

# 論文 定着部腐食を有する RC はりの力学性能と補修方法に関する研究

酒井 舞<sup>\*1</sup>・松本 浩嗣<sup>\*2</sup>・森 誠<sup>\*3</sup>・二羽 淳一郎<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究では、定着部を含み腐食した RC はりの断面修復工法による補修効果を検討するため、鉄筋の定着形状、腐食量、補修の有無、補修材の種類を実験パラメータとして、鉄筋定着部の引抜き試験および RC はりの載荷試験を行った。実験の結果、ビニロン繊維とシリカフュームを併用した補修材により、定着性能を健全時と同程度まで回復できた。特に、曲上げ形の定着部を有する RC はりにおいては、腐食により定着強度が著しく低下し、定着破壊を呈したが、補修により曲げ引張破壊に移行した。また、RC はりの各断面における圧縮合力の作用位置の高さ変化から、腐食や補修によるアーチ機構の形成段階を捉えることができた。  
**キーワード：**補修、断面修復工法、鉄筋腐食、定着部、RC はり、附着性能、アーチ機構

## 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) 構造物の多くがその設計耐用年数を迎えようとしており、鉄筋腐食、アルカリ骨材反応、凍害等の劣化問題が顕在化してきている。このような劣化した構造物に対しては、使用性能・美観の保持、再劣化の防止といった観点から補修が行われているが、補修した RC 構造物の構造性能に関する研究は十分になされていないのが現状である。

一方、RC 構造物が十分な構造性能を発揮するためには、定着の確保が重要であることが、既往の研究によって示されている<sup>1)</sup>。実構造物に目を向けると、RC はり部材における劣化はスパン内に限らず、定着部にも同様に起こり得る。しかし、定着部に損傷を有する部材の耐荷性能に関する研究は十分ではない。また、その補修方法を開発することも急務となっている。

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、またその補修方法を開発することを目的に、鉄筋の定着形状、腐食量、補修の有無、補

修材の種類をパラメータとして、腐食を有する鉄筋定着部の引抜き試験ならびに RC はりの載荷試験を行った。

## 2. 試験概要

### 2.1 供試体概要

本研究で行った実験は、2 つのシリーズで構成されている。シリーズ 1 は鉄筋定着部の引抜き試験、シリーズ 2 は RC はりの載荷試験である。図-1 に、鉄筋定着部の引抜き試験の概要図を示す。定着部の引抜き試験においては、実構造物における RC はり定着部を模擬するため、はり型の載荷試験治具を用いた。載荷点と支点の間に働く曲げモーメントにより、試験区間の鉄筋に引抜き力が作用する。図-2 に定着部供試体の詳細を、表-1 に定着部供試体の諸元を示す。定着形状は直線形および曲上げ形とした。また、どちらの定着形状に対しても供試体端から 50mm のアンボンド区間を設けており、定着長はそれぞれ 350mm, 447mm となっている。供試体の側面、下面のかぶり厚はそれぞれ 34mm, 42mm である。表-2 に、供試体作製に用いたコンクリートの配合を示す。セ

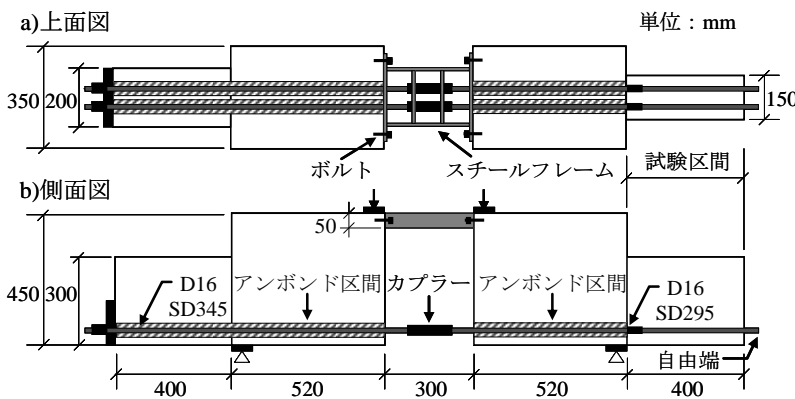


図-1 鉄筋定着部の引抜き試験の概要図

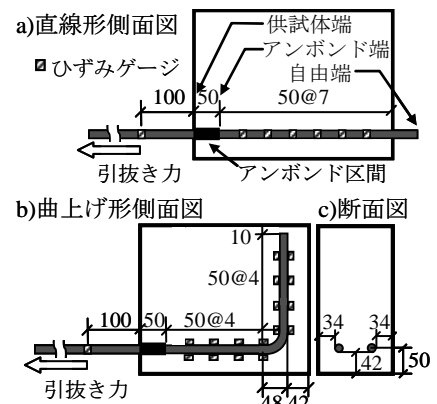


図-2 定着部供試体の詳細

\*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 (学生会員)  
 \*4 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)

メントには早強ポルトランドセメントを用いた。また、  
表-3に鉄筋の力学特性を示す。

図-3にRCはり供試体概要を、表-4にRCはり供試体の諸元を示す。なお、せん断補強筋はスパン内、定着部どちらにも配置されていない。定着形状は直線形および曲上げ形であり、定着長はそれぞれ 350mm, 507mm とした。曲上げ形の定着長は定着部供試体とは異なる。また、RCはり供試体の側面、下面のかぶり厚は定着部供試体と同一とし、それぞれ 34mm, 42mm とした。

RCはり供試体は健全な状態で、せん断余裕度（せん断耐力/曲げ破壊時のせん断耐力）が 0.60, 斜め引張余裕度（計算上のせん断圧縮耐力/計算上の斜め引張耐力）が 0.66 であり、斜め引張破壊を呈するように設計した。なお、斜め引張耐力  $V_c$  の算定には式(1)<sup>2)</sup>、せん断圧縮耐力  $V_{cc}$  の算定には式(2)<sup>3)</sup>を用い、両者のうち大きい方をせん断耐力とした。

$$V_c = 0.2 \cdot f'_c{}^{1/2} \left( \frac{10^3}{d} \right)^{1/4} p_t^{1/2} (0.75 + 1.4 \frac{d}{a}) \cdot b_w d \quad (1)$$

$$V_{cc} = \frac{0.244 f'_c{}^{2/3} b_w d (1 + 3.33 r/d) (1 + p_t^{1/2})}{1 + (a/d)^2} \quad (2)$$

ここで、 $f'_c$  はコンクリートの圧縮強度、 $d$  は有効高さ、 $p_t$  は引張鉄筋比、 $a$  はせん断スパン長、 $b_w$  ははりの幅、 $r$  は支承板の幅で 50mm とした。

## 2.2 荷重試験および計測項目

定着部の引抜き試験における計測項目は、鉄筋の軸方向ひずみ、自由端すべりである。ひずみゲージは、アンボンド端から約 50mm の間隔で貼付し、アンボンド区間にも 1箇所貼付した。なお、曲上げ形定着部供試体においては、鉄筋の曲げ内側および外側でひずみを計測した。

図-4に、RCはりの荷重試験方法を示す。計測項目は、荷重、試験体中央および支点部の変位、鉄筋の軸方向ひずみ、およびコンクリートのひずみである。コンクリートのひずみは、図-4に示すように、はり中央から 134, 200.5, 267, 333.5, 400mm の各断面において、はり上面から 10, 30, 50, 70, 90mm の位置にコンクリートゲージを貼付して計測した。

なお、定着部の引抜き試験は、アンボンド区間における鉄筋の降伏を確認し、試験を終了した。また、どちらの荷重試験においても、荷重には油圧式 2000kN 万能試験機を用いた。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。

## 2.3 腐食促進試験方法

本研究では、鉄筋に腐食を導入するため、材齢 6 日目以降から電食試験を実施した。図-5にRCはりの電食試験の概要図を示す。電食試験では腐食を導入する軸方

表-1 定着部供試体諸元

軸方向鉄筋断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張鉄筋比 (%)	幅 (mm)	有効高さ (mm)
397.2	1.06	150	250

表-2 コンクリートの示方配合

$G_{max}$ (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	AE
20	60	45	174	291	808	1005	0.436

$G_{max}$ : 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

表-3 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> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
定着部	D16 SD295	341	197
RCはり	D16 SD390	463	182

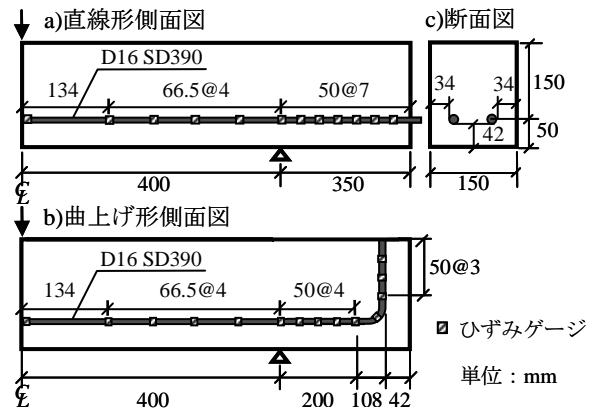


図-3 RCはりの供試体概要

表-4 RCはり供試体諸元

項目	記号	値
軸方向鉄筋断面積 (mm <sup>2</sup> )	$A_s$	397.2
引張鉄筋比 (%)	$p_t$	1.77
幅 (mm)	$b_w$	150
せん断スパン長 (mm)	$a$	400
有効高さ (mm)	$d$	150
せん断スパン有効高さ比	$a/d$	2.67

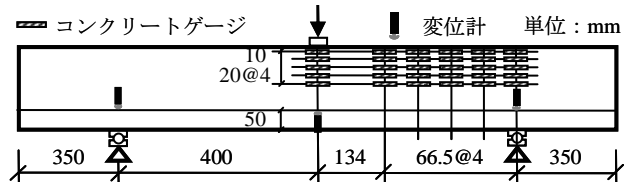


図-4 RCはりの荷重試験方法

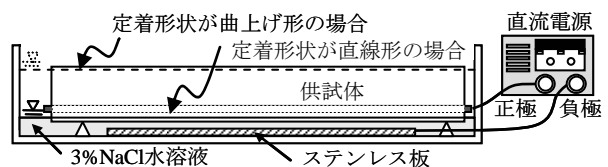


図-5 電食試験の概要図 (RCはり)

向鉄筋を陽極，ステンレス板を陰極として，電解質溶液に3%NaCl水溶液を用いた<sup>4)</sup>。なお，電解質溶液の水位は定着形状が直線の場合は供試体の底面付近，定着形状が曲上げ形の場合は供試体の上面付近とし，曲上げ部分の定着部鉄筋にも同様に腐食が導入されるようにした。鉄筋の質量減少率は，電食試験時の積算電流量を供試体ごとに管理することで調節した。

## 2.4 補修方法

本研究では，断面修復工法<sup>5)</sup>により補修を行った。一般的な断面修復工法の施工フローに基づき，著者らの既往の研究<sup>6)</sup>と同様，以下に示す手順で断面修復を行った。

### (1) 腐食領域のコンクリートの除去

実構造物における断面修復工法においては，かぶりコンクリートのはつり後，腐食生成物を取り除くため，腐食した鉄筋を完全に露出させる必要がある。本研究では，実際のはりの補修を模擬するため，鉄筋と母材コンクリートとの間に20mm以上の空気を確保した。

### (2) 腐食生成物の除去

露出した鉄筋を10%クエン酸水素二アンモニウムに常温で2日間浸漬することで，腐食生成物を除去した。

### (3) プライマー処理

母材と補修材の界面の接着性を確保するため，補修材による埋戻しの24時間前に，はつり面にプライマーを塗布した。

### (4) 埋戻し

電食試験終了後，埋戻しを行った。埋戻し材には，高強度モルタル(配合名:H)，および普通モルタルのセメント量の10%をシリカフュームに置換し，ビニロン繊維を1.5%混入したもの(SF)の2種類を用いた。なお，曲上げ形定着部供試体およびRCはり供試体の補修には全て配合SFを用いている。表-5に本研究で使用した埋戻し材の配合を，表-6にビニロン繊維の物性値を示す。なお，埋戻しは，供試体を上下逆に設置し，型枠を組み，補修材を流し込むことにより行った。

## 2.5 実験ケース

表-7に，実験ケースを示す。定着部の引抜き試験(シリーズ1)の実験パラメータは，定着形状，腐食量，補修の有無，補修材の種類であり，RCはりの載荷試験(シリーズ2)の実験パラメータは，定着形状，腐食量，補修の有無である。

## 3. 電食試験結果

### 3.1 供試体の腐食ひび割れ状況

図-6a)に，一例として，曲上げ形定着部を有するRCはり供試体HC8の腐食ひび割れ性状を示す。全ての定着

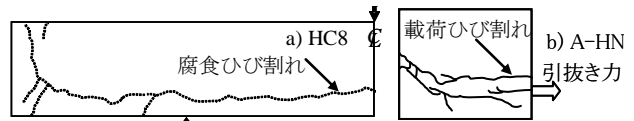
表-5 埋戻し材の配合

配合名	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	SF	S	PVA	SP
H	20	225	1011	112	1006	—	33.7
SF	40	274	616	68	1147	19.5	10.3

W/B: 水結合材比, SF: シリカフューム,  
PVA: ビニロン繊維, SP: 高性能減水剤

表-6 ビニロン繊維の物性値

直径 (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	繊維長 (mm)
0.66	1.3	860	23	30



a) 腐食ひび割れ (HC8) b) 載荷ひび割れ (A-HN)

図-6 ひび割れ図

部供試体，直線形および曲上げ形定着部を有するRCはりにおいて，軸方向鉄筋に沿ったひび割れが観察された。

### 3.2 鉄筋腐食状況

鉄筋の腐食を定量的に評価するため，式(3)に示す質量減少率C(%)を用いた<sup>4)</sup>。

$$C = \frac{\Delta w}{w} \times 100 \quad (3)$$

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。

各供試体における鉄筋の質量減少率を算出するため，載荷試験終了後，供試体を解体して鉄筋を取り出した。表面に付着した腐食生成物の除去は，著者らの既往の研究<sup>6)</sup>と同様，以下に示す手順で行った。

腐食供試体については，鉄筋を取り出した後，一次処理として，取り出した鉄筋の表面をブラシで清掃し，その後，二次処理としてJCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に則って<sup>7)</sup>，60℃のクエン酸水素二アンモニウムに2日間浸漬した。

補修供試体については，2.4(2)の処理により腐食生成物は既に除去されているため，供試体から鉄筋を取り出した後は，鉄筋表面に付着したモルタルを除去する以外の処理は行っていない。

これらの処理を行った後，鉄筋を50mm間隔で分割し，各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。表-7に，各供試体の試験区間全体における質量減少率の平均値を示す。

表-7 実験ケース、材料の力学特性および載荷試験結果

シリーズ	供試体名	実験パラメータ			材料の力学特性		載荷試験結果	
		定着形状	質量減少率 (%)	補修材の種類	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		破壊モード	最大引抜き力または最大荷重 (kN)
					コンクリート	モルタル		
定着部供試体 (シリーズ 1)	A-SN	直線	0		35.5		鉄筋降伏	67.7
	A-SC7		6.8		33.4		鉄筋降伏	67.7
	A-SC9		8.8		32.1		付着割裂	32.2
	A-SC10		10.2		32.1		付着割裂	34.0
	A-SC6H		5.8	H	13.4	107.1	鉄筋降伏	67.7
	A-SC14SF		13.9	SF	36.2	39.0	鉄筋降伏	67.7
	A-HN	曲上げ	0		31.8		付着割裂	56.6
	A-HC14		14.0		37.3		付着割裂	45.1
	A-HC14SF		—*	SF	33.0	48.6	鉄筋降伏	67.7
RC はり供試体 (シリーズ 2)	SN	直線	0		32.4		斜め引張	75.3
	SC5		5.3		37.2		せん断圧縮	81.9
	SC6SF		6.0	SF	35.4	33.1	曲げ引張	123.3
	HC8	曲上げ	8.0	—	41.1	—	定着	110.2
	HC8SF		7.6	SF	44.4	45.7	定着	107.0

\*: A-HC14SF の質量減少率は不明であったが、A-HC14 と同じ積算電流量を与えているため、同程度の腐食量であると考えられる。

#### 4. 鉄筋定着部の引抜き試験結果 (シリーズ 1)

##### 4.1 最大引抜き力

表-7 に、コンクリートおよび補修モルタルの力学特性、および載荷試験結果を示す。なお、以降の議論では、アンボンド区間に貼付したひずみゲージの測定値から鉄筋の引抜き力を算出している。すなわち、ひずみが降伏ひずみよりも小さい場合にはひずみに弾性係数および断面積を乗じた値、ひずみが降伏ひずみよりも大きい場合には降伏強度に断面積を乗じた値を引抜き力とした。

直線形腐食供試体 A-SC7 は鉄筋降伏により終局したが、A-SC9、A-SC10 の供試体は付着割裂破壊を呈し、最大引抜き荷重は健全供試体 A-SN の半分程度まで低下した。すなわち、質量減少率 8%前後で、定着強度が急激に低下することが分かる。一方、直線形補修供試体 A-SC14SF は鉄筋降伏により終局した。14%程度の腐食を導入したことで、定着強度は健全時の半分以下に低下したと考えられるが、補修により定着強度が健全時と同じ程度まで回復したことがわかる。

曲上げ形健全供試体 A-HN においては、図-6b)に示すような付着割裂破壊を呈した。直線形よりも定着長が長いにもかかわらず、曲上げ形の方が定着強度が小さくなった。また、曲上げ形腐食供試体 A-HC14 は、腐食の導入により、最大引抜き荷重がさらに低下した。しかし、同程度の腐食量を有すると考えられる A-HC14SF は鉄筋降伏により終局に至っており、断面修復により定着強度が健全時を上回るレベルまで回復したことがわかる。

##### 4.2 ひずみ分布

図-7 に、曲上げ形定着部供試体 A-HN、A-HC14SF におけるひずみ分布の推移を示す。なお、ここでは、引抜き

荷重 16kN 毎の曲げ内側、曲げ内側および外側の平均のひずみ分布の推移を示している。

曲上げ形健全供試体 A-HN においては、曲げ加工開始点近傍で、曲げ内側のひずみが急激に増大していることがわかる。曲げ加工部が元の形状の直線形に戻ろうとした結果、曲げ内側に大きな引張りひずみが生じたと考えられる<sup>8)</sup>。

##### 4.3 付着応力分布

付着応力  $\tau$  (N/mm<sup>2</sup>) を、式(4)、式(5)で算出した。

$$\tau(x) = \frac{d\varepsilon(x)}{dx} \cdot \frac{ED}{4} \quad (4)$$

$$\varepsilon(x) = a(350 - x)^b \quad (5)$$

ここで、 $x$  はアンボンド端からの距離 (mm)、 $\varepsilon(x)$  は計測したひずみの近似式、 $a$  および  $b$  は最小二乗法で決まる定数、 $E$  は健全時の軸方向鉄筋の弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)、 $D$  は 3.2 節で得られた各区間の質量減少率をもとに算出した腐食後の鉄筋径 (mm) である。図-8 に、各供試体の 16kN 毎の付着応力分布の推移を示す。

図-8 に示すように、シリカフェームおよびビニロン繊維を混入したモルタルで補修した供試体 A-SC14SF は、高強度モルタルにより補修した供試体 A-SC6H と同程度まで付着応力が増大した。

##### 4.4 すべり量の推移

直線形定着鉄筋のすべり量  $S(x)$  を、式(6)で算出した。

$$S(x) = \int_x^{350} \varepsilon(x) dx + S_{350} \quad (6)$$

ここで、 $S_{350}$  は自由端でのすべり (mm) である。図-9 に、アンボンド端からの距離が 50mm の位置における

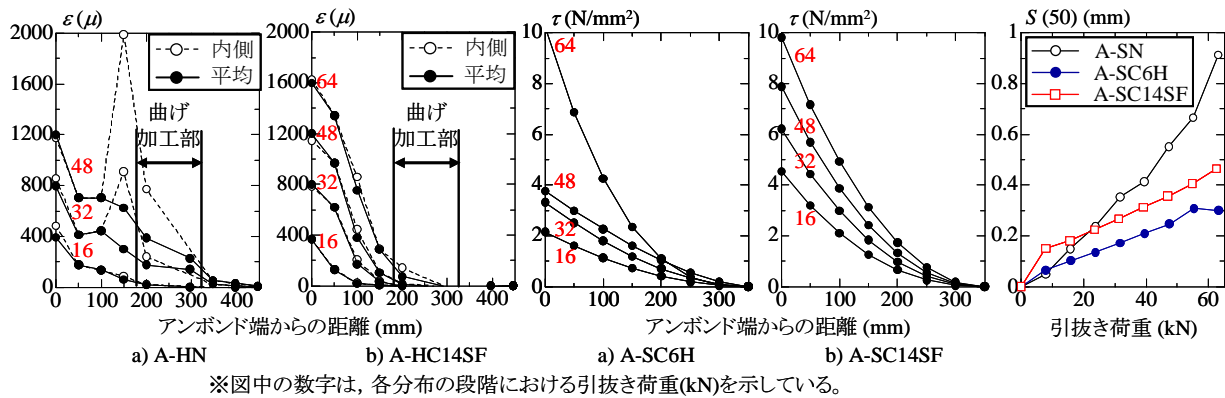


図-7 ひずみ分布(シリーズ1, 曲上げ形) 図-8 付着応力分布(シリーズ1, 直線形補修) 図-9 すべり量の推移

すべり量  $S(50)$  の推移を示す。

供試体 A-SC14SF においては、すべり量が鉄筋降伏時において、健全供試体 A-SN の半分程度まで抑えられた。高強度モルタルにより補修した供試体 A-SC6H のすべり量が最も小さいが、実構造物においては、収縮によるひび割れの発生が懸念される。これに対して、ビニロン繊維およびシリカフュームを混入したモルタル (SF) による補修は最も実用的と考えられることから、RC はりの補修 (シリーズ2) には配合 SF を用いることとした。

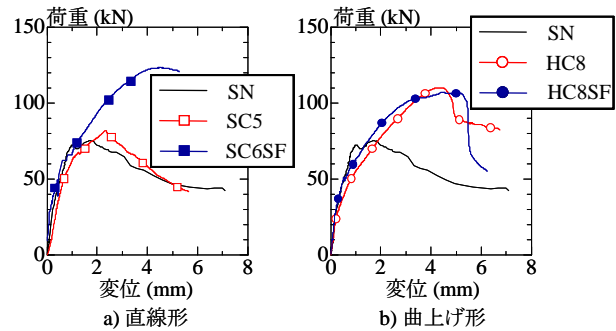


図-10 荷重-変位関係

## 5. RC はりの載荷試験結果 (シリーズ2)

### 5.1 破壊モードおよび最大荷重

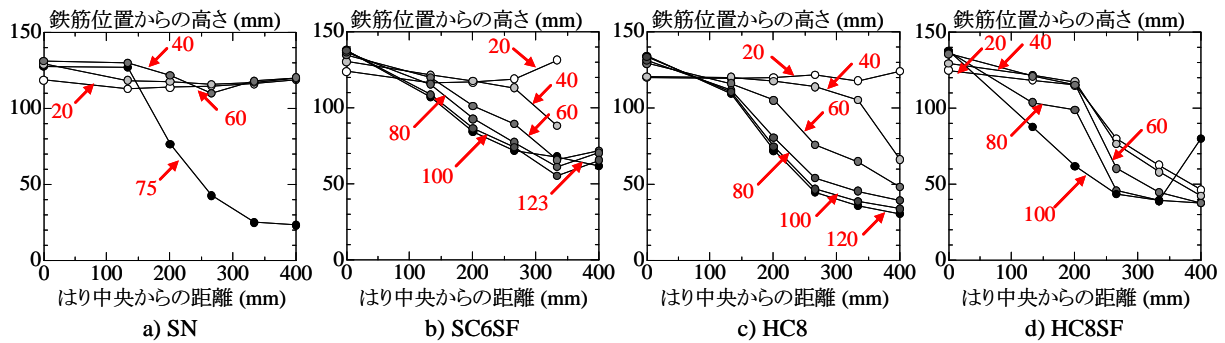
表-7 に RC はりのコンクリートおよび補修モルタルの力学特性と載荷試験結果, 図-10 に荷重-変位関係を示す。斜め引張破壊を呈するように設計した RC はりに腐食を導入した直線形供試体 SC5 においては、破壊モードがせん断圧縮型に移行し、せん断耐力が 9% 程度増大した。これは、軸方向鉄筋の腐食によりアーチ機構が形成されたためと考えられる<sup>4)</sup>。また、直線形補修供試体 SC6SF においては、破壊モードが曲げ引張に移行し、アーチ機構が形成され、せん断圧縮耐力が少なくとも 60% 以上増大したことが分かる。一方、曲上げ形定着部を有する RC はりに腐食を導入した供試体 HC8 においては、定着破壊を呈した。これは、軸方向鉄筋の腐食により、せん断耐力が増大したものの、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。しかし、曲上げ形補修供試体 HC8SF は鉄筋降伏後に、荷重一定のまま変位が増大し、その後定着破壊を呈した。腐食供試体 HC8 は、荷重一定のまま変位が増大するような現象は確認されなかったことから、鉄筋降伏前に定着破壊したと考えられる。以上より、補修により鉄筋の定着強度が向上し、鉄筋の降伏を生じさせることができたものの、降伏後の定着性状に難があるものと考えられる。これを解決するためには、今後、鉄筋降伏後の定着性状に関する検討が必要である。

### 5.2 圧縮合力の作用位置

貼付したコンクリートゲージの測定値から圧縮合力およびその作用位置を算出した。圧縮合力は、測定で得られたひずみ分布を、各測定区間で台形近似してはり上面からひずみが 0 となる位置まで積分することで算出した。なお、はり上面から 90mm の位置でもひずみが 0 より大きい場合には、はり上面から 70, 90mm の位置におけるひずみの直線近似により、斜めひび割れの通過位置におけるひずみを算出し、ひび割れの通過位置までを積分した。また、はり上面におけるひずみは、はり上面から 10, 30mm の位置におけるひずみの直線近似により算出した。

図-11 に、各断面における圧縮合力の作用位置の推移を示す。健全供試体 SN においては、荷重初期では、各断面における圧縮合力の作用位置はほぼ同じ高さである。しかし、斜めひび割れ発生(70kN)後に、圧縮合力の作用位置が、支点近傍で急激に低下している。すなわち、圧縮力の流れが斜めひび割れ発生前後で変化していることがわかる。一方、曲上げ形腐食供試体 HC8 においては、斜めひび割れ発生(72kN)前から圧縮合力の作用位置が支点近傍で徐々に低下している。これは軸方向鉄筋に沿った腐食ひび割れの存在により、軸方向鉄筋とコンクリートの付着力が低下し、アーチ機構が形成されたためと考えられる。直線形腐食供試体 SC5 においては、ひずみの計測を行っていないが、曲上げ形と同様にアーチ機構が形成されることで、せん断耐力が増大したと考えられる。

直線形補修供試体 SC6SF においては、目視で補修材-



※図中の数字は、各圧縮合力作用位置分布の段階の荷重(kN)を示している。

図-11 RC はりの各断面における圧縮合力作用位置の推移

母材コンクリート間の界面にひび割れの発生を確認した52kN前後で、支点近傍において圧縮合力の作用位置が低下している。これは、荷重に伴い発生した界面のひび割れにより、界面においてすべりが生じ、補修材と軸方向鉄筋が一体となって引張材となったことで、腐食時と同様にアーチ機構が形成されたためと考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、定着形状、腐食量、補修の有無、補修材の種類を実験パラメータとして、RC はりの載荷試験およびRC はりの定着部を模擬した供試体のはり型引抜き載荷試験を実施した。

以下に、本研究で得られた結論を述べる。

- 1) 埋込み長さ 350mm の直線形定着部供試体は鉄筋降伏により終局したが、埋込み長さ 447mm の曲上げ形定着部供試体は付着割裂破壊を呈した。
- 2) 腐食による質量減少率 7%の直線形定着部供試体は鉄筋降伏により終局したが、質量減少率 9, 10%のものは、急激に定着強度が低下し、付着割裂破壊を呈した。
- 3) シリカフュームおよびビニロン繊維を混入した補修材を用いて、腐食による質量減少率 14%の鉄筋定着部を断面修復したところ、付着応力が高強度モルタルで補修したものと同程度まで回復し、すべり量を健全供試体の半分程度まで抑えられた。
- 4) 腐食による質量減少率 14%の曲上げ形定着部供試体は付着割裂破壊を呈したが、補修を施した供試体は鉄筋降伏により終局し、定着強度が回復した。
- 5) 斜め引張破壊を呈するように設計した直線形定着部を有する RC はりに腐食による質量減少率 5%を導入したところ、破壊モードがせん断圧縮に移行し、せん断耐力が 9%程度増大した。また、補修を施した供試体はせん断耐力がさらに増大し、破壊モードが曲げ引張型に移行した。
- 6) 曲上げ形定着部を有する RC はりに腐食による質量減少率 8%を導入したところ、アーチ機構が形成さ

れ、せん断耐力が増大したものの、定着破壊が生じた。一方、補修した供試体は定着強度が改善されたことにより、鉄筋降伏後に定着破壊を呈した。

- 7) コンクリートの圧縮部におけるひずみの測定値から各断面における圧縮合力の作用位置を算出した。その結果、腐食および補修によるアーチ機構の形成段階の違いを捉えることができた。

## 謝辞

本研究で使用した軸方向鉄筋は東京鐵鋼株式会社より、提供して頂きました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 阿部仁ほか：鉄筋の定着不良を有する RC 梁のせん断破壊性状の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27, No. 2, pp. 337-342, 2005.7.
- 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) 二羽淳一郎：FEM 解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式，第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，pp. 119-126, 1983.10.
- 4) 角田真彦ほか：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, No. 3, pp. 1705-1710, 2008.7.
- 5) 土木学会：表面保護工法 設計施工指針（案）〔工種別マニュアル編〕，コンクリートライブラリー119，pp. 189-266, 土木学会，2005.4.
- 6) 酒井舞ほか：断面修復工法により補修した腐食を有する鉄筋定着部の力学性能，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33, No. 2, pp. 601-606, 2011.7.
- 7) 日本コンクリート工学会：JCI 規準集（1977-2002），pp. 91-94, 2004.
- 8) 島弘，川竹裕哉：フック定着部における鉄筋の軸外変形とすべり，土木学会論文集 E，Vol. 65, No. 3, pp. 364-377, 2009.8.