

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

石田 拓巳¹・増田 啓佑¹・徐 哲俊²・王 彦文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早稲田大学 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)

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、構造物が置かれる位置と海岸線からの距離、あるいはかぶりや水セメント比の大きさなどにより鉄筋腐食が発生することがある。鉄筋腐食の生じた RC 部材は、腐食の無い場合に比べ、耐力および変形能がともに低下し、あわせて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 部材の荷重実験が行われている^{例え1),2)}。鉄筋腐食量と構造性能の低下量とを関係づける際、過去には、塑性ヒンジ領域や純曲げ区間内の平均や最大腐食率が用いられてきた。しかしながら、RC 部材内に生じる鉄筋腐食は一様ではなく、位置によって異なる、すなわち空間的に変動する特性（以下、空間変動性）を有している。鉄筋腐食の空間変動性が RC 部材の耐力に及ぼす影響の評価に関する知見の蓄積は十分ではなく^{3),4)}、特に RC 柱の塑性変形能と鉄筋腐食分布の関係の整理は、著者らの知る限り既存研究において全く行われていない。

本稿では、この背景のもと、電食により鉄筋腐食量とその空間変動性が異なる 2 体の RC 柱、および腐食のない RC 柱の計 3 体の供試体を製作し、正負交番荷重実験により水平荷重-水平変位関係を得た。また、実験後には、腐食を生じさせた 2 体の RC 柱から軸方向鉄筋を取り出し、その腐食分布を詳細に測定した。そして、塑性ヒンジ内の軸方向鉄筋の平均腐食量、あるいは、軸方向鉄筋間の腐食分布の相関性と RC 柱の塑性変形能の関係などについて得られた実験的な知見を本稿では報告する。

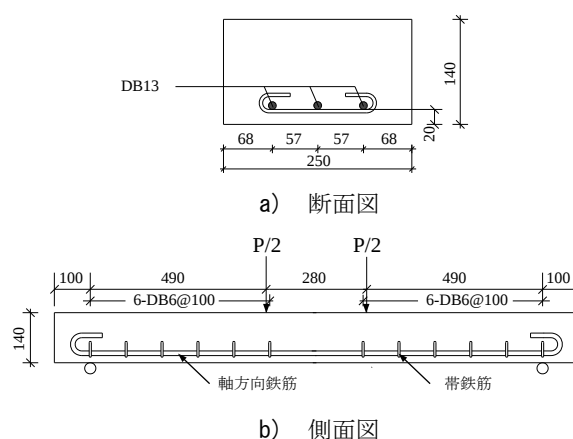


図-1 RC はり供試体の概要 (単位: mm)

2. 劣化RC部材内の軸方向鉄筋腐食分布の相関性に着目した既往の研究

(1) 概説

Zhang et al.⁴⁾は軸方向鉄筋が腐食した RC はり供試体を用いて、軸方向鉄筋間の腐食分布の相関性が構造性能に及ぼす影響を検討している。本研究は、Zhang et al.⁴⁾が行った RC はりの検討を正負交番荷重を受ける RC 柱を対象に実施するものである。そこで、軸方向鉄筋間の腐食分布の相関性の表現など、Zhang et al.⁴⁾が着目した腐食分布の統計量と主な実験結果をここに紹介する。

Zhang et al.⁴⁾が用いた RC はり供試体の形状と寸法を図-1 に示す。供試体の諸元は、幅×高さ×全長 = 250 mm×140 mm×1460 mm であり、軸方向鉄筋の腐食量をパラメータとした 6 体の供試体が製作されている。各供試体の目標腐食量は、10 % (B10-1・

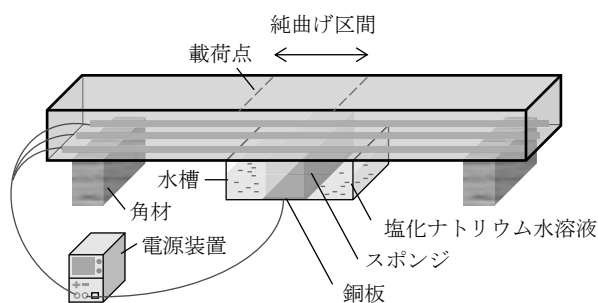


図-2 電食試験の概要

表-1 純曲げ区間における腐食分布の統計量

供試体	$MA_{loss,G}$ (%)	$Am_{loss,maxG}$ (%)	γ_{LC}	γ_{CR}	γ_{LR}	γ_{ave}
B10-1	10.2	20.7	0.75	0.50	0.34	0.53
B10-2	11.3	24.8	0.80	0.86	0.86	0.84
B20-1	24.8	53.6	0.79	0.92	0.76	0.82
B20-2	23.0	33.5	0.32	0.80	0.16	0.43
B30-1	28.4	52.0	0.66	0.68	0.31	0.55
B30-2	28.0	67.9	0.77	0.91	0.85	0.85

B10-2 供試体) , 20 % (B20-1・B20-2 供試体) , および 30 % (B30-1・B30-2 供試体) である。

(2) 電食試験概要

電食試験の概要を図-2 に示す。電食の際は、電解質溶液として濃度 3 % の塩化ナトリウム水溶液を用いている。また、電源装置のプラス端子に軸方向鉄筋を、マイナス端子に銅板を導線でつないで直流電流を流しながら目標とする鉄筋腐食量に到達するまで電食を継続している。なお、陰極となる銅板上にスポンジを設置し、RC は供試体下面に接触させることにより、鉄筋腐食の範囲が純曲げ区間となるように工夫されている。

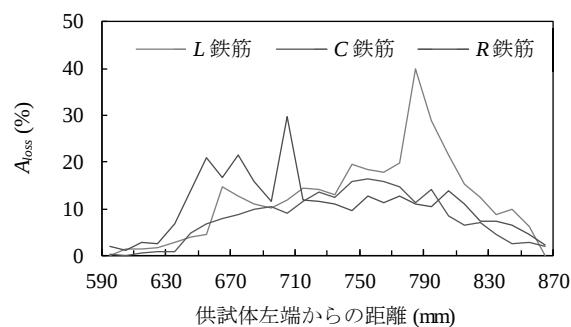
(3) 曲げ載荷実験概要

電食試験後、曲げ載荷実験が行われている。載荷方法は、支点間距離 1260 mm、純曲げ区間 280 mm、せん断スパン 490 mm とした、変位制御による 4 点曲げ単調載荷である。

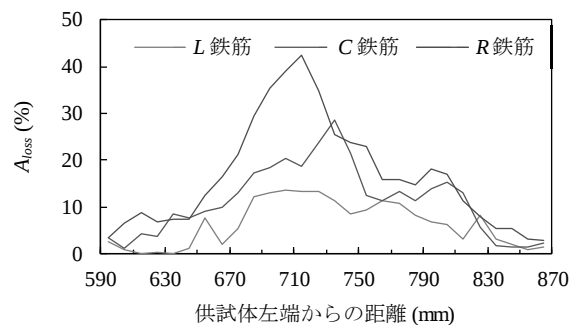
(4) 鉄筋腐食量の測定

曲げ載荷実験後、軸方向鉄筋をはつり出し、10 mm 間隔でノギス計測が行われている。腐食が最も激しい部分の鉄筋径とその直角方向の径の平均値を直径とする真円を腐食後の断面積と仮定し、以下の式を用いて断面減少率 A_{loss} が算出されている⁵⁾。

$$A_{loss} = \left\{ 1 - \frac{(d_a + d_b)^2}{4d_0^2} \right\} \times 100 \quad (1)$$



a) B10-1 供試体



b) B10-2 供試体

図-3 純曲げ区間における軸方向鉄筋の腐食分布

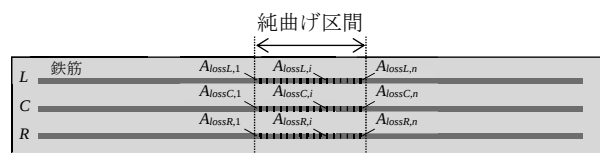


図-4 軸方向鉄筋の各名称

ここで、 d_a と d_b はそれぞれ腐食が最も激しい部分とその直角方向の鉄筋径 (実測値)、 d_0 は健全時の鉄筋径である。

表-1 に各供試体の純曲げ区間内の断面減少率 A_{loss} の分布 (腐食分布) の統計量を、図-3 に B10-1 および B10-2 供試体の純曲げ区間内の軸方向鉄筋の腐食分布を示す。図中の $L \cdot C \cdot R$ 鉄筋とは、図-4 に示される各軸方向鉄筋の名称である。また、表-1 において、 $MA_{loss,G}$ は 3 本の軸方向鉄筋の断面減少率 A_{loss} の平均値、 $Am_{loss,maxG}$ は各断面位置において 3 本の軸方向鉄筋の断面減少率 A_{loss} の平均値 $Am_{loss,i}$ の中の最大値、 γ_{LC} 、 γ_{CR} 、および γ_{LR} はそれぞれ純曲げ区間における $L \cdot C$ 鉄筋間、 $C \cdot R$ 鉄筋間、および $L \cdot R$ 鉄筋間の相関係数である。また、 γ_{ave} は、 γ_{LC} 、 γ_{CR} 、および γ_{LR} の平均値を表しており、各諸量は以下の式により算出されている⁴⁾。ただし、相関係数に関しては、例として γ_{LC} について求める式を示す。

$$MA_{loss,G} = \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n (A_{lossL,i} + A_{lossC,i} + A_{lossR,i}) \quad (2)$$

$$Am_{loss,i} = \frac{1}{3} (A_{lossL,i} + A_{lossC,i} + A_{lossR,i}) \quad (i=1, \dots, n) \quad (3)$$

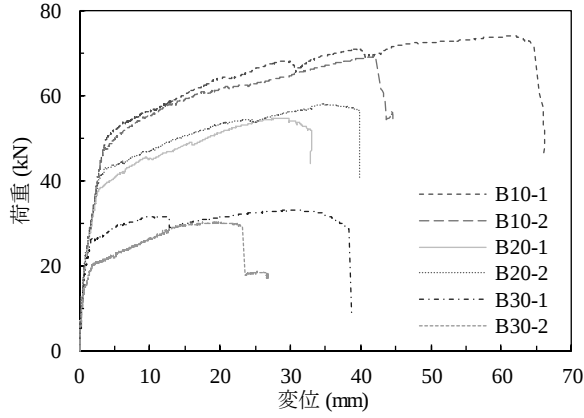
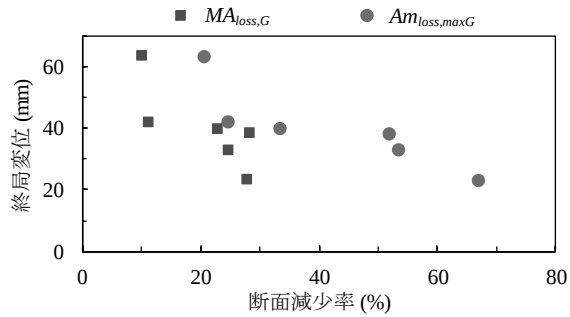
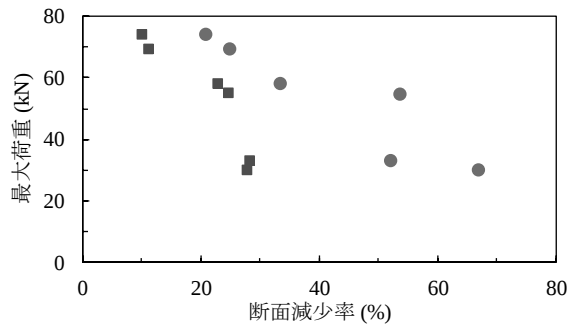


図-5 荷重－変位関係



a) 終局変位



b) 最大荷重

図-6 軸方向鉄筋の断面減少率と各構造性能の関係

$$Am_{loss,maxG} = \max(Am_{loss,i}) \quad (i=1, \dots, n) \quad (4)$$

$$\gamma_{LC} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{lossL,i} - MA_{lossL})(A_{lossC,i} - MA_{lossC})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_{lossL,i} - MA_{lossL})^2 \sum_{i=1}^n (A_{lossC,i} - MA_{lossC})^2}} \quad (5)$$

$$\gamma_{ave} = \frac{1}{3}(\gamma_{RC} + \gamma_{LC} + \gamma_{RL}) \quad (6)$$

ここで、 n は 1 本の軸方向鉄筋の純曲げ区間における A_{loss} の測定数、 $A_{lossL,i}$ 、 $A_{lossC,i}$ 、および $A_{lossR,i}$ は各軸方向鉄筋の i 番目の断面減少率 (図-4 参照)、 MA_{lossL} と MA_{lossC} はそれぞれ L 鉄筋と C 鉄筋の純曲げ区間における断面減少率 A_{loss} の平均値である。

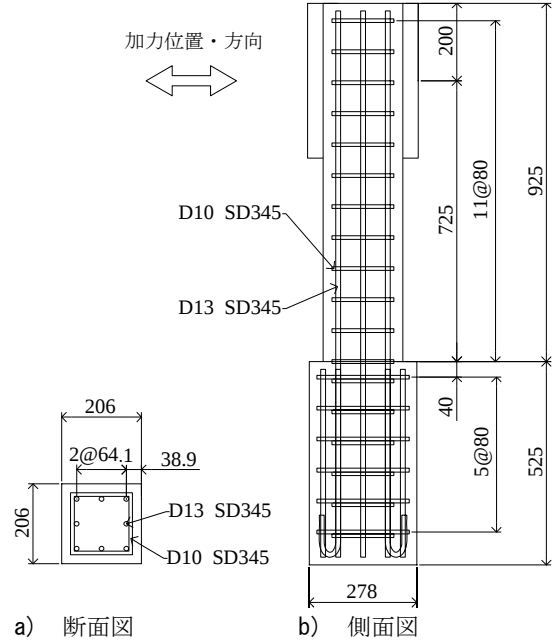


図-7 RC 柱供試体の概要 (単位: mm)

(5) 実験結果

図-5 に各供試体の荷重－変位 (スパン中央位置で測定) 関係を、図-6 に $MA_{loss,G}$ 、および $Am_{loss,maxG}$ と終局変位および最大荷重の関係をそれぞれ示す。図-6 より、軸方向鉄筋の断面減少率が増加すると、RC はりの最大荷重、および終局変位は減少する傾向がみられる。しかし、この傾向には大きなばらつきがあり、 $MA_{loss,G}$ や $Am_{loss,maxG}$ などの単一指標のみで腐食 RC はりの構造性能を評価することの困難さを Zhang et al.⁴⁾ は指摘している。

Zhang et al.⁴⁾ は、表-1 および図-5 に示す結果から、B10-1、B20-2、B30-1 供試体に比べ、より軸方向鉄筋間の腐食分布の相関が強い B10-2、B20-1、B30-2 供試体の方が構造性能がより低下していることに着目した。例えば、B10-1 および B10-2 供試体の腐食分布に着目すると、軸方向鉄筋間の腐食分布の相関が強い B10-2 供試体では、図-3b に示すように、純曲げ区間の中央部分で 3 本の鉄筋が同時に大きな A_{loss} の値を持っている。一方で、軸方向鉄筋間の腐食分布の相関が弱い B10-1 供試体では、図-3a に示すように、3 本の鉄筋が別々の位置で局所的に大きな値を取っている。このように、軸方向鉄筋間の腐食分布の相関が強い B10-2 供試体は、同じ断面位置で 3 つの鉄筋が同時に大きな腐食量を持つことになるため、平均腐食量は両供試体で同程度であるにも関わらず、B10-1 供試体よりも構造性能が低下したと Zhang et al.⁴⁾ は指摘している。

本実験では、正負交番载荷を受ける劣化 RC 柱の耐震性能について、Zhang et al.⁴⁾ の研究を参考にして、

表-2 コンクリート・鉄筋の材料特性（単位：N/mm²）

柱No.	コンクリート		鉄筋		
	圧縮強度	ヤング率	種類	降伏強度	引張強度
CY0	31.4	2.5×10^4	軸方向鉄筋	416	562
CY1	45.1	2.8×10^4			
CY2	47.5	2.7×10^4	帯鉄筋	371	568

特に塑性ヒンジ内の軸方向鉄筋の腐食分布の相関性に着目し、その強弱が塑性変形能の大小などに及ぼす影響について考察する。

3. 劣化 RC 柱の正負交番載荷実験の概要

(1) 試験体の寸法・概要

図-7 に供試体の概要を示す。供試体数は 3 体であり、同じ構造諸元および配筋を有しており、使用材料も同じである。柱断面は 206 mm×206 mm の正方形、フーチング（供試体下端から 525 mm までの領域）の寸法は 278 mm×278 mm×525 mm である。本実験では、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当に小さくなっている。軸方向鉄筋には SD345-D13 を、帯鉄筋には SD345-D10 を用いた。また、せん断破壊を防ぐために帯鉄筋を 80 mm 間隔（帯鉄筋比 0.87 %）で配置した。

供試体は、腐食させていない柱供試体（CY0）と電食により軸方向鉄筋を腐食させた 2 体の柱供試体（CY1 および CY2）である。表-2 に、各供試体のコンクリート（材料試験は、正負交番載荷実験日に実施）、および鉄筋の材料特性をまとめて示す。

(2) 電食試験概要

写真-1 に電食試験の様子を示す。CY1 および CY2 供試体の腐食範囲は塑性ヒンジ区間（柱基部から 150 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。

電食期間を変化させることで、CY2 供試体の塑性ヒンジ内の軸方向鉄筋腐食量の平均値が CY1 供試体の 2 倍程度となるように調整した。また、帯鉄筋は、その腐食を防ぐためにビニルテープで保護した。

(3) 正負交番載荷実験

載荷時の様子を写真-2 に示す。正負交番載荷時に



写真-1 電食試験の様子



写真-2 載荷実験の様子

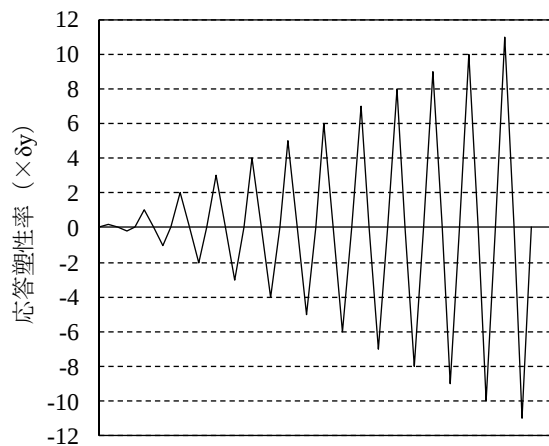


図-8 載荷履歴

は軸力は与えておらず、鋼製治具上面（柱下端）から載荷位置までのスパンは 725 mm である。

載荷履歴を図-8 に示す。まず、曲げひび割れが発生するまで載荷を行い、その後は降伏変位 δ_y を基本とし、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。 δ_y は、CY0 供試体の柱基部に位置する軸方向鉄筋に貼付したひずみゲージの何れかの値が降伏ひずみに達したときの水平変位であり、6.78 mm と同定された。CY1 および CY2 供試体は電食試験を施すため、軸方向鉄筋にひずみゲージを貼付できないことから、両供試体の正負交番載荷実験でも CY0 供試体から得られた δ_y を用いて載荷を制御した。

また、本実験では、載荷の進展に伴い、かぶりコンクリートの剥離を最初に確認した点を終局状態とした⁶⁾。RC 柱の正負交番載荷実験では、軸方向鉄筋の座屈に伴うかぶりコンクリートの剥離により、

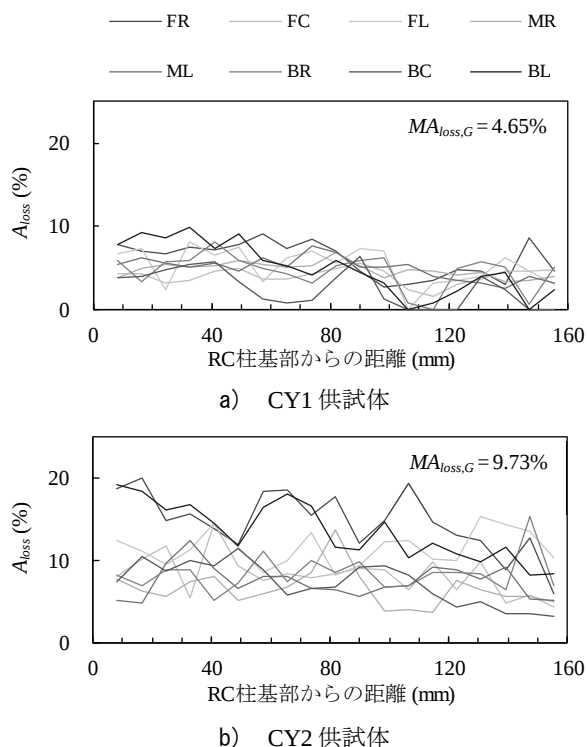


図-9 塑性ヒンジ部における軸方向鉄筋の腐食分布

水平荷重の低下が顕著になり、多くの耐震基準において修復、あるいは終局の限界状態として用いられているからである。ただし、CY0 供試体に関しては、終局に至った 10 δ_y で荷重を終えたが、CY1 および CY2 供試体に関しては、軸方向鉄筋の座屈後の挙動を観察するために、終局変位に達した後も荷重ジャッキのストロークの限界変位まで実験を続けている。

なお、CY2 供試体では、-2 δ_y からの除荷後、+3 δ_y に向かい荷重しなければならないところ、誤って-3 δ_y に向かい荷重している。このため、CY2 供試体のみ、3 δ_y 付近での荷重方法が他の供試体と異なるが、最大荷重や終局変位に及ぼす影響は限定的なものであると考えている。

(4) 軸方向鉄筋腐食分布の測定

CY1 および CY2 供試体は、鉄筋の腐食状況を確認するために、荷重実験後に軸方向鉄筋を供試体からはりだした。そして、10 %のクエン酸水素二アンモニウム水溶液への浸せきを行い、腐食生成物を取り除いた後、腐食分布を得るためにノギス計測を行った。なお、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価法」⁷⁾では、水溶液の温度を 60℃に規定しているが、本研究では常温のものを使用している。計測箇所は、軸方向鉄筋における節と節の間とし、式(1)を用いて断面減少率 A_{loss} を算出した。

塑性ヒンジ部を含む RC 柱下端の各軸方向鉄筋の

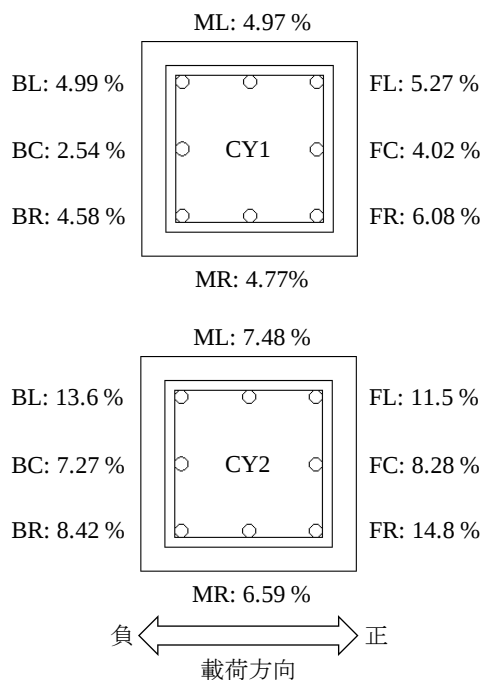


図-10 各軸方向鉄筋の MA_{loss}

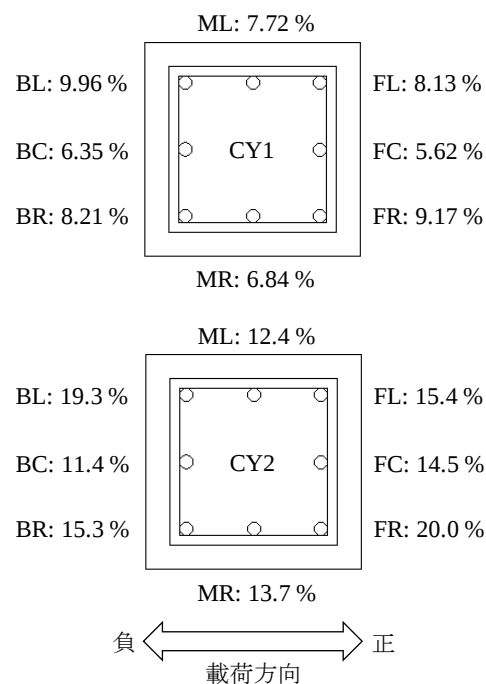


図-11 各軸方向鉄筋の $A_{loss,max}$

腐食分布を図-9に示す。また、この腐食分布から求められる各軸方向鉄筋の断面減少率 A_{loss} の平均値 MA_{loss} を図-10に、およびその最大値 $A_{loss,max}$ を図-11にそれぞれ示す。なお、図-9の凡例にあるFRやBCなどは、各軸方向鉄筋の名称であり、図-10や図-11に示されるFRやBCと対応している。全軸方向鉄筋の断面減少率 A_{loss} の平均値 $MA_{loss,G}$ を式(2)に基づいて算出すると、CY1 供試体では 4.65 %、CY2 供試体

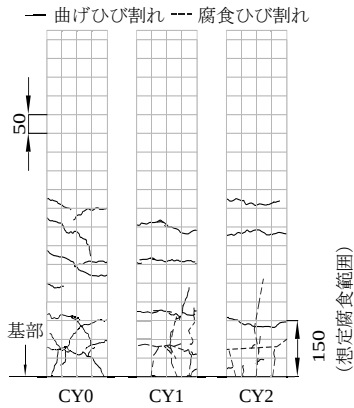
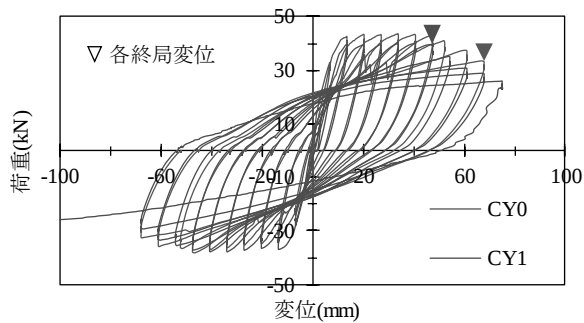
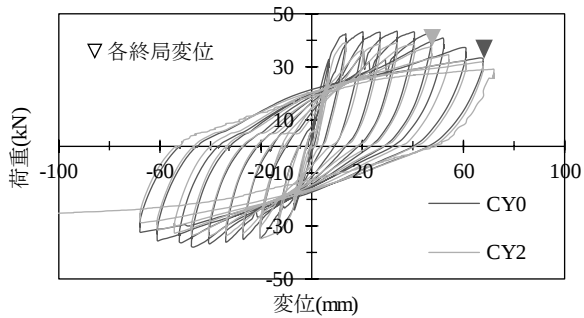


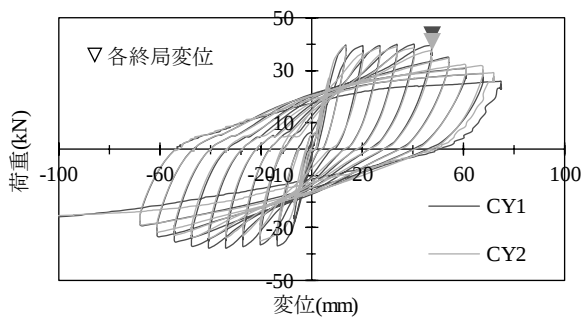
図-12 5δy 載荷後の載荷面のひび割れ発生状況



a) CY0 および CY1



b) CY0 および CY2



c) CY1 および CY2

図-13 水平荷重—水平変位関係の比較

では 9.73 %であった。また、全軸方向鉄筋の断面減少率 A_{loss} の最大値 $Am_{loss,maxG}$ を式(4)に基づいて算出すると、CY1 供試体では 6.32 %、CY2 供試体では 11.2 %であった。

表-3 正負交番載荷実験の一覧

供試体名	CY0		CY1		CY2	
	正	負	正	負	正	負
最大荷重 (kN)	42.9	-37.9	39.5	-37.1	38.6	-33.4
終局変位 (mm)	67.9	-68.0	47.5	-47.6	47.5	-47.6

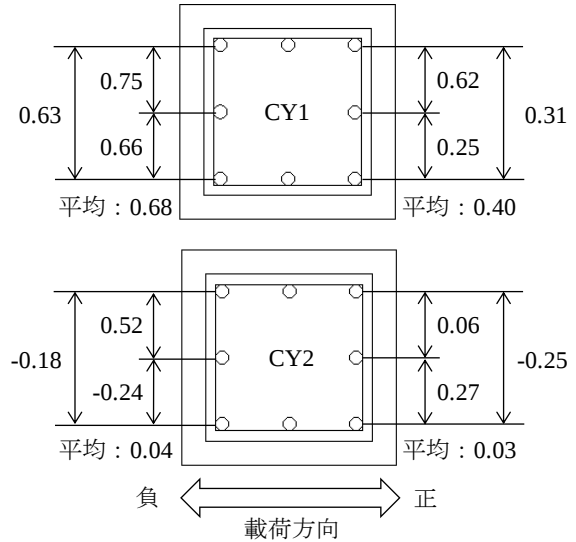


図-14 軸方向鉄筋間の腐食分布の相関係数

4. 実験結果と考察

(1) 破壊性状

図-12 に、各供試体の 5δy 載荷終了時におけるひび割れ状況を示す。図中の破線は、電食試験により生じた腐食ひび割れであり、荷重載荷に伴い発生したひび割れと区別している。CY1 供試体では、正負交番載荷に伴い、腐食ひび割れ位置からのひび割れの進展が確認されたが、CY2 供試体では、腐食ひび割れはそのままに、別の位置において載荷に伴うひび割れが進展した。ひび割れ本数は、腐食の無い CY0 供試体では、2δy、5δy、そして 8δy の載荷時に急激に増加したのに対して、CY1 および CY2 供試体ではほぼ一定の割合で増加した。また、既往の研究で指摘されているように⁸⁾、鉄筋腐食量の増加による付着の劣化により、ひび割れの分散性の低下が観察された(図-12)。

本実験では、各供試体に十分な帯鉄筋量を与えたことから、せん断損傷は進展せず、各供試体の柱基部に塑性ヒンジの形成が確認された。外観的な損傷状況の観察から、塑性ヒンジ長さは何れの供試体においても約 150 mm であると推察された。かぶりコンクリートの剥離は、CY0 供試体では 10δy、CY1 および CY2 供試体では 7δy で観察された。かぶりコンクリートの剥落は、CY0 供試体では 10δy、CY1 および CY2 供試体では 8δy で確認された。なお、本実験

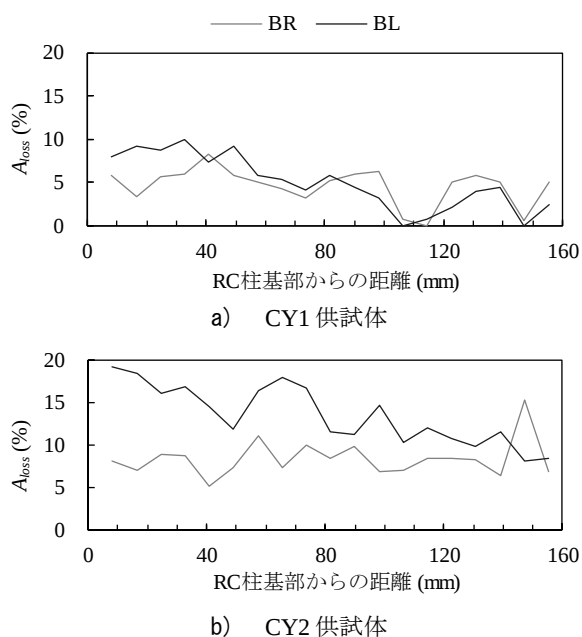


図-15 BR・BL鉄筋の腐食分布の比較

では、いずれの供試体においても軸方向鉄筋の破断は生じなかった。

(2) 水平荷重－水平変位関係

図-13に各供試体の水平荷重－水平変位関係を、表-3に各供試体の最大荷重および終局変位をまとめて示す。CY0供試体に比べてCY1供試体では、最大荷重が8%，変形能が30％程度減少し、CY2供試体では、最大荷重が10%，変形能が30％程度減少している。軸方向鉄筋の腐食の有無による耐震性能の差が確認される。一方で、CY1供試体とCY2供試体を比較すると、CY2供試体の $MA_{loss,G}$ 、および $Am_{loss,maxG}$ はCY1供試体よりも2倍程度大きいものの、最大荷重や終局変位には明確な差がみられない。既往の研究⁶⁾では、塑性ヒンジ領域内にある鉄筋の平均腐食量により塑性ヒンジ解析に用いるパラメータを表現しており、このような解析モデルでは、鉄筋腐食量が倍半分異なるにもかかわらず、同程度の最大荷重や終局変位となった本実験結果の再現はできないことになる。これは、2章において指摘した、軸方向鉄筋の腐食分布の相関性、つまり腐食の空間変動性の影響を考慮する必要性を示唆している。

側方鉄筋を除く、最外縁に位置する軸方向鉄筋の相関係数を図-14に示す。図-14において、例えば、CY1供試体の左側にある「0.63」とは、軸方向鉄筋BLとBRの腐食分布（柱基部150mm区間内の19点で計測した断面減少率 A_{loss} ）から式(5)により求められる相関係数であり、平均とは、載荷方向正側、あるいは負側にある3つの相関係数の平均値であ

る。図-14から、CY1供試体は軸方向鉄筋間の腐食の相関が強いに対して、CY2供試体は相関がほとんどないことが分かる。つまり、CY1供試体では、同じ断面位置で大きな腐食量が同時に発生する可能性が高まり、耐震性能の低下が大きくなると推測される。例えば、図-15に示すように、CY1供試体のBRとBL鉄筋では、柱基部付近や柱基部から約130mmの位置において、大きな腐食が同時に発生していることが分かる。一方で、CY2供試体では、BR鉄筋は柱基部から約150mm、BL鉄筋は柱基部付近で大きな腐食が発生しており、柱基部からの距離が同じところで両鉄筋が大きな腐食量を同時に取ることはない。

本研究で得られた実験結果は、正負交番載荷を受ける劣化RC柱の塑性変形能の評価では、塑性ヒンジ内の単純な平均腐食量だけではなく、詳細な腐食分布を必要とすることを意味している。今後、腐食分布を確率場により表現し、これと数値解析を融合させるなどして、軸方向鉄筋が腐食したRC柱の耐震性能評価法を確立したい。

5. まとめ

軸方向鉄筋が腐食したRC柱供試体では、軸方向鉄筋の平均断面減少率が10%以下であるにも関わらず、腐食していない供試体と比較して耐震性能は顕著に低下した。一方で、軸方向鉄筋が腐食した供試体同士では、平均断面減少率や最大断面減少率が倍半分違うにもかかわらず、耐震性能の差はあまり見られなかった。

これは、軸方向鉄筋の腐食分布の相関性の強弱から説明できると推察された。つまり、劣化RC柱の耐震性能は、鉄筋腐食分布の代表値（平均値等）を用いた評価では不十分であり、個々の軸方向鉄筋に生じる腐食分布、および軸方向鉄筋相互の腐食分布の相関性を考慮する必要がある。今後、実際の環境に近い小さい電流密度を用いたり、さらに大きな腐食量を与えたりしたRC柱の実験も行うなどして、軸方向鉄筋間の腐食分布の相関性が耐震性能に与える影響を詳細に検討したい。

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) 加藤絵万, 岩波光保, 伊藤始, 横田弘: 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, コ

- ンクリート工学年次論文集, Vol.27, No. 2, pp. 1489-1494, 2005.
- 3) Lim, S., Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling, *Engineering Structures*, Vol.127, pp. 189-205, 2016.
- 4) 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.
- 5) 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E (材料・コンクリート構造), Vol.66, No. 4, pp. 466-482, 2010.
- 6) Akiyama, M., Frangopol, D. M. and Matuzaki, H.: Life-cycle reliability of RC bridge piers under seismic and airborne chloride hazards, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.40, No. 15, pp. 1671-1687, 2011.
- 7) 日本コンクリート工学協会: JCI-SC1 コンクリート中の鋼材の腐食評価方法, コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法並びに基準 (案), pp. 91-94, 2004.
- 8) 青山敏幸, 下村匠, 丸山久一: 塩害により鉄筋が腐食した RC 部材の曲げ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No. 2, pp. 883-888, 1998.