

論文 混和材料と合成繊維を併用した高強度軽量骨材コンクリートの破壊力学特性

河野 克哉^{*1}・大滝 晶生^{*2}・二羽 淳一郎^{*3}

要旨：微粉材料ならびに高性能減水剤を用いて水結合材比を低減し、独立空隙を有する低吸水性の高品質軽量骨材を使用することで、軽量かつ高強度なコンクリートを製造できる。しかし、高強度化にともなう脆性的な破壊挙動や自己収縮の増大などの問題が生じる。このため、膨張材、収縮低減剤などの混和材料と合成繊維を併用し、高強度軽量骨材コンクリートの破壊力学特性に与える改善効果を検討した。この結果、各混和材料と合成繊維を併用した場合には自己収縮の低減効果が大きくなること、また、繊維を混入した配合において自己収縮の低減が破壊エネルギーの向上に寄与できることを確認した。

キーワード：高品質軽量骨材，合成繊維，膨張材，収縮低減剤，破壊エネルギー，自己収縮

1. はじめに

高品質軽量骨材は、従来の膨張頁岩を原料とする非造粒型軽量骨材にくらべて吸水率が低く、コンクリートの施工性や耐久性を改善できる¹⁾。この種の軽量骨材では内部に微細な独立空隙が形成されており、骨材自体の強度も向上している。このため、微粉材料や高性能減水剤などと組み合わせて低水結合材比で使用した場合でも強度低下が生じにくく、軽量かつ高強度なコンクリートを得ることができる。しかし、高品質軽量骨材を用いた高強度コンクリートでは、脆性破壊の発生や自己収縮の増大などの問題がある。これらの問題に対して、これまで筆者らは合成繊維の混入が有効であることを確認している²⁾。

このような背景のもと、本研究では合成繊維で補強した高強度軽量骨材コンクリートに着目し、その破壊力学特性を効果的に改善することを目的とした。具体的には、混和材料に膨張材ならびに収縮低減剤を用いて自己体積変化を制御することで繊維の架橋効果を向上させることを検討し、混和材料と合成繊維の併用が破壊力学特性に与える影響を考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した材料を表-1に示す。早強セメントとともにシリカフュームならびに高性能 AE 減水剤を使用し、粗骨材には骨材強度に優れた独立空隙型の中国製高品質軽量骨材(以下、NL)を用いた。また、低水結合材比コンクリートに生じる自己収縮の低減に有効となる混和材料として石灰系の早強型膨張材(以下、EX)ならびに有機系の収縮低減剤(以下、TG)の2種類を使用した。なお、短繊維は軽量性を考慮して合成繊維とし、混入によるスランプの低下が比較的小さくなる波型のポリプロピレン繊維(以下、PP)を使用した。

2.2 配合

配合条件を表-2に示す。すべての配合において単位水量 165kg/m^3 、水結合材比 22%で一定とした。シリカフュームは全結合材量に対して内割で 10%置換した。混和材料は表に示すように膨張材量を $0\sim 40\text{kg/m}^3$ の3水準、収縮低減剤添加量を $0\sim 6\text{kg/m}^3$ の2水準に、また、繊維は混入率を $0\sim 2\%$ の3水準に変化させた。膨張材はセメント量の一部に、収縮低減剤は水量の一部に

*1 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 助手 修(工) (正会員)

*2 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*3 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

材料	種類	記号	物性または成分
結合材 (B)	早強セメント	C	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4490cm ² /g
	シリカフェウム	SF	密度 2.22g/cm ³ , 比表面積 200000cm ² /g
	早強型膨張材	EX	石灰系, 密度 3.19g/cm ³ , 比表面積 4550cm ² /g
細骨材	小槽産陸砂	S	表乾密度 2.60kg/ℓ, 吸水率 1.53%, 粗粒率 2.63
粗骨材 (G)	高品質軽量骨材	NL	絶乾密度 1.17kg/ℓ, 24 時間吸水率* ¹ 1.77%, 煮沸吸水率* ² 4.40%, 最大寸法 15mm, 粗粒率 6.48 黄河流域堆積粘土(黄土), 造粒型, 中国製
短繊維	ポリプロピレン	PP	波型, 繊維長 30mm, アス ^ペ 外比 54.2, 密度 0.91kg/ℓ, 引張強度 465N/mm ² , 弾性係数 15kN/mm ²
混和剤	収縮低減剤	TG	低級アルコールアルキレンオキシド付加物, 密度 1.00g/cm ³
	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物, 密度 1.07g/cm ³

*¹ 骨材を 24 時間静水に浸漬して表乾状態にしたときの含水率, *² 骨材を 2 時間煮沸して表乾状態にしたときの含水率

表-2 コンクリート配合

W/B (%)	s/a (%)	配合条件									フレッシュ性状			強度性状* ⁴	
		W (kg/m ³)	TG (kg/m ³)	C (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	EX (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (ℓ/m ³)	SP (B×%)	PP* ³ (vol.%)	Slump (cm)	Air (%)	単位容 積質量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
22	45.6	165	0	675	75	0	653	300	1.10	0.0	23.5	2.4	1938	67.5	27.0
				1.20		1.0	23.5		3.8	1918	67.2	27.0			
				1.25		2.0	18.5		3.9	1915	66.2	26.4			
				1.20		0.0	19.0		3.0	1922	70.1	27.3			
				1.20		1.0	22.5		3.5	1932	68.9	26.4			
				1.25		2.0	18.5		3.5	1926	70.2	27.1			
				1.20		0.0	23.5		4.2	1912	72.4	27.5			
				1.20		1.0	22.5		3.7	1922	68.5	26.6			
				1.25		2.0	18.5		3.8	1916	67.7	26.3			
				1.20		1.0	19.0		3.2	1930	62.6	27.2			
		159	6	675		0	653								

*³ コンクリート体積に対する短繊維の外割体積比率, *⁴ 材齢 14 日(封緘養生 20°C)

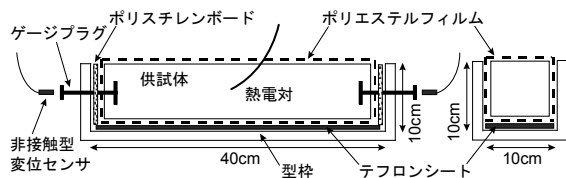


図-1 自己体積変化の測定(材齢 24 時間以前)

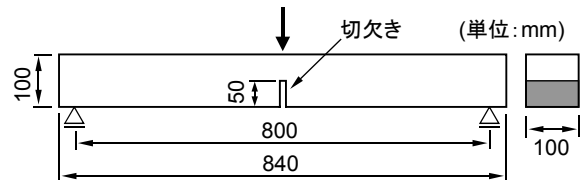


図-2 切欠きはり 3 点曲げ試験

それぞれ内割で置換した。スランプならびに空気量は, それぞれ $21 \pm 2.5\text{cm}$, $3.5 \pm 1.5\%$ となるように高性能 AE 減水剤の添加量で調整した。なお, これらの配合は表-2に示すように単位容積質量 1.9t/m^3 程度で圧縮強度 70N/mm^2 程度を有する軽量かつ高強度なコンクリートとなった。

2.3 練混ぜならびに養生

あらかじめ 2 軸強制練りミキサにて 3 分間練り混ぜてモルタルを製造し, 短繊維を投入しながら, さらに 1 分間の練混ぜを行った。その後, 軽量粗骨材を投入して 1 分間練り混ぜることでコンクリートを製造した(計 5 分間)。

圧縮強度および引張強度の測定には円柱供試体を, 破壊力学特性値の測定には切欠きはり供試体を用い, いずれの場合も材齢 1 日で脱型後, ポリ塩化ビニリデンフィルムで密封することで封緘養生(20°C)し, 材齢 14 日で各試験に供した。

2.4 自己体積変化の測定

(1) 材齢 24 時間以前の測定

JCI 規準案 JCI-SAS2-2 に準じ, 図-1に示すように供試体の自由な変形の拘束, および水分の逸散を防止した型枠(10×10×40cm)内で始発に達した時点から両端部に設置したゲージプラグの移動量を非接触型変位計にて測長した。なお,

ひずみの算出では、熱電対にて水和熱を実測し、コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して長さの補正を行った。

(2) 材齢 24 時間以降の測定

図-1 の供試体を脱型後、アルミ粘着テープで全面シールし、側面にコンタクトチップを貼り付け、ホイットモアひずみ計にて測長した。

2.5 破壊力学特性の測定

(1) 破壊エネルギーの算出

破壊エネルギー G_F は、図-2 に示すように RILEM が推奨する切欠きはりの 3 点曲げ試験を行い、以下の式を用いて算出した。

$$G_F = (W_0 + mg \cdot \delta_0) / A_{lig} \quad (\text{N/m}) \quad (1)$$

ここで、 W_0 : 荷重-変位曲線下の面積 ($\text{N} \cdot \text{m}$)、 m : 載荷スパンとはり長さの比を乗じて求めた支点間はり質量 (kg)、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 δ_0 : はり破断時変位 (m)、 A_{lig} : はり破断部分面積 (m^2)

なお、短繊維を混入した供試体は最終的に破壊しないため、ひび割れ発生後の最大荷重(第 2 ピーク)とその下降域の挙動が十分に確認できる時点(はり中央変位 20mm)で試験を打ち切り、その時点で破壊したものと仮定して計算した。

(2) 引張軟化曲線の推定

引張軟化曲線は、図-2 の試験で得られた荷重-変位曲線から、はり供試体中央に仮想ひび割れモデルを組み込んだ FEM を用いて、多直線近似法³⁾にて推定した。

3. 実験結果および考察

3.1 自己体積変化

(1) 膨張材ならびに短繊維の影響

図-3、図-4 および図-5 は、膨張材量がそれぞれ 0 kg/m^3 、 20 kg/m^3 および 40 kg/m^3 の NL コンクリートにおいて繊維混入率を変化させた場合の自己収縮を示したものである。なお、ここに示したデータは 3 個の供試体の平均値であり、供試体間のバラツキはほとんどなかった。図-3 に示す膨張材量 0 kg/m^3 の場合、PP 繊維の混入率が自己収縮に与える影響はほとんど確認できず、材齢の経過にともなう自己収縮の発生挙動

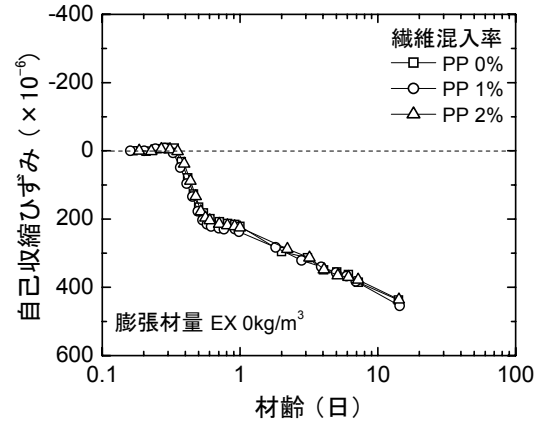


図-3 膨張材量 0 kg/m^3 とした供試体の自己収縮

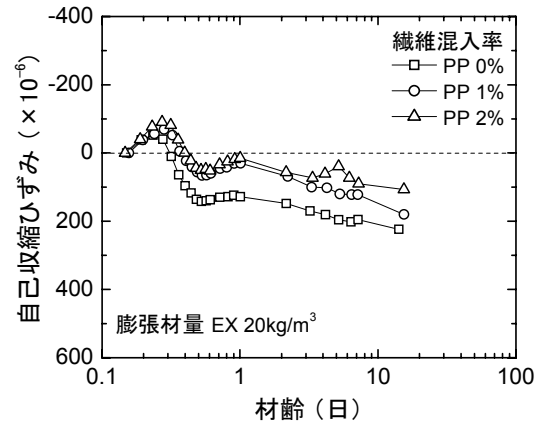


図-4 膨張材量 20 kg/m^3 とした供試体の自己収縮

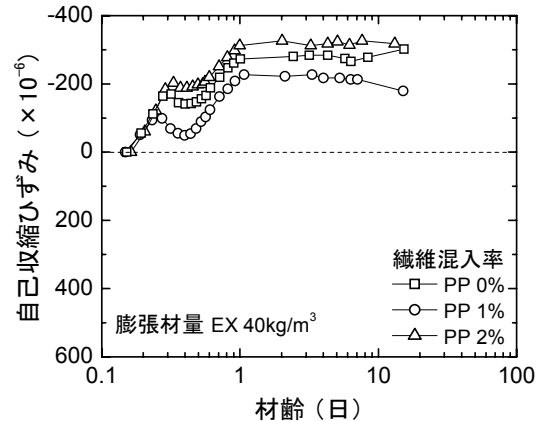


図-5 膨張材量 40 kg/m^3 とした供試体の自己収縮

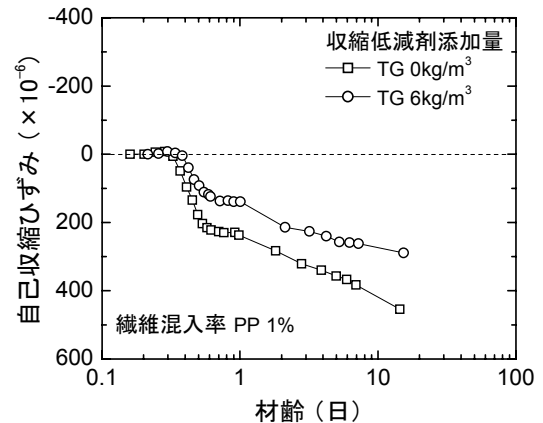


図-6 収縮低減剤を添加した供試体の自己収縮

はほとんど一致している。いずれの場合もごく初期の材齢から収縮が起り、材齢14日では 450×10^{-6} 程度の大きな収縮ひずみを生じた。この配合では、水結合材比を著しく低下させたために母材マトリックスに大きな収縮力が発生し、比較的軟質なPP繊維の混入では収縮に対して十分に抵抗できなかったものと考えられる。一方、**図-4**に示す膨張材量 20 kg/m^3 の場合には、PP繊維の混入率によって自己収縮の発生に違いが生じており、繊維混入率が増加するほど自己収縮が低減した。膨張材量 20 kg/m^3 を用いた供試体の材齢14日における自己収縮は、膨張材を無添加とした供試体にくらべて、繊維混入率が0%、1%および2%の場合でそれぞれ 220×10^{-6} 、 270×10^{-6} および 320×10^{-6} 程度低減した。このことは、膨張材のみ単独で使用するよりも膨張材と合成繊維を併用した方が収縮低減効果が大きいことを示すものである。膨張材の添加によって母材マトリックスに生じる収縮力が低減し、軟質のPP繊維であっても収縮変形の拘束に寄与できたものと思われる。また、**図-5**に示す膨張材量を 40 kg/m^3 まで増加させた配合では、いずれの繊維混入率においても自己膨張が生じた。ただし、繊維混入率1%の配合では、繊維無混入の配合よりも膨張量が抑制されており、母材マトリックスには膨張拘束によるプレストレスが発生した可能性もある。本実験で用いた早強型の膨張材は、近年、新しく開発されたもので、石灰含有量が多く、比表面積も大きいために反応速度が早いという性質をもっている⁴⁾。したがって、材齢1日以前の母材マトリックス自体の剛性がまだ低い段階から膨張反応を示し、この初期段階では比較的軟質な合成繊維であっても膨張に対する微視的な拘束効果を発現できたものと考えられる。しかし、繊維混入率2%の場合には、繊維無混入の場合よりも逆に膨張量が多くなっており、軟質の合成繊維が多くなったことで母材マトリックスの全体的な剛性が低下し、膨張力に対して十分抵抗できなくなったのではないかと思われる。

(2) 収縮低減剤の影響

図-6は、繊維混入率1%のNLコンクリートに収縮低減剤を 6 kg/m^3 添加した場合の自己収縮を示したものである。膨張材を使用した場合と同様に収縮低減剤を添加することでもコンクリートの自己収縮が低減された。これは、母材マトリックスの毛細管空隙中の液相において自己乾燥によるメニスカスが生じていても、収縮低減剤が液相自体の表面張力を低下させているために自己収縮量が小さくなったものである。

3.2 破壊力学特性

(1) 荷重-変位曲線に与える影響

図-7ならびに**図-8**は、それぞれPP繊維混入率1%ならびに2%の場合に混和材料の添加量を変化させた切欠きはりの荷重-変位曲線を示したものである。荷重-変位曲線には2つのピーク、すなわち、母材マトリックスに初期ひび割れを生じて荷重が急減する点(第1ピーク)、ならびに初期ひび割れ発生後にひずみ硬化をとめないながら荷重が漸増した後にひずみ軟化に転じる点(第2ピーク)が存在した。**図-7**に示す繊維混入率1%の場合、第1ピークの荷重は、膨張材量を 20 kg/m^3 まで増加させてもほとんど変化せず、膨張材量 40 kg/m^3 まで増加させることで、はじめて大きくなった。**図-5**に示した自己体積変化の結果と考え合わせると、膨張材を 40 kg/m^3 使用した配合では母材マトリックスにケミカルプレストレスが作用しているものと考えられ、このプレストレスがひび割れ発生に要するエネルギーを増加させ、第1ピーク荷重が大きくなったものと推察できる。また、第2ピークの形状はもともとなだらかな曲線であるが、膨張材量を増加させるほど徐々に明瞭なピークが現われるようになった。**図-7**には、収縮低減剤を添加した場合の荷重-変位曲線も併記したが、膨張材の場合と同様に第2ピーク荷重が増加する現象が確認できる。

図-8に示した繊維混入率2%の供試体では、第2ピーク荷重が膨張材の増加量と対応しておらず、膨張材量 20 kg/m^3 の場合で最大となった。

この供試体では、第 1 ピーク荷重よりもむしろ第 2 ピーク荷重の方が大きくなり、はりのリガメント部にひび割れが発生した以降に最大耐荷力を示している。これに対して膨張材量 40kg/m^3 の場合には、膨張材を無添加とした場合よりも第 1 ピーク荷重ならびに第 2 ピーク荷重がともに小さくなって耐荷性能が大幅に低下した。

(2) 引張軟化曲線に与える影響

図-9ならびに図-10は、それぞれ PP 繊維混入率 1%ならびに 2%の場合に混和材料の添加量を変化させた NL コンクリートの引張軟化曲線を示したものである。図-9に示す繊維混入率 1%の場合、ひび割れ面の結合応力は膨張材量が多いほど増加した。これは自己収縮によって母材マトリクスと PP 繊維の界面に発生する応力、換言すれば、母材マトリクスに生じる微視的自己収縮応力が膨張材量が多いほど低減されるのではないかと考える。つまり、膨張材の添加で PP 繊維と母材マトリクスの付着が改善され、ひび割れ面における PP 繊維の応力伝達効果が向上したものと推察される。また、収縮低減剤を添加した配合では、仮想ひび割れ幅が増加しても、大きな結合応力を保持できることがわかった。このことから、母材マトリクスに生じる自己収縮の低減がひび割れ面における短繊維の架橋効果の向上に寄与することがわかる。

一方、図-10に示す繊維混入率 2%の場合は、膨張材量 20kg/m^3 のときにもっとも結合応力が増大し、逆に膨張材 40kg/m^3 では膨張材が無添加の場合よりもひび割れ面における結合応力が低下している。この現象は、図-5で示したように PP 繊維が混入率 2%になると母材マトリクスの膨張が十分に拘束されず、母材マトリクスと繊維の界面で付着不良が生じ、曲げ試験の際にひび割れ面で母材マトリクスからの PP 繊維の拔出が生じやすくなったことによるものではないかと思われる。

(3) 破壊エネルギーに与える影響

破壊エネルギーは、CEB-FIP Model Code 1990 で圧縮強度の関数として与えられている。ここ

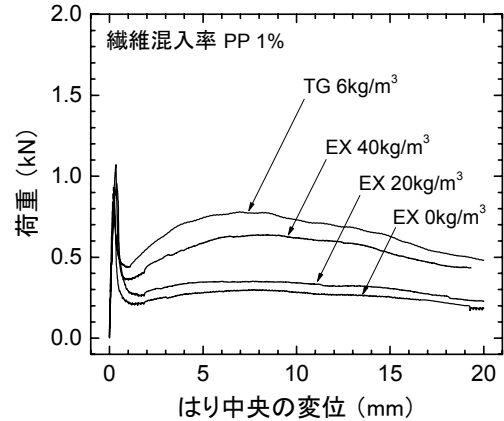


図-7 繊維混入率 1%のはりの荷重-変位曲線

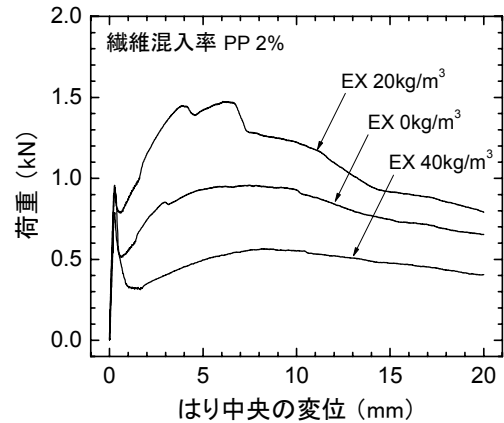


図-8 繊維混入率 2%のはりの荷重-変位曲線

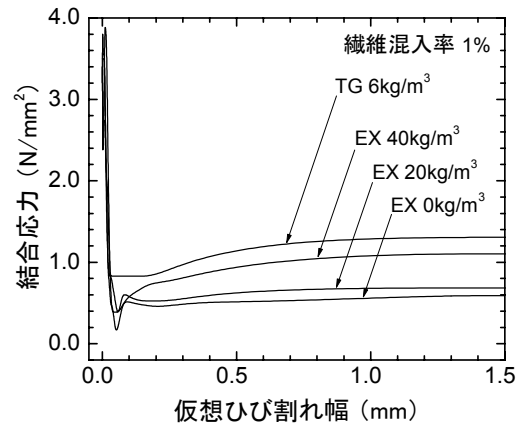


図-9 繊維混入率 1%の場合の引張軟化曲線

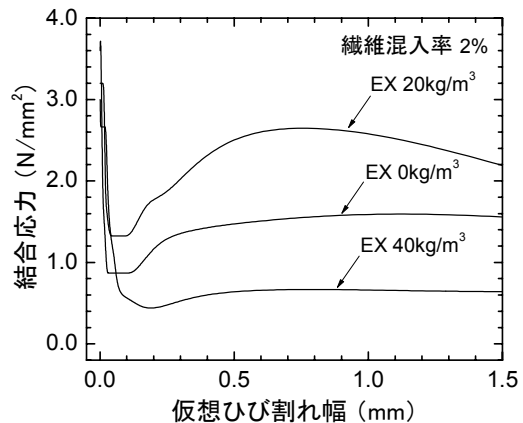


図-10 繊維混入率 2%の場合の引張軟化曲線

では、曲げ試験の結果から算出した破壊エネルギーの値から圧縮強度の影響を次式によって補正し、 G_{F0} として評価した。

$$G_{F0} = G_F / (f'_c / f_{c0})^{0.7} \quad (2)$$

ここで、 G_F ：破壊エネルギー(N/m)、 f'_c ：圧縮強度(N/mm²)、 f_{c0} ：定数(10 N/mm²)

図-11は、PP繊維混入率を変化させたNLコンクリートにおいて、前述の G_{F0} と膨張材量の関係を示したものである。なお、収縮低減剤を添加した場合についても図中に併記した。繊維を無混入とした場合の破壊エネルギーは、膨張材量の増加にともなって、ごくわずかに減少している。しかし、繊維混入率1%の場合には、膨張材量の増加にともなって徐々に破壊エネルギーが増加した。繊維混入率2%の場合では、膨張材量20kg/m³のときに膨張材による破壊エネルギーの向上効果が最大となり、逆にこれ以上、膨張材量が増加した場合には膨張材による改善効果が大幅に低下している。本実験で検討した範囲で破壊エネルギーの改善効果の高い配合条件は、混入率2%のPP繊維と単位量20kg/m³の膨張材の組合せとなった。また、収縮低減剤とPP繊維を組合せた場合は、膨張材とPP繊維を組合せた場合にくらべて同一の繊維混入率における破壊エネルギーの向上効果が大きくなった。これは、収縮低減剤による繊維と母材マトリクスの付着の改善効果が大きいほか、表-2に示すように収縮低減剤の添加で圧縮強度が約7%低下し、この影響が G_{F0} の値に反映されたものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ポリプロピレン繊維混入率1%の場合、膨張材量の増加とともに自己収縮の低減ならびに破壊エネルギーの増大が観察された。
- (2) ポリプロピレン繊維混入率2%の場合、膨張材量20kg/m³では自己収縮が低減し、破壊エネルギーが増大したものの、膨張材量40kg/m³になると自己膨張を生じて、膨張材を使用しない場合よりも破壊エネルギー

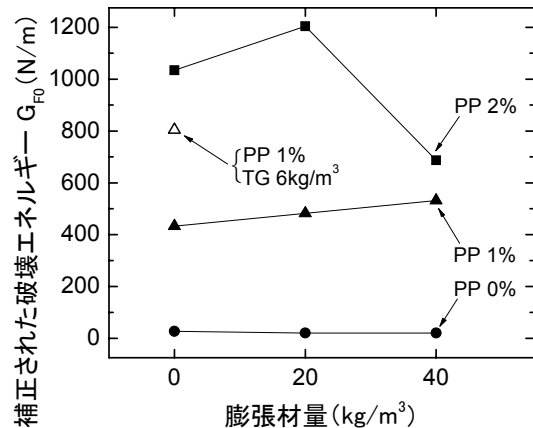


図-11 破壊エネルギーに与える影響

は小さくなった。

- (3) 収縮低減剤とポリプロピレン繊維を併用した場合にも、母材に生じる自己収縮の低減、ならびにコンクリートの破壊力学特性の向上が確認できた。

謝辞

本研究は、平成16年度科学研究費補助金(若手研究(B) 課題番号 16760359)により行ったものである。また、本研究の実施に当たり、伊藤忠商事社、太平洋マテリアル社およびポゾリス物産社からコンクリート材料を提供頂いた。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 岡本享久ほか：高性能軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol.37, No.4, pp.12-18, 1999.4
- 2) 河野克哉ほか：高品質軽量骨材を用いたコンクリートの破壊力学特性ならびに自己収縮特性に及ぼす短繊維の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.1587-1592, 2004.7
- 3) 栗原哲彦ほか：多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状，土木学会論文集，No.532, V-30, pp.119-129, 1996.2
- 4) 佐久間隆司ほか：早強型膨張材の諸特性とコンクリート製品への適用性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.131-136, 2003.7