

論文 コンクリートの自己収縮に及ぼすセメントの種類の影響

宮澤 伸吾^{*1}・黒井 登起雄^{*1}・川合 雅弘^{*2}

要旨：5種類のセメント(普通, 早強, 中庸熱, 低熱, 高炉B種)を用い, 水セメント比を22~50%としたコンクリートの自己収縮ひずみを測定し, セメントの種類がコンクリートの自己収縮に及ぼす影響について調べるとともに, 既往の自己収縮ひずみの予測式の適合性について検討した。その結果, 既往の予測式においてセメントの種類を表す係数を適切に定めることにより, 種々のセメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみを予測できることが明らかとなった。

キーワード：自己収縮, 予測式, セメント, 鉱物組成, 水セメント比

1. はじめに

コンクリートの体積変化が構造物の変形やひび割れ等に及ぼす影響を検討する場合, 特に高強度コンクリートでは自己収縮の影響を考慮する必要がある。平成11年度土木学会コンクリート標準示方書においても, 温度応力のみでなく自己収縮ひずみによる応力も考慮して応力算定を行う方法が示されている。

コンクリートの自己収縮はセメントの種類の影響を著しく受けることが知られている^{1),2)}。普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみの予測はある程度可能になってきたが, その他の各種セメントについては予測がまだ難しいのが現状である。そのため, 示方書で応力算定の枠組みが示されたものの, 入力値として必要な自己収縮ひずみの設計用値が得られていないことから, 自己収縮を考慮した応力算定はまだ広く一般に行われるには至っていない。

以上のような観点から, 本研究では, 各種セメントを用いた広範囲の水セメント比のコンクリートについて自己収縮試験を実施し, 実測値に基づいて自己収縮ひずみの予測式について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントには市販の5種類のセメント, すなわち普通ポルトランドセメント(N), 早強ポルトランドセメント(H), 中庸熱ポルトランドセメント(M), 低熱ポルトランドセメント(L)および高炉セメントB種(BB)を使用した。各セメントの化学分析結果およびBogue式から算出した鉱物組成を表-1に示す。骨材としては鬼怒川産川砂(密度 2.58g/cm^3 , 吸水率 2.01% , 粗粒率 2.88), 葛生産硬質砂岩碎石(密度 2.62g/cm^3 , 吸水率 0.59% , 最大寸法 20mm)を用いた。混和剤としては, 水セメント比(W/C)22~30%についてはポリカルボン酸系高性能AE減水剤, W/C=40%および50%についてはリグニン系AE減水剤を用いた。コンクリートの配合, フレッシュコンクリートの試験結果, 凝結試験結果および圧縮強度試験結果(シール養生, 材齢28日)を表-2に示す。

2.2 自己収縮の測定方法

コンクリートの自己収縮ひずみの測定は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 供試体を用い, JCI 自己収縮研究委員会の提案した試験方法³⁾により行った。供試体の本数は普通セメントで6個, その他のセメントでは3個とし, 結果は平均値で示した。

*1 足利工業大学教授 工学部都市環境工学科 工博 (正会員)

*2 足利工業大学 大学院土木工学専攻

表 - 1 セメントの性質

セメントの種類	密度 (g/cm ³)	粉末度 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	R ₂ O (%)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)
N	3.16	3280	1.71	1.43	1.99	0.58	54	21	8	8
H	3.14	4420	1.05	1.42	3.07	0.52	63	11	8	8
M	3.21	3240	0.60	1.08	2.13	0.51	44	34	4	12
L	3.22	3350	0.82	0.84	2.27	0.38	30	52	3	9
BB	3.04	3720	1.27	3.02	2.14	-	-	-	-	-

表 - 2 コンクリートの配合および各種試験結果

セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ, スランプフロー (cm)	空気量 (%)	凝結始発 (日)	材齢28日 圧縮強度 (N/mm ²)
			W	C	S	G	Ad (Cx%)				
N	22	43.0	165	750	661	890	1.2	69x70	3.1	0.180	92.5
H					660	888	1.1	50x51	1.2	0.194	106.8
M					665	896	1.0	56x54	2.1	0.167	118.0
L					666	897	1.1	72x70	2.6	0.272	109.5
BB					651	876	1.2	70x69	2.6	0.375	85.0
N	25	45.6	165	660	735	890	1.0	68x70	0.9	0.167	94.2
H					733	888	1.2	54x52	2.3	0.139	103.0
M					739	895	0.8	62x65	2.5	0.167	111.0
L					739	896	0.8	70x70	1.1	0.218	101.2
BB					725	879	0.7	60x60	3.8	0.235	78.2
N	30	48.6	165	550	827	888	0.7	44x44	3.0	0.178	72.5
H					825	886	1.0	52x52	3.1	0.212	76.1
M					830	891	0.8	51x51	3.5	0.208	74.1
L					831	892	0.7	65x65	1.3	0.231	88.9
BB					818	879	0.8	65x65	3.6	0.250	68.7
N	40	43.2	174	435	761	1018	0.25	8.0	4.0	0.199	60.1
H					760	1016	0.25	8.0	2.0	0.176	57.9
M					743	994	0.25	11.5	2.7	0.316	53.5
L					743	994	0.25	13.0	3.1	0.366	57.5
BB					734	982	0.25	10.5	3.6	0.283	58.3
N	50	45.2	185	371	806	995	0.25	8.5	3.1	0.197	44.0
H					806	995	0.25	8.0	3.2	0.181	46.1
M					830	1024	0.25	8.0	3.2	0.219	43.6
L					831	1025	0.25	8.0	4.0	0.316	45.7
BB					823	1013	0.25	11.5	3.1	0.247	50.0

3. 結果および考察

3.1 自己収縮ひずみの測定結果

図 - 1 ~ 図 - 5 は、各種セメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみの測定結果を示したものである。測定は20の恒温室で行ったが、初期材齢において水和熱により供試体温度が若干上昇しており、その際の温度ひずみは熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/$ として計測されたひずみから差し引いた。

いずれのセメントの場合も、自己収縮ひずみは水セメント比の影響を著しく受け、水セメン

ト比が低いほど自己収縮ひずみが大きくなった。また、普通セメントに比べて早強セメントでは自己収縮ひずみが若干大きくなった。中庸熱セメントを用いた場合は自己収縮ひずみが小さく、低熱セメントではさらに小さくなった。これらの実験結果は、一般に知られている自己収縮特性と同様の傾向である。

高炉セメントB種を用いた場合は、普通セメントに比べて低水セメント比における自己収縮ひずみが小さくなった。既往の研究では、比表面積が $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度以下の高炉スラグ微粉

末を用いると、水セメント比 20～40%の範囲で自己収縮ひずみは同等もしくは若干減少するという報告があり^{1),4)}、本研究でも同様の傾向が認められた。

3.2 自己収縮ひずみの予測式

(1) セメントペーストの自己収縮予測式

著者らは、通常の石こう量を有するセメントを用いたセメントペーストの自己収縮ひずみは、セメントの鉱物組成に基づいて式(1)により推定できることを報告した¹⁾。

$$\begin{aligned}
 p(t) = & A \cdot C_{3S}(t) \cdot (C_3S\%) + B \cdot C_{2S}(t) \cdot (C_2S\%) \\
 & + C \cdot C_{3A}(t) \cdot (C_3A\%) + D \cdot C_{4AF}(t) \cdot (C_4AF\%) \\
 & + E \cdot (\text{Blaine}) + F \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここに、

$p(t)$: 材齢 t におけるセメントペーストの自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 $C_{3S}(t)$: 材齢 t における C_3S の反応率(%), $(C_3S\%)$: C_3S の含有率(%), t : 材齢

表 - 3 セメントペーストの自己収縮ひずみの予測値および式(2)の係数

セメントの種類	W/C (%)	セメントペーストの終局自己収縮ひずみ		式(2)の
		式(1)による計算値 ($\times 10^{-6}$)	比	
N	23	1,849	1.00	1.00
	30	1,016	1.00	
H	23	2,051	1.11	1.20
	30	1,323	1.30	
M	23	1,496	0.81	0.85
	30	925	0.91	
L	23	1,010	0.55	0.40
	30	217	0.21	
BB	-	-	-	0.85

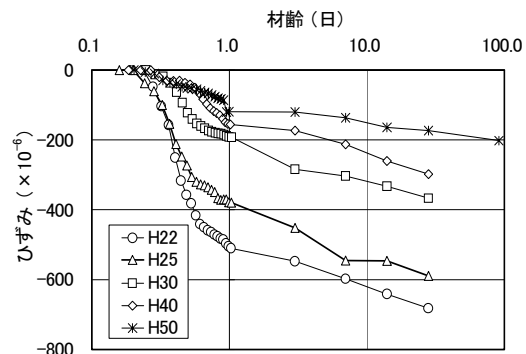


図 - 2 コンクリートの自己収縮ひずみ(H)

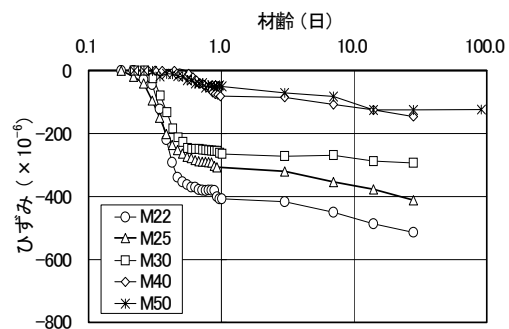


図 - 3 コンクリートの自己収縮ひずみ(M)

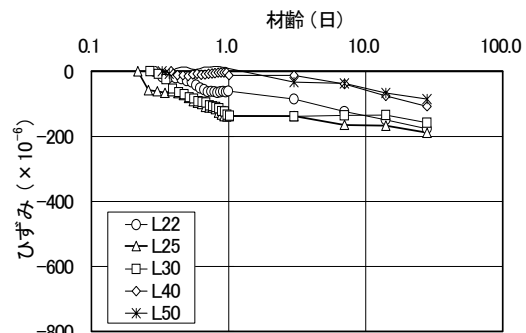


図 - 4 コンクリートの自己収縮ひずみ(L)

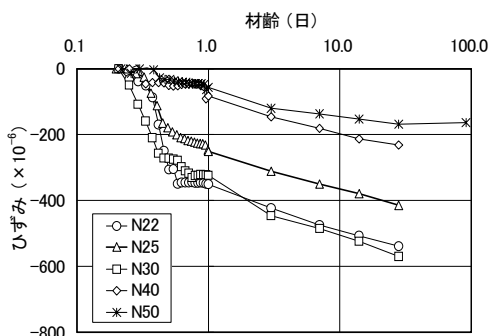


図 - 1 コンクリートの自己収縮ひずみ(N)

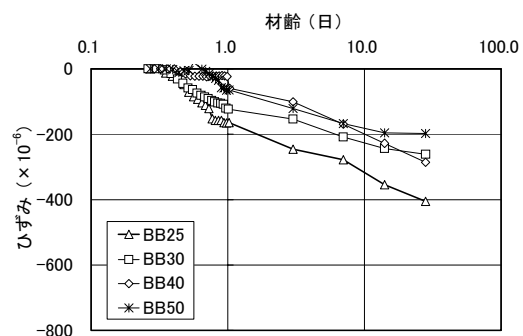


図 - 5 コンクリートの自己収縮ひずみ(BB)

(日) , (Blaine): プレーン値(cm²/g) , A, B, C, D, E, F : 定数, C₂S, C₃A, C₄AFについても同様。

既往の研究⁵⁾で報告した係数 A ~ F の値およびに本研究で使用したセメントの鉱物組成を用いて, セメントペーストの自己収縮ひずみの終局値を式(1)から算出した。ここでは, 水セメント比が小さい場合も t = における各鉱物の反応率は 100%と仮定した。計算結果を普通セメントに対する比とともに表 - 3 に示す。自己収縮ひずみの終局値の計算値は, 大きい順に H < N < M < L となり, 図 - 1 ~ 図 - 5 に示した実測値とほぼ同様の傾向を示した。

(2) コンクリートの自己収縮予測式

一般的な骨材量を有するコンクリートの自己収縮ひずみの予測式としては, 著者らは実用式として次式を既に提案している⁶⁾。

$$a(t) = a_0(W/B) a(t) \quad (2)$$

ここに,

a(t): 材齢 t 日における自己収縮ひずみ(×10⁻⁶),

a(t): 自己収縮ひずみの進行速度を表す関数で

次式により求める。

$$a(t) = 1 - \exp\{-a(t - t_0)^b\} \quad (3)$$

表 - 4 式(3)における係数 a および b

W/C	a	b
0.20	1.2	0.4
0.23	1.5	0.4
0.30	0.6	0.5
0.40	0.1	0.7
0.50 以上	0.03	0.8

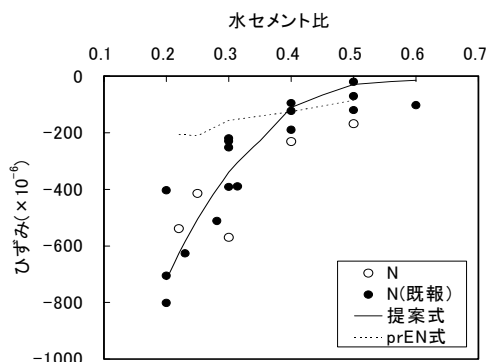


図 - 6 W/C と自己収縮ひずみの関係(N)

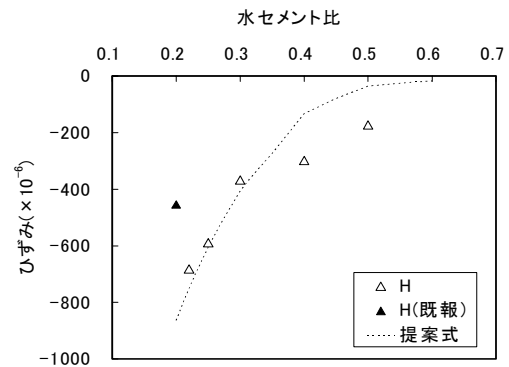


図 - 7 W/C と自己収縮ひずみの関係(H)

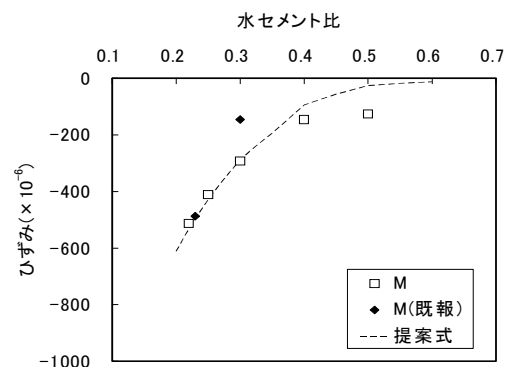


図 - 8 W/C と自己収縮ひずみの関係(M)

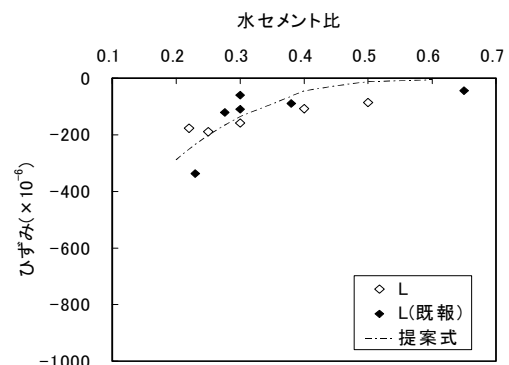


図 - 9 W/C と自己収縮ひずみの関係(L)

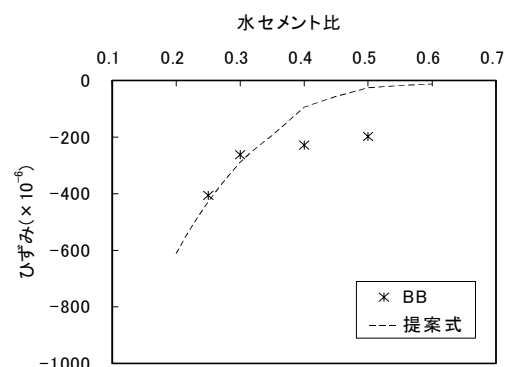


図 - 10 W/C と自己収縮ひずみの関係(BB)

$a_0(W/B)$: 自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)で次式により求める。

$$a_0(W/B) = 3070 \exp(-7.2(W/B)) \quad (4)$$

:セメントの種類の影響を表す係数(表 - 3 参照), W/B : 水結合材比(混和材を含まない場合は水セメント比), a, b : 定数(表 - 4 参照), t_0 : 凝結の始発(日), t : 材齢(日)

式(2)のセメントの種類の影響を表す係数は, 3.2(1)に記述したセメントペーストによる検討をもとに表 - 3 に示すように決定した。すなわち, セメントペーストの終局自己収縮ひずみを式(1)から算出し, 普通セメントの計算値に対する比をコンクリートの場合の係数に等しいと仮定した。なお鉱物組成の影響は水セメント比により変化すると考えられるが, 式(1)の係数 A ~ F の値が得られている $W/C=23\%$ および 30% についての平均値を他の水セメント比にも適用した。高炉セメント B 種に対しては自己収縮ひずみの実測値をもとに a_0 を決定した。

海外におけるコンクリートの自己収縮ひずみの予測式としては, Eurocode prEN で提案されている次式がある⁷⁾。

$$ca(t) = cc(t) \cdot ca_0 \quad (5)$$

ここに,

$$ca_0(t): \text{材齢 } t \text{ 日における自己収縮ひずみ} (\times 10^{-6})$$

$$cc(t) = \exp\{s[1 - (28/t)^{0.5}]\} \quad (6)$$

$$ca_0 = -2.5(f_{ck} - 10) \quad (7)$$

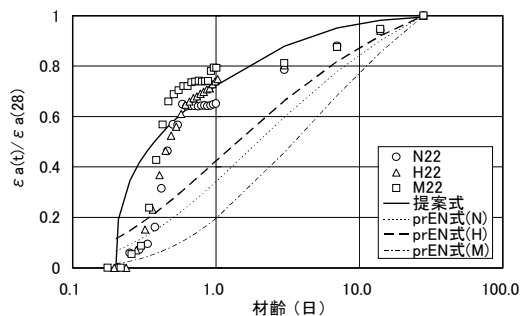


図 - 1 1 自己収縮ひずみの経時変化($W/C=22\%$)

ここに,

$cc(t)$: 自己収縮の進行を表す関数

ca_0 : 自己収縮ひずみの終局値

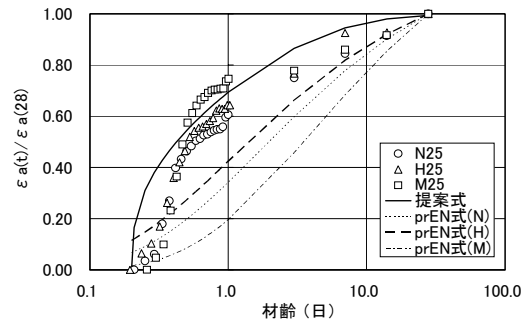


図 - 1 2 自己収縮ひずみの経時変化($W/C=25\%$)

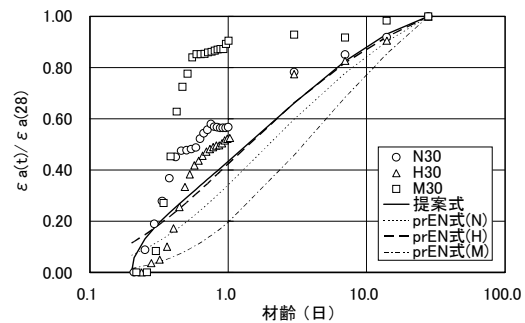


図 - 1 3 自己収縮ひずみの経時変化($W/C=30\%$)

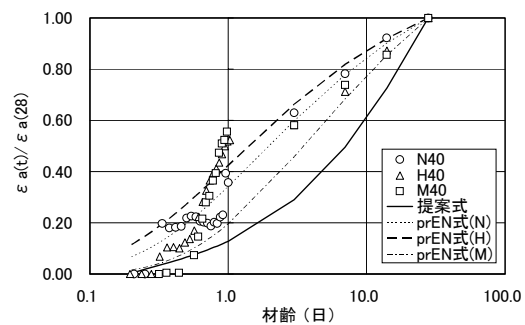


図 - 1 4 自己収縮ひずみの経時変化($W/C=40\%$)

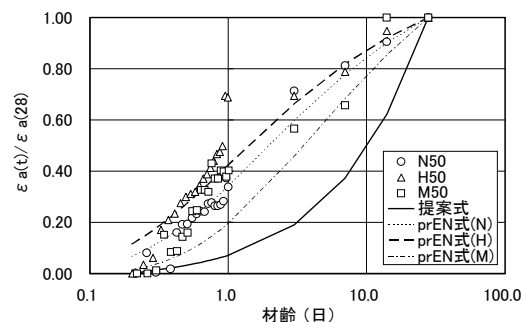


図 - 1 5 自己収縮ひずみの経時変化($W/C=50\%$)

f_{ck} :材齢 28 日における設計基準強度

s:セメントの種類の影響を表す係数, 普通セメント $s=0.25$, 早強セメント $s=0.38$, 中庸熱セメント $s=0.20$

prEN 式(式(5))においては,水セメント比の影響は圧縮強度の関数として評価されている。セメントの種類の影響は,自己収縮の進行速度に対して考慮されており,終局値は同一強度であればセメントの種類によらず一定値としている。prEN 式による計算値と普通セメントの実測値との比較を図 - 6 に示す。prEN 式は水セメント比が小さい場合の自己収縮を過小評価するようである。

図 - 11 ~ 図 - 15 は,材齢 28 日における自己収縮ひずみに対する各材齢の自己収縮ひずみの比を示したものである。図には提案式(式(3))および prEN 式(式(6))による予測値も示してある。prEN 式では水和の速いセメントほど自己収縮の進行速度が速くとしているが,測定結果からはそのような傾向は認められなかった。W/C=22%および 25%の場合は,いずれのセメントについても提案式による予測値は実測値と概ね一致している。W/C=40%および 50%の場合には自己収縮の進行速度を過小評価している傾向が認められる。

以上のことから,提案式(式(2))により各種セメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみを実用上満足のできる精度で予測することが可能であると考えられる。ただし,ここで設定したの値は,材齢 28 日までの自己収縮ひずみの測定値に基づいて決定したものであるため,今後,さらに長期材齢におけるデータに基づいた検討が必要である。

4. まとめ

本研究では,水セメント比 22 ~ 50%の範囲で 5 種類のセメント(普通セメント,早強セメント,中庸熱セメント,低熱セメント,高炉 B 種セメント)を用いたコンクリートの自己収縮ひずみの測定を行い,セメントの種類の影響を考慮で

きる自己収縮ひずみの予測式について検討を行った。本研究の範囲内で明らかになった事項をまとめると以下の通りである。

- (1) いずれのセメントの場合も,水セメント比が小さくなるほど自己収縮ひずみは大きくなった。
- (2) 普通セメントを用いた場合に比べて,中庸熱セメントあるいは高炉セメント B 種を用いた場合は自己収縮ひずみは若干小さく,低熱セメントを用いた場合はさらに小さくなった。
- (3) 既往の自己収縮ひずみの予測式(式(2))において,セメントの種類の影響を表す係数の値を適切に設定することにより,各種セメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみを予測することが可能である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 田澤栄一,宮澤伸吾,佐藤 剛:自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響,セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.528-533, 1993
- 3) 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.195-198, 1996
- 4) 三浦智哉,田澤栄一,宮澤伸吾,保利彰宏:コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.359-364, 1995
- 5) Tazawa, E. and Miyazawa, S.: Influence of cement composition on autogenous shrinkage of concrete, Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, 2ii071, 1997
- 6) 田澤栄一,宮澤伸吾:コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究,土木学会論文集, No.571 / V-36, pp.211-219, 1997
- 7) CEN, Eurocode 2, prEN 1992-2, 2000