

論文 超高強度 RC プリズムの自己応力低減に関する検討

鈴木 雅博*1・丸山 一平*2・川畑 智亮*3・佐藤 良一*4

要旨: 超高強度コンクリートは自己収縮ひずみに起因して自己応力が発生するため、ひび割れ発生リスクが高くなる。自己応力を低減するため、粗骨材を吸水率が高く、多孔質材料である瓦粗骨材で20%容積置換し、セルフキュアリング効果による自己応力低減効果を明らかにしたが、自己応力が時間経過に伴い、漸増する結果となった。本研究では、瓦粗骨材を用いたコンクリートに膨張材と収縮低減剤を混入し、自己応力の低減効果をさらに高める検討をした。その結果、粗骨材の一部を廃瓦粗骨材で置換したコンクリートに膨張材と収縮低減剤を混入することにより、自己応力の経時変化に伴う増加を抑制することが明らかになった。

キーワード: 超高強度コンクリート, 自己応力, 自由変形, 廃瓦粗骨材

1. はじめに

超高層建築や橋梁桁高制限からコンクリートの高強度化が要求されている。また、コンクリートの高強度化により組織が緻密になるため¹⁾、高耐久性となりコンクリート構造物の長寿命化技術の1つになりうる。近年の技術進歩により、圧縮強度150MPaクラスの構造物の構築も可能となってきている²⁾。しかし、超高強度コンクリート(以下UHSCと示す)は、水和熱に起因した温度上昇量が大きく、かつ、自己収縮ひずみも大きくなるためひび割れリスクが高くなる。この影響を評価する目的で実施した実大柱模擬部材試験においてひび割れが観察³⁾された。また、自己収縮ひずみによりせん断耐力の低下も報告⁴⁾されている。このことから、耐久面や構造面から自己収縮ひずみに起因した引張応力を低減し、UHSCの優位性を発揮することが望まれる。

自己収縮ひずみを低減する方法には高含水率の軽量骨材を用いることによる骨材からの水分補給による自己乾燥防止方法(以下セルフキュアリング法)⁵⁾や水結合材比0.3において、膨張材による機械的な膨張ひずみを付与する方法⁶⁾や収縮低減剤による表面張力の低下を制御する方法⁶⁾が提案されている。しかし、軽量骨材を用いた場合には置換率の増加により収縮ひずみの低減効果があるが、圧縮強度が頭打ちすることが報告⁷⁾されている。筆者らは、水結合材比0.15において、標準量より多い膨張材量を用いたコンクリートの簡易断熱養生条件下の自己応力試験を実施し、収縮低減効果があるが、膨張材による効果の温度依存性を明らかにした⁸⁾。また、水結合材比が極度に低いコンクリートに膨張材を使用する場合には、未反応の膨張材が残存し、長期にわたって反応する可能性を指摘する報告⁹⁾もある。

こうした背景から、筆者らは吸水率が高く、かつ、軽量粗骨材より破砕値の低い多孔質である瓦粗骨材を用いて、粗骨材全容積を廃瓦粗骨材でそれぞれ40%と20%容積置換した自己応力に関する実験的検討を行い、材齢約1日まで圧縮応力が発生し、自己応力が低減することを実験的に示したが、20%の容積置換をした場合、材齢1日から、自己応力が漸増する結果を得た¹⁰⁾。

そこで、本研究では、自己応力の低減効果をより高めることを目的に粗骨材全容積を廃瓦粗骨材で20%容積置換したUHSCに膨張材と収縮低減剤を混入したコンクリートの圧縮強度発現、収縮ひずみおよび自己応力を無置換のUHSCと実験的に比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表1に示す。セメントには、低熱ポルトランドセメント(記号L)を使用した。混和材には、シリカフューム(記号SF)、標準使用量20kg/m³の石灰系低添加型膨張材(記号EX)を使用した。なお、セメント種類Lと混和材SFを混合する配合では、Lの重量の10.3%を混和材SFにあらかじめ置換したプレミックス材(記号SFLC、密度3.08g/cm³、比表面積6210cm²/g)を使用した。収縮低減剤(記号RA)には、低級アルコール系を使用した。廃瓦粗骨材(記号GK)は島根県江津産を使用した。GKはカオリン粘土(SiO₂:65.7%, Al₂O₃:27.1%, Fe₂O₃:2.9%, K₂O:1.8%)を焼成して作製した瓦の不適合品を破砕したものである。使用した廃瓦粗骨材ロッドが異なり、Aロッドは表乾密度2.27g/m³、吸水率8.88%、破砕値19.60%、Bロッドは表乾密度2.27g/m³、吸水率9.31%、破砕値21.38%である。

*1 (株)ピーエス三菱 技術本部技術研究所材料研グループ グループリーダー 工修 (正会員)

*2 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 (株)ピーエス三菱 技術本部技術研究所材料研グループ 修士(工学)

*4 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

使用材料	種類	性質	記号
セメント	低熱セメント	密度 3.22g/cm ³ ,比表面積 3510cm ² /g	L
細骨材	砕砂	表乾密度 2.62g/cm ³ ,吸水率 2.41%, 粗粒率 3.21,実積率 67.8%	S
粗骨材	碎石	表乾密度 2.92g/cm ³ ,吸水率 0.88%, 粗粒率 6.55, 実積率 61.0%, 破砕値 7.86%	G
	廃瓦粗骨材*	表乾密度 2.27g/cm ³ ,吸水率 8.88(9.31)%, 粗粒率 6.41(6.66), 実積率 61.3%, 破砕値 19.60(21.38)%, 骨材粒径 15-5mm	GK
混和材	シリカフューム	密度 2.24g/cm ³ ,比表面積 16.3m ² /g	SF
	膨張材	密度 3.05g/cm ³	EX

* : ()内の数値は B ロッドの数値を示す。

表-2 配合表

配合名	(W+RA)/(SFLC+EX)	単位量(kg/m ³)							SP**/(SFLC*+EX)	D***/(SFLC*+EX)
		W	SFLC*	EX	S	G	GK	RA		
B	0.15	155	1033	-	435	944	-	-	0.023	0.00002
K20	0.15	155	1033	-	435	755	147	-	0.0225	0.00002
K20-R	0.15	149	1033	-	435	755	147	6	0.023	0.00002
K20-EX10-R	0.15	149	1023	10	435	755	147	6	0.023	0.00002
EX20-R	0.15	149	1013	20	435	944	-	6	0.023	0.00002

* : SFLC は低熱ポルトランドセメントとシリカフュームとのプレミックス材

** : SP は高性能 AE 減水剤, *** : D は消泡剤

2.2 配合

配合を表-2に示す。検討する配合は5種類とし、水結合材比は全て15%とし、単位水量は同一量の155kg/m³とした。配合K20とK20-RおよびK20-EX10-Rでは、それぞれ粗骨材全容積を廃瓦粗骨材でそれぞれ20%容積置換した。廃瓦粗骨材は配合K20ではロッドBを使用し、他の配合ではロッドAを使用した。使用した廃瓦粗骨材は、3日間以上吸水させ、105℃の炉で24時間乾燥して求めた含水率が吸水率以上となる状態とした。打設直前に試験により求めた含水率と吸水率から算出した表面水は単位水量に含むこととした。瓦粗骨材の含水率は、配合K20では11.2%、配合K20-Rでは10.8%、配合K20-EX10-Rでは9.3%であり、十分な吸水状態であった。配合Bはセメント種類SFLC単体の配合、配合EX20-RはSFLCに膨張材と収縮低減剤を混入した配合とした。単位膨張材量は20kg/m³とし、結合材に含めることとした。収縮低減剤は、標準使用量6kg/m³とし、単位水量に含めることとした。

2.3 試験方法

(1) 試験項目

試験は配合EX20-Rを用いた単位膨張材量確認試験、全配合を用いた20℃室内自己応力・無拘束ひずみ試験(以下ひずみ試験と示す)および配合K20-Rを用いた簡易断熱養生した自己応力・ひずみ試験をそれぞれ実施した。

(2) 単位膨張材量確認試験の養生方法

配合EX20-Rにおいて、材齢1週間まで10℃室内にて厚さ0.05mmのアルミ箔テープで覆った封緘養生し、その後20℃水中養生を行う養生条件下において無拘束ひずみ試験を実施した。

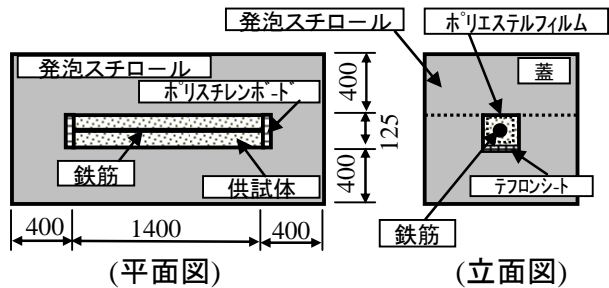


図-1 簡易断熱した自己応力供試体

(3) 20℃自己応力・ひずみ試験の養生方法

自己応力とひずみ試験の養生条件は温度20℃の室内にて打設し、材齢1日で脱枠を行い、温度20℃、湿度60%の室内にて封緘養生した。

(4) 簡易断熱養生自己応力・ひずみ試験の養生方法

20℃室内にて打設したコンクリートを発泡スチロール型枠に打設し、簡易断熱養生した。脱枠は材齢7日で行い、温度20℃、湿度60%の室内にて封緘養生した。簡易断熱養生した自己応力供試体の試験状況を図-1に示す。この簡易断熱養生方法は概ね900×900×1100mmの部材の中心部の温度履歴を再現⁴⁾できる。

(5) 試験体

20℃室内と単位膨張材量確認試験での収縮ひずみ供試体寸法は100×100×400mmとし、簡易断熱養生したひずみ供試体は100×100×1400mmとした。自己応力供試体の寸法は20℃室内試験、簡易断熱養生試験とも100×100×1400mmとした。拘束供試体の形状を図-2に示す。埋設する鉄筋はD16(鉄筋比1.7%)とした。自己応力試験体とひずみ試験体の作製方法はJCI「コンクリートの自己応力試験方法(案)」¹¹⁾に準拠した。本試験では予

備試験において3本の測定結果にほとんど差がなかったことから、各条件で1体作製した。

(6) 測定方法

自己応力で使用した鉄筋は、あらかじめ「荷重-ひずみ」の関係を試験により求め、自己応力算出に反映した。また、温度ひずみは、コンクリートとの付着を切った鉄筋に貼付したダミーゲージを用いて差し引いた。収縮ひずみの測定は、供試体中央部に埋設した低弾性型(弾性係数:約40MPa)の埋込みひずみ計によって測定した。コンクリートの温度変化に伴う体積変化はコンクリートの中心部に設置した熱電対にて測定した温度変化を JCI 案¹¹⁾に準拠し、線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として補正した。

3. 試験結果および考察

3.1 単位膨張量確認試験

既報¹⁰⁾から20°C室内の封緘養生の条件下では、配合Bを基調とした場合には単位膨張材量を $25\text{kg}/\text{m}^3$ で後膨張し、 $20\text{kg}/\text{m}^3$ では材齢約1年においても後膨張しない結果となった。ここでは、さらに、水分供給のある水中養生において、単位膨張材量を $20\text{kg}/\text{m}^3$ とした場合に未反応の膨張材が反応することによる後膨張の有無を確認することを目的に実施する。

図-3に材齢7日まで封緘養生し、その後、20°C水中養生をおこなった配合EX20-Rにおける供試体のひずみの経時変化を示す。材齢約200日においても顕著な後膨張しない結果となった。配合Bを基調とした場合には単位膨張材量 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 以下にすれば後膨張ひずみを抑制できると考えられる。このことから、膨張材を使用する配合は、単位膨張材量 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 以下とした。

3.2 20°C室内試験

(1) 力学的特性

図-4に各配合の圧縮強度発現を、図-5に材齢56日における各配合の圧縮強度と配合Bの圧縮強度との比を示す。膨張材と収縮低減剤を混入しない粗骨材に廃瓦粗骨材を混入した配合K20の圧縮強度は材齢56日で圧縮強度170MPaとなり、配合Bの圧縮強度と比較して大きくなる結果を示した。この理由として、軽量骨材を粗骨材としたコンクリートにおいて、マトリックスの自己乾燥による相対湿度低下により、骨材に吸水している水分移動がともなうことが報告¹⁾されており、廃瓦粗骨材でも同様の現象がおき、結果として未反応の結合材が反応し、より強固なマトリックスを形成したため、圧縮強度が増加したと考えられる。

しかし、膨張材と収縮低減剤を混入した配合の圧縮強度は配合Bの圧縮強度と比較して小さくなる傾向を示した。この理由として、膨張材の作用機構は、膨張材による水和反応生成物による毛細管空隙生成であるとする

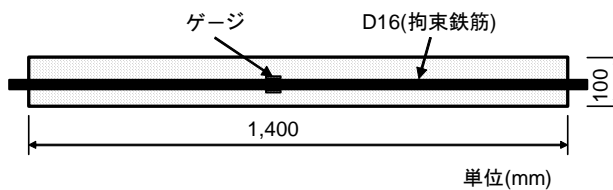


図-2 自己応力供試体

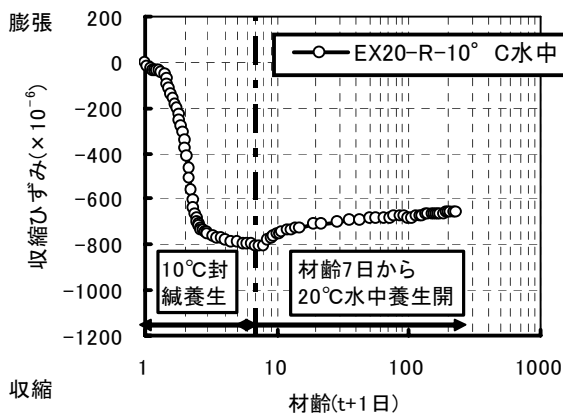


図-3 配合EX20-R水中養生収縮ひずみ

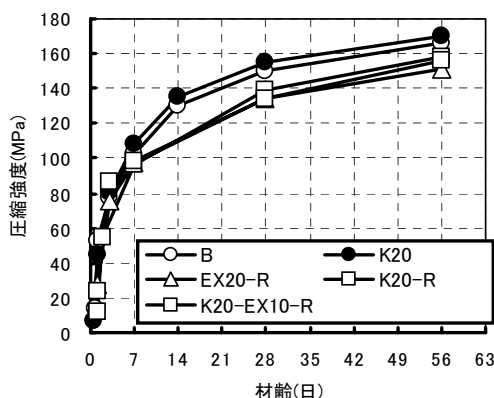


図-4 圧縮強度発現

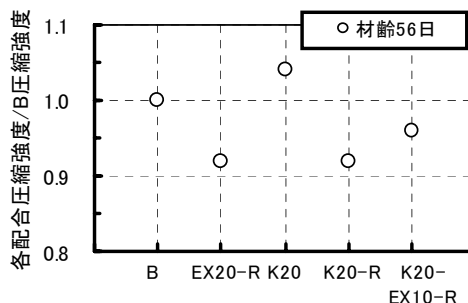


図-5 各配合の圧縮強度比較(材齢56日)

報告¹²⁾があり、膨張材混入供試体の組織が粗となったため、圧縮強度が低下したことが考えられる。配合K20-RとK20-EX10-Rの圧縮強度が低下する傾向は水結合比

17%の配合に膨張材あるいは収縮低減剤を混入した場合に基準コンクリートと比較して低減する結果⁸⁾と傾向的に合致した。このことから、廃瓦粗骨材による圧縮強度増加よりも膨張材や収縮低減剤による圧縮強度低下の影響の方が大きいことが考えられる。

表-3に材齢28日の圧縮強度とヤング係数の結果を示す。ヤング係数は配合Bと比較して若干低下する傾向を示した。割裂引張強度は配合K20-EX10-Rで小さくなる傾向を示した。

(2) ひずみ

図-6に各配合のひずみの経時変化を示す。時間軸原点は、打設終了時点とした。廃瓦粗骨材を混入することにより、セルフキュアリングによる収縮ひずみの低減効果が確認され、その低減効果は膨張材と収縮低減剤を混入した配合EX20-Rより収縮低減効果が高くなる結果を示した。廃瓦粗骨材を用いた配合のひずみ発現は、材齢1.5日までに膨張ひずみが発生し、その後収縮側に転じる結果となり、膨張材と収縮低減剤を用いた配合EX20-Rのひずみ発現とは明らかに異なる性状を示した。この理由として、水和生成物が析出した状態で気液界面が生成される中で骨材から水が供給されると、分離圧の考え方によれば、水和生成物間の距離が押し広げられ、膨張ひずみが生じたことが考えられる。なお、この膨張ひずみの発生は含水軽量骨材を用いたコンクリートにおいても散見されている¹³⁾。

材齢1.5日からの収縮量は配合K20-EX10-Rの配合がもっとも小さく、材齢56日のひずみは0となった。自己収縮ひずみは自己乾燥に伴うマトリックスの相対湿度が低下し、ケルビン式から毛細空隙内の水がより小さい細孔径に移動し、メナスカス半径が小さくなることによる毛細管張力の増加により大きくなることが報告されている¹¹⁾。瓦粗骨材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみの低減は、マトリックス内の相対湿度低下に伴い瓦粗骨材中の水分がマトリックスに移動したため、メナスカス半径が大きくなり、毛細管張力が低減したためと考えられる。

図-7に材齢56日の収縮ひずみ低減量の比較を示す。ここでは、材齢56日の収縮低減量は各配合の材齢56日のひずみを配合Bのひずみで差し引いた値を示す。容積置換率20%の配合K20-EX-Rの収縮低減量が最も大きくなる結果を示した。

廃瓦粗骨材(GK)、収縮低減剤(R)、膨張材(EX10)およびGK+EX10+Rの収縮ひずみ低減量の経時変化を図-8に示す。ここでは、各収縮ひずみ低減量は、GKでは、K20のひずみからBのひずみを、Rでは、K20-RのひずみからK20のひずみを、EX10では、K20-EX10-RのひずみからK20-Rのひずみを、GK+EX10+Rでは、K20-EX10-R

表-3 ヤング係数・割裂引張強度(材齢28日)

配合名	ヤング係数 (GPa)	割裂引張強度 (MPa)
B	51.2	4.79
EX20-R	51.1	5.73
K20	47.9	6.08
K20-R	45.5	5.73
K20-EX10-R	45.5	4.32

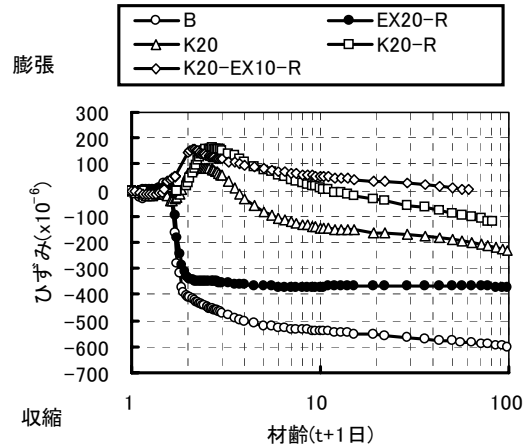


図-6 ひずみ経時変化

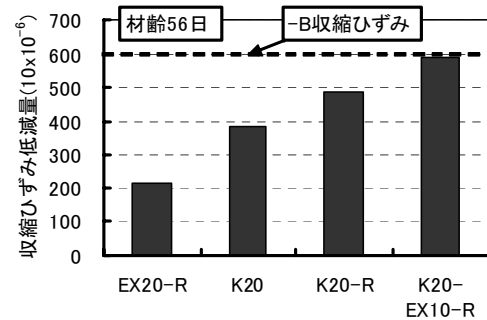


図-7 収縮ひずみ低減量

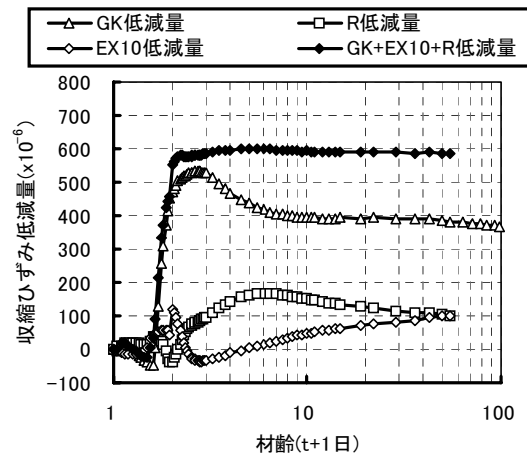


図-8 各収縮低減材料による収縮ひずみ低減量

のひずみからBのひずみをそれぞれ差し引いた値と仮定した。GKの収縮ひずみ低減量は材齢1.5日において小さくなり、Rの収縮低減量は材齢7日まで増加した。

GK+EX10+R の収縮ひずみ低減量が経時変化により小さくならない理由として、GKの材齢1.5日からの低下を収縮ひずみ低減剤により補填し、EX10によりさらに収縮ひずみ低減量を大きくしたため考えられる。

(3) 自己応力

図-9に各配合の自己応力の経時変化を示す。収縮ひずみ同様に配合 K20-EX10-R の自己応力が最も小さくなり、材齢56日において0.2MPaの引張応力となった。配合 EX20-R 供試体と配合 K20 供試体においては材齢100日においてほぼ同等となった。図-6に示すように収縮ひずみでは配合 K20の方が配合 EX20-Rと比較して約 150×10^{-6} 小さいひずみとなっているが自己応力がほぼ等しくなった理由として、配合 EX20-Rは配合 K20と比較して収縮側に転じる材齢が早いいため、ヤング係数が小さく、かつ、クリープ変形による応力緩和により自己応力の発生が小さくなったことが考えられる。

図-10に各配合の自己応力低減量の経時変化を示す。ここで、自己応力低減量は、配合 Bの自己応力から廃瓦粗骨材を用いたコンクリートおよび配合 EX20-Rのそれぞれの自己応力を引いた値とした。配合 K20-EX10-Rの自己応力低減量は最大で1.3MPa低減でき、それを持続しているが、配合 K20と配合 K20-Rの自己応力低減量は漸減する結果となった。

3.3 簡易断熱養生試験

(1) コンクリート温度

図-2の発泡型枠を用いた簡易断熱養生した配合 Bと配合 K20-Rにおいてひずみ試験と自己応力試験を実施した。ひずみ試験供試体の温度履歴を図-11に示す。

(2) ひずみ(簡易断熱養生)

図-12に配合 Bと K20-Rの簡易断熱養生および20℃室内におけるひずみを打設終了時点からの経時変化を示す。簡易断熱養生した場合においても廃瓦粗骨材と収縮低減剤を併用した配合とすることにより収縮低減効果が認められた。配合 K20-Rとすることによる簡易断熱養生した収縮ひずみ低減量は材齢56日において、約 520×10^{-6} (配合 Bのひずみ 800×10^{-6} 、配合 K20-Rのひずみ 280×10^{-6})となり、20℃室内養生した収縮ひずみ低減量は約 500×10^{-6} となった。このことから、廃瓦粗骨材を混入することによる収縮ひずみ低減量はコンクリートの温度上昇による影響はほとんどないと考えられる。

(3) 自己応力(簡易断熱養生)

図-13に配合 Bと K20-Rの簡易断熱養生および20℃室内養生した供試体のひずみの打設終了時点からの経時変化を示す。自己応力についても収縮ひずみと同様に初期高温履歴の影響を受けた供試体において自己応力が大きくなる結果となった。これらのことから、実構造物のように初期に高温履歴が生じる場合の収縮低

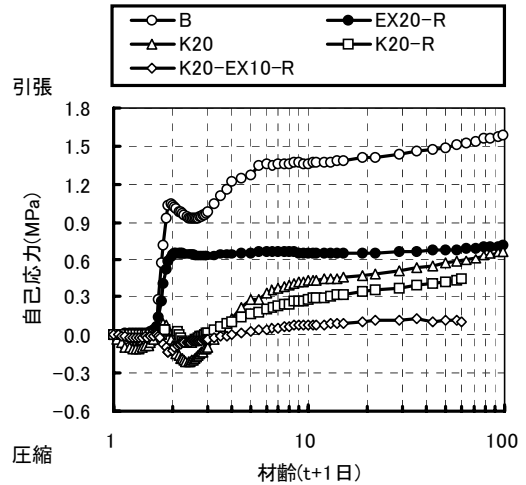


図-9 自己応力経時変化

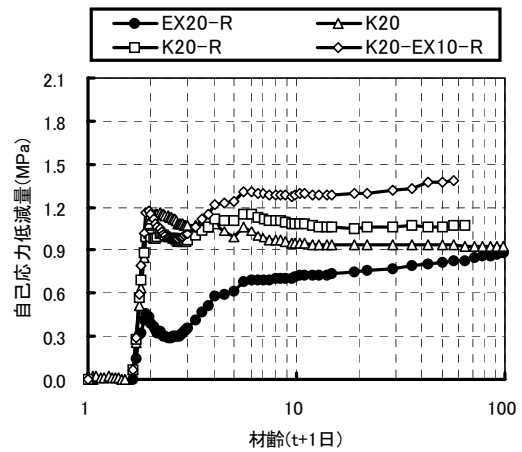


図-10 自己応力低減量経時変化

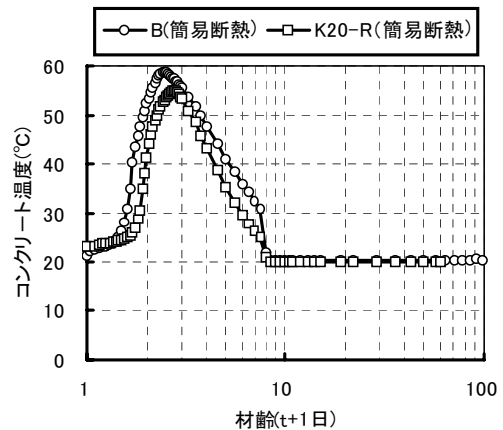


図-11 コンクリート温度履歴

減対策を考える場合には収縮ひずみの温度履歴の影響を考慮する必要があると考える。

4. まとめ

粗骨材全容積を廃瓦粗骨材で20%容積置換した超高強度コンクリートに膨張材と収縮低減剤を混入したコン

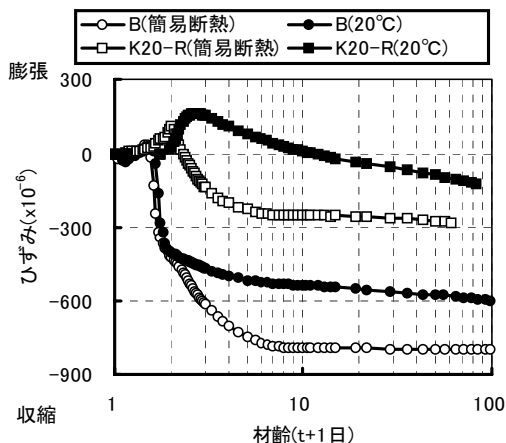


図-1-2 ひずみ経時変化

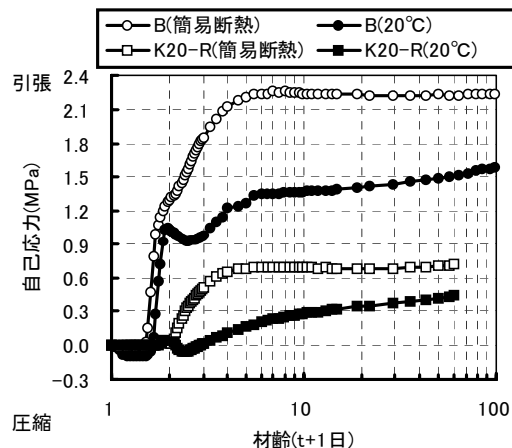


図-1-3 自己応力経時変化

クリートの圧縮強度発現、収縮ひずみおよび自己応力を無置換の超高強度コンクリートと実験的に比較を行い、以下のことが明らかになった。

- (1) 粗骨材を廃瓦粗骨材で20%容積置換し、膨張材と収縮低減剤を混入したコンクリートの圧縮強度は、無置換のコンクリートと比較して若干小さくなった。
- (2) 廃瓦粗骨材を混入したコンクリートは材齢初期に膨張ひずみが発生することが認められた。
- (3) 収縮ひずみと自己応力は、廃瓦粗骨材を用いたコンクリートに膨張材と収縮低減剤を混入することにより、材齢1.5日からの収縮量が低減した。
- (4) 簡易断熱養生を実施した供試体の自己応力と収縮ひずみに温度履歴の影響が認められ、20°C室内試験養生の結果と比較して大きくなった。
- (5) 単位膨張材量を 20kg/m^3 としたコンクリートの水中養生条件において後膨張ひずみが生じなかった。

謝辞

本研究の部材製作にあたり、中国電力(株)、中国高圧コンクリート(株)および広島大学の多くの方々にご協力を頂きました。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 五十嵐心一ほか：若材齢における高強度コンクリートの内部組織の特徴と自己収縮拘束特性，土木学会論文集，No.704，V-55，pp.173-186，2002.5
- 2) 陣内 浩ほか：設計基準強度 150N/mm^2 クラスの高強度コンクリートによる実大 RC 柱の施工性と構造体強度発現性状の検討，日本建築学会技術報告集，No.17，pp.1-5，2003.6
- 3) 丸山一平ほか，超高強度コンクリートを用いた RC 柱部材の初期応力に関する検討，耐久性力学に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート協

会，pp.303-312，2007.12

- 4) Ryoichi sato and Hazime Kawakane: A New Concept for the Early Age Shrinkage Effect on Diagonal Cracking Strength of Reinforced HSC Beams, Journal of Advanced Concrete Technology Vol.6, No.1, pp.45-67,2008.2
- 5) 五十嵐心一ほか：軽量骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，2002，pp.399-404
- 6) 谷村充ほか：膨張材を用いた高強度コンクリートの自己膨張・収縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，2002，pp.951-956
- 7) 日紫喜剛啓ほか：自己収縮を低減した 150N/mm^2 級超高強度コンクリートに関する実験的検討，土木学会論文集，No.781，V-66，2005，pp.101-112
- 8) 鈴木雅博ほか：超高強度膨張コンクリートの自己応力に及ぼす温度履歴の影響，セメント・コンクリート論文集，No.59，2005，pp.375-382
- 9) 日本コンクリート協会：膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化に関するシンポジウム，pp.40-46，2003.9
- 10) 鈴木雅博ほか：廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの変形と拘束応力に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，2007，pp.651-656
- 11) 日本コンクリート協会：自己収縮研究委員会報告書，1996 および 2002
- 12) 盛岡 実ほか：膨張材を混和したセメント硬化体の微細構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，1998，pp.169-174
- 13) P. Lura, et. al.: Autogenous and drying Shrinkage of High Strength Lightweight Aggregate Concrete at Early Ages – The Effect of Specimen size, Proceeding RILEM International Conference on Early Age Cracking in Cementitious System (EAC'01), Hifa, 2001, pp337-344