

論文 破砕剤充填パイプ導入による腐食ひび割れ模擬 RC 部材の繰返し局所付着挙動

三谷 龍世^{*1}・Syll Amadou Sakhir ^{*2}・金久保 利之^{*3}

要旨 : RC 部材の鉄筋腐食による付着劣化に着目し, 腐食ひび割れを模擬した付着長の小さい試験体の繰返し引抜き試験を実施した。鉄筋腐食ひび割れの模擬手法として, 破砕剤充填パイプによりひび割れを模擬する方法を採用し, 試験体表面の加力前ひび割れ幅を実験因子とした。実験の結果, 単調加力, 繰返し加力の両方において加力前ひび割れ幅が大きいほど最大付着応力が小さくなる傾向が確認でき, その低下は, 単調加力よりも繰返し加力の方が大きくなった。一方で, 荷重端すべり量が大きくなるほど付着応力の低下率は小さくなった。

キーワード : 腐食ひび割れ, 付着劣化, 破砕剤充填パイプ, 引抜き試験, 単調加力, 繰返し加力

1. はじめに

高度経済成長期における鉄筋コンクリート (以下, RC) 構造物の建設ラッシュから 50 年以上が経過した現在, 現存する RC 構造物は経年劣化による安全性が懸念されており, 維持管理のために劣化状況の定量的な評価が必要とされている。RC 構造物で生じる劣化の要因として鉄筋腐食が挙げられる。鉄筋に腐食生成物が発生することでコンクリートに膨張圧がかかり, これによりひび割れが生じ, 鉄筋がさらに腐食するというメカニズムにより劣化が進行していく。このような過程を経て進行する劣化の程度を, 部材を破壊することなく判定する指標として RC 部材表面に生じるひび割れ状態の把握が有効である。実部材において表面のひび割れ幅の測定は容易であり, これより RC 部材の性状を評価することで劣化状態の把握に繋げることができる。

腐食劣化した RC 部材の性能を評価する特性としてコンクリートと異形鉄筋の付着性状があり, これに関して幾多の研究がなされている¹⁾。しかしながら, 繰返し荷重下における付着性状に焦点を当てた研究は多くない。RC 構造物は地震力を代表とする繰返し荷重を受け, 地震が多発する日本ではその影響がさらに顕著に表れる。従って繰返し荷重を想定することは重要であり, これによる RC 構造物の性能評価が必要となる。

本研究では, 腐食ひび割れを模擬した RC 部材において, 繰返し荷重下におけるコンクリートと鉄筋の付着挙動を検討することを目的として, 破砕剤充填パイプ (Expansion Agent Filled Pipe: 以下, EAFFP)²⁾を埋設した RC 試験体の繰返し鉄筋引抜き試験を行う。EAFFP によりコンクリートのひび割れを模擬し, 鉄筋の正負交番繰返し加力を行うことで, コンクリートと鉄筋の付着特性を

評価する。試験体の付着長は鉄筋径の 4 倍とし, 局所的な付着性状に着目する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体形状を図-1 に示す。断面形状は 170mm×220mm の長方形で, 断面中央に異形鉄筋 D16 (SD345) を配した。試験体軸方向の長さは 112mm とし, 鉄筋両端部に付着絶縁区間を 24mm ずつ設け, 付着区間は鉄筋径の 4 倍の 64mm とした。鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れを模擬するために, 既往の研究³⁾と同様に, 外径 22mm, 厚さ 1mm のアルミパイプを図-1 に示すように鉄筋中央から 50mm の位置に 2 本配した。本試験体は 1 列に並んだ鉄筋群を有する部材断面を想定しており, 加力前にひび割れを導入する試験体においては, 腐食鉄筋を模擬する両端 2 本のアルミパイプに破砕剤を充填することで腐食による膨張圧を発生させ, 経過時間により目標幅とする加力前ひび割れとした。実験因子は, 加力前ひび割れ幅および後述する加力方法 (単調, 繰返し) である。試験体の名称を図-2 に示す。試験体は各実験要因について 3 体ずつ, 計 36 体作製した。

試験体に用いたコンクリートの材料特性を表-1 に, 鉄筋の材料特性を表-2 に示す。

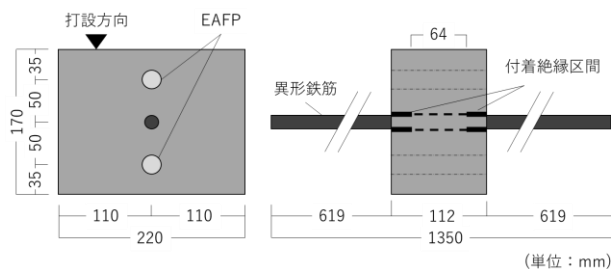
2.2 加力方法

加力装置を図-3 に示す。試験体両端面にテフロンシートを介して 112mm 径の孔を設けた反力板を設置し, 試験体を両側から挟み込むようにセンターホールジャッキを設置する。両側のセンターホールジャッキを個々に制御することで正負交番の繰返し加力を行った。また, 単調加力の場合は正側のセンターホールジャッキのみを

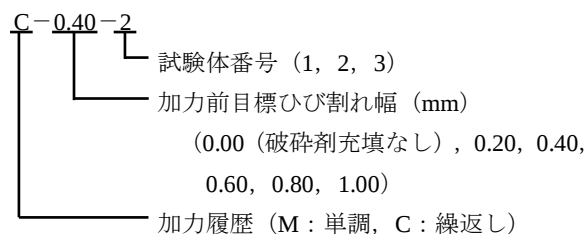
*1 筑波大学 理工学群 工学システム学類 (学生会員)

*2 筑波大学大学院 システム情報工学研究群 修士 (工学)

*3 筑波大学 システム情報系教授 博士 (工学) (正会員)



図－１ 試験体形状



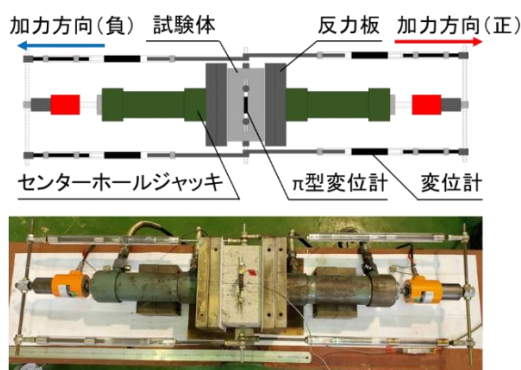
図－２ 試験体名称

表－１ コンクリートの材料特性

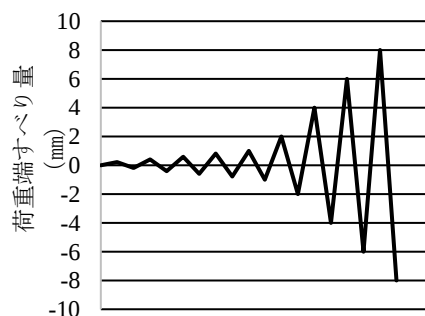
圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	割線弾性係数 (GPa)
22.4	2.44	20.0

表－２ 異形鉄筋の材料特性

降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
403	554	191



図－３ 加力装置



図－４ 加力履歴

用いて加力を行った。

計測項目はロードセルによる引抜き荷重，変位計による試験体側面と鉄筋端部間の相対変位およびπ型変位計による試験体表面のひび割れ幅である。加力方向と反対側に設置した変位計による相対変位を自由端変位とし，自由端変位量に式(1)により算出される試験体付着区間の鉄筋の伸び（付着応力は一様に分布していると仮定）を加算した変形を荷重端すべり量とした。

$$\Delta L = PL/2EA \quad (1)$$

ここで， P ：引抜き荷重（kN）， L ：付着長（mm）， E ：異形鉄筋の弾性係数（GPa）， A ：異形鉄筋の公称断面積（mm²）である。

繰返し加力の加力履歴は，図－４に示すように，荷重端すべり量で0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0mmの加力サイクルを各1回ずつ，計9サイクルの正負交番漸増繰返し加力とした。

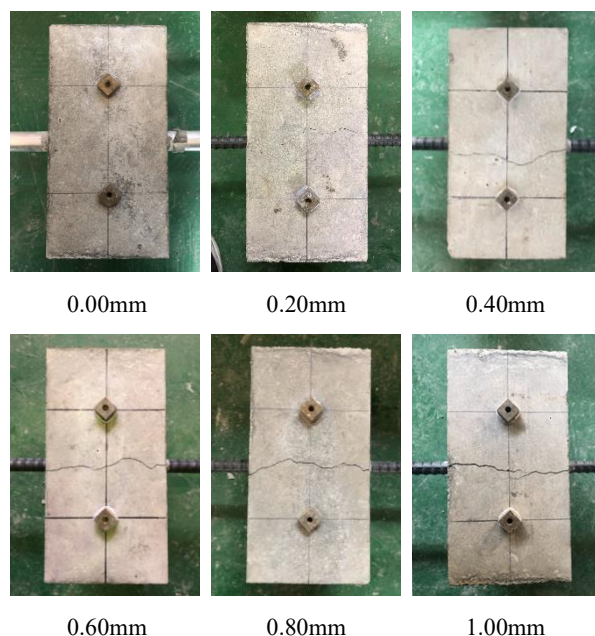
3. 実験結果

3.1 試験体ひび割れ状況

試験体の加力前ひび割れ状況を図－５に示す。加力前のひび割れ幅はクラックスケールにより計測した。なお，加力前ひび割れ幅0mmの試験体とは，破砕剤を充填していないひび割れのない健全試験体である。

破砕剤充填後，EAFP から鉄筋方向および試験体側面方向の2方向にひび割れが発生するサイドスプリット型のひび割れが生じた。さらに時間経過後，ひび割れが進展することで試験体側面に1本の軸方向ひび割れが確認された。

加力前後のひび割れ状況の一例として，加力前ひび割



図－５ 加力前ひび割れ状況

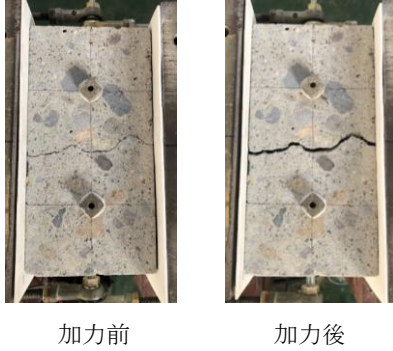


図-6 加力前後のひび割れ状態 (M-1.00-3)

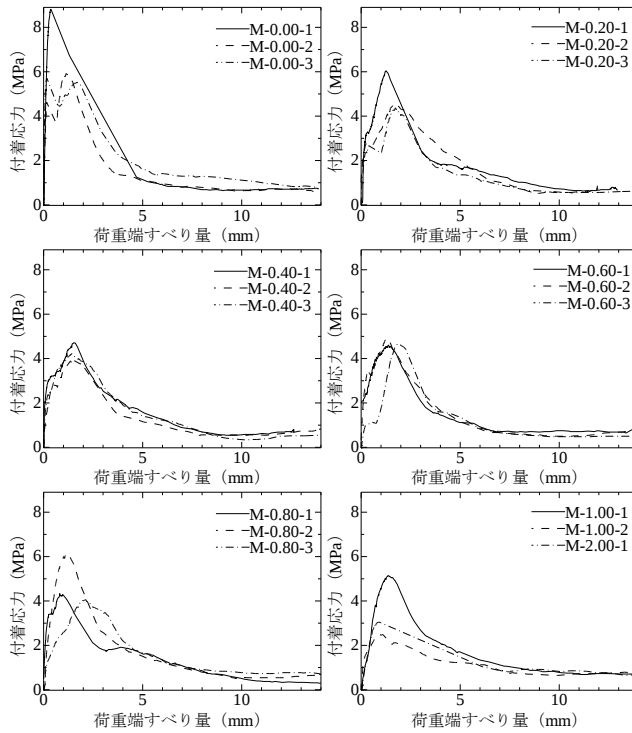


図-7 τ - S 関係 (単調加力)

れ幅が 1.00mm の試験体の単調加力試験前後の試験体側面を図-6 に示す。

加力前に導入したひび割れが鉄筋の引抜き加力によって拡大する様子が確認された。また、数体の試験体において軸方向に新たにひび割れが発生する様子も確認された。試験体の加力過程においてこれらのひび割れが拡大して、最終的な破壊に至った。

3.2 単調加力試験体

単調加力より得られた付着応力-荷重端すべり量関係 (τ - S 関係) を図-7 に、各試験体の最大付着応力 τ_{max} と最大付着応力時の荷重端すべり量 S_{max} を表-3 に示す。付着応力は荷重を付着面積で除することで算出し、表-3 中の τ_{max} 、 S_{max} の値はそれぞれ対応する実験因子試験体の平均値である。各試験体の加力前ひび割れ幅と

表-3 単調加力試験結果一覧

試験体 名称	試験 体数	最大付着応力 τ_{max} (MPa)	最大付着応力時 荷重端すべり量 S_{max} (mm)
M-0.00	3	6.813	0.555
M-0.20	3	4.979	1.586
M-0.40	3	4.299	1.472
M-0.60	3	4.715	1.556
M-0.80	3	4.833	1.373
M-1.00	2	3.813	1.132
M-2.00	1	3.042	0.913

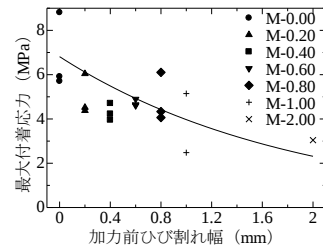


図-8 加力前ひび割れ幅-最大付着応力関係 (単調加力)

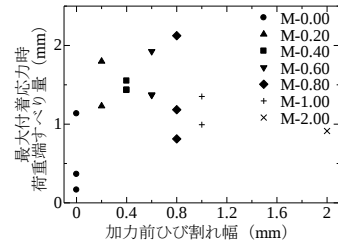


図-9 加力前ひび割れ幅-最大付着応力時荷重端すべり量関係 (単調加力)

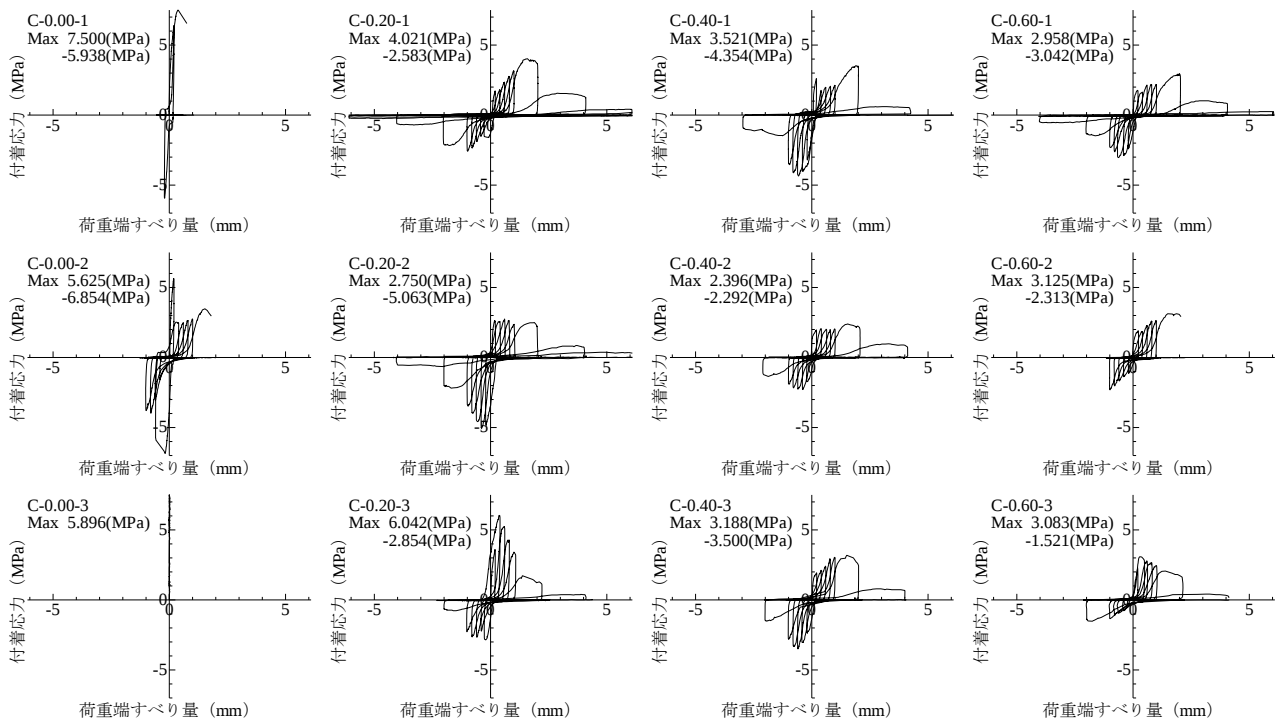
最大付着応力の関係を図-8 に、加力前ひび割れ幅と最大付着応力時荷重端すべり量の関係を図-9 に示す。

図-7、表-3、図-8 より、試験体の加力前ひび割れ幅が大きいほど最大付着応力が小さくなる傾向が確認できる。図-8 の加力前ひび割れ幅と最大付着応力の関係において回帰分析を行った結果、式(2)を得た。

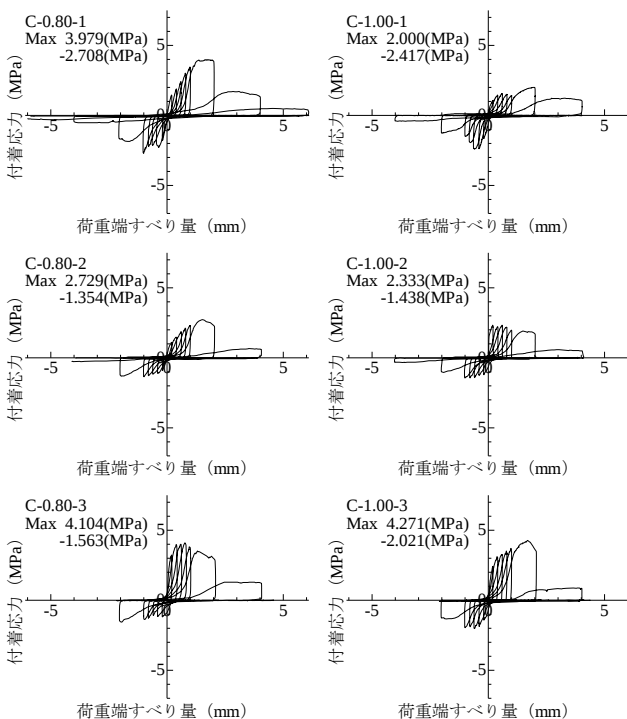
$$P_{(Wcr)} = P_0 e^{-0.540 Wcr} \quad (2)$$

ここで、 $P_{(Wcr)}$: ひび割れが入ったコンクリートの最大付着応力 (MPa)、 P_0 : 健全試験体 (加力前ひび割れ幅 0.00mm) の最大付着応力 (MPa)、 Wcr : 加力前ひび割れ幅 (mm) である。式(2)において、加力前ひび割れ幅 0.00mm~1.00mm の範囲で最大付着応力は 6.813MPa~3.970MPa まで減少し、試験結果との決定係数は 0.39 であった。

表-3、図-9 より、最大付着応力時の荷重端すべり量



図－10 τ － S 関係（繰返し加力：ひび割れ幅 0.00～0.60mm）



図－11 τ － S 関係（繰返し加力：ひび割れ幅 0.80～1.00mm）

は加力前ひび割れ幅 0.2mm で最大となったが、ばらつきが大きく一定の傾向を示さなかった。

3.3 繰返し加力試験体

繰返し加力より得られた付着応力－荷重端すべり量関係（ τ － S 関係）を図－10 および図－11 に、各試験体の加力方向正側と負側それぞれの最大付着応力 τ_{pmax} 、 τ_{nmax}

と、最大付着応力時の荷重端すべり量 S_{pmax} 、 S_{nmax} を表－4 に示す。また、各試験体の加力方向正側と負側それぞれについて、加力前ひび割れ幅と最大付着応力の関係を図－12 に示す。

これらの図表より、単調加力の結果と同様に、加力前ひび割れ幅が大きいほど最大付着応力が小さくなる傾向が確認できる。さらに、表－3 と表－4 を比較すると、同一の加力前ひび割れ幅の試験体の繰返し加力時の最大付着応力は、単調加力時よりも小さい値となった。単調加力の結果と同様に、図－12 の加力前ひび割れ幅と最大付着応力の関係において回帰分析を行った結果を式(3)、式(4)に示す。

加力方向正側

$$P_{(Wcr)} = P_0 e^{-0.973Wcr} \quad (3)$$

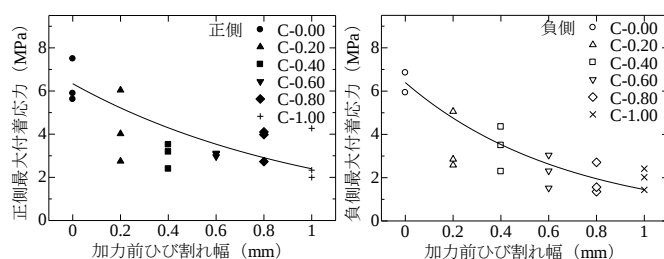
加力方向負側

$$P_{(Wcr)} = P_0 e^{-1.483Wcr} \quad (4)$$

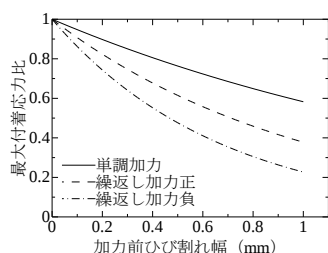
式(3)において、加力前ひび割れ幅 0.00mm～1.00mm の範囲で最大付着応力は 6.340MPa～2.396MPa まで減少し、試験結果との決定係数は 0.49 であった。また、式(4)において、加力前ひび割れ幅 0.00mm～1.00mm の範囲で最大付着応力は 6.396MPa～1.452MPa まで減少し、試験結果との決定係数は 0.67 であった。回帰分析によって得られた式(2)、式(3)、式(4)について、 P_0 を 1 として基準化し、比較した結果を図－13 に示す。加力前ひび割れ幅 1.00mm における最大付着応力の低下率は、単調加力で 0.417、繰返し加力の加力方向正側で 0.621、負側で 0.773 であり、単調加力と繰返し加力の負側で 2 倍近く差が生

表－4 繰返し加力試験結果一覧

試験体 名称	試験 体数	最大付着応力 (MPa)		最大付着応力時 荷重端すべり量 (mm)	
		正 τ_{pmax}	負 τ_{nmax}	正 S_{pmax}	負 S_{nmax}
C-0.00	3	6.340	6.396	0.226	0.191
C-0.20	3	4.271	3.500	0.853	0.527
C-0.40	3	3.035	3.382	1.650	0.516
C-0.60	3	3.056	2.292	1.387	1.127
C-0.80	3	3.604	1.875	1.338	1.313
C-1.00	3	2.868	1.958	1.406	0.732



図－12 加力前ひび割れ幅－最大付着応力関係（繰返し加力）



図－13 回帰分析結果の比較

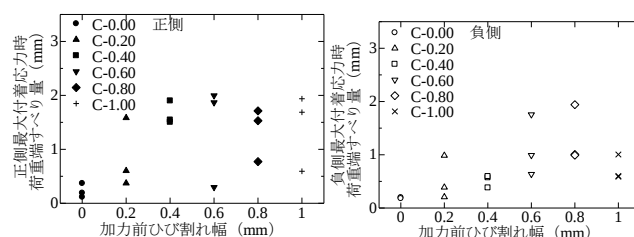
じた。繰返し加力により加力前ひび割れの拡幅が大きくなり、鉄筋周囲のコンクリートの拘束力が低下すると考えられる。

加力前ひび割れ幅と最大付着応力時荷重端すべり量の関係を図－14 に示す。表－4、図－14 より最大付着応力時の荷重端すべり量は正側では0.4mm、負側では0.8mmの加力前ひび割れ幅で最大となったが、単調加力の結果と同様にばらつきが大きく一定の傾向を示さなかった。

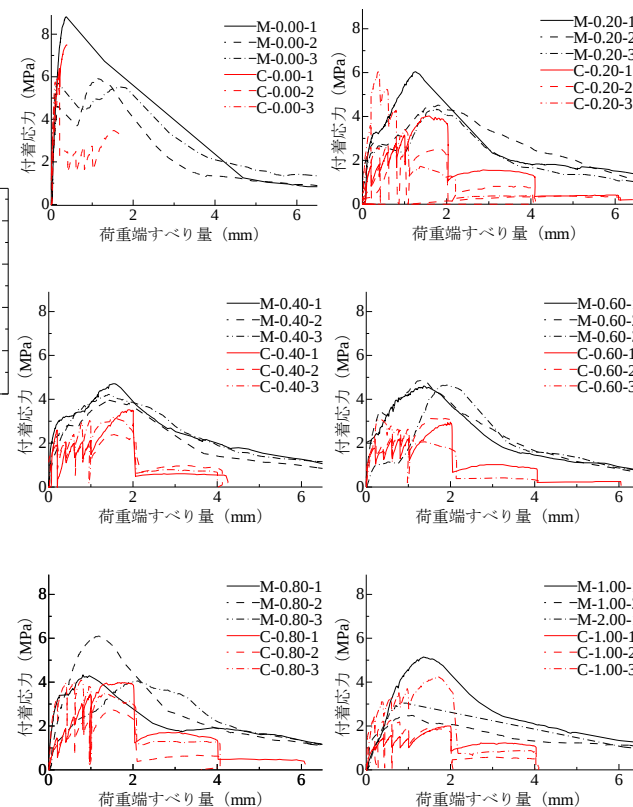
3.4 単調加力と繰返し加力の比較

単調加力試験体の付着応力－荷重端すべり量関係と繰返し加力試験体の包絡線を比較して図－15 に示す。黒線は単調加力試験体を、赤線は繰返し加力試験体の正側包絡線を示す。

各試験体の付着応力を健全試験体（加力前ひび割れ幅0.00mm）の付着応力で除した値を付着応力比とし、最大



図－14 加力前ひび割れ幅－最大付着応力時荷重端すべり量関係（繰返し加力）



図－15 τ -S 関係

付着応力および荷重端すべり量 1.0mm, 2.0mm, 4.0mm 時点の付着応力比と加力前ひび割れ幅の関係を図－16 に示す。なお、健全試験体の計測できた範囲（繰返し加力正側 2.0mm、負側 1.0mm まで）の結果を示している。また、図－16 における加力前ひび割れ幅 1.0mm 時の付着応力比の値を表－5 に示す。

図－15 より、各試験体で多少のばらつきはあるものの、繰返し加力試験体の付着応力－荷重端すべり量関係は、同じ加力前ひび割れ幅の単調加力試験体と同程度のすべり量で付着応力が最大となることが確認できる。また、最大付着応力となった後は単調加力試験体の付着応力－荷重端すべり量関係と同様に荷重端すべり量の増加に伴って各サイクルの最大付着応力が低下する様子が見られる。

図－16、表－5 より、最大付着応力時の付着応力比は

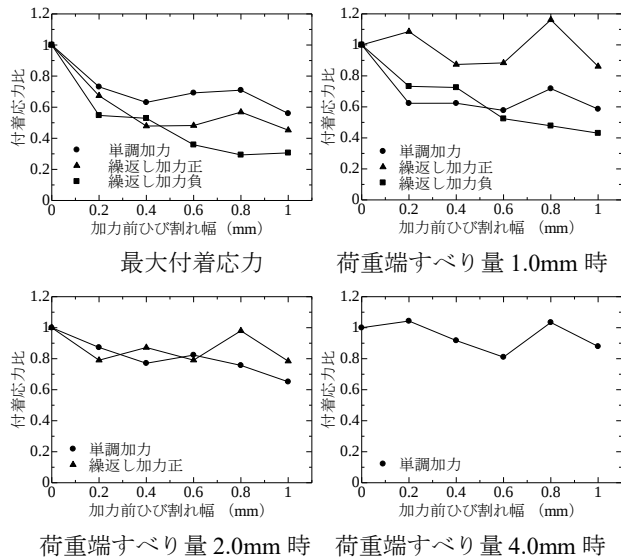


図-16 付着応力比の比較

図-13 で示したように、単調加力よりも繰返し加力、また、繰返し加力の正側よりも負側において低下率大きい。正側の引抜き加力により表面のひび割れが拡幅することで、同一サイクルの負側に対する付着応力が低下したためであると考えられる。一方で、荷重端すべり量が大きくなるほど付着応力比の低下率は小さくなり、加力方法の違いによる付着応力比の差が減少した。荷重端すべり量の小さい加力初期における付着応力比は、加力前ひび割れの影響により低下率が大きくなる。一方で、荷重端すべり量が大きい状態における付着応力比の低下率は、周辺コンクリートの破壊が進行したことで試験体におけるひび割れの拡幅が緩慢になるため、加力前ひび割れが与える影響が小さくなると考えられる。

4. まとめ

本研究では、腐食ひび割れを模擬した RC 部材において、繰返し荷重下におけるコンクリートと鉄筋の付着挙動を検討することを目的として、EAFP による鉄筋ひび割れ模擬 RC 試験体の繰返し鉄筋引抜き試験を実施した。本研究によって得られた知見を以下に示す。

表-5 付着応力比（加力前ひび割れ幅 1.0mm 時）

	最大付着 応力	荷重端すべり量		
		1.0mm	2.0mm	4.0mm
単調加力	0.560	0.586	0.651	0.879
繰返し加力正	0.452	0.861	0.784	—
繰返し加力負	0.306	0.430	—	—

- (1) 単調加力、繰返し加力の両方において、加力前ひび割れ幅が大きいほど最大付着応力が小さくなる傾向が確認できた。
- (2) 単調加力、繰返し加力の両方において、最大付着応力時の荷重端すべり量と加力前ひび割れ幅の間に明瞭な関係は見られなかった。
- (3) 加力前ひび割れ幅が同一の場合、繰返し加力時の最大付着応力は単調加力時より小さくなった。また、繰返し加力正側よりも負側の最大付着応力の低下が大きかった。
- (4) 付着応力比の低下率は、荷重端すべり量が大きくなるほど加力前ひび割れが与える影響が小さくなった。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費基盤研究(B)21H01472 によっている。

参考文献

- 1) Syll, A.S., Kanakubo, T.: Impact of Corrosion on the Bond Strength between Concrete and Rebar: A Systematic Review, materials, 15-19, 7016 (21pp.), 2022
- 2) 川村佳弘, 金久保利之: 破碎剤充填パイプにより鉄筋腐食時ひび割れを模擬した RC 梁部材の曲げ性状, 土木学会関東支部技術研究発表会, V-22, 2018
- 3) Syll, A.S., Aburano, T., Kanakubo, T.: Bond strength degradation in concrete cracked by expansion agent filled pipes, Structural Concrete, 1-17, 2021