

論文 鉄筋に沿ったひび割れが鉄筋-コンクリート間の付着劣化に及ぼす影響

小島 萌^{*1}・千々和 伸浩^{*2}・栗原 遼大^{*3}

要旨：引張応力下において腐食ひび割れが鉄筋-コンクリート間の付着に与える影響を、引抜試験と数値解析を用いて分析した。腐食ひび割れの影響を顕在化させるため、試験体には主鉄筋に沿った平滑な鉄板を人工亀裂として組み込み、ひび割れが大きく開口した状態を模擬した。鉄筋の節とコンクリートのかみ合わせに周囲のひび割れが与えるメカニズムを分析するため、ひび割れ本数および節とひび割れの相対位置をパラメータとした。鉄筋周囲のコンクリートの引張応力が大きい場合や、鉄筋の節が45度以下の傾斜角を持っている場合に、人工亀裂による鉄筋とコンクリート間の付着が顕著に低下することが分かった。

キーワード：付着、腐食ひび割れ、引抜試験、人工亀裂、数値解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)構造においては、鉄筋とコンクリート間の付着によって部材として一体性が確保され、構造部材としての機能が発現される。この付着の構成要素は節によるかみ合わせと化学的粘着、摩擦の3つに大別される。既往の研究から¹⁾、鉄筋に腐食が生じた場合には、鉄筋腐食による断面欠損と腐食ひび割れの形成によって付着力が低下するとされているが、その定量的な機構解明は未だ途上にある。合理的な維持管理に向けて、実構造物の残存構造性能評価精度を高めていくためには、微視的スケールでの現象理解を深める必要がある。よって本研究では付着を鉄筋とコンクリート間の応力伝達と定義し、鉄筋腐食時にこの応力伝達機構がどのように変化するかを定量的に明らかにすることを旨とする。

2. RC 部材内の鉄筋腐食が付着に与える影響

RC 部材中の鉄筋腐食について、断面の減少と腐食ひび割れの進展が進む加速期以降において、部材の力学的性能が大幅に変化する²⁾。この際には付着が低下するといわれているものの、この付着低下機構の更なる理解の為には、どの因子がどの程度影響しているかを分析する必要がある。影響因子の中でも特に影響が強いと考えられる、鉄筋断面欠損と腐食ひび割れについて、それぞれを切り分けて分析を行った既往の研究を以下に示す。

2.1 節の欠損による付着の変化

断面欠損が力学的性能の低下に及ぼす要因として、節によるかみ合わせの低下が考えられる。蔡ら³⁾は鉄筋腐食による局所的な付着劣化の影響を検討するため人工的に異形鉄筋節を削り、節が欠損した鉄筋を用いた RC は

りの載荷実験と鉄筋の引抜試験を行っている。その結果、せん断スパン内で鉄筋とコンクリートの付着が一様に損失している場合、既往の研究でも示されるとおり⁴⁾、アーチ機構を形成しせん断耐力は増加するという結果を得ている。はりの載荷試験において、節を完全に研削し、付着の主機構である節とコンクリートのかみ合わせが大幅に減少しているにもかかわらず、アーチ機構は明確に形成されなかった。引抜試験においても、節を完全に研削したものを用いた場合と丸鋼を用いた場合で結果に差異がみられ、研削したものは丸鋼の約2倍程度の最大付着応力度を有した。表面に残存した微小な凹凸が付着に機能したと考察されている。研削により節の高さを低減させ、節高を半分とした試験体は、健全なものに比較して最大付着応力度に顕著な違いは見られなかった。鉄筋の断面欠損が生じて、鉄筋表面の形状によりかみ合わせ機能が少しでも機能すれば、付着が維持され得ることがわかる。

2.2 腐食ひび割れによる付着の変化

主鉄筋に沿った腐食ひび割れによっても付着が低下する可能性があり、この点に着目した研究も行われている⁵⁾⁶⁾。以下では筆者らが別途行った、模擬ひび割れを導入した RC 試験体を用いた、鉄筋の引抜試験と RC はりの曲げ試験による検討の概略⁶⁾を示す。

(1) 鉄筋の引抜試験

鉄筋を中心に配置した長さ1800mmのRC部材を試験体にし、コンクリート表面まで貫通した腐食ひび割れを塩化ビニル板によって再現し、亀裂の有無及び方向性をパラメータとした。本試験ではネジ節鉄筋を用いたため節の位置に非対称性があり、節に対する亀裂の導入位置

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 修士課程 (学生会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

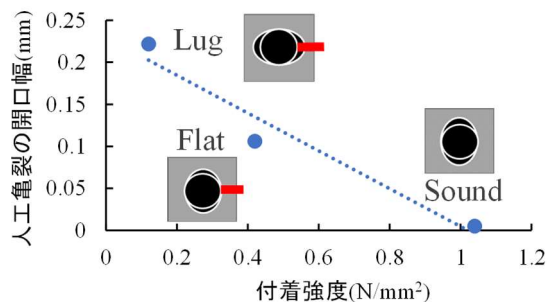


図-1 開口幅－付着強度グラフ⁶⁾

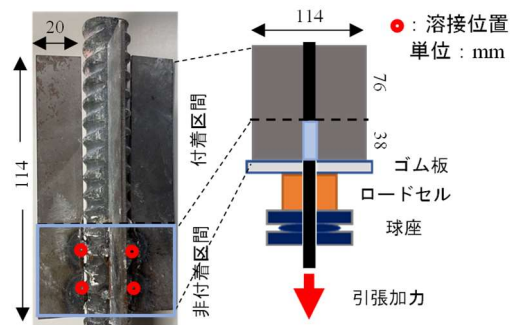


図-2 試験概要

表-1 鉄筋周囲の断面図⁶⁾

	はり曲げ試験体			引抜試験			
略称	sound	1-under	1-side	round	lug-1	lug-2	plus-4
断面							
略称	4-plus	4-cross	round	sound	flat-1	flat-2	cross-4
断面							

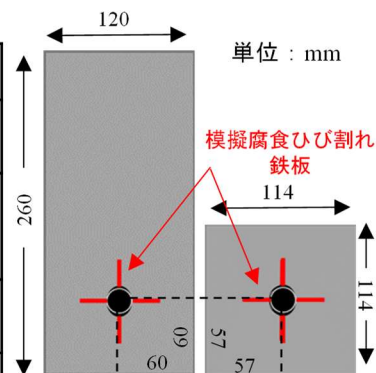


図-3 試験体断面図

(左：はり試験⁶⁾，右：引抜試験)

の違いもパラメータとした。図-1 に人工亀裂開口幅－付着強度のグラフを示す。鉄筋節は引抜きに従って軸方向ひび割れを開口させ、ひび割れの開口と付着力に負の相関があった。人工亀裂による不連続面の生成が付着劣化に強く影響を及ぼすことがわかる。

(2) はり曲げ試験

はりに対する载荷試験では鉄筋に引張応力と曲げ応力が同時発生するため、主鉄筋に沿ったひび割れはその方向によって付着に対して異なる影響があると考えられる。表-1 に示す実験ケースのとおり、パラメータは人工亀裂の本数と方向としている。試験体断面図を図-3 に示す。4-plus は人工亀裂がはり底面に直角もしくは平行になるように配置したもの、4-cross は人工亀裂がはり底面と 45 度の角度をもつように配置したものである。試験の結果、鉄筋に沿った腐食ひび割れが 4 方向十字形に導入された試験体では、付着低下の挙動がみられた。ひび割れによって鉄筋周囲のコンクリートが分割されることで、鉄筋を保持する能力が低下したことが、この原因と考えられる。

3. 引抜試験

2.2(2) で述べたはり曲げ試験では軸方向ひび割れが多いほど付着は低下するという結果が得られた。この結果に基づき、本研究では、ひび割れがコンクリート表面に

到達していない状況において、付着低下に対する主鉄筋に沿った人工亀裂の本数及び方向性の影響について評価を行うため、鉄筋の引抜試験を行った。

3.1 試験概要

(1) 試験体

先行研究⁶⁾のはり曲げ試験と同様に、鉄筋から 20mm 進行した腐食ひび割れを厚さ 2mm、鉄筋軸方向 114mm の鉄板で模擬することとし、鉄板を鉄筋に点溶接で固定した(図-2)。鉄板の剛性による影響を排除するため、溶接位置は非付着区間とし、鉄板表面には油脂を塗布することで可能な限り付着を小さくした。

表-1 に各試験体の鉄筋と人工亀裂の位置関係図、図-2 に試験概略図、図-3 に試験体断面図を示す。試験体は JSCE-G 503 引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法を参考に、ねじ鉄筋 SD345D19 を中心にした 1 辺 114mm の RC 立方体を作製した。引抜き端部の応力集中を防ぐため、コンクリート引張側端部から 2D(38mm)までを非付着区間として鉄筋に油粘土をはりつけた状態で打設を行った。

試験ケースは人工亀裂本数と節に対する亀裂の方向を主なパラメータとして、8 種類を 3 体ずつ計 24 体用意した(表-1)。試験体名にある数字は亀裂の本数を表し、名前の lug, flat が亀裂の方向を示している。lug は亀裂を節上に、flat は節のない平滑な面に導入したものとした。

加えて、かみ合わせによる付着がない極端な例として鉄筋に丸鋼(PC 鋼棒)を用いた試験体も用意した。round, sound, lug-1, plus-4, cross-4 ははり曲げ試験時に用いた鉄筋と同様の形である。

試験体の作製にあたっては、人工亀裂の存在に起因した充填不良を防ぐため、鉄筋が地面と垂直になるように型枠を作成し、人工亀裂に沿った方向を打設方向とした。コンクリートは早強セメントを用い、打設後 7 日目と 8 日目に試験を行った。各試験日におけるコンクリート一軸圧縮強度は表-2 に示した。

(2) 載荷方法

図-2 のとおりアムスラー式万能試験機を用いて引抜試験を行った。引張加力側のコンクリート面の凹凸による影響を軽減するため、試験体の真下にゴム板を挟んだ。鉄筋が加力方向と平行でない場合の曲げモーメント発生を考慮して、球座も設置している。載荷は鉄筋の引張応力が毎分 50N/mm² となる速度で行い、載荷重はロードセルで計測し、変位計で計測した加力反対面(図-2 における上面)の、コンクリート表面と鉄筋端部での差を引抜き変位とした。

3.2 試験結果と考察

(1) ひび割れ本数の影響

腐食ひび割れを模擬した人工亀裂の本数の影響を検討するため、表-2 に各試験体の付着応力度を示す。付着応力度は最大荷重から次式を用いて算出し、3 体の平均値を示す。

$$\tau = \frac{P}{4\pi D^2} \cdot \alpha \quad (1)$$

ただし、 τ : 付着応力度 (N/mm²)、 P : 引張力 (kN)、 D : 鉄筋直径 (mm)、 α : コンクリートの圧縮強度に対する補正係数 ($\alpha=300/\sigma_c$)、 σ_c : 同時に打設した円柱形供試体の圧縮強度 (N/mm²)。

flat-1, flat-2 は亀裂本数が増えるにつれて最大付着応力度が減少した。lug-1, lug-2 では lug-1 の最大付着応力度が sound に比べ半分ほどに大幅に減少しているのに対し、lug-1, lug-2 からは亀裂が増えたことによる影響はあまり観測できなかった。これらより付着低下には、亀裂の本数よりも亀裂の存在、つまり節周辺の脆弱部分になりうる存在が重要となる。節から伝わる力は亀裂を開口させる方向に働くため、人工亀裂が存在するとその部分を起点に開口していき、鉄筋周囲のコンクリートの支圧強度が低下していくからであると考ええる。

(2) 鉄筋節の影響

lug と flat の試験体内部における応力伝達の違いや節の影響を検討するため、破壊時の挙動と破壊後の試験体断面に着目する。sound, flat-1, flat-2 は突然大きな音を立てて脆性的に破壊したのに対し、lug-1, lug-2, plus-4,

表-2 各試験体の実験値

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	人工亀裂数	最大付着応力度 (N/mm ²)
round	43.0	0	4.2
sound	40.4	0	10.8
flat-1	43.0	1	7.3
lug-1	40.4	1	5.6
flat-2	43.0	2	6.4
lug-2	43.0	2	4.5
plus-4	43.0	4	4.6
cross-4	43.0	4	6.0



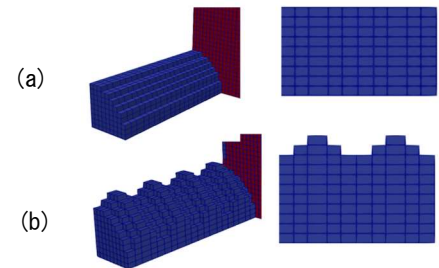
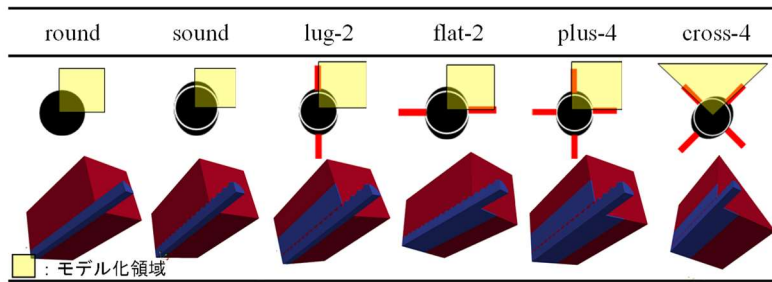
図-4 破壊後の試験体の様子 (cross-4)

cross-4 はメキメキと音を立てながら徐々に荷重が低下して破壊した。この挙動の違いは節上に人工亀裂を有しているか否かであると考ええる。なお前者にあげた試験体は人工亀裂を有していない、もしくは節のない平らな面に人工亀裂を導入したものであり、後者にあげた試験体は節上に亀裂を有している部分を持つ試験体である。鉄筋に引張力が加わった際、節とコンクリートの接触面に支圧応力が発生するが、節上に人工亀裂を有している場合、不連続面が存在していることで、この亀裂が開口しあるいは局所的な破壊を起こし、引抜き変位とともにコンクリート側の見かけの支圧強度が徐々に低下する、という現象が起こったと考えられる。

(3) 亀裂先端からコンクリート表面までの距離の影響

plus-4 と cross-4 の最大付着応力度を比較すると、表-2 に示しているように plus-4 が低い値をとった。2 つの試験体は人工亀裂の本数および節に対する亀裂の方向が同じであるため、相違点である人工亀裂からコンクリート表面までの距離が影響したと考えられる。この影響は破壊モードにも現れた。他の試験体は破壊時にコンクリートが割裂したが、cross-4 では割裂したものは 3 体中の 1 体のみであった。破壊後の試験体に注目すると(図-4)、ひび割れが人工亀裂の延長上に向かうのではなく、人工亀裂の先端から最も近い表面に向かって延伸していた。ひび割れは、最もひび割れ開口拘束力の弱い方向へ向けて延伸することから、人工亀裂先端周囲ではコンクリートの厚さが最も薄い方向へと形成されたものと思われる。

表-3 解析モデルシリーズ

図-5 節の解析モデル
(a)丸鋼, (b)ネジ節鉄筋

割裂ひび割れの長さの小さい plus-4 の最大付着応力度が小さくなった。

一方、既往の研究⁹⁾におけるはり曲げ試験においては、4-cross の付着が 4-plus よりも低いという結果であった。曲げ試験と引抜試験でこのように相反する結果となったのは、鉄筋周囲のコンクリート応力状態の違いによるものと考えられる。どちらの試験においても、亀裂によりコンクリートの健全部が減じられ、コンクリートのもつ鉄筋の保持能力が低下したと考えられるが、応力状態が異なる。はり曲げ試験では主鉄筋周囲のコンクリートのうち、底面側のコンクリートは上面側より大きな引張力を受ける状態となる。4-cross では、底面側コンクリート部分に 4-plus よりも人工亀裂の本数がより多い。引抜試験では鉄筋軸直角方向断面内の応力は鉄筋からの距離が同じであればどの方向でも等しく、このはり試験と引抜試験の傾向の違いから、ひび割れからコンクリート表面までの距離よりもひび割れが存在する部分のコンクリート応力状態が付着に影響すると推測できる。

4. 解析

「3. 引抜試験」では人工亀裂の性状と付着強度の関係を得たが、微視的スケールでの力の伝達機構に対する検討は困難であり、実験を対象とした数値解析による検討を行う。

4.1 解析条件

解析は鉄筋コンクリート非線形解析プログラム COM3⁷⁾を用いて行った。解析モデルは引抜試験体の対称性を考慮して 1/4 モデルで作成した。各モデル断面を表-3 に、plus-4 の全体図を図-6 に示す。cross-4 のみ、1/4 モデルとして抽出した向きが他の試験体と異なるが、これは節の向きを揃えたためであり、解析条件は等しい。

モデルの諸条件を表-4 に記す。圧縮強度は「3.引抜試験」と同様の値を用いている。ヤング係数と引張強度は 2017 年制定コンクリート標準示方書をもとに、圧縮強度の値から算出した値を用いた。鉄筋と腐食ひび割れを模擬した鉄板はいずれも鋼材要素として表現した。節周囲の応力伝達を再現するためメッシュサイズはおおよそ

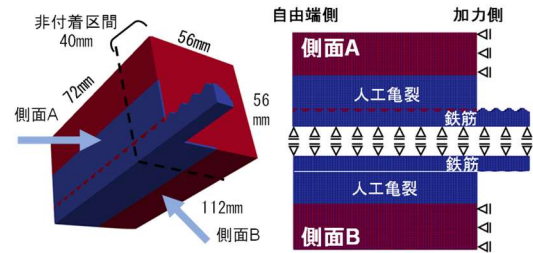


図-6 解析モデル (plus-4 1/4 モデル)

表-4 解析諸条件

コンクリート				鉄筋/鉄板
圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ポアソン 比	降伏強度 N/mm ²
40.4	31080	2.71	0.2	392
43.0	31599	2.83		

表-5 界面物性値

	方向	剛度 (N/mm ² /mm)		最大静止 摩擦係数	粘着強度 (N/mm ²)	
		面直交	せん断		面直交	せん断
付着 区間	接触時	19600	98	0.4	0.78	0.59
	開口時	0.196	0.098			
非付着 区間	接触時	196	0.098	0.3	0.78	0.59
	開口時	0.196	0.098			
鉄板の 界面	接触時	196	0.098	0.1	0	0
	開口時	0.196	0.098			

1mm とし、図-5 に示すとおり節の形を再現した。鋼とコンクリートの界面には両者の接触と開口という非対称な状況を再現するため、接合要素を配置した。Kurihara⁸⁾の研究において鉄筋の形状を再現した解析が行われており、この中で鋼材とコンクリート間の適切な界面特性の設定についても検討が行われていることから、本研究ではこれを参考に表-5 に示すように特性を設定した。なお開口時には実質的に応力伝達しないものとして剛度を低い値に設定した。引張加力側の非付着区間は、界面の剛度を低下させて表現し、ひび割れ模擬の鉄板とコンクリートの界面は、実験条件と合わせて摩擦係数の値を小さく設定した。

載荷は加力側のコンクリート表面に鉄筋軸方向の拘束を与え、鉄筋端面に変位を与えた。破壊に至る前後の

変形大きいと、この挙動を正確に追跡できるよう毎秒 0.01mm の値を設定した。

4.2 解析結果

解析によって得られた付着応力度と引抜け量の関係を図-7に示す。付着応力度は実験同様に、式(1)を用いて算出したものである。

実験と解析によって得られた、各ケースの最大付着応力度をまとめたグラフを図-8に示す。青いプロットが実験結果を示し、赤いプロットが解析結果を示している。記号は試験体シリーズごとに異なり、○が sound, □が flat-2, △が lug-2, ◇が cross-4, +が plus-4 の結果を表す。

最大付着応力度に注目すると全ての試験体において、数値解析による強度は実験結果よりも大きい値を示した。また、「3. 引抜試験」では亀裂の節に対する位置やかぶりが付着に影響を及ぼすという結果が得たが、解析においても同様の傾向がみられた。人工亀裂を有している試験体の強度は、亀裂を有していない sound に比べ 2.8-3.8N/mm² ほど小さくなった。また、flat-2 の最大付着応力度は lug-2 よりも大きく、cross-4 は plus-4 より大きくなった。

5. 考察

健全なケース sound については、数値解析と実験での最大付着応力度がよく整合した。一方で、人工亀裂を有する試験体では、ケース間の大小関係の傾向は捉えられているものの、絶対値としては解析値が実験値に比べ大きな値を示した。健全試験体の最大付着応力度に対する人工亀裂を有した試験体での値の低下程度を比較すると、実験では 50-65%低下したのに対し、解析では 20-30%低下する結果であった。解析でも実験と同様に人工亀裂によって付着が低下する傾向はみられたものの、実験と比べ影響が過小評価される結果となっている。これは節モデルの形状、特に鉄筋節の傾斜角が原因と推測される。

引抜試験時の鉄筋周りのコンクリートは、鉄筋節による圧力によって外側に広がろうとする。その際、本研究のようにコンクリート内に鉄筋軸に沿った不連続面が存在すると、鉄筋周辺のコンクリート応力が解放され、鉄筋とコンクリート間の応力伝達が弱まると推測できる。一方、もし節の傾斜角が 90 度である場合、鉄筋周囲の押し広げられる力、つまり外側に広がろうとする力は弱くなり、腐食ひび割れによる応力解放の影響が小さくなると推定できる。

これは既往の研究の結果からも支持される考察であり、村田らは節の傾斜角によって節の役割が異なることを指摘している⁹⁾。鉄筋が引っ張られると、傾斜角が小さい場合は節の斜面に沿って鉄筋が滑るため、周囲のコン

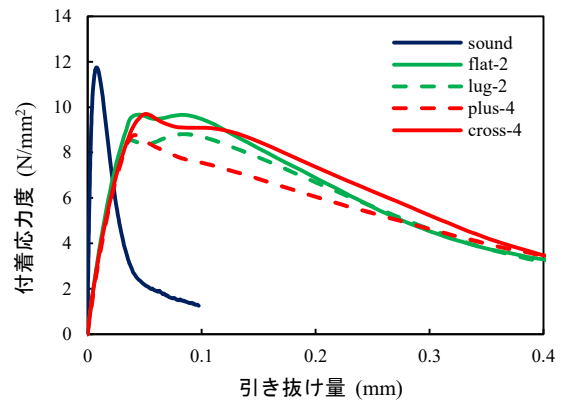


図-7 付着応力度-引き抜け量

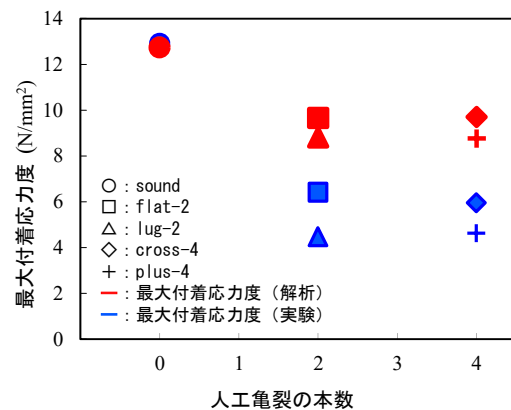


図-8 最大付着応力度—人工亀裂本数

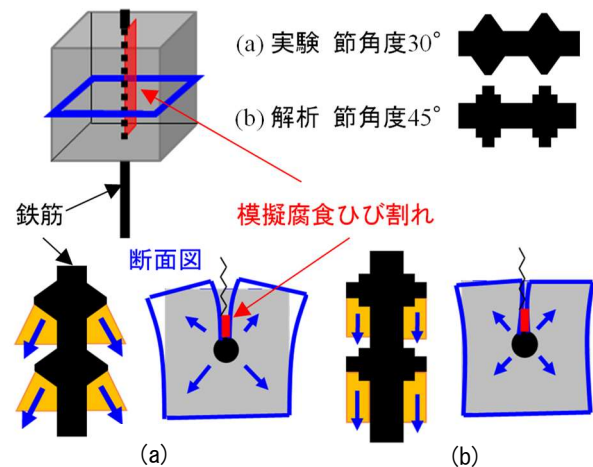


図-9 鉄筋節による作用範囲 ((a)実験, (b)解析)

クリートを押し広げるように働く。傾斜角が 45 度以上の場合、ふし前面が支圧によって粉砕化したものが押し固められたあとに鉄筋のすべりが生じる。傾斜角ごとの付着応力-すべり曲線は、傾斜角が大きいほど初期付着強度が大きくなるという。

解析で用いたモデルは図-5に示すように、節を八面体ソリッド要素で再現した結果、コンクリートが支圧する面は傾斜角 90 度となっている。これに対し実験で用いた鉄筋の傾斜角はおおよそ 30 度であり、微視的には異なる接触角となっている。実験では節角度が小さく、載

荷初期から鉄筋周りのコンクリートは押し広げる力を受ける。一方で解析では節角度が45度以上にあたるため、載荷初期では割裂ひび割れの発生よりも、ふし前面のコンクリートでの破壊が先行し、後に模擬的に節角度が30度ほどの節を形成され、実験同様の押し広げる力を受ける。図-9に鉄筋が下方向へ引き抜かれた場合に、鉄筋節が作用をおよぼす様子を示す。

人工亀裂の無い健全な試験体では、割裂ひび割れが生じた瞬間に脆性的に破壊に至り、節が鉄筋周囲の亀裂を広げるという作用はほぼ無いと考えられる。そのため、実験と解析で、載荷初期の押し広げる作用力の遅れによる影響の違いがみられなかった。一方、人工亀裂を有しているものは亀裂幅が開口していくことで破壊するため、実験では腐食ひび割れによる応力解放の影響が大きかった。解析では押し広げる力の小さい載荷初期には、メッシュ上の節角度が実験と異なるため、人工亀裂によって付着が低下する程度も小さくなったと考えられる。

鉄筋に引抜き力が作用することで、節周りでコンクリートを押し広げるような働きが生じるが、鉄筋周囲にひび割れが存在する場合には押し戻す力が弱まり、付着が弱まるのが数値解析からも確認できた。付着低下には鉄筋とコンクリートの接触角が大きく影響することもわかった。付着にはかぶりや補強筋による拘束といった鉄筋周囲のコンクリートの状態が影響することが知られており、腐食ひび割れの性状も拘束などに影響される。実際の腐食ひび割れや節の接触角などの影響を考慮した実験や数値解析によって、更なる微視的レベルでの現象理解とともに、これらの影響を統合して考察することで、腐食の付着劣化への影響の理解を深めていく必要があると考えられる。

6 結論

本研究では、腐食ひび割れの影響に注目するため、模擬腐食ひび割れとして人工亀裂を導入した試験体を用いて、一軸引抜試験を実験と解析にておこなった。得られた知見を以下に示す。

- (1) 人工亀裂は鉄筋に沿ったコンクリートの不連続面としてみなせるが、引抜試験においてひび割れの起点になるため、人工亀裂は付着強度を大きく低下させる結果となった。
- (2) コンクリート表面までの距離の違いによらず、人工亀裂が存在しているコンクリートの引張応力が高いほど、付着劣化が顕著になる。
- (3) 節が周囲のコンクリートを押し広げるように働く

ため、節と人工亀裂の方向によって破壊時の特徴が異なった。

- (4) 実験と解析では、実験の方が人工亀裂による付着劣化が大きく現れた。この差は節角度によるものと考えられる。人工亀裂の本数よりも節角度による差が大きかったことから、コンクリートの応力状態が付着特性に重要であるとわかった。

参考文献

- 1) Fang, C., Lundgren, K., Chen, L., Zhu, C.: Corrosion influence on bond in reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.2159-2167, Nov.2004
- 2) 山本貴士, 宮川豊章: 鉄筋腐食を生じた鉄筋コンクリート構造部材の力学的性能, *材料*, Vol. 56, No. 8, pp. 684-693, 2007
- 3) 蔡強華, 伊藤陽平, 栗原遼大, 千々和伸浩: 鉄筋腐食による局所的な付着劣化が RC 梁のせん断性能に及ぼす影響に関する研究, *コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集*, 第 21 巻, pp.75-80, 2021
- 4) 池田尚治, 宇治公隆: 鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究, *土木学会論文報告集*, 第 293 号, pp.101-109, 1980
- 5) 八十島章, 保坂剛, 大屋戸理明, 金久保利之: 鉄筋の腐食による内部ひび割れが付着性状へ及ぼす影響に関する実験的研究, *土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集*, 第 5 部門, pp.397-398, 2010
- 6) 小島萌, 栗原遼大, 千々和伸浩: 主鉄筋に沿ったひび割れが鉄筋-コンクリート間の付着性状に与える影響, *コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集*, 第 22 巻, pp.475-480, 2022
- 7) Mackawa, K., Okamura, H., Pimanmas A., *Nonlinear mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, 2003
- 8) Kurihara, R., Ito, Y., Cai, Q., Chijiwa, N.: The Influence of Interlock Loss between Rebar and Concrete on Bond Performance of RC Member, *Applied Sciences*, Vol.12, 2022
- 9) 村田二郎, 河合紘茲: 引抜き試験による異形鉄筋の付着強度に関する研究, *土木学会論文集*, 1984 巻, 348 号, p.113-122, 1984