

鉄筋腐食した RC 壁部材の疲労性能に及ぼす環境条件の影響

中央大学 学生会員 ○松本 陽平

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、中性化などによりコンクリート内部の鉄筋腐食が進行することで、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、漏水により鉄筋に腐食が生じ、壁のかぶりコンクリートと鉄筋の一体性が失われた領域に、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、鉄筋腐食した RC 壁部材の疲労性能の低下に及ぼす環境条件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、環境条件の異なる試験体において、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 75mm×200mm×900mm、基部は 600mm×500mm×250mm、縦方向鉄筋のかぶり厚は 35mm である。北側および南側に縦方向鉄筋を 1 本と横方向鉄筋を 2 本配置した。横方向鉄筋は、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、横方向鉄筋の鉄筋間隔は 150mm とした。試験体の設計曲

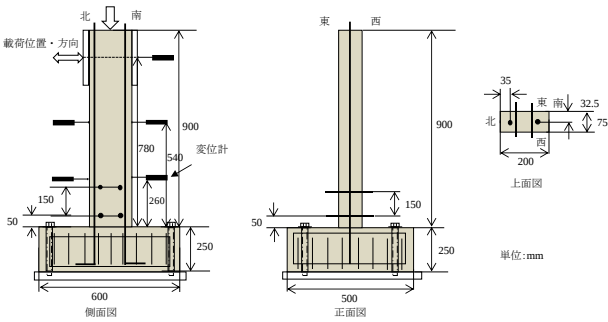


図-1 試験体概要

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

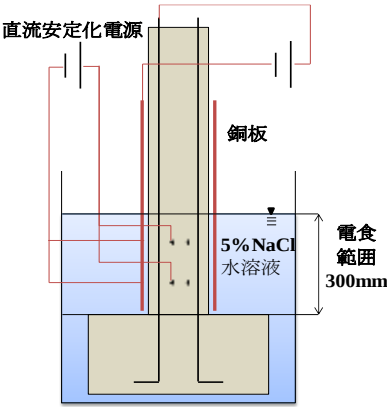
げ耐力は 11.2kN、設計せん断耐力は 13.5kN であり、曲げ破壊先行型である。水セメント比は 60%とし、練り混ぜ水には鉄筋の腐食促進のため 5%NaCl 水溶液を使用し、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。また、縦方向鉄筋を腐食させる対象領域は、図-1 において、基部上面から高さ 300mm の範囲であり、基部内の縦方向鉄筋には防錆剤を塗布した。試験体は打設後 24 時間で脱型し、7 日間湿布養生を行った後、電食試験を実施し目標腐食率に到達するまで通電した。試験体は、目標腐食率 5%の乾燥状態(腐食率 5%－D)と湿潤状態(腐食率 5%－W)の計 2 体で疲労試験を行う。なお、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

キーワード RC 構造物、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 TEL03-3817-1711



図－２ 電食試験概要図

表－２ 試験体の設計曲げ耐力と載荷荷重

試験体	設計曲げ耐力(kN)	載荷荷重(kN)	
		～10 ⁶ サイクル	10 ⁶ サイクル～
5%	11.19	±5.5	±7.8

表－３ 各試験体の鉄筋の腐食率

鉄筋	試験体	腐食率5% _d		腐食率5% _w	
		北側	南側	北側	南側
縦方向鉄筋	最大	6.90	9.00	8.09	8.28
	最小	1.40	4.20	1.77	3.65
	平均	4.95	7.44	5.69	6.71
横方向鉄筋	最大	9.48	10.54	6.38	10.43
	最小	7.79	5.71	5.27	7.92
	平均	8.64	8.13	5.83	9.17

単位: %

体を浸漬させ、直流安定化電源を用いて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。

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付近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。試験条件は、設計曲げ耐力の50%を応力振幅とした両振り载荷とする。水平荷重は平均荷重を0kNとし、1.0Hzのsin波とする。载荷回数は10⁶サイクルとするが、载荷回数が10⁶サイクルに達した時点で試験体が破壊しなかった場合は、設計曲げ耐力の70%を応力振幅とした両振り载荷によって、再び10⁶サイクル载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、载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2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%－D

表－3 に各試験体における鉄筋の腐食率を示す。腐食率の最大値、最小値、平均値は、北側、南側それぞれ縦方向は鉄筋1本、横方向は鉄筋2本の腐食率をまとめて算出している。平均腐食率からわかるように、各試験体の南側縦方向鉄筋と横方向鉄筋の腐食率が目標より大きくなり、北側の縦方向鉄筋が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) において腐食率5%－Dには南側に大きな剥離ひび割れが発生した。東面および西面においては、横方向鉄筋の下側の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、腐食膨張圧がコンクリート部へ影響を及ぼす範囲は、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、鉄筋からコンクリート表面に向かう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。測定した50mmごとの腐食率は測定箇所ごとにばらつきが大きい値となったが、鉄筋が破断を起こすような局所的に偏差率が突出して大きくなるような値は確認できなかった。

(2) 腐食率5%－W

縦方向鉄筋は腐食率5%－Dと同様に、北側より南側の方の腐食率が高い値となったが、目標腐食率に近い値となり、腐食率のばらつきも腐食率5%－Dと同様に大きい結果となった。腐食率5%－Wは南側に剥離につながるようなひび割れが発生した。これは南側の横方向鉄筋の腐食率が比較的大きな値なったことに

よるものである。さらに、南側は縦方向鉄筋の腐食により、開口幅の大きいひび割れが表面に生じている結果となった。

腐食ひび割れ幅はいずれの試験体も同程度であり、腐食率の大き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。

3. 2 疲労試験後のひび割れ性状

(1) 腐食率 5%—D

図-3 において、青線が 10^6 サイクル载荷までの疲労試験で生じたひび割れであり、緑線が 10^6 回载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、北面および南面においては、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、载荷による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、北面においても、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が確認された。また、北面では、曲げひび割れが载荷によって試験体表面の中腹部に発生した。

鉄筋の腐食率とひび割れとの関連性であるが、载荷によるひび割れは、腐食率の大きい領域ほど少ない载荷回数の段階で発生していた。すなわち、载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、東面と西面においては、载荷によって、コンクリート表面へ水平方向に向かうひび割れと、北側と南側それぞれの鉄筋間を結ぶ鉛直ひび割れが発生した。

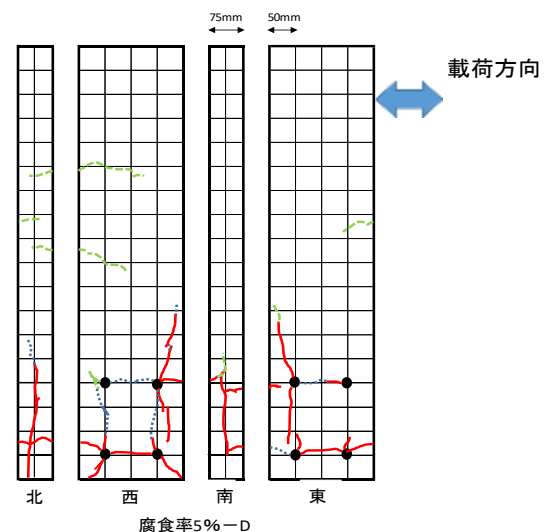
(2) 腐食率 5%—W

腐食率 5%—W の試験体では、载荷回数が 1.0×10^6 サイクルに達する前に破壊に至った。図-3 (b) において、北面の縦方向鉄筋の腐食による腐食ひび割れがほとんど確認できなかったが、腐食による鉄筋近傍に生じていた微細なひび割れが载荷によりコンクリート表面に現れた。一方、西面および東面において、南側のひび割れは縦方向鉄筋の腐食による影響が大きく、腐食ひび割れの開口幅が大きい結果となったため、载荷に伴うひび割れにより南側の剥離につながるひび割れが進行したと考えられる。

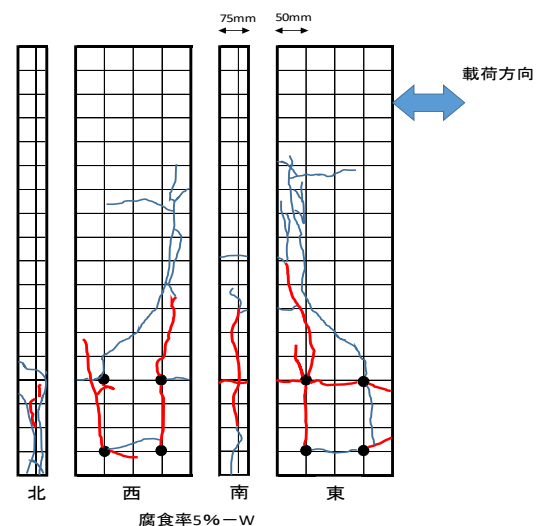
3. 3 荷重変位関係

(1) 腐食率 5%—D

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。赤い矢印がそれぞれの応力振幅の値を示している。载荷開始から設計曲げ耐力の 50% を応力振幅とした両振り载荷で 1.0×10^6 サイクルまで载荷したが変位は 0.8mm 前後で一定となり、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が少ない要因である。そして、試験体の破壊が確認できなかったため、 1.0×10^6 サイクル以降、設計曲げ耐力の 70% を応力振幅とした両振り载荷で再び载荷を開始した。その結果、変位が急激に増加した後に、1.8mm 前後で一定となり変位は再び増加が確認できなくなったので 2.0×10^6 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。载荷回数が 2.0×10^6 サイクルに到達しても、南側の剥離ひび割れがコンクリートの疲労

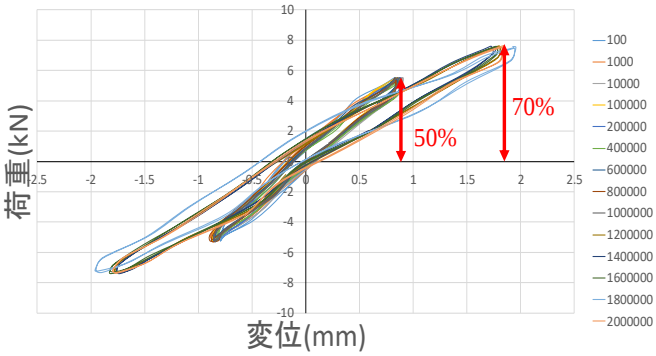


(a) 腐食率 5%—D

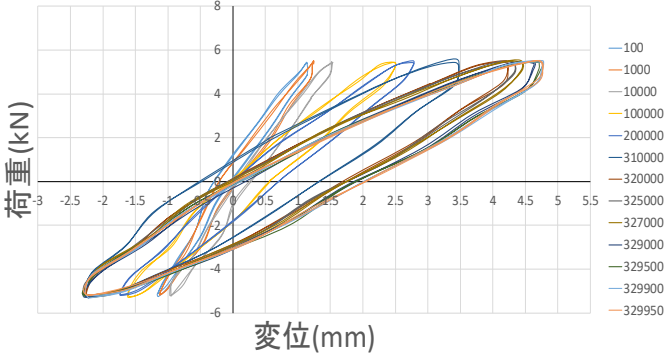


(b) 腐食率 5%—W

図-3 ひび割れ性状



(a) 腐食率 5%－D



(b) 腐食率 5%－W

図－4 荷重変位関係

表－4 各試験体の載荷回数と最大偏差率

試験体名	載荷回数(回)	最大偏差率
5%－D	2000000	0.43
5%－W	329950	0.45

性能に大きな影響を及ぼすことはなく、かぶりコンクリートと鉄筋は一体性を保っていた。

(2) 腐食率 5%－W

腐食率 5%－W の試験体は 1.0×10^6 サイクルに達する以前に試験体が破壊に至った。図－4 (b) において、急激な変位の増加の後、ヒステリシスの中心が徐々にプラス側へ移行していることがわかる。これは南面の剥離につながるようなひび割れが進行することにより壁のかぶりコンクリートと鉄筋の一体性がサイクルとともに失われたことが原因である。また、乾燥状態の試験体と比べて、湿潤状態の試験体は、水分の影響でコンクリートと縦方向鉄筋の付着応力が低下したと考えられる。このことから、せん断に対する抵抗力を失ったため、破壊モードが曲げ破壊からせん断破壊に移行して、試験体は破壊に至ったと考えられる。

4. 環境条件が疲労性能に及ぼす影響

疲労荷重を受ける RC 壁部材の曲げ耐力は、鉄筋の局所的な腐食によりその箇所に発生する応力が大きくなるため、局所的に腐食が進行した箇所の腐食率によ

って決定される。村上らの研究⁴⁾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、曲げ耐力に及ぼす影響を評価することが可能であった。

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

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 2 つの試験体の縦方向鉄筋 2 本にそれぞれ適用する。その結果を表－4 に示す。乾燥状態の試験体と湿潤状態の試験体とも腐食率において、不均一性が同程度であることがわかる。本実験では、乾燥状態で行った疲労試験が 2.0×10^6 サイクルまで載荷しても破壊に至らなかったことに対し、湿潤状態の試験体が約 3.3×10^5 サイクルでせん断破壊した。これは、水分によって RC 構造物のコンクリートと鉄筋の付着応力が弱まることで、鉄筋とコンクリートとの一体性が失われることが原因である。それにより、せん断に対する抵抗力を失った試験体がせん断破壊されたと考えられる。このことから、本実験の範囲内では、鉄筋腐食の不均一性が RC 壁部材へ及ぼす疲労性能に対する影響よりも、環境条件が及ぼす疲労性能の影響の方が大きいことが確認された。

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) 鉄筋腐食の不均一性よりも環境条件の方が疲労性能に与える影響が大きい。

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) 宇田周平ほか：RC 壁部材の疲労性能に及ぼす鉄筋腐食の影響に関する研究，コンクリート年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1039－pp.1044，2017
- 4) 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