

論文 アラミド繊維シートおよび炭素繊維シートによる RC 柱の 圧縮靱性に関する補強効果

杉本敏和*1・益尾 潔*2・谷垣正治*3・角田 敦*4

要旨：本研究では、アラミド繊維シートおよび炭素繊維シートにより補強した既存RC柱について圧縮実験を行い、両シート補強による補強量および隅角部面取り半径の違いが、既存RC柱の圧縮靱性に及ぼす影響を明らかにした。また、アラミド繊維の種類の違いによる影響も併せて検討した。

キーワード：アラミド繊維, 炭素繊維, 既存 RC 柱, 圧縮靱性, 補強量, 面取り半径

1. はじめに

筆者らは、鋼板や炭素繊維（以下、CFRPと称す）シートによる既存RC柱の圧縮靱性に関する補強効果について、実験を既に行ったり。これらは、高軸力下の補強RC柱の性状を把握するための基礎実験であり、今回、アラミド繊維（以下、AFRPと称す）シートについてそれらと比較するための実験を行った。本論文では、両繊維シート補強による補強量および隅角部面取り半径の違いが、既存RC柱の圧縮靱性に及ぼす影響を明らかにする。

2. 試験体

実験計画の一覧および試験体の形状、寸法を

表-1 実験計画の一覧

実験シリーズ*	試験体	シートの種類	巻き数	$pw_2 \sigma_{fd}$ (MPa)	面取り半径 r (mm)
AFRPシリーズ*	AF-0	なし	0	0.0	0
	AF1-2-10	アラミド* -1	2	5.6	10
	AF2-2-10	アラミド* -2		4.9	
	AF1-4-10	アラミド* -1	4	11.2	
	AF2-4-10	アラミド* -2		9.9	
	AF1-4-30	アラミド* -1		11.2	
CFRPシリーズ*	CF-0	なし	0	0.0	30
	CF-1	CFRP	1	2.2	
	CF-2		2	4.3	
	CF-4		4	8.6	
	CF-6		6	12.9	

(注) AF-0, CF-0: 無補強試験体

表-1および図-1に示す。同表に示すように、実験因子は、補強量、隅角部面取り半径、シートの種類の3項目であり、AFRPシリーズとCFRPシリーズの実験系列がある。試験体数は、AFRPシリーズ6体、CFRPシリーズ5体の計11体である。

同表中に示した置換帯筋量 $pw_2 \sigma_{fd}$ の算定に際して、計算用引張強度 σ_{fd} は、AFRPシートでは1000MPa、CFRPシートでは2000MPaとし、置換帯筋比 pw_2 は下式によった。

$$pw_2 = 2tf/b, \quad tf: \text{シートの厚さ}, b: \text{柱幅}$$

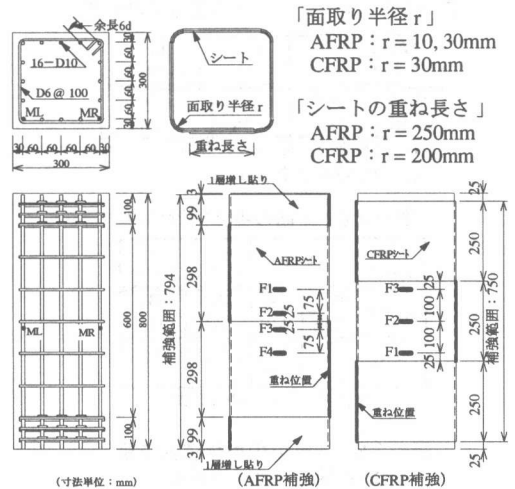


図-1 試験体の形状・寸法および補強方法

*1 (財) 日本建築総合試験所 構造物試験室 工修 (正会員)

*2 (財) 日本建築総合試験所 構造部長 工博 (正会員)

*3 三井建設(株) 技術研究所 工博 (正会員)

*4 東レ・デュボン(株) ケブラー営業部

(シートの1層あたりの見かけ厚さ)

アラミド-1 = 0.430mm, 目付量 = 623g/m²

アラミド-2 = 0.378mm, 目付量 = 525g/m²

CFRP = 0.165mm, 目付量 = 300g/m²

図-1に示すように、各試験体ともに、柱断面寸法は30cm×30cm、高さが80cm、中央部60cmを供試区間とし、上下10cmずつの範囲は、帯筋を密に配置するとともに、AFRPシリーズではシートを1層増し貼りした。

隅角部の面取り半径は、AFRP試験体では10mmと30mm、CFRP試験体ではいずれも30mmとした。シートは、図-1に示すように、AFRP試験体では幅が30cm、CFRP試験体では幅が25cmで、順次、柱四周に巻き付け、重ね長さは、AFRP試験体では25cm、CFRP試験体では20cmとした。

コンクリートの圧縮試験結果を表-2.1、鉄筋の引張試験結果を表-2.2、シートの引張試験結果およびメーカー規格値を表-2.3に示す。

表-2.1に示すように、シリンダーコンクリートの圧縮強度 σ_B は、AFRP試験体では29.4MPa、CFRP試験体では23.1MPaであった。

表-2.1 コンクリートの圧縮試験結果

実験シリーズ	σ_B (MPa)	ϵ_{co} ($\times 10^{-3}$)	E_c ($\times 10^4$ MPa)
AFRP	29.4	1.84	2.86
CFRP	23.1	1.78	2.53

σ_B : 圧縮強度 E_c : ヤング係数

ϵ_{co} : σ_B 時のひずみ度

表-2.2 鉄筋の引張試験結果

実験シリーズ	種別	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)
AFRP	帯筋 D6	408	531
	主筋 D10	354	486
CFRP	帯筋 D6	391	526
	主筋 D10	326	478

σ_y : 降伏点, σ_u : 引張強度

表-2.3 シートの引張試験結果
およびメーカー規格値

種別	試験結果		規格値		ϵ_{fu}
	σ_{fu}	E_f	σ_{fuo}	E_{fo}	
アラミド-1	2550	1.22	2060	1.18	21.7
アラミド-2	3300	0.79	2350	0.78	42.1
CFRP	3020	2.27	3430	2.30	13.3
	~4250	~2.69			

σ_{fu} , σ_{fuo} : 引張強度 (MPa)

E_f , E_{fo} : 引張弾性率 ($\times 10^5$ MPa)

ϵ_{fu} ($= \sigma_{fu}/E_{fo}$): シート破断時ひずみ度 ($\times 10^{-3}$)

3. 実験方法

荷重は、図-2に示すように、10MN構造物試験機を用いて上下の載荷板を介して平押しの状態 で加力する方法によった。軸方向変位量の測定は、図-2に示すように、変位計を用いて行い、ひずみ度の測定は、図-1に示すように、主筋およびシート(表面)について行った。

4. 実験結果および考察

4.1 破壊性状

実験因子ごとの $\sigma_c / \sigma_B - \epsilon_c$ 関係を図-3、破壊状況を写真-1に示す。

ここに、 $\sigma_c (= P_c / A_c)$

: コアコンクリートの圧縮応力度

A_c : コンクリートの断面積

$P_c (= P - Pr)$

: コアコンクリートの負担軸力

P : 全荷重値

Pr : 主筋の負担軸力

σ_B : シリンダーコンクリートの圧縮強度

ϵ_c ($= \delta c / hc$): 軸方向ひずみ度

δc : 軸方向変位量

hc : 測定間距離

なお、 Pr は、鉄筋の応力-ひずみ関係を完全弾塑性型に仮定して算定した。

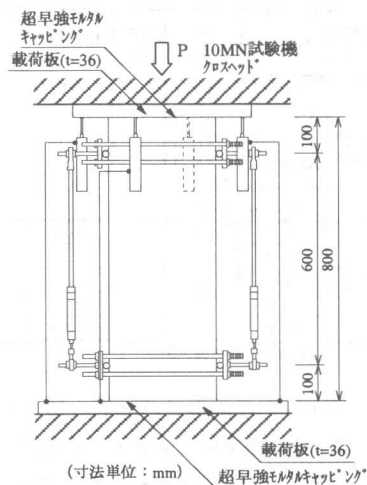


図-2 加力方法および変位測定位置

4.1.1 面取り半径10mmのAFRP

面取り半径が10mmの試験体では、いずれも主筋が圧縮降伏した後、 ϵ_c が0.3%~0.4%のとき最大耐力に達した。最大耐力は、アラミド-1、アラミド-2ともに、シートの巻き数が多いほど増大する傾向があった。ただし、2層巻き試験体(AF1-2-10, AF2-2-10)の最大耐力は、無補強試験体(AF-0)よりも若干増大した程度であった。

各試験体ともに、最大耐力後、 ϵ_c の増大に伴い、耐力が低下する一方で、シートのひずみ度が増大し、再び耐力が上昇し、最終的にシートが破断した。耐力反転時の ϵ_c は、2層巻きでは2%程度、4層巻きでは2.5%程度で、シート破断時の ϵ_c は、2層巻きでは2.6%~3.4%、4層巻きでは4.1%~4.8%であった。

アラミド-1試験体(AF1-2-10, AF1-4-10)では、 ϵ_c が1%程度以降、シート重ね部の始端部近傍でシートが剥がれ始めた。これは、コアコンクリー

トの圧壊後のシート表面の膨らみに伴い生じ、接着用樹脂の含浸性、シートの厚みおよびシート幅などが影響したと推察される。アラミド-2試験体(AF2-2-10, AF2-4-10)では、シートの剥がれは観察されなかった。

4.1.2 面取り半径30mmのAFRP

面取り半径が30mmのAF1-4-30では、主筋の圧縮降伏後、 ϵ_c が0.4%時に第1ピーク荷重に達した。その後、一旦、耐力が低下した後、再び耐力が上昇し、 ϵ_c が2%程度よりシート重ね部の始端

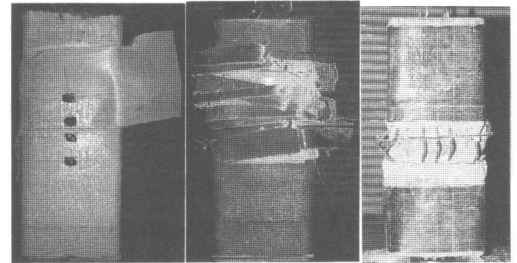
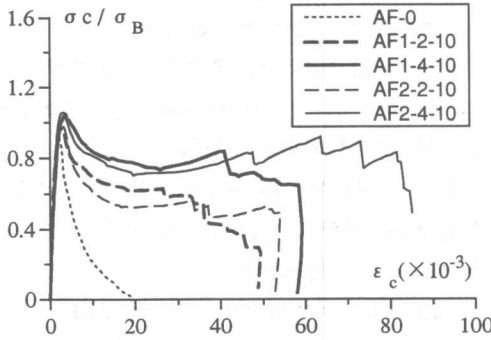
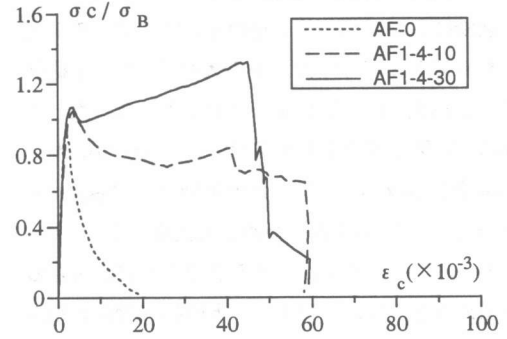


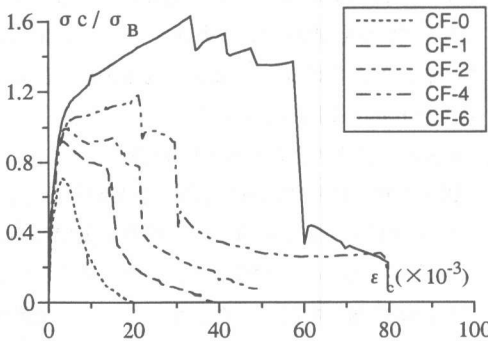
写真-1 破壊状況



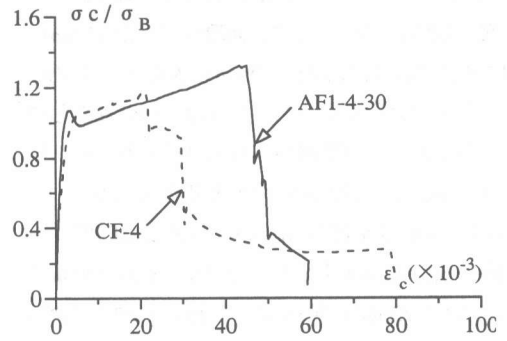
(a) 面取り半径10mmのAFRP補強



(b) 面取り半径10mmと30mmのAFRP補強



(c) 面取り半径30mmのCFRP補強



(d) 面取り半径30mmのAFRP補強とCFRP補強

図-3 $\sigma_c / \sigma_B - \epsilon_c$ 関係

部近傍でシートが剥がれ始め、 ϵ_c が4.3%時にシートが破断し、その直後に最大耐力に達し、最大耐力後、耐力が急激に低下した。

4.1.3 面取り半径30mmのCFRP

面取り半径30mmのCFRP補強の場合、シートが1層と2層の試験体では、最大耐力後、一旦耐力が低下した後、 ϵ_c が1.4%~1.6%に達した時点でシートが破断し、急激に耐力が低下した。4層と6層の場合は、主筋の圧縮降伏後、 ϵ_c が2.2%~3.4%まで耐力が徐々に上昇し、その時点でシートが破断して急激に耐力が低下した。最大耐力およびシート破断時の ϵ_c は、巻き数の増加に伴い増大した。

なお、各試験体ともに、コンクリート打込み側で圧壊が著しくなった。

4.2 実験因子ごとの性状の比較

4.2.1 アラミド-1とアラミド-2の比較

図-3(a)に示すように、同一巻き数の場合、アラミド-1とアラミド-2の最大強度はほぼ等しくなった。ただし、最大強度以降、アラミド-1のシート破断時まで、同一 ϵ_c 時の σ_c は、アラミド-2よりもアラミド-1の方がやや大きく、シート破断時の ϵ_c は、アラミド-1の方が小さくなった。これは、アラミド-2よりもアラミド-1の方が、ヤング係数 E_f が大きく、シートの破断時ひずみ度 ϵ_{fu} ($=\sigma_{fu}/E_{fo}$)が小さいためと考えられる。

また、アラミド-1、アラミド-2ともに、巻き数が増えると、コアコンクリートの拘束効果の増大に伴い、シート破断時の ϵ_c が大きくなった。

4.2.2 面取り半径10mmと30mmのAFRP

図-3(b)に示すように、面取り半径が30mmのAF1-4-30の最大強度は、10mmのAF1-4-10に比べて明らかに大きくなった。これは、隅角部からのシートによる拘束効果が、面取り半径が10mmに比べ30mmの方が大きいためと考えられる。

4.2.3 面取り半径30mmのAFRPとCFRP

図-3(d)に示すように、面取り半径が30mmで4層巻きのAFRP試験体AF1-4-30とCFRP試験体CF-4の性状はほぼ同様に推移した。ただし、AFRP試験体では、第1ピーク荷重後、耐力が若干低下

した。また、シート破断時の ϵ_c は、CFRP試験体では2.2%、AFRP試験体では4.3%で、CFRP試験体の方が明らかに小さくなった。これは、AFRP(アラミド-1)に比べCFRPの方が、シートの破断時ひずみ度 ϵ_{fu} ($=\sigma_{fu}/E_{fo}$)が小さいためと考えられる。

4.3 シートのひずみ度

コンクリート打込み側のシートひずみ度 ϵ_{F1} と ϵ_c との関係を図-4.1に示す。

4.3.1 面取り半径10mmのAFRP

図-4.1(a)に示すように、アラミド-1、アラミド-2ともに、巻き数が増えると、コアコンクリートの拘束効果の増大に伴い、同一 ϵ_c 時の ϵ_{F1} が減少する一方で、シートのヤング係数 E_f の違いに起因して、アラミド-2の方が、同一 ϵ_c 時の ϵ_{F1} が増大した。

これらの試験体の $\sigma_{f\ell}/\sigma_B$ と ϵ_c との関係を図-4.2に示した。ただし、シートによる拘束応力度 $\sigma_{f\ell}$ は、下式により算定した。

$$\sigma_{f\ell} = pw2 \cdot \sigma_{F1} = pw2 \cdot E_{fo} \cdot \epsilon_{F1}$$

ここに、 E_{fo} : メーカー規格値

図-4.2(a)によると、アラミド-1とアラミド-2の $\sigma_{f\ell}/\sigma_B$ は、それぞれ $pw2 \sigma_{fd}$ に概ね比例し、同一巻き数の場合、同様に推移した。

なお、1層あたり $pw2 E_{fo}$ の値は、アラミド-1が338MPa、アラミド-2が198MPaであり、アラミド-1の方が1.7倍程度大きい。

4.3.2 面取り半径10mmと30mmのAFRP

図-4.1(b)に示すように、同一 ϵ_c 時の ϵ_{F1} は、面取り半径が10mmのAF1-4-10に比べて30mmのAF1-4-30の方が明らかに大きくなった。すなわち、隅角部からのシートによる拘束力は、面取り半径が10mmに比べ30mmの方が大きい。

4.3.3 面取り半径30mmのCFRP

図-4.1(c)に示すように、巻き数が増えると、 ϵ_{F1}/ϵ_c の値が小さくなり、最大耐力直後では、0.4~1.2程度となった。すなわち、巻き数が少ないと著しい体積膨張を起こした。また、シート破断時の ϵ_{F1} は、巻き数が多くなると、小さくなる傾向がみられた。これは、シートの巻き数が少ないと

シートの破断が局所的に起こることなどに起因すると考えられる。ただし、図-4.2(c)に示すように、巻き数が多くなると、 σ_{fl}/σ_B は増大した。

4.3.4 面取り半径30mmのAFRPとCFRP

面取り半径が30mmで4層巻きのAFRP試験体(AF1-4-30)とCFRP試験体(CF-4)の $\epsilon_{F1} - \epsilon_c$ 関係および $\sigma_{fl}/\sigma_B - \epsilon_c$ 関係を図-4.1(d)と図-4.2(d)に示す。

同図によると、両シートの ϵ_{F1} および σ_{fl}/σ_B は、それぞれほぼ等しくなった。すなわち、アラミド-1とアラミド-2の場合と同様、pw2 σ_{fd} がほぼ等しいと、シートによる拘束応力度は概ね等しくなった。

4.4 コアコンクリートの圧縮強度

コアコンクリートの拘束係数 $S_c (= f_{cc}/\sigma_B)$ とpw2 σ_{fd}/σ_B との関係を図-5.1に示す。ここに、 f_{cc} はコアコンクリートの圧縮強度を示す。現在のところ、AFRPシートの σ_{fd} の明確な定義は定まっておらず、シートのヤング係数 E_f に基づく方法も考えられるが、ここでは、下式によりAFRPシートの $(\sigma_{fd})_{AF}$ を定義した。

$$(\sigma_{fd})_{AF} = (\sigma_{fd})_{CF} \times \{(\sigma_{fuo})_{AF}/(\sigma_{fuo})_{CF}\}$$

ここに、 $(\sigma_{fuo})_{AF}$ 、 $(\sigma_{fuo})_{CF}$ ：AFRPシートおよびCFRPシートのメーカー規格引張強度

$(\sigma_{fd})_{CF}$ ：CFRPシートの計算用引張強度

ただし、 $(\sigma_{fd})_{CF}$ は、暫定的な値として2000MPaと設定した。 σ_{fd} の計算値を表-3に示す。

図-5.1に示すように、同一pw2 σ_{fd}/σ_B のとき、面取り半径が10mmのアラミド-1とアラミド-2の拘束係数 S_c は概ね等しくなった。

また、面取り半径30mmの場合、同一pw2 σ_{fd}/σ_B のとき、AFRP補強とCFRP補強によるコア

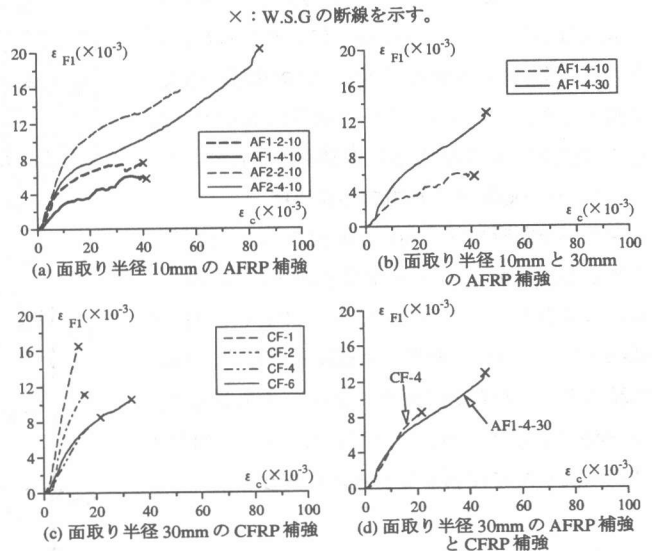


図-4.1 $\epsilon_{F1} - \epsilon_c$ 関係

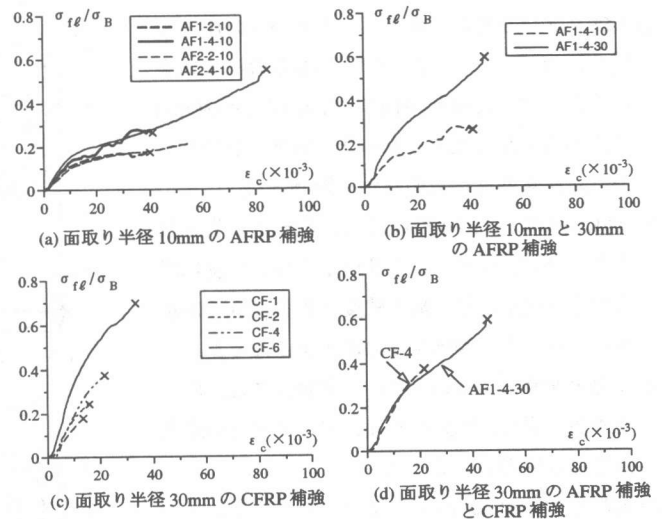


図-4.2 $\sigma_{fl}/\sigma_B - \epsilon_c$ 関係

コンクリートの拘束係数 S_c は概ね等しくなった。

4.5 コアコンクリートの限界ひずみ度

f_{cc} の85%に耐力が低下したときの軸方向ひずみ度 ϵ_c をコアコンクリートの限界ひずみ度 ϵ_{cu} と定義し、これとpw2 σ_{fd}/σ_B との関係を図-5.2に示した。

同図によると、同一pw2 σ_{fd}/σ_B のとき、面取り半径が10mmのAFRP試験体の ϵ_{cu} は、面取り半径が30mmのAFRP試験体の ϵ_{cu} よりも明らか

に小さく、面取り半径30mmのAFRP試験体とCFRP試験体では、 ϵ_{cu} は概ね等しくなった。すなわち、隅角部の面取り半径は、AFRP補強、CFRP補強ともに、コアコンクリートの圧縮強度のみならず、圧縮靱性にも明らかに影響を及ぼしている。

4.6 シート破断時の軸方向ひずみ度

シート破断時の軸方向ひずみ度を $(\epsilon_c)_{FR}$ とし、これと $pw_2 \sigma_{fd} / \sigma_B$ との関係を図-5.3に示す。同図によると、同一 $pw_2 \sigma_{fd} / \sigma_B$ のとき、AFRP試験体の $(\epsilon_c)_{FR}$ は、面取り半径に係わらず、CFRP試験体よりも明らかに大きくなった。したがって、 $(\epsilon_c)_{FR}$ は、 $pw_2 \sigma_{fd} / \sigma_B$ のほかにシート破断時ひずみ度 ϵ_{fu} に比例すると考えられる。

5. まとめ

本実験より得られた知見を以下に示す。

- 1) AFRP補強の場合、コアコンクリートの圧縮強度 f_{cc} は、シートによる隅角部からの拘束効果に起因して、面取り半径が10mmに比べ30mmの方が明らかに大きくなった。また、面取り半径は、圧縮靱性にも明らかに影響した。
- 2) AFRP補強、CFRP補強ともに、シートの巻き数が多いほど、コアコンクリートの最大強度は増大する傾向があり、最大強度後の強度低下が小さく、シート破断時の ϵ_c が大きくなった。
- 3) 面取り半径が10mmのAFRP試験体では、同一巻き数の場合、アラミド-1とアラミド-2の最大強度はほぼ等しくなった。
- 4) 面取り半径を30mmとすると、同一の $pw_2 \sigma_{fd} / \sigma_B$ のとき、AFRP補強とCFRP補強によるコアコンクリートの拘束係数 Sc ならびに限界ひずみ度 ϵ_{cu} は概ね等しくなった。

参考文献

- 1) 益尾潔, 平井義行, ほか2名: 鋼板補強およびカーボン繊維補強による鉄筋コンクリート柱の圧縮靱性の改善効果に関する実験, GBRC, No.86, pp.50-62, 1997.4
- 2) 中塚侑, 小牟禮建一, 田垣欣也: 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軸応

表-3 シートの計算用引張強度の設定

シート種別	σ_{fuo}	$\frac{\sigma_{fuo}}{(\sigma_{fuo})_{CF}}$	σ_{fd}	Efo	$\frac{Efo}{(Efo)_{CF}}$	ϵ_{fu}
アラミド-1	2060	(0.60)	1200	1.18	(0.51)	17.5
アラミド-2	2350	(0.69)	1400	0.78	(0.34)	30.0
CFRP	3430	(1.00)	2000	2.30	(1.00)	14.9

(注) $\epsilon_{fu} = \sigma_{fuo} / Efo (\times 10^{-3})$ $\sigma_{fuo}, \sigma_{fd}$ (MPa)
Efo ($\times 10^3$ MPa): メーカー規格値

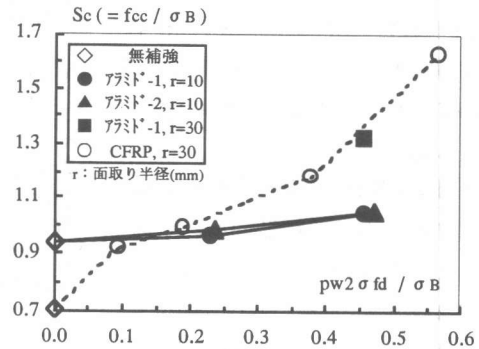


図-5.1 $Sc - pw_2 \sigma_{fd} / \sigma_B$ 関係

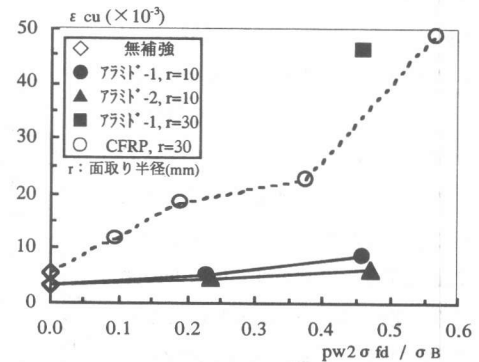


図-5.2 $\epsilon_{cu} - pw_2 \sigma_{fd} / \sigma_B$ 関係

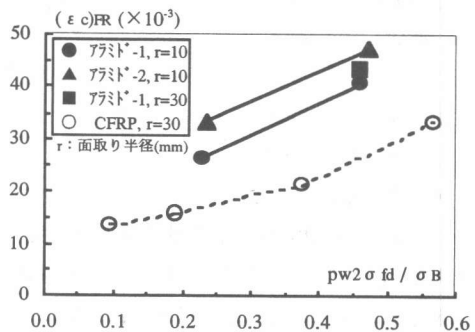


図-5.3 $(\epsilon_c)_{FR} - pw_2 \sigma_{fd} / \sigma_B$ 関係

力度一軸ひずみ度特性, コンクリート工学論文集, 第9巻第2号, pp.65-78, 1998.7