

# 論文 3D プリンタとロボットを用いた PCa ケーソン基礎の自動化製造に関する研究

北村 勇斗\*1・石関 嘉一\*2・高橋 敏樹\*3・西村 俊亮\*4

**要旨:** セメント系材料を使用した 3D プリンタとロボットアームを用いたコンクリート自動打設システムより構成される RC 構造物の自動化製造システムを開発した。システムの適用対象としてプレキャストケーソン基礎を選定して部材である RC 製プレキャストブロックを製造し、施工性に関する試験を実施した。さらに、プレキャストブロックを連結した柱状体の曲げ試験を実施し、耐荷性能の試験を実施した。その結果、本システムにより、プレキャストブロックの製造が可能であること、製作した柱状体は構造物として十分な耐荷力を有することが明らかになった。

**キーワード:** 3D プリンタ, ロボットアーム, 自動化, プレキャストコンクリート, ケーソン

## 1. はじめに

コンクリート工事において、型枠の組立・解体やコンクリート打設の多くは人力によって行われている。今後、国内の労働力不足が加速することで、コンクリート構造物の供給や品質確保が困難になると考えられる。解決策の一つとして、3D プリンタや自動化施工が必要となる。

プレキャストコンクリート工法は工場では部材をあらかじめ製造した後、現場で組み立てる工法である。このうち、プレキャストケーソン基礎は単体または分割で製作した RC 造のプレキャストブロック（以下、PCa ブロック）を施工地点で接続することで構築され、橋梁の基礎等として用いられる。PCa ブロックは、その製造時に使用する鋼製型枠の製作費が数千万円と非常に高価である。さらに、1 物件当りの鋼製型枠の転用回数が少ない場合は 1 部材当りの型枠のコストが高くなる。

筆者らは、3D プリンタとコンクリート自動打設システムより構成される RC 構造物の自動化製造システムを開発している<sup>1)2)</sup>。本システムでは、3D プリンタ用特殊モルタル（以下、3D プリンタモルタル）をプリントすることで、モルタル造外殻を構築する。さらに、制御プログラムに従いロボットアームが高強度モルタルの吹付けやコンクリートの打込みを実施する。そのため、型枠の組立や打込み作業の省力化が可能となる。また、鋼製型枠の製造が不要となり、製造コストの削減が期待できる。これまで著者らは、半円筒形の PCa ブロックが製造可能であることを確認し、PCa ブロックの載荷試験により、構造物として荷重に耐えられることを確認してきた<sup>3)4)</sup>。

本研究では、円筒形の PCa ブロックを製造し、施工性の試験を実施した。また、PCa ブロックを連結した柱状

体を曲げ載荷することで、構造性能の試験を実施した。

## 2. PCa ブロックの製造実験

### 2.1 自動化製造システム

3D プリンタは、写真-1 に示す産業用ロボットアーム（6 軸型）にノズルを装着したものをを使用した。コンクリート自動打設システムでは、同一のロボットアームに異なるノズルを装着して用いた。コンクリート自動打設システムのフローを図-1 に示す。打込み方法は、吹付けと高流動コンクリートの流し込みの 2 種類とした。吹付けでは、最初に、3D プリンタで製造した、内周部の打込み型枠（以下、内側外殻）と鉄筋かごを設置した。その後、ロボットアームの制御プログラムを作成し、指定した経路で吹付けた。吹付け後、ロボットアームを用いて表面仕上げを実施した。流し込みでは、最初に、内側外殻と、外周部の打込み型枠（以下、外側外殻）を設置し、この間に鉄筋かごをセットした。その後、ノズルの移動経路を設定し、自動でコンクリートを打設した。

### 2.2 実験概要

#### (1) 試験体

本実験では、図-2 に示す円筒形の PCa ブロックを模



写真-1 ロボットアーム

\*1 株式会社大林組 技術研究所生産技術研究部 修士（工）（正会員）

\*2 株式会社大林組 技術研究所生産技術研究部 上席研究員 博士（工）（正会員）

\*3 株式会社大林組 土木本部生産技術本部技術第一部 副部長 修士（工）

\*4 株式会社大林組 土木本部生産技術本部技術第一部 主任 修士（工）

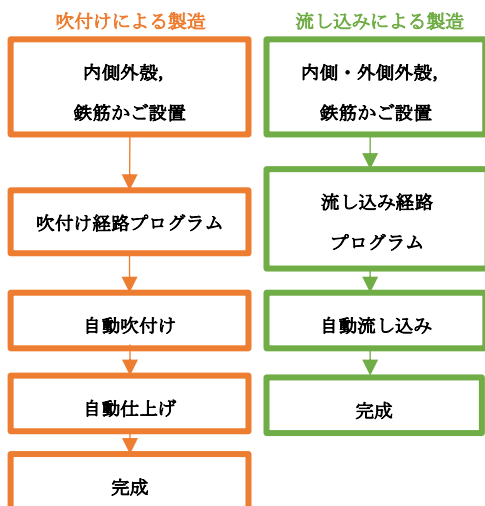


図-1 コンクリート自動打設システムのフロー

擬した試験体を製造した。いずれの試験体でも外径をΦ1000mm、厚さを200mm、長さを1000mmとした。PCaブロックの形状は構造物によって異なるが、標準品は外径Φ1600~4000mmであり、試験体は縮小モデルである<sup>5)</sup>。吹付け試験体では内径Φ600mmの内側外殻を3Dプリンタで構築し、躯体部分を高強度モルタルで構築した。流し込み試験体では内側外殻と外径Φ1000mmの外側外殻を3Dプリンタで構築し、躯体部分を高流動コンクリートで構築した。外殻の積層幅は30mmとした。125mm間隔で帯鉄筋を配置し、帯鉄筋上には中間帯鉄筋を千鳥状に配置した。鉄筋径はいずれもD10とした。また、連結時にD22の主鉄筋を配置するため、外径Φ48mmのシース管を配置した。鉄筋径や鉄筋量は実工事に使用されるPCaブロックを参考に決定した。

製造数量は、吹付け試験体2体、流し込み試験体8体とした。なお、製造順に、内側外殻にA1~A10、外側外殻にB1~B8、吹付け試験体にC1~C2、流し込み試験体にD1~D8の製造番号を割り当てた。実験工程は、外殻の製造を1~3日目で行い、その後養生期間を設けた後、吹付けを6~7日目、流し込みを8~11日間で実施した。

## (2) 使用材料

3Dプリンタモルタルには、ポルトランドセメント、細骨材、硬化促進剤、チキソ性調整剤、有機繊維をあらかじめ混合したプレミックス材を用いた。プレミックス材の単位量を  $P=1590\text{kg/m}^3$ 、水プレミックス材比を  $W/P=16.8\%$  とした。また、凝結遅延剤を  $P \times 0.20\%$  添加し、硬化速度を調整した。凝結試験 (JIS A 1147) の結果は、始発時間は54分、終結時間は57分であった。有機繊維は少量であり、引張特性への影響はほとんどないレベルである。吹付けには著者らが開発した高強度モルタル<sup>6)</sup>を用いた。高強度モルタルには、プレミックス粉体を用い、プレミックス粉体の単位量を  $P=1989\text{kg/m}^3$ 、水プレ

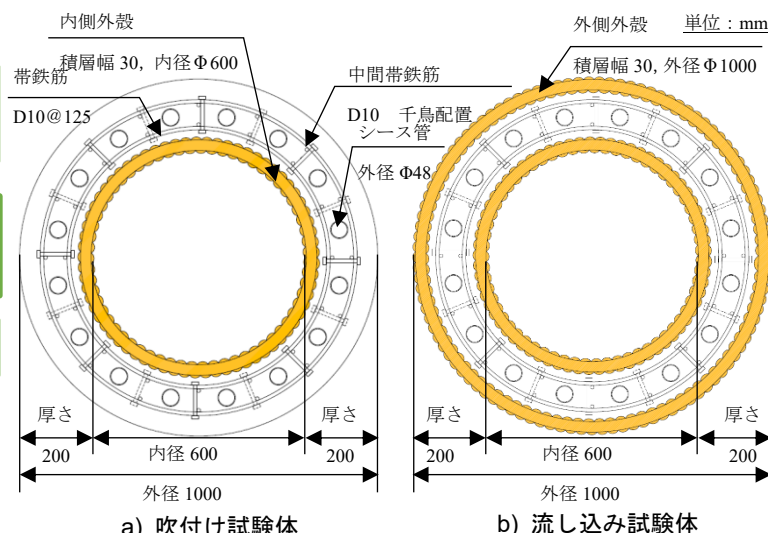


図-2 試験体の形状

ミックス粉体比  $W/P=12.8\%$  (水結合材比  $W/B=30.0\%$ ) とした。なお、本材料は急結剤を使用しておらず、表面仕上げが容易である点が特徴である。高流動コンクリートは、スランプフロー60.0cm、単位セメント量  $C=500\text{kg/m}^3$ 、水セメント比  $W/C=35.0\%$ 、細骨材比51.8%とした<sup>3)</sup>。

## (3) 外殻の製造

外殻の製造状況を写真-2に示す。圧送配管は、モルタルポンプに長さ10m、内径1インチのマテリアルホースを取り付け、先端にノズルを設置した。外殻1体のプリントに要した時間は、内側外殻で約30分、外側外殻で約40分であった。製造後、コンクリートの打込みまで、気温20℃の室内環境下で気中養生した。

## (4) 吹付けによる製造

吹付け状況を写真-3に示す。圧送配管は、全長20mで、スクイーズポンプに長さ10m、内径2インチのマテリアルホースとその先に長さ10m、内径1.5インチの樹脂製ホースを取り付け、先端にノズルを設置した。ノズル付近で圧縮空気を挿入した。試験体1体の吹付けに要した時間は約80分であった。

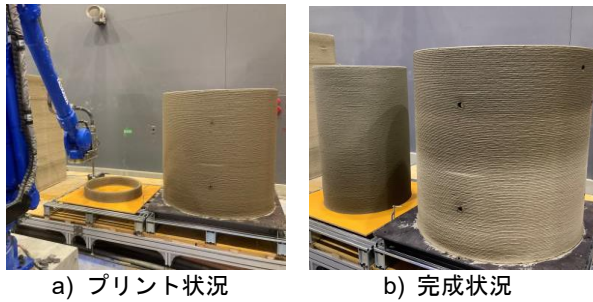
表面仕上げ状況および試験体の完成状況を写真-4に示す。試験体側面に、ロボットアームに取り付けた自動コンクリート平滑装置のこて面をセットし、こて面が試験体側面を均すように鉛直方向に上昇下降させた。試験体1体の仕上げに要した時間は約50分であった。製造後は、気温20℃の室内環境下で封緘養生した。

## (5) 流し込みによる製造

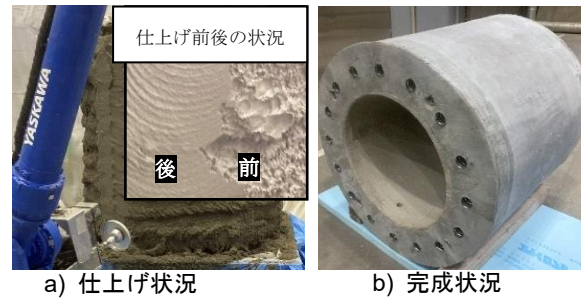
流し込み状況および試験体の完成状況を写真-5に示す。圧送配管は、スクイーズポンプに長さ10m、内径2インチのマテリアルホースを取り付け、先端にノズルを設置した。試験体1体の打込みに要した時間は約40分だった。製造後は気温20℃の室内環境下で封緘養生した。

## (6) 試験項目

試験項目を表-1に示す。外殻の製造では、フレッシュ



a) プリント状況 b) 完成状況  
写真-2 外殻のプリント状況



a) 仕上げ状況 b) 完成状況  
写真-4 仕上げ状況および試験体の完成状況



a) 吹付け状況 b) 吹付け後  
写真-3 吹付け状況



a) 流し込み状況 b) 完成状況  
写真-5 流し込み状況および試験体の完成状況

表-1 試験項目

製造工程	試験項目	試験方法の詳細	頻度	規格値
外殻	モルタルフロー	JIS R 5201 に準拠、ノズル先端で試料採取、0 打および 15 打で試験	1 回/日	—
	圧縮強度*1	JIS A 1108 に準拠、試験材齢 28 日、標準水中養生、ノズル先端で試料採取	1 回/日	60N/mm <sup>2</sup> 以上
	外殻の寸法	内側外殻の内径と外側外殻の外径を上端の 2 箇所をノギスで計測	全数	—
吹付け	ミニスランプ*2	JIS A 1171 に準拠、練上がり直後に試料採取*3	1 回/日	4.5±1.5cm
	スランプフロー*3	JIS A 1150 に準拠、練上がり直後に試料採取*3		60.0±5.0cm
流し込み	圧縮強度*1	JIS A 1108 に準拠、試験材齢 28 日、標準水中養生、練上がり後試料採取*4	全数	60N/mm <sup>2</sup> 以上
	試験体の寸法	外径および厚さを上部の 8 箇所をノギスで計測		—

※1 試験体数 3 本 ※2 吹付けのみ試験 ※3 流し込みのみ試験 ※4 初日のみノズル先端でも採取

フレッシュ性状、圧縮強度および外殻の寸法を確認した。フレッシュ性状の確認では、ノズル先端から試料を採取し、0 打および 15 打のモルタルフロー試験 (JIS R 5201 に準拠) を実施した。また、本研究では、外殻も構造体の一部として荷重に耐えることを期待している。そのため、モルタルの圧縮強度の規格値を躯体コンクリートと同等 (材齢 28 日で 60N/mm<sup>2</sup> 以上) とした。また、実製造時には、規定寸法での製造が重要となる。そのため、内側外殻の内径および外側外殻の外径をノギスにより計測した。3D プリンタで製造した外殻表面は凹凸があるが、凸部にノギスの測定面を当てることにより計測した。

吹付けおよび流し込みによる製造では、フレッシュ性状、圧縮強度および試験体寸法を確認した。フレッシュ性状および圧縮強度の確認では、試料は練上がり直後に採取した。ただし、本システムを用いた場合でも材料の品質が確保されていることを確認するため、製造初日は、ノズル先端においても試料を採取した。また、上記のほかに、曲げ載荷材齢の圧縮強度試験を実施した。試験体は、製造した PCa ブロックと同様の環境下で養生した。

## 2.3 実験結果

### (1) フレッシュ性状および硬化物性

材料のフレッシュ性状および圧縮強度は、図-3~図-5 に示すように、練上がり直後またはノズル先端において、規格値を満足することを確認した。また、3D プリントモルタルのモルタルフローは、0 打で 103~107mm、15 打で 139~143mm であった。

### (2) 外殻の寸法精度

外殻の内径および外径の計測結果を図-6 と図-7 に示す。製造した 10 体の内側外殻に関して、内径の平均値は 597mm、標準偏差は 3mm (変動係数 0.43%) であった。また、8 体の外側外殻に関して、外径の平均値は 999mm、標準偏差は 2mm (変動係数 0.19%) であった。外殻の寸法精度が高いことを確認した。

### (3) 吹付けによる製造

吹付け性状に関して、写真-3 に示すように、外側から吹付けることで、鉄筋かごとロボットアームが干渉しないで吹付けられることを確認した。また、仕上げ性状に関して、写真-4 a) に示すように、仕上げ箇所にて

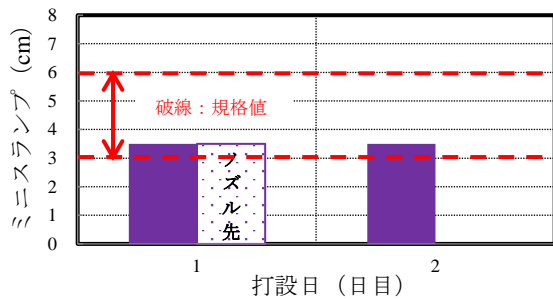


図-3 ミニスランブ (吹付け)

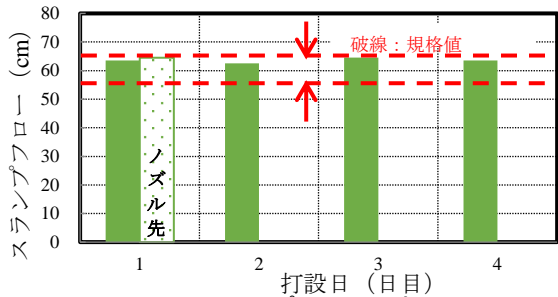


図-4 スランブフロー (流し込み)

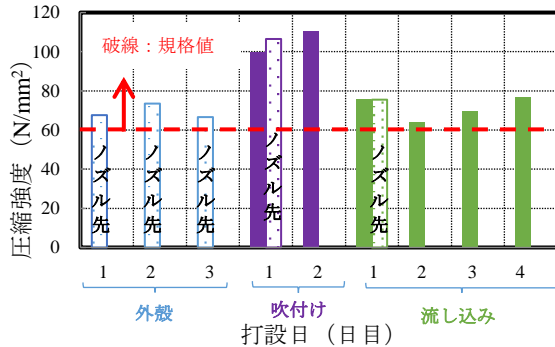


図-5 圧縮強度

面の跡が残ったため、人手による最終仕上げを実施した。ただし、ロボットアームにより粗仕上げができるため、人手による仕上げ作業が容易となった。

完成後の吹付け試験体の外径と厚さの計測結果を図-8と図-9に示す。試験体ごとの外径と厚さの計測値の平均は、それぞれ1000~1006mmと198~201mmの範囲であり、設計値と大きく変わらなかった。他方で、計測点間のばらつきに関して、外径の標準偏差は最大で26mm(変動係数2.25%)、厚さの標準偏差は最大で6mm(変動係数2.75%)であり、後述する流し込み試験体に比較してばらつきが大きかった。内側外殻は精度良く製造されていたことから、吹付け厚さにばらつきが生じていると考えられる。今後は、精度の良い吹付け厚さ管理方法を検討する必要がある。

#### (4) 流し込みによる製造

打込み性状に関して、配管の閉塞を生じず安定した圧送が可能であることを確認した。

完成後の流し込み試験体の外径と厚さの計測結果を図-8と図-9に示す。試験体ごとの外径と厚さの計測値の平均は、それぞれ1000~1003mmと200~203mmで

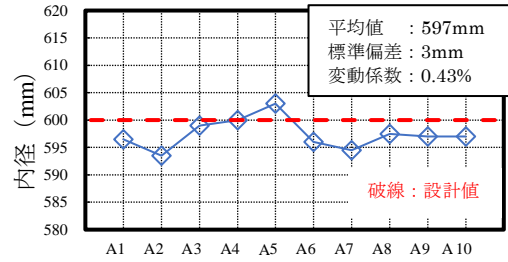


図-6 内側外殻の外径

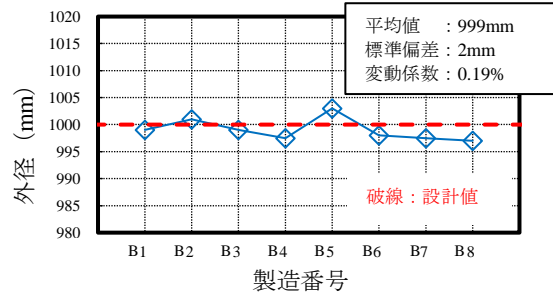


図-7 外側外殻の外径

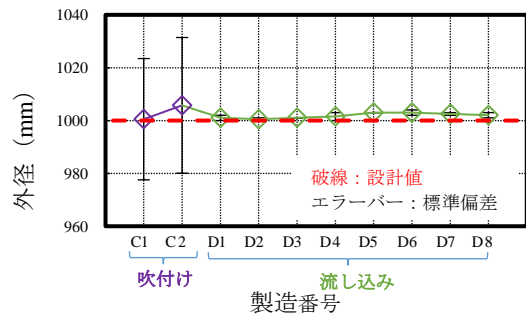


図-8 試験体の外径

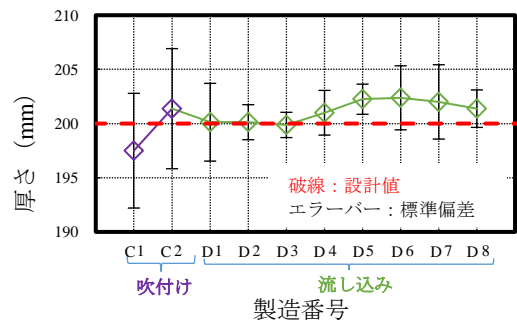


図-9 試験体の厚さ

あり、設計値と大きく変わらなかった。計測点間のばらつきに関しても、試験体厚さの標準偏差は最大で4mm(変動係数1.7%)であり、吹付け試験体に比較して小さかった。内側と外側両方の外殻を3Dプリンタで製造したため、寸法精度が高かったと考えられる。

### 3. 柱状体曲げ試験

#### 3.1 実験概要

##### (1) 試験体

高流動コンクリートの流し込みにて製造したPCaブロックを軸方向に8体接合し、全長8.0mの柱状体とした。



写真-6 接合後の柱状体

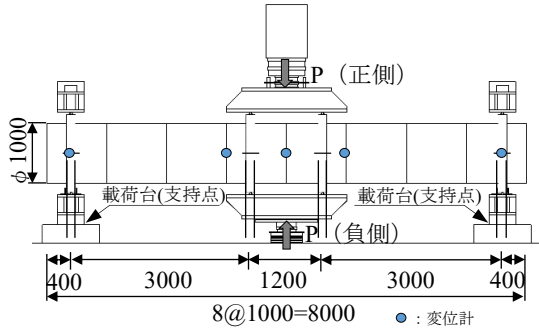


図-10 荷重方法

柱状体の長さは、曲げ破壊となる荷重スパンを確保でき、かつ、試験装置で荷重可能な長さより決定した。接合後の柱状体の状況を写真-6 に示す。PCa ブロックは上端を研磨し、エポキシ樹脂接着剤により隣接する PCa ブロックと接合した。エポキシ樹脂接着剤は、断面の一体化を図る目的で、「プレキャストコンクリート用樹脂系接着剤（橋げた用）品質規格（JSCE-H 101-2013）」を満足するものを使用した。また、シース管に主鉄筋（D22）を挿入し、無収縮モルタルで充填した。

## (2) 試験方法

荷重方法は図-10 に示す通り、2 点支持、2 点荷重の単純梁方式とした。せん断スパン比は 3.7 である。スパン中央点と支持点の変位計より、スパン中央点の鉛直方向の相対変位を測定した。また、スパン中央点と荷重点の外側に設置した変位計より、2 点間の水平距離と鉛直方向の相対変位を測定し、スパン中央部の曲率を算出した。変位および曲率は柱状体をセットし、自重でたわんだ状態を 0 として補正した。主鉄筋が最初に降伏応力度に達する荷重を設計曲げ降伏荷重  $P_y$  とし、 $P_y$  に達するまでは、 $1/3P_y$  ずつ荷重を増加させた ( $1/3P_y \rightarrow 1/3P_y \rightarrow 2/3P_y \rightarrow 2/3P_y \dots$ )。  $P_y$  はコンクリートの設計基準強度を  $60\text{N/mm}^2$ 、主鉄筋の降伏強度を  $345\text{N/mm}^2$  として算出した。荷重荷重は表-2 の通りである。 $P_y$  に達してからは、 $P_y$  作用時のスパン中央点における変位を  $1 \delta y$  とし、3 サイクル毎に  $1 \delta y$  ずつ変位を増加させた ( $\delta y \rightarrow \delta y \rightarrow \delta y \rightarrow -\delta y \rightarrow \delta y \rightarrow -\delta y \rightarrow 2 \delta y \rightarrow 2 \delta y \dots$ )。4  $\delta y$  サイクルを越えた後は、正側と負側の最大荷重まで荷重し、最後に正方向の片押しで引張鉄筋の破断が確認（破断音により確認）されるまで荷重した。

## 3.2 実験結果

材料特性値を表-3 に、試験結果を表-4 に示す。荷重スパン中央点における荷重-変位関係を図-11 に、載

表-2 荷重荷重

項目	曲げモーメント ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	荷重( $\text{kN}$ )		
		正側	負側	
降伏	1/3	210.31	86.0	194.4
	2/3	420.60	226.2	334.6
	1/1	630.94	366.4	474.8

※文献より計算

表-3 材料特性値

項目	試験値		
	コンクリートの圧縮強度 ・鉄筋の引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	弾性係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )	
コンクリート	3Dプリンタモルタル	67.3	22.3
	高流動コンクリート	76.5	34.4
	無収縮モルタル	72.3	23.4
主鉄筋 D22/SD345	降伏強度	414	200 (設計値)
	引張強度	579	

※無収縮モルタルの弾性係数、主鉄筋の試験値はミルシートの値

表-4 荷重試験結果

項目	ひび割れ曲げモーメント $M_c$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	降伏曲げモーメント $M_y$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	引張鉄筋降伏時の変位 $\delta y$ ( $\text{mm}$ )	破壊抵抗曲げモーメント $M_u$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	
正側	計算値	378.06 (197.9)	736.41 (436.8)	--	1115.84 (689.7)
	試験値	322.03 (160.5)	850.48 (512.8)	5.9 (366.4)	1345.03 (842.5)
負側	計算値	378.06 (306.2)	736.41 (545.1)	--	1115.84 (798.1)
	試験値	326.12 (271.6)	842.42 (615.8)	6.8 (474.8)	1161.02 (828.2)

※()内は試験時の荷重荷重( $\text{kN}$ )を示す。

荷重スパン中央点における曲げモーメント-曲率関係を図-12 に示す。また、文献より算出した断面性能も図中に示す。なお、外殻にも高流動コンクリートの物性値を用いた。高流動コンクリートは 3D プリンタモルタルより圧縮強度が高いため、計算結果は危険側となる。実験の結果、ひび割れ曲げモーメントは 15%程度計算値を下回ったが、降伏・終局時の曲げモーメントは計算値を上回る結果となった。ひび割れ曲げモーメントが計算値を下回った点に関して、試験体数を増やして試験することで、ばらつきの範囲であるか等を確認する必要がある。

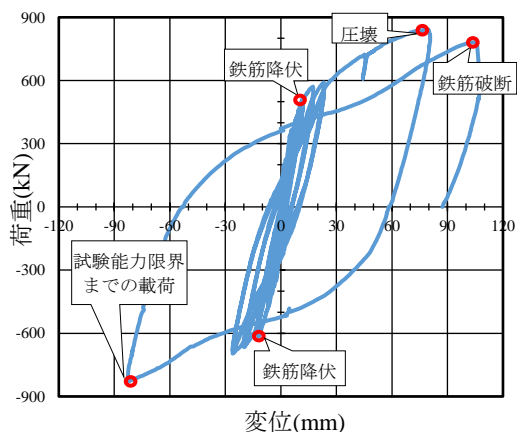


図-11 荷重-変位関係

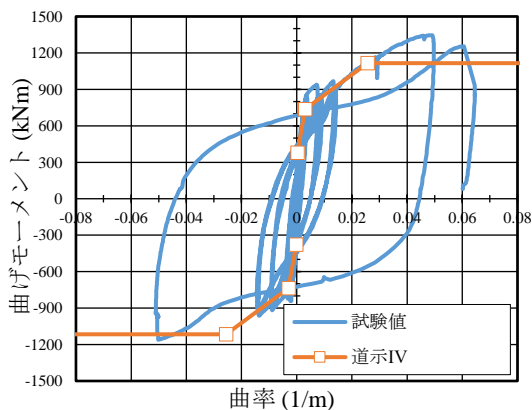


図-12 曲げモーメント-曲率関係

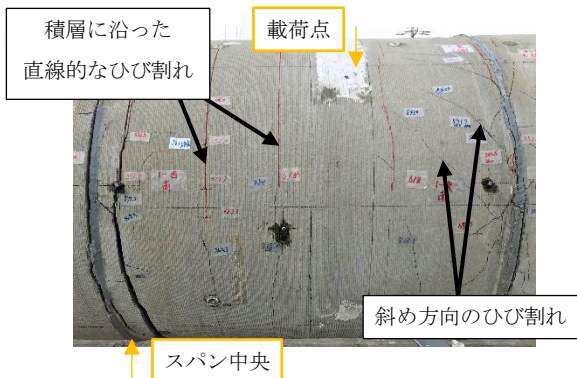


写真-7 曲げ試験後のひび割れ状況

また、破壊形式がせん断破壊の場合の性能を確認する必要があるが、本柱状体は構造的に成立する可能性がある。

写真-7に、荷重点部分のブロックに発生したひび割れの状況を示す。初期の曲げひび割れは外殻の積層間に沿うように直線的に発生した。しかし、降伏に至る前に、積層間に沿わない斜め方向のひび割れが発生しており、積層間に集中したひび割れの発生は確認できなかった。また、接合部に集中したひび割れの発生や、引張鉄筋破断以前における外殻の剥落は確認できなかった。

#### 4. まとめ

本稿では、3Dプリンタとコンクリート自動打設システムより構成されるRC構造物の自動化製造システムを用

いて、プレキャストケーソン基礎の部材であるRC造PCaブロックを製造し、施工性を確認した。また、PCaブロックを連結して作成した柱状体の曲げ試験を実施し、構造性能の評価を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 自動化システムにより、円筒形のPCaブロックの製造が可能である。
- (2) 3Dプリンタにより、外殻を精度よく製造することが可能である。
- (3) 流し込みによる製造では、吹付けによる製造に比べて試験体の寸法精度が良好であった。
- (4) 精度の向上は必要であるが、表面仕上げの自動化が可能である。
- (5) PCaブロックを連結した柱状体は計算値と同等の耐力を有している。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、試験体の設計、荷重試験の実施等、多大な協力を頂いた共同研究者の日本ヒューム株式会社の関係各位に深謝致します。

#### 参考文献

- 1) 北村勇斗, 石関嘉一, 武田篤史, 坂上肇, 荒木昭俊, 沼崎孝義: 3Dプリンタおよび吹付ロボットで製造したRC構造の荷重実験, 第76回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第5部門, V-487, 2021.8
- 2) 中村允哉, 坂上肇, 穴吹拓也, 石関嘉一: 3Dプリンティングと常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートによる複合構造体の試験施工に関する報告, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1882-1887, 2020.7
- 3) 新杉匡史, 石関嘉一, 西村俊亮, 高橋敏樹, 田口拓望, 郷富雄: 3Dプリンターを活用したPCaケーソン基礎の製作, 第77回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第5部門, V-565, 2020.8
- 4) 深澤連莉, 西村俊亮, 高橋敏樹, 新杉匡史, 田口拓望, 郷富雄: 3Dプリントにより製作した埋設型枠を用いたPCaケーソン基礎の性能確認, 第77回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第5部門, V-303, 2022.8
- 5) PCウェル工法研究会: PCウェル工法設計・施工マニュアル-施工編-, 2019.3
- 6) 平田隆祥, 川西貴士, 石関嘉一: 高強度の断面修復材の耐摩耗性と加熱に対する爆裂抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1527-1531, 2018.6
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 2017