

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題	主鉄筋に沿ったひび割れが鉄筋-コンクリート間の付着特性に与える影響
Title	Effect of Cracks along Main Reinforcement on the Bond between Rebar and Concrete
著者	小島萌, 栗原遼大, 千々和伸浩
Author	Moe Kojima, Ryota Kurihara, Nobuhiro CHIJIWA
出典	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, Vol. 22, , pp. 475-480
Citation	, Vol. 22, , pp. 475-480
発行日 / Issue date	2022, 10
権利情報 / Copyright	著作権は公益社団法人日本材料学会が保有しています。 Copyright(c) 2022 The Society of Materials Science , Japan
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

論文

## 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

小島 萌<sup>\*1</sup>, 栗原 遼大<sup>\*2</sup>, 千々和 伸浩<sup>\*3</sup>Effect of Cracks along Main Reinforcement  
on the Bond between Rebar and ConcreteMoe KOJIMA<sup>\*1</sup>, Ryota KURIHARA<sup>\*2</sup> and Nobuhiro CHIJIWA<sup>\*3</sup>

**要旨**：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分析するため、実験的検討を行った。腐食ひび割れの影響を顕在化させるため、主鉄筋に沿って平滑な薄板を組み込み、ひび割れが大きく開口した状態を模擬した。コンクリート中の鉄筋に対する引抜き試験と一軸引張試験を行い、引張応力下においてひび割れが付着に与える影響を検討した。また、RCはりへの載荷試験によって、曲げ応力下でのひび割れの付着への影響も検討した。これらの検討から、主鉄筋に沿ったひび割れがコンクリートと鉄筋の応力伝達を低下させることが確認できた。

**キーワード**：付着、鋼材腐食、腐食ひび割れ、かみ合わせ

## 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。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、実建造物の残存構造性能評価精度を上げていくためには、微視的スケールでの現象理解を深める必要がある。

腐食が微視的な付着機構に与える影響に関して、Kuriharaらは、腐食後も節によるかみ合わせが残存する限り、かなりの鉄筋とコンクリート間の応力伝達が温存されることを実験・解析によって示し、腐食ひび割れが付着低下に大きく影響している可能性を示唆している<sup>2)</sup>。そこで、本研究では主鉄筋に沿って生じる腐食ひび割れの影響に焦点をあて、その影響度の評価を試みることにした。

本研究では鉄筋に沿った腐食ひび割れが付着に与える影響を分析するため、3種の実験を行った。付着強度を直接評価可能な鉄筋の引抜き試験、鉄筋が引張応力を受ける状況の分析のための一軸引張試験、部材が受ける応力下での挙動の評価のためのRCは

りの載荷試験である。実際の腐食ひび割れ面では表面の凹凸による応力伝達があるが、本検討では腐食ひび割れという不連続面が鉄筋軸に沿って存在することによる影響に焦点をあてるため、腐食ひび割れを凹凸のない平滑な平面によって模擬することとした。

なお付着は様々な事象を包含した概念であり、観点によって論点が異なる場合がある。本研究において、付着を鉄筋とコンクリート間の応力伝達と定義して議論を進める。

## 2. 引抜き試験

## 2.1 実験概要

鉄筋の軸方向ひび割れを模擬した人工亀裂を有するRC一軸部材に対して、鉄筋の引抜き試験を行った。目的は一軸応力下で試験をすることによって、鉄筋節周辺での応力伝達を微視的なスケールから分析することである。

## (1) 試験概要

図-1に試験体と試験装置の詳細を示す。試験体は人工亀裂の有無と、ねじ節鉄筋D19 SD345の節に対する人工亀裂の位置をパラメータとする3種類を用意した。人工亀裂の導入位置について、節上に導入したものをLug、平坦面上に導入したものをFlat、ひび割れを導入しないものをSoundと呼称する。

\*1 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 修士課程

\*2 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 助教

\*3 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 准教授

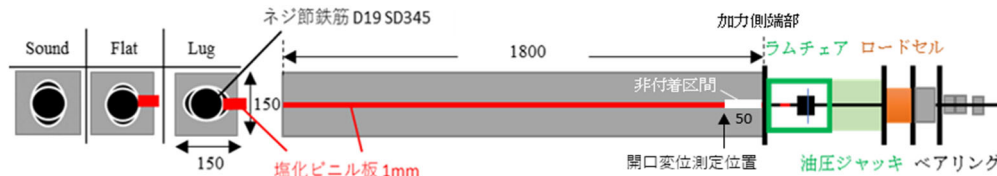


図-1 試験概要図

試験体作成にあたっては、引き抜き端部に応力が集中し破壊に至ることを防ぐ目的から、鉄筋の引き抜き端部から5cmの領域に粘土を使用し、非付着区間を設けた。コンクリートと地面との摩擦を取り除くため、ローラの上に試験体を置き、油圧ジャッキを用いて鉄筋の引抜きを試験行った。

## (2) 人工亀裂の導入

本試験においては、表面に油脂を塗布した1mm厚の塩化ビニル板を、鉄筋に接着し、その状態でコンクリートの打設を行うことで鉄筋に沿った人工亀裂を導入した。プレート面でのブリーディングを防ぐため、プレートを鉛直に立てた状態で打設した。ビニル板と鉄筋は接着剤を用いて接合し、Lugにおいて発生する節と板の間の空間はエポキシ樹脂で充填した。

## 2.2 実験結果

### (1) 人工亀裂の開き

すべての供試体において荷重104kNで鉄筋が降伏し、以降鉄筋のひずみのみが増大し引抜け挙動に進展はなかった。図-2では鉄筋降伏に達するまでの関係を示す。

すべり量と人工亀裂の開きには正の相関がみられ、開口幅の軸方向分布での評価を行うため、図-2に鉄筋軸に沿って導入した人工亀裂の開口幅の動きを示す。人工亀裂の開きは小さい順に Sound, Flat, Lug という結果になった。凡例名の数字は各加力側端部から測定位置までの長さを(cm)であらわしている。人工亀裂を導入していない Sound では、鉄筋に沿った軸方向ひび割れは観察できなかった。Lug は加力側端部から20cmでは人工亀裂の開口がみられたが、45cm位置ではほぼ0cmであった。Flat では20cm部分は測定不足があったものの、45cm部分での開きはほぼ0であり、20cm部分での開口は5cm部より小さいと推測できる。このことから各試験体での人工亀裂開口特性は、付着区間の終端部となる、加力側端部から5cm位置の値で概ね評価できると考えた。また、明確に開口が認められた点と端部との距離は、端部開口幅と同様に Lug-Flat の順に長かった。

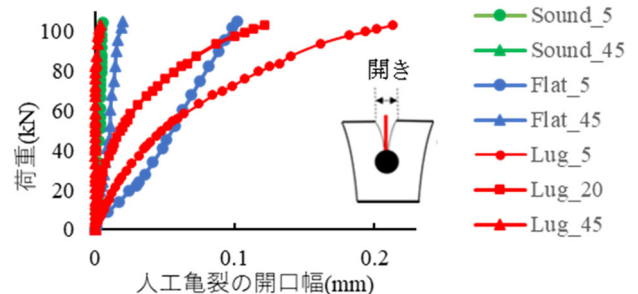


図-2 人工亀裂の開口幅

### (2) 付着強度とひび割れ幅の関係

図-3に鉄筋の降伏直前にあたる荷重105kN時点での、付着強度と加力側端部から50mmの人工亀裂開口幅との関係を示す。なお、付着強度は檜木(1)により求めた。

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

ただし、 $\tau$ : 付着強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $P$ : 引張力 (kN),  $D$ : 鉄筋直径 (mm),  $\alpha$ : コンクリートの圧縮強度に対する補正係数 ( $\alpha = 300/\sigma_c$ ),  $\sigma_c$ : 同時に作った円柱形供試体の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>).

圧縮試験によるコンクリート圧縮強度は46.6N/mm<sup>2</sup>であった。

なお、鉄筋のすべり量を、試験体端部における鉄筋とコンクリートとの相対変位とし、すべり量0.002Dでの付着強度で比較を行う。付着強度はSoundが最大で、Flat, Lugと続く結果になった。これらから人工亀裂を持つ試験体の強度が健全な試験体よりはるかに小さいことや、節に対するひび割れ面の方向も強度に影響を及ぼすことが明らかになった。

開口幅と付着強度の関係は、人工亀裂の開口幅が大きくなるにつれて付着強度が小さくなった。鉄筋に沿ったひび割れが開口することでコンクリートと鉄筋のかみ合わせによる保持力が低下したためと考えられる。

以上の引抜き試験の結果から、人工亀裂があることによる付着低下が確認された。LugとFlatとの結果の違いから、節に対するひび割れの位置によって異なる影響を与えることもわかった。人工亀裂が節上にあるLugでは、節直上でコンクリートが分割され

ているため、鉄筋の引抜き力が直接的に亀裂の開口を発生させた。結果として、節がコンクリートに与える支圧面積が減じ、付着が大きく低下した。一方、平滑面に人工亀裂が存在する Flat では、亀裂が開口しても支圧面積はある程度保たれ、Lug ほどの付着低下が発生しなかったと考えられる。

### 3. 一軸引張試験

#### 3.1 実験概要

引抜き試験での検討より、軸方向ひび割れが付着の低下を生じることは確認できたが、引抜き試験では、加力端部側に圧縮力が作用することで人工亀裂の開口を誘発するものであった。実構造物中の鉄筋の受ける引張応力下で検討するため、鉄筋両端引きによる一軸引張試験を行った。

試験シリーズとひび割れ模擬方法は2章の引抜き試験と同様である。試験体は引抜き試験の試験体と同寸法・同材料で、同日打設のため、各材料特性は等しい。また本試験では引抜き試験同様に鉄筋降伏前の105kNまでの部分に注目し考察を行う。図-4に荷重システムの全体図を示す。鋼製フレームの左側で鉄筋を固定し、右側から鉄筋に引張力がかかることで試験を行った。

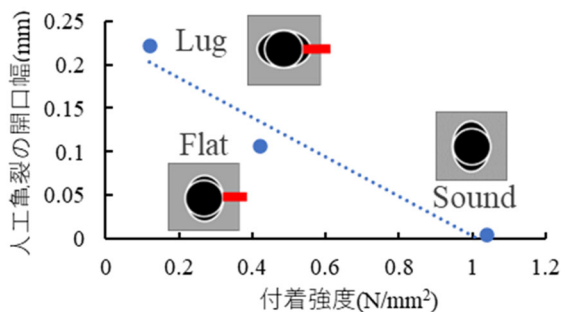


図-3 付着強度とひび割れ幅の関係



図-4 荷重システム

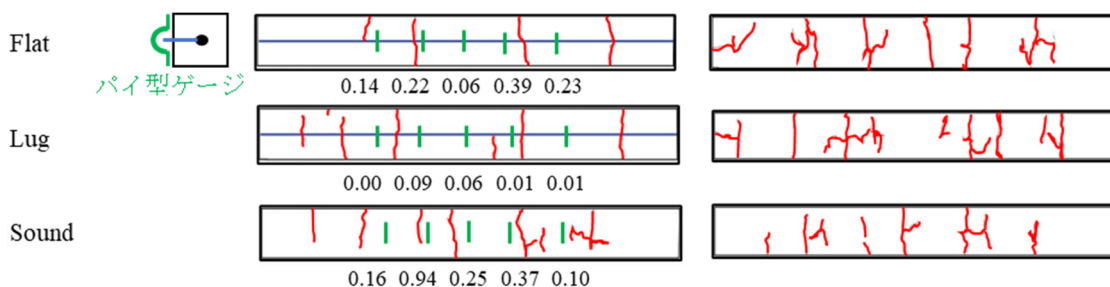


図-5 ひび割れ分布図と開口幅 (mm) (左: 模擬ひび割れ導入面, 右: 健全面)

### 3.2 実験結果

#### (1) ひび割れ分布

一軸引張試験では付着が低下したときにひび割れ本数が減少することがわかっている<sup>3)</sup>。図-6はひび割れ分布を示す。なお、左に人工亀裂を有する面、右に亀裂の無い面の結果を示している。人工亀裂のない面ではすべての試験体で軸直交ひび割れは同様の本数・分布となった。一方、人工亀裂を有する面では、人工亀裂を持つ Flat と Lug は人工亀裂を持たない Sound と比べひび割れ数が少ない。健全な試験体では鉄筋とコンクリート間で十分な応力伝達がなされる。しかしひび割れがある場合、コンクリートによる鉄筋保持能力が低下し、両者の間での応力伝達が低下したことで、ひび割れが分散せず、局所化する傾向が生じたものと考えられる。軸方向ひび割れの形成面での付着低下が発生することが示された。

#### (2) 人工亀裂の開き

加力に伴う人工亀裂の開きも同時に測定し、図-5にはひび割れ分布図に荷重105kN時点での各位置における最大開口幅も記した。図-6に荷重-開口ひび割れ幅関係を示した。軸方向ひび割れを導入していない Sound の試験体が最も大きく開口する結果となった。これは引抜き試験において Sound の試験体で最も開口が小さかったという結果と真逆である。この理由として、軸直交方向に入ったひび割れの影響が考えられる。軸方向開きを測定したパイ型ゲージの位置と軸直交ひび割れの位置を対応させると、大きな開口を記録したパイ型ゲージの付近において軸直交ひび割れが発生しており、これらのひび割れが測定値に影響していた可能性がある。同様に Flat で大きな開口を記録したパイ型ゲージの位置は、軸直交ひび割れ付近であったことが確認できる。軸方向の応力状態はほぼ同一であるはずが、パイ型変位計付近にひび割れを観測した Flat, Sound では開口幅にばらつきが大きかったことから、軸直角方向のひび割れの影響があったと考えられる。軸直角方向ひび割れから離れた位置の人工亀裂の開口のみに着目すれば、一軸引張試験のいずれの試験体でもほ

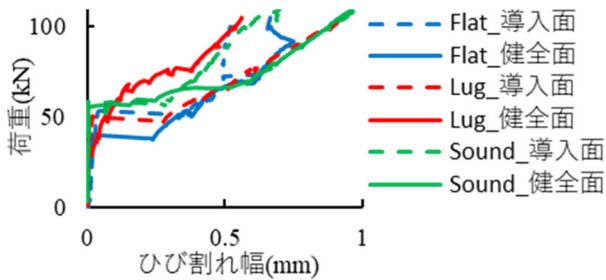


図-6 荷重-最大軸方向ひび割れ幅

ほぼ同じ値となっていた。一軸引張試験において人工亀裂の開口幅は試験体による差がなかった。

Sound と Lug では、パイ型ゲージを設置した面と節との相対位置が同一であるが、人工亀裂の開口幅は大きく異なり、開口幅の測定結果に節の向きはあまり影響を与えていないと考えられる。これらは図-6 に示した試験体ごとの最大軸方向ひび割れ幅をみてもわかる。試験体や面の違いによる特異な挙動はなく、人工亀裂による開口幅への影響は観察できなかった。

引抜き試験と一軸引張試験の開口幅の傾向の違いの原因は試験方法の差と考えられる。引抜き試験において加力側コンクリート端部は圧縮力がかかり、軸直交方向のひび割れが開口する結果となっている。一方、一軸引張試験ではコンクリートは引張力のみ作用するため、軸方向ひび割れ幅を広げる作用がなく、人工亀裂を導入した試験体と健全な試験体で差が生じなかったと考えられる。この試験方法が結果に与える違いについては碓本ら<sup>3)</sup>も言及している。

#### 4. はり部材曲げ試験

##### 4.1 実験概要

はり部材においては、主引張鉄筋の付着の低下によって曲げひび割れ分散性、部材剛性が低下する一方、鉄筋のひずみ分布は軸方向に均一化することでタイドアーチ機構を形成し、せん断耐力が上昇することが知られている<sup>4)</sup>。本検討ではこの特性を利用して、ひび割れの有無によるはりの耐荷挙動の変化に基づき、はり部材中の主鉄筋に沿ったひび割れが鉄筋の付着にどのような影響を与えるのかを検討す

る。

2章、3章での一軸応力下での検討から、主鉄筋に沿った軸方向ひび割れによって、付着が低下することや、軸方向ひび割れの節に対する相対位置によって付着への影響程度が変化することがわかった。はりに対する荷重試験では断面内で応力分布が異なるため、主鉄筋に沿ったひび割れの影響がその方向によって異なるものとなる可能性がある。

##### (1) 試験概要

せん断耐荷力の変化を付着低下の指標とするため、せん断補強筋を配置せず、せん断破壊先行のほりを設計した。試験体寸法を図-7 に示す。定着破壊を防ぐため、定着部にはせん断補強筋を配置するとともに、試験体端部に鉄板を設置し、その外側から主鉄筋をナットで固定することで定着を確保した。

実験のパラメータは人工亀裂の方向及び本数である。表-1 に試験ケース及び鉄筋周囲の断面形状を示し、試験体名の数字部は人工亀裂の導入本数、単語部がひび割れの導入方向を示す。鉄筋にはねじ鉄筋を用いるが、付着の極端に低下したケースとして丸鋼を用いたケースも準備した(Round)。なお前章までの実験から、節の上にひび割れが存在するケースで付着に大きな変化が見られたことから、人工亀裂は基本的に節上に導入している。

##### (2) 人工亀裂の導入

かぶりを貫通しない、鉄筋から 20mm 進行した腐食ひび割れを模擬する人工亀裂を導入した。亀裂の貫通は高い曲げ応力下においてはかぶりの剥落に近い状況となり、ひび割れの方向よりも鉄筋の曲げ変形による鉄筋の剥落の影響が支配的となる可能性があるためである。既往研究でも同様の傾向が示されている<sup>2)</sup>。

打設後においても確実に直線状の人工亀裂を保持するため、ビニル板より剛性の高い鉄板を用いた。材質に差異があるものの、主眼である鉄筋軸方向の直線状の不連続面を形成する点においては同等である。なお、鉄板に油脂を塗布し、主鉄筋には点溶接とすることで亀裂面とコンクリート間の摩擦及び鉄筋と人工亀裂の機械的拘束条件を同一としている。



図-7 試験体概要 (図は 1-under)

表-1 試験ケース

略称	Sound	1-under	1-side
断面	●	●	●
	ねじ鉄筋	ねじ鉄筋	人工亀裂
略称	4-plus	4-cross	Round
断面	●	●	●
	丸鋼	丸鋼	丸鋼

## 4.2 実験結果

載荷試験で得られた各試験体の荷重-変位曲線を図-8に、ひび割れ分布及び最大荷重を図-9に示す。ひび割れ図ははりの支点間のみ示しており、破線は載荷点直下を示す。青線で描いた部分は破壊に直結するひび割れが生じる前のひび割れを示している。健全試験体(Sound)の最大荷重は、土木学会コンクリート標準示方書に基づくせん断耐力(63.0kN)に近い値を示している。1-under と 4-plus もほぼ同値であり、1-side は健全試験体よりも最大耐力が小さくなった。なお、極端に付着の小さいRoundの最大荷重はSoundの2.1倍となり、タイドアーチが形成されせん断耐力が増加する現象を確認している。

破壊後のひび割れ概形をみるとSound, 1-under, 1-side は、曲げひび割れに端を発したせん断ひび割れが破壊を起こしているのに対し、4-plus, 4-cross では載荷点から支点に直線的に向かう特徴的なひび割れが形成されている。

図-10は主引張鉄筋のひずみ分布を示す。測定位置は試験スパン端部、せん断スパン中央、試験スパン中央である。ただし1-sideの試験スパン中央のひずみは機器損傷により測定できなかった。ひずみ分布の傾向は2パターンに分けられる。再荷重60kN時でのひずみに着目すると、Sound, 1-under, 1-sideは中央部分の値が大きく出ている。これに対し、4-plus, 4-cross, Roundのひずみは鉄筋に沿って均一となっており、ひずみの大きさも前述した3つの試験体より小さな値となった。

## 4.3 はりの載荷試験の考察

異形鉄筋を用いたRCはりでは、ビーム機構を中心とした耐荷機構が形成される。これに対し、丸鋼を用いたものでは付着が小さいことから、載荷点から支点へと応力が直接流れるような応力場が形成され、アーチ機構を中心とした耐荷機構が形成される。これにより、せん断耐荷力も異形鉄筋を用いた場合と異なるものとなる。付着状態に起因したこの変化を元に、各はりの付着性状を分析した。最大荷重の観点ではRound以外の試験体であまり差がみられなかったが、1-sideのみ耐力が低くなった。これは試験体断面の非対称性に由来するねじり変形によるものと考えられる。試験体の非対称性の影響は、片側にのみ人工亀裂を導入した非対称的な1-sideと、人工亀裂を両側に対称に導入した4-plusを比較すると観察できる。試験体のはり中央変位ははりの両側面付近で計測したが、4-plusでは2点の変位挙動にほぼ差異が生じていなかった。一方、1-sideでは人工亀裂側の変位の上昇は健全側の変位より大きく、両

点の変位差は荷重上昇に応じて開いていった。片面に導入した人工亀裂が載荷中に開口したことで、このような変形を起こしたと考えられる。

ひび割れ図では4本の人工亀裂を導入した4-plus, 4-crossにおいて、載荷点と支点を結ぶ直線状の特徴的なひび割れを形成した。これはせん断スパン内の鉄筋とコンクリート間の付着が低下し、アーチ機構の形成によって均質とみなせる材料の曲げ応力下の応力分布を離れ、載荷点から支点へアーチに沿った力の流れが生じたためであると考えられる。ひずみ分布図も人工亀裂の本数によって変化が生じており、鉄筋に沿った軸方向ひび割れが1方向ではなく様々な方向に存在している場合において、付着が低下することがうかがえる。ここで4-plusと4-crossではひび割れ本数は一致しているのにも関わらず耐力は4-crossの方が22.2kN高い値を示した。これは人工亀裂の位置が関係していると考えられる。鉄板の表面には油脂を塗布しており、接触するコンクリートと摩擦抵抗がないため、鉄板と周囲のコンクリー

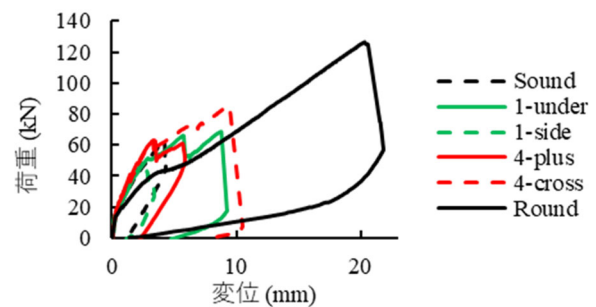
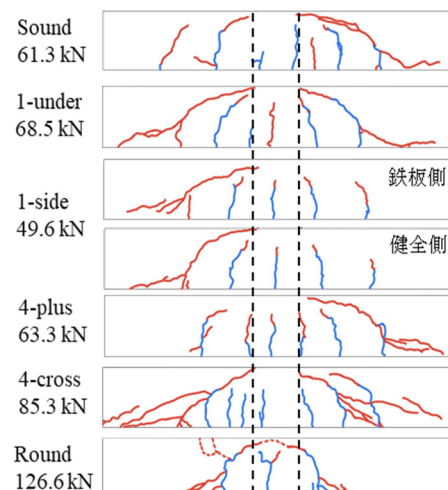


図-8 荷重-変位曲線



青線：破壊時に発生したひび割れ

赤線：載荷中に生じたひび割れ

図-9 試験体ごとのひび割れ図

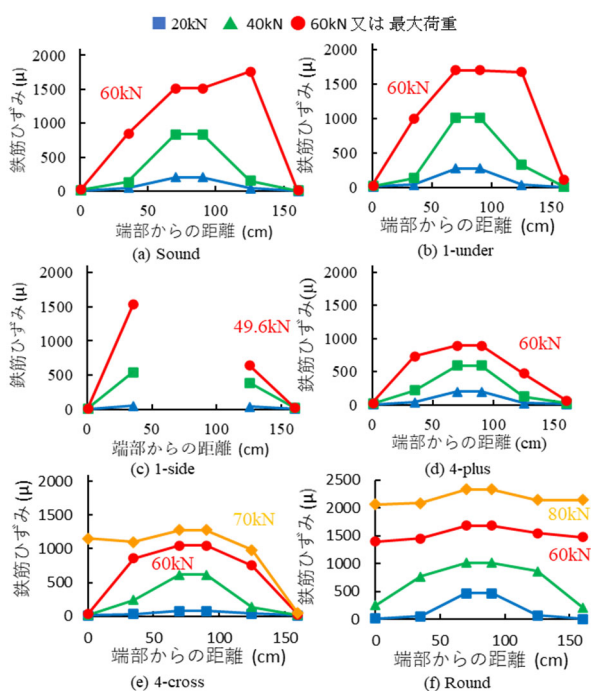


図-10 ひずみ分布

トとの間ではひずみ差が生じる。このひずみ差は、鉄筋重心位置からはり高さ方向の距離が離れるほど大きくなる。4-plusに比べ4-crossでは鉄筋重心からはり高さ方向に離れた亀裂部が多いため、この部位のコンクリートの一体性がより低下し、アーチ機構の寄与が大きくなったものと考えられる。

以上のように破壊形態と最大荷重の観点では軸方向ひび割れを1方向のみに持つはりの構造性能はあまり変化が見られなかったが、4方向に軸方向ひび割れを持つ試験体では、付着が低下し、タイドアーチ機構が形成される結果となった。鉄筋周囲のコンクリートにひび割れが生じることで、支圧強度が低下し、鉄筋とコンクリートの応力伝達が失われたためと考えられる。

## 5. 考察

一連の実験に基づいてひび割れと付着の関係について考察する。

主鉄筋に沿ったひび割れが表面に達した状態で、鉄筋に引抜き力が作用すると、鉄筋の引き抜き量が大きくなり、付着強度を引き抜き量に基づいて算出すると評価値として小さくなる。節と腐食ひび割れの相対位置によってもひび割れ開口幅は変化し、特に腐食ひび割れが節上に形成されている場合には、腐食ひび割れがより大きく開口する。加力方法によっても開口幅は変化した。軸直交ひび割れに関しては、腐食ひび割れがある面とその他の面で軸直交ひ

び割れ数に違いがあることが確認された。鉄筋に沿ったひび割れの方向に偏りがある場合、コンクリートと鉄筋の一体性に差が生じており、部材断面で不均一な付着状況となることがあると考えられる。

表面に達しない腐食ひび割れを有するRC部材を用いた曲げ試験の結果から、鉄筋に沿った腐食ひび割れが1方向だけのものでは、構造性能に大きな変化が見られなかった。しかし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、付着の低下がみられた。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。

## 6. まとめ

本研究から、腐食ひび割れを模擬する鉄筋に沿った軸方向ひび割れは、鉄筋とコンクリート間の付着を低下させることが確認できた。付着低下に対する影響の大きさは軸方向ひび割れの本数が多いほど大きくなり、鉄筋節とひび割れの位置関係によっても変化することが分かった。

腐食ひび割れと付着劣化の関係の、より詳細な機構分析が今後の課題となる。そのためには、多方向応力下での節と軸方向ひび割れの相対位置の影響や、腐食ひび割れの進行度、鉄筋軸方向でのばらつき、異方性の影響などについての分析が必要である。

## 参考文献

- 1) Al-Sulaimani, G. J., Kaleemullah, M., Basunbul, I.A., Rasheeduzzafar: Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behaviour and Strength of Reinforced Concrete Members, ACI Struct. J., Vol. 87, pp. 220-231, 1990.
- 2) 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.
- 3) 碓本大, 荒木弘祐, 服部篤史, 宮川豊章: 論文 両引き試験による鉄筋腐食と付着強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, p.661-666, 2006.
- 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.