

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：12601
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21360444
 研究課題名（和文）PET ボトルから再生したマイクロ繊維の開発

研究課題名（英文）Development of recycled micro PET fiber

研究代表者
 福井 勝則（FUKUI KATSUNORI）
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号：70251361

研究成果の概要（和文）：繊維補強コンクリートは、斜面やトンネルの支保によく利用されている。コンクリートに混入された繊維により、亀裂の進展が阻害されて、靱性が増す。繊維をマイクロ化することによって単位体積あたりの表面積は増大し、寸法が小さくなることによって引張強度が増加する。それによって繊維の補強性が増大する。本研究では、ペットボトルから再生したマイクロ PET 繊維に関して多くの試験を実施し、その特性を把握した。その結果、マイクロ化することによって特性が改善することがわかった。

研究成果の概要（英文）：Fiber reinforced concrete is used for supporting of slope and tunnel when condition is severe. Fibers in concrete are considered to improve crack resistance and toughness. Micronization of fiber increases in total surface area of fiber per unit volume also can be expected and improves tensile strength of fibers due to size effect. As a result, reinforcement by fibers is increased. In this study, we examined micro PET fibers made from waste PET bottles. Through many experiments, some properties of micro PET fiber reinforced concrete were found out. It is found that micronization of PET fiber is more effective on reinforcing concrete.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	9,100,000	2,730,000	11,830,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学，地球・資源システム工学

キーワード：モルタル，繊維補強，付着，力学特性，ブリーディング

1. 研究開始当初の背景

コンクリートは強度に達すると、急激に破壊してしまう。そのため、大規模な地震の発生などにより、建物やトンネルなどのコンクリート構造物が脆性破壊し、人的・物的被害が拡大することが多い。また、経年劣化によりコンクリートの剥離・剥落が起こり、列車、

車や人身を直撃することが度々報告されている。これらを防ぐために、コンクリートに直径 1 mm、長さ 20-30 mm 程度の繊維を混入させた繊維補強コンクリートが使用されるようになった。繊維補強コンクリートは、コンクリートからの繊維の引き抜き抵抗によって延性化された材料であり、試験体にひ

び割れを発生しても繊維が荷重を受け持つので、剥離しにくい。当初、繊維として鋼繊維が主流であり、著者らは鋼材倶楽部（現：鉄鋼連盟）のスチールファイバー委員会との共同研究で、一軸引張特性（福井他, 1996）、曲げ特性（大久保・福井他, 1998）や耐久性（福井・大久保他, 2004）など多数の検討を行い、鋼繊維補強コンクリートの特性を明らかにし、トンネルなどへの利用を促進させた。しかし、錆の発生や施工が難しいという点から、最近では鋼繊維に替わってプラスチック製繊維が主に使われている。数年前から著者らはPETボトルから再生したペレットを用いたPET繊維を開発し、各種試験を行い、改良を重ねて製品化し、菱刈鉱山での坑道支保用の吹き付けモルタルをかわきりに、現在、多数の坑道・トンネル現場などで使用されている。PET繊維の最大の特徴は、コンクリート中での分散性の良さによる施工性の高さである。他の繊維では、ファイバーボールと呼ばれる、繊維がだんご状に固まってしまうことが多く、コンクリートの内部欠陥となってしまうが、コンクリートに3%の体積混入率でPET繊維を投入してもファイバーボールは生じず、素人でも容易に混練が可能である。また、PETボトルからの再生品ということで、環境にやさしい商品であることも長所である。

2. 研究の目的

Ochi et al. (2007)は使用済のPETボトルを利用したPET繊維を提案し、その製造方法と利用技術に関する研究を行った。またOchi et al. (2007)はPET繊維の親水性、耐アルカリ性、燃焼特性に関する室内実験を行い、PET繊維をコンクリート補強用繊維として使用することに関しては特に問題点はないという結果を得た。従来、PET繊維は直径0.7mmの繊維が使用されてきた。本研究では、さらに細くした直径0.12mmと直径0.032mmのPET繊維を開発し使用した。一般に材料強度は寸法効果を示し、繊維が細くなるほど繊維の引張強度が上昇することが知られている。また、繊維の比表面積は繊維の直径に反比例し、繊維が細くなるほど、繊維の比表面積は上昇する。繊維の比表面積の上昇は、繊維補強コンクリートにおける繊維の補強効果であるひび割れ強度、粘り強さ、耐久性への~~上~~上昇につながり、繊維を細くすることで繊維の補強効果が向上することが予想される。

本研究では、極細PET繊維補強コンクリートの諸特性を明らかにすることを目的とし、直径0.12mmと直径0.032mmの極細PET繊維を使用したコンクリートのフレッシュ性状、付着特性、力学的特性についての試験を行った。

3. 研究の方法

(1) フレッシュ性状

フレッシュコンクリートには、流動性が大きく、施工が容易で、材料分離が起こらないことが要求される。流動性が小さいコンクリートは、型枠のすみずみまで充填させることが難しく、構造物の強度低下の原因となる。また、コンクリートは比重の異なる様々な材料の混合物であるために材料分離が生じやすい。材料分離が起きてしまうと、コンクリート内部が不均一になり、強度に大きな影響を与えてしまう。ここでは、極細PET繊維補強コンクリートについて、スランプ試験とブリーディング試験を行い、流動性と材料分離特性を評価した。

極細PET繊維（ ϕ 0.032mm）補強コンクリートの流動性をJIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」に基づいたスランプ試験によって評価した。スランプ試験はコンクリートのコンシステンシーを測定する方法として最も広く用いられている。スランプ試験は、円錐台形のスランプコーン（高さ30cm、下端 ϕ 20cm、上端 ϕ 10cm）にコンクリートを充填し、スランプコーンを取り除いた後に、コンクリートがどの程度原型を留めているかを見るもので、高さの減少量（スランプ値）で評価する。

コンクリートは、水やセメント、骨材などの比重の異なる材料を練り合わせたものであり、セメントと水が水和反応を起こすことで強度を発現する。その水和反応に使われる水はセメント重量の30~40%であるとされており、水和反応に使われる水以外の余分な水は、遊離水としてコンクリート中に存在することになる。コンクリート打設後、比重の大きい骨材やセメント粒子の沈降に伴い、比重の小さい水（遊離水）の一部が分離上昇しコンクリートの上面に浮いてくるブリーディング現象が起こる。ブリーディングが発生すると、コンクリート上層部の多孔質化や水セメント比の上昇、鉄骨や粗骨材の下部における空隙の形成によって強度が低下する。また、ブリーディングに伴って、コンクリート表面に浮び出て沈殿した微細な物質をレイタンスという。レイタンスも構造物の弱点となり、コンクリートの打継ぎなどに際して、これを取り除かないで打ち継ぐと、打継目の強度が著しく低下する。ここでは、JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に基づいてブリーディング試験を行い、市販のPP（ポリプロピレン）繊維と比較しながら、極細PET繊維（ ϕ 0.032mm）の混入によるブリーディング現象への影響を調べた。

(2) 付着特性

繊維を混入していないコンクリートは、ひび割れが発生すると急激に載荷能力を失う。

それに対し、繊維補強コンクリートは、ひび割れ発生後も急激に荷重能力を失うことなく、高い靱性を示す。これは、繊維/コンクリートの付着によって、繊維がコンクリートから引抜かれるときに生じる引抜抵抗によるものである。繊維/コンクリートの付着に関する研究は、繊維の改良や新規開発、既存の繊維の適切な応用方法や適用範囲の把握には欠かすことができないものである。ここでは、極細 PET 繊維/セメントペースト間の付着についての試験を行い、極細 PET 繊維の付着特性、繊維極細化に関する検討を行った。繊維/コンクリートの付着特性を調べる試験法として、固化する前のコンクリートに1本の繊維を挿入し、コンクリートが固化した後に繊維を引抜くという方法（Pullout 試験）が用いられている。従来の試験方法を極細 PET 繊維に適用することが難しかったため、本研究では、マイクロドロプレット法と呼ばれる試験法を応用し、繊維/セメントペースト間の付着特性を調べた。少量の水を垂らすと、水滴は球状になる。これは水に表面張力が作用し、その表面積を最小にしようとするためである。マイクロドロプレット法はこの性質を利用する試験方法である。まず、繊維上に液体のセメントペーストを垂らし、繊維を中心軸とする球形の微小な試験片を作る。そして、セメントペーストが固化した後に、繊維配向方向に沿って力を加え、繊維とセメントペーストとを剥離させることで繊維/マトリックス間の付着強度を測定する（図1）。この試験方法を用いて、材齢7~28日、水セメント比0.5のセメントペーストと、極細 PET 繊維（ $\phi 0.12$ mm, $\phi 0.032$ mm）間の付着特性を調べた。

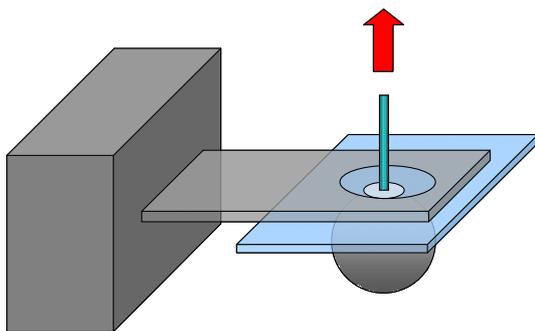


図1 付着強度試験方法

4. 研究成果

(1) フレッシュ性状

スランブ試験結果を図2に示す。1回目、2回目とも繊維混入率の増加により、スランブ値はほぼ直線的に減少した。同様の結果は過去の研究でも報告されている。スランブは水セメント比やコンクリートに含まれる空気

量の影響を受ける。水セメント比が減少するとスランブ値は低下する。また、空気量が低下することによってもスランブ値は低下する。過去の研究では、コンクリート中にランダムに分散している繊維が空気の逃げる経路を形成することによって空気量が減少し、その結果としてスランブ値が減少しているものもある。極細 PET 繊維の混入によってコンクリートに含まれる空気量が減少し、スランブ値が減少している可能性は十分考えられる。また他にも繊維表面に水が吸着され、実際の水セメント比が小さくなることでスランブ値が減少している可能性がある。いずれにせよ、繊維混入による流動性の低下は施工上問題になり、これは極細 PET 繊維を混入することの欠点と言える。

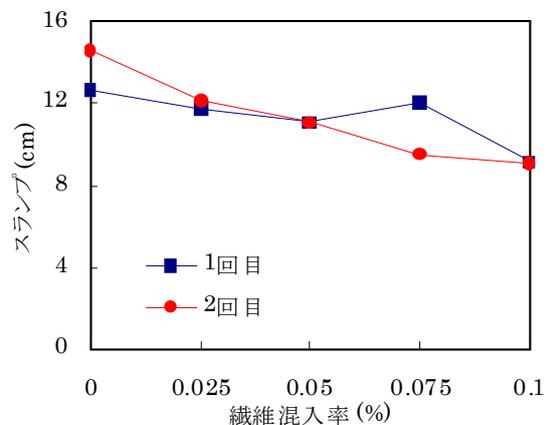


図2 スランブ試験結果

ブリーディング試験結果を図3に示す。繊維混入率によってブリーディング水の総量に多少の差はあるものの、極細 PET 繊維、PP(ポリプロピレン)繊維ともに繊維混入率とブリーディング総水量との間に明白な関係性は見られなかった。過去の研究では、繊維の混入によるブリーディング抑制効果が報告されており、繊維の表面にコンクリート中の水分を補足するためとしている研究もある。極細 PET 繊維、PP 繊維ともにブリーディング低減効果が確認されなかった原因として、両繊維ともに繊維表面の親水性が充分でなく、繊維の表面にコンクリート中の水分を補足することができなかった可能性が考えられる。もう一つ考えられる可能性として、ブリーディング試験におけるブリーディング総水量の誤差に対して、極細 PET 繊維のブリーディング抑制効果が微小であった可能性がある。ブリーディングは、コンクリート温度や外部からの振動に非常に敏感な現象である。ブリーディング水の採取・計量時のわずかな振動が、ブリーディング総水量に影響を与えてしまった可能性がある。

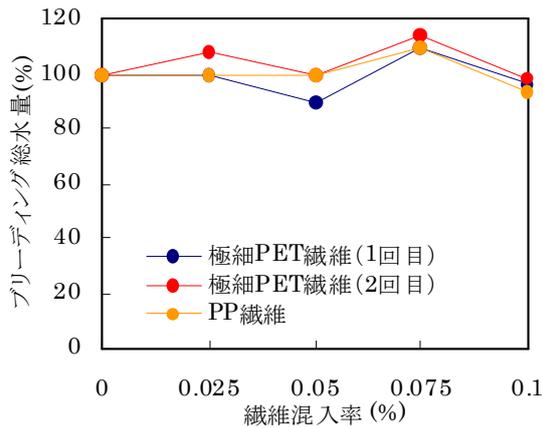
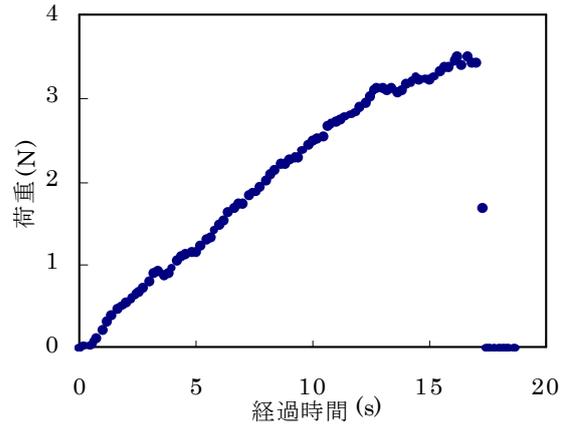


図3 ブリーディング試験結果
(繊維混入率 0 % の総水量 100 % とした)

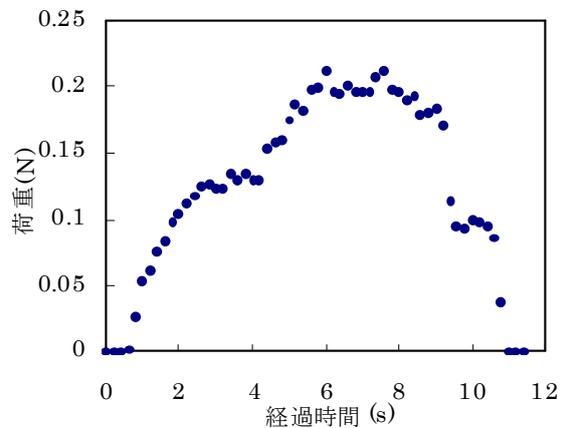
(2) 付着特性

図4に各繊維について、破断せずに引抜けた時の典型的な荷重曲線を示す。Kanda and Li (1998)は、引抜試験における荷重曲線には、繊維/マトリックス間の付着抵抗が卓越している剥離過程と、繊維/マトリックス間の摩擦抵抗が卓越している引抜過程があるとしている。さらに、Liら(1999)は、この荷重曲線における荷重の急激な低下は、繊維/マトリックス間の付着が剥離したことを示すもので、うまく付着していない場合には、繊維/マトリックス間の摩擦抵抗のみが働くため、この急激な低下がないとしている。ここで各極細PET繊維の荷重曲線を見ると、極細PET繊維 ($\phi 0.12$ mm) の荷重曲線 (図4a) には明瞭な引抜過程がなく、付着抵抗と比較して摩擦抵抗が微小であったことを示している。また、極細PET繊維 ($\phi 0.032$ mm) の荷重曲線 (図4b) には荷重の急激な低下がなく、最大荷重も極細PET繊維 ($\phi 0.12$ mm) と比較して小さく、極細PET繊維 ($\phi 0.032$ mm) /マトリックス間が十分に付着していない可能性を示唆している。繊維/セメントマトリックス間の付着は、繊維の親水性に影響されるとされており、極細PET繊維 ($\phi 0.032$ mm) /マトリックス間が付着していなかった原因として繊維の表面状態 (親水性) に問題があった可能性が考えられる。

図5に埋め込み長さ と剥離荷重 (最大引抜荷重) の関係を示す。極細PET繊維 ($\phi 0.12$ mm) については、直線的な比例関係ではなく、上に凸な関係を示した。このような結果は、過去の研究でも報告されており、繊維マトリックス間に発生するせん断応力が一様ではないためと考えられる。図6に示すような、せん断応力分布モデル (赤線) を仮定したところ、実験結果とよく一致した。モデル (赤線) では $x \geq 5$ mm の領域では、発生するせん断応力が 0 MPa となる。実際のせん断応力分



(a) 極細PET繊維 ($\phi 0.12$ mm)



(b) 極細PET繊維 ($\phi 0.032$ mm)

図4 引抜荷重曲線

布も、このモデルと近い分布をしていると考ええると、埋め込み長さを 5 mm より長くしても、剥離荷重はほとんど上昇しないことになる。これは、極細PET繊維 ($\phi 0.12$ mm) /セメントペースト間の剥離荷重には臨界値が存在することを示唆するものであり、出来るだけ少ない繊維量で効率よく補強効果を得るためには、繊維のアスペクト比を決定する際にこの臨界値を考慮する必要があるだろう。同様のモデルを他のPET繊維 ($\phi 0.032$ mm, $\phi 0.7$ mm) にも適用し、繊維極細化について、繊維の単位体積あたりの付着力で評価した (図7)。埋め込み長さが大きい範囲では、いずれの繊維も単位体積あたりの付着力は大差なく、また埋め込み長さが小さくなるにつれて、いずれの繊維も単位体積あたりの付着力は上昇している。この上昇幅は直径が小さい繊維ほど大きく、埋め込み長さ 0~6 mm の範囲において繊維の極細化は非常に有効であることがわかる。この結果から、繊維を短くするほど、極細化の効果は大きくなるように思える。コンクリート補強用繊維の補強効果に及ぼす因子として、繊維の最大引抜抵抗

と引抜エネルギー（完全に引抜くために要するエネルギー）が考えられる。繊維を短くすると、引抜エネルギーが低下してしまい、補強効果の低下が予想される。今後の課題として、PET 繊維の直径・長さとの引抜エネルギーの関係を解明し、最大引抜抵抗と引抜エネルギーのバランスを考えながら、繊維の長さについて検討することが必要である。

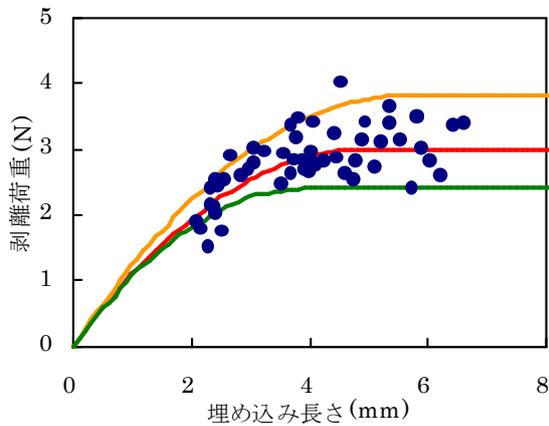


図5 埋め込み長さとの剥離荷重
(極細 PET 繊維: ϕ 0.12 mm)
(点: 実験値, 実線: モデル)

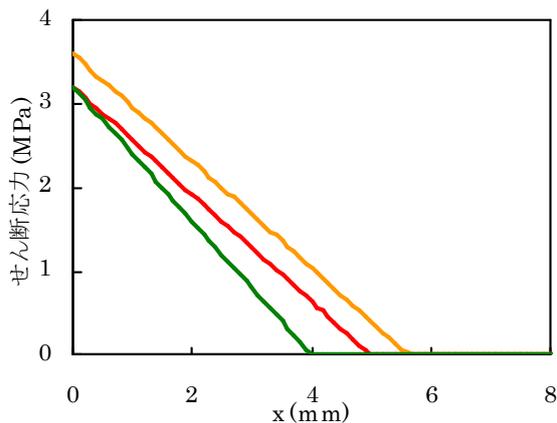


図6 せん断応力分布モデル

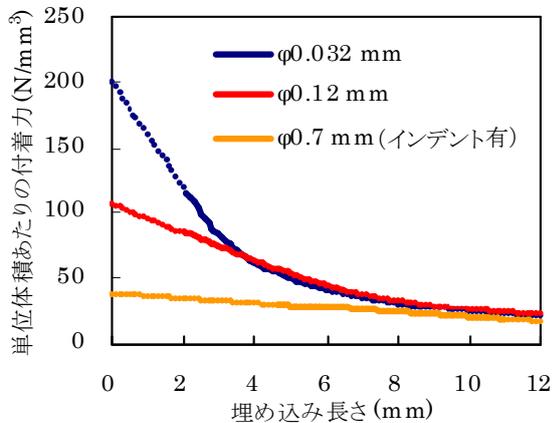


図7 各 PET 繊維の単位体積あたりの付着力
(実線: 実測範囲, 点線: 推測範囲)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 董賀祥, 大久保誠介, 福井勝則, コンクリート強度が補強用繊維の付着特性におよぼす影響, 資源・素材, 査読有, Vol. 127, No. 6, 7, pp. 249-255
- ② 董賀祥, 大久保誠介, 福井勝則, ポリオレフィン繊維のコンクリートとの付着特性と埋込角度・長さの影響, 資源・素材, 査読有, Vol. 126, No. 12, pp. 654-659

[学会発表] (計 1 件)

- ① 鈴木喜久, 横沢圭一郎, 木内勉, 大久保誠介, 福井勝則, トンネル補助工法に適用する複合動的注入の研究, 第 28 回日本道路会議講演集, 2009 年 10 月 29 日, 東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福井 勝則 (FUKUI KATSUNORI)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 70251361

(2) 研究分担者

大久保 誠介 (OKUBO SEISUKE)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 90092155

羽柴 公博 (HASHIBA KIMIHIRO)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 60456142