

論文 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

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引張応力が発生するため、ひび割れ発生の可能性が高くなる。拘束応力を低減するために、膨張材を過添加した場合には未反応の膨張材が残存し、後膨張する可能性が高くなる。本研究では、粗骨材の一部を吸水率の高い瓦粗骨材に置換し、水結合材比 0.15 のコンクリートの圧縮強度、収縮応力低減効果を検討した。その結果、粗骨材を廃瓦粗骨材で 40%容積置換したコンクリートは置換しないコンクリートと比較して、圧縮強度は大きくなり、かつ、収縮低減効果が高い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、拘束応力、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おり、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た。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ことが知られており、コンクリートが鉄筋や外部の拘束などを受けた場合にひび割れの可能性が高い。拘束応力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)¹⁾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²⁾や収縮低減剤による表面張力の低下を制御する方法²⁾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。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

拘束応力試験を実施し、収縮低減効果があるが、膨張材による効果の温度依存性が確認され、コンクリート温度履歴により後膨張する場合がある知見⁴⁾を得た。

瓦粗骨材は吸水率が高く、かつ、破碎値⁵⁾は、市販の軽量骨材⁶⁾と比較して小さい。廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの特性に関しては、圧縮強度 100MPa 以下であり、圧縮強度 100MPa を超える UHSC での適用についての検討はほとんど行われていないのが現状である。

そこで、本研究では、廃瓦を粗骨材の一部に使用した超高強度コンクリートの圧縮強度発現、収縮ひずみおよび拘束応力を無置換のコンクリート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

*1 (株)ピーエス三菱 技術本部技術研究所材工研グループ 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工研グループ 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 3590cm 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 6.51, 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 9.31%, 粗粒率 6.66, 実積率 61.3%, 破碎値 21.38%, 骨材粒径 15-5mm	GT
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

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	GT	RA		
SFLC	0.15	155	1033	-	435	944	-	-	0.023	0.00002
SFLC-G40	0.15	155	1033	-	435	566	294	-	0.023	0.00002
SFLC-G20	0.15	155	1033	-	435	755	147	-	0.023	0.00002
SFLC-E20-R	0.15	149	1013	20	435	944	-	6	0.025	0.00002
SFLC-E25-R	0.15	149	1008	25	435	944	-	6	0.027	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

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 9.7%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 GT)は島根県江津産を使用した。廃瓦粗骨材は、吸水率 9.31%, 破碎値 21.38%の材料特性を有する。

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 SFLC-G40 と SFLC-G20 では、それぞれ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。軽量骨材の場合には、吸水状態が十分でない場合に収縮低減効果が小さくなることが報告¹⁾されていることから、使用した瓦粗骨材は、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。単位水量は、打設 1 日前に前述の試験方法により求めた含水率(SFLC-G40 9.4%, SFLC-G20 11.2%)と吸水率から表面水率を算出し、表面水率の水量を

補正した。配合 SFLC はセメント種類 SFLC 単体の配合、配合名 SFLC-E20-R と SFLC-E25-R は SFLC に膨張材と収縮低減剤を混入した配合とした。単位膨張材量はそれぞれ 20kg/m³ および 25kg/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) 試験条件

配合 SFLC-E20-R と SFLC-E25-R を除いた配合において、無拘束ひずみ試験(以下ひずみ試験と示す)と拘束応力試験を実施した。拘束応力とひずみ試験の養生条件は 2 種類とし、1 つは全面を厚さ 0.05mm のアルミ箔テープで覆った封緘養生とあと 1 つは材齢 28 日まで封緘養生し、材齢 28 日にアルミ箔テープを取り除き気乾養生とした。配合 SFLC-E20-R と SFLC-E25-R は封緘養生したひずみ試験のみを実施した。いずれの供試体も打設後、温度 20℃, 60%R.H.の室内にて静置した。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生じなかったことから、本試験では各条件で 1 体作製した。

(2) 拘束応力・ひずみ試験

拘束応力の作製方法と測定方法は JCI「コンクリートの自己応力試験方法(案)」⁷⁾に準拠した。脱枠は材齢 2 日で実施した。供試体の寸法は収縮ひずみ供試体では $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ とし、拘束応力供試体では $100 \times 100 \times 1400\text{mm}$ とした。拘束供試体の形状を図-1に示す。埋設する鉄筋は D16 とし、その鉄筋比は 1.6% である。

(3) 測定方法

拘束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、拘束応力算出に反映した。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⁷⁾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 力学的特性

図-2に各配合の圧縮強度発現を図-3に材齢 56 日における各配合の圧縮強度と SFLC の圧縮強度との比を示す。粗骨材容積の 40%を廃瓦粗骨材で置換した場合においても圧縮強度の低下が認められず、材齢 56 日で圧縮強度 180MPa となり、また、廃瓦粗骨材を用いたコンクリートは配合 SFLC と比較して強度が大きくなった。一方、膨張材を混入した場合には、配合 SFLC と比較して圧縮強度が低下した。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⁸⁾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。軽量骨材の場合に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⁾されている。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。

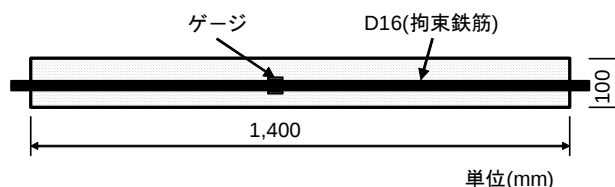


図-1 拘束応力供試体

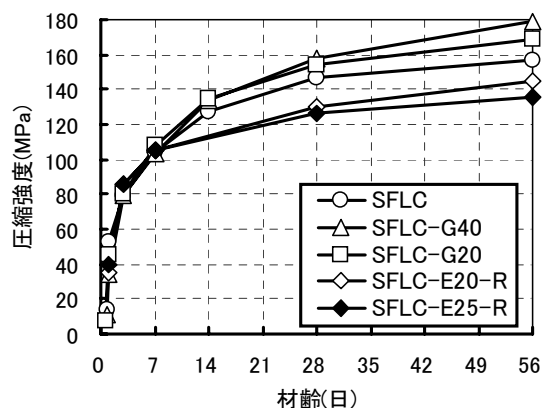


図-2 圧縮強度発現

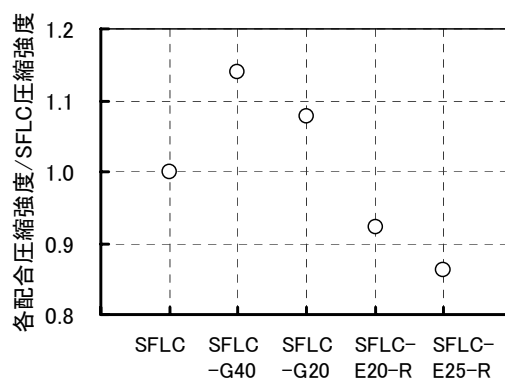


図-3 各配合の圧縮強度比較(材齢 56 日)

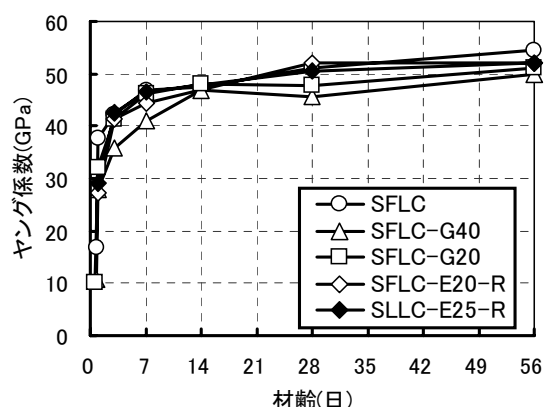


図-4 ヤング係数発現

図-4にヤング係数発現を示す。廃瓦粗骨材を用いたコンクリートのヤング係数は配合

SFLC と比較して低下する傾向が認められた。粗骨材破砕値が小さいほどコンクリートのヤング係数が大きくなる傾向が報告⁹⁾されており、碎石より破砕値の大きな廃瓦粗骨材を混入によりヤング係数が低下したと考えられる。

SFLC, SFLC-G40 および SFLC-G20 の材齢 7 日の割裂引張強度はそれぞれ 4.21, 4.35 および 4.78MPa であり、瓦粗骨材を混入することによる割裂引張強度の低下は認められなかった。

3.2 ひずみ

自己収縮ひずみの開始時点は凝結始発時間であるが、ここではコンクリート内部に発生する応力の基礎データを得ることを目的とした。既報⁴⁾より、拘束応力の発生時間が、ほぼ終結時間であることから時間軸原点を終結時間とした。

図-5 に配合 SFLC, SFLC-E20-R および SFLC-E25-R のひずみの経時変化を示す。膨張材と収縮低減剤を混入した場合に収縮低減効果が認められたが、単位膨張材量を 25kg/m^3 とした場合には後膨張した。

図-6 に SFLC, SFLC-G40 および SFLC-G20 のひずみの経時変化を示す。廃瓦粗骨材を用いた供試体の収縮ひずみは、配合 SFLC の収縮ひずみと比較して小さく、廃瓦粗骨材においてもセルフキュアリングによる収縮低減効果が推察され、材齢約 1 日において、配合 SFLC-G40 では約 200×10^{-6} 、配合 SFLC-G20 では約 120×10^{-6} の膨張ひずみが発生した。膨張材を用いたコンクリートとは異なる傾向を示した。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、メニ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⁾。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、メニ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。初期に膨張ひずみが発生については吸水率の高い軽量骨材を用いた場合

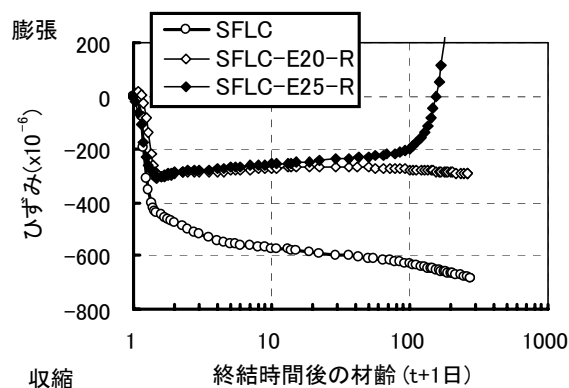


図-5 膨張材使用コンクリート収縮ひずみ

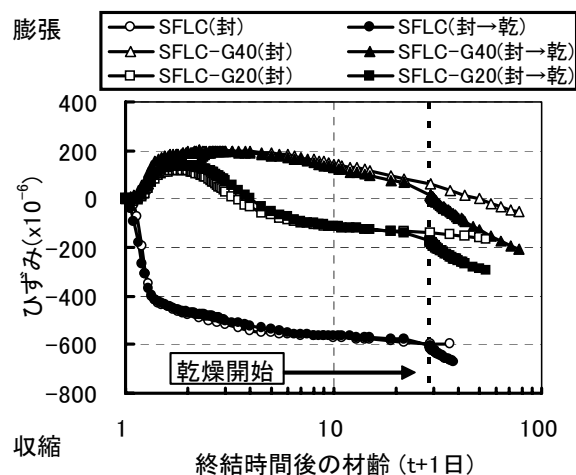


図-6 瓦骨材使用コンクリート収縮ひずみ

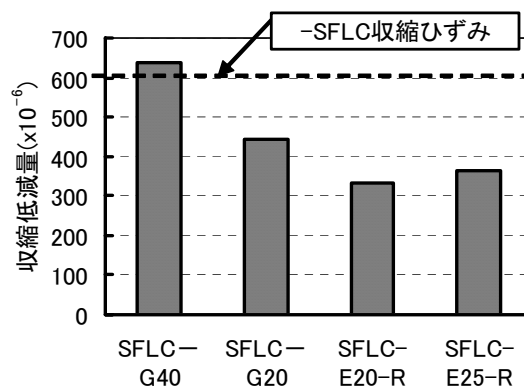


図-7 収縮ひずみ低減量(材齢 28 日)

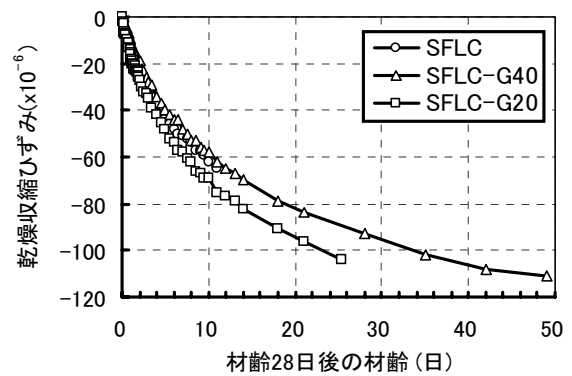
と傾向的に合致する結果³⁾となった。このメカニズムについては、前述の毛細管張力の低減の他に、なんらかの膨張性の水和生成物の発生が考えられるが、今後さらに検討が必要である。封緘養生供試体の配合 SFLC-G40 の材齢 10 日以降のひずみ変化量は配合 SFLC-G20 と比較して大きくなる傾向を示した。また、配合 SFLC-G20 の

収縮ひずみは材齢 1 日まで膨張ひずみが大きくなっているが、材齢 1 日から材齢 9 日までの収縮量が大きい結果を示した。このことは、粗骨材を廃瓦粗骨材で 20%容積置換では自己収縮ひずみを抑制するセルフキュアリングに必要な水量が十分でなかったことが 1 要因と考えられるが、自己収縮ひずみ抑制に必要な水量との関連について、さらに検討する必要があると考える。

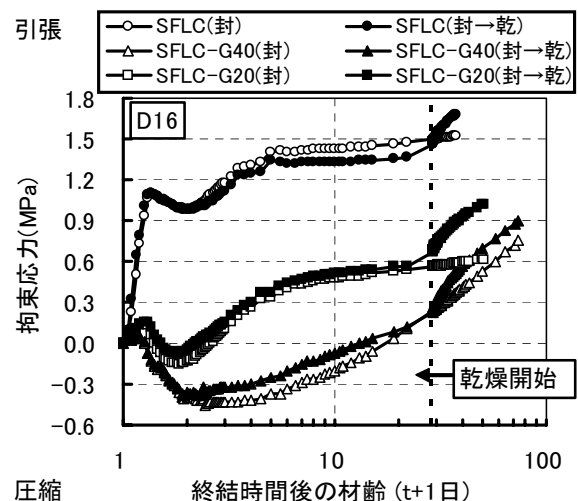
図－7 に材齢 28 日時点における収縮低減量を示す。収縮低減量は各供試体の材齢 28 日における収縮ひずみの平均値から配合 SFLC ひずみを差し引くことにより算出した。容積置換率 20%の配合 SFLC-G20 の収縮低減量は、膨張材を混入したコンクリートより大きくなる結果を示した。

図－8 に配合 SFLC, SFLC-G40 および SFLC-G20 の材齢 28 日からの乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。ここでは、ひずみを自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの和であると仮定し、乾燥収縮ひずみは、材齢 28 日から気乾養生を開始した供試体の材齢 28 日からのひずみ変化量から封緘養生した供試体の材齢 28 日からのひずみ変化量を差し引くことにより算出した。乾燥収縮ひずみの経時変化に伴う配合 SFLC-G20 の発現量は、配合 SFLC と SFLC-G40 と比較して若干大きくなり、配合 SFLC と SFLC-G40 ではほぼ等しくなり、廃瓦粗骨材の容積置換率の増加にともなう乾燥収縮ひずみの発現量が大きくなることは本試験の範囲では認められなかった。

超高強度コンクリートに膨張材を使用した場合に未反応の膨張材が残存し、水中養生供試体では長期にわたって反応することが報告¹⁰⁾されている。配合 SFLC は、材齢 28 日時点で自己収縮ひずみの経時変化量が小さくなっているが、材齢 28 日からの乾燥下において、乾燥収縮ひずみが発生している。このことは、この時点では乾燥ひずみを発生させる水分がマトリックスに内在していることを示唆していると考ええる。配合 SFLC-E25-R においても同様の傾向が考えられ、封緘養生として外部の水分補給がない状態でも未反応の膨張が未反応水と反応を起し、



図－8 乾燥収縮ひずみ



図－9 コンクリート拘束応力 (D16)

後膨張を生じたことが考えられる。この点については、マトリックス中の水分量や未反応膨張材量などの観点からさらに検討が必要である。

3.3 拘束応力

図－9 に配合 SFLC, SFLC-G40 および SFLC-G20 供試体の拘束鉄筋 D16(鉄筋比 1.6%)を用いた場合の拘束応力の経時変化を示す。材齢 28 日における SFLC-G20 供試体の拘束応力は、SFLC 供試体の拘束応力の約 40% ($0.6\text{MPa(D16)}/1.5\text{MPa(SFLC)}=0.4$)となった。図－6 と図－8 から、材齢 28 日から乾燥状態とした配合 SFLC-G20 において、材齢 1 日から材齢 9 日の収縮ひずみ変化量 230×10^{-6} に対する D16 拘束供試体の拘束応力変化が 0.4MPa となり、材齢 28 日から材齢 38 日のひずみ変化量 100×10^{-6} に対する D16 拘束供試体の拘束応力変化が 0.4MPa となり、後者

の方がより小さいひずみ変化量に対して拘束応力が増加する結果を示した。これは、同一の収縮ひずみ変化量でも、ヤング係数が経時変化にともない大きくなり、この結果、拘束応力発現量が大きくなったことが考えられる。

図-10に瓦粗骨材を用いたコンクリートの拘束応力低減量の経時変化を示す。ここで、拘束応力低減量は、配合 SFLC と瓦粗骨材を用いたコンクリートのそれぞれの拘束応力の引いた値である。配合 SFLC-G40 の拘束応力低減量は最大で 1.8MPa 低減できたが、材齢 4 日以降において、減少する傾向が認められた。

4. まとめ

廃瓦を粗骨材の一部に使用した超高強度コンクリートの圧縮強度発現、収縮ひずみおよび拘束応力を無置換のコンクリートと実験的に比較検討を行い、以下のことが明らかになった。

- (1) 粗骨材を廃瓦粗骨材で 40%容積置換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大きくなり、膨張材を混入した場合には圧縮強度の低下が認められた。
- (2) 廃瓦粗骨材を用いたコンクリートのヤング係数は無置換のコンクリートと比較して小さくなる傾向となった。
- (3) 収縮ひずみと拘束応力は、廃瓦粗骨材を用いることにより低減した。
- (4) 瓦粗骨材の容積置換率 40%と 20%の収縮ひずみの材齢 1 日以降の経時変化は異なり、前者は収縮する傾向を示した。
- (5) 粗骨材を廃瓦粗骨材で容積置換する割合を増加にすることにより、材齢 28 日からの乾燥収縮ひずみ発現量が大きくなることは認められなかった。

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

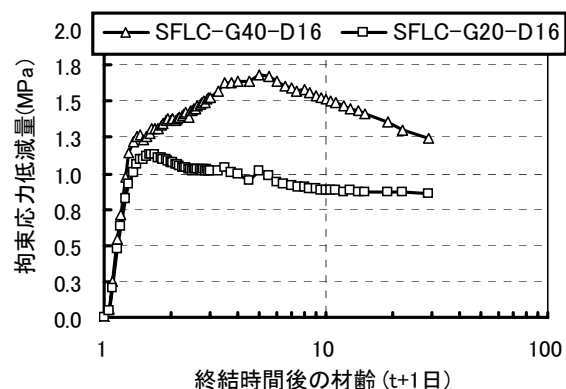


図-10 拘束応力低減量

- 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/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-66，2005，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) 飛田浩孝ほか：瓦廃材のコンクリート用骨材への適用性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006，pp.1577-1582
- 6) 鈴木雅博ほか：PVA 繊維補強軽量コンクリートの耐凍害性，第 14 回プレスト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
- 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) 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
- 9) 鶴田浩章：高強度コンクリートの力学的性質に及ぼす粗骨材品質の影響に関する基礎的研究，九州大学学位論文，2000，pp.55-67
- 10) 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，2003，pp.40-43