

論文 3DCP で積層した RC はりの曲げ破壊性状

宮島 朗^{*1}・加藤 竜祥^{*2}・藤 駿哉^{*3}・國枝 稔^{*4}

要旨: 材料押出方式の 3D プリンティング技術で水平と垂直に層間を有し、繊維を混和しないモルタルを用いて作製した RC はり部材に対して曲げ試験を行った。曲げ耐力の算定結果は安全側となったが、耐力算定にあたりその前提条件について考察した。断面内においては平面保持が成立し、ひび割れの進展に伴い中立軸が上昇したこと、終局時の圧縮縁のモルタルのひずみが 3000μ 程度であり曲げ破壊を呈していたことを明らかにした。また、鉄筋位置において、フィラメント層間剥離が複数発生認められたため、層間付着強度を測定したところ、モルタルの割裂引張強度の 30%程度であった。

キーワード: 3DCP, 曲げ破壊, 平面保持, 圧縮ひずみ, 層間付着強度

1. はじめに

近年, 3D コンクリートプリンティング (以下, 3DCP) 技術を用いた橋梁, 大型のキャノピーや 3DCP で街を創出するなど多くの施工例が紹介されている。3DCP は中国, 中東や欧州などでは加速的に本技術の開発が進められており, 実用化の段階と言っても過言ではないのに対して, 日本は国土面積が世界の 0.25% でありながら, マグニチュード 6 以上の地震発生回数は世界の約 1 割を占める世界有数の地震国¹⁾であることに起因して, 建築基準法をはじめとする多くの基準を満たす必要があるなど, 多くの規制の中で本技術の実用化が難しい状況下ではある。しかし, JCI の 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²⁾や土木学会 3D プリンティング技術の土木構造物への適用に関する研究小委員会³⁾など産官学のオールジャパンで 3DCP の発展に向けての取り組みが加速化している。将来的には鉄筋により補強された部材の適用も期待されており, 積層体と鉄筋との複合部材の破壊性状に関する知見を蓄積しておく必要がある。

本研究では, 3DCP を用いて作製した軸方向鉄筋を有するはり部材の曲げ破壊性状を実験的に検証し, 中立軸位置の変化や圧縮縁のひずみ, ならびに層間付着強度の観点での考察を行った。

2. 実験の概要

2.1 3DCP システムの概要

本研究で用いた 3D プリンタを写真-1 に示す。プリンタ本体には六軸ロボットアームを用い, その先端に, 直径 25mm のステンレス製の円筒管を取付けて吐出ノズルとした。3DCP の構造物は, 層間の付着が弱点となることが容易に想像でき, 多くの研究は層間数を低減するよ

うにフィラメントのサイズや形状の最適化を行っている場合が多い。本実験では層間が各種強度に及ぼす影響を把握することを目的の一つとしているため, 層間を付与するために小径の丸形ノズルを用いた。

また, モルタルを圧送するポンプに求められる性能は, 脈動することなく一定量を送ることであるため, 本実験では回転容積式一軸偏心ねじポンプを用いた。

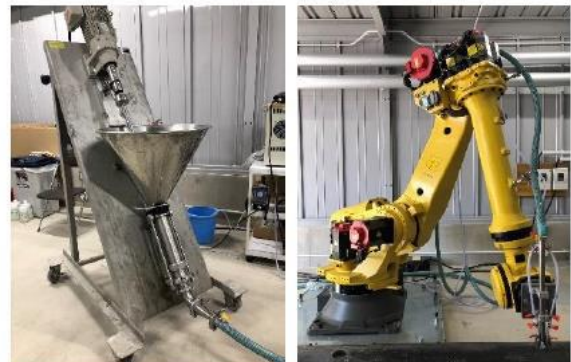


写真-1 本研究で用いたシステム

2.2 使用材料

既往の研究²⁾の多くは, モルタルに繊維を混和した材料を用いているが, 鉄筋による補強を前提とし, かつコスト削減を目的に, 本研究では著者らの既往の研究⁴⁾で用いた繊維を混和していないモルタルを用いて試験体を作製した(表-1)。水結合材比(W/B)を 32.2%として, 結合材は早強ポルトランドセメント, 混和材(フライアッシュ II 種)ならびにエトリンガイト・石灰複合系の膨張材, 細骨材結合材比(S/B)を 69%とした珪砂 5 号を用いた。なお, 計量の手間を省くため, 結合材と細骨材を予め調合したプレミックス材 (20kg/袋)を用いた。また, 混和剤はリグニンスルホン酸系の AE 減水剤を用いて, JIS R 5021 に準じた 15 打フロー値が $160\pm 5\text{mm}$ となるよ

*1 岐阜大学大学院 工学研究科工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科

*3 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科環境社会基盤工学専攻

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 博士(工) (正会員)

表-1 モルタルの配合

水	単位量 (kg/m ³)			5号珪砂
	セメント	結合材	膨張材	
336	720	310	20	720

※混和剤は結合材×0.2w%

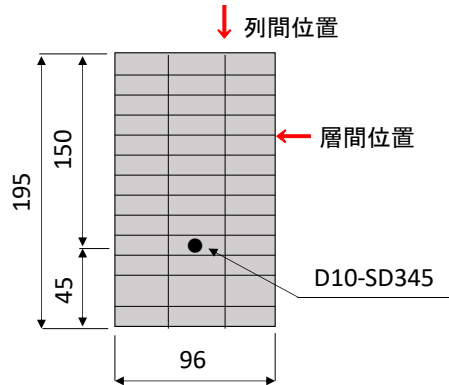


図-1 フィラメントの割付図 (単位: mm)



写真-2 積層の状況



写真-3 試験体一覧

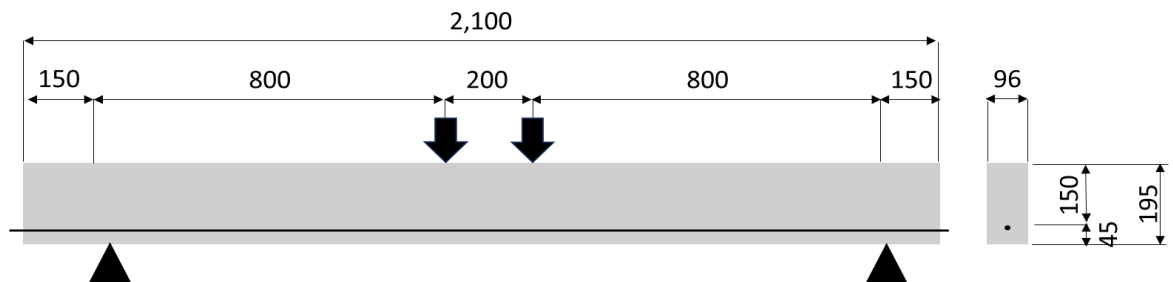


図-2 曲げ試験概要図 (単位: mm)

う添加量を調整した。

練混ぜは、ミキサ (容量 50 リットル、パン型強制練り一軸ミキサ) にプレミックス材 3 袋を投入して空練りを行い、減水剤が混合された水を投入して 180 秒間練り混ぜた。空気量は 2 リットルの単位容積法を用いて測定した結果 1.1%であった。

2.3 試験体の作製

試験体の寸法は長さ 2100mm×高さ 195mm×幅 96mm として計画した。モルタルの吐出量は 0.02 リットル/秒、ノズルの移動速度は 40mm/秒である。なお、隣り合うフィラメント間に空隙ができることは構造上望ましくない。そのため先行してプリントしたフィラメントに 1mm 程度重なるようプリントした (写真-2)。これにより一層あたり 3 列プリントして幅 96mm のはりの造形を行った (図-1)。また、積層にあたっては自立性を目的としてケイ酸ナトリウム系の急結剤を噴霧した。噴霧にはソレノイド式の定量ポンプを用いて、フィラメントの吐出ノズルの前後に直径 3mm のホースを噴霧ホースとして取付け、フィラメントの積層と同時にフィラメントの層間および列間へ継続的に噴霧した。なお、急結剤の噴霧量は 70ml/分である。

試験体の種別は鉄筋の有無 (以降、有筋試験体 (No.1～3)、無筋試験体 (No.4～6) と称す) により各 $N=3$ 本の計 6 本を作製した。有筋試験体は、SD345 の D10 の鉄筋を試験体の下縁から純かぶり 45mm に試験体幅方向の 3 列のフィラメントの中央のフィラメント上部に配置した (図-1)。これは、鉄筋の配置位置を検討する予備実験で、フィラメントの列間に鉄筋を配置した場合に、付着が十分ではなく割裂ひび割れが生じて終局を呈したことから、本試験では列間ではなく、フィラメント上に鉄筋を配置することとした。鉄筋の配置にあたっては、3 層まで積層した後、予め鉄筋の両端 (モルタル試験体の外側) にかぶり 45mm のスペーサを取り付けた鉄筋をフィラメント上に配置して、その後 13 層まで順次積層を行った (写真-3)。

なお、作製した試験体は、室温 20℃の環境下で 24 時間気中養生の後 14 日間湿布養生を行い、その後、同環境下で載荷試験を行う材齢 27 日まで封緘養生を行った。また、圧縮強度試験用の試験体として、 $\phi 50 \times 100$ mm のプラスチック製型枠に練り混ぜたモルタルを充填して作製するとともに、RC はりと同条件下で養生を行った。

2.4 試験方法

曲げ載荷試験の概要図を図-2に示す。支点の条件は、両端ローラー支持とし、載荷スパン 1800mm、等モーメント区間 200mm の曲げ試験とした。計測項目は、荷重（ロードセル容量 100kN、精度 30N）と載荷点変位（変位計容量 50mm、精度 1/200mm）とした。また、載荷中に各はり高さにおける軸ひずみを測定するために、試験体中央の側面のフィラメント（13 層）にひずみゲージ（長さ 30mm）を貼り付けた。さらに、上縁の圧縮部のモルタルにも同様にひずみゲージを貼付した。

2.5 層間強度の測定

試験体の最上縁および最下縁のフィラメントの水平層間付着強度を把握することを目的に、曲げ試験で用いた無筋試験体の試験片を対象に建研式接着力試験器（治具寸法 40×40mm）を用いて層間の付着力を確認した。治具を接着し、接着剤の硬化後に対象とする層間までコンクリートカッターにより切込みを入れ、引張力を作用させた。試験片はそれぞれ $N=5$ とし、最大値と最小値を棄却し $N=3$ で判断することとした。

3. 実験結果

3.1 試験結果の概要

(1) 材料試験の結果

前項で示した円柱供試体を用いた圧縮強度試験によるモルタルの圧縮強度（材齢 27 日）の結果を表-2に、はりに配置した鉄筋の引張強度試験の結果を表-3に示す。

表-2 モルタルの硬化後の試験結果

	圧縮強度 (N/mm^2)	割裂引張強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)
σ_{27}	86.3	5.4	33.5

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)
SD345	392	545.3	202

(2) 無筋試験体の曲げ載荷試験結果

無筋試験体（No.4～6）を用いて曲げ載荷試験を実施した結果、平均最大荷重が 5.55kN、標準偏差 0.59kN、変動係数は 0.11 であり大きくばらつくことのない結果を得た。なお、ひび割れははり中央部に 1 本のみ発生した。曲げ強度を算出する際の試験体の断面積は、安全側の評価につながる各辺の凸を結ぶ最大面積⁹⁾を用いた。その結果、曲げ強度の平均値は $4.10\text{N}/\text{mm}^2$ となった。写真-4に、曲げ試験後の破断面の状況を示す。層間、列間に大きな

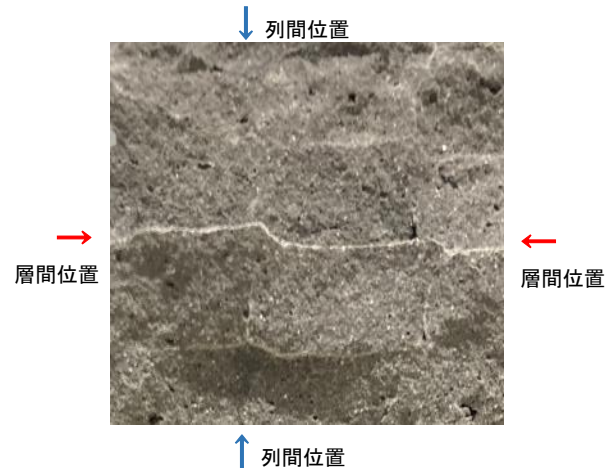


写真-4 無筋試験体の断面の拡大写真

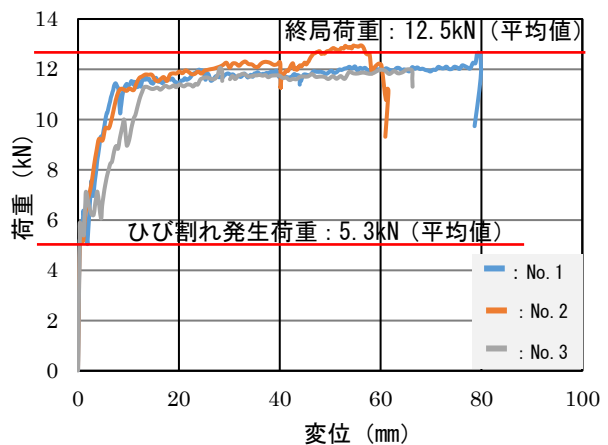


図-3 有筋試験体の荷重-変位曲線

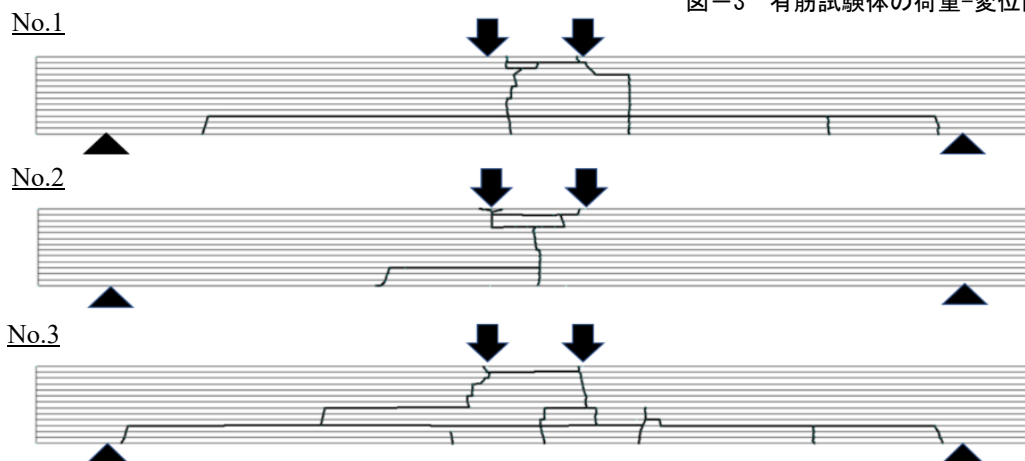


図-4 有筋試験体のひび割れ図

隙間も生じておらず、目視によれば比較的均質な硬化体が積層できているといえる。

(3) 有筋試験体の曲げ載荷試験結果

写真－5～7 に示すように、有筋試験体（No.1～3）の曲げ試験から得られた荷重-変位曲線を図－3 に示す。図中に記載したひび割れ発生荷重と終局荷重は、試験体 3 体の本実験で得られたデータの平均値である。また、曲げ試験終了時の試験体のひび割れ発生状況を図－4 に示す。いずれの RC はりについても、曲げひび割れが等モーメント区間に発生し、鉄筋が降伏した後に最大荷重となった。初期ひび割れ発生後においては、荷重の増加に伴って、曲げひび割れは上部へ進展したものの、鉄筋位置の積層界面に沿ったひび割れ（層間剥離）が発生した。図－4 に示すように、ひび割れの形状は各試験体で異なり、No.1 と No.3 は載荷スパン全長にわたるほど鉄筋位置において層間剥離が発生した。

終局時には、No.2 において上縁のモルタルの圧壊が目視により確認でき、通常のコングリートをを用いた RC はりの曲げ破壊に類似した破壊性状となった。一方、No.1 と No.3 に関しては、終局以前に上縁から 1 層目あるいは 2 層目に積層部のひび割れ（剥離）が観察されたことから、そのひび割れ位置より下層のモルタルが圧縮力を分担し、結果として中立軸位置が下がったため、No.2 に比べて No.1 と No.3 の耐力がやや低くなったと推察される。

3.2 耐力算定に関する考察

表－2 および表－3 の使用材料の特性値を用いて終局耐力を算出したところ $P_u=10.0\text{kN}$ であった。先述のとおり、本実験で得られた耐力の平均値は 12.6kN であったことから、1 割程度実験値が大きく、従来の曲げ耐力の計算値は安全側の結果を与えている。ここで、3DCP を用いて積層した RC はりの耐力を算定するにあたり、その前提となる平面保持、上縁モルタルの圧壊の有無、および鉄筋とモルタルとの付着に関して考察を行った。



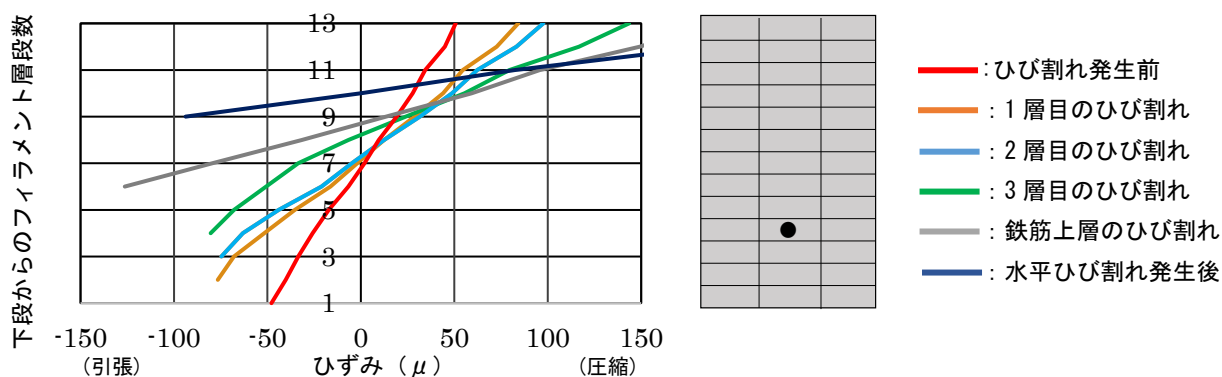
写真－5 No. 1 の試験体（載荷時）



写真－6 No. 2 の試験体（載荷時）



写真－7 No. 1 の試験体（終局後）



図－5 等モーメント区間でのフィラメント側面の変形状態 (No. 1 試験体)

(1) 平面保持について

図-5 に示した各層のフィラメント側面のひずみは、縦軸にフィラメント層の段数（1～13 層）と横軸にひずみとした。ひび割れ発生前から発生後の挙動を確認すると、ひび割れ発生前のはり試験体の中立軸が 7 層目であるのに対して、ひび割れ発生後には中立軸が上層に移行していることが確認できる。これは、従来の鉄筋コンクリート製のはりと同様な挙動を示しているとともに、平面保持が成立しているといえる。すなわち、この荷重レベルまでは、層間のすべりも生じておらず力学的には一体化しているといえる。

(2) 上縁モルタルに生じる圧縮ひずみについて

図-6 に上縁部のモルタルの圧縮ひずみと載荷点変位の関係を示す。No.2 は最大圧縮ひずみ約 2900 μ 程度で急激にひずみが低下し、通常のコンクリートを用いた RC はりの圧壊時と類似したひずみの変化を示している。また、No.1 についても、得られた最大圧縮ひずみの値が約 3500 μ であり、最後には除荷過程に入っていることから、測定位置以外のモルタルが圧壊したと推察できる。なお、No.3 は他の試験体の圧縮ひずみと比較すると 1100 μ 程度と非常に小さな値であり、最上層付近の積層部のひび割れ（剥離）が先行したためと考えられる。このように圧縮側において層間剥離が生じる破壊形態が生じるのが層間付着強度が小さい場合における 3DCP 独特の破壊と捉えることができる。

また、図-7～9 に各試験体の上縁の圧縮ひずみ、上縁から 1 層目（図中：最上層）と 2 層目（図中：最上層-1）の側面の圧縮ひずみを示す。上縁のモルタルが圧壊した No.1 および No.2 は上縁と最上層の側面とのひずみに大きな違いがあり、上縁部にひずみ勾配が生じていることが確認できる。一方、No.3 においては、上縁と最上層にひずみ差が生じていない。先述のとおり、上層部付近にて層間剥離が生じたためである。田中らの研究⁶⁾では、人為的に損傷部を設けたはり試験体の位置と規模によっては無損傷部材よりも大きな変形性能を呈する場合があると述べている。ここでいう損傷を積層間の付着と捉えると、No.3 試験体は他の試験体と比べ、鉄筋降伏前に発生したひび割れ（層間剥離を含む）が長く、本数も多いためひび割れにおけるエネルギー消費が大きく、部材としての脆性的な破壊を防ぐことができたと考えられる。

(3) 鉄筋に沿った層間剥離をもたらす層間付着強度について

曲げ試験後の無筋試験体を用いて 2.5 節に示した方法により層間の付着強度試験を行った。対象とした箇所は最上層間（図-10：朱線）と最下層間（図-10：黄線）とし、図-10 における上下方向の付着強度を測定した。

表-4 に試験の結果を、写真-10 に剥離した界面の状

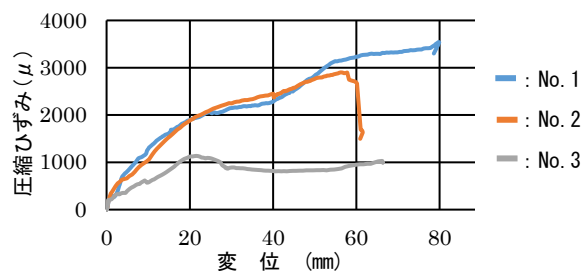


図-6 上縁の圧縮ひずみ-変位 曲線

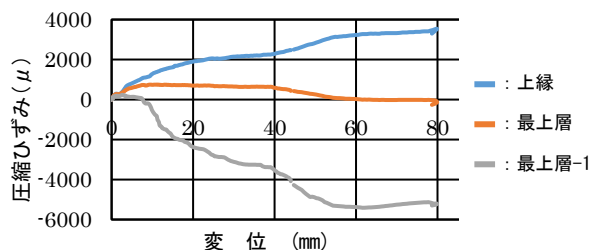


図-7 No. 1 圧縮ひずみ-変位 曲線

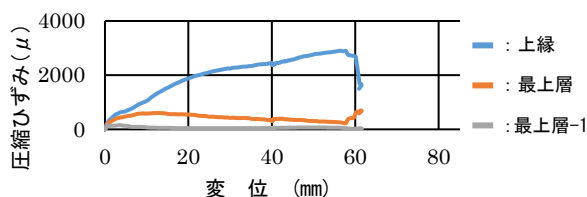


図-8 No. 2 圧縮ひずみ-変位 曲線

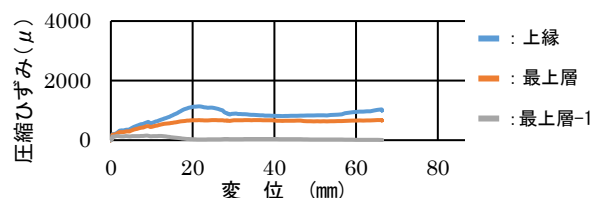


図-9 No. 3 圧縮ひずみ-変位 曲線

表-4 層間付着強度試験結果

	下 1 ～ 2 間	上 12 ～ 13 間
平均荷重 (kN)	2. 69	2. 19
層間付着強度 (N/mm ²)	1. 68	1. 37
標準偏差 (N/mm ²)	0. 14	0. 09
変動係数	0. 05	0. 04

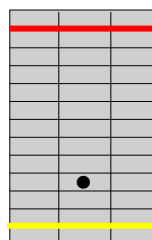


図-10 対象箇所



写真-10 剥離した界面の状況

況を示す。なお、破断位置は全て層間位置と一致した。

上段の層間付着強度は下段のそれと比較すると、20%程度低下していることが分かる。これは、下層から上層へ積層するごとに上載荷重が増し、下層の層間が圧密されるために層間付着強度が大きくなったと考えられる。

本実験で得られた層間付着強度（表-4）と表-2で得られた割裂引張強度との強度比（層間付着強度/割裂引張強度）は30%程度であり、既往の報告書²⁾と比較すると非常に小さい値となった。

写真-4に示した積層体の断面において、層間にやや白い層を確認することができる。これは、自立性の向上を目的に積層時に噴霧しているケイ酸ナトリウム系の急結剤であると推測する。既往の研究⁷⁾によると、ケイ酸ナトリウムを主成分とする特殊混和剤をコンクリートに混入することにより、強度に及ぼす影響はないが、ひび割れ内部に析出物が観察されたと述べている。ケイ酸ナトリウムは浸透性コンクリート改質材の成分として使用されることから、層間の付着に何らかの影響を及ぼしている可能性が考えられるため、本件に関しては今後の検討課題としたい。

4. まとめ

鉛直と水平に層間を有し、繊維を混和しないモルタルを用いて軸方向鉄筋を有するはり部材に対して曲げ試験を行った。本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 荷重の増加に伴い、等モーメント区間内に曲げひび割れが発生し、鉄筋降伏後に終局となる曲げ破壊性状を呈した。なお、初期ひび割れ発生後の荷重の増加に伴いひび割れの長さはやや大きくなるものの、鉄筋位置近傍の積層部の層間剥離が大きく進展した。
- 2) 初期ひび割れ発生後においても、ひび割れが発生していない断面内においては平面保持が成立していることが確認できた。
- 3) 終局時において、上縁のモルタルが圧壊する試験体もあったが、3本のうち1本が上縁から2層分下がったところでひび割れ（層間剥離を含む）が発生して終局を迎えた。当該試験体は本来であれば曲げ耐力は小さくなるはずであるが、ひび割れにおけるエネルギー消費が大きいことに起因して部材としての脆性的な破壊を防ぐことができたと考えられる。
- 4) 上縁モルタルに生じる圧縮ひずみは、圧壊した試験体は一般的なRCはりと同様に3000 μ 程度であるが、層間が剥離した試験体は1000 μ 程度と小さな値を示した。

- 5) 鉄筋近傍の層間剥離が生じたことから、層間付着強度を調べたところ、モルタルの割裂引張強度に比べて約30%と小さいことが確認できた。また、上層と比較して下層の層間付着強度が約20%程度大きく、下層は上層の自重により圧密されたと推察された。

本実験の結果は、積層体の層間付着強度が比較的低い場合の曲げ破壊形態を検討したものであり、材料や3DCPの組合せによっては、十分な層間付着強度を有するものがある点について付記する。

謝辞

本研究成果は、岐阜大学「建設用3Dプリンティングによる部材造形技術の高度化に向けた研究」の参加企業（安部日鋼工業、昭和コンクリート工業、東海コンクリート工業、日本コンクリートならびに丸栄コンクリート工業（五十音順））に支援を受けたものである。ここに記し感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 2022 河川データブック参照：
https://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen_db/pdf/2022/0-1all.pdf（閲覧日：2023年12月17日）
- 2) 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：(公)日本コンクリート工学会，2021年11月，p.p.90-101
- 3) 3Dプリンティング技術の土木構造物への適用に関する研究小委員会(364委員会)成果報告書：(公)土木学会，2023年10月
- 4) 藤駿哉，石原弘登，宮島朗，國枝稔：建設用3Dプリンタによるフィラメントの強度評価 土木学会全国大会第78回年次学術講演会 V-420 p.p.1-2 2023
- 5) 宮島朗，藤駿哉，石原弘登，國枝稔：建設用3Dプリンティング技術を用いて作製した部材の強度特性 プレストレストコンクリート工学会 第32回シンポジウム論文集 p.p.613-618 2023
- 6) 田中泰司，岸利治，前川宏一：曲げせん断力を受けるRC部材の人工亀裂装置とせん断補強筋の併用効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，p.p.349-354,2005
- 7) 渕田安浩，田口信子，人見尚，片岡弘安：ケイ酸ナトリウムによるコンクリートの自己修復効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，p.p.349-354,2012