

廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの自己収縮応力低減

技術研究所 材料グループ 川畑智亮
技術研究所 材料グループ 鈴木雅博

概要: 超高強度コンクリートは水和熱に起因した温度上昇量が高く、かつ自己収縮ひずみも大きくなるため、自己収縮ひずみに起因した自己収縮応力(以下、自己応力)が発生し、ひび割れ発生リスクが高くなる。本研究は、吸水率が高く多孔質材料でありながらも強度低下を伴わないことを特徴とする廃瓦粗骨材を、全粗骨材容積の20%を置換した場合の自己応力の低減効果について検討した。その結果、廃瓦粗骨材の置換だけでは自己応力が時間経過に伴い漸増する結果となったが、廃瓦粗骨材の置換に加えて膨張材と収縮低減剤を混入することで自己応力の経時変化に伴う増加は認められることなく、自己応力の低減効果も高めることを確認した。さらに、水結合材比が15%より大きい領域に関して廃瓦粗骨材の効果に関する検討を行い、水結合材比が大きくなると自己応力低減効果は低くなるが、強度は同等以上となることを確認した。

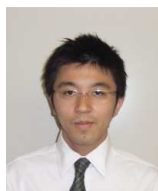
Key Words: 超高強度コンクリート、収縮低減、廃瓦粗骨材、セルフキュアリング

1. はじめに

低桁高の橋梁や耐久性向上の観点からコンクリートの高強度化が望まれている。しかし、高強度コンクリートは自己収縮ひずみ量が大きくなるため、これに起因して自己応力が大きくなりひび割れリスクが高くなる。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(セルフキュアリング法)¹⁾、水結合材比30%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²⁾、収縮低減剤による表面張力の低下を制御する方法³⁾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³⁾されている。これまで筆者らは、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⁴⁾。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⁵⁾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り、高含水率である廃瓦粗骨材を用いて、粗骨材全容積を廃瓦粗骨材で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⁶⁾。

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、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実験的に比較検討した。さらには、水結合比が15%より大きい領域で廃瓦粗骨材を用い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実験的に比較検討した。



川畑智亮



鈴木雅博

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

2.1.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。セメントは低熱ポルトランドセメント90%にシリカフェーム10%を混入したプレミックスセメント(記号 SFLC, 密度 3.08g/cm³, 比表面積 6210cm²/g)を使用した。膨張材は標準使用量 20kg/m³ の石灰系低添加型を使用した。収縮低減剤は低級アルコール系を使用した。廃瓦粗骨材は島根県江津産で、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碎したものである。使用した廃瓦粗骨材はロッドが異なり、Aロッドは表乾密度 2.27g/m³, 吸水率 8.88%, 破碎値 19.60%, Bロッドは表乾密度 2.27g/m³ 吸水率 9.31%, 破碎値 21.38%である。

2.1.2 配合

配合を表-2に示す。水結合材比は 15, 23 および 30%とし、単位水量は同一量の 155kg/m³とした。B-15, B-23 および B-30 は自己応力低減しない配合(B配合)である。膨張材および収縮低減剤を使用した E20R-15, E20R-23 および E20R-30, 廃瓦粗骨材, 膨張材および収縮低減剤を使用した K20E10R-15, K20E10R-23 および K20E10R-30 は自己応力低減した配合(それぞれ ER 配合, KER 配合)である。単位膨張材量は 20kg/m³ または 10kg/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。配合名に“K20”とあるものは、粗骨材全容積を廃瓦粗骨材でそれぞれ 20%容積置換した配合であり、水結合材比は 15%に関しては膨張材を混入しない配合(K20-15, K20R-15)も実施した。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。

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%, 破碎値 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%, 破碎値 19.60(21.38)%, 骨材粒径 15-5mm	GK
混和材	シリカフェーム	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
混和剤	収縮低減剤	低級アルコール系	RA
	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	消泡剤		D

*: ()内の数値はBロッドの数値を示す。

表-2 配合

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-15	0.15	155	1033	-	435	944	-	-	0.0230	0.0002
K20-15	0.15	155	1033	-	435	755	147	-	0.0230	0.0002
E20R-15	0.15	149	1013	20	435	944	-	6	0.0230	0.0002
K20E10R-15	0.15	149	1023	10	435	755	147	6	0.0230	0.0002
K20R-15	0.15	149	1033	-	435	755	147	6	0.0230	0.0002
B-23	0.23	155	674	-	741	944	-	-	0.0130	0.0006
E20R-23	0.23	149	654	20	741	944	-	6	0.0130	0.0006
K20E10R-23	0.23	149	664	10	741	755	147	6	0.0130	0.0006
B-30	0.30	155	517	-	875	944	-	-	0.0090	0.0006
E20R-30	0.30	149	497	20	875	944	-	6	0.0100	0.0006
K20E10R-30	0.30	149	507	10	875	755	147	6	0.0105	0.0006

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

2.2 試験方法

2.2.1 試験項目

試験は配合 E20R-15 を用いた単位膨張材量確認試験, および全配合 20°C室内での力学的特性 (圧縮強度, ヤング係数, 割裂引張強度) および無拘束ひずみ試験 (以下ひずみ試験と示す), 自己応力試験を実施した。

2.2.2 養生方法

単位膨張材量確認試験は, 10°C室内にて打設し, 材齢1日で脱枠後, 材齢1週間まで厚さ0.05mmのアルミ箔テープで覆った封緘養生し, その後に20°C水中養生を行った。

全配合の20°C室内試験は, 温度20°C, 湿度60%の室内にて打設, ひずみ試験体と自己応力試験体は材齢1日で脱枠し, 封緘養生を行った。

2.2.3 試験体

単位膨張材量確認試験とひずみ試験の供試体寸法は100×100×394mmとし, 自己応力試験の供試体寸法は100×100×1400mmとした。ひずみ試験体の形状を図-1に, 自己応力試験体の形状を図-2に示す。埋設する鉄筋はD16(鉄筋比1.7%)とした。

ひずみ試験体と自己応力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)」⁷⁾に準拠した。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, 本試験では各条件で1体作製した。

また, 力学的特性値はφ100×200mmの円柱供試体により算出した。

2.2.4 測定方法

単位膨張材量確認試験とひずみ試験は, 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ひずみを測定した。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⁷⁾に準拠し, 線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として補正した。

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。

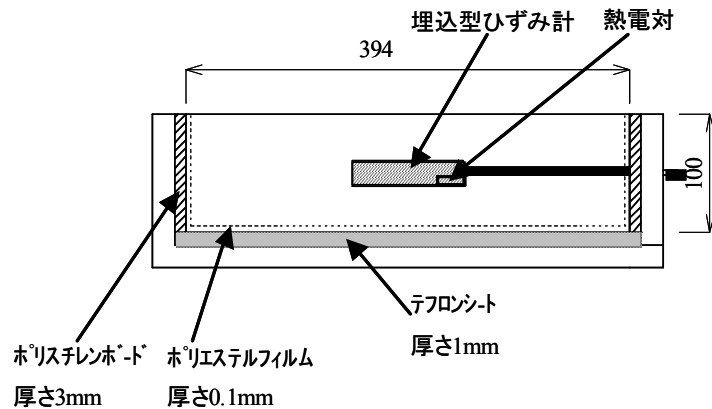


図-1 ひずみ試験体

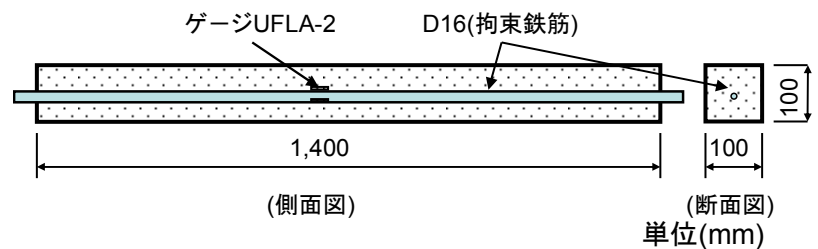


図-2 自己応力試験体

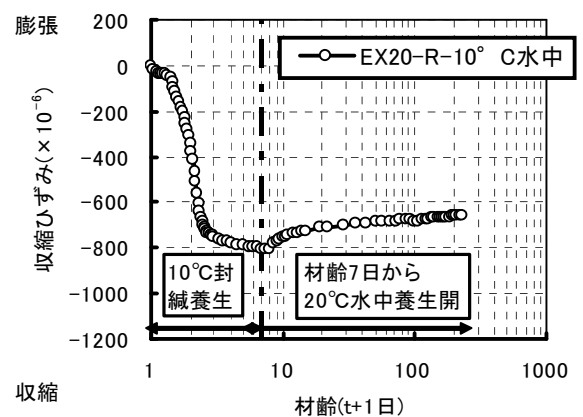


図-3 配合 EX20-R 水中養生収縮ひずみ

3. 試験結果および考察

3.1 単位膨張材量確認試験

既報⁶⁾から20°C室内の封緘養生の条件下では, 配合 B-15 を基調とした場合には単位膨張材量を $25\text{kg}/\text{m}^3$ で, 材齢約1年で未反応の膨張材が反応することによって起こる後膨張が認められ, $20\text{kg}/\text{m}^3$ では後膨張が認められない結果となった。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 $20\text{kg}/\text{m}^3$ とした場合に後膨張の有無を確認することを目的に実施した。

図-3に単位膨張材量確認試験体のひずみの経時変化を示す。材齢約200日においても顕著に後膨張は生じ

ない結果となった。このことより、配合 B-15 を基調とした場合には単位膨張材量 20kg/m³ 以下にすれば後膨張ひずみを抑制できると考えられる。よって膨張材を使用する配合は、単位膨張材量 20kg/m³ 以下とした。

3.2 20°C室内試験

3.2.1 力学的特性

図-4 に各配合の圧縮強度発現を、図-5 に材齢 91 日における各配合の圧縮強度を B 配合の圧縮強度でそれぞれ除した値を示す。水結合比 15% の配合で粗骨材を廃瓦粗骨材に置換した K20 の圧縮強度は材齢 91 日で圧縮強度 173MPa, 177MPa となり、基準配合 B-15 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⁸⁾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、膨張材を混入した配合 E20R-15, K20E10R-15 の圧縮強度は基準配合 B-15 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報告⁹⁾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。

水結合比 23%, 30% で膨張材を混入した配合 E20R-23, E20R-30 は基準配合 B-23, B-30 とそれぞれ比較して圧縮強度が低減する結果となり水結合比 15% の場合と傾向的に合致したが、廃瓦粗骨材と膨張材を混入した配合 K20E10R-23, K20E10R-30 は基準配合 B-23, B-30 とそれぞれ比較して圧縮強度が増大する結果となった。このことから、水結合比 15% では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く、水結合比 23%, 30% では廃瓦粗骨材による圧縮強度増加の影響の方が大きいと言える。

表-3 に材齢 28 日のヤング係数と割裂引張強度の結果を示す。ヤング係数は B 配合と比較して、廃瓦粗骨材、膨張材や収縮低減剤を混入した場合に若干低下する傾向を示した。また、割裂引張強度は同程度の傾向を示した。

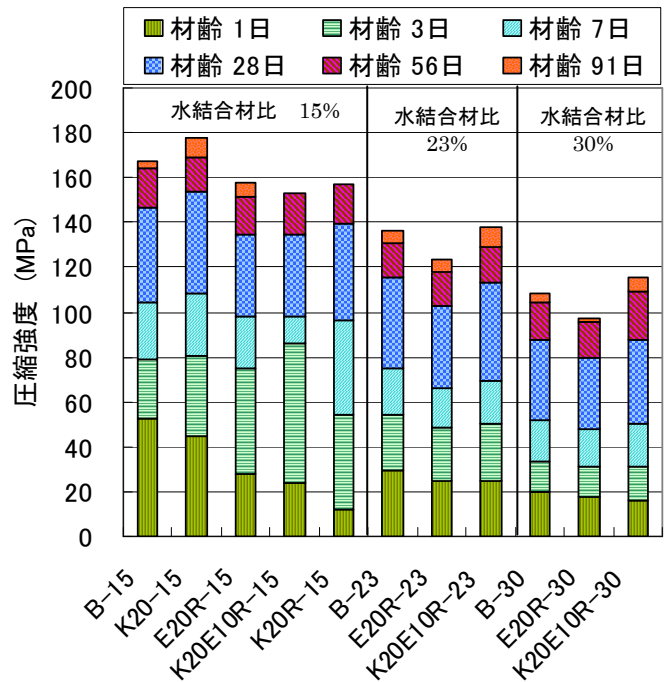


図-4 圧縮強度発現

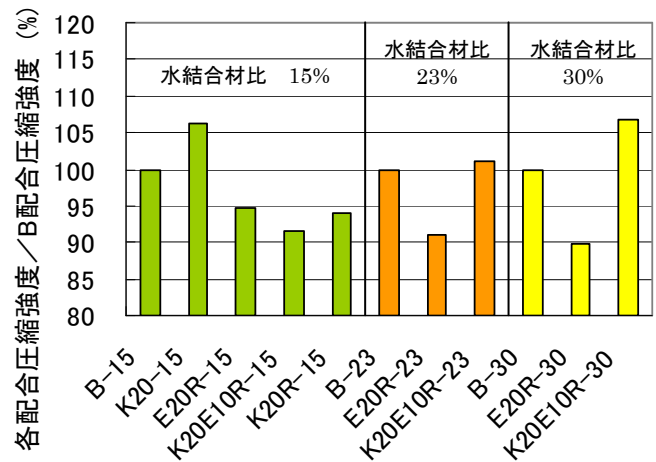


図-5 各配合の圧縮強度比較(材齢 91 日)

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-15	51.2	4.79
K20-15	47.9	5.72
E20R-15	49.8	5.63
K20E10R-15	46.7	3.99
K20R-15	45.5	5.73
B-23	46.0	5.38
E20R-23	43.8	5.54
K20E10R-23	41.3	4.87
B-30	41.5	4.74
E20R-30	40.5	4.74
K20E10R-30	38.1	4.86

3.2.2 ひずみ試験

(1) 水結合材比 15%配合の比較

図-6に水結合材比 15%の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。廃瓦粗骨材を混入した配合では、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た。その低減効果は膨張材と収縮低減剤を混入した配合 E20R-15 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 E20R-15 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¹⁰⁾。

材齢 1.5 日からの収縮量は配合 K20E10R-15 の配合が最も小さく、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⁷⁾。廃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廃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。

廃瓦粗骨材(K)、膨張材(E)、および収縮低減剤(R)が収縮ひずみに与える影響を評価するため、各収縮ひずみ低減量と材齢の関係を図-7に示す。ここで各収縮ひずみ低減量は、

$$\begin{aligned} \text{K 低減量} &= [\text{K20-15}] - [\text{B-15}] \\ \text{E 低減量} &= [\text{K20E10R-15}] - [\text{K20R-15}] \\ \text{R 低減量} &= [\text{K20R-15}] - [\text{K20-15}] \\ \text{K+E+R 低減量} &= [\text{K20E10R-15}] - [\text{B-15}] \end{aligned}$$

と仮定した。K 低減量は、配合 K20-15 のひずみから配合 B-15 のひずみを差し引いた値というように、[配合名] は各配合のひずみ値を表す。

廃瓦粗骨材の収縮ひずみ低減効果は打設終了から材齢 1.5 日までが顕著であり、収縮低減剤の収縮

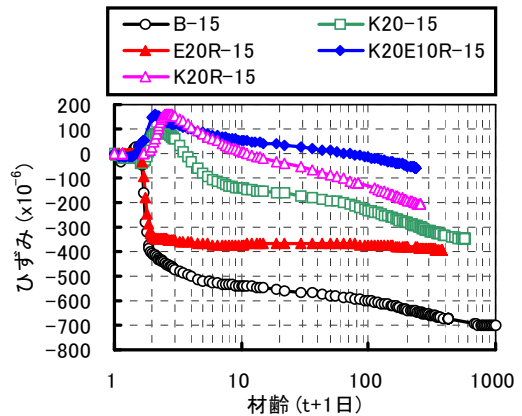


図-6 ひずみ経時変化

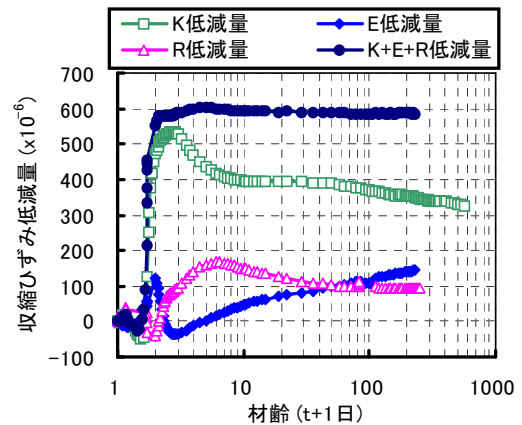


図-7 各収縮低減材料による収縮ひずみ低減量

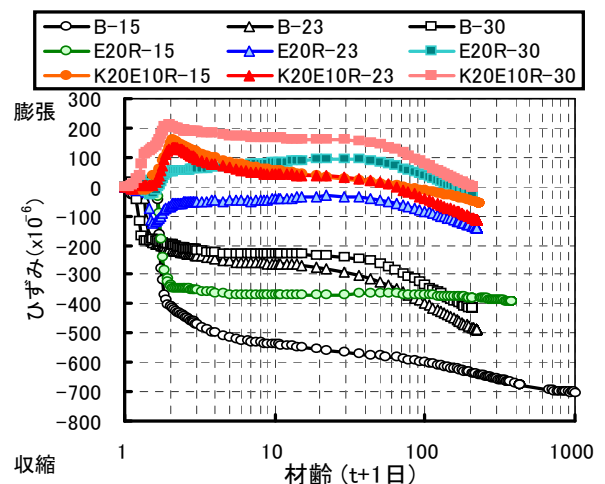


図-8 ひずみ経時変化

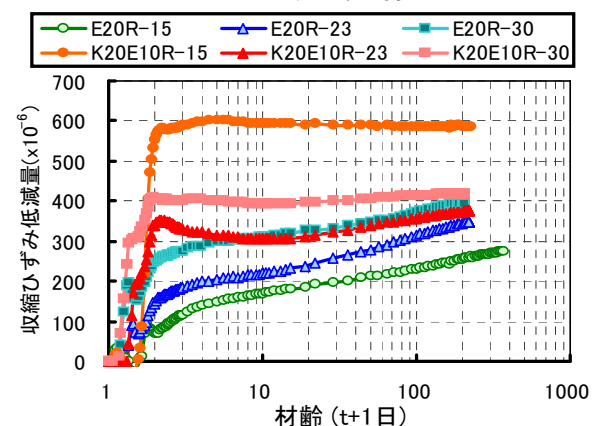


図-9 各結合材比による収縮ひずみ低減量

低減効果は材齢 7 日まで増加が認められた。K+E+R の収縮ひずみ低減量が時間の経過に伴い小さくならない理由は、K 低減量の材齢 1.5 日からの低下を R 低減量の増加により補填し、膨張材の収縮低減効果により、さらに収縮ひずみ低減量を大きくしたことによるものと考えられる。

(2) 水結合材比の違いによる比較

図-8 に B 配合, ER 配合および KER 配合の各ひずみの経時変化を示す。時間軸原点は、拘束応力が発生している時点とした。廃瓦粗骨材、膨張材および収縮低減剤を混入することにより、水結合材比に関わらず材齢初期に圧縮ひずみが発生し、自己収縮ひずみの低減効果が認められた。

図-9 に各水結合材によるひずみ低減効果を検討するため、ER 配合および KER 配合の各ひずみから B 配合の各ひずみを差し引いたひずみ(ひずみ低減量)の経時変化を示す。ひずみ低減量は水結合材比 15% で大きくなったが、水結合材比 23% と 30% では差がほとんど認められなかった。このことは、廃瓦粗骨材内の水分移動がコンクリート内の自己乾燥による湿度低下によるものとするれば、水結合材比がより小さい場合に自己乾燥が大きく、移動する水分量が多くなり、結果として水結合材比 15% の場合に最も収縮低減ひずみが大きくなったと考えられる。

3.2.3 自己応力試験

(1) 水結合材比 15% 配合の比較

図-10 に水結合材比 15% の各配合の自己応力の経時変化を示す。ひずみ試験同様に配合 K20E10R-15 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。E20R-15 と K20-15 においては材齢 100 日においてほぼ同等となった。図-6 に示すようにひずみ試験では K20-15 の方が E20R-15 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、E20R-15 は K20-15 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-11 に水結合材比 15% の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-15 の自己応力から K20-15, K20R-15, K20E10R-15 および E20R-15 のそれぞれの自己応力を差し引いた値とした。K20E10R-15 の自己応力低減量は最大で 1.3MPa であり、それを持続しているが、K20-15 と K20R-15 の自己応力低減量は漸減する結果となった。

(2) 水結合材比の違いによる比較

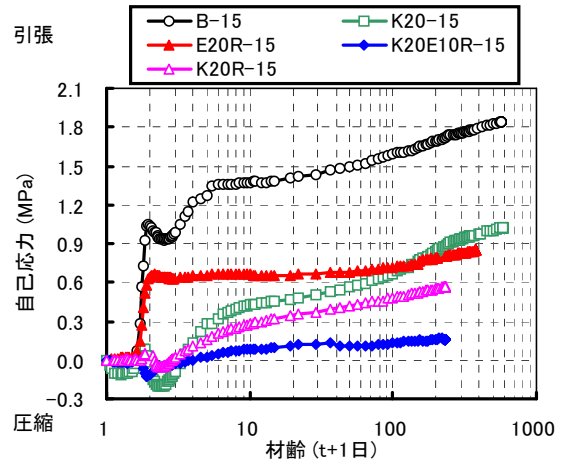


図-10 自己応力経時変化

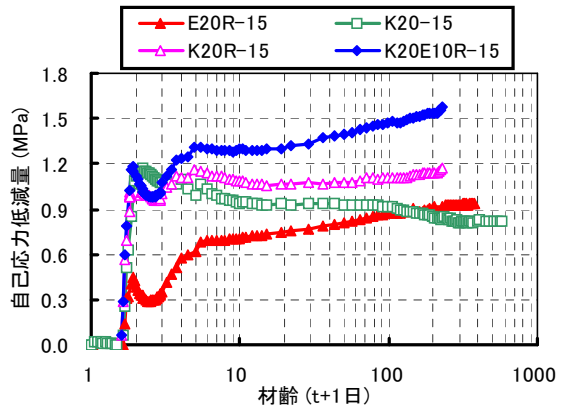


図-11 自己応力低減量経時変化

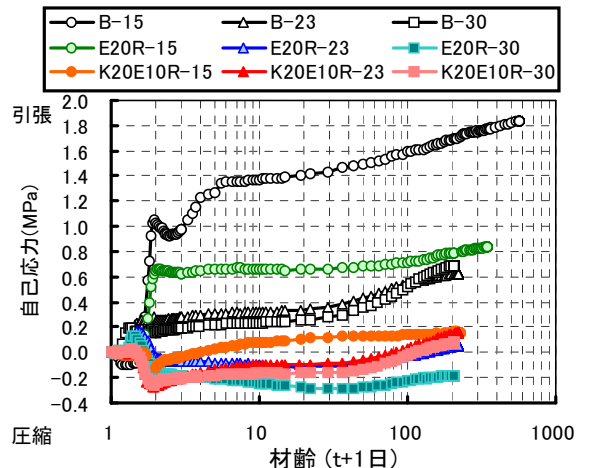


図-12 自己応力経時変化

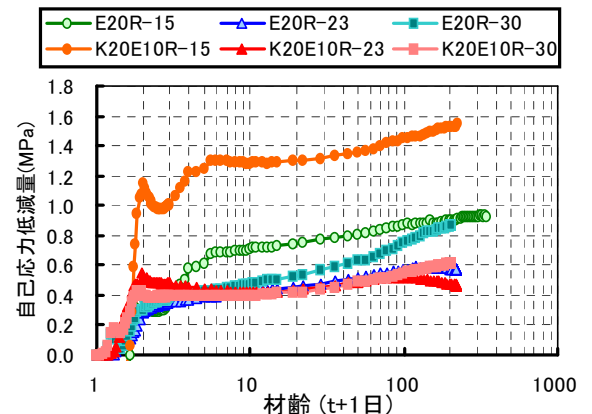


図-13 自己応力低減量経時変化

図-12にB配合, ER配合およびKER配合の各自己応力の経時変化を示す。水結合材比15%においては, K20E10R-15の自己応力低減効果が顕著であったが, 水結合材比23%と30%では, B配合の自己応力が小さくなり, K20E10R-23, K20E10R-30の自己応力低減効果は比較的小さい結果となった。

図-13に各水結合材による自己応力低減効果を検討するため, B配合の自己応力からER配合, KER配合の自己応力を差し引いた応力(自己応力低減量)の経時変化を示す。自己応力低減量は水結合材比が小さくなるほど大きくなる傾向を示したが, 水結合材比15%の低減効果だけが大きい。この理由としては, ひずみ試験と同様だと考えられる。

4. まとめ

水結合材比15%, 23%, 30%を対象に, 粗骨材全容積の20%を廃瓦粗骨材で置換したコンクリートと, 上記に加え膨張材, 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実験的に比較した結果, 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, 水結合材比15%においては, 無置換のコンクリートと比較して若干小さくなり, 水結合材比23%, 30%においては, 同等以上となった。

(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) 水結合材比15%において, 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) 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。

(5) 廃瓦粗骨材, 膨張材および収縮低減剤を混入することにより, 自己収縮ひずみと自己応力の低減効果が認められ, その低減効果は水結合材比が小さいほど顕著に認められた。

謝辞

本研究の実施にあたり, 広島大学大学院工学研究科 佐藤良一教授, ならびに名古屋大学大学院環境学研究科 丸山一平准教授にご指導を頂きました。また中国電力(株), 中国高圧コンクリート工業(株)および広島大学の多くの方々にご協力を頂きました。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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, pp.337-344