

コンクリート補強用短繊維としての ポリエチレンテレフタレート (PET) の再利用

RECYCLING OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) FOR SHORT FIBERS TO REINFORCE CONCRETE

宮崎 晋行*・大久保 誠介**・福井 勝則***・石川 常夫****・越智 恒男*****

Kuniyuki MIYAZAKI, Seisuke OKUBO, Katsunori FUKUI, Tsuneo ISHIKAWA and Tsuneo OCHI

Fiber reinforced concrete is improved in toughness and crack resistance by pullout resistance of mixed fibers. In this study, it was investigated whether fibers made of recycled polyethylene terephthalate (PET) is appropriate to concrete reinforcement. As the first step toward practical use of PET fibers, mixing tests were conducted, and it was found that mixing efficiency of PET fibers with concrete matrix is excellent. Secondly pullout tests were conducted pulling a fiber out of the concrete matrix. It was found that the bond strength with concrete matrix of PET fibers is enough high. It can be said that PET is a promising material as reinforcement of concrete.

Key Words: PET, fiber, concrete, mortar, pullout

1. はじめに

繊維補強コンクリートは、トンネルの支保工や岩盤斜面の保護工などに利用されている。コンクリート中に短い繊維を分散させることによって、曲げ強度、引張強度、靱性、ひび割れ抵抗性などの改善を図った複合材料であるといえる¹⁾。補強用の繊維としては、炭素鋼を材料とした鋼繊維やガラス繊維、プラスチック繊維などが主に使用されている。しかしながら、鋼繊維を補強材とする鋼繊維補強コンクリートでは、表面に露出した鋼繊維の錆、吹付け時における鋼繊維の跳ね返りなどの問題がある。プラスチック繊維の中で比較的多く使用されているポリプロピレン繊維(以下、PP繊維)は、疎水性のためコンクリートとの付着力が低く、比重が水より小さい

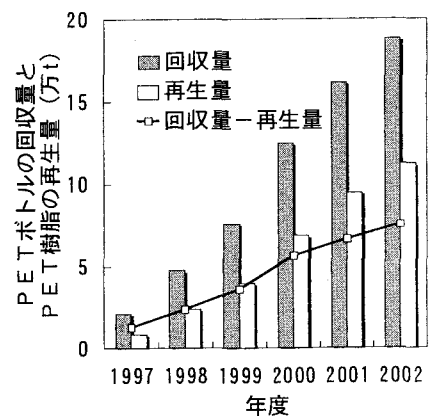


図-1 PETボトルの回収量と PET樹脂の再生量²⁾

* 東京大学大学院博士課程 工学系研究科地球システム工学専攻
** 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻
*** 正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科地球システム工学専攻
**** (株)サンゴ 取締役
***** (株)サンゴ 技術顧問

ため、繊維がスラリー上に浮上して一様に分散しにくいので、親水基界面活性剤を塗布するなどの処理が必要である。また、ポリビニルアルコール繊維（以下、PVA繊維）は、温水で加水分解しやすいなどの問題がある。

本研究では、廃PETボトルを再生して補強用繊維として用いることの適否について検討した。PET（polyethylene terephthalate）は、焼却時に有毒ガスを発生することがなく、何度でもリサイクルの可能な素材である。従来、再生PET樹脂の主な用途は工業用繊維やシートなどであり、最近ではPETボトル完全循環型のケミカルリサイクル技術「ボトル to ボトル」も実用化されつつある。しかしながら、図-1²⁾からわかるように、回収量と再生量の差は年々増大しており、回収に対して再生が追いつかない現状であり、経済性の面でより有利な新規用途の開発が待たれている。

本稿では、まず再生PET樹脂を能率的に短い繊維に成形する方法について述べる。次に、PET繊維の混練性をはじめとする施工性や、PET繊維とコンクリートとの付着力に関する検討結果について述べる。最後に、コンクリート補強用繊維としてPET繊維が利用できるかどうかについて一定の判断を示す。

2. PET繊維の製造方法と諸元

使用済みPETボトルを洗浄・粉砕後に、融解して押し出し成形したペレットを原料とする。このペレット状の再生PET樹脂を、再度押し出し成形機に投入して温度250から280℃で熔融し、ノズル穴から押し出すことにより単繊維を製作した。ノズルを出た後に、延伸倍率4から7.5の延伸処理を施すことによって引張強度を高めた。次にコンクリートとの付着力を増すために、単繊維を一對のエンボスロールで挟んで加工して表面に凹凸（圧印）をつけた後に、長さ30mm毎に切断した。

表-1に、延伸温度165℃、延伸倍率4.5として製造した直径0.75mmの繊維の引張強度を示す。比較のため、延伸処理を施さない場合や、補強用として市販されているPP繊維、PVA繊維の結果も示した。この表からわかるように、PET繊維の引張強度は、延伸処理を施すことにより約6倍となり、PP繊維の約2倍、PVA繊維と同程度となる。また表には、濃度1%の水酸化ナトリウム溶液中（60℃）に120時間浸漬させた後の引張強度と低下率も示したが、PET繊維は他よりも強度の低下が少ないことがわかる。

エンボスロールの接触面の形状寸法によって、繊維の凹凸（エンボスパターン）が決定される。図-2に試作した2種類の凹凸形状の概念図を示す。図中、灰色の部分が凹部である。以下では、図の(a)と(b)を、それぞれローレット型と波型と呼ぶことにする。この2種類のPET繊維について、さらに凹凸の深いものと浅いものとの試作し引張試験をおこなった結果を表-2に示す。PET繊維の凹部断面積は単繊維のそれよりも小さいため、引張破壊荷重は単繊維の4割程度になった。同じ理由で凹凸の深いものの引張破壊荷重がより低い。

表-1 各種繊維の諸元

繊維の種類	比重	親水性	延伸率	引張強度 (MPa)		強度の低下率 (%)
				アルカリ溶液浸漬		
				なし	120時間	
PET繊維 (延伸処理あり)	1.34	—	4.5	352	348	1.1
PET繊維 (延伸処理なし)	1.34	—	0	57	53.3	6.5
PP繊維	0.91	撥水性	4	170	147	13.8
PVA繊維	1.31	親水性	—	360	202	43.8

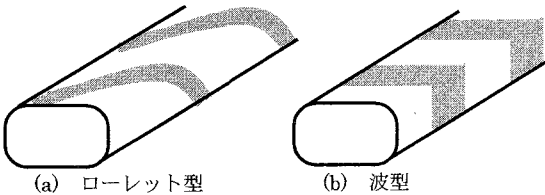


図-2 PET繊維の凹凸形状（灰色の部分が凹部）

3. P E T繊維補強コンクリートの混練性

ファイバーボールが生じず、繊維がコンクリート中に一様に分散することが望ましいことはよく知られている³⁾。

複雑な手順を経ずして簡単な混練方法で、繊維が一様に分布することは施工上、極めて大切な事項といえる。そこで、手練りと機械練りにおける混練性／施工性を検討した。

(1) 手練りによる混練試験

表－3の配合①で、手練りによる混練試験を行った。まず計量したセメントと細骨材をバケツに入れてよく混ぜ合わせた後に、水を所定量まで徐々に加えながらスコップで8分間練り混ぜた。こうして得られたコンクリートにP E T繊維を3から4回に分けて投入し、さらに8分間練り混ぜた。混練状況を注意深く観察したが、ファイバーボールの発生は皆無で、その他の異常も認められなかった。繊維の配向性を調べるため、練り上がったP E T繊維補強モルタルを直径75 mm、高さ150 mmの型枠2個と直径100 mm、高さ200 mmの型枠1個にハンドスコップを用いて打設したが、このときの流動性は良好で、木ハンマーで型枠を叩いて突固めてもP E T繊維の浮き上がりは全く見られなかった。なお、型枠に打設した後に残ったP E T繊維補強モルタル約2リットルに、繊維46.9 gを追加投入し、混練を行った。このときの繊維体積混入率は約3%であるが、ファイバーボールの発生は皆無であり、粘性は増加したものの流動性は保たれていた。

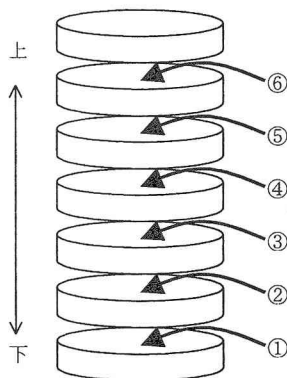
硬化後に型枠より外した3本のP E T繊維補強モルタルの試験片を、図－3のように6ヶ所で輪切りにした。図－4に示した切断面の写真の一例からも分かるように、モルタル中のP E T繊維は目立たないので、切断面に露出したP E T繊維に色を付けて、その本数を数えた。例として、直径100 mm、高さ200 mmの試験片の切断面を図－

表－2 P E T繊維の引張強度と引張破壊荷重

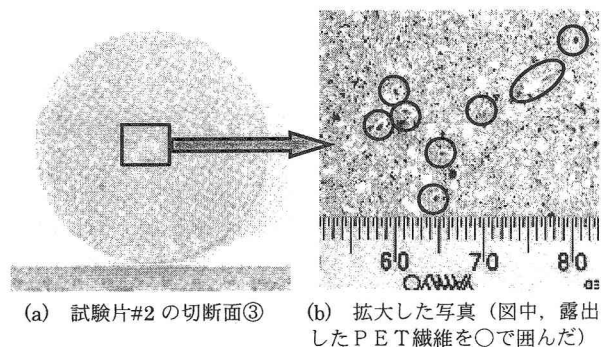
種類	凹凸形状	凹凸の程度	引張強度 (MPa)	引張破壊荷重 (N)
単繊維	なし	－	352	325
P E T繊維	ローレット型	浅い	432	138
		深い	328	131
	波型	浅い	371	137
		深い	321	127

表－3 混練試験でのコンクリートの配合

	配合①	配合②
繊維体積混入率 (%)	0.76	0, 0.5, 1.0, 1.5
水セメント比 (%)	50.0	69.2
セメント (kg/m ³)	681	325
細骨材 (kg/m ³)	1129	992
粗骨材 (kg/m ³)	0	789
細骨材率 (%)	100	55.5



図－3 試験片の輪切り



図－4 試験片の切断面の一例

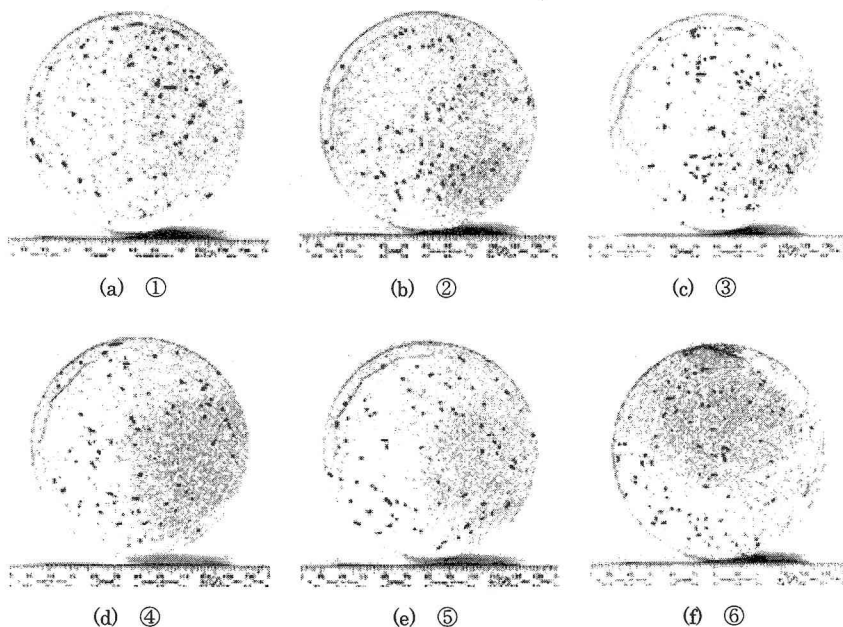


図-5 試験片#3の切断面

5に示す。図を見ると試験片内のPET繊維は偏りなく分散しているように見える。3本の試験片全てについて、6ヶ所の切断面に露出した繊維本数およびその試験片の高さ方向の配向係数を求めると表-4のようになった。繊維本数は試験片#2の切断面①を除いて、偏りなく分散している。配向係数はいずれの試験片でも2次元ランダム配向での理論値0.64よりも低く、3次元ランダム配向での理論値0.5付近の値であり、ほぼ均等に配向していると考えられる。

以上から、モルタルマトリックス中におけるPET繊維の分散性は、鋼繊維と比較して同等以上であると考えられる。

(2) 機械練りによる混練試験

表-3の配合②で、機械練りによる混練試験を行った。まず計量したセメントと細骨材を容量55リットルの二軸ミキサーに入れて15秒間攪拌機で混練し、次に所定量の水を加え30秒間攪拌した後、粗骨材を入れさらに60秒間混練した。こうして得られたコンクリートを100mm×100mm×400mmの型枠3個に打設した後に、振動機を用いて型枠に振動を与えて突固めて曲げ試験用の供試体を作製した。その後、残ったコンクリートを練り混ぜながら所定量のPET繊維を45秒かけてミキサーに投入し、その後、PET繊維補強コンクリートの曲げ試験用の供試体を作製した。全ての混練状況を注意深く観察したが、ファイバーボールの発生は皆無で、その他の異常も認められず、型枠に打設する際には流動性も保たれていた。以上から、PET繊維補強コンクリートの混練性は機械練りでも良好と考えられる。

表-4 切断面に露出した繊維本数と配向係数

試験片番号		#1	#2	#3
試験片断面積 (cm ²)		44	44	79
繊維切断面に露出した(本)	切断面⑥	31	52	73
	切断面⑤	20	52	78
	切断面④	31	60	73
	切断面③	43	42	91
	切断面②	51	44	75
	切断面①	37	14	67
	平均	36	44	76
単位面積当たりの繊維本数 (本/cm ²)		0.80	1.00	0.97
配向係数		0.47	0.58	0.56

同様な方法で P P 繊維補強コンクリートの曲げ供試体を作製した。この場合には、P P 繊維補強コンクリートを充填した型枠に振動を与えた際、P P 繊維の浮き上がりが見られた。

4. 繊維の引抜試験

(1) 引抜試験方法

繊維の引抜試験に用いた供試体は、直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱型枠にコンクリートを流し込み、図-6 のように全長 30 mm の繊維を半長だけ埋込んだもので、打設後は気中養生した。引抜試験では、図-7 のように繊維の突出部が下を向くように 1 ton 万能試験機の上に取り付け、繊維をペンチで引抜いた時の最大荷重を測定した。

配合などの試験条件は表-5 のように設定し、表-2 に示した 4 種類の P E T 繊維を用いて行った。

(2) 引抜試験結果

1 回目の引抜試験は材齢 7 日目と 28 日目に行った。図-8 は 4 種類の P E T 繊維について、材齢による最大引抜荷重の変化を表している。各条件で 10 本ずつの試験をおこない、その平均値と標準偏差を示す。ばらつきはあるものの、モルタルの強度の増加により、最大引抜荷重は増加した。

図-9 は、表-2 に示した引張破壊荷重と、材齢 28 日目での最大引抜荷重、両者の差を、4 種類の P E T 繊維についてまとめたものである。凹凸がローレット型であっても波型であっても、凹凸の深いものの最大引抜荷重が高いことが分かる。今回の試験結果から判断する限りでは、波型で凹凸の深いものが、引張破壊荷重と最大引抜荷重との差が最も小さかった。

2 回目の引抜試験は、凹凸が波型で深い P E T 繊維の他に、市販されている P P 繊維 2 種類と P V A 繊維について行った。試験中、P E T 繊維は 1 本も破断しなかった。表-6 に 2 回目の引抜試験の結果をまとめた。単位面積当たりの付着力とは、最大引抜荷重を、[繊維断面の周長] × [埋込深さ (15 mm)] で除した値である。今回の条件では、P E T 繊維の最大引抜荷重は他よりも低いが、

表-5 引抜試験の条件とコンクリートの圧縮強度

回	繊維の種類	コンクリートの配合		試験時の材齢	コンクリートの圧縮強度
		水セメント比	細骨材率		
1回目	PET繊維 4種類	50.0 %	100.0 % (モルタル)	7 日	30 MPa
				28 日	38 MPa
2回目	PET繊維 PP繊維A PP繊維B PVA繊維	69.2 %	55.5 %	12 日	20 MPa

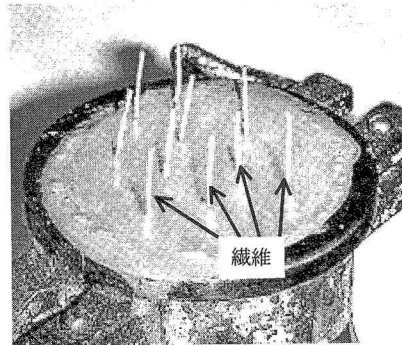


図-6 コンクリートに埋め込んだ繊維

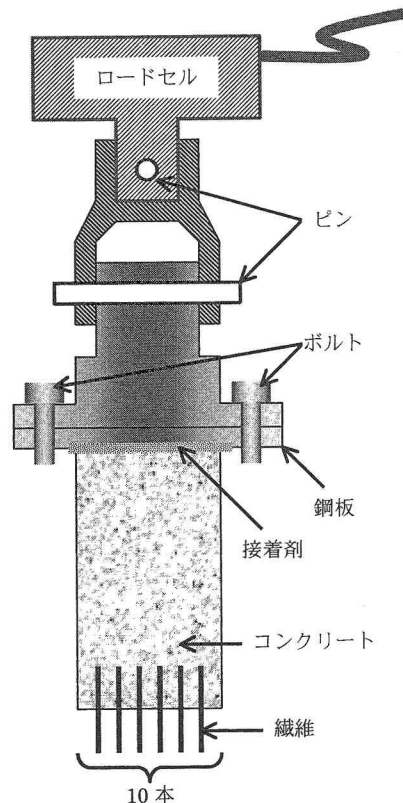


図-7 引抜試験方法

単位面積当たりの付着力はPP繊維と同等であった。

5. まとめおよび今後の課題

再生PET樹脂より製造したコンクリート補強用繊維の利用可能性について検討した。混練試験を行った結果、PET繊維補強コンクリートの混練性は、手練り、機械練りを問わず良好であった。またモルタル中においてPET繊維が偏りなく分散していることがわかった。PET繊維を含む数種類の繊維について引抜試験を行ったところ、PET繊維は1本も破断しなかった。以上から、再生PET樹脂の新規用途のひとつとして、コンクリート補強用繊維は有力と考えられる。

今後、PET繊維補強コンクリートの供試体を用いて4点曲げ試験などの力学試験を行い、力学的特性を求める予定である。また、今回の簡易引抜試験方法では得られなかった最大引抜荷重以降の引抜抵抗曲線を実験的に求め、得られた引抜特性と繊維補強コンクリートの力学的特性との関連について調べる予定である。

本研究を行うにあたり、産業技術総合研究所材料技術部・篠原敬治氏にご協力いただいたことに感謝の意を表す。なお、本研究の一部は、文部科学省21世紀COEプログラム「機械システム・イノベーション」による補助を受けた。

参考文献

- 1) 片脇清士：新しい土木材料とその展開，p. 214-235，1995
- 2) PETボトルリサイクル推進協議会：ホームページ (<http://www.petbottle-rec.gr.jp/>)
- 3) 小林一輔：繊維補強コンクリート—特性と応用—，オーム社，p. 53-67，1981

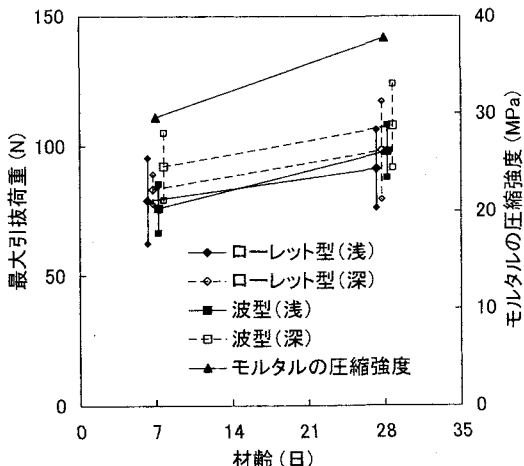


図-8 最大引抜荷重とモルタルの材齢との関係

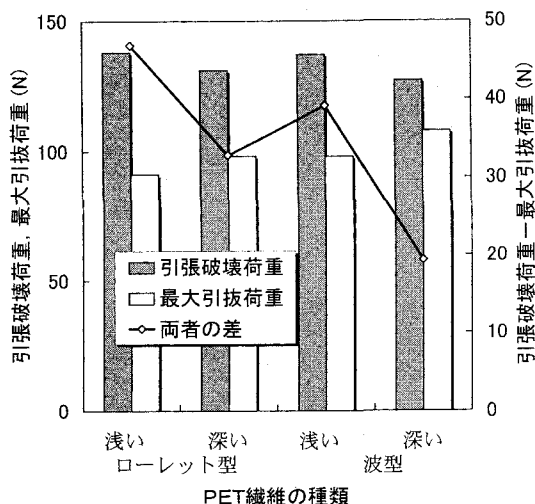


図-9 引張破壊荷重と最大引抜荷重

表-6 2回目の引抜試験結果のまとめ

繊維の種類	最大引抜荷重 (N)	単位面積当たりの付着力 (N/mm ²)
PET繊維	91	2.8
PP繊維A	130	2.9
PP繊維B	186	2.9
PVA繊維	125	3.6