

論文 炭素繊維シートによって曲げ補強したRC梁の有限要素解析

李翰承^{*1}・友澤史紀^{*2}・野口貴文^{*3}・鹿毛忠繼^{*4}

要旨：炭素繊維シートで曲げ補強したRC梁の曲げ抵抗挙動を把握する目的で、非線形有限要素解析を行い、実験結果と比較検討した。その結果、炭素繊維シートの付着をモデル化することによって実験の荷重一たわみ関係を正確に評価することができた。解析の結果、補強試験体の最大耐力はシートの剥離によって決まり、その時の最大付着強度は 20kgf/cm^2 である。また、付着強度が 30kgf/cm^2 以上、補強量8枚以上では、圧縮コンクリートの圧壊で耐力が決まるため、補強設計においてはシートの付着を十分に確保する方法及びコンクリートの圧壊を防ぐ方法について検討する必要がある。

キーワード：有限要素解析、炭素繊維シート、RC梁、塩害、鉄筋腐食

1. はじめに

塩害や中性化によって鉄筋コンクリート構造部材の鉄筋が腐食した場合には、その腐食程度によって適切な補修あるいは補強が必要である[1]。また、既往の研究によると鉄筋の腐食減量率が1.5%までは、梁の曲げ耐力には影響を与えないが、4.2%になると曲げ耐力は12%減少し、補修だけではなく補強の必要性が報告されている[2]。このような背景から、最近、軽量で作業性がよく腐食の問題がないため、海岸や過酷な環境化にある構造物の補強工法として最適な炭素繊維シート補強工法が注目を浴びている[3]。筆者らも別報[4]の研究を通じ、炭素繊維シートをコンクリートに貼り付けて曲げ補強することによって引張主筋にかかる応力を分担させ梁の曲げ耐力を向上させることを確認している。しかし、炭素繊維シート補強工法では、コンクリートと炭素繊維シートの付着破壊によってその最大耐力が決まり、炭素繊維が本来有している高い引張強度を生かすことができなかった。また、現状では、炭素繊維シートで補強したRC構造部材の耐力推定をシートの剥離現象を見込んだ上で炭素繊維シートの引張強度を低減させ、梁の平面保持を仮定した曲げ理論により曲げ耐力の略算を行っているのが実情である。従って、炭素繊維シートが持っている材料特性を生かして補強設計を行うためには、RC構造部材の挙動や耐力に及ぼす炭素繊維シートの貼付量、定着の有無及び付着強度などの影響を明らかにしておく必要がある。

本研究は、炭素繊維シートのRC梁に対する曲げ補強効果のメカニズムを明らかにするために、曲げ耐力に影響を与える炭素繊維シートとコンクリートの付着性状、シートの補強量及びシートの弾性係数を因子として、2次元弾塑性有限要素解析を行い別報の実験結果と比較検討とともに、炭素繊維シートによる補強設計に有益な情報を提供するものである。

2. 実験結果の概要

本解析で検討した試験体の形状及び載荷方法の概要を図-1に示す。また、表-1に比較検討を行った試験体の実験結果を示す。引張主筋欠損試験体であるBDを炭素繊維シートによって補強することによって耐力は15%~77%向上し、その曲げ補強効果が確認された。しかし、図-2に示

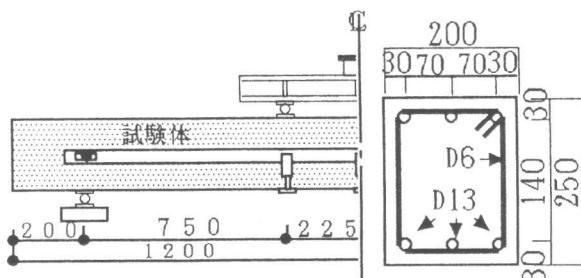
*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻、工修（正会員）

*2 東京大学教授 工学系研究科建築学専攻、工博（正会員）

*3 東京大学助手 工学系研究科建築学専攻、博士（工学）（正会員）

*4 建設省建築研究所 第2研究部（正会員）

すように無補強試験体であるBS及びBDはコンクリートの圧壊によって崩壊したが、補強試験体の最大耐力は、炭素繊維シートとコンクリートの界面でシートの剥離によって決まり、炭素繊維シートの付着特性が補強試験体の耐力に多大な影響を与えることがわかった。



図一 1 試験体の形状及び載荷方法

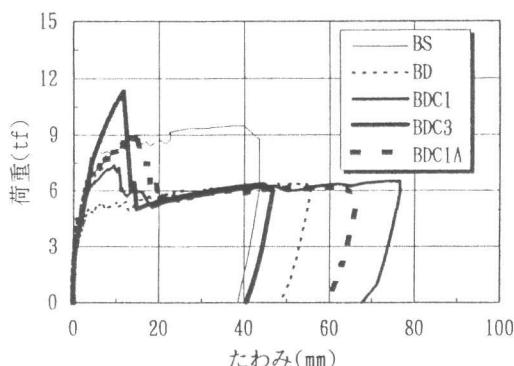
表一 1 実験結果の一覧

記号	試験体名	最大荷重 (ton)
BS	健全試験体	9.50
BD	欠損試験体	6.38
BDC1	1枚補強	7.35
BDC3	3枚補強	11.30
BDC1A	1枚補強と定着	8.90

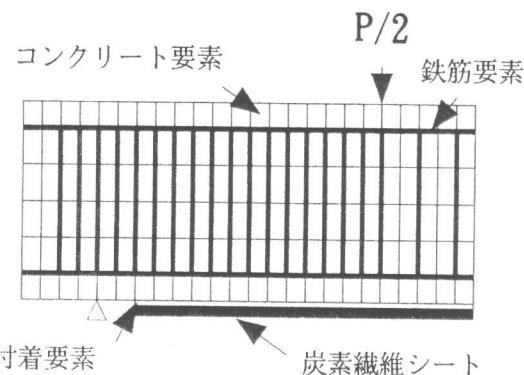
3. 有限要素解析の概要

3. 1 解析方法及び要素分割

解析試験体は、上記2に示した無補強試験体(BS, BD)と補強試験体(BDC1, BDC3)であり、試験体の対称性を考慮し左半分を解析対象とした。また、試験体は図一3に示す要素分割でモデル化した。解析方法は、材料の非線形性を考慮した2次元平面応力弾塑性解析とし、外力としては炭素繊維シートの剥離現象を表現するために、強制変位を与えた。



図一 2 荷重ーたわみ曲線



図一 3 試験体の要素分割図

3. 2 各材料要素の物性

(1)コンクリート：コンクリートの応力ーひずみ関係には載荷実験時の圧縮強度試験から得られた1軸応力ーひずみ関係を用いた。圧縮側は軟化を考慮した2直線モデルとし、引張側はひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ発生後は指數関係により引張軟化を考慮した。コンクリート要素は等方性材料で4節点アイソパラメトリック平面応力要素を用いた(図一4(a)、(b))。

(2)鉄筋：鉄筋は主筋及びあら筋をトラス要素で表現し、その物性は実験値をBi-linearで表した。また、降伏条件としてはVon Misesの降伏条件を用いた(図一4(c))。

(3)鉄筋とコンクリートの付着：コンクリートから鉄筋への応力伝達として、4節点アイソパラメトリック板ボンド要素を用い、その物性は実験から得られた付着応力ーすべり曲線を最大付着応力とせん断剛性を物性値とするBi-linearで表現した(図一4(d))。

(4)炭素繊維シート：炭素繊維シートには降伏点がないので、その物性を弾性係数と引張強度を特性値とする直線で表現した(図一4(e))。

(5)炭素繊維シートとコンクリートの付着:鉄筋の付着要素と同様に4節点アイソパラメトリック板ボンド要素を用いた。その特性値に関しては既往の研究[5]を参考にして、最大付着応力(τ_{cf})とせん断剛性(Dcf)を変えながら実験の荷重一たわみ関係に合うように解析を行った。また、剥離を表現するために最大付着応力に到達した後は、応力を解放するとともに剛性を減少させたモデルで表現した(図-4(f))。

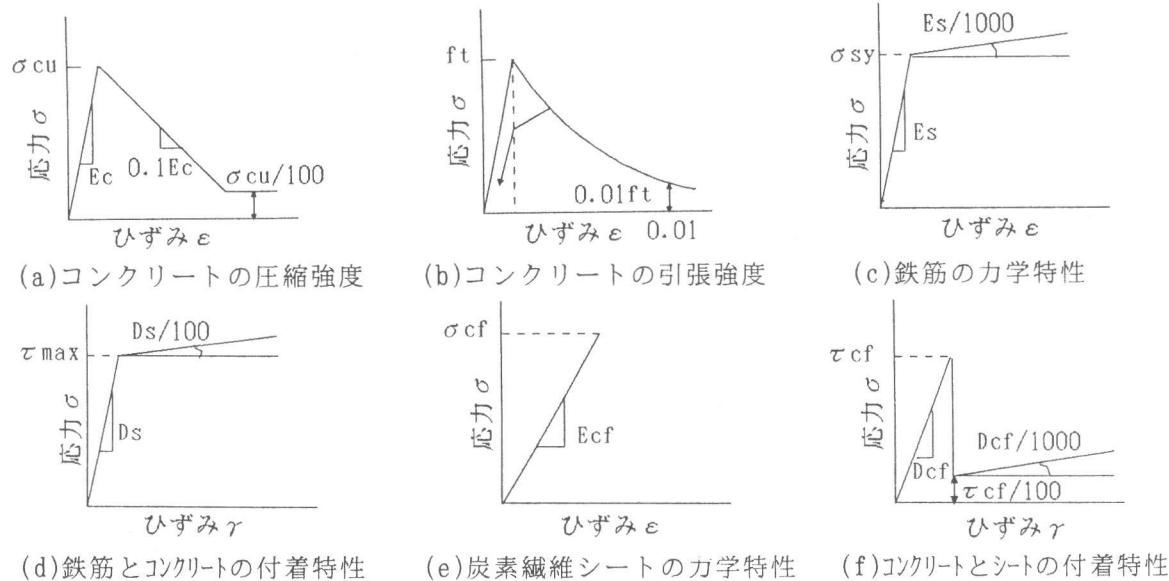


図-4 各材料物性のモデル化

4. 解析結果と実験結果の比較検討

4. 1 ひびわれ性状及び主応力分布

図-5にBDC3試験体の剥離時及び崩壊後におけるひび割れ性状及び主応力分布を示す。崩壊時のひび割れ性状について、実験結果とFEM解析結果を比較すると、曲げひび割れ性状及び圧縮コンクリートの圧壊性状はよく一致しており、本FEM解析手法の妥当性がなされている。FEM解析によれば、圧縮コンクリート部分に大きな圧縮応力が作用し、すでに圧壊に至っている要素も認められる。一方、引張主筋はシートの剥離発生時点では降伏していないことから、炭素繊維シートによる過大な引張補強が施されたため、引張主筋の降伏よりも圧縮コンクリートの圧壊が先に生じたと考えられる。

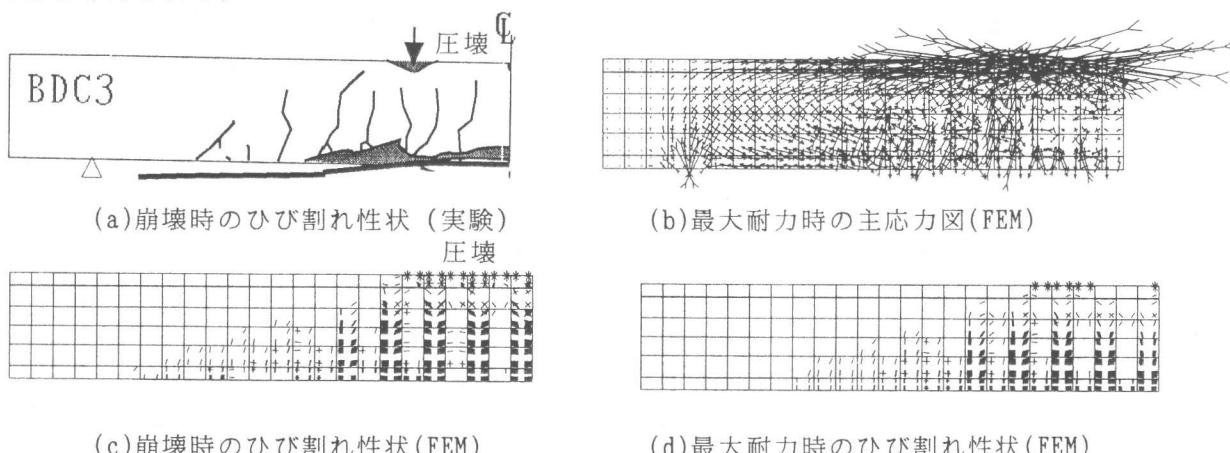


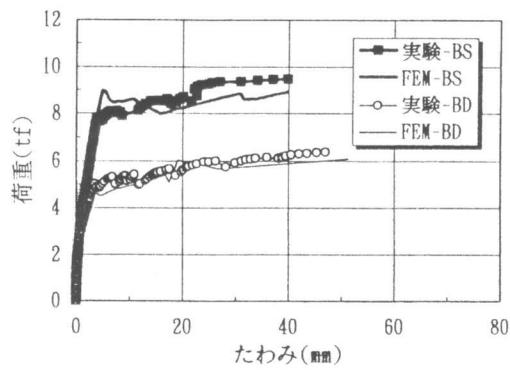
図-5 BDC3の主応力とひびわれ性状

4.2 荷重一たわみ関係

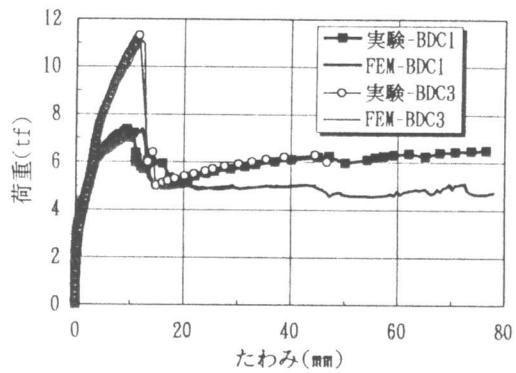
図一6は、BSとBDの荷重一たわみ関係をFEMに解析した結果を実験結果と比較したものである。解析結果は、鉄筋の降伏による剛性の低下を表現できており、荷重一たわみ関係は実験結果とよく一致することから、各材料要素の物性値が適切に入力されたと考えられる。また、図一7に炭素繊維シート補強試験体であるBDC1及びBDC3の荷重一たわみ関係を示す。コンクリートと炭素繊維シートの付着物性を変えながら、実験結果と比較した結果、炭素繊維シートの平均付着強度は約20kgf/cm²であった。図一7に示すように付着要素の応力解放及び剛性を低下させることにより炭素繊維シートの剥離による耐力の急激な低下が表現できた。しかし、FEM解析で定めた鉄筋のひずみ硬化率やコンクリートの圧壊による計算上の収束性の影響から、シートの剥離後の耐力は実験結果より若干低い値を示した。

4.3 引張主筋及び炭素繊維シートのひずみ

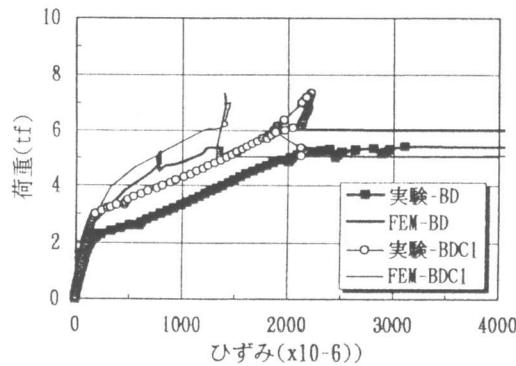
図一8は補強試験体の荷重と引張主筋のひずみとの関係を表したものである。同一荷重での鉄筋のひずみは、炭素繊維シートで補強することによって小さくなることをFEM解析結果も示している。また、荷重が増加しても鉄筋のひずみが約2000μ付近で増加しなくなる現象は、FEM解析でも生じたが、この原因は、ひび割れ発生に伴う鉄筋とコンクリートの局部的な付着破壊や鉄筋降伏前のコンクリートの圧壊による変形を弾性係数の大きい炭素繊維シートが拘束するためであると考えられる。また、図一9は、荷重と炭素繊維シートのひずみ関係を示したものであるが、FEM解析結果は実験結果とよく一致しており、荷重初期段階から炭素繊維シートは荷重を負担し、両結果とも約5000~6000μでシートの剥離が生じることを示している。



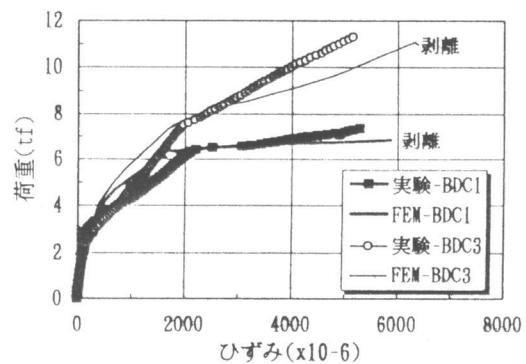
図一6 無補強試験体の荷重一たわみ曲線



図一7 補強試験体の荷重一たわみ曲線



図一8 荷重と引張主筋のひずみの関係



図一9 荷重と炭素繊維シートのひずみ関係

4.4 炭素繊維シートの付着性状

図-10は、BDC3の炭素繊維シートのひずみ分布を示したものである。実験結果とFEM解析結果はほぼ一致しており、曲げモーメントが最も大きい等曲げ区間で載荷初期段階から炭素繊維シートのひずみは増加している。また、最大耐力時（剥離時）のひずみは等曲げ区間で約 6000μ 程度で平坦になっており、炭素繊維シートの付着破壊が生じている。図-11は、BDC3の最大耐力時のコンクリートと炭素繊維シート間のせん断応力分布である。最大せん断応力は約 20kgf/cm^2 であり、コンクリートのひび割れ部分及びシートの付着破壊が生じた部分で大きくなっている。

5. 有限要素法によるパラメータ解析

5.1 炭素繊維シートとコンクリートの付着の影響

図-12は、補強試験体の耐力に及ぼすコンクリートと炭素繊維シートの付着の影響を調べたものである。BDC3について付着応力を変化させながら、FEM解析を行った結果、本解析の範囲では $15\sim30\text{kgf/cm}^2$ の付着応力区間では付着応力の増加によって最大耐力も増加しているが、 15kgf/cm^2 以下では付着応力の増加に伴う耐力の変化は生じなかった。一方、 30kgf/cm^2 以上でも付着応力の増加に伴う耐力の変化は生じなかったが、これは、コンクリートの圧壊により最大耐力が決まるためである。

5.2 炭素繊維シート補強量の影響

図-13は、BDC3において他の物性は一定にし、炭素繊維シートの貼付量が最大耐力に及ぼす影響を調べたものであるが、貼付量を増やしても最大耐力は頭打ちの傾向がある。これは、過大な引張補強によるコンクリートの圧壊や炭素繊維シートの付着破壊が先行したためである。

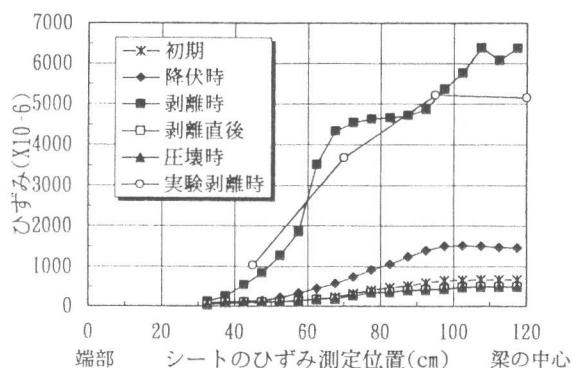


図-10 炭素繊維シートのひずみ分布

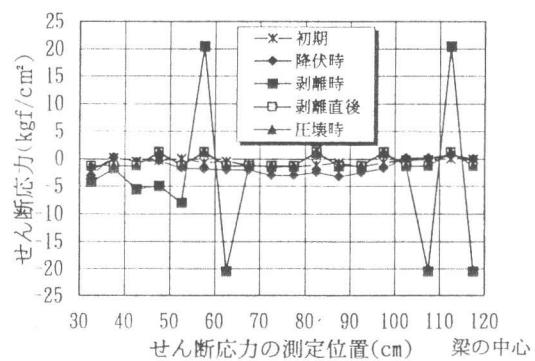


図-11 コンクリートと炭素繊維シートのせん断応力分布

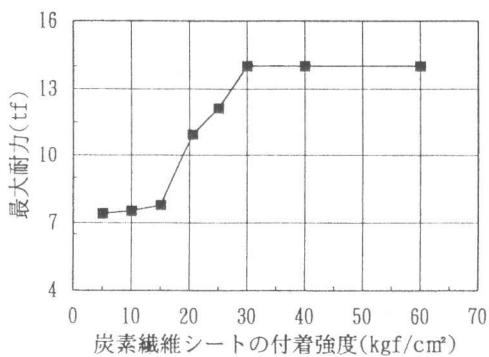


図-12 最大耐力に及ぼす付着強度の影響

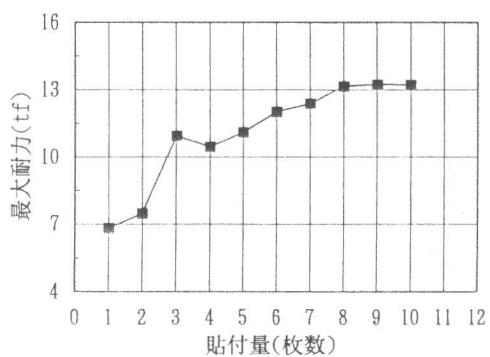


図-13 炭素繊維貼付量が最大耐力に及ぼす影響

5.3 炭素繊維シートの弾性係数の影響

図-14及び図-15は、他物性を一定にし、炭素繊維シートの弾性係数が補強試験体の最大耐力及び曲げ剛性に及ぼす影響を調べたものである。一般的に使用されている炭素繊維シートの弾性係数($2.5 \sim 6.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)の範囲では、弾性係数が大きくなるほど、試験体の耐力及び曲げ剛性は増加する傾向となった。

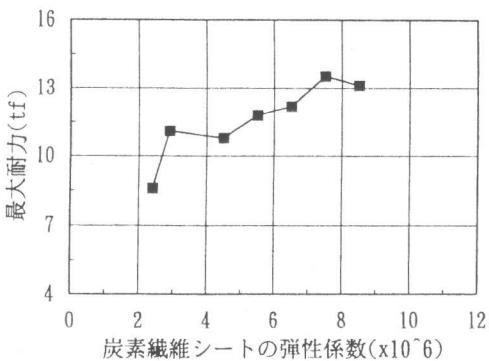


図-14 シートの弾性係数と最大耐力との関係

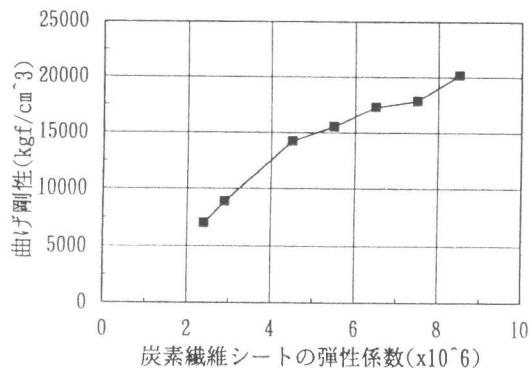


図-15 シートの弾性係数と曲げ剛性との関係

6.まとめ

炭素繊維シートで曲げ補強したR C梁の有限要素解析から以下に示す知見が得られた。

- (1) コンクリートと炭素繊維シートの付着要素において剥離現象をモデル化した有限要素解析によって、実験から得られたR C梁の荷重一たわみ関係を表現することができた。
- (2) 炭素繊維シートで補強したR C梁の曲げ耐力は、シートとコンクリートの界面でシートの剥離によって決まり、本解析では剥離時の最大付着応力は 20 kgf/cm^2 であると推定された。
- (3) 炭素繊維シートの付着強度を大きくすることによって曲げ耐力は向上するが、付着強度が 30 kgf/cm^2 以上ではコンクリートの圧壊によって耐力が決まるためその効果は小さかった。
- (4) 炭素繊維シートの補強量を増やすことによって曲げ耐力は向上するが、過大な引張補強はコンクリートの圧壊を招来する。解析によれば、本実験の範囲では8枚の貼付までその効果が認められることがわかった。
- (5) 炭素繊維シートの弾性係数の増加は曲げ耐力及び剛性の向上に効果がある。
- (6) R C梁に対する炭素繊維シート補強工法を実用化するためには、炭素繊維シートとコンクリートの付着強度の向上が今後の課題であると考えられる。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金一般研究(A)（課題番号：06402045、代表者：友澤史紀東京大学教授）の一部として行ったものである。解析では(株)Total Information Serviceの金刀督純氏、実験では、建設省建築研究所の第2研究部の皆様及び黄光律をはじめとする東大友澤研究室のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。材料は三菱化学(株)から提供されたもので、坂井廣道及び久部修弘氏に感謝いたします。

参考文献

- [1]河野広隆ほか：塩害・中性化と補修・補強方法、コンクリート工学、Vol.31, No.7, pp.65-68, 1993.7
- [2]G.J.Al-Sulaimani,M.Kaleemullah,I.A.Basubui:Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members, ACI Structural Journal, Vol.87, No.2, pp.220-231, 1990.3
- [3]宇治公隆：シート状連続炭素繊維補強材を用いた既設鉄筋コンクリート部材のせん断耐力向上効果に関する研究、コンクリート工学論文集、第3巻、第2号、pp.37-47, 1992.7
- [4]李翰承、友澤史紀、野口貴文、庄司弘和：鉄筋腐食をモデル化したR C梁における炭素繊維シートの曲げ補強効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.1, 1996(投稿中)
- [5]宇治公隆：既設構造物の補強におけるシート状連続炭素繊維の付着特性、土木学会第47回年次学術講演会、V-391、pp.812-813、1992.9