

材料噴射方式の3Dプリンティングで製作した梁部材の曲げ载荷実験

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

1. はじめに

材料押出方式の3Dプリンティングでは、造形中にノズルが干渉するため鉄筋などの補強材を造形物に埋込むことが困難である。一方で材料噴射方式の3Dプリンティングではセメント系材料を圧縮空気で吹き付けて造形を行うため、補強材を有する部材を製作できる特徴がある²⁾。しかし、材料押出方式に比べて研究事例は少ない。

本研究では、通常の型枠打込みおよび材料噴射方式により製作した鉄筋を有する梁試験体の4点曲げ载荷実験を実施し、荷重-変位関係や破壊性状を比較検討することで、材料噴射方式による構造部材製作の可能性を検討した。

2. 実験概要

2.1 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。载荷実験の要因は梁試験体の製作方法および材料配合の2種類とした。製作方法は、材料噴射方式と比較用の型枠打込みの2水準とした。配合は、独自に開発した3Dプリンティング用の繊維補強セメント複合材料（配合A）と普通コンクリート（配合B）の2水準とした。材料噴射方式のばらつきを評価するために、ケースIは試験体数を3とした。

配合Aは、普通ポルトランドセメントを用い、水粉体比を0.28、砂粉体比を0.80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（容積）は1%とした。配合Bは、早強ポルトランドセメントを用い、水セメント比（W/C）を0.60、単位水量を165kg/m³、細骨材比（s/a）を0.46、粗骨材最大寸法を20mm、空気量を4.5%とした。なお、配合Bは一般的な材料という位置づけで型枠打込みでのみ製作した。

2.2 梁試験体および载荷・支持条件

梁試験体の寸法と载荷・支持条件を図-1に示す。鉄筋は全てSD345とした。载荷点と支点については、回転および水平変位は非拘束の境界条件とした。载荷については、载荷点ごとに配置した油圧ジャッキで片押し载荷を行った。鉄筋降伏までは0.08kN/secの荷重制御とし、鉄筋降伏後は片方のジャッキを0.08mm/secの変位制御として、もう一方のジャッキは変位制御のジャッキに生じた荷重に追従する荷重制御とした。計測項目は、ジャッキ荷重、梁中央鉛直変位、引張鉄筋（D19）中央部のひずみ、ひび割れ発生状況とした。

表-1の曲げ終局荷重は材料試験で得られた圧縮強度（配合A:91.8MPa、配合B:37.0MPa）および鉄筋降伏強度（385MPa）・弾性係数（184GPa）を用いて、コンクリート標準示方書の算定式から求めた。

表-1 実験ケース

ケース	要因		試験体数	計算曲げ終局荷重(kN)
	製作方法	配合		
I	材料噴射	A	3	42.6
II	型枠打込み	B	1	
III			1	38.6

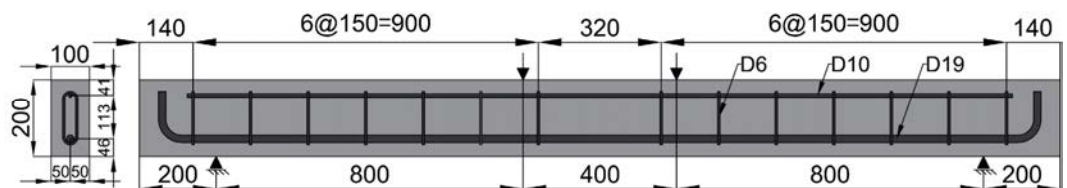


図-1 梁試験体の寸法と境界条件

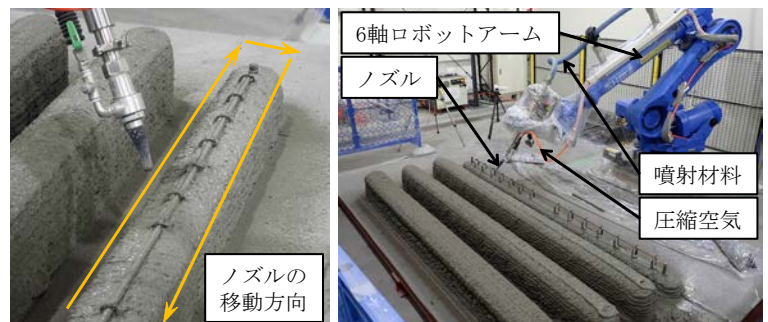


図-2 材料噴射方式による梁試験体の製作

キーワード 3Dプリンティング, 材料噴射方式, 曲げ载荷, 繊維補強セメント複合材料

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 TEL03-3820-5504

2. 3 試験体製作

材料噴射方式による試験体製作では図-2に示すように、一定の姿勢を保ったノズルが事前に架台上に設置した鉄筋を周回するようにした。1周ごとにノズルを20mm上昇させ、計10周させた。圧縮空気流量は標準状態(1気圧, 20°C)換算で300L/min, ノズル移動速度は25mm/secとした。平面や角は精度よく造形できないためひと回り大きく製作し、硬化後に余剰部をカットして設計寸法にした。

3. 実験結果

荷重-変位関係を図-3に、荷重と引張鉄筋中央部のひずみの関係を図-4に、降伏荷重および最大荷重、圧壊時変位を表-2に示す。荷重は両ジャッキの合計である。圧壊の判定は、降伏後の荷重低下および梁上縁でのひび割れ発生を根拠とした。

全ケースとも変位10mm付近で降伏した後、梁上縁の圧壊に至り荷重が低下した。ケースIの降伏荷重は平均値45.5kN(ケースIIの99.6%), 標準偏差0.7kNであり, 最大荷重は平均値53.4kN(ケースIIの111.3%), 標準偏差1.7kNであった。ケースIの3体とも圧壊発生まで同様の挙動であることから, 製作方法に起因する構造的なばらつきは小さかったと考えられる。ケースIIは降伏まではケースIと同様であったが, ケースIより圧壊発生が早い分, 二次剛性による荷重増加が減り, 最大荷重は小さくなった。ケースIとIIに比べ, ケースIIIは降伏・最大荷重が小さく, 靱性も小さかった。ケースIIIで使用した配合Bは圧縮強度が低いこと, 繊維補強していないことが理由と考えられる。

ケースIよりケースIIが早期に圧壊した原因として, 破壊性状の差異が考えられる(図-5参照)。ケースIでは載荷過程において複数のひび割れが等しく開口した一方, ケースIIでは降伏後から一つのひび割れ面の開口幅が大きくなり, 圧壊はその上部で生じた。この理由については, 繊維の架橋効果に差が生じていたと推測される。その主要因は製作方法だと考えられるが, 詳細については今後の課題である。

4. まとめ

材料噴射方式の3Dプリンティングおよび一般的な型枠打込みにより製作した梁試験体の4点曲げ載荷実験を行い, 構造的な性能を検討した結果, 本研究の条件では, 材料噴射方式は型枠打込みと同等以上の構造的な性能を有する部材を安定して製作可能であることがわかった。

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) 渡邊 晋也, 永沢 薫, 国枝 稔, 小倉 大季, 小堀 規行: 吹付けコンクリートとICT建設機械を組み合わせた3Dプリンティングシステムに関する検討, 土木学会全国大会第75回年次学術講演会, VI-611, 2020

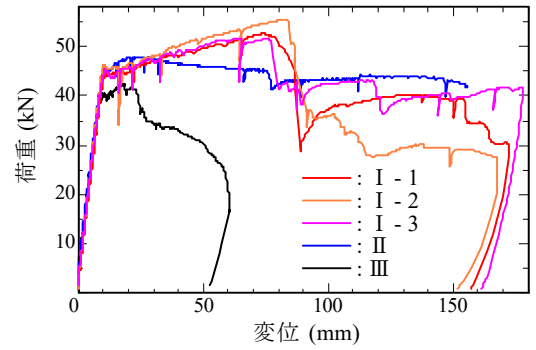


図-3 荷重-変位関係

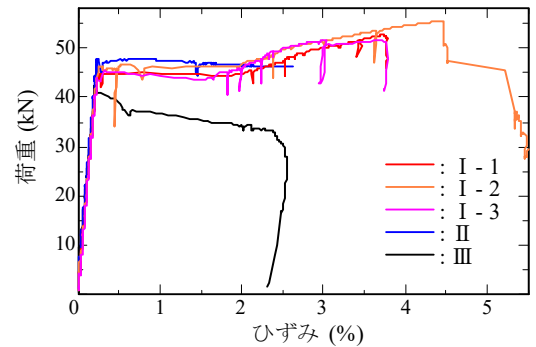


図-4 荷重-引張鉄筋ひずみ関係

表-2 梁試験体の載荷結果

ケース	No.	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	圧壊時変位 (mm)
I	1	44.7	52.8	79
	2	46.4	55.5	85
	3	45.5	51.9	78
II	-	45.7	48.0	30
III	-	40.7	42.5	24

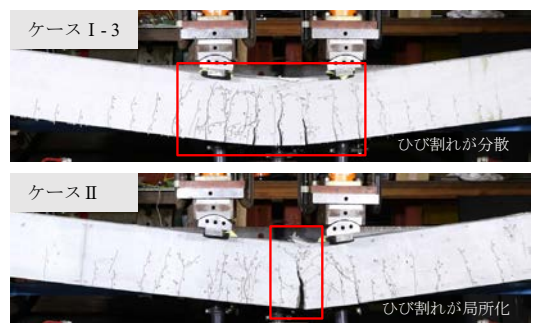


図-5 ケースIとIIの破壊性状
(変位110mm時点)