

建設用コンクリート 3D プリンタ用モルタルと細径鉄筋の付着・定着性能に関する基礎的研究

ライフサイクル工学分野
伊藤尚哉

建設用コンクリート 3D プリンタ
テンションスティフニング

細径鉄筋
定着性能

付着性能

1. はじめに

近年、建設業界の就業者数の減少による労働力不足が深刻な問題となっており、その解決策の一つとして、建設用コンクリート3Dプリンタ（以下、3DCP）を活用した自動化施工技術が注目を集めている。3DCPは、材料押出方式を主とする付加製造技術の一つであり、自由な造形が可能であるという利点を有する¹⁾。一方で、積層された部材は層間に微細な空隙や不連続面を有しやすく、力学的な弱点となり得る²⁾。また、積層材料として使用するモルタルの引張強度が低いことから、地震国である日本においては、鉄筋コンクリート造と同等の安全性を確保するための適切な鉄筋補強が重要な課題となっている。3DCPの積層体に対する配筋方法として、施工の自動化を阻害しないよう、細径鉄筋を予め溶接等で一体化させた組立体の利用が検討されている³⁾。しかし、3DCPの材料として用いられるモルタルには粗骨材が含まれないため、通常のコンクリートとは材料特性が異なり、細径鉄筋に対する付着性能や定着性能は未解明な点が多い。そのため、構造体の安全性を数値解析により評価するためには、その入力値となる鉄筋とモルタル間の付着・定着性能を定量的に把握し、信頼性の高い構造解析モデルを構築する必要がある。したがって、それらの解析に使用できる基礎データを取得することが求められている。

これらの背景から、3DCP製の積層体に対して、細径鉄筋としてD4鉄筋を埋設した試験体を作製し、引抜き試験を実

施することで、付着・定着性能の定量的な評価を行う。本研究では、鉄筋とモルタルの接触界面における応力伝達機構を「付着」、溶接部や端部形状を含めた積層体内部での耐力発現機構を「定着」と定義し、それらの評価を行った。さらに、付着応力度一すべり変位関係から付着性能を、引抜き試験における最大荷重から定着性能を評価した。また、一軸引張試験を実施することにより、ひび割れ後の剛性低下が抑制される現象として、テンションスティフニング効果を定量的に評価する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

積層材料として、既に実構造物での積層実績があるプレミックスセメントを使用した。これに対して、水添加率を16%、硬化剤添加率を1%とした。この調合における力学特性は、圧縮強度 36.1 N/mm²、引張強度 2.91 N/mm²である（いずれも 28 日材齢）。鉄筋には、SD295 相当の D4 鉄筋（公称径 4.23 mm，節間隔 1.20 mm）を使用した。

2.2 試験体の作製

作製した試験体の形状および寸法を図 1 および図 2 に示す。引抜き付着試験体では、付着性能を評価するために、中心に付着区間を設けた。定着試験体では、標準的に使用される半円形フックに加え、トラス格点部および直交スポット溶接の 3 種類の定着体を埋設させた試験体を作製した。一軸引張試験体では、積層数を変えた試験体を 2 種類作製し、

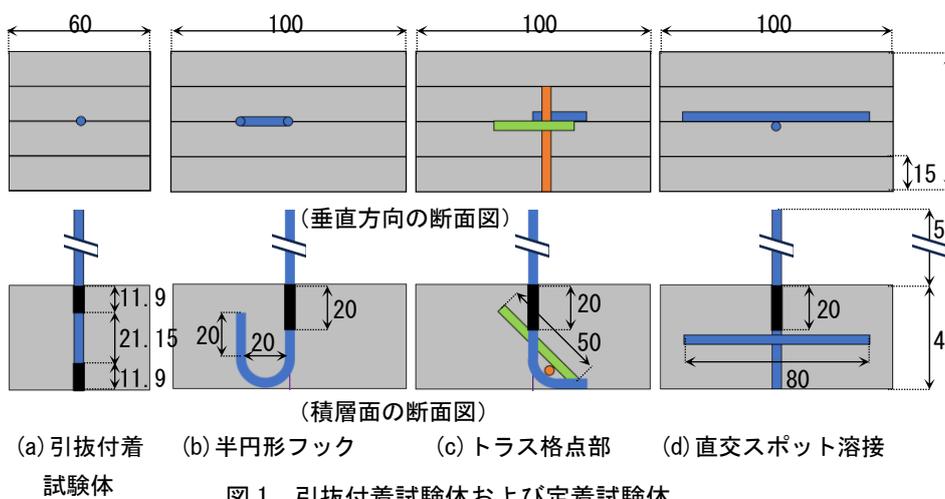


図 1 引抜き付着試験体および定着試験体

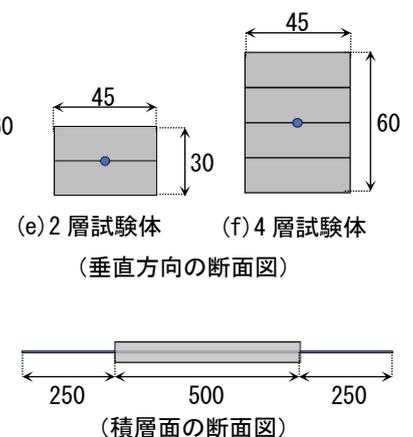


図 2 一軸引張試験体

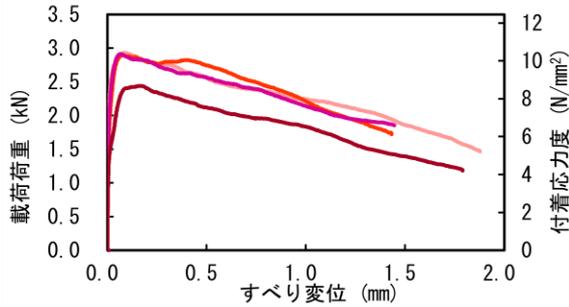


図3 D4鉄筋の付着応力度—すべり変位

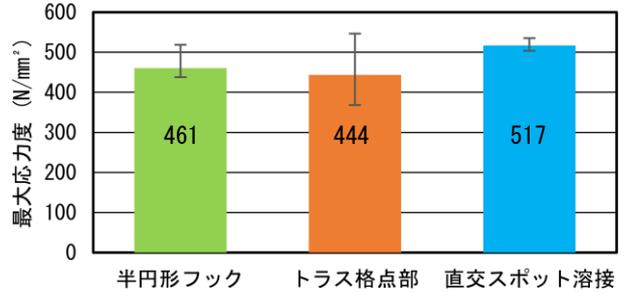


図4 定着試験体の最大応力度

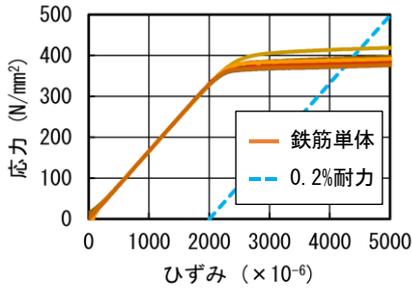


図5 D4鉄筋の応力ひずみ曲線

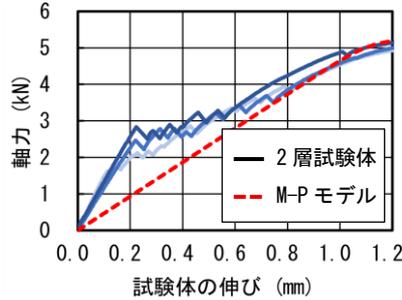


図6 2層試験体の引張剛性挙動

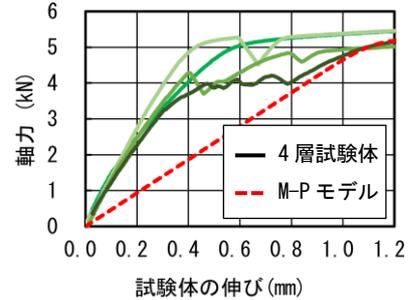


図7 4層試験体の引張剛性挙動

積層高さの中心となる層間に鉄筋を埋設した。試験体は積層後、湿潤環境にて28日間養生を行った。

2.3 引抜き試験

引抜き付着試験体および定着試験体に対して引抜き試験を実施し、応力—すべり変位関係を導出した。

2.4 一軸引張試験

鉄筋単体および積層試験体に対して一軸引張試験を実施し、テンションスティフニング効果の指標として、コンクリートが負担した引張応力を算定した。ここで、鉄筋単体のデータ処理には、Menegotto-Pintoモデルを適用した⁴⁾。

3. 実験結果と考察

3.1 引抜き試験

引抜き付着試験体の付着応力度—すべり変位関係を図3に示す。載荷初期から高い剛性が確認され、すべり変位が0.1 mm程度で最大応力度に達した。また、最大付着応力度は概ね10 N/mm²程度であったが、一部の試験体では約8 N/mm²と低い結果となった。これは、モルタルの付着面積の微小な誤差によって生じたと推察される。

定着試験体の最大応力度を図4に示す。トラス格点部では、半円形フックと比較し最大応力度のばらつきが大きく、鉄筋を垂直に挿入したことによる空隙の発生が要因と考えられる⁵⁾。一方で直交スポット溶接では、半円形フックと同等以上の最大応力度を示し、最大応力度のばらつきも小さかったことから、定着体として十分な定着性能を示した。

3.2 一軸引張試験

鉄筋単体の一軸引張試験により得られた応力ひずみ曲線を図5に示す。鉄筋のヤング率が 1.66×10^5 N/mm²程度と測定されたが、これは一般的な鉄筋のヤング率と比較すると非常に小さい⁶⁾。この理由として、本来コイル材であるD4鉄筋

に対して直線矯正を行う際に強い曲げ作用が生じ、塑性変形に伴い見かけのヤング率が低下したと考えられる⁷⁾。

2層試験体および4層試験体の引張剛性挙動を図6および図7に示す。両者の試験体においても、テンションスティフニング効果が表れることを確認した。また、4層試験体は、2層試験体より断面積が大きいことから、ひび割れ発生荷重と鉄筋の降伏域が近づいた。そのため、鉄筋に急激なひずみが発生することで鉄筋径は細くなり、モルタルとの付着作用が低下することで、ひび割れ発生後のテンションスティフニング効果は抑制されたと推察される。

4. まとめ

3DCP積層体にD4鉄筋を埋設した試験体に対して引抜き試験を実施し、付着応力度とすべり変位の関係を導出した。また、直交スポット溶接による定着が、標準的な半円形フックと同等以上の性能を示した。さらに一軸引張試験では、従来の鉄筋コンクリートと同様に、積層体に対してもテンションスティフニング効果の発現性状を定量的に評価した。

[参考文献]

- 1) Buswell, R. A. et. al., *Cem. Con. Res.*, 112, 37–49, 2018
- 2) Wolfs, R. J. M. et. al., *Cem. Con. Res.*, 119, 132–140, 2019
- 3) 桐野康則ら, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工(九州), 1523–1524, 2025
- 4) 孫玉平ら, コンクリート工学年次論文集, 26(2), 769–774, 2004
- 5) 浅川智哉ら, コンクリート工学年次論文集, 45(1), 1642–1647, 2023
- 6) 土木学会:2022年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2023
- 7) 早川邦夫ら, *Journal of the JSTP*, 52(610), 53–58, 2011