

論文 炭素繊維シートによるコンファインドコンクリートの強度・変形特性

小牟禮 建一^{*1}・田垣 欣也^{*2}・中塚 信^{*3}

要旨：低強度から高強度 ($F_0 = 30 \sim 80 \text{ MPa}$) のコンクリートに高強度型および高弾性型の炭素繊維シートを種々の巻き数 (拘束応力指標 $p_f \sigma_{fu} = 1 \sim 24 \text{ MPa}$) で巻き付けたコンファインドコンクリートの単軸圧縮試験を行った。その結果、 $p_f \sigma_{fu}$ の大きさ及び F_0 によって変化する軸応力-軸ひずみ-周方向ひずみ関係、炭素繊維破断点に及ぼす $p_f \sigma_{fu}$ と F_0 の影響を明らかにした。

キーワード：炭素繊維、コンファインドコンクリート、高強度コンクリート、拘束効果

1. はじめに

コンクリートを帶鉄筋やスパイラル筋などによって横拘束した、いわゆるコンファインドコンクリートが曲げ靭性改善に有効であることが実験的・解析的に明らかにされ、その基礎力学特性である単軸圧縮応力下での強度・変形特性に関する研究が種々進められている [1, 2]。一方、最近炭素繊維シートが注目を浴びている [3] が、同繊維が巻き付けられたコンクリート部材において、炭素繊維シートが曲げ圧縮部に及ぼす横拘束効果についてはほとんど明らかではない。さらには、より基本的な単軸圧縮応力を受ける炭素繊維シートによるコンファインドコンクリートについての知見も不足しており、特にコンクリート強度の影響に関する研究はほとんどなされていない [4]。

本研究は、鉄筋のように降伏現象を示さず破断まで完全弾性的に挙動し、また試験体側面に連続的に拘束応力を与える炭素繊維シートを用いたコンファインドコンクリートの基本的な力学特性の追究を目的としている。すなわち、炭素繊維の補強量、剛性、伸び能力、ならびに材料の高強度化という趨勢に沿う広い範囲のコンクリート強度が、同コンファインドコンクリートの強度・変形特性に及ぼす影響を調べようとするものである。

2. 実験概要

実験の概要を表-1に示す。取り上げた要因は、炭素繊維シート（以下、CFシートと略す）の種類（高強度および高弾性タイプ）、コンクリート強度 (F_{0D} ; 30, 60, 80MPa級)、および横拘束応力指標 ($p_f \sigma_{fu}$; 1~24MPa、表-1参照) である。試験体は図-1に示すように、直径が150mm、高さが300mmの無筋円柱コンクリートの周方向にCFシートをそれぞれ所定量巻き付け、エポキシ樹脂を含浸させたものである。なお、巻き付けに際し、シートのラップ長は60mmとした。また、試験体は1試験体種に対し各2体である。

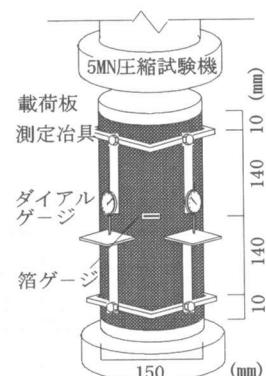


図-1 試験体図

*1 ショーボンド建設（株）西日本技術センター技術部（正会員）

*2 （株）竹中工務店

*3 大阪大学助教授 工学部建築工学科、工博（正会員）

使用した各コンクリートの配合を表-2に、使用したCFシートの樹脂含浸後の力学特性を表-3に示す。載荷は5MN圧縮試験機を用いた単軸圧縮載荷とした。球座は載荷荷重の偏心を取り除いた後に固定し、載荷速度は手動で調整した。試験体の軸方向変形量はダイヤルゲージ式変位変換器を用い、検長280mmで測定した。また、試験体におけるCFシートの周方向ひずみ（以下、周ひずみと略す）は、試験体中央部の対称位置でCFシートに貼付した2枚の箔ひずみゲージ（検長10mm）によって計測した。なお、軸ひずみの測定検長は、プレーンコンクリートからコンファインドコンクリートまで統一的に比較できるように、プレーンコンクリートの破壊領域にほぼ一致する試験体直径の約2倍（280mm）に設定した。

表-1 実験概要

試験体名	高強度繊維シートシリーズ						高弾性繊維シートシリーズ					
	p_f (%)	σ_{f_u} (MPa)	$p_f \sigma_{f_u}$ (MPa)	F _{OD} (MPa)			p_f (%)	σ_{f_u} (MPa)	$p_f \sigma_{f_u}$ (MPa)	F _{OD} (MPa)		
				30	60	80				30	60	80
C04**	0.038	3790	1.41	○			0.036	2510	0.91	○		
C07**			2.81	○	○		0.072		1.82	○	○	
C15**			5.63	○	○	○	0.145		3.64	○	○	○
C22**			8.44	○	○	○	0.217		5.46			○
C30**			11.25	○	○	○	0.290		7.27		○	
C45**			16.88		○	○	0.435		10.91			○
C60**			22.50			○	0.580		14.55			

注) 表中○印は作成試験体を示す。

試験体名 (例 C0436)

$$\begin{cases} F_{OD} = 60 \text{ MPa} \\ \sigma_{f_u} = 3000(2510) \text{ MPa} \\ p_f = \text{約} 0.04\% \end{cases}$$

F_{OD} : コンクリート圧縮強度 (計画値)

p_f : 炭素繊維補強材比 (面積比 = 2 t / D)

t = 炭素繊維換算厚さ (mm)、D = 試験体直径 (mm)

σ_{f_u} : 樹脂含浸炭素繊維シートの引張強度

表-2 コンクリートの配合、および力学特性

F _{OD} (MPa)	W/C (%)	W	C	S	G	SP	F ₀ (MPa)	ϵ_0 (%)
30	0.57	189	332	786	931	0.830	32.4	0.23
60	0.37	175	473	699	939	6.622	57.7	0.27
80	0.30	175	583	1023	947	9.328	75.4	0.30

(注) W:水、C:セメント、S:砂、G:砂利、SP高性能減水材

(単位: kg/m³)

F₀、 ϵ_0 : $\phi 150 \times 300$ mmのプレーンコンクリートの圧縮強度、およびその時の軸ひずみ (3体の平均値)

表-3 樹脂含浸後の炭素繊維シートの力学特性

	σ_{f_u} (MPa)	E _f (MPa)	ϵ_{f_u} (%)
高強度繊維シート	3790	244000	1.55
高弾性繊維シート	2510	441000	0.57

(注) E_f : 樹脂含浸炭素繊維シートの引張弾性率 ϵ_{f_u} : 繊維破断時ひずみ

3. 実験の結果及び考察

3.1 軸応力-軸ひずみ-周ひずみ関係におよぼす拘束応力指標の影響

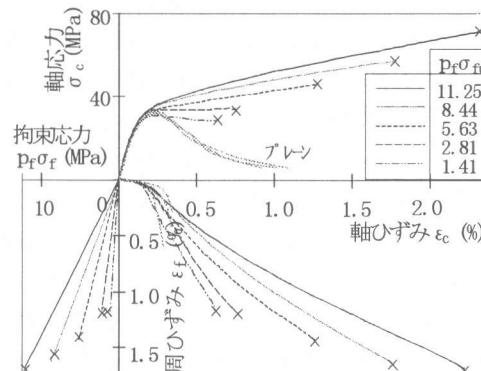
各試験体の軸応力(σ_c)-軸ひずみ(ϵ_c)-周ひずみ(ϵ_f)関係が、拘束応力指標($p_f \sigma_{f_u}$)の変化によってどのような影響を受けるかを高強度CFシリーズの各プレーンコンクリート強度(F₀)ごとに調べた結果を図-2(a)～(c)に示す。1試験体種に関する結果は、2体ともほぼ同様な結果

を示したので、代表的なものを表記した。図中の×印はCFシート破断時を、また、 ε_f は各試験体に貼付した2枚の箇ひずみゲージの平均測定値を示す。

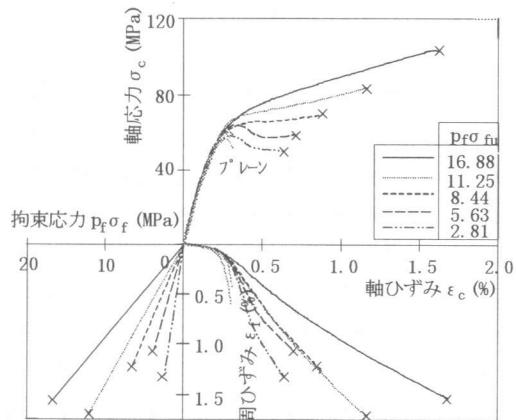
同図によれば、横拘束材がCFシートの場合、 $p_f \sigma_{fu}$ の増大による $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係の変化が鉄筋の場合のそれと異なることが観察される。すなわち、横拘束材が鉄筋のとき、 $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係は、横拘束筋量の多寡に関わらず、プレーンコンクリートとほぼ同じ立ち上がり部に続いて極大点（圧縮強度点）を示し、その後比較的ためらかに応力低下することが一般的である。これに対し、CFシートの場合の $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係は、拘束量が少ないとには鉄筋の場合と同様の傾向（極大値型）になるが、拘束量が増大するに従い、極大点を示さず、CFシートの破断まで単調に応力増加する $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係（単調増大型）へと移行する。横拘束材の相違による $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係のこの違いは、鉄筋が降伏を示すのに対し、CFシートが破断まで弾性的に挙動することに起因すると推測される。

一方、 $\varepsilon_c - \varepsilon_f$ 関係には、次のような特徴がみられる。すなわち、いずれの F_0 の場合でも、 $p_f \sigma_{fu}$ が大きくなるほど ε_c 増加に対する ε_f 増分は小さくなり、 $p_f \sigma_{fu}$ の増大に伴ってコンクリートの横方向変形がより拘束されることが分かる。また ε_f は ε_c の増大に対し、初期弾性域ではほぼプレーンコンクリートと同様に直線的に増加する。続いて $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係が極大値を示す付近より急激に増加し、その後 ε_c がさらに大になるにつれ、徐々に増加率（ $\Delta \varepsilon_f / \Delta \varepsilon_c$ ）を減じながら増大する傾向を示す。なお、図に示さなかった高弾性CFシートシリーズでは、シート破断が早期に生じたため、 $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係の変化の判定は明確に行えなかつた。

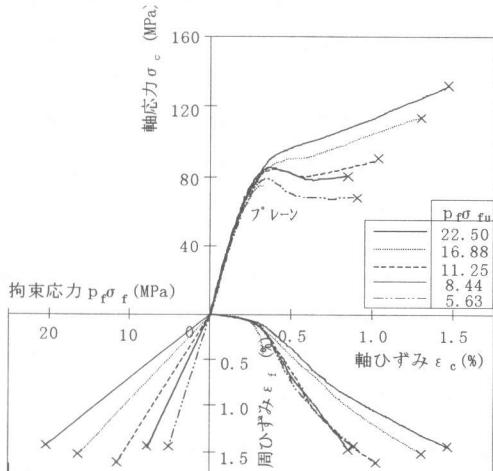
次にCFシートによるコンファインドコンクリートの終局破壊点であるシート破断点には下記のような特徴がみられた。破断時軸ひずみ（ ε_{cr} ）は、いずれの F_0 の場合でも $p_f \sigma_{fu}$



(a) $F_0 = 30 \text{ MPa}$ 級の場合



(b) $F_0 = 60 \text{ MPa}$ 級の場合



(c) $F_0 = 80 \text{ MPa}$ 級の場合

図-2 拘束応力指標の影響

(高強度繊維シリーズ)

の増加によって増大し、その増加程度はコンクリート強度が小さいときほど大きかった。また、素材の破断ひずみが小さい高弾性CFシートの方が、高強度CFシートのものよりも小さかった。

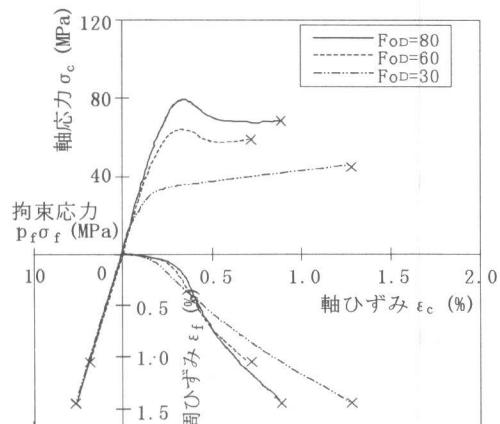
また、 p_f が小さい試験体では試験体破壊時の周ひずみ(ε_{fr})が素材の終局ひずみ(ε_{fu})よりも若干小さくなつた。このことについて明確な原因は分からぬが、せん断力に敏感であるCFシートが、補強量の小さい試験体で生ずる傾向のある破壊過程でのずれ変形の影響を受けて生じた現象と考えられる。

3. 2 $\sigma_c - \varepsilon_c - \varepsilon_f$ 関係におけるコンクリート強度の影響

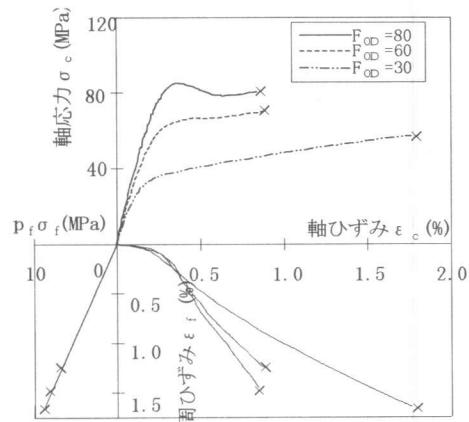
図-3(a)～(c)は、 $p_f \sigma_{fu}$ が同じ時、 $\sigma_c - \varepsilon_c - \varepsilon_f$ 関係が、 F_0 によってどのように変化するかを高強度CFシートシリーズにおける3種の $p_f \sigma_{fu}$ のケースについて示したものである。 $p_f \sigma_{fu}$ が5.63MPaと小さい場合、 $F_0=30$ MPa級では単調増大型の $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係となるが、 $F_0=60$ 、80MPa級では、極大点を示した後、単調応力低下、あるいは応力低下後再上昇するタイプが観察された。これに対し、 $p_f \sigma_{fu}$ が8.44MPaと大きくなると、 $F_0=60$ MPa級では明確な極大点を持たなくなるが、 $F_0=80$ MPa級では依然極大点を示す。

更に $p_f \sigma_{fu}$ が11.25MPaになると $F_0=60$ MPa級は単調増大型に移行し、 $F_0=80$ MPa級でも極大後、大きく応力再上昇するタイプに推移する。これらのこととは、明確な極大点を持つタイプから単調増大型への $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係の変化が、 $p_f \sigma_{fu}$ および F_0 によって大きく影響を受けることを示している。

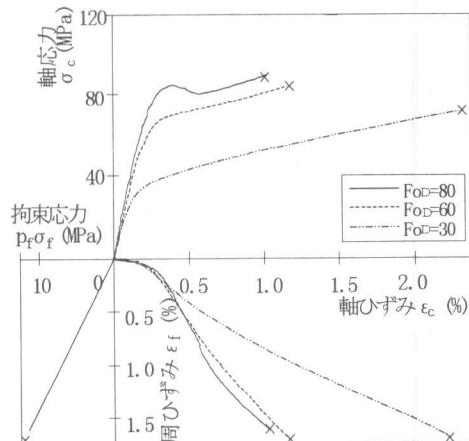
図-4は縦軸に F_0 、横軸に $p_f \sigma_{fu} / F_0$ をとり、これらの2タイプの $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係がどのような条件下で生じるかを、変化が明確に判定できた高強度CFシートシリーズの結果を用いて調べたものである。同図によれば、コンクリート強度によって多少ばらつくものの $p_f \sigma_{fu}$ をコンクリート強度の2割程度以上にすれば単調増大型の $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係となり、それ以下であれば極大値型となる傾向のあることが分かる。



(a) $p_f \sigma_{fu} = 5.63$ MPaの場合



(b) $p_f \sigma_{fu} = 8.44$ MPaの場合



(c) $p_f \sigma_{fu} = 11.25$ MPaの場合

図-3 コンクリート強度の影響

(高強度繊維シリーズ)

3. 3 CFシートの弾性率が $\sigma_c - \varepsilon_c - \varepsilon_f$ 関係に及ぼす影響

コンファインドコンクリートにおける横拘束材の拘束機構には、拘束材の伸び剛性 ($p_f E_f$) が影響する [2]。ここでいう伸び剛性とは、図-2、3、5の第3象限に表された $p_f \sigma_{fu} - \varepsilon_f$ の傾き、すなわち周ひずみによって生ずる拘束応力の増加率という一種の剛性である。図-5は、横拘束材の伸び剛性をほぼ等しくするため、同じプレーンコンクリートに弾性率の高いCFシートを少量巻き付けた試験体と、弾性率の低いものを多量に巻き付けた試験体の $\sigma_c - \varepsilon_c - \varepsilon_f$ 関係を比較したものである。なお、同図中には、高強度（低弾性）CFシートによる試験体と同等の $p_f \sigma_{fu}$ をもつ、高弾性CFシートによる試験体の結果も併記してある。同図によれば、伸び剛性が等しい場合、高弾性CFシートの時の方が、素材の破断ひずみが小さいため試験体のシート破断は早期に生ずるもの、 $\sigma_c - \varepsilon_c - \varepsilon_f$ 関係はほぼ同様のものになっている。このことは、CFシートの種類が異なっても、拘束材の伸び剛性が等しければ、同じ ε_f に対する拘束応力が等しくなるため、同様の $\sigma_c - \varepsilon_c - \varepsilon_f$ 関係が得られる事を示唆している。一方、図-5において同じ $p_f \sigma_{fu}$ をもつ試験体を比べると伸び剛性の高い試験体の方が ε_c に対する ε_f の増加は小さく、よく拘束されており、 $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係も単調増大型になっている。これらのこととは、CFシートによるコンファインドコンクリートの強度・変形特性に対し、 $p_f \sigma_{fu}$ ばかりでなく、横拘束材の伸び剛性 $p_f E_f$ が重要な要因であることを示している。

3. 4 CFシート破断時の軸応力と軸ひずみ

図-6は、CFシート破断時の軸ひずみ ε_{cr} を縦軸に、 $p_f \sigma_{fu}$ を横軸にとって示したものである。同図によれば、 ε_{cr} は $p_f \sigma_{fu}$ の増加に従ってほぼ直線的に増大し、その増加率はコンクリート強度が大なるほど小さい。また、

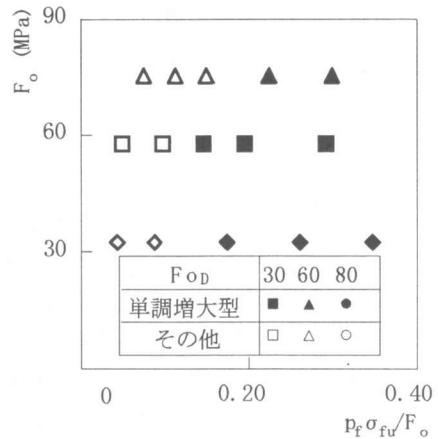


図-4 単調増大型のための条件

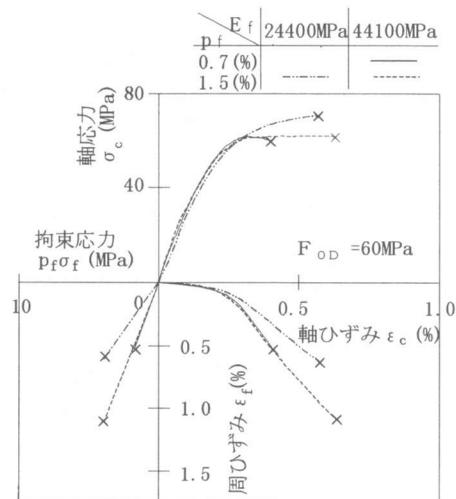


図-5 $\sigma_c - \varepsilon_c - \varepsilon_f$ 関係に及ぼす伸び剛性の影響

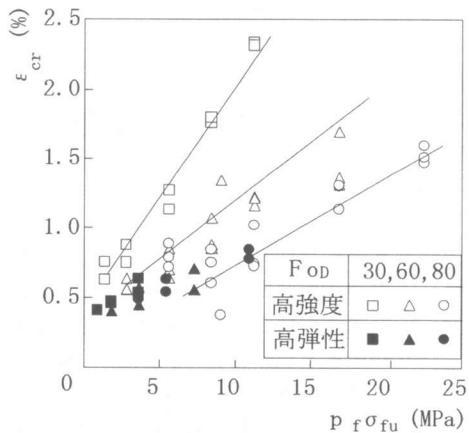


図-6 破断時軸ひずみ

$p_f \sigma_{fu}$ が同じなら、素材の破断ひずみが小さい高弾性CFシートの方が小さくなる傾向が見られた。

一方、高弾性CFシリーズでの場合、 $p_f \sigma_{fu}$ の増大によって ε_{cr} は増加するが、コンクリート強度による影響はあまり明確ではなかった。この原因として高弾性CFシートは素材の破断時ひずみが0.5%程度と小さく、 $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係に及ぼすコンクリート強度の影響が明確に判断できる ε_c レベルに達しなかったことが考えられる。

図-7は縦軸にCFシートが破断を示した時の応力である破断時軸応力(σ_{cr})をコンクリート強度で無次元化した σ_{cr}/F_0 を縦軸にとり、横軸に $p_f \sigma_{fu}/F_0$ をとったまとめたものである。同図によれば、 σ_{cr}/F_0 は、 $p_f \sigma_{fu}/F_0$ の増大に対しほぼ直線的に増大し、 $\sigma_{cr}/F_0 - p_f \sigma_{fu}/F_0$ 関係は各CFシートに対し、 F_0 に関わらずほぼ同じ直線関係を示した。

4.まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 炭素繊維シートによるコンファイドコンクリートの軸応力-軸ひずみ($\sigma_c - \varepsilon_c$)関係は、拘束応力指標($p_f \sigma_{fu}$)の増大に伴って、鉄筋による場合と同様の極大点(従来の圧縮強度点)をとるタイプから、極大点を示さず炭素繊維(CF)シートの破断まで単調増大するタイプへと変化した。その変化状況は、コンクリート強度(F_0)の影響を受け、 $p_f \sigma_{fu}/F_0$ が2割程度以上では、単調増大型の $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係となることがわかった。
- 2) 試験体におけるCFシートの周ひずみ(ε_f) - 拘束応力関係での伸び剛性が同じならば、CFシート種が異なる場合でもほぼ同様の $\sigma_c - \varepsilon_c - \varepsilon_f$ 関係が得られた。
- 3) CFシートが破断するときの試験体軸ひずみ(ε_{cr})は $p_f \sigma_{fu}$ の増大によって増加し、その増加率は F_0 が大なるほど小さかった。また、各CFシートに対し無次元化破断時軸応力 $\sigma_{cr}/F_0 - p_f \sigma_{fu}/F_0$ 関係は、 F_0 に関わらずほぼ同じ直線関係を示した。

謝辞

本研究に際し、炭素繊維シートの提供および高強度コンクリート製作において、多大な御助力を戴いた東レ株式会社、並びに大阪生コンクリート株式会社・千島工場に、深く謝意を表します。

参考文献

- [1] 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能、pp.507-525、1990
- [2] 中塚信、坂井由尚、中川裕史、鈴木計夫：高強度材料によるコンファイドコンクリートの強度・変形特性、日本建築学会構造系論文集、No.483、pp.129-138、1996.5
- [3] (社)日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案)、1995.7
- [4] 細谷学、川島一彦、星隈順一：炭素繊維で横拘束されたコンクリート柱の応力度-ひずみ関係、東京工業大学地震工学研究グループ報告集、1996.8

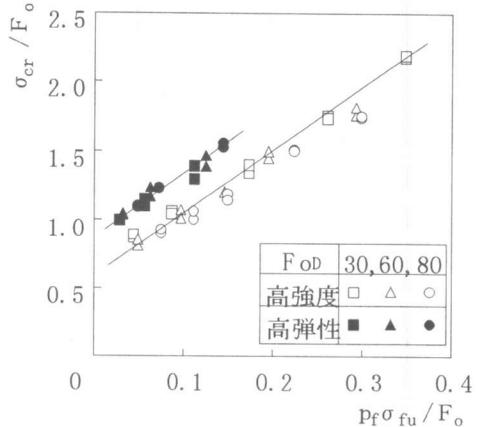


図-7 破断時軸応力