

PCaケーソン基礎の自動化製造

北村 勇斗 石関 嘉一 新杉 匡史
 高橋 敏樹 西村 俊亮 深澤 連莉
 (生産技術本部) (生産技術本部) (生産技術本部)

Automated Manufacturing of PCa Caisson Foundation

Yuto Kitamura Kazuyoshi Ishizeki Masashi Shinsugi
 Toshiki Takahashi Shunsuke Nishimura Renri Fukasawa

Abstract

The construction industry in Japan is required to improve on-site productivity owing to a decrease in the working population and skilled workers. In concrete works, many tasks, such as assembling/disassembling of formworks and pouring of concrete, are manually performed. Therefore, an automated manufacturing system for RC structures was developed, which consisted of a 3D printer and an automated concrete pouring system. In this study, a precast RC block was manufactured to investigate the construction performance of the system. A bending test was performed on a pile manufactured using the connecting blocks. The results indicated that precast blocks could be manufactured, and the pile had a sufficient load-bearing capacity. In future, this system will be applied to construction projects.

概要

我が国の建設業において、就労人口や熟練工の減少に伴い、現場の生産性向上が求められている。特にコンクリート工事は型枠の組立・解体やコンクリートの打込み等多くの作業が人力で行われており、省力化が大きな課題である。そこで、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の開発に取り組んできた。本稿では、本システムによりプレキャストケーソン基礎の部材であるRC製プレキャストブロックを製造し、その施工性について確認した。また、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、耐荷性能を確認した。その結果、RC構造物の自動化製造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。今後は、本システムを実工事に適用することで、コンクリート工場の生産性向上を実現する。

1. はじめに

我が国の建設業は就労人口や熟練工の減少、現場の生産性向上などの難題に直面している。コンクリート工場の生産性は30年間ほとんど変化しておらず、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¹⁾。今後、人材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。

コンクリート工事における現場の生産性向上の対策の一つとしてプレキャストコンクリートの使用が挙げられる²⁾。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³⁾。

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^{3),4)}。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。既往の研究では、半円筒形のPCaブロックが製造可能であることを確認した⁵⁾。また、製造したPCaブロックの載荷試験により、外殻とコンクリートが一体となって荷重に抵抗することを確認した⁶⁾。

本研究では、新たに円筒形のPCaブロックを製造し、その施工性を確認した。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、その構造性能を確認した。

2. 自動化製造システム

自動化製造システムは、3Dプリンタとコンクリート自動打設システムから成る。3Dプリンタは、Photo 1に示す産業用ロボットアーム（6軸型）に取り付けたノズルから

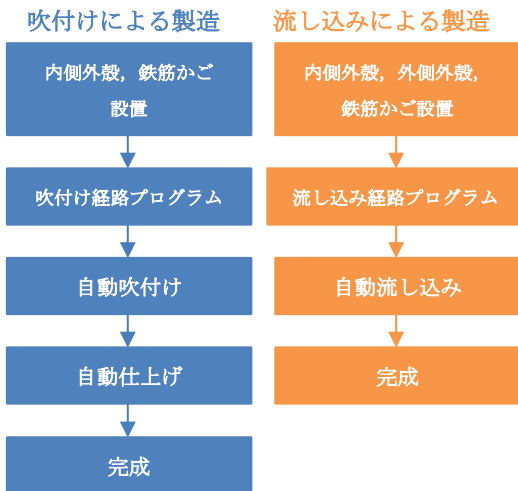


Fig. 1 コンクリート自動打設システムのフロー
Flowchart of Automated Concrete Pouring System



Photo 1 ロボットアーム
The Robot Arm

3Dプリンタモルタルを吐出して積層する製造装置である。ロボットアームの制御データは、製造する対象物の3Dモデルから自動的にオフライン（直接教示しない）で生成できる⁷⁾。

コンクリート自動打設システムは、同一のロボットアームに専用のノズルを装着し、ポンプ圧送したコンクリートを吐出して打設した。コンクリート自動打設システムのフローをFig. 1に示す。打込み方法は、吹付けコンクリートの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、3Dプリンタで製造した、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、ロボットアームの制御プログラムにより、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。

3. PCaブロックの製造実験

3.1 実験概要

3.1.1 試験体 本実験では、自動化製造システムを

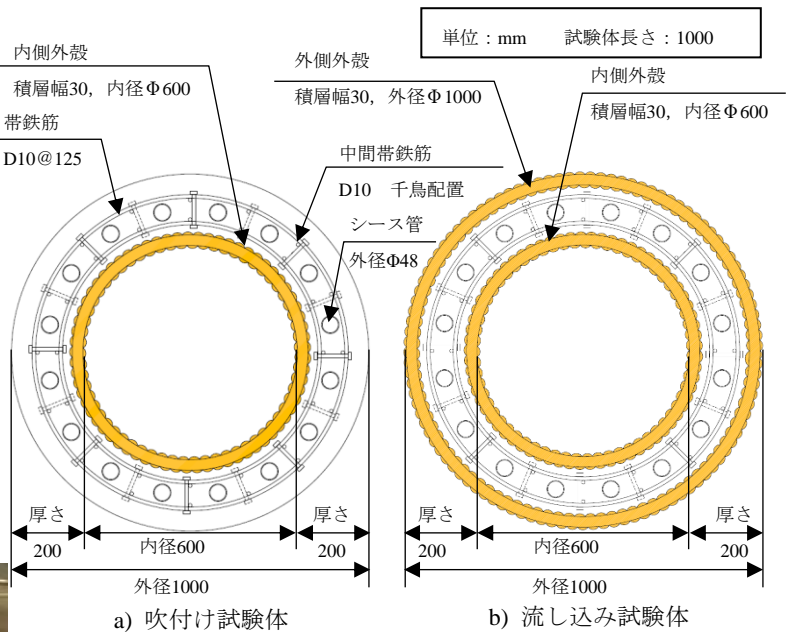


Fig. 2 試験体の形状
Shape of Test Specimens

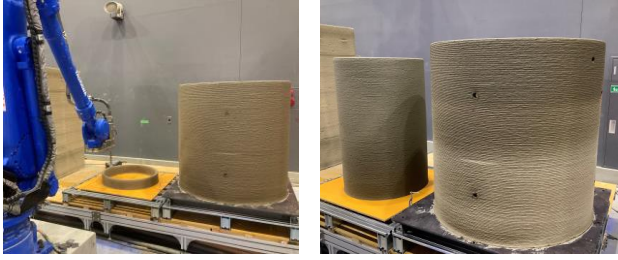
用いて、Fig. 2に示す円筒形のPCaブロックを模擬した試験体を製造し、施工性や施工精度、コンクリートの充填状況を確認した。いずれの試験体でも外径を $\Phi 1000\text{mm}$ 、厚さを 200mm 、長さを 1000mm とした。PCaブロックの形状は構造物によって異なるが、標準品は外径 $\Phi 1600\sim 4000\text{mm}$ であり、試験体は縮小モデルである⁸⁾。吹付け試験体では内径 $\Phi 600\text{mm}$ の内側外殻を3Dプリンタで構築し、躯体部分を吹付けコンクリートで構築した。流し込み試験体では内側外殻と外径 $\Phi 1000\text{mm}$ 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。帯鉄筋、中間帯鉄筋を支持するため、組立鉄筋を配置した。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 $\Phi 48\text{mm}$ のシース管を配置した。このときのシース管のかぶりは 76mm である。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。

3.1.2 使用材料 3Dモルタルは、硬化促進剤を混合したプレミックスモルタルを使用し、凝結遅延剤による硬化速度の調整を行った³⁾。

吹付けコンクリートは、超高耐久繊維補強吹付け材であるタフショットクリートを使用した⁹⁾。タフショットクリートは大林組が開発した補強用モルタルである。急結剤を使用しないため、仕上げが容易である点の特徴である。

高流動コンクリートは、半円筒形PCaブロックの製造



a) プリント状況 b) 完成状況

Photo 2 外殻のプリント状況
Printing Outer Shell



Photo 3 ロボットアームによる吹付け状況
Spraying by Robot Arm

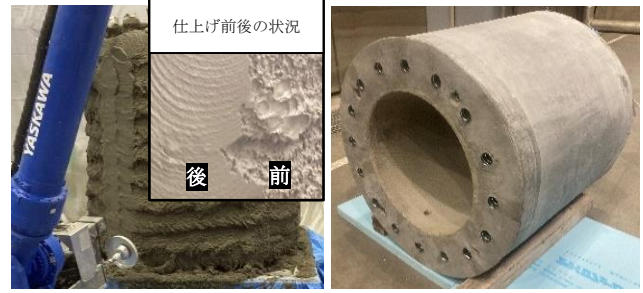
時と同配合とし、スランプフロー60.0cm，単位セメント量500kg/m³，水セメント比35.0%，細骨材比51.8%のものを使用した⁴⁾。

また、使用した材料のフレッシュ試験および硬化物性試験を1日に1回実施した。吹付けコンクリートのフレッシュ試験では、ミニスランプ (JIS A 1171) を確認した。ミニスランプは4.5±1.5cmで管理した。高流動コンクリートのフレッシュ試験では、スランプフロー (JIS A 1150)，空気量 (JIS A 1128) を確認した。スランプフローは60.0±5.0cm，空気量は4.5±1.5%で管理した。硬化物性試験では、各材料の材齢28日と曲げ試験 (4章参照) 時の材齢における圧縮強度 (JIS A 1108) を確認した。養生方法は、材齢28日の供試体は標準水中養生，曲げ試験時の材齢の供試体はPCaブロックと同一環境下で封緘養生とした。各試験で供試体は3本ずつ採取した。

3.1.3 外殻の製造 3Dプリンタによる外殻の製造状況をPhoto 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。外殻の断面が水平となるようにし，ロボットアームを周回させて積層した。

3.1.4 吹付けによる製造

(1) 吹付け ロボットアームを用いた吹付け状況をPhoto 3に示す。吹付けの圧送配管は，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。ノズル付近で圧送したモルタルに圧縮空気を挿入した。なお，シース管背面に未充填が生じないように，吹付け方向に配慮した。



a) 仕上げ状況 b) 完成状況

Photo 4 仕上げ状況および試験体の完成状況
Finishing and Manufactured Test Specimens



a) 流し込み状況 b) 完成状況

Photo 5 流し込み状況および試験体の完成状況
Pouring and Manufactured Test Specimens

Table 1 試験項目

Test Item		
種類	項目	方法
外殻	寸法	内径と外径を上端の2箇所計測
試験体	寸法	外径を試験体上端の4箇所計測 厚さを試験体上端の8箇所計測
	充填確認	断面に対して水平な面で切断し， 充填状況を目視確認する

(2) 仕上げ 表面仕上げ状況および試験体の完成状況をPhoto 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て仕上げを行った。

3.1.5 流し込みによる製造 ロボットアームを用いた高流動コンクリートの流し込み状況および試験体の完成状況をPhoto 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。

3.1.6 試験項目 外殻や試験体の寸法計測，コンクリートの充填状況を目視確認した。詳細をTable 1に示す。

3.2 実験結果

3.2.1 フレッシュ性状および硬化物性 モルタルおよびコンクリートのフレッシュ性状は目標とする範囲であった。また，材齢28日の圧縮強度の平均値は，3Dプリンタモルタルで69.2N/mm²，吹付けコンクリートで

105.3N/mm², 高流動コンクリートで70.5 N/mm²であった。曲げ試験時の材齢の試験結果は4章で示す。

3.2.2 外殻の寸法精度 外殻の内径および外径の計測結果をFig. 3とFig. 4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。

3.2.3 吹付けによる製造

(1) 吹付け性状 Photo 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ので吹付けられることを確認した。

(2) 仕上げ性状 Photo 4 a)に示すように, 仕上げ箇所にて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。

(3) 試験体の寸法精度 完成後の吹付け試験体の外径と厚さの計測結果をFig. 5と6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であり, 設計値と大きく変わらなかった。他方で, 試験体ごとの計測値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。

(4) 充填状況 試験体を切断しコンクリートの充填状況を確認したところ, 吹付け時に配慮したシースマン背面の充填状況は良好であった。他方で, 組立鉄筋の背

面に未充填が確認された。鉄筋背面の充填性向上が課題である。

3.2.4 流し込みによる製造

(1) 打込み性状 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。

(2) 試験体の寸法精度 完成後の流し込み試験体の外径と厚さの計測結果をFig. 5とFig. 6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であり, 設計値と大きく変わらなかった。試験体毎の計測値のばらつきに関して, 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, 吹付け試験体に比較して寸法精度が高くなったと考えられる。

(3) 充填状況 コンクリートの充填状況は良好であった。

4. 柱状体曲げ試験

4.1 実験概要

4.1.1 試験体 製造したPCaブロックの耐荷性能を確認するため, 柱状体の正負交番荷重試験を実施した。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。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Photo 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

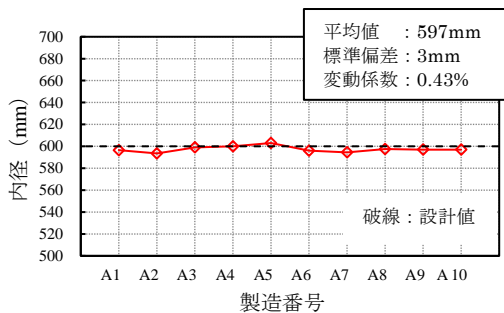


Fig. 3 内側外殻の内径

Inner Diameter of Inside Outer Shells

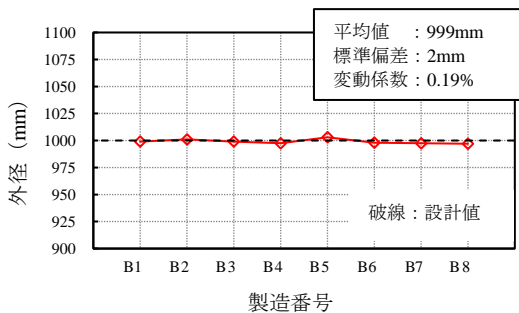


Fig. 4 外側外殻の外径

Outer Diameter of Outside Outer Shells

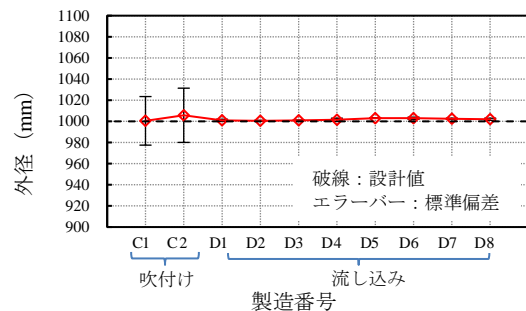


Fig. 5 試験体の外径

Outer Diameter of Specimens

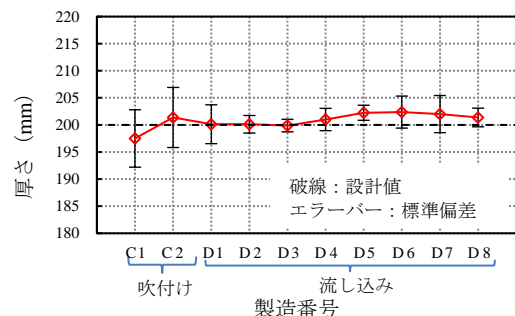


Fig. 6 試験体の厚さ

Thickness of Specimens

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、シーソ管に主鉄筋（D22）を挿入し、無収縮モルタルで充填した。

4.1.2 試験方法 荷重方法はFig. 7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（ $1/3P_y \rightarrow 2/3P_y \rightarrow 3/3P_y \rightarrow \dots$ ）。 P_y はコンクリートの設計基準強度を 60N/mm^2 、主鉄筋の降伏強度を 345N/mm^2 として算出した。荷重荷重はTable 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（ $\delta y \rightarrow 2\delta y \rightarrow 3\delta y \rightarrow \dots$ ）。 $4\delta y$ サイクルを越えた後は、正側と負側の最大荷重（負側は荷重装置能力の限界で終了）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。

4.2 実験結果

Table 3に材料特性値、Table 4に試験結果を示す。Fig. 9に荷重スパン中央点における荷重-変位関係、Fig. 10に荷重スパン中央点における曲げモーメント-曲率関係を示す。断面性能は外殻も内部コンクリート（高流動コンクリート）と同一の材料として文献¹⁰より算出した。実験の結果、ひび割れ曲げモーメントは計算値と同程度であった。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。今後、破壊形式がせん断破壊の場合における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といえる。

Photo 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たことから、積層間の存在が耐荷性能に与える影響はほとんどないと考えられる。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。

5. 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



Photo 6 接合後の柱状体

Pile Manufactured by Connecting Blocks

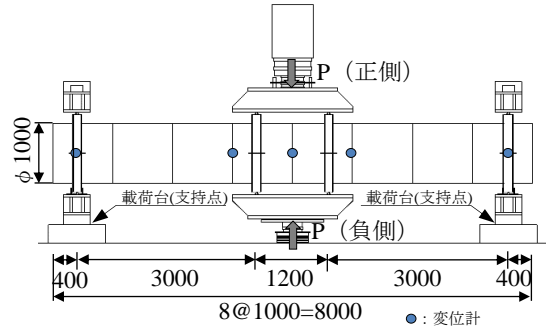


Fig. 7 荷重条件

Loading Condition

Table 2 荷重荷重
Test Load

項目	曲げモーメント (kN・m)	荷重(kN)	
		正側	負側
降伏	1/3	210.31	86.0
	2/3	420.60	226.2
	1/1	630.94	366.4

※文献¹⁰より計算

Table 3 材料特性値
Material Property

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

Table 4 荷重試験結果
Result of Bending Test

項目	ひび割れ曲げモーメント M_c (kN・m)	降伏曲げモーメント M_y (kN・m)	引張鉄筋降伏時の変位 δy (mm)	破壊抵抗曲げモーメント M_u (kN・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)	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)	1161.02 (828.2)

概要	最初の曲げひび割れの発生	引張鉄筋降伏	---	(正側)圧縮側コンクリート圧壊 (負側)試験機能力の限界で終了のため参考値
----	--------------	--------	-----	--

※()内は荷重荷重(kN)

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) 自動化製造システムにより、円筒形のPCaブロックの自動化製造が可能である。
- 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) 吹付けでは、鉄筋背面の充填性向上が課題である。
- 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以上の耐力を有している。

今後は、プレキャストケーソン基礎の実工事において、自動化製造システムにより製造したPCaブロックを適用する予定である。また、プレキャストケーソン基礎以外のプレキャストコンクリートの製造や施工現場でコンクリート構造物を施工することも予定している。RC構造物の自動化製造により、コンクリート工事の更なる生産性向上を実現していきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、試験体の設計、载荷試験の実施等、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) 石橋忠良, 中村光, 古市耕輔, 河野哲也: 土木学会「コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案」の概要, コンクリート工学, Vol. 55, No. 4, pp. 279-284, 2017
- 2) 土田伸治: プレキャストコンクリートの製造, コンクリート工学, Vol. 38, No. 5, pp. 33-37, 2000
- 3) 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けロボットで製造したRC構造の载荷実験, 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
- 4) 石関嘉一, 金子智弥, 坂上肇, 中村允哉, 武田篤史: 3Dプリンタを用いたコンクリート構造物の自動化施工の取組み, 大林組技術研究所報, No. 85, 2021
- 5) 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, 2022.8
- 6) 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
- 7) 坂上肇, 中村允哉, 穴吹拓也, 金子智弥, 松永成雄,

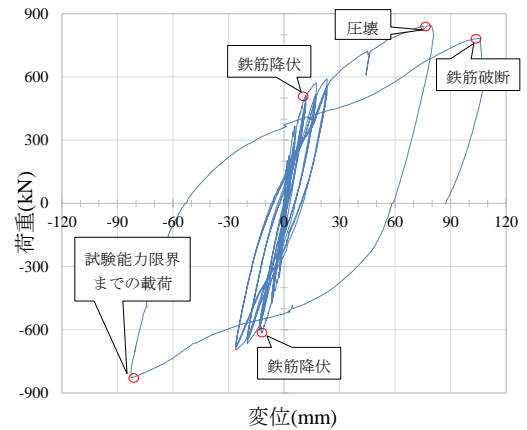


Fig. 9 荷重-変位関係

Load-Displacement Relationship

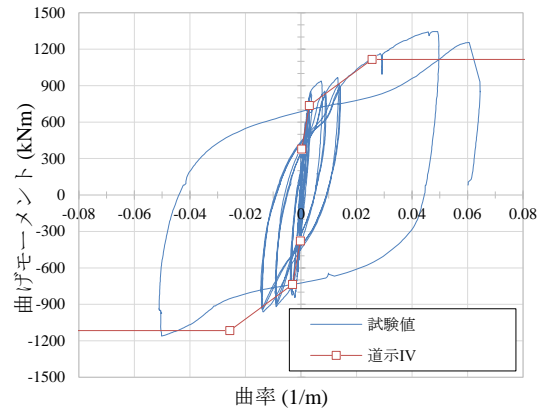


Fig. 10 曲げモーメント-曲率関係

Bending Moment-Curvature Relationship

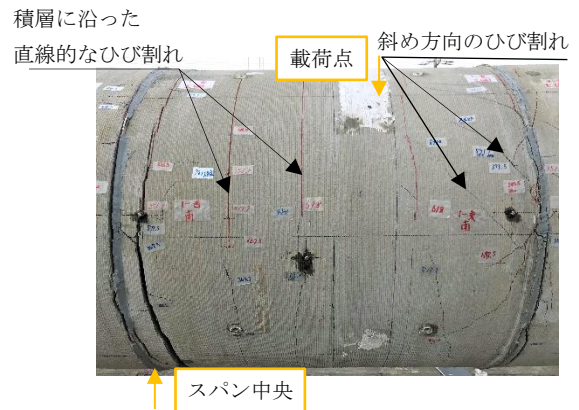


Photo 7 曲げ試験後のひび割れの状況
Crack Distribution after Bending Test

福見祐司: 建設用3Dプリンターにより製造したシェル型ベンチの設計と施工, 大林組技術研究所報, No. 84, 2020

- 8) 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一, 2019
- 9) 川西貴士, 石関嘉一, 平田隆祥, 富井孝喜: 高強度かつ高耐久性のセメント系補修・補強材料「タフショットクリート」, 大林組技術研究所報, No. 81, 2017
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 2017