

材料押出方式 3D プリンティングで作製した積層体と埋設された鉄筋の付着特性評価

清水建設（株） 正会員 ○山本 伸也, 小倉 大季, 菊地 竜, 阿部 寛之

1. はじめに

材料押出方式の 3D プリンティング¹⁾では、プリントの途中で積層体の上面に鉄筋を配置し、その上から積層を続けることで積層体の補強が可能となり、適用対象を大きく広げられると考えられる。しかし、積層体と層間に埋設された鉄筋の付着特性を評価した事例は少ない。著者らは積層体と埋設された鉄筋の付着応力を引抜き試験により確認し、従来の型枠打込みの場合と比較した。

2. 実験概要

2. 1 試験ケース

試験ケースを表-1 に示す。試験要因はセメント系材料の配合と製作方法である。3D プリンティング用配合を積層プリントするケース S-P、同配合を型枠に打ち込むケース S-F、普通コンクリートを型枠に打ち込むケース N-F の 3 種類について試験した。各ケースとも試験体数は 3 とした。

3D プリンティング用の配合については普通ポルトランドセメントを用い、水粉体比を 24 %、砂粉体比を 80 %とし混和材にフライアッシュ、シリカフューム、石灰石微粉末を用いた。繊維混入率は 0.75 vol% とした。普通コンクリート配合については、普通ポルトランドセメントを用い、単位水量を 157 kg、水セメント比を 55 %、細骨材率を 47 % とした。

2. 2 試験体製作

鉄筋は D13-SD295（降伏強度実測値は 375 N/mm²）とし、JSCE-G 503²⁾ に準拠して、試験体寸法は 80×80×80mm の立方体、付着区間は 51mm とした。残りの 29mm は軟質ビニール管で縁を切り非付着区間とした。ケース S-F、N-F は、鉄筋をセットした型枠にコンクリートを打ち込んで作製した。ケース S-P の作製手順を図-1 に、鉄筋埋設状況を図-2 に示す。プリントには吐出口が 60×10mm のノズルを使用し、層の厚み 7.5mm、幅 80mm で押し出した。1 層（直線 160mm）プリントするたびに鉛直方向に 7.5mm 上昇させ次の層に移行した。6 層積層したタイミングでプリント動作と材料の吐出を中断し、積層体の上面に鉄筋の下半分を埋め込んだ後、プリントを再開し、その上に 5 層積層することで鉄筋を埋設した。プリント後に積層体を中央で二等分することで 1 つの積層体から試験体を 2 つ採取した。

フレッシュ性状は、材料の練上がり直後にスランプ、空気量、材料温度を測定した。また、圧縮強度用と割裂引張強度用の円柱供試体（φ100×200mm）を 3 本ずつ採取した。引抜き試験体および円柱供試体は全て脱型まで 2 日間水分が逸散しない状態で保管し、脱型後は封緘し 20℃の環境下で 28 日間養生を行い、材齢 28 日で試験に供した。

表-1 試験ケース

ケース	配合	製作方法
S-P	3D プリンティング用	積層プリント
S-F	3D プリンティング用	型枠打込み
N-F	普通コンクリート	型枠打込み

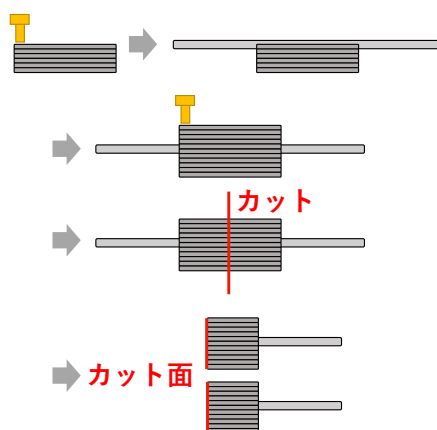


図-1 ケース S-P 作製手順

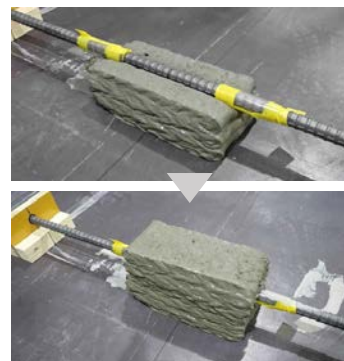


図-2 鉄筋埋設状況

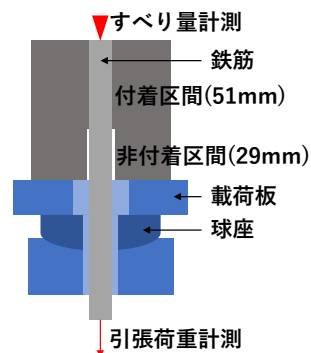


図-3 荷重方法

キーワード 3D プリンティング, 積層体, 引抜き試験, 付着応力, 付着強度

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設（株）技術研究所 TEL 03-3820-5504

2. 3 引抜き試験

図-3 に載荷方法を示す。試験体は球座を介して載荷板に置き、偏心荷重の発生を防いだ。載荷速度は鉄筋の引張応力が毎分 50 N/mm² 増加するようにした。ケース S-P は載荷板に非平滑な積層面が当たるため、石膏にて平滑面を作製した。鉄筋の引張荷重および自由端のすべり量を計測し、引張荷重を（公称直径×付着区間長）で除して付着応力を求めた。

3. 実験結果

表-2 に使用した 2 配合のフレッシュ性状と力学特性を、表-3 に試験ケースごとのすべり量が 0.002D (0.026mm) における付着応力 $\tau_{0.002D}$ と付着強度 τ_{max} を示す。図-4 に付着応力と自由端のすべり量の関係を示す。

ケース S-P、S-F は鉄筋降伏後に 50 kN 付近で、N-F は 30 kN 付近で最大引張荷重に至り、付着割裂破壊を生じた。付着割裂破壊はリングテンションに起因するため、割裂ひび割れ発生強度が高く、繊維の架橋効果による靱性を有する 3D プリンティング用配合のケースの方が τ_{max} が高くなったと考えられる。ケース S-P と S-F を比較すると、初期剛性の差から $\tau_{0.002D}$ は S-P の方が高かったが、 τ_{max} および変動係数は同等であった。なお、ケース S-P は積層界面に沿って付着割裂ひび割れが生じ（図-5 参照）、最大引張荷重以降の挙動については S-F との差異が認められた。積層界面は架橋繊維が少ないため、材料の引張靱性が相対的に低いことが原因と推察される。

以上から本試験の条件では、積層体と埋設された鉄筋の付着強度とそのばらつきは、型枠打込みの場合と同等であり、一般的なコンクリートと鉄筋の付着強度を上回り、25N/mm² 程度であることが認められた。

4. まとめ

積層体と埋設された鉄筋の付着応力を引抜き試験により確認し、本試験の条件で以下の結果を得た。

- ・ 積層体と埋設された鉄筋の付着強度およびそのばらつきは型枠打込みで製作する場合と同等であった。
- ・ 積層体と埋設された鉄筋の付着強度は一般的なコンクリートと鉄筋の付着強度を上回り、25N/mm² 程度であった。

参考文献

1) 山本 伸也, 小倉 大季, 阿部 寛之, 菊地 竜: 自由曲面を有する埋設型枠への 3D プリンティング技術の適用, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, V-135, 2021

2) 土木学会: 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, 土木学会標準方書(規準編), pp.359-363, 2013

表-2 フレッシュ性状および力学特性

配合	スランプ (cm)	空気量 (%)	材料温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂ひび割れ発生強度 (N/mm ²)
3D プリンティング用	7.5	3.8	27	109	4.53
普通コンクリート	10.5	4.8	18	37.0	3.15

表-3 引抜き試験の結果

ケース	$\tau_{0.002D}$ (N/mm ²)	$\tau_{0.002D}$ 平均 (N/mm ²)	τ_{max} (N/mm ²)	τ_{max} 平均 (N/mm ²)	τ_{max} 変動係数 (%)
S-P	20.1	21.0	23.5	25.0	5.43
	23.1		26.2		
	19.8		25.2		
S-F	17.3	17.5	25.3	24.9	4.19
	17.7		23.8		
	17.6		25.8		
N-F	4.75	4.41	15.4	14.9	3.73
	3.58		14.3		
	4.91		15.0		

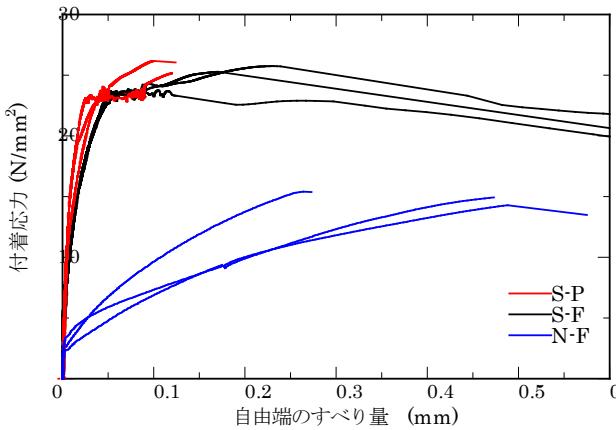


図-4 付着応力-自由端のすべり量

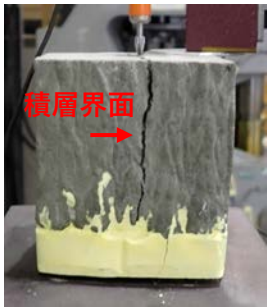


図-5 ケース S-P の付着割裂ひび割れ