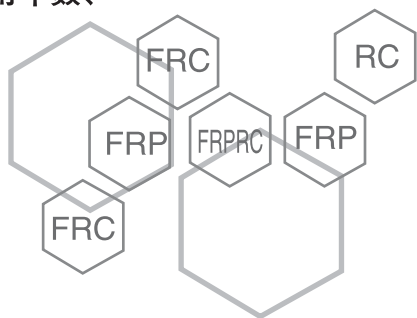


先端複合材料・部材・構法の 環境調和性・持続可能性の 評価と環境調和型設計

持続可能な環境調和型・資源循環型建築・都市・社会を支える エコマテリアル及びエコデザインの視点からのアプローチ

キーワード: 短繊維補強セメント系複合材料 (FRC)、
繊維強化プラスチック系複合材料 (FRP)、連続繊維
補強コンクリート (FRPRC)、鉄筋コンクリート
(RC)、総材料投入量、単位エネルギー消費量、
有害ガス発生量、地球環境インパクト、環境調和
性評価尺度、耐用年数、
資源循環、
持続可能性、
外断熱構法



1. 研究の背景と目的

炭素、ガラス、アラミドなどの新素材繊維を利用した人工材料の傑作とも言える先端複合材料は、航空・宇宙分野ばかりでなく、建築・土木分野にも着実に普及するようになってきている。短繊維強化セメント系複合材 (FRC) は、最近中皮腫・肺癌等の誘発の問題で使用禁止の趨勢にあるアスベスト繊維を利用した材料の代替材として、例えば、外断熱構法用の機能性外装材料などに使用される。汎用繊維強化プラスチック (FRP) のガラス短繊維強化不飽和ポリエステル樹脂は、バスタブ、キッチンユニット、給水タンクなどに多用される。また、連続繊維強化プラスチック (FRP) の非金属補強材を用いた連続繊維補強コンクリート (FRPRC) は、塩化物イオン等によ

る内部鉄筋の腐食による劣化が起りやすい塩害環境や、磁性を嫌う建築物で、鉄筋コンクリート (RC) に代わる高耐久性・高機能性構造部材としてその利用が図られている。しかし、これらの建築・土木分野における先端複合材料・部材が、環境／景観と安全性／長寿命性と経済の鼎立に配慮した資源循環型・環境調和型の持続可能な建築・都市・社会を支える環境調和型材料・部材 (エコマテリアル・エココンポーナント) たるためには、ライフサイクルでの環境調和性・持続可能性の的確な評価が必要であり、それらを組み合わせた建築複合構法にも、環境調和型設計 (エコデザイン) の考え方が必要不可欠である。本研究は、この環境調和性・持続可能性の評価方法と環境調和型材料設計 (エコマテリアル・デザイン) および環境調和型生涯設計 (エコライフサイクル・デザイン) に関するものである。今回は、特に、先端複合材料・部材の環境調和性・持続可能性の評価に焦点を絞って、話を進めたい。

2. 環境調和性・持続可能性の 定量的評価の条件

ライフサイクルコスト (LCC) と、ライフサイクルの環境負荷 (LCEL) と総材料投入量 (TMR) の3つを最小にして、材料・部材・部品・製品・建造物の最大の性能とサービスを得るように設計行為をするという新しい考えに立つものである。このとき、長寿命性のメリットを考え、耐用年数 (SL) の効果を取り入れる。これらの数式的表現を以下に示す。

環境調和性 (Ecobalance Performance)

= 要求性能およびサービス (Demanded Performance and/or Service) $\times$ (SL) / LCC $\cdot$ LCEL $\cdot$ TMR (1)

このことは、環境調和性・持続可能性を実現するためには、イニシャル・コストを最小にして最大の性能及びサービスを得るという従来の欧米物質文明の体系から、ライフサイクルの視点を加味した資源循環型・環境調和型体系への転換を目指すことを意味する。この考えに沿って、長寿命性、資源循環性、有害物質非発生性、資源容量・環境容量改善性、物質・材料効率、健康安全性の6つの環境評価項目(エコインディケーター)に関する5段階指数表示による正六角形のレーダチャートに基づいて、先端複合材料・部材のライフサイクルでのエコマテリアル度としての環境調和性・持続可能性の定量適評価を行った。このレーダチャートによる環境調和性・持続可能性の視覚的表現の例を図-1および2に示す。

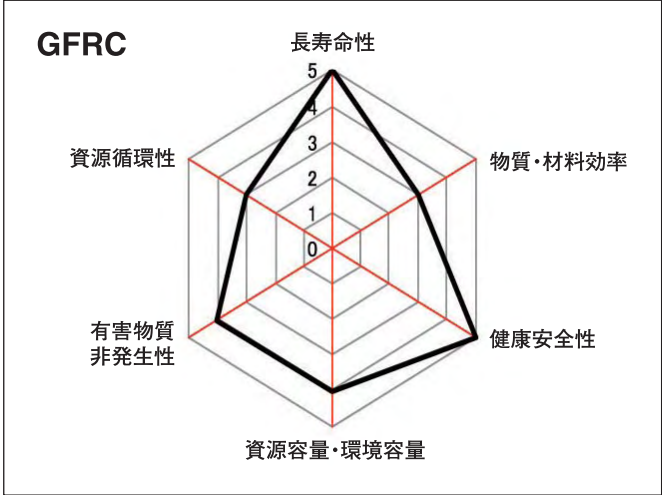


図1 耐アルカリガラス短繊維強化セメント系複合材料 (GFRC) の環境調和性・持続可能性のレーダチャートによる視覚的表現

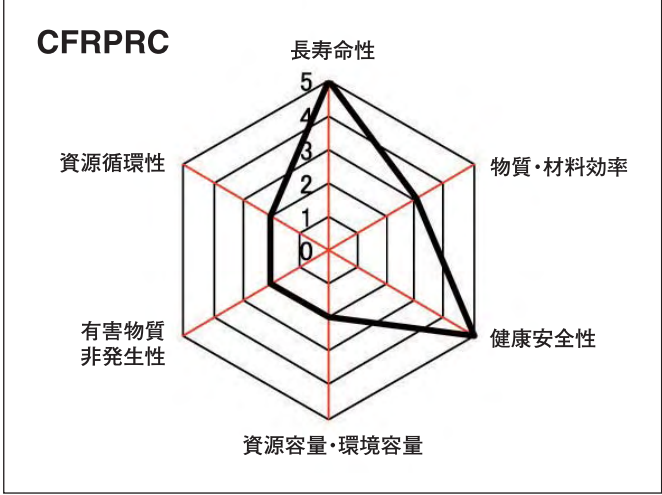


図2 PAN系炭素連続繊維補強コンクリート複合部材 (CFRPRC) の環境調和性・持続可能性のレーダチャートによる視覚的表現

限りなく正六角形に近くなるのが環境調和性に優れていることになる。GFRCは、かなり優れたエコマテリアルと考えられるが、物質・材料効率と資源循環性はやや劣る。CFRPRCは、製造時にかなりのCO₂、SO_x、NO_xなどの有害物質を発生し、リサイクル性に乏しいという意味で、先端複合材料としての性質は優れているが、環境調和性は、やや劣ると考えられる。

3.先端複合材料・部材の環境負荷評価

FRC等についての地球環境影響度評価

(1) FRCの引張・曲げ強度あたりの総材料投入量

マトリックスモルタルの調合を統一して(水セメント比40%、砂セメント比25%、繊維長6mm)(表-1)、繊維の体積含有率(V_f)のみを変えて製造した各種のFRCについて得られた基本的特性のデータを基に、単位引張・曲げ強度を得るためにどれだけの材料を投入する必要があるかの検討を行った。図-3、-4は、それぞれ、引張強度および曲げ強度あたりの総材料投入量を示す。単位総材料投入量(TMR)は、各種のFRCでほとんど同じ程度(2009-2029kg/m³)であるが、 V_f (繊維体積含有率)とともに小さくなる。引張強度・曲げあたりの総材料投入量(TMR/σ_{tu} 、および TMR/σ_{bu})は、いずれも V_f とともに減少するが、 $V_f=3\%$ だとピッチ-CFRCが最も大きく、PAN-CFRCが最も小さい。

◆表1 FRCのマトリックスモルタル

水セメント W/C (%)	砂セメント比 S/C (%)	単位量 (kg/m ³)					繊維
		水 (W)	セメント (C)	砂 (S)	高性能減水剤 (C×1.0%)	消泡剤 (C×0.05%)	
40	25	488	1220	305	12.2	0.6	*

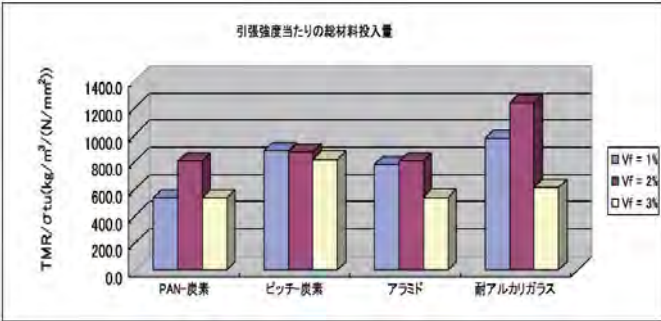


図3 FRCの引張強度あたりの総材料投入量

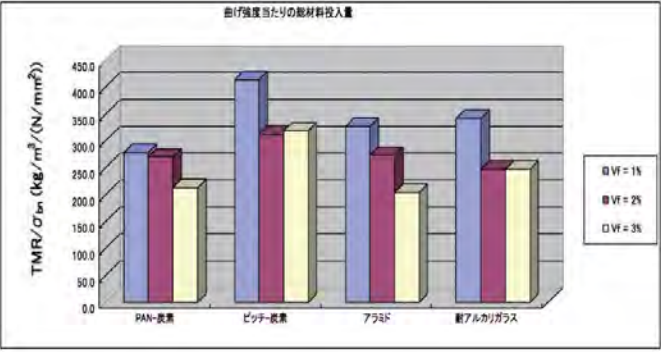


図4 FRCの曲げ強度あたりの総材料投入量

(2) FRCの製造に伴う単位エネルギー消費量

・有害ガス排出量と地球環境インパクト分析

FRCを構成する繊維やセメント、砂などのエネルギー原単位や、有害ガス排出量のデータを基に、組成比に基づく計算の積み上げにより、各種のFRC1m³の製造に伴う単位エネルギー消費量・有害ガス排出量を算出し、地球環境インパクト分析を行った。

◆表2 FRC及びコンクリートの構成材のエネルギー原単位

構成材の種類	エネルギー原単位 (MJ/kg)	CO ₂ (kg/kg)	SO _x (kg/kg)	NO _x (kg/kg)	出典
PAN-炭素繊維	478.5	29.7	0.00682	2.00946	炭素繊維協会
耐アルカリガラス繊維	29.8	1.85	0.000926	0.000685	ガラス繊維協会
天然砕砂	5.6	0.2888	0.00069	0.0047	エコマテリアル・フォーラム
天然採石	5.6	0.2756	0.00064	0.00044	エコマテリアル・フォーラム
普通ポルトランドセメント	3.943	0.788	0.0008	0.001399	セメント協会
電力(KWH)	3.6MJ	0.424	0.00037	0.0000261	産業環境管理協会

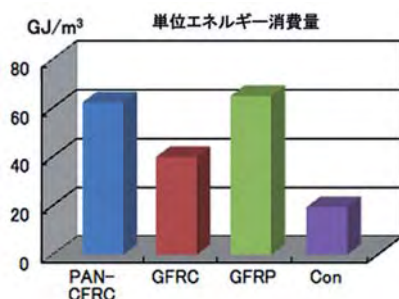
◆表3 FRC及びコンクリートの調合

構成材	PAN-CFRC (2009kg/m ³)	GFRC (2029kg/m ³)	コンクリート (2264kg/m ³)
	繊維密度:1.75g/cm ³ 繊維長:6mm 繊維体積含有量:3%	繊維密度:2.55g/cm ³ 繊維長:6mm 繊維体積含有量:3%	水セメント比:60% セメント砂比:36.7% 細骨材率:45.8%
普通ポルトランドセメント	1176	1176	300
砂	295	295	818
粗骨材	0	0	968
水道水	486	486	180
PAN-炭素繊維	52	0	0
耐アルカリガラス繊維	0	72	0
総材料投入量	2009	2029	2264

◆表4 各種のFRCの製造に伴う
単位エネルギー消費量・有害ガス排出量算出結果

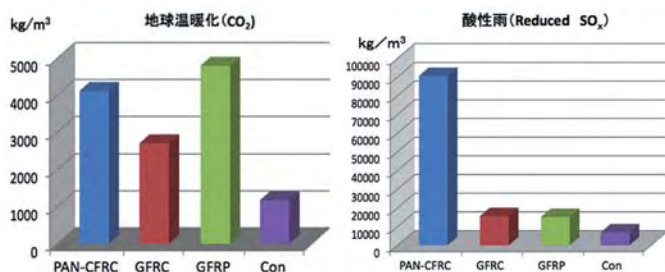
複合材料の種類	エネルギー単位 (GJ/m ³)	CO ₂ (kg/m ³)	SO _x (g/m ³)	NO _x (g/m ³)
PAN-CFRC	62.4	4117.08	4073.86	123653.66
GFRC	40.0	2698.63	2898.63	18153.13
普通コンクリート	19.5	1176.88	1176.88	8183.88
GFRP	65.0	4802.00	599.56	20893.61

PAN-CFRCおよびSMC製浴槽ユニット用GFRPの製造時のエネルギー消費量が、GFRCおよび普通のコンクリートに比べてかなり高いことがわかる。



◆図5 複合材料のエネルギー消費量

地球環境インパクト分析結果



◆図6 複合材料の地球温暖化影響度評価

◆図7 複合材料の酸性雨影響度評価

地球温暖化影響評価は、CO₂排出量で、酸性雨影響評価は、SO_x排出量+0.7×NO_x排出量によるものである。地球温暖化への影響は、PAN-CFRCおよびGFRPともに高いが、酸性雨に対する影響は、GFRPではかなり低くなる。

コンクリート複合部材FRPRCおよびRCの地球環境影響度評価

(1) 補強材及びFRPRCの総材料投入量

まず、構成材料の調合に基づいて、普通コンクリートの総材料投入量(TMR)およびエネルギー原単位および有害ガス発生量を算出し、ついで、連続繊維補強材(FRP)および鉄筋(S)のそれらと結びつけて、FRPRCおよびRCとしての1m³あたりのTMRおよび単位エネルギー消費量(UEC)およびCO₂、SO_x、NO_x発生量の積算を行う。この際に、釣り合い主引張鉄筋比に基づくモデル化された梁断面を考えて、積算を行う。連続繊維補強材の場合は、次の弾性率比による有効引張主鉄筋比を考える。

$$P_{\text{eff}} = p_s \times (E_{\text{FRP}}/E_s)$$

◆表5 FRP補強材および鉄筋の引張強度あたりの
総材料投入量算出結果

補強材の種類	密度	引張強度	引張弾性率	引張強度あたりの 総材料投入量
	g/cm ³	N/mm ²	kN/mm ²	kg/m ³ /(N/mm ²)
CFRP ¹⁾	1.5	1372	117.6	0.11
GFRP ²⁾	2	980	42.1	0.21
鉄筋(電気炉鋼)(SD345)	7.8	490(345 ³⁾)	200	1.62

(注) 1) CFRP: PAN系炭素連続繊維強化エポキシ樹脂

2) GFRP: Eガラス連続繊維強化エポキシ樹脂 3) 降伏強度

CFRP(PAN系炭素連続繊維強化エポキシ樹脂)およびGFRP(Eガラス連続繊維強化エポキシ樹脂)補強材の引張強度あたりのTMRは、S(鉄筋)よりはかなり少ない。

◆表6 FRPRCおよびRCの総材料投入量(TMR)算出結果

補強コンクリートの種類	総材料投入量(kg/m ³)
CFRPRC	2377.7
GFRPRC	2304.1
RC	2353.7

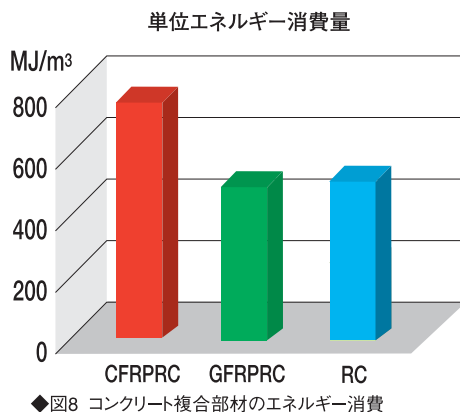
コンクリート複合部材のTMRは、ほとんどコンクリートのTMRで決まり、CFRPRCおよびGFRPRCのTMRは、RCとほとんど変わらない。

(2) FRPRCおよびRCの製造に伴う単位エネルギー

消費量・有害ガス排出量と地球環境インパクト分析結果

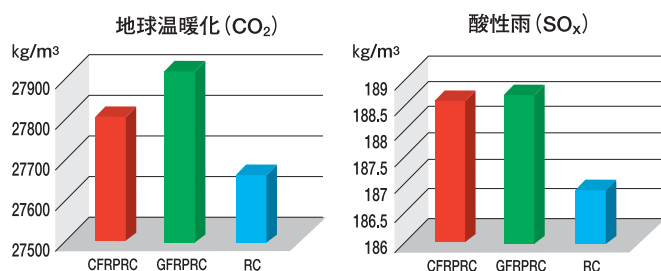
◆表7 コンクリート複合部材の製造に伴う単位エネルギー消費量・有害ガス排出量算出結果

補強コンクリートの種類	エネルギー消費量 (MJ/m ³)	有害ガス発生量		
		CO ₂ (kg/m ³)	SO _x (kg/m ³)	NO _x (kg/m ³)
CFRPRC	769.24	27786.9	47.57	201.27
GFRPRC	470.06	27898.8	47.77	201.04
RC	482.72	27658.5	47.36	199.31



CFRPRCおよびGFRPRCのUECと有害ガス発生量は、RCよりかなり大きいことがわかる。補強材のそれに左右されるものとも考えることもできる。

地球環境インパクト分析結果



◆図9 FRPRCおよびRCの地球温暖化影響度評価

◆図10 FRPRCおよびRCの酸性雨影響度評価

地球温暖化影響評価は、CO₂排出量で、酸性雨影響評価は、SO_x排出量+0.7×NO_x排出量によるものである。FRPRCの地球環境負は、RCよりはかなり高いが、耐用年数(SL)(FRPRC:100年、RC:65年)を考慮すると、FRPRCの単位年あたりの地球環境負荷は、かなり改善されると考えることもできる。

4. 結論

(1) 短繊維セメント系複合材料(FRC)等について

- 1) 引張強度・曲げ強度あたりの総材料投入量は、いずれも、繊維体積含有率とともに減少する傾向がある。
- 2) PAN—CFRCもGFRPも先端複合材料として優秀であるが、製造時の地球環境インパクトの面からは、GFRCが最もエコマテリアル度が高いと考えられる。

(2) 連続繊維補強コンクリート(FRPPRC)と鉄筋コンクリート(RC)について

- 1) CFRPおよびGFRPの引張強度あたりの総材料投入量は、Sよりはかなり小さいが、単位エネルギー消費量と有害ガス排出量は、逆に、Sよりはかなり大きい。
- 2) コンクリート複合部材の総材料投入量は、ほとんどコンクリートで決まるが、地球環境負荷は、補強材で決まる。
- 3) FRPRCもRCも力学的性能と地球環境負荷については、オーダーは、ほぼ同じくらいであるが、耐用年数(SL)(FRPRC:100年、RC:65年)を考慮すると、FRPRCの単位年あたりの地球環境負荷は、かなり改善されると考えることもできる。

Toshio Fukushima



福島 敏夫

プロフィール

役 職 / 教授
学 位 / 工学博士
学位授与機関 / 東京大学

研究分野・専門 / 建築材料工学(コンクリート系複合材料、高分子系仕上材、エコマテリアル)
環境調和型資源循環学 / 環境調和型材料設計
耐久設計と劣化機構

主要研究テーマ / 1. 建築材料のエコマテリアル化と建築部材・構法の環境調和型設計(エコ・デザイン)
2. コンクリートの中性化と鉄筋腐食による鉄筋コンクリート造建築物の寿命設定法)
3. 複合材料・部材の環境調和性・持続可能性評価

PR・その他 / 建築材料・部材・構法を媒介として、環境 / 景観と安全性 / 長寿命性と経済の鼎立に配慮した持続可能建築・都市・社会の構築の基礎として、資源循環と耐久設計と劣化機構、環境調和型材料、環境調和型材料設計、環境調和型生涯設計に取り組んでいます。受賞: 1) マテリアルライフ学会論文賞 2) 建設大臣表彰 3) 科学技術庁長官賞 4) 日本建築士学会論文賞。趣味: 散歩、囲碁、クロスワード・パズル、数独パズルなど。

連絡先

〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1番1号
北九州市立大学国際環境工学部建築デザイン学科
TEL093-695-3238 FAX093-695-3338
E-mail fukushima@env.kitakyu-u.ac.jp