

論文 軸引張鉄筋およびスターラップが腐食した RC はりのせん断耐力について

薛 昕¹・広森 紳太郎^{*2}・関 博^{*3}

要旨: 鉄筋（軸引張鉄筋，スターラップ）の腐食が RC はりのせん断耐荷性状に及ぼす影響を実験により検討した。その結果，最大腐食減量率が 35%程度以下であれば，スターラップの腐食がせん断耐荷機構に及ぼす影響は少ないことを示した。一方，軸引張鉄筋が腐食した場合，斜めひび割れが載荷点近傍に近づき耐荷機構の変化を起こすことを確認した，軸引張鉄筋が腐食した場合，既往のせん断算定式を用い，支点が中央載荷点方向に移動したと仮定して RC はりのせん断耐力を評価できることを明らかにした。

キーワード: 鉄筋腐食，アーチ機構，せん断耐荷性状，軸引張鉄筋，スターラップ

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC とする）構造物の維持管理は新設構造物の維持管理と同様に重要である。構造物の維持管理では，供用期間中の RC 構造物の性能を推定し，要求される水準に維持する必要がある，劣化した部材の構造性能を精度よく評価することが求められている¹⁾。

鉄筋腐食が RC はりのせん断耐荷性状に及ぼす影響は複雑であり，メカニズムの究明には多くの課題が残されており，より多くの研究データの蓄積が必要である。軸引張鉄筋の腐食による影響に関して，既往の研究^{2),3)}では，軸引張鉄筋の腐食は RC はりの耐荷機構の移行を引き起こすと指摘している。著者ら⁴⁾は，実験により軸引張鉄筋の腐食と耐荷機構の変化との関係がせん断スパン比の影響を受けることを確認した。しかし，耐荷メカニズムの完全究明および腐食影響の定量化まで至っていない。スターラップの腐食による影響に関して，既往の研究では結論は多岐に及ぶが，軸引張鉄筋の腐食などほかの因子の影響が絡みあい，影響の特定は難しいと思われる。

そこで，本研究は，電食試験を用いて鉄筋を腐食させた RC はりの試験体の載荷試験を行い，鉄筋が腐食した RC はりのせん断耐荷性状を実験的に調査し，はりの耐荷メカニズムを検討した。さらに，軸引張鉄筋，スターラップのそれぞれの影響を定量化する手法を探ることを試みた，また，本論文では既発表の実験結果⁴⁾をも今回の実験結果にできるだけ取り入れて検討することとした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の概要は図-1 に示し，試験体の断面形状は幅 12cm×高さ 24cm，有効高さ 22cm の矩形断面である。せん断破壊を先行させるため，軸引張鉄筋に高強度のネジ節鉄筋 D19 を使用した。スターラップに SR235 の $\phi 6$ を使用し溶接閉鎖型とした。スターラップの配筋間隔は 120mm で，鉄筋比は 0.39%である。鉄筋の物性は表-2 に示す。軸引張鉄筋を十分定着させるため，軸引張鉄筋をナットで端部に配置してある鉄板に固定した。電食試験で鉄筋を腐食させるため，軸引張鉄筋とスターラップとの接触箇所に絶縁処理を施した。

試験体諸元は表-1 に示す。実験パラメータは腐食対象，せん断スパン比 a/d ，腐食レベルである。No.7~No.11 はスターラップ，それ以外の試験体は軸引張鉄筋を腐食対象とした。せん断スパン比ごとに健全な試験体を用意した。コンクリートの配合は表-3 に示す。試験体を打設した後，一週間湿潤養生を行い，28 日経過後に電食試験を始めた。電食試験が終了直後に載荷試験を行った。各試験体の圧縮強度を表-1 に示す。

シリーズ名	a (mm)	b (mm)	a/d	S_1 (mm)	S_2 (mm)
B(2.0)-ms	440	1120	2.0	120	80
B(2.6)-ms	580	1400	2.6		100
B(3.2)-ms	700	1640	3.2		100

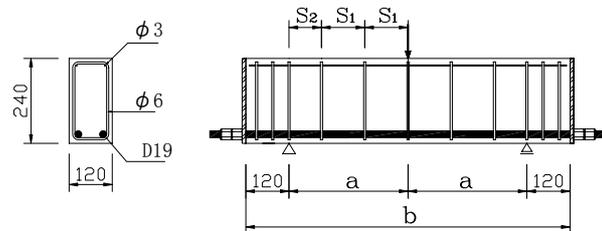


図-1 試験体概略

*1 早稲田大学大学院 創造理工研究科 建設工学専攻 工修 (正会員)

*2 早稲田大学大学院 創造理工研究科 建設工学専攻 (正会員)

*3 早稲田大学 創造理工学部 工博 (正会員)

表-1 試験体諸元及び実験結果

番号	a/d ²⁾	試験体名 ¹⁾	f' _c (N/mm ²)	電食 ⁴⁾ 対象	軸引張鉄筋 腐食減量率(%)		スターラップ 腐食減量率(%)		P _{test} ⁵⁾ (kN)
					平均	最大	平均	最大	
No.1	2.0	B(2.0)-ms	38.0	—	0.0	0.0	0.0	0.0	163.5
No.2		B(2.0)-m1s	39.1	○	7.8	15.1	1.0	1.6	178.6
No.3		B(2.0)-m2s	39.3		9.1	15.0	3.0	4.9	206.1
No.4	2.6	B(2.6)-ms	33.1	—	0.0	0.0	0.0	0.0	148.0
No.5		B(2.6)-m1s	35.1	○	3.1	5.0	3.4	5.6	154.8
No.6		B(2.6)-m2s	35.9		18.4	32.0	17.8	29.2	164.2
No.7		B(2.6)-ms1	34.2	△	0.6	0.9	5.6	6.1	144.0
No.8		B(2.6)-ms2	33.9		1.0	1.5	8.3	11.2	148.2
No.9		B(2.6)-ms3	34.6		1.5	2.3	14.0	20.9	138.9
No.10		B(2.6)-ms4	35.1		1.7	3.0	16.3	27.6	140.8
No.11		B(2.6)-ms5	34.9		0.8	0.6	19.3	34.2	138.9
No.12	3.2	B(3.2)-ms	35.2	—	0.0	0.0	0.0	0.0	141.1
No.13		B(3.2)-m1s	34.9	○	5.0	8.0	2.9	4.8	141.0
No.14		B(3.2)-m2s	33.3		6.0	8.5	1.5	2.5	143.4

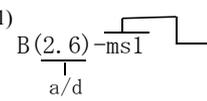
注：1)  ms：健全試験体
 m1s：軸引張鉄筋を電食対象とし、腐食レベルが1であ
 ms1：スターラップを電食対象とし、腐食レベルが1である。
 2) a/d：せん断スパン比
 3) f'_c：コンクリート圧縮強度、
 4) 電食対象：-の場合 健全、○の場合 軸引張鉄筋、△の場合 スターラップ
 5) P_{test}：破壊荷重

表-2 鉄筋の物性

補強材	種別	規格	断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)
軸引張鉄筋	D19	USD685A	287	706
スターラップ	φ6	SR235	28	300

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
48.1	51.8	387	186	881	842	5.8

2.2 腐食促進方法

電食試験を行い鉄筋を腐食させた。鉄筋をアノード、銅板をカソードとし、3%のNaCl溶液に浸漬させた試験体に直流電流を印加した。積算電流量を変化させることにより鉄筋の腐食レベルを相違させた。鉄筋腐食生成物の除去作業は日本コンクリート工学協会の規準集JC1-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠して行った。腐食レベルに関しては、平均腐食減量率と最大腐食減量率の2つの指標を用いて評価することとした。せん断スパン内のすべての鉄筋の質量減量率の平均値を平均腐食減量率とした。質量減量率は腐食生成物を取り除いた後の質量減量を用いて式(1)により求めた。

$$C = \frac{\Delta w}{w} \times 100 \quad (1)$$

ここに、C：質量減量率 (%)

Δw：腐食に伴う減少質量 (g)

w：腐食前の質量 (g)

最大腐食減量率については、軸引張鉄筋の場合、ノギスを用いて最も欠損した断面の垂直2方向の直径を測定

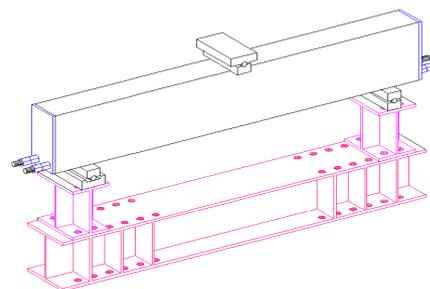


図-2 荷重試験概略

し、楕円と仮定して求めた断面欠損率を最大腐食減量率とした。スターラップの場合、縦方向側面を切り出した試料に引張試験を行い、強度差により求めた。

2.3 荷重試験概略

荷重方法の概略は図-2に示す。荷重方法は3点曲げ荷重とし、荷重速度は0.1mm/分を標準とした。荷重点および支持点に使用した支圧板の幅は50mmである。

測定項目は、荷重荷重、スパンの中央鉛直変位である。また、ひび割れは一定の荷重ごとに観察し、斜めひび割れの進展状況を記録した。

3. 実験結果

3.1 腐食性状

すべての試験体に電食対象鉄筋に沿う方向に錆汁が確認された。平均腐食減量率が10%を超える試験体では幅が1mmを超える腐食ひび割れが確認された。これは鉄筋腐食による膨張ひび割れと考えられる。

最大腐食減量率と平均腐食減量率との関係は図-3に示す。最大腐食減量率/平均腐食減量率に関しては、軸引張鉄筋と比べスターラップは少し小さい値になる。これは強度差の測定に用いるスターラップの試料は孔食が激しい隅角部を含まないためと考えられる。

3.2 スターラップを腐食対象とした場合の载荷試験結果

スターラップを電食対象とした試験体(No.7~No.11)では、軸引張鉄筋の腐食も確認されたが、腐食減量率が小さく(2%以下)、付着強度はほとんど低下しない¹⁾ため、耐荷性状に及ぼす影響はほとんどないと思われる。

すべての試験体は斜めひび割れ発生後荷重の増加に従い斜めひび割れが载荷点に進展し、終局時に载荷板付近のコンクリートの圧壊により耐力を失いせん断圧縮破壊した。図-4に荷重-変位関係に関する実験結果の例を示す。せん断耐力はスターラップの腐食量の増加に応じて減少する傾向が見られた。スターラップの腐食による断面減少は耐力低下の一因と考えられる。終局時のひび割れ性状(一部)および斜めひび割れの進展状況はそれぞれ図-5、図-6に示す。腐食膨張ひび割れを点線

で、終局につながるひび割れを太い線で表す。腐食試験体はいずれも斜めひび割れの発生数が少ないが、終局につながる斜めひび割れの発生位置、傾きおよび進展状況においては、健全試験体と大きな差がないことが示している。したがって、スターラップが腐食しても斜めひび割れを横切るスターラップの本数と箇所は変化がないと考えられる。

以上の検討によりスターラップの腐食がはりのせん

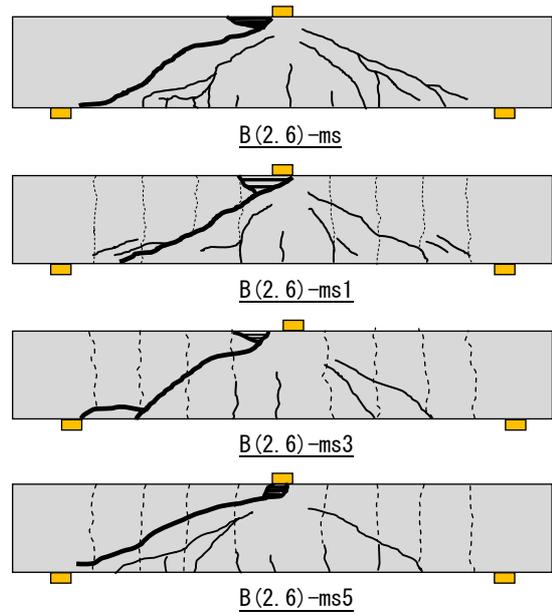


図-5 終局時ひび割れ性状

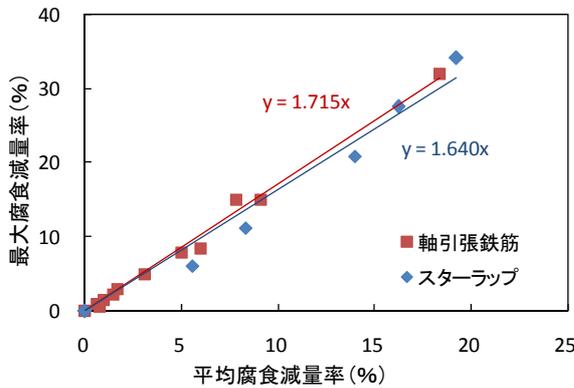


図-3 平均腐食減量と最大腐食減量関係

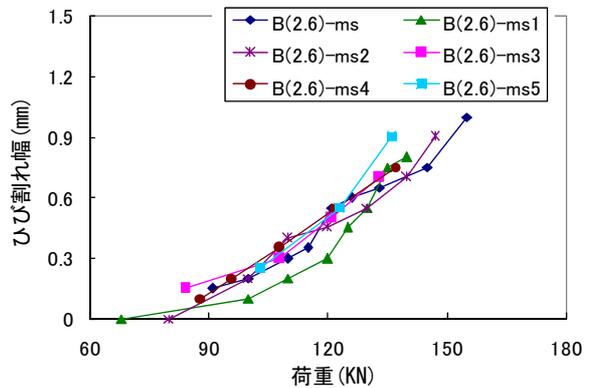


図-6 ひび割れ幅進展状況

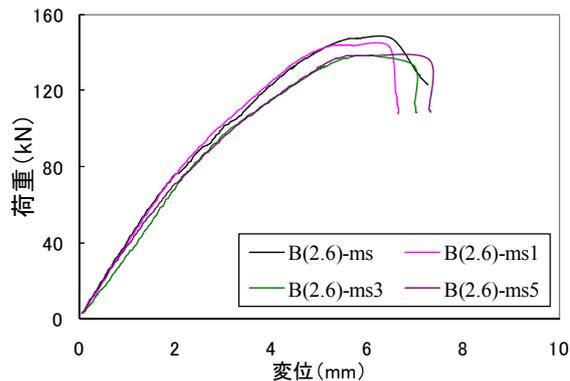


図-4 荷重-変位関係

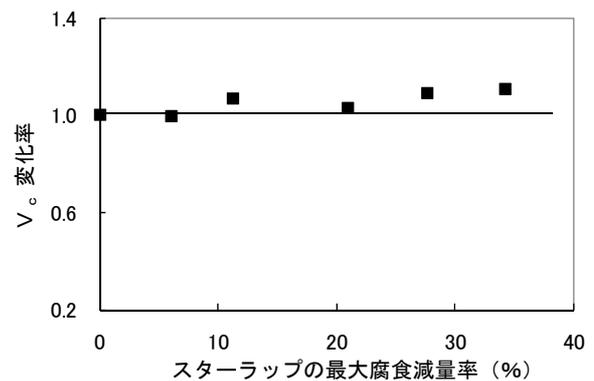


図-7 スターラップの腐食とV_cの関係

断耐荷機構に与える影響が小さいと考えられる。修正トラス理論⁵⁾はスターラップが腐食した試験体の耐力評価にも適用できると考え、式(2)を用いてコンクリートによるせん断抵抗 V_c を検討した。

$$V_u = V_c + V_s \quad (2)$$

ただし、 V_u は実験のせん断耐力である。 V_s はスターラップによるせん断抵抗で、腐食によるスターラップの断

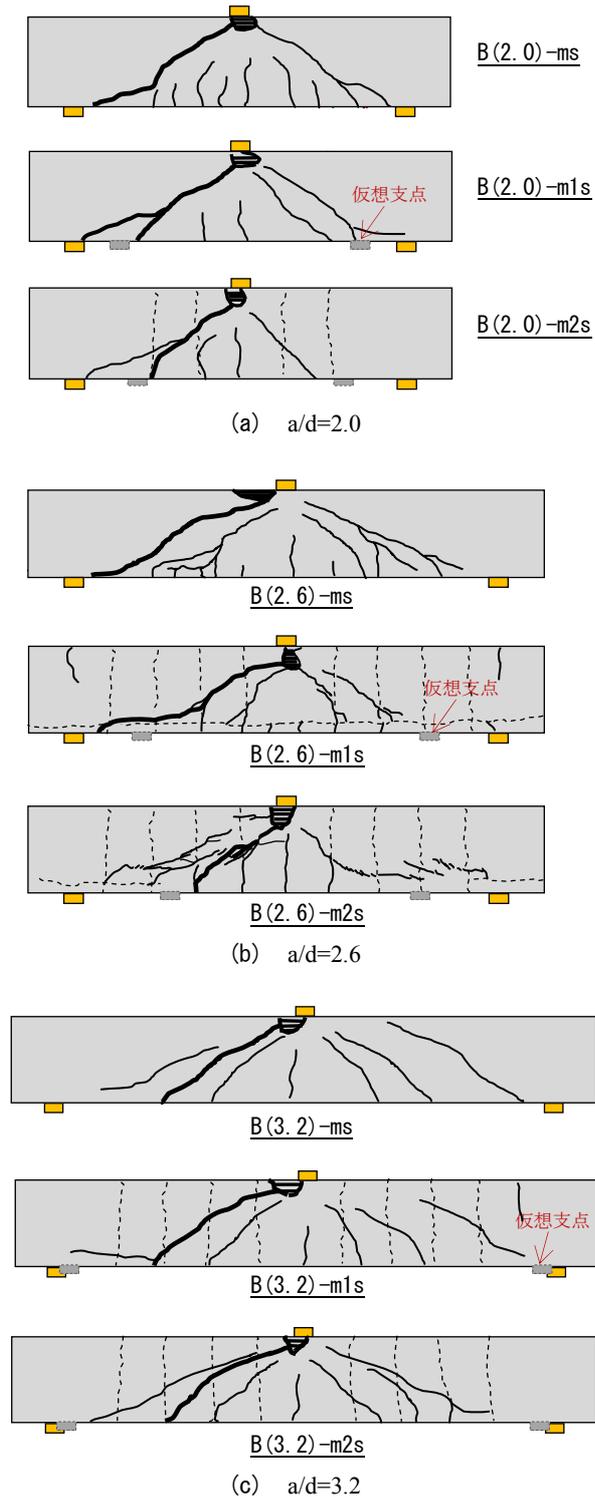


図-8 終局時ひび割れ性状

面減少を考慮してトラス理論の式⁵⁾により求めた。 V_c の変化率とスターラップの最大断面減少率との関係は図-7に示す。図より、スターラップが腐食しても V_c はほとんど変化しないことが明らかになった。

以上の考察により、スターラップが腐食する場合、せん断耐荷機構に影響を及ぼさず、腐食による影響はスターラップの断面減少によるトラス作用のせん断抵抗減少分のみで定量化できると思われる。

3.3 軸引張鉄筋を腐食対象とした場合の荷重試験結果

すべての試験体はせん断圧縮破壊した。終局時のひび割れ性状は図-8に示す。腐食した試験体のひび割れ数は健全試験体より少ない。これは鉄筋の腐食に伴う鉄筋とコンクリートとの付着強度の低下によりひび割れの分散性が低下したためと思われる。軸引張鉄筋の腐食量の増加に応じて終局に繋がるひび割れが荷重点に近づくと共に終局時の圧縮域コンクリートの面積が大きくなるようである。

腐食試験体ではスターラップに軸引張鉄筋とほぼ同程度の腐食が確認されたものもあったが、3.2によりスターラップの腐食による影響が小さいと考え、耐荷機構の変化は軸引張鉄筋の腐食によるものと思われる。軸引張鉄筋が腐食する場合、平面保持ができなくなり、付着低下により軸引張鉄筋が受ける力を端部支点到伝達するため、端部を定着点とするアーチ機構の影響が大きくなると考えられる。このとき、支点寄りに配置するスターラップの主な役割は直接せん断力を負担するよりも、軸引張鉄筋に沿う付着ひび割れの発達の防止および軸引張鉄筋曲げ剛性の増強により、強固なアーチ機構の形成に貢献することであると思われる。すなわち、トラス機構の一部はアーチ機構に移行すると考えられる。本研究では、軸引張鉄筋の腐食により耐荷機構が移行した結果、アーチ機構が卓越することによりコンクリートが負担するせん断抵抗の増加分がトラス機構でスターラップが負担するせん断抵抗の減少分を上回り、図-9に示

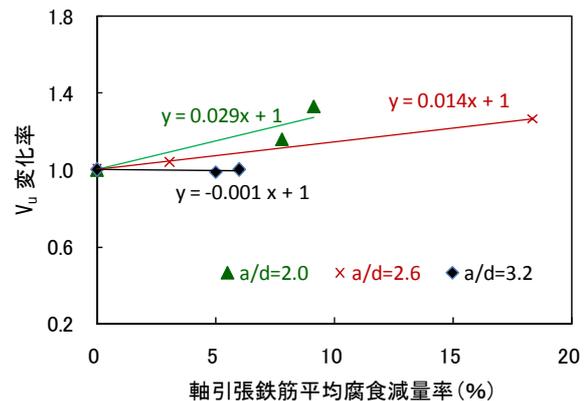


図-9 軸引張鉄筋の腐食と V_u の関係

表-4 仮想せん断スパン比によるせん断耐力の評価

試験体名	実験値 $V_u^{1)}$		仮想 $a/d^{2)}$		(仮想) a/d	計算値			
	値(kN)	変化率	値	変化率		$V_c^{3)}$	$V_s^{4)}$	$V_{u-cal}^{5)}$	V_{u-cal} 変化
B(2.0)-ms	81.9	1.00	0	1.00	2.0	53.9	28.0	81.9	1.00
B(2.0)-m1s	89.3	1.09	60	0.86	1.7	67.7	27.5	95.2	1.16
B(2.0)-m2s	103.1	1.26	110	0.75	1.5	83.0	26.2	109.1	1.33
B(2.6)-ms	74.0	1.00	0	1.00	2.6	46.0	28.0	74.0	1.00
B(2.6)-m1s	77.4	1.05	110	0.81	2.1	50.2	26.4	76.6	1.04
B(2.6)-m2s	82.1	1.11	150	0.74	2.0	74.1	19.8	93.9	1.27
B(3.2)-ms	70.6	1.00	0	1.00	3.2	42.6	28.0	70.6	1.00
B(3.2)-m1s	70.5	1.00	20	0.97	3.1	43.1	26.7	69.8	0.99
B(3.2)-m2s	71.7	1.02	25	0.96	3.1	43.2	27.3	70.5	1.00

注：1) $V_u=1/2 \times P_{test}$, P_{test} は表-1 を参照. 2) ひび割れ図より測定した仮想せん断スパンの変化量.
 3) V_c : 仮想 a/d 用いて式 3)、4)により求めた. 4) V_s : スターラップの最大腐食減量率を考慮してトラス理論により求めた.
 5) $V_{u-cal} = V_c + V_s$

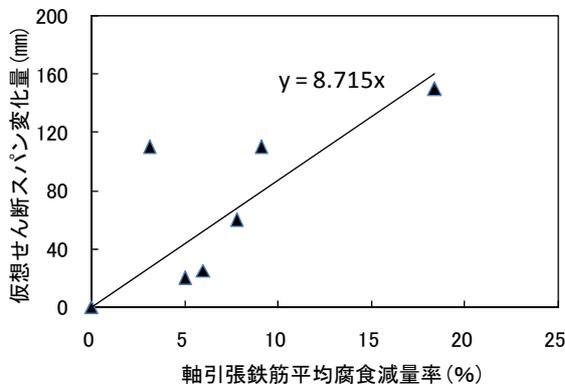


図-10 軸引張鉄筋の腐食と仮想せん断スパン変化量との関係

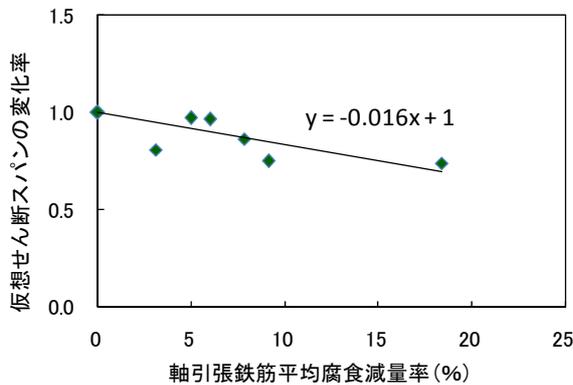


図-11 軸引張鉄筋の腐食と仮想せん断スパン変化率との関係

すように、腐食した試験体の耐力が健全試験体の耐力を上回る結果になったと考えられる。

図-8 のひび割れ図より耐荷機構の変化はせん断スパン比 a/d の影響を受けることがわかった。 a/d が 2.6 の場合、腐食による耐荷機構の移行が最も明確であるが、 a/d が 3.2 になると、腐食試験体と健全試験体との明確な差は見られない。せん断スパン比 a/d が 2.6 の場合、破壊形式が遷移的な領域にあるため、耐荷機構は軸引張鉄筋の

付着低下に影響されやすいと思われる。せん断スパン比が大きくなると、軸引張鉄筋に腐食が発生しても端部を定着点とするアーチ機構の影響が弱くなり、耐荷機構の移行が発生しにくくなると考えられる。また、既往の研究⁶⁾でも指摘しているように、せん断スパンが大きい場合、腐食による鉄筋の付着低下の不均一性の増加も耐荷機構が移行しにくくなる原因のひとつと考えられる。したがって、図-9 に示すように、軸引張鉄筋の腐食量に応ずるせん断耐力の増加率は a/d の影響を受ける結果となり、 a/d が大きくなるにしたがい増加率が小さくなると考えられる。

腐食した試験体は、斜めひび割れが中央載荷点に近づく、支点が中央載荷点に移動しせん断スパン比が減少する場合と同様な耐荷性状を呈していると思われる。ここでは、軸引張鉄筋の腐食により支点(仮想支点と定義、図-8 に参考)が中央載荷点に移動しせん断スパン(仮想せん断スパンと定義)が減少したと仮定してせん断耐荷性状を検討してみることにした。仮想せん断スパンの変化量は終局に繋がる斜めひび割れが軸引張鉄筋と交わる位置の変化量として求めた。求めた結果は表-4 に示す。図-10 に示す仮想せん断スパンの変化量と軸引張鉄筋の腐食量の関係を示す。両者にある程度の相関性は見られるが、ばらつきが大きいことがわかった。これは試験体のせん断スパンの相違によるものと考えられ、縦軸をせん断スパンの変化率としてプロットした結果は図-11 に示す。軸引張鉄筋の平均腐食減量率とせん断スパンの変化率と良い相関性があると考えられる。

仮想支点を仮定して式(2)を用いて鉄筋腐食した試験体のせん断耐力を評価することとする。 V_c としては既往の提案式^{7),8)} (3), (4)で求めた。スターラップによるせん断抵抗 V_s は腐食による断面減少を考慮し、トラス理論を用いて算定した。算定した結果は表-4 に示す。

$a/d \geq 2.0$ の場合

$$V_c = 0.2f_c^{1/3}(100p_t)^{1/3} \left(\frac{10^3}{d} \right)^{1/4} \left(0.75 + \frac{1.4d}{a} \right) b_w d \quad (3)$$

$a/d < 2.0$ の場合

$$V_c = \frac{0.24f_c^{2/3}(1 + \sqrt{100p_t})(1 + 3.33r/d)}{1 + (a/d)^2} b_w d \quad (4)$$

ここに、 f_c' : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

p_t : 軸引張鉄筋比

a : せん断スパン (mm), ここでは仮想せん断スパンとする。

d : 有効高さ (mm)

b_w : 部材幅 (mm)

r : 載荷板軸方向長さ (mm)

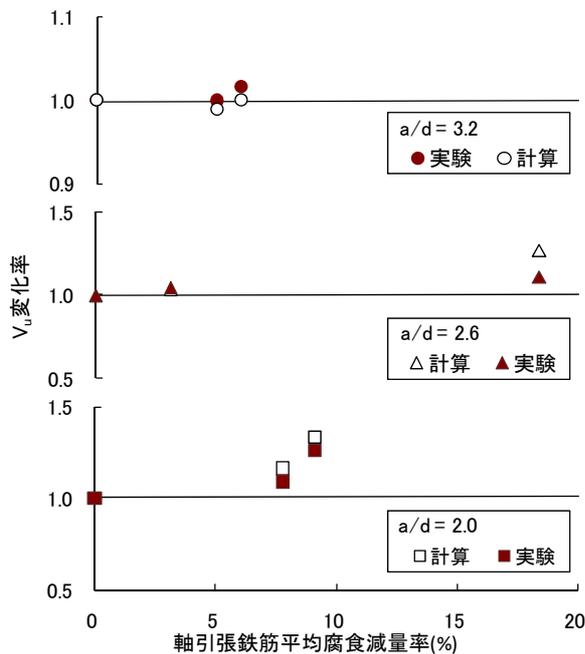


図-12 V_u の計算値と実験値の比較

V_u の計算結果と実験結果の比較を図-12に示す。 a/d が2.6で軸引張鉄筋の腐食量が多い場合計算結果は実験結果より大きい、そのほかの試験体においてはおよそ実験結果を評価できると思われる。

以上の検討により、軸引張鉄筋が腐食する場合、スターラップの配置により、端部を定着点とする強固なアーチ機構が形成されるため、仮想支点の移動と仮定し、仮想せん断スパンを用いてRCはりのせん断耐荷性状を評価することが可能である。

4. まとめ

本実験では、鉄筋（軸引張鉄筋、スターラップ）が腐食したRCはりのせん断耐荷性状を実験で考察した。本実験の範囲では、以下の知見を得られた。

- 1). スターラップの腐食がはりのせん断耐荷機構に及ぼす影響は少なく、最大腐食減量率が35%程度以下であれば、腐食による断面減少を考慮して修正トラス理論によりせん断耐力を評価できることが確認できた。

- 2). 軸引張鉄筋が腐食する場合、鉄筋の付着低下により端部を定着点とするアーチ機構の影響が強くなり、トラス機構の一部がアーチ機構に移行すると考えられる。
- 3). 軸引張鉄筋の腐食による耐荷機構の移行は、せん断スパン比 a/d の影響を受ける。 a/d が大きい場合、端部を定着点とするアーチ機構の影響が弱くなる。
- 4). 軸引張鉄筋が腐食する場合、支点（仮想支点）が中央載荷点方向へ移動すると見なし、既往のせん断式を用いてせん断耐力をおおよそ評価することができた。

謝辞：本研究では東京鐵鋼株式会社よりネジ節鉄筋を提供いただいた。ここで感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ71，2006。
- 2) 佐藤吉孝，山本貴士，服部篤史，宮川豊章：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.821-826，2003。
- 3) 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，第15巻，第2号，pp.69-77，2004.5。
- 4) 薛昕，関博，広森紳太郎：鉄筋が腐食したRCはりのせん断耐荷性状におけるせん断スパン比の影響について，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.745-750，2008。
- 5) 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.67-72，2002.3。
- 6) 山本貴士，佐藤吉孝，服部篤史，宮川豊章：鉄筋腐食RCはりのせん断耐荷挙動に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.913-918，2005。
- 7) 二羽淳一郎，山田一宇，横沢和夫，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断挙動式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986。
- 8) 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式，第2回RC構造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.119-128，1983