

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

Effects of Initial Curing Temperature on Unconfined Compressive Characteristics of Foamed Mixture Light-weight Soil

亀井健史 Takeshi KAMEI (島根大学総合理工学部)
前川晴義 Haruyoshi MAEKAWA (金沢工業大学工学部)
堀切保則 Yasunori HORIKIRI (島根大学大学院総合理工学研究科)

本研究では、打設時に発生している可能性のある温度上昇に伴う気泡混合軽量土の強度変形特性の基本的な変化挙動を明らかにするために、供試体の初期養生温度を10~90℃に変化させ、その後一軸圧縮特性に及ぼす試験条件影響を取りまとめている。その結果、気泡混合軽量土の一軸圧縮強さと変形係数は初期養生温度の上昇に伴って、ほぼ直線的に減少していくことが明らかとなった。また、80℃以上の高温履歴を受けた場合には、養生期間の増加に伴う強度増加が、あまり期待できなくなることが示唆された。このことにより気泡混合軽量土の施工に伴う温度管理の重要性が明確になった。

キーワード：一軸圧縮強さ，温度効果，間隙比，軽量土，固化材，時間効果
(IGC : D06, M05)

1. はじめに

軽量盛土工法は、軟弱地盤上に構造物を建設するための対策工法の一つであり、荷重コントロール工法に分類される¹⁾。近年、建設現場では、良質な地盤材料の慢性的な不足、工費の削減、環境問題に配慮した作業(省スペース、低騒音や建設残土の減量または再利用)が必要となっている。これらの社会的なニーズを合理的に解決する方法として、大規模な地盤改良を必要としない軽量盛土工法が最近注目されている。

日本道路公団では、気泡混合軽量土(Foamed Mixture Light-weight Soil)を用いた軽量盛土工法を数多く実施しており、その工法をFCB工法(Foamed Cement Banking Method)と称している²⁾。FCB工法は、軽量で流動性に富み、締固めが不要であり、さらに硬化後は自立するという特徴を有している。そのため、沈下量の抑制、鉛直土圧の低減、掘削部の置き換え、地すべりの抑制、土圧の低減や空間の充填等に幅広く用いられている³⁾。また、本工法では、水量、骨材量、セメント量および空気量を調節することによって、任意の強度と単位体積重量を選択することができる。

気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の施工例としては、エアミルクの道路盛土⁴⁾、⁵⁾や橋台の裏込め土⁴⁾への利用および気泡モルタルの鉄道盛土への利用⁶⁾などがある。しかしながら、気泡混合軽量土を用いる際の問題点として、打設用の型枠から気泡混合軽量土が漏出することや盛土面でのクラックの発生、表層剥離などが指摘されている⁵⁾。また、一度に大量の気泡混合軽量土を打設する場合には、内部に急激な温度上昇

が認められ、60~90℃程度まで上昇することが報告されている^{7)~9)}。このような多量の熱の発生が、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指摘されている⁷⁾。

上記のような発熱現象は、コンクリート工学の分野において、マスコンクリートの現象として良く知られている。例えばダムサイトなどで大量のコンクリートを一度に打設する場合、内部で発生した水和熱が外部に放散されずに蓄積され、内部温度が上昇するという報告例がある¹⁰⁾。このような内部温度の上昇と以後の冷却により生じる温度差は、内部応力を発生させ、その結果、温度ひび割れが発生しやすくなる。今回対象としている気泡混合軽量土は、空気を大量に含む材料であることから断熱性に優れているという特徴を持っている¹¹⁾。このため現場において大量に打設する気泡混合軽量土地盤の施工過程においても先述したような発熱現象の可能性がある。

一方、日本道路公団における気泡混合軽量土に関する既往の施工実績では、打設時の材料の均質性や施工期間の短縮、および工費の削減などの観点から、いわゆる地盤材料を用いない、セメント、水、気泡からなるエアミルクが施工される機会が多くみられるようになってきた。

以上の点に着目して本研究では、気泡混合軽量土の一種として用いられているエアミルクの一軸圧縮特性に及ぼす初期養生温度の影響を明らかにするために、その初期養生温度を10~90℃と変化させた供試体に対して一軸圧縮試験を行い、その結果、初期養生温度の影響が一軸圧縮特性に及ぼす効果について検討して

表-1 配合条件

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 m ₁ +m ₂ +m ₃ (kg/m ³)
0.71	353.0	1.6	25.0	227.0	253.6

表-2 養生条件

	養生期間	
	1日	2~28日
Tic-90	90℃	20℃
Tic-80	80℃	20℃
Tic-60	60℃	20℃
Tic-40	40℃	20℃
Tic-20	20℃	
Tic-10	10℃	20℃

いる。

2. 実験方法

2.1 エアミルクの材料

エアミルクを製造するための材料には、固化材、起泡剤、水（混練水、希釈水）が必要である。本研究では、供試体を表-1の配合に従い作製した。固化材としては、強度特性と経済性を考慮し、高炉セメントB種を用いた。また、気泡を得るために界面活性剤系の起泡剤（主成分：高級アルコールの硫酸エステル化合物）を使用した。起泡剤の発泡には、希釈水の水質が大きな影響を及ぼすことから蒸留水を用いた。

2.2 供試体の作製方法

本研究では、水セメント比 W/C=0.71 のエアミルクを供試体を用いた。まず、固化材（高炉セメントB種）に混練水を加え良く混ぜてセメントミルクを作製する。次に、起泡剤を希釈水で16倍に薄めた後、手混ぜにより発泡させて気泡群を作る。最後にセメントミルクと気泡群の両者をミキサーで混合することによりエアミルクを作製した。

試料の品質管理は、フロー値、空気量および作製時の湿潤密度（生比重）の項目について行った。各試験値が目標の範囲内⁷⁾であることを確認して、縦割りモールド（φ=50mm, H=100mm）に打設した。使用したモールドの内部には、OHPシートを貼り、その表面にシリコングリスを薄く塗布してモールドへの試料の付着を防いだ。

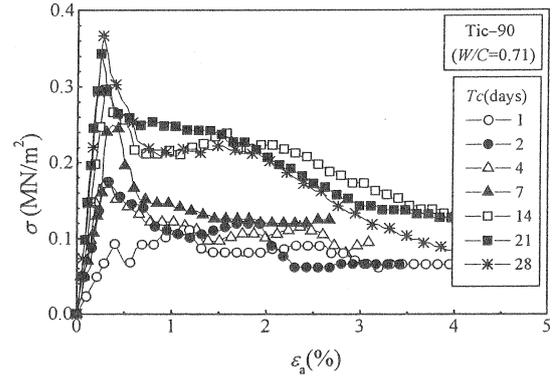


図-1 圧縮応力-軸ひずみの関係 (Tic=90℃)

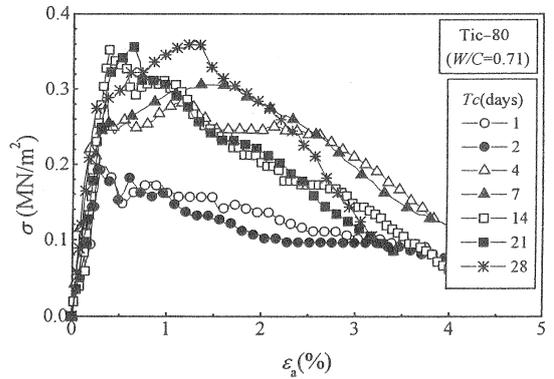


図-2 圧縮応力-軸ひずみの関係 (Tic=80℃)

モールドに打設した試料は、全体をビニール袋で覆った後、表-2の養生条件に従い、乾燥炉内で初期養生温度(Tic)が10~90℃の温度により24時間養生した。その後、試料をモールドから取り外し、約20℃で所定の養生期間（1, 2, 4, 7, 14, 21, 28日）までプラスチック製の円筒容器内で気中養生した。また、所定の養生期間を経た供試体はプラスチック製の円筒容器から取り出し、両端面を成形して実験に用いた。

2.3 一軸圧縮試験方法

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、端面摩擦が強度変形特性に及ぼす影響を軽減するために一軸圧縮試験装置の上下加圧版の表面にシリコングリスを薄く塗布した。なお、供試体内の含水比の違いを検討するために、試験後の供試体を上部・中部・下部の3つに分割し、それぞれの含水比を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮応力-軸ひずみ曲線

図-1~6は、異なる初期養生温度(Tic)から得られたエアミルクの圧縮応力-軸ひずみ曲線を各養生日数(Tc)ごとに示している。いずれのTicにおいても圧

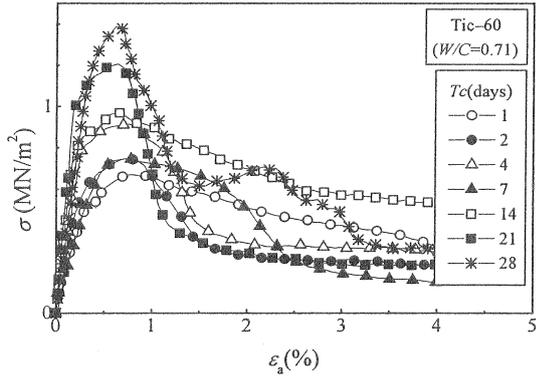


図-3 圧縮応力-軸ひずみの関係 (Tic=60°C)

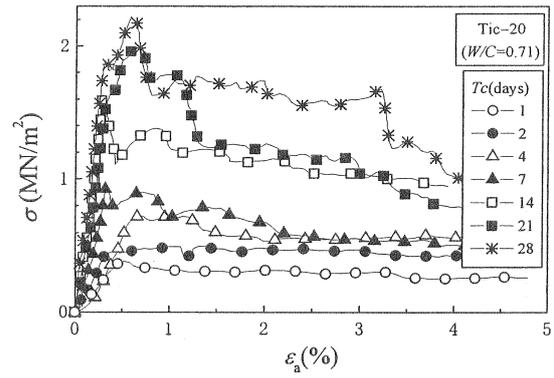


図-5 圧縮応力-軸ひずみの関係 (Tic=20°C)

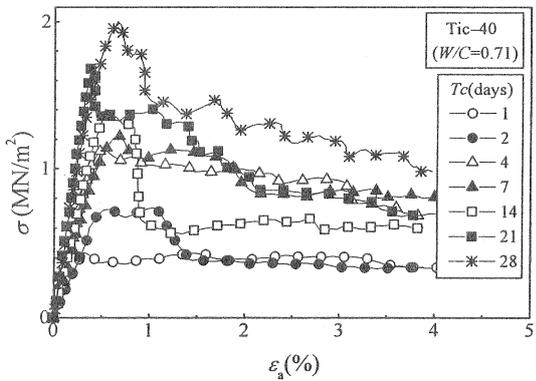


図-4 圧縮応力-軸ひずみの関係 (Tic=40°C)

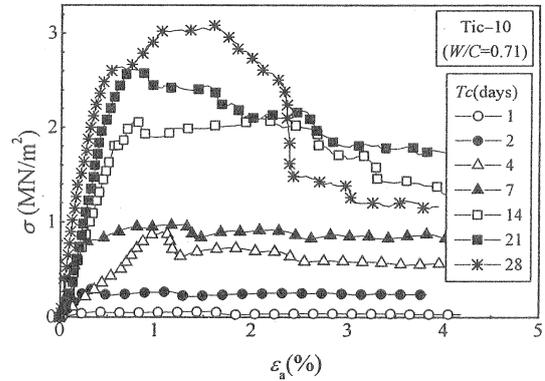


図-6 圧縮応力-軸ひずみの関係 (Tic=10°C)

縮応力-軸ひずみ曲線は、軸ひずみ (ϵ_a) の増加に伴い、顕著な立ち上がりを示し、軸ひずみ量 0.2~2.0% においてピークに達している ($q_u=0.1\sim 3.0\text{MN/m}^2$)。ピークに達した後、圧縮応力-軸ひずみ曲線には、増加と減少をくり返しながらひずみ軟化する傾向が認められた。このような挙動は、Tic および T_c の違いによらず全ての圧縮応力-軸ひずみ曲線で確認できた。また、 q_u 値および E_{50} 値は、 T_c の経過に伴い増加していることがわかる。

Tic が 80°C 以上の場合 (図-1, 2) には、1日から 28 日の T_c の増大に伴い、 q_u 値は 0.1~0.4MN/m² 程度となった。 E_{50} 値については、 T_c が 1 日では、20MN/m² 程度であったが、28 日には、150MN/m² へと増加した。一方、Tic が 60°C 以下 (図-3~6) の場合の q_u 値は、 T_c が 1 日で 0.1~0.7MN/m² 程度であったものが、 T_c が 28 日に増大すると、1.4~3.0MN/m² となった。また、 E_{50} 値は、 T_c が 1 日において 20~160MN/m² となっているが、 T_c が 28 日では、360~620MN/m² へと大幅に増加した。したがって、 q_u 値と E_{50} 値の増加率は、Tic が低い条件ほど大きくなる傾向が示された。

図-7 では、 T_c が 28 日について Tic の違いが圧縮応力-軸ひずみ曲線に及ぼす影響を比較している。図から圧縮応力は、Tic の違いによらず、軸ひずみ量の増

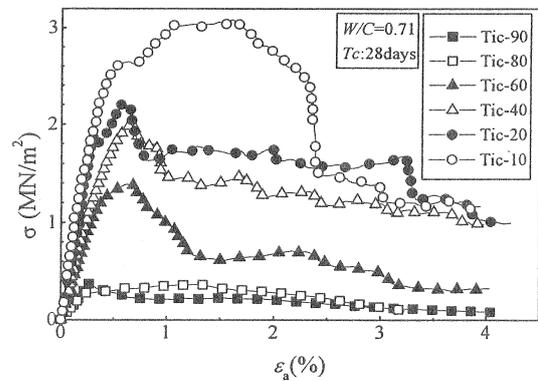


図-7 初期養生温度の違いが圧縮応力-軸ひずみの関係に及ぼす影響

加に伴い、急激に増大し、軸ひずみ量 0.2~1.3% においてピークに達する ($q_u=0.4\sim 3.0\text{MN/m}^2$)。その後、圧縮応力は、増加と減少をくり返しながらひずみ軟化挙動を示した。また、 q_u 値および E_{50} 値には、Tic が高くなるほど低下していく傾向が認められた。例えば、Tic-90, 80 の q_u 値と Tic-20 のそれと比較すると、Tic-90, 80 の q_u 値は Tic-20 の 1 割程度である。一方、Tic-10 の場合の q_u 値は、Tic-20 のそれと比較すると、1.3 倍程度に増加していることがわかる。

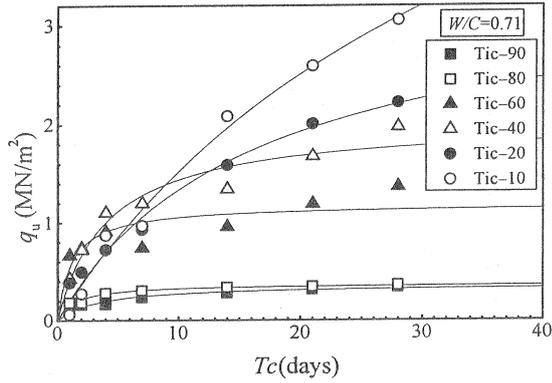


図-8 初期養生温度の違いが一軸圧縮強さと養生日数の関係に及ぼす影響

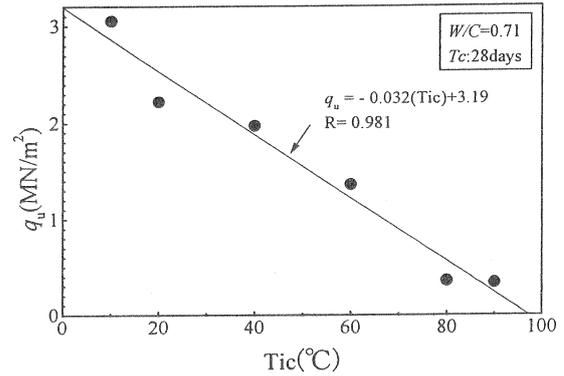


図-9 初期養生温度と一軸圧縮強さの関係

表-3 異なる養生条件から得られた一軸圧縮強さと養生日数の関係

養生条件	関係式
Tic-90	$q_u = 0.36T_c / (3.26 + T_c)$
Tic-80	$q_u = 0.37T_c / (1.43 + T_c)$
Tic-60	$q_u = 1.18T_c / (1.17 + T_c)$
Tic-40	$q_u = 2.02T_c / (4.05 + T_c)$
Tic-20	$q_u = 3.46T_c / (15.81 + T_c)$
Tic-10	$q_u = 7.17T_c / (37.05 + T_c)$

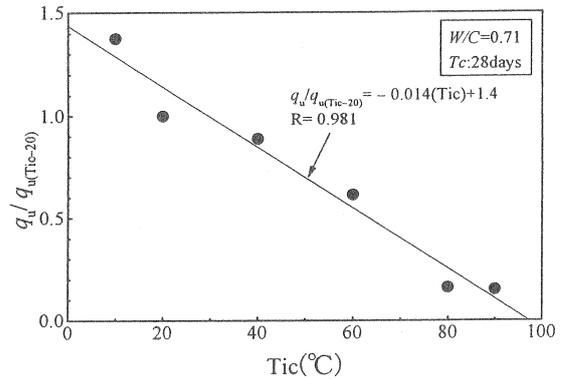


図-10 初期養生温度と $q_u/q_{u(Tic=20)}$ 値の関係

3.2 一軸圧縮強さ (q_u)

図-8は、初期養生温度 (Tic=10~90℃) が一軸圧縮強さ (q_u) と養生日数 (T_c が 1~28 日) の関係に及ぼす影響を示している。 q_u 値と T_c の関係は双曲線によって近似でき、 T_c が 28 日の場合には、 q_u 値の範囲は $q_u = 0.4 \sim 3.0 \text{ MN/m}^2$ となった。なお、その関係式を表-3に示した。

Tic が 90~80℃ の場合と Tic が 60~10℃ の場合では、 q_u 値の増加傾向が異なる。Tic が 90~80℃ の場合には、 q_u 値は T_c が 1~28 日に対して $0.1 \sim 0.4 \text{ MN/m}^2$ を示し、 T_c の増大に伴う q_u 値の増加は、ほとんど認められなかった。一方、Tic が 60℃ から 10℃ の供試体の場合、 T_c が 1 日の q_u 値は、 0.7 MN/m^2 以下であったが、 T_c が 28 日の q_u 値は、 $1.3 \sim 3.0 \text{ MN/m}^2$ に増加しており、Tic が 80℃ 以上の場合と比較して q_u 値の増加傾向は大きくなった。

Tic の 60℃ 以下の場合について詳細に検討すると、 T_c が 7 日以前の場合には、Tic-20, 10 の q_u 値は、Tic-60, 40 の q_u 値と比較して、小さな値を示した。しかしながら、 T_c が 14 日以降の q_u 値の増加量は、 T_c が 7 日以前と異なり Tic-20, 10 の方が q_u 値は Tic-40, 60 より大きくなっており、Tic が低いほど q_u 値の増加傾向は大きくなることが明らかになった。

T_c が 28 日の場合について Tic の違いが q_u 値に及ぼす影響を検討すると、Tic-90, 80 の供試体の q_u 値は、

0.4 MN/m^2 程度であったのに対して Tic-60~10 では、 $1.3 \sim 3.0 \text{ MN/m}^2$ まで増加している。このように Tic の増大によって q_u 値の増加が妨げられることがわかる。

T_c が 28 日の場合の q_u 値と Tic の関係を図-9に示す。 q_u 値には、Tic の上昇に伴って直線的に減少していく傾向が認められ、Tic が 20℃ 増加するのに伴い、 q_u 値は、 0.6 MN/m^2 程度減少することが明らかとなった。

T_c が 28 日の場合について、各 Tic の q_u 値を Tic-20 の q_u 値を用いて正規化することにより、Tic の変化に伴う q_u 値の変化を定量的に評価する (図-10)。図より、 $(q_u/q_{u(Tic=20)})$ 値と Tic の間には、高い相関性を有する直線関係が認められる。とくに Tic=80℃ 以上の場合には、Tic=20℃ の場合の 20% 程度の q_u 値となり、温度上昇に伴う強度の減少が著しくなる。このことは、気泡混合軽量土のような打設に伴い発熱の可能性のある地盤材料を施工する場合には、温度管理を充分考慮した施工が望ましいことを示唆している。

上述のように Tic が増加するのに伴い q_u 値が減少した原因としては、高温履歴が供試体内部の構造や組成に変化を及ぼすことが考えられる。Tic が 80℃ 以上のような高温の場合には、熱によって供試体内の気泡が膨張し、その直径が大きくなり、この結果、供試体内に占める気泡部分の割合が増加する。また、この高温履歴は、供試体内の含水比も減少させることから、供

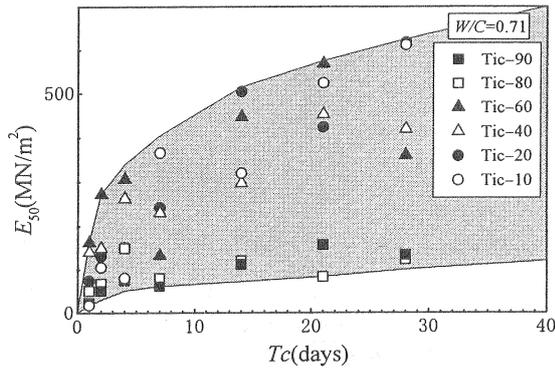


図-11 初期養生温度の違いが変形係数と養生日数の関係に及ぼす影響

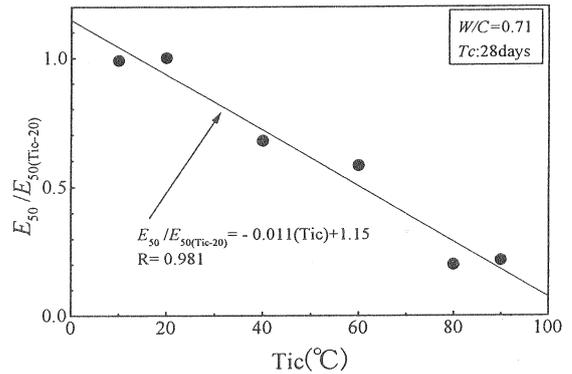


図-13 初期養生温度と $(E_{50}/E_{50(Tic-20)})$ 値の関係

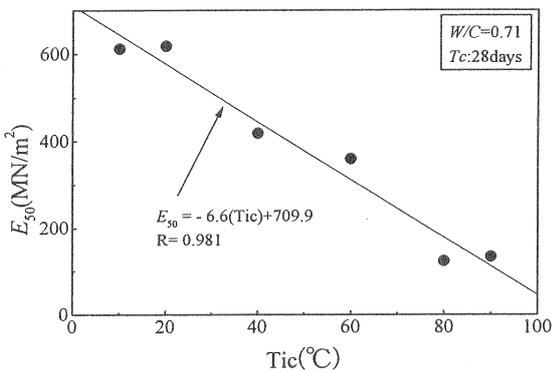


図-12 初期養生温度と変形係数の関係

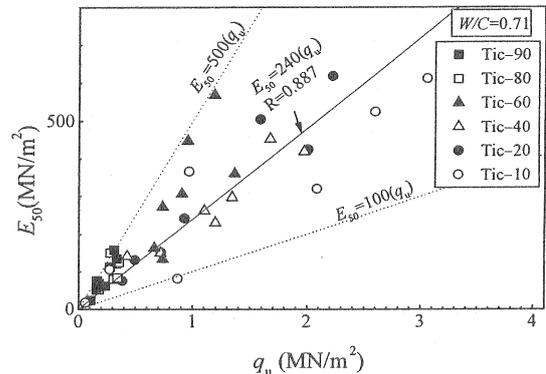


図-14 初期養生温度の違いが一軸圧縮強さと変形係数の関係に及ぼす影響

試体内のセメント水和反応の阻害につながる。以上のことから、供試体の強度は十分に増進することができないものと考えられる。

一方、Tic が低い場合には、供試体内の気泡はほとんど膨張しないため、Tic が高いものと比較してマトリクス部分の割合が大きくなり、さらに供試体内にも十分な水分が存在することから、 T_c の経過に伴ってセメント水和反応が十分に進展するものと考えられる。これらの理由によって、Tic が低い供試体は、Tic が高い供試体と比較して、強度が増加するものと推察される。

マスコンクリートのように一度に大量のコンクリートを打設する場合には、水和反応によって発生した熱が外部に放出されず、内部の温度を上昇させるため、コンクリートの強度は低下する。本研究において Tic が 80°C 以上となった供試体の q_u 値が大きく低下する現象は、上述のマスコンクリートの現象と同様のものと考えられる。

Tic の変化が気泡混合軽量土の q_u 値に大きな影響を及ぼすという本結果は、気泡混合軽量土の品質管理を行なう上において温度管理に十分な注意を払う必要があることを示唆している。よって施工時においては、熱の発生と密接な関係にある打設厚さ等に関して、そ

の熱の発生を抑えるために、慎重な対応をとる必要がある。

3.3 変形係数 (E_{50})

初期養生温度 (Tic) の違いによる変形係数 (E_{50}) と養生日数 (T_c) の関係を図-11 に示す。図より E_{50} 値は、Tic の違いによらず、 T_c の増加に伴いほぼ直線的に増加しており、 $20 \sim 600 \text{MN/m}^2$ の範囲に存在することが示された。また、 T_c の増加に伴う E_{50} 値の増加率は、Tic が小さくなるに従い、大きくなる傾向を示した。

図-12 は、 T_c が 28 日の場合の E_{50} 値と Tic の関係を示している。 E_{50} 値は、Tic の増加に伴い直線的に減少していくことがわかる。また、 T_c が 28 日の場合について、 E_{50} 値を Tic-20 の E_{50} 値で正規化した $(E_{50}/E_{50(Tic-20)})$ 値と Tic の関係 (図-13) に着目する。Tic-60 の場合の E_{50} 値は、Tic-20 の 6 割程度まで減少しており、Tic-80 の供試体の E_{50} 値は 2 割程度まで急減している。この E_{50} 値の急激な減少は、供試体の力学的性質が大きく変化していることを示唆している。

3.4 変形係数 (E_{50}) と一軸圧縮強さ (q_u) の関係

初期養生温度 (Tic) の違いが変形係数 (E_{50}) と一軸圧縮強さ (q_u) の関係に及ぼす影響を図-14 に示し

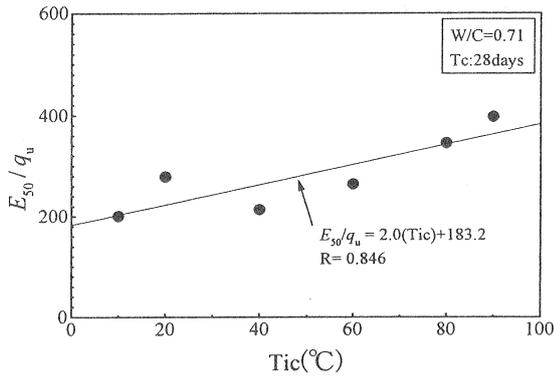


図-15 初期養生温度と (E_{50}/q_u) 値の関係

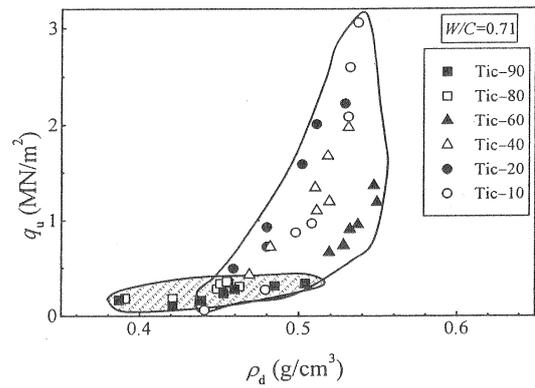


図-16 初期養生温度の違いが一軸圧縮強さと乾燥密度の関係に及ぼす影響

た. E_{50} 値には, q_u 値の増大に伴い増加する傾向が認められた. (E_{50}/q_u) 値は, 100 から 500 の範囲にあり, E_{50} 値と q_u 値は良い相関を示している ($E_{50}=240q_u$ (相関係数 0.887)). また, 図より Tic が高い供試体は, (E_{50}/q_u) 値が増加し, Tic が低い場合には (E_{50}/q_u) 値が減少する傾向が認められた.

一般的に気泡混合軽量土の E_{50} 値と q_u 値の間には, 比例関係が認められる. 横田・三嶋¹²⁾によると, 変形係数は, 一軸圧縮強さの 100 倍から 200 倍の範囲内にあることが報告されている. 今回の試験結果は, その値より広い範囲を示していた.

上記の E_{50} 値と q_u 値の関係を詳細に検討するために, Tc が 28 日の場合の (E_{50}/q_u) 値に及ぼす Tic の影響を定量的に表した (図-15). その結果, Tic の増加に伴い (E_{50}/q_u) 値が増加する線形関係となった. この原因としては, Tic の増加に伴う q_u 値の減少量が E_{50} 値の減少量より大きかったためと考えられる.

3.5 一軸圧縮強さ (q_u) と乾燥密度 (ρ_d) の関係

ρ_d 値の増加に伴う q_u 値の増加率は, W/C によらずほぼ一定の割合になることを亀井ら¹³⁾が報告している. そこで初期養生温度 (Tic) の変化が q_u 値と ρ_d 値の関係に及ぼす影響を検討した.

図-16 は, 異なる初期養生温度 (Tic=10~90°C) から得られた供試体の q_u 値と ρ_d 値の関係を示している. 図より, その傾向は, Tic が高い Tic-90, 80 の場合と Tic-60~10 の場合に分類できる. いま, q_u 値と ρ_d 値の変化傾向について検討すると, Tic-90, 80 の場合には, ρ_d 値は, 0.40~0.50g/cm³, q_u 値は 0.1~0.4MN/m² 程度の範囲に分布しており, ρ_d 値の増加に伴う q_u 値の増加傾向は, ほとんど認められなかった. 一方, Tic-60~10 の場合は, ρ_d 値が 0.45~0.55g/cm³ に対して q_u 値は, 0.1~3.0MN/m² 程度の範囲に分布し, ρ_d 値の増大に伴い q_u 値は顕著な増加を示した.

以上のような結果から, 気泡混合軽量土の養生初期に高温履歴を与えることは, 気泡混合軽量土の q_u 値の

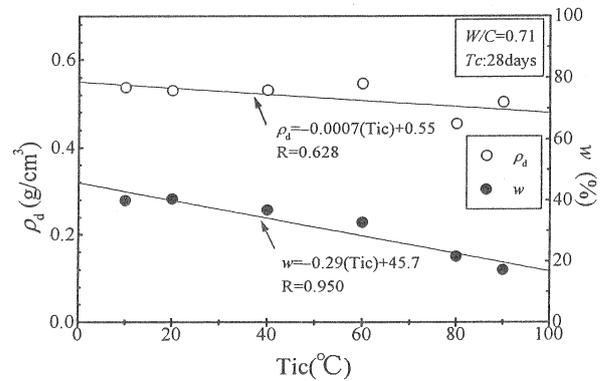


図-17 初期養生温度の違いが乾燥密度と含水比に及ぼす影響

増進を妨げる原因となるものと推察される.

図-17 は, Tic の違いが ρ_d 値と含水比 (w) に及ぼす影響を示している. 図より, Tic の増加に伴い, ρ_d 値も w 値も減少していることがわかる. すなわち, 高温履歴により供試体内の気泡が大きくなり, その影響で内部構造が変化するものと考えられる. また, 高温履歴によって供試体内の w 値が低下するために水和反応が進まず, 強度が増進しないものと推察される. このように ρ_d 値と w 値の変化は, 気泡の分布や気泡の大きさおよび形状などに影響を及ぼしていることが推察できる. したがって, 今後このような条件で作製された気泡混合軽量土の内部気泡の諸特性と土の一軸圧縮特性について熱が発生していることを含めて総合的な評価をする必要があるだろう.

3.6 一軸圧縮強さ (q_u) と間隙比 (e) の関係

一般的な土では, 一軸圧縮強さ (q_u) と間隙比 (e) の関係は, e 値の減少に伴い q_u 値が増加する傾向にあることが知られている. 気泡混合軽量土でも同様に e 値の小さな供試体の q_u 値は大きくなることが報告されている¹⁴⁾. 図-18 は, q_u 値と e 値の関係に及ぼす初期養生温度 (Tic) の影響を示している. 図より Tic-80,

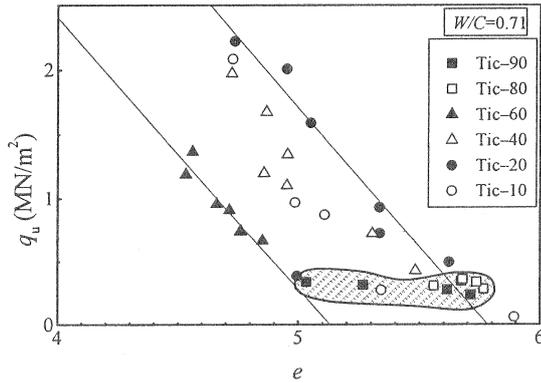


図-18 初期養生温度の違いが一軸圧縮強さと間隙比の関係に及ぼす影響

90 の場合には、 e 値の減少に伴う q_u 値の増加傾向は認められない。一方、Tic-60~10 では、 e 値の減少に伴い q_u 値は直線的に増加する傾向が得られた。このように Tic が 80℃ 以上の場合には、気泡混合軽量土の強度増進が認められないことがわかった。

3.7 含水比 (w) と養生日数 (T_c) の関係

異なる初期養生温度 (Tic) から得られた含水比 (w) と養生日数 (T_c) の関係を図-19 に示した。図より w 値は T_c の経過に伴い減少し、その減少傾向は、Tic が高い場合 (Tic-90, 80) と、Tic が比較的低い場合 (Tic-60~10) の 2 つに分類することができる。Tic が高い場合では、 T_c が 1 日の w 値は、20% 程度であり、それ以降は、 T_c の経過に伴ってほとんど変化が認められなかった。一方、Tic が比較的低い場合では、 T_c が 1 日において $w=55\sim40\%$ 程度あった。その後の w 値は、 T_c の経過とともに T_c が 7 日程度までは、急激に減少し、それ以降は緩やかに減少していく傾向が認められ、 T_c が 28 日では、 $w=40\sim30\%$ となった。これらの関係は、図-8 の q_u 値と T_c の関係と良く対応している。例えば、Tic-80, 90 の場合、 T_c の増加に伴う w 値と q_u 値の増減はほとんど認められない。一方、Tic-40, 60 の場合には、 T_c が 7 日程度までは、 w 値の減少に対して q_u 値は増加するが、それ以降、 w 値は緩やかに減少し、 q_u 値は、緩やかな増加となる。

このような現象は、養生初期の加熱によって、供試体内の含水比が急激に低下し、マトリックスの強度を増加させる水和反応を進展させるための十分な水分が得られなかったために生じたものと考えられる。このように Tic の違いは、一軸圧縮強さと密接な関係にある含水比に対して影響を及ぼすことが明らかになった。

4. まとめ

初期養生温度の上昇に伴う気泡混合軽量土の強度変

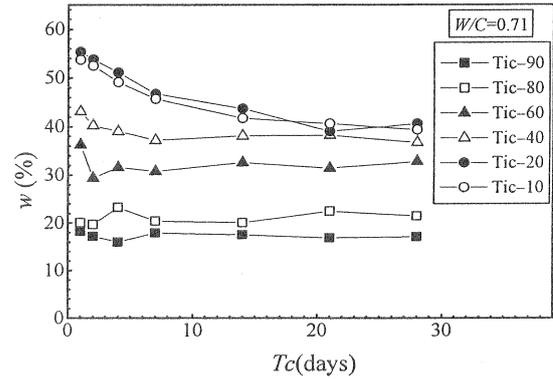


図-19 初期養生温度の違いが含水比と養生日数の関係に及ぼす影響

形特性の基本的な変化傾向を明らかにするため、初期養生温度 (Tic) を 10~90℃ に変化させ、その後の一軸圧縮特性に及ぼす試験条件の影響を取りまとめた。その結果、気泡混合軽量土の一軸圧縮特性は、初期養生温度の影響を受け、一軸圧縮強さと変形係数は初期養生温度の上昇に伴って、ほぼ直線的に減少していくことが明らかとなった。また、初期養生温度が 80℃ 以上の履歴を受けた場合には、養生期間の増加に伴う長期強度の増加現象があまり認められなくなることが明らかとなった。

以上のことから、気泡混合軽量土の打設直後の温度管理には極めて注意が必要であり、一回当たりの打設量に関する問題あるいは温度上昇を抑える混和材等を考慮することにより、十分な品質管理が必要なことを指摘できる。

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技術事務所より試料提供をいただいた。記して謝辞の意を表します。

参考文献

- 1) 嶋津晃臣：軽量盛土工法の進展，土と基礎，Vol.37，No.2，pp.7-12，1989。
- 2) 三島信雄，長尾和之：気泡セメント盛土工法 (FCB 工法) の研究，土木学会誌，Vol.79，No.1，pp.18-21，1994。
- 3) 久楽勝行：軽量盛土工法の特徴とその適用，基礎工，Vol.18，No.12，pp.2-9，1990。
- 4) 赤井公昭：エアーミルクの道路盛土への利用，基礎工，Vol.18，No.12，pp.40-49，1990。
- 5) 都築敏樹：エアーミルクの道路盛土への適用例，基礎工，Vol.18，No.12，pp.102-109，1990。
- 6) 海野隆哉，八巻一幸，古谷時春：気泡モルタルの鉄道盛土への利用，基礎工，Vol.18，No.12，pp.50-58，1990。

- 7) 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.
- 8) 新井恵一，渡辺将之，山科敏章，石田誠幸：FCBを用いた橋台部の背面土圧の軽減について，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.199-202，2000.
- 9) 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.
- 10) 例えば，近藤奉夫，坂静雄：コンクリート工学ハンドブック，pp.798-799，朝倉書店，1965.
- 11) 例えば，三嶋信雄，益村公人：FCB工法，pp.23-65，理工図書，2000.
- 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.
- 13) 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（掲載予定）.
- 14) 古谷俊明：軽量盛土材としての気泡モルタル，土と基礎，Vol.37，No.2，pp.73-77，1989.