

論文 マスコンクリートの拘束応力に及ぼすセメント種類の影響

谷田貝 敦^{*1}・宮澤 伸吾^{*2}・廣島 明男^{*3}・大友 健^{*4}

要旨：普通セメント，中庸熱セメント，高炉セメント B 種および低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートについて，マスコンクリート構造物を想定した温度履歴条件下で強度試験，ヤング係数試験および一軸拘束試験を実施した。応力発生材齢は，凝結の始発と終結の間にあること，拘束応力から逆算した見かけの有効ヤング係数は，ヤング係数の実測値に比べ有効材齢 2 日以前において非常に小さいことが明らかとなった。低発熱・収縮抑制型高炉セメントでは，自己膨張に起因する圧縮応力が導入され，ひび割れ低減効果が認められた。

キーワード：マスコンクリート，拘束応力，自己収縮，自己膨張，有効ヤング係数

1. はじめに

マスコンクリートの温度ひび割れ制御においては，FEM 温度応力解析等による事前検討を行なうことが少なくないが，解析精度を高めるためにはコンクリートの物性値を正確に把握することが重要である。特に，セメントの種類により発熱特性，高温履歴条件下における自己膨張・自己収縮，ヤング係数およびクリープ特性が異なり，応力の計算結果に大きな影響を与えと考えられる。著者らは，高炉セメント B 種の JIS 規格の範囲内で化学成分と比表面積を調整した低発熱・収縮抑制型高炉セメントを提案し，各種実構造物に

適用して，そのひび割れ低減効果について実証してきた^{1), 2)}。しかし，構造物や施工の条件によっては，ひび割れ低減効果の程度を正確に予測することが難しい場合がある。

本研究では，各種セメントを用いたマスコンクリートの応力発生状況を一軸拘束試験により把握するとともに，高温履歴条件下における各種物性値について検討した。マスコンクリート構造物を想定した温度履歴を供試体に与え，温度変化と自己膨張・自己収縮によるコンクリートの変形を熱膨張係数の小さいインバー鋼により拘束する試験を実施した。また，高温履歴条

表-1 使用材料

種類	物性値
セメント	普通ポルトランドセメント (N)，密度 3.16g/cm ³ ，比表面積 3290cm ² /g
	中庸熱ポルトランドセメント (M)，密度 3.21g/cm ³ ，比表面積 3130 cm ² /g
	高炉セメント B 種 (BB)，密度 3.04g/cm ³ ，比表面積 4080cm ² /g，BF 置換率 40%
	低発熱・収縮抑制型高炉セメント (LBB)，密度 2.98g/cm ³ ，比表面積 3380 cm ² /g，BF 置換率 58%
細骨材	密度 2.61g/cm ³ ，吸水率 2.27%，粗粒率 2.89，微粒分量 0.15%，単位容積質量 1751 kg/m ³ ，実積率 70.0%
粗骨材	最大寸法 20mm，密度 2.64g/cm ³ ，吸水率 0.56%，粗粒率 6.73，単位容積質量 1664 kg/m ³ ，実積率 65.0%
混和剤	AE 減水剤(Ad)：リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体（主成分）

*1 足利工業大学 大学院工学研究科（正会員）

*2 足利工業大学 工学部都市環境工学科 博(工学)（正会員）

*3 (株) デイ・シイ セメント事業本部

*4 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所 博(学術)（正会員）

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (℃)
			W	C	S	G	Ad			
N	55	45.7	163	296	833	1001	0.74	13.0	4.4	21.5
M			163	296	835	1003		10.0	5.4	24.5
BB			163	296	828	996		12.0	3.8	22.0
LBB		45.4	154	280	838	1019	0.7	8.5	4.7	20.5

件下での強度特性およびヤング係数を把握するとともに、圧縮応力の発生開始材齢および見かけの有効ヤング係数についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメント(N)，中庸熱ポルトランドセメント(M)，一般の高炉セメント B 種 (BB) および著者らが提案した初期膨張を有し，自己収縮の低減効果のある低発熱・収縮抑制型高炉セメント (LBB)¹⁾ を用いた。LBB は，JIS 規格範囲内において高炉スラグ比表面積を小さくし，SO₃ 量を約 4%に調整し，高炉スラグ置換率 58%としたものである。表-2 にコンクリートの配合およびフレッシュ性状を示す。

2.2 実験方法

(1) 断熱温度上昇量試験

断熱温度上昇量試験はコンクリートの練上り温度を 20±2℃とし，材齢 14 日まで空気循環式断熱温度上昇量試験機を用いて行った。

(2) 力学的特性試験

圧縮強度試験，静弾性係数試験および引張強度試験は JIS A 1108，JIS A 1149 および JIS A1113 に従って，材齢 1，3，7，15 日に行った。養生方法は，(5) に記述するような実構造物想定温度条件下でシール養生とした。

(3) 無拘束供試体の長さ変化試験

100×100×400mm 供試体を用い(5)に記述するような構造物想定温度条件下において乾燥を防いで長さ変化の測定を行った。長さ変化の測定は埋込型ひずみ計（弾性係数：40N/mm²）によ

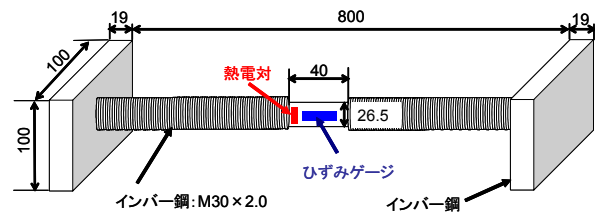


図-1 拘束器具

表-3 温度解析条件

設定項目	設定値
熱伝導率	コンクリート 2.1[W/m℃]
	地盤 1.4[W/m℃]
密度	コンクリート 示方配合より算出
	地盤 1720[kg/m ³]
比熱	コンクリート 0.96[kJ/kg℃]
	地盤 2.06[kJ/kg℃]
断熱温度上昇量	コンクリート 実測値(図-4)
初期温度	コンクリート，地盤 20[℃]
外気温	20[℃]
熱伝達率	型枠（鋼製） 14[W/m ² ℃]

り行った。供試体は各セメントに対し 2 個とし，平均値を用いて評価した。

(4) 一軸拘束応力試験

一軸拘束応力試験は三谷らの研究成果を参考にして図-1 に示す拘束器具を用いて行った³⁾。インバー鋼（ヤング係数：150 k N/mm²，線膨張係数：0.6×10⁻⁶/℃）製のねじ切り加工した鋼棒（M30×2.0）を拘束体として使用し，同素材の端板に溶接した。また，鋼棒のひずみ測定のために鋼棒中心にねじ切り削除部(長さ：40mm，直径：26.5mm，鉄筋比：5.6%)をもうけ，ひずみゲージを軸方向対称に計 4 枚貼付した。

以上のような拘束器具を型枠の一部として用いてコンクリートを打設し、100×100×800mmの供試体を作製し、温度制御槽内に設置して(5)に記述する構造物想定温度履歴を与えた。供試体数は各セメントに対し1個とした。

(5) 温度条件

力学的特性試験，無拘束供試体の長さ変化試験および一軸拘束応力試験では，図-2 に示す部材厚 0.8m の壁状構造物をモデルとした FEM 温度解析の結果を基に壁中心の温度履歴を供試体に与えた。解析条件は表-3 に示すものとし，3.1 に示す断熱温度上昇量の実測値を用いて温度解析を行った。図-3 に想定した温度環境の一例として，一軸拘束応力試験における供試体中心部の温度（熱電対により測定）を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 断熱温度上昇量

図-4 は断熱温度上昇量の実測値および式 (1) ⁴⁾ による近似値を，表-4 は式(1)中の係数を示したものである。BB は最も大きな温度上昇を示した。LBB においては，温度上昇量が最も小さく，セメント量に若干の違いはあるが M に比べ約 6℃ 低くなった。

$$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-\gamma t^s)\} \quad (1)$$

$Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量 (℃)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (℃)

γ, s : 温度上昇速度に関する定数

t : 材齢 (日)

3.2 高温履歴条件下における力学的特性

図-5 に構造物想定温度条件下における圧縮強度と有効材齢 (式 (2)) の関係について示す。LBB は，BB に比べ圧縮強度の増進は小さいが，M と同等の強度増進を示すことが認められた。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (2)$$

t_e : 有効材齢

Δt_i : 温度が T (℃)である期間の日数, T_0 : 1℃

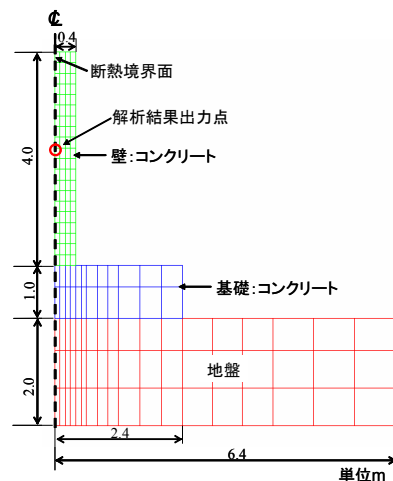


図-2 解析モデル

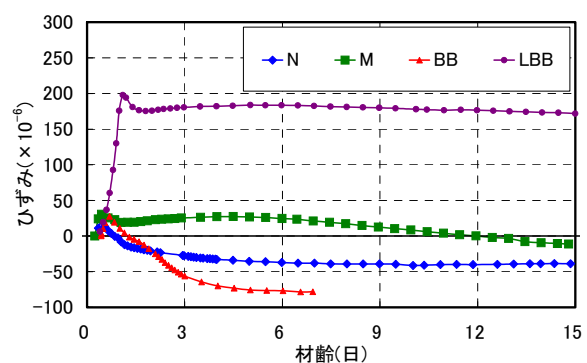


図-3 供試体中心部の温度履歴の測定値

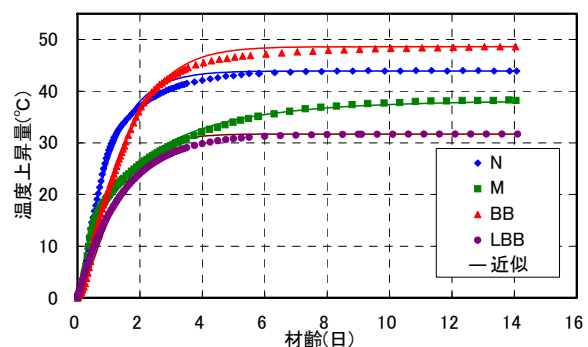


図-4 断熱温度上昇量試験結果

表-4 断熱温度上昇量に関する係数

セメントの種類	Q_{∞} (℃)	γ	s
N	43.9	0.94	1.10
M	38.2	0.68	0.76
BB	48.6	0.56	1.25
LBB	31.7	0.65	1.36

図-6 に圧縮強度とヤング係数の関係について示す。また、同図には、土木学会コンクリート標準示方書に示されている式(3)⁵⁾ および JCI マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会により提案された式(4)⁶⁾ による予測値を示す。各種セメントの圧縮強度とヤング係数の関係は、セメントの違いによらず概ね同様な傾向を示しており、JCI 式により概ね評価できることが認められた。

$$E_c(t) = 4700 \{f'_c(t)\}^{0.5} \quad (3)$$

$$E_c(t) = 6300 \{f'_c(t)\}^{0.45} \quad (4)$$

$E_c(t)$: 材齢 t におけるヤング係数 (kN/mm²)

$f'_c(t)$: 材齢 t 日における圧縮強度 (N/mm²)

図-7 に圧縮強度と引張強度の関係について示す。また、同図には、土木学会コンクリート標準示方書に示されている式(5)⁵⁾ および JCI により提案された式(6)⁶⁾ による予測値を示す。各種セメントの圧縮強度と引張強度の関係は概ね同様な傾向を示しており、JCI 式により概ね評価できることが認められた。

$$f_{tk}(t) = 0.44 \cdot f'_c(t)^{0.5} \quad (5)$$

$$f_{tk}(t) = 0.54 \cdot f'_c(t)^{0.53} - 0.74 \quad (6)$$

$f_{tk}(t)$: 材齢 t 日における引張強度 (N/mm²)

3.3 自己膨張・自己収縮および拘束応力

図-8 は構造物想定温度条件下における一軸拘束応力の測定結果を示す。同図では、引張を正、圧縮を負として表している。圧縮応力の発生開始材齢は、表-5 に示す通りであり、N および LBB は凝結の始発と終結の間で圧縮応力が発生し始めている。M は、ほぼ始発において、BB は、ほぼ終結において圧縮応力が発生し始めている。最大圧縮応力は、N および LBB が大きくなった。N に比べ最大温度が約 7℃低い LBB に比較的大きな圧縮応力が認められたのは、LBB の自己膨

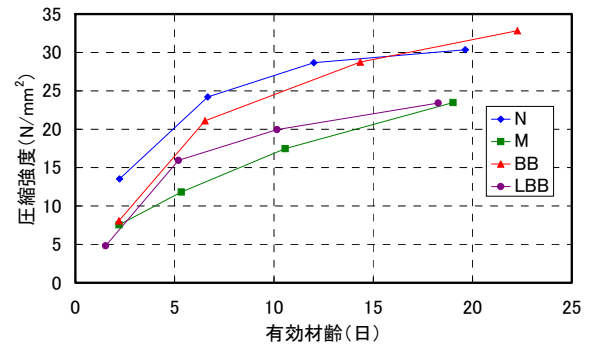


図-5 圧縮強度と有効材齢の関係

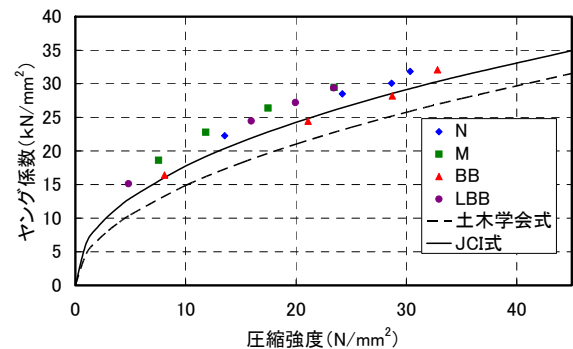


図-6 圧縮強度とヤング係数の関係

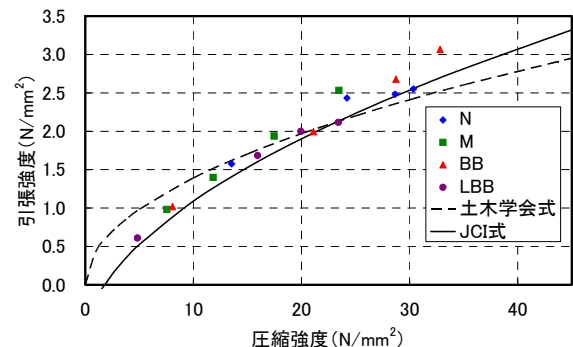


図-7 圧縮強度と引張強度の関係

張の効果によるものと考えられる (図-9 参照)。今回の測定期間においては N に比べ BB の引張応力の増加傾向がほぼ同等であった。LBB については、N および BB に比べて引張応力が低減され、材齢 9 日以降における引張応力は M よりも小さくなっていることが認められた。

図-9 に自己膨張・自己収縮の経時変化を示す。同図では、コンクリートの熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とし、無拘束供試体の実ひずみから温度ひずみを差し引いて示している。また、自己膨張・自己収縮ひずみの基点は、一軸拘束応力試験結果から得られた圧縮応力の発生開始材齢とした

(表-5 参照)。材齢 7 日における自己収縮ひずみは、BB が最も大きい。LBB は約 200×10^{-6} の自己膨張ひずみを示し、前述したように、この自己膨張は、拘束条件下での圧縮応力の発生に寄与していることが考えられる。また、材齢 2 日以降にもわずかなではあるが膨張し、自己収縮が著しく低減されることが認められた。

図-10 に構造物想定温度条件下における一軸拘束試験で得られた引張応力と引張強度の関係を応力強度比として整理したものを示す。LBB および M は、N および BB に比べ応力強度比が小さくなっており、ひび割れの低減効果が認められた。BB および N については、材齢 7 日までの範囲では同等の応力強度比を示した。

3.4 見かけの有効ヤング係数

図-11 にヤング係数と有効材齢の関係を示す。同図では、JCI 自己収縮研究委員会により提案された式⁷⁾を参考にして式(7)により実測値を近似している。ヤング係数と有効材齢の関係は式(7)により評価できることが認められた。

$$E_c(t_e) = E_c(t_a) \exp \left\{ S_e \left[1 - \left(\frac{t_a - t_0}{t_e - t_0} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (7)$$

$E_c(t_e)$: 材齢 t_e におけるヤング係数 (kN/mm^2)

S_e : 係数, t_e : 有効材齢 (日)

t_a : 基準材齢 (材齢 15 日) の有効材齢(日)

t_0 : 圧縮応力の発生開始有効材齢(日)

土木学会コンクリート標準示方書では、マスコンクリートの簡便な温度応力計算の方法として、クリープによるコンクリートの剛性低下を考慮した有効ヤング係数を用いる方法が提案されている。そこで、本研究における一軸拘束試験結果を用い、コンクリートの有効ひずみ [(拘束供試体のひずみ) - (無拘束供試体のひずみ)] の増分に対する拘束応力の増分比を「見かけの有効ヤング係数($E_{ef}(t_e)$)」として求めた。その結果を図-12 に示す。なお、同図には式(8)による近似値も示している。

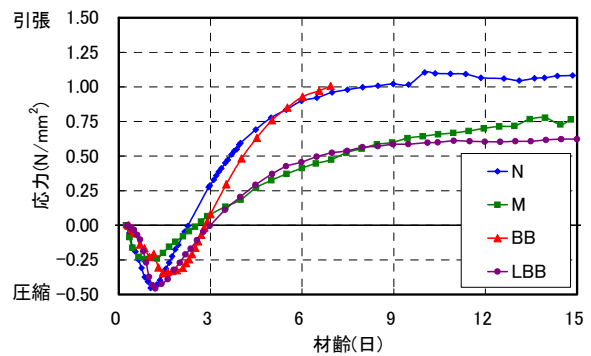


図-8 拘束応力の経時変化

表-5 凝結時間および圧縮応力の発生開始材齢

セメントの種類	凝結時間		圧縮応力の発生開始材齢 (時-分)
	始発(時-分)	終結(時-分)	
N	5-40	8-05	7-00
M	5-50	8-05	6-00
BB	7-30	10-25	10-30
LBB	6-45	12-10	10-00

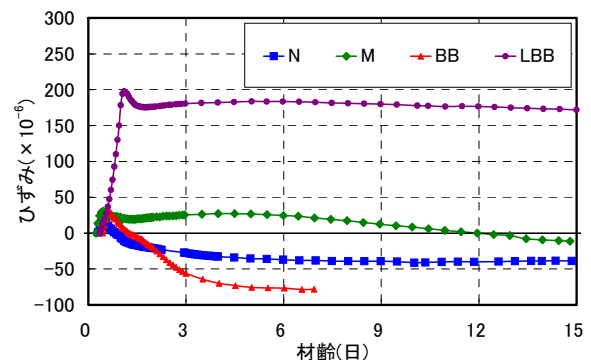


図-9 自己膨張・自己収縮の経時変化

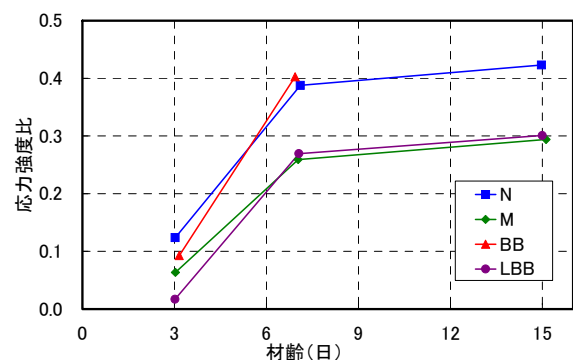


図-10 応力強度比の経時変化

$$E_{ef}(t_e) = \Phi(t) E_c(t_e) \quad (8)$$

$E_{ef}(t_e)$: 有効材齢 t_e における見かけの有効ヤング係数

$E_c(t_e)$: 有効材齢 t_e におけるヤング係数(式(7)による)

$\Phi(t_e)$: ヤング係数の補正係数(表-6 参照, 有効材齢 2~3 日は直線補間)

いずれのセメントにおいても、有効材齢 2 日以前において見かけの有効ヤング係数が著しく小さくなっている。膨張効果を有する LBB の見かけのヤング係数は、若材齢時において他のセメントに比べ小さいことが認められた。これは、一般の膨張材コンクリートの場合と同様の傾向である。³⁾

4. 結論

本研究では、マスコンクリート構造物を想定した温度条件下において応力発生状況を一軸拘束試験により把握するとともに、各種物性値について検討した。本研究の範囲内で明らかになったことを以下に示す。

- (1) 硬化過程でコンクリートが拘束を受けた場合の圧縮応力の発生開始材齢は、凝結の始発と終結の間にあり、セメントの種類により若干異なる。
- (2) 中庸熱セメントおよび低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いた場合、普通セメントおよび高炉セメント B 種を用いた場合と比較して応力強度比が小さく、ひび割れ低減効果が認められた。
- (3) 低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いた場合、温度上昇過程において、自己膨張に起因する圧縮応力が導入されることが認められた。
- (4) 見かけの有効ヤング係数は有効材齢 2 日以前で小さく、特に低発熱・収縮抑制型高炉セメントの場合は一般の市販セメントと比べてかなり小さくなった。

参考文献

- 1) 宮澤伸吾ほか：高炉セメントの自己収縮および断熱温度上昇量に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.58，pp.154－159，2005
- 2) 大友健ほか：マスコンクリートに生じている自己収縮の実態とその制御対策の一例，コンクリート工学，Vol.44，No.3，pp.26－33，2006
- 3) 三谷祐二ほか：マスコンクリート様の温度履歴を受けた膨張コンクリートの応力評価法，

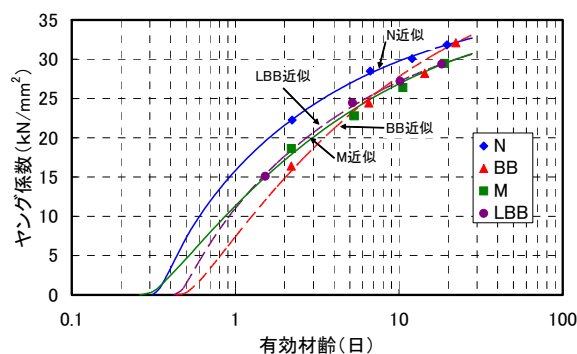


図-11 ヤング係数と有効材齢の関係

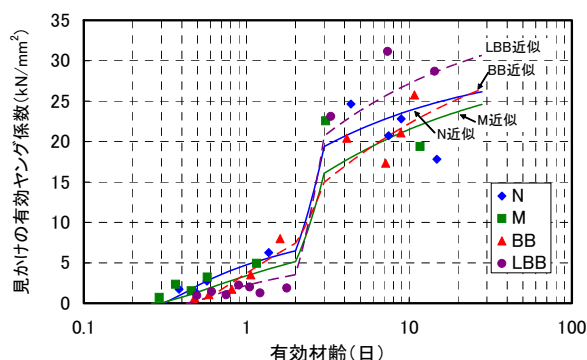


図-12 見かけの有効ヤング係数と有効材齢の関係

表-6 ヤング係数の補正係数

セメントの種類	ヤング係数の補正係数 $\Phi(t)$	
	材齢 2 日まで	材齢 3 日以降
N	0.3	0.8
M	0.5	0.8
BB	0.5	0.8
LBB	0.2	1.0

マスコンクリートのひび割れ制御方法とその効果に関するシンポジウム，pp.49－56，2005

- 4) 鈴木康範ほか：新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量の定量化，土木学会論文集，第 396 号/V-9，pp.109－117，1988
- 5) (社) 土木学会：2002 年度制定，コンクリート標準示方書[施工編]，pp.52－53，2002
- 6) (社) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御に関する委員会報告書，pp.150－155，2006
- 7) (社) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.96，1996