

引張鉄筋定着部に腐食劣化を有するRC梁の 残存耐力と未損傷領域への面的補強

千々和 伸浩¹・川中 勲²・前川 宏一³

¹正会員 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: chijiwa@concrete.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 鹿島建設 (〒107-8388 東京都港区元赤坂1-3-1)
E-mail: kawanaki@kajima.com

³フェロー会員 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: maekawa@concrete.u-tokyo.ac.jp

引張鉄筋定着部にひび割れ損傷を有するRC部材では、既存のひび割れ先端近傍から新たな斜めひび割れが脆性的に進展し、終局を迎える場合がある。本研究では、RC梁の定着部引張鉄筋に沿って腐食ひび割れを導入した後、せん断ひび割れの進展が想定される健全部分に面的広がりをもつ補強材を施した。その結果、梁の残存耐力の大幅な回復が得られた。すなわち、定着部の引張鉄筋に沿った腐食ひび割れを残した状態でせん断スパン内の健全部に予防的な対策を施すことで、部材耐力が大幅に向上する可能性があることを、実験から提示した。

Key Words : *damage, anchorage, corrosion, shear failure, cracking, sheet strengthening*

1. 序論

鉄筋コンクリート構造における主たる劣化損傷に、鋼材の腐食が挙げられる。鋼材断面欠損あるいは破断による耐力の低下のみならず、腐食膨張に伴うひび割れがコンクリートに導入されるため、鋼-コンクリート間の付着やひび割れ面に沿ったせん断伝達能力が低下し、耐荷機構に影響が及ぶ場合がある。腐食ひび割れの発生部位に着目すると、損傷がせん断スパン内に留まり、引張鉄筋定着部が健全な場合には、条件によっては耐力の低下が抑えられること¹⁾が報告されている。これは、腐食ひび割れによる引張鉄筋付着の劣化によって、せん断耐荷機構がトラスからタイドアーチ機構へ転換するためである。一方で、腐食損傷が引張鉄筋定着部に発生すると、部材耐力が著しく損なわれることが著者らによって報告されている²⁾。せん断力に抵抗する斜め圧縮ストラットと引張鉄筋による引張力の合流点が維持できなくなり、せん断耐荷機構が消失するからである。

既往の補強法は構造部材のアップグレード³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾や、腐食損傷があっても、設計で想定された耐荷機構が維持されている状態を対象にしたもの⁷⁾が多く、引張鉄筋定着部損傷により、著しく耐荷機構が損なわれたRC部材に対する補強法はあまり検討されていない。定着部は耐

荷機構を機能させる上で力の結節点となり、人の関節同様に損傷後の機能回復は一般に困難を伴う。著者らは、非損傷領域への選択的な補強(予防保全的)によって耐荷機構を転換させる方法を提案してきた⁸⁾。既存の損傷領域を保存したまま、荷重作用による損傷の進展が想定される健全な領域に先回りの補強を付加することで新たな耐荷機構を形成させ、部材強度の向上を図るものである。これまでの実験研究では、腐食ひび割れを模したモデル損傷面を使って系統的な検討が行われてきた⁸⁾。本研究では、鋼材を強制的に腐食させ、引張鉄筋定着部に腐食ひび割れを導入したRC部材を作成し、より現実に近い状態に対して予防保全的な補強法の有効性を検証し、既往研究⁸⁾の補完を試みるものである。

2. 予防保全的な補強による効果の検証試験体

(1) 検討対象部材

著者らの既往研究²⁾⁸⁾では、定着部の引張鉄筋に沿ったひび割れを1mm厚スチレンボードで模擬した試験体を用い(図-1)、その耐荷挙動を報告している(図-2)。この報告では定着部の引張鉄筋に沿ったひび割れが存在すると、その先端からひび割れが進展し、無損傷のものに比べ耐

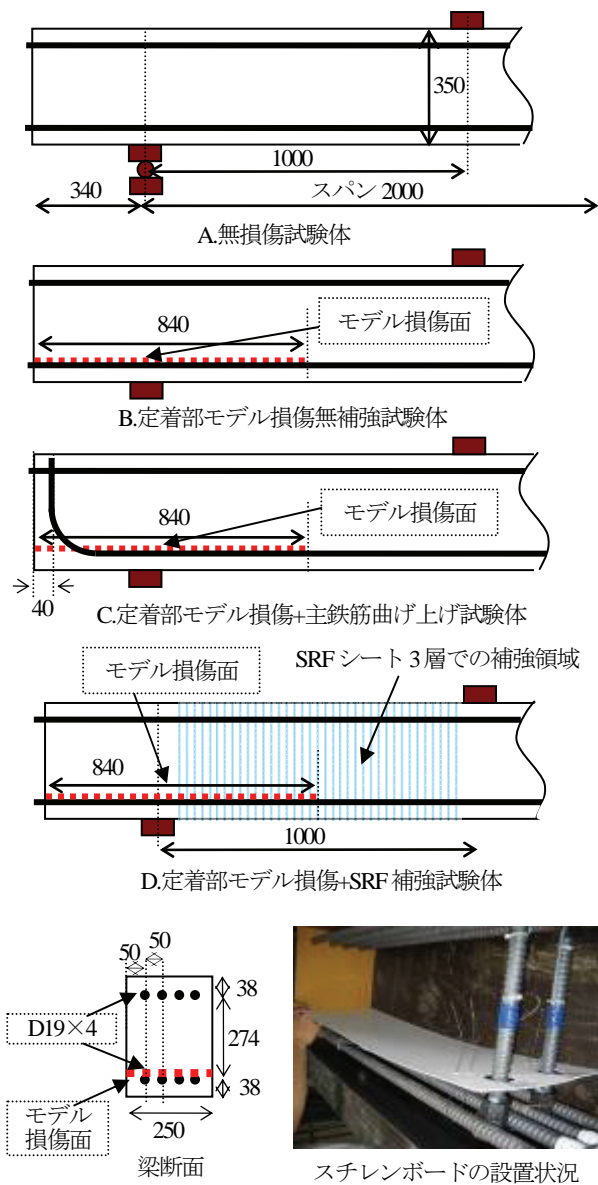
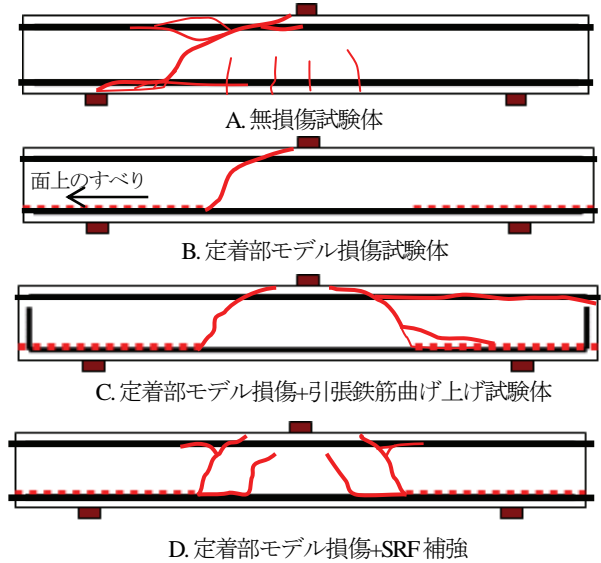
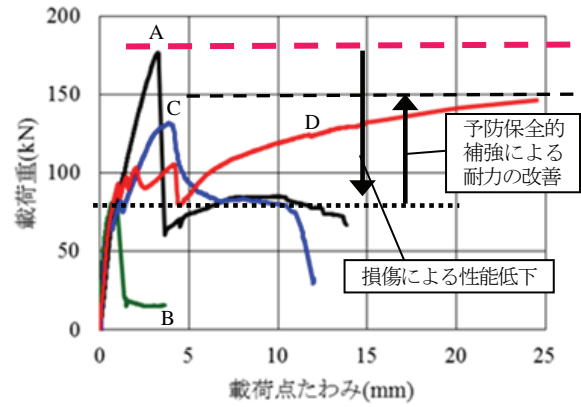


図-2 A. 無損傷試験体
 B. 定着部モデル損傷試験体
 C. 定着部モデル損傷+引張鉄筋曲げ上げ試験体
 D. 定着部モデル損傷+SRF補強試験体



力が最大で50%程度にまで低下すること(図-2 B), 損傷が発生した後に痛んだ定着部に補強しても耐力は80%程度までにしか回復できないこと(図-2 C), そしてこの種の損傷に対しては外力による損傷の発生が予想される部位を面的に補強し, 耐荷機構を転換させることで耐荷力の回復が可能なこと(図-2 D)を明らかにしている。

本文ではこれらの報告の梁諸元を基準に, 定着部に導入する損傷を電食による実際の腐食ひび割れに置き換えて, 機構検討の深化を試みる。梁の詳細な図-3に示した通りであり, 無補強用・補強用とに2本の梁を作成した。以降, それぞれを電食無補強試験体と電食SRF補強

試験体(SRF補強については後述)と呼称する。
 定着長は引張鉄筋に強度295MPaのD19鉄筋4本を用い, かつ定着部の横方向筋としてD10鉄筋をd2間隔で配置した時に必要な定着長を設定したものである。本研究では確実なせん断破壊の再現を意図して, 同じ定着長のままで引張鉄筋, 圧縮鉄筋ともに高強度鉄筋を使用した。損傷した定着部に直接補強せず, せん断スパン内にだけ補強するという予防保全的な補強の効果を明確化するという目的から, 定着部への横方向筋配置も行わなかった。

せん断スパンは荷重試験機のサイズに合わせて1mとした。損傷領域は梁端部から発生した腐食が, せん断スパンの中央にまで延伸した状態を想定して定めた。腐食損傷は図-4に示したような電食(詳細は後章)により導入し, 鋼材腐食によるひび割れが引張鉄筋に沿って進展し, かつ部材厚さ方向にも貫通した状態を再現した。腐食ひび割れを確実に水平貫通させるため, 既報²⁸⁾で用いられた引張鉄筋D19鉄筋4本から, ほぼ同じ鋼材量となるD16鉄筋6本に変更している。付着が変化してしまうことが懸念されるが, 本研究では定着部の水平貫通ひび割れが

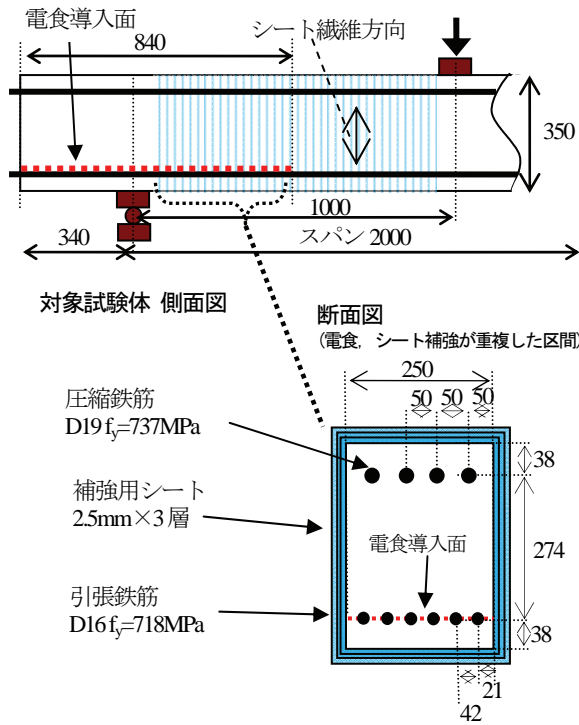
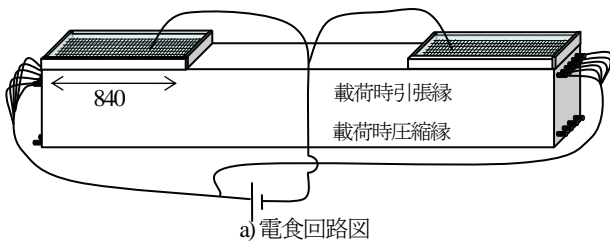


図-3 対象補強試験体配筋図



a) 電食回路図



b) 電食直後の状況

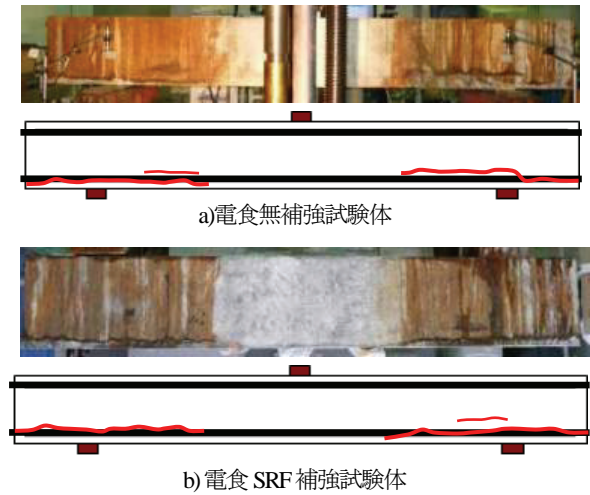
c) 削孔した径 10mm 孔

図-4 電食の状況

構造耐力に与える影響を分析することを優先した。これらの梁に同時通電し、引張鉄筋に沿った水平腐食ひび割れを導入したが、目視によるひび割れパターンは若干異なった(図-5)。載荷実験は2日連続で行い、同材齢のコンクリート圧縮強度は48.0MPa、引張強度は3.64MPa、引張鉄筋に用いたD16鉄筋の降伏強度は737MPa、圧縮鉄筋に用いたD19鉄筋の降伏強度は718MPaであった。梁に損傷がない場合、土木学会標準示方書式によると曲げ耐力は469kN、せん断耐力は173kNと算定される。

(2) 腐食ひび割れの導入

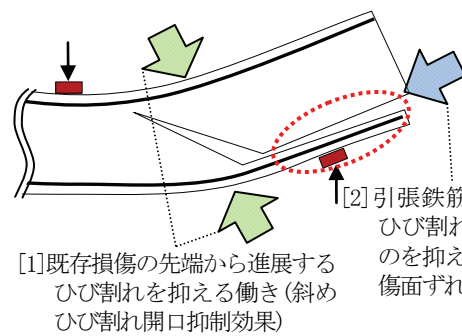
腐食ひび割れ面を電食によって導入した。電食の状況



a) 電食無補強試験体

b) 電食 SRF 補強試験体

図-5 電食後の各試験梁のひび割れ状況



[1] 既存損傷の先端から進展するひび割れを抑える働き(斜めひび割れ開口抑制効果)
 [2] 引張鉄筋に沿ったひび割れがずれるのを抑える働き(損傷面ずれ抑制効果)

図-6 予防保全的な補強に求められる要件

を図-4に示す。載荷時の引張縁側が上面となるように梁を静置し、電食範囲として500mm×250mmの底面積の貯水槽を作成した。貯水槽の側面はモルタルによって作成した高さ30mm厚さ10mmの板で覆われている。槽内には10%食塩水を電解液として貯めた。腐食を加速するため、電食部位のかぶりコンクリートに数カ所の穴をあけ、局所的にかぶりを5mm程度まで薄くした。この穴は電食完了後にモルタルで塞いだ。陰極側電極は470mm×20mmのステンレスメッシュであり、各貯水槽に1枚ずつ沈めた。等電位となるように、これらの電極を同じ電源の陰極側で並列に接続した。陽極側となる鉄筋についても、全て等電位となるように、同一電源の陽極に並列で接続した。電源の定電流制御機能を利用し、1.5Aの直流を連続的に通電した。電食開始から4時間経過後には局所的に穴を薄くした部分でさびの発生が確認され、総計672時間の連続通電後には、総腐食量は204mg/cm²(断面欠損率では3.26%)、腐食ひび割れ幅は平均0.5mm程度となった。

(3) 予防保全的な補強の条件を満たす補強材の選定

既報⁸⁾により、引張鉄筋定着部損傷を有するRC梁部材に対しては、補強工事の困難な定着部を直接、修繕・修復するよりも、荷重増加に伴うひび割れ進展が予想され

る箇所に予防的に補強を施すことで、部材の機能改善が計られることが示されている。この際の補強に求められる要件として、低剛性かつ高靱性の補強材を広範囲に配備し、既存の損傷の先端から延びるひび割れと確実に交差しつつ、その開口を抑える働きをすること(斜めひび割れ開口抑制効果)、引張鉄筋方向に発生したひび割れがずれるのを抑える働きをすること(損傷面ずれ抑制効果)の2つが示されている(図-6)⁸⁾。

これらの要件を同時に満たす方法として、梁側面にシートを塗布する面的な補強を採用することとした。使用したシート(SRF)の伸び能は炭素繊維シートのそれに比べて約7倍であり、ヤング率4.5GPa、破断強度400GPa、破断ひずみ10%である。補強剛性は塗布枚数で制御可能であるため、1層2.5mmのシートを3層巻きとし、炭素繊維シート1層を巻き立てた場合と同様の補強剛性となるように調整した。既往の施工法に則り、面取りを行わず直接、ポリウレタン系の接着剤をコンクリートに塗り、1本のベルト状のシートで梁を3層にわたり巻き立てた。

補強範囲は、荷重板幅を除いたせん断スパン全面を覆うよう巻き立てることとした。これは事前の数値解析等によって、予防保全的な補強効果が最も高いと想定される条件⁹⁾に合致させたものである。梁に損傷がない状態で、シートがせん断補強筋と同じようにトラス機構形成を形成するものと仮定して計算を行うと、補強後の耐力は190kNと算定された。

3. 定着部に腐食ひび割れを有する梁の耐荷特性と予防保全的な補強の効果

(1) 実験条件

荷重は変位制御とし、0.2mm/minの変位速度とした。荷重板と支承板は幅100mm、厚さ10mmの鋼板である。試験機から隔離された床面を絶対変位測定の基準とし、荷重点直下の鉛直変位、両支点上の梁高さ中央位置における鉛直変位を計測し、荷重点直下の変位から両支点上の平均変位を差し引き、荷重点たわみ量を得た。荷重時の両支点はローラーヒンジとなっており、水平方向の剛体変位は、荷重点位置で拘束している。

(2) 定着部に腐食ひび割れを有する梁の耐荷挙動

a) 定着部損傷面の特性が残存構造性能に与える影響

実験による荷重-たわみ曲線を図-7に示す。定着部に腐食ひび割れを有する試験体では、定着部に平滑なモデル損傷面を導入した試験体ほどには最大耐力の低下は起こらず、30%程度の耐力低下に留まった。これは腐食ひび割れ面でのせん断伝達機構による損傷面ずれ抑制効果

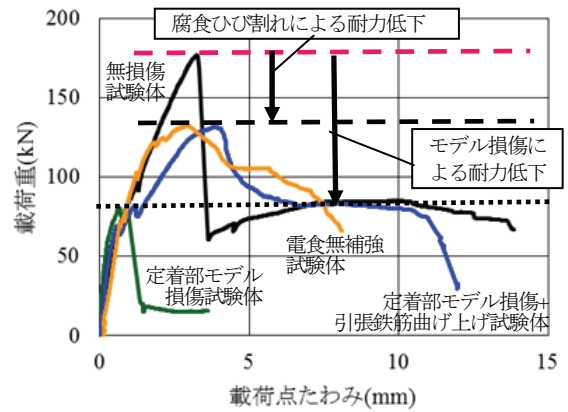


図-7 電食無補強試験体・定着部モデル損傷試験体荷重-たわみ関係

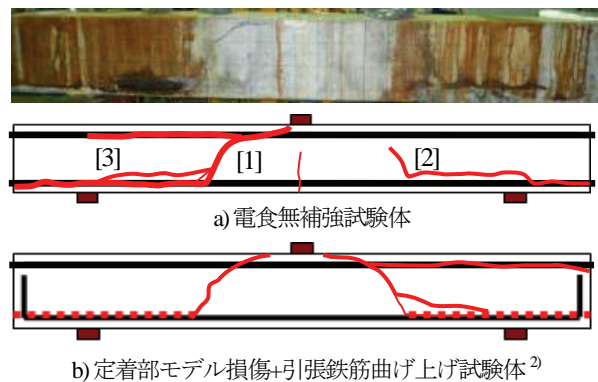


図-8 電食無補強試験体のひび割れ状況

が高く、引張鉄筋に平行に導入された腐食ひび割れに沿ったせん断ずれが生じなかったためと考えられる。更に圧縮鉄筋が斜めせん断ひび割れ(図-8 a) [2])の圧縮縁貫通を阻害したことも耐力低下を抑制した一因と推定される。

b) 定着部損傷面の特性によるひび割れ分布の変化

図-8 に腐食ひび割れによる定着部損傷を有する試験体で観察されたひび割れ分布を示す。

表面が平滑なモデル損傷面の場合、モデル損傷面上でのせん断伝達が非常に小さいため、ピーク荷重で突如損の先端から斜めせん断ひび割れが発生すると同時に、モデル損傷面上の部材が損傷面上を滑り、変形が局所化し、早期に終局を迎えることが報告されている(図-2B)⁹⁾。

しかし、現実に近い腐食ひび割れを導入した RC 梁では、80kN で既存ひび割れの先端から斜めせん断ひび割れ(図-8 a) [1])が発生しても、定着部腐食ひび割れに沿ったずれ変形は抑制された。即ち、せん断伝達機構によって定着部での耐荷機構が維持され、その後も荷重は順調に増加した。この荷重の増加する過程で、スパン中央を軸に既存のひび割れとほぼ対称に斜めせん断ひび割れ(図-8 a) [2])が新たに発生し、これが荷重点付近に達したところで最大荷重 131kN を迎えた。以降は、圧縮鉄筋

とせん断ひび割れが交差した個所から水平方向にひび割れが進展しながら、徐々に荷重が低下し、終局を迎えた。

引張鉄筋が曲げ上げ定着された梁にモデル損傷を導入した場合の耐荷挙動²⁾と、本研究の腐食ひび割れを有する試験体を比較すると、両者の荷重-たわみ関係(図-7)と終局時のひび割れ分布(図-8)が酷似していることがわかる。引張鉄筋を曲げ上げた試験体では、曲げ上げ部が引張鉄筋に沿った損傷面のせん断ずれを抑制し、タイドアーチ的な機構を形成したと考えられている²⁾。この状況から、定着部に腐食ひび割れを導入した本実験の場合でも同様の耐荷機構が形成された、と推測される。

(3) 定着部に腐食ひび割れを有する梁に対する予防保全的な補強の効果

a) 定着部損傷面の特性が補強効果に与える影響

引張鉄筋定着部にモデル損傷を導入した梁に対して予防保全的な面的補強を施すことで、損傷以前の耐荷性能に近いレベルまで、耐力が回復することが既報⁸⁾で報告されている(図-2)。これに対し、定着部に実際の腐食ひび割れを導入した梁に予防保全的な補強を施した場合には、原設計での耐荷性能を大きく超えて、最大耐力450kNにまで耐力の向上が得られた(図-9)。これは部材が劣化せず、しかも十分なせん断補強筋が設置されている場合の最大耐力(曲げ耐力)に匹敵する水準である。原設計の耐力をも上回る理由は、腐食劣化と予防的補強による耐荷機構の転換によるものと考えられる。電食無補強試験体の場合と同様、この試験体でも引張鉄筋に沿った腐食ひび割れ面でのずれは観察されず、電食による実ひび割れ面上でせん断伝達力が高く発揮されたことが伺える。このため、損傷面やその先端から発達した斜めせん断ひび割れは、部材軸方向よりも鉛直方向に向かって広がる傾向が強い。この方向はシート補強材の補強方向と一致しているので、ひび割れの開口が効率的に拘束され、補強効果が効率的に引き出されたものと考えられる。

b) 予防保全的な補強を施した場合のひび割れ分布状況

載荷中には表面にシートがあるため、内部のひび割れ状況を観察することができない。そこで載荷後にシートを剥離して得られるひび割れパターン(図-10)とひずみゲージの値の推移とを合わせてひび割れ進展を推定した。まず発生したひび割れは載荷重が60kNの時に生じた図-10 b) [1]のもので、発生後も腐食ひび割れの近傍に留まっていたと考えられる。その後、荷重は単調に増加し、続く100kNで図-10 b) [2]の位置でひび割れが発生し、こちらは圧縮鉄筋位置にまで速やかに延伸し、そこから200kNに達するまでは、このひび割れの鉛直開口が進む。200kNに達すると図-10 b) [1]のひび割れが圧縮鉄筋にまで延伸し、以降はこちらのひび割れと圧縮鉄筋の交差箇

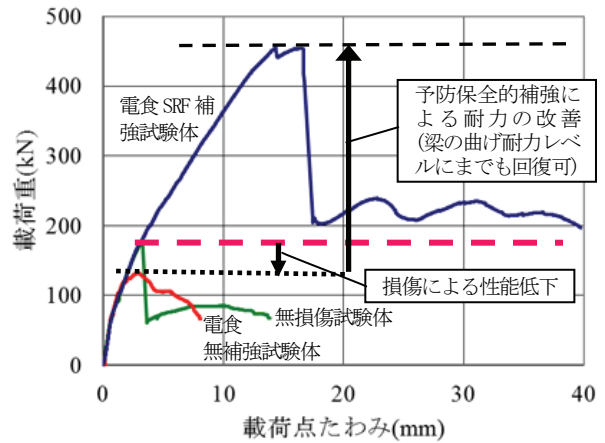


図-9 電食損傷試験体への予防保全的な補強効果



図-10 電食無補強試験体・電食予防保全的な補強試験体ひび割れ状況比較

所に曲げが局所集中するようになる。曲げの集中箇所ではコンクリートの圧潰や鉄筋の座屈が発生する可能性があるが、梁がシートによって覆われているためこれらの影響はあまり現れない。一方の引張縁側では鉄筋に大きな引張力が生じ、結果として電食ひび割れ面の先端と支点部の中間で鋼材が破断し、最大耐力以後の荷重の急落を生むことになったと考えられる。

ひび割れ分布の特徴に着目すると、損傷面先端を境としてせん断スパン内側と外側とでひび割れのパターンに違いがあることが分かる。

スパン内側の部位でのひび割れは、無補強のものと同じく腐食ひび割れの先端に端を発しているものと、それよりも更にせん断スパン内側で斜め方向に生じているものが観察された。このひび割れパターンはせん断補強筋を配置した無損傷の梁に見られるトラス機構的なひび割れパターンと類似している。この部位では補強材がせん断補強筋と同様の役割を果たし、せん断力を伝達したのと考えられる。これらのひび割れは圧縮縁を貫通せず、圧縮鉄筋に沿って水平に延伸している。補強材のせん断補強効果によって圧縮鉄筋によるひび割れ分散性が

更に有効となったため、と考えられる。

せん断スパン外側では電食によるひび割れに起因すると思われるひび割れのみで、載荷に伴ったひび割れは観察されていない。但し、シートを剥がした際に、梁端の電食ひび割れ面と端部では引張縁側のかぶりがかぶり剥落し、この部位で鉄筋破断も生じていた。この部位の鉄筋は支点と電食ひび割れ先端との間で両引き状態にあったためである。本実験におけるシートの剥離域は、既報⁸⁾で報告されたのと同様、ひび割れ近傍数 cm 程度という限定的なものであった。

4. 結論

定着部に引張鉄筋に沿った腐食ひび割れを有するRC梁に対して予防保全的な面的補強を行った場合の効果について、本研究で得られた知見を以下に列記する。

- 1) 定着部の引張鉄筋に沿って損傷面が発生した場合、その面の形状に関わるせん断伝達機構の大小により、耐力低下の度合いが異なることが、モデル損傷面と腐食ひび割れ面を有する部材実験の比較により検証できた。
- 2) 健全部に対する予防保全的な面的補強の効果は、定着部の損傷面のせん断伝達特性によって大きく異なることが例示された。すなわち、腐食鉄筋に沿って導入される腐食ひび割れ面の場合には、ひび割れ面でのかみ合い効果が高く、補強による部材耐力の向上が一層、有効に機能することが期待できる。

以上より、腐食による引張鉄筋定着部の劣化に対しても、予防保全的な補強コンセプトが成立する場合が存在することを例示し、既往の研究で予見された事象(面的補強の効果とせん断伝達特性⁸⁾)は存在することを示した。ただし予防保全的な補強の適用範囲と一般性は不明であり、補強効果の定量評価には今後、実証例の積み上げと耐力照査法の開発が不可欠であることは言うまでもない。

謝辞：本研究の実験遂行にあたりE. Gebreyouhannes博士、藤山知加子氏から有益な助言を頂いた。試験体の作成にあたって東京鉄鋼(株)と入部工業(株)から協力を得た。シート材の施工にあたって五十嵐俊一博士から指導を頂いた。ここに甚大なる謝意を表する。

参考文献

- 1) Toongoenthong, K. and Maekawa, K.: Multi-mechanical approach to structural performance assessment of corroded RC members in shear, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.3, No.1, pp.107-122, 2005.
- 2) 千々和伸浩, Esayas GEBREYOUHANNES, 藤山知加子, 前川宏一: 定着部に損傷を有する RC 梁のせん断耐荷機構, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 29, No. 3, pp. 709-714, 2007.
- 3) 萩尾浩也, 勝俣秀雄, 木村耕三, 小島克朗: 炭素繊維シートにより補強された梁のせん断設計に関する研究, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol. 20, No. 1, pp. 503-508, 1998.
- 4) 五十嵐俊一: 部材表面を包絡する伸展性補強材の補強効果, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 24, No. 2, pp. 171-178, 2002.
- 5) 小林靖典, 小林亨, 清宮理: 異形鉄筋の埋込みによるあと施工せん断補強効果に関する梁の載荷実験, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 24, No. 2, pp. 1549-1554, 2002.
- 6) 木村耕三, 小島克朗, 岡野素之: 炭素繊維およびアラミド繊維を補強筋とした梁部材のせん断実験, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 12, No. 1, pp. 1135-1140, 1990.
- 7) 山川哲雄, 宮城敏明: 緊張力を導入した PC 鋼棒と鋼板を用いたせん断損傷 RC 梁の応急補強法, *日本建築学会構造系論文集*, Vol. 586, pp. 171-178, 2004.
- 8) 千々和伸浩, 川中勲, 前川宏一: 未損傷部への選択的な鉄筋配置が定着部損傷を有する RC 部材の耐荷機構に及ぼす影響, *土木学会論文集 E*, Vol. 66, No. 2, pp.179-192, 2010.

(2010.4.27 受付)

EFFECT OF STRENGTHENING AT EXPECTED DAMAGING ZONE OF A RC MEMBER WITH DAMAGED ANCHORAGE

Nobuhiro CHIJIWA, Isao KAWANAKA and Koichi MAEKAWA

When a reinforced concrete member having cracks at the anchorage zones is loaded, diagonal crack is formed from the tip of the existing crack, and it leads to brittle shear failure. A reinforced concrete beam containing corrosion cracks at the anchorage zone were strengthened with sheets at the expected damaging zones, and tested in 3-point loading. The test result shows that the load capacity of the strengthened beam was the same to that of the replicate beam with no damage at the anchorage zones and contained enough shear reinforcement to develop flexural failure. It means that strengthening at the expected damaging zone with keeping corrosion cracks along to the tensile reinforcements at the anchorage zones may improve the load capacity of the damaged reinforced concrete.