

鉄筋が腐食したRC柱の補修前後における 耐荷性能に関する実験的研究

An Experimental Study on the Structural Performance of RC Columns with Corroded Reinforcement and on the Structural Performance of Repaired Columns

三澤孝史* 川口昇平* 石井敏之*

要旨

柱の耐荷性能への鉄筋腐食の影響および鉄筋腐食した柱の補修効果に関する知見を得ることを目的に、水平交番載荷試験を行った。電食により軸方向鉄筋を腐食させた柱試験体および腐食させた鉄筋をはつり出して切除し、柱基部で同径の鉄筋を突合せアーク溶接継手により補修した試験体を用いた。載荷試験の結果、鉄筋を腐食させた柱は、腐食無しの柱に比べ、耐力・変形性能とも大きく低下し、補修した柱は腐食無しの柱とほぼ同じ耐力・変形性能を示すことがわかった。

キーワード：鉄筋腐食、RC、柱、電食

1. まえがき

鉄筋コンクリート（RC）構造物において、中性化や塩害等に起因する鉄筋の腐食は、RC構造物の耐荷性能に大きな影響を与える。鉄筋腐食とRC構造物の耐力・変形性能の関係を把握することは、適切な補修・補強を実施する上で重要な課題である。

しかしながら、現状においては鉄筋の腐食程度とRC構造物の耐力・変形性能に関する定量的な評価は明確にされていない。鉄筋の腐食を考慮したRC構造物の耐荷性能に関する研究は、各機関において実施されているが、梁部材を対象とした研究¹⁾が多く、柱を対象とした研究²⁾は少ない。

本研究では、電食により軸方向鉄筋を腐食させた柱試験体および電食により腐食させた鉄筋をはつり出して切除し、柱基部で同径の鉄筋を突合せアーク溶接継手により補修した柱試験体の水平交番載荷試験を実施し、健全な試験体との比較により、鉄筋が腐食した柱および鉄筋が腐食した柱の補修後の耐力・変形性能の把握を目的とした。

2. 水平交番載荷試験の概要

試験体の形状を図-1に、試験体の諸元を表-1に示

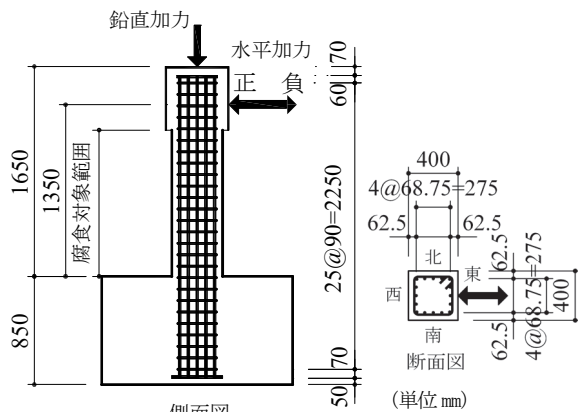


図-1 試験体の形状

表-1 試験体の概要

試験体名	CASE-1	CASE-2	CASE-3
概要	断面 400mm×400mm せん断スパン 1350mm(せん断スパン比 4.0) 設計基準強度 f'_{ck} 27N/mm ² G_{max} 13mm 軸方向鉄筋 D19 (SD345) 16本 引張鉄筋比 1.06% 帯鉄筋 D13 (SD345) @90mm 帯鉄筋比 0.7% 曲げせん断耐力比 2.0(材料試験値による)		
腐食の有無	腐食無し	軸方向鉄筋のみ腐食	軸方向鉄筋のみ腐食
		目標鉄筋質量減少率 30%	
補修の有無	補修無し		全ての軸方向鉄筋を柱基部で切断し、同径の鉄筋で溶接接続

* 技術研究所

す。試験体の断面寸法は 400×400mm、柱基部から載荷点まで 1350mm であり、曲げ破壊（材料試験値による曲げせん断耐力比 2.0）するように設計した。

試験体は、基準試験体として健全な CASE-1、軸方向鉄筋のみ腐食させた CASE-2、軸方向鉄筋のみ腐食させて鉄筋を取り替えた CASE-3 の 3 体とした。供用されている柱の鉄筋腐食の進行は、その環境条件によって異なるが、一般的には表面に近い帯鉄筋が最初に腐食し、その後、軸方向鉄筋が腐食すると考えられる。本研究では、鉄筋腐食状況を単純化して鉄筋腐食が耐荷性能に与える影響を把握しやすいように、軸方向鉄筋および帯鉄筋をそれぞれ腐食させたが、本報では、軸方向鉄筋のみ腐食させた試験結果について述べる。

腐食による鉄筋質量減少率の目標は、交番載荷試験において耐力・変形性能が低下するように 30%とした³⁾。

鉄筋が腐食した RC 部材の耐力・変形性能は、既往の報告⁴⁾によると、局所的な腐食による断面欠損の影響が大きい場合があるが、本報では平均的な腐食量を表す鉄筋の質量減少率で試験結果を整理した。鉄筋腐食のばらつきが耐荷性能に与える影響については、今後詳細に検討したいと考えている。

なお、腐食対象とする鉄筋および腐食範囲を限定するために、CASE-2、CASE-3 では帯鉄筋にエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた。さらに、CASE-1（腐食無し）も含め全ての試験体で、加力部およびフーチング部の軸方向鉄筋にエポキシ樹脂塗装を施した。表-2、表-3 に使用材料の試験結果を示す。

3. 電食

3.1 電食方法

電食の概念図を図-2 に示す。試験体の柱の周囲に塩化ビニール製の水槽を設置し、内部に海水相当の 3%塩化ナトリウム水溶液を満した。試験体から約 30mm の離隔を取って設置した銅板（厚さ 1mm）を直流電源の陰極に、軸方向鉄筋に繋いだリード線を柱試験体頭部から出し、陽極側に接続し印加した。写真-1 に電食状況を示す。

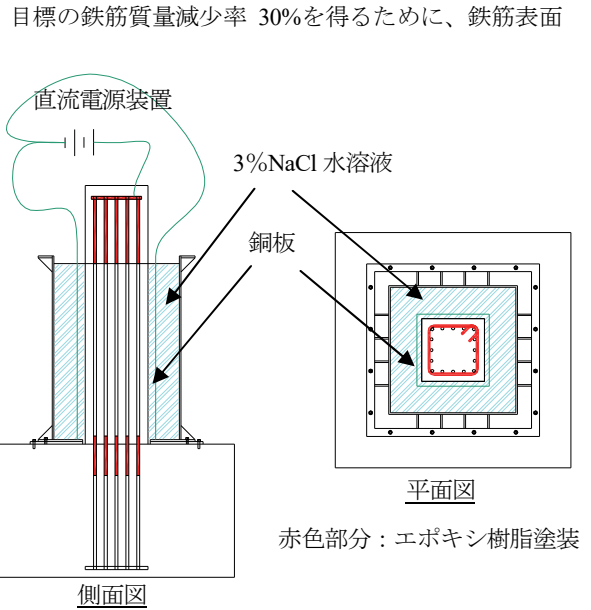


図-2 電食概念図 (CASE-2、3)

表-2 使用した鉄筋の材料試験結果

材料名	使用試験体	仕様	降伏強度 N/mm ²	降伏ひずみ ×10 ⁻⁶	弾性係数 10 ⁵ N/mm ²	引張強度 N/mm ²	破断伸び %
軸方向鉄筋	CASE-1~3	D19-SD345	389	2060	1.89	595	17.2
帯鉄筋	CASE-1	D13-SD345	367	1910	1.92	499	19.6
	CASE-2、3	D13-SD345	365	1900	1.92	509	19.6

CASE-2、3 の帯鉄筋はエポキシ樹脂塗装鉄筋

表-3 使用したコンクリートの材料試験結果

材料名、使用試験体		仕様	圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 10 ⁴ N/mm ²	引張強度 N/mm ²	材齢 日	備考
載荷試験時 コンクリート	CASE-1	柱	33.6	2.69	2.77	204	引張強度は割裂引張強度試験による
		フーチング	34.5	2.88	2.84	212	
	CASE-2	柱	34.5	2.73	2.54	223	
		フーチング	32.5	2.81	2.81	231	
	CASE-3	柱	33.7	2.75	2.45	238	
		フーチング	33.1	2.82	2.43	246	
補修 コンクリート	CASE-3	配合強度 f28 33N/mm ² Gmax 15mm 高流動コンクリート	41.6	3.37	2.58	74	

積当たりの電流密度を $1\text{mA}/\text{cm}^2$ として、積算電流量と腐食減少量理論値の関係を表(1)に示すファラデーの式より求め⁵⁾、通電時間を設定した。

$$W = \frac{C \cdot I \cdot t}{Z \cdot F} \quad (1)$$

ここに、W：腐食減少量理論値(g)、C：鉄の原子量、
I：電流(A)、t：通電時間(s)、Z：鉄の原子価、
F：ファラデー定数(96480C/mol)

CASE-2 については、交番載荷試験後に鉄筋を取り出し、JCI-SCI の方法に準拠して 60℃、10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬し、水洗した後に乾燥させて質量減少率を測定した。CASE-3 については、補修時に取り出した鉄筋について、CASE-2 と同様の方

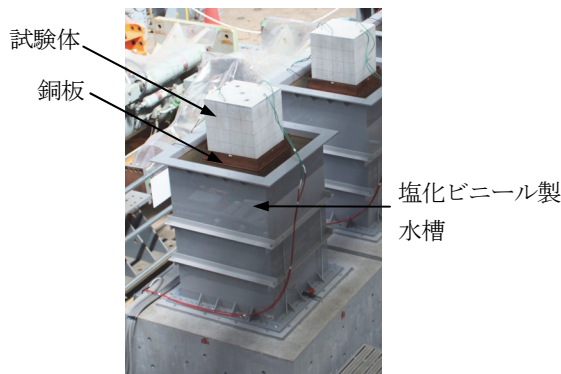


写真-1 電食状況

表-4 鉄筋腐食状況の評価方法

	質量減少率
軸方向鉄筋	腐食後の軸方向鉄筋を 150mm ごとに横リブ 8 節間 (約 100mm) で切断し、この質量と腐食のない加力部の鉄筋の質量との比
帯鉄筋	腐食対象帯鉄筋 1 本ごとの腐食後質量と腐食のない加力部の鉄筋の質量との比

基準長を横リブ 8 節間としたのは交番載荷試験の残留ひずみによる鉄筋長さの変化を考慮

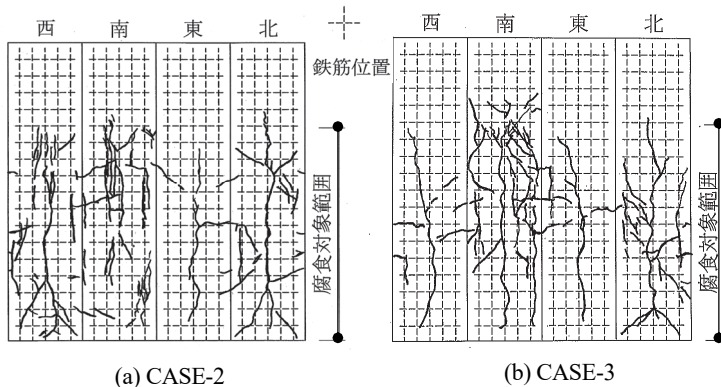


図-3 電食終了時のひび割れ状況

法で質量減少率を測定した。

3.2 電食による劣化状況

電食終了後の試験体のひび割れ状況を図-3に示す。ひび割れは、CASE-2、CASE-3 のいずれも部材軸方向が卓越し、柱中央付近や柱隅角部の軸方向鉄筋付近に生じている。ひび割れ幅は CASE-2 が最大 1.1mm (西面)、CASE-3 が最大 1.5mm (南面) であった。

鉄筋の腐食状況を表-4に示す方法で算出した質量減少率で評価した。表-5に CASE-2、CASE-3 における軸方向鉄筋および帯鉄筋の質量減少率を、全体、東西南北の各面ごとに示す。全体は、腐食範囲内の全ての軸方向鉄筋あるいは帯鉄筋の質量減少率の平均値である。東西面は各 5 本、南北面は各 3 本の軸方向鉄筋の質量減少率の平均値である。

CASE-2 の鉄筋腐食状況は、軸方向鉄筋の目標質量減少率 30% に対し、平均 25.2% であり、帯鉄筋にも質量減少率で平均 2.7% の腐食が生じた。軸方向鉄筋は、西面と北面が東面と南面よりも腐食量が多くなっており、腐食量にばらつきがある。このような腐食量のばらつきは、鉄筋の腐食に伴いかぶりコンクリートがひび割れると通電し易くなり腐食が進行するため、ひび割れ発生時期の差異やひび割れ幅等のひび割れ性状の違いによる影響と思われる。

CASE-3 の鉄筋腐食状況は、軸方向鉄筋の目標質量減少率 30% に対し、平均 19.5% であり、帯鉄筋にも CASE-2 と同様に、質量減少率で平均 0.9% の腐食が生じた。

4. 補修方法

本研究では、柱の軸方向鉄筋が腐食し、フーチング内の軸方向鉄筋は健全であるので、腐食した鉄筋を切除し、同一規格で同径の鉄筋を接続する補修方法を想定した。鉄筋の接続方法には、ガス圧接、機械式継手、溶接継手があるが、今回は鉄筋のはつり出し長が短く、施工治具が比較的小さい突合せアーク溶接継手を用いた。溶接は、半自動アーク溶接機を用い、「鉄筋定着・継手指針

表-5 平均質量減少率 (%)

	区間・部位	CASE-2	CASE-3
軸方向鉄筋	全体	25.2	19.5
	東	17.0	15.3
	西	33.9	15.6
	南	16.1	23.6
帯鉄筋	全体	2.7	0.9

[2007年版]⁹⁾に準拠した。軸方向鉄筋を取り替えた部分の帯鉄筋は、同一規格で同径の鉄筋に取替え、端部を重ね合わせてフレア溶接した。

CASE-3の電食終了後、図-4に示すように、劣化したコンクリートを、溶接治具の設置に必要な離隔を考慮して、軸方向鉄筋の裏側40mmまでウォータージェットによりはつり、柱基部で全ての軸方向鉄筋を切断した。次に、同径の鉄筋を突合せアーク溶接により接続し、帯鉄筋を配筋した後、補修前の柱と同じ断面寸法となるよ

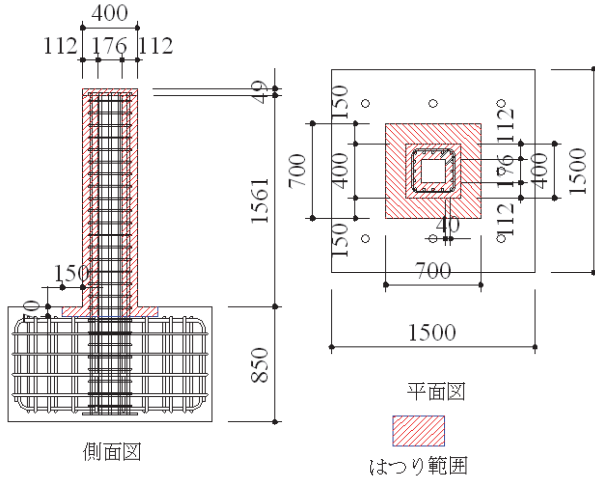


図-4 ウォータージェットによるはつり範囲

うに型枠を設置して高流動コンクリートを打設した。

5. 水平交番載荷試験

5.1 載荷試験の概要

水平交番載荷試験は、試験体のフーチングを反力床にPC鋼棒で定着させ、試験体頭部に油圧ジャッキで一定の軸力(上部工の自重を想定した圧縮応力度 $1\text{N}/\text{mm}^2$)を加えた状態で、反力壁より油圧ジャッキ(容量 1000kN 、ストローク $\pm 250\text{mm}$)で正負交番の水平力を加えた。軸力を載荷する油圧ジャッキは、スライド支承を介して載荷フレームに設置されており、水平変位を妨げない構造になっている。写真-2に交番載荷試験状況

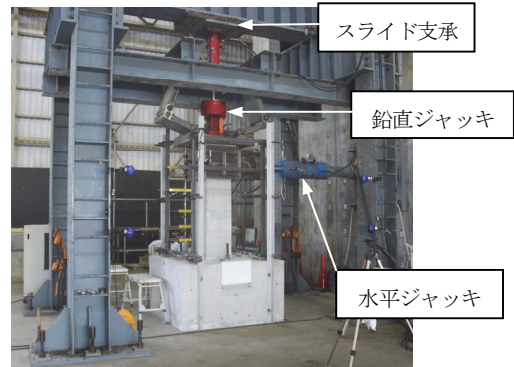
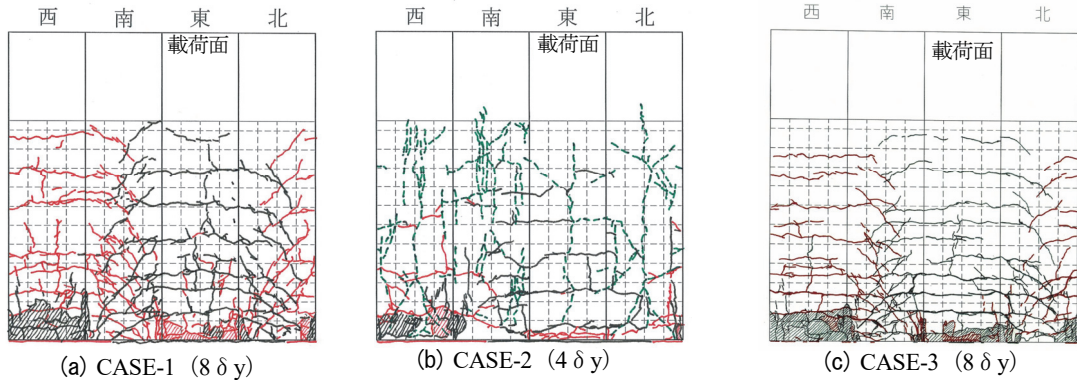


写真-2 水平交番載荷試験状況



実線：交番載荷時のひび割れ 破線：腐食時のひび割れ

図-5 交番載荷試験時のひび割れ状況

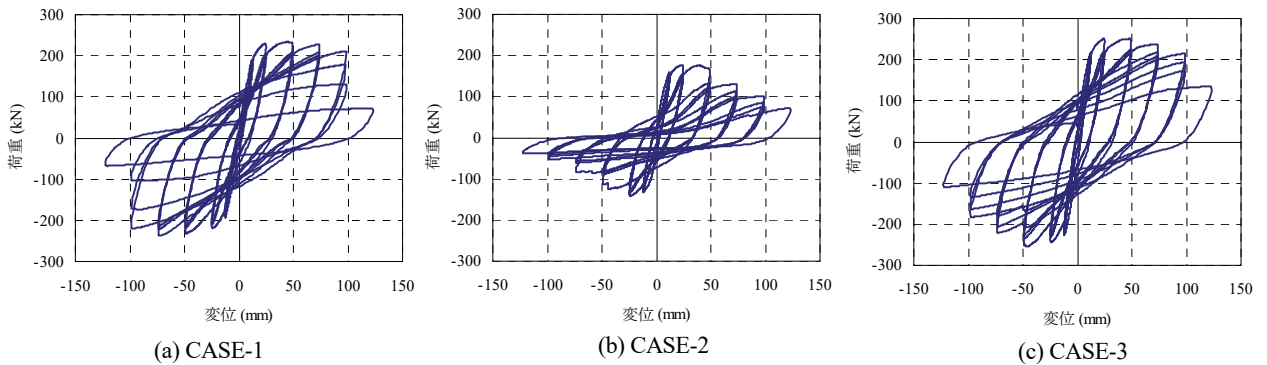


図-6 水平荷重-水平変位関係

を示す。

以下、試験体頭部に加える水平荷重を「荷重」、荷重
 載荷位置の水平変位を「変位」と記す。また、図-1に
 示すように、水平ジャッキを押し出す方向に載荷した時
 を「正載荷」、引き戻す方向に載荷した時を「負載荷」
 と記す。

載荷パターンは、CASE-1、CASE-3 においては、軸
 方向鉄筋が柱基部において降伏する変位 (δy) までは
 荷重制御で載荷し、以降は変位制御により、降伏変位の
 偶数倍の変位を各 3 サイクルずつ載荷した。CASE-2 は
 腐食させるため、ひずみゲージを貼付していないので、
 CASE-1 で得られた正載荷における降伏変位 (δy) を
 基準に CASE-1 と同様に載荷した。

5.2 水平交番載荷試験結果

(a)破壊性状

CASE-1 では、図-5 (a)に示すように、水平方向の
 曲げひび割れの発生とせん断方向のひび割れが発生した
 が、軸方向鉄筋の降伏後もせん断破壊は生じなかった。
 6~8 δy において、柱基部の軸方向鉄筋の座屈に伴うか
 ぶりコンクリートのはらみ出し・剥落が生じ、荷重が低
 下する曲げ破壊であった。

CASE-2 では、図-5 (b)に示すように、CASE-1 に比
 べ、水平方向の曲げひび割れおよびせん断方向のひび割
 れの発生が少ない。これは、腐食ひび割れと軸方向鉄筋
 の腐食により鉄筋の付着強度が低下し、コンクリートと
 鉄筋の一体性が低下したことによるものと考えられる。

CASE-3 では、図-5 (c)に示すように、曲げひび割
 れとせん断ひび割れの発生状況に CASE-1 と大きな差異
 はない。CASE-1 とほぼ同じような破壊性状を示し、6
 ~8 δy で、柱基部の軸方向鉄筋の座屈に伴うかぶりコ
 ンクリートのはらみ出し・剥落が生じ、荷重が低下する
 曲げ破壊であった。

(b)耐力・変形性能

図-6 に荷重-変位関係を示す。荷重-変位曲線にお
 ける履歴性状は、CASE-1 は図-6 (a)に示すように、

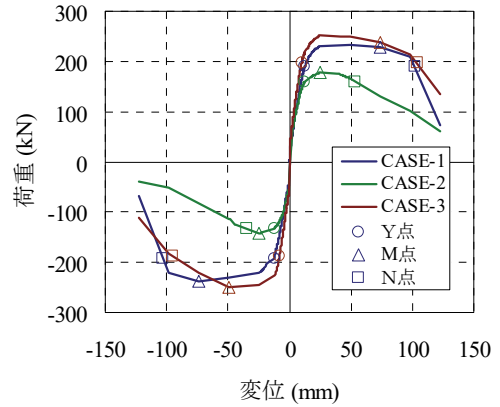


図-7 荷重-変位曲線の包絡線

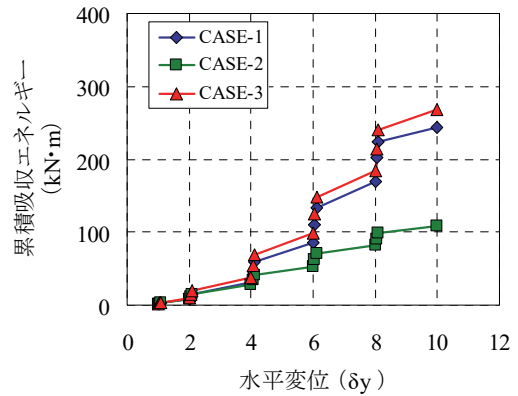


図-8 累積吸収エネルギー

吸収エネルギーの大きい紡錘型の形状を示し、終局変位
 は 8 δy 程度と、変形性能も良好である。

CASE-2 は、図-6 (b)に示すように、1 δy の時点か
 ら CASE-1 に比べ、荷重が小さい。2 δy までは、正載
 荷と負載荷で荷重の違いはあるが、軸方向鉄筋の降伏後、
 荷重が低下せずに変形が大きくなる CASE-1 と同様の履
 歴性状を示した。正載荷と負載荷における荷重の違いは、
 表-5 に示したように、負載荷時に引張り側となる西面
 の軸方向鉄筋の腐食量が東面に比べ大きいことから、鉄
 筋腐食による鉄筋断面の減少の影響が大きいと考えられ
 る。4 δy の 1 サイクル目の負載荷で軸方向鉄筋 (西

表-6 水平交番載荷試験結果

	CASE-1		CASE-2		CASE-3	
	正載荷	負載荷	正載荷	負載荷	正載荷	負載荷
降伏荷重 (kN)	190.7	192.1	159.9 (0.84)	132.5 (0.69)	197.1 (1.03)	187.1 (0.97)
降伏変位 (mm)	12.3	12.6	12.3	12.3	9.9	8.2
最大荷重 (kN)	227.3	236.7	176.9 (0.76)	143.0 (0.60)	237.2 (1.04)	250.6 (1.06)
終局変位 (mm)	101.7	102.8	53.7 (0.53)	35.0 (0.34)	103.7 (1.02)	95.5 (0.93)

降伏荷重：最外縁主鉄筋のひずみが降伏ひずみに達した時点の水平荷重。但し、CASE-2 はひずみゲージ
 を貼付していないので、載荷の基準として用いた CASE-1 の正載荷における降伏変位(12.3mm)時の荷
 重とした。

降伏変位：降伏荷重時の水平変位

最大荷重：繰り返し荷重により耐力低下が顕著にならない最大変位時の水平荷重

終局変位：水平荷重-水平変位曲線の包絡線において、水平荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位
 ()内の数値は CASE-1 に対する比

側) 2本の破断、 $6\delta y$ の1サイクル目の負荷荷で軸方向鉄筋(西側)2本の破断に伴い、負荷荷での荷重は大きく低下した。その後も正載荷では、負荷荷より荷重が大きい状態が続き、正載荷で圧縮側となる東面では、 $10\delta y$ において柱基部の軸方向鉄筋の座屈に伴うかぶりコンクリートのはらみ出し・剥落が生じた。

CASE-3は、図-6(c)に示すように、CASE-1と同様に吸収エネルギーの大きい紡錘型の形状を示した。 $8\delta y$ において、繰り返し荷重により、荷重が顕著に低下し、 $10\delta y$ において、柱基部の軸方向鉄筋の座屈に伴うかぶりコンクリートのはらみ出し・剥落が生じ、荷重が大きく低下した。

図-7に各試験体について、荷重-変位曲線の包絡線を示す。図には、Y点(部材降伏点)、M点(最大荷重点)、N点(終局点)を丸印等で示す。表-6に各試験体の載荷試験結果を示す。

図-7、表-6より、CASE-2の降伏荷重は、正載荷時においてCASE-1に比べ約80%に、負載荷時において約70%に低下している。最大荷重は、正載荷時においてCASE-1に比べ約80%に、負載荷時において約60%に低下している。終局変位は正載荷時において、CASE-1の53%、負載荷時において34%と大きく変形性能が低下している。このように、CASE-2では耐力、変位とも低下しているが、軸方向鉄筋の腐食は、特に耐力に与える影響が大きいと思われる。降伏荷重および最大荷重の低下は、腐食による鉄筋断面の減少および鉄筋とコンクリート間の付着強度の低下の影響と考えられる。

CASE-3の降伏荷重は、CASE-1とほぼ等しい。最大荷重は、正載荷および負載荷とも、CASE-1に比べ、若干大きい。構造性能を「鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)、平成16年4月」⁷⁾に準拠して計算した結果、コンクリート強度および鉄筋強度の差による荷重の違いよりも大きい。これは、溶接部の径が大きくなっていることによる幾何学的な影響が大きいと思われるが、今後、さらに検討したい。終局変位は、CASE-1とほぼ同じであり、変形性能に大きな差はない。

図-8に各試験体について、各載荷ステップにおける荷重-変位関係から算出した累積吸収エネルギーを示す。

CASE-2の累積吸収エネルギーは、CASE-1に比べ、軸方向鉄筋が破断した $4\delta y$ 以降小さくなっている。 $10\delta y$ における累積吸収エネルギーはCASE-1の半分以下である。

一方、CASE-3の累積吸収エネルギーは、終局付近の $8\delta y$ において、CASE-1の約1.07倍と若干大きい、エネルギー吸収性能に大きな差は見られない。

以上より、軸方向鉄筋が約25%腐食した柱は、耐力・変形性能とも大きく低下するが、腐食した軸方向鉄筋をはつり出して柱基部で切除し、同径の鉄筋を突合せ溶接により接続する補修によって、健全時の柱と同程度

の耐力・変形性能に復元することが可能と考える。

6. まとめ

電食により柱の軸方向鉄筋を腐食させた柱試験体および柱試験体の軸方向鉄筋を腐食させた後、はつり出して軸方向鉄筋を取り替えて補修した柱試験体の水平交番載荷試験により、以下のことが明らかになった。

- i. 平均質量減少率で軸方向鉄筋が約25%、帯鉄筋が約3%腐食した柱試験体は、曲げ降伏後に軸方向鉄筋の破断により破壊した。腐食無しの柱に比べ、耐力は正載荷時において約80%、変形性能は約30%に低下した。降伏荷重および最大荷重の低下は、腐食による鉄筋断面の減少および鉄筋とコンクリート間の付着強度の低下の影響と考えられる。
- ii. 腐食させた軸方向鉄筋を取り出し、同径の軸方向鉄筋を柱基部で突合せ溶接により接続した柱試験体は、腐食無しの試験体と同様の破壊性状を示し、腐食無しの柱に比べ、耐力は若干大きくなるが変形性能は同程度であり、健全時の柱と同程度の耐力・変形性能に復元する。

本報では目標の鉄筋質量減少率を1水準としたが、今後、鉄筋の腐食量を変化させて柱の耐力・変形性能に鉄筋腐食が与える影響を把握し、劣化状況に応じた補修方法を検討していきたいと考える。

【参考文献】

- 1) 岩波光保、横田 弘、佐藤文則、「鉄筋腐食がRCはり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、2002.7
- 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、2005.7
- 3) 土木学会、「続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能」、2009.5
- 4) 日本コンクリート工学協会、「コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会 報告書」、1998
- 5) 碓本 大、荒木弘祐、服部篤史、宮川豊章、「両引き試験による鉄筋腐食と付着強度に関する研究」、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.2、pp.661-666、2006
- 6) 土木学会、「鉄筋定着・継手指針[2007年版]」、2007.8
- 7) 鉄道総合技術研究所 編、「鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)、平成16年4月」、2004.4