

論文 高ビーライト系セメントを用いた高強度コンクリートの高温加熱後の諸物性に関する研究

廣畠 光生^{*1}・河辺 伸二^{*2}・岡島 達雄^{*3}・中村 雅之^{*4}

要旨:本研究では、高ビーライト系セメントと普通ポルトランドセメントを用いた高温加熱後の高強度コンクリートの物性を比較・検討し、また一年間水中養生と一年間曝露したコンクリートの物性を比較・検討する。その結果、高ビーライト系セメントを用いたコンクリートを水中養生後高温加熱した圧縮強度は100°Cと200°Cで大きくなり、これ以上の加熱温度では低下する。単位容積質量の減少は、水中養生後高温加熱した場合は曝露した場合より大きい。

キーワード:高強度コンクリート、高ビーライト系セメント、高温加熱、物性

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高層化が進み、コンクリートの高強度化が要求されるようになってきた。高強度コンクリートは強度の他に、中性化に対する優れた耐久性等多くの利点を期待できる。しかし、結合材料が多くため水和による発熱が大きくなり、温度ひび割れや強度発現を阻害する可能性がある。このため、水和熱の小さい高ビーライト系セメントを高強度コンクリートに適用する様々な研究 [1, 2] が行われている。

本研究では、高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの火災を想定した高温加熱後の諸物性の把握するために、高ビーライト系セメントを用いた高強度コンクリートを20°Cから600°Cまで加熱した後の物性について、普通ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの物性と比較・検討を行う。また同時に、一年間水中養生したコンクリートの物性と、一年間曝露したコンクリートの物性を比較・検討する。そして、高温加熱後のコンクリートの弾性係数推定式を提案する。

2. 実験方法

2.1 実験内容及び手順

研究の概要を図1に示す。コンクリートの設計基準強度は48MPaとし、セメントは高ビーライト系セメント(HF)、普通ポルトランドセメント(NP)の2種類とする。養生方法は、脱型後1年間水中養生(W)と、脱型後1ヶ月間水中養生後1年間曝露(E)の2種類とする。ここで、供試体は平成6年8月下旬から9月上旬打設し、水中養生は水温20°C±3°Cの水槽内、曝露場所は屋外(名古屋工業大学社会開発工学棟屋上)とした。HF-W, NP-W, HF-E, NP-Eの4種類について加熱冷却後、諸物性の測定を行い、そのデータをもとに比較・検討する。

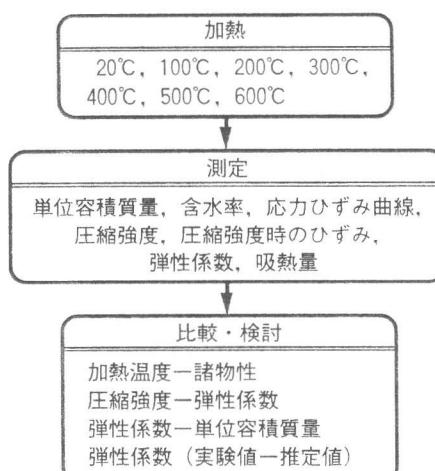


図1 研究の概要

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)

*2 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)

*3 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科, 工博 (正会員)

*4 鹿島建設株

2.2 供試体の製作

(1) 供試体の形状

供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体とする。脱型後、供試体の両端面を研磨機を用いて研磨した。

(2) 使用材料・調合

セメントの組成を表1に、骨材の物理的性質を表2に、コンクリート調合を表3に示す。骨材は木曽川産、混和剤は高性能AE減水剤とする。

2.3 加熱方法

(1) 加熱温度

加熱温度は図1に示す、20°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°Cとする。

(2) 加熱冷却方法

電気マッフル炉を用い、1時間当たり150°C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ながら冷却した。

3. 実験結果と考察

3.1 加熱温度による諸物性の変化

(1) 単位容積質量・含水率

単位容積質量と加熱温度の関係を図2に示す。ここで、単位容積質量変化は、加熱前の単位容積質量、質量を基点として求めた。加熱後の単位容積質量は、200°Cまでは急激に、その後緩やかに直線的に低下する。HF, NPともに水中養生したコンクリートの方が曝露したコンクリートより大きく減少している。この原因としては、図3に示すように、20°C時の含水率が水中養生したコンクリートの方が比較的大きいため、加熱前後の質量変化が大きいことがあげられる。セメントの違いによる差異は見られなかった。

(2) 応力ひずみ曲線

加熱後の応力ひずみ曲線を図4から7に示す。加熱後の応力ひずみ曲線は、養生方法、セメントの種類に関係なく、加熱とともに圧縮強度が徐々に低下し、圧縮強度時のひずみは大きくなる。

(3) 圧縮強度

20°Cの圧縮強度を1とした各温度の圧縮強度の比を圧縮強度比とする。圧縮強度比と加熱温度との関係

表1 セメントの組成

セメントの種類	比重	比表面積	SO ₃ (%)	組成化合物 (%)			
				C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
NP	3.16	3260	2.0	50	25	9	9
HF	3.20	4080	2.7	35	46	3	9

表2 骨材の物理的性質

	最大寸法 (mm)	表乾比重	粗粒率 (%)
細骨材	5	2.60	2.75
粗骨材	25	2.62	6.85

表3 コンクリート調合

セメントの種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	粗骨大材寸の法 (mm)	細骨材率 (%)	単位質量 (kg/m ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
NP	18	3	33	25	45.2	170	515	749	914	5.15
HF	18	3	35	25	46.1	170	486	777	914	4.62

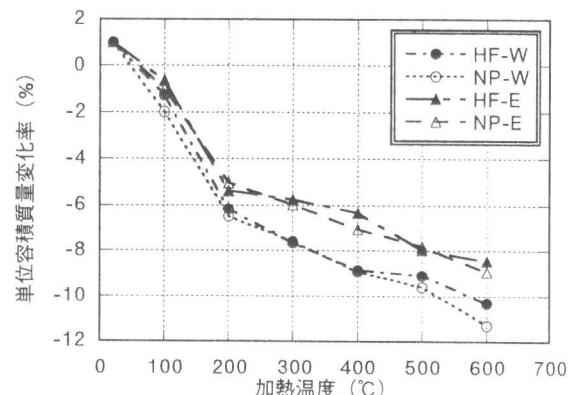


図2 単位容積質量変化

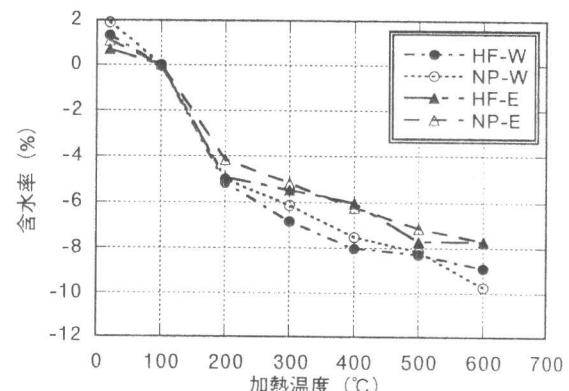


図3 含水率変化

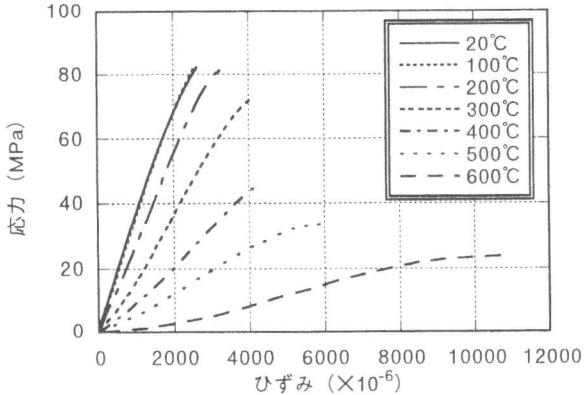


図4 応力ひずみ曲線 (HF-W)

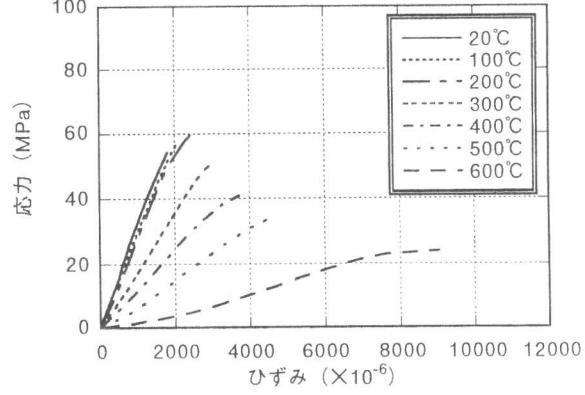


図5 応力ひずみ曲線 (NP-W)

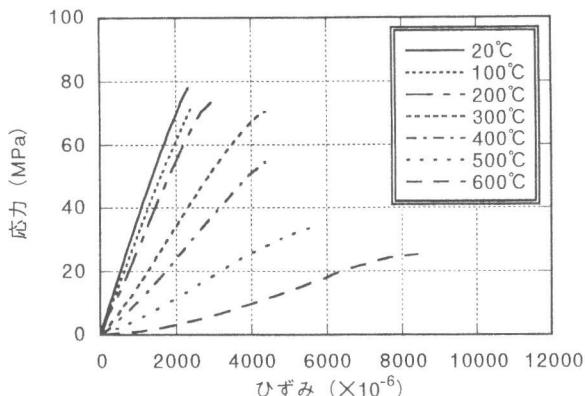


図6 応力ひずみ曲線 (HF-E)

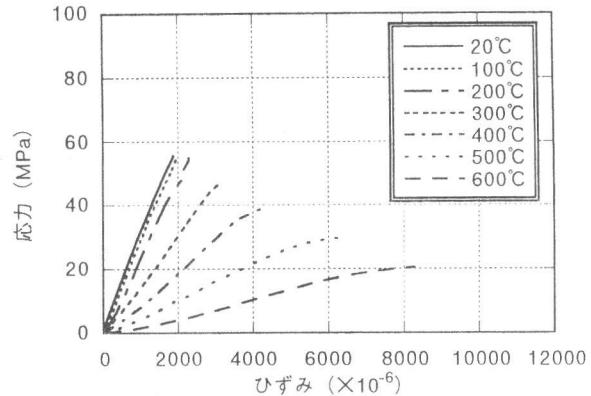


図7 応力ひずみ曲線 (NP-E)

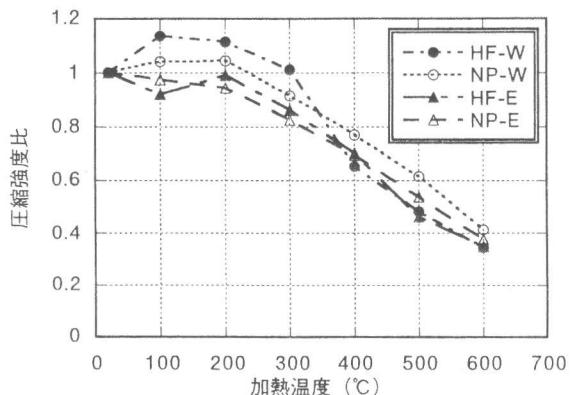


図8 圧縮強度変化

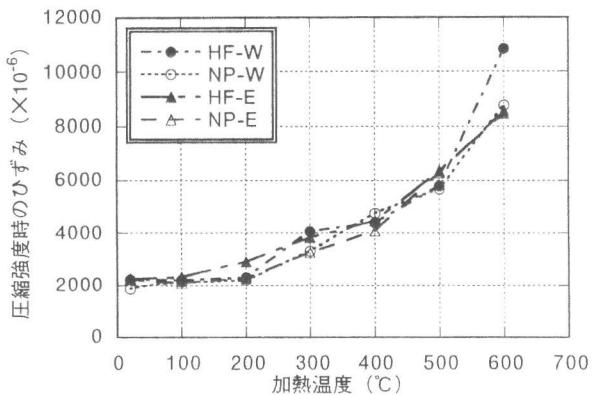


図9 圧縮強度時のひずみ変化

を図8に示す。加熱後の圧縮強度比は、HF, NPともに水中養生したコンクリートは100°C, 200°Cで増加し、その後低下する。曝露したコンクリートは、加熱とともに徐々に低下し、200°C以降大きく直線的に低下する。100°C, 200°Cで増加する理由は、水中養生したコンクリートは図3に示す様に、加熱により含水量が減少するためと考えられる。また、NPに比べHFの強度が大きく増加しているのは、HFの方が水和速度の遅いC₂Sが多く含まれ、1年後の加熱時において水和が促進されたためと考えられる。

(4) 圧縮強度時のひずみ

圧縮強度時のひずみと加熱温度との関係を図9に示す。今回の実験では、静ひずみの圧縮強度時のひずみを求めた。加熱後の圧縮強度時のひずみは、加熱とともに徐々に増加し、高温に加熱するほどその増加も大きくなる。セメント、養生の違いによる差異は見られなかった。

(5) 弹性係数

20°Cの弾性係数を1とした各温度の弾性係数の比を弾性係数比とする。弾性係数比と加熱温度との関係を図10に示す。加熱後の弾性係数は、100°CでHF-WがHF-Eより大きな値を示すが、その後はどちらも同じような傾向を示す。NP-Wは200°C以降大きく低下するのに対し、NP-Eは加熱とともに直線的に低下し、NP-Wを常に大きく下回っている。

(6) セメント水和物の熱分解

セメント水和物の中で、100°Cから120°Cでエトリンガイト($C_3A \cdot C\bar{S} \cdot 32H$)の脱水反応、140°Cから175°Cで二水セッコウ($C\bar{S} \cdot 2H$)の脱水反応、450°Cから500°Cで水酸化カルシウム(CH)の脱水反応が生じる[3]。この脱水反応で生じる吸熱量を示差走査熱量測定(DSC)によって測定する。この吸熱量を用い、以下に示す式(1)により、セメント水和物の生成率・残存率 $C_q(\%)$ を求める。

$$C_q (\%) = \frac{q}{Q_C} \times 100 \quad (1)$$

表4にそれぞれの場合のコンクリート1g当たりの吸熱量 Q_C [3, 4]を示し、DSC測定で得られた吸熱量 q を代入する。

$C\bar{S} \cdot 2H$ の残存率を図11に示す。加熱とともに減少し、200°Cではほとんどすべて分解し、半水セッコウ($C\bar{S} \cdot 1/2H$)を経て無水セッコウ($C\bar{S}$)となる。曝露したコンクリートの方が残存率は大きい。

CHの生成率を図12に示す。CHの生成率は、HF-W, NP-Wについては、加熱とともに大きくなり、200°Cをピークに低下する。HF-E, NP-Eについては、加熱とともに緩やかに増加する。20°Cを含め高温加熱後もNPに比べHFの方が小さいのは、HFは、表1に示すように C_2S が多く含まれているためである。20°Cでは水中養生したもの方が曝露したものより生成が進んでいる。曝露したものは未水和セメントが多く残っているので、高温度まで生成が進んでいる。

3.2 弹性係数推定式

(1) 弹性係数と圧縮強度・単位容積質量

高温加熱後の高強度コンクリートについて弾性係数と圧縮強度・単位容積質量のそれぞれの相関関係

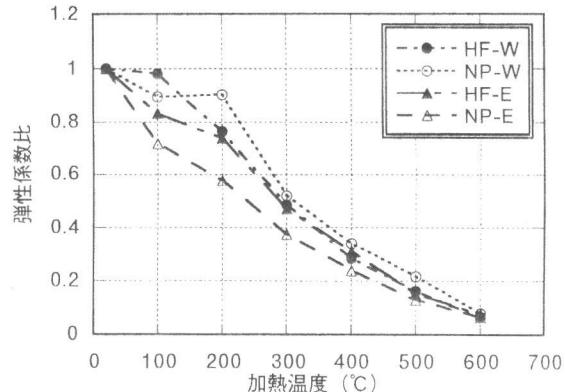


図10 弹性係数変化

表4 コンクリート1g当たりの吸熱量 Q_C

	コンクリート1g当たりの吸熱量(J/g)	
	NP	HF
水酸化カルシウム	85.981	77.923
二水セッコウ	3.413	4.350

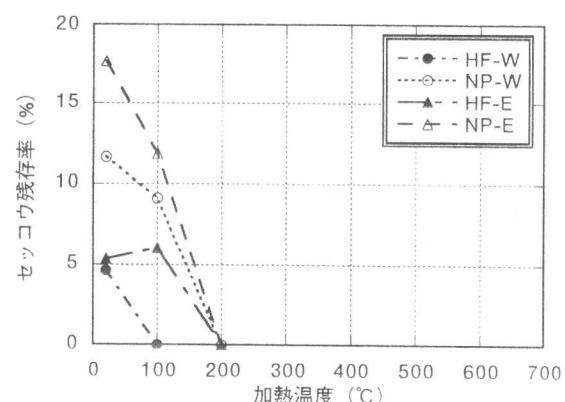


図11 二水セッコウの残存率

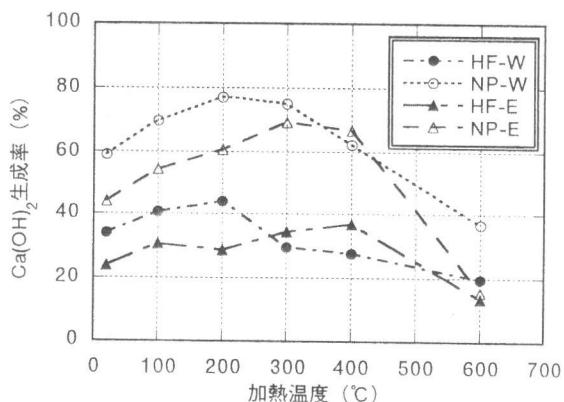


図12 水酸化カルシウム生成率

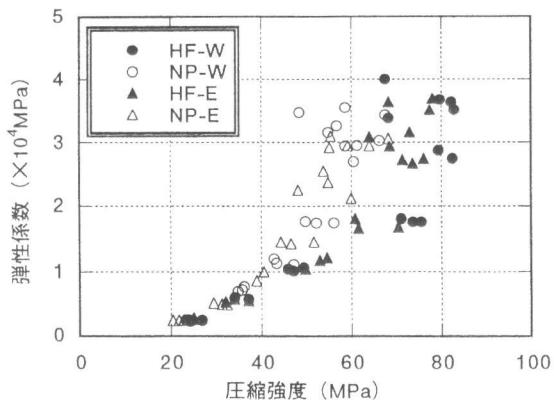


図13 圧縮強度と弾性係数の相関関係

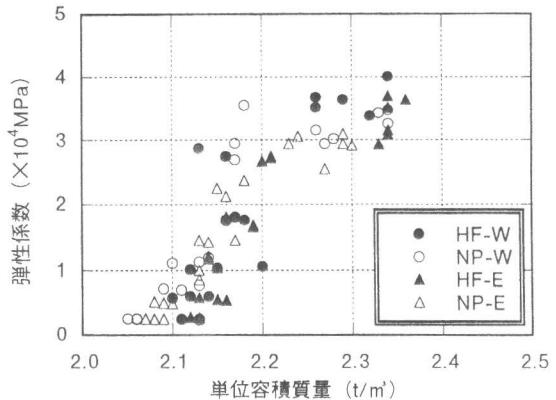


図14 単位容積質量と弾性係数の相関関係

を図13, 14に示す。圧縮強度と弾性係数の関係は、HF, NPともに圧縮強度が小さくなるほど弾性係数も小さくなる。単位容積質量と弾性係数の関係は、HF, NPともに単位容積質量が小さくなるほど弾性係数も小さくなる。そこで、弾性係数推定の要素として圧縮強度と単位容積質量をふまえることにする。

(2) 弾性係数推定式

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」[5] をもとに、式(2)に示す高強度コンクリートにおける「New RC ヤング係数推定式」 [6] が提案されている。

$$E = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60} \right)^{1/3} \quad (2)$$

E : 弾性係数 (MPa)

γ : 単位容積質量 (t/m^3)

σ_B : 圧縮強度 (MPa)

この式(2)をもとに、加熱温度による影響をふまえた高温加熱後のコンクリートの弾性係数推定式(3)を提案する。なお、式(4)に示す $K_c(\theta)$ は、加熱温度補正係数とし、本研究の範囲内において実験値より求めた。

$$E_c(\theta) = K_c(\theta) \times E_c(20) \times \left(\frac{\gamma_c(\theta)}{\gamma_c(20)} \right)^2 \times \left(\frac{\sigma_c(\theta)}{\sigma_c(20)} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$K_c(\theta) = 1.0 + 10^{-3}\theta - 10^{-5}\theta^2 + 10^{-8}\theta^3 \quad (4)$$

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/m^3)

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

$K_c(\theta)$: θ °C 加熱温度補正係数

弾性係数の実験値と推定値の比較を図15, 16に示す。NP-Wにおける200°Cを除くと本研究の範囲内では、ほぼ実験値に近似した値となっている。

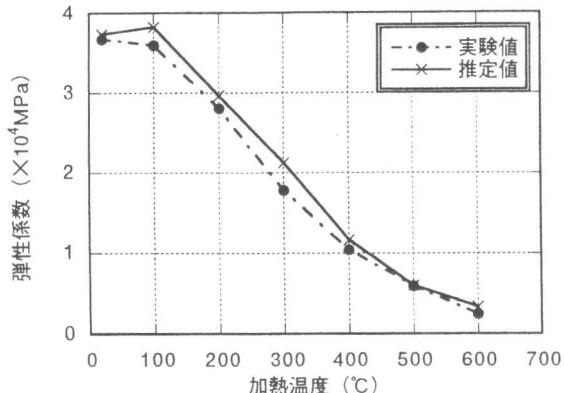


図15 弾性係数の実験値と推定値の比較 (HF-W)

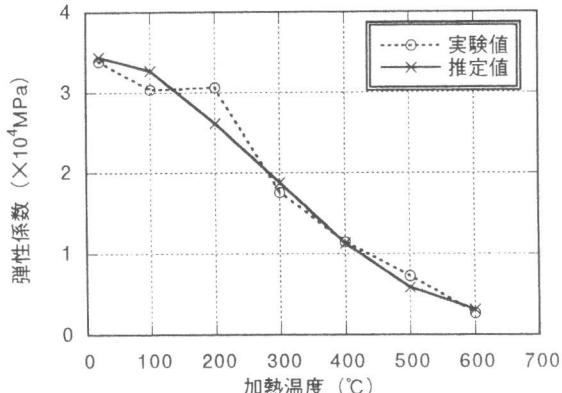


図16 弾性係数の実験値と推定値の比較 (NP-W)

4. 結論

高強度コンクリートの高温加熱後の諸物性について次のことが言える。

- (1) 高ビーライト系セメントを用いた高強度コンクリートは、1年間水中養生後高温加熱した場合の圧縮強度は100°C及び200°Cで増加し、200°C以上の加熱温度では低下する。その増加は、普通ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートより大きい。
水酸化カルシウム生成率において高ビーライト系セメントを用いた高強度コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートより、小さな値を示す。
- (2) 1年間水中養生後高温加熱した高強度コンクリートの単位容積質量の変化は、1年間曝露後高温加熱した高強度コンクリートより大きい。
1年間水中養生したコンクリートを100°C及び200°Cに加熱した後の圧縮強度は、20°Cの圧縮強度より大きくなる。
- (3) 高強度コンクリートにおける「New RC ヤング係数推定式」をもとに、弾性係数を圧縮強度と単位容積質量により式(3)と(4)のように表せた。

謝辞

本研究は、日本スパンクリート協会研究助成金、文部省科学研究費（奨励A07750659）により行われたものである。また、実験にご協力いただいた矢作建設工業（株）、竹本油脂（株）、山建コン（株）に感謝致します。

参考文献

- [1] 内川浩、野村幸治ほか：高ビーライトセメントの水和反応硬化体構造と物理的性状、第45回セメント技術大会講演集, pp.48~53, 1991.4
- [2] 加藤和巳、大澤勉ほか：高ビーライト系ポルトランドセメントを用いたセメント硬化体の骨材界面に関する研究、第48回セメント技術大会講演集, pp.104~109, 1994.4
- [3] 大門正機、山口修ほか：フライアッシュのセッコウ存在下での水和反応、セメント技術年報, pp.65~68, 1982.12
- [4] 荒井康夫：セメントの材料化学、大日本図書, pp.119~160, 1984.3
- [5] 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
- [6] 野口貴文、友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係、日本建築学会構造系論文集, pp.1~10, 1995.8