

## 論文 フック継手の連続構造を想定した補強筋の力学的性質の基礎検討

平野 裕一\*1・山崎 柊\*2・駒井 健人\*2・山本 貴士\*3

**要旨:** 3D プリンティングに適用することを想定し開発した S 字連結鉄筋の力学的性質の基礎的な検討を実施した。S 字連結鉄筋とは両端がフック継手の鉄筋を短いスパンで連結した構造であり、自由な曲線を描くことができる 3D プリンティングに追従可能である。本稿ではその基本単位のフック継手に焦点を当てフック継手の耐荷挙動を検討した。かぶりの拘束により湾曲部の開いていく挙動が抑制され、かぶりが鉄筋径の 6 倍のフック継手では最大引張荷重は普通鉄筋降伏荷重比で 88% になった。梁構造では、フック継手の接点の遊びが曲げ破壊の起点になるが、限定された載荷環境下において通常の鉄筋よりも大きな変位を示した。

**キーワード:** 3D プリンティング, S 字連結鉄筋, フック継手

## 1. はじめに

セメント材料で構造物を製作する際には鉄筋などの補強材が欠かせない。近年、各方面で進められているセメント材料の 3D プリンティング技術の研究では、補強材または補強方法の種類として、①鉄筋配置後に片側または両側から吹き付け<sup>1)</sup>、②3D プリンティングを化粧型枠または外殻のみに適用<sup>2)</sup>、③短繊維等を混入したモルタルの使用<sup>3)</sup>、④上記いずれかの方法または無筋で製作した部材を緊張材で接合、に分類できる。

ここで、これらの方法を可能な限りで施工の自動化を目指すという観点でみたとき、部材の引張方向の力に耐えられる鉄筋を組み立てる工程を自動化できる技術は未だないと考えられる。そこで、鉄筋の組立てが自動化可能になり、3D プリンティングの特徴のひとつである曲線施工も可能になる鉄筋として S 字連結鉄筋<sup>4)</sup>を提案した。

今回、S 字連結鉄筋で課題になると考えられる連結部分の力学的性質について、引張試験および梁載荷試験を行うことで基礎的な検討をした。

## 2. S 字連結鉄筋

## 2.1 S 字連結鉄筋の概要

S 字連結鉄筋とは、あらかじめ組み立てておくことなく設置可能な鉄筋であり、3D プリンティングの吐出口の動きに応じて曲線を描くことも可能であり、吐出口進行方向に対し上下左右方向の S 字連結鉄筋同士とつなげることが可能である鉄筋として提案した鉄筋である。

図-1 に S 字連結鉄筋の基本単位である S 字鉄筋を示す。これは S 字状に加工した鉄筋を複数組み合わせ、中央で緊結または溶接したものである。図-2 に示すように、この S 字鉄筋の、3 つのうちの 2 つの S 字状の鉄筋が同一面上に、残りの 1 つはこの面に対して垂直にな

るように複数並べて、その同一面上の S 字の湾曲部が相互に引っ掛かることで面状の鉄筋が可能である。例えば、図-3 に示すように、3D プリンティングの材料に S 字の湾曲部を引っ掛けた S 字鉄筋を埋め込みながら、直下の層の S 字鉄筋にも引っ掛かるように吐出することで、曲線状の擁壁の製作が可能になる。

なお、本検討では吐出装置および吐出方法の具体的な構成は考慮しない。

## 2.2 本検討で対象とする構造

本稿ではフック部同士の引っ掛かりにより連続した構造をフック継手と呼び、その力学的性質を検討する。

本検討で用いた試験材料は JIS G 3112 異形鉄筋 SD345 の D13 である。フック継手の加工寸法を図-4 に示す。フックの曲げ内半径は、梁試験の断面の寸法を考慮し文献<sup>5)</sup>の折曲げ内法直径  $3\phi$  ( $\phi$  は公称直径、以下同じ) の半分の  $1.5\phi$  よりいくぶん大きい値とし、文献<sup>6)</sup>のスターラップの曲げ内半径  $2.0\phi$  である 25mm とした。

一方、余長は、折曲げ角度  $180^\circ$  において、文献<sup>5)</sup>では  $4\phi$  以上、文献<sup>6)</sup>では  $4\phi$  以上かつ 60mm 以上となっているところであるが、後から設置する S 字鉄筋が先に設置された S 字鉄筋にフック部同士で容易に引っ掛かることが求められる構造を考慮し 25mm とした。

以後の検討でフック継手の引張試験をする際には図-5 に示す配置とした。ただし、図-5 に示す両端に伸びる鉄筋の軸線を幾何的な理由から同一線上に配置できないため、平行になるように保持して試験した。

## 3. 引張試験

## 3.1 目的

S 字連結鉄筋を想定したフック継手の引張挙動を把握することを目的とし、継手がない 1 本の鉄筋、フック継

\*1 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻技術職員 (正会員)

\*2 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻

\*3 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

手、およびフック継手の周りをコンクリートで覆った試験体を比較検討した。

### 3.2 試験体

引張試験の試験体を要因別に記号を付し表-1 に示す。1本の鉄筋のみを normal, フック継手のみを hook-N とした。フック継手の周りをコンクリートで覆った試験体は、表-1 に示す寸法のとおりフック継手をコンクリート内に埋め込み、鉄筋径 D13 に対し 3φ および 6φ であるそれぞれ 39, 78mm の最小かぶりとし、それぞれ hook-3 φ, hook-6 φ とした。最小かぶりは図-6 に示すように両端に伸びる鉄筋の直線部分の位置で、かぶりが図示した寸法になるようにした。要因ごとに1体ずつの試験体を1回ずつ試験した。コンクリートの配合を表-2 に示す。圧縮強度は 47.6 N/mm<sup>2</sup> (4w), 静弾性係数は 2.55 × 10<sup>4</sup> N/mm<sup>2</sup> であった。

hook-N, hook-3 φ および hook-6 φ のそれぞれ一方のフックに図-6 に示す位置の軸線上にひずみゲージを張り付けた。湾曲部の余長側から 45 度ごとに順にひずみ 1, ひずみ 2, ひずみ 3, ひずみ 4, ひずみ 5 の位置でひずみを測定した。hook-6 φ ではコンクリート内部のコンクリート表面から 10mm のひずみ 6 の位置で、hook-3 φ および hook-6 φ ではコンクリート外部のコンクリート表面から 20mm のひずみ 6 の位置でもひずみを測定した。フックは、軸線方向の突起であるリブが、図-6 の紙面上方向である、湾曲面に対し垂直方向になるように製作した。ひずみ貼り付け位置はリブ上とし、軸線方向の伸縮を計測できるようにした。

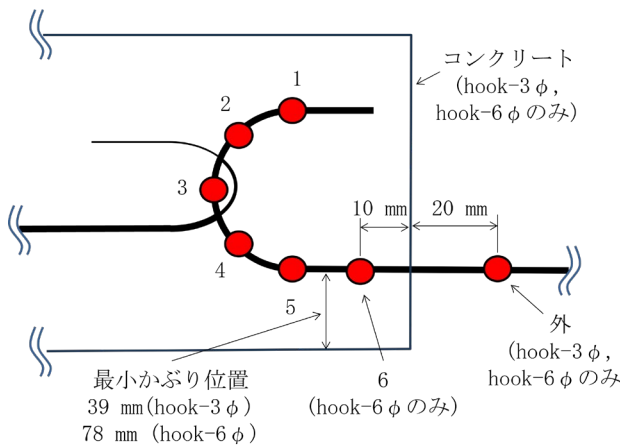


図-6 ひずみゲージ貼付位置

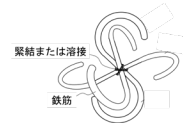


図-1 S字鉄筋(基本単位)(文献<sup>4)</sup>の図に加筆)

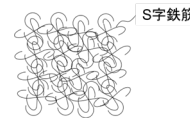


図-2 S字鉄筋の引っ掛かり合い(文献<sup>4)</sup>の図に加筆)

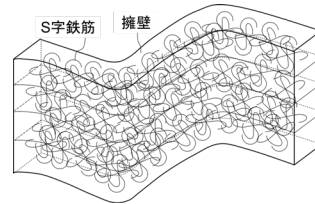


図-3 S字連結鉄筋の擁壁の例(文献<sup>4)</sup>の図に加筆)

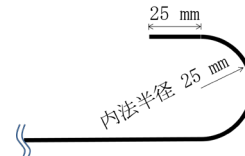


図-4 フック寸法

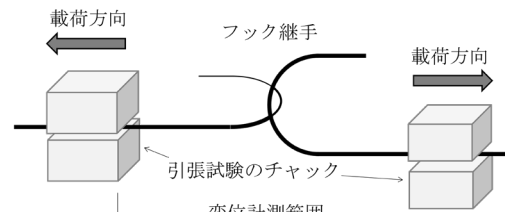


図-5 本検討でのフック継手

表-1 引張試験の試験体

記号	説明	コンクリート部分寸法
normal	1本の鉄筋	
hook-N	フック継手のみ	
hook-3 φ	フック継手 最小かぶり39mm	
hook-6 φ	フック継手 最小かぶり78mm	

表-2 配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水 セメント 比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				水 (kg) W	セメント (kg) C	細骨材 (kg) S	粗骨材 (kg) G	AE減水剤 (ml) A
15	41	7	44.8	174	424	732	931	1061

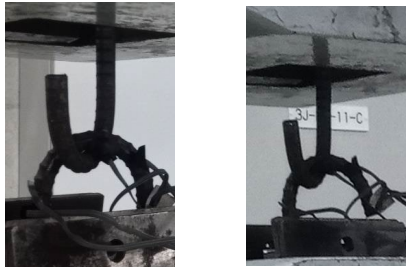


写真-1 hook-N 荷重の様子 (左: 荷重前, 右: 荷重中)



写真-2 Hook-3φ 荷重の様子  
(左: ひび割れ開始, 右: かぶり剥落)

### 3.3 試験方法

normal は両端を引張試験機のチャックでつかみ、一軸の引張試験をした。normal 以外の試験体は図-5 に示すように両端の軸が平行になるように両端を引張試験機のチャックでつかみ、平行を保ちながら引張試験をした。引張試験は静的に荷重した。変位はチャック間の図-5 に示す範囲で計測した。

### 3.4 試験結果および考察

#### (1) 引張荷重の比較

引張試験の荷重-変位曲線を図-7 に示す。縦軸は応力とせずにフック継手の周りをコンクリートで覆った試験体との比較を考慮し、荷重時に計測した引張荷重とした。

フック継手は、通常の鉄筋の引張試験である normal と比べると最大引張荷重が大きく下回っている。normal の最大荷重を基準にすると、hook-N は 16%、hook-3φ は 29%、hook-6φ は 59% になった。normal の降伏荷重を基準にすると、hook-N は 24%、hook-3φ は 43%、hook-6φ は 88% になった。

写真-1 および写真-2 に試験時の様子を示す。hook-N の荷重-変位曲線の挙動および荷重中の写真-1 の様子から、フック継手のみの荷重では荷重中に湾曲部が開いていく挙動を示した。荷重中の引張荷重はフックの湾曲部が直線状に戻ろうとしていく際の変形に必要な力であると考えられる。hook-N では、変位の増加につれて引張荷重が徐々に増加し、急激に下がるということが変位 5mm 程度の周期で繰り返された。これは、異形鉄筋に節

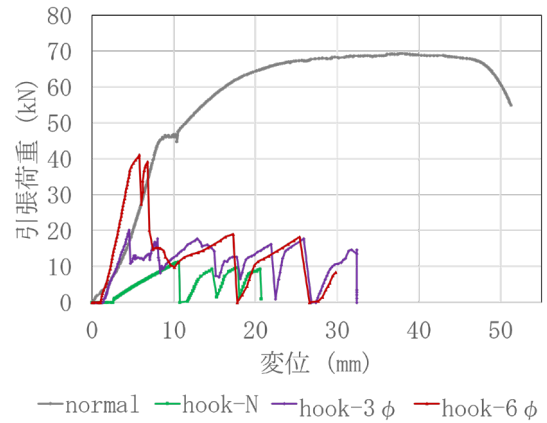


図-7 引張試験の荷重-変位曲線

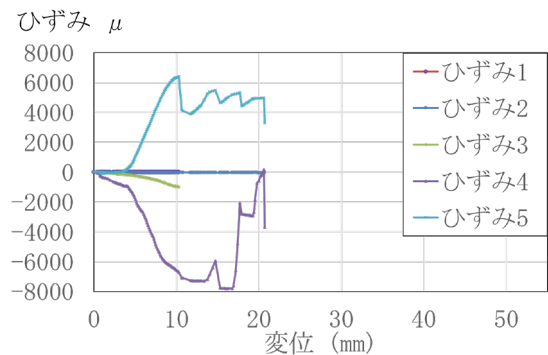


図-8 hook-N の引張試験のひずみ推移

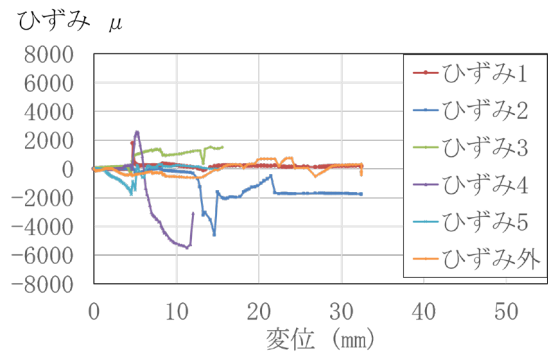


図-9 hook-3φ の引張試験のひずみ推移

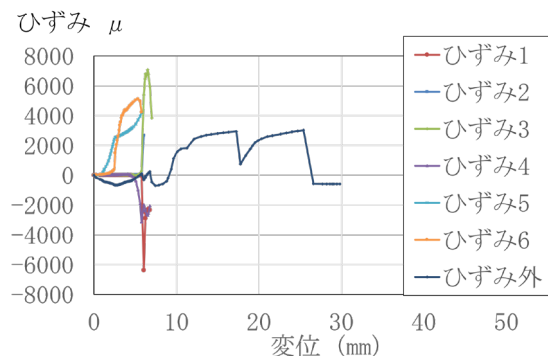


図-10 hook-6φ の引張試験のひずみ推移

と腹（節と節の間のへこみ部分，以下同じ）の段差があり，載荷中に節と腹の段差同士のかみ合いが瞬間的にひとつ隣にずれることにより生じたと考えられる。

フック継手の周りをコンクリートで覆った試験体である hook-3φ および hook-6φ では，かぶりの拘束によりフック部の変形が抑制されたため，最小かぶりが大きいかほど最大引張荷重が大きくなったと考えられる。引張荷重が最大に達すると同時に，写真-2 左のようにかぶりにひび割れが生じた。その後，かぶりの剥落とともに引張荷重が低下していった。写真-2 右のようにかぶりが完全に剥落した時点以降は，荷重-変位曲線の挙動および載荷中の様子は hook-N と同様となった。

## (2) 載荷挙動の検討

hook-N，hook-3φ および hook-6φ の引張試験時のひずみ推移をそれぞれ図-8，図-9 および図-10 に示す。ひずみは引張が正である。図-7 の引張荷重の推移と照らし合わせて検討する。なお，引張荷重が最大に達し，かぶりが剥落した際にひずみゲージの剥がれが生じ，ひずみ測定が困難になったため，以下の検討では引張荷重が最大になった直後までを対象とする。

hook-N では，引張試験つかみ部に近い直線部であるひずみ 5 は荷重の増加とともに増加した。しかし，引張試験つかみ部直近の湾曲部であるひずみ 4 は荷重の増加とともに減少した。もう一方のフックとの接点であるひずみ 3 はほとんど変化がみられなかった。直線部は引張力を受け，直線部と接点の間の湾曲部では圧縮力を受けると考えられることから，接点が支点となって直線部と接点の間の湾曲部が開いていく挙動を示したと考えられる。

かぶりの拘束がある hook-3φ および hook-6φ では，引張荷重が最大に達するまでひずみ 4 の減少はなく，湾曲部が開いていく挙動を示さなかった。これは，かぶりによって湾曲部が開いていく挙動が拘束されたためであると考えられる。引張荷重が最大に達した後は，ひずみ 4 が減少したことから，かぶりが剥落することにより拘束がなくなり，hook-N と同様に直線部と接点の間の湾曲部が開いていく挙動を示したと考えられる。

引張荷重が最大に達するまで，hook-3φ ではひずみ 4，hook-6φ ではひずみ 3，ひずみ 5 およびひずみ 6 の増加が確認された。これらひずみ位置ではかぶりにひび割れが生じ，鉄筋に伸びが生じたと考えられる。

hook-3φ では載荷初期にひずみ 5 の低下が確認された。ひずみ 5 付近でかぶりにひび割れが生じ，鉄筋に曲げ変形が生じたと考えられる。

本実験では，引張試験におけるつかみ部の確保のために，かぶり拘束の要因に対しても鉄筋を露出させる必要があった。直線部または直線部に近い位置に比較的大きなひずみがみられたことから，引張試験中に両端の直線

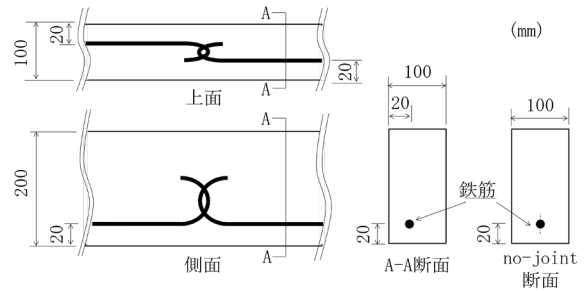


図-11 梁供試体内部のフック継手部詳細図

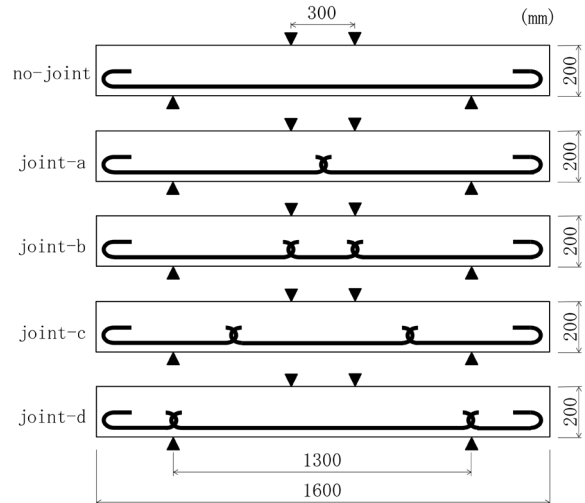


図-12 梁供試体の寸法およびフック継手の位置

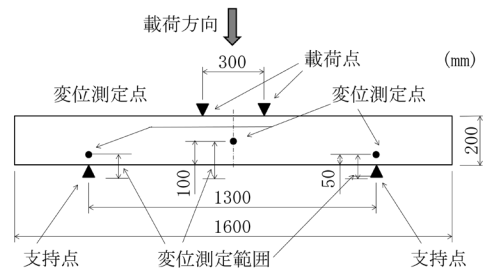


図-13 梁供試体の載荷方法の詳細図

部の鉄筋の平行を保つことができずに，鉄筋露出部の近傍で鉄筋がかぶり方向に押し出される挙動が，かぶりにひび割れが生じた一因になった可能性も考えられる。

## (3) フック継手部の破壊挙動

以上の検討により，コンクリートに埋設されたフック継手の破壊挙動は，次の順序になると考えられる。

- 直線部または直線部と接点の間の湾曲部で鉄筋の伸びが生じる。
- 鉄筋の伸びによる付着割裂破壊または直線部のかぶり方向への押し出しにより，かぶりにひび割れが生じる。
- 最大引張荷重に達する。
- 湾曲部が開いていくことにより湾曲部のかぶりが押し出され，剥落する。

e. 接点が支点となって直線部と接点の間の湾曲部が開いていく。

#### 4. 梁供試体載荷試験

##### 4.1 目的

梁供試体内部の鉄筋の一部をフック継手と置き換えて載荷試験をすることで、梁のフック継手部の力学的挙動の把握を目的とする。

##### 4.2 試験体

梁供試体内部のフック継手部の側面図、上面図、断面図、および比較用としての no-joint の断面図を図-11 に、載荷点の位置およびフック継手の位置を要因別に記号を付した側面図を図-12 に示す。長さ 1600mm、断面高さ 200mm、断面幅 100mm の単鉄筋 RC 梁供試体である。鉄筋径は D13 とした。供試体下面からのかぶり厚は 20mm とした。曲げスパン 300mm、せん断スパン 500mm とした。スターラップは用いていない。

載荷における載荷点、支持点、鉛直変位の測定点およびそれらの位置を図-13 に示す。鉛直変位は、中央の変位から両側の変位の平均を引いたものを用いた。

比較用としてのフック継手なしを no-joint、曲げスパンの中央 1 か所にフック継手を設けたものを joint-a、曲げスパンとせん断スパンの境界 2 か所にフック継手を設けたものを joint-b、それぞれのせん断スパンの中央 2 か所にフック継手を設けたものを joint-c、それぞれのせん断スパンの試験体端部側の境界 2 か所にフック継手を設けたものを joint-d と呼ぶ。要因ごとに 2 体ずつの試験体をそれぞれ 1 回ずつ試験した。荷重-変位曲線は要因ごとに平均ではなく、一方の値のみを用いた。

用いたコンクリートの配合は 3.2 と同じであり表-2 に示す。圧縮強度は 47.6 N/mm<sup>2</sup> (4w)、静弾性係数は 2.55 × 10<sup>4</sup> N/mm<sup>2</sup> であった。

フックの組み合わせの構造上、断面におけるフック継手の鉄筋位置は、図-11 のように断面横方向に対し中心にはなっておらず、側面のいずれか一方に偏っている。この偏りは鉄筋直径の長さ分程度である。供試体下面からのかぶり厚は 20mm を確保した。フック湾曲部先端の最小かぶり厚も 20mm を確保した。

##### 4.3 試験方法

載荷は、曲げスパン 300mm の対称 2 点集中荷重の静的曲げ載荷試験とした。コンクリート圧縮破壊による急激な破壊または梁中央変位が 50mm 程度 (joint-c のみ 35mm 程度) に到達するまで載荷を続けた。

##### 4.4 試験結果および考察

梁載荷試験の荷重-変位曲線を図-14 に示す。縦軸は載荷時に計測した荷重、横軸は中央変位とした。載荷終了後の供試体側面の様子を写真-3 に示す。荷重-変位曲

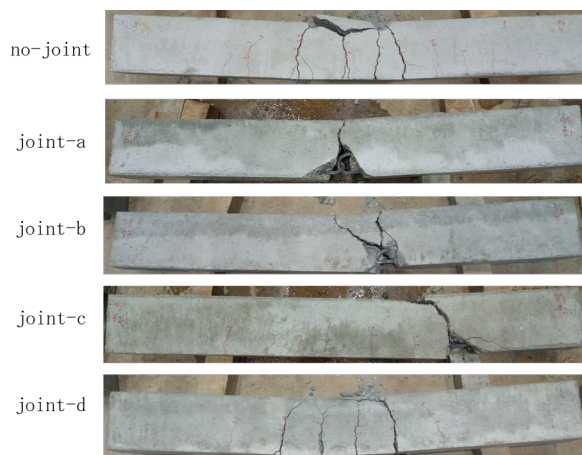


写真-3 梁載荷試験後の供試体側面の様子

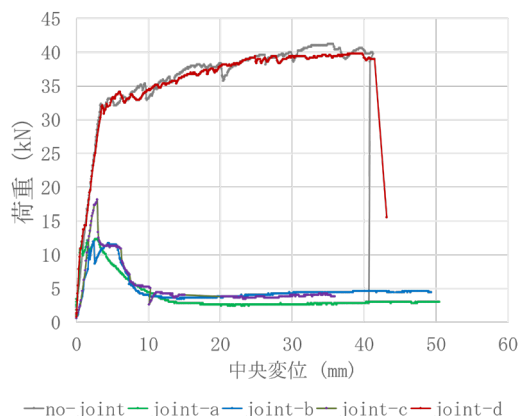


図-14 梁載荷試験の荷重-変位曲線

表-3 梁載荷の最大荷重と破壊形態

	最大荷重 (kN)	破壊形態
no-joint	41.2	最大曲げモーメント区間で曲げ破壊
joint-a	12.3	フック継手部で曲げ破壊
joint-b	11.9	フック継手部で曲げ破壊
joint-c	18.2	フック継手部で曲げ破壊
joint-d	39.8	最大曲げモーメント区間で曲げ破壊

線から読み取った最大荷重および供試体の破壊形態の比較を表-3 に示す。

##### (1) joint-d および no-joint の比較

joint-d は、フック継手なしの no-joint との比較において、載荷初期の荷重変化、最大荷重、荷重-変位曲線、破壊形態のいずれも同等となった。joint-d のフック継手の位置は曲げモーメントがゼロ付近である。このことから、曲げモーメントが作用しない位置においては、フック継手の存在に対する影響はないと考えられる。

また、下面からのかぶり厚が 20mm で一定であり、断面の有効高さを一定に保ちながら載荷をすることによって、鉄筋が断面横方向に偏心した影響は小さくなると考えられる。

## (2) 最大荷重の比較

最大荷重の比較では、no-joint を基準にして、joint-a は 30%、joint-b は 29%、joint-c は 44%になった。joint-a および joint-b のフック継手の位置は、曲げモーメントがそれぞれ最大の区間内および境界にある。フック継手の接点には、鉄筋設置時にフック継手には引張力が作用していないため、フック同士の間には一定の隙間が存在すると考えられる。このフック同士の間隙をフック同士の引っ掛かり合いの遊びと呼ぶ。これにより、フック継手部で鉄筋の引張応力伝達が可能となるまでの曲げ変形が大きくなり、引張力の負担できない状態で曲げひび割れが大きくなったと考えられる。

一般に梁の曲げ耐力は、同一の有効高さと同じ断面積の引張主筋が配筋されている場合、引張鉄筋の降伏強度に比例する。本実験の梁試験における最小かぶりは 20mm であり、3 章の hook-N と hook-3φ との中間付近に相当し、最大引張荷重は図-7 に示す normal の降伏荷重の 3 分の 1 程度になると考えられる。一方、フック継手の位置が最大曲げモーメントの区間にある joint-a および joint-b の最大荷重は、no-joint の 3 分の 1 程度である。このことから、梁の最大荷重は、かぶりに応じたフック継手の最大引張荷重から求めることができると考えられる。

## (3) フックの湾曲部の位置

joint-c の最大荷重は joint-a および joint-b のそれより 1.5 倍程度になった。joint-c のフック継手の位置は曲げモーメントが最大曲げモーメントの 2 分の 1 の地点である。joint-c のフック継手に作用する曲げモーメントが joint-a および joint-b のその 2 分の 1 であるため、joint-c の最大荷重は joint-a および joint-b のそれよりも大きくなったと考えられる。

(1) および (2) も含めて考察すると、やはり試験体が最大荷重に達するまでにおける破壊挙動の違いに影響の大きい要素は、フック継手の接点の位置における曲げモーメントであると考えられる。

## (4) 最大荷重以降の挙動

載荷中の試験体の観察から、最大荷重以降、中央変位が 10mm 付近になるまではフック継手の遊びがなくなりフック同士が十分にかみ合うまでの期間であると考えられる。中央変位 10mm 付近以降は湾曲部が開いていく挙動を示した。湾曲部が開いていく際の変形により、かぶりが外側へ押し出され剥落していく様子が観察された。かぶりの剥落後は、湾曲部が開いていきながら上記の曲げひび割れが局在化した断面がヒンジ的な挙動を示した。

フック継手は通常の鉄筋と比べ最大荷重は小さい。しかし、かぶりが剥落しヒンジ的な挙動の開始以降は、比較的安定した載荷荷重を保持しながら、通常の鉄筋よりも大きな変位を許容すると考えられるため、かぶりコン

クリートが剥落しフック継手だけで支持することになるような変形段階でも、フック継手は変形能力を確保できる可能性が見出された。

## 5. 結論

以下に、本報告の範囲内で得られた知見をまとめる。

- (1) フック継手は、かぶりの拘束により湾曲部が開いていく挙動が抑制され、鉄筋径の 6 倍のかぶりでは普通鉄筋の降伏荷重比で 88% になった。
- (2) フック継手の破壊挙動は、直線部または直線部と接点の間の湾曲部で鉄筋が伸び、かぶりにひび割れが生じ、最大引張荷重に達した後、湾曲部のかぶりが剥落し、接点が支点となって直線部と接点の間の湾曲部が開いていく挙動を示すと考えられる。
- (3) 継手のない通常の鉄筋に対し、フック継手を有する梁では、フック継手の接点における引っ掛かり合いの遊びが曲げ破壊の起点になると考えられる。
- (4) 梁の接点のかぶりが剥落しヒンジ的な挙動開始以降は、かぶりコンクリートが剥落しフック継手だけで支持することになるような変形段階でも、フック継手は変形能力を確保できる可能性が見出された。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H04229 の助成を受けた。

## 参考文献

- 1) 例えば、山本伸也，小倉大季，阿部寛之，菊池竜：材料噴射方式 3D プリンティングで製作した梁部材の構造性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1576-1581，2022.6
- 2) 例えば，木ノ村幸士，張文博，川端康平，河村圭亮：3D プリンティングで外殻を構築したデモ橋脚の交番載荷試験による性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1528-1533，2022.6
- 3) 例えば，宮田賢優，浅川智哉，宮澤友基，西脇智哉：建設用コンクリート 3D プリンタに適用可能な高強度繊維補強セメント系複合材料の開発と評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1558-1563，2022.6
- 4) 国立大学法人京都大学，平野裕一：コンクリート 3D プリンティング用補強材，特許公報，特許第 6999193 号，2022.1
- 5) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：公共建築工事標準仕様書（建築工事編）平成 31 年版，国土交通省，p.25，2022.3
- 6) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書 [設計編：標準]，土木学会，p.351，2018.3