

論文 腐食鉄筋を有する炭素繊維シート横拘束曲げ部材の変形特性

山本 貴士^{*1}・柚本 真介^{*2}・服部 篤史^{*3}・宮川 豊章^{*4}

要旨：本研究では、鉄筋腐食部材への炭素繊維シート巻立て補強の適用性と補強後の変形性能の経時変化に関する知見を得ることを目的として、引張主筋の腐食をモデル化した炭素繊維シート横拘束曲げ部材について、腐食量ならびに炭素繊維シート横拘束量が補強部材の曲げ変形特性に与える影響を検討した。質量減少率 23%の腐食で、引張主筋の破断による終局となり、健全部材を補強したものよりも曲げ変形性能が低下した。また、同一変位 3 回繰返しの正負交番载荷では、質量減少率 3.3%の炭素繊維シート横拘束量が最も多いもので主筋破断による終局となった。

キーワード：鉄筋腐食、横拘束効果、炭素繊維シート、変形性能、曲げ部材

1. はじめに

柱部材の周方向に炭素繊維シートを巻き立て、部材の塑性変形性能を向上させることを目的とする靱性補強がある。この場合、横拘束効果による曲げ圧縮部コンクリート終局ひずみの増加に対して、十分な引張主筋の伸びが必要となる。しかし、引張主筋腐食部材へ靱性補強を適用する場合、あるいは靱性補強後に引張主筋が腐食する場合、鉄筋の機械的性質、特に伸び能力の低下が生じるため、曲げ圧縮部のコンクリートが圧潰する前に引張主筋が破断し終局に至る可能性がある。このような破壊形式は、急激な荷重低下をともなった脆性的な破壊形態であり、靱性補強により期待される変形性能が得られないことが懸念される。

本研究では、引張主筋腐食部材への靱性補強の適用性、ならびに靱性補強部材の変形挙動の経時変化を把握するために、予め腐食させた鉄筋を用いて作製した炭素繊維シート横拘束曲げ部材に対し、正負交番曲げ载荷試験を行い、補強部材の曲げ変形挙動を検討した。要因として、引張主筋の腐食量、炭素繊維シート横拘束筋体

積比および繰返し载荷の回数を採り上げた。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体として、図-1 に示す幅×高さ×スパン長(全長)=100×200×1400mm(1600mm)の2-D10(SD295A)複鉄筋はりを用いた。引張鉄筋比は 0.81%、载荷時のコンクリート平均圧縮強度 f_c は 40.1N/mm² であった。せん断補強筋は間隔 $s_s=45$ mm($p_w=1.41\%$)で配筋しており、せん断耐力比 $V_u \cdot a / M_u$ は 5.3 となった。なお、最大曲げモーメント M_u は、3.2(2) で述べる方法により求め、せん断耐力 V_u は、平成 8 年制定コンクリート標準示方書[設計編]¹⁾により求めた。

鉄筋腐食供試体の作製にあたっては、中央部の曲げ区間 700mm のみに 3%の塩水を室温約 10℃の実験室内で散水することにより、予め腐食させた鉄筋を用いた。なお、圧縮鉄筋についても同様に腐食させた。この曲げ区間 700mm の腐食量については 2.2(1) で述べる。

また、炭素繊維シート(目付量 200g/m²、幅 50mm、引張強度 3500N/mm²、ヤング係数 2.3×

*1 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*3 京都大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

*4 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

10^5N/mm^2)は、図-2 に示すように、曲げ区間 700mm のみにスパイラル状に巻き立てた。炭素繊維シートは横拘束量については 2.2(2)で述べる。なお、炭素繊維シートによる横拘束効果を明確にする目的で、曲げスパン内に既存部横拘束筋は配さなかった。

2.2 実験要因

(1) 鉄筋の腐食量

引張主筋の腐食量は、曲げ区間 700mm の質量減少率で 0.0%、3.3%、23.0%の3段階を設定した。なお、質量減少率 3.3%は、本検討のコンクリート強度およびかぶりをも有する無補強供試体の場合、表面に腐食ひび割れが目視確認できる程度の腐食(加速期初期)である。さらに、大きな腐食である質量減少率 23.0%(劣化期を想定)を設定した。

(2) 炭素繊維シート横拘束量

曲げ区間への炭素繊維シート横拘束量は、横拘束筋体積比 ρ_{CF} で、無補強の 0%、一辺 0.6m の正方形断面部材に対して 2層(目付量 200g/m^2)程度巻き立てる実施工を考慮した 0.17%、さらに大きな横拘束効果が得られる領域を対象とした 0.66%の3種類を設定した。なお、 $\rho_{CF}=0.17\%$ の場合、炭素繊維シートの中心線間隔が 100mm となるため、シートが巻かれている部分と巻かれていない部分が存在するゼブラ状になる。

(3) 荷重繰返し回数

引張主筋の質量減少率 3.3%の供試体について、繰返し荷重が曲げ変形挙動に与える影響を検討するために、降伏荷重時変位 δ_y の奇数倍変位での同一変位繰返し回数 N を 1 回および 3 回とする 2 種類の荷重方法を設定した。

以上の要因をもとに作製した供試体一覧を表-1 に示す。

2.3 鉄筋の腐食量測定および引張試験

腐食量の測定には、供試体作製に用いた鉄筋と同一期間、同一環境で腐食させた曲げ区間に相当する長さ 700mm の鉄筋を用い、質量減少率として算出した²⁾。また、これらの鉄筋を用いて引張試験を行った。

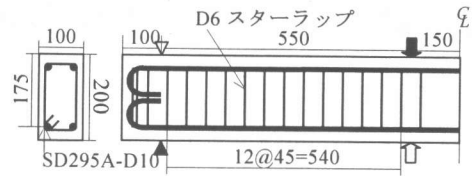


図-1 供試体形状・寸法 (単位:mm)

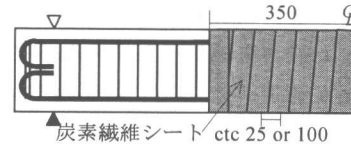


図-2 炭素繊維シート補強供試体 (単位:mm)

表-1 供試体一覧

供試体	質量減少率 (%)	横拘束筋体積比 ρ_{CF} (%)	同一変位繰返し回数 N (回)	
N0	0.0	0.00	1	
L0		0.17		
H0		0.66		
N1	3.3	0.00		
L1		0.17		
H1		0.66		
N2	23.0	0.00	3	
L2		0.17		
H2		0.66		
N1(3)	3.3	0.00		3
L1(3)		0.17		
H1(3)		0.66		

2.4 曲げ荷重試験

荷重は、図-1 に示すように、スパン長 1400mm に対し、曲げスパン 300mm の対称 2 点漸増型正負交番荷重曲げ試験とし、降伏荷重時変位 δ_y の奇数倍変位において同一変位 1 回あるいは 3 回の繰返しとした。なお、降伏荷重時変位 δ_y は、無補強健全供試体(N0 供試体)荷重時の荷重-変位曲線の屈曲点から求め、 $\delta_y=3.80\text{mm}$ とした。また、終局は、荷重-変位曲線の包絡線上の荷重低下領域で、荷重が最大荷重の 80%を下回らない最大の変位として定義した。

荷重時の荷重は、ロードセル(容量 250kN)により測定した。変位は、スパン中央に設置した変位計(容量 100mm)と両支点位置に設置した変位計(容量 50mm)により測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋の引張試験

質量減少率と、塩水散布により腐食をモデル化した鉄筋の降伏点および伸びの関係を図-3に示す。降伏点では、文献3)に示された降伏点残存率-質量減少率関係を、伸びでは、文献4)の引張試験結果の線形回帰直線をあわせて示した。なお、降伏点の算出には、一様腐食を仮定し、質量減少率を断面欠損率とすることにより推定した残存断面積を用いた。

文献3)の塩化物を含むコンクリート中での鉄筋腐食では、降伏点が質量減少率とともに低下しているが、実験では質量減少率によらずほぼ一定であった。一方、伸びは、質量減少率の増加とともに顕著に低下した。延性材料である鉄筋では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。しかし、低下の割合は文献4)よりも小さい。コンクリート中に塩化物が存在する場合には、水分、酸素および塩化物の量や濃度が場所によって異なるため、局所的な腐食が顕著になるが、塩水散水により鉄筋のみを腐食させたことから、比較的均一に腐食が進行し、強度に影響を与えるまでの孔食が生じていなかったものと考えられる。

3.2 曲げ載荷試験

(1) 終局時破壊原因および荷重-変位曲線

各供試体の荷重-変位曲線を、終局時の破壊原因とともに図-4、図-5、図-6、図-7に示す。同一変位1回の繰返しでは、質量減少率3.3%までは、主筋破断が生じなかったが、質量減少率23.0%では、いずれの横拘束筋体積比においても、引張主筋の破断により終局に至った。一方、同一変位3回繰返しでは、横拘束筋体積比0.00%、0.17%の供試体が、曲げ圧縮部コンクリートの圧潰により終局に至ったのに対し、横拘束筋体積比0.66%の供試体が、引張主筋の破断により

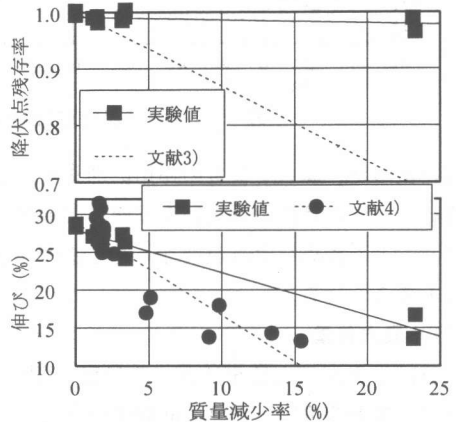


図-3 腐食鉄筋の機械的性質

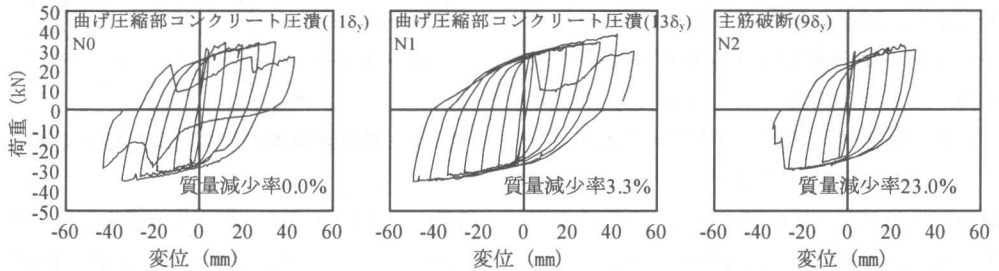


図-4 荷重-変位曲線(横拘束筋体積比 $\rho_{cf}=0.00\%$)

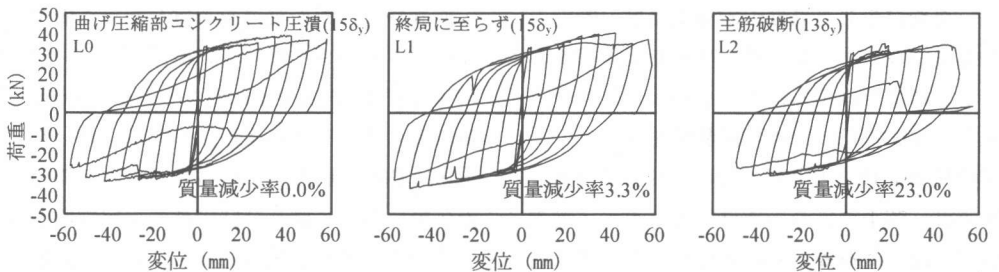


図-5 荷重-変位曲線(横拘束筋体積比 $\rho_{cf}=0.17\%$)

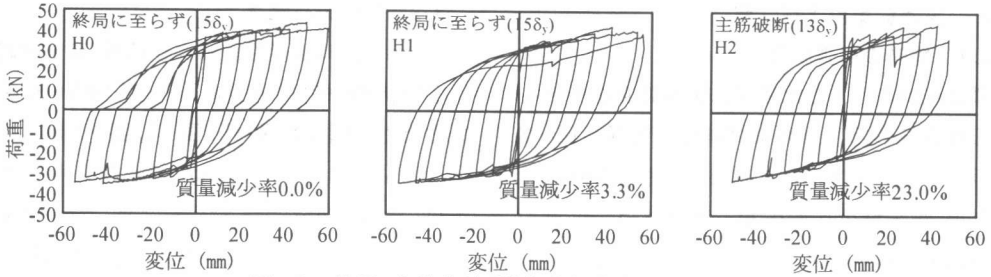


図-6 荷重-変位曲線(横拘束筋体積比 $\rho_{CF}=0.66\%$)

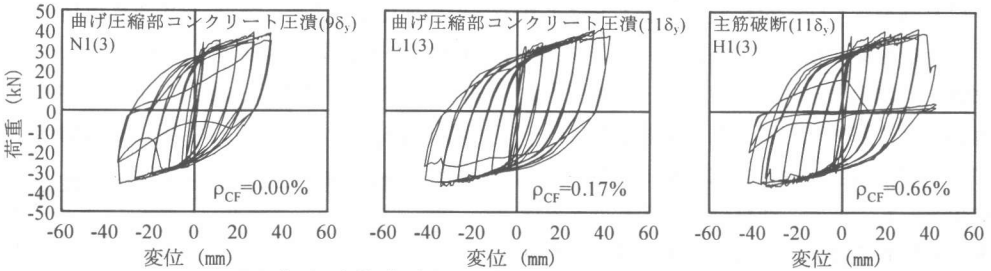


図-7 荷重-変位曲線(同一変位3回繰返し(質量減少率3.3%))

終局に至った。繰返し荷重の作用に加えて、炭素繊維シートの横拘束効果により曲げ圧縮部コンクリートの終局ひずみが増加したことによるものと考えられる。

(2) 最大荷重

質量減少率が最大荷重に与える影響を図-8に示す。最大荷重は、正負方向載荷のうち小さい方を採用した。最大荷重の計算値は、平面保持を仮定した断面分割法による一方向載荷の曲げモーメント-曲率解析により得られた荷重-変位曲線から求めた。コンクリートの応力-ひずみモデルは、無補強供試体には平成8年制定コンクリート標準示方書[設計編]¹⁾のモデルを、炭素繊維シート補強部材には細谷-川島モデル⁵⁾を用いた。また、鉄筋には平成8年制定コンクリート標準示方書[設計編]¹⁾の応力-ひずみモデルを用い、腐食が生じた鉄筋の断面積には、断面の一樣腐食を仮定し、質量減少率を断面欠損率とすることにより推定したものをを用いた。各材料の強度、ヤング係数は強度試験値を用いた。

実験値における質量減少率 3.3%までの腐食段階では、若干のばらつきはあるものの、横拘束筋体積比、載荷繰返し回数にかかわらず、最大荷重の低下は認められなかった。しかし、質

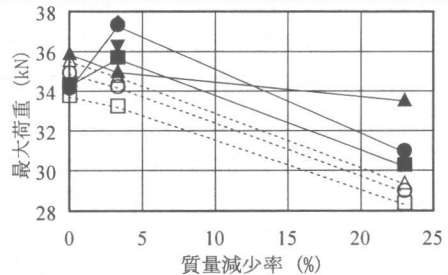
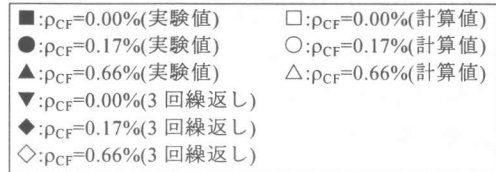


図-8 質量減少率が最大荷重に与える影響

量減少率 23.0%では、無補強と横拘束筋体積比 $\rho_{CF}=0.17\%$ のものが、健全時よりも約 10%最大荷重が低下している。

腐食鉄筋の断面欠損を考慮した計算値は、実験値よりも小さくなっているが、低下の割合は、横拘束筋体積比 $\rho_{CF}=0.66\%$ のものを除いて、実験値を捉えているといえる。しかし、コンクリート中で鉄筋の腐食が生じる場合には、鉄筋の断面欠損に加え、腐食ひび割れおよび鉄筋とコンクリートの付着劣化が生じることから、最大荷重の低下がさらに大きくなると考えられる。

(3) 靱性

質量減少率が変位靱性率($\mu = \delta_u(0.8P_m) / \delta_y$)および終局時までの消散エネルギーの累積値に与える影響を、それぞれ図-9、図-10に示す。消散エネルギーは、荷重-変位履歴ループの囲む面積で表される⁶⁾。なお、終局に至らなかった供試体では、変位靱性率を $\mu=15$ 、消散エネルギーを $15\delta_y$ 載荷終了時までの累積値で示した。

いずれの質量減少率においても、補強供試体は、同一の質量減少率の無補強供試体よりも大きな変位靱性率、消散エネルギーを有している。一方、質量減少率 23.0%の大きな腐食量となった場合、いずれの供試体も主筋破断による終局となり、健全時に比べ変位靱性率、消散エネルギーが低下している。

また、載荷繰返し回数3回では、引張主筋の破断により終局に至った横拘束筋体積比 0.66%の供試体が、曲げ圧縮部コンクリートの圧潰により終局に至った横拘束筋体積比 0.17%の供試体と同じ変位靱性率となっている。

以上のことから、鉄筋腐食を生じた部材に対して靱性補強を行うことにより、変位靱性率およびエネルギー消散能の回復あるいは向上が得られる。しかし、質量減少率 20%程度となると、健全時の無補強供試体の水準からの大幅な変位靱性率の向上は期待できないといえる。

また、質量減少率が 3.3%の腐食段階においても、大変形の繰返し荷重の作用が想定される曲げ部材では、過度の靱性補強は避けるべきであるとともに、曲げ補強の併用を念頭におく必要があるものと考えられる。

さらに、炭素繊維シート巻立て補強部材中での腐食進行が懸念される場合には、事前に鉄筋の防食を講じておくべきであろう。

(4) 破壊形式の推定

部材の曲げ圧縮部上縁のコンクリートが終局ひずみに達するときの引張鉄筋ひずみを断面内の力の釣合い式を解くことにより求め、これと 3.1 文献 4)の腐食鉄筋の伸び-質量減少率関係を比較することにより、炭素繊維シート横拘

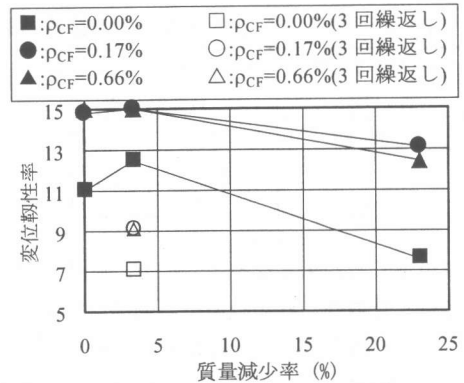


図-9 質量減少率が変位靱性率に与える影響

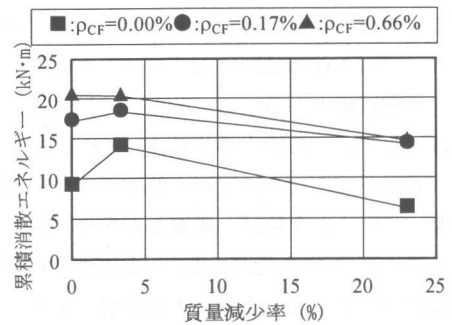


図-10 質量減少率が終局時までの消散エネルギーの累積値に与える影響

束曲げ部材の破壊形式が曲げ圧縮部コンクリートの圧潰から引張主筋破断となる質量減少率を求めた。なお、引張主筋破断に対して厳しい条件とするために、文献 4)よりも伸びの低下が小さかった本研究のデータは、伸び-質量減少率関係に含めていない。

圧縮側のコンクリートの応力-ひずみ関係には、3.2(2)と同じものを用い、横拘束筋体積比ごとに終局ひずみを求めた。鉄筋についても 3.2(2)と同じ応力-ひずみ関係を用いており、ひずみ硬化は考慮していない。なお、降伏点を $f_{sy}=350\text{N/mm}^2$ 一定とするものに加えて、式(1)³⁾により孔食による降伏点降下を考慮したものについても検討を行った。

$$f_{sy(\text{腐食})}/f_{sy(\text{健全})}=1.00-1.32 \times \text{質量減少率} \quad (1)$$

計算結果を表-2に示す。炭素繊維シートの横拘束量が多いものほど、腐食が小さい段階で、曲げ圧縮部コンクリートの圧潰前に引張主筋の

表-2 主筋破断となる質量減少率の計算結果

横拘束筋体積比 ρ _{CF} (%)	降伏点一定	降伏点降下有
	質量減少率 (%)	
0.00	21.6	20.6
0.17	19.1	17.6
0.66	13.3	11.3

破断が生じる結果となった。一方、降伏点降下を考慮した場合、終局時の中立軸が、降伏点一定としたものよりも圧縮縁に近づくため、引張主筋の破断が生じる質量減少率の値が小さくなった。また、本実験で適用した質量減少率 23.0%の腐食量は、炭素繊維シートの横拘束量に関わらず、引張主筋の破断により終局となる値であり、実験結果と一致する。しかし、同一変位 3 回繰返しでは、横拘束筋体積比 0.66%の供試体が、質量減少率 3.3%で引張主筋破断による終局となっており、今後は、繰返し荷重作用時の腐食鉄筋の伸び-腐食量関係を、孔食による局所的な伸びの低下を含めて検討する必要があると考えられる。

4. 結論

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) 塩水散布により腐食させた鉄筋の降伏点は、質量減少率によらずほぼ一定であったのに対し、伸びは、質量減少率の増加とともに顕著に低下した。延性材料である鉄筋では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) 腐食鉄筋を用いて作製した炭素繊維シート横拘束曲げ部材において、質量減少率 3.3%までは、健全に対する最大荷重の低下は見られなかったが、質量減少率 23.0%の大きな腐食量では、最大荷重が約 10%低下した。また、腐食鉄筋の断面欠損を考慮した断面分割法により、最大荷重の低下の割合を捉えることができた。
- (3) 炭素繊維シート横拘束曲げ部材は、質量減少率 23.0%の腐食でも、同じ腐食量の無補強部材より大きな変形性能を有するが、終局が引張

主筋の破断になるため、健全部材を補強したものよりも変形性能が低下した。また、同一変位 3 回繰返しでは、質量減少率 3.3%の炭素繊維シート横拘束量が最も多いもので主筋破断による終局となった。したがって、大変形の繰返し荷重の作用が想定される曲げ部材では、過度の靱性補強は避けるべきであるとともに、曲げ補強の併用を念頭におく必要があるものと考えられる。さらに、炭素繊維シート巻立て補強部材中の腐食進行が懸念される場合には、補強前に鉄筋腐食に対する対策が必要である。

(4) 曲げ圧縮部上縁コンクリートが終局ひずみに達するときの引張主筋ひずみと腐食鉄筋の伸びの関係から、炭素繊維シート横拘束曲げ部材の破壊形式は、炭素繊維シートの横拘束量が多いものほど、腐食が小さい段階で終局が引張主筋の破断となることがわかった。

参考文献

- 1) 土木学会：平成 8 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，1996.3.
- 2) 日本コンクリート工学協会：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)，pp.1, 1987.4.
- 3) 日本コンクリート工学協会：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，pp.43-45, 1998.10.
- 4) 大井孝和：コンクリート円柱供試体に埋設した鉄筋の腐食実験結果(続)鉄筋腐食進行の評価について，第 25 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.111-116, 1998.10.
- 5) 細谷学，川島一彦，星隈順一：炭素繊維シートで横拘束したコンクリート柱の応力度-ひずみ関係の定式化，土木学会論文集，No.592/V-39, pp.37-52, 1998.5.
- 6) 井上晋，宮川豊章，藤井学：パーシャリープレストレストコンクリートはり部材の正負交番荷重下の消散エネルギーと損傷評価，土木学会論文集，No.496/V-24, pp.61-70, 1994.8.