

報告 廃瓦細骨材による超高強度繊維補強コンクリートの自己収縮低減効果

周 波^{*1}・平岩 修人^{*2}・小澤 満津雄^{*3}・内田 裕市^{*4}

要旨: 超高強度繊維補強コンクリート (UFC) の自己収縮を低減するために, 2 種類の UFC を対象として細骨材を廃瓦細骨材で置換し, モルタルマトリクスおよび UFC の自己収縮低減効果, フレッシュ性状, ならびに圧縮および曲げ特性への影響を検討した。その結果, UFC の細骨材を廃瓦細骨材で置換することで, 自己収縮ひずみを 30~40%程度に低減できることが示された。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, 自己収縮, 廃瓦細骨材, 内部養生

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength Fiber reinforced Concrete : UFC) は, ポルトランドセメントをベースに, 珪砂や反応性微粉末などから構成された粉体に, 韌性を付与するための専用の鋼繊維, もしくは有機繊維を混入したコンクリートである。UFCは低水結合材比でありながら優れた流動性を有し, 圧縮強度は 200N/mm²程度で通常のコンクリートの約5~10倍, 曲げ強度は30N/mm²程度で通常のコンクリートの約10~15倍の超高強度が得られるのが特徴である。しかしながら, UFCは低水結合比であるため, 養生中 (20°C, 48hrの一次養生と90°C, 48hrの二次養生) の自己収縮ひずみが大きい欠点がある。そのため, UFCに鋼材を配置すると, 鋼材の拘束によりコンクリートに引張応力が発生し, ひび割れが発生する可能性がある。したがって, 現状では UFCはRC構造に使用することが困難であるとされている。しかし, UFCの自己収縮が低減することが出来れば, RC構造に使用することも可能となり, UFC の適用範囲の拡大が期待できる。

これまでに, コンクリートの自己収縮を低減する方法は幾つか提案されており, 収縮低減剤を用いる方法¹⁾, 高吸水性のポリマーや高含水率の軽量骨材あるいは廃瓦粗骨材を用いたいわゆる内部養生による方法²⁾⁻⁵⁾, 膨張材を用いることで収縮を補償する方法⁶⁾などがある。しかし, これらの研究は普通強度や高強度コンクリートを対象としたものが多く, UFCの自己収縮を対象とした研究報告は少ないのが現状である。

そこで本研究では, 内部養生によるUFCの自己収縮の低減を目的として, これまでに高強度コンクリートにおいて実績のある廃瓦骨材の利用の可能性について検討することとした。温品ら⁵⁾は高強度コンクリートの粗骨材として廃瓦を用いることで, 自己収縮が低減できること

を報告しているが, UFCの場合には粗骨材を用いないため, 細骨材を廃瓦細骨材で置換することとした。実験では, まず廃瓦細骨材の自己収縮低減効果の可能性を確認するために, 繊維を混入していないモルタルマトリクスについて常温養生下での自己収縮を計測した。その後, 繊維を混入したUFCについて熱養生下での自己収縮を計測するとともに, 熱養生後の力学特性についても確認した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料を示す。本実験では P-UFC⁷⁾ と S-UFC の 2 種類の UFC を対象とした。P-UFC は筆者らがこれまでに検討してきたもので, ポリビニルアルコール (PVA) 繊維を用いた UFC である。セメントには, シリカフェームセメント (密度: 3.08g/cm³, 比表面積 0.60 m²/g, シリカフェーム置換率 20%) を使用し, 微粉末材料として, 珪石粉末 (密度 2.60g/cm³, 比表面積 0.812m²/g) を使用した。細骨材には, 6号珪砂 (密度 2.60g/cm³) を使用した。混和剤として, 高性能減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系) を使用した。繊維は直径 0.66mm, 長さ 30mm (密度 1.30g/cm³, 引張強度 900MPa) のものと, 直径 0.1mm, 長さ 12mm (密度 1.30g/cm³, 引張強度 1200MPa) を混合して用いた。

S-UFC は市販のプレミックスタイプのものであり, 主に結合材から成るプレミックス材, 細骨材, 鋼繊維および専用減水剤で構成されている。

廃瓦細骨材 (密度 2.33g/cm³, 吸水率 8.40%) は瓦工場から発生する寸法規格外瓦を破砕し, S-UFC で用いられている細骨材と同程度の粒度になるよう, 粒径が 0.3-0.6mm となるようにふるい分けして, 3 日間吸水させたものを使用した。

*1 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 (学生会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 博士(工学) (正会員)

*4 岐阜大学 総合情報メディアセンター 博士(工学) (正会員)

表-1 使用材料

種類	名称	記号	物性
練混ぜ水	上水道水	W	—
セメント	シリカフェュームセメント	C	密度：3.08g/m ³ ；比表面積 0.60m ² /g シリカフェューム置換率 20%
細骨材	珪砂	S	6号珪砂；密度 2.60g/cm ³ 粒度分布：91.7% (0.053-0.3mm)，8.3% (0.3-0.6mm)
	廃瓦細骨材	PCA	密度 2.33 g/cm ³ ；表乾状態吸水率 8.40%；粒度分布：100%(0.3-0.6mm)
微粉末材料	珪石粉末	SPW	密度 2.60g/cm ³ ；比表面積 0.812m ² /g
混和剤	高性能減水剤	Ad1	ポリカルボン酸エーテル系化合物
繊維	ポリビニルアルコール繊維	F1, F2	F1：SF3000×30mm(密度 1.30g/cm ³ ，引張強度 900MPa) F2：RECS100×12mm(密度 1.30g/cm ³ ，引張強度 1200MPa)
	鋼繊維	F3	密度 7.85 g/cm ³ ；引張強度 2700N/mm ² ；直径 0.2mm；長さ 15mm

表-2 P-UFC モルタルの配合

P-UFC モルタル	細骨材置換率	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	S	PCA	SPW	Ad1
M-P000	0%	18.0	175	1166	632	0	229	35.0
M-P060	60%				253	336		
M-P100	100%				0	559		

表-3 P-UFC の配合

P-UFC	細骨材置換率	W/C (%)	単位量(kg/m ³)							
			W	C	S	PCA	SPW	Ad1	F1	F2
P000	0%	18.0	175	1166	632	0	229	35.0	13.0	26.0
P100	100%				0	559				

表-4 S-UFC モルタルの配合

S-UFC モルタル	細骨材置換率	単位量(kg/m ³)				
		W	PRA	PRB	PCA	Ad2
M-S000	0%	158	1322	932	0	22.0
M-S060	60%			373	487	
M-S100	100%			0	812	

表-5 S-UFC の配合

S-UFC	細骨材置換率	単位量(kg/m ³)					
		W	PRA	PRB	PCA	Ad2	F3
S000	0%	158	1322	932	0	22.0	157
S100	100%			0	812		

PRA：プレミックス材；PRB：細骨材，粒度：85%(0.3-0.6mm)；Ad2：減水剤

表-2, 3, 4, 5 に両 UFC ならびにモルタルの配合を示す。本実験では，細骨材の体積置換率のみ変化させることとし，置換率を 0%，60%および 100%の 3 種類とした。ただし，置換率 60%については，繊維を混入してい

ないモルタルでのみ試験を行った。

2.2 練り混ぜおよび養生方法

練混ぜは，モルタルについては容量 10L のホバートミキサーを用いた。UFC については容量 120L の 2 軸強制練

りミキサを使用した。なお、廃瓦細骨材については、材料準備を省力化するために、炉乾燥を行った後に計量した材料に吸水量と練混ぜ水量に相当する水を加え、3日吸水させたものをミキサに投入することとした。

供試体の養生は、繊維を混入していないモルタルについては自己収縮の計測の都合上、蒸気養生ができないため、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温室のみで行い、打込み後7日間自己収縮ひずみを計測した。ただし、モルタルの圧縮供試体については、常温養生 (20°C , 48hr) 後、 90°C の温水養生を48時間行った。

UFCについては一次養生として $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温室で48時間行い、その後二次養生として 90°C で48時間の蒸気養生を行った。UFCの自己収縮ひずみは打込み後から蒸気養生終了後、常温に戻るまで計測をした。

2.3 モルタルの自己収縮ひずみの計測

図-1にモルタルの自己収縮ひずみ計測装置を示す。ここでは、供試体の長さ変化を計測する方法を用いた。この方法は使用材料が少なく、ゲージの消耗がないため、簡易かつ安価で多数の実験が出来るためである。装置はスーパーインバー鋼製の測定台とダイヤルゲージ(分解能: $3/1000\text{mm}$)および伸縮性を有するコルゲートチューブ($\phi 20\times 415\text{mm}$)から構成されている。モルタルを練混ぜ後、コルゲートチューブにテーブルバイブレータで加振しながらモルタルを注入して供試体を作製した。供試体数は1条件につき3体とした。本実験では、自己収縮ひずみの計測開始点⁸⁾を凝結始発にほぼ対応する供試体内部温度上昇開始点とした。

2.4 UFCの自己収縮ひずみの計測

UFCの自己収縮ひずみの計測は、繊維長とコルゲートチューブの寸法の関係から、モルタルの自己収縮計測装置は利用できないため、図-2に示すように、埋設ゲージを用いた。供試体は $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱とし、供試体中央に埋込み型ひずみ計(標点距離: 100mm , 許容温度範囲: $-20\sim 180^{\circ}\text{C}$, 容量: $\pm 5000\mu$)を設置して計測した。供試体数は1条件につき2体とした。

2.5 モルタルおよびUFCのフレッシュ性状および力学特性試験

モルタルについては、練混ぜ直後のフロー試験(0打)と硬化後の圧縮強度試験(供試体寸法: $\phi 50\times 100\text{mm}$)を行い、細骨材置換率がモルタルのフレッシュ性状と圧縮強度に及ぼす影響について検討した。

UFCについては、モルタルの場合と同様、練混ぜ直後のフロー試験と硬化後の圧縮強度試験(供試体寸法: $\phi 100\times 200\text{mm}$)を行うとともに、曲げ試験(供試体寸法: $100\times 100\times 400\text{mm}$)を行った。なお、曲げ試験は図-3に示すような切欠きはりの3点曲げ試験であり、荷重-開口変位曲線を計測した。試験は「切欠きはりを用いた

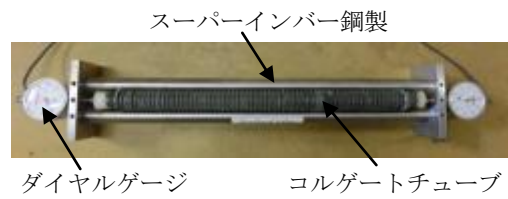


図-1 モルタルの自己収縮ひずみの計測



図-2 UFCの自己収縮ひずみの計測

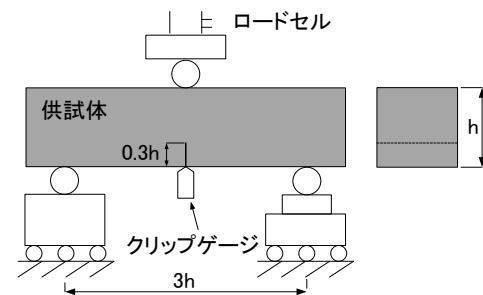
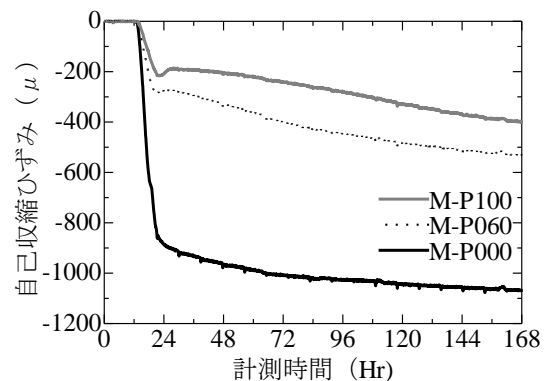
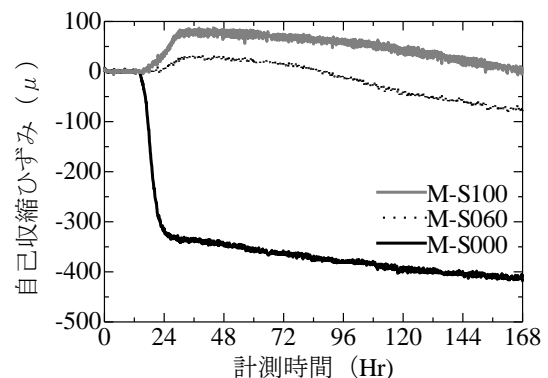


図-3 切欠きはりの3点曲げ試験



(a) P-UFC モルタル



(b) S-UFC モルタル

図-4 モルタルの自己収縮ひずみ

繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」⁹⁾ (JCI-S-002-2003) に準じて行った。

モルタルおよびUFCの力学特性の供試体数は1条件につき4体とした。

3. 実験結果

3.1 モルタルの実験結果

(1) モルタルの自己収縮ひずみ

図-4 にモルタルの自己収縮ひずみの経時変化を示す。いずれの配合にも、廃瓦細骨材で置換することで、自己収縮ひずみが著しく低減されることが確認された。

図-4(a)は P-UFC モルタルの自己収縮ひずみであり、P-UFCは収縮低減剤や膨張材などの使用による収縮低減対策をまったく行っていないため、置換率が 0%の場合には材齢 7 日で 1000 μ 程度の収縮が生じている。これに対して廃瓦を用いることで材齢 7 日の収縮ひずみは 400 μ (置換率 100%) ~500 μ (置換率 60%) 程度に低減された。

一方、図-4(b)に示す S-UFC モルタルの場合には、置換率 0%の場合でも材齢 7 日での自己収縮ひずみは 400 μ 程度であり、廃瓦を用いると材齢初期には膨張ひずみが生じ、材齢 7 日の自己収縮ひずみは 0 μ (置換率 100%) ~80 μ (置換率 60%) と非常に小さい値になった。なお、材齢初期に発生した膨張ひずみの原因については不明である。

図-5 には供試体材齢 1 週間の時点における細骨材置換率と置換率 0%の場合の収縮ひずみに対するひずみの比率 (以下、低減率とよぶ) の関係を示す。いずれのモルタルにおいても細骨材置換率が 60%から 100%に増加することで、自己収縮ひずみの低減率も小さくなったが、置換率 60%と 100%では低減率の差はそれほど小さくなく、P-UFC モルタルの場合には 0.4~0.50、S-UFC モルタルの場合には 0~0.2 となった。

(2) モルタルのフレッシュ性状および圧縮強度

図-6と図-7に両モルタルの細骨材置換率と0打フロー値および圧縮強度の関係を示す。フロー値に関しては、P-UFC モルタルの場合には置換率の増加とともにフロー値が増大する傾向がみられたが、S-UFC モルタルではフロー値に変化はほとんどみられなかった。P-UFC モルタルのフロー値が置換率の増加に伴い増大したのは、6号珪砂に比べ、廃瓦細骨材の粒径が大きいためと考えられる。

モルタルの圧縮強度に関しては、細骨材置換率の増加にともない P-UFC モルタルでは圧縮強度が増加したのに対して、S-UFC モルタルの場合には強度が若干低下した。しかし、S-UFC モルタルにおける圧縮強度の低下は 6%程度であり瓦細骨材の影響はほとんどないと考えら

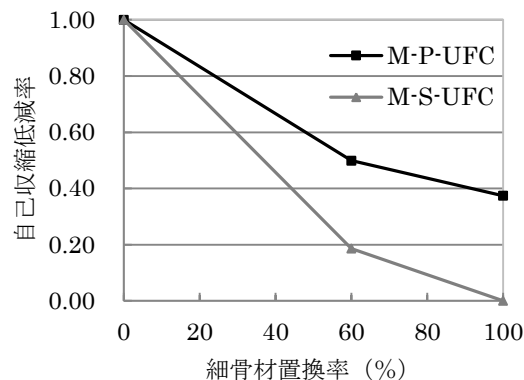


図-5 モルタルの自己収縮低減率

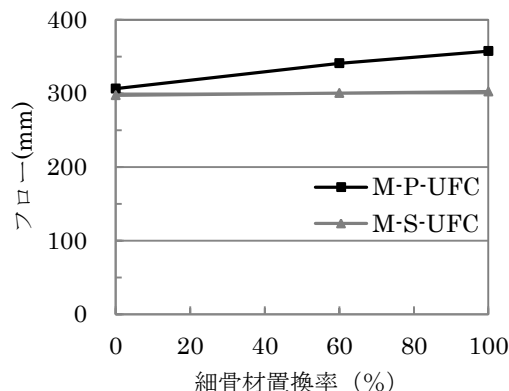


図-6 モルタルのフロー値

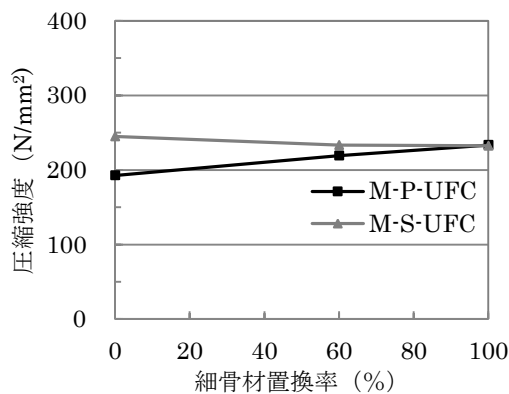


図-7 モルタルの圧縮強度

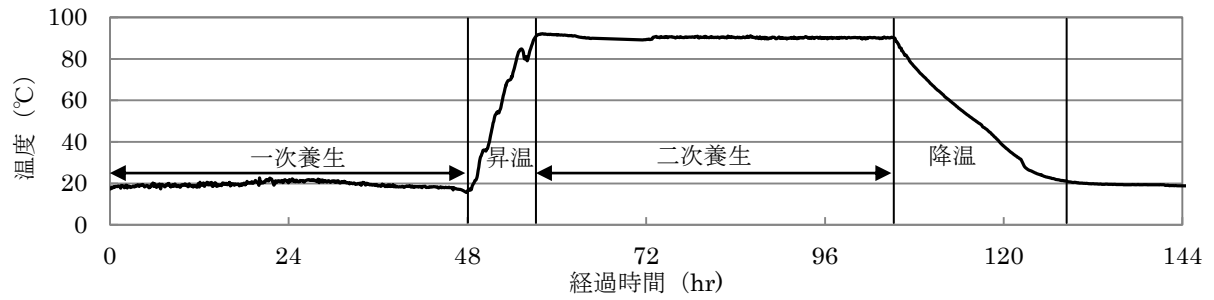
れる。

3.2 UFC の実験結果

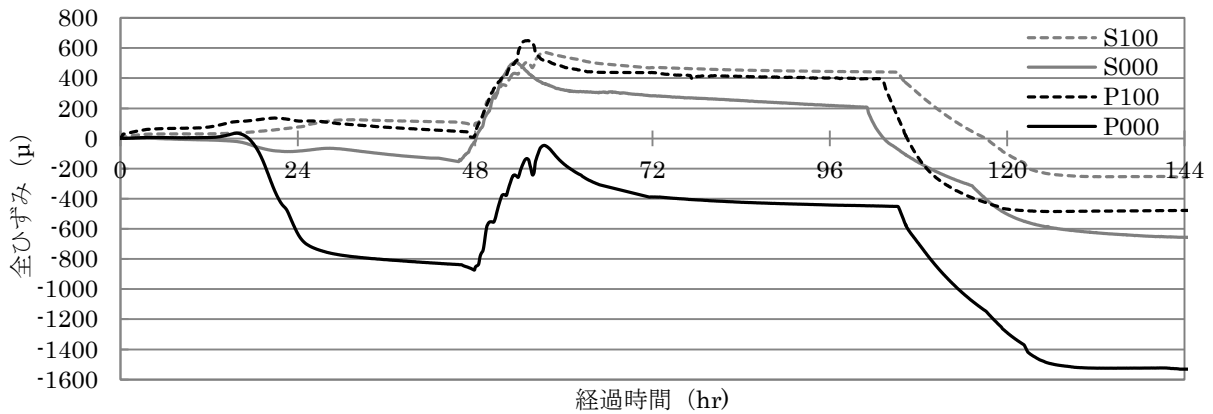
(1) UFC の自己収縮ひずみ

図-8に両UFCの養生履歴と打込み直後から二次養生終了後室温に戻るまでの全ひずみ (温度ひずみを含んだ値) の経時変化を示す。図-9には一次養生と二次養生のそれぞれの期間における自己収縮ひずみを示す。

P-UFCにおいては、細骨材を置換していない場合、一次養生と二次養生中の自己収縮ひずみはそれぞれに850 μ と650 μ となり、二次養生終了後には合計1500 μ の収縮が生じた。これに対して、細骨材を廃瓦細骨材で100%置



(a) 温度履歴



(b) 全ひずみ

図-8 UFCの温度履歴と全ひずみの経時変化

換した場合には、一次養生中にはほとんど収縮は生じず、二次養生によって最終的に480 μ の収縮となった。したがって、最終的な収縮の低減率は0.3程度となった。

S-UFCにおいては、一次養生と二次養生期間中の収縮ひずみは、細骨材を置換しない場合にはそれぞれ130 μ と490 μ であり、最終的に620 μ の収縮が生じた。これに対して、廃瓦細骨材で100%置換した場合には、一次養生においては90 μ の膨張ひずみとなり、二次養生においては350 μ の収縮を生じ、最終的には260 μ の収縮ひずみが生じた。したがって、S-UFCにおける最終的な低減率は0.4程度となった。

以上の結果より、廃瓦細骨材はUFCの自己収縮ひずみの低減に対して有効であることが示された。

(2) UFCのフレッシュ性状

図-10に各UFCにおける繊維混入前後のフロー値を示す。P-UFCにおいては、廃瓦細骨材で置換しても、繊維混入前のフロー値は大きな差は見られなかったが、繊維混入後は、廃瓦細骨材で置換するとフロー値が大幅に低下する結果となった。

一方、S-UFCの場合には繊維の混入によってフロー値は低下するが、廃瓦細骨材によるフロー値への影響はほとんどみられなかった。これは、P-UFCの場合には6号珪砂と廃瓦細骨材では表-1に示した通り粒度が大きく異なるため、繊維を混入する前のモルタルのフロー値が

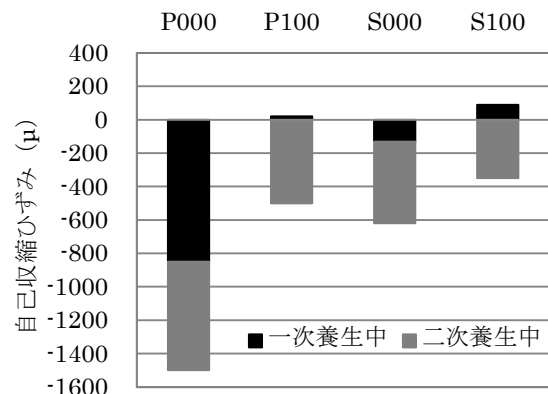


図-9 各養生期間中の自己収縮ひずみ

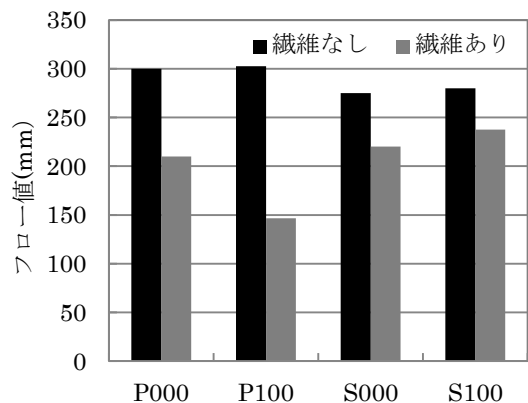


図-10 UFCのフロー値

同じであっても、粘性が異なることによって繊維混入後のフロー値が変化したものと考えられる。

(3) UFC の力学特性

図-11 に各 UFC の圧縮強度を示す。P-UFC については、廃瓦細骨材で置換しても圧縮強度は 150N/mm^2 程度で変化は見られなかった。一方、圧縮強度が 200N/mm^2 程度の S-UFC では廃瓦細骨材で置換すると、置換しない場合に比べて圧縮強度が 10%程度低下する結果となった。これは骨材強度とマトリクスの強度の大小関係にするもので、マトリクスの強度が高い S-UFC では骨材の影響が大きく現れたものと考えられる。

図-12 には各 UFC の曲げ試験時の荷重-切欠き開口変位曲線を示す。S-UFC において、廃瓦細骨材で置換することにより荷重が若干高くなったが、その差は小さく廃瓦細骨材を用いることによる UFC の曲げ特性に対する影響はほとんどないと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) UFC の細骨材を廃瓦細骨材で置換することで、自己収縮ひずみを 30~40%程度に低減できる可能性のあることが示された。
- (2) 廃瓦細骨材を用いることで、圧縮強度 150Mpa 程度の P-UFC の場合には、圧縮強度は低下しなかった。一方、圧縮強度 200Mpa 程度の S-UFC の圧縮強度は低下するが、その低下の割合は 10%程度である。
- (3) 廃瓦細骨材は UFC の曲げ特性にはほとんど影響しない。

謝辞

本研究にあたり実験材料を提供していただいた宇部三菱セメント(株)、BASF ポゾリス(株)、太平洋セメント(株)、クラレ(株)の各社に謝意を表します。

参考文献

- 1) 森香奈子, 川口哲生, 河野克哉, 田中敏嗣: 収縮低減剤を使用した超高強度繊維補強コンクリートの収縮特性と破壊力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011
- 2) O. M. Jensen and P. F. Hansen: A Dilatometer for Measuring Autogenous Deformation in Hardening Portland Cement Paste, Materials and Structures, Vol.28, No.7, pp.406-409, 1995
- 3) 日紫喜剛啓, 高田和法, 大野俊夫, 一宮利通, 盛田行彦: 自己収縮を低減した 150N/mm^2 級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

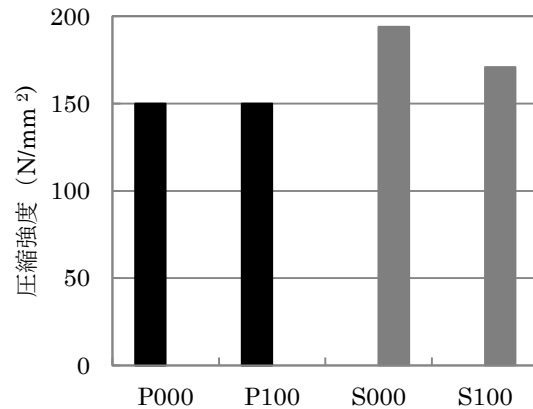


図-11 UFCの圧縮強度

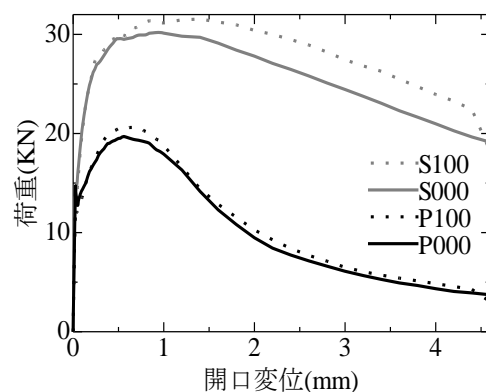


図-12 UFCの曲げ強度

- 4) D. Cusson, T. Hoogeveen: Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking, Cement and Concrete Research 38, pp.757-765, 2008
- 5) 温品達也, 清木祥平, 中川信矢, 佐藤良一: 廃瓦の内部養生によるフライアッシュ混入コンクリートの性能向上に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.241-246, 2009
- 6) 谷村充, 兵頭彦次, 佐藤良一: 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.
- 7) 周波, Ha Duy Nhi, 内田裕市, 稲熊唯史: PVA 繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートの特性, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, V-193, pp.385-386, 2012
- 8) 小澤満津雄, 大橋一樹, 山本基田, 森本博昭: 天然繊維を用いた内部養生によるセメントペーストの自己収縮低減効果, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.276-281, 2011
- 9) JCI 規準: 切欠きはりをを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法 JCI-S-002-2003