

論文 収縮低減タイプ高性能AE減水剤と膨張材を併用したコンクリートの基礎物性と収縮ひび割れ抵抗性に関する研究

井上 和政*1・椎貝 英仁*2・岩清水 隆*3・齊藤 和秀*4

要旨: 建築物のデッキ床に発生するひび割れを低減・抑制する目的で、収縮低減タイプ高性能 AE 減水剤と膨張材を組み合わせて、乾燥収縮ひずみ 500 μ 以下相当を目標に低収縮コンクリートを作製し、室内実験による基礎物性とひび割れ低減・抑制効果について検討した。同一水セメント比の普通コンクリートと比較して、乾燥収縮ひずみが約 30%低減でき、乾燥収縮ひずみが 500 μ 以下相当のコンクリートが室内で実現できた。また、中性化の進行は普通コンクリートよりも遅い結果となった。そして一軸拘束ひび割れ試験の結果、フラットデッキ床相当の拘束度が 0.3~0.5 の条件において、収縮ひび割れの抑制効果を確認することができた。

キーワード: コンクリート, 乾燥収縮, ひび割れ, 混和剤

1. はじめに

環境問題対応等によるコンクリート構造物への高耐久化の要求や、コンクリート構造物の品質に対する厳しい要求の背景から、建築物へのひび割れ低減の重要性が再認識されている。建築分野では、2006年に日本建築学会から「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」が刊行¹⁾され、コンクリートの乾燥収縮を把握・制御していくことの必要性が示されている。また 2009 年 JASS5 の改定²⁾では、コンクリートの乾燥収縮率を特記することや長期・超長期の建築物においては乾燥収縮率の最大値が示されるに至った。

筆者らは、コンクリートのひび割れ低減を目的に、各種レディーミクストコンクリートの乾燥収縮量把握³⁾や、収縮低減タイプ高性能 AE 減水剤⁴⁾、収縮低減剤⁵⁾⁶⁾を用いた技術を実用化し、コンクリートの乾燥収縮を 800 μ 程度から 650 μ 程度、更には 400~200 μ 程度に制御して、各種建築物でのひび割れ低減効果⁷⁾を検討している。今回フラットデッキ床のひび割れ低減・抑制⁸⁾を目的に、

膨張材との併用で乾燥収縮 500 μ 以下クラスとなるよう、既報⁴⁾の収縮低減タイプ高性能 AE 減水剤を改良し(以下 SR3)、JIS に適合する材料構成で低収縮コンクリートを実現し、基礎物性とひび割れ抑制効果を検討した。同様の検討結果⁹⁾は極めて少ない。その結果、乾燥収縮ひずみが 500 μ 以下相当の低収縮コンクリートが実現でき、フラットデッキ床相当の拘束度の範囲において、ひび割れの抑制効果を確認できたので、その結果を報告する。

2. 実験の概要

2.1 実験の因子・水準および試験項目

実験の因子・水準と試験項目を表-1に示す。乾燥収縮率の目標値が 700, 800, 600 μ となるように粗骨材 (G1, G2, G3)を用いたコンクリートを基準として作製し、SR3のみおよびSR3と膨張材を併用したコンクリートを比較検討した。実験 I は乾燥収縮率の目標値が 700 μ となるように粗骨材 (G1)を使用し、普通(高性能 AE 減水剤(以下 SP)を使用)、低収縮 (SR3 を使用)、低

表-1 実験の因子・水準と試験項目

実験	記号	骨材種別	水セメント比 (%)		混和剤種別	膨張材 (kg/m ³)	試験項目											
			50	40			圧縮強度	ヤング係数	割裂引張	乾燥収縮	拘束膨張	自己収縮	凍結融解	中性化	拘束ひび割れ			
I	0-700 μ 仕様	G1	○	-	SP	0	○	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	
	0-550 μ 仕様		○	-		SR3	0	○	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-
	150-550 μ 仕様		○	-			20	○	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-
II	0-800 μ 仕様	G2	○	○	SP	0	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	
	0-650 μ 仕様		○	○		SR3	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	150-650 μ 仕様		○	○			20	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○
	300-650 μ 仕様	○	-	G3	25	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○		
	0-600 μ 仕様	○	-		SP	0	○	○	○	○	○	-	-	-	○	-	-	
	0-480 μ 仕様	○	-			SR3	0	○	○	○	○	○	-	-	-	○	-	-
150-480 μ 仕様	○	-	20	○	○		○	○	○	○	-	-	-	○	-	-		

注) 記号aaa-bbb:aaaは初期拘束膨張ひずみの目標値を、bbbは乾燥収縮ひずみの目標を表す
拘束ひび割れ試験: JIS型はJIS A 1151を改良した試験(文献4)参照)を、JCI型はJCI自己収縮応力試験方法をベースとした試験(文献10)参照)を示す

*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 先端技術研究部 工博 (正会員)

*2 (株) 竹中工務店 技術研究所 先端技術研究部 (会員外)

*3 (株) 竹中工務店 大阪本店 技術部 (正会員)

*4 竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部 (正会員)

収縮+初期膨張(SR3+膨張材併用)の各コンクリートにおいて、乾燥収縮、拘束膨張量と圧縮強度の検討を行った。実験Ⅰでは、膨張材はセメントの内割として実験を行ったが、圧縮強度の低下傾向が見られたので、実験Ⅱでは膨張材を砂の内割置換とした。更に実験Ⅱは乾燥収縮の目標値が約800 μ 、約600 μ となる粗骨材(G2, G3)を使用したコンクリートにおいて、表-1に示す各試験を行った。なお各種長さ変化試験、凍結融解試験、中性化試験等は各々のJISに準じて実施した。

JIS A 1151を改良した拘束試験体の概要を図-1に示す。ひび割れ発生の有無、ひび割れ幅と本数を試験するため、試験区間を300mmから1000mmに変更⁴⁾した試験体を作製した。計算拘束度は0.5とし、建物一般階の標準的な拘束度0.3¹⁾よりも厳しい拘束条件とした。拘束応力算出を目的に実施した内部鋼材型の一軸拘束試験体概要を図-2に示す。内部鋼材からの計算拘束度が約0.3および0.5となるように拘束鋼材径を設定した。また、膨張材による初期膨張効果が確実に導入されるように、文献¹⁰⁾の試験方法に対して端面に鋼板を設置した。図-1の試験体と計算拘束度0.5を共通とした。試験に供したコンクリートは表-2に示す通り、表-1の実験Ⅱにおいて、粗骨材にG2を使用した4調合とした。

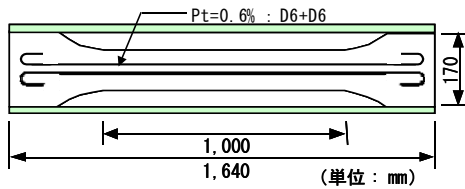


図-1 JIS改良型一軸拘束ひび割れ試験体の概要

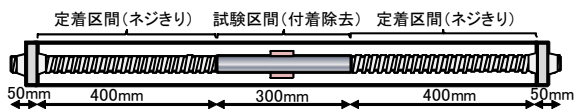


図-2 JCI内部鋼材型一軸拘束試験体の概要

表-2 ひび割れ試験の因子・水準とその組合せ

No.	記号	W/C (%)	ひずみの目標値($\times 10^{-6}$)						JIS型拘束試験		鋼材拘束試験		
			乾燥収縮		初期拘束膨張*		拘束度	鉄筋比	計算拘束度**	計算拘束度**	計算拘束度**		
			800	650	600	480	300	150	0	0.5	0.6%	0.3	0.5
4	0-800 μ 仕様	50	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	0-650 μ 仕様		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
6	150-650 μ 仕様		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7	300-650 μ 仕様		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注) 記号aaa-bbb-aaaは初期拘束膨張ひずみの目標値を、bbbは乾燥収縮ひずみの目標値を表す
* : JIS A 6202による拘束膨張ひずみを表す
** : 鉄筋のヤング係数を 2.1×10^4 に、コンクリートのヤング係数を 2.1×10^4 に仮定して算出した計画の数値

2.2 コンクリートの使用材料および調査

使用材料を表-3に、調査を表-4に示す。水セメント比は50%と40%の2水準で目標スランブは 18 ± 2.5 cm、空気量は 4.5 ± 1.0 %とした。コンクリートは、容量100Lの強制練りパン型ミキサを用いて、練混ぜ量40~90Lで練り混ぜた。練混ぜ時間は、空練り15秒、注水後30秒、

粗骨材投入後90秒間とした。混和剤は水の一部として計量した。各種試験方法を表-5に示す。

表-3 使用材料

セメント	N:普通ポルトランドセメント(密度 $3.16g/cm^3$)3銘柄混合
細骨材	S1:大井川水系陸砂(表乾密度 $2.59g/cm^3$ 、吸水率 2.03 、FM2.84)
	S2:君津産山砂(表乾密度 $2.62g/cm^3$ 、吸水率 1.58 、FM2.59)
粗骨材	G1:岡崎産砕石(表乾密度 $2.68g/cm^3$)
	G2:大月産砕石(表乾密度 $2.63g/cm^3$)
	G3:秩父産石灰砕石(表乾密度 $2.70g/cm^3$)
混和剤	SP:高性能AE減水剤(T社製ポリカルボン酸系)
	SR3:収縮低減タイプ高性能AE減水剤(T社製ポリカルボン酸系)
膨張材	EX:T社製低添加型 石灰系(密度 $3.16g/cm^3$)

表-4 コンクリートの調査

実験 No.	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)																			
				W	C	EX	S1	S2	G1	G2	G3												
I	1 0-700 μ 仕様	50	48.1	160	320	-	865	-	965	-	-												
	2 0-550 μ 仕様											300	20	-	-	-							
	3 150-550 μ 仕様																						
II	4 0-800 μ 仕様	50	48.1	160	320	-	-	875	-	943	-												
	5 0-650 μ 仕様											20	-	859									
	6 150-650 μ 仕様														25	-	854						
	7 300-650 μ 仕様											50	48.1	160				320	-	-	875	-	972
	8 0-600 μ 仕様														20	-	859						
	9 0-480 μ 仕様																						
	10 150-480 μ 仕様											40	46.1	160	400	-	-	807	-	943	-		
11 0-800 μ 仕様	20	-	790																				
12 0-650 μ 仕様																							
13 150-650 μ 仕様																							

表-5 試験方法

試験項目	試験方法
スランブ、スランブフロー	スランブ:JIS A 1101に準拠、スランブフロー:JIS A 1150に準拠
空気量	JIS A 1128に準拠
圧縮強度	JIS A 1108に準拠 標準養生(1週、4週、13週)
引張強度	JIS A 1113に準拠 標準養生(1週、4週、13週)
乾燥収縮	JIS A 1129に準拠 成形後24時間で脱型、7日間標準養生後の長さを基長とした
拘束膨張	JIS A 6202附属書2(B法)に準拠
自己収縮	JCI超流動コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ)の試験方法に準拠
凍結融解抵抗性	JIS A 1148に準拠
中性化	JIS A 1153に準拠
拘束収縮ひび割れ	内部鋼材型:コンクリートの収縮ひび割れ評価試験方法 ¹⁰⁾ による JIS改良型:JIS A 1151に準拠、文献 ⁴⁾ による

3. 基礎物性に関する実験結果

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状を表-6、振動フロー速度¹¹⁾とスランブの形状係数¹¹⁾を図-3に示す。

SPに対してSR3は1.8~2倍程度の使用量で同等のスランブが得られた。またSR3と膨張材を併用した場合も、性状等は特にSPの場合と大差はなかった。振動フロー速度とスランブの形状係数をみても、図-3のようにSPとほぼ同等の値が得られた。SR3と膨張材はコンクリートの施工性には大きな影響を及ぼさないと考えられる。

表-6 フレッシュ試験結果

実験 No.	記号	W/C (%)	混和剤種類	添加量(C%)	スランブ(cm)	スランブフロー(cm)	空気量(%)	コンクリート温度(°C)
I	1 0-700 μ 仕様	50	SP	0.65	18.0	30.0	4.0	19.5
	2 0-550 μ 仕様		SR3	1.30	18.5	32.0	4.3	20.0
	3 150-550 μ 仕様		SR3	1.30	18.9	32.5	4.2	20.0
II	4 0-800 μ 仕様	50	SP	1.00	20.0	29.5	4.3	20.8
	5 0-650 μ 仕様		SR3	1.90	20.5	33.5	4.4	20.0
	6 150-650 μ 仕様		SR3	1.80	20.5	34.0	4.1	21.8
	7 300-650 μ 仕様		SR3	1.80	20.5	34.0	4.1	21.0
	8 0-600 μ 仕様		SP	0.80	20.0	32.5	4.6	21.0
	9 0-480 μ 仕様		SR3	1.50	20.5	33.0	5.1	21.0
	10 150-480 μ 仕様		SR3	1.40	20.5	34.5	4.6	21.0
II	11 0-800 μ 仕様	40	SP	0.85	19.5	29.5	4.9	20.5
	12 0-650 μ 仕様		SR3	1.60	18.0	29.5	4.4	20.5
	13 150-650 μ 仕様		SR3	1.60	19.0	29.0	4.2	21.0

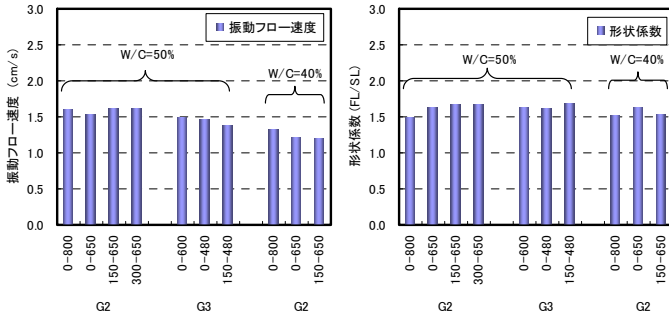


図-3 振動フロー速度および形状係数

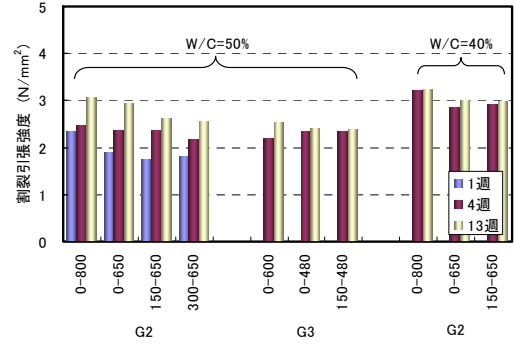


図-6 割裂引張強度試験結果

3.2 各種強度特性およびヤング係数

圧縮強度およびヤング係数の試験結果を図-4, 5に示す。実験Iより、膨張材をセメントの内割で使用した場合、SR3を使用すると、SPとほぼ同等の圧縮強度であったが、SR3と膨張材を併用した場合はSPと比較して若干低下する傾向がみられた。実験IIより、膨張材を砂置換で使用した場合、SR3を使用すると、SPに対して若干圧縮強度が低下する傾向がみられたが、SR3と膨張材を併用することで圧縮強度がSPとほぼ同等となった。さらに膨張材を割増使用した場合には強度低下する傾向であった。ヤング係数と圧縮強度の関係性は骨材種類の影響がみられるが、SR3やSR3と膨張材の併用がヤング係数に与える影響は小さかった。

割裂引張強度の試験結果を図-6に示す。G2においてはSR3やSR3と膨張材を併用することによりSPに対して若干低下する傾向となったが、G3においてはSPとほぼ同等の割裂引張強度であった。

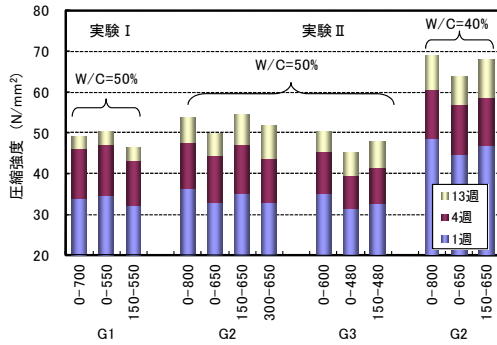


図-4 圧縮強度試験結果

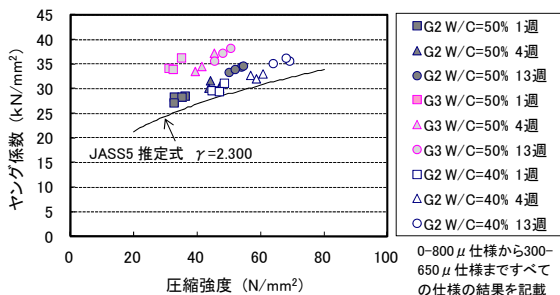
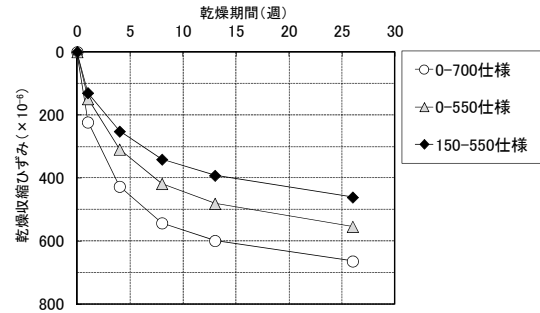


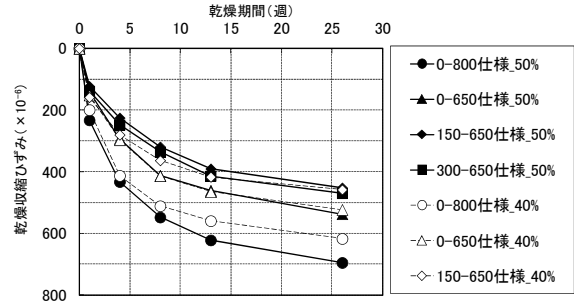
図-5 圧縮強度とヤング係数の関係

3.3 乾燥収縮

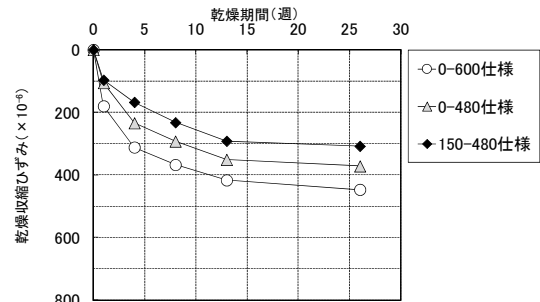
乾燥収縮試験結果を図-7に示す。SR3を使用することによって、SPに対して16~22%の収縮低減効果が出ている。さらに膨張材を併用することにより、さらなる収縮低減効果を確認できた。実験Iにおける質量減少率結果を図-8に示す。SR3を使用した場合でも、SPを使用したコンクリートとほぼ同等な質量減少率となることを確認できた。



(1) 粗骨材種：G1, W/C=50%の場合



(2) 粗骨材種：G2, W/C=50%および40%の場合



(3) 粗骨材種：G3, W/C=50%の場合

図-7 乾燥収縮試験結果

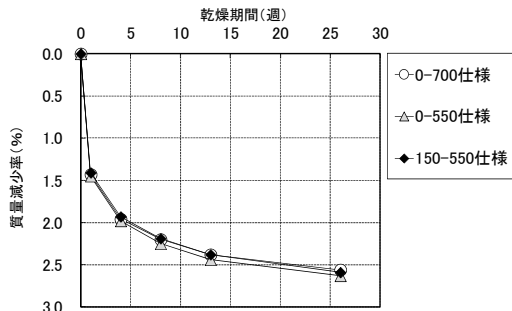


図-8 実験 I におけるコンクリートの質量減少率

3.4 拘束膨張・収縮量

拘束膨張収縮試験結果を図-9に示す。SR3と膨張材を併用したコンクリートにおいても、膨張材の効果を確認することができた。

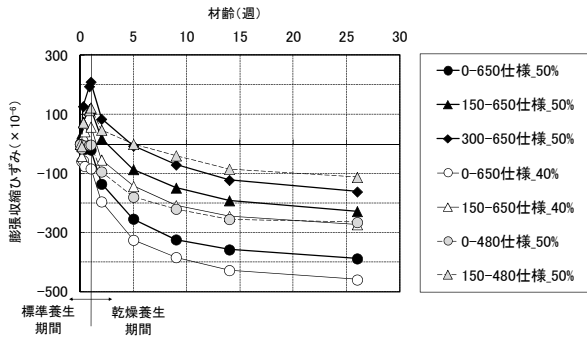


図-9 拘束膨張収縮試験結果

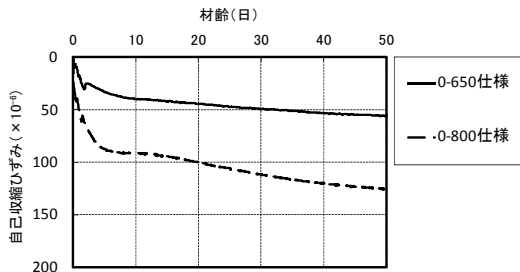


図-10 自己収縮試験結果

3.5 自己収縮

自己収縮試験結果を図-10に示す。材齢28日における自己収縮ひずみに関して、SR3を使用した場合、SPを使用した場合に対して55%の収縮低減効果が出ている。これは、乾燥収縮の4週乾燥時と同じ低減効果である。

3.6 凍結融解抵抗性

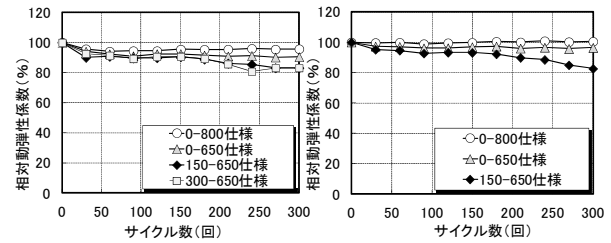
凍結融解抵抗性試験結果を図-11に示す。SR3を使用した場合、またSR3と膨張材を併用した場合、水セメント比が50~40%の全ての調査において、300サイクルにて相対動弾性係数が80%以上の良好な結果となった。

3.7 中性化抵抗性

中性化試験結果を図-12に示す。SR3を使用した場合、促進期間の進行に従って、SPと比較して中性化深さが小

さくなる傾向にある。今後、細孔径分布や透気性の変化を検討することで、この原因を調べていく予定である。

強度、耐久性、収縮特性等の基礎物性の検討結果より、ひび割れ低減対策目的で、普通コンクリートに置換して、本低収縮コンクリートを使用できるものと考えられる。



(1) W/C=50%の場合 (2) W/C=40%の場合

図-11 凍結融解抵抗性試験結果

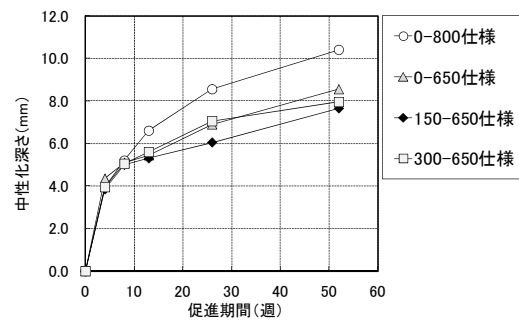


図-12 促進中性化試験結果

4. 収縮ひび割れ試験結果および考察

4.1 JCI内部鋼材型一軸拘束試験結果

材齢1年までの各仕様の乾燥収縮試験結果と拘束膨張収縮試験結果を図-13に示す。SR3の使用により、SPに対して20%以上乾燥収縮ひずみが小さくなっている。また膨張材と併用した場合、いずれの場合も更に乾燥収縮ひずみが小さくなる結果であった。

ひずみの測定結果を図-14に、発生応力の算出結果¹⁾を図-15に示す。0-800 μ仕様とSR3を使用した0-650 μ仕様は、拘束度0.3と0.5のいずれの場合にもひび割れが発生した。ひび割れ発生材齢は、0-800 μ仕様が約13~23日、0-650 μ仕様が20~39日で、発生材齢の増加傾向が確認できた。但し建物一般階の標準的な拘束度0.3¹⁾や、拘束度が0.5程度とより厳しい場合には、収縮ひび割れ発生の可能性がある。これに対して膨張材を併用した150-650 μ仕様と300-650 μ仕様は、乾燥52週までひび割れの発生がない。このため、拘束条件が0.5程度までの部位においてひび割れ抑制効果が期待できる。図-15に示した拘束応力の算出結果から、ひび割れ発生時の応力は1.5~1.7N/mm²で、割裂強度に対し応力強度比で約0.7程度であった。拘束度0.3~0.5の範囲で、SR3の使用により発生応力を同一材齢で0.3~0.5N/mm²程度低

減した。一方、膨張材を併用したタイプは最大 $1.7\text{N}/\text{mm}^2$ 程度で、材齢 1 年までいずれもひび割れ発生には至っていない。また膨張材を併用すると、発生応力は $0.5 \sim 1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 程度低減する結果となった。拘束条件等によっては収縮ひび割れの抑制効果が期待できるレベルに達しているものと考えられる。

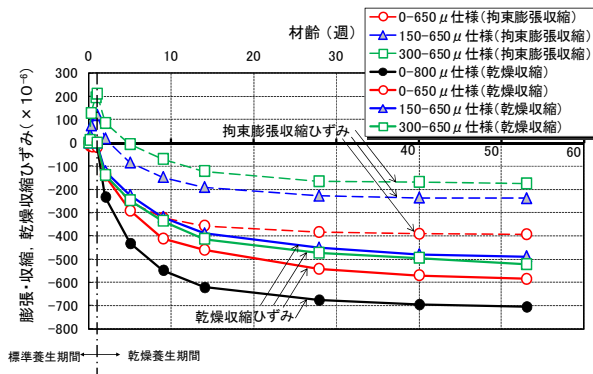


図-13 各種仕様コンクリートの乾燥収縮ひずみおよび拘束膨張・収縮ひずみ

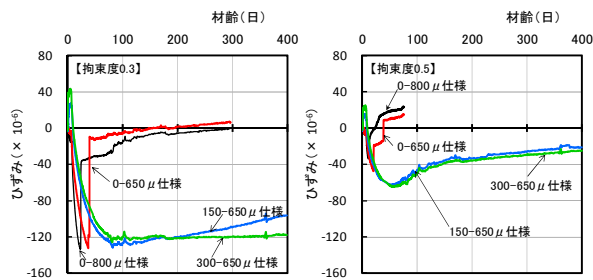


図-14 拘束ひび割れ試験におけるひずみ測定結果

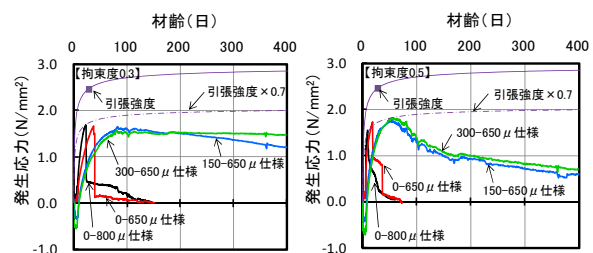


図-15 拘束試験における発生応力の算出結果

4.2 JIS 改良型一軸拘束試験結果

ひび割れの発生状況を図-16 に示す。ひび割れの有無は内部鋼材型拘束試験と同じ傾向で、SR3 を用いた 0-650 μ 仕様では、ひび割れ幅と本数が少なくなる結果であった。筆者らが実施した、式(1)によるひび割れ係数を用いた収縮ひび割れ量の既往の評価結果⁷⁾との比較を図-17 に示す。0-650 μ 仕様は既往の結果に比較的良好に対応する結果である。膨張材を併用した 150-650 μ 仕様および 300-650 μ 仕様のコンクリートは、石灰砕石と収

縮低減剤で実現した乾燥収縮ひずみ 400 μ クラスのコンクリート⁷⁾とほぼ同等レベルの効果が期待できる結果で推移している。また図-18 に、ひび割れ係数とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係における既往の試験結果と本試験結果、および文献¹²⁾中の式(2)による両者の関係の算出結果を示す。本試験の乾燥収縮ひずみが目標値より若干小さく推移していることを考慮すれば、同一条件の既往のひび割れ係数の試験結果とほぼ同等で、十分に推定可能な範囲にある。

$$\text{ひび割れ係数} = \text{ひび割れ幅合計} / \text{部材全長} \quad (1)$$

ここでは、試験体の表、裏面の各ひび割れ幅の合計を 2 倍の測定区間長さで除した

$$\text{ひび割れ係数} = \text{拘束変形} - \text{弾性変形} - \text{クリープ} \quad (2)$$

ここで、拘束変形は乾燥収縮と拘束度の積とし弾性変形とクリープ分は各 75 μ と仮定した

更に図-19 より、発生応力の最大値も、筆者らの既往の検討結果⁷⁾で 400 μ クラス時の発生応力約 $2.0\text{N}/\text{mm}^2$ に達していないことから、同様に 400 μ クラスのひび割れ抑制効果が期待できる結果で推移している。

以上から、拘束度が 0.3~0.5 程度のフラットデッキ床等の収縮ひび割れ対策として、新たに改良した収縮低減タイプ高性能 AE 減水剤 SR3 と膨張材を併用した JIS 適合材料による低収縮コンクリートの有効性が期待できる。なお今後は、模擬部材や実構造物で本低収縮コンクリートのひび割れ低減・抑制効果を検証していく必要がある。

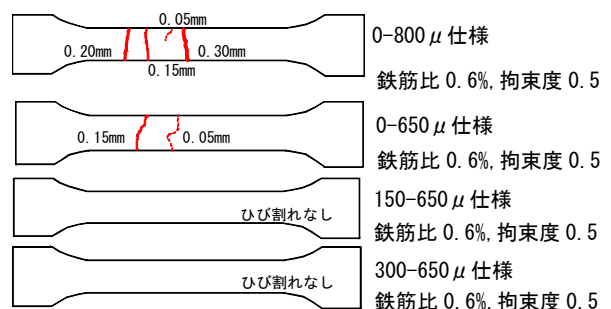


図-16 各試験のひび割れの発生状況(乾燥期間 52 週)

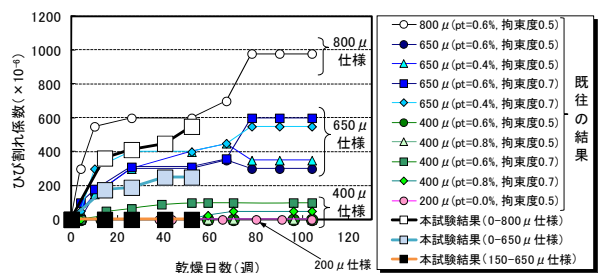


図-17 各種拘束試験結果のひび割れ係数との比較

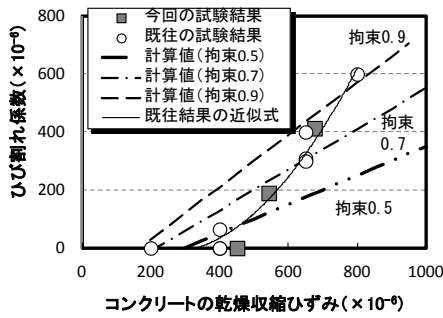


図-18 ひび割れ係数と乾燥収縮ひずみの関係

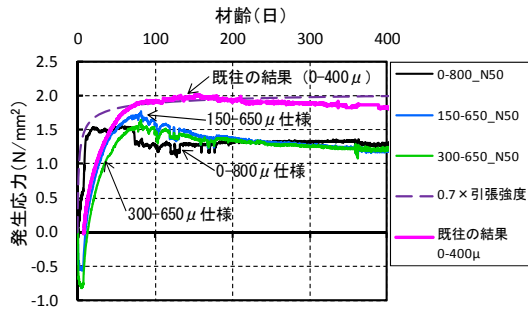


図-19 既往の拘束試験の発生応力との比較

5. まとめ

SR3, SR3 と膨張材を併用し、各種骨材を用いてフレッシュ性状、強度特性、耐久性等の基礎物性とひび割れ抵抗性を検討した結果、以下の結論が得られた。

- (1) SR3 または SR3 と膨張材を併用した場合のフレッシュ性状で、施工上問題となる物性はなかった。
- (2) 膨張材をセメントの内割置換で SR3 と併用した場合、若干の圧縮強度の低下傾向が見られるが、膨張材を砂の内割置換で併用すれば SP とほぼ同等となった。
- (3) SR3 と膨張材を併用した場合、割裂引張強度は若干の低下傾向がみられた。
- (4) SR3 を使用することで、乾燥収縮が 16~22%程度低減できた。また膨張材を併用すると、より大きな収縮低減効果が得られる可能性がある。
- (5) SR3 と膨張材を併用しても、ほぼ所定の膨張効果を確認することができた。
- (6) SR3 を使用することで、SP に対して自己収縮ひずみが約 50%程度低減できた。
- (7) SP に対して SR3 を使用した場合、また SR3 と膨張材を併用した場合いずれも、300 サイクルで相対動弾性係数が 80%以上の良好な結果を確認した。
- (8) SR3 の使用で、中性化深さは小さくなる傾向にある。
- (9) SR3 を用いて乾燥収縮ひずみを 800 μ から 650 μ 程度に低減すると、拘束度 0.3~0.5 の範囲でひび割れ低減効果が確認できた。
- (10) 乾燥収縮ひずみが 650 μ 以下で膨張性を付与した 300-650 μ 仕様、150-650 μ 仕様の低収縮コンクリートは、拘束度によりひび割れ抑制効果が期待できる。

- (11) 300-650 μ 仕様と 150-650 μ 仕様は、乾燥収縮 500 μ 以下相当でほぼ 400 μ クラスの挙動であり、収縮ひび割れの抑制効果が期待できる可能性がある。

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.61-78，2006.2
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2009
- 3) 石山直希ほか：全国のレディーミクストコンクリート工場におけるコンクリートの乾燥収縮調査報告，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.821-822，2008.9
- 4) 井上和政ほか：ハイブリッド高性能 AE 減水剤を用いた低収縮コンクリートの開発と建築物への適用によるひび割れ低減効果の検証，日本建築学会技術報告集，Vol.16，No.34，pp.849-854，2010.10
- 5) 井上和政ほか：樹状 RC 構造化粧打放し建物への低収縮コンクリートの適用報告，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，pp.637-638，2005.9
- 6) 井上和政ほか：乾燥収縮 200 μ クラスの超低収縮コンクリートのひび割れ抑制効果に関する研究，JCI 年次論文集，Vol.33，pp.515-520，2011.7
- 7) 井上和政ほか：一軸拘束ひび割れ試験を用いた乾燥収縮量が異なるコンクリートのひび割れ量に関する検討，pp.47-52，JCI 収縮特性シンポジウム，2010.12
- 8) 小林竜平ほか：ハイブリッド高性能 AE 減水剤と膨張材を併用したコンクリートのひび割れ抵抗性に関する研究（その 1. 各種調合のコンクリートの基礎物性検討-1）～その 3.），日本建築学会大会学術講演集梗概集(東海)，pp.737-742，2012.9
- 9) 都築正則ほか：収縮低減材料を使用したコンクリートの乾燥収縮に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.857-858，2008.9
- 10) 日本コンクリート工学会：混和材料からみた収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告書，pp.209-211，2010.9
- 11) 小島正朗，三井健郎：衝撃落下による材料分離と打込み欠陥を低減できる材料・調合の評価に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，pp.279-280，2004.8
- 12) 日本コンクリート工学会：コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関する調査研究委員会報告書，pp.152-156，2012.8