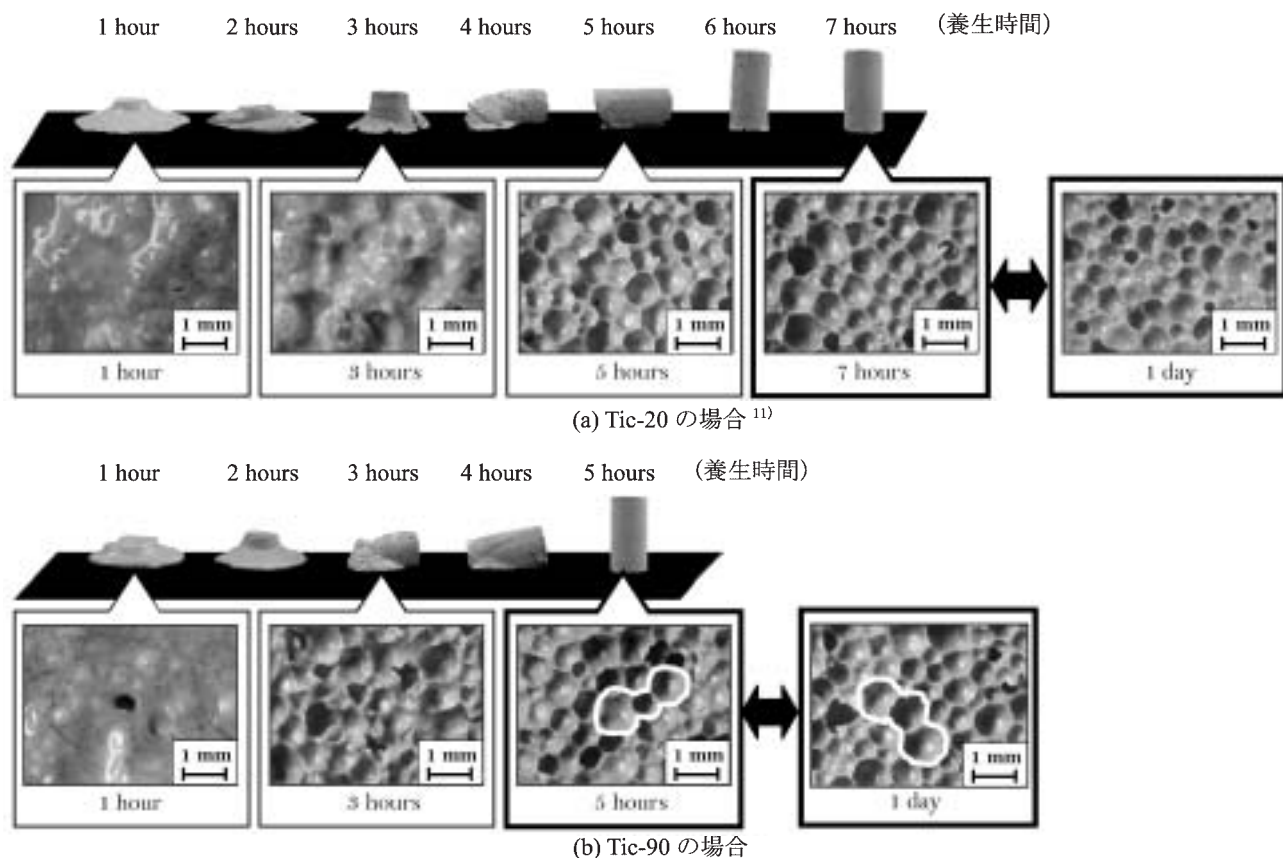


写真-3 養生時間経過に伴う気泡混合軽量土の内部構造の変化(K0-10)

ことは、先述したように本研究では、養生初期の温度上昇を段階的に変化させているため、Ticの上昇に伴う w 値の減少はほぼ認められなかった。このことよりTicの違いによらず、養生28日後の供試体内の水和反応の程度はほぼ同程度であったものと推察できる。

図-13において、一軸圧縮強さ(q_u)と ρ_d 値の関係について検討する。一般的に、気泡混合軽量土には、 ρ_d 値の増大に伴って q_u 値も増加する傾向が認められている^{7), 14)}。すなわち、気泡混合軽量土の 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ている。しかしながら、図より、K0-3, K0-10ともに、 ρ_d 値はほぼ同程度であるが、 q_u 値にはバラツキが認められる。さらに、同様の結果が、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¹¹⁾からも得られている。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、セメント水和反応に伴う水和熱の影響を受けた気泡混合軽量土の q_u 値を、その ρ_d 値から推定することは極めて危険であると考えられる。

4.6 初期養生温度と供試体の内部構造の関係

前述したように、施工現場から得られたFCBボーリングコア試料において、乾燥密度(ρ_d)が同程度であるにも関わらず、一軸圧縮強さ(q_u)には大きな差が認められる試料

が存在した(図-3)。また写真-1より、それらの試料の間には内部構造に違いが認められた。すなわち、気泡の大きさや形状の違いなどが気泡混合軽量土の強度に影響を及ぼしているものと考えられる。同様に、本研究においても、供試体の ρ_d 値はほぼ同程度にも関わらず、その q_u 値には大きな差が認められたことから、FCB打設現場から採取したボーリングコア試料の場合と同様に、その内部構造に違いがあるものと推察できる。そこで、強度のバラツキの原因をより詳細に検討するために、以下に気泡混合軽量土内の気泡の大きさや形状の違いなどについて考察を行う。供試体の内部構造の観察には双眼実体顕微鏡を用いた。まず、写真-3に気泡混合軽量土打設後から、供試体が自立するまでの内部構造の変化を示す。なお、写真-3(a)はTic-20、(b)はTic-90の場合である。

Tic-20の場合に着目すると、打設後3時間程度までは供試体内には構造が認められず、3時間以降にはマトリクス部分(気泡の周囲を埋めるように存在している基質部分)が徐々に固化し個々の気泡を独立させている。5時間後には、供試体下部の構造は軟弱であり、自立することはできないが、上部・中部の構造はほぼ出来上がっている。6~7時間後には全体の骨格が形成され、供試体は自立した。このような養生時間経過に伴うマトリクス部分の発達は、養生初期のセメントの水和反応の進行程度の違いによるものと考えられる。さらに、供試体自立時の内部構造は、打

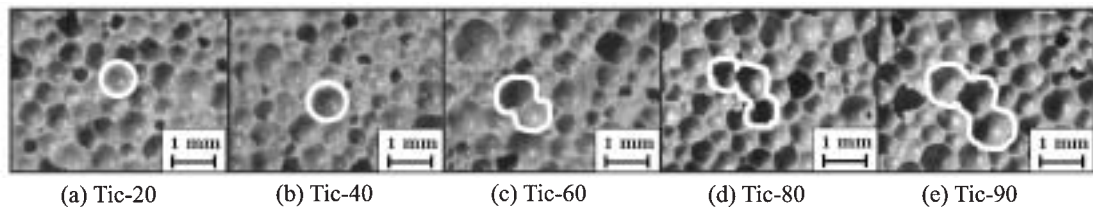


写真-4 気泡混合軽量土(K0-10)の養生1日における代表的な内部構造(初期養生温度の影響)

設後1日が経過した供試体とほぼ同じ内部構造を有していることが明らかとなった。

Tic-90の場合には、打設後5時間後に供試体は自立している。Tic-20の場合と比べ、Tic-90の場合の供試体が早期に自立した理由として、養生初期における高温履歴が、水和反応を進展させたためと考えられる。さらに、Tic-90の場合の自立時の内部構造に着目すると、気泡同士が連結している箇所が認められる。この原因としては、高温に伴うマトリクス部分の粘性度の上昇により供試体内の気泡径が増大することによって、気泡間のマトリクス部分が薄くなり、気泡同士が連結するものと考えられる。また、このような気泡の連結はTic-20の場合と同様、打設後1日経過後にも認められた。

一方、打設後1日を90℃に保った場合¹¹⁾には、供試体は打設後2時間後に自立し、また、自立時の内部構造における気泡同士の連結の程度は大きい。これらの結果と本研究から得られた結果との間に大きな違いがある原因としては、本研究において与えた養生温度履歴は初期の温度上昇が段階的であり、それに伴いマトリクス部分が徐々に固化していくためであると考えられる。そのため、既往の研究と比較して供試体の自立には時間がかかり、また、気泡が膨張しない程度の温度状態においてマトリクス部分が形成されるため、気泡同士の連結の程度が小さいものと推察できる。

また、Tic-40~Tic-80の場合においても、供試体は5~7時間の間に自立し、自立時と打設後1日経過後の内部構造にはほとんど変化が認められなかった。したがって、Ticの違いによらず、気泡混合軽量土は供試体の自立後、その内部構造はほとんど変化しないものと考えられる。すなわち、供試体に与えた温度履歴により自立するまでの経過時間はそれぞれ異なるが、供試体の内部構造の評価は、自立時の供試体内部の気泡の大きさや形状を観察することによって評価できるものと推察される。

そこで、Ticの上昇が気泡混合軽量土の内部構造に及ぼす影響をより明らかにするために、写真-4において養生1日における代表的な供試体の内部構造について比較する。Tic-20の場合において供試体内の気泡に着目すると、それぞれ独立して分布しており、代表的な気泡径は0.5mm程度であることがわかる。一方、Tic-60の場合の気泡の代表的な大きさは0.6mm程度であり、Tic-20の気泡よりも大きくなっている。さらに、Tic-90の場合は0.8mm程度にまで

増大しており、大きいものでは1.0mm程度の気泡も存在している。したがって、Ticの上昇に伴い、供試体内部の気泡の直径は大きくなる傾向が認められた。また写真より、Tic-60以上の場合、上述した理由により気泡同士が連結しており、さらに、その連結の程度はTicが上昇するにつれ大きくなっていることがわかる。以上のことから、気泡混合軽量土は水和熱などによる高温履歴を養生初期に受けると、その内部構造が変化し、その結果、強度が大きく減少する危険性があることを示唆した。したがって、気泡混合軽量土を打設する際には、その構造がほぼ出来上がる打設後1日程度の間、温度上昇に関する温度管理を適切に行い、その情報を施工に反映することが極めて重要な問題となる。

5. まとめ

本研究では、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を検討するために、クローズドシステム条件下、FCB打設現場の温度履歴に即して、養生初期に温度が徐々に上昇する温度履歴を与えた供試体に対し、一軸圧縮試験及び内部構造観察を行った。以下に、本研究から得られた主要な結論を列記する。

- (1) 初期養生温度の上昇に伴い気泡混合軽量土の一軸圧縮強さは、ほぼ直線的に減少し、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明らかとなった。このような強度減少の割合は、現位置で得られた実験結果と一致している。
- (2) 初期高温養生に伴う強度減少の主要因として、温度上昇に伴う内部構造の変化(気泡の大きさや形状)が重要であることを双眼実体顕微鏡の観察結果に基づいて明らかにした。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、日本道路公団北陸支社金沢事務所よりボーリングコア試料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) 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.
- 5) 亀井健史，松尾和俊：気泡混合軽量土への石炭灰の有効利用，土木学会論文集，No.764/III-67，pp.257-254，2004.
- 6) 亀井健史，松尾和俊，前川晴義，志比利秀：石炭灰を混入した気泡混合軽量土の一軸圧縮強さに及ぼす初期高温養生の影響，土木構造・材料論文集，No.20，pp.111-118，2004.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 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初期養生温度の影響，地盤と建設，Vol.20，No.1，pp.35-42，2002.
- 11) 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（掲載予定）.
- 12) 日本道路公団東北支社仙台技術事務所：橋台背面土圧軽減に関する追跡調査報告書，144p.，1999.
- 13) 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.
- 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.