

各種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

(社)セメント協会 コンクリート専門委員会*

1. はじめに

本レポートは、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、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試験結果を取りまとめたものである。

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ついては、1992年に委員会報告¹⁾を刊行しているが、この委員会報告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。そこで、今回は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。要因はセメントの種類以外に、コンクリートの水セメント比ならびに乾燥前養生条件を加え、さらに試験所間の差として7試験所の共通試験も実施した。本レポートの詳細は2011年3月に刊行したコンクリート専門委員会報告F-55(追補)²⁾を参照されたい。

*【委員長】中山英明 [三菱マテリアル(株)] 【委員】小倉 東 [日鐵セメント(株)]、加藤弘義 [株)トクヤマ]、石川雄康 [太平洋セメント(株)]、大和功一郎 [宇部興産(株)]、川原正秀 [電気化学工業(株)]、植木康知 [新日鐵高炉セメント(株)]、草野昌夫 [住友大阪セメント(株)] 【事務局】佐藤智泰、島崎 泰、泉尾英文 [(社)セメント協会]

A STUDY ON THE DURABILITY OF CONCRETE MADE USING VARIOUS CEMENTS (THE RESULTS OF THE EXAMINATION FOR DRYING SHRINKAGE OF CONCRETE) (by TECHNICAL COMMITTEE ON CONCRETE/JCA)

2. 実験概要

2-1. 実験の要因と水準

実験の要因と水準を以下に示す。要因は、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、試験所間の差とした。W/Cは55、45および35%の3水準、乾燥前養生条件は材齢を7日とする条件とW/Cごとに圧縮強度を一定とする条件の2水準、試験所間の差は7試験所で実施した。なお、乾燥条件はJIS A 1129附属書A(参考)の温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ とし、測定方法は7試験所全てにおいてJIS A 1129-2のコンタクトゲージ方法で統一した。

- (1) セメントの種類……5種類：セメントの種類を表1に示す。
- (2) W/C……3水準：55%、45%および35%
- (3) 乾燥前養生条件……2水準：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。
 - ① JIS A 1129附属書A(参考)に準拠し、成形翌日に脱型後、材齢7日まで標準水中養生

表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

表2 セメントの化学成分

セメントの種類	化学成分(%)											
	ig.loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ Oeq	Cl ⁻
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
中庸熟	0.74	0.05	23.73	3.39	3.84	64.28	0.80	2.05	0.26	0.47	0.57	0.009
低熟	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 セメントの物理的性質

セメントの種類	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)	凝結			安定性	圧縮強さ(N/mm ²)				
			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	-
中庸熟	3.21	3190	27.9	3-02	4-27	良	-	20.6	29.0	56.9	-
低熟	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	-

生(材齢7日とする条件)

- ② 成形翌日に脱型後、W/Cごと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(±2N/mm²)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) 試験所間の差……7 試験所：(社)セメント協会 研究所および同協会 会員会社

2-2. 使用材料

2-2-1. 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)、中庸熟ポルトランドセメント(以下、中庸熟と略)、低熟ポルトランドセメント(以下、低熟と略)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、中庸熟は2銘柄、その他はそれぞれ3銘柄を任意に選定して等量で混合したものを試料とした。これらのセメントの化学成分および物理的性質を表2および表3に示す。

2-2-2. 骨材

骨材は、JIS A 5308：2009(レディーミクストコンクリート)附属書A(規定)の粒度および品質値を満足する、東京都青梅市産の硬質砂岩碎石(表乾密度2.65g/cm³、吸水率0.74%、粗粒率6.63)を粗骨材に、千葉県君津市産の山砂(表乾密度2.63g/cm³、吸水率1.63%、粗粒率2.77)を細骨材に使用した。

2-2-3. 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。

2-3. 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4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、配合決定に当ってはセメン

表4 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 ³)				(ml/m ³)				
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	(64×63)	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	(58×55)	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	(66×62)	4.8	21.5

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 ± 1.5 cmの配合条件を得て、その他のセメントはW/Cごと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 ± 5 cmとした。なお、空気量は、すべての配合において $4.5 \pm 0.5\%$ とした。

2-4. 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」に準じて行い、 $10 \times 10 \times 40$ cmの角柱供試体で乾燥収縮率を測定した。

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55ℓ)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. 試験結果および考察

3-1. 試験所間の差

試験所間の差を把握するため、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、計7試験所にて同時に乾燥収縮率の共通試験を行った。なお、本試験は乾燥前養生条件を材齢7日とした条件で行い、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た。

結果の一例として、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの乾燥収縮率を図1に、乾燥期間26週の7試験所平均および最大・最小乾燥収縮率を図2に示す。乾燥期間26週における乾燥収縮率の試験所の範囲(=最大-最小)は、普通で 172×10^{-6} 、早強で 111×10^{-6} 、中庸熱で 77×10^{-6} 、低熱で 157×10^{-6} 、高炉B種で 98×10^{-6} であり、これらを平均す

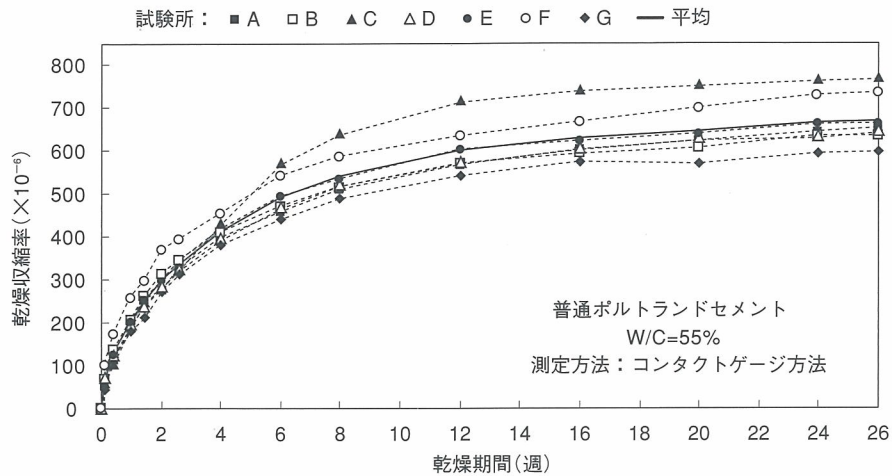


図1 普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの乾燥収縮率

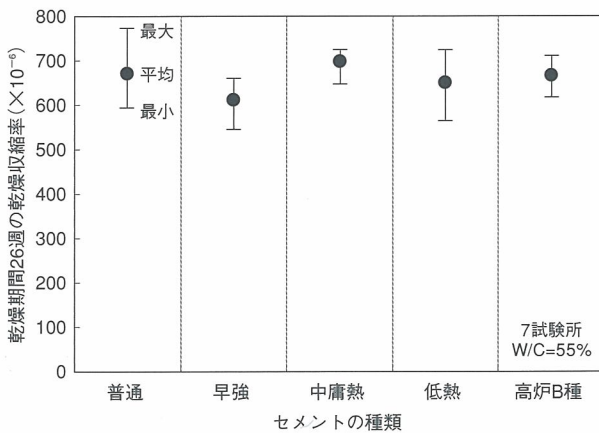


図2 乾燥期間26週の7試験所平均および最大・最小乾燥収縮率

ると 123×10^{-6} 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 100×10^{-6} 程度となることが報告されている³⁾。本共通試験における試験所の範囲はこれを若干上回るものの、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、附属書A(参考)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、 100×10^{-6} 程度の試験所誤差が生じると考えられる。また、本試験は測定方法をコンタクトゲージ方法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

表5 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					

^{4, 5)}されている。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当たっては、測定値の変動の要因を十分に考慮する必要がある。

3-2. 有意差検定によるセメントの種類の影響

3-1.の7試験所による試験所間の差の共通試験結果をもとに、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。

有意差検定の方法はt検定(危険率5%, 両側)を採用した。セメントの種類による乾燥収縮率の有意差検定結果を表5に示す。セメントの種類間でt検

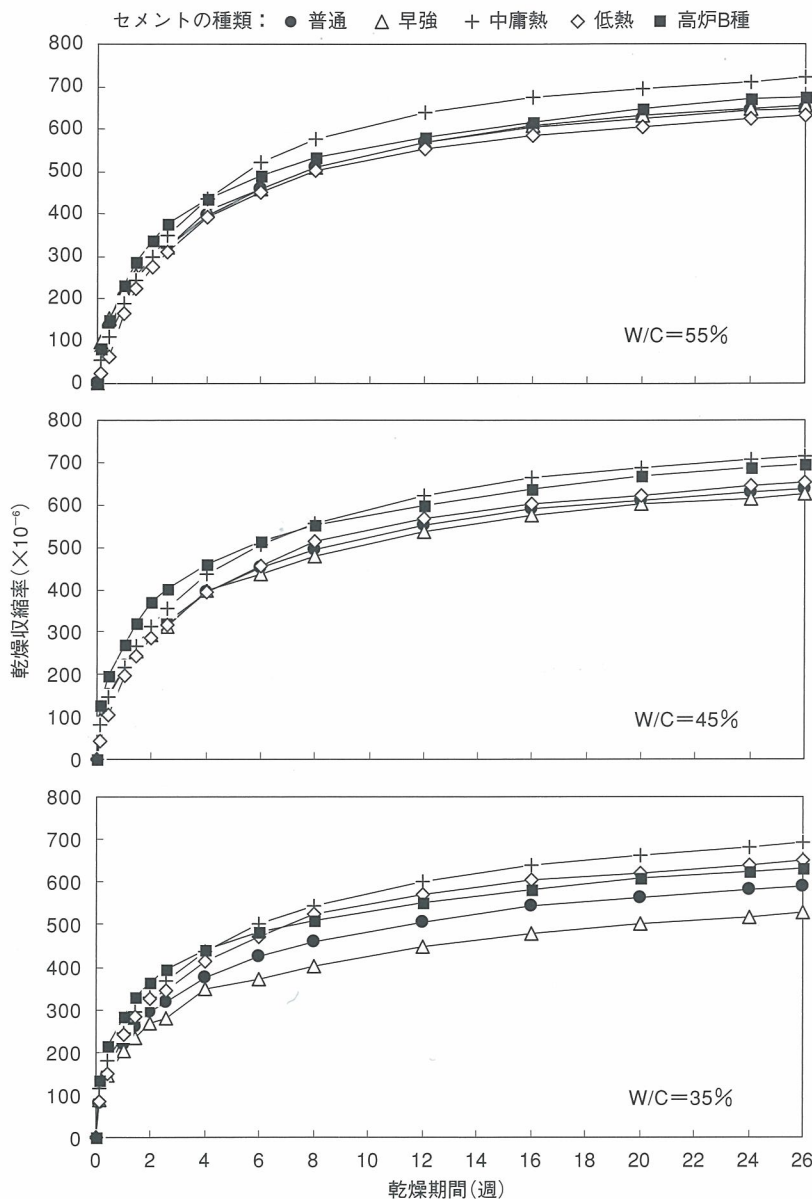


図3 W/Cごとにセメントの種類で比較したコンクリートの乾燥収縮率(乾燥前養生条件-材齢7日)

定を行った結果、ケース①、ケース⑤およびケース⑦で有意な差があると認められた。これらの3つのケースは、いずれも早強と比較したケースであり、その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コンクリート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。早強を使用したコンクリートの乾燥収縮率が小さくなった原因の一つとして、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。

3-3. 水セメント比の影響

W/Cごと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試験結果を図3に示す。なお、この結果は3-1.および3-2.と同様、乾燥前養生条件を材齢7日とした条件で実施し、3-1.の試験所Aの試験結果である。普通および早強は、乾燥期間2.57週(18日)まではいずれの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の影響をほとんど受けない結果となった。

乾燥期間26週におけるW/Cごとのセメント種類の範囲を比較すると、W/C55%で 90×10^{-6} 、45%で 87×10^{-6} 、W/C35%で 162×10^{-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、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 102×10^{-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いと言える。しかし, W/Cの低いコンクリート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⁶⁾。したがって, 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。

3-4. 乾燥前養生条件の影響

これまで述べた, 乾燥前養生条件を材齢7日とした条件では, 乾燥開始時(材齢7日)の圧縮強度および静弾性係数がセメントの種類で大きく異なる。そこで本試験では, 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条件を, 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て乾燥収縮率を測定した。なお, W/Cは3-3.と同様に55%, 45%および35%の3水準とし, 3-1.の試験所Aの試験結果である。

W/Cごと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試験結果を図4に示す。図中

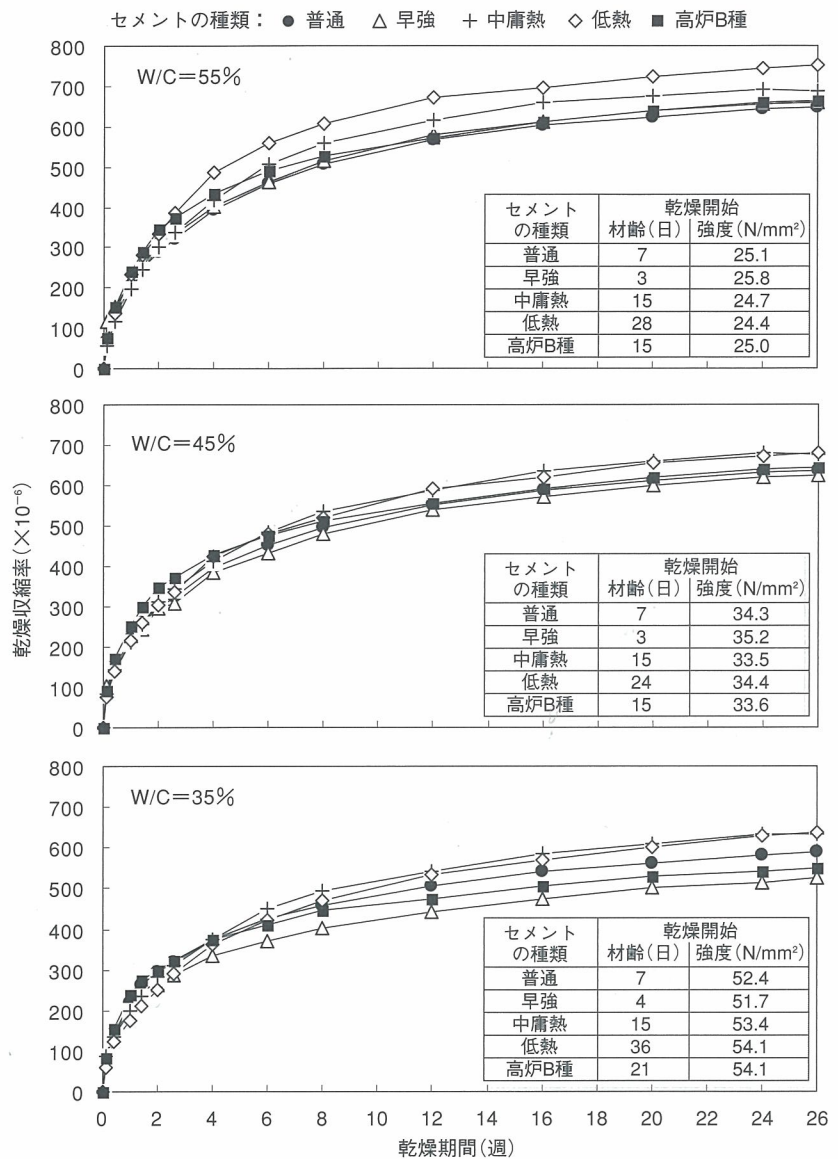


図4 W/Cごとにセメントの種類で比較したコンクリートの乾燥収縮率(乾燥前養生条件-圧縮強度一定)

には乾燥開始時の材齢と圧縮強度を付記する。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, 乾燥前養生条件を材齢7日と比較して, いずれの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。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 102×10^{-6} , W/C45%で 55×10^{-6} , W/C35%で 110×10^{-6} となり, 乾燥前養生条件を材

齢7日とした場合に比べて、W/C55%で同等、W/C45%および35%で小さくなった。

4. まとめ

本実験では、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。得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) 試験所間の違いによる影響

W/C55%のコンクリートの配合において、乾燥前養生条件を材齢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、普通で 172×10^{-6} 、早強で 111×10^{-6} 、中庸熱で 77×10^{-6} 、低熱で 157×10^{-6} 、高炉B種で 98×10^{-6} であり、これらを平均すると 123×10^{-6} となった。

(2) セメントの種類の影響

(1)の結果をもとに、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についてt検定(危険率5%、両側)による有意差検定を行った。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コンクリート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。

(3) 水セメント比の影響

乾燥前養生条件を、材齢7日とした場合の各種セメントを使用したコンクリートの乾燥期間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った。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った。

(4) 乾燥前養生条件の影響

乾燥前養生条件を、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの材齢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、乾燥前養生条件を材齢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W/C55%で同等、W/C45%および35%で小さくなることが明らかとなった。

[引用文献]

- 1) (社)セメント協会/コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討, 耐久性専門委員会ひびわれ分科会報告H-23, pp.16~23, 1992.10
- 2) (社)セメント協会/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), コンクリート専門委員会報告F-55(追補), 2011.3
- 3) 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, pp.10~15, 2010.2
- 4) (社)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, pp.48~58, 2010.3
- 5) 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, pp.83~84, 平成22年3月
- 6) (社)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, pp.105~107, 2002.9