

PCの新しい材料 入門講座 No.7

連続繊維補強材

講師：岩崎 達彦*1・酒井 博士*2・細谷 学*3

1. はじめに

連続繊維補強材という言葉は、1992年頃から土木学会を中心に用いられはじめました¹⁾。その後、1995年には建築学会で²⁾、翌1996年には土木学会で³⁾正式に定義されました。それ以前は、われわれ建設の分野では、一般に新素材とかFRPという名前で呼ばれていました。前者は、主にコンクリートの分野において鋼材に代わる新しい材料としての意味合いで用いられてきた用語です。一方後者は、繊維強化複合材料全般を示す記号として、工学の分野で広く一般に用いられている用語です。

土木学会では、連続繊維補強材は、「連続繊維に繊維結合材を含浸させ、硬化させて成形し、コンクリートを補強する目的で使用する一方向強化材や連続繊維のみを束ねたもの、または織ったものの総称」と定義されていますが³⁾、現在製造されている連続繊維補強材は、連続繊維と繊維結合材からなる一方向強化材がほとんどです。したがって、本講座では主にこのような材料を対象に説明することとします。

2. 連続繊維補強材の位置づけ

複数の異種素材により構成される複合材料は、一般に母材と強化材で構成されています。母材による分類では、大別してプラスチック系、金属系、セラミック系、ゴム系の4種類に分けられます。この中で、プラスチック系を強化材でさらに分類すれば、繊維強化複合材料(FRP)と粒子強化複合材料に分かれます。そして繊維系複合材料は、繊維の形態によって短繊維と長繊維に分かれますが、連続繊維補強材は後者の範疇に分類されています。

繊維強化複合材の一種である連続繊維補強材においても、母材としてのプラスチックと、強化材である連続繊維それぞれで分類可能ですが、一般には、図-1に示すように繊維の種類で分けて略称で呼ばれます。

繊維強化複合材としての繊維は、炭素系、アラミド系、ガラス系、ビニロン系、ポロン系、シリカ系、アルミナ系などがありますが、建設の分野で用いられる連続繊維補強材としては、最初の4種類の連続繊維が実用化されていま

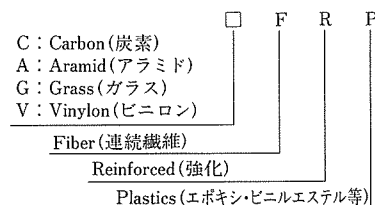


図-1 連続繊維補強材の略称

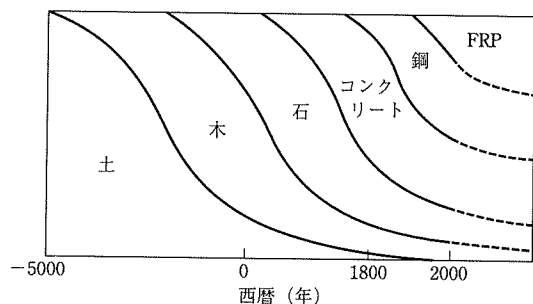


図-2 使用材料の推移

す。また母材である繊維結合材には、エポキシ系樹脂やビニルエステル系樹脂が多く使用されています。

3. 連続繊維補強材の歴史

われわれの生活環境周辺には、鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートなどの土木構造物から合板や壁などの建築材料、車から電化製品に至るまであらゆる分野に幅広く複合材料が用いられています。ここで、複合材料の歴史を簡単に振り返ることにします。

図-2は、私たち人類が利用してきた材料の歴史を模式的に示したのですが、最も身近な土や木に始まり、文明の進歩とともに、より強度の高い石からコンクリートや鉄へと推移してきました。来世紀には、連続繊維補強材の本格的な利用が期待されているところです。一方、このような材料を組み合わせた複合材料の歴史は意外に古く、縄文時代の縄文土器は粘土と植物繊維、エジプト文明発祥の日干し煉瓦は泥と砂および切り藁を組み合わせたもので、複合材料の起源と言えます。また、身近なところでは、日本家屋の土壁は土と竹格子そして切り藁の組合せで、現在まで

*1 Tatsuhiko IWASAKI: ACC倶楽部, エー・エム・エンジニアリング(株) 技術部部长

*2 Hiroshi SAKAI: ACC倶楽部, (株)ピー・エス 開発技術第一部 主任研究員

*3 Manabu HOSOTANI: ACC倶楽部, 大成建設(株) 土木本部 土木設計第一部 橋梁設計室 主任

表-1 繊維強化複合材および連続繊維補強材の歴史

年	繊維強化複合材			連続繊維補強材		
	複合材料	強化剤	母材	種類	製品名	
19世紀後半	鉄筋コンクリート	鉄筋	コンクリート			
1900前後	タイヤ	麻布・綿糸・レーヨン	加流ゴム	GFRP		
1907	FRP	木粉・紙・綿布	フェノール樹脂			
1920	FRP	木綿	ユリア樹脂			
1940	ガラス繊維開発					
1942	GFRP	ガラス繊維	不飽和ポリエステル樹脂			
1950	ビニロン繊維開発					
1959	炭素繊維開発					
1960	ボロン繊維開発					
1966	BFRP	ボロン繊維	エポキシ樹脂			
1970	CFRP	炭素繊維	エポキシ樹脂			
1971	アラミド繊維開発					
1971	AFRP	アラミド繊維	エポキシ樹脂			
1971	アルミナ繊維開発					
1975	炭化ケイ素繊維開発					
1983					CFRP	リードライン
1986					CFRP	CFCC
1986					AFRP	FIBRA
1986					各種	ネフマック
1987					AFRP	アラプリ
1989				AFRP	テクノーラ	
1992				CFRP	NACCストランド	
1993	VFRP	ビニロン繊維	エポキシ樹脂			
1997				各種	コンボーズ	

引き継がれてきた画期的な建築用複合材料と言っても過言ではありません。まさに、先人たちが自然と闘いながら生み出した知恵の成果が複合材料なのです。

次に、近代における複合材料史を見てみると、表-1に示すように、20世紀後半には次々に新しい繊維の開発とその複合化に成功し、さまざまな種類の繊維強化複合材が開発されてきました。一方、連続繊維補強材としての利用は、1942年、ドイツでGFRPが建設材料に初めて用いられましたが、国内外を問わず本格的に実用化されるようになったのは、今から約10年ほど前です。

4. 連続繊維補強材の形状と分類

現在実用化されている連続繊維補強材を写真-1に示します。これらを形状によって分類すれば、図-3のようになりますが、実にさまざまな種類の連続繊維補強材が開発されていることが分かります。

5. 連続繊維補強材のメカニズム

連続繊維補強材は、図-4に示すように、直径 $7\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ 程度の極めて細い繊維を、 1mm^2 あたり数万本(連続繊維補強材の種類によって異なりますが、一般的には1万本~2万本)、繊維結合材で含浸して硬化させたものです。繊維は、繊維結合材に比べて非常に強度が高く、かつ脆性材料であるため、各繊維に引張力のばらつきが生じた場合は、一部の繊維が破断してしまっ、連続繊維だけでは十分な引張耐力を得ることができません。そこで、繊維よりヤング係数の小さな繊維結合材により繊維一本一本を満遍なく被うことで、各繊維に作用する引張力ができるだけ均一になるようにしています。

6. 連続繊維補強材の特徴

連続繊維補強材は、連続繊維または繊維結合材のどちら

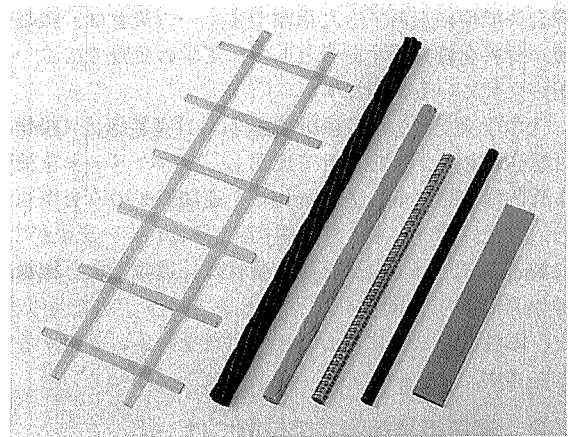


写真-1 連続繊維補強材の外観

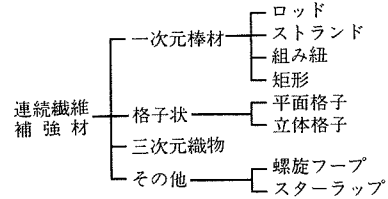


図-3 連続繊維補強材の形状による分類

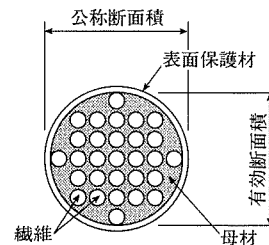


図-4 連続繊維補強材断面模式図

か一方の卓越した材料特性や、複合材としての材料特性など、鋼材のような均一材料とは異なった、複合材料特有の

表-2 連続繊維補強材の各種特性⁴⁾

	CFRP	AFRP	GFRP	PC鋼より線	鉄筋
比重	1.5	1.3	1.7~1.9	7.85	7.85
引張強度	N/mm ² 1900~2300	1400~1800	600~900	1700~1900	490
弾性係数	kN/mm ² 130~420	50~70	30	200	210
破断伸び	% 0.6~1.9	2~4	2	6	10
リラクゼーション	% 1.5~3	5~15	10	1~2	—
線膨張係数	10 ⁻⁶ /°C 0.6	-2~-5	9	12	12
耐食性	○	○	○	×	×
非磁性	○	○	○	×	×

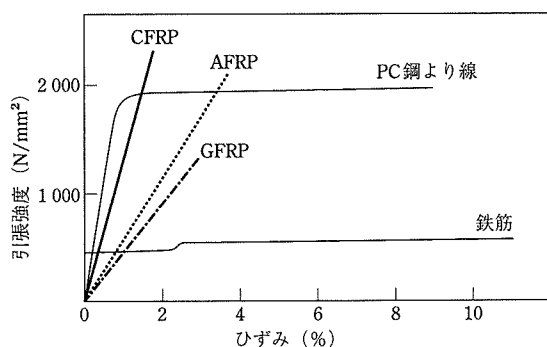


図-5 荷重とひずみの関係

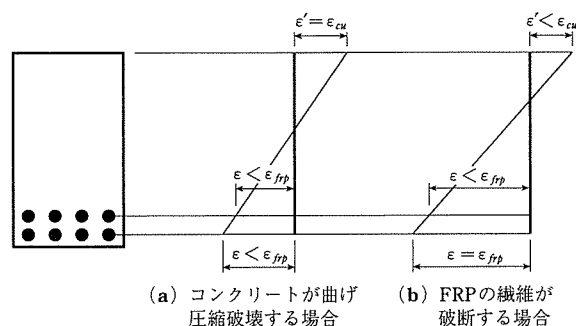


図-6 主筋を多段配置した部材の終局時のひずみ分布

性質を有しています。そして、とくに物理的性質は、繊維の種類や形状および製造方法によって異なり、鋼材のように画一化することは困難です。そこで、設計や施工に必要な特性値は、連続繊維補強材ごとにそれぞれ試験によって定めるか、製造メーカーによって実験的に確認された信頼できる値を用いる必要があります^{2), 3)}。ここでは、表-2に示すように⁴⁾、鉄筋やPC鋼材と比較しながら、連続繊維補強材の一般的な性質に触れてみることにします。

6.1 引張強度特性

図-5に示すように、応力とひずみの関係には降伏点がなく、終局までほぼ直線を保ったまま脆性的に破断します。PC鋼より線と比較した場合、引張強度はほぼ同等ですが、弾性係数は2/3~1/4程度です。

6.2 単位重量

比重は1.3~1.7であり、鋼材の1/4~1/6と非常に軽量であることから、施工時の取扱いや運搬は容易です。

6.3 耐食性

pH3~pH13の酸やアルカリの環境下では、鋼材のように錆びることなく安定していますので、腐食の心配がありません。

6.4 線膨張係数

鋼材の線膨張係数は、コンクリートのそれと同一ですが、CFRPでは $0.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と極めて小さく、またAFRPでは $-2 \sim -5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と負値となります。

6.5 電磁気特性

鋼に比べて透磁率が十分小さいため、リニアガイドウェイなどの非磁性が要求される構造物への適用が可能です。

7. 実構造物への適用

7.1 設計上の取扱い

前章で説明したように、連続繊維補強材には鉄筋やPC鋼材とは異なる性質がいくつかあります。それでは、連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計は、どのように行えばよいのでしょうか。結論から言いますと、基本的には鉄筋やPC鋼材を用いた場合と同様に設計することができます。ただし、いくつかの注意が必要です。設計方法については、土木学会、建築学会およびACC倶楽部から指針^{2), 3)}やマニュアル⁵⁾がすでに出されていますので、具体的にはこれらを参考にさせていただくとして、ここでは注意点を簡単に述べることにします。

最も注意すべき連続繊維補強材の性質は、「降伏および塑性域がなく、脆性的に破断する」という点です。通常の使用状態では、連続繊維補強材は破断に対して十分に余裕のある弾性体ですので、鉄筋やPC鋼材と同じように設計することができます。しかし、終局状態では、連続繊維補強材が破断していないかどうかをチェックしなければなりません。すなわち、連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の破壊形態には、連続繊維補強材が終局ひずみに達する場合とコンクリートが終局ひずみに達する場合の2通りを考える必要があります。表-2に示したように、従来の鉄筋やPC鋼材には十分な伸び能力があるため、通常、鋼材が破断するかどうかを考慮しませんが、これらに比べて、連続繊維補強材は伸び能力が小さいため、連続繊維補強材の破断に対する照査が必要になるのです。設計断面耐力(破壊抵抗曲げモーメント)を算定するとき、コンクリートが曲げ圧縮破壊する場合には、鉄筋やPC鋼材を用いた場合と設計方法は同じです。一方、連続繊維補強材が破断する場合には、図-6のように、断面の平面保持を仮定して、連続繊維補強材が終局ひずみに達するときのひずみ分布を求め、これをもとに耐力を算定します。このとき、連続繊維補強材を多段配置した場合には、最外端のFRPから順に終局ひずみに達して破断することに注意が必要です。

次に、せん断耐力の算定について説明します。土木学会の

指針³⁾では、せん断耐力 V_{ud} は次式で求めることができます。

$$V_{ud} = V_{cd} + V_{sd} + V_{ped} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 V_{cd} : せん断補強筋を用いない棒部材の設計せん断耐力

V_{sd} : せん断補強筋により受け持たれる設計せん断耐力

V_{ped} : 軸方向緊張材の有効引張力のせん断力に平行な成分

です。

式(1)は鉄筋やPC鋼材を用いる場合と同じですが、連続繊維補強材を用いる場合には、主に次の3つの点に注意が必要です。

- ① 前述のようにヤング係数が鉄筋やPC鋼材に比べて小さいため、引張鋼材に連続繊維補強材を用いるとダウエル効果の低下などによりコンクリートが負担するせん断耐力が小さくなります。
- ② 連続繊維補強材をスターラップとして用いる場合に、断面形状に合わせて曲げ加工した部分の強度が引張強度より小さくなるため、連続繊維補強材が受け持つせん断耐力の算定には、曲げ成形部の強度を用います。
- ③ 連続繊維補強材が受け持つせん断耐力の算定には、連続繊維補強材の破断強度ではなく、部材の終局時における連続繊維補強材のひずみから求めた強度 $E_{fip} \epsilon_{fip}$ (ここで、 ϵ_{fip} : 連続繊維補強材の終局ひずみ、 E_{fip} : 連続繊維補強材のヤング係数) を用いるということです。

なお、せん断耐力の算定においても、せん断補強用の連続繊維補強材が破断するかしないかの2通りの破壊形態があることに注意が必要です。

このほかに鉄筋やPC鋼材と異なる点として、連続繊維補強材の引張強度、ヤング係数、見かけのリラクセーション率、線膨張係数、応力度の制限値、緊張材として用いる場合のダクトとの摩擦などがありますが、いずれも試験によって定めるか、前述した指針やマニュアルに示されている数値を用いることにより、従来と同じ設計が可能です。ただし、連続繊維補強材の線膨張係数は、表-2のようにコンクリートの線膨張係数とはかなり異なっており、CFRPのように極めて小さかったり、AFRPのようにコンクリートとは反対の性質をもっていたりします。したがって、連続繊維補強材を緊張材に用いる場合、温度変化によって緊張力が変動することを考慮しなければならないこともあります。たとえば、CFRPを用いる場合には、20℃の温度上昇で緊張材応力度が約2%増加します³⁾が、一般には問題ないレベルと考えられます。

なお、現行の指針やマニュアルにはまだ示されてはいませんが、連続繊維補強材は鉄筋やPC鋼材に比べて耐食性に優れているので、たとえば「連続繊維補強材を用いる場合にはコンクリートのかぶり厚を小さくしてよい」というように、この特徴を設計に反映させることができれば、さらに連続繊維補強材を有効に利用することができると考えられ

ます。

7.2 施工上の取扱い

連続繊維補強材は鉄筋やPC鋼材に比べて軟らかい材料ですから、外傷を受けやすく、取扱いによっては材料強度を低下させる場合があります。したがって、取扱いの際には慎重な作業が必要です。このため、連続繊維補強材は破断しやすく、取扱いが困難な材料だというイメージが出来上がってしまいました。しかし、通常の手取扱いであれば問題はありませし、むしろ軽い材料のため、取扱いやすいという意見もあります。連続繊維補強材の施工性に関する実験では、CFRPに深さ0.4mm~1.2mmの外傷を付けたり(図-7)、静的側圧や重錘落下による衝撃的側圧を与えた場合(写真-2, 3)の強度低下を測定しています⁶⁾。これによると、外傷や静的側圧ではほとんど強度低下はありませんが、衝撃的側圧では大きな強度低下が見られます。したがって、ハンマー等の重量物の落下に気をつけたり、連続繊維補強材に損傷を与えない配慮はいるものの、過度に心配する必要はないと考えられます。

7.3 連続繊維補強材の定着装置

連続繊維補強材をポストテンション方式の緊張材に適用

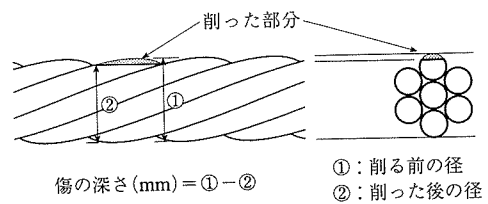


図-7 削り傷の深さ

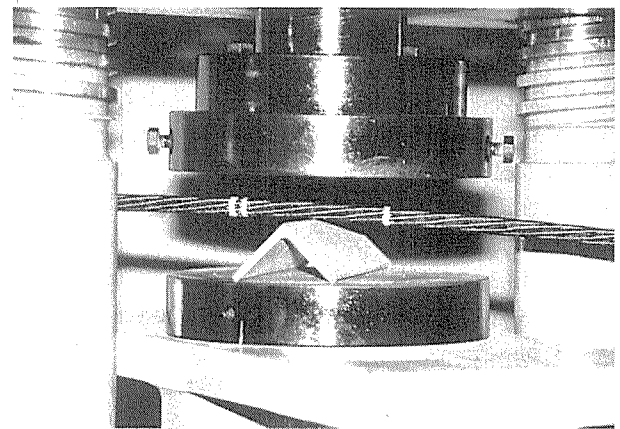


写真-2 静的側圧試験方法

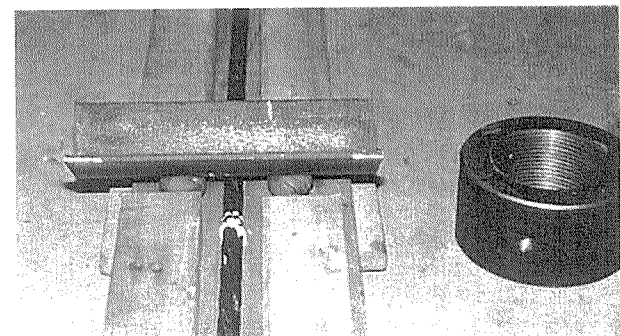


写真-3 衝撃的側圧試験方法

する場合、定着装置の構造が問題点の一つに挙げられていました。連続繊維補強材は一方強化材ですから、定着による繊維直角方向の力の作用によっては、連続繊維補強材が本来有する引張強度よりも小さな応力で破断することが知られています。このため、ポストテンション方式に用いられる定着装置について従来から研究開発が進められ、今日ではくさび型と付着型の2種類が実用化されています。

くさび型定着体は、緊張材の長さを現場で自由に調節できる現場製作ケーブル用に開発されたものです。写真-4(a)に示すように、定着時にくさびによる繊維直角方向の圧力を緩和する目的で、特殊な形状のくさびや、連続繊維補強材を被覆保護するなどの工夫が施されています。

付着型定着体は、写真-4(b)に示すように、樹脂やセメントモルタルの付着力によって連続繊維補強材とスリーブを結合し、ねじ定着される形式で、外ケーブルのような工場製作によるプレハブケーブルとしてよく用いられています。

7.4 これまでの施工実績

連続繊維補強材の施工実績は、国内外でこれまでに140件(平成11年5月現在)を超えています⁴⁾、⁷⁾が、このうち約70%が緊張材として、残りが鉄筋代替の補強筋として利用されています。図-8に示すように、連続繊維補強材の採用理由として最も多いのは耐食性で全体の約30%を占めています。

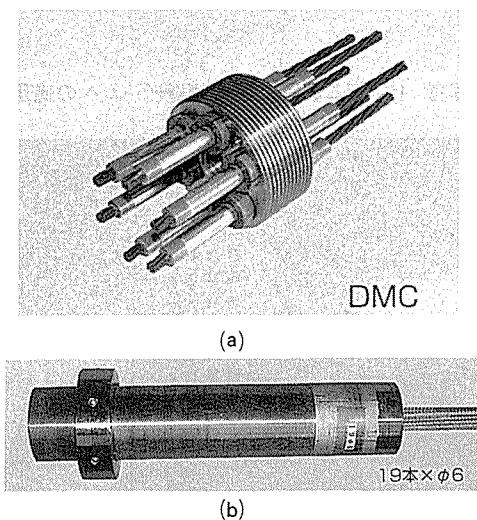


写真-4 ポストテンション用定着体

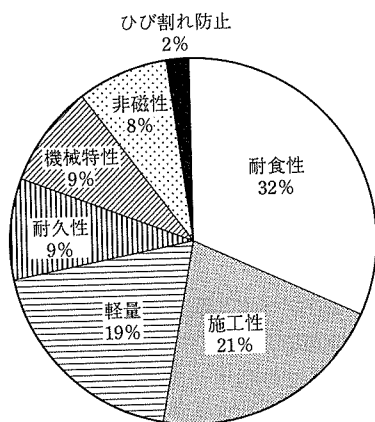


図-8 連続繊維補強材の採用理由

す。以下、施工性、軽量と続きます。最近では、非磁性、非電導といった連続繊維補強材ならではの実施例が増加しています。図-9は用途別に施工実績の推移を示したものです。連続繊維補強材が使われはじめた頃は、PC橋梁の緊張材への適用が最も多かったのですが、現在ではグラウンドアンカーや補修・補強への適用が増加しています。

それでは、連続繊維補強材が実際にどのように使われているのか具体例を紹介しましょう。写真-5は、AFRPをグラウンドアンカーに適用した例です。定着体にもステンレスを用いているため高耐久性を有していること、ヤング係数が小さいため地盤変形による張力変動が小さいという理由から採用されています。このほかにも、温泉地などの腐食環境下での永久アンカーに多く採用されています。

写真-6は主ケーブルにAFRP、グラウンドアンカーにCFRPを使用した吊床版橋です。床版部には耐久性および軽量化を目的としてCFRPとVFRPを使用しています。写真-7はゴルフ場内のPCラーメン歩道橋(支間75.0m)で、全緊張材(カンチレバーケーブル、外ケーブル)にCFRPを用いており、本格的に連続繊維補強材を適用した最初の橋梁で、連続繊維補強材がPC鋼材と同様にカンチレバーケーブルや外ケーブルに使用できることを実証しました。橋梁では、連続繊維補強材の高強度、高弾性を有効に活用するため、連続繊維補強材を緊張材として用いることが多いのですが、塩害が厳しい地域では、腐食した鉄筋の代わりに連続繊維補強材を配置して桁を補修する場合があります。

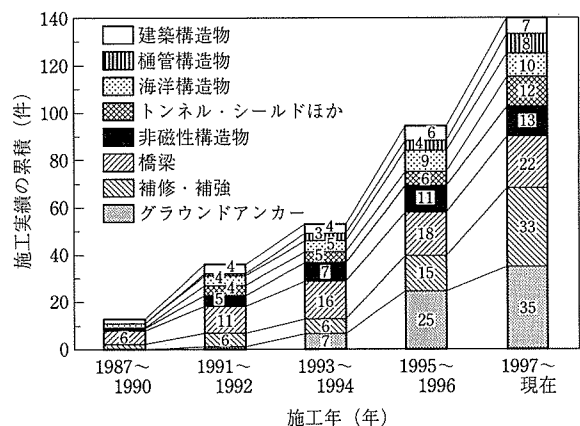


図-9 用途別の施工実績の推移

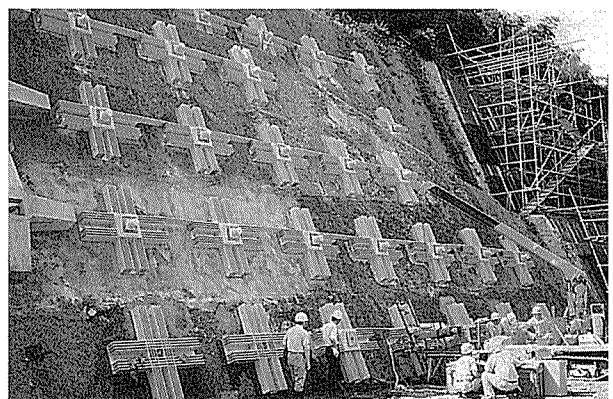


写真-5 グラウンドアンカーへの適用例

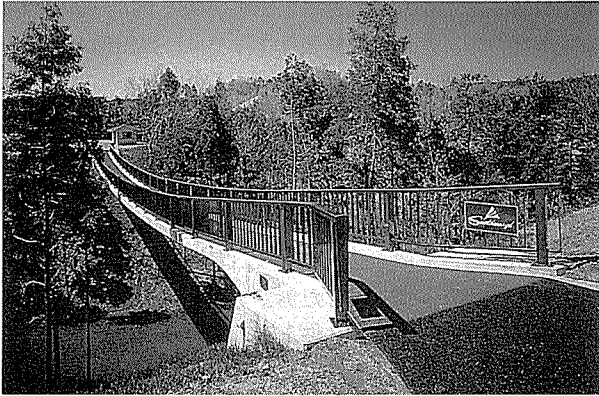


写真-6 吊床版橋への適用例

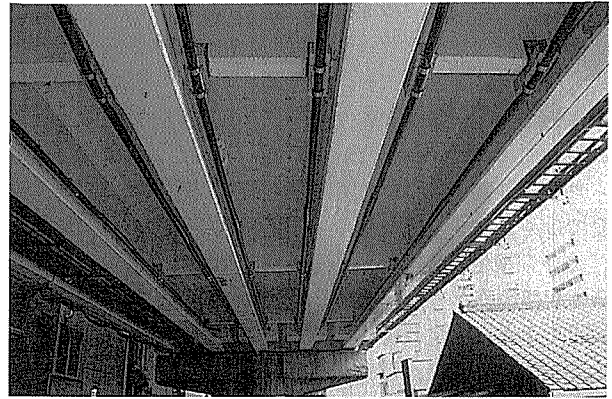


写真-9 外ケーブルによる桁補強への適用例

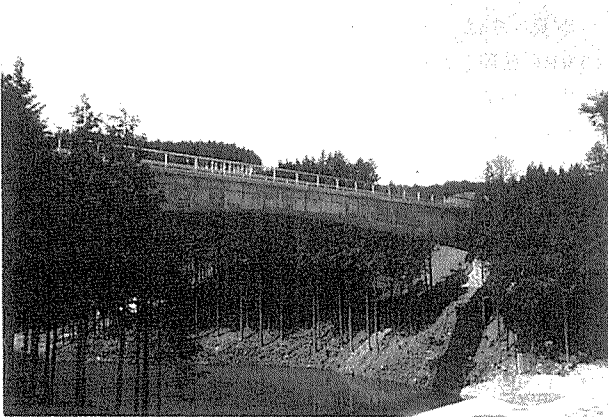


写真-7 PCラーメン橋への適用例

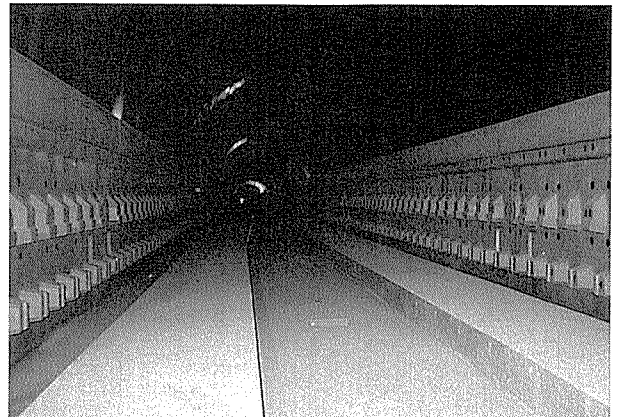


写真-10 リニア実験線の側壁ビームへの適用例

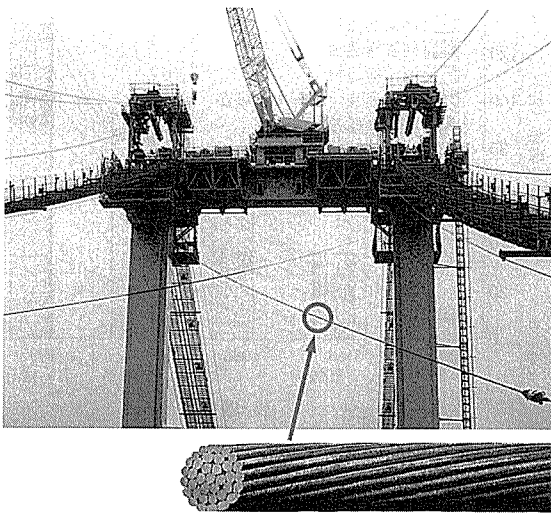


写真-8 キャットウォークのステイケーブルへの適用例

写真-8は、吊橋の架設に用いるキャットウォークのステイケーブルにCFRPを適用した例です。連続繊維補強材が軽量のためサグが小さくなること、防食処理が不要であることが採用理由です。写真-9は、高速道路の桁補強にAFRPとCFRPを外ケーブルとして用いた例です。PC鋼材に比べて軽量で取扱いやすいこと、高耐久性であること等が採用理由です。写真-10はリニア実験線の側壁ビームにCFRPとAFRPが適用された例です。非電導・非磁性のため、誘導電流による電力ロスがないことにより採用されました。同様に、連続繊維補強材の非磁性を利用した例には、写真-11の



写真-11 TV電波のゴースト障害対策としての適用例

ように、TV電波のゴースト障害対策として電波透過型カーテンウォールにAFRPを用いた例があります。最後に、興味ある連続繊維補強材の利用法を紹介します。写真-12はCFRPをシールド立坑の地下連続壁の補強材に適用した例です。これは、シールドマシンが立坑から発進する際に、

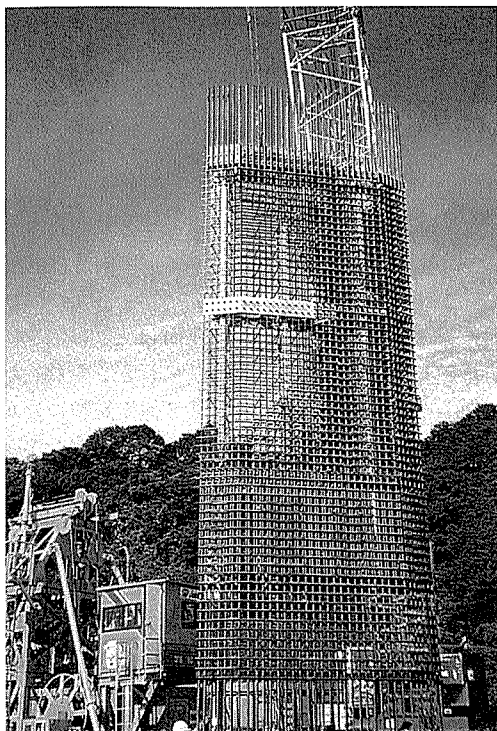


写真-12 シールド立坑への適用例

カッタービットで容易に切削できることから採用されたもので、連続繊維補強材の弱点とも言える繊維直角方向の低切断抵抗性を有効に利用した逆転の発想によるものです。

8. おわりに

連続繊維補強材が建設分野に登場してから早くも10年以上が経過しました。しかし、建設分野への適用はまだまだ十分ではありません。これにはいろいろな原因が考えられ

ますが、経済性の点から採用が見送られることが多いようです。実際、連続繊維補強材の価格はPC鋼材の7倍～10倍程度と決して安くはありません。しかし、構造物にもよりますが、構造物全体の工費で考えると、おおよそ10%～20%程度の増加で済むようです。

最近、社会資本はLCC(ライフサイクルコスト)を考慮すべきだという考え方が取り入れられようとしています。連続繊維補強材は腐食しない材料ですから、連続繊維補強材を使用したコンクリート構造物は、初期建設費がやや高くてもLCCを考えれば、経済的な構造物と言えるかもしれません。また、前述したように、桁の耐荷性を向上させるための外ケーブルとしての適用や塩害が厳しい地域での桁の補修など、連続繊維補強材の高耐久性を利用した補修・補強への適用も年々増加しています。このように、連続繊維補強材が本領を發揮するのは、まさしくこれからの時代と考えられます。

最後に、これからますますの連続繊維補強材の発展を望むとともに、本稿が今後の連続繊維補強材発展の一助となれば幸いです。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー72，連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用，1992
- 2) 建設省大臣官房技術調査室監修 連続繊維補強コンクリート編集委員会編：連続繊維補強コンクリート—諸性質と設計法—，技報堂出版，1995.7
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー88 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)，1996
- 4) ACC倶楽部：新素材施工実績集 (Vol.1～2)
- 5) ACC倶楽部：ACC倶楽部：FRP材を用いたPC道路橋設計・施工マニュアル(案)(4訂版)，1998.4
- 6) 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，Vol.31，No.12，pp.34～42，1993
- 7) ACC倶楽部：ACCトピックス，Vo.1～9

【2000年2月8日受付】