コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，2011

論文　RC 梁部材のダボ作用に及ぼす鉄筋腐食の影響に関する研究

梶山　裕稔[*1]・池田　春樹[*2]・大下　英吉[*3]

要旨：本研究では，RC 梁のダボ作用に及ぼす鉄筋腐食の影響を評価するため，切り欠きを導入した RC 梁部材を用いて，ダボ作用のみの評価が可能な条件の下で逆対称加力式せん断実験を行った。その結果，腐食ひび割れが存在することでせん断変形が生じやすくなり，ダボ作用の影響領域は拡大し，鉄筋の曲率も増加することがわかった。また，かぶり厚が一定な 3 本の引張主鉄筋を配筋した場合には，かぶりコンクリートがコンクリート上部と離れた状態になるため，1 本の場合に比べてダボ効果が増大し，せん断変形も起こりやすいことが示された。

キーワード：ダボ効果，ダボ作用，鉄筋腐食，腐食ひび割れ，曲率，逆対称加力式，影響領域

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，供用期間中に要求される水準の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，長期供用やライフサイクルコストの縮減を含めた適切な維持管理体制の確立が不可欠である。

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とともに，鉄筋の断面減少のほか，かぶりコンクリートへの腐食ひび割れの発生，鉄筋とコンクリート間の付着損失等，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。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 [1)]。

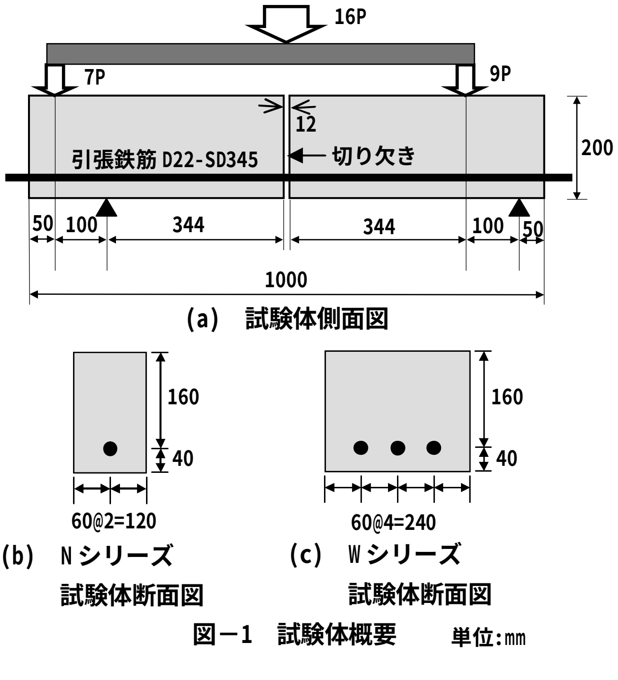
鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存耐荷性状に関する既往の研究では，非腐食時に曲げ破壊が先行する RC 梁部材においても主鉄筋が腐食することで付着割裂破壊やせん断破壊といった脆性的な破壊性状を引き起こす場合もあることが報告されている [2)]。これは鉄筋腐食の影響で，鉄筋軸に沿った水平ひび割れの発生がより顕著となるためであり，腐食ひび割れ存在下でのダボ効果が大きく関与している。しかしながら，これまで腐食ひび割れの存在が RC 梁部材のダボ作用に及ぼす影響について評価検討を行った事例はほとんどない。

そこで，本研究では RC 梁部材のダボ作用に着目し，鉄筋腐食によるひび割れの相異が 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。N シリーズ試験体の形状寸法は 120×200×1000 mm であり，引張主鉄筋を 1 本配筋した。一方で，W シリーズ試験体の形状寸法は 240×200×1000mm であり，引張主鉄筋を 3 本配筋した。また，すべての試験体



図－1　試験体概要　単位:mm

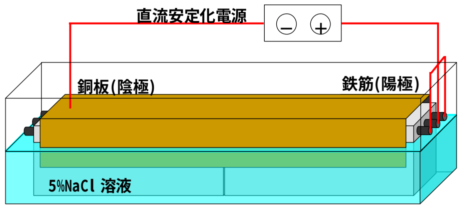
*1 中央大学　理工学部　(正会員)
*2 中央大学大学院　理工学研究科　土木工学専攻　(正会員)
*3 中央大学　理工学部教授　工博　(正会員)

表－1　コンクリートの配合（設計基準強度 30N/mm²）

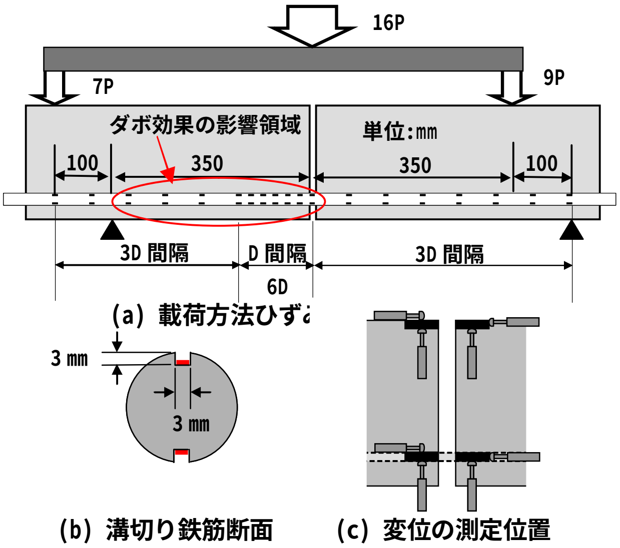
Gmax (mm)	W/C (%)	SL (cm)	Air (%)	単位量(kg/cm³)					
				W	C	S	G	AE減水剤	NaCl
20	60	10	5	168	280	826	996	2.8	8.8

表－2　実験パラメータ

試験体名	セメント	主鉄筋本数	目標腐食率	積算電流量 (hr·A)	圧縮強度 (N/mm²)	割裂強度 (N/mm²)
N-1	早強	1本	0%	-	32	2.3
N-1-C	早強		2%	52	31	2.9
W-3	普通	3本	0%	-	16	1.6
W-3-C	早強		2%	156	31	2.9



図－2　電食試験概要



図－3　実験概要および各種測定方法

において コンクリート表面から主鉄筋中心までの距離は 40mm であり，主鉄筋のかぶりは 29mm とした。主鉄筋は D22（SD345）異形鉄筋を用い，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 とした。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。W シリーズでは配筋した 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 鉄筋と称することとする。実験パラメータは**表－2** に示すように主鉄筋本数と目標腐食率である。主鉄筋本数は 1 本と 3 本の 2 水準とし，主鉄筋本数による腐食ひび割れ性状の相違がダボ効果にもたらす影響を評価することとした。また，目標腐食率は 0%と 2%の 2 水準に設定した。ここで本研究においては，鉄筋腐食の評価手法として，腐食率，すなわち腐食前後の鉄筋の質量減少率を用いることとする。目標腐食率は，実際の腐食率が大きい場合，鉄筋に貼付したひずみゲージが破損するため，予備実験で腐食率が 2%程度であればひずみは計測可能であることを確認し，決定した。また，試験体 W-3 においては普通セメントを用い，それ以外の試験体では早強セメントを用いた。これは当初，全ての試験体において普通セメントを用いて実施したものの，試験体 N-1 において載荷条件に不備があったことや，試験体 N-1-C と試験体 W-3-C において鉄筋腐食に伴い鉄筋の表面に貼付したひずみゲージが破損したためであり，これら 3 体の試験体に関しては早強セメントを用いて行った再実験の結果を示すこととする。また，試験体 W-3 は養生時に水分が不足したため他の試験体より強度が半分程度となっているが，せん断耐力は示方書に従うと 2 割減であり，その値はほとんど影響がないといえる。

2.2 腐食方法

本実験では，鉄筋の腐食には電食法を採用した。電食試験は**図－2** に示すように試験体を載荷時とは上下反対に設置し，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 6A を 8.7 時間通電した。積算電流量は予備実験を元に決定した。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進行を抑制した。なお，**図－1(a)**に示す切り欠き位置および試験体端部では鉄筋が直接 NaCl 水溶液に浸漬すると，過度に腐食が進行するため，その領域にはエポキシをコーディングすることとした。

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－3** に示すような方法で逆対称加力式載荷実験を行った [3),4)]。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。また，予備実験においてダボ作用の影響領域を 350mm とした際に，健全試験体，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を確認したため，本実験においてもダボ作用の影響領域長を 350mm とした。載荷速度は 0.5mm/min とした変位制御により実施した。なお，載荷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**同図−3(b)**に示すように，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。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。**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 N シリーズの主鉄筋と W シリーズの M 鉄筋において行い，W シリーズの両外側鉄筋には加工をしていない鉄筋を用いた。

3. 鉄筋の腐食膨張によるコンクリートの腐食ひび割れ性状

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

表−3 には各試験体の主鉄筋の平均腐食率を示す。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，いずれの試験体も目標腐食率に近い値を示した。**図−4** に腐食試験体の主鉄筋の腐食率分布を示す。同図中の 500mm の位置は切り欠きを示し，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同図の左側に示した。同図より鉄筋腐食は梁全長にわたり比較的均一であるといえる。

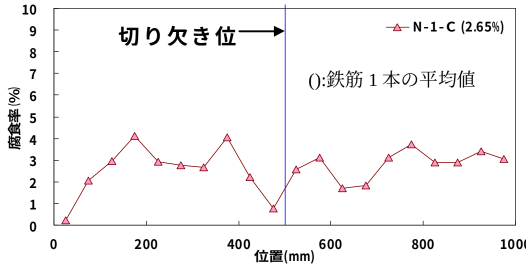
(2) 腐食ひび割れ性状に及ぼす主鉄筋本数の影響

図−5 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。まず，**同図(a)**に示すように，主鉄筋を 1 本有する試験体 N-1-C では底面において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−6(a)**に示すように鉄筋の腐食膨張圧の影響で，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，主鉄筋を 3 本配筋した試験体 W-3-C では**図−5(b)**に示すように両外側の L と R 鉄筋に沿って梁全長にわたり腐食ひび割れが発生した。これは**図−6(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

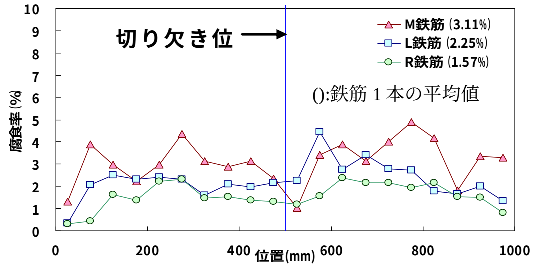
膨張圧が直接作用することでひび割れが発生したためである。しかし，M 鉄筋のかぶりコンクリートには M 鉄筋自体の腐食膨張圧が作用する一方で，両外側鉄筋の腐食による膨張圧が M 鉄筋に沿ったひび割れの発生を抑制しているものと考えられる。なお，**図−5(b)**の右側のコンクリートには M 鉄筋に沿ったひび割れが発生しているが，**図−4(b)**より，この部分の M 鉄筋の腐食率は両外側鉄筋に比べて高くなっており，電食試験初期の段階

表−3 主鉄筋の腐食率

試験体名	目標腐食率(%)	主鉄筋腐食率(%) L	M	R	平均	変動係数
N-1-C	2.0	-			2.65	0.36
W-3-C	2.0	2.25	3.11	1.57	2.31	0.27

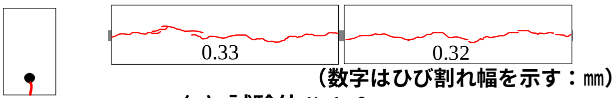


(a) N-1-C 試験体腐食率分布

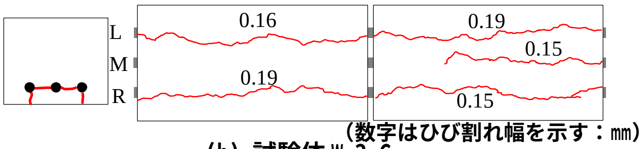


(b) W-3-C 試験体腐食率分布

図−4 主鉄筋腐食率分布

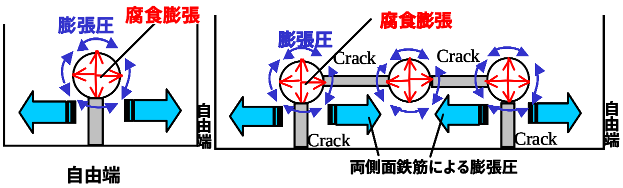


(a) 試験体 N-1-C



(b) 試験体 W-3-C

図−5 かぶりコンクリートの腐食ひび割れ性状



(a) 主鉄筋 1 本　**(b) 主鉄筋 3 本**

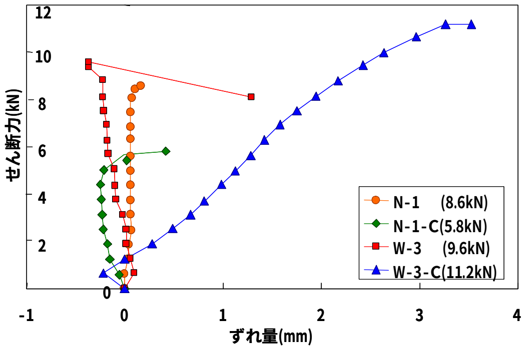
図−6 腐食ひび割れ発生メカニズム

に発生したものである。

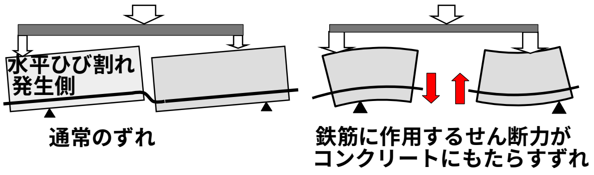
また，**図−5(b)**に示すように，試験体 W-3-C では端面においても 3 本の鉄筋を結ぶ腐食ひび割れが生じた。**図−5** のひび割れに示した数値は各ひび割れ幅の平均値を示しており，ひび割れに沿って 25mm 間隔で計測したひび割れ幅の値から算出した平均値を示している。試験体 N-1-C では平均値が 0.33mm であるのに対し，試験体 W-1-C では L 鉄筋が 0.16mm，R 鉄筋が 0.19mm となり，鉄筋が 1 本の試験体は 3 本の試験体に比べてひび割れ幅

表－4　各試験体の破壊荷重

シリーズ	試験体名	主鉄筋の平均腐食率 (%)	水平ひび割れ発生時の荷重(kN)	破壊時における切り欠き位置でのせん断力(kN)
N	N-1	-	68.7	8.6
	N-1-C	2.65	46.4	5.8
W	W-3	-	76.8	9.6
	W-3-C	2.31	86.9	11.2



図－7　せん断変形と作用せん断力



(a)　正の変形　　**(b)　負の変形**

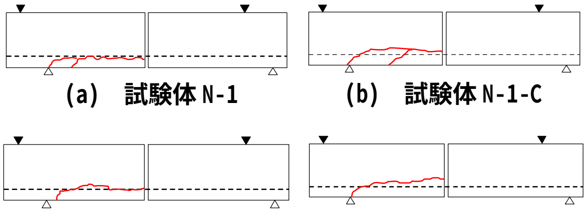
図－8　ずれの正負の定義

が大きくなる。これは**図－6** に示したように主鉄筋が 3 本では，鉄筋直下のコンクリート同士が互いに膨張し合うことによるものである。

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を，**図－7** せん断力とずれ量の関係を示す。ずれ量は試験体に設置した水平方向の変位計により，回転角を求め，鉛直方向の変位差を補正することにより相対ずれを算出した(**図－3(c)**参照)。その際，**図－8(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－7** より，試験体 W-3-C は載荷初期の段階から正のずれを生じているほかは，負の変形あるいは，ほとんど変形が生じていない。このことは，**図－5(b)**の試験体 W-3-C の腐食ひび割れ性状より，かぶりコンクリートが上部コンクリートから剥離した状態にあるため，ダボ作用が発生し難しく，支点を固定端とする鉄筋の片持ち梁機構が生じている。一方，他の試験体で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，健全試験体である試験体 W-3 において負のせん断変形が生じているのは，**図－8(b)**の自由体図に示すように，左側部分の切り欠き位置において鉄筋には下向きのせん断力が作用しているのに対し，右側部分の鉄筋には上向きのせん断力が作用しているため，梁全体がわ



(a)　試験体 N-1　　**(b)　試験体 N-1-C**

(C)　試験体 W-3　　**(d)　試験体 W-3-C**

図－9　各試験体の破壊ひび割れ性状

ずかに負の変形を生じているものと考えられる。主鉄筋が 1 本の試験体においても，腐食試験体 N-1-C では荷重の増加に伴い次第に正のせん断変形を生じているのに対して，健全試験体 N-1 においては荷重が増加した際にもほとんど変形が生じないことがわかる。なお，この傾向は下段の変位計においても同様であった。N シリーズにおいて，健全試験体 N-1 は切り欠き位置のせん断力が 8.6kN で水平ひび割れが発生し，荷重が低下したのに対し，試験体 N-1-C では腐食に伴いダボ効果が得られ易く，5.8kN で荷重が低下した。W シリーズにおいては健全試験体 W-3 において 9.6kN で水平ひび割れが発生したのに対し，腐食試験体 W-3-C では 11.2kN となり，健全試験体に比べて高い値を示した。これは，試験体 W-3 のコンクリートの圧縮強度と割裂強度が，**表－2** に示したように，ともに他の試験体に比べて小さくなっており，試験体 W-3 の鉄筋のダボ効果に対するコンクリートの耐力が低下したためである。

(2) 破壊ひび割れ性状とひび割れの進展

図－9 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試験体側面の切り欠き位置から鉄筋軸に沿った水平ひび割れが発生し，荷重の低下後，ひび割れは支点まで進展した。

4. RC 梁部材のダボ効果に及ぼす鉄筋腐食の影響

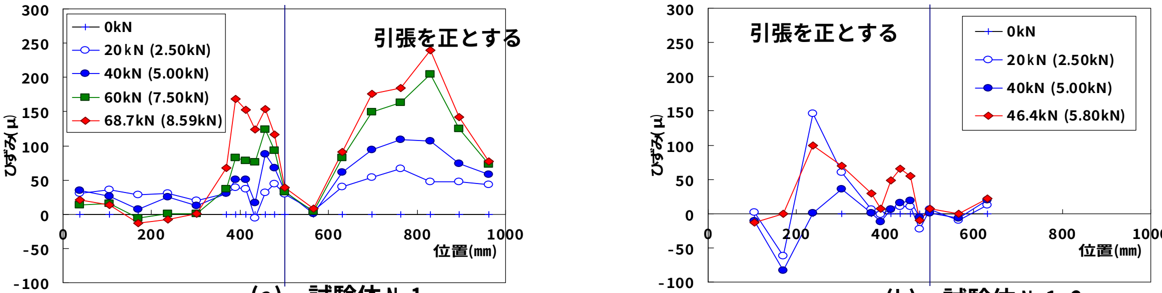
4.1 一本の鉄筋が配筋された状態

主鉄筋を 1 本有する N シリーズ試験体の鉄筋軸ひずみ分布を**図－10** に，曲率分布を**図－11** に示す。鉄筋軸ひずみ $\bar{\varepsilon}_s(x)$ 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，それぞれ**式(1)**と**式(2)**を用いて算出した。このとき，引張ひずみの値を正とした。

$$\bar{\varepsilon}_s(x)=\frac{\varepsilon_t+\varepsilon_b}{2} \qquad (1)$$

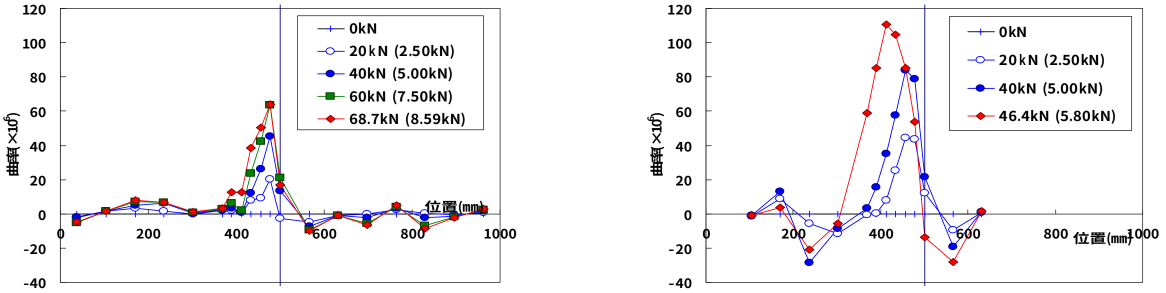
$$\phi(x)=\frac{\varepsilon_t-\varepsilon_b}{D} \qquad (2)$$

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



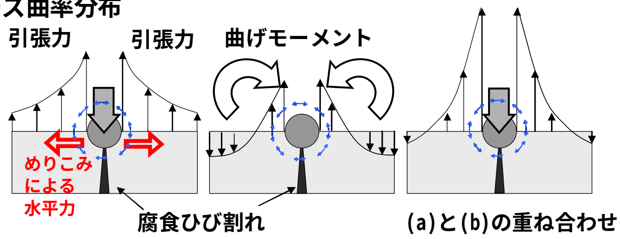
(a) 試験体 N-1　　(b) 試験体 N-1-C

図－10 Nシリーズ鉄筋軸ひずみ分布



(a) 試験体 N-1　　(b) 試験体 N-1-C

図－11 Nシリーズ曲率分布



(a)鉄筋のめりこみによる引張応力　(b)ひび割れ拡大による応力　(c)ダボ作用による応力状態

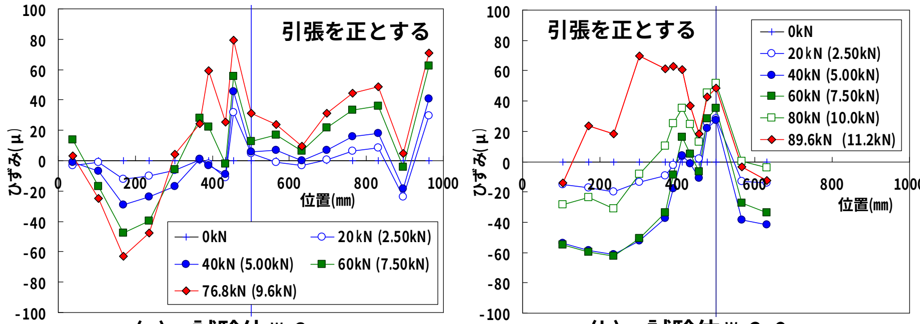
図－12 ダボ作用による鉛直方向応力状態

した。なお，各値は油圧ジャッキが示した載荷荷重を20kN 刻みで示しており，その時点で切り欠き部分の鉄筋が伝達しているせん断力を括弧内に示した。切り欠き部分におけるせん断力は**図－3(a)**に示す試験体寸法を加味して，鉛直方向の力の釣合いにより算出あいた。まず，**図－10** より鉄筋軸ひずみはいずれの試験体においても切り欠き近傍では荷重の増加に伴って鉄筋軸平均ひずみも増加し，端部に向かうにつれていずれは小さくなっていることがわかる。

次に，**図－11** より曲率分布はどちらの試験体においても切り欠き位置近傍で曲率は 0 となっており，鉄筋変形の変曲点となっていることがわかる。ダボ効果の影響領域に関しては，載荷初期の段階ではどちらの試験体においても 400mm から 500mm，すなわち鉄筋径 22mm の約 5 倍の区間で曲率が発生しているが，試験体 N-1 では破壊荷重の 68.7kN に達するまでその影響領域の長さを保持しているのに対して，試験体 N-1-C においては破壊荷重が 46.4kN に低下し，影響領域も 300mm から 500mm，つまり鉄筋径の約 9 倍にまで拡大していることがわかる。またひび割れ発生時の曲率の大きさに関しても，試験体 N-1 では 64.2 であるが試験体 N-1-C においては約 2 倍の 110.7 となり，変形がより大きいものといえる。このように健全試験体と腐食試験体で鉄筋の変形が異なるのは，**図－12** に示すように，両者のダボ作用によるコンクリート応力状態が異なるためであると考えられる。腐食ひび割れが存在しない試験体では，かぶりコンクリートが鉄筋に押し下げられることで，鉄筋位置のコンクリートの水平断面には**図－12(a)**のように鉛直方向の引張応力が生じる。一方，腐食ひび割れを生じた試験体においては，鉄筋が下に押し込まれることで，**図－12(a)**の鉛直方向の応力状態に加えて，かぶりの腐食ひび割れを拡大させる力が水平方向にはたらき，その力に対して，鉄筋高さのコンクリート水平断面では**図－12(b)**のような，鉄筋近傍では引張応力，側面付近では圧縮応力が生じており，曲げモーメントが発生しているものと考えられる。よって，これらを重ね合わせることで**図－12(c)**のように鉄筋近傍の引張応力が大きくなり，水平ひび割れが発生し易くなっているものと考えられる。また，**図－9** より，健全試験体 N-1 においては点線で示した鉄筋とほぼ同じ高さに水平ひび割れが発生しているのに対し，腐食試験体 N-1-C においては水平ひび割れが鉄筋位置よりも高い位置に発生しており，腐食ひび割れの発生に伴い腐食ひび割れを拡大するモーメントが作用していることに起因するものと考えられる。

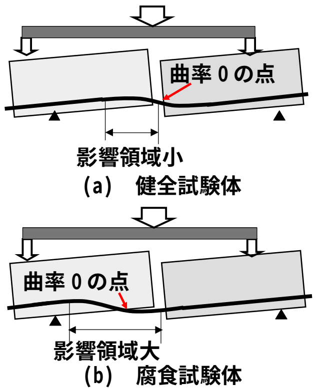
4.2 複数の鉄筋が配筋された状態

3 本の主鉄筋を有する W シリーズ試験体の鉄筋軸ひずみ分布を**図－13** に，曲率分布を**図－14** に示す。まず**図－13** 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付着力が作用しないために，引張応力が生じている。また，**図－14** より試験体 W-3 においては載荷初期から切り欠き位置が鉄筋の変形の変曲点とな

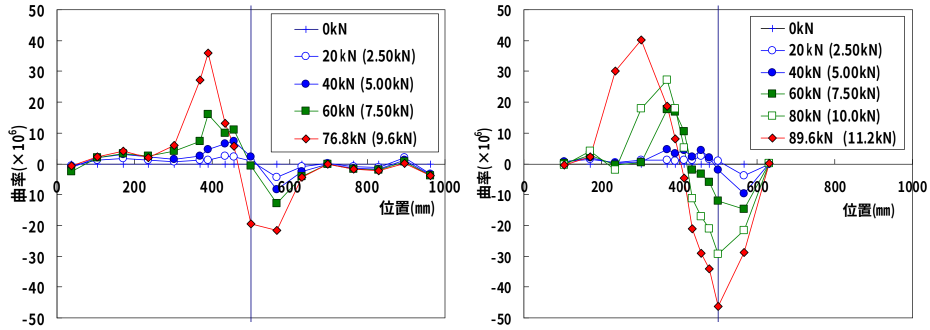


(a) 試験体W-3　(b) 試験体W-3-C

図－13 Wシリーズ鉄筋軸ひずみ分布

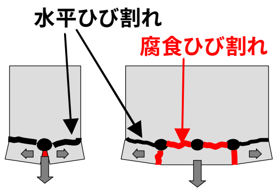


図－15 変形の概念図



(a) 試験体W-3　(b) 試験体W-3-C

図－14 Wシリーズ曲率分布



(a) N-1-C (b) W-3-C

図－16 鉄筋本数と腐食ひび割れの概念図

っており軸対称な曲率分布が得られたのに対し，試験体W-3-C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。同図(a)より，切り欠き位置よりも左側のコンクリートは鉄筋から下向きの力が作用し，逆に右側のコンクリートには上向きの力が作用するために3.2(1)で述べた試験体W-3の負の変形が生じるものである。**図－15**には破壊時における変形の概念図，**図－16**には鉄筋本数と腐食ひび割れの概念図を示す。鉄筋1本である試験体N-1-Cでは，**図－16(a)**に示すようにかぶりコンクリートが鉄筋の下方向変形を抑制することとする。一方，試験体W-3-Cでは，**図－16(b)**に示すようにかぶりの中間部分が水平方向の腐食ひび割れによって剥離しており，せん断変形を生じ易く，切り欠き位置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-3-Cでは，せん断変形が増大したために支点近傍においても曲率が発生し影響領域は鉄筋径の約16倍にまで拡大した。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梁部材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

本研究ではRC梁部材のダボ作用に及ぼす鉄筋腐食の影響を評価した。以下に本研究で得られた知見を示す。

(1) 鉄筋腐食によりかぶりコンクリートに発生する腐食ひび割れはダボ効果の影響領域を拡大させ，鉄筋の曲率も増大する。

(2) 鉄筋を複数本配筋したRC梁部材では，鉄筋腐食時にかぶりコンクリートが上部コンクリートとの一体性を喪失すると，荷重の増加に伴うダボ効果の影響領域と鉄筋の曲げ変形がともに増大し，変曲点の位置も水平ひび割れが進展する方向に移動する。

参考文献

1) 池田春樹，村上祐貴，大下英吉，堤　知明：鉄筋腐食がRC梁部材のせん断耐荷性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.769-774, 2009

2) 村上祐貴，大下英吉，鈴木修一，堤知明：鉄筋腐食したRC梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断補強筋ならびに定着性能の影響に関する研究，土木学会論文集E，Vol.64，No.4，pp.631-649，2008.12

3) 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

4) Maekawa, K. and Qureshi, J.: Embedded Bar Behavior in Concrete Under Combined Axial Pullout and Transverse Displacement, J. Materials, Conc. Struct. , Pavements, No.532/Ⅴ-30, pp.183-195, Feb.1996