

論文 鉄筋腐食した RC 梁部材の残存曲げ耐力に及ぼすせん断補強筋の影響

村上 祐貴^{*1}・山内 佑樹^{*2}・堤 知明^{*3}・大下 英吉^{*4}

要旨：著者らは、梁全長にわたり鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の曲げ耐力は、定着フックとせん断補強筋が設けられていない場合、鉄筋が健全な場合に比べて大幅に低下する事を明らかにした¹⁾。その主たる要因は、鉄筋の腐食に伴う断面欠損、付着劣化に加えて腐食ひび割れ性状であった。本研究では、上述の RC 梁部材にせん断補強筋を配筋し、鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力に及ぼすせん断補強筋の影響に関する評価を行った。その結果、せん断補強筋は RC 梁部材の鉄筋腐食に伴う曲げ耐力の低下を抑制するとともに、変形性能も向上させることが明らかとなった。

キーワード：鉄筋腐食、残存曲げ耐力、せん断補強筋

1. はじめに

現在、コンクリート構造物性能照査体系への移行により、各種劣化性状と材料或いは構造性能の関係に関する研究が盛んに行われている。特に、鉄筋腐食によるコンクリート部材の構造性能変化に関する研究はその典型であり、これまでも数多くの研究が報告されている。しかしながら、現時点における劣化状況に基づきその構造性能を定量的に評価する手法は確立されておらず、その手法の確立は昨今の時代情勢からも火急の課題である。

特に、残存耐力の推定は現時点での構造性能を評価する他に、補修・補強時においては LCC を含めた適用工法の選定から事後の機能回復評価、構造物の将来に渡る経年劣化予測においても重要な位置付けにある。

著者らは、梁全長にわたり鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状の定性的かつ定量的評価を目的として、実験的手法により曲げ耐力に及ぼす鉄筋腐食率、腐食ひび割れ発生領域や幅などの腐食ひび割れ性状、鉄筋の抜け出し挙動、鉄筋腐食の不均一性の影響に関する評

価を行った¹⁾。

この実験は、アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張によって RC 構造中のフックやせん断補強筋等の曲げ加工部において、鋼材の破断する事例が複数報告されていることが背景にある。したがって、最も過酷な状況を想定し、定着フックならびにせん断補強筋を有しない RC 梁部材に対して、鉄筋腐食が RC 部材の残存耐力に及ぼす影響評価を行ったわけである。

その結果、梁全長にわたり鉄筋腐食を生じた RC 部材の耐力は主鉄筋の平均腐食率が約 10% で、鉄筋が健全な部材耐力の約 55%、平均腐食率が 20% の場合においては約 35% と大幅に耐力が低下した。また、梁の破壊形態は鉄筋の拔出しによる付着割裂破壊であり、破壊挙動は脆性的であった。

その主たる要因は、鉄筋腐食に伴う断面減少、鉄筋とコンクリートの付着性状の劣化に加えて、腐食ひび割れ性状が大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。この残存耐力を大幅に低下させる腐食ひび割れ性状は、その発生領域が支点近傍で鉄筋からコンクリート表面近傍までひび

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科 (非会員)

*3 東京電力株式会社 技術開発研究所設備基盤技術グループ (正会員)

*4 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

割れが進展している場合であった。

上述したように、既往の研究¹⁾は、最悪の状況を想定し、定着フックに加えて、せん断補強筋を有しない RC 梁部材を対象として行ったものである。しかしながら、一般に構造物には各種補強筋が配筋されており、この種の RC 構造物に対しても鉄筋腐食が RC 梁部材の残存耐力に及ぼす影響評価を行うことは重要である。

そこで本研究では、鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に及ぼすせん断補強筋の影響を評価することを目的として、せん断補強筋を有する RC 梁部材の残存耐力、破壊性状、およびひずみ分布性状を評価するとともにせん断補強筋を有しない RC 梁部材との比較検討を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状と寸法および配筋を図-1 に示す。試験体は既往の研究¹⁾と同様、240×200×2100mm、鉄筋は D16 異形鉄筋 (SD295A) を引張側のみに 60mm 間隔で 3 本配置した。さらに、本実験においては、図-1 に示すように、せん断補強筋 (D6, SD295A) を 80mm 間隔で配筋した。

試験体は 28 日間湿布養生後、電食試験を行い、材齢 36 日の時点で曲げ載荷試験を実施した。コンクリートの配合を表-1 に示す。設計基準強度は 30N/mm² であり、練混ぜ水には 5%NaCl 溶液を使用した。また、表-2 に鉄筋の物性値を示す。

載荷試験は、図-1 に示すように載荷点間隔 350mm、支点間距離 1800mm とした静的二点曲げ載荷試験であり、載荷速度は 0.5 (mm/min) である。

2.2 電食試験方法

腐食試験方法には、電食試験を採用した。その具体的な方法であるが、5%NaCl 水溶液を満たした水槽内に試験体を浸漬し、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続した後、直流定電流 20A を

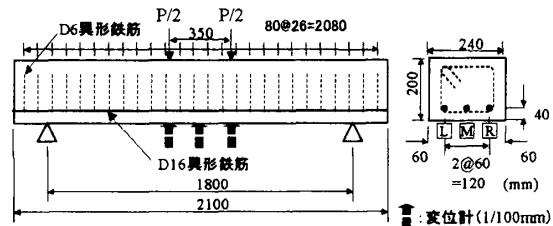


図-1 試験体概要

表-1 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	SP
20	60	10	5.0	168	280	826	996	2.80

W: 水, C: 普通セメント, S: 細骨材 G: 粗骨材, SP: AE 減水剤

表-2 鉄筋の物性値

鉄筋の種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
D16	378	523	2.0 × 10 ⁵
D6	438	557	2.0 × 10 ⁵

表-3 実験パラメータ

シリーズ	試験体名	せん断補強筋	目標腐食率	コンクリート強度 (N/mm ²)
S0 ¹⁾	S0-0	無	0%	30.8
	S0-10		10%	31.8
	S0-20		20%	35.5
	S1-0		0%	27.0
S1	S1-5	有	5%	29.6
	S1-10		10%	26.5
	S1-20		20%	27.2

通電した。

2.3 実験パラメータ

実験パラメータは、表-3 に示すように引張鉄筋の腐食率であり、目標とした腐食率は、0% (健全)、5%、10%および 20%の 4 水準である。試験体名称の S はせん断補強筋の有無を表しており 0 は無し、1 は有りである。また、後の数字は目標腐食率を表している。なお、S0 シリーズの実験結果については著者らは既に報告している¹⁾。

2.4 測定項目

測定項目は、荷重、たわみ量、鉄筋の軸方向ひずみ、コンクリート圧縮縁における軸ひずみ、ひび割れ開口幅およびひび割れ進展状況である。たわみ量の測定は、変位計 (1/100mm) を図-1 に示す荷重載荷点およびスパン中央部の 3 箇所に設置して実施した。また、鉄筋の軸方向ひずみの測定は、中央の鉄筋のみとした。鉄筋ひずみの具体的な測定方法は文献 1) を参照されたい。なお、ひずみゲージの貼付け間隔は、3D (48mm) 間隔の計 45 箇所とした。

3. 電食試験結果

3.1 鉄筋の腐食状況

腐食率の計測は3本の引張主鉄筋およびせん断補強筋に対して実施した。主鉄筋に関しては、50mm間隔で切断し、計40箇所計測した。なお、3本の鉄筋をそれぞれL鉄筋(側面), M鉄筋(中央), R鉄筋(側面)と称することとする(図-1参照)。また、せん断補強筋に関しては、1本毎に腐食率を算出した。腐食率の具体的な算出方法は文献1)を参照されたい。

図-2(a)～(c)にS1シリーズ試験体の腐食率分布を示す。また、表-4に両シリーズ試験体の各鉄筋の平均腐食率を示す。

まず、主鉄筋に関しては図-2(a)に示す目標腐食率が5%である試験体S1-5は、いずれの鉄筋においてもほぼ均一に腐食していることが分かる。また、各鉄筋の平均腐食率はL鉄筋が3.7%, M鉄筋が3.5%, R鉄筋が4.0%であり、いずれの鉄筋も目標値5.0%とほぼ同様の値を示している。

同図(b)に示す目標腐食率が10%である試験体S1-10に関しては、300mm～600mmの領域ではM, R鉄筋, 900mm～1200mmの領域においてはL, M鉄筋の腐食率が著しく大きい。

同図(c)に示した目標腐食率が20%である試験体S1-20に関しては1200mm～1800mmの領域においてL鉄筋の腐食率が非常に大きくなっている。この主たる要因は、腐食ひび割れによるものであり、著しく鉄筋の腐食率が大きい領域では、腐食ひび割れ幅も大きかった。このひび割れを通じて内部まで塩水が浸漬し、他の領域に比べて鉄筋の腐食率が大きくなったものと考えられる。また、試験体S1-10のL鉄筋とM鉄筋、試験体S1-20のL鉄筋は、載荷に伴い破断した。その位置は試験体S1-10に関しては、L鉄筋, M鉄筋ともに900mm～1200mmの領域内、試験体S1-20に関しては1250mm～1750mmの領域内であった。したがって、この領域における鉄筋の腐食率にはその影響も含まれている。なお、表-4に示した平均腐食率および総平均腐

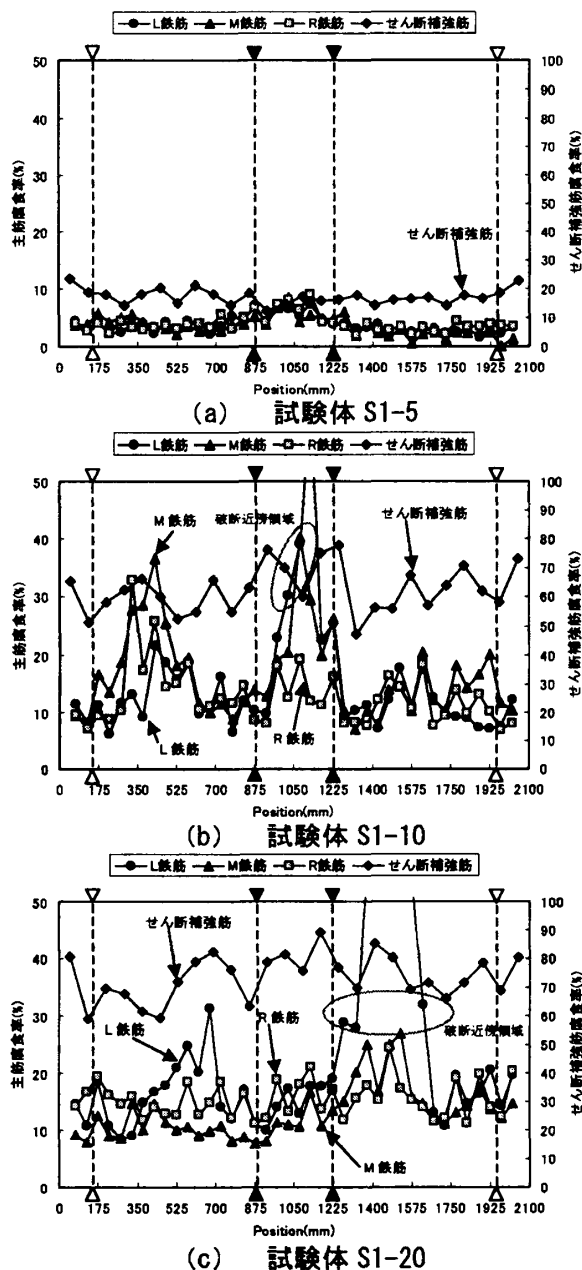


図-2 腐食率分布 (S1シリーズ)

表-4 腐食率一覧

シリーズ	試験体名	目標腐食率	実測腐食率(%)				
			L	M	R	総平均	せん断補強筋
S0 ¹⁾	S0-10	10%	10.7	9.5	10.3	10.2	-
	S0-20	20%	18.6	18.4	18.8	18.6	-
S1	S1-5	5%	3.7	3.5	4.0	3.7	17.2
	S1-10	10%	12.6	15.7	12.7	13.7	62.5
	S1-20	20%	18.8	13.7	16.7	16.3	73.6

食率に関しては、鉄筋破断を生じた領域近傍を除外した値である。

次に、せん断補強筋の腐食率であるが、いずれの試験体においても主筋に比べて全体的に高い腐食率を示していることが分かる。これは、せん断補強筋の鉄筋径が主鉄筋に比べて小さいことに加えて、かぶり厚が小さいことによる。

4. 曲げ載荷試験結果

4.1 破壊性状

図-3にS1シリーズ各試験体の荷重とスパン中央におけるたわみの関係を示す。また、図-4はS0シリーズ試験体の荷重たわみ関係である。

まず、健全鉄筋を有する試験体のピーク荷重は、試験体S0-0は95.0kN、試験体S1-0は91.7kNであり、せん断補強筋の有無によらず、ピーク荷重はほぼ同じ値を示した。

次に、S0シリーズにおける鉄筋腐食を生じた試験体においては試験体S0-10では53.1kN、試験体S0-20においては34.3kNと鉄筋が健全な試験体に比べて大幅に耐力が低下した。また、いずれの腐食試験体も脆性的な破壊挙動を示した。

一方、S1シリーズに関しては、腐食試験体の耐力はS0シリーズと同様、鉄筋が健全な試験体に比べて低下している。また、荷重が50kNの時点までに発生した曲げひび割れの本数は、試験体S1-0は13本、試験体S1-5は15本、試験体S1-10は6本、試験体S1-20は7本であり、腐食率が10%を超えると、ひび割れ分散性能が著しく低下した。これは、鉄筋腐食に伴い付着劣化を生じたためである。この傾向はS0シリーズにおいても同様である。しかしながら、S1シリーズ腐食試験体の耐力は試験体S1-10では57.9kN、試験体S1-20では56.7kNと鉄筋腐食に伴う耐力の低下量はS0シリーズに比べて小さい。また、いずれの腐食試験体もS0シリーズとは異なり延性的な破壊挙動を示した。このことはS0シリーズ腐食試験体の破壊モードがいずれの試験体も付着割裂破壊であったことに対して、S1シリーズ腐食試験体はいずれの試験体も曲げ引張破壊であったことによる。S1シリーズ腐食試験体においては、部材全体にわたるせん断補強筋のコンファインド効果によりS0シリーズ腐食試験体に生じたような、主鉄筋の拔出し挙動が抑制され、破壊モードが付着割裂破壊に遷移しなかったと考えられる。

4.2 鉄筋のひずみ分布性状

図-5 (a), (b) にS0シリーズおよびS1シ

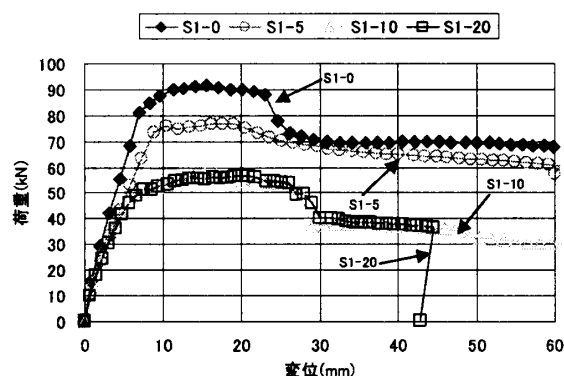


図-3 荷重変位関係 (S1 シリーズ)

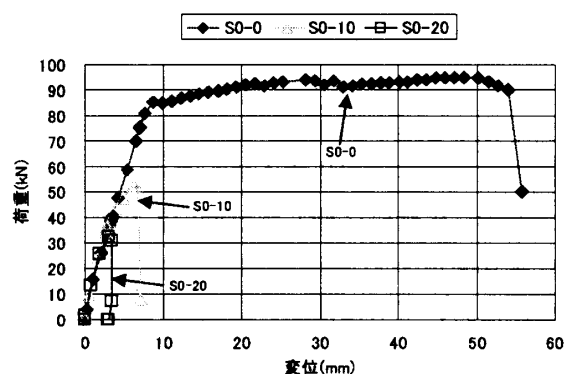


図-4 荷重変位関係 (S0 シリーズ)

リーズ試験体の荷重が30kN 時におけるひずみ分布を示す。なお、試験体S1-20に関しては電食試験に伴い、0mm～1050mmの領域に貼付けたゲージが破損したためデータが存在しない。

まず、S0シリーズに関しては、いずれの腐食試験体におけるひずみ分布も鉄筋が健全な試験体S0-0に比べて全体的に小さい。これは、鉄筋腐食およびそれに伴う腐食ひび割れの発生により、梁全長にわたり著しく付着劣化を生じたことから、定着部からの鉄筋の拔出し挙動が生じたためである。

一方、S1シリーズに関しては、試験体S1-20を除く腐食試験体と健全な鉄筋を有する試験体S1-0のひずみの分布に明確な差異は生じていない。このことは後に詳述する。

試験体S1-20に関しては、他の腐食試験体と異なる傾向を示しており、試験体S1-0のひずみ分布に比べて全体的にひずみの値が大きい。これは、1200mm～1800mmの領域におけるL鉄筋が著しく腐食していたこと(図-2(c)参照)、当該領域においてL鉄筋が破断したことから判断すると、L鉄筋は構造体として十分に機能し

ていないと考えられる。したがって、M 鉄筋に分担される荷重が大きくなり、試験体 S1-20 においては M 鉄筋のひずみが全体的に大きくなったものと考えられる。

図-6にS1シリーズ試験体における鉄筋降伏以前の荷重の載荷に伴う中立軸の変化を示す。中立軸は、計測した等曲げ区間における圧縮縁のコンクリートひずみと鉄筋のひずみを用いて算出した。また、各荷重レベル時における最大ひび割れ進展位置までのコンクリートの分担力は無視することとした。なお、試験体 S1-5 に関しては載荷に伴い圧縮縁のゲージが破損したためデータが存在しない。

同図に示すように、鉄筋腐食を生じた試験体の中立軸は、健全な鉄筋を有する試験体 S1-0 に比べて圧縮縁に近い位置にあることが分かる。このことは、鉄筋の腐食に伴いコンクリートに腐食ひび割れが生じたことから、コンクリートは荷重を分担しないことに加えて、ひび割れ分散性能の低下により、曲げひび割れが梁上縁に急速に進展したことが要因として挙げられる。また、この結果から腐食試験体は鉄筋が健全な試験体に比べてモーメントアーム長が長いことが分かる。したがって、同荷重レベル時において腐食試験体の鉄筋に作用する力は、鉄筋が健全な場合に比べて小さくなり、図-5 (b) に示したように鉄筋の断面減少が生じているのにもかかわらず、健全な鉄筋を有する試験体とひずみ分布がほぼ同様になったものと考えられる。

4.3 せん断補強筋が鉄筋腐食を生じた RC 梁の耐力に及ぼす影響評価

図-7 に鉄筋腐食率と各試験体の耐力比を示す。ここで、腐食率は総平均腐食率であり、耐力比とは腐食試験体の耐力を鉄筋が健全な試験体の耐力で無次元化したものである。鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の耐荷・変形性能は、局所的な断面減少に支配される場合があるが、本研究においては、表-4 に示した総平均腐食率により整理することとした。また、同図には両シリーズの近似直線も併せて示すとともに腐食に

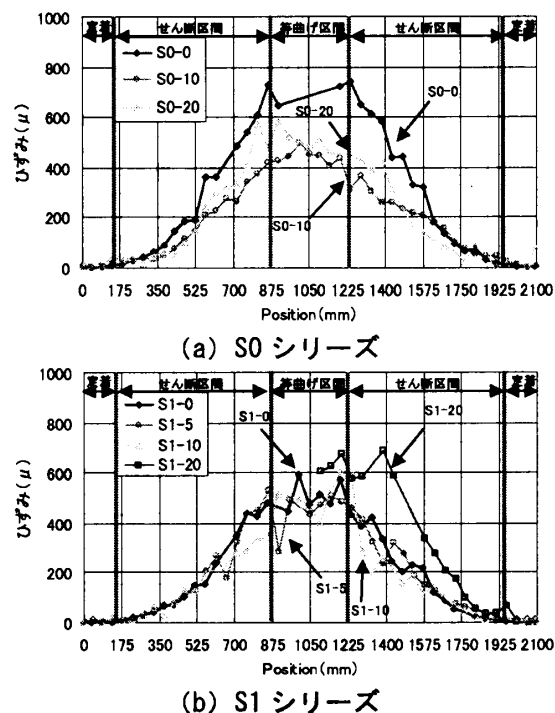


図-5 鉄筋ひずみ分布 (30kN 時)

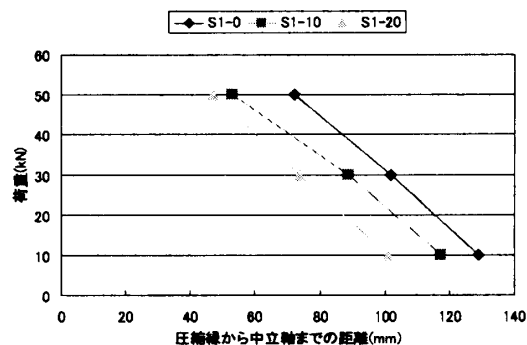


図-6 荷重～中立軸関係

よる断面減少および鉄筋降伏応力の低下を考慮して、コンクリート標準示方書に基づき算出した結果も示す²⁾。その具体的な算出方法であるが、コンクリートの圧縮強度には表-2 に示す各試験体の圧縮強度の平均値を用いた (29.7N/mm^2)。鉄筋の降伏応力は、事前に腐食レベルの異なる鉄筋に対して引張試験を実施したところ、図-8 に示すように、降伏応力は腐食率の増加とともに線形的に減少した。これは、鉄筋の腐食性状が軸方向に不均一であることによるものである。示方書に基づく耐力算定の際には、この鉄筋の降伏応力の低下を考慮した。なお、材料係数および部材係数はいずれも 1.0 である。

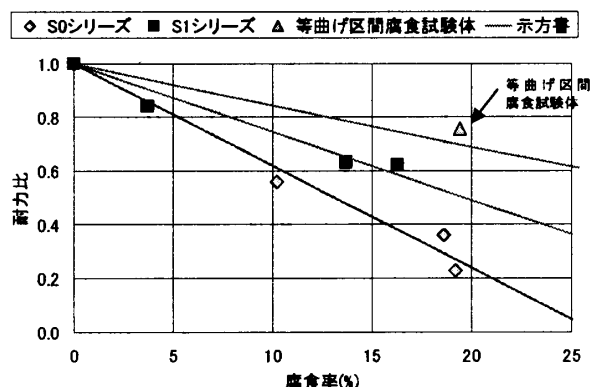


図-7 耐力比

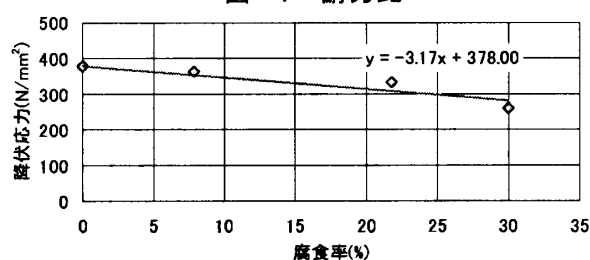


図-8 鉄筋降伏応力～腐食率関係

全体的な傾向としては、いずれのシリーズにおいても腐食率の増加とともに耐力比はほぼ直線的に低下している。しかしながら、その低下率はS1シリーズの方がS0シリーズに比べて小さい。これは、付着割裂破壊を誘発する鉄筋軸方向に沿った腐食ひび割れの進展および拡大が部材全体にわたるせん断補強筋のコンファインド効果により、抑制されたためである。したがって、S1シリーズに関しては腐食ひび割れ性状が耐力に及ぼす影響は少ないものと考えられる。

本実験においては両シリーズに加えて、等曲げ区間の鉄筋のみを部分的に腐食させた試験体（せん断補強筋有）に関しても同様の実験を行っており、その耐力比は、示方書算定値とほぼ同様の値を示している（図-7 参照）。このことは松尾ら³⁾も指摘しており、等曲げ区間のみを部分的に腐食させた場合、梁の曲げ耐力は鉄筋の断面欠損のみを考慮した示方書算定値により評価可能であるとしている。しかしながら、S1シリーズの耐力比からもそうであるように、梁全長にわたり鉄筋が腐食した場合においては、その限りでは無い。せん断補強筋による部材全体にわたる拘束効果により、補強筋を有しない場合に比べると耐力の低下は抑制されるものの、

その低下割合は腐食に伴う鉄筋の断面減少量や降伏応力の低下といった材料的劣化のみを考慮した評価では困難であり、材料劣化に加えて、鉄筋腐食性状の不均一性、腐食に伴う付着劣化性状を考慮する必要がある。

5. 結論

本研究では、梁全長にわたり鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力に及ぼすせん断補強筋の影響に関する評価を行った。

以下に本研究で得られた知見を要約する

- 1) 梁全長にわたり鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存耐力は、せん断補強筋が配筋されている場合、部材全体にわたるコンファインド効果により、せん断補強筋を有しない場合に比べて向上する。
- 2) せん断補強筋を有する RC 梁部材は、梁全長にわたり鉄筋腐食を生じた場合においてもせん断補強筋の部材全体にわたるコンファインド効果により付着割裂破壊が生じず、その破壊挙動は延性的である。
- 3) 梁全長にわたり、鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存耐力に影響を及ぼす因子は、せん断補強筋を有する場合、鉄筋腐食に伴う断面欠損量に加えて、付着応力性状および鉄筋腐食の不均一性であり、腐食ひび割れ性状の影響は小さい。

参考文献

- 1) 村上祐貴・木下哲秀・鈴木修一・福本幸成・大下英吉：鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究，コンクリート工学論文集，第 17 巻，第 1 号，2005.1
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造的能照査編]，2002 年
- 3) 松尾豊史，松村卓郎，金津努，岡市明大：鉄筋腐食が正負交番載荷した RC はりの力学特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.3，pp.1321-1326，2001.