

鉄筋腐食が RC 梁の曲げ挙動に与える影響に関する実験と解析検討

朱 曉旭 阿部 寛之 田中 博一

(技術研究所)

(技術研究所)

(技術研究所)

Experimental and Analytical Study on the Influence of Rebar Corrosion on the Flexural Behavior of RC Beams

Xiaoxu Zhu, Hiroyuki Abe and Hirokazu Tanaka

本研究では、鉄筋腐食が鉄筋コンクリート(RC)部材の曲げ性能に与える影響を評価するため、健全な RC 梁 1 体と、全長腐食および片側スパン腐食という異なる範囲で不均一に腐食した RC 梁 2 体に対し、曲げ試験を実施した。鉄筋の腐食分布は、断面減少率と質量減少率の 2 つの方法で測定し、両者の傾向が一致することを確認した。断面減少率における腐食分布のピーク値は質量減少率におけるものよりもはるかに大きかった一方で、断面減少率による平均腐食は質量減少率によるものよりも小さいという違いが見られた。鉄筋腐食により、載荷時に生じる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という類似した破壊パターンが観察された。鉄筋腐食は梁の剛性、降伏荷重、および最大耐力を低下させることが明らかになった。特に、全長腐食における耐力低下は片側スパン腐食よりも顕著であった。さらに、鉄筋の不均一な腐食を考慮した非線形三次元解析モデルを構築し、実験データを用いてその妥当性を検証した。

This study investigated the behavior of a non-corroded reinforced concrete (RC) beam and two RC beams with non-uniform corrosion (whole span and side span) in a four-point bending test. The corrosion distributions of the tensile steel rebars were measured by two methods: diameter loss and mass loss. The peak values of corrosion distribution in the diameter-loss measurements were much greater than in the mass-loss measurements, while the average corrosion according to the diameter measurements was smaller than in the mass-loss measurements. The overall corrosion distribution trends were consistent between the two methods. From the bending test results, it was found that increased corrosion area and corrosion ratios reduced the beams' stiffness, yielding capacity, and ultimate capacity. All three specimens exhibited similar failure patterns: steel yielding followed by compression failure of the concrete. A nonlinear three-dimensional analysis model that considered the non-uniform corrosion of the rebars was established and verified by experimental data. The model's predictions for stiffness, ultimate capacity, and failure patterns were consistent with experimental results.

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、温海水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拔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⁾。

これらの先行研究により、鉄筋腐食が RC 部材の構造性能に与える影響に関する知見は蓄積されてきた。しかしながら、異なる腐食範囲における不均一腐食が RC 梁の曲げ挙動に及ぼす影響の研究データは少ない。本研究では、鉄筋腐食が鉄筋コンクリート (RC) 部材の曲げ性能に与える影響を評価するため、健全な RC 梁 1 体と、全長腐食および片側スパン腐食という異なる範囲で不均一に腐食した RC 梁 2 体を対象に曲げ試験を実施した。腐食解析について、鉄筋の平均腐食量を考慮した解析事例^{15)・16)}があるが、不均一な腐食を考慮した解析手法は十分には整備されていないため、この研究では精緻な解析モデルを提案し、実験結果との比較によりその有効性を示す。本論文は、文献¹⁷⁾にすでに掲載されたものを再構成、加筆修正したものである。

2. 実験の概要

2.1 試験体の詳細

合計 3 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。各試験体の詳細を図-2 に示す。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(400 mm 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。

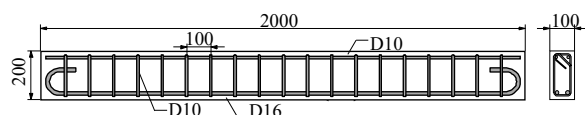
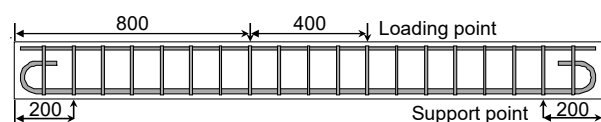
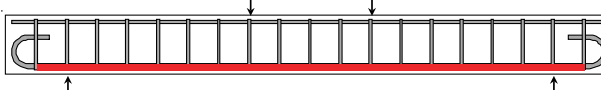


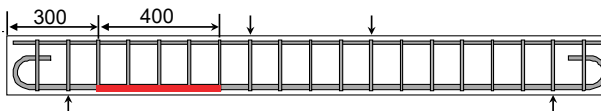
図-1 試験体の詳細



(a) 試験体 1、健全



(b) 試験体 2、全長腐食



(c) 試験体 3、片側スパン腐食

図-2 各試験体の詳細

載荷時のコンクリートの材料試験結果を表-1 に示す。コンクリート圧縮強度は健全の試験体では 36.1 N/mm²、腐食の試験体では 35.4 N/mm² であった。RC 梁の軸方向鉄筋に使用した D16、せん断補強筋に使用した D10 の材料試験の結果を表-2 に示す。健全の場合に、土木学会コンクリート標準示方書¹⁸⁾に基づく曲げ破壊荷重は 69.5 kN、せん断破壊荷重は 185 kN であり、せん断余裕度 (せん断耐力/曲げ耐力) は 2.7 である。

表-1 コンクリートの材料試験結果

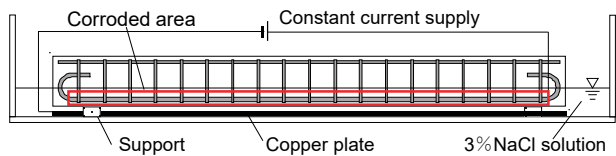
名称	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
試験体 1	36.1	29.0
試験体 2、3	35.4	26.8

表-2 鉄筋の材料試験結果

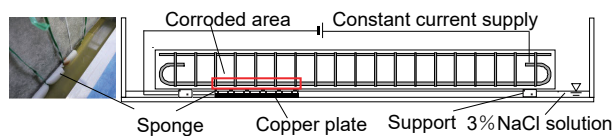
名称	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D16	202.0	356.6	523.3
D10	185.0	355.8	477.3

2.2 電食方法

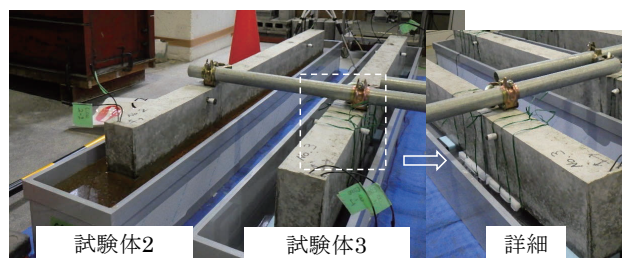
材齢 28 日から、試験体 2 と試験体 3 を図-3 に示すように、3%塩化ナトリウム(NaCl)水溶液を入れたプラスチックタンク内に設置した。試験体 2 と 3 の各々の腐食範囲に超吸収性スポンジを配置し、底面から 1 cm 程度の深さで浸漬させ、引張側の軸方向鉄筋に陽極電流を流すことにより、定着部周りに局所的な腐食を発生させた。具体的には、試験体 2 では載荷点と支持点間の片側スパンにおける 400 mm の範囲の引張鉄筋を、試験体 3 では全長範囲の引張鉄筋を電食させた。引張鉄筋圧縮側の軸方向鉄筋とせん断補強筋の腐食を防止するため、引張側の軸方向鉄筋との接触部に防食エポキシ樹脂を塗布し絶縁した。一定電流を供給し、電流密度は 1.0 mA/cm²、電食時間は 37.5 日であった。



(a) 試験体 2



(b) 試験体 3



(c) 電食実験の写真

図-3 電食方法の詳細

2.3 載荷方法

4 点曲げ試験の載荷および計測の概要を図-4 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、支持点と載荷点にテフロンを使用して 4 点曲げ試験を行った。載荷点間の間隔は 400 mm、せん断スパンは 600 mm と設定した。一方向への単調増加載荷を行い、鉛直荷重は 2 つのロードセルで記録した。載荷は、片側のジャッキストロークを 0.01 mm/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。載荷点、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。

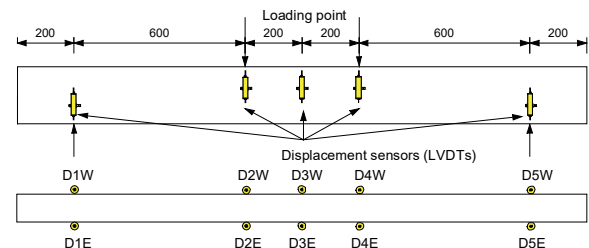


図-4 載荷と計測の概要

2.4 腐食率の測定

載荷試験後に下側の 2 本の引張鉄筋をはつりだした後、約 200mm の長さで切断して鉄筋ピースを採取した。JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」¹⁹⁾に従って、鉄筋ピースを 10% クエン酸二アンモニウム溶液に浸漬して、60℃ の一定温度の乾燥機に入れた。さびの大部分が溶解した後、サンドペーパーで腐食さびを除去後、再び乾燥機で鉄筋ピースを乾燥した。

鉄筋の腐食率は断面減少率と質量減少率の 2 つの方法により測定した。断面の直径はノギスを用いて長手方向に 20 mm 間隔でリブのある所とない所の直径を測定した。図-5 に示すように、同じ場所で 90 度回転後に再び直径を測定した。2 つの測定直径の平均を用いて、健全な鉄筋の直径と比較して、断面減少率を腐食率として算定した。断面腐食率の測定後、質量減少率を計測するため、鉄筋を 50 mm に切断した。各ピースの質量と長さを測定し、健全鉄筋の密度に基づいて計算した質量と比べ、質量減少率を腐食率として算定した。

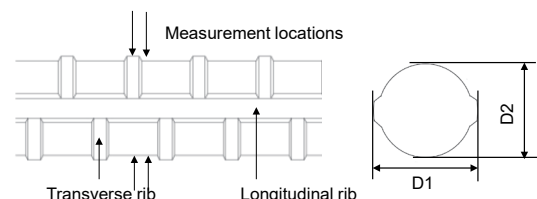


図-5 鉄筋直径の測定方法

3. 解析の概要

3.1 解析手法

材料非線形構造解析システム COM3D を適用した。腐食システムのモデル化には、主に 3 つの要素がある。それは、腐食した後の鉄筋、腐食生成物による発生した膨張応力、および腐食ひび割れにより引き起こされる鉄筋とコンクリートの付着劣化である^{20),21)}。COM3D では、腐食生成物と腐食した鉄筋は一つのシステムとして扱われる。断面減少率と質量減少率の 2 つの方法により測定した鉄筋腐食率の分布をそれぞれの鉄筋位置に入力した。

3.2 対象梁部材のモデル化

RC 梁の解析モデルを図-6 に示す。実験を実施した時に、載荷点と支持点に 40 mm の鉄板を使った。実際の載荷条件を再現するため、載荷点と支持点には長さ 40 mm の弾性要素を設定した。解析モデルは、引張鉄筋、圧縮鉄筋、せん断鉄筋とコンクリートをソリッド要素でモデル化し、配筋位置とコンクリートの被り状況を考慮し、メッシュの分割を行った。

3.3 材料物性

解析では、表-1 に示したコンクリートの剛性と強度および表-2 に示した鉄筋のヤング率と降伏強度を用いた。

3.4 解析プロセスと荷重条件

本解析では、最初に鉄筋を実際に発生した腐食量まで腐食させて、次に COM3D の restart 機能を使い、強制変位で破壊まで載荷した。載荷の速度は、載荷速度と同等で、0.01 mm/s の変位速度で解析した。想定する荷重は、自重と載荷荷重になった。

4. 実験と解析の結果

4.1 腐食量分布

試験体 2 および試験体 3 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。断面減少率と質量減少率の 2 つの方法により測定した鉄筋の腐食分布をそれぞれ図-7 および図-8 に示す。断面減少率の方が細かい増

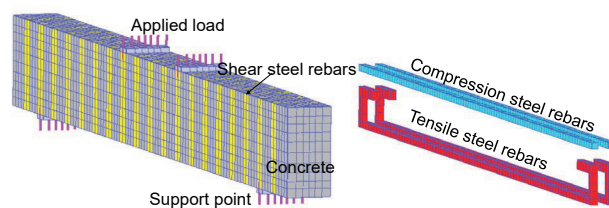


図-6 解析モデル

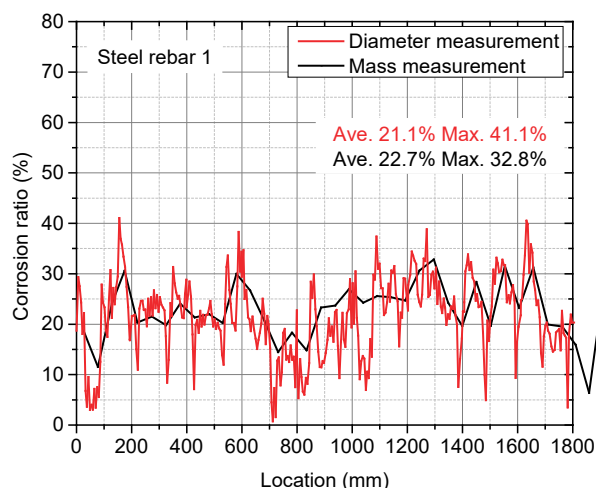


図-7 試験体 2 の腐食分布

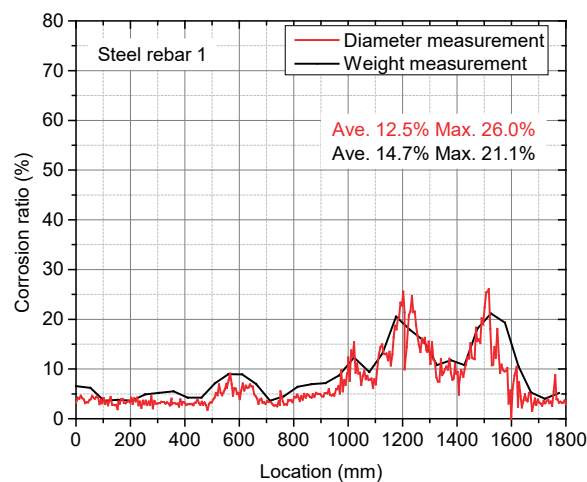


図-8 試験体 3 の腐食分布

表-3 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%

減を捉え、質量減少率は平均化されなだらかな変化を示している。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-3 にまとめた。

質量減少率の平均値が断面減少率の平均値よりも大きかった。この原因として、断面減少率は有限個の離散点での計測であるのに対し、質量減少率は連続的な質量変化を積分によって得られた代表値であるためと考えられる。この傾向は、過去の研究²²⁾で確認された結果と一致している。一方、断面減少率の最大値が質量減少率の最大値よりも大きかった。これは、孔食のような局所的に大きな腐食が生じて、離散的な断面計測ではそのような局所的な変化を捉えやすい一方、質量計測では平均化されるためその影響が表れにくいと考えられた。

4.2 破壊パターン

図-9 に試験体の実験的および解析的な破壊パターンを示す。

まず、載荷前に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 600 mm）に腐食ひび割れが生じた。また、反対側の片側スパンにおいても、約 200 mm 程度の範囲で軽微な腐食現象が認められた。これらの結果は、電食における電子移動の複雑性により、腐食の発生位置および腐食量を高精度に制御することが困難であることを示唆している。

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が腐食し、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。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2と3とも、鉄筋腐食により、載荷時に生じる曲げひび割れの本数が減少する傾向がみられた。

図-9 に示す解析のコンター図において、赤色領域はコンクリートのひび割れ発生範囲を示している。引張鉄筋に沿って確認される赤色領域は、腐食生成物の膨張に起因するコンクリートひび割れである。載荷の増加に伴い、支持点間、特に等曲げモーメント領域において曲げひび割れが発生し、ひび割れは圧縮側へと進展していることが確認された。また、載荷点間の梁上部側は圧縮応力を受け、コンクリートの圧縮破壊も観察された。これらの解析結果とし

てのひび割れおよび破壊パターンは、実験で観察された状況と概ね一致している。

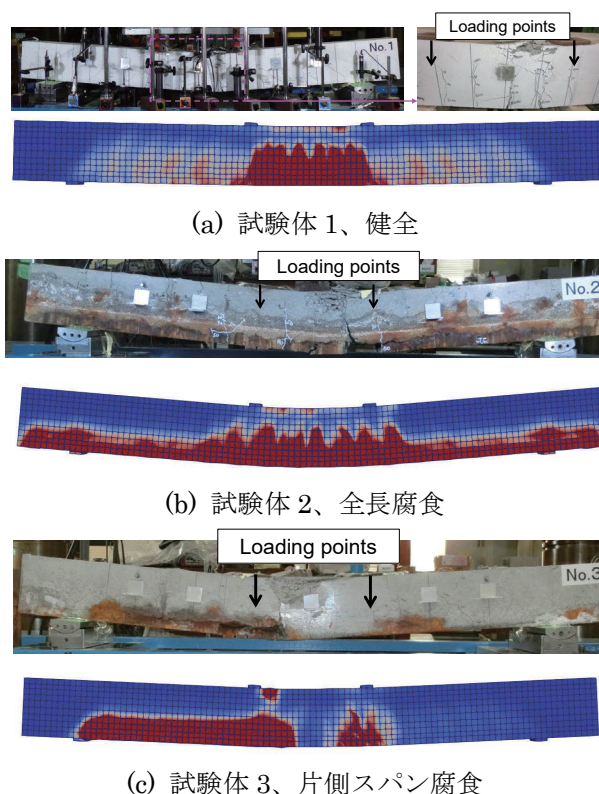
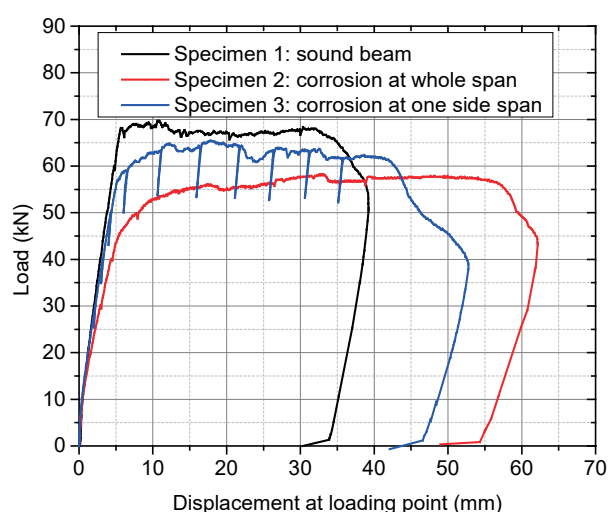


図-9 実験的および解析的な破壊パターン

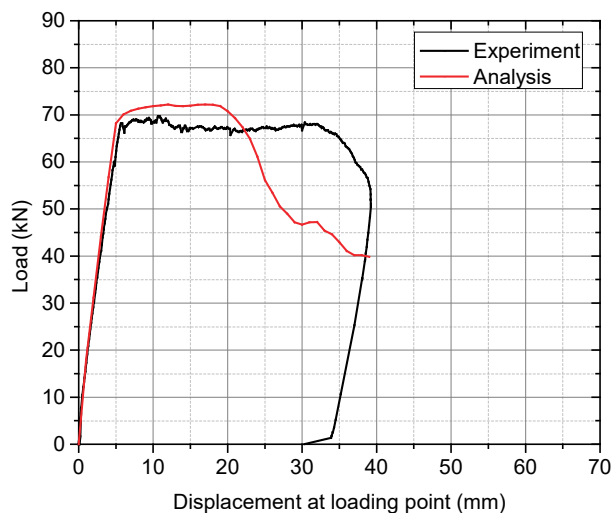
4.3 載荷曲線

実験および解析から得られた荷重-変位曲線を図-10 に、降伏荷重と終局荷重の値を表-4 に示す。荷重は2つのロードセル測定値の合計で、支持点での変位を載荷点での測定値から差し引いたものが相対変位である。

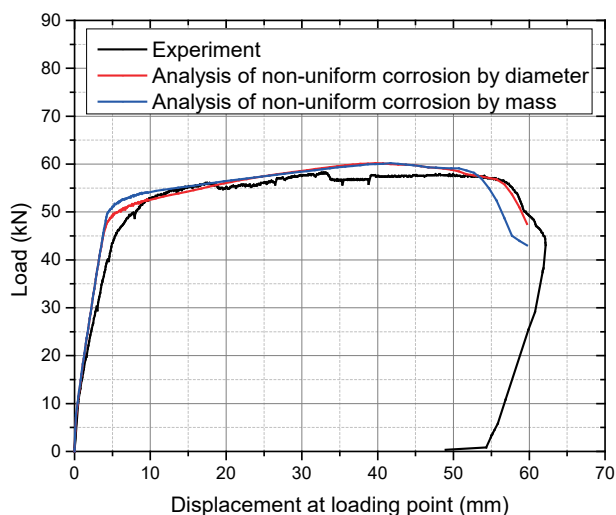
図-10 (a) は、試験体1、2、3の実験結果を示す。試験体1、2、3の降伏耐力はそれぞれ 67.0 kN、44.4 kN、56.0 kN であった。終局耐力はそれぞれ 69.7 kN、58.2 kN、65.5 kN であった。健全な試験体1より、試験体2と3の降伏耐力はそれぞれ約 34%と 16%減少し、終局耐力はそれぞれ約 16%と 6%減少した。曲げ試験の結果、腐食した RC 梁は健全な RC 梁と比較して、剛性、降伏耐力、および終局耐力が低下することが明らかになった。特に、全長腐食と片側スパン腐食の比較から、腐食範囲の拡大と腐食率の増加が、梁の曲げ性能をさらに低下させることが示された。載荷が小さい場合、3つの試験体の初期剛性は近似していた。しかし、載荷の増加に伴い、引張鉄筋の腐食により鉄筋とコンクリートの付着性能は低下したため、腐食した梁の剛性は健全な梁よりも大きく低下した。試験体2の剛性が試験体3より



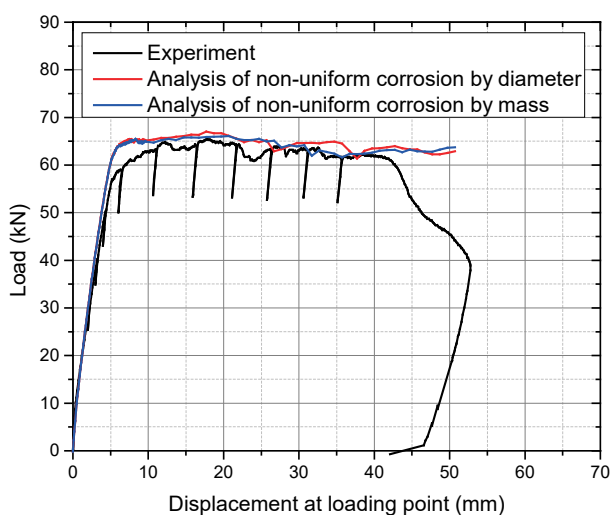
(a) 実験より得られた荷重-変位曲線



(b) 試験体 1、健全



(c) 試験体 2、全長腐食



(d) 試験体 3、片側スパン腐食

図-10 実験および解析から得られた荷重-変位曲線

表-4 実験と解析より得られた降伏耐力と最大耐力の比較

試験体	降伏耐力(kN)				最大耐力(kN)			
	実験値	解析値			実験値	解析値		
		健全	断面減少率	質量減少率		健全	断面減少率	質量減少率
1	67.0	68.2 (1.02)			69.7	72.2 (1.04)		
2	44.4		45.8 (1.03)	49.9 (1.12)	58.2		60.2 (1.03)	60.2 (1.03)
3	56.0		61.7 (1.10)	61.2 (1.09)	65.5		67.0 (1.02)	66.1 (1.01)

(): 解析値と実験値の比率。

も低かった理由は、試験体 2 の局所的な鉄筋の最大腐食率と平均腐食率が、特に中央スパンの位置で試験体 3 よりも著しく高かったためである。図-10 (b) は、試験体 1 の実験結果と解析結果の比較を示

す。剛性は良好に一致して、解析終局耐力と実験終局耐力の比は 1.04 であった。この比較により、解析モデルが健全な梁の性能を正確に予測できることが確認された。

試験体2および3の実験結果と解析結果の比較をそれぞれ図-10 (c)および図-10 (d)に示す。試験体2の場合、断面減少率によって測定された腐食分布を用いた解析降伏耐力は、質量減少率によって測定されたものよりもわずかに小さかった。理由は、鋼材の降伏は通常、腐食率が最大となる位置で発生し、断面減少率によって測定されたピーク腐食率が質量減少率によるものよりも大きかったことが考えられる。試験体3の場合、2つの測定方法による解析降伏耐力はほぼ同等だった。理由は、片側スパンに沿った腐食が降伏耐力に与える影響が限定的であったことが考えられる。試験体2および3において、2つの異なる方法で測定された腐食分布間の解析終局耐力はほぼ同等だった。試験体2および3の解析剛性は、実験結果と概ねに一致していた。

5. まとめ

本研究では、健全なRC梁1体と、全長腐食および片側スパン腐食という異なる範囲で不均一に腐食したRC梁2体を対象に曲げ試験を実施し、その挙動を再現する非線形三次元解析を行った。本研究から以下の知見が得られた。

(1) 鉄筋腐食は、鉄筋とコンクリートの付着性能を低下させ、鉄筋表面のリブ機能が低下したため、曲げひび割れの本数が減少する傾向が観察された。

(2) 鉄筋の腐食分布を断面減少率と質量減少率の2つの方法で測定した結果、断面減少率による腐食分布のピーク値は質量減少率によるものよりも顕著に大きかった。一方で、平均腐食率については、断面減少率による値が質量減少率による値よりも小さい傾向が確認された。

(3) 曲げ試験の結果、腐食したRC梁は健全なRC梁と比較して、剛性、降伏耐力、および終局耐力が低下することが明らかになった。特に、全長腐食と片側スパン腐食の比較から、腐食範囲の拡大と腐食率の増加が、梁の曲げ性能をさらに低下させることが示された。

(4) 鉄筋の不均一腐食を考慮した非線形三次元解析モデルを構築し、実験結果との比較を行った。解析モデルはRC梁の剛性、終局耐力、および破壊パターンを概ね良好に再現し、解析モデルの妥当性が検証された。今後、この解析モデルを活用することにより、鉄筋の腐食分布の違いが曲げ性能に及ぼす影響の系統的な評価が期待される。

<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) Mohammed, A.M.Y., A. Ahmed, and K. Maekawa: Comparative nonlinear behavior of corroded circular and square RC columns. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.24, pp. 2110-2119, 2020
- 16) Ahmed, A., A. Mohammed, and K. Maekawa: Effect of corrosion of steel reinforcing bars on the ductility of RC columns. in *Fifth international conference on the constructed environment*, 2014
- 17) X. Zhu, H. Abe, D. Hayashi, H. Tanaka: Behavioral characteristics of RC beams with non-uniform corrosion along the reinforcement, *J. Intelligent Construction*, Vol.1 (3), pp. 9180019, 2023
- 18) 土木学会：コンクリート標準示方書, 2022
- 19) 日本コンクリート工学会：JCI 規準集（1977-2002），pp. 91-94, 2004
- 20) Toongoenthong, K. and K. Maekawa, Multi-mechanical approach to structural performance assessment of corroded RC members in shear. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.3(1), pp. 107-122, 2005
- 21) Toongoenthong, K. and K. Maekawa, Simulation of coupled corrosive product formation, migration into crack and propagation in reinforced concrete sections. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.3(2), pp. 253-265, 2005
- 22) 田中 泰司, 山口 貴幸, 下村 匠：塩害劣化により鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート橋桁の耐荷試験と数値解析による評価, *土木学会論文集*, Vol.66, No.4, pp. 466-482, 2010