

複数主鉄筋を有する RC 梁部材のダボ効果に及ぼす鉄筋腐食の影響

中央大学大学院 学生会員 池田 春樹
 中央大学 学生会員 鳥谷 直史
 中央大学 正会員 大下 英吉

1. はじめに

近年、既存の鉄筋コンクリート構造物の経年劣化に伴い、耐久性能の低下が深刻な問題となっており、適切な維持管理体制の確立が叫ばれている。特に、中性化や塩害に起因する RC 構造物の鉄筋腐食は、構造物の耐荷性能に大きな影響を及ぼす劣化現象であり、腐食性状に応じた残存耐荷性能を定量的に評価することが、実構造物の耐荷性能を予測する上で極めて重要である。

鉄筋腐食に関する既往の研究では、主鉄筋の腐食膨張によってかぶりコンクリートに発生する腐食ひび割れの存在が RC 梁部材の耐荷性能低下に大きな影響を及ぼすことが報告されている。そこで著者らは、その要因の一つとして考えられるダボ効果に及ぼす鉄筋腐食の影響に着目し、引張主鉄筋を 1 本のみ有する試験体を用いて逆対称加力実験を実施した。その結果、腐食試験体では健全試験体に比べてダボ効果の影響領域は拡大し、鉄筋の変形も増大するという知見を得た。

しかしながら、複数本の主鉄筋を有する試験体では、腐食ひび割れ性状が異なり、かぶりコンクリートの一体性が喪失するため、主鉄筋を 1 本有する試験体と比較してダボ効果に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

そこで、本研究では複数本の主鉄筋を有する試験体に関して、腐食ひび割れ性状の相異が RC 梁部材のダボ効果に及ぼす影響を評価した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要および実験パラメータ

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 × 1000mm の RC 梁部材であり、軸方向中心位置には幅 12mm の切り欠きを導入した。引張主鉄筋には D22(SD345)異形鉄筋を 3 本配筋し、主鉄筋のかぶりは 40mm である。また、コンクリートの配合は表 - 1 に示す通りである。なお、配筋した 3 本の主鉄筋を識別するため、両外側鉄筋を L, R 鉄筋、中央鉄筋を M

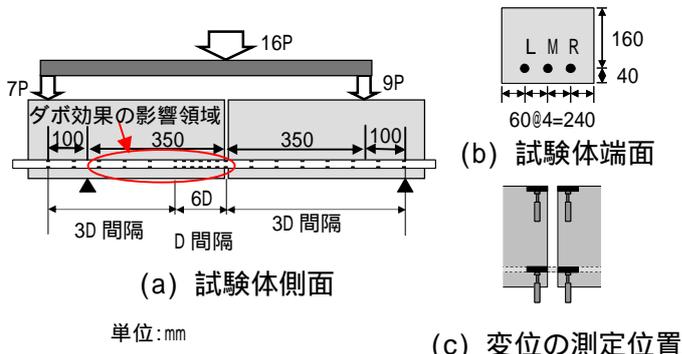


図 - 1 実験概要および各種測定方法

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	5.0	168	280	826	996	2.80	8.8

表 - 2 実験パラメータ

試験体名	主鉄筋本数	目標腐食率(%)
W-0	3本	0
W-2		2

鉄筋と称することとする。

実験パラメータは目標腐食率とし、表 - 2 に示すように 0%と 2%の 2 水準とした。なお、著者らが実施した主鉄筋を 1 本有する試験体のうち健全試験体を N-0、腐食試験体を N-2 と称する。

2.2 腐食方法

本実験では、腐食方法に電食試験法を採用した。試験体は 5%NaCl 水溶液に浸漬し、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続し、直流定電流 6A を通電した。本研究においては、鉄筋腐食の評価手法として、腐食率(腐食前後の鉄筋の質量減少率)を用いることとした。なお、腐食前の鉄筋の質量は配筋の前に直接計測し、単位長さ当りの質量は一定と仮定した。載荷試験終了後はつり出した鉄筋は、20 の 10%濃度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後に質量を計測した。なお、主鉄筋は全体の腐食率測定後に 50mm 間隔で切断し、局所的な腐食率も計測した。

2.3 実験方法

実験は、図 - 1 に示すように逆対称加力式載荷方法に

表 - 3 主鉄筋の腐食率

試験体名	目標腐食率 (%)	主鉄筋腐食率 (%)				変動係数
		L	M	R	平均	
W-2	2.0	2.25	3.11	1.57	2.31	0.27

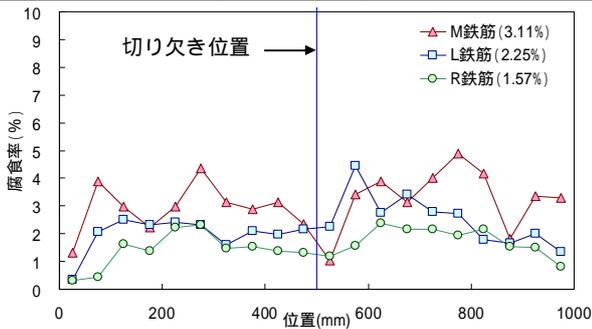


図 - 2 試験体 W-2 主鉄筋腐食率分布

より実施した¹⁾。支点間隔および荷重点間隔は、切り欠き位置における主鉄筋の曲率が 0 となるように定め、切り欠きを導入することで、実際の RC 梁部材に存在する圧縮部コンクリートや骨材のかみ合いによるせん断伝達の影響を取り除き、鉄筋のダボ作用のみの評価を可能とした。引張鉄筋がコンクリートのかぶりを押すダボ効果の影響領域は 350mm とし、荷重速度を 0.5mm/min とした変位制御により実施した。なお、荷重点と試験体が接する箇所にはテフロンシートを敷き、摩擦の影響を低減した。

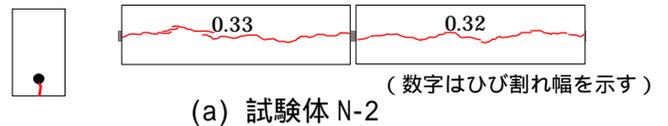
測定項目は、荷重、切り欠き位置におけるコンクリートの変位、および鉄筋上下面の鉄筋軸方向ひずみである。鉄筋ひずみの計測は、鉄筋の上下両面に幅 3mm × 深さ 3mm の溝を軸方向に切削加工した箇所にひずみゲージを貼付して行った。同図(a)に示すようにひずみゲージは切り欠きから 6D の区間において、1D(22mm) 間隔で貼付し、それ以外の箇所においては 3D(66mm) 間隔で貼付することで、切り欠き位置近傍の詳細なひずみを得ることとした。また、同図(c)に示すように切り欠きを挟む左右のコンクリートの上端と鉄筋位置の計 4 箇所において変位を測定した。なお、鉄筋ひずみの計測は M 鉄筋において行い、両外側鉄筋には通常鉄筋を用いた。

3. コンクリートの腐食ひび割れ性状と荷重の荷重によるひび割れ進展状況

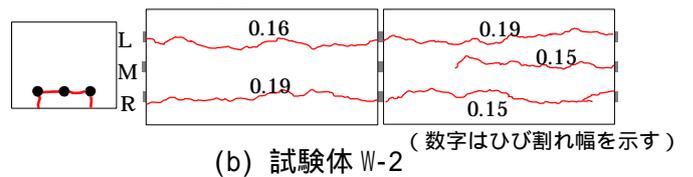
3.1 コンクリートの腐食ひび割れ性状

(1) 鉄筋の腐食性状

主鉄筋 3 本の平均腐食率を表 - 3 に示す。主鉄筋全体の平均腐食率は、50mm 間隔で計測した値の平均値であり、目標腐食率である 2% に近い値を示した。また、50mm 間隔で計測した腐食率の変動係数は 0.27、最大局

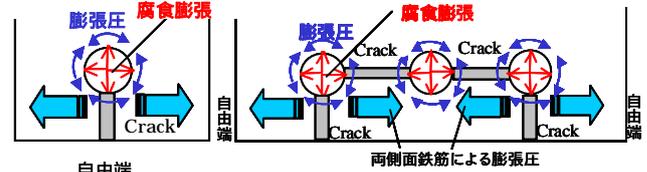


(a) 試験体 N-2



(b) 試験体 W-2

図 - 3 かぶりコンクリートの腐食ひび割れ性



(a) 主鉄筋 1

(b) 主鉄筋 3 本

図 - 4 腐食ひび割れ発生メカニズム

所腐食率は 5% 未満であることから、際立った不均一性はない。図 - 2 に腐食試験体の主鉄筋の腐食率分布を示す。同図中の 500mm の位置にある青い直線は切り欠き位置を示し、ダボ効果により水平ひび割れが発生する側のコンクリートを左側に示した。同図においても鉄筋腐食は梁全長にわたり比較的均一であることが確認されるが、切り欠き近傍において防錆剤を塗布したために腐食率が小さくなっていることがわかる。

(2) 腐食ひび割れ性状に及ぼす主鉄筋本数の影響

図 - 3 に腐食試験体底面のかぶりコンクリートおよび端面に発生した腐食ひび割れ性状を示す。図 - 3(a) に示すように、主鉄筋を 1 本有する試験体においては、底面に引張主鉄筋に沿った腐食ひび割れが梁全長にわたって発生した。これは、図 - 4(a) に示すように鉄筋の腐食膨張圧の影響であり、最もかぶりの小さい底面に向かって腐食ひび割れが進展したためである。一方、試験体 W-2 においては、腐食ひび割れは図 - 3(b) に示すように両外側主鉄筋に沿って梁全長にわたり発生した。これは図 - 4(b) に示すように両外側鉄筋のかぶりコンクリートの一端が自由端であり、鉄筋の腐食による膨張圧が直接作用することでひび割れが発生したためである。しかし、M 鉄筋のかぶりコンクリートには M 鉄筋自体の腐食膨張圧が作用する一方で、両外側鉄筋の腐食による膨張圧が M 鉄筋に沿ったひび割れの発生を抑制しているものと考えられる。また、図 - 3(b) に示すように、試験体 W-2 では端面においても 3 本の鉄筋を結ぶ形で腐食ひび割れが生じた。図 - 3 のひび割れに示した数値はひび割れ幅の平均値を示しており、ひび割れに沿って 25mm 間隔で計測したひび割れ幅の

値から算出した平均値を示している。載荷実験においてダボ効果を生じさせるのは左側半分であるが、同図より主鉄筋を 1 本のみ有する試験体では平均値が 0.33mm であるのに対し、試験体 W-2 では L 鉄筋が 0.16mm、R 鉄筋が 0.19mm となり、鉄筋が 1 本の試験体はひび割れ幅を拡大する。

3.2 荷重の載荷に伴うひび割れ進展状況

(1) せん断力とせん断変形量の関係

表 - 4 に各試験体の破壊荷重、図 - 5 に切り欠き位置において鉄筋が伝達するせん断力とせん断変形量を示す。なお、同図には主鉄筋を 1 本のみ有する試験体の結果も併せて示す。また、せん断変形は試験体上側に設置した変位計の値より算出し、図 - 6(a) に示すように、載荷時に水平ひび割れが発生するコンクリートが上にずれる変形を正の値とした。

図 - 5 より、試験体 W-2 は載荷初期の段階から正のせん断変形を生じているが、それ以外の試験体では、負の変形を生じている。これは、前掲の試験体 W-2 において鉄筋同士を繋ぐ腐食ひび割れによりかぶりコンクリートの一体性が喪失し、鉄筋が変形しやすくなるため、正のせん断変形を引き起こしているものと考えられる。一方、その他の試験体においては鉄筋の変形がコンクリートに拘束されているため、荷重が増加しても水平ひび割れが発生しない限りせん断変形は生じない。特に、試験体 W-0 においては図 - 6(b) に示すように、鉄筋がコンクリートにめり込むことで、左側のコンクリートのかぶりには鉛直下向きの力がはたらき、切り欠きを挟んでもう一方のコンクリートには鉛直上向きの力がはたらく。そのため梁全体の負の変形が顕著に表れている。図 - 7 に破壊エネルギーを示す。破壊エネルギーは、図 - 5 を用いてせん断力を変位で積分し、リガメント面積で除することで算出した。積分区間は載荷開始から水平ひび割れ発生後に荷重が極小となるまでの区間とし、リガメント面積は影響領域(350mm)の鉄筋位置水平断面において上部コンクリートとかぶりコンクリートが接合している面積を用いた。なお、同図よりピーク荷重後のせん断力は鉄筋の曲げ剛性によって受け持たれるが、鉄筋本数と終局せん断力には比例関係が認められ、ダボ効果のみの破壊エネルギーを算出する上で鉄筋の曲げ剛性を取り除くことが可能であることを示唆している。同図より、腐食に伴い破壊エネルギーは低下し、同等の腐食率であっても、腐

表 - 4 各試験体の破壊荷重

試験体名	主鉄筋本数	主鉄筋の平均腐食率 (%)	水平ひび割れ発生時の荷重(kN)
N-0	1本	-	68.7(8.6)
N-2		2.65	46.4(5.8)
W-0	3本	-	76.8(9.6)
W-2		2.31	86.9(11.2)

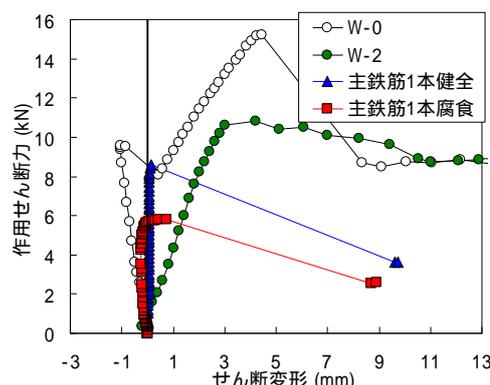
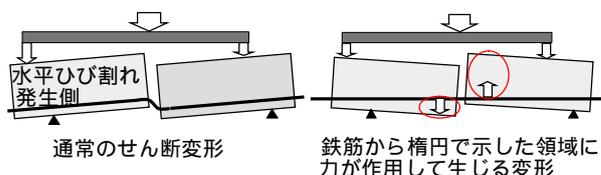


図 - 5 せん断変形と作用せん断力



(a) 正の変形 (b) 負の変形

図 - 6 せん断変形の正負の定義

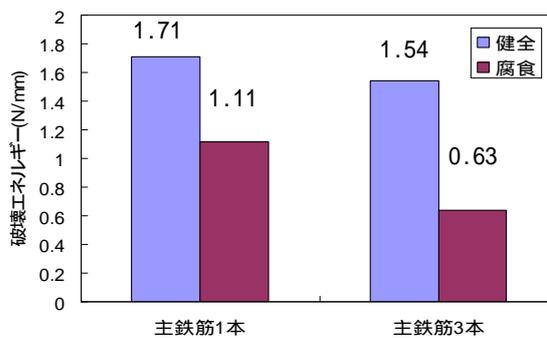
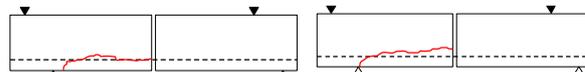


図 - 7 破壊エネルギー



(a) 試験体 W-0 (b) 試験体 W-2

図 - 8 各試験体の破壊ひび割れ性状

食ひび割れ性状の相異から主鉄筋を 3 本配筋したものが変形し易く、破壊に至るまでのエネルギーが小さいことがわかる。

(2) 破壊ひび割れ性状とひび割れの進展

図 - 8 に載荷試験後の破壊ひび割れ性状を示す。破壊ひび割れは、どの試験体においても最大せん断力を示した時点で切り欠き位置と支点のおよそ中間位置まで水平に発生し、荷重が低下した後にひび割れは支点にまで進展した。

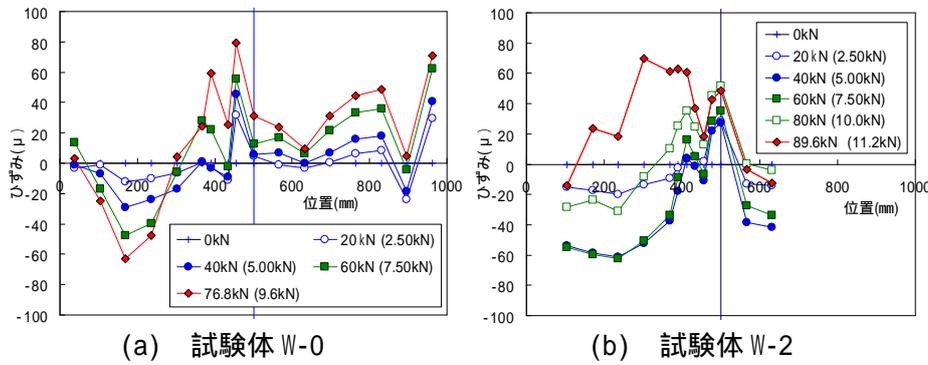


図 - 9 W シリーズ鉄筋軸ひずみ分布

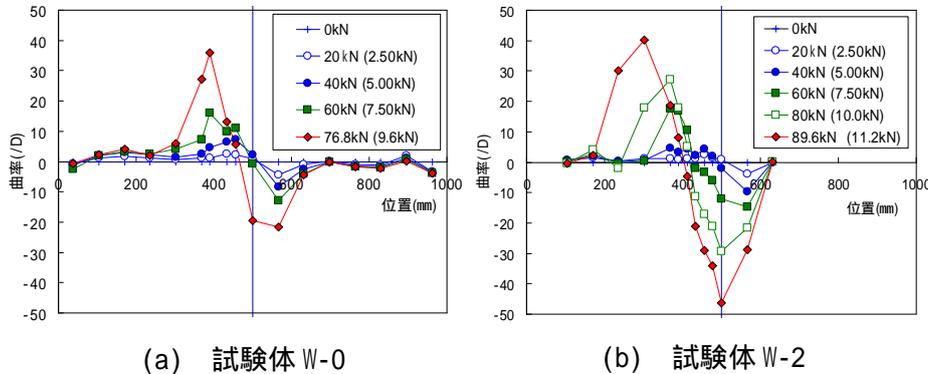


図 - 10 W シリーズ曲率分布

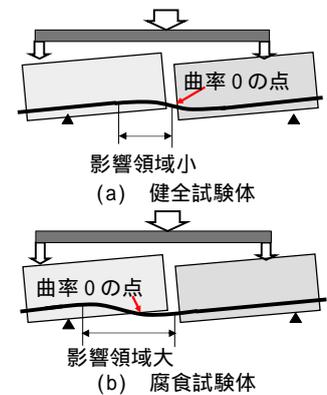


図 - 11 変形概念図

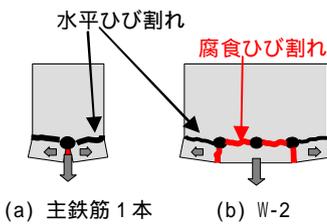


図 - 12 鉄筋本数に伴う腐食ひび割れの影響

4. 複数主鉄筋を有する RC 梁部材のダボ作用に及ぼす鉄筋腐食の影響

各試験体の鉄筋軸ひずみ分布を図 - 9 に、曲率分布を図 - 10 に示す。鉄筋軸ひずみ $\bar{\epsilon}_s$ と鉄筋の曲率 $\phi(x)$ は鉄筋の上面と下面に貼付したひずみゲージにより計測した値より、式(1)を用いて算出した。

$$\bar{\epsilon}_s(x) = \frac{\epsilon_t + \epsilon_b}{2} \quad \phi(x) = \frac{\epsilon_t - \epsilon_b}{D} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_t ：鉄筋の上面ひずみ、 ϵ_b ：鉄筋の下面ひずみであり、 D は鉄筋径の 22mm から鉄筋上下表面に加工した溝の深さ 6mm を差し引いた 16mm を用いて算出した。なお、図中には 20kN 毎の载荷荷重および破壊時の载荷荷重におけるひずみを示している。载荷荷重を 20kN 刻みで示しており、その時点での切り欠き位置せん断力を括弧内に示す。

図 - 9 より、鉄筋軸方向ひずみはどちらの試験体においても切り欠き近傍でコンクリートの付着力が作用しない切り欠き位置において引張応力が生じている。また、図 - 10 より試験体 W-0 においては载荷初期の段階から切り欠き位置が鉄筋の変形の変曲点となっており、対称な曲率分布が得られたのに対し、試験体 W-2 においては、荷重の増加に伴って変曲点の位置が左に移動し、水平ひび割れ発生時には鉄筋径の約 5 倍の位置が変曲点となった。図 - 11 にこの変形概念図を示す。

試験体 W-2 においては図 - 12(b)に示すように鉄筋同士を繋ぐ腐食ひび割れによりかぶりコンクリートの一体性が喪失しており、せん断変形を生じ易く、コンクリートと切り欠きの境界で曲げ変形が生じたために変曲点が左に移動したものと考えられる。影響領域に関しても、健全時には鉄筋径の約 9 倍であったのに対し、試験体 W-2 では、せん断変形が増大したために支点近傍にまで拡大した。このことから、鉄筋を 3 本配筋した腐食試験体は主鉄筋 1 本の腐食試験体に比べて腐食ひび割れ性状が異なり、荷重の増加に伴う鉄筋の曲率分布の変遷に大きな影響を与えるものである。よって、鉄筋腐食した RC 梁のダボ作用を評価する際には主鉄筋本数に応じた腐食ひび割れ性状に着目して検討する必要があるといえる。

5. 結論

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 主鉄筋を 3 本配筋した RC 梁では、鉄筋間を繋ぐ腐食ひび割れによりかぶりコンクリートの一体性が喪失し、1 本配筋した場合に比べ、破壊エネルギーは低下し、変曲点の位置も支点方向へ移動する。

参考文献

1) 新井 泰ほか: 鉄筋腐食が部材の強度特性に及ぼす影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.739-744, 2005