

論文 腐食した RC 部材の剥離・剥落に及ぼす環境条件の影響に関する研究

宇田 周平*1・大下 英吉*2・鈴木 修一*3・熊野 義敏*3

要旨：鉄筋腐食を生じた RC 壁部材の剥離・剥落に及ぼす環境条件の影響を解明するため、RC 壁部材に対して疲労試験を実施するとともに、二次元非線形解析ソフトを用いて剥落が生じる際の RC 部材に発生する応力状況を把握することを試みた。その結果、湿潤状態ではかぶりコンクリートの剥落が発生しやすいことを示した。また、解析を行うことで荷重変位関係において解析値と実験値において比較的良い一致が得られ、コンクリートの応力分布から、剥落が生じる際は引張側のコンクリートに圧縮応力がほとんど作用しないことや、剥落が発生した際にかぶりコンクリートの一体性が消失することを示した。

キーワード：疲労荷重, 鉄筋腐食, RC 壁部材, 環境条件, 剥離・剥落, 有限要素法解析

1. はじめに

高度経済成長期に多くのコンクリート構造物が建設されたわが国では、今後建設後 50 年を超える構造物の割合が急増する。これらの構造物は建設時と比較して構造性能が低下していると考えられる。そのため、既存の構造物に対して適切な維持管理を行っていくうえで、各種劣化要因に起因した構造性能の変化を正確に把握することは極めて重要である。

鉄筋コンクリートの劣化は多岐にわたるが、その中でも特に中性化や塩害などによる鉄筋腐食は、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状の低下や耐力の低下等、構造性能に及ぼす影響が大きい劣化現象の一つである。それに加え、鉄筋腐食が進行した領域に荷重が作用することで、コンクリート片の剥離・剥落を招き、第三者被害が発生する可能性がある。

このような背景から、近年では鉄筋腐食を生じた RC 部材の構造性能に関して、数多くの研究が行われている。既往の研究¹⁾では、RC 床版に対し付着試験を行うことで、各種パラメータから剥離・剥落リスクの評価方法の検討を行っている。これにより、残存付着強度に及ぼすひび割れの進展モードとかぶり厚さの関係性を明らかにし、残存付着強度を用いることでかぶりコンクリートの剥離・剥落を定性的に評価可能であることが示された。

このように、鉄筋腐食を生じた RC 部材において、自重を模擬した静的荷重によるかぶりコンクリートの剥離・剥落について研究はなされているものの、風圧や揺れを模擬した疲労荷重による剥離・剥落に関する研究はほとんど実施されていない。トンネル等にみられる RC 壁部材においては、地山からの地下水の流入等により鉄筋腐食が促進され、湿潤状態にある領域に疲労荷重が作用することにより、かぶりコンクリートの剥離・剥落が生じると考えられる。しかしながら、鉄筋腐食を生じた RC

壁部材における剥離・剥落に及ぼす環境条件が与える影響は解明されていないのが現状である。

そこで本研究では、鉄筋腐食を生じた RC 壁部材に対し、乾燥・湿潤状態の下、疲労試験を行った。その結果からかぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす環境条件の影響の評価を試みた。また、実験で使用した試験体を対象として、二次元非線形解析ソフト ATENA(ver.5.4.1)を用いて解析を行い、RC 壁部材の変形挙動を再現するとともに、剥落が生じる際に RC 部材に発生する応力状況を把握することを試みた。

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。本研究における試験体は既往の研究²⁾に準じた一般的な RC 壁部材である。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。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。格子鉄筋の位置は図-1 に示すように、基部上面から 50mm の位置とした。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、本研究におけるコンクリートの配合は表-1 に示すように、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、セメントは早期に実験を開始するため、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、電食試験によりコンクリート内部の鉄筋を腐食させた。本研究では、短期間に効率良く鉄筋を腐食させる

*1 中央大学大学院 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 (正会員)

*3 東電設計株式会社

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法(mm)	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	C	S	G	AE減水剤	NaCl
20	60	10	5	171	290	798	1003	1.2	8.6

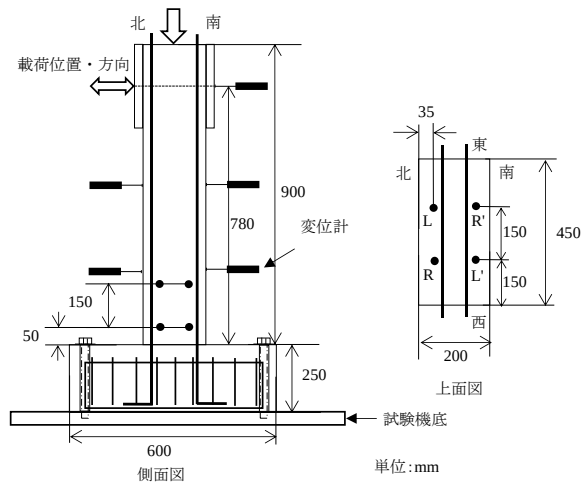


図-1 試験体概要

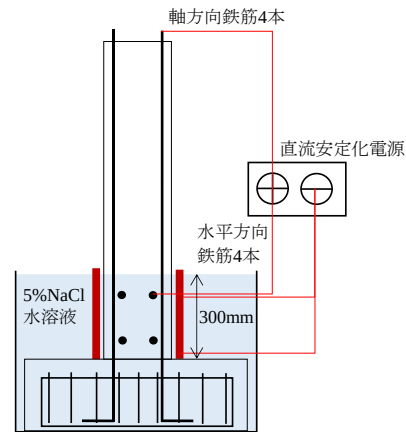


図-2 電食試験概要

表-2 実験パラメータ

試験体名	目標腐食率(%)	乾燥・湿潤条件	圧縮強度(N/mm ²)
5-D	5	乾燥	38.6
10-D	10		47.1
10-W		湿潤	39.5

表-3 荷荷条件

試験体名	荷荷条件		周波数
	～10 ⁶ サイクル	10 ⁶ サイクル～	
5-D	±22.5kN	±31.5kN	1.0Hz
10-D	±22.4kN	±31.4kN	
10-W			

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。電食試験は図-2 に示すように、電食範囲を基部上面から 300mm の範囲とし、5%NaCl 水溶液を満たした水槽内に試験体電食試験範囲を浸漬させ、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続し、規定の積算電流量になるまで通電を行った。なお、基部内の鉄筋には腐食が生じないように、防錆剤を塗布した。鉄筋腐食率の算出方法は、荷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。

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

表-2 に実験パラメータを示す。実験パラメータは、鉄筋腐食率および試験体の含水状態である。表-2 に示すように、目標腐食率は 5%および 10%とし、含水状態は乾燥状態および湿潤状態として、計 3 体の試験体に対して疲労試験を実施した。

2.3 疲労試験概要および測定項目

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

基部上面から高さ 780mm の位置に繰り返し荷重を作用させて行った。疲労試験の荷荷条件を表-3 に示す。軸力は壁断面に一定の軸圧縮力(1.0N/mm²)を作用させた。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、あらかじめ同様の試験体の静的試験から得られた最大荷重に基づいて決定した。風圧や揺れ等を想定するため、最大荷重の 50%を応力振幅とした両振り荷荷とし、1.0Hz の sin 波で 10⁶サイクル作用させた。そして、10⁶サイクル荷荷終了時、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荷荷で再度 10⁶ サイクル作用させた。湿潤状態の疲労試験時には、試験体格子鉄筋付近を濡れたタオルで覆うことにより湿潤状態を保った。

試験中の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 の位置の水平荷重荷荷点を除く壁部両面とし、計 5 個の変位計を設置した。また、電食試験後および荷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-4 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示す。表-4 において、試験体の電食試験

表-4 各試験体の鉄筋腐食率

試験体名		5-D			10-D			10-W		
		北	南	全体	北	南	全体	北	南	全体
縦方向鉄筋	最大	7.32	9.76	9.76	10.33	11.54	11.54	10.63	10.81	10.81
	最小	2.61	2.09	2.09	6.77	7.14	6.77	5.18	5.23	5.18
	平均	5.46	5.59	5.53	8.54	9.23	8.89	7.16	7.69	7.43
横方向鉄筋	最大	11.07			18.64			18.24		
	最小	2.71			6.47			7.67		
	平均	6.60			11.08			12.05		

単位: %

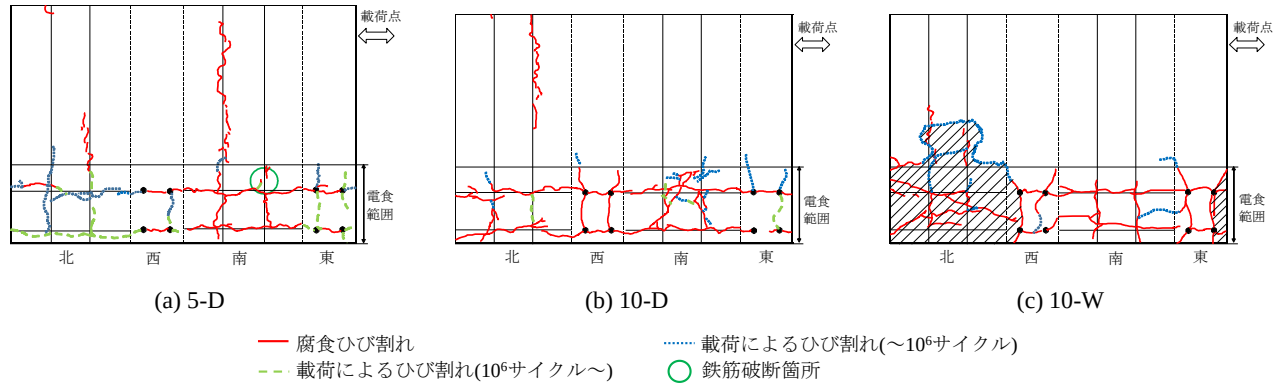


図-3 壁部のひび割れ性状

範囲は基部上面から 300mm であったが、試験体表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 の範囲の鉄筋腐食率を算出した。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、横方向鉄筋については北側、南側分けることなく 4 本の平均腐食率を算出した。

表-4 より、試験体 5-D において、縦方向鉄筋の腐食率は平均腐食率に近い値となった。試験体 10-D および試験体 10-W は縦方向鉄筋の平均腐食率が目標腐食率をやや下回る結果となった。

表-4 より、試験体 5-D において、縦方向鉄筋の腐食率は目標に近い値となったが、局所的な腐食率は大きな値となった。試験体 10-D は比較的一様に鉄筋が腐食し、試験体 10-W は試験体 5-D 同様に腐食率のばらつきが大きな結果となった。

3.2 ひび割れ性状

図-3 に疲労試験後の壁部のひび割れ性状を示す。図-3 は試験体壁部の展開図となっており、同図に示す朱書きの実線は電食試験後の腐食ひび割れ、青書きの点線は疲労試験において 10⁶ サイクル以前に発生したひび割れであり、緑書きの破線は疲労試験において 10⁶ サイクル以降に発生したひび割れである。また、図中に示した緑書きの丸印は疲労試験によって鉄筋が破断した箇所を示しており、図中の斜線部分は載荷によってかぶりコンクリートが剥落した箇所を示している。

(1) 腐食ひびわれ性状

図-3 の朱書きの実線を見ると、すべての試験体において鉄筋格子に沿って腐食ひび割れが発生していることがわかる。また、図-3(a) より、試験体 5-D では東面と西面

において鉄筋軸ひび割れが発生している。図-3(b) および図-3(c) より、試験体 10-D および試験体 10-W では東面と西面において鉄筋軸ひび割れに加え、剥離ひび割れも発生していることが確認された。

図-3(a) より、試験体 5-D では北面の腐食ひび割れは南面と比較して少ないことがわかる。図-3(b) から、試験体 10-D 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、図-3(c) を見ると、試験体 10-W では、南面において鉄筋格子上ではない箇所にも腐食ひび割れが確認された。目標腐食率 10% の試験体の腐食ひび割れは、目標腐食率 5% の試験体よりも腐食ひび割れの発生が顕著であることが確認された。

図-3 から、すべての試験体において南面の腐食ひび割れは北面の腐食ひび割れよりも多く、表-4 に示した南面の腐食率の高さと一致する結果となった。

(2) 載荷ひび割れ性状

図-3(a) から、試験体 5-D の北面では鉄筋格子上に載荷によるひび割れが発生した。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載荷ひび割れとして現れたものであると考えられる。東面と西面の上下の横方向鉄筋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-4 における南面の腐食率の高さと一致している。試験体 10-D では、疲労試験中に腐食ひび割れ開口幅が大きくなる現象は見られたが、載荷による新たなひび割れの発生は少なかった。図-3(c) より、試験体 10-W では鉄筋格子上には載荷によるひび割れは発生せず、東面および西面の剥離ひび割れから進展したひび割れが鉄筋格子上部に発生し、その後載荷によって図-3(c) の斜線で示す範囲でかぶりコンクリートの剥落が生

じた。図-4 に試験体 10-W の載荷試験終了時の北面の剥落状況を示す。

3.3 破壊形状

試験体 5-D では、 1.049774×10^6 サイクルで試験体が破壊した。疲労試験終了後、試験体から鉄筋をはつり出したところ、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。表-4 によれば、鉄筋の平均腐食率は南側が大きくなっており、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、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で試験体が破壊したと考えられる。試験体 10-D では、載荷による新たなひび割れの発生は少なく、 1.4×10^6 サイクルを超えた時点で変位の増加がみられなかったため、試験を中断した。試験体 10-W では、 1.74102×10^5 サイクルでかぶりコンクリートの剥落と同時に試験体が破壊したが、縦方向鉄筋の破断は確認されなかった。腐食ひび割れから水分が浸透し、かぶりコンクリートと鉄筋の間に水分が到達することで、水分が潤滑油のような役割を發揮し、鉄筋とかぶりコンクリート間の付着力が低下し、かぶりコンクリートが剥落したと考えられる。

3.4 荷重変位関係

図-5 に水平荷重載荷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) および図-5 (c) から急激な水平変位の増加が確認され、その

直後に試験体の破壊が確認された。

図-5 (a) より、試験体 5-D は 10^6 サイクル到達後、試験体の破壊が確認されなかったため、応力振幅を増加させ再度載荷を行ったところ、試験体が破壊に至った。図-5 (a) において、水平変位の急激な増加の後、ヒステリシスの中心がプラス側へ移行しているが、これは 4 本の縦方向鉄筋のうち、R'鉄筋のみが破断したためであると考えられる。

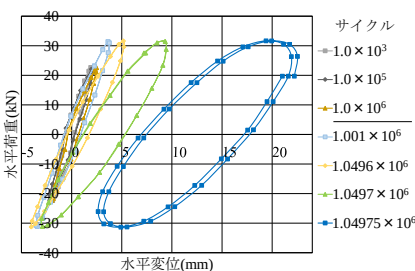
図-5 (b) より、試験体 10-D においても 10^6 サイクルで試験体の破壊が生じなかったため、応力振幅を増加させ再度載荷を行ったが、試験体は破壊せず、 1.4×10^6 サイクル時点で水平変位の増加が確認できなかったため、試験を中断した。図-5 (b) より、試験体は破壊に至らなかったものの、残留変位が生じ、塑性変形が発生していることが確認された。

図-5 (c) から、試験体 10-W は他の試験体と比較して、塑性変形を生じるまでの載荷回数が少なく、破壊に至るまでのサイクルも他の試験体と比較してオーダーが一つ小さい結果となった。これは、腐食ひび割れから水分が浸透することにより、縦方向鉄筋とかぶりコンクリート間の付着力が小さくなり、鉄筋格子付近のかぶりコンクリートが剥落を生じることで、かぶりコンクリートの一体性が消失したためであると考えられる。

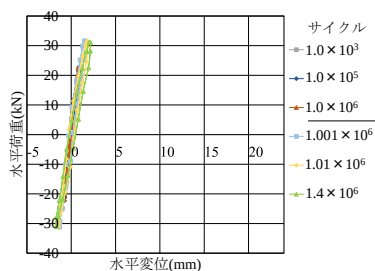
試験体 10-D は 1.4×10^6 サイクルに到達しても試験体の破壊が確認されなかったが、これは表-4 に示したように、縦方向鉄筋の腐食率のばらつきが小さいためであると考えられる。ここで、既往の研究²⁾において、RC 壁部材の疲労性能を縦方向鉄筋における鉄筋腐食の不均一性の指標である最大偏差率を用いることである程度評価可能であることが確認されている。試験体 5-D の最大偏差率は 0.55、試験体 10-D の最大偏差率は 0.26、試験体 10-W は 0.44 であることから、試験体 10-D は最大偏差率が小さかったために破壊が生じなかったと考えられる。試験体 5-D および試験体 10-W は最大偏差率が同程度であるにも関わらず破壊を生じるまでの載荷回数に大きな違いがあるが、これは試験体 10-W は水分の影響によって早期に破壊が生じたためであると考えられる。



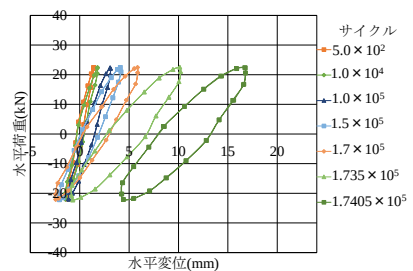
図-4 10-W の北面の損傷状況(載荷試験終了時)



(a) 5-D



(b) 10-D



(c) 10-W

図-5 載荷点における荷重変位関係

4. 解析概要

4.1 解析概要

図-1の試験体に対して、二次元における解析のモデル化を行った。図-6に解析モデル図を示す。モデルの寸法およびひび割れは実試験体と一致させ、腐食ひび割れ箇所、載荷ひび割れ箇所にはインターフェース要素を配置した。基本的に4節点ソリッド要素を用い、1辺が50mmの正方形となるように要素分割した。鉄筋については実試験体に基づき全鉄筋を埋込鉄筋要素でモデル化した。支持条件は、実験時と同様に、基部下面の鋼棒固定箇所は水平・鉛直方向を固定し、基部上面については鉛直方向のみ固定した。載荷方法は実験と同じく荷重制御であり、鉛直荷重を載荷した後、試験体 5-D では1ステップあたり2.25kNで加力を行い、試験体 10-D および 10-W では2.24kNで加力を行い、40ステップで1サイクルを表現した。

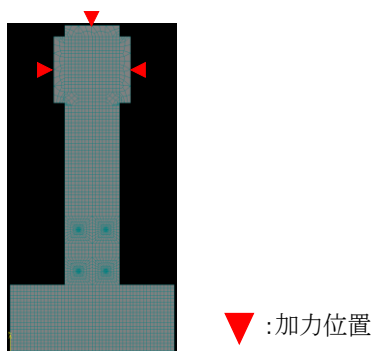


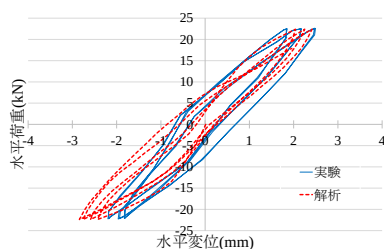
図-6 解析モデル

表-5 コンクリートの材料特性

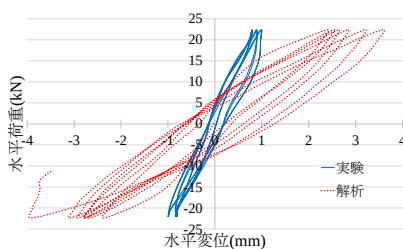
解析モデル	弾性係数	ポアソン比	圧縮強度	引張強度
	$E_c(\text{N/mm}^2)$	ν	$f_c(\text{N/mm}^2)$	$f_t(\text{N/mm}^2)$
5-D	26379	0.2	38.6	2.43
10-D	29082		47.1	2.62
10-W	27747		39.5	3.33

表-6 鉄筋の材料特性

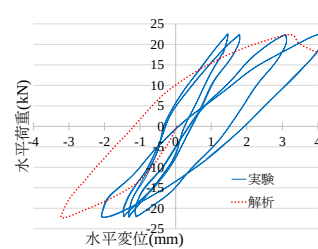
鉄筋	弾性係数	降伏応力	断面積
	$E_s(\text{N/mm}^2)$	$\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	$A(\text{mm}^2)$
D16	200000	295	198.6



(a) 5-D



(b) 10-D



(c) 10-W

図-7 解析から得られた荷重変位関係

材料特性値は表-5 および表-6 に示すように実験時に行った材料試験の値を用いた。コンクリートの破壊基準は、圧縮領域において Menetry-William 塑性基準を用い、引張領域では Rankin 基準を用いた。鉄筋の応力ひずみ関係はバイリニア型とした。ひび割れは実験と同様の箇所にインターフェース要素を配置することでモデル化を行った。ひび割れ箇所に適用するインターフェース要素の物性については、表-7、表-8 のように定めた。鉛直方向の腐食ひび割れ箇所は「No Connection」(接合なし)とし、水平成分を含む腐食ひび割れ箇所には、鉛直荷重が作用することでひび割れが閉じ、応力を伝達するため「2D Interface Tension」を、載荷ひび割れ箇所には「2D Interface」を配置した。なお、インターフェース要素として配置する剥離・圧着方向のバネ係数 K_{nn} およびせん断方向のバネ係数 K_{tt} については、あらかじめコンクリートの圧縮強度、鉄筋腐食率、鉄筋径とかぶり厚さの比をパラメータとした式(1)および式(2)の導出を行った。

$$K_{nn} = N_0 \times f_c^{-2.02837} \times (c/\varphi)^{3.281824} \times C_d^{2.210241} \quad (1)$$

$$K_{tt} = S_0 \times f_c^{-2.0593} \times (c/\varphi)^{0.822346} \times C_d^{1.181281} \quad (2)$$

ここで、既往の研究³⁾から、 $N_0 = 3.5 \times 10^6 (\text{MN/m}^3)$ 、 $S_0 = 1.46 \times 10^6 (\text{MN/m}^3)$ であり、 f_c : コンクリートの圧縮強度、 c/φ : 鉄筋径とかぶり厚さの比、 C_d : 鉄筋腐食率である。また、本研究で使用した解析ソフトは二次元解析ソフトであるため、西側と東側の二つの解析を行い、その平均値を各ステップあたりで得られた値とした。

4.2 解析結果および考察

(1) 荷重変位関係

図-7に各試験体の解析結果から得られた荷重変位関係

表-7 「2D Interface」の物性条件

解析モデル	剥離・圧着方向のバネ定数 $K_{nn}(\text{MN/m}^3)$	せん断方向のバネ定数 $K_{tt}(\text{MN/m}^3)$	粘性係数 $C(\text{MPa})$	摩擦係数 μ
5-D	45.9895	49.1720	8.313	0.75536
10-D	87.7082	57.1864		
10-W	84.3042	66.4695		

表-8 「2D Interface tension」の物性条件

解析モデル	剥離・圧着方向のバネ定数 $K_{nn}(\text{MN/m}^3)$	せん断方向のバネ定数 $K_{tt}(\text{MN/m}^3)$	粘性係数 $C(\text{MPa})$	摩擦係数 μ
5-D	45.9895	0.2459	0	0
10-D	87.7082	0.2859		
10-W	84.3042	0.3323		

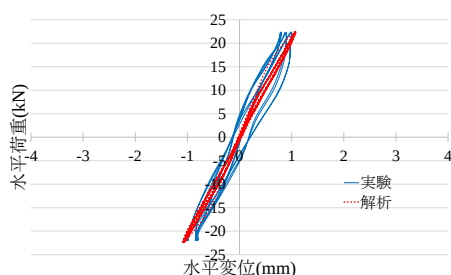


図-8 インターフェース要素を配置した健全状態における荷重変位関係

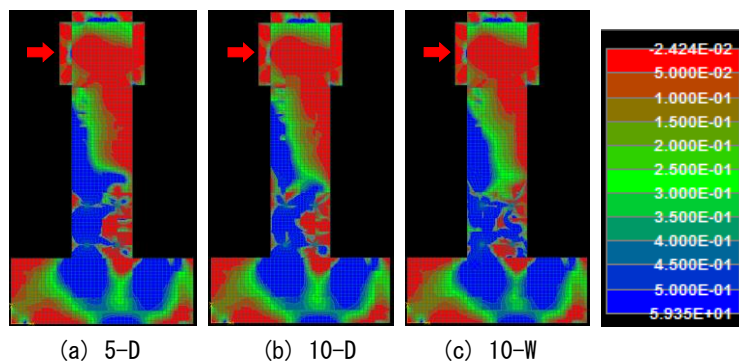


図-9 31 ステップにおける主応力分布

を示す。図-7 における水平変位は実験と同様に、基部上面から 780mm の位置での水平変位である。図-7 には解析結果から得られた荷重変位関係に併せて、実験結果から得られた荷重変位関係も示している。図-7 (a) および図-7 (c) から 5-D および 10-W に関しては剛性がほぼ一致し、実験結果に近い挙動を示していることが確認された。しかし、図-7 (b) から、10-D に関しては剛性が一致しておらず、実験値と比較すると剛性が小さくなっていることがわかる。他の二体の試験体と比較すると、実験から得られた 10-D の剛性は明らかに大きいことがわかる。そこで、実験結果において剛性の観点で信頼性を確認するため、物性値は 10-D と同様とし、腐食後と同じ位置に載荷ひび割れが発生するという仮定の下で、「2D Interface」のみを配置した健全状態の解析を行った。その結果を図-8 に示す。図-8 から、健全状態において水平変位は±1.1mm 程度となっており、実験から得られた試験体 10-D の水平変位を上回っていることがわかる。図-7 (a) および図-7 (c) から、解析結果と実験結果から得られた荷重変位関係は剛性が良い一致を示しているため、総合的に考察すると、試験体 10-D は実験結果の信頼性が低いことが窺えるため、再実験が必要であると考えられる。図-7 (c) から 10-W は早期に水平変位の急激な増加が確認されたが、これは載荷ひび割れとして配置したインターフェース要素において、載荷によりコンクリートの一体性が消失したためだと考えられ、本研究では、荷重変位関係における変曲点である 31 ステップ付近で剥落が発生したと判断した。

(2) 主応力分布

図-9 に各試験体の 31 ステップにおけるコンクリート主応力分布を示す。図-9 (c) から 10-W は他の二体の試験体と比較すると、鉄筋格子付近において、圧縮を受け持つ領域が明らかに小さくなっていることがわかる。また、引張側に関しても他の二体は横方向鉄筋付近で圧縮応力が発生しているが、10-W ではほとんど生じておらず、応力分布が周囲の領域と不連続であることがわかる。この

ことから、載荷によって格子鉄筋付近におけるコンクリートの一体性が消失したことが解析上でも確認された。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 一定軸圧縮力を受ける壁部材の曲げ疲労試験において、湿潤状態では水分の影響により付着応力が減少することで、かぶりコンクリートの剥落が生じやすいことを示した。
- (2) 荷重変位関係において解析値と実験値において比較的良好な一致が得られた。
- (3) 主応力分布から、かぶりコンクリートが剥落する際には、引張側のコンクリートには圧縮応力がほとんど発生しないことを示した。
- (4) 解析では、湿潤状態の試験体において主応力分布が不連続であることから、剥落が発生する際、コンクリートの一体性が確かに消失することが確認され、実験結果と良い一致を示した。

参考文献

- 1) 藤井智大，大下英吉：腐食ひび割れが誘発したかぶりコンクリートの剥離・剥落に対する安全余裕度に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1033-1038，2017
- 2) 宇田周平，大下英吉，熊野義敏：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1039-1044，2017
- 3) 喜多俊介，三木朋広，松尾真紀，二羽淳一郎：形状が異なる打継面を有する鉄筋コンクリートの非線形解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.709-714，2002
- 4) 穴吹卓也，後藤康明，城 攻：RC 内部柱梁接合部のせん断抵抗機構に関する非線形有限要素解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.61-66，2004
- 5) 富田充宏，梶川康男，久野和敬：鉄筋腐食により劣化した RC ばりの剛体一ばねモデルによる非線形解析，土木学会論文集，No.584，I-42，267-276，1998