

コンクリート専門委員会報告  
REPORT OF THE TECHNICAL COMMITTEE ON CONCRETE  
F-55  
(追補)

各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究  
(コンクリートの乾燥収縮に関する実験結果)

A Study on the durability of concrete made using various cements  
(The results of the examination for drying shrinkage of concrete)

2011年3月

(march. 2011)

社団法人 セメント協会

JAPAN CEMENT ASSOCIATION

## 要旨

コンクリート専門委員会では、2008年3月に委員会報告F-55「各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究」を刊行した。本研究はF-55の追補として、普通、早強、中庸熱、低熱の各ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の混合セメントの合計5種類のセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮に関する実験結果を取りまとめたものである。

コンクリートの配合は、水セメント比を、普通コンクリートを想定して55%および45%，高強度コンクリートを想定して35%の3水準とした。配合決定にあたってはセメントの種類以外の要因をできる限り排除するため、水セメント比が55%および45%の水準では、まず、普通ポルトランドセメントの配合を決定した後、その他のセメントは、これと同一の単位水量および単位粗骨材量、AE減水剤量の配合とした。水セメント比が35%の水準においても全てのセメントで単位水量および単位粗骨材量を一定とし、目標スランプフロー60±5cmを満足するように高性能AE減水剤量を変化させて配合を決定した。

試験所の違いがコンクリートの乾燥収縮へ及ぼす影響についても検討した。試験所間誤差を要因とし、1試験所で成形した同一ロットのコンクリート供試体を6試験所に移送して、合計7試験所において同時に測定する共通試験を行った。この共通試験は、水セメント比55%かつ乾燥前養生期間を標準水中養生7日間一定とする条件で実施した。なお、測定方法による誤差要因を排除するため、測定方法は全ての試験所でJIS A 1129-2:2010のコンタクトゲージ法で統一した。

また、乾燥を開始するまでの前養生期間がコンクリートの乾燥収縮へ及ぼす影響についても検討した。乾燥前養生期間をJIS A 1129:2010の付属書Aにある、標準水中養生7日間一定とする条件および乾燥収縮測定開始時のコンクリートの圧縮強度が同等となる前養生期間とする条件の2種類の乾燥前養生条件で実施した。

その結果、乾燥収縮率の試験所間の範囲は、セメントの種類毎に見ると、普通で $172 \times 10^{-6}$ 、早強で $111 \times 10^{-6}$ 、中庸熱で $77 \times 10^{-6}$ 、低熱で $157 \times 10^{-6}$ 、高炉B種で $98 \times 10^{-6}$ であり、これらを平均すると $123 \times 10^{-6}$ となった。

また、コンクリートの乾燥収縮に及ぼすセメントの種類の影響を検討した結果、乾燥期間26週におけるセメントの種類による乾燥収縮率の範囲(=最大ー最小)は、W/C55%および45%で約 $90 \times 10^{-6}$ 、W/C35%で約 $160 \times 10^{-6}$ であった。W/C55%における共通試験の結果をもとに統計的手法で検討した結果、早強が他のセメントよりも若干乾燥収縮率が小さくなることが認められたものの、他の普通、中庸熱、低熱および高炉B種の4種類間では有意な差は無いと判定する結果となった。

さらに、乾燥前養生期間の影響を検討した結果、圧縮強度が同等となる前養生期間の場合、前養生期間を標準水中養生7日間とした場合に比べて、セメントの種類によるコンクリートの乾燥収縮率の範囲は小さくなる傾向となつた。また、乾燥収縮率と質量減少率の関係より評価した収縮性状も、圧縮強度を同等とすることでセメントの種類によらず同程度となることが明らかとなつた。

## 序

本研究は、2008年3月に刊行した委員会報告F-55「各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究」の追補として主にセメントの種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響の把握を目的として2009年8月から実験を開始したものである。

今般、実験結果を取りまとめたので報告する。

2011年 3月

社団法人 セメント協会 コンクリート専門委員会  
(敬称略 順不同)

委員長	三菱マテリアル株式会社 (太平洋セメント株式会社)	中山 英明 (横山 良 2009年9月 交替)
委 員	日鐵セメント株式会社 株式会社トクヤマ 太平洋セメント株式会社 宇部興産株式会社 電気化学工業株式会社 新日鐵高炉セメント株式会社 住友大阪セメント株式会社	小倉 束 加藤 弘義 石川 雄康 大和 功一郎 川原 正秀 植木 康知 草野 昌夫 佐藤 智泰
事務局	社団法人セメント協会	島崎 泰 泉尾 英文 (村田 芳樹 2010年4月 交替)

## 目 次

1. 緒言 .....	1
2. 研究の概要 .....	2
3. 実験の概要 .....	4
3.1 使用材料 .....	4
3.1.1 セメント .....	4
3.1.2 骨材 .....	4
3.1.3 練混ぜ水 .....	5
3.1.4 混和剤 .....	5
3.2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状 .....	5
3.3 コンクリートの練混ぜおよび成形 .....	6
3.4 コンクリートの試験方法 .....	7
3.4.1 圧縮強度および静弾性係数試験 .....	7
3.4.2 乾燥収縮率および質量減少率試験 .....	7
4. 試験結果および考察 .....	8
4.1 圧縮強度 .....	8
4.2 静弾性係数 .....	10
4.3 乾燥収縮率および質量減少率 .....	12
4.3.1 試験所間誤差 .....	12
4.3.2 有意差検定によるセメントの種類の影響 .....	21
4.3.3 水セメント比の影響 .....	26
4.3.4 乾燥前養生期間の影響 .....	34
4.3.5 乾燥収縮率と質量減少率の関係 .....	38
5. 結言 .....	42
参考文献 .....	43

## 1. 緒言

昨今、コンクリートの収縮ひび割れについて社会的な関心が高く、設計、施工および材料面から様々な収縮ひび割れの制御対策が実施されている。

収縮ひび割れを制御する上で、コンクリートの乾燥収縮を低減させることが有効な対策の一つであり、配合の工夫、使用材料の選定、収縮低減効果のある混和材料の使用等、コンクリートの使用材料や配合面による乾燥収縮低減対策が提案されている。具体的には、単位水量の低減、骨材種類の選定、膨張材や収縮低減剤の利用等が挙げられる。これらの各種材料がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響について多くの検討がなされている。しかしながらが、乾燥収縮に及ぼすセメント種類の影響については明確にされておらず、またデータが十分に蓄積されているとは言い難い現状である。

セメント協会では1992年にセメントの種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する委員会報告<sup>1)</sup>を刊行している。しかし、これは水セメント比や乾燥前養生条件を限定して検討したものである。また、19年前のデータであり、当時と現在ではコンクリートの骨材事情が異なっており、新たにデータ収集が必要と考える。

そこで、本研究では、セメントの種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響の把握を目的とし、汎用的に市場で流通している各種のセメントを用いて当時の委員会報告に新たな要因および水準を追加してデータ収集を行った。

今回、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす要因および水準は、セメントの種類が普通、早強、中庸熱、低熱の各ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の混合セメントの合計5種類、コンクリートの配合条件である水セメント比が普通コンクリートを想定した55%および45%，高強度コンクリートを想定した35%の合計3水準、乾燥前養生期間を7日間一定および乾燥開始時の圧縮強度一定の2種類とし、これに加え、試験所間誤差を要因として7試験所による共通試験を実施した。

## 2. 研究の概要

本研究は、セメントの種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を把握すること目的として行った。すなわち、試験条件としてセメントの種類、水セメント比（以下、W/Cと略）、乾燥前養生条件、試験所を取り上げ、これらの条件がコンクリートの乾燥収縮率および質量減少率に及ぼす影響について検討したものである。これらの試験条件を以下に示す。

### [試験条件]

(1) セメントの種類……5種類：セメントの種類を表-2.1に示す。

表-2.1 セメントの種類

系	略称	セメントの種類
ポルトランドセメント	普通	普通ポルトランドセメント
	早強	早強ポルトランドセメント
	中庸熱	中庸熱ポルトランドセメント
	低熱	低熱ポルトランドセメント
混合セメント	高炉B種	高炉セメントB種

(2) 水セメント比(W/C)…3種類：55%, 45%, 35%

(3) 乾燥前養生条件……2種類：乾燥開始前の養生方法は標準水中養生とし、養生期間は以下のとおりである。乾燥開始までの前養生期間を図-2.1に示す。

①JIS A 1129 : 2010 の付属書Aに準拠し、成形翌日に脱型後、材齢7日まで標準水中養生

（材齢を一定とする条件）

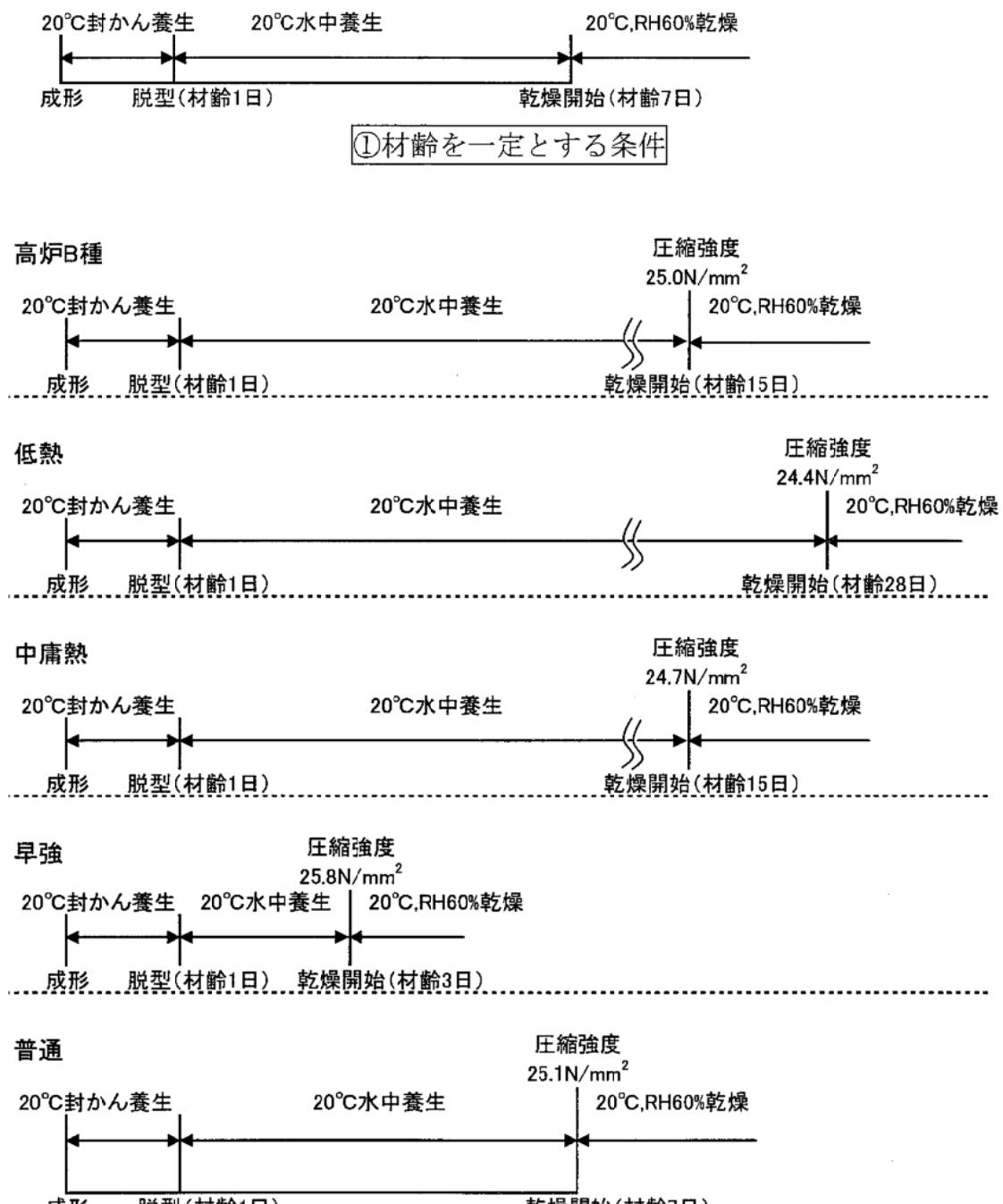
②成形翌日に脱型後、W/C毎に普通ポルトランドセメントの材齢7日の圧縮強度と同程度( $\pm 2\text{N/mm}^2$ )の強度が得られる材齢まで標準水中養生

（圧縮強度を一定とする条件）

(4) 試験所……………7試験所：(社)セメント協会 研究所および同協会 会員会社

(5) 測定方法……………1種類：JIS A 1129-2 : 2010「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法第2部：コンタクトゲージ法」

(6) 乾燥条件……………1条件：温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$



②圧縮強度を一定とする条件の一例 (W/C55%のケース)

図-2.1 乾燥開始までの前養生期間

### 3. 実験の概要

#### 3.1 使用材料

##### 3.1.1 セメント

セメントは、市販の普通ポルトランドセメント（以下、普通と略）、早強ポルトランドセメント（以下、早強と略）、中庸熱ポルトランドセメント（以下、中庸熱と略）、低熱ポルトランドセメント（以下、低熱と略）および高炉セメントB種（以下、高炉B種と略）の5種類を使用した。なお、中庸熱は2銘柄、その他はそれぞれ3銘柄を任意に選定し、等量で混合したものを試料とした。

これらセメントの化学成分および物理的性質を表-3.1.1.1 および表-3.1.1.2 に示す。

表-3.1.1.1 セメントの化学成分

セメント の種類	化学成分 (%)											
	ig.oss	insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> Oeq	Cl <sup>-</sup>
普通	1.94	0.16	20.71	5.51	2.92	64.24	1.11	2.14	0.26	0.38	0.51	0.019
早強	1.45	0.10	20.03	5.12	2.68	65.34	1.02	3.06	0.24	0.41	0.51	0.010
中庸熱	0.74	0.05	23.73	3.39	3.84	64.28	0.80	2.05	0.26	0.47	0.57	0.009
低熱	0.77	0.12	26.00	3.00	3.22	62.92	0.74	2.41	0.25	0.39	0.51	0.004
高炉B種	1.61	0.11	25.82	9.18	1.76	54.98	3.24	1.92	0.27	0.34	0.49	0.012

表-3.1.1.2 セメントの物理的性質

セメント の種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面 積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結			安定性	圧縮強さ (N/mm <sup>2</sup> )				
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		1日	3日	7日	28日	91日
普通	3.14	3280	27.9	2-21	3-31	良	—	30.0	45.0	61.3	—
早強	3.12	4490	30.7	1-14	2-22	良	26.6	44.0	54.4	63.5	—
中庸熱	3.21	3190	27.9	3-02	4-27	良	—	20.6	29.0	56.9	—
低熱	3.22	3400	26.9	3-04	4-59	良	—	11.4	16.2	53.8	77.7
高炉B種	3.02	3740	29.3	2-16	3-57	良	—	22.1	35.6	63.7	—

#### 3.1.2 骨材

骨材は、粗骨材に東京都青梅市産の硬質砂岩碎石を、細骨材に千葉県君津市産の山砂を使用した。これらの骨材の粒度および物性を表-3.1.2.1 および表-3.1.2.2 に示す。

表-3.1.2.1 骨材の粒度

分類	種類	産地	ふるい目の寸法 (mm)	ふるい通過量(%)										粗粒率
				25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
粗骨材	硬質砂岩碎石	東京都 青梅市産	100	97	79	39	1	0	—	—	—	—	—	6.63
細骨材	山砂	千葉県 君津市産	—	—	—	100	92	80	67	52	29	3	2.77	

表-3.1.2.2 骨材の物性

分類	密度		単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	吸水率 (%)	微粒 分量 (%)
	表乾	絶乾				
	(g/cm <sup>3</sup> )					
粗骨材	2.65	2.63	1.68	63.9	0.74	0.8
細骨材	2.63	2.59	1.86	71.9	1.63	0.1

### 3.1.3 練混ぜ水

練混ぜ水は、上水道水を使用した。

### 3.1.4 混和剤

混和剤は、W/C が 55%および 45%の配合のコンクリートに BASF ポゾリス社製 AE 減水剤標準形（I 種）（ポゾリス No.70）および同社製 AE 剤（I 種）（マイクロエア 303A）を使用した。また、W/C35%の配合のコンクリートに同社製高性能 AE 減水剤標準形（I 種）（レオビルド SP8SV）および同社製 AE 剤（I 種）（マイクロエア 101）を使用した。

## 3.2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表-3.2.1 に示す。コンクリートの配合は、W/C を 55, 45 および 35%の 3 水準とし、配合決定にあたってはセメントの種類以外の配合要因をできる限り、排除するよう配慮した。すなわち、W/C が 55%および 45%の水準では、普通の目標スランプ 12±1.5cm の配合条件を得て、他のセメントは W/C 每に普通と同一の単位水量および単位粗骨材量、AE 減水剤量の配合とした。

一方、W/C が 35%の水準では、全てのセメントで単位粗骨材量および単位水量を一定とし、高性能 AE 減水剤量を変化させて目標スランプフローを 60±5cm とした。なお、空気量は、すべての配合において 4.5±0.5%とした。

表-3.2.1 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	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量						フレッシュ性状		
			水	セメント	細骨材	粗骨材	(高性能) AE減水剤	AE剤	スランプ (フロー) (cm)	空気量 (%)	練上 温度 (°C)
			(kg/m <sup>3</sup> )								
普通	55	47.0	156	284	883	995	710	3	12.0	4.9	21.0
	45	47.0	159	353	851	960	882	4	11.0	4.7	21.0
	35	49.0	170	486	818	852	(6318)	13	67×62	4.1	21.0
早強	55	47.0	156	284	881	995	710	5	10.5	4.2	22.0
	45	47.0	159	353	850	960	882	6	9.0	4.0	22.0
	35	48.9	170	486	815	852	(6124)	11	63×64	4.5	22.0
中庸熱	55	47.2	156	284	888	995	710	2	13.5	4.8	21.0
	45	47.2	159	353	858	960	882	3	13.5	4.5	21.0
	35	49.3	170	486	827	852	(4860)	9	55×58	4.3	21.0
低熱	55	47.2	156	284	889	995	710	3	11.5	4.2	21.0
	45	47.2	159	353	859	960	882	4	12.5	4.4	21.0
	35	49.3	170	486	828	852	(5103)	10	61×61	5.0	21.0
高炉B種	55	46.8	156	284	873	995	710	2	9.0	4.3	21.0
	45	46.6	159	353	840	960	882	6	9.5	4.6	21.0
	35	48.5	170	486	802	852	(5832)	12	62×66	4.8	21.5

### 3.3 コンクリートの練混ぜおよび成形

コンクリートの練混ぜおよび成形は、JIS A 1132 : 2006「コンクリート強度試験用供試体の作り方」およびJIS A 1138 : 2005「試験室におけるコンクリートの作り方」に準じて行った。

練混ぜに使用したミキサは、パン型強制練りミキサ(公称容量55リットル)であり、練混ぜの方法は、粗骨材、細骨材、セメント投入後、空練り30秒、その後、混和剤を分散させた練混ぜ水を投入し、W/C55%および45%の配合では90秒、W/C35%の配合では120秒の練混ぜとした。

### 3.4 コンクリートの試験方法

#### 3.4.1 圧縮強度および静弾性係数試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108 : 2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行った。静弾性係数試験は、JIS A 1149 : 2010「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠し、コンプレッソメータ（(株)東京測器研究所社製）を使用して行った。供試体の寸法は  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の円柱供試体とし、養生方法は標準水中養生 ( $20.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ ) とした。試験材齢は、7,28,56,91 日とした。

#### 3.4.2 乾燥収縮率および質量減少率試験

乾燥収縮率および質量減少率試験は、JIS A 1129-2 : 2010「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法 第2部：コンタクトゲージ法」に準拠して行った。供試体の寸法は  $10 \times 10 \times 40\text{cm}$  の角柱供試体とし、乾燥を開始するまでの養生方法は標準水中養生 ( $20.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ ) とした。乾燥条件は、温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度  $60 \pm 5\%$  の恒温恒湿室に静置し、乾燥期間 0.14, 0.43, 1, 1.43, 2, 2.57, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 24, 26 週（1, 3, 7, 10, 14, 18, 28, 42, 56, 84, 112, 140, 168, 182 日）に測定を行った。

実施した試験項目の一覧を表-3.4.1 に示す。

表-3.4.1 試験項目の一覧

セメント の種類	W/C (%)	試験項目	圧縮 強度 <sup>※1</sup>	静弾性 係数 <sup>※1</sup>	乾燥収縮率および質量減少率		
					材齢 一定 <sup>※2</sup>	強度 一定 <sup>※3</sup>	試験所
普通	55	○	○	○	○	○	○
	45	○	○	○			
	35	○	○	○			
早強	55	○	○	○	○	○	○
	45	○	○	○	○		
	35	○	○	○	○		
中庸熱	55	○	○	○	○	○	○
	45	○	○	○	○		
	35	○	○	○	○		
低熱	55	○	○	○	○	○	○
	45	○	○	○	○		
	35	○	○	○	○		
高炉 B 種	55	○	○	○	○	○	○
	45	○	○	○	○		
	35	○	○	○	○		

※1 標準水中養生で材齢 7,28,56,91 日にて測定した。

※2 図-2.1 の①材齢を一定とする条件を参照。測定は乾燥期間 26 週（182 日）まで定期的に測定した。

※3 図-2.1 の②圧縮強度を一定とする条件を参照。測定は※2 と同様に乾燥期間 26 週（182 日）まで定期的に測定した。

## 4. 試験結果および考察

### 4.1 圧縮強度

コンクリートの圧縮強度を表-4.1.1 および図-4.1.1～図-4.1.3 に示す。

セメントの種類による圧縮強度は材齢の経過とともに変化した。材齢 7 日の圧縮強度は、何れの W/C でも概ね、早強 > 普通 > 高炉 B 種 > 中庸熱 > 低熱の順となつた。しかし、材齢 91 日の圧縮強度は、W/C55% および W/C45%において低熱、高炉 B 種、中庸熱の方が早強および普通よりも高く、W/C35% では早強および普通の方が低熱、高炉 B 種、中庸熱よりも高くなり、W/C 毎にセメントの種類の発現性状が異なつた。

また、セメントの種類による材齢 7 日の圧縮強度の範囲は W/C55% で  $25.1 \text{ N/mm}^2$ 、W/C45% で  $34.3 \text{ N/mm}^2$ 、W/C35% で  $34.3 \text{ N/mm}^2$  であった。一方、材齢 91 日の圧縮強度の範囲は W/C55% で  $42.3 \text{ N/mm}^2$ 、45% で  $53.8 \text{ N/mm}^2$ 、35% で  $57.7 \text{ N/mm}^2$  となり、材齢の経過とともにセメントの種類による範囲は小さくなつた。

表-4.1.1 コンクリートの圧縮強度

水セメント比 (%)	セメントの種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
		材齢(日)			
		7	28	56	91
55	普通	25.1	33.6	38.2	42.3
	早強	33.2	40.2	41.9	43.5
	中庸熱	16.4	33.9	43.6	47.0
	低熱	7.4	24.4	42.6	48.5
	高炉B種	18.2	34.2	44.9	48.8
45	普通	34.3	42.8	51.3	53.8
	早強	40.7	49.3	49.7	55.7
	中庸熱	23.2	42.8	50.9	56.8
	低熱	12.9	37.8	54.3	59.4
	高炉B種	24.2	42.0	48.1	57.7
35	普通	52.4	64.7	76.8	80.9
	早強	63.3	71.0	78.8	82.3
	中庸熱	39.7	59.1	68.7	78.5
	低熱	22.2	46.6	66.1	75.0
	高炉B種	34.5	58.5	65.1	72.0

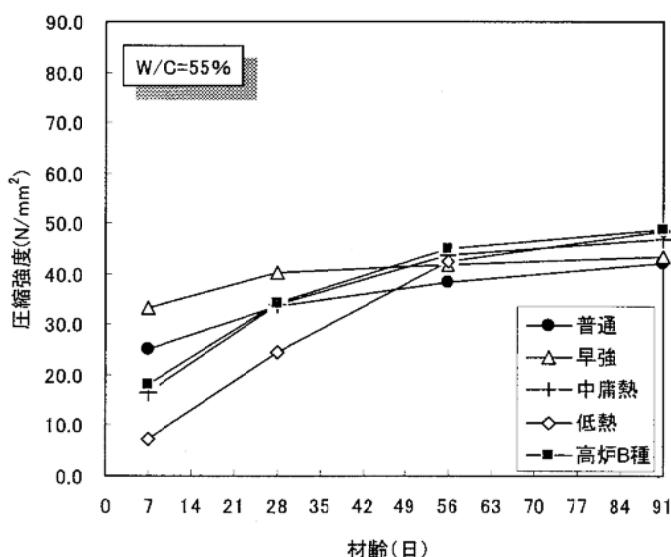


図-4.1.1 コンクリートの圧縮強度 (W/C55%)

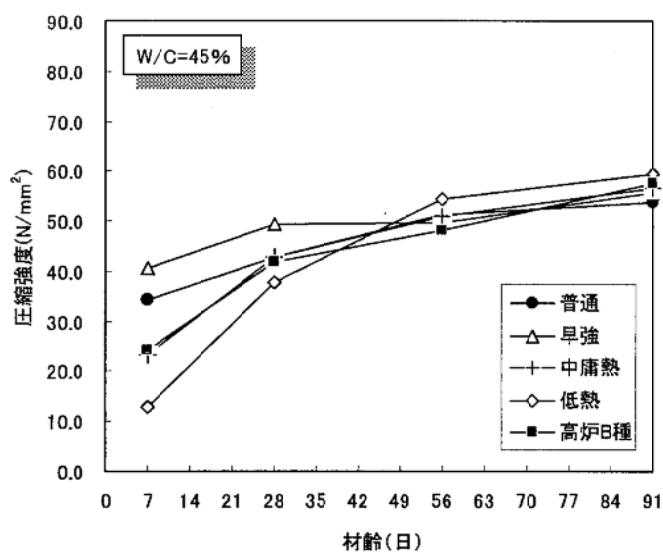


図-4.1.2 コンクリートの圧縮強度 (W/C45%)

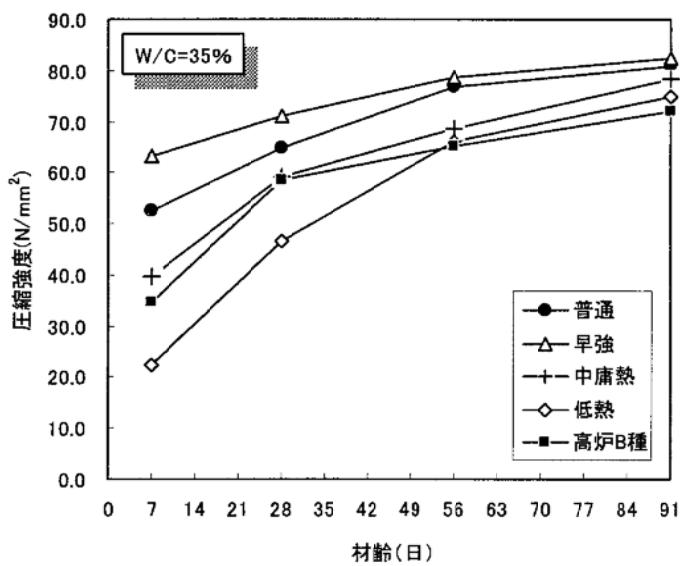


図-4.1.3 コンクリートの圧縮強度 (W/C35%)

## 4.2 静弾性係数

コンクリートの静弾性係数を表-4.2.1 および図-4.2.1～図-4.2.3 に示す。

材齢 7 日の静弾性係数は、何れの W/C でも早強 > 普通 > 中庸熱 > 高炉 B 種 > 低熱の順であり、その範囲は W/C55% で  $10.7 \text{ kN/mm}^2$ 、W/C45% で  $7.8 \text{ kN/mm}^2$ 、W/C35% で  $9.1 \text{ kN/mm}^2$  であった。一方、材齢 91 日における静弾性係数の範囲は W/C55% で  $3.2 \text{ kN/mm}^2$ 、45% で  $1.9 \text{ kN/mm}^2$ 、35% で  $1.6 \text{ kN/mm}^2$  となり、圧縮強度と同様、材齢の経過とともにセメントの種類による静弾性係数の範囲は小さくなり、W/C 毎にセメントの種類の発現性状が異なった。

表-4.2.1 コンクリートの静弾性係数

水セメント比 (%)	セメントの種類	静弾性係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )			
		材齢(日)			
		7	28	56	91
55	普通	28.1	32.1	32.9	34.2
	早強	30.3	31.8	33.6	33.6
	中庸熱	25.8	30.3	32.4	35.7
	低熱	19.6	30.6	33.0	35.7
	高炉B種	23.1	32.1	34.8	36.8
45	普通	29.9	35.1	35.6	36.3
	早強	31.5	33.8	35.8	36.9
	中庸熱	27.8	32.3	36.2	36.8
	低熱	23.7	31.8	35.6	37.8
	高炉B種	24.0	32.3	36.9	38.2
35	普通	31.2	35.0	36.7	39.7
	早強	33.9	34.7	38.1	40.1
	中庸熱	30.5	34.8	38.6	39.9
	低熱	24.8	31.8	36.1	38.5
	高炉B種	28.3	34.7	36.5	39.4

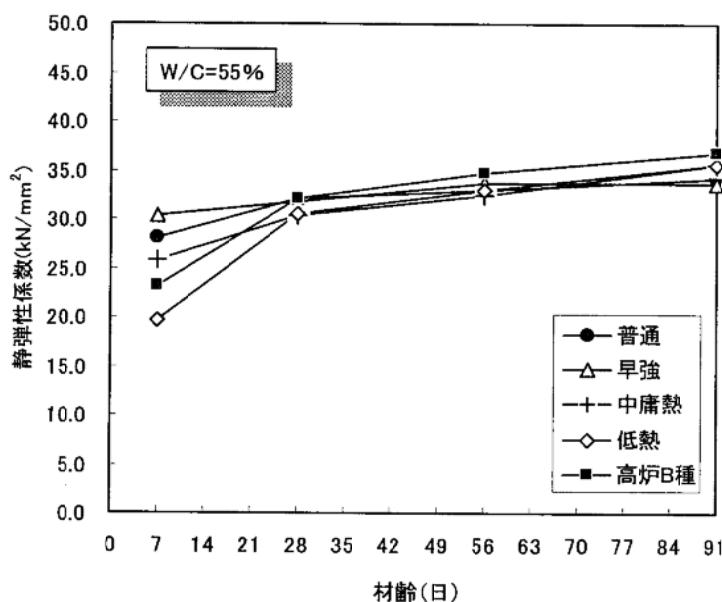


図-4.2.1 コンクリートの静弾性係数 (W/C55%)

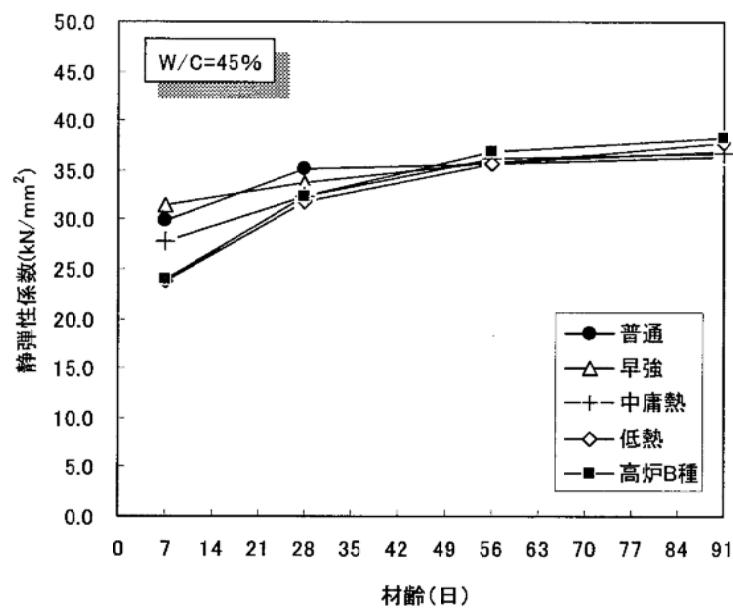


図-4.2.2 コンクリートの静弾性係数 (W/C45%)

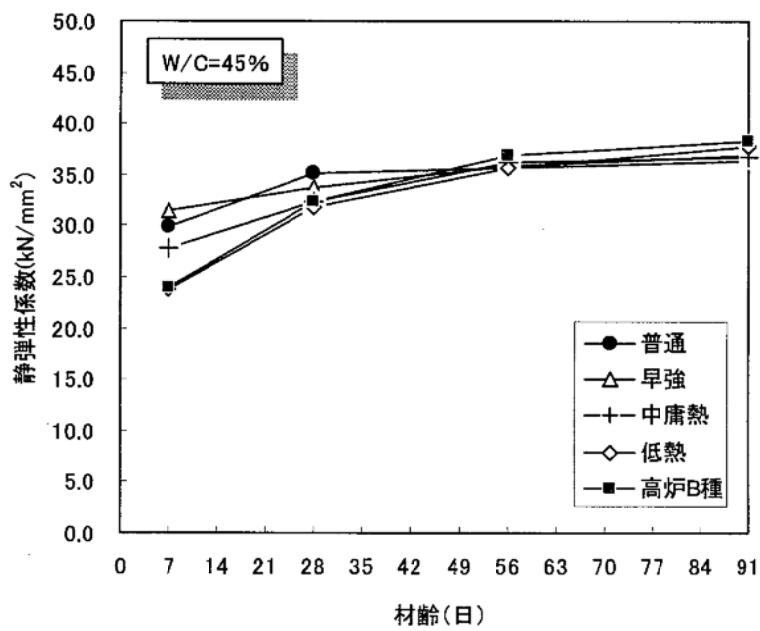


図-4.2.3 コンクリートの静弾性係数 (W/C35%)

## 4.3 乾燥収縮率および質量減少率

### 4.3.1 試験所間誤差

コンクリートの乾燥収縮率試験の試験所間誤差を把握するため、1試験所で成形した同一ロットのコンクリート供試体を6試験所に移送し、合計7試験所において乾燥収縮率および質量減少率試験による共通試験を行った。試験は、誤差要因を少なくするために、基長時間および測定方法をコンタクトゲージ法（ホイットモア）に統一して行った。なお、本試験では乾燥前養生期間をJIS A 1129：2010の付属書Aに準拠し、材齢7日まで標準水中養生とした条件で、普通、早強、中庸熱、低熱および高炉B種の5種類のセメントを使用したW/C55%のコンクリートを対象として実施した。

乾燥収縮率および質量減少率の結果を図-4.3.1.1～図-4.3.1.10および表-4.3.1.1～表-4.3.1.10に示す。

乾燥期間26週における乾燥収縮率の試験所間の範囲（＝最大－最小）は、セメントの種類毎に見ると、普通で $172 \times 10^{-6}$ 、早強で $111 \times 10^{-6}$ 、中庸熱で $77 \times 10^{-6}$ 、低熱で $157 \times 10^{-6}$ 、高炉B種で $98 \times 10^{-6}$ であり、これらを平均すると $123 \times 10^{-6}$ であった。

本共通試験は、二日間に分けてコンクリートを成形しており、一日目は普通および低熱の2種類を、二日目は早強、中庸熱および高炉B種の3種類を成形した。今回の結果を見ると、一日目に成形した普通と低熱が大きくばらついていることから、成形日の違いがコンクリートの乾燥収縮率に何らかの影響を及ぼしている可能性がある。また、試験所毎に見ると、G試験所の結果のみ、低熱および中庸熱の質量減少率が他の試験所と異なっており、乾燥収縮率も全てのセメントで最小値であった。

同一ロットの材料を使用し、乾燥収縮試験を繰り返し10回実施した既往の実験結果によれば、乾燥期間26週における乾燥収縮率の範囲は $100 \times 10^{-6}$ 程度となることが報告されている<sup>2)</sup>。本共通試験における試験所間誤差はこれを若干上回るもの、ほぼ同じ程度に乾燥収縮率がばらつく結果となった。コンクリートの乾燥収縮試験を異なる試験所で実施した場合、JIS A 1129付属書Aに定められている温湿度の管理の範囲を満足していても、 $100 \times 10^{-6}$ 程度の誤差が生じると考えられる。

なお、本試験では測定方法をコンタクトゲージ法（ホイットモア）で統一して行ったが、乾燥収縮率は測定方法によっても異なることが報告<sup>3) 4)</sup>されている。従って、コンクリートの乾燥収縮率の測定や測定結果の評価を行うにあたっては、測定誤差の要因を十分に考慮する必要がある。

共通試験結果【乾燥収縮率 普通，早強，中庸熱】

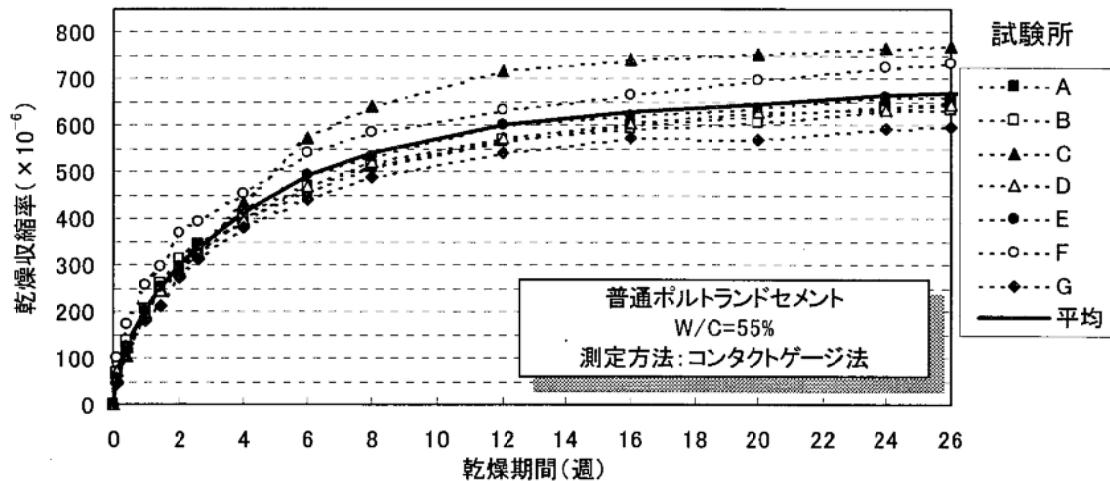


図-4.3.1.1 普通を使用したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C55%，乾燥前養生期間7日)

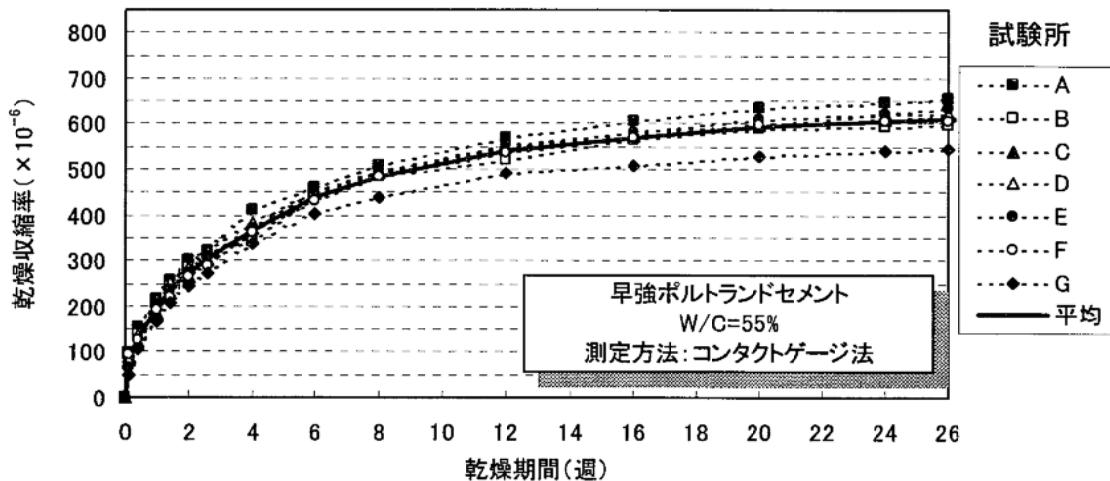


図-4.3.1.2 早強を使用したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C55%，乾燥前養生期間7日)

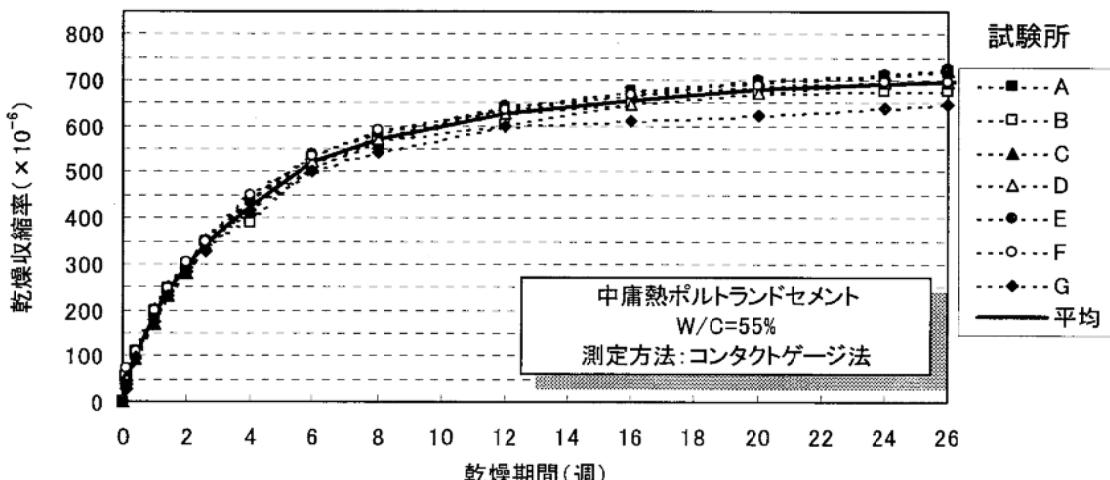


図-4.3.1.3 中庸熱を使用したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C55%，乾燥前養生期間7日)

共通試験結果【乾燥収縮率 低熱, 高炉 B 種】

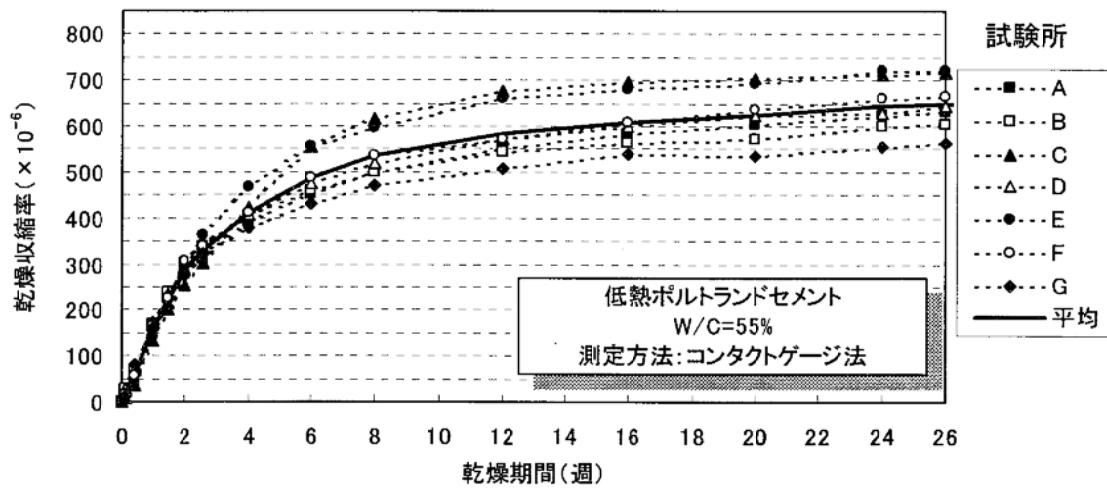


図-4.3.1.4 低熱を使用したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

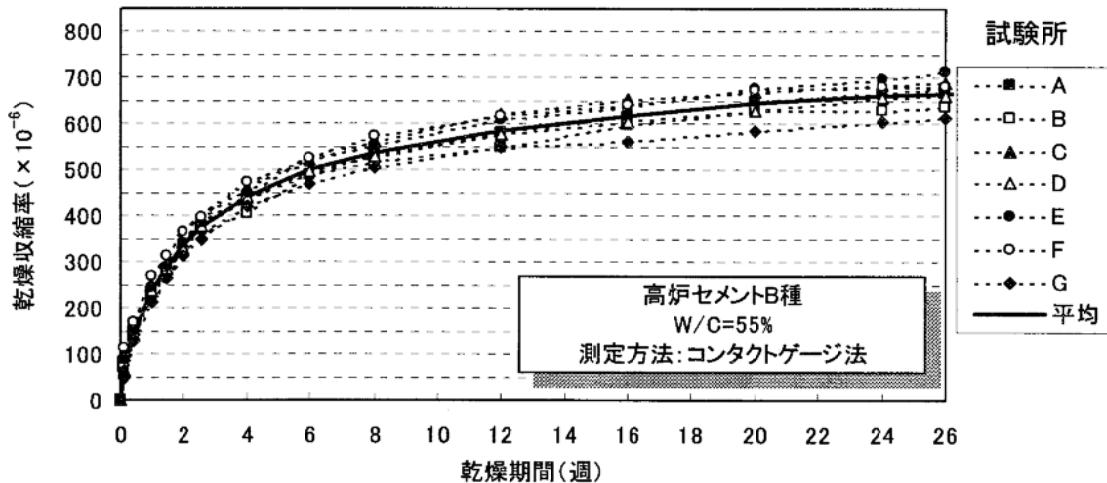


図-4.3.1.5 高炉 B 種を使用したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

共通試験結果【質量減少率 普通, 早強, 中庸熱】

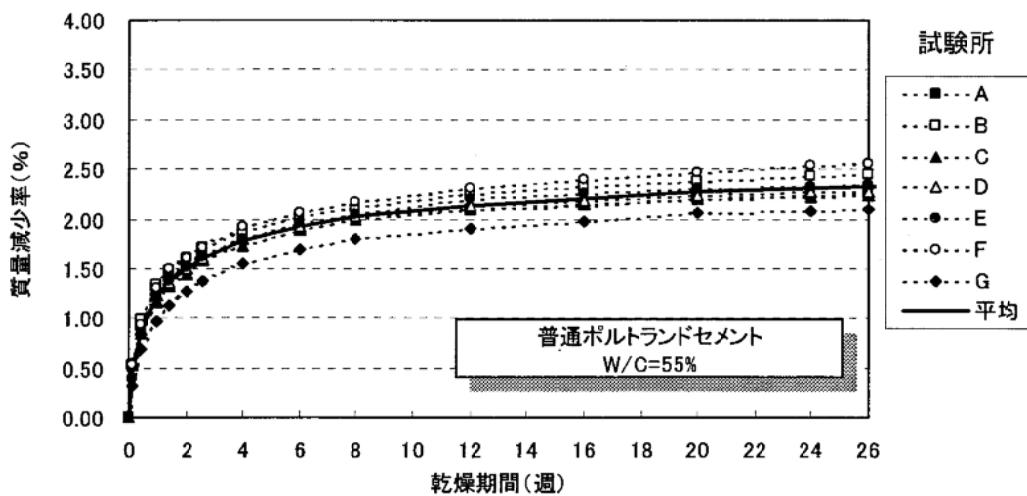


図-4.3.1.6 普通を使用したコンクリートの質量減少率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

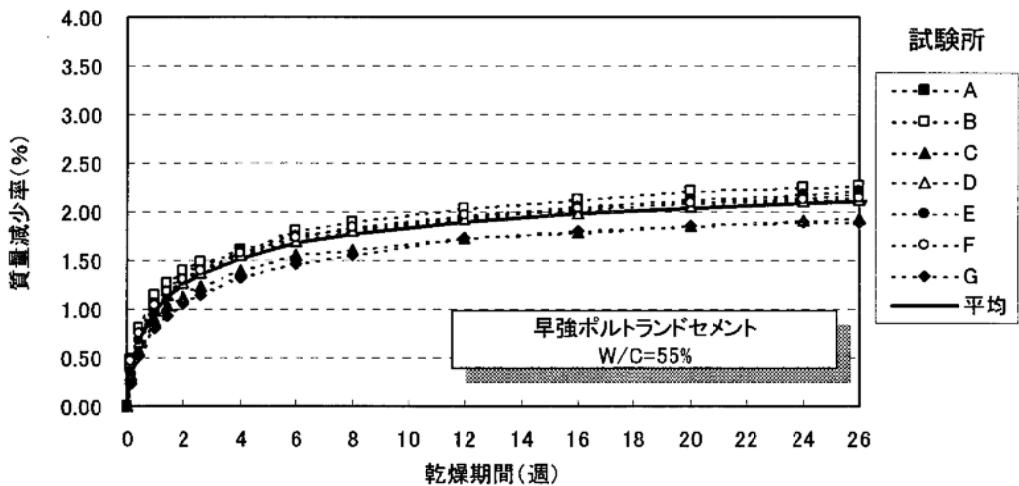


図-4.3.1.7 早強を使用したコンクリートの質量減少率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

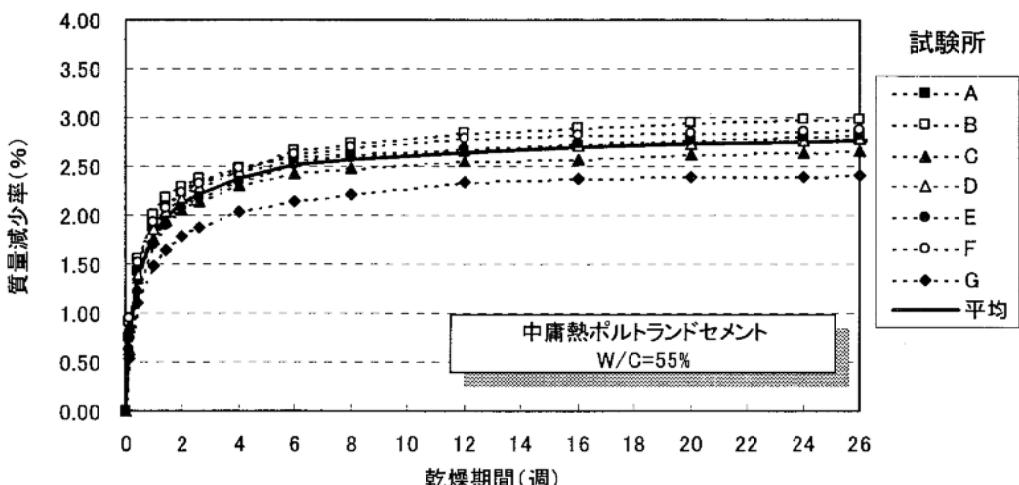


図-4.3.1.8 中庸熱を使用したコンクリートの質量減少率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

共通試験結果【質量減少率 低熱, 高炉 B 種】

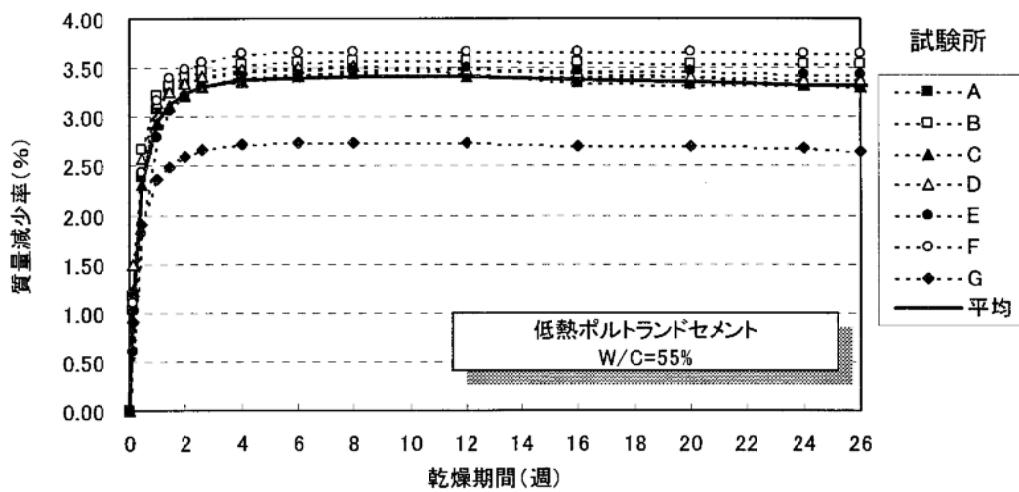


図-4.3.1.9 低熱を使用したコンクリートの質量減少率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

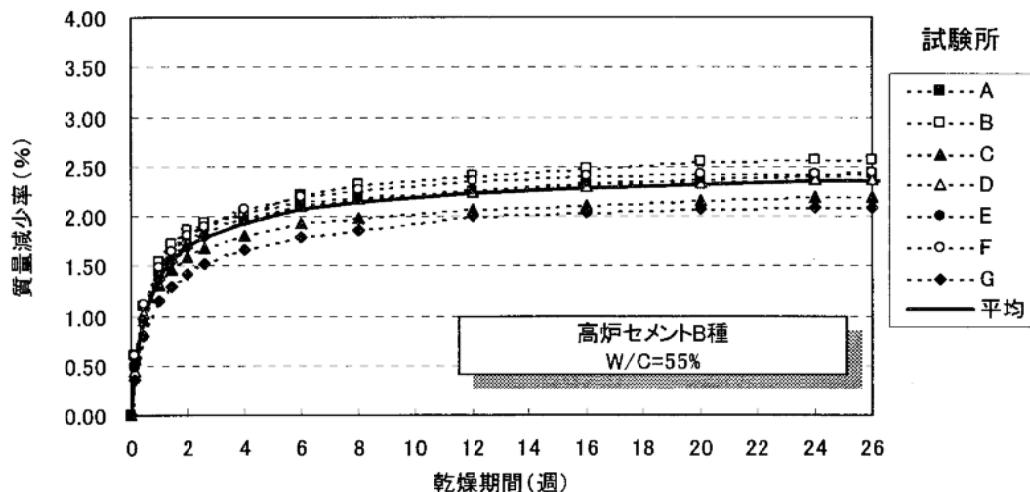


図-4.3.1.10 高炉 B 種を使用したコンクリートの質量減少率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

共通試験結果【乾燥収縮率 普通, 早強, 中庸熱】

表-4.3.1.1 普通を使用したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

試験所	(×10 <sup>-6</sup> )														
	乾燥期間 (週)														
	0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
A	0	67	133	205	248	289	322	395	458	508	567	603	623	642	649
B	0	68	135	206	260	313	343	410	470	513	570	594	607	633	634
C	0	60	105	197	248	288	324	432	575	642	717	741	755	764	769
D	0	73	126	198	243	286	325	395	468	520	574	605	629	635	646
E	0	58	123	199	251	295	340	417	494	534	602	622	638	662	662
F	0	99	171	257	295	367	394	455	540	587	633	666	697	726	732
G	0	46	122	182	214	273	313	380	443	489	540	574	570	594	597
平均	0	67	131	206	251	302	337	412	493	542	600	629	646	665	670
最大	0	99	171	257	295	367	394	455	575	642	717	741	755	764	769
最小	0	46	105	182	214	273	313	380	443	489	540	574	570	594	597
範囲	0	53	66	75	81	94	81	75	132	153	177	167	185	170	172
標準偏差	0	16	20	24	24	31	27	25	48	54	59	57	61	59	60

表-4.3.1.2 早強を使用したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

試験所	(×10 <sup>-6</sup> )														
	乾燥期間 (週)														
	0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
A	0	99	153	215	255	299	320	409	459	509	569	607	633	646	656
B	0	95	137	208	243	283	313	341	439	483	519	564	590	592	596
C	0	89	120	181	228	265	301	372	447	491	549	580	599	612	619
D	0	82	140	215	253	284	320	384	452	496	551	575	596	623	624
E	0	67	128	202	235	273	311	371	452	498	555	582	612	624	634
F	0	95	127	193	221	264	290	361	431	485	535	571	599	604	605
G	0	49	105	165	207	242	272	339	403	439	494	508	527	540	545
平均	0	82	130	197	235	273	304	368	440	486	539	570	594	606	611
最大	0	99	153	215	255	299	320	409	459	509	569	607	633	646	656
最小	0	49	105	165	207	242	272	339	403	439	494	508	527	540	545
範囲	0	50	48	50	48	57	48	70	56	70	75	99	106	106	111
標準偏差	0	18	15	19	17	18	18	24	19	22	25	30	33	34	35

表-4.3.1.3 中庸熱を使用したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

試験所	(×10 <sup>-6</sup> )														
	乾燥期間 (週)														
	0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
A	0	54	109	189	244	299	349	437	521	576	640	676	696	710	721
B	0	57	106	197	245	299	349	387	520	567	603	647	673	674	675
C	0	57	94	172	230	279	338	418	508	563	641	677	700	714	722
D	0	47	107	203	252	305	354	443	524	572	626	649	670	697	696
E	0	36	100	194	241	297	349	435	537	584	643	668	699	714	724
F	0	72	108	200	245	304	349	449	534	591	636	669	689	698	698
G	0	28	97	175	232	283	327	417	501	541	598	612	624	641	647
平均	0	50	103	190	241	295	345	427	521	571	627	657	679	693	698
最大	0	72	109	203	252	305	354	449	537	591	643	677	700	714	724
最小	0	28	94	172	230	279	327	387	501	541	598	612	624	641	647
範囲	0	44	15	31	22	26	27	62	36	50	45	65	76	73	77
標準偏差	0	15	6	12	8	10	9	21	13	16	19	23	27	27	29

共通試験結果【乾燥収縮率 低熱, 高炉 B 種】

表-4.3.1.4 低熱を使用したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

試験所	(×10 <sup>-6</sup> )														
	0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
A	0	25	64	163	224	276	311	392	451	501	551	586	604	623	631
B	0	27	70	169	239	302	339	407	461	498	545	562	574	601	603
C	0	8	35	133	201	255	303	421	556	617	677	695	706	714	719
D	0	28	69	174	233	289	333	406	476	521	572	599	623	629	643
E	0	18	39	143	221	295	362	466	556	595	659	682	694	722	722
F	0	18	55	165	227	305	340	409	488	536	574	609	638	661	663
G	0	13	80	163	206	275	321	380	432	470	507	539	534	557	565
平均	0	20	59	159	222	285	330	412	489	534	584	610	625	644	649
最大	0	28	80	174	239	305	362	466	556	617	677	695	706	722	722
最小	0	8	35	133	201	255	303	380	432	470	507	539	534	557	565
範囲	0	20	45	41	38	50	59	86	124	147	170	156	172	165	157
標準偏差	0	8	17	15	14	18	20	27	49	54	62	58	62	60	58

表-4.3.1.5 高炉 B 種を使用したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

試験所	(×10 <sup>-6</sup> )														
	0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
A	0	83	149	231	285	337	376	437	491	534	582	617	649	669	676
B	0	69	135	229	281	330	368	404	488	519	548	597	629	630	638
C	0	96	153	238	295	339	393	462	522	560	620	653	671	684	690
D	0	64	139	236	286	330	375	441	497	529	578	604	630	659	662
E	0	62	143	246	290	342	384	449	522	555	608	638	676	698	712
F	0	112	168	268	311	364	398	475	526	573	619	643	675	680	680
G	0	50	130	211	263	314	348	419	471	505	550	563	585	607	614
平均	0	77	145	237	287	337	377	441	502	539	586	616	645	661	667
最大	0	112	168	268	311	364	398	475	526	573	620	653	676	698	712
最小	0	50	130	211	263	314	348	404	471	505	548	563	585	607	614
範囲	0	62	38	57	48	50	50	71	55	68	72	90	91	91	98
標準偏差	0	22	13	17	15	15	17	24	21	24	30	31	33	32	33

共通試験結果【質量減少率 普通, 早強, 中庸熱】

表-4.3.1.6 普通を使用したコンクリートの質量減少率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

試験所	(%) 乾燥期間 (週)														
	0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
A	0.00	0.53	0.92	1.25	1.41	1.53	1.63	1.80	1.93	2.03	2.10	2.14	2.20	2.24	2.26
B	0.00	0.53	0.99	1.34	1.48	1.61	1.71	1.87	2.02	2.11	2.25	2.33	2.38	2.44	2.45
C	0.00	0.52	0.85	1.17	1.33	1.45	1.58	1.73	1.88	1.99	2.09	2.15	2.20	2.22	2.24
D	0.00	0.55	0.88	1.23	1.36	1.50	1.60	1.79	1.92	2.02	2.14	2.19	2.24	2.27	2.28
E	0.00	0.39	0.83	1.21	1.37	1.52	1.62	1.80	1.95	2.04	2.20	2.25	2.31	2.33	2.35
F	0.00	0.52	0.94	1.30	1.50	1.61	1.71	1.92	2.06	2.16	2.30	2.40	2.47	2.53	2.55
G	0.00	0.32	0.68	0.97	1.13	1.27	1.37	1.55	1.69	1.79	1.91	1.98	2.06	2.08	2.09
平均	0.00	0.48	0.87	1.21	1.37	1.50	1.60	1.78	1.92	2.02	2.14	2.21	2.27	2.30	2.32
最大	0.00	0.55	0.99	1.34	1.50	1.61	1.71	1.92	2.06	2.16	2.30	2.40	2.47	2.53	2.55
最小	0.00	0.32	0.68	0.97	1.13	1.27	1.37	1.55	1.69	1.79	1.91	1.98	2.06	2.08	2.09
範囲	0	0.23	0.31	0.37	0.37	0.34	0.34	0.37	0.37	0.37	0.39	0.42	0.41	0.45	0.46
標準偏差	0.00	0.09	0.10	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.13	0.15	0.15

表-4.3.1.7 早強を使用したコンクリートの質量減少率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

試験所	(%) 乾燥期間 (週)														
	0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
A	0.00	0.42	0.78	1.06	1.21	1.34	1.44	1.61	1.76	1.82	1.94	2.02	2.10	2.15	2.18
B	0.00	0.48	0.80	1.14	1.27	1.39	1.48	1.58	1.80	1.90	2.04	2.13	2.21	2.25	2.26
C	0.00	0.33	0.58	0.87	1.04	1.12	1.23	1.39	1.55	1.61	1.74	1.79	1.86	1.91	1.93
D	0.00	0.28	0.66	0.99	1.14	1.27	1.38	1.56	1.70	1.80	1.92	1.99	2.05	2.11	2.12
E	0.00	0.35	0.67	0.99	1.14	1.28	1.39	1.57	1.75	1.84	1.96	2.06	2.12	2.17	2.21
F	0.00	0.46	0.75	1.04	1.17	1.31	1.39	1.58	1.74	1.84	1.96	2.04	2.09	2.13	2.15
G	0.00	0.23	0.52	0.80	0.93	1.05	1.15	1.32	1.47	1.56	1.74	1.80	1.85	1.89	1.89
平均	0.00	0.36	0.68	0.98	1.13	1.25	1.35	1.52	1.68	1.77	1.90	1.98	2.04	2.09	2.11
最大	0.00	0.48	0.80	1.14	1.27	1.39	1.48	1.61	1.80	1.90	2.04	2.13	2.21	2.25	2.26
最小	0.00	0.23	0.52	0.80	0.93	1.05	1.15	1.32	1.47	1.56	1.74	1.79	1.85	1.89	1.89
範囲	0	0.25	0.28	0.34	0.34	0.34	0.33	0.29	0.33	0.34	0.3	0.34	0.36	0.36	0.37
標準偏差	0.00	0.09	0.10	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	0.13	0.12	0.13	0.14	0.14	0.14

表-4.3.1.8 中庸熱を使用したコンクリートの質量減少率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

試験所	(%) 乾燥期間 (週)														
	0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
A	0.00	0.75	1.43	1.87	2.10	2.24	2.34	2.49	2.61	2.63	2.65	2.72	2.77	2.80	2.82
B	0.00	0.91	1.55	2.00	2.17	2.29	2.38	2.45	2.66	2.74	2.84	2.90	2.95	2.98	2.98
C	0.00	0.86	1.35	1.75	1.94	2.06	2.15	2.31	2.43	2.48	2.55	2.58	2.62	2.65	2.66
D	0.00	0.63	1.39	1.86	2.04	2.18	2.29	2.45	2.56	2.62	2.68	2.71	2.74	2.77	2.78
E	0.00	0.62	1.21	1.69	1.90	2.07	2.18	2.34	2.52	2.59	2.67	2.73	2.76	2.80	2.83
F	0.00	0.94	1.52	1.92	2.08	2.23	2.32	2.49	2.62	2.69	2.78	2.82	2.84	2.86	2.87
G	0.00	0.54	1.11	1.49	1.65	1.78	1.88	2.03	2.15	2.21	2.34	2.37	2.40	2.40	2.41
平均	0.00	0.75	1.37	1.80	1.98	2.12	2.22	2.37	2.51	2.57	2.64	2.69	2.73	2.75	2.76
最大	0.00	0.94	1.55	2.00	2.17	2.29	2.38	2.49	2.66	2.74	2.84	2.90	2.95	2.98	2.98
最小	0.00	0.54	1.11	1.49	1.65	1.78	1.88	2.03	2.15	2.21	2.34	2.37	2.40	2.41	2.41
範囲	0	0.4	0.44	0.51	0.52	0.51	0.5	0.46	0.51	0.53	0.5	0.53	0.55	0.58	0.57
標準偏差	0.00	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16	0.17	0.18	0.16	0.17	0.18	0.18	0.18

共通試験結果【質量減少率 低熱, 高炉 B 種】

表-4.3.1.9 低熱を使用したコンクリートの質量減少率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

試験所	(%)													
	乾燥期間 (週)													
0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
A	0.00	1.04	2.39	3.07	3.27	3.34	3.40	3.47	3.49	3.50	3.45	3.34	3.33	3.32
B	0.00	1.18	2.66	3.21	3.33	3.42	3.47	3.53	3.56	3.57	3.58	3.56	3.54	3.54
C	0.00	1.23	2.32	2.93	3.11	3.22	3.31	3.36	3.41	3.45	3.41	3.41	3.41	3.31
D	0.00	1.49	2.58	3.14	3.26	3.35	3.41	3.48	3.51	3.52	3.49	3.45	3.42	3.38
E	0.00	0.61	1.82	2.79	3.05	3.22	3.30	3.41	3.44	3.47	3.50	3.47	3.46	3.43
F	0.00	1.11	2.43	3.17	3.39	3.48	3.55	3.65	3.67	3.67	3.67	3.66	3.66	3.64
G	0.00	0.91	1.91	2.36	2.49	2.60	2.66	2.72	2.74	2.74	2.74	2.71	2.71	2.68
平均	0.00	1.08	2.30	2.95	3.13	3.23	3.30	3.37	3.40	3.42	3.41	3.37	3.36	3.32
最大	0.00	1.49	2.66	3.21	3.39	3.48	3.55	3.65	3.67	3.67	3.67	3.66	3.66	3.64
最小	0.00	0.61	1.82	2.36	2.49	2.60	2.66	2.72	2.74	2.74	2.74	2.71	2.71	2.65
範囲	0	0.88	0.84	0.85	0.9	0.88	0.89	0.93	0.93	0.93	0.93	0.95	0.95	0.96
標準偏差	0.00	0.27	0.32	0.30	0.31	0.29	0.30	0.30	0.30	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32

表-4.3.1.10 高炉 B 種を使用したコンクリートの質量減少率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

試験所	(%)													
	乾燥期間 (週)													
0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
A	0.00	0.61	1.09	1.46	1.66	1.79	1.89	2.03	2.14	2.19	2.24	2.32	2.37	2.41
B	0.00	0.61	1.10	1.54	1.71	1.85	1.93	2.02	2.22	2.31	2.41	2.48	2.54	2.56
C	0.00	0.56	0.95	1.31	1.47	1.60	1.68	1.81	1.93	1.98	2.07	2.11	2.16	2.19
D	0.00	0.45	1.02	1.42	1.59	1.73	1.84	1.99	2.10	2.17	2.25	2.30	2.33	2.37
E	0.00	0.48	0.95	1.37	1.54	1.69	1.79	1.94	2.11	2.18	2.27	2.33	2.38	2.42
F	0.00	0.61	1.11	1.49	1.65	1.81	1.89	2.07	2.20	2.27	2.36	2.40	2.42	2.44
G	0.00	0.35	0.80	1.15	1.29	1.42	1.53	1.67	1.78	1.85	2.00	2.03	2.07	2.09
平均	0.00	0.52	1.00	1.39	1.56	1.70	1.79	1.93	2.07	2.14	2.23	2.28	2.32	2.35
最大	0.00	0.61	1.11	1.54	1.71	1.85	1.93	2.07	2.22	2.31	2.41	2.48	2.54	2.56
最小	0.00	0.35	0.80	1.15	1.29	1.42	1.53	1.67	1.78	1.85	2.00	2.03	2.07	2.09
範囲	0	0.26	0.31	0.39	0.42	0.43	0.4	0.4	0.44	0.46	0.41	0.45	0.47	0.47
標準偏差	0.00	0.10	0.11	0.13	0.14	0.15	0.14	0.14	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16

#### 4.3.2 有意差検定によるセメントの種類の影響

4.3.1 の試験所間誤差の共通試験結果をもとに、セメントの種類で比較した 7 試験所の平均乾燥収縮率を図-4.3.2.1 に、乾燥期間 26 週における 7 試験所平均および最大・最小乾燥収縮率を図-4.3.2.2 に示す。

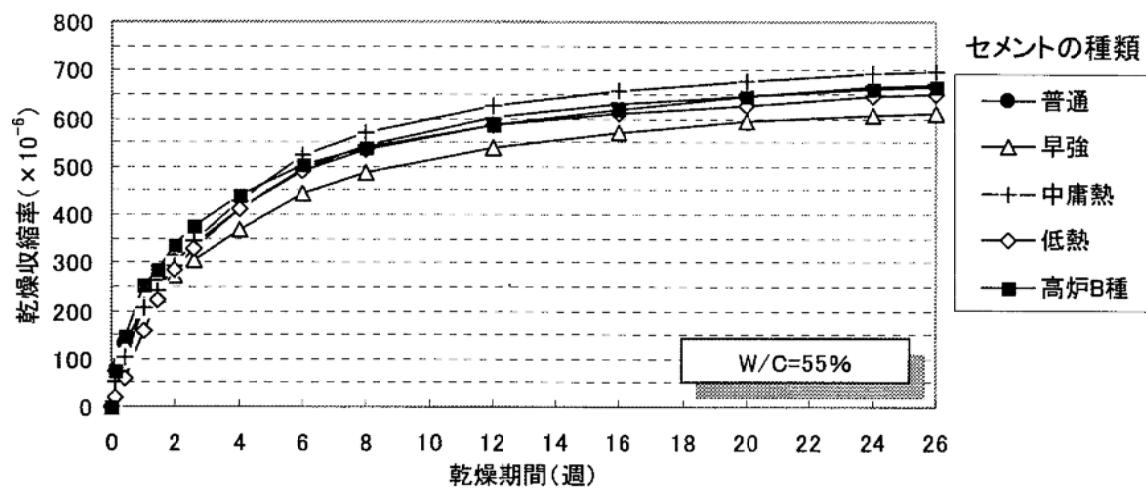


図-4.3.2.1 共通試験結果によるセメントの種類で比較したコンクリートの 7 試験所の平均乾燥収縮率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

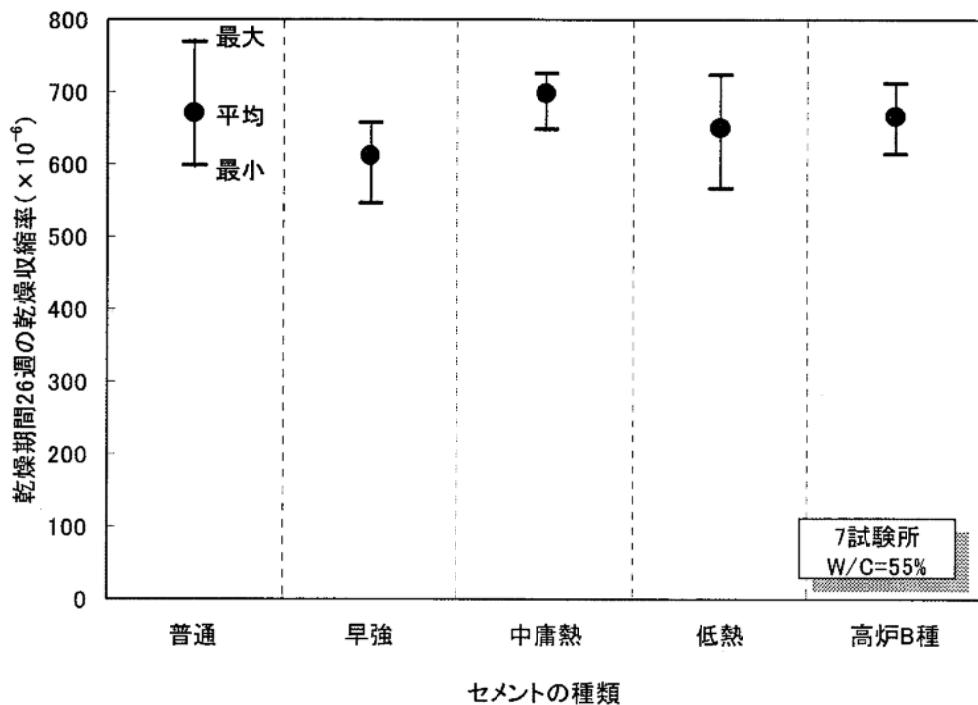


図-4.3.2.2 共通試験結果による乾燥期間 26 週の 7 試験所平均および最大・最小乾燥収縮率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

セメントの種類によるコンクリートの乾燥収縮率の範囲は  $87 \times 10^{-6}$  であった。また 7 試験所の乾燥収縮率の結果をセメントの種類で見ると、その範囲は、最小の中庸熱で  $77 \times 10^{-6}$ 、最大の普通で  $172 \times 10^{-6}$ との試験所間誤差の結果であった。これらの結果をもとに、コンクリートの乾燥収縮率の違いがセメントの種類に起因しているかどうかについて統計解析による有意差検定を行った。

### 1) Grubbs の異常値検定

統計解析による有意差検定を行う前に、各試験所の試験結果が統計上、異常な値を有していないかどうかについて、異常値検定による検証を行った。

異常値検定は、JIS Z 8402-2（測定方法及び測定結果の精確さ（真度及び精度）－第2部：標準測定方法の併行精度及び再現精度を求めるための基本的方法）に準拠し、Grubbs の方法をもとに危険率 5%とした異常値の検定を行った。その結果を表-4.3.2.1 に示す。異常値検定の結果、異常値と判定される試験所のデータは無いため、全てのデータを対象として有意差検定を行なうこととした。

表-4.3.2.1 Grubbs の方法による異常値検定結果

		普通	早強	中庸熱	低熱	高炉B種
A		649	656	721	631	676
B		634	596	675	603	638
C		769	619	722	719	690
D		646	624	696	643	662
E		662	634	724	722	712
F		732	605	698	663	680
G		597	545	647	565	614
平均		670	611	698	649	667
標準偏差		59.7	35.1	28.6	57.7	32.9
棄却限界値 G(7;0.05)		1.938				
最大	値	769	656	724	722	712
	Gp	1.66	1.27	0.92	1.26	1.36
	5% 判定	異常値 ではない	異常値 ではない	異常値 ではない	異常値 ではない	異常値 ではない
最小	値	597	545	647	565	614
	Gp	1.22	1.89	1.77	1.46	1.63
	5% 判定	異常値 ではない	異常値 ではない	異常値 ではない	異常値 ではない	異常値 ではない

## 2) セメントの種類を因子とした分散分析

試験所間誤差の共通試験は、1 試験所で成形した供試体を使用して温度  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $60 \pm 5\%$  の乾燥環境下で行った試験であるため、各試験所の結果を繰り返し結果と仮定してセメントの種類を因子とした一元配置法の分散分析を行った。分散分析結果を表-4.3.2.2 に示す。セメントの種類による分散比( $F_0$ )は 3.53 であり、有意差を判定する境界値は、有意水準 5% で 2.69、有意水準 1% で 4.02 であることから、有意水準 5%において境界値を上回る結果となった。つまり、有意水準 5%においては、セメントの種類によってコンクリートの乾燥収縮率に有意な差があると統計的に判定された。ただし、この有意な差は、5 種類のセメントに差があることを示すもので、どのセメントにより有意な差が認められるのか具体的に示すものではない。そこで、次に個々のセメントに関して有意差の検討を行った。

表-4.3.2.2 分散分析結果

要因	平方和 S	自由度 $\phi$	分散 V	分散比 $F_0$	F境界値		判定
					有意水準	F	
セメントの種類	$S_a$ 28314.1	$\phi_a$ 4	$S_a/\phi_a = V_a$ 7078.5	$V_a/V_e$ 3.53	5%	2.69	有意
					1%	4.02	有意では無い
残差	$S_e$ 60101.4	$\phi_e$ 30	$S_e/\phi_e = V_e$ 2003.3				
計	88415.5	34					

### 3) t 検定によるセメントの種類の有意差検定

前述のセメントの種類を因子とした分散分析の結果、有意水準 5%において 5 種類のセメントにおいて統計的に有意な差が認められた。そこで、有意な差がどのセメント間に生じているのかを検討するために、t 検定により個々のセメントの比較検討を行った。t 検定の解析ケースおよび検定結果を表-4.3.2.3 に、t 検定過程を表-4.3.2.4 に示す。

表-4.3.2.3 におけるケース①では、普通と早強を比較しており、2 標本のデータによる t 値は 2.255 であり、境界値（危険率 5%，両側）±2.179 を超える結果となった。つまり、帰無仮説は棄却され、普通を使用したコンクリートと早強を使用したコンクリートの乾燥収縮率は統計的に有意な差があると判定された。

同様に全てのセメント間で t 検定を行った結果、ケース①、ケース⑤およびケース⑦において有意な差があると認められた。これらの 3 つのケースは、何れも早強と比較したケースであり、他のケースでは有意な差は認められなかった。つまり、W/C55%において、早強を使用したコンクリートの乾燥収縮率は他のセメントを使用したものより小さいことが統計的に認められたものの、その他、普通、中庸熱、低熱、高炉 B 種を使用したコンクリート間の乾燥収縮率に、有意な差は無いと統計的に判定された。

従って、前述の分散分析により認められたセメントの種類による有意な差は、早強のみが他のセメントと異なり、コンクリートの乾燥収縮率が小さいことを示している。この原因の一つとして、早強は他のセメントに比べ、乾燥開始時の圧縮強度および静弾性係数が大きく、これが乾燥収縮に影響を及ぼしていることが推察される。

表-4.3.2.3 セメントの種類による乾燥収縮率の有意差検定結果（t 検定）

	普通	早強	中庸熱	低熱	高炉 B 種
普通		有意な差 がある ケース①	有意な差 はない ケース②	有意な差 はない ケース③	有意な差 はない ケース④
早強			有意な差 がある ケース⑤	有意な差 はない ケース⑥	有意な差 がある ケース⑦
中庸熱				有意な差 はない ケース⑧	有意な差 はない ケース⑨
低熱					有意な差 はない ケース⑩
高炉 B 種					

表-4.3.2.4 t 検定過程

検討ケース	①		②		③		④		⑤		
セメントの種類	普通	早強	普通	中庸熱	普通	低熱	普通	高炉B種	早強	中庸熱	
計測値	A	649	656	649	721	649	631	649	676	656	721
	B	634	596	634	675	634	603	634	638	596	675
	C	769	619	769	722	769	719	769	690	619	722
	D	646	624	646	696	646	643	646	662	624	696
	E	662	634	662	724	662	722	662	712	634	724
	F	732	605	732	698	732	663	732	680	605	698
	G	597	545	597	647	597	565	597	614	545	647
標本数		7	7	7	7	7	7	7	7	7	
標本平均		670	611	670	698	670	649	670	667	611	698
標本平均の差		59		-28		21		3		-86	
標本分散		3050.1	1057.6	3050.1	701.96	3050.1	2850.8	3050.1	925.39	1057.6	701.96
自由度		12		12		12		12		12	
平均の差の標準偏差		26.2		25.0		31.4		25.7		17.1	
t検定	t	2.255		-1.120		0.670		0.117		-5.022	
	境界値両側(5%)	2.179		2.179		2.179		2.179		2.179	
	帰無仮説	棄却		棄却できない		棄却できない		棄却できない		棄却	

検討ケース	⑥		⑦		⑧		⑨		⑩		
セメントの種類	早強	低熱	早強	高炉B種	中庸熱	高炉B種	中庸熱	低熱	低熱	高炉B種	
計測値	A	656	631	656	676	721	631	721	676	631	676
	B	596	603	596	638	675	603	675	638	603	638
	C	619	719	619	690	722	719	722	690	719	690
	D	624	643	624	662	696	643	696	662	643	662
	E	634	722	634	712	724	722	724	712	722	712
	F	605	663	605	680	698	663	698	680	663	680
	G	545	565	545	614	647	565	647	614	565	614
標本数		7	7	7	7	7	7	7	7	7	
標本平均		611	649	611	667	698	649	698	667	649	667
平均の差		-38		-56		48		30		-18	
標本分散		1057.6	2850.8	1057.6	925.39	701.96	2850.8	701.96	925.39	2850.8	925.39
自由度		12		12		12		12		12	
平均の差の標準偏差		25.5		18.2		24.3		16.5		25.1	
t検定	t	-1.493		-3.086		1.981		1.834		-0.717	
	境界値両側(5%)	2.179		2.179		2.179		2.179		2.179	
	帰無仮説	棄却できない		棄却		棄却できない		棄却できない		棄却できない	

#### 4.3.3 水セメント比の影響

本試験は 4.3.1 と同様に乾燥前養生条件を JISA1129 : 2010 の付属書 A に準拠し、材齢 7 日まで標準水中養生として実施した。なお、本結果は 4.3.1 の共通試験にある試験所 A の試験結果である。

コンクリートの乾燥収縮率および質量減少率に関して、W/C 每にセメントの種類で比較した結果を図-4.3.3.1～図-4.3.3.6 に、セメントの種類毎に W/C で比較した結果を図-4.3.3.7～図-4.3.3.16 に、W/C 每にセメントの種類で比較した結果を表-4.3.3.1、表-4.3.3.2 に示す。

コンクリートの乾燥収縮率をセメントの種類で比較すると、早強は総じて小さい傾向にあり、W/C45%および35%では乾燥期間 4 週程度以降最も小さい結果となった。また、何れの W/C でも乾燥期間 4 週程度までは、高炉 B 種が最も大きくなり、乾燥期間 4 週程度以降は中庸熱が最も大きい結果となった。

コンクリートの乾燥収縮率を W/C で比較すると、普通および早強は、乾燥期間 2.57 週(18 日)までは何れの W/C でも同程度であるが、それ以降、W/C が低くなるにつれて小さくなかった。乾燥収縮率の低減効果は、W/C45%よりも W/C35%の方が大きく、その傾向は特に早強で顕著であった。一方、中庸熱および低熱は、乾燥期間初期から 26 週に至るまでほぼ同程度であり、W/C の影響を殆ど受けない結果となった。

乾燥期間 26 週における W/C 每のセメント種類の範囲を比較すると、W/C55%で  $90 \times 10^{-6}$ 、45%で  $87 \times 10^{-6}$ 、W/C35%で  $162 \times 10^{-6}$  であった。W/C35%において範囲が大きくなった理由は、W/C を低くすることで特に早強の乾燥収縮率が低減される一方、中庸熱および低熱はあまり変化しなかったため、セメントの種類によって範囲が大きくなった。

W/C35%の早強を除く普通、中庸熱、低熱および高炉 B 種の 4 種類のセメントの種類の範囲は  $102 \times 10^{-6}$  となり、W/C55%および45%の範囲と同程度であった。すなわち、早強は他のセメントに比べて W/C を小さくすることによる乾燥収縮率の低減効果が大きいと言える。

しかし、W/C の低いコンクリートでは自己収縮が大きくなりやすく、また早強は他のセメントに比べ、自己収縮が大きくなることが報告されている<sup>5)</sup>。従って、収縮による体積変化に対しては、配合や用途等を考慮の上、セメントの種類を選定する必要がある。

コンクリートの質量減少率は、何れのセメントでも W/C を低くなるほど小さくなり、またその低下の割合は、低熱を除けば普通、早強、中庸熱および高炉 B 種の 4 種類のセメントで同程度であった。また、セメントの種類で比較すると、何れの W/C においても低熱>中庸熱>高炉 B 種>普通>早強の順であった。特に、低熱の質量減少率は大きく、乾燥前養生条件が材齢 7 日まで標準水中養生の条件では水和反応が十分に行われず、水分の逸散が大きい結果となった。また、W/C55%の低熱は、乾燥 12 週以降に質量の増加が生じた。W/C45%および35%では質量増加が生じていないことや、4.3.4 に後述するように乾燥開始前の養生期間を長くすると質量増加が生じていないことから、この原因の一つとして、中性化による質量増加が考えられる。

### セメントの種類の比較【乾燥収縮率】

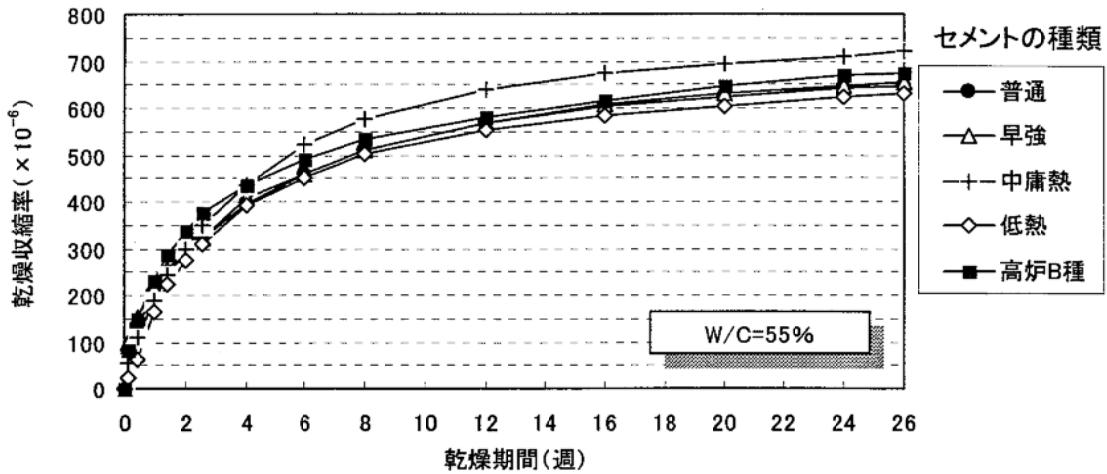


図-4.3.3.1 セメントの種類で比較したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C55%, 乾燥前養生期間 7 日)

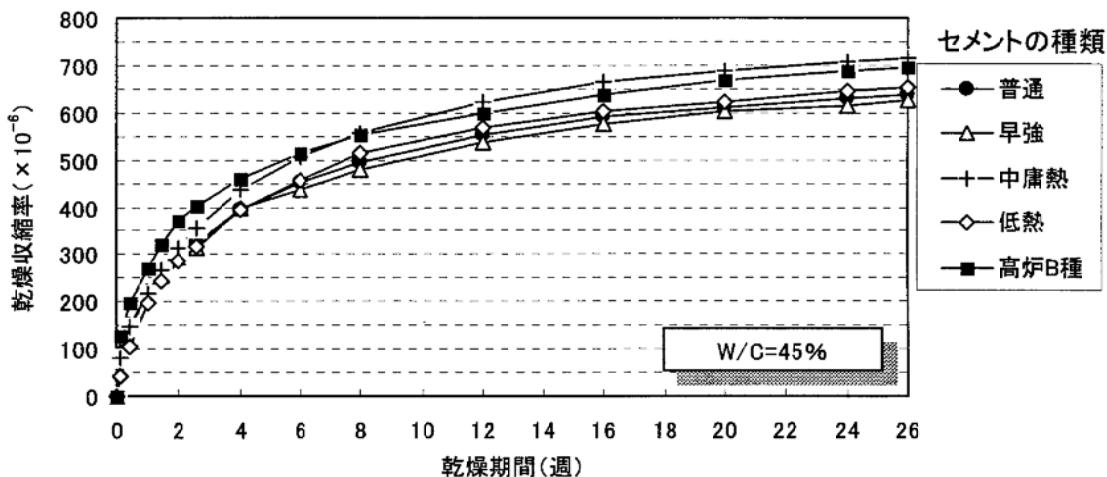


図-4.3.3.2 セメントの種類で比較したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C45%, 乾燥前養生期間 7 日)

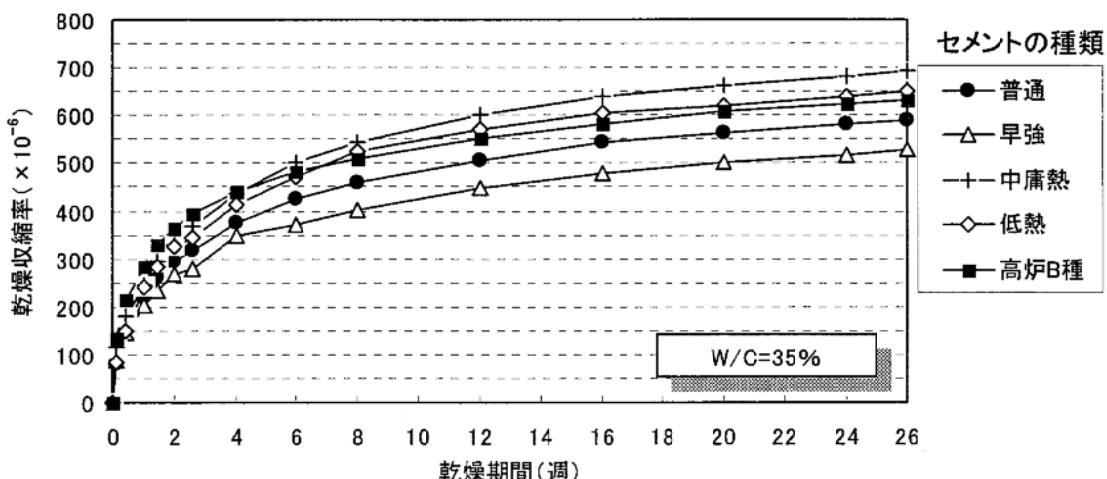


図-4.3.3.3 セメントの種類で比較したコンクリートの乾燥収縮率 (W/C35%, 乾燥前養生期間 7 日)

### セメントの種類の比較【質量減少率】

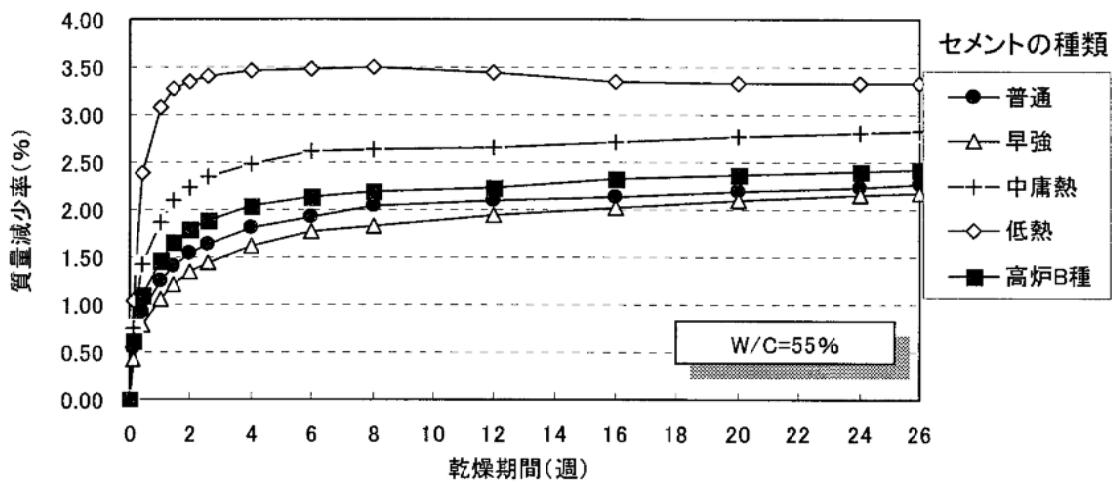


図-4.3.3.4 セメントの種類で比較したコンクリートの質量減少率(W/C55%, 乾燥前養生期間7日)

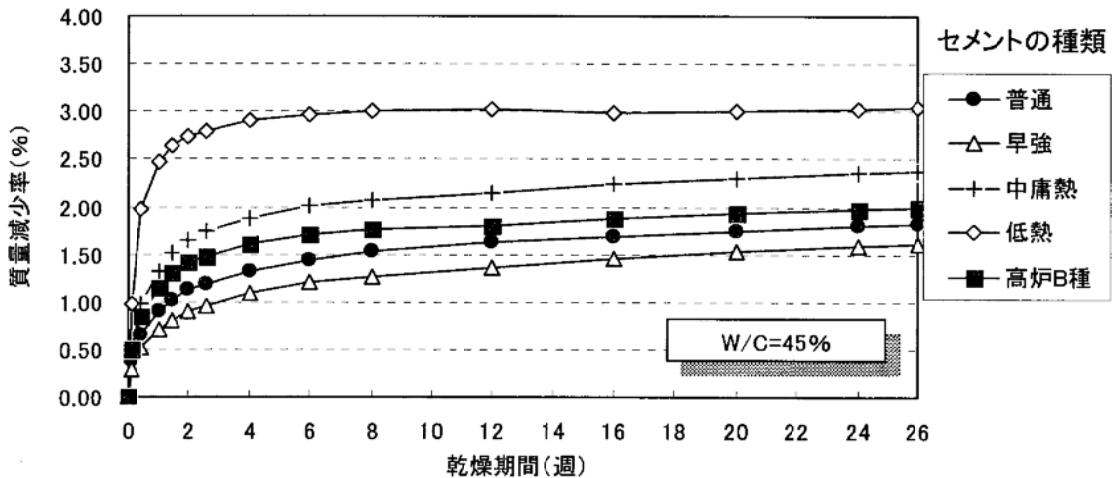


図-4.3.3.5 セメントの種類で比較したコンクリートの質量減少率(W/C45%, 乾燥前養生期間7日)

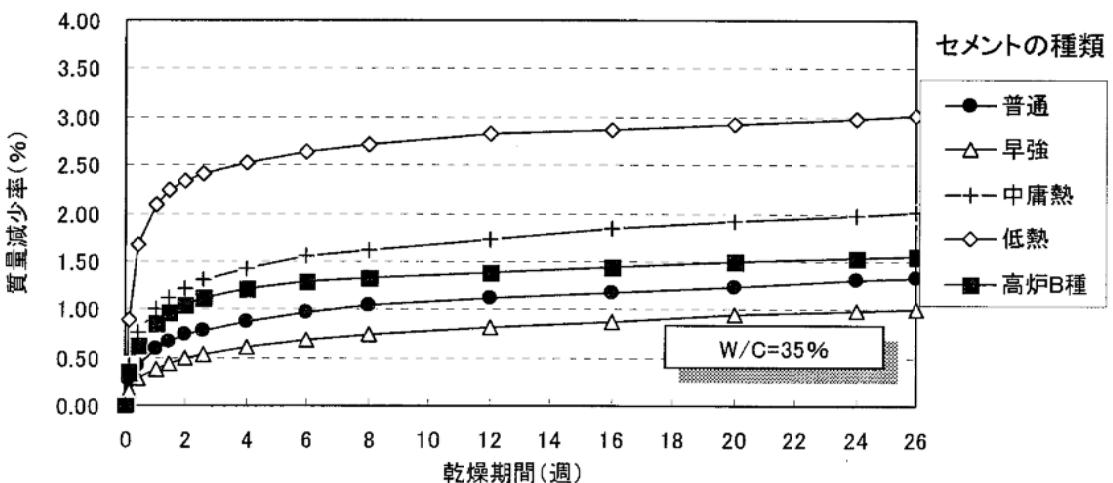


図-4.3.3.6 セメントの種類で比較したコンクリートの質量減少率(W/C35%, 乾燥前養生期間7日)

### W/C の比較【乾燥収縮率】

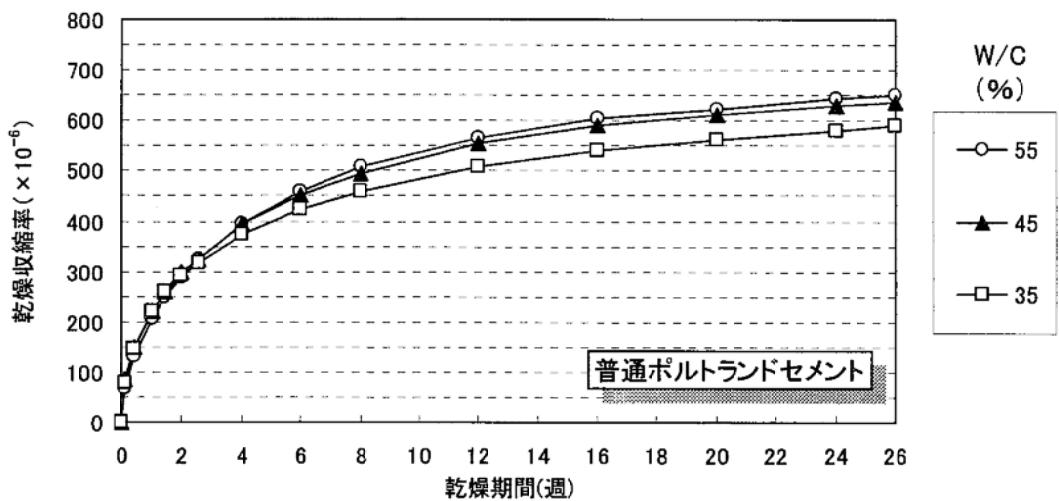


図-4.3.3.7 W/C で比較したコンクリートの乾燥収縮率（普通、乾燥前養生期間 7 日）

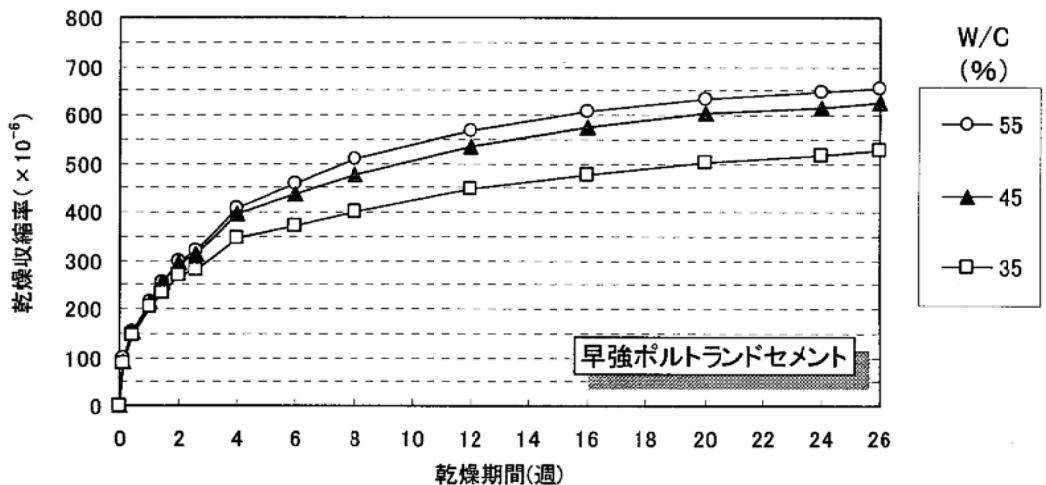


図-4.3.3.8 W/C で比較したコンクリートの乾燥収縮率（早強、乾燥前養生期間 7 日）

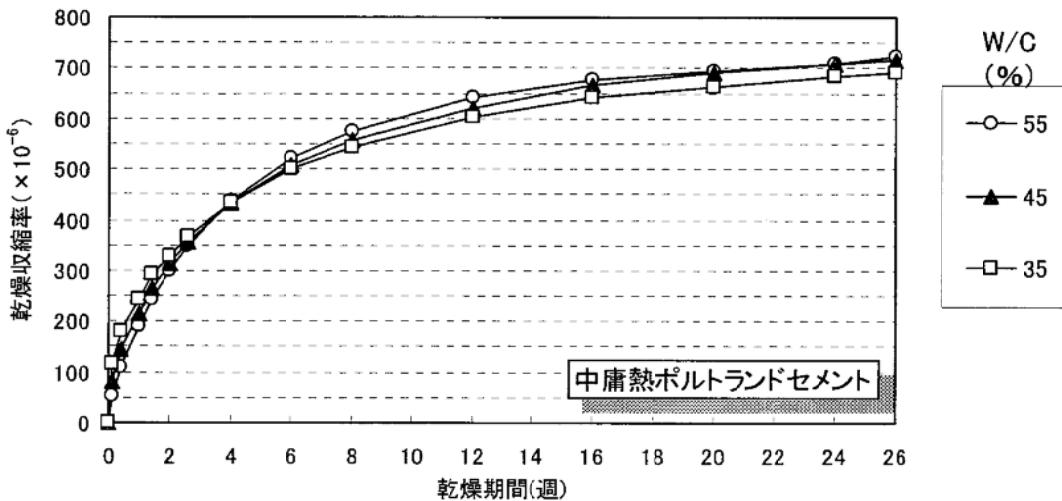


図-4.3.3.9 W/C で比較したコンクリートの乾燥収縮率（中庸熱、乾燥前養生期間 7 日）

### W/C の比較【乾燥収縮率】

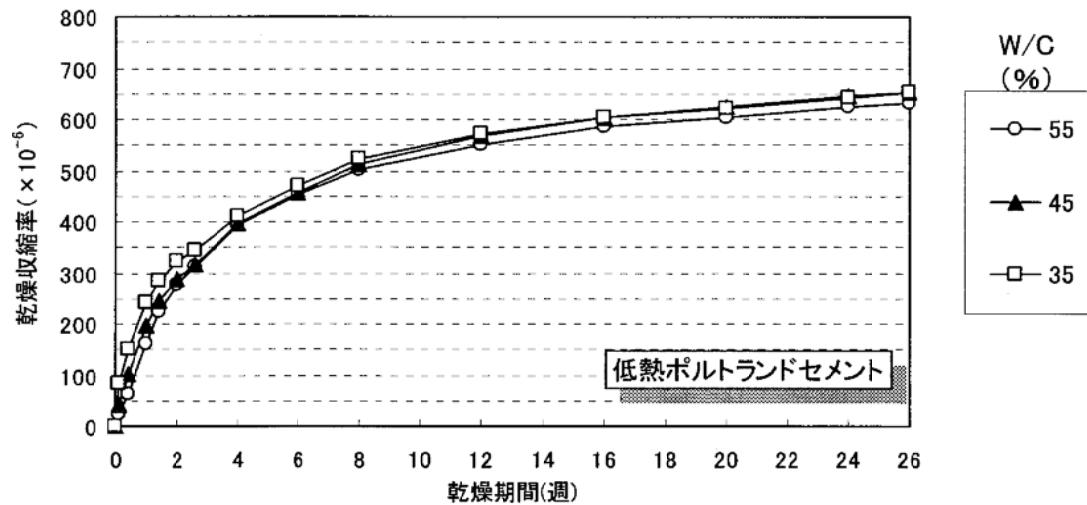


図-4.3.3.10 W/C で比較したコンクリートの乾燥収縮率（低熱、乾燥前養生期間 7 日）

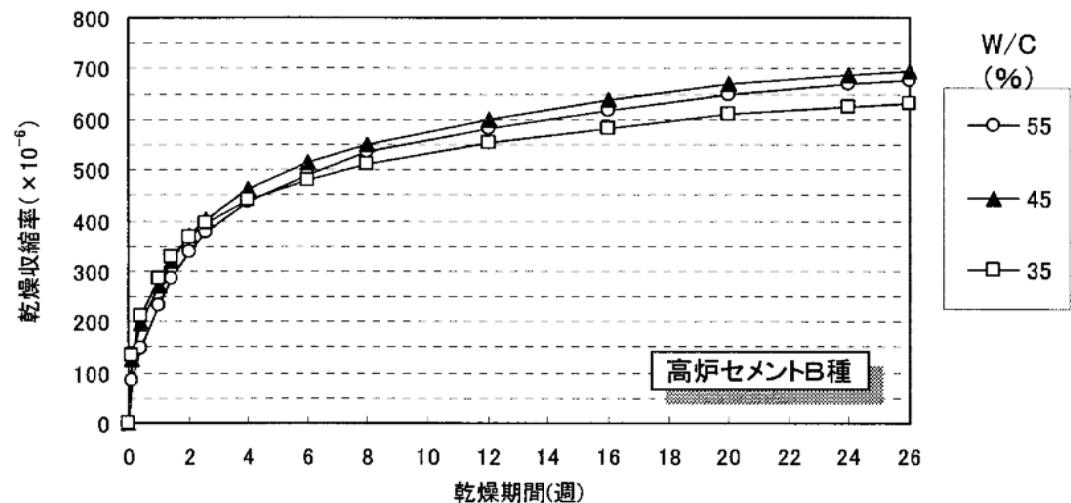


図-4.3.3.11 W/C で比較したコンクリートの乾燥収縮率（高炉 B 種、乾燥前養生期間 7 日）

### W/C の比較【質量減少率】

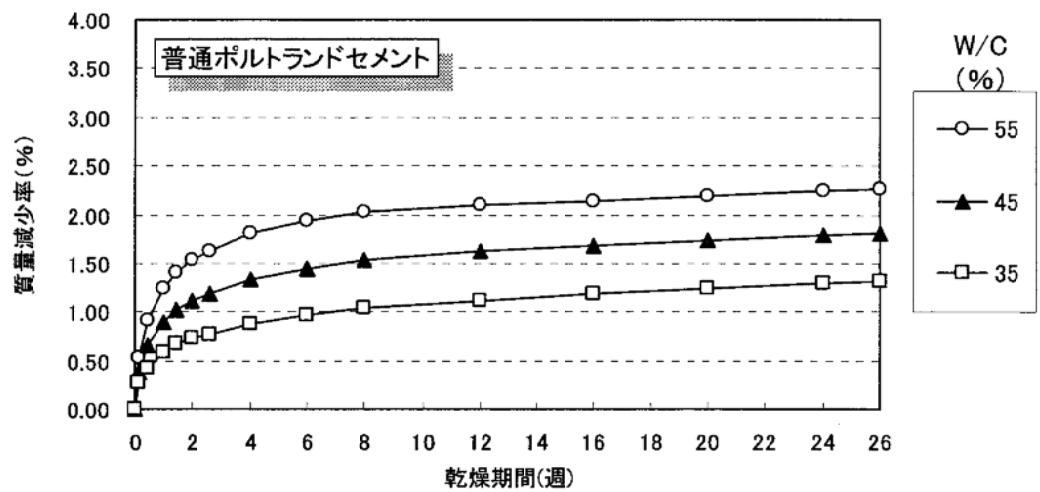


図-4.3.3.12 W/C で比較したコンクリートの質量減少率（普通、乾燥前養生期間 7 日）

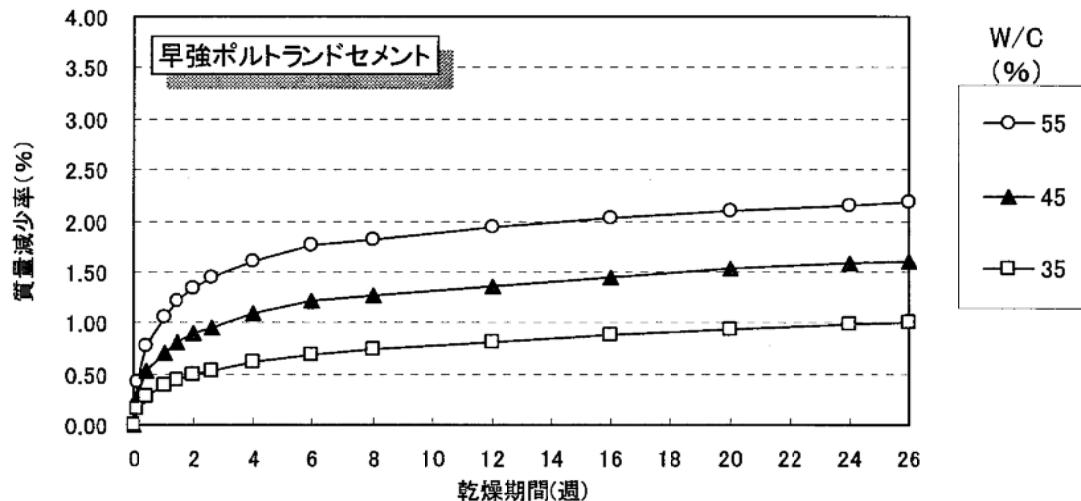


図-4.3.3.13 W/C で比較したコンクリートの質量減少率（早強、乾燥前養生期間 7 日）

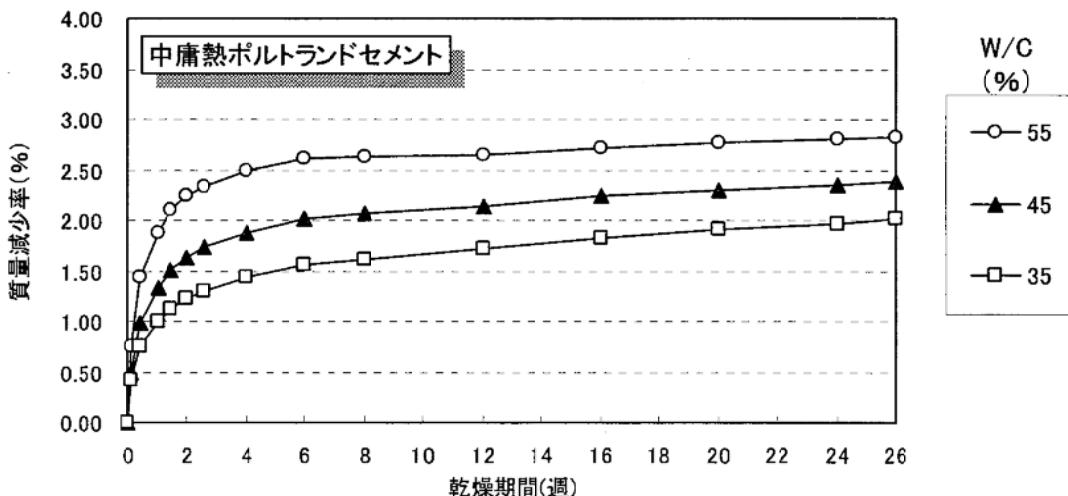


図-4.3.3.14 W/C で比較したコンクリートの質量減少率（中庸熱、乾燥前養生期間 7 日）

### W/C の比較【質量減少率】

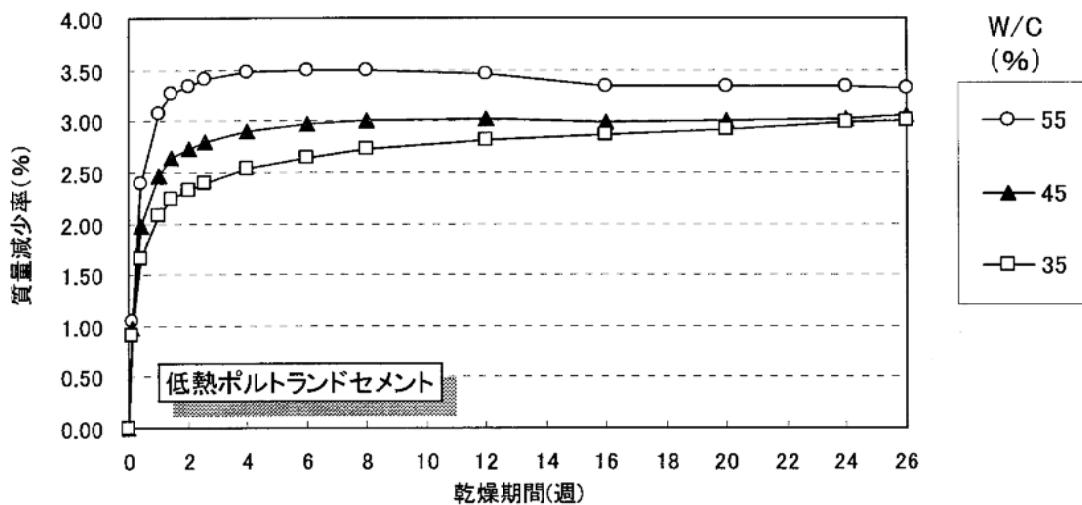


図-4.3.3.15 W/C で比較したコンクリートの質量減少率（低熱、乾燥前養生期間 7 日）

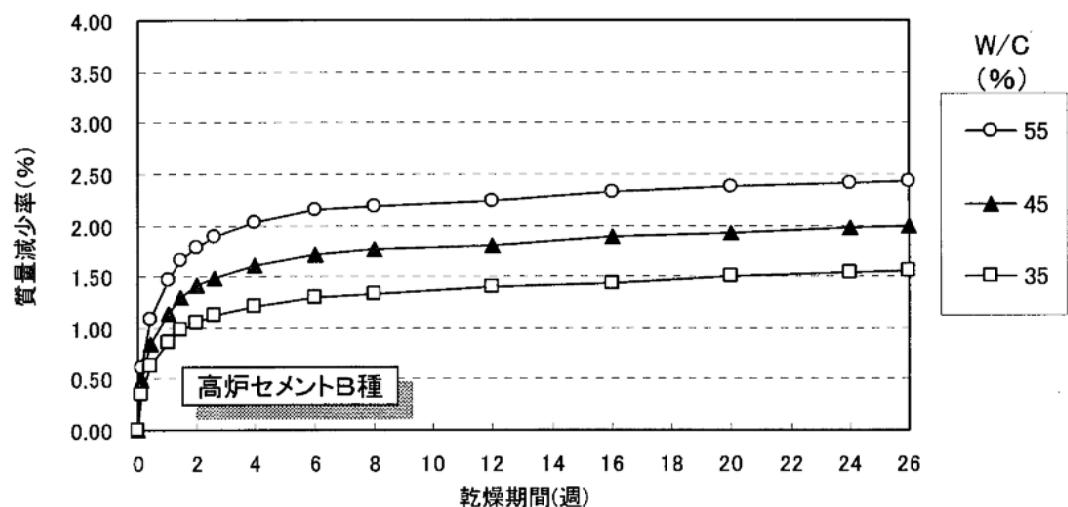


図-4.3.3.16 W/C で比較したコンクリートの質量減少率（高炉 B 種、乾燥前養生期間 7 日）

表-4.3.3.1 W/C毎にセメントの種類で比較したコンクリートの乾燥収縮率(乾燥前養生期間7日)

水セメント比 (%)	セメントの種類	乾燥期間(週) (×10 <sup>-6</sup> )														
		0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
55	普通	0	67	133	205	248	289	322	395	458	508	567	603	623	642	649
	早強	0	99	153	215	255	299	320	409	459	509	569	607	633	646	656
	中庸熱	0	54	109	189	244	299	349	437	521	576	640	676	696	710	721
	低熱	0	25	64	163	224	276	311	392	451	501	551	586	604	623	631
	高炉B種	0	83	149	231	285	337	376	437	491	534	582	617	649	669	676
45	普通	0	85	151	219	259	298	325	395	452	496	553	590	611	631	637
	早強	0	92	151	215	255	295	313	397	438	478	536	574	602	616	627
	中庸熱	0	82	145	216	265	313	356	435	507	557	621	666	689	708	714
	低熱	0	43	103	197	245	287	317	395	457	513	568	603	623	644	652
	高炉B種	0	127	198	272	322	370	403	461	513	551	600	637	668	688	694
35	普通	0	79	145	220	261	293	317	375	424	459	507	542	561	581	589
	早強	0	87	146	202	234	268	280	347	372	401	446	478	503	518	529
	中庸熱	0	115	178	244	294	329	366	435	500	544	601	641	664	682	691
	低熱	0	83	151	242	285	324	345	412	471	523	572	604	622	641	651
	高炉B種	0	135	213	284	329	365	393	440	481	511	553	582	610	624	631

表-4.3.3.2 W/C毎にセメントの種類で比較したコンクリートの質量減少率(乾燥前養生期間7日)

水セメント比 (%)	セメントの種類	乾燥期間(週) (%)														
		0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
55	普通	0.00	0.53	0.92	1.25	1.41	1.53	1.63	1.80	1.93	2.03	2.10	2.14	2.20	2.24	2.26
	早強	0.00	0.42	0.78	1.06	1.21	1.34	1.44	1.61	1.76	1.82	1.94	2.02	2.10	2.15	2.18
	中庸熱	0.00	0.75	1.43	1.87	2.10	2.24	2.34	2.49	2.61	2.63	2.65	2.72	2.77	2.80	2.82
	低熱	0.00	1.04	2.39	3.07	3.27	3.34	3.40	3.47	3.49	3.50	3.45	3.34	3.33	3.33	3.32
	高炉B種	0.00	0.61	1.09	1.46	1.66	1.79	1.89	2.03	2.14	2.19	2.24	2.32	2.37	2.41	2.43
45	普通	0.00	0.39	0.66	0.90	1.02	1.12	1.19	1.33	1.44	1.54	1.63	1.68	1.74	1.79	1.81
	早強	0.00	0.29	0.52	0.70	0.81	0.90	0.96	1.09	1.21	1.27	1.36	1.45	1.53	1.58	1.60
	中庸熱	0.00	0.50	0.98	1.33	1.51	1.64	1.74	1.88	2.01	2.07	2.14	2.24	2.30	2.35	2.38
	低熱	0.00	0.98	1.98	2.47	2.64	2.73	2.79	2.90	2.97	3.00	3.02	2.98	3.01	3.03	3.05
	高炉B種	0.00	0.49	0.84	1.14	1.30	1.41	1.48	1.61	1.71	1.76	1.80	1.88	1.93	1.97	1.99
35	普通	0.00	0.27	0.42	0.58	0.67	0.73	0.77	0.88	0.96	1.04	1.12	1.18	1.24	1.30	1.32
	早強	0.00	0.16	0.28	0.38	0.44	0.49	0.53	0.61	0.69	0.74	0.81	0.88	0.94	0.99	1.01
	中庸熱	0.00	0.42	0.76	1.00	1.12	1.22	1.30	1.43	1.56	1.62	1.72	1.83	1.91	1.97	2.01
	低熱	0.00	0.90	1.66	2.08	2.24	2.33	2.40	2.53	2.64	2.72	2.82	2.86	2.92	2.98	3.01
	高炉B種	0.00	0.35	0.63	0.85	0.97	1.05	1.12	1.21	1.29	1.33	1.39	1.44	1.50	1.54	1.55

#### 4.3.4 乾燥前養生期間の影響

各種セメントを使用したコンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、材齢 7 日で大きく異なることを 4.1 および 4.2 で述べた。すなわち、4.3.1 および 4.3.3 の乾燥前養生期間を材齢 7 日一定とした条件は、乾燥開始時の圧縮強度および静弾性係数が大きく異なる。

そこで本試験は、各種セメントを用いたコンクリートの強度発現性の違いが乾燥収縮率にどの程度影響を及ぼすかを把握するため、早強、中庸熱、低熱および高炉 B 種の 4 種類のセメントの乾燥前養生期間を、普通の材齢 7 日と同等の圧縮強度が得られる材齢で乾燥を開始した。なお、乾燥前養生は標準水中養生とし、W/C は 4.3.3 と同様に 55%，45% および 35% の 3 水準とした。また、本結果は 4.3.3 と同様、試験所 A の試験結果である。

乾燥前養生期間と乾燥開始時の圧縮強度を表-4.3.4.1 に示す。普通の 7 日強度と同等の強度が得られる材齢は、W/C およびセメント種類で異なり、早強が 3 日程度と短くなり、中庸熱は 15 日、高炉 B 種は 15~21 日、強度発現性が最も低い低熱では 24~36 日となった。

コンクリートの乾燥収縮率および質量減少率に関して、W/C 每にセメントの種類で比較した結果を図-4.3.4.1~図-4.3.4.6 および表-4.3.4.2、表-4.3.4.3 に示す。

乾燥期間 26 週におけるコンクリートの乾燥収縮率をセメントの種類で見ると、乾燥前養生期間を材齢 7 日一定の条件と比較して、何れの W/C でも中庸熱および高炉 B 種で小さく、早強で同等であった。低熱は W/C で異なり、55% で大きく、45% と 35% で同等であった。

また、乾燥期間 26 週におけるセメントの種類によるコンクリートの乾燥収縮率の範囲は、W/C55% で  $102 \times 10^{-6}$ 、W/C45% で  $55 \times 10^{-6}$ 、W/C35% で  $110 \times 10^{-6}$  となり、乾燥前養生期間を材齢 7 日一定とした場合に比べて、W/C55% で同等、W/C45% および 35% で小さくなつた。

質量減少率は、乾燥前養生期間を短くした早強では増加、長くした他のセメントでは減少した。水和反応の進行に応じて緻密性が変化し、水分の逸散量が変化したと考えられる。そのため、セメントの種類による質量減少率の範囲は、乾燥開始時の圧縮強度を一定とすることで、何れの W/C においても小さくなる結果となつた。

表-4.3.4.1 乾燥前養生期間と乾燥開始時の圧縮強度

セメント の種類	W/C	55%		45%		35%	
		養生期間 日	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	養生期間 日	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	養生期間 日	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>
普通	7	25.1	7	34.3	7	52.4	
早強	3	25.8	3	35.2	4	51.7	
中庸熱	15	24.7	15	33.5	15	53.4	
低熱	28	24.4	24	34.4	36	54.1	
高炉B種	15	25.0	15	33.6	21	54.1	

### セメントの種類の比較【乾燥収縮率】

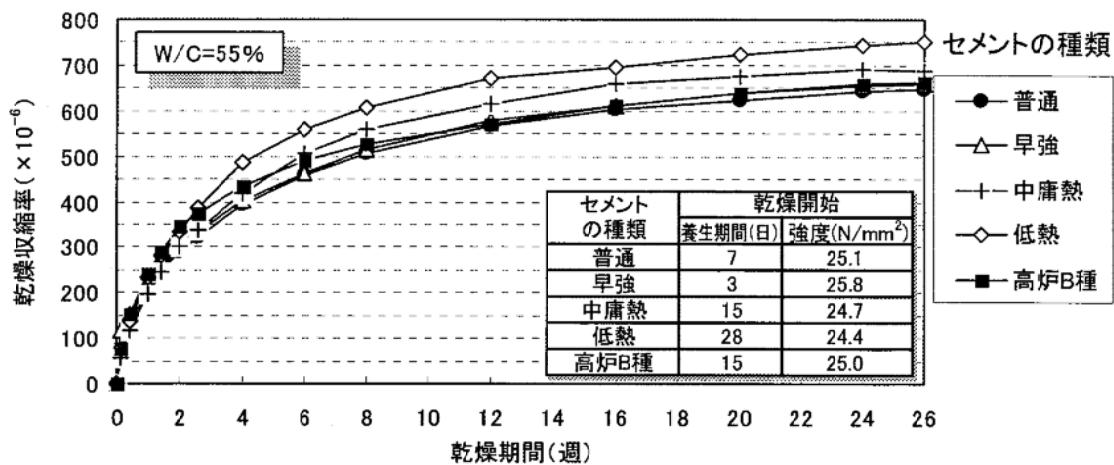


図-4.3.4.1 セメントの種類で比較したコンクリートの乾燥収縮率(W/C55%, 乾燥開始強度一定)

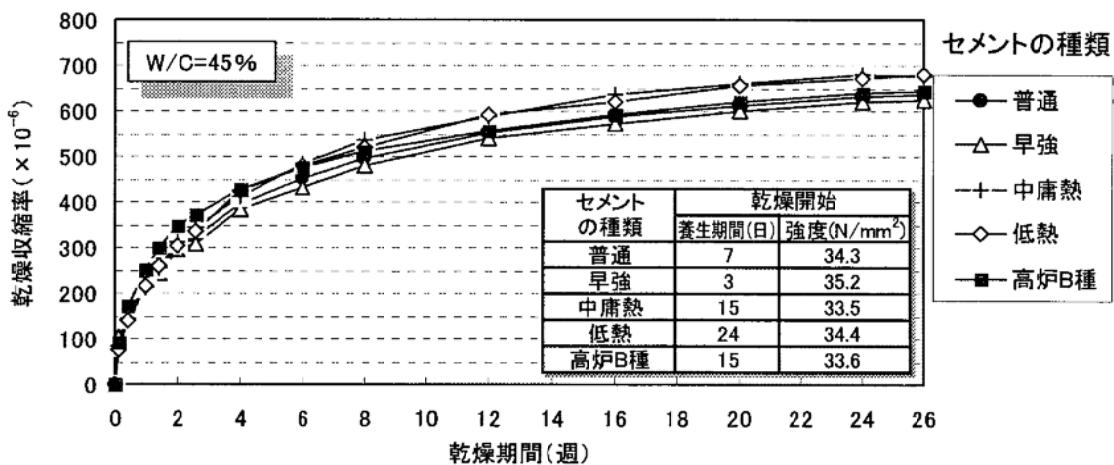


図-4.3.4.2 セメントの種類で比較したコンクリートの乾燥収縮率(W/C45%, 乾燥開始強度一定)

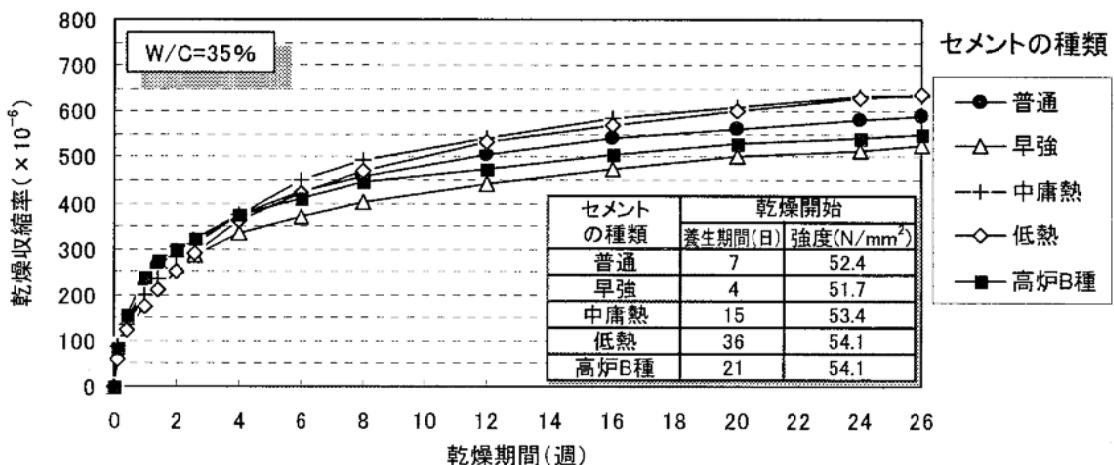


図-4.3.4.3 セメントの種類で比較したコンクリートの乾燥収縮率(W/C35%, 乾燥開始強度一定)

### セメントの種類の比較【質量減少率】

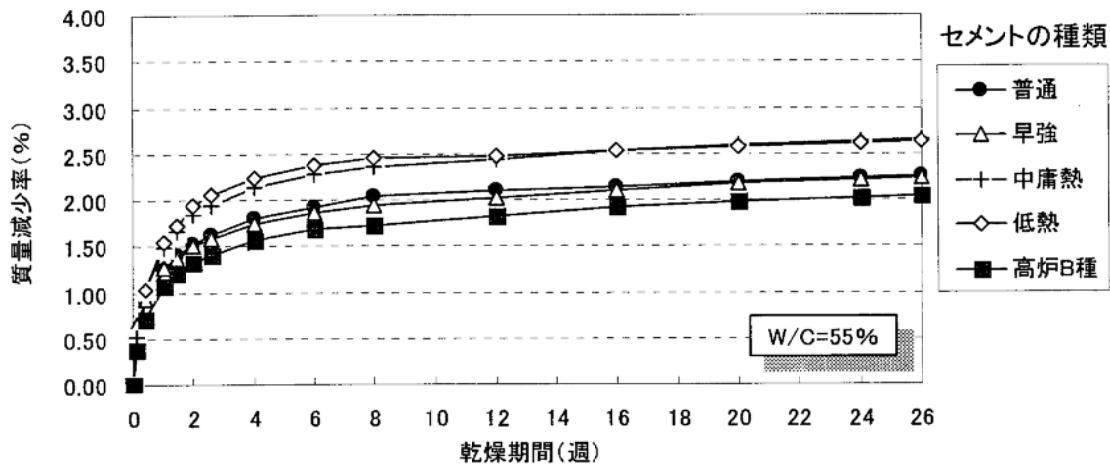


図-4.3.4.4 セメントの種類で比較したコンクリートの質量減少率(W/C55%, 乾燥開始強度一定)

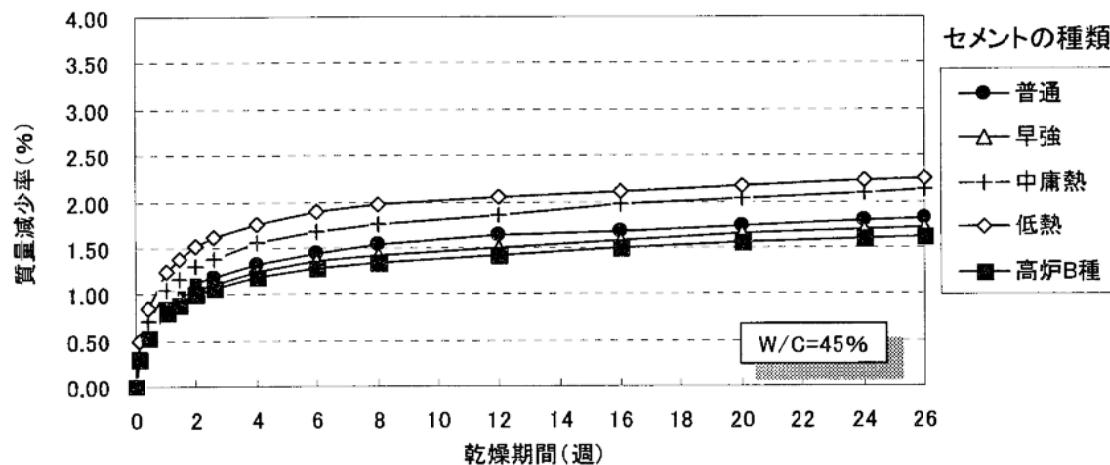


図-4.3.4.5 セメントの種類で比較したコンクリートの質量減少率(W/C45%, 乾燥開始強度一定)

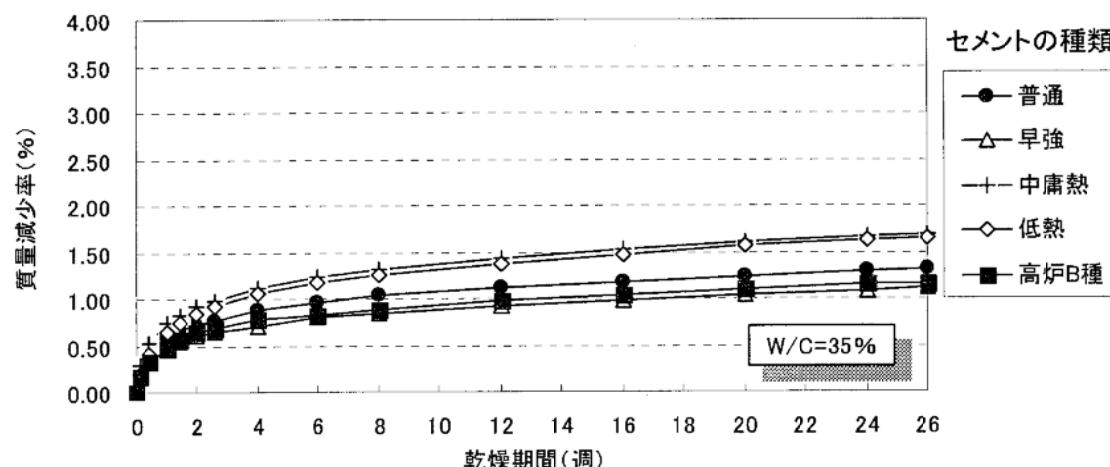


図-4.3.4.6 セメントの種類で比較したコンクリートの質量減少率(W/C35%, 乾燥開始強度一定)

表-4.3.4.2 W/C 毎にセメントの種類で比較したコンクリートの乾燥収縮率(乾燥開始強度一定)

水セメント比 (%)	セメントの種類	乾燥開始		(×10 <sup>-6</sup> )														
		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	養生期間 (日)	乾燥期間(週)														
				0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
55	普通	25.1	7	0	67	133	205	248	289	322	395	458	508	567	603	623	642	649
	早強	25.8	3	0	116	152	218	255	309	335	402	463	513	580	611	639	654	661
	中庸熱	24.7	15	0	58	117	195	244	301	337	419	506	558	616	658	675	691	688
	低熱	24.4	28	0	—	137	233	283	334	387	487	557	609	671	694	722	743	751
	高炉B種	25.0	15	0	77	151	241	288	344	372	434	490	525	571	612	641	661	663
45	普通	34.3	7	0	85	151	219	259	298	325	395	452	496	553	590	611	631	637
	早強	35.2	3	0	105	142	214	246	295	309	384	432	479	539	573	602	619	626
	中庸熱	33.5	15	0	85	143	213	257	313	344	412	483	535	589	638	659	679	677
	低熱	34.4	24	0	75	140	218	259	305	335	423	481	521	591	620	657	672	681
	高炉B種	33.6	15	0	94	171	253	301	349	373	427	477	513	555	592	621	639	643
35	普通	52.4	7	0	79	145	220	261	293	317	375	424	459	507	542	561	581	589
	早強	51.7	4	0	—	145	202	229	263	287	334	372	403	443	473	501	515	526
	中庸熱	53.4	15	0	87	134	199	235	283	311	374	449	493	541	586	610	632	633
	低熱	54.1	36	0	59	122	175	209	249	289	363	421	471	533	571	600	629	636
	高炉B種	54.1	21	0	84	156	238	273	298	323	375	410	444	472	504	528	542	549

表-4.3.4.3 W/C 每にセメントの種類で比較したコンクリートの質量減少率(乾燥開始強度一定)

水セメント比 (%)	セメントの種類	乾燥開始		(%)														
		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	養生期間 (日)	乾燥期間(週)														
				0	0.14	0.43	1	1.43	2	2.57	4	6	8	12	16	20	24	26
55	普通	25.1	7	0.00	0.53	0.92	1.25	1.41	1.53	1.63	1.80	1.93	2.03	2.10	2.14	2.20	2.24	2.26
	早強	25.8	3	0.00	0.66	0.94	1.26	1.37	1.50	1.58	1.74	1.87	1.94	2.01	2.10	2.17	2.21	2.24
	中庸熱	24.7	15	0.00	0.51	1.03	1.49	1.67	1.84	1.94	2.14	2.28	2.35	2.44	2.53	2.59	2.63	2.66
	低熱	24.4	28	0.00	—	1.02	1.55	1.73	1.95	2.05	2.24	2.38	2.46	2.48	2.53	2.58	2.62	2.64
	高炉B種	25.0	15	0.00	0.37	0.72	1.06	1.20	1.33	1.41	1.56	1.68	1.73	1.83	1.92	1.99	2.02	2.04
45	普通	34.3	7	0.00	0.39	0.66	0.90	1.02	1.12	1.19	1.33	1.44	1.54	1.63	1.68	1.74	1.79	1.81
	早強	35.2	3	0.00	0.43	0.62	0.87	0.96	1.04	1.11	1.24	1.35	1.41	1.49	1.57	1.65	1.70	1.72
	中庸熱	33.5	15	0.00	0.37	0.70	1.04	1.17	1.30	1.38	1.55	1.67	1.75	1.86	1.97	2.03	2.09	2.12
	低熱	34.4	24	0.00	0.49	0.84	1.25	1.38	1.51	1.61	1.76	1.89	1.97	2.04	2.11	2.17	2.23	2.25
	高炉B種	33.6	15	0.00	0.29	0.54	0.80	0.89	1.00	1.07	1.19	1.28	1.34	1.42	1.50	1.56	1.60	1.62
35	普通	52.4	7	0.00	0.27	0.42	0.58	0.67	0.73	0.77	0.88	0.96	1.04	1.12	1.18	1.24	1.30	1.32
	早強	51.7	4	0.00	—	0.36	0.48	0.54	0.60	0.64	0.71	0.80	0.84	0.93	0.99	1.04	1.08	1.11
	中庸熱	53.4	15	0.00	0.29	0.53	0.74	0.83	0.93	0.99	1.12	1.23	1.31	1.43	1.53	1.60	1.66	1.69
	低熱	54.1	36	0.00	0.19	0.41	0.64	0.74	0.84	0.92	1.05	1.17	1.26	1.37	1.47	1.56	1.62	1.65
	高炉B種	54.1	21	0.00	0.18	0.34	0.48	0.56	0.64	0.68	0.78	0.83	0.88	0.98	1.04	1.09	1.15	1.16

#### 4.3.5 乾燥収縮率と質量減少率の関係

##### 1) 乾燥前養生期間が材齢 7 日一定によるセメントの種類の比較

4.3.3 で述べた、乾燥前養生期間を材齢 7 日一定とした試験結果をもとに、コンクリートの乾燥収縮率と質量減少率の関係を検討した。W/C 每にセメントの種類で比較した結果を図-4.3.5.1 に示す。

図の傾きは、水分の逸散に対する乾燥収縮率としてのコンクリートの収縮性状を表すが、何れの W/C においてもセメントの種類により収縮性状の差が確認された。材齢 7 日の時点で圧縮強度の低い中庸熱や低熱のセメントは、乾燥開始初期において水分が多く逸散するが収縮は生じない乾燥期間があり、これはセメント硬化体の粗大な空隙からの水分の逸散と思われる。この傾向は W/C を低くすると小さくなり、他のセメントと同様に乾燥の初期においても収縮が生じるようになる。そのため、W/C を低くするとセメントの種類による収縮性状の差が小さくなつた。

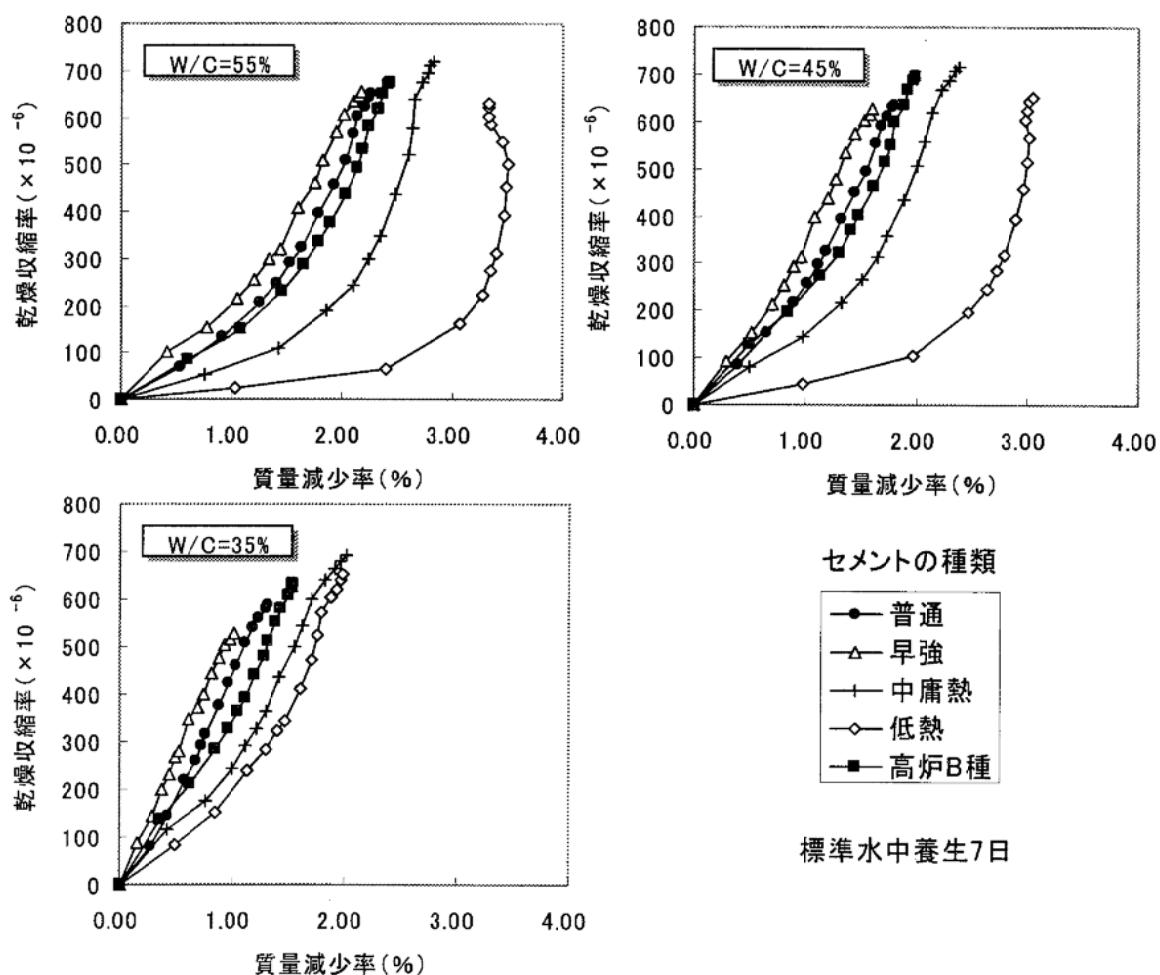


図-4.3.5.1 セメントの種類で比較したコンクリートの乾燥収縮率と質量減少率の関係  
(乾燥前養生期間 7 日)

## 2) 乾燥前養生期間が圧縮強度一定によるセメントの種類の比較

4.3.4 で述べた、乾燥開始時の圧縮強度を一定とした試験結果をもとに、コンクリートの乾燥収縮率と質量減少率の関係を検討した。W/C 每にセメントの種類で比較した結果を図-4.3.5.2 に示す。

前述の材齢 7 日一定と比較して、セメントの種類による収縮性状の違いが小さくなつた。特に、W/C35%では、セメントの種類に係わらずほぼ同等の収縮性状であった。その他の W/C55%および 45%においても、乾燥を開始した初期の収縮性状を除けば傾きは同程度であり、セメントの種類に係わらずほぼ同等の収縮性状であった。つまり、強度が同等となるまで養生することで、セメントの種類による収縮性状の差は小さくなり、ほぼ同等の収縮性状を示す結果となつた。ただし、逸散できる水分量と逸散速度はセメントの種類によって異なるため、乾燥期間 26 週におけるコンクリートの乾燥収縮率には差が生じるものと考えられる。

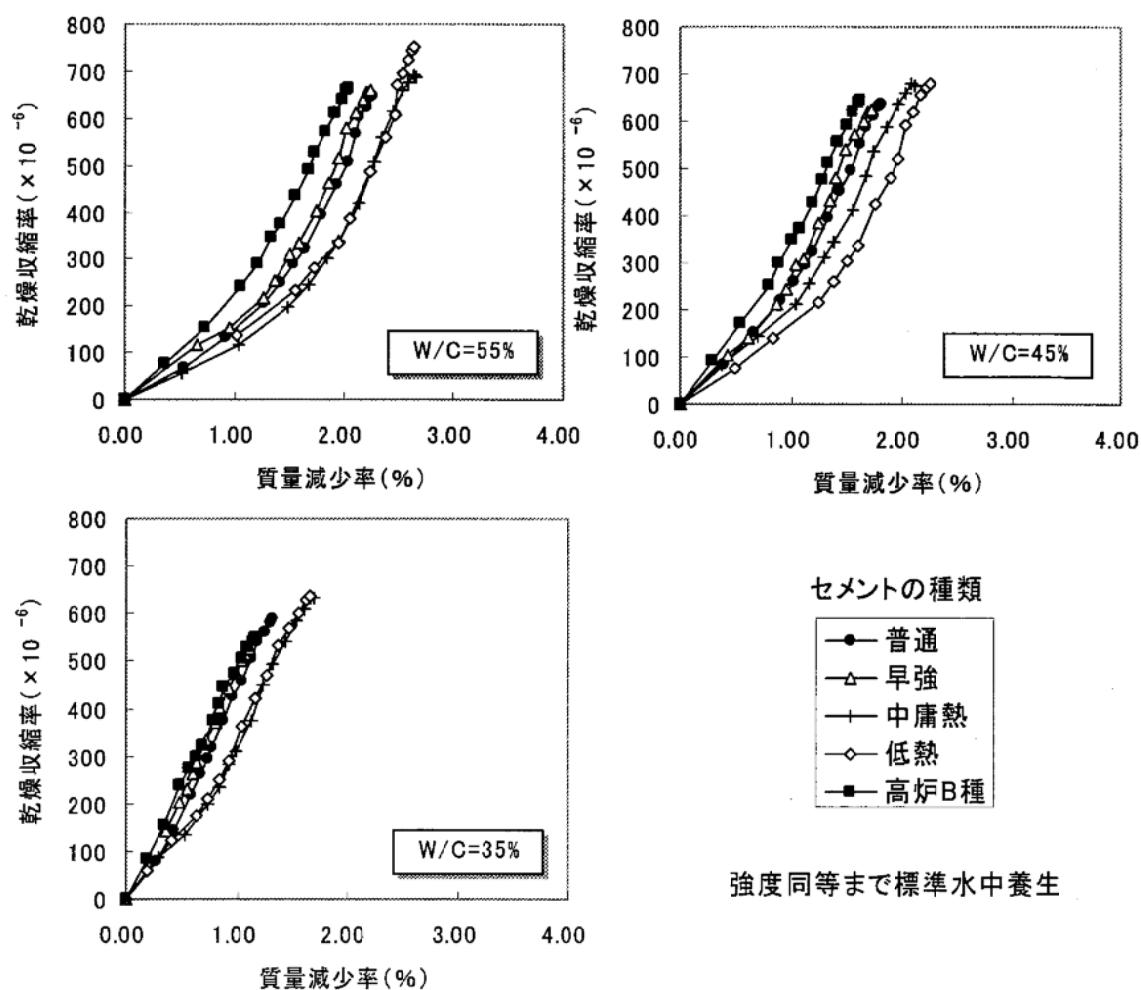


図-4.3.5.2 セメントの種類で比較したコンクリートの乾燥収縮率と質量減少率の関係  
(乾燥開始強度一定)

### 3) 乾燥前養生期間が材齢 7 日一定による水セメント比の比較

4.3.3 で述べた、乾燥前養生期間を材齢 7 日一定とした試験結果をもとに、コンクリートの乾燥収縮率と質量減少率の関係を検討した。セメントの種類毎に W/C で比較した結果を図-4.3.5.3 に示す。

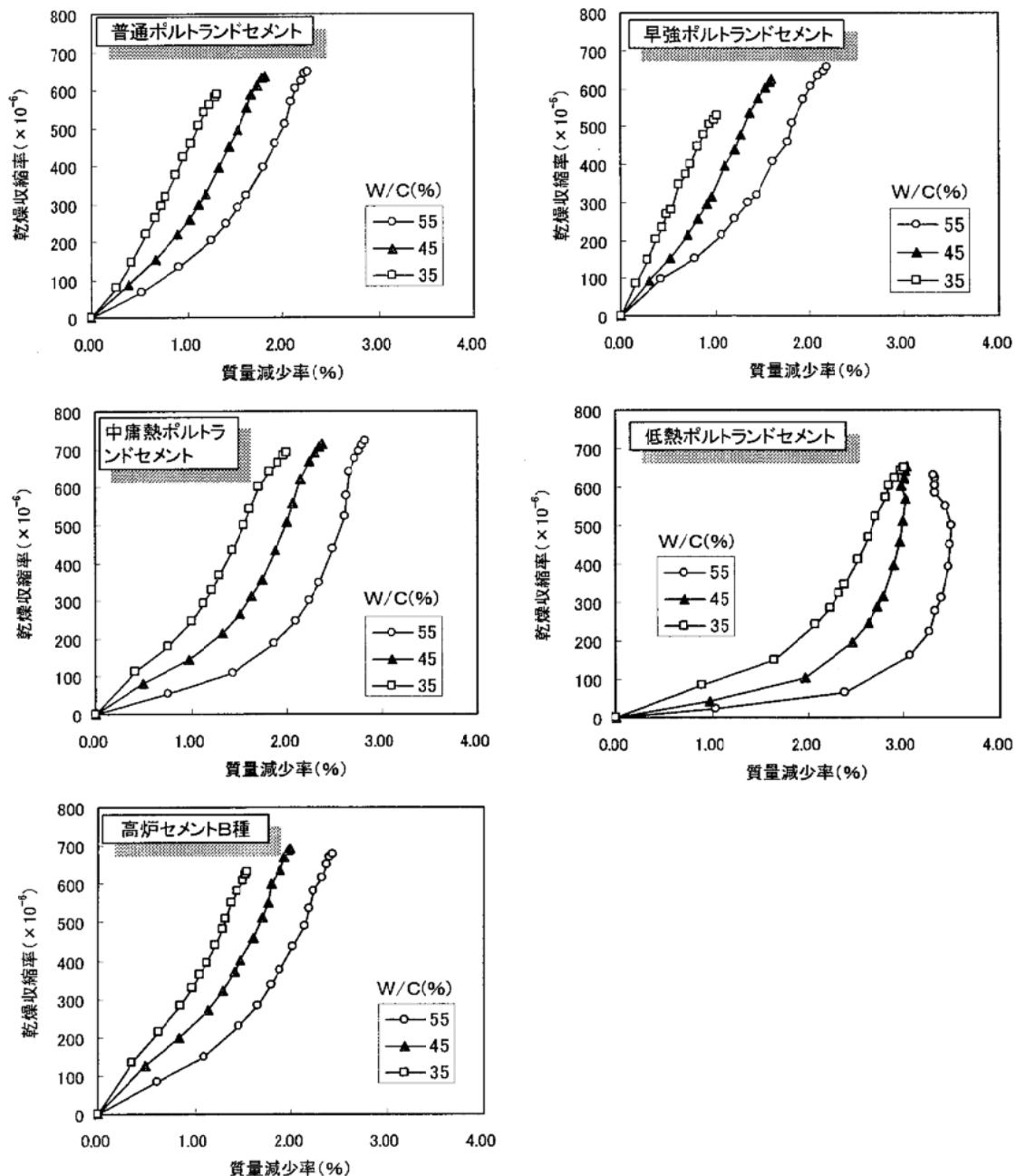


図-4.3.5.3 W/C で比較したコンクリートの乾燥収縮率と質量減少率の関係  
(乾燥前養生期間 7 日)

全てのセメントにおいて、W/C を低くすることで、乾燥初期の傾きが大きくなつた。図の傾きが大きくなることは、一定の水分逸散に対する乾燥収縮率の増加を表しているが、W/C を低くすることによりセメント硬化体が緻密化され、収縮を引き起こす微細な空隙が

増加したものと考えられる。ただし、緻密となることにより、逸散する水分の量が少なくなり逸散する速度も遅くなるため、その変化量と傾きの増加程度に応じてコンクリートの乾燥収縮率の増減が左右されるものと考えられる。

## 5. 結言

本研究では、普通、早強、中庸熱、低熱の各ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種の混合セメントの合計 5 種類のセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮率を評価した。コンクリートの配合は、水セメント比を、普通コンクリートを想定して 55% および 45%，高強度コンクリートを想定して 35% の 3 水準とした。また、配合の要因に加え、乾燥前養生期間を材齢 7 日一定とした場合と乾燥開始時の圧縮強度が同等となる材齢とした場合の 2 種類とした要因と試験所間の要因についても検討した。

本研究により得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

### (1) 圧縮強度および静弾性係数

材齢 7 日の圧縮強度および静弾性係数は、何れの W/C でも概ね、早強 > 普通 > 高炉 B 種 > 中庸熱 > 低熱の順となるが、材齢の経過に伴い、セメントの種類で異なる傾向を示した。

### (2) コンクリートの乾燥収縮率

#### 1) 試験所間の違いによる影響

W/C 55% のコンクリートの配合において、乾燥前養生期間を材齢 7 日とした場合、同一ロットのコンクリート供試体を用いて、7 試験所にて同時に乾燥収縮率を測定した。その結果、乾燥期間 26 週における乾燥収縮率の試験所間の範囲は、セメントの種類毎に見ると、普通で  $172 \times 10^{-6}$ 、早強で  $111 \times 10^{-6}$ 、中庸熱で  $77 \times 10^{-6}$ 、低熱で  $157 \times 10^{-6}$ 、高炉 B 種で  $98 \times 10^{-6}$  であり、これらを平均すると  $123 \times 10^{-6}$  となった。

#### 2) セメントの種類の影響

セメントの種類がコンクリートの乾燥収縮率に及ぼす影響を統計解析により検証した。その結果、本実験で得られた範囲では、早強を使用したコンクリートの乾燥収縮率は他のセメントを使用したものより小さくなることが判明した。しかし、普通、中庸熱、低熱、高炉 B 種を使用したコンクリートの乾燥収縮率はいずれも同等となった。

#### 3) 水セメント比の影響

乾燥前養生期間を材齢 7 日とした場合の各種セメントを使用した乾燥期間 26 週における乾燥収縮率は、W/C で傾向が異なり、普通および早強は W/C が低くなるほど、乾燥収縮率は小さくなつた。また、高炉 B 種も、W/C が最も低い場合に乾燥収縮率が最小となつた。一方、中庸熱および低熱は W/C に関わらず、乾燥収縮率は同等となつた。

#### 4) 乾燥前養生期間

乾燥前養生期間を普通の材齢 7 日の圧縮強度と同等の強度が得られる材齢とした場合、乾燥前養生期間を材齢 7 日とした場合に比べ、乾燥期間 26 週におけるセメントの種類間の乾燥収縮率の範囲は小さくなることが明らかとなつた。

## 参考文献

- 1) 社団法人 セメント協会,耐久性専門委員会ひびわれ分科会報告 H-23,コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討,1992年10月,pp16~pp23
- 2) 中村則清,コンクリートの乾燥収縮試験結果の変動に関する検討,建材試験情報,Vol 46,2010.2,pp10~pp15
- 3) 社団法人 日本コンクリート工学協会,コンクリートの収縮問題検討委員会,2010年3月,pp48~pp58
- 4) 全国生コンクリート工業組合連合会,コンクリートの乾燥収縮の影響要因に関する調査研究報告書,平成22年3月,pp83~pp84
- 5) 社団法人 日本コンクリート工学協会,コンクリートの自己収縮研究委員会報告書,2002年9月,pp105~pp107

## 関係報告

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-1	昭和28年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係に関する報告(I)
F-2	昭和29年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強さの関係に関する報告(II)
F-3	昭和30年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強度の関係に関する報告(III)
F-4	昭和31年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と曲げおよび圧縮強さとの関係に関する報告
F-5	昭和32年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強度および引張強さ係数との関係に関する報告
F-6	昭和33年5月	最近のポルトランドセメントを用いた舗装用コンクリートを対象とするAEコンクリートのセメント水重量比と曲げおよび圧縮強度との関係に関する報告
F-7	昭和34年5月	各種セメントを用いた舗装用AEコンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その2 早強および中庸熱ポルトランドセメント)
F-8	昭和35年4月	各種セメントを用いた舗装用AEコンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その3 高炉セメント)
F-9	昭和36年4月	各種セメントを用いた舗装用AEコンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その4 シリカセメントおよびフライアッシュセメント)
F-10	昭和36年4月	コンクリート強度におよぼす細骨材の影響に関する共同試験報告
F-11	昭和36年4月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告
F-12	昭和37年5月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告(その2)
F-13	昭和38年3月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告(その3)
F-14	昭和39年6月	各種のセメントを用いたコンクリートの圧縮強度に関する共同試験報告(その1)
F-15	昭和40年8月	各種のセメントを用いたコンクリートの圧縮強度に関する共同試験報告(その2)
F-16	昭和41年9月	スランプの相違をも含めたコンクリートのセメント水比と圧縮強度との関係に関する報告
F-17	昭和42年4月	各種のセメントを用いたコンクリートの長期強度に関する共同試験報告
F-18	昭和42年9月	硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告
F-19	昭和43年5月	富配合かた練りコンクリートのセメント水比と圧縮強度および引張強度との関係に関する報告
F-20	昭和43年10月	砕石を用いた舗装用コンクリートの圧縮強度および曲げ強度に関する報告
F-21	昭和44年9月	砕石を用いた軟練りコンクリートの配合および強度に関する報告
F-22	昭和45年9月	舗装用コンクリートの曲げ強度および引張強度に関する共同試験報告
F-23	昭和46年3月	硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告(その2)
F-24	昭和47年9月	コンクリートの強度試験方法に関する共同試験報告(その1)
		I 圧縮強度試験におけるキャッピング材料およびキャッピング方法
		II 引張強度試験における支承材の有無および支承材の材質
F-25	昭和48年10月	III 曲げ強度試験における供試体の寸法および載荷方法
		レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-26	昭和 50 年 9 月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告(II) 1.回収水使用コンクリートの性質に及ぼす温度の影響 2.減水剤を用いたコンクリートに及ぼす回収水の影響 3.スラッジの経過日数がコンクリートの性質に及ぼす影響 4.回収水とスラッジの品質調査
F-27	昭和 50 年 9 月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告(III) 回収水使用コンクリートの性質に及ぼすスラッジ組成の影響 (付)F-25 における中性化試験の中間報告
F-28	昭和 51 年 12 月	細骨材の品質調査報告
F-29	昭和 52 年 10 月	粗骨材の品質調査報告
F-30	昭和 52 年 9 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する促進試験報告
F-25 追加報告	昭和 53 年 4 月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験 コンクリートの中性化試験結果
F-31	昭和 54 年 6 月	粗骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-32	昭和 56 年 3 月	細骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-33	昭和 56 年 3 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢 5 年中間報告(その 1)-
F-34	昭和 57 年 5 月	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告(その 1) -普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを用いた場合-
F-35	昭和 57 年 7 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢 5 年中間報告(その 2)-
F-36	昭和 58 年 2 月	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告(その 2) -高炉セメント B 種およびフライアッシュセメント B 種を用いた場合-
F-37	昭和 59 年 3 月	コア供試体の圧縮強度におよぼす各種試験要因の影響
F-38	昭和 60 年 7 月	初期の乾燥がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-39	昭和 61 年 6 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢 10 年中間報告(その 1)-
F-40	昭和 62 年 8 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢 10 年中間報告(その 2)-
F-41	昭和 63 年 4 月	コンクリートによる高炉スラグ微粉末の混合率に関する研究
F-42	昭和 63 年 1 月	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究(その 1) -40℃湿空条件における試験結果-
F-43	1989 年 8 月	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究(その 2) -屋外暴露および 20℃海水反復浸漬条件における試験結果-
F-44	1989 年 9 月	コンクリートによるアルカリ・シリカ反応の防止に関する研究
F-45	1991 年 6 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢 15 年中間報告-
F-46	1992 年 10 月	石灰石骨材コンクリートに関する研究
F-47	1994 年 3 月	石灰石骨材のアルカリ炭酸塩岩反応に関する調査・研究

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-48	1998年4月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 材齢20年最終報告
F-49	1999年3月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 セメントの種類、養生条件および海洋暴露条件の影響(材齢10年試験)一
F-50	1999年3月	コンクリートの断熱温度上昇試験方法に関する研究
F-51	2002年3月	各種セメントを用いたコンクリートの初期強度発現および断熱温度上昇
F-52	2006年3月	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢5年報告
F-53	2006年3月	蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響
F-54	2008年3月	寒冷地に暴露したAEコンクリートの耐凍害性・材齢20年報告-
F-55	2008年3月	各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究
F-56	2010年3月	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢10年最終報告
F-55(追補)	2011年3月	各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究 (コンクリートの乾燥収縮に関する実験結果)

ISBN978-4-88175-107-7 C3358

## コンクリート専門委員会報告 F55 (追補)

定価：本体1,500+税

平成 23 年 3 月 25 日 印刷 社団法人 セメント協会  
平成 23 年 3 月 31 日 発行 東京都中央区日本橋本町 1 丁目 9 番 4 号  
Daiwa 日本橋本町ビル 7 階  
電話 03(5200)5051(代)  
発行所 社団法人 セメント協会 研究所  
東京都北区豊島 4 丁目 17 番 33 号  
電話 03(3914)2691(代)  
印刷所 有限会社 イー・エム・ピー  
東京都千代田区三崎町二丁目 14 番地 6 号 T.M 水道橋ビル 2F  
電話 03(3265)6050

**JCA**