「トピックス」

セメント系複合材料の補強材としての連続繊維

辻 幸 和

1. まえがき

炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維、ビニロン繊維などの連続繊維を、鉄筋やPC鋼材などの鋼材に代わってコンクリートで代表されるセメント系材料の補強材として用いるための研究開発が、近年活発になされ、実用例の報告も多くなっている。鋼材と比較してこれらの繊維は、比重が小さいにもかかわらず引張強度が高く、また、耐食性にも優れているなどの長所が注目されているためである。そして、これらの繊維は、建物や橋などのコンクリート構造物の設計施工の合理化や効率化、海水や凍結防止材などによる塩害に対する高耐久性化、超電導磁気浮上式鉄道用ガイドウェイやグラウンドアンカーなどにみられる新分野の開拓などに、それぞれ多量に利用される可能性を秘めた材料と言えるのである。

建設材料の主幹をなすコンクリートの補強材として、これらの連続繊維が鋼材に代わって実用されるためには、その品質に対する価格が特に重要な問題となる。鋼材に比べて数倍から100倍を超える高価な連続繊維を多量に使用できるか否かは、この材料を補強材に用いたセメント系複合材料としての補強コンクリートの部材や構造物の性能に依存するのである。

本文では、セメント系複合材料の補強材として要求される連続繊維の種類や品質ならびに連続繊維で補強したはり部材の曲げ性状などについて取りまとめることにする¹⁻⁴⁾。

2. 繊維の種類と品質

モルタルやコンクリートのようなセメント系材料は引張強度が小さい。そのため、繊維を混入して補強するセメント系複合材料は、比較的古くから実用化されている。

代表的な例としては、これまで多量な実績があった石綿スレートなどがあるが、石綿は近年はその使用が禁止されている。補強用の短繊維としては、1970年代の初めに鋼繊維と耐アルカリ性のガラス繊維が実用化された。そして、現在のところ我が国で実用化のための研究開発の対象となっている繊維は、鋼繊維とガラス繊維以外に、炭素繊維、アラミド繊維、ビニロン繊維である。それらの品質を概略的に説明すると、以下のとおりである(表1参照)。

繊維の引張応力とひずみの関係を図1に示す。この図から、普通鋼材の鉄筋とPC鋼線を除くいずれの繊維も、応力とひずみは破断まで直線関係にあり、鉄筋のような降伏現象を示さない。また、引張強度は鉄筋の数倍程度以上ある。

炭素繊維は、他の繊維に比べヤング係数が大きく、破断時のひずみである伸びが1%前後と小さい。そのため、破壊じん性や衝撃抵抗性が劣るという欠点を有している。しかし炭素繊維は、ガラス繊維に比べ、コンクリートの補強材として必要な性質である耐水性や耐アルカリ性などの化学抵抗性に優れている。

アラミド繊維は、炭素繊維と同様に化学抵抗性に優れているが、紫外線照射による強度低下は大きい。しかし、コンクリート中に使用されることにより、この強度低下は問題にならない。またアラミド繊維は、ガラス繊維と同様に伸びが3~5%を示し、引張強度もPC鋼材と同等以上であるが、ヤング係数が鋼材の2/3~1/5と小さい。

従来のものに比べて高強度化、高弾性化されたビニロン繊維は、軽量で伸び能力はあるが、引張強度およびヤング係数は比較的小さい。また、コンクリート中のアルカリ性に対しては安定している。

Continuous Fiber Reinforcing Materials Used for Cement-based Composite Materials

著者紹介 YUKIKAZU TSUJI

Department of Civil Engineering, Gunma University

群馬大学工学部建設工学科 教授、工学博士

著者はコンクリート工学を専門とされ、著書に「コンクリート学(I)」,(彰国社,1993)ほかがある。趣味はゴルフ、読書。

本稿では、鉄筋およびPC鋼材に代わる連続繊維補強材について用途例とともに解説されている。

表1 各種繊維素材の品質¹⁾

諸 元	炭 素 繊 維				アラミド繊維			ガラス繊維		ポリビニルアル コール繊維	鋼繊維*
	PAN系		ピッチ系		ケブラー49	トワロン	テクノーラ	Eーガラス	耐アルカリ ガラス		
	高強度品	高弾性率品	汎 用 品	高弾性率品						高強力ビニロン	
引張強度 (MPa)	3,500	2,500 ～4,000	750 ～1,000	3,000 3,500	2,800		3,500	3,500 ～3,600	1,800 ～3,500	2,300	400 ～2,000
ヤング係数 (GPa)	200～240	350～650	38～400	400～800	130		74	74～75	70～76	61	200
伸 び (%)	1.3～1.8	0.4～0.8	2.1～2.5	0.4～1.5	2.3		4.6	4.8	2～3	5.0	2～20
密度(g/cm ³)	1.7～1.8	1.8～2.0	1.6～1.7	1.9～2.1	1.45		1.39	2.6	2.27	1.30	7.8
直径(μ m)	5～8		9～18		12		12	8～12	8～12	14	200～700
価 格 (円/kg)	10,000 ～15,000	20,000 ～40,000	1,500 ～3,000	50,000 ～100,000	4,000 ～6,000	10,000	6,000	400	600	2,000	200～600

*鋼繊維を著者追記

図1 各種繊維の引張応力-ひずみ関係¹⁾

表2 繊維の利用形態

利 用 形 態	
連続繊維	棒状の補強材
	PC用緊張材
	2次元格子
	3次元格子
	布・織物
短 繊 維	外囲き材

3. 繊維の利用の形態

繊維をセメント系材料の補強材として利用する形態は、

表2に示すように、①連続繊維として用いる方法と、②短繊維として用いる方法とに大別できる。

①の方法はまた、a) 鉄筋と同様な棒状の補強材として用いる方法、b) PC鋼材と同様な棒状のプレストレストコンクリート用の緊張材として用いる方法、c) ストラランドにして、コンクリートを外側から緊張しながら被覆して補強する方法、d) 布、2次元あるいは3次元の格子状あるいは織物として用いる方法などに分けることができる。②の方法は、繊維を数mm~数10mmの長さ切断した短繊維を、コンクリートやモルタル中に分散して用いるものである。本文では、①の方法について述べる。

4. 連続繊維補強材の種類・形状

連続繊維をコンクリートなどのセメント系材料の補強材として利用するためには、繊維を集束し、結合材(マトリックス)を含浸させて成形して用いる場合がほとんどである。このように成形したものを、連続繊維補強材と称している。連続繊維補強材はまた、鉄筋のように用いる連続繊維棒材、PC鋼材のように用いる連続繊維緊張材、および形鋼のように用いる連続繊維形材に大別できる¹⁾。

これまでに研究開発されている連続繊維の種類は、炭素繊維がその半数以上を占めている。次に、アラミド繊維、ガラス繊維、ビニロン繊維の順である。結合材としては、エポキシ樹脂やビニルエステル樹脂などの合成樹脂を用いているのが大半である。一部、特殊セメントやシリカフェウムを併用しているものがある。したがって、これらの連続繊維補強材を、FRP (Fiber Reinforced Plastic) 補強材と称する場合が多い。

形状については、1次元棒材、2次元格子、3次元立体織物などがある。棒材の場合は、繊維に一定の張力を

表3 連続繊維補強材の形状の種類⁵⁾

種 類	ロ ッ ド	ス ト ラ ン ド	組 紐	格 子	矩 形
形 状

加えながら補強材に成形するプルトレーション法が、一般に用いられている。補強材中の各繊維のよじれをなくして引張応力度の均一化を図ることにより、静的疲労現象を防止しているのである。

また、コンクリートとの付着力を確保するためには、表面に異形性を賦与することが必要となる。そのため、表3に示すように⁵⁾、ストランド状にしたり、編み方を組紐状にしたりする。また、表面に繊維を綾状やらせん状に巻きつけたり、表面に砂を固着するなどの様々な表面処理もなされている。

格子状補強材は、繊維の束に合成樹脂を含浸させながら緊張した状態で、X方向、Y方向にあるいはZ方向に交互に積層して製造されている。また立体織物補強材は、繊維の束に合成樹脂を含浸させながらX、Y、Zの各方向に交互に積層して成形する方法や、3次元織物を作製した後に合成樹脂を含浸させる方法により製造されている。特殊セメントやシリカフェウムを併用したものを結合材にして繊維を集束させたものは、棒材、板材および曲面板として製造されている。

上記以外でも、コンクリート構造物の補強や補修に主として使用される繊維シート、およびアラミド繊維ロープなどの製品が製造されている。連続繊維補強材への需要が高まるとともに、多種多様の補強材が今後とも開発されるものと予想される。

5. 連続繊維補強材の機械的性質

セメント系複合材料では、圧縮力はモルタルやコンクリートが、引張力は補強材がそれぞれ分担することになる。すなわち、図2に示すように外力として曲げモーメントが作用する場合、引張強度が圧縮強度の約1/10以下のセメント系材料では、ひび割れが発生して引張力を受け持つことができない点を、補強材で分担するのである。そして、ひび割れ幅は最大で0.1~0.4mm程度までに抑えるのである。なお、ひび割れの発生を許さない場合には、後述するように、コンクリート中に配置した補強材を両側から引張って、伸びたままコンクリートに止めてしまうことにより、将来荷重の作用により引張応力が生じる部分のコンクリートに圧縮応力（これをプレスト

図2 セメント系複合材料における補強材の働き

図3 繊維および繊維補強材の応力-ひずみ関係¹⁾

レスという)を導入させておくのである。したがって、補強材には高い引張強度とヤング係数（剛性）が要求されるとともに、高いじん性を賦与するために大きな伸び能力が必要である。

連続繊維補強材として利用する場合の肝要な点は、補強材中にいかに多くの連続繊維を損傷させずに混入させて成形させるかである。マトリックスの結合材は、強度およびヤング係数とも、一般に連続繊維より小さい。そ

図4 連続繊維補強材の荷重-ひずみ曲線⁶⁾ 図5 FRP補強コンクリートはりの断面諸元と載荷方法⁶⁾ 図6 曲げひび割れ幅と荷重の関係⁶⁾ 図7 プレストレストコンクリートの原理⁷⁾

のため、繊維混入率を高めることが、連続繊維補強材としての強度および剛性を増し、補強材としての品質を向上させることになる。

図3に、引張試験の一例を示す。連続繊維補強材の引張強度およびヤング係数は、連続繊維および結合材の種類、繊維混入率、断面形状などにより異なるため、系統的に論じることはできないが、一般的には引張強度が500~2000MPaで、ヤング係数が30~150GPaである。そして、応力-ひずみ関係は、1種類の連続繊維からなる連続繊維補強材(繊維混入率が約60%)については、最大応力時まではほぼ直線とみなすことができる。これは、連続繊維自体とはほぼ同じ傾向を示している。すなわち、結合材の影響により全体的にヤング係数が小さくなるが、炭素繊維補強材は他の連続繊維補強材に比べてヤング係数が大きく、また、破断時の伸びが1%前後と小さくて降伏現象を示さないため、ぜい性的な破壊を示す。一方、アラミド繊維補強材ならびにガラス繊維補強材は、破断時の伸びが2~4%を示し、炭素繊維補強材に比べて伸びが大きい。

しかし、図4に示すように⁶⁾、炭素繊維とガラス繊維を併用することにより、伸び能力の小さい炭素繊維からまず破断し始めた後、ガラス繊維の破断で終局とさせる鉄筋の降伏に似た現象(ハイブリッド効果)を生じさせることも可能である。このような方法により、連続繊維補強材のじん性を増す工夫もなされている。

引張強度やヤング係数は、温度の影響を受ける場合がある。連続繊維や結合材の種類によって異なるが、環境温度が0℃~60℃の範囲では10℃高くなるごとに、引張強度で約50~100MPa、ヤング係数で1~2GPaほど低下する場合もある。

6. 連続繊維棒材を用いたはり部材の曲げ性状

連続繊維補強材のうち連続繊維棒材をコンクリートはりの補強材として用いた場合の曲げ性状について、図5に示す断面諸元をもつはりを例に、以下に述べる⁶⁾。

連続繊維棒材の引張剛性が鉄筋に比べて小さいことは、その補強効果が減じ、①曲げひび割れ発生後における補強材のひずみが大きくなること、②曲げひび割れ幅が大きくなること(図6参照)、③たわみが大きくなること、④曲げひび割れ発生荷重の増加が小さいことなどの、曲げ性状が示されている。

破断時のひずみが小さい連続繊維補強材をはり部材の引張補強材として配置すると、その破壊形式が補強材で破断する繊維破断型曲げ破壊を生じて脆い破壊となる。そのため、設計においては、この種の破壊を避けて、圧縮側のコンクリートが補強材の破断の前に圧壊する曲げ

圧縮破壊の形式を採らざるを得なくなる。

このようなはり部材の曲げ性状を改善するためには、引張剛性と伸びの大きい連続繊維補強材を製造する技術の開発が必要である。

また、連続繊維を機械的に緊張して PC 鋼材のように用いることにより、引張剛性が小さいことの悪影響を軽減している。そして、コンクリート用膨張材を用いて、連続繊維補強材をあらかじめ引張っておくことにより、ケミカルプレストレスを自動的に導入することも、一つの有力な方法と考えられる。すなわち、図 7 に連続繊維緊張材を機械的に緊張して荷重の作用によりコンクリートに引張応力が生じる下側の部分にプレストレスの圧縮応力を導入する原理を示す⁷⁾。(a)図が固ったコンクリートの中に連続繊維緊張材が入っている状態、(b)図が連続繊維緊張材をジャッキで引張った状態を示す。ジャッキで引張ると、この緊張材は伸びて、前の状態より両側に Δl cm だけ伸びる。次にこのままこの緊張材をコンクリートに止めて定着してしまうと、コンクリートは Δd cm だけ縮んで(c)図ようになる。この Δd cm 分だけ、コンクリートには圧縮力が加えられており、上側に反っている。荷重が増加すると、この反りが零に近づくが、設計荷重の作用時にも、下側のコンクリートには引張応力が生じないように、プレストレスの圧縮応力をあらかじめ導入しておくのである。そのため、高強度の補強材が必要で、これまではピアノ線を原料にした PC 鋼材が一般に用いられてきた。この PC 鋼材の代わりに、高強度の品質を持つ連続繊維補強材を用いるのである。また、コンクリート用膨張材を用いてコンクリートを膨張させると、コンクリート中に配置された連続繊維補強材がこの膨張を拘束するとともに、自身は(b)図のように伸びて、逆にコンクリートには(c)図のように縮んだことと同じ現象で圧縮応力が導入されるのである。この圧縮応力をケミカルプレストレスと称している。

7. 連続繊維緊張材としての利用

近年、世界的な規模で問題になっている PC 鋼材の塩分腐食によるプレストレストコンクリート (PC) 構造物の劣化を防ぐ抜本的な対応策として、高張力鋼の PC 鋼材の代わりに連続繊維補強材を連続繊維緊張材として利用する研究開発が活発になされ、実用化され始めている。連続繊維補強材の引張剛性が小さいことが部材の力学的性状に及ぼす悪影響を、6. に述べたあらかじめ補強材には引張力を、引張側のコンクリートにはプレストレスをそれぞれ与えておくことにより軽減できるためである。

連続繊維補強材をコンクリート構造物に適用した例は

図 8 大型橋の一般図⁹⁾

写真 1 浮き橋

50件を超えるが、そのうち70%が連続繊維緊張材として利用されている。残りが、鉄筋の代わりに用いられたものである。

また、それらの主な採用理由の内訳は、塩害地区のような厳しい環境下において高耐久性化を図った橋りょう21件、海洋および水に接する構造物10件、非磁性・非電導性が要求される構造物6件、グラウンドアンカー4件、建築構造物4件、トンネルおよび地下構造物5件となっている⁸⁾。このように、現状では、腐食しないという新素材繊維の特徴を生かした実施例が大半であるが、非磁性や軽量などの特徴や個々の材料独自の性質を応用した新しい分野の実施例も現れてきている。以下に、比較的新しい施工実施例を紹介する。

図 8 は、1993年に愛知県内のゴルフ場に建設された橋長111m、支間75m、全幅3.6mの1径間有ヒンジラーメン歩道橋である⁹⁾。使用された緊張材はすべてポストテンション方式で、 $\phi 12.5$ mmの炭素繊維のCFRPストランドを6本束にした大容量のマルチストランドケーブルを108本使用した。その内8ケーブルは、コンクリートの外側に配置した外ケーブルとしている。

写真 1 は、1992年に茨城県のゴルフ場の池の中に建設された橋長 56.37m、全幅 4 m のプレテンション方式で施工された函体連結浮き橋 (歩道橋) である。プレテンション用および函体連結外ケーブル用の緊張材には組紐状のアラミド繊維の AFRP を使用し、鉄筋の代わりの補強材として組紐状の AFRP とビニロン繊維の VFRP

を使用している。

8. む す び

炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維、ビニロン繊維などの新繊維をコンクリートなどのセメント系材料の補強材として使用する場合に要求される品質を、連続繊維として用いたはり部材についての力学的性状の観点より概観した。鋼材は、補強材として優れた品質を有するが、発錆するというアキレス腱をもっている。海洋や環境の厳しい場所においてもコンクリート構造物は今後ますます建造されていくことになる。このような場合に、このアキレス腱をコンクリートだけでは防護できない事例が数多く生じてくる。また、軽量化あるいは非磁性などの品質が要求される構造物も多くなるだろう。このような場合、本文で紹介した連続繊維は、鋼材と競合して、セメント系材料の有用な補強材の地位を確立するものと期待される。

本文の作成においては、多くの貴重な研究成果を参照させて頂いた。特に、土木学会 コンクリート委員会 連続繊維補強材研究小委員会（委員長 岡村 甫 東京大学教授）における審議内容および委員会報告書ならびに連続繊維補強材研究小委員会（委員長 町田篤彦 埼玉大学教授）における審議内容が無ければ本文は作成できなかった。ここに厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 土木学会 コンクリート委員会 連続繊維研究小委

員会報告、連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用、コンクリートライブラリー72, 1992年4月

- 2) 日本建築学会 連続繊維複合材料研究委員会：新補強材のコンクリート構造物への利用の現状と問題点, 1989
- 3) 日本建築学会 連続繊維複合材料研究委員会：新補強材のコンクリート構造物への適用に必要な評価項目の整理と現状の評価方法, 1990
- 4) 辻 幸和：教室 コンクリート最新技術（2）繊維補強コンクリート, コンクリート工学, **32**, No. 5, 1994. 5
- 5) 土木学会 連続繊維補強材研究小委員会 品質規格部会資料, 1994年12月
- 6) 辻, 斉藤, 関島, 小川：FRPで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状, 第10回コンクリート工学年次論文報告集, 1988年
- 7) 池田, 小村, 田辺, 中田, 松村, 本岡：楽しく読める鉄筋コンクリートのはなし, 日本コンクリート工学協会, 1980年
- 8) 熊谷, 関島：コンクリート技術の最前線-1. コンクリート材料-繊維, コンクリート工学, **33**, No. 3, 1995. 3
- 9) 関, 田中, 濱田, 榎本：カンチレバーケーブルに炭素繊維補強材を用いたPCラーメン橋, コンクリート工学, **31**, No. 12, 1993. 12

(平成7年6月5日受理)

第39回 日本学術会議材料研究連合講演会

協 賛：日本学術会議材料工学研究連絡委員会
日本学術会議金属工学研究連絡委員会
繊維学会ほか
日 時：9月20日(水), 21日(木)
会 場：日本学術会議（東京都港区六本木7-22-34）
電話 03-3403-6291
問い合わせ先：〒606 京都市左京区吉田泉殿町1-101
日本材料学会材料研究連合講演会係
電話 075-761-5321

1996年国際膜会議 (ICOM'96)

主 催：日本膜学会
協 賛：繊維学会ほか
日 時：平成8年8月18日(日)～8月23日(金)
会 場：パシフィコ横浜
論文申込締切：平成7年9月1日
問い合わせ先：(株)アイエス企画
1996年国際膜会議 (ICOM'96) 事務局
〒103 東京都中央区日本橋2-14-9
電話 03-3272-7981
FAX 03-3272-2445
担当者：関 敦, 中島陽子