

論文 低収縮超高強度 RC プリズムの長期長さ変化に関する検討

鈴木 雅博*1・佐久間 和弘*2・佐藤 良一*3

要旨: 超高強度コンクリートは大きな自己収縮ひずみが発生する。このため、拘束を受ける部材のひび割れ発生リスクは高くなる。粗骨材の一部に吸水率の高い廃瓦粗骨材を用いた内部養生法は、材齢 100 日までの測定結果から自己応力の低減に有効であることを確認してきた。本研究では、材齢 1100 日の長期材齢における内部養生法による自由変形および自己応力の低減効果を実験的に検討した。また、乾燥条件下における内部養生法の効果を実験的に検討した。その結果、内部養生法にさらに膨張材と収縮低減剤を加えることにより、乾燥条件下においても拘束応力が長期材齢においても抑制できることなどが明らかになった。

キーワード: 超高強度コンクリート, 自己変形, 拘束応力, 廃瓦粗骨材

1. はじめに

コンクリート構造物の長寿命化が求められている。超高強度コンクリート(以下, UHSCと示す)は、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につながり、社会的要請に対する1つの方策になると考えられる。一方で、UHSCは自己収縮ひずみが大きくなることが知られており²⁾、UHSCを用いたRC部材のひび割れの報告³⁾や、せん断ひび割れ発生荷重を低下させるとの報告⁴⁾がなされている。

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⁵⁾や高吸水性のポリマー(SAP)⁶⁾から水分を補給する自己乾燥防止方法(以下、内部養生法と示す)や膨張材により化学的な膨張ひずみを付与する方法⁷⁾や収縮低減剤により表面張力の低下を制御する方法⁷⁾が提案されている。しかし、軽量骨材を用いた場合には、自己収縮ひずみの低減効果があるものの圧縮強度が頭打ちすることが報告⁸⁾されている。こうした背景から、筆者らは内部養生で使用する材料として、吸水率が高く、かつ、軽量粗骨材より破砕値の小さい多孔質材料である廃瓦粗骨材(以下、PCWA)を用いた自己応力低減効果に関する実験的検討を行った。この結果、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⁹⁾。さらに膨張材、および収縮低減剤を加えることにより拘束応力を大幅に低減できること¹⁰⁾を明らかにしてきた。また、粗骨材全容積をPCWAで20%容積置換したコンクリートの自己応力の発現量は40%容積置換したコンクリートと比較して小さくなることも明らかにしてきた⁹⁾。

本研究では、これまでは材齢100日までの実験結果に基づき、PCWAの内部養生効果による拘束応力の低減効果を検討してきたのに対し、材齢1100日(約3年)の

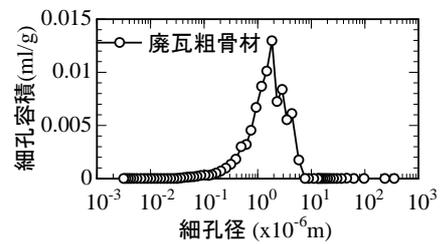


図-1 廃瓦粗骨材の細孔径分布

PCWAの自由変形および拘束応力の低減効果を長期材齢の観点から収縮ひずみの低減対策をとらないUHSCと実験的に比較検討を行った。また、封緘養生した供試体を材齢28日から気乾養生にすることにより、乾燥条件化における内部養生法が拘束応力に与える影響も検討した。さらにStep by step法¹¹⁾によるクリープ解析を行い、実験値と解析値との比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験における使用材料を表-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、シリカフェーム(記号SF)、標準使用量20kg/m³のエトリンサイト・石灰複合系低添加型膨張材(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。化学混和剤にはポリカルボン酸系の高性能減水剤(記号SP)、ポリアルキレングリコール誘導体の消泡剤(記号D)および低級アルコール系の収縮低減剤(記号SRA)を使用した。PCWAはカオリ

*1 (株)ピーエス三菱 技術本部 技術研究所 材料グループ グループリーダー 博(工) (正会員)

*2 日本工営(株)広島支店 技術部第三課 課長 修(工) (正会員)

*3 広島大学大学院 工学研究科 社会基盤環境工学専攻 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
プレミックス材	-	0.898 × L + 0.103 × SF	SFLC
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 6.51, 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 9.3%, 粗粒率 6.66, 実積率 61.3%, 破砕値 21.38%, 骨材粒径 15-5mm	PCWA
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	エトリンナイト・石灰複合系, 密度 3.05g/cm ³	EX
混和剤	収縮低減剤	低級アルコール系	SRA
	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体	D

表-2 配合表

配合名	(W+SRA)/SFLC	空気量(%)	かさ容積 ¹⁾ (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)								SP/(SFLC+EX)	D/(SFLC+EX)
				W	SFLC	EX	S	G	PCWA	SRA			
B	0.15	2	0.530	155	1033	-	435	944	-	-	0.023	0.0002	
PCA20	0.15	2	0.530	155	1033	-	435	755	147	-	0.023	0.0002	
PCA20-R	0.15	2	0.530	149	1033	-	435	755	147	6	0.023	0.0002	
PCA20-E10-R	0.15	2	0.530	149	1023	10	435	755	147	6	0.023	0.00002	
E20-R	0.15	2	0.530	149	1013	20	435	944	-	6	0.023	0.00002	

1)かさ容積:単位粗骨材かさ容積

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,粗骨材径を15mmから5mmとなるようにふるい分けして使用した。廃瓦粗骨材は多孔質(図-1参照)であり,吸水率9.3%,破砕値21.38%の材料特性を有する。骨材の破砕値試験は骨材の強さを把握する方法としてBS81part110に記載されており,容器に詰めた粗骨材を400kNで載荷し,載荷後に2.5mmふるいを通過した割合で示される。廃瓦粗骨材の強さは市販の軽量骨材(30%)と碎石(10%)の中間的位置づけとなる¹²⁾。

2.2 配合

配合を表-2に示す。配合は5種類とした。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。EXは単位結合材に含めることとし,SRAは単位水量に含めることとした。配合Bは収縮ひずみの低減対策をとらない基準配合である。全配合の単位粗骨材かさ容積を同一とし,配合PCA20,PCA20-R,PCA20-E10-Rは,配合Bの単位粗骨材容積の20%を廃瓦粗骨材で置換した。配合PCA20-Rは,配合PCA20の配合においてSRAを添加し,配合PCA20-E10-Rは,さらにEXを標準添加量の半分の10kg/m³を添加した配合である。配合E20-RはPCWAを使用せずにSRAと標準添加量のEXを添加した配合である。配合EX20-RはEXとSRAによる自己応力低減効果とPCWAによる自己応力低減効果とを比較する目的で実施した。コンクリートのスランプフローは675±75mmとなるように高性能減水剤で調整し,空気量は2±1%となるように消泡剤で調整した。

使用したPCWAの水中浸漬日数ごとの含水率の測定

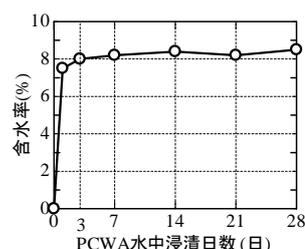


図-2 廃瓦粗骨材の含水率

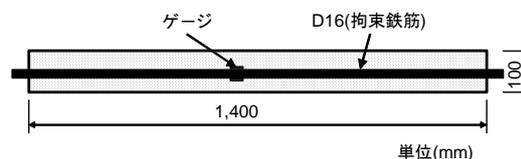


図-3 拘束応力供試体(RCプリズム)

例を図-2に示す。PCWAは概ね3日間で含水率が最大となることから,使用したPCWAは3日間吸水させて使用することとした。単位水量の管理は,PCWAを供試体作製開始前に105℃の炉に24時間乾燥させて求めた含水率と24時間吸水したPCWAの吸水率から算出した表面水を単位水量に含めることにより調整した。

コンクリートの練混ぜは,容量100リットルの2軸強制練りミキサーを用い,1バッチあたり80リットルとした。練混ぜ方法は,結合材と細骨材による空練り15秒,その後水と混和剤を添加したモルタル練り240秒,最後に粗骨材を投入してコンクリート練り60秒とした。

2.3 供試体

収縮ひずみ供試体寸法は100×100×400mmとし,拘束応力供試体(RCプリズム)寸法は100×100×1400mmとした。RCプリズムの形状を図-3に示す。埋設する鉄

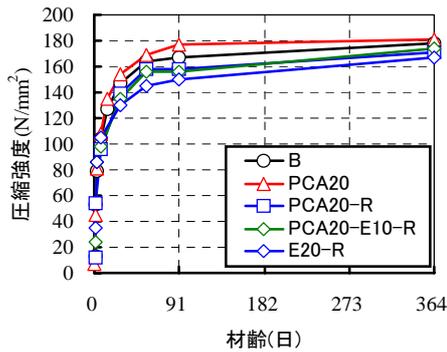


図-4 圧縮強度発現

筋はSD345D16(鉄筋比1.7%)とした。作製方法はJCI「コンクリートの自己応力試験方法(案)」¹³⁾に準拠した。

2.4 試験方法

(1) 養生方法

収縮ひずみ供試体と拘束応力供試体の養生条件は2種類とした。1つは温度20℃の室内にて打込みを行い、打込み後に打込み面をポリエステルシートで覆い、さらに濡れウエスで覆い乾燥を防止した。材齢1日で脱枠を行い、供試体をアルミ箔テープで覆い、封緘養生した。あと1つは、内部養生をした供試体の乾燥条件下での影響を把握するために、材齢28日まで封緘養生を行い、材齢28日にアルミ箔テープをはがし、気乾養生とした。封緘養生と気乾養生した供試体は室温20℃、湿度60%の室内に静置した。配合PCA20-Rは自己収縮試験のみ実施した。圧縮強度供試体の養生は封緘養生とした。

(2) 測定方法

拘束応力供試体に使用した鉄筋は、あらかじめ「荷重-ひずみ」の関係を試験により求め、拘束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40N/mm²)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¹³⁾に準拠し、線膨張係数10×10⁻⁶/℃として補正した。

3.試験結果および考察

3.1 圧縮強度およびヤング係数

ここでは、後掲に示す拘束応力の解析に使用する圧縮強度発現および圧縮強度とヤング係数との関係を試験結果から求めた回帰曲線を示す。各配合の圧縮強度発現を図-4に示す。式(1)に圧縮強度発現の回帰曲線を示す。回帰結果を表-3に示す。

$$\sigma_c(t) = A \cdot \exp \left[B \cdot \left\{ 1 - (28 / (t - C))^{0.5} \right\} \right] \quad (1)$$

表-3 圧縮強度発現の回帰結果

供試体名	A	B	C
B	149	0.193	0.6
PCA20	154	0.233	0.6
PCA20-R	140	0.298	0.6
PCA20-E10-R	141	0.247	0.6
E20-R	137	0.216	0.6

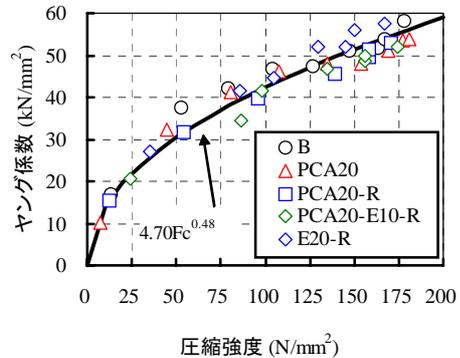


図-5 圧縮強度とヤング係数との関係

ここで、 $\sigma_c(t)$ は有効材齢 t 日での圧縮強度、 A, B, C は回帰係数を示す。

圧縮強度は全ての配合において材齢約365日において、160N/mm²を超える結果を示した。配合PCA20において圧縮強度が配合Bより大きくなる結果を示した。この理由として廃瓦粗骨材からの水分供給により、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ことが考えられる。膨張材と収縮低減剤を混入することにより、圧縮強度が低下する傾向が認められた。膨張材の膨張ひずみの発生は、膨張材自体の反応が収縮側となるが、膨張材の水和生成物が空隙を生成するために生じるとする報告¹⁴⁾がある。このことから、膨張材の添加による圧縮強度の低下は、マトリックスが粗になったためと考えられる。

圧縮強度とヤング係数の関係を図-5に示す。圧縮強度とヤング係数の関係は概ね1つの回帰曲線で示すことができる。これは、本研究においては、単位粗骨材容積と使用骨材を固定したためと考えられる。式(2)に有効材齢 t 日の圧縮強度とヤング係数 $E_c(t)$ の回帰式を示す。

$$E_c(t) = 4.70\sigma_c(t)^{0.48} \quad (2)$$

3.2 収縮ひずみ

各配合の収縮ひずみの経時変化を図-6に示す。横軸はlogで示しているため、有効材齢0日から発現を記載するために有効材齢 t 日に1を加算した $(t+1)$ 日として標記した(横軸の1日は有効材齢0日を示す)。以降のグラフも同様に示した。自己収縮ひずみは廃瓦粗骨材を混入することにより、内部養生による低減効果が確認され、その収縮低減効果は膨張材と収縮低減剤を混入した配合E20-Rより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 E20-R のひずみ発現とは明らかに異なる性状を示した。吸水率以上に含水した軽量骨材を用いたコンクリートの既往の研究⁸⁾においても膨張ひずみが発生しており、傾向的には整合している。

自己収縮ひずみの低減効果を把握するために、自己収縮ひずみの低減量の経時変化を図-7に示す。ここでは、自己収縮ひずみの低減量は各配合の自己収縮ひずみから配合 B の自己収縮ひずみを差し引くことにより算出した。有効材齢 1100 日では配合 PCA20-E10-R が最も収縮ひずみ低減量が大きくなる結果を示した。配合 PCA20 および PCA20-R では有効材齢初期において低減量が大きくなったが、それ以降の低減量は小さくなる傾向が認められた。一方、PCA20-E10-R の低減量はわずかに小さくなるに留まった。このことから、PCWA に膨張材と収縮低減剤を添加する効果は、自己収縮ひずみの低減効果を持続させることに有効であると考えられる。

乾燥収縮ひずみの経時変化を図-8に示す。ここでは、乾燥収縮ひずみは各配合の気乾養生した収縮ひずみから封緘養生した自己収縮ひずみを差し引くことにより算出した。乾燥収縮ひずみの発現は有効材齢 100 日までは、配合による差異がほとんど認められなかったが、配合 PCA20 と PCA20-E10-R は有効材齢 100 日から乾燥収縮ひずみの発現がほとんどなく、乾燥からの有効材齢 1000 日においては配合 B より小さくなる結果を示した。このことから、PCWA を混入することにより乾燥収縮ひずみの最終値を抑制する効果があると考えられる。

3.3 拘束応力

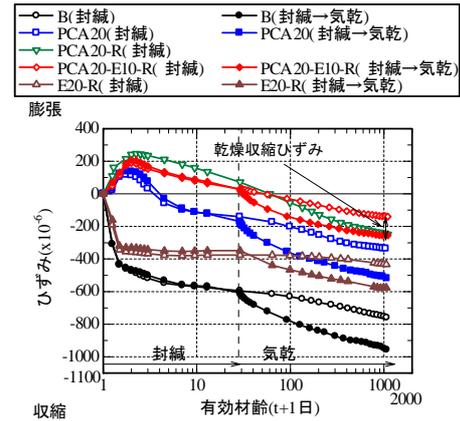
ここでは、圧縮強度発現(式(1))、圧縮強度とヤング係数との関係(式(2))および収縮ひずみの実験値(図-6)を用いた拘束応力の解析値と実験値との比較をあわせて行う。このことから、始めに解析方法を記述し、次に解析値と実験値との比較を記述する。

(1) 解析方法

解析方法は、増分型 Step by step 法¹¹⁾を用いた。Step by step 法の概念図を図-9に示す。Step by step 法によるステップ i の応力変動は、式(3)で示される。

$$\Delta\sigma_i = E_e(t_i) \cdot \left[(\Delta\varepsilon_c)_i - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta\sigma_j \cdot \{\Delta\phi(t_i, t_j)\} / E_{c28} - (\Delta\varepsilon_{sh})_i \right] \quad (3)$$

ここで、 $\Delta\sigma_j$: step j のコンクリート変動応力度、
 $E_e(t_i) = 1 / j(t_{i+1/2}, t_i)$ 、
 $j(t_{i+1/2}, t_i) = 1 / E_c(t_i) + \phi(t_i, t_i) / E_{c28}$ 、
 $(\Delta\varepsilon_c)_i$: 時間ステップ $i-1$ から i のコンクリートの全ひずみ変化量、 $(\Delta\varepsilon_{sh})_i$: 自由ひずみ変化量を示す。



注)凡例の○内は供試体の養生方法を示す

図-6 ひずみの経時変化

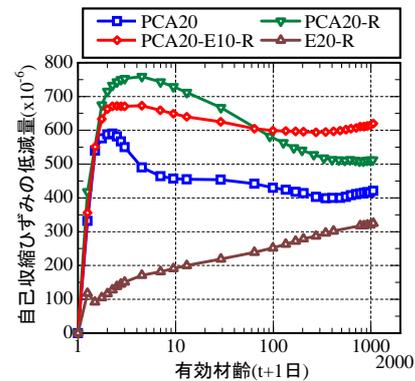


図-7 自己収縮ひずみの低減量の経時変化

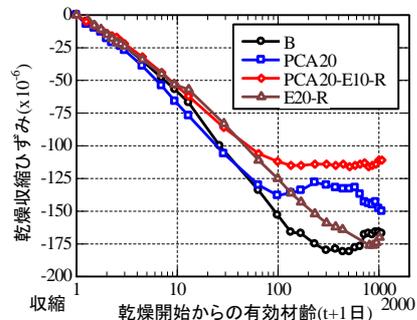


図-8 乾燥収縮ひずみの経時変化

クリープ関数は修正 MC90 法¹⁵⁾を用いて評価した。本研究における解析で用いたクリープ関数は、配合 B と同一の配合である既報の文献¹⁶⁾を参考に定めた。クリープ関数を式(4)に示す。 ϕ_0 と β_H は荷重時有効材齢のヤング係数 ($E_c(t_0)$) と有効材齢 28 日のヤング係数 (E_{c28}) の比とする関数で示される。

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \left(\frac{(t - t_0) / t_1}{\beta_H + (t - t_0) / t_1} \right)^{0.3} \quad (4)$$

ここで、 $\phi(t, t_0)$: クリープ係数、 ϕ_0 : クリープ係数の終局値、 β_H : クリープ進行速度を表す係数、 t : 有

効材齢(日), t_1 : 1日, t_0 : 荷重時有効材齢(日)を示す。

$\phi_0 - E_c(t_j)/E_{c,28}$ と $\beta_H - E_c(t_j)/E_{c,28}$ の関係を図-10に示す。図より, ϕ_0 と β_H は式(5)と(6)となる。

$$\phi_0 = 0.15 + 5.2 \exp(-2.0(E_c(t_0)/E_{c,28})) \quad (5)$$

$$\begin{cases} 0 < E_c(t_0)/E_{c,28} < 0.270 \\ \beta_H = 0.000001 \\ 0.270 < E_c(t_0)/E_{c,28} \\ \beta_H = 49.4(E_c(t_0)/E_{c,28}) - 13.2 \end{cases} \quad (6)$$

既報の研究¹¹⁾において, 膨張材と収縮低減剤の混入の有無にかかわらず, 水結合材比の同じ配合ではほぼ等しいクリープ性状を示したことから, 配合 EX20-R のクリープ関数は配合 B と同じと仮定した。また, 配合 PCA20, PCA20-E10-R のクリープ特性は, 本来は実施すべきであるが, ここでは配合 B のクリープ関数を用いた。解析で用いた線膨張係数は, 鉄筋を $11.8 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (測定値), コンクリートを $10.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (仮定値)とした。

(2) 実験値と解析値との比較

各配合の拘束応力の実験値と解析値の経時変化を図-11に示す。実験値を凡例に示すプロット, 封緘養生した解析値を実線, 封緘養生から材齢 28 日から気乾養生した解析値を一点鎖線でそれぞれ示す。拘束応力の実験結果によれば, 配合 PCA20 と PCA20-E10-R の供試体は材齢 1 日まで圧縮応力が生じ, その後, 引張応力の増加が認められた。計測終了時点において配合 PCA20 の供試体の引張応力は配合 E20-R と同程度となり, 配合 PCA20-E10-R の供試体では配合 E20-R より小さくなる結果となった。このことから, 内部養生法にさらに膨張材と収縮低減剤の併用することにより拘束応力の低減効果を高める効果が認められた。

次に解析値と実験値との比較を行う。配合 B と PCA20 の拘束応力は養生条件に寄らず実験値と解析値とは概ね合致した。このことから, 配合 B と PCA20 のクリープ特性はほぼ同等と考えられる。しかし, 配合 PCA20-E10-R と E20-R は有効材齢 1 日までの段階で一致しない結果となった。膨張材と収縮低減剤を混入した場合に実験値と解析値が一致しない要因を自己収縮ひずみと鉄筋ひずみとの関係を用いて検討する。配合 B と E20-R の有効材齢 1 日までの自己収縮ひずみと拘束応力供試体の鉄筋ひずみとの関係を図-12に示す。配合 E20-R の自己収縮ひずみ変動に対する鉄筋ひずみの変動は配合 B と比較して小さくなる傾向が認められた。このことから, 膨張材と収縮低減剤を添加した配合の材齢初期のクリープによる応力緩和は配合 B より大きいことが推察され, 前述の既往研究¹¹⁾とは異なる結果となった。この理由として, 膨張材を混入したことにより組織に空

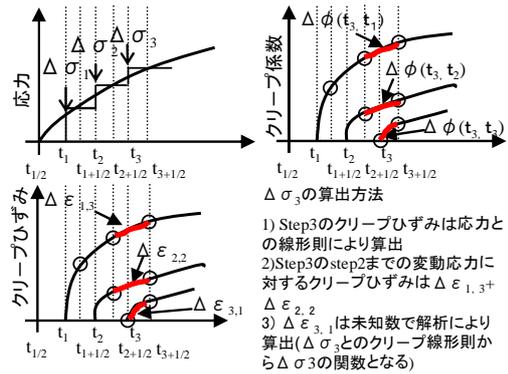


図-9 Step by step 法の概念図

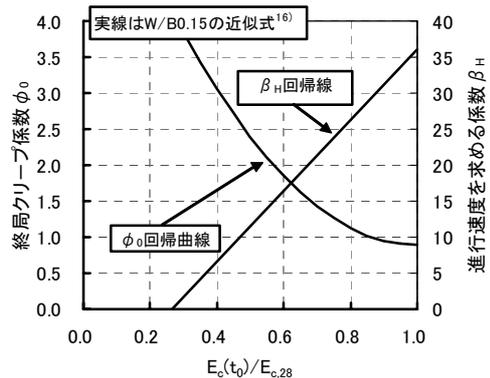


図-10 $E_c(t_0)/E_{c,28}$ と ϕ_0 および β_H の関係

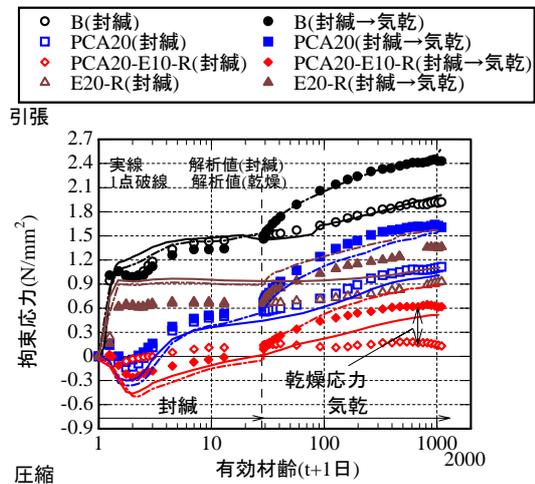


図-11 各配合における拘束応力の実験値と解析値の比較

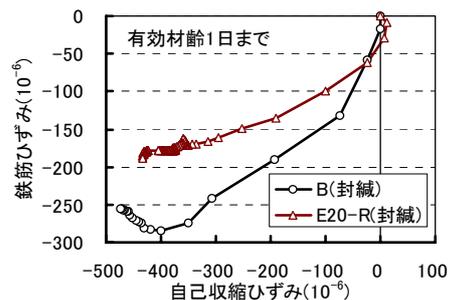


図-12 自己収縮ひずみと鉄筋ひずみとの関係

隙が生じたため、異なるクリープ特性を示したことが考えられる。膨張材と収縮低減剤を添加した供試体のクリープ特性はさらに検討をしていく必要があると考える。

(3) 乾燥応力

各配合の乾燥収縮ひずみに起因して生じた応力(以下、乾燥応力)の実験値の経時変化を図-13に示す。ここでは、乾燥応力は各配合の気乾養生した供試体の拘束応力から封緘養生した供試体の拘束応力を差し引くことにより算出した。拘束応力の低減を実施した各供試体の乾燥応力は、配合Bと比較して小さくなる傾向が認められた。各低減方法はいずれも乾燥収縮ひずみに起因して生じる拘束応力の低減にも有効であると考えられる。

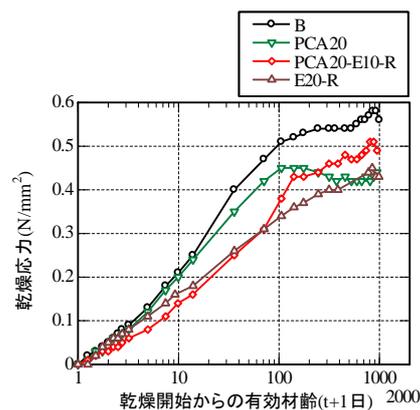


図-13 各配合における乾燥応力の経時変化

4. まとめ

超高強度コンクリートの内部養生による自由変形および拘束応力の低減効果を取縮ひずみの低減対策とらないコンクリートと実験的、解析的に比較検討し、以下のことが明らかになった。

- (1) 廃瓦粗骨材を混入した供試体の収縮ひずみと拘束応力は基準コンクリートと比較して長期にわたり小さくなり、低減効果が認められた。廃瓦粗骨材の適用は、ひび割れ抵抗性の向上に有効であることが認められた。その効果は乾燥条件下においても膨張材と収縮低減剤を混入することにより、長期的に持続することが認められた。
- (2) 廃瓦粗骨材を混入したコンクリートの圧縮強度は基準配合のコンクリートと比較して大きくなる。
- (3) 廃瓦粗骨材を用いた場合の拘束応力は基準配合のクリープ特性を用いることにより解析値と実験値が概ね一致したが、膨張材と収縮低減剤を混入した供試体では若材齢時に解析値と実験値の乖離が認められた。

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) 田澤榮一ほか：コンクリートの自己収縮，コンクリート工学年次論文集，Vol.14，No.1，pp.561-566，1992.5
- 3) 片寄哲務ほか：高強度コンクリートの若材齢における力学特性と自己収縮挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.497-502，2006.7
- 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, Feb. 2008
- 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，pp.399-404，2002.6

- 6) O. M. Jensen and P. F. Hansen: 'Water-entrained cement-based materials I. Principals and theoretical background', Cement and Concrete Research, Vol.31, No.4, pp.647-654, Apr. 2001
- 7) 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，pp.951-956，2002.6
- 8) 日紫喜剛啓ほか：自己収縮を低減した 150N/mm² 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，pp.101-112，2005.2
- 9) 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，pp.651-656，2007.7
- 10) 鈴木雅博ほか：超高強度 RC プリズムの自己応力低減に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.459-461，2008.7
- 11) Ito, Hidetoshi, et al. : Early Age Deformation and Result Induced Stress in Expansive High Strength Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.2, pp.155-174, June 2004
- 12) 例えば，鈴木雅博他：PVA 繊維補強軽量コンクリートの耐凍害性，第 14 回プレレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.143-146，2005.10
- 13) 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
- 14) 盛岡実他：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，pp.169-174，1998.6
- 15) CEB-FIP Model Code 1990, Tomas Telford, 1993
- 16) 鈴木雅博ほか：超高強度膨張コンクリートの自由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.28，No.1，pp.563-568，2006.7