

# 高分子系複合材料の構造物への用途とインテリジェント化

## Application of Polymer Composites for Structures and Intelligence

座古 勝\*・倉敷 哲生\*\*

Masaru Zako Tetsusei Kurashiki

### 1. はじめに

現在、複合材料が種々の分野で用いられ、その用途拡大が注目的となっている。そこで、本報では今後の展開を考える資料とすべく、高分子系複合材料の構造物への適用理由を例を用いて概説する。さらに、このような構造物に損傷が発生した場合、近年注目されている自己修復を考慮した構造物のインテリジェント化手法について記述する。

複合材料 (composite material) とは、粒子や繊維等を媒体となる物質に系統的に分散し、全体として一つの組織構造を形成することにより、目的とする用途へ性能の最適化を図った材料である。熱硬化性あるいは熱可塑性樹脂をマトリックスとし、ガラス繊維等の各種繊維を混合・分散させた複合材料は繊維強化プラスチック (FRP: fiber reinforced plastic) と称される。FRPは弾性率・強度が高く密度が小さいため、航空・宇宙用途のように重量が厳しく制約される分野には欠かせない材料である。1952年に米国より不飽和ポリエステル樹脂が導入され、翌年には国産の樹脂が市販され、手作りによる試作が開始された時点が我が国におけるFRP産業の出発点といえる。過去40年間のFRP製品の生産量を米国と比較し図-1に示す。我が国のFRP産業は1961年に約7千トンであったものが、その誕生以来40年以上を経て現在の約440千トン、売り上げ規模約1兆円近い市場規模へと成長し、産業基盤も確実なものとして成長している。我が国のFRP産業は過去2回のオイルショックで憂き目をみたが、その後、市場の要求に合わせた多様化対応等により成長してきた。その後、我が国ではほとんど成長はないが、米国では好景気に伴い近年は急成長となっている。また、米国は輸送部門中心にFRP産業が伸びている

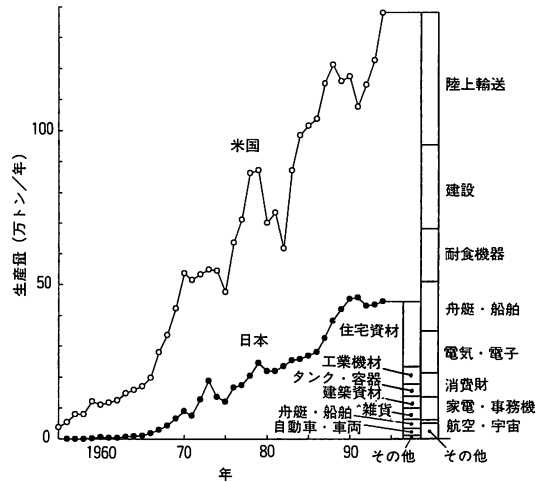


図-1 米国および日本におけるFRP生産量の推移

が、我が国では住宅部門が半数の割合を占める。ユニットバス等は米国では全く成長していないし、人口大理石など我が国独特の製品も多いことが異なる点である。

また、表1に示す通り、複合材料使用時の際に常に問題となるのはコスト削減が挙げられる。現在、複合材料の製造において、組む、織る、編むといった工程や不織布工程の利用が提案されており、これが製造および保全コストの低減をもたらしている。また、表2は各種材料の曲げ剛性における比較を示す。複合化により重量が大きく軽減できることが判る。

FRPの開発は、マトリックスに不飽和ポリエステル、強化剤にガラス繊維を使用するものから始まったが、その後の繊維強化の技術進歩と新しい材料開発を含む複合化技術の発展により、今日では各種の繊維、各種のマトリックス材料が繊維強化複合材料とされるようになっている。以下では、このようなFRPを用いた製品の最近の動向およびFRPを利用した構造物補強に関する研究例について記述する。

\* 大阪大学工学研究科生産科学専攻教授  
\*\* " " " 助手

〒565 大阪府吹田市山田丘2-1

表1 織物複合材料使用時のコスト<sup>1)</sup>

分野	製品例	特性	価格
航空宇宙／エネルギー	エンジン部品 熱交換機	高温特性 超高剛性 強度 耐酸性	(240,000円/kg)
航空機	翼 表面補強材 胴体パネル	軽量化 再利用化 損傷強度	(24,000円/kg)
自動車	電気／ハイブリッド 自動車構造補強材	耐久性 耐衝撃性 低製造コスト	(730円/kg)
建造物／公共施設／石油施設	耐震構造物 橋梁 海上施設 配管	超低材料コスト 大規模製造	(240円/kg)

表2 同一曲げ剛性における比較

種別	材質	パネル厚さの比	重量比	破壊荷重の比
普通剛板	SS400	1	1	1
アルミ板	A5083	1.5	1.1	2.5
アルミ表面 アルミニウム	A5052 1/4-3003-002	2.5	4.5	5
CFRP表面 ノーマックスハニカム	P201 HRH-10-3/16-6.0	2	1.7	20
CFRP表面 アルミハニカム	SPG-100 A1/8-5052-002	3.5	7	10

## 2. 現状の用途

最近のFRP構造物の適用について市場分野別に以下概説する。

### 2.1 住宅資材

現在、FRP製品の出荷比率第一の分野は住宅資材であり、その需要内訳は、サニタリー製品約45%、浄化槽約50%、残りがその他である。サニタリー製品は浴室ユニット、洗面化粧台、キッチンカウンターが主であり、特に浴室ユニットの進歩が顕著である。近年、戸建てには約40%、集合住宅には95%以上FRPユニットが採用されている。サニタリー製品に関する最近の傾向は、各社が競って高級化への加飾技術を駆使した新製品を市場へ導入している点にある。特に、浴槽としては、耐食性、透明性、平滑性、光沢などFRPの優位性を特徴にし、図-2に示す人造大理石バスと称した我が国独特の製品が出回っている。1980年当時はステンレス浴槽が材質別では1位であったが、人造大理

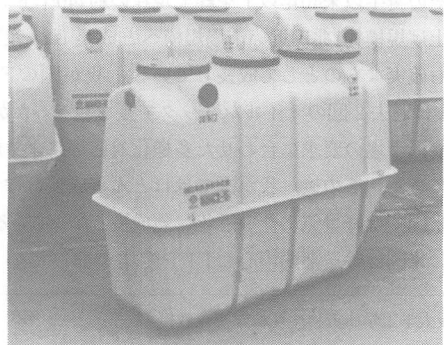
図-2 人造大理石浴槽<sup>2)</sup>

石浴槽の開発に成功した結果、市場から圧倒的な支持を得てFRP浴槽が1位の座を奪取し今日の隆盛を確立している。浴室ユニットの床や壁にも多様な材料と加飾品が開発され、選択の自由度が非常に広がっている。また、成形方法も自動化、高速化が進み、多彩な商品展開が可能になったことなど今後とも大きく期待されている。

浄化槽は、1969年の浄化槽構造基準が制定されてから順調に伸びてきたが、近年は合併処理槽の設置へ向けた指導が中心になっている。1987年からは国と地方自治体の補助金制度が活用され始め、それに最近の環境問題改善への取り組みを背景にして、その普及は大きく広がりつつある。図-3は浄化槽の一例である。現在、各社は新成型法を駆使した新製品の開発を図っており、今後使用実績は益々増加するものと予想される。

### 2.2 車両

東急車輛では、図-4のようなフェノール樹脂系CFRP製屋根構体を用いた新幹線構体を試作している<sup>4)</sup>。

図-3 浄化槽成形品<sup>3)</sup>

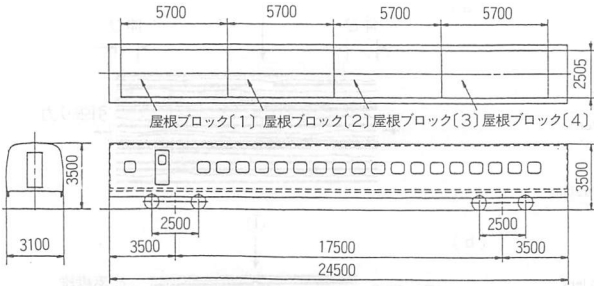


図-4 CFRP製屋根を用いた新幹線試作構体<sup>4)</sup>

屋根構体は4つのブロックに分かれており、(1) CFRP外板にCFRP製の木とCFRP縦桁とを格子状に組んだもの、(2) 外板およびたる木の肉厚を変更したもの、(3) 縦桁を廃止したる木内をポリウレタンフォーム心材とするサンドイッチ構造としたもの、(4) フェノールフォームを充填したペーパーハニカムを心材とするサンドイッチ構造としたもの、となっている。

図-5に示す鉄道総研により開発された超電導磁気浮上型リニアモーターカー試作車MLX01用の腰掛には、背ずり、台枠、そで部等の主要部材にCFRP成形品が採用されている<sup>5)</sup>。特に、従来の角チューブと板材の溶接によるアルミフレーム構造に代わって、CFR

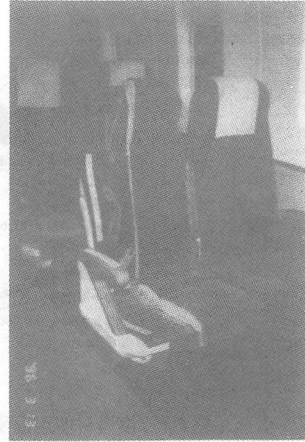


図-5 CFRPシェル構造の軽量腰掛<sup>5)</sup>

Pの成形自由度を利用した曲面構成のシェル構造(2枚のCFRP成形品を接着およびリベットにより接合した骨組み構造を持たないシェル状の薄板構造)として軽量、高強度、高剛性が図られている。

2.3 航空機

重量軽減が至上命題である航空機の構造設計において、小型機や軍用機で広範囲に使用されていた複合材は、1980年代に大型旅客機でも利用範囲を大きく増加させた。航空機における複合材の長所は、高比強度・

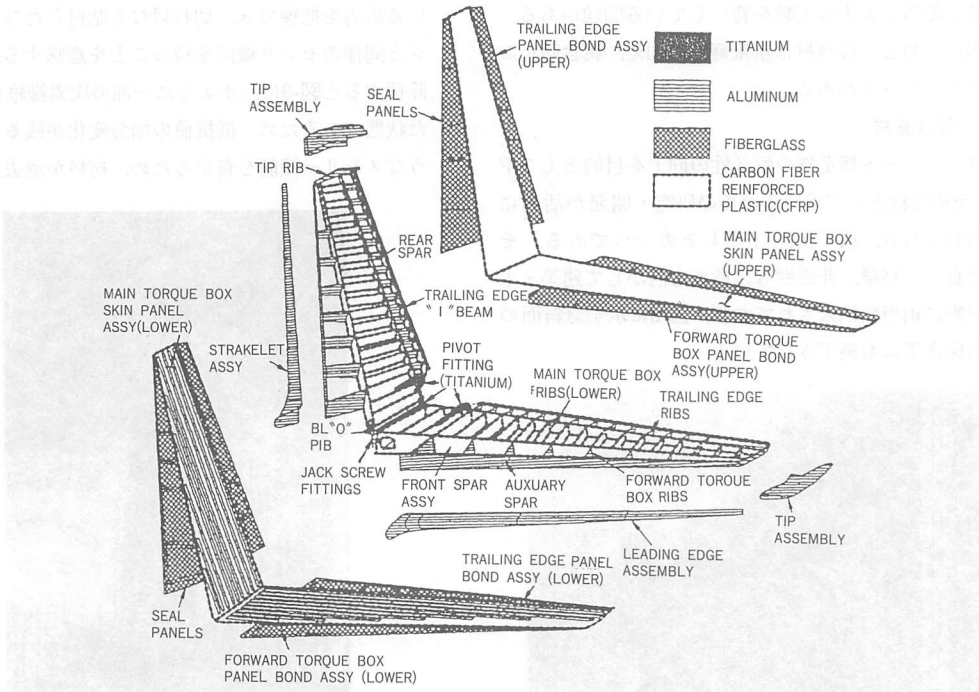


図-6 ボーイング777の水平尾翼の構造<sup>6)</sup>

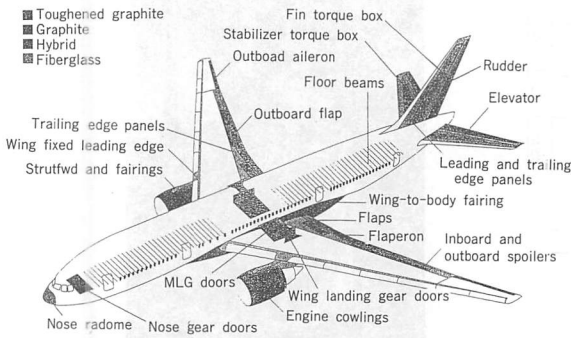


図-7 ボーイング777複合材使用箇所<sup>6)</sup>

高比剛性／耐疲労性／耐腐食性／複雑な形状への対応／部品点数の削減／重量軽減による燃料の削減／電波透過性等が挙げられる。1995年に就航したボーイング777は、図-6に示す水平尾翼の主要構造部に新複合材を採用しており革新的である<sup>6)</sup>。図-7に示す777の機体構造において複合材料の重量は全体の約9%を占め、アルミ合金等を使用した場合に比べ約1.2トンの重量軽減を果たしている。これは荷物を含んだ乗客10人分の重量に相当する。また、航空機の構造部材にはアルミ合金が多く使用されているが、長期間の使用により腐食が大きな問題となっており、整備作業において腐食防止処置に多大な工数を費やしている問題がある。その点に対し、複合材は重量軽減に加え、腐食防止の点でもメリットがある。

2.4 建設資材

コンクリート構造物の耐久性の向上を目的としてFRPを補強材として用いるための研究・開発が活発に行われており、格子状FRP筋もその一つである。その耐食性、軽量、非磁性等の機能を活かして建築・土木分野に相当数納入されており、図-8に示す急斜面の表面保護工にも施工されている。

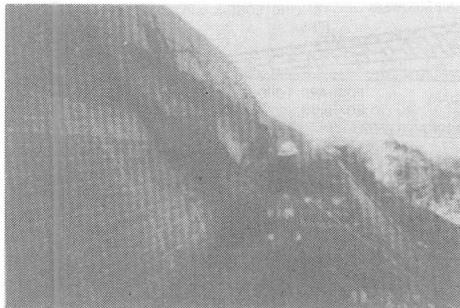
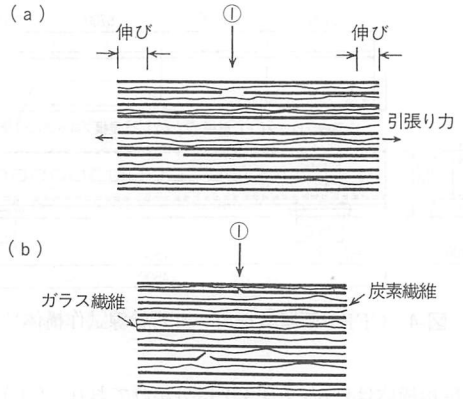


図-8 急斜面の表面保護に施工された例<sup>3)</sup>



荷重時(a)に切れた炭素繊維の一部①は力を除くと再び電氣的に接続される

図-9 Hタイプネフマックに引張力を加えた場合とその後除荷した場合の模式図<sup>7)</sup>

また、炭素繊維の電気的特性に着目し、センサとして利用している例もある<sup>7)</sup>。炭素繊維とガラス繊維を混ぜ合わせたHタイプのネフマックでは、繊維の混合比率を変えることにより初期弾性率が調整でき、また脆性的な炭素繊維と比較的伸びの大きいガラス繊維との組み合わせにより擬似的延性挙動を示すハイブリッド効果を有する。この材料が応力を受けた際には、伸びの少ない炭素繊維は破断の進行に伴い電気抵抗値を増大させる。これは逆に、抵抗値の測定により受けている応力を把握でき、切れ目なく貼付したひずみゲージと同様のセンサ機能を持つことを意味する。また、除荷すると図-9に示すように一部の炭素繊維は破断した状態であるため、抵抗値の増分変化が残る。このようなメモリー機能を有するため、材料が過去に受けた

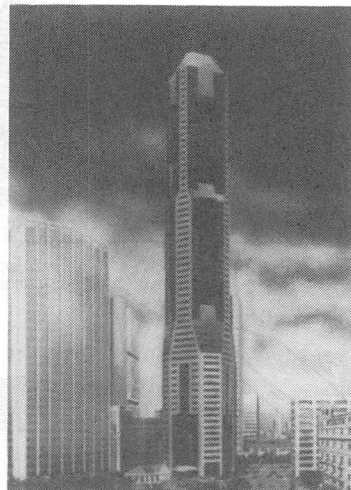


図-10 リバブリックプラザ

損傷の履歴を知ることができる。炭素繊維は、強化材とセンサの両方を兼ねており、構成要素の数からみてもシンプルで、かつ多くの機能を備えているといえる。

コンクリートのひび割れ検知への応用例として、図-10に示すシンガポールのリパブリックプラザ(1995年8月完成・清水建設施工)がある。高さ280m、地上66階建て高層ビルの20階部分の床スラブ中にネフマックが数箇所配置されている。今後、長い年月にわたり建物のひび割れや応力による破損の程度を検知し続けることになる。

### 3. 構造物補強への適用例

土木・建築分野における橋梁やトンネル、建築物等に対して、耐力向上やひび割れ等による強度劣化を防止するため、FRPでコンクリート表面を貼付補強す

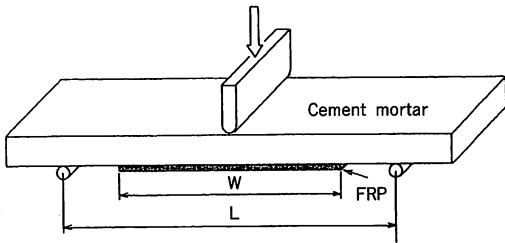


図-11 CFRP補強材貼付セメントモルタル材の概略

る手法が実施されている。補修・補強の例として、阪神大震災の際、山陽新幹線六甲トンネル(全長16.25 km)のはぼ中央に近い地点の側壁に生じたき裂や剥落に対し、樹脂やモルタルを注入し炭素繊維シートを貼り付けることによるき裂進展と剥落防止が施されている。このような補強効果を予測する手法として、近年のコンピュータの大容量化・高速化による発展に伴い、シミュレーションによる力学的挙動解明が重要な位置を占めている。そこで、CFRPにより補強されたセメントモルタル材の三点曲げ試験を対象に、有限要素法を用いた力学的挙動のシミュレーション結果と実験結果との比較を示す<sup>9)</sup>。供試体は、図-11に示す150mm幅×50mm厚×400mm長のセメントモルタル材の表面にCFRP補強材を貼り付けたものである。図-12および図-13に各補強長における荷重-変位曲線の解析および実験結果を示す。なお、Wは補強幅、Lはスパン間距離である。補強長の増加に伴い耐荷重および耐変位値が増加し、その補強効果が顕著に現れる。補強長(W/L)が0.3以下では耐荷重値が若干増加するものの、耐変位はセメントモルタル単材と同様であり補強効果は少ない。また、補強長(W/L)が0.6以上では耐荷重値がほとんど変化しない結果となるが、耐変位は増大する。したがって、対象とした条件下で十分な補強効果を得るには補強長が0.6以上であればよいことが判る。また、破壊挙動の解析結果は実験結果に対し良い傾向を示す。今後、このような解析手法が補強長の決定などの補修設計において非常に有用な手法となろう。

### 4. インテリジェント化

構造物中のき裂や損傷の発生および進展を監視する方法として、AE法やひずみゲージによるモニタリング等があるが、大型構造物を随時監視するにはセンサ数、費用等の問題がある。そのため、構造物の保守点検は目視観察に頼っているのが現状であるが、目視ではき裂を見落とす可能性がある上、発見不可能な損傷も少なくない。そこで、損傷の発生や程度を常時監視し、損傷発見時にはそれに対処する機構、すなわち構造物のインテリジェント化に関する研究が盛んとなっている。特に、センサとして光ファイバを用いる場合は、強化のための繊維と光ファイバ用繊維を混合して使用できるのでFRPは非常に都合が良い。以下では、FRPを用いたインテリジェント化の例を示す。

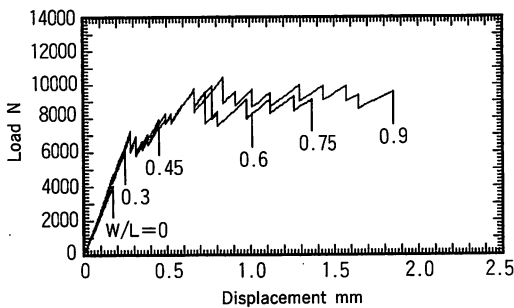


図-12 荷重-変位関係の解析結果

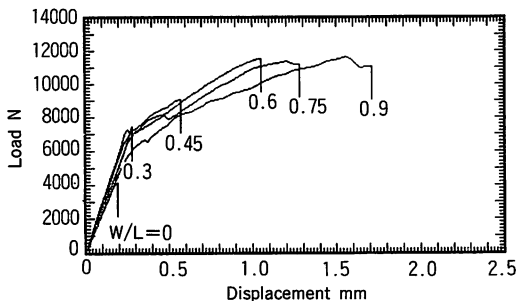


図-13 荷重-変位関係の実験結果

### 4.1 CFRP貼り付け補強コンクリートのインテリジェント化

FRP貼り付け補強コンクリートにおける損傷の一つにFRPとコンクリート間のはく離がある。はく離が発生すると補強効果が低下するので、早期発見・早期対応が重要である。そこで、CFRP貼り付け補強コンクリートに光ファイバを用いてはく離をモニタリングし、はく離が生じた場合には自動的にはく離を補修するインテリジェント構造物が試作されている<sup>9)</sup>。

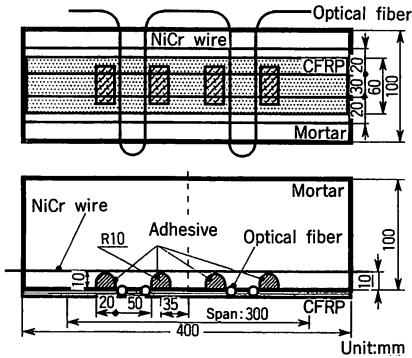


図-14 供試体の概略

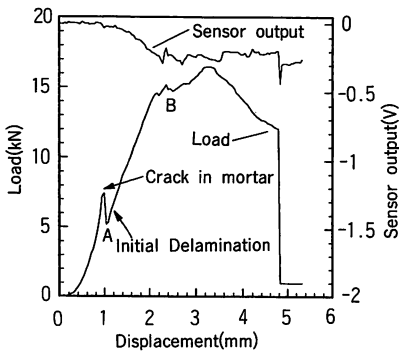


図-15 アクチュエータを作動しない場合の荷重-変位曲線とダイオード出力

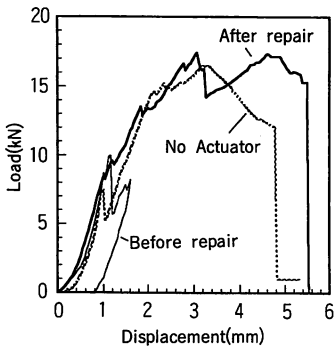


図-16 アクチュエータを作動した場合の荷重-変位曲線

センサ部には光ファイバを適用し、はく離が生じた際には光ファイバに変形が生じ透過光量が減少するため、これを利用してFRPのはく離を検出する。制御部としては、CFRP補強板のはく離モニタリングから損傷発生時におけるアクチュエータ作動の一連の動作をコンピュータで制御する。アクチュエータとしては、補修用接着剤であるエポキシ樹脂を封入したゴム製カプセルとニクロム線を予め供試体に埋設し、通電加熱によりカプセルを破壊させ樹脂を放出する。

図-14は供試体の概略である。はく離モニタリングおよび補修効果の確認のため、三点曲げ試験を実施した。図-15にアクチュエータを作動させない場合の荷重-変位曲線、および光ファイバからの出射光をフォトダイオードで計測した際の出射光の変化を示す。荷重増加と共にダイオード出力が減少し、はく離発生と同時にダイオード出力が変動する。そこで、A点に示す損傷発生時点において三点曲げ試験を中断し、アクチュエータを作動させ以後破断するまで三点曲げを行った結果を図-16に示す。インテリジェント化により、耐変位性能が向上し、耐荷重性能についても若干の向上が見られる結果となる。

### 4.2 CFRPの微視的き裂の自己補修に着目したインテリジェント化

CFRPの破壊挙動は繊維束の破断や樹脂と繊維界面の破壊、樹脂内の破壊等の微視的な損傷を重ねた後、最終破断に至ることとなる。また、炭素繊維シートを様々な角度で重ねて硬化させた積層材においても、各単層材間の界面で破壊が生じる。このような微視的損傷は外から観察することは難しく、また材料内部で損傷が起こる場合には補修することは困難である。したがって、致命的な損傷が発生する前に、材料自身がその損傷を判断して内部から対応できるとすれば大変望ましい。そこで、微視的き裂を自己補修する為の手段として、樹脂中に微小な粉末粒子型接着剤を予め配合させたCFRPに関する研究が行われている<sup>10)</sup>。この粉

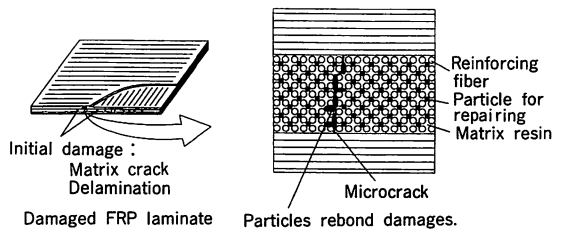


図-17 自己補修材料の概念図

末粒子は平均粒径 $50\mu\text{m}$ であり、熱硬化性であるエポキシ樹脂を主成分とした接着剤を封入したカプセル型粒子である。加熱により粉末粒子はき裂部で溶解し、接着剤が浸透して補修することが可能となる。材料の概念図を図-17に示す。この構造における微粒子は、人体において皮膚の傷口をふさぐ血小板の役割を模倣しているといえる。

自己補修効果の確認のため、炭素繊維を除いた樹脂中に接着剤粒子を分散させた供試体を作成し、三点曲げ試験を行った結果を示す。樹脂は炭素繊維間を接着する作用を有するため、粉末粒子を大量に配合することはその接着強度の低下と共に力学的特性の悪化につながる。逆に、粉末粒子が微量であればそれだけ補修効果も薄い。そこで、粉末粒子の体積含有率が約40%、約30%、約17%、そして粒子を配合しないものの4種の供試体を用意し、強度低下および補修効果を調査した。補修前後において、粉末粒子の体積含有率-破断強度関係を図-18に示す。体積含有率の増加に伴い初期強度は30~50%低下するが、剛性定数の変化はわずかであり、また、補修効果は大きく上昇する。特に、含有率が約40%の供試体では、補修により初期強度の約90%が回復する。粉末粒子を40%以上配合するとさらに補修効果が増大することも考えられるが、樹脂の体積含有率低下により樹脂と炭素繊維との接着が困難となる。したがって、対象とした条件下で十分な補修効果を得るには、粉末粒子の含有率が40%の供試体で十分であることが判る。

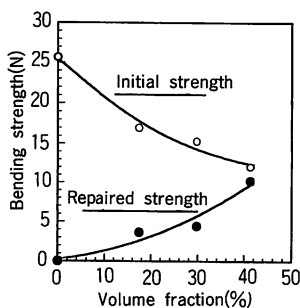


図-18 粉末粒子の体積含有率-破断強度関係

## 5. まとめ

FRPの優れた材料特性をいかし、構造物の補修・補強への適用が着実に普及されている。今後は、先の阪神大震災を教訓とし耐震補強対策としての採用増大が予想される。耐震補強に関しては、変形性能(靱性)

向上が不可欠であり、剛性向上のみの工法よりも変形性能向上も期待できるFRP貼付け補強工法が有効な耐震補強であるため、今後この方面での適用が期待される。また、FRPにインテリジェント機能を付加し、損傷判断および自己修復を考慮したインテリジェント材料が建設分野のみならず形態を変えて他の広範な分野に対して応用展開できるものとする。一方、形状により種々の力学的特性を有する構造材をも設計できる。例えば、配向角を選定することによりポアソン比を負にしたり、また零にすることも可能である。

また、FRPは軽くて強く、さびないという特徴を有した熱硬化性材料として幅広く使用されているが、近年、廃棄物削減の立場からその廃棄物の処理方法が問題となっている。リサイクルの際には、細かく砕いて溶かし新品材料に混入する方法が取られるが、裁断工程と混入工程を必要とするためコスト高となり普及していない。また、ガラス繊維が全体の約40%を占めるため焼却処分もできず、埋立処分やFRP製品の増量材として使用されているのが実状である。そこで、資源の再利用や廃棄物処理量の低減等の環境調和に配慮されるFRTP (fiber reinforced thermoplastics: 繊維強化熱可塑性プラスチック)が注目されている。FRTPの生産量は1.2万トン/年で毎年20%伸びており、リサイクル技術の確立によりさらに需要増加すると思われる。

## 参考文献

- 1) F.Ko: Global activities in advanced textile performing, TEXCOMP-3 (1996)
- 2) 東啓司, 松本政己: プレス成型による人造大理石バスタブ, 強化プラスチック, 41-6, 34 (1995).
- 3) 強化プラスチック協会: FRP40年の歩み (1994)
- 4) 松岡茂樹, 麻生和生: 東急車輛技報, 42, 6 (1992)
- 5) 高尾喜久雄, 井上明彦: 山梨リニア実験線MLX01形式車両のFRP製品, 強化プラスチック, 42-4, 134 (1996)
- 6) 浅野真弘: 航空機用接着, 強化プラスチック, 42-8, 300 (1996)
- 7) 林 耕四郎: センサー機能付FRP格子材, 強化プラスチック, 41-4, 126 (1995)
- 8) 座古 勝, 辻上哲也: FRPにより表面補強されたセメントモルタル材の破壊挙動シミュレーション, 材料, 44-498, 327 (1995)
- 9) 座古 勝, 高野直樹, 裏垣 博, 辻上哲也, 小館一浩: センサ・アクチュエータを有するCFRP貼付構造物のインテリジェント化に関する研究, 第25回FRPシンポジウム講演論文集, 123 (1996)
- 10) 座古 勝, 高野直樹, 藤岡英典: 繊維強化複合材料の微細き裂の自己補修に関する研究, 第74期日本機械学会通常総会, 講演論文集 (I), 673 (1997)