

繰り返し載荷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

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、繰り返し載荷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2本配筋した(L鉄筋, M鉄筋, R鉄筋と称する)。せん断補強筋が無い試験体では、自由端からの鉄筋の拔出しを抑制するため、自由端から130mm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)を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。なお、練混ぜ水には、鉄筋腐食を促進させるため5%NaCl水溶液を用いた。

2.2 電食試験法

試験体を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を所定の積算電流量に到達するまで通電した。

2.3 引抜き試験方法

引抜き試験方法の概要を図-1に示す。引抜き鉄筋は配筋

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(L鉄筋)および中央(M鉄筋)の鉄筋である。なお、載荷速度は9.8kN/minとした。

荷重は図-2に示すように20kN、40kNおよび60kNまで繰り返し載荷させた後に除荷を行ない、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。なお、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

腐食試験体については、載荷試験終了後に鉄筋をはとり出し、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、それを平均した値である。

3.2 腐食ひび割れ性状

図-3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。

図-3 (a)と(b)および(c)を比較すると、図(a)においてはM鉄筋軸上に腐食ひび割れが発生していない。こ

キーワード 付着応力, すべり, せん断補強筋, ひび割れ幅

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

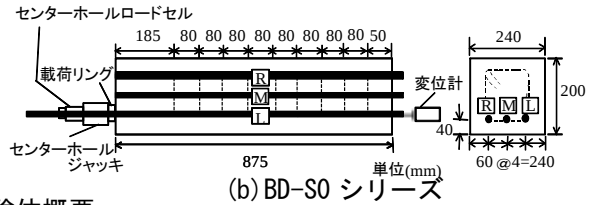
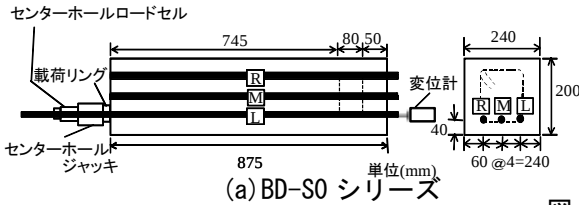


図 - 1 試験体概要

表 - 1 コンクリートの配合表

G _{max} (mm)	W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材	NaCl	
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-S0-0L	無し	L (外側)	-	-
BD-S0-20L			20	14.5
BD-S80-0L	有り	L (外側)	-	-
BD-S80-20L			20	14.3
BD-S80-20M		M(中央)	20	15.6

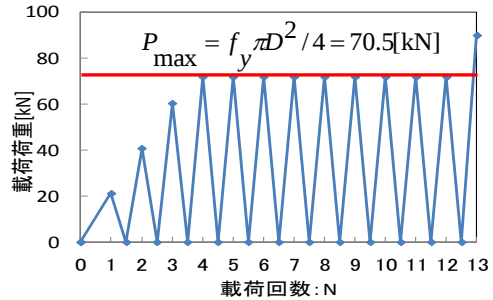
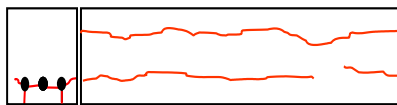
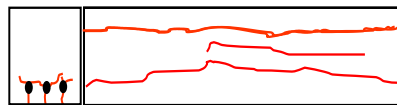


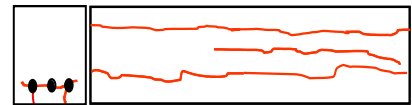
図 - 2 荷重履歴



(a) BD-S0-20L



(b) BD-S80-20L



(c) BD-S80-20M

図 - 3 腐食ひび割れ性状

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拘束されるためである。

4. 引抜試験結果

4.1 付着応力とすべりの関係

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 は鉄筋径、 P は鉄筋力であり、鉄筋径は腐食試験体において計測した局所腐食率から換算した。

鉄筋力は、計測した鉄筋ひずみから鉄筋応力を算出した後、計測した局所腐食率から換算した断面積を乗じることにより算出した。具体的な鉄筋力勾配の算出方法であるが、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、鉄筋とコンクリートの相対的なずれが生じない位置を基準として、式(2)により算出される。

$$s = \int \epsilon \, dx \quad (2)$$

図 - 4 および図 - 5 は、それぞれ9Dおよび15Dの付着応力とすべり関係を表したものであり、各図(a)～(d)はそれぞれ試験体 BD - S0 - 0L, BD - S0 - 20L, BD - S80 - 20L および BD - S80 - 20M に対応している。なお、既往の研究¹⁾と同様に、付着応力は、圧縮強度の2/3乗、すべり量は鉄筋径で除することにより無次元化した。

まず、既往の単調荷重²⁾と繰り返し荷重を比較すると

繰り返し荷重の試験体は付着応力の低下が顕著である。これは、荷重の繰り返しによりコンクリート内にひび割れが発生し、コンクリートの拘束圧が解放されることにより生じる。しかしながら、健全試験体の場合、どの試験体の場合でも繰り返し荷重よりも付着応力が大きい値を示している。これは、腐食ひび割れが発生していないため、コンクリートの拘束圧が解放されず、鉄筋とコンクリートの付着応力が大きくなったと考えられる。なお、BD - S80 - 20M の単調荷重時の試験体においては、引抜く M 鉄筋直上に腐食ひび割れが確認された。そのため、コンクリートの拘束圧が解放され繰り返し荷重時の試験体に比べ著しく付着応力が低下したと考えられる。また、いずれの試験体においても、包絡線は付着応力が最大となった後に、徐々に低下している。これは、後述するように荷重により発生したひび割れの影響によるものである。

荷重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サイクルとなる60kNまで荷重を作用させたときには急激な増加を示した後に付着応力が最大となるが、それ以降の荷重では緩やかに増加するとともに、荷重回数に応じてその増加率も小さくなっている。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荷重に伴い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

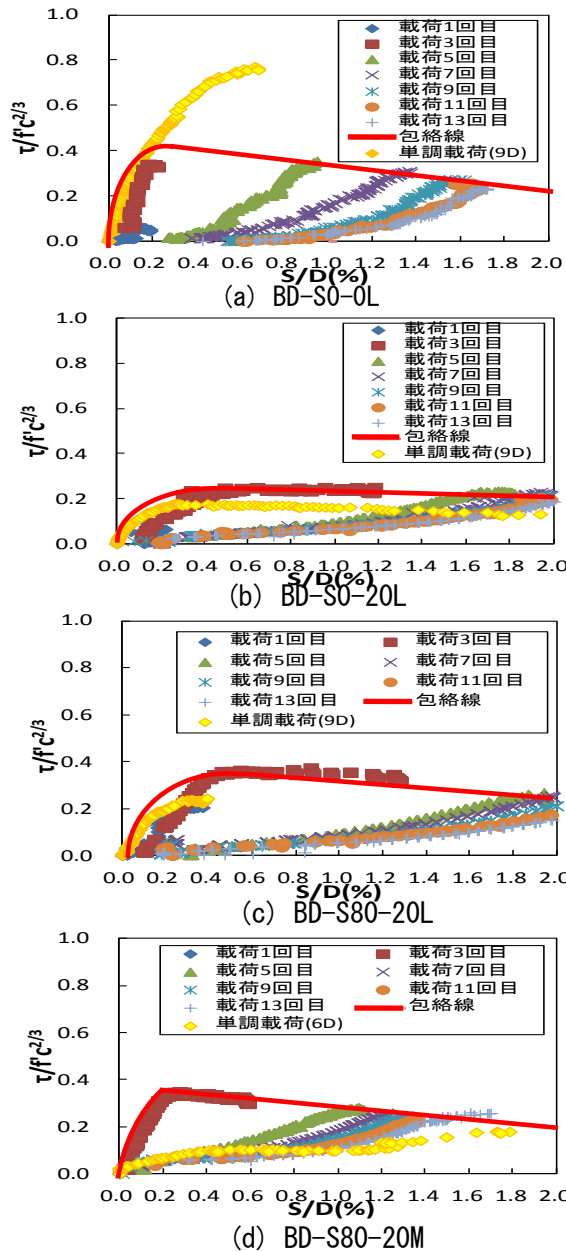


図 - 4 付着応力-すべり関係 (9D 位置)

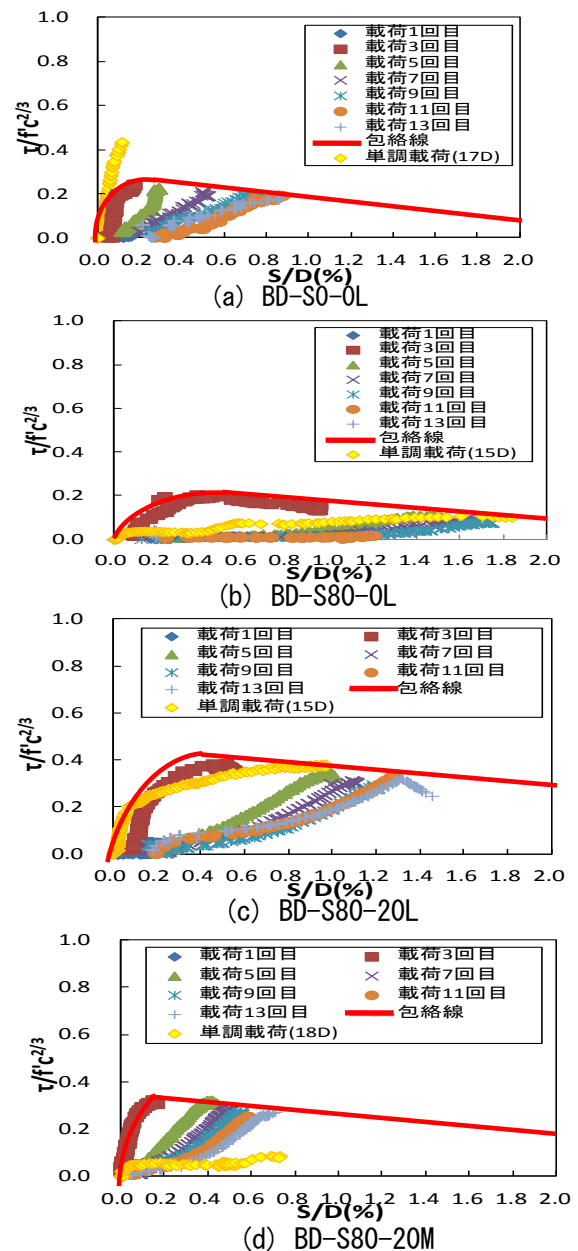


図 - 5 付着応力-すべり関係 (15D 位置)

ような挙動が顕著である。

せん断補強筋の有無による比較を行う。せん断補強筋の存在は付着応力を増加させる。これは、せん断補強筋の拘束効果により、引抜鉄筋の抜け出しが抑制されることによるものである。

腐食ひび割れの有無による比較を行うと(図-4, 5(c) および(d)), M 鉄筋の付着応力の増加率は, L 鉄筋に比べると比較的大きな値を示すとともに、付着応力が最大となった以降にすべりの増加とともに緩やかに低下する。これに関しても、荷重の載荷によるひび割れの影響であり、その詳細は 4.3 節で述べるものとする。

せん断補強筋がある試験体 BD-S80-20L および BD-S80-20M の比較により、腐食ひび割れが付着応力に及ぼす影響について検討を行う。付着応力の最大値は

図-4 および図-5 (c) (d) に示すように比較的同じ値である。すべりに着目すると、9D, 15D 位置では試験体 BD-S80-20M は最大付着応力時には 0.4% 程度のすべりが発生しているが、試験体 BD-S80-20L は 0.2% 程度まですべりが抑制されている。これは、試験体 BD-S80-20M は腐食ひび割れが生じていないため(図-3(c)), コンクリートと鉄筋は一体化しており荷重が伝達される。しかし、試験体 BD-S80-20L は腐食ひび割れ(図-3(b))が生じているため、コンクリートに応力伝達がされず、鉄筋のみが荷重を分担する。したがって、試験体 BD-S80-20L では付着応力最大時にすべり量が大きくなる。

4.3 付着応力とひび割れ幅の関係

前節で示したように図-6 および図-7 は、それぞれ 9D

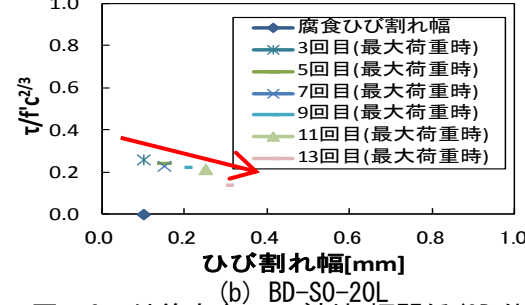
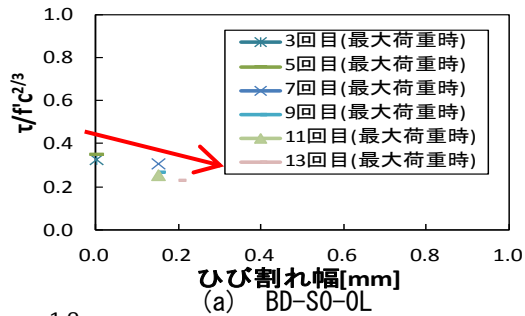


図 - 6 付着応力-ひび割れ幅関係(9D 位置)

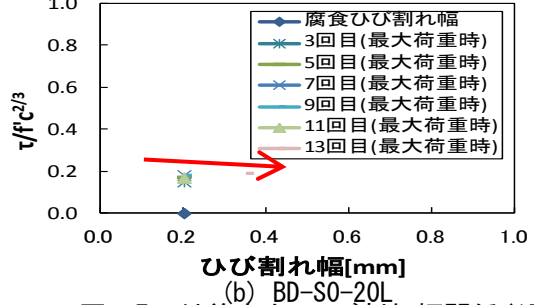
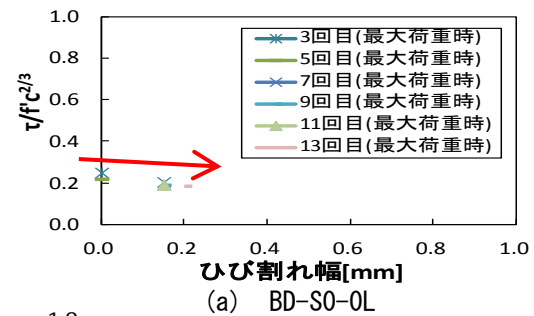
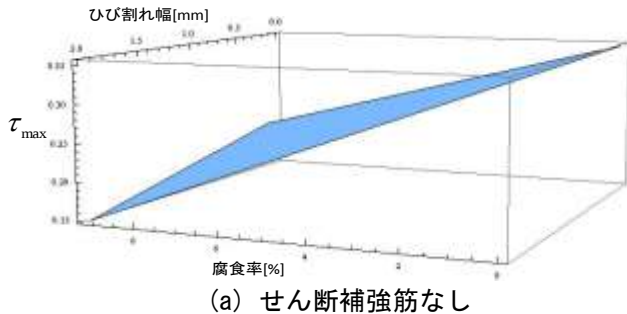
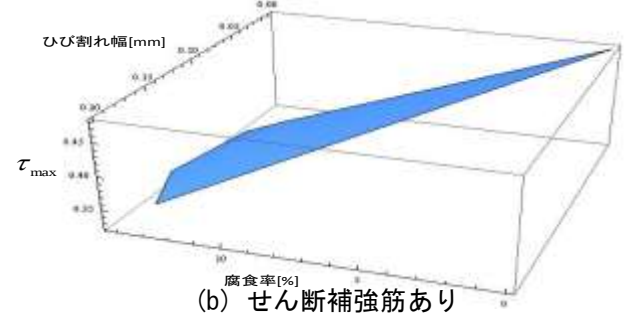


図 - 7 付着応力-ひび割れ幅関係(15D 位置)



(a) せん断補強筋なし



(b) せん断補強筋あり

図 - 8 最大付着応力-腐食率, ひび割れ幅関係

および 15D の付着応力とひび割れ幅の関係を表したものであり、各図 (a) ~ (b) はそれぞれ試験体 BD - S0 - 0L, BD - S0 - 20L に対応している。

付着応力とひび割れ幅の進展に関する一般的な傾向は、ひび割れ幅の増加とともに付着応力は低下する。これは、コンクリートのひび割れが進展することによりコンクリートの局所破壊がより進展ならびに、その拘束圧が低減し、鉄筋とコンクリートの付着応力が減少する。

荷端付近である 9D 位置で付着応力は、急激に低下することに対して、15D 位置では緩やかに低下する。これは、9D 位置では荷端から近いため付着応力が大きく、コンクリートへ荷重が伝達されやすい。すなわち、鉄筋を引抜くことによりコンクリートにひび割れが発生し、進展することによって、付着応力が急激に低下したと考えられる。

以上のように、荷重回数の増加に伴いひび割れ幅が開く・進展しやすくなり、付着応力が低下する。

4.4 最大付着応力-腐食率, ひび割れ幅の関係

図 - 8 に最大付着応力と腐食率および最大付着応力時のひび割れ幅の関係を示す。図 - 8(a) に示すせん断

補強筋なしの試験体では、腐食率およびひび割れ幅の増加とともに付着応力は低下する。一方、せん断補強筋を有する試験では、せん断補強筋の拘束効果によりひび割れ幅の影響はほとんどなく、腐食率のみに依存している。

まとめ

以下に本研究で得られた知見を要約する。

- (1) 非腐食試験体では、繰り返し荷重に伴うひび割れ発生に起因しコンクリートの拘束圧が解放されることにより、急激に付着応力が低下する。
- (2) 腐食試験体では、腐食ひび割れが既に発生しているため、繰り返し荷重に伴う付着応力の低下が緩やかである。
- (3) せん断補強筋が無い場合は、最大付着応力は腐食率およびひび割れ幅と相関性がみられた。

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) 村上裕貴: 鉄筋腐食を生じた RC 梁の残存耐荷性能に関する研究, 中央大学博士論文, pp.28-85, 2008