

論文 プラスチック板で鉄筋腐食ひび割れを模擬した RC 柱の構造性能

相沢 慧*¹・八十島 章*²

要旨：主筋が腐食した RC 柱の構造性能を評価するため、静的破砕剤を用いて主筋腐食を模擬した RC 短柱の内部ひび割れ性状を把握し、その模擬腐食ひび割れをプラスチック板で模擬した単純梁形式の付着実験と RC 柱の曲げせん断実験を実施した。静的破砕剤による模擬腐食ひび割れ性状は、鉄筋の近傍や柱の中央付近でひび割れが貫通していない部分があることが確認された。単純梁形式の付着実験結果より、模擬ひび割れが付着強度に及ぼす影響を検討し、総付着耐力を模擬ひび割れの投影長さに基づいて評価した。また、RC 柱の曲げせん断実験の結果より、模擬ひび割れの有無によって破壊形式や靱性能が影響を受けることが確認された。

キーワード：経年劣化、鉄筋腐食、プラスチック板、曲げ柱、付着強度、総付着耐力

1. はじめに

高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート造建築物の多くは、竣工から 50 年以上経過しており耐用年数に近づいているため、様々な環境要因や経年劣化に伴う構造性能の低下が問題視されている。特に鉄筋腐食は、鉄筋の断面減少による鉄筋の強度低下とともに、鉄筋表面の腐食生成物の発生により鉄筋の体積が膨張し、コンクリートにひび割れを生じさせるため、構造物の性能低下を引き起こす危険性がある。既存 RC 造構造物を長期的に利用するためには、構造部材の既存ひび割れ状態や残存耐震性能を定量的に評価し、適切な補強・補修を行うことが求められる。

本研究では、鉄筋腐食によるひび割れが RC 柱の構造性能に与える影響を把握するため、静的破砕剤を用いて主筋の腐食膨張を模擬した RC 短柱の内部ひび割れ性状確認実験と、その結果に基づいたプラスチック板の埋設により鉄筋腐食ひび割れを模擬した単純梁形式の付着実験を行い、模擬ひび割れの妥当性と付着性能に及ぼす影響を検討する。さらに、プラスチック板の埋設により鉄筋腐食ひび割れを模擬した RC 柱の曲げせん断実験を行い、模擬ひび割れが曲げ性能に及ぼす影響を検討する。

2. 破砕剤充填で腐食を模擬した RC 柱のひび割れ性状

鉄筋腐食による RC 柱の内部ひび割れ性状を把握するため、鉄筋腐食生成物の発生による体積膨張と同じように膨張圧を生じる静的破砕剤を用いて、主筋の腐食膨張を模擬させた RC 短柱のひび割れ性状を把握する実験を実施した。破砕剤充填用試験体の概要、破砕剤の充填位置、破砕剤充填後の内部ひび割れ状況を図-1 に示す。なお、左下図のひび割れ 1, 2, 3 はそれぞれ右上図の赤線で示したひび割れの断面を撮影したものである。

試験体は断面 320mm×320mm、高さ 300mm であり、

主筋の配筋として 12-D13 を想定し、破砕剤充填箇所は 16mm の丸鋼を用いて打設を行い、打設後に丸鋼を引き抜いて充填用の円孔を設けた。丸鋼を引き抜いた円孔に破砕剤を充填し、試験体側面の平均ひび割れ幅が、肉眼でははっきり見える程度の損傷である 0.5mm になった時点で充填した破砕剤を除去し、試験体を 2 時間インクに浸けてひび割れ内部への着色を行なった。その後、破砕剤を再び充填させ、試験体を割裂してひび割れの内部状況を観測した。観測の結果から、模擬腐食ひび割れは、破砕剤を充填した腐食模擬鉄筋の近傍とひび割れ中央の一部分において、インクの着色が見られず、これらの箇所ではコンクリートが部分的につながり、ひび割れが貫通していない状態であることが確認された。

3. 模擬腐食ひび割れが付着強度に及ぼす影響

3.1 実験概要

模擬腐食ひび割れを有する単純梁形式の付着実験の概要を図-2 に示す。また、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。試験体は、断面

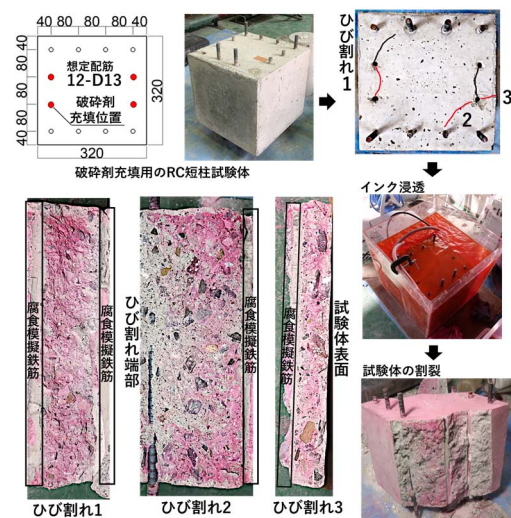


図-1 試験体概要および模擬腐食ひび割れ性状

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究群構造エネルギー工学学位プログラム (学生会員)

*2 筑波大学 システム情報系構造エネルギー工学域 准教授 博士(工学) (正会員)

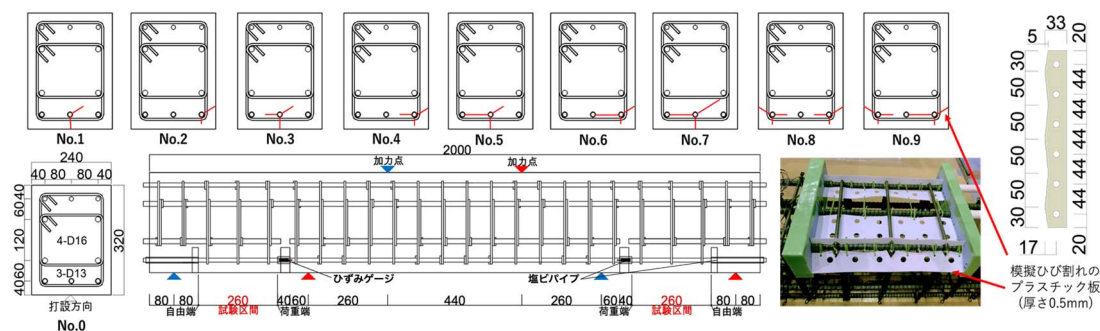


図-2 単純梁形式付着実験の試験体概要

240mm×320mm, 全長 2000mm, 引張主筋 3-D13(SD390), せん断補強筋 2-D6@100(せん断補強筋比 0.26%)であり, 供試体 1 体につき左右 2 箇所試験区間を有する単純梁形式の付着試験体である。付着長の長い鉄筋群の付着性能を検討するため, 試験区間の付着長は 260mm とした。試験区間を明確にするため, 荷重端側および自由端側にスリットを設け, 荷重端から 40mm の区間には塩ビパイプを配して付着を絶縁した。自由端側は, 支点反力による主筋の拘束を防止するために梁端から 160mm を付着絶縁区間とし, 試験鉄筋の内側には補強用鉄筋を配した。供試体数は 5 体で, 1 体につき左右 2 箇所の試験区間があるので, 各々を試験体として見なし, 試験体数は合計 10 体である。試験体 No.0 は模擬ひび割れのない健全な試験体, 試験体 No.1~No.9 は模擬ひび割れのある試験体である。鉄筋腐食ひび割れを模擬するために, 厚さ 0.5mm のプラスチック板をコンクリートに埋設し, 内部ひび割れ確認実験の結果を基に, 図-1 のひび割れ断面において鉄筋付近とひび割れ中央の部分的に着色が見られなかったコンクリートの固着部分をプラスチック板端部の切欠きと直径 10mm の穴によって再現した。実験因子はプラスチック板の位置と長さとし, 試験区間の全長にわたってプラスチック板を埋設した。加力は 2MN 万能試験機を用いてせん断スパン 700mm の 3 点曲げによる単調載荷とした。計測項目は全体荷重, 全体たわみ, 主筋の自由端すべり量, 荷重端位置のひずみ値である。

3.2 実験結果

代表的な最終破壊状況を図-3 に示す。また, 各主筋の付着応力-自由端すべり量関係を図-4 に, 全主筋による総付着力-全体たわみ量関係を図-5 に, 各試験体における鉄筋毎の付着強度を図-6 に示す。付着応力は荷重端の鉄筋ひずみ値から引張荷重を算出し, それを主筋の周長と付着長で除すことで算出した。また, 全主筋による総付着力はひずみ値から算出した各主筋の荷重端引張力を総和することで算出した。

試験体 No.9 以外の試験体では, 荷重端側のスリットから斜め方向のひび割れが発生した後, 自由端側のスリットから斜め方向のひび割れが発生した。試験体 No.9 では鉄筋のすべりが急激に増大したため自由端側にひび割れ

表-1 コンクリートの材料試験結果

圧縮強度 σ_B (MPa)	割裂強度 σ_t (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)
21.7	2.03	17.1

表-2 鉄筋の引張試験結果

鉄筋種別	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	引張強度 σ_u (MPa)	伸び (%)
D13	452	192	636	19.2
D6	459	193	552	16.3

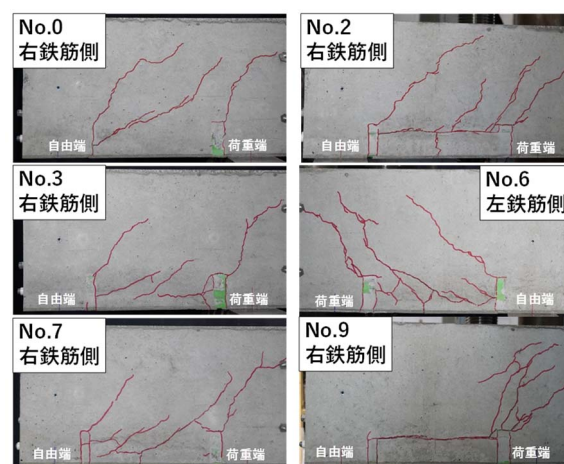


図-3 付着試験体の最終破壊状況

は発生しなかった。その後, 隅筋のかぶりに模擬ひび割れのない試験体 No.0, 1, 3, 5, 7 では, 鉄筋に沿った斜めひび割れが急激に発生して全体荷重が低下するとともに付着割裂破壊に至った。隅筋のかぶりに模擬ひび割れのある試験体 No.2, 4, 6, 8, 9 では, かぶり部分に埋設したプラスチック板に沿ったひび割れが拡幅し, 全体荷重が低下して付着割裂破壊に至った。プラスチック板を鉄筋の周囲に埋設した主筋は, 他の鉄筋と比較して付着強度が小さく, 顕著な付着性能の低下が確認された。また, 全主筋による総付着耐力は, 断面内のプラスチック板が長くなるほど小さくなる傾向が見られ, 中央筋に模擬ひび割れのある試験体のほうが, 隅筋のみにある場合よりも低くなっていた。

3.3 付着強度の検討

既往の付着強度評価式の多くは, コンクリートのかぶり厚さや割裂線長さに基づいて表現されているため, 本

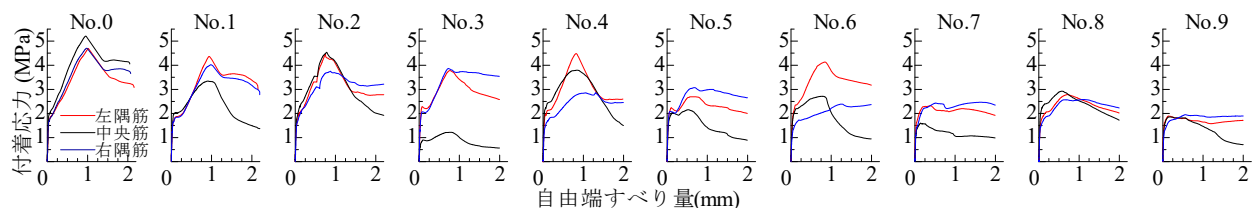


図-4 付着応力-自由端すべり量関係

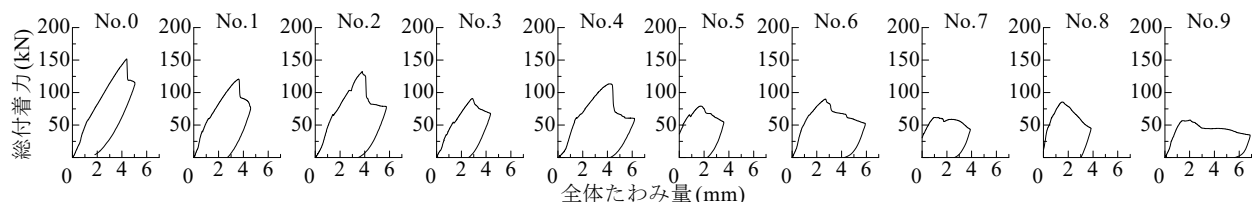


図-5 総付着力-全体たわみ量関係

実験結果についても割裂線長さ比による強度の検討を試みた。図-7のように、付着割裂面からプラスチック板による模擬ひび割れの投影長さを差し引くことで、模擬ひび割れを考慮した割裂線長さ比 b_{cri} を式(1)により表現した。

$$b_{cri} = (b - C_{cr} - Nd_b) / Nd_b \quad (1)$$

ここで、 b ：部材幅、 C_{cr} ：模擬ひび割れの投影長さ、 d_b ：主筋径、 N ：主筋本数

各主筋の付着強度の平均値と割裂線長さ比の関係を図-8に示す。図中には既往の強度評価式^{1),2)}による計算値も示している。プラスチック板の埋設長さに応じて割裂線長さ比が小さい試験体ほど、付着強度の平均値が低下することが確認され、既往の強度式と同様の傾向を示していることから、プラスチック板による模擬ひび割れは、鉄筋腐食による付着割裂面の劣化を模擬できていると考えられる。また、プラスチック板を中央筋の周りに埋設した試験体 No.1, 3, 5, 7 では、他の試験体と比較して中央筋の付着強度の低下が顕著であったため、同程度の割裂線長さ比を有する試験体よりも付着強度の平均値が小さくなる傾向があった。既往の強度式と比較すると、藤井・森田式¹⁾では No.3, 7 が危険側になり、前田・小谷式²⁾では全試験体が安全側の評価であった。また、実験結果の回帰直線の傾きは既往の強度式と比べて大きくなっており、模擬ひび割れによる割裂線長さの低下は、模擬ひび割れの無い健全状態における割裂線長さの変化よりも付着強度に与える影響が大きいことが確認された。

鉄筋腐食により主筋周辺にひび割れが生じる場合、腐食鉄筋と周囲の鉄筋の相互作用によって腐食鉄筋だけでなく周囲の鉄筋の付着強度も低下することが考えられる。また、そのような状況においては、すべての主筋が同時に付着強度に達するとは限らない。そのため、鉄筋毎の付着強度を検討するのではなく、部材全体の総付着耐力を評価することが重要と考えられる。そこで、模擬ひび割れの長さが部材の総付着耐力に及ぼす影響を検討した。

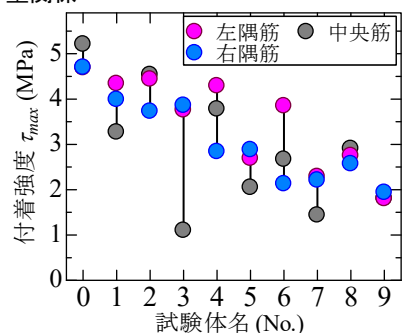


図-6 各主筋の付着強度

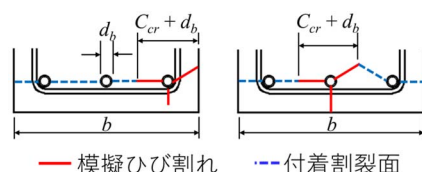


図-7 模擬ひび割れを考慮した割裂線長さ

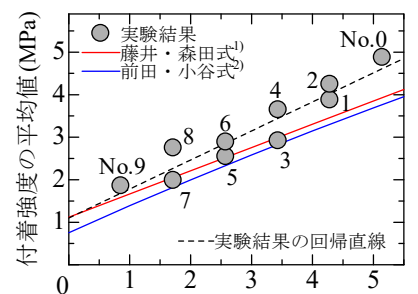


図-8 付着強度-割裂線長さ比関係

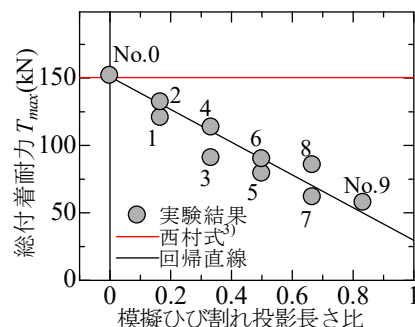


図-9 総付着耐力-模擬ひび割れ投影長さ比関係

図-9 に各試験体の総付着耐力と模擬ひび割れ投影長さ比の関係を示す。図中には既往の総付着耐力式³⁾による計算値および回帰直線も示している。ここで、模擬ひび割れ投影長さ比は、模擬ひび割れ投影長さ C_{cr} を、健全状態における割裂線長さ $(b - Nd_b)$ で基準化した値である。総付着耐力の計算値は、模擬ひび割れの無い試験体 No.0 と良い対応を示した。また、実験結果の回帰分析により、模擬ひび割れ幅 0.5mm における総付着耐力が模擬ひび割れ投影長さ比に応じて低減する下式を得た。腐食ひび割れによる部材の付着割裂面の減少を考慮することで、腐食鉄筋を有する部材の総付着耐力の推定が可能であることが示唆された。

$$T_{max} = \Delta T_{CAL} \cdot \left(1 - 0.804 \frac{C_{cr}}{b - Nd_b} \right) \quad (2)$$

ここで、 T_{max} : 腐食ひび割れを有する部材の総付着耐力、 ΔT_{CAL} : 文献 3) の付着耐力式

4. 模擬腐食ひび割れを有する RC 柱の曲げせん断性状

4.1 実験概要

鉄筋腐食ひび割れをプラスチック板の埋設によって模擬した RC 柱の曲げせん断実験における試験体の諸元を表-3 に、試験体の配筋およびプラスチック板の配置を図-10 に示す。また、コンクリートの材料特性を表-4 に、鉄筋の材料特性を表-5 に示す。試験体は計 3 体であり、断面は 300mm×300mm、内法高さが 1200mm、配筋は主筋 12-D13、せん断補強筋 2-D6@80 (せん断補強筋比 0.26%) であり、曲げ破壊先行型の試験体である。変動因子は模擬ひび割れの投影長さとし、引張側主筋の中央筋の腐食を想定して断面内のプラスチック板の長さを変化させた。プラスチック板は厚さ 0.5mm とし、破碎剤充填による内部ひび割れ確認実験の結果に基づき、鉄筋付近とひび割れ中央の部分的なコンクリートの固着をプラスチック板端部の切欠きと直径 10mm の穴によって再現した。柱の軸方向におけるプラスチック板の配置は、柱脚から柱頭までの全域とし、コンクリート打設前にプラスチック板をタイラップによって鉄筋と結びつけ、その状態で打設することで鉄筋腐食ひび割れを模擬した。

加力は、鉛直アクチュエータにより軸力比 0.1 の一定軸力を加えた状態で加力フレーム上部に設置された左右のオイルジャッキで平衡を保持し、加力梁を面外拘束させながら、反力壁に固定された水平アクチュエータで変位制御による逆対称曲げモーメントの正負交番漸増繰り返し載荷を行った。加力サイクルは、部材角 $R = \pm 0.25, \pm 0.5, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4\%$ rad を各 2 回、 $R = \pm 5\%$ rad を 1 回とした。計測項目は、せん断力、軸力、上下スタブ間の相対水平変位と鉛直変位、主筋のひずみ値である。

表-3 曲げせん断実験の試験体諸元

試験体名	C0	C1	C2
断面 $b \times D$ (mm)	300×300		
内法高さ h (mm)	1200		
主筋	12-D13		
せん断補強筋 (p_w)	2-D6@80 (0.26%)		
軸力比 η	0.1		
模擬ひび割れ投影長さ C_{cr} (mm)	0	67	134

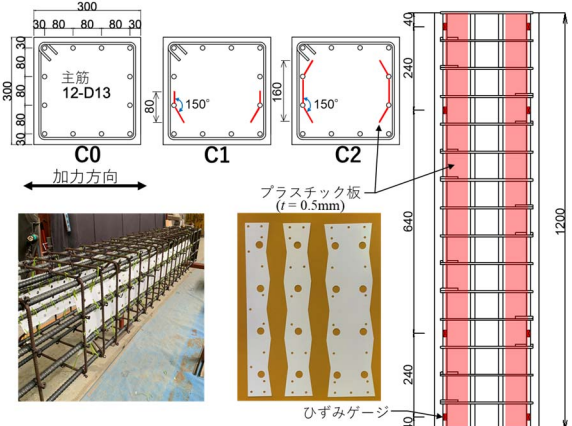


図-10 曲げせん断実験の試験体配筋

表-4 コンクリートの材料試験結果

圧縮強度 σ_B (MPa)	割裂強度 σ (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)
20.1	2.08	18.5

表-5 鉄筋の引張試験結果

鉄筋種別	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	引張強度 σ_u (MPa)	伸び (%)
D13	378	195	562	23.4
D6	431	200	539	19.4

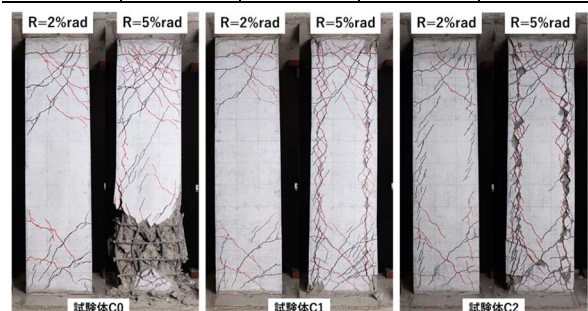


図-11 RC 柱の破壊状況

4.2 実験結果

各試験体の破壊状況を図-11 に、せん断力-部材角関係を図-12 に示す。また、図-12 中には断面解析により求めた曲げ強度の計算値も示している。模擬ひび割れの無い試験体 C0 は、部材角 $R = 0.25\%$ rad 時に柱頭部および柱脚部に曲げひび割れが発生し、部材角 0.75% rad 時に主筋が降伏した。その後、ひび割れの拡幅によって部材角 1.64% rad で最大荷重 150kN に達した。部材角 3% rad で柱中央にせん断ひび割れが発生し、その後、柱脚部の

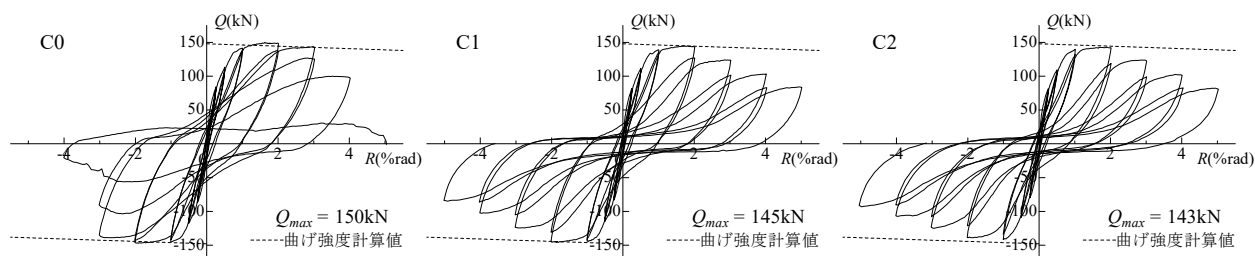


図-12 セン断力一部材角関係

せん断ひび割れの拡幅によって荷重が顕著に低下し、部材角 5%rad の 1 サイクル目で軸力を保持できなくなり最終破壊に至った。試験体 C1 は、部材角 0.25%rad 時に柱頭部および柱脚部に曲げひび割れが発生し、部材角 0.68%rad 時に主筋が降伏した。その後、ひび割れの拡幅によって部材角 1.69%rad で最大荷重 145kN に達した。部材角 2%rad 時に 1 段目主筋に沿った付着割裂ひび割れが発生し、付着割裂ひび割れの進展と拡幅によって最終破壊に至った。試験体 C2 は、部材角 0.25%rad 時に柱頭部および柱脚部に曲げひび割れが発生し、部材角 0.71%rad 時に主筋が降伏した。部材角 1%rad 時に 1 段目主筋に沿った付着割裂ひび割れが発生し、ひび割れの拡幅によって部材角 1.92%rad で最大荷重 143kN に達した。その後、付着割裂ひび割れの進展と拡幅によって最終破壊に至った。また、曲げ強度の計算値は 148kN であり、試験体 C0 の実験結果と良い対応を示し、試験体 C1, C2 は実験結果が計算値をやや下回った。

4.3 セン断力一部材角関係の包絡線

各試験体の正加力時のせん断力一部材角関係の包絡線を図-13 に示す。また、図中には主筋が曲げ降伏した点、限界変形角に達した点も示している。ここで、限界変形角の実験値は、せん断力一部材角関係の包絡線上においてせん断力が最大荷重の 80% に低下した点の部材角と定義した。各試験体の包絡線は、部材角 1%rad まではほぼ同様に推移しており、部材角 1%rad から 3%rad までは試験体 C0 が他の試験体よりも荷重が大きく、特に部材角 3%rad 時ではその違いが顕著に確認された。模擬ひび割れを有する試験体 C1, C2 では付着割裂ひび割れが多数発生したが、試験体 C0 ではほとんど付着割裂ひび割れが発生せずに曲げによるひび割れ損傷が支配的だったためと考えられる。ただし、試験体 C0 は、部材角 3%rad 以降においてせん断ひび割れの発生と拡幅とともに、塑性回転角の増大に伴う曲げ圧縮部コンクリートの劣化によって曲げ降伏後のせん断破壊に至り、急激な荷重低下を生じた。また、試験体 C1, C2 の曲げ降伏時部材角および限界変形角はほとんど差がなく、模擬ひび割れの長さによる影響は小さいことが確認された。さらに、降伏点剛性低下率は試験体 C0 が 32.3%, C1 が 33.2%, C2 が 31.2% と全試験体で同様の値となり、模擬ひび割れが降

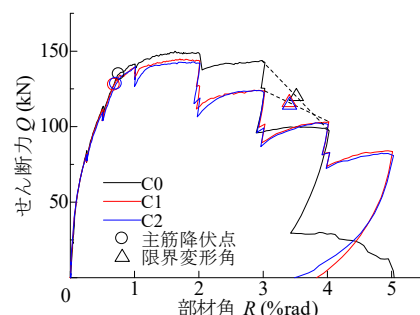


図-13 セン断力一部材角関係の包絡線

表-6 破壊形式、最大耐力、限界変形角

試験体名	C0	C1	C2
破壊形式	曲げ降伏後 せん断破壊	曲げ降伏後 付着割裂破壊	曲げ降伏後 付着割裂破壊
最大耐力 実験値 (kN)	150	145	143
耐力 計算 値	曲げ強度 Q_{mu} (kN)	148	
	せん断強度 Q_{su} (kN) [Q_{su}/Q_{mu}]	195 [1.32]	
	付着強度 Q_{bu} (kN) [Q_{bu}/Q_{mu}]	226 [1.53]	190 [1.28]
	155 [1.05]		
限界変形角 実験値 (%rad)	3.51	3.41	3.41
限界変形角 計算値 (%rad)	3.05	3.22	2.37

伏点剛性低下率に与える影響も小さいことが確認された。

4.4 耐力および靱性能の検討

各試験体の破壊形式、最大耐力の実験値と計算値、限界変形角の実験値と計算値を表-6 に示す。曲げ強度計算値は、コンクリートの応力-ひずみ関係に e 関数⁴⁾を用いて平面保持を仮定した断面解析により求め、せん断強度および付着強度の計算値は日本建築学会の靱性保証型指針式⁴⁾を用いて算出した。模擬ひび割れを有する試験体の付着強度計算値は、模擬ひび割れ投影長さによる影響を考慮するため、靱性保証型指針の式中における負担できる付着力 T_x に、式 (2) による総付着耐力を用いて算出した。また、限界変形角の計算値は、弾性剛性と菅野式の降伏点剛性低下率⁵⁾を用いて曲げ降伏時変形角を求め、耐力計算値と靱性保証型指針式に基づいて塑性

変形角を計算し、それらを足し合わせることで算出した。

全試験体において、せん断強度計算値と付着強度計算値の大小関係が、曲げ降伏後の破壊形式と対応しており、式(2)を用いた付着強度評価の妥当性がうかがえる。特に試験体C2は、部材角1%rad程度から付着ひび割れが発生して曲げ降伏後の荷重上昇も小さく、最大荷重が断面解析による曲げ強度計算値に達していないが、これらは付着強度計算値を曲げ強度計算値で除した付着余裕度が1.05であることと対応していると思われる。

限界変形角の実験値は、いずれの試験体でも計算値を上回っており、式(2)を用いた付着耐力の計算と、靱性保証型指針式によるコンクリート有効圧縮強度および付着強度の低下とトラス機構の角度変化に基づいた評価は安全側になることが確認された。本実験の範囲内においては、式(2)を用いた耐力計算による付着余裕度が1.0以上を確保できていれば、鉄筋腐食ひび割れが発生しても脆性的な破壊にはならず、塑性変形角2%rad以上の変形性能が確保できることが確認された。

各試験体の等価粘性減衰定数一部材角関係を図-14に示す。図中には武田モデルを用いた等価線形化法に基づく等価粘性減衰定数評価式⁹⁾の式(3)による計算値も示している。等価粘性減衰定数の実験値は、部材角2%radまでは試験体C0とC1でほぼ同様の傾向を示し、試験体C2は部材角2%radから他の試験体よりも下回った。試験体C2は、部材角1%rad程度から付着割裂ひび割れが発生したためと考えられる。また、部材角2%rad以降において、試験体C0は増加傾向を示したが、試験体C1とC2はほとんど増大しなかった。試験体C1とC2は、曲げ降伏した後の部材角2%rad以降から付着割裂破壊に移行したことで逆S字型のスリップ性状になり、模擬ひび割れの長さが長い試験体C2のほうがその傾向が顕著であったと考えられる。また、試験体C0の実験値はすべての部材角で計算値を上回っているが、試験体C1は部材角3%rad以降で、試験体C2は部材角2%rad以降で計算値を下回り、模擬ひび割れの長さによる違いが確認された。模擬ひび割れが長くなると、付着割裂破壊に遷移する部材角が早期になり、模擬ひび割れが等価粘性減衰定数に与える影響も大きくなることが確認された。

$$h_{eq} = \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{R/R_y}} \right) \quad (3)$$

ここで、 R ：部材角、 R_y ：全試験体の降伏変形角の平均値

5. まとめ

静的破砕剤を用いた主筋腐食模擬実験を行いRC短柱の内部ひび割れ性状を把握した。また、腐食ひび割れをプラスチック板で模擬した単純梁形式の付着実験および

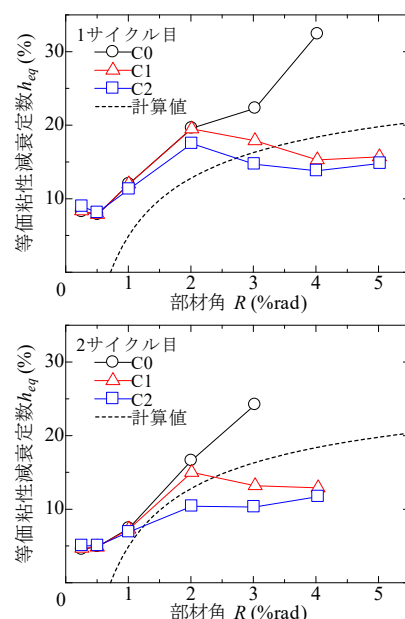


図-14 等価粘性減衰定数一部材角関係

RC柱の曲げせん断実験を実施し、模擬ひび割れが付着耐力および構造性能に及ぼす影響を検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 静的破砕剤による部材内部の模擬腐食ひび割れは、鉄筋近傍やひび割れ中央付近でコンクリートが貫通していない部分があることが確認された。
- (2) 鉄筋群の総付着耐力は模擬ひび割れの長さと同関があり、ひび割れ幅0.5mm時の総付着耐力を模擬ひび割れ投影長さ比に応じて低減する提案式を示した。
- (3) 提案式を用いた耐力計算において付着余裕度が1.0以上であれば、塑性変形角2%rad以上の変形性能は確保できるが、腐食ひび割れの度合いに応じて等価粘性減衰定数が低下する可能性があることを示した。

参考文献

- 1) 藤井栄, 森田司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究, 第1報着割裂破壊を支配する要因についての実験結果, 日本建築学会論文報告書, 第319号, pp.47-54, 1982.9
- 2) 前田匡樹, 小谷俊介, 青山博之: 異形鉄筋とコンクリートの付着応力伝達機構に基づいた付着強度式, 構造工学論文集, Vol.40B, pp.277-284, 1994.3
- 3) 西村康志郎, 大西直毅: 付着長さの異なる引張鉄筋群の付着耐力に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第83巻, 第743号, pp.155-165, 2018.1
- 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, 1999.8
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説, 2021.2
- 6) 柴田明德: 最新 耐震構造解析(第3版), 森北出版株式会社, 2014.12