

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

Influences of Bubble Preparation Time 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)

起泡剤の攪拌に要する時間の違いは、得られる気泡の大きさに違いを生じさせ、気泡混合軽量土の物理的および力学的性質に多大な影響を及ぼすものと推察される。本研究では、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を明らかにするために、三種類の気泡作製時間で作製した供試体に対して一軸圧縮試験を行った。その結果、気泡作製時間の増大に伴い、空気量は増加し、フロー値と生比重は減少する傾向が認められた。一軸圧縮強さは、気泡作製時間の短縮に伴い増加し、その増加傾向は、水セメント比が小さいほど顕著となった。また、乾燥密度の増加に伴う一軸圧縮強さの増加率は、気泡作製時間が短い場合には、大きくなることが明らかとなった。

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

1. はじめに

軟弱地盤上に構造物を建設するための対策工法は、その原理により、地盤改良工法、盛土補強土工法、構造物による工法および荷重コントロール工法の4つに分類される¹⁾。一方、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荷重コントロール工法に分類される軽量盛土工法が注目されている。

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が数多く実施されており、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おり、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などに用いられている³⁾。また、本工法では、水量、骨材量、セメント量及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。

FCB工法の施工実績は、特に軽量性と施工性に優れるという長所から近年確実に増加している。しかしながら、密度管理、ひび割れや経年変化の問題など^{4)~8)}、今後発生する可能性がある問題に関する評価は、まだ確立されていない。また、室内実験についても、限られた配合比において、水セメント比や土セメント比が一軸圧縮特性に及ぼす影響^{8)~12)}は評価されているものの、内部の気

泡の大きさやその分布性状などが一軸圧縮特性に及ぼす影響については未解明である。

気泡混合軽量土に用いる気泡を作製する場合、施工現場では、圧縮空気を用いて希釈しておいた起泡剤を強制的に発泡させることにより、気泡を得ている。しかしながら、実験室などで少量の供試体を作製する場合には、圧縮空気などを使用せず、ミキサー(機械混ぜ)または手混ぜを用いて希釈した起泡剤を物理的に攪拌して発泡させることにより、気泡を得ている場合が多い。

気泡混合軽量土の配合設計は、空気量やフロー値、湿潤密度、一軸圧縮強さを用いて行われている。しかしながら、起泡剤の攪拌に要する時間(以後、気泡作製時間 T_{BP} と呼ぶ)の違いは、得られる気泡の大きさを変化させ、気泡混合軽量土の物理的および力学的性質に多大な影響を及ぼすものと推察される。

本研究では、手混ぜにより気泡を得る際、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を明らかにするために、気泡作製時間を変化させて作製した供試体に対して一軸圧縮試験を行った。また、気泡作製時間が空気量、フロー値などのFCB工法の品質管理項目に及ぼす影響についても検討している。

2. 試料、供試体作製方法および実験方法

2.1 試料の物理的特性

本研究では、骨材として砂を用いた。その物理的性質は表-1に示すとおりであった。固化材としては、強度特性と経済性に着目し、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系化合物) 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、10分、15分および20分の気泡作製時間から得られる気泡を用いて、表-2に示す配合に対して試料を作製した。なお、土セメント比 (S/C) が1.0の場合を対象とするため、水セメント比 (W/C) は、FCB工法の品質管理基準の関係から、0.9から1.1の範囲を選択した。

試料の作製手順は、以下に示すとおりである。まず、骨材と固化材に混練水を加え良く混ぜてセメントスラリーを作製する。つぎに、起泡剤を希釈水で16倍に薄めた後、手混ぜにより決められた気泡作製時間だけ攪拌し気泡群を作る。最後にセメントスラリーと気泡群の両者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。

試料の空気量、フロー値及び作製時の湿潤密度 (生比重) が目標の範囲内¹³⁾にあることを確認した後、試料をモールド (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、その上にシリコングリスを薄く塗布することにより、モールドへの試料の付着を防いだ。空気量は、所定量の気泡が混入さ

れ、所定の軽量性が得られているかを確認するもので、JHS A 313-1992「エアモルタル及びエアミルク試験方法」の空気量の測定法¹⁴⁾から求めた。空気量の規定値は、目標値±5%である¹³⁾。フロー値とは、所定の流動性を確認する指標であり、暫定配合表では、その規定値は180±20mmとされており、この規定値内であれば、十分な流動性が得られるとともに圧送しても材料が分離しないことが確かめられている¹³⁾。本研究では、JHS A 313-1992「エアモルタル及びエアミルク試験方法」のコンシステンシー試験方法のシリンダー法¹⁴⁾に基づいてフロー値を測定した。生比重は、所定量の原料土、セメント、水および気泡が適正に計量、混合され、設計した所定の湿潤密度が得られているかを確認するものであり、目標値±0.1(g/cm³)により規定される¹³⁾。

モールドに打設した試料は、全体をビニール袋で被い、約20℃で48時間保管した。その後、モールドから供試体を外し、7、14、21、28日の養生期間までプラスチック製の円筒容器内で気中養生によって保管した。所定の養生期間を経た供試体をプラスチック製の円筒容器から取り出し、両端面を成形した後、実験に用いた。

2.3 実験方法

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板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、試験後の供試体の上部・中部・下部の含水比を測定した。

表-1 砂の物理的特性

ρ_s (g/cm ³)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	U_c	U_c'
2.570	0.230	0.500	0.950	1.200	5.22	0.91

表-2 配合

水セメント比 W/C	土セメント比 S/C	セメント C (kg/m ³)	細骨材 S (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)	細骨材含水比 w (%)	細骨材含水量 m_4 (kg/m ³)	水量 $m_1+m_2+m_3+m_4$ (kg/m ³)
0.9	1.0*	233.0	233.0*	1.7 [1.7]**	25.5 [25.5]**	176.1 [176.4]**	2.8	6.5 [6.5]**	209.8 [210.1]**
1.0						199.3 [199.7]**			233.0 [233.4]**
1.1						222.6 [223.0]**			256.3 [256.7]**

() *絶乾状態, [] **常温 20℃のときの容積 (ℓ/m³)

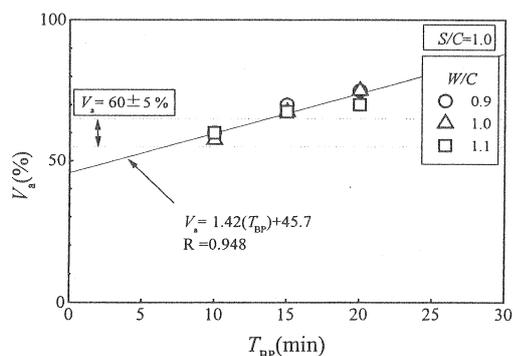


図-1 空気量と気泡作製時間の関係

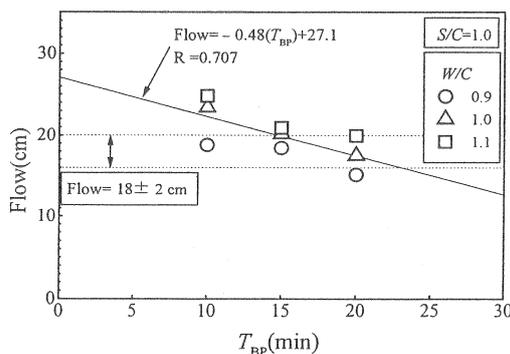


図-2 フロー値と気泡作製時間の関係

表-3 気泡作製時間と品質管理項目の関係式一覧

力学特性と諸条件	関係式	相関係数
$V_a - T_{BP}$	$V_a = 1.42 (T_{BP}) + 45.7$	0.948
Flow - T_{BP}	Flow = $-0.48 (T_{BP}) + 27.1$	0.707
$\rho_t - T_{BP}$	$\rho_t = -0.0248 (T_{BP}) + 0.964$	0.913

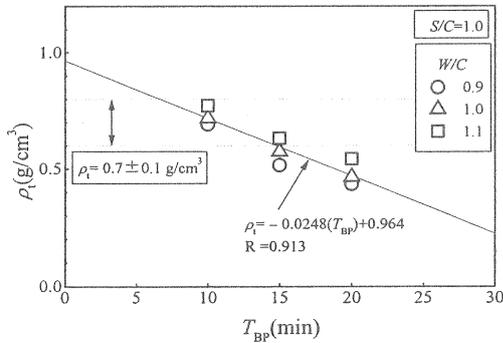


図-3 湿潤密度（生比重）と気泡作製時間の関係

3. 実験結果及び考察

3.1 品質確認項目（空気量，フロー値，湿潤密度）と気泡作製時間の関係

供試体作製時の空気量 (V_a) と気泡作製時間 (T_{BP}) の関係を図-1 に示す。なお、図の点線は、土セメント比 (S/C) が 1.0、水セメント比 (W/C) が 1.0 の配合において目標一軸圧縮強さが 0.49MN/m^2 の場合に関する V_a 値の規定値の範囲を表している。図より、 V_a 値は、 T_{BP} の増加とともに直線的に増加していることがわかる。この原因については、後述するものとする。また、それぞれの気泡作製時間において W/C の異なる供試体を比較すると、 T_{BP} が同じ条件であれば V_a 値もほぼ同じ値となっている。したがって、 W/C の違いが V_a 値に及ぼす影響は、極めて小さいことがわかる。

以上のことから、 V_a 値と T_{BP} との関係は、 T_{BP} が 10 分から 20 分、 W/C が 0.9 から 1.1 の範囲では、表-3 に示すとおりとなる。したがって、 T_{BP} を管理することにより、 V_a 値を調整できることがわかる。なお、 V_a 値が規定値の範囲となる T_{BP} は、7 分から 13 分程度となる。

図-2 は、 $W/C = 0.9, 1.0, 1.1$ における代表的なフロー値 (Flow) と T_{BP} の関係を示している。図の点線の範囲は、フロー値の規定値 $18 \pm 2\text{cm}$ を表している。フロー値は、 W/C の違いによらず、 T_{BP} の増加に伴い減少する関係が認められた。その関係式は、表-3 に示すとおりとなった。フロー値が規定値の範囲を満足する T_{BP} は、15 分から 20 分程度であったが、水セメント比の大きさによっては 10 分程度でも規定値の範囲内の値が得られた。なお、フロー値が大きい場合には、圧送する際に材料分離の可能性が生じるが、本研究では、試料作製後、速やかにモールドに打設したので材料分離は認められなかった。

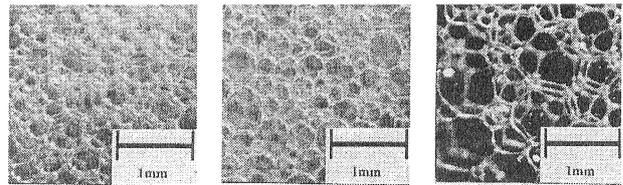


写真-1 異なる気泡作製時間で作製した気泡の状態

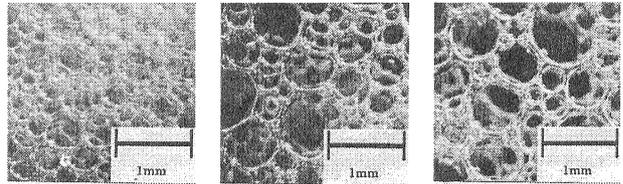


写真-2 放置に伴う気泡の状態の遷移 ($T_{BP} = 10$ (分))

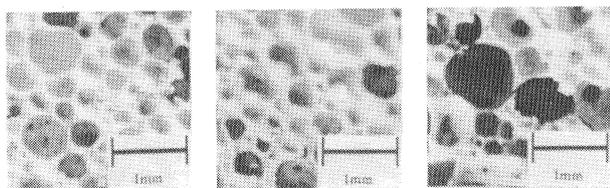
T_{BP} が增大すると気泡の直径が大きくなり、 V_a が增大する(図-1)。スラリー内部では、気泡が消しなれば、気泡は粒状体として働くことが推察される。気泡の混入に伴いセメントスラリーの粘性は大きくなり、その結果、フロー値は下がるものと考えられる。以上のことから、フロー値は、 T_{BP} の増加に伴って減少したものと推察される。

また、 W/C が增大することにより、 T_{BP} が同じ条件であっても、フロー値は若干増加する傾向が認められた。これは水量が増加することに伴う流動性の増大によるものと考えられる。

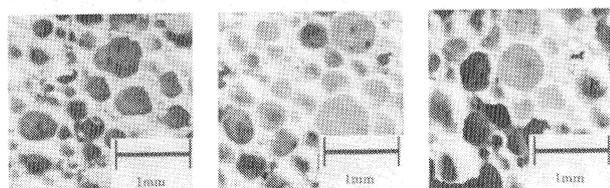
気泡混合軽量土の密度には、練り混ぜ直後の湿潤密度(生比重)、硬化後の湿潤密度および乾燥密度の3種類が考えられる。気中養生の場合には、練り混ぜ直後と硬化後の湿潤密度の差は、ほとんど認められない¹²⁾ ことなどから、気泡混合軽量土の設計に用いる単位体積重量は、練り混ぜ直後の湿潤密度から求めている^{11), 13)}。このように湿潤密度は、気泡混合軽量土の品質管理をする上で重要な項目となっている。

図-3 は、 W/C が 0.9 から 1.1 の範囲における代表的な練り混ぜ直後の湿潤密度 (ρ_t) と T_{BP} の関係を示したものである。図の点線は、 $S/C = 1.0, W/C = 1.0$ の配合において、目標一軸圧縮強さが 0.49MN/m^2 の場合に関する ρ_t 値の規定値の範囲を示している。図より、 ρ_t 値は、 T_{BP} 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_{BP} が同じ場合には、 W/C の違いによる ρ_t 値の差は、ほとんど認められない。以上のことから、 ρ_t と T_{BP} の関係は、 W/C が 0.9 から 1.1、 T_{BP} が 10 分から 20 分の範囲では、表-3 に示すとおりとなる。なお、 ρ_t 値が規定値の範囲となる T_{BP} は、7 分から 15 分程度であることがわかる。

以上の結果から、 $S/C = 1.0, W/C = 0.9 \sim 1.1$ の場合には、 T_{BP} の増加に伴い V_a 値は増加し、それに伴い ρ_t 値は減少することがわかる。このように T_{BP} を管理することにより、密度管理も可能となることが明らかとなった。



(a) $T_{BP} = 10$ (分) (b) $T_{BP} = 15$ (分) (c) $T_{BP} = 20$ (分)
 写真-3 異なる気泡作製時間で作製された供試体断面
 ($W/C = 1.0, S/C = 1.0$)



(a) $W/C = 0.9$ (b) $W/C = 1.0$ (c) $W/C = 1.1$
 写真-4 異なる水セメント比で作製された供試体断面
 ($S/C = 1.0, T_{BP} = 10$ (分))

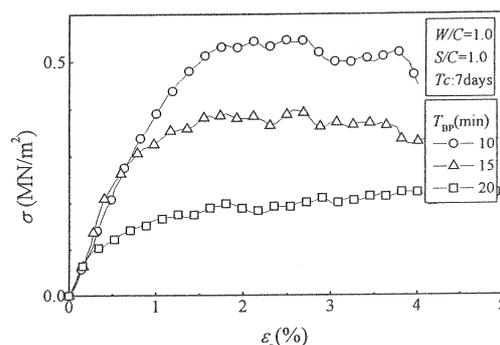
3.2 気泡作製時間と気泡の平均直径の関係

気泡作製時間 (T_{BP}) の違いによって気泡の大きさがどのように変化するかを調べるために、実体顕微鏡を用いて気泡の大きさやその分布性状を観察した。本研究では、実体顕微鏡を用いて撮影された気泡の写真の中から約 30 個の計測可能な気泡を取り出し、その直径の平均値を求めた。

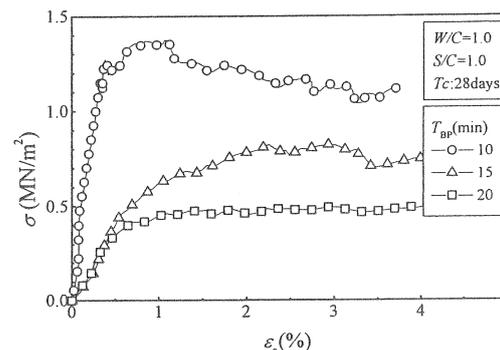
写真-1 は、 $T_{BP} : 10, 15, 20$ 分で作製した気泡の顕微鏡写真を示している。 T_{BP} の違いに関係なく、気泡の直径は非常に小さく、それぞれの気泡は独立している。 T_{BP} ごとの気泡の大きさを比較すると、(a) $T_{BP} : 10$ 分で気泡の平均直径は 0.24mm 、(b) $T_{BP} : 15$ 分の場合には 0.27mm 、(c) $T_{BP} : 20$ 分では 0.37mm となり、 T_{BP} が增大するほど気泡の直径は大きくなる傾向が認められた。 T_{BP} の長さは、気泡の直径に影響を及ぼしており、気泡の直径が大きくなることでそれぞれに気泡の中に含まれる空気量 (V_a) が増大し、その結果、全体としての V_a 値が増えることが推察される。

作製後に気泡を放置した場合の時間経過に伴う気泡の大きさの変化について検討を行う。写真-2 は、 $T_{BP} : 10$ 分で作製した気泡の作製直後と 5 分間および 15 分間放置した後の写真である。

作製直後の気泡の平均直径は、約 0.24mm であった(写真-2 (a))。放置後、気泡は、時間の経過に伴い、消泡や気泡同士が結合することにより、その平均直径は、徐々に大きくなる傾向が認められた。その結果、気泡の平均直径は、放置から 5 分後には約 0.44mm (写真-2 (b))、15 分後には約 0.51mm (写真-2 (c)) となった。なお、気泡は時間とともに消泡し、全体の気泡量は減少していった。このような傾向は、 T_{BP} が長い条件で作製した気泡ほど顕著であった。この原因としては、大きな気泡は消泡しやすく、かつ消泡した場合にその体積が急激に減少するためと考えられる。



(a) 養生日数 7 日



(b) 養生日数 28 日

図-4 応力-ひずみ曲線に及ぼす気泡作製時間の影響
 ($W/C = 1.0, S/C = 1.0$)

したがって、気泡の品質管理の観点から考えると、作製後の気泡は、速やかにセメントスラリーと混合する必要がある。また、この結果は、気泡とセメントスラリーを混合する時間も気泡の大きさや分布性状に影響を及ぼす可能性があることを示唆している。今後は、気泡とセメントスラリーの混合時間が品質管理項目に及ぼす影響も調べる必要があるだろう。

T_{BP} の違いが供試体内部の気泡の大きさに及ぼす影響を明らかにするために、土セメント比 (S/C) が 1.0 、水セメント比 (W/C) が 1.0 の配合のもと、 $T_{BP} : 10, 15, 20$ 分の条件で作製した供試体の一軸圧縮試験終了後における供試体断面を写真-3 に示す。

供試体内部の気泡は、 T_{BP} が增大するのに伴い、大きくなる傾向が認められた。これらの気泡の平均直径は、 $T_{BP} : 10$ 分の場合には 0.35mm 、 $T_{BP} : 15$ 分の場合には 0.37mm であり、 $T_{BP} : 20$ 分の場合には 0.41mm となった。また、気泡作製時間が長い場合には、短い場合に比較して、マトリクス部分が占める領域が狭くなっている。

写真-1 と写真-3 を比較すると、供試体内部の気泡の大きさは、発泡後の気泡の大きさより、若干大きくなることわかる。気泡作製時間が增大するのに伴い供試体内部の気泡の大きさが大きくなる傾向は、 $W/C = 0.9, 1.1$ の場合でも認められた。

W/C の違いが供試体内の気泡の平均直径に及ぼす影響を検討するために、 $W/C = 0.9, 1.0, 1.1$ のもとで作製した供試体の断面の写真を示す(写真-4)。なお、気泡作製時間は $T_{BP} : 10$ 分とした。写真より $W/C = 0.9$ から 1.1 の

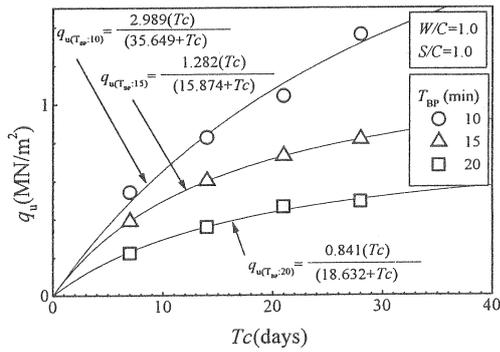


図-5 一軸圧縮強さと養生日数の関係に及ぼす気泡作製時間の影響

表-4 実験から得られた関係式一覧

力学特性と諸条件	関係式	相関係数
$q_u - Tc$ ($W/C=1.0$)	$q_u = A(Tc) / (B+(Tc))$	0.947
	$A = -0.215(T_{BP}) + 4.926$ $B = -1.702(T_{BP}) - 48.911$	0.794
$E_{50} - q_u$	$E_{50} = 192.2(q_u)$	0.938
$q_u(28) - q_u(7)$	$q_u(28) = 2.55(q_u(7))$	0.963

それぞれの供試体内に含まれる気泡の平均直径は、 $W/C = 0.9$ では0.35mm、 $W/C = 1.0$ では0.35mm、 $W/C = 1.1$ では0.31mmとなることが示された。供試体内部の気泡の直径は、 T_{BP} が一定の場合には、 W/C の違いによらず、ほぼ等しくなることがわかった。

3.3 気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす気泡作製時間の影響

(1) 応力-ひずみ曲線

図-4は、土セメント比(S/C)が1.0、水セメント比(W/C)が1.0の配合条件のもとで、気泡作製時間(T_{BP})を変化させて作製された気泡混合軽量土の応力-ひずみ曲線を表しており、(a)は養生日数(Tc)7日の場合を、(b)は $Tc: 28$ 日の場合を示している。図より、 T_{BP} を短縮することにより、 $Tc: 7$ 日および28日のいずれの場合にも、一軸圧縮強さ(q_u)は増大するとともに、破壊ひずみ(ϵ_f)は減少し、変形係数(E_{50})は増大することがわかる。とくに、 $Tc: 28$ 日の場合には、 $T_{BP}: 20$ 分における q_u 値を基準とすると、 $T_{BP}: 15$ 分における q_u 値は約66%増加し、さらに気泡作製時間を短くした $T_{BP}: 10$ 分の場合には、 q_u 値は約176%も増加することが示された。なお、 $Tc: 7$ 日の場合には、応力-ひずみ曲線に明瞭なピークは認められない。また、 $Tc: 28$ 日の場合には、 $T_{BP}: 10$ 分の応力-ひずみ曲線のように q_u 値が 1MN/m^2 を超える場合には、若干のひずみ軟化挙動が認められるものの、その他の T_{BP} の場合には、明瞭なピークは認められない。 T_{BP} の違いが q_u 値、 ϵ_f 値および E_{50} 値に及ぼす影響は、 $W/C = 0.9, 1.1$ の場合にも同様な傾向となった。

このような傾向は、 T_{BP} が長くなるのに伴い供試体内の気泡の平均直径が増大し、その結果、空気量(V_a)が

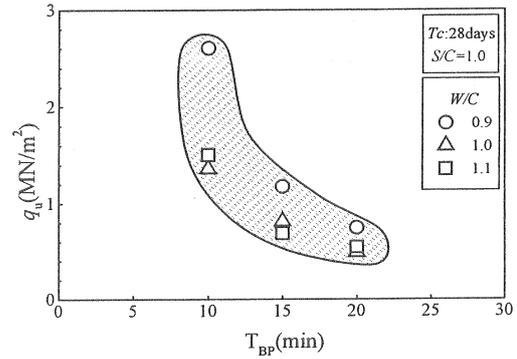


図-6 一軸圧縮強さと気泡作製時間の関係

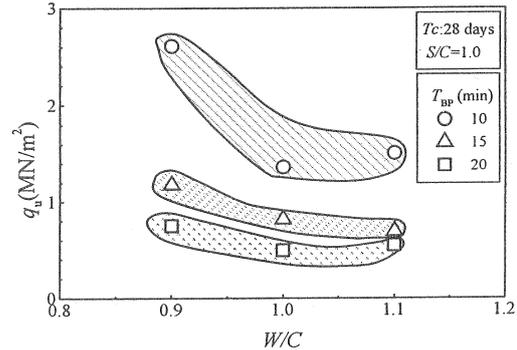


図-7 一軸圧縮強さと水セメント比の関係に及ぼす気泡作製時間の影響

増加することによって生じているものと考えられる。すなわち、 V_a 値の増大は、供試体全体に占めるマトリクス部分の割合を減少させ、供試体の全体的な強度を低下させるものと考えられる。一方、気泡作製を短い時間で行うことにより、供試体内の気泡の平均直径を小さくすることができ、かつ V_a 値も低く抑えることが可能となる。この場合には、供試体内のマトリクス部分の占める領域が増大し、 q_u 値が増加するものと推察される。すなわち、 $S/C, W/C$ が同じ配合であっても、 T_{BP} が異なれば、 q_u 値は変化することとなる。

(2) 一軸圧縮強さ

図-5は、気泡作製時間(T_{BP})が10、15、20分に対して、土セメント比(S/C)が1.0、水セメント比(W/C)が1.0の配合によって作製された供試体の一軸圧縮強さ(q_u)と養生日数(Tc)の関係を示した図である。 q_u 値は、 T_{BP} の違いによらず、短い養生日数の場合には急激に増加し、養生日数が長期化するのに伴い増加傾向が緩やかとなる双曲線近似によって定式化できた。なお、 W/C 比が1.0、 T_{BP} が10分から20分の範囲においては、 q_u 値と Tc の関係は、表-4に示すとおりとなった。また、図より、 T_{BP} と q_u 値の関係を比較すると、 T_{BP} が短いほどその増加傾向は大きくなることがわかる。同様の傾向は、 $W/C = 0.9, 1.1$ ($T_{BP}: 10, 15, 20$ 分)の条件で作製された供試体でも認められた。

図-6は、 $Tc: 28$ 日における q_u 値と T_{BP} の関係を示したものである。 q_u 値は、図の斜線部分に示

表-5 気泡作成時間の違いが品質管理項目と一軸圧縮特性に及ぼす影響

気泡作製時間	短	↔	長
気泡量	少	↔	多
気泡の直径	小	↔	大
フロー値	大	↔	小
生比重	大	↔	小
q_u 値	大	↔	小
E_{50} 値	大	↔	小

してあるように、同じ W/C の場合には、 T_{BP} が長いほど小さく、 T_{BP} が短くなるのに伴って増大する。また、 q_u 値に及ぼす W/C の影響は、 T_{BP} が 10 分と短い場合には大きくなるが、 T_{BP} が長くなるのに伴い小さくなるのがわかった。

T_c : 28 日において、異なる気泡作製時間から得られた q_u 値と W/C の関係を図-7 に示す。 q_u 値は、 T_{BP} が減少するのに伴い増加することがわかる。また、 $S/C=1.0$ の場合、 W/C の減少に伴う q_u 値の増加率は、 T_{BP} が短いほど急勾配となり、長いほど緩勾配となる傾向が認められた。

気泡作製時間の違いが品質管理項目と一軸圧縮特性に及ぼす影響をまとめ、表-5 に示す。

(3) 変形係数と一軸圧縮強さの関係

気泡作製時間 (T_{BP}) 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-8 に示す。図より、水セメント比 (W/C) が 0.9 から 1.1, T_{BP} が 10 分から 20 分の範囲では、 T_{BP} が E_{50} 値と q_u 値の関係に及ぼす明瞭な影響は認められなかった。しかしながら、 E_{50} 値と q_u 値のほとんどは、 $E_{50} = 100q_u$ から $E_{50} = 300q_u$ の範囲内にあり、その両者の間には、表-4 に示すように高い相関性を有する比例関係が認められた。一般的に、変形係数と一軸圧縮強さの間には、比例関係があることが報告されており、気泡混合軽量土についても、この傾向は認められている。横田・三嶋¹¹⁾ や亀井ら¹²⁾ によると、母材として砂を用いた気泡混合軽量土の場合には、実験結果に基づいてばらつきを考慮することにより、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。

(4) $q_{u(28)}$ と $q_{u(7)}$ の関係

一般的に、気泡混合軽量土を用いた盛土の設計では、材令 28 日における一軸圧縮強さ ($q_{u(28)}$) を基準として用いている¹³⁾。しかしながら、施工現場においては、早期強度を確認する必要があること、および打設開始から 28 日後には、ほとんどの場合、施工が完了していることなどから、材令 7 日の一軸圧縮強さ ($q_{u(7)}$) を用いて強度の確認を行う場合がある¹⁵⁾。本研究では、図-9 に示すように $q_{u(28)}$ 値と $q_{u(7)}$ 値には、 T_{BP} の違いによらず比例関係が認められ、その関係式は表-4 のとおりとなった。

したがって、 T_{BP} が異なる気泡混合軽量土においても、

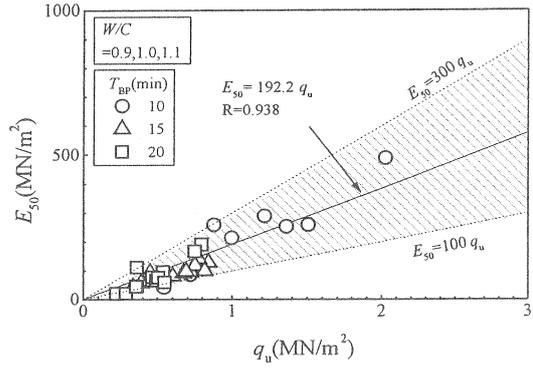


図-8 変形係数と一軸圧縮強さの関係に及ぼす気泡作製時間の影響

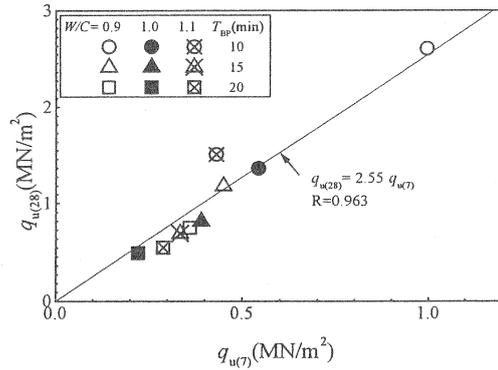


図-9 $q_{u(28)}$ と $q_{u(7)}$ の関係

材令 7 日の一軸圧縮強さから材令 28 日のそれを推定可能なことが明らかとなった。なお、既往の研究では、母材として砂を用いた気泡混合軽量土の $q_{u(28)}$ 値と $q_{u(7)}$ 値の関係は、 $q_{u(28)} = 2.19q_{u(7)}$ ¹²⁾ や $q_{u(28)} = 2.33q_{u(7)}$ ¹³⁾ と報告されている。本研究から得られた結果は、 $q_{u(28)} = 2.55q_{u(7)}$ と既往の研究と比較して、若干大きな傾きとなった。

(5) 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

乾燥密度 (ρ_d) の増加に伴い一軸圧縮強さ (q_u) は、直線的に増加することが報告されている¹²⁾。本研究では、気泡作製時間 (T_{BP}) が q_u 値と ρ_d 値の関係に及ぼす影響について検討する(図-10)。なお、供試体の配合条件は、土セメント比 (S/C) が 1.0, 水セメント比 (W/C) が 1.0 の場合である。 q_u 値は、 ρ_d 値の増大に伴い増加する傾向を示している。また、 T_{BP} が短い場合には、 T_{BP} が長い場合に比較して、 ρ_d 値の増大に伴う q_u 値の増加率が大きくなった。このような関係は、 $W/C = 0.9, 1.1$ の場合にも認められた。以上のことから、 q_u 値は、気泡の直径や量、分布性状の影響を受ける可能性が示唆される。

(6) 一軸圧縮強さと含水比の関係

一軸圧縮強さ (q_u) と含水比 (w) の関係を図-11 に示す。図より、 q_u 値と w 値の関係は、 w 値の減少により、 q_u 値が直線的に増加することがわかる。気泡作製時間 (T_{BP}) が短い場合には、 w 値および q_u 値の変化量が大き

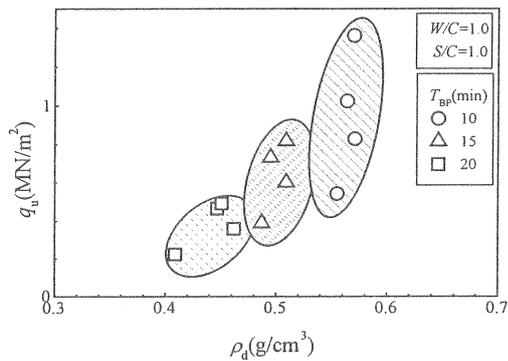


図-10 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係に及ぼす気泡作製時間の影響

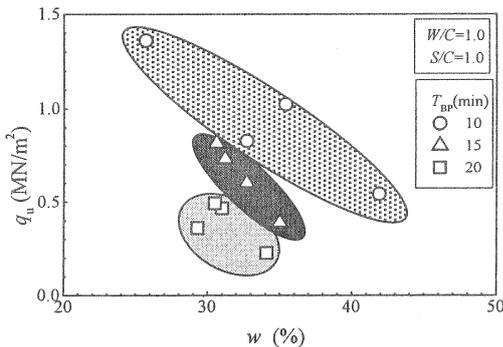


図-11 一軸圧縮強さと含水比の関係に及ぼす気泡作製時間の影響

大きく、 T_{BP} が長くなるのに伴い小さくなった。同様の傾向は、 W/C が 0.9, 1.1 の場合でも認められた。この傾向は、 T_{BP} が短くなるのに伴いマトリクス部分の占める割合が増加すること、および水分がセメントの水和反応によって消費されることによる影響が大きいものと推察される。

4. まとめ

本研究から得られた主要な結果を以下に列記する。

- (1) 気泡作製時間は、空気量、フロー値および湿潤密度と線形関係にあり、気泡作製時間が増加するに伴い、空気量は増加し、フロー値と湿潤密度は減少することが明らかとなった。
- (2) 起泡剤の攪拌時間を 10 分間にした場合には、20 分間にした場合より、供試体内の気泡の平均直径を小さくできるとともに空気量を減少させることができる。また、作製後に気泡を放置すると、その直径が大きくなるので、品質管理上注意する必要がある。
- (3) 一軸圧縮強さと養生日数の関係は、気泡作製時間の違いによらず、双曲線近似により定式化できる。また、一軸圧縮強さは、気泡作製時間を 20 分間から 10 分間へと短縮するに伴い増加し、その増加傾向は、水セメント比が小さいほど顕著となることが示唆された。
- (4) 乾燥密度の増加に伴う一軸圧縮強さの増加率は、気泡

作製時間の短縮に伴い、大きくなることが明らかとなった。

以上のことから、気泡混合軽量土の力学的特性は、その気泡の形状、大きさおよび分布性状等の違いにより大きく異なることが明らかになった。よって、気泡混合軽量土地盤の施工に際しては、その気泡の特性や分布性状を適切に評価・管理することにより、安全かつ経済的な人工地盤が構築されよう。

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を提供していただいた。記して謝意を表します。

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) 三嶋信雄，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) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 地盤工学会：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.1-274，2000。
- 9) 林泰弘，鈴木敦巳：気泡セメント改良土の一軸圧縮強度への影響因子，土木学会論文集 No.638/III-49，pp.353-362，1999。
- 10) 前川晴義，和泉聡，亀井健史，光松章：発泡モルタルの一軸圧縮特性に与える養生期間と軸ひずみ速度の影響，土木構造・材料論文集，No.16，pp.101-106，2000。
- 11) 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。
- 12) 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）。
- 13) 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。
- 14) 日本道路公団：日本道路公団試験方法，1993。
- 15) 例えば，三嶋信雄，益村公人：FCB工法，pp.148-154，理工図書，2000。