

論文 せん断補強筋に沿った模擬腐食ひび割れを有する RC はりのせん断挙動

伊藤 賢^{*1}・松本 浩嗣^{*2}・中村 拓郎^{*3}・二羽 淳一郎^{*4}

要旨: せん断スパン比の小さな RC はりにおいてせん断補強筋の腐食によって生じたひび割れが、部材のせん断挙動に与える影響を検討するため、腐食ひび割れを模擬したひび割れを有する試験体を用いて載荷実験を実施した。その結果、腐食ひび割れにせん断変形が集中することにより斜めひび割れ発生荷重が増大することを確認した。また、階段状の不連続な斜めひび割れが生じ、その腐食ひび割れに沿った段差部におけるすべり変位と斜めひび割れの拡幅が連動することにより終局時に斜めひび割れの拡幅が確認された。さらに、この拡幅に伴う圧縮軟化挙動により圧縮ストラット強度が低下し、せん断耐力が低下することが確認された。
キーワード: 鉄筋腐食, 腐食ひび割れ, 斜めひび割れ, せん断耐荷機構, タイドアーチ機構, 圧縮軟化

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建造された鉄筋コンクリート (RC) 構造物の供用年数が 50 年を迎えようとしており、構造物の劣化が顕在化している。鉄筋腐食は RC 構造物の代表的な劣化であり、腐食に伴う鉄筋断面の欠損だけでなく、体積膨張によるコンクリートへのひび割れ、コンクリートと鉄筋の付着低下等を生じさせる。鉄筋腐食に関する研究は、塩害や中性化による腐食劣化が顕在化し始めた 1980 年代から数多く行われてきた。しかし、鉄筋腐食が生じた RC 部材の構造性能を評価する統一的方法は確立されておらず、特にせん断耐荷機構に関する検討は未だ十分とは言えない。

RC 部材の主鉄筋が腐食した場合、付着性状が低下し、耐荷機構がタイドアーチ機構に移行することによるせん断耐力の増大が確認されている¹⁾。一方、せん断補強筋が腐食した場合、その断面減少により分担せん断力が低下し、せん断耐力が低下するとの報告もある²⁾。このように、既往の研究の多くは鉄筋の断面 (質量) 減少率や付着劣化による影響を検討したものが多く、腐食ひび割れが構造性能に与える影響を検討した研究は少ない。

松尾ら¹⁾は、せん断補強筋に沿った腐食ひび割れの存在により斜めひび割れの貫通が抑制され、数%程度の質量減少率ではせん断耐力は保持されると報告している。すなわち、斜めひび割れ発生荷重が終局荷重に影響する部材においては、腐食ひび割れが耐力低下を抑制する効果があると考えられる。一方、タイドアーチ機構が発現するせん断スパン比 (a/d) が小さな RC はりにおいては、斜めひび割れ発生後も圧縮ストラットの形成により、大

きな荷重増進が期待できるが、腐食ひび割れの影響は明らかにされていない。

そこで、本研究では腐食ひび割れを有する a/d が小さな RC はりのせん断挙動の検討を目的に、模擬腐食ひび割れを導入した RC はりの載荷実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本研究では、 a/d 、模擬腐食ひび割れ間隔 (s)、せん断補強筋の有無をパラメータとした合計 6 体の試験体を作製し、載荷実験を実施した。せん断補強筋を有する試験体においては、せん断補強筋を模擬腐食ひび割れと同じ位置に配置した。せん断補強筋比 (r_w) が同程度となるよう、 $s=100\text{mm}$ の試験体には D6 を、 $s=200\text{mm}$ の試験体には D10 のせん断補強筋を用いた。また、せん断補強筋の断面減少と模擬腐食ひび割れの影響を区別するため、模擬腐食ひび割れのみを導入したせん断補強筋を有しない試験体も作製した。なお、腐食鉄筋を模擬するため、試験区間に質量減少率 5%程度程度の腐食をあらかじめ導入したせん断補強筋を配筋し、模擬腐食ひび割れを後述の

表-1 試験体概要

試験体名	a/d	s	せん断補強筋
$a/d1.0-s100$	1.0	100	D6 ($r_w=0.422\%$)
$a/d1.0-s200$		200	D10 ($r_w=0.476\%$)
$a/d1.0-s100n$		100	無
$a/d1.5-s100$	1.5	100	D6 ($r_w=0.422\%$)
$a/d1.5-s200$		200	D10 ($r_w=0.476\%$)
$a/d1.5-s100n$		100	無

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京大学 生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター特任講師 博(工) (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助教 博(工) (正会員)

*4 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)

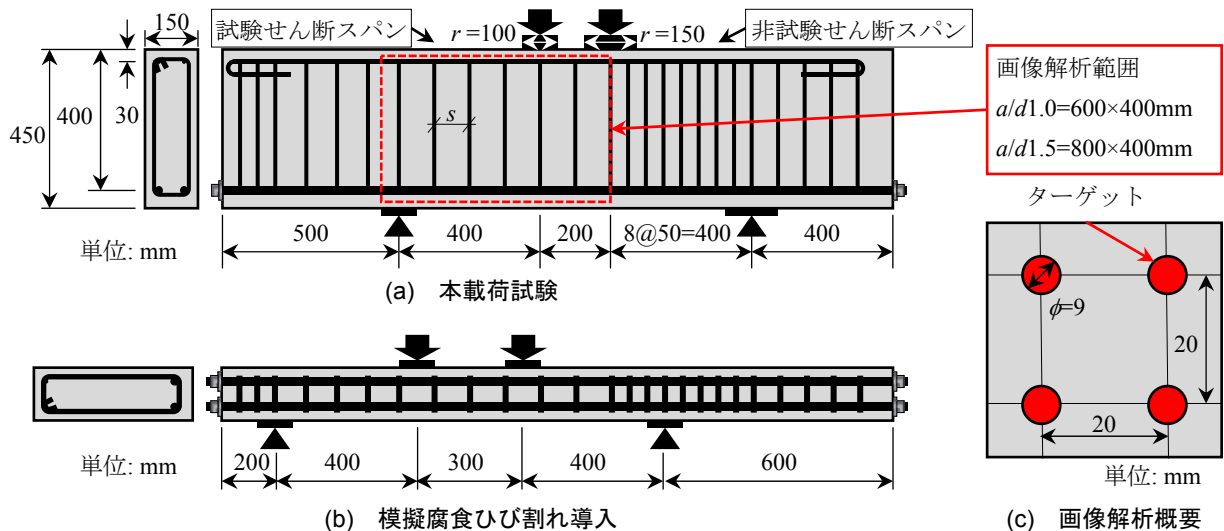


図-2 試験体概要 (a/d1.0-s100 試験体)

表-2 コンクリートの配合

G_{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	AE 減水剤
20	60	44	172	286	797	1046	0.573

表-3 鉄筋の力学特性

配筋場所	種類	呼び径	公称断面積	降伏強度
引張鉄筋	SBPD1080	D25	506.7	1181
圧縮鉄筋	SBPD1275	U10.7	90.0	1377
せん断補強筋	SD295A	D6	31.7	336
		D10	71.3	370

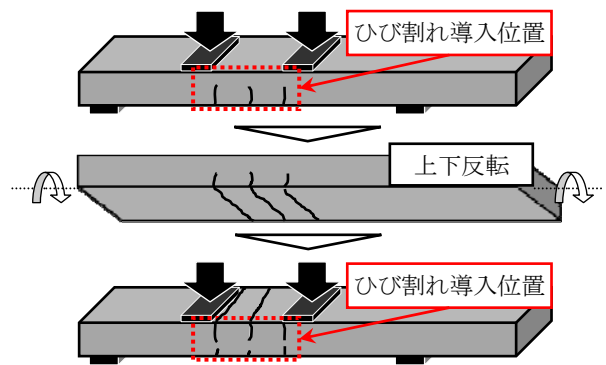


図-1 模擬腐食ひび割れ導入方法

方法で別途導入した。各試験体の概要を表-1 に、a/d1.0-s100 試験体の概要を図-2 に示す。他の試験体は、図-2 (a) に示した試験体概要から、せん断スパン (a)、模擬腐食ひび割れ間隔 (s)、またはせん断補強筋の有無を変化させた。引張鉄筋には異形 PC 鋼棒を用いた。なお、異形 PC 鋼棒は緊張せず、試験体端部に定着板を設けて定着した。また、試験せん断スパンを限定するため、非試験せん断スパンには過密な配筋を行い、幅の広い載荷板を用いた。載荷試験は、図-2 に示すように静的 4 点曲げ載荷とした。試験体と支点の間には減摩パッドを使用することで水平反力の影響を除去した。本実験で用いた配合を表-2 に、各鉄筋の力学特性を表-3 に示す。測定項目は、荷重、スパン中央における鉛直変位、また東ら³⁾が開発した画像解析を用いて、試験体表面のターゲットの変位量からひずみ分布及び模擬腐食ひび割れ及び斜めひび割れにおける開口変位、すべり変位を計測した。なお、画像計測は図-2 (a)、(c) に示す領域を対象とし、直径 9mm のターゲットを 20×20mm の格子状に貼付して実施した。

2.2 模擬腐食ひび割れ導入試験

鉄筋の腐食膨張により生じる腐食ひび割れでは部材断

面方向にひび割れ幅分布が生じるが、本研究で検討したせん断挙動への影響は小さいと仮定し、Pimanmas ら⁴⁾の方法を参考に比較的ひび割れ幅分布が均一な模擬ひび割れを載荷によって導入することにした。図-2 (b) に模擬ひび割れ導入時の載荷概要を、模擬腐食ひび割れ導入方法の概略図を図-1 に示す。まず、図-2 (a) に示した本載荷試験において試験せん断スパンとなる位置が等曲げモーメント区間になるように載荷点及び支点を配置し、試験体を横倒しにした状態で静的 4 点曲げ試験を実施した。また、ひび割れの発生位置を制御するため、打設時に、せん断補強筋のかぶり部分にはり高と同じ長さ 450mm、幅 25mm、板厚 1.5mm の PET 板のスリットを埋設した。片方向の載荷終了後、試験体を反転して同様の載荷を再度実施し、断面に貫通ひび割れを導入した。

模擬腐食ひび割れ導入後のひび割れ幅 ($w_{cr,ave}$) を表-4 に、ひび割れ性状を図-3 に示す。ひび割れ幅は、載荷試験後の残留ひび割れ幅を指し、ひび割れが複数ある場合はその平均値を示した。試験体間でばらつきはあるものの概ね 0.05mm 程度のひび割れが導入された。また載荷試験中の目視観察から、図-3 に点線に示す位置に貫通したひび割れが導入されたことを確認している。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

本実験で得られた各試験体の圧縮強度 (f'_c), 斜めひび割れ発生荷重 (P_{cr_exp}), 最大荷重 (P_{u_exp}) を表-4 に, 終局時のひび割れ状況を図-3 に示す。いずれの試験体においても引張鉄筋は降伏しておらず, 図-3 の斜線部に示すようにコンクリートの圧壊は, 等曲げモーメント区間ではなくせん断スパン内で生じたため, 破壊形態はせん断圧縮破壊であったと判断した。

本実験では画像解析を用いたため, 载荷中のひび割れ挙動の観察は全てこの画像解析を基に行った。ひび割れの進展挙動の一例として $a/d1.0-s100$ の荷重増進に伴う主引張りずみ分布を図-4 に示す。いずれの試験体においても载荷初期に等曲げモーメント区間における曲げひび割れの発生, 進展が確認された。また, 模擬腐食ひび割れは断面高さ方向に貫通していたため, ひび割れは载荷初期の段階でも断面高さの半分以上の高さで開口が確認された。図-3 に示すように斜めひび割れは, 一般的な RC はりで見られる一本の連続的なひび割れではなく階段状に不連続に発生した。なお, 全ての試験体において斜めひび割れ発生時に数 kN の荷重低下が生じ, この荷重低下直前の荷重を斜めひび割れ発生荷重 (P_{cr_exp}) とした。この時に生じた最初の斜めひび割れを図-3 に赤色の太線で示した。一般的なディープビームの挙動と同様に斜めひび割れ発生後も荷重が再度増加した。その後, 最初の斜めひび割れが拡幅, また二本目の斜めひび割れが発生し, 最終的に, 図-3 に示した領域で圧壊が生じることにより破壊に至った。

3.2 斜めひび割れ発生荷重

既往の研究より部材軸直角方向の初期ひび割れは斜めひび割れ挙動に影響することが報告されている^{1),4)}。図-5 は試験体が健全な場合の計算値 (P_{cr_cal}) と模擬腐食ひび割れを有する試験体の斜めひび割れ発生荷重 (P_{cr_exp}) の比較を示す。本研究では, 式(1)に示すせん断補強筋を有しないコンクリートはりのせん断耐力式⁵⁾により健全な場合の斜めひび割れ発生荷重 (P_{cr_cal}) を算定した。なお, 本研究の試験体と類似した寸法の $a/d=1.0$ の RC はりにおける斜めひび割れ発生荷重の予測式とし

て同式が適用可能なことを別途確認している⁶⁾。

表-4 試験結果

試験体名	w_{cr_ave} (mm)	f'_c (N/mm ²)	P_{cr_exp} (kN)	P_{u_exp} (kN)
$a/d1.0-s100$	0.0719	39.9	321.1	636.2
$a/d1.0-s200$	0.0409	38.7	256.8	696.7
$a/d1.0-s100n$	0.0519	37.4	305.0	504.9
$a/d1.5-s100$	0.0493	49.5	254.6	640.6
$a/d1.5-s200$	0.0506	37.2	244.0	500.1
$a/d1.5-s100n$	0.0377	32.2	226.2	385.3

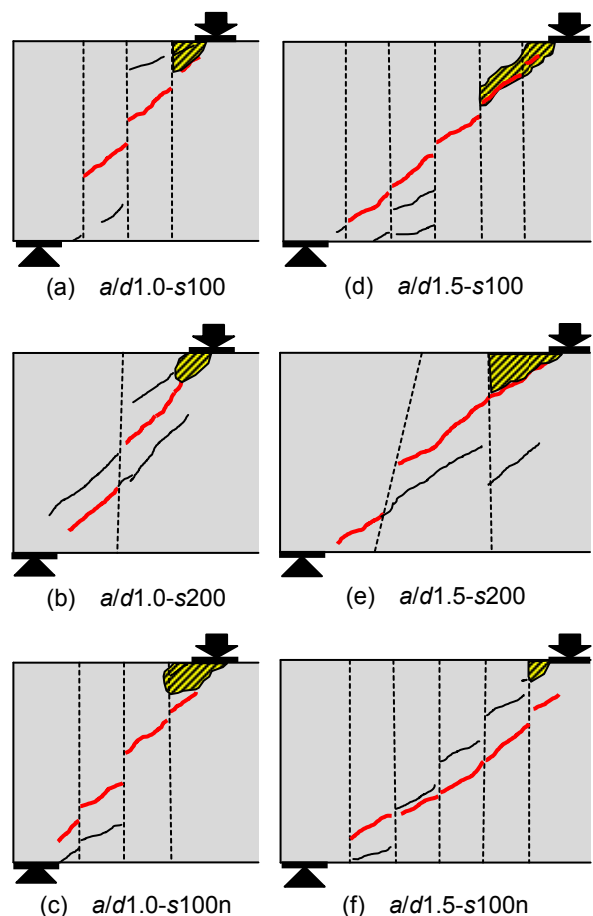


図-3 終局時のひび割れ状況
(点線：模擬腐食ひび割れ, 実線：载荷により生じたひび割れ, 赤色の太線：最初に生じ, 終局時に大きく拡幅した斜めひび割れ, 斜線部：圧壊領域)

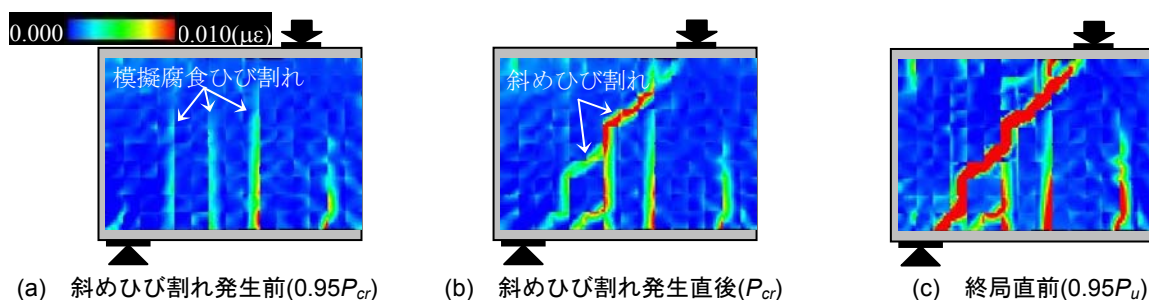


図-4 主引張りずみ分布の変化 ($a/d1.0-s100$)

$$V_c = 0.2 f_c^{1/3} p_t^{1/3} \left(\frac{10^3}{d} \right)^{1/4} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d} \right) b_w d \quad (1)$$

ここで、 f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²), p_t : 引張鉄筋比(%), d : 有効高さ(mm), a : せん断スパン(mm), b_w : 断面幅(mm), である。

図-5 から分かるように $a/d1.0-s200$ 試験体を除く全ての試験体で 20%程度, 斜めひび割れ発生荷重が計算値 (P_{cr_cal}) を上回ることが確認された。

画像解析結果から得られた斜めひび割れ発生直前のせん断ひずみ分布を図-6 に示す。このせん断ひずみ分布からも分かるように, せん断ひずみが模擬腐食ひび割れ位置に集中していることが確認された。これらの結果より, せん断補強筋に沿った模擬腐食ひび割れにせん断ひずみ (変形) が集中し, 未損傷部のせん断変形が緩和されるために斜めひび割れの発生が遅れ, 斜めひび割れ発生荷重が計算値より大きな値を示したものと推察される。

一方, 既往の研究^{1),4)}では部材軸直角方向の模擬腐食ひび割れにより斜めひび割れの発生が遅延しただけでなく, 進展が抑制されたとされている。しかし, 本研究において斜めひび割れは不連続ではあったものの, 同時に発生し, 斜めひび割れの進展抑制効果は確認されなかった。これは, 載荷前の初期ひび割れが数ミリ程度あった既往の研究に比べて本研究で導入されたものが 0.05mm 程度 (表-4 参照) と小さかったことが要因であると考えられる。このことより, 初期ひび割れによる斜めひび割れの発生遅延効果はひび割れ幅が小さな場合においても期待できるが, 斜めひび割れの進展抑制効果はひび割れ幅に依存し, 本実験で検討した 0.05mm 程度のひび割れ幅においては, その効果は期待できないと考えられる。

また, $a/d1.0-s200$ 試験体において, 斜めひび割れの発生遅延効果は確認できなかった。Pimanmas ら⁴⁾の研究では, 本実験と同様の軸方向に直交する初期ひび割れが終局状態に繋がる斜めひび割れの形成を阻害することが確認されている。しかし, Pimanmas らの実験において斜めひび割れの遅延効果が確認されたのは, 初期ひび割れに挟まれた区間のみであった。また, $a/d1.0-s200$ 試験体では, 模擬腐食ひび割れは 1 本のみであり, 模擬腐食ひび割れに挟まれた区間はない。これらの結果から, 斜め発生遅延効果は, 模擬腐食ひび割れにより挟まれた区間でのみ期待できることが示唆された。

3.3 斜めひび割れ拡幅挙動

図-4 (c)にも示すように, 終局時に図-3 に赤線で示す最初に生じた斜めひび割れが大きく拡幅していることが分かる。また, この斜めひび割れの拡幅は模擬腐食ひび割れにおける鉛直方向のすべり変位に連動して生じることを確認した。図-7 に $a/d1.0-s100$ 試験体の荷重増加

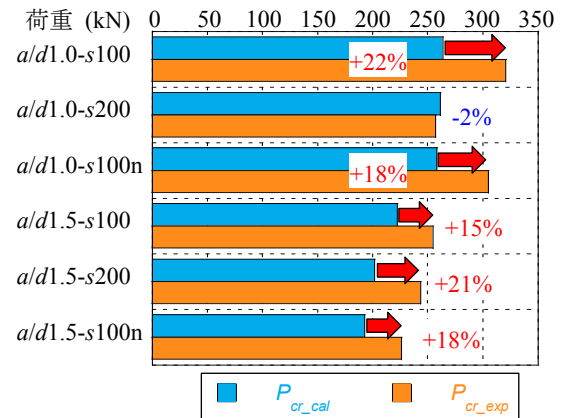


図-5 斜めひび割れ発生荷重

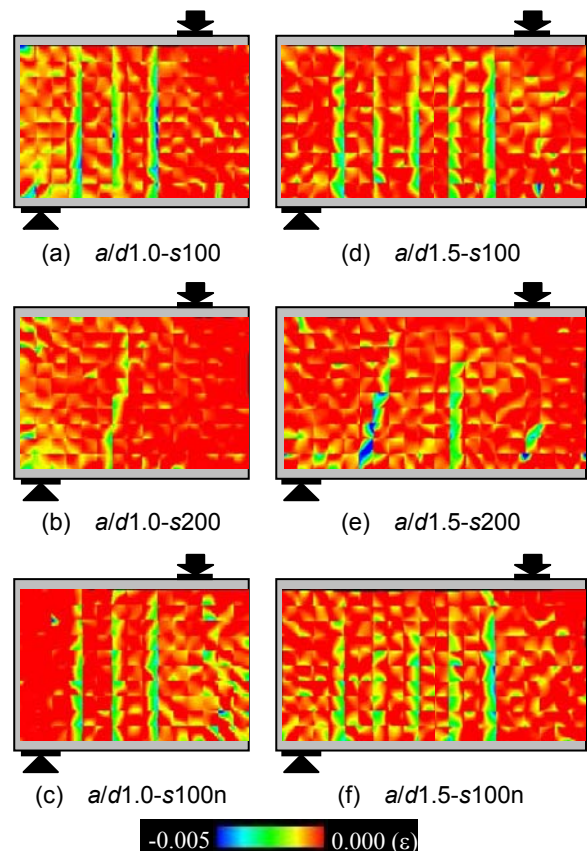


図-6 模擬腐食ひび割れに沿ったせん断ひずみの集中

に伴う模擬腐食ひび割れに沿った, 部材軸鉛直方向のすべり変位の分布を示す。この分布から斜めひび割れ発生までは, 模擬腐食ひび割れに沿ったすべり変位は, はり高方向に概ね平均的に増加していることが確認できる。一方, 階段状の斜めひび割れが発生した後は, 図-7 の(a)~(c)に示すような段差部にそのすべり変位が集中していることがすべり変位の分布からも確認できる。また, この局所化したすべり変位の荷重増加に伴う変化を図-8 に示す。なお, このすべり変位は, 図-7 の(a)~(c)に示すような段差部で生じたすべり変位の平均値である。この段差部において, 斜めひび割れ発生後に模擬腐食ひび割れのすべり変位が大きく増進していることが確認で

きる。さらに、この模擬腐食ひび割れに沿ったすべり変位量が図-9に示すような斜めひび割れ部の主引張方向の開口変位量と概ね一致していることが確認できる。これは、図-9に示すように段差部のすべりが斜めひび割れの開口に連動して生じるためであると考えられる。なお、同様のすべり変位の局所化と斜めひび割れ拡幅量との相関関係は他の試験体においても確認された。

これらのすべり変位の局所化と斜めひび割れ拡幅との連動が、終局時における斜めひび割れの大きな拡幅に繋がったものと考えられる。

3.4 セン断耐力

表-5に各試験体の設計せん断耐力と本実験より得られたせん断耐力の比較を示す。なお、設計せん断耐力 ($P_{u,cal}$) は、式(2)に示す二羽⁷⁾が提案したせん断補強筋を用いないディーブームのせん断耐力 (V_{cal1}) と式(3)に示す谷村ら⁸⁾が提案したせん断補強筋の貢献分を評価した係数 k との積から算出した。

$$V_{cal1} = \frac{0.24 f_c^{1/2/3} (1 + \sqrt{p_t}) (1 + 3.33 r/d) b_w d}{1 + (a/d)^2} \quad (2)$$

$$k = 1 + 0.85 r_w^{1/3} (a/d - 0.75) \quad (3)$$

ここで、 r : 部材軸方向の載荷板幅(mm)、 r_w : セン断補強筋比(%), である。

表-5から分かるように模擬腐食ひび割れを有する試験体のせん断耐力は、設計値よりも20%程度低い値を示した。これは、斜めひび割れの拡幅に伴う、圧縮スト

ラット強度の低下が要因であると推察される。

前述したとおり本実験では、終局時に斜めひび割れの大きな拡幅が確認された。また、コンクリート標準示方書ではストラットタイモデルに関する項目中に、ストラット強度がストラット内に生じるひび割れにより影響を受けることが示されている⁹⁾。また、Vecchioらは、板厚70mmの壁板状試験体を用いて、圧縮応力作用方向に平行するひび割れによって圧縮強度が低下する圧縮軟化現象を確認し、圧縮軟化係数 (η) の評価方法を提案している¹⁰⁾。本研究では、壁とはり、板厚等の違いはあるもののストラット強度の低下率に Vecchio らの提案式を用いた評価を試みた。

$$f_{c2}' = \eta f_c' \quad (4)$$

$$\eta = (0.8 - 0.34 \varepsilon_1 / \varepsilon_c')^{-1} \quad (5)$$

ここで、 f_{c2}' : 圧縮軟化を考慮した圧縮強度(N/mm²)、 ε_1 : 平均引張ひずみ、 ε_c' : コンクリートの圧壊ひずみ(負値), である。なお、 ε_1 は表-5に示す終局時の平均斜めひび割れ幅 (w) をストラットタイモデルから得られるストラット幅で除すことにより求めた。

この圧縮軟化挙動を考慮して再評価したせん断耐力 ($P_{u,cal2}$) を表-5にまとめる。表-5から分かるように、再評価したせん断耐力は、 $a/d \leq 1.5$ の試験体を除いて概ね評価できていることが確認できる。図-10に圧縮ストラットの強度低下を引き起こしたと考えられる終局時に大きく拡幅した斜めひび割れ(図-3赤線参照)とス

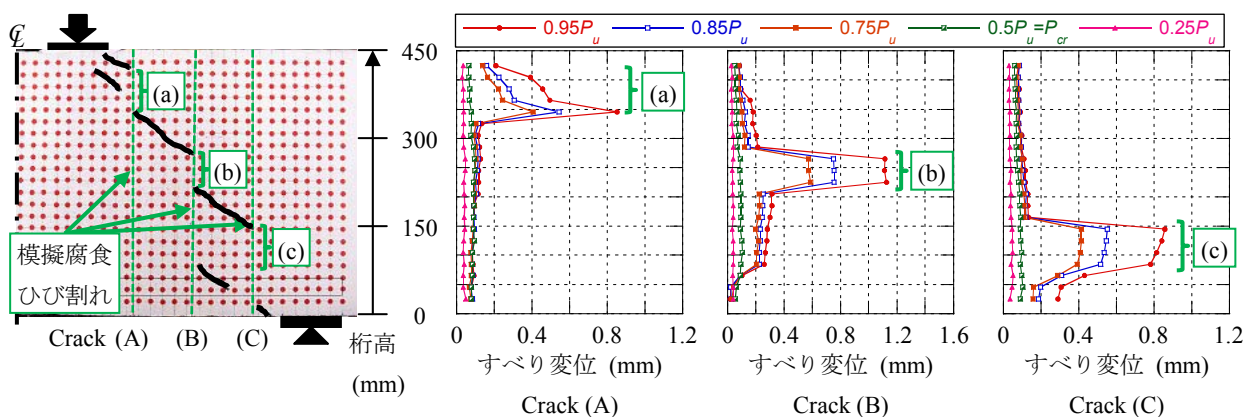


図-7 斜めひび割れ段状部におけるすべり変位の局所化

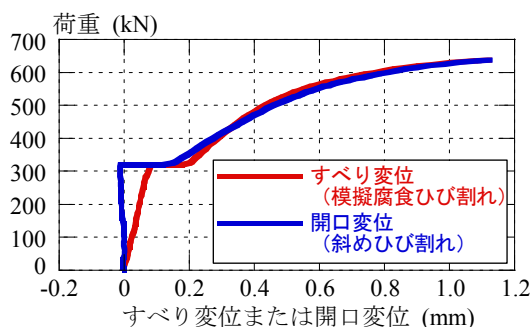


図-8 荷重増加に伴うすべり変位及び開口変位の推移

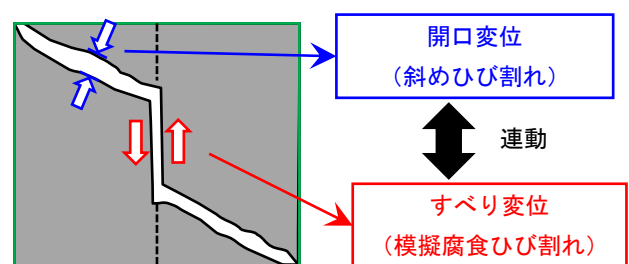


図-9 すべり変位と斜めひび割れ拡幅の連動

表-5 終局荷重の評価

試験体名	P_{u_exp} (kN)	圧縮軟化考慮せず ^a			圧縮軟化考慮					
		f'_c (N/mm ²)	P_{u_cal} (kN)	P_{u_exp}/P_{u_cal}	w (mm)	η	f'_{c2} (N/mm ²)	P_{u_cal2} (kN)	P_{u_exp}/P_{u_cal2}	
a/d1.0-s100	636.2	39.9	821.5	0.77	1.12	0.760	30.3	662.6	0.96	
a/d1.0-s200	696.7	38.7	809.4	0.86	0.90	0.824	31.9	711.6	0.98	
a/d1.0-s100n	504.9	37.4	678.6	0.74	1.22	0.738	27.6	554.2	0.91	
a/d1.5-s100	640.6	49.5	744.5	0.86	1.52	0.647	32.1	557.6	1.15	
a/d1.5-s200	500.1	37.2	622.7	0.80	1.63	0.645	24.0	465.3	1.07	
a/d1.5-s100n	385.3	32.2	377.9	1.02	1.70	0.644	20.7	307.2	1.25	

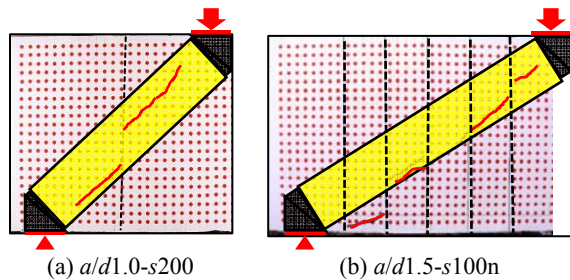


図-10 圧縮ストラットと斜めひび割れ位置

トラットタイモデルから得られる圧縮ストラットの位置関係を示す。多くの試験体で図-10 (a)に示すようにストラット中央部に顕著な斜めひび割れが生じているのに対し、図-10 (b)に示すように a/d1.5-s100n 試験体においては顕著なひび割れがストラットの下縁に沿うように発生した。このため、a/d1.5-s100n 試験体では圧縮軟化の影響が小さく再評価値と実験値が乖離したと推察される。

4. 結論

本研究では、せん断補強筋に沿った腐食ひび割れが a/d の小さな RC はりのせん断挙動に及ぼす影響を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 腐食ひび割れを有する RC はりでは、斜めひび割れ発生荷重が計算値よりも 20%程度増大することが確認された。これは、せん断変形が腐食ひび割れ位置に集中し、ひび割れていない健全部のせん断変形を緩和するためであると推察される。ただし、この効果は、腐食ひび割れにより挟まれた区間でのみ期待できることが実験結果から示唆された。
- (2) 一般的な RC はりとは異なり、斜めひび割れが腐食ひび割れを境界に階段状に不連続に発生し、この階段状の斜めひび割れの段差部における腐食ひび割れに沿ったすべり変位が局所的に増大した。さらに、このすべり変位の局所化に起因して、終局時に斜めひび割れが大きく拡幅することが確認された。
- (3) 腐食ひび割れを有する場合、せん断耐荷力が計算値よりも 20%程度低下することが確認された。これは、斜めひび割れの拡幅に伴う圧縮ストラット強度の低下に起因すると推察され、その低下率は、終局時の斜めひび割れ幅とストラットタイモデルにお

るストラット幅を用いてストラットでの圧縮軟化を考慮することにより概ね評価できることが確認された。

参考文献

- 1) 松尾豊史, 酒井理哉, 松村卓郎, 金津 努: 鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.2, pp.69-77, 2004.5
- 2) 佐藤吉孝, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: せん断補強筋及び主筋の腐食が RC 部材のせん断耐荷特性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.821-826, 2003.7
- 3) 東 広憲, 渡辺 健, 三木朋広, 二羽淳一郎: 画像解析を用いた鉄筋コンクリートはりの破壊性状の予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.793-798, 2008.7
- 4) Pimanmas, A. and Maekawa, K.: Influence of Pre-Crack on RC Behavior in Shear, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.277-291, 2001.2
- 5) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村 甫: せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 6) 渡辺 健, 岩波光保, 横田 弘, 二羽淳一郎: AE 法を用いたディーブームにおける圧縮破壊領域の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.175-180, 2002.7
- 7) 二羽淳一郎: FEM 解析に基づくディーブームのせん断耐力算定式, 第2回 RC 建造物のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, pp.119-126, 1983.10
- 8) 谷村幸裕, 佐藤 勉, 渡邊忠朋, 松岡 茂: スターラップを有するディーブームのせん断耐力に関する研究, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.29-43, 2004.5
- 9) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2012.3
- 10) Vecchio, F. J. and Collins, M. P.: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, No.83-22, pp.219-231, 1986.3-4