

論文 熱可塑性樹脂による連続繊維強化プラスチック (FRTP) の リサイクル可能なコンクリート用補強材への応用

福島敏夫*¹・坂山和久*²・橋本壮一郎*³

要旨: 連続繊維補強コンクリートの長寿命性とリサイクル性の両立を図るための環境調和型材料設計 (エコマテリアル・デザイン) を実現するための材料要素技術として, 熱可塑性樹脂でできた炭素及びガラス連続繊維強化プラスチック (CFRTP 及び GFRTP) を開発し, リサイクル可能なコンクリート用補強材への応用のための諸検討を行った。その結果, これらの新しく開発された連続繊維強化熱可塑性プラスチック (FRTP) は, 熱硬化性樹脂による強化プラスチック (FRTS) と同様な十分な引張強度と, リサイクル性をも持つエコマテリアルとして利用可能であることが明らかとなった。

キーワード: 連続繊維強化熱可塑性プラスチック, コンクリート用補強材, リサイクル

1. はじめに

軽くて, 強くて, 耐久性のある炭素, アラミド, ガラスの新素材連続繊維で強化されたプラスチック (FRP) を補強筋として用いた, 連続繊維補強コンクリート (FRPRC) は, 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 (RC) の改善を図った新しい建設用複合部材として, 建築・土木分野に定着しつつある^{1), 2)}。しかし, その補強筋は, エポキシ樹脂, ビニルエステル樹脂などの熱硬化性樹脂で作られているために, 微粉末化してコンクリート用細骨材またはセメント置換材として再利用する方法^{3), 4)}を除いては, リサイクルがかなり難しく, 環境負荷を与える難処理性残留物となり易い。このため, 連続繊維補強コンクリートの長寿命性とリサイクル性の両立を図るための環境調和型材料設計 (エコマテリアル・デザイン)^{5), 6)}を実現するための材料要素技術として, 熱可塑性樹脂でできた炭素及びガラス連続繊維強化プラスチック (CFRTP 及び GFRTP) を開発し, リサイクル性の評価や, リサイクル可能なコンクリート用補強材への応用

のための力学的実験・画像解析結果に基づく検討を行ったので報告する。

2. 研究方法

2.1 連続繊維補強コンクリートの環境調和型材料 (エコマテリアル) への転換法

図-1は, リサイクル性と長寿命性の両立を配慮した CFRP 補強材を用いた新補強コンクリートと, 通常の鉄筋コンクリートとの概念の比較を表す。現在, 建築分野での主要基幹構造部材のひとつである鉄筋コンクリートについては, 大都市地帯での予想外に早いコンクリートの中性化や, 海岸地帯での塩分浸透あるいは海砂や混和剤の形でコンクリート中に混入される塩分によるコンクリート構造物の劣化問題が, "コンクリート・クライシス" として, マスコミなどを賑わしたのは, 記憶に新しい。この問題の解決を図るために, 鉄筋コンクリート造建築物の長寿命化のための耐久設計についての新たな取り組みがなされ, また, 腐食し易い鉄筋に代わる各種の連続繊維強化プラスチック (FRP) 新補強

*1 建設省建築研究所 第二研究部 複合材料研究官 工博 (正会員)

*2 筒中プラスチック工業 (株) 関東研究所 主事 工修

*3 同上 研究員 工修

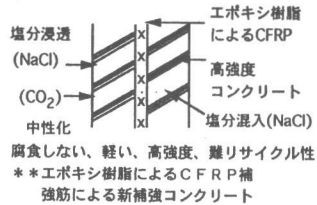
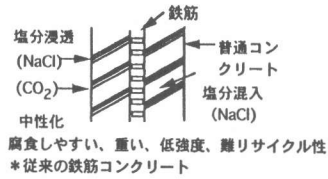
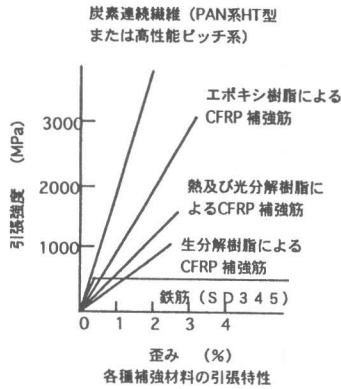


図-1 CFRP補強材を用いた新補強コンクリートと通常の鉄筋コンクリートの概念比較

材の利用についての活発な急速の研究が進展している。しかしながら、熱硬化性樹脂によるFRTSは、その使用時の高機能性とは裏腹に、解体時のリサイクルが困難である。もしも、化学的分解可能な樹脂でできたFRPを利用するならば、FRPRCを地球環境に優しいエコマテリアルに転換することが期待できる。このため、このようなエコマテリアル・デザインの体系化を図る。

2.2 実験方法

(1) リサイクル可能なFRP補強材

開発されたリサイクル可能なFRP補強材は、炭素及びガラス連続繊維強化ポリカーボネート(PC/CF及びPC/GF)及びポリ塩化ビニル(PVC/CF及びPVC/GF)であり、一部ポリプロピレンも試作された。図-2に新しく開発された補強筋の状況を示す。PC/CF及びPC/GFは、圧力2.94N/mm²、温度200-200℃の条件で製造された。また、PVC/CF及びPVC/GFは、圧力0.4N/mm²、温度160-180℃で製造された。製造された連続繊維強化熱可塑性強化プラスチック(FRTP)の基本特性を表-1に示す。リサイク

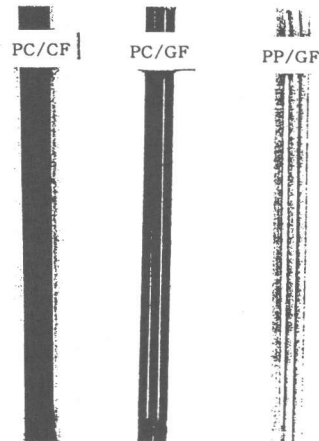


図-2 新しく開発された連続繊維強化熱可塑性プラスチック(FRTP)補強筋の概略図

ル性は、サンプルの樹脂焼き(電気炉)を行い、繊維のみを取り出して再積層を行って、諸性質の低下率を調べることで評価を行った。

(2) 繰り返し引張試験

繰り返し引張試験は、新しく開発された繰り返し引張試験機(鷲宮製作所: Model SERVO-500, 静的最大荷重: 560KN, 最大荷重速度: 5cm/sec)を用い、周波数: 5Hz, 荷重制御: 短形波モードで行われた。図-3は、試験

体及びFRP平板の取り付け状況の概略図を示す。試験体は、ボルト接合による鋼製金具への装着により、荷重チャックに取り付けられた。

(3) 赤外線熱応力画像解析法

繰り返し引張載荷条件でのFRP平板試験体の応力集中状況は、8～13 μmでの

波長領域において、CdHgTe赤外センサーで検出された。可視画像、温度画像及び熱応力画像は、熱応力画像解析装置(日本電子製: Model JTG-8010)を用いてパーソナルコンピュータのマルティ・ウィンドウ表示形式で測定された。試験体は、試験体からの室内光の反射を防ぐために、黒色塗料で表面処理を行った。

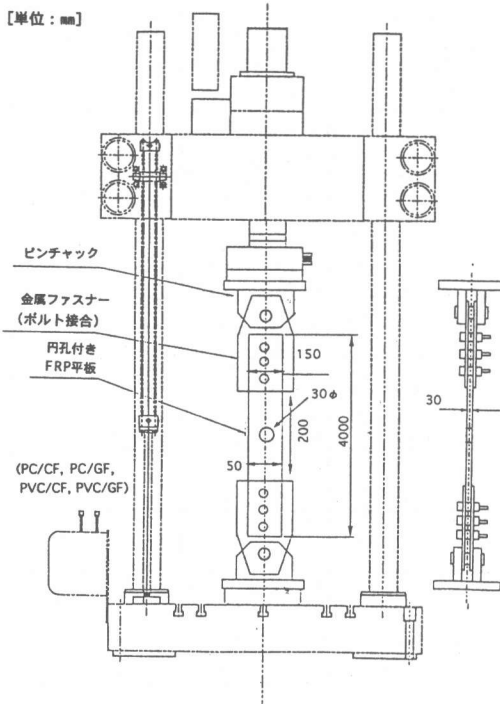


図-3 繰り返し引張試験機と試験体の概要

表-1 連続繊維強化熱可塑性プラスチック (FRTP) の基本特性

試験項目	試験法	単位	PVC/GF	PC/GF	PVC/CF	PC/CF
比重	ASTM D792	—	1.50	1.34	1.51	1.35
引張強度	ASTM D638	N/mm ² (kgf/cm ²)	129 (1320)	118 (1200)	347 (3540)	347 (3540)
曲げ強度	ASTM D790	N/mm ² (kgf/cm ²)	173 (1770)	169 (1720)	189 (1930)	312 (3180)
曲げ弾性率	ASTM D790	N/mm ² (kgf/cm ²)	7771 (79300)	6125 (62500)	21000 (212000)	21000 (212000)
アイゾット衝撃強度	ASTM D256	J/m (kgf/cm)	304 (31)	774 (79)	304 (31)	304 (31)

3. 研究結果と議論

3.1 連続繊維補強コンクリートの環境調和型生涯設計

図-4は、想定されるFRPRCを、ある環境条件下にある建築物における特定部位に対して、要求性能の比較に基づいて、建築材料・部材

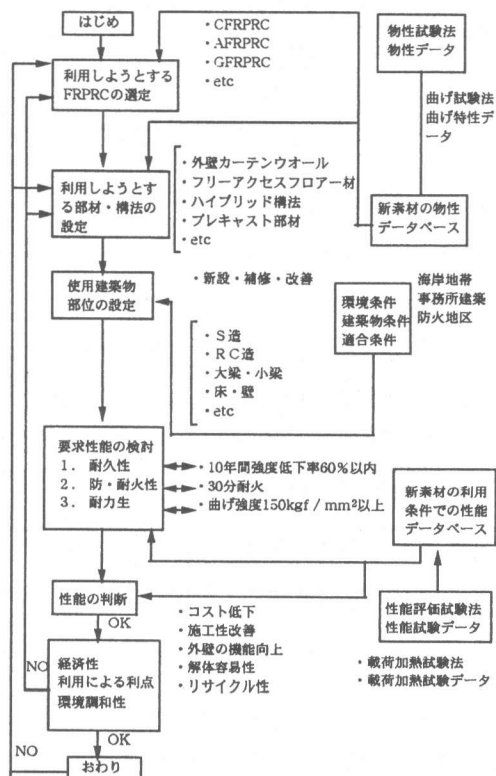


図-4 FRPRCの材料設計の考え方

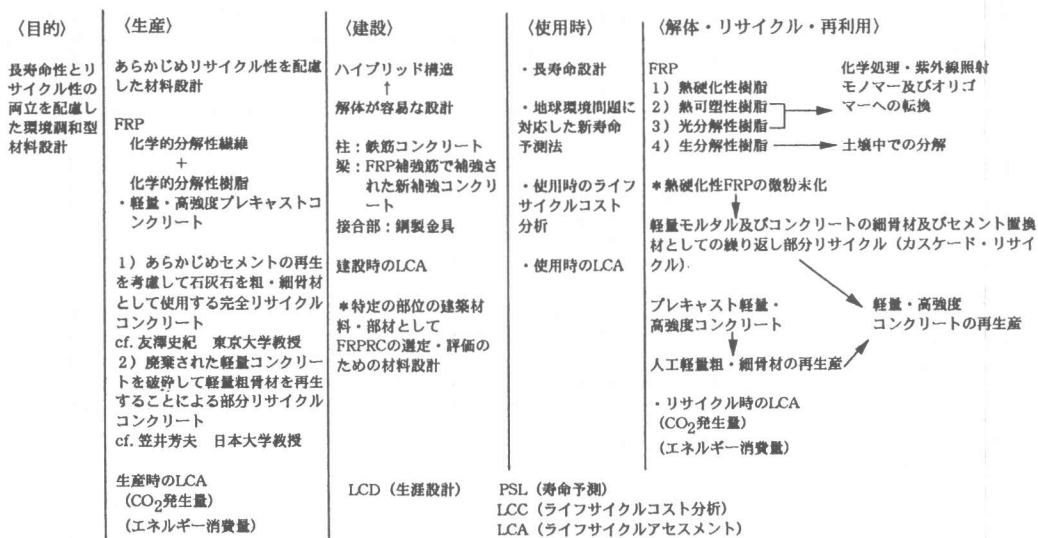


図-5 FRPRCの環境調和型生涯設計の手順

表-2 連続繊維強化熱可塑性プラスチック (FRTP) のリサイクル性評価試験結果

① PC/CF

サンプル名	リサイクル：1回	リサイクル：2回	リサイクル：3回	ブランク
サンプル厚さ (mm)	0.92	0.80	0.83	0.97
曲げ強度 (N/mm ²)	360	300	250	390
最小、最大値	33 ~ 40	24 ~ 36	21 ~ 30	39 ~ 40
曲げ弾性率 (KN/mm ²)	38	30	21	42
最小、最大値	3700 ~ 3900	2800 ~ 3300	1900 ~ 2500	4200 ~ 4500
外観変化①繊維クロス	クロス周辺がほどけた	クロス周辺の焼け、サイズ縮小	クロスの焼け大サイズ縮小最大	
②積層シート	周辺流れあり	クロス小さいが積層可能	クロス切れ発生 (中央部)	

4回目は焼け、縮小がひどくリサイクル不可

② PC/GF

サンプル名	リサイクル：1回	リサイクル：2回	リサイクル：3回	ブランク
サンプル厚さ (mm)	0.75	0.73	0.73	0.81
曲げ強度 (N/mm ²)	160	140	200	280
最小、最大値	15 ~ 17	14 ~ 15	19 ~ 22	27 ~ 29
曲げ弾性率 (KN/mm ²)	18	19	22	17
最小、最大値	1700 ~ 1900	1900 ~ 2000	2100 ~ 2300	1700 ~ 1800
外観変化①繊維クロス	ほとんど変化なし	クロス周辺の焼け、サイズ縮小	クロスの焼け大サイズ縮小最大	
②積層シート	特に問題なし	特に問題なし	クロス切れ発生 (中央部)	

4回目はクロスがホロボロとなりリサイクル不可

として選定・評価するための過程を示す。環境調和性という新たな性能評価項目を考えるのがポイントである。

図-5は、寿命予測 (PSL)、ライフサイクルコスト分析 (LCC) 及び環境負荷評価 (ライフサイクルアセスメント: LCA) に基づく FRPRC

の生涯設計（ライフサイクル・デザイン）の考え方をまとめたものである。あらかじめ、長寿命性とリサイクル性の両立を配慮するのがポイントである。図-6は、廃FRPを微粉末化して、軽量コンクリートの細骨材またはセメント置換材として繰り返し部分リサイクル（カスケード・リサイクル）を行う概念をまとめたものである。性能低下率とリサイクル回数を配慮するのがポイントである。

3. 2 実験結果と議論

(1) 連続繊維強化熱可塑性プラスチック（FRTP）のリサイクル性

FRTP のリサイクル性に関するデータを表-2 に示す。

PC/CF は、回数を重ねる毎に、繊維が焼けて細くなり、クロスサイズが小さくなっていった。リサイクル4回目ではサイズが約半分になった。また、リサイクル3回目でクロスが半分に切れた。曲げ性能はリサイクル3回目で半減した。

PC/GF は、2回目までは外観変化はほとんどないが、3回目でクロス切れが発生した。4回目ではクロスがポロポロになり、取り扱いが出来ない状態となった。曲げ性能はリサイクル3回目までは低下が見られなかった。（但し、初期の曲げ性能は、PC/CF の約 1/2 である。）上記の結果から、樹脂焼きによるリサイクルは、3回が限度である。

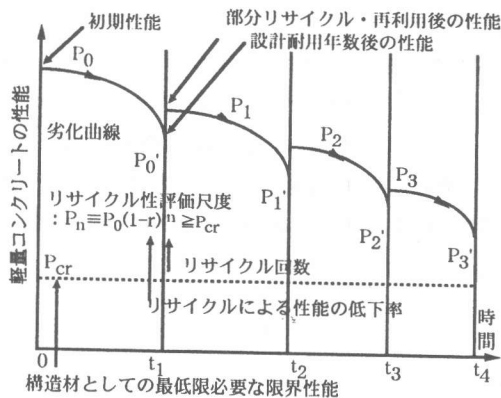


図-6 軽量コンクリートの繰り返し部分リサイクル（カスケード・リサイクル）の概念

(2) 繰り返し引張载荷における応力-歪み曲線

繰り返し引張载荷では、図-7に示すように、すべてのFRP平板は、完全弾性体としての挙動を示すと共に、引張特性は、強化材としての繊維により決定された。PC/CF及びPVC/CF平板は、ほとんど同じ引張強度を示し、荷重120KN、変位1.2mmで破断した。PC/GF及びPVC/GF平板においては、荷重67KN、変位2.7mmで破断した。

(3) 熱応力画像解析の結果

図-8は、強化材である繊維部分に熱応力集中が起こることを示す。

また、図-9は、円孔周辺で繊維方向と直角に亀裂が発生した後に、約2/3の荷重で繰り返し引張载荷を行うと、亀裂背後に熱応力集中が生じる状況を示している。

(4) 議論

実験結果に基づいて、新しく開発されたリサイクル可能な熱可塑性樹脂による強化プラスチック（FRTP）補強材は、通常熱硬化性エポキシ樹脂による強化プラスチック（FRTS）補強材CFRTS及びGFRTSの引張強度（約1,000N/mm²及び約500N/mm²）と比較しても十分な引張強度を持つこと、また、引張繰り返し载荷のもとでは、強化材としての繊維部分に応力が集中すること、更に、繊維方向と直角に亀裂が発生した後は、亀裂の背部が繰り返し引張载荷に対して弱点となると考えることができる。

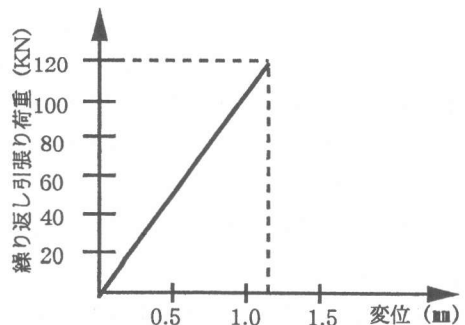


図-7 PC/CF及びPVC/CFの繰り返し引張荷重と変位との関係

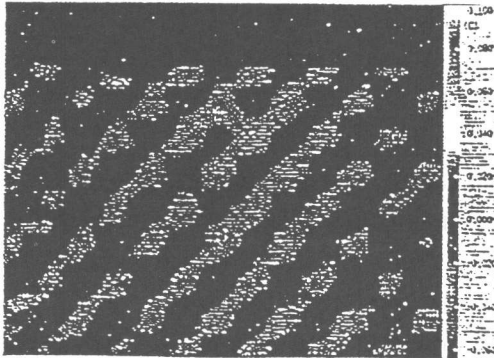


図-8 PC/CF平板における強化用繊維部分での熱応力集中状況（熱応力画像の灰色部分）

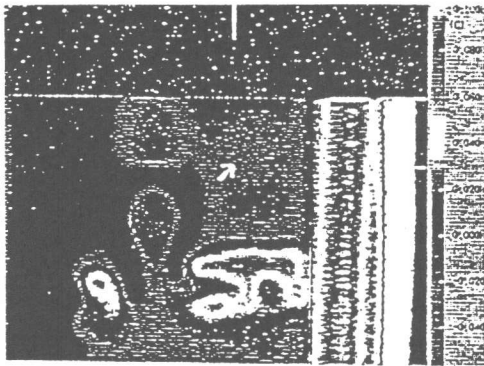


図-9 PVC/CF平板における亀裂発生後の低レベルでの繰り返し引張試験下での亀裂背部での応力集中状況（熱応力画像の灰色部分）

4. 結論

連続繊維補強コンクリート（FRPRC）を、環境調和性をも合わせ持つ新しい建築用複合構造部材に転換する目的で諸検討を行った。次のような結論をまとめることができる。

- 1) 目下のところ一番リサイクルが難しいとされる強化プラスチック（FRP）とコンクリートを両方使用する連続繊維補強コンクリート（FRPRC）を、環境調和型材料設計（エコマテリアル）に転換するためには、長寿命性とリサイクル性の両立を配慮した環境調和型生涯設計を確立する必要がある。
- 2) FRP 補強材をリサイクル可能なものに転換するために、熱可塑性樹脂でできた連続繊維強

化プラスチック（FRTP）を開発し、その応用性について諸検討を行った。その結果、新しく開発された FRTP 補強材は、構造材料としての十分な力学的特性とリサイクル性を持つエコマテリアルとして利用可能なことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 白山和久ほか：炭素繊維を中心とする新素材繊維で強化したセメント・コンクリート系複合材料の力学的特性の評価に関する研究，建築研究報告，No.131，つくば，pp.154，1991.8
- 2) Shirayama, K. et al. : "CFRP Deformed Bar Reinforcement," Concrete 2000, E&FN SPON, London, pp.857-858, Sep. 1993
- 3) 小島 昭 ほか：連続繊維補強コンクリートの環境調和型材料設計（エコマテリアル・デザイン）とその要素技術（その2. 廃 FRP 微粉末を用いたモルタル及びコンクリートの基本的特性の把握実験），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1（材料・施工），pp.1499-1500，1995.8
- 4) 柳 啓，小島 昭，福島敏夫：廃 FRP 微粉末を利用したコンクリートの二，三の性状，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.938-943 1996.12
- 5) Fukushima, T., Yanagi, K. and Maeda, T., : "Environmental Conscious Materials Design of Lightweight Precast Concrete Components with Recyclable FRP Rebars," Disposal and Recycling of Organic and Polymeric Construction Materials, E&FN SPON, London, pp.111-125, Mar. 1995
- 6) Fukushima, T. et al. : "Ecomaterial Design of Building Structural Composite Materials and/or Components Considering Recyclability and its Elemental Technology," Proceedings of International Ecomaterials Conference, Xi'an, China, pp.263-266, Sep. 1995