

# 建設用3Dプリンターによる建築物「3dpod™」の設計と施工

坂上 肇 大川 悠奈 北村 勇斗  
木村 達治 鈴木 貴博 山形 龍一  
(設計本部) (設計本部) (設計本部)

## Design and Construction of Building (3dpod™) Using a 3D Construction Printer

Hajime Sakagami Haruna Okawa Yuto Kitamura

Tatsuji Kimura Takahiro Suzuki Ryuichi Yamagata

### Abstract

In this study, we developed a composite structure in which the outer part was laminated with mortar for 3D printing, and the inner part was filled with ultra-high strength fiber-reinforced concrete "Slim-Crete®." Subsequently, a "3dpod™" building was constructed to collect knowledge about the design and construction. Furthermore, 3dpod was designed to take advantage of the features of a 3D printer, such as a building shape that saves material and provides a large space. In addition, because 3dpod is a building that utilizes new materials and construction methods, it obtained national certification for structural strength for the first time in Japan. We will continue to develop this and other construction methods using 3D printers.

### 概要

建設用3Dプリンターにセメント系材料を用いる場合には、構造物に生じる引張力の負担方法が課題となっている。そこで、引張力を負担する材料として、超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート®」を3Dプリンター製の打込み型枠に充填する工法を開発している。今般、本工法を用いた建築物の設計施工に関する知見の収集と実証を目的に実建築物「3dpod™」の建設を行った。省材料で広い空間が得られる建物形状やリブ付きスラブなど、3Dプリンターの特長を生かした設計とした。壁は、躯体に加えて断熱や設備ダクトとなる部分を有する複層壁として、3Dプリンターで同時に施工した。また、3Dプリンターを用いた建築物として、国内で初めて構造耐力に関する国土交通大臣の認定を取得して建築確認を得た。今後は、本工法の展開やその他の3Dプリンターによる建設技術の開発を進め、建設現場の省人化や効率化による持続可能な建設プロセスの実現を目指す。

## 1. はじめに

セメント系材料を用いた建設用3Dプリンター（以下、3DP）は、複雑な曲面などの形状を自動で製造できることから、デザインの自由度向上による設計の付加価値向上や施工の省人化に対する期待が大きい。また、型枠が不要かつオンサイトで部材を製造できることから木製型枠や部材運搬の削減によるCO<sub>2</sub>排出量の削減の効果も期待されている。このような背景から、近年、国内外において3DPの研究開発が行われている。

一般にセメント系材料は、圧縮強度に比べて引張強度が低く、構造物に用いる場合には、鉄筋コンクリート造に代表されるように、引張強度の高い鉄筋などの鋼材との複合構造として用いられることが多い。一方、現状の3DPは、セメント系材料のみを使用するものが多いため、部材に生じる引張力への抵抗方法が課題となっている。これに対して筆者らは、3DP製の打込み型枠（以下、打込み型枠）に超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート®」（以下、スリムクリート）を充填する複合構造（以下、本工法）を開発した。ス

リムクリートは、セメント系材料でありながら、高い引張強度や曲げ強度に加え、引張靱性も有するため、単独でも構造体として使用できる材料である。これまで、本工法を用いて大型構造物を試作<sup>2)</sup>するなど、技術開発を進めてきた。

本報では、本工法による建築物の設計施工に関する知見の収集と実証を目的として建設した建築物「3dpod™」（以下、3dpod）の設計施工について述べる。なお、3dpodは、本工法による特殊な材料及び特殊な構造方法を用いた建築物であるため、建築基準法20条の構造耐力の性能評価を受けて国土交通大臣の認定を取得し建築確認を得た。

## 2. 複合構造

### 2.1 複合構造の構成

Fig. 1に示すように、複合構造は、3DP製の打込み型枠の内部にスリムクリートを打ち込んで製造する。打込み型枠は、スリムクリートの打込み後も存置するため、打込み時の型枠であると同時に内外装材も兼ねている。

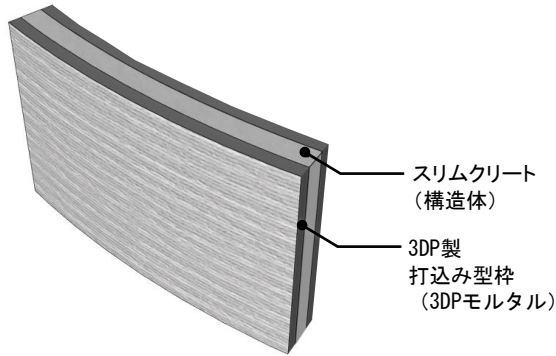


Fig. 1 複合構造の概要  
Concept of Composite Structure

スリムクリートは、自己充填性を有する材料であるため、3DPで製造した複雑形状の打込み型枠への打込みも容易である。また、鉄筋の配筋が原則不要で、ポンプ圧送も可能な材料のために、打込みの自動化や機械化への展開がしやすい。そのため、スリムクリートは、デザイン自由度の向上や自動化施工による省力化や短工期化といった3DPの特長を生かすことができる材料である。

## 2.2 3DPモルタル

3DP用のモルタル（以下、3DP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う。さらに、雰囲気温度の変化のある屋外環境においても、凝結遅延剤の調整によりプリントが可能である。また、初期ひび割れの防止や積層時の形状保持を目的として、PVA（ポリビニルアルコール）繊維を混合している。強度は、圧縮強度60N/mm<sup>2</sup>、引張強度4.0N/mm<sup>2</sup>程度である。

## 2.3 スリムクリート

スリムクリートは、土木学会の「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）<sup>3)</sup>」（以下、UFC指針）に準拠したセメント系複合材料であり、結合材、細骨材、水、混和剤、および鋼繊維で構成されている。なお、スリムクリートは、UFC指針の標準材料が加熱養生を必要とするのに対して、常温で硬化するところが特長である。また、強度は、圧縮強度180N/mm<sup>2</sup>、引張強度8.8N/mm<sup>2</sup>、曲げ強度32.6N/mm<sup>2</sup>を実現できる。モルタルフローは260mm程度であり、自己充填性が高い。なお、スリムクリートは、2012年に土木学会より技術評価<sup>4)</sup>を受けた材料である。

# 3. 建築設計

## 3.1 建築物の概要

Fig. 2, Fig. 3に3dpodの外観および内観図（見上げ）を、Fig. 4に平面図を、Table 1に3dpodの建築概要を示す。また、Fig. 5, Fig. 6に外観および内観パースを示す。3dpodは、断熱、防水を施すとともに電気、空調、給排水の基

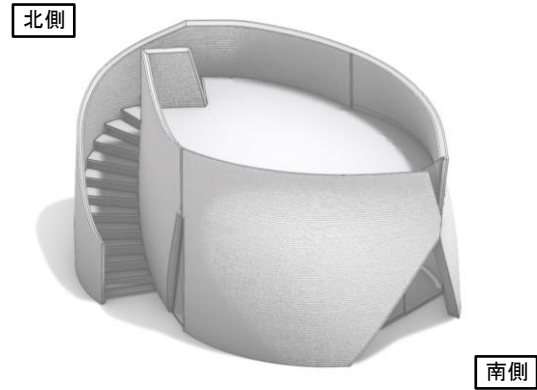


Fig. 2 外観図  
External View

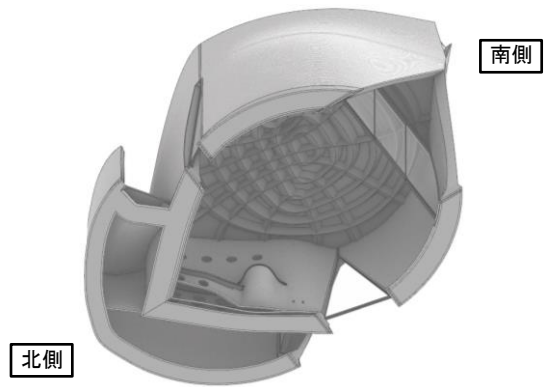


Fig. 3 内観図（見上げ）  
Internal View

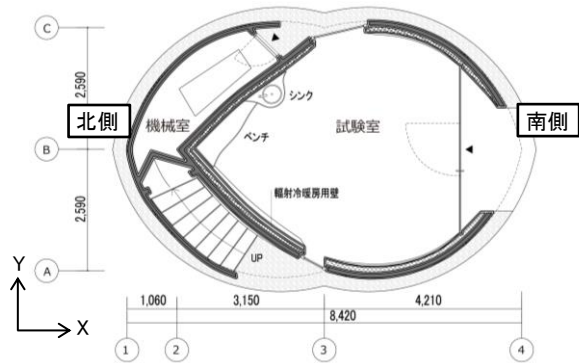


Fig. 4 平面図  
Plan View

Table 1 建築概要  
Overview of the Building

延べ面積	27.09 m <sup>2</sup>	
階数	1階	
高さ軒高	2.800m	
建築物の高さ	4.040m	
基礎底	0.500m(地盤面より)	
基準階高さ	2.700m	
構造種別	地上部	UFC造
	基礎	RC造直接基礎

本設備を備えている。建物形状は、次節で詳述するように、3DPのプリント可能な範囲を考慮したうえで、最小限の材料で最大限の空間が得られるように設計した。将来的な3DPによる建築の多層化を見据えて屋上は陸屋根として、ここに至るための外部階段を設けた。また、地上構造物のすべてに本工法を用いた。そして、屋上スラブ、屋外階段の踏板を除くすべての部材の打込み型枠をオンサイトでプリントする計画とした。なお、オンサイトプリントは、計画建物を包含するように、3DPを南北2か所に盛り替えながら行った。屋上スラブの打込み型枠は、屋内製作のプレキャスト製の部材とした。そして、1階壁の構築後にこれを敷き並べて、上部にスリムクリートを打設する計画とした。

### 3.2 建物形状の設計方法

建物形状の設計には、Robert McNeel & Associates社製の3Dモデリングソフトウェア「Rhino」を用いた。Rhinoは、建築や製造業向けのフリーフォームの3Dモデリングに特化したソフトウェアであり、建築分野でも広く用いられている。また、Rhino上で動作するモデリング支援ツールプラグイン「Grasshopper」を用いることで複雑形状のデザインをパラメトリックに検討することができる。

建物形状の設計は、次のように行った。まず、1階と屋上スラブの平面形状について、それぞれの面積と周長の比率が最大となる平面形状を3DPのプリント範囲を考慮して求める。次に、それぞれの平面形状をつなぐサーフェス形状を求めて全体形状を決定するが、この際には、空間の体積と表面積の比率が3DPのプリント範囲で最大となるサーフェス形状を求めた (Fig.7)。最後に、プリントできる傾斜を考慮して出入口および窓を作成し、外部階段を付け加えることで得られた最終形状がFig. 2である。この方法により、3DPのプリント可能な範囲を考慮したうえで、最小限の材料で最大限の空間が得られるように建物形状を設計した。

### 3.3 複層壁

Fig.8に壁の概要を示す。壁は、構造部材となるスリムクリートの層 (構造体層)、断熱層、設備層の最大三層からなる複層壁で設計した。3DPで打込み型枠の外周部と各層を隔てる隔壁をオンサイトでプリントする。躯体工事と同時に断熱、設備工事の一部を行うことで工期短縮および省力化を図った。断熱層には、断熱材としてビーズ状のポリスチレンフォームを充填した。設備層は、主に電気の縦配管として利用するが、一部の壁面には、空調空気を流入させることで輻射冷暖房となる機能を持たせている。

### 3.4 リブ付きスラブ

Fig. 9に屋上スラブの1階からの見上げを示す。屋上スラブは、リブ付きスラブとした。このリブの形状や配置



Fig. 5 外観パース  
External Perspective



Fig. 6 内観パース  
Internal Perspective

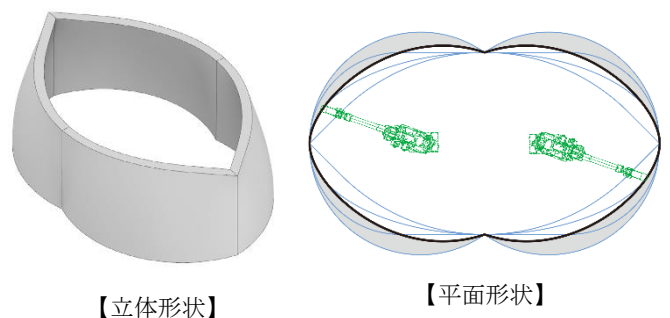


Fig. 7 建物形状の検討  
Examination of Building Shape

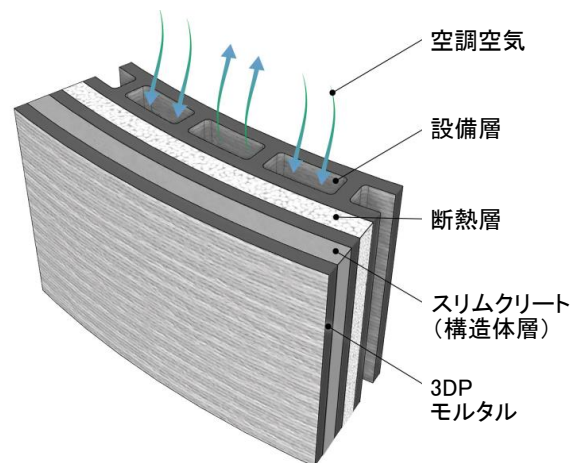


Fig. 8 複層壁の概要  
Overview of Walls (Multilayer Walls)

は、屋上スラブに生じる応力の主応力線に基づき決定した。この形状を在来工法で製造することは非効率かつ困難だが、3DPを用いればこの点を改善でき、3DPの特長を生かした複雑な形状のデザインを実現できた。

#### 4. 構造設計

##### 4.1 構造計画の概要

地上部は、スリムクリートを構造部材とする壁式構造で、3DP製の型枠は非構造部材として扱う。スリムクリートの許容耐力をTable 2に示す。基礎部分は、基礎スラブ形式の直接基礎である。構造計算では、長期荷重時、積雪時、風圧力時、稀に発生する地震時、極めて稀に発生する地震時について検討した。

##### 4.2 構造計算の概要

特殊な材料及び特殊な構造方法を用いた建築物であるため、建築基準法20条の構造耐力の性能評価を受けて国土交通大臣の認定を取得し建築確認を得た。なお、壁の多い小規模建築物であるため、日本建築センター発行の時刻歴応答解析建築物性能評価方法書<sup>5)</sup>より、時刻歴応答解析の適用除外となった。そのため、上部構造と基礎構造を一体とした立体FEM解析（マイダスアイティジャパン社製Midas iGenを使用）を用いた静的応力解析により構造計算を行った。なお、応力は、FEM解析モデルの最大・最小主応力度によって評価した。さらに、地震荷重の加力方向は、Fig. 4に示したX正負方向、Y正負方向、X軸に対する45度、135度、225度、315度方向の計8方向とした。Fig. 10に、FEM解析結果の一例（Y正方向）を示す。また、FEM解析におけるモデル化の条件は、図中の通りとした。

**4.2.1 長期荷重時の設計方針** 建築基準法施行令（以下、施行令）に基づき、固定荷重及び積載荷重を設定した。各部位に生じる応力度は、スリムクリートのひび割れ耐力に対して安全率2以上とした。また、屋上スラブの鉛直変形は、弾性たわみに変形増大係数16を乗じた値が、スパン長さの1/250以下となるようにした。

**4.2.2 短期荷重時の設計方針** 積雪荷重および風圧力については、施行令に基づき設定した。地震力は、稀に発生する地震動に対してせん断力係数0.2、極めて稀に発生する地震動に対してせん断力係数1.0に偏心による割り増しを考慮してせん断力係数を1.5とした。各部位に生じる応力度は、圧縮縁は圧縮強度(180N/mm<sup>2</sup>)に対して安全率1.5以上、引張縁はひび割れ耐力 (8.0N/mm<sup>2</sup>)以下とした。ただし、極めて稀に発生する地震動に対して、FEM解析モデルにおけるメッシュ引張縁の最大主応力度がひび割れ耐力を超過することを部分的に許容した。なお、その値は実験結果のひび割れ耐力<sup>4)</sup>の平均値である15N/mm<sup>2</sup>までとし、引張縁の最大主応力度がひび割れ耐力を超えるメッシュを全体の5%以下とした。実験結果の平均値の15N/mm<sup>2</sup>までに抑えることで、ひび割れによ

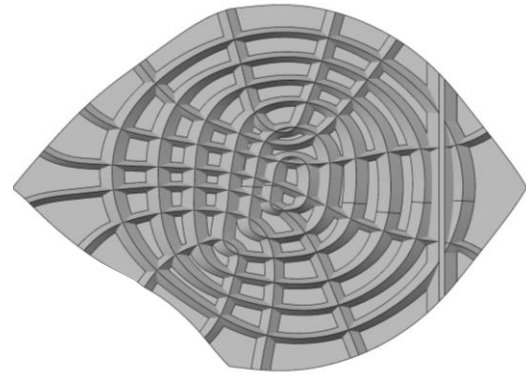
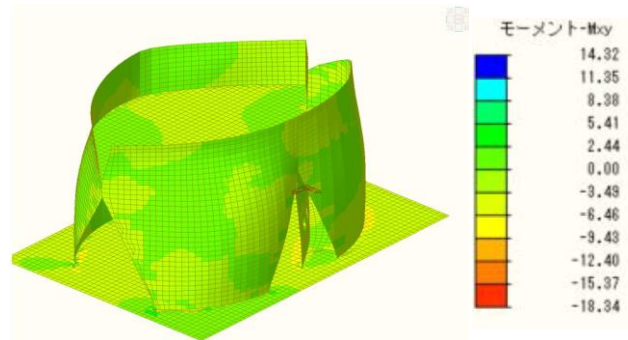


Fig. 9 屋上スラブ (1Fからの見上げ)  
Underside of the Roof Slab

Table 2 スリムクリートの許容耐力  
Allowable Strength of Slim-Crete

F <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	長期許容耐力		極めて稀に発生する 地震時許容耐力		ヤング 係数 (N/mm <sup>2</sup> )
	圧縮縁 (N/mm <sup>2</sup> )	引張縁※ (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮縁 (N/mm <sup>2</sup> )	引張縁(N/mm <sup>2</sup> ) (ひび割れ耐力)	
180	60	4	120	8	4.60 × 10 <sup>4</sup>

※引張縁の長期許容耐力はひび割れ耐力(8.0N/mm<sup>2</sup>)に対して安全率2を見た値とする。



■モデル化の条件

- ・メッシュ分割は、200mm×200mm以下
- ・各部位の厚板要素(4面体要素)の厚さ  
基礎:300mm、壁:60~100mm、階段部スラブ:60mm  
屋上スラブ:120mm(※リブ厚さ含む平均厚さ)

Fig. 10 FEM解析の例 (面外曲げモーメント)

Example of FEM  
(Bending Moment of Out-of-plane Direction)

る剛性低下の影響を考慮せず、弾性解析した。また、層間変形角は、1/100以下とした。

#### 5. 施工

##### 5.1 施工概要

Fig. 11に施工ステップを示す。南北2か所の3DPの設置位置を基に、工区を分割した。各工区では、打込み型枠が所定の高さになるまでオンサイトでプリントした後、構造部材となるスリムクリートを打ち込んだ。なお、打込み高さは、打込み時の側圧を考慮して計画した。屋上スラブのプレキャスト製の打込み型枠（以下、デッキ）

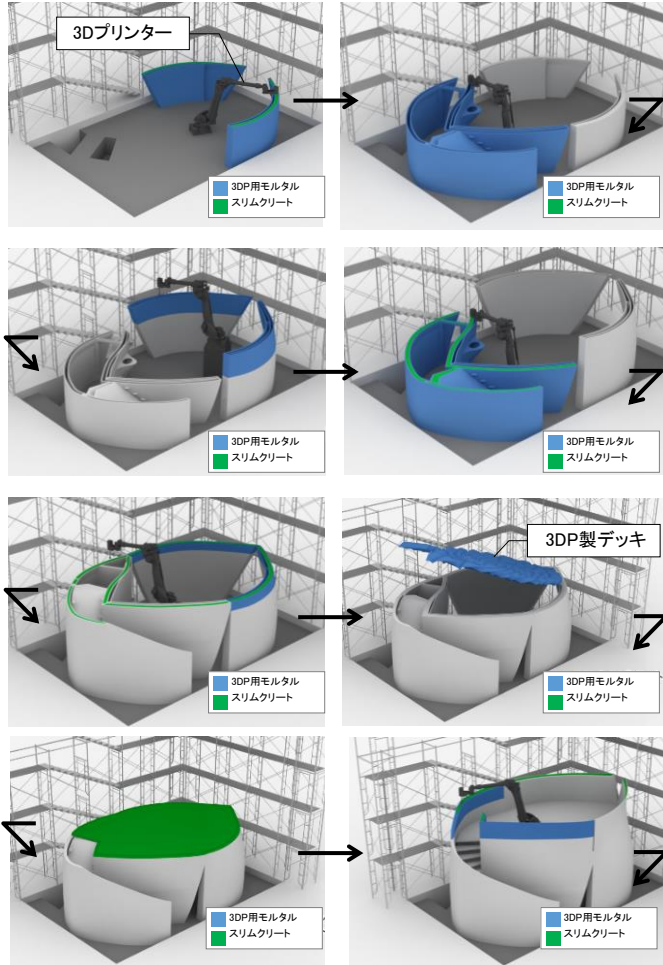


Fig. 11 施工ステップ  
Construction Steps of 3D Printing

は、所定の高さまで1階壁のスリムクリートの打込みが完了した後、揚重機で設置した。屋上スラブのスリムクリート打込み後に、3DPをこの上へ据え付けた。そして、2階の立ち上がり壁を想定したパラペット部をプリントした。

## 5.2 3Dプリント工事

Fig. 12に3DPを示す。3DPは、昇降架台上にロボットアームを取り付けた構成である。ポンプ圧送した3DPモルタルをロボットアームの先端に取り付けたノズルから吐出することでプリントする。

5.2.1 キャリブレーション Fig. 13に示すように、ロボットアームには、固有の直交座標系（以下、ロボット座標系）が定義されており、ロボットアーム先端に取り付けたノズルは、この系に基づき、所定の位置と姿勢に制御される。つまり、3DPが設計通りにプリントするには、ロボットアームが計画した位置と姿勢で現場に据え付けられる必要があるが、実際には、据え付け誤差が生じる。そこで、キャリブレーションにより据え付け誤差を把握することで、計画通りにプリントを行う。

Fig. 14に、ロボット座標系の計画時の設置状況と実際



Fig. 12 3Dプリンター  
3D Printer

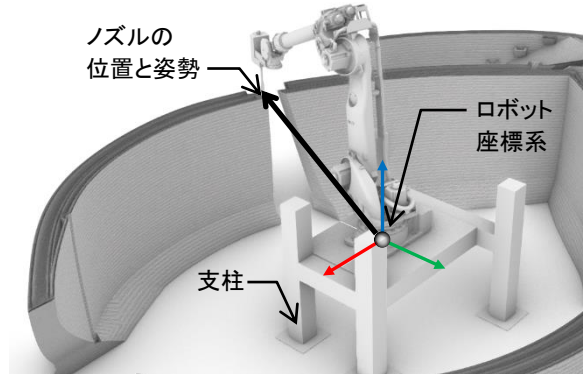


Fig. 13 ロボット座標系  
Robot Coordinate System

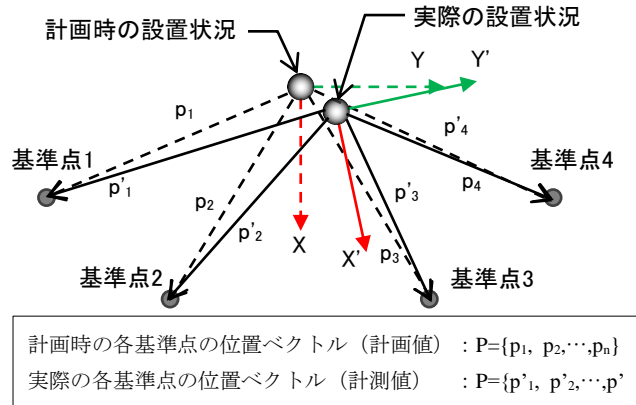


Fig. 14 キャリブレーションの模式図  
Schematic Diagram of Calibration

の誤差を含む設置状況の平面模式図を示す。なお、3DPは、支柱に備え付けたジャッキ機構により、所定の高さで地面に対して水平に据え付けられるため、ロボット座標系のXY平面の位置ベクトルとZ軸周りの回転角のみ据え付け誤差が生じる。キャリブレーションには、現場の基準墨から設定した基準点を用いる。ここで、計画時のロボット座標系における各基準点の位置ベクトル（以下、計画値）は既知である。これに対して、実際のロボット座標系における各基準点の位置ベクトルは、ノズル先端を各基準点に位置合わせすることで実測する（以下、実測値）。このようにして得られた計画値と実

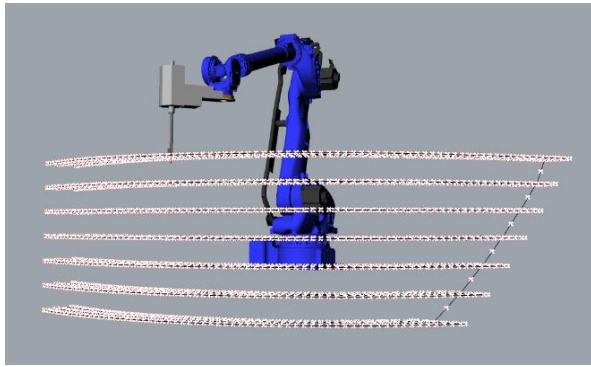


Fig. 15 プリントパスの生成  
Generating of Print Path

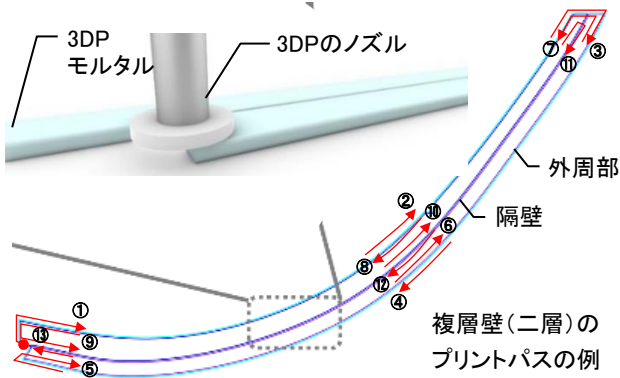


Fig. 16 複層壁のプリント方法  
Printing Method of Multilayer Walls

測値から、ロボット座標系の据え付け誤差として、XY平面の位置ベクトルとZ軸周りの回転角を求める。なお、計画値と実測値から据え付け誤差を求める方法は、対応の与えられた点集合のマッチング問題として一般的な解法である特異値分解による手法<sup>6)</sup>を用いた。

**5.2.2 プリントパスの生成** 3Dプリント工事では、Grasshopper上で動作するコンポーネントを開発し、プリントパスの生成や施工検討を行った。Fig. 15に開発したコンポーネントの動作状況を示す。プリントパスは、建築設計で作成した3Dモデルから生成する。なお、複層壁は、Fig. 16に示すように、外周部と層間の隔壁を一筆書きでプリントする。一筆書きでプリントするために、外周部と層間の隔壁の各部位を2列に分割してプリントする。また、Fig. 17に示すように、複層壁の打込み型枠および屋上スラブのデッキは、すべて厚さ30mmのシェル構造である。プリントパスの生成では、3Dモデルを水平に切断して、プリントする3DPモルタルの幅を計算する。シェル構造は、面の法線方向に厚さが定義されるため、水平に切断した時の厚さは、面の傾斜に応じて変化する。そこで、この厚さとなるように3DPモルタルの幅を制御する必要がある。3DPモルタルの幅は、吐出量とノズルの移動速度を調整することで所定寸法に制御できる<sup>7)</sup>。そのため、プリントデータの生成では、シェル構造の厚さを再現するため、この傾斜に応じてこれらを自動調整するプログラムを作成した。

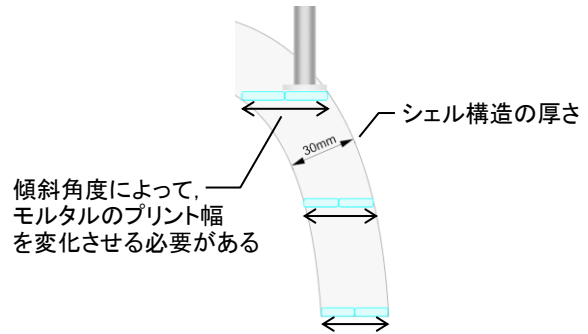


Fig. 17 傾斜角度に応じた幅の制御  
Change in Width of Mortar due to Tilt Angle

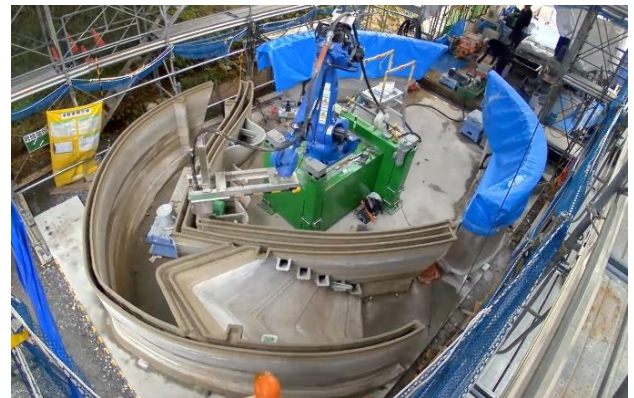


Fig. 18 オンサイトプリント  
On-site Printing



Fig. 19 複層壁のプリント  
Printing Multilayer Walls



Fig. 20 3DP製デッキの建方  
3DP Deck Laying on the Roof Slab

**5.2.3 プリント状況** オンサイトでの複層壁のプリント状況をFig. 18およびFig. 19に、屋上スラブのデッキの設置状況をFig. 20に示す。また、屋上へ至る外部階段部分のプリント状況をFig. 21に示す。オンサイトでのプリント時の雰囲気温度は、6.4~39.8度と温度変化が生じたが、3DPモルタルに添加する凝結遅延剤量を調整し凝

結時間を制御することで、安定的にプリントすることができた。また、外部階段では、緩傾斜のスロープ形状をオンサイトでプリントできることを確認した。3DPによる躯体工事期間（断熱工事、設備工事の一部を含む）は、のべ58日間であった。そのうち、オンサイトプリントの総時間は、約138時間（のべ33日間）であった。

品質管理項目の一つとして、複層壁では、打込み型枠の構造体層の厚さを、屋上スラブのデッキではリブの深さを計測した。なお、施工誤差の許容値は、施工に先立ち行ったプリント実験の結果から定めた±5mmとした。複層壁・デッキともに曲面形状のため、事前に計測部を定めておき、各部の設計値を把握してから計測した。品質管理の計測は、計306か所で行った。プリントの結果、許容値以内で施工することができ、施工誤差の平均値は-0.28mmであった。また、標準偏差は 1.46mmであった。

### 5.3 スリムクリートの打込み

スリムクリートの配合をTable 3に示す。スリムクリートの打込みは、計6回実施した。練混ぜは、二軸強制練りミキサを用いて行った。練上がり後のスリムクリートは、打込み箇所までポンプ圧送した。圧送は、油圧ピストン式ポンプを用いて、ポンプ側に内径3インチの鋼製管（延長4~6m、打込み日によって異なる）と吐出口にフレキシブルホース（延長10m）を接続して行った。フレキシブルホースの先端は、3DPの先端に取り付けてある3Dプリント用のノズルと交換して装着した（Fig. 22）。圧送高さは約2~3m、吐出量は約 0.5m<sup>3</sup>/hであった。3Dプリントと同様、打込みパスを事前にプログラムすることで、自動打込みが可能となった。

なお、本施工に先立ち、本施工と同等の圧送条件で室内圧送試験（鋼製管延長7m、フレキシブルホース延長10m、圧送高さ3m）を実施した。室内圧送試験では、圧送後の鋼繊維混入率試験<sup>8)</sup>、圧送前後のフレッシュ性状や圧縮強度の確認、ポンプ吐出口の管内圧力の計測を行い、所定の基準値を満たすことを確認した。また、実部材の形状を模したモックアップ試験体を作成し、後日コア削孔および建研式接着試験機を用いた引張試験（JIS A 1171に準拠）を行うことで、打込み型枠内へのスリムクリートの充填および接着性状の確認を実施した。本施工では、圧送前後のフレッシュ性状や圧縮強度の確認、ポンプ吐出口の管内圧力の計測を行い、所定の基準値を満たすことを確認した<sup>9)</sup>。

全6回のスリムクリートの打込みを終了し、躯体工事を完了した。なお、打込み時に作用する側圧により、打込み型枠にひび割れが生じることもなかった。以上より、3DP製の打込み型枠を使用し、スリムクリートを構造部材とする建築物を構築できることを確認した。

### 5.4 仕上げ工事

Fig. 23に仕上げ後の外観を、Fig. 24に内観を示す。3DPによる躯体工事の完了後、3DPモルタル素地の色合いを



Fig. 21 外部階段のプリント  
Printing of Exterior Staircase

Table 3 スリムクリートの配合  
Compounding Ratio of Slim-Crete

水/結合材比 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
	水	結合材	細骨材	混和剤	鋼繊維
12.6	230	1830	331	18.8	157

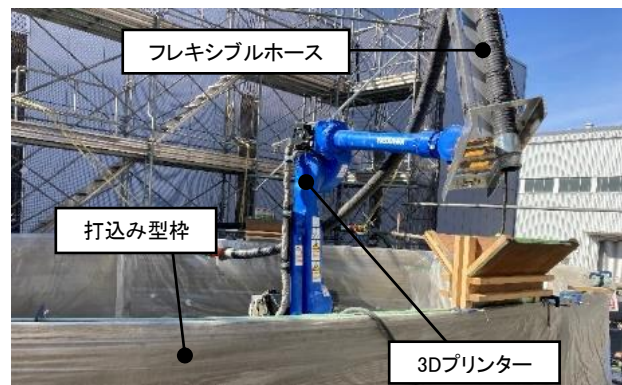


Fig. 22 スリムクリートの打込み  
Placing Slim-Crete

生かしながら防汚性、防塵性を持たせるため、内外部に共に打放しコンクリート用の透明型カラー仕上げ材の疎水剤を塗装した。また、雨掛かりとなる外部については、防水性を高めるためにクリア塗膜防水を上塗りした。今後、外観の経年変化等を確認していく予定である。

## 6. まとめ

本報では、3dpodの設計施工について述べた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 省材料で広い空間が得られる建物形状、複層壁やリブ付きスラブなど3DPの特長を生かして設計を行った。また、3DPやスリムクリートを使用した新材料・新工法を用いた建築物として、国内で初めて建築基準法20条における構造耐力の性能評価を受けて国土交通大臣の認定を取得することで建築確認を得た。
- 2) 3DPモルタルの吐出量と3DPのノズルの移動速度

を制御することで、壁の打込み型枠と屋上スラブのデッキのシェル構造としての厚みを正確に再現できた。また、その設計値に対する施工誤差の平均値は-0.28mm、標準偏差は 1.46mm であり、施工誤差の許容値である±5mm 以内で施工することができた。

- 3) オンサイトでのプリント時の雰囲気温度は、6.4～39.8度と温度変化が生じたが、3DPモルタルに添加する凝結遅延剤量を調整し凝結時間を制御することで、安定的にプリントすることができた。また、外部階段では、緩傾斜のスロープ形状をオンサイトでプリントできることを確認した。
- 4) 全6回のスリムクリートの打込みを行い、3DP製の打込み型枠を使用しスリムクリートを構造部材とする建築物を構築できることを確認した。また、本施工に先立ち実施した室内圧送試験で作成したモックアップ試験体により、打込み型枠にスリムクリートが密実に充填されること、打込み型枠とスリムクリートの付着性状が良好であることを確認した。そして、ポンプ圧送によりスリムクリートを打ち込み、鋼繊維の分離を生じずに圧送できることを確認した。本施工では、圧送前後でフレッシュ・硬化性状が良好であることを確認した。

今後は、本工法の展開やその他の3DPによる建設技術の開発を進めていく。特に、土木分野では、建築分野に対して建築基準法に係る制約も少ないことから展開が早いと考えている。大林組では、既に土木分野の実構造物に向けた開発にも着手している<sup>10)</sup>。また、本年6月16日に閣議決定された規制改革実施計画<sup>11)</sup>において、「建設DX新市場創出に向けた建設用3Dプリンターの社会実装に資する環境整備」が盛り込まれており、建築分野での展開も加速する可能性がある。

さらに、本技術を活用し、ロボティクスコンストラクションを推進することで、建設現場の省人化や効率化により持続可能な建設プロセスの実現を目指す所存である。

## 謝辞

3DPモルタルの設計と供給において、デンカ株式会社様にご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 西脇 智哉, 他: 建設3Dプリンティング技術とその普及状況, 日本建築学会大会(北海道)材料施工部門PD “デジタルファブリケーションが切り開くRC工事の未来” 資料, pp.14-24, 2022
- 2) H.Sakagami et al.: Design and Construction of Shell-shaped Bench using a 3D Printer for Construction, ISARC, 2020



Fig. 23 完成状況 (外観)  
Completion(External View)



Fig. 24 完成状況 (内観)  
Completion(Internal View)

- 3) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 2004
- 4) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書, 技術推進ライブラリーNo.10, 2012
- 5) 一般財団法人日本建築センター: 時刻歴応答解析建築物性能評価業務方法書, 2020
- 6) K.Kanatani: Analysis of 3-D rotation fitting, IEEE trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.16, No.5, pp.543-549, 1994
- 7) 中村 允哉, 他: 積層工法による部材製造に関する研究 その3) 出来形寸法の制御に関する考察, 日本建築学会大会, pp.1257-1258, 2019
- 8) NEXCO: トンネル施工管理要領, pp.7, 2017
- 9) 北村 勇斗, 他: 建設用3Dプリンタにより建設した建築物の設計と施工, コンクリート工学, Vol.61, No.11, 2023
- 10) 北村 勇斗, 他: PCa ケーソン基礎の自動化製造, 大林組技術研究所報, No.86, 2022
- 11) 内閣府, “「規制改革実施計画」(令和5年6月16日閣議決定)”, 2023-06-16.  
[https://www8.cao.go.jp/kiseikaikaku/kisei/publication/program/230616/01\\_program.pdf](https://www8.cao.go.jp/kiseikaikaku/kisei/publication/program/230616/01_program.pdf), (参照 2023-08-20)