

## 論文 鉄筋腐食が RC 梁部材のせん断耐荷性能に及ぼす影響

池田 春樹<sup>\*1</sup>・村上 祐貴<sup>\*2</sup>・大下 英吉<sup>\*3</sup>・堤 知明<sup>\*4</sup>

要旨：本研究では、主鉄筋とコンクリートの付着性能、特に定着性能に着目して鉄筋腐食した RC 梁部材のせん断耐荷性能に及ぼす鉄筋腐食の影響評価を行った。その結果、鉄筋腐食した RC 梁部材のせん断耐荷性能は、せん断区間における付着損失ならびに十分な定着性能が確保されている場合、アーチ耐荷機構が形成されることを実験的に明らかとした。またアーチ耐荷機構の形成によって斜め引張破壊が先行型の RC 梁部材においては、鉄筋が非腐食時よりも耐力が増加することを示すとともに、アーチ耐荷機構の形成は定着性能に依存することを指摘した。

キーワード：定着性能，アーチ耐荷機構，付着性能

## 1. はじめに

近年、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向が活発となっている。既存構造物の長期供用化は、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。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等、構造性能に及ぼす影響が大きい劣化現象の一つである。

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、グレーディングによる半定量的な評価により、かなりの安全余裕度をもって、構造性能を評価せざるを得ないのが現状である。

鉄筋腐食を生じた RC 部材の構造性能に関する既往の研究を大別すると、曲げ耐荷性能に着目した研究とせん断耐荷性能に着目した研究がある。前者に関しては主鉄筋の材料劣化が耐荷性能に支配的となり、主鉄筋の断面減少量に応じて、曲げ耐力が低下する<sup>1),2)</sup>。一方、せん断耐荷性能に関しては、鉄筋腐食によってせん断耐荷力は非腐食時よりも増加することが指摘されている<sup>3),4)</sup>。これは、主鉄筋とコンクリートの付着が低下することにより、せん断スパンでの平面保持が保たれずこれによってアーチリブが形成され、破壊モードが斜め引張破壊から斜め圧縮破壊に移行することで、せん断耐荷力が増加するものと考えられる。したがって鉄筋腐食を生じた RC 部材のせん断耐荷性能の定量的評価を行うためには、鉄

筋とコンクリートの付着応力性状に着目した検討が不可欠となるが、この種の検討事例はほとんどない。

そこで本研究では、主鉄筋とコンクリートの付着性能、特に定着性能に着目して鉄筋腐食した RC 梁部材のせん断耐荷性能に及ぼす鉄筋腐食の影響評価を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体

試験体の形状と寸法および配筋を図-1に示す。試験体は、240×340×2100mm および 240×340×2400mm の RC 梁部材であり、せん断破壊先行型の構造諸元である。引張主鉄筋には D22 (SD345) 異形鉄筋を 3 本配筋し、せん断補強筋には D6 (SD295A) 異形鉄筋を用いた。以下、3 本の主鉄筋はそれぞれ L 鉄筋、M 鉄筋、R 鉄筋と称することとする。コンクリートの配合は表-1に示す。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。

## 2.2 腐食試験方法

本実験では、腐食試験方法として、電食試験法を採用した。具体的な電食試験方法であるが、試験体を 5% NaCl 水溶液を満たした水槽内に浸漬し、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続し、直流定電流 20A を通電した。

本研究においては、鉄筋の腐食結果指標として腐食率(腐食後の質量減少率)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樣と仮定した。載荷試験終了後、試験体から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。主鉄筋の腐食率の測定箇所は主鉄筋を 50mm 間隔に切断し、局所的な腐食率を計測した。

\*1 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (学生会員)

\*2 中央大学 理工学部助教 工博 (正会員)

\*3 中央大学 理工学部教授 工博 (正会員)

\*4 東京電力(株) 技術開発研究所 工博 (正会員)

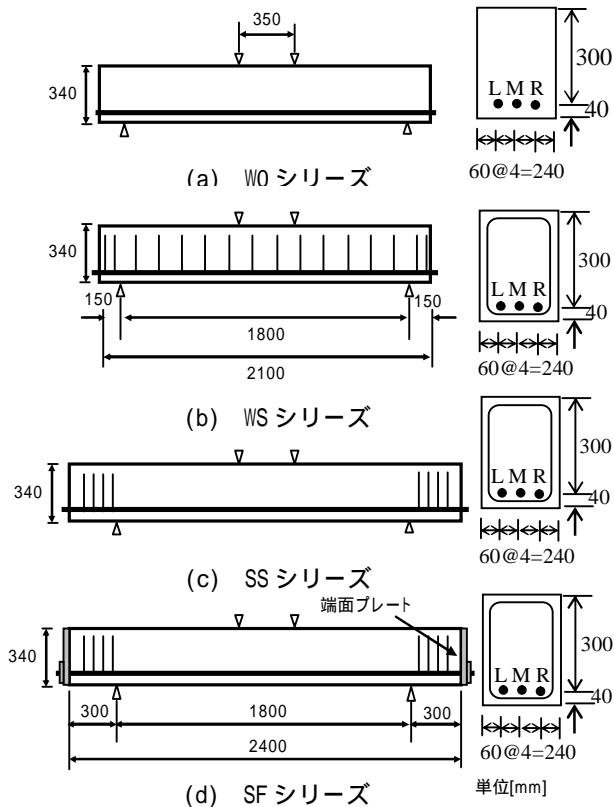


図 - 1 試験体の形状と寸法

表 - 1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	SI (cm)	Air (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	混和剤
20	60	10	5.0	168	280	826	996	2.80

### 2.3 実験パラメータ

実験パラメータは、表 - 2 に示すように鉄筋腐食率、せん断補強筋の有無および定着長である。なお、ここで定着長とは端部から支点までの長さとして定義する。まず、W0 シリーズは、主鉄筋のみを有する試験体であり、定着長も 150mm と短くした試験体シリーズである。WS シリーズは、形状、寸法は W0 シリーズ試験体と同じであるが、せん断補強筋を示方書の規定に基づき有効高さの 1/2 間隔(150mm)で配筋した試験体シリーズである<sup>5)</sup>。

SS シリーズは、定着長を 300mm とし、さらに定着筋を配筋した(図 - 1 参照)。SF シリーズは SS シリーズと形状、寸法および配筋は同様であるが、試験体端面において、主鉄筋をプレートにより固定することで、完全定着状態とした。さらに、試験体 SF-0N は支点間の付着を完全に除去した。付着の除去は鉄筋の節を口ウで埋めて凹凸を除去した後、表面にビニールテープを巻きつけ、グリスを塗布することで行った。

### 2.4 荷重試験および測定項目

荷重試験は、図 - 1 に示すように 荷重点間隔 350mm、

表 - 2 実験パラメータ

シリーズ	試験体名	目標腐食率 (%)	積算電流量 (hr·A)	せん断補強筋間隔	定着長 (mm)
W0	W0-0	0	-	-	150
	W0-10	10	1932		
WS	WS150-0	0	-	150mm	300
	WS150-10	10	4033		
SS	SS-0	0	-	定着筋4本	300+プレート
	SS-10	10	4283		
	SS-20	20	9343		
SF	SF-0B	0	-		
	SF-0N				

表 - 3 各試験体の主鉄筋の腐食率

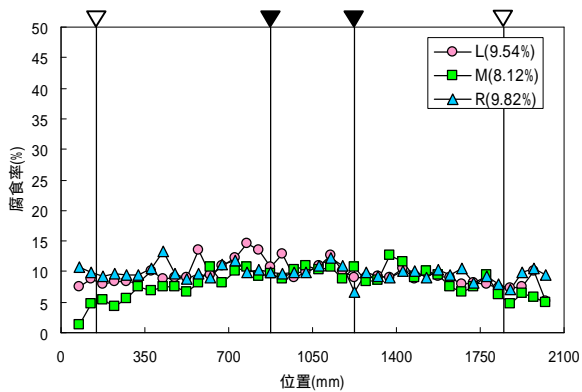
シリーズ	試験体名	目標腐食率 (%)	主鉄筋変動係数(%)				変動係数
			L	M	R	平均	
W0	W0-0	0	-				0.15
	W0-10	10	9.54	8.12	9.82	9.16	
WS	WS150-0	0	-				0.33
	WS150-10	10	10.00	14.19	9.84	11.34	
SS	SS-0	0	-				0.49
	SS-10	10	14.06	12.45	9.03	11.97	
	SS-20	20	23.87	7.20	18.04	15.14	
SF	SF-0B	0	-				
	SF-0N						

支点間距離 1800mm とした静的 4 点曲げ荷重試験であり、荷重速度は 0.5(mm/min)である。たわみ量の測定は、変位計(1/1000mm)をスパン中央部の 3 箇所に設置して実施した。試験体共通の測定項目は荷重と中央変位であるが、試験体 SS-10 および試験体 SF-0B は鉄筋内部にひずみゲージを埋め込み、鉄筋の局所的な変形状を計測した。具体的な鉄筋ひずみの計測手法に関しては、既往の文献を参照されたい<sup>6)</sup>。

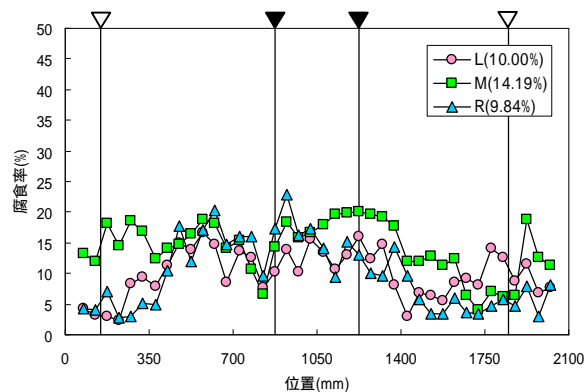
### 3. 腐食状況

表 - 3 に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 間隔毎に計測した腐食率の平均値であり、いずれの試験体も目標腐食率に近い値を示した。また、各主鉄筋の平均腐食率は、試験体 WS150-10 を除き、M 鉄筋が両外側鉄筋に比べて小さい値を示した。図 - 2 に腐食試験体の主鉄筋の腐食率分布を示す。W0 および WS シリーズにおいて、主鉄筋の腐食は梁全長にわたり比較的均一に生じている。表 - 3 には各腐食試験体の 50mm 間隔で計測した腐食率の変動係数を示すように、両試験体の変動係数はそれぞれ 0.15 および 0.33 である。SS シリーズに関しては、W0 および WS シリーズに比べて、主鉄筋軸方向の腐食は不均一性を有しており、その傾向は主鉄筋の平均的な腐食率が大きい試験体 SS-20 において顕著であった。

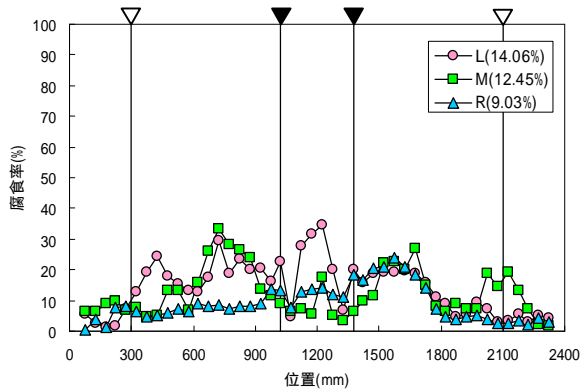
図 - 3 にかぶりコンクリートの腐食ひび割れ性状の一例を示す。まず、同図(a)に示す主鉄筋のみを有する試験体 W0-10 では、両外側鉄筋に沿って梁全長にわたり腐食ひび割れが発生した。これは、図 - 4(a)に示すように両外側鉄筋のかぶりコンクリートの一端が自由端であり、鉄筋の腐食による膨張圧が直接作用することにより



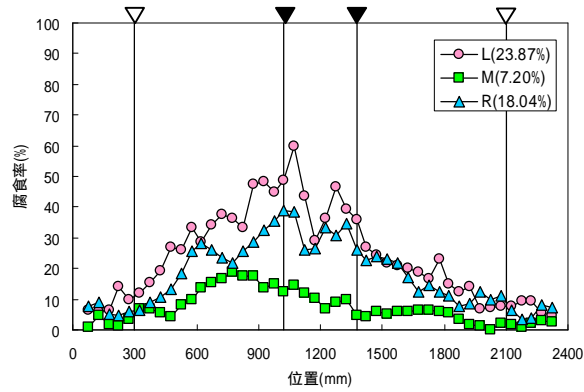
(a) W0-10



(b) WS150-10

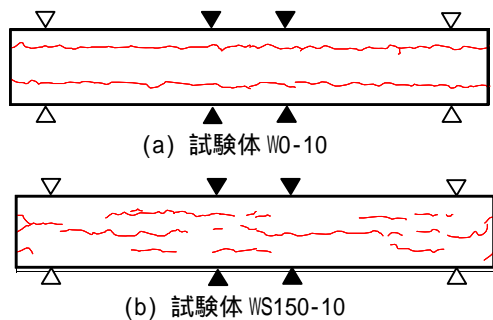


(c) SS-10



(d) SS-20

図 - 2 主鉄筋腐食率分布



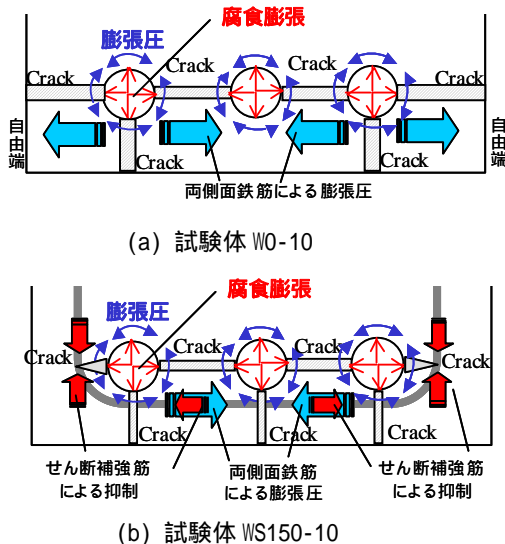
(a) 試験体 W0-10

(b) 試験体 WS150-10

図 - 3 かぶりコンクリートの腐食ひび割れ性状

ひび割れが発生したものである。しかし M 鉄筋のかぶりコンクリートには M 鉄筋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。

図 - 3(b)にはせん断補強筋を有する試験体 WS150-10の腐食ひび割れ性状を示す。腐食ひび割れは両外側鉄筋のかぶり部分のみならず、M 鉄筋のスパン中央領域にも発生している。これは図 - 4(b)に示すように、両外側鉄筋の腐食によるかぶりコンクリートへの膨張圧がせん断補強筋により抑制され、M 鉄筋の腐食による膨張圧の抑制効果が低下するためであると考えられる。また、後に詳述するが、最終的に試験体 SS150-10のせん断補強筋は電食に伴い腐食が著しく生じている。



(a) 試験体 W0-10

(b) 試験体 WS150-10

図 - 4 腐食ひび割れ発生メカニズム

#### 4. 実験結果

##### 4.1 破壊性状

###### (1)荷重～中央変位

表 - 4 に各試験体の終局耐力ならびに破壊モードを示す。また、図 - 5 に W0 および WS シリーズ試験体の荷重と中央変位の関係を示す。図中には設計せん断耐力を併せて示しているが、コンクリート分担分は二羽式、せん断補強筋分担分は示方書に基づき算出した<sup>5), 7)</sup>。

表 - 4 各試験体の破壊荷重および破壊モード

シリーズ	試験体名	目標腐食率 (%)	主鉄筋の平均腐食率 (%)	圧縮強度 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊モード
W0	W0-0	0	-	35.7	215.8	付着割裂
	W0-10	10	9.16	38.9	129.0	付着割裂
WS	WS150-0	0	-	34.6	321.6	斜め引張
	WS150-10	10	11.34	36.0	194.6	付着割裂
SS	SS-0	0	-	32.8	199.5	斜め引張
	SS-10	10	11.85	29.2	236.0	付着割裂
	SS-20	20	15.14	31.2	251.2	付着割裂
SF	SF-0B	0	-	32.1	180.5	斜め引張
	SF-0N			28.0	360.3	

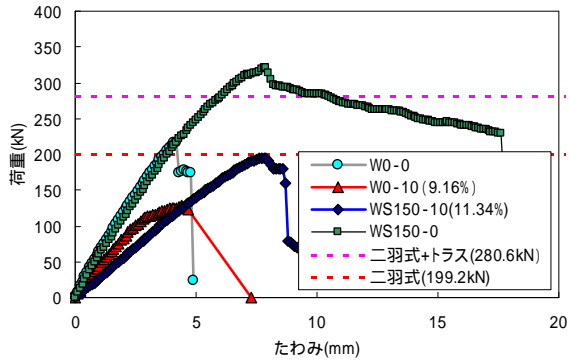


図 - 5 荷重と中央変位(W0・WSシリーズ)

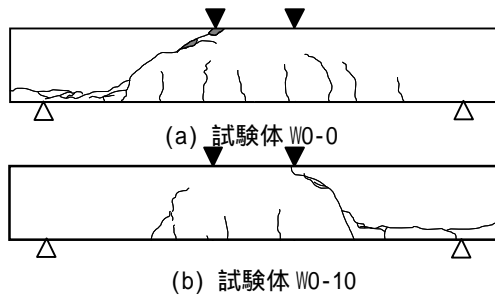


図 - 6 破壊ひび割れ性状(W0シリーズ)

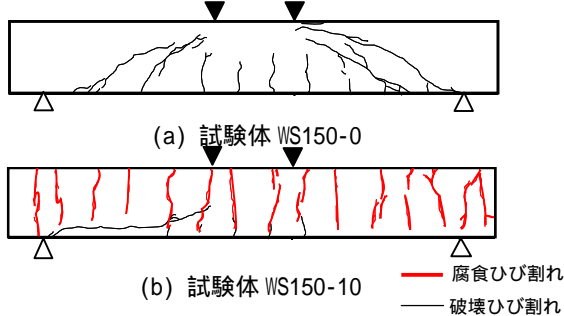


図 - 7 破壊ひび割れ性状(WSシリーズ)

まず、鉄筋が非腐食である試験体 W0-0 は荷重が約 215kN で梁は破壊に至り、その値は設計せん断耐力とほぼ同様である。これに対して、鉄筋腐食率が約 10% である試験体 W0-10 は荷重が約 129kN の時点で梁は破壊に至り、鉄筋が非腐食時の約 60% まで耐力は低下した。

図 - 6 に W0 シリーズの破壊ひび割れ性状を示すように、両試験体ともにせん断スパンに発生した斜めひび割れから付着割裂ひび割れを誘発した破壊形態であったが、試験体 W0-10 の斜めひび割れは試験体 W0-0 に比べて載荷点よりに発生した。次にせん断補強筋を配筋した試験体 WS シリーズでは、非腐食試験体は約 321kN で破壊したことに對して鉄筋腐食率が約 10% である試験体

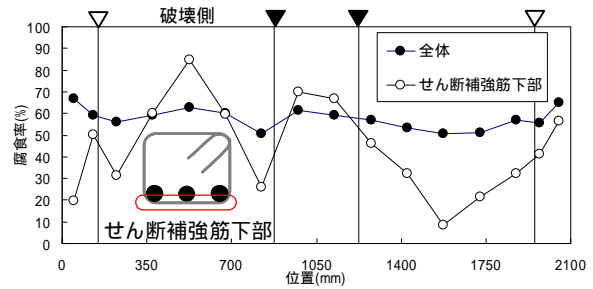


図 - 8 せん断補強筋の腐食性状(WS150-10)

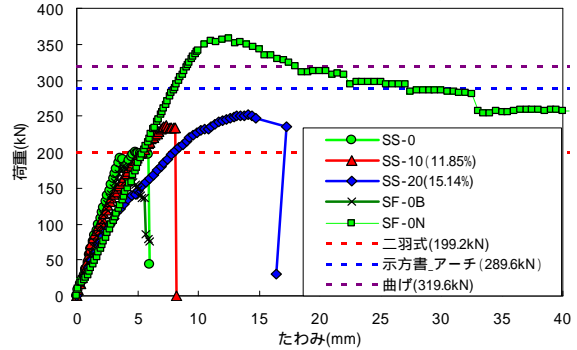


図 - 9 荷重と中央変位(SS・SFシリーズ)

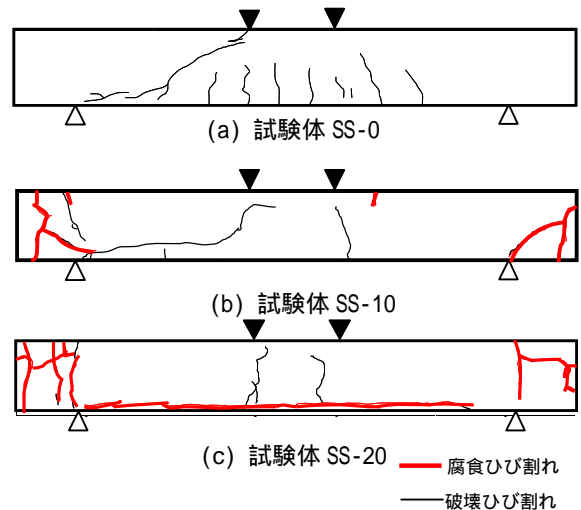


図 - 10 破壊ひび割れ性状(SSシリーズ)

WS150-10 は約 194kN で破壊を生じた。試験体 W0-10 と同様、鉄筋が健全な場合に比べて耐力は大幅に低下した。図 - 7 に WS シリーズの破壊ひび割れ性状を示すように、非腐食試験体は斜め引張り破壊を生じたことに對し、試験体 WS150-10 は付着割裂破壊を生じた。このことは、せん断補強筋の腐食が要因であると考えられる。図 - 8 に試験体 WS150-10 のせん断補強筋全体およびせん断補強筋下部の腐食率分布を示す。同図に示すように、せん断補強筋全体の腐食率はいずれのせん断補強筋もほぼ同様である。しかしながら、せん断補強筋下部では、破壊を生じたせん断スパンにおいて、腐食率が非常に大きい値を示し、平均で約 52% であった。既往の研究<sup>1)</sup>において、せん断補強筋下部の腐食率は主鉄筋とコンクリートの付着応力性状に極めて重要であることが明らかとなっており、この指摘を鑑みれば、試験体 WS150-10 に

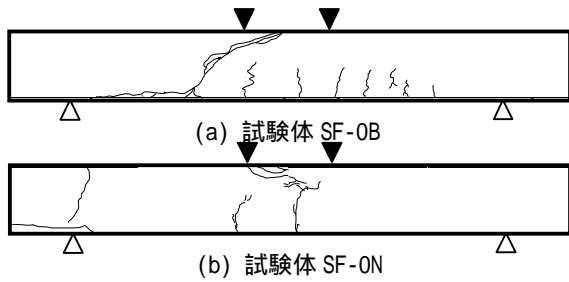
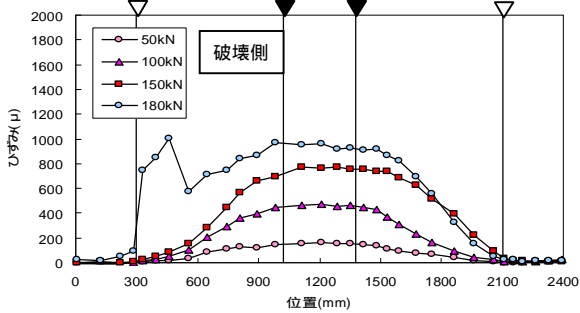
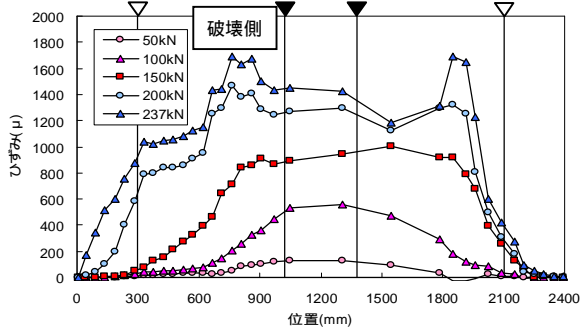


図 - 11 破壊ひび割れ性状(SFシリーズ)



(a) 試験体 SF-0B

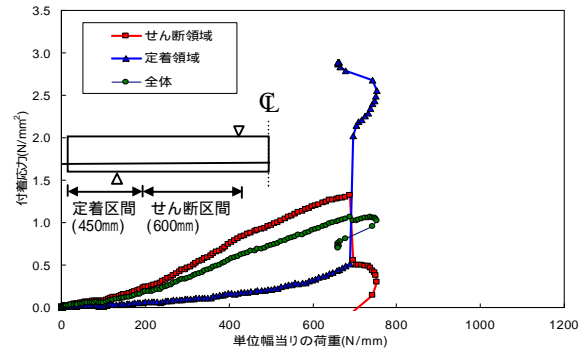


(b) 試験体 SS-10

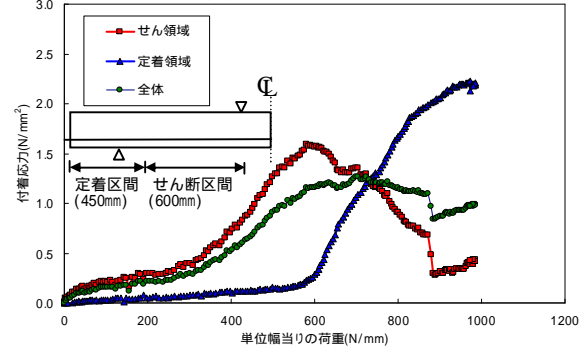
図 - 12 鉄筋のひずみ分布

において破壊側のせん断スパンのせん断補強筋の拘束効果が、著しく低下しており、定着領域まで荷重が伝達され主鉄筋の抜出しが生じたものと考えられる<sup>1)</sup>。以上のように、定着長が短いW0, WSシリーズにおいては、鉄筋腐食に伴い主鉄筋が抜出し、耐力は大幅に低下した。

図 - 9 に定着長を 300mm に延長した SS シリーズおよび SF シリーズ試験体の荷重と中央変位の関係、図 - 10 および図 - 11 に両シリーズの破壊ひび割れ性状を示す。まず、SS シリーズ試験体であるが、鉄筋が非腐食である試験体 SS-0 は荷重が約 200kN の時点で斜め引張破壊を生じた。一方、腐食試験体においては、破壊モードは図 - 10 に示すように、W0 シリーズと同様、付着割裂破壊を示した。しかしながら、その耐力は、試験体 SS-10 では 236kN、試験体 SS-20 では 251kN であり、WS シリーズとは異なり鉄筋腐食によって、むしろ耐力は増加する結果となった。このことは後に詳述することとする。次に、主鉄筋を試験体端面において、プレートにより固定した SF シリーズでは、試験体 SF-0B において荷重が約 180kN の時点で破壊を生じた。プレート固定を施していない試験体 SS-0 の耐力は約 199kN であることから、非



(a) 試験体 SF-0B



(b) 試験体 SS-10

図 - 13 各領域の平均付着応力

腐食時において主鉄筋の抜出しの影響は無いといえる。一方、試験体 SF-0N では、図 - 9 に示すように、主鉄筋は降伏し、破壊は延性的な挙動を示した。また、その最大荷重は約 360kN であり、試験体 SF-0B に比べて約 180kN 大きく、せん断スパンでの付着除去により耐力が大幅に増加した。破壊ひび割れ性状に関しても試験体 SF-0N は他の試験体と異なりせん断スパンに斜めひび割れは発生しておらず、等曲げ区間において圧壊を生じた。

このように W0 シリーズと SS シリーズでは主鉄筋の腐食に伴う、せん断耐荷性能の変化は明らかに異なる傾向を示した。また、試験体 SF-0N と試験体 SF-0B の破壊性状の比較から、支点間の付着の有無がせん断耐荷性能に影響を及ぼすものと考えられ、次節で詳細に検討する。

#### 4.2 鉄筋のひずみ分布性状

図 - 12 に試験体 SF-0B および試験体 SS-10 の各荷重レベルにおけるひずみ分布性状を示す。横軸は試験体左端からの距離である。同図に示すように斜め引張破壊を生じた試験体 SF-0B のひずみ分布は、上に凸のおわん型形状を示した。また、破壊に至るまで定着領域におけるひずみはほとんど生じておらず、定着領域まで荷重伝達がなされていないことがわかる。一方で、試験体 SS-10 では荷重が約 150kN の時点において、支点間のひずみ勾配が緩やかとなり、荷重の増加にしたがい一様化した。さらに、支点間のひずみの一様化に伴い破壊側の定着領域におけるひずみが急激に増加しているが、これは主鉄筋とコンクリート間の付着応力の消失に起因している。

図 - 13 に試験体 SS-10 と試験体 SF-0B の破壊側のせん

断領域および定着領域における平均付着応力と荷重の関係を示す。なお、荷重は断面幅で除することにより単位幅当りの荷重とし、断面幅の影響を取り除いた。また、支点よりも載荷点寄りの部分も定着として寄与するため、ここでは端部から 450mm の領域を定着領域とし、残りをせん断領域とした。鉄筋に沿った各位置における付着応力 $\tau$ は、次式を用い算出した。

$$\tau = \frac{1}{\pi D} \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

ここで、 $D$ ：鉄筋径、 $P$ ：鉄筋力である。

鉄筋力勾配の算出方法は、計測した鉄筋ひずみから、対象とする計測点を含む近傍の 3 点を通る 2 次曲線を求め、対象位置でのひずみ勾配に鉄筋の弾性係数と断面積を乗ずるものとした。その際、腐食鉄筋の弾性係数は実測値とし、断面積および周長は、腐食鉄筋を円断面と仮定して対象点近傍の腐食率を用いて算出した。

まず、試験体 SF-0B においては、破壊直前までは荷重の増加と共にせん断領域の付着応力は緩やかな増加を示した。破壊直前において、せん断領域の付着応力は急激に増加したが、破壊に至るまでは付着応力の低下は小さかった。また、定着領域においては、破壊直前までに発生した付着応力はわずかである。破壊直前では定着領域の付着応力は急激な増加を示したものの、それによる荷重増加は小さい。試験体 SS-10 では、単位幅当りの荷重が約 600N/mm の時点でせん断領域の付着応力は最大値を示し、その後低下を示した。定着領域の付着応力は、せん断領域の付着応力が低下してから増加を示し、それに伴い荷重も増加した。また、定着領域で付着応力が発生した後に荷重の増加量は大きくなっており、定着領域で付着応力が発生した時点を境に、せん断耐荷機構が梁機構から、アーチ耐荷機構に移行したことが考えられる。

一般に RC 梁部材のせん断耐荷力は次式で示される。

$$Q = \frac{dT}{dx} z + \frac{dz}{dx} T \quad (2)$$

ここで、 $T$ ：鉄筋力、 $z$ ：モーメントアーム長である。

右辺第一項が梁機構によるせん断抵抗であり、図 - 13 に示すように付着応力は低下していることから判断すると梁機構からアーチ機構によって荷重を保持しているものと考えられる。すなわち、鉄筋腐食を生じた試験体のせん断耐荷メカニズムはせん断スパンの付着応力性状によって異なり、鉄筋腐食に伴ってせん断スパンの付着性能が低下し、スパン全長にわたり、鉄筋力が一般的な状態になると、断面内における平面保持が成立せず、アーチ耐荷機構によってせん断力に対して抵抗する。この場合、アーチ耐荷機構の形成は、定着性能に依存することとなり、試験体 SF-0N のように定着が十分に確保されていれば、強固なアーチリブが形成され、せん断耐荷

力は支点間に付着がある場合よりも大幅な増加を示す。一方、S0 シリーズのように定着が不十分な状態では、アーチ耐荷機構が形成される過程で、主鉄筋が抜け出し、非腐食試験体に比べて大幅に耐力の低下が生じる場合もある。したがって、鉄筋腐食を生じた RC 梁部材のせん断耐荷力予測は、主鉄筋とコンクリートの付着性能、特に定着性能に着目して評価を行わなければならない。

## 5. 結論

本研究は鉄筋腐食を生じた RC 梁部材のせん断耐荷性能に及ぼす鉄筋腐食の影響を評価したものである。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 鉄筋腐食を生じた RC 梁部材のせん断耐力は、せん断スパンの付着が低下した場合においても定着が十分に確保されれば、アーチ耐荷機構が形成され非腐食時よりも耐力が増加する場合がある。一方、定着不良が生じている場合においては、アーチ機構が形成される過程で鉄筋が抜け出し非腐食時よりも耐力は大幅な低下を示す。
- (2) 鉄筋腐食を生じた RC 梁部材のせん断耐荷力は、主鉄筋の平均腐食率では評価できず、鉄筋とコンクリートの付着応力性状、特に定着性能に基づいた耐力評価が必要であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 村上祐貴，大下英吉，鈴木修一，堤知明：鉄筋腐食した RC 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
- 2) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 71,2006
- 3) 松尾豊史，酒井理哉，松村卓郎，金津努：鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.15，No2，pp.69-77，2004.5
- 4) 角田 真彦，渡辺 健，三木 朋広，二羽 淳一郎：局所的な鉄筋腐食を有する RC はり部材のせん断耐荷性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No3，pp.1705-1710，2008
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書，2002
- 6) 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，Vol.17，No.1，pp.61-74，2006.1
- 7) 二羽淳一郎，山田一宇，横沢和夫，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第 325 号/V-5，pp167-176，1986