

正負交番载荷を受ける 劣化RC柱の塑性変形能評価に関する基礎的研究

川俣 永遠¹・石田 拓巳²・松崎 裕³・秋山 充良⁴

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1）

²早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1）

³正会員 博（工）防衛大学校准教授 システム工学群建設環境工学科
（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

⁴正会員 博（工）早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1）

1. はじめに

塩害環境にある鉄筋コンクリート（RC）部材は、飛来する塩化物イオンの浸透により鉄筋周りの不動態被膜が破壊されることで腐食が始まる。鉄筋腐食の生じた RC 部材は、腐食生成物の膨張に伴い、かぶりコンクリートに腐食ひび割れが発生し、さらには鉄筋断面積の減少による耐荷力および変形能の低下、付着の劣化に伴う剛性低下が生じる。この影響を定量化するため、劣化 RC 部材の载荷実験などが行われてきた^{例え}¹⁾。この研究の最も困難な点は、鉄筋腐食量は部材内で一様ではなく、部材位置により鉄筋腐食量が変動するため（以降、鉄筋腐食の空間変動性）、耐荷力や塑性変形能の評価に用いる鉄筋腐食の代表値（鉄筋腐食率の平均値や最大値等）を決めることが難しいところにある。近年は、劣化 RC はりの耐荷力に鉄筋腐食の空間変動性が及ぼす影響を実験と解析の両面から検討した報告²⁾も見られるようになったが、交番载荷を受ける劣化 RC 柱の塑性変形能については、著者らの知る限り、その空間変動性に着目した研究事例はほとんどない。

本稿では、この背景の下、電食により鉄筋腐食量とその空間変動性が相互に異なる 5 体の RC 柱を作製し、正負交番载荷実験により水平荷重－水平変位関係を得た。また、载荷実験後には RC 柱から軸方向鉄筋を取り出し、塑性ヒンジ部を中心にその腐食分布を詳細に測定した。そして、鉄筋腐食分布の空間変動性が劣化 RC 柱の塑性変形能に及ぼす影響を検討した。また、実験で得られた知見を基に、鉄筋腐食の空間変動性と破壊モードの違いを考慮した劣化 RC 柱の塑性変形能の評価手法を提案した。

2. 劣化 RC 柱の正負交番载荷実験の概要

(1) 供試体の概要

本研究で作製した RC 柱供試体の側面図と断面図、および軸方向鉄筋の名称を図-1 に示す。本研究では、すべての RC 柱は同じ断面・構造諸元を有しており、鉄筋腐食量とその空間変動性のみが異なる 5 体の RC 柱供試体（CY_16_1，CY_16_2，CY_16_3，CY_16_4，CY_16_5（以降、CY16 シリーズ））を作製した。なお、本研究では载荷実験の際に、剛な鋼製治具を使用して供試体と反力床を一体化しているため、フーチングの寸法は通常のものに比べて相対的に小さくなっている。鋼製治具上面（柱下端）か

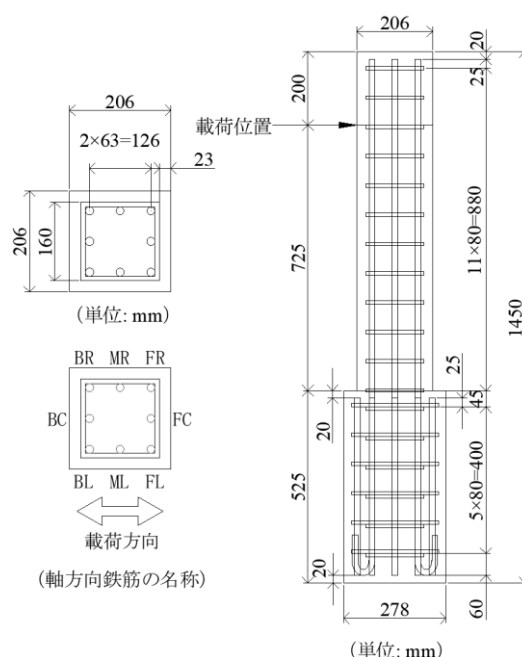


図-1 供試体の側面図，断面図および軸方向鉄筋の名称

表-1 コンクリートおよび鉄筋の特性値

コンクリート		鉄筋		
供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
CY_16_1	48.3	軸方向 鉄筋	383	554
CY_16_2	50.2			
CY_16_3	51.6			
CY_16_4	44.0	帯鉄筋	370	585
CY_16_5	55.5			

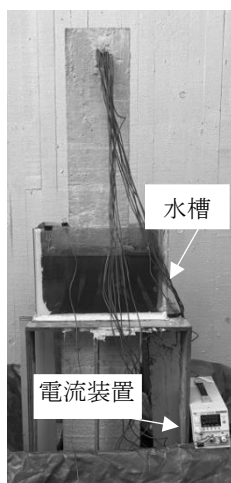


写真-1 電食試験の様子

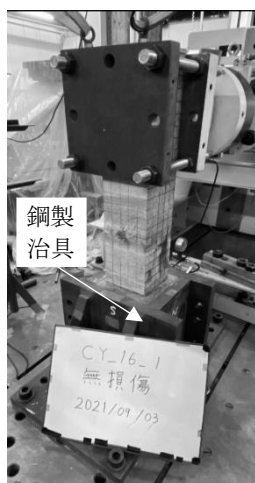


写真-2 載荷試験の様子

ら載荷位置までのスパンは 725mm である。軸方向鉄筋には SD345-D16 を、帯鉄筋には SD345-D10 を用いた。また、曲げ破壊が先行するように帯鉄筋を 80mm 間隔（面積比 0.87%）で配置した。表-1 に、各供試体のコンクリートの圧縮強度（正負交番載荷実験日に実施）、および鉄筋の材料特性を示す。

(2) 電食試験概要

写真-1 に電食試験の様子を示す。CY シリーズの腐食範囲は塑性ヒンジ区間（柱基部から 210 mm と仮定）とした。電食方法は、塑性ヒンジ区間を囲むように水槽を設置し、塑性ヒンジの高さまで濃度 3% の塩化ナトリウム水溶液を入れ、軸方向鉄筋 8 本を並列につないだ上で、電流密度 1000 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を与えた。更に、各供試体の目標腐食率はそれぞれ 10%（CY_16_1・CY_16_2）、20%（CY_16_3、CY_16_4）、30%（CY_16_5）とした。ここで、目標腐食率とは柱供試体の塑性ヒンジ内の軸方向鉄筋の腐食率の目標値である。本研究では、軸方向鉄筋の腐食の影響のみを検討するために、帯鉄筋をビニルテープで被覆し、電食が生じないようにした。

(3) 正負交番載荷実験

載荷時の様子を写真-2 に示す。正負交番載荷実験

では軸力を与えていない。載荷は、まず、曲げひび割れが発生するまで載荷を行い、その後、降伏変位 δ_y を基本とし、変位制御にて水平変位が δ_y の整数倍に達した際に荷重を反転させている。各載荷の繰り返し数は 1 回である。なお、 δ_y は、電食実験では軸方向鉄筋にひずみゲージを貼付することができないため、各供試体の目標腐食率に応じて軸方向鉄筋の断面積を減少させた上で RC 柱の曲げ変形と軸方向鉄筋のフーチングからの抜け出しによる回転変位を算出し、その和を降伏変位 δ_y として用いた。

測定項目は、水平荷重および水平変位のほか、鉛直方向の変位の変化と耐震性能の関係を考察するため、レーザー変位計を用いて鉛直変位の測定も行った。また載荷実験は、押し側と引き側の両側で水平荷重が最大水平荷重の 80% まで低下し、さらにかぶりコンクリートの剥落と軸方向鉄筋の露出が観察されるまで行った。ただし、CY_16_1 は、押し側の水平荷重が最大水平荷重の 80% まで低下したことを確認して載荷を終了した。

(4) 軸方向鉄筋の腐食分布の測定

軸方向鉄筋の腐食状況を確認するために、載荷実験後に鉄筋を供試体からはりだした。そして腐食生成物を取り除いた後、腐食分布を得るためにノギスによる計測を行った。計測箇所は、鉄筋の節と節の間（10mm 間隔）の腐食が最も激しい部分の鉄筋径と、その直交方向の径を計測し、その平均値を直径とする真円の断面積を算出しており、それと健全時の断面積を比較することで腐食率分布を得た。また、得られた腐食率分布から、柱基部から塑性ヒンジ区間の 210mm までを対象として全ての鉄筋の平均腐食率と最大腐食率を算出した。

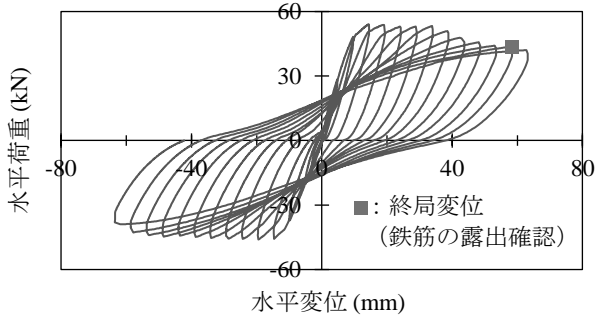
3. 実験結果と考察

(1) 劣化 RC 柱で生じる 2 つの破壊モード

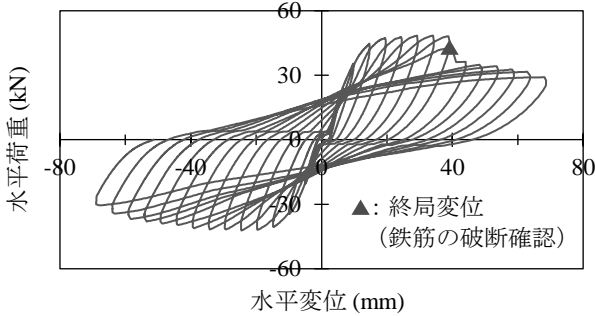
本実験では、塑性変形能を評価する際の終局点は、載荷面のいずれかの面のかぶりコンクリートが剥落し、最大水平荷重に対する荷重の低下が明確となる、軸方向鉄筋が露出した際の載荷段階とした。以降、この破壊モードを座屈と呼ぶ。一方、本実験では、軸方向鉄筋の座屈が生じる前にその破断が生じた供試体もあった。この場合には、軸方向鉄筋の破断による水平荷重の低下を確認した時点までに与えた最大変位を終局変位とした。以降、この破壊モードを破断と呼ぶ。

表-2 実験結果

供試体名	平均腐食率 (%)	最大腐食率 (%)	終局変位 (mm)	破壊モード
CY_16_1	7.8	21.3	56.0	座屈
CY_16_2	9.4	27.7	58.8	座屈
CY_16_3	17.5	91.2	17.1	破断
CY_16_4	17.9	48.1	41.6	破断
CY_16_5	22.3	74.7	39.9	破断



(a) CY_16_1



(b) CY_16_4

図-2 水平荷重-水平変位関係

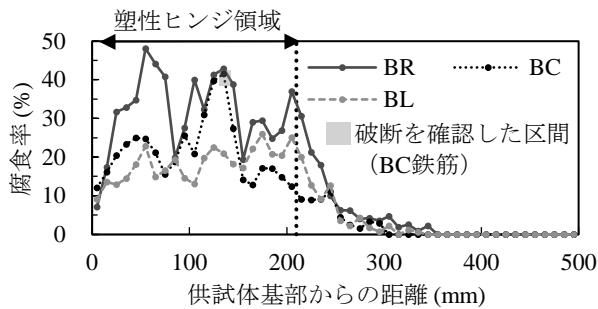


図-3 軸方向鉄筋の腐食分布 (CY_16_4)

(2) 実験結果とその考察

水平荷重-水平変位関係の一例として、供試体 CY_16_1 (破壊モード: 座屈) と CY_16_4 (破壊モード: 破断) の結果を図-2 に示す。また、得られた平均腐食率、最大腐食率、終局変位および破壊モードを表-2 にまとめて示す。

表-2 から、鉄筋の腐食率が増加するにつれて破壊モードが軸方向鉄筋の座屈から破断に変化することを確認できる。軸方向鉄筋の座屈は、圧縮側の鉄筋で生じる破壊形態であるのに対して、軸方向鉄筋の

↑: 破壊が生じる载荷方向における最大鉛直変位

□: P_{max} = 最大水平荷重 ■: $0.9P_{max}$

☆: 軸方向鉄筋座屈 ○: かぶりコンクリート剥落

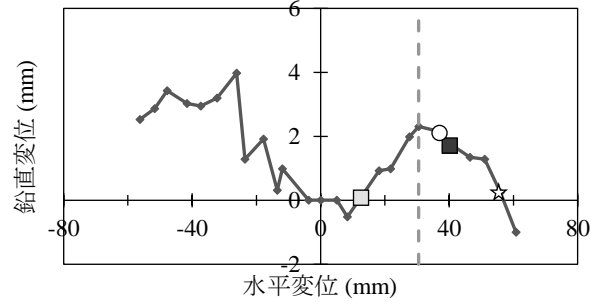


図-4 CY_16_1 の鉛直変位-水平変位関係

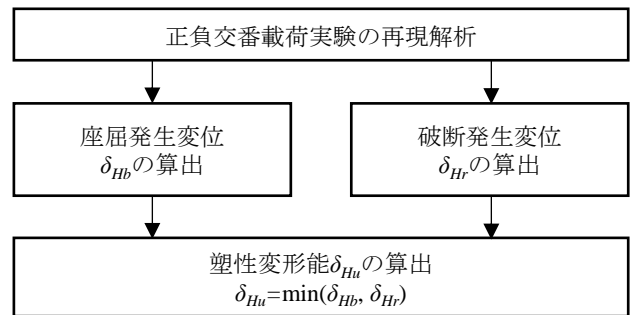


図-5 塑性変形能評価手法のフロー

破断は引張側の鉄筋で生じる。

表-2 において、破壊モードが軸方向鉄筋の破断であった供試体に着目してみると、最大腐食率が増えると塑性変形能は低下している。一方、破断が生じた CY_16_4 において、破断時に引張側に位置した 3 本の鉄筋の腐食分布に示されるように (図-3), 破断を生じた鉄筋と最大腐食率を生じた鉄筋は異なっている。つまり、平均腐食率や最大腐食率などの単一の指標のみでは破壊モード (座屈・破断) を判定することは困難であり、塑性変形能の評価では別のアプローチが要る。

図-4 に CY_16_1 の鉛直変位-水平変位関係を示す。図-4 に示されるように、破壊モードが座屈となる RC 柱では、最大の鉛直変位 (最も柱長さが長くなる時の変位) は、最大水平荷重 P_{max} と $0.9P_{max}$ に低下するまでの間に発生し、コンクリートの剥落や座屈により、鉛直変位は小さく (柱が圧縮される) なる。この点を踏まえた劣化 RC 柱の塑性変形能評価法を次節で提案する。

4. 塑性変形能評価手法

(1) 概要

図-5 に提案する塑性変形能の評価フローを示す。鉄筋腐食の空間変動性を反映した有限要素モデルを用いて正負交番载荷実験の再現解析を行う。そして、

表-3 解析結果

実験供試体名	CY_16_1	CY_16_2	CY_16_3	CY_16_4	CY_16_5	CY0 ⁴⁾	CY1 ⁴⁾	CY2 ⁴⁾	P5 ⁵⁾
平均腐食率 (%)	7.8	9.4	17.5	17.9	22.3	0	4.7	9.7	0
塑性変形能 (mm)	50.3	46	23.5	54	39.2	50.3	50.6	53.8	106.1
破壊モード	座屈	座屈	破断	破断	破断	座屈	座屈	座屈	座屈

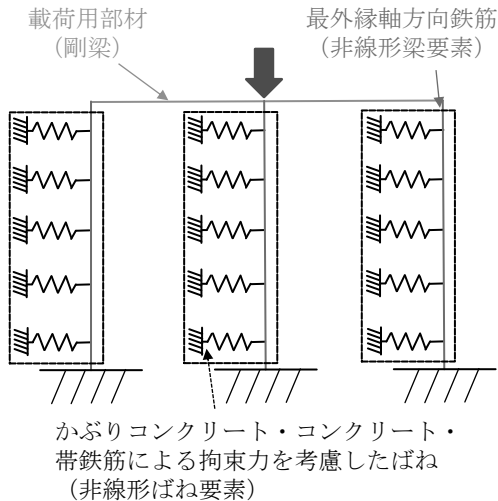


図-6 座屈解析を行う際の有限要素モデルの例

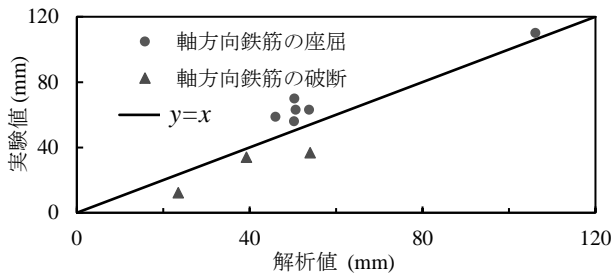


図-7 塑性変形能の実験値と解析値の比較

軸方向変位に着目して算定される座屈発生変位 δ_{HB} と、引張を受ける軸方向鉄筋の応力に着目して算定される破断発生変位 δ_{Hr} を比較し、小さい方の変位を対象とする劣化 RC 柱の塑性変形能 δ_{Hu} とする。

(2) 座屈および破断解析

破壊モードが軸方向鉄筋の座屈の場合には、図-6 に示す堺ら³⁾の座屈解析によって求まる座屈発生時の鉛直変位と、正負交番载荷を受ける RC 柱の有限要素解析から得られた鉛直変位の比較に基づき座屈発生点を同定した。

破壊モードが軸方向鉄筋の破断の場合、有限要素解析より得られた最外縁軸方向鉄筋の引張応力が引張強度に達した際を破断発生点とした。

(3) 解析結果

以上の手法を用いて、本実験および過去に行われた4体の RC 柱^{4),5)}を用いて塑性変形能評価を行った結果を表-3、および図-7 に示す。解析値と実験値の

比の平均値は 1.03 となり、変動係数は 26.5%であった。今後、より多くの実験供試体を用いた検証が必要であるが、鉄筋腐食量の大きさに関わらず破壊モードを正しく判定でき、また、実験値と良く対応する塑性変形能を評価することができた。

5. まとめ

劣化 RC 柱の正負交番载荷実験を実施し、鉄筋腐食の空間変動性（1本の鉄筋内に生じる鉄筋腐食量の大小、あるいは、同じ断面内にある鉄筋同士の腐食量の相関性）の影響を受けながら、軸方向鉄筋の座屈、あるいは破断が生じることで柱は終局を迎えることを確認した。そして、非線形有限要素解析から得られる柱の軸方向変位の変化、および引張を受ける軸方向鉄筋応力に着目することで破壊モードの判定は可能であり、劣化 RC 柱の塑性変形能を概ね評価できることを示した。

今後、より多くの実験結果を取得し、適宜、解析モデルの改良を図りたい。

参考文献

- 1) 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘, 中村晃史, 伊藤始: 繰り返し荷重を受ける RC はり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.
- 2) Zhang, M., Nishiya, N., Akiyama, M., Lim, S. and Masuda, K.: 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, 120678, 2020.
- 3) 堺淳一, 星隈順一: 軸方向鉄筋のはらみ出し現象に着目した鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長の評価, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp.782-795, 2014.
- 4) 石田拓巳, 増田啓佑, 徐哲俊, 王彦文, 秋山充良: 軸方向鉄筋間の腐食分布の相関性が劣化 RC 柱の塑性変形能に及ぼす影響に関する実験的研究, 第23回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.239-246, 2021.
- 5) 星隈順一, 運上茂樹, 川島一彦, 長屋和宏: 载荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.877-888, 1998.