低発熱形セメントを使用したマスコンクリートの 調合強度の補正に関する考察

STUDY ON CORRECTION OF STRENGTH FOR PROPORTIONING OF MASS CONCRETE USING LOW-HEAT TYPE CEMENT

池内 俊之*, 梶田 佳寛**

Toshiyuki IKEUCHI and Yoshihiro MASUDA

Based on the data of strength obtained from experiment, corrections of proportioning strength of mass concrete using low-heat type cement are studied. In case that the age for quality control of the strength of concrete in structure using low-heat portland cement is 28 days, curing under low temperature makes the strength of concrete in structure be lower than expected strength. And for several combinations of the age for proportioning strength of concrete and the age for quality control of the strength of concrete in structure, influence of difference between the two methods of proportioning design is clarified.

Keywords: low-heat type cement, mass concrete, fly-ash, mix proportion, strength correction value, S value
低発熱形セメント, マスコンクリート, フライアッシュ, 調合, 強度補正值, S 値

1. はじめに

低発熱形セメントは、水和熱を抑制することができるため、部材断面が大きく、水和熱によって内部温度が大きくなるマスコンクリートに適したセメントである。日本建築学会が制定する「建築工事標準仕様書 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事」(以下、JASS5N という) ¹⁾ は、主にマスコンクリートを対象としていることから、水和熱抑制に有効である低発熱形セメントを標準的なセメントとして取り扱っている。

JASS5N では、コンクリートの種類がマスコンクリートの場合、調合設計の定め方は、構造体コンクリートの強度管理用供試体の種類および養生方法に応じて、4つの方法が規定されている。基本的には 1997 年に改定された日本建築学会「建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事」(以下、JASS5 という) ²⁾ の考え方を踏襲しているが、JASS5N の4つの方法では、構造体補正強度および養生温度補正強度のうちいずれかをを用いて調合強度を補正している。

構造体補正強度は、標準養生した管理用供試体の強度と構造体コンクリートの強度の差を唯一の補正值(いわゆる S 値)として算出される。S 値は原則として試験または信頼できる資料によって、その都度定めなくてはならず、工事ごとに、あらかじめ部材を模擬した試験体や簡易断熱養生供試体等を用いた実験によって S 値を求めるケースが多い ³⁾。

一方、養生温度補正強度は、構造体コンクリートの養生温度条件等から決まる補正值および補正係数の組合せによって算出される。算出に必要な補正值および補正係数は、主要な低発熱形セメントについては実験に基づく研究 ^{4)~8)} がなされており、その成果が JASS5N に標準値や目安値として示されている。また、筆者ら ^{9)~11)} は、これまで使用実績が少ない低発熱形セメントとして、普通ポルトランドセメントの 30%をフライアッシュに置換した場合や低熱ポルトランドセメントを使用した場合について補正值および補正係数を提案している。したがって、これらが適用できる場合には、構造体補正強度を用いる場合と異なり、あらかじめ実験等を行わなくても調合強度を補正することができる。

上記2つの補正方法のどちらを採用したとしても、調合強度は本来同じとなるはずであるが、実際の構造体コンクリートでの発現強度から直接的に算出する構造体補正強度と、積算温度の考え方に基づいて補正值および補正係数を定め、それらを組み合わせて求める養生温度補正強度とは必ずしも一致しない。

本検討は、これまでに得られた実験データを検討資料とし、構造体補正強度および養生温度補正強度を同一データから算出し、それらを比較することにより低発熱形セメントを使用したマスコンクリートの調合強度の補正方法について考察するものである。なお、養生温度補正強度を求めるために必要な補正值および補正係数は、既に規定もしくは提案されている値を用いる。

* 関西電力土木建築室 工修

** 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

Office of Civil Eng. and Architecture, The Kansai Electric Power Co., Inc., M. Eng. Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., Faculty of Eng., Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

2. 検討資料

低発熱形セメントを使用したマスコンクリートの調合強度について検討するための資料として、既往文献^{4)~10)}の実験データを用いる。対象としたセメントは、普通ポルトランドセメントの20%をフライアッシュに置換したもの(FB)、同じく30%を置換したもの(FC)、中庸熱ポルトランドセメント(M)、中庸熱ポルトランドセメントの18%をフライアッシュに置換したもの(MF)および低熱ポルトランドセメント(L)の5種類である。本検討に用いた実験データの概要を表1に示す。

表1 実験データの概要

実験シリーズ	I	II	III
セメント	FB,M,MF	FB,M,MF	FB,FC,L
水セメント比 ^{*1}	55%	40%,50%	40%,50%
試験体製作季節	—	秋期,冬期,春期,夏期	冬期,夏期
養生方法	標準養生,模擬部材(コア)		
試験材齢	28日,56日(標準養生のみ),91日		
コア強度データ数 ^{*2}	21	36	70

※1:フライアッシュを混入する場合は全てをセメントとみなす

※2:材齢28日、91日においてそれぞれ表中記載数ずつ

3. 検討方法

1991年版JASS5Nまでは、調合強度を定める材齢 m [日]と構造体コンクリートの強度管理材齢 n [日]は一致させていたが、2001年版JASS5Nでは、この両者を異なる材齢($m \leq n$)とすることを認めている。本検討では、検討資料とした実験データから m と n を組み合わせ、それぞれについて設計基準強度(厳密には耐久設計基準強度と設計基準強度の大きいほうの値であるが、本検討では設計基準強度について記載する)に対する補正値を算出する。

3.1 構造体補正強度による補正

JASS5Nにおいて構造体補正強度 mF'_n [N/mm²]は、(1)式のように規定されている。

$$mF'_n = F_c + mS_n \quad (1)$$

ここで F_c : 設計基準強度[N/mm²]、 mS_n : 材齢 m 日での標準養生供試体の強度と材齢 n 日での構造体コンクリートの強度との差による強度の補正値[N/mm²] (JASS5Nでは、この補正値を S としているが、本論文では m と n を明確にするためJASS5「19節 高強度コンクリート」での定義を参考に mS_n とする。)

ここでは、実験で得られた強度データより構造体補正強度の考え方に基づく補正値 mS_n [N/mm²]を(2)式によって算出する。

$$mS_n = mF_{std} - nF_{core} \quad (2)$$

ここで、 mF_{std} : 実験により得られた材齢 m 日での標準養生供試体の強度[N/mm²]、 nF_{core} : 実験により得られた材齢 n 日でのコア供試体の強度[N/mm²]

3.2 養生温度補正強度による補正

JASS5Nにおいて養生温度補正強度 mF'_n [N/mm²]は、(3)式のように規定されている。

$$mF'_n = \alpha_T (F_q + mTM_n) \quad (3)$$

ここで α_T : 予想最高温度による強度の補正係数、 F_q : 品質基準強度[N/mm²]、 mTM_n : 予想平均養生温度による強度の補正値[N/mm²]

F_q は F_c に、構造体コンクリートの強度と、構造体と類似の温度履歴

を与えた管理用供試体の強度との差を考慮した割増し ΔF [N/mm²]を加えたものである、(3)式は(4)式になる。

$$mF'_n = \alpha_T (F_c + \Delta F + mTM_n) \quad (4)$$

ここでは、まず、実験により得られた材齢 m 日での標準養生供試体の強度を養生温度補正強度とし、後述する補正係数および補正値を用いて(4)式を変形した(5)式から材齢 n 日において期待される構造体強度 nF_{calc} を算出する。そして、求めた nF_{calc} と材齢 m 日での標準養生供試体の強度 mF_{std} との差として養生温度補正強度の考え方に基づく補正値 mS'_n を(6)式によって算出する。

$$nF_{calc} = (mF_{std} / \alpha_T) - (\Delta F + mTM_n) \quad (5)$$

$$mS'_n = mF_{std} - nF_{calc} \\ = mF_{std} (1 - 1/\alpha_T) + (\Delta F + mTM_n) \quad (6)$$

(1) 予想最高温度による強度の補正係数 α_T

補正係数 α_T は、セメント種類ごとに、構造体コンクリートの強度管理材齢 n およびコンクリートの打込みから材齢 n 日までの期間中において予想される部材断面内の最高温度によって決まる。FB、MおよびMFについてはJASS5N解説に補正係数 α_T の目安が示されており、FCおよびLについては、筆者ら^{10),11)}が提案している。ここでは、「予想最高温度」を「コア供試体採取位置での最高温度」と読み替え、(7)式および表2により補正係数 α_T を算出する。

$$\alpha_T = 1 + a(T_{max} - T_0) \quad (7)$$

ここで a : セメント種類および構造体コンクリートの強度管理材齢 n によって決まる定数(表2)、 T_{max} : コア供試体採取位置での最高温度[°C]、 T_0 : α_T による補正が必要となる最高温度の下限値[°C](表2)

表2 補正係数 α_T に用いる定数 a および T_0

セメント 種類	定数 a		T_0 (°C)
	$n=28$	$n=91$	
FB	0	0.0094	60
FC	0	0.0066	40
M	0	0.0094	60
MF	0	0.0094	60
L	0	0	—

(2) 構造体強度と管理用供試体強度との差を考慮した割増し ΔF

JASS5Nでは設計基準強度が36N/mm²以下で、特記がない場合の割増し ΔF は一律3N/mm²と規定されている。これはJASS5の規定を踏襲しているが、ここでは既往研究^{7),10),11)}に基づく平均的な割増しとしてセメント種類ごとに(8-1)~(8-5)式から算出する。

$$FB: \Delta F = 0.087 \times nF_{core} \quad (8-1)$$

$$FC: \Delta F = 0.0023 \times nF_{core}^2 + 0.0466 \times nF_{core} \quad (8-2)$$

$$M: \Delta F = 0.097 \times nF_{core} \quad (8-3)$$

$$MF: \Delta F = 0.093 \times nF_{core} \quad (8-4)$$

$$L: \Delta F = 0.003 \times nF_{core}^2 + 0.0077 \times nF_{core} \quad (8-5)$$

(3) 予想平均養生温度による強度の補正値 mTM_n

補正値 mTM_n は、セメント種類ごとに、調合強度を定める材齢 m と構造体コンクリートの強度管理材齢 n およびコンクリートの打込みから材齢 n 日までの期間の予想平均養生温度によって決まる。FB、MおよびMFについては、JASS5に標準値が規定されており、FCおよびLについては筆者ら^{10),11)}が提案している。表3に本検討に用

いる mTM_n とそれに対応する予想平均養生温度の範囲を示す。ここでは標準養生供試体の強度試験材齢を m 、コア供試体の強度試験材齢を n とし、「予想平均養生温度」を「コア供試体採取位置での打込みから材齢 n 日までの期間の平均養生温度」と読み替え、表 3 に基づき mTM_n を求める。なお、本検討では、平均養生温度が JASS5N 標準値および参考文献^{10,11)}提案値の $6N/mm^2$ の温度範囲を下回る場合は、 mTM_n を $9N/mm^2$ とする。

表 3 予想平均養生温度による強度の補正值 mTM_n

セメント種類	m (日)	n (日)	予想平均養生温度の範囲(°C)		
FB	28	28	16 以上	9 ~ 16	4 ~ 9
		91	2 以上	—	—
	56	91	7 以上	3 ~ 7	2 ~ 3
FC	28	91	17 以上	10 ~ 17	6 ~ 10
		28	16 以上	10 ~ 16	6 ~ 10
	56	91	2 以上	—	—
M	28	91	6 以上	2 ~ 6	—
		28	16 以上	10 ~ 16	6 ~ 10
	56	91	17 以上	13 ~ 17	9 ~ 13
MF	28	91	2 以上	—	—
		28	18 以上	14 ~ 18	10 ~ 14
	56	91	8 以上	5 ~ 8	3 ~ 5
L	28	91	18 以上	14 ~ 18	10 ~ 14
		28	18 以上	15 ~ 18	12 ~ 15
	56	91	7 以上	5 ~ 7	4 ~ 5
$mTM_n (N/mm^2)$			0	3	6

4. 検討結果および考察

S 値には種々の要因による補正が含まれているため、既往研究^{3),12)}において S 値は、平均養生温度、最高温度、コア供試体の強度等をパラメータとして評価されている。本検討で対象としているのは低発熱形セメントであり、かつ、水セメント比が 40~55% であることから、コア供試体採取位置での最高温度が、一般に長期材齢での強度増進への影響が顕著になると言われる 60°C を上回るデータが全体の約 15% に過ぎない。一方、平均養生温度が 20°C を下回るデータは全体の約 60% を占めている。

以上より、本検討では各種の要因のうち構造体コンクリートの強度発現に与える影響が最も大きいと考えられる平均養生温度を主なパラメータとして検討する。

4.1 水セメント比の違いによる比較

図 1 に、打込みから材齢 91 日までの期間の平均養生温度と $_{56}S_{91}$ の関係をセメント種類ごとに示す。M および MF において、水セメント比が 40% の場合に $_{56}S_{91}$ が若干大きくなる傾向が認められるが、水セメント比ごとに区分できるほど明確な差異ではない。その他のセメント種類については、水セメント比ごとの差異は認められない。なお、これらの傾向は他の m と n の組合せについてもほぼ同様である。

上述のように、対象としている水セメント比の範囲において、補正值 $_{m}S_n$ を水セメント比ごとに区分することが困難であること、また、JASS5N では、養生温度補正強度による調合強度の補正に用いる補正值等を水セメント比によって区分していないことを踏まえ、

これ以降の検討では水セメント比によって区分しないものとする。

4.2 構造体補正強度による補正

図 2 に、打込みから材齢 n 日までの期間の平均養生温度と補正值 $_{m}S_n$ の関係を m と n の組合せごとに示す。

$m=28, n=28$ の場合、L 以外のセメントでは平均養生温度に関係なく補正值は概ね $0 \sim 10N/mm^2$ の範囲に分布しているが、L では平均養生温度が概ね 10°C を下回る範囲において、 $_{28}S_{28}$ が大きくなっている。これは、低熱ポルトランドセメントを使用した構造体コンクリートを低温で養生した場合に初期材齢での強度が同一積算温度での標準養生供試体の強度より低くなる現象に起因していると考えられる。この現象はビーライトの水和の温度依存性による¹³⁾ものと推測され、既往実験¹⁴⁾のデータでも確認されている。なお、筆者ら¹¹⁾は、この現象が確認できる積算温度の範囲を概ね $1,000^\circ\text{C}\cdot\text{D}$ 以下としている。

$n=91$ の場合、 $_{28}S_{91}$ では $_{28}S_{28}$ で見られるような、平均養生温度が 10°C 付近で L の補正值のみが大きくなる傾向は見られない。これは材齢 n が大きくなったことによって積算温度が $1,000^\circ\text{C}\cdot\text{D}$ を超え

図 1 セメント種類ごとの平均養生温度と補正值 $_{56}S_{91}$ の関係

たためと考えられる。また、 m が大きくなるにつれて全体的に補正値が大きくなる傾向にある。その傾向は、特に L で顕著であり、 $_{91}S_{91}$ が 30N/mm^2 程度になっているものもある。これは標準養生供試体の強度が材齢 28 日以降も長期にわたって増進していることを示しており、特に低熱ポルトランドセメントを使用した場合は、積算温度が $1,000^\circ\text{C}\cdot\text{D}$ 以上の範囲での強度増進がその他のセメント以上

に大きい¹⁰⁾ためであると考えられる。

4.3 養生温度補正強度による補正

図 3 に、打込みから材齢 n 日までの期間の平均養生温度と補正値 $_{m}S'_{n}$ の関係を m と n の組合せごとに示す。

$m=28, n=28$ の場合、平均養生温度が 10°C 付近では、 L 以外のセメントの $_{28}S'_{28}$ は、図 2 の $_{28}S_{28}$ とほぼ同等であるが、図 2 で見られ

図 2 平均養生温度と補正値 $_{m}S_n$ の関係

図 3 平均養生温度と補正値 $_{m}S'_n$ の関係

図4 材齢 n 日でのコア供試体の強度 nF_{core} と材齢 n 日において期待される構造体強度 nF_{calc} の関係

たような L の補正值のみが他のセメントより大きくなる傾向は現れていない。この理由としては、既往研究^{8),10),11)}では、従来の積算温度の考え方に基づき補正值 mTM_n を求めているため、養生温度が低い場合に積算温度が小さい範囲で標準養生供試体の強度より低くなる低熱ポルトランドセメントの特性が $_{28}TM_{28}$ に反映できていない¹¹⁾ことが挙げられる。

$n=91$ の場合、 m が大きくなっても、全体的には図2で見られたほど補正值が大きくはならないが、平均養生温度が $10\sim15^{\circ}\text{C}$ の範囲において、特に L の場合に、 m が大きくなるにつれて補正值が大きくなる傾向は図2と同様である。また、平均養生温度が 25°C 以上の範囲で FB および FC の補正值のばらつきが大きくなっている。これは平均養生温度が高い場合、最高温度も高くなることが多いため、本検討で対象としているセメント種類の中で比較的水和熱が大きい FB と、最高温度 40°C 以上で補正を行っている FC については、補正係数 α_T による補正が影響しているものと考えられる。

4.4 養生温度補正強度の適用性

図4に、材齢 n 日でのコア供試体の強度 nF_{core} と、このコア供試体と同時に製作し、材齢 m 日まで標準養生した供試体の強度から(5)

式によって計算した材齢 n 日において期待される構造体強度 nF_{calc} との関係を示す。

$m=28, n=28$ の場合、 $_{28}F_{core}$ と $_{28}F_{calc}$ はほぼ同等であるが、 L では $_{28}F_{core}$ が $_{28}F_{calc}$ を大きく下回るデータがある。これは図2および図3において平均養生温度が 10°C を下回るデータである。一方、 $n=91$ の場合、セメント種類による差異は明確に認められず、ばらつきは大きいものの、平均的に $m=28$ では $_{91}F_{core}$ が $_{91}F_{calc}$ より大きくなり、 $m=56$ では両者はほぼ同等、 $m=91$ では $_{91}F_{core}$ が $_{91}F_{calc}$ をより小さくなる傾向が認められる。

次に、3.1に基づき算出した補正值 mS_n と3.2に基づき算出した補正值 mS'_n の関係を図5に示す。 $m=28, n=28$ の場合、 $_{28}S'_{28}$ と $_{28}S_{28}$ はほぼ同等であるが、 L では $_{28}S'_{28}$ が $_{28}S_{28}$ を大きく下回るデータがある。

$n=91$ の場合、 $m=28$ では構造体コンクリートの強度が標準養生供試体の強度を上回っているため $_{28}S_{91}$ のほとんどが負の値であるが、 m が大きくなるとともに標準養生供試体の強度が増進するため mS_{91} は大きくなり、 $m=56$ および $m=91$ では正の値となっている。一方、 mS'_{91} は、算出の基となっている補正值および補正係数が全て正の値

図5 補正值 mS'_n と補正值 mS'_n の関係

であることから、 $m=28$ においても全て正の値となり、 m が大きくなるとともにその値は大きくなる傾向にあるが、 m の増加に対する mS'_{91} の増加の程度は、 mS_{91} のそれに比べて小さい。その結果、 $m=28$ では $28S'_{91}$ が $28S_{91}$ より大きく、 $m=56$ では $56S'_{91}$ と $56S_{91}$ はほぼ同等、 $m=91$ では $91S'_{91}$ が $91S_{91}$ より小さくなっている。

以上より、調合強度を定める材齢 m および構造体コンクリートの強度管理材齢 n をともに 28 日とする場合、養生温度補正強度による補正は、構造体補正強度による補正とほぼ同等の補正を行うことができるが、低熱ポルトランドセメントを使用する場合には、養生温度が低いと構造体コンクリートの強度が調合において期待される強度を下回ることがあるので、コンクリートの打込み時期や温度管理には留意する必要がある。また、構造体コンクリートの強度管理材齢 n を 91 日にする場合、調合強度を定める材齢 m を 28 日として養生温度補正強度によって補正すると、実際には必要のない補正を行うことになる。これは、調合強度を定める材齢 m を延長することで解消されるが、材齢 m の延長に伴い、実際に必要な補正値が増加する割合に対して、養生温度補正強度によって算出する補正値が増加する割合が小さいため、調合強度を定める材齢を 91 日まで延長すると、養生温度補正強度によって算出する補正値が実際に必要な補正値を下回り、調合強度の補正としては危険側に過小評価してしまう可能性が高くなる。

これらより勘案すると、本検討で対象とした低発熱形セメントを使用する場合、構造体コンクリートの強度管理材齢 n は、長期材齢での強度増進が期待できるため、91 日まで延長することが望ましい。また、構造体コンクリートの強度管理材齢 n を 91 日とし、養生温度補正強度によって調合強度を補正する場合、調合強度を定める材齢 m を 56 日とすると、構造体補正強度による補正とほぼ同等の補正ができると言える。

5. 結論

本検討では、実験資料に基づき低発熱形セメントを使用したマスコンクリートの調合強度の補正について検討した結果、以下のこと

が明らかになった。

- (1) いずれのセメント種類においても、水セメント比が 40~55% の範囲では、水セメント比ごとに補正値を区分することは困難である。
- (2) 低熱ポルトランドセメントを使用し、構造体コンクリートの強度管理材齢を 28 日として養生温度補正強度によって調合強度を補正する場合、養生温度が低いと構造体コンクリートの強度が調合において期待される強度を下回る可能性がある。
- (3) 構造体コンクリートの強度管理材齢を 91 日として養生温度補正強度によって調合強度を補正する場合、調合強度を定める材齢を 28 日とすると、実際には必要のない補正をすることになる。一方、調合強度を定める材齢を 91 日まで延長すると、実際に必要な補正値を危険側に過小評価してしまう可能性が高い。
- (4) 養生温度補正強度によって調合強度を補正する場合、調合強度を定める材齢を 56 日、構造体コンクリートの強度管理材齢を 91 日とすると、構造体補正強度による補正とほぼ同等の補正ができる。

なお、本検討は既往研究の実験データから平均的な補正値を算出することにより、調合強度の補正方法とその傾向について考察したものである。実際に調合強度を定める場合には、補正係数および補正値の具体的な値を設定する段階や調合強度から水セメント比を設定する段階において、適度な安全余裕を見込む必要がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事,2001.5
- 2) 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事,2003.2
- 3) 例えば、立松和彦ほか3名:簡易断熱養生による高強度コンクリートの構造体強度の品質管理および S 値,日本建築学会技術報告集, No15, pp.11-14,2002.6
- 4) 仕入豊和ほか2名:マッシュパなコンクリートの予想平均養生温度および強度発現に関する研究,セメント・コンクリート, No.499, pp.35-48,1988.9
- 5) 仕入豊和ほか6名:マッシュパなコンクリートの予想平均養生温度および強度発現に関する研究 第1報~第4報,日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.211-218,1987.10

- 6) 仕入豊和ほか 5 名:高強度マスコンクリートの構造体の予想平均養生温度および強度発現に関する研究 第 1 報～第 4 報,日本建築学会大会学術講演梗概集(九州),pp.525-532,1989.10
- 7) 榊田佳寛ほか 3 名:低発熱形セメントを用いたマスコンクリートの強度発現性と調合強度の補正,日本建築学会構造系論文集,No.533,pp.7-12,2000.7
- 8) 榊田佳寛ほか 3 名:低発熱形セメントを用いたコンクリートの平均養生温度による強度補正值,日本建築学会構造系論文集,No.535,pp.7-12,2000.9
- 9) 嵩英雄ほか 4 名:低発熱形セメントを用いた構造体コンクリートの強度発現性に関する研究 その 1～その 3,日本建築学会大会学術講演梗概集(東北),pp.801-806,2000.9
- 10) 池内俊之ほか 3 名:フライアッシュを使用したマスコンクリートの強度発現性と調合強度の補正,日本建築学会構造系論文集,No.560,pp.9-16,2002.10
- 11) 池内俊之ほか 3 名:低熱ポルトランドセメントを使用したマスコンクリートの強度発現性と調合強度の補正,日本建築学会構造系論文集,No.566,pp.21-27,2003.4
- 12) 例えば、西村進ほか 2 名:高強度コンクリートへの低熱ポルトランドセメントの適応性について(その 3.構造体コンクリートの強度発現性状),日本建築学会大会学術講演梗概集(東北),pp.917-918,2000.9
- 13) 浅賀喜与志,大門正機,小西和夫,吉田孝三郎:低熱セメントの各構成鉱物の水和反応に及ぼす養生温度の影響,セメント・コンクリート論文集,No.45,pp.58-63,1991
- 14) セメント協会:高ビーライト系セメントを用いた高性能コンクリートの性能評価に関する研究,建築用高性能コンクリート専門委員会報告,pp.26-76,1997.3

(2003年 7 月10日原稿受理, 2004年 3 月11日採用決定)