

# 論文 鉄筋腐食による付着劣化を模擬した RC 部材の繰返し曲げせん断性能

下河邊 大貴\*1・藤原 海\*2・Syll Amadou Sakhir\*2・金久保 利之\*3

**要旨:** 鉄筋腐食による付着劣化が RC 部材の構造性能に与える影響に着目するため、付着劣化を模擬した RC 部材の逆対称繰返し曲げせん断実験を行った。付着劣化の模擬方法として、鉄筋腐食によるひび割れ幅を因子とし、破砕剤充填パイプによるひび割れ模擬および主筋に非付着領域を設けて付着強度を直接低減する方法を採用した。実験の結果、破砕剤充填パイプによる腐食ひび割れ模擬試験体では、付着劣化が大きい試験体において最大耐力の低下、部材角 1/100rad までの剛性低下を確認した。付着低減試験体では最大耐力の低下は確認できなかったが、部材角 1/100rad までの剛性低下を確認した。

**キーワード:** 腐食ひび割れ、付着劣化、破砕剤充填パイプ、付着低減、剛性低下

## 1. はじめに

高度経済成長期の建設ラッシュ時に建設された、現存する多くの鉄筋コンクリート (以下 RC) 造構造物が建設から 50 年以上経過し、塩害や中性化などの環境要因や経年劣化による性能低下が危惧されている。性能低下の代表例である鉄筋腐食は、鉄筋の断面減少とコンクリートのひび割れを引き起こす。鉄筋の断面減少が RC 造構造物の構造性能に与える影響については既往の研究で数多く検討がなされているが、コンクリートのひび割れが与える影響に着目した例は少ない。

既往の研究<sup>1)</sup>では、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れが RC 部材の構造性能に与える影響を検討するため、破砕剤充填パイプを用いた手法により腐食ひび割れを模擬した試験体の逆対称繰返し曲げせん断加力実験が行われた。模擬する腐食ひび割れの幅を変動因子として実験が行われ、ひび割れ幅の増大に伴う剛性の低下が確認されたが、最大耐力に大きな変化は見られなかった。全ての試験体で曲げ降伏が先行する破壊経過を辿ったためであると考察された。

本研究では破壊経過の違いが部材の耐力に与える影響に着目し、付着劣化が進んだ場合に付着割裂破壊が先行する試験体の設計を行った。付着劣化の模擬には、既往の研究<sup>1)</sup>と同様の破砕剤充填パイプにより腐食ひび割れを模擬する手法に加え、主筋の付着領域を直接低減することで付着劣化に伴う付着強度の低下を模擬する手法を用い、それぞれ比較検討を行った。試験体の変動因子は着目する腐食ひび割れの幅とし、前者に対しては破砕剤を充填してからの経過時間、後者に対しては非付着領域の長さで対応させた。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体の一覧を表-1に、試験体配筋を図-1に示す。

試験体は、付着劣化のない健全試験体が1体 (NC)、破砕剤により腐食ひび割れを模擬する試験体 (以下、腐食ひび割れ模擬試験体) が3体 (C-Lv.1~3)、主筋の付着領域を直接低減する試験体 (以下、付着低減試験体) が3体 (BD-1~3) の全7体である。試験体断面は幅×せいが235mm×315mmである。主筋は2-D19、せん断補強筋はD10@200の配筋である。試験体の中央部1260mmを試験区間とし、両端部はD10@100を配し補強している。

表-1 試験体一覧

試験体名	共通事項	目標最大ひび割れ幅 (相当ひび割れ幅)
NC	断面：235mm×315mm 内法スパン：1260mm せん断スパン比：2.0 せん断補強筋比：0.32%	-
C-Lv.1 BD-1		0.20mm
C-Lv.2 BD-2		0.55mm
C-Lv.3 BD-3		1.10mm

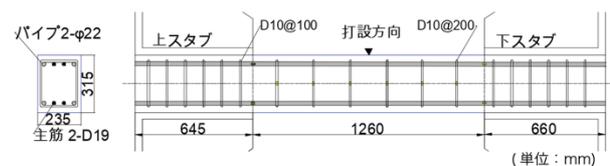


図-1 試験体配筋図

\*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究群 (学生会員)

\*2 筑波大学大学院 システム情報工学研究群 筑波大学

\*3 筑波大学 システム情報系教授 博士 (工学) (正会員)

コンクリート目標強度は18MPaで、変動因子は腐食ひび割れ模擬試験体では破砕剤によって生じる目標最大ひび割れ幅、付着低減試験体では付着領域の低減率に対応する相当ひび割れ幅とした。

試験体の耐力計算結果を表-2に示す。破壊経過の違いが耐力に与える影響に着目するため、試験体は付着劣化が大きい試験体で付着割裂破壊が先行するよう設計を行った。曲げ強度は梁の終局曲げ強度略算式<sup>2)</sup>を用いた。せん断強度は日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」<sup>3)</sup>によるせん断強度式A法で算出した。付着強度は日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説」<sup>4)</sup>による付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度式から算出した。付着劣化を模擬する試験体では、既往の研究<sup>5)</sup>におけるひび割れ幅と付着強度比の関係式により、せん断信頼強度式の付着信頼強度の低減を行った。破砕剤充填パイプが負担する荷重はないものとし、付着信頼強度の割裂線長さを求める際に外径22mmのアルミパイプが埋設されていることを考慮している。

## 2.2 付着劣化模擬方法

腐食ひび割れ模擬試験体では、既往の研究<sup>1)</sup>と同様に、試験体断面4隅に配した外径22mm、厚さ1mmのアルミパイプに静的破砕剤を充填することで腐食ひび割れを模擬する。破砕剤充填後の経過時間によって加力前の目標最大ひび割れ幅を変動させる。付着低減試験体では、図-2に示すように鉄筋表面に粘土を塗布し、その上からフィルムを巻き付け鉄筋とコンクリートとの噛み合いを無くすことにより非付着領域を設け、付着劣化を模擬する。既往の研究<sup>5)</sup>における、(1)式に示す腐食ひび割れ幅と付着強度比の関係式から、相当ひび割れ幅に対応する付着強度比と、試験区間に対する付着領域の長さの比が等しくなるように非付着領域の長さを設定した。非付着領域は、せん断補強筋間に等間隔に設けた。なお、全ての試験体間で結果を比較するために、健全試験体および付着低減試験体においても断面4隅にアルミパイプを配し、脱型後に試験体を立て起こして無収縮グラウトを充填した。

$$\text{付着強度比} = e^{-1.523 \times (\text{腐食ひび割れ幅})} \quad (1)$$

## 2.3 材料試験結果

### (1) コンクリート

コンクリートには、目標強度を18MPaとした最大骨材寸法20mmの普通コンクリートを用いた。コンクリートの材料特性を表-3に示す。

### (2) 鉄筋

主筋には、異形鉄筋D19を用いた。せん断補強筋には、異形鉄筋D10を用いた。D19にはSD345を、D10にはSD295を使用した。鉄筋の材料特性を表-4に示す。

表-2 耐力計算結果

試験体	曲げ強度 $Q_{Mu}$ (kN)	せん断強度 $V_u$ (kN)	付着強度 $V_{bu}$ (kN)	せん断余裕度 $V_u / Q_{Mu}$	付着余裕度 $V_{bu} / Q_{Mu}$
NC	78	144	109	1.85	1.41
C-Lv.1 BD-1			95		1.22
C-Lv.2 BD-2			78		1.01
C-Lv.3 BD-3			65		0.83

曲げ強度：AIJ 終局曲げ強度略算式<sup>2)</sup>

せん断強度：AIJ 終局強度型指針式A法<sup>3)</sup>

付着強度：AIJ 靱性保証型指針式<sup>4)</sup>



図-2 付着低減試験体の付着劣化模擬方法

表-3 コンクリート材料試験結果

目標強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)	備考
18.0	22.2	19.9	2.07	加力前・後材齢の平均

表-4 鉄筋材料試験結果

種別	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	破断伸び (%)
D10	358	492	184	25.9
D19	355	532	187	24.0

表-5 グラウト材料試験結果

圧縮強度(MPa)	割裂強度(MPa)	備考
61.3	3.31	加力中間材齢

### (3) グラウト

破砕剤を充填しない健全試験体と付着低減試験体のアルミパイプにはプレミックス無収縮グラウトの充填を行った。グラウトの材料特性を表-5に示す。

## 2.4 加力・計測方法

加力装置を図-3に、加力履歴を図-4に示す。加力方法は建研式加力で、試験体を縦に起こして端部を鋼製アングルで固定して加力装置に設置し、軸力を0に制御し加力梁の平行度を保ちつつ、100tアクチュエーターでせん断加力を行った。計測項目は、せん断力、スタブ間相対変位、スタブ間軸変位、主筋歪、せん断補強筋歪、アルミパイプ歪である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 試験体破壊状況

腐食ひび割れ模擬試験体の加力前のひび割れ状況、および全試験体の部材角  $1/33\text{rad}$  時のひび割れ状況を図-5に示す。以下、破壊状況を述べる。

NC 試験体では、正加力時部材角  $1/400\text{rad}$  に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。部材角  $1/100\text{rad}$  に至る過程で上端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、曲げせん断ひび割れと上下端筋位置の付着割裂ひび割れが拡大して最終的な破壊に至った。

C-Lv.1 試験体では、破砕剤充填パイプによって、幅が最大で  $0.20\text{mm}$  のひび割れが発生した。正加力時部材角  $1/400\text{rad}$  に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れ発生した。部材角  $1/100\text{rad}$  に至る過程で上端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、曲げせん断ひび割れと上端筋位置の付着割裂ひび割れが拡大して最終的な破壊に至った。

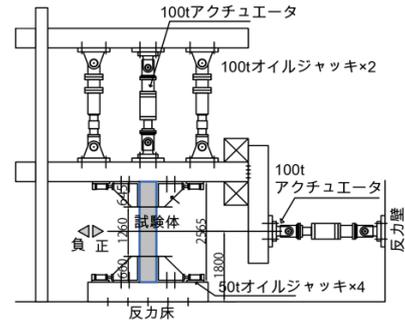


図-3 加力装置図

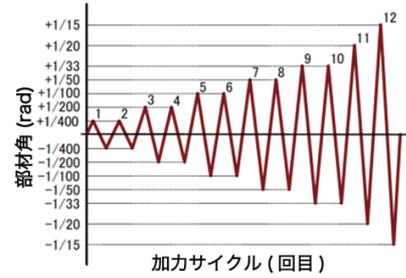
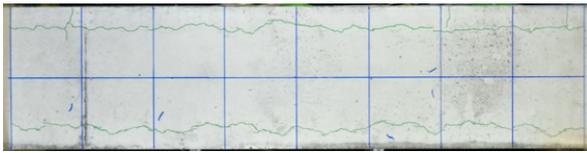


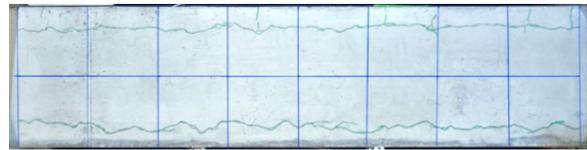
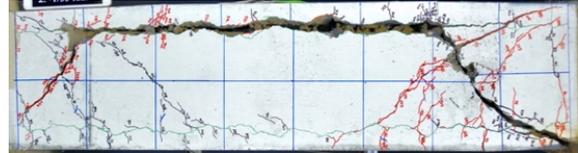
図-4 加力履歴

(加力前のひび割れ状況)

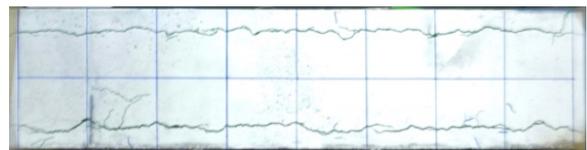
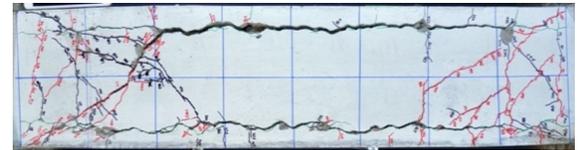


(a) C-Lv.1 (加力前最大ひび割れ幅  $0.20\text{mm}$ )

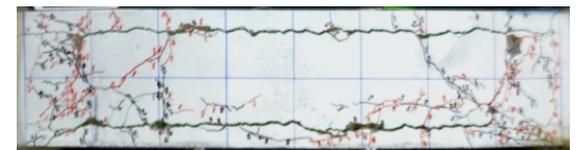
(部材角  $1/33\text{rad}$  時のひび割れ状況)



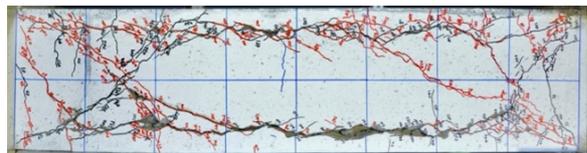
(b) C-Lv.2 (加力前最大ひび割れ幅  $0.60\text{mm}$ )



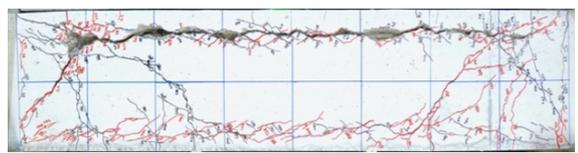
(c) C-Lv.3 (加力前最大ひび割れ幅  $1.30\text{mm}$ )



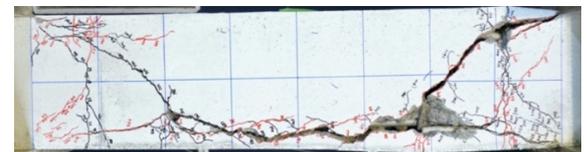
(部材角  $1/33\text{rad}$  時のひび割れ状況)



(d) NC



(e) BD-1 (加力前ひび割れ幅  $0.20\text{mm}$  相当)



(f) BD-2 (加力前ひび割れ幅  $0.55\text{mm}$  相当)



(g) BD-3 (加力前ひび割れ幅  $1.10\text{mm}$  相当)

図-5 部材角  $1/33\text{rad}$  時のひび割れ発生状況

C-Lv.2 試験体では、破砕剤充填パイプによって、幅が最大で 0.60mm のひび割れが発生した。正加力時部材角 1/400rad に至る過程で曲げひび割れが発生した。負加力時部材角 1/400rad に至る過程で曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 1/100rad に至る過程で上端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、上下端筋位置の付着割裂ひび割れが拡大して最終的な破壊に至った。

C-Lv.3 試験体では、破砕剤充填パイプによって、幅が最大で 1.30mm のひび割れが発生した。正加力時部材角 1/400rad に至る過程で曲げひび割れが発生した。負加力時部材角 1/400 に至る過程で曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 1/100rad に至る過程で上下端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、加力前ひび割れが拡大して最終的な破壊に至った。

BD-1 試験体では、正加力時部材角 1/400rad に至る過程で曲げひび割れが発生した。部材角 1/200rad に至る過程で曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 1/100rad に至る過程で上端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、曲げせん断ひび割れと付着割裂ひび割れが拡大して最終的な破壊に至った。

BD-2 試験体では、正加力時部材角 1/400rad に至る過程で曲げひび割れが発生した。部材角 1/200rad に至る過程で曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 1/100rad に至る過程で下端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、曲げせん断ひび割れと付着割裂ひび割れが拡大して最終破壊に至った。

BD-3 試験体では、正加力時部材角 1/400rad に至る過程で曲げひび割れが発生した。部材角 1/50rad に至る過程で下端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、曲げひび割れの拡大と端部の圧壊により最終的な破壊に至った。

### 3.2 せん断力一部材角関係

各試験体のせん断力一部材角関係を図-6 に示す。

NC 試験体では、正加力時部材角 1/100rad 時に最大耐力 99kN に達した。正負部材角 1/100rad 時に危険断面位置の主筋が降伏した。負加力時は部材角 1/50rad に至る過程で最大耐力 91kN に達した。その後、付着割裂破壊により耐力が徐々に低下し、部材角 1/50rad の加力サイクル以降、主筋のすべりによる逆 S 字型の履歴が顕著に現れた。

C-Lv.1 試験体では、正加力時部材角 1/100rad 時に最大耐力 96kN に達した。負加力時も同様に最大耐力 102kN に達した。正負部材角 1/100rad 時に危険断面位置の主筋が降伏した。その後、付着割裂破壊と曲げせん断ひび割れの拡大により耐力が急激に低下した。逆 S 字型の履歴も NC 試験

体と同様に現れた。

C-Lv.2 試験体では、正加力時部材角 1/100rad に至る過程で、最大耐力 90kN に達した。負加力時も同様に最大耐力 89kN に達した。正負部材角 1/100rad 時に危険断面位置の主筋が降伏した。逆 S 字型の履歴は NC 試験体、C-Lv.1 試験体と同様に現れた。

C-Lv.3 試験体では、正加力時部材角 1/50rad 時に最大耐力 90kN に達した。負加力時は部材角 1/100rad 時に最大耐力 93kN に達した。正負部材角 1/100rad 時に危険断面位置の主筋が降伏した。また、上記試験体と比較して最大耐力以降の耐力低下が小さいことが確認できる。これは付着劣化により主筋がすべり、最終破壊に至る過程でのひび割れの拡大が NC、C-Lv.1,2 試験体と比較して小さいためと考えられる。逆 S 字型の履歴は他の試験体と同様な傾向が見られた。

BD-1 試験体では、正加力時部材角 1/100rad 時に最大耐力 95kN に達した。負加力時も同様に最大耐力 100kN に達した。正負部材角 1/100rad 時に危険断面位置の主筋が降伏した。その後、付着割裂破壊により徐々に耐力が低下した。部材角 1/50rad の加力サイクル以降、主筋のすべりによる逆 S 字型履歴が顕著に現れた。

BD-2 試験体では、正加力時部材角 1/50rad に至る過程で最大耐力 100kN に達した。負加力時も部材角 1/100rad 時に最大耐力 100kN に達した。主筋の降伏は、正加力時では 1/50rad 時に、負加力時では 1/100rad 時に見られた。最大耐力後の急激な耐力低下は、部材角 1/50rad 以降の曲げせん断ひび割れおよび下端主筋の付着割裂ひび割れの拡大による影響と考えられる。

BD-3 試験体では、正加力時部材角 1/50rad に至る過程で最大耐力 97kN に達した。負加力時も部材角 1/50rad に至る過程で最大耐力 97kN に達した。主筋の降伏は、正負部材角 1/50rad 時に見られた。逆 S 字型の履歴も他の試験体と同様に現れた。

試験体の正負それぞれの最大耐力と最大耐力時の部材角および正負の平均を表-5 に示す。腐食ひび割れ模擬試験体では、加力前ひび割れ幅の増大により付着割裂破壊が先行したと考えられる C-Lv.2,3 試験体で最大耐力が低下した。付着低減試験体では、付着低減領域の違いは最大耐力に大きな影響を及ぼさなかった。いずれの試験体も引張鉄筋の降伏により最大耐力に達したと考えることができる。また、全試験体に共通して、付着劣化が大きい試験体で最大耐力時の部材角が増大する傾向が見られた。主筋の付着領域の減少に伴い主筋のすべりが増大し、主筋の全体伸びが大きくなることによるものと考えられる。

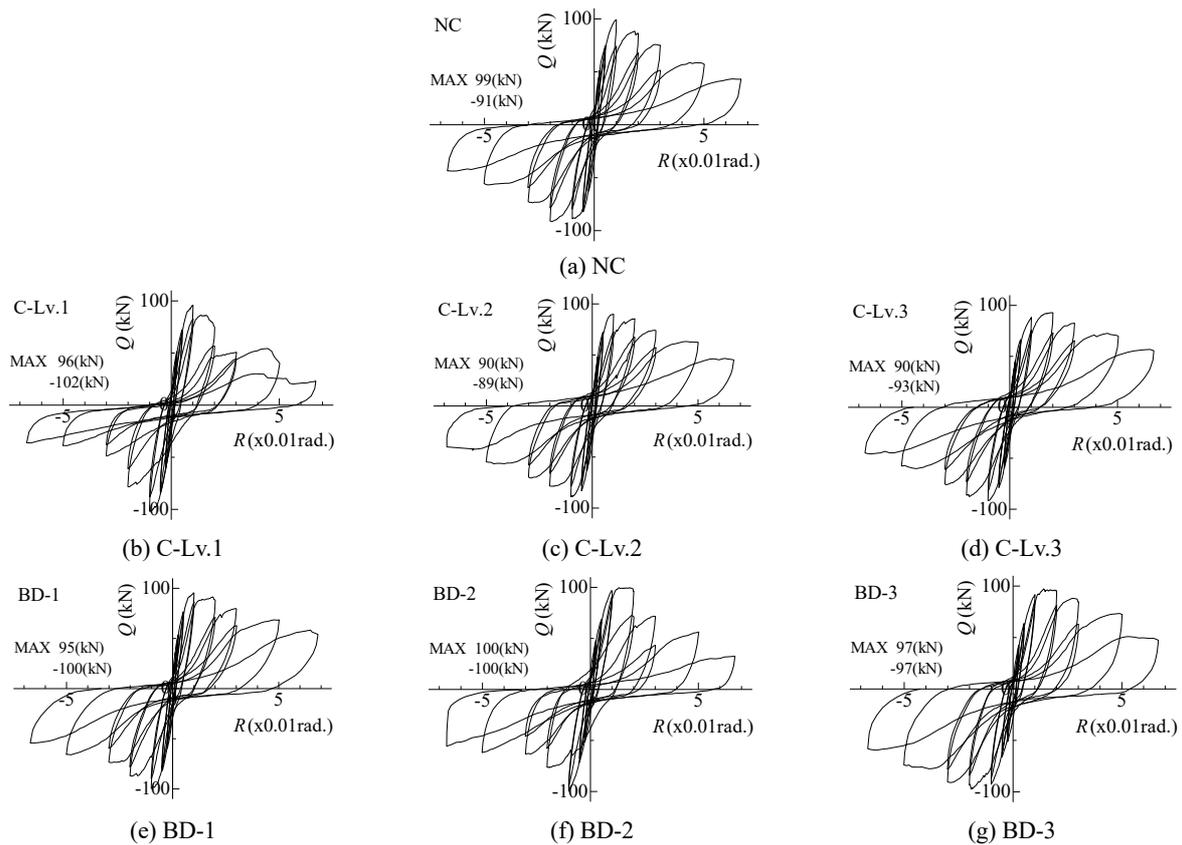


図-6 せん断力-部材角関係

表-6 最大耐力実験結果

試験体	正側最大耐力 (kN)	正側最大耐力時の 部材角(×0.01rad)	負側最大耐力 (kN)	負側最大耐力時の 部材角(×0.01rad)	正負平均 最大耐力(kN)	正負平均 部材角(×0.01rad)
NC	99	1.01	91	1.91	95	1.46
C-Lv.1	96	1.01	102	0.95	99	0.98
C-Lv.2	90	0.98	89	0.98	90	0.98
C-Lv.3	90	1.90	93	1.01	92	1.46
BD-1	95	0.98	100	0.98	98	0.98
BD-2	100	1.80	100	1.00	100	1.40
BD-3	97	1.40	97	1.93	97	1.67

### 3.3 包絡線の比較

各試験体のせん断力-部材角関係の包絡線を図-7に示す。各シリーズ試験体右図は、部材角 1/50rad 時までの包絡線を示す。部材角 1/100rad までの包絡線を比較すると、腐食ひび割れ模擬試験体、付着低減試験体共に付着劣化が大きい試験体ほど剛性が小さくなる傾向が見られた。主筋の付着劣化によるものと考えられる。腐食ひび割れ模擬試験体の部材角 1/100rad 以降に注目すると、他の試験体と比較して、C-Lv.1 試験体の耐力低下が顕著に見られる。3.1 節で述べた、曲げせん断ひび割れの拡大が耐力に与える影響が大きいと考えられる。一方付着劣化が最も大きいC-

Lv.3 試験体の耐力低下は他の試験体と比較して最も小さかった。最終破壊状況におけるひび割れの拡大が最も小さかったためと考えられ、破壊経過やひび割れは耐力低下に大きく影響するが、必ずしも加力前のひび割れの大きさには関係しないことがわかる。また、付着低減試験体の部材角 1/100rad 以降に注目すると、BD-3 試験体の耐力低下が最も小さい。これは 3.1 節で述べたように BD-3 試験体のみ付着割裂ひび割れの拡大が生じなかった影響であるとされる。また BD-2 試験体で耐力低下が最も大きいことから、顕著な曲げせん断ひび割れの拡大は耐力低下及ぼす影響が大きいと考えられる。

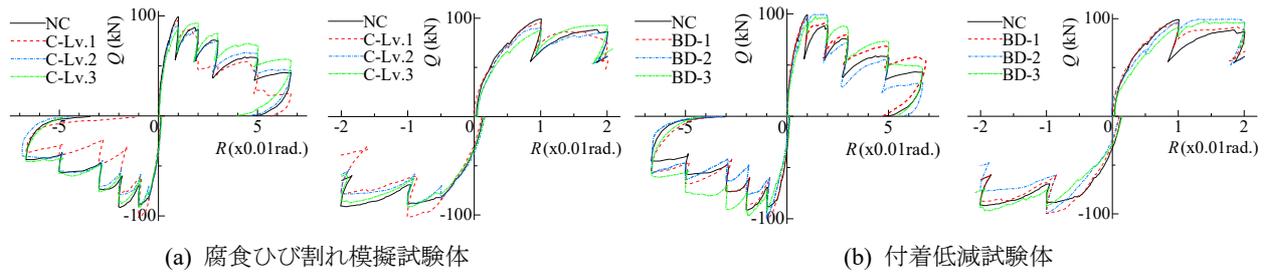


図-7 包絡線比較

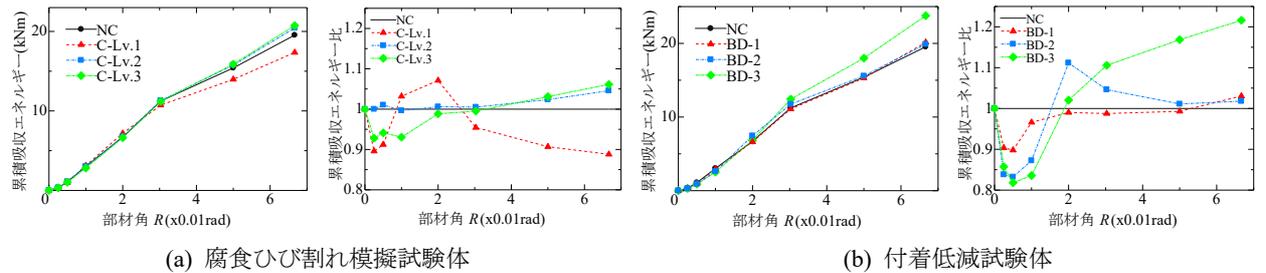


図-8 累積エネルギー吸収量および累積エネルギー吸収量比

### 3.4 エネルギー吸収性能

各試験体の累積エネルギー吸収量および NC 試験体を基準とした累積エネルギー吸収量比を図-8 に示す。腐食ひび割れ模擬試験体および付着低減試験体に共通して、C-Lv.2 試験体以外の全ての試験体で部材角 1/100rad までのエネルギー吸収量が小さい傾向が、累積エネルギー吸収量比より確認できた。これは主筋の付着劣化に伴う剛性低下の影響と考えられる。ひび割れが最終破壊の状態近くまで進行した 1/33rad 以降に注目すると、腐食ひび割れ模擬試験体のエネルギー吸収量は、NC 試験体と比較して C-Lv.1 試験体は低下し、C-Lv.2,3 試験体はわ

ずかに増大する傾向が見られた。最終破壊に至る過程では、全ての試験体で付着割裂ひび割れの拡大が見られたが、C-Lv.1 試験体で特に顕著であった曲げせん断ひび割れの拡大の影響と考えられる。

付着低減試験体のエネルギー吸収量は、NC 試験体と比較して BD-1,2 試験体は同程度であるが、BD-3 試験体で大幅に増大する傾向が見られた。BD-3 試験体では主筋のすべりにより付着割裂ひび割れが発生せず、端部の圧壊によって最終破壊に至ったため、NC、BD-1,2 試験体と比較してエネルギー吸収能の低下が小さかったと考えられる。

## 4. まとめ

腐食ひび割れ模擬試験体および付着低減試験体の逆対称繰返し曲げせん断加力を実施し、付着劣化が RC 部材の繰返し曲げせん断性能に与える影響を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 腐食ひび割れ模擬試験体では、付着劣化が大きい試験体で最大耐力が低下した。
- (2) 付着低減試験体では、付着劣化の増大に伴う最大耐力の低下は見られなかった。
- (3) 腐食ひび割れ模擬試験体、付着低減試験体共に、付着劣化の増大に伴い、部材角 1/100rad までの剛性が低下する傾向が見られた。
- (4) 腐食ひび割れ模擬試験体では、C-Lv.1 試験体で、部材角 1/33rad 以降のエネルギー吸収性能が低下した。
- (5) 付着低減試験体では、BD-3 試験体で、部材角 1/33rad 以降のエネルギー吸収性能が増大した。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費基盤研究(B)JP21H01472 による。

## 参考文献

- 1) 油野登梧, 金久保利之, Syll Amadou Sakhir: 破碎剤充填パイプにより鉄筋腐食ひび割れを模擬した RC 部材の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.181-186, 2020.7
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1997
- 5) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, pp.47-49, 1998