

論文 高炉セメント B 種の品質がマスコンクリートの体積変化に及ぼす影響

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

要旨：マスコンクリートのひび割れ抵抗性の向上を目的として粒度及び化学成分を調整した高炉セメント B 種が提案された。本研究では、この種の高炉セメント B 種を用いたコンクリートの力学特性、断熱温度上昇量、20 環境下および簡易断熱環境下での自己収縮の各試験を行い、一般の高炉セメント B 種と比較して検討した。また、これらの実験結果を踏まえて実構造物を想定した 3 次元 FEM 応力解析を行い、高炉セメントの品質がひび割れ抵抗性に及ぼす影響について検討を行った。

キーワード：高炉セメント，自己収縮，断熱温度上昇量，膨張，マスコンクリート

1. はじめに

高炉セメントはアルカリ骨材反応の制御や化学抵抗性の向上、さらに環境負荷低減効果など観点から多くの構造物に使用されている。また、水和熱の低減を期待してマスコンクリートに使用される場合も多い。しかし条件によっては、高炉セメントの使用による温度ひび割れ抑制効果が十分に得られない事例が報告されている¹⁾。

比表面積の高い高炉スラグを混入すると自己収縮が大きくなるが、低比表面積の高炉スラグであれば置換率が高くなるほど自己収縮が低減されると報告されている²⁾。また、高炉セメント中の SO₃ 量が過大であると異常膨張、強度低下などの悪影響を及ぼす場合があるが、SO₃ 量を適切な範囲で大きくすると自己収縮及び水和熱の低減が期待できる。このような知見に基づき著

者らは、高炉スラグの粒度および化学成分の調整により高炉セメント B 種のひび割れ抵抗性を改善することを提案した³⁾⁴⁾。すなわち、高炉スラグ比表面積を 3000cm²/g 程度、SO₃ 量を 4%程度とし、置換率を 40%および 60%とした高炉セメント B 種は、従来の高炉セメント B 種と比較して、コンクリートの自己収縮および断熱温度上昇特性が大幅に改善されることを報告した。さらに、これらの高炉セメントは実際のマスコンクリート構造物に適用され、ひび割れ抑制効果が得られたことが報告された⁵⁾⁶⁾。

本研究では、以上のような背景のもとに開発された低発熱・収縮抑制型高炉セメント B 種のひび割れ抵抗性について、実験および解析に基づいて定量的に把握することを目的とする。すなわち、粒度および化学成分の異なる高炉セ

表-1 使用材料

材料名	物性値
セメント	高炉セメント B 種(BB): 密度 3.04g/cm ³ 、比表面積 3950cm ² /g、SO ₃ 2.0%
	低発熱・収縮抑制型高炉セメント(LBB-1): 密度 3.04g/cm ³ 、比表面積 3460cm ² /g、SO ₃ 3.7%
	低発熱・収縮抑制型高炉セメント(LBB-2): 密度 2.99g/cm ³ 、比表面積 3440cm ² /g、SO ₃ 3.9%
細骨材	葛生産砕石: 密度 2.63g/cm ³ 、吸水率 2.72%、粗粒率 2.16
粗骨材	鬼怒川産川砂: 密度 2.62g/cm ³ 、吸水率 0.94%、最大寸法 20mm
混和剤	AE 減水剤: 主成分、リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体

*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 工博 (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 工博 (正会員)

表-2 セメントの化学成分

(%)

種類	Ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	total
BB	0.59	25.19	8.37	2.23	56.32	3.64	2.04	0.30	0.34	0.44	0.34	0.15	99.36
LBB-1	0.33	25.10	8.65	1.97	54.81	3.58	3.69	0.30	0.32	0.45	0.30	0.18	99.35
LBB-2	0.22	27.28	10.41	1.45	50.53	4.25	3.88	0.26	0.30	0.54	0.20	0.23	99.33

表-3 コンクリートの配合

セメントの種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
BB	12±2	4.5±1	55	45.7	172	313	815	971	0.783
LBB-1				45.4	175	318	804	969	0.795
LBB-2				45.4	161	293	833	993	0.732

ントを用いたコンクリートの力学的特性および自己収縮の温度依存性について実験により把握するとともに、壁状モデル構造物を対象としてFEM 応力解析を行い、ひび割れ指数に及ぼす高炉セメントの品質の影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料、表-2 にセメントの化学成分を示す。セメントには一般の高炉セメント B 種 (BB) と低発熱・収縮抑制型高炉セメント (LBB-1, LBB-2) の 3 種類を使用した。高炉スラグ置換率は BB および LBB-1 が 40%程度、LBB-2 が 60%程度である。また、LBB-1 および LBB-2 は、一般の高炉セメントと比較して比表面積は低く、SO₃量は高く調整されているが、いずれも高炉セメント B 種の JIS 規格を満足している。表-3 にコンクリートの配合を示す。

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がり温度を 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) 強度試験

圧縮および引張強度試験は JIS A 1108 および JIS A1113 に従って、材齢 1, 3, 7, 28, 56, 91 日に行った。

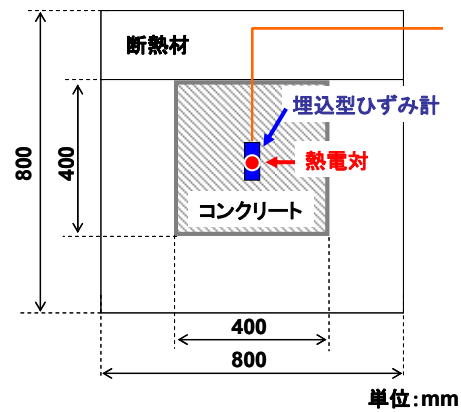


図-1 簡易断熱環境下における自己収縮試験

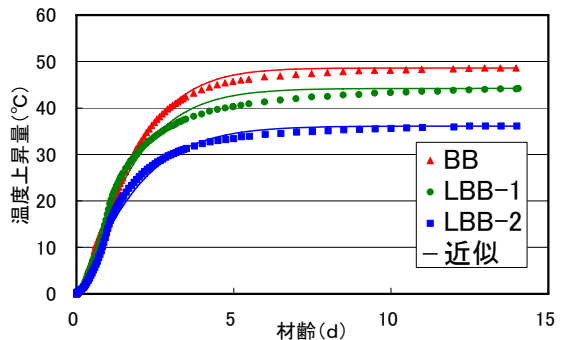


図-2 断熱温度上昇量試験結果

表-4 断熱温度上昇量についての係数

種類	Q _∞ (°C)	γ	s
BB	48.6	0.186	1.30
LBB-1	44.2	0.212	1.20
LBB-2	36.1	0.203	1.18

(3) 自己収縮試験

100×100×400mm 供試体を用い20 環境下における自己収縮の試験を JCI 自己収縮研究委員会の方法に従って行った。また、高温履歴下での自己収縮を測定するために、図-1 に示すように400×400×400mmのコンクリート供試体を厚さ200mmの発泡スチロールで簡易断熱し、埋込型ひずみ計を用いて供試体中心部のひずみ及び温度を測定した。

自己収縮ひずみの測定開始材齢は20 環境下での凝結の始発とし、測定は埋込型ひずみ計(弾性係数：40N/mm²)により行った。

3. 実験結果および考察

3.1 断熱温度上昇量

図-2 は断熱温度上昇量の実測値および式(1)による近似値を示したものである。LBB-1 および LBB-2 は BB に比べ温度上昇量が抑制されており、特に、LBB-2 では BB に比べ終局断熱温度上昇量が約12%低い結果となった。

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

$Q(t)$: 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()

s : 温度上昇速度に関する定数

t : 材齢(日)

3.2 力学的特性

図-3 は圧縮強度の実測値と土木学会コンクリート標準示方書(以下示方書と省略)に提示されている式(2)による近似値を示したものである。

$$f'_c(t) = \{t/(a + bt)\} \cdot f'_{ck} \quad (2)$$

$f'_c(t)$: 材齢 t 日における圧縮強度(N/mm²)

t : 材齢(日)

a, b : 係数

f'_{ck} : 設計基準強度(N/mm²)

ただし、 f'_{ck} としては示方書の記述を参考にして材齢91日における圧縮強度の試験値を用いた。

LBB-1 および LBB-2 は BB と比べて強度発現が穏やかである。LBB-1 および LBB-2 に対する

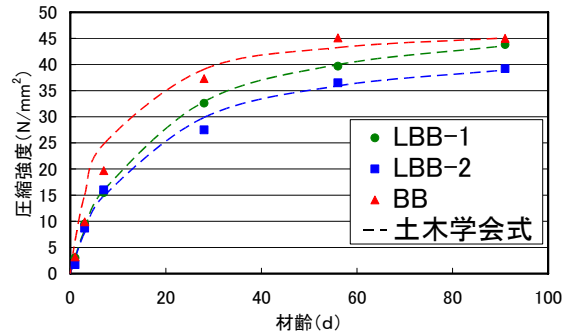


図-3 圧縮強度試験結果

表-5 圧縮強度発現に関する係数

種類	a	b
BB	6.2 注)	0.93 注)
LBB-1	13.2	0.86
LBB-2	12.4	0.87

注) 土木学会コンクリート標準示方書の値

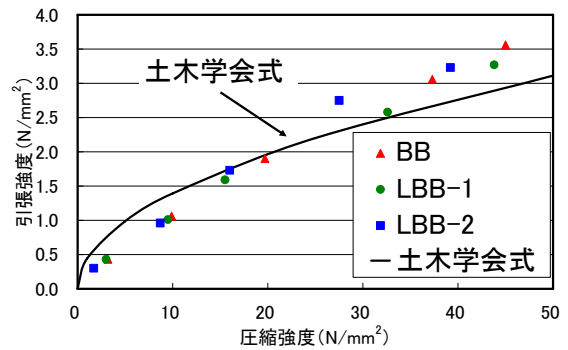


図-4 圧縮強度と引張強度の関係

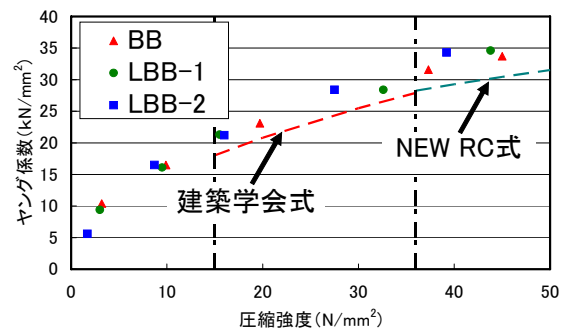


図-5 圧縮強度とヤング係数の関係

係数 a および b は表-5 に示す通りであり、式(2) による評価が可能であると考えられる。

図-4 に圧縮強度と引張強度の関係を示す。圧縮強度と引張強度の関係はセメントの種類によらず概ね同等である。また、LBB-1 及び LBB-2 を用いたコンクリートについても引張強度は示方書に示されている式(3) により評価が可能であると考えられる。

$$f_{ik}(t) = C \cdot \sqrt{f'_c(t)} \quad (3)$$

$f_{ik}(t)$: 材齢 t 日における引張強度 (N/mm²)

t : 材齢 (日)

C : 0.44

$f'_c(t)$: 材齢 t 日における圧縮強度 (N/mm²)

図-5 に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。圧縮強度とヤング係数の関係はセメントの種類によらず概ね同等である。また、圧縮強度が 15N/mm² ~ 36N/mm² では建築学会式(4)を用い、36N/mm² 以上では New RC 式(5)を用いた計算値と実測値を比較した結果、LBB-1 及び LBB-2 を用いたコンクリートについても、強度レベルに応じて式(4) または式(5) によりヤング係数の評価が可能であると考えられる。

$$E = 20600 \cdot (\quad / 2.3)^{1.5} \cdot (Fc/19.6)^{0.5} \quad (4)$$

E : ヤング係数 (N/mm²)

: 単位容積質量 (t/m³)

Fc : 設計基準強度 (N/mm²)

$$E = 33500 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot (\quad / 2.4)^2 \cdot (\quad / 60)^3 \quad (5)$$

E : ヤング係数 (N/mm²)

k_1, k_2 : 粗骨材および混和材に関する係数

: 単位容積質量 (t/m³)

B : 設計基準強度 (N/mm²)

3.3 自己収縮特性

図-6 および図-7 は 20 環境下および簡易断熱環境下での自己収縮試験結果を示したものであ

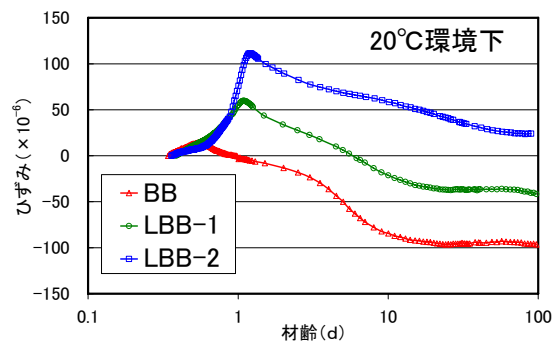


図-6 20 環境下での自己収縮試験結果

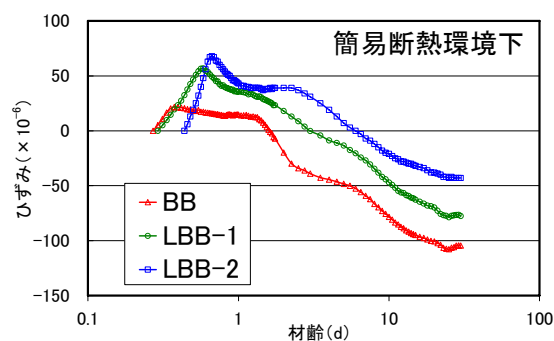


図-7 簡易断熱環境下での自己収縮試験結果

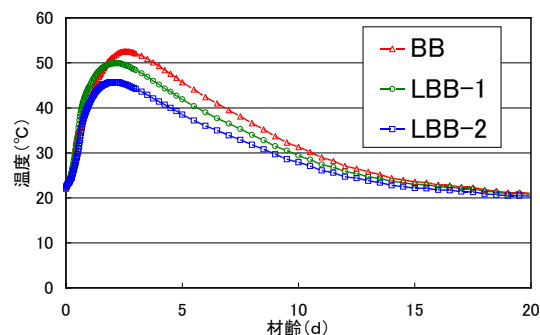


図-8 簡易断熱環境下での温度履歴

る。また、簡易断熱環境下の供試体は図-8 のような温度履歴を示した。なお、自己収縮ひずみは、コンクリートの熱膨張係数として材齢 4 ヶ月で 100 × 100 × 400mm 供試体を用いて測定した実測値 (BB : 8.4 × 10⁻⁶/ , LBB1 : 9.3 , LBB2 : 10.5 × 10⁻⁶/) を用い、計測された全ひずみから温度ひずみを差し引いて求めた。20 環境下において LBB-1 及び LBB-2 は初期材齢に自己膨張が認められ、BB に比べ自己収縮が低減されている。LBB-1 は材齢 1 日で約 50 × 10⁻⁶ の膨張が生

じた。また，LBB-2 は材齢 1 日で約 100×10^{-6} の膨張を生じ，材齢 91 日においても膨張側のひずみを示した。LBB-1 および LBB-2 で初期膨張が認められたのは SO_3 量を約 4% と高めに設定しているため初期材齢においてエトリンガイトの生成量が多いためと考えられる。

簡易断熱環境下においても，LBB-1 および LBB-2 を用いたコンクリートの自己収縮は BB と比べて低減されている。高温履歴を受けると 20 環境下の場合と比べて初期膨張を生じる時期が早くなり，その後の自己収縮の増加速度が大きくなっている。また，LBB-2 の最大膨張ひずみは 20 環境下に比べ 50% 程度となった。

表-6 解析条件

項目		入力データ
コンクリート	圧縮強度	$f'_c = \frac{t}{a+bt} \cdot f'_{ck}$
	引張強度	$f_{tk} = c\sqrt{f'_c(t)}$
	有効ヤング係数	$E_e(t) = \Phi(t) \cdot 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)}$
	温度上昇特性	実測値
	自己収縮	実測値
熱伝達率 (W/m ²)	露出面	14
	養生マット	5
	合板	8
熱伝導率 (W/m)	コンクリート	2.1
	地盤	1.4
密度 (kg/m ³)	コンクリート	2300
	地盤	1720
比熱 (kJ/kg)	コンクリート	0.96
	地盤	2.06
温度 ()	外気温	20

3.4 モデル構造物の温度および応力解析

本研究で使用した 3 種類の高炉セメント B 種 (BB, LBB-1, LBB-2) をマスコンクリート構造物に適用した場合のひび割れ抵抗性を比較するために，モデル構造物について 3 次元 FEM 応力解析を実施した。

解析対象構造物は図-9 に示す通り，厚さ 1.5m，奥行き 6.5m の壁状構造物とした。壁中心部の温度履歴の解析値は 3.3 で記述した簡易断熱環境下の実測値と類似しているため，応力解析においては図-7 の自己収縮ひずみを用いた。また，3.1 に示した断熱温度上昇量，3.2 に示した力学的特性をそれぞれ用いた。図-10 に壁中心部の応力解析結果を示す。また，自己収縮の影響を把握するために温度応力のみを考慮して解析を行った結果を図-11 に示す。いずれの条件においても最大引張応力は壁中心部の高さ 0.8m の位置で発生した。自己収縮を考慮せず温度応力のみを考慮した解析では，BB と比べ LBB-1 で約 10%，LBB-2 で約 20% の最大引張応力の低減が認められた。また，自己収縮を考慮した結果では BB に

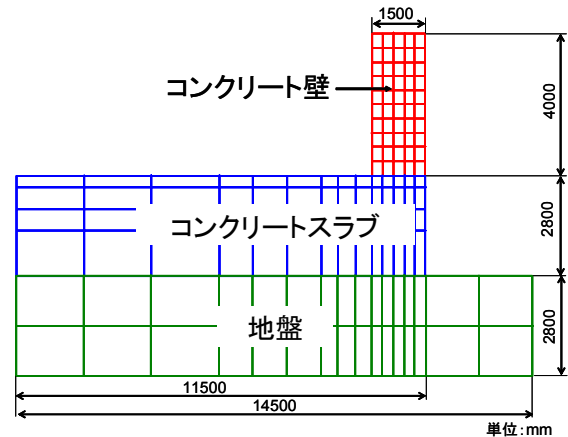


図-9 解析モデル

比べ LBB-1 で約 15%，LBB-2 で約 30% の引張応力低減効果が認められた。このことから，LBB-1 および LBB-2 では，水和熱の低減のみならず初期膨張による自己収縮の低減により，引張応力が低減されている。自己収縮を考慮した場合の最小ひび割れ指数は BB が 1.27，LBB-1 が 1.34，LBB-2 が 1.59 であり，LBB-1 および LBB-2 は BB と比べてひび割れ抵抗性が改善されていると考えられる。

4. 結論

本研究では、高炉セメント B 種のひび割れ抵抗性の向上を目的とし、高炉セメントの粒度および化学成分がマスコンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす影響について検討した。本研究で明らかとなった事項は以下のとおりである。

- (1) 粒度および化学成分を調整した高炉セメント B 種 (LBB-1, LBB-2) は、従来の高炉セメント B 種と比較して、水和熱による温度上昇が低減される。
- (2) LBB-1 および LBB-2 は初期材齢において膨張ひずみが生じるため、従来の高炉セメント B 種と比較して自己収縮が低減される。自己収縮の低減効果の程度は温度履歴の影響を受ける。
- (3) LBB-1 および LBB-2 を用いたコンクリートの圧縮強度の発現、圧縮強度とヤング係数および引張強度の関係は、既往の設計式で評価が可能である。
- (4) FEM 応力解析の結果、LBB-1 および LBB-2 を用いたマスコンクリートのひび割れ抵抗性は従来の高炉セメント B 種に比べ優れていることが推察される。

参考文献

- 1) 須網功二, 大友健, 山上正敏: 底面を拘束されたスラブにおける自己収縮によるひび割れ発生現象の解明, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.685 - 690, 2003
- 2) 田澤栄一, 宮澤伸吾: セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響, 土木学会論文集, No.502/V-24, pp.43 - 52, 1994
- 3) 宮澤伸吾, 大澤友宏, 廣島明男, 鯉淵清: 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
- 4) 宮澤伸吾, 大澤友宏, 廣島明男, 鯉淵清: 低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.487 - 492, 2005

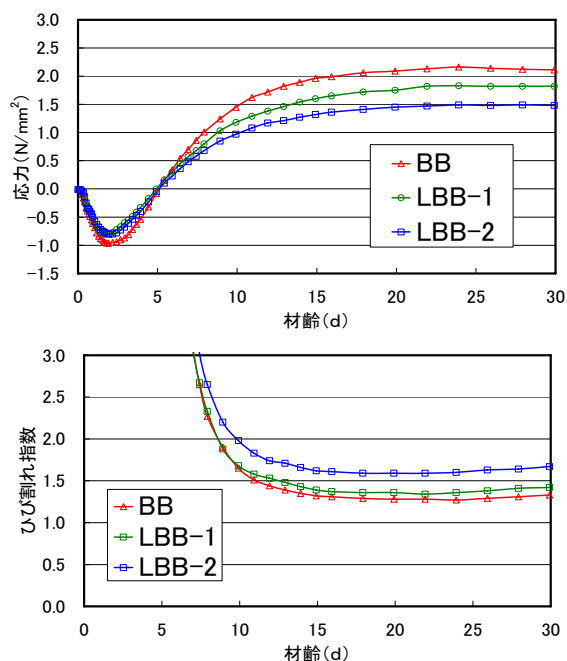


図-10 応力解析結果 (自己収縮考慮)

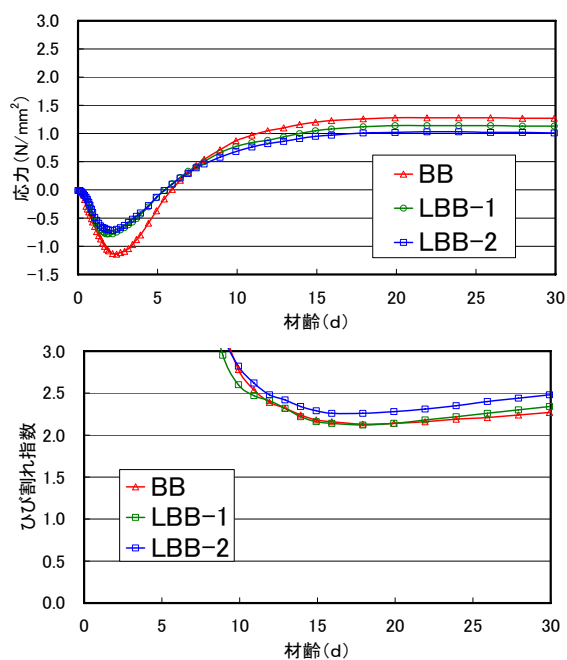


図-11 応力解析結果 (自己収縮考慮無し)

- 5) 児玉浩一, 石川哲也, 菅原竜也, 廣島明男, 低発熱・収縮抑制型高炉セメントの実構造物への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1135 - 1140, 2005
- 6) 大友健, 二戸信和, 廣島明男, 宮澤伸吾: 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