## 論文 せん断補強筋および主筋の腐食が RC 部材のせん断耐荷特性に与える 影響

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

要旨:鉄筋腐食が RC 部材のせん断耐荷特性に与える影響について知見を得ることを目的として,せん断補強筋あるいは主筋の腐食を電食によりモデル化した RC はりの載荷実験を,腐食量ならびにせん断補強筋比を要因として行った。せん断補強筋が腐食した RC はりに斜めひび割れが発生する状況では,軽微な腐食段階においてもせん断耐荷力が低下する可能性がある。一方で,主筋が腐食した RC はりでは,引張主筋の腐食と腐食ひび割れによって付着が低下したことにより形成されたと考えられるアーチ的な耐荷機構によって,耐荷力が増加するとともに,エネルギー吸収能が大きくなる可能性があることがわかった。

キーワード:鉄筋腐食, せん断, 耐荷力, 腐食ひび割れ, RC はり

1. はじめに

2.

実験概要

近年,塩害や中性化に起因する鉄筋腐食による RC 構造物の性能低下が問題となってきている。かぶりはく落などの第三者影響度に関する性能あるいは使用性能に加えて,鉄筋腐食の進行に伴う耐荷性能の低下が懸念される。これに対し,維持管理における対策を適用するためには,保有耐荷性能とその経時変化を明らかにしておく必要がある。しかし,鉄筋腐食が RC 部材の耐荷性能に与える影響は不明な点が多く,特に RC 棒部材のせん断耐荷力に与える影響については,研究事例が少ないのが現状である。

そこで本研究では, せん断補強筋および主筋 の腐食が RC はりのせん断耐荷特性に与える影響について知見を得ることを目的として, せん 断補強筋および主筋の腐食を電食法にてモデル 化した RC はり供試体に対し, 曲げ載荷試験を 行い, その耐荷性状を検討した。

本研究では,電食によりせん断補強筋の腐食

## をモデル化したせん断補強筋シリーズと,主筋 の腐食をモデル化した主筋シリーズについて 検討した。供試体一覧を表-1に示す。

- 2.1 実験要因
- (1) 腐食量

電食によるせん断補強筋および主筋の腐食量

	No.	腐食量	p <sub>w</sub>	載荷方法
せん断補強筋シリーズ	S1	健全	0.80%	一方向
	S2	健全	0.40%	一方向
	S3	0.26%	0.80%	一方向
	S4	0.50%	0.40%	一方向
	S5	9.2%	0.80%	一方向
	S6	12.8%	0.40%	一方向
	S7	健全	0.80%	正負交番
	S8	健全	0.40%	正負交番
	S9	0.60%	0.80%	正負交番
	S10	0.59%	0.40%	正負交番
	S11	4.5%	0.80%	正負交番
	S12	12.9%	0.40%	正負交番
主筋シリーズ	L1	健全	なし	一方向
	L2	健全	0.23%	一方向
	L3	2.1%	なし	一方向
	L4	2.0%	0.23%	一方向
	L5	3.3%	なし	一方向
	L6	3.9%	0.23%	一方向

表 - 1 供試体一覧

## \*1 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員) \*2 京都大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 博士(工学) (正会員)

- \*3 京都大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 博士(工学) (正会員)
- \*4 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工学博士 (正会員)

は,積算電流量を変化させることにより,健全 (腐食なし)を含めた3水準を目標とした。腐食 量の指標として,載荷終了後,実際に腐食鉄筋 をはつり出し測定した質量減少率を用いた。

せん断補強筋シリーズでは,腐食量小に今回 の供試体(せん断補強筋かぶり 13.4mm)で腐食 ひび割れが目視で観察できる加速期前期相当の 約0.5%,腐食量大に耐荷力の低下が大きくなる と予想される劣化期相当の約10%を設定した。

主筋シリーズでは,腐食量小として,せん断 補強筋シリーズよりも若干大きく,腐食ひび割 れが大きくなる値の約2.0%,さらに積算電流量 を2倍とした腐食量大の約3.5%を設定した。

(2) せん断補強筋量

せん断補強筋量は, せん断耐力比 V<sub>yd</sub>/V<sub>mu</sub><sup>1)</sup> (V<sub>yd</sub>:設計せん断力, V<sub>mu</sub>: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,せん 断破壊先行型のものを対象とした。

せん断補強筋シリーズでは、 $V_{yd}/V_{mu}=0.68$  と なるせん断補強筋比  $p_w=0.40\%$ (せん断補強筋間 隔  $s_s=160mm$ ) および  $V_{yd}/V_{md}=0.98$  となる  $p_w=0.80\%(s_s=80mm)$ とした。また、主筋シリー ズでは、 $V_{yd}/V_{md}=0.58$  となる  $p_w=0.00\%$ (せん断 補強筋なし)および  $V_{yd}/V_{md}=0.88$  となる  $p_w=0.23\%(s_s=275mm)$ とした。耐力比の算定には、2000曲げ耐力は断面分割法を用い、せん断耐力は平 成 8 年制定コンクリート標準示方書[設計編]<sup>2)</sup> の耐力式を部材係数 $\gamma_{\beta}=1$ で用いた。なお、せん 断補強筋シリーズでは、曲げ耐力増加を目的と して、PC 鋼棒を無緊張で導入している。

(3) 載荷方法

RC はりのせん断耐荷特性は,載荷履歴の影響を受ける<sup>3)</sup>ことがあるため,せん断補強筋シ リーズでは,一方向繰返し載荷と正負交番繰返 し載荷を行い,ある腐食量におけるせん断耐荷 特性に与える載荷履歴の影響を検討した。

2.2 供試体

供試体は,幅×高さ×スパン長=100×200× 1400mm,引張側 2-D16(SD295A)の対称複鉄筋 RC はりとした。せん断補強筋には,135°フッ ク付きスターラップ(SD295A,D6)を用い,曲げ スパンには一定間隔 50mm で配筋した。コンク リートの目標配合強度は f'cr=30N/mm<sup>2</sup> とし, NaCl 5kg/m<sup>3</sup>を外割り添加した。

せん断補強筋シリーズの供試体形状・寸法を 図 - 1 に示す。せん断破壊を先行させるための 曲げ耐力増加を目的として,断面高さ 50mm, 150mmの位置に PC 鋼棒(B 種 1 号, \$13mm)を 無緊張で用い,グラウトを注入した。図 - 1 中 の 印で示したスターラップを電食対象とし, これらを直列に接続して通電した。次に,主筋 シリーズの供試体形状・寸法を図 - 2 に示す。圧 縮鉄筋を含むすべての主筋を電食対象とした。

2.3 載荷方法

載荷はスパン 1400mm に対し等曲げモーメン ト区間 300mm の対称 2 点載荷(a/d=3.06)とした。

せん断補強筋シリーズでは,一方向載荷につ いて,降伏変位δ<sub>y</sub>の奇数倍変位での定変位繰返 し1回,正負交番載荷について,降伏変位δ<sub>y</sub>の 奇数倍変位での定変位繰返し3回とした。降伏



p<sub>w</sub>=0.40%では 印のスターラップを除く。 図 - 1 せん断補強筋シリーズ 供試体の断面形状・寸法



p<sub>w</sub>=0.23%では 印のスターラップを除く。 図 - 2 主筋シリーズ 供試体の断面形状・寸法





変位 $\delta_y$ は,健全供試体(S-2)の載荷において,降 伏荷重の計算値  $P_{ycal}=65.8$ kN に達した時の変位  $\delta_y=3.37$ mm とした。荷重,スパン中央変位を測 定するとともに,せん断スパン中央付近におい て,定変位繰返し中の最大変位時の斜めひび割 れ幅を,クラックゲージを用いて測定した。

主筋シリーズでは,一方向単調載荷とした。 荷重,スパン中央変位を測定するとともに, pw=0.23%の供試体については,せん断補強筋の ひずみを測定した。

終局は,ポストピーク以降,荷重が最大荷重 の80%を下回らない最大の変位とした。



3. 実験結果および考察

3.1 せん断補強筋シリーズ

(1) 荷重 - 変位曲線

各供試体の荷重-変位曲線の包絡線を図 - 3 に , 一方向載荷の終局時ひび割れ図を図 - 4 に示す。

電食後の供試体には,スターラップに沿った 腐食ひび割れは確認できたが,主筋に沿った腐 食ひび割れは見られず,また載荷後の供試体内 部観察から,主筋の腐食は認められなかった。

一方向載荷,pw=0.80%の健全供試体は曲げ破 壊を生じた。また,一方向載荷,pw=0.40%の腐 食量大は顕著な斜めひび割れが見られず,せん 断スパン内の主筋付近に軸方向ひび割れが発生, 進展することで荷重低下が生じた。主筋に沿っ た腐食ひび割れは見られなかったが,スターラ ップの上縁奥行き(幅)方向の部分が腐食するこ とで,かぶり方向だけでなく,軸方向(図-5中 スターラップ点線囲み部分の紙面垂直方向)に も内部の潜在的な腐食ひび割れが存在し,これ が荷重の増加とともに進展した可能性がある。 正負交番載荷,pw=0.80%の腐食量大も同様の傾 向が見られた。これら以外は,斜めひび割れが 拡大し,斜め引張破壊を生じた。ただし,いず れもせん断補強筋の破断は見られなかった。

(2) 最大荷重

せん断補強筋の質量減少率が最大荷重に与え る影響を図 - 6 に示す。また,せん断補強筋の 質量減少率を断面欠損率と仮定し,2.1(2)で示 したせん断耐力式を用いた計算値をせん断補強 筋比ごとに併せて図中に破線で示した。

いずれの載荷方法においても、せん断補強筋 が腐食した供試体の最大荷重は,腐食量小でも 健全よりも小さい。この健全から腐食量小まで の最大荷重の低下率は,計算値における低下率 よりも大きくなった。せん断補強筋を横切る斜 めひび割れが発生したものは, せん断補強筋の 腐食と腐食ひび割れによって, せん断補強筋と コンクリートの付着が低下し,コンクリート負 担せん断力が, せん断ひび割れ発生後, 早期に 低下したと考えられる。また, せん断補強筋を 電食の対象としたため,ひずみを測定すること はできなかったが, せん断補強筋の断面欠損と 降伏荷重の低下により, せん断補強筋負担せん 断力も低下している可能性がある。このように, せん断補強筋の腐食が生じたはり部材に斜めひ び割れが発生する場合,軽微な腐食段階におい てもせん断耐荷性状に影響を与えることがある。

ただし, いずれの要因においても, 腐食量小 と大の最大荷重に顕著な差は見られなかった。 むしろ, 一方向載荷, pw=0.40%の腐食量大と正 負交番載荷, pw=0.80%の腐食量大では, それぞ れの腐食量小よりも, 最大荷重が若干増加する 傾向が見られる。荷重低下の原因が, 斜めひび 割れでなく, 3.1(1)で述べた主筋付近の軸方向 ひび割れとなり, 耐荷機構が変化したことによ ると考えられる。このことから, せん断補強筋 が腐食した RC はり部材のせん断耐荷力評価に は, 質量減少率だけでなく, 腐食ひび割れの状



態もあわせて考慮する必要があると考えられる。

(3) 最大せん断ひび割れ幅

正負交番載荷供試体でのせん断ひび割れ幅の 挙動を図 - 7 に示す。

せん断ひび割れ幅は,定変位繰返し中の最大 変位時に,せん断スパン中央付近においてクラ ックゲージを用いて測定したものである。なお, 正負交番載荷,p<sub>w</sub>=0.80%の腐食量大の挙動は, 他とひび割れ性状が異なったため省いた。

腐食供試体の方が,健全に比べて早期にひび 割れ幅が拡大している。せん断補強筋の腐食と 腐食ひび割れにより,せん断補強筋とコンクリ ートのすべりが大きくなり,斜めひび割れが拡 がりやすくなったと考えられる。これによって,



コンクリート負担せん断力の低下が生じたと推察される。また,pw=0.40%の腐食量小と大の挙動はほぼ同じ傾向であり,腐食量小と大の最大荷重に差が見られなかった結果と一致する。

3.2 主筋シリーズ

(1) 荷重 - 変位曲線および破壊形式

各供試体の荷重-変位曲線を図-8に,終局時 のひび割れ図を図-9に示す。

電食後の供試体には,主筋に沿った腐食ひび 割れは確認できたが,スターラップに沿った腐 食ひび割れは見られず,また載荷後の供試体内 部の観察から,スターラップの腐食は認められ なかった。

健全供試体では斜め引張破壊を生じたが,腐 食供試体では,斜めひび割れの下端が主筋に沿 った腐食ひび割れにつながり,これが変位の増 加とともに進展することで荷重低下が生じた。

また,剛性は腐食供試体の方が小さくなる傾向にあった。主筋の断面欠損,腐食ひび割れおよび主筋とコンクリートの付着劣化が影響していると考えられるが,エネルギー吸収能力としては増加する耐荷機構になっているといえる。

(2) 最大荷重

主筋の質量減少量が最大荷重に与える影響を 図 - 10 に示す。また,主筋の質量減少率を断面



欠損率と仮定し,2.1(2)で示したせん断耐力式 を用いた計算値をせん断補強筋比ごとに併せて 図中に破線で示した。

pw=0.23%の腐食供試体の最大荷重は健全よ り若干小さい。しかし,pw=0.00%の腐食供試体 の最大荷重は健全より大きくなった。主筋の断 面欠損を考慮した計算値は,腐食量による変化 は小さいが,実験では,主筋の腐食と腐食ひび 割れによって主筋の付着が低下したためにアー チ的な耐荷機構となり<sup>4)</sup>,耐荷力が増加した。



そこで,  $p_w$ =0.23%の供試体についても, せん 断補強筋ひずみを用いて算出したせん断補強筋 負担せん断力と全荷重の差から求められるコン クリート負担せん断力  $V_c$ と変位の関係を求め, その耐荷機構を検討した。結果を図 - 11(縦軸は  $V_c$ と最大荷重  $P_u$ の比)に示す。これより, 健全 供試体のコンクリート負担せん断力は最大約 8 割となっている。対して,腐食供試体ではせん 断補強筋にほとんど力が作用せず,ほぼ全荷重 をせん断補強筋以外の部分で負担しているよう であり,図-8の $p_w$ =0.00%供試体の荷重-変位曲 線と同様の傾向になっていることがうかがえる。

しかし、 $p_w$ =0.00%の質量減少率 3.3%の最大荷 重が、質量減少率 2.1%のものよりも低下した。 アーチ的な耐荷機構には圧縮域コンクリートの 軸方向耐荷力が必要である。今回、圧縮鉄筋も 腐食の対象となっており、圧縮鉄筋の腐食にと もなう腐食ひび割れが、アーチ機構による耐荷 力を低下させる一因となっていると考えられる。 これに対し、 $p_w$ =0.23%では、質量減少率 3.9% のものが同程度の耐荷力となっている。圧縮域 コンクリートの腐食ひび割れの状態が  $p_w$ =0.00%と異なっていた可能性があるととも に、スターラップが存在することで、引張主筋 のダウエル作用の低下と腐食ひび割れの軸方向 への進展が抑制されたものと考えられる。

## 4. 結論

以下に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) 健全時に斜め引張破壊を生じる RC はりの せん断補強筋が腐食した場合,腐食量と腐食ひ び割れの状況によっては,耐荷機構が変化し, 斜めひび割れが荷重低下の原因とならないこと がある。

(2) せん断補強筋が腐食した RC はりに斜めひ び割れが発生する状況では,軽微な腐食段階に おいてもせん断耐荷力が低下する傾向がある。 腐食とそれにともなう腐食ひび割れによって、 せん断補強筋とコンクリートの付着が低下し, コンクリート負担せん断力が, せん断ひび割れ 発生後,早期に低下するとともに,せん断補強 筋の断面欠損と降伏荷重の低下により、せん断 補強筋負担せん断力も低下すると考えられる。 (3) 主筋が腐食した RC はりでは,最大荷重が 健全供試体と同程度以上となった。また,剛性 の低下とともに変形能力が増加した。引張主筋 の腐食と腐食ひび割れによって付着が低下した ことにより形成されたと考えられるアーチ的な 耐荷機構によって耐荷力が増加するとともにエ ネルギー吸収能が大きくなったと考えられる。 (4) ただし,圧縮鉄筋の腐食にともなう腐食ひ び割れが存在すると,アーチ的な耐荷機構に必 要な圧縮域コンクリートの耐荷力が低下するた め,部材の耐荷力が持続しないこともある。

参考文献

- 1) 土木学会:平成8年制定コンクリート標準示 方書[耐震設計編], pp.11-15, 1996.3.
- 2) 土木学会:平成8年制定コンクリート標準示 方書[設計編], pp.58-65, 1996.3.
- 3) 例えば,日本コンクリート工学協会近畿支部:土木コンクリート構造物の震災対策に関する研究委員会報告書,pp147-148,1998.5.
- 4)橋本 航,森川 英典,岩田 和隆,小林 秀
  恵:鉄筋腐食を考慮した RC はり部材のせん
  断耐荷性能評価,土木学会第 57 回年次学術
  講演会講演概要集,V-138,pp.275-276,2002.9