

論文 せん断スパン有効高さ比の異なる RC はりのせん断耐荷機構に及ぼす軸方向鉄筋の部分的な鉄筋腐食の影響

辻上 和輝*1・三木 朋広*2

要旨: 本研究では RC はりの鉄筋の腐食発生位置・発生領域および斜めひび割れの進展とせん断耐荷機構の関係を明らかにすることを目的として、軸方向鉄筋の部分的に腐食が生じた RC はりに対して載荷試験を実施した。実験結果から、 $a/d = 4.0$ の RC はりでは、平均 10~20%程度質量減少した鉄筋腐食がせん断スパン中央から定着部の間に位置する場合、耐荷力が低下する場合があることがわかった。また、画像解析の結果から、鉄筋腐食がせん断スパン中央と載荷点の間に位置する場合においては、腐食量の違いは耐荷力に影響しないが、斜めひび割れの進展状況には影響を及ぼすことがわかった。

キーワード: RC はり, 鉄筋腐食, せん断耐力, 耐荷機構, 軸方向鉄筋

1. はじめに

近年、既設の鉄筋コンクリート (RC) 構造物の劣化問題に対して、適切な維持管理システムが求められており、劣化した RC 構造物の残存性能を適切に評価する必要がある。RC 構造物においては鉄筋腐食による早期劣化が主な問題である。鉄筋腐食が進行すると腐食ひび割れの発生や鉄筋とコンクリート間の付着強度の低下などの劣化性状を引き起こす。さらに、腐食ひび割れは鉄筋に沿うように生じるため、荷重によって生じるひび割れに影響を与える。このため、鉄筋腐食による劣化現象は RC 構造物の耐荷性能に対して重大な影響を及ぼす。

また、RC 構造物の耐荷性能において重要とされるのがせん断耐荷力である。せん断破壊は脆性的な破壊であるため、構造物に致命的な損傷を与えることが理由である。そのため、せん断破壊は RC 部材の設計において考慮すべきものである。しかし、既往の研究では、RC はり部材の鉄筋腐食と曲げ耐力の関係についての検討は多いものの、鉄筋腐食とせん断耐力の関係について検討されたものは少ないのが現状である。そのため、鉄筋腐食における RC はりのせん断耐力やせん断耐荷特性についてはまだ十分に明らかとなっていない。

松尾ら¹⁾は電食試験によって、軸方向鉄筋を腐食させた RC はり部材の載荷試験を行い、せん断耐荷機構について検討している。鉄筋腐食が生じた RC はりのせん断耐荷機構はトラス機構からアーチ機構に移行し、その結果、健全時のはりと比較してせん断耐荷力が増加することを報告している。広森ら²⁾は、鉄筋腐食した RC はりのせん断耐力とせん断スパン比 a/d の関係についての検討を行い、軸引張鉄筋の腐食進行により、耐荷性状は a/d の影響を受けることを明らかにした。これらの研究においては、RC はり部材内で一様に鉄筋腐食が生じた場合

について評価している。しかし、実構造物では鉄筋腐食が一様に進行せず、コンクリート内で部分的な腐食が生じるケースも考えられるため、既存の知見のみで部材の残存性能を評価することは難しい。

竹内ら³⁾は、 $a/d = 2.8$ の試験体において軸方向鉄筋を部分的に腐食させて載荷試験を行った。部分的な腐食を有する RC はりでは、腐食ひび割れの発生領域によって耐荷力が上昇することが明らかになっている。

本研究では、軸方向鉄筋を部分的に腐食させた RC はりを対象とした載荷試験を実施し、鉄筋腐食によって生じたひび割れが a/d の異なる RC はりの斜めひび割れの進展および耐荷機構に与える影響について検討する。また、載荷中、非接触ひずみ計測システムによってはりの表面ひずみ分布を計測し、腐食発生位置と領域、表面ひずみの変化および腐食ひび割れ幅がせん断耐荷機構に与える影響について考察していく。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本研究では RC はり部材に対して部分的に軸方向鉄筋を腐食させる電食試験を実施し、載荷試験を行った。試験体はせん断スパン比 $a/d = 2.8$ ならびに 4.0 であり、載荷試験の結果を既往の研究³⁾と比較した。試験体概要を図-1に、主鉄筋の材料特性を表-1にそれぞれ示す。なお、本研究では RC はりのせん断耐荷機構に着目するため、健全状態において斜め引張破壊が先行するように設計し、せん断スパン内にせん断補強鉄筋を配置していない。支点と載荷点位置には組立鉄筋を用いた。

試験体に用いたコンクリートの示方配合を表-2に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを用い、混和剤として AE 減水剤を使用した。

*1 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (学生会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻准教授 工博 (正会員)

試験体シリーズの詳細を表-3 に示す。試験体名称は(せん断スパン比 a/d)-(腐食位置)(試験体番号)とした。実験パラメータは腐食の程度、腐食発生位置、および、腐食発生領域である。腐食位置は図-2 に示すように、せん断スパン中央と荷重点の間(ケース A)、せん断スパン中央(ケース B)、およびせん断スパン中央から試験体端(ケース C)の3つに分類し、腐食のない健全な試験体をケース N とした。

2.2 荷重試験および計測項目

荷重実験では、油圧式 2000kN 万能試験機を用い、単純支持 RC はりの 2 点集中荷重を行った。計測項目は荷重、支点および荷重点の鉛直変位とした。荷重中は、ひび割れの目視観察を行うとともに、各荷重でデジタルカメラにより試験体表面を撮影して画像解析を実施した。

2.3 鉄筋腐食試験および腐食量の評価方法

本研究では、鉄筋の腐食促進方法として電食試験を用いた。電食試験の概要を図-3 に示す。電食試験では、3% NaCl 水溶液に浸したスポンジを試験体底面に接触させ、スポンジの幅で腐食領域を管理した。計測項目は、通電電流、電圧、通電時間とした。

鉄筋腐食量は、質量減少率から定義した。荷重試験後、試験体から軸方向鉄筋を取り出し、クエン酸水素二アンモニウム水溶液に室温で約 3 日間浸漬した。その後、腐食生成物を除去し、約 50mm 毎に分割して長さや質量を計測した。腐食した鉄筋片と目視によって腐食が確認できない健全な鉄筋片の単位長さあたりの質量の比によって、鉄筋の質量減少率を算出した。このとき、健全な鉄筋片の質量減少率は 0% とした。式(1)に質量減少率 $C(\%)$ の算出式を示す。

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

ここに、 Δw : 健全な鉄筋片と腐食した鉄筋片の単位長さあたりの質量差(g/mm)、 w : 腐食していない鉄筋の単位長さあたりの質量(g/mm)である。

2.4 画像解析

本研究では、ひび割れ進展状況を把握するために、デジタル画像相関法を用いて画像解析を行った。画像相関法は、解析対象範囲において変形前と変形後の画像を比

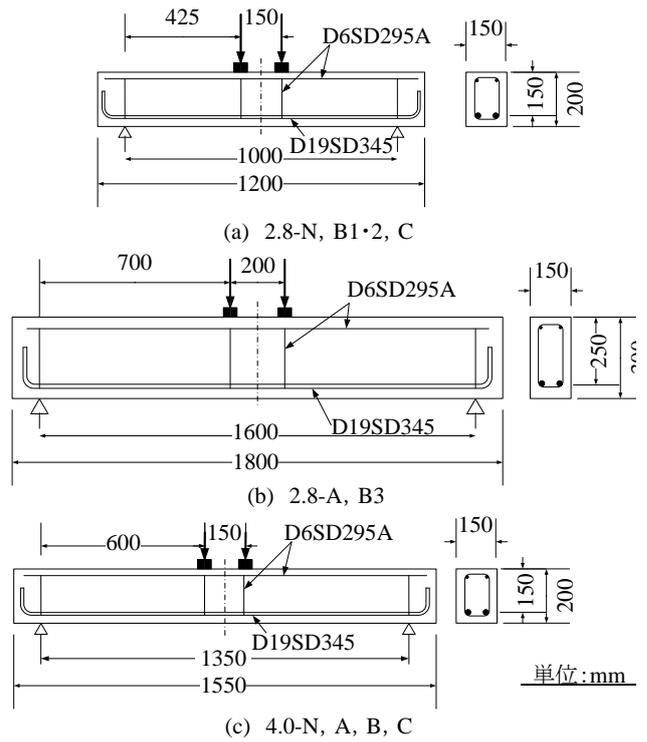


図-1 試験体概要

表-1 主鉄筋の材料特性

	断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D19	287	388	573
D6	31.7	321	522

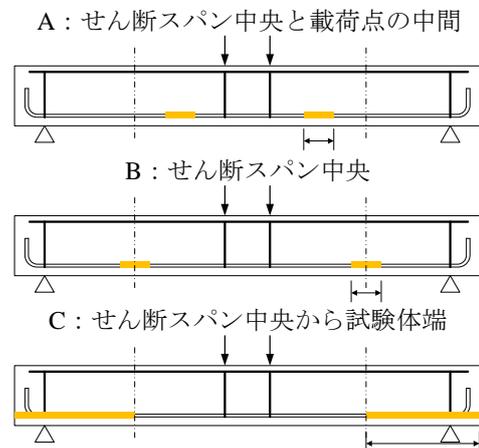


図-2 供試体名称の記号と腐食位置

表-2 示方配合

試験体名称	最大骨材寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				ml/m ³ 混和剤
						水	セメント	粗骨材	細骨材	
2.8-N, B1	20	64.9	45	14.5	4.8	179	276	884	945	414
2.8-B2, C1, C2				9.5	2.3					
2.8-A, B3				9.0	2.9					
4.0-A1~A3				5.0	1.0					
4.0-N1, B1, C1	67.3	47.3	7.5	9.0	172	256	865	954	1104	
4.0-N2, A4	62.5	46.7	7.0	5.3	172	276	840	963		

較して類似点を見つけ、それらの類似点の移動量を計測し、計測した移動量を用いて、ひずみ計算ソフトにより最大、もしくは最小主ひずみ分布を求めるものである。

3. 実験結果と考察

3.1 腐食試験結果

$a/d = 4.0$ のそれぞれの試験体の腐食分布図を図-4に示す。各試験体において、それぞれの腐食領域の軸方向鉄筋における鉄筋腐食の局所化を再現することができた。なお、電食試験では自然暴露による鉄筋腐食に比べて腐食の進行速度が速く、腐食生成物の量や状態、腐食ひび割れ幅が自然暴露の場合と異なる点に注意を要する。

腐食した鉄筋の質量減少率の平均値および最大値を表-4に示す。ここで、平均質量減少率は表-3に示した腐食発生領域幅における質量減少率の平均である。電食試験中、試験体には軸方向鉄筋に沿うように腐食ひび割れが発生していた。

試験体 4.0-A シリーズにおいては、腐食量による影響を検討するために、質量減少率を変化させた。目標腐食量として A1~A3 は 15% 程度、A4 は 7.5% 程度を想定し、電食試験を行った。試験体 4.0-C1 では、腐食領域幅が大きいことを想定し、電食試験を行った。しかし、初期段階で発生した腐食ひび割れの位置に腐食が集中したため、腐食領域において平均的に腐食が生じず、せん断スパン中央の一部のみ著しく鉄筋腐食した。

3.2 荷重試験結果

(1) 荷重-変位関係

荷重試験で得られた荷重-変位関係を図-5に示す。また、前出の表-4にコンクリートの材料特性および荷重試験結果を示す。すべての試験体において軸方向鉄筋の降伏は確認できなかった。なお、表-4に示す V_c は式(2)⁴⁾を用いて算定したせん断耐力である。

$$V_c = 0.2 \cdot \sqrt[3]{f_c'} \cdot \sqrt[4]{\frac{1000}{d}} \cdot \sqrt[3]{p_v} \cdot \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

ここに、 f_c' : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 p_v : 引張鉄筋比(%), a : せん断スパン長(mm), d : 有効高さ(mm), b_w : ウェブ幅(mm)である。

荷重試験における斜めひび割れ発生後の挙動は、健全試験体 4.0-N1, N2 およびせん断スパン中央と荷重点の中間を腐食した 4.0-A1~A4 では荷重が急激に低下した。4.0-A1 と A4 において、耐荷力は変わらないが、曲げひび割れ発生後の剛性は異なっていることがわかる。一方、せん断スパン中央を腐食した 4.0-B1, B2 およびせん断スパン中央から試験体端を腐食した 4.0-C では、図中に実線で示す 4.0-N1 で急激に低下した荷重と同等まで荷重が低下した時、4.0-N1 に比べて変位が増大している。このため、4.0-N1 に比べて荷重の低下率が低く、比較的緩

表-3 試験体シリーズの詳細

試験体	腐食位置, 腐食領域幅 (mm)
2.8-N ³⁾	
2.8-A1, A2	せん断スパン中央と荷重点の中間, 100
2.8-B1 ³⁾	せん断スパン中央, 100
2.8-B2 ³⁾	せん断スパン中央 (切欠きあり), 100
2.8-B3 ³⁾	せん断スパン中央, 165
2.8-C1 ³⁾	せん断スパン中央~端, 312.5
2.8-C2 ³⁾	同上 (追加: 定着部), 312.5
4.0-N1, N2	
4.0-A1~A4	せん断スパン中央と荷重点の中間, 100
4.0-B1	せん断スパン中央, 100
4.0-C1	せん断スパン中央~端, 400

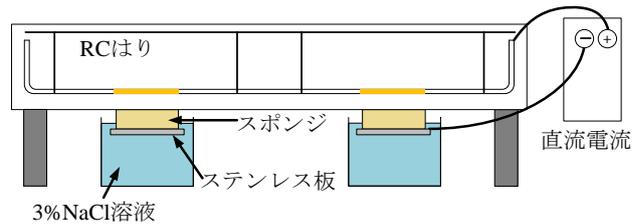
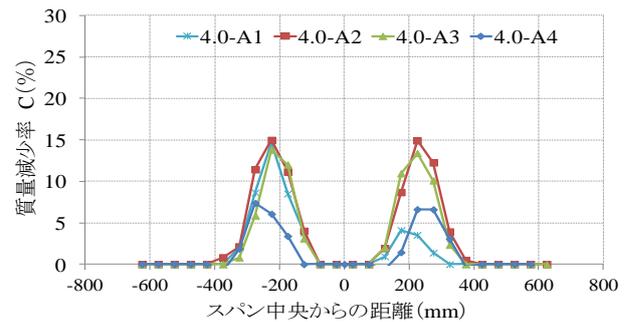
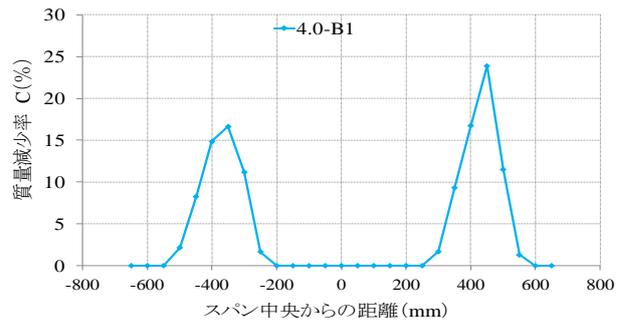


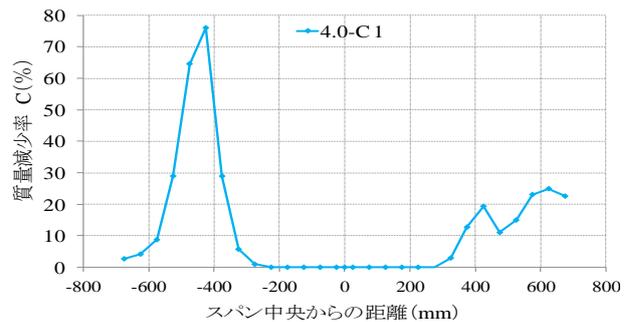
図-3 電食試験概要



(a) 腐食位置 A



(b) 腐食位置 B



(c) 腐食位置 C

図-4 腐食分布

表-4 コンクリートの材料特性, 平均・最大質量減少率および載荷試験結果

試験体名	材料特性			質量減少率		載荷試験結果			破壊モード
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	平均 (%)	最大 (%)	最大荷重 V _{max} (kN)	算定荷重 V _c (kN)	V _{max} /V _c	
2.8-N ³⁾	23.3	2.46	24.9	0	0	71.9	70.2	1.0	斜め引張
2.8-A1	31.7	2.72	28.5	7.4	17.2	96.8	96.7	1.0	斜め引張
2.8-A2	38.3	3.32	26.5	10.3	14.6	100.2	102.9	0.97	斜め引張
2.8-B1 ³⁾	23.3	2.46	24.9	9.0	12.4	107.7	70.2	1.5	せん断圧縮
2.8-B2 ³⁾	33.4	3.34	27.8	8.7	15.0	80.9	79.1	1.0	斜め引張
2.8-B3 ³⁾	34.7	5.12	27.2	—	—	133.3	99.6	1.3	せん断圧縮
2.8-C1 ³⁾	33.2	3.33	28.4	8.4	12.1	104.1	79.0	1.3	圧縮／割裂
2.8-C2 ³⁾	33.4	3.34	27.8	10.5	20.3	98.1	79.1	1.2	圧縮／割裂
4.0-N1	30.0	2.78	22.5	0	0	49.5	67.5	0.73	斜め引張
4.0-N2	37.4	3.20	27.6	0	0	65.2	72.6	0.90	斜め引張
4.0-A1	37.0	3.04	26.6	6.8*	14.6	76.3	72.4	1.0	斜め引張
4.0-A2	38.3	3.32	26.5	12.2	13.8	78.1	73.2	1.0	斜め引張
4.0-A3	38.3	3.32	26.5	11.0	15.0	72.5	73.2	1.0	斜め引張
4.0-A4	37.4	3.20	27.6	6.7	7.4	73.7	72.6	1.0	斜め引張
4.0-B1	30.0	2.78	22.5	14.6	23.9	46.5	67.5	0.69	圧縮／割裂
4.0-C1	30.0	2.78	22.5	22.2	76.0	41.3	67.5	0.61	圧縮／割裂

*左右のスパンにおける腐食量が異なる (図-4(a)参照)

やかに荷重が低下しているといえる。これより, $a/d = 4.0$ のはりにおいて, せん断スパン中央から定着部の間に腐食がある場合, 健全はりと同様耐荷機構ならびにポストピーク挙動が異なることが推測される。

(2) ひび割れ状況

載荷試験終了後のひび割れ状況および斜めひび割れ角度 θ を図-6 に示す。斜めひび割れ角度は, 竹内らの研究³⁾を参考にして, 斜めひび割れと軸方向鉄筋の交点とひび割れ先端を結ぶ直線の軸方向に対する角度とした。

健全試験体 4.0-N1 および 4.0-N2 では, 斜めひび割れは載荷点と支点を結ぶ直線に近い角度で発生した。また, 4.0-A1~A3 は健全試験体と同様に載荷点と支点を結ぶ直線に近い角度で発生し, 斜めひび割れ角度 θ も同程度であった。一方, 4.0-A4 では, 曲げせん断ひび割れから進展した角度の低い斜めひび割れが, 破壊時に載荷点に向けて曲げ圧縮領域に突き抜けるように進展したため, 角度が大きくなった。また, 4.0-B および 4.0-C は腐食ひび割れの影響により載荷点とせん断スパン中央の鉄筋位置を結ぶ直線に近い形になったが, ひび割れ角度はあまり変化しなかった。

健全試験体 4.0-N は最大荷重時に斜めひび割れが大きく進展して破壊に至った。4.0-A1~A3 では, 最大荷重時に支点と載荷点を結ぶような斜めひび割れが急激に発生, 進展して破壊に至った。4.0-A4 では腐食位置に発生した曲げせん断ひび割れが斜めひび割れに進展し, 破壊に至った。4.0-B1 および 4.0-C1 においては, 最大荷重時に斜めひび割れは大きく進展せず, 荷重の低下とともに斜めひび割れが載荷点および支点に向かって進展し, 破壊に至った。

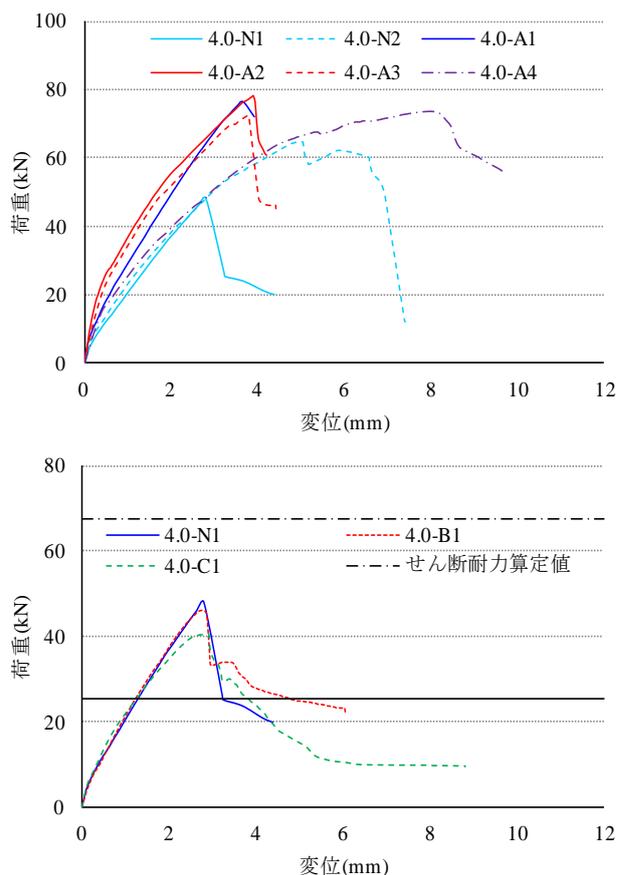


図-5 荷重-変位関係

(3) 腐食位置による比較

試験体の腐食位置は, せん断スパン中央と載荷点の間 (ケース A), せん断スパン中央 (ケース B), およびせん断スパン中央から試験体端 (ケース C) の3つに分類した。

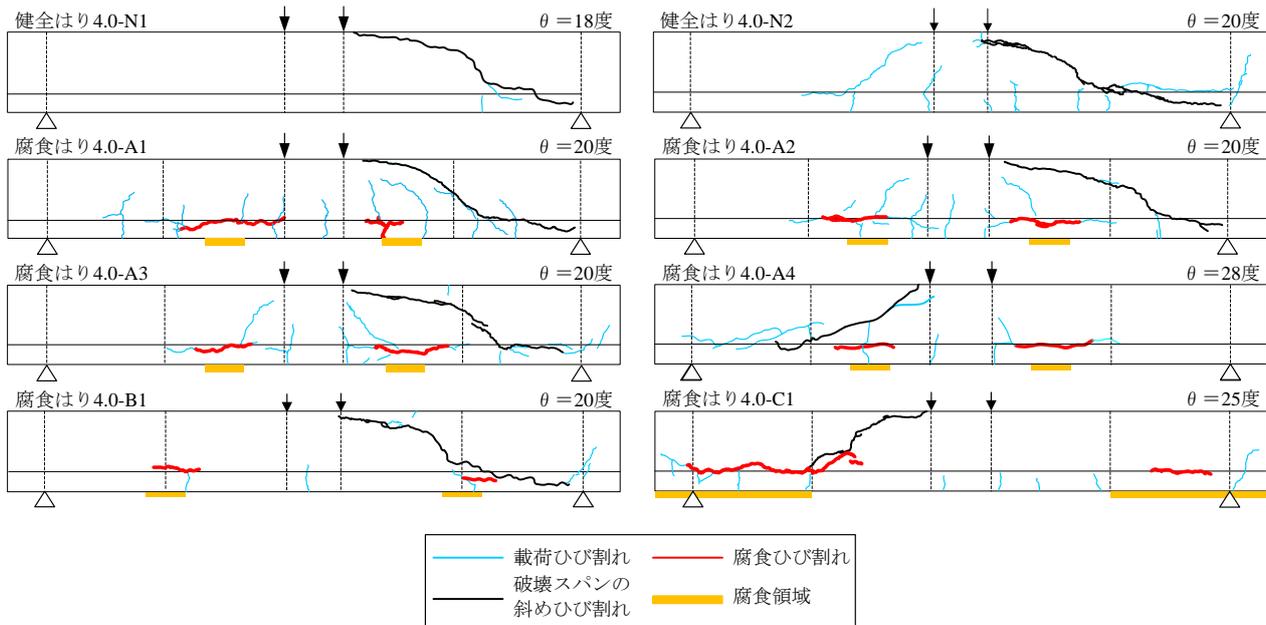


図-6 ひび割れ図 ($a/d = 4.0$)

せん断スパン中央を腐食した試験体 4.0-B1 およびせん断スパン中央から試験体端を腐食した 4.0-C1 では、健全試験体 4.0-N1 よりも荷重が低下した。また、荷重が低下した試験体で比べると、4.0-B1 に比べて 4.0-C1 の方が最大荷重は低くなった。一方で、せん断スパン中央と荷重点の中間を腐食した 4.0-A シリーズは、式(2)によって算定したせん断耐力と同程度となっており、腐食による荷重の低下は見られない。

以上のことから、 $a/d = 4.0$ の試験体において、せん断スパン中央およびせん断スパン中央から試験体端に腐食がある場合は耐荷力が同程度かもしくは低下するものの、せん断スパン中央と荷重点の中間に腐食がある場合は耐荷力が同程度かもしくは増加することがわかる。

(4) 腐食量による比較

$a/d = 4.0$ の試験体において、鉄筋の腐食量を変化させた。腐食量による耐荷機構の変化およびひび割れの進展状況を確認するために、画像相関法を用いて画像解析を行った。試験体 4.0-A1 および 4.0-A4 の斜めひび割れ発生時の画像解析の結果を図-7 に示す。図中の赤枠は、それぞれの画像解析における解析対象範囲である。

図-7 より、試験体 4.0-A1 では、腐食位置に曲げせん断ひび割れが発生しているが、せん断スパン中央より外側に斜めひび割れが発生していることがわかる。一方、試験体 4.0-A4 は腐食位置に曲げせん断ひび割れが発生し、その曲げせん断ひび割れが大きく進展して斜めひび割れが発生していることがわかる。

以上の結果から、せん断スパン中央と荷重点の中間を腐食した試験体では、腐食量の違いは耐荷力に影響しないが、斜めひび割れの進展状況には影響するといえる。

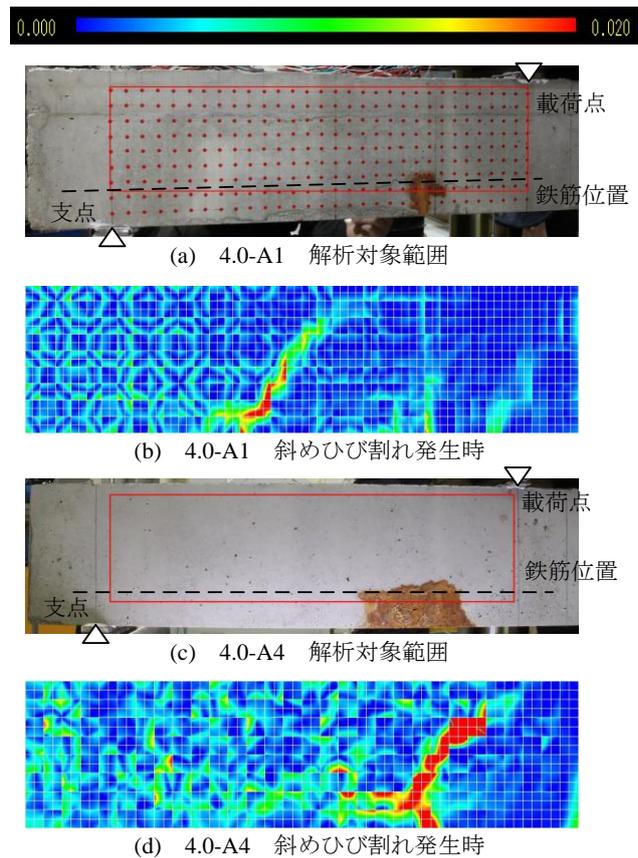


図-7 試験体 4.0-A1, A4 の画像解析による比較

3.3 せん断スパン比 a/d の影響

既往の研究³⁾ ($a/d = 2.8$) で得られた荷重試験の結果および追加実験の結果を前出の表-4 に示す。また、それぞれの a/d の RC はりにおける腐食位置の異なる試験体の耐荷力比 V_{max}/V_c の比較を図-8 に示す。腐食試験体と比較できる健全試験体がある場合は健全試験体の最大

荷重 $V_{N,max}$ で除している。一方、健全試験体がない場合は式(2)の算定荷重を用いて除している。表-4 に示す耐荷力比において、式(2)で示す項で考慮されていない腐食位置および腐食量の変化によりばらつきが生じていることがわかる。

図-8 より、せん断スパン中央と荷重点の間を腐食した試験体 (A シリーズ) において、 $a/d = 2.8$ および 4.0 の耐荷力比は 1.0 程度であり、健全試験体と変わらないことがわかる。一方、せん断スパン中央を腐食した試験体 (B シリーズ) においては、 $a/d = 2.8$ のときは耐荷力比が 1.0 より大きくなるものも見られるが、 $a/d = 4.0$ のときは耐荷力比が 1.0 より小さくなっている。また、せん断スパン中央から試験体端を腐食した試験体 (C シリーズ) では、 $a/d = 2.8$ のときは耐荷力比が 1.0 より大きくなっているが、 $a/d = 4.0$ のときは耐荷力比が 1.0 より小さいことがわかる。

以上のことから、腐食による平均質量減少率が 20% 程度以下であれば、腐食位置によっては a/d が異なると荷重が増加または低下する場合がある。

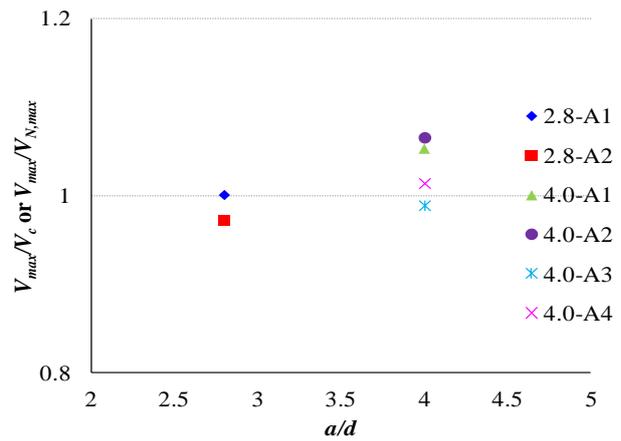
4. まとめ

本研究では、電食試験により軸方向鉄筋を部分的に腐食させた、 $a/d = 2.8$ ならびに 4.0 の RC はりを対象に荷重試験を実施し、鉄筋の腐食量と腐食領域、および腐食ひび割れが斜めひび割れの進展と RC はりの耐荷機構に与える影響を検討した。また、既往の研究³⁾と比較することで、せん断スパン比の影響も検討した。本研究で得られた結論を以下に述べる。

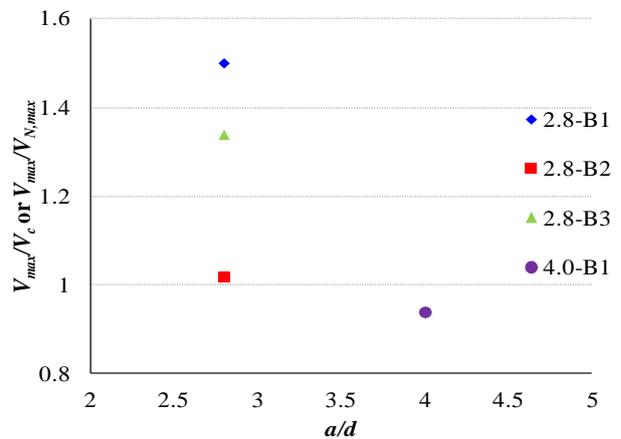
- (1) せん断スパン中央から定着部において部分的に軸方向鉄筋が鉄筋腐食した $a/d = 4.0$ の RC はりでは、腐食していない健全なはりより耐荷力が低下することがわかった。
- (2) $a/d = 2.8$ ならびに 4.0 の RC はりにおいて、せん断スパン中央から荷重点の間の領域で軸方向鉄筋が腐食した試験体は、腐食していない健全なはりと同等の耐荷力となることがわかった。
- (3) 画像解析から、せん断スパン中央から荷重点の間の領域で軸方向鉄筋が部分的に腐食した RC はりでは耐荷力に影響を与えないが、斜めひび割れの進展状況に影響を与えることが確認できた。

参考文献

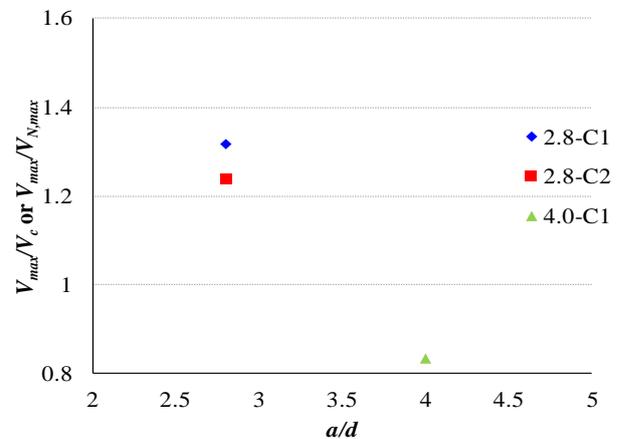
- 1) 松尾豊史, 坂井理哉, 松村卓郎, 金津努: 鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.2, pp.69-77, 2004.
- 2) 広森紳太郎, 薛昕, 関博: 軸引張鉄筋が腐食したせん断スパン比の異なる RC はり部材のせん断耐力について, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2,



(a) 腐食位置 A



(b) 腐食位置 B



(c) 腐食位置 C

図-8 a/d による荷重変動の比較

pp.1537-1542, 2009.

- 3) 竹内靖人, 三木朋広: 軸方向鉄筋に局所的鉄筋腐食を有する RC はりのせん断耐荷機構評価, 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, Vol.10, pp.235-240, 2010.
- 4) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.