

再生PET繊維の力学特性と保護工・覆工への適用性の検討

STUDY ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS AND THE APPLICABILITY OF SHORT FIBERS OF RECYCLED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) FOR PROTECTION AND LINING

福岡 賢紀*・宮崎 晋行**・大久保 誠介***・福井 勝則****・越智 恒男*****

Masanori FUKUOKA, Kuniyuki MIYAZAKI, Seisuke OKUBO, Katsunori FUKUI and Tsuneo OCHI

Fiber reinforced concrete, which has improved in crack resistance owing to pullout resistance of mixed fibers, is expected as one of the promising materials. In this study, it was investigated whether fibers made of recycled polyethylene terephthalate (PET) is appropriate to concrete reinforcement for protection and lining as well as conventional fibers such as steel fibers. As the first step toward practical use of PET fibers, pullout tests were conducted, pulling a fiber out of the mortar matrix. In these tests 5 kinds' PET fibers with different shape were used. It was found that the shape of PET fibers affects the pullout resistance. Secondly pullout tests, using fibers which were buried in mortar with various angles against the mortar surface, were conducted. The correlation between the maximum pullout resistance and the angle of burying fiber was obtained. Finally, the applicability of PET fiber reinforced mortar for protection and lining was discussed.

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

1. はじめに

繊維補強モルタルは、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。モルタル中に不連続な短繊維を一様に分散させることによって、繊維補強モルタルは曲げ強度、引張強度、靱性、ひび割れ抵抗性などの改善が図られた複合材料である¹⁾。補強材の短繊維としては、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の化学短繊維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モルタルでは、長期間使用した場合、表面に露出した鋼繊維が錆びるといった問題のほか、吹き付け時における鋼繊維の跳ね返り、モルタル中における鋼繊維の分散性、鋼繊維によるベルトコンベアーの損傷²⁾など、施工上の問題点が

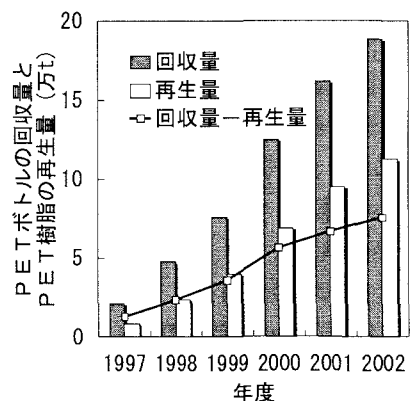


図-1 PETボトルの回収量とPET樹脂の再生量⁴⁾

- * 東京大学大学院修士課程 工学系研究科地球システム工学専攻
- ** 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 技術顧問

数多くある。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は、疎水性で、比重が水より小さいため、繊維がスラリー上に浮上して一様に分散しにくいいため、繊維をモルタル中に混入する前にプラズマ照射や親水基界面活性剤の塗布などの表面処理が必要となる。ポリビニルアルコール繊維は温水で加水分解しやすいなどの問題がある³⁾。

本研究では、繊維として材料コストの安い廃PETボトルより再生した、再生PET樹脂に着目した。PETとはポリエチレンテレフタレート (polyethylene terephthalate) と呼ばれるプラスチック樹脂の一種であり、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。図-1⁴⁾はPETボトルの回収量とPET樹脂の再生量および両者の差の経年的な変化を表したグラフである。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る。従来、再生PET樹脂の主な用途は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」が実用化されつつあるが、それでもやはり経済性の面で有利な新規用途の開発が待たれている。

本研究では、保護工・覆工への利用を目的としたモルタルの補強用繊維として再生PET繊維が利用できるかどうかを検討した。再生PET繊維補強モルタルは施工性の面で鋼繊維補強モルタルと同等以上と考えられているが、再生PET繊維補強モルタルの力学特性に関しては未だ報告例は少ない。鋼繊維補強モルタルに関しては、鋼繊維の引抜特性と一軸引張特性、曲げ特性などの関連付けがある程度なされており^{5) 6) 7)}、引抜抵抗 (荷重) が力学特性の根本になっていると考えられる。本研究では、試験手順が有効であると思われることから、大久保ら⁵⁾と同様の方法でPET繊維引抜試験を行った。

2. PET繊維引抜試験の試料と試験方法

2. 1 試験概要、及び試料

表-1に試験概要を示す。試験1では、繊維の埋込深さ、及び繊維形状を変えてPET繊維引抜試験を行った。試験2では、繊維の埋込角度を変えてPET繊維引抜試験を行った。

図-2はPET繊維引抜試験に用いた試験片である。本研究では、表-2に示すように、試験の種類により、各寸法 (図-2のa~d) の異なる3種類の塩ビ管キャップ (以下、塩ビキャップと呼ぶ) を使用した。これらの塩ビキャップの中心に穴を開け、これを型枠としてモルタルを打設した。図-2 (b) のように、穴の中心付近を貫くようにPET繊維を埋込んだ。

使用したモルタルはケー・エフ・シー (株) 製SNドライモルタルで、重量配合比はセメント : 細骨材 (細砂) = 1 : 1、水セメント比は試験片を作製しやすいようにW/C=0.5とした。

使用したPET繊維はサンゴ (株) 製であり、その製造過程において繊維の表面にさまざまな寸法形状の凹凸を施すことが可能である。図-3に試験1で使用した2種類の凹凸形状の概略図を示す。図中、灰色の部分が凹部である。以下では、図-3の(a)と(b)をそれぞれ螺旋型と波型と呼ぶことにする。この2種類の凹凸形状を有するPET繊維について、それぞれさらに凹凸の深いものと浅いものを使用した。比較のため、プレーン型 (凹凸なし) も試験に用いることとし、計5種類の繊維を試験に用いた。それらの諸元を表-3に示す。なお、これらのPET繊維は試作品であり、試験2では波型をベースに製品化されたPET繊維を使用した。

モルタルの強度特性を把握するため、PET繊維引抜試験と同一ロットのモルタルに対して、一軸圧縮試験と圧裂引張試験を行った。一軸圧縮試験片は直径5 cm、高さ10 cmの円柱形の型枠、圧裂引張試験片は表-2のIで示される塩ビキャップにモルタルを打設して作製した。

試験片はプラスチックシートで軽く覆い、試験日まで温度23±3℃、湿度70±15%の試験室で保管した。

2. 2 試験方法

PET繊維引抜試験には容量10kNのサーボ試験機を使用した。図-4は試験装置と試験中の様子である。予め上部ブラテンには接着剤により固定されたドリルチャックが、下部ブラテンにはロードセルが、それぞれ固定されている。さらにロードセルの上には鋼製円板Aがネジで取り付けられている。試験は次の手順で行った。

- ① 試験片下端に鋼製円板Aをエポキシ樹脂で接着。
- ② PET繊維をドリルチャックで固定し、鋼製円板AとBが接触するまで、上部ブラテンを降下させる。
- ③ 鋼製円板AとBを左右から手万力で挟み、密着させた後、ドリルチャックを締めこむ。
- ④ 上部ブラテンを定変位速度0.1 mm/sで上昇させていき、PET繊維をモルタルから引抜く。

モルタルの力学試験はPET引抜試験と同日に行った。一軸圧縮試験には容量200kNの万能試験機を用いた。圧裂引張試験には容量10kNの万能試験機を用い、定変位速度約0.02 mm/sで試験を行った。

表-1 モルタルの材齢と試験概要

	材齢 (日)	埋込深さ (mm)	埋込角度 θ (度)
試験1	7, 14, 21, 28, 30, 32	5, 10	0
試験2	7, 28, 30, 32	10	0~90

表-2 試料の各寸法

	a : 孔径	b : 内径	c : 外径	d : 高さ
I	8mm	18mm	26mm	31mm
II	10mm	18mm	26mm	31mm
III	17mm	20mm	33mm	31mm

表-3 PET繊維の諸元

長さ	比重	形状	凹凸の程度	引張強度(MPa)
30mm	1.34	なし	—	352
		波型	浅い	432
			深い	328
		螺旋型	浅い	371
			深い	321

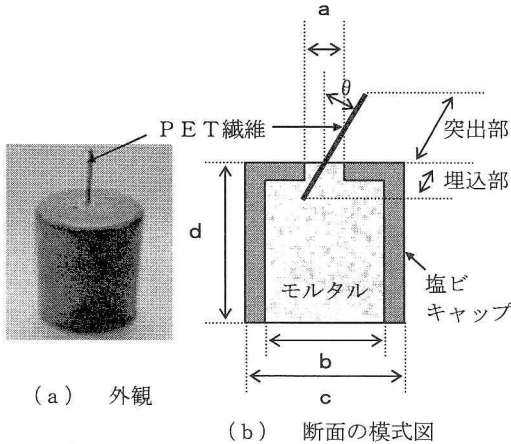


図-2 PET繊維引抜試験用の試験片

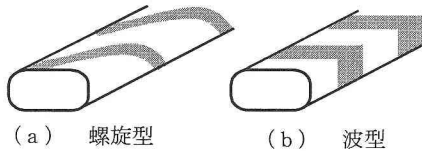


図-3 PET繊維の形状

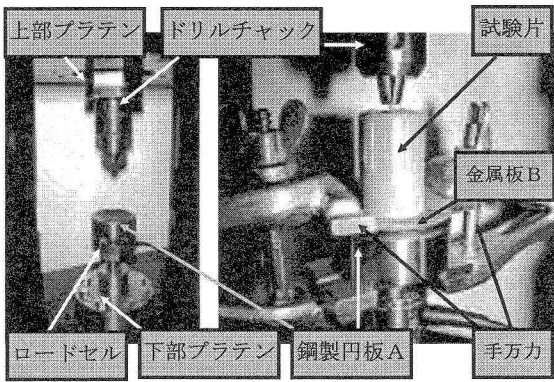


図-4 試験装置と試験方法

3. 試験結果

3. 1 モルタルの力学試験結果

モルタルの材齢による強度変化を図-5に示す。はじめ一軸圧縮強度、圧裂引張強度ともに材齢に従って増加していくが、28日目以降殆ど変化はなく、減少する傾向もみられた。同様の結果は、モルタルを空中養生した場合に得られることが知られており⁸⁾、セメントの水和反応が十分に進まなかった可能性が考えられる。

3. 2 引抜抵抗曲線

図-6に先述した凹凸形状の異なる5種類のPET繊維の引抜試験より得られた引抜抵抗曲線を示す。モルタルの材齢は7日目、繊維の埋込深さは10mmである。はじめ引抜抵抗は変位に対して増加していくが、次第にその傾きは緩やかになっていく。引抜抵抗がピークに達した後は、変位9から11mm付近で零となるまで減少していく。図-6に示されているように、ピーク後の引抜抵抗は、表面に凹凸のある繊維では、ある周期で波打ちながら徐々に減少していくが、凹凸のない繊維ではほぼ単調減少していることがわかる。

本研究では、PET繊維がモルタルから完全に引き抜ける前に繊維が破断するという場合もあった（モルタルからの引抜抵抗の方がPET繊維の引張強度より大きかったことを意味する）。このような現象は、波型（深）、螺旋型（深）、及び螺旋型（浅）の3種類にみられた。破断したケースの引抜抵抗曲線を図-7に示した。図-6に示したものと同じく、はじめ引抜抵抗は次第に増加するが、ある抵抗（荷重）に達すると（変位2mm～3mm付近にて）PET繊維が破断して、引抜抵抗は急激に減少する。

3. 3 繊維表面の凹凸形状の影響

繊維形状と最大引抜抵抗の関係、繊維形状とエネルギーの関係をそれぞれ図-8、図-9に示した。各図は材齢7、14、21、28、30、32日に実施した試験結果をPET繊維の形状ごとにまとめたものである。繊維の埋込深さは10mmである。なお、黒色の棒グラフは繊維が破断せずに抜けたもの、白色の棒グラフは繊維が完全に抜け切るまでに破断したものを示している。

図-8に示した通り、繊維に凹凸がつけられているものは凹凸が無いものに比べ最大引抜抵抗が2倍から3倍程度となっている。繊維が破断した場合も最大引抜抵抗に大きな違いはみられなかった。図-9からわかるように繊維が破断するとエネルギーはかなり低い値を示している。凹凸が深い方が、最大引抜抵抗が大きくなるが、繊維が途中で破断しやすくなるという結果が得られた。

表-4には、各形状の平均最大引抜抵抗、平均エネルギーを示した。今回の試験1で用いた5種のPET繊維の中では、最大引抜抵抗、エネルギーともに螺旋型（深）が最も大きいという結果が得られた。

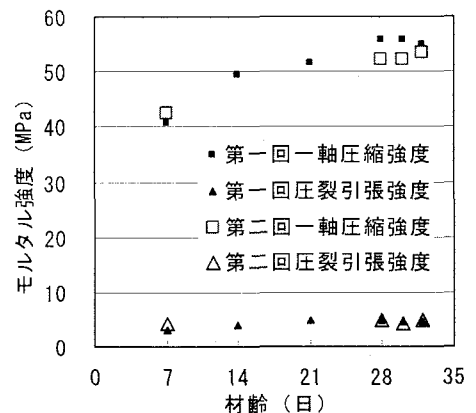


図-5 モルタル強度と材齢

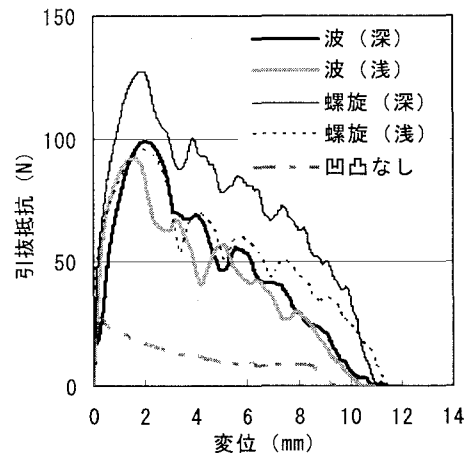


図-6 引抜抵抗曲線1

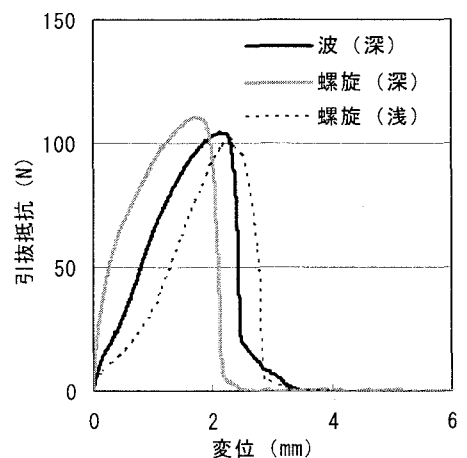
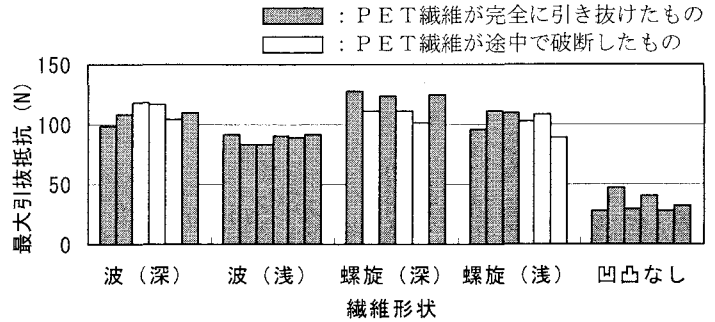


図-7 引抜抵抗曲線2

3. 4 埋込深さの影響

最大引抜抵抗と埋込深さの関係、エネルギーと埋込深さの関係を、繊維が破断したものを除いて、それぞれ図-10、図-11に示した。最大引抜抵抗、エネルギーともに埋込深さに対して増加傾向にあるという結果が得られた。



3. 5 埋込角度の影響

引抜抵抗曲線はPET繊維の埋込角度によって異なっており、代表的な3パターンを図-12に示す。埋込角度 θ が0度から30度での引抜抵抗曲線は①、30度から60度での引抜抵抗曲線は②、60度から90度での引抜抵抗曲線は③のような形状であった。 θ が0度から30度での引抜抵抗曲線は、試験1で得られたものと同様の形状であった。 θ が30度を越えるとモルタル表面が剥離するという現象がみられるようになり、 θ が60度を越えるとPET繊維がモルタル表面を剥がれるように抜けた。図-13に最大引抜抵抗と埋込角度の関係を示した。実線は、0度における平均最大引抜抵抗に $\cos(\pi\theta/180)$ 乗じたものである。これより、0度における平均最大引抜抵抗を P_0 (N)とすると、埋込角度 θ における最大引抜抵抗の関係は、次式で近似できると考えられる。

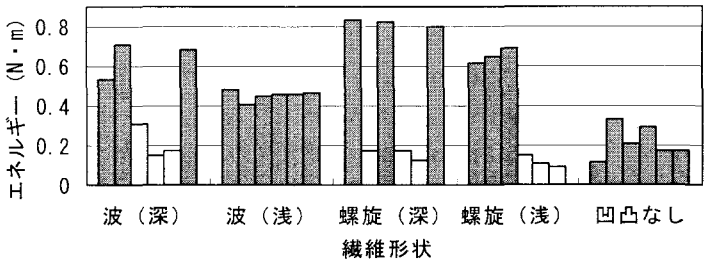
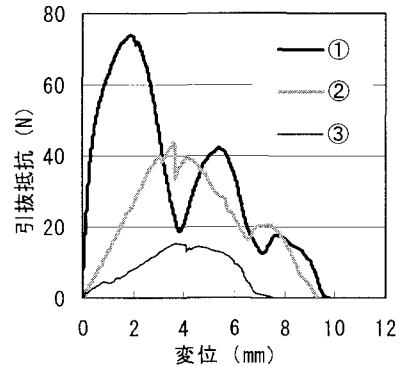
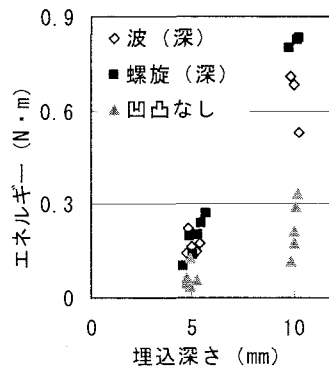
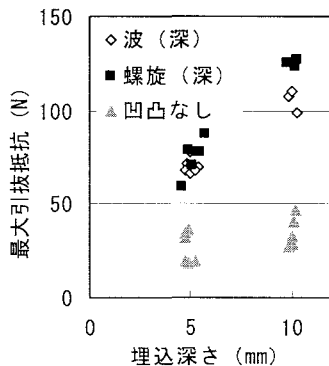


表-4 同形状における平均最大引抜抵抗、及び平均エネルギー

	波(深)	波(浅)	螺旋(深)	螺旋(浅)	凹凸なし
最大引抜抵抗(N)	109.4	88.1	116.4	102.6	34.1
エネルギー(N・m)	0.43	0.45	0.49	0.39	0.22

$$\text{埋込角度 } \theta \text{ における最大引抜抵抗} = P_0 \cdot \cos \frac{\pi \theta}{180} \quad \dots \dots \dots (1)$$

図-14にエネルギーと埋込角度の関係を示した。0度から30度付近ではばらつきが大きかったが、全体としては埋込角度 θ が増加すると、エネルギーは減少することがわかった。



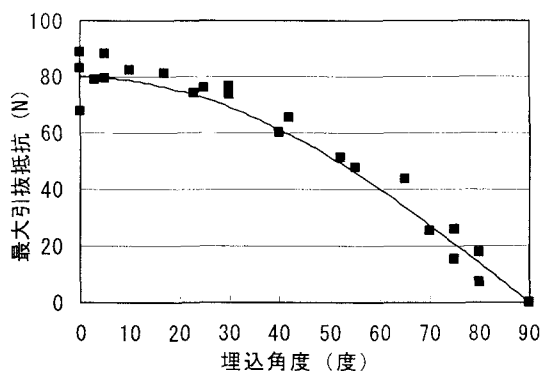


図-13 最大引抜抵抗と埋込角度

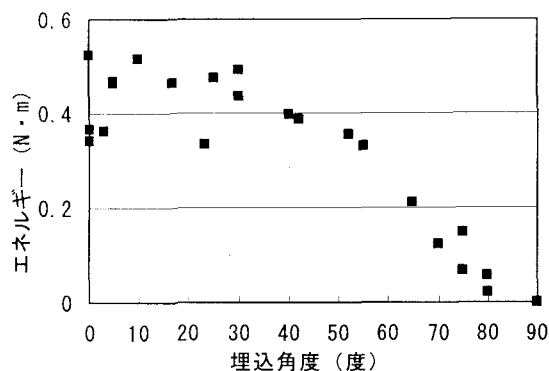


図-14 エネルギーと埋込角度

4. まとめ

再生PET繊維補強モルタルは将来性のある複合材料であり、その力学特性の基本となるのはPET繊維の引抜特性であると考えられる。本研究ではモルタルに埋込んだPET繊維の引抜試験を繊維形状、埋込深さ、埋込角度を変えて行い、引抜抵抗曲線を実験的に求めた。その結果、繊維形状が最大引抜抵抗、及びエネルギーに大きく影響し、表-4に示すように平均値では両者とも螺旋型(深)が最も高いという結果を得た。最大引抜抵抗、エネルギーともに、埋込深さに対して増加傾向があることがわかった。埋込角度の影響を検討した結果、最大引抜抵抗は埋込角度0度(垂直に埋込んだ場合)の平均値 $P_0(N)$ に $\cos(\pi\theta/180)$ を乗じたものに一致することがわかった。今回の試験結果より再生PET繊維補強モルタルの一軸引張応力下における最大残留強度(強度破壊点直後の残留応力)を試算したところ⁵⁾、PET繊維体積混入率に対して図-15のように求められた。図よりPET繊維体積混入率が2%になると、今回の試験に用いたモルタルの圧裂引張強度 σ_t に対して50%以上の残留強度が期待されることになるが、これに関しては今後、再生PET繊維補強モルタルの一軸引張試験を行うことによって確かめる必要がある。

PET繊維引抜試験において、最大引抜抵抗では、鋼繊維の1/3程度である⁵⁾という結果であったが、リサイクル素材の有効活用、不腐敗性、施工性などの面で再生PET繊維補強モルタルは優位にあり、今後より詳細に引抜特性を明らかにし、力学特性をモデル化できれば、保護工・覆工への幅広い利用が可能になると思われる。

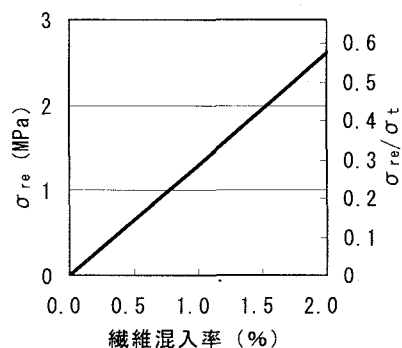


図-15 残留強度の試算結果

参考文献

- 1) 片脇 清士 (1995) : 新しい土木材料とその展開, pp.214-235
- 2) 堂山 弘幸・狭川義弘 (2004) : 資源と素材, Vol.120, pp.235-239
- 3) 宮崎晋行・大久保誠介・福井勝則・石川常夫・越智恒男 (2003) : 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.373-378
- 4) 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/>)
- 5) 大久保誠介・福井勝則・宮崎晋行・中島武典 (2003) : 資源と素材, Vol.119, pp.741-746
- 6) 福井勝則・大久保誠介・楊 勤・越智恒男 (1996) : 資源と素材, Vol.112, pp.69-74
- 7) 大久保誠介・福井勝則・楊 勤・西松裕一・下村 弥 (1998) : 資源と素材, Vol.114, pp.87-92
- 8) 例えば、河野 清・田澤栄一・門司 唱 (1994) : 新しいコンクリート工学, 朝倉書店, pp.59-65