

論文 炭素繊維シートで横補強したコンクリートの一軸圧縮性状

辻誠*¹・大工綾子*²・水野英二*³・畑中重光*⁴

要旨：炭素繊維シート（CFシート）で補強された円形および角形コンクリートの圧縮性状について、ひずみ軟化型構成モデルを組み込んだ三次元有限要素プログラムを用いて破壊シミュレーションを行った。その結果、1) 本シミュレーション解析によって形状の異なる供試体におけるCFシートの補強効果の違いはほぼ再現できること、2) CFシートを部分的に巻付けた円形供試体では、シート間で損傷が最も進展しやすい応力状態が生じること、3) 角形コンクリートでは、隅角部の面取り半径が小さいと辺中央部と隅角部に生じる拘束圧の差が大きいこと、などがわかった。

キーワード：三次元FEM解析、炭素繊維シート、重ね長さ、面取り半径、圧縮応力-ひずみ

1. はじめに

近年、既存コンクリート構造物の耐震補強の必要性から炭素繊維シート(CFシート)を用いた補強方法が注目されている。筆者らは、現在まで炭素繊維シートで横補強したコンクリート柱の一軸圧縮実験を行ってきた^{1), 2)}。本研究はその延長上にある。すなわち、CFシートの重ね長さ（補強量）、コンクリート強度および角形供試体の面取り半径がコンクリート柱の一軸圧縮性状に及ぼす影響を取り上げ、これまでに筆者らが開発したひずみ軟化型構成モデル³⁾を組み込んだ三次元有限要素解析プログラム(FEAP)⁴⁾を用いてシミュレーション解析を行う。また、CFシート補強コンクリートの拘束効果および破壊メカニズムを、等価拘束圧および損傷度という2つの指標を用いて考察する。ここでいう等価拘束圧とは、一般応力状態を三軸主応力状態に換算した時の拘束圧の大きさのことである³⁾。

2. 解析概要

本研究では8節点アイソパラメトリック三次元ソリッド要素⁵⁾を組み込んだ三次元有限要素プログラム

を使用する。構成モデルとして、コンクリート部分にはひずみ軟化型構成モデルを採用し、CFシートは完全弾塑性体とし、付着要素部分は弾性体とした。ここで、付着要素はCFシートからの拘束効果がエポキシ樹脂等によって緩和される効果を考慮するために導入した。炭素繊維シートおよび付着要素の材料特性を表-1に示す。付着要素の材料特性値は文献6)を参考に2C00(表-2に示す供試体)の解析値と実験値の応力-ひずみ関係を合わせるように設定したパラメトリック解析の一定数である。なお、供試体は一軸（重ね長さを考慮する場合の円形断面）または二軸（角形および円形断面）対象ならびに上下対象と仮定し、円形供試体には1/4または1/8、角形供試体には1/8の部分モデルを用いた。境界条件は、対象面において、その直角方向を固定とした。载荷条件は供試体上部に0.01%刻みの軸ひずみを与える変位制御とし、CFシートの破断まで解析を行った。軸ひずみ(ϵ)は全長における平均値である。横ひず

表-1 CFシートおよび付着要素の材料特性

	強度(MPa)	弾性率(GPa)	ポアソン比	厚さ(cm)
CFシート	3430	230	0.2	0.01
付着要素	∞	0.002	0.000003	0.001

*1 熊谷組（正会員）

*2 中日本建設コンサルタント

*3 中部大学教授 工学部土木工学科 Ph.D.（正会員）

*4 三重大大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

み（角形断面）については、実験では高さ方向中央部の辺部分（約6.7cm）における平均値であり、解析では供試体の高さ方向中央部のコンクリートの中心から辺まで（5cm）の平均ひずみとした。

3. 円形コンクリートの三次元有限要素解析

3.1 供試体および解析概要

本解析で対象とした要因を表-2に、円形コンクリート供試体の形状・寸法を図-1に、要素分割図を図-2に示す。なお、圧縮実験では、原則として上下端面に載荷板との摩擦（端面摩擦）が存在する状態で実験を行ったが、本解析では、端面摩擦は全て無いものとした。なお、本解析対称の供試体形状（高さ-直径比が2.0）の場合、端面摩擦の有無によって供試体全体としての平均軸応力-ひずみ関係に大きな差は生じないことが確かめられている¹⁾。

3.2 解析結果および考察

(1) 平均軸応力-ひずみ関係

図-3(a)に重ね長さを変化させた場合の平均軸応力-ひずみ関係を、また図-3(a)~(c)にコンクリート強度を変化させた時の平均軸応力-ひずみ関係を示す。図-3(a)によれば、CFシート1枚補強の範囲つまり重ね長さ0~30cmでは解析上で得られたCFシート破断時の軸ひずみは、重ね長さに関わらずおよそ0.012とほぼ同様の値で、重

表-2 円形供試体の概要

供試体*	重ね長さ (cm)	コンクリート 材料特性**	CF補強量
2C00	0	強度(MPa) 27.0 弾性率(MPa) 2.8×10^4	1枚補強
2C10	10		
2C20	20		
2C30	30		
2C40	40		
4C10	10	強度(MPa) 38.8 弾性率(MPa) 3.4×10^4	1枚補強
4C40	40		2枚補強
6C10	10	強度(MPa) 62.1 弾性率(MPa) 3.9×10^4	1枚補強
6C40	40		2枚補強

* 供試体名：(コンクリート強度)-C-(重ね長さ)

** ポアソン比：0.2

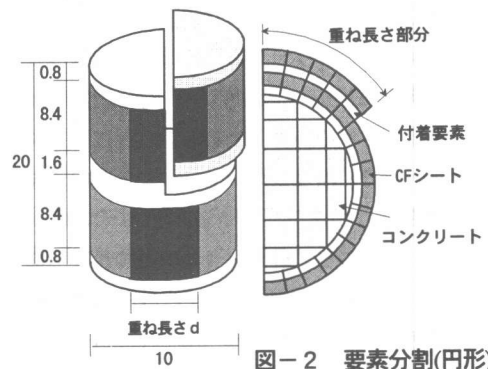


図-1 円形供試体の形状・寸法(cm)

図-2 要素分割(円形)

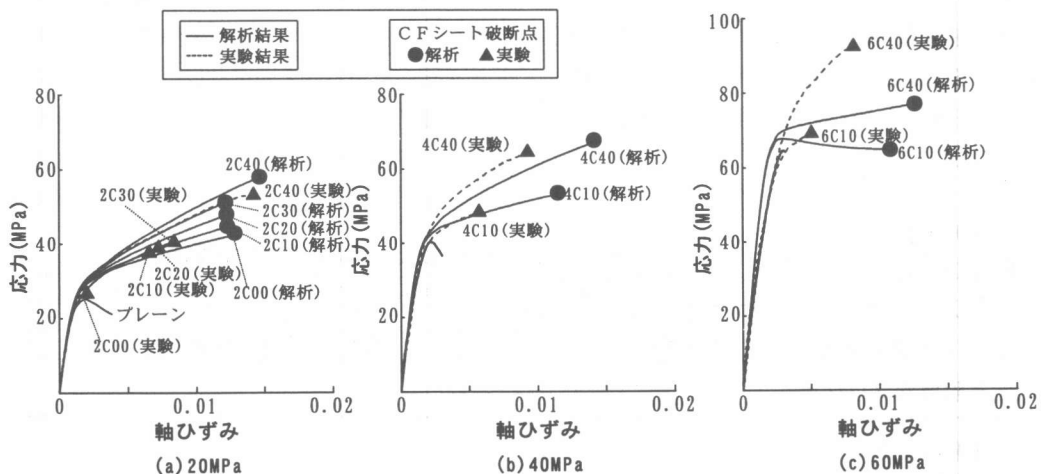


図-3 円形供試体の平均軸応力-ひずみ関係

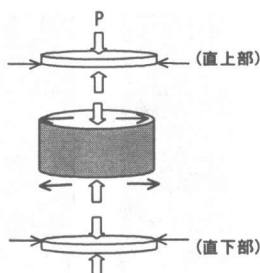


図-4 拘束メカニズムの説明モデル

ね長さが増加するにつれて圧縮強度も増加していることがわかる。一方、実験¹⁾で得られた応力-ひずみ曲線は、重ね長さに関わらず、ほぼ同一曲線上にのっている。これは、実際の実験では、1枚のCFシートを巻き付け、重ね部の長さの調節を行ったためであり(シート間でのすべりが発生する)、解析では、まず1枚を円筒状に巻き付け、その上に重ね部を張り付けた設定にしているためと考えられる。

コンクリート強度を変化させた図-3(a)~(c)によれば、一部を除いて解析結果は実験結果を比較的良く再現できているといえるが、全ての供試体について実験結果より解析結果の方がCFシートの破断時の軸ひずみが大きくなっている。また、コンクリート強度が高く、補強量が多い供試体(6C40)では、応力-ひずみ関係が実験結果とかなりずれている。このレベルの高強度コンクリートの破壊については、構成則の適応性も含めて、今後更に検討する必要がある。

(2) 等価拘束圧および損傷度の進展

解析結果の考察に先立ち、CFシートを部分的に巻付けた時に生じる拘束圧の分布の特徴について、図-4により説明しておく。圧縮力Pが作用し始めると、CFシートを巻いてない直上部(および直下部)のコンクリートは側方へはらみ出そうとする。そのため、CFシートが巻いてある部分(図-4の中央部分)の上面(下面)は、外に押し広げられ、その反作用として直上部(直下部)のコンクリートには膨張を抑止する力が働くことになる。その結果、CFシートの直上部および直下部のコンクリート要素は、CFシートが巻いて

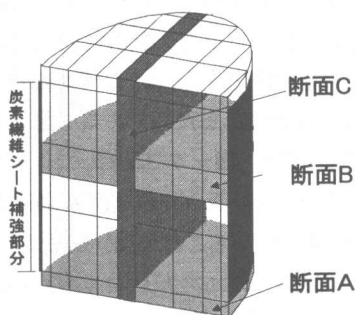


図-5 供試体の切断面(2C40)

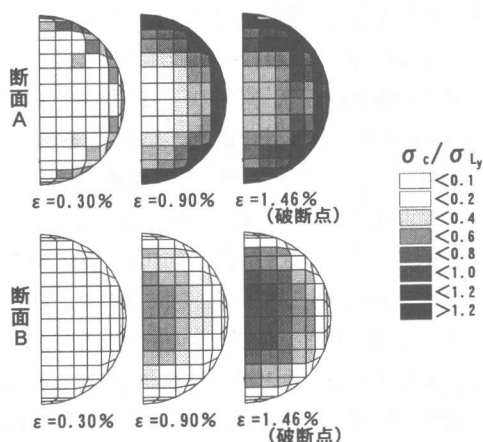


図-6 等価拘束圧(σ_c)の進展

ある区間の中央部より相対的に大きな拘束圧を受ける可能性がある。

図-5に示す2C40供試体の各切断面(A,BおよびC)について供試体内部の等価拘束圧および損傷度を考察する。ここでは、各ガウス点の値を採用した。

切断面A(中央面)およびB(中央面から5.0cm上側)における各要素の平均等価拘束圧(切断面内のガウス点での等価拘束圧とガウス点周辺の要素の面積とを掛け合わせた量の合計を全断面積で割った値)の分布状況を図-6に示す。なお図中の σ_{Ly} は、CFシートの破断時の計算拘束圧(CFシートからの拘束がコンクリート部分に様にかかり、CFシートが同時に引張強度まで達した時の理想的な拘束圧)であり、ここでは5.7MPa

である。図-6の拘束圧の分布が対称でないのは、CFシートを2枚に巻き付けた上に10cmの重ね部分を設けたことにより、その部分の拘束の影響を受けているためである（図-1参照）。断面Aでは、図-4で説明した作用が働き、コンクリート表面の拘束圧が中心部に比べかなり高くなっていることがわかる。また逆に、断面Bでは断面Aのコンクリートの膨張の影響を受けて、表面部分の拘束圧が小さくなっていることがわかる。

断面Cにおける損傷度の進展状況を図-7に示す。損傷度とは、現時点での強度パラメータ f_p とその最大値（破壊時の f_p 値） $\eta_1=243.1$ との比で定義される³⁾。図中の「・」はコンクリート要素のガウス点が軟化領域にあることを示す。強度パラメータ f_p とは、軟化型構成モデルの負荷曲面の大きさを表し、硬化域では、0から最大値（ $\eta_1=243.1$ ）まで増加し、軟化域では、最大値から減少していく。図によれば、CFシートで補強したコンクリートの中央部外側から破壊が進行していることがわかる。実験でもシート中央部で損傷の大きい供試体が多く見られており、解析結果は実験結果とほぼ同様の傾向を示しているといえる。

4. 角形コンクリートの三次元有限要素解析

4.1 供試体および解析概要

本解析で対象とした要因を表-3に、角形コンクリート供試体の形状・寸法を図-8に、要素分割図を図-9に示す。本解析では、荷重条件を中押しとした。中押しとは、荷重面でコンク

表-3 角形供試体の概要

供試体*	r (mm)	コンクリート 材料特性	端面 拘束	CF補 強量
10r	10	強度(MPa) 27.1	なし	2枚 補強
10rf			あり	
20r	20	弾性率(MPa) 3.3×10^4	なし	
20rf			あり	
30r	30	ポアソン比 0.2	なし	
30rf			あり	

* 供試体名：(面取り半径)-r-(端面拘束)

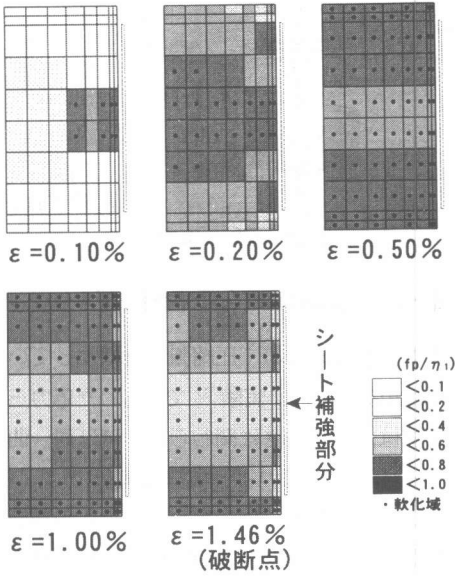


図-7 損傷度の進展 (2C40, 断面C)

リートのみにひずみ変位を与え、CFシートおよび付着要素の変位は自由にする事でコンクリートのみを押すことである。また、端面拘束有りとは、供試体の最上面の水平方向の変位を完全固定することである。

4.2 解析結果および考察

(1) 平均軸応力-ひずみ関係

面取り半径を変えたときの平均軸応力-ひずみ関係の解析値と実験値²⁾を図-10(a)~(c)に示す。実験は、端面摩擦が有る状態で荷重しており、解析は、端面拘束有り無しで行っている。また、端面拘束有り（解析時）の方が供試体端面での横

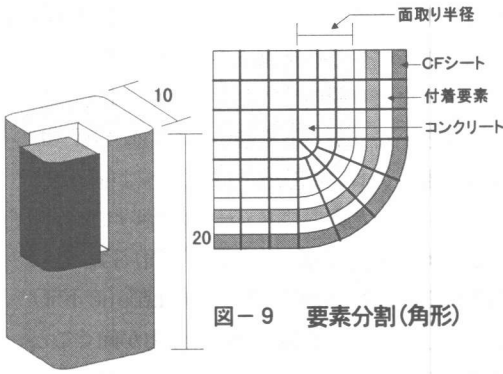


図-8 角型供試体の形状寸法(cm)

図-9 要素分割(角形)

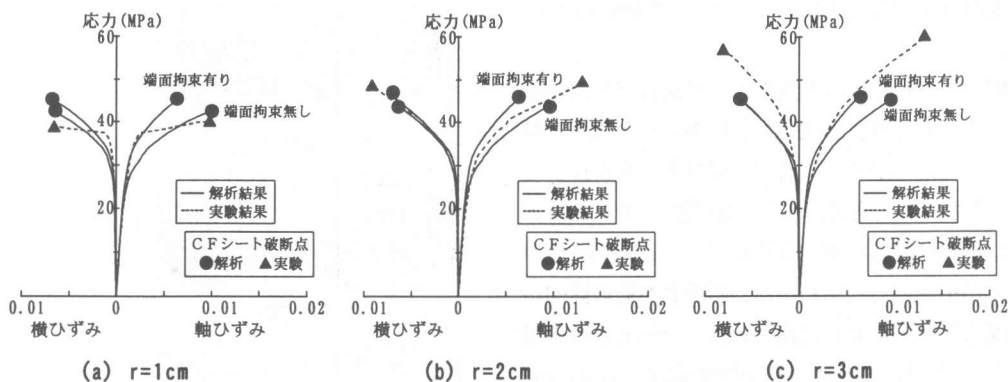


図-10 角形供試体の平均軸応力-ひずみ関係

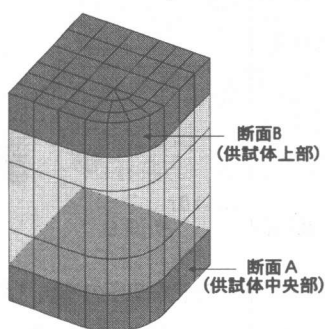


図-11 供試体の切断面 (角形)

方向の変形が無い場合、端面摩擦有り (実験時) より拘束効果が大きい。これらの図によれば、全体的に破断時ひずみは、実験結果より解析結果の方が小さくなる傾向がある。しかし、応力-ひずみ曲線の実験結果は、端面拘束有りとなし条件で得られた2つの解析結果付近に位置しており、概ねではあるが、実験挙動が再現されているといえる。また、シート破断時の横ひずみは、端面拘束および、面取り半径に関係なく約0.007と近似した値を示している。これは、炭素繊維シートの破断ひずみ (材料試験値) の約5割の値に相当し、実験値と比較すると若干低い値である。

(2) 損傷度および等価拘束圧の進展

図-12に面取り半径 $r = 2\text{cm}$ の供試体の断面Aでの損傷度の進展図を、図-13(a)に $r = 1\text{cm}$ の供試体の等価拘束圧の進展図を、図-13(b), (c)に、それぞれ $r = 2\text{cm}$, 3cm の供試体

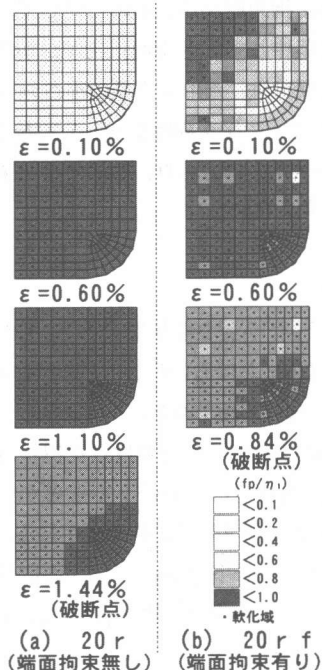


図-12 損傷度の進展 (断面A)

のシート破断時の等価拘束圧の分布を示す。なお図中の σ_{Ly} はCFシート1枚あたりの破断時の計算拘束圧であり、ここでは 6.8MPa である。図-12(a), (b)ともに、隅角部におけるCFシートからの拘束力が強いので、隅角部の破壊の進展が最も遅くなっている。また、(a)図より(b)図の方が供試体中央部での破壊の進展が早い。これは、供試体上部では、端部拘束のために破壊の進展が遅いものの、逆にこの端部拘束のために供試体中

中央部の破壊が助長されることによるものと思われる。

図-13 (a)~(c)を見ると、断面A（供試体中央）より断面B（供試体上部）のほうが拘束圧が高いことがわかる。これは、载荷条件を中押しと設定したためである。また、(a)図によれば断面Aでは、対角線状に強拘束域が生じ、辺の部分の拘束圧が小さいことがわかる。断面Bもその傾向が見られるが断面Aに比べれば、全体的に拘束域が生じている。面取り半径が異なる場合（(a)、(b)図）においても同様の傾向が見られる。また、(a)~(c)図を比較すると、面取り半径 r の大きいものほど断面全体に拘束圧がかかるのに対して、小さいと隅角部に集中して大きな拘束圧がかかることがわかる。実験では、面取り半径の小さい（ $r=1$ cm）で、隅角部での炭素繊維シートの破断による破壊の集中化が見られており、この解析結果の延長上の結果と考えられる。

5. まとめ

- 1) 本シミュレーション解析によって、形状の異なる供試体におけるCFシートの補強効果の違いは、ほぼ再現できる。
- 2) 部分的にCFシートを巻付けた円柱コンクリート供試体では、シート中央部から損傷が最も進展しやすい応力状態が生じる。
- 3) 角形コンクリート供試体では、面取り半径が小さいと辺中央部と隅角部に生じる拘束圧の差が大きい。

謝辞：本研究は、文部省ハイテクリサーチ構想による研究費(中部大学)によったことを付記する。また、有限要素解析データ等の整理に関して、三重大学大学院工学研究科博士前期課程建築学専攻1年の吉田幸夫君にご協力いただいた。ここに、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 伊藤秀樹，辻誠，畑中重光：炭素繊維シートで補強した円形コンファインドコンクリート

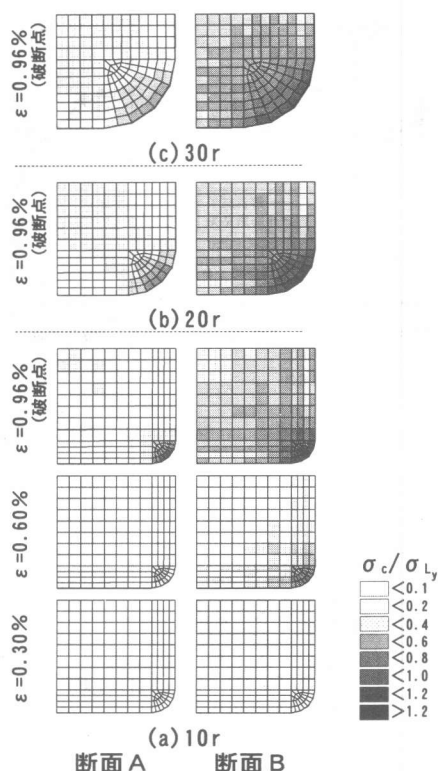


図-13 等価拘束圧の進展（角形）

の圧縮実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，1998

- 2) 辻誠，小池狭千朗，畑中重光：炭素繊維シートで横補強したコンクリートの圧縮挙動について（その1：形状効果），日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.637-638，1999
- 3) 水野英二，森本康介，畑中重光：中心圧縮力を受けるコンファインドコンクリートの拘束効果に関する三次元 FEM 解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，1999
- 4) Zienkiewicz,O.C.: The Finite Element Method , Third Ed., (吉識・山田監訳：マトリックス有限要素法)，培風館，pp.672-796，1984
- 5) Chen,W.F. and Mizuno,E.: Nonlinear Analysis in Soil Meshanics, Elsevier, 1990
- 6) 深津伸，水野英二，山田善一，森本康介，畑中重光：炭素繊維シートで補強されたコンクリート供試体の圧縮挙動解析：土木学会第54回年次学術講演会，pp.512-513，平成11年9月