

論文 コンクリートの自己収縮ひずみの予測式に関する一考察

川合 雅弘^{*1}・宮澤 伸吾^{*2}・黒井 登起雄^{*2}・齊藤 倫将^{*3}

要旨：種々のセメントを用い,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材齢 1 年まで測定した。さらに普通セメントを用い,水セメント比を 18~65%の範囲で 10 種類に変えたコンクリートの自己収縮ひずみを測定した。これらの測定結果を基に土木学会の自己収縮ひずみの予測式におけるセメントの種類の影響を表す係数および自己収縮の進行特性を表す係数についての検討を行った。

キーワード：自己収縮, 予測式, セメント, 水セメント比

1. はじめに

自己収縮とは,セメント系材料の水和反応に起因する体積減少のことであり,この現象によりコンクリート構造物が巨視的なひび割れを起こす可能性があると言われている。平成 14 年度制定土木学会標準示方書には,コンクリートの自己収縮ひずみの予測式^{1) 2)}が掲載されている。しかし,この土木学会の予測式は,普通ポルトランドセメントのみ適用可能であるため,既報³⁾では各種セメントを用いたコンクリートで材齢 28 日まで自己収縮試験を行い,セメントの種類の影響を評価できるように予測式の適用範囲を拡張した。本研究では,材齢 1 年までの自己収縮試験結果を基に既報³⁾で提案した予測式の適用性について確認した。さらに土木学会式における自己収縮の進行特性を表す係数の評価式について新たに提案した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料および配合は,以下のシリーズ A, B, C の通りである。

(1) シリーズ A

セメントは,普通セメント (N),早強セメント (H),中庸熱セメント (M),低熱セメント (L),高炉セメント B 種 (BB) を使用して,水セメン

ト比 (W/C) を 22~50%としたコンクリートの自己収縮ひずみを材齢 1 年まで測定した。各セメントの化学分析結果および鉱物組成を表-1 に示す。骨材として,鬼怒川産川砂(密度 2.58 g/cm³,吸水率 2.01%,粗粒率 2.88),葛生産硬質砂岩碎石(密度 2.62 g/cm³,吸水率 0.59%,最大寸法 20mm)を用いた。

(2) シリーズ B

セメントは,普通セメント (N) を使用して,W/C を 18~65%としたコンクリートの自己収縮ひずみを材齢 91 日まで測定した。骨材としては,鬼怒川産川砂(密度 2.60g/cm³,吸水率 2.28%,粗粒率 2.67),葛生産硬質砂岩碎石(密度 2.64g/cm³,吸水率 0.52%,最大寸法 20mm)を用いた。

(3) シリーズ C

セメントは,普通セメント (N) を使用して,W/C を 22~50%としたコンクリートの自己収縮ひずみを材齢 182 日まで測定した。骨材としては,大井川水系陸砂(密度 2.58g/cm³,吸水率 1.97%,粗粒率 2.73),青梅産砂岩碎石(密度 2.65g/cm³,吸水率 0.59%,最大寸法 20mm)を用いた。

シリーズ A, B, C において,混和剤として W/C = 18~30%についてはポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤,W/C=32~65%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

* 1 足利工業大学 大学院工学研究科 修士課程土木工学専攻 (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 足利工業大学 工学部 都市環境工学科

表-1 セメントの性質

セメント	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（シリーズA, シリーズB, シリーズC）

シリーズ	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					スランブ、 スランブ ロー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	凝結 始発 (日)	材齢28日 圧縮強度 (N/mm^2)
				W	C	S	G	Ad ($\text{C} \times \%$)					
A	N	22.0	43.0	165	750	661	890	1.20	70×69	3.1	20.6	0.180	92.5
	H					660	888	1.10	51×50	1.2	13.0	0.194	106.8
	M					665	896	1.00	56×54	2.1	16.0	0.167	118.0
	L					666	897	1.10	72×70	2.6	16.0	0.272	109.5
	BB					651	876	1.20	70×69	2.6	15.0	0.375	85.0
	N	25.0	45.6	165	660	735	890	1.00	70×68	0.9	20.4	0.167	94.2
	H					733	888	1.20	54×52	2.3	18.1	0.139	103.0
	M					739	895	0.80	65×62	2.5	14.2	0.167	111.0
	L					739	896	0.80	70×70	1.1	16.4	0.218	101.2
	BB					725	879	0.70	60×60	3.8	17.7	0.235	78.2
	N	30.0	48.6	165	550	827	888	0.70	44×44	3.0	18.3	0.178	72.5
	H					825	886	1.00	52×52	3.1	21.6	0.212	76.1
	M					830	891	0.80	51×51	3.5	19.4	0.208	74.1
	L					831	892	0.70	65×65	1.3	16.0	0.231	88.9
	BB					818	879	0.80	65×65	3.6	18.5	0.250	68.7
	N	40.0	43.2			174	435	0.25	8.0	4.0	18.0	0.199	60.1
	H					174	435	0.25	8.0	2.0	15.5	0.176	57.9
	M					184	461	0.25	11.5	2.7	15.0	0.316	53.5
	L					184	461	0.25	13.0	3.1	14.5	0.366	57.5
	BB					184	461	0.25	10.5	3.6	14.0	0.283	58.3
	N	50.0	45.2			185	371	0.25	8.5	3.1	26.9	0.197	44.0
	H					185	370	0.25	8.0	3.2	23.2	0.181	46.1
	M					174	348	0.25	8.0	3.2	21.4	0.219	43.6
	L					174	348	0.25	8.0	4.0	16.9	0.316	45.7
	BB					174	348	0.25	11.5	3.1	18.8	0.247	50.0
B	N	18.0	40.0	165	917	546	831	1.85	80×79	2.5	27.0	0.132	132.8
		22.0	43.0	165	750	646	869	1.00	69×69	2.8	28.0	0.160	106.3
		22.0	43.0	165	750	646	869	1.20	60×59	3.1	21.0	0.160	108.3
		25.0	45.6	170	680	705	854	0.90	69×69	2.9	22.0	0.174	103.6
		28.0	43.8	165	589	704	918	0.70	63×62	3.9	26.0	0.153	88.1
		30.0	43.8	170	567	718	936	0.65	48×48	2.1	25.0	0.169	78.7
		32.0	40.5	180	563	668	937	0.50	7.0	3.0	27.0	0.306	72.8
		36.0	41.3	170	472	677	977	0.45	7.2	4.0	25.0	0.253	55.4
		40.0	43.1	170	425	723	970	0.45	7.0	4.4	25.0	0.241	46.0
		50.0	46.1	162	324	822	975	0.45	8.5	4.8	21.0	0.257	29.8
C	N	65.0	49.1	170	262	890	937	0.35	6.7	4.5	26.0	0.247	26.4
		22.0	43.0	165	750	646	880	1.00	68×65	4.0	15.0	0.153	87.4
		25.0	45.6		660	720	880	0.70	53×52	3.4	11.0	0.201	89.6
		30.0	48.6		550	809	880	0.80	52×52	2.1	11.0	0.167	73.5
		40.0	43.0	158	395	746	1015	0.50	9.5	5.9	13.0	0.299	46.4
		50.0	45.0	160	320	805	1011	0.50	11.0	4.4	15.5	0.278	40.7

および圧縮強度試験結果を表-2 に示す。

2.2 自己収縮ひずみの測定方法

コンクリートの自己収縮ひずみの測定は、100×100×400mm 供試体を用い、温度 20±2°C において J C I 自己収縮研究委員会の提案した試験方法⁴⁾により行った。コンクリートの自己収縮試験は、シリーズA, B, Cの合計 41 配合について凝結試験の始発時間より行った。供試体は各配合につき 3 本作製した。なお、材齢 1 日までの測定は、接触タイプの変位計を用いることを基本としたが、シリーズAの一部の配合においては、供試体本数を 6 本とし非接触タイプの変位計（渦電流式）による測定も行った。

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-7 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°C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線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ として計測された全収縮ひずみから差し引いた。いずれのセメントにおいて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ている。また、セメントの違いによる影響も大きく現れている。普通セメントに比べ

て早強セメントでは、自己収縮ひずみが大きくなる傾向が確認された。中庸熱セメントを使用した場合は、自己収縮ひずみが小さくなる傾向が確認され、低熱セメントを使用した場合の自己収縮ひずみは、さらに小さくなる傾向が確認された。これらの実験結果は、一般的に発表されている自己収縮特性と同様の傾向を示したものである。

高炉セメントB種を使用した場合においては、普通セメントに比べて低水セメント比において自己収縮ひずみが小さくなっている。既往の研究では、高炉セメントB種を用いたコンクリー

トの自己収縮は普通セメントを用いた場合より大きいとする報告もある。これらの実験結果の相異については今後の研究が必要である。

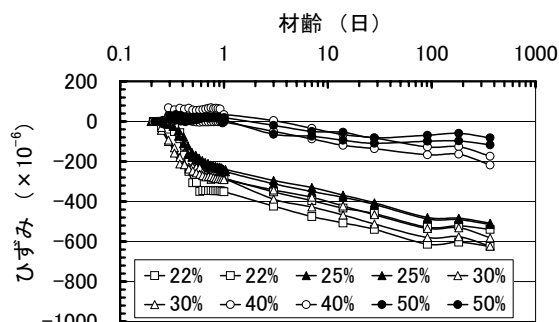


図-1 コンクリートの自己収縮ひずみ
(シリーズA, セメントN)

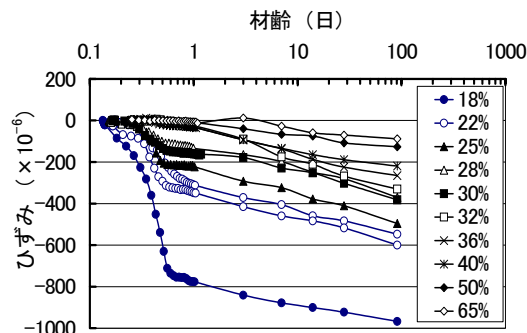


図-2 コンクリートの自己収縮ひずみ
(シリーズB, セメントN)

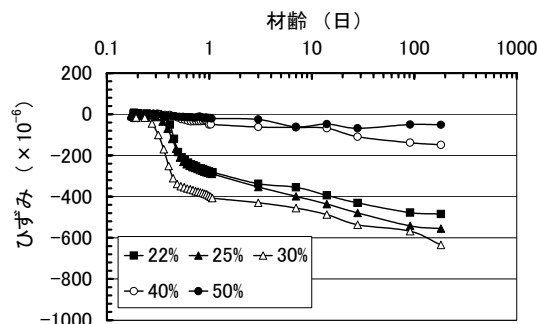


図-3 コンクリートの自己収縮ひずみ
(シリーズC, セメントN)

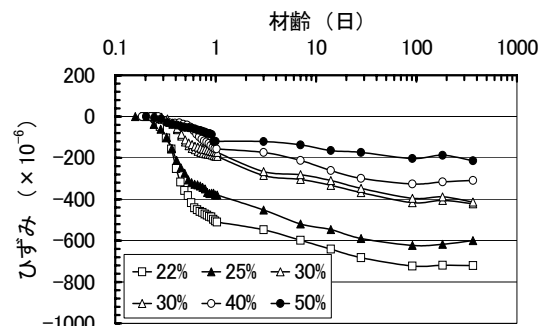


図-4 コンクリートの自己収縮ひずみ
(シリーズA, セメントH)

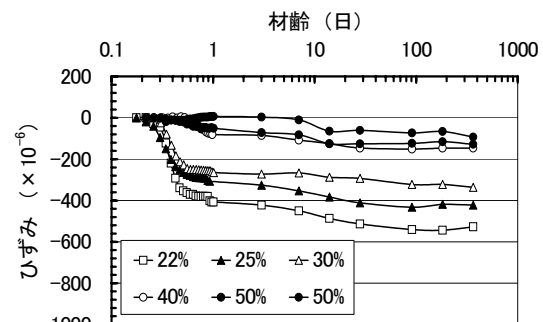


図-5 コンクリートの自己収縮ひずみ
(シリーズA, セメントM)

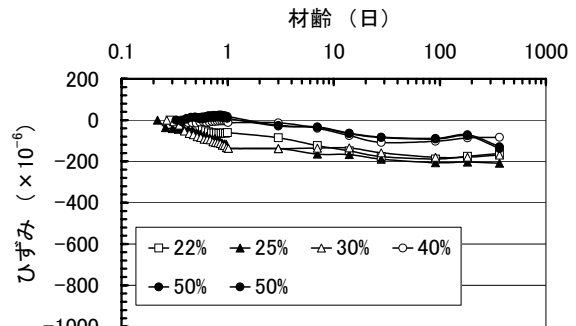


図-6 コンクリートの自己収縮ひずみ
(シリーズA, セメントL)

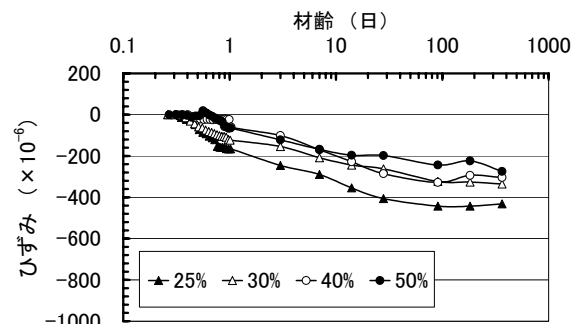


図-7 コンクリートの自己収縮ひずみ
(シリーズA, セメントBB)

3.2 自己収縮ひずみ予測式

本研究では、式(1)～(3)に示す土木学会のコンクリートの自己収縮ひずみ予測式を検討対象としている。

$$\varepsilon_a(t) = \gamma \varepsilon_{ao}(W/C)\beta_a(t) \quad (1)$$

ここに、

$\varepsilon_a(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 $\varepsilon_{ao}(W/C)$ ：自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$) で次式により求める。

$$\varepsilon_{ao}(W/C) = 3070 \exp(-7.2(W/C)) \quad (2)$$

$\beta_a(t)$ ：自己収縮ひずみの進行特性を表す関数で次式により求める。

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

γ ：セメントの種類の影響を表す係数（表-3 参照）、 (W/C) ：水セメント比、 a, b ：定数（式(4, 5)参照）、 t_o ：凝結の始発（日）、 t ：材齢（日）。

土木学会の自己収縮ひずみの予測式におけるセメントの種類の影響を表す係数 γ は、普通セメントの場合 1.00 と定められている。しかし、他のセメントにおける係数 γ は定められていない。そこで、セメントの鉱物組成から求めた γ の値³⁾（表-3）を用いてコンクリートの自己収縮ひずみの予測値を算出し、シリーズAにおける材齢 1 年の実験値と比較を行った。

自己収縮の進行特性については、水セメント比により著しく異なる。そのため、土木学会式では、自己収縮の進行特性を表す係数 a, b は、特定の水セメント比（20, 23, 30, 40, 50%）に対して定められている。しかし、任意の水セメント比に対応するためには、係数 a および b は水セメント比の関数として与えられることが望ましい。そこで、本研

表-3 式(1)の γ

セメントの種類	N	H	M	L	BB
式(1)の γ	1.00	1.20	0.85	0.40	0.85

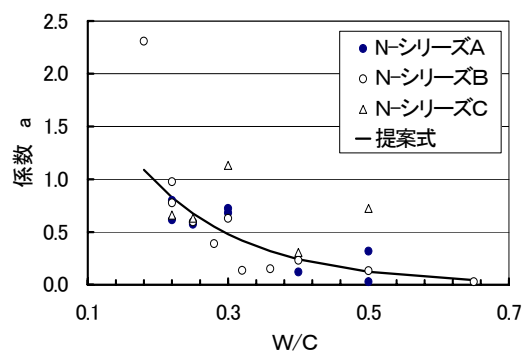


図-8 W/Cと係数 a の関係

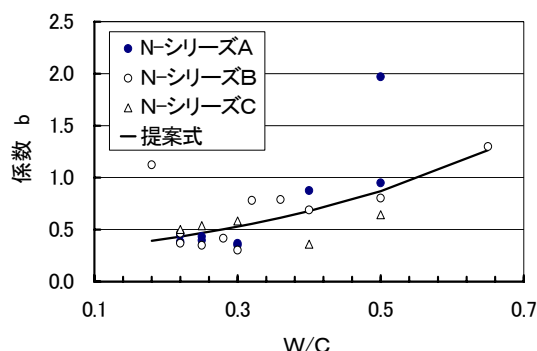


図-9 W/Cと係数 b の関係

究では、水セメント比を 18～65% の範囲で 10 種類に変えたコンクリートの自己収縮ひずみ（シリーズA, B, C）の測定を行い、実測値を基に自己収縮の進行特性の検討を行った。

材齢 91 日における自己収縮ひずみの実測値を基準とし、これに対する各材齢における自己収縮ひずみの比を求め、式(3)で近似したときの係数 a, b を算出した。各配合について、算出した係数 a, b と W/C の関係を図-8, 9 に示す。これらの結果を指数関数により近似し、係数 a, b の算定式として式(4)、(5)を提案する。

$$a = 3.72 \exp(-6.83 \times (W/C)) \quad (4)$$

$$b = 0.251 \exp(2.49 \times (W/C)) \quad (5)$$

図-10～図-15 では、土木学会の自己収縮ひずみ予測式(式(1)～(3))に本研究で提案する式(4)、(5)を適用することによりコンクリートの自己収縮を材齢 1 年においても概ね予測可能であることが確認された。

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代表的な Eurocode prEN⁵⁾ による

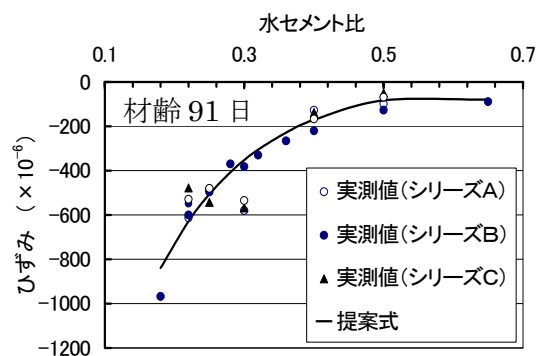


図-10 W/Cと自己収縮ひずみの関係
(シリーズA, B, C, セメントN)

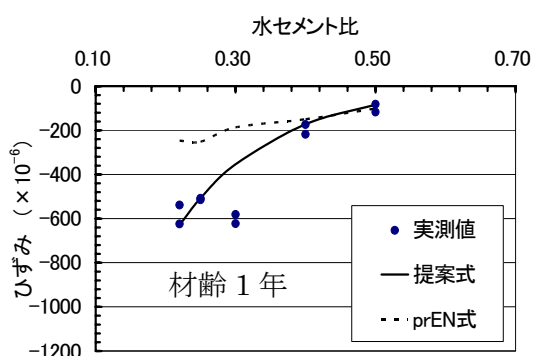


図-11 W/Cと自己収縮ひずみの関係
(シリーズA, セメントN)

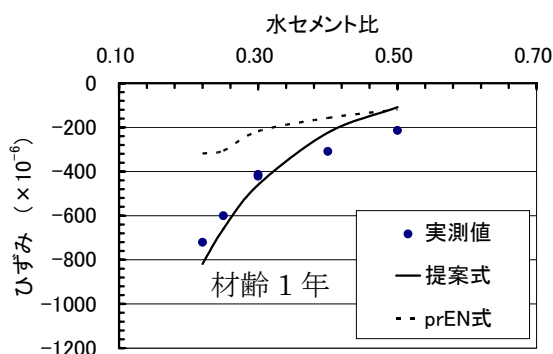


図-12 W/Cと自己収縮ひずみの関係
(シリーズA, セメントH)

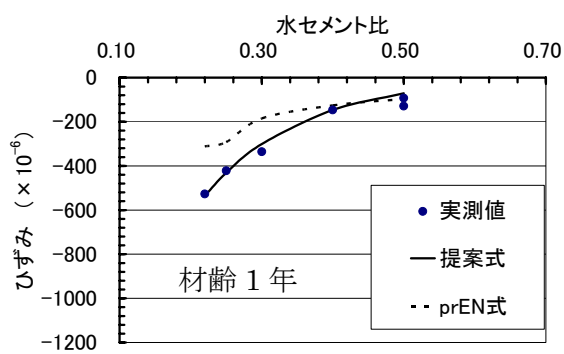


図-13 W/Cと自己収縮ひずみの関係
(シリーズA, セメントM)

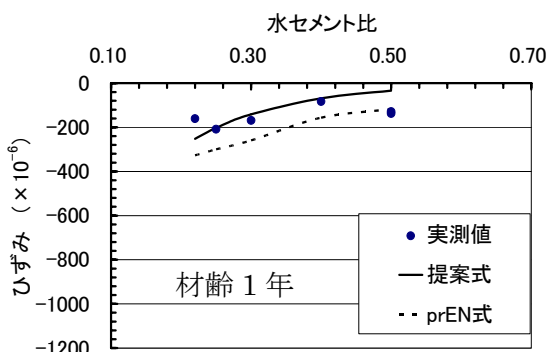


図-14 W/Cと自己収縮ひずみの関係
(シリーズA, セメントL)

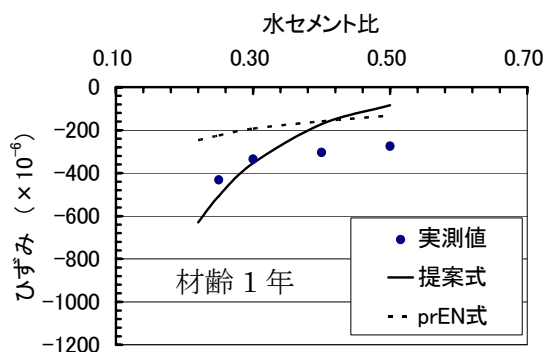


図-15 W/Cと自己収縮ひずみの関係
(シリーズA, セメントBB)

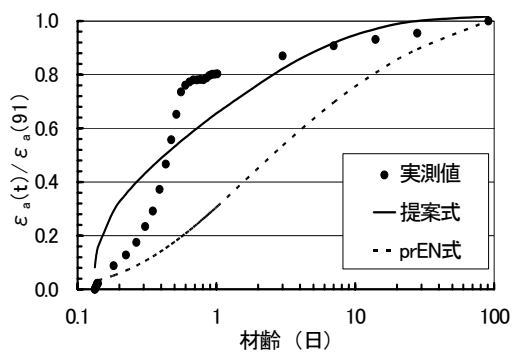


図-16 自己収縮ひずみ経時変化
(シリーズB, セメントN, W/C=18%)

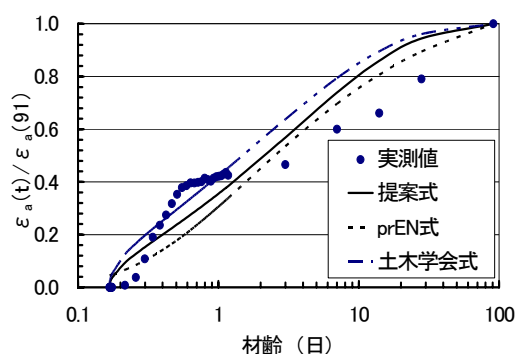


図-17 自己収縮ひずみ経時変化
(シリーズB, セメントN, W/C=30%)

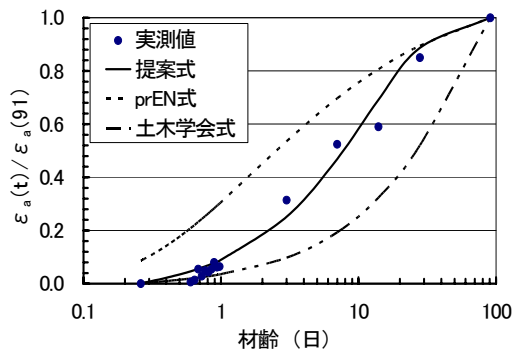


図-18 自己収縮ひずみ経時変化
(シリーズB, セメントN, W/C=50%)

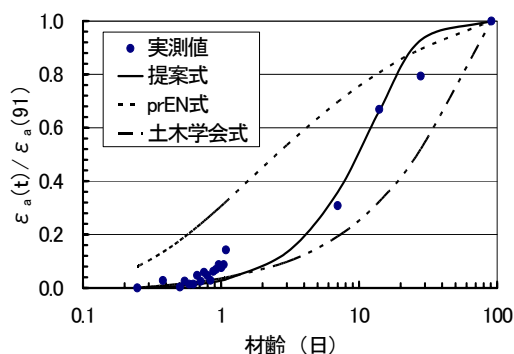


図-19 自己収縮ひずみ経時変化
(シリーズB, セメントN, W/C=65%)

予測値も図中に示したが,prEN 式は低水セメント比において自己収縮ひずみを過小評価する傾向が認められた。

図-16～図-19 は,提案式である式 (4), (5) から算出した係数 a, b を用いた自己収縮ひずみの経時変化の予測値と実測値を比較したものである。土木学会の自己収縮ひずみの予測式における自己収縮の進行特性を表す係数 a, b は,従来まで特定の水セメント比 (20,23,30,40,50%) に対してのみ定められていたが,提案式 (式 (4), (5)) によりW/Cが 18～65%の範囲で,任意の水セメント比においてコンクリートの自己収縮の予測をすることができるようになった。

4. まとめ

本研究では,水セメント比 18～65%の範囲で 5 種類のセメントを使用してコンクリートの自己収縮ひずみを最長で材齢 1 年まで測定した。

実験値を基に土木学会の自己収縮ひずみの予

測式におけるセメントの種類の影響を表す係数および自己収縮の進行特性を表す係数についての検討を行った。本研究の範囲内で明らかになった事項を以下にまとめる。

- (1) セメントの種類により自己収縮ひずみの発現が著しく異なり,また,いずれのセメントを用いた場合においても,水セメント比が低くなると自己収縮ひずみは大きくなる。
- (2) 土木学会の自己収縮ひずみ予測式における自己収縮の進行特性を表す係数 a および b の算定式として式 (4), (5) を提案した。これにより,W/C = 18～65%の任意の水セメント比における自己収縮ひずみの経時変化の予測が可能となった。
- (3) 土木学会の自己収縮ひずみ予測式におけるセメントの種類の影響を表す係数 γ (表-3) および本研究で提案した係数 a, b の算出式を用いることにより,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となった。

参考文献

- 1) (社) 土木学会,2002 年度制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編],pp.32,2002
- 2) 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,pp.211～219,1997
- 3) 宮澤伸吾,黒井登起雄,川合雅弘: 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,コンクリート工学年次論文集,pp.429～434,2002
- 4) (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.51～54,2002
- 5) European Standard prEN 1992-1