

論文 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

井上 和政*1・三井 健郎*1・見澤 大介*2・木之下 光男*3

要旨: 建築物の開口部に発生するひび割れを低減・抑制していく目的で、収縮低減剤と石膏を組み合わせた、乾燥収縮ひずみが200 μ クラスの超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実大模擬部材によるひび割れ低減・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40~50%低減でき、乾燥収縮ひずみが200~250 μ のコンクリートが室内および実機で実現できた。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。そして実大模擬壁部材へ打ち込んだ結果、開口部まわりの腰壁、垂壁および開口隅角部において、ひび割れの低減・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, 収縮低減剤, ひび割れ, 壁開口部

1. はじめに

環境問題対応におけ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、コンクリートの乾燥収縮制御を目的に、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、収縮低減型高性能AE減水剤^{4),5)}および収縮低減剤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、さらには400 μ 程度に制御し、建築物への適用とひび割れ低減効果を検討している。

今回、建築物の壁部材の開口部周りのひび割れ低減・抑制を目的に、新たに乾燥収縮200 μ クラスの超低収縮コンクリート⁷⁾の実現性、室内実験による基礎物性、および実大模擬部材によるひび割れ低減・抑制効果について検討した。その結果、乾燥収縮ひずみが200~250 μ 程度の低収縮コンクリートが室内および実機で実現でき、実大模擬部材で開口部まわりのひび割れの低減と抑制効果を確認することができた。ここでは、これらの各種試験結果について報告する。

2. 室内基礎物性実験の概要

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。200 μ クラスの超低収縮コンクリートを実現するために、収縮低減剤(以下、HSRと記す)を20kg/m³添加し、さらに二水石膏(以下、石膏と記す)をセメントの質量に対して2%内割置換した。またコンクリートの特性が把握できるように、水結合材比(以下、W/B)を4水準設定し、W/B=50.0%では従来の400 μ クラス⁸⁾のコンクリートとなるHSRを6kg/m³添加したコンクリートも製作して基礎物性を比較検討した。

2.2 コンクリートの使用材料および調査

コンクリートの使用材料を表-2、調査を表-3に示す。目標スランプは18 \pm 2.5cm、目標空気量は4.5 \pm 1.5%とした。またHSRは水の内割置換とした。

表-1 実験の因子・水準および試験項目

No.	記号	W/B (%)	収縮低減剤量 (kg/m ³)			石膏 (C*2%)	試験項目				
			0	6	20		乾燥収縮	自己収縮	圧縮強度	引張強度	中性化
1	55-00	55.0	○	-	-	-	○	-	○	○	○
2	55-20		-	○	-	-	○	-	○	○	○
3	55-20G		-	-	○	○	○	-	○	○	○
4	50-00	50.0	○	-	-	-	○	-	○	-	-
5	50-6		-	○	-	-	○	-	○	-	-
6	50-20		-	-	○	-	○	-	○	-	-
7	47-00	47.5	○	-	-	-	○	-	○	○	○
8	47-20		-	-	○	-	○	-	○	○	○
9	47-20G		-	-	○	○	○	-	○	○	-
10	40-00	40.0	○	-	-	-	○	○	○	○	-
11	40-20		-	-	○	-	○	○	○	○	-
12	40-20G		-	-	○	○	○	-	○	○	-

表-2 コンクリートの使用材料

セメント (C)	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³)
細骨材 (S)	君津産山砂(表乾密度2.65g/cm ³ , F.M.2.89, 吸水率1.53%)
粗骨材 (G)	秩父産石灰砕石(表乾密度2.70g/cm ³ , 実積率61.9%)
高性能AE減水剤 (SP)	T社製ポリカルボン酸系 記号:SP
収縮低減剤 (HSR)	T社製低級アルキルエーテル系 記号:HSR
二水石膏 (石膏)	CaSO ₄ ·2H ₂ O 記号:石膏

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 工博 (正会員)

*2 (株)竹中工務店 技術研究所 (非会員)

*3 竹本油脂(株) 第三事業部 工博 (正会員)

表-3 コンクリートの調合

No.	記号	W/B (%)	S/a (%)	単用量(kg/m ³)						空気量 (%)
				W	C	石膏	S	G	HSR	
1	55-00	55.0	48.8	160	290.9	—	899	968	—	4.5
2	55-20			140	290.9	—			20	
3	55-20G			140	285.1	5.8			20	
4	50-00	50.0	48.1	160	320	—	871	968	—	
5	50-6			154	320	—			6	
6	50-20			140	320	—			20	
7	47-00	47.5	47.7	160	336.8	—	860	968	—	
8	47-20			140	336.8	—			20	
9	47-20G			140	330.1	6.7			20	
10	40-00	40.0	46.1	160	400	—	808	968	—	
11	40-20			140	400	—			20	
12	40-20G			140	392	8			20	

2.3 実験方法

コンクリートは、容量 55L の強制練りパン型ミキサを用いて、セメント、細骨材を投入後 15 秒間空練りを行い、水と混和剤を投入後 30 秒練り混ぜ、ケレン後粗骨材を投入して 75 秒間練り混ぜて作製した。練混ぜ量は試験体採取量にあわせて 35~50L とし、練上がり温度は 20±3℃とした。スランブは高性能 AE 減水剤 (以下, SP) を用いて調整し、空気量は AE 剤および消泡剤を用いて調整した。実験項目および実験方法を表-4 に示す。

表-4 実験項目および実験方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101 に準拠
空気量	JIS A 1128 に準拠
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とした
圧縮強度	JIS A 1108 に準拠 標準養生
引張強度	JIS A 1113 に準拠 標準養生
中性化	JIS A 1153 に準拠
自己収縮	JCI 自己収縮研究委員会の試験方法に準拠、但し埋込型ひずみゲージ使用 凝結始発後のひずみ変化を自己収縮ひずみとした

3. 基礎物性実験の結果

3.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-5 に示す。HSR の添加により SP 添加量が 10~25% 低減した。また、HSR の添加によるフレッシュ性状の違いはわずかであった。石膏添加による SP 添加量やフレッシュ性状への影響は、今回の実験の範囲では見られなかった。

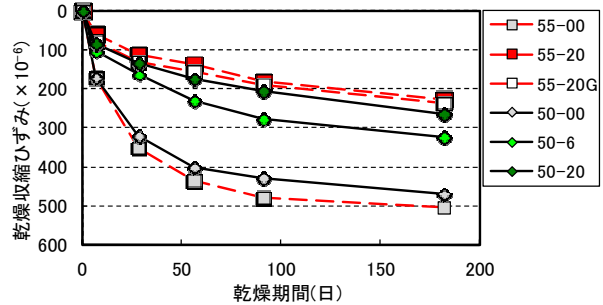
表-5 フレッシュコンクリートの試験結果

No.	記号	W/B (%)	SP (C%)	HSR (kg/m ³)	石膏 (C%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
1	55-00	55.0	0.70	—	—	18.2	5.7	20.0
2	55-20		0.55	20	—	20.5	4.7	20.0
3	55-20G		0.55	20	2	18.5	4.6	20.0
4	50-00	50.0	0.73	—	—	20.5	5.6	19.0
5	50-6		0.55	6	—	19.5	5.0	20.0
6	50-20		0.55	20	—	17.0	5.6	20.0
7	47-00	47.5	0.60	—	—	17.5	4.7	19.0
8	47-20		0.50	20	—	20.5	5.4	20.0
9	47-20G		0.50	20	2	20.5	4.8	20.0
10	40-00	40.0	0.55	—	—	16.5	4.5	20.0
11	40-20		0.50	20	—	19.0	5.8	20.0
12	40-20G		0.50	20	2	19.5	5.2	21.0

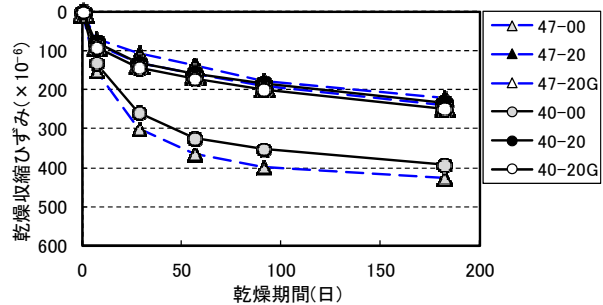
3.2 乾燥収縮および自己収縮

乾燥収縮試験結果を図-1, 自己収縮試験結果を図-2 に示す。200μクラスは HSR 20kg/m³ 添加により乾燥収縮ひずみを HSR 無添加に対して 40~50% 低減し、乾

燥収縮ひずみが 200~250μ の超低収縮コンクリートを実現することができた。今回、石膏添加が乾燥収縮ひずみの低減に対する明確な効果は確認できなかったが、石膏はコンクリートの初期膨張効果も期待できるため、今後確認する予定である。また、自己収縮ひずみは材齢 28 日で 35μ 程度と小さく、無添加に対して 44% 低減した。



(1) W/B=55~50% の場合



(2) W/B=47.5~40% の場合

図-1 乾燥収縮試験結果

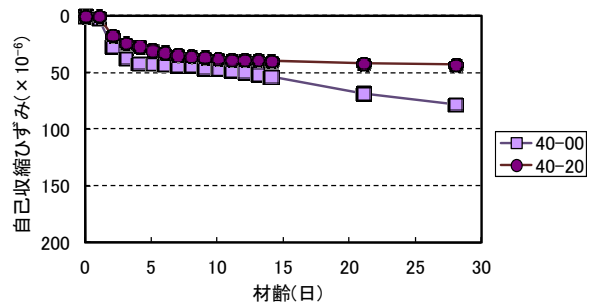


図-2 自己収縮試験結果

3.3 圧縮強度および割裂引張強度

圧縮強度および引張強度試験結果を図-3 に示す。200μクラスの超低収縮コンクリートの圧縮強度は、HSR 無添加に対して、材齢 1 週で 30~40%、材齢 4 週で 20~30% 低下し、材齢 26 週でも 10% 程度低下した。同様に引張強度も材齢 4 週で 20% 前後低下した。以上より、乾燥収縮 200μクラスの超低収縮コンクリートの実現には圧縮強度および引張強度の強度補正が必要であることがわかった。例えば、W/B=55.0% のコンクリートの材齢 4 週の圧縮強度 (34N/mm²) と同等の圧縮強度を得るには W/B を 45% 程度に補正する必要がある。

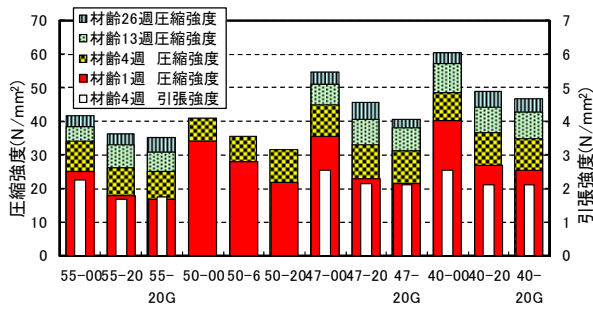


図-3 圧縮強度および割裂引張強度試験結果

3.4 促進中性化

促進中性化試験結果を図-4に示す。200 μ クラスの超低収縮コンクリートの中性化は、W/B=55.0%ではHSR無添加の場合に対して60%程度進行が遅くなったが、W/B=47.5%の場合にはHSR無添加の中性化の進行が遅いため、その抑制効果は10%程度であった。水結合材比が小さい場合に、中性化の抑制効果が小さくなる理由については、細孔や含水率の影響等今後検討が必要である。

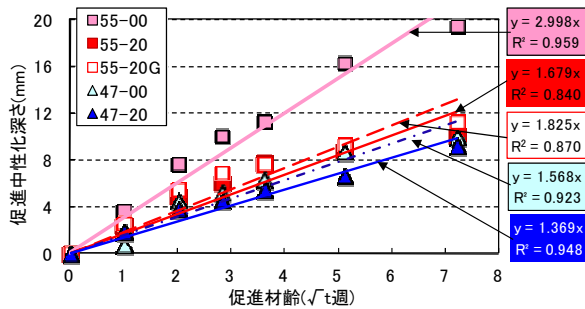


図-4 促進中性化試験結果

4. 実大模擬部材実験の概要

本章では、2~3章において基礎物性を検討した乾燥収縮が200 μ クラスの超低収縮コンクリートをレディームイクストコンクリート工場の実機で製造し、施工性とひび割れの低減・抑制効果について、開口部を有する実大模擬部材を用いて検討した結果について述べる。

4.1 実験の因子と水準

収縮低減剤HSRを20kg/m³を使用した200 μ クラスおよびHSRを6kg/m³を使用した400 μ クラスの2種類のコンクリートについて比較実験を行った。実大模擬部材はいずれも同一条件とした。

4.2 強度の補正方法

3章に示した通り、収縮低減剤HSRを用いたコンクリートに若干の強度低下が見られることを考慮し、水セメント比で圧縮強度の補正を行った。収縮低減剤を使用しないコンクリートとHSRを20kg/m³を使用したコンクリートの2種類について、水結合材比を4水準とした材齢4週の圧縮強度の比較を図-5に示す。使用材料は2~3

章と同一のものを使用した。水結合材比が55%の時の34N/mm²を基準とし、同一強度を実現するための水結合材比を、200 μ クラスでは45%に決定した。400 μ クラスも同様の補正を行い53%と決定した。

4.3 使用材料および割合

使用材料を表-6に、割合を表-7に示す。いずれのコンクリートも目標スランプが21 \pm 1.5cmとなるように、高性能AE減水剤の量を調整した。また、目標空気量は、4.5 \pm 1.0%とした。

4.4 実験方法

実大模擬部材の概要を図-6に示す。壁厚を180mmとし、梁による拘束度が0.5程度となるように梁部材断面を設定した。各部材および開口部の配筋方法を図-7に示す。壁の鉄筋比は縦横とも0.6%とし、柱・梁部材は通常の一般的な鉄筋量とした。また、図-8に示す鋼材の板厚を調整して拘束度を0.5と0.7にした一軸拘束ひび割れ試験を、JIS A 1151に準拠して併せて実施した。

コンクリートは、容量3.0m³の2軸強制練りミキサーを用いて、練混ぜ量2.25m³の2バッチ練りとし、骨材投入後20秒間(材料投入開始から40~45秒間)練混ぜて作製した。荷卸時にHSRをアジテータ車に混入し、フレッシュ試験を行って性状を確認した後、スクイズ式ポンプ車にて実大模擬部材を打設した。打設後1週間で型枠は脱型した。

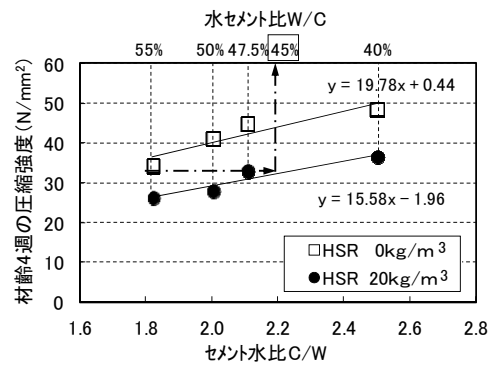


図-5 セメント水比と圧縮強度の関係

表-6 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³)		
細骨材	S1: 神橋産陸砂(表乾密度2.63g/cm ³ , F.M.2.37, 吸水率2.06%) S2: 中国福建省川砂(表乾密度2.57g/cm ³ , F.M.3.53, 吸水率1.52%)		
粗骨材	秩父産石灰砕石(表乾密度2.69g/cm ³ , 実積率65.2%)		
高性能AE減水剤	T社製 ポリカルボン酸系 記号: SP		
収縮低減剤	T社製 低級ポリアルキルエーテル系 記号: HSR		
二水石膏	CaSO ₄ ・2H ₂ O		

注) 細骨材の混合比: S1:S2=8:2

表-7 コンクリートの割合

No.	記号	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				HSR (kg/m ³)	SP (G%)	空気量 (%)	
				W	C	二水石膏	細骨材				粗骨材
1	400 μ クラス	53	47.3	170	321	0	863	956	6	0.7	4.5
2	200 μ クラス	45	45.9	170	370	8	815	956	20	0.6	4.5

注) HSR・SPは水の内割置換にて使用した
二水石膏は200 μ クラスのみセメントの重量比2.0%内割置換にて使用した

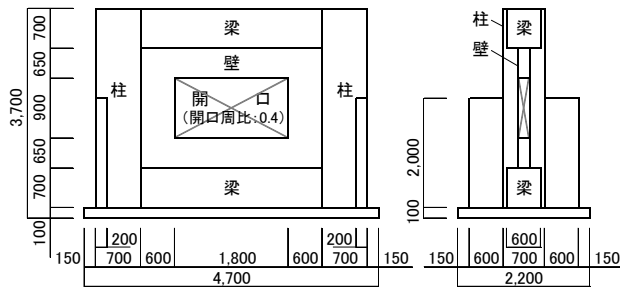


図-6 実大模擬部材の概要

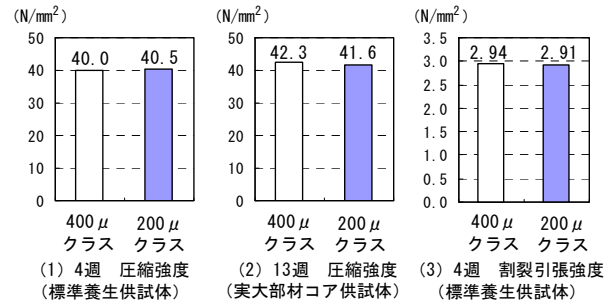


図-9 強度試験結果

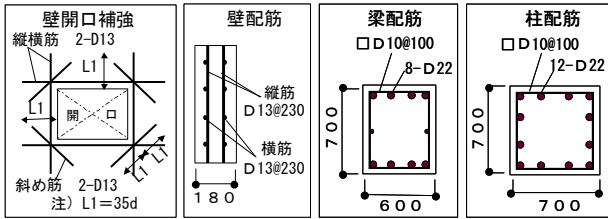


図-7 実大模擬部材の配筋方法

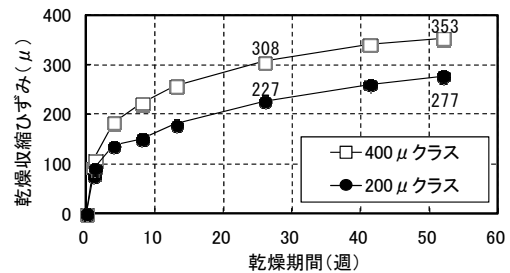


図-10 コンクリートの乾燥収縮試験結果

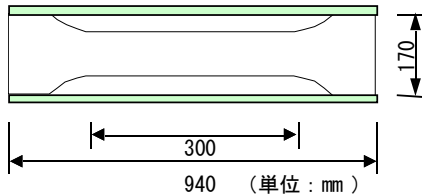


図-8 一軸拘束ひび割れ試験体の概要

5. 実大模擬部材実験の結果および考察

5.1 フレッシュ試験結果および施工性

フレッシュ試験結果を表-8に示す。400 μ クラス、200 μ クラスともに材料分離等の性状問題は見られず、良好な施工性が確認でき、問題なく型枠に打ち込むことができた。

5.2 強度試験結果

強度試験結果を図-9に示す。それぞれの試験において、400 μ クラスと200 μ クラスの強度試験結果がほぼ等しい結果となっており、水結合材比の補正により設計通りの強度発現が確認できた。

5.3 乾燥収縮試験結果

標準養生した供試体の乾燥収縮試験結果を図-10に示す。乾燥26週経過時の値は、400 μ クラスは308 μ、200 μ クラスは227 μ であり、乾燥52週経過時の値はそれぞれ、353 μ、277 μ であった。

表-8 フレッシュコンクリートの試験結果

No.	記号	スラブ (cm)	空気量 (%)	フロー (cm)	振動フロー速度 (秒)
1	400 μ クラス	21.2	4.4	38.8	1.17
2	200 μ クラス	22.0	3.9	38.8	0.86

5.4 拘束収縮ひび割れ試験結果

拘束ひび割れ試験の結果を図-11, 12に示す。20±1℃、RH=60±5%の環境下で静置した結果、拘束度0.7の試験体では乾燥192日でひび割れが発生したが、無筋の状態の乾燥期間3年でも最大ひび割れ幅は0.08mmと極めて微細なひび割れであった。拘束度が0.5の場合、乾燥期間3年でもひび割れの発生はみられない。図-13に力のつり合いから求めた発生応力と材齢の関係を示す。なお図-12に示すように、拘束度0.7においては、ひび割れ発生後の拘束収縮ひずみがゼロを超えて解放されていることから、脱型までに自己収縮等の影響があったものと考え、このひずみ約34 μ分を初期の応力に合計して検討した。また同図中には、材齢28日の圧縮強度試験結果をCEB-FIP1990モデルコード式^{1),8)}を用いてフィッティングし、さらに野口・友澤の式⁹⁾を用いて圧縮強度との関係から求めた引張強度も同時に示している。同図に示すように、拘束度0.7の場合、発生応力が約2.7N/mm²、応力強度比で約0.77の時にひび割れが発生している。一方、拘束度が0.5の場合、乾燥期間3年でも発生応力は2.0N/mm²程度と引張強度に比べてかなり小さく、応力強度比で0.55程度である。このように、拘束度によってはひび割れが発生しない可能性が高いと推測される。

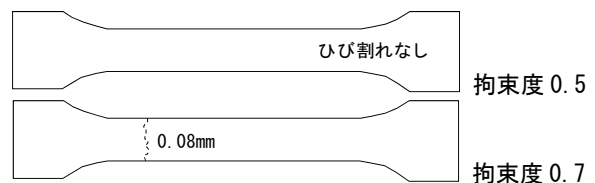


図-11 拘束ひび割れ試験結果 (乾燥期間3年)

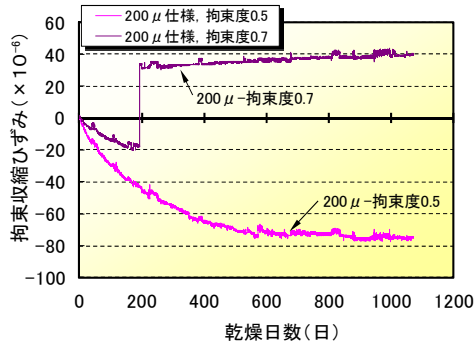


図-12 拘束収縮ひずみと乾燥日数の関係

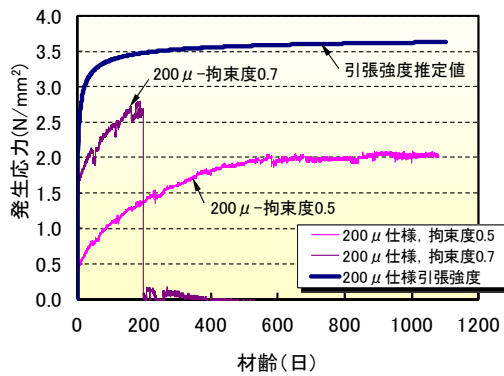


図-13 発生応力と材齢の関係

5.5 実大模擬部材のひび割れ性状

実大壁におけるひび割れ性状を図-14 に示す。400 μ クラスでは 39 週経過時に、200 μ クラスでは 52 週経過時にひび割れが確認された。ひび割れ箇所は開口隅角部に偏っており、いずれの長さも 50mm 以下と非常に短いことを考慮すると、乾燥収縮により隅角部に応力の集中が働き、見かけの拘束度が増加したと考えられる。また、

400 μ クラスでは 91 週時に腰壁中央部にも幅 0.05mm 未満の微細なひび割れが観察された。乾燥期間約 3 年経過後も、これらひび割れ幅の進展は見られず、ひび割れ幅は 0.05mm 未満、長さ 50mm 以下という非常に小さい値となっている。400 μ クラスでは全開口隅角部と腰壁の一部にひび割れが発生しているが、200 μ クラスでは片側の開口隅角部のみひび割れ発生に留まっており、開口隅角部周りのひび割れの低減・抑制効果を確認することができた。

図-10 に示した乾燥期間 26 週時の乾燥収縮ひずみに整合するように CEB-FIP1990 式^{1,8)}を用いて求めた、壁部材(仮想部材厚 180mm)および梁部材(仮想部材厚 460mm)の乾燥収縮ひずみの推移を図-15 に示す。また同図より求めた壁部材と梁部材の乾燥収縮ひずみの差の推移を図-16 に示す。壁部材と梁部材の乾燥収縮ひずみの差は材齢約 1400 日で最大となる傾向を示す。現在材齢は約 1127 日で、乾燥条件は異なるが、200 μ クラスの乾燥収縮ひずみの差の最大値は約 93 μ となる。この値はコンクリートの平均的な伸び能力の約 150 μ¹⁰⁾よりも小さい値であり、200 μ クラスでは隅角部以外の腰壁、垂壁にはひび割れが発生していない試験結果と整合する。但し、開口隅角部においては、この収縮ひずみの差による応力集中によりひび割れの発生に至っていると推測される。一方、400 μ クラスの収縮ひずみの差の最大値は約 137 μ となり、伸び能力に近い値となり、腰壁部分に微細なひび割れが発生した結果と概ね整合する。ひび割れ幅については、森田¹¹⁾が示す鉄筋比とひび割れ幅の関係によると、腰壁部における鉄筋比 0.6%で、幅約 0.26mm のひび割れ発生が算出されるが、400 μ クラスではひび割れ幅 0.05mm 未満であり、200 μ クラスでは

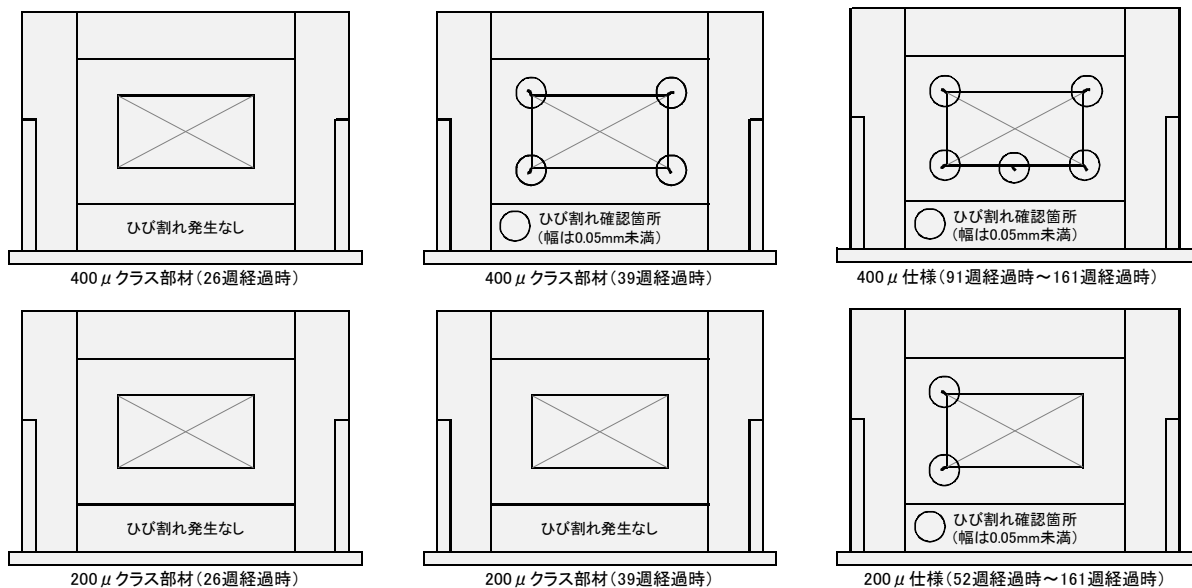


図-14 実大模擬部材によるひび割れ状況

ひび割れは発生していない。隅角部において、鉄筋比を部材厚相当の立方体で計算すると約 1.0% となり、約 0.09mm 幅のひび割れ発生が森田式より算出されるが、400 μ 、200 μ クラスともにひび割れ幅は計算値よりも小さい値に抑えられていることがわかった。

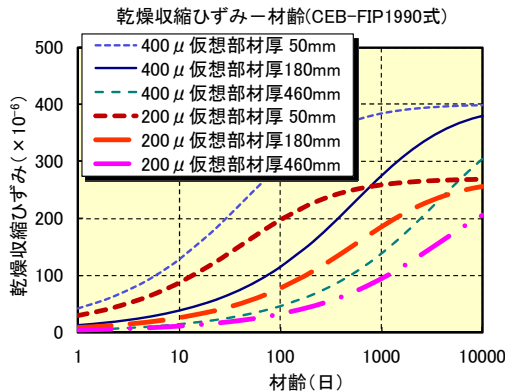


図-15 CEB-FIP1990 式による部材の収縮ひずみの推移

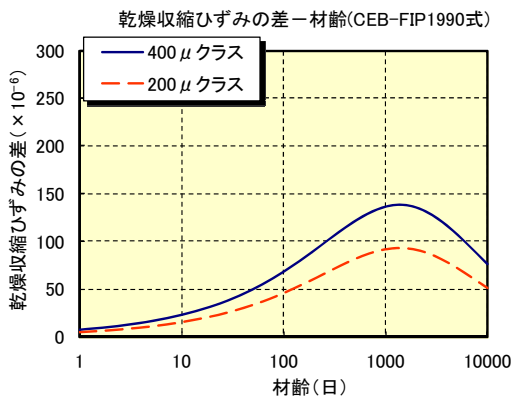


図-16 CEB-FIP1990 式による収縮ひずみの差の推移

6. まとめ

乾燥収縮 200 μ クラスの超低収縮コンクリートの実現性、基礎物性およびひび割れ低減効果について検討した結果、以下のことがわかった。

- (1) 200 μ クラスの超低収縮コンクリートと収縮低減剤を添加しないコンクリートのフレッシュ性状の違いはわずかであった。
- (2) 収縮低減剤と石膏の使用により、乾燥収縮ひずみを 40~50% 低減し、乾燥収縮 200~250 μ のコンクリートを実現することができた。
- (3) 200 μ クラスの超低収縮コンクリートは、普通コンクリートに比べて圧縮強度が低下するため、強度補正が必要である。
- (4) 200 μ クラスの超低収縮コンクリートの中性化は、最大で 60% 程度進行が遅くなった。
- (5) 200 μ クラスの超低収縮コンクリートを実機で製造

し、施工性および目標強度を確認できた。

- (6) 実機で製造された 200 μ クラスの超低収縮コンクリートの乾燥期間 26 週時における乾燥収縮ひずみは 227 μ で、ほぼ目標通りの値であった。
- (7) 実大模擬部材の腰壁、垂壁および開口隅角部において、200 μ クラスの超低収縮コンクリートは、400 μ クラスの低収縮コンクリートに比べて、ひび割れの低減・抑制効果を有することが確認できた。

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，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，2009.2
- 3) 石山直希，三井健郎，井上和政，岩清水隆他：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) 稲垣順司，木之下光男，齊藤和秀，井上和政，駒井悟，鈴木健他：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(その 1~3)，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，pp.283-288，2007.8，(その 4~5)，pp.849-852，2008.9
- 5) 井上和政，三井健郎，岩清水隆，木之下光男，齊藤和秀，稲垣順司：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，第 16 巻，第 34 号，pp.849-854，2010.10
- 6) 井上和政，三井健郎，井上孝之，鈴木健：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
- 7) 稲垣順司，井上和政，齊藤和秀，見澤大介他：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(その 1~3)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) A-1，pp.917-922，2010.9
- 8) Comite-international du Beton「CEB-FIP MODEL CODE 90」,1990
- 9) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文報告集，No.472，pp.11-16，1995
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造のひび割れ対策（設計・施工）指針・同解説，p.90，1990
- 11) 小阪義夫・森田司郎著：鉄筋コンクリート構造，丸善株式会社，pp.229-231，1975