

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^{*1}・山本 貴士^{*2}・服部 篤史^{*3}・宮川 豊章^{*4}

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

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た。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。

2. 実験概要

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

表 - 1 供試体一覧

No.	腐食量	p_w	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

*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 $V_{yd}/V_{mu}^{(1)}$ (V_{yd} :設計せん断力, 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、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 $s_s=160\text{mm}$) および $V_{yd}/V_{md}=0.98$ となる $p_w=0.80\%$ ($s_s=80\text{mm}$)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 $p_w=0.23\%$ ($s_s=275\text{mm}$)とした。耐力比の算定には、曲げ耐力は断面分割法を用い、せん断耐力は平成8年制定コンクリート標準示方書[設計編]²⁾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³⁾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

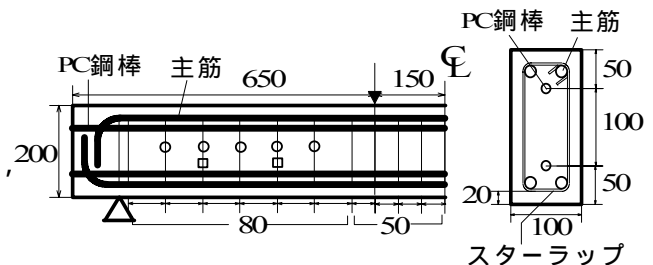
RCはりとした。せん断補強筋には、135°フック付きスターラップ(SD295A, D6)を用い、曲げスパンには一定間隔50mmで配筋した。コンクリートの目標配合強度は $f_{cr}=30\text{N/mm}^2$ とし、NaCl 5kg/m^3 を外割り添加した。

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, $\phi 13\text{mm}$)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_y 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_y の奇数倍変位での定変位繰返し3回とした。降伏

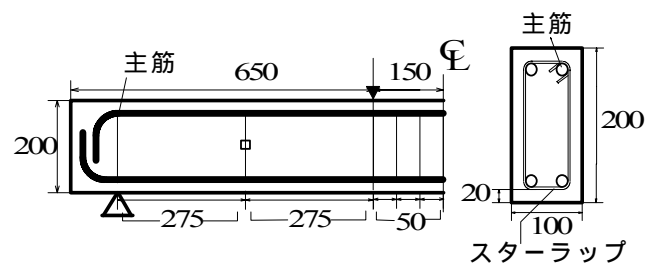


印は電食対象スターラップを示す。

$p_w=0.40\%$ 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



$p_w=0.23\%$ 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

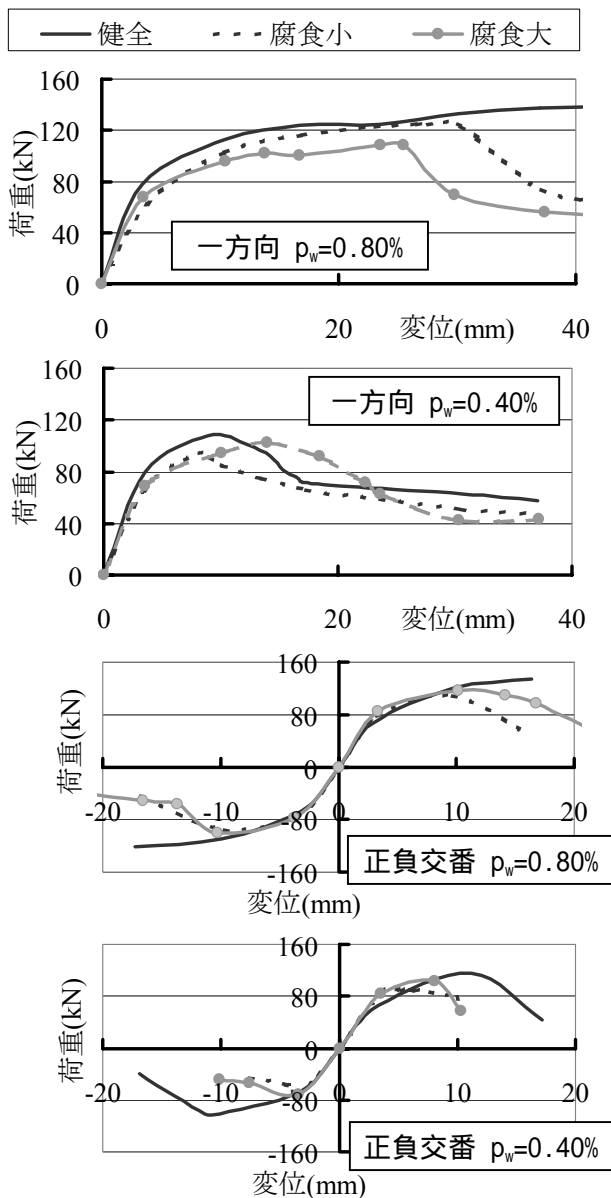


図 - 3 セン断補強筋シリーズ荷重-変位曲線

変位 δ_y は、健全供試体(S-2)の載荷において、降伏荷重の計算値 $P_{yca1}=65.8\text{kN}$ に達した時の変位 $\delta_y=3.37\text{mm}$ 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、 $p_w=0.23\%$ 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。

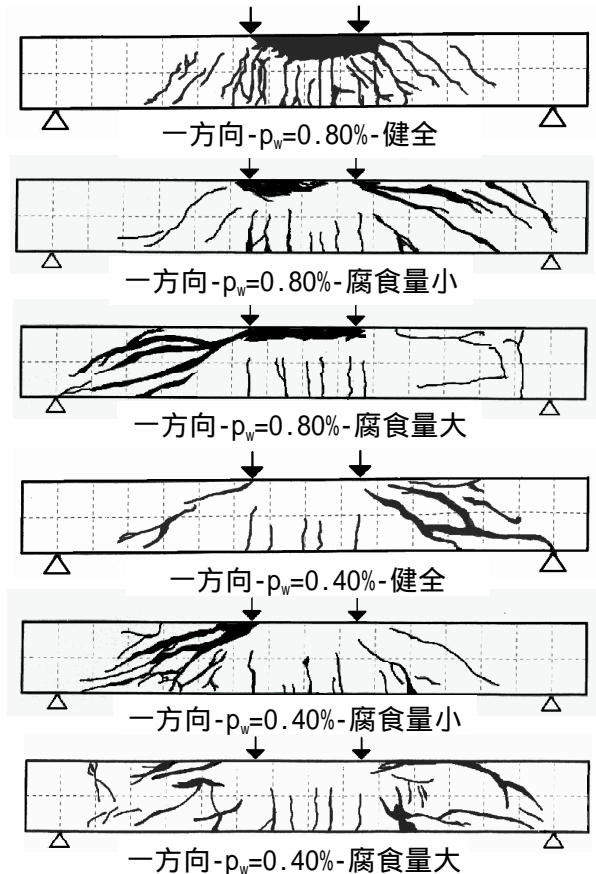


図 - 4 セン断補強筋シリーズ ひび割れ図

3. 実験結果および考察

3.1 セン断補強筋シリーズ

(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、 $p_w=0.80\%$ の健全供試体は曲げ破壊を生じた。また、一方向載荷、 $p_w=0.40\%$ 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, $p_w=0.80\%$ 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, $p_w=0.40\%$ の腐食量大と正負交番載荷, $p_w=0.80\%$ 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

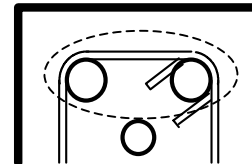


図-5 ひび割れ位置

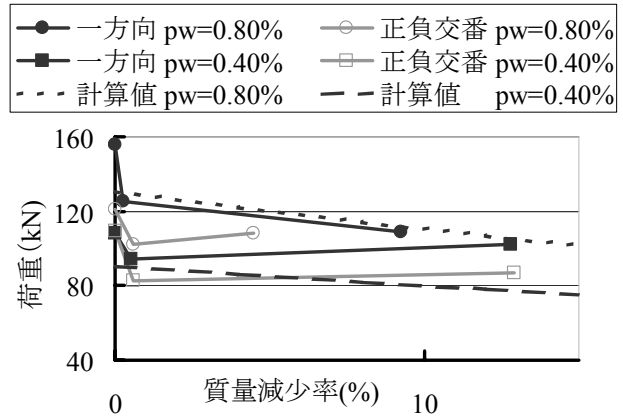


図-6 最大荷重

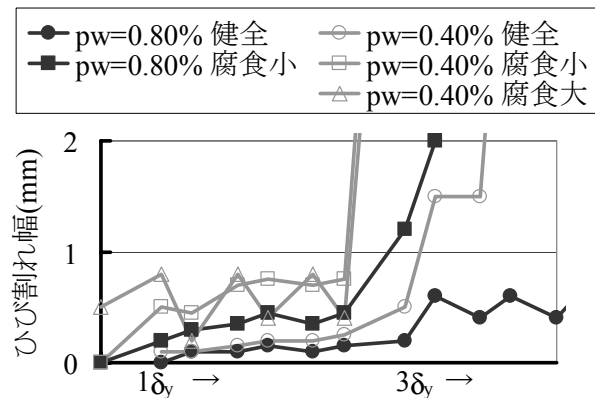


図-7 せん断ひび割れ幅 (正負交番載荷)

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, $p_w=0.80\%$ 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,

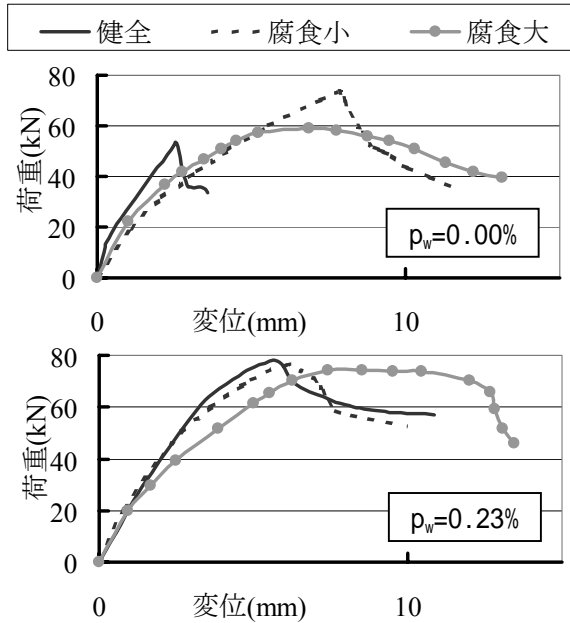


図 - 8 主筋シリーズ 荷重-変位曲線

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、 $p_w=0.40\%$ 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

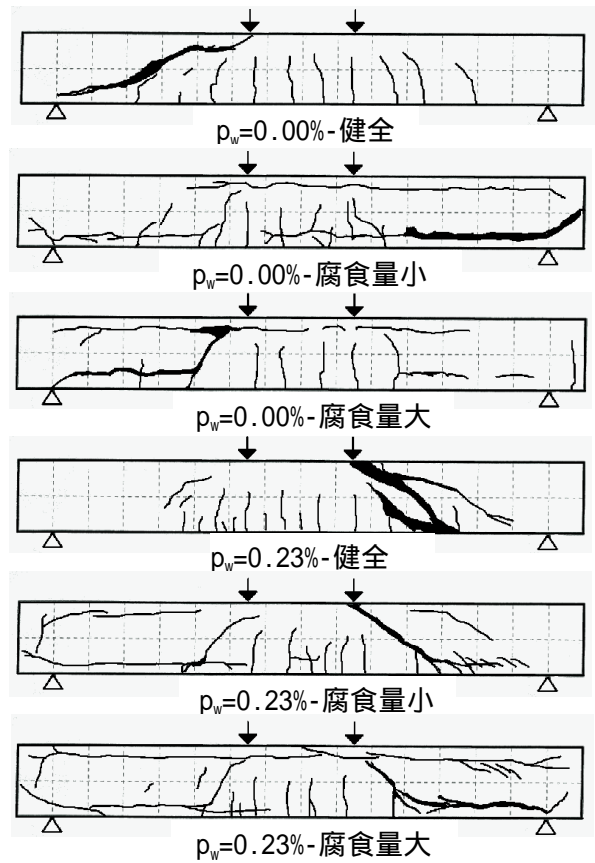


図 - 9 主筋シリーズ ひび割れ図

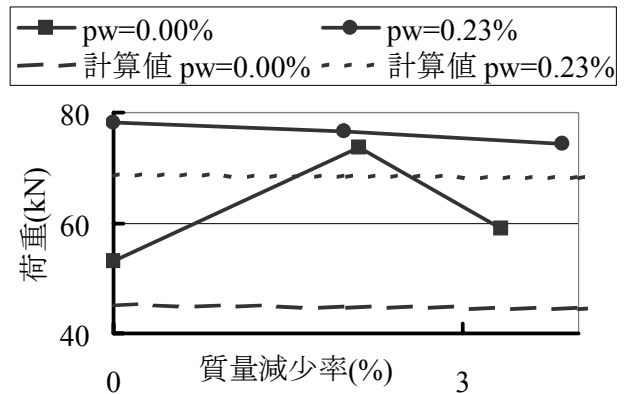


図 - 10 最大荷重

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。

$p_w=0.23\%$ の腐食供試体の最大荷重は健全より若干小さい。しかし、 $p_w=0.00\%$ 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⁴⁾、耐荷力が増加した。

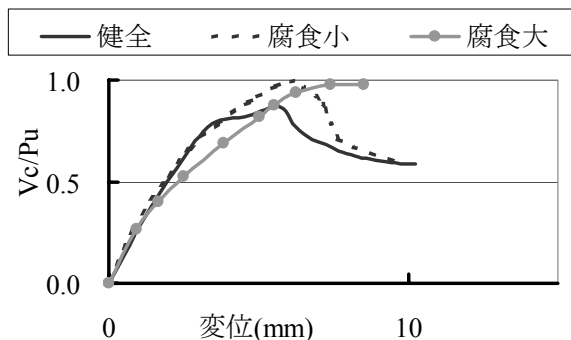


図 - 11 V_c/P_u -変位関係 ($p_w = 0.23\%$)

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。腐食とそれにとま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