

炭素繊維シート補強部材の耐荷特性に与える鉄筋腐食の影響[†]

山本 貴士* 服部 篤史** 宮川 豊章**

Load Carrying Behavior of RC Member Strengthened with CFRP Sheet Subjected to Reinforcing Steel Corrosion

by

Takashi YAMAMOTO*, Atsushi HATTORI** and Toyoaki MIYAGAWA**

Strengthening technique using CFRP sheet has recently spread widely and strengthening of the existing RC structures deteriorated due to reinforcing steel corrosion is becoming important. Furthermore, it is also important to understand load carrying performance of strengthened RC member during its whole life under corrosive environment. In this study, corrosion of reinforcing steel in RC beams strengthened with CFRP sheet was simulated by the electrolytic corrosion using an external current source. Tension test of corroded reinforcing steel, observation of cracks due to reinforcing steel corrosion in cross section and static flexural test were carried out in order to investigate the influences of reinforcing steel corrosion on load carrying behavior of RC member strengthened with CFRP sheet. Additionally, finite element analysis was carried out using discrete joint elements for the bond between concrete and reinforcing steel, the bond between concrete and CFRP sheet and longitudinal crack due to reinforcing steel corrosion. Reinforcing steel corrosion hardly affected static load carrying behavior of RC member strengthened with CFRP sheet until yield. However, longitudinal distribution of strain in CFRP sheet was changed to be uniform by longitudinal crack due to reinforcing steel corrosion, which was successfully simulated by the finite element analysis.

Key words: RC member, Strengthening using CFRP sheet, Reinforcing steel corrosion, Crack due to reinforcing steel corrosion, Load carrying behavior, Electrolytic corrosion, Finite element analysis

1 緒 言

近年、施工時の使用材料の品質、供用期間中の様々な環境作用、荷重作用に起因するコンクリート構造物の劣化・損傷事例が数多く報告され、このような構造物に対する補強が注目されている。中でも、連続繊維シートを用いた補強工法は、施工性の良さや材料の高耐久性への期待などから、広範囲にわたる適用の検討が行われてきている。¹⁾

補強を行う構造物に対しては、その種類、使用目的、重要度に応じて、補強以降の残存設計耐用期間においても保有すべき性能が規定されるため、安全性、使用性、第三者影響度に関する性能などの各種性能の経時的な抵抗性、すなわち耐久性を考慮する必要がある。²⁾

このような補強部材の一つに、塩害を受ける連続繊維シート補強部材が考えられる。これには、すでに塩害により鉄筋腐食が生じた部材に対して補強を行う場合と、海砂の使用あるいは飛来塩分の蓄積により多量の塩化物が含まれている部材において、補強後に鉄筋腐食が進行する場合が考えられる。後者については、連続繊維シート補強層の環境遮断性により新たな塩化物の浸透抑制にきわめて大きな効果が期待できるものの、内部に存在す

る塩化物の拡散によって鉄筋腐食が生じる可能性がある」と指摘されている。³⁾ これらのような、鉄筋腐食部材の補強あるいは補強後に鉄筋腐食が生じる部材について、その耐荷特性を把握することは、補強部材の耐久性能を評価する上で重要である。しかし、腐食にともなう鉄筋の機械的性質の低下および腐食ひび割れが耐荷特性に与える影響など、明らかにすべき点が多い。

そこで本研究では、炭素繊維シート補強部材中の鉄筋腐食を電食法によりモデル化し、静的曲げ試験をもとに鉄筋腐食および腐食ひび割れが補強部材の耐荷特性に与える影響を検討した。また、2次元有限要素解析において、鉄筋とコンクリートの付着劣化および腐食ひび割れを離散型の要素を用いて表現することにより、腐食鉄筋を有する炭素繊維シート補強部材の耐荷特性を解析的に検討した。

2 実験概要

2.1 曲げ試験

曲げ試験供試体は、幅 × 高さ × 全長 (スパン長) = 100 × 100 × 400 (300)mm で、引張主鉄筋に 1-D10 (SD295A) をかぶり 20mm で配した。また、せん断補強筋には D6 (SD295A) フープ筋を間隔 40mm で配置し

[†] 原稿受理 平成 12 年 11 月 13 日 Received Nov. 13, 2000

* 学生会員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻 〒606-8501 京都市左京区吉田本町, Dept. of Civil Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501

** 正会員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻 〒606-8501 京都市左京区吉田本町, Dept. of Civil Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501

通常、電食では一様腐食に近い状態となるが、塩化物を含む供試体中での電食であり、局所的な断面欠損が生じたものと考えられる。

3・2 断面内の腐食ひび割れ状況

炭素繊維シート補強部材の腐食段階 1 および 2 における断面内の腐食ひび割れ状況を Fig. 4 に示す。なお、無補強供試体の腐食ひび割れは、かぶり方向（底面方向）へのものが卓越しており、底面でのひび割れ幅は 1.0mm 程度で、鉄筋に沿って発生していた。

一方、炭素繊維シート補強供試体では、供試体側面方向への腐食ひび割れが卓越していた。また、せん断補強筋の拘束がないスパン中央でかぶり方向への微細な腐食ひび割れが見られたものの、FRP 層にひび割れを生じさせるには至っていなかった。電食であるため炭素繊維シートの有無によって電流経路が変化したものと考えられる。また、繊維方向は鉄筋に対して平行であり、炭素繊維シートによる鉄筋直角方向の拘束力は小さいが、FRP 層によりコンクリートの表面強度が若干大きくなったことも一因として考えられる。しかし、腐食段階 2 では、かぶり方向への微細な腐食ひび割れが経路となったと思われる腐食生成物が FRP 層とコンクリートの間に蓄積し、一部 FRP 層が膨らみはく離する現象も見られた。

3・3 分散型要素を用いた 2 次元有限要素解析

炭素繊維シート補強部材の耐荷特性に与える鉄筋腐食の影響を検討するために、鉄筋とコンクリートの付着、腐食ひび割れおよび炭素繊維シートとコンクリートの接着を考慮できる分散型の要素を用いた 2 次元有限要素解析⁵⁾を行った。

3・3・1 解析モデルおよび境界条件 本解析では、実験に用いた供試体の対称性を考慮して左側半分についての解析を行った。要素分割図を Fig. 5 に示す。解析は、以下の 2 ケースについて行った。

(1) Case I

無補強および炭素繊維シート補強供試体において、それぞれ健全なものと、腐食段階 2 の腐食が生じたものについて、鉄筋の断面減少および鉄筋とコンクリートの付着劣化を考慮して解析を行った。腐食段階 2 の質量減少率は、N2 供試体で 8.2%、CF2 供試体で 8.6% であるが、解析上は質量減少率を 8% とした。付着劣化を生じた付着要素の特性は 3・3・2 項で述べる。

(2) Case II

炭素繊維シート補強供試体の腐食段階 2 の CF2 供試

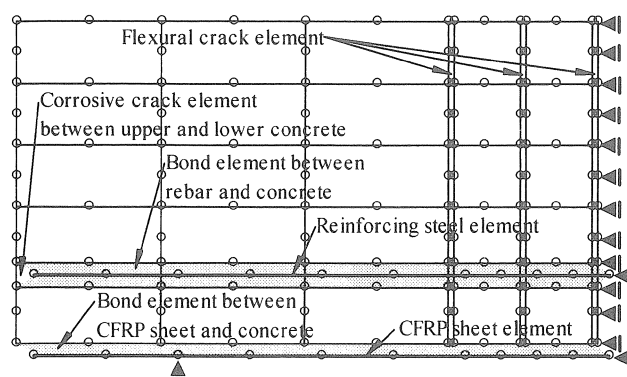


Fig. 5. F. E. M. mesh.

体について、鉄筋の断面減少および鉄筋とコンクリートの付着劣化を考慮するとともに、供試体側面の腐食ひび割れに対し、ひび割れ要素を適用して行った。質量減少率は Case I と同様、8% とした。なお、腐食ひび割れ要素を挟む上下のコンクリートと鉄筋の付着を考慮するため、本ケースでは、鉄筋周長の半分ずつが上下コンクリートと付着しているとしてモデル化している。

境界条件は、支点の鉛直方向を固定、スパン中央の水平方向を固定とし、スパン中央上縁に鉛直下向きに増分変位を与えた。

3・3・2 要素特性 各要素には、中間節点を有する 2 次要素を用いた。コンクリートには 2 次元四辺形要素、鉄筋には 1 次元はり要素、炭素繊維シートには 1 次元線要素、鉄筋とコンクリートの付着、炭素繊維シートとコンクリートの付着、腐食ひび割れおよび曲げひび割れには、各要素の界面において節点を共有する 1 次元線要素を用いた。

コンクリートには文献 6) の要素特性を使用し、引張応力に対する軟化域は考慮していない。このことにより、コンクリートに過大な引張応力が生じることを避けるために、供試体端部から 150, 175, 200mm の位置に曲げひび割れを模したひび割れ要素をあらかじめ導入した。⁶⁾ なお、コンクリート強度 $f'_c = 27\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数 $E_c = 2.65 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.1667$ とした。鉄筋にも同様に文献 6) の要素特性を使用し、降伏点および引張強度は $f_y = 350\text{N/mm}^2$ 、 $f_u = 500\text{N/mm}^2$ で一定とした。ただし、腐食段階 2 では、一様腐食を仮定し、質量減少率を断面減少率として公称断面積 A_s および公称周長 u_s を低減した。炭素繊維シートは、引張強度 $f_u =$

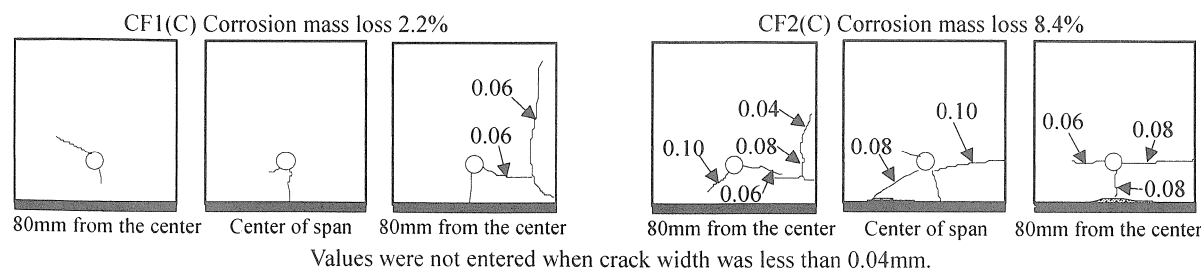


Fig. 4. Crack due to reinforcing steel corrosion in cross section (unit : mm).

3500N/mm², ヤング係数 2.3×10^5 N/mm² の線形弾性体とし, 破断ひずみを 1.5% とした。

鉄筋とコンクリートの付着要素の応力-変位関係は, 要素法線方向の応力および相対変位をそれぞれ σ_n , δ_n , 接線方向の応力および相対変位をそれぞれ τ_t , δ_t とすると次式で表される。

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{nn} & B_{nt} \\ B_{tn} & B_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \end{Bmatrix} = B \cdot \delta \quad (1)$$

本解析では, 要素接線方向のみ非線形性を考慮し, 応力-変位マトリックスの係数 B_{tt} に Fig. 6 に示す要素特性⁶⁾を導入し, $B_{nn} = 1.0 \times 10^4$ N/mm³, $B_{nt} = B_{tn} = 0.0$ N/mm³ で一定とした。また, 腐食による付着劣化は, 式 (2) に示す付着強度低下式⁷⁾により付着強度 t_{bcorr} を算出し用いた。

$$\frac{\tau_{bcorr}}{\tau_{b0}} = e^{-0.0607 \times (\text{Corrosion mass loss (\%)})} \quad (2)$$

炭素繊維シートとコンクリートの付着要素も式 (1) の応力-変位関係で表し, B_{tt} には付着応力-すべり関係⁸⁾を用いた。ただし, 付着劣化は考慮しないこととした。

腐食ひび割れおよび曲げひび割れ要素の応力-変位関係も付着要素と同様に次式で表される。

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{nn} & C_{nt} \\ C_{tn} & C_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \end{Bmatrix} = C \cdot \delta \quad (3)$$

ここで, 腐食ひび割れの応力-ひび割れ幅およびずり変位関係に関しては不明な点が多いため, 今回は要素法線方向および接線方向に $C_{nn} = C_{tt} = 1.0 \times 10^3$ N/mm³ の線形関係を適用し, また $C_{nt} = C_{tn} = 0.0$ N/mm³ とした。⁹⁾ なお, 腐食ひび割れは鉄筋高さの位置の軸方向全長に生じていると仮定し, 奥行きは供試体の幅と同一の 100mm とした。

解析結果については, 以下の曲げ試験結果とあわせて考察を行う。

3・4 曲げ試験

3・4・1 ひび割れおよび破壊性状 曲げ試験終了後のひび割れ状況および荷重低下原因となった現象を, 載荷前に観察した腐食ひび割れとともに Fig. 7 に示す。

載荷前の腐食ひび割れの観察では, CF2 供試体のみに, 供試体側面の主筋に沿う腐食ひび割れが観察されたが, 断面内腐食ひび割れの観察からもわかるように, CF1 供試体においても, 側面には到達していないものの, 断面

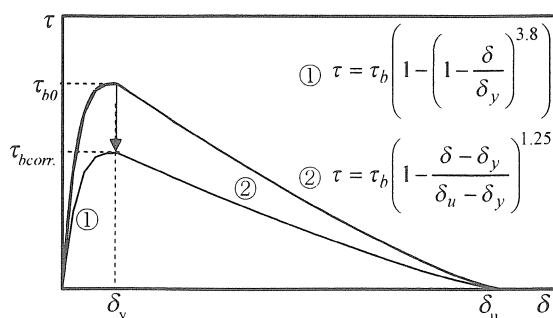


Fig. 6. Bond stress-slip relationship.⁶⁾

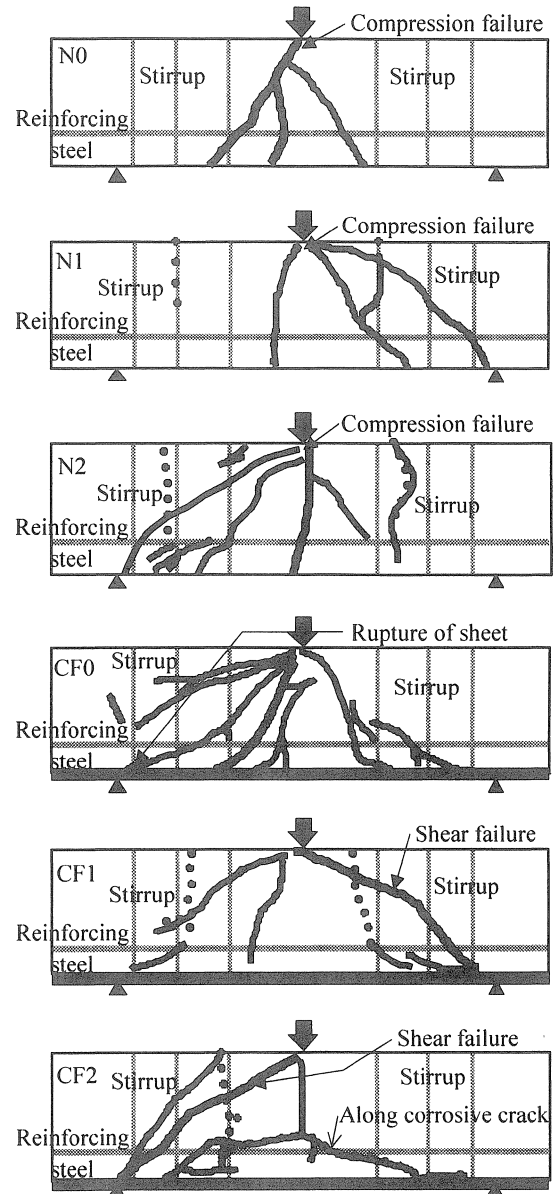


Fig. 7. Crack pattern (Dotted line : Crack due to rebar corrosion before loading).

高さ方向を横切る腐食ひび割れが存在している。

無補強供試体では, セン断ひび割れよりも曲げひび割れの方が卓越する傾向にあるが, 炭素繊維シート補強供試体では, 補強による曲げ耐力の向上によりセン断ひび割れの拡幅が顕著となった。また, 荷重低下は, 支点付近のセン断ひび割れと炭素繊維シートが交差する部分で, 鉛直方向のずれが生じ炭素繊維シートが破断したことにより生じた。

腐食段階 1 および 2 では, 一部の電流がセン断補強筋にも流れたと考えられ, セン断補強筋に沿った腐食ひび割れが観察された。曲げ試験終了後, 内部のセン断補強筋を調査したところ, 防錆塗料が剥がれ腐食していることが確認できた。セン断補強筋とコンクリートの付着劣化が, セン断ひび割れ幅の拡幅が生じる一因となったものと考えられる。今回の電食による腐食のモデル化に限らず, セン断補強筋の腐食は, 特にセン断余裕度が小さ

い曲げ補強部材の耐荷性状を考える上で、留意すべき項目であるものと考えられる。また、CF2 供試体では、主筋に沿う腐食ひび割れが、載荷初期段階において側面の軸方向に進展した。

3・4・2 荷重－変位曲線 各供試体の荷重－変位曲線を、解析結果とともに Fig. 8 に示す。

無補強供試体の実験結果から、今回の電食による腐食が降伏荷重、最大荷重および変形挙動に与える影響は、小さいことがわかる。

炭素繊維シート補強供試体の実験結果から、降伏荷重（約 40kN）は、腐食段階によらずほぼ同じであり、炭素繊維シートで曲げ補強した部材では、補強効果に与える鉄筋腐食の影響は小さい。しかし、せん断補強筋の腐食にともなうせん断補強筋とコンクリートの付着劣化により、せん断ひび割れ幅が拡幅し、骨材のかみ合わせ作用が低下したと思われる荷重低下が生じたため、最大荷重については鉄筋腐食の影響は評価できなかった。

今回のような電食による腐食のモデル化に対し、塩水散水環境下で主筋が腐食した曲げ部材に対して載荷実験を行った結果¹⁰⁾では、2本の引張側主筋のうち大きい方の腐食量を質量減少率としているものの、質量減少率 4% 程度でも最大荷重が低下し、またじん性が顕著に低下している。電食よりも塩化物存在下での腐食の方が、局所的な鉄筋断面欠損および鉄筋とコンクリートの付着劣化が大きくなったことで、曲げ変形性能の低下が生じたものと考えられる。したがって、実際の塩害環境下での鉄筋腐食が炭素繊維シート補強部材の曲げ変形性能に与える影響を評価するためには、さらなる検討が必要である。

一方、解析結果の降伏荷重および最大荷重は、無補強、炭素繊維シート補強供試体ともに、実験結果を良く捉えている。また、腐食を考慮したものは、鉄筋の断面欠損によって最大荷重が若干小さくなっている。

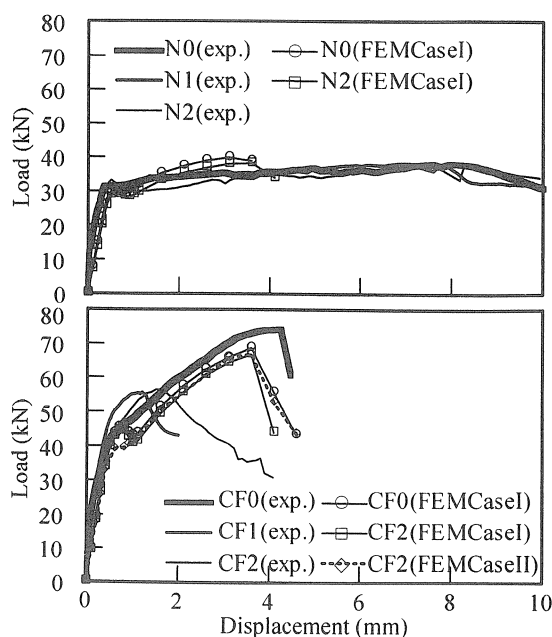


Fig. 8. Load-displacement curve.

3・4・3 初期剛性 次に、鉄筋腐食が初期剛性に与える影響を検討するために、荷重－変位曲線の変位 1.5mm までの部分を取り出したものを Fig. 9 に示す。

実験結果では、無補強供試体、炭素繊維シート補強供試体ともに、30kN 付近までの初期剛性に与える腐食の影響はほとんど見られない。しかし、炭素繊維シート補強供試体では、腐食したものの方が、30kN から 45kN 付近の剛性が大きくなっている。ひび割れの状況からもわかるように、曲げひび割れが少なく、せん断ひび割れが支配的になったことが影響していると考えられる。ただし、曲げモーメント一定区間の無い中央一点載荷であったため、ひび割れ性状にばらつきが生じ、剛性が異なった可能性もある。

解析結果は、無補強供試体、炭素繊維シート補強供試体ともに、実験結果より曲げひび割れ発生時（15kN 付近）までの剛性が小さいが、曲げひび割れを模した仮定のひび割れ要素をあらかじめ導入しているためである。しかし、曲げひび割れ発生後の剛性はよく捉えている。また、Case I の鉄筋とコンクリートの付着劣化を考慮したものと Case II の腐食ひび割れ要素を導入したものでは、Case I の健全なものよりも若干剛性が小さい。一方、Case I の付着特性を低減したものよりも Case II の方が、35kN 付近の剛性が小さくなっている。腐食ひび割れによりアンボンド化傾向が強くなり、これより下のひび割れが生じていないコンクリートの引張力負担が減少しているためである。ただし、鉄筋降伏後の炭素繊維シートへの引張力の分担が大きくなる領域での剛性は、ほぼ同じとなった。

3・4・4 炭素繊維シートひずみの軸方向分布 スパン中央と中央から 100mm 位置での炭素繊維シートひずみを Fig. 10 に示す。なお、せん断ひび割れ発生（約 40kN）後は、せん断ひび割れがせん断スパン内シートの

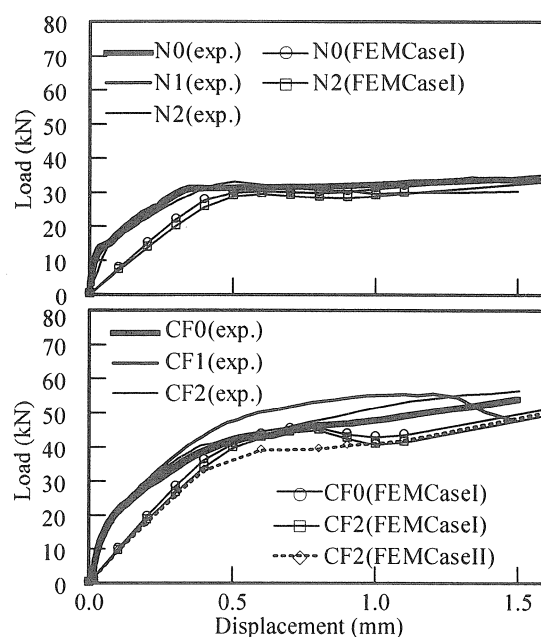


Fig. 9. Load-displacement curve in the early stage.

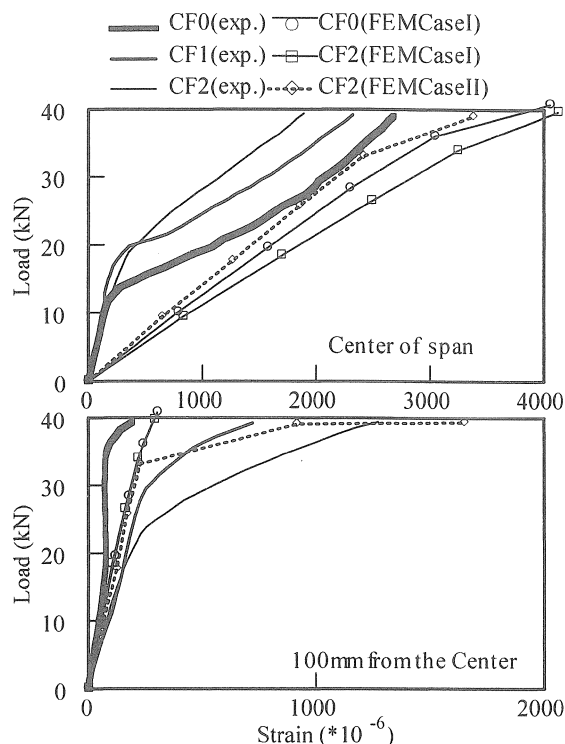


Fig. 10. Strain of CFRP sheet.

ひずみに与える影響が大きくなるため、荷重 40kN までの領域を記した。

実験結果では、炭素繊維シートのひずみは、同一荷重において、腐食が大きなもののほどスパン中央では小さく、逆に 100mm 位置では大きくなっており、腐食ひび割れよりも下の部分でアンボンド化傾向が強くなり、軸方向に均一化した応力が作用していると考えられる。

解析結果は、Case I の健全と付着劣化を考慮したものでは、100mm 位置のシートひずみに差は見られず、スパン中央ではむしろ付着劣化を考慮したものの方が大きくなっている。これは、付着劣化を導入したことにより、中央のひび割れ幅が健全よりも大きくなったためであると考えられる。これに対し、Case II では、スパン中央のシートひずみが小さく、100mm 位置のシートひずみが大きくなるという傾向を捉えている。鉄筋とコンクリートの付着劣化を考慮するとともに、腐食ひび割れ要素を導入することによって、腐食ひび割れによるアンボンド化を表現できたものと考えられる。

以上のような離散型の要素は、一様な腐食、付着劣化および腐食ひび割れの分布だけでなく、局所的な腐食に適用することで、より詳細なシミュレーションが期待できるものと思われる。

4 結 論

電食により鉄筋腐食をモデル化した炭素繊維シート補強供試体に対し静的曲げ試験を行うとともに、離散型要素を用いた 2 次元有限要素解析を行い、炭素繊維シート補強部材の耐荷特性に与える鉄筋腐食の影響を検討し

た。本研究の範囲内で得られた主な結果をまとめて結論とする。

(1) 腐食鉄筋の引張試験より、降伏強度および引張強度に低下は見られなかったものの、伸びが顕著に低下した。鉄筋が延性材料であることから、強度よりも伸びにおいて孔食の影響を大きく受けるものと考えられる。

(2) 電食による鉄筋腐食のモデル化では、炭素繊維シート補強の有無によって電流経路が異なるため、断面内の腐食ひび割れの発生方向が変化した。

(3) 電食により鉄筋腐食をモデル化した炭素繊維シート補強部材に対する静的曲げ試験において、部材降伏までの曲げ補強効果に与える鉄筋腐食の影響は認められなかった。ただし、炭素繊維シートによる曲げ補強では、曲げ耐力が増加するため、せん断補強筋の腐食に対して留意する必要がある。

(4) 電食により鉄筋腐食をモデル化した炭素繊維シート補強部材では、腐食ひび割れの存在により、炭素繊維シートのひずみが軸方向に均一化する傾向が見られた。

(5) 2 次元有限要素解析において離散型の要素を用い、鉄筋腐食による鉄筋とコンクリートの付着劣化とともに、腐食ひび割れを考慮することにより、腐食ひび割れの存在による炭素繊維シートひずみの軸方向分布の変化を捉えることができた。

最後に、本論文の作成にあたり貴重な助言、ご指導をいただいた児島孝之教授（立命館大学）ならびに日比野憲太氏（立命館大学大学院博士後期課程）、実験に際してご協力いただいた卒業研究生の真邊剛典氏（現日本道路公団）に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、服部篤史，山本貴士，嘉指成詞，宮川豊章，土木学会論文集，599/V-40，59（1998）。
- 2) 宮川豊章，コンクリート工学，36-7，4（1998）。
- 3) 堀口賢一，宇治公隆，第 54 回セメント技術大会講演要旨，388（2000）。
- 4) “コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)”，p.1（1987）日本コンクリート工学協会。
- 5) 日比野憲太，中越貴宣，児島孝之，高木宣章，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集，5，574（1999）。
- 6) “土木コンクリート構造物の震災対策に関する研究委員会報告書”，p.322（1999）日本コンクリート工学協会近畿支部。
- 7) “コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書”，p.48（1998）日本コンクリート工学協会。
- 8) 劉 玉擎，彦 坂熙，亀山好秀，原田拓也，コンクリート工学年次論文報告集，20-3，1（1998）。
- 9) 松尾真紀，児島孝之，高木宣章，土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集，5，508（1997）。
- 10) 尾崎 健，服部篤史，宮川豊章，土木学会関西支部年次学術講演概要，V-28，1（2000）。