

論文 鉄筋の腐食したRC構造物の耐荷性能および補修効果に関する実験的研究

三澤 孝史*1・川口 昇平*2・宮川 豊章*3

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試験体を用いた。載荷試験の結果、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, 補修, RC柱, 交番載荷試験

1. はじめに

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、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て、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た。

2. 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。実際の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

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

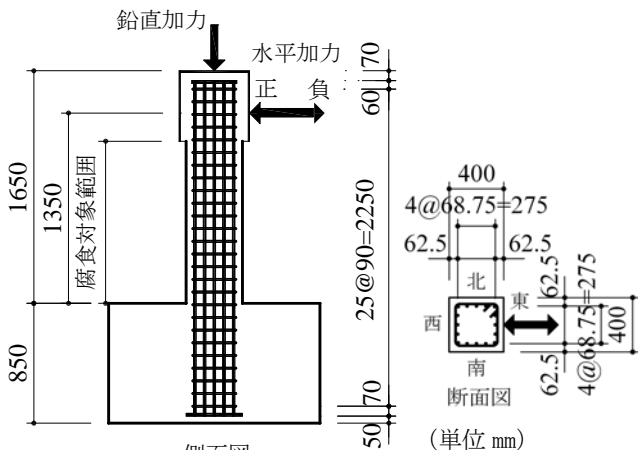


図-1 試験体の形状

*1 (株)奥村組 技術研究所 土木研究課課長 (正会員)

*2 (株)奥村組 技術研究所 土木研究課 (正会員)

*3 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授 工博 (正会員)

食状況を単純化して鉄筋腐食が耐荷性能に与える影響の考察が容易になるように軸方向鉄筋のみを腐食させた。

腐食による目標の鉄筋質量減少率は、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、本稿では簡便のために平均的な腐食量を表す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をエポキシ樹脂塗装した。表-2、表-3に使用材料の試験結果を示す。

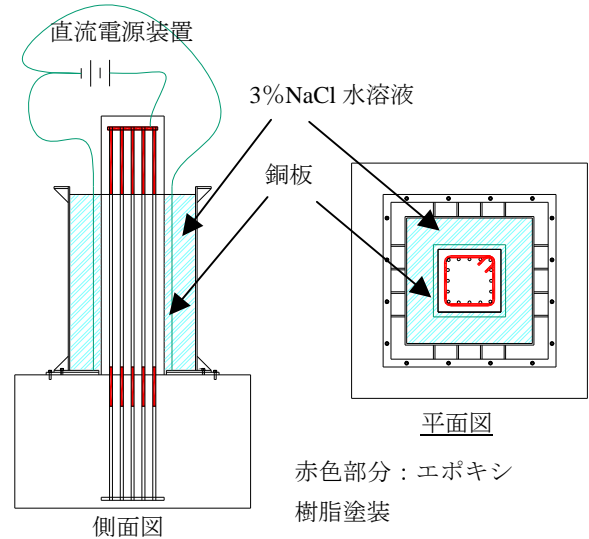


図-2 電食概念図 (CASE-2,3)

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たした。試験体から約30mmの離隔を取って設置した銅板(厚さ1mm)を直流電源装置の陰極に、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。

目標の鉄筋質量減少率30%を得るために、鉄筋表面積当りの電流密度を1mA/cm²として、積算電流量と腐食減

少量理論値の関係をファラデーの式より求め⁵⁾、通電時間を設定した。

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°C、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

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 f ₂₈ 33N/mm ² G _{max} 15mm 高流動コンクリート	41.6	3.37	2.58	74	

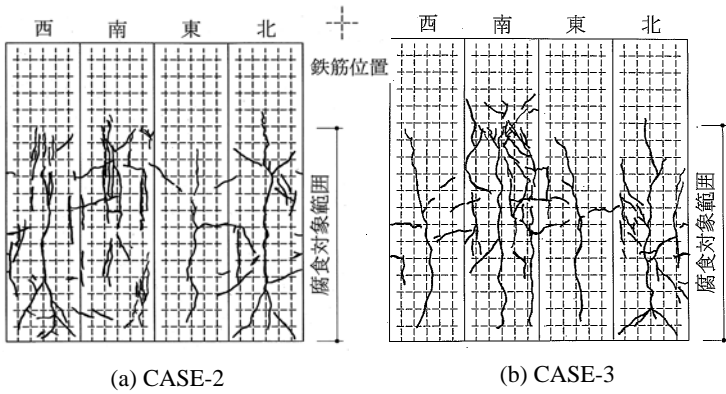


図-3 電食終了時のひび割れ状況

表-5 平均質量減少率 (%)

		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
	北	33.4	29.0
帯鉄筋	全体	2.7	0.9

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。図-4に軸方向鉄筋の質量減少率を東西面は各5本、南北面は各3本の平均値で示す。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。

軸方向鉄筋の腐食状況は、図-4(a)に示すように、柱基部から約700mmまでの区間がその上部に比べ若干腐食量が多い。また、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。

軸方向鉄筋の腐食状況は、図-4(b)に示すように、南

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質量比
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質量比

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

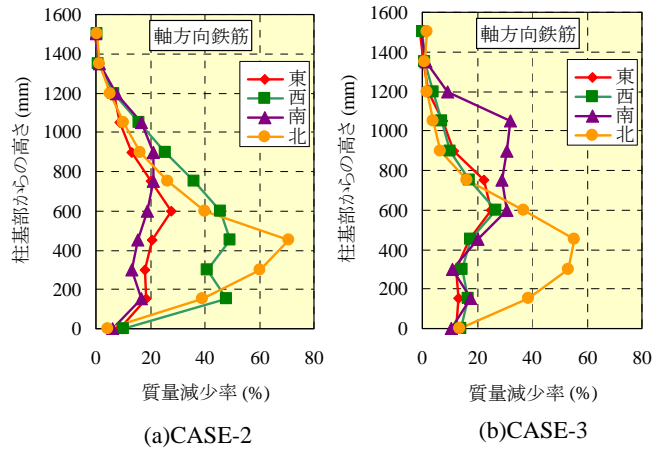


図-4 鉄筋の腐食状況

面以外は、柱基部から約700mmまでの区間がその上部に比べ若干腐食量が多い。南面については、柱基部から約600~1000mmの区間の腐食量が多くなっている。また、北面と南面の腐食量が他の面に比べ、腐食量が多くなっている。

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と設定している。そこで、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、「鉄筋定着・継手指針 2007年版」⁹⁾に準拠し、半自動アーク溶接機を用いて行った。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ー溶接した。

CASE-3の電食終了後、図-5に示すように、ウォータージェットにより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まではつり、柱基部において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

うに型枠を設置して高流動コンクリートを打設した。

5. 交番載荷試験

5.1 載荷試験の概要

載荷は、試験体のフーチングを反力床にPC鋼棒で定着し、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 1N/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。

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、水平ジャッ

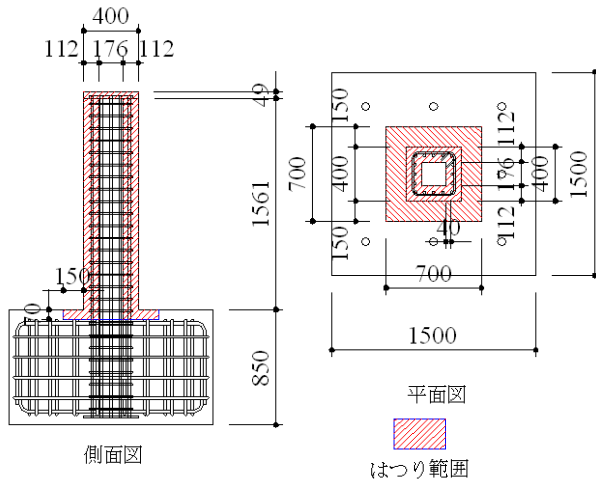


図-5 ウォータージェットによるはつり範囲

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（図-1 参照）。

図-6 に鉄筋のひずみゲージ位置を示す。Case-3 のひずみゲージは、補修時に貼付した。

載荷パターンは、CASE-1、CASE-3 で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

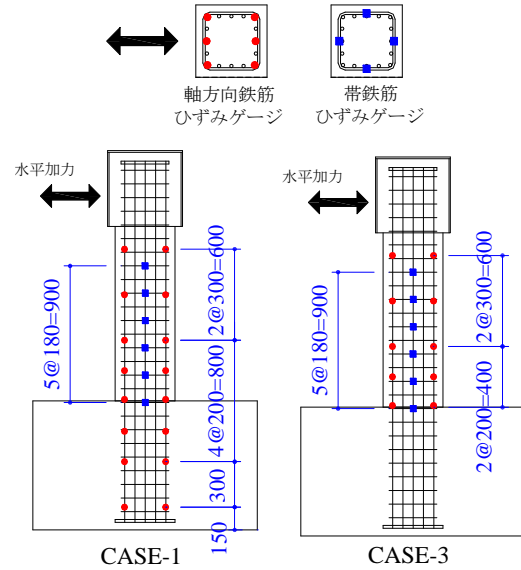


図-6 鉄筋のひずみゲージ位置図

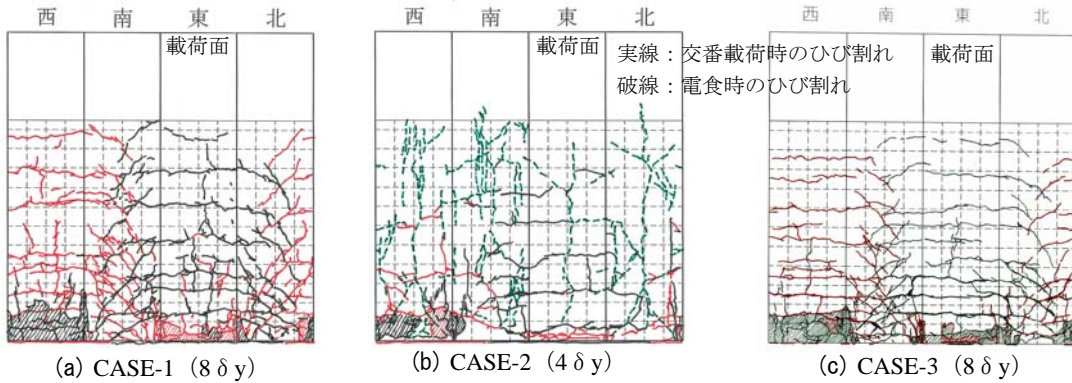


図-7 交番載荷試験時のひび割れ状況

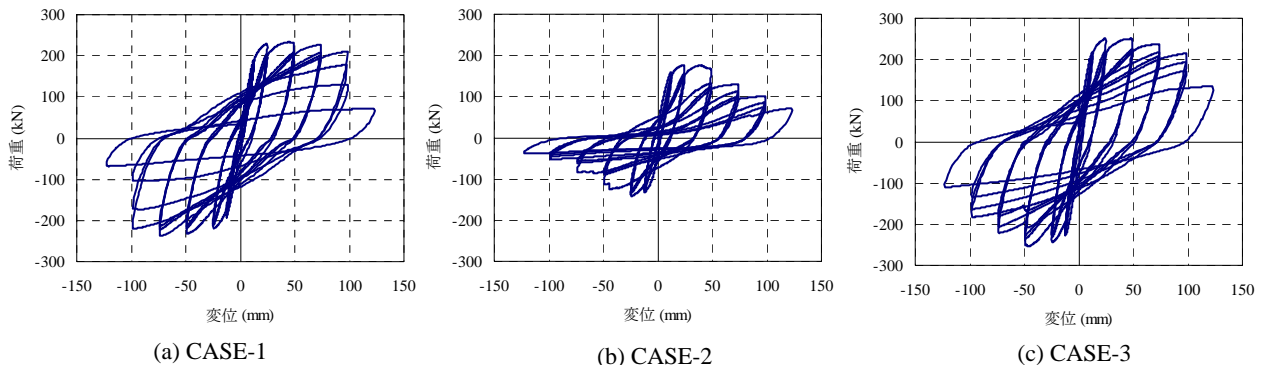


図-8 水平荷重-水平変位関係

表-6 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

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 載荷試験結果

(1) 破壊性状

CASE-1 は、図-7(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するが、軸方向鉄筋の降伏後もせん断破壊せず、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・剥落を生じ荷重が低下する曲げ破壊であった。

CASE-2 は、図-7(b)に示すように、腐食ひび割れと軸方向鉄筋の腐食による付着強度の低下により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。

CASE-3 は図-7(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・剥落を生じ荷重が低下する曲げ破壊であった。

(2) 耐力・変形性能

図-8 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-8(a)に示すように、紡錘型で吸収エネルギーの大きい形状を示し、終局変位は 8 δy 程度と、変形性能も良好である。

CASE-2 は図-8(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-4 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 (西側)

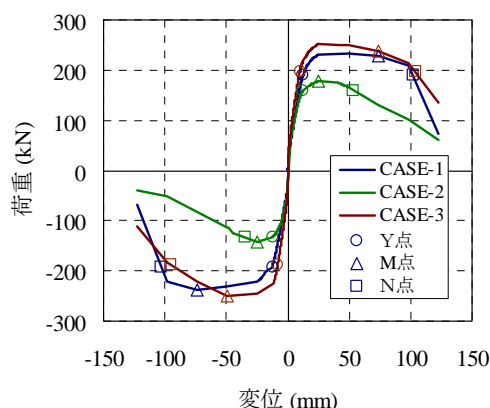


図-9 荷重-変位曲線の包絡線

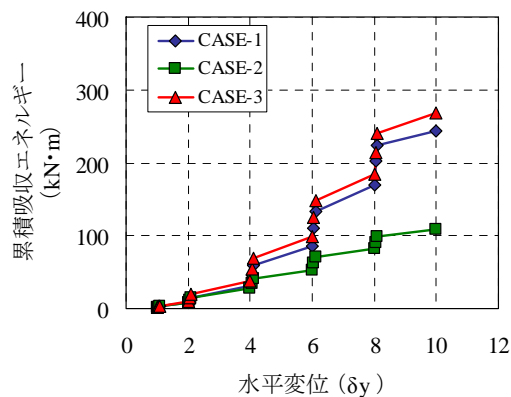


図-10 累積吸収エネルギー

2本の破断, 6 δy の 1 サイクル目負載荷で軸方向鉄筋(西側) 2本の破断に伴い負載荷での荷重は大きく低下した。その後も正載荷では負載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 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・剥落が生じた。

CASE-3 は図-8(c)に示すように、CASE-1 と同様に紡錘型で吸収エネルギーの大きい形状を示した。8 δy において繰り返し荷重による荷重低下が顕著となり、10 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・剥落が生じ荷重が大きく低下した。

図-9 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-9、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。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。終局変位は正載荷時において、CASE-1 の34%、負載荷時において53%と大きく変形性能が低下している。

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」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、さらに検討したいと考える。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-10 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。

図-10 より、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 δy における累積吸収エネルギーは、CASE-1 の半分以下である。

CASE-3 の累積吸収エネルギーは終局付近の8 δy 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・変形性能を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交番載荷試験より、本試験の範囲内であるが以下のことが明らかになった。

- (1) 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・変形性能とも大きく低下した。また、累積吸収エネルギーも、腐食無しの試験体の半分以下であり、エネルギー吸収性能も大きく低下する。
- (2) 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た。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、荷重-変位関係に大きな差異はない。また、累積吸収エネルギーについても、腐食無しの試験体と大きな差は見られない。

謝辞

本研究を進めるに当たり、多大な貢献を頂いた中村敏晴氏に深く感謝の意を表します。

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) 加藤絵乃, 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, 2004.4