

論文

[1196] ハイブリッド繊維補強セメント複合体の引張挙動とモデル化

大野 定俊^{*1}、柿沢 忠弘^{*2}

1. はじめに

繊維補強はコンクリートなどの脆性材料のひびわれ耐力の向上、ひびわれ制御、靱性の向上などを目的として行われている。現在、こうした補強用繊維には鋼、ガラス、炭素繊維をはじめ種々の力学的特性を有するものが利用されているが、通常繊維補強セメント複合体は加工繊維のような特殊な用途のものを除くと、一種類の繊維で補強されるものが一般的である。しかし、補強繊維の形態や力学的特性上の制約から一種類の繊維による補強では目的とした補強効果を十分に得られない場合がある。このような場合、2種類以上の異なる特性を持つ繊維で補強する方法が有効であることが知られている。しかし、繊維の種類、形態は非常に多様であるため、適切な組み合わせ方法に関する基礎的なデータは十分に蓄積されておらず、複合体の特性をコントロールするための基本的な考え方も整理されていないのが現状である。本研究では、異なる2種類の繊維で補強した複合体の基礎的なデータを得るために、その引張挙動について実験的に明らかにするとともに、その挙動をモデル化するための基本的な考え方について考察した。

2. ハイブリッド繊維補強セメント複合体の引張挙動

2.1 実験計画

ハイブリッド補強に関して、非常に多くの種類の繊維の組み合わせが考えられるが、本研究ではモデル化への展開も考慮して連続繊維を中心に用いることとした。補強繊維の組み合わせを表-1の実験計画表に示す。表に示すように、炭素、アラミド繊維の3軸メッシュを主補強材として、ビニロン3軸メッシュ、フィブリル(小繊維)化したポリプロピレン繊維ネット、およびガラス短繊維を組み合わせ用いた(写真-1参照)。

純引張試験はそれぞれ単体の補強と2種類の繊維を組み合わせ補強したものの両者について実施した。

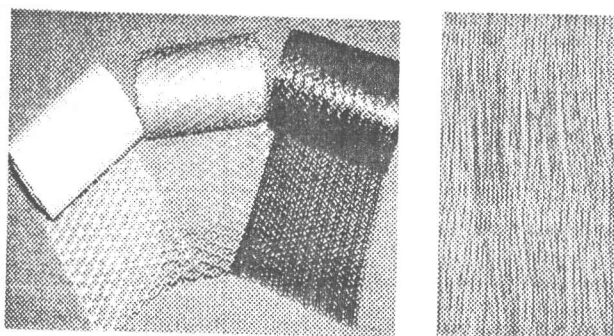


写真-1 3軸メッシュおよびフィブリル化ポリプロピレン繊維ネット

表-1 実験計画表

試験体名称	補強繊維		繊維量 (%)	
	主	副	Vf1	Vf2
C3		—	1.07	-
C4			1.26	-
C5			1.41	-
CV-34	炭素 3軸 メッシュ	ビニロン	0.61	1.48
CV-44		3軸	0.85	1.56
CV-54		メッシュ	0.99	1.82
CP-23	アラミド	フィブリル	0.68	3.01
CP-33		ポリプロ	0.96	3.01
CP-43		ピレン	0.90	2.98
A2		—	0.73	-
A3			1.21	-
A4			1.45	-
AV-23	アラミド 3軸 メッシュ	ビニロン	0.80	1.76
AV-33		3軸	1.06	1.56
AV-43		メッシュ	1.32	1.46
AG-32		ガラス	1.20	2.00
AG-42		短繊維	1.48	2.00

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 基礎研究部, Ph.D., (正会員)

*2 (株)竹中工務店 技術研究所 基礎研究部, (正会員)

2.2 使用材料および試験方法

試験に用いた各繊維素材の材料特性を表-2に示す。実験にはこれらの繊維を3軸のメッシュやフィブリル化ネットに加工したものを補強材として用いた。表-3にメッシュの繊維束の詳細を示した。マトリックスは繊維束への浸透性や流動性および収縮、強度等のバランスを考慮して表-4に示す配合を採用した。試験用の複合体はハンドレイアップ法（積層法）で作成し、試験時に所定の寸法に切断して用いた。引張試験体は50x5x600mmの寸法のクーボン試験体で両端部をアルミ板で補強し、純引張試験に供した。測定は引張载荷時の荷重と変形であり、変形は試験体中央部の100mm区間の変化を直接変位計で測定した（写真-2参照）。

表-2 使用繊維の特性

繊維種類	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	伸び (%)	比重	繊維直径 (μm)
炭素繊維	2200	210	1.5	2	10
アラミド繊維	3040	70	4.4	1.39	12
ビニロン繊維	740	12	3~7	1.3	14
ポリプロピレン	550	7~15	5~8	0.93	-
ガラス繊維	2100	74	2~3	2.7	12

表-3 メッシュの繊維束

種類	繊維束形態			繊維直径 μm
	繊維束数 (本)	繊維束間隔	断面積 (mm ²)	
炭素繊維3軸メッシュ	2000	10 mm	0.157	10
アラミド3軸メッシュ	3000	12 mm	0.339	12
ビニロン3軸メッシュ	1880	10 mm	0.288	14
フィブリル化ポリプロピレン	—			100~200 x 90

2.3 結果と考察

図-1 (a)-(f) に各試験体の引張応力-ひずみ関係を、また表-5に試験結果を示した。連続繊維で補強した複合体の応力-ひずみ関係はひびわれ発生までの弾性域、ひびわれ発生応力を維持したまま次々とひびわれが発生するひびわれ多発域、ひびわれの発生が終了し、応力、ひずみが漸増し補強繊維の破断等によって終局荷重に至るひびわれ終了域の3つの領域から構成されることが知られている。本実験で得られた

表-4 セメントマトリックスの配合

w/c	s/c	セメント C	水 W	珪砂		減水剤 (C・%)
				S1 (6号)	S2 (7号)	
0.3	0.7	1.0	0.3	0.53	0.17	1.25

表-5 引張試験結果

試験体名称	繊維量(%)		引張強度 (MPa)	ひびわれ多発域終了ひずみ (%)		ひびわれ多発終了域の剛性 (MPa)	終局ひずみ (%)
	主補強材 Vf1	副補強材 Vf2		第1領域 ^{*1}	第2領域 ^{*2}		
C3	1.07	-	18.6	-	0.22	2320	0.65
C4	1.26	-	21.4	-	0.12	2880	0.48
C5	1.41	-	18.5	-	0.10	3590	0.49
CV-34	0.61	1.48	12.7	-	0.23	1320	0.61
CV-44	0.85	1.56	16.4	-	0.20	1980	0.64
CV-54	0.99	1.82	18.1	-	0.15	2340	0.61
CP-23	0.68	3.01	17.6	0.19	0.26	1690	0.69
CP-33	0.96	3.01	19.5	0.14	0.22	2450	0.73
CP-43	0.90	2.98	24.0	0.15	0.25	2090	0.73
A2	0.73	-	10.8	0.28	0.60	533	1.46
A3	1.21	-	17.4	0.25	0.49	853	1.54
A4	1.45	-	17.7	0.18	0.44	862	1.58
AV-23	0.80	1.76	17.7	0.12	0.60	633	2.10
AV-33	1.06	1.56	19.5	0.07	0.60	886	1.54
AV-43	1.32	1.46	22.0	0.07	0.45	906	1.81
AG-32	1.20	2.00	28.0	-	-	980	2.10
AG-42	1.48	2.00	29.5	-	-	982	2.24

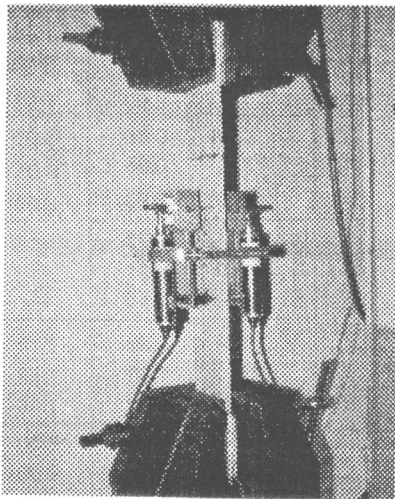


写真-2 引張変位の測定状況

- *1 新たなひびわれ発生のために応力が増加に転じるひずみ点
- *2 ひびわれ発生が最終的に終了するひずみ

引張応力-ひずみ曲線も基本的にこの3つの領域から構成されていると見なすことができる。2種類以上の繊維で補強される場合、繊維の強度、弾性率、2種の繊維の体積率の比、付着強度（応力の伝達率）などの要因がその挙動に影響を及ぼすと考えられる。補強繊維の影響は複合体のひびわれ発生後に大きく現れると考えられるが、実験結果から評価できるのは、ひびわれ多発域の終了ひずみと傾き、ひびわれ終了域の傾きなどであり、個々の繊維の影響度を分離して評価することは困難である。

炭素繊維の3軸メッシュを主補強材として用いた複合体の応力-ひずみ関係を見ると、炭素繊維メッシュ単体(Cシリーズ)の図-1(a)では、ひびわれ発生応力は5.5MPaから8MPaであり、繊維量が多くなるとひびわれ発生応力が高くなっている。また、繊維量が多くなるとひびわれ多発域での応力上昇が顕著であり、ひびわれ多発域の終了ひずみも小さくなっている。ひびわれ多発域の終了ひずみは以下に示す摩擦付着応力伝達に基づくACKモデルの式から算定される。

$$\epsilon_{cre} = (1 + 0.659 E_m V_m / E_f V_f) \epsilon_{mu} \quad (2-1)$$

上式によるC3~C5のひびわれ多発域終了ひずみは、それぞれ0.20, 0.17, 0.15%であり、表-5に示す実測値よりやや大きい、ほぼ対応しているものと考えられる。ひびわれ終了域の傾きは $E_f V_f$ の値とほぼ一致している。終局ひずみは0.5~0.6%、引張強度は18~21MPaであり、C2~C4いずれの試験体も $\sigma_f V_f$ から予測される引張強度の約80%程度の値となっている。これは、繊維束中の個々の繊維が均等に応力を分担しないことと、繊維束の配向状態の両者の影響が考えられる。炭素繊維メッシュとビニロン繊維メッシュを組み合わせ用いた複合体(CVシリーズ)の引張挙動は全体的に見て、ビニロン繊維よりも炭素繊維メッシュの影響を大きく受けている。たとえ

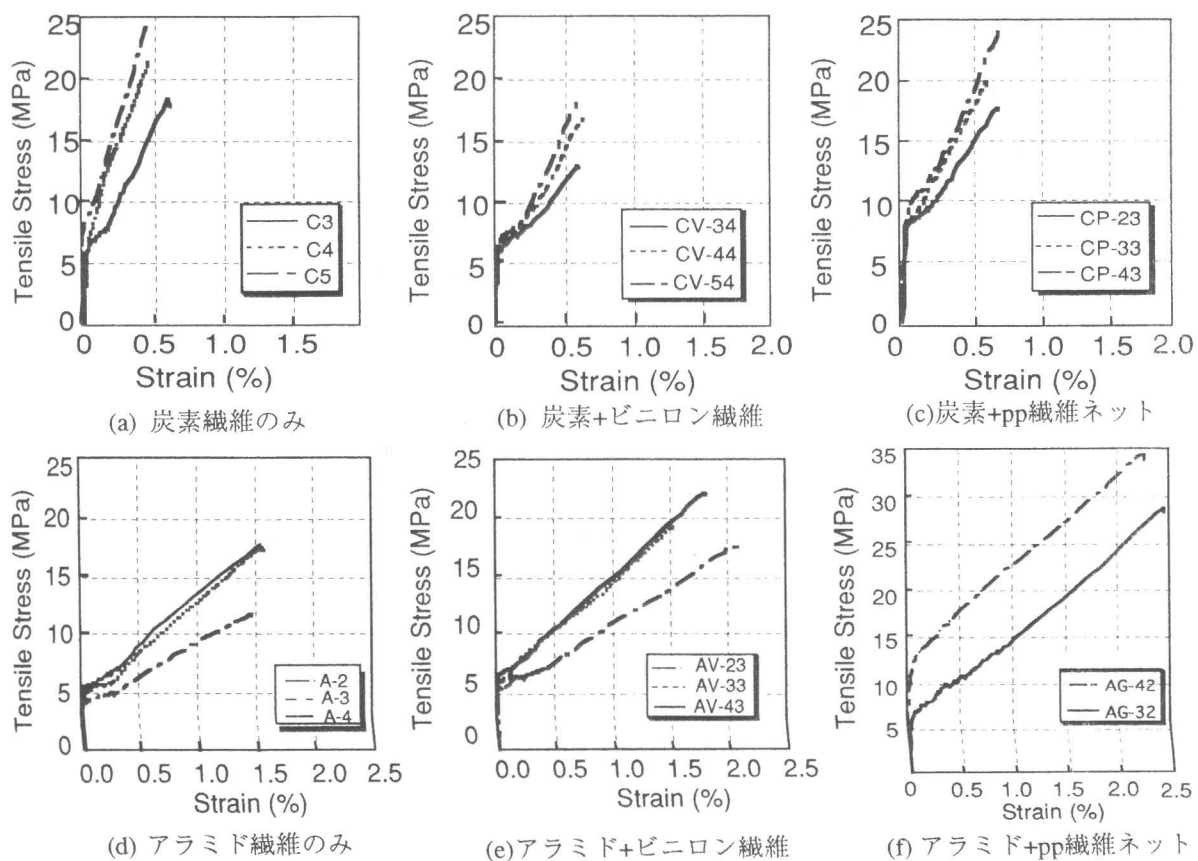


図-1 各種繊維補強セメント複合体の引張応力-ひずみ関係

ば、炭素繊維量がほぼ同じであるC3とCV54を比較すると、その引張挙動はCV54の方がひびわれ発生応力がわずかに大きく、ひびわれ多発域の終了ひずみがやや小さくなるものの、両者の応力ひずみ関係はほとんど一致している。これは両者の付着特性の差が大きくなり、かつ弾性係数は炭素繊維の方がビニロン繊維よりかなり高いために、ビニロン繊維の応力分担が小さくなるためと考えられる。一方、炭素繊維メッシュとポリプロピレン繊維ネットを組み合わせて用いた複合体(CPシリーズ)は、炭素繊維の体積率が0.68~0.96%とCシリーズよりも低いが、ひびわれ発生応力は8~9MPaとC2に比べかなり高くなっている。ひびわれ多発域、終了域の応力勾配はほぼ同じである。これに対し、終局ひずみは0.6~0.7%とやや大きくなっている。これはポリプロピレン繊維ネットがその形態からも窺われるように、付着特性が良好なことに起因しているものと思われる。

アラミド繊維3軸メッシュで補強した複合体(Aシリーズ)のひびわれ発生応力は4.5~5.5 MPa程度で炭素繊維メッシュよりやや低い値であるが、繊維の伸び能力が大きいため複合体の終局ひずみもCシリーズの約3倍の値を示している。複合体の終局状態は必ずしも繊維束がすべて破断しておらず、付着切れ、繊維の抜けだしを伴ったものとなっている。

また、ビニロン繊維メッシュと組み合わせたAVシリーズはひびわれ発生応力がわずかに高くなると共に、終局ひずみの伸びが認められる。これは、CVシリーズに比べればアラミドとビニロン繊維の弾性係数、伸び能力、付着性状などの特性の差が小さいことに起因していると考えられる。これに対し、ガラス短繊維を併用したAGシリーズはひびわれ発生応力の上昇、ひびわれ多発域での顕著な応力上昇が認められた。ガラスとアラミド繊維の弾性係数はほぼ同じであること、ガラス繊維の混入率がやや高いこと、良好な付着特性などの理由からひびわれ発生応力や多発域のレベルで補強効果が現れたものと考えられる。また、AGシリーズの場合、ガラス繊維の混入により終局状態の付着切れ、繊維の抜けだしが抑制され、終局強度の上昇につながったと思われる。

一方、全ての試験体についてひびわれ多発域の終了ひずみと $E_{f1}V_{f1}+E_{f2}V_{f2}$ との関係を図-2に示した。限られたデータから両者の相関を論じるのは困難であるが、基本的には1種類の繊維で補強した場合と同様な関係(式2.1参照)のあることが窺われる。また、図-3にひびわれ終了域の剛性と $E_{f1}V_{f1}+E_{f2}V_{f2}$ との関係を示す。図から明らかなように両者はよく一致していることが認められる。すなわち、補強繊維が途中で破断したり、抜け出したりしなければ、ひびわれ終了域の剛性は2種類以上の繊維で補強される場合においても、 $\sum_{i=1}^n E_n V_n$ で表されると考えてよい。

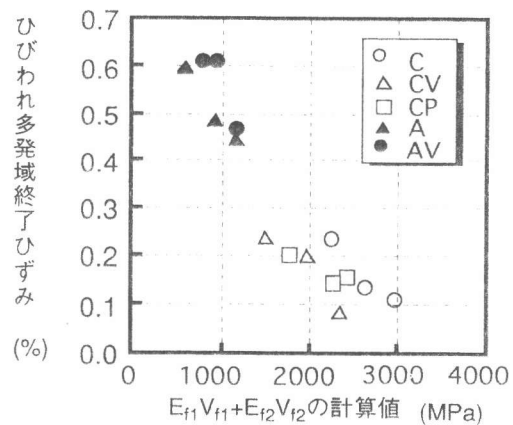


図-2 ひびわれ多発域終了ひずみと $E_{f1}V_{f1}+E_{f2}V_{f2}$ の計算値の関係

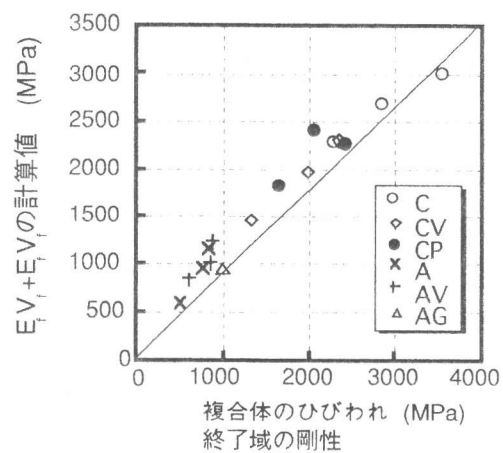


図-3 ひびわれ終了域の剛性と $E_{f1}V_{f1}+E_{f2}V_{f2}$ の計算値の関係

3. 引張挙動のモデル化

ハイブリッド繊維補強複合体の引張挙動をモデル化する場合、種々のモデル化が考えられるが、ここでは最も単純なAveston等[1]の摩擦付着応力伝達モデルをベースにモデル化を考えることとした。このモデル化は著者等が繊維あるいは繊維束中の滑りを仮定して繊維補強複合体の引張挙動をモデル化した場合と同様な手順で行うことが可能である[2]。モデル化の基本仮定は、(i)マトリックスおよび繊維は弾性的に挙動する、(ii) 繊維とマトリックス間の応力伝達は界面で一定に作用する摩擦付着応力によって伝達される、等である。マトリックスにひびわれが入った時の、ひびわれ面近くのひずみ分布を図-4に示す。ひびわれが発生するとひびわれ面ではマトリックスの連続性が失われるのでマトリックスのひずみと負担応力はゼロとなる。その応力は全て繊維によって負担されることになり、この場合、2種の繊維によって受け持たれる応力は、繊維の弾性係数、体積率、応力伝達能力(付着力)等によって支配される。図-4に示すひずみ分布に対し、 $0 \sim x_1$ および $x_1 \sim x_2$ の区間でのマトリックスと各繊維間の付着応力伝達(2、3式)、複合体の各断面で力のバランス(1、4式)、繊維の長さ方向の変形の適合条件(5、6式)を考慮して以下の6つ式が導かれる。

$$E_{f1} V_{f1} \epsilon_{f1} + E_{f2} V_{f2} \epsilon_{f2} = E_c \epsilon_{mu} \quad (3-1)$$

$$(P_1 \tau_1 \frac{V_{f1}}{A_{f1}} + P_2 \tau_2 \frac{V_{f2}}{A_{f2}}) x_1 = E_m V_m \epsilon_{fi} \quad (3-2)$$

$$P_2 \tau_2 \frac{V_{f2}}{A_{f2}} (x_2 - x_1) = (\epsilon_{mu} - \epsilon_{fi}) (E_m V_m + E_{f2} V_{f2}) \quad (3-3)$$

$$\epsilon_{f2i} E_{f2} V_{f2} = \epsilon_{fi} (E_m V_m + E_{f2} V_{f2}) \quad (3-4)$$

$$\epsilon_{f2i} x_2 = (\epsilon_{f2} - \epsilon_{mu}) (x_2 - x_1) \quad (3-5)$$

$$x_2 (\epsilon_{f2} - \epsilon_{fi}) = x_1 (\epsilon_{f1} - \epsilon_{mu}) \quad (3-6)$$

以上6式の中で未知数は $x_1, x_2, \epsilon_{f1}, \epsilon_{f2}, \epsilon_{fi}, \epsilon_{f2i}$ の6個であるので、これらの連立方程式を解くことによって求められる。この条件下では、マトリックスのひずみはひびわれ面から x_2 以上離れた位置で ϵ_{mu} となるので、その領域でまた新たにひびわれが入る。それ故、ACK理論の場合と同様に、マトリックスはひびわれ発生荷重と同じ荷重レベルで複合体が x_2 から $2x_2$ の間の長さのブロックに分割されるまで、ひびわれが次々と形成されていく。その後もこのモデルでは繊維1とマトリックス間の応力伝達は維持されるので、作用応力が増加すれば、さらにひびわれが発生する。最終的には複合体が $2x_1$ 以下の長さのブロックに分割されると新たにひびわれは発生しなくなる。 $x < 2x_2$ の時の繊維とマトリックスのひずみ分布を図-5に示す。図-5の x のひずみ分布に対しても(3-1)~(3-6)と同

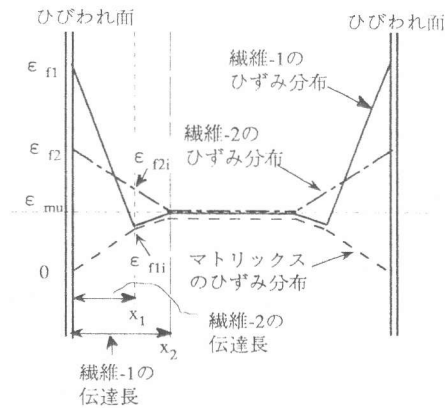


図4 ひびわれ近傍のひずみ分布 (ひびわれ間隔 $>2x_2$)

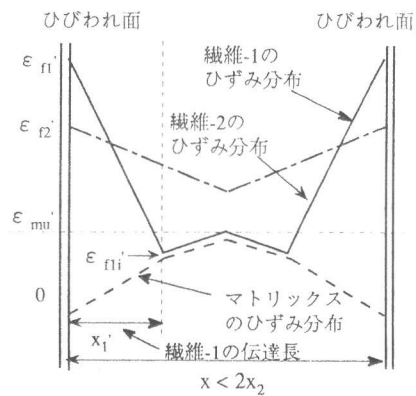


図5 ひびわれ近傍のひずみ分布 (ひびわれ間隔 $<2x_2$)

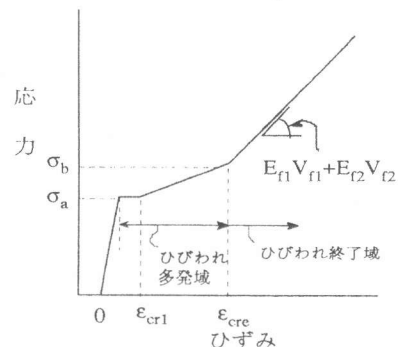


図6 算定される応力-ひずみ関係

様の連立方程式を導くことにより、 ϵ_{f1}' , ϵ_{f2}' , ϵ_{m1}' , x_1' の値が求められる。また、複合体の応力-ひずみ関係は図-4、図-5の状態をもとに計算された繊維とマトリックスのひずみ分布をもとに計算される。本モデルから得られる応力-ひずみ関係を模式的に表すと図-6に示すようになる。この応力-ひずみ関係はひびわれ多発域の後半部分で応力勾配を持つこと、ひびわれ終了域の傾きが $E_{f1}V_{f1}+E_{f2}V_{f2}$ となることが特徴である。ただし、ハイブリッド繊維補強の場合、終局状態で2種類の繊維が同時に破断することはまれであり、どちらか一方が先に破断したり、付着力を失って抜け出すことが一般的である。この場合、もう一方の繊維に十分な耐荷力があれば、マトリックスにひびわれが入った時と同様、応力の再分配が起こる。Xu等[3]はフィブリル化ポリプロピレン繊維ネットとガラス短繊維あるいはガラス連続繊維と組み合わせることにより、図-7のハイブリッド繊維補強複合体の応力-ひずみ関係を表すと図-8のように示される。応力-ひずみ曲線の経路は一方の繊維の破断が急激に起こるか、徐々に起こるか、或いは短繊維が抜け出す場合などのケースによって異なるが、破断によってもう一方の繊維に伝達される応力、ひずみの増分が算定されれば繊維破断時の複合体の応力、ひずみ状態が求められる。繊維破断後の複合体の応力-ひずみ勾配は破断した繊維分の剛性が低下し、残った繊維の剛性 $E_{f1}V_{f1}$ となる。短繊維の場合は複雑となるがLaws等[4]の方法に基づけば同様なモデル化が可能であると考えられる。

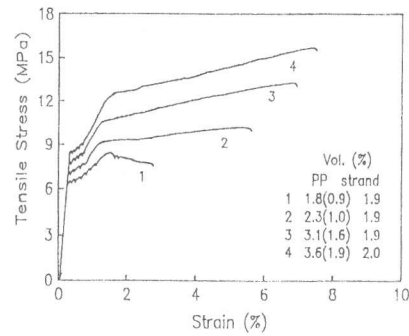


図-7 PPメッシュ・ガラス短繊維ハイブリッド補強セメントの応力ひずみ曲線

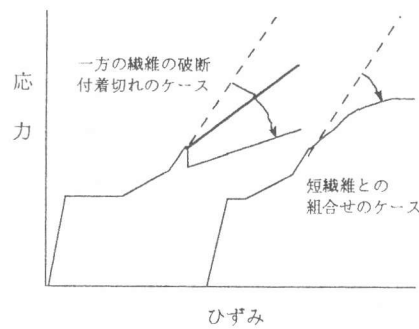


図-8 ハイブリッド補強セメントの応力ひずみ曲線の終局時のパターン

4. まとめ

本論文では異なる2種類の繊維で補強した複合体の引張挙動について実験的に明らかにするとともに、その挙動をモデル化するための基本的な考え方について考察した。炭素、アラミド繊維メッシュを中心に異なる特性の繊維を組み合わせた結果、 E_fV_f の比や付着特性の差によって2種類の繊維の補強効果への影響度が異なることが明らかになった。また、引張挙動に関しては摩擦付着応力伝達を仮定した力学モデルによってモデル化が可能であることが示された。力学モデルの適用性については今後さらに検討してゆく必要があるが、ハイブリッド繊維補強複合体の最適な繊維の組合せや繊維量の設計に有効に活用できるものと考えられる。

記号： E_c ：ひびわれ前の複合体の弾性係数、 V_{f1} , V_{f2} ：繊維1, 2の体積率、 A_{f1} , A_{f2} ：繊維平均断面積
 σ_{mu} ：マトリックスの引張強度、 τ_1 , τ_2 ：繊維1, 2とマトリックス界面の摩擦付着応力
 ϵ_{f1} , ϵ_{f2} ：ひびわれ面での繊維1, 2のひずみ、 ϵ_{m1} , ϵ_{m2} ：ひびわれ面から x_1 位置での繊維1, 2ひずみ
 x_1 , x_2 ：繊維1, 2の応力伝達長、 P_1 , P_2 ：繊維周長、 ϵ_{mu} ：マトリックスのひずみ

参考文献

- [1] Aveston, et al.: 'Single and multiple fracture', Proc. of NPL Conference, IPC Sci. and Tech. Press Ltd., 1971, pp.15-24.
- [2] 大野, Hannant: 連続繊維補強セメント中の繊維-マトリックス間の応力伝達のモデル化, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, 1991, pp.789-794.
- [3] Xu Guodong, Hannant D.J., Synergistic Interaction Between Fibrillated Polypropylene networks and glass fibres in a cement-based composite, Cement & Concrete Composites, 13, 1991, pp.95-106.
- [4] Majumdar, A.L. & Laws, V.: Glass Fibre Reinforced Cement, BSL Pro. Books, 1991, p.197.