

RC 梁部材のダボ作用に及ぼす鉄筋腐食の影響に関する影響

中央大学 学生会員 梶山裕稔
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いる。その要因として、高度経済成長期に建設された大量の社会資本ストックの使用材料や施工法の欠陥による劣化が指摘されている。このように劣化した構造物に対して供用期間内に要求される性能を十分に確保するためには、劣化状態を正確に診断し補修・補強を行うことで、設計段階に要求された性能を十分に確保するとともに、適切な維持管理体系の確立が求められている。

鉄筋コンクリート構造物に生じる劣化現象は多岐にわたるが、特に中性化や塩害に起因する RC 構造物の鉄筋腐食は比較的起こりやすい劣化現象である。これらの劣化機構は、鉄筋の断面減少に加えてかぶりコンクリートへの腐食ひび割れの誘発、鉄筋とコンクリートの付着損失等、鉄筋コンクリートの構造性能や耐久性能の低下に大きな影響を及ぼすことになり、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。しかしながら、鉄筋腐食が生じたコンクリート構造物の構造性能を定量的に評価可能な手法はいまだ確立されておらず、定性的な評価をせざるを得ないのが現状である。

鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存耐荷性状に関する既往の研究では、非腐食時に曲げ破壊が先行する RC 梁部材においても主鉄筋が腐食することで付着割裂破壊やせん断破壊といった脆性的な破壊性状を引き起こす場合もあることが報告されている^{1,2)}。これは、鉄筋とコンクリートの付着劣化に加えて、鉄筋腐食により発生したかぶり面のひび割れや鉄筋軸に沿う水平ひび割れが、鉄筋のダボ効果を大きく低下させることによるものと考えられる。しかしながら、これまで腐食ひび割れの存在が RC 梁部材のダボ作用に及ぼす影響について評価検討を行った事例はほとんどない。

そこで本研究では、RC 梁部材のダボ効果に着目し、鉄筋腐食によるひび割れが RC 梁部材のダボ効

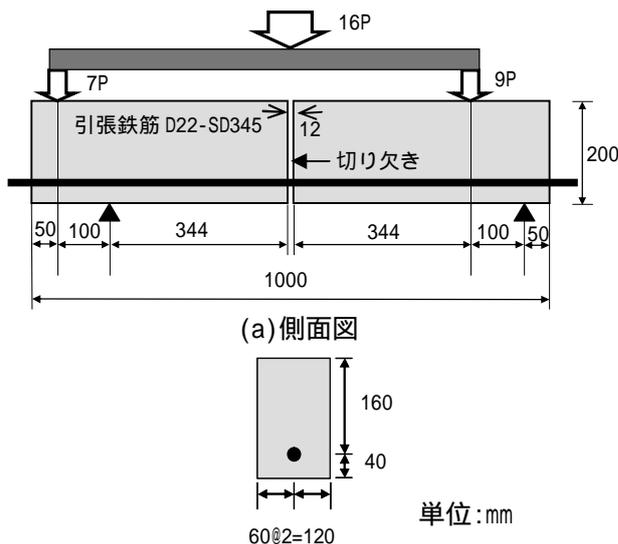
果に及ぼす影響を定性的かつ定量的に評価した。

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。試験体は軸方向中心断面に幅 12mm の切り欠きを導入した RC 梁部材である。主鉄筋 1 本有する試験体を N シリーズと称することとした。試験体名称を最初のアルファベットで表した。次の数字は主鉄筋の本数を示し、最後の数字は目標腐食率を示すこととした。

試験体の形状寸法は 120 × 200 × 1000 mm であり、D22 (SD345) 異形鉄筋 1 本が配筋されている。すべての試験体において、鉄筋の芯かぶりは 40 mm である。コンクリートの配合は、表 - 1 に示すように設計基準強度を 30N/mm² であり、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。なお、練り混ぜ水には鉄筋腐食を促進させるため、5%NaCl 水溶液を使用した。



(a) 側面図

(b) 断面図

単位: mm

図 - 1 試験体概要

表 - 1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	Sl (cm)	Air (%)	単位量(kg/cm ³)					
				W	C	S	G	AE減水剤	NaCl
20	60	10	5	168	280	826	996	2.8	8.8

(設計基準強度 30N/mm²)

キーワード：ダボ効果，鉄筋腐食，ダボ作用
連絡先 〒112 0003 東京都文京区春日 1-13-27
TEL 03-3817-1892

表 - 2 実験パラメータ

試験体	主鉄筋	目標腐食率
N1-0	1本	0%
N1-2	1本	2%

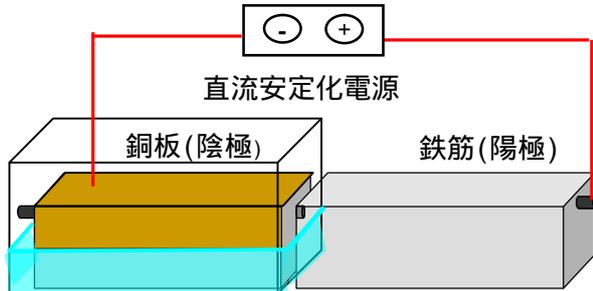


図 - 2 電食試験概要

実験パラメータは、表 - 2 に示すように目標腐食率であり、その値は 0%と 2%とした。なお、腐食率の定義は、次節で記述する。目標腐食率 2%という比較的小さな値に設定した理由は、腐食率を大きくすると鉄筋に貼付したひずみゲージが破損してしまうためであり、既往の研究¹⁾に準拠したものである。

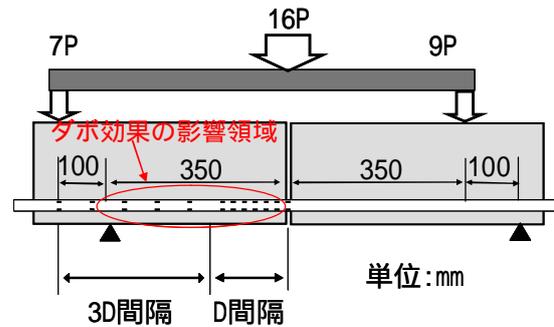
2.2 腐食方法

鉄筋の腐食には電食試験法を採用した。電食試験は、図 - 2 に示すようにかぶり面を上側にした状態で 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て直流電流 12.6A を 3 時間通電した。その際、鉄筋腐食に伴うひずみゲージの破損を防ぐため、NaCl 水溶液の水位を鉄筋位置よりも 100mm 程度低くし、鉄筋が露出する切り欠き位置近傍では防錆剤を塗布し腐食の大幅な進行を抑制した。なお、本研究ではダボ効果に及ぼす鉄筋腐食の影響評価を行うものであるため、試験体の片側のみを電食試験の対象とした。

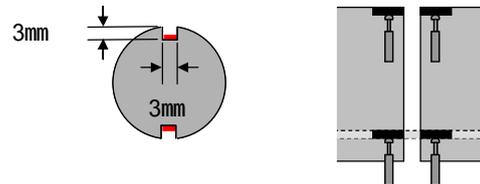
本研究においては、鉄筋腐食の指標として腐食率（腐食前後の鉄筋の質量減少率）を用いることとした。なお、腐食前の鉄筋の質量は配筋の前に直接計測し、単位長さ当りの質量は一定と仮定した。載荷試験終了後はつり出した鉄筋は、20 の 10%濃度クエン酸二アンモニウム溶液に 24 時間浸漬させ、腐食生成物を除去した後に質量を計測した。腐食の測定は、鉄筋を 50mm 間隔で切断し、局所的な腐食率として計測した。

2.3 実験方法

実験は、図 - 3 に示すような逆対称加力式載荷で行った³⁾。支点間隔および載荷点間隔は、切り欠き位置における主鉄筋の曲げモーメントが 0 とな



(a) 載荷方法ひずみゲージ貼付位置



(b) 溝切り鉄筋断 (c) 変位の測定位置

図 - 3 実験概要および各種測定方法

るように決定した。切り欠きの導入は、実構造物の斜め引張りひび割れに見られ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を評価をするためである。また、支点から切り欠きまで距離は、350mm に設定した。この値は、健全試験体および腐食試験体ともに鉄筋軸に沿った水平なひび割れが試験体側面に発生することが明らかとなっていることを参照したものである¹⁾。載荷速度は 0.5mm/min とした変位制御により実施した。

試験体は切り欠きに存在する鉄筋 1 本を介して 2 つの部材から構成されており、試験体をそのままの状態試験機に設置すると自重により部材が大きいたわむとともに初期応力が発生することとなる。したがって、載荷前に試験体の中央部に枕木を設け、自重による影響を抑制した。その後、載荷直前に枕木を取り除いた時点で生じるひずみを測定しておき、荷重の載荷によるひずみから除去することとした。

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、同図(b)に示すように鉄筋の上下両面に幅 3mm x 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。ひずみゲージのリード線は、鉄筋内の溝を這わせて端部から取り出し、その上からエポキシ樹脂を塗布してひずみゲージを保護した。ひずみゲージの貼付位置は、同図(a)に示すように切り欠き位置および鉄筋腐食させた部材側のみに切り欠きから 6D の区間において 1D (16mm) 間隔で貼付

し、それ以外の箇所においては 3D(48mm)間隔で貼付した。また、たわみの測定は、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 箇所において実施した。

3. コンクリートの腐食ひび割れ性状

3.1 鉄筋の腐食性状

表 - 3 は、鉄筋の平均腐食率を示しており、その値は 50mm 間隔で計測した値の平均値である。試験体 N1-2 の平均腐食率は、目標値とほぼ同一であることがわかる。図 - 4 は、50 mm 間隔で計測した腐食率分布を示しており切り欠き近傍では防錆剤を塗布したことにより腐食率が小さいが、鉄筋腐食は比較的均一な状態である。

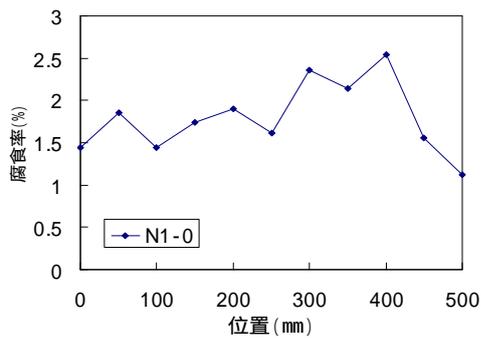
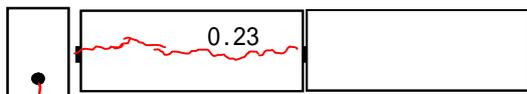


図 - 4 主鉄筋の腐食率分布

表 - 3 主鉄筋の腐食率

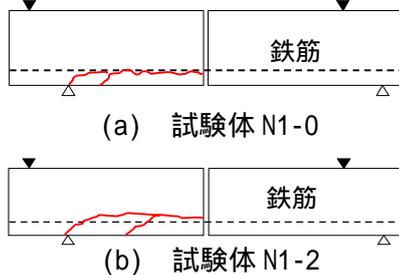
試験体名	目標腐食率	腐食率
N1-0	0%	-
N1-2	2%	1.79%



(a) 断面 (b) かぶり面
図 - 5 かぶりコンクリートの腐食ひび割れ性状



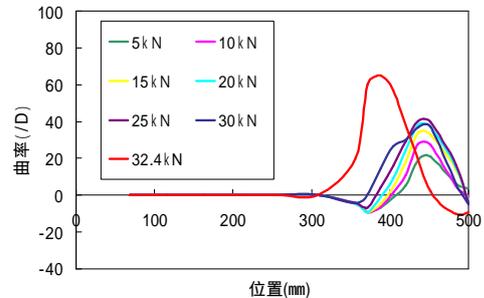
図 - 6 腐食ひび割れ発生メカニズム



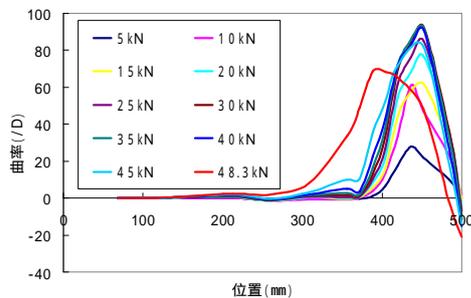
(a) 試験体 N1-0 (b) 試験体 N1-2
図 - 7 破壊ひび割れ性状

3.2 腐食ひび割れ性状

図 - 5 は、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している。まず、同図に示すように、かぶりコンクリート表面において鉄筋に沿った腐食ひび割れが発生し、ひび割れ幅の平均値は 0.23 mm であった。これは、図 - 6 に示すように鉄筋の腐食膨張圧の影響によるものであり、最もかぶり厚が薄い底面に向かって腐食ひび割れが進展したためである。

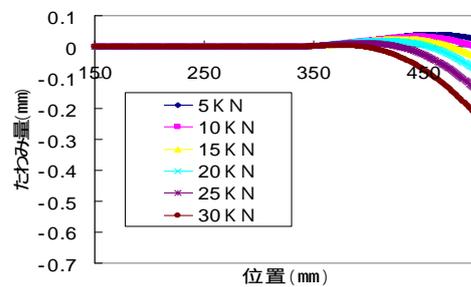


(a) 試験体 N1-0

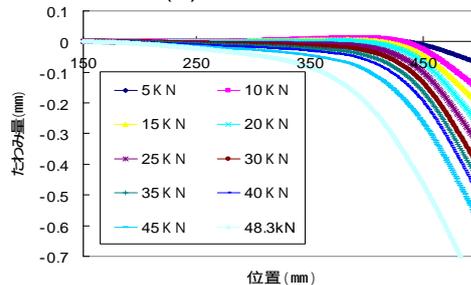


(b) 試験体 N1-2

図 - 8 各試験体の曲率分布



(a) 試験体 N1-0



(b) 試験体 N1-2

図 - 9 各試験体のたわみ分布

4. RC 梁部材のダボ効果に及ぼす鉄筋腐食の影響

4.1 破壊ひび割れ性状

図 - 7 に载荷試験後の破壊ひび割れ性状を示す。試験体 N1-0 においては、22kN に初期ひび割れが発生した。その後、ひび割れは鉄筋軸に沿って支点方向に進展し、最大荷重 32.3kN で支点までひび割れが進展して破壊に至った。一方、試験体 N1-2 では、45kN で初期ひび割れが発生し、最大荷重が 48.3kN となった後に急激な荷重低下を生じ支点までひび割れが進展した直後に破壊を生じた。

4.2 曲率, たわみ, 反力に及ぼす鉄筋腐食の影響

鉄筋の曲率分布を図 - 8 に示す。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で計測した値より、式(1)を用いて算出した。この時、引張ひずみの値を正とした。

$$\phi(x) = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_b}{D} \quad (1)$$

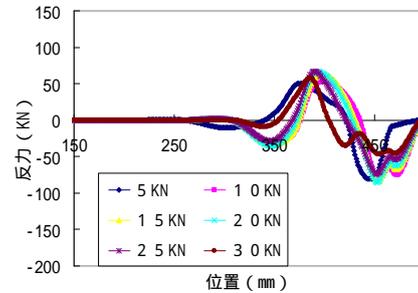
ここで、 x は試験体端面からの距離、 ε_b は鉄筋の上面ひずみ、 ε_t は鉄筋の下面ひずみであり、 D は鉄筋径の 22mm から鉄筋上下表面に加工した溝の深さ 6mm を差し引いた 16mm とした。たわみは、ひずみゲージから算出した曲率を 2 階積分することで算出しその分布図は、図 - 9 に示す通りである。境界条件は、支点位置においてたわみ量とたわみ角が 0 であることとした。反力は鉄筋の曲率を 2 階微分することで算出しその分布図は図 - 10 に示す通りである。

まず、図 - 8 に示す曲率分布の検討を行う。いずれの試験体においても、切り欠き位置 (500 mm) において曲率はほぼゼロとなっており、鉄筋の変曲点であることが分かる。また、ダボ作用が影響する領域に関しては、健全鉄筋では約 350 mm から 500 mm の区間であることに対して、腐食試験体では約 250 mm から 500 mm の区間である。腐食試験体の方が健全試験体よりも影響領域が拡大している。

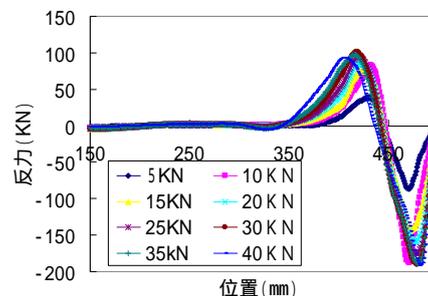
次に、最大荷重に着目すると、健全試験体では 32.4 kN、腐食試験体では 48.3 kN であり、腐食試験体の方が大きな値となった。腐食試験体では鉄筋とコンクリートの付着劣化ならびにかぶり面に生じた腐食ひび割れによりダボ作用の影響する領域が比較的広範囲に渡る。一方、非腐食試験体では、荷重の載荷端から比較的狭い領域において鉄筋とコンクリートの相対ひずみが生じ、その領域におけるコンクリートが局所的に破壊すると同時に鉄筋軸に沿うひび割れが発生することによる。このような性状は、図 - 10 に示す反力分布からも

確認でき、同図(a)および(b)に示すように、反力が生じる領域は腐食試験体の方が広範囲に渡っている。

図 - 9 に示す鉄筋のたわみ分布であるが、腐食試験体の方が健全試験体に比べて大きく変形していることが分かる。これは、腐食試験体では腐食ひび割れの存在により鉄筋下面の受圧面積は小さくなり鉄筋がかぶりコンクリートにめり込み易くなることによるものである。



(a) 試験体 N1-0



(b) 試験体 N1-2

図 - 10 各試験体の反力分布

5. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 主鉄筋 1 本を配筋した RC 梁では、鉄筋腐食によりかぶりコンクリートに発生する腐食ひび割れによりダボ効果の影響領域を拡大させ、鉄筋の曲率も大きくなる。

(2) 最大荷重が大きくなるのはかぶりコンクリートに発生する腐食ひび割れによる影響領域の拡大およびたわみの増加によるものである。

参考文献

- 1) 池田春樹他：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, 土木学会関東支部第 37 回
- 2) Maekawa, K. and Qureshi, J.: Embedded Bar Behavior in Concrete Under Combined Axial Pullout and Transverse Displacement, J. Materials, Conc. Struct., Pavements No.532/ -30, pp.183-195, Feb.1996