論文 鉄筋腐食RCはりのせん断耐荷挙動に関する検討

山本 貴士*1・佐藤 吉孝*2・服部 篤史*3・宮川 豊章*4

要旨:本研究では,鉄筋腐食が RC はりのせん断耐荷特性に与える影響を明らかにすること を目的として,約 10 ヶ月間の塩水散水で鉄筋腐食を生じさせた RC はりの曲げ載荷試験を もとにせん断耐荷性状を検討した。また,鉄筋腐食による鉄筋とコンクリートの付着性能の 低下に着目した有限要素解析による検討をあわせて行った。これらの結果,腐食なしの健全 時において斜めひび割れを原因として終局に至る RC はりでは,斜めひび割れが発生する状 況ではせん断補強筋の付着低下によりせん断耐力が低下するが,主筋の付着低下により斜め ひび割れが発生しなくなると,アーチ耐荷機構の形成で耐力が増加することが分かった。 キーワード:鉄筋腐食,せん断耐荷特性,付着性能,アーチ耐荷機構,RC はり

1. はじめに

近年,鉄筋腐食による RC 構造物の性能低下が 問題となってきており,腐食の進行程度によっ ては耐荷性能の低下が懸念される。鉄筋腐食が RC 部材の曲げ耐荷性能に与える影響について は比較的検討例は多くなってきているものの, せん断耐荷性能に与える影響については,検討 事例が少ないのが現状である。

そこで本研究では,約10ヶ月間の室内におけ る塩水散水で鉄筋腐食を生じさせた RC はりの 曲げ載荷試験,および鉄筋腐食にともなう付着 性能の低下に着目した有限要素解析を行うこと で,鉄筋腐食が生じた RC はり部材のせん断耐荷 特性を明らかにすることを目的とした。 補強筋には、135°フック付きの D6 スターラッ プ(SD295A)を用いた。載荷時コンクリート強度 は、せん断補強筋比 p_w =0.32%および 0.40%の健 全(腐食なし)供試体で f_c =34.6 N/mm², p_w =0.32% の腐食供試体で f_c =29.5 N/mm², p_w =0.40%の腐食 供試体で f_c =33.1 N/mm²であった。なお、コンク リートには腐食促進を目的として NaCl 5.00 kg/m³を外割り添加した。せん断スパン内には、 2.2(2)に後述する要因にしたがって、曲げスパン 内には、曲げ圧縮部コンクリートの耐荷力を持 続させるために一定間隔 50mm でスターラップ を配置した。また、鉄筋の自然電位測定のため に、引張主筋端部にリード線を取り付け、主筋 およびスターラップを電気的に接続した。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の形状・寸法 を図-1に示す。供試 体は,引張側 2-D16 (SD295A)の対称複鉄筋 RC はりとした。せん断



^{*1} 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助手 博士(工学) (正会員)

- *2 大成建設(株) 土木本部土木設計部 工修
- *3 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教授 博士(工学) (正会員)
- *4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 工博 (正会員)

表一1 鉄筋腐食状況

供試体	主筋				スターラップ			
	自然電位		質量 減少率	腐食 ひび割れ幅	自然電位		質量 減少率	腐食 ひび割れ幅
	(mV vs. Ag/AgCl)				(mV vs. Ag/AgCl)			
	散水前	散水後	(%)	(mm)	散水前	散水後	(%)	(mm)
p _w =0.32%	-159	-415	0.32	0.30	-168	-429	1.13	0.10
p _w =0.40%	-169	-379	0.80	0.40	-166	-394	1.36	0.10

2.2 実験要因

(1) 腐食量

健全(腐食なし)と腐食の2水準を設定し,腐食の指標として質量減少率を用いた。脱型,養生(28日散水湿布養生)後の供試体を実験室内で,湿潤状態と乾燥状態の環境サイクルを模擬するために,1日1回の3%塩水の散布状況下(350g/m²,供試体単位表面積あたり)に300日間置いた。

質量減少率は,曲げ載荷試験終了後の供試体 からはつり出した主筋およびスターラップを対 象に,10%クエン酸水素二アンモニウム溶液での 錆除去による質量減少を測定することにより算 出した。測定結果は3.1に示す。

(2) せん断補強筋

せん断補強筋量は、せん断耐力比 V_{yd}/V_{mu} (V_{yd} : 設計せん断耐力, V_{mu} : 部材が設計曲げ耐力に達 するときのせん断力)を参考に決定し、斜め引張 破壊の生じる可能性がある $V_{yd}/V_{mu}=0.86$ (<1)と、 腐食により生じるせん断耐力の低下が曲げ耐力 の低下よりも大きい場合にせん断破壊に対して 危険側に作用する可能性のある $V_{yd}/V_{mu}=0.95$ (= 1)とした。このとき、せん断補強筋比はそれぞれ $p_w=0.32\%$ ($s_s=200$ mm, s_s : せん断補強筋間隔), $p_w=0.40\%$ ($s_s=160$ mm)となる。耐力比の算定には、 曲げ耐力は断面分割法を用い、せん断耐力は 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能 照査編]¹⁾の耐力式を部材係数 $\gamma_b=1$ で用いた。

2.3 載荷方法および測定項目

載荷は,対称2点一方向載荷曲げ試験とした。 載荷点および支点位置を図-1に示す。せん断ス パン有効高さ比は a/d=2.91 とした。載荷時の荷 重,スパン中央変位および両支点変位(支点変位



量の補正用)を測定した。

また,脱型後の健全(腐食なし)状態と載荷前の 腐食状態で,主筋(7ヶ所)およびスターラップ(せ ん断スパン内スターラップ(6本)のはり高さ中央 部分)の自然電位を測定(照合電極:飽和銀/塩化銀 電極)した。さらに,載荷前に腐食ひび割れ状況 をスケッチするとともに,供試体側面にてクラ ックゲージを用いて腐食ひび割れ幅を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋腐食および腐食ひび割れ状況

塩水散水開始前(脱型・養生後 28 日)と散水後 (材齢 300 日)に測定した主筋およびスターラッ プの自然電位の値を表-1に示す。また,載荷 終了後の供試体からはつり出した主筋,スター ラップを用いて測定した質量減少率と供試体表 面でクラックゲージを用いて測定した腐食ひび 割れ幅をあわせて表-1に示す。自然電位およ び質量減少率は,主筋,スターラップごとの平 均値,腐食ひび割れ幅は,主筋,スターラップ



に沿ったひび割れごとの最大値とした。さらに, 腐食供試体の腐食ひび割れ状況を図-2に示す。 供試体図の鉛直線はスターラップの位置を表す。

載荷時においては,主筋,スターラップの自 然電位は卑な値となっており,ASTM 基準²⁾にお ける腐食領域に位置している。また,腐食供試 体の側面には主筋およびスターラップに沿った 腐食ひび割れが見られた。質量減少率はスター ラップの方が主筋よりも相対的に大きいのに対 して,腐食ひび割れ幅は主筋に沿ったものの方 が大きくなった。スターラップよりも主筋の方 が鉄筋径が大きく,腐食膨張による周辺コンク リートの変形が大きくなったと考えられる。

なお、同一寸法の RC はりで主筋(D16)を電食 により腐食させた研究³⁾では、せん断補強筋比が 若干異なるため正確な比較はできないが、およ そ 3%の質量減少率で 0.6mm 前後の腐食ひび割 れが確認されており、本研究の塩水散水による 腐食の方が質量減少率の割に腐食ひび割れ幅が 大きいことがわかる。



3.2 曲げ載荷試験結果

載荷終了後のひび割れ状況を図-3に示す。 また,各供試体の荷重-変位曲線をせん断補強筋 比ごとに図-4に示す。さらに,最大荷重と質 量減少率の関係を図-5に示す。なお,横軸に はスターラップの質量減少率を用いた。

いずれの供試体も曲げ降伏後,斜めひび割れ 幅の拡大によって破壊に至ったが,健全(腐食な し)供試体に比べて腐食供試体の方が,斜めひび 割れが載荷点よりに発生した。主筋腐食にとも なう付着低下でアーチ的な耐荷機構になりせん 断スパンウェブ部の圧縮領域が大き くなったとみられる。一方で、これ までのせん断補強筋の腐食のみに着 目した研究⁴⁾から、腐食にともなうせ ん断補強筋の付着低下でせん断補強 筋の定着部、すなわち主筋とせん断 補強筋の接点に大きな応力が作用し、斜めひび 割れの起点が変化した可能性も考えられる。

また,いずれのせん断補強筋比においても, 最大荷重に顕著な差は見られなかったが、腐食 供試体の方が終局に至るまでの変形が若干大き くなった。上述のひび割れ状況から、主筋の付 着低下によりアーチ耐荷機構が形成され、荷重 が持続したようである。しかし, 腐食供試体に おいても斜めひび割れが腐食したスターラップ と交差している。このため、腐食によるせん断 補強筋の付着性能低下により、せん断補強筋の ひび割れ抑制効果が低下し、コンクリート負担 せん断力の低下も同時に起こり,結果として, アーチ耐荷機構による耐力増加とせん断補強筋 の腐食による耐力低下が相殺して最大荷重に顕 著な差が見られなかったことも一因として考え られる。なお,前出の既往研究⁴⁾では,電食によ るスターラップの質量減少率 5.90%, 腐食ひび割 れ幅 0.20mm と, 質量減少率は本研究よりも大き かったが, 塩水散水で腐食させた本研究の腐食 ひび割れ幅 0.10mm は、電食よりも質量減少率の 割に大きかったことから,スターラップの付着 性能は低下していたと推定できる。

さらに、安定したアーチ耐荷機構を形成する ためには、スパン全長にわたって均一に付着が 低下することが望ましいが、実験でははり軸方 向に沿って主筋の腐食状態にばらつきがあり、 付着低下の状況が一様でなかったために、最大 荷重に顕著な差が見られなかった可能性もある。 3.3 鉄筋腐食による鉄筋とコンクリートの付着

性能低下に着目した有限要素解析

以上の実験結果に対して,主筋とスターラッ プの腐食にともなう付着性能の変化がせん断耐 荷機構に与える影響を検討するために,鉄筋の



付着性能に着目した有限要素解析を行い,破壊 形式および耐荷力の検討を行った。

(1) 解析モデル

解析モデルを図-6に示す。供試体の対称性 を考慮し、片側のみについてモデル化した。ス パン中央断面をはり軸方向に、支点を鉛直方向 に拘束した。すべての鉄筋-コンクリート間の付 着をバネ要素で表現したが、主筋の定着部(供試 体端部)のみは節点を剛結した。コンクリートに は2次元1次の四辺形要素、主筋およびスター ラップには1次のトラス要素を用いた。解析に は、汎用有限要素解析コード ABAQUS /STANDARD Ver6.3を用いた。

(2) 材料モデル

コンクリートのモデルには塑性損傷モデルを 用い, 圧縮側の応力-ひずみ関係には修正 Kent&Park⁵⁾モデル,引張側にはCEBモデル⁶⁾を 用いた。せん断補強筋を含む鉄筋の応力-ひずみ 関係にはThompsonモデル⁷⁾を用いた。今回の解 析では,主筋およびスターラップの付着の影響 に着目するため,鉄筋の機械的性質には健全(腐 食なし)時の値を使用した。

鉄筋-コンクリート間の付着応力-すべり関係



は、図-7に示すように、最大付着応力以前で は線形関係とし、以降は一定値とした。腐食に よる付着性能の低下は、付着剛性を一定とした まま最大付着強度を 6.00(健全(腐食なし))⁸⁾~ 1.00N/mm² で変化させることで表現し、 1.00N/mm² ごとに解析値を出力して付着の影響 を検討した。なお、実験結果では主筋とスター ラップの腐食量および腐食ひび割れ幅に差が見 られたが、主筋とスターラップの腐食量の関係 は明らかになっていないため、腐食した主筋と スターラップの付着強度は同じとして解析した。

(3) 解析結果

最大荷重と付着強度の関係を図-8に示す。 健全(腐食なし)を想定した付着強度 6.00N/mm² では,特に p_w=0.32%において解析値(74.3 kN)が 実験値(95.0 kN)を大きく下回る結果となった。実 験では,曲げ降伏後に斜めひび割れの拡大によ って終局に至ったのに対し,解析では曲げ降伏 前に斜めひび割れの拡大にともなって終局(発散 終了)に至った。解析における健全(腐食なし)ス ターラップの付着強度の設定や斜めひび割れ発 生後のせん断変形量の影響が実験と異なったこ とが原因として考えられる。

いずれのせん断補強筋比においても,最大付 着強度 4.00N/mm² までは付着強度を大きく設定 する程,最大荷重が小さくなる傾向にある。な お,付着強度 4.00~6.00N/mm²ではスターラップ に斜めひび割れが交差するひび割れ状況であっ たことから,既往の研究⁴⁾で示したように,腐食 によるせん断補強筋の付着性能がせん断補強筋 のひび割れ抑制効果に影響し,設定したスター ラップの最大付着強度が大きい程,最大荷重が 大きくなったようである。しかし,付着強度 4.00N/mm²以下では顕著な斜めひび割れが見ら れなくなり,1.00N/mm²では曲げ破壊と判別でき る破壊形態であった。それにともなって最大荷 重も大きくなり,斜め引張破壊を生じる健全(腐 食なし)状態のものよりも大きな耐力となった。

ここで,**表-1**の主筋の腐食ひび割れ幅から, 式(1)⁹⁾を用いて付着強度を算出した。

$$r_{b} = e^{-1.2220 \times 腐食ひび割れ幅(mm)}$$
(1)

ここに, rb:付着強度比

算出の結果, pw=0.32%で付着強度 2.07 N/mm², pw=0.40%で1.45 N/mm²となった。これらの付着 強度を解析結果に当てはめると, アーチ耐荷機 構が顕著に発揮されて最大荷重が増大する領域 に相当する。しかし,実験結果の最大荷重は, 健全(腐食なし)供試体に比べて顕著な増加は見 られていない。主筋にはスターラップの拘束が あること, また, 実験では付着の低下している ところや比較的付着が健全なところが混在する といった一様な付着低下の形態を示していなか ったことなどを原因として十分なアーチ耐荷機 構が形成されず,最大荷重が大きく増加しなか ったと考えられる。さらに、スパン全長にわた って付着強度を低下させた解析では、顕著な斜 めひび割れが見られない付着強度の領域である が、実験では斜めひび割れが発生して腐食した スターラップと交差するひび割れ状況であった

ことから,スターラップの付着低下の影響も表 れたと推定される。

以上のことから,健全(腐食なし)供試体におい て斜めひび割れを原因として終局に至る RC は りでは,アーチ耐荷機構を形成する腐食段階の 付着強度よりも主筋の付着強度が大きい段階,

すなわち斜めひび割れが発生する状況では, せ ん断補強筋の付着低下によりせん断耐力が低下 する。しかし, 主筋の付着低下が大きくなると 斜めひび割れが発生しなくなり, アーチ耐荷機 構により耐力が増加するといえる。ただし, 実 際の腐食において付着低下がスパン全長にわた って均一に生じない場合, 大きな耐力増加が得 られないこともあると考えられる。

4. 結論

本研究の範囲内で得られた主な結果をまとめて結論とする。

- (1) 健全(腐食なし)時において斜めひび割れを 原因として終局に至る RC はりを,約10ヶ月 間の塩水散水により腐食させ,曲げ載荷試験 を行った結果,健全(腐食なし)供試体に比べ て腐食供試体の方が,斜めひび割れが載荷点 よりに発生するとともに,終局までの変形が 若干大きくなった。主筋腐食にともなう付着 低下でアーチ耐荷機構が形成され,荷重が持 続したと考えられる。
- (2) 健全(腐食なし)供試体と腐食供試体の最大 荷重に大きな差は見られなかった。腐食供試 体においても斜めひび割れが腐食したスタ ーラップと交差しており、腐食によるせん断 補強筋の付着性能低下でせん断補強筋のひ び割れ抑制効果が低下し、コンクリート負担 せん断力の低下が生じていた可能性がある。
- (3) 主筋およびスターラップの付着性能に着目した有限要素解析の結果,腐食なしの健全時に斜めひび割れを原因として終局に至る RCはりでは,腐食にともなう主筋の付着低下でアーチ耐荷機構を形成する前の腐食レベル,すなわち斜めひび割れが発生する状況では,

せん断補強筋の付着低下によりせん断耐力 が低下するが,主筋の付着低下が大きくなる とアーチ耐荷機構により耐力が増加する。た だし,実際の腐食において付着低下がスパン 全長にわたって均一に生じない場合,大きな 耐力増加が得られないこともある。

参考文献

- 1) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示 方書[構造性能照査編], pp.67-69, 2002.3
- ASTM C876: Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing in Concrete, 1991
- 小金知史、山本貴士、服部篤史、宮川豊章: 主筋腐食が生じた RC はりのせん断耐荷特性、 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集、 5-369、pp.735-736、2004.9
- 4) 佐藤吉孝,山本貴士,服部篤史,宮川豊章: 鉄筋腐食の生じた RC 部材のせん断耐荷特性 の検討,コンクリート構造物の補修,補強, アップグレード論文報告集,第4巻,pp.33-38, 2004.10
- Park, R., Priestley, M. J. N. and Gill, W. D.: Ductility of Square-Confined Concrete Columns, J. Struct. Div., ASCE, Vol.108, No.ST4, pp.929-950, 1982.4
- Comite Euro-International Du Beton: CEB-FIP MODEL CODE 1990, 2-Material Properties, 1991
- Thompson, K. J. and Park, R.: Ductility of Prestressed and Partially Prestressed Concrete Beams' Sections, PCI Journal March-April, pp.46-77, March-April 1980
- 8) 李翰承,友澤史紀,野口貴文:鉄筋腐食が鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.534-539,1996
- 9) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構
 造物のリハビリテーション研究委員会報告
 書, pp.47-51, 1998.10