

# 論文 腐食ひび割れの補修が残存耐荷性能の回復に及ぼす影響

尾形 直紀\*1・山崎 理美\*2・大下 英吉\*3

要旨：島国である我が国では経年劣化に伴う塩害による鉄筋腐食は深刻な問題となっている。RC 構造物において鉄筋とコンクリートの付着は実構造物の耐荷性能において非常に重要な位置づけにある。そこで、本研究では腐食ひび割れに補修を施した RC 梁部材の耐荷力、付着応力の回復性能について検討を行った。また、補修を施す領域を分けることでより有効な補修領域についての検討を行った。

キーワード：鉄筋腐食、耐荷力、付着応力、すべり、ひび割れ、補修

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景

昨今の社会情勢において、既存の構造物を適切に維持管理し、長期的な供用を目指すために維持補修は重要な位置づけにある。また、構造性能ならびに耐久性能とライフサイクルコストの両者を含めた観点から議論されなければならない。設定した構造物の余寿命に対してその機能と性能を十分に発揮しなければならない。したがって、構造物によっては長期延命を目的とした補修補強工法の適用が必要なものもあれば短期延命を目的としたものもある。維持管理手法に際しては前者の長期延命の補修補強工法は1回あたりのコストが高く処理の手法が複雑である。一方で後者に関しては、1回あたりのコストが低く処理が比較的容易な補修工法を5年から10年ごとに繰り返した適用により、構造性能を維持することは必要不可欠となる。特に、後者においては構造性能に大きく影響を及ぼす部位の特定と適切な対処方法の確立が必要不可欠である。

既存構造物の長期供用化のためには各種劣化に起因した構造性能の変化を正確に把握する必要がある。そのため、近年では内的、外的要因により構造物に生じる各種劣化現象が構造性能に及ぼす影響について各方面で盛んに研究が行われている。鉄筋コンクリートに生じる劣化現象は多岐にわたっているが、特に中性化や塩害による鉄筋腐食は構造体として機能する鉄筋量を減少させるとともに鉄筋とコンクリートの一体性すなわち付着性能を低下させるなど構造性能に及ぼす影響が大きい劣化現象の一つである。

このような観点から、鉄筋腐食を生じた RC 部材の耐荷力性状、付着性状を評価した研究は現在までに数多くある。例えば、梁全長にわたり過度に鉄筋腐食を生じることにより定着が不十分な RC 梁部材の残存耐荷力は定着部の鉄筋の抜け出しにより、大幅な耐荷力低下が起こ

ることが報告されている。この要因は、鉄筋の腐食と、それに伴い発生する腐食ひび割れの影響による付着応力の低下である。すなわち鉄筋腐食を生じた RC 部材の耐荷性状、付着性状を定量的に評価することは、腐食劣化の生じた RC 構造物の構造性能を評価する上で極めて重要な位置づけにある。

鉄筋腐食した RC 部材の補修による耐荷力、付着応力の回復性能に関する研究は著者らの知る限りさほど多くない。これは、前述した鉄筋腐食に起因する各種の劣化現象が前述の構造性能に及ぼす影響の定量的な評価を可能とする手法が確立されていないためである。このようなことから各学協会においてその確立に向けた取り組みが行われている。

### 1.2 研究目的

本研究では、RC 部材に対して短期延命を目的とした補修工法に着目し、腐食ひび割れの補修効果が耐荷力の回復性能に及ぼす影響の評価を行うことを目的とする。具体的には鉄筋とコンクリートの曲げ試験を実施し、耐荷力、荷重と変位の関係、付着応力とすべりの関係について評価を行った。また、補修を施す領域を変化させることにより補修対象領域が耐荷力の回復性能に及ぼす影響についても検討を行った。

## 2. 腐食ひび割れ補修実験

### 2.1 試験体概要およびコンクリートの配合

試験体の形状と寸および配筋を図-1に示す。試験体は、220mm×1950mm×180mm の梁部材であり、主鉄筋には、主筋降伏による曲げ破壊を防ぐため、D19(USD685)高強度異型棒鋼を60mm間隔に2本配筋した。試験体は、打設後24時間で脱型した後に、7日間湿布養生を行った。コンクリートの配合を表-1に示す。練混ぜ水には鉄筋の腐食を促進させるために5%NaCl水溶液を使用し、セメントは早強セメントを使用した。なお、荷重の載荷は、材

\*1 中央大学 理工学部土木工学科 (学生会員)

\*2 中央大学 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*3 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

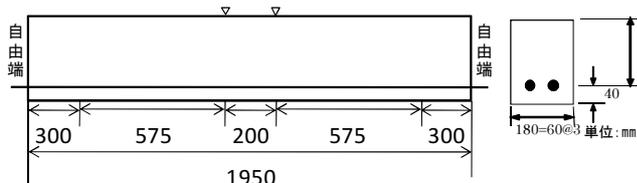


図-1 試験体概要

表-1 コンクリートの配合

| 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     |      |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| W                        | C   | S   | G   | 混和剤 | NaCl |
| 168                      | 280 | 826 | 996 | 2.8 | 8.11 |

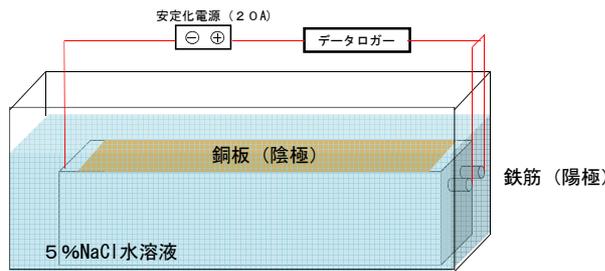


図-2 電食試験概要

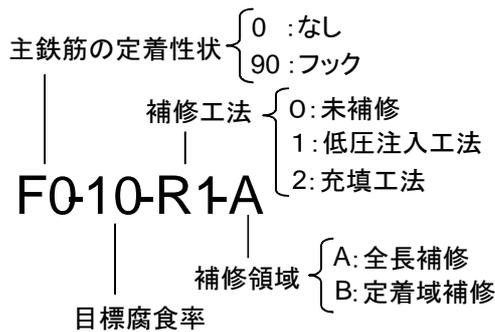


図-3 試験体名称

齢 28 日の時点で行った。

## 2.2 腐食試験手法

鉄筋の腐食促進試験手法は、設定した腐食率が早期に得られ、その制御が比較的容易である電食試験法を採用した。その具体的な方法は図-2 に示すように、5%NaCl 水溶液を満たした水槽内に試験体を浸漬させ、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続し、既定の積算電流量に到達するまで直流定電流 12.3A を通電した。

## 2.3 試験体名称

図-3 に試験体名称の一例を示す。F は主鉄筋を表しており、0 は主鉄筋がストレート、90 は 90°フック加工を施している。その後の数値 10 は目標腐食率、R は補修工法を表しており、0 は未補修、1 は低圧注入工法、2 は充填工法を表している。また、アルファベットは補修を施した領域であり、図-4 に示すように A は試験体の全長、B は試験体の定着域のみを表している。なお、F90 は鉄筋を 90°フック加工を施した試験体であり、既往の研究

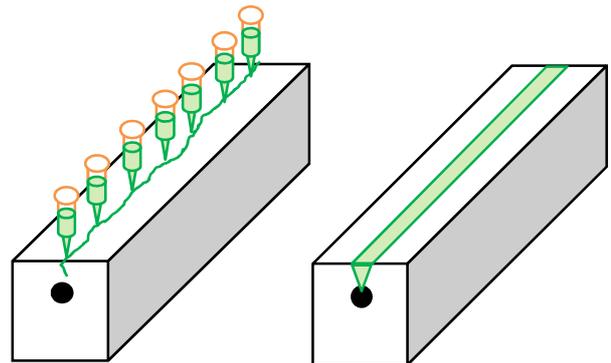


(a) A 全長補修



(b) B 定着域補修

図-4 補修領域



(a) 低圧注入工法

(b) 充填工法

図-5 補修工法概要

表-2 実験パラメータ

| 試験体名       | 腐食率 (%) | 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 補修工法   | 補修領域 |
|------------|---------|---------------------------|--------|------|
| F0-0-R0    | -       | 30.0                      | -      | -    |
| F0-10-R0   | 8.1     | 35.0                      | -      | -    |
| F0-10-R1-A | 8.4     | 29.6                      | 低圧注入工法 | 全長   |
| F0-10-R1-B | 12.1    | 21.2                      |        | 定着域  |
| F0-10-R2-B | 5.6     | 30.9                      | 充填工法   | 定着域  |

4) から引用した。詳細は 3.4 章で後述する。

## 2.4 補修工法と補修剤

腐食ひび割れの補修工法の概要を図-5 に示す。同図 (a) に示す低圧注入工法は、主にひび割れ幅が 0.2mm から 1mm 程度の微細なひび割れに対してゴムなどの圧力で 24 時間かけて補修剤をひび割れに注入する工法である。一方、同図 (b) に示す充填工法は 1mm 以上の比較的大きなひび割れにそって U 字もしくは V 字の溝を入れその溝に補修剤を充填させる工法である。低圧注入工法の補修剤には、7 日間の養生で強度を発揮するエポキシ系樹脂補修剤を使用した。充填工法の補修剤には、エポキシ系樹脂補修剤でも低圧注入工法で使用した補修剤よりも硬化後の可とう性が高いポキシ系樹脂補修剤を使用した。いずれの試験体においても、補修後に 7 日間養生し荷重の載荷を行った。また、充填工法は一般的には腐

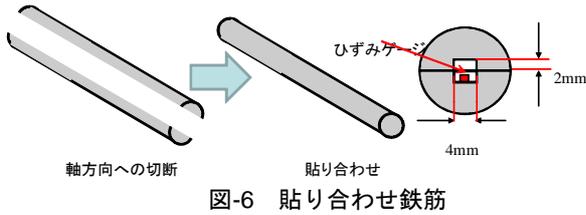
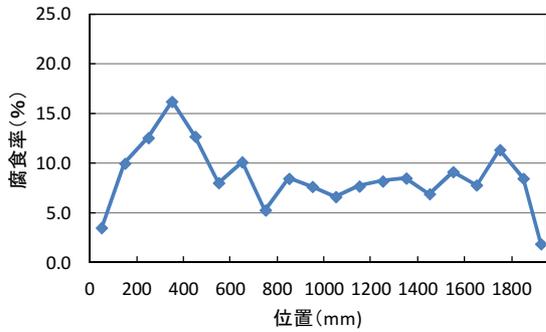
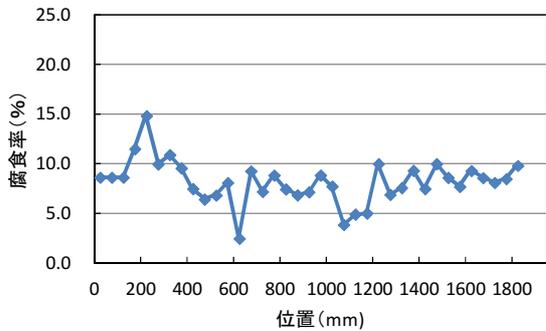


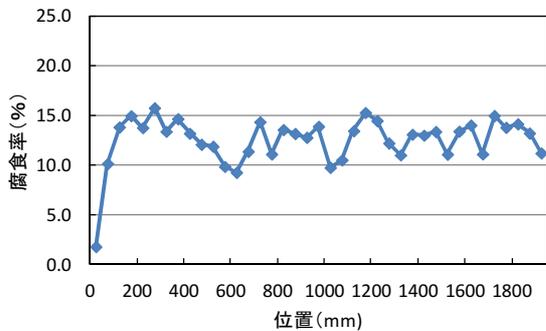
図-6 貼り合わせ鉄筋



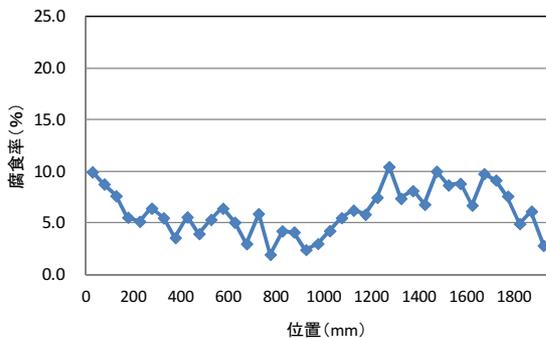
(a) F0-10-R0 (腐食, 未補修)



(b) F0-10-R1-A (腐食, 低圧注入工法, 全長補修)



(c) F0-10-R1-B (腐食, 低圧注入工法, 定着域補修)



(d) F0-10-R2-B (腐食, 充填工法, 定着域補修)

図-7 腐食率分布

食鉄筋周辺のコンクリートまではり鉄筋とコンクリートの付着を回復するために腐食生成物を除去する処理やプライマー処理を行うが、本実験においては短期延命の観点から腐食生成物の除去は実施しないこととした。

## 2.5 実験パラメータおよび載荷試験方法

各試験体の腐食率、圧縮強度、補修工法、および補修領域を表-2 に示す。

載荷試験は(0.5mm/min)変位制御で行い、載荷点間隔200mm、支点間距離1350mmの静的4点載荷とした。

## 2.6 測定項目

測定項目は、スパン中央部のたわみ、鉄筋の軸方向ひずみ、腐食率である。

スパン中央部のたわみは1/1000mm変位計を試験体中央部に1点、載荷点直下に2点設置して測定した。

鉄筋の軸方向ひずみの測定方法は、鉄筋ひずみの測定であるが、図-6 に示す貼り合わせ鉄筋を用い、鉄筋内部にひずみゲージを貼り付けることにより測定した。その具体的な方法は、鉄筋を軸方向に切断後、その断面内に2mm×4mmの溝を切削し、ひずみゲージを貼り付けた後に2対の切断された鉄筋をエポキシ樹脂接着剤により貼り合わせ1本の鉄筋とした。貼り合わせ鉄筋は2本の鉄筋のうち引抜き鉄筋のみとし、残りの鉄筋は通常の鉄筋を使用した。なお、ひずみゲージの貼り付け間隔は50mmである。

鉄筋は載荷試験終了後にはり出し、10%濃度のクエン酸二アンモニウム溶液に24時間浸漬させ、腐食生成物を除去した。その後、腐食鉄筋の質量を計測し、電食以前の健全な鉄筋との質量差を健全な鉄筋の質量で除することにより腐食率を算出した。腐食率算定式を次式に示す。なお、表-2 に示す腐食率は、各鉄筋を50mm間隔で切断し腐食率 $n$ を算出し、それを平均した値である。

$$n = \frac{m'}{m} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

$$A' = A \times (1 - n/100)$$

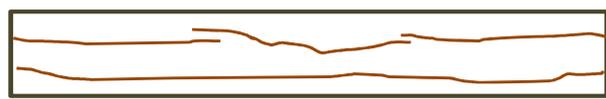
ここで、 $A'$ は腐食後の鉄筋の断面積であり $A$ は健全鉄筋の断面積である。なお、腐食後の断面積に関しては式(1)より算出した腐食鉄筋の断面積に、鉄筋に設けた溝の断面積(16mm<sup>2</sup>)を加えた値とした。

試験体 F0-10-R0, F0-10-R1-A, F0-10-R1-B では設定電圧にできるだけ近い値で通電したが、試験体 F0-10-R2-B では、電食試験時に他の試験体の電食試験時に比べ低電圧で長時間通電したため平均腐食率が低くなった。

## 3. 補修による構造性能回復効果

### 3.1 鉄筋の腐食性状

図-7 に各試験体の腐食率分布を示す。いずれの試験体



かぶり面

(a) F0-10-R1-A (腐食, 低圧注入工法, 全長補修)



かぶり面

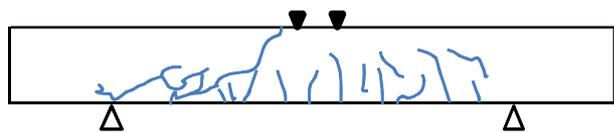
(b) F0-10-R1-B (腐食, 低圧注入工法, 定着域補修)



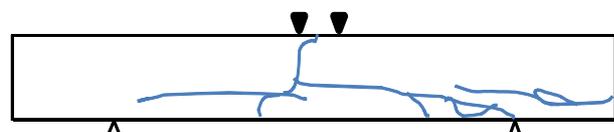
かぶり面

(c) F0-10-R2-B (腐食, 充填工法, 定着域補修)

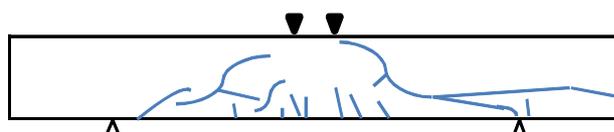
図-8 腐食ひび割れ性状



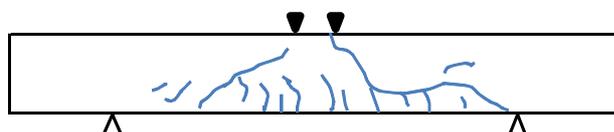
(a) F0-0-R0 (非腐食, 未補修)



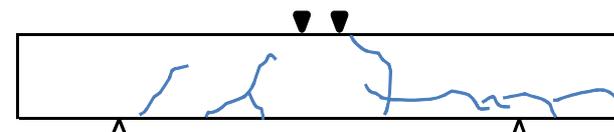
(b) F0-10-R0 (腐食, 未補修)



(c) F0-10-R1-A (腐食, 低圧注入工法, 全長補修)



(d) F0-10-R1-B (腐食, 低圧注入工法, 定着域補修)



(e) F0-10-R2-B (腐食, 充填工法, 定着域補修)

図-9 ひび割れ性状

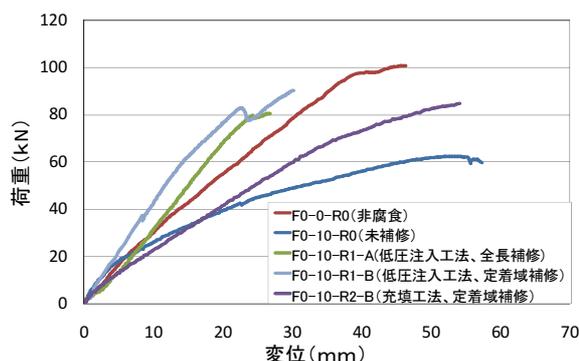


図-10 荷重と中央変位の関係

も主鉄筋の腐食率は鉄筋軸方向にばらつきを生じている。これは、鉄筋腐食に起因してかぶりコンクリートに鉄筋に沿ったひび割れが発生し、ひび割れを介して NaCl 水溶液がコンクリート内部に侵入することにより、鉄筋腐食が加速したことで生じた。

図-8 に各試験体の腐食ひび割れ性状を示す。いずれの試験体においてもかぶり面には鉄筋に沿った腐食ひび割れが発生している。また、F0-10-R2-B においては鉄筋に沿ったひび割れは片側にしか見られなかった。これは、全体的に腐食率が小さかったためである。

### 3.2 破壊性状

図-9 に各試験体の荷重の載荷時によるひび割れ性状を示す。試験体 F0-10-R0, F0-10-R1-A および F0-10-R2-B では鉄筋の抜け出しによる付着割裂ひび割れを生じている。

図-10 に荷重と中央変位の関係を示す。ここでは、鉄筋腐食した試験体と腐食ひび割れに補修を施した試験体の比較、また非腐食試験体とそれぞれの工法で補修を施した試験体との比較を行う。

補修を施した試験体 F0-10-R1-A, F0-10-R1-B と補修を施していない試験体 F0-10-R0 を比較すると、補修した試験体の剛性は大きく鉄筋とコンクリートの一体性が確認される。しかしながら、破壊を生じる変形量は小さく脆的な挙動を生じる。

また、低圧注入工法で補修した試験体 F0-10-R1-A および F0-10-R1-B と鉄筋が非腐食である試験体 F0-0-R0 を比較すると、脆的な破壊性状を示す。これは、低圧注入工法で使用した補修剤の剛性がコンクリートより大きく、また、硬化後に塑性的挙動を示すためである。そのため、試験体の剛性も上がったと考えられる。

一方で、充填工法で補修した試験体 F0-10-R2-B と鉄筋が非腐食である試験体 F0-0-R0 を比較すると同一の荷重作用時における中央変位が大きくなる。これは、充填工法で使用した補修剤の粘性が高いために、健全なコンクリートよりもじん性が高まったためである。

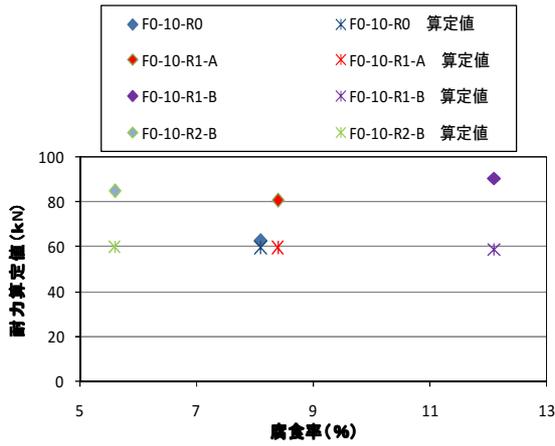


図-11 各試験体の算定値と実験値の比較

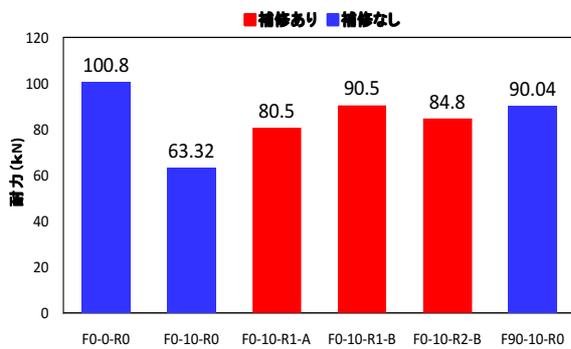


図-12 各試験体における耐荷力

### 3.3 実験値と二羽式より算定した耐荷力値

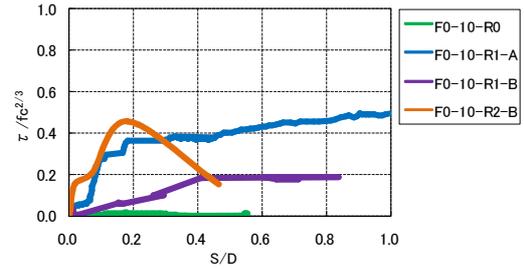
本節では、実測した鉄筋腐食率を用いて式(1)より腐食後の断面積を算出することで腐食後の鉄筋比をもとめ、二羽式に基づき耐荷力を算定した。また算定値と実験値の耐荷力と比較を行う。せん断耐荷力算定式として式(2)が提案されている。

$$V_c = 0.2f_c' \frac{1}{13} (100P_w)^3 \left(\frac{d}{1000}\right)^{\frac{1}{4}} (0.75 + 1.4\frac{d}{a}) bd \frac{1}{1000} \quad (2)$$

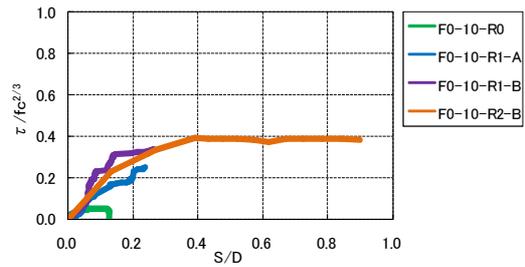
ここで、 $f_c'$ はコンクリートの圧縮強度、 $P_w$ は鉄筋比、 $d$ は有効高さ、 $b$ は部材幅、 $a$ はせん断スパンである。この式は一般的にせん断補強筋を用いない棒部材の設計せん断耐荷力を算出するのに使われ、コンクリート強度、有効高さ及び鉄筋比を考慮して導かれたものである。本研究においても式(2)より算出される算定値と比較を行う。

図-11 に各試験体の実験値を記号■で表し、および式(2)より算出した算定値を実線で表す。

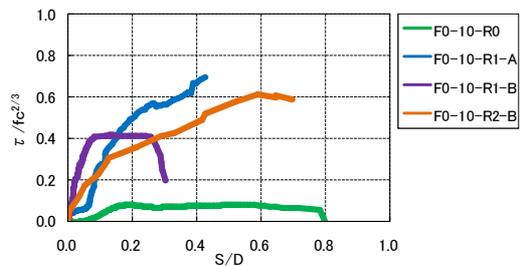
補修を施した試験体においては二羽式より算定したせん断耐荷力よりも補修を施した試験体はいずれにおいても、耐荷力が高かったことがわかる。特に、F0-10-R1-Bにおいては式(2)より算出される算定値に比べ耐荷力が特に大きくなっている。このことから低圧注入工法で定着域を補修することが耐荷力の回復に最も効果的である



(a) 曲げ領域



(b) せん断領域



(c) 定着領域

図-13 破壊側における付着応力すべり関係

と言える。

### 3.4 耐荷力回復性能

図-12 に各試験体における耐荷力の一覧を示す。また、同図には既往の研究<sup>4)</sup>による主鉄筋にフック加工を施し未補修の試験体 F90-10-R0 の耐荷力を併せて示す。いずれの補修工法で補修を施した場合においても鉄筋が健全な試験体に比べ耐荷力は小さな値を示している。これは、補修剤をひび割れに浸透させ鉄筋とコンクリートの付着を回復させるためであるが、鉄筋腐食に伴い腐食生成物が鉄筋の周囲に存在しているために鉄筋とコンクリートの付着が健全なものに比べ小さくなるためである。一方、補修していない試験体 F0-10-R0 に比べ補修した試験体 F0-10-R1-A、F0-10-R1-B および F0-10-R2-B の耐荷力は大きくなっている。これは、補修剤を浸透させた効果があったものだと考える。また、主鉄筋にフック加工を施し未補修の試験体 F90-10-R0 と、ストレート鉄筋の定着域に低圧注入工法をした試験体 F0-10-R1-B の比較をすると、後者の低圧注入工法で定着域のみを補修した試験体は、前者の主鉄筋にフック加工を施した試験体に比べ

でも耐荷力にほとんど差異はない。これは、定着域のみを補修すると定着域の鉄筋とコンクリートの付着が回復し、抜け出しが抑制されたためである。

また、低圧注入工法と充填工法の異なる2種類の補修工法で定着域のみを補修した試験体において、前者の補修工法で補修した試験体においては、腐食率は高いにも関わらず耐荷力は大きくなっている。これは、低圧注入工法で用いた補修剤が塑性的挙動を示すため鉄筋とコンクリートの間にも補修剤が浸透しコンクリート同士だけでなく鉄筋とコンクリートの付着が回復するが、充填工法で使用した補修剤は粘性が高いため鉄筋とコンクリートの間まで補修剤が充填されず、付着の回復がコンクリート同士の付着の回復効果のみにとどまったためであると考えられる。

### 3.5 付着応力回復性能

鉄筋に沿った各位置における付着応力 $\tau$ は、式(3)を用い算出した。

$$\tau = \frac{1}{\pi D} \frac{dP}{dx} \quad (3)$$

ここで、 $D$ は鉄筋径、 $P$ は鉄筋の引張力である。具体的な鉄筋の引張力勾配の算出方法であるが、腐食試験体の鉄筋は断面欠損を有することから測定近傍領域(10mm)の腐食率を3.1節において述べた同様の手法により測定し、測定点近傍の周長、断面積を算出した。そして着目する測定点を含む近傍の3点を通る2次曲線から描く測定点の鉄筋の引張力勾配を算出した。

すべり量は、試験体端部から対応する測定点までのひずみを積分することにより式(4)から算出される。

$$s = \int \varepsilon dx \quad (4)$$

ここで、 $S$ はすべり量、 $\varepsilon$ は鉄筋ひずみである。

破壊側における試験体が破壊に至るまでの値から得られた付着応力すべり関係を図-13に示す。なお、既往の研究<sup>2)</sup>と同様に、縦軸は圧縮強度の2/3乗で、横軸のすべり量は鉄筋径で除することにより無次元化した。また、付着に関与する相対ずれは剛性ずれを加味しておらず、図-13の結果も前途のようにになっている。

$$\tau = 0.9 f_c^{2/3} \left( 1 - \exp \left( -40 (S/D)^{0.6} \right) \right) \quad (5)$$

いずれの領域においても未補修の試験体に比べて補修をした試験体のほうが、付着応力が大きくなっていることがわかる。したがって、図-13からも補修による効果があったと言える。

また、各局所点から得られた値を平均化することにより本研究では評価を可能とした。

既往の研究<sup>2)</sup>において曲げ区間におけるひび割れが応力を分散させることにより耐荷力が向上することが報

告されている。同図(a)に示すように曲げ領域の付着応力は低圧注入工法で定着域を補修した試験体 F0-10-R1-B に比べ、低圧注入工法によって全長を補修した試験体 F0-10-R1-A の付着応力の回復は顕著であった。対して、曲げ区間を補修したことにより鉄筋とコンクリートの付着が回復することに伴い、変形性能を妨げるため F0-10-R1-A における耐荷力の回復効果は F0-10-R1-B に比べ確認されなかった。

## 4. まとめ

本研究では、腐食ひび割れの補修効果を補修工法の違い、荷重と変位の関係、耐荷力、付着応力の観点から検討したものである。以下、本研究により得られた知見を示す。

- 1) 鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の耐荷力を回復させるという点では低圧注入工法が有効である。しかし、荷重と変位の関係では荷重に対する変位が小さくなってしまいうことが問題点であるため橋梁などの実構造物に対して低圧注入工法を行うと、剛性が高くなる。
- 2) 鉄筋腐食を生じた RC 梁部材において、充填工法で補修するという事は、耐荷力の回復という点では低圧注入工法に劣るものの、荷重と変位の関係では低圧注入工法に比べ剛性が下がり破壊時の変位は大きくなる。
- 3) 充填工法では、鉄筋とコンクリートの間の付着応力は回復してないが、かぶり面のひび割れたコンクリート同士の付着は鉄筋腐食によるひび割れが補修剤により塞がり、コンクリート同士付着が回復され結果、実験値の付着応力が回復される。

## 参考文献

- (1) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡本甫:せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第 372 号, V-5, pp167-176, 1986
- (2) 村上祐貴, 塩谷文彬, 堤知明, 大下英吉:鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐荷性能に及ぼす定着性能の影響, コンクリート工学次論文集, Vol. 32, No. 2, pp 1489-1494, 2010
- (3) 島弘, 周礼良, 岡村甫:マッシュパなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, No. 378, V - 6, pp. 165-174, 1987. 2
- (4) 松永将人, 村上裕貴, 大下英吉:鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存せん断耐荷性状に及ぼす定着フックの影響, 第 39 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, V-12, 2012