

ピッチ系高弾性炭素繊維の土木・建築分野における利用技術

Reinforcing Materials from Pitch-based High Modulus Graphite Fiber for Civil and Construction Engineering

林 田 道 弥⁽¹⁾ 山 崎 義 人⁽²⁾ 竹 田 敏 和⁽³⁾ 中 村 稔⁽⁴⁾
Michiya *Yoshito* *Toshikazu* *Minoru*
 HAYASHIDA YAMASAKI TAKEDA NAKAMURA

抄 録

炭素繊維は航空・宇宙及びスポーツ・レジャーの分野を中心に、機能材、構造物材として利用されてきた。最近、土木・建築の分野でもその需要の開拓が著しい。炭素繊維は、その原料によりPAN系とピッチ系に分けられるが、ここでは、新日本製鐵が開発を進めてきたピッチ系高弾性炭素繊維について、その概要と、土木・建築分野での適用例を紹介した。

Abstract

Carbon fiber has been recently applied in various fields as a functional or structural material. The carbon fiber is grouped into two classes according to its raw materials, PAN (Polyacrylonitrile)-based system and pitch-based system. In this paper, the high modulus carbon fiber (graphite fiber) of a pitch-based system is mainly described which Nippon Steel has been developing for the use of a reinforcing material, and some examples of its practical and remarkably developed application in the field of civil engineering and construction are introduced.

1. 緒 言

今日、軽量で、高強度、高弾性である炭素繊維は、先進複合材料の基材として利用されており、弾性率200GPa以上、強度2～6GPa以上のものは高性能炭素繊維と呼ばれ、PAN(ポリアクリルニトリル)又は、メソフェースピッチを原料として製造されている。

炭素繊維の工業化は、1959年、レーヨン原料としてUnion Carbide Corporation (UCC)によって始められた。その後、(PAN)系炭素繊維の工業化が英国、米国、日本で盛んになり、今日に至っている。一方、ピッチ系炭素繊維は、1969年に呉羽化学工業で等方性ピッチを原料にした最初の工業化が行われた。高性能ピッチ系炭素繊維は、大谷の研究¹⁾を基に、1975年にUCCによってメソフェースピッチを原料として工業化が行われた^{2,3)}。しかし、UCCのメソフェースピッチ系炭素繊維は引張強度が2GPa程度であり、使用分野が限られた材料であった。その後の開発により、強度、弾性率ともに優れた炭素繊維が製造されている。炭素繊維は、航空・宇宙及びスポーツ・レジャーの分野を中心に、機能材、構造物材として利用されてきた。

新日本製鐵では、ここ10数年メソフェースピッチを原料としたピッチ系炭素繊維の研究開発及びその利用技術の開発に取り組むとともに、その事業化を進め、1995年4月に日本石油(株)と合併で日

本グラファイトファイバー(株)を設立するに至っている。

ここでは、新日本製鐵が開発してきたピッチ系炭素繊維の概要と、その特性を生かす複合材料の適用分野の一つとして取り組んできた土木・建築の分野での利用について述べる。

2. ピッチ系高弾性炭素繊維の製造方法とそれを用いた複合材料の特性

2.1 ピッチ系高弾性炭素繊維の製造方法⁴⁾

ピッチ系炭素繊維の製造は図1に示す工程を経て製造される。すなわち、まず、コールタール、石油系残さ油から改質したピッチを溶融紡糸し、直径数 μm ～10数 μm のプリカーサー繊維(ピッチ繊維)を得る。次に、プリカーサー繊維を気相酸化して不融の熱硬化性とする不融化工程を経る。更に、炭化処理、黒鉛化処理によって炭素以外の元素を繊維外に放出させるとともに黒鉛結晶の成長を促進させる。これによって繊維としての高弾性の性質を付与する。最後に、複合材料とした場合のマトリックスとのなじみをよくするために複数の表面処理を施して成品を得る。表1に高弾性ピッチ系炭素繊維の物性の一例を示す。

2.2 ピッチ系炭素繊維による複合材料特性^{5,6)}

炭素繊維を基材とし、エポキシ樹脂をマトリックスする複合材料(エポキシ系CFRP)の特性の一例を表2に示す。新日本製鐵のピッ

⁽¹⁾ 新素材事業部 炭素繊維商品部 部長代理

⁽²⁾ 新素材事業部 炭素繊維商品部 掛長

⁽³⁾ 新素材事業部 炭素繊維商品部 部長

⁽⁴⁾ 建材営業部門 建材開発技術部 部長代理

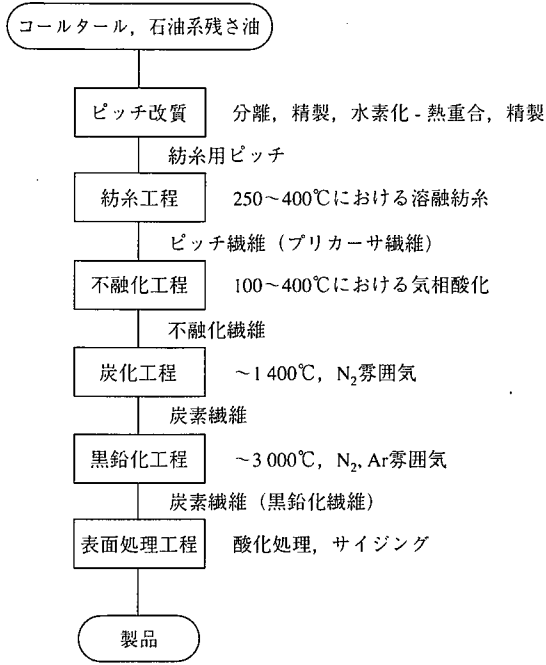


図1 ピッチ系炭素繊維の製造工程⁴⁾

表1 市販超高弾性ピッチ系炭素繊維の物性例

		Eskainos NU-80	Thornel P-120
引張弾性率	(GPa)	785	827
引張強度	(GPa)	3.23	2.20
密度	(kg/m ³)	2 180	2 180
黒鉛層間隔	d ₀₀₂ (nm)	0.3393	0.3374
積層厚み	L _c (nm)	21.8	28.6

チ系炭素繊維は高弾性であるとともに、引張強度や曲げ特性、層間せん断強度(ILSS)に優れた特徴をもつ。

3. 土木・建材分野向けの補強材

炭素繊維による複合材料(CFRP)の用途として、土木・建材の分

野では、モルタル、コンクリートと複合化されたCFRC(Carbon Fiber Reinforced Concrete)が挙げられる。このCFRC用のCFRPは表3に示すように多様な形態で使用される⁶⁾。新日本製鐵は一次元の棒材としてのCFRPストランド、CFRPロッドとともに二次元の炭素繊維シート、メッシュ状織物を実用化している。以下に、CFRPストランド、CFRPロッド、炭素繊維シートについて述べる。

3.1 CFRPストランド

3.1.1 製造方法

CFRPストランドは、図2に示すように、まず、ストランドの構成単位である素線を製造し、これを束ねてストランド(より線)とする。素線は、6000本~12000本程の高弾性炭素繊維を収束して、エポキシ系熱硬化性樹脂を含浸させ、更に、外皮として高分子のブレードを巻き付けたものである。これを7本~37本束ねながら加熱し、樹脂を硬化させてより線とする。より線は可とう性が良く、リールに巻き取ることができる。また、端部に他の構造体との接合のための定着具を取り付けることもできる。

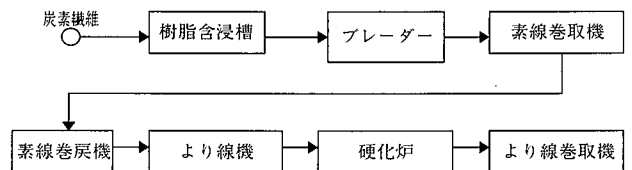


図2 ストランド(より線)製造方法

3.1.2 機械的性質

CFRPストランドの外観を写真1に、その機械的性質を表4にまとめる。

高弾性CFRPストランドは、次の特徴を有する。

- (1)PC鋼より線と同程度の弾性率を有する(1.5×10⁶~2.1×10⁶ kgf/cm²)。
- (2)比重1.7で鋼材の1/5程の軽さである。
- (3)耐酸性・耐アルカリ性に優れた高耐蝕性である。
- (4)磁気を帯びない(非磁性)。
- (5)リールに巻き取れる。

表2 炭素繊維エポキシ系複合材料の機械的特性の例⁶⁾

繊維品種	メーカー	0° 引張		0° 曲げ		0° 圧縮		ILSS* (kgf/mm ²)
		強度 (kgf/mm ²)	弾性率 (tf/mm ²)	強度 (kgf/mm ²)	弾性率 (tf/mm ²)	強度 (kgf/mm ²)	弾性率 (tf/mm ²)	
ピッチ系	NT 15	150	9.5	130	8	82	8	9.7
	NT 20	200	12.0	170	11	71	11	10.2
	NT 50	215	30.0	110	24	55	24	9.5
	NT 60	210	36.0	95	29	50	30	9.5
	NT 70	180	41.0	90	35	50	35	9.0
	NT 80	170	46.0	80	40	45	40	8.0
PAN系	T300	180	13.5			160	13.0	11
	T800H	290	16.5			160	15.0	11
	T1000	360	16.0			160	15.0	10
	M50	120	27.0			80		
	M50J	200	26.5			90	25.0	8
	M60J	180	33.5			80	32.5	7
LM 16	東邦レーヨン	158	9.2	141	8.9	129		

*ILSS: 層間せん断強度

表 3 建設材料としての炭素繊維の適用形態⁶⁾

適用形態(イメージ)	炭素繊維の形状			
	短繊維	一次元	二次元	三次元
適用形態(イメージ)	 ・通常、長さ3~30mm程度のチョップドファイバー	 ・長繊維(巻き付け) ・CFRP棒材	 ・炭素繊維シート ・メッシュ状繊維物	 ・三次元織物
強度に対する方向性	・原則として全方向均質(等方性)	・補強が1方向(異方性)	・補強が2方向(異方性)	・補強が層間にまで及び、層間はく離が改善
曲げ強度(モルタル供試体)	・45MPa(Vf5.3%) ⁷⁾		・120MPa(Vf3.8%) ⁸⁾	・160MPa(Vf3.8%) ⁸⁾
適用上の問題点	・繊維の特性利用率が低い ・混練、打設が困難	・配列に手間がかかる ・付着強度の改善が必要	・層間強度が弱い	・生産性に課題あり
適用例	・バグダットの大形モニュメント(鹿島建設) ・赤坂アーク森ビル(鹿島建設)	・煙突の耐震補強(大林組/三菱化成) ・船橋市人道橋(熊谷組/日本コンクリート工業) ・石川県新宮橋	・橋脚段落し部の補強(大成建設/東燃) ・清水地所横浜ビル(清水建設) ・フリーアクセスフロアパネル(鐘紡/新日鐵)	・東京ガス地冷センタービル、品川ベイシティタワー(鹿島建設/有沢製作所)

(注) この表の作成に当り、炭素繊維協会編：「カーボンファイバの世界」、工業材料 38. No.13, 89(1990)の表5を参考にした。

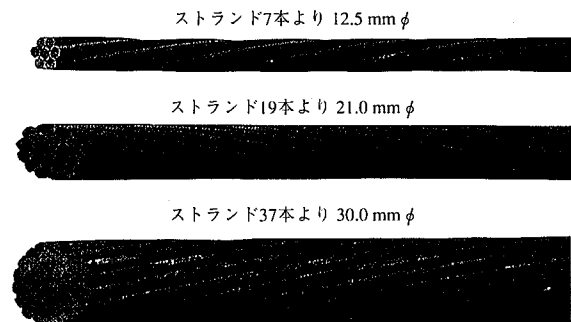


写真 1

表 4 CFRPストランドの機械的性質

構成	公称径(mm)	公称断面積(cm ²)	保証耐力(tf)	弾性係数(kgf/cm ²)	単位質量(g/m)
7本より	12.5	0.970	(11.0)	(2.1×10 ⁶)	182
19本より	21.0	2.632	(23.0)	(1.7×10 ⁶)	495
37本より	30.0	5.383	(43.5)	(1.5×10 ⁶)	1010

(保証耐力以外は参考値)

また、後に、シールド立坑への適用で述べるように、
(6)カッターで容易に切削できる高快削性を有している。

3.2 CFRPロッド

3.2.1 製造方法

写真2のCFRPロッドは、図3に示すように高弾性率のピッチ系炭素繊維とエポキシ系熱硬化樹脂を複合化した芯線の表層に、樹脂を含んだ外線(炭素繊維)をらせん状に巻き付けて硬化成形される。

3.2.2 機械的性質

CFRPロッドの仕様を表5に示す。高弾性CFRPロッドは、上記3.1.2のCFRPストランドと(1)~(4)については同じであるが、スト

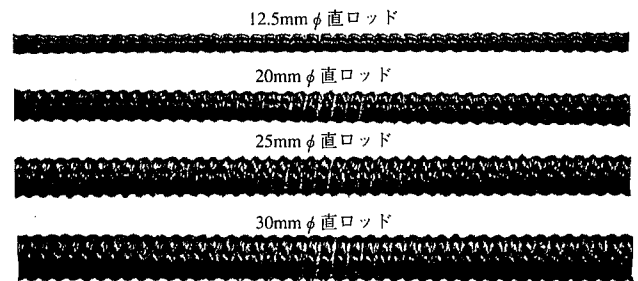


写真 2 CFRPロッド

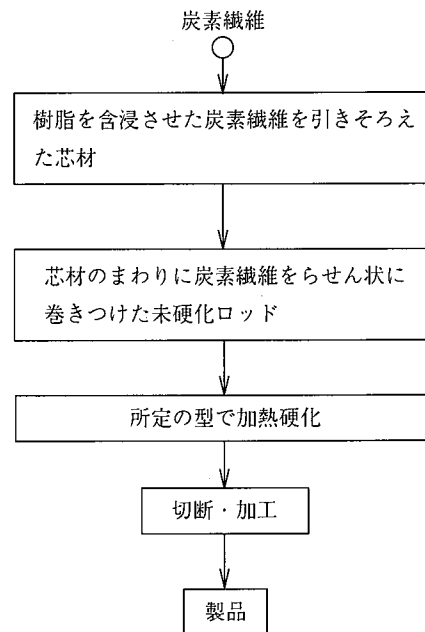


図 3 ロッドの製造方法

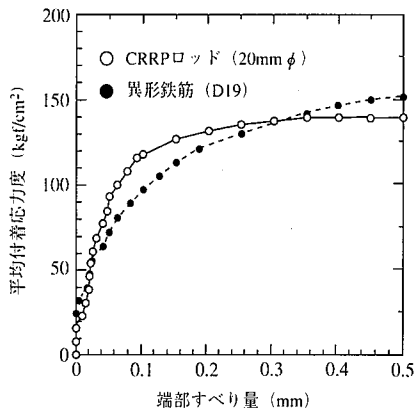
表 5 CFRPロッドの仕様

サイズ	公称径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	引張保証耐力 (tf)	引張弾性係数 (kgf/cm ²)	単位質量 (g/m)
12.5φ	12.5	122.7	12.0	2.0×10 ⁶	260
17.0φ	17.0	227.0	21.0	2.0×10 ⁶	431
20.0φ	20.0	314.2	28.0	1.9×10 ⁶	575
25.0φ	25.0	490.9	41.0	1.9×10 ⁶	865
30.0φ	30.0	706.9	56.0	1.9×10 ⁶	1219

保証耐力以外は参考値

ランドに比べ多くの炭素繊維を長手方向に配置できるため、同一の断面積(外径)の場合、強度がより大きくとれ、コンクリートとの付着力も大きい。

CFRPロッド、及び、ほぼ同径の鉄筋について行った引き抜きによる付着力試験結果を図4に示す。CFRPロッドは異径鉄筋と同等以上の付着力を有している。CFRPロッドは、写真3のように端部に膨張材を用いてメタル定着体を取り付けることが可能で、メタル定着体にねじ加工等を施すことによって他の構造体と機械的な接合ができる。写真4に示すように種々の形に成形することも可能である。また、CFRPロッドもカッターによる高快削性を有している。



20.0mmφのコンクリート付着力試験結果 (参考値)

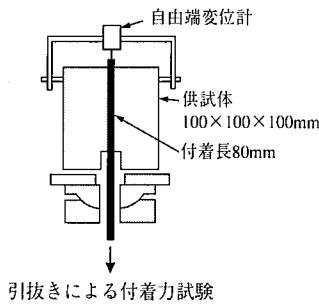


図4 引抜きによる付着力試験



写真3 メタル定着体

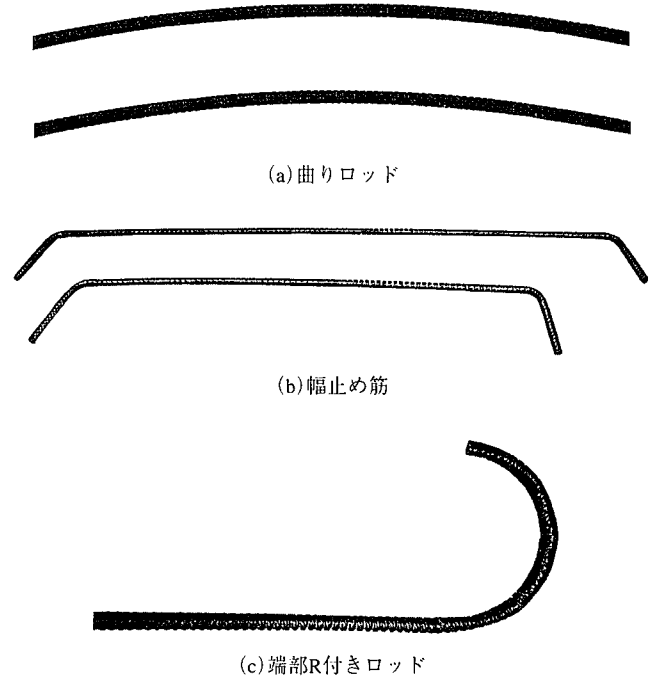


写真4 種々のCFRPロッド形状

4. CFRPのCFRCへの適用

4.1 設計の考え方

CFRPストランドとCFRPロッドをコンクリートの補強材として利用する場合は、通常の鋼線や鉄筋と同様な取り扱いが可能である。すなわち、曲げを受けるコンクリート梁に利用した場合、梁の変形には断面の平面保持仮定が成り立つことが載荷試験により確認されている(写真5参照)。

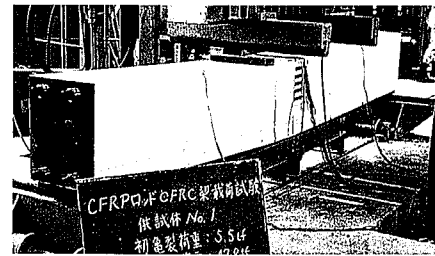


写真5 コンクリート部材の載荷試験

4.2 高弾性補強材の優位性

曲げを受ける部材の場合、一般に、補強材が高弾性になる程(弾性係数比nが大きいく程)中立軸位置は補強材位置に近づき(コンクリートの圧縮縁から遠くなり)、コンクリートに発生する圧縮応力度を低減する(図5参照)。これは、当然のことながら、高弾性程、部材の曲げ変形量(歪み)を押さえられることを意味している。すなわち、部材の高さが低く制限された場合は、高弾性の補強材の方がより大きな部材耐力を実現できるので、高弾性CFRPを使用する方が有利である。

上記について、部材の有効高さが定められた場合の曲げを受けるコンクリート梁の具体的な数値例を示す。ここでは、断面は矩形とし、筋材は引張力のみを負担し、コンクリートは圧縮力のみを分担

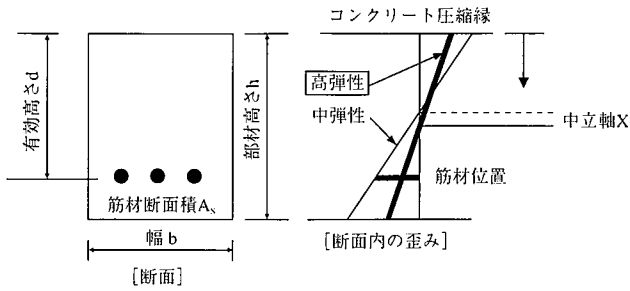


図5 曲げを受ける矩形断面梁の歪み

するものとする。設計の条件、想定した高弾性と中弾性の補強材について、それぞれ表6、7に示す。中弾性のCFRPロッドの物性は、PAN系炭素繊維の特性から類推した。このときの許容応力度法による計算結果を表8に示す。

設計が可能になる条件は、発生応力度が材料の許容応力度を越えないことである。表8から、この場合は明らかに、高弾性CFRPロッドの方が採用される。

以下にこの高弾性を生かした使用例について述べる。

表6 設計条件例

曲げモーメント	120tf・m/m
溝幅	80cm
部材幅	55cm
部材高さ	70cm
有効高さ	65cm

表7 補強材の物性

補強材種類	公称径 (mm)	筋材総断面積 (cm ²)	許容応力度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (t/mm ²)	弾性係数比 n
高弾性CFRPロッド	30	35.335 (5本)	5940	19	9
中弾性CFRPロッド	30	35.335 (5本)	8316	14	6

表8 発生応力度

補強材の種類	発生応力度 (kgf/cm ²)		コンクリート圧縮縁からの中立軸位置 (cm)	判定
	筋材	コンクリート		
高弾性CFRPロッド	5896	340.7	22.23	OK
中弾性CFRPロッド	5783	394.0	18.86	NG

4.3 適用例

4.3.1 新素材コンクリートを用いたシールド機の直接発進・到達工法(商標：NOMOST)

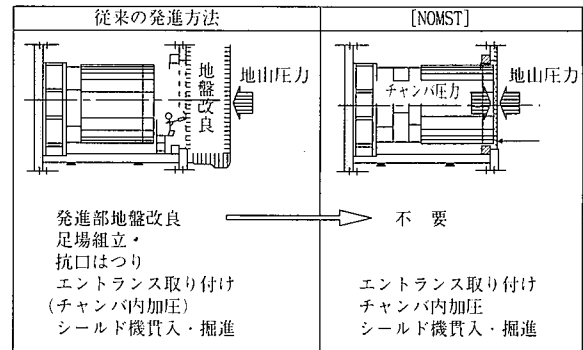
土木分野でのCFRPの利用例として、トンネル掘削工法の一つであるシールドでの立坑開口部への適用が上げられる。NOMST (Novel Material Shield-cutttable Tunnel-wall System)では、立坑土留壁のシールド機が発進・到達を行う部位にCFRPストランドやCFRPロッドで補強されたコンクリート(新素材コンクリート)を設ける。鉄筋コンクリートではシールド機の cutter では切断できないが、CFRPで補強されたコンクリートは、CFRPの快削性によりシールド機の cutter で直接削ることができる。このことにより、従来必要とされてきた地盤の改良、及び、地山崩壊の危険を伴う人力による土留壁の取り壊しを行わずにシールド機の cutter ビットで直接開

孔する(図6参照)¹⁰⁾。なお、本工法は新日本製鐵とゼネコン8社の9社が研究会を発足させて開発に取り組んだものであり、1994年度の土木学会技術開発賞を受賞している*1。

また、ケーソン等でNOMSTを適用する場合は、シールドで直接に切削・開口される部位には、鉄筋と同じ要領でCFRPロッドを配筋し(写真6参照)、組み立てた後、現場でコンクリート打設を行うことになる。NOMSTは1992年9月の初めての採用から、1996年12月末現在で40件を越える採用実績を有している。

4.3.2 高弾性炭素繊維(CF)シート

高弾性CFシートは、高弾性の炭素繊維をシート状に一方方向に配列させたシートで、常温硬化樹脂を使用してコンクリート表面や鋼板表面に張付けて補強に用いる(写真7参照)。高弾性CFシートの仕様を表9に、コンクリート梁に高弾性CFシートを張付けて行った曲げ試験より得られた代表的な補強特性を図7に示す。高弾性炭素繊維



<立坑発進部土留め壁構造>

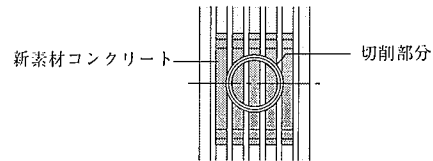


図6 NOMST工法



写真6 CFRPロッドをNOMSTのコンクリート補強に使用した場合の施工状況

*1 受賞者：園田徹士，中村 稔，新井時夫，宮田弘之介，栗原和夫

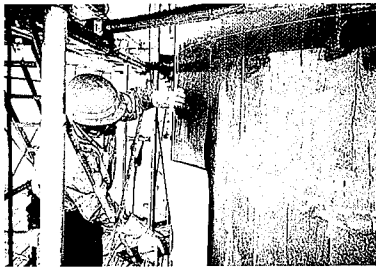
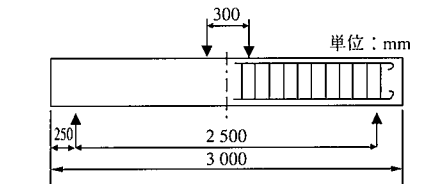


写真7 高弾性炭素繊維シートの施工状況

表9 炭素繊維シートの仕様例

品番	繊維目付 (g/m ²)	設計厚 (mm)	引張強度 (kgf/cm幅)	設計強度 (kgf/cm ²)	引張弾性率 (kgf/cm幅)	設計弾性率 (kgf/cm ²)
FTS-C1-20	300	0.167	590	35 500	39 200	2.35×10 ⁶
FTS-C5-30 (高弾性)	300	0.165	500	30 000	62 700	3.80×10 ⁶
FTS-C6-30 (高弾性)	300	0.144	360	25 000	72 000	5.00×10 ⁶



梁曲げ試験体概略図
試験体寸法：高さ300mm、幅200mm、長さ3000mm

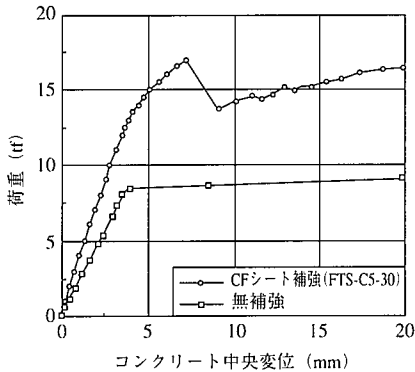


図7 コンクリート梁での曲げ試験例

シートの補強効果により、部材耐力は大幅に増加している。CFシートは軽量で張付け施工には重機が不要となる。高弾性CFシートを利用すると、全体の変形を押さえるための張付けシート枚数を減らすことができ、工費の節減に寄与すると考えられる。

高度成長期に建設された構造物の劣化が問題視される昨今、CFシートを用いた補修・補強工法は、その有効な解決手段になっていくものと予想される。

5. 結 言

炭素繊維の適用は、航空・宇宙の分野からスポーツ・レジャーの民生の分野にまで広がってきた。21世紀を目前にした現在、ピッチ系炭素繊維はPAN系炭素繊維とともにその特性を生かして、土木・建築の分野にも広く適用されていくものと信じる。そのためには、より効率的な製造と効果的な用途開発、すなわち、製造から利用までのトータルとしてのコストダウンへの取組みが不可欠である。また、使用期間の長い構造物への炭素繊維の適用を考えると、CFRPの長期特性(耐久性)の検討も不可欠となる。これらは、課題解決に多大な努力を要するものの、確実な実行が必要であり、今後、鋭意、推進していきたいと考える。

なお、本論文で述べたCFRPストランドは、新日本製鐵と新日鐵化学(株)、鈴木金属工業(株)で共同開発したものである。CFRPロッドは新日本製鐵と新日鐵化学(株)で開発したものである。また、高弾性CFシートは新日本製鐵と新日鐵化学(株)、東燃(株)とで共同開発したものである。

参考文献

- 1) 日本特許出願公告 昭49-8634. 1974年2月27日
- 2) Singer, L.S.: Carbon. 16(6), 409(1978)
- 3) U.S. Patent 4005183. 1977 Jan 25
- 4) 荒井 豊: 新日鉄技報. (349), 56(1993)
- 5) 木村浩巳 ほか: 新日鉄技報. (349), 61(1993)
- 6) 佐藤公隆 ほか: 炭素. 166, 55(1995)
- 7) 秋浜繁幸, 末永龍夫, 中川裕章, 鈴木清孝: 鹿島建設技術研究所年報 33, 1985, 57
- 8) 米沢敏彦, 大野定俊, 真柄栄毅: 日本建設学会大会学術講演梗概集. No.1384, 1989, p767
- 9) 那珂亮一 ほか: 土木学会第47回年次学術講演会予講集. V
- 10) NOMST研究会: NOMSTパンフレット. 1994