

論文 FRP シートにより補強されたコンクリート柱の横補強効果に関する基礎的研究

渡部 憲^{*1}・本田義博^{*2}・白井伸明^{*3}・金刀督純^{*4}

要 旨:本研究では、中心圧縮をうけるコンクリート柱(10φ×20cm)の圧縮塑性変形挙動に及ぼすFRPシートの影響を 実験および3次元非弾性有限要素法を適用した解析により検討を行った。結果を要約すると、次のようにまとめられる。1)3軸応力下のコンクリートの応力-ひずみ関係の表示にエンドクロニック理論を適用した3次元非弾性有限要素法による解析結果は、コンクリート柱の1軸圧縮実験の結果と概ね一致した。2)各種FRPシートにより効果的にコンクリート柱の圧縮靱性を改善させるためには、繊維シートのヤング率の相違が拘束効果に及ぼす影響を明確に把握する必要がある。

キーワード:FRPシート、拘束効果、圧縮靱性能、3次元非弾性有限要素法

1. はじめに

脆性材料であるコンクリートを主材料として使用する鉄筋コンクリート(以下、RCと略記する。)部材の靱性を改善するための手法として、横補強筋によるコンクリートの3軸拘束効果を利用してRC部材の靱性を確保する方法が一般的に用いられている。しかし、近年、既存建築物に対して繊維シート(以下、FRPシートと略記する。)を巻き付けることによりRC柱の圧縮靱性能等を改善する方法が注目を集めており、その有効性が多くの研究者によって指摘されている[1-2]。しかし、コアコンクリートの拘束効果発現機構までを詳細に検討した解析的研究例は少なく不明な点が多い。そのため、本研究では、コンクリート柱(10φ×20cm)の1軸圧縮塑性変形挙動に及ぼすFRPシートの影響を、実験および3次元非弾性有限要素法(以下、3DFEMと略記する。)を適用した解析により検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本実験では、FRPシートにより補強されたコンクリート柱の1軸圧縮塑性変形挙動に及ぼすFRPシートの種類および補強枚数の影響を調べるために、10φ×20cmの柱試験体を用意した。FRPシートは、炭素繊維(CFRP)シート、高弾性炭素繊維(HCFRP)シートおよびアラミド繊維(AFRP)シートの3種類、補強枚数は、1、2および3枚とし(ただし、CFRPシートのみ1、3および4枚とした。)、無補強試験体も含めて、各3体製作した。また、FRPシートの強度確認用として、1.25×20cmのFRPシート試験体を6枚一組として、必要枚数製作した。柱試験体およびFRPシート試験体の一覧を表-1に示す。柱試験体の製作に際して、早強ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの調合は、水セメント比(W/C)を63.5%、設計スランプを8cmに設定し試し練りによって決定した。本実験で用いたコンクリートの調合表を表-2に示す。柱

*1 東急建設(株)技術研究所建築研究部建築材料研究室、工修(正会員)

*2 東急建設(株)技術研究所建築研究部建築材料研究室室長

*3 日本大学教授 理工学部建築学科、工博(正会員)

*4 (株)トータル・インフォメーション・サービス(正会員)

試験体は、コンクリート打設後、翌日脱型し、1週間は水中養生（水温20℃）、その後、試験時までは恒温気中養生（室温20℃、湿度60%）を行った。試験材令は70～80日とした。なお、FRPシートの施工は、試験日の20日前までに終了した。

2.2 荷重および計測方法
本実験では、100tf 耐圧試験機を用い、JIS A 1108 に準じた単調漸増圧縮荷重を行った。

図-1 に柱試験体の荷重および計測方法を示す。計測項目は、無補強試験体の場合は荷重、コンクリート面の軸および横方向ひずみおよび荷重板間変位とし、FRPシート補強試験体の場合は荷重、コンクリート面の軸および横方向ひずみ、繊維シート面の軸および横方向ひずみおよび荷重板間変位とした。各計測データは、データロガーを使用して取り込んだ。また、FRPシート試験体は、10tf インストロン試験機を用い、JIS K 7073 に準じた単調漸増引張荷重を行った。

3. 解析方法

筆者らは、先に高強度横補強筋を用いた高強度鉄筋コンクリート柱の1軸圧縮実験[3-4]および解析[5]を行っている。解析では、多軸応力を受けるコンクリートの応力度(σ)-ひずみ度(ε)関係の表示にエンドクロニック理論[6-7]を適用した3DFEM解析を行い、その適用性・妥当性を確認した。そのため、本研究では、多軸応力下のコンクリートのσ-ε関係の表示にエンドクロニック理論を用いた3DFEMを適用して検討を行うこととした。本解析では、コンクリートを8節点アイソパラメトリック要素、FRPシートを線材要素で近似した3次元モデルを用いた。なお、FRPシートは弾性と仮定した。FEM解析モデルは、対称性を考慮して1/8モデルとし、各要素を図-2 に示すように分割した。解析は、軸方向ひずみ度(ε

表-1 試験体一覧

(a) 柱試験体

試験体名称	試験体寸法 (cm)	FRPシート			
		種類	単位面積重量 (g/m ² /枚)	補強枚数 (枚)	繊維体積比 ρ _f ¹⁾
N-0	10φ×20	無補強		0	-----
CF30-1		炭素繊維	300	1	0.0067
CF30-3				3	0.0200
CF30-4				4	0.0268
HCF30-1				高弾性炭素繊維	1
HCF30-2		2	0.0113		
HCF30-3		3	0.0169		
AF20-1		アラミド繊維	200	1	0.0058
AF20-2				2	0.0115
AF20-3				3	0.0173

1) ρ_f=(af×L)/(A×H)

af: 繊維シート断面積(cm²) L: 試験体周長(cm)
A: 試験体断面積(cm²) H: 試験体高さ(cm)

(b) FRPシート試験体

試験体名称	FRPシート				
	種類	単位面積重量 (g/m ² /枚)	積層枚数 (枚)	引張強度 カタログ値 (kgf/cm ²)	ヤング率 カタログ値 (×10 ⁴ kgf/cm ²)
CFRP30-1	炭素繊維	300	1	35000	2.40
CFRP30-2			2		
CFRP30-3			3		
HCFRP30-1	高弾性炭素繊維	300	1	25000	6.50
HCFRP30-2			2		
HCFRP30-3			3		
AFRP20-1	アラミド繊維	200	1	35000	0.74
AFRP20-2			2		
AFRP20-3			3		

表-2 コンクリートの調査表

W/C (%)	標準調査(kg/m ³)				スランブ	空気量 (%)
	水	セメント	砂	砂利		
63.5	162	256	885	985	8	4.5

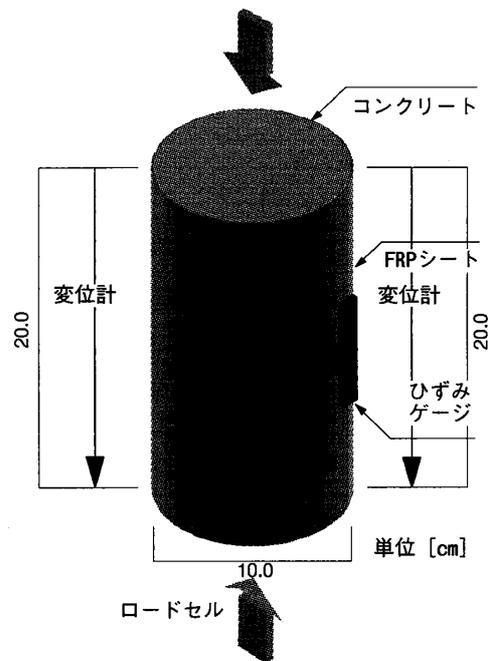


図-1 荷重方法

v) の増分が 200μ となるように設定した変位制御型増分解析とし、計算時間の都合上、 ϵv の値が $20,000 \mu$ となった時点で解析を打ち切った。なお、構成材料の強度特性としては、表-3 に示す材料試験結果を用いた。

4. 結果と考察

4.1 最大耐力

FRPシートにより補強されたコンクリート柱の最大耐力に関する実験および解析結果の一覧を表-4 に示す。なお、解析結果の圧縮強度は、圧縮強度時のFRPシートの繊維方向ひずみ度の実測値より決定した。この表によれば、圧縮強度に関する実験結果と解析結果との比は、 $0.96 \sim 1.05$ (ただし、解析の範囲内で圧縮強度に達しなかった試験体はのぞく(表中の直線))であり、FRPシートにより補強されたコンクリート柱の圧縮強度は、本解析の範囲内で解が得られたものについては、よく一致している。

4.2 圧縮応力-ひずみ関係

(1) FRPシート補強枚数の影響

図-3 (a) ~ (c) は、CFRP、HCFRP およびAFRPシートにより補強されたコンクリート柱の圧縮応力度 (σv) - ひずみ

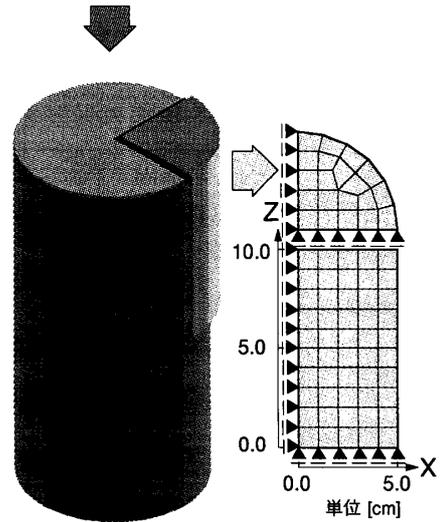


図-2 試験体のモデル化

表-3 構成材料の強度試験結果

試験体名称	構成材料	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング率 ($\times 10^4$ kgf/cm ²)
N-0	コンクリート	308	—	0.226
CFRP30-1	CFRPシート	—	27700	2.290
CFRP30-2			27200	2.240
CFRP30-3			29300	2.290
CFRP30-4			27100	2.290
HCFRP30-1	HCFRPシート	—	16100	6.410
HCFRP30-2			18600	6.420
HCFRP30-3			13100	5.880
AFRP20-1	AFRPシート	—	26400	0.990
AFRP20-2			27600	0.890
AFRP20-3			27200	0.890

表-4 最大耐力一覧

試験体名称	FRPシート		ヤング率 ¹⁾ ($\times 10^4$ kgf/cm ²)		圧縮強度 (kgf/cm ²)		圧縮強度時軸ひずみ (μ)	
	種類	補強枚数 (枚)	繊維面	コンクリート面	実験結果	解析結果	実験結果	解析結果
CF30-1	炭素繊維	1	2.53	未計測	475	486	15111	18400
CF30-3		3	2.48	2.55	889	—	31075	—
CF30-4		4	2.46	2.57	1067	—	41506	—
HCF30-1	高弾性炭素繊維	1	2.47	2.35	425	441	5749	5600
HCF30-2		2	2.62	2.67	571	545	8764	6400
HCF30-3		3	2.64	2.53	645	630	12984	6800
AF20-1	アラミド繊維	1	2.54	2.56	398	—	15824	—
AF20-2		2	2.51	2.57	698	—	47446	—
AF20-3		3	2.63	2.6	939	—	55536	—

1) 無補強試験体圧縮強度の1/3荷重を基準に決定した。
 なお、表中の直線は、解析範囲内では圧縮強度に達していないことを示す。

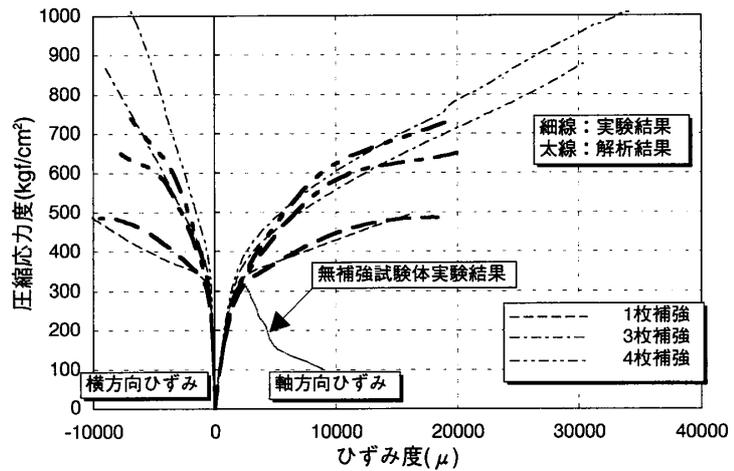
み度 (ϵ) 関係に関する実験結果と解析結果を、それぞれ補強枚数別に示したものである。FRPシート種類および補強枚数に関わらず実験結果と解析結果とは概ね一致しており、いずれの図においても σv が 100 kgf/cm^2 程度までは (1次直線領域)、補強枚数の影響はあまり顕著ではない。また、 σv が無補強試験体の圧縮強度 (308 kgf/cm^2) に近づき、横方向ひずみ度 (ϵh) が急激に増大しはじめると、 $\sigma v - \epsilon v$ 関係の非線形性が顕著となる (非線形領域)。さらに、無補強試験体では σv が圧縮強度の1/2程度となる領域 ($\epsilon v = 5000 \mu$ 程度) 以降は、ほぼ直線で近似可能であり (2次直線領域)、その勾配 (2次勾配) は、補強枚数の増加にともない急勾配となることがわかる。

(2) FRPシート種類の影響

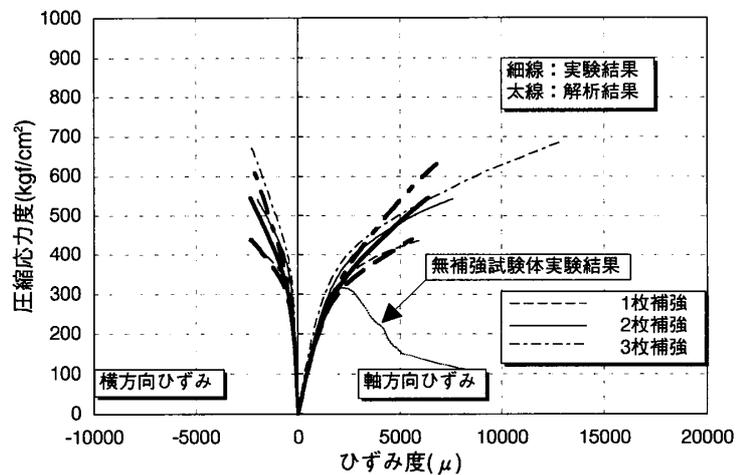
図-4はFRPシート1枚により補強されたコンクリート柱の σ_v - ϵ 関係に及ぼすFRPシート種類の影響を示したものである。非線形領域および2次直線領域はFRPシートの相違によりかなり影響を受けることが分かる。すなわち、非線形領域では、AFRPシート補強された試験体はAFRPシートのヤング率が小さいこともあり ϵ_v の増加にともなう σ_v の増大は観察されないが、CFRPシート補強された試験体およびHCFRPシート補強された試験体では、 σ_v は増大しており、その増加量は、HCFRPシート補強された試験体の結果が最も大きくなっている。また、2次直線領域における2次勾配は、HCFRPシート補強された試験体>CFRPシート補強された試験体>AFRPシート補強された試験体の順に大きくなっている。これらの事実は、FRPシートのヤング率の相違によるものと思われる。

4.3 FRPシートの拘束効果

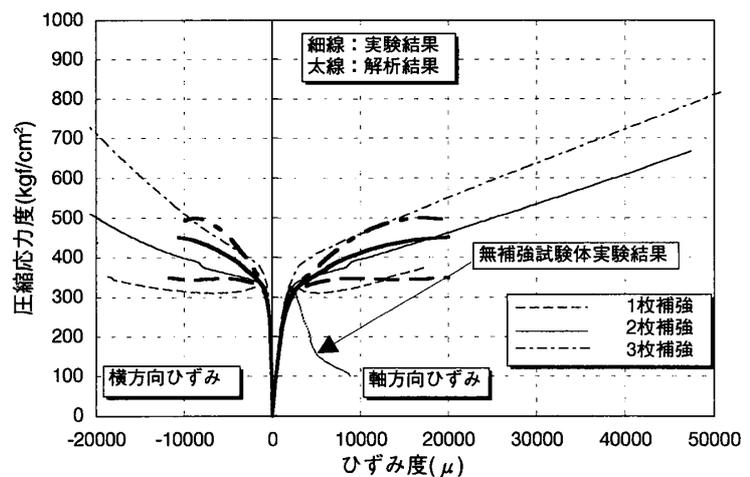
図-5(a)~(c)は、CFRP、HCFRPおよびAFRPシートにより補強されたコンクリート柱の圧縮応力度比-拘束力関係に関する実験結果と解析結果を、それぞれ補強枚数別に示したものである。なお、圧縮応力度比： σ_v /無補強試験体の圧縮強度、拘束力：FRPシート繊維方向ひずみ度 \times FRPシートヤング率 $\times \rho_f$ とする。FRPシート種類および補強枚数に関わらず実験結果と解析結果とは概ね一致しており、いずれの結果も圧縮応力度比が1以降の領域では、同一拘束力の場合、補強枚数の増加にともない圧縮応力度比は増大しており、図-3で示した、補強枚数の増加にともない2次勾配が急勾配となる



(a) CFRPシート



(b) HCFRPシート



(c) AFRPシート

図-3 圧縮応力-ひずみ関係

傾向にも合致する。すなわち、本 FEM 解析手法を用いれば、FRP シートにより補強されたコンクリート柱の圧縮靱性能の改善効果がうまく表現できることがわかる。

図-6 は、FRP シート 1 枚により補強されたコンクリート柱の圧縮応力度比-拘束力関係に及ぼす FRP シート種類の影響を示したものである。FRP シート種類により拘束効果の発現状況はかなり相違している。すなわち、FRP シートのヤング率の相違のため、圧縮応力度比が 1 以前の領域では、同一拘束力の場合、圧縮応力度比は、AFRP シート補強された試験体 > CFRP シート補強された試験体 > HCFRP シート補強された試験体の順に大きくなっており、特に、AFRP シート補強された試験体は、圧縮応力度比が 1 に近づいても十分な拘束力が発現していないため、すでにコアコンクリートがかなりの損傷を受けているものと思われる。また、圧縮応力度比 1 以降では、拘束力が同じであっても、コアコンクリートの損傷の程度により、圧縮応力度比の大きさは、HCFRP シート補強された試験体 > CFRP シート補強された試験体 > AFRP シート補強された試験体の順となっている。この事実と、図-4 より、各種 FRP シートにより効果的にコンクリート柱の圧縮靱性を改善させるためには、繊維シートのヤング率の相違が拘束効果に及ぼす影響を明確に把握する必要があり、本 FEM 解析においても、このような事象を確認することができた。

4.4 強度推定式

FRP シートにより補強されたコンクリート柱の実験より得られた圧縮強度と圧縮強度時拘束力との関係を図-7 に示す。なお、圧縮強度時拘束力：圧縮強度時の FRP シート繊維方向ひずみ度 × FRP シートヤング率 × ρf とする。FRP シートにより補強されたコンクリート柱の圧縮強度は FRP シートの種類に関わらず、圧縮強度時拘束力の増加とともに直線的に増大することがわかる。従って、FRP シートにより補強されたコンクリート柱の圧縮強度 ($f_{cc}(fib)$) は、圧縮強度時拘束力 (C)

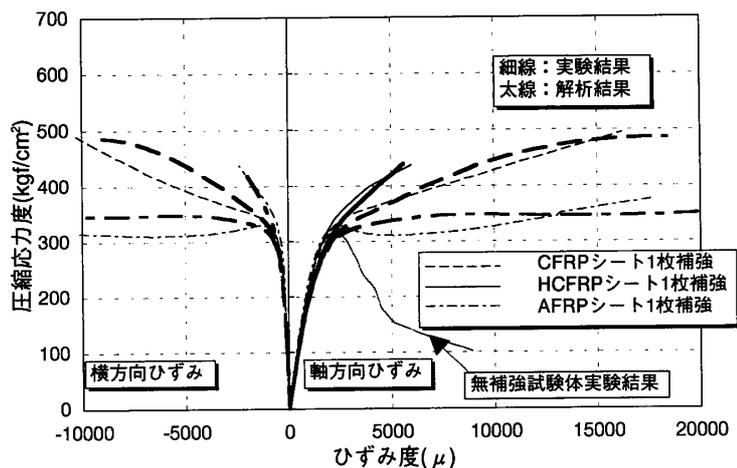
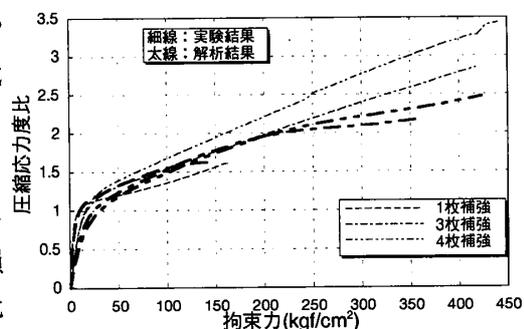
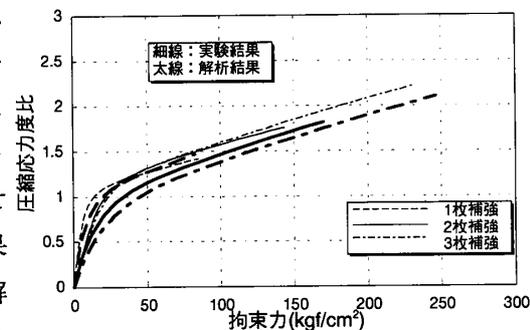


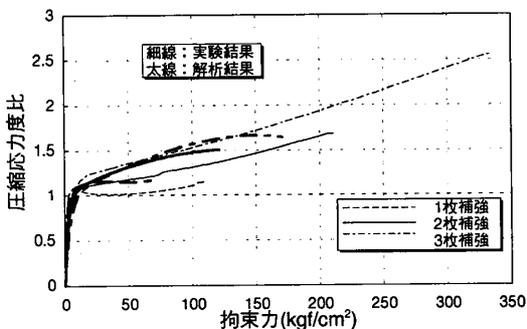
図-4 圧縮応力-ひずみ関係 (FRP シート種類の影響)



(a) CFRP シート



(b) HCFRP シート



(c) AFRP シート

図-5 圧縮応力度比-拘束力関係

と、無補強コンクリートの圧縮強度 (f_c) の関数である式 (1) で推定できる。

$$f_{cc} = \alpha \cdot C + f_c \quad (1)$$

図-8は、図-7と同様の方法で整理した場合の結果で、縦軸に圧縮強度時の ϵ_v をとったものである。圧縮強度時の ϵ_v も直線で近似可能であり、FRPシートにより補強されたコンクリート柱の圧縮強度時の ϵ_v ($\epsilon_{cc}(fib)$) は、圧縮強度時拘束力 (C) と、無補強コンクリートの圧縮強度時の ϵ_v (ϵ_c) の関数である式 (2) で推定できる。

$$\epsilon_{cc} = \beta \cdot C + \epsilon_c \quad (2)$$

5. 結論

本研究では、コンクリート柱の1軸圧縮塑性変形挙動に及ぼすFRPシートの影響を実験および3次元非弾性有限要素法を適用した解析により検討を行った。結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 3軸応力下のコンクリートの応力-ひずみ関係の表示にエンドクロニック理論を適用した非線形3次元有限要素法による解析結果は、コンクリート柱の1軸圧縮実験の結果と概ね一致した。
- 2) 各種FRPシートにより効果的にコンクリート柱の圧縮靱性を改善させるためには、繊維シートのヤング率の相違が拘束効果に及ぼす影響を明確に把握する必要がある。
- 3) FRPシートにより補強されたコンクリートの圧縮強度および圧縮強度時の軸方向ひずみ度は、FRPシートによる圧縮強度時拘束力の増加とともに直線的に増大する。

今後は、本研究成果を基に、FRPシートにより補強されたコンクリートの σ - ϵ 関係式を提案していく予定である。

謝辞

実験および実験結果の整理に際して御助力を得た東急建設(株)の磯 雅人氏および藤巻敏之氏に謝意を表します。

参考文献

- [1]細川 学、川島一彦、星隈順一、宇治公隆：炭素繊維シートで横拘束されたコンクリート柱の応力度-ひずみ関係、コンクリート工学年次論文報告集、第18巻、第2号、pp.95-100、1996.6
- [2]片岡隆広、松崎育弘、福山 洋、橋本一郎：シート状連続繊維により補強されたRC柱の構造性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第18巻、第2号、pp.1463-1468、1996.6
- [3]山本俊彦、本田義博、白都 滋、大滝 健：高強度鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究(その1 実験概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.739-740、1989.10
- [4]本田義博、山本俊彦、白都 滋、大滝 健：高強度鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究(その2 一軸圧縮引張実験)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.741-742、1989.10
- [5]山田和夫、渡部 憲、山本俊彦、本田義博：高強度鉄筋コンクリート柱の横補強効果に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第14巻、第2号、pp.535-540、1992.6
- [6]Bazant, Z.p. and Bhat, P.D.: Endochronic Theory of Inelasticity and Failure of Concrete, Jour. of EM-Div., Proc. of ASCE, Vol. 102, No. EM4, pp.701-722, Aug. 1976
- [7]谷川恭雄、山田和夫：エンドクロニック理論のコンクリート工学への適用、コンクリート工学、第21巻、第1号、pp.31-43、1983.1

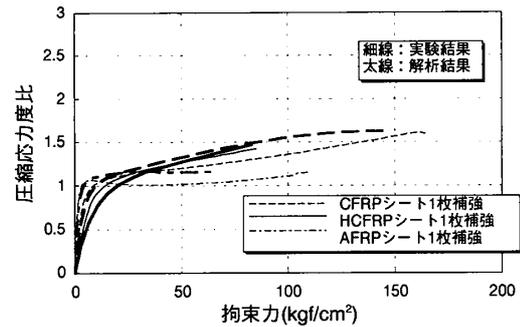


図-6 圧縮応力度比-拘束力関係 (FRPシート種類の影響)

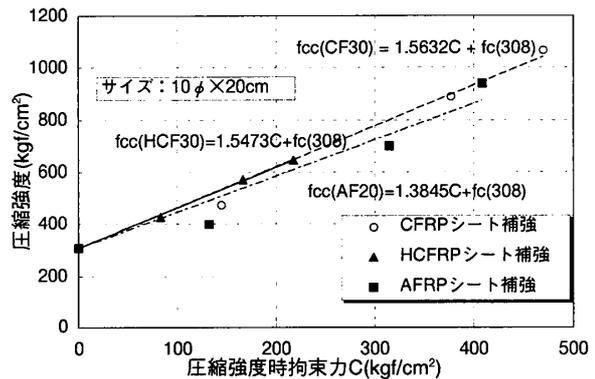


図-7 圧縮強度-圧縮強度時拘束力関係

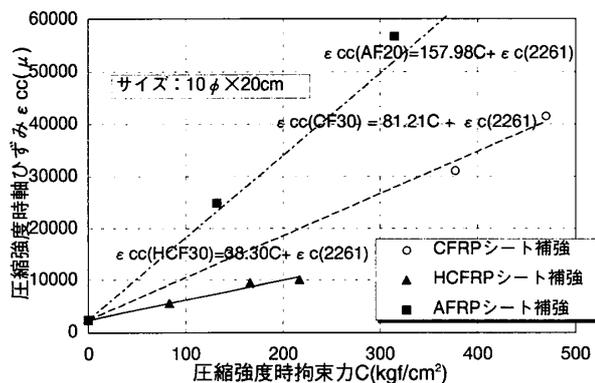


図-8 圧縮強度時軸方向ひずみ-圧縮強度時拘束力関係