

# 論文 軸方向鉄筋の定着部またはスパン全体に腐食を有する RC はりの力学性状

森 誠<sup>\*1</sup>・松本 浩嗣<sup>\*2</sup>・二羽 淳一郎<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本研究では、定着部腐食を有する RC はりの力学性能を把握することを目的として、軸方向鉄筋全体または定着部に腐食を導入し、質量減少率を実験パラメータとした RC はりの載荷試験を行った。実験の結果、定着部を含み腐食した RC はりは、スパン内の腐食により斜めひび割れ発生以前に定着部に引抜き力が作用し、質量減少率が大きくなると定着破壊を呈し、耐荷力が減少することがわかった。一方、定着部のみに腐食を有する RC はりは、斜めひび割れ発生後に定着部に引抜き力が作用し、腐食により減少した引抜き耐力に達した時点で定着破壊が生じることで、耐荷力が減少することを確認した。

**キーワード:** 定着, 腐食, すべり, 定着破壊, 斜めひび割れ, アーチ機構, せん断

## 1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート(RC)構造物の供用期間が半世紀を迎えようとしており、劣化が顕在化した構造物が増加している。鉄筋腐食はRC構造物の劣化の代表例であり、断面欠損による強度減少のみならず、コンクリートとの付着力が低下することが知られている。鉄筋定着部に腐食が発生すると定着強度が減少すると考えられ、とりわけ定着部に大きな引抜き力が作用するせん断破壊時には、部材の耐荷力が大きく低下する危険性がある。

このような背景から、村上らは定着部の腐食が RC はりの力学性能に及ぼす影響を検討することを目的として、軸方向鉄筋の定着部およびスパン内に腐食を導入した RC はりの載荷試験を行っており、定着部の腐食により破壊モードが定着破壊型へと移行し、耐荷力が低下することを確認している<sup>1)</sup>。しかし、特にせん断破壊型の RC はりに対する検討は十分ではなく、腐食量と耐荷力との関係を見出すまでには至っていない。また、実構造物では部材全体に均一に腐食が発生することではなく、腐食領域が局所化するが、定着部のみに腐食が発生するケースに関しては検討されていない。

そこで本研究では、定着部腐食を有する RC はりの力学性能を把握することを目的として、腐食による質量減

少率を実験パラメータとし、軸方向鉄筋全体あるいは定着部に腐食を導入した RC はり供試体を作製し、載荷試験を実施した。

## 2. 試験概要

### 2.1 供試体概要

本実験では、鉄筋が全体的および局所的に腐食した構造物を模擬するため、軸方向鉄筋全体に腐食を導入した供試体(シリーズ 1)、および定着部のみに腐食を導入した供試体(シリーズ 2)を作製した。図-1 に各シリーズにおける RC はりの供試体側面図、表-1 に使用した鉄筋の力学特性、表-2 に供試体諸元を示す。なお、せん断補強鉄筋はシリーズ 2 のみに配置した。また、一方のせん断スパンで破壊を生じさせるため、もう一方のせん断スパンには十分な量のせん断補強鉄筋を配置した。図-2 に各シリーズの供試体断面図を示す。シリーズ 1 の供試体の側面、底面のかぶり厚はそれぞれ 34mm, 42mm, シリーズ 2 はそれぞれ 29.5mm, 37.5mm である。また、支点位置の鉄筋のすべり量を計測するため、鉄筋にねじ切り加工を施し、図-3 に示すアタッチメント器具を鉄筋とアルミ板をネジを介して固定し、支点部直上のコンクリート表面に設置した変位計をアルミ板に当てることで支点付近の鉄筋のすべり量を計測した。その際、アルミ

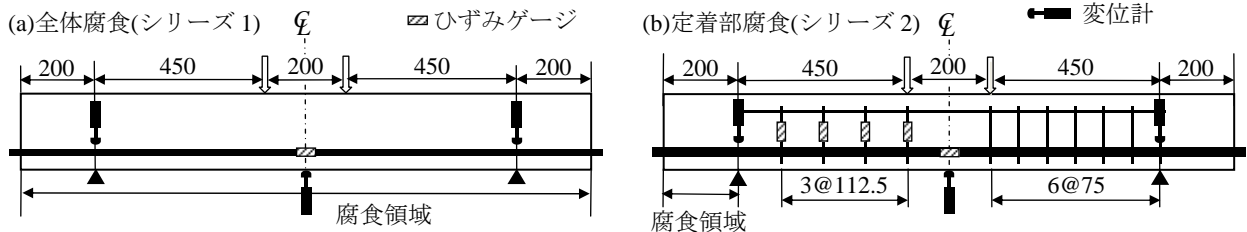


図-1 供試体側面図

単位: mm

\*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

\*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 鉄筋の力学特性

供試体 シリーズ		種類	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )
1	軸方向鉄筋	D16 SD390	465
2		D25 SD390	461
	せん断補強鉄筋	D6 SD295A	328

表-2 供試体諸元

項目	記号	単位	値	
			シリーズ1	シリーズ2
軸方向鉄筋の 総断面積	$A_s$	mm <sup>2</sup>	397.2	1013.4
引張鉄筋比	$p_t$	%	1.77	4.50
せん断補強鉄筋比	$r_w$	%	—	0.38
幅	$b_w$	mm	150	
せん断スパン	$a$	mm	450	
有効高さ	$d$	mm	150	
せん断スパン 有効高さ比	$a/d$	—	3.0	

表-3 コンクリートの示方配合

$G_{max}$ (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	AE
20	60	45	176	293	816	985	0.440

$G_{max}$ :粗骨材最大寸法, W/C:水セメント比, s/a:細骨材率  
W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材, AE:AE 減水剤

板を RC はり側面より外側に出すため、図中に示すように欠損部を設けた。なお、シリーズ1の健全供試体にはアタッチメント器具を設置していない。

定着長は両シリーズとも 200mm とした。表-3 に、供試体作製に用いたコンクリートの示方配合を示す。セメントには早強ポルトランドセメントを用いており、コンクリートの設計基準強度は 30MPa とした。

RC はりのせん断耐力  $V_u$  の算定には、式(1)~(3)を用いた<sup>2)</sup>。ただし、シリーズ1は、せん断補強鉄筋が配置されていないため、式(1)のみを用いて算定した。

$$V_c = 0.2 \cdot f_c^{1/3} \left( \frac{10^3}{d} \right)^{1/4} p_t^{1/3} (0.75 + 1.4 \frac{d}{a}) \cdot b_w d \quad (1)$$

$$V_s = A_w f_{wy} \frac{z}{s} \quad (2)$$

$$V_u = V_c + V_s \quad (3)$$

ここで、 $f_c$  はコンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $b_w$  は部材幅(mm)、 $d$  は有効高さ(mm)、 $p_t$  は引張鉄筋比(=100 $A_s/(b_w d)$ )(%)、 $A_s$  は軸方向鉄筋断面積(mm<sup>2</sup>)、 $A_w$  はせん断補強鉄筋断面積(mm<sup>2</sup>)、 $f_{wy}$  はせん断補強鉄筋の降伏強度(N/mm<sup>2</sup>)である。また、支承板幅は 50mm である。

健全時の RC はり供試体は、せん断余裕度(せん断耐力/曲げ耐力)がシリーズ1で 0.66、シリーズ2で 0.78 である。

## 2.2 荷重方法および計測項目

荷重には油圧式 2000kN 万能試験機を用い、静的 4 点

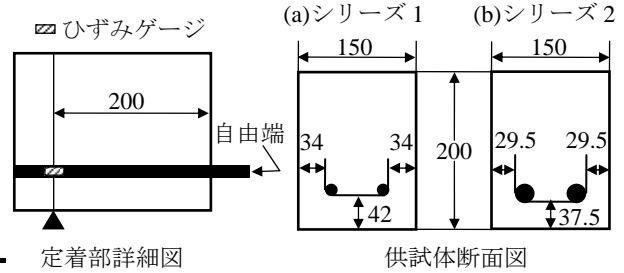


図-2 定着部の詳細図および各シリーズ供試体断面

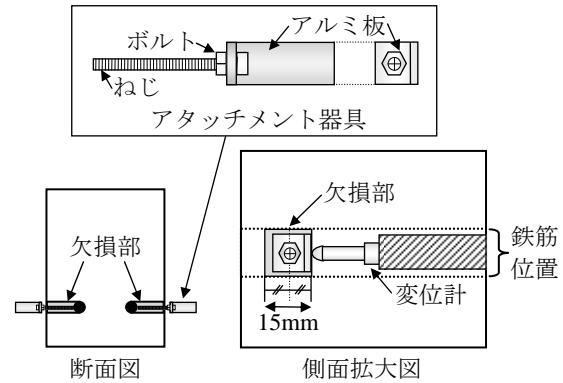


図-3 アタッチメント器具取付け方法

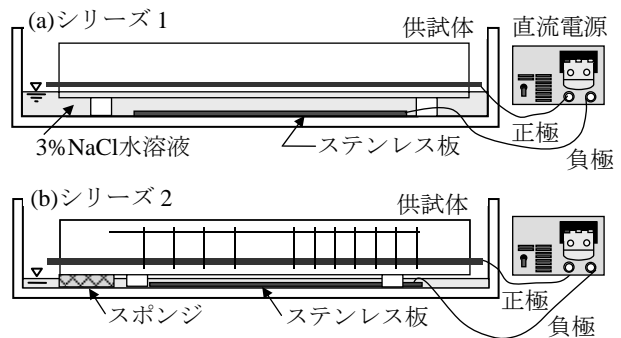


図-4 電食試験の概要図

曲げ荷重とした。支点と供試体の間には減摩パッドを挿入することで、支点の拘束による水平反力を除去した。荷重試験における計測項目は、供試体中央および支点部の変位、軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋のひずみ、支点位置および自由端のすべりである。ひずみゲージは、図-2 に示すように RC はりの支点位置に貼付した。また、ひずみゲージは健全供試体のみ貼付した。軸方向鉄筋の自由端のすべりは自由端に変位計を設置することにより計測した。

## 2.3 腐食促進方法

本研究では、軸方向鉄筋に腐食を生じさせるため、供試体打込み後 7 日目以降に電食試験を実施した。図-4 に電食試験の概要図を示す。電食試験では軸方向鉄筋を陽極側、ステンレス板を陰極側とした。シリーズ2では、軸方向鉄筋とせん断補強鉄筋の接触部にエポキシ樹脂を塗布し絶縁することでせん断補強鉄筋の腐食を防止した。また、電解質溶液として 3%NaCl 水溶液を使用し、シリ

ーズ1では供試体底面から2cm程度の深さまで浸漬させることで、軸方向鉄筋全体に腐食を導入し、シリーズ2では電解質溶液に浸したスポンジをはり供試体の定着部底面に接触させることで、定着部における局所的な腐食が生じるようにした。

### 2.4 実験ケース

表-4 に実験ケースを示す。実験パラメータは、両シリーズともに腐食領域の質量減少率である。腐食による鉄筋の質量減少率は、電食試験時の積算電流量を管理することで調整した。

表-4 実験ケース

シリーズ	供試体名	積算電流量 (A・H)	質量減少率 (%)
全体腐食 (シリーズ1)	W-0	0	0
	W-12	750	12.5
	W-16	925	16.4
	W-21	1100	21.2
定着部腐食 (シリーズ2)	A-0	0	0
	A-9	250	8.8
	A-13	350	13.1

## 3. 電食試験結果

### 3.1 腐食ひび割れ性状

図-5 に、各腐食供試体の腐食ひび割れ性状を示す。図中の数値は腐食ひび割れ幅を表している。なお、側面および底面のうち最も大きなひび割れ幅が確認された面のひび割れ性状のみを示している。この面をA側とし、反対の側面をB側とする。

電食試験終了後、供試体には、軸方向鉄筋に沿って側面および底面にひび割れが観察された。また、シリーズ2において、積算電流量の増加に伴い観察された腐食ひび割れ幅が大きくなっていることがわかる。シリーズ1においては、供試体 W-16 より W-12 の最大腐食ひび割れ幅の方が大きい、供試体 W-21 の最大腐食ひび割れ幅はさらに大きな値となった。

### 3.2 鉄筋腐食状況

軸方向鉄筋の腐食を定量的に評価するため、式(4)に示す質量減少率 C(%)を用いた。

$$C = \frac{\Delta w}{w} \times 100 \quad (4)$$

ここで、 $\Delta w$  は健全な鉄筋と腐食した鉄筋の単位長さあたりの質量差 (g/mm)、 $w$  は健全な鉄筋の単位長さあたりの質量 (g/mm) である。

全ての供試体において、載荷試験終了後、供試体を解体して軸方向鉄筋を取り出し、鉄筋の表面を清掃し付着した腐食生成物を除去した。その後、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」<sup>3)</sup>に従って、60°Cのクエン酸水素二アンモニウム水溶液に2日間浸漬した後、シリーズ1については鉄筋を50mmごとに分割し、各鉄筋片の長さや質量を測定した。同様に、シリーズ2については定着部(200mm)および支点からスパン中央方向へ100mmの鉄筋片の長さや質量を測定した。このようにして得られた単位長さあたりの質量を、健全な鉄筋と比較することで質量減少率を算出した。

図-6 にシリーズ1の供試体の質量減少率の分布を、表-5 に腐食領域全体、スパン内および定着部の質量減少率を示す。なお、図-5の支間中央からの距離と図-6

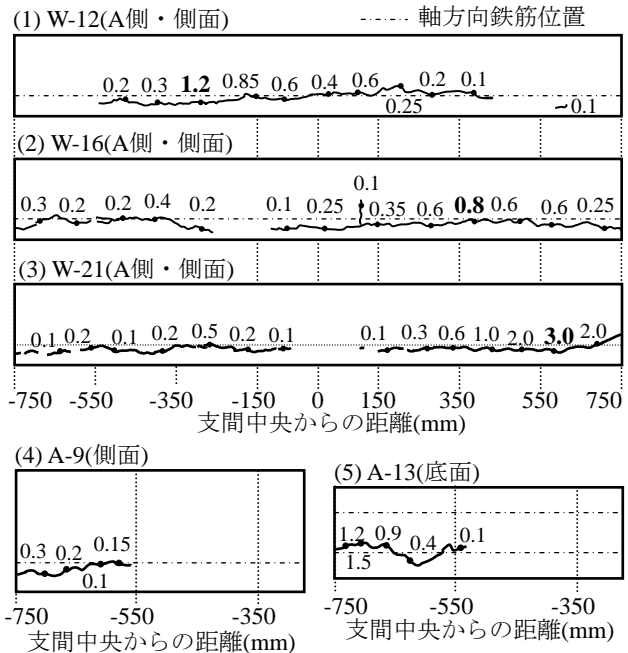


図-5 腐食ひび割れ性状

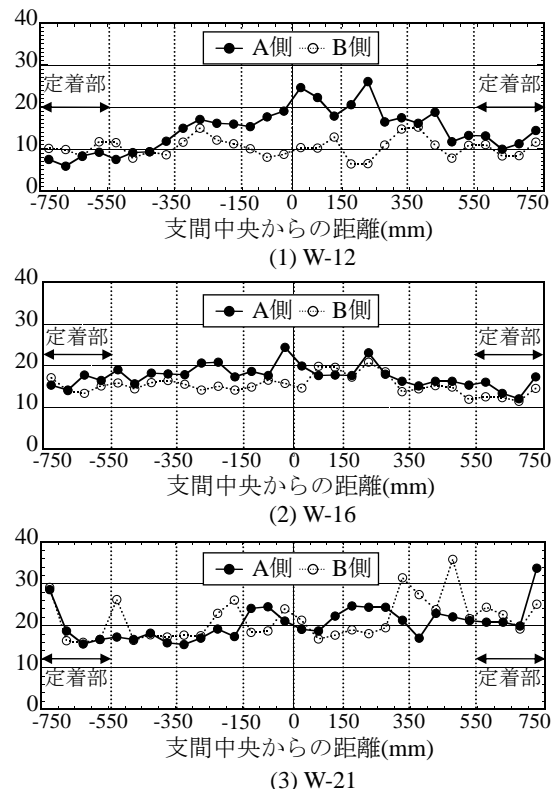


図-6 質量減少率分布(シリーズ1)

表-5 質量減少率, コンクリートの力学特性およびせん断耐力の算定値と実験値の比較

供試体名	質量減少率 $C$ (%)					コンクリートの力学特性		算定値			載荷試験結果	
	腐食領域全体	スパン内	定着部			$f'_c$	$f_t$	$P_{c-cal}$	$P_{s-cal}$	$P_{cal}$	破壊モード	$P_{exp}$
			平均	支間中央から +側	-側							
W-0			0			29.1	2.29	65.4	0	65.4	斜め引張破壊	71.7
W-12	12.5	13.4	9.9	11.0	8.8	41.2	2.91	73.4		73.4	定着破壊	98.5
W-16	16.4	17.0	14.6	13.7	15.4	32.9	2.64	68.1		68.1	定着破壊	75.7
W-21	21.2	20.9	21.4	23.0	19.7	37.7	3.51	71.3		71.3	定着破壊	24.0
A-0			0			30.4	2.91	90.7		48.5	139.2	斜め引張破壊
A-9	8.8	スパン中央方向へ		2.8	38.6	2.79	98.2	146.7	146.7		斜め引張破壊	173.8
A-13	13.1	100mm の $C$ (%)		3.1	38.1	3.00	97.8	146.3	146.3		定着破壊	134.5

$f'_c$ : 圧縮強度,  $f_t$ : 引張強度,  $P_{cal}$ : 健全時(質量減少率が0%の時の)の算定せん断引張耐力

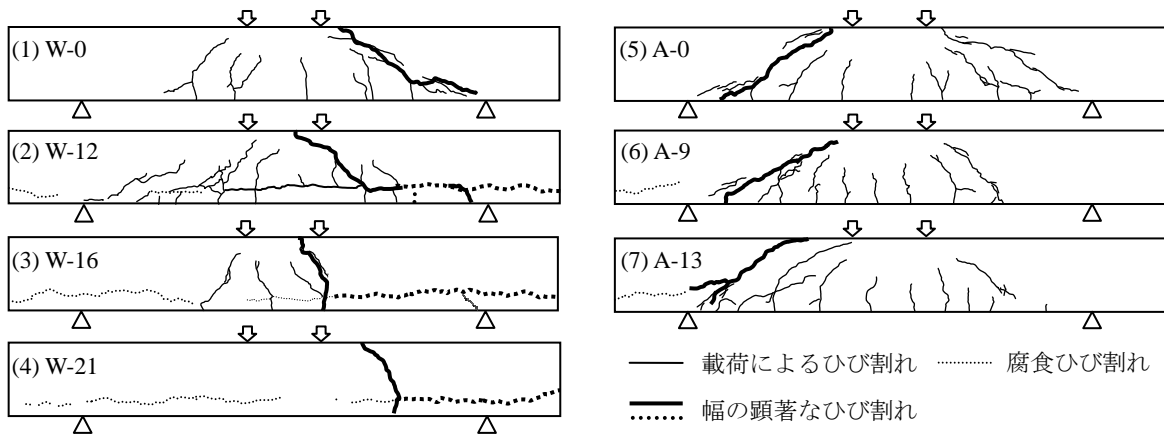


図-7 載荷ひび割れ性状

中のそれぞれは対応している。シリーズ1において、供試体 W-12 は特にスパン内において2本の軸方向鉄筋の質量減少率に差異が見られるが、供試体 W-16 および W-21 は概ね2本の軸方向鉄筋の質量減少率が等しくなった。また、W-21 は、スパンおよび定着部に目立った質量減少率の差は見られなかったが、W-12 はスパン内の方が質量減少率が大きいことがわかる。これは図-5 に示すように、供試体 W-12 はスパン内で腐食ひび割れの発生が集中しており、スパン内の軸方向鉄筋が容易に腐食したためと考えられる。一方、シリーズ2では、支点からスパン中央方向に100mmの範囲の軸方向鉄筋の質量減少率は供試体 A-9, A-13 でそれぞれ2.8%, 3.1%であり、さらにスパン中央寄りの軸方向鉄筋の質量減少率はほぼ0であった。すなわち、定着部のみに腐食が導入されたことが確認できた。

#### 4. 載荷試験結果

##### 4.1 破壊性状

表-5に、コンクリートの力学特性、RCはり供試体のせん断耐力の算定値と載荷試験結果を示す。また、図-7に最大荷重時のひび割れ性状を示す。健全供試体 W-0 および A-0 は想定通り支点から載荷点へ斜めひび割れが進展し、せん断引張破壊を呈した。供試体 W-12 は、健

全時と比較して37%荷重が増大した。これは、既往の研究<sup>4)</sup>で指摘されているように、軸方向鉄筋の腐食によりアーチ機構が形成されたためと考えられる。また、シリーズ1では、供試体 W-12 を含め全ての腐食供試体が定着破壊により終局した。これは、軸方向鉄筋の腐食により、引抜き耐力が低下した定着部に大きな引抜き力が作用したためと考えられる。さらに、質量減少率が大きくなるにしたがって、最大荷重が小さくなった。特に、質量減少率が20%を超える供試体 W-21 は等曲げスパン内に曲げひび割れが発生する前に定着破壊を呈し、健全時の3割程度の耐力に留まった。

一方、シリーズ2において、腐食供試体 A-9 は健全供試体と同様にせん断引張破壊を呈した。これは、質量減少率が9%程度では、鉄筋の付着強度があまり低下せず、引抜き耐力が十分であったためと考えられる。供試体 A-13 は定着破壊により終局し、最大荷重は健全時と比較して14%減少した。質量減少率が13%程度になると、定着部に作用する引抜き力が引抜き耐力を上回ることがわかる。

##### 4.2 荷重-変位関係

図-8に、全ての供試体の荷重-変位関係を示す。シリーズ1において、健全供試体 W-0 は62kNで載荷点と支点を結ぶ斜めひび割れが発生し、荷重が一度低下した

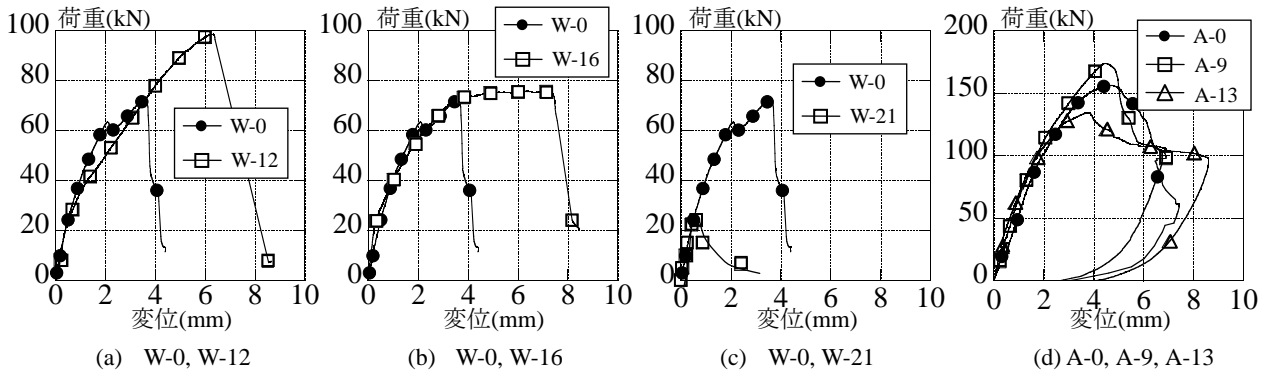


図-8 荷重－変位関係

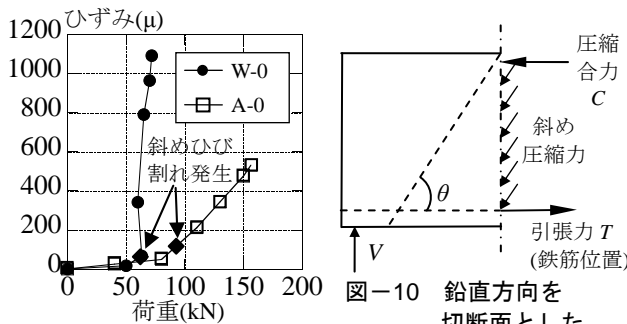


図-9 支点位置のひずみの変化

図-10 鉛直方向を切断面としたフリーボディー

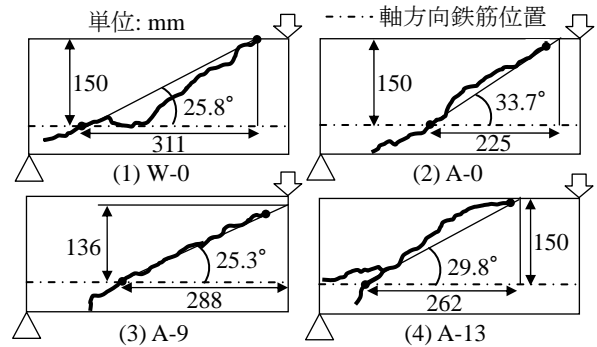


図-11 斜めひび割れ角度

が、その後荷重は再度増加し、71.7kNに達した時点で斜めひび割れが大きく拡幅し、荷重が急激に低下した。この際、スパン中央の位置に貼付したひずみゲージの値から、軸方向鉄筋は降伏していなかったことを確認している。供試体 W-16 では、健全時の最大荷重(71.7kN)を超えてから、荷重がほぼ一定のまま変位が増大しているのがわかる。これは、載荷により軸方向鉄筋がすべり、顕著に抜け出したためと考えられる。図-7 に示されるように、載荷に伴い供試体 W-16 の軸方向鉄筋に沿う腐食ひび割れの拡幅が確認された。腐食ひび割れの拡幅により軸方向鉄筋にすべりが生じたため、荷重の増加が停滞したものと推察される。さらに、破壊に至った後の荷重の急激な低下が供試体 W-12 および W-16 で認められた。特に、供試体 W-12 はピーク荷重時(98.5kN)から 7.2kNへ急激に荷重が減少しており、腐食供試体の中で最も大きな引抜き力が定着部の鉄筋に作用した結果、極めて脆性的な定着破壊を呈したものと考えられる。シリーズ2では、全ての供試体に対してせん断補強鉄筋を配置したため、斜めひび割れ発生後も荷重が増加した。その後、健全供試体 A-0 および A-9 は、せん断補強鉄筋が降伏し、斜め引張破壊を呈した。一方、供試体 A-13 は、せん断補強鉄筋の一部が降伏したが、軸方向鉄筋の定着破壊により終局した。

#### 4.3 定着部に作用する引抜き力の算定

図-9 に、健全供試体の軸方向鉄筋定着部の支点位置に貼付したひずみゲージにより計測したひずみを各荷重

表-6 引抜き力の算定値および実験値

供試体名	引抜き力(kN)	
	算定値	実験値
W-0	37.1	43.4
A-0	58.6	53.9
A-9	92.0	—
A-13	58.7	—

ごとに示す。

健全供試体 W-0 および A-0 は、斜めひび割れ発生前は、ほとんどひずみが生じていないが、斜めひび割れ発生後はひずみが増大しており、定着部に引抜き力が作用し始めていることがわかる。ここで、ピーク荷重時の支点位置における軸方向鉄筋のひずみの値から、定着部に作用する引抜き力を算定する。図-10 に示す鉛直方向を切断面としたフリーボディーを考え、斜めひび割れの角度を  $\theta$ 、せん断力を  $V$  とすると、モーメントの釣合いから、定着部に作用する引抜き力  $T$  は式(5)で算定できる。

$$T = \frac{V \cot \theta}{2} \quad (5)$$

図-11 に、供試体 W-0, A-0, A-9, A-13 で観察された斜めひび割れ角度を示す。ここで、斜めひび割れ角度は軸方向鉄筋位置と斜めひび割れが交差した点と斜めひび割れの端部を結んだ直線が部材軸となす角度と定義する。観察された斜めひび割れ角度を用いて算定した定着部に作用する軸方向鉄筋 1 本あたりの引抜き力(式(5)で算出される  $T$  を軸方向鉄筋の本数(=2)で除した値)を表-

6 に示す。なお、健全供試体については、支点位置のひずみの値から算出した引抜き力も示している。健全供試体の算定値と実験値を比較すると概ね近い値となっている。

算出結果から、腐食供試体 A-9 はピーク荷重時に 92.0kN 程度の引抜き力が定着部に作用したと想定されるが、定着破壊は生じていない。このことから、定着部の引抜き耐力は 92.0kN 以上であったと予想される。一方、腐食供試体 A-13 はピーク荷重時に 58.7kN 程度の引抜き力が定着部に作用したと想定され、定着破壊が生じた。定着部の引抜き耐力は 58.7kN 程度に低下していたと考えられる。このように、定着部に腐食を有する RC はりの破壊モードおよび耐荷力は定着強度の減少だけでなく、定着部に作用する引抜き力の影響を受けるものと考えられる。

#### 4.4 支点位置および自由端における軸方向鉄筋のすべり

支点付近の軸方向鉄筋のすべり量をアタッチメント器具を設置することにより計測した。図-12 に各供試体のすべり量の推移を示す。

健全供試体 A-0 のすべり量は斜めひび割れ発生(91kN)以前はほとんど生じていない。これは、4.3 で述べたように、斜めひび割れ発生以前は定着部の鉄筋に引抜き力がほとんど作用していなかったためである。また、斜めひび割れ発生後は、支点位置の鉄筋にすべりが生じ、ピーク荷重に近づくにつれて増加速度が大きくなった。また、供試体 A-13 については、斜めひび割れ発生後(89kN)、支点位置のすべりが急激に増加している。これは、定着部が腐食したことにより、健全供試体よりも付着強度が減少したためである。また、ピーク荷重を過ぎてからもすべりが増加し続けていることもわかる。

図-12 に自由端における軸方向鉄筋のすべり量を示す。なお、健全供試体 W-0 および A-0 はすべりがほとんど生じていなかったため、また腐食供試体 W-21 は変位計を設置しなかったため図示していない。

供試体 W-16 は W-12 と比較して、すべりが生じた後のすべりの増加が著しい。これは、供試体 W-12 よりも定着部に大きな腐食が導入されたことで、定着強度が減少したためと考えられる。供試体 A-9 および A-13 において、斜めひび割れ発生後にすべりが大きくなっており、斜めひび割れ発生後に定着部に引抜き力が作用し始めたためと考えられる。また、シリーズ 1 と同様、質量減少率の大きい供試体 A-13 の方が、すべり量の増加が大きいこともわかる。

#### 5. 結論

本研究では、質量減少率を実験パラメータとして、鉄筋定着部に腐食を導入した RC はりの載荷試験を実施し

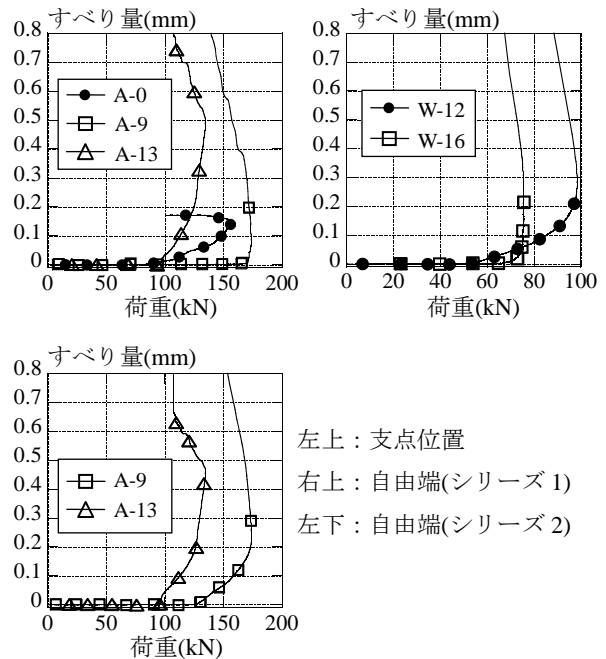


図-12 支点位置および自由端における軸方向鉄筋のすべり量の推移

た。以下に、本研究で得られた結論を述べる。

- 1) 定着部を含み腐食した RC はりは、スパン内の腐食により斜めひび割れ発生以前に定着部に引抜き力が作用する。質量減少率 12%程度まではアーチ機構によりせん断耐力が増加するが、質量減少率がさらに大きくなると定着破壊が先行し、耐荷力が大きく減少する。
- 2) 定着部のみに腐食を有する RC はりは、斜めひび割れ発生後に定着部に引抜き力が作用する。定着部の腐食量が大きいと斜めひび割れ発生後に定着破壊を呈し、耐荷力が減少する。
- 3) 定着部に腐食を有する RC 部材の破壊モードや耐荷力は、腐食による定着強度の減少だけでなく、腐食によって変化する定着部に作用する引抜き力の影響を受ける。

#### 参考文献

- 1) 村上祐貴ほか:鉄筋腐食により定着不良を生じた RC はり部材の耐荷性状評価, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.4, pp. 605-624, 2011.
- 2) 二羽淳一郎:コンクリート構造の基礎, 数理工学社, 2006.2.
- 3) 日本コンクリート工学会: JCI 規準集 (1977-2002), pp. 91-94, 2004.
- 4) 松尾豊史ほか: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, No.2, pp. 69-77, 2004.