# 論文 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

濱田 洋志<sup>\*1</sup>·加藤 絵万<sup>\*2</sup>·岩波 光保<sup>\*2</sup>·横田 弘<sup>\*3</sup>

要旨:電食により鉄筋を局所的に腐食させた RC はりの曲げ載荷試験を実施し,鉄筋の径や 本数および腐食の発生位置が耐荷性に及ぼす影響について検討した。その結果,鉄筋の径が 大きくなる,あるいは本数が多くなると部材降伏後の耐荷性に影響を及ぼすことが分かった。 また,腐食の発生位置が異なった場合,スパン中央部が腐食した場合と比較すると,それ以 外が腐食した場合は部材降伏以降,鉄筋腐食の程度ほど耐荷性が低下しないことが分かった。 キーワード: RC はり,鉄筋腐食,耐荷性,局所化

#### 1. はじめに

海洋環境下における鉄筋コンクリート(RC) 構造物は,塩化物イオン等の劣化因子が容易に 供給される苛酷な環境に曝されている。そのた め,コンクリートや鋼材等の構成材料の劣化進 行に伴って構造物全体の性能が低下し,設計供 用期間終了以前に補修せざるを得ない状況にま で至ることが多い。構造物全体の性能を供用中 確保するためには,その性能が失われていくメ カニズムを明らかにし,かつその進行状況を定 量的に評価することが不可欠となる。

既往の研究<sup>1)</sup>において,材料劣化進行予測手法 や劣化による構造物の性能低下に関する評価手 法は多々提案されている。しかしながら,鉄筋 腐食などの材料劣化が構造物内で一様に進行せ ず,局所的に発生している場合,これらの既往 の知見のみで構造物の残存性能評価や寿命評価 を行うことは現実的には難しいと思われる。

そこで,局所的に生じた鉄筋腐食が RC はりの 耐荷性に及ぼす影響を実験的に調べた。実験で は,電食により鉄筋を局所的に腐食させた RC は りの曲げ載荷試験を行い,鉄筋の径や本数およ び腐食の発生位置が RC はりの耐荷性に及ぼす 影響について検討した。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 RC はり

RC はりの形状と寸法,配筋を図-1 に示す。 RC はりは,曲げ破壊が先行するように設計し, 200mm×300mmの断面に主鉄筋(異形鉄筋 SD295A)として D16×3 本を配置したもの(以 下,B16)を基本とし,この主鉄筋パターンと同 等の鉄筋比となるように設定した RC はりを計 15 体製作した。それらの配筋状況は,D22×2本

(B22) と D13×3本(B13), D16×6本(B16-6) である。せん断補強鉄筋(異形鉄筋 SD295A)は, B16および B13においては D6, B22および B16-6 においては D10 を用いて図-1 に示すように配 置した。コンクリートの配合を表-1に示す。ま た,曲げ載荷試験時のコンクリートおよび鉄筋 の物性値を表-2に示す。



\*1 独立行政法人 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター 依頼研修員(東亜建設工業)(正会員) \*2 独立行政法人 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター 主任研究官 博(工)(正会員) \*3 独立行政法人 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター長 博(工)(正会員)

#### 2.2 電食試験

図-2 に電食試験の概要を示す。電食試験は, 直流安定化電源装置を用いて, RC はり内部の鉄 筋に,リード線を介して直流電流を印加するこ とにより行った。RC はりに局所的な鉄筋腐食を 生じさせるために,陰極として使用したステン レス板の上に幅 50mm の吸水スポンジを積み上 げ,これを RC はり下面に密着させることにより 海水を供給した。また,印加する電流量は,鉄 筋表面に対して 500A・日/m<sup>2</sup>となるように,設定 電流や試験期間を調整した。

表-3に各試験体における腐食位置を示す。ス パン中央部腐食は,吸水スポンジの中心を試験 体のスパン中央に設置し,はり軸直角方向全面 に当てて腐食させたものである。また,載荷点 直下部腐食,せん断スパン部腐食は,吸水スポ ンジの中心をそれぞれ試験体のスパン片側の載 荷点直下,RC はり中心から 500mm 離れた位置 にそれぞれ設置し,中央部腐食と同様に,はり 軸直角方向全面に当てて腐食させたものである。 それに対し,半面腐食は,はり軸直角方向にお ける腐食の偏りを形成するため,上記の各腐食 位置においてはり軸直角方向半面を腐食させた ものである。

## 2.3 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験は、図-1に示すように、支点間 隔を2100mm、曲げスパン 500mm、せん断スパ ン 800mm の 2 点載荷とし、石こうを用いて幅 100mm の載荷板を設置し、RC はりの上部幅全体 に渡って載荷を行った。また、支点幅も RC はり と同じ幅に設定した。計測項目は、載荷荷重、 変位、コンクリート圧縮縁におけるひずみ、ひ び割れの開口幅、ひび割れ進展状況とした。変 位を計測する位置は、スパン中央、載荷点、せ ん断スパン中央および支点の他に、等曲げモー メント区間の詳細な変形性を見るため、スパン 中央と載荷点の中間点も含めて 9 箇所とした。 また、試験体の両側面にて変位の計測を行い、 左右の変形性の違いを確認した。コンクリート 圧縮縁における圧縮ひずみは、RC はり上面中央

表-1 コンクリート配合

G <sub>max</sub> (mm)	SL (cm)	air (%)	W/C (%)	s/a (%)		
20	18	4.5	57.2	47.3		
 単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤		
179	313	839	964	3.333		

#### 表-2 コンクリートおよび鉄筋の物性値

コンクリート	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	₹ )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )		
	43.0		$3.0 \times 10^{4}$		
鉄筋	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )		ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	
D22	413	56	50	$1.8 \times 10^{5}$	
D16	366	52	28	$1.8 \times 10^{5}$	
D13	364	50	)8	$2.0 \times 10^{5}$	
D10	377	49	98	$1.7 \times 10^{5}$	
D 6	361	52	24	$1.9 \times 10^{5}$	



図-2 電食試験概要

主 _	2	分岔	ጠ	府合	パカ	<b>`</b>
<u>-</u>	- ა	<b>亚大</b> 肋	107	减良。	ノヽゾ	

試験体 No.		腐食位置			
B16	-0	腐食なし			
	-1	スパン中央部腐食			
	-2	スパン中央部腐食			
	-3	載荷点直下部腐食			
	-4	せん断スパン部腐食			
B22	-0	腐食なし			
	-1	スパン中央部腐食			
	-0	腐食なし			
B13	-1	スパン中央部腐食			
	-2	載荷点直下部腐食			
B16-6	-0	腐食なし			
	-1	スパン中央部腐食			
	-2	スパン中央部半面腐食			
	-3	載荷点直下部半面腐食			
	-4	せん断スパン部半面腐食			

部に3箇所,上面載荷点付近に1箇所ずつひず みゲージを貼り付けて計測した。ひび割れ開口 幅は,試験体側面の主鉄筋の高さの位置にπゲ ージを貼り付け,スパン中央から両側に800mm の範囲で計測した。また,電食試験を行ったた め, RC はり内部の鉄筋にひずみゲージを貼り付けていない。したがって,部材の降伏荷重は, 計測した荷重変位曲線から判断した。

## 2.4 鉄筋質量減少率の測定

曲げ載荷試験終了後, RC はりを解体し, 取り 出した鉄筋に対してサンドブラスト処理および 10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液への浸 せきを行い, 腐食生成物を完全に除去した。こ の鉄筋を 50mm 毎に切断して, 単位長さ当たり の質量を計測し, 同等の処理をした健全な鉄筋 と比較することで質量減少率を算出した。なお, 目視で発錆が確認されなかったものは質量減少 率 0%として取り扱った。

#### 実験結果および考察

#### 3.1 鉄筋腐食の偏在が変形性に及ぼす影響

はり軸直角方向半面を腐食させた RC はりに おける各主鉄筋の最大質量減少率を表-4 に示 す。ここで鉄筋 No.とは,はり軸直角方向におけ る鉄筋の位置を示している。また,各主鉄筋の 最大質量減少率とは,図-2に示すように,各主 鉄筋の質量減少率が最大となった位置における 幅 50mmの質量減少率を示している。これより, はり軸直角方向において,想定どおりに鉄筋腐 食が偏在していた。

スパン中央部において,はり軸直角方向半面 を腐食させた RC はりにおける降伏荷重時およ び最大荷重時の変位分布を図-3に示す。両側面 における変位分布は,鉄筋腐食の偏在に関わら ずほぼ同程度であった。この結果は,載荷点直 下部およびせん断スパン部を腐食させた RC は りにおいても同様となった。これより,本研究 の範囲(RC はりの形状や鉄筋の質量減少率)で は,はり軸直角方向における鉄筋腐食の偏在が RC はりの変形性に及ぼす影響は少ないと考え られる。したがって,以後の RC はりの耐荷性に 関する検討においては,表-4に示すように,腐 食による主鉄筋6本の質量減少率の平均値を RC はりの質量減少率とし,他の RC はりと同様に評 価を行った。

#### 表-4 各主鉄筋の最大質量減少率(B16-6)

試験	鉄筋 No.						
体 No.	1	2	3	4	5	6	平均
2	49.1	63.9	29.7	9.0	0.0	0.0	25.3
3	77.3	38.0	21.6	0.0	0.0	0.0	22.8
4	8.4	8.0	6.9	3.5	0.0	0.0	4.5



等曲げモーメント区間の最大質量減少率(%) 図ー4 降伏荷重比と鉄筋の最大質量減少率

# 3.2 鉄筋の径や本数が耐荷性に及ぼす影響

鉄筋の径や本数が耐荷性に及ぼす影響につい て,スパン中央部が腐食した RC はりにて検討し た。鉄筋の最大質量減少率と降伏荷重比の関係 を図-4 に示す。ここで降伏荷重比とは,鉄筋が 腐食していない RC はりの降伏荷重の実験値に 対する各 RC はりの降伏荷重の比を示している。 また,実線は,はりの曲げ理論に基づき算出し た鉄筋断面積と降伏荷重比の関係を示しており, 最大質量減少率は,以後,各主鉄筋の質量減少 率が最大となった位置における幅 50mm の質量 減少率の平均値を示す。これより,鉄筋の最大 質量減少率を用いることにより降伏荷重を評価 することができた。

鉄筋の最大質量減少率と最大荷重比の関係を

図-5に示す。ここで最大荷重比は、降伏荷重比 と同様,鉄筋が腐食していない RC はりの最大荷 重の実験値に対する各 RC はりの最大荷重の比 を示している。また、実線は、はりの曲げ理論 に基づき算出した鉄筋断面積と最大荷重比の関 係を示している。また、コンクリートの圧縮応 力分布を等価応力ブロックと仮定し、鉄筋降伏 後、鉄筋の応力はひずみによらず降伏強度を維 持するものとした。これより, B16 シリーズと B13 シリーズは、鉄筋の最大質量減少率を用い ることにより最大荷重を評価することができた が, B22 シリーズと B16-6 シリーズは, 実験値 が計算値より上回る結果となった。この結果に 対して考えられる要因は,鉄筋とコンクリート の一体性の違いである。耐荷性が向上した RC は りは,他の RC はりと比較して主鉄筋の径が大き いあるいは主鉄筋の本数が多い RC はりである。 異形鉄筋は、径が大きくなるほど節の高さが大 きくなる。このため,鉄筋が腐食し,節が減少 していく過程の中で径の小さい鉄筋と比較する と,径の大きい鉄筋の場合,コンクリートがす べることなく一体となって変形し、両者の間で 応力伝達を確保できたため、鉄筋の最大腐食断 面における圧縮域のコンクリートひずみが小さ くなり最大荷重が大きくなったと考えられる。 また、節の数が増えるため、鉄筋の本数が多い 場合においても同様であると考えられる。

したがって,鉄筋が腐食した RC はりにおいて, 部材降伏までは鉄筋の径や本数が耐荷性に及ぼ す影響は見られなかったが,それ以降,主鉄筋 の径が大きい,あるいは主鉄筋の本数が多い場 合は,コンクリートとの一体性を維持し,鉄筋 腐食が耐荷性に及ぼす影響が小さくなった。

## 3.3 腐食の発生位置が耐荷性に及ぼす影響

腐食の発生位置が耐荷性に及ぼす影響につい て、B16シリーズおよびB13シリーズにて検討 した。スパン中央部、載荷点直下部、せん断ス パン部の3箇所を腐食させたRCはりにおける鉄 筋の最大質量減少率と降伏荷重比の関係を図-6に示す。実線は、はりの曲げ理論に基づき算出



図-7 ひび割れ幅の経緯(せん断スパン部腐食)

した鉄筋断面積と降伏荷重比の関係を示してい る。これより,鉄筋の最大質量減少率を用いる ことにより降伏荷重を評価することができた。

せん断スパン部が腐食した場合,腐食した位 置での曲げモーメントが等曲げモーメント区間 の70%であるため,鉄筋の質量減少率が30%以 上でないと降伏荷重比は低下しないと考えられ る。しかし,実際には降伏荷重比が低下してい た。この結果に対して考えられる要因は,テン ションスティフニング効果の低下である。図-7 に示すように,ひび割れ幅の分布より,部材降 伏以前から腐食位置でのひび割れ幅が卓越して いた。これより,腐食位置にて鉄筋-コンクリ ート間で応力が伝達されず,テンションスティ フニング効果が失われたため、集中的に鉄筋ひ ずみが大きくなり部材が降伏したと考えられる。

鉄筋の最大質量減少率と最大荷重比の関係を 図-9に示す。実線は、はりの曲げ理論に基づき 算出した鉄筋断面積と最大荷重比の関係を示し ている。スパン中央部が腐食した RC はりは,降 伏荷重の場合と同様、計算値で評価することが できた。それに対し、載荷点直下部およびせん 断スパン部が腐食した RC はりは, 計算値より最 大荷重比が大きい結果となった。ここで、図-8 に示すように, 載荷試験終了後のひび割れ状況 を比較すると、スパン中央部が腐食した RC はり よりも等曲げモーメント区間のひび割れの本数 が多い結果となった。これより、スパン中央部 が腐食した RC はりは, 等曲げモーメント区間に おいて鉄筋-コンクリート間の付着力が低下し, 応力が伝達されずに圧縮域のコンクリートにお いて集中的に圧縮変形が生じたと考えられる。 それに対し、載荷点直下部およびせん断スパン 部が腐食した RC はりは,等曲げモーメント区間 全般にわたり鉄筋ーコンクリート間の応力伝達 が確保されたことにより,鉄筋の最大腐食断面 における圧縮域のコンクリートひずみが小さく なり最大荷重が大きくなったと考えられる。な お,既往の研究<sup>1)</sup>に示された解析結果にも同様の 傾向が示されている。

したがって、せん断スパン部が腐食した場合、 テンションスティフニング効果が失われること により、部材降伏までは等曲げモーメント区間 が腐食した場合と鉄筋腐食による耐荷性の低下 の程度が同等であった。また、それ以降は、等 曲げモーメント区間における鉄筋-コンクリー ト間の応力伝達の違いにより、スパン中央部が 腐食した場合と比較すると、載荷点直下部およ びせん断スパン部が腐食した場合は鉄筋腐食の 程度ほど耐荷性の低下が見られなかった。

# 4. 鉄筋の平均質量減少率を用いた耐荷性評価に ついての検討

局所的に生じた鉄筋腐食が RC はりの耐荷性



に及ぼす影響は,鉄筋の最大質量減少率を用い ることで評価することができた。しかし,既往 の研究では,鉄筋の全面を一様に腐食させた部 材における耐荷性の評価が一般的であり,それ によると,等曲げモーメント区間の主鉄筋の平 均質量減少率を用いることで耐荷性を概ね評価 できるとされている<sup>1)</sup>。既往の研究と同様に,鉄 筋の平均質量減少率を用いて RC はりの耐荷性 を評価する場合,局所化をどのように取り込む かについては明確にされていない。そこで,局 所化を耐荷性の評価に取り込む方法を検討した。

鉄筋の等曲げモーメント区間における平均質 量減少率と降伏荷重比の関係を図-10に示す。 実線は、はりの曲げ理論に基づき算出した鉄筋 断面積と降伏荷重比の関係を示している。本研 究での実験値は,既往の研究<sup>2)</sup>と比較すると,降 伏荷重比の低下が顕著であった。これより,こ の傾向の違いは,鉄筋腐食の局所化の程度が影 響していると考えられる。

図-11 に示すように、本研究と既往の研究<sup>2)</sup>の実験結果より、等曲げモーメント区間における鉄筋腐食の局所化の程度を鉄筋の質量減少率 比と昇順/総数から求めた。ここで質量減少率比 は、各 RC はりの最大質量減少率に対する測定位 置の鉄筋の質量減少率の比を示しており、昇順/ 総数は、採取した鉄筋を質量減少率の小さい順 に並び替え、総数で無次元化したものである。 つまり、図中に示す折れ線より上側の面積が小 さいほど、等曲げモーメント区間での鉄筋腐食 の局所化の程度が大きいことを示す。これより、 本研究で検討した鉄筋腐食は、既往の研究と比 較すると、局所化の程度が大きくなった。

また,各RCはりにおける鉄筋腐食の局所化の 程度(図-11に示す折れ線より上側の面積)と 図-10に示す,鉄筋の平均質量減少率に比例し た降伏荷重比の低下の程度(傾き)を表す係数k の関係を図-12に示す。この結果より,鉄筋腐 食の局所化の程度が大きくなると,鉄筋の平均 質量減少率の増加に対する降伏荷重比の低下の 程度が大きくなった。

したがって,係数 k を用いることにより,局 所的に鉄筋腐食が生じた RC はりの耐荷性を鉄 筋の平均質量減少率にて評価できる可能性があ ると考えられるが,今後の検討が必要である。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 鉄筋が腐食した RC はりにおいて,部材降伏 以降は,主鉄筋の径が大きい,あるいは主鉄 筋の本数が多い場合,鉄筋腐食が耐荷性に及 ぼす影響は小さくなった。
- (2) せん断スパン部が腐食した場合,部材降伏までは等曲げモーメント区間が腐食した場合と鉄筋腐食による耐荷性の低下の程度が同等であり、それ以降は、スパン中央部が腐食



した場合と比較すると,載荷点直下部および せん断スパン部が腐食した場合は鉄筋腐食 の程度ほど耐荷性の低下が見られなかった。

(3) 局所化の程度を検討することにより,局所的 に鉄筋が腐食した RC はりの耐荷性を鉄筋の 平均質量減少率で評価できる可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 土木学会:材料劣化が生じたコンクリート構 造物の構造性能,コンクリート技術シリーズ 71,2006
- 加藤絵万ほか:繰返し荷重を受ける RC 柱の 構造性能に及ぼす鉄筋腐食の影響,港湾空港 技術研究所資料 No.1079, 2004