

繰り返し荷重を受ける鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす鉄筋腐食の影響に関する研究

中央大学大学院 学生会員 ○鈴木 綾
 中央大学 学生会員 直 兼司
 中央大学 正会員 大下 英吉

1. はじめに

近年、既存の RC 構造物において経年劣化により耐久性能や構造性能の大幅な低下が深刻な問題となっており、維持管理体系が非常に重要な位置付けをなしている。特に、各種劣化が生じた RC 構造物の構造性能に関しては、人的被害にも直結するため構造性能劣化の要因や劣化機構の関連性および現時点で保有する耐荷性能その将来予測手法の確立は急務となっている。

RC 構造物において構造性能を低下させる要因は様々あるが、その中でも鉄筋の腐食は非常に重要な要因である。鉄筋腐食に起因する RC 梁部材の耐荷性能に関する研究は、これまで盛んに行われてきている。現在までのところ、鉄筋の腐食性状と耐荷機構の関連性はある程度明らかにされているが、定量化は勿論のこと、その体系化にも至っていない。

鉄筋腐食した RC 部材の耐荷機構および耐荷力を決定付ける主たる要因は、鉄筋の腐食率とその不均一性、コンクリートの腐食ひび割れ幅や間隔、腐食鉄筋とコンクリートの付着性状である。その耐荷力の定則においては、それぞれの要因の影響度合い或いは複合的な影響度合いにより定性的かつ定量的に評価しなければならない。特に、腐食鉄筋とコンクリートの付着性状は、鉄筋とコンクリートの一体性が前提条件である RC 部材にとって非常に重要な要因であり、その詳細な説明が必要不可欠である。

既往の研究¹⁾において、梁全長にわたって鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存耐力は、せん断補強筋および定着フックを有さない状態では、定着部からの鉄筋の抜け出しにより、大幅な耐力低下が生じることを報告されている。このような大幅な耐力低下を示した主たる要因に鉄筋の腐食および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性状の低下が指摘された。すなわち、腐食劣化が生じた RC 構造物の構造性能を評価する際、腐食を生じた鉄筋とコンクリートの付着応力性状の定量化が極めて重要な位置付けにあるというこ

とを、実現象においても確認されたわけである。

現在までに腐食を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散見されるが、既存の研究¹⁾は単調増加による評価に留まり、繰り返し荷重履歴下における付着性状を評価したものはない。一般に、実構造物では繰り返し荷重を受けたり単調荷重が載荷されたとしてもひび割れ発生や変形の局所化等により局所領域では繰り返し荷重下にある。

そこで本研究では、繰り返し荷重履歴を受ける鉄筋腐食した RC 梁部材の付着性状を評価することを目的として、鉄筋とコンクリートの引抜き実験を実施し、付着性状に及ぼす鉄筋の腐食および腐食ひび割れ性状の影響を評価した。

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。試験体は、240×200×875mmであり、かぶり40mmの位置にD16(SD295A)異形鉄筋を60mm間隔で3本配筋した(L鉄筋, M鉄筋, R鉄筋と称する)。また、自由端からの鉄筋の抜き出しを抑制するため、自由端から150mmの領域に定着筋を2本配筋した。

一方、せん断補強筋を有する試験体は、D6のせん断補強筋(SD295A)が80mm間隔で配筋した。

試験体は、打設後48時間で脱型した後に、28日間湿布養生を施した。荷重の載荷は、材齢36日の

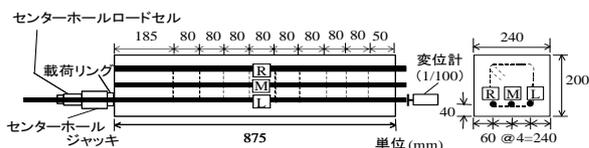


図-1 試験体概要

表-1 試験体配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				混和材	NaCl
				水	セメント	細骨材	粗骨材		
				W	C	S	G		
20	60	10	5.0	168	280	826	996	2.80	8.11

表-2 実験パラメータ

試験体名	せん断補強筋	引抜き鉄筋	目標腐食率	実測値[%]
BD-S0-20L	無し	L	20%	14.6
BD-S80-20L	有り	M		14.3
BD-S80-20M		M		15.6

キーワード 付着応力, すべり, 付着劣化, せん断補強筋

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 理工学部 都市環境学科

時点とした。コンクリートの配合は表-1に示す通りである。

2.2 電食試験法

試験体を5%のNaCl水溶液を満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を所定の積算電流量に到達するまで通電した。

2.3 引抜試験方法

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。なお、載荷速度は9.8kN/minとした。

また、載荷履歴を図-3に示すように20kN、40kNおよび60kNまで荷重を載荷させた後に除荷を行い、その後、鉄筋の降伏荷重である70.5kNを最大荷重とする載荷・除荷を10回繰り返し10回目で試験体が破壊に至るまで荷重を載荷し続けた。

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に示すように主鉄筋の腐食率およびせん断補強筋の有無である。目標腐食率は0%および20%の2水準とした。

2.5 測定項目

測定項目は、鉄筋の軸方向ひずみ、自由端すべりおよびひび割れ幅である。

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た。表-2に各試験体における3本の主鉄筋の腐食領域における腐食率を示す。ここに示す腐食率は各鉄筋を50mm間隔で切断し腐食率を算出し、それを平均した値とする。

3.2 腐食ひび割れ性状

図-2にコンクリートのかぶり面および端面に発生した腐食ひび割れ性状を示す。いずれの腐食試験体においても、かぶり表面に両外側鉄筋に沿った腐食ひび割れが梁全長にわたり発生していることに対して、M鉄筋では腐食ひび割れが発生

していない。これは、M鉄筋の腐食による膨張圧が両外側鉄筋のかぶりコンクリートの膨張により相殺されるためである。

また、図-2(a)と(b)および(c)を比較すると、(b)および(c)の腐食ひび割れが多い。これは、せん断補強筋は主鉄筋に比べコンクリート表面からの距離が短いことにより、先行して腐食が生じるためである。

4. 引抜試験結果

4.1 鉄筋ひずみ履歴

載荷端から9Dおよび15Dの位置における鉄筋のひずみの履歴を図-3に示す。なお、試験体BD-S0-20Lにおいて15Dのひずみゲージが腐食した際に破損してしまったため、12Dの位置についての図を示す。まず、いずれの試験体においても鉄筋ひずみは、載荷荷重に伴って増加し、鉄筋降伏荷重での載荷回数が増えるにしたがっても増加した。せん断補強筋が無い試験体はBD-S0-20Lではいずれの位置においても載荷回数が2回或いは3回目以降において荷重の載荷によりひずみが急激に増加し、荷重が完全に除荷された時点で残留ひずみが生じている。一方、せん断補強筋を配筋した試験体BD-S80-20LおよびBD-S80-20Mでは、3回目において急激に鉄筋ひずみが増加しているが、荷重の除荷時に残留ひずみは生じていない。この一連の挙動は、荷重の載荷前に生じていた腐食ひび割れの進展ならびにそれに伴う付着応力の低下によるものであり、次節以降で詳述することとする。

次に、場所による検討を行う。12D 或いは 15D の位置では9Dに比べると荷重の載荷位置から離れていることや、ひび割れ幅の開口幅が小さいためコンクリートへの応力伝達が十分に行われる。したがって、鉄筋ひずみが小さくなる。

また、せん断補強筋および腐食ひび割れ発生の有無による比較を行うと、せん断補強筋のない試験体はせん断補強筋の有る試験体に比べひび割れが発生しやすい。そのため、ひび割れが発生しコンクリートの拘束圧が解放されることにより鉄筋ひずみが減少する。

4.2 付着応力とすべりの関係図-4に各試験体における付着応力-すべり関係を示す。付着応力は、既往の研究と同様に圧縮強度の2/3乗、すべり量は

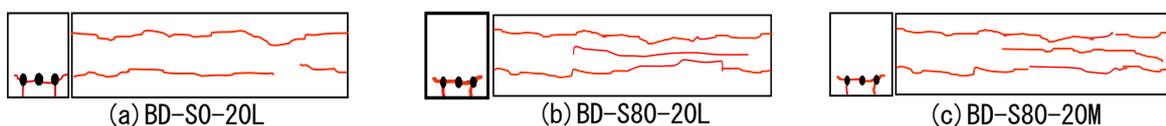


図-2 腐食ひび割れ性状

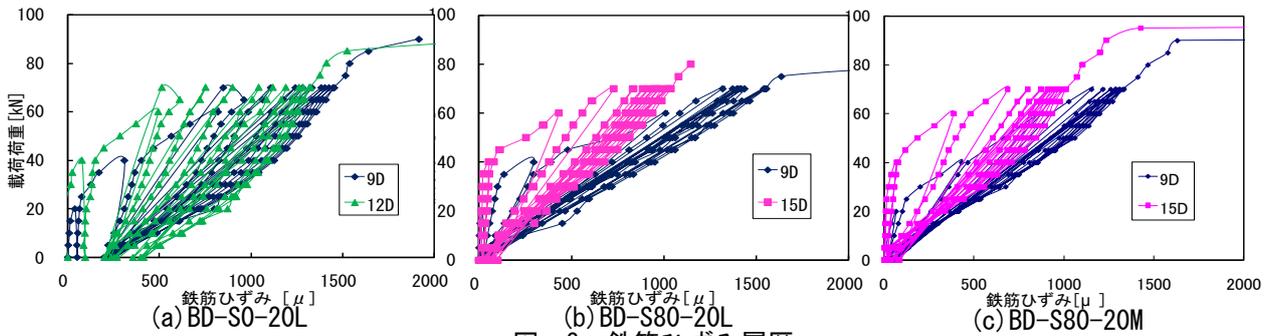


図-3 鉄筋ひずみ履歴

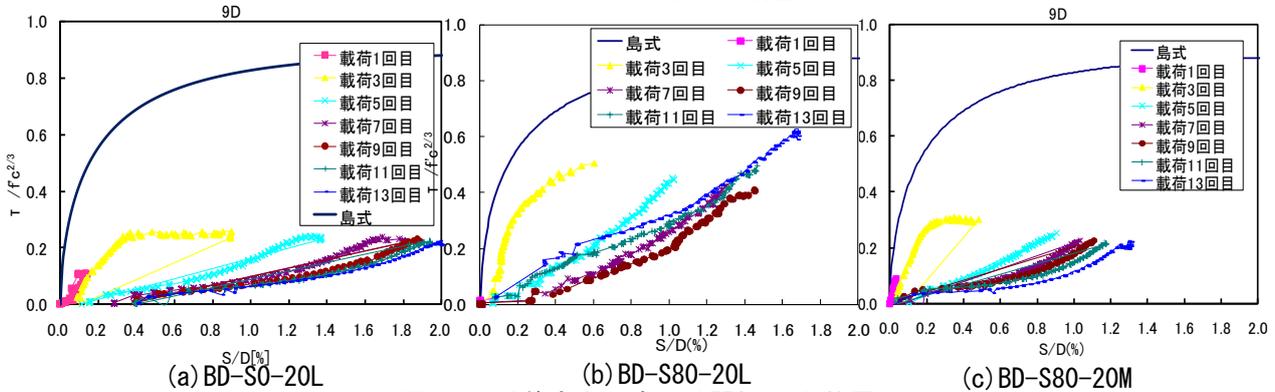


図-4 付着応力 - すべり関係 (9D 位置)

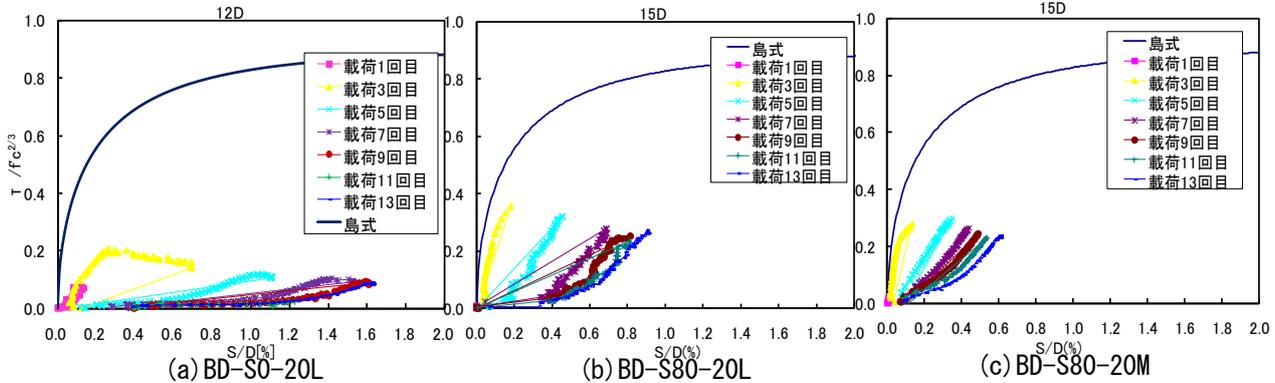


図-5 付着応力 - すべり関係 (12D, 15D 位置)

鉄筋径で除することにより無次元化した。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(1)に示す鳥ら²⁾による提案式も併せて示している。

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

ここで、 f_c' : 圧縮強度、 S : すべり量、 D : 鉄筋径で表される。

図-4 および図-5 に付着とすべりの関係を示す。前者は 9D、後者は 12D 或いは 15D 位置のものであり、各図(a)~(b)はそれぞれ試験体 BD-S0-20L、BD-S80-20L および BD-S80-20M に対応している。まず、せん断補強筋を有する試験体 BD-S80-20L および BD-S80-20M は、いずれの位置においてもせん断補強筋が無い試験体 BD-S0-20L に比べ大きな付着応力を示している。

これは、せん断補強筋のコンファインド効果に

よるものである。しかしながら、9D 位置である図-4 に示すせん断補強筋を有した応力の最大値は、9D 位置において腐食ひび割れが生じていないにもかかわらず(図-2(c))、同図(b)に示す通り腐食ひび割れ(図-2(b))が生じている鉄筋に比べると小さな値となっている。図-2(b)および(c)に示す端面におけるひび割れは、いずれの試験体においても鉄筋同士を結ぶひび割れと両外側鉄筋のかぶり面および側面に生じるひび割れというように同一の性状となっている。しかしながら、かぶり面におけるひび割れ幅は、BD-S80-20M の方が大きな値である。すなわち、引抜く対象である M 鉄筋のかぶり面には腐食ひび割れは生じていないが、同士を結ぶひび割れを介して両外縁の鉄筋かぶり表面に到達するひび割れによって引抜き荷重が鉄筋からコンクリートに伝達され難くなることによるものであり、その性状は腐食ひび割れ幅が大き

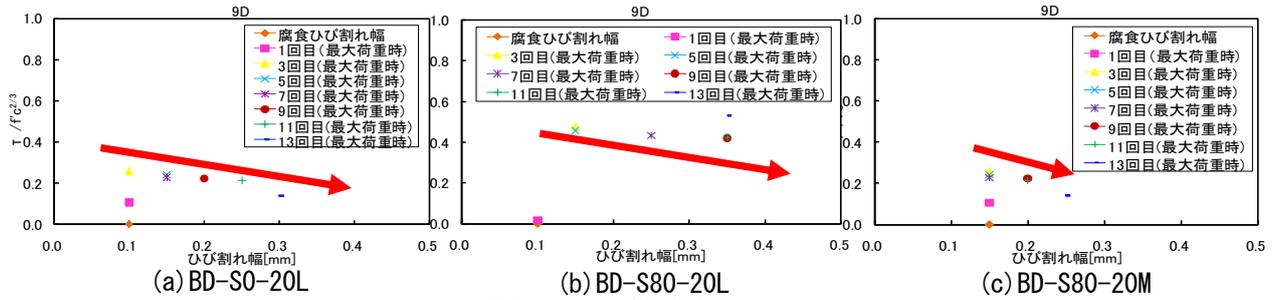


図-6 付着応力とひび割れ幅の関係 (9D 位置)

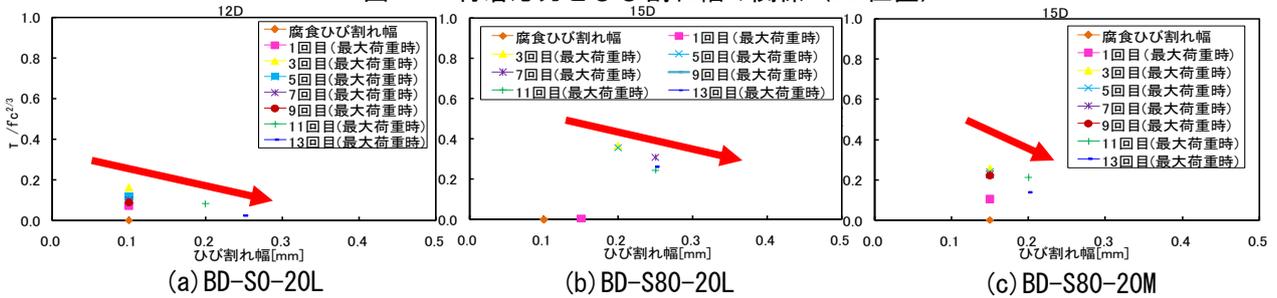


図-7 付着応力とひび割れ幅の関係 (12, 15D 位置)

い鉄筋ならば顕著となる。次に、載荷履歴に応じた付着応力性状であるが、いずれの試験体においても 3 サイクルまでは急激な増加を示した後に付着応力が最大値となり、それ以降のサイクルでは非常に緩やかに増加するとともにサイクル数に応じた増加率も小さくなっている。また、各荷重サイクル時に生じる付着応力の最大値も荷重回数とともに低下している。これは、ひび割れ進展状況である図-6, 7 に示すように 3 サイクル以降では腐食ひび割れ幅が荷重の載荷に伴って開口することにより、鉄筋とコンクリートの相対すべり量が大きくなるためである。特に、せん断補強筋が無い試験体 BD-S0-20L においては、このような挙動が顕著である。また、9D および 15D における挙動の差異であるが、引抜き端に近い 9D ではひび割れ幅の開口幅が大きいことにより、すべり量が大きくなり緩やかな付着応力の増加率を示している。除荷時において残留するすべり量であるがせん断補強筋の有無によらず、L 鉄筋を引抜いた試験体では、荷重回数に応じてひび割れ幅の開口によりコンクリートの応力伝達が低下し、鉄筋力が増加するため鉄筋の応力状態が降伏或いは硬化域となることにより残留ひずみが生じることになる。一方、M 鉄筋を引抜いた試験体では、コンクリートへの応力伝達が十分に生じることにより、鉄筋は弾性状態であることにより残留すべりが発生しない。

4.3 付着応力とひび割れ幅の関係

図-6 および図-7 に付着とひび割れ幅の関係を示す。前者は 9D、後者は 12D 或いは 15D 位置のもの

であり、各図(a)~(b)はそれぞれ試験体 BD-S0-20L, BD-S80-20L および BD-S80-20M に対応している。このとき、図-6(a)に示すように荷重回数が増加するに伴い、ひび割れ幅も増加した。しかしながら、図-7(a)に示すように 12D では 11 回目の載荷時に、0.2mm までひび割れ幅が急激に増大している。そのため、12D においては載荷時のひび割れ幅の増加に伴い、コンクリートと腐食鉄筋の付着応力が 9D よりも大幅に低下している。このことは、せん断補強筋を有する試験体 BD-S80-20L および BD-S80-20M にも同じことが言えた。すなわち、荷重回数が増えることによってひび割れ幅が開口することにより、コンクリートと腐食鉄筋の付着応力が進展したひび割れから解放されてしまう。そのため、荷重回数が増加することによって付着応力は減少する。

5. まとめ

以下に本研究で得られた知見を要約する。

- (1) 残留ひずみは荷重増加と回数の増加に伴い増加した。
- (2) 付着応力は載荷端からの距離によらず、ひび割れの進展に依存する傾向にある。

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) 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