

論文 異なる環境条件における鉄筋腐食を生じた RC 梁の疲労挙動特性に関する研究

金廣 琴乃^{*1}・大下 英吉^{*2}

要旨：現在までに、鉄筋腐食を生じた RC 構造物が静的な外力を受ける事を対象とした実験的、解析的研究は数多く行われてきた。しかしながら、近年問題となっている動的外力に対しての研究は未だ十分とは言えない。そこで本研究では、鉄筋腐食を生じた RC 構造物が動的外力によって受ける影響を評価すると共に、既設構造物のライフサイクルメンテナンス手法の提案を行う事を目的として、腐食させた RC 梁部材に対し、地震動のような連続的な動的外力による曲げ疲労試験を行った。その結果、鉄筋腐食した RC 梁部材の耐力性能ならびに耐久性能は試験体が絶乾状態より湿潤状態の方が低下することを明らかとした。

キーワード：鉄筋腐食、疲労試験、RC 梁、曲げ破壊、電食

1. はじめに

ストックメンテナンス時代に突入した我が国において、構造物の長期的な供用を目指す動きが活発となり、その維持管理体系の確立が急務となっている。このことはすなわち、各種劣化に起因した構造物の各種性能低下を時空間において精度良く予測することが重要になるというわけである。

鉄筋コンクリートに生じる劣化現象は多岐にわたるが、特に中性化や塩害による鉄筋腐食は構造物として機能する鉄筋量を減少させるとともに、鉄筋とコンクリートの付着性能を低下させるなど、構造性能に及ぼす影響が大きい劣化現象の代表である。近年では、鉄筋腐食により、トンネル等の天井が剥離・剥落し、第三者被害をも生じる事態となっている。

既往の研究¹⁾では、静的荷重の載荷による RC 梁部材の曲げ破壊およびせん断破壊に及ぼす鉄筋腐食の影響評価が実施された。その結果、主鉄筋の断面減少率、腐食した鉄筋とコンクリートの付着性状およびコンクリートの腐食ひび割れ性状が RC 梁部材の構造性能に影響を及ぼす主たる要因であることが確認された。また、腐食鉄筋を有する梁部材の残存耐力および破壊性状を定量的に評価可能とする予測式の提案も行われた。

動的荷重の載荷に関しては、劣化を生じていない RC 梁部材や床版に対してこれまでに多くの実験的、解析的研究が行われており、疲労強度は鉄筋の疲労強度に依存することが知られている。また、鉄筋コンクリート構造物は様々な環境下において建設されることから、環境条件の異なる実験も数多く行われ、油中や水中では疲労強度が低下するといわれている²⁾。しかしながら、鉄筋が

腐食した梁部材での研究は数少なく、未解明な部分が多い現状にある。そこで、今後増大する劣化した RC 構造物の地震時応答等の挙動を評価し得るモデルの確立は急務であるといえる。

本研究では、鉄筋腐食を生じた RC 梁部材に対する曲げ疲労試験を行い、疲労荷重による構造性能ならびに耐久性能に関する検討を含水状態の異なる試験体を用いて環境条件の違いを模擬し議論することとする。

2. 実験概要

2.1 試験体概要および実験パラメータ

試験体の形状寸法および配筋を図-1に示す。試験体は、240mm×200mm×2530mmの梁部材であり、引張主鉄筋には、D16(SD295A)異形鉄筋を60mm間隔に3本配筋した。3本の主鉄筋はそれぞれL鉄筋、M鉄筋、R鉄筋と称することとする(図-1参照)。

試験体は、既往の研究¹⁾に準じて、鉄筋本数およびせん断スパン比を用いた。また、主鉄筋の定着長さはコンクリート標準示方書に基づいた。

実験パラメータは表-1に示すように、鉄筋腐食率および試験体の含水状態である。本研究では、目標腐食率は10%に統一し、加圧中における試験体の含水状態は絶乾状態および湿潤状態とした。なお、電食後15日程度乾

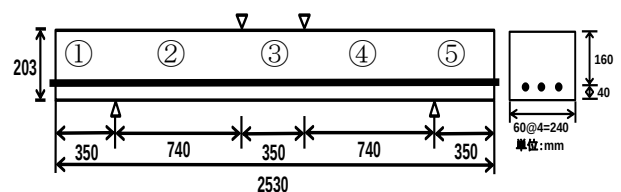


図-1 試験体概要

*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)

表-1 実験パラメータ

試験体名	載荷方法	載荷条件	腐食率 (%)	コンクリートの 圧縮強度(N/mm ²)
S0-d	静的	絶乾状態	0	35.2
D0-d	動的			36.8
D10-d			10	42.6
D10-w		湿潤状態		43.0

表-2 コンクリートの配合

単位量(kg/m ³)					
W	C	S	G	混和剤	NaCl
171	290	798	1003	1.2	8.6

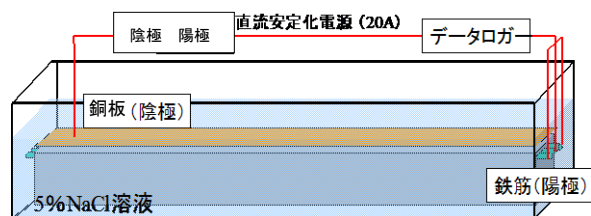


図-2 電食試験概要

表-3 荷重概要

荷重回数(回)	荷重荷重			
	D10-d,D10-w		D0-d	
	min	max	min	max
1.0×10 ⁰ - 4.0×10 ⁵	10	30	15	70
4.0×10 ⁵ - 1.0×10 ⁶	20	40	25	80

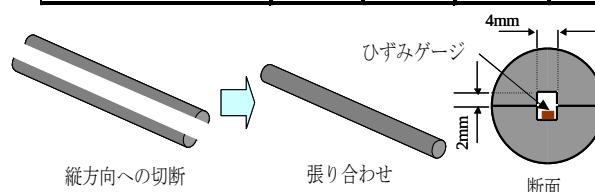


図-3 張り合わせ鉄筋

乾燥させ、水分を飛ばした試験体を絶乾状態、電食後直ぐに試験を開始し、試験中も湿ったタオルを巻き付けた試験体を湿潤状態とした。

2.2 コンクリートの配合および使用材料の力学特性

コンクリートの配合を表-2 に示す。設計基準強度は30N/mm²である。練混ぜ水には鉄筋の腐食を促進させるため5%NaCl水溶液を使用し、セメントは早強セメントを使用した。試験体は、打設後24時間で脱型した後に、7日間湿布養生を行った。なお、荷重の荷重は、材齢28日の時点で行った。各試験体の荷重試験時におけるコンクリートの圧縮強度は表-1 に示す通りである。

コンクリート標準示方書に基づく、曲げ耐力およびせん断耐力はそれぞれ、68.89 (kN)、83.15 (kN) であり、曲げ破壊先行型の梁部材とした。

2.3 腐食試験手法

本研究においては、鉄筋の腐食手法として比較的早期に、設定した腐食率が得られ、またその制御が容易である電食試験法を採用した。具体的な方法は、図-2 に示すように、5%のNaCl水溶液を満たした水槽内に試験体を浸漬させ、鉄筋を陽極側、銅版を陰極側に接続し、既定の積算電流量に到達するまで直流定電流を通電した。

2.4 荷重方法

(1) 静的試験

荷重点間隔350mm、支点間距離1830mmであり、荷重速度、0.5mm/minの変位制御による4点曲げ荷重である。対象となる試験体は、S0試験体および疲労試験において100万回荷重後も破壊に至らなかった試験体である。

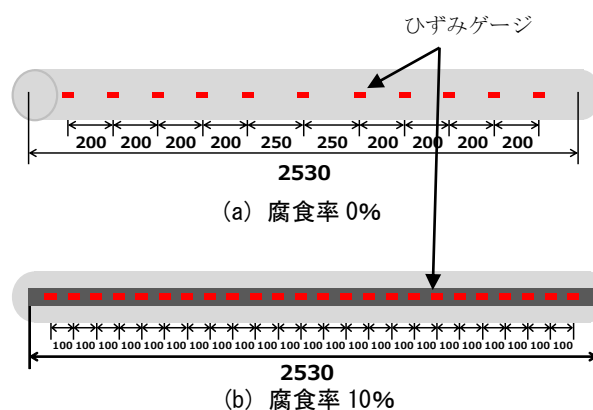


図-4 ゲージ貼り付け箇所

(2) 疲労試験

荷重点間隔および支点間距離は静的試験と同一であり、300kN疲労試験機を用いて、1Hz、sin波で100万回荷重を行った。加力方法に関しては表-3 に示す通りである。

2.5 測定項目

測定項目は、荷重、スパン中央のたわみ、鉄筋の軸方向ひずみである。スパン中央のたわみは、変位計を試験体中央および荷重点直下に各1本の、計3本により計測した。鉄筋の軸方向ひずみの計測においては、腐食によるひずみゲージの破損を防止するために、図-3 に示すように、鉄筋内部にゲージを貼りつけることにより実施した。具体的な方法は、鉄筋を軸方向に切断後、その断面内に2mm×4mmの溝を切削し、ひずみゲージを貼りつけた後、2対の切断された鉄筋をエポキシ樹脂接着剤により張り合わせて、一本の鉄筋とした。張り合わせ鉄筋

表-4 主鉄筋の平均腐食率

試験体	腐食率 (%)				繰返し回数 (回)	破壊モード
	L	M	R	平均		
D10-d	11.89	12.53	11.37	11.93	1.0×10^6	(付着割裂)
D10-w	9.49	8.60	9.64	9.24	49650	付着割裂
D0-d					995250	曲げ破壊

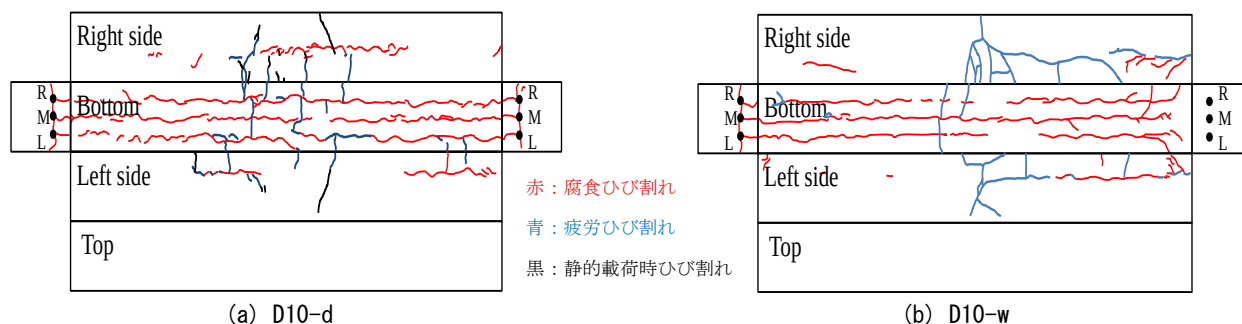


図-5 腐食ひび割れ図

表-5 腐食ひび割れ幅

単位 (mm)	区間	①	②	③	④	⑤	平均	R,Lの平均	Mの平均	Max
D10-d	平均ひび割れ幅	R	0.11	0.86	1.21	0.96	0.44	0.56	0.18	2.00
		M	0.41	0.22	0.10	0.10				1.00
		L	0.10	0.46	0.27	0.42				2.50
D10-w	割れ幅	R	0.13	0.18	0.10	0.24	0.57	0.38	0.95	0.80
		M	0.24	0.78	2.54	1.03				3.00
		L	0.61	0.24	0.10	0.91				2.00

は3本配筋した引張主鉄筋のうち中央のみとし、残りの鉄筋には通常の鉄筋を使用した。なお、ひずみゲージの貼り付け箇所は図-4に示す通りであり、リード線は、健全鉄筋については鉄筋の側面に沿って這わせた後、結束戦にて固定、腐食鉄筋は溝に沿って這わせた。

鉄筋は、载荷試験終了後にはつり出し、10%濃度のクエン酸二アンモニウム溶液に24時間浸漬させ、腐食生成物を除去した。その後、腐食鉄筋の質量を計測し、電食以前の健全鉄筋との質量差を健全鉄筋の質量で除することにより腐食率を算出した。腐食率算定式を次式に示す。なお、表-4に示す腐食率は、各鉄筋を100mm間隔で切断し腐食率 n を算出し、それを平均した値である。

$$n = \frac{m - m'}{m} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

$$A' = A \times (1 - n/100)$$

ここで、 m' は腐食後の鉄筋の質量、 m は腐食前の鉄筋の質量、 A' は腐食後の鉄筋の断面積、 A は健全鉄筋の断面積である。なお、張り合わせ鉄筋の腐食後の断面積に関しては式(1)より算出した腐食鉄筋の断面積に、鉄筋に設けた溝の断面積(16mm²)を加味した値とした。

3. 実験結果

3.1 コンクリートの腐食ひび割れおよび鉄筋の腐食量

コンクリートの腐食ひび割れを図-5に示す。いずれの試験体もかぶりコンクリートには、軸方向鉄筋に沿ったひび割れが生じている。D10-dにおけるひび割れ幅は、表-5(領域は図-1参照)に示すようにR、L鉄筋では、0.56mm、M鉄筋では0.18mmであり、M鉄筋はR、L鉄筋に比べて小さい。これは、M鉄筋はR、L鉄筋による膨張圧を受けるためである。なおD10-wにおいてはM鉄筋がR、L鉄筋に比べて大きい値となった。これは、M鉄筋の腐食速度がR、L鉄筋と比較して早く、膨張圧の影響を受けなかったためであると考えられる。

各試験体の主鉄筋の腐食率分布を図-6に、主鉄筋の平均腐食率を表-4に示す。主鉄筋全体の平均腐食率は、いずれの試験体も目標腐食率に近い値を示し、各試験体にそれぞれ配筋されたL、M、Rの鉄筋腐食率はほぼ同じ値を示した。しかしながら、平均ひび割れ幅は腐食率の小さいD10-wの方が大きい結果となった。これは、D10-wは、腐食の進行速度が早く、腐食生成物が短時間で多量発生したため、コンクリート内部の膨張圧が急激に上がったためであると考えられる。

3.2 破壊モード

梁の破壊形態であるが、図-5に示すように、D10-wは49650回の時点でかぶりコンクリートの剥落によって

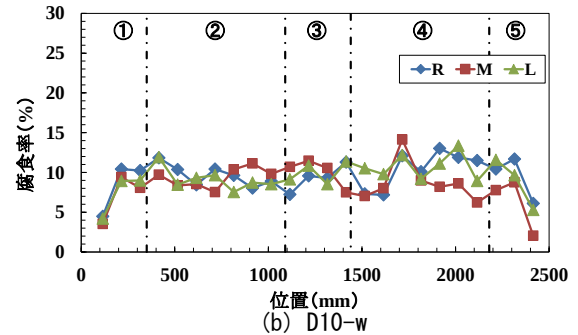
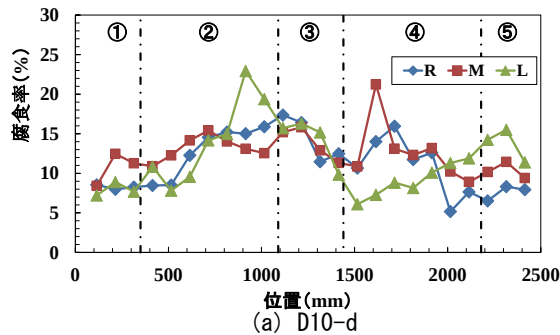


図-6 腐食率分布

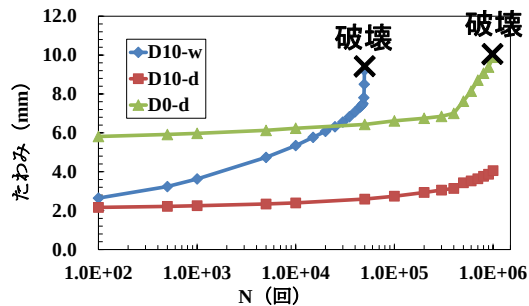


図-7 たわみと繰り返し回数の関係

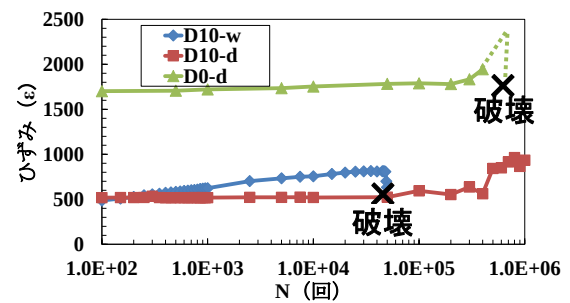
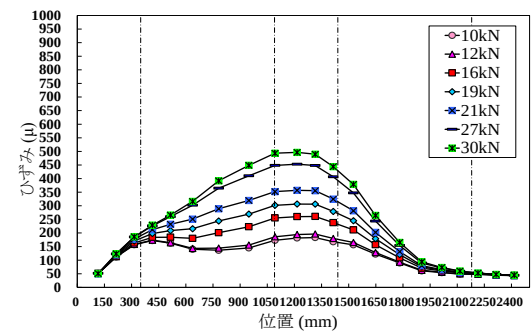


図-8 鉄筋ひずみと繰り返し回数の関係

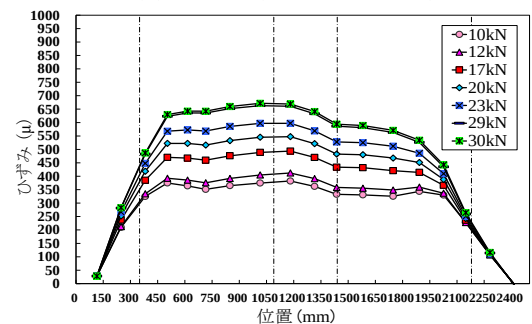
破壊に至り、D0-d は 995250 回の時点で曲げ破壊に至った。一方、D10-d は 100 万回の繰り返し载荷によって破壊には至らなかったため、破壊まで静的荷重を载荷させた。D10-w が D10-d に比べてかなり少ない繰り返し回数で、またコンクリート片の剥落によって破壊した原因は、腐食ひび割れ幅にも起因するが、ひび割れや腐食鉄筋とコンクリート間に存在する水分が、鉄筋とコンクリートとの付着性能を低下させたためであると考えられる³⁾。

3.3 繰り返し回数に応じたたわみとひずみ履歴

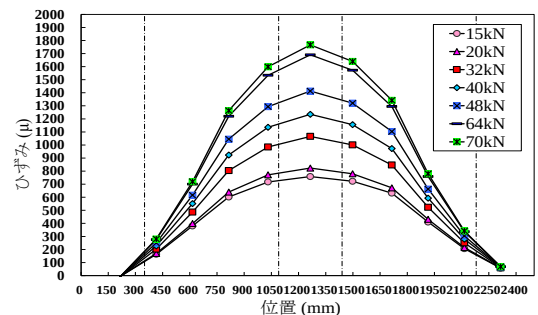
図-7 および図-8 は、それぞれ繰り返し回数に応じた試験体中央のたわみおよび試験体中央部に設置した鉄筋のひずみを示している。D10-d および D0-d は、たわみとひずみは繰り返し回数 30 万回程度まではほぼ一定値であることに對して、D10-w では繰り返し回数の増加に伴って大きくなっている。これは、3.5 節で示すが、D10-w は D10-d に比べて腐食ひび割れ幅が大きく、さらにひび割れ間に存在する水分の影響によって腐食鉄筋とコンクリートとの付着が小さく、腐食鉄筋とコンクリートとの一体性が失われているためである。一方、D10-d および D0-d では腐食鉄筋とコンクリートの付着がある程度保持されているため、梁の剛性が D10-w に比べて大きいためである。なお、D0-d の試験体中央部に設置した鉄筋のひずみゲージは繰り返し回数 40 万回あたりで破壊したため、点線にて破壊までのひずみ履歴を D10-w をもとに予測し、示してある。また、図-7 より繰り返し回数 100 万回以内に破壊を生じた D10-w および D0-d の変位は破壊直前に急激に大きくなっていることがわかる。これは破壊直前において、鉄筋とコンクリートとの付着が小さくなったためであると考えられる。



(a) D10-d (50000 サイクル)



(b) D10-w (49650 サイクル)



(c) D0-d (50000 サイクル)

図-9 ひずみ履歴

3.4 ひずみ履歴

図-9は、 5.0×10^4 サイクル周辺における鉄筋のひずみ履歴を示している。D10-dおよびD0-dは 5.0×10^4 サイクル目の値を、D10-wは破壊直前である49650サイクル目の値を示す。絶乾状態の試験体であるD10-dおよびD0-dのひずみは等曲げ区間に近づくほど大きくなっていくことがわかる。しかしながら、湿潤状態の試験体であるD10-wは定着領域以外ではほぼ、一定値となっている。腐食試験体であるD10-dおよびD10-wは、図-6に示す腐食率分布と同じ形状の傾向を示しており、腐食の程度が大きくなるにつれて鉄筋の強度が下がり鉄筋のひずみに影響を与えたと考えられる。また、D10-wは腐食ひび割れおよび鉄筋腐食により生じる鉄筋とコンクリートとの隙間に水分が存在し、コンクリートの強度が低下したことに加え、表-5にも示すようにM鉄筋の腐食ひび割れ幅が大きかったことによって付着劣化の程度が大きく、ひずみが一定値となったのではないかと考えられる。

3.5 付着応力履歴

付着応力 τ は、式(2)を用い算出した。

$$\tau = \frac{1}{\pi D} \frac{dP}{dx} \quad (2)$$

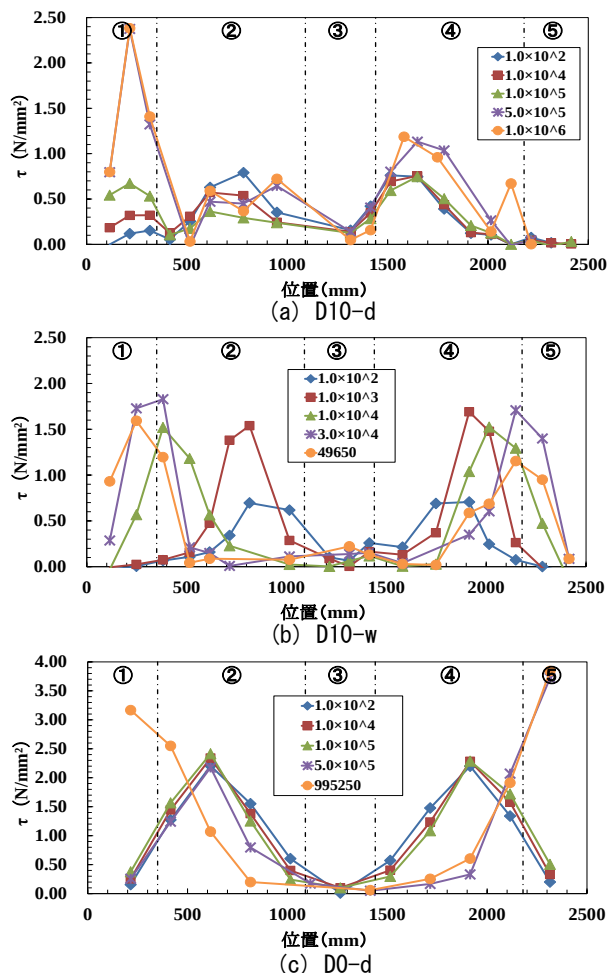


図-10 繰返し回数における付着応力分布

ここで、Dは鉄筋径、Pは鉄筋力である。

鉄筋力勾配の算出方法であるが、腐食試験体の鉄筋は断面欠損を有することから測定近傍領域(100mm)の腐食率を2.5節において述べた手法により測定し、測定点近傍の周長、断面積を算出した。そして、着目する測定点とその両隣の測定点の計3点を通る2次曲線から描く測定点の鉄筋の引張力勾配を算出した。

図-10にある繰返し回数の付着応力の分布を示す。まず、等曲げ区間③においては、付着応力は全ての試験体において発生しておらず、理論的値と同様の傾向を示している。

次に、繰返し回数に応じた付着応力の変化であるが、D10-wは付着応力が定着領域に進展していくことがわかる。絶乾状態の試験体であるD10-dおよびD0-dはせん断領域にも付着応力が生じていることから、これは繰返し回数の増加に伴って試験体中に存在する水分の影響により、試験体に生じるひび割れが発生しやすくなったと共に、ひび割れ進展速度も速くなり、せん断領域における鉄筋とコンクリートとの付着応力が低下したためであると考えられる。また、繰返し回数が増加をしても、D0-dの付着応力は試験開始から破壊に至るまでほとんど変化が見られなかった。これは、D0-dは非腐食の絶乾状態の試験体であるため、コンクリートと鉄筋との付着が十分に保持され、コンクリートに生じる曲げひび割れが、繰返し回数の少ない時点で梁全長にわたり発生したためであると考えられる。

3.6 1サイクルにおける付着応力履歴

図-11は、定着領域における1サイクルにおける付着応力の変化を示している。絶乾状態の試験体であるD10-dは荷重の載荷時および除荷時において、付着応力が1サイクル間で同じ経路を通っていることがわかる。しかしながら、湿潤状態であるD10-wは 2.0×10^4 サイクルを境にして、荷重の載荷時と除荷時で異なった経路を通るヒステリシスがみられる。D0-dがD10-dと同様の傾向であることから、D10-wの挙動は水分の影響によるものと考えられる。そして、その後は繰返し回数に応じて、1サイクルでの付着応力の変化量は次第に大きくなっていく。また、付着応力は繰返し回数の増加にともなって大きくなっていくが、D10-dは 2.0×10^5 サイクル、D10-wは 4.0×10^4 サイクル程度より小さくなっていくことがわかる。このことにより、鉄筋とコンクリートとの付着が疲労により、低下していることがわかる。

3.7 疲労強度

100万回以内に破壊したD10-wを対象として、疲労強度と繰返し回数の関係を図-12に示す。図中には、二羽らの式⁴⁾から求まる異形鉄筋の疲労強度算定値、コンクリートの疲労強度算定値および既往の研究⁵⁾において

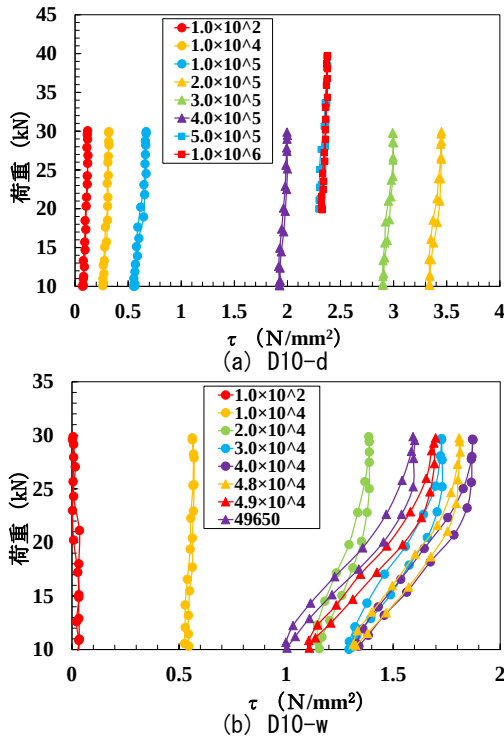


図-11 1サイクルにおける付着応力の変化

求めた鉄筋腐食した RC 梁の疲労強度を併せて示している。鉄筋およびコンクリートの疲労強度算定値は、式(3)(4)に示す通りである。

$$f_{sr} = (1 - \sigma_{\min} / f_{su}) \frac{10^{\alpha}}{N^K} \quad (3)$$

$$f_{rd} = k_{1f} f_d (1 - \sigma_p / f_d) (1 - \frac{\log N}{M}) \quad (4)$$

ここで、 f_{sr} は疲労振幅強度、 f_{su} は鉄筋の引張強度、 K は 0.12、 α は $k_0(3.17-0.003D)$ 、 D (mm) は鉄筋の公称径、 k_0 は 1.00、 k_{1f} は 0.85、 f_d はコンクリートの設計強度、 σ_p は 0、 M は 17 である。

D0-d の疲労強度は二羽らの式から求まる疲労強度算定値とはほぼ一致する結果となった。しかしながら、D10-w は、疲労強度算定値および既往の研究結果を大きく下回る結果となり、コンクリートの疲労強度算定値と近い値となった。これは D10-w が腐食試験体かつ湿潤状態にあったことに併せ³⁶⁾、付着割裂破壊による鉄筋引抜きにより、試験体が破壊を生じたためである。また、(3) 式中の $\sigma_{\min}$ を 53N/mm^2 として D10-w の実験結果を通過する曲線が図-12 中の破線である。破壊回数は黄色で示す約 1000 回と非常に小さなものとなる。

多くの鋼材の場合、およそ $10^6 \sim 10^7$ 回の繰返し回数でこれ以上回数を増やしても破断まで至らない応力振幅値が存在する。D10-d に関しては、30 万回辺りより、繰返し回数が増加しても付着応力に変化がみられなかったことから、腐食により強度は低下していたが、強度に対して振幅が小さかったのではないかと考えられる。

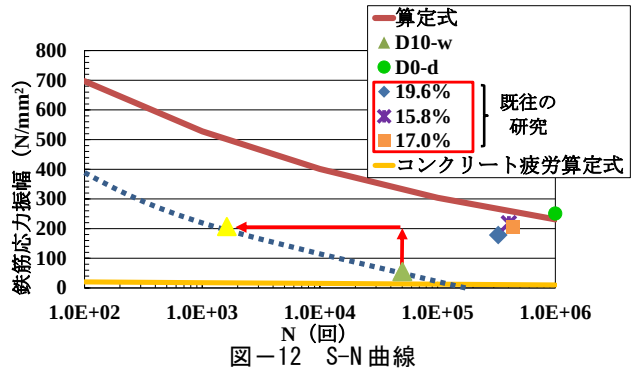


図-12 S-N 曲線

4. まとめ

本研究では、腐食した RC 梁部材の疲労強度を含水状態を変化させ、腐食率、腐食ひび割れ、付着応力などの観点から検討したものである。以下、本研究により得られた知見を示す。

- (1) 非腐食試験体は梁全体に渡って付着が確保されているため、繰返し回数の増加に伴って梁全域に曲げひび割れが発生する。
- (2) 鉄筋腐食した梁の付着応力発生位置は疲労回数が増加するにつれて、等曲げ区間からせん断領域、定着領域へと変化すると思われる。
- (3) コンクリートと腐食した鉄筋との間に存在する水分は RC 梁部材の疲労強度に大きく影響をもたらすと考えられる。これは、水分によって付着力が小さくなるためであると考えられる。

参考文献

- 1) 村上祐貴ほか：鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究，コンクリート工学論文集，vol.17,No.1,pp.61-74,2005
- 2) 皆川翔平，子田康弘，岩城一郎：RC はりの耐疲労性に及ぼす環境温度および含水状態の影響，コンクリート工学年次論文集，vol.1.37,No.2,2015
- 3) 大下英吉，谷口幸弘：部分的に水で飽和された多孔質材料としてのコンクリートの破壊エネルギーに関する研究，土木学会論文集，No.620/V-43,pp.257-270,1999
- 4) 二羽淳一郎，前田詣一，岡村甫：異形鉄筋の疲労強度算定式，土木学会論文集，第 354 号，V-2,pp.73-79,1985.2
- 5) 西脇敬一，大屋戸理明，長谷川雅志，長岡高：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.1.24,No.1,2002
- 6) Wei-Jian Yi et al. : Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams with Corroded Steel Reinforcement, ACI Structural Journal/September-October, No.107-S51,2010