論文　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に及ぼす短繊維の効果

河野　克哉[*1]・二羽　淳一郎[*2]・大滝　晶生[*3]

要旨：内部に独立空隙を有する低吸水性の高品質軽量骨材を用いることで，軽量コンクリートの高強度化が可能になっている。しかし，高強度化にともなう脆性的破壊挙動および自己収縮の増大が問題となる。このため，合成繊維を混入することで，高品質軽量骨材を用いた低水セメント比コンクリートの破壊力学特性ならびに自己収縮特性の改善を検討した。この結果，破壊力学特性の向上には，繊維自体の力学的性質に優れるビニロン繊維が，一方，自己収縮の低減には，繊維自体の力学的性質よりもむしろ幾何学的性質，すなわち形状による微視的拘束作用を期待できる波型のポリプロピレン繊維が効果的であることがわかった。

キーワード：軽量骨材，短繊維，破壊エネルギー，引張軟化曲線，自己収縮

1. はじめに

近年，従来の膨張頁岩を原料にした軽量骨材よりも吸水率が低く，施工性と耐久性に優れた高品質な軽量骨材が開発されている[1)]。この種の軽量骨材は，鉱物質粉末に少量の添加材を加えた混合原料を造粒・焼成する製法により，内部に微細な独立空隙が形成される。このため，吸水特性のみならず骨材自体の強度も向上し，高性能減水剤や微粉材料などと組み合せて使用した場合でも，水結合材比の低減にともなう強度低下が生じにくく，軽量コンクリートを高強度化できる特長がある。しかし，これまで筆者らは，高品質軽量骨材を用いたコンクリートは圧縮強度に対する引張強度の増加割合が小さく，脆性的な破壊挙動を示すこと[2)]，また，高品質軽量骨材を用いた低水結合材比コンクリートでは，骨材が低吸水率となって高品質化するほど，自己収縮が増大すること[3)]を明らかにしている。

本研究では，このような高品質軽量骨材を用いた低水セメント比コンクリートの破壊力学特性ならびに自己収縮特性に着目し，短繊維の混入による性能の改善効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した材料を**表－1**に示す。結合材には早強セメントを用いた。細骨材には小櫃産陸砂を，粗骨材には新しく開発された中国製の高品質人工軽量骨材(以下，NL)を用いた。なお，この軽量骨材は，黄河流域の堆積粘土を主原料とする低吸水性骨材であり，骨材内部の SEM 観察によって独立空隙組織が形成されていることを確認した上で使用した。また，短繊維は軽量性を考慮して合成繊維とし，ポリプロピレン繊維(以下，PP)，ならびにビニロン繊維(以下，PVA)の 2 種類を使用した。なお，混和剤には高性能 AE 減水剤ならびに AE 剤を用いた。

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ならびに単位セメント量を一定とし，W/C=30%とした。また，短繊維の種類とその混入率，および粗骨材の含水率(吸水状態)を，表のとおりに変化させた。なお，スランプならびに空気量は，それぞれ 18±2.5cm，4.5±1.5%となるように混和剤の添加量にて調整した。

*1 東京工業大学　大学院理工学研究科土木工学専攻　助手　工修　(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　教授　工博　(正会員)
*3 東京工業大学　工学部土木工学科

表－１　使用材料

材 料	種 類	記号	物 性 ま た は 成 分
結合材	早強セメント	C	密度 3.14g/cm^3, 比表面積 4490cm^2/g
細骨材	小櫃産陸砂	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 1.49%*[1], 煮沸吸水率 5.59%*[2], 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 (F)	ポリプロピレン	PP	波型, 繊維長 30mm, ｱｽﾍﾟｸﾄ比 54.2, 密度 0.91kg/ℓ, 引張強度 465N/mm^2, 弾性係数 15kN/mm^2
	ビニロン	PVA	直線型, 繊維長 30mm, ｱｽﾍﾟｸﾄ比 45.5, 密度 1.3kg/ℓ, 引張強度 861N/mm^2, 弾性係数 23kN/mm^2
混和剤	高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系, 密度 1.05g/cm^3
	AE 剤	AE	変性アルキルカルボン酸化合物系, 密度 1.02g/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

配 合 条 件													フレッシュ性状	
W/C (%)	s/a (%)	F 種類	F 混入率*[3] (Vol.%)	G 含水率 (%)	G 吸水状態	G 単位量 (ℓ/m^3)	単位量(kg/m^3) W	C	S	SP	AE	スランプ (cm)	単位容積質量(t/m^3)
30	49.5	―	0.0	1.49	24h 吸水	300	175	583	763	6.7	0.03	20.0	1.84
				5.59	煮沸吸水					6.7		20.0	1.87
		PP	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0	1.49	24h 吸水					7.0～8.2		18.0～19.5	1.85～1.89
			3.0	5.59	煮沸吸水					8.2		20.5	1.85
		PVA	0.5, 1.5, 2.0, 3.0	1.49	24h 吸水					7.6～8.8		17.0～18.5	1.87～1.91

*[3] コンクリート体積に対する短繊維の外割体積比率

2.3 練混ぜ方法および養生

あらかじめ 2 軸強制練りミキサにて 1 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 3 分間の練混ぜ)。

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 14 日まで水中養生(20℃)した後，各試験に供した。

2.4 破壊力学特性の測定

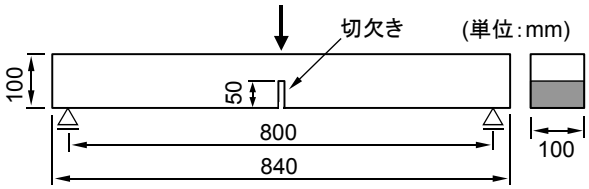
(1) 破壊エネルギーの算出

破壊エネルギーG_F は，**図－１**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。

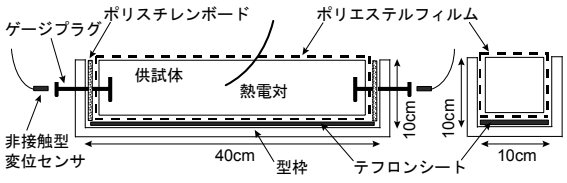
$$G_F=(W_0+mg\cdot\delta_0)/A_{lig} \quad (N/m) \quad (1)$$

ここで，W_0 : 荷重変位曲線下の面積(N･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重量(kg)，g : 重力加速度(m/s^2)，δ_0 : はり破断時変位(m)，A_{lig} : はりの破断部分面積(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，はり中央の変位が 20mm に達した時点で破壊したものと仮定して計算した。



図－１ 切欠きはり 3 点曲げ試験の方法



図－２ 自己収縮の測定方法(材齢 24 時間以前)

(2) 引張軟化曲線の推定

引張軟化曲線は，**図－１**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 を用いた多直線近似法[4]にて推定した。

2.5 自己収縮特性の測定

(1) 材齢 24 時間以前の自己収縮の測定

図－２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 10×10^{-6}/℃と仮定して長さの補正を行った。

(2) 材齢 24 時間以降の自己収縮の測定

図－２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。

3. 実験結果および考察

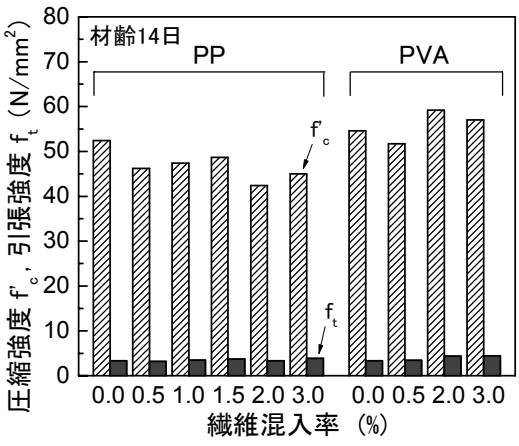
3.1 短繊維が破壊力学特性に与える影響

(1) 圧縮強度ならびに引張強度に与える影響

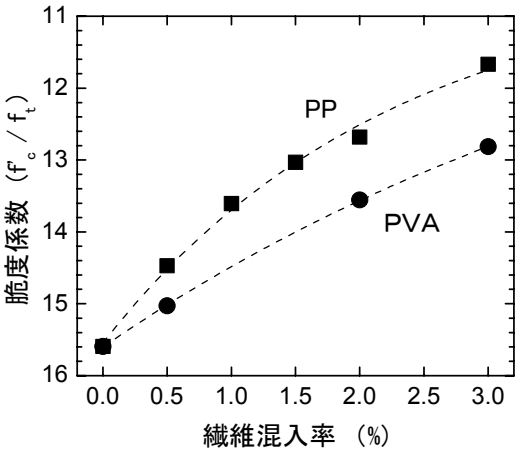
図－3は，NL を用いたコンクリートにおいて PP ならびに PVA の混入率が圧縮強度ならびに引張強度に与える影響を示したものである。この図から，PP の場合，繊維混入率が引張強度に与える影響は非常に小さく，圧縮強度は繊維混入率とともにやや低下する傾向が見られる。一方，PVA の場合，繊維混入率とともに圧縮強度ならびに引張強度のいずれもわずかに増加する傾向が見られた。ここで，**図－4**に示すように各繊維混入率において脆度係数(引張強度に対する圧縮強度の比率)を算出したところ，脆度係数はいずれの繊維においても混入率が増加するほど小さくなる傾向となった。PP と PVA を比較すると，同一の混入率における脆度係数は PVA よりも PP の方が小さくなった。また，いずれの繊維の場合にも混入率と脆度係数の関係は線形ではなく，短繊維の混入による脆度係数の低減効果は徐々に頭打ちとなることがわかった。

(2) 破壊エネルギーに与える影響

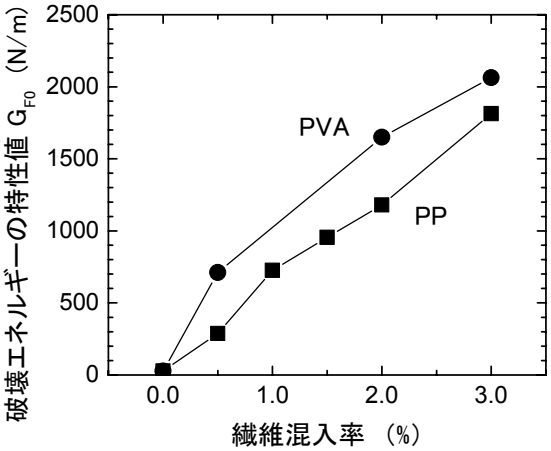
NL を用いたコンクリートの破壊エネルギーは，繊維補強を行わない場合に 74N/m となり，同一強度レベルの普通コンクリートにおける値が 100N/m 程度であることを考えると，軽量骨材の高品質化を図っても破壊エネルギーの向上効果はまだ十分でないといえる。普通骨材ではモルタル部よりも骨材自体の強度が高いため，ひび割れは比較的脆弱なモルタル部と骨材の界面



図－3 短繊維が各種強度に与える影響



図－4 各短繊維の混入率と脆度係数の関係



図－5 繊維混入率と破壊エネルギーの特性値

に沿う形で迂回するのに対し，軽量骨材ではモルタル部よりも骨材自体の強度が低く，骨材自体が引張応力を受けて破壊している。このため，NL を用いたコンクリートにおいても，短繊維の混入によって母材を補強し，破壊エネルギーを向上させることを検討した。なお，破壊エネル

ギーは，CEB-FIP Model Code 1990 において圧縮強度の関数として与えられていることから，ここでは，実測された破壊エネルギーにおける圧縮強度の影響を次式のように補正し，破壊エネルギーの特性を示す値 G_{F0} として評価している。

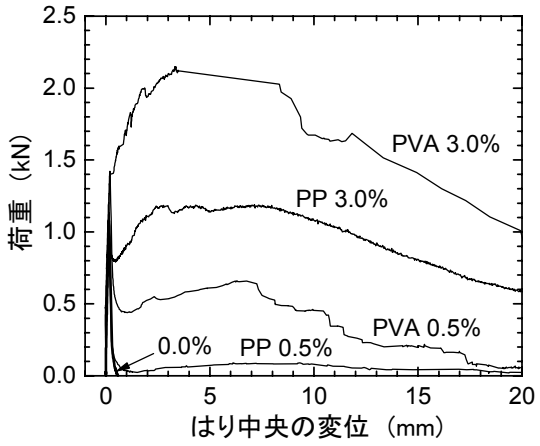
$$G_{F0}=G_F / (f'_c / f_{c0})^{0.7} \quad (2)$$

ここで，G_F：破壊エネルギー(N/m)，f'_c：圧縮強度(N/mm^2)，f_{c0}：定数(10 N/mm^2)

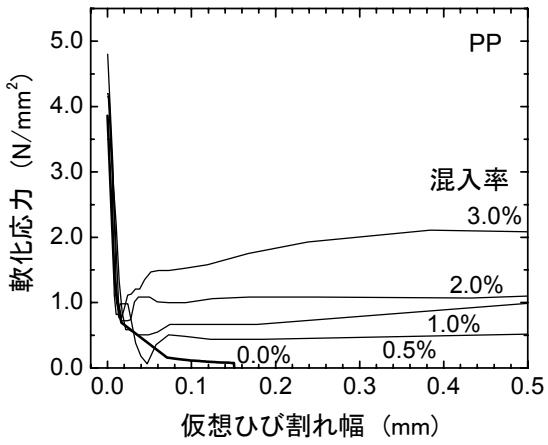
図－5は，各繊維の混入率と破壊エネルギーの特性値 G_{F0} の関係を示したものである。この図から，繊維混入率が増加するほど破壊エネルギーが飛躍的に増大することがわかる。また，破壊エネルギーの向上効果は繊維の種類に依存し，同一の繊維混入率における破壊エネルギーは PP よりも PVA の方が大きいことが明らかになった。これは，**図－4**で示したように脆度係数の低減の面で PP の方が優れていたことと異なり，曲げ試験では PVA の方が破壊時のエネルギー吸収能力に優れる結果となった。通常の圧縮試験や割裂引張試験にくらべて，切欠きはりの 3 点曲げ試験では母材に大きなひび割れが進展した後でも短繊維がひび割れ間を架橋して応力を伝達する過程も評価できる。このため，**表－1**に示すように PP よりも繊維自体の引張強度と弾性係数が高い PVA において，架橋した繊維自体の力学的性質が試験結果に直接反映されたものと考える。

(3) 引張軟化曲線に与える影響

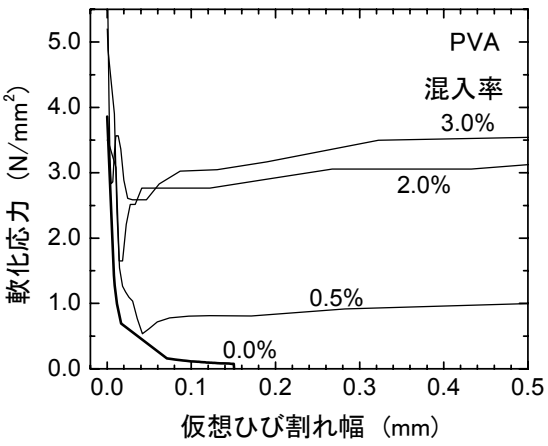
図－6は，各切欠きはり供試体の曲げ試験における中央変位と荷重の関係を示したものである。短繊維を混入しない場合，母材にひび割れが発生するのとほぼ同時に急激な荷重の低下を生じて供試体が破断する。一方，短繊維を混入した場合では，荷重－変位曲線は 2 つのピークをもつことがわかる。すなわち，第 1 ピークは，母材にひび割れが発生する点で，直後に急激な荷重低下を生じており，第 2 ピークは，ひび割れ面を架橋した短繊維によって応力伝達機構が徐々に発揮され，その応力伝達効果が最大となった点である。第 2 ピーク以降は，母材からの短繊維の抜出しによって耐荷力が徐々に低下する過程と考えられる。なお，PVA を 3.0%混入した場合には明瞭な第 1 ピークが観察されなくなり，第 2 ピークで最大荷重を示した。**図－6**から，ひび割れ発生荷重(第 1 ピーク)は繊維の種類ならびに混入率による影響を受けにくいものの，ひび割れ発生後の耐荷性能(第 2 ピーク)は，繊維



図－6　短繊維を混入した場合の荷重変位曲線



図－7　PP を混入した場合の引張軟化曲線



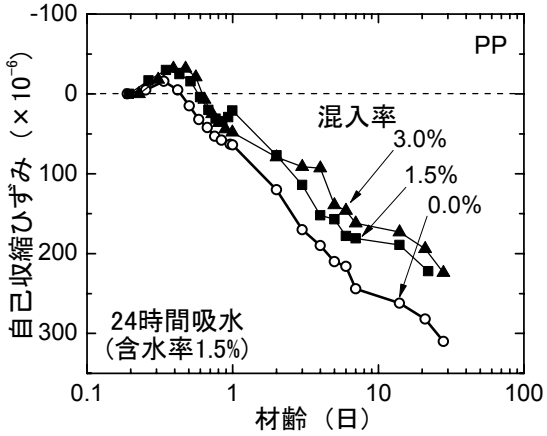
図－8　PVA を混入した場合の引張軟化曲線

混入率が高いほど，また，PP よりも PVA のように繊維自体の引張強度や弾性係数などの力学的性質に優れるものほど向上することがわかった。

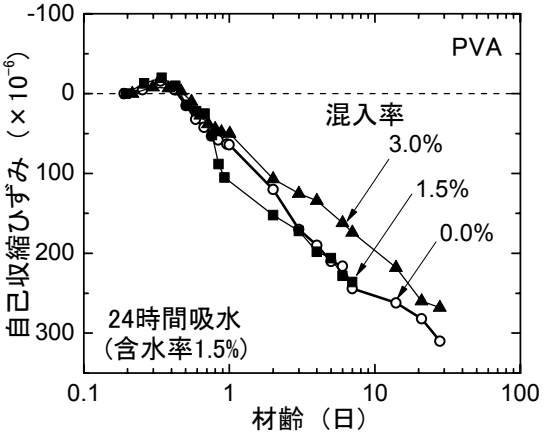
図－７ならびに**図－８**は，NL を用いたコンクリートに PP ならびに PVA を混入した場合の引張軟化曲線をそれぞれ示したものである。短繊維を混入しないで NL を用いたコンクリートでは，仮想ひび割れ幅が 0.15mm に到達した時点で破壊している。しかし，繊維を混入した場合には，仮想ひび割れ幅が 0.15mm より増加しても結合応力が保持され，その結合応力は繊維混入率が高いほど大きくなっている。また，同一の繊維混入率では，PP よりも PVA の方が結合応力の保持効果が高く，繊維自体の力学的性質に優れた PVA の方がひび割れ面を架橋する際に高い応力を伝達できることがわかった。

3.2 短繊維が自己収縮特性に与える影響

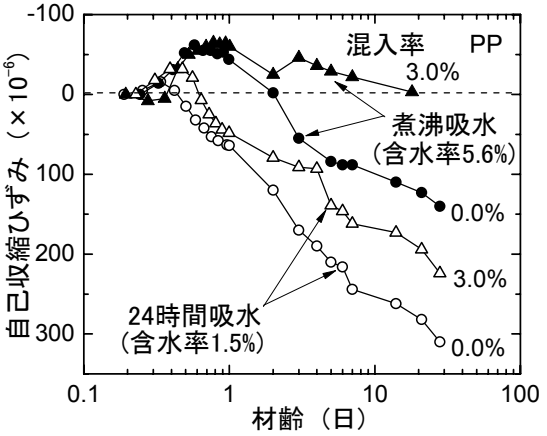
図－９は，NL を用いたコンクリートにおいて PP の混入率が自己収縮に与える影響を示したものである。これまで筆者が明らかにしたように，きわめて吸水率が小さい軽量骨材を用いた低水セメント比コンクリートでは，セメントペースト部分の自己乾燥によって材齢初期から大きな収縮ひずみが発生する。NL を用いたコンクリートにおいても自己収縮が増大する傾向が見られたものの，PP の混入率が増加するとともに自己収縮は低減することが明らかになった。短繊維を混入しない場合にくらべて PP を 3.0%混入した場合には，材齢 28 日において約 100×10^{-6} の自己収縮ひずみの低減効果が認められた。また，PP を 1.5%混入した場合には 3.0%混入した場合よりも自己収縮ひずみはやや大きいものの，同様に自己収縮の低減効果が認められる。一般に，母材に混入された短繊維は，主として外力により発生した引張応力に抵抗し，圧縮応力には十分に抵抗しない場合が多いと考えられている。しかし，**図－９**の結果から，拘束を受けない状態で自由に圧縮変形するような自己収縮においても，短繊維によるエネルギー吸収効果(以下，これを拘束効果とよぶことにする)をある程度期待できることが明らかになった。



図－９ PP を混入した場合の自己収縮



図－10 PVA を混入した場合の自己収縮



図－11 NL の含水率と自己収縮の関係

また，**図－10** は，NL を用いたコンクリートにおいて PVA の混入率が自己収縮に与える影響を示したものである。PVA の場合にも PP の場合と同様に短繊維が自己収縮の低減に寄与できることがわかった。しかし，PVA を 3.0%混入した

ことによる自己収縮の低減量は，材齢 28 日において高々50×10^{-6} であり，混入率 1.5%の場合には自己収縮に対する低減効果はきわめて小さくなる。このように自己収縮の低減には，PVA よりも PP の方が有効であった。**表－1** に示すように PP は, PVA にくらべて引張強度などの繊維自体の力学的性質に劣るものの，凸凹の型押し加工(エンボス加工)によって波型の形状を有している。このため，収縮のように比較的小さい圧縮応力の作用下では，繊維自体の力学的性質ばかりでなく，むしろ繊維形状に起因した幾何学的な拘束効果や付着性状などの影響の方を受けやすいのではないかと考える。また，各繊維の吸水性に着目すると，PP がまったく吸水しないのに対し, PVA は約 5%の吸水性をもっており [5]，このような繊維自体の吸水特性の違いも，繊維とペーストの界面領域の組織を変化させ，付着特性ならびに収縮に対する繊維の拘束効果に影響を及ぼしているのではないかと思われる。

図－11 は，24 時間吸水ならびに煮沸吸水した NL を用いて骨材の含水率を変化させた場合に PP の混入が自己収縮に与える影響を示したものである。この図から，繊維混入の有無によらず NL の含水率が増加すると骨材中の水分がペースト部分の自己乾燥を抑制するため，自己収縮が大幅に小さくなることがわかる。したがって，煮沸吸水した NL を用いたコンクリートに PP を 3.0%混入した場合では，軽量骨材中の豊富な水分によるペーストの自己乾燥抑制効果，ならびに短繊維の混入による微視的拘束効果の 2 つの異なる作用が複合する形となり，材齢 14 日まで自己収縮が発生しないこととなった。

このように短繊維の混入は，微視的な拘束効果によってコンクリート自体の自己収縮を低減できるため，コンクリートが鉄筋や型枠などによって拘束を受けた場合にもコンクリートに生じる引張応力を低減できると考えられる。また，外部から強い拘束を受けて，母材にひび割れが発生した場合でも短繊維が架橋するため，ひび割れ幅の増大を抑制できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

(1) 高品質軽量骨材を用いたコンクリートの破壊力学特性値は, 合成繊維を混入することにより大幅に改善が可能である。

(2) 破壊エネルギーや引張軟化曲線の向上には, ひび割れ面における短繊維の架橋効果の影響が大きいため, 繊維自体の力学的性質に優れるビニロン繊維が効果的である。

(3) 高品質軽量骨材を用いたコンクリートの自己収縮は, 合成繊維を混入することで低減できる。

(4) 自己収縮の低減には, 繊維自体の力学的性質よりも幾何学的性質，すなわち，形状に起因した微視的な拘束効果の影響が大きいものと推察され, 波型形状を有するポリプロピレン繊維が効果的である。

謝辞

本研究の実施に当たって，伊藤忠商事社ならびにネオマテリアル社から骨材サンプルをご提供頂きました。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) 木場美子ほか : 超軽量人工軽量骨材を用いたコンクリートの破壊力学特性値に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23，No.2，pp.49-54，2001.6
3) 河野克哉ほか : 超軽量骨材を用いたコンクリートの自己収縮ならびに乾燥収縮, コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.43-48，1998.6
4) 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
5) 大石不二夫 : 高分子材料の活用技術，日刊工業新聞社，pp.72-73，1979