

一軸圧縮・圧裂引張・曲げ試験から得られた気泡混合軽量土の 強度に及ぼす養生温度の影響

Effects of Curing Temperature on Strength of Foamed Mixture Lightweight Soil
Obtained from Unconfined Compressive, Split Tensile and Bending Tests

前川晴義 Haruyoshi MAEKAWA (金沢工業大学 環境系)
亀井健史 Takeshi KAMEI (島根大学 総合理工学部)
山崎裕之 Hiroyuki YAMAZAKI (金沢工業大学 工学研究科 博士前期課程)
松田哲夫 Tetsuo MATSUDA (日本道路公団 北陸支社 金沢技術事務所)

気泡混合軽量土の打設現場では、水和熱によって 80℃を超える温度が長期に渡って継続するケースの存在が明らかになっている。本論文では、20～100℃の異なる温度条件下で養生した FCB 供試体に対して、一軸圧縮、圧裂引張、曲げ試験を行った。その結果、三種類の異なる強度試験から得られた強度特性の違いとその強度特性に及ぼす養生温度の影響を明らかにした。

キーワード：気泡混合軽量土、温度条件、一軸圧縮強さ、引張強度、曲げ強度 (IGC : D06, D08, M05)

1. はじめに

軟弱地盤上に構造物を建設する場合、支持力や沈下などの問題が発生する。これらの対策方法として、最近では軽量土工法が採用されるケースが多くなっており、中でも気泡混合軽量土（ここでは FCB と呼ぶ）は、軽量性以外に、セメント量を調整することで強度の管理が容易なことや、流動性が高いために施工がしやすいなどの理由から、使用実績が増加している。また、最近の FCB の施工箇所は、本来の充填材以外に軟弱地盤の沈下対策や構造物に対する土圧の軽減策のための裏込め材など、その利用箇所や利用目的が多様化しており¹⁾、これに伴って FCB の物性値の適切な評価が求められるようになってきている。

気泡混合軽量土は利点ばかりが注目されているが、不明な特性も多い材料である。例えば、本材料は、薄い殻で多孔質な骨格構造が形成されており²⁾、この骨格構造の長期レベルにおける安定性は、全く解明されていない。また、流動性の高さが施工のしやすさに結び付いているが、セメントミルク内の気泡の状態などは、現場サイドの問題として残されている。

上記以外に、施工に伴う重要な問題として発熱現象の問題が挙げられる。セメント量の多い配合条件の FCB を打設した場合、施工現場では水和反応に伴う水和熱により、温度の上昇が著しくなる。現場では打設作業が連日行われることと、気泡が断熱材の役割を果たすため、高温の状態が長期に渡って継続することになる。打設後の気泡混合軽量土の温度が 100℃近くに達することが報告³⁾されており、著者らが計測した現場においても、

打設から約 1 日で 90℃に達し、その後、2 週間以上の期間で 80℃の温度が計測された⁴⁾。打設直後にこのような高温を受けた場合の FCB の力学特性への影響が問題になるが、これに関する報告⁵⁾は非常に少ない。本論文でも紹介するが、80℃を超える養生温度を与えた供試体の一軸圧縮強さは、20℃の場合の約 1/4 にとどまっており、養生温度と強度の発現は FCB の重要な問題の一つになっている。

ところで、地盤は特殊なケースを除いて、引張や曲げ応力を受けることはない。しかしながら、FCB はいろんな箇所に使用されるようになってきている。例えば、軟弱地盤上に盛土材として FCB を使用する場合、軟弱地盤に不同沈下が起きると、FCB は地盤沈下に追従しないために土との間に隙間が生じ、道路であれば交通荷重によって曲げ応力が FCB に作用する。このように FCB の利用の多様化と同時に、各種の応力に対する特性の把握が必要になってきている。

そこで本論文では、各種の養生温度が、FCB の一軸圧縮強さ、引張強度、曲げ強度に及ぼす影響を明らかにすることを目的にしている。

2. 供試体作製および実験方法

実験に使用した試料は、日本道路公団暫定配合表⁶⁾の「K0・10」を配合条件で作製し、フロー値、空気量、密度が目標の範囲内であることを確認した。K0・10 の具体的な配合量は表・1 に示しており、セメントは高炉セメント B 種を使用した。また、起泡剤には、界面活性系のも

表-1 FCBの配合表

JH 配合 種別	目標値			
	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	一軸圧縮 強さ q_u (kPa)	空気量 (%)	
K0-10	0.61	981	63.1	
配合条件(1m ³ あたり)				
水セメント比 W/C (%)	セメント量 C (kN)	起泡剤 m1 (kN)	希釈水 m2 (kN)	混練水 m3 (kN)
71.7	3.46	0.016	0.25	2.23

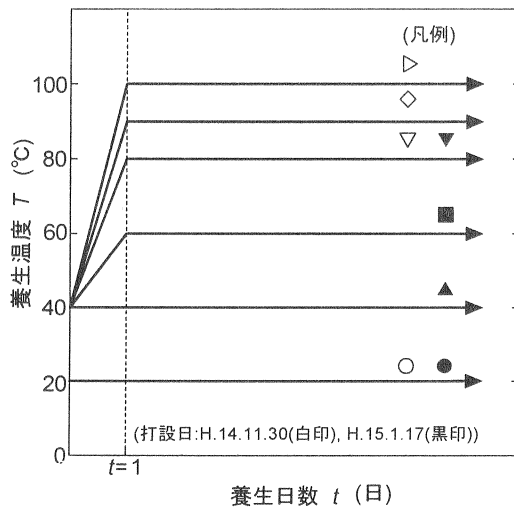


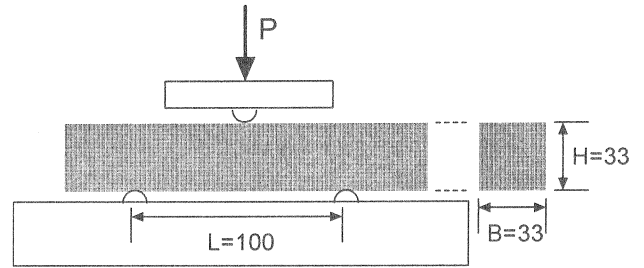
図-1 供試体の養生温度と管理方法

のを利用した。

一軸圧縮試験用の供試体は、上記の配合条件で作製した試料を直径 50mm の紙モールドに打設し、ガラス瓶（内部容積：約 470cm³）に入れて密封し、40℃に調整した乾燥炉に入れた。乾燥炉の温度は、図-1 のように 24 時間後に 60, 80, 90, 100℃になるように設定した。供試体は、打設から 24 時間経過した時点で紙モールドから外し、再びガラス瓶に入れて乾燥炉に戻して、所定の養生期間（1, 4, 7, 14, 28 日）まで温度を一定に保った。これ以外に、40℃と恒温室（20±3℃）で養生した条件（ここでは 20℃と呼ぶ）についても実験を行った。なお、乾燥炉の台数に限りがあったため、供試体は、図-1 中のように 2 回に分けて作製した。

所定の養生日数が経過した供試体は、高さ約 100mm になるように両端面を成形した後、1.0mm/min の軸圧縮速度で圧縮した。以下の圧裂引張、曲げ試験用の供試体は、一軸圧縮試験と同じ試料で作製している。

圧裂引張試験の供試体は、一軸圧縮試験と全く同じ方法で打設、管理を行い、所定の養生期間が経過した時点で厚さ $L \approx 50\text{mm}$ に成形し、載荷試験装置にセットした後、1.0mm/min の圧縮速度で載荷し、最大圧縮力 P から引張強度 $\sigma_t (= 2P/\pi DL)$ を算出した。



単位 (mm)

図-2 曲げ試験装置

曲げ試験用の供試体は、試料をモルタル供試体作製用三連型枠に打設し、乾燥防止のためにビニール袋で覆い乾燥炉に入れ、24 時間後に脱枠し、再び供試体をビニール袋に入れて所定の養生温度、期間保管をした。所定の養生日数が経過した供試体は、高さ約 33mm×幅約 33mm に成形したものを図-2 のようにセットし、1.0mm/min の圧縮速度で最大圧縮力 P を測定し、曲げ強度 $\sigma_m (= 3PL/2BH^2)$ を求めた。

なお、以下の図中の一軸圧縮強さ、引張強度、曲げ強度の結果は、2 供試体の平均値を示している。

3. 実験結果および考察

3.1 一軸圧縮特性⁴⁾

図-3 は、養生温度 $T=20, 40, 60, 80, 90, 100^\circ\text{C}$ における一軸圧縮強さ q_u と養生日数 t の関係を示している。養生温度 $T=20^\circ\text{C}$ で管理した供試体の q_u 値は、養生期間の増大に伴い上昇している。これに対して、養生温度 $T=80, 90, 100^\circ\text{C}$ を与えた供試体の場合、打設直後の q_u 値は、 $T=20^\circ\text{C}$ の結果を上回るが、その後は q_u 値が逆に低下し、 $t=28$ 日の q_u 値は、 $T=20^\circ\text{C}$ のその約 1/4 にとどまった。このように養生温度が 80°C を超えることが、強度の発現に対して大きな障害を与えると考えられる⁵⁾。 $T=40, 60^\circ\text{C}$ の q_u 値に関しては、 $t=7$ 日まで $T=20^\circ\text{C}$ の結果と大差がなく、その後は q_u 値に増減が起きている。 q_u 値は養生温度によって変動しており、 $t=28$ 日の時点の q_u 値は、養生温度の低い条件ほど高いことがわかる。

ところで、図-3 からは、養生温度 $T=60^\circ\text{C}$ の養生日数 $t=28$ 日および $T=80^\circ\text{C}$ の $t=7$ 日で黒印の供試体で急激な強度の低下が確認できる。また、 $T=80^\circ\text{C}$ の打設日が異なる 2 ケースでは、養生日数によって一軸圧縮強さが異なる。著者らは、このような強度の変化の要因に供試体の乾燥密度の大きさが関与しているものと考えている。表-2 には、各条件における供試体の乾燥密度 ρ_d の平均値を一覧した。試料作製時の湿潤密度、空気量、フロー値は、許容範囲内であったが、打設日により乾燥密度 ρ_d が異なっていたことがわかる。養生温度 $T=20^\circ\text{C}$ の場合、打設日で ρ_d 値は異なるものの、一軸圧縮強さ q_u には大きな違いが起

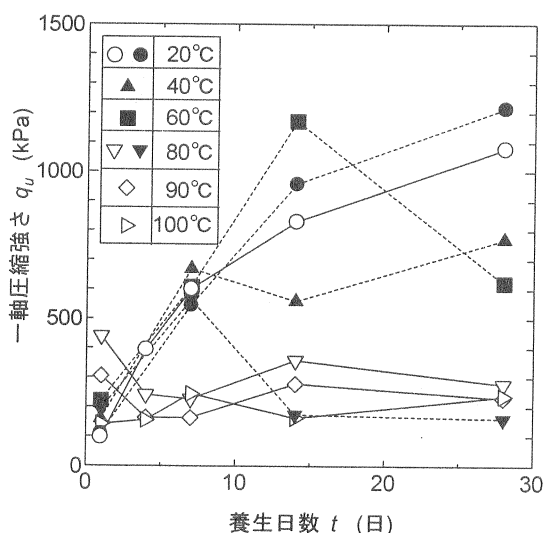


図-3 一軸圧縮強さと養生日数の関係

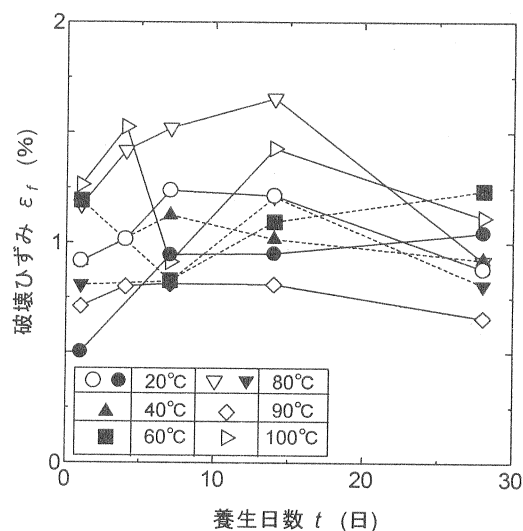


図-5 破壊ひずみと養生日数の関係

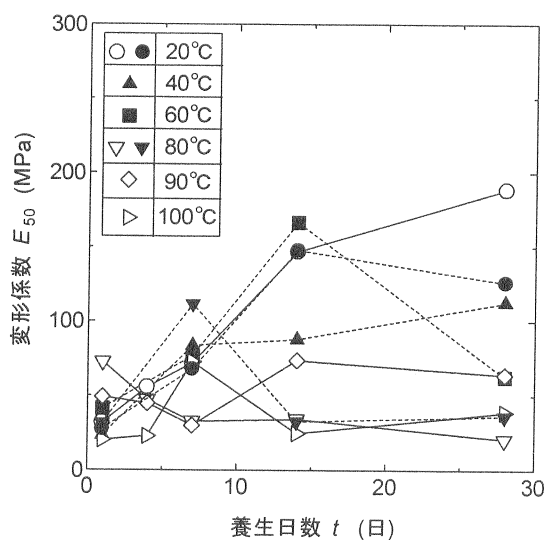


図-4 変形係数と養生日数の関係

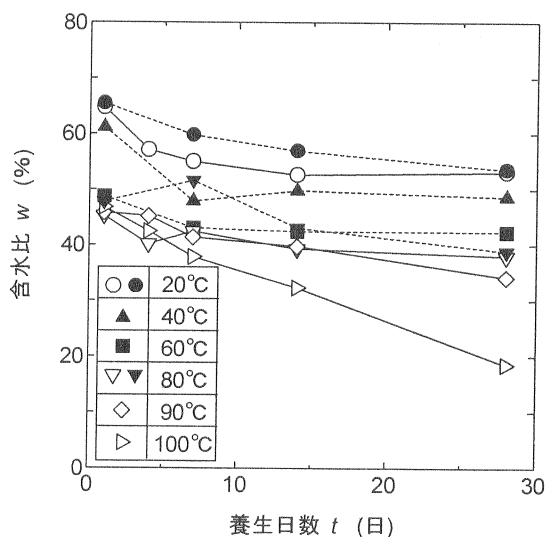


図-6 含水比と養生日数の関係

表-2 乾燥密度の一覧表

打設日	養生温度 $T(^{\circ}\text{C})$	養生日数 t (日)					
		1日	4日	7日	14日	28日	
H14.11.30	20	0.367	0.380	0.379	0.387	0.391	
	80	0.386	0.386	0.378	0.394	0.383	
	90	0.388	0.354	0.359	0.375	0.365	
	100	0.359	0.366	0.382	0.367	0.381	
H15.1.17	20	0.431	-	0.444	0.450	0.453	
	40	0.414	-	0.445	0.425	0.433	
	60	0.449	-	0.440	0.494	0.447	
	80	0.398	-	0.426	0.414	0.430	

(g/cm^3)

きていないことから、強度への乾燥密度の影響は小さかったと考えている。これに対して、養生温度が高い $T=80^{\circ}\text{C}$ の乾燥密度が異なる両ケースの一軸圧縮強さには、養生日数によって顕著な違いが確認できる。乾燥密度の違いは、上述した急激な強度低下にもつながっているものと考えており、今後は、乾燥密度に関する詳細な検討が必要であろう。

変形係数 E_{50} と養生日数 t の関係は、図-4 に示している。 q_u 値の結果と比べると、バラツキが大きく、養生温度や上述した乾燥密度の影響は、 E_{50} 値にも適用できると考えられる。 $T=20^{\circ}\text{C}$ の場合の E_{50} 値は、養生日数の増大に伴い増加するが、 $T=80^{\circ}\text{C}$ 以上の養生温度を与えた場合は、 $t=1$ 日以降、 E_{50} 値は低下傾向を示し、 $t=28$ 日の $T=100^{\circ}\text{C}$ の E_{50} 値は、 $T=20^{\circ}\text{C}$ の場合の約 $1/6$ であった。

図-5 には破壊ひずみ ε_f と養生日数 t の関係を示した。破壊ひずみと養生温度の関係は全体にバラツキが大きく、明確な傾向が確認できないが、 $t=14$ 日までは、 ε_f 値は増加の傾向を示し、その後は減少に転じている。このような結果の背景には、FCB の硬化の増進に伴う骨格構造の安定が深く関与していると思われる。

供試体の含水比 w と養生日数 t の関係は、図-6 に示した。打設時に約 74% であった試料の含水比は、養生日数の増加に伴い低下する。供試体はガラス瓶の中で密封

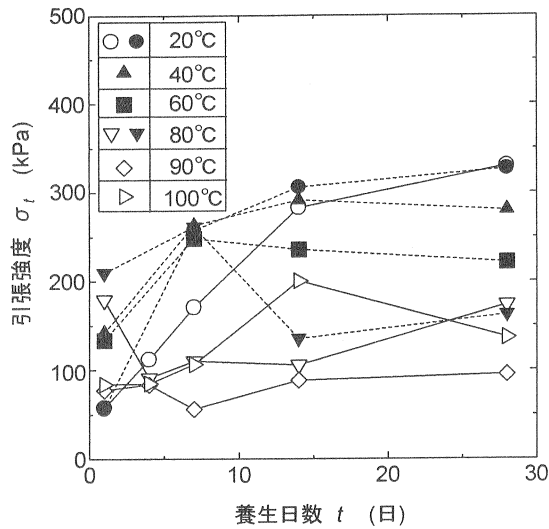


図-7 引張強度と養生日数の関係

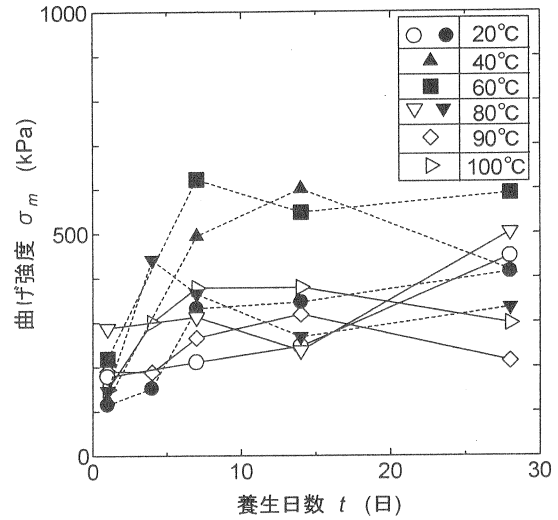


図-9 曲げ強度と養生日数の関係

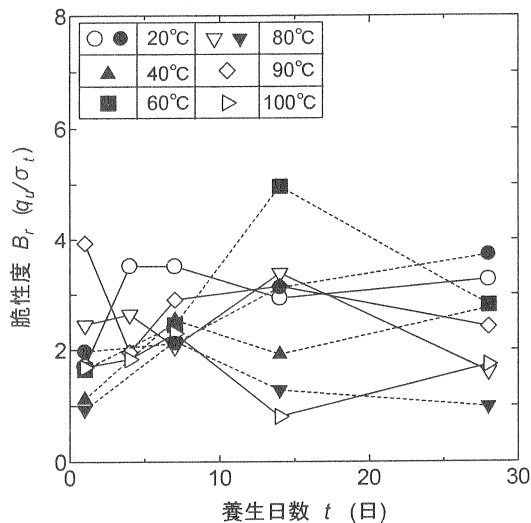


図-8 脆性度と養生日数の関係

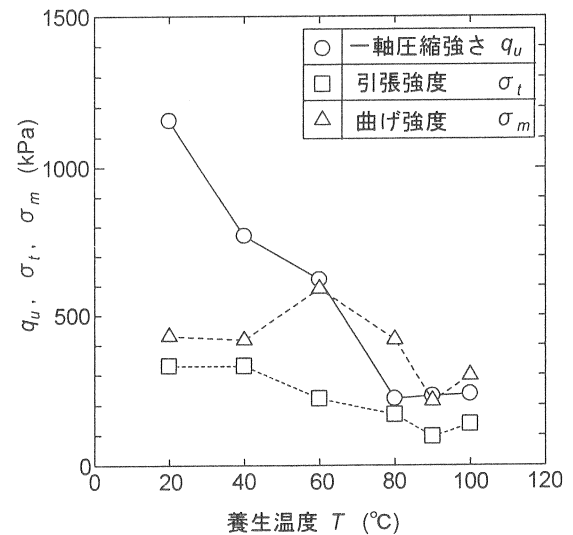


図-10 養生 28 日における一軸圧縮強さ、引張強度、曲げ強度と養生温度の関係

状態にしており、ここでの w 値の低下には、水和反応による分とガラス瓶の中に蒸発した分とが考えられるが、ガラス瓶の容量が小さいため後者の量は少ないと予想している。 w 値の変化は、 $T=20^{\circ}\text{C}$ の場合、 $t=7$ 日までの低下が著しく、 $t=7$ 日以降は少なくなっており、図-3 の一軸圧縮強さ q_u と養生日数 t のパターンと類似している。また、 $T=20^{\circ}\text{C}$ 以外の結果は、養生温度が高くなるに従い、含水比の低下が大きいことがわかる。

3.2 圧裂引張特性

図-7 には引張強度 σ_t と養生日数 t の関係を示した。試験中の供試体の状況は、載荷箇所がつぶされるように圧縮し、最大圧縮力の圧縮量は大きいもので 5mm に達しており、線載荷の条件は満足していなかった。なお、典型的な縦割れの破壊形態は、主として養生日数 $t=28$ 日の供試体で確認できた。

養生温度 20°C で管理した供試体の σ_t 値は、養生期間

の増大に伴い増加している。これに対して、養生温度が $80, 90, 100^{\circ}\text{C}$ のように高温の場合は、養生の早期の段階において強度増加が起きるが、養生日数 $t=4$ 日以降は、 σ_t 値の増進がほとんど認められず、 $t=28$ 日における三者の σ_t 値は、 $T=20^{\circ}\text{C}$ のそれの約 $1/2 \sim 1/3$ であった。また、養生温度 $T=40, 60^{\circ}\text{C}$ の場合、初期強度は $T=20^{\circ}\text{C}$ を上回るが、 $t=28$ 日では $T=20^{\circ}\text{C}$ の強度を下回っていることがわかる。

一連の引張強度 σ_t の結果は、図-3 の一軸圧縮強さのパターンに類似しており、養生日数 $t=28$ 日の σ_t 値は $T=90, 100^{\circ}\text{C}$ で逆の結果になっているが、養生温度の上昇に伴い引張強度の発現が低下すると予想される。

材料の鋭敏性の指標になる脆性度 $B_r (= q_u / \sigma_t)$ と養生日数 t の結果を図-8 に示した。ここでの一軸圧縮強さ q_u は、図-3 の結果を引用した。養生温度 $T=20^{\circ}\text{C}$ の結果は、 $t=4$ 日で $B_r=3.5$ に上昇するものの、その後は

大きな変化が起きていない。 $T=20^{\circ}\text{C}$ 以外の養生温度を与えた場合の B_r 値は、バラツキの度合が大きく、両者の間には規則性が認められないが、 $t=28$ 日の結果は養生温度の高い条件の方が、 B_r 値は小さくなる傾向が確認できる。

3.3 曲げ特性

図-9 は曲げ強度 σ_m と養生日数 t の結果を示している。養生温度 $T=20^{\circ}\text{C}$ の σ_m 値の結果は、養生日数の増大に増加傾向を示し、 $t=28$ 日の σ_m 値は、約 430kPa に達する。この結果は、同じ養生日数の一軸圧縮強さ q_u の約 40% に相当しており、モルタルなどで指摘されている値に近似している。しかしながら、 $T=20^{\circ}\text{C}$ 以外の養生温度の結果には、 $T=20^{\circ}\text{C}$ の結果を上回るものも存在した。この理由として、曲げ試験用の供試体は、ビニール袋に入れて乾燥炉内で保管したが、密封状態が不十分であったために、供試体は乾燥したことが強度に影響を及ぼしたとされている。一軸圧縮や圧裂引張試験のように乾燥しないよう供試体を管理していたならば、 $T=20^{\circ}\text{C}$ より高い養生温度の σ_m 値は、 $T=20^{\circ}\text{C}$ の結果より低い値になると予想している。

図-10 は、養生日数 $t=28$ 日の曲げ強度を一軸圧縮強さなどと併せて示した。養生温度の上昇に伴い三者の強度は、漸近しているが、これは一軸圧縮強さの温度依存特性が他の試験の強度よりも大きいためと考えられる。また、一軸圧縮強さと引張強度は、特定の養生温度の範囲で直線的に低下しているが、養生温度と強度の関係には、本材料の構造形態や水和熱の影響が関与しているものと考えている。

4. あとがき

本論文では現場における水和反応の影響を想定した温度を養生中の FCB に与えて一軸圧縮強さ、引張強度、そして曲げ強度を調べた。ここでの研究成果を列举すると、以下の通りである。

- 1) 養生温度の上昇に伴って一軸圧縮強さは減少し、 80°C を超える養生温度を受けた供試体の一軸圧縮強さは、 20°C の場合の約 1/4 であった。
- 2) 引張強度も一軸圧縮強さと同様に養生温度の上昇に伴って減少していくが、その程度は一軸圧縮強さと比較して小さい。
- 3) 曲げ強度は養生温度が 20°C の場合、一軸圧縮強さの約 40% であったが、養生温度の影響に関しては、一軸圧縮強さや引張強度のような規則性が認められず、バラツキが大きかった。
- 4) 養生温度の上昇に伴い一軸圧縮強さ、引張強度、曲げ強度の差が小さくなった。

謝辞

本研究に対しご助言を頂いた日本道路公団北陸支社金沢技術事務所の職員の方々、また、実験に協力を得た金沢工業大学の卒業生の諸君に対して心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 三島信雄, 益村公人著: FCB 工法, 理工図書, 2000.
- 2) 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, 第 18 号, pp.168-176, 2002.
- 3) 後藤年芳, 垣本泰臣, 鈴木教泰: 盛土内温度履歴養生をした気泡モルタルの強度発現, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp.901-902, 2002.
- 4) 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論文集, pp.53-60, 2003.
- 5) 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.35-41, 2002.
- 6) 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, p.15, 1996.