

論文 圧縮鉄筋の腐食が RC はりの曲げ耐荷性能に与える影響

國元 陸登*1・桑野 仁成*2・近藤 拓也*3・横井 克則*4

要旨： 腐食圧縮鉄筋を有する RC はりの曲げ耐荷性能は、引張鉄筋が腐食した RC はりと比較して統一的な見解が少ない。しかし、圧縮鉄筋の腐食によるかぶりコンクリートの剥落は、圧縮部コンクリートの断面積を減少させるため、耐荷力の減少や、変形の増加などが想定される。そこで、圧縮鉄筋の腐食による劣化過程を模擬し、電食、もしくは圧縮側コンクリートに欠損が生じた RC はりを作製し、曲げ試験を行った。試験結果から、腐食量の増加や圧縮部コンクリートの欠損が生じると曲げ耐荷性能が低下する可能性を示した。

キーワード： 圧縮鉄筋, 鉄筋腐食, 靱性能, 曲げ剛性, 曲げひび割れ

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により明らかとなっている¹⁾。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²⁾。

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、部材には引張力、圧縮力ともに作用する。このうち、腐食した引張鉄筋を有する RC はりの曲げ挙動については、RC 構造物の根幹をなすことから、上述のように様々な研究事例が存在する。

一方で、圧縮鉄筋が腐食した RC はりの曲げ挙動に関する研究事例は、引張鉄筋が腐食したものと比較して多く存在しない。既往の研究では、引張鉄筋の腐食量が多いほど靱性能の低下は、曲げ耐力の低下に対して大きいということも報告されている³⁾。そのため、圧縮鉄筋の腐食による曲げ性能の検討も必要であると考えられる。

また、「既存コンクリート構造物の性能評価指針 2014」²⁾によると、耐震性能を評価する上で最も基本となる保有性能基本指標は強度指標と靱性能との積で求められる。靱性能は耐震性に比例しているため、想定される問題は、全て耐震性の低下に影響すると考えられる。

そのため本研究では、圧縮鉄筋が腐食し、断面欠損が生じるまでの劣化過程を模擬し圧縮鉄筋を電食、もしくは圧縮側コンクリート断面を欠損した RC はりで曲げ試験を行った。得られた結果から、曲げ耐荷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は水セメント比 55%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。スランプは 12±4.5cm とし、空気量は 4.5±1.5%とした。使用し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、引張試験およびヤング係数の測定値結果を表-2 に示す。はり理論による曲げ耐荷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

表-1 コンクリートの配合表

s/a (%)	W/C (%)	Gmax (mm)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
43.3	55	25	168	305	749	1000	1.2

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)
40.2	3.40	27.8

表-3 試験要因一覧

試験体名	試験体条件	試験体数
試験体 A	健全	1
試験体 B	圧縮鉄筋の電食 (積算電流量 40hr・A)	1
試験体 C	圧縮鉄筋の電食 (積算電流量 80hr・A)	1
試験体 D	圧縮鉄筋位置まで欠損	1
試験体 E	圧縮鉄筋完全露出	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 環境都市デザイン工学科

*3 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)

*4 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)

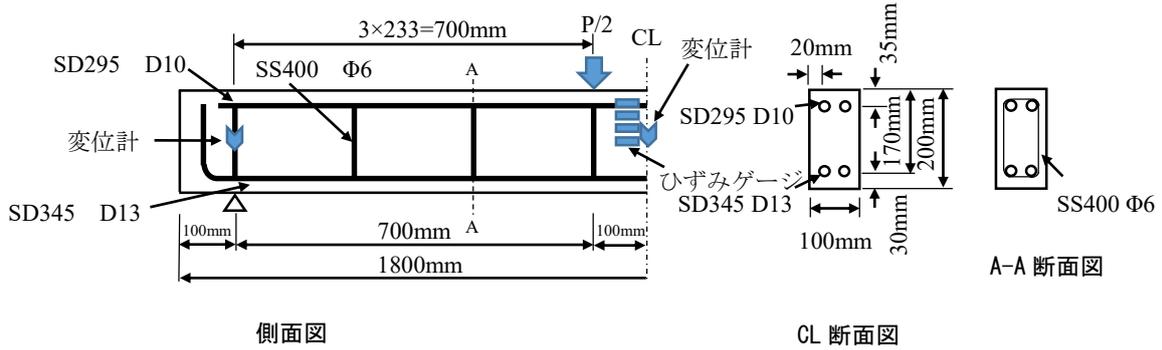
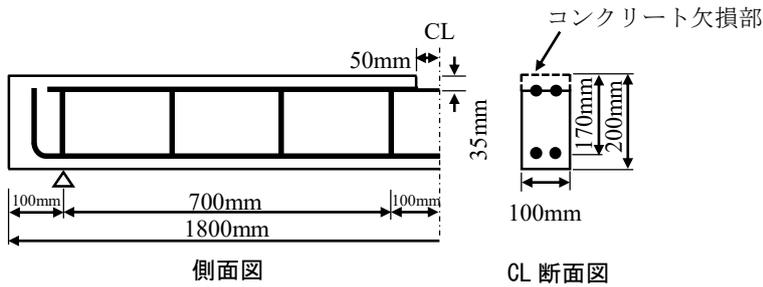
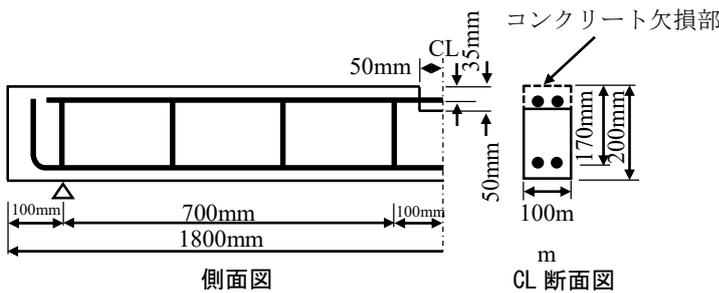


図-1 試験体の概要図（健全及び電食試験体 A, B, C, シリーズ）



(a) コンクリート試験体 D シリーズ



(c) コンクリート試験体 E シリーズ

図-2 試験体の概要図



(a) 欠損部作製



(b) 断面欠損部

写真-1 断面欠損部作製状況

D13(SD345A), 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 に示す下限値を示した。

2.2 試験体概要

試験体の概要図を図-1 および図-2 に示す。供試体寸法は 100mm×200mm×1800mm の矩形断面はりとした。打込み後、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。パラメータは、圧縮鉄筋の劣化過程を模擬し、健全試験体(A)と 2 種類の電食試験体(B, C), 圧縮鉄筋の腐食が進行し、圧縮部コンクリート剥落を模擬した試験体(D), さらにには圧縮鉄筋が完全に露出した試験体(E), の計 5 種類とした。せん断力に対する安全性の照査を行い、圧縮鉄筋の腐食が破壊性状に与える影響を確認するために V_{yd}/V_y が 1.0 以上 1.2 以下を目標とし、1.18 となるようにせん断補強

筋を配置した。

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した。等曲げ区間内中央 100mm 間の試験体上面に Φ6 の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。その上側に水道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 2.55mA/cm² とした。なお、電食は材齢 28 日から行った。載荷後に電食させた鉄筋を取出し、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。

等曲げ区間以外の圧縮鉄筋及びせん断補強筋には、ビニルテープを全面に巻き、電食防止を行った。引張鉄筋は被覆を行わなかった。なお、発錆は確認しなかったが、コンクリート表面にひび割れ等は確認できなかった。

圧縮部コンクリートが欠損した試験体については、

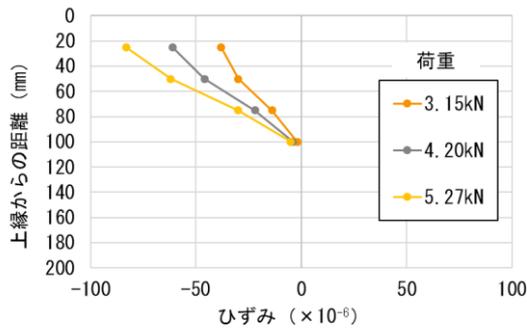


図-2 試験体 A はり高さ方向ひずみ分布 (健全)

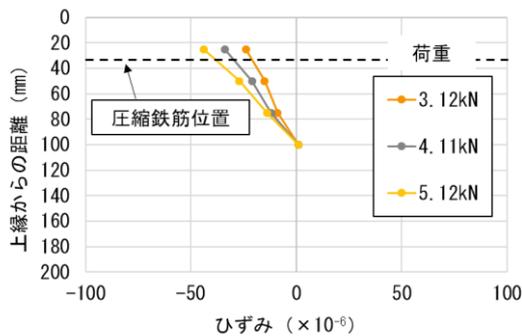


図-3 試験体 B はり高さひずみ分布 (電食)

試験体中心部 100mm の部分を欠損させた。コンクリート欠損試験体の型枠設置状況を写真-1 に示す。圧縮部コンクリート欠損部は防水処理を施した発泡スチロールを予め型枠に取り付け、打込み時に移動しないように紐で固定した。

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、荷重点および取付け器具は、図-1 に記載した。荷重方法は 2 点漸増繰り返し曲げ荷重とした。測定計器類については、両側面支間中央及び両支点に変位計(感度 0.01mm)を設置した。中立軸の位置を確認するために側面支間中央部に 50mm 離れた位置で、はり高さ方向 25mm 間隔にひずみゲージ(ゲージ長 60mm)を張り付けた。曲げひび割れ発生後は引張部のコンクリートは応力を負担しないため、圧縮部にのみ張り付けた。また引張鉄筋には支間中央部からひずみゲージ(ゲージ長 20mm)を張り付けた。なお、ひずみゲージには防水措置を施した。

荷重試験は、試験体 A, D, E は材齢 28 日で行い、試験体 B, C は電食試験終了後(B:材齢 45 日, C:材齢 62 日)に行った。引張鉄筋が降伏に到達するまでは 5kN 毎の漸増繰り返し荷重を行った。引張鉄筋の降伏到達以降は、降伏荷重到達時の中心変位を δ とし、 δ 毎に載除荷

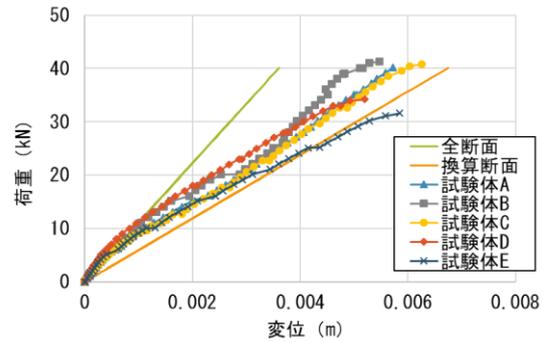


図-4 荷重-変位曲線 (降伏時まで)

表-4 曲げ剛性 (曲げひび割れ発生荷重前)

	計算値 ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$) ①	実測値 ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$) ②	比 ①/②
試験体 A	11.1 $\times 10^3$	10.1 $\times 10^3$	1.11
試験体 B		9.84 $\times 10^3$	1.13
試験体 C		9.77 $\times 10^3$	1.14
試験体 D		15.5 $\times 10^3$	0.72
試験体 E		13.2 $\times 10^3$	0.85

表-5 各試験体の曲げ耐力

	計算値(kN) ①	実測値(kN) ②	比 ①/②
試験体 A	34.0	40.2	0.93
試験体 B	34.0	41.3	0.91
試験体 C	34.0	43.3	0.87
試験体 D	32.9	36.3	0.90
試験体 E	31.6	31.6	1.00

を繰り返し行った。荷重は荷重が最大荷重の 8 割に低下するまで行った。また、中心変位 10 δ に到達すると荷重を終了した。

3. 曲げ試験結果

3.1 はり高さ方向のひずみ分布

等曲げ区間内での断面高さ方向に張り付けたひずみゲージを利用して、曲げひび割れ発生以前の断面高さ方向のひずみ分布を図-2 および図-3 に示す。鉄筋の断面減少による中立軸の変化を確認するため、健全試験体と電食試験体で比較した。試験体 C は、データ不備のため除外した。ひずみ分布では、電食による中立軸の変化は見られなかった。腐食ひび割れの有無に関わらず(図-5 参照)、はり高さ方向に対してひずみ分布が直線となり、平面保持の仮定が成立していると考えられる。また、腐食ひび割れ発生に関わらず、断面が一体化し曲げに抵抗しているためと考えられる。

3.2 降伏以前の荷重-変位曲線

降伏以前の荷重-変位関係を図-4に示す。図中に示す実測値は荷重変位関係の包絡線とした。また、曲げひび割れ発生前における曲げ剛性について、荷重-変位曲線の原点から曲げひび割れ発生荷重までで得られたデータを線形回帰し、算出した傾きを実測値とした。これと計算値と比較したものを表-4に示す。計算値については、すべて健全試験体の断面を使用し、はり理論を用いて算定した。算定の前提として、曲げ剛性は全区間で一定とした。なお、断面二次モーメントについては、曲げひび割れ前は、全断面を有効として求め、曲げひび割れ発生後は、引張部コンクリートを考慮しない換算断面二次モーメントを利用して求めた。

試験体 A, B, C および D については、曲げひび割れ発生前において、全断面有効の計算式に沿った挙動を示した。曲げひび割れ発生後は、換算断面の計算式に荷重の増加とともに接近する傾向を示した。これは、健全な RC はりである試験体 A の荷重-変位関係に漸近していることから、本試験範囲では、圧縮鉄筋のみの腐食では曲げ剛性に与える影響は小さいものと考えられる。また、試験体 E については、降伏荷重到達時に、換算断面の荷重-変位関係を下回っていることが確認できる。これは、はり高さの低下によるものと考えられる。

3.3 曲げ耐荷力

各試験体の曲げ耐荷力を計算値と実測値で比較したものを表-5に示す。計算値の算定については、試験体 A~D ははり理論で算定した。また、試験体 B および C は電食による鉄筋断面径の減少を考慮した計算とした。なお鉄筋直径は、等曲げ区間内の鉄筋 200mm を切り取り、リブ 10 カ所を測定した。健全試験体との直径変化量を健全試験体直径で割った値の百分率を直径減少率とした。試験体 B で 2%、試験体 C で 4% を示した。また、電食後の鉄筋の錆は電食対象箇所全体に確認できた。また、試験体 E は、鉄筋とコンクリートが付着していない区間があるため、はり理論で曲げ耐力を求めることができない。しかし、この条件が耐力に与える影響について確認を行う必要があるため、2 次元弾塑性 FEM 解析により算定した。

解析は対称性を考慮してはり左側半分について行い、支点の鉛直方向およびスパン中央部の軸方向を固定した。また、支点部から 800mm の位置のはり上縁の接点に、鉛直下向きの増分変位を与えた。要素特性については、健全部コンクリートは 1 次のアイソパラメトリック四辺形要素とした。また、スターラップとして使用している鉄筋は付着考慮しない 1 次の線要素とした。引張鉄筋の応力-ひずみ関係は、ひずみ硬化を考慮した

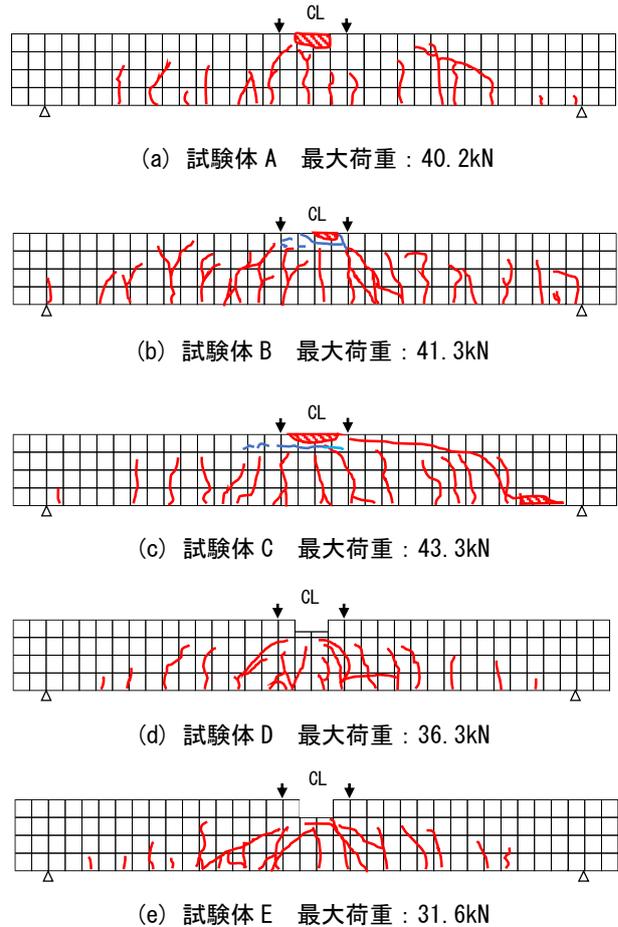


図-5 曲げ試験終了時のひび割れ発生状況
(赤線は曲げ試験時に生じたひび割れ)
(青線は電食によって生じたひび割れ)

トリリニア型の応力ひずみ関係を適用した。圧縮鉄筋およびスターラップは、バイリニア型の応力ひずみ関係を用いた。引張コンクリートの最大応力以降の応力-ひずみ関係は指数関数モデルを適用した。また、コンクリートの破壊エネルギーは、土木学会標準示方書【設計編】³⁾に基づき算定した。なお、引張鉄筋が降伏ひずみに達した時点を曲げ耐荷力とした。

試験体 A と試験体 B, C を比較すると、積算電流量の増加とともに、実測値が大きくなる傾向を示した。ここで、計算値については、鉄筋の減少による鉄筋面積の影響を考慮したため、等価応力ブロックの高さが大きくなったため曲げ耐力が大きくなったと考えられる。

3.1 で述べたように曲げひび割れ発生以前では、中立軸には変化が確認できなかった。そのため、曲げひび割れ以降の中立軸については、本試験で確認できなかったが、腐食ひび割れの影響により中立軸が変化した可能性が考えられるため、検討が必要である。

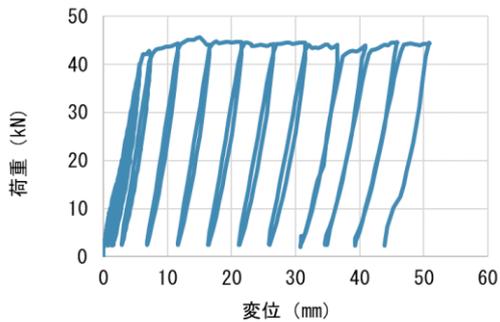


図-6 試験体 A 荷重-変位関係 (健全)

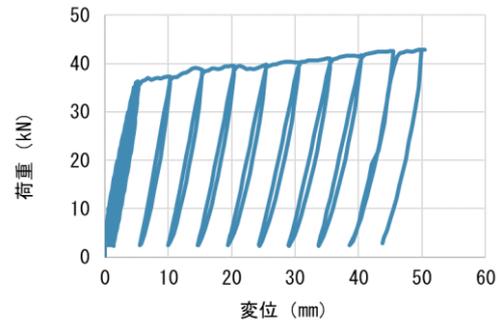


図-9 試験体 D 荷重-変位関係 (欠損)

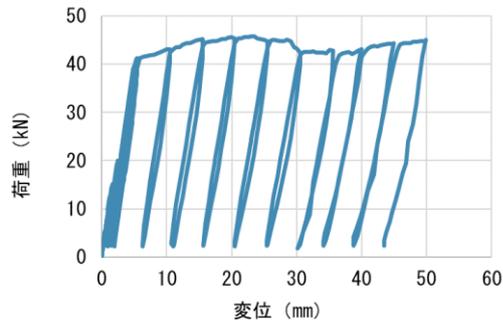


図-7 試験体 B 荷重-変位関係 (電食)

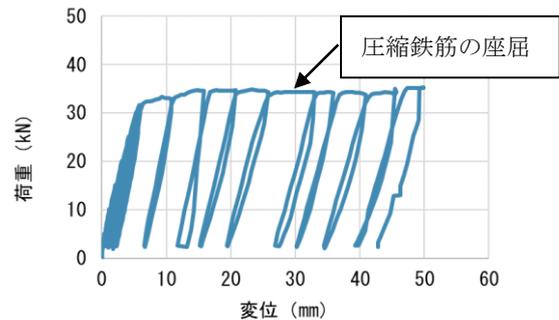


図-10 試験体 E 荷重-変位関係 (欠損)

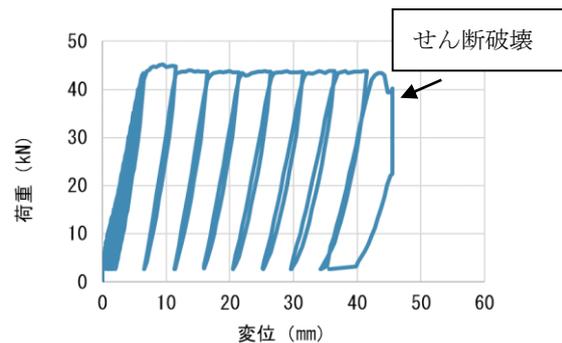


図-8 試験体 C 荷重-変位関係 (電食)



(a) 上面 (b) 側面

写真-2 圧縮縁接触状況 (試験体 E10 δ 終了)

試験体 D および E においては、健全なものと比較して曲げ耐力の低下が確認できた。これは中央部のコンクリートが欠損したことにより、はり高さが試験体 A と比較して小さくなるため、曲げ耐力が低下したものと考えられる。

3.4 曲げひび割れ性状

曲げ試験終了後の各試験体側面のひび割れ発生状況を図-5 に示す。健全な試験体 A と比較し、コンクリートが欠損している試験体 D, E では、等曲げ区間外のひび割れが欠損部に集中するように斜め方向のひび割れが発生した。これは、圧縮部コンクリートの欠損が大きくなったことで、欠損区間の曲げ剛性が低下することにより、コンクリートの変形が局所的に大きくなったことが影響していると考えられる。そのため、せん断スパンにおけるせん断変形が大きくなり、曲げモーメントのみならず、せん断力の作用が大きくなったため、ひび割れ発生方向が変化したものと考えられ

る。

試験体 A, B, C は、等曲げ区間に圧壊が確認できる。また、C については、斜めひび割れが卓越している様子も確認できた。

3.5 降伏荷重後の荷重-変位関係

曲げ載荷試験で得られた荷重-変位関係について図-6~10 に示す。

電食を行った試験体と比較すると、試験体 B と試験体 C で差が生じた。試験体 C では、圧壊が 6δ で生じたが、その後 9δ 到達までに斜め方向のひび割れが生じた。試験体 A, B と同様に、試験体 C でも 6δ 程度で等曲げ区間内の圧縮部コンクリートに圧壊が生じた。しかし、試験体 A, B と異なり、その後荷重低下が生じなかった。これは、圧壊後もコンクリートが剥落することなく、圧壊部分も一体化して外力に抵抗したと考えられるため、せん断区間に大きなせん断力が作用したことが一因として考えられる。しかし、圧縮鉄筋の腐食による破壊形態や応力状態の変化は、高橋らの一連の研究⁴⁾などにより報告されているため、今後も

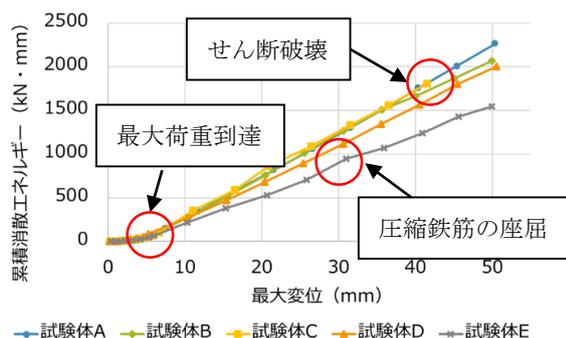


図-11 累積消散エネルギーと最大変位の関係

詳細な考察が必要であると考えられる。試験体 B は圧壊が 6δ で生じ荷重が少し小さくなったが、その後回復傾向を示した。これは、圧縮後も断面が保持され、剥落部も一体化して抵抗したためと考えられる。

欠損試験体では、試験体 D、E とともに等曲げ区間内の圧縮部コンクリートが欠損していても、最大荷重到達後、10δ 到達まで荷重が低下していない傾向が示された。試験体 D では、最大荷重到達後 10δ に達するまで、最大荷重が増加していることが確認できた。これは、変位が増加するとともに、圧縮鉄筋がコンクリート中に食い込んでいくため、コンクリートと鉄筋の一体感が増すため、徐々に荷重が増加したものと考えられる。圧縮鉄筋とコンクリートの付着およびそれによる外力への抵抗については、そのメカニズムが不明であるため、今後、さらなる検討が必要である。試験体 E では、圧縮鉄筋が露出しているため、6δ 載荷時に鉄筋の座屈が確認できた。9δ まで到達すると、座屈した鉄筋が下部のコンクリート圧縮縁に接触した。その様子を写真-2 に示す。次の 10δ 載荷時には、最大荷重が増加する傾向がみられた。今回は、10δ までの繰り返し載荷としているが、今後載荷を続けると、試験体 D に似た傾向を示す可能性があると考えられる。

3.6 最大荷重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-11 に示す。なお、消散エネルギーは、各載荷ステップにおける曲げ載荷時に得られる荷重-変位関係履歴ループの囲む面積とした。健全なものと電食した試験体の消散エネルギー累積値は、最大荷重以降同等もしくは低下傾向を示した。それに対して、鉄筋が露出した試験体 E では、6δ 目の鉄筋の座屈以降、他の試験体と比較して累積消散エネルギーの低下が確認できる。これは、鉄筋の座屈が生じる前は、主に圧縮鉄筋による応力負担が支配的である。その後、写真-2 に示すように、座屈によって圧縮鉄筋の下方への変位が増加した。その後コンクリート上部への接触により、圧

縮鉄筋とコンクリートが一体化して外力に抵抗したため、荷重の低下は示さなかったものと考えられる。それに伴い、6δ 以降累積消散エネルギーが低下傾向を示したと考えられる。

4. おわりに

本論文では、圧縮鉄筋の腐食、また圧縮側コンクリート断面欠損が生じた RC はりで曲げ試験を行い、耐震性に及ぼす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) 降伏以前において、荷重-変位曲線は、健全試験体と電食試験体は同様の傾向を示した。コンクリート欠損試験体は、健全試験体と比較して大きな差は確認できなかった。
- (2) 曲げ試験の結果、健全な試験体と比較し、コンクリートが欠損している試験体では、等曲げ区間外のひび割れが欠損部に集中するように斜め方向のひび割れが確認できた。
- (3) 荷重-変位関係は、引張鉄筋降伏時の最大荷重はことなるものの、圧縮部のコンクリートが欠損しても健全な試験体と同様に 10δ 到達まで急激な変位の低下が見られなかった。
- (4) 消散エネルギーは、健全や電食試験体は最大荷重以降同等もしくは低下傾向であるが、コンクリート欠損試験体では、変形が大きく低下傾向を示した。

謝辞

本研究のはりの曲げ耐荷力の 2 次元弾塑性 FEM 解析を CORE 技術研究所(株)のご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会四国支部：塩害劣化を受けたコンクリート構造物の耐荷力評価委員会報告書，pp.10~13，2015.5
- 2) 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，pp.131~132，2014.11
- 3) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2018.3
- 4) 高橋良輔，石丸善久：圧縮主鉄筋の腐食がせん断圧縮破壊挙動に及ぼす影響，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.13.pp.279-284，2013.11
- 5) 高橋良輔：圧縮主鉄筋の腐食ひび割れがせん断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