

論文 不均一腐食を受けた RC 梁部材の曲げ耐力に関する検討

朱 暁旭*1

要旨：鉄筋腐食が鉄筋コンクリート（RC）部材の耐力および変形性能に与える影響を評価するため、健全な RC 梁 1 体と、腐食位置、腐食範囲、腐食量が異なる不均一な鉄筋腐食を付与した RC 梁 6 体を対象に曲げ試験を実施した。それらの試験結果から、以下の知見が得られた。中央スパンの腐食は、せん断スパンに比べて曲げ耐力への影響が大きく、特に腐食範囲の影響が顕著であった。一方、片側スパン腐食ではその影響は比較的小さかった。曲げ剛性の比較結果は曲げ耐力と同様の傾向を示した。また、腐食位置は曲げひび割れの分布に影響を与え、中央スパンでの腐食では曲げひび割れが分散せず中央部に集中する傾向が確認された。

キーワード：RC 梁, 不均一腐食, 腐食位置, 腐食範囲, 曲げ耐力

1. はじめに

鉄筋腐食は RC 構造物の主要な劣化要因であり、断面欠損による強度低下に加え、鉄筋方向に沿ったひび割れが鉄筋とコンクリート間の付着強度を低下させることが明らかにされた。長期間使用されたコンクリート構造物において、補修・補強の適切な判断を行うためには、腐食に伴う部材の耐力や変形性能の変化を把握することが重要である。

RC 梁の構造性能に対する鉄筋腐食の影響は、これまでに多くの実験的研究で調査された¹⁻⁵⁾。岩波らが電食、温海中での乾湿繰り返し、海水噴霧という 3 つの促進腐食手法を用いて鉄筋腐食を誘発させた RC 梁の耐荷性能を調査し、曲げスパン内の引張側鉄筋の平均断面減少率と鉄筋降伏荷重および最大荷重との関係を整理している¹⁾。村上らは、引張側鉄筋の定着部にフックがない場合、引張鉄筋全体の腐食によって RC 梁の曲げ耐力が大幅に低下することを明らかにした²⁾。大屋戸らが電食試験体と暴露試験体の部材試験を行い、質量減少率以上に鉄筋の引張強度および終局耐力が減少する場合があります、鉄筋の断面積分布を把握する必要があることを示した³⁾。

さらに、引張鉄筋の定着部腐食に着目した研究も多く、腐食による付着力の低下が引抜き耐力に影響を与え、その時点で定着破壊が発生し最終耐力に至ることが確認されている⁶⁻⁸⁾。また、他の研究では、鉄筋腐食により主鉄筋の定着不良が生じていると、極めて低い荷重レベルで鉄筋の抜出しによる脆性破壊が生じることも示されている⁹⁾。加えて、鉄筋腐食が RC 梁のせん断耐荷機構に及ぼす影響を検証する梁試験が行われ、腐食による破壊モードの変化が観察されている¹⁰⁻¹²⁾。

中央スパン部において不均一な鉄筋腐食を受けた RC 梁の挙動について、異なる腐食レベルを対象に試験的に調査が行われた¹³⁾。その結果、不均一な腐食が RC 梁の耐力および剛性を大幅に低下させることが示された。ま

た、他の研究では、腐食長がスパン長の 60%未満の場合、RC 梁の終局耐力には影響がないことが示された⁴⁾。さらに、RC 部材は複数の鉄筋で補強されているため、1 本の鉄筋の腐食が横方向に隣接する鉄筋に影響を及ぼし、隣接鉄筋間の局所的腐食の相関が RC 部材の構造性能に及ぼす影響について、実験的に研究された¹⁴⁾。

本研究では、腐食位置、腐食範囲および腐食量の曲げ耐力への影響に着目し、健全な RC 梁 1 体と不均一な腐食を有する RC 梁 6 体を対象に、4 点曲げ試験を実施した。健全な梁との比較を通じ、不均一な腐食が曲げ耐力、剛性およびひび割れ分布に及ぼす影響を検討した。試験および解析手法を用いて、試験体 1~3 を対象に腐食が耐力に与える影響を検討した内容については、朱ら¹⁵⁾の論文に記載されている。

2. 試験の概要

2.1 RC 梁試験体

合計 7 体の RC 梁を同一条件で作製した。試験体の詳細を図-1 に示す。各梁の長さは 2000 mm、断面寸法は幅 100 mm、高さ 200 mm とした。引張鉄筋として D16 鉄筋 2 本、圧縮鉄筋として D10 鉄筋 2 本を、それぞれかぶり厚さ 20 mm で配置した。RC 梁は曲げ破壊を想定して設計されており、せん断補強筋として D10 の異形鉄筋を 100 mm 間隔で配置した。

試験ケースを表-1 に示す。試験パラメータとして設定したのは、腐食位置、腐食範囲、および腐食量である。試験体 1 は健全な梁とした。試験体 2, 3 では、引張鉄筋 2 本を対象に、全スパンおよび片側スパン(400mm 範囲)において、それぞれ腐食量 30%を目標値として電食を行った。試験体 4~7 は、中央スパンおよび片側スパンの局所において、それぞれ 20mm と 120mm の範囲で腐食量 30%を目標値に腐食を施した後、全スパンにわたり新たな腐食量 30%まで電食を行ったものである。中央スパン

*1 清水建設（株） 技術研究所 社会システム技術センター 博（工）（正会員）

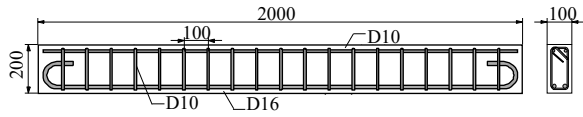
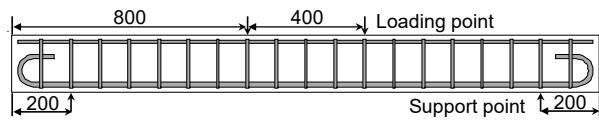


図-1 試験体の詳細



試験体 1 (Sound)

試験体 2 (W-1800)

試験体 3 (S-400)

試験体 4 (M-20)

試験体 5 (S-20)

試験体 6 (M-120)

試験体 7 (S-120)

■ 局所腐食 ■ 全長腐食

図-2 腐食試験体の詳細

および片側スパンの局所の腐食量は累計で 60%となる。試験ケースの詳細を図-2 に示す。

全ての試験体は、コンクリート打設に使用した木製型枠内で 7 日間の養生を行い、その後 21 日間の気中養生が施された。その後、腐食試験体 2~7 は、3%の塩化ナトリウム (NaCl) 溶液を満たしたプラスチックタンクに移された。全スパンを腐食させる場合には、試験体の底部の引張鉄筋が塩水溶液中に浸かる位置まで浸漬させた。一方、中央部および片側スパンの局所範囲を腐食させる場

表-1 試験ケース

試験体	腐食位置	腐食範囲	腐食量	
1	Sound	健全		
2	W-1800	全スパン	1800 mm	30%
3	S-400	片側スパン	400 mm	30%
4	M-20	中央スパン	20 mm	60%
5	S-20	片側スパン	20 mm	60%
6	M-120	中央スパン	120 mm	60%
7	S-120	片側スパン	120 mm	60%
4~7 (共通)	全スパン	1800 mm	30%	

合には、試験体を塩水溶液の上方に保持し、試験体の底部と塩水溶液の間に超吸水性スポンジを配置することで、目標とする腐食位置を実現した。詳細な電食方法については、朱らの論文に記載されている^{8,15)}。

電流密度は 1.0 mA/cm²、腐食率 30%とした場合、全体の促進腐食期間はファラデーの法則に基づき 37.5 日と算出された。試験体 2 および試験体 3 の場合、電食時間は 37.5 日であった。一方、試験体 4~7 では、中央スパンおよび片側スパンの局所位置を先に腐食させた後、全スパンにわたり電食を実施した。局所と全スパンの通電時間はそれぞれ 37.5 日であった。圧縮側の軸方向鉄筋およびせん断補強筋の腐食を防止するため、引張側の軸方向鉄筋との接触部に防食エポキシ樹脂を塗布し絶縁した。

2.2 荷重方法と計測項目

4 点曲げ試験の荷重および計測の概要を図-3 に示す。6MN 構造物試験機を反力装置とし、0.35MN ジャッキを用いて、支持点と荷重点にテフロンを使用して 4 点曲げ試験を行った。荷重点間の間隔は 400mm、せん断スパンは 600mm と設定した。一方向への単調増加荷重を行い、鉛直荷重は 2 つのロードセルで記録した。荷重は、片側のジャッキストロークを 0.01mm/s の変位速度で制御し、両ジャッキの荷重が均等になるよう調整した。荷重点、支持点、および中央部の鉛直方向変位は、2 つの側面から計測した。

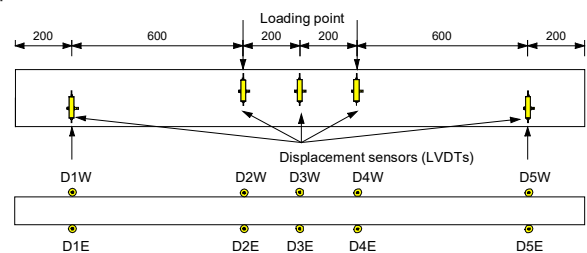


図-3 荷重と計測の概要

2.3 材料強度

コンクリートの配合を表-2 に示す。水セメント比は

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	
									AE1	AE2
20	15±2.5	60	4.5±1.5%	46	165	275	846	997	0.69	0.03

表-3 コンクリートの材料試験結果

名称	材齢 (d)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
試験体 1	28	32.5	28.3
	107	36.1	29.0
試験体 2, 3	28	34.3	28.4
	107	35.4	26.8
試験体 4~7	28	30.0	28.4
	246	34.1	29.0

表-4 鉄筋の材料試験結果

名称	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D16	202.0	356.6	523.3
D10	185.0	355.8	477.3

60%, 単位水量は 165kg/m³ とした。セメントは早強ポルトランドセメント, 細骨材は山砂, 粗骨材は硬質砂岩砕石とした。粗骨材の最大寸法は 20 mm とした。鉄筋の腐食を促進するため, 電食させる試験体は塩化ナトリウムを練混ぜ水の外割で 5kg/m³ 混入した。

コンクリート材齢 28 日および荷重日におけるコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の結果を表-3 に示す。試験体 1~3 の荷重試験は材齢 107 日に実施され, 試験体 4~7 の荷重試験は材齢 246 日に実施された。荷重日におけるコンクリートの圧縮強度は, 健全な試験体で 36.1 N/mm², 試験体 2 および試験体 3 で 35.4N/mm², 試験体 4~7 では 34.1 N/mm² であった。これらの結果から, 腐食試験体と健全試験体のコンクリート圧縮強度の差は 5% 以内であり, 各試験体の曲げ耐力を比較する際に, コンクリート材料の強度の影響は無視できると考えられる。

RC 梁に配置された鉄筋はすべて SD295A であり, RC 梁の軸方向鉄筋に使用した D16 およびせん断補強筋に使用した D10 の材料試験の結果を表-4 に示す。各試験体に使用された鉄筋材料の強度は均一であると考えられる。

3. 試験の結果

3.1 鉄筋腐食率

荷重試験後, 試験体 2 および試験体 3 の引張鉄筋をはりだした後, 鉄筋の腐食率を断面積と質量の 2 つの方法により測定した。鉄筋断面の直径はノギスを用いて長

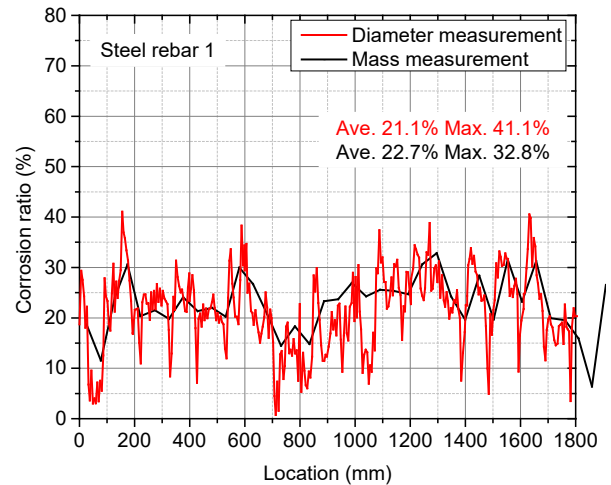


図-4 試験体 2 の腐食分布

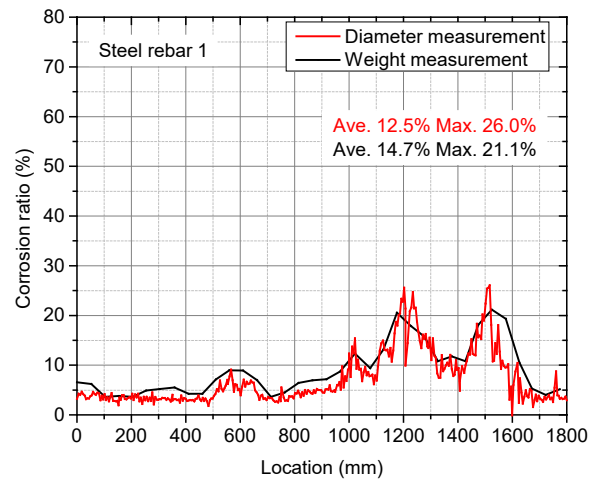


図-5 試験体 3 の腐食分布

表-5 腐食率の測定結果

試験体	断面減少率		質量減少率	
	平均	最大	平均	最大
2	21.1%	41.1%	22.7%	32.8%
3	12.5%	26.0%	14.7%	21.1%

手方向に 5mm 間隔で測定し, 質量測定時には鉄筋を 50mm の長さに切断し測定を行った。

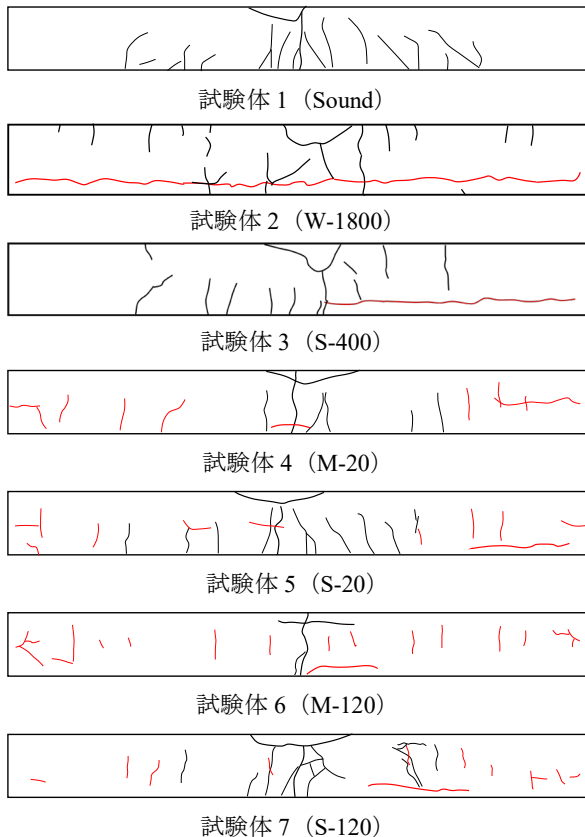
各試験体において 2 本の引張鉄筋の腐食率を測定した結果, 両者は近似していたため, 本論文では 1 本の鉄筋の腐食分布を示すこととした。試験体 2 および試験体 3

の腐食分布をそれぞれ図-4および図-5に示す。また、それらの断面減少率および質量減少率の平均値と最大値を測定した結果を表-5にまとめた。

断面減少率の結果によると、試験体2の場合、鉄筋1の平均および最大腐食率は、それぞれ21.1%および41.1%であった。試験体3の場合、鉄筋1の平均および最大腐食率は、それぞれ12.5%および26.0%であった。試験体2の平均および最大腐食率は試験体3のそれより大きかった。腐食率の分布より試験体3において、実際に腐食した鉄筋の長さは約600mmであり、目標とされた400mmの長さより長かった。このことは、電食試験の場合に、局所的な腐食領域の長さを正確に制御することが困難であることを示している。

3.2 破壊パターン

図-6に各試験体のひび割れ状況を示す。赤線は腐食によるひび割れを、黒線は載荷後に発生したひび割れを表している。



— 腐食ひび割れ — 載荷ひび割れ
図-6 各試験体のひび割れ状況

まず、腐食ひび割れの状況について説明する。試験体2では、全スパンにわたり引張鉄筋に沿った方向に腐食ひび割れが発生した。試験体3では、片側スパンにおける目標範囲を超えた広い範囲(約600mm)に腐食ひび割れが生じた。試験体4~7では、試験体全体に広範囲な

腐食ひび割れが分布していたが、試験体2のように引張鉄筋の位置に貫通する腐食ひび割れは見られなかった。試験体4および試験体6では、引張鉄筋に沿った方向の腐食ひび割れが中央スパン付近で観察された。試験体5および試験体7の片側スパンでも腐食ひび割れが確認された。特に、試験体4~7では局所的な最大腐食位置で大きなひび割れ幅が確認され、これらの部位での劣化が顕著であることが示された。

次に、載荷によるひび割れの特徴について説明する。試験体1では、載荷に伴い曲げひび割れが分散的に発生し、載荷点に向かって斜め方向に進展し、最終的にコンクリート圧壊に至った。試験体2では、全スパンにわたり引張鉄筋に沿った方向に腐食ひび割れが発生していたため、曲げひび割れの本数は健全な試験体より少なかった。試験体3では、曲げひび割れが中央スパンと腐食していない側に集中していた。試験体4および試験体6では、中央スパンに大きな局所腐食が発生したため、曲げひび割れの本数は少なく、特に試験体6では中央部200mmの範囲に大きな腐食があるため、曲げひび割れの本数がさらに少なかった。試験体5では、顕著な腐食ひび割れが片側スパンの狭い範囲(20mm)に発生したため、曲げひび割れの分布状況は健全な試験体とほとんど変わらなかった。一方、試験体7では、片側スパンの広範囲(200mm)に腐食ひび割れが発生したため、曲げひび割れは中央付近に集中し、本数は減少した。

全スパンにわたり引張鉄筋が腐食した場合、鉄筋とコンクリートの付着が弱まり、鉄筋表面のリブの機能が低下し、ひび割れが中央部に集中しやすくなることが示された。また、中央スパンに腐食範囲が広がるにつれて、曲げひび割れの本数が急激に減少し、中央部に集中する傾向が確認された。片側スパンの狭い範囲で腐食が生じた場合、曲げひび割れの分布への影響は小さかったが、腐食範囲が広がると曲げひび割れの本数が減少する傾向がみられた。

全ての試験体において、鉄筋の降伏に続いてコンクリートの圧縮破壊が発生する類似した破壊パターンが観察された。

3.3 荷重-変位曲線

試験から得られた荷重-変位曲線の結果を図-7および図-8に示す。また、最大耐力の結果を表-6にまとめた。荷重は2つのロードセルの測定値を合算したものであり、載荷点の相対変位は載荷点の変位から支持点の変位を差し引いたものである。

梁に腐食損傷がない場合に、土木学会コンクリート標準示方書¹⁶⁾によると曲げ破壊荷重は69.5kN、せん断破壊荷重は185kNであり、せん断余裕度(せん断耐力/曲げ耐力)は2.7である。試験結果から、健全な梁の曲げ耐力

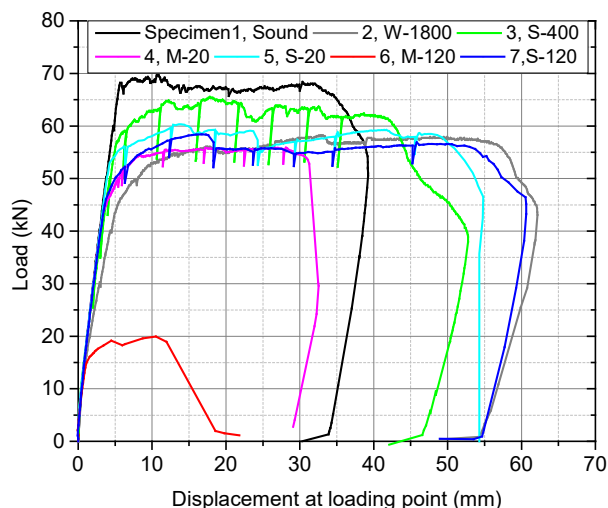


図-7 試験の荷重-変位曲線結果 (全体図)

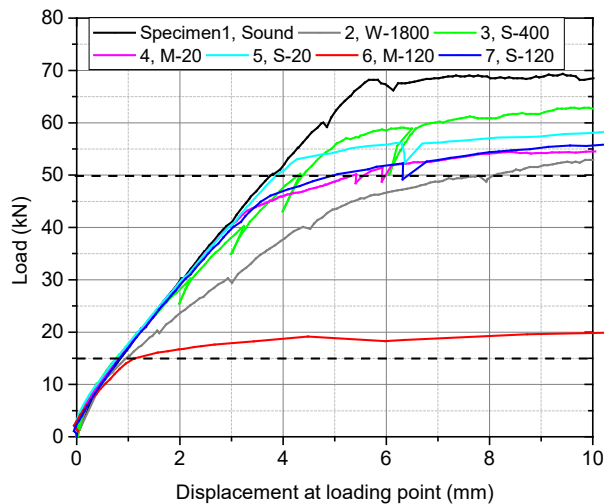


図-8 試験の荷重-変位曲線結果 (拡大図)

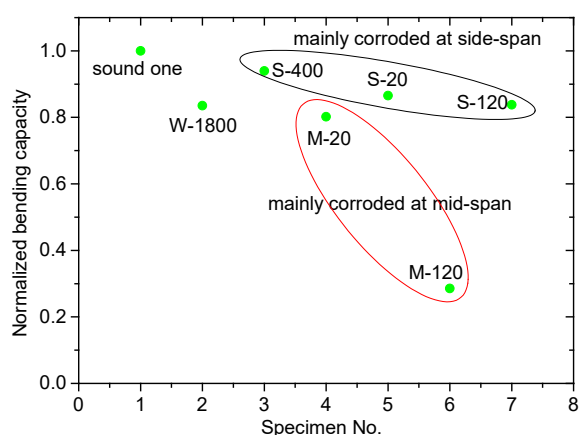


図-9 曲げ耐力の比較

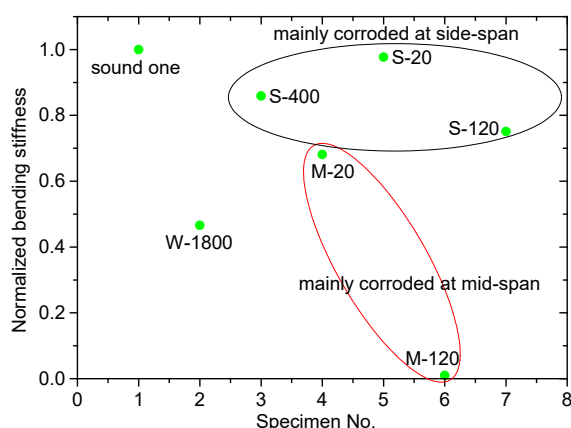


図-10 曲げ剛性の比較 (荷重 50kN の場合)

表-6 各試験体の載荷結果

試験体	1 (sound)	2 (W-1800)	3 (S-400)	4 (M-20)	5 (S-20)	6 (M-120)	7 (S-120)
曲げ耐力 (kN)	69.7	58.2 (16.5% ↓)	65.5 (6.0% ↓)	55.9 (19.8% ↓)	60.3 (13.5% ↓)	19.9 (71.4% ↓)	58.4 (16.2% ↓)

は 69.7 kN であり、土木学会コンクリート標準示方書に基づく計算値 69.5 kN に近い値を示した。試験体 2 (W-1800) では、全スパンに腐食が生じた結果、健全な試験体に比べ曲げ耐力が約 16.5%低下した。一方、試験体 3 (S-400) では、片側スパン (実際 600 mm) の腐食により曲げ耐力が約 6.0%低下した。試験体 2 (W-1800) の耐力低下が試験体 3 (S-400) より大きい理由は、腐食範囲および腐食率が高かったためである。試験体 4 (M-20) および試験体 6 (M-120) の曲げ耐力の低下率は、それぞれ約 19.8%および 71.4%であり、中央スパン部の鉄筋腐食が曲げ耐力を著しく低下させること、また腐食範囲の拡大に伴いその低下が顕著になることを示している。一方、試験体 5 (S-20) および試験体 7 (S-120) の曲げ耐力の低下率は、それぞれ約 13.5%および 16.2%であり、

せん断スパンにおける腐食では、腐食範囲の長さが曲げ耐力の低下量に与える影響は比較的小さいことが分かった。試験体 5 (S-20) および試験体 7 (S-120) は、試験体 3 (S-400) より局所腐食の範囲が狭いにもかかわらず曲げ耐力の低下が大きい理由は、局所的な腐食量が大きく、さらに全スパンにわたり腐食が進行したためである。全ての試験体の曲げ耐力を健全な試験体との比率で標準化した結果を図-9 にまとめた。中央スパンにおける腐食の方が、せん断スパンに比べて曲げ耐力への影響が大きいという傾向が確認された。中央スパン腐食の場合、腐食範囲の影響が顕著であり、一方で片側スパン腐食の場合、腐食範囲の影響は中央スパンほど大きくはなかった。

図-8より、荷重の初期段階(15kN)において、試験体2(W-1800)と試験体6(M-120)の両方で剛性が低下し、試験体6(M-120)の方がさらに大きく低下した。他の腐食試験体では、健全試験体の剛性とほとんど変わらなかった。載荷荷重が50kNの時点において、腐食試験体の荷重-変位曲線の傾きの差が明確であったため、この時点の曲げ剛性を比較した。具体的には、載荷荷重が50kNの時点の割線の傾斜率を試験体の剛性として計算し、さらに健全な試験体との比率で標準化した結果を図-10にまとめた。試験体5(S-20)の剛性は健全試験体の剛性と近似していたが、剛性の低下レベルは試験体3(S-400)、試験体7(S-120)、試験体4(M-20)、試験体2(W-1800)の順に大きくなった。この時点で試験体6(M-120)はすでに破壊していたが、比較のために曲げ剛性をほぼ0として図-10に示した。なお、曲げ剛性の比較結果は、曲げ耐力と同様の傾向を示した。

4. 結論

本研究では、健全なRC梁1体と、腐食位置、範囲、腐食量が異なる不均一な鉄筋腐食を付与したRC梁6体を対象に曲げ試験を実施した。以下の結果が得られた。

- (1) 中央スパンにおける腐食は、せん断スパンに比べて曲げ耐力への影響が大きい傾向が確認された。
- (2) 局所的腐食の影響について、中央スパン腐食の場合、腐食範囲が曲げ耐力に与える影響が顕著であり、一方で片側スパン腐食の場合はその影響は中央スパンほど大きくないことが示された。
- (3) 曲げ剛性の比較結果は曲げ耐力と同様の傾向を示した。
- (4) 局所的腐食の位置は曲げひび割れの分布に影響を与え、特に中央スパンで発生した腐食では、曲げひび割れが分散せず中央部に集中する傾向が確認された。

参考文献

- 1) 岩波光保, 横田弘, 佐藤文則: 鉄筋腐食がRC梁の耐荷性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1501-1506, 2002.
- 2) 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, Vol.17, No.1, pp. 61-74, 2006
- 3) 大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦, 佐藤勉: 鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響, 土木学会論文集, Vol.62, No.3, pp. 542-554, 2006
- 4) F. Jnaid, R.S. Aboutaha: Residual flexural strength of

corroded reinforced concrete beams, Engineering Structures, Vol.119, pp. 198-216, 2016

- 5) 島弘: 鉄筋が腐食した一方向RCスラブの曲げ耐力, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp. 563-568, 1990
- 6) 森誠, 松本浩嗣, 二羽 淳一郎: 軸方向鉄筋の定着部またはスパン全体に腐食を有するRCはりの力学性状, コンクリート工学論文集, Vol.35, No.2, pp. 547-552, 2013
- 7) 千々和伸浩, 川中勲, 前川宏一: 引張鉄筋定着部に腐食劣化を有するRC梁の残存耐力と未損傷領域への面的補強, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.67, No.2, pp. 160-165, 2011
- 8) 朱曉旭, 林大輔, 吉武謙二, 稲田裕: 異形鉄筋と丸鋼の定着部腐食劣化がRC梁部材の曲げ性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp. 829-834, 2024
- 9) 董衛, 村上祐貴, 大下英吉, 鈴木修一, 堤知明: 鉄筋腐食したRC梁部材の残存耐力ならびに破壊性状に及ぼす定着性能の影響に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp. 13-26, 2011
- 10) 松尾豊史, 酒井理哉, 松村卓郎, 金津努: 鉄筋腐食したRCはり部材のせん断耐荷機構に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.2, pp. 69-77, 2004
- 11) 橋本航, 森川英典, 小林秀恵: 鉄筋腐食を考慮したRCはり部材のせん断耐荷性能評価, コンクリート工学年次論文, Vol.25, No.2, pp. 1009-1014, 2003
- 12) 山本貴士, 佐藤吉孝, 服部篤史: 鉄筋腐食RCはりのせん断耐荷挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文, Vol.27, No.1, pp. 913-918, 2005
- 13) R.K. Biswas, M. Iwanami, N. Chijiwa, K. Uno: Effect of non-uniform rebar corrosion on structural performance of RC structures: A numerical and experimental investigation, Construction and Building Materials, Vol.230, pp. 116908, 2020
- 14) M. Zhang, N. Nishiya, M. Akiyama, S. Lim, K. Masuda: Effect of the correlation of steel corrosion in the transverse direction between tensile rebars on the structural performance of RC beams, Construction and Building Materials, Vol.264, pp. 120678, 2020
- 15) X. Zhu, H. Abe, D. Hayashi, H. Tanaka: Behavioral characteristics of RC beams with non-uniform corrosion along the reinforcement, Journal of Intelligent Construction, Vol. 1(3), pp. 9180019, 2023
- 16) 土木学会: コンクリート標準示方書, 2022