

論文 局所的な鉄筋腐食を有する RC はり部材のせん断耐荷性能に関する研究

角田 真彦^{*1}・渡辺 健^{*2}・三木 朋広^{*3}・二羽 淳一郎^{*4}

要旨：RC はりのせん断耐荷力と鉄筋の腐食発生位置・発生領域との関係を明らかにすることを目的として、軸方向鉄筋の局所的な腐食が生じた RC はりに対して載荷試験を実施した。実験結果から、試験体支間における軸方向鉄筋の局所的に腐食させた RC はりのせん断耐荷力は、予側式による耐荷力と同等以上になることを確認した。また、軸方向鉄筋の腐食発生位置によって、RC はりのひずみ分布および斜めひび割れ角度に変化があらわれ、耐荷力および耐荷機構の差異を確認した。

キーワード：鉄筋腐食，せん断耐荷力，耐荷機構，画像解析

1. はじめに

供用中の鉄筋コンクリート(RC)構造物において、鉄筋腐食に関する問題が顕在化してきている。鉄筋が腐食すると、鉄筋自体の体積が減少することに加え、膨張圧によりかぶりコンクリートに腐食ひび割れが生じる。このような劣化現象が RC 構造物の耐荷性能に及ぼす影響は大きいと考えられる。鉄筋腐食と RC 部材の構造性能の関係を明らかにすることは、既存構造物の維持管理において必須である。

RC はり部材のせん断耐荷力と鉄筋腐食との関係に関する既往の研究¹⁾では、軸方向鉄筋を全スパンにわたり電食させた RC はり部材の載荷試験を通して検討している。一方、実環境下では、コンクリート内の鉄筋一部が先行して腐食するケースも考えられ、腐食の発生位置が、せん断耐荷力に及ぼす影響を検討することが重要となる。

本研究では、軸方向鉄筋が全スパンにわたって腐食した RC はりのせん断耐荷力に関する既往の研究を参考に、せん断耐荷力に及ぼす軸方向鉄筋の局所的な腐食の影響を、RC はりの耐荷機構に着目して考察した。そして、全スパンにわたって軸方向鉄筋を腐食させたはり、および局所的に軸方向鉄筋を腐食させた RC はりの載荷試験を実施し、腐食発生位置ならびに領域が、せん断耐荷性能に及ぼす影響を検討した。

2. 既往の研究に基づく局所的な腐食の影響の推察

濱田ら²⁾は、曲げ破壊が先行する RC はり試験体の軸方向鉄筋を局所的に腐食させ、曲げ耐荷力と局所的な鉄筋腐食の関係を実験的に明らかにしている。一方で、せ

ん断破壊が先行する RC はりにおいて、局所的な鉄筋腐食の影響を検討した報告は少ない。

RC はりのせん断耐荷機構は、トラス機構とアーチ機構に区別できる。せん断破壊が先行する、せん断スパンと有効高さの比が 2.5 程度以上のはりにおいて、耐荷機構はトラス機構による貢献が支配的である。しかし、RC はり内の軸方向鉄筋が腐食すると、軸方向鉄筋に沿った腐食ひび割れが生じ、鉄筋とコンクリートの付着が低下する。付着が低下すると、せん断スパン中で平面保持が保たれず、その結果、定着が健全な場合には、RC はりのせん断耐荷機構は、斜めひび割れ上部にアーチ状の圧縮領域が形成され、アーチ機構による割合が増加する^{1), 3), 4)}。支配的な耐荷機構が、アーチ機構に移行すると、圧縮力に強いコンクリートの性質が発揮され、RC はりのせん断耐荷力は増加する。これらの現象から、RC はりの破壊モードが、斜め引張破壊からせん断圧縮破壊や曲げ破壊へ移行するという既往の報告が説明できる。

これらの既往の研究を踏まえると、十分に定着された軸方向鉄筋の一部のみに腐食が生じている RC はりにおいても、耐荷機構の違いにより、せん断耐荷力が増加する可能性があると考えられる。そこで、本研究では、腐食発生位置および領域寸法を実験パラメータとして設定した。特に、実験では、RC はりの耐荷機構を把握するうえで重要な情報となる、せん断スパンにおいて発生するひずみを、画像解析により計測する。さらに、本研究の位置づけを示すために、軸方向鉄筋を全スパンにわたって腐食させた RC はりの載荷試験を行い、既往の研究で得られた知見を確認し、検討に加えている。

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 Ph.D. (正会員)

*3 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻准教授 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)

表 - 1 示方配合

粗骨材最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単体量 (kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
20	65	45	179	276	884	945	0.414

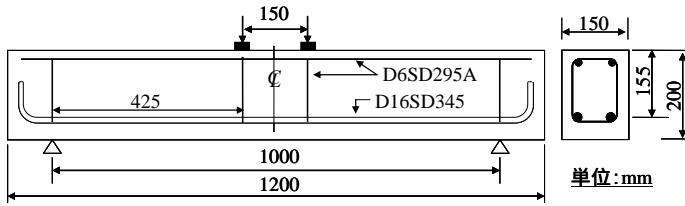


図 - 1 試験体概要図

表 - 2 試験体諸元

項目	記号	単位	値
軸方向鉄筋断面積	A_s	mm ²	397.2
引張鉄筋比	p_t	--	1.71%
幅	b	mm	150
せん断スパン長	a	mm	425
有効高さ	d	mm	155
せん断スパン有効高さ比	a/d	--	2.74

3. 実験概要

3.1 コンクリート示方配合

表 - 1 に、試験体作製に用いたコンクリートの示方配合を示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。

3.2 試験体概要

図 - 1 に、試験体の概要図、および表 - 2 に、試験体の諸元を示す。試験体は通常の状態では、斜め引張破壊が再現できる設計がなされている。RC はりのせん断耐力 V_c の算出には式 (1) を用いた⁵⁾。また、耐力算定の際には腐食のない状態での p_t を用いている。

$$V_c = 0.2 \sqrt[3]{f'_c} \sqrt[3]{\frac{1000}{d}} \sqrt[3]{100 p_t} b_w d \quad (1)$$

試験体の側面のかぶりは 22 mm、下面は 37 mm である。腐食による定着部の破壊を防止するために、軸方向鉄筋は、端部を直角に折り曲げて、定着している。せん断耐力に対するコンクリートの貢献分に着目するため、せん断スパン内には、せん断補強鉄筋を配置していない。支点と載荷点位置に組立鉄筋を用いた。表 - 3 に、鉄筋の材料特性を示す。

3.3 載荷試験および計測項目

載荷には、油圧式 2000kN 万能試験機を用いた。支点と試験体の間には減摩パッドを挿入することで、支点の拘束による水平反力を除去した。載荷試験における計測項目は、荷重、支点および RC はりスパン中央の鉛直変位とし、さらに試験中は、載荷により発生するひび割れの目視観察を行った。また、所定の荷重において、デジ

表 - 3 鉄筋の材料特性

鉄筋の種類	SD345	SD295A
降伏強度 (N/mm ²)	384	371
引張強度 (N/mm ²)	565	524
弾性係数 (kN/mm ²)	184	200

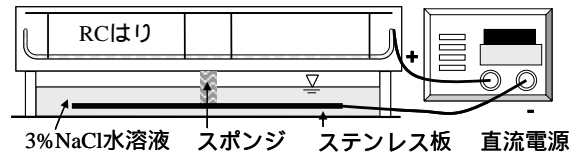


図 - 2 電食試験概要図

表 - 4 試験体シリーズ

試験体名	腐食位置 (図-6 参照)	スポンジの接触幅 (mm)
S-0	腐食なし	---
S-M-125	支間中央	125
S-M-250	支間中央	250
S-S-125	片側のせん断スパン中央	125
S-S-250	両側のせん断スパン中央	125
S-A	全スパン	1000

片側の接触面積

タルカメラにより試験体表面を撮影し、画像解析を実施した。

3.4 画像解析方法

格子法による画像解析を行った¹⁾。試験体に直径 6 mm の赤色のターゲットを格子状に貼付し、デジタルカメラを用いて載荷に伴って移動するターゲットを撮影した。得られた画像から画像処理によりターゲットを抽出し、その重心の座標を求めた。画像処理には画像処理ソフトを用いた。このようにして得たターゲットの座標位置から節点変位を求め、有限要素法の手法を用いて、定ひずみ三角形要素のひずみを算出した。

3.5 腐食促進試験方法

本研究では、RC はりの軸方向鉄筋に腐食を生じさせるため、材齢 7 日目から電食試験を実施した。図 - 2 に電食試験の概要図を示す。電食試験では軸方向鉄筋を陽極、ステンレス板を陰極側としている。組立鉄筋の軸方向鉄筋との接触部にエポキシ接着剤を用いてコーティングすることで、組立鉄筋の腐食を防止した。また、軸方向鉄筋の一部の領域における局所的な腐食を再現するために、電食試験時に、3%NaCl 水溶液に浸したスポンジを試験体底部の一部に接触させた²⁾。腐食領域の幅は、

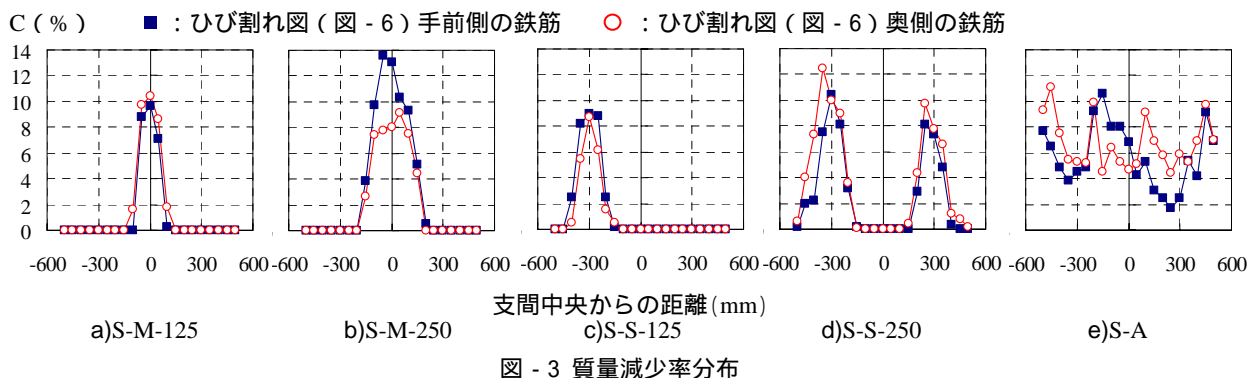


図 - 3 質量減少率分布

表 - 5 コンクリートの材料特性および載荷試験結果

試験体名	コンクリートの材料特性			載荷試験結果				
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	破壊モード	荷重の最大値 V_{exp} (kN)	V_c (kN)	V_{exp}/V_c	β (度)
S-0	32.2	2.76	27.8	斜め引張	72.3	69.2	1.04	27
S-M-125	35.0	3.00	27.7	斜め引張	74.2	73.1	1.01	27
S-M-250	36.7	3.21	26.1	斜め引張	75.5	72.3	1.04	28
S-S-125	32.6	2.37	26.4	斜め引張	68.6	69.5	0.99	28
S-S-250	36.8	3.16	26.5	せん断圧縮	99.7	71.2	1.40	34
S-A	30.4	2.59	26.2	斜め引張	95.4	67.9	1.40	41

3%NaCl 水溶液に浸したスポンジの幅にて管理した。

3.6 試験体シリーズ

表 - 4 に、試験体シリーズを示す。試験パラメータは、軸方向鉄筋の腐食の発生位置と腐食領域の幅である。腐食発生位置は、試験体支間中央の等モーメント区間およびせん断スパン中央とした。腐食区間の幅は、125 mm および 250 mm とした。また、せん断スパン中央を電食させる試験体では、片側のせん断スパンに 125 mm のスポンジを接触させたときと両側のせん断スパンに 125 mm のスポンジを接触させた 2 体の試験体を用意した。図 - 6 に併せて腐食位置を示している。腐食鉄筋の質量減少率の最大値が、同等になるように、電食試験時の総電流量を試験体ごとに管理した。

4. 実験結果

4.1 腐食状況

軸方向鉄筋の腐食を定量的に評価するために、式 (2) に示す質量減少率 C (%) を用いた²⁾。

$$C = \frac{\Delta w}{w} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 w は腐食してない鉄筋と腐食した鉄筋の単位長さあたりの質量差 (g/mm)、 w は腐食してない鉄筋片の単位長さあたりの質量 (g/mm) を示している。

載荷試験終了後、鉄筋の質量減少率を算出するために、試験体を解体して内部から軸方向鉄筋を取り出した。その後、取り出した鉄筋を 60 のクエン酸水素二アンモニ

ウムに 2 日間浸漬し、表面をブラシで磨くことで、表面に付着した腐食生成物を除去した。腐食生成物の除去後、鉄筋を 50 mm ごとに分割し、各鉄筋片の長さや質量を測定した。健全な鉄筋にも同様な処理を行い、腐食した鉄筋と比較することで質量減少率を算出した。なお健全な鉄筋とは、軸方向鉄筋を取り出したとき、目視で腐食が確認できない鉄筋片を指しており、これらの鉄筋片の質量減少率は 0% としている。

図 - 3 に、各試験体の質量減少率の分布を示す。S-M-125, S-M-250, S-S-125, S-S-250 の試験体において、軸方向鉄筋の質量減少率の軸方向に沿った偏りを確認できる。局所的な腐食を与えた以上の試験体において、電食区間の中央部において、質量減少率が最大値を示し、おおよそ 10% 程度であった。2 本の軸方向鉄筋の質量減少率には差異はみられるものの、軸方向に沿う質量減少率の分布は同様の傾向を示していた。また、電食試験後の試験体の側面においては、軸方向鉄筋に沿うように腐食ひび割れが発生していた。腐食ひび割れの生じた区間では、鉄筋とコンクリートとの付着が低下しているものと考えられる。

4.2 載荷実験結果

(1) せん断耐荷力

表 - 5 に、コンクリートの材料特性および載荷試験結果を示す。軸方向鉄筋が全スパンにわたって腐食させた S-A の V_{exp}/V_c は 1.4 となり、既往の研究¹⁾と同様に耐荷力の増加が確認された。同様に、両方のせん断スパンの

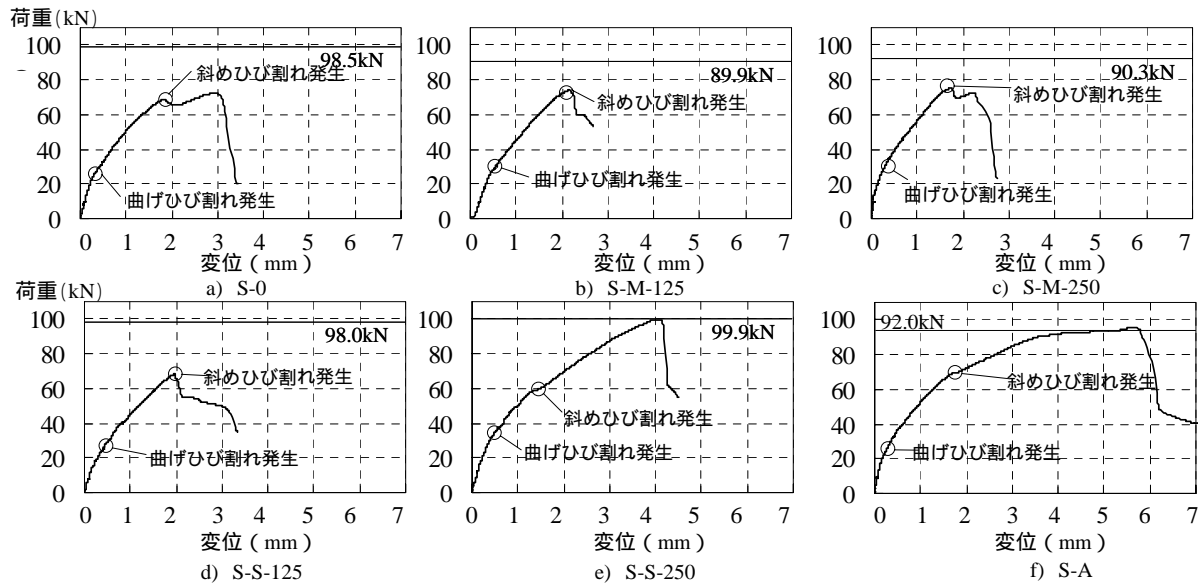


図 - 5 荷重 変位関係

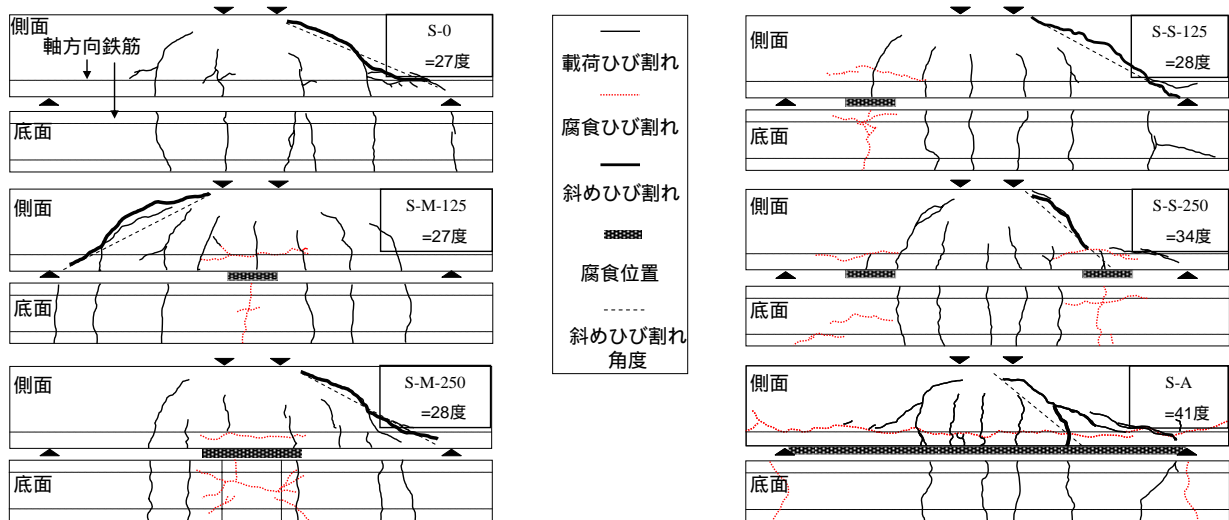


図 - 6 ひび割れ状況

軸方向鉄筋を腐食させた S-S-250 においても、 V_{exp}/V_c は 1.4 となり、せん断耐力の増加が確認された。腐食させたその他の 3 体では V_{exp}/V_c がほぼ 1.0 程度となり、せん断耐力の増加はほとんど認められなかった。

(2) 荷重 - 変位関係

図 - 5 に、荷重 - 変位関係を示す。また、加えて、図中に、軸方向鉄筋の質量減少率が最大となる断面から決定した、RC はりの曲げ耐力を示す。

全試験体において、30 kN 前後で、荷重 - 変位関係における傾きの変化を確認した。全試験体において、およそ 70 kN の斜めひび割れ発生荷重まで、剛性はおおよそ同程度になった。斜めひび割れ発生後、荷重が急激に低下する試験体 (S-0, S-M-125, S-M-250, S-S-125) と、傾きが低下しつつも荷重が増加する試験体 (S-S-250, S-A) に区別でき、耐荷機構の相違が推測された。荷重増加が認められた試験体において、 V_{exp} は、軸方向鉄筋

の質量減少率が最大となる断面から決定される、RC はりの曲げ破壊荷重値とほぼ一致した。荷重増加が認められた 2 体の荷重 - 変位関係の斜めひび割れ発生後の傾きでは、S-S-250 における傾きと比較して、S-A の傾きが低下した。これは、図 - 4 の d) および e) を比較しても推測できるように、S-A の等モーメント区間における、腐食による軸方向鉄筋の断面欠損が、剛性の低下に影響したものと考えられる。

(3) ひび割れ状況

図 - 6 に、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 β を示す。ここで、観察された斜めひび割れから、斜めひび割れ角度 β を次のように定めた。斜めひび割れの水平方向に対する角度は、位置に依存して傾きが変化するために、その角度 β は、両側面に発生した斜めひび割れにおいて、先端と軸方向鉄筋位置と交わる点を直線近似することで得られる角度の平均値と定

義した。全試験体のうち S-S-250, S-A を除く 4 体は、せん断スパンにおいて、載荷点から支点を結ぶ直線に近い位置に斜めひび割れが発生し、 V_{exp} に達した。S-S-250, S-A 試験体では、 β が大きくなり、この斜めひび割れとせん断スパン内の腐食ひび割れの開口が観察され、荷重が増加した。S-A では、斜めひび割れから軸方向鉄筋に沿うように斜めひび割れが進展して V_{exp} に達した。S-S-250 では、斜めひび割れ上部のコンクリートが圧壊し、荷重が V_{exp} に達し、せん断圧縮破壊を示した。また、耐力力の増加が認められた試験体 (S-S-250, S-A) では、他の 4 体と比較して、 β が大きいことが確認された。

実験結果から、軸方向鉄筋が局部的に腐食を有する試験体においても、せん断耐力力の増加を確認した。以下では、局所的な鉄筋腐食を有する試験体のせん断耐力機構について、さらに検討する。

4.3 せん断耐力力と区間ごとの鉄筋腐食の関係

(1) 破壊スパンと腐食量

図 - 7 に、左右の各せん断スパンにおける鉄筋の平均質量減少率 \bar{C}_s を示す。ここで \bar{C}_s は、左側スパンでは、スパン中央から -500 mm ~ -100 mm 位置、右スパンでは、500 mm ~ 100 mm までの鉄筋の質量減少率の平均値である。図 - 6 および図 - 7 より、 \bar{C}_s が 3% を上回ると、 \bar{C}_s が低いせん断スパン側で破壊したことが確認できる。特に S-S-125 においては、健全なスパンで破壊し、その特徴が顕著に現れた。

(2) β と腐食量およびせん断耐力力の関係

図 - 8 に、各試験体の破壊したスパンにおける \bar{C}_s と V_{exp}/V_c および \bar{C}_m と V_{exp}/V_c の関係を示す。ここで、 \bar{C}_s は、破壊したせん断スパン側の軸方向鉄筋の質量減少率の平均値であり、 \bar{C}_m は、等モーメント区間の鉄筋の質量減少率の平均値である。図 - 8 より、本研究の腐食状況において、 \bar{C}_s の増加に伴い V_{exp}/V_c も単調に増加していることが確認でき、相関が認められる。一方、 \bar{C}_m と V_{exp}/V_c では一定の傾向を見出すことができなかった。したがって、 \bar{C}_s は腐食した RC はりのせん断耐力力をよく反映できる指標である可能性がある。そこで、この原因についてさらに検討する。

図 - 9 a) に、斜めひび割れ角度 β に対する \bar{C}_s の関係、および β に対する V_{exp}/V_c の関係を示す。図より、斜めひび割れ角度 β が 28 度程度であった 4 体の試験体における V_{exp}/V_c はほぼ 1.0 に等しく、 β の高い試験体では、 V_{exp}/V_c が大きいことが確認できる。また、 \bar{C}_s の増加に伴って、 β が増加していることが確認できる。これらのことから、せん断スパンの腐食量が高くなると、せん断スパン中の鉄筋とコンクリートの付着が低下する。付着が低下すると、軸方向鉄筋が受持つ引張力がはり軸方向に沿って一様に近づく。その結果、RC はりの耐力機構は、モーメントを受持つ腕の長さが軸方向に沿って変化し作用モーメントに抵抗する、アーチ機構に移行する。アーチ機構に移行した RC はりでは、載荷点と支点を結ぶ圧縮ストラットの幅の増加に伴って圧縮ストラットの貢献分が増加し、せん断耐力力が増加したと考えられる。すなわち、せん断耐力力の増加した試験体では、 β が増加したが、これは圧縮ストラットの幅が増加した現象と関連しているものと考えられる。ただし、せん断耐力力ならびに β は、せん断スパン中の腐食発生領域、腐食発生位置によって変化する可能性があり、今後、検討を進めたいと考える。

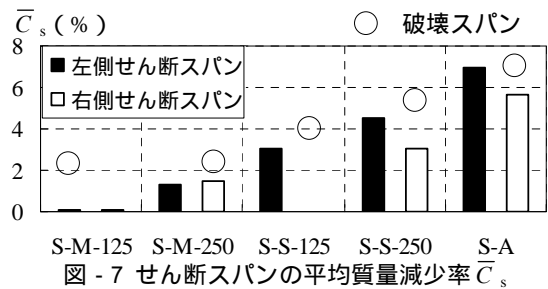


図 - 7 せん断スパンの平均質量減少率 \bar{C}_s

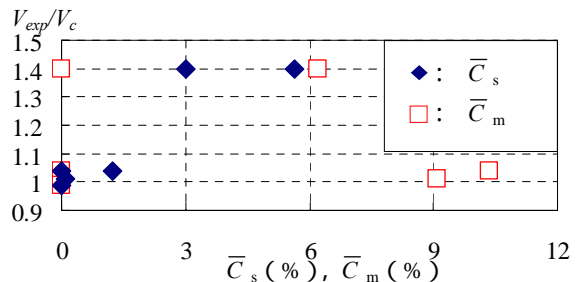


図 - 8 \bar{C}_s , \bar{C}_m に対する V_{exp}/V_c の関係

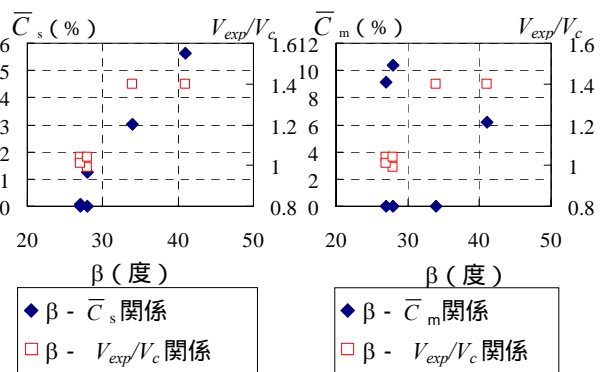


図 - 9 各種パラメータの相関図

図 - 9 a) に、斜めひび割れ角度 β に対する \bar{C}_s の関係、および β に対する V_{exp}/V_c の関係を示す。図より、斜めひび割れ角度 β が 28 度程度であった 4 体の試験体における V_{exp}/V_c はほぼ 1.0 に等しく、 β の高い試験体では、 V_{exp}/V_c が大きいことが確認できる。また、 \bar{C}_s の増加に伴って、 β が増加していることが確認できる。これらのことから、せん断スパンの腐食量が高くなると、せん断スパン中の鉄筋とコンクリートの付着が低下する。付着が低下すると、軸方向鉄筋が受持つ引張力がはり軸方向に沿って一様に近づく。その結果、RC はりの耐力機構は、モーメントを受持つ腕の長さが軸方向に沿って変化し作用モーメントに抵抗する、アーチ機構に移行する。アーチ機構に移行した RC はりでは、載荷点と支点を結ぶ圧縮ストラットの幅の増加に伴って圧縮ストラットの貢献分が増加し、せん断耐力力が増加したと考えられる。すなわち、せん断耐力力の増加した試験体では、 β が増加したが、これは圧縮ストラットの幅が増加した現象と関連しているものと考えられる。ただし、せん断耐力力ならびに β は、せん断スパン中の腐食発生領域、腐食発生位置によって変化する可能性があり、今後、検討を進めたいと考える。

一方、 V_{exp}/V_c と等モーメント区間の腐食量の関係について検討するため、図 - 9 b) に、 β に対する \bar{C}_m の関係、および β に対する V_{exp}/V_c の関係を示す。図より、 β と \bar{C}_m との相関が認められなかった。したがって、 \bar{C}_m の変化はせん断耐力機構に影響せず、その結果、試験体のせん断耐力力は増加しなかったと考えられる。

軸方向鉄筋の腐食発生位置によって、RC はりの斜めひび割れ角度 β が変化し、耐力力に差異が認められた。

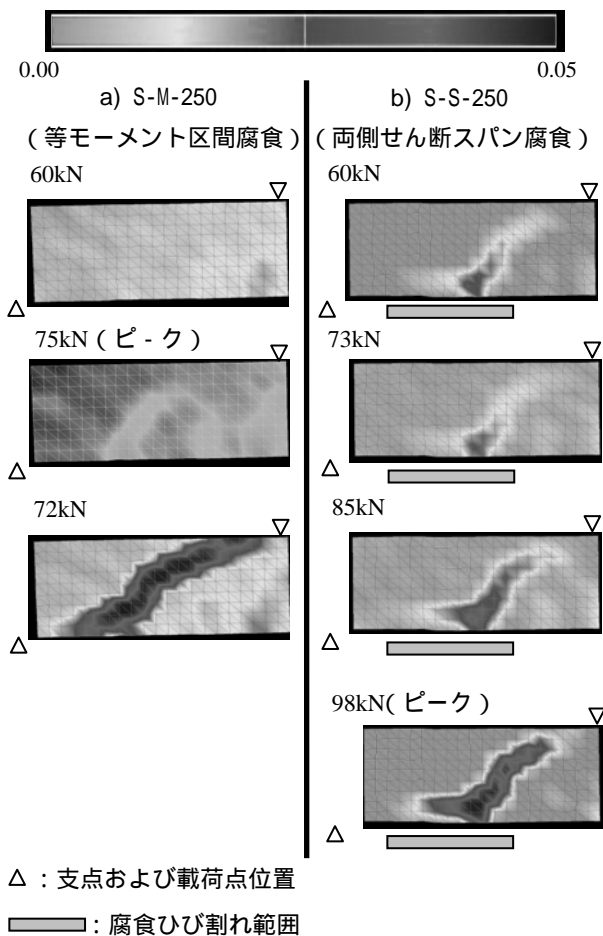


図-10 画像解析結果

したがって、軸方向鉄筋腐食量だけでなく、腐食発生位置も耐力および耐力機構に影響することを確認した。

5. 画像解析結果

画像解析を用いて、耐力に違いのある2体の試験体各荷重での主引張ひずみの分布について考察する。図-10に、等モーメント区間を腐食させたS-M-250と両側のせん断スパンを腐食させたS-S-250の主引張ひずみを示す。また加えて、画像の左上に荷重値を示す。図-10a)より、S-M-250では、荷重の最大値の手前では主引張ひずみに卓越した領域を確認することができない。荷重が最大になると斜めひび割れ位置に主引張ひずみが卓越し、急激に斜めひび割れ発生していることが確認できる。一方、図-10b)より、荷重増加の認められたS-S-250では、荷重増加に伴って、ひずみの卓越する領域が増加し、徐々に、斜めひび割れが進展・開口していることが確認できる。また、せん断スパン内の腐食ひび割れに沿って、主引張ひずみが卓越し、斜めひび割れより支点側の腐食ひび割れの開口が確認できる。開口した腐食ひび割れ範囲では、鉄筋からコンクリートへの伝達力が低下しているものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、軸方向鉄筋における腐食位置と領域を変化させたRCはりを作製した。その後、このRCはりの4点曲げ荷重実験を実施し、軸方向鉄筋に局所的な腐食を有するRCはりのせん断耐力性能について検討した。

以下に、本研究で得られた結論を述べる。

- 1) 試験体支間における軸方向鉄筋を局所的に腐食させたRCはりのせん断耐力は、予測式による耐力と同等以上になることを確認した。
- 2) 片側のせん断スパンを腐食させた試験体、および等モーメント区間を腐食させた試験体においては、耐力の増加が認められなかった。
- 3) 軸方向鉄筋の腐食発生位置によって、RCはりのひずみ分布や斜めひび割れ角度が変化し、耐力に差異が認められた。したがって、軸方向鉄筋の腐食量だけでなく、腐食発生位置も耐力に影響することを確認した。
- 4) 画像解析を用いて、耐力が異なる2体の試験体について、破壊進展状況の特徴を考察した。耐力の増加の認められない試験体では、急激に斜めひび割れが発生・進展するという特徴がみられた。一方、耐力の増加した試験体では、荷重増加に伴って、斜めひび割れおよび斜めひび割れより支点側の腐食ひび割れが徐々に進展・開口していくという特徴を確認した。

なお、本研究では、画像解析を行う際に、電力中央研究所が開発したソフトウェア「非接触ひずみ計測ソフトウェア(NCDM)」を使用した。また、本研究の一部は、平成19年度科学研究費補助金(基盤研究(A)、課題番号19206050)によって実施したものである。

参考文献

- 1) 松尾豊史ほか：鉄筋腐食したRCはり部材のせん断耐力機構に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.15，No2，pp.69-77，2004.5
- 2) 濱田洋志ほか：局所的に生じた鉄筋腐食がRCはりの構造性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，pp.1729-1734，No.3.2007.7
- 3) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の性能，コンクリート技術シリーズ，2006.9
- 4) 池田尚治ほか：鉄筋コンクリートはりのせん断耐力挙動に及ぼす鉄筋付着の影響に関する研究，土木学会論文報告集，第293号，pp.101-109，1980
- 5) 二羽淳一郎ほか：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