

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

坂上 肇 中村 允哉 穴吹 拓也
金子 智弥 松永 成雄 福見 祐司
(本社設計本部) (本社設計本部)

Design and Construction of Shell-shaped Bench Manufactured Using 3D Printer

Hajime Sakagami Masaya Nakamura Takuya Anabuki
Tomoya Kaneko Shigeo Matsunaga Yuji Fukumi

Abstract

Three-dimensional (3D) printers using cement-based materials are expected to yield innovation, such as digital fabrication and automation of building construction. In this study, we develop a composite structure, in which the outer part is laminated with mortar for a 3D printer, and the inner part is filled an ultra-high strength fiber-reinforced concrete. Subsequently, a large shell-shaped bench is fabricated. The design applies a topology optimization that derives a shape with high structural rationality. The total weight is approximately 40%. The shape derived by the topology optimization is difficult to construct using a formwork; however, it is achievable using a 3D printer.

概要

セメント系材料を使用する建設用3Dプリンターは、設計データを即時的に利用できることや自動化への展開など、建設生産の革新が期待されている。一方、セメント系材料だけでは、構造物に生じる引張力を負担できない。そこで、外形部を3Dプリンター専用のモルタルで積層し、内部に引張力を負担する材料として超高強度繊維補強モルタルを打込む複合構造を開発した。さらに、この複合構造による構造物の実現の実証として、幅7m、奥行き5m、高さ2.5mの外形寸法を有するシェル型ベンチを製造した。設計では、構造合理性の高い形態を導出するトポロジー最適化を用い、全体重量を約40%にした。導出した形態は、型枠による施工が困難な形態であり、3Dプリンターで製造するメリットを活かすことができた。

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、3Dプリンター）は、ロボットアーム等に取り付けたノズルから、3Dプリンター専用のモルタル（以下、3Dモルタル）を吐出し、これを積層して部材を製造するものである。

3Dプリンターは、従来の鉄筋コンクリート構造と異なり型枠を使用しないため、自由度の高いデザインや、構造合理性の高い形態を有する構造物を製造できる。また、3Dモルタルを自動的に積層するため、施工の省力化を実現できる可能性がある。さらに、3Dモデルを用意すれば、型枠加工の準備期間がなく、即時に製造に着手できる。従来の製造プロセスで必要であった製造開始までの準備期間を含むトータルの工期を短縮できる可能性もある。

筆者らは、これまでに、3Dプリンターの基礎的な実験として、モルタルブロックで構成する小規模なアーチ状ブリッジを製造した¹⁾。このブリッジに生じる応力は圧縮力が支配的であるため、鉄筋による補強は不要だったが、実用的な構造物の製造には、引張力の負担方法が課題となる。そこで、鉄筋等の鋼材による引張補強の必要な部分が空洞となるように構造物の外形部を3Dモルタル

で積層し、この空洞部に常温硬化型の超高強度繊維補強モルタル（以下、鋼繊維モルタル）を打ち込む複合構造を開発した。

本報では、複合構造に関する基礎実験と、その設計・施工法を確認するために建設したシェル形状の大型ベンチ（以下、シェル型ベンチ）について詳述する。

2. 複合構造の開発

2.1 複合構造の構成

3Dモルタルと鋼繊維モルタルを組合せた複合構造を開発した。複合構造を製造するには、まず鉄筋等の鋼材による引張補強の必要な部分が空洞となるように、構造物の外形部を3Dプリンターで3Dモルタルを積層する。

次に、この空洞部に鋼繊維モルタルを打ち込む。打込んだ鋼繊維モルタルが部材に生じる引張力を負担する。

2.2 3Dモルタルと鋼繊維モルタル

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う。また、初期ひび割れの防止や積層時の形状保持、層間の一体性の確保を目的として、PVA繊維を混合してい

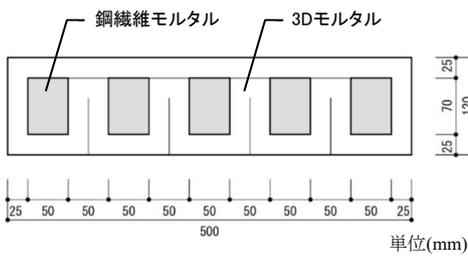


Fig. 1 複合構造の断面構成
Cross Section of Composite Structure



Photo 1 試験体の製造状況
Printing of Test Piece



Photo 2 鋼繊維モルタルの打込み
Placing UFC

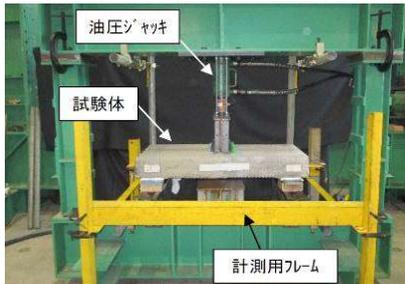


Photo 3 荷重装置
Loading Setup

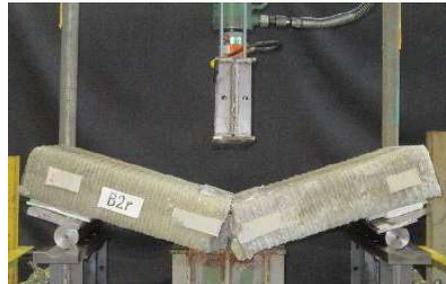


Photo 4 最終破壊直後 (No.1)
Final Fracture (No.1)



Photo 5 破壊面の拡大 (No.1)
Detail of Fracture Surface (No.1)

る。圧縮強度 60N/mm^2 、曲げ強度 3.5N/mm^2 程度である。鋼繊維モルタルは、大林組が開発した常温硬化型のモルタル材料であり、圧縮強度 180N/mm^2 、引張強度 8.8N/mm^2 、曲げ強度 32.6N/mm^2 を達成できる²⁾。さらに、引張強度や曲げ強度が高いだけでなく、高い引張靱性を有するため、単独でも構造体として使用できる。スランプフローは 600mm 程度あり、自己充填性を有する。そのため、打込み作業も容易で、鉄筋を人手で配筋するのに比べ、自動化や機械化も容易であると考えられた。

2.3 力学的性能の検証

2.3.1 実験概要 試験体の断面をFig.1に示す。試験体は、幅 500mm ×厚さ 120mm 、高さ 1m で、内部に幅 50mm ×厚さ 70mm の鋼繊維モルタル部が5箇所均等に配置されている。

試験体の製造は、まずPhoto 1に示すように3Dプリンターで3Dモルタルを高さ 1m まで積層する。次に、Photo 2に示すように、空洞部に鋼繊維モルタルを打ち込む。空洞部に打込む鋼繊維モルタルは、打継ぐこと無く施工した。

製造した複合構造の試験体（以下、No.1）の曲げ性状について確認するため、単純支持として3点曲げ試験を行った。また、比較のため、Fig.1と同様の形状で鋼繊維モルタルを打込まない試験体（以下、No.2）についても曲げ試験を行った。

2.3.2 加力方法および計測方法 Photo 3に曲げ試験の荷重装置を示す。試験体は左端をピン支持、右端ピンローラー支持とし、支持点の間隔は 800mm とした。部材中央において曲げモーメントが最大となるよう、スパン中央上部に油圧ジャッキ及び球座を取り付け、鉛直方向下向きに単調荷重を行った。荷重は、部材中央荷重点

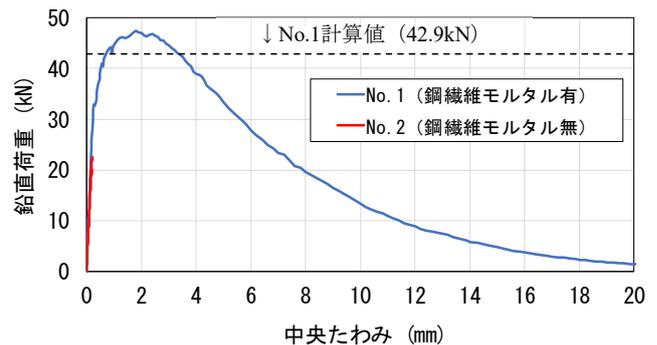


Fig. 2 鉛直荷重-中央たわみ関係
Vertical Load and Center Deflection

における鉛直方向荷重をロードセルにより計測した。変位は、部材中央の鉛直方向変位を変位計により計測し、鉛直下向きを正とした。また、変位については、試験体の表裏で計測した値の平均値とした。

2.3.3 実験結果 Photo 4, Photo 5に最終破壊状況を示す。Photo 4は、No.1の最終破壊直後、Photo 5は、No.1の破壊面の拡大写真である。No.1とNo.2のどちらの試験体も部材中央下端近傍にひび割れが見られ、最終的にはほぼ試験体中央に破壊面が生じた。No.1の破壊面の鋼繊維モルタル部分からは鋼繊維が多数突き出していた。また、空洞部に鋼繊維モルタルが隙間なく充填されていることが確認できた。なお、どちらの試験体においても圧縮縁の3Dモルタルが圧縮破壊の様子は確認できなかった。

次に、鉛直荷重と中央たわみ関係をFig.2に示す。No.1の最大荷重は、 47.4kN であった。一方、鋼繊維モルタルを打込まないNo.2の最大荷重は、 22.5kN であった。No.1は、鋼繊維モルタルが引張力を負担したことからNo.2に

比べて、2倍以上の最大荷重を示した。また、No.2では、最大荷重後に脆性的な破壊が生じ、耐力が急激に低下したのに対して、No.1では鋼繊維モルタルの引張靱性に由来し、なだらかに耐力が低下した。

最後に、曲げ耐力の計算値を求める。Fig. 3に示すように、引張応力度は、鋼繊維モルタル全域が引張強度 8.8N/mm^2 で一定の矩形分布、圧縮応力度は、圧縮縁応力度が3Dモルタルの圧縮強度 60N/mm^2 の三角形分布であると仮定した。なお、3Dモルタルが負担する引張応力度は無視した。この仮定のもと、引張力と圧縮力が釣り合う中立軸の位置を求めた。中立軸の位置から算出した応力中心間距離と引張力で求めた曲げ耐力時の鉛直荷重は 42.9kN となり、実験値よりも僅かに小さかった。このことから、上記の仮定に基づき複合断面の耐力を設計することが可能と考えられる。

以上より、開発した複合構造は、空洞部に打込んだ鋼繊維モルタルが引張力を負担することで、最大荷重と靱性能が向上することが分かった。

3. シェル型ベンチの設計

3.1 設計概要

開発した複合構造の実用性を検証するため、Fig. 4に示すシェル型ベンチを製造した。設計に際しては、引張力が大きく生じる片持ち形状を含み、かつ、3Dプリンターが得意とする曲面を取り入れたデザインとした。

外形は3Dモルタルを積層して形成するが、Fig. 5に示すように内部全体に鋼繊維モルタルを打ち込むと、重量が増加して構造合理性が低下する。そのため、シェル型ベンチの断面構造は、Fig. 6に示すように中空部分を設け重量の軽減を図った。内部構造の形態の決定には、FEM解析で応力が小さい部分を除去し、徐々に最適な形態を導くトポロジー最適化を適用した。内部構造の設計フローをFig. 7に示す。3Dプリンターは型枠を使用せずに製造できるため、中空を含むような複雑な形態を製造することに適している。

なお、複合構造は、前述の曲げ試験の結果から3Dモルタルと鋼繊維モルタルが一体として挙動することが示唆されているが、メカニズムが未解明な部分も多いことから安全に配慮し、鋼繊維モルタルの断面のみで成立するように設計した。

3.2 トポロジー最適化と意匠上の形態の調整

トポロジー最適化は、初期重量から削減する重量の割合を目的値として設定し、この目的値を満たす範囲で応力が最小となるような形態を導出する。今回、初期重量から削減する重量の割合の目標値を65%とした。FEM解析における荷重条件は、長期荷重（自重）のみとし、供用中に生じる短期荷重（水平力）は考慮しなかった。これは、シェル型ベンチの大部分が片持ち形状で、自重の影響を受けやすい形状であったためである。また、Fig. 8

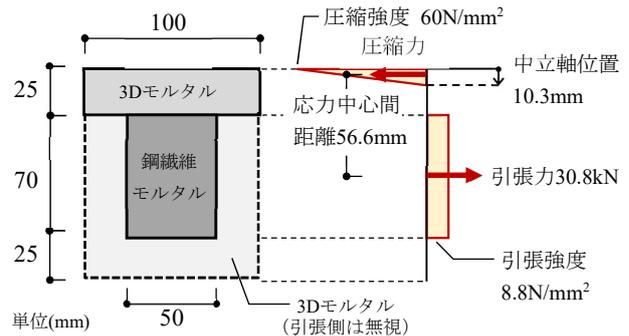


Fig. 3 曲げ耐力算定における応力ブロック
Stress Block for Calculation of Bending Strength

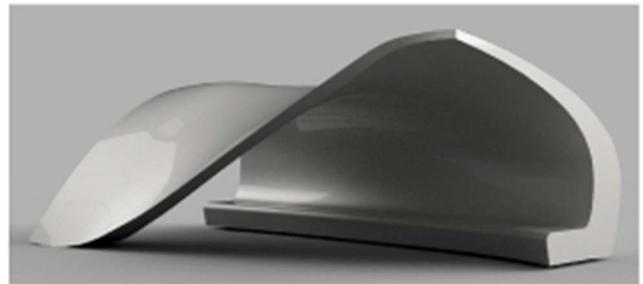


Fig. 4 シェル型ベンチの外形デザイン
External Design of Shell-shaped Bench

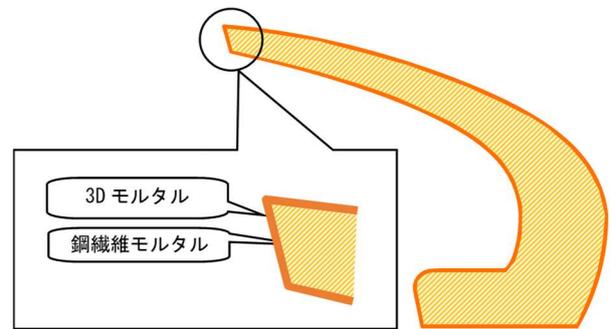


Fig. 5 内部全体に鋼繊維モルタルを打込んだ様子
Layout of 3D Mortar and UFC (Fully Filled)

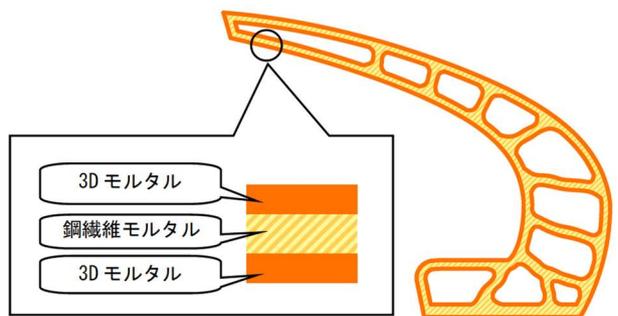


Fig. 6 構造合理性の高い形態のイメージ
Layout of 3D Mortar and UFC (Structurally Rational)

に示すように、トポロジー最適化は、ベンチ全幅7mを1mごとに7分割した各部材の中央位置の断面形状で幅30mmの薄板と仮定して行った。固定条件は、各部材底部の両端部を固定とした。

トポロジー最適化の結果の一例をFig.9に示す。7分割した各部材のトポロジー最適化の結果は、Fig.9に類似のトラス状の形態であった。なお、シェル型ベンチの小口面は塞がずにトポロジー最適化で得られたトラス状の形態を見せる意匠とした。また、小口面からシェル型ベンチを見たときに、各部材の束材の位置が揃って見えるように各部材の束材の位置を微調整した。

3.3 許容応力度の検定

トポロジー最適化では、形態の導出過程で算定された応力が、鋼繊維モルタルの許容応力度の範囲内であるかの検定が行なえない。そのため、意匠上の調整をした形態を線材に置換して静的応力解析を行い、許容応力度の検定を行う。この際、長期荷重に加えて、供用中に生じる短期荷重として、水平力(0.2G)も考慮した。許容応力度の検定をクリアするまで、構造設計者が手作業にて断面形状を修正した。なお、今回の設計では、長期荷重および短期荷重時の許容応力度は、鋼繊維モルタルの圧縮強度180N/mm²および引張強度8.8N/mm²のそれぞれ、1/3および2/3とした。

許容応力度の検定後の最終デザインをFig.10に示す。なお、最終デザインでは、内部構造が密実な状態の重量から軽量化し、全体重量を約40%とした。

4. 製造のための要素技術の開発

4.1 バルブの開発

3Dモルタルの積層において材料の吐出を一時停止できないと、積層経路は一筆書きかつ交差しない経路でなければならない¹⁾。シェル型ベンチには空洞部があり、外周と空洞の周囲(内周)を積層するため、外周から内周へ、また内周から他の内周へ、Photo 6に示すようにノズルを間欠的に移動しなければならない。この際、3Dモルタルの吐出を一時停止する必要がある。そこで、ポンプと連動するバルブを開発して、3Dモルタルの吐出を一時的に停止することを可能とした。

4.2 積層経路の生成

3Dモデルから3Dモルタルの積層経路を生成するソフトウェアを開発した。3Dモデルは、STL形式と呼ばれる三角メッシュで立体を表現する形式で用意する。STL形式は、3Dモデリングのソフトウェアで、標準的に出力が可能な形式である。Fig.11にSTL形式のモデルから任意の積層高さの積層経路を生成した例を示す。なお、積層経路は、自動的に内周と外周に分類される。また、開発したソフトウェアでは、生成した積層経路に従ってロボットアームを制御するためのデータも合わせて生成される。

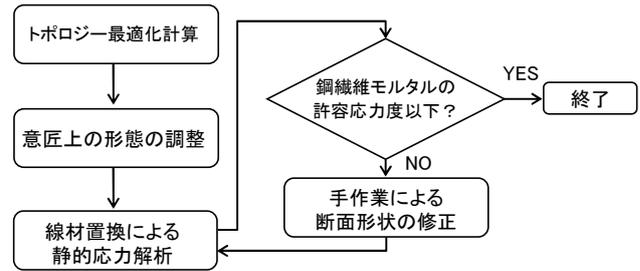


Fig. 7 設計フロー
Design Flow

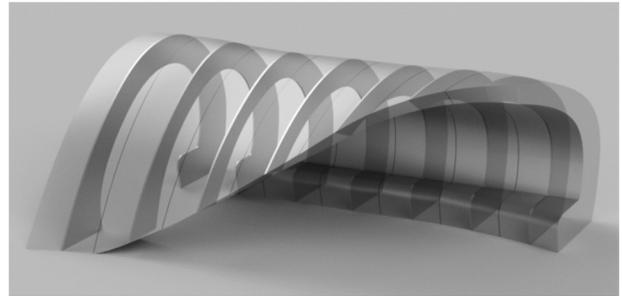


Fig. 8 トポロジー最適化を適用した部分
Sections to Apply Topology Optimization

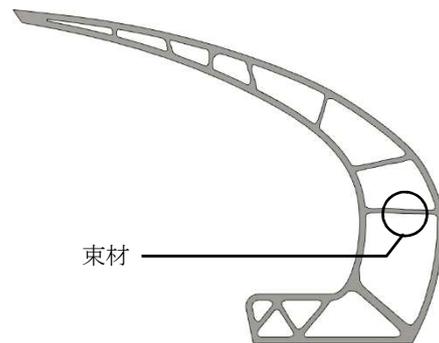


Fig. 9 トポロジー最適化で導出した形態の例
Example of Applying Topology Optimization

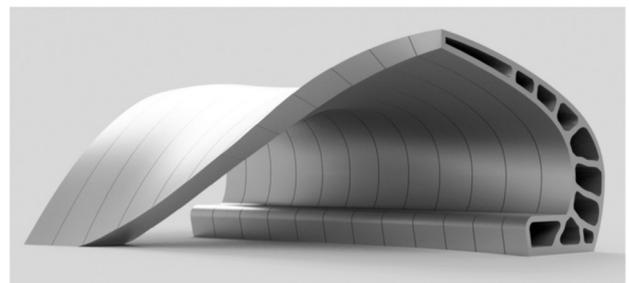


Fig. 10 最終デザイン
Final Design

5. シェル型ベンチの施工

5.1 施工概要

全体を12の部材に分割して施工した。この理由は、積層に要する時間(1日の作業時間)の制約や、小口面を寝かせた状態で積層するため、部材製造後の設置場所へ

の移動, 取り付けを安全かつスムーズに行うためである。12部材の分割幅は, 両端部を幅500mm, その他を幅600mmとした。各部材は, クレーンにて隣接する部材との間に幅10mmの目地を設けて設置し, 隣接する部材と相互に接続せず, コーキングで塞ぐものとした。

3Dプリンターは, 屋内に設置した。シェル型ベンチの部材の製造工程をFig.12に示す。製造のサイクル工程は, 5日とした。1日目に, 3Dモルタルの積層により複合構造の外形を製造する。2日目は, 3Dモルタルの強度発現のための養生日である。3日目は, 鋼繊維モルタルの打込み日である。4日目は, 鋼繊維モルタルの強度発現のための養生日である。5日目は, 3Dプリンター上から設置場所へ移動する。

5.2 施工状況

5.2.1 3Dモルタルの積層 3Dモルタルの積層状況をPhoto 7, Photo 8に示す。積層したモルタルの幅と厚さは, 3Dモルタルの吐出量とノズルの移動速度を調整することで所定の寸法に制御することができる³⁾。事前にこれらを調整し, モルタル幅30mm, モルタル厚5mmとした。

3Dモルタルの積層は, 部材を寝かした状態で行った。正味の積層時間は, 約5時間であった。3Dモルタルの積層が完了した後, 湿潤養生マットで覆い, 鋼繊維モルタル打込みの前日夕方まで散水養生した。

5.2.2 鋼繊維モルタルの打込み 鋼繊維モルタルは, 容量0.3m³のコンクリートバケツを使用して, 打ち継ぐこと無く一度に打ち込んだ。打込み状況をPhoto 9に示す。鋼繊維モルタルは, 自己充填性がある。そのため, 3Dモルタルの積層で製造した複雑な形態にもかかわらず, 鋼繊維モルタルを打ち込むことができた。また, 常温硬化する特長があるため, 採暖養生などの特別な養生は不要であった。

5.2.3 部材の移動と建込み 鋼繊維モルタルの打込みから1日養生した後に, 部材を3Dプリンター上から設置場所まで移動し, 建て込んだ。Photo 10に示すように, 屋根部分の先端側に支保工を設けて部材を仮受けした。最後に, ベンチ座面底部に取付けたインサートを介して基礎に固定させた。この支保工は, 基礎への固定後に撤去した。

5.2.4 仕上げ工事 部材間の目地には建築用変性シリコーン系シーリング材を充填した。3Dモルタル面への塗装性能に関して, 今後, 暴露試験を行う計画であることから, 水性ふっ素樹脂系と, 弱溶剤型2液シリコーン系の2種類の塗料を半分ずつ塗り分けた。完成状況をPhoto 11に示す。

6. まとめ

本報では, セメント系材料を用いた3Dプリンターで実用的な構造物を実現するため, 3Dモルタルと鋼繊維モルタルとの複合構造を開発し, その基礎的な力学的性能を

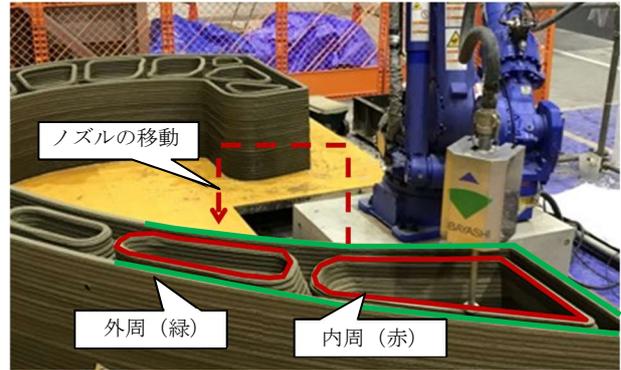


Photo 6 間欠移動する積層経路の例
Example of Jump in Print Path

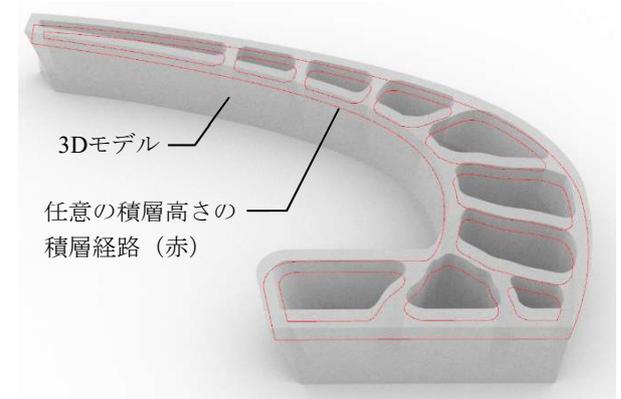


Fig. 11 積層経路の自動生成
Automatic Generation of Print Path

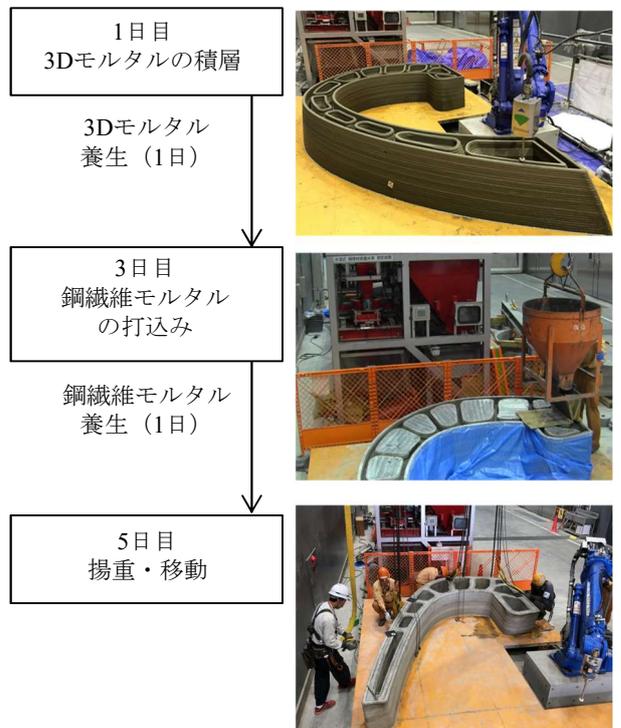


Fig. 12 シェル型ベンチの部材の製造工程
Manufacturing Process of Shell-shaped Bench



Photo 7 3Dモルタルの積層状況（開始直後）
Printing of 3D Mortar (at Start)



Photo 8 3Dモルタルの積層状況（終了時）
Printing of 3D Mortar (at Finish)

実験により検証した。また、この複合構造による構造物の実現の実証実験として実施した、幅7m、奥行き最大5m、高さ最大2.5mのシェル型ベンチの設計と施工についてまとめた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 開発した複合構造は、鋼繊維モルタルが引張力を負担することで、最大荷重と靱性能の向上が見られた。この複合構造を用いて、引張力の負担が必要な複雑形状のシェル型ベンチの製造を行うことができた。
- 2) トポロジー最適化により、シェル型ベンチの全体重量を約40%にした。また、トポロジー最適化で生成した曲面からなる中空部は、型枠による施工が困難な形状であり、3Dプリンターで製造するメリットを生かすことができた。
- 3) 鋼繊維モルタルは、自己充填性があり、3Dプリンターで製造した複雑な形態に対しても密実に打込むことができた。

謝辞

本研究では、3Dプリンター専用のモルタルの設計と供給においてデンカ株式会社にご協力を頂きました。ここに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 坂上肇，他：セメント系材料を用いた3Dプリンターによる部材製造技術，大林組技術研究所報，技術紹介，No82，2018
- 2) 平田隆祥，他：常温硬化型UFC材料「スリムクリート」の開発，セメント・コンクリート，Vol.782，pp.24-28，2012
- 3) 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，材料施工，pp.1257-1258，2019



Photo 9 鋼繊維モルタルの打込み状況
Placing UFC

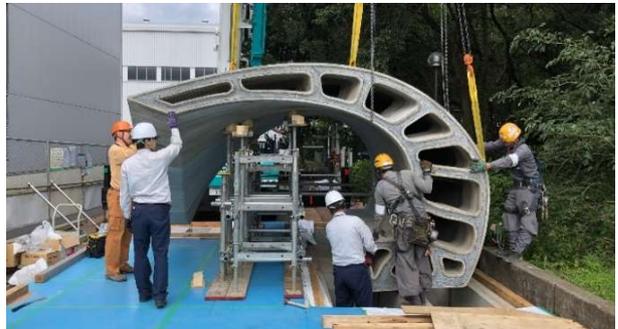


Photo 10 建方状況
Erection and Installation of Pieces



Photo 11 完成状況
Completion of Shell-shaped Bench