

論文 セメント複合材料の繊維架橋応力に関する考察

山田 寛次^{*1}・石山 智^{*2}・本間 匠^{*3}

要旨：短繊維で補強されたセメント系複合材料の初期ひび割れ前後のエネルギーバランスについて考察を行った。実験に用いたのは、押出成形された耐アルカリガラス繊維，ポリプロピレン繊維及び両者で補強されたセメント系複合材料である。これら材料の引張軟化曲線，応力拡大係数，さらに引張軟化応力から繊維架橋応力を求めた。それらをもとに，ひずみエネルギー，引張軟化応力によって消費されるエネルギー，繊維架橋応力によるコンプライメンタリエネルギー，ひび割れ先端でのJ積分値を計算した。その結果，これらのエネルギーバランスはひび割れ後の曲げ挙動と大いに関係あることが明らかになった。

キーワード：引張軟化，ポリプロピレン繊維，ひび割れ幅，繊維架橋応力，応力拡大係数

1. はじめに

短繊維で補強された高靱性セメント系材料は様々な新しい可能性を開くことが期待され，用途開発と材料開発が進展している¹⁾。しかし現在のところ，それらの材料は自然養生される構造部材を対象にしたものがほとんどで，高度に工業化されたパネル状二次部材に適用される例は少ない¹⁾。

その理由の一つに，使用される繊維の問題がある。一般に，高靱性セメント系材料の補強に使用されるのは，マトリックスよりも弾性率の高い(30GPa超)ポリビニルアルコール繊維，高弾性ポリエチレン繊維がほとんどである¹⁾。これらの繊維は，市販セメント二次部材に適用されているオートクレーブ養生温度(150℃～180℃)に耐えない¹⁾ため，工業化製品への使用が困難となっている。

一方，オートクレーブ養生に耐える汎用のPP繊維は，マトリックスよりも弾性率が低く(12GPa以下)，また付着強度も低いため，初期ひび割れと同時に荷重が急減し(スナップバック挙動)，高靱性化は困難である。

著者はこれまで，PP繊維で補強したセメン

ト系複合材料に関する研究を行い^{2)~4)}，PP繊維で補強した場合でも複数ひび割れを発生させて，高靱性化は可能であることを実験的に明らかにした^{3),4)}。また当該材料を用いて，引張軟化応力によるエネルギー吸収³⁾および曲げ応力によるひずみエネルギーの計算³⁾を行い，また引張軟化曲線から繊維架橋応力を分離できることを明らかにした⁴⁾。本論文では，既往の研究^{3),4)}を発展させ，エネルギー的な観点から初期ひび割れ後の高靱性化について考察する。

2. 実験

2.1 材料

実験に使用したセメントは比重3.16の普通ポルトランドセメント，粉末珪石は比重2.67で平均粒径12.7 μm のもので，増粘材として2%溶液が30Pa-Sの粘度を持つメチルセルロース(MC)を用いた。用いた繊維は，延伸フィルムを切断した扁平断面を有するPP繊維(TI)，円形断面に溶融紡糸したのち表面に水酸化鉄をコーティングしたPP繊維(My)，直径18 μm のARG繊維を200本収束したタイプのARG(Ar)である。これら繊維の性質をTable 1に示す。

*1 秋田県立大学 建築環境システム学科教授 工博 (正会員)

*2 秋田県立大学 建築環境システム学科助手 工修 (正会員)

*3 秋田県立大学 建築環境システム学専攻 (非会員)

Table 1 Material properties of short fiber

Type	Name	Diameter mm	Length mm	Modulus GPa	Strength GPa	Features
Polypropylene	My	0.018	6.0	6.4	0.250	Surface treatment by Iron hydroxide
	TI	0.040 x 0.215	6.0	12.0	0.490	Split film
Alkaline resistant glass	Ar	0.018 (Mono-filament)	6.0	74.0	1.400	Bundle of 200pcs.

Table 2 Mix proportions of composites with monolithic reinforcement

Fiber	Mixture name	Cement vol. %	Powdered silica vol. %	Fiber vol. %	MC vol. %	Water vol. %	W/C wt. %	W/B wt. %
Plain	PI	30.1	32.0	0.0	1.4	36.5	38.0	20.0
	TI-18	29.1	32.9	1.8	1.4	34.8	38.0	19.0
PP	My-18	29.1	32.9	1.8	1.4	34.8	38.0	19.0
	My-36	28.6	32.3	3.6	1.4	34.1	38.0	19.0
	My-54	27.9	31.4	5.4	1.4	33.9	38.0	20.0
	Ar-18	29.1	32.9	1.8	1.4	34.8	38.0	19.0
ARG	Ar-36	28.6	32.3	3.6	1.4	34.1	38.0	19.0
	Ar-54	27.9	31.4	5.4	1.4	33.9	38.0	20.0

Table 3 Mix proportions of composites with hybrid reinforcement

Fiber	Mixture name	Cement vol. %	Powdered silica vol. %	Fiber		MC vol. %	Water vol. %	W/C wt. %	W/B wt. %
				Ar	TI				
	AT-1810	29.5	31.0	1.8	1.0	1.4	35.3	38.0	20.0
Hybrid	AT-3610	28.8	30.8	3.6	1.0	1.4	34.4	38.0	20.0
	AT-5410	28.1	30.6	5.4	1.0	1.4	33.5	38.0	20.0

2.2 調合

調合は微粉からなる押出成形調合で、容積比を**Table 2**に示す。水セメント比(W/C)、水粉体比(W/B)は各調合で同一となるように定めた。また繊維の体積含有率をTIで1.8%、MyとArで1.8%から5.4%の3水準に設定した。さらに、これら単独繊維で補強されたもの以外に、Ar-18、Ar-36、Ar-54調合それぞれにTIを1%追加したハイブリッド補強調合を定めた。**(Table 3参照)**

2.3 混練と成形

容量20Lのホバートミキサーを使用して、粉体のみで1分間空練りをし、その後、水を添加して2～3分間混練し、材料が一つにまとまる直前に繊維を添加して、更に3分間混練して粘土状に仕上げた。

成形には、真空脱気室を有しオーガースクリュー直径が75mmの押出成形機を使用した。成形金型は、断面形状が40mm×40mmまたは40mm×15mmのものを使用して、それぞれ破壊靱性試験用、曲げ試験用の試験体を作成した。

成形後の試験体は20℃、湿度95%の養生室に静置し、その後高温高圧養生(150℃、476kPa、8時間保持)を行った。なお、繊維補強のない試験体として、10℃基準の養生積算温度を同一とした蒸気養生(80℃、16時間保持)のものも追加した。

2.4 試験体

養生後、成形体をダイヤモンドソーで長さ160mmに切断し、平面研削盤で表面を研磨した。各実験水準毎に曲げ、破壊靱性試験用の試

験体を3体ずつ準備した。試験体は含水率のばらつきを避ける為、試験まで湿空養生室内に静置した。

2.5 曲げ試験

断面形状が40mm×15mmの金型で成形された試験体を用い、載荷速度0.002mm/S、支点間距離150mmの中央集中載荷によって曲げ試験を行った。得られた荷重－中央部たわみ曲線の代表例（ひび割れ荷重が3体の中央値であるもの）を**Fig.1**に示す。またそれら代表例から求めた初期ひび割れ曲げ強度、曲げヤング率を**Table 4**に示す。測定された3体間でのばらつきの最大は、表に示す代表値(3体の中央値)から強度で約15%，弾性率で約8%である。

本論文では、後の考察に関連する挙動の特徴だけを述べる。まず、**Fig.1(b)**は、同一含有率の試験体の比較であるが、TIでは2本ひび割れるのに対し、Myでは1本である。また、**Fig.1(c)**で、繊維含有率が増えるに従って靱性が向上し、My-36ではTI-18と同様に2本のひび割れをし、My-54では多数のひび割れをしている。**Fig.1(d)**では、Arの含有率が増えるに従って、より脆性的な破壊挙動を示した。しかし**Fig.1(e)**から、PP繊維の効果によってその傾向はうち消されるのが分かる。

2.6 破壊靱性試験

断面形状が40mm×40mmの金型で成形された成形体の中央にダイヤモンドソーで、幅1mm、高さ半分まで切欠を導入し、試験体とした。油圧サーボ式試験機を用いて、載荷速度0.002mm/S、支点間距離150mmの中央集中載荷によって切欠梁の曲げ試験を行い、荷重と中央部のたわみ、亀裂開口変位(COD)を連続的に計測した。

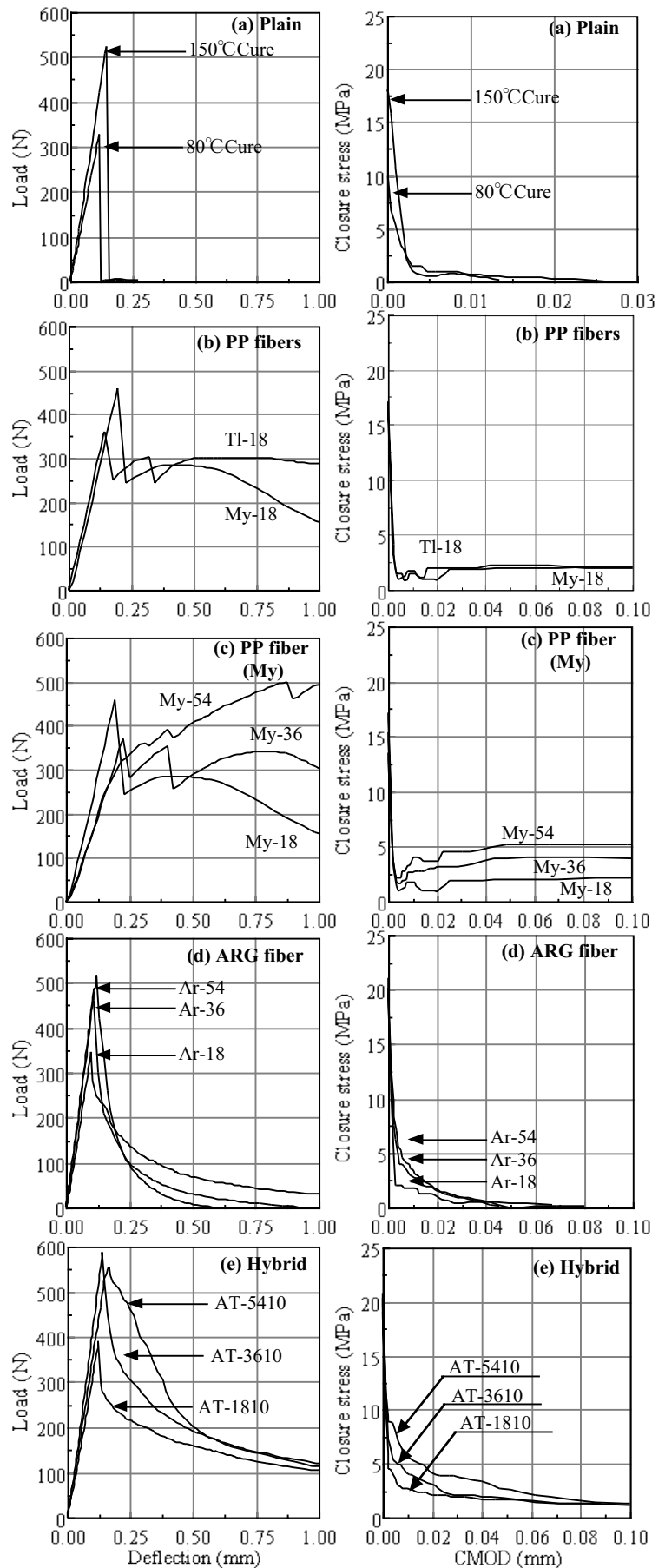


Fig.1 Bending behavior

Fig.2 Tension softening diagram

3. 解析

3.1 引張軟化曲線の推定

得られた荷重－COD曲線をもとに、標準試験法⁵⁾に従って多直線近似法による逆解析を行い、引張軟化曲線(TSD)を得た。得られたTSDの代表例（軟化開始応力が3体の中央値を示したもの）をFig.2に、軟化開始応力をTable 4に示す。

Fig.2(b)から、Tl-18とMy-18ではCODが0.1mmまでの範囲で大差ないことが分かる。またFig.2(c)～(e)から、繊維の含有量に対応する明確な引張軟化挙動の差異が確認できるが、これだけで曲げ挙動の説明をするのは困難である。

3.2 繊維架橋応力

既往の研究⁴⁾で、TSDから繊維架橋応力を求める方法を示しているので、ここではその最終結果のみを引用する。但し、引用に当たって以下の2点の変更を加えた。

第一点は繊維架橋応力が原点を通るようにした点である。求めた結果のままでは、PP繊維補強の場合は架橋応力が負の値から、ARG繊維補強の場合は架橋応力が正の値から始まる。これは、軟化開始応力が繊維補強によるノッチ効果⁶⁾で低下(PP繊維)、またはピンチング効果⁷⁾などによって上昇(ARG繊維)したためであると考えられる。

著者は、この軟化開始応力の変動が初期の繊維架橋応力を原点から移動させたと考え、以下のように軟化開始応力の変動を取り除いた。

Fig.3はCODが4 μ mまでの繊維架橋応力を示したものであるが、PP、ARG両繊維ともCODが3 μ m程度の部分から、繊維架橋応力の全体的傾向を示し始め、繊維量に比例した大きさの架橋応力となっている。従って、本研究では3 μ mの架橋応力と原点とを結ぶ直線を、軟化開始応力の変動の影響を省いた架橋応力とした。

また、第二の変更点は繊維架橋応力をスムーズ化したことである。TSDは多直線近似による結果であるため、滑らかでない部分を生じる。そこで、3点毎の平均化処理によってスムーズ化し、局所的な変動と思われる点は省いた。最

Table 4 Mechanical properties of composites

Fiber	Mixture name	Tension softening stress	Flexural properties	
		MPa	Strength MPa	Modulus GPa
Plain	80°C Cure	9.7	10.3	19.2
	150°C Cure	18.1	15.4	21.5
	Tl-18	17.0	12.3	21.4
PP	My-18	17.2	14.8	20.8
	My-36	15.4	14.5	19.8
	My-54	13.5	7.9	19.7
ARG	Ar-18	19.7	11.6	21.9
	Ar-36	20.1	14.0	24.2
	Ar-54	21.0	15.4	24.4
Hybrid	AT-1810	19.1	12.6	21.5
	AT-3610	20.1	14.0	24.2
	AT-5410	21.0	15.4	24.4

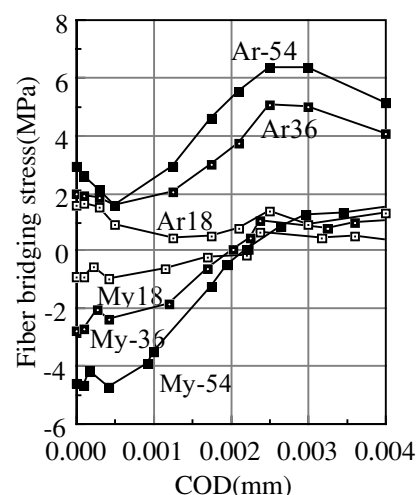


Fig.3 Fiber bridging stress at early stage

最終的に得られた繊維架橋応力はFig.4に示す。

4. 考察

曲げ試験におけるひび割れ前後のエネルギーを二つの方法によって計算し、ひび割れ後の挙動との関係を考察した。第一は試験体全体のエネルギーに関するもので、ひずみエネルギーがひび割れ部で全て吸収されると仮定する方法、第二はひび割れ先端部でのエネルギー解放(J積分値)に着目した方法である。

(1) ひずみエネルギーに関するバランス

ひび割れの原動力は、試験機と試験体に蓄えられたひずみエネルギー(単位N-mm)であるが、試験機に蓄えられたものを無視して、既往の研究³⁾を参考に、次式に従って計算した。

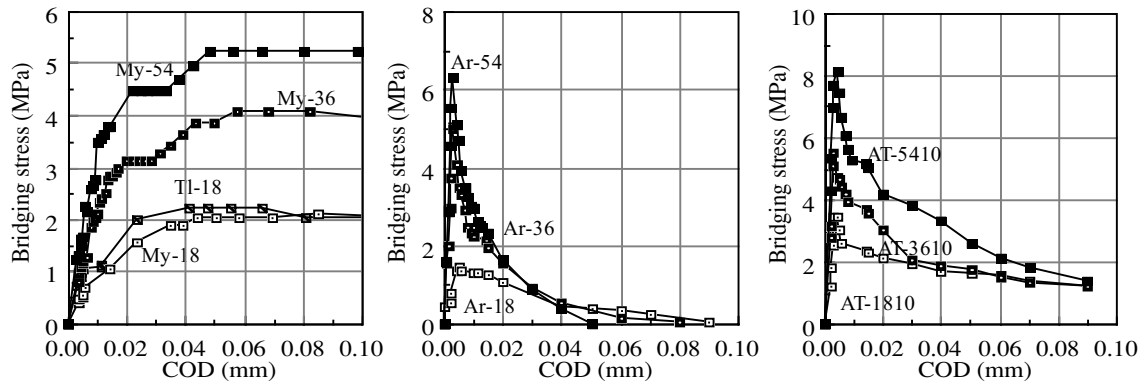


Fig.4 Bridging stress of composites reinforced with PP and ARG

$$W = \iiint w dx dy dz = \frac{1}{12} F_b \epsilon_b H B L \quad (1)$$

ここで、 W はひずみエネルギーで、ひずみエネルギー密度 w を体積全体で積分して求められる。断面内の応力分布が線形であると仮定すれば、曲げ強度 F_b 、縁ひずみ ϵ_b 、断面高さ H 、幅 B 、スパン L によって計算できることを示している。

ところで、荷重点下に一本だけひび割れが発生し、徐々に開くことによってたわみが大きくなり、ひび割れ直前のたわみと同一となる状態を考える。この時、ひび割れの進展によってTSDと x 、 y 軸で囲まれる範囲に対応するエネルギーが消費される。この値は、既往の研究³⁾を参考にして下式に従って計算した。

$$E = B \int_0^H \int_0^c \sigma(c) dc dy \quad (2)$$

ここで、 E はTSDによって吸収されるエネルギーで、引張軟化応力 $\sigma(c)$ を幅 B について、断面高さ H 、ひび割れ幅 c まで積分することで求められる。

以上から得られたひずみエネルギーとTSDによる吸収エネルギーとは、たわみが変わっていないとき、発音などのエネルギー散逸がなければ釣り合うことになる。この関係をFig.5に示す。この図から、Arシリーズはグラフの対角線近辺に並んでおり、上述の仮定が満足されたことを表している。一方、対角線上方に位置するものは発音など他のエネルギー放出があったこと(Pl,

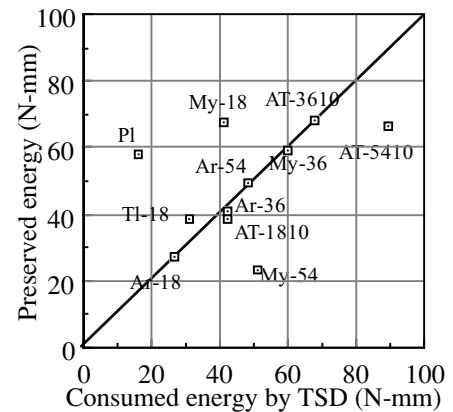


Fig.5 Consumed and preserved energy

My-18)、また下方に位置するものは複数ひび割れが発生してエネルギー吸収のメカニズムが違っていること(My-54)を示している。

なお、Fig.1で見たように、二本のひび割れをした試験体(Tl-18, My-36)は、明らかにMy-18とは異なり、Arシリーズと同様のエネルギーバランスであることが分かる。しかし、ArシリーズとATシリーズとのグラフ上の差は、AT-5410を除き、わずかであった。

(2) J積分値に関するバランス

Marshallらの理論⁸⁾を元に展開された関田らの研究⁹⁾に従って、ひび割れ分散に関する検討を行なった。この理論は、ひび割れが分散するには、ひび割れを閉じようとする応力(繊維架橋応力)によるコンプリメンタリエネルギー(J_b)が、ひび割れ先端で解放されるエネルギーであるJ積分値(J_{tip})よりも大でなければならないというものである。つまり、 J_{tip} と比較して J_b が大きければ、ひび割れ分散に対する性能は優れており、

高靱性となるはずである。既往の研究⁹⁾に従って、 J_{tip} を次式により計算した。

$$J_{tip} = \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad (3)$$

ここで、 K_{Ic} は材料の応力拡大係数で、本研究の破壊靱性試験結果を用い、線形破壊力学の式¹⁰⁾を参照して計算した。また E はヤング率で、Table 4の結果を用いた。

また J_b は、4.1項と同様に、ひび割れ直前のたわみを生じるためのひび割れ幅までとした。

以上から得られた J_b と J_{tip} との関係をFig.6に示す。この図は、My-54とMy-36がエネルギー的に近接している事、およびArシリーズとATシリーズとはエネルギー的に差がある事を的確に示している。しかし、My-18とTI-18の違いは、このグラフ上では不明瞭である。

5. まとめ

PP、ARGおよび両者で補強されたセメント系複合材料に関して、曲げひび割れ前後のエネルギーバランスを検討した。その結果、下記の二点は、ひび割れ後の曲げ挙動と大いに関係があり、両者を総合的に評価することにより、ひび割れ分散による靱性向上を的確に予測できることが明らかとなった。

- (1) 曲げひび割れ直前のひずみエネルギーと、同一たわみに至るまでのTSDによる吸収エネルギーとの比較
- (2) 繊維架橋応力によるコンプリメンタリエネルギー J_b と、ひび割れによる供給エネルギーである J_{tip} との比較

参考文献

- 1) 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う，JCI，128 pages，2002
- 2) 山本基由，山田寛次：オートクレーブ養生温度を変えたPP短繊維補強セメント材料の曲げ挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，

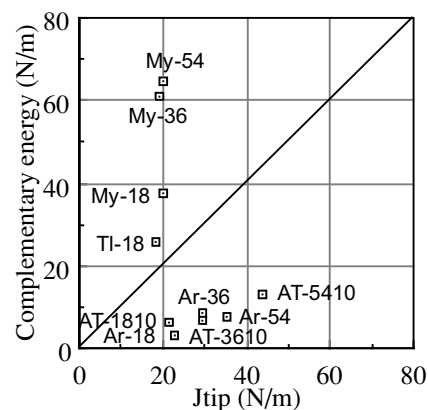


Fig.6 J_{tip} and complementary energy

pp.231-236, 2002

- 3) Yamada, K, Ishiyama, S and Homma, T: Tension softening properties approach to enhancement of ductility of extruded cement composites, Proceedings of DFRCC-2002, pp.103-112, 2002
- 4) 山田寛次，石山 智：ひび割れ初期におけるセメント複合材料の繊維架橋応力，高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，pp. 31-36, 2003
- 5) 橘高義典，内田裕市：コンクリートの破壊特性の標準試験法，コンクリート工学，Vol.40，No.2，pp.8-15, 2002
- 6) 山田寛次，三橋博三：ポリアリレン短繊維補強セメント系押出成形材料の高靱性化のメカニズムに関する考察，日本建築学会構造系論文報告集，No.520，pp.1-8, 1999
- 7) Romualdi, J. P. and Batson, G. B.: Behavior of reinforced concrete beams with closely spaced reinforcement, Journal of ACI, No.60, pp. 775-789, 1963
- 8) Marshall, D. B. and Cox, B. N.: A J-integral method for calculating steady-state matrix cracking stresses in composites, Mechanics of Materials, Vol.7, No.8, pp.127-133, 1988
- 9) 閑田徹志，Li, V. C.：擬似ひずみ硬化性引張挙動を有する短繊維補強セメント複合材料の設計ガイドライン，日本建築学会構造系論文集，No.552，pp.13-21, 2002
- 10) 例えば，西田俊彦，安田栄一：セラミックスの力学特性評価，日刊工業新聞社，240 pages，1986