

論文 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

宇田 周平*1・大下 英吉*2・熊野 義敏*3

要旨：RC 壁部材には疲労荷重が作用しており、鉄筋腐食が進行することでコンクリートの破壊や剥落等を生じさせ、第三者被害を引き起こすことが考えられる。そこで本研究では、鉄筋腐食の生じた RC 壁部材に対して、一定軸力作用下において曲げ疲労試験を実施した。その結果、疲労荷重を受ける RC 壁部材において、载荷によるひび割れの発生位置は腐食ひび割れの存在に影響されることが確認された。また、疲労荷重を受ける RC 壁部材の疲労性能を一定条件のもと、鉄筋腐食の不均一性によって評価する可能性を示した。

キーワード：疲労荷重、鉄筋腐食、RC 壁部材、鉄筋腐食の不均一性

1. はじめに

高度経済成長期に多くの土木構造物が建設され、今後は建設後 50 年が経過するものが急増する。そのため、既存の構造物の構造性能を正確に把握し、適切な方法で維持管理していく必要がある。したがって、各種劣化状況に起因した構造性能の変化を正確に把握することが重要である。

鉄筋コンクリートに生じる劣化現象は多岐にわたるが、その中でも特に中性化や塩害による鉄筋腐食は、鉄筋の断面積の減少やそれに伴う鉄筋とコンクリートの付着性能の低下や耐荷力の低下等、構造性能に及ぼす影響が大きい劣化現象の一つである。

既往の研究では、RC 梁部材に多くの成果が蓄積されている。具体的には、この種の劣化した RC 梁部材の静的挙動に関して、その耐荷力は腐食による鉄筋の断面減少に応じて低下する。しかしながら、鉄筋腐食による断面減少が不均一であった場合、局所的に腐食が進行している箇所において鉄筋の破断等により RC 部材が破壊する。したがって、鉄筋コンクリート構造物が保有する構造性能や耐久性能を評価するには、鉄筋腐食による断面減少の不均一性を定量的に評価することも必要不可欠である。

一方、曲げ疲労試験等の動的挙動に関して、その疲労強度は鉄筋の質量減少率の増加に伴って低下することが確認されている¹⁾。また、孔食が存在する場合の鉄筋の疲労強度は、応力集中による影響を受けやすく、腐食量が同程度であっても、RC 梁部材より疲労強度が低下する可能性があることも明らかとなっている。

このように、RC 梁部材の疲労性能に対する研究は行われているものの、交通機関でみられる RC 壁部材に関する研究はほとんど実施されていない。トンネル等における RC 壁部材には高速列車等の走行に伴う圧力変動に

よる繰り返し荷重が作用する。RC 壁部材に発生した腐食ひび割れによって、コンクリートの連続性が失われることで、その箇所においてモーメントが発生する。そのため、漏水などにより鉄筋腐食が生じた壁面に繰り返し荷重が作用すると、コンクリートの破壊やかぶりコンクリートの剥離・剥落が生じ、第三者被害が発生する恐れがある。しかしながら、RC 壁部材における疲労性能と鉄筋腐食の関連は解明されていないのが現状である。

そこで本研究では、RC 壁部材の疲労性能に及ぼす鉄筋腐食の影響を把握することを目的とし、鉄筋腐食の生じた RC 壁部材に対して一定軸力作用下において曲げ疲労試験を行った。その結果から、構造性能および耐久性に及ぼす鉄筋腐食の影響の評価を試みた。本研究は、鉄筋腐食の進行した RC 壁部材における疲労性能を把握するための基礎的研究であり、今後、RC 壁部材で発生する剥離剥落現象のメカニズムを解明するために行う実験の基準とすることが可能である。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の形状寸法および配筋を図-1 に示す。試験体寸法は、壁部では 450mm×200mm×900mm、縦方向鉄筋のかぶり厚を 35mm とし、その内側に横方向鉄筋を配置した。本研究における壁部材は、既往の研究²⁾に準じた一般的な RC 壁部材をモデル化したものである。縦方向鉄筋は図-1 に示すように、それぞれ R 鉄筋、L 鉄筋、R' 鉄筋、L' 鉄筋と称することとした。壁部の配筋は格子鉄筋 (2 本×2 本) とし、鉄筋間隔は 150mm とした。基部に関しては 600mm×500mm×250mm の形状寸法とし、基部での破壊が生じないように、鉄筋を密に配置した。鉄筋は壁部、基部ともに D16(SD295)を使用した。また、本実験におけるコンクリートの配合は表-1 に示すように、

*1 中央大学 理工学研究科都市環境学専攻 (学生会員)

*2 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

*3 東電設計株式会社 土木本部 技術開発部

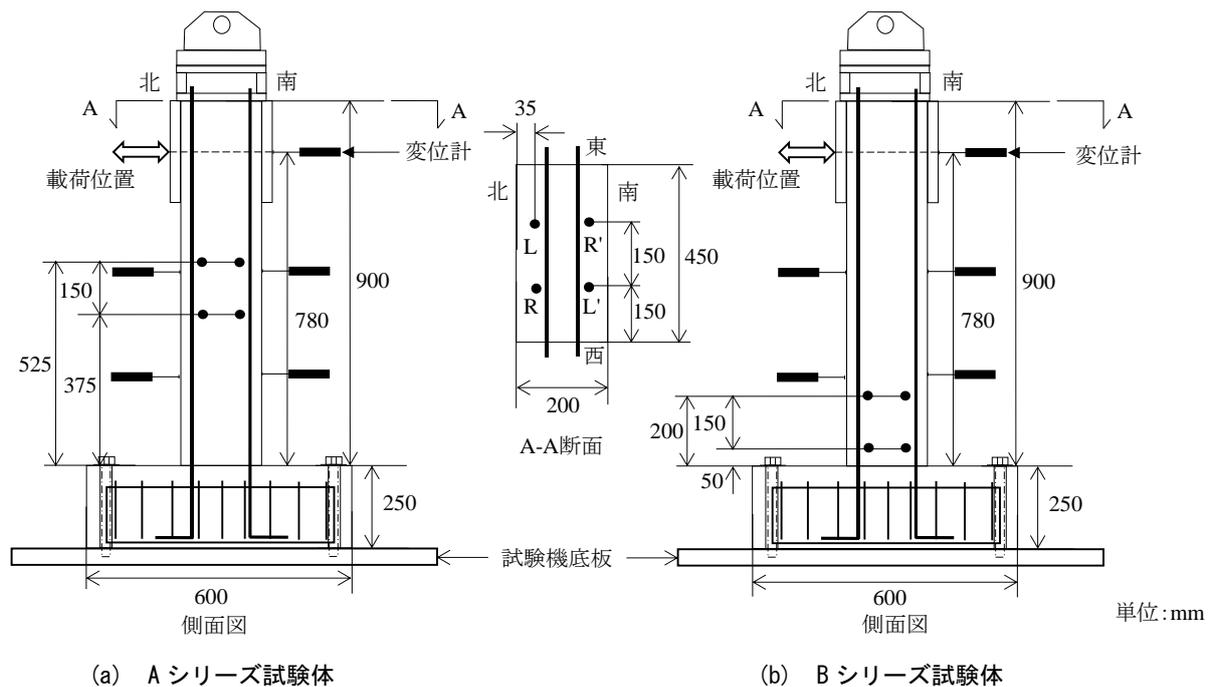


図-1 試験体概要

表-1 コンクリートの配合表

単位量(kg/m ³)				
水 W	セメント C	粗骨材 G	細骨材 S	AE 減水 剤
171	290	798	1003	1.2

水セメント比を 60%とした。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。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、電食試験を行い、腐食率が目標腐食率に到達するまで通電した。

試験体の設計曲げ耐力は 48.0kN であり、設計せん断耐力は 55.9kN であるため、曲げ破壊先行型の試験体である。

2.2 実験パラメータ

本研究における試験体は、格子鉄筋が壁部中心に位置する A シリーズと、格子鉄筋が壁部下方に位置する B シリーズの二つのパターンとした。A シリーズは、図-1(a)に示すように横方向鉄筋を基部上面から 375mm と 525mm の高さに配置し、B シリーズは、図-1(b)に示すように横方向鉄筋を基部上面から 50mm と 200mm の高さに配置した。A シリーズの試験体は電食試験により鉄筋を腐食させた試験体 A-5 および A-10 (それぞれ目標腐食率 5%および 10%) の計 2 体であり、B シリーズの試験体は同じく電食試験により鉄筋を腐食させた試験体 B-5 および B-10 (それぞれ目標腐食率 5%および 10%) の計 2 体である。

2.3 電食試験概要

鉄筋の腐食方法は、短期間に効率よ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。試験体の縦方向鉄筋 4 本および横方向鉄筋 4 本に銅線を繋ぎ、直流安定化電源により目標腐食率に到達するまで通電した。A シリーズについては、試験体を 5%NaCl 水溶液で満たした水槽内に浸漬させ、陰極として銅板を設置し、壁部全体を腐食させた。B シリーズについては、電食試験は基部上面から高さ 300mm までの位置を電食範囲として行い、この範囲に陰極として銅板を設置し、試験体基部および壁部電食範囲を 5%NaCl 水溶液で満たした水槽内に浸漬させて行った。

腐食率の算出方法は、载荷試験終了後に各試験体から縦方向鉄筋 4 本と横方向鉄筋 4 本をはつり出し、鉄筋を 10%濃度のクエン酸水素二アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬させ、腐食生成物を除去した後に鉄筋を 50mm 間隔に切断し、質量を計測した質量減少量により算出した。

2.4 試験方法および測定項目

疲労試験は図-1 に示すように、試験体基部を試験機の底板上に鋼棒で固定し、壁部頭頂部に鉛直アクチュエータにより軸圧縮力を作用させ、水平アクチュエータにより壁部頭頂部付近に繰り返し荷重を作用させて行った。疲労試験の载荷条件を表-2 に示す。軸力は道路橋示方書に準じ、壁断面に一定の軸圧縮力 (1.0N/mm²) を作用させた。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。水平荷重は電車や車の走行による風圧や揺れおよび地震等による地山か

らの力を模擬した。あらかじめ A シリーズ試験体と同様の試験体の静的試験から得られた最大荷重に基づき決定した。風圧や揺れ等を想定するため、弾性範囲内である最大荷重の 50% を応力振幅とした両振り载荷とし、1.0Hz の sin 波で 10⁶ サイクル作用させた。そして、10⁶ サイクル载荷終了時、試験体の破壊が確認されなかった場合は、静的試験最大荷重の 70% を応力振幅とした両振り载荷で再度 10⁶ サイクル作用させた。

測定項目は、鉛直荷重、鉛直変位、水平荷重、水平変位とした。水平変位を計測する変位計の設置位置は図-1 に示すように、基部上面から高さ 260mm, 520mm, 780mm の位置に水平荷重载荷点を除く壁部両面とし、計 5 個の変位計を設置した。計測するデータの採取間隔は 50 サイクル毎とした。また、電食試験後および载荷試験中のひび割れは目視により確認することとした。

3. 実験結果

3.1 電食試験結果

表-3 に疲労試験終了後、はつり出した鉄筋から得られた鉄筋腐食率を、図-3 に縦方向鉄筋の腐食率分布を示す。なお、B シリーズにおいて電食試験範囲は基部上面から 300mm であったが、南面に電食試験範囲外の腐食ひび割れが確認されたため、基部上面から 450mm の範囲の腐食率を算出した。縦方向鉄筋については北側と南側の二つに分けて平均腐食率を算出し、横方向鉄筋は北側、南側分けることなく 4 本の平均腐食率を算出した。また、図-3 において、腐食率分布は B シリーズの腐食率算出範囲である基部上面から高さ 450mm の範囲を記した。

表-3 から、試験体 A-5 は目標腐食率が 5% であったが、

表-2 载荷概要

試験体名	载荷条件		周波数
	~10 ⁶ サイクル	10 ⁶ サイクル~	
A-5, B-5	±22.5kN	±31.5kN	1.0Hz
A-10, B-10	±22.4kN	±31.4kN	

表-3 各試験体の鉄筋腐食率

試験体名 鉄筋		A-5			A-10			B-5			B-10		
		北面	南面	全体	北面	南面	全体	北面	南面	全体	北面	南面	全体
縦方向	最大	12.83	20.25	20.25	13.98	13.01	13.98	7.32	9.76	9.76	10.33	11.54	11.54
	最小	1.01	4.54	1.01	3.61	5.73	3.61	2.61	2.09	2.09	6.77	7.14	6.77
	平均	6.49	8.21	7.35	8.15	9.20	8.68	5.46	5.59	5.53	8.54	9.23	8.89
横方向	最大	12.38			19.53			11.07			18.64		
	最小	5.92			5.48			2.71			6.47		
	平均	9.15			10.18			6.60			11.08		

単位：%

縦方向鉄筋、横方向鉄筋ともに平均腐食率はそれを大幅に超える結果となった。これに対して、試験体 A-10 は目標腐食率をやや下回る値となった。A シリーズでは縦方向鉄筋の腐食率が北側と南側で差がみられた。また、図-3 から、各鉄筋の腐食率にばらつきがみられるが、それは後述する 4 章で検討することとする。

試験体 B-5 については縦方向鉄筋の平均腐食率は目標腐食率に近い値となったが、局所的な腐食率は A シリーズ同様大きな値となった。試験体 B-10 は目標腐食率よりも小さな値となったが、他の試験体と比較して腐食率に大きなばらつきは見られなかった。

3.2 ひび割れ性状

図-4 に疲労試験後の壁部におけるひび割れ性状を示す。図-4 において、赤線は電食試験後の腐食ひび割れを示しており、青線は疲労試験において 10⁶ サイクル以前の载荷によって発生したひび割れであり、緑線は疲労試験において 10⁶ サイクル以降の载荷によって発生したひび割れである。また、図中に示した緑丸は疲労試験によって鉄筋が破断した箇所を示している。

(1) 腐食ひび割れ性状

図-4 の赤線を見ると、A シリーズ、B シリーズともに、鉄筋格子上に腐食ひび割れが発生していることがわかる。

図-4(a) より、試験体 A-5 では、鉄筋格子上の腐食ひび割れに加えて、上下の横方向鉄筋同士を結ぶひび割れが発生している。また、横方向鉄筋からコンクリート表面に向かう腐食ひび割れが複数本確認された。試験体 A-10 では、図-4(b) からわかるように、南面に上下の横方向鉄筋上の腐食ひび割れ同士を結ぶひび割れが発生した。東面、西面に発生した腐食ひび割れは試験体 A-5 と比較して少なく、試験体 A-5 で確認された上下の横方向鉄筋同士を結ぶ腐食ひび割れも確認されなかった。図-4(c) より、試験体 B-5 では、北面の腐食ひび割れは南面と比較して少なくなっていることがわかる。図-4(d) をみると、試験体 B-10 では南面の鉄筋格子付近に腐食ひび割れの発生が多くみられた。また、西面においては横方

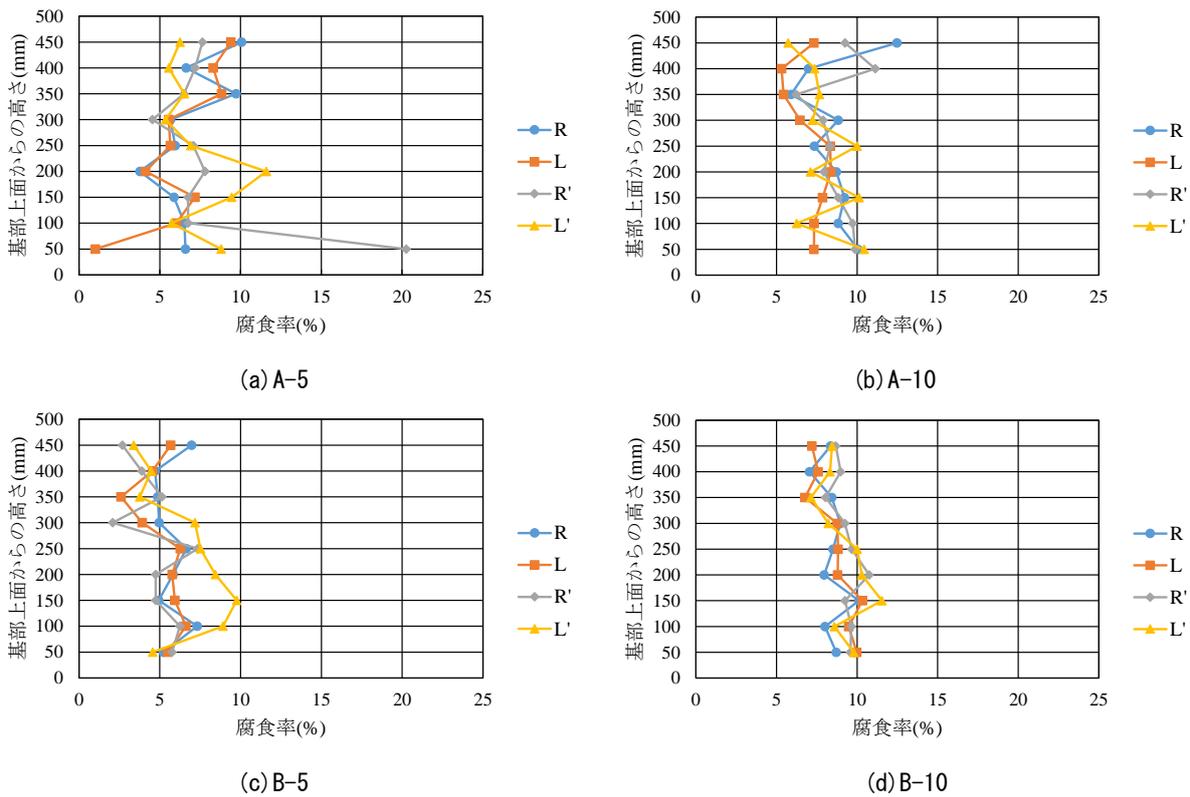


図-3 各試験体の縦方向鉄筋の腐食率分布

向鉄筋同士を結ぶひび割れの発生も顕著であった。

図-4 から、すべての試験体において南面の腐食ひび割れの発生が顕著であり、表-3 に示した、南面の腐食率の大きさに一致する結果となった。

(2) 荷重ひび割れ性状

試験体 A-5 では、荷重によるひび割れが縦方向鉄筋上にわずかに発生したが、これらのひび割れは表面にまで達していなかった腐食ひび割れが荷重ひび割れとして現れたものであると考えられる。試験体 A-10 では、鉄筋上に発生した荷重ひび割れ以外にも、図-4(b)の緑線で示した、横方向鉄筋より下部に荷重による曲げひび割れが発生した。図-4(a) , 図-4(b)から、A シリーズではともに、壁部と基部の接合部に青線および緑線で示した荷重ひび割れが発生した。これらは南面接合部に発生した荷重ひび割れが西面、東面へと卓越したものである。

試験体 B-5 における荷重によるひび割れ性状を見ると、北面、南面においては格子部である鉄筋上に荷重ひび割れが発生し、東面、西面においては上下の横方向鉄筋同士を結ぶひび割れが発生している。これは試験体 A-5 と同じく電食試験により発生した腐食ひび割れが電食試験終了時に表面に現れておらず、疲労試験の荷重によって荷重ひび割れとして現れたものであると考えられる。図-4(c)の東面と西面の上下の横方向鉄筋同士を結ぶひび割れが発生しているのはどちらも南側であり、これは表

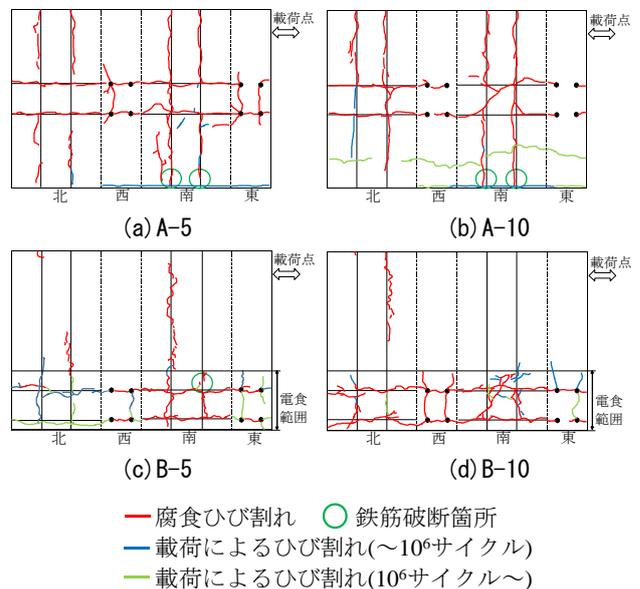


図-4 壁部のひび割れ性状

図-3 における南面の腐食率の大きさと一致している。試験体 B-10 では、疲労試験中に腐食ひび割れ開口幅が荷重によって大きくなる現象は見られたが、荷重によるひび割れの発生は少なかった。

また、図-4(a)および図-4(b)に示すように A シリーズでは接合部に卓越したひび割れが発生したが、試験体 B-5, B-10 では接合部にはひび割れが発生しておらず、

横方向鉄筋上に载荷によるひび割れが発生していることがわかる。このことから、腐食ひび割れの存在により、载荷によるひび割れ発生位置が接合部付近から上部へと移行していると考えられ、载荷によるひび割れ発生位置は腐食ひび割れに影響されることがわかった。

3.3 破壊形状

まず、A シリーズ試験体では、図-4(a)、図-4(b)から、南面の接合部近傍の縦方向鉄筋2本の破断が確認された。縦方向鉄筋の破断により、壁部と基部の接合部にひび割れが卓越することにより変位が増加し、破壊に至った。このことから、A シリーズではともに縦方向鉄筋の破断によって破壊が生じており、図-3(a)および図-3(b)に示すように、局所的な鉄筋腐食の影響によるものである。

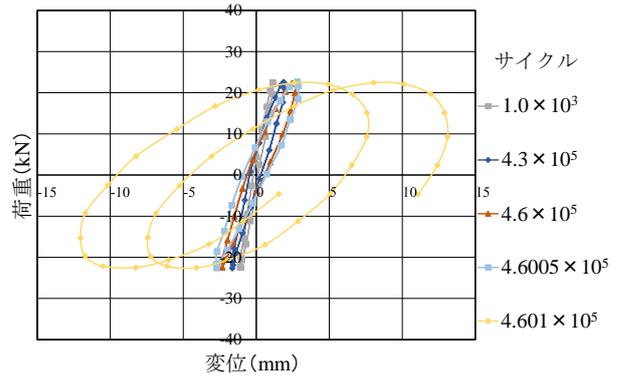
一方、試験体B-5に関しては、基部上面から高さ250mmの位置でR'鉄筋が破断していることが確認された。疲労試験中に鉄筋が破断したことにより耐荷力が急激に減少し、南面の腐食ひび割れ開口幅が大きくなることにより水平変位が増加したことで試験体が破壊した。

表-3によれば、A シリーズ、B シリーズともに鉄筋の平均腐食率は南側が大きくなっており、図-3から平均腐食率に比べ、局所的な腐食率も大きくなっていることがわかる。このことから、局所的に鉄筋腐食率の大きい箇所は発生する応力が大きくなり、その箇所の鉄筋が降伏、破断し、破壊に至ったと考えられる。なお、試験体が破壊したのは試験体A-5では 4.60101×10^5 サイクル、試験体A-10では 1.0781×10^6 サイクル、試験体B-5では 1.049774×10^6 サイクルであった。また、試験体B-10は 1.4×10^6 サイクルを超えた時点で変位の変化が見られなかったため試験を中断した。

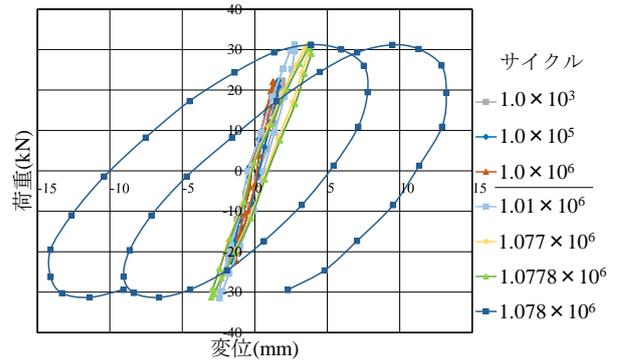
3.4 荷重変位関係

図-5に水平荷重作用位置における疲労試験の荷重変位関係を示す。図-5から、サイクルの増加とともに残留変位が徐々に増加していることがわかる。また、図-5(a)、図-5(b)、図-5(c)から、急激な水平変位の増加が確認されており、その付近で縦方向鉄筋が破断したと考えられる。その後、図中に示したサイクル直後に試験体の破壊が確認された。

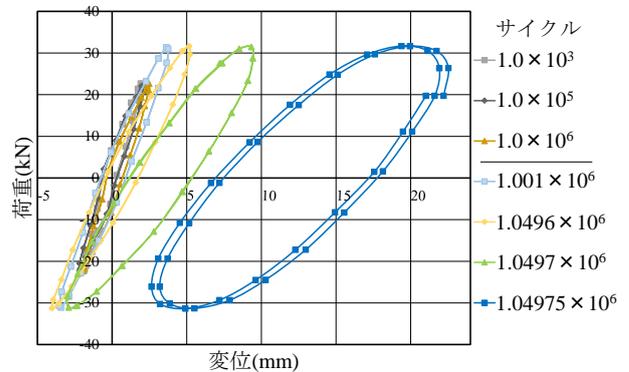
図-5より、 10^6 サイクル以前で破壊を生じているのは試験体A-5のみであることがわかる。これは、表-3に示した試験体A-5の実際の腐食率に対して、与える応力振幅が大きかったためであると考えられる。また、図-5(a)、図-5(b)では、急激な変位の増加が確認できたが、ヒステリシスの中心は原点であった。それに対し、図-5(c)では、急激な変位の増加のあと、ヒステリシスの中心がプラス側へ移行していることがわかる。これは、試験体A-5および試験体A-10では南面の縦方向鉄筋2本



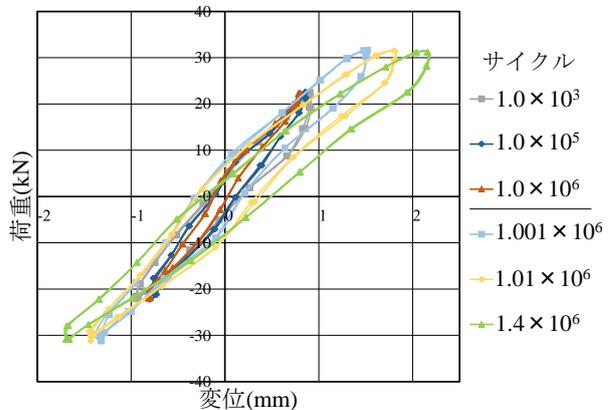
(a) A-5



(b) A-10



(c) B-5



(d) B-10

図-5 水平荷重作用位置における荷重変位関係

が破断したが、試験体 B-5 では、R'鉄筋のみが破断したためであると考えられる。

試験体 A-5 は与える応力振幅に対して試験体の腐食率が大きかったため塑性変形を生じ破壊に至った。試験体 B-5 も 10^6 サイクル以前で塑性変形が僅かに発生していることが確認された。A-10 および B-10 試験体では、 10^6 サイクル以前では弾性変形しており、応力振幅を大きくすると塑性変形が生じ破壊に至っている。

これらより、本研究の範囲内では、作用する疲労荷重が RC 壁部材の本来保有している曲げ耐力の 50% を超えると塑性変形が生じることがわかる。

4. 鉄筋腐食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が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。したがって、鉄筋の腐食の不均一性が存在する場合における鉄筋腐食した RC 壁部材の疲労性能は、局所的な鉄筋腐食率によってある程度評価可能である。そこで本研究では、鉄筋腐食の不均一性を示す指標として村上ら⁴⁾が提案した式(1)に示す偏差率を用いることとする。

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

ここで、 k : 偏差率、 α : 縦方向鉄筋の局所的な腐食率、 α_{avg} : 縦方向鉄筋の平均腐食率である。なお、A シリーズと B シリーズでは電食試験範囲が異なるため、B シリーズの電食試験範囲である基部上面から 300mm の範囲を式(1)の適用範囲とする。

図-6 は試験体の縦方向鉄筋の最大偏差率と载荷回数を示した片対数グラフであり、図中の点線は近似直線を表している。 10^6 サイクル以前に破壊した試験体 A-5 は最大偏差率が 1.69 となっており、応力振幅を増加させ 10^6 サイクル以降に破壊した試験体 A-10 および B-5 の最大偏差率はそれぞれ 0.46、0.55 であった。また、 1.4×10^6 サイクルに到達しても鉄筋の破断、試験体の破壊が確認されなかった試験体 B-10 の最大偏差率は 0.26 であった。試験体 A-5 の最大偏差率は他の試験体と比較すると大きい値となっていることが確認でき、最大偏差率が小さくなると、载荷回数は片対数で直線的に増加していることがわかる。図-6 より、応力振幅が曲げ耐力の 50% である疲労荷重に対して、最大偏差率は約 0.6 以上である場合、 10^6 サイクル以前に破壊が生じることが考えられる。このことから、鉄筋腐食の不均一性が疲労荷重を受ける RC 壁部材の疲労性能に影響を及ぼす可能性があるため、今後検討する余地があると考えられる。

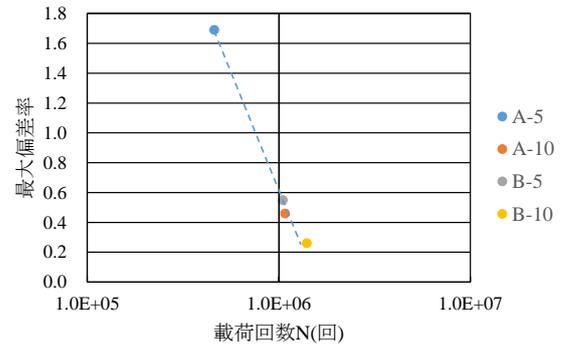


図-6 最大偏差率と载荷回数

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 疲労荷重を受ける RC 壁部材では、载荷によるひび割れ発生位置は腐食ひび割れの存在に影響された。
- (2) 本研究の範囲内において、一定軸圧縮力作用下における RC 壁部材の疲労試験では、作用する疲労荷重が壁部材の本来保有している曲げ耐力の 50% を超えると塑性変形が生じることが確認された。
- (3) 疲労荷重を受ける RC 壁部材の疲労性能を、一定条件のもとで鉄筋腐食の不均一性によって評価する可能性を示した。本実験の範囲内では、基部上面から高さ 300mm の範囲内の最大偏差率が約 0.60 以下の場合、 10^6 サイクル以下で鉄筋の破断、試験体の破壊は生じないことが確認された。

参考文献

- 1) 西脇敬一, 大屋戸理明, 長谷川雅志, 永岡 高: 鉄筋が腐食した RC 梁の疲労性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.783-788, 2002.6
- 2) 森田 武, 山下平祐, 別府万寿博, 鈴木 誠: 鉛直荷重を支持する鉄筋コンクリート造壁の火災時における変形挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1009-pp.1014, 2015.6
- 3) 鈴木三馨, 堀口賢一, 福浦尚之, 丸屋 剛: 鉄筋の腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1081-1086, 2009.6
- 4) 村上裕貴, 董 衛, 鈴木修一, 大下英吉: 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
- 5) 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, 2005.6