鉄筋腐食が炭素繊維シート補強 RC 曲げ部材の耐荷特性に 与える影響

山本 貴士*1, 服部 篤史*2, 宮川 豊章*3

Influence of Reinforcing Steel Corrosion on Load-Carrying Behavior of RC Flexural Member Strengthened with CFRP Sheet

Takashi YAMAMOTO^{*1}, Atsushi HATTORI^{*2}, and Toyo MIYAGAWA^{*3}

要旨:本研究では,炭素繊維シート補強工法の鉄筋腐食 RC 曲げ部材への適用性を明らかに することを目的として,主筋の腐食をモデル化した RC 曲げ部材に,炭素繊維シート補強を 適用し,補強部材の耐荷特性を検討した.その結果,主筋腐食部材への炭素繊維シート靱 性補強では,曲げ圧縮部の圧潰よりも主筋破断が先行する場合があり,変形性能の大幅な 向上は期待できないことがあるとともに,腐食ひび割れによって,曲げ圧縮部コンクリー トが受け持つ圧縮力が低下し,最大荷重,靱性の低下が生じる可能性が示された. キーワード:鉄筋腐食,耐荷性能,靱性補強,曲げ補強,炭素繊維シート

1.はじめに

コンクリート橋脚などの曲げを受ける RC 部 材において鉄筋腐食が顕在化した場合,補強を 検討しなければならないことがある.これに対 して,炭素繊維シートを曲げ部材の周方向に巻 立てる靱性補強により,部材の変形性能が向上 することが知られている.また,この工法では 腐食ひび割れの拘束や劣化因子の侵入抑制など の補修効果もあわせて期待できると考えられる. しかし,補強による靱性の改善には,曲げ圧縮 部コンクリート終局ひずみの向上に対して,引 張主筋の十分な伸びが必要とされることから、 引張主筋の腐食下では,伸び性能が低下するこ とで,主筋破断をともなった破壊形式となり, 補強に期待される変形性能の十分な向上が得ら れない可能性がある.このような場合,腐食鉄 筋の取替えや断面修復などの補修をあわせ用い る必要があるが,これらの適用を判断するため

には,炭素繊維シート補強部材の耐荷特性に与 える腐食の影響についての知見が重要となる.

本研究では,鉄筋腐食 RC 曲げ部材への炭素 繊維シート補強の適用性を明らかにすることを 目的として,主筋の腐食をモデル化した RC 曲げ 部材に,炭素繊維シート靱性および曲げ補強を 適用し,正負交番曲げ載荷試験結果をもとに, 補強部材の耐荷特性を検討した.また,靱性補 強設計における主筋腐食とそれにともなう伸び 性能の低下に関する考慮方法について検討した.

2.実験概要

2.1 実験要因

主筋腐食のモデル化には,電食法を用いた. 供試体の要因を表-1に示す.

(1) 主筋の腐食量

鉄筋の腐食量は,3 段階とした.腐食の指標 として,載荷終了後の供試体からはつり出した

- *1 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 助手*2 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 助教授
- *3 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授

論文

腐食鉄筋の腐食生成物を酸溶解した後,質量減 少を測定することで求めた質量減少率を用いた. 段階1は、供試体表面に腐食ひび割れが目視観 察されたあと,さらに腐食が進み,既往研究 1) において鉄筋の伸びが5~10%程度低下し,部材 の靱性に影響が現われる可能性のある段階(加 速期後期)を想定した質量減少率 3.7%とした. このときの鉄筋表面積あたりの積算電流密度は, 77.8mA・hour/cm²で,供試体表面にてクラックゲ ージを用いて測定した腐食ひび割れ幅の平均は, 0.43mm であった.段階2は,無補強供試体で, 腐食鉄筋の断面欠損のみを考慮して断面分割法 で算出した最大耐力が,健全時より約5%低下す ると予想される質量減少率 5.7%とした.このと きの積算電流密度は,200mA・hour/cm²で,腐食 ひび割れ幅の平均は,0.87mm であった.

さらに,腐食ひび割れの有無による影響を検 討するために,あらかじめ主筋のみを曲げ区間 (700mm)について塩水散水により腐食させ,この 鉄筋を用いて供試体を作製したものを用意した. このときの質量減少率は 3.3%,7.1%であった.

(2) 炭素繊維シートの補強量

炭素繊維シート横拘束量は,横拘束筋体積比 を指標として,0.00%,0.66%の2段階を設定し た. ρ_{CF}=0.66%は,炭素繊維シート(目付量 200g/m²,t_{CF}=0.111mm,f_{CF}=3500 N/mm²,E_{CF}=2.3 ×10⁵ N/mm²)を2層巻き立てた補強量であり, 曲げ圧縮部コンクリートの終局ひずみの増加に より引張主筋に対する負担が大きくなる領域を 想定した.また,靱性補強に加えて,引張主筋 の断面減少により低下すると想定した曲げ耐力 を向上させる補強として,炭素繊維シート1層 を部材軸方向のスパン内に貼り付けた曲げ補強

表-1 供試体要因表

種類	炭素繊維シート 補強量 ρ _{CF} (%)	質量減少率 (%)
無補強	0.00	0.0,3.7,5.7
靱性	0.66	0.0,3.7(3.3 [*]), 5.7(7.1 [*])
封きませる	0 66+曲げ(1 扇)	3757

*:()内の数値は,あらかじめ塩水散水で腐食させた鉄筋を用いて作製した供試体の質量減少率

を併用したものについても検討した.

2.2 供試体

既存部の供試体は,図-1 に示すように,100⁸ ×200^H×1600^L(1400^{SL})mm の 2-D10(SD295A)複鉄 筋 RC はりとした .曲げ性状を検討することから, せん断補強筋として 135°フック付 D6 スターラ ップ(SD295A)をピッチ 45mm(せん断補強筋比 p_W=1.41%)で配筋した.また,スターラップには エポキシ系樹脂を用いた絶縁処理による防錆処 理を施した.なお,載荷時のコンクリートの圧 縮強度は,平均 30.2 N/mm²であった.

電食は,供試体作製および養生後,引張・圧 縮主筋の曲げ区間(700mm)を対象とした所定期 間の定電流の通電とした.

炭素繊維シート補強の概要を図-1 に示す.靱 性補強では,炭素繊維シートを2層,スパン全 長に渡って巻き立てた.また,靱性補強に加え て曲げ補強を併用した供試体では,まず曲げ補 強用のシートをスパン内軸方向に一層貼付けた 後,靱性補強用シートを巻き立てた.

2.3 載荷方法

載荷は,スパン 1400mm に対して曲げスパン 300mmの対称2点正負交番曲げ載荷試験とした. 降伏変位の実測値δ_y=3.80mm を用いて,その奇 数倍変位での定変位繰返し回数を1回とした.







終局は,ポストピーク以降,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.

3.実験結果および考察

3.1 最大荷重

(1) 質量減少率の影響

質量減少率が最大荷重に与える影響を図-2 に示す.電食により主筋の腐食をモデル化した 供試体の最大荷重は,質量減少率の増加にとも ない,炭素繊維シート靱性補強の有無に関わら ず低下した.図中には,供試体の諸元が比較的 類似しており,室内での36ヶ月にわたる塩水散 水で鉄筋腐食をモデル化した既往研究²⁾の質量 減少率と最大荷重の関係をあわせて示した.塩 水散水腐食の方が,今回の電食より最大荷重の 低下が大きくなっている.電食供試体では,最 大荷重は曲げ圧縮部コンクリートの圧潰で決定 し,その後の緩やかな荷重低下領域で主筋破断 が生じて終局に至った.これに対し,塩水散水 腐食では,局所的な腐食による主筋の断面欠損



図-4 曲げ補強の併用が最大荷重に与える影響

が大きく,荷重-変位関係の早い段階で,主筋破 断により最大荷重(同時に終局)が決定したこと で最大荷重の低下が大きくなったと考えられる. (2) 腐食ひび割れの影響

腐食ひび割れの有無が最大荷重に与える影響を図-3 に示す.鉄筋のみを腐食させて作製したものよりも腐食ひび割れが存在する電食の方が,最大荷重の低下の割合が大きい.局所的な主筋の断面欠損および引張主筋とコンクリートの付着低下が影響しているとともに,腐食ひび割れの存在により,曲げ圧縮部コンクリートが受け持つ圧縮力が低下していると考えられる³⁾.

また,靱性補強したものについて,断面分割 法により求めた計算値と比較した結果をあわせ て図-3に示す.コンクリートには,炭素繊維シ ート横拘束コンクリートのモデル⁴⁾を,鉄筋に はバイリニア型の応力-ひずみ関係を用いた.腐 食鉄筋の断面積には,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.腐食ひび割れのない供試 体の最大荷重の低下率(低下直線の傾き)は,鉄 筋の断面欠損の考慮のみで推定できるようであ る.しかし,腐食ひび割れを有する電食供試体 の最大荷重の低下率は,計算値の低下率よりも 大きく,最大荷重の推定には鉄筋の断面欠損以 外の要因も考慮する必要があると考えられる.

(3) 曲げ補強の併用の影響

曲げ補強を併用した供試体の最大荷重を靱 性補強のみと比較したものを図-4 に示す.いず れの補強方法においても,質量減少率の増加に



図-5 質量減少率が変位靱性率に与える影響

ともなって最大荷重が低下しているものの,同 一の質量減少率では,靱性補強のみよりも曲げ 補強を併用した方が,最大荷重が増加しており, また,二つの質量減少率において,最大荷重の 増加量は同程度であった.しかし,最大荷重の 低下率は,鉄筋の断面欠損のみを考慮した計算 値よりも大きく,曲げ補強の併用による最大荷 重の向上を算定するためには,断面欠損以外に, 腐食鉄筋とコンクリートの付着や腐食ひび割れ の影響を考慮する必要があると考えられる.

3.2 靱性

(1) 質量減少率の影響

質量減少率が,変位靱性率(μ=δ_u/δ_v)に与える 影響を図-5 に示す.電食により主筋の腐食をモ デル化した供試体の変位靱性率は,質量減少率 の増加にともない,炭素繊維シート靱性補強の 有無に関わらず低下した,無補強供試体では, 腐食ひび割れの生じた曲げ圧縮部のかぶり部分 が,圧縮鉄筋の座屈にともなってはく落するこ とで荷重低下が生じて終局に至った.曲げスパ ン内の既存部横拘束筋は配していなかったため, 圧縮鉄筋の座屈長が長くなり,かぶりのはく落 が急激に起こったと考えられる.これに対し, 靱性補強した供試体では,引張主筋の伸び能力 の低下¹⁾によって主筋破断が生じ,終局に至っ た.また,質量減少率5.7%のときの変位靱性率 は,健全時の無補強供試体と同程度となった. このように,主筋腐食部材に対する炭素繊維シ ート靱性補強では,主筋破断が先行するため, 大幅な靱性の向上は期待できないことがある.





(2) 曲げ補強の併用の影響

曲げ補強を併用した供試体の変位靱性率を 図-5にあわせて示す.今回定義した終局に対し ては,シート破断による荷重低下が終局に至る 原因となるため,同一質量減少率の無補強供試 体よりも小さくなるとともに,質量減少率の大 小に関わらず,ほぼ同程度の値となった.

一方,98,までの消散エネルギーの累積値に与 える質量減少率の影響を図-6に示す.消散エネ ルギーは,荷重-変位履歴ループに囲まれる領域 の面積で表される.このエネルギー靱性を指標 とすると,曲げ補強の併用による最大荷重の増 加で,エネルギー消散能の向上が得られること がわかった.このように,鉄筋腐食部材に対し て炭素繊維シートによる曲げ補強を適用するこ とで,エネルギー靱性を改善することができる. 3.3 靱性補強における主筋腐食の考慮方法に

関する検討

本研究の供試体の曲げ変形を,断面分割法で 解析する場合,等曲げ区間内には平均的にひび 割れが分散した断面を仮定し,区間内曲率一定 とすることが一般的である.しかし実際には, ひび割れ断面とひび割れの発生していない断面 が存在し,ひび割れ断面周辺の曲率は,平均曲 率分布で仮定される曲率よりも大きくなる.

ひび割れ断面周辺の曲率集中領域では,破壊 形式が曲げ圧縮部コンクリートの圧潰となるた めに引張主筋に必要とされる伸びは大きくなる ことから,曲率集中領域での終局時引張主筋ひ



図-7 仮定したはり軸方向の終局時の曲率分布



図-8 計算のフロー

ずみを求め,腐食鉄筋を有する炭素繊維シート 横拘束曲げ部材の破壊形式を推定することが, 鉄筋腐食 RC 部材への靱性補強の適用可否を判 断するにおいて重要であると考えられる.

まず,式(1)のひび割れ間隔算定式⁵⁾を用いて 等曲げ区間内のひび割れ本数を決定した.

 $\ell = 1.1k_1k_2k_3\{4C+0.7(C_s - \phi)\}$ (1) ただし, k_1 :鋼材の表面形状の影響に関する係数, k_2 :コンクリートの品質の影響に関する係数, k_3 :引張鋼材の段数の影響に関する係数(1 段, k_3 =1), ℓ :ひび割れ間隔(mm),C:かぶり(mm), C_s : 鋼材の中心間隔(mm), ϕ :鋼材径(mm)

鉄筋腐食あるいは腐食ひび割れの影響につ いては,*k*₁,*k*₂で考慮する方法が考えられるが, 今回は,異形鉄筋の場合の*k*₁=1.0,コンクリー

表-2 主筋破断となる質量減少率の計算結果

横拘束筋	質量減少率 (%)			
体積比	亚均曲索	曲率集中仮定		
$ ho_{CF}(\%)$	十均田平	b _{cr} =25mm	b _{cr} =30mm	
0.00	21.6	8.65	11.0	
0.66	13.3	0.920	4.93	

トの圧縮強度 30.2 N/mm²の場合の k₂=1.0 を用 いた .算定の結果 ,ひび割れ間隔はおよそ 120mm で,スパン中央に1本発生すると仮定すると, 等曲げ区間 300mm に発生するひび割れ本数は3 本となった.また,終局時の曲率集中領域の幅 b_{cr}については,不明な点が多いため,いくつか の値を用いてパラメトリックに検討した.

以上により,図-7に示す曲率分布を仮定した. せん断スパンについては,通常の断面分割法に より求められた曲率分布を,また等曲げ区間に おけるひび割れの発生していない部分の曲率は、 ひび割れ発生モーメント時の曲率を仮定した. 曲率集中領域の幅 b_{cr} を仮定し,終局時のはり 中央変位を曲率 (:未知数)を用いて表す.この 変位の値が,平均曲率分布から求められる変位 の計算値に等しくなると仮定し,終局時の曲率 φ., を算出した.曲率φ., に対応する引張主筋のひ ずみを求め、腐食鉄筋の伸び-質量減少率関係と 比較することによって,破壊形式を推定1)した. なお,計算における終局は,曲げ圧縮部上縁コ ンクリートが終局ひずみに達した時とし、炭素 繊維シート横拘束コンクリートおよび鉄筋の応 力-ひずみ関係には3.1と同様の関係を用いた. 計算のフローを図-8 に示す.

計算結果を表-2 に示す.表中には平均曲率分 布を仮定したときの結果¹⁾をあわせて示す.曲 率集中領域を仮定した方が,また曲率集中領域 の幅が小さい方が,質量減少率の小さい段階で 主筋破断になる結果となった.すなわち,引張 主筋の腐食量が小さい段階においても,ひび割 れ断面周辺の曲率が大きくなる領域では,靱性 補強された部材の引張主筋には大きな伸びが必 要とされるため,靱性補強の適用にあたっては 注意が必要であると考えられる.なお,曲率集 中領域の幅を 30mm とした方が,主筋破断となる 質量減少率の実験値(ρ_{CF}=0.66%,質量減少率 3.7%)に近くなった.しかし,炭素繊維シートを 巻き立てていることや、載荷終了後の内部の損 傷が大きかったことから,この曲率集中領域の 幅 30mmを実験上確認することはできなかった.

以上の方法によって,引張主筋の腐食量を考 慮したうえで靱性補強の適用性あるいは適用量 を検討できる可能性を示したが,腐食鉄筋とコ ンクリートの付着力低下で,今回仮定したひび 割れ間隔,本数よりもひび割れが局所化する可 能性があること,ひび割れ断面での鉄筋の抜け 出しが存在すること,あるいは腐食ひび割れを 有する曲げ圧縮部コンクリートの終局ひずみの 考え方など,さらなる検討が必要である.

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) 電食により主筋の腐食をモデル化した供試 体の最大荷重は,質量減少率の増加にともない 低下した.ただし,最大荷重の低下率は,室内 での 36 ヶ月にわたる塩水散水により鉄筋腐食 をモデル化した既往研究結果の方が大きかった. (2) 腐食鉄筋の断面積に, 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断面分割法による計算 値は,腐食ひび割れのない供試体の最大荷重の 低下率を推定できた.しかし,腐食ひび割れを 有する電食供試体の最大荷重の低下率は、計算 値よりも大きくなった.局所的な主筋の断面欠 損および引張主筋とコンクリートの付着低下が 影響しているとともに,腐食ひび割れの存在に より,曲げ圧縮部コンクリートが受け持つ圧縮 力が低下していると考えられる.

(3) 靱性補強に加え曲げ補強を併用することで、 同一の質量減少率の靱性補強のみよりも最大荷 重が増加した.また、曲げ補強によって、エネ ルギー靱性を改善することができる。

(4) 電食により主筋の腐食をモデル化した供試体の変位靱性率は,質量減少率の増加にともな

い低下した.主筋腐食部材に対する炭素繊維シ ート靱性補強では,主筋破断が先行するため, 大幅な靱性の向上は期待できないことがある. (5)曲げ圧縮部コンクリートが終局ひずみに達 した時の引張鉄筋ひずみを求め,これと腐食鉄 筋の質量減少率-伸び関係を比較することによ って炭素繊維シートで靱性補強した曲げ部材の 破壊形式の推定を行うにあたって,曲率集中領 域を仮定した曲率分布を用いる方法を検討した. これによって、腐食量が小さい段階においても, ひび割れ断面周辺の曲率が大きくなる領域では, 靱性補強された部材の引張主筋には大きな伸び が必要とされるため,靱性補強の適用にあたっ ては注意が必要であることがわかった.

参考文献

1) Takashi Yamamoto, Atsushi Hattori, Toyo Miyagawa: Influence of Reinforcing Steel Corrosion on Flexural Behavior of RC Member Confined with CFRP Sheet, Proceedings of the first fib Congress 2002, pp. 177-182, 2002. 10 2) Atsushi Hattori, Toyoaki Miyagawa: Prediction of Degradation and Performance in RC Beams Subjected to Chloride Attack by Corrosion Monitoring, Proc. of 7th International Conference on Inspection, Appraisal, Repair & Maintenance of Buildings & Structures, Vol. 2, pp.81-88, 2001. 9 3) 福田貴志, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: 鉄筋腐食を生じた横拘束コンクリートの一軸圧 縮耐荷性状,土木学会平成15年度関西支部年次 学術講演会講演概要集, V-22, 2003.5 4) 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 5) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示

方書[構造性能照査編], pp.100-101, 2002.3