

材料押出方式の 3D プリンティング技術で作製した梁部材の耐荷性能

清水建設（株） 正会員 ○原 紘一朗，小倉 大季，山本 伸也，阿部 寛之，菊地 竜

1. はじめに

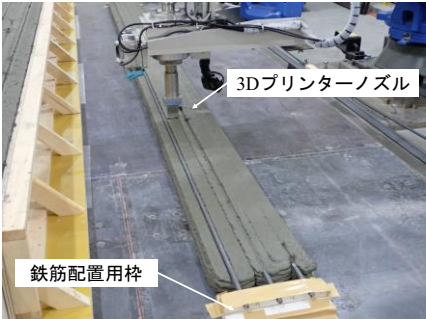
材料押出方式の 3D プリンティング技術は、任意の曲面を有する部材を作製できるのみならず、型枠なしでの埋設型枠の作製や、コンクリート構造物の施工が見込まれ、建設現場における省力化・省人化に貢献することへの期待が寄せられている¹⁾。しかし、3D プリンティング技術を用いて、内部に補強筋を有する部材を作製し、その耐荷性能を検討した事例は少なく、十分な知見は蓄積されていない。そこで、本研究では、材料押出方式の 3D プリンティング技術、ならびに従来の型枠打込みによる方法で軸方向鉄筋を有する梁部材を作製し、曲げ載荷実験を行い、試験体の作製方法の違いが耐荷性能に及ぼす影響を評価した。

2. 実験概要

2. 1. 試験体の諸元と作製方法

図－1 に試験体の寸法，境界条件を示す。試験体の寸法は，部材長 3900 mm，高さ 230 mm，幅 250 mm とした。また，支間長，せん断スパンは，それぞれ，3100 mm，1300 mm とし，等曲げモーメント区間は 500 mm として試験を行った。鉄筋は 3 段とし，D13 の SD295 を使用した。作製方法の都合上，定着区間は直線とし，せん断補強鉄筋は配置していない。本研究では，「プリント」及び「型枠打込み」の 2 種類の方法により試験体の作製を行った。試験体数は各 1 体である。

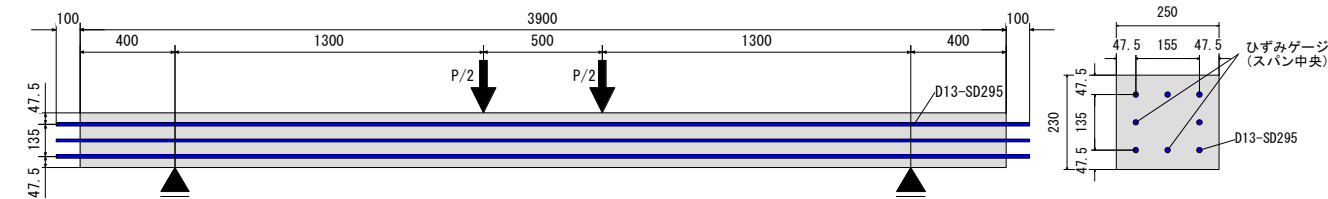
写真－1 に試験体の作製状況を示す。3D プリントに際しては，吐出口が 40 mm×10 mm のノズルを使用し，1 層 7.5 mm 厚で 30 層のプリントを行った。フィラメント（ノズルから押し出した線上の材料）の幅は 50 mm とし，1 層当たり 5 列になるようプリントした。プリントの特性上，鉄筋を配置する際には，配置高さまでプリントが終了次第，一度プリントを中断し，プリント面に鉄筋の断面下半分を埋込んだ。プリント再開後は材料を上から重ねることで，鉄筋の埋設を行った。型枠打込みでは，鉄筋を所定の位置に配置して同一配合の材料を型枠に打設した。作製後の試験体は，表面をビニールシートで覆い，空調環境の無い屋内ヤードにて載荷試験まで封緘養生した。表－1 に実験ケースを示す。表－1 には，ノギスにより計測した各試験体の幅，高さ，設計寸法に対する幅，高さの誤差をまとめた。



写真－1 試験体の作製状況

表－1 試験体実寸法と設計寸法に対する誤差

作製方法	幅 (mm)	誤差 (%)	高さ (mm)	誤差 (%)
プリント	263.2	5.27	234.2	1.82
型枠打込み	250.6	0.25	232.8	1.20



図－1 試験体の寸法・境界条件

キーワード 3D プリンティング，材料押出方式，繊維補強セメント複合材料，曲げ破壊
連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目 4 番 17 号
清水建設（株）技術研究所 TEL：03-3820-5504

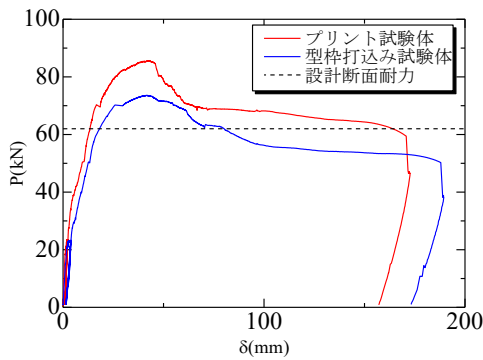


図-2 荷重-変位関係

表-2 試験結果まとめ

作製方法	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)	終局時変位 (mm)
プリント	85.6	43.5	171
型枠打込み	73.6	41.8	188

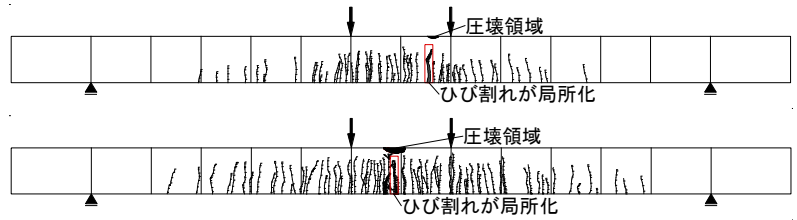


図-3 ひび割れ性状（上：プリント，下：型枠打込み）

ト、シリカフューム、フライアッシュ、石灰石微粉末を使用し、砂の最大粒径は 0.85 mm とした。混和剤には、高性能減水剤を用いた。繊維には、長さ 6 mm、直径 0.012 mm のポリエチレン繊維を使用している。作製時の空気量は 4.3 %、スランプは 13.0 cm であった。また、20℃環境で封緘養生を行った材齢 29 日の材料の圧縮強度、引張強度、静弾性係数は、それぞれ 117 N/mm²、5.58 N/mm²、37.5 kN/mm² であった。

使用した D13 SD295 の材料試験の結果から得られた降伏点、引張強度、静弾性係数は、それぞれ 375 N/mm²、510 N/mm²、185 kN/mm² であった。さらに、材料試験の結果を用いて、土木学会コンクリート標準示方書に記載の等価応力ブロックの仮定に基づき算定した、本試験体の終局曲げ耐力は、31.2 kN であった。

2. 2. 曲げ載荷方法

載荷には容量 2MN のジャッキ 2 基を使用した。境界条件として、載荷点と支点にはピンローラー支承を使用し、水平方向の移動と回転を拘束しない条件とした。また、載荷点と支点には、試験体との間に幅 50 mm の鋼板を挿入し、設置面に荷重が均等に作用するように、鋼板と試験体の間は石膏で間詰めを行った。加力に際しては、初期載荷として 2 基のジャッキの合計荷重が 23 kN まで 3 回の繰返し載荷を行い、その後は終局まで単調に片押し載荷を行った。計測項目は、ジャッキ荷重、スパン中央変位、載荷点直下変位、鉄筋ひずみとした。ひずみゲージ位置は、図-1 に示す鉄筋のスパン中央位置である。

3. 試験結果

図-2 に、荷重-変位関係を示す。ここで、図-2 の縦軸は、ジャッキ 2 本の合計荷重であり、横軸はスパン中央変位である。また、表-2 に試験結果のまとめ、図-3 に両試験体の終局後のひび割れ性状をそれぞれ示す。本試験では、プリントと型枠打込みの作製方法の違いに依らず、中段鉄筋降伏後に図-3 に示す位置において、局所化したひび割れが拡大し、最大荷重を迎えた。最大荷重は、両試験体ともに設計断面耐力の値以上であった。ひび割れ局所化後は、変位のみが増大し、ひび割れ上部の材料の圧壊により終局を迎えた。プリント試験体、型枠打込み試験体ともに、スパン内で良好なひび割れ分散性を示したことから、鉄筋と材料の付着は良好であることが確認された。プリント試験体の最大荷重は型枠試験体と比較し、16 % 大きい値を示した。これは、試験体の形状誤差に加えて、材料がノズルから部材軸方向に押出されることで、部材軸方向に繊維が配向されやすくなったためと推察されるが、詳細なメカニズムは今後の分析が必要となる。

4. まとめ

材料押出方式の 3D プリンティング技術を用いて、軸方向鉄筋を有する梁部材を作製し、型枠打込みにより作製した試験体との構造性能を比較した結果、今回提案した製作方法を用いて、型枠打込みと同等の、耐荷性能・変形性能、ひび割れ分散性を有する梁部材を作製できることが確認された。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会:3D プリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会報告書、2021.