論文 軸方向鉄筋が局部的に腐食した RC 棒部材のせん断破壊性状

角田 真彦^{*1}·渡辺 健^{*2}·二羽 淳一郎^{*3}

要旨:RC部材のせん断破壊性状に与える局部的な鉄筋腐食の影響を明らかにすることを目的として,部材支 間内における軸方向鉄筋の腐食位置・腐食量が異なるRCはりの単調載荷実験ならびにRC柱部材の正負交番 載荷実験を行った。また,RCはりを対象とした数値解析を行った。RCはりの載荷実験ならびに数値解析結 果から,局部腐食を有するRCはりでは,アーチリブを形成する主圧縮応力度ならびにそれが卓越する領域 は,腐食生成位置の影響を受けることが明らかとなった。また,正負交番載荷実験の結果,局部腐食を有す るRC柱のせん断力は,せん断力を受持つコンクリートの貢献分が増加すること確認した。 キーワード:RCはり,RC柱,正負交番載荷,局部鉄筋腐食,せん断耐荷機構,せん断耐荷力

1. はじめに

海洋環境下の鉄筋コンクリート(以下 RC)構造物で は、塩化物イオンが容易にコンクリート中に浸透するた め、塩害による早期劣化が問題となっている。塩害によ り鉄筋が腐食すると、鉄筋の断面欠損ならびに膨張圧に よりかぶりコンクリートにひび割れが生じるため、RC 構造物の構造性能に影響を与える。これに対し、より合 理的な補修対策を適用するためには、材料劣化した RC 部材に残存する耐荷性能を把握することが重要となる。

鉄筋腐食劣化機構の特徴の一つとして,RC 部材内の 鉄筋の一部分が先行して腐食すること,すなわち鉄筋腐 食の局部化が挙げられる。このため,RC 部材の構造性 能を検討するうえでは,腐食量の経時変化に加えて腐食 生成位置の影響を明らかにする必要がある。著者らは, 腐食位置の異なる RC はり部材の載荷実験を実施するこ とで,腐食生成位置により RC はり部材のせん断耐荷力 が異なることを確認している¹⁾。しかしながら,そのメ カニズムに関して,さらなる検討の余地があった。

そこで本研究では,RC 部材のせん断破壊性状に及ぼ す軸方向鉄筋の局部的な鉄筋腐食の影響を明らかにす ることを目的として、軸方向鉄筋が局部的に腐食したRC はり部材の静的一方向載荷実験ならびにRC 柱部材の正 負交番載荷実験を行った。また,RC はり供試体を対象 として有限要素法を利用した数値解析を実施した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表 - 1 に, RC はり供試体の諸元,図-1 に, RC はり 供試体ならびに載荷方法を示す。また,図-2 に, RC 柱 供試体ならびに載荷方法,表-2 に, RC 柱供試体の諸元 を示す。供試体の設計段階では,健全な状態でのせん断

*1 東京工業大学大学院	理工学研究科土木工学専攻(正義	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	Ph.D.	(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)

余裕度(RC部材のせん断耐荷力/曲げ破壊時のせん断力) は,RCはりで0.72,RC柱で0.68である。RC部材のせ ん断耐荷力 V_u算定には,式(1)~(3)を使用した²⁾。

$$V_u = V_c + V_s \tag{1}$$

$$V_{c} = 0.2 \cdot f_{c}^{'3} (10^{3}/d)^{4} p_{w^{3}}(0.75 + 1.4d/a) \cdot b_{w}d \quad (2)$$
$$V_{s} = A_{w} f_{wy}(z/s) \quad (3)$$

ここで ,f_w: せん断補強鉄筋の降伏強度 ,z=(7d)/8 である。

定着部の破壊ならびに軸方向鉄筋の抜出しを防止す るために,軸方向鉄筋は,端部を直角に折り曲げること で,定着を確保した。

2.2 実験ケース

表 - 3 に,実験を行った供試体を示す。パラメータは, 軸方向鉄筋の腐食生成位置ならびに腐食領域の最大腐 食量とした。腐食鉄筋の質量減少率の最大値が同等とな るように,電食試験時の積算電流量を供試体ごとに管理 した。なお,表 - 3 の腐食生成位置とは,RC はりでは,

表 - 1 RC はり供試体の諸元



支間中央から電食区間中央部までの距離を表している。 一方, RC 柱では,柱基部から電食区間中央部までの距 離を表している。

2.3 腐食促進試験方法

写真-1 に,電食試験の様子を示す。供試体の軸方向 鉄筋に腐食を生じさせるため,打設後材齢7日目から電 食試験を行った。組立鉄筋とせん断補強鉄筋の腐食を防 止するために,これらの鉄筋に対しては,軸方向鉄筋と の接触部をエポキシ塗装した。また,電食試験時に, 3%NaCl 水溶液に浸したスポンジをはり供試体底部およ び柱供試体載荷面の一部に接触させることで,軸方向鉄筋 の一部の領域における局部的な腐食が生じるようにした。 2.4 載荷方法ならびに測定項目

RC はりの載荷には,油圧式 2000kN 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,拘 束による支点の水平反力を除去した。

RC 柱の載荷には,油圧式 200kN 水平サーボアクチュ エータを用い,変位制御による静的正負交番載荷試験を 行った。載荷条件は,同一変位での載荷繰返し回数を 3 回とし,変位を0.5mm ごとに増加させた。軸方向鉄筋の 降伏の有無を確認するため,柱とフーチングの継目部に おける軸方向鉄筋のひずみを計測した。同様に,せん断 スパン内に配置したせん断補強鉄筋の断面高さ方向の 中央部のひずみを測定した。

3. 腐食試験結果

3.1 供試体の腐食ひび割れ状況

写真 - 2 に, 錆汁の漏出の様子を示す。また,図-3 には,一例として,RC柱 C-10-300の腐食ひび割れ性状 を示す。なお,図-3の図中の数値はひび割れ幅を表し ている。電食試験終了後,供試体には,側面に軸方向鉄 筋に沿うひび割れ,また,底面に電食区間中央部におい ては軸直角方向のひび割れが観察された。積算電流量の 増加に伴い錆汁の漏出量が増え,RCはりB-20-287.5な らびに B-20-400 では吹き錆ならびに一部のかぶりコン クリートに剥離がみられた。

3.2 鉄筋腐食状況

軸方向鉄筋の腐食量の評価には,質量減少率を使用した。ここで,質量減少率とは,健全な鉄筋片に対する腐 食鉄筋片の質量減少量の質量比を表す指標である。質量 減少率の測定は,筆者らの研究に示す通りである¹⁾。図 -4 ならびに図-5 に,各供試体の2本の軸方向鉄筋に おける50mm間隔の平均質量減少率の分布を示す。なお, 図-4 の左右の質量減少率は図-3 に対応する。局部的 な腐食を与えた供試体では,軸方向に沿って軸方向鉄筋 の質量減少率に偏りが確認できる。また,これらの供試 体は,電食区間の中央部において質量減少率が最大値を示



図 - 2 RC 柱供試体ならびに載荷方法 表 - 2 RC 柱供試体の諸元

項目	記号	単位	値		
軸方向鉄筋断面積	A _s	mm ²	1013.4		
軸方向鉄筋比	p_w		3.38%		
幅	b_w	mm	150		
せん断スパン長	а	mm	600		
有効高さ	d	mm	200		
せん断スパン有効高さ比	a/d		3.00		
せん断補強鉄筋間隔	S	mm	200		
せん断補強鉄筋比	r_w		0.21%		

表 - 3 供試体シリーズ

供試体名 [*]	部材	最大質量 減少率[%]	腐食生成 位置[mm]	
B-N		0		
B-10-0		9.8	0	
B-10-287.5	RC	12.4	287.5	
B-10-400	はり	13.9	400.0	
B-20-287.5		21.4	287.5	
B-20-400		20.7	400.0	
C-N	RC	0		
C-10-300	柱	8.8	300.0	

*供試体表記方法:[部材]-[腐食量]-[腐食位置]



写真 - 1 電食試験の様子 写真 - 2 錆汁の漏出 した。すべての供試体で,2本の鉄筋の質量減少率には差 違がみられたが、軸方向に沿う質量減少率の分布は同様の 傾向を示した。

4. RC はりの載荷実験結果ならびに数値解析

4.1 RC はりの載荷実験結果ならびに考察

表 - 4 に,コンクリートと軸方向鉄筋の材料特性ならび に RC はりの載荷実験結果を示す。なお,載荷実験時のコ ンクリート圧縮強度にばらつきがみられたため,式(2)に 従い,V_uを断面積 b_xd で除すことにより公称せん断強度 を求め,さらに f'_c¹³で除し補正されたせん断強度 v を用 いてせん断耐荷力を検討した。B-20-400 を除く全ての供 試体で,局部腐食を有する RC はりのせん断耐荷力は B-N のそれと同等以上となった。せん断スパン中央部で腐食を 有する B-10-287.5, B-20-287.5 はせん断耐荷力が増加した。

図 - 6 に,載荷実験後の供試体ひび割れ図を示す。載 荷実験中,腐食ひび割れにより載荷によるひび割れが誘 発されて発生・進展する特徴がみられた。特に,支点部 付近に腐食を有する B-10-400 および B-20-400 では,荷 重 50kN 程度において腐食ひび割れから斜めひび割れが 急激に進展し,一時的に荷重が低下した。その後,この 斜めひび割れは,荷重の増加とともに拡幅した。

4.2 RC はりの数値解析

(1) 数値解析の概要

本研究で実施した RC はりの載荷実験に対して,2次 元有限要素解析を行った。RC はり供試体を図-7に示す ように要素分割し,コンクリートには8節点アイソパラ メトリック平面応力要素を,組立鉄筋には埋込み鉄筋要 素を,軸方向鉄筋には3節点トラス要素を用いた。また, 腐食に伴う軸方向鉄筋とコンクリートの付着劣化を評 価するため,軸方向鉄筋要素とコンクリート要素の間に ボンド要素を設定した。

(a) コンクリートモデル

コンクリートには固定ひび割れモデルを使用し,ひび 割れ後のせん断剛性低減係数 を 0.05 とした。コンクリ ートの非線形構成則には,圧縮側は,Thorenfeldt モデル に圧縮破壊エネルギーG_{FC}を適用したモデルを用いた。 一方,引張側は Hordijk モデルを用いた。

(b) 鉄筋モデル

軸方向鉄筋は,降伏強度に達する前は弾性挙動で,降 伏強度に達した後は剛性が0.01*E*。に変化するバイリニア モデルとした。腐食した鉄筋の断面積は,図-3に示さ れる質量減少率 C を利用して,式(4)から算出される値を 軸方向鉄筋の各トラス要素に用いた。

$$A_c = (1 - C/100) \cdot A_0 \tag{4}$$

ここで, *A_c*:腐食鉄筋の断面積, *C*:質量減少率, *A₀*:健全 な鉄筋の断面積である。

(c) 付着モデル

本研究では、トラス要素と平面応力要素との間にボン ド要素を用いることで、腐食による軸方向鉄筋とコンク リートの付着劣化を評価した。付着特性には、鈴木ら³⁾



図 - 5 RC はり供試体の質量減少率分布

供試体名	コンク	コンクリートの硬化特性		軸方向鉄筋力学特性		RC 部材の載荷試験結果			数値解析結果
	f'_c [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	E_c [kN/mm ²]	f_y [N/mm ²]	E_s [kN/mm ²]	破壊モード	V _{exp} [kN]	v	$V_{FEM}[{ m kN}]$
B-N	32.2	2.76	27.8	384	184	斜め引張破壊	36.2	0.49	34.1
B-10-0	35.0	3.00	27.7	384	184	斜め引張破壊	37.1	0.49	39.0
B-10-287.5	36.8	3.21	26.1	384	184	せん断圧縮破壊	(49.5)*	0.64	51.9
B-10-400	32.0	2.55	25.3	384	184	斜め引張破壊	36.4	0.49	35.9
B-20-287.5	36.2	2.82	26.8	386	200	斜め引張破壊	41.2	0.54	44.0
B-20-400	30.6	2.49	27.8	386	200	斜め引張破壊	33.3	0.46	32.5
C-N	36.6	2.77	26.1	387	200	斜め引張破壊	82		
C-10-300	30.3	2.51	25.0	387	200	曲げ引張破壊	(72.8)*		

表 - 4 コンクリートと軸方向鉄筋の材料特性ならびに RC 部材の載荷実験・数値解析結果

*異なる破壊モードのため参考値





が提案した図 - 8 に示される付着応力 - すべり変位モデ ルを用いた。このとき、ボンド要素の水平剛性 k₁は、s₁、

max から決定される。図 - 8 の式中,指数 a, b は定数 とし 既往の文献を参考³⁾にそれぞれ a = 1 b = 4 とした。 また,鉄筋の質量減少率と付着劣化の程度を関連付けた 加藤らの研究⁴⁾を参考として, s₁, s₂はそれぞれ 0.1mm, 0.8mm とした。 max は,鉄筋の質量減少率 C(%)を用い て,次式から求めた³⁾。

$$_{\max} = -0.16C + 4 \quad (C > 0) \tag{5}$$

また,ボンド要素の奥行きは鉄筋の周長,ボンド要素 高さは 1mm に設定した。付着特性を軸方向鉄筋の質量 減少率に応じて各ボンド要素に適用した。

(2) 数值解析結果

図-9に,載荷実験結果ならびに解析結果から得られ た荷重 - たわみ関係を示す。B-10-400 ならびに B-20-400 は、50kN 程度から解析結果が実験結果と異なる傾向を示 した。これは解析において,腐食ひび割れによるコンク リートの損傷を適切に数値解析に組み入れていないこ とが原因と考えられる。すなわち,実験では腐食ひび割 れにより斜めひび割れが誘発され発生・進展したことに対 して,解析では,せん断スパン中に曲げひび割れが発生し, このひび割れが徐々に斜めひび割れに移行し,進展する結 果となった。しかし、この点を除けばいずれのケースにお いても解析結果は実験結果の荷重 - たわみ関係ならびに 最大荷重を概ね予測できている。そこで,解析結果,実験 結果を踏まえて, RC はり部材のせん断耐荷機構に及ぼす 軸方向鉄筋の局部腐食の影響について検討した。

4.3 軸方向鉄筋の局部腐食が RC はりのせん断耐荷機構 に及ぼす影響

(1) 軸方向鉄筋の腐食生成位置の影響

図 - 10 に,解析から得られた B-N, B-10-0, B-10-287.5 ならびに B-10-400 の最大荷重時の主圧縮応力分布を示 す。また,図中の円は,着目する部分を示している。腐 食を有する RC はり供試体のアーチリブの角度が腐食の 無い RC はりよりも低いことが確認できる.これは,鉄 筋腐食に伴う軸方向鉄筋とコンクリートの付着低下に



伴い, RC はりのせん断耐荷機構がトラス機構からタイ ドアーチ機構に移行することを示唆している。載荷実験 において, B-10-400 ならびに B-20-400 では腐食ひび割 れの存在により, B-N よりも低い荷重で斜めひび割れが 発生・進展したが, ひび割れ進展後, 斜めひび割れより 上側に形成されるアーチリブがせん断力に抵抗するた め, さらに耐荷機構を維持できたと考えられる。

また,図-10 より,主圧縮応力度ならびにそれが卓 越する領域は,腐食生成位置に依存した。特に腐食生成 位置がせん断スパンの中央部の場合は,主圧縮応力度が 高く,またそれが卓越して発生する領域が広域にわたっ ていることがわかる。このことから,せん断スパン中央 にて軸方向鉄筋を腐食させた RC はり(B-10-287.5, B-20-287.5)のせん断耐荷力の増加は,RC はりのせん断 スパンにおいて広域にわたる強固なアーチリブが形成さ れたことによるものと考えられる。一方,支間中央なら びに支点付近に腐食領域のある RC はりでは,せん断ス パン中にアーチリブが十分に形成されなかったため,せ ん断耐荷力が増加することができなかったと考えられる。

以上のように,局部腐食を有する RC はりでは,せん 断耐荷機構がトラス機構から一部タイドアーチ機構に 移行するが,アーチリブを形成するせん断スパンの主圧 縮応力度ならびにその卓越する領域は,腐食生成位置の 影響を受けることが示された。特に,局部腐食を有する RC はりのせん断耐荷機構は,腐食領域がせん断スパン 中央部の場合に,アーチリブの貢献が最も大きいため, 腐食量が同一の場合には,せん断耐荷力の増加量が最も 大きくなると考えられる。

(2) 軸方向鉄筋の腐食量の影響

せん断耐荷力に及ぼす腐食量の影響を検討するため に、FEM 解析を利用して数値解析実験を実施した。表 -5 に解析シリーズを示す。質量減少率の分布は、最大質 量減少率が 5%となるように、電食区間中央部にかけて 増加する分布とした。腐食生成位置を変化させて、計 3 ケースについて解析を行った。すべてのケースにおいて、 $f'_c=34$ N/mm² 、 $E_c=27000$ N/mm² 、 $f_r=2.80$ N/mm² 、 $f_y=384$ N/mm² 、 $E_s=200$ kN/mm²とした。

図 - 11 に,各腐食位置における B-N に対する腐食した RC はりのせん断耐荷力比と最大質量減少率との関係をまとめた。なお,図中の質量減少率 0%,10%ならび20%のせん断耐荷力比の値は実験結果を示している。 (a)支間中央部に腐食領域を有する RC はり

図 - 11 より支間中央に腐食を有する B-5-0, B-10-0 で は、実験値ならびに解析値を含むせん断耐荷力の変動が 小さい。前述のように, せん断スパン中にアーチリプが 十分に形成されないこと, すなわち, トラス機構よる耐 荷機構が支配的となるためと考えられる。



(b) せん断スパン中央部に腐食領域を有する RC はり

せん断スパン中央部に腐食領域を有する B-5-287.5 の せん断耐荷力の解析値は B-N の実験値を上回り, B-10-287.5 実験値を下回る結果となった。4.3 (1) に示す アーチリブの貢献度の違いによる結果であると考えら れる。一方, B-N に対する B-20-287.5 のせん断耐荷力の 増加量は, B-10-287.5 と比較して低下した。これは,鉄 筋の断面欠損の増加によりアーチリブ・コンクリートを 拘束するタイ材(軸方向鉄筋)の剛性が低下したためであ ると考えられる。

(c) 支点部付近に腐食領域を有する RC はり

支点部付近に腐食領域を有する B-5-400, B-10-400, B-20-400 では A.3 (1) に示すようにアーチリブの貢献が 低いため,最大質量減少率の変動による,実験値ならび に解析値を含むせん断耐荷力の変動が小さい。また, B-20-400 のせん断耐荷力が N-B を下回る結果となった。 これは,腐食量の増加に伴う軸方向鉄筋の断面欠損が増 加に伴い,軸方向鉄筋のひび割れ拘束力が低下し,ダウ エル作用が低下したためであると考えられる。



5.1 破壊進展ならびに破壊モード

表 - 4 に, RC 柱の載荷実験結果を示す。また,図 - 12 に,RC 柱の破壊進展性状を示す。同一振幅において, C-10-300 でひび割れ分散性が低下した。これは,腐食に より軸方向鉄筋とコンクリートの付着が低下したため と考えられる。振幅の増加に伴い,C-N が振幅 6.0mm で 斜めひび割れが開口したのに対して,C-10-300 では卓越 する斜めひび割れが見られず,振幅 9.0mm で最大荷重と なった。破壊モードは,C-N では,軸方向鉄筋が降伏し ていないこと,ならびに最大荷重時において,斜めひび 割れが支配的であることから,斜め引張破壊を呈したと 判断した。一方でC-10-300 では,軸方向鉄筋が降伏した こと,ならびにポストピーク域で荷重が維持されたこと から,曲げ引張破壊と判断した。最大荷重は,C-N が C-10-300 を上回った。

5.2 RC 柱部材のせん断耐荷機構

RC 柱部材のせん断耐荷機構を検討するために,せん 断補強鉄筋のひずみを用いて算出したせん断補強鉄筋 の貢献分V。と全水平力Pの差から求められるコンクリー ト貢献分V。と水平変位の関係を求めた。図-13に,こ の結果を示す。図より,C-10-300のせん断力に対するコ ンクリートの貢献分がC-Nを上回っていることがわかる。 すなわち,RC はり部材と同様に,耐荷機構が,一部タ イドアーチ機構に移行したことを示している。そのため, C-10-300では,コンクリートの貢献分が増加し,せん断 耐荷力が曲げ耐荷力を上回ることで,曲げ破壊を呈した と考えられる。載荷実験においては,腐食した供試体の 耐荷力が健全な供試体を下回ったが,これは,正負交番 載荷により柱の両側面のコンクリートが損傷を受けた こと,ならびに腐食ひび割れの存在により圧縮側コンク リートのみかけの圧縮強度が低下したためと考えられる。

6. まとめ

以下に,本研究から得られた知見をまとめる。

(1) 腐食によるひび割れは,載荷によるひび割れの発生 ならびに進展に影響を及ぼす。特に,支点部に存在



する腐食ひび割れは,健全な RC はり部材と比較し て低い荷重レベルで斜めひび割れを発生させる。

- (2) 局部腐食を有する RC はりでは,RC はりのせん断耐 荷機構がトラス機構から一部タイドアーチ機構に 移行するが,アーチリブとなるせん断スパンの主圧 縮応力度ならびにその卓越領域は,腐食位置の影響 を受ける。また,RC はりのせん断耐荷機構は,腐 食位置がせん断スパン中央部の場合に,アーチリブ の貢献が最も高くなるため,腐食量が同一の場合に は,せん断耐荷力が最も増加した。
- (3) 最大質量減少率が20%になると,支点部に局部腐食 を有する RC はりのせん断耐荷力は低下した。これ は,軸方向鉄筋の断面欠損により,斜めひび割れの 拘束力ならびにダウエル作用が低下したためであ ると考えられる。
- (4) せん断スパン中央部に腐食位置を有する軸方向鉄 筋で補強された RC 柱が正負交番荷重を受ける場合, 曲げ引張破壊が観察された。これは,せん断力に対 するコンクリートの貢献分が増加するため,せん断 耐荷力が増加したことに起因していると考えられ る。また,両側面のコンクリートがひび割れにより 損傷を受けるため,正負交番載荷による最大荷重は 算出した曲げ破壊荷重を下回った。

参考文献

- 1) 角田真彦ほか:局部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
- 2) 二羽淳一郎:コンクリート構造の基礎,数理工学社, 2005.11
- 3) 鈴木暢恵ほか:格子モデル解析による損傷 RC はり 部材のせん断耐荷機構の評価,コンクリート工学年 次論文集, Vol.28, No.2, pp.235-240, 2006.7
- 加藤絵万ほか:鉄筋とコンクリート間の付着性能に 及ぼす鉄筋腐食の影響,港湾空港技術研究所資料, No.1044,2003.3