

## 論文 建設用3Dプリンターで造形した無筋モルタルベンチの構造性能評価

村上 健斗\*1・眞弓 碧生\*2・田中 泰司\*3

**要旨：**本研究では、建設用3Dプリンターで造形した無筋モルタルベンチの載荷試験とFEM解析により構造性能評価を行った。まず、十分な安全率を設定した上で、FEM解析を行い、設計荷重以上の耐力を有することを確認した。次に実物大の試験体を制作し、載荷試験を行って、耐力を直接確認した。その結果、本研究で検討した無筋ベンチは、供用時の荷重に対し安全であることを確認した。また、FEM解析との比較から施工誤差や界面の一体性が構造性能に深く影響を及ぼすことが示唆された。

キーワード：建設用3Dプリンター、FEM解析、層間付着、DIC

## 1. はじめに

近年、建設用3Dプリンターに関する技術開発が世界各国で進められている。3Dプリンティングは型枠が不要なため、造形する部材の自由度を高めたり、構造最適化を取り込むことができたりする。また、使用材料の削減や構造物の軽量化、省人化につながり、コンクリート施工の生産性向上に対する有効な解決策の一つとしても注目されている。

3Dプリンティングされた構造物は、通常のコンクリート構造物とは異なり多くの界面が存在する。界面の付着強度は母材より低下することがあるため、その影響を考慮する必要がある。積層面が十分に一体化していない場合、耐久性にも影響を与える可能性がある。補強方法が確立していないことも課題の一つである。一方、3Dプリンティングされた構造物は施工例や構造性能に関する知見が少なく、構造計算などでは構造性能を保証することができないため、実物大やモックアップ試験による構造実験によって性能照査の根拠とする事例がある。

そこで、本研究では比較的複雑な造形を有する無筋モルタルベンチを研究対象として実物大載荷試験を行った。また、FEM解析との比較を行い、3Dプリンティング固有の留意点や構造性能評価方法を検討した。

## 2. 載荷試験

## 2.1 試験体の概要

本研究の検討対象は、金沢工業大学 蜂谷研究室および下川研究室でデザイン、設計された無筋モルタルベンチである。設計外力を2.5kN・1点集中荷重と設定し、安全率3を確保するため、モルタルの引張許容応力を引張強度の1/3として3次元FEM解析を行って安全性を確認した後に、実物大の試験体を載荷して、実際の耐力を確認することにした。試験体の側面図、断面図を図-1に

示す。試験体一覧を表-1に示す。また、事前のFEM解析で使用した材料特性値を表-2に示す。コンクリートの圧縮強度は25.5MPaとし、その他の材料特性値にはEurocode 2に従って圧縮強度から推定した値を適用した。ただし引張強度は上記に記載する通り、3Dプリンティングの造形の出来形のばらつきや積層の界面が存在することを考慮し、推定値から1/3に割り引くことにした。

表-1 試験体一覧

試験体番号	実験目的
No.1	支間中央の正曲げ耐力の評価
No.2	支点の負曲げ耐力の評価
No.3	張り出し部の押し抜き耐力の評価

表-2 事前解析で使用した材料特性値

圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
25.5	0.772	30320	0.2

表-3 使用材料

材料名	記号	摘要
水	W	水道水, 密度 1.00g/cm <sup>3</sup>
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
混和材	γ	炭酸化混和材, 密度 2.85g/cm <sup>3</sup>
	SF	シリカフェーム, 密度 2.61g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	6号珪砂, 密度 2.61g/cm <sup>3</sup>
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤(標準形 I 種)
	DF	消泡剤

\*1 金沢工業大学 工学部環境土木工学科 (学生会員)

\*2 金沢工業大学大学院 工学研究科環境土木工学専攻 (学生会員)

\*3 金沢工業大学 工学部環境土木工学科教授 博(工) (正会員)

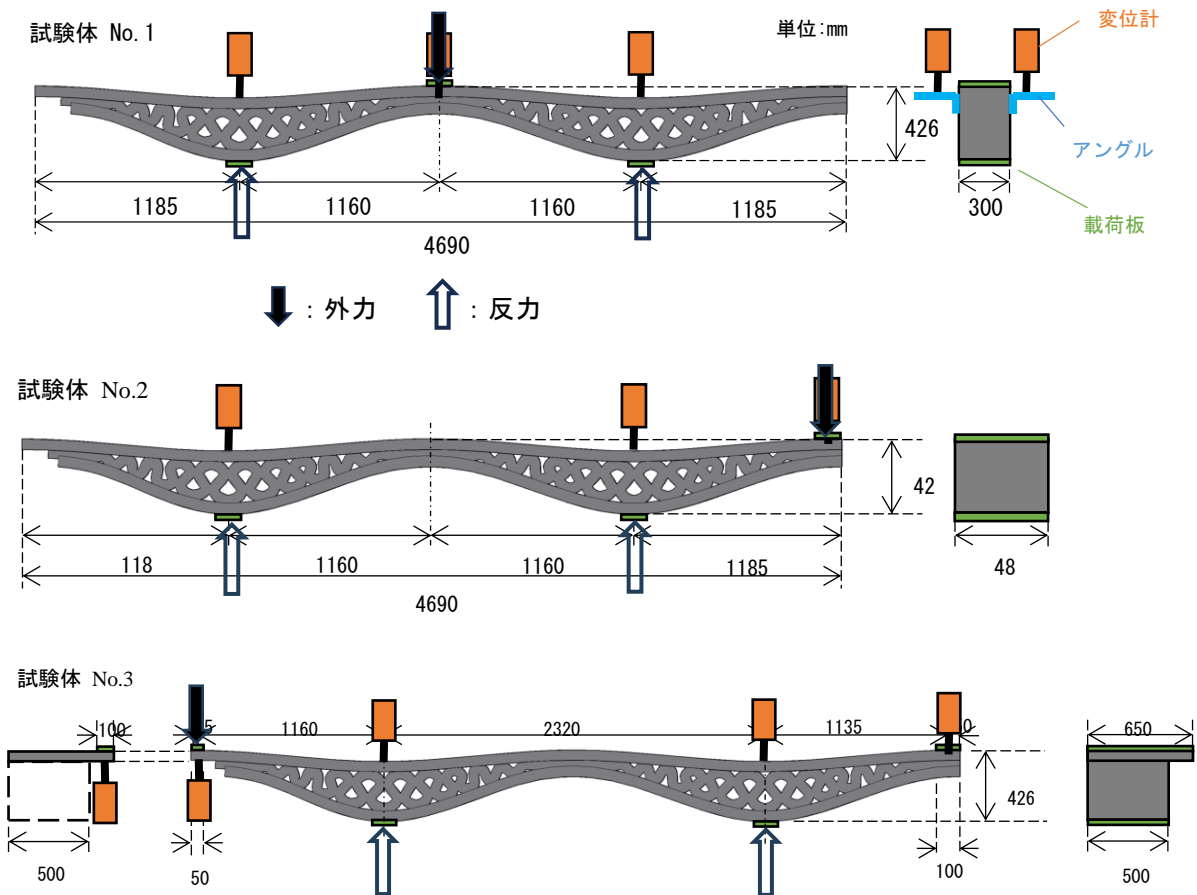


図-1 試験体の側面図，断面図

使用材料を表-3に、モルタルの配合を表-4に示す。水結合材比は0.31であり、細骨材には6号珪砂を使用した。結合材には、普通ポルトランドセメント、炭酸化混和材に加え、チキソトロピー性の付与を期待してシリカフェームを使用した。混和剤には、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤と消泡剤を用いた。

表-4 モルタルの配合

W/P (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
	W	S	C	γ	SF	SP	DF
31	280	970	187	496	211	7.15	4.47

## 2.2 実験概要

試験体 No.1 の荷重方法を例として図-2に示す。荷重点周辺の3Dプリンティングの積層痕による表面の凹凸はグラインダーによって削り、その上に石こうを敷いて平らにしてから、H鋼を設置した。そして、このH鋼上部から、油圧ジャッキにて加力を行った。荷重は容量50kNのロードセルにて計測し、高感度変位計を用いて支点部及び荷重点の計測を行った。また、荷重点付近、支点部においてデジタル画像相関法(以降DICと記す)による変位計測を行った。

る変位計測を行った。

支点部の不陸も石こうを敷くことによって、できる限り除去した。支点は両端ともにローラー支持とした。

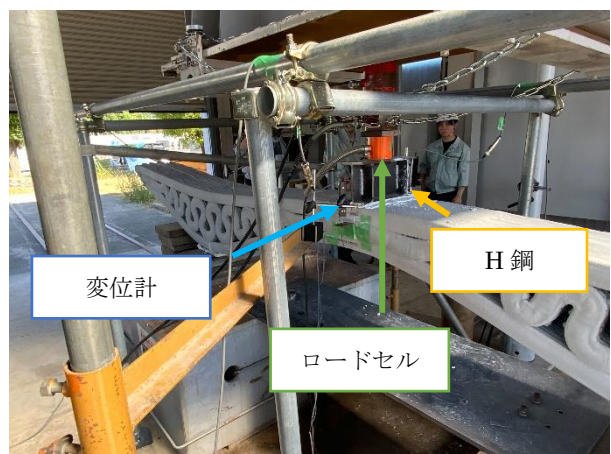


図-2 試験体 No.1 の荷重方法

## 2.3 試験結果

荷重試験と事前解析の結果を表-5に示す。また、各試験体の破壊状況を図-3に示す。各試験体の主応力図を図-4~6に示す。試験体 No.1 と No.3 に関しては事前



(a)試験体 No.1



(b)試験体 No.2



(c)試験体 No.3

図-3 各試験体の破壊状況

表-5 試験結果一覧

試験体番号	実験	破壊挙動	破壊荷重
No.1	実験	ベンチ中央で曲げ破壊	5.8kN
	事前解析	ベンチ中央で曲げ破壊	3.8kN
No.2	実験	ベンチ中央で曲げ破壊	9.8kN
	事前解析	ベンチ中央付近で曲げ破壊	4.4kN
No.3	実験	張り出し部で押し抜きせん断破壊	5.4kN
	事前解析	張り出し部で押し抜きせん断破壊	3.8kN

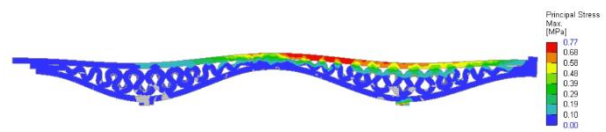


図-5 試験体 No. 2 の最大荷重時の主引張応力図(変形倍率 100 倍)

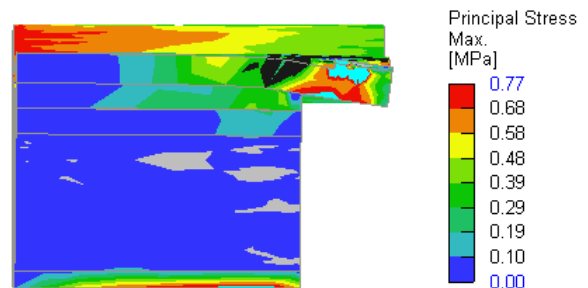


図-6 試験体 No. 3 の最大荷重時の主引張応力図(変形倍率 100 倍)

解析の破壊荷重よりも 2 倍程度大きいので、実際の引張強度が事前解析で設定した値よりも 1.5~2 倍程度大きいと考える。

荷重と載荷点変位の関係を図-7 に示す。いずれの試験体においても最大荷重に至るまで、荷重と載荷点変位は直線関係となった。試験体 No.1, 2 は、中央付近でひび割れ発生によって、すみやかに荷重が解放され載荷点変位が急増した。試験体 No.3 も同様に、張り出し部でひび割れ発生によって、すみやかに荷重が解放され載荷点変位が急増した。

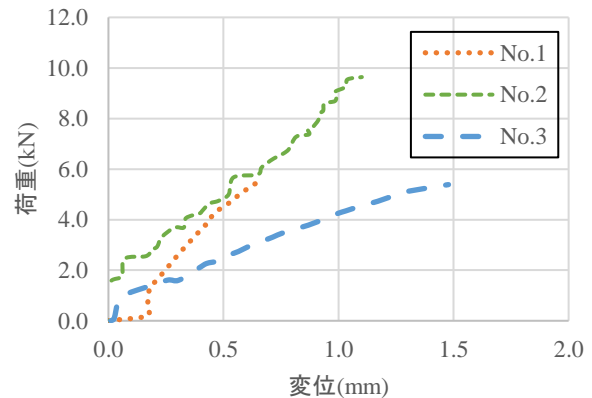


図-7 各試験体の荷重-載荷点変位関係

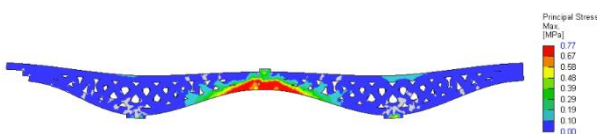


図-4 試験体 No. 1 の最大荷重時の主引張応力図(変形倍率 100 倍)

### 3. DIC による計測

載荷点変位だけでなくベンチの変位分布を取得して、後述する FEM 解析との結果を比較し、FEM 解析の妥当

性を検証するために DIC による変位計測を行った。

### 3.1 試験概要

DIC は、変形前後のデジタル画像を比較することで、計測範囲全体の変位分布を取得することができる計測方法である<sup>2)</sup>。上記の載荷試験の変位計の値と DIC の解析結果を比較することにより、精度の検証を行った。DIC は載荷点付近と支点付近で計測を行った。DIC では、表面の模様を読み取り、模様の変化を画像解析することで、変位計測を行う。そこで、図-8 に示すように、DIC の計測面には、各試験体の載荷点付近全体にランダム模様の塗布を行った。試験体の撮影には、解像度が 1440×1080pixel のビデオカメラを使用し、加力開始直後から破壊荷重まで撮影した。撮影した動画から 1 秒毎に 1 コマの画像を抽出して解析を行った。

### 3.2 解析結果

DIC で得られた鉛直変位と変位計の計測値との比較を行った。例として、図-9～10 に試験体 No.3 の荷重—載荷点変位関係を示す。図中の max, med, min はそれぞれ DIC 変位分布における最大値、中央値、最小値を示している。図-9～10 を見てみると、DIC の鉛直変位と変位計の計測値はほぼ一致していることがわかる。



図-8 試験体へのランダム模様の塗布状況

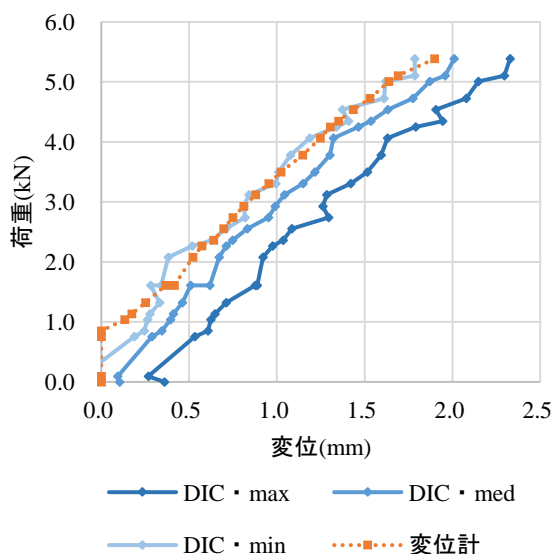


図-9 試験体 No. 3 の荷重—変位関係

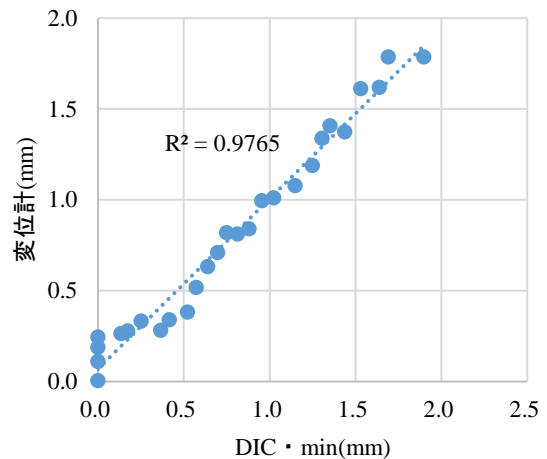


図-10 試験体 No. 3 における DIC と変位計の関係

## 4. 構造解析との比較

### 4.1 構造解析方法

解析モデルは 3D CAD(Rhinoceros)を使用して作成した。層間ごとの付着は完全付着とした。完全付着モデルを図-11 に示す。また、比較用に中層のひだ部分を除去したモデルを作成した。中層を除去したモデルを図-12 に示す。支点および載荷点には試験と同様の載荷版を作成し、弾性体として設定した。

構造解析は、汎用型構造解析ソフト(ATENA)を使用した。荷重としては自重および載荷荷重を考慮した。材料構成則は、圧縮側は硬化と軟化で構成されるモデルを使用し、引張側は引張軟化を含むモデルを使用した。材料構成則を図-13 に示す<sup>3)</sup>。解析に使用した材料定数を表-6 に示す。各材料定数は材料試験から得られた結果を用いた。支点の境界条件は片側を完全拘束とし、もう一方をローラー支持とした。

### 4.2 構造解析結果

各試験体の構造解析結果と載荷試験の比較を図-14～16 に示す。試験体 No.1, 3 は初期剛性、破壊荷重共に FEM 解析の方が実験より高い結果を示した。3D プリンティングによる層間の付着強度が小さかったために、上層と中層が完全に一体化していなかったことが要因のひとつであると考えられる。図-17 に、試験体 No.1 の上層と中層の接着面が不足していた部分を示す。中層のひだを削除した解析結果は完全付着の場合に比べて、剛性と耐力が大幅に低下した。試験結果は剛性および耐力とともに完全付着と中層のひだの付着がない場合の中間に位置した。これらのことから試験体 No.2 は層間の付着が良好であったため FEM 解析と試験結果が同等の結果となったと考えられる。

図-18, 19 に試験体 No.3 における中層除去モデルの荷重—変位関係を示す。図-18, 19 より、載荷点から

300mm または 500mm 離れた位置においても載荷点とほぼ同程度の変位が生じており、解析値と乖離していることから、上層と中層の接着不良以外にも変位が大きくなった要因があると考えられる。なお、目視では層間の接着不良箇所すべてを特定することは困難であったので、その検査確認方法を今後の課題である。

このように、3D プリンティングされた部材の構造性能評価に関しては、層間の付着の考慮が不可欠であることが明らかとなった。ただし、今回の実験では設計荷重の範囲内ではひび割れが生じる様子が目視で確認できなかったため、安全であると確認した。

最大荷重時の主応力分布を図-20~22 に示す。各試験体で載荷試験のひび割れ発生箇所と同様の場所に引張強度と同等の応力が生じていることを確認した。

表-6 解析に使用した材料定数

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数(MPa)	ポアソン比
試験体 No.1	52.2	2.3	23800	0.15
試験体 No.2	40.1	2.3	23400	0.17
試験体 No.3	55.0	2.6	25600	0.22

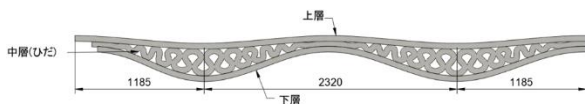


図-11 完全付着モデル

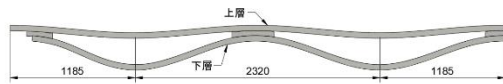


図-12 中層除去モデル

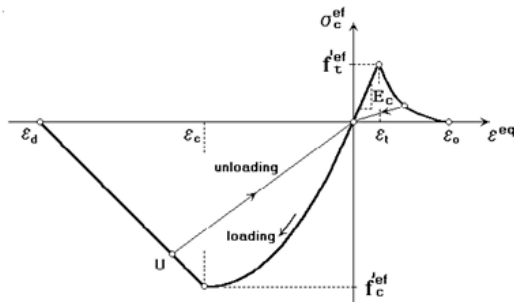


図-13 モルタルの構成則<sup>3)</sup>

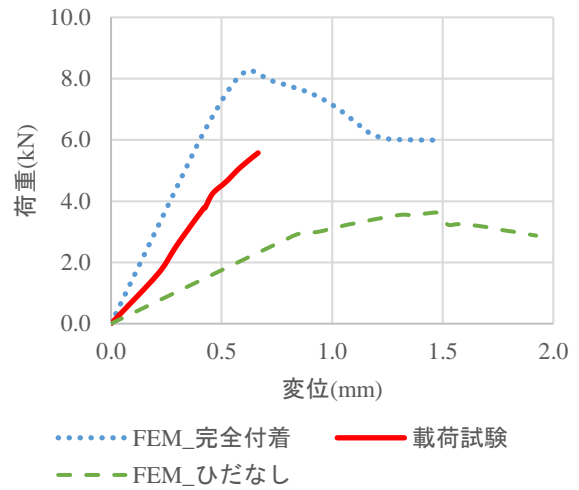


図-14 試験体 No. 1 の荷重—載荷点変位関係

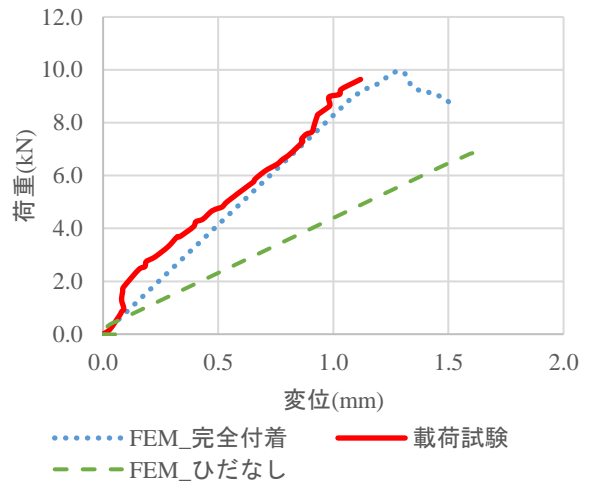


図-15 試験体 No. 2 の荷重—載荷点変位関係

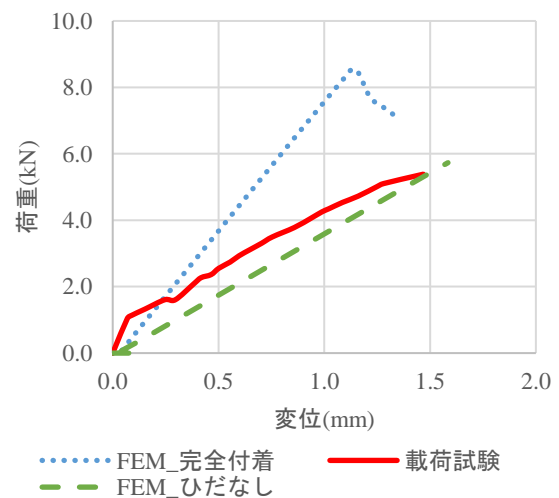


図-16 試験体 No. 3 の荷重—載荷点変位関係



図-17 試験体 No. 1 の層間接着不良箇所

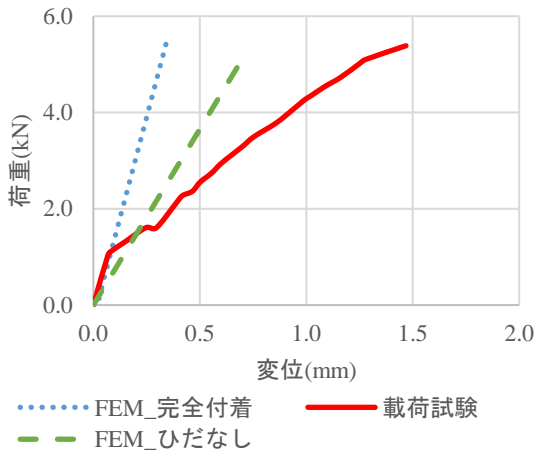


図-18 試験体 No. 3 の荷重変位関係 (载荷点から 300mm)

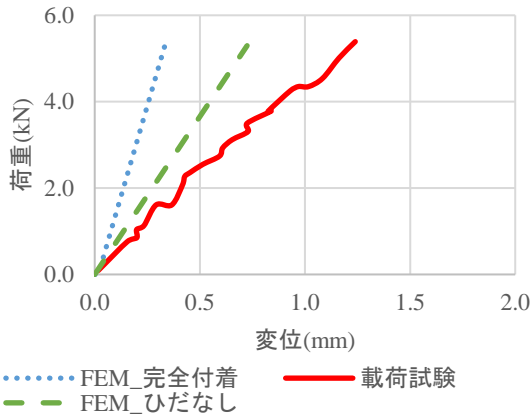


図-19 試験体 No. 3 の荷重変位関係 (载荷点から 500mm)

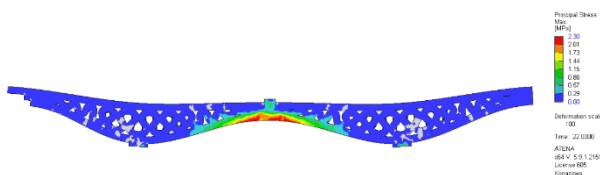


図-20 試験体 No. 1 の主引張応力分布 (変形倍率 100 倍)

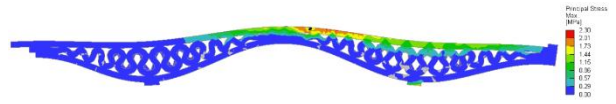


図-21 試験体 No. 2 の主引張応力分布 (変形倍率 100 倍)

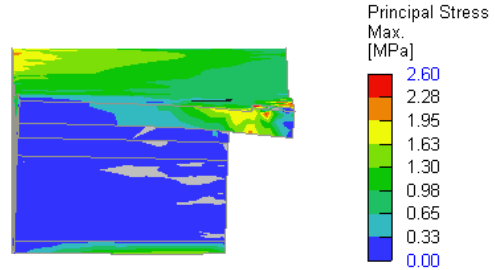


図-22 試験体 No. 3 の主引張応力分布 (変形倍率 100 倍)

## 5. まとめ

本論文では 3D プリンティングされた無筋ベンチの構造性能評価を行った。FEM 解析や载荷試験の比較を通じて以下の知見を得た。

- (1)本研究の対象とした 3D プリンティングにされた無筋構造物は所用の性能を有していることを実物大载荷試験により確認した。
- (2)3D プリンティングした構造物は積層による施工誤差を設計時に考慮する必要がある。
- (3)3D プリンティングした構造物の载荷試験と FEM 解析結果を比較した結果、実際の挙動をある程度予測できることが確認した。
- (4)3D プリンティングした構造物は積層面との付着の良し悪しがあるため、接合面が小さい場合には付着が小さかった場合の影響を、今後の設計時に考慮する必要があることを確認した。

謝辞：本研究は KIT×KAJIMA 3D Printing Lab の共同研究として実施した。また、载荷試験を株式会社日本ピーエスのご協力を得て実施した。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会: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, 2021
- 2) 車谷麻緒, 邊見哲一, 小坏祐輔, 橋口和哉「コンクリート供試体の圧縮試験に対するデジタル画像相関法の計測制度に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A2, Vol.73, No.2, 2017
- 3) Vladimir Cervenka et al : ATENA Program Documentation Part8 Users Manual for ATENA GID-interface , 2021