

.....  
 解 説  
 .....

## 建築・土木分野での複合材料の利用の現状と将来 ——連続繊維強化プラスチック補強コンクリート (FRPRC) を中心として——

福島 敏夫\*

### 1. はじめに

近年、諸科学技術・産業分野で沸き起こっている技術革新の波のうねりの中で、エレクトロニクス、バイオテクノロジー、新エネルギーと並んで、新素材・新材料が先端技術の主役を担っており、社会的関心も高く、いわばブームの様相を呈している。景気低迷という社会状況や、地球環境問題への有効な対応という人類共通の課題への取り組みの必要性の高まりの中でも、新素材・新材料の科学技術が、それらの解決に対する先導的な重要な役割を担うという潮流は今後も変わらないと考えられる。この新素材・新材料の科学技術の動向は、今後の建設技術へも少なからず影響を及ぼすと言って過言ではない。歴史的に見ても、新素材・新材料の出現と進歩が、人間社会と産業形態に時代を画するインパクトを与え、その時代の技術革新の旗手として先導的な役割を担ったのは明らかである。建築・土木分野においても例外ではなく、建設材料の革新は、従来の建造物の形態や構造に変化を与え、より高度の機能性を持つ各種の建造物や新居住空間の創成を可能ならしめる“鍵”になってきたと考えられる<sup>1)</sup>。

いくつかの素材を組み合わせ、単体で持っているそれぞれの長所を最大限に活用しながらお互いの短所を補完し、強度、剛性、軽量性、耐食性、耐熱性などの材料特性の向上を図ると共に、単体では得られない優れた特性を引き出す、“複合材料・複合部材”の考え方は、竹や骨など天然材料に見られる複合材料構造を考えると、“自然”に学ぶ材料の使用形態としては、究極の目標であり、ある意味では理想的であると言っても良いであろう。この材料の複合化の技術は、古くから経験的には理解され、

かつ行われてきたが、この半世紀における材料科学の進歩と昨今の日進月歩の技術革新の中で豊かな開花を遂げ、炭素、アラミド、ガラス等の高機能性の新素材繊維の出現と共に、従来の材料と比較して遙かに軽量・高強度・高耐食性の先端複合材料 (Advanced Composite Materials: ACM) として結実し、航空・宇宙分野をはじめとする各種の産業分野での積極的な活用が図られており、建設分野でも例外ではない。

鉄筋や PC 鋼線・PC 鋼棒に代表されるように、コンクリートの補強材としては、従来高剛性の鋼材が使用され、その降伏により、靱性を確保して、それにより、地震時における鉄筋コンクリート部材のエネルギー吸収能に基づいて、鉄筋コンクリート造建造物の崩壊を防ぐという設計が行われてきた。しかしながら、コンクリートの予想外の早い中性化や、海砂の使用及び海岸地帯での飛来塩分の浸透によるコンクリート中の塩分により腐食しやすく、大都市地帯や海洋・海岸地帯の鉄筋コンクリート造 (RC) 建造物の劣化問題が“コンクリート・クライシス”として、マスコミを賑わせたのは記憶に新しい。このため、高強度・高弾性の炭素、アラミド、ガラス等の新素材連続繊維で強化したプラスチック (FRP) をコンクリート用補強筋として用いた連続繊維強化プラスチック補強コンクリート (FRPRC) を、内部鉄筋の腐食による劣化が起こり易い鉄筋コンクリート部材に代わる新しい建築・土木用複合部材として利用しようとする動きが活発化し、現在もなお、研究及び技術開発が盛んに行われている<sup>2-6)</sup>。本稿では、この連続繊維強化プラスチック補強コンクリート (FRPRC) を中心として、複合材料の建築・土木分野での利用の現状と将来について、概略的に解説することにした。

\* Toshio FUKUSHIMA: 建設省建築研究所第二研究部  
 複合材料研究官 (305-0802 つくば市立原 1)

## 2. 都市と複合材料

### 2.1 建設構造物と建設材料・部材

人間の諸活動の場としての都市構成の諸条件を考えると、大体次のようになる。

- (1) 基本的条件…人間居住性
- (2) 社会的側面…都市生態学
- (3) 経済的側面…経済の活性

(4) 科学技術的側面…インフラストラクチャーの整備  
このうち、インフラストラクチャーの整備として、①道路、橋、上下水道、建築物の建設 ②電気、ガスの供給 ③情報、通信、輸送手段の普及 ④教育、文化、娯楽、研究施設の配備などが考えられる。このインフラストラクチャーの一環としての建設構造物を構造別に分類すると、次のようになる。

- (1) 鉄筋コンクリート造 (RC)
- (2) 鉄骨造 (S)
- (3) 鉄骨鉄筋コンクリート造 (SRC)
- (4) 木造 (W)
- (5) 新しい構造形式
  - i) ハイブリッド構造
  - ii) コンクリート充填鋼管構造
  - iii) 連続繊維強化プラスチック補強コンクリート構造 (FRPRC)

また、これらの構造を支える構造材料としては、次のものが考えられる。①コンクリート ②鉄鋼 ③木材 ④繊維補強プラスチック (FRP)

これらのうちの①, ②, ③が既存の構造材料であり、④が新しい構造材料として認知されつつある。

### 2.2 材料科学的側面からみた構造材料

建築・土木用複合材料を材料科学的側面から考えると、コンクリートは、セメントペーストをマトリックスとする粒子分散強化型無機-無機複合材料であり、鉄鋼は、鉄を主体とする合金型の金属-金属複合材料と見なせるし、木材は、リグニンをマトリックスとする一軸性繊維強化有機-有機複合材料と見なせる。また、鉄筋コンクリート (RC)、繊維強化プラスチック (FRP)、連続繊維強化プラスチック補強コンクリート (FRPRC)、短繊維補強コンクリート (FRC) などは、無機、有機、金属の異相の組合せとしての典型的な複合材料である。このように、建築・土木分野での材料の使用形態は、いくつかの材料の組合せとしての何らかの複合材料・部材の形であり、材料単体で使用されることの方が稀である。したがって、建築・土木分野と複合材料との関わりは、深い

ものがあると考えられる。

### 3. 連続繊維強化プラスチック (FRP) と連続繊維強化プラスチック補強コンクリート (FRPRC)

#### 3.1 連続繊維強化プラスチック (FRP) 新補強材—鉄筋及び PC 鋼棒代替材—

この新補強材は、炭素、アラミド、ガラス等の新素材連続繊維をエポキシ樹脂やビニルエステル樹脂等で固めた繊維強化プラスチック (FRP) であり (建築・土木両学会では「連続繊維補強材」と称することにしているがここでは、これまでの習慣と話の便宜上、FRP 新補強材と呼ぶことにするが、高強度・高剛性繊維そのものが補強の主体であるという意味では、樹脂で固めた繊維 “Polymer reinforced fiber : PRF” と呼ぶ方がよいのかもしれない)、ロッド、ストランド、組紐あるいは異形筋の形の一軸補強材、メッシュ、ネットの形の二軸補強材、トラス、格子あるいは織物の三軸補強材等の各種の形態のものがあり、カーテンウォールやフリーアクセスフロア材等の構造 2 次部材としての利用法もあるが、一般的

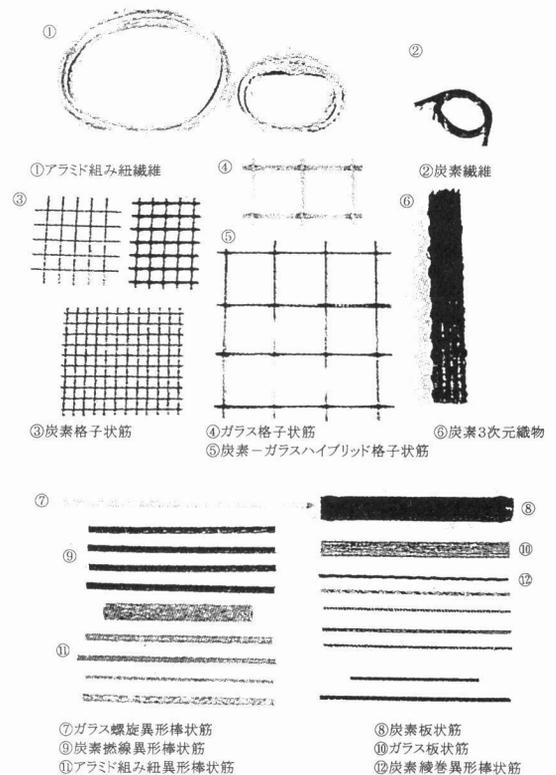


図 1 各種の新素材繊維及び FRP 新補強材

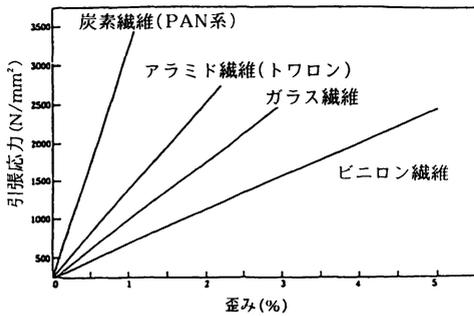


図2 各種繊維の応力-歪み関係

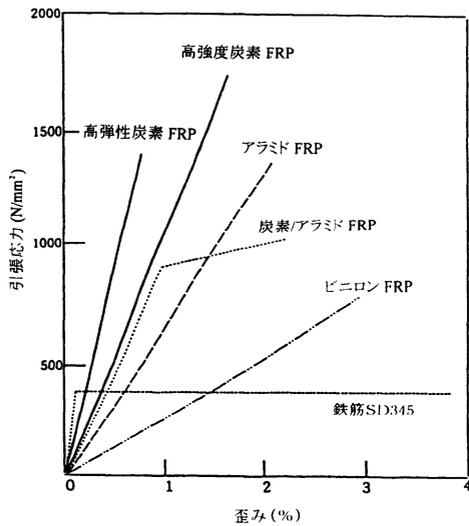


図3 各種FRPロッドの応力-歪み関係

には、いずれも構造1次部材としての利用が図られている。図1に、各種の新素材繊維及び、FRP新補強材の概略図、図2, 3に各種繊維の応力-歪み関係、FRP新補強材の応力-歪み関係を、鋼材の比較として示す<sup>3)</sup>。表1にFRP新補強材における各種の繊維とマトリックス樹脂との組合せを、表2にFRP新補強材の種類と使用形態を<sup>7)</sup>、表3にFRP補強材の特徴と標準物性を示す<sup>3)</sup>。FRP新補強材の引張強度は、ガラス繊維を用いたものは500~1,000 N/mm<sup>2</sup>、アラミド繊維(ケブラーまたはテクノラ)及び、PAN系高強度炭素繊維及び高性能ピッチ系炭素繊維を用いたもので、1,000~2,000 N/mm<sup>2</sup>であり、鉄筋の300~500 N/mm<sup>2</sup>に比べて数倍の引張強度を有し、またPC鋼線の1,600 N/mm<sup>2</sup>に比べて遜色がない。ただし、繊維の弾性係数は炭素繊維を除いては、一般的に鋼材に比べて低く、かつマトリックスが30%~50%を占めることから、FRP新補強材の弾性係数は鋼材

表1 繊維と結合材の組合せ

樹脂	繊維	ガラス	アラミド	炭素	ポロン
熱硬化性樹脂					
不飽和ポリエステル		◎	△	△	△
エポキシ		○	◎	◎	○
ポリイミド		△	△	◎	△
熱可塑性樹脂					
PEEK		△	○	○	×
汎用		○	△	△	×

の数の1となる。これらのFRP新補強材は、いずれも、軽量・高強度・高耐食性さらに非磁性、電波通過性、電波シールド性等の特性を持ち、その特性を生かした各種の利用法が期待されている。図4にCFRP及びAFRPの年度別使用量の推移をm/年換算として示す<sup>8)</sup>。また図5に、CFRP、AFRP及びGFRPの用途別施工件数を示す<sup>8)</sup>。

### 3.2 連続繊維強化プラスチック補強コンクリート (FRPRC) の特性

通常の鉄筋コンクリートの曲げ部材においては、脆性的な圧縮破壊やせん断破壊を避けるために、引張鉄筋の降伏と塑性変形を利用して、部材のたわみや変形が弾性域に比べて大きくなるようにして、地震時のエネルギー吸収を大きくし、大崩壊を防ぐ設計を行う。しかし、FRP新補強材は、ほぼ完全な弾性体であるので、降伏点や塑性変形特性を持たず、引張強度に達すると突然破断する。このためFRPRCを曲げ部材に用いた場合には、図6に示されるように、CFRPRC、AFRPRC、GFRPRCいずれの場合も、破壊モードが引張でも圧縮でも、明確な梁の降伏状態を示すことなく非常に脆性的な破壊となることが特徴である<sup>9)</sup>。FRP新補強筋は鉄筋のような腐食は心配ないので、構造物の耐久性面からひび割れ幅が問題になることはなくて、外観や使用上の機能の面からのひび割れ幅を検討すればよいことになる。他方、FRP新補強筋は、一般的に弾性係数が小さいために、コンクリートのひび割れ発生後の部材の剛性低下が大きいが、コンクリートとFRP新補強筋の応力-歪み曲線を仮定して、断面分割法によってその予測を行うことができる。

FRPRCの曲げ部材の曲げ状態の特徴をまとめると以下のようなになる<sup>3,4)</sup>。

- ① ひび割れ発生は、コンクリートの曲げ強度により決まるので、鉄筋コンクリートの場合と同様である。
- ② ひび割れ幅やひび割れの分散性はFRP新補強筋の移動や付着特性によって決まる。ひび割れ幅は、鉄筋の場合よりも大きいが、分散性は著しくは変わらない。
- ③ ひび割れ発生後の剛性低下やたわみの変形は、鉄

表 2 連続繊維による新補強材の種類<sup>7)</sup>

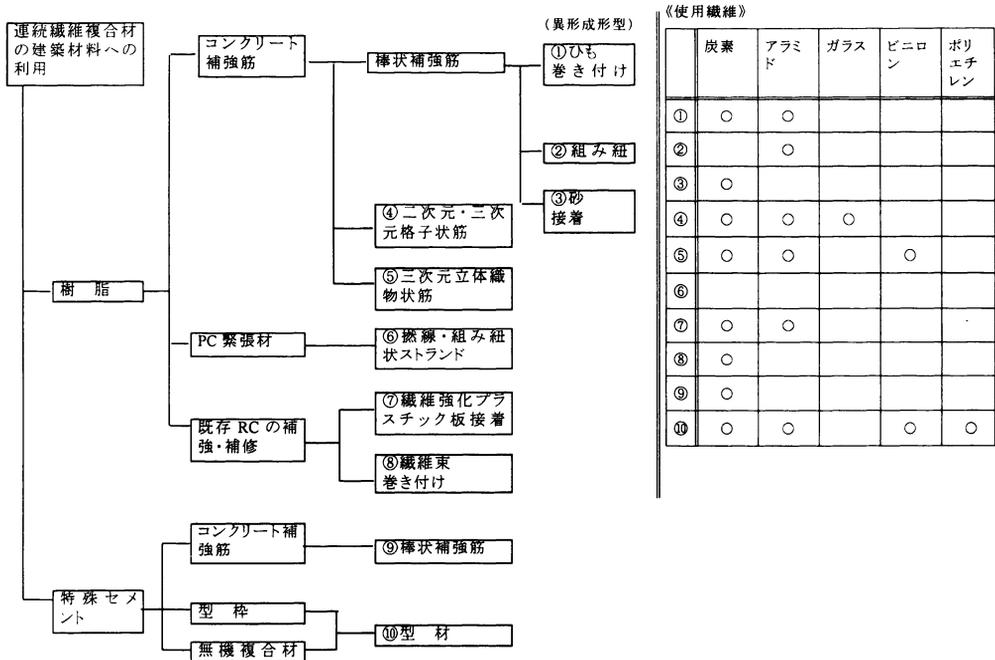


表 3 FRP 新補強材の特徴と標準物性

		アラミド (AFRP)	ガラス (GFRP)	カーボン (CFRP)	PC鋼より線	鉄筋
比重	-	1.3	1.7~1.9	1.5	7.85	7.85
引張強度	Kgf/mm <sup>2</sup>	140~180	60~90	190~230	175~190	50
引張弾性率	Kgf/mm <sup>2</sup>	5,000~7,000	3,000	13,000~42,000	20,000	21,000
破断伸び	%	2~4	2	0.6~1.9	6	10
リラクゼーション	%	5~15	10	1.5~3	1~2	-
熱膨張係数	10 <sup>-6</sup> /C	2~5	9	0.6	12	12
耐食性	-	○	○	○	×	×
非磁性	-	○	○	○	×	×

筋コンクリートの場合よりも大きい。

④ FRPRC の量の曲げ破壊モーメントは、従来の鉄筋コンクリート理論で算定できる。

⑤ 引張破壊、圧縮破壊いずれの場合でも、破壊は非常に脆性的である。

ひび割れ発生後の剛性低下が大きいという特徴のために、FRP の応力度には相当の余裕があっても、たわみや変形による使用限界状態に早く到達して、せっかくの新素材としての FRP 補強材の高強度を活かしきれない場合もある。このために、FRP 新補強材の特性をより効果的に活用するために、橋梁などで PC 緊張材として用いるプレストレスコンクリート部材としての利用法や外ケ

ール補強材としての利用法が土木分野を中心として盛んに行われている。

従来 FRP は航空・宇宙・自動車分野を中心として利用されてきたが、ここで取り扱った FRP 新補強材は、鉄筋及び PC 鋼棒代替補強材を目指した、建築・土木用の新素材であり、現在も活発な研究が行われている。建設省総合技術開発プロジェクト「建設事業への新素材・新材料利用技術の開発」では、ほぼ研究が終了し、その後土木及び建築分野で「連続繊維補強コンクリートの設計・施工指針」が策定されている<sup>10,11)</sup>

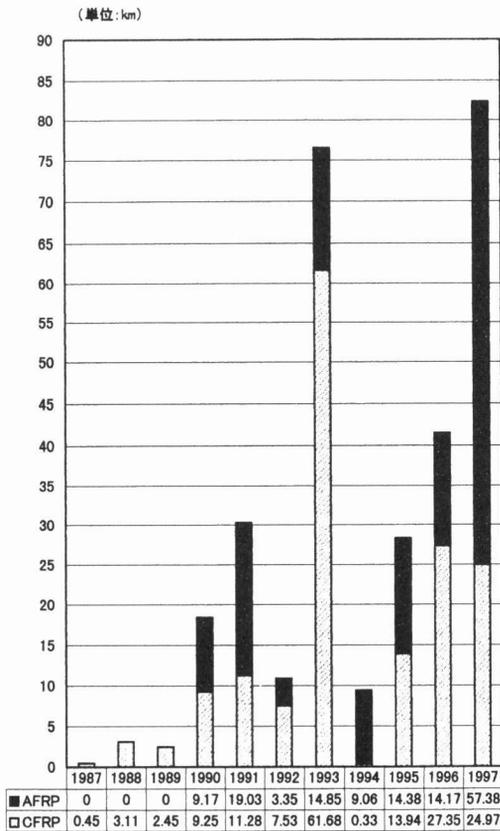


図4 CFRP・AFRPの年度別使用量推移(平成9年8月現在)

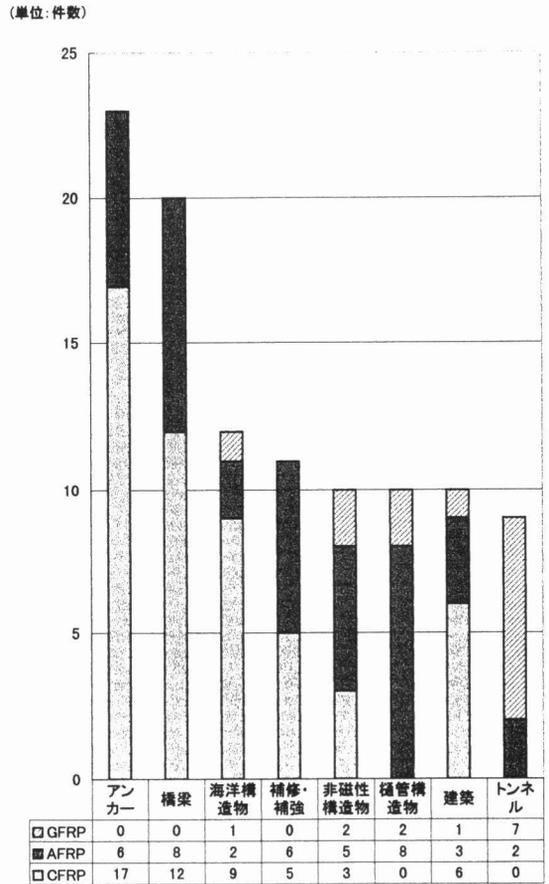


図5 用途別施工件数

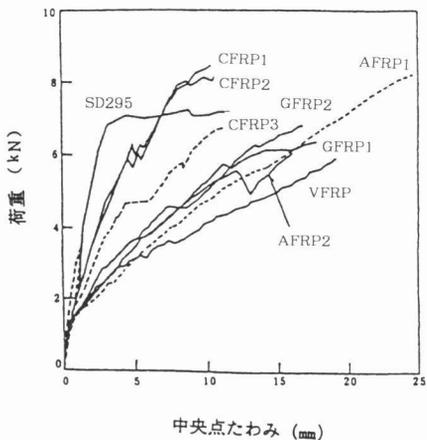


図6 各種FRPロッドを用いたRC梁のたわみ<sup>9)</sup>

4. 連続繊維シートによる既存鉄筋コンクリート造構造物の補修・補強

1995年1月17日に起こった阪神・淡路大震災において、被災を受けた既存鉄筋コンクリート造構造物の補修・補強のために、炭素及びアラミド連続繊維シートが積極的に活用されるようになり、その試験方法や設計法についても急ピッチに動きが進展し、日本コンクリート工学協会の連続繊維補強コンクリート研究委員会でも、それを取り上げ、用語の統一化や繊維シート材料の引張試験法、付着試験法について報告を行っている<sup>12)</sup>。図7に連続繊維シート使用量の推移を、図8, 9に炭素繊維による補修・補強件数の推移及び補強部位別に見たアラミド繊維による施工実績を示す<sup>12)</sup>。また、表4に様々なところで策定された連続繊維補強材による補強工法基準・指針の一覧を示す<sup>12)</sup>。

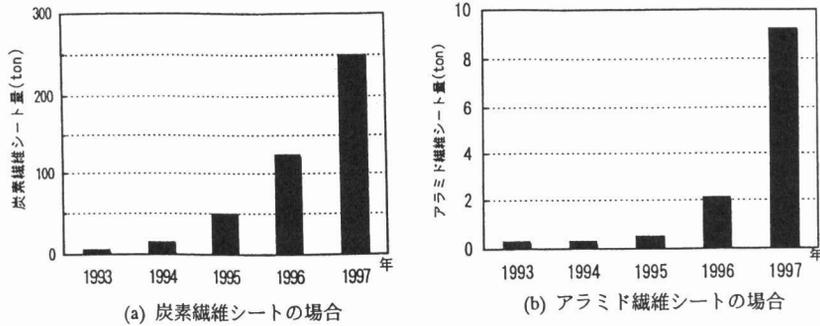


図 7 連続繊維シートの使用量の推移<sup>12)</sup>

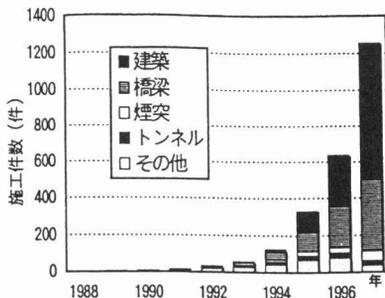


図 8 炭素繊維による補修・補強件数の推移<sup>12)</sup>  
(主要メーカー 3 社の資料をもとに作成)

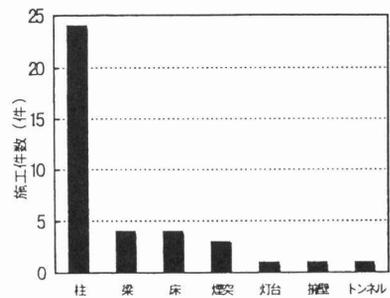


図 9 補強部位別にみたアラミド繊維による施工実績<sup>12)</sup>  
(アラミド補強研究会の資料をもとに作成)

表 4 連続繊維補強材による補強工法基準・指針一覧<sup>10)</sup>

基準・指針名	発行者	発行時期	連続繊維の種類	対象構造物	補強目的
炭素繊維による鉄筋コンクリート橋脚の補強工法・設計・施工要領(案)	日本道路公団試験研究所 橋梁研究室	1995年2月	炭素繊維シート/ ストランド	道路橋橋脚	段落とし部と基部の耐震補強(曲げ、せん断補強)
CFRPによる既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強工法	CRS研究会	1995年9月	炭素繊維シート/ ストランド	建築物柱	耐震補強(せん断補強)
炭素繊維シートによるコンクリート構造物の補修・補強設計・施工マニュアル(案)橋脚編	炭素繊維による補修・補強工法技術研究会橋梁下部工部会	1996年	炭素繊維シート	道路橋橋脚	耐震補強(曲げ、せん断補強)
炭素繊維シートによるコンクリート構造物の補修・補強設計・施工マニュアル(案)橋梁上部工鉄筋コンクリート床板編	炭素繊維による補修・補強工法技術研究会橋梁上部工部会	1996年	炭素繊維シート	道路橋床板	新活荷重対応補強・劣化補強(曲げ補強)
MARS工法(既存鉄筋コンクリート柱の炭素繊維シート耐震補強構法)	MARS研究会	1996年2月	炭素繊維シート	建築物柱	耐震補強(せん断、靱性補強)
炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強設計・施工指針	鉄道総合技術研究所	1996年7月	炭素繊維シート	鉄道高架橋柱	耐震補強(せん断、靱性、曲げ補強)
アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強設計・施工指針	鉄道総合技術研究所	1996年11月	アラミド繊維シート	鉄道高架橋柱	耐震補強(せん断、靱性、曲げ補強)
炭素繊維シートによる地下鉄RC柱の耐震補強設計・施工指針	鉄道総合技術研究所	1997年1月	炭素繊維シート	地下鉄柱	耐震補強(せん断、靱性補強)
AF工法(アラミド繊維を用いた既存鉄筋コンクリート造柱の耐震補強構法)設計・施工指針	AF工法研究会	1997年2月	アラミド繊維シート	建築物柱	耐震補強(せん断、靱性補強)
炭素繊維シートによるRC橋脚補強に関する設計施工要領(案)	阪神高速道路公団コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会	1997年5月	炭素繊維シート	道路橋橋脚	段落とし部と基部の耐震補強(せん断、靱性、曲げ補強)
SR-CF工法による鉄筋コンクリート柱の設計施工指針	SR-CF工法研究会	1997年12月	炭素繊維シート	建築物柱	主に耐震補強(せん断、靱性、曲げ補強)
アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法・設計・施工要領(案)	アラミド補強研究会	1998年1月	アラミド繊維シート	道路橋橋脚	段落とし部と基部の耐震補強(せん断、靱性、曲げ補強)
日米共研ハイブリッド構造「連続繊維シートを用いた改修設計ガイドライン	(社)建築研究振興協会	1998年3月	連続繊維シート全般	建築物全般	補強・補修全般

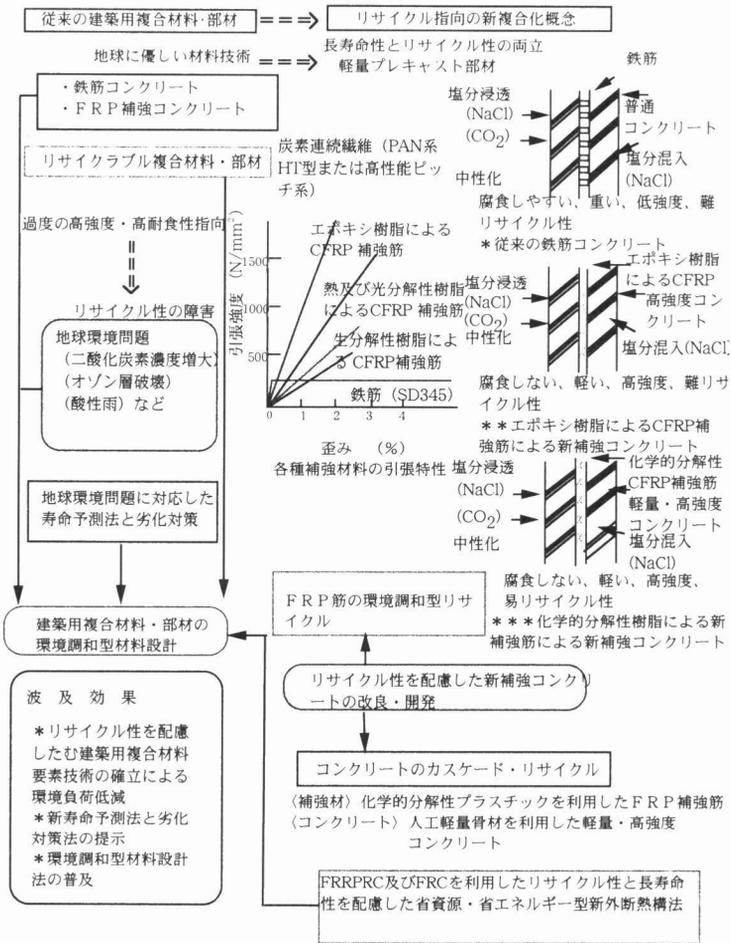


図 10 RC 及び FRPRC をエコマテリアルに転化するための手順

連続繊維シート補強は、シートをエポキシ樹脂などで固めてFRP化するもので、鋼板補強と比較して、狭い施工空間での作業性、工期短縮などの利点があり、積極的な利用が進んでいるが、品質管理された工場内で接着剤で作る飛行機の場合と異なり、建築・土木の現場施工の場合は、降雨や、温・湿度の変化、紫外線の影響も受け易いために、下地との接着耐久性及びFRPとしての耐久性の問題と、耐用年数後の解体・リサイクルなど、未解決な問題もある。それらの問題の解決を含めて、実績を増やしてゆけば、広く建築・土木分野での新しい補修・補強方法として定着していくことが予想され、また、期待されている。

### 5. 建設用複合材料のエコマテリアル・デザインとエコマテリアル・テクノロジー

新しい建築・土木用部材としてのFRPRCは、部材の軽量化・高強度化・高耐久化による高性能・高機能化を図る上では、極めて有望であり、魅力的ではあるが、目下のところ、一番リサイクルが難しいとされる熱硬化性樹脂による繊維強化プラスチック(FRTS)とコンクリートを両方使用する為に、使用時の高性能化とは裏腹に、設計耐用年数に達した後に解体・廃棄する段階になると、かなりの程度解体が難しく、またリサイクルの難しい残処理性残留物となり、かけがえのない地球環境への負荷を与えることを否めない。このため、これまでの耐久性、防・耐火性、耐力性の3大性能の他に、新たに環境

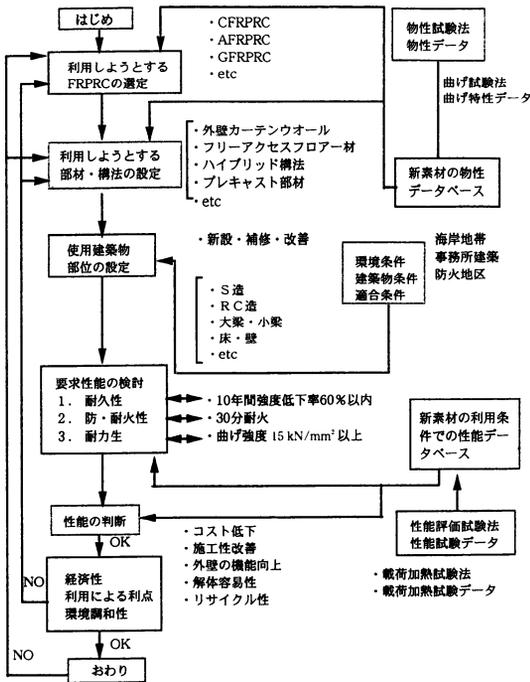


図 11 リサイクル性を配慮した FRPRC の選定・評価システム の概念

調和性という性能評価項目を設定し、FRPRC の長寿命性と環境調和性を実現するためのライフサイクル設計及びそれを実現するための環境調和型材料設計（エコマテリアル・デザイン）が必要になる<sup>13-17)</sup> (図 10, 11)。すなわち、まずは、解体とリサイクルし易いように、半分は工場生産されたプレキャスト部材を利用し、接合部だけを現場施工すると共に(図 12)、例えば、柱部は鉄筋コンクリート部材、梁部は FRPRC にして、接合部は鋼製金具により接合するハイブリッド構造形式を考える。また、新補強コンクリートも、将来的には、リサイクル性を配慮した環境調和型材料（エコマテリアル）に切り換えていく必要がある。FRP 補強筋は、強度、耐久性を配慮しながらも、リサイクルし易い熱可塑性、光分解性、生分解性樹脂及び繊維で製作すると共に、現状における主流である熱硬化性樹脂による FRP 補強材は、微粉末化して再生コンクリートの細骨材等に利用して、コンクリートのカスケード・リサイクルに回すというリサイクル性を考慮した設計手順を考えることである(図 13)。また、コンクリートについても、将来、天然骨材の枯渇、あるいは環境保全の立場から天然骨材の採取が制限されることを予想し、人工軽量骨材や再生骨材の有効利用を図った軽量・高強度コンクリートに切り換えるということが

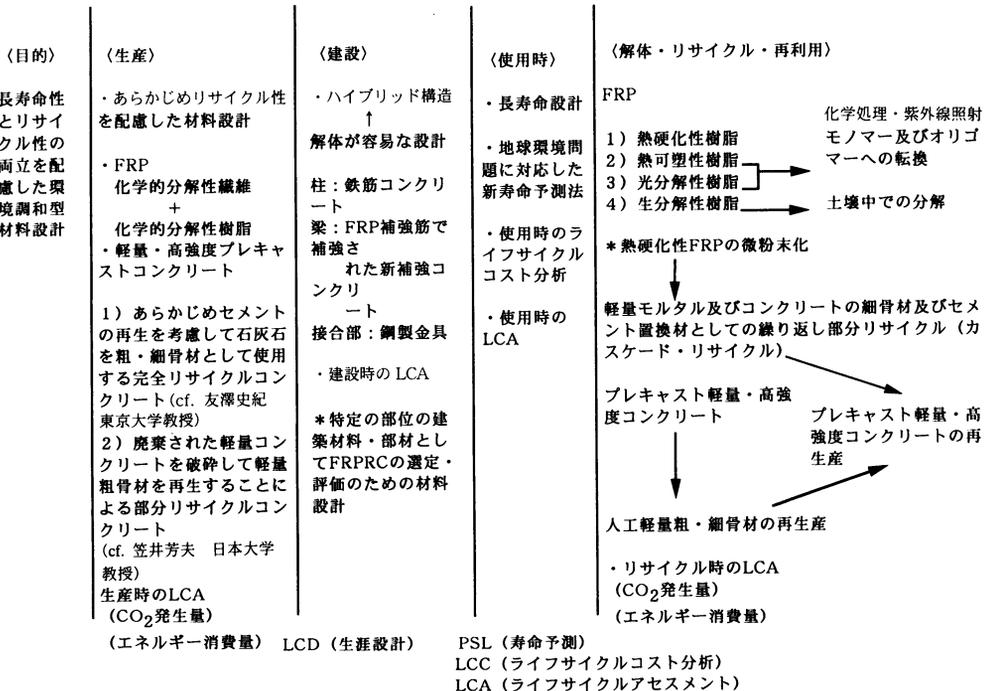


図 12 長寿命性とリサイクル性の両立を配慮した FRPRC のライフサイクル・デザイン

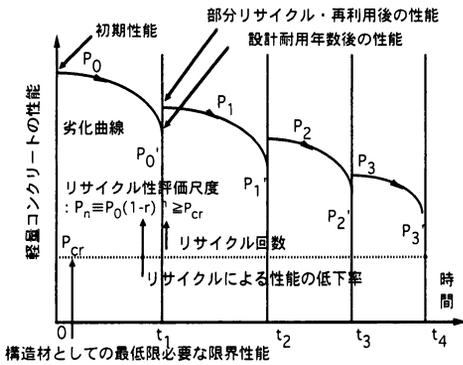


図 13 軽量・高強度コンクリートの繰り返し部分リサイクル (カスケード・リサイクル) の概念

重要である。このようなエコマテリアル・デザインを実現するためのエコマテリアル・テクノロジーとして次の3つの材料要素技術が開発されている。

① コンクリートの繰り返し部分リサイクルでの熱硬化性樹脂による廃 FRP (FRTS) の微粉末化によるコンクリートの細骨材及びセメント補強材としての段階的再利用技術 (カスケード・リサイクル技術)<sup>18,19)</sup>

② 熱可塑性樹脂による FRP (FRTP) のリサイクル可能なコンクリート用補強材への応用<sup>20,21)</sup>

③ RC 及び FRPRC の地球環境問題に対応した新しい寿命予測法としてのステップ応答による促進中性化試験法<sup>22,23)</sup>

このようなエコマテリアル・デザインとエコマテリアル・テクノロジーが確立されれば、FRPRC も地球環境に優しいエコマテリアルとして、軽量、高強度、高耐食性と共に、環境調和性をも実現し得ると考えられ、また別の形の発展も期待されるため、今後、このような研究のアプローチも必要かと考えられる。

## 6. 終わりに

連続繊維補強コンクリートに関する研究及び技術開発は、元来、日本の建築分野が世界をリードしていたが、防・耐火制限やコスト等の諸問題の解決に手間取っている内に、橋梁用ケーブルやプレストレスコンクリート用の PC 鋼材代替の緊張材としての FRP の利用用途を見いだした土木分野での動きが活発になると共に、冷戦構造が終わり、軍需研究から民需研究への研究者の移動が行われた北米で、社会的インフラストラクチャーの整備の一環として、FRPRC の利用に関して急ピッチの動きが出ているのが現状である。FRPRC は、目下、建築分野

では、カーテンウォール材、フリーアクセスフロア材あるいは補修・補強用の吹付コンクリート等の構造二次部材としての利用が主なものである。それでも、FRPRC の構造一次部材としての建築分野での利用の促進とその定着に関しては、根強い期待があり、日本建築学会や日本コンクリート工学協会における発表件数にも反映されるように、未解決な問題点の克服も含めて、現在なお活発な研究が継続されている。防・耐火制限の少ない地中梁への利用や、海岸地帯で特に耐久性が重視される原子力施設の海洋側外壁部材、厳しい気象条件の南極昭和基地の建築物、高度の耐食性が要請される塩素貯蔵所の外壁、非磁性の特性を利用した大島地磁気観測所の建築基礎などの特殊な状況での利用実績がある。このような特殊建築物への適用事例を増やしながら実績を重ね、徐々に一般建築物への応用も進め、さらにニューフロンティアである海洋建築物や超々構想建築物などの 21 世紀の夢を叶える建築物用複合材料・部材として利用されたいくだろうと考えられる。また、阪神・淡路大震災以後、補修・耐震補強のために、炭素及びアラミド繊維シート (CFRS, AFRS) や炭素及びアラミド繊維強化プラスチック (CFRP, AFRP) 平板を鉄筋コンクリート躯体の表面に接着する積層型の建築用複合材料・部材として、別の形の繊維補強コンクリートに関する研究開発の急ピッチの動きもあり、今後の発展が期待される場所である。

地球環境問題の顕在化と共に、建築・土木用複合材料の環境調和性を配慮した材料設計及びそのリサイクル技術を含むエコマテリアル・テクノロジーの確立が大きく叫ばれつつある。

連続繊維補強コンクリートの社会的定着を目指して、必要な性能評価法と材料・部材設計法の確立と共に、そのエコマテリアル化に向けての技術開発を行う必要があると考えられる。筆者は、建築研究所先端技術官時代等を通して、複合材料を中心とする新素材・新材料の建築・土木分野への利用を推進させた 1 人であり、また FRPRC の振興とエコマテリアル化を図ってきた。FRPRC が何とか建築・土木分野に定着することを願いつつ、その動向を見守りながら、本稿を終えることにしたい (1998 年 9 月 30 日つくばにて)。

## 参考文献

- 1) 福島敏夫：新素材開発と建築—材料物性から地球環境まで、技法堂出版、東京 (1993)。
- 2) 特集・新素材—連続繊維によるコンクリートの補強：コンクリート工学, 29, 11 (1991)。

- 3) 丸山武彦：セメント・コンクリート，**563** (1994)，72-82.
- 4) 丸山武彦：セメント・コンクリート，**564** (1994)，36-45.
- 5) 日本土木学会：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).
- 6) 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).
- 7) 中辻照幸：建築雑誌，**104**，1289 (1989)，60-81.
- 8) 岩崎達彦：「炭素，アラミド繊維による耐震補強工法利用事例」講習会資料，工業技術会，東京 (1997).
- 9) 田中正和，眞嶋光保：各種 FRP ロッドを用いた FRP 筋コンクリートの曲げ挙動特性，連続繊維補強材のシンポジウム講演論文報告集，日本土木学会，東京 (1992).
- 10) 土木学会コンクリート委員会連続繊維補強材小委員会：連続繊維補強コンクリート構造物の設計・施工指針 (案)，土木学会 (1996).
- 11) 建設省大臣官房技術調査室監修，連続繊維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，東京 (1996).
- 12) 丸山久一，島 弘，福山 洋，下村 匠：コンクリート工学年次論文報告集，**20**，1 (1998)，1-10.
- 13) 福島敏夫，エコマテリアル研究会編：持続可能リサイクル設計の現状と展望，(社)未踏科学技術協会，東京 (1995)，pp. 145-154.
- 14) 福島敏夫，柳 啓，前田利勝，仕入豊和，小島 昭，木村耕三，渡辺 聡，伊藤 弘，棚野博之：日本建築学会大会学術講演集梗概集 (北海道)，A (材料・施工) (1995)，pp. 1499-1500.
- 15) 小島 昭，柳 啓，福島敏夫，仕入豊和，木村耕三，渡辺 聡，前田利勝，伊藤 弘，棚野博之：日本建築学会大会学術講演集梗概集 (北海道)，A (材料・施工) (1995)，pp. 1501-1502.
- 16) T. Fukushima, K. Yanagi & T. Maeda : Proc. Int. RIREM Workshop on Disposal and Recycling of Organic and Polymeric Construction Materials, ed. by Y. Ohama, E&FN SPON, London (1995), pp. 111-125.
- 17) T. Fukushima : Proc. 3rd Int. Conf. Ecomaterials, Ecomaterials Forum, Tsukuba (1997), pp. 463-466.
- 18) 柳 啓，小島 昭，福島敏夫：セメント・コンクリート論文集，**50** (1991)，938-943.
- 19) 小島 昭，柳 啓，福島敏夫，仕入豊和：日本建築学会大会学術講演集梗概集 (関東)，A (材料・施工) (1997)，pp. 1079-1080.
- 20) T. Fukushima, K. Sakayama & S. Hashimoto : Proc. 3rd Int. Symp. Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Vol. 2, JCI, Sapporo (1997), pp. 14-16.
- 21) T. Fukushima, K. Sakayama & S. Hashimoto : Proc. 5th Japan Int. SAMPE Symp., ed. by Y. Miyano and M. Yamabe, SAMPE, Tokyo (1997), pp. 1457-1462.
- 22) 福島敏夫，吉崎芳郎，林 俊彦：セメント・コンクリート論文集，**49** (1995)，692-697.
- 23) T. Fukushima, Y. Yoshizaki & T. Hayashi : Proc. 7th Int. Conf. Durability of Bulding Materials and Components, Vol. 2, ed. by C. Sjöström, E&FN SPON, London (1996), pp. 1060-1070.