

論文 圧縮鉄筋の腐食量と RC はりの曲げ耐荷性能に関する研究

桑野 仁成*1・國元 陸登*1・近藤 拓也*2・横井 克則*3

要旨: 圧縮鉄筋の腐食が RC はりの引張鉄筋降伏以降の挙動に与える影響を確認するため、電食を行い圧縮鉄筋の腐食による劣化過程を模擬した RC はりを作製し、曲げ試験を行った。試験結果から、一定の直径減少率までは曲げ耐力の低下との相関がみられた。消散エネルギーに関しては変位の増加による供試体間に差は確認できなかったため、圧縮鉄筋の腐食による影響は小さいと考えられる。

キーワード: 圧縮鉄筋, 鉄筋腐食, 最大荷重, 中立軸高さ, 消散エネルギー

1.はじめに

腐食環境下にある RC 部材の曲げ耐力は、引張鉄筋の健全度に依存することが過去の様々な研究¹⁾²⁾により明らかとなっている。そのため、曲げ耐力の算定式や推定方法については、維持管理の実務に活用できるところまで研究が進行していると考えられる³⁾。

RC 部材のうち、柱部材などは地震時に交番作用が働くため、同じ位置においても引張力、圧縮力がともに作用する。このうち、腐食した引張鉄筋を有する RC はりの曲げせん断挙動については、RC 構造物の根幹をなすことから様々な研究事例¹⁾²⁾⁴⁾が存在する。既往の研究¹⁾では、主筋の腐食量増加による影響は耐力よりも靱性能への影響のほうが大きいと報告されている。また、引張鉄筋の腐食によって付着力が低下するとアーチ機構を形成するなどの応力状態の変化も確認されている⁴⁾。

一方で、RC はりの設計では、引張側と違い圧縮側では、設計段階でコンクリートの圧縮力を算入している。そのため、圧縮鉄筋が腐食し軸方向ひび割れが生じることによって、圧縮力を負担するコンクリートの断面積が低下し、耐力の低下が考えられる。例えば、高橋⁵⁾や宇

田⁶⁾らの研究により圧縮鉄筋の腐食によるひび割れによりせん断耐力に与える影響について述べている。しかし、圧縮コンクリートの腐食ひび割れがはりの曲げ性能に与える事例は多くみられない。そのため、圧縮鉄筋の腐食が、RC 部材の曲げ性能に与える影響について検討することも必要であると考えられる。

そのため本研究では、電食を用いて、劣化した RC はりを模擬し、曲げ試験を行った。得られた結果から圧縮鉄筋の腐食が RC はりの耐荷性能および靱性能に与える影響について検討を行った。

2.実験概要

2.1 使用材料

(1) コンクリート

使用したコンクリートの水セメント比は 50%とした。

セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材は硬質砂岩砕砂、粗骨材は硬質砂岩砕石を使用した。混和剤として変性ロジン性酸系の AE 調整剤を使用した。スランブは 12±2.5cm とし、空気量は 4.5±1.5%とした。使用し

表-1 コンクリートの配合表

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
20	50	43.8	162	328	433	356	3.47

表-2 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
51.1	3.2	27.8

表-3 供試体種類

供試体種類	せん断補強筋数 (本)	積算電流量 (hr・A)	供試体本数 (本)
シリーズ1 (S1)	4	0	2
		40	2
		80	2
シリーズ2 (S2)	5	0	3
		50	2
		100	3
		150	3
		200	1

*1 高知工業高等専門学校 専攻科 建設工学専攻 (学生会員)

*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

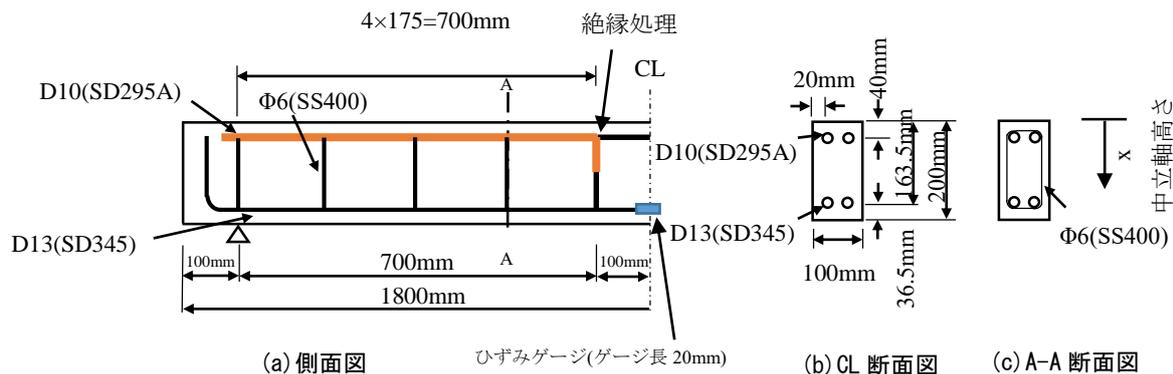


図-1 供試体概要図

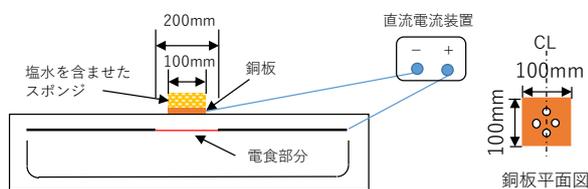


図-2 電食概要図

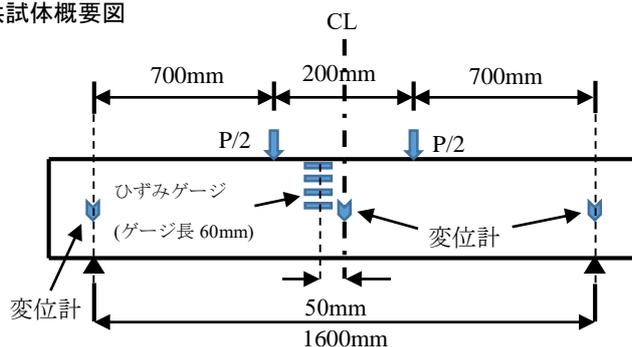


図-3 荷重試験概要

たコンクリートの配合表を表-1 に、材齢 28 日に実施した圧縮試験、引張試験の結果を表-2 に示す。なお、試験結果は試験体 3 体の平均値とした。はり理論による曲げ耐力等の算定にはこの実測値を用いた。

(2) 鉄筋

本試験では、圧縮鉄筋に D10(SD295A)、引張鉄筋に D13(SD345)、スターラップ Φ6(SS400)を使用した。はり理論による曲げ耐力の算定には JIS G 3112 に示す下限値を使用した。

2.2 供試体概要

試験体の概要図を図-1 に示す。供試体寸法は 100mm×200mm×1800mm の矩形断面はりとした。打込み翌日に脱型を行い、材齢 7 日まで湿布養生を行った。その後、室内に存置した。

試験要因を表-3 に示す。圧縮鉄筋が腐食した RC の曲げ性能についての検討を行うため、せん断補強筋量およびせん断スパンはせん断耐力比 V_{yd}/V_{mu} (V_{yd} :せん断耐力, V_{mu} :部材が曲げ耐力に達するときのせん断力)を参考に設計した。曲げ破壊先行型 $V_{yd}/V_{mu} > 1.0$ 以上を目標とし、シリーズ 1 では 1.19, シリーズ 2 では 1.42 とした。これは、 V_{yd}/V_{mu} が与える影響について考察を行う予定であったが、破壊形態に変化が見られなかったため、本論文では論じないこととした。パラメータは積算電流量(hr・A)とし、シリーズ 1 では 0, 40, 80, シリーズ 2 では 0,

50, 100, 150, 200 の 8 種類合計 18 体作成した。

図-2 のように電食試験を行った。電食試験体には、圧縮鉄筋にあらかじめリード線をはんだ付けた。等曲げ区間内中央 100mm 間の試験体上面に穴を数カ所あけた銅板を直接コンクリート面に設置した。その上側に質量濃度 3% の塩水を含めたスポンジを置き、電食を行った。電流密度は、鉄筋表面積あたり $2.55\text{mA}/\text{cm}^2$ とした。なお、電食は材齢 7 日から行った。荷重試験後に供試体の圧縮部コンクリートをはつり、等曲げ区間の圧縮鉄筋を切断し取り出した。切断した鉄筋は JCI-SC1 法に従い、60°C のクエン酸 2 アンモニウム 10% 溶液中に 8 時間浸漬し、除錆を行った。その後、各鉄筋のリブ 10 カ所を測定した。電食を行っていない供試体との直径変化量を百分率で表し直径減少率とした。

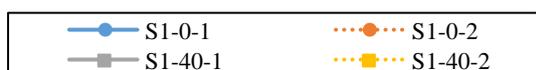
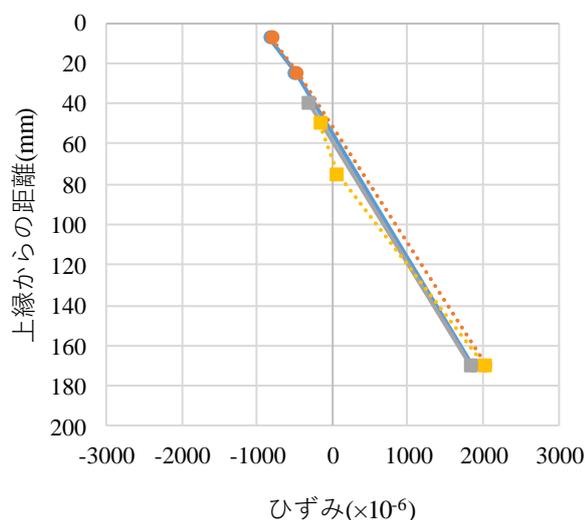
腐食区間は等曲げ区間内とし、等曲げ区間以外の圧縮鉄筋及びせん断補強筋には、ブチルテープを巻き、絶縁処理を行った。絶縁処理を行った部分を図-1 のオレンジ色の線にて示す。また引張鉄筋は被覆を行わなかった。電食による腐食ひび割れ幅は等曲げ区間内の軸方向ひび割れをクラックスケールで測定した。

2.3 荷重方法

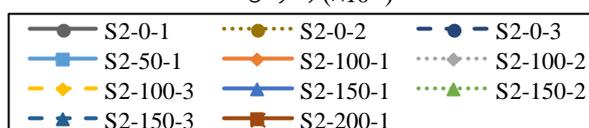
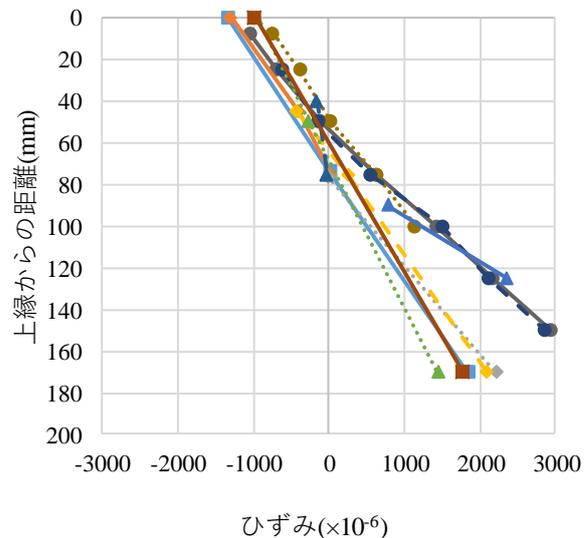
試験体の支間長は 1600mm で単純支持とし、等曲げ区間は 200mm、せん断スパン 700mm の 2 点曲げ荷重とした。なお、荷重点および取り付け器具を図-3 に記載した。

表-4 電食結果

供試体種類	積算電流量(hr・A)	供試体 No	直径減少率(%)	最大腐食ひび割れ幅(mm)
シリーズ 1 S1 ($V_{yd}/V_{mu}=1.19$)	40	1	3.3	0.80
		2	3.3	0.65
	80	1	6.9	0.65
		2	7.3	1.00
シリーズ 2 S2 ($V_{yd}/V_{mu}=1.42$)	50	1	1.0	0.35
		2	1.1	0.50
	100	1	6.5	0.90
		2	4.5	0.45
		3	3.1	0.50
	150	1	12.4	1.10
		2	12.7	0.90
		3	10.1	0.80
200	1	16.5	1.30	



(a) シリーズ 1



(b) シリーズ 2

図-4 最大荷重到達時のはり高さ方向ひずみ分布

荷重方法は2点漸増繰り返し試験とした。測定計器類については、支点中央両側面および、両支点に変位計(感度0.01mm)を設置した。ひずみゲージは、中立軸の位置を確認するため側面支間中央部から50mm水平方向に離れた位置で貼り付けた。健全供試体でははり高さ方向25mm間隔にひずみゲージ(ゲージ長60mm)を貼り付けた。また、電食を行った供試体では、軸方向にひび割れが生じているため、ひび割れを避けて貼り付けた。引張鉄筋には支間中央にひずみゲージ(ゲージ長20mm)を貼り付けた。引張鉄筋が降伏に到達するまでは5kN毎の漸増繰り返し載

荷を行い、引張鉄筋の降伏到達以降は降伏荷重到達時の中央変位を δ とし、 δ 毎に載除荷を繰り返し行った。また、中心変位 8δ に到達すると載荷を終了した。

2.4 電食結果

各供試体の直径減少率および、最大ひび割れ幅をまとめたものを表-4に示す。

3. 曲げ試験結果

3.1 最大荷重と腐食量の関係

曲げ試験により得られた最大荷重、および中立軸高さ

表-5 最大荷重および最大荷重比

供試体種類	積算電流量 (hr・A)	供試体 No	最大荷重 (kN)	最大荷重比	中立軸高さ (mm)	中立軸位置考慮最大荷重比	座屈
S1	0	S1-0-1	40.4		56.0		-
		S1-0-2	41.1		52.4		-
	40	S1-40-1	38.6	0.96	58.0	0.99	-
		S1-40-2	38.2	0.95	63.8	0.98	-
	80	S1-80-1	37.4	0.93			-
		S1-80-2	39.1	0.98			-
S2	0	S2-0-1	40.1		49.6		-
		S2-0-2	38.6		45.5		-
		S2-0-3	40.2		51.7		-
	50	S2-50-1	38.9	0.97	69.0	0.98	-
		S2-50-2	39.1	0.98			-
	100	S2-100-1	38.8	0.97	70.6	0.98	有
		S2-100-2	38.7	0.97	77.5	0.97	-
		S2-100-3	39.8	0.99	66.1	0.98	-
	150	S2-150-1	39.0	0.97	72.6	0.98	有
		S2-150-2	38.6	0.96	66.8	0.98	有
		S2-150-3	40.2	1.00	84.0	0.97	-
	200	S2-200-1	40.1	1.00	60.4	0.99	有

を表-5 に示す。また、図-4 に、最大荷重到達時のひずみ分布を示す。中立軸高さは図-1 に示すように、はりの上端を始点とした。RC はりの断面では平面保持の仮定が成り立つとし、側面に貼り付けたひずみゲージと、引張鉄筋に貼り付けたひずみゲージから最大荷重時の中立軸を算定した。ひずみゲージは荷重直前に貼り付けたため、電食供試体は、ひび割れを避けるようにして貼り付けた。荷重の進行とともに曲げひび割れが進行し測定不可能となったひずみゲージに関してはデータを省略した。最大荷重比は各シリーズの健全供試体の最大荷重の平均値との比とした。最大荷重比と直径減少率の関係を図-5 に示す。等価応力ブロック法⁹⁾より、断面のつり合いから式(1)を用いて、計算値の算出をした。

$$\mu = (A_s f_{yd} - A_s' \sigma_s') \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \sigma_s' (d - d') \quad (1)$$

ここで、 A_s : 引張鉄筋の断面積(mm²)、 A_s' : 圧縮鉄筋の断面積(mm²)、 f_{yd} : 引張鉄筋の降伏応力(N/mm²)、 d : 有効高さ(mm)、 d' : 圧縮縁から圧縮鉄筋の図心までの距離(mm)、 σ_s' : 圧縮鉄筋の応力度(N/mm²)、 a : 等価応力ブロック高さ(mm)、とする。また、後述する中立軸を考慮した計算値を算出する場合には $a=0.8x$ (x : 中立軸高さ(mm)) を使用した。

電食を行った供試体では健全供試体と比較し、最大荷

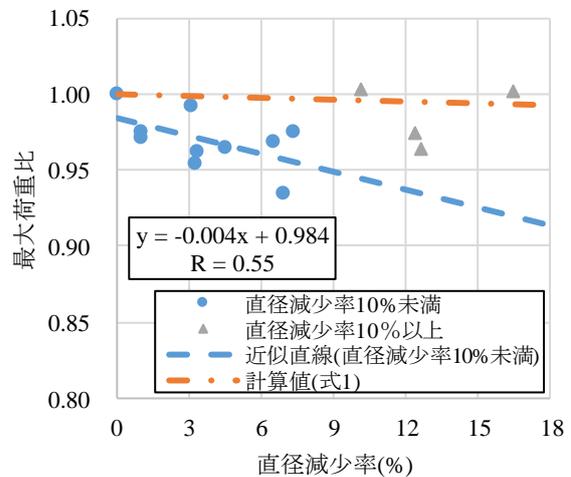


図-5 最大荷重比と直径減少率の関係

重の低下が確認できた。圧縮鉄筋の直径減少率を考慮した計算値の直線よりも低い値に分布していることから、軸方向ひび割れの発生により、圧縮力に抵抗するコンクリート断面積の低下が考えられる。

引張鉄筋が腐食した RC はりの最大荷重に関する玉井らの研究²⁾では、質量減少率が 10%程度以上になると最大荷重のばらつきが大きくなると確認されている。本研究は圧縮鉄筋であるが、図-5 に示すように直径減少率が 10%未満では相関性が得られているものの、直径減少率

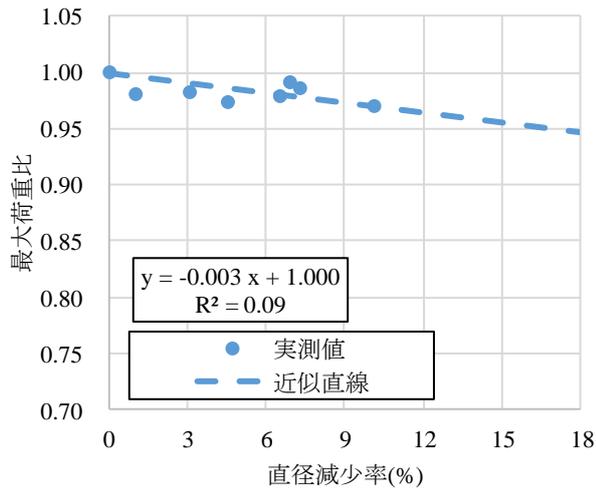


図-6 中立軸を考慮した荷重比と直径減少率の関係

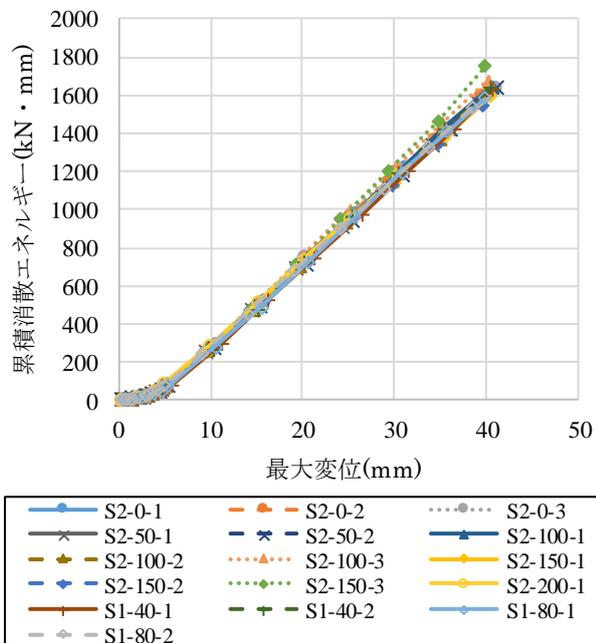
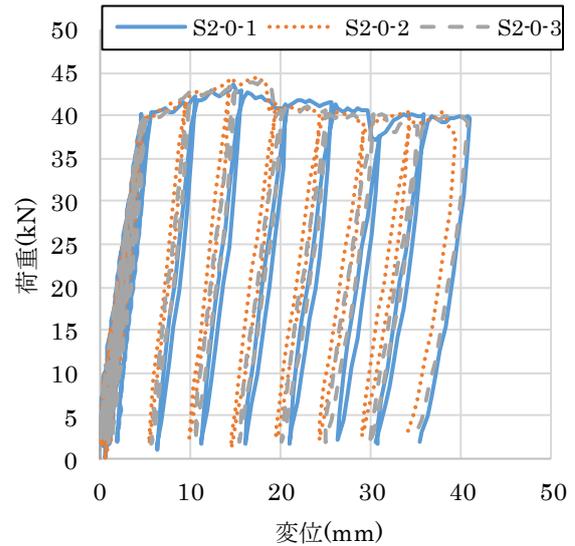


図-7 累積消散エネルギーと最大変位の関係

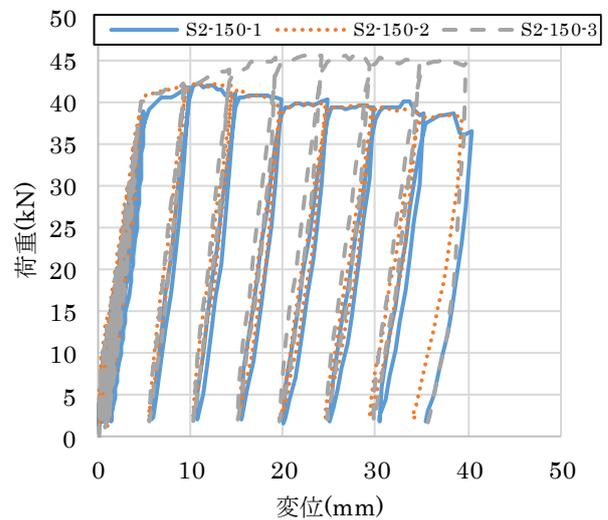
が10%を超えた供試体では相関性が得られなかった。また、玉井らの研究²⁾では引張鉄筋における質量減少率が6から12%のRCはりにおいて最大荷重比が0.84から0.86となっている。そのため、引張鉄筋の腐食による耐力低下率ほどは大きくないものの、鉄筋腐食による耐力低下傾向には同様の傾向を示す可能性がある。

また、実測ひずみから算出した中立軸の位置を考慮した最大荷重比を表-5および、図-6に示す。なお、載荷中にひずみゲージがはがれたことによる、データ不備が発見された供試体については省略した。

腐食ひび割れが発生した供試体では、健全供試体に比べて、中立軸がはり下側に移動していることが分かる。中立軸がはり下側に移動するということは、圧縮合力の



(a) 0hr・A



(b) 150hr・A

図-8 荷重-変位図

低下が原因であると考えられる。圧縮鉄筋の腐食による鉄筋断面積の減少は最大荷重の計算への寄与は小さいため、腐食ひび割れが生じることによる圧縮部コンクリートの断面積の減少が支配的であると考えられる。

また、中立軸の位置を考慮した最大荷重比より、実測値の最大荷重比の低下率のほうが大きい。これは、軸方向ひび割れの発生により、軸方向ひび割れよりも上縁部ではコンクリートにせん断力が伝達されていないため、等価応力ブロックの面積が低下していることが考えられる。

3.2 降伏以降の曲げ載荷挙動

部材靱性を評価するため、部材載荷時に消費するエネルギーの累積値と、各グループで示す最大変位の関係を図-7に示す。なお消散エネルギーは曲げ載荷時に得られる荷重-変位曲線履歴ループの囲む面積とした。また載荷試

験での荷重-変位図を図-8に示す。図-8(b)では、座屈が生じた S2-150-1,2 では S2-150-3 と比べて最大荷重が載荷の進行とともに低下している。S2-150-1 では、圧縮鉄筋の座屈により内部から外部へ押し出す力が作用したため、図-9に示すように、圧壊域が拡大した。今回の検討では、腐食区間が等曲げ区間のみである。そのため、等曲げ区間外が定着区間となり、腐食が生じた等曲げ区間は鉄筋が拘束されていない状態で圧縮力が作用した状態となっている。そのため、腐食区間において、周辺からの拘束が最も弱い側面方向に鉄筋が座屈したものと考えられる。

しかし、図-7の最大変位-累積消散エネルギーでは、圧縮鉄筋の腐食、そして、圧縮鉄筋の座屈が生じた供試体であっても有意な差がみられなかった。これは、圧縮鉄筋に座屈が生じた供試体では、座屈発生時に荷重が一旦低下するものの、除荷時の荷重-変位関係は、ほぼ載荷時と同じ傾きを示すためである。座屈により、圧縮部コンクリートが欠損し、圧縮部コンクリートの断面積は低下するが、座屈は生じたものの、圧縮鉄筋がその後の圧縮力を負担しているものと考えられる。

そのため、RC はりの靱性能は従来の知見⁸⁾通り、引張鉄筋の健全性の影響を強く受ける可能性が高いと考えられる。

4. 結論

本論文では、圧縮鉄筋の腐食を模擬した RC はりで曲げ試験を行い、腐食ひび割れ幅や、圧縮鉄筋の健全度が耐荷性能、靱性能に与える影響について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 圧縮鉄筋の直径減少率が 10%程度では腐食量と最大荷重比の相関が得られるが、今回の実験では 12%を超えた場合で相関の得られない結果となった。
- (2) 腐食ひび割れが生じると中立軸が低下する傾向を示した。
- (3) 実測により得られた中立軸を考慮した耐力計算値が実測耐力を下回った。そのため、腐食ひび割れによって圧縮部コンクリートの応力伝達が正常に行われていない可能性が示された。
- (4) 圧縮鉄筋が座屈した供試体では、載荷の進行とともに耐荷力の低下が確認できた。しかし、累積消散エネルギーでは差がみられなかった。そのため、圧縮鉄筋の座屈は靱性能に与える影響は少なく、引張鉄筋の健全度に依存すると考えられる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会四国支部：塩害劣化を受けた



(a) 0-3 試験後外観性状



(b) 150-1 試験後外観性状

図-9 載荷試験後 外観性状

コンクリート構造物の耐力評価委員会報告書, pp.10-13, 2015.5

- 2) 玉井宏樹, 桑原功旺, 園田佳巨：鉄筋腐食により劣化した RC 梁部材の曲げ耐荷性能および耐衝撃性能に関する基礎的研究, 構造工学論文集, vol.63A, pp.1224-1236, 2017.3
- 3) 日本コンクリート工学会：既存コンクリート構造物の性能評価指針 2014, 2014.11
- 4) 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研究, コンクリート工学年次論文集, vol.27, No.1, 2005.7
- 5) 3) 高橋良輔：圧縮鉄筋の腐食ひび割れがせん断圧縮破壊挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, vol.36, No.2, pp.475-480, 2014.7
- 6) 宇田好一郎, 川本卓人, 出路康夫, 佐藤良一：圧縮鉄筋の腐食がせん断補強筋のない RC はりのせん断強度の及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, vol.28, No.2, pp.751-756, 2006.7
- 7) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.182, 2017.3
- 8) 山本貴士, 宮川豊章：鉄筋腐食を生じた鉄筋コンクリート構造物の力学的性能, 「材料」(Journal of the Society of Materials Science, Japan), vol.56, No.8., pp.684-693, 2007.8