

3D プリンティングで外枠を構築した梁の曲げ・せん断载荷試験

東日本旅客鉄道（株）正会員 ○松田 聡美

東日本旅客鉄道（株）正会員 高見澤 拓哉

東日本旅客鉄道（株）正会員 井口 重信

會澤高压コンクリート（株）東 大智

1. はじめに

近年、セメント系材料を用いた 3D プリンティング技術が注目されている。同技術について構築後の性能に関する知見が少なく、構造部材への適用に関する検証が必要である。本稿では、3D プリンター（以後、3DPT）で外枠を製作し、内側に主鉄筋および帯鉄筋を組み立てた鉄筋かごを配置し、内部にコンクリートを打設して活用する方法を検討した。同方法にて製作した試験体と一体でコンクリート打設を行った試験体を用い、破壊形式をパラメータとした载荷試験により、構造部材への適用に関して実験的検討を行った。

2. 試験概要

試験体の詳細を図-1、試験パラメータを表-1 に示す。M-1、S-1 は一体でコンクリート打設を行った比較用の RC 試験体で、M-3、S-3 が 3DPT で外枠を製作した後に、内側に鉄筋かごを配置してコンクリートを充填した 3DPT 試験体である。RC 試験体は 400mm×200mm×2200mm とし、3DPT 試験体はできる限りこの寸法に近づけるように製作した。外枠はロボットアームタイプの 3DPT を用いた材料押出方式で製作し、試験体断面を 1 周として積層していき、1 層あたり幅約 45 mm、高さ約 20 mm のセメント系材料を約 2200mm まで積み上げた（図-2）。400mm×200mm では 1 周にかかる時間が短く積層が難しいことから、3DPT 試験体は外縁の平均寸法で約 440mm×240mm の断面寸法となった。試験パラメータは、破壊パターンによる違いを検証するため、それぞれ曲げとせん断の 2 種類とした。载荷は、試験体端部からそれぞれ 100mm の位置に支点を設け、中心から左右に 150mm の位置に治具を設置して载荷点とした。上部からアクチュエーターで加圧し、2 点の単調载荷を行った。各種材料試験の結果を表-2 に示す。

表-1 試験パラメータ

試験体名称	種類	破壊パターン	主鉄筋	帯鉄筋
M-1（基準）	RC	曲げ	SD345 D19	SD345 D13 @150
M-3	3DP+内部コン			
S-1（基準）	RC	せん断	SBPD B種1号 D25	SD295 D6 @150
S-3	3DP+内部コン			

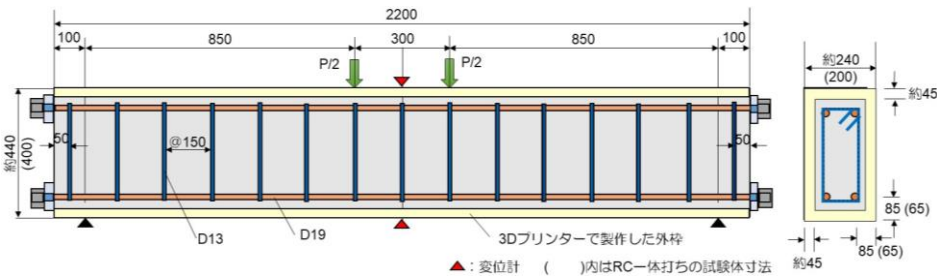


図-1 試験体詳細（曲げ）

表-2 各種材料試験結果

試験体	鉄筋		コンクリート	
	主鉄筋	帯鉄筋	RC	3DP枠
M-1	D19 SD345 $\epsilon_y=383.1$ (N/mm ²)	D13 SD345 $\epsilon_y=347.2$ (N/mm ²)	52.0 (N/mm ²)	-
M-3	D19 SD345 $\epsilon_y=383.1$ (N/mm ²)	D13 SD345 $\epsilon_y=372.1$ (N/mm ²)	51.1 (N/mm ²)	30.2 (N/mm ²)
S-1	D25 SBPD B種1号 $f_y=1000$ (N/mm ²)	D6 SD295 $\epsilon_y=429.3$ (N/mm ²)	52.0 (N/mm ²)	-
S-3	D25 SBPD B種1号 $f_y=1000$ (N/mm ²)	D6 SD295 $\epsilon_y=429.3$ (N/mm ²)	51.1 (N/mm ²)	28.0 (N/mm ²)

（図-2）。400mm×200mm では 1 周にかかる時間が短く積層が難しいことから、3DPT 試験体は外縁の平均寸法で約 440mm×240mm の断面寸法となった。試験パラメータは、破壊パターンによる違いを検証するため、それぞれ曲げとせん断の 2 種類とした。载荷は、試験体端部からそれぞれ 100mm の位置に支点を設け、中心から左右に 150mm の位置に治具を設置して载荷点とした。上部からアクチュエーターで加圧し、2 点の単調载荷を行った。各種材料試験の結果を表-2 に示す。

3. 試験結果

M-1 および M-3 の荷重－変位関係を図-3 に示す。M-1 では約 42kN でスパン中央から 80mm 付近の試験体下縁からひび割れが発生し、その後スパン中央上縁に向けて進展、スパン中央に発生したひび割れが上縁付近に達すると上縁が圧壊した。M-3 ではほぼ同様にひび割れ進展がみられたが、3DPT の積層の影響を受け、積層境界に沿ってひび割れが進展する傾向が強かった。また、スパン中央上縁付近での圧壊状況も層状のひび割

図-2 外枠製作状況



キーワード 3D プリンティング，载荷試験

連絡先 〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町 2 丁目 479 番地 JR 東日本研究開発センター TEL 048-651-2552

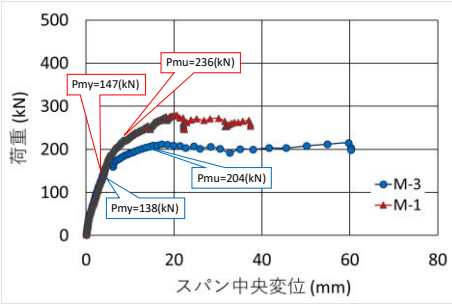


図-3 荷重－変位関係(曲げ)

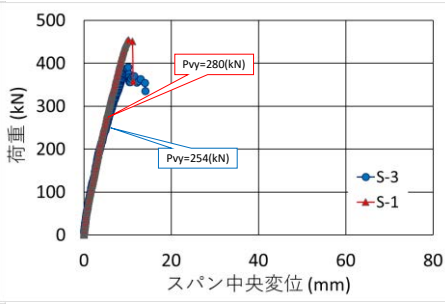


図-4 荷重－変位関係(せん断)

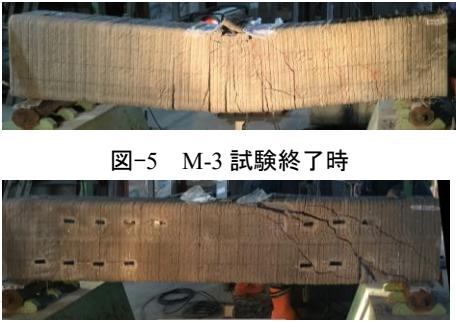


図-5 M-3 試験終了時

図-6 S-3 試験終了時



図-7 M-3 ひび割れ確認状況

(上:試験終了後, 下:外枠撤去後)

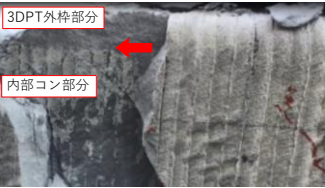


図-8 3DPT 外枠と内部コンの
一体化状況

れが多数みられ、M-1 とは異なった。次に、S-1 および S-3 の荷重－変位関係を図-4 に示す。S-1 では約 50kN で支点付近の試験体下縁からひび割れが発生し、その後、上縁の載荷点に向けて進展し、載荷支点から発生したひび割れが上縁に達して荷重が低下した。S-3 でもほぼ同様のひび割れ進展がみられた。

試験終了後に 3DPT で製作した外枠部分をはつり落として内部を確認したところ、M-3 および S-3 に発生したひび割れは 3DPT で製作した外枠と内部コンクリートを貫通しており、載荷中も外枠と内部コンクリートの肌離れのような状態は確認できなかった。また、外枠と内部コンクリートの界面の一体性は強く、ハンマーで容易にはがすことはできなかった (図-7、図-8)。

表-3 に曲げ・せん断耐力の計算結果と実験結果の比較を示す。Py は曲げモーメントにより引張側主鉄筋降伏時の荷重、Pu は圧縮縁コンクリートが終局ひずみに達したときの荷重、Pvy はコンクリート標準示方書の棒部材の設計せん断耐力の計算値である。いずれも材料試験で得られた諸数値を用いて算出した。M-1'、S-1'は M-1、S-1 を 3DPT 試験体と同じ断面寸法および外枠のコンクリート強度として算出したものである。せん断試験体については、S-1、S-3 とともに、Pvy の計算値は、実験値よりも大きく最大荷重よりも小さかった。曲げ試験体については、降伏荷重 Py は M-1 が計算値より実験値が小さいのに対し、M-3 は実験値が計算値より大きかった。また、終局荷重 Pu は M-1、M-3 とともに計算値が実験値よりも小さかった。

4. まとめ

本稿では、3DPT で外枠を製作し、外枠の内側に鉄筋かごを配置し、内部にコンクリートを打設して活用する方法を踏まえ、載荷試験により構造部材への適用に関して実験的検討を行ったところ、以下のことが分かった。

- (1) 3DPT で外枠を製作した M-3 については引張主鉄筋の曲げ降伏、圧縮縁での圧壊を迎えて終局に至った。S-3 についても帯鉄筋の降伏を迎えてせん断破壊に至った。
- (2) M-3 については、ひび割れが積層境界に発生および進展しやすい傾向がみられたが、S-3 については M-3 ほどの積層の影響は見られなかった。
- (3) 3DP 試験体について、内部のコンクリートと外枠の 3DPT 部分でひび割れ位置は一致しており、両者の界面での剥離等は見られなかった。
- (4) せん断試験体について、S-1、S-3 とともに、Pvy の計算値は、実験値よりも大きく最大荷重よりも小さかった。曲げ試験体について、降伏荷重 Py は M-1 が計算値より実験値が小さいのに対し、M-3 は実験値が計算値より大きかった。また、終局荷重 Pu は M-1、M-3 とともに計算値が実験値よりも小さかった。

参考文献

- ・土木学会：2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，pp.188-195，2018.3

表-3 計算値と実験値の耐力比較

試験体	計算値			実験値			
	Py (kN)	Pu (kN)	Pvy (kN)	Py (kN)	Pu (kN)	Pvy (kN)	Pmax (kN)
S-1	670.8	674.6	301.9	-	-	280.0	454.3
S-1'	593.6	648.7	306.9	-	-	-	-
S-3	515.8	595.8	333.9	-	-	254.0	391.1
M-1	156.9	176.0	503.8	147.4	236.1	-	279.1
M-1'	142.4	166.8	527.3	-	-	-	-
M-3	129.2	184.5	573.2	137.8	204.0	-	229.2