

論文 材料押出方式の3D プリンティング技術で作製した軸方向鉄筋を有する梁部材の曲げ性能評価

原 紘一朗*1・小倉 大季*2・山本 伸也*1・阿部 寛之*3

要旨: 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、静的4点曲げ載荷試験に供した。繊維補強セメント複合材料を使用し、せん断スパン比を7.1と3.3とした2ケースで、3D プリンティングと型枠打込みによる方法で試験体を作製して、構造性能を比較した。プリント試験体は、いずれのせん断スパン比でも型枠打込み試験体と同等以上の耐荷性能、変形性能を示し、最大荷重は既往の設計式で算定される値以上であることが示された。また、プリント試験体は良好なひび割れ分散性を示し、今回用いた作製方法により、鉄筋と積層体との付着が十分確保できることが認められた。

キーワード: 3D プリンティング, 繊維補強セメント複合材料, 材料押出方式, 曲げ破壊

1. はじめに

近年、建設分野における実構造物レベルでの3D プリンティング技術(付加製造技術: Additive Manufacturing)の実装に向けた研究開発が、国内外を問わず精力的に行われている¹⁾。建設分野における3D プリンティング技術には主に、フレッシュ状態のセメント系複合材料を、デジタルデータに基づき制御されたノズルから押し出して積層する「材料押出方式」が用いられる場合が多い。材料押出方式では、任意の曲面を有する部材を作製できるだけでなく、型枠工無で埋設型枠の作製や、コンクリート構造物の施工が見込まれることから、建設現場における施工の省力化・省人化や、環境負荷低減に貢献することに期待が寄せられている²⁾。

著者らの研究グループにおいても、これまで本手法を用いた研究開発として、3D プリンティング用材料の開発や構造体の作製を行ってきた³⁾。既報では、開発したセメント系複合材料を用いて作成した積層体の界面の一体性が良好で、力学特性についても型枠打込みと同等以上の性能を有することを示している^{4),5)}。一方で、材料押出方式を用いて、補強筋を有する構造部材を作製し、その構造性能を検討した事例⁶⁾は少なく、著者らにおいても未検討であった。

そこで、本研究では、材料押出方式による3D プリンティング技術を用いて、積層体内部に軸方向鉄筋を有する梁部材を作製し、構造実験に供することで、提案する作製方法の有効性を確認した。試験体は、せん断スパン比 a/d (せん断スパン: a , 有効高さ: d)をパラメータとし、異なる3種の作製方法を用いることで、作製方法の違いが曲げ性能に及ぼす影響についても評価を試みた。

2. 実験概要

2.1 実験ケース

表-1 に実験ケースを示す。本研究では、せん断スパン比 a/d の異なる2種の試験体を、「プリント:P」、「プリント(側枠有り):FP」、「型枠への打込み:F」の3種類の方法により作製を行った。図-1 に試験体の寸法、載荷・支持条件を示す。なお、本研究では、曲げ破壊を想定した a/d が7.1のケースをIシリーズ、せん断破壊を想定した a/d が3.3のケースをIIシリーズと呼称する。Iシリーズの試験体寸法は、部材長3900mm、高さ230mm、幅250mm、IIシリーズの試験体寸法は、部材長2500mm、高さ230mm、幅250mmとした。支間長、せん断スパンは、Iシリーズでそれぞれ、3100mm、1300mm、IIシリーズでそれぞれ、1700mm、600mmとし、等曲げモーメント区間、有効高さは両シリーズで、それぞれ、500mm、182.5mmとした。鉄筋は3段とし、IシリーズではD13のSD295、IIシリーズではD13のSD345を用いた。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

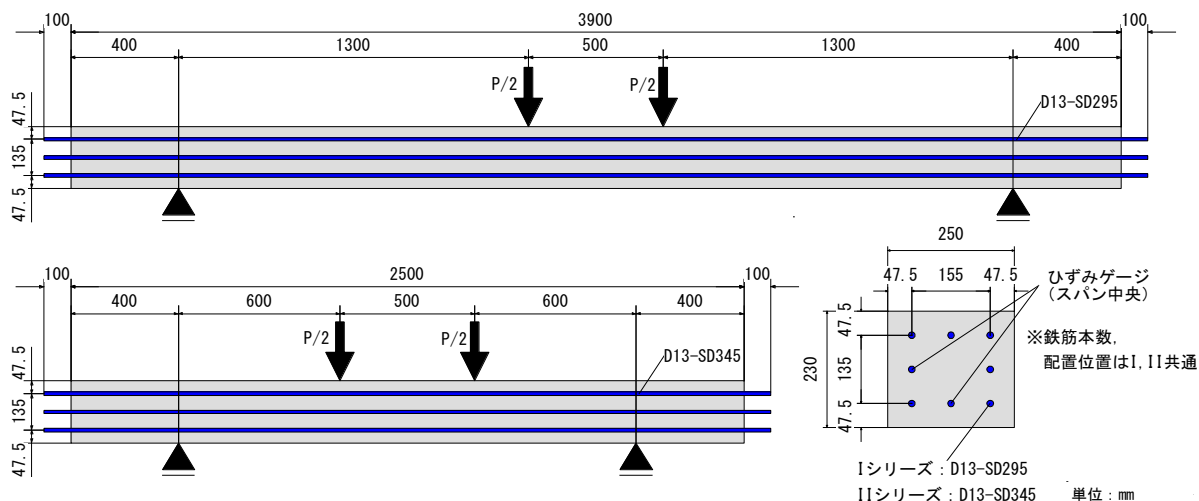
表-1 実験ケース

Case	a/d	作製方法	試験体数
I-P	7.1	プリント	2
I-FP		プリント (側枠有り)	1
I-F		型枠への打込み	1
II-P	3.3	プリント	1
II-FP		プリント (側枠有り)	1
II-F		型枠への打込み	1

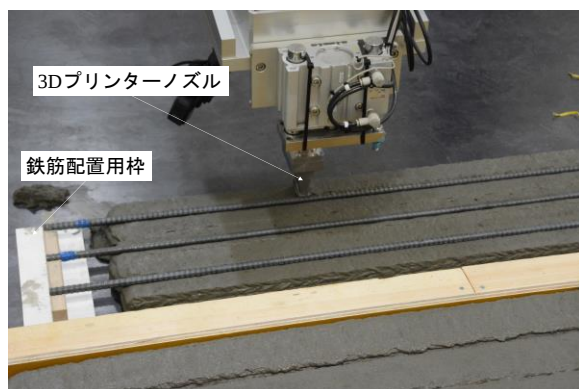
*1 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター 修士(工学) (正会員)

*2 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター (正会員)



図ー1 試験体概要（上：I シリーズ，下：II シリーズ）



写真ー1 試験体の作製状況

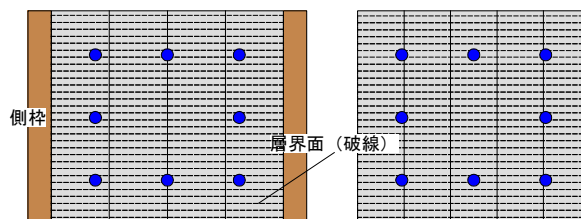
配置していない。

2.2 使用材料について

本研究では、著者らが開発した 3D プリンティング用の繊維補強セメント複合材料を使用した。本材料は、フレッシュ状態において積層性と圧送性を両立し、硬化後は高い力学性能と物質移動抵抗性を有する。使用材料は、水粉体比 (W/P) を 0.24、砂粉体比 (S/P) を 0.79、繊維混入率を 0.75Vol.% とした配合である。粉体には、普通ポルトランドセメント、シリカヒューム、フライアッシュ、石灰石微粉末を使用し、砂の最大粒径は 0.85mm とした。混和剤には、高性能減水剤（ポリカルボン酸系）を用いた。繊維には、長さ 6mm、直径 0.012mm のポリエチレン繊維を使用している。練混ぜには、容量 120L の 2 軸強制練りミキサーを使用し、練混ぜ試験は材料投入後から 6 分間とした。1 バッチあたりの製造量は 70L として作製を行っている。なお、本試験では 2 日間に分けて試験体の作製を行ったが、作製日 1 の空気量は 4.3%、スランプは 13.5cm、作製日 2 の空気量は同じく 4.3%、スランプは 13.0cm であった。

プリント（側枠有り）、型枠打込み：4列

プリント：5列



図ー2 フィラメント割付

2.3 梁試験体の作製方法

写真ー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 40mm×10mm のノズルを使用し、1 層 7.5mm 厚で 30 層のプリントを行った。本研究の条件では、積層厚が 7.5mm のため、鉄筋は層間に埋設できる D13 を使用した。また、ノズル移動速度とポンプ回転数を調整し、フィラメント（ノズルから押し出した線状の材料）の幅を抑制している。図ー2 に、プリントで作製する梁試験体のフィラメント割付を示す。I-P、II-P（プリント）はフィラメント幅が 50mm になるようにノズル移動速度やポンプ回転数を調整し、これを 1 層につき 5 列横に並ぶようにプリントしていき、幅 250mm の梁の造形を行った。I-FP、II-FP（プリント、側枠有り）では、プリントする梁試験体の側面に垂直な側枠を配置する。側枠を設けることにより、設計値通りの形状を満たすことを試みている。なお、側枠が無い場合と同様に 5 列で積層する場合、ノズルの外形がフィラメント幅を上回り、側枠とノズルが干渉してしまうため、干渉回避のために幅 63mm のフィラメント 4 列にてプリントを行った。

プリントの特性上、I-P、I-FP、II-P、II-FP の鉄筋は、以下の手順で配筋を行った。

- ① 鉄筋を配置する層までプリントが終了次第、プリン

表－2 試験体最外縁寸法と設計寸法に対する誤差

case	幅 (mm)	誤差 (%)	高さ (mm)	誤差 (%)
I-P-1	263.0	5.21	233.4	1.46
I-P-2	263.2	5.27	234.2	1.82
I-FP	251.4	0.57	236.3	2.72
I-F	250.6	0.25	232.8	1.20
II-P	262.3	4.91	233.8	1.63
II-FP	253.4	1.37	236.5	2.84
II-F	251.0	0.40	232.4	1.04

表－3 鉄筋の引張試験結果

	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
SD295	375	510	185
SD345	361	541	177

トを一時中断する。

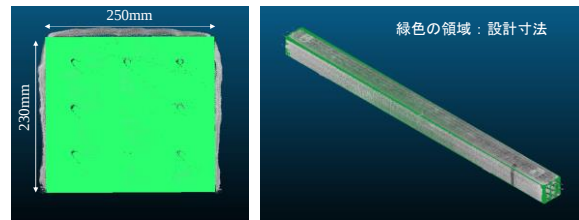
- ② プリント面に鉄筋の断面下半分を埋込むことで鉄筋を設置する。
- ③ プリントを再開後、材料を上から重ねることで鉄筋を埋設する。

なお、I-F、II-F は、配筋済みの型枠に、型枠パイプレータを使用しながらプリント試験体と同様の繊維補強セメント複合材料を打込み作製した。

作製後の試験体は、表面をビニルシートで覆い、翌日まで水分が散逸しない状態で保管した。その後は、ラップフィルムで覆い、空調環境の無い屋内ヤードに移動させ、載荷試験に供するまで封緘養生した。表－2 に各試験体の最外縁寸法と設計寸法に対する誤差を、図－3 に I-P-1 を対象にレーザースキャナ用いて取得した点群データと設計寸法(幅:250mm, 高さ:230mm, 長さ:3900mm)との比較を示す。プリント試験体では、図－3 のように、試験体表面が平滑にはならず、厳密な試験体寸法の評価が困難であることから、本実験では、各試験体の 2 点の支点位置及び、スパン中央位置において、ノギスを用いて計測した 4 辺の長さを平均化した値を用いて、試験体の形状を評価することとした。今回作製したプリント試験体は、側枠の有無にかかわらず、図－3 のように設計寸法と比較して断面が大きい形状となっている。

2.4 試験方法について

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 50mm の鋼板を挿入し、設置面に荷重が均等に作用するよう、鋼板と試験体の間は石膏で間詰めを行った。



図－3 点群データと設計寸法の比較(I-P-1)

表－4 繊維補強セメント複合材料の強度試験結果

作製日	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
作製日 1	104	5.07	37.1
作製日 2	117	5.58	37.5

表－5 各試験体の設計耐力

試験体 シリーズ	降伏荷重 (kN)	終局曲げ 耐力 (kN)	せん断耐力 (kN)
I (I-P-1)	25.1 (24.6)	31.2 (31.4)	46.4 (46.4)
II	51.5	65.8	46.4

加力に際しては、初期載荷として I シリーズでは 2 基のジャッキの合計荷重が 23kN、II シリーズで 30kN 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。(鉄筋の左右 2 か所) なお、本試験における変位計測では、部材側面に接続したチャンネル材に変位計を設置し、変位の計測を行っている。また、加力時に随時ひび割れスケッチを行った。

3. 実験結果

3.1 材料試験結果

表－3 に鉄筋の引張試験結果、表－4 に繊維補強セメント複合材料の材料試験結果を示す。本試験では、2 章で述べた通り、7 体の試験体を 2 日間に分けて作製しており、作製日 1 では I-P-1 及び II シリーズ、作製日 2 では I シリーズの作製を行っている。なお、繊維補強セメント複合材料の強度試験結果は、それぞれの作製日に対して、20℃封緘養生を行った試験体の材齢 29 日強度を示している。

3.2 載荷試験結果

表－5 に、コンクリート標準示方書 7 記載の等価応力ブロックの仮定に基づいて算出した両シリーズの各耐力を示す。せん断耐力の算定には、棒部材の設計せん断耐力式 7 を使用した。本研究では繊維を添加した材料を使

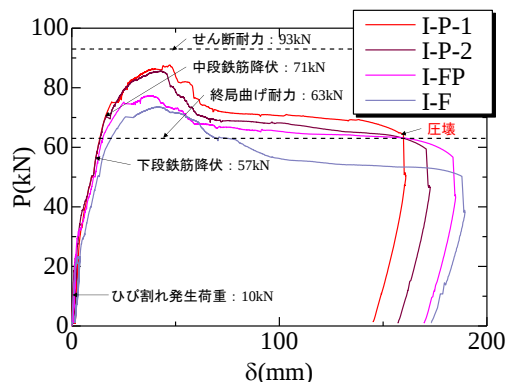


図-4 荷重-変位関係 (I シリーズ)

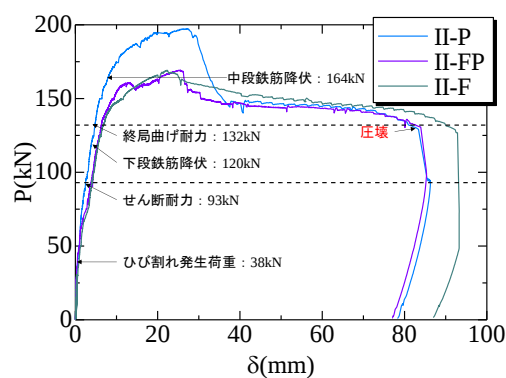


図-5 荷重-変位関係 (II シリーズ)

表-6 試験結果まとめ

Case	ひび割れ発生荷重(kN)	下段鉄筋降伏荷重(kN)	中段鉄筋降伏荷重(kN)	最大荷重(kN)	型枠試験体に対する最大荷重の割合(%)	最大荷重時変位(mm)	終局時変位(mm)
I-P-1	10	57	71	87.6	119	47.1	160
I-P-2	14	57	75	85.6	116	43.5	171
I-FP	23	59	74	77.3	105	39.0	183
I-F	15	48	66	73.6	-	41.8	188
II-P	38	120	164	197.5	117	27.3	83.4
II-FP	36	104	150	169.4	100	25.4	83.9
II-F	28	96	136	169.3	-	22.3	92.9

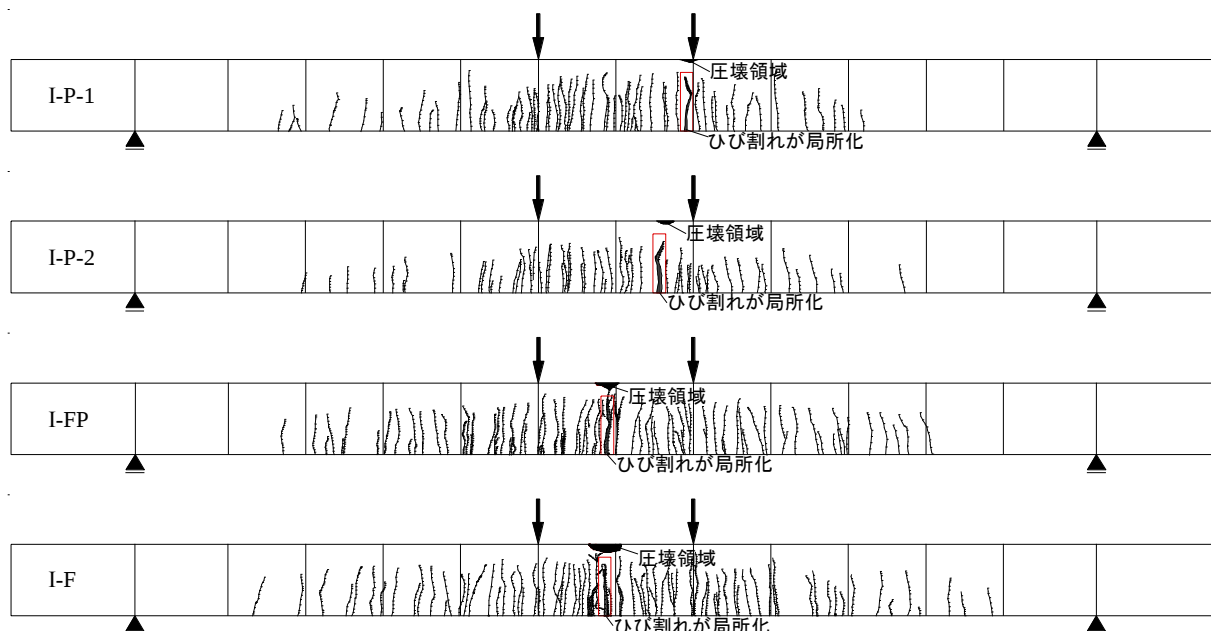


図-6 ひび割れ図 (I シリーズ)

用しているが、その補強効果の貢献分は考慮できていない。試験体の寸法には、設計上の寸法を使用し、材料物性値には表-3、表-4の値を用いた。なお、本計算では部材係数を全て1.0としている。

図-4,5に各シリーズの荷重-変位関係を示す。ここで、

両図の縦軸はジャッキ2本の合計荷重、横軸はスパン中央にて計測した変位値であり、図中の各耐力は、表-5に示した設計耐力に基づき記載している。さらに、表-6に各試験体の試験結果をまとめた。なお、表中のひび割れ発生荷重は、図-4,5の荷重-変位曲線の剛性が初期剛性

から低下した荷重値として定義しており，下段鉄筋降伏荷重，中段鉄筋降伏荷重は，計測点におけるひずみが材料試験より得られた降伏ひずみに達した時点での荷重を記載している。また，図-6 に I シリーズのひび割れ図を示す。ひび割れ図には，終局時のひび割れ性状を記載している。

I シリーズでは，作製方法に依らず全試験体で設計耐力以上の最大荷重を示す結果となった。I-P 試験体は 2 体作製したが，それぞれの降伏荷重，最大荷重，終局時変位の差異は小さいことが確認された。また，I シリーズでは全試験体において，中段鉄筋降伏後，図-6 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。ひび割れ局所化後は，荷重の増加は見られず，載荷に伴って変位だけが增大し，局所化したひび割れ上部の圧壊により終局を迎えた。最大荷重に着目すると，プリント試験体の最大荷重は型枠試験体に対して，最大で 19% 大きく，表-2 に示した試験体寸法の誤差以上の差が確認された。これは，プリント試験体では，型枠打込みとの製作方法の違いにより，繊維の配向や分散性が変化し，繊維による補強効果が向上した可能性があると考えられる。プリントでは，材料がノズルから部材軸に沿って押し出されることにより，部材軸方向に繊維が配向されやすくなったと考えられるが，詳細なメカニズムは今後の検討課題としたい。

また，図-6 に示す通り，全試験体において，スパン内で微細なひび割れが多数分散していることが確認でき，鉄筋と積層体間の付着が作製方法に関わらず，良好であることが認められた。プリント試験体においては，フィラメント同士の境界付近に鉄筋を埋設したケースもあったが，付着に与える影響は確認されなかった。なお，I-P-1,2 試験体は，表面の凹凸の影響により，ひび割れの視認性が低下したため，0.06mm 以下の微細なひび割れが目

視で確認できなかった可能性がある。終局後の I-P-2 のひび割れ面の状況を写真-2 に示す。全ての試験体において，局所化したひび割れ面の全面に繊維が架橋していることが目視で確認でき，プリント試験体において，均一に繊維が分散していることが認められた。

II シリーズにおいても，図-5，表-6 に示す通り，作製方法に依らず，設計値以上の最大荷重が確認されている。また，I シリーズ同様に，中段鉄筋の降伏後，ひび割れが局所化し最大荷重に達し，その後は変形のみが進展し，局所化したひび割れ上部の圧壊により終局を迎えた。なお，II シリーズは，せん断破壊を想定して試験を行ったが，I シリーズ同様，曲げひび割れが卓越し，全ケース

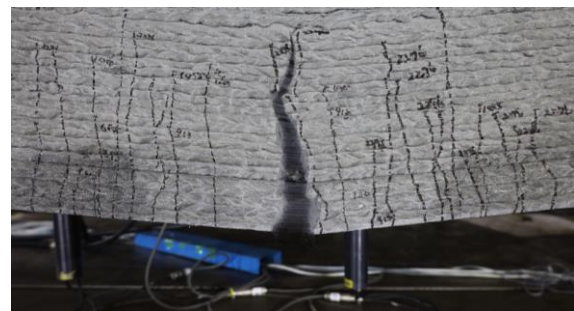


写真-2 終局後の試験体 (I-P-2)



写真-3 終局後の試験体 (II-P)

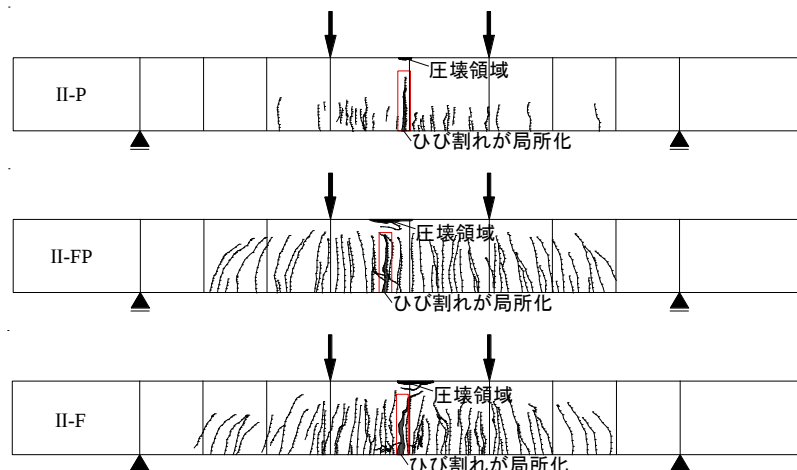


図-7 ひび割れ図 (II シリーズ)

において、圧縮縁の圧壊（曲げ破壊）により終局を迎える結果となった。

図-7 に II シリーズのひび割れ図、写真-3 に終局後の II-P 試験体を示す。本試験では、せん断補強鉄筋は配置していないにも関わらず、曲げ破壊に至った要因として、材料のせん断ひび割れに対する抵抗性が高かったことに加え、添加した短繊維の補強効果が作製方法に依らず機能したためと考えられる。なお、図-7 では、II-P 試験体のひび割れ分散性が他の試験体より小さいように見受けられるが、I シリーズ同様、積層面の凹凸によって微細なひび割れが視認できなかったためと考えられる。また、最大荷重に着目すると、II-P 試験体の最大荷重は、II-FP、II-F 試験体を 17%程度上回っている。

両せん断スパン比の試験体を通じて、プリント試験体では、提案した試験体の作製方法により、軸方向鉄筋と積層体の付着が良好であり、高いひび割れ分散性を示す梁部材を作製できることが確認された。

4. まとめ

本研究では、材料押出方式による 3D プリンティング技術を用いて、積層体内部に軸方向鉄筋を有する梁部材を作製し、提案する作製方法の有効性を確認すると共に、作製方法による曲げ性能の差異を検討した。以下に、本研究のまとめを記載する。

- 1) 提案した作製方法により、材料押出方式の 3D プリンティング技術を用いて作製した梁試験体は、異なる 2 つのせん断スパン比においても、型枠打込みにより作製した試験体と同等以上の耐荷性能と変形性能を有することが確認され、その最大荷重は、既往の設計式で算定される値以上であった。
- 2) せん断スパン比 7.1 の試験体シリーズでは、全ての試験体において、圧縮縁材料の圧壊により終局が確認され、作製方法に依らず、材料と鉄筋の良好な付着性能に起因する、高いひび割れ分散性能と、部材としての靱性が確認された。

- 3) せん断スパン比 3.3 の試験体シリーズでは、せん断破壊先行を想定していたものの、材料のせん断ひび割れに対する抵抗性が高かったことから、曲げ破壊により終局を迎えたが、作製方法の違いによる構造性能の差は見られなかった。
- 4) 両せん断スパン比のシリーズを通じて、プリント試験体の最大荷重は型枠試験体を上回り、ひび割れ分散性状や破壊性状に有意な差は見られなかった。提案した試験体の作製方法により、高い曲げ性能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) 丸屋剛, 石田哲也: 3D プリンティングの技術開発の現状と展望, コンクリート工学, Vol.59, No.2, pp.173-180, 2021.
- 2) 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.
- 3) 山本伸也, 小倉大季, 阿部寛之, 菊地竜: 建設用 3D プリンティング技術の開発とその実用化, コンクリート工学, Vol.59, No.8, pp.655-660, 2021.
- 4) 小倉大季, 阿部寛之, 山本伸也, 菊地竜: 3D プリンティング技術で積層造形した繊維補強セメント複合材料の力学特性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1379-1384, 2021.
- 5) 阿部寛之, 小倉大季, 菊地竜, 山本伸也: 3D プリンティング技術で積層造形した繊維補強モルタルの積層界面の一体性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1552-1557, 2022.
- 6) Asprone, D. et al.: Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 112, No. January, pp. 111-121, 2018.
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, 2017 年制定