

論文 エコセメントおよび再生ポリエチレンテレフタレート繊維を用いた コンクリートの破壊力学特性

野間 康隆^{*1}・河野 克哉^{*2}・二羽 淳一郎^{*3}

要旨：本研究では，都市ごみ焼却灰などを主原料とするエコセメント，および使用済みペットボトルを再利用した再生ポリエチレンテレフタレート短繊維を用いたコンクリートの破壊力学特性について検討した。その結果，初期材齢および水セメント比が小さい場合は，エコセメントを用いたコンクリートの破壊エネルギーは普通セメントを用いた場合よりもやや大きくなるが，長期材齢では同等，水セメント比が大きい領域では小さくなることが確認された。また，再生ポリエチレンテレフタレート短繊維を用いたコンクリートの破壊エネルギーは市販のポリプロピレン繊維を用いた場合とほぼ同等であった。

キーワード：エコセメント，再生 PET 繊維，破壊エネルギー，引張軟化曲線

1. はじめに

現在，資源の有効利用を図る目的で，都市ごみ焼却灰や下水汚泥などの廃棄物を主原料としたエコセメント（以下，EC）が実用化されている。この EC は普通セメント（以下，NC）に比べて，塩素および間隙相の量が多く，強度発現性が大きく異なっている¹⁾。また，鉄筋コンクリートに適用した場合には，鉄筋の腐食に対する検討も必要となる。このため，現在まで RC 構造物への適用は限られているのが実情である。このような背景により，現在まで EC コンクリートの破壊力学特性に関する研究もまったく行われていない。また，最近では，使用済みペットボトルを再利用した再生ポリエチレンテレフタレート短繊維（以下，PET）が開発され，コンクリート用の短繊維補強材としての利用が検討されるようになってきている²⁾。

本研究では，このようなリサイクル材料を適用したコンクリートの破壊力学特性について検討した。具体的には，EC コンクリートの破壊力学特性を NC コンクリートと比較することで評価した。また，EC および PET を用いた繊維補強コンクリートの破壊力学特性について検討した。

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 EC および NC を用いた。また，短繊維は，直線型の繊維長 30mm および 15mm の 2 種類の PET のほかに，比較用として市販されている直線型のポリビニルアルコール繊維（以下，PVA）および波型のポリプロピレン繊維（以下，PP）の 3 種類を使用した。混和剤には AE 減水剤および AE 剤を用いた。

2.2 配合

コンクリートの配合条件を表 - 2 に示す。すべての配合において単位水量を 170kg/m^3 ，粗骨材の絶対容積を 350 /m^3 で一定とし，スランプおよび空気量は，それぞれ $18 \pm 2.5\text{cm}$ ， $4.5 \pm 1.5\%$ となるように混和剤の添加量にて調整した。

(1) EC の評価実験（シリーズ 1）

表に示すようにセメントの種類を EC および NC の 2 水準，W/C を 40，50 および 60% の 3 水準に変化させ，材齢は 7 日とした。また，EC，NC コンクリートそれぞれ W/C50% にて，材齢を 7，28，91 日の 3 水準とした。

*1 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 (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 助手 修(工) (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

使用材料		記号	物性または成分
セメント	エコセメント	EC	密度 3.17g/cm ³ , 比表面積 4260cm ² /g , 鉱物組成(C ₃ S48% , C ₂ S13% , C ₃ A12% , C ₄ AF12%) ¹⁾
	普通セメント	NC	密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3300cm ² /g 鉱物組成(C ₃ S51% , C ₂ S24% , C ₃ A10% , C ₄ AF8%) ¹⁾
細骨材	小櫃産陸砂	S	表乾密度 2.60kg/ , 吸水率 1.57% , 粗粒率 2.63
粗骨材	青梅産砕石	G	表乾密度 2.64kg/ , 吸水率 0.63% , 粗粒率 6.89
繊維	ポリビニルアルコール繊維	PVA	直線型 , 繊維長 30mm , 密度 1.30kg/ , アスペクト比 45.5 , 断面積 0.34mm ² , 引張強度 0.86kN/mm ² , 弾性係数 23kN/mm ²
	ポリプロピレン繊維	PP	波型 , 繊維長 30mm , 密度 0.91kg/ , アスペクト比 54.2 , 断面積 0.62mm ² , 引張強度 0.47kN/mm ² , 弾性係数 15kN/mm ²
	再生ポリエチレンテレフタレート繊維	PET30 PET15	直線型 繊維長 30mm および 15mm 密度 1.37kg/ , アスペクト比 41.7 断面積 0.41mm ² , 引張強度 0.46kN/mm ² , 弾性係数 5.8kN/mm ²
混和剤	AE 減水剤	WRA	リグニンスルホン酸系 , 密度 1.06g/cm ³
	AE 剤	AE	アルキルエーテル系 , 密度 1.025g/cm ³

表 - 2 示方配合

実験シリーズ	粗骨材の最大寸法 (mm)	セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)				短繊維			WRA (C×%)	AE (C×%)	フレッシュ性状				
					W	C	S	G	種類	長さ (mm)	混入率 (Vol.%)			スランプ (cm)	空気量 (%)			
シリーズ1	20	EC	60	49.4	170	340	852	921	-	-	-	0.25	0.005	16.5	5.0			
			50	48.1										18.5	3.6			
			40	45.9										16.0	4.0			
		NC	60	49.4										283	899	0.25	16.0	5.0
			50	48.1										340	852	0.3	19.0	4.1
			40	45.9										425	781	0.35	16.0	3.0
シリーズ2	20	EC	50	48.1	170	340	852	921	PET	30	1.0	0.5	0.005	13.0	4.7			
														PP	16.0	3.7		
														PET	18.0	3.0		
			50	48.1						0.2	0.35	0.005	17.0	5.4				
													0.4	0.4	17.5	5.6		
															0.6	0.45	17.0	4.7
										0.2	0.3	18.0					4.5	
												0.4	0.4	18.0			4.7	
														0.6	0.4	17.0	5.0	

(2) PET の評価実験 (シリーズ2)

PET のコンクリート用補強繊維としての性能を比較評価する目的で、短繊維の種類を PET , PVA および PP の 3 水準とし、それぞれ長さ 30mm の短繊維を体積混入率 1% にて使用した。また、PET の寸法や混入率による影響を評価する目的で、表に示すように PET の長さを 30mm (以下、PET30) および 15mm (以下、PET15) の 2 水準、混入率を 0.2 , 0.4 , 0.6 , と 3 水準に変化させ、合計 6 水準とした。材齢に関しては、全 9 水準 28 日とした。

(3) PET の混入による流動性の変化

また、繊維混入率の増加に起因したフレッシュコンクリートの流動性の低下を評価するため、繊維長 30mm および 15mm の PET を使用し、シ

リーズ1のECコンクリートで、W/C50%の配合を用い、オムニミキサ(容量70)を用いた。最初に、繊維混入率0%のコンクリートを作成し、AE減水剤一定(セメント量の0.3%)の下で、スランプを測定した。その後、混入率0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0%となるように短繊維を投入し、それぞれ1分間練混ぜを行った後、スランプを計測した。

2.3 練混ぜおよび養生

図-1に示すように2軸型強制練りミキサ(容量60)にて練混ぜを行った。

圧縮強度および引張強度の測定には円柱供試体を、破壊力学特性の測定には切欠きはり供試体を用いており、いずれの供試体も各試験に供するまで水中養生(20)を行った。

2.4 試験方法

すべての水準にて、以下の試験を実施し、1水準のそれぞれの試験ごとに、試験体を3体ずつ作製した。

(1) 強度特性の測定

所定材齢で圧縮強度および引張強度を、それぞれ JIS A 1108, JIS A 1113 に準じ、測定した。

(2) 破壊力学特性の測定

破壊エネルギー G_F (N/m) を、図 - 2 に示すように JCI が推奨する切欠きはりの3点曲げ試験を行い、次式を用いて算出した。

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

ここで、 W_0 : 荷重 - たわみ曲線下の面積 (N・m), m : 支点間の供試体質量 (kg), g : 重力加速度 (m/s^2), δ_0 : はり破断時のたわみ (m), A_{lig} : リガメント部の面積 (m^2)。

引張軟化曲線は、図 - 2 の試験で得られた荷重 - たわみ曲線から、多直線近似法³⁾によって推定した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

表 - 2 に AE 減水剤を用いた場合のフレッシュ性状を示す。シリーズ 1 では、所定のスランプを得るための AE 減水剤の添加率のセメントによる変化は見られなかった。シリーズ 2 においては、PET を用いたフレッシュコンクリートは、PP および PVA を用いた同一配合のコンクリートと比較し、もっともスランプが大きくなった。また、繊維混入率の増加に対し、所定のスランプを得るための AE 減水剤の添加率が大きくなった。

図 - 3 は、AE 減水剤の添加率一定の下で、繊維長 30mm と 15mm の PET を用いて、各短繊維の混入率を変化させた EC コンクリートのスランプ試験 (2.2(3)) の結果を示したものである。PET30 の場合よりも PET15 の場合の方がスランプが大きい。すなわち、繊維長が短いほどスランプが大きいことになる。

3.2 EC コンクリートの破壊力学特性

(1) 材齢による影響

EC および NC を用いたプレーンコンクリートの圧縮強度および破壊エネルギーの経時変化を図 - 4 に示す。図 - 4 の(a)から、EC コンクリートの圧縮強度は、材齢 7 日の時点では NC コンクリートよりも若干大きいものの、材齢が 28 日以降になると強度の増進が見られず、長期強度は NC コンクリートよりも小さくなるのがわかる。これは、EC のセメント鉱物組成を NC と比較した際、 C_3S および C_2S の量が少ないことに起因するものと考えられる。

一般にコンクリートの破壊エネルギーには圧縮強度が関与しており、CEB-FIP Model Code 1990 では圧縮強度の関数として与えられている。このため、切欠きはりの曲げ試験結果から算出した破壊エネルギー G_F における圧縮強度の影響を次式で補正することとし、以下、破壊力学特

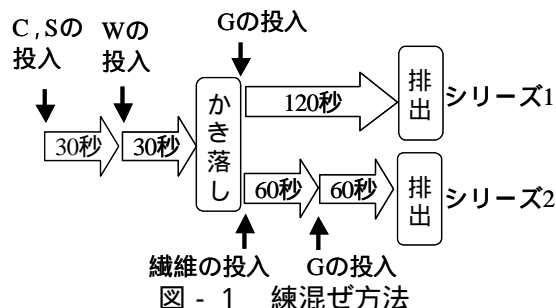


図 - 1 練混ぜ方法

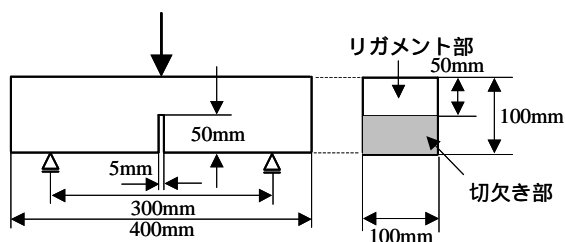


図 - 2 切欠きはりの3点曲げ試験

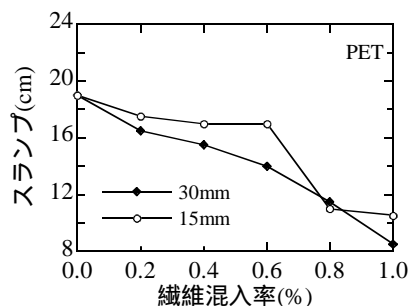


図 - 3 繊維混入率とスランプの関係

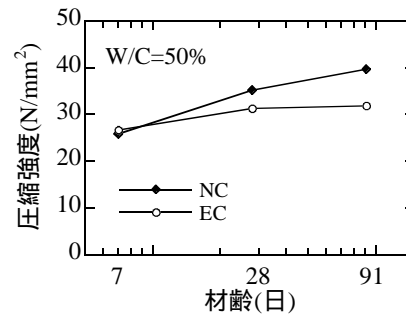
性の評価には、破壊エネルギーの特性値 G_{F0} を用いることにした。

$$G_{F0} = G_F \left(f_c' / f_{cmo} \right)^{-0.7} \quad (2)$$

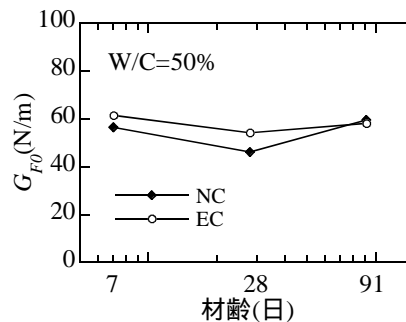
ここで、 f_c' ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 f_{cmo} ：定数(10N/mm²)。図 - 4 の(c)は、 G_{F0} の算出結果を示したものであり、EC コンクリートの G_{F0} は、NC コンクリートに比べて、材齢 28 日までは若干大きくなり、材齢 91 日ではほとんど一致していることがわかる。EC コンクリートにおいて材齢 28 日までの G_{F0} が NC コンクリートよりも若干大きくなった理由としては、EC コンクリートではセメントペーストと骨材の界面の付着特性が比較的良好であったためではないかと考えられる。松尾ら⁴⁾の研究では、セメントの種類によって母材マトリックスと骨材の付着性状が変化し、骨材界面との付着力の低下によって破壊エネルギーが減少することが明らかとなっている。また、Tsuyumoto ら⁵⁾の研究によると、EC では C₃S および C₂S の量が少ないため、水と生成する水酸化カルシウム量も少なく、主として水酸化カルシウムから成る骨材周辺のポーラスな遷移帯が形成されにくいことが指摘されている。以上より、EC コンクリートの骨材と母材マトリックスの界面付着は良好であったと推測される。

(2) W/C による影響

図 - 5 は、EC および NC を用いたプレーンコンクリートにおいて、材齢 7 日の圧縮強度および破壊エネルギーに与える W/C の影響を示したものである。図 - 5 の(a) に示した W/C と材齢 7 日の圧縮強度の関係は、EC コンクリート、NC コンクリートのいずれの場合もほぼ同等であり、セメントの種類による影響は確認できなかった。図 - 5 の(b)は、圧縮強度の影響を補正した G_{F0} を示したものである。この図から、W/C が 40% および 50% の場合は、EC コンクリートの破壊エネルギーは NC コンクリートよりやや大きいものの、W/C が 60% になると EC コンクリートの破壊エネルギーは NC コンクリートよりも低下した。

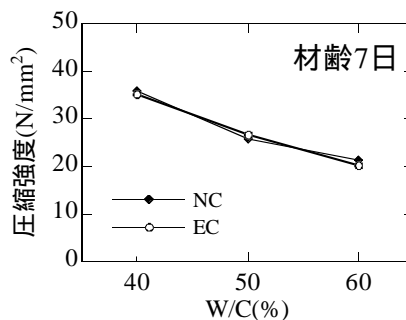


(a) 圧縮強度

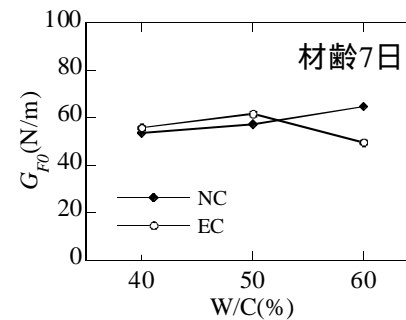


(b) G_{F0}

図 - 4 材齢による影響



(a) 圧縮強度



(b) G_{F0}

図 - 5 W/C による影響

3.3 PET が破壊力学特性に与える影響

(1) PET の適用性

図 - 6 は、PET、PVA および PP を混入した EC コンクリートの曲げ試験から得られた荷重 - たわみ曲線の一例を示したものである。市販の

PVAおよびPPを用いた場合の荷重 - たわみ曲線には、第 1 ピーク（母材マトリックスにひび割れが発生して急激に荷重が低下する点）、および第 2 ピーク（ひび割れ面での架橋効果が徐々に発揮されて伝達応力が最大となる点）が存在しており、ひび割れ発生後にひずみ硬化が観察された。この第 2 ピークの荷重は、PVA がもっとも大きい値を示している。一方、PET の場合には、第 1 ピークは存在するものの、第 2 ピークは観察できず、ひび割れ発生後からすぐにひずみ軟化を生じた。また、リガメント部に存在する短繊維は全て引き抜け、切断した繊維はなかった。

図 - 7 は、各繊維を混入した EC コンクリートの引張軟化曲線を示したものである。引張軟化曲線における折曲げ点の応力は、PVA がもっとも大きく、つづいて PP となり、PET がもっとも小さくなった。折曲げ点の応力は繊維の弾性係数と対応させることができ、弾性係数が高いほど折曲げ点の応力が大きくなっている。これは、弾性係数の大きい繊維を使用するほど母材中での繊維の架橋応力が発揮されることに起因するためと考えられる。

また、表 - 3 は、曲げ試験終了後のはり供試体においてリガメント部に存在する短繊維の本数を計測し、単位面積当りの繊維本数を算出したものである。本実験では短繊維の体積混入率を一定としていることから、表 - 3 に示したように 1 本当りの繊維断面積が小さいほどリガメント部に存在する繊維本数が多くなる。繊維断面積が小さい種類の繊維では、母材との付着面積が大きくなったことで、繊維の拔出しに必要な応力が増加し、結合応力の増大が生じたものと考えられる。よって弾性係数の小さいPETもひび割れ幅が大きくなるにつれ結合応力がPPとほぼ同程度になることができると考えられる。ただし、PET では折曲り点以降に結合応力の増加は生じておらず、一旦、短繊維の拔出しが生じると結合応力を維持できなくなることがわかる。このことは、PET と母材との付着が他の繊維に比べてやや劣っている可能性を示している。

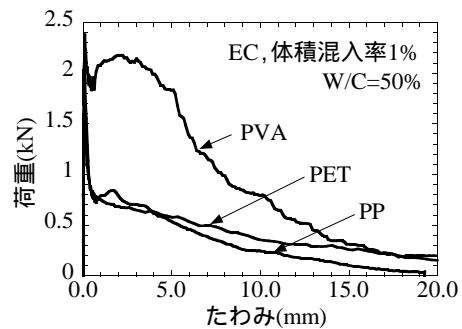


図 - 6 荷重 - たわみ曲線

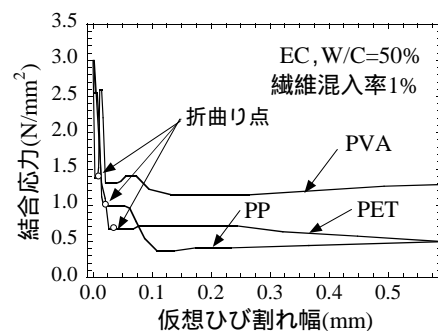


図 - 7 引張軟化曲線

表 - 3 単位面積当りの繊維本数
(体積混入率 1%, W/C=50%)

短繊維の種類	PVA	PP	PET
繊維 1 本当りの断面積(mm ²)	0.34	0.62	0.41
弾性係数(kN/mm ²)	23	15	5.8
単位面積当りの繊維本数(本/cm ²)	1.53	0.55	1.33

表 - 4 G_{F0} および標準偏差
(体積混入率 1%, W/C=50%)

繊維の種類		G_{F0} (N/m)
PVA	平均値	1597
	標準偏差	379
PP	平均値	894
	標準偏差	165
PET	平均値	958
	標準偏差	57

一般に、PET はアルカリ雰囲気において加水分解を生じることが知られており⁶⁾、このことが PET とセメントペースト母材の化学的な付着機構に影響を与えている可能性がある。

表 - 4 は、 G_{F0} およびこれらの標準偏差を算出した結果であり、PET を用いた場合の破壊エネルギーは PP を用いた場合と同等となった。表 - 1 に示したように、PET 自体の引張強度や弾性係数などの力学的性質は、PP の場合よりもやや

劣っているものの、前述したように PET の断面積が小さいためにひび割れ面で架橋する繊維本数が増加し、破壊エネルギーは PP の場合と同等になったものと考えられる。以上のことから、PET は、長期耐久性などの検討が必要になるものの、市販の PP とほぼ同等の破壊力学特性を与えることがわかった。

(2) PET の寸法による影響

図 - 8 は、PET30 および PET15 の混入率を変化させた EC コンクリートの破壊エネルギーを示したものである。いずれの繊維長においても繊維混入率にほぼ比例する形で破壊エネルギーが増大した。同一の繊維混入率における破壊エネルギーは、PET15 の場合に比べて PET30 の場合の方が大きくなり、破壊力学特性の改善には長い繊維の方が有効であることが確認された。

表 - 5 は、曲げ試験終了後のはり供試体においてリガメント部に存在する短繊維の本数を計測し、単位面積当りの繊維本数を算出したものである。ひび割れ面における単位面積当りの繊維本数は、繊維長 30mm および 15mm のいずれの場合であってもほぼ同数であった。このため、長い繊維の方が繊維と母材との付着面積が増加し、ひび割れ面における繊維の架橋効果が大きくなったものと考えられる。同一混入率の条件下で、PET15 の混入本数は、PET30 のそれと比較すると 2 倍であるが、リガメント垂直方向に同体積の繊維が存在したことにより、単位面積当りの繊維本数は、同程度になったのではないかと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 初期材齢および水セメント比が小さい場合は、エコセメントを用いたコンクリートの破壊エネルギーは普通セメントを用いた場合よりもやや大きくなるが、長期材齢では同等、水セメント比が大きい領域では小さくなる。
- (2) 再生ポリエチレンテレフタレート短繊維を用いたコンクリートの破壊エネルギーは、市販のポリプロピレン繊維を用いた場合とほ

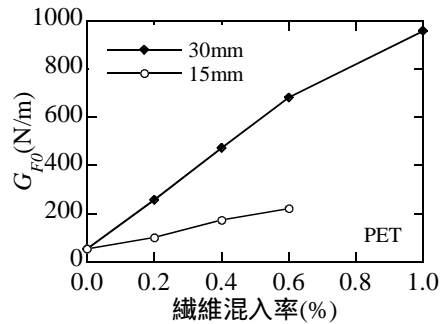


図 - 8 短繊維の長さによる影響

表 - 5 単位面積当りの短繊維本数

繊維長(mm)	30			15		
	0.2	0.4	0.6	0.2	0.4	0.6
単位面積当りの繊維本数(本/cm ²)	0.16	0.45	0.77	0.25	0.39	0.72

ぼ同程度である。

- (3) 再生ポリエチレンテレフタレート短繊維の長さが短い場合、混入によるスランプ低下をある程度抑制できるものの、破壊エネルギーの向上に寄与する程度は小さくなる。

謝辞

本研究を実施するに当たり、太平洋セメント社からエコセメントを、また、プラスワン社から再生ポリエチレンテレフタレート繊維を提供頂きました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 棚野博之ほか：普通エコセメントを使用したコンクリートの調合、力学特性および耐久性に関する研究、コンクリート工学、Vol.40, No.7, pp.16-24, 2002.7
- 2) 宮坂尚樹ほか：再生 PET 短繊維補強コンクリートによる剥落防止技術の基礎的検討、土木学会第 58 回年次学術講演会、Vol.58, pp.1135-1136, 2003.9
- 3) 栗原哲彦ほか：多直線近似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) 松尾豊史ほか：セメントの種類がコンクリートの破壊力学特性値に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.2, pp.1311-1316, 1995.6
- 5) Tsuyumoto, I et al. : Microstructures of Hardened Mortars Using Eco-Cements and Sintered Sewage Sludge, J. Ceram. Soc. Jpn., Vol. 110, pp.535-540, 2002.6
- 6) 大石不二夫：高分子材料の活用技術、日刊工業新聞、p.30, 1979