

3D プリンティング技術製作を想定したフック継手の連続する補強筋の力学特性

京都大学 正会員 ○平野 裕一

京都大学 正会員 山本 貴士

1. 背景および目的

セメント系材料の 3D プリンティング技術の研究は、近年、各方面で進められている。しかし、セメント系材料の 3D プリンティング施工と並行して鉄筋組立てを自動化する技術は未だないと考えられる。

筆者は、鉄筋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の施工も可能になる鉄筋として、S 字連結鉄筋¹⁾を提案した。図 1 は S 字状に加工した鉄筋を複数組み合わせ、S 字の中央で緊結または溶接した基本単位の S 字鉄筋である。S 字連結鉄筋は短いスパンの鉄筋である S 字鉄筋の両端のフック部を連結した構造であり、自由な曲線を描くことができる 3D プリンティング施工に追従可能である。また、この S 字鉄筋を複数組み合わせ、図 2 に示すように、フック部が相互に引っ掛かることで面状の鉄筋構造が可能である。

本稿では、フック部同士の引っ掛かりにより連結した構造をフック継手と呼び、フック継手が連続するコンクリート用の補強筋を考える。本研究ではこのフック継手を有する鉄筋の基本的な力学特性の検討を行った。

2. フック継手の構造

本研究で用いた試験材料は JIS G 3112 異形鉄筋 SD345 の D13 である。フック部の加工寸法を図 3 に示す。フック部の曲げ内半径は、今後作製予定の RC 梁供試体の断面(200×100mm)の寸法を考慮し、文献²⁾の折曲げ内法直径 3d の半分の 1.5d よりいくぶん大きい値で、文献³⁾のスターラップおよび帯鉄筋の曲げ内半径 2.0φ である 25mm とした。一方、余長は、折曲げ角度 180° において、文献²⁾では 4d 以上、文献³⁾では 4φ 以上で 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。

フック継手の引張試験用試験体の概要を図 4 に示す。ただし、図 4 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. フック継手の引張試験

3.1 試験体

引張試験の試験体一覧を表 1 に示す。表 1 には、フック継手をコンクリートに埋設した試験体の形状・寸法を合わせて示した。鉄筋径 D13 に対し、3φ、6φ であるそれぞれ 39、78mm の最小かぶりとした。それぞれの要因の試験体数は各 1 体で、コンクリートの水セメント比は 41%、強度は 47.6 N/mm² (28 日)であった。

3.2 試験方法

試験体 normal は両端をつかみ、一軸の引張試験をした。試験体 normal 以外の試験体は両端の軸が平行になるように両端をつかみ、平行を保ちながら引張試験をした。

3.3 試験結果および考察

引張試験の荷重-変位曲線を図 5 に示す。縦軸は応力とせずにコンクリート埋設フック継手試験体との比較を考

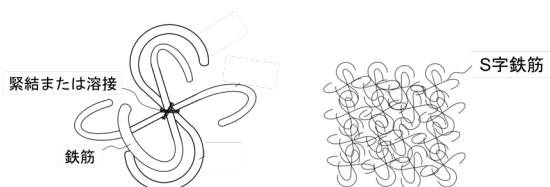


図 1 S 字鉄筋



図 2 S 字鉄筋の引っ掛かり合い

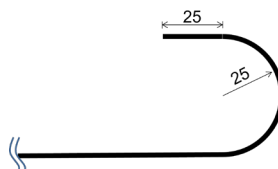


図 3 フック部寸法

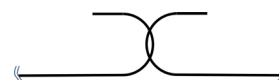


図 4 本検討でのフック継手

(図 1、図 2 とともに文献¹⁾の図に加筆)

キーワード フック継手, S 字鉄筋, S 字連結鉄筋, 3D プリンティング

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 075-383-3173

慮し載荷時に計測した引張荷重とした。載荷状況の例として hook-N, hook-3 φ の様子をそれぞれ写真 1, 写真 2 に示す。

(1) 最大引張荷重の比較

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 を基準にして、hook-N は 14%, hook-6 φ は 44% になった。かぶりの拘束によりフック部の変形が抑制されたため、最小かぶり大きいほど、最大引張荷重が大きくなったと考えられる。

(2) 荷重-変位曲線および試験体の破壊挙動

hook-N の荷重-変位曲線の挙動および載荷中の様子から、フック継手のみでは載荷中にフック部が開きつつ伸びていく挙動を示した。載荷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 20mm 程度の周期で繰り返された。これは、異形鉄筋に節と腹の段差があり、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。

hook-3 φ, hook-6 φ では、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、引張荷重-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。

(3) 引張方向の大変形の許容

引張試験の変位に着目すると、normal が破断した変位を超えても、フック継手の試験体は変位が大きくなる余地を残している。載荷中は写真 1 右のようにフック継手の湾曲部が延ばされていき、フック部同士の引っ掛かりがなくなるまで、系全体としての変位が大きくなった。普通鉄筋の伸びだけでないフック部の開きによる変位も加わるため、大きな変形になったと考えられる。

4. 結論

フック継手のみの最大引張荷重は、普通鉄筋の引張強度に相当する最大引張荷重の 14% であったが、コンクリートに埋設したフック継手では、最大引張荷重は普通鉄筋の 44% まで改善した。また、普通鉄筋の伸びだけでないフック部の開きによる変位も加わるため、大きな変形を生じる。

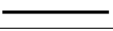
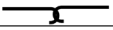
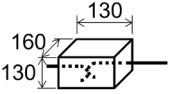
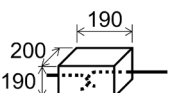
謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H04229 の助成を受けた。

参考文献

1) 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
2) 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) 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], 公益社団法人土木学会, pp. 350-351, 2018

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	

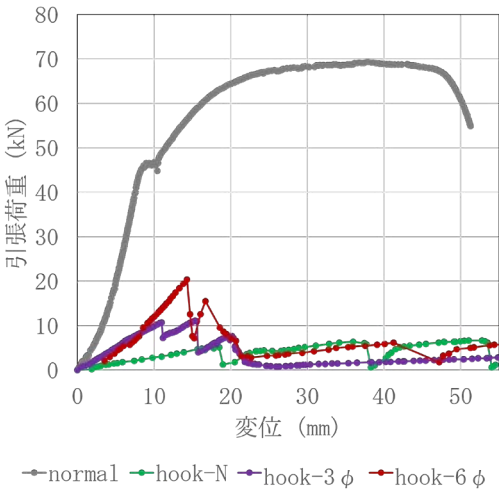


図 5 引張試験の荷重-変位曲線



写真 1 hook-N 載荷の様子(左: 載荷前, 右: 載荷中)



写真 2 hook-3 φ 載荷の様子 (左: ひび割れ開始, 中: かぶり剥落, 右: 完全に剥落)