

# 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<sup>\*1</sup>・佐藤 吉孝<sup>\*2</sup>・服部 篤史<sup>\*3</sup>・宮川 豊章<sup>\*4</sup>

**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 $f_c=34.6\text{ N/mm}^2$ ， $p_w=0.32\%$ の腐食供試体で $f_c=29.5\text{ N/mm}^2$ ， $p_w=0.40\%$ の腐食供試体で $f_c=33.1\text{ N/mm}^2$ 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/m<sup>3</sup>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氣的に接続した。

## 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

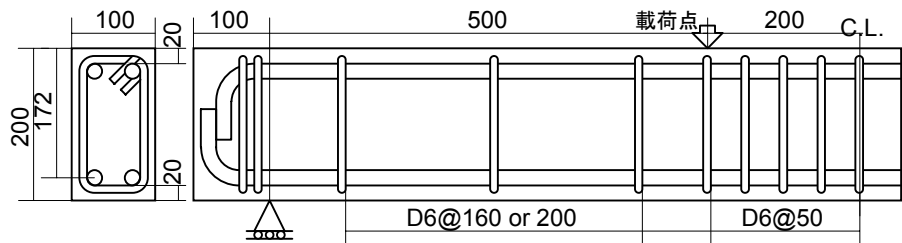


図-1 供試体形状・寸法 (単位:mm)

\*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－1 鉄筋腐食状況

供試体	主筋				スターラップ			
	自然電位 (mV vs. Ag/AgCl)		質量 減少率 (%)	腐食 ひび割れ幅 (mm)	自然電位 (mV vs. Ag/AgCl)		質量 減少率 (%)	腐食 ひび割れ幅 (mm)
	散水前	散水後			散水前	散水後		
p <sub>w</sub> =0.32%	-159	-415	0.32	0.30	-168	-429	1.13	0.10
p <sub>w</sub> =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(350 g/m<sup>2</sup>, 供試体単位表面積あたり)に300日間置いた。

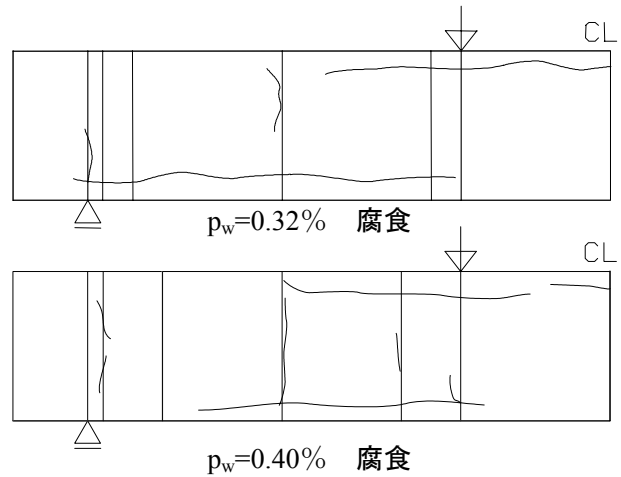
質量減少率は、曲げ載荷試験終了後の供試体からはつり出した主筋およびスターラップを対象に、10%クエン酸水素二アンモニウム溶液での錆除去による質量減少を測定することにより算出した。測定結果は3.1に示す。

(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  $V_{yd}/V_{mu}=0.95$  ( $\approx 1$ )とした。このとき、せん断補強筋比はそれぞれ  $p_w=0.32\%$  ( $s_s=200\text{mm}$ ,  $s_s$ : せん断補強筋間隔),  $p_w=0.40\%$  ( $s_s=160\text{mm}$ )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]<sup>1)</sup>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



図－2 腐食ひび割れ状況

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

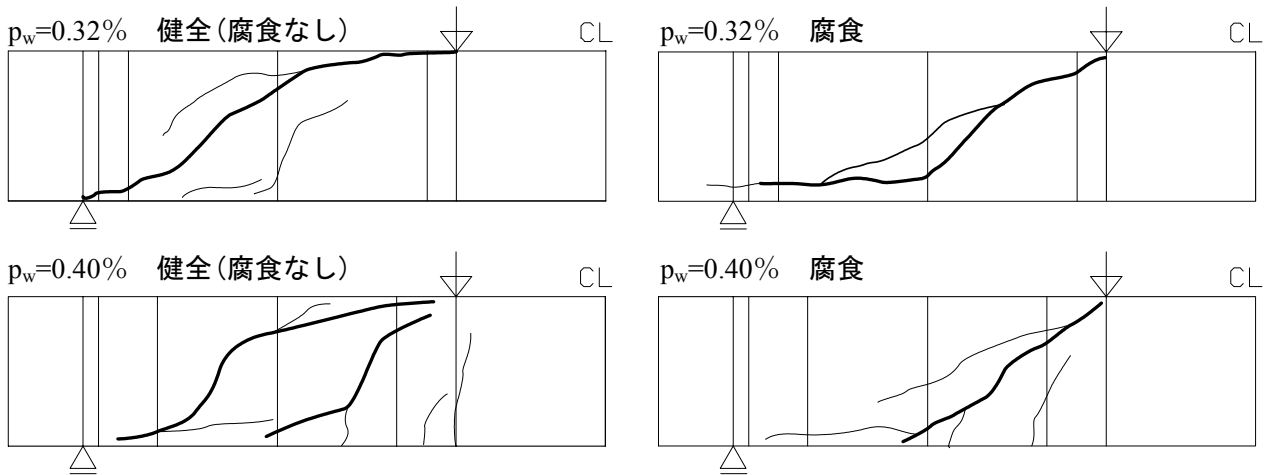


図-3 荷重終了後のひび割れ状況

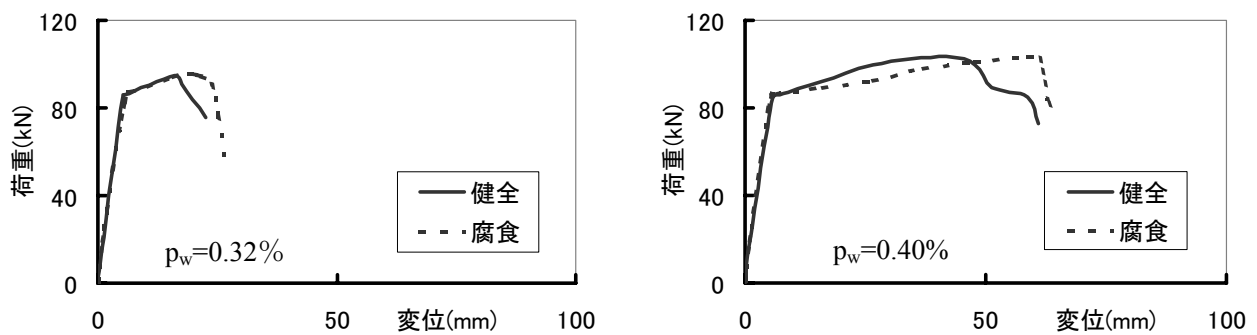


図-4 荷重-変位曲線

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。

荷重時においては、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<sup>2)</sup>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ものに対して、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<sup>3)</sup>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。

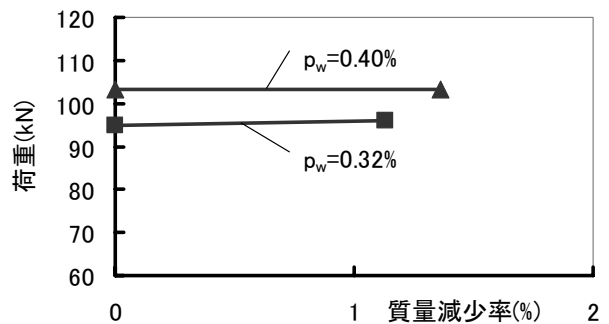


図-5 最大荷重

### 3.2 曲げ荷重試験結果

荷重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、斜めひび割れが荷重点よりに発生した。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<sup>4)</sup>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<sup>4)</sup>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樣でなかったために、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

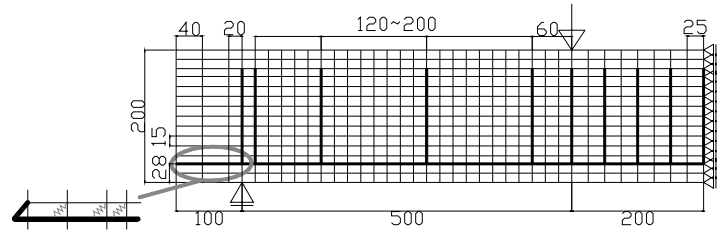


図-6 解析モデル

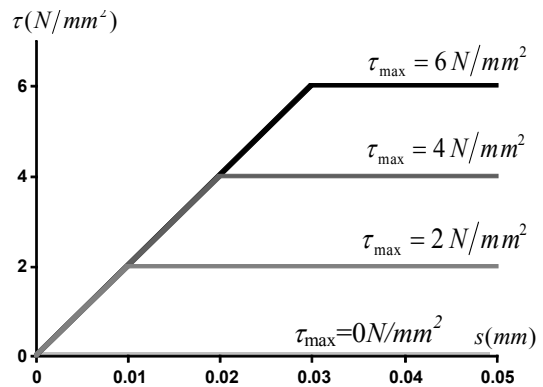


図-7 付着-すべり関係

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&Park<sup>5)</sup>モデル、引張側には CEB モデル<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>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

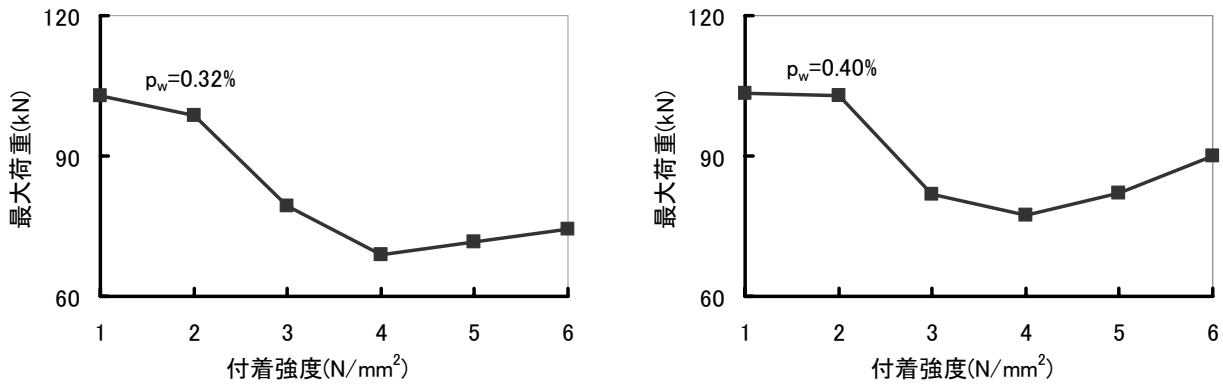


図-8 最大荷重-付着強度関係(解析)

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))<sup>8)</sup>~1.00N/mm<sup>2</sup> で変化させることで表現し、1.00N/mm<sup>2</sup> 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/mm<sup>2</sup> では、特に p<sub>w</sub>=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/mm<sup>2</sup> 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/mm<sup>2</sup> 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<sup>4)</sup>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/mm<sup>2</sup> 以下では顕著な斜めひび割れが見られなくなり、1.00N/mm<sup>2</sup> 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)<sup>9)</sup>を用いて付着強度を算出した。

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

ここに、 $r_b$ :付着強度比

算出の結果、p<sub>w</sub>=0.32%で付着強度 2.07 N/mm<sup>2</sup>、p<sub>w</sub>=0.40%で 1.45 N/mm<sup>2</sup> 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よう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
- 2) ASTM C876: Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing in Concrete, 1991
- 3) 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
- 5) 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
- 6) Comite Euro-International Du Beton: CEB-FIP MODEL CODE 1990, 2-Material Properties, 1991
- 7) 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