

論文 ビーライトセメントを用いた高強度コンクリートの強度発現に 及ぼす温度履歴の影響

田中敏嗣*1・丸岡正知*2・竹内 良*3・富田六郎*4

要旨：ビーライトセメントを用いた高強度コンクリートの養生温度および初期高温履歴が強度発現性に及ぼす影響について調べた。その結果ビーライトセメントを用いた場合、①高温養生下でも良好な強度発現性を示すとともに、養生温度が高くなると同一圧縮強度を得るために必要な水セメント比は大きくできること、②履歴した最高温度が高い場合でも強度は低下しないことがわかった。よって、暑中環境の影響を大きく受ける場合や、部材内部が長期間高温にさらされるマッシュパなコンクリート構造物の施工に対して、ビーライトセメントの使用が適していると考えられた。

キーワード：ビーライトセメント、高強度コンクリート、圧縮強度、養生温度、高温履歴、温度履歴、マッシュパ

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化、高層化に伴い設計基準強度 $60\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の高強度コンクリートが施工されるようになってきている。この種の高強度コンクリートは、単位セメント量が多いため、水和発熱による温度上昇が強度発現に影響を及ぼすことが知られている。また、暑中環境で施工される場合は、環境温度の影響を受け、強度発現性が低下することが予想される。

ビーライトセメントは、低発熱性のみならず、高流動性、高強度性が期待されることから、高強度コンクリートへの適用に関する研究が行われている[1][2][3][4]。しかし、上記の観点からの研究は散見されるものの[5]、まだ十分に検討されているとは言えない。

そこで、本研究はビーライトセメントを用いた高強度コンクリートの強度発現性に及ぼす養生温度および高温履歴の影響を普通セメントの場合と比較・検討し、ビーライトセメントの特徴を明らかにした。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

(1)セメント

実験に用いたセメントは、ビーライトセメント（記号LC）および普通ポルトランドセメント（以下普通セメント、記号NC）である。それらの物理化学的性質を表1に示す。

(2)骨材

粗骨材は北九州門司区鹿鳴産碎石（表乾比重 2.82）を、細骨材は北九州小倉産砕砂（表乾比重 2.69）を用いた。

*1 日本セメント(株)中央研究所セメント・コンクリート研究部副主任研究員、工修（正会員）

*2 日本セメント(株)中央研究所コンクリート試験技術センター、工修

*3 日本セメント(株)中央研究所セメント・コンクリート研究部、工修

*4 日本セメント(株)中央研究所セメント・コンクリート研究部主席研究員、工博（正会員）

表1 セメントの物理化学的性質

記号	鉱物組成 (%)				粉末度 (cm^2/g)	圧縮強さ (N/mm^2)				水和熱 (J/g)	
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF		3d	7d	28d	91d	7d	28d
L C	22	58	3	10	3120	5.9	10.0	33.2	55.8	202	271
N C	52	21	8	9	3280	17.7	27.3	40.3	—	327	375

(3) 混和剤

混和剤として、ポリカルボン酸系の高性能A E減水剤を用いた。また、空気量を調整するために消泡剤を用いた。

2. 2 コンクリートの配合

表2にコンクリートの配合を示す。単位水量は $180\text{kg}/\text{m}^3$ と固定とし、単位セメント量を300、400、 $600\text{kg}/\text{m}^3$ の3水準とした。したがって、水セメント比は、60、45および30%となる。スランプは混和剤添加量で調整し、空気量は消泡剤を用い2.0%以下に調整した。

表2 コンクリートの配合

練り上がり温度	セメント	単位セメント量 (kg/m^3)	単位量 (kg/m^3)						フレッシュコンクリートの性状		
			W	C	S	G	Ad1	Ad2	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)
20 $^{\circ}\text{C}$	L C	300	180	300	859	1097	4.5 (1.5%)	0.1%	17.0	0.2	21.0
		400	180	400	821	1049	5.6 (1.4%)	0.1%	18.0	0.3	21.0
		600	180	600	745	953	6.6 (1.1%)	0.1%	17.0	1.1	22.5
	N C	300	180	300	856	1093	3.6 (1.2%)	0.1%	15.5	0.6	21.0
		400	180	400	818	1043	5.2 (1.3%)	0.1%	17.0	0.6	21.0
		600	180	600	740	948	6.0 (1.0%)	0.1%	15.5	1.3	22.0

Ad1: 高性能A E減水剤、Ad2: 消泡剤

2. 3 養生方法および試験項目

(1) 養生温度の影響に関する実験

コンクリートの練り上がり温度は20 $^{\circ}\text{C}$ とした。材齢1日で脱型し、水温を10、20、30および40 $^{\circ}\text{C}$ に設定した養生水槽にて水中養生を行った。材齢1、3、7、28、56および91日において圧縮強度試験を行った。よって、材齢1日のみ20 $^{\circ}\text{C}$ 養生である。また、強度試験終了後の供試体よりモルタルを採取し、水銀圧入法にて細孔径分布を測定した。

(2) 初期高温履歴の影響に関する実験

この実験は、単位セメント量300および600 kg/m^3 の配合について行った。コンクリートの練り上がり温度は20 $^{\circ}\text{C}$ とした。成形後直ちに、供試体を養生槽に入れ、部材内部の温度変化を模擬し図1に示すような温度履歴を与えた。すなわち、昇温速度を2.5 $^{\circ}\text{C}/\text{時}$ 、最高温度を50、65および80 $^{\circ}\text{C}$ で1日間保持し、材齢4日で20 $^{\circ}\text{C}$ に戻した。圧縮強度試験は、材齢7、28、56および91日にて行った。

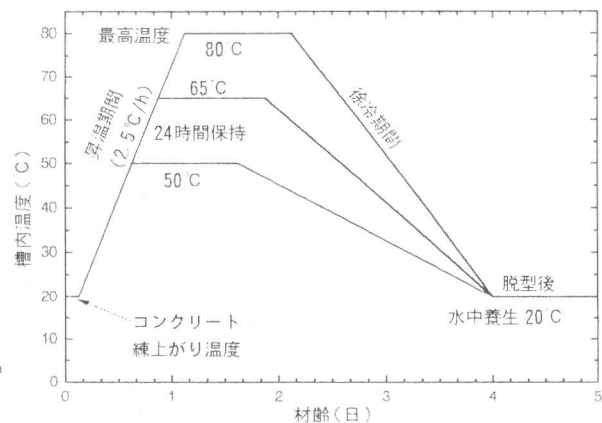


図1 温度履歴パターン

3. 結果および考察

3. 1 養生温度がコンクリートの強度発現に及ぼす影響

図2および図3に養生温度と圧縮強度の関係を示す。普通セメントの場合、同一の単位セメント量において養生温度が高いほど、材齢7日までの圧縮強度は大きくなる傾向が認められた。そ

れ以降の強度の伸びは、単位セメント量が300および400kg/m³の場合、養生温度が高くなるにしたがい小さくなった。また、単位セメント量600kg/m³の場合、養生温度が高くなっても強度低下の傾向は認められず、これまでの実験結果と傾向が一致した[7]。

ビーライトセメントの場合、単位セメント量300および400kg/m³では養生温度30℃までは温度に比例し長期強度が伸びる傾向が認められた。しかし、単位セメント量600kg/m³の場合、養生温度が高いほど圧縮強度が大きくなる傾向があり、普通セメントの場合より強度が高くなった。

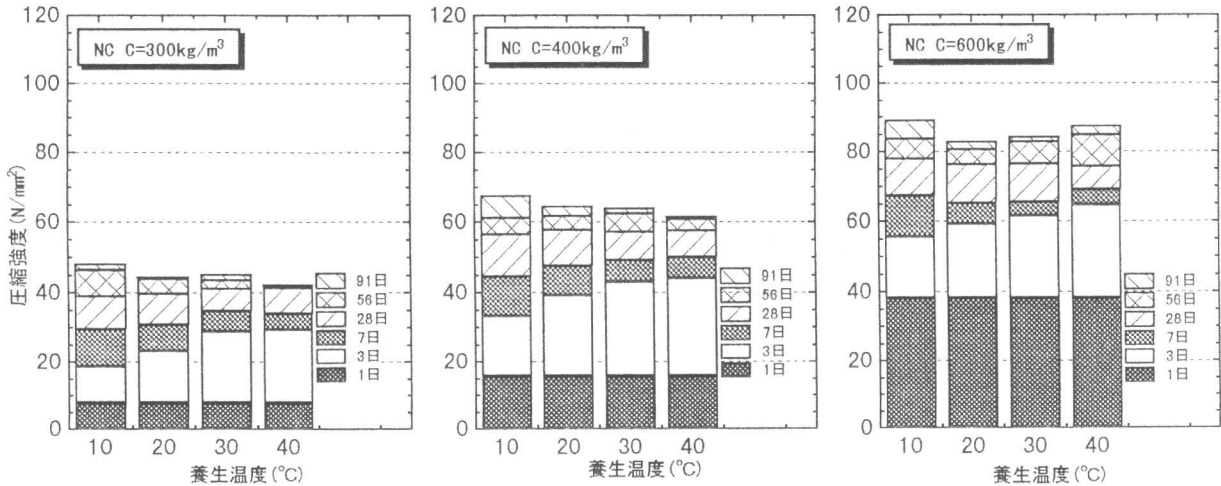


図2 養生温度と圧縮強度の関係(普通セメント)

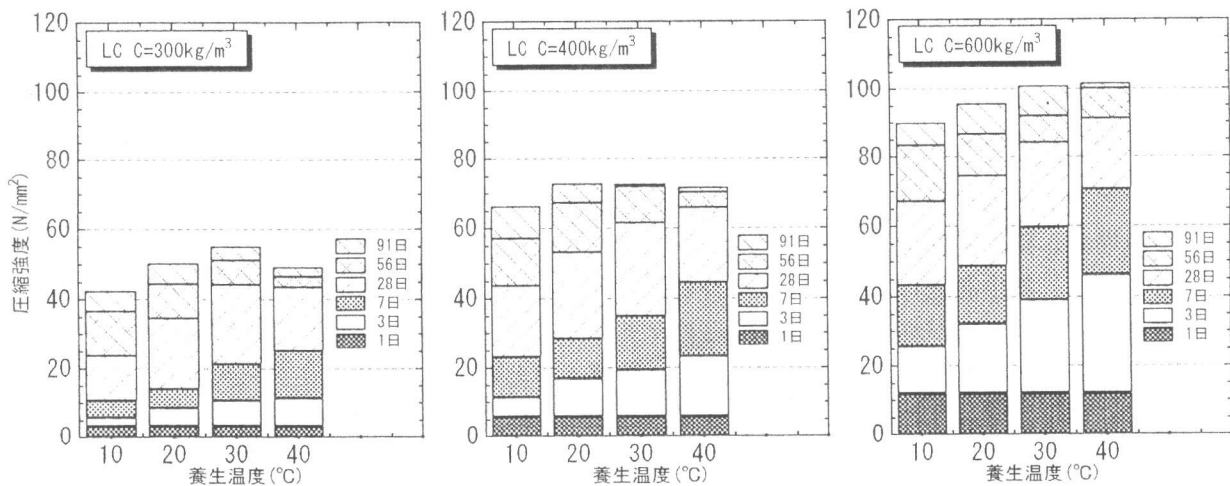


図3 養生温度と圧縮強度の関係(ビーライトセメント)

図4に細孔量と圧縮強度の関係を示す。単位セメント量、材齢および養生温度の区別なく一括して表示した。ビーライトおよび普通セメントともに細孔量の減少に伴う強度増加の割合はほぼ同じである。しかし、普通セメントと比較すると、同一細孔量における圧縮強度はビーライトセメントの方が大きくなっている。したがって、ビーライトセメントを用いた場合に高強度が発現するのは、単にペースト組織の緻密化だけでなく、骨材界面の遷移帯の構造、水和物の相違等が影響していると推定される[6]。

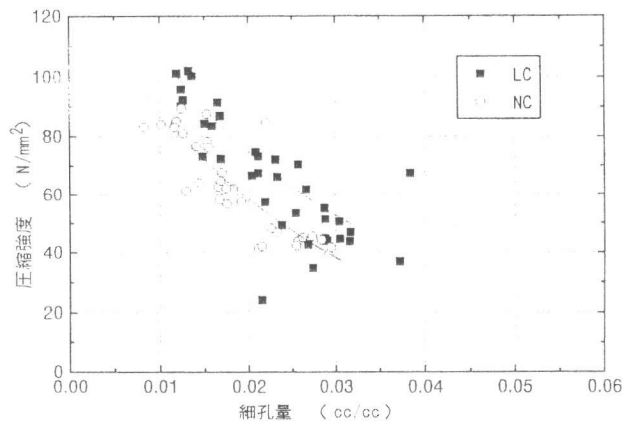


図4 細孔量と圧縮強度

図5に、それぞれビーライトセメントおよび普通セメントの場合について、マチュリティーと圧縮強度の関係を示す。マチュリティー（M）は次式で求めた。なお、温度は水温を用いた。

$$M = \sum (T + 10) \Delta t \quad (1)$$

ここに、Tは温度、tは材齢

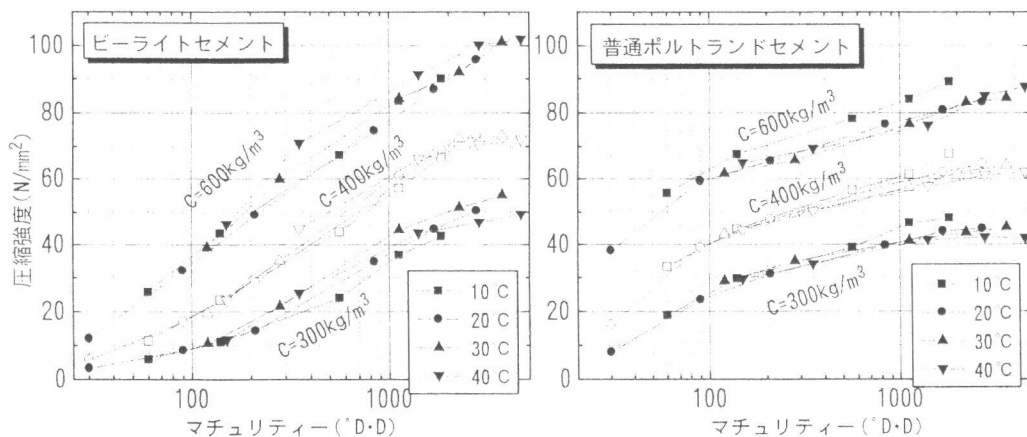


図5 マチュリティーと圧縮強度の関係

普通セメントの場合、いずれの分布も全体的に上に凸の曲線を描き、1000° D・D程度以上で強度の伸びは緩やかとなった。ビーライトセメントの場合、単位セメント量300および400kg/m³の場合、S字を描くように分布したが、600kg/m³では本実験の範囲ではマチュリティーにほぼ比例して強度が増加した。曲線の傾きは、ビーライトセメントの方が大きい。これはビーライトセメントの方が養生温度に敏感であり強度の温度依存性が高いこと、養生効果が持続することを示していると考えられる。このことから長期にわたり高温を受け続けるような部材でビーライトセメントを用いた場合、普通セメントより強度面で有利となると考えられる。また、普通セメントの場合、養生温度が高くなるほど同一のマチュリティーにおいて強度が若干低くなる傾向があるものの、養生温度によらずほぼ一つの線で評価が可能と思われる。一方ビーライトセメントの場合は、養生温度が高くなるほど同一のマチュリティーにおいて強度が高くなる傾向があり、20°Cの関係式で全ての場合を評価することは困難と思われる。

図6に養生温度と圧縮強度が40, 60および80N/mm²となる水セメント比の概略値の関係を材齢28および91日について示す。なお、これらの水セメント比はセメント水比と圧縮強度の関係から求めた。普通セメントの場合、材齢によらず同一の圧縮強度を得るのに必要な水セメント比は、養生温度が高くなった場合、ほぼ一定か、あるいは

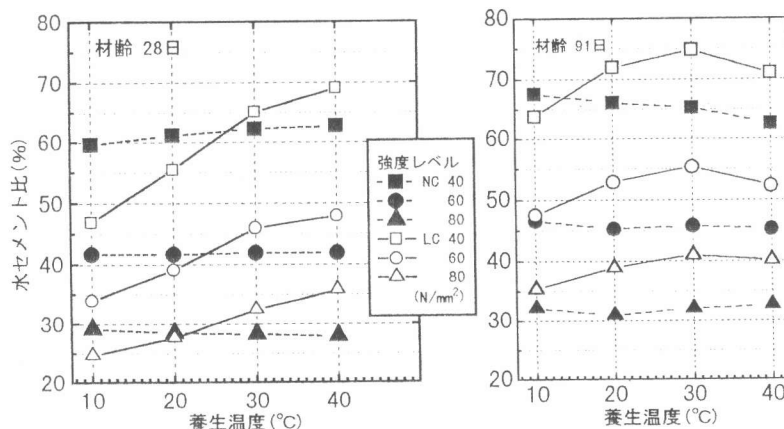


図6 養生温度と同一の強度を得るために必要な水セメント比

やや小さくなる傾向があった。一方、ビーライトセメントの場合、養生温度が高くなるほど、材齢が長いほど、同一の圧縮強度を得るのに必要な水セメント比は大きくなる傾向があり、最大で普通セメントの場合と比較して10%程度水セメント比が大きくなった。したがって、ビーライト

セメントを用いた場合、暑中環境の影響を大きく受ける場合には、このことを考慮に入れて配合設計を行う必要があると考える。

3. 2 初期の高温履歴がコンクリートの強度発現に及ぼす影響

図7に履歴した最高温度と圧縮強度の関係を示す。普通セメントの場合、いずれの単位セメント量においても、高温履歴を受けた場合の強度は、20℃水中養生の場合より低く、また履歴した最高温度が高いほど、低下する傾向があった。この理由として、初期温度上昇により細孔構造が変化すること等が推定される[8]。

ビーライトセメントの場合、材齢28日程度までの圧縮強度は、20℃水中養生の場合と同等かやや高かった。単位セメント量300kg/m³の場合、最高温度が高いほど材齢91日の強度は低下する傾向があるが、単位セメント量600kg/m³の場合は、材齢91日における強度には履歴した最高温度の影響がほとんど現れていない。すなわち、高強度コンクリートのように高温履歴を受ける場合、ビーライトセメントは強度面の問題が小さいと考えられる。

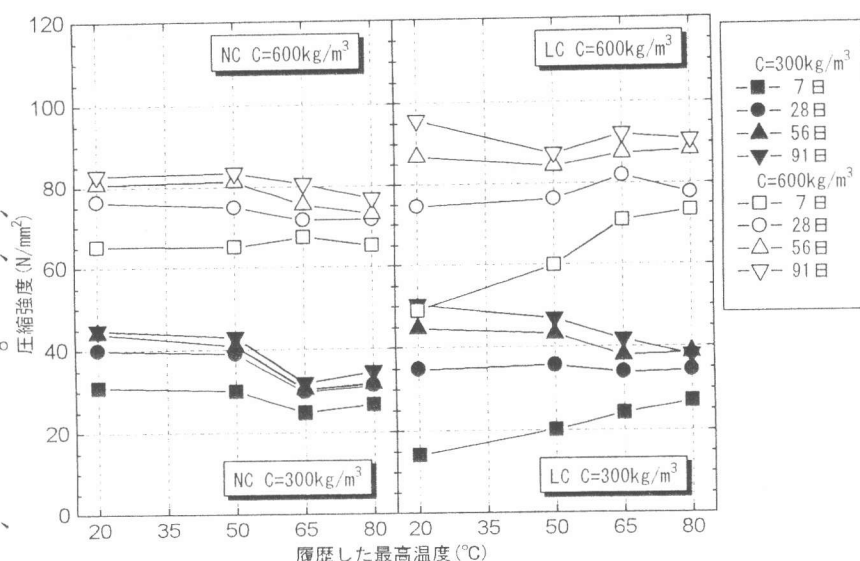


図7 履歴した最高温度と圧縮強度の関係

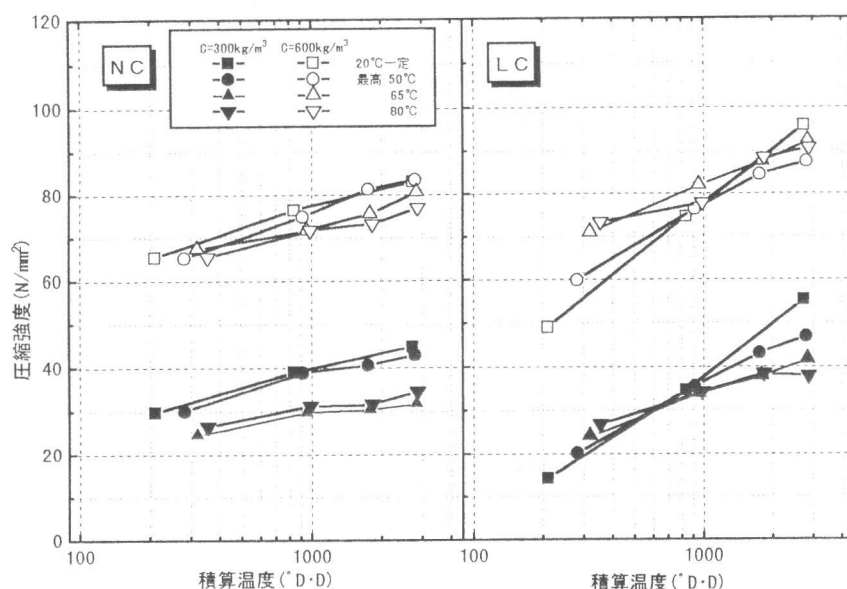


図8 マチュリティーと圧縮強度の関係

図8にマチュリティーと圧縮強度の関係を示す。なお、計算に用いた温度は、供試体温度とした。普通セメントの場合、同一のマチュリティーにおける強度は、20℃一定養生の場合と比べ高温履歴を受けた場合の方が低く、また最高温度が高いほど低下する傾向が認められた。

ビーライトセメントを用いた場合、単位セメント量300kg/m³の場合では、マチュリティーが大きい部分で比較すると、履歴した最高温度が高いほど強度が低下する傾向が認められた。すなわち、単位セメント量300kg/m³程度の配合では、一時的に受けた温度上昇は長期では悪影響すると考えられる。一方、単位セメント量600kg/m³の場合、単位セメント量300kg/m³の場合での問題が大きく生じておらず、高強度コンクリートでは初期高温履歴の影響を受けにくいものと考えられる。なお、今回の実験では普通セメントを用いた場合の温度上昇を模擬した温度を履歴さ

せており、今後ビーライトセメントの温度上昇を想定した場合についても実験し、さらに検討する必要がある。

4. まとめ

ビーライトセメントを用いた高強度コンクリートの強度発現性に及ぼす養生温度および高温履歴の影響を普通セメントの場合と比較検討した。本研究の範囲内で得られた結論を要約すると以下ようになる。

(1) ビーライトセメントは普通セメントと比較して、単位セメント量の多い高強度な配合条件では、高温で養生された場合および初期に高温履歴を受けた場合においても、長期強度発現性が良好であり、普通セメントより長期材齢における圧縮強度は大きくなる。

(2) ビーライトセメントを用いた場合、水セメント比が小さくなるほど、養生温度が高くなるにしたがい、圧縮強度が普通セメントを用いた場合を上回る材齢が早くなる傾向にある。

(3) 同一圧縮強度を得るために必要な水セメント比に及ぼす養生温度の影響は、普通セメントでは養生温度に関わらずほとんど変化しないか、あるいは小さくなる。一方、ビーライトセメントの場合、養生温度が高くなると、同一圧縮強度を得る水セメント比が大きくなり、普通セメントを用いた場合より大きくできる。

(4) マチュリティーと圧縮強度の関係において、直線の傾きは、普通セメントよりビーライトセメントの場合の方が大きい。これはビーライトセメントの方が養生温度に敏感であること、養生効果が持続することを示していると考えられる。

(5) 養生温度および高温履歴の条件の異なる場合の圧縮強度は、普通セメントおよびビーライトセメントを用いた場合いずれにおいても、20℃水中養生で得られたマチュリティーの関係式では適切に評価できない。

(6) 以上より、暑中環境の影響を大きく受けるコンクリート、部材内部が長期間高温にさらされるマッシブなコンクリート構造物の施工において、特に高強度な配合条件でビーライトセメントを使用することにより、良好な強度発現性を有するコンクリートを製造することが可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 田中光男、原田宏、名和豊春；高ビーライト系ポルトランドセメント、コンクリート工学，Vol. 31, No. 31, pp. 18-27, 1993. 9
- [2] 寺田了司、富田六郎、田中敏嗣；ビーライト系ポルトランドセメントを用いたコンクリートの諸特性、第47回セメント技術大会講演集，pp. 146-151, 1993
- [3] 竹村英樹、大塚昭男、堀口浩司、五十嵐達夫；低発熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートについて、第47回セメント技術大会講演集，pp. 726-731, 1993
- [4] 松永篤、大西利勝、大高聡；高ビーライト系セメントを使用した低水セメント比コンクリートの強度発現性、第49回セメント技術大会講演集，pp. 330-335, 1995
- [5] 青木茂、三浦律彦、竹田宣典、十河茂幸；ビーライト高含有セメントを用いた高強度コンクリートの高温履歴下での強度発現性、コンクリート工学年次論文報告集，No. 16, No. 1, pp. 1317-1322, 1994
- [6] 堂園昭人、丸岡正知、神省吾、広瀬哲；ビーライト系セメントを用いたコンクリートの高温環境下における特性、第49回セメント技術大会講演集，pp. 538-543, 1995
- [7] 高範勲、近藤吾朗、森田司郎；水和熱による初期高温履歴を考慮したコンクリートの強度発現則に関する研究、第46回セメント技術大会講演集，pp. 872-877, 1992
- [8] 森本文太郎、魚本健人；初期高温養生したポルトランドセメントの水和に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集，No. 17, No. 1, pp. 651-654, 1995