

腐食ひび割れの補修による付着応力回復性能に関する研究

中央大学 学生会員 ○山崎 理美
中央大学 正会員 大下 英吉

1. はじめに

近年，既存の構造物において経年劣化に伴った耐久性能の低下が深刻な問題となっている。昨今の時代情勢から，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動きが活発となっている。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。

既往の研究¹⁾では，梁全長にわたり過度に鉄筋腐食を生じた定着が不十分な RC 梁部材の残存耐力は定着部の鉄筋の抜け出しにより，大幅な耐力低下が起ることが報告されている。このような，大幅な耐力低下を示す主たる要因は，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である。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，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。このような観点から，鉄筋腐食を生じた RC 部材の付着性状を評価した研究は現在までに数多くある。構造物を作るにあたって強度の大きいコンクリートを作することを急速に求められてきたため，腐食ひび割れの補修効果が付着応力の回復性能に及ぼす影響を評価したものはほとんどない。

そこで本研究では，定着を有する RC 部材に対して

腐食ひび割れの補修効果が付着応力性状に及ぼす影響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，付着応力～すべり関係について評価を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の概要を図 - 1 に示す。試験体は 180mm×220mm×875mm であり，かぶり 40mm の位置に D19 高張力鉄筋（USD685B）を 60mm 間隔で 2 本配筋した（L 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に，自由端から 290mm の領域に D6 の定着筋（SD295）を 4 本配筋した。試験体は，打設後 24 時間で脱型した後に，7 日間湿布養生を施した。荷重の載荷は，材齢 14 日の時点とした。なお，コンクリートの配合は表 - 1 に示す通りである。

2.2 電食試験方法

図 - 2 に電食試験概要を示す。試験体は 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。

設定した腐食率に対する積算電流量は，事前に鉄筋単体および RC 梁部材で電食試験を実施し，その結果に基づき決定した。

2.3 補修工法

腐食ひび割れの補修工法は，浸透圧着工法と低圧注入工法を採用した。浸透圧着工法はひび割れの毛細管現象を利用し，補修剤を繰返し塗布する工法である。低圧注入工法はシリンダーを 150mm 間隔に設置し 24 時間かけて注入する工法である。

表 - 1 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	SL (cm)	Air (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	C	S	G	混和剤	NaCl
20	60	10	5	168	280	826	996	2.8	8.11

キーワード 付着応力，すべり，ひび割れ幅，補修効果

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

表 - 2 実験パラメータ

試験体名	目標腐食率	補修工法
BD-0-R0	0	補修無し
BD-10-R0	10	
BD-10-R1		低圧注入
BD-10-R2		浸透圧着

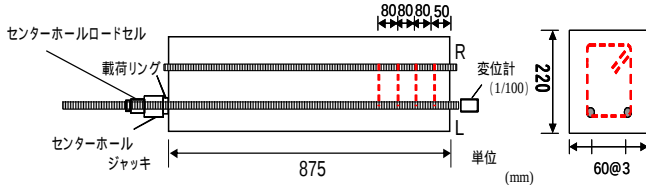


図 - 1 試験体概要

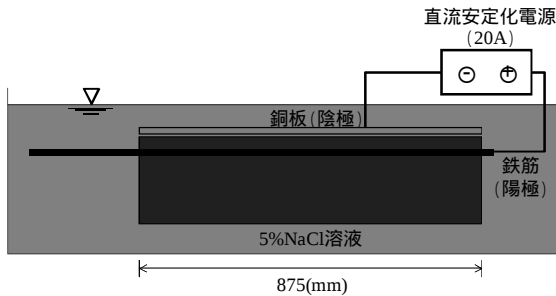


図 - 2 電食試験方法

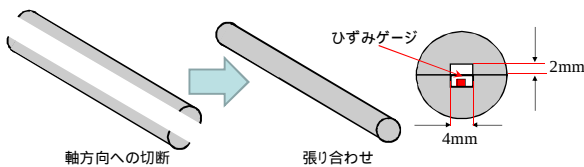


図 - 3 貼り合わせ鉄筋概要

表 - 3 主鉄筋の腐食

試験体名	目標腐食率 (%)	実測値 (%)		
		L	R	平均
BD-0-R0	0	-	-	-
BD-10-R0	10	4.8	7.6	5.8
BD-10-R1		8.6	5.4	7.5
BD-10-R2		7.6	6.2	6.9

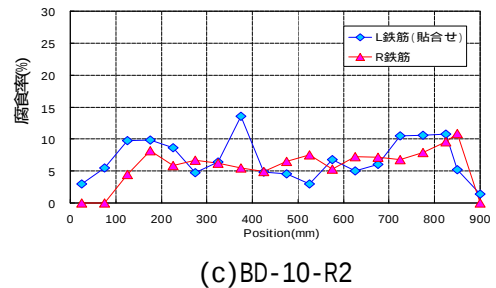
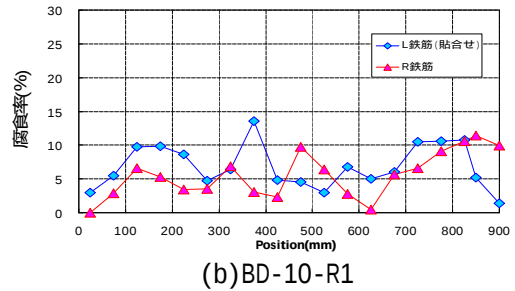
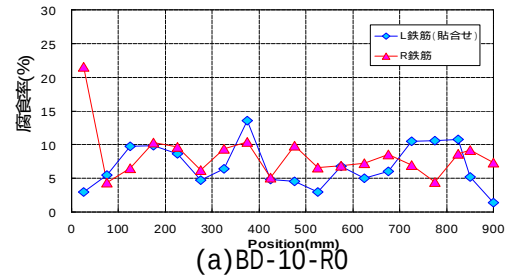


図 - 4 腐食率分布

補修剤には7日間の養生で強度を発揮するエポキシ樹脂のアルファテック 380 を使用した。いずれの工法も補修をした後に7日間気中養生し、材齢14日の時点で荷重の載荷を行った。

2.4 引抜試験

鉄筋の引抜きは片引き試験であり、その概要を図-1に示す。引抜き鉄筋は、配筋された鉄筋のうちL鉄筋である。なお、載荷速度は9.8kN/minの単調載荷とした。

2.4 実験パラメータ

実験パラメータは、表-2に示すように腐食率および、ひび割れ補修の有無とその工法である。

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。鉄筋ひずみの測定であるが、図-3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、図-3に示すように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。

3. 補修による効果の確認

3.1 鉄筋の腐食性状

表-3に各試験体における主鉄筋の腐食率を示す。電食試験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腐食率を算出した。腐食率の計算は配筋した2本の鉄筋に対して実施した。なお、同表に示す腐食率は、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。

図-4(a)～(c)に各試験体の腐食分布を示す。いずれの試験体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、ひび割れを介して塩水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。このような鉄筋腐食を促進させる腐食ひび割れ性状は鉄筋軸方向に不均一であることから、主鉄筋軸方向の腐食率にばらつきが生じることとなる。

3.2 腐食ひび割れ性状

図-5(a)～(c)にコンクリートのかぶり表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、かぶり表面には鉄筋軸に沿った腐食ひび割れが梁全長にわたり発生している。ひび割れ幅は0.2mm～0.45mmとなっている。また、試験体 BD-10-R1 の試験体では、L 鉄筋に沿った腐食ひび割れのみが発生している。図-4 からわかるように R 鉄筋の腐食は非常に小さく、ばらついているため R 鉄筋側にひび割れは発生しなかった。

BD-10-R0 については L 鉄筋の腐食率が小さいため腐食ひび割れ幅も小さかった。

3.3 付着応力の回復性能

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(mm)、 P は鉄筋力(N)である。

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)に示すとおりである。

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

A : 健全鉄筋の断面積(mm²)、 n : 腐食率(%),

A' : 腐食鉄筋の断面積(mm²)

なお、腐食後の断面積に関しては式(2)より算出し

た腐食鉄筋の断面積に設けた溝の断面積(16mm²)を加えて算出した。そして着目する測定点を含む近傍の3点を通る2次曲線から書く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対応する測定点までのひずみを積分することにより算出される

$$s = \int \varepsilon dx \quad (3)$$

ここで、 S はすべり量(mm)、 ε は鉄筋ひずみである。

図-6は、それぞれ9D、14D付近の付着応力とすべり関係を表したものであり、同図(a)～(c)はそれぞれ試験体 BD-10-R0、BD-10-R1、BD-10-R2 に対応している。なお、既往の研究¹⁾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、図中には示す島らが提案した非腐食時における付着応力～すべり関係²⁾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' は圧縮強度(N/mm²)である。

まず、島式と腐食試験体 BD-10-R0 を比較すると、BD-10-R1 の最大付着応力は小さい。これは平均腐食率が小さく、腐食ひび割れが小さかったからだと考えられる。

写真-1に浸透圧着工法で補修した試験体 BD-10-R1 の17D 付近の補修剤の充填状況を示す。

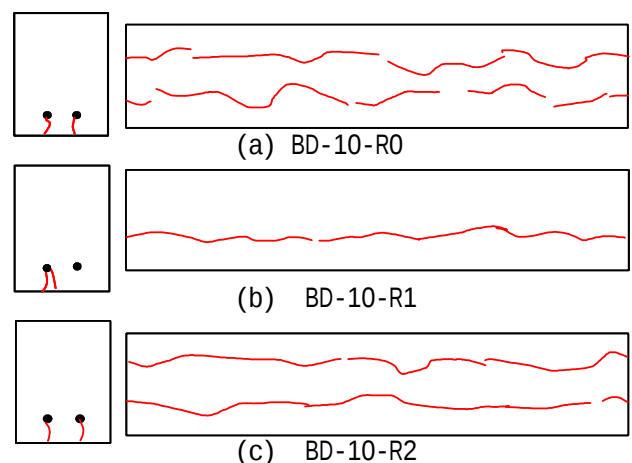


図-5 ひび割れ性状

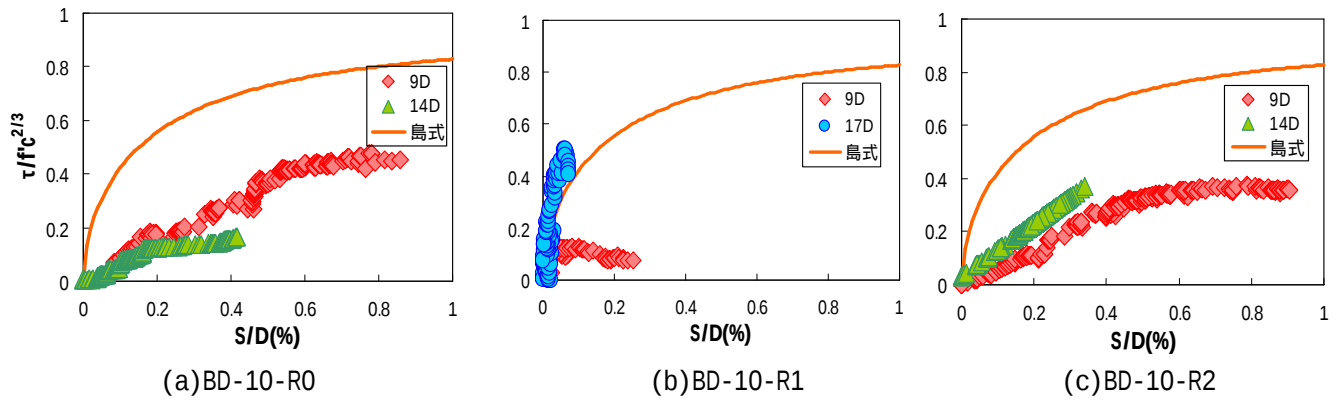


図 - 6 付着応力 - ひずみ関係



写真—1(BD-10-R1 17D 付近)



写真—2(BD-10-R2 15D 付近)

低圧注入工法で補修した試験体 BD- 10- R2 と島式を比較をすると BD- 10- R1 の 17D の位置の付着応力が非常に大きくなっている。これは写真 - 1 に示すように、BD- 10- R1 の 17D の位置におけるひび割れ幅が小さかったため毛細管現象が十分に発揮され、補修剤が鉄筋まで充填されたことによる。

低圧注入工法で補修した試験体 BD- 10- R2 の 14D の位置の付着応力とすべりの関係からコンクリートと鉄筋の付着が確保されていない傾向を示している。

ここで、写真 - 2 に低圧注入工法で補修した試験体 BD- 10- R2 の 9D 付近の補修剤の充填状況を示す。14D の位置の付着応力が試験体 BD- 10- R0 より大きくなっている。これは、写真 - 2 が示すように補修剤が鉄筋まで充填されていないものの、ひび割れ表面に塗布されている補修剤が効果を発揮したと考えられる。

浸透圧着工法で補修した試験体 BD- 10- R1 と島式の比較では BD- 10- R2 の 17D における応力が島式の付着応力よりも大きくなった。よって、ひび割れ幅が大きな場合には低圧注入工法で付着応力が回復され、ひび割れ幅が小さな場合には浸透圧着工法でも付着応力を回復させることがわかった。

3.4 すべりの抑制効果

低圧注入工法で補修した試験体 BD- 10- R1 の 9D

と 17D の位置における鉄筋のすべりの違いをみると、9D の位置の補修に比べ、17D の位置の補修剤の充填が十分だったことからすべりが抑制されたといえる。

このことから補修剤が鉄筋まで充填されていると鉄筋のすべりの抑制に影響を与えることがわかった。

4. まとめ

鉄筋腐食した RC 梁部材の補修効果が付着性状に及ぼす影響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、局所付着応力～局所すべり関係について実験的手法により評価した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1)鉄筋腐食によるひび割れの補修により付着応力は増加しすべりも抑制される。
- (2)鉄筋とコンクリートの付着応力の回復や鉄筋のすべりの抑制は補修剤の充填深さに影響する。

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