

U.D.C 666.9.017

コンクリートのひび割れ防止のための乾燥収縮低減技術

川崎健二郎* 大岡 督尚*

要約： コンクリートの乾燥収縮によるひび割れを抑制するために、様々な乾燥収縮低減対策が提案されている。提案されている収縮低減対策としては、粗骨材の石灰石置換、膨張材の使用、収縮低減剤の使用、収縮低減型高性能 AE 減水剤の使用、塗布型収縮低減剤の使用などが挙げられる。本報はそれら効果および特性について実験的に検討を行った報告である。結論は以下の通りである。

- (1)収縮低減型高性能 AE 減水剤は 8~14%程度の収縮低減効果を示した。
- (2)粗骨材の石灰石 100%置換は乾燥収縮率を 600×10^{-6} 以下とすることが可能。
- (3)膨張材は多くとも 300×10^{-6} の収縮低減効果にとどまる。
- (4)収縮低減剤は 20%程度の収縮低減を示した。
- (5)塗布型収縮低減剤は 10%程度の収縮低減を示した。

キーワード： 乾燥収縮, 石灰石, 膨張材, 収縮低減剤, 塗布型収縮低減剤

- 目次：**
- 1. はじめに
 - 2. 実験概要

- 3. 結果および考察
- 4. まとめ

1. はじめに

コンクリートのひび割れは乾燥収縮が主原因とするものが多数あり、ひび割れを抑制するため乾燥収縮を抑制することは重要である。日本建築学会は乾燥収縮率に対する目標品質を表 1 の様に設定し、目標の乾燥収縮率に対する具体的な対策を提案している。提案されている対策としては、粗骨材の石灰石 100%置換、膨張剤の使用、収縮低減剤の使用である。本実験では、これらの収縮低減効果を確認するとともに、近年開発された収縮低減型高性能 AE 減水剤や塗布型収縮低減剤の効果についても検討をおこなったので、ここに報告する。

2. 実験概要

収縮低減対策効果を検証する実験を以下に示す 4 シリーズとした。シリーズ A は収縮低減型高性能 AE 減水剤の効果の確認、シリーズ B は粗骨材の岩種および石灰石砕石の産地が乾燥収縮に与える影響、シリーズ C は膨張

材および収縮低減剤の乾燥収縮低減効果の確認、シリーズ D は塗布型の収縮低減剤の効果について検討を行ったものである。それぞれの実験に使用した材料は表 2 に示す通りであり、これらの石灰石砕石は東京川崎近郊のプラントから提供を受けたものである。供試体名の文字表記構成、調合、フレッシュ性状、硬化後性状をシリーズ毎に表 3~6 に示す。表 3 に示したシリーズ A は収縮低減型高性能 AE 減水剤の効果を確認するため、水セメント比および粗骨材を一定にし、混和剤のみを変動因子とした。表 4 に示したシリーズ B は骨材の岩種、石灰石砕石の産地による影響を確認するため単位水量、水セメント比を一定とし、粗骨材のみを変動因子とした。表 5(a),(b)に示したシリーズ C は膨張材および収縮低減剤の効果を確認するために膨張材および収縮低減剤の有無のみを変動因子とした。強度は 27N/mm²および 100N/mm²を対象とし、それぞれ同図(a)および(b)に示した。膨張材はセメントに対して内割りとして W/C の計算を行っ

表 1 乾燥収縮ひずみの目標品質を満足するための使用材料の組み合わせ¹⁾

収縮低減の対象となる コンクリートの 乾燥収縮率(×10 ⁴)	目標とするコンクリートの乾燥収縮率(×10 ⁴)		
	650~800(標準仕様)	500~650(高級仕様)	500以下(特級仕様)
800~1000	低減 0~20%	低減 20~35%	低減 35~50%
	(石)または(膨)または(収)	(石)+(膨)または(石)+(収)または(膨)+(収)	(石)+(膨)+(収)
650~800	低減 0%	低減 0~20%	低減 20~40%
	-	(石)または(膨)または(収)	(石)+(収)または(石)+(収)または(膨)+(収)
500~650	-	低減 0%	低減 0~25%
	-	-	(膨)または(収)

注) (石) : 石灰石砕石 100%置換, (膨) : 膨張材使用, (収) : 収縮低減剤使用

* 基盤技術開発部

た、表6に示したシリーズDは塗布型収縮低減剤の効果を確認するもので塗布(21-CS, 27-CS)、無塗布(21-BL, 27-BL)に対して同様の調合のコンクリートを使用した。比較のため変動因子を呼び強度とし、21および27に相当する2種類に設定した。試験体は図1の様な型枠で製作した100mm×100mm×400mm直方体とし、長手方向の長さ変化率を計測するために試験体中央部分に埋込型ひずみ計(KM-100B：東京測器製)を設置した。試験体は変動因子毎に3体としそれぞれの平均値を実測値として採用した。コンクリートの温度履歴を計測するため3体の内1体は埋め込みゲージ近傍に熱電対を設置した。練り混ぜには50ℓパン型の強制練りミキサーを使用し、打設は温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室で行った。フレッシュ性状は表3～6

表2 使用材料

材料	種類	記号
セメント	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³)	C
水	上水道水	W
細骨材	陸砂：静岡県掛川市上内田(表乾密度2.57g/cm ³ ,吸水率1.81%)	S
	硬質砂岩碎石：東京都八王子産(表乾密度2.69g/cm ³ ,吸水率0.56%)	硬 th
	埼玉県飯能市上名栗産(表乾密度2.69g/cm ³ ,吸水率0.94%)	石 sh
	北海道北斗市寝朗産(表乾密度2.71g/cm ³ ,吸水率0.45%)	石 hg
	東京都西多摩郡奥多摩町氷川産(表乾密度2.69g/cm ³ ,吸水率0.60%)	石 th
	山口県美祿郡秋芳町産(表乾密度2.69g/cm ³ ,吸水率0.63%)	石 ys
粗骨材	石灰石 砕石	石 yi
	山口県美祿市伊佐町産(表乾密度2.69g/cm ³ ,吸水率0.43%)	石 yi
	AE 減水剤	70
	高性能 AE 減水剤	SV HU
	収縮低減型高性能 AE 減水剤	SR1 SR2 SR3
	AE 剤	202
混和材料	膨脹材	EX
	収縮低減剤	SRA
	塗布型収縮低減剤	CS

表3 シリーズA 調合および材料特性

	調合											フレッシュ性状				硬化性状 (4週標準)										
	W/C	s/a	W	質量 (kg/m ³)						70	SV	SR1	SR2	SR3	202	SL	Air	CT	T	Fc	E	ρ	Ft			
	(%)	(%)	(kg/m ³)	C	S	石 sh	硬 th	石 sh	石 hg	石 th	石 ys	石 yi	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(%)	(%)	(°C)	(°C)	(N/mm ²)	kN/mm ²	(t/m ³)
27-70	55.0	48.1	178.0	323.6	834.2	941.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.125	19.5	3.6	22.6	22.0	38.4	30.8	2.34	3.45	
27-SV	55.0	49.6	165.0	300.0	886.8	941.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.500	19.0	4.6	22.9	22.0	36.6	29.1	2.31	3.10	
27-SR1	55.0	49.6	165.0	300.0	886.8	941.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.300	18.5	3.8	23.0	22.0	39.9	31.9	2.34	3.30	
27-SR2	55.0	49.6	165.0	300.0	886.8	941.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.300	19.0	3.9	22.8	22.0	38.6	29.6	2.35	3.33	
27-SR3	55.0	49.6	165.0	300.0	886.8	941.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.300	19.5	3.9	22.7	22.0	39.2	32.2	2.37	3.15	

表4 シリーズB 調合および材料特性

	調合											フレッシュ性状				硬化性状 (4週標準)										
	W/C	s/a	W	質量 (kg/m ³)						SV	202	SL	Air	CT	T	Fc	E	ρ	Ft							
	(%)	(%)	(kg/m ³)	C	S	硬 th	石 sh	石 hg	石 th	石 ys	石 yi	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(%)	(%)	(°C)	(°C)	(N/mm ²)	kN/mm ²	(t/m ³)
39-硬 th	42.0	47.4	165.0	392.9	811.3	941.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.0	0.23	22.0	4.0	22.1	21	48.6	29.8	2.32	3.74
39-石 sh	42.0	47.4	165.0	392.9	811.3	—	941.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.0	0.21	21.0	5.0	24.5	22	54.4	32.7	2.34	3.07
39-石 hg	42.0	47.4	165.0	392.9	811.3	—	—	948.5	—	—	—	—	—	—	—	—	1.0	0.39	21.0	4.4	23.9	22	58.2	35.0	2.36	3.27
39-石 th	42.0	47.4	165.0	392.9	811.3	—	—	—	941.5	—	—	—	—	—	—	—	1.0	0.40	21.0	4.9	23.8	22	57.8	33.5	2.33	3.09
39-石 ys	42.0	47.4	165.0	392.9	811.3	—	—	—	—	941.5	—	—	—	—	—	—	1.0	0.07	22.5	5.0	23.8	22	54.4	32.6	2.33	2.54
39-石 yi	42.0	47.4	165.0	392.9	811.3	—	—	—	—	—	941.5	1.0	0.17	22.0	4.5	23.9	22	57.0	33.8	2.34	3.13					

表5(a) シリーズC 調合および材料特性 (普通強度)

	調合											フレッシュ性状				硬化性状 (4週標準)										
	W/C	s/a	W	質量 (kg/m ³)						70	SRA	202	SL	Air	CT	T	Fc	E	ρ	Ft						
	(%)	(%)	(kg/m ³)	C	S	硬 th	EX	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(%)	(%)	(°C)	(°C)	(N/mm ²)	kN/mm ²	(t/m ³)
27-BL	55.0	48.1	178.0	323.6	834.2	941.5	—	0.250	—	0.100	16.0	3.9	20.4	20	40.6	28.1	2.34	3.21								
27-EX	55.0	48.1	178.0	303.6	834.2	941.5	20.0	0.250	—	0.100	16.0	3.7	21.7	20	40.5	28.8	2.33	3.32								
27-AS	55.0	48.1	178.0	323.6	834.2	941.5	—	0.250	6.000	0.100	18.5	4.0	21.2	20	40.5	29.9	2.35	2.11								
27-EXAS	55.0	48.1	178.0	303.6	834.2	941.5	20.0	0.250	6.000	0.100	18.0	3.8	22.0	20	40.5	29.0	2.36	3.20								

表5(b) シリーズC 調合および材料特性 (高強度)

	調合											フレッシュ性状				硬化性状 (4週標準)										
	W/C	s/a	W	質量 (kg/m ³)						HU	SRA	SLF	Air	CT	T	Fc	E	ρ	Ft							
	(%)	(%)	(kg/m ³)	C	S	硬 th	EX	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(%)	(%)	(°C)	(°C)	(N/mm ²)	kN/mm ²	(t/m ³)
100-BL	20.0	44.0	155.0	775.0	647.0	860.8	—	0.800	—	—	52.0×51.0	2.8	22.9	20	104.7	41.4	2.43	5.92								
100-AS	20.0	44.0	155.0	775.0	647.0	860.8	—	0.900	6.000	—	73.0×69.0	0.5	24.2	20	111.4	42.9	2.54	7.29								
100-EX	20.0	44.0	155.0	755.7	646.9	860.8	20.0	0.900	—	—	57.5×55.0	3.2	24.7	20	100.8	40.6	2.43	6.14								
100-EXAS	20.0	44.0	155.0	755.7	646.9	860.8	20.0	0.900	6.000	—	75.0×56.0	1.0	25.3	20	107.0	41.5	2.48	5.71								

表6 シリーズD 調合および材料特性

	調合											フレッシュ性状				硬化性状 (4週標準)										
	W/C	s/a	W	質量 (kg/m ³)						70	202	SL	Air	CT	T	Fc	E	ρ	Ft							
	(%)	(%)	(kg/m ³)	C	S	硬 th	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(原液)	(%)	(%)	(°C)	(°C)	(N/mm ²)	kN/mm ²	(t/m ³)
27-BL(無塗布)	55.0	48.1	178.0	323.6	834.2	941.5	0.250	0.100	16.0	3.7	17.5	20.0	39.6	26.7	2.32	3.23										
27-CS(塗布)	55.0	48.1	178.0	323.6	834.2	941.5	0.250	0.100	16.0	3.7	17.5	20.0	39.6	26.7	2.32	3.23										
21-BL(無塗布)	65.0	46.0	175.0	269.2	827.5	1016.3	0.250	0.250	17.5	4.6	17.9	20.0	28.1	27.2	2.31	2.85										
21-CS(塗布)	65.0	46.0	175.0	269.2	827.5	1016.3	0.250	0.250	17.5	4.6	17.9	20.0	28.1	27.2	2.31	2.85										

Note) Fc : 圧縮強度, E : ヤング係数, ρ : 単位容積質量, Ft : 引張強度

に示した通りである。打設から材齢 1 日で脱型し、シリーズ A・B・C は材齢 1 週まで標準養生とした。シリーズ D は脱型の後、試験体の両小口面、および打設面、底面をアルミテープでシールし(図 2)、両側面に塗布型収縮低減剤を 125g/m^2 量塗布し材齢 1 週まで封緘養生とした。その後温度 20°C 相対湿度 60%の恒温恒湿室内に静置し乾燥を開始した。乾燥期間は JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法—第 2 部：コンタクトゲージ法」に準拠された期間である 6 ヶ月とし、供試体の間隔は 3cm とした。測定は同 JIS に準じたコンタクトゲージおよび埋め込みゲージによって行った。埋め込みゲージによる測定は打設前から行い、計測間隔は材齢 3 ヶ月まで 30 分、計測期間終了の材齢 6 ヶ月まで 2 時間とした。計測は、データロガー (TDS-302：東京測器製)、スイッチボックス (ASW-50C：東京測器製) を用いた。

3. 結果及び考察

実験結果およびその考察をシリーズ毎に行う。

まず、シリーズ A については、図 3 に示すような結果となった。収縮低減型高性能 AE 減水剤使用の乾燥収縮率は、対策なし(27-SV)の乾燥収縮率に対して 27-SR1、

27-SR2 および 27-SR3 に対して、 79×10^{-6} 、 53×10^{-6} および 89×10^{-6} の低減を示した。収縮低減効果は 8~14%程を示し、メーカーによる差が顕著である傾向を示した。比較した中で最も乾燥収縮率の低減が顕著であった収縮低減型高性能 AE 減水剤 SR3 は 14%の低減率を示した。収縮低減効果としては少なくとも 8%以上であり、収縮低減対策としてはある程度の有効性があるといえる。

図 4 にシリーズ B についての結果を示す。硬質砂岩砕石を使用した供試体(39-硬 th)の乾燥収縮率は、 900×10^{-6} 程度を示し、検討に用いた石灰石の乾燥収縮率は、 $538 \sim 574 \times 10^{-6}$ となり粗骨材の石灰石 100%置換は乾燥収縮率を約 600×10^{-6} 以下とする結果を示した。最大値と最小値との差は 40×10^{-6} 程度であり産地による差異は少ないといえる。その他、粗骨材の石灰石 100%置換の効果を検証するため、全国生コンクリート工業組合連合会の資料²⁾の中から普通セメント使用、混和材不使用の条件で粗骨材の岩種毎にまとめたヒストグラムを図 5(a：石灰石)、(b：砂岩)、(c：安山岩)、(d：流紋岩)にそれぞれ示す。図 5(a)石灰石に注目すると乾燥収縮率が 625×10^{-6} 未満の供試体が全数の 87%に達し、粗骨材の石灰石 100%置換は乾燥収縮率を 600×10^{-6} 程度以下とすることが、この結果からも明らかである。同図(b)の砂岩におい

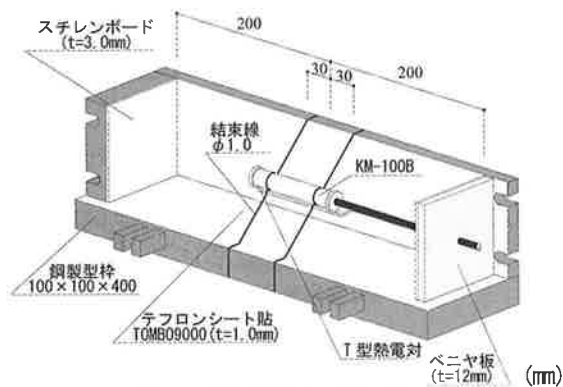


図 1 収縮計測試験体型枠 (埋め込みゲージ)



図 2 シリーズ D 乾燥収縮試験体

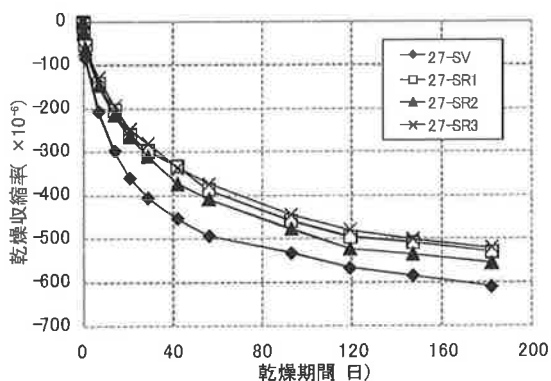


図 3 収縮低減型高性能 AE 減水剤の効果

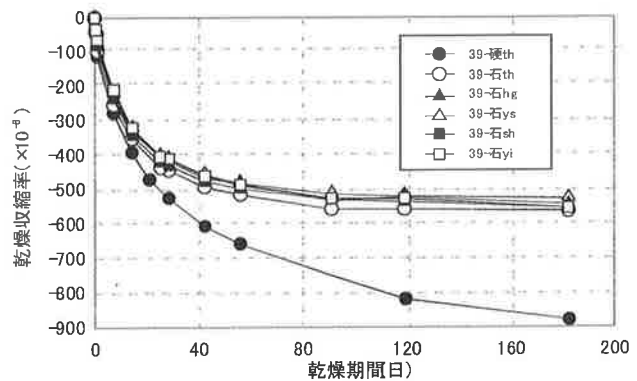
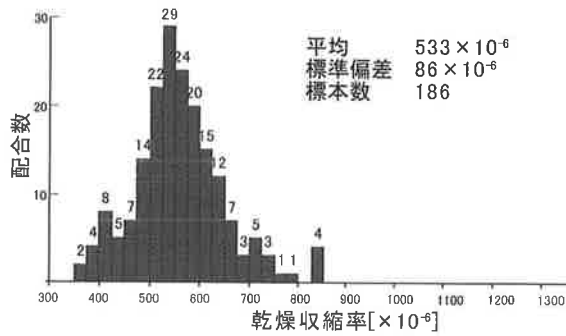
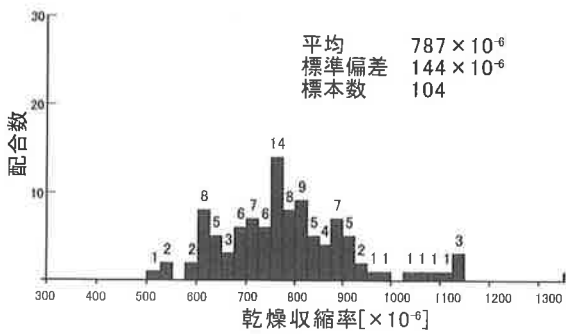


図 4 石灰石の産地の影響

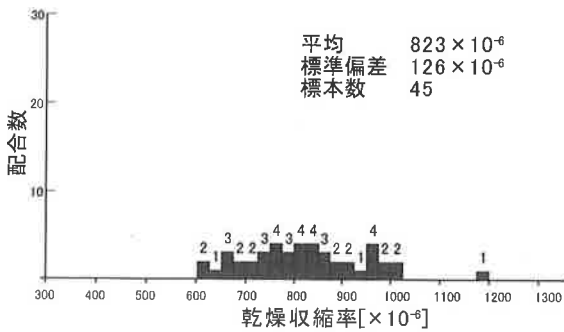
ては約 780×10^{-6} に分布の中心があり、標準偏差は 144×10^{-6} を示している。本実験において粗骨材に硬質砂岩を使用したコンクリート(39-硬 th)の乾燥収縮率は約 900



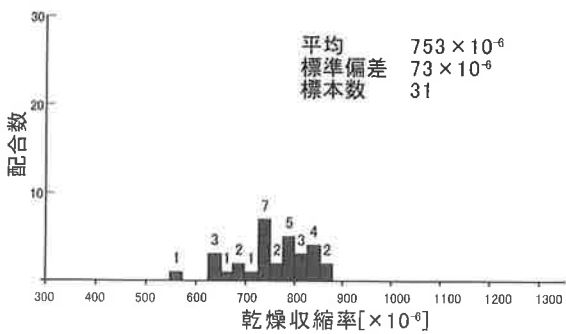
(a) 石灰岩



(b) 砂岩



(c) 安山岩

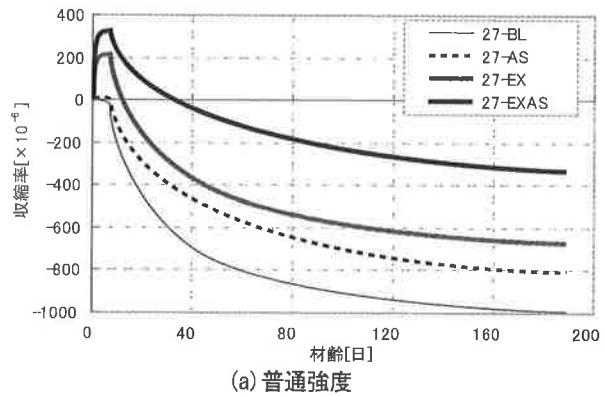


(d) 流紋岩

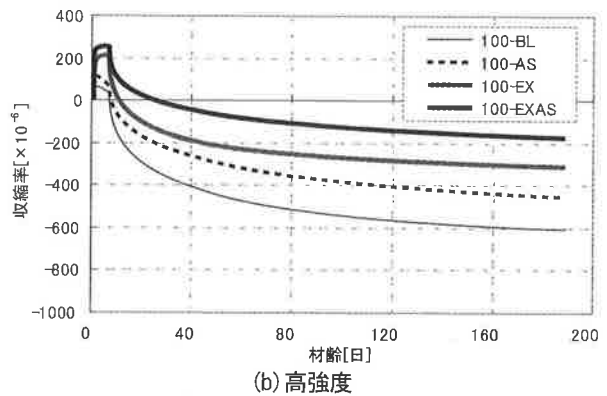
図5 粗骨材の影響

$\times 10^{-6}$ となり、当該資料に対しては若干大きめの収縮量を示した。また、実験では対象としなかったが、同図(c)および(d)の安山岩および流紋岩については、標本数が少ないが、およそ安山岩で 800×10^{-6} 程度、流紋岩で 750×10^{-6} 程度にピークをもつ分布と考えられ、標準偏差は安山岩で 126×10^{-6} 、流紋岩で 73×10^{-6} を示す。したがって乾燥収縮率を約 600×10^{-6} 程度以下する骨材は実用的に石灰石のみであり、採用する価値は高いと判断される。

図 6(a), (b)には膨張材、収縮低減剤の効果について示す。膨張材は若材齢(3 日程度)における膨張が非常に大きいため乾燥開始(材齢 1 週)からの挙動は膨張材の効果を適切に評価しているとはいえない。このことより凝結初期からの収縮を評価する方法として、自己収縮委員会報告書による基準³⁾を採用し、凝結の始発を原点として膨張および収縮の計測をおこなった。同図(a)普通強度に着目すると、膨張材を使用した供試体(27-EX)は若材齢の膨張率が 200×10^{-6} 程度、材齢 189 日で収縮率が対策なし(27-BL)に対して 300×10^{-6} 程度の低減、収縮低減剤使用試験体(27-AS)は 200×10^{-6} 程度の低減、両方使用



(a) 普通強度



(b) 高強度

図6 膨張材および収縮低減剤の効果

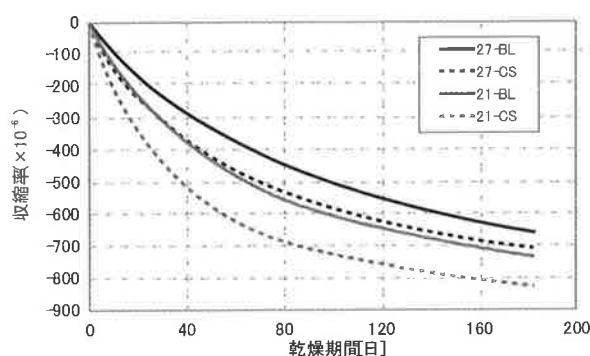


図7 塗布型収縮低減剤の効果

(27-EXAS)は 650×10^{-6} 程度の収縮低減を示した。同図(b)高強度に着目すると、膨張材を使用した供試体(100-EX)は若材齢の膨張率が 200×10^{-6} 程度、材齢 189 日で収縮率が対策なし(100-BL)に対して 300×10^{-6} 程度の低減、収縮低減剤使用試験体は(100-AS)の収縮率は、約 150×10^{-6} の低減、両方使用(100-EXAS)は 430×10^{-6} 程度の収縮低減を示した。

ここで、膨張材使用、収縮低減剤使用および膨張材収縮低減剤両方使用それぞれの効果について考察を行う。膨張材の若材齢における膨張率および収縮率の低減は、普通強度と高強度との間に大きな差が確認されなかった。これは、膨張材の効果がコンクリートの圧縮強度によらずに収縮率が約 300×10^{-6} の概ね一定の低減を示すことを唆している。すなわち、収縮の小さいコンクリートに適用すると収縮低減率としては大きく、収縮の大きいコンクリートに適用すると小さくなる傾向を示すものと考えられる。ただし、この 300×10^{-6} という収縮率低減がそのまま乾燥収縮低減に寄与するかという不確定な部分が残る。つまり、若材齢においてコンクリートのヤング係数は低い値であることより、若材齢の膨張は収縮応力を効果的には低減できていないと考えられるためである。そのため本報では膨張材による収縮低減効果を「乾燥収縮率の低減は多くても 300×10^{-6} 程度にとどま

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご助力を賜りました首都大学東京の松沢見一助教に深謝致します。本研究における材料を提供していただいた、BASF ポリス株式会社様、株式会社フローリック様、竹本油脂株式会社様、太平洋セメント株式会社様には謝意を表すものであります。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, pp.121, 2006年2月
- 2) 乾燥収縮に関する実態調査結果報告書(平成20年度), 生コンクリート工業組合連合会 技術委員会, pp.33-45, 2009年3月
- 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.196, 1996年11月

る」と記述することとする。収縮低減剤の収縮低減は、膨張材とは異なり乾燥収縮自体に作用することから、普通強度および高強度において対策なしの収縮に対する割合として約 20%の低減を示す。またどちらも材齢を経るにつれ収縮低減の割合が低下する傾向が確認された。膨張材収縮低減剤両方使用の収縮低減は、普通強度(27-EXAS)において膨張材、収縮低減剤の効果の単純な足し合わせでなく、相乗効果と取れる効果が示されている。一方、高強度(100-EXAS)において相乗効果は確認されず、概ね膨張材および収縮低減剤の効果の足し合わせとして考えることができる。この両方使用による、普通強度と高強度の膨張、収縮特性の差異について、結論を述べるにはなお検討を重ねる必要がある。

シリーズ D の図 7 には、塗布型収縮低減剤の効果について示す。塗布型収縮低減剤はこれまでに示した生コンクリートに適用する対策とは異なり打設後のコンクリートに塗布し収縮を低減させるものである。呼び強度 21 において、塗布(21-CS)の乾燥収縮率が、無塗布(21-CS)より 289×10^{-6} の低減となり 10%強の収縮低減が示された。呼び強度 27 においては、塗布(27-CS)の乾燥収縮率が、無塗布(27-CS)より 165×10^{-6} の低減となり 10%弱の収縮低減が示された。塗布型収縮低減剤の効果は 10%程度で呼び強度が低いほど効果が高い結果となった。

4. まとめ

本研究において得た知見を以下にまとめる。

- (1)収縮低減型高性能 AE 減水剤は 8~14%程度の収縮低減効果を示した。
- (2)粗骨材の石灰石 100%置換は乾燥収縮率を 600×10^{-6} 以下とすることが可能。
- (3)膨張材は多くとも 300×10^{-6} の収縮低減効果にとどまる。
- (4)収縮低減剤は 20%程度の収縮低減を示した。
- (5)塗布型収縮低減剤は 10%程度の収縮低減を示した。

EXPERIMENTAL STUDY ON BEHAVIOR OF CONCRETE
WITH DRYING SHRINKAGE REDUCTION

K. Kawasaki and T. Oh-oka.

Drying shrinkage of concrete with measures for reducing shrinkage was experimentally investigated. The countermeasures in this investigation were using shrinkage-reducing type of superplasticizer, expansive additive, shrinkage reducing admixture, paint type of shrinkage reducing agent and replacing coarse aggregate with limestone. Concerning drying shrinkage the following results were obtained:

- (1) Using shrinkage-reducing type of superplasticizer was reduced by 10% to 15%.
- (2) Drying shrinkage of concrete replacing coarse aggregate with limestone was less than about 600×10^{-6} .
- (3) Using expansive additive was reduced by less than about 300×10^{-6} .
- (4) Using shrinkage reducing admixture was reduced by about 15%.
- (5) Using paint type of shrinkage reducing agent was reduced by about 10%.