

## 論文 短繊維補強コンクリートの環境調和型材料設計

福島敏夫\*<sup>1</sup>・笠井哲郎\*<sup>2</sup>・木村耕三\*<sup>3</sup>・仕入豊和\*<sup>4</sup>

**要旨**：炭素，アラミド，ガラスなどの軽量・高強度・高耐久性の高機能繊維を利用した短繊維補強コンクリートを、ある環境下での建築・土木構造物の部位に使用することを想定する場合に、要求性能を満足させ、目標とする材料特性を持つものを製造・選択・評価する材料設計法の基本骨格と、力学的特性を中心とするエキスパートシステム化とデータベースの構築を行った。この際、三大性能である力学的特性、耐久性、防・耐火性の他に、新たにリサイクル性や環境負荷低減性などの環境調和性という性能評価項目を設定し、将来を見据えた環境調和型材料設計への転換を図ったので報告する。

**キーワード**：短繊維補強コンクリート，材料設計，要求性能，環境調和性

## 1. はじめに

短繊維補強コンクリート（短繊維—FRC）は、肺ガンの問題により使用が制限されつつある石綿繊維セメント板代替の新しい機能性を持った建設材料としての用途を促進し、また、新機能性の複合部材・構法への応用への道を切り開くものである。それ故、適切な用途を考えれば、その機能性の発揮により十分に地球環境負荷低減に寄与すると考えることもできる。しかし、環境調和性の観点からすると、短繊維が分散して混入される短繊維—FRCは、パネル部材としてそのまま再利用する場合を除き、マテリアル・リサイクルが最も難しい建設材料の部類に属し、必ずしも“環境に優しい材料（エコマテリアル）”<sup>1)</sup>とは言えない。それ故、他分野の産業廃棄物や未利用資源の有効利用技術と共に、設計耐用年数終了後のリサイクル時には、セメントに再転換する技術の確立などにより、環境調和性に富んだものにする方法を考えるべ

きである。また、その目標となる性能・特性を持つ短繊維—FRCを製造し、選択・評価する材料設計においても、環境調和性を考慮した設計法に転換する必要がある<sup>2),3)</sup>。

## 2. 環境調和型材料設計の基本体系

各種の短繊維—FRCの材料特性についての報告例は多いが、ある環境条件下の建築・土木構造物のある部位において使用する状況を想定した場合に、その要求性能・機能を満足させるためには、どのような既存の短繊維—FRCを選択し、その評価を行うか、または、物性改善法を含めて、目標とする性能・機能を持つものをどのように新たに製造するかという時には、材料設計法の基本骨格を構築し、そのエキスパートシステムとデータベースの整備を行う必要が生じる。建築分野での3大要求性能は、力学的特性、耐久性、防・耐火性（土木分野では、防・耐火性は必ずしも要求されない）である。

\* 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）

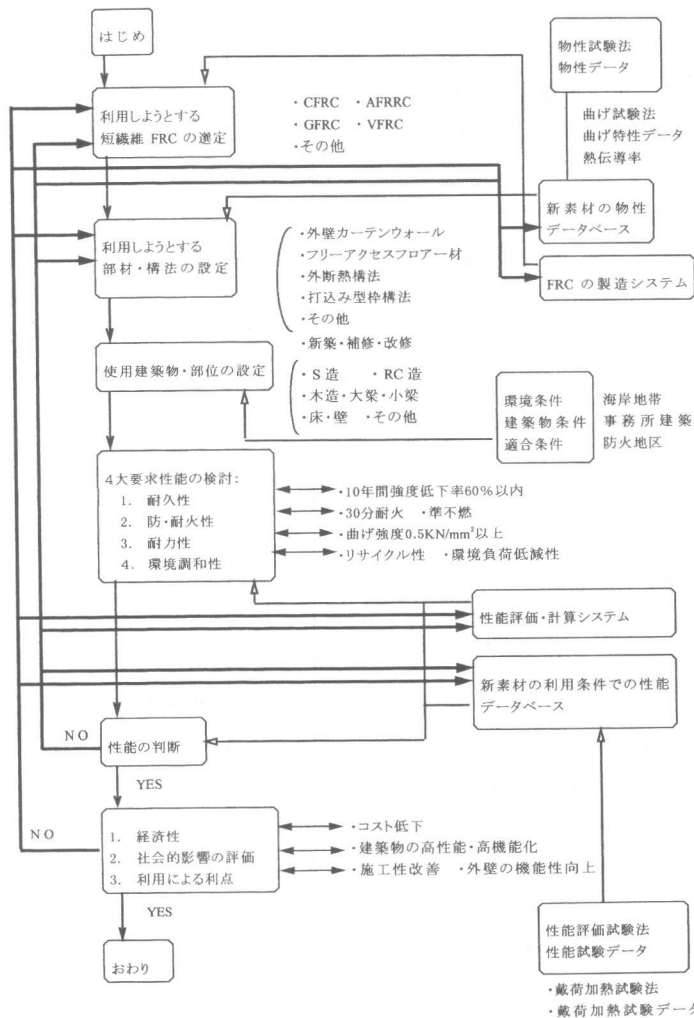
\* 2 東海大学工学部土木工学学科助教授 工博（正会員）

\* 3 ㈱大林組技術研究所構造第1研究室主任研究員 工博（正会員）

\* 4 神奈川大学工学部建築学科教授 工博（正会員）

しかし、地球環境問題への有効対応という 21 世紀に向かう人類共通の課題を考え、環境、経済と長寿命性/安全性のバランスによる持続的発展可能な建築・都市の構築を考える時、短繊維-FRC においても、リサイクル性や環境負荷低減性などの環境調和性という新たな性能評価項目を設定し、新材料設計法に転換することが必要不可欠である。このため、従来の建設材料の選択・評価システムとしての材料設計法を踏襲しながらも、環境調和性を考慮した環境調和型材料設計の基本体系の構築を図った。図一

1にその基本概念について示す。例えば、海岸地帯の防火地区での事務所建築の外断熱構法に、CFRC を利用しようとする時、データベースと 4 大要求性能を比較し、満足する性能が得られているかを判断し、合理的な選定・評価を行うことがポイントである。この時、要求性能の数値化と性能評価試験・計算法の確立が重要になる。また、この基本体系の基礎をなすデータベースの物性及び性能データ表の一例を表一1に示す。曲げ、圧縮、引張特性と製造時の混練特性などが数値データとして示されている。



図一 短繊維補強コンクリート(短繊維-FRC)の環境調和型材料設計の概念

表-1 短繊維-FRCの物性及び性能データ表  
(PAN系炭素繊維FRCの場合の一例)

分類・種類	PAN系炭素繊維									
	モルタル(早強セメント, 粉末珪砂, 繊維セメント, 消泡剤)									
使用繊維の特性	密度	長さ	径	7 $\times$ 対比	引張強度	引張弾性率	伸び			
	g/cm <sup>3</sup>	mm	$\mu$ m		N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	%			
マトリックスの特性	圧縮強度	弾性係数	引張強度	曲げ強度	曲げ弾性率	曲げひずみ	単位質量			
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N $\cdot$ m	g/l			
短FRCの配(濃)合(%)	W/(C+S)	S/a	S/(C+S)	S1/(C+S1)	DF/(C+S1)	MC/(C+S1)	WRA/(C+S1)	vis/(C+S1)		
	45	25			0.29	0.27				
特性性能	評価項目	V <sub>f</sub> (vol%)	0.5	1	2	3	試験法			
	曲げ強度	N/mm <sup>2</sup>	7	12	20	19	CRC引張試験, 4 $\times$ 38 $\times$ 1cm			
	曲げ弾性率	N/mm <sup>2</sup>	12553	11760	15000	13827	at: 引張強度の1/2			
	曲げタフネス	N $\cdot$ m	0.3	0.9	1.9	1.9	JIS A 110R, $\phi$ 5 $\times$ 10cm, at: 圧縮強度の1/3			
	最大たわみ量									
	引張強度	N/mm <sup>2</sup>	2.2	4.9	4.6	5.4	CRC引張試験, 4 $\times$ 38 $\times$ 1cm, at: 引張強度の1/2			
	引張弾性率	N/mm <sup>2</sup>	11964	13230	17260	16089				
	圧縮強度	N/mm <sup>2</sup>	71	63	53	48	JIS A 110R, $\phi$ 5 $\times$ 10cm, at: 圧縮強度の1/3			
	圧縮弾性率	N/mm <sup>2</sup>	17260	15985	15200	13631				
	付着特性									
耐衝撃性		N $\cdot$ m								
	その他									
練混ぜ成形	ミキサ	オムニミキサ								
	練混ぜ法	同時に6分間練り混ぜ								
フレッシュ時の特性	成型方法	成形後, 20 $^{\circ}$ C湿度養生, 翌日脱型, 材令2日オートクレーブ養生, 1年保存後								
	スランプフロー	cm								
施工性	施工性	mm	171	149	124	113				
	価格									
参考文献	田中亮, 友塚史紀, 福島大樹, 秋沢繁生: 短繊維補強セメント板の性能について, セメント・コンクリート論文集, No. 43, pp. 542-547(1989)									
備考	W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材, a:骨材全容積, DF:消泡剤, MC:繊維セメント, S1:シリカF <sub>4</sub> , SB:シリカF <sub>2</sub> , WRA:高性能減水剤, vis:増粘剤, SP:流動化剤, PA:起泡剤									

表-2 各種の短繊維-FRCの繊維混入率と引張強度及び繊維有効係数の関係

繊維	繊維引張強度 $\sigma_{fu}$ (N/mm <sup>2</sup> )	繊維含有率 V <sub>f</sub> (%)	FRC引張強度 $\sigma_{cu}$ (N/mm <sup>2</sup> )	繊維有効係数 $\eta$
PAN系炭素 (l <sub>f</sub> =6mm)	35.3	1	2.1	0.06
トセラT-300		2	2.9	0.04
		3	3.7	0.03
ビッチ系炭素 (l <sub>f</sub> =6mm)	7.8	1	1.5	0.19
クレンカ		2	2.3	0.15
		3	2.4	0.10
アラミド (l <sub>f</sub> =6mm)	30.4	1	2.6	0.05
テクノラ		2	2.5	0.04
		3	3.7	0.04
耐アルカリガラス (l <sub>f</sub> =6mm)	14.7~19.6	1	2.1	0.11~0.14
アルファイバー		2	1.7	0.05~0.09
		3	3.4	0.06~0.08

### 3. 修正複合則による力学的特性予測システム 3.1 短繊維-FRCの強度予測システム

ある想定環境の部位で, ある短繊維-FRCを建築・土木材料として選定しようとする際, 先ずは, 要求される力学的特性(あるいは構造性能)を満足するかを判断するための力学的強度の予測と評価を行う必要が生じ, その後に, 耐久性, 防・耐火性, 環境調和性あるいは機能性能改善効果, コストなどを論ずることになる。

このために, 繊維とマトリックスの界面付着特性を考慮した修正複合則に基づいて, 与えられたマトリックスデータと各種の繊維データを結びつけた引張強度, 曲げ強度を予測・評価するシステムの構築を行った。図-2に短繊維-FRCの強度予測システムを示す。

一般に短繊維-FRCの最大引張強度の予測式は, 次式(1)で与えられる。

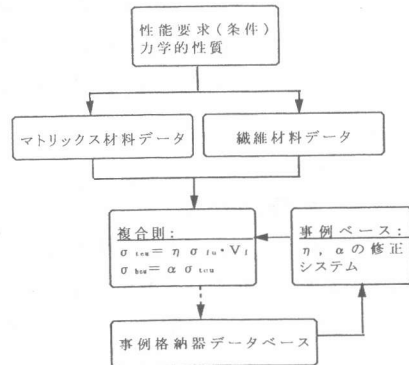


図-2 短繊維-FRCの強度予測システム

表-3 各繊維  $\eta$  の初期値 ( $\eta(0)$ )

繊維名	記号	$\eta(0)$ の値
パン系CF	$\eta_1(0)$	0.26
ビッチ系GPCF	$\eta_2(0)$	0.42
ビッチ系HPCF	$\eta_3(0)$	0.60
アクリル	$\eta_4(0)$	0.76
アラミド	$\eta_5(0)$	0.21
ガラス	$\eta_6(0)$	0.27
ポリプロピレン	$\eta_7(0)$	0.76
ポリエチレン	$\eta_8(0)$	0.76
鋼	$\eta_9(0)$	1.35
ビニロン	$\eta_A(0)$	0.76

$$\sigma_{cu} = \eta_1 \eta_2 \sigma_{fu} V_f = \eta \sigma_{fu} \cdot V_f \quad (1)$$

ここで,  $\sigma_{cu}$ : 短繊維-FRCの理論引張強度,  $\sigma_{fu}$ : 繊維の引張強度,  $\eta_1, \eta_2$ : 繊維の配向及び付着に関する係数で,  $\eta_1 \times \eta_2 = \eta$  (繊維有効係数)は, 既存の実験研究の結果から, 繊維の種類により異なる傾向を示すことが知られている。表-2に W/C = 40%, S/C = 25%の統一したマトリックス条件で作成した CFRC (PAN系, ビッチ系), AFRC, GFRC の4種類の短繊維-FRCの4 $\times$ 38 $\times$ 1cmの試験体について, 日本GRC工業会の規格である「GRCの引張試験方法」に基づいて, 行った試験結果を示す<sup>4)</sup>。ここでは,  $\eta$ については, 各繊維ごとにその平均値を用い, データベースの追加・更新に伴い同時に修正されるものとした。これまでの検討で得た各繊維の $\eta$ 初期値( $\eta(0)$ )を表-3に示す。

他方、短繊維-FRCの力学的強度データは、純引張強度に関するものが少なく、ほとんど曲げ強度に関するものが多い。それ故、引張強度 ( $\sigma_{tcu}$ ) と曲げ強度 ( $\sigma_{bcu}$ ) の関係を直線則で表し、曲げ強度の予測式として次式 (2) を用いた。

$$\sigma_{bcu} = \alpha \sigma_{tcu} \quad (2)$$

$\alpha$  : 曲げ破壊係数

鋼繊維コンクリートに関する小林の研究<sup>9)</sup>によれば、 $\alpha$  は 1.6 程度であると報告されている。本システムにおける  $\alpha$  の値について、既存の実験結果における全短繊維-FRCの引張強度及び曲げ強度から得られる平均値を  $\alpha(0)$  として、データベースの追加・更新に伴い同時に修正されるものとした。なお、 $\alpha(0) = 3.16$  である。

### 3.2 係数 $\eta$ , $\alpha$ の修正システム

力学的強度の複合則による係数  $\eta$  及び  $\alpha$  は、 $\eta$ ,  $\alpha$  の修正システムによりデータベースの追加・更新に伴い修正される。係数  $\eta$ ,  $\alpha$  の修正システムのフローチャートを図-3に示す。

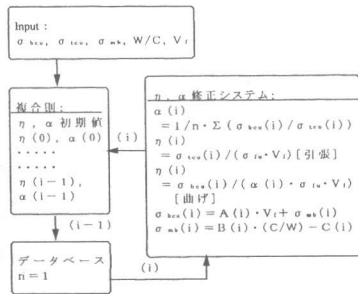


図-3 係数  $\eta$ ,  $\alpha$  の修正システム

$\alpha$  の値については、既存の実験データにおける曲げ強度と引張強度との関係から、次の (3) 式によって算出した値の全平均値とすることにした。

$$\alpha(i) = \sigma_{bcu}(i) / \sigma_{tcu}(i) \quad (3)$$

$\eta$  の値については、使用繊維ごとに、強度の予測式 (1), (2) と引張及び曲げ強度の実験データから次の式により求めることにした。

$$\eta(i) = \sigma_{tcu}(i) / (\sigma_{tu} \cdot V_f) \text{ [強度]} \quad (4)$$

$$\eta(i) = \sigma_{bcu}(i) / (\alpha i) \cdot \sigma_{tu} \cdot V_f$$

[曲げ] (5)

ここに、 $\sigma_{tcu}(i)$ ,  $\sigma_{bcu}(i)$  は、データベースから得られた、引張、曲げ強度の平均値である。

他方、データの検討により、 $\sigma_{bcu}$  は、各繊維ごとに繊維混入率  $V_f$  と一次関係にあるため、以下の式により、繊維混入率の異なる調査条件の短繊維-FRCの  $\sigma_{bcu}$  を予測できる。

$$\sigma_{bcu} = A \cdot V_f + \sigma_{mb} \quad (6)$$

$$\sigma_{mb} = B(C/W) - D \quad (7)$$

$V_f$  : 繊維混入率

$\sigma_{mb}$  : マトリックスの曲げ強度

$C/W$  : セメント水比

$A, B, D$  : 実験データから求まる定数

なお、 $\sigma_{mb}$  は  $V_f = 0\%$  の場合の曲げ強度に相当する。この実験データが無い場合には、(7) 式を用いて  $\sigma_{mb}$  を推定するものとした。これらの式より、繊維混入率が仕意の場合の  $\eta$  は、式 (8), (9) より求められる。

$$\eta(i) = \frac{A(i) \cdot V_f + \sigma_{mb}(i)}{\alpha i \cdot \sigma_{tu} V_f} \quad (8)$$

$$\eta(i) = \frac{A(i) \cdot V_f + B(i) \{ (C/W) - D(i) \}}{\alpha(i) \cdot \sigma_{tu} V_f} \quad (9)$$

### 4. 耐久性等の評価・予測システム

図-4に耐久性や防・耐火性、製造コストなどの予測システムを示す。

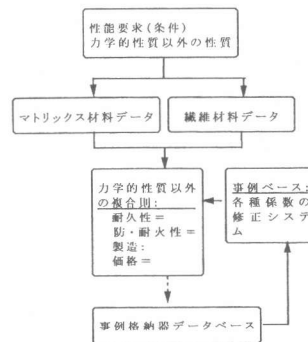


図-4 短繊維-FRCの耐久性等予測システム

この予測システムは、力学的性質の予測・評価システムと同様に、複合則を基礎として、短繊維

維一 FRC を構成するマトリックスと各繊維の性能に容積比率をかけた和として構成される。耐久性に関する評価項目として表-4を設定する。これらの各評価項目ごとに、マトリックス及び各種耐久性を3段階にランクし、次のように短繊維一 FRC の耐久性を評価するものである。

例えば、耐久性 A (耐凍害性) の場合

- ・マトリックス：耐久性 MA
 
$$= a \cdot (C/W) + b \cdot (air) + c \cdot (aggregate) + d$$
- $a, b, c, d$  : 実験データから求まる定数
- ・繊維：耐久性 FA
- ・短繊維一 FRC：耐久性 A の評価
 
$$= \alpha \cdot (耐久性 MA) \cdot (1 - V_f) + \beta (耐久性 FA) \cdot V_f + r$$
- $\alpha, \beta, r$  : 実験データから求まる定数

表-4 耐久性に関する評価項目

評価項目	記号
耐凍害性	耐久性 A
耐候性	耐久性 B
耐薬品性	耐久性 C
耐摩耗性	耐久性 D
耐ひび割れ性	耐久性 E
耐水性	耐久性 F
寸法安定性	耐久性 G
耐食性	耐久性 H

表-5に防・耐火性に関する評価項目も示す。防・耐火性も評価項目ごとに、やはり、複合則で評価することが基本である。

表-5 防・耐火性に関する評価項目

評価項目	記号
熱伝導率	防・耐火 A
熱拡散係数	防・耐火 B
比熱	防・耐火 C
熱膨張係数	防・耐火 D
耐熱性	防・耐火 E
難燃性	防・耐火 F
耐火性	防・耐火 G

## 5. 環境調和性評価システム

### 5.1 環境負荷低減性の評価尺度

短繊維一 FRC は、様々な有効性を持つが、目下のところリサイクル性に乏しく、高純度、

高品質材料を多用して、未利用資源や再生資源の有効利用を図っていないために、必ずしもエコマテリアルではない。このために、エコセメント、高炉スラグセメント、フライアッシュ、微粉末化廃 FRP などの再生資源や未利用資源をセメントや細骨材に利用すると共に、設計耐用年数の後に、繊維は CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O に分解するなどの手法により、セメントとしてリサイクルする方法の確立を行うことにより、エコマテリアルへの転換を図る。また、未利用資源及び再生資源の利用率と環境負荷物質排出量の関係から、環境負荷低減率を設定する。図-5に、この環境調和性を考慮した短繊維一 FRC の資源循環プロセスと MLCA に関する概念図を示す。

### 5.2 リサイクル性の評価尺度

短繊維一 FRC の初期力学的性能 (P<sub>0</sub>) を考え、リサイクルに伴う性能低下率 (r) を考慮しながらも、ある使用状況下での最低限必要な力学的性能 (P<sub>σ</sub>) に達するまで、セメントとしての再生を媒体として、何度 (n) も繰り返し部分リサイクル (カスケード・リサイクル) する概念を図-6 に示す。例えば、PAN-CFRC では初期曲げ強度 P<sub>0</sub> = 20kN/mm<sup>2</sup> であり、P<sub>σ</sub> = 5kN/mm<sup>2</sup>、性能低下率を 20% とすれば、

$$P_n = P_0 (1 - r)^n$$

$$= 20 \times (1 - 0.2)^4$$

$$= 20 \times 0.4096$$

$$= 8.2 \geq 5$$

であり、4 回まで繰り返し部分リサイクルができることになる。「何度リサイクルが可能か」ということが、リサイクル性の評価尺度である。

## 6. 結論

力学的特性、耐久性、防・耐火性、環境調和性などの要求性能に応じた、短繊維一 FRC の製造・選定・評価システムとしての環境調和型材料設計法の構築を行った。今後、その具体的完成のためには、定量的な数値データの整備を含めて、その精緻化が必要不可欠である。

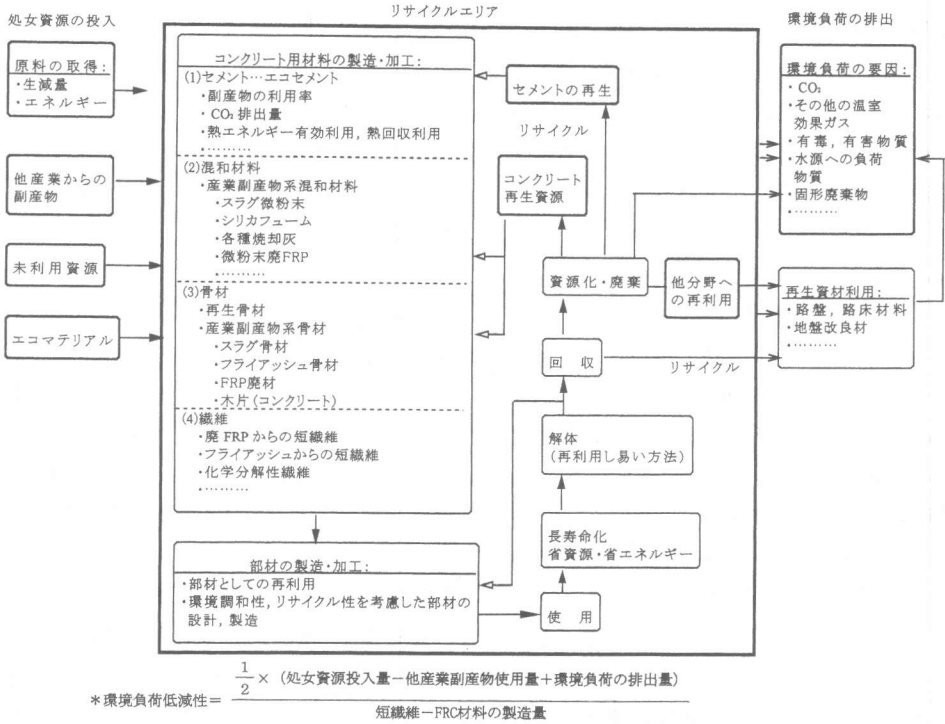


図-5 環境調和性を考慮した短繊維-FRCの資源循環プロセスとMLCAに関する概念図

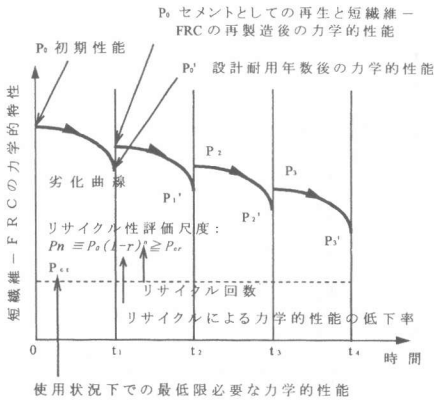


図-6 短繊維-FRCの繰り返し部分リサイクル

### 7. 謝辞

ここで述べた環境調和型材料設計の基礎となるデータベースの作成には、(株)三菱化学の前田利勝氏に多大な貢献を頂いた。ここに記して深謝したい。

### 参考文献

- 1) 「材料のエコマテリアル化のための設計・評価技術の確立に関する研究」(第I期平成5～7年度)研究成果報告書, 科学技術庁研究開発局, 1997.3
- 2) 建築用複合材料・部材の材料設計と性能評価に関する調査 平成8年度報告書, (社)建築研究振興協会, 1997.3
- 3) 建築用複合材料・部材の材料設計と性能評価に関する調査(その2) 平成9年度報告書, (社)建築研究振興協会, 1998.3
- 4) 福島敏夫・白山和久・一家惟俊・丸山武彦: 短繊維補強コンクリートの力学的特性の評価, セメント・コンクリート論文集, No.44, pp.571-575, 1990.12
- 5) 小林一輔: 繊維補強コンクリート, オーム社, 1982