

論文 定着を有する腐食鉄筋とコンクリートの付着応力性状に関する研究

福井 亨平*1・佐藤 優*2・鈴木 修一*3・大下 英吉*4

要旨：RC 構造物において、鉄筋腐食が生じた場合、断面の欠損および腐食ひび割れの発生によって付着性能の低下が生じる。その結果、鉄筋が健全な RC 構造物と腐食した RC 構造物では破壊性状は異なるものと考えられる。そこで本研究では、鉄筋が腐食した RC 部材の付着応力性状を評価することを目的として、実験的手法により鉄筋腐食、腐食ひび割れ性状に加えてせん断補強筋が定着を有する RC 部材の付着応力性状に及ぼす影響を評価した。

キーワード：腐食鉄筋，付着応力，せん断補強筋

1. はじめに

近年、コンクリート構造物における耐久性設計や維持管理の重要性が認識されており、それに伴い供用中のコンクリート構造物の寿命予測や耐久性診断および残存耐力の推定などが盛んに行われている。特に、残存耐力の推定は現時点での構造性能を評価する他に、補修・補強等においては LCC を含めた適用工法の選定から事後の機能回復評価、構造物の将来に渡る経年劣化予測においても非常に重要である。

著者らは梁全長に渡り鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の曲げ耐力は定着フックを設けない場合、鉄筋が健全な場合に比べて大幅に低下することを指摘した¹⁾。その主たる要因は、鉄筋の腐食に伴う断面減少、コンクリートの腐食ひび割れ性状および腐食ひび割れ性状を加味した鉄筋コンクリートの付着応力性状であることが解析的手法を適用することにより明らかとなった。すなわち、鉄筋腐食を生じた RC 部材の付着応力性状を定量的に評価することは、現時点における構造性能を評価する上で非常に重要な位置付けにあることは明らかである。

現在までに腐食の生じた鉄筋とコンクリートとの付着性状を評価した研究は広く実施されているが、それら研究の多くは、定着長の短い部

材におけるものである²⁾。しかしながら、実構造物では腐食していない定着領域やフック等による幾何学的な定着等、その程度は異なるものの定着を有する断面の存在がある。したがって、定着を有する状態における腐食鉄筋とコンクリートの付着性状を評価することが必要である。しかしながら現在までに定着を有する状態において鉄筋の腐食が、付着応力性状に及ぼす影響を評価した研究は数少ない³⁾。さらに、せん断補強筋がコンファインド効果を有するということを鑑みれば、せん断補強筋が配置された状態において付着応力を評価する必要もあると考えられる。

そこで本研究では、鉄筋が腐食した定着を有する RC 部材の付着応力性状を評価することを目的として、実験的手法により鉄筋腐食、腐食ひび割れ性状に加えてせん断補強筋が RC 部材の付着応力性状に及ぼす影響を評価した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状寸法および配筋を図-1 に示す。試験体寸法は 240×200×960mm であり、試験体下面から 40mm の位置に D16 異形鉄筋 (SD295A) を 60mm 間隔で 3 本配筋した。また、上述の試

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科 (非会員)

*3 東電設計株式会社 第二土木部地盤・構造部設計高度化グループ課長 (正会員)

*4 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

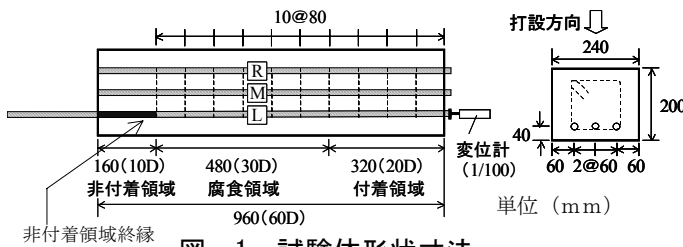


図-1 試験体形状寸法

表-1 試験体配合

| Gmax (mm) | W/C (%) | スランブ (cm) | 空気量 (%) | 単体量(kg/m ³) | | | | |
|--------------|------------|--------------|------------|-------------------------|------|-----|-----|------|
| | | | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤 |
| 20 | 60 | 10 | 5 | 168 | 280 | 826 | 996 | 2.80 |

験体に加えて D6 せん断補強筋 (SD295A) を 80mm 間隔で計 10 本配筋した試験体も作成した。試験体は打設後 48 時間で脱型した後、28 日間湿布養生を施した。載荷試験実施時の材齢は 36 日とした。試験体配合は表-1 に示す通りであり、練混ぜ水には 5%NaCl 溶液を使用した。

2.2 電食試験方法

図-2 に電食試験概要を示す。腐食領域は図-1 に示すように載荷端から 10D~40D の領域であり、当該領域のみを 5%の NaCl 水溶液を満たした水槽内に浸漬させ、鉄筋を陽極側、銅版を陰極側に接続し直流定電流 20A を通電した。各腐食試験体の積算電流量を表-2 に示す。

2.3 引抜き試験方法

引抜き試験概要を図-1 に示す。引抜く鉄筋は配筋された 3 本の鉄筋の内、試験体側面から 60mm の位置に配筋された外側の鉄筋である。また引抜く鉄筋には載荷端から 10D まで非付着領域を設けた。なお、載荷速度は 9.8kN/min とした。

2.4 実験パラメータおよび試験体名称

実験パラメータは表-2 に示すように鉄筋の腐食率およびせん断補強筋の有無である。目標とした腐食率はせん断補強筋を配筋しない試験体シリーズ (S0 シリーズ) では 0%、10%および 20%の 3 水準であるが、目標腐食率が 10%であった試験体は設定した積算電流量が 640hr・A と大きかったことから目標腐食率と実測値に大きな差異が生じたため、本実験の対象から除外した。せん断補強筋を配筋した試験体シリーズ (S1 シリーズ) においては 0%および 10%の 2 水準である。また同表に各試験体の圧縮強度を示す。なおコンクリートの圧縮強度試験は引抜

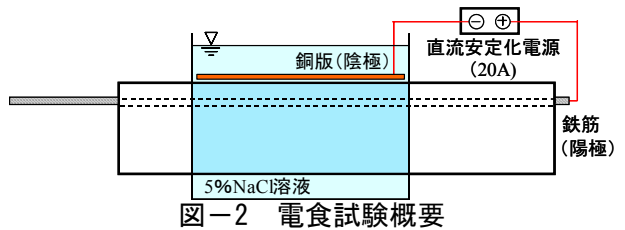


図-2 電食試験概要

表-2 実験パラメータ

| シリーズ | 試験体名 | せん断補強筋 | 目標腐食率 | コンクリート強度 | 積算電流量 |
|------|----------|--------|-------|-----------------------|---------|
| S0 | BD-S0-0 | 無し | 0% | 26.2N/mm ² | 427hr・A |
| | BD-S0-20 | | 20% | 25.8N/mm ² | |
| S1 | BD-S1-0 | 有り | 0% | 26.2N/mm ² | 740hr・A |
| | BD-S1-10 | | 10% | 28.7N/mm ² | |

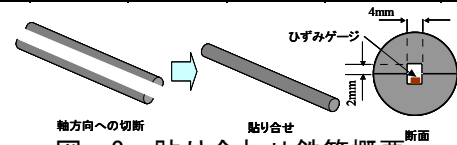


図-3 貼り合わせ鉄筋概要

表-3 鉄筋の力学的性質

| 鉄筋の種類 | 降伏強度(N/mm ²) | 引張強度(N/mm ²) | 弾性係数(N/mm ²) |
|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| D16 | 378 | 523 | 2.0×10 ⁵ |
| D6 | 438 | 557 | - |

き試験と同じ材齢の 36 日の時点で実施し、その間の養生方法は湿布養生とした。

2.5 測定項目

測定項目は鉄筋の軸方向ひずみおよび自由端すべりである。鉄筋ひずみの測定であるが、ひずみゲージ (検長 2mm) を鉄筋表面へ貼り付けて電食を行うと、ゲージ自体の機能を損なう。したがって、その貼り付け位置は鉄筋内部とした。その具体的な方法は、図-3 に示すように鉄筋を軸方向に切断後、その断面に 2mm×4mm の溝を掘り、ひずみゲージを貼り付けた後、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。貼り合わせた鉄筋は 3 本の鉄筋のうち引抜く鉄筋のみとし、残りの 2 本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 3D である。貼り合わせ鉄筋およびせん断補強筋の力学的性質を表-3 に示す。なお、鉄筋の断面積は、引張試験前に測定した鉄筋質量から換算した。

3. 電食試験結果

3.1 鉄筋の腐食性状

電食を行った試験体に配筋した鉄筋は、載荷試験終了後にはつり出し、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

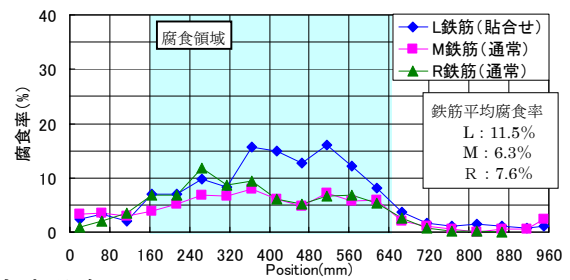
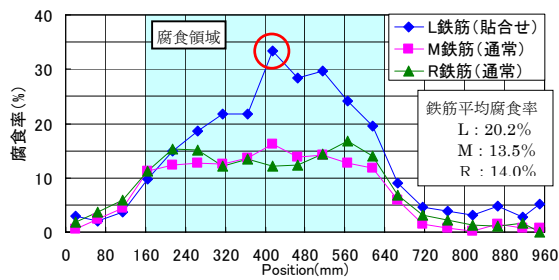
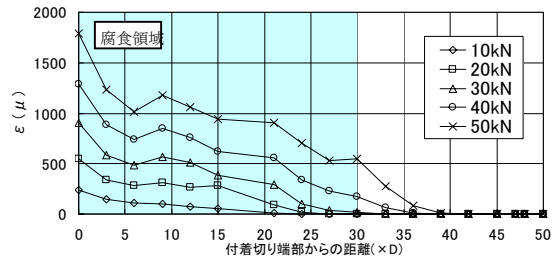
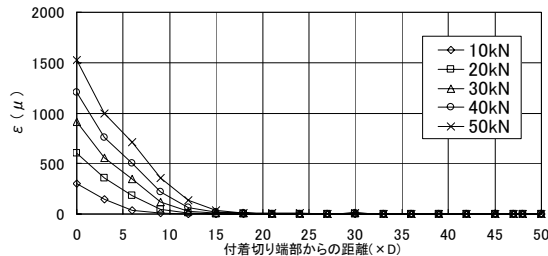
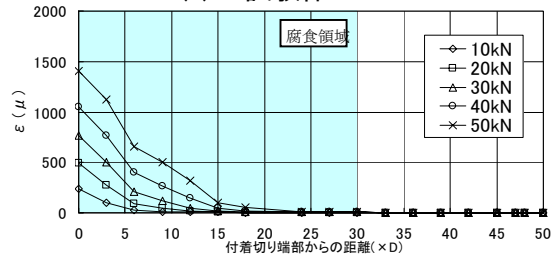
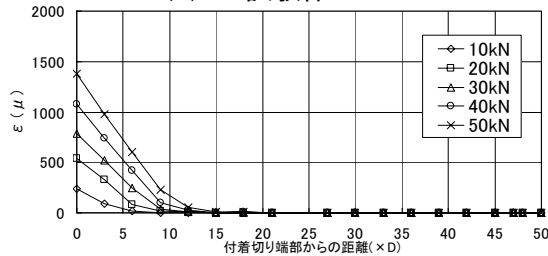


図-4 腐食率分布 (a) BD-S0-20 (b) BD-S1-10



(a) 試験体 BD-S0-0 (b) 試験体 BD-S0-20



(c) 試験体 BD-S1-0 (d) 試験体 BD-S1-10

図-5 L鉄筋ひずみ分布

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。腐食率の計算は配筋した3本の鉄筋全てに対して実施し、1本の鉄筋を50mm間隔で切断し計18箇所計測した。なお鉄筋を識別するために3本の鉄筋をそれぞれL鉄筋(引抜き)、M鉄筋(中央)、R鉄筋と称することとする。(図-1参照) 図-4(a)、(b)に各試験体の腐食率分布を示す。図中の記号◆、■および▲はそれぞれL、M、R鉄筋に対応しており横軸は荷重端から計測位置中央までの距離である。なお、同図(a)に示す○枠部は荷重に伴い鉄筋の破断した箇所である。なお、図中に各鉄筋の平均腐食率を示すが、これは鉄筋の破断箇所近傍を除外した値である。いずれの腐食試験体においても、L鉄筋(引抜き)の腐食率がM、R鉄筋に比べて大きくなっている。本実験における腐食ひび割れ性状はいずれの試験体も同様の傾向を示しており、試験体底面に関しては、両外側鉄筋に沿った比較的幅の小さい腐食ひび割れが発生した。側面に関しては、L鉄筋側の側面にのみ腐食ひび割れが発生し

た。また、側面に生じたひび割れ幅は底面に比べて比較的大きかった。その確固たる理由は検討中であるが、L鉄筋(引抜き)のみ非附着領域を設けたことが影響していると考えられる。したがって、L側の側面においては反対側の側面に比べて腐食ひび割れが発生しやすく、その結果腐食率が大きくなったものと考えられる。これに加えて、L鉄筋の腐食率には荷重に伴う鉄筋の伸びの影響も含まれていると考えられる。

4. 引抜き試験結果

4.1 鉄筋のひずみ分布 図-5(a)~(d)に各試験体のL鉄筋のひずみ分布を示す。

なお横軸は附着切り端部から測定位置までの距離を示している。

(1) S0シリーズ(せん断補強筋無し)

図-5(a)に示すように、鉄筋腐食の有無によらず、ひずみ分布は荷重の荷重とともに全体的に大きくなるとともに自由端に向かうに従いひずみ値は小さくなる傾向を示している。しかしながらひずみ勾配に関しては、鉄筋が健全な試

験体 BD-S0-0 に比べて、鉄筋腐食を生じた試験体 BD-S0-20 は非常に緩やかである。

(2) S1 シリーズ (せん断補強筋有り)

せん断補強筋を配筋した S1 シリーズであるが、同図 (c) に示す鉄筋が健全である BD-S1-0 では、試験体 BD-S0-0 と明確な差異は生じていない。

次に鉄筋が腐食した試験体 BD-S1-10 では、試験体 BD-S1-0 に比べて腐食領域のひずみ勾配は全体的に緩やかな傾向を示している。しかしながら、試験体 BD-S0-20 と比較すると腐食領域におけるひずみ勾配は急であることが分かる。このことは、同試験体の腐食率が BD-S0-20 に比べて、小さいことに加えて、せん断補強筋のコンファインド効果によるものと考えられる。

4.2 付着応力 - すべり量関係

鉄筋に沿った各位置における付着応力 τ は、式(1)を用い算出した。

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

ここで、 D : 鉄筋径, P : 鉄筋力

具体的な鉄筋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点近傍領域 (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。具体的な算出方法は式(2)に示す通りである。

$$A \times (1 - n/100) = A' \quad (2)$$

ここで、

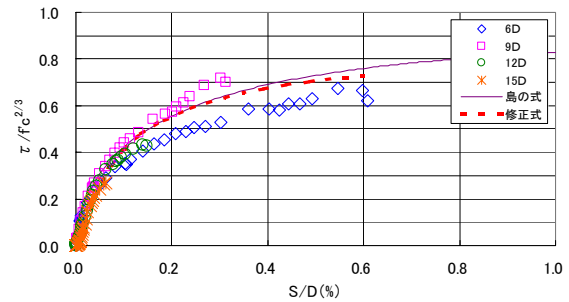
A : 健全鉄筋の断面積 (mm^2), n : 腐食率 (%),

A' : 腐食鉄筋の断面積 (mm^2)

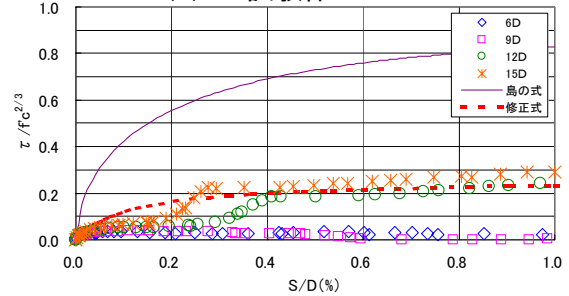
なお、周長に関しては式(2)より算出した腐食鉄筋の断面積に、設けた溝の断面積($16mm^2$)を加えて算出した。そして着目する計測点を含む近傍の 3 点を通る 2 次曲線から、各測定点の鉄筋力勾配を算出した。

すべり量はいずれの試験体も自由端すべりが生じていなかったことから、式(3)に示すように自由端から任意の測定点まで積分することにより算出される。

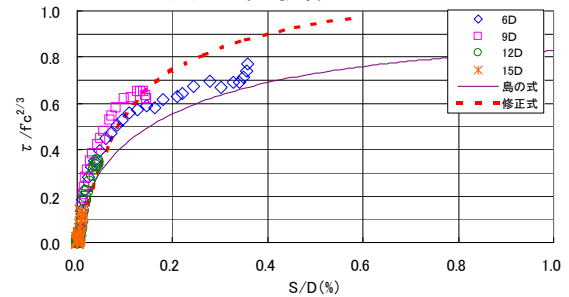
$$s = \int_b^{a_i} \varepsilon dx \quad (3)$$



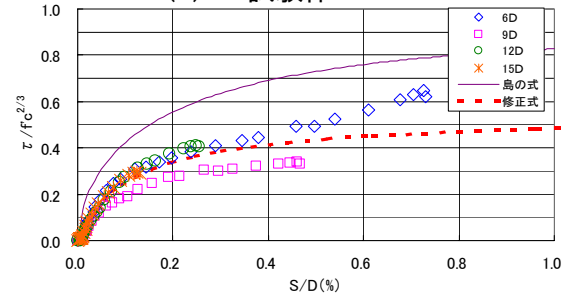
(a) 試験体 BD-S0-0



(b) 試験体 BD-S0-20



(c) 試験体 BD-S1-0



(d) 試験体 BD-S1-10

図-6 付着応力 - すべり関係

ここで、 s : すべり量, ε : 鉄筋ひずみ
 a_i : i 番目の測定点, b : 自由端

図-6 に各試験体における付着応力 - すべり関係を示す。図中の記号 \diamond , \square , \circ および $*$ はそれぞれ付着切り終縁から 6D, 9D, 12D, 15D の位置における付着応力 - すべり関係である。付着応力は既往の研究と同様、圧縮強度の 2/3 乗で、すべり量は鉄筋径で除することにより基準化した。なお鉄筋径は腐食に伴う断面欠損を考慮した値である。また図中には、式(4)に示す島ら⁴⁾による提案式も併せて示す。

$$\tau = 0.9 f_c^{2/3} \left(1 - \exp \left(-40 \left(\frac{S}{D} \right)^{0.6} \right) \right) \quad (4)$$

ここで、 f'_c : 圧縮強度、 S : すべり量、 D : 鉄筋径
また図中に示す破線については 4.4 節において
詳述する。

(1) S0 シリーズ (せん断補強筋無し)

同図(a)に示した BD-S0-0 の $\tau - s$ 関係は、島の式 (式(4)) に比べて若干小さな値を示したものの、比較的良好な一致を示している。また、鉄筋軸に沿った位置によらず、付着応力 - すべり関係はほぼ同じであった。

次に腐食鉄筋を有する試験体 BD-S0-20 においては、6D、9D の位置における付着応力はほとんど生じていない。また 12D、15D の位置においても基準化した付着応力は約 0.2 程度であり、腐食に伴い著しく付着性状の劣化が生じていることが分かる。

(2) S1 シリーズ (せん断補強筋有り)

同図(c)に示した BD-S1-0 は、すべりが 0.1% の時点で基準化した付着応力が 0.6 生じた。これに対しせん断補強筋を有しない BD-S0-0 は同一すべりに対する基準化した付着応力値は 0.4 と、せん断補強筋を有することにより同一すべりに対する付着応力が大きいことが分かる。これはせん断補強筋を有することによりコンクリートの拘束力が S0 シリーズに比べて向上したためである。

次に鉄筋が腐食した BD-S1-10 においては、鉄筋腐食に伴う付着劣化により、健全鉄筋を有する試験体 BD-S1-0 に比べて、同一すべりに対する基準化した付着応力の値が小さい。しかしながらせん断補強筋を有しない BD-S0-20 に比べると、同一すべりに対する付着応力が大きい。このことは腐食程度の違いも要因の一つであるが、試験体 BD-S0-0 および試験体 BD-S1-0 の結果に立脚すれば、せん断補強筋によるコンファインド効果が主たる要因であると考えられる。

4.3 付着応力 - すべり - ひずみ関係

島ら⁴⁾は、ヤング係数の異なる同様な形状のアルミニウム棒と鋼棒の付着応力 - すべり関係が異なることに着目し、アルミニウム棒および鋼棒のひずみの違いが $\tau - s$ 関係に大きな影響

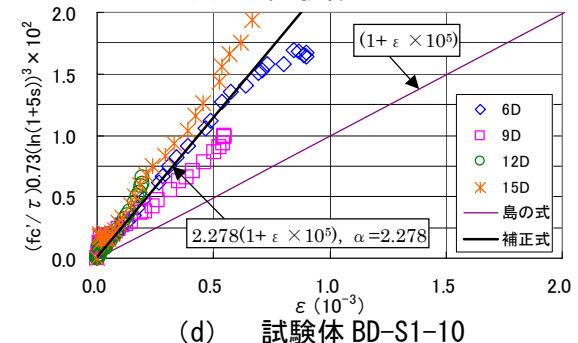
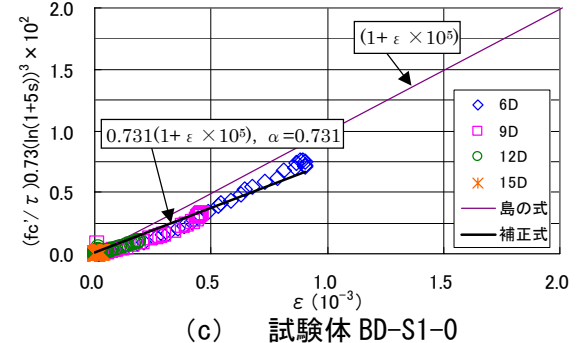
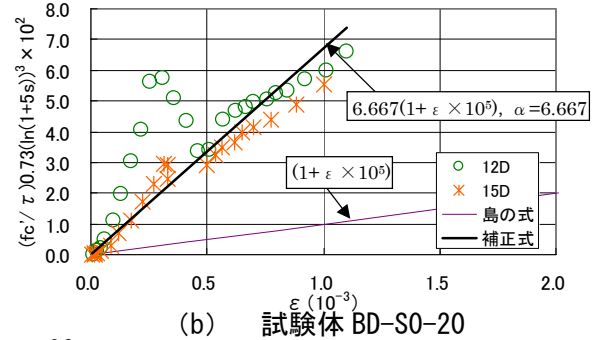
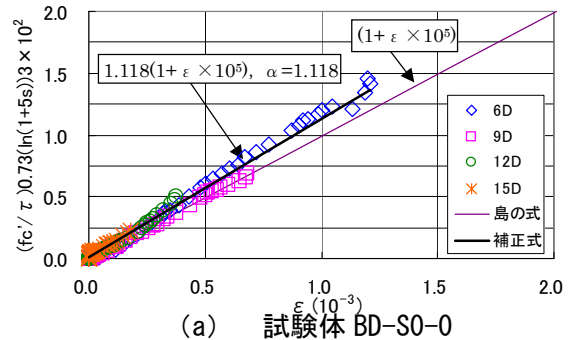


図-7 付着応力-すべり-ひずみ関係

を及ぼすことを指摘するとともに、式(4)に加えて、式(5)に示すような付着応力 - すべり - ひずみ関係を提案している。

$$(1 + \epsilon \times 10^5) = \left(\frac{f'_c}{\tau} \right) 0.73 (\ln(1 + 5s))^3 \quad (5)$$

ここで $s = 1000S/D$ 、 D : 鉄筋径、 S : すべり量
 ϵ : ひずみ、 τ : 付着応力、 f'_c : 圧縮強度

図-7(a) ~ (d) は式(5)の右辺を縦軸、横軸にひずみを取って実験値をプロットしたものである。

(1) S0 シリーズ (せん断補強筋無し)

まず同図(a)に示した。BD-S0-0 においては、式(5)の左辺値と実験値は良好な一致を示してい

る。これに対し、鉄筋を腐食させた試験体 BD-S0-20 に関しては式(5)に比べてその値は非常に大きい。なお、図-6(b)に示すように 6D, 9D の位置においては付着切れが生じていると思われるため、図-7(b)では 12D, 15D の位置における値のみをプロットした。

(2) S0 シリーズ (せん断補強筋有り)

次にせん断補強筋を有する場合の試験体であるが、BD-S1-0 では、式(5)の左辺値に比べ全体的に小さくなっている。これはせん断補強筋の影響により、コンクリートの拘束力が大きくなったためである。

次に鉄筋が腐食した BD-S1-10 においては BD-S0-20 と同様、式(5)に比べその値は大きい。

以上の結果から、鉄筋腐食を生じた試験体に関しては、式(5)により評価することが出来なかった。これは鉄筋腐食に伴う断面欠損や腐食ひび割れの影響によるものである。しかしながら図-7(b), (d)から分かるように式(5)より算出した鉄筋腐食の生じた試験体の値は、同式と大きく異なるものの、ひずみと付着応力-すべり関係の相関性は保持されている。

そこで式(6)に示すように式(5)の左辺に、鉄筋腐食に伴う付着応力低下を表す腐食劣化係数を乗じ、本試験体の付着応力性状を評価することとする。なお、この腐食劣化係数 α は図-7(a)~(d)に示すように実験値を線形近似し算出した。

$$\alpha(1+\varepsilon \times 10^5) = \left(\frac{f'_c}{\tau}\right) 0.73(\ln(1+5s))^3 \quad (6)$$

4.4 補正式を用いた付着応力-すべり関係

式(6)より算出した付着応力-すべり関係を図-6に破線で示す。同図に示すようにいずれの試験体においても実験結果は式(6)より算出した付着応力-すべり関係と比較的良好に一致していることがわかる。

したがって、この腐食劣化係数 α を決定することが可能であれば、鉄筋腐食の生じた RC 部材においても付着応力-すべり関係を定量的に評価することが可能であると考えられる。

この腐食劣化係数 α に及ぼす因子としては鉄筋腐食率、腐食ひび割れ性状、せん断補強筋の腐食劣化性状等である。今後、腐食率の異なる試験体に対し実験を重ね、腐食劣化係数を同定する事が可能であると考えている。

5. 結論

本研究では、鉄筋が腐食した定着を有する RC 部材の付着応力性状を評価することを目的として、実験的手法により鉄筋腐食、腐食ひび割れ性状に加えてせん断補強筋の有無が RC 部材の付着応力性状に及ぼす影響を評価した。

以下に本研究で得られた知見を要約する。

- (1) せん断補強筋を有しない RC 部材の場合、鉄筋腐食が生じると、付着応力は健全な場合に比べて大幅に低下する。
- (2) せん断補強筋を有する RC 部材の場合においても、鉄筋腐食が生じると付着応力は鉄筋の健全な場合に比べて低下する。しかしながら、その低下量はせん断補強筋のコンファインド効果により、せん断補強筋を有しない場合と比べて小さい。
- (3) 鉄筋腐食を生じた RC 部材の付着応力性状は、島らの提案した付着応力-すべり-ひずみ関係に腐食劣化係数を導入することにより評価可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 村上祐貴, 木下哲秀, 鈴木修一, 福本幸成, 大下英吉: 鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 17 巻, 第 1 号, 2005.1
- 2) 例えば宇田好一郎ら: 腐食ひび割れを有する鉄筋コンクリートプリズムの付着特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.841-846, 2004
- 3) 島弘, 山本恭史: 腐食した鉄筋の局所付着応力-局所すべり関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.663-668, 1991
- 4) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシュ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