論文 マス養生温度履歴下で測定した自己収縮ひずみの評価方法と温度ひ び割れに及ぼす影響に関する考察

臼井 達哉*1·大友 健*2·宮原 茂禎*3·宮澤 伸吾*4

要旨:マス養生あるいはマス養生に類似した温度履歴下で測定した各種ポルトランドセメントコンクリート および高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみについて,従来の JCI 委員会報告に示される予測式およ び JCI ひび割れ制御指針 2008 に示される経験最大温度をパラメータとした新しい予測式に対する適合性を 各々評価した。高炉セメントコンクリートについては,新しい予測式により得られる特性値を基準として, 実測の自己収縮ひずみの変動範囲を定め,これが壁状部材のひび割れ発生の程度に及ぼす影響を考察した。 キーワード:自己収縮ひずみ,養生温度,温度応力,高炉セメント,マスコンクリート,ひび割れ指数

1. はじめに

著者らは、今までに関与したマスコンクリート工事に おいて、構造体内の無拘束ひずみを測定すること、ある いはマスコンクリート構造物の内部の温度変化に近似 する温度履歴を与えた場合の体積変化測定を行うこと で、マス養生温度履歴下で生じている自己収縮ひずみに 関するデータを蓄積してきた。この分析については一部 をテクニカルレポートとして報告¹⁾している。

本論文は、この報告以降に得たデータをこれに追加し たうえで、実測で得られた自己収縮ひずみから定めた自 己収縮関数が、従来のJCIの委員会報告²⁾ やあるいは新 しく発刊されたJCI ひび割れ制御指針 2008³⁾ に記載され ている自己収縮予測式とどの程度適合しているのかを 比較したものである。また、実測の自己収縮ひずみの特 性値が、予測式の値とどの程度の範囲で異なっているか を評価し、この差が壁状のマスコンクリート部材のひび 割れ発生程度に及ぼす影響についても考察した。

2. 自己収縮ひずみの予測式

マスコンクリート構造物の温度ひび割れ制御のため に温度応力解析を行う場合に利用する自己収縮ひずみ の予測値については,歴代のJCIの関連委員会において 各種セメントを用いた場合の予測式が提案されてきて いる。最も新しい知見によるものは,2006年の委員会報 告²⁾によるものであり,これは式(1)により示される。

NP/HP/MP/BB の場合 $a_1:6.3 / a_2:-8.6 / b_1:0.22 / b_2:3.0$ LP の場合 $a_1:2.4 / a_2:-6.5 / b_1:0.12 / b_2:2.7$ ここに、 $\epsilon_c(t):自己収縮ひずみ関数(×10⁻⁶), \epsilon_{co}:$ 自己収縮ひずみの終局値(×10⁻⁶), t:有効材齢(日), $<math>t_c:硬化原点材齢(日), W/C:水セメント比$

NP は普通, HP は早強, MP は中庸熱, LP は低熱の各 種ポルトランドセメント, BB は高炉セメント B 種の略 称である(以下同様)。

すなわち,従来のJCI委員会式ではセメント種類と水 セメント比により自己収縮ひずみ関数値が与えられて いた。以下これをJCI従来式(JCI従来関数値)と呼ぶ。

著者らは、マスコンクリートにおける高温履歴が自己 収縮ひずみに及ぼす影響についていくつかの検討を行 い^{4),5)など}、とくに高炉セメントB種を使用した配合で、 材齢初期に高温履歴を受けたコンクリートでは、積算温 度では表現できないほど自己収縮ひずみが増進する現 象を明らかとしてきた。

JCI ひび割れ制御指針 2008 の内容の検討過程では,高 温履歴を受ける高炉セメントコンクリートの自己収縮 をマスブロックにより評価する共通実験が行われ⁶,こ の結果から,最大温度をパラメータに加えた予測式が示 されている³⁾。これは式(2)により示されるものである。 なお,NP 以外のポルトランドセメントは NP の予測式に 式(1)に準じた係数 γ を乗ずることにより算定している。

 $\varepsilon_{c}(t) = \varepsilon_{co} (1-\exp(-a(t-t_{o})^{b}))$ (2) ここに、高炉セメントB種の場合: $\varepsilon_{co} = 2350 \exp(-5.8 (W/C))$ +80(1-exp(-1.2×10⁻⁶×(T_{max}-20)⁴))

*1	大成建設(株)	技術センター土木技術研究所 工修 (正会員)
*2	大成建設(株	土木本部プロジェクト部 次長 博士(学術) (正会員)
*3	大成建設(株	技術センター土木技術研究所 工修 (正会員)
*4	足利工業大学	工学部都市環境工学科 教授 工博 (正会員)

 $a = 3.7 \exp(-6.8 (W/C)) \times (0.060 T_{max} - 0.20)$

 $b=0.25\exp(2.5(W/C))\times(-0.0075T_{max}+1.15)$ ポルトランドセメントの場合:

 $\epsilon_{co} = 3070 \exp(-7.2 (W/C))$

+50 (1-exp(-1.2×10⁻⁶×(T_{max}-20)⁴))

LP以外:a= 3.7exp(-6.8(W/C)), b= 0.25exp(2.5(W/C)) $a= 2.4 \exp(-6.5(W/C)), b= 0.12 \exp(2.7(W/C))$ LP

ここに、Tmax: コンクリートの最大 温度(℃)

以下,式(2)の予測 式を JCI 修正式(JCI 修正関数値)と呼ぶ。

3. 自己収縮ひずみ の実測値の評価

3.1 コンクリートの 種別と自己収縮 関数値

表-1 に,自己収 縮ひずみを実測した コンクリートのセメ ント種類,配合(水 セメント比と単位セ メント量),線膨張係 数,温度履歴条件(打 込み温度,最大温度, 平均温度(材齢0~28 日までの平均値))と 実測ひずみ履歴を指 数関数式にフィッテ イング(有効材齢 0 ~28 日) させて求め た自己収縮関数値を 示す。

表-2は,表-1に 示すセメントの種 類・水セメント比・ 最大温度の条件から 算定した3係数によ り構成される JCI 従 来関数值, JCI 修正関 数値と各々の関数値 に対する実測自己収 縮関数値の係数ごと の倍数を示す。なお,

_ 表-1 セメント種類,配合,線膨張係数,温度履歴特性と実際の自己収縮ひずみ関数															
No.	セメント	記号	置換率	ťck	t	W/C	С	α^{*1}	打込	最大	平均	実測自己収縮関数*			
	種類		(NP:	(N/	f'ck		(kg/	$(x10^{-5})$	温度	温度	温度	E co	а	b	
			BS)	mm ²)	(日)	(%)	m ³)	/°C)	(°C)	(°C)	(°C)	$(x10^{-6})$			
1	早強ポルト	HP	-	40	28	42	365	0.85	23.8	77.1	65.9	168	0.08	0.70	
2	普通ポルト	NP1	-	35	91	55	309	0.63	29.9	53.0	30.2	32	0.08	1.10	
3	普通ポルト	NP2	-	30	28	50	344	1.00	28.3	65.1	54.0	78	0.50	0.85	
4	普通ポルト	NP3	-	24	28	50	348	0.88	21.5	57.2	49.3	95	0.18	0.50	
5	普通ポルト	NP4	1	24	28	55	309	0.84	21.4	53.9	32.4	99	0.06	0.98	
6	中庸熱ポルト	MP1	-	40	28	38	382	0.85	25.5	62.8	54.8	104	0.13	0.59	
7	中庸熱ポルト	MP2	-	30	91	55	280	0.84	28.8	53.9	46.1	38	0.17	1.00	
8	中庸熱ポルト	MP3	-	24	56	55	305	0.83	20.7	46.9	30.2	73	0.02	1.60	
9	低熱ポルト	LP1	-	40	56	37	392	0.85	23.8	51.4	45.3	59	0.11	1.00	
10	低熱ポルト	LP2	-	24	91	59	247	1.04	29.6	58.0	52.0	34	0.08	1.25	
11	低熱ポルト	LP3	-	30	91	45	340	0.74	29.4	66.6	56.0	24	0.22	1.50	
12	低熱ポルト	LP4	-	60	91	36	425	1.02	13.9	47.3	39.7	50	0.06	1.00	
13	低熱ポルト	LP5	-	24	91	55	300	0.87	27.3	66.9	54.8	25	0.005	1.60	
14	低熱ポルト	LP6	-	24	91	55	313	0.85	20.8	40.0	28.7	78	0.003	2.35	
15	高炉B種	BB1	不明	21	28	59	297	1.02	20.0	47.8	28.0	119	0.38	0.70	
16	高炉B種	BB2	不明	21	28	64	233	0.80	18.4	50.4	41.0	92	0.43	0.60	
17	高炉B種	BB3	60:40	24	28	55	295	0.61	22.3	63.1	54.7	140	0.25	0.75	
18	高炉B種	BB4	57:43	24	28	55	295	0.62	22.3	60.5	53.3	230	0.18	0.50	
19	高炉B種	BB5	60:40	35	91	55	300	0.72	29.0	52.9	29.8	71	0.12	0.85	
20	高炉B種	BB6	60:40	24	28	55	296	1.00	13.4	63.3	53.2	101	0.22	1.15	
21	高炉B種	BB7	不明	24	28	50	322	1.09	21.2	55.3	45.8	270	0.17	0.65	
22	高炉B種	BB8	不明	30	28	48	357	1.00	28.0	64.2	56.0	80	0.50	1.00	
23	高炉B種	BB9	不明	24	28	52.5	284	0.95	21.3	55.6	47.2	80	0.40	1.50	
24	高炉B種	BB10	60:40	24	28	55	313	0.84	22.3	52.9	30.2	155	0.07	0.85	
25	低発熱高炉B種	LBB1	50:50	24	28	54	270	0.58	11.4	40.2	27.0	137	0.11	1.05	
26	低発熱高炉B種	LBB2	45:55	30	91	50	306	0.80	31.9	63.3	47.5	58	0.15	1.40	
27	低発熱高炉B種	LBB3	40:60 ^{*3}	27	91	45	330	1.02	20.1	49.5	42.9	122	0.05	1.00	
*1別 *2 ɛ	途供試体を作成 co=(1−exp(−a(tef	し、自己 ff) ^b))	己収縮が	ほぼ終	を結した	-と考;	zish.	る材齢2	8日以	春 に、 温	度変化	とを与えて	て算出		
ΞΞ	に、ε co:終局自己	こ収縮で	ひずみ, a	a•b:自i	こ収縮	速度	系数,t	eff:硬化	原点が	いらの有	効材虧	(日)			
*3微	な粉スラグ(BL=60	00cm ² /	′g)												

表-2 JCIの自己収縮ひずみ予測式(従来式・修正式)とこれに対する実測ひずみの倍数 セメント 記号 JCI従来関数値 JCI修正関数値 JCI従来関数値 JCI修正関数値 No. 種類 に対する実測倍数 こ対する実測倍数 εco b b а εco а x10⁻⁶) $(x10^{-6})$ 60 3 h 60 3 b а а 早強ポルト 1 HP 179 0.17 0.78 239 0.21 0.71 0.94 0.47 0.90 0.70 0.38 0.98 2 普通ポルト NP1 59 0.056 1.15 96 0.088 0.99 0.55 1.44 0.96 0.33 0.91 1.11 3 普通ポルト NP2 0.085 0.99 134 0.12 0.87 0.93 5.85 0.86 0.58 4.05 0.97 84 普通ポルト 普通ポルト NP3 211 4 0.085 0.99 0.87 0.74 1.46 0 57 84 129 012 1.13 0.51 NP4 59 0.09 0.99 1.69 1.08 1.01 0.68 0.99 5 0.056 1.15 98 0.86 MP1 <u>6</u> 中庸熱ポルト 169 0.24 0.69 211 0.28 0.65 0.61 0.54 0.86 049 047 091 7 中庸熱ポルト MP2 0.056 1.15 0.088 0.99 0.76 3.06 0.87 0.45 1.93 1.01 50 84 8 中庸熱ポルト MP3 50 0.056 1.15 70 0.088 0.99 1.47 0.36 1.40 1.05 0.23 1.62 9 低熱ポルト LP1 0.22 0.33 99 0.22 0.33 0.69 0.51 3.07 0.59 0.51 3.07 86 LP2 10 低熱ポルト 0.052 0.59 18 36 0.052 0.59 194 1 5 4 212 0.95 1.54 212 <u>低熱ポルト</u> LP3 48 0.40 0.13 0.40 0.50 11 0.13 1.71 3.71 0.35 1.71 3.71 68 低熱ポルト 0.23 0.23 0.32 12 LP4 0.32 0.54 0.26 3.15 0.49 0.26 3.15 92 102 低熱ポルト 13 LP5 23 0.067 0.53 43 0.067 0.53 1.07 0.07 3.02 0.58 0.07 3.02 14 低熱ポルト 1 P6 23 0.067 0.53 27 0.067 0.53 3 33 0 04 4 4 4 290 004 444 0.18 0.86 高炉B種 BB1 57 0.039 1.29 118 2.09 9.64 0.54 1.01 2.13 0.81 15 高炉B種 BB2 16 40 0.026 1.50 109 0.13 0.96 2.31 16.8 0.40 0.85 3.19 0.63 17 高炉B種 BB3 76 0.056 1.15 175 0.32 0.67 1.84 4.50 0.65 0.80 0.79 1.12 高炉B種 0.30 18 BB4 76 1.15 174 0.69 3.02 3.24 0.44 0.60 0.73 0.056 1.33 1 1 5 0.74 2.16 19 高炉B積 BB5 0.056 157 0.26 0.93 074 0.45 0.46 1.14 76 <u>高炉B種</u> 高炉B種 20 BB6 76 0.67 1.00 0.70 1.72 0.056 1.15 176 0.32 1.33 3.96 0.58 0.39 0.64 2.48 1.99 1.37 0.44 1.01 21 BB7 109 0.085 0.99 197 0.66 高炉B積 BB8 22 126 0.10 0.93 224 0.52 0.55 0.64 4.92 1.08 0.36 0.97 1.80 23 高炉B種 BB9 91 0.069 1.06 180 0.33 0.68 0.88 5.80 1.41 0.44 1.22 2.20 0.056 0.26 24 高炉B種 **BB10** 76 115 157 0.74 2.04 1.26 074 0.99 027 114 25 低発熱高炉B種 LBB1 82 1.68 1.82 1.17 0.53 1.28 0.061 1.11 117 0.21 0.82 0.94 低発熱高炉B種 LBB2 109 0.085 0.99 208 0.44 0.59 0.53 1.75 1.42 0.28 0.34 2.38 26 低発熱高炉B種 LBB3 156 0.13 0.85 0.48 0.60 0.78 0.38 1.18 0.10 0.55 1.67

LBBは、高炉セメントB種の規格の範囲内で高炉スラグ

の比率をポルトランドセメントより多くしたもので、低

各々の測定データは、実際の工事に使用したコンクリ

ートやその事前検討のために行った実験に関する検討

結果であるため、使用するセメントのメーカー・工場や 骨材の種類,配合などに統一性はない。与えられた温度

発熱型高炉セメントB種の略称である。

履歴についても相当に異なる^{1),4),5) な} どが,ここでは,式(2)に対応して最大 温度をパラメータとして考慮したもの である。

3.2 自己収縮ひずみに及ぼすセメント 種類・配合と最大温度の影響

図-1 には各種ポルトランドセメン ト配合, 図-2には高炉セメント B 種 配合における,水セメント比あるいは 最大温度が自己収縮特性に及ぼす影響 を各々示す。各種ポルトランドセメン トでは水セメント比が小さいほど終局 ひずみは大きくなる傾向にある。発熱 が大きくなる配合・施工環境ほど自己 収縮ひずみも大きくなるのが当然と思 われたが、低熱ポルトランドセメント では,最大温度が大きくなっても終局ひ ずみは増大していない。速度係数は最大 温度が大きくなるほど増大するようで ある。

異なる材料・配合のデータを合わせて 記載した場合でも,各種ポルトランドセ メント配合については一定の傾向が見 いだせるのに対して,高炉セメント B 種配合においては,水セメント比・最大 温度の双方について一定した傾向が見 いだせず,終局ひずみ・速度係数ともに ばらつきが大変に大きいデータとなっ ている。

図-3には、実測の自己収縮ひずみの 特性値と JCI 従来予測式での特性値を

> 250 10⁻⁶

200

100

0

`300

0

0

0

Ľ

Ť 150

U # 0

実測1 50

比較した結果を示す。各 種ポルトランドセメント 配合では実測の終局ひず みは予測式とおおむね同 程度とみられるが、高炉 セメント B 種配合では予 測式よりも明らかに大き くなる傾向がある。また 速度係数 a も非常に大き くなる場合があることが 明らかとなった。

3.3 JCI 修正式の評価

JCI 従来式での評価を、 コンクリートの最大温度 の要因を加えて評価した



図-3 実測の自己収縮ひずみの特性値と JCI 従来予測式での特性値の比較



JCI 修正式に替えた場合の変化を,各種ポルトランドセメ ント配合については図-4 と図-5 に,高炉セメント B 種配合については図-6 と図-7 に比較して示す。これ らの図は実測ひずみの指数関数における終局ひずみ,速 度係数 a・b の各々が予測式における各係数の何倍になっ ているかを示したものである。

各種ポルトランドセメント配合に JCI 修正式を適用し た場合,例外はあるものの,予測値が実測値に近づくか あるいはこれを下回るものとなるようである。ただし, 低熱ポルトランドセメント配合での係数bは,実測値が 予測値の平均3倍程度となっており他のポルトランドセ メントの傾向とは大きく異なっている。

高炉セメントB種配合についても、最大温度の影響を 考慮した修正式を用いることによって、終局ひずみ・速 度係数 a のばらつきの範囲は小さくなる傾向が認められ る。したがって JCI ひび割れ制御指針 2008 に示される最 大温度の影響を考慮した項は有効であると評価される。 しかしながら,それでもなお予測値に対する実測値の差 は相当残るものとなった。

高炉セメントコンクリートの自己収縮の変動範囲と その影響

4.1 高炉セメントコンクリートの自己収縮の変動範囲

高炉セメント B 種配合において, JCI 修正式による予 測値に対する実測値の倍数を,指数関数3係数の相互の 関係として図-8に示す。速度係数bの倍数が終局ひず みの倍数に従属して変化する傾向が認められるため,実 測ひずみのばらつきの範囲は終局ひずみ ϵ_{co} の倍数と速 度係数 a の倍数の範囲として考えられる。本調査研究で 得られたデータの範囲としては,図-8(a)中の A~H となり,終局ひずみは予測式の0.4~1.3倍,速度係数は 0.3~3.3 倍の範囲となっている。

仮に水セメント比を 55%, コンクリートの最大温度を 68.8℃(部材厚 1.5m に相当, 4.2 参照)とした時, これ

らの特性値の組み合わせの変化範囲 A ~H, JCI 修正式(3 係数の倍数が全て 1.0) を T, 実測値の平均を M として, 各々 有効材齢軸上での自己収縮ひずみ曲線 として算出すれば、この履歴曲線は図-9に示すように非常に異なった形状を示 すものとなった。

3.5

数 3

迎 2.5

速度係数aの倍 2.5 2.5 2.5 2.5

0

0

さらに部材の形状条件や打込み温度 などの環境条件の相違が加わり,最高温 度に差が生じることも考え合わせれば, 同じ高炉セメント B 種を使用した水密 仕様のコンクリートといっても, 著しく 異なる自己収縮ひずみ曲線を有する高 炉セメントコンクリートが存在し得る ことが自明とも思われる。

4.2 自己収縮曲線の相違がひび割れ発生の程度に及ぼす 影響

壁厚が相違することによって部材の最大温度が異な ることを考慮し、Case1:壁厚 1.5m および Case2:0.6m の 2 種類の壁状部材について、自己収縮特性が図-8(a)に 示される A~H および M, T に変化した場合の発生する 引張応力およびひび割れ指数を算出した。この結果を図 -10に示す。

コンクリートの配合は、水セメント比 55%、単位セメ ント量 300kg/m³, セメントは, 高炉セメント B 種とし, 打込み温度 30℃,外気温 20℃の環境での施工を想定し た。発熱特性・型枠からの放熱条件などは JCI ひび割れ 制御指針 2008³⁾に示される標準的な値としている。この 時, 壁厚 1.5m の部材中心の最大温度は 68.8℃, 壁厚 0.6m では 51.7℃となった。温度応力の算出には下水道構造物 のひび割れの評価で実績が確認されている増分法⁷⁾を使 用し, 自己収縮ひずみの考慮も実績のあるひずみの重ね 合わせ法⁸⁾を用いた。

壁厚 1.5m の部材の長さが 8m, 壁厚 0.6m の部材の長 さが 20m と異なるのは、JCI 修正式(自己収縮関数の 3係 数の倍数が 1.0)である T の最小ひび割れ指数の結果が Case1, Case2 とも 1.0 になるようにしたことによる。す なわち, T の最小ひび割れ指数 1.0 に対して A~H と M の最小ひび割れ指数の差が相対的なひび割れ発生程度 の差を評価していることになる。

図-10 では、CやDの発生する引張応力が大きく、A・ H・G の発生する引張応力が小さくなる。最小ひび割れ 指数は T と C~E で小さくなりひび割れの発生確率が高 まってくると考えられる。最大温度の大きい壁厚 1.5m の部材よりも壁厚 0.6m の部材のほうが自己収縮ひずみ 量の相違の影響が大きいように見えるが、この条件の設 定では壁厚の小さいほうが温度ひずみによる応力成分



CA

→ 温度ひずみ考慮 → 温度ひずみ+自己収縮考慮

T

в

の算定結果

М

壁部材における応力・最小ひび割れ指数

В

С

Т

Α

м

図-10

が小さくなるため自己収縮ひずみの影響度が相対的に 高まって見えるようである。

自己収縮関数の3係数がひび割れ指数に及ぼす影響を 図-11に示す。Case1:壁厚1.5mとCase2:壁厚0.6mのひ び割れ指数の変化傾向および変化量は異なっているこ とから,自己収縮ひずみ曲線の相違がひび割れの発生状 態に及ぼす影響は,構造物の形状等にも影響を受けるこ とがわかる。

自己収縮関数の 3 係数の組み合わせの影響について、 これらを説明変数としたひび割れ指数に関する重回帰 分析結果を図-11 の付表として示す。Case1:壁厚 1.5m では、 ϵ_{∞} が大きいほど、速度係数 a が小さいほどひび 割れ指数は小さくなり、速度係数 a に関する影響がより 大きい(t 値が大きい)。これに対して Case2:壁厚 0.6m では、ひび割れ指数の大きさには ϵ_{∞} のみが強く影響し ている。このように自己収縮関数の各係数の影響につい ても、構造物の形状を含めての影響があると思われる。

自己収縮ひずみ量あるいはひずみ関数形だけで温度 ひび割れへの影響を評価することは難しいということ も本研究の知見であろう。

5. 結論

実際の工事に関係して収集したマスコンクリートの 温度履歴を受けた状態での自己収縮特性の評価方法に ついて検討した。この結果以下が明らかとなった。

- (1) 実測自己収縮ひずみの特性値と JCI の従来予測式の 特性値を比較した場合,各種ポルトランドセメント 配合では実測の終局ひずみは予測式とおおむね同程 度とみられるが,高炉セメント B 種配合では予測式 よりも明らかに大きくなる傾向がある。また速度係 数 a も非常に大きくなる場合がある。
- (2) 自己収縮の予測にJCI修正式を適用した場合,各種ポルトランドセメント配合では予測値が実測値に近づくか下回る傾向にある。
- (3) 高炉セメント B 種配合では,最大温度の影響を考慮 した修正式を用いることによって,終局ひずみ・速 度係数 a のばらつきの範囲は小さくなる傾向が認め られた。JCI 修正式に示される最大温度の影響を考慮 した項は有効であると評価される。しかしながら, それでもなお予測値に対する実測値の差は相当残る。
- (4) 高炉セメント B 種配合の自己収縮特性では,速度係数 b の倍数が終局ひずみの倍数に従属して変化するため,実測ひずみのばらつきの範囲は終局ひずみ ε_{co}の倍数と速度係数 a の倍数の範囲として考えられる。ばらつきの範囲として,終局ひずみは JCI 修正式の0.4~1.3 倍,速度係数は0.3~3.3 倍の範囲である。
- (5) 壁厚が異なることにより、自己収縮ひずみ曲線の相



図-11 異なる自己収縮特性値に対するひび割れ指数 の変化および回帰分析結果

違が最小ひび割れ指数に及ぼす影響は一様ではない ことが重回帰分析の結果からも明らかとなった。 実際の工事に関連した計測結果の集積であるため,統 一的な材料・環境での試験結果ではないが,そのような 条件においても,(1)-(5)に示すような新たな知見が得ら れている。今後,さらに分析を深めたい。

参考文献

- 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
- 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研究委員会報告書,2006.6
- 日本コンクリート工学協会:マスコンクリートのひ び割れ制御指針 2008, 2008.12
- 4) 大友健ほか:各種セメントを使用したコンクリートの異なる温度条件下での自己収縮特性,第 57 回セメント技術大会講演要旨, PP.176-177, 2003.5
- 5) 宮澤伸吾ほか:各種セメントの自己収縮に及ぼす温 度の影響,第 59 回セメント技術大会講演要旨, PP.186-187,2005.5
- 6) 宮澤伸吾ほか:高温履歴を受ける高炉セメントコン クリートの自己収縮予測式,コンクリート工学年次 論文集, Vol.30, No.1, pp.465-470, 2008.6
- 7) ライフサポート研究会:ひび割れ指数を用いた温度 ひび割れの評価-事例紹介-,月刊下水道, Vol.27, No.14, pp.75-79, 2004.12
- (須網巧二ほか: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, 2003.6