

論文 軽量骨材を用いたコンクリート・モルタルの高温加熱後の力学的性質

河辺伸二*¹・岡島達雄*²・伊藤嘉規*³

要旨：近年、コンクリート構造物の軽量化、建築工事の省力化が求められている。また、良質な骨材も不足している。そのため岩石・副産物を原料とした超軽量骨材を用いた研究が行われている。そこで本研究では、超軽量骨材と言われる膨張頁岩系と廃ガラス系の軽量骨材を用いたコンクリートとモルタルの高温加熱後の力学的物性とコンクリートの弾性係数と圧縮強度の推定について検討した。その結果、単位容積質量と弾性係数は、加熱温度の上昇とともに低下し、圧縮強度は、用いる骨材により影響を受け増減する。さらに高温加熱後のコンクリートの弾性係数と圧縮強度の推定式を示した。

キーワード：超軽量骨材, コンクリート, 高温加熱, 弾性係数, 圧縮強度

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高層化・大型化に伴いコンクリートの軽量化や建築工事の省力化が求められている。このため岩石やガラス副産物などを原料とした超軽量骨材を用いた研究^{1) 2)}が行われている。

そこで本研究では、超軽量骨材と言われる膨張頁岩系と廃ガラス系の軽量骨材を用いたコンクリートとモルタルの高温加熱後の力学的性質について考察する。さらに高温加熱後のコンクリートの弾性係数と圧縮強度の推定を行う。

2. 実験方法

2.1 実験内容及び手順

コンクリート及びモルタルを打設し24時間後に脱型する。3ヶ月水中養生後、電気マッフル炉を用いて加熱し、その後冷却した供試体を用いて、力学的性質についての測定を行った。

2.2 供試体の作製

コンクリートは $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体、モルタルは $\phi 5 \times 10$ cmの円柱供試体とした。脱型後、供試体の両端面を研磨機により研磨した。

セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨

材・細骨材はともに膨張頁岩系と廃ガラス系の2種類を使用した。骨材の物理的性質を表-1に、コンクリート、モルタルの調合を記号を用いて表-2に示す。コンクリートの空気量は5%, スランプは21 cmを目標とした。モルタルは、コンクリートから粗骨材を除いた比で調合した。フローは150~200 mmであった。混和剤は高性能 AE 減水剤(セメント質量比の1%)を用いる。

表-1 骨材の物理的性質と骨材の記号

骨材	種類と記号	最大寸法 (mm)	絶乾比重	粗粒率	24時間吸水率 (%)
細骨材	膨張頁岩系 (m)	2.5	1.57	2.80	14.0
	廃ガラス系 (g)	2.5	0.62	3.17	9.7
粗骨材	膨張頁岩系 (M)	15	0.94	6.52	9.6
	廃ガラス系 (G)	15	0.55	6.14	10.2

表-2 コンクリート、モルタルの調合と記号

記号	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
Mm35	35	55	150	429	570	283
Mm45	45	53	150	333	571	311
Gg35	35	52	150	429	215	175
Gg45	45	54	150	333	234	175
m35	35	—	219	629	832	—
m45	45	—	230	509	874	—
g35	35	—	225	645	323	—
g45	45	—	225	499	351	—

*1 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 工博(正会員)

*2 名古屋工業大学長 工博(正会員)

*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻

2.3 加熱方法

加熱温度は、20℃、80℃、100℃、200℃、300℃、400℃とする。電気マuffle炉を用い、1時間当たり150℃を目標に所定の温度まで加熱し、炉内の温度が一定に保たれた後、所定の温度で3時間保持した。その後、炉内でファンを回し冷却した。温度分布については、熱電対を埋め込み供試体内が所定の温度になることを確認した。

2.4 載荷方法

アムスラー試験機を用い、JIS A 1108に基づき載荷した。

2.5 ひずみ測定方法

変位計をコンクリート、モルタル円柱供試体の両側面に設置し、この変位よりひずみを求めた。

2.6 熱分析

熱分析にはペーストの粉体を用い、1分間当たり10℃の昇温速度で1000℃まで昇温する熱質量測定(TG)により、結合水率を求めた。

2.7 骨材の破碎試験

骨材の破碎試験は粗骨材 M, G を24時間吸水させ、その後コンクリート、モルタルと同様の加熱を行った。これを英国規格 812 に基づき試験を行い、10%破碎値を求めた。

3. 実験結果と考察

表-3 に加熱前(20℃)の力学的性質を示す。ただし、この加熱前の供試体は、3ヶ月水中養生の後であり、供試体は吸水している。

3.1 単位容積質量

コンクリートとモルタルの高温加熱後の単位容積質量比(高温加熱後の単位容積質量/20℃の単位容積質量)の変化を図-1と図-2に示す。コンクリート、モルタルともに骨材種類にかかわらず、水セメント比の大きいコンクリートとモルタルの方が単位容積質量の低下は大きい。また、100～200℃にかけて単位容積質量が大きく減少している。これは、100～200℃の間でペースト内の自由水及びゲル水の脱水、軽量骨材中の水分の脱水が激しく起こったと考える。

3.2 弾性係数

コンクリートとモルタルの高温加熱後の弾性係数比(高温加熱後の弾性係数/20℃の弾性係数)の変化を図-3と図-4に示す。

コンクリート、モルタルともに加熱温度の上昇とともに弾性係数は直線的に低下している。ただし、コンクリートの弾性係数は200℃以降、G, gを用いた方が、M, mを用いたものより大きく低下している。モルタルにおいても300℃以降同様の傾向が見られる。

軽量骨材を用いたコンクリート、モルタルの弾性係数は加熱温度の上昇とともに低下していくが、ある温度以降用いる骨材によって低下し

表-3 加熱前(20℃)の力学的性質

供試体 記号	単位容積 質量 (t/m ³)	弾性 係数 (×10 ⁴ MPa)	圧縮 強度 (MPa)
Mm35	1.56	1.61	30.9
Mm45	1.46	1.32	16.9
Gg35	1.03	0.70	11.3
Gg45	0.97	0.69	10.1
m35	1.83	2.16	58.6
m45	1.77	1.85	37.8
g35	1.29	1.00	25.9
g45	1.19	0.76	18.5

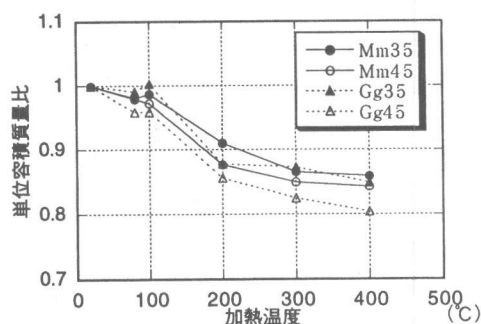


図-1 コンクリートの単位容積質量比

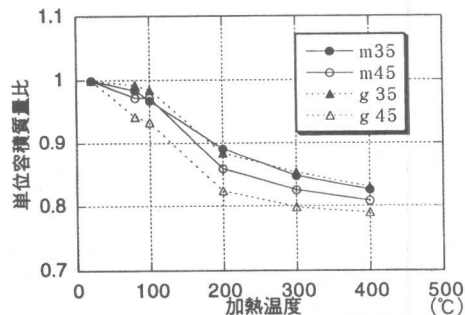


図-2 モルタルの単位容積質量比

ていく割合が異なることが分かった。

3.3 圧縮強度

コンクリートとモルタルの高温加熱後の圧縮強度比（高温加熱後の圧縮強度/20℃の圧縮強度）の変化を図-5と図-6に示す。

M, mを用いたコンクリートとモルタルは加熱温度が上昇しても圧縮強度比は1前後を増減する。G, gを用いたコンクリートとモルタルは200℃までは大きな変化がないが、それ以上の加熱温度では直線的に低下している。

軽量骨材を用いたコンクリートとモルタルの高温加熱後の圧縮強度は、水セメント比の影響より骨材の種類に大きく影響される。

3.4 500℃の加熱について

今回、前述の2.3加熱方法で述べた加熱冷却方法で500℃の加熱も行った。Mm35とMm45の供試体を用いた結果爆裂した。軽量骨材を用いたコンクリートは爆裂しやすいと言われている。今回の実験の範囲内ではM, mを用いた場合、500℃で爆裂する結果となった。

3.5 10%破砕値

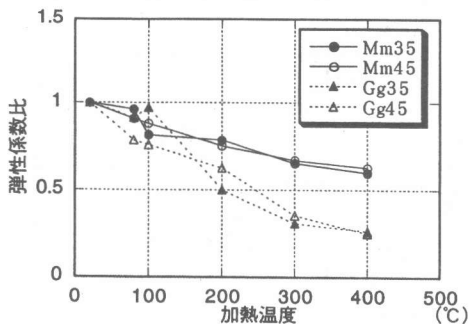


図-3 コンクリートの弾性係数比

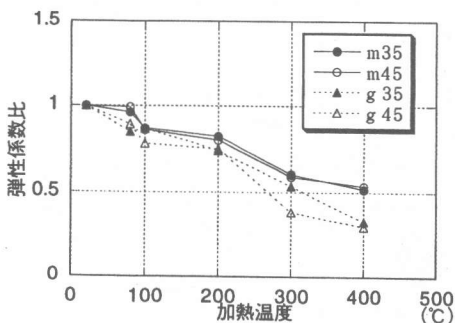


図-4 モルタルの弾性係数比

図-7に加熱温度と10%破砕値の関係を示す。加熱温度が上昇しても10%破砕値は大きく変化しない。今回用いた骨材は400℃までの加熱による大きな強度低下はないと考える。

4. コンクリートの弾性係数推定

4.1 弾性係数と単位容積質量・圧縮強度

軽量骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の弾性係数と単位容積質量の関係を図-8、弾性係数と圧縮強度の関係を図-9に示す。単位容積質量と弾性係数の関係は水セメント比、骨材の種類にかかわらず、単位容積質量が大きくなるほど弾

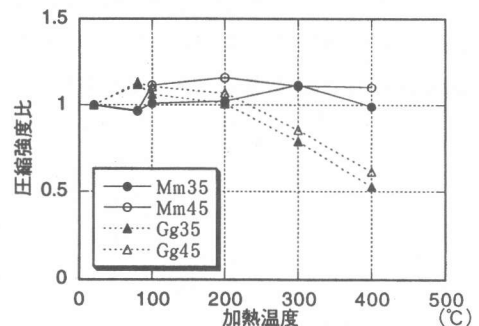


図-5 コンクリートの圧縮強度比

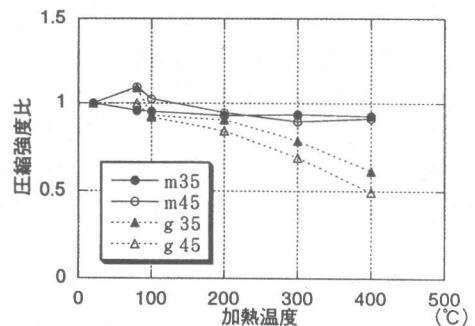


図-6 モルタルの圧縮強度比

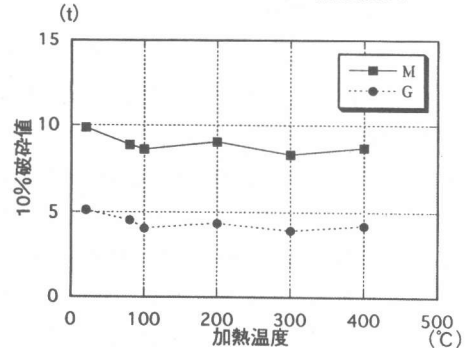


図-7 加熱温度と10%破砕値の関係

性係数も大きくなる。圧縮強度と弾性係数の関係はMm35とMm45に多少ばらつきが見られるが、全体的には圧縮強度が大きくなるほど弾性係数も大きくなる。そこで、弾性係数の推定に圧縮強度と単位容積質量を用いることとする。

4. 2 弾性係数推定式

コンクリートの弾性係数を圧縮強度と単位容積質量から求める式は、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算基準」³⁾に式(1)が示されている。

$$E = 2.1 \times 10^5 \times \left(\frac{\gamma}{2.3} \right)^{1.5} \times \sqrt{\frac{F_c}{200}} \quad (1)$$

E : コンクリートの弾性係数 (kgf/cm²)

γ : コンクリートの単位容積質量 (t/m³)

F_c : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²)

これをもとに軽量骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の弾性係数推定式(2)を提案する。

$$E_c(\theta) = K_c(\theta) \times E_c(20) \times \frac{\gamma_c(\theta)}{\gamma_c(20)} \times \left(\frac{\sigma_c(\theta)}{\sigma_c(20)} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$K_c(\theta) = 1.0 + 10^{-3} \theta - 10^{-5} \theta^2 + 10^{-8} \theta^3$$

θ : 加熱温度 (°C)

$E_c(\theta)$: θ °C 加熱後の弾性係数 (MPa)

$\gamma_c(\theta)$: θ °C 加熱後の単位容積質量 (t/m³)

$\sigma_c(\theta)$: θ °C 加熱後の圧縮強度 (MPa)

$K_c(\theta)$: θ °C 加熱温度補正係数

式(2)で求めた推定値と本実験における実験値の比較を図-10に示す。水セメント比、骨材種類が異なるコンクリートを用いても全体として相関係数が0.95と高い値を得た。

5. パーストの仮説モデルによるコンクリートの弾性係数推定

パーストの含水状態と水和状態を考慮に入れたコンクリートの高温加熱後の弾性係数推定の仮説モデルを構築する。パーストを空隙をもつブロックB1(図-11)と、100%水が入った水隙をもつブロックB2(図-12)の2つに分けて考える。

B1の弾性係数 E_{B1} はPowersの実験式⁴⁾を用い式(3)から算出する。B2については、Hansenによる複合式⁵⁾の粒子相の弾性係数の代わりに水の等価

弾性係数 $E_w(0.25 \times 10^4 \text{MPa})$ をあてはめた式(4)から算出する。パーストの固相(未水和セメント+

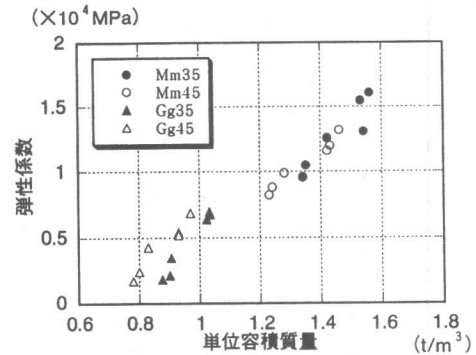


図-8 弾性係数と単位容積質量の関係

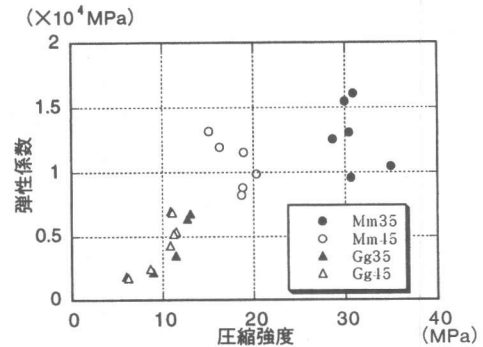


図-9 弾性係数と圧縮強度の関係

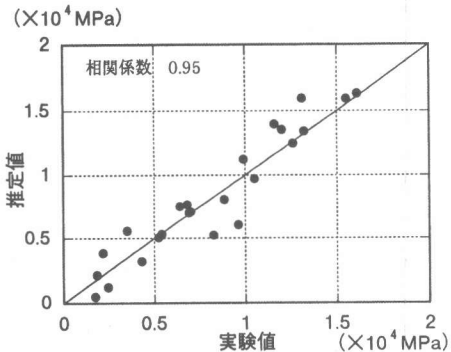


図-10 コンクリートの弾性係数の推定

$$E_{B1} = E_s(1 - V_p)^3 \quad (3)$$

E_s : 固相の弾性係数
 V_p : 空隙率

図-11 空隙をもつブロック(B1)

$$E_{B2} = E_s \cdot \frac{(1 - V_p)E_s + (1 + V_p)E_w}{(1 + V_p)E_s + (1 - V_p)E_w} \quad (4)$$

E_w : 水の等価弾性係数
 V_p : 空(水)隙率

図-12 水隙をもつブロック(B2)

水和セメント+ゲル水)の弾性係数 E_s は一定とする。次に、ペーストを図-13-1のように等しい空(水)隙量をもったブロックの集合とみなす。弾性係数の算出を考えるとB2以外のブロックは全てB1とみなせ、図-13-1は図-13-2と同じものとする。ペースト全体の弾性係数はB1とB2の複合を用いた式(5)となる。

$$E_p = E_{B1} \cdot \frac{(1 - V_{B2})E_{B1} + (1 + V_{B2})E_{B2}}{(1 + V_{B2})E_{B1} + (1 - V_{B2})E_{B2}} \quad (5)$$

図-13-2におけるB2の体積比 V_{B2} はブロックの総数を m 、ブロック1個当りの空(水)隙量を v 、 i ブロックの空隙中の水の容積を ω_i とすると式(6)で表される。 a はパラメータである。

$$V_{B2} = a \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i}{mv} \quad (0 \leq a \leq 1) \quad (6)$$

ペーストと骨材の間にHansenの複合式を用いてモルタル、コンクリートの弾性係数を求めることができる。Helmuthらの実験結果⁶⁾をもとに、本研究では、固相の弾性係数 E_s の値を 3.70×10^4 MPaと決定する。以上のように求めたコンクリートの弾性係数の理論値と本実験における実験値の比較を図-14に示す。弾性係数の増加を本実験結果全般にわたって満足させる a の値が0.5の場合、水セメント比、骨材種類が異なるコンクリートを用いても全体として相関係数0.93と高い値を得た。

6. 圧縮強度推定

6.1 モルタル圧縮強度の推定

コンクリートとモルタルの圧縮強度は、常温においては水和の進行状態に影響を受けることが知られている。よって、水和の進行状態を表すペーストの結合水率を用いて、以下に示す高温加熱後のモルタルの圧縮強度推定式(7)を提案する。⁷⁾

$$\sigma_m(\theta) = \sigma_m(20) \times \left(0.2 + 0.8 \times \frac{H_p(\theta)}{H_p(20)} \right) \quad (7)$$

$\sigma_m(\theta)$: θ ℃加熱後のモルタル圧縮強度(MPa)

$H_p(\theta)$: θ ℃加熱後のペーストの結合水率

式(7)で求めた推定値と本実験における実験値の比較を図-15に示す。水セメント比、骨材種類

が異なるモルタルを用いても全体として相関係数0.92と高い値を得た。

6.2 コンクリート圧縮強度の推定

コンクリート強度において軽量骨材を用いた場合、骨材の強度がモルタルの強度に対して小さくなるので式(8)を適用⁸⁾することとする。

$$\sigma_c = \sigma_a^n \cdot \sigma_m^{1-n} \quad (8)$$

σ_c : コンクリート圧縮強度 (MPa)

σ_a : 粗骨材圧縮強度 (MPa)

σ_m : モルタル圧縮強度 (MPa)

n : 粗骨材の体積比

骨材の10%破砕値は骨材自身の強度と骨材表面のすべり抵抗によって決まってくると考える。これは軽量骨材を用いたコンクリート中の軽量粗

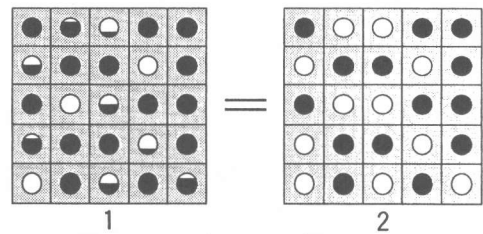


図-13 ペーストの仮想モデル

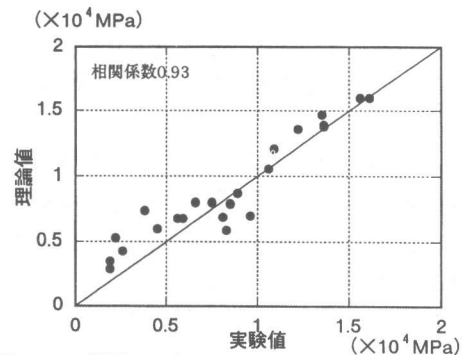


図-14 仮説モデルによるコンクリートの弾性係数の推定

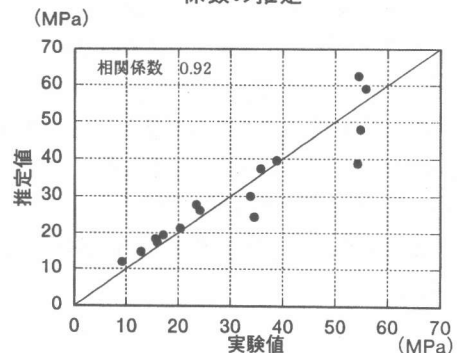


図-15 モルタル圧縮強度の推定

骨材圧縮強度においても同様と考える。よって10%破砕値とコンクリート中の粗骨材圧縮強度には相関があると考え、5種類の軽量骨材についてその関係を図-16に示す。粗骨材圧縮強度は同じ骨材を用いた1ヶ月水中養生のコンクリートとモルタルの圧縮強度から式(8)を用いて算出した。10%破砕値と粗骨材圧縮強度は比例関係にあり、式(9)に示す関係においては相関係数が0.94と高い相関を示した。

$$y=0.84x \quad (9)$$

y : 粗骨材圧縮強度 (MPa)

x : 10%破砕値 (t)

これらをもとに軽量骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の圧縮強度推定式(10)を提案する。

$$\sigma_c(\theta) = (0.84 \times x(\theta))^n \times \left\{ \sigma_m(20) \times \left(0.2 + 0.8 \times \frac{H_p(\theta)}{H_p(20)} \right) \right\}^{1-n} \quad (10)$$

$\sigma_c(\theta)$: θ ℃加熱後のコンクリート圧縮強度 (MPa)

$x(\theta)$: θ ℃加熱後の粗骨材の10%破砕値 (t)

$\sigma_m(20)$: モルタル圧縮強度 (MPa)

$H_p(\theta)$: θ ℃加熱後のペーストの結合水率

n : 粗骨材の体積比

式(10)で求めた推定値と本実験における実験値の比較を図-17に示す。水セメント比、骨材種類が異なるコンクリートを用いても全体として相関係数が0.89と高い値を得た。

7. 結論

膨張頁岩系と廃ガラス系の軽量骨材を用いたコンクリートとモルタルの高温加熱後の力学的性質について次のことが言える。

- (1) 高温加熱後の単位容積質量と弾性係数は、水セメント比、骨材の種類にかかわらず、加熱温度の上昇とともに低下していく。
- (2) 高温加熱後の圧縮強度は、用いる骨材により影響を受け増減する。
- (3) 高温加熱後の弾性係数の推定式を示した。
- (4) 高温加熱後の圧縮強度の推定式を示した。

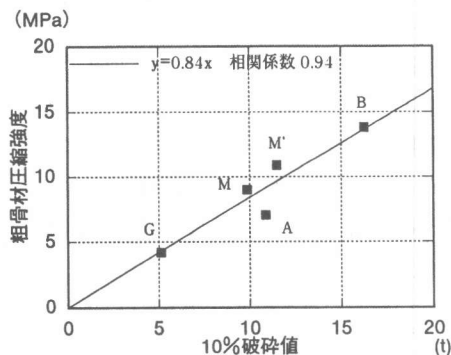


図-16 10%破砕値と粗骨材圧縮強度の関係

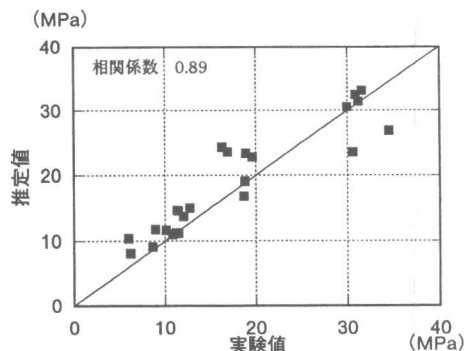


図-17 コンクリートの圧縮強度推定

参考文献

- 1) 大野豊・菊池雅史ほか：超軽量骨材およびそれを用いたコンクリートに関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1015～1018，1997
- 2) 沢田英二・藤木英一ほか：超軽量高強度コンクリートの建築構造物への適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.333～336，1997
- 3) 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，日本建築学会，pp.5～6，1991.4
- 4) Powers, T. C. : The physical structure of portland cement paste, chap. 10, 1964
- 5) Hansen, T. C. : Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity, Proceedings of A. C. I., [62], 2, pp.193～216, 1965
- 6) Helmuth, R. A. et al. : Effect of Porosity, ref.7.19, p.135, 1966
- 7) 広畑光生ほか：高温加熱後の高強度コンクリートの力学的性質，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No. 1, pp.625～630，1997
- 8) 岩崎訓明：コンクリートの特性，共立出版株式会社，p.82，1975