

研究展望  
Review

# 研究展望

## 新素材とコンクリート

### APPLICATION OF ADVANCED COMPOSITE MATERIALS TO CONCRETE CONSTRUCTION

小林一輔\*

By Kazusuke KOBAYASHI

#### 1. はしがき

これまで、主として宇宙・航空または自動車の分野への利用を目的として開発されてきた炭素繊維やアラミド繊維などの新素材を、建設分野において活用しようとする機運が高まってきた。さらに、最近では各種の連続繊維によって強化された新しいセメント系複合材料の開発研究も活発に進められている。昭和63年度からは建設省が5年間の予定で総合開発プロジェクト『建設分野への新素材・新材料利用技術の開発』をスタートさせている。これは昭和59年に行われた先端技術の建設分野への活用懇談会新素材部会の答申を受けて発足したものであり、新素材の土木分野への利用について調査研究を進めようとするものである。

一方、民間レベルでも大手の建設会社と上記のハイテク繊維のメーカーが、これらの繊維の建設分野への利用促進を図る研究会を結成し、土木・建築両学会に委託研究を出すなど活発な活動を行っている。このような背景から、最近の土木学会やコンクリート工学協会の年次講演会においてもこれらの新素材の利用に関する研究発表が年を追って増加しており、新素材関連の研究発表のみで1つの講演会場を終日独占することも珍しいことではない。

本文は、著者を中心として実施した研究を軸として最近のこの分野の開発研究の動向を紹介し、併せてこのような新素材・新材料を建設分野において活用しようとする

場合の問題点について明らかにした。

#### 2. 高強度繊維のコンクリート分野への利用

##### (1) 概要

ガラス繊維、炭素繊維、アラミド繊維などの特性を、コンクリート分野への利用という観点からチェックしてみると、①引張強度が高い、②鋼材のように腐食を生じることがない、③鋼材に比べて軽い、という点である。これらの特性を活用して構造材料として利用するためにはFRPとして目的に合致した部材に成型する必要がある。たとえば、航空機の機体に用いる場合には板状の積層材に成型されたものが用いられることになるが、この場合に重要視されるのは引張強度ではなく圧縮強度である。上記の繊維をコンクリート分野に利用しようとする場合には当然のことながら高い引張強度が活用できる一方方向強化FRPとしての利用、すなわち、引張材としての利用ということになる。現在、コンクリート分野においては、この引張材としての利用対象としては、プレストレストコンクリート用緊張材と鉄筋コンクリート用補強材の2つが検討されている。しかし、ここで注意を要する点は、すでにFRP材を使用している上記の航空機の分野をはじめとして、これらの繊維によって強化されたFRPを引張材として実用に供している例がほとんどないという点である。このことは、FRPを引張材として利用しようとする場合には周辺技術の開発も含めて全く新しく調査研究を行う必要があることを意味する。

##### (2) 各種高強度繊維の製造方法と特性

一般に高強度繊維というと、ガラス繊維、炭素繊維(PAN系)、アラミド繊維などが挙げられるが、最近では上記の繊維にほぼ匹敵する高強度・高弾性の有機繊維

\* 正会員 王博 千葉工業大学教授 工学部土木工学科

(〒275 習志野市津田沼 2-17-1)

Keywords: fiber reinforced plastics, carbon fiber, aramid fiber, prestressing tendon

維が開発されている。その1つが高強度ピニロン繊維である。ここでは、すでに、製造方法と特性が知られているガラス繊維を除く各種繊維の製造方法と特性の概要について示すことにする。

a) 炭素繊維の製造方法と特性

1) 炭素繊維の種類と製造

炭素繊維はポリアクリルニトリルやレーヨンのような高分子繊維を原料とするものと、石油ピッチを原料とするものの2種に大別することができる。前者の代表的なものがポリアクリルニトリルを原料とするPAN系炭素繊維であって、金属より高強度で、しかも高弾性のものが得られることが特徴である。現在は、比強度、比弾性の優れた先進複合材料の強化用繊維として航空機や宇宙開発機器の分野に用いられており、またわが国では、ゴルフやスキー用具などのレジャー分野に多用されている。

ポリアクリルニトリルの原料分子は、 $(C_3NH_3)_n$ で示される。PAN系の炭素繊維は、このような有機繊維を高温で処理することにより窒素と水素を抜いてやり、炭素原子のみから成る、安定でしかも優れた配向性を有する組成構造とするものである。さて、炭素繊維のセールスポイントは高強度・高弾性であるが、これらの特性は炭素の結晶の配向度によって大きく左右される。PAN系の炭素繊維は、図-1に示すように空気中で加熱する酸化過程、500~1500°Cで熱処理を行う炭素化過程お

よび2000~2500°Cで熱処理を行う黒鉛化過程を経て製造される。これらの熱処理は緊張下で実施して、繊維に高い結晶度を与えている。酸化過程は前駆体(原料となる炭素含有材料：プリカーサーともよばれる)調整過程ともよばれ、あらかじめ原料繊維の過程で延伸率を高めたものを、引張力を加えた状態で加熱して繊維の長さの方向の熱収縮を抑制すると同時に、繊維に高い配向度を与える。この過程では主として水素の一部が $H_2O$ の形で除去されるが、このままでは強度が低いため、工業用材料としては耐炎性繊維としてのみ用いられる。図-1において1000~1500°Cの炭素化過程において製造される繊維が高強度タイプの炭素繊維(HT)であり、2000~2500°Cの黒鉛化過程を経て製造される繊維が高弾性率タイプの炭素繊維(HM)である。

石油ピッチを原料として高強度、高弾性率の炭素繊維を製造するためには、液晶を含んだ非等質性のピッチ(メソフェーズピッチ)を紡糸する必要がある。すなわち、石油ピッチは分子量が約500の等質ピッチ(図-2(a))で、それを350~380°Cに加熱すると脱水縮合反応が起こり、分子量が1000以上の平面縮合芳香環分子(図-2(b))となる。400~450°Cまで加熱を続けると、それらの高分子の分子量や数がさらに増加し、表面張力によって等質ピッチ環境から分離して液晶となる。液晶部分が40%を越えると相変換が起こり、液晶部分が連続相となる。この状態で紡糸すると液晶が繊維軸に平行に

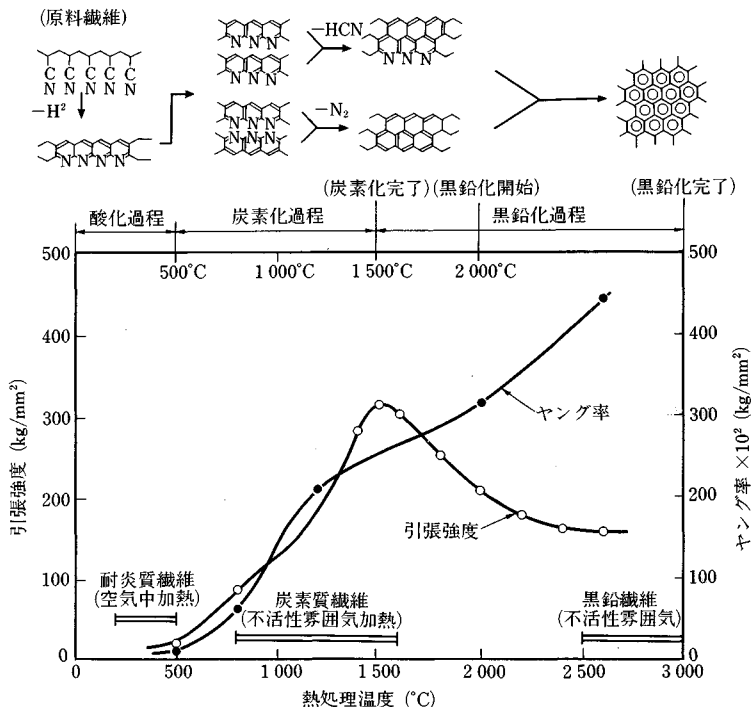
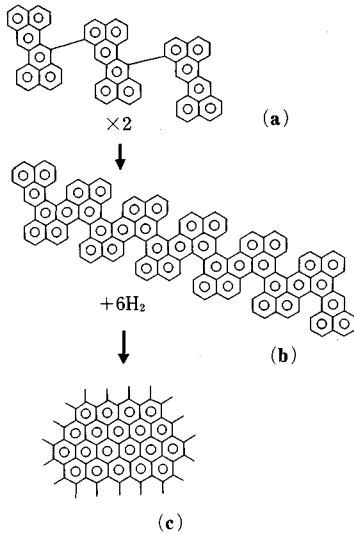


図-1 炭素繊維の生成過程および引張特性と熱処理温度

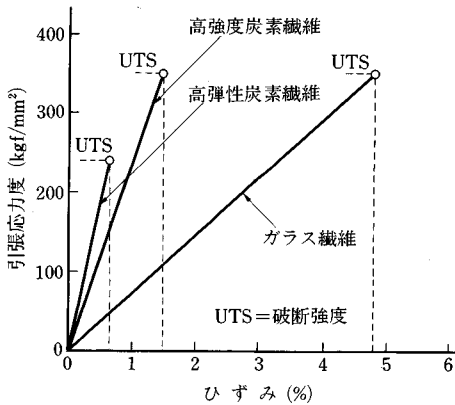
配向するので、このあと酸化によって架橋反応を起こさせ、さらに炭化させることによって高弾性の黒鉛結晶(図一2(c))が得られる。しかし、このような2相系の紡糸はなかなか難しく、特に連続繊維の製造は目下開発段階にある。

2) 炭素繊維の特性

表一に各種の炭素繊維の力学的性質を示す。また、



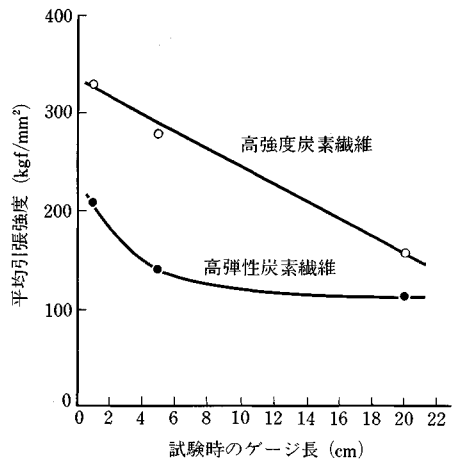
図一2 加熱に伴うピッチ中の分子の変化<sup>1)</sup>



図一3 炭素繊維とガラス繊維の引張応力-ひずみ関係の比較<sup>3)</sup>

炭素繊維の力学的特性を従来のFRPの強化材であるガラス繊維と対比して示したものが図一3である。これらの図表より、炭素繊維はガラス繊維の約70%程度の密度で、引張強度はほぼ同程度であり、またヤング率は数倍も高いことがわかる。このことは炭素繊維は比強度よりも比弾性が高い繊維であることを示している。しかし、図一3より明らかなように、破断時ひずみが小さいために、荷重導入部分に応力集中が起こったり、ねじれがかかると繊維の破断を生じやすい点が欠点である。

図一4は、50本のPAN系炭素繊維の引張強度を変位制御式引張試験機を用いて求めた値の平均値とゲージ間隔、すなわち、チャック間隔長の関係を示したものである。この図はゲージ間隔が長くなるほど平均引張強度が減少することを示している。この理由は、繊維の長さ方向の欠陥がゲージ間隔が長くなるほど多くなることに加えて炭素繊維の脆性がこの影響を増幅させているためと考えられる。炭素繊維をFRPの強化材として用いる場合には、ガラス繊維とのハイブリッドとして用いることが多いのはこのような短所を補うためである。炭素繊維は化学的に安定な材料であり、酸化によって質量の減少と強度の低下を起こす以外には大抵の環境条件下で性質が変化することはない。炭素繊維が劣化を生じるのは、次のような条件である<sup>2)</sup>。



図一4 試験時のゲージ長と50本の炭素繊維の平均強度との関係<sup>3)</sup>

表一 炭素繊維の力学的性質<sup>2)</sup>

前駆体	タイプ	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率 (kg/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
PAN	HT	1.7~1.8	350~450	23 000~24 000	1.5~1.8
	IM	1.7~1.8	450~550	28 000~31 000	1.7~1.9
	HM	1.8~1.9	250~450	40 000~60 000	0.5~1.2
MPP	HM	1.9~2.2	190~350	38 000~83 000	0.3~1.5

MPP=メソフェースピッチ

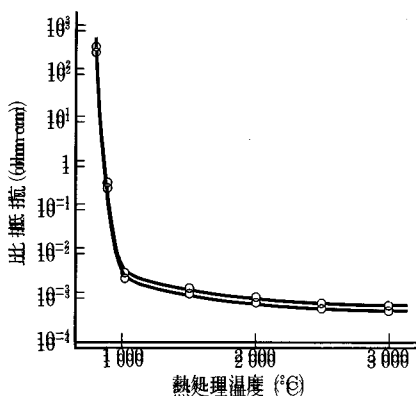


図-5 炭素繊維の電気伝導性<sup>1)</sup>

(1) 窒気中で高温にさらされると酸化を受けで劣化する: 表-1におけるHT:IMタイプの場合長期に使用可能な上限温度は300°C、HMタイプの場合、350°Cである。(2) 硝酸、次亜塩素酸ソーダ、重クロム酸のような酸化性酸によって劣化する:

一方、図-5から明らかなように炭素繊維には電気伝導性がある: 炭素繊維のこのような電気伝導性は、次のような場合に現在のような情報化社会に大混乱を引き起こす可能性がある: すなわち、炭素繊維を使用した材料が何らかの原因で破壊され、炭素繊維の微小な破片が窒気中に飛散して、電気によって作動する種々の機器に入り込んだとき、繊維自体の電気伝導性のためこれらが絶縁不良により作動しなくなるのである:

b) アラミド繊維の製造方法と特性

1) アラミド繊維の種類と製造

アラミド繊維は芳香族ポリアミド (Aromatic Polyamide) 繊維の略称であり、オイロシ工業から派生した物質である: 最初にアメリカのデュボシ社によってケブラー (Kevlar) が開発された: 元来はタイヤ補強用の鋼線 (スチールコード) に代わり得る、より強い材料として開発されたもので、比弾性の小さいケブラー-29と比弾性の大きいケブラー-49の2種がある: 前者の方は海底ケーブルや空中ケーブルなどに用いられ、また、その耐海水性や耐油性のために係留ブイや石油産業で使用する索具などに用いられされており、ケブラー-49の方はFRPとして航空機体に用いられている: 我が国では帝人(株)が独自にテタノールを開発し、昭和63年から商業生産を開始している:

ケブラーの素材は有機合成の産物であるパラ系アラミド (PPTA)<sup>2)</sup>であるが、そのポリマーは分子が剛直で

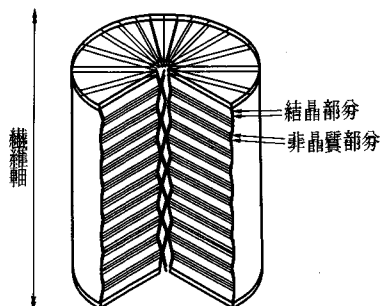


図-6 アラミド繊維 (PPTA) の構造

あるため溶剤への溶解性が低く、重合中に沈殿する: これを洗浄・乾燥して、発煙硫酸に溶解して液状ドープ (高粘度溶液から成るものの呼称、dope) とし、紡糸して配向繊維としたものがケブラーである: PPTA 繊維の構造モデルはいくつか提案されているが、図-6はその1つでプリーツ構造となっており、良く整った結晶部と少量の非晶部 (プリーツ構造の折れ目部分) がラメラ組織になっているものである: 一方、テタノールの素材はポリ芳香族エーテルアミドであるが、その分子構造は約110°に折れ曲がったエステル結合を有する<sup>2)</sup>ので、溶剤への溶解度が高く、重合中に沈殿することなく高重合度ドープとなるため、そのままスプールから紡出することができる: これを、高温度下で延伸することにより、直線上の分子構造としたものがテタノールである: テタノールの構造については、①ケブラーに比べて結晶サイズが小さいこと、②結晶と非晶の分離が不明確であって完全な結晶ではないが、結晶度の高い部分の比率が大きい構造であると推定されている:

2) アラミド繊維の特性

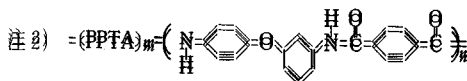
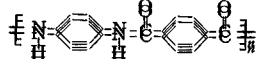
表-2はアラミド繊維の力学的性質を示したものである: 表-1との対比から明らかなように、アラミド繊維は炭素繊維よりも軽く、しかもこれとほぼ同等の引張強度を有するが、ヤシダ率は小さい: ヤシダ率が小さい理由は、1) に述べたように繊維構造中に非晶質部分を有するためと考えられる: このことは、同時にタリブも大きいことを意味する: しかし一方において、これらの

表-2 アラミド繊維の力学的性質<sup>2)</sup>

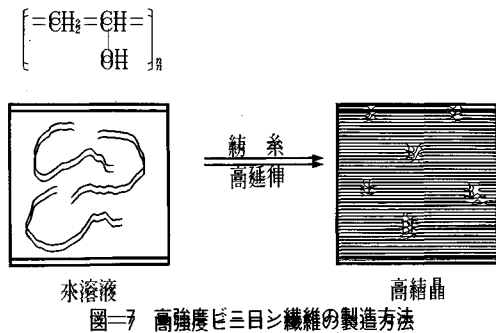
種別	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率 (kg/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
PPTA	1.45	285	13000	2.3
テタノール	1.39	350	7700	4.4

PPTA は高弾性タイプ

注1) PPTAの分子式は次のとおりである:



ポリビニルアルコール 高強度ビニロシ繊維



特性は同時にアラミド繊維が炭素繊維よりも靱性が大きいことを意味する。アラミド繊維は炭素繊維と同様に耐薬品性に優れており、一部の強酸を除いては侵されることはない。ただし、多ブアラニについては耐アルカリ性が若干劣るといわれている。これは、図-6 におけるグリニツ構造の折れ目部分が構造的に不安定であるためと考えられている。アラミド繊維は紫外線照射による強度低下の大きいこと、圧縮に弱いことが欠点である。アラミド繊維のもう1つの特徴は負の線膨張係数を有することであり、その値は20°Cから150°Cの間で $-4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。なお、炭素繊維のような電気伝導性はない。

③ 高強度ビニロシ繊維の製造方法と特性

高強度ビニロシ繊維は図-7 に示すように原料であるポリビニルアルコールをアルカリ浴中で湿式紡糸し、高重合度のポリマを高倍率で延伸を行って、分子の配向度を高め、高結晶化させて製造したものである。表-3 は高強度ビニロシ繊維の力学的性質を示したものであるが、これを見ると、強度、弾性係数、破壊時伸びなどの力学的性質については、いずれも多ブアラ-29 に近い品質の繊維であることがわかる。なお、主鎖切断が起こりにくいため、アルカリの作用に対しては抵抗性があるといわれている。

3. 高強度繊維を用いた二方向強化 FRP 材の特性

(1) 引張応力-変形関係および引張強度の変動

二方向強化 FRP 材の特性は強化用繊維の種類とその容積百分率によって決まる。図-8 は FRP に使用される代表的な強化用繊維の引張応力-ひずみ曲線を示したもので、いずれの繊維も破壊時までほぼ直線であった。

表-3 高強度ビニロシ繊維の力学的性質

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率 (kg/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
1.30	230	6.100	5.0

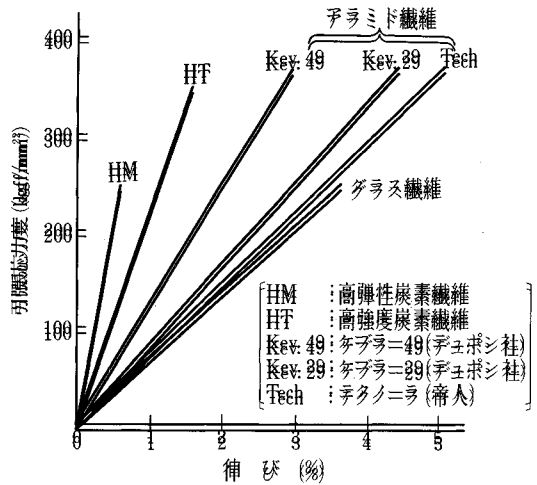


図-8 各種強化用繊維の引張応力-ひずみ曲線<sup>⑧</sup>

塑性はほとんど示さない。この図から炭素繊維のヤング率は一般的に高く、小さい方でも鋼と同程度の値を有しているが、破断時伸びが1.7~1.9%と小さいこと、アラミド繊維とガラス繊維はともにヤング率が鋼の1/3程度で小さいが、破断時伸びが3.5~4.4%であった。炭素繊維に比べて大きいことがわかる。引張強度は250~320 kg/mm<sup>2</sup>程度のもものが多く使用されているが、これらの繊維を用いてつくった一方向強化 FRP 材 (φ6~φ7.5 mm) の引張応力-ひずみ曲線を高張力鋼と比較して示したものが図-9 である。この図をみると、ガラス繊維やアラミド繊維を用いた FRP 材のヤング率は鋼の値の1/4~1/5 程度であった。しかし、表-4 から明らかのように、破壊時伸びは前者のガルニブが4%程度であるのに対して、後者のそれは2%以下であった。

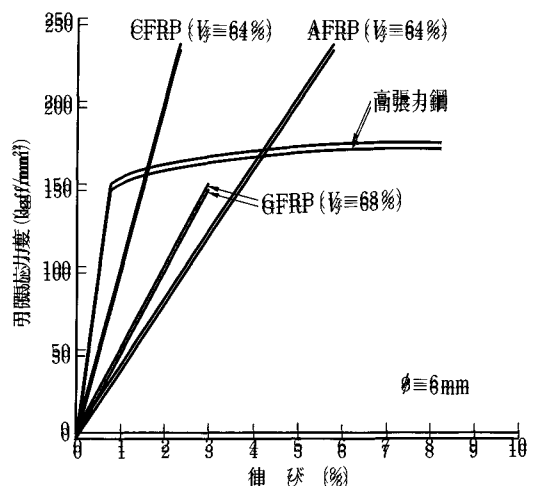


図-9 各種一方向強化 FRP 材の引張応力-ひずみ曲線<sup>⑧</sup>

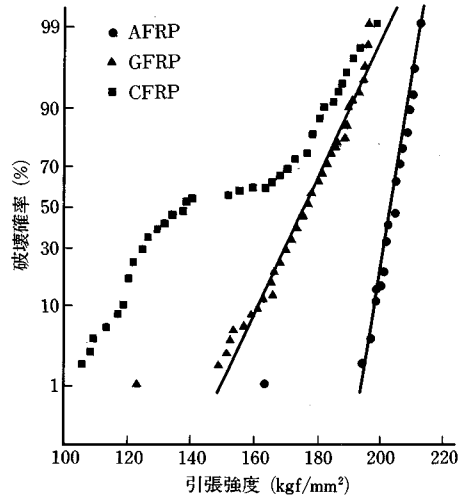
表—4 FRP ロッドと繊維素材の破断時伸び

	繊維	FRP ロッド
アラミド繊維	4.2%	3.8%
ガラス繊維	4.0%	3.3%
炭素繊維	1.3%	1.7%

表—5 実験に使用した各種 FRP ロッドの品質

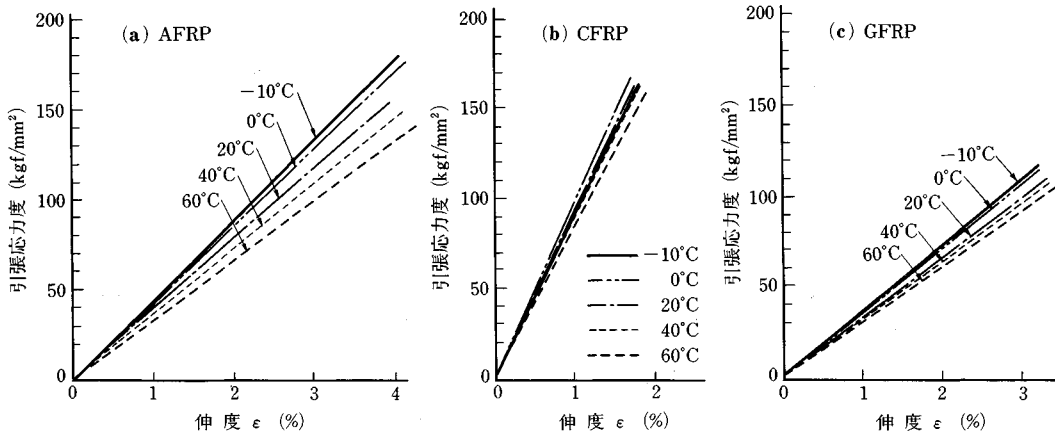
	AFRP ロッド	CFRP ロッド	GFRP ロッド
ロッドの径	φ6mm	φ6mm	φ6mm
繊維の種類	アラミド テクノーラ	カーボン T300B 600-50B	T-ガラス RST 110PA-535
繊維の引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	310	350	300
繊維の引張弾性率 (kg/mm <sup>2</sup> )	7 100	24 000	8 600
繊維の破断伸び (%)	4.4	1.4	5.5
マトリックスの種類	ビニールエス テル樹脂	ビニールエス テル樹脂	ビニールエス テル樹脂
繊維の体積含有率 V <sub>f</sub> (%)	66.0	66.1	66.8
FRP ロッドの理論耐力 (kg)	5 780	6 540	5 660

材である強化用繊維の特性を反映している。以上から明らかのように炭素繊維強化 FRP 材は伸びが小さく、脆性的な破壊を示すのに対して、アラミド繊維強化 FRP 材は靱性が大きいといえる。魚本と西村<sup>7)</sup>は表—5 に示すような炭素繊維、ガラス繊維およびアラミド繊維の 3 種の繊維を用いてつくった一方向強化 FRP 材の引張試験を行い、引張強度と破壊確率との関係を図—10 のように正規確率紙にプロットして示している。この結果に



図—10 各種 FRP ロッドの引張強度と破壊確率との関係 (正規確率プロット)

よると、同じ破壊確率で最も高い強度を示すのはアラミド繊維を用いた FRP 材であり、炭素繊維を用いた FRP 材が最も低いことがわかる。破壊確率 10%とした場合の引張強度は、アラミド繊維を用いた場合には約 200 kg/mm<sup>2</sup>、ガラス繊維を用いた場合では約 160 kg/mm<sup>2</sup>であるが、炭素繊維を用いた場合には約 120 kg/mm<sup>2</sup>となっている。さらにこの図から明らかなのは、アラミド繊維を用いた FRP 材およびガラス繊維を用いた FRP 材では、引張強度と破壊確率との間にほぼ直線関係が得られており、これらの破壊強度はいずれも正規分布を示すことがわかる。特に、アラミド繊維を用いた FRP 材ではばらつきも少なく (標準偏差 5.7 kg/mm<sup>2</sup>)、平均引張強度は混合則によって求めた理論強度にほぼ等しい値 (204 kg/mm<sup>2</sup>) が得られている。また、ガラス繊維を求めた FRP 材ではアラミド繊維を用いた



図—11 FRP ロッドの引張応力度-伸度曲線<sup>8)</sup>

場合に比べてばらつきが大きく（標準偏差 12, 2 kg/mm<sup>2</sup>）、平均引張強度は理論強度の約 90% (177 kg/mm<sup>2</sup>) である。これに対して、炭素繊維を用いた FRP 材では他の繊維を用いた FRP 材のような直線関係が認められず、またばらつきが大きいのみでなく、平均引張強度は 147 kg/mm<sup>2</sup> と最も低い値であり、理論強度に比べてはるかに小さい値となっている。このことは、FRP 材を引張材として用いる場合には、強度のばらつきを考慮して評価する必要があることを示唆している。図-11 は 3 種類の FRP 材の引張応力-伸度曲線に及ぼす環境温度の影響を示したものであるが、いずれの FRP 材の場合にも環境温度が低くなるに従ってヤング率が高くなり、また破断時伸びもやや小さくなる傾向がある。このことは、このように、環境温度によって FRP 材のヤング率が変化する原因の 1 つはマトリックスである樹脂の温度依存性によるものであるが、繊維素材の温度依存性にも関係するようである。

(2) FRP 緊張材のリラクセーション特性

図-12 は、初期荷重をそれぞれの引張耐力の 70~80% に相当する荷重として、AFRP, CFRP および GFRP 緊張材の常温時の純リラクセーション率の経時変化を示したものである。いずれの FRP 緊張材も、純リラクセーション率と時間（対数表示）との間に直線関係が成立することは、一般に用いられている PC 鋼材の場合と同様である。また、図-12 から明らかなように、もしこの関係が 30 年後まで成立すると仮定した場合、AFRP および GFRP 緊張材の純リラクセーション率は約 14% 程度、CFRP 緊張材の値は約 12% 程度となる。一般の PC 鋼棒の純リラクセーション率には約 7%、また PC 鋼線の場合には約 15% であることから、FRP 緊張材の純リラクセーション率は PC 鋼線とほぼ等しく、PC 鋼棒の約 2 倍である。しかし、FRP 緊張材の純リラクセーション率が PC 鋼材の値よりも大きいことは確かであり、この傾向は CFRP よりも AFRP の場合に顕著である。これはアラミド繊維の分子構造に

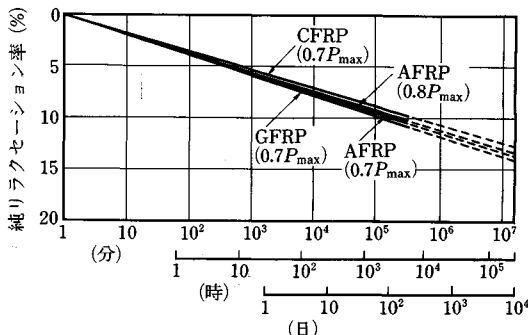


図-12 純リラクセーション率と時間との関係 (20°C)<sup>8),9)</sup>

起因するものと考えられ、この特性を考慮して、プレストレス導入時に張力調整を行うことにより、純リラクセーション率を大幅に減少させることが可能である<sup>10)</sup>。

4. 高強度繊維を用いた一方向強化 FRP 材のプレストレストコンクリート用緊張材への応用

(1) 概 要

プレストレストコンクリート (PC) 用緊張材として一方向強化 FRP 材を用いることを目的とした研究は 1950 年から 60 年代にわたり、アメリカ、イギリス、ソ連、西ドイツの各国において活発に行われている。これらの各国が競って FRP 緊張材の開発研究に力を入れたのは、ガラス繊維の高い引張強度に着目したからである。ソ連の Aslanova は 1945 年に直径が 3 μm のガラス繊維のモノフィラメントを真空中で引張試験を行い、3 640 kg/mm<sup>2</sup> の引張強度が得られたことを報告しており、1 400 kg/mm<sup>2</sup> 程度の引張強度の繊維は工業生産が可能であると考えられていた。この場合、モノフィラメントを束にしてストランドやロービングの形で使用しても 700 kg/mm<sup>2</sup> 程度の引張強度が期待できそうであり、この値は冷間引抜鋼線で得られる 200 kg/mm<sup>2</sup> 程度の値と比較した場合、きわめて魅力のあるものであった。しかし、以上の各国の開発研究は、1970 年代に入って FRP の新しい成形方法である pultrusion 方法が開発されるまで足踏み状態になっていた。これは、一方向強化 FRP に引張荷重を持続して加えた場合、断面内の個々の繊維に必ずしも様な引張応力が生じないために、時間の経過とともに引張力が低下する現象、すなわち、“静的疲労”の壁に遮られていたからである。pultrusion 方法は図-13 に示すように、繊維に一定の張力を与えつつ集束して樹脂含浸を行い、金型を通して成形・硬化させて等断面の FRP 製品を得る方法であって、このような成形方法を適用することにより、複合体としての FRP に加えた引張力によって個々の繊維に生じる引張応力はより様なものとなり、上記のような静的疲労による引張力低下の問題は基本的には解消されることになった。

これによって FRP 緊張材の開発は大幅に進展した。1980 年には西ドイツ最大手の建設会社である Strabag 社と、著名な化学会社である Bayer 社が、Düsseldorf

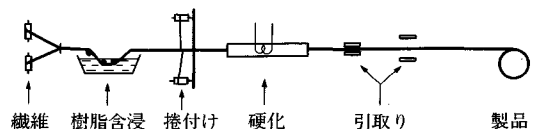
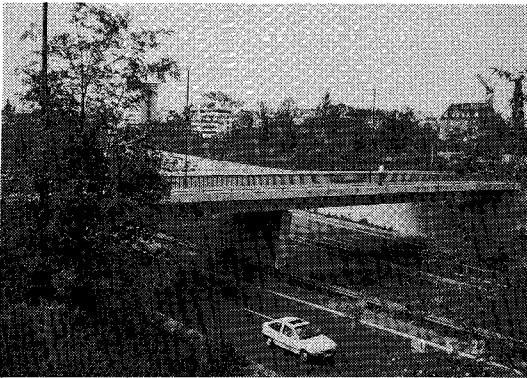


図-13 プルトルージョン法の概念図





写真一 GFRP 緊張材を用いた道路橋 ((株)クラレ, 服部氏撮影)

市当局の協力の下に史上最初のガラス繊維を強化材とした FRP 緊張材を用いた実験橋 (スパン 7.5 m) を Düsseldorf 市郊外に架設し, その 5 年後の 1985 年には同じく Düsseldorf 市内にやはりガラス繊維強化 FRP 材を用いて橋長 46.8 m, 幅 15 m の 2 径間の中空床版橋が建設され供用されている (写真一)。さて, 一方強化 FRP 材を高張力鋼の代わりに PC 用緊張材として用いることの最大の利点は腐食しないという点であり, 西ドイツのグループもこれをセールスポイントに挙げている。

## (2) FRP 緊張材の実用化と問題点

現在, FRP 緊張材の開発研究は, ある特定の繊維によって強化された FRP 材が前提となって進められているケースが多いので, それぞれの繊維が横並びで実用化に向かって検討が進められているかのような印象を与がちである。しかし, これらの FRP 材の中には, 緊張材として実用化される可能性がほとんどないものも含まれている。このような奇妙な事態が進行している原因についてはいくつか考えられるが, その主なものは, ①ユーザーとしての土木技術者が FRP の特性について十分な知識を持ち合わせていないこと, ②この種の開発研究には特定の繊維メーカーが参加する形をとることになるので, 他の種類の繊維を用いた FRP 材を対等に評価することが困難になること, などである。このような状態を引き起こしているもう 1 つの原因は PC 緊張材に適する FRP 材の評価基準が確立されていないことである。ここでは最も基本的な評価の基準として, FRP 材のもつ引張耐力に対してどの程度の有効プレストレスを導入できるかという点を取りあげ, 3 種の FRP 材の評価を試みることにする。

FRP 材の引張耐力と有効プレストレス力との関係は強化材としての繊維の特性に大きく左右される。すなわち, 繊維の純リラクセーション率, ヤング率, 破断時伸び, 引張強度のばらつき, などである。FRP

材を PC 用緊張材として利用しようとする場合の前提は, その優れた引張強度の活用にある。炭素繊維, アラミド繊維, 高強度ガラス繊維のいずれを用いた FRP 材をとっても PC 鋼材に比べて相当に高価なものであるから, 少なくとも PC 鋼材と同程度に引張耐力が活用できないと, ますます高価な緊張材となり実用から遠ざかることになる。このような観点から, 望ましい FRP 材の特性としては, ①純リラクセーション率が小さいこと, ②ヤング率が小さいこと, ③破断時伸びが大きいこと, ④引張強度のばらつきが小さいこと, などが挙げられる。表一六は以上の点を尺度として, 3 種の FRP 材の PC 緊張材としての適性について評価したものである。まず, 純リラクセーション率について検討すると, CFRP が最も優れており, PC 鋼材の場合と同程度の評価が与えられるが, AFRP と CFRP の場合にはこれより大きくなる。しかし, ヤング率の値は AFRP と GFRP が鋼材の値の 1/3 程度であるため, 有効リラクセーション率の値は PC 鋼材の場合とほぼ同程度となり, この面では 3 種の FRP 材について性能の差がほとんどないといってよい。したがって, 破断時伸びと引張強度のばらつきという 2 つの尺度によって評価が決まることになるが, これらの点に関しては明らかに CFRP が不利である。すなわち, CFRP は PC 用緊張材に適しないということになる。

FRP 緊張材の実用化を図る場合にまず当面するきわめて基本的な問題は, FRP 材の引張強度をどのようにして試験するかという点であろう。FRP は鋼材のように均質で塑性をもつ材料ではなく, 所要の方向に繊維を配置している異方性材料であって, 断面に占める強化用繊維の体積百分率は 50~70% 程度, 残りは合成樹脂である。また, 両者のヤング率には 2 桁の相違がある。このような複合材料は強化方向に直交する面内から作用する力に対しては非常に脆い。緊張材として使用される棒状の FRP 材に引張力を与える治具として鋼材用のものを用いても, いわゆるチャック破断を生じるので, その引張強度を調べることができないのである。著者が東京大学生産技術研究所において約 10 年前に FRP 緊張材の開発研究に着手したときには, この引張強度試験用の治具の開発に 2 年を要したが, これを知ったある大手の

表一六 各種 FRP 材の評価

	CFRP	AFRP	GFRP
純リラクセーション率	○	△	△
引張弾性率	△	○	○
破断時伸び	×	○	○
引張強度のばらつき	×	○	△
コスト	×	△	○

材料試験機メーカーの部長から、“FRP材の引張試験機の製作依頼が来ているが、チャックが問題なので引き受けることができない。何とかそのチャックを使用させて貰えないか”と打診されたことがある。このことは取りも直さず、FRP緊張材の実用化における緊張および定着装置の開発の重要性を示唆している。

FRP材をPC用緊張材として用いる場合に検討を要するもう1つの課題は、持続引張荷重または繰返し荷重を受けた状態における耐アルカリ性の問題である。このような状態においてFRPは劣化が進行する可能性があるとの指摘もあり<sup>2)</sup>、特にプレテンション方式を考える場合、この点についての検討が必要である。

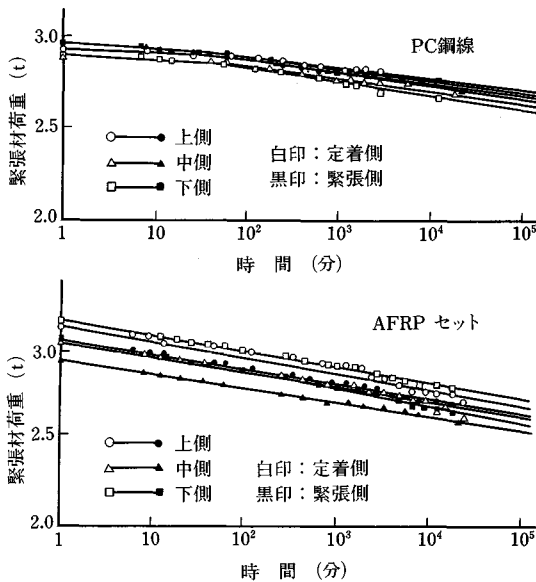
また、プレテンション方式によるPC部材では緊張材のコンクリートとの付着強度が問題になるが、この点に関しては異形加工されたFRP材<sup>12),13)</sup>が開発されており十分に実用に耐え得るような付着性能を有することが確認されている。

(3) FRP緊張材によるプレストレスの導入とPC部材の耐荷力

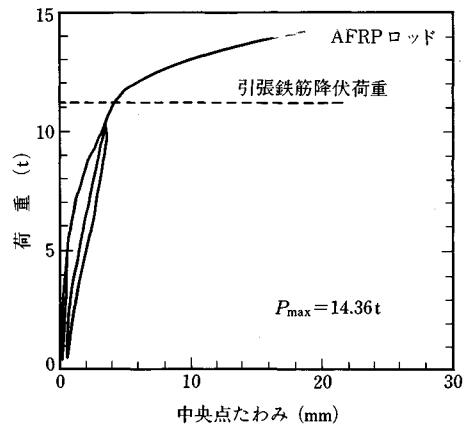
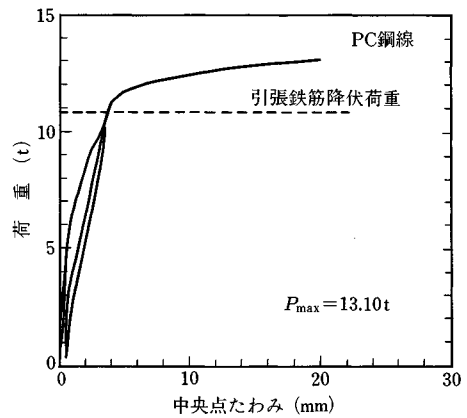
FRP緊張材として最も実用の可能性が高いと考えら

れるAFRP緊張材を用いたPC部材としての力学的性質に関する検討結果を以下に示す。

表一七は、AFRP緊張材を用いた場合のプレストレス導入時のセットによる引張力の減少を、PC鋼材と比較して示したものである。この表から、AFRP緊張材はPC鋼材に比べてセットによる引張力の減少が少ないことがわかる。これは、AFRP緊張材のヤング率が小さいことによるものである。一方、図一四はAFRP緊張材およびPC鋼線を用いたポストテンションPC供試体にプレストレスを導入した後における緊張材の引張力の経時変化を示したものである。これらの図より緊張材の引張力と対数表示した時間とはほぼ直線関係にあ



図一四 引張力の経時変化<sup>10)</sup>



図一五 荷重-中央点たわみ曲線<sup>10)</sup>

表一七 セットによる緊張材の引張力の減少<sup>10)</sup>

緊張材	PC 鋼 線			FRP ロ ッ ド							
	試験体番号	No.1	No.2	平均	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	平均
減少量 (kg)		329 309*	333 299*	331 304*	100 79*	71 70*	100 90*	108 100*	62 78*	62 71*	84 82*
減少応力 (kg/mm <sup>2</sup> )		16.8	17.0	16.9	3.5	2.5	3.5	3.8	2.2	2.2	3.0

\*は緊張側のロードセルによる定着前後の荷重減少量

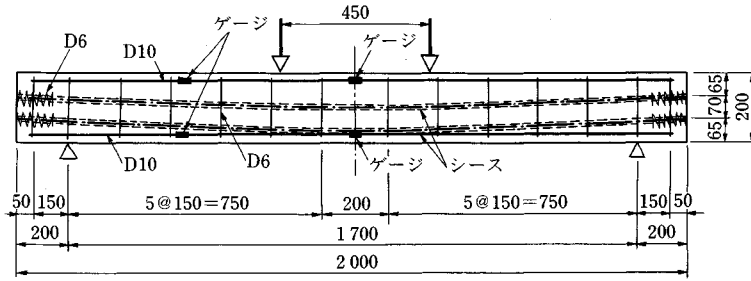


図-16 緊張材を曲線配置した試験体配筋図

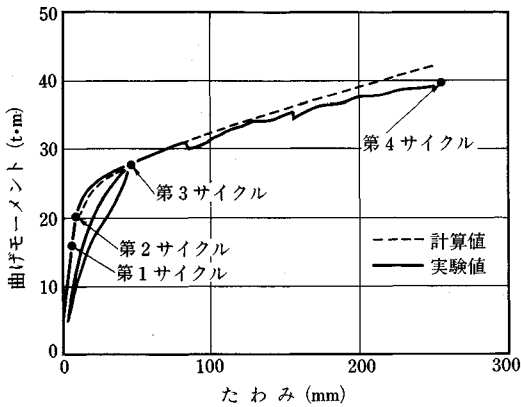


図-17 曲げモーメント-たわみ曲線<sup>12)</sup>

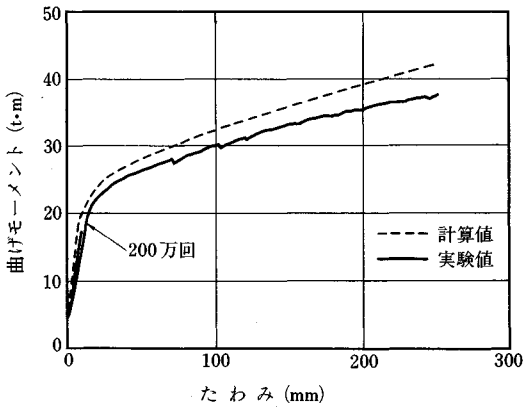


図-18 曲げモーメント-たわみ曲線<sup>12)</sup>

ることがわかる。この直線関係が30年後まで成立すると仮定した場合、PC鋼線が初期プレストレス力の約85%、AFRP緊張材で約82%が有効プレストレスとして残存すると考えられる。この差はFRP緊張材の方がPC鋼線に比べてリラクゼーション率が大きいため生じるのであるが、セットによる応力損失までを考慮に入れると、FRP緊張材は最大緊張応力の約79%、PC鋼線は約77%となり、逆にFRP緊張材の方が有利になる。

図-15は、図-16に示すようなポストテンションPC小型はり供試体の載荷試験によって求めた荷重-中央点たわみ曲線の一例を示したものであって、それぞれPC鋼線およびAFRP緊張材を用いたものである。いずれの供試体も同じプレストレス力を導入したものであり、ひびわれ荷重の4.0tまでは弾性的挙動を示し、弾性計算より求めた結果とほぼ一致した。引張鉄筋が降伏した後は、PC鋼線を用いた場合には、PC鋼線の降伏に伴ってたわみが急速に増加しているが、FRP緊張材を用いた場合にははりの破壊時まで荷重-たわみ曲線はほぼ一定の割合で増加している。これは図-9に示したような緊張材の応力-ひずみ曲線の影響によるものと考えられる。一方、図-17および18は、図-19に示すような支間10mのポストテンションPC大型はりによる静的曲げ載荷試験および曲げ疲労試験の結果を示したものである。図-17の結果は、曲げモーメント-たわみ曲線の実測値が計算値と良く合っていることを示しており、また、図-18は200万回の繰り返し載荷後にお

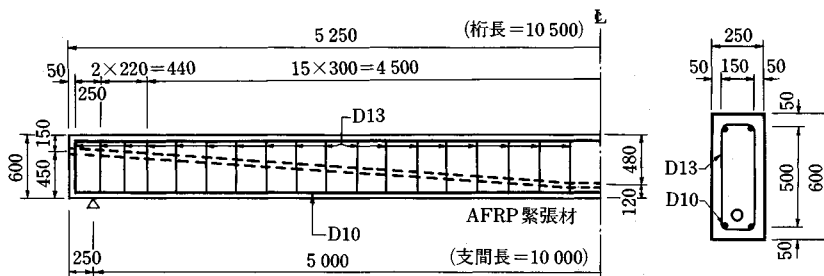


図-19 試験桁形状寸法

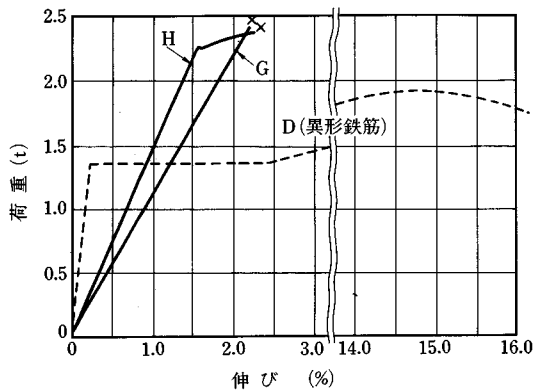


図-20 ガラス繊維使用 FRP 筋ならびにガラス繊維/炭素繊維混合使用 FRP 筋の荷重-伸び曲線<sup>14)</sup>

る静的載荷試験による曲げモーメント-たわみ曲線を示したものであって疲労により若干はりの耐荷力が減少しているが、定着体の疲労は生じていないことが確認されている。

### 5. FRP 材の鉄筋コンクリート用補強材としての利用

#### (1) 概要

最近、大手の建設会社では、FRP 材を鉄筋代替品として利用しようとする動きが活発である。鉄筋代替品といっても、従来のような現場で組み立てる方式ではなく、工場においてメッシュ状または立体格子状に一体成形されたプレハブ補強体を用いる方式が主流になっている。FRP 材を鉄筋の代わりに使用することによって得られる利点としては以下の諸点が挙げられる。

- 1) 軽量で取り扱いが容易である。
- 2) 高強度が得られる。
- 3) 耐食性が優れている。
- 4) 複雑な形状のものも自由に成形できる。

強化材としてはガラス繊維、炭素繊維、アラミド繊維、ビニロン繊維などが用いられるが、炭素繊維のような固い繊維と、ガラス繊維のような柔らかい繊維をハイブリッドとして使用する場合もある。

#### (2) 鉄筋代替用 FRP 材とその利用形態

写真-2 はメッシュ状に、写真-3 は立体格子状に、それぞれ一体成形された FRP 材の一例を示したものである。特に立体格子状に一体成形した FRP 製プレハブ補強体は格子の構成を変えることによって、部材の形状・寸法、荷重の作用条件などの異なる種々の構造物に適用できる自由度を有している点で今後の展開が注目される<sup>13)</sup>。また、写真-4 はせん断補強筋として使用するためにらせん状に加工されたものである。表-8 はガラス繊維を強化材として用いた FRP 材の諸元を示したも

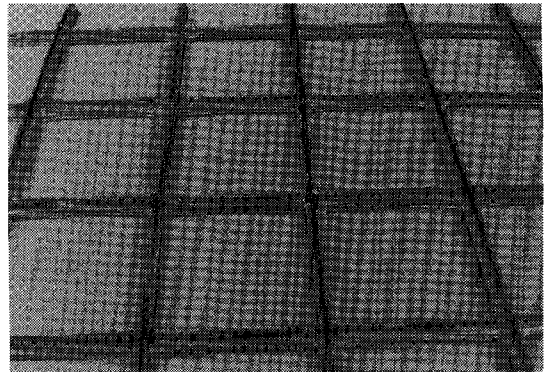


写真-2 メッシュ状に一体成形された FRP 材 (清水建設 (株) 技術研究所)

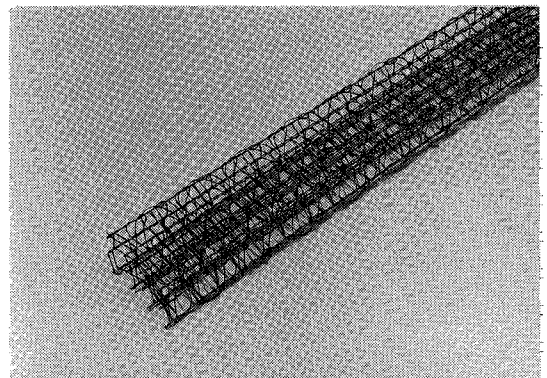


写真-3 立体格子状に一体成形された FRP 材 (鹿島建設技術研究所)

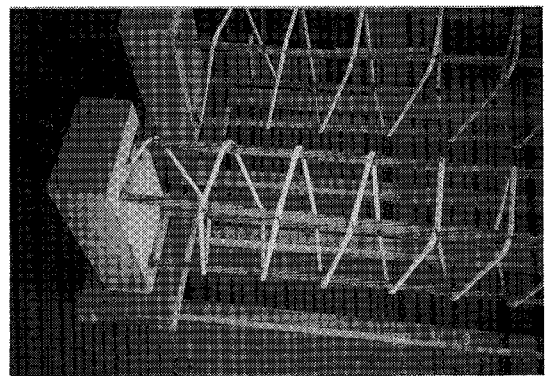


写真-4 高強度ビニロン強化 FRP 材によるらせん状せん断補強

のであるが、単位長さ当たりの重量が非常に小さい点が注目される。図-20 は表-8 における  $\phi 6 \text{ mm}$  の FRP 材の荷重-伸び曲線を示したものである。図中、荷重-伸び曲線が途中で折れ曲がっているものは、炭素繊維とガラス繊維によってハイブリッド強化を行ったもので、炭

表一 鉄筋代替用 FRP 材の仕様の一例<sup>4)</sup>

タイプ	筋番	最大荷重 (t)	剛性 (t)	標準重量 (g/m)
G	G 2	0.26	12.9	7
	G 4	0.78	38.7	22
	G 6	2.1	103	60
	G 10	4.7	232	130
	G 13	7.8	387	220
	G 16	12.0	593	340
	G 19	17.7	877	510
	G 22	23.4	1160	670
H	H 6	2.1	147	66
	H 10	4.6	331	150
	H 13	7.7	552	250
	H 16	11.8	846	380
	H 19	17.5	1250	560
	H 22	23.1	1650	740

タイプ：Gはガラス繊維，Hはガラス繊維とカーボン繊維のハイブリッド。

筋番：数字は異形棒鋼の呼び名に対応しており，ほぼ等しい断面積をもっている。

剛性：断面積×ヤング率。

素繊維の破断が先行するためにこのような現象が起こる。なお，高強度ビニロン繊維によって強化した FRP 材は加熱により曲げ加工が可能であり，切断も容易である。

## 6. コンクリート分野における FRP 材の今後の展開と課題

西ドイツが世界に先駆けて FRP 緊張材の実用化研究に乗り出した端緒は，PC 鋼材の水素脆性割れに起因する西ベルリンの建物ドームの崩落事故であったといわれる。一方，わが国においては数年前に，日本海沿岸に沿う国道 7 号線に架設されている建設後 10 数年の道路橋の PC 緊張材に塩分腐食が生じていることが明らかにされた。このことは，塩分環境下において優れた耐久性を有すると考えられてきた PC 構造物の信頼性について，耐久性の面から根本的な見直しを迫られることになり，わが国における FRP 緊張材開発の引金になった。このように，PC 構造物の耐久性の面からの FRP 緊張材のニーズは現在でも変わっておらず，今後はさらに各種の海洋環境に建設されるコンクリート構造物に対する適用が検討されることになる。FRP 材の鉄筋代替品としての利用に関しては，現在，トンネルライニングの 2 次ライニング補強筋，吹付けコンクリート用補強網，

などの 2 次構造材が対象になっている。しかし，今後内需拡大の一層の進展に伴い，建設工事は増大の一途をたどると予想されている反面，労務者不足はますます深刻化する様相をみせている。このような状況を考えるとき，上記のような工場成形の FRP 材の利用はより広い分野へ拡大されるであろう。FRP 緊張材，鉄筋代替品としての FRP 材のいずれもが利用される可能性があるのは，これらの非磁性を利用する分野である。その代表的な例が磁気浮上式鉄道ガイドウェイへの適用<sup>15)</sup>である。今後の課題としては前述した FRP 材自体の化学的耐久性に関する検討とコストの問題があるが，後者に関しては，繊維素材の他分野における利用拡大に伴う量産によるコスト低減がキポイントである。

## 参考文献

- 1) 日本複合材料学会編：複合材料を知る辞典，アグネ，pp.40～41，1982。
- 2) 土木学会平成元年度全国大会研究討論会資料，1989.10。
- 3) Gill, R.M.: Carbonfibres in Composite Materials, London ILIFFE Books, 1972。
- 4) 進藤昭男：炭素繊維，工業材料，Vol.21, No.5, p.107。
- 5) (株)クラレ，技術資料
- 6) 小林：PC と新材料，プレストレストコンクリート，Vol.30, No.1, 1988。
- 7) 魚本・西村：プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性 (I)，生産研究，Vol.42, No.5, 1990。
- 8) 小林・趙：繊維強化複合材料製プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究 (その 1)，生産研究，Vol.36, No.8, 1985。
- 9) 小林・趙・西村：繊維強化複合材料製プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究 (その 2)，生産研究，Vol.37, No.6, 1985。
- 10) 小林・趙・西村・中井：アラミド繊維を用いた FRP ロッド緊張材のリラクゼーション特性，生産研究，Vol.40, No.8, 1988。
- 11) 水谷・則武・本間・浅井：AFRP 異形ロッドの定着機構について，土木学会第 44 回年次学術講演会梗概集 (V)，平成元年 10 月。
- 12) 迎ほか：AFRP ロッドを用いた PC 構造物に関する研究 (その 3)，住友建設技術研究所報，1989。
- 13) Amano, R. *et al.*: Study on 3-Dimensional Carbon Fabric Reinforced Concrete, IABSE Symposium, Brussels, 1990。
- 14) 中辻：コンクリート補強用格子状 FRP 筋，工業材料，Vol.38, No.6, 1990。
- 15) 涌井 一ほか：側壁ビーム方式ガイドウェイと FRP 補強材導入の可能性，JREA, Vol.33, No.3, 1990。

(1990.7.13・受付)