

RC 壁部材の疲労性能に及ぼす鉄筋腐食の影響

中央大学 学生会員 ○染谷 幸汰
中央大学 学生会員 宇田 周平
中央大学 正会員 大下 英吉
東電設計株式会社 正会員 鈴木 修一
東電設計株式会社 正会員 熊野 義敏

1. はじめに

RC 構造物の劣化による事故の増加は、深刻な社会的問題である。これは、塩害、中性化などの鉄筋コンクリートの劣化を促進させる要因によって、各種性能が著しく低下するためである。例えば、鉄道トンネル内でのコンクリート塊落下事故は、鉄筋腐食による鉄筋とかぶりコンクリートの付着性能が低下した領域に、高速列車の走行に伴う圧力変動による疲労荷重が作用することによって引き起こされる。今後、このような事故が急増すると考えられるため、各種性能の変化を時間的かつ空間的に把握することが非常に重要になるわけである。現在までに、RC 柱部材、RC 梁部材における低サイクル疲労試験や正負交番載荷試験は数多く実施されているが、RC 壁部材における高サイクル疲労試験はあまり実施されていない。したがって、RC 壁部材の疲労性能の低下に及ぼす鉄筋腐食の影響に関する定量的な評価がなされているとは言い難い。

そこで本研究では、鉄筋腐食を生じた RC 壁部材に対し一定軸圧縮力作用下において高サイクル疲労試験を実施し、疲労荷重による構造性能について検討することとする。

2. 実験概要

2. 1 試験体概要

図-1 に試験体概要を示す。試験体寸法は、壁部は 450mm×200mm×900mm、基部は 600mm×500mm×250mm、縦方向鉄筋のかぶり厚は 35mm である。鉄筋は、北側および南側に縦方向鉄筋と横方向鉄筋を 2 本ずつ格子状に配置した。横方向鉄筋については、基部上面から高さ 50mm、200mm の位置に配置した。鉄筋は D16 (SD295) を使用し、鉄筋間隔は 150mm とした。試験体の設計曲げ耐力は 48.0kN、設計せん断耐力は 55.9kN であり、曲げ破壊先行型で設計した。水セメント比は

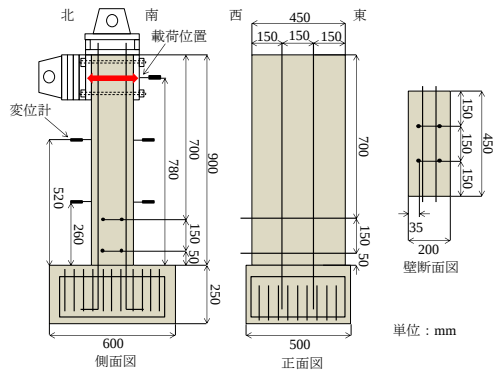


図-1 試験体概要

表-1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	Sl (cm)	W/C (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE減水剤
20	10	60	5	171	290	789	1003	1.2

60%とし、練り混ぜ水には鉄筋の腐食を促進させるために 5%NaCl 水溶液を使用し、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。また、縦方向鉄筋を腐食させる対象領域は、図-1 において、基部上面から高さ 300mm の範囲のため、基部内の縦方向鉄筋には防錆剤を塗布した。打設後 24 時間で脱型し、7 日間湿布養生を行った後、電食試験を実施し目標腐食率に到達するまで通電した。試験体は、目標腐食率 5%と 10%の計 2 体とする。なお、本実験におけるコンクリートの配合を表-1 に示す。

2. 2 電食試験概要

鉄筋の腐食方法は、短期間に効率良く鉄筋を腐食させることができ、腐食の程度が容易に制御することができる電食試験方法を採用した。図-2 に電食試験概要を示す。具体的な方法は、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続し、5%NaCl 水溶液を満たした水槽内に試験体を浸漬させ、直流安定化電源を用いて各目標腐食率に到達するまで通電した。なお、基部上面から高さ 300mm の範囲を電食範囲とした。

キーワード RC壁部材, 疲労, 鉄筋腐食

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学後楽園キャンパス TEL 03-3817-1711

2. 3 試験方法と測定項目

疲労試験は、鉛直アクチュエータにより壁断面に一定の軸圧縮応力（1.0N/mm²）を生じさせ、水平アクチュエータにより壁頂部に疲労荷重を作用させて実施した。水平荷重の作用位置は図-1に示すように、基部上面から高さ780mmの位置とする。また、あらかじめ同試験体で静的試験を実施し、その最大荷重をもとに本実験における載荷荷重を決定することにした。表-2に各試験体の静的試験の最大荷重と、本実験における載荷荷重を示す。試験条件は、静的試験の最大荷重の50%を応力振幅とした両振り載荷とする。水平荷重は平均荷重を0kNとし、1.0Hzのsin波とする。載荷回数は10⁶回とするが、載荷回数が10⁶回に達した時点で試験体が破壊しなかった場合は、静的試験の最大荷重の70%を応力振幅とした両振り載荷によって、再び10⁶回載荷させることとした。

試験中は鉛直荷重、鉛直変位、水平荷重、水平変位を計測した。水平変位の計測位置は、図-1に示すように、基部上面から高さ260mm、520mmの壁両面と780mmの位置の南側の計5点とした。また、電食試験による腐食ひび割れ、載荷試験中のひび割れは目視により確認する。

2. 4 鉄筋腐食の評価方法

疲労試験終了後、試験体の縦方向鉄筋4本と横方向鉄筋4本をはつりだし、それぞれの質量減少量を用いて腐食率を評価した。はつりだした鉄筋は、電食範囲外への鉄筋腐食の進行を考慮し、基部上面から高さ450mmまでの範囲を10%クエン酸二水素アンモニウム水溶液に24時間浸漬させ、腐食生成物を取り除いた後、50mm間隔に切断し、質量減少量を測定した。

3. 実験結果

3. 1 電食試験結果

(1) 腐食率5%

表-3に各試験体の鉄筋の腐食率を示す。なお、腐食率の最大値、最小値、平均値は、北側、南側それぞれの鉄筋2本の腐食率をまとめて算出している。表-3において、平均腐食率からわかるように、南側の横方向鉄筋以外は目標腐食率に近い値となった。図-3は各試験体のひび割れ発生状況を示しており、赤線が電食試験によって生じた腐食ひび割れである。図-3(a)において、南側の腐食ひび割れは鉄筋の格子に沿って発生した。横方向鉄筋の平均腐食率が北側に比べて高い

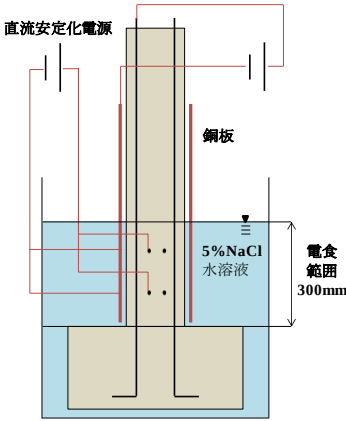


図-2 電食試験概要図

表-2 各試験体の静的試験の最大荷重と載荷荷重

試験体	静的試験の最大荷重 (kN)	載荷荷重 (kN)	
		～10 ⁶ 回	10 ⁶ 回～
腐食率5%	45.15	±22.5	±31.5
腐食率10%	44.86	±22.4	±31.4

表-3 各試験体の鉄筋の腐食率

鉄筋	試験体	腐食率5%		腐食率10%	
		北側	南側	北側	南側
縦方向鉄筋	最大	7.32	9.76	10.33	11.54
	最小	2.61	2.09	6.77	7.14
	平均	5.46	5.59	8.54	9.23
横方向鉄筋	最大	6.54	11.07	18.64	14.92
	最小	2.71	5.70	7.62	6.47
	平均	5.28	7.93	11.10	11.06

単位：%

ため、南側のみにこのようなひび割れが発生したと考えられる。東側および西側においては、上側と下側に、鉄筋間を結ぶ腐食による水平ひび割れが発生した。これは、既往の研究¹⁾において、腐食膨張圧のコンクリート部への影響範囲は、最小かぶり厚の約1.5倍を半径とした円と考えられ、鉄筋間に影響範囲が重なる領域が生じることによる腐食膨張圧の相互作用に起因している。また、コンクリート表面へ水平方向に向かう腐食ひび割れが発生した。これは、既往の研究²⁾において、かぶり厚と鉄筋径の関係から、鉄筋軸上ひび割れモードに属するためである。

(2) 腐食率10%

縦方向鉄筋の平均腐食率が目標腐食率の10%に僅かに充たないものの、腐食率のばらつきが少なくほぼ一様に腐食したといえる。全ての鉄筋が一様に腐食したため、図-3(b)において、腐食ひび割れは、北側、南側ともに鉄筋の格子に沿って発生した。腐食ひび割れ幅は、腐食率5%の試験体の腐食ひび割れ幅よりも大きく、腐食率の高さと腐食ひび割れ幅の大きさに関す

る整合性がとれる結果となった。また、東側および西側においては、腐食率 5% の試験体と同様に、上側と下側に、鉄筋間を結ぶ腐食による水平ひび割れと、コンクリート表面へ水平方向に向かう腐食ひび割れが発生した。

3. 2 疲労試験後のひび割れ性状

(1) 腐食率 5%

図-3 において、青線が 10^6 回載荷までの疲労試験で生じたひび割れであり、緑線が 10^6 回載荷以降の疲労試験で生じたひび割れである。図-3 (a) において、南側は、縦方向鉄筋に沿って発生した腐食ひび割れが僅かに進展したことと、全体的にひび割れ開口幅が大きくなったこと以外に、新たなひび割れは確認できなかった。これは、電食試験によって生じた腐食ひび割れが卓越していたためと考えられる。一方、北側においては、電食試験終了時点では腐食ひび割れは確認できなかったが、腐食による潜在的なひび割れが載荷によって試験体表面に現れた。測定した 50mm ごとの腐食率と、載荷によって試験体表面に発生したひび割れの発生順序を比較すると、載荷によるひび割れは、腐食率の大きい領域ほど載荷回数の少ない段階で発生していた。つまり、載荷によるひび割れの発生時期は腐食率の大きさに依存することが確認できた。また、東側と西側においては、載荷によって、コンクリート表面へ水平方向に向かうひび割れと、南側の鉄筋間を結ぶ鉛直ひび割れが発生した。

(2) 腐食率 10%

図-3 (b) において、全体的に、載荷によるひび割れの発生は少ない結果となった。腐食率 5% の試験体において、最初にひび割れを確認したのは 1.0×10^4 サイクル付近であるのに対し、腐食率 10% の試験体においては、 5.2×10^5 サイクル付近まで、ひび割れ開口幅は大きくなるものの腐食ひび割れの進展や新たなひび割れは一切確認できなかった。

3. 3 荷重変位関係

(1) 腐食率 5%

図-4 (a) に水平荷重作用位置における荷重変位関係を示す。載荷開始から 2.0×10^5 サイクルまでは変位の増加は確認できなかった。 2.0×10^5 サイクル以降は、 5.0×10^5 サイクルまで変位が緩やかに増加し、 6.0×10^5 サイクル以降の変位はほぼ一定であり、試験体は破壊に至らずに 1.0×10^6 サイクルに達した。その後、載荷荷重

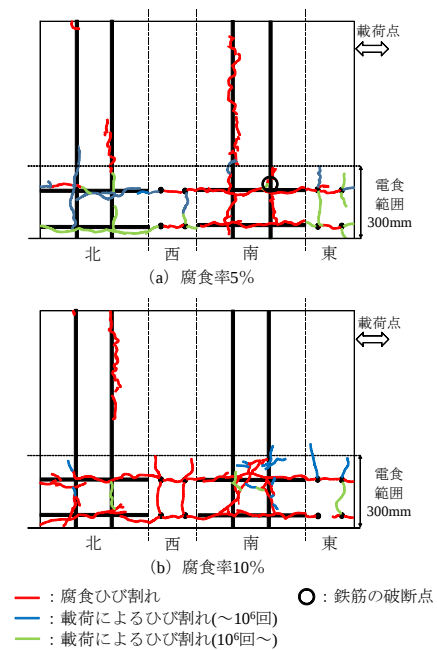


図-3 ひび割れ発生状況

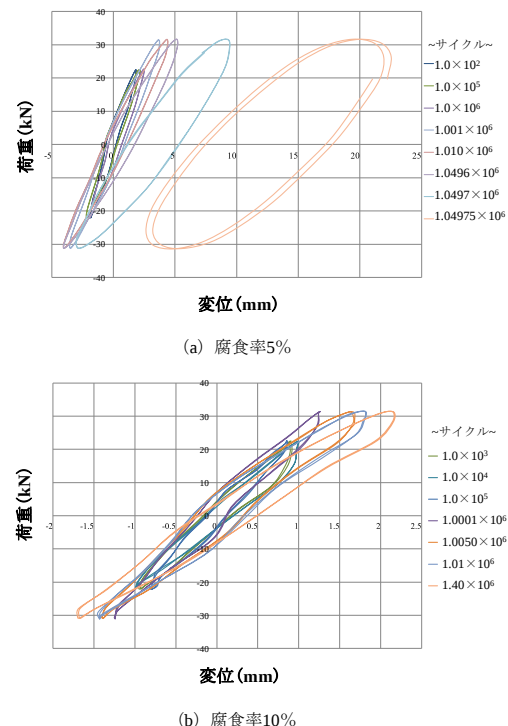


図-4 水平荷重作用位置における荷重変位関係

を静的試験の最大荷重の 70% の応力振幅とし、再び載荷を開始した。その結果、載荷開始直後から変位が大きく増加し、増加傾向を保ったまま 1.049774×10^6 サイクル目で破壊に至った。破壊に至った原因は、図-3 (a) において、試験体南側の縦方向鉄筋（東側）の基部上面から高さ 200mm から 250mm の領域の黒い円で囲った箇所が破断したためである。また、 1.0496×10^6 サイクル付近で鉄筋が破断したと考えられるため、図-4 (a) において、 1.0496×10^6 サイクル以降からヒステリシスが右側に推移している。

(2) 腐食率 10%

図-4 (b) に荷重作用位置における荷重変位関係を示す。载荷開始から 1.0×10^6 サイクルまで変位は 0.9mm 前後で一定で、変位の増加は確認できなかった。これは、载荷によるひび割れの発生が少ない要因である。 1.0×10^6 サイクルに達しても、試験体は破壊しなかったため、载荷荷重を静的試験の最大荷重の 70% の応力振幅とし、再び载荷を開始した。その結果、载荷開始直後から変位が大きく増加し、 1.2×10^6 サイクルまで増加傾向を辿った。 1.2×10^6 サイクル以降は変位の増加が確認できなかったため、 1.4×10^6 サイクルで载荷を終了した。また、鉄筋の破断は確認できなかった。

4. 鉄筋腐食の不均一性の影響

鉄筋の耐荷性能においては、腐食率 5% の試験体のみ、縦方向鉄筋の破断が確認される結果となった。これは、鉄筋の局所的な腐食によって、鉄筋のある部分に、変形に伴う応力が集中したために引き起こされたと考えられる。村上らの研究³⁾においては、鉄筋腐食の不均一性を式 (1) に示す偏差率を指標として用いることによって、曲げ耐力に及ぼす鉄筋腐食の不均一性の影響をある程度評価することが可能であった。

$$k = (\alpha - \alpha_{avg}) / \alpha_{avg} \quad (1)$$

ここで、 k : 偏差率、 α : 縦方向鉄筋の局所的な腐食率、 α_{avg} : 基部上面から高さ 450mm の範囲における縦方向鉄筋の平均腐食率である。この式を本研究の両試験体それぞれの縦方向鉄筋 4 本に適用する。図-5 は各試験体の偏差率の分布を示し、図-5 (b) において、腐食率 10% の試験体は、ばらつきが少なく一様に腐食したため偏差率がグラフの縦軸に密集している。図-5 (a) において、腐食率 5% の試験体の縦方向鉄筋の破断が確認された領域の偏差率は 0.55 であり、縦方向鉄筋 4 本の中で最大となった。一方、腐食率 10% の試験体においては、最大偏差率は 0.26 となった。このことは、腐食率 10% の試験体が、腐食率 5% の試験体が破壊に至った 1.049774×10^6 サイクルに達しても破壊しなかった原因であると考えられる。つまり、鉄筋腐食の不均一性が、本来備えている疲労性能を低下させることが確認できた。以上の結果より、本研究の範囲内ではあるが、偏差率の閾値を 0.5 とし、閾値を上回る領域では局所的な腐食が引き起こす応力集中が発生し、鉄筋が破断する可能性があり、閾値を下回る領域では鉄筋の破断が確認し難いという予測が可能である。この

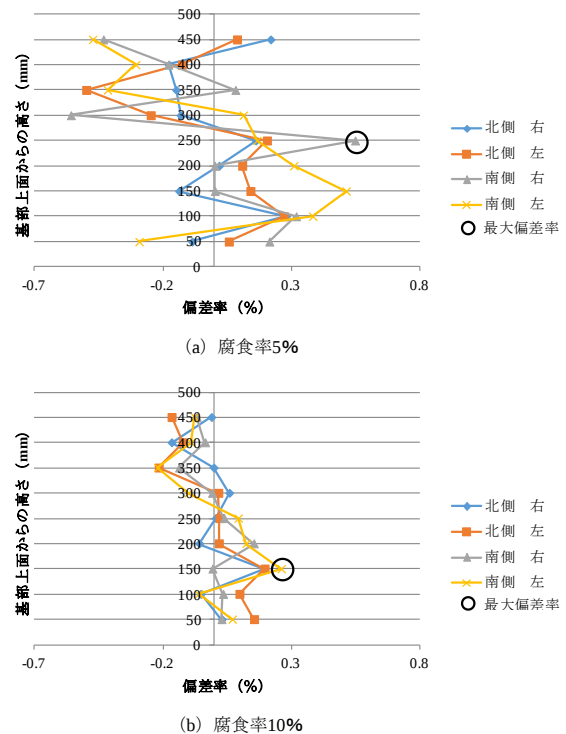


図-5 基部上面から 450mm の範囲における偏差率分布

ようにして、曲げ変形に対する疲労性能は、縦方向鉄筋の偏差率を評価することによってある程度予測できる可能性がある。また、偏差率の評価を行う際に、評価の対象となる領域の隣り合う領域との偏差率の差が大きいほど、より大きい応力集中が生じると考えられるので、閾値とともに偏差率の差を合わせて評価することが必要になる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 疲労荷重によるひび割れは、鉄筋の腐食率が大きい領域から順に発生することが確認できた。
- 2) 偏差率を用いて、疲労性能の低下を評価する可能性を示した。
- 3) 鉄筋腐食の不均一性が、本来備えている RC 壁部材の疲労性能を低下させる事が確認できた。

【参考文献】

- 1) 長岡和真ほか：複数の鉄筋腐食膨張厚がコンクリートの拘束圧に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1048-pp.1053，2012.6
- 2) 堤智明ほか：腐食ひび割れの発生機構に関する研究，土木学会論文集，No.532/V-30，pp.159-pp.166，1996.2
- 3) 村上裕貴ほか：鉄筋腐食の不均一性が RC 梁部材の残存曲げ耐荷性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.709-pp.714，2009.6