

論文 破砕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

山野 登梧*1・金久保 利之*2・Syll Amadou Sakhir*3

要旨: 鉄筋の腐食膨張によって発生するコンクリートのひび割れが RC 部材の構造性能に及ぼす影響に着目し、静的破砕剤充填パイプによりひび割れを模擬した RC 部材の逆対称繰返し曲げせん断実験を行った。ひび割れ導入実験の結果より、破砕剤を充填したパイプを用いるとコンクリートにひび割れが発生し、経過時間の増大にともなってひび割れ幅も大きくなった。曲げせん断実験の結果、加力前のひび割れ幅の増大に伴って、部材角 $1/100\text{rad}$ までの剛性は低下し、最大耐力時の部材角が大きくなる傾向がみられた。加力前ひび割れ幅が約 0.5mm の試験体では、 0.05mm の試験体よりも最大耐力以降の耐力低下割合が減少した。

キーワード: 鉄筋腐食、ひび割れ幅、付着性状、静的破砕剤、建研式加力、エネルギー吸収性能

1. はじめに

1960 年代に始まった建設ラッシュによって、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 40~50 年以上経過し、塩害や中性化など、環境要因や経年劣化による性能低下が危惧されている。性能低下の一つとして鉄筋腐食が挙げられ、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。

既往の研究¹⁾では、暴露した試験体に逆対称繰返し曲げせん断加力を行った結果、基準試験体に比べて最大耐力およびエネルギー吸収性能が低下したと報告され、これらの性能低下は引張鉄筋の断面減少が原因であると考察している。しかし、加力前後の試験体のひび割れ状況を比較すると、暴露によって発生したひび割れ箇所が破壊が局所化していることから、腐食ひび割れも部材の構造性能に影響を及ぼすと考えられる。

鉄筋腐食によるひび割れを模擬する方法として暴露試験や電食実験が行われるが、実験に時間がかかるなどの問題点が挙げられる。著者らは、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れを模擬する方法として、コンクリート中に埋設した中空パイプに静的破砕剤を充填し、腐食生成物による場合と同様の内部圧によってひび割れを生じさせ、実験を行う手法を試みている²⁾。本手法では電食と比較して短期間でひび割れを生じさせることが可能で、さらに、破砕剤充填後の経過時間によって目標とするひび割れ幅を設定することができる。

破砕剤充填パイプを圧縮鉄筋の代わりに用いた RC 梁試験体の実験³⁾では、充填後 300 時間経過後の試験体の平均ひび割れ幅は $0.5\sim 1\text{mm}$ であった。圧縮側にひび割れが発生した試験体の単調曲げ載荷より、腐食ひび割れ

は純曲げ性状に大きく影響を及ぼさないことが報告されている。

本研究では、腐食ひび割れが部材の構造性能において最も影響を及ぼすと予想される主筋とコンクリートの付着性状に与える影響について検討することを目的とする。はじめに、逆対称繰返し曲げせん断実験試験体と同一の断面を有するひび割れ導入実験試験体により、破砕剤充填パイプによって発生するひび割れの観察およびひび割れ性状の確認を行う。続いて、破砕剤充填パイプによってひび割れを生じさせた試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験を実施し、鉄筋腐食によるひび割れが部材の付着性状およびエネルギー吸収性能に及ぼす影響について考察を行う。

2. 破砕剤充填パイプによるひび割れ導入実験

2.1 試験体

試験体一覧を表-1 に、試験体配筋を図-1 に示す。試験体は全 4 体である。試験体断面は逆対称曲げせん断実験試験体と同一の幅 $b\times$ せい D を $220\text{mm}\times 420\text{mm}$ とした。試験体の四隅に外径 22mm 、肉厚 1mm のアルミパイプを配置し、断面上部と下部に異形鉄筋 D19 を 2 本配置した。試験体両端部は肋筋(D10@60)を配し補強した。試験体長を 840mm 、 1260mm の 2 種とし、 1260mm は逆対称曲げせん断実験試験体の内法スパンと同一とした。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。ひび割れ状況を目視およびクラックスケールで確認した S シリーズ試験体、ひび割れ発生箇所に設置した π 型変位計によりひび割れ幅を計測した P シリーズ試験体の合計 4 体の実験を

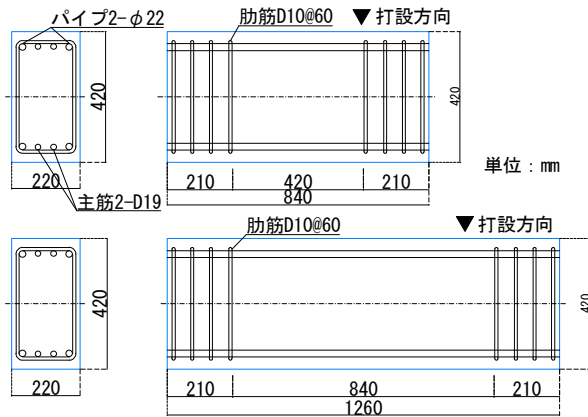
*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (学生会員)

*2 筑波大学 システム情報系教授 博士 (工学) (正会員)

*3 筑波大学大学院 システム情報工学研究科

表一 ひび割れ導入実験試験体一覧

No.	試験体名	ひび割れ計測方法	試験体長(mm)
1	S-84	目視および	840
2	S-126	クラックスケール	1260
3	P-84	π型変位計	840
4	P-126		1260



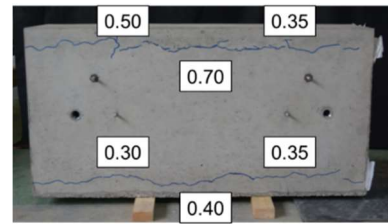
図一 ひび割れ導入実験試験体配筋図

行った。試験体は脱型後材齢4週時に建て起こし、パイプ上部から静的破砕剤を充填して静置した状態でひび割れの観察、測定を行った。静的破砕剤充填時の材齢は、Sシリーズでは54日、P-126では68日、P-84では97日である。破砕剤充填時にはいずれの試験体においても上端筋位置で幅0.2mm程度の沈みひび割れが見られた。なお、材齢52日および66日におけるコンクリートの圧縮強度の平均は、26.1MPaであった。

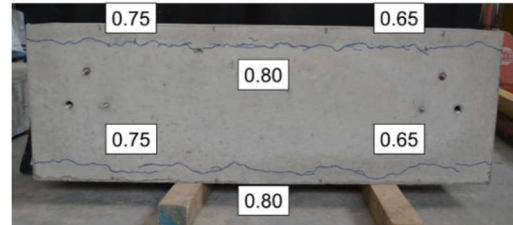
2.2 ひび割れ導入実験結果

破砕剤を充填してから300時間経過後の試験体のひび割れ発生状況を図-2に示す。ひび割れ幅は肋筋のない試験体中央部を3等分し、それぞれの区間でアルミパイプに沿って生じたひび割れについてクラックスケールを用いて計測した。図中の値はそれぞれの区間で計測したひび割れ幅のうち最大となる値を示した。いずれの試験体も破砕剤の充填によって、パイプに沿ったひび割れが生じた。試験長が長い試験体では上端筋と下端筋でひび割れ幅にほとんど違いは見られなかった。試験長が短い試験体では、下端筋よりも上端筋の方がひび割れ幅が大きくなった。これは、上端筋位置でのコンクリートの沈降による沈みひび割れの影響であると考えられる。

S-84およびS-126試験体ではひび割れ幅を計測後、試験体中央部で切断し断面を観察した。それぞれの試験体の切断面を図-3に示す。いずれの試験体も破砕剤充填パイプによって、試験体の内部にもひび割れが発生していることがわかった。S-84では上下端筋ともにサイドスプリット型のひび割れが生じた。S-126では上端筋でサ



S-84 (単位: mm)



S-126 (単位: mm)

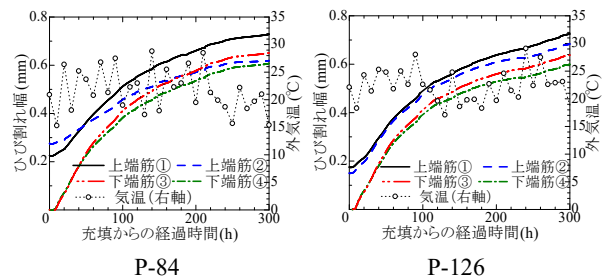
図二 破砕剤充填から300時間経過後の試験体



S-84

S-126

図三 試験体中央部の切断面



P-84

P-126

図四 ひび割れ幅の推移

イドスプリット型、下端筋でコーナースプリット型のひび割れが生じた。

π型変位計を用いて、破砕剤充填から300時間経過までのひび割れ幅を計測した結果を図-4に示す。π型変位計は一つのひび割れについて試験体をおおよそ3分割する位置に2ヶ所、表裏上端下端筋位置の計8ヶ所に取り付けた。グラフには同一主筋位置で計測した2つのデータの平均値をプロットした。なお、図-4に示す気温は、気象庁地域気象観測システム(アメダス)つくば観測所による10時間毎のデータである。上端筋には沈みひび

割れが発生していたため、破砕剤充填時にクラックスケールで計測したひび割れ幅から測定を開始した。破砕剤充填からおよそ 50 時間までにひび割れ幅が大きく増大する傾向が見られ、特に下端筋においてグラフの勾配が大きい。沈みひび割れが発生していた上端筋よりも下端筋の方がコンクリートが密に充填されており、破砕剤による膨張圧の影響を大きく受けたためと考えられる。気温の影響は明瞭でない。また、試験体長の違いの影響も大きくなかった。

3. 逆対称繰返し曲げせん断実験

3.1 試験体

逆対称繰返し曲げせん断実験試験体の一覧を表-2 に、試験体配筋を図-5 に示す。試験体は全 3 体である。断面はひび割れ導入実験試験体と同一であり、幅 $b \times$ せい D は 220mm \times 420mm 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、両端部は助筋(D10@100)を配し補強している。コンクリート目標強度は 18MPa で、変動因子は破砕剤によって生じる目標最大ひび割れ幅とした。

ひび割れ発生を考慮しない場合の耐力計算結果を表-3 に示す。試験体は、付着割裂破壊性状の確認のため、曲げ降伏後に付着割裂破壊が起こるように設計した。曲げ強度は梁の終局曲げ強度略算式⁴⁾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」⁵⁾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」⁶⁾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。曲げ強度算出においては破砕剤充填パイプが負担する荷重はないものとした。付着強度算出においては、サイドスプリット型の割裂線長さ比を求める際に主筋径を一段に並ぶ鉄筋とパイプの総和とし、せん断信頼強度を求める際にはパイプの負担付着力はないものとした。

3.2 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-4 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-5 に示す。

(3)アルミパイプ

破砕剤充填用パイプには外径 22mm、肉厚 1mm のアルミパイプを用いた。アルミパイプ単体の引張試験結果を表-6 に示す。

3.3 加力・計測方法

加力装置を図-6 に、加力履歴を図-7 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、局部変形、主筋歪、せん断補強筋歪、加力時をゼロ点としたアルミパイプの歪である。

表-2 試験体一覧

試験体名	共通事項	目標最大ひび割れ幅
Level.1	内法スパン：1260mm	$\omega_{cr} < 0.3\text{mm}$
Level.2	せん断スパン比：1.5	$0.3 \leq \omega_{cr} < 0.5\text{mm}$
Level.3	せん断補強筋比：0.32%	$0.5\text{mm} \leq \omega_{cr}$

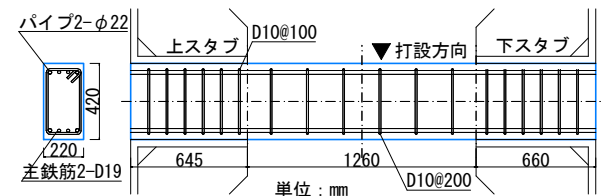


図-5 試験体配筋図

表-3 耐力計算結果

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}
111	220	179	1.99	1.62

曲げ強度：AIJ 終局曲げ強度略算式
せん断強度：AIJ 終局強度型指針式 A 法
付着強度：AIJ 靱性保証型指針式

表-4 コンクリート材料試験結果

目標強度	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)	備考
18MPa	23.8	17.6	2.28	加力前・後材令の平均

表-5 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	349	525	190	25.2
D19	366	535	193	25.4

表-6 アルミパイプ引張試験結果

降伏強度* (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
176	199	61.7	0.341

*：0.2%オフセット耐力

4. 実験結果

4.1 試験体破壊状況

加力前のひび割れ状況と部材角 $1/50\text{rad}$ 時のひび割れ状況を図-8 に示す。以下、破壊状況を述べる。

Level.1: 破砕剤充填パイプによって、幅が最大で 0.05mm 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付着割裂ひび割れが拡大して最終破壊に至った。

Level.2: 破砕剤充填パイプによって、幅が最大で 0.4mm 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が発生した。部材角 $1/200\text{rad}$ 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、部材角 $1/100\text{rad}$ に至る過程で曲げせん断ひび割れ、下端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。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。

Level.3: 破砕剤充填パイプによって、幅が最大で 1.6mm 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が発生した。部材角 $1/200\text{rad}$ に至る過程で、曲げせん断ひび割れと上端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。加力前ひび割れ幅が 0.8mm を超えた区間では、新たな付着割裂ひび割れは発生せず、加力前ひび割れの拡幅がみられた。

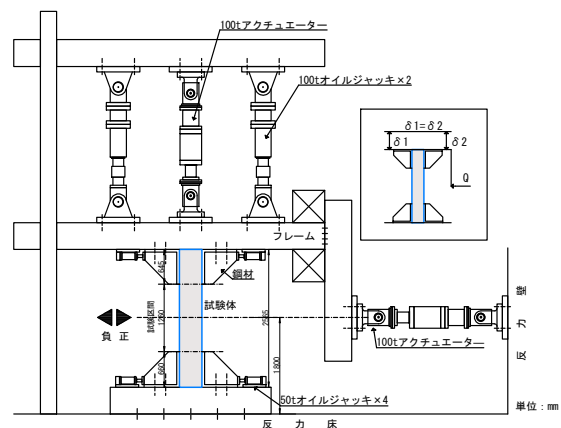


図-6 加力装置図

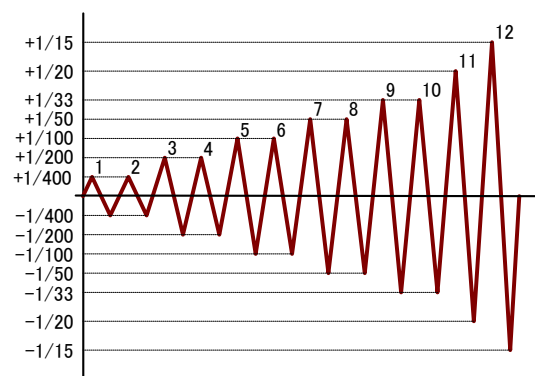
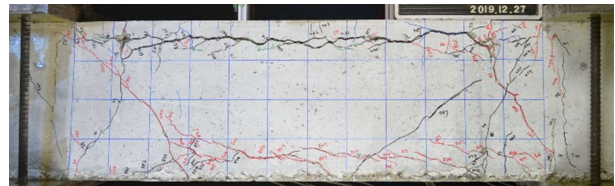


図-7 加力履歴

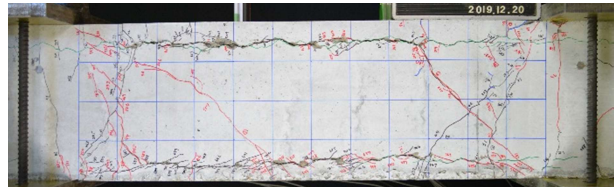
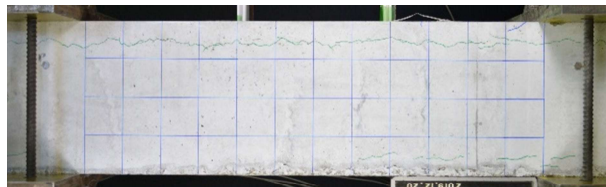
(a)加力前のひび割れ状況



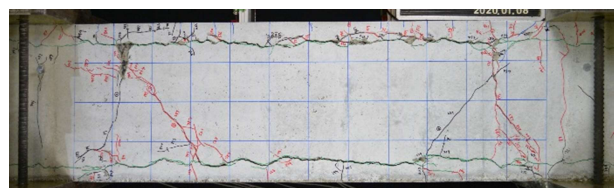
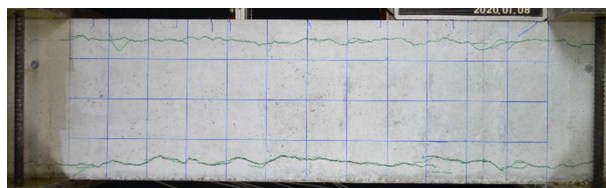
(b) 部材角 $1/50\text{rad}$ 時のひび割れ状況



Level.1 (加力前最大ひび割れ幅 0.05mm)



Level.2 (加力前最大ひび割れ幅 0.4mm)



Level.3 (加力前最大ひび割れ幅 1.6mm)

図-8 加力前および部材角 $1/50\text{rad}$ 時のひび割れ発生状況

4.2 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-9に示す。直線は曲げ終局強度計算値を示す。

Level.1：正加力時部材角 1/100rad に至る過程で、最大耐力 139kN に達した。最大耐力時の引張側破砕剤充填パイプの危険断面位置歪は最大で 0.29%であった。負加力時も同加力サイクルで最大耐力 121kN に達した。部材角 1/50rad まで耐力低下がなかったことから、曲げ降伏が先行したと考えられる。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、主筋の滑りによる逆 S 字型の履歴が顕著に表れた。

Level.2：正加力時部材角 1/100rad に至る過程で、最大耐力 141kN に達した。最大耐力時の引張側破砕剤充填パイプの危険断面位置歪は最大で 0.27%であった。負加力時は部材角 1/50rad に至る過程で最大耐力 118kN に達した。Level.1 試験体と同様に曲げ降伏が先行し付着割裂破壊が起こったと考えられる。逆 S 字型の履歴も Level.1 試験体と同様にみられた。

Level.3：正加力時部材角 1/50rad に至る過程で、最大耐力 132kN に達した。最大耐力時の引張側破砕剤充填パイプの危険断面位置歪は最大で 0.38%であった。負加力時も同加力サイクルで最大耐力 115kN に達した。その後、耐力一定の区間はなく、すぐに耐力が低下した。Level.1, Level.2 試験体と最大耐力の差が大きくないことから、曲げ降伏後ただちに付着割裂破壊が起こったと考えられる。逆 S 字型の履歴は他の試験体と同様な傾向がみられた。

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-7に示す。加力前ひび割れ幅

の違いは、最大耐力に大きな影響を及ぼさなかった。各試験体は引張鉄筋の降伏によって最大耐力に達したため、加力前ひび割れ幅は最大耐力に影響を及ぼさないと考えられる。加力前ひび割れ幅の増大に伴って、最大耐力時の部材角が増大する傾向がみられた。主筋の付着劣化により滑りが増大し、危険断面位置における曲げひび割れの開口や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。

4.3 包絡線の比較

各試験体の包絡線を図-10に示す。部材角 1/100rad までの包絡線を比較すると、Level.3 試験体は Level.1, Level.2 試験体に比べて剛性低下の割合が顕著に大きいことがわかる。4.2節で述べた主筋の付着劣化によるものと考えられる。部材角 1/100rad から 1/33rad の区間において、Level.2 試験体の耐力低下の割合が小さくなる傾向がみられた。既往の研究⁷⁾によると、電食鉄筋の腐食減量率が 3%程度までは健全鉄筋と比較して付着強度が上昇する場合も散見され、腐食生成物による噛み合い効果によるものとされている。本研究においても、Level.2 試験体程度のひび割れであれば破砕剤による膨張圧の影響でコンクリートの拘束が増大し、耐力低下が抑制される可能性が考えられる。

部材角 1/50rad 以降の包絡線では正加力と負加力で違いがみられた。正加力時では、部材角の増大に伴って耐力が低下し、加力前ひび割れ幅が大きい試験体ほど耐力低下の割合が大きい。負加力時では、部材角の増大に伴って耐力は低下するが、耐力低下の割合は大きい順に Level.3, Level.1, Level.2 と加力前ひび割れ幅の大きさと

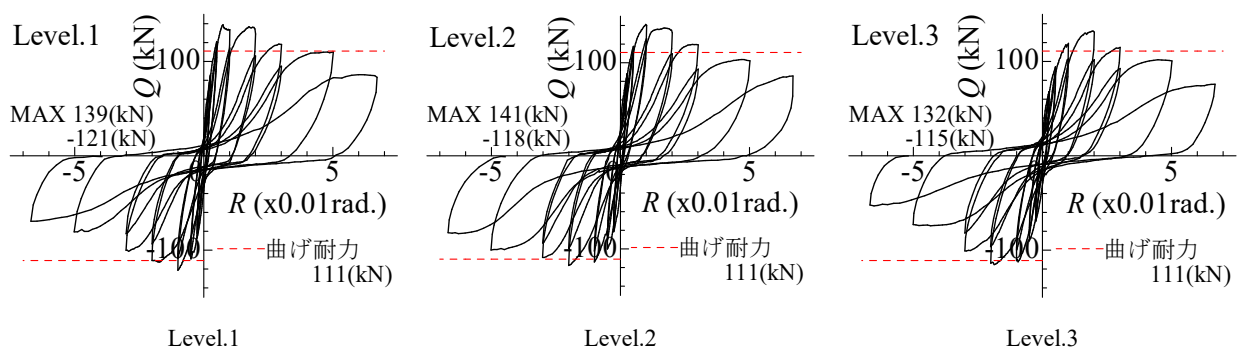


図-9 せん断力一部材角関係

表-7 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)
Level.1	139	0.75	121	0.98	130	0.87
Level.2	141	0.98	118	2.01	130	1.50
Level.3	132	1.95	115	1.91	124	1.93

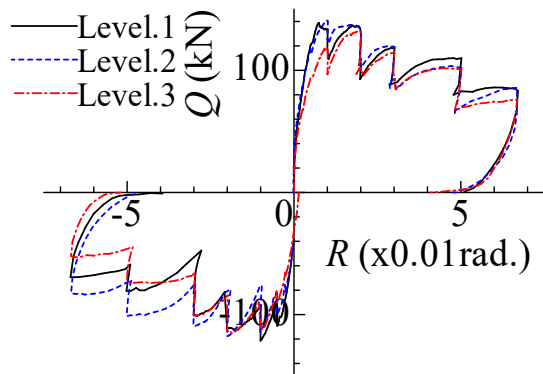


図-10 包絡線比較

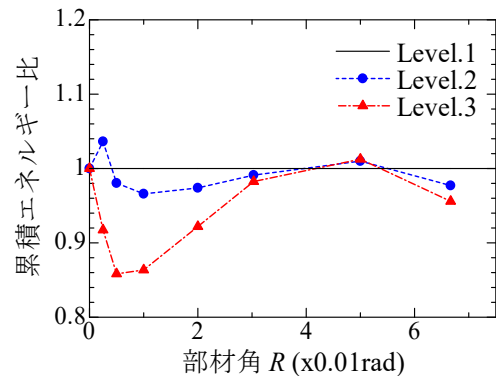


図-11 累積エネルギー吸収量比

の関係性がみられなかった。変形が大きい領域では、加力前ひび割れよりも加力によって発生したひび割れの影響が大きくなったと考えられる。

4.4 エネルギー吸収性能

各試験体の Level.1 試験体を基準とした累積エネルギー吸収量比を図-11 に示す。Level.2 のエネルギー吸収量に注目すると、部材角 1/200rad までは、Level.1 試験体よりも累積エネルギー吸収量が大きい。部材角 1/200rad 以降は、Level.1 試験体と Level.2 試験体の間で、累積エネルギー吸収量に大きな差は見られなかった。

Level.3 試験体に注目すると、部材角 1/100rad までの累積エネルギー吸収量が大幅に低下している傾向がみられた。加力前ひび割れ幅が 1.5mm 程度の試験体では、主筋の付着劣化に伴う剛性低下が大きく影響したと考えられる。部材角 1/33rad 以降は、いずれの試験体も同程度のエネルギー吸収性能である傾向がみられた。加力進行によって、各試験体のひび割れ状況に違いがなくなったためと考えられる。

5. まとめ

破砕剤充填パイプを用いて腐食ひび割れを模擬した RC 部材のひび割れ導入実験を行い、ひび割れ性状の検討を行った。また、逆対称繰返し曲げせん断実験を行いコンクリートのひび割れが RC 部材の構造性能に及ぼす影響を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 破砕剤充填後の経過時間の増大にともなって発生ひび割れは長くなり、ひび割れ幅も大きくなる傾向がみられた。
- (2) 破砕剤充填パイプを用いることによって、試験体内部の断面にコーナースプリット型およびサイドスプリット型のひび割れが発生した。
- (3) 加力前ひび割れは、試験体の最大耐力に大きな影響を及ぼさなかったが、部材角 1/100rad までの剛性および最大耐力時の部材角に影響を及ぼした。

- (4) 加力前最大ひび割れ幅が 0.4mm の試験体では、破砕剤充填パイプの膨張圧から生じる拘束力により、耐力低下の割合が減少した。
- (5) 加力前最大ひび割れ幅が 1.6mm の試験体では、部材角 1/100rad までのエネルギー吸収性能が低下した。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費挑戦的研究(萌芽)17K18917 によっている。

参考文献

- 1) 船木裕之, 山川哲雄, 中田幸造: 沖縄の西海岸で暴露した大型 RC 柱の耐久性能と耐震性能に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.666, pp.1479-1488, 2011.8
- 2) Syll, A. S., Kawamura, Y., Kanakubo, T., Simulation of Concrete Cracks due to Bar Corrosion by Aluminum Pipe Filled with An Expansion Agent, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure IV, pp.55-56, 2018.9
- 3) 川村佳弘, 金久保利之: 破砕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
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 2010
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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