

有限要素法による 3D プリンティングモルタルの 積層安定性評価に関する基礎的検討

田中 俊成^{*1}・吉田 昂平^{*1}・山本 悠人^{*1}・木ノ村 幸士^{*1}

Keywords : T-3DP, 3D printing, buildability, elastoplastic model, time-dependent, collapse modes

T-3DP®, 3D プリンティング, 積層安定性, 弾塑性モデル, 時間依存性, 崩壊モード

1. はじめに

建設用 3D プリンティング（以降、3DP と記載）は、PC で設計した 3D モデルを 3D プリンターで印刷する技術である。従来工法では手間のかかる複雑な形状を容易に造形することができ、機械化施工による省人化・省力化の効果も期待されている。設計から施工までをシームレスに繋ぐ建設 DX 技術として当社でも開発を進めてきた¹⁾。

3DP で主流となっている材料押出方式では、フレッシュ状態のセメント系材料を押出してプリントし、層状に積み重ねて立体形状を構築する。この方式ではプリント後の材料のこわばりや凝結により積層の自重に抵抗する。

3DP ではプリントした層が変形したり崩壊したりせず安定的に積層できること（積層安定性）が工法成立の前提となる。積層安定性には材料性状、造形物の形状や高さ、プリント速度などの要素（プリント条件）が影響する。さらに、材料性状には配合やプリントを開始する時間など管理可能な条件や、温湿度など管理の困難な条件も影響するため、十分な積層安定性を有するプリント条件を計画するのは一般に容易ではない。

筆者らの過去のプロジェクト²⁾では事前に実環境・実物大の条件で試積層を行って十分な積層安定性を有するプリント条件を確認するなどしてきたが、十分な積層安定性が確保できない場合には造形物の形状を再度設計しなおすなどの手戻りが発生する。また、3DP のオンサイト化や造形物の大規模化を見据えると、事前の実験だけで積層安定性を確認するのは非効率あるいは現実的に不可能であるため、今後、

3DP をスマートに活用していく観点で解析的手法^{2), 3)}による予測を補完的に用いるのが有用と考えた。

そこで本論文は、種々のプリント条件を複合的に考慮して積層安定性を解析的に評価することを目的とし、その基礎検討として円筒 2 ケース、中空四角柱 2 ケースの積層実験とその再現解析を行った。

2. 材料の構成則と時間依存モデル

2.1 材料の構成則

本論文の解析における材料構成則は、Wolfs ら²⁾と同様に弾塑性モデルとした。弾性挙動の材料パラメータとして、ヤング係数 E 、ポアソン比 ν を、塑性挙動の材料パラメータとして粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ 、ダイレタンシー角 ψ を設定した。降伏基準には Mohr-Coulomb の破壊基準を用いた。流れ則は非関連流れ則とした。3D プリント中に 3DP 材料の物性が時間依存変化する影響を考慮するため、材料パラメータは時間依存型とした。

2.2 材料パラメータの時間依存モデル

3DP 材料の材料パラメータの時間依存変化モデルとして、図-1 のようなモデルを採用した。3DP 材料は、プリント前は圧送システムの中で一定のせん断が与えられて流動性を保持し、プリント後は静置されることでこわばりを発揮する⁴⁾。この 2 つの異なる時間依存性を表現し、かつ最も簡単な仮定として、3DP 材料の時間依存変化を 2 段階の直線モデルで表現するモデルを採用した。なお、時間依存モデルを適用するのは、後述の検討より時間依存性が顕著だったヤング係数 E と粘着力 C のみとし、その他パラメータは一定値とした。

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室

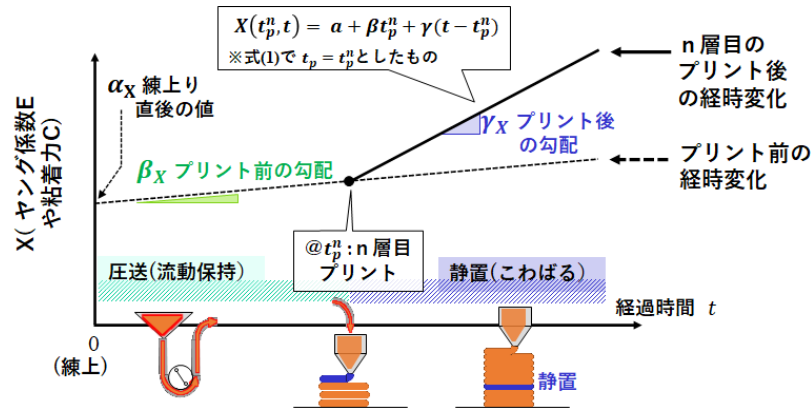


図-1 材料パラメータの時間依存モデルの概要

Fig.1 Overview of time-dependent model of material parameters

本論文では以降、時刻表記の 0 は材料の練上がり時刻とする。時刻 t_p にプリントされた材料の、時刻 t における材料パラメータ $X(t_p, t)$ の値を以下の式で与える。

$$X(t_p, t) = \alpha_X + \beta_X t_p + \gamma_X (t - t_p) \quad (X = E, C) \quad (1)$$

ただし、 $t \geq t_p$

ここで、 α_X は練上がり直後 ($t=0$) の X の値を表す定数、係数 β_X はプリント前の X の変化率を表す定数、係数 γ_X はプリント後の X の変化率を表す定数である。 α_X 、 β_X 、 γ_X を時間依存モデル定数と呼ぶこととする。

なお、図-1 は、点線でプリント前の材料の X ($= E, C$) の時間依存変化を表し、実線で n 層目 (プリントされた時刻 t_p^n) の材料のプリント後の X の時間依存変化を例示したものである。

3. 積層実験と材料試験

3.1 3DP の諸条件と積層実験のケース

3.1.1 共通の 3DP 条件

3DP 材料には、普通セメントベースのモルタルを使用した (以降、3DP モルタルと記載)。3DP モルタルの基本的な配合や練混ぜ方法は過去の研究⁵⁾と同様とした。ただし、化学混和剤のうち高性能 AE 減水剤 (以降、SP と記載) の種類と硬化促進剤添加率はパラメータとして変化させた。SP にはポリカルボン酸エーテル系で遅延形のものと同標準形のものを使用した (以降 SP-R, SP-N と記載)。硬化促進剤は無機カルシウム塩系のものを使用した。

3D プリントには直径 25 mm のノズルを使用し、1 層の高さは 10 mm とした。

3.1.2 積層実験のケース

表-1 に示す 4 ケースの積層実験を実施した。造形モデルの形状、設計寸法、列数および 1 列の射出幅、

表-1 積層実験のケース
Table 1 Cases of piling-up experiments

ケース名	造形モデルの形状	造形モデルの設計寸法 []内は実施寸法	列数×1 列の 射出幅	配合 (SP 種類、硬化促進剤 添加率)	プリント速度 $t_{interval}$	1 層目プリント時刻 t_p^1	外気温、練上がり温度*1 (°C)
円筒 1	円筒	外径 600 mm [615 mm]	2 列× 32.5 mm	配合 1 (SP-R, 硬化促進剤 0.33%×B)	45s/層	34 分 (練上を 0 分)	19.9, 24.3
円筒 2	円筒	外径 600 mm [610 mm]	1 列× 30 mm	配合 2 (SP-R, 硬化促進剤 0.67%×B)	20s/層	30 分	23.5, 32.6
角筒 1	中空 四角柱	外寸 600×400 mm [615×415 mm]	2 列× 32.5 mm	配合 1 (SP-R, 硬化促進剤 0.33%×B)	30s/層	9 分	22.3, 26.1
角筒 2	中空 四角柱	外寸 500×200 mm [515×215 mm]	2 列× 32.5 mm	配合 3 (SP-N, 硬化促進剤 0.67%×B)	30s/層	18 分	23.0, 29.6

*1: 練混ぜ方法⁵⁾に従って、上水道水と SP 等を投入し、10 分間攪拌した直後に測定した

配合, プリント速度 ($t_{interval}$), 1 層目プリント時刻 (t_p^1) を実験条件として変化させた。また, 外気温や練上がり温度については, 積層実験時の測定値を示す。

設計寸法と実施寸法が異なるのは, プリントパスは設計寸法とノズル直径の 25 mm を計算条件として算出したが, プリント実施時には, 特に 2 列で積層する場合の列間の空隙をなくすため 25 mm よりも太い射出幅でプリントしたためである。

配合は 3 水準用意した。配合 1<配合 2<配合 3 と, 番号の大きい配合ほどこわばりが強く (流動保持性が弱く) なるよう意図して配合設計した。配合 1 と配合 2 では遅延形の SP-R を使用し, 硬化促進剤の添加率は配合 2 では配合 1 の 2 倍とした。配合 3 では, 標準形の SP-N を使用し, 硬化促進剤の添加率は配合 2 と同量とした。

3.2 積層実験中の形状計測と変形観察

積層途中の造形物の形状変化を計測するために, 積層実験中は図-2(a)に示すような画角で造形物の一方向にはステレオデジタル画像相関法 (以降 S-DIC

と記載) 用のカメラを設置した (奥行方向の測距精度 14 μm , 画角縦横方向の測距精度 6 μm)。角筒 1, 角筒 2 のケースでは, 長辺側を撮影範囲とした。

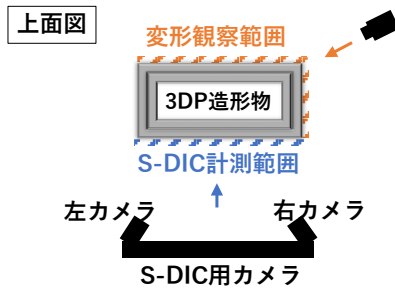
S-DIC では左右 2 台のカメラで撮影した画像から, 計測対象面の 3 次元形状, すなわち計測対象面上の各点の 3 次元座標が取得可能である (図-2(b))。S-DIC の撮影頻度は 10~20 秒に 1 回とし, 5.2 の分析では計測対象面の 3 次元座標から得た変位分布を, 解析と比較した。なお, 撮影範囲には, 3 層に 1 回の頻度で白ペンキを散布して S-DIC に必要となるランダムパターンを作成した。

また, 崩壊時の巨視的な変形の様子を観察するために, S-DIC 用カメラによる撮影に加えて, 図-2(a)のように S-DIC 用カメラを設置した反対側の斜め方向にはビデオカメラを設置し造形物全体を撮影した。

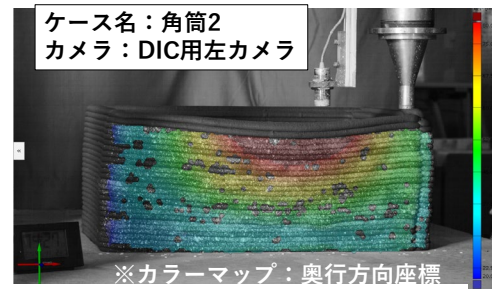
3.3 材料パラメータの決定

3.3.1 材料パラメータ決定方法の方針

表-2 に本論文における材料パラメータ決定方法の方針を整理した。ポアソン比 ν , 内部摩擦角 ϕ , ダイレタンシー角 ψ は, 一定値とした。



(a) カメラ配置図



(b) S-DIC による 3 次元座標分析の概要

図-2 S-DIC 計測と変形観察の状況

Fig.2 S-DIC measurement and deformation observations.

表-2 材料パラメータの決定方法の方針

Table 2 Strategies for determining material parameters

材料パラメータ	試験方法と算出方法	参考	本論文での解析上の扱い
ヤング係数 E	一軸圧縮試験 (JIS A 1216) を行って求めた変形係数 E_{50} により定めた。	Wolfs ら ²⁾	時間依存モデルとし, 式(1)の形で定めた。 $E(t_p, t) = \alpha_E + \beta_E t_p + \gamma_E (t - t_p)$ (具体値は表-3 に記載)
ポアソン比 ν	上記一軸圧縮試験の縦・横ひずみを測定して求めた ²⁾	Wolfs ら ²⁾	事前に配合 1 で測定したところ, $\mu = 0.35 \sim 0.45$. 時間依存の傾向は無し。以下の一定値を設定。 $\nu = 0.40$
内部摩擦角 ϕ	上記一軸圧縮試験結果から次式で求めた。 $\phi = 90^\circ - 2\theta$ θ : 最大応力時すべり面と水平面の角度 ($^\circ$)	内村ら ⁹⁾	積層実験 4 ケースの一軸圧縮試験から求めたところ, $\phi = 15.4 \sim 25.6^\circ$ (図-4)。 時間依存の傾向なし。以下の一定値を設定。 $\phi = 20^\circ$
粘着力 C	上記一軸圧縮試験結果から次式で求めた。 $C = f'_c / 2 \cdot (1 - \sin \phi) / \cos \phi$ f'_c : 一軸圧縮強度, ϕ : 内部摩擦角	内村ら ⁹⁾	時間依存モデルとし, 式(1)の形で定めた。 $C(t_p, t) = \alpha_C + \beta_C t_p + \gamma_C (t - t_p)$ (具体値は表-3 に記載)
ダイレタンシー角 ψ	硬化コンクリートの値 (13°) と同様と仮定した。	Wolfs ら ²⁾	Wolfs ら ²⁾ と同様に以下の一定値を設定。 $\psi = 13^\circ$

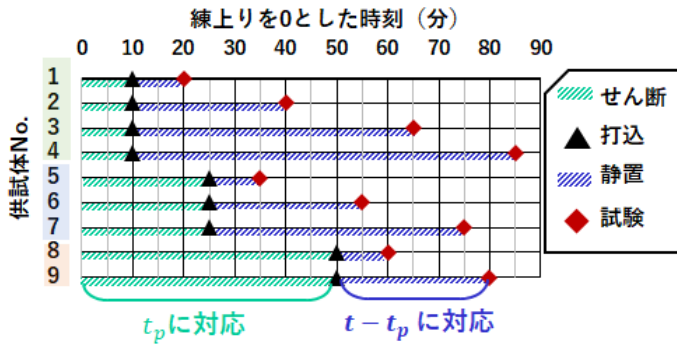


図-3 一軸圧縮試験の時刻設定

Fig.3 Time table for uniaxial compression tests



図-4 一軸圧縮試験の様子

Fig.4 Example of uniaxial compression test

ヤング係数 E と粘着力 C は、一軸圧縮試験より決定した。4 ケースの積層実験のそれぞれに対して、図-3 の時刻管理の下、各試験時刻につき 1 体、合計 9 体の試験を行ってヤング係数 E と粘着力 C を取得し、式(1)の時間依存モデルの形で整理した。図-3 の型枠打込み時刻を式(1)の t_p (プリント時刻) に対応させるように、一軸圧縮試験に用いる材料に対しても型枠打込み以前はせん断を与えて流動性を保持し、打込み後は静置して材料をこわばらせた。

3.3.2 供試体準備および一軸圧縮試験

まず、3D プリントに用いた 3DP モルタルと同一バッチの材料をミキサーから排出後に一部分けておき、型枠に打込むまでは 3D プリントに用いる材料と同様に 5 分に 1 回ケレン棒で突いて流動性を維持した。図-3 の打込み時刻において、事前に内側面にテフロンシートを巻いた直径 75 mm、高さ 150 mm の鋼製型枠に、JIS A 1132 に準じて 3DP モルタルを打込んだ。その後、脱型までは型枠内で静置して材料をこわばらせた。そして、図-3 中の試験時刻の 3 分前に鋼製型枠ごと供試体を加圧板に設置した後に、供試体を乱さないように注意して半割に脱型し、テフロンシートを剥がし、一軸圧縮試験に供した。

一軸圧縮試験には精密万能試験機（荷重容量 100

kN）を用い、試験は JIS A 1216 に準じて実施した。載荷速度など詳細条件は Wolfs ら²⁾と同様とした（図-4）。

3.3.3 時間依存モデル定数の決定

3.3.2 で一軸圧縮試験を実施すると、 (t_p, t, X) の組が 9 組得られる ($X = E, C$)。この 9 組のデータを、式(1)により最小二乗法で回帰して、時間依存モデル定数 $\alpha_X, \beta_X, \gamma_X$ を求めた。

表-3 には積層実験 4 ケースに対して求めたヤング係数 E と粘着力 C の時間依存モデル定数を整理した。また、式(1)による決定係数（以降、 R^2 と記載）も示しているが、全てのケースで、 $R^2 \geq 0.80$ と高い相関の水準を満たしており、本論文の範囲内では式(1)によるモデル化が適当であると判断した。

$\beta_E, \gamma_E, \beta_C, \gamma_C$ の値に着目すると、いずれも配合 1 < 配合 2 < 配合 3 の順に大きくなっており、3.1.2 で述べた配合設計の意図の通り、番号の大きい配合ほどこわばりの強い（流動保持性の弱い）ことを示す結果となっていた。また、配合 1 を用いた円筒 1、角筒 1 のケースでは、 β_E, β_C ともに負の値となった。これは練上がり後も遅延性の SP が分散効果を発揮し、軟化したためと考えられる。

表-3 各ケースの時間依存モデル定数の値

Table 3 Values of time-dependent model constants for each case

材料パラメータ		ヤング係数 E				粘着力 C			
		α_E (kPa)	β_E (kPa/min)	γ_E (kPa/min)	R^2	α_C (kPa)	β_C (kPa/min)	γ_C (kPa/min)	R^2
ケース名	円筒 1 (配合 1)	66.5	-28.1	27.8	0.87	2.14	-0.52	1.30	0.89
	円筒 2 (配合 2)	73.7	33.8	70.7	0.82	2.38	1.58	2.74	0.92
	角筒 1 (配合 1)	50.9	-9.7	39.0	0.91	2.17	-0.66	1.38	0.94
	角筒 2 (配合 3)	34.4	79.8	136.1	0.89	1.02	3.77	5.84	0.95

※ α : 練上がり直後の E, C の値, β/γ : プリント前/後の E, C の変化率

4. 有限要素法による解析方法

解析コードには Abaqus2018 を使用した。解析方法は有限要素法（以降、FEM と記載）とした。解析モデルの概要を図-5 に示す。解析で入力する情報は形状情報と、各層のメッシュに与える材料物性情報である。

モデル形状は、対称性を考慮した 1/4 モデルとした（図-5(a), (b)）。解析では 1 解析ステップごとに 1 層分のフィラメントのメッシュを積層し、荷重は鉛直下向きに自重のみを作用させた。境界条件として 1 層目の底面を固定して変位を 0 とした。また、フィラメントの断面は図-5(c)に示す形状を仮定した。フィラメント断面の 1 層の厚さ h は 10 mm とし、両端は h を直径とする円弧とした。フィラメントの幅 B は、1 列でプリントした円筒 2 では 1 列分の射出幅（30 mm）とし、2 列でプリントした他の 3 ケースでは解析上は 2 列分をまとめて 1 列とみなすこととして、2 列分の射出幅（65 mm）とした。モデルの形状は実施寸法に合わせた。メッシュの要素は 2 次四面体要素とし、サイズは 10 mm を基準とした。

解析方法は前のステップの応力やひずみを引き継ぐステップ解析とし、ステップを更新するごとに、積層済みの層それぞれのヤング係数 E と粘着力 C を更新した。 m ステップ時点（ m 層目積層時）における n 層目のヤング係数 E 、粘着力 C の設定方法を図-5(d)に示した。 n 層目、 m 層目をプリントした時刻をそれぞれ t_p^n, t_p^m と表記すると、 m ステップの解析時は注目している時間が t_p^m であるので、式(1)において、 $t_p = t_p^n, t = t_p^m$ として、ヤング係数 E を $E(t_p^n, t_p^m)$ 、粘着力 C を $C(t_p^n, t_p^m)$ で与えた。なお、 t_p^n や t_p^m は表-1 に示した t_p^1 （1 層目プリント時刻）および $t_{interval}$ （プリント速度）から求めた。

5. 結果と考察

5.1 崩壊モード

表-4 に積層実験での崩壊状況と解析との対応を示す。

円筒 1 の積層実験では 28 層目積層時に、下部（矢印 1 付近）で塑性領域が発生し、下部が広がるようにして崩壊した。解析（変形図）では実験とほぼ同等の 26 層目に下部から大変形に至り、27 層目で計算が収束に至らず発散した。塑性領域図を見ると、26 層目の前後に底面外側から斜めに走る帯状の塑性領域が発達し、壁内側でも広い範囲で塑性化が見られた。積層実験で外側に広がるように崩壊したのは、斜めの塑性領域に沿ってすべり破壊が発生し大変形が生じたものと考えられる。

円筒 2 の積層実験では、37 層目積層時に、上部（矢印 2 付近）が内側に倒れるように大変形し、崩壊に至った。解析（変形図）では、28 層目の前後で変形が急速に進み、逆「く」の字に折れるような崩壊モードを示したところで、計算が収束に至らず発散した。塑性領域図を見ると、28 層目時点で底面付近の塑性領域は壁の外縁に留まっており、円筒 1 のような壁内部に向かって連結した塑性領域は発達していなかった。一方で 28 層目の前後で壁の内側の帯状の塑性領域（矢印 5）が急速に拡大していた。このことから、すべり破壊に至る前に、壁内側の塑性化の影響で座屈が起きて逆「く」の字状に変形し、上部は内側に倒れる形で崩壊に至ったものと考えられる。

大変形に至る層数は実験の方が 25%遅かった。その理由として、本論文の材料試験の方法では解析上の材料物性を過小評価していた可能性を考えている。本論文では打込み後、試験実施まで型枠内にて静置

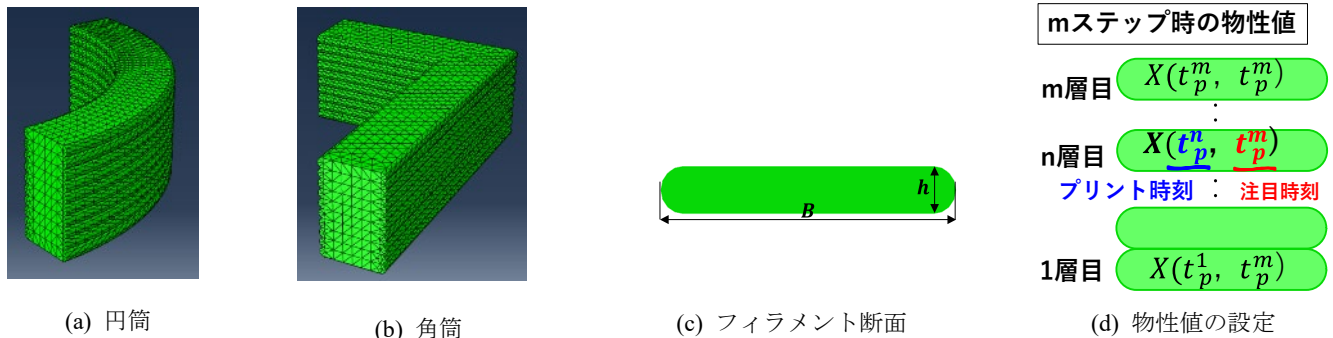

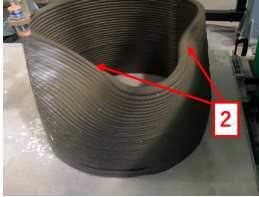
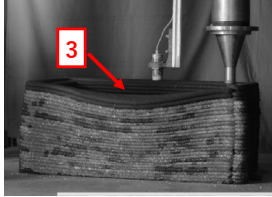
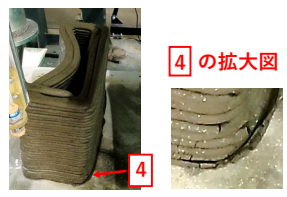
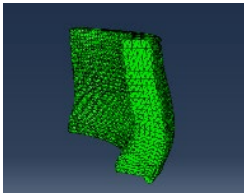
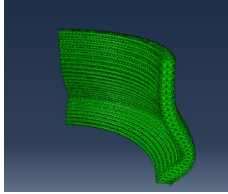
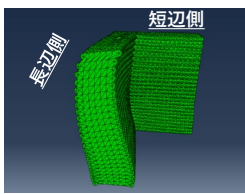
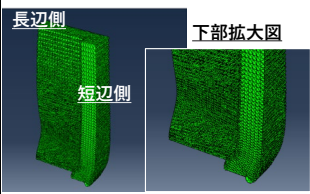
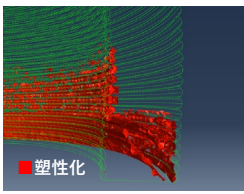
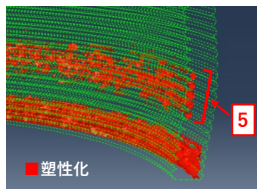
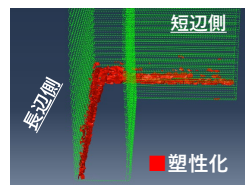
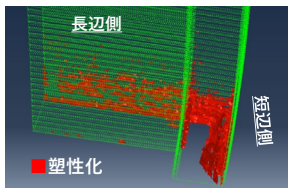


図-5 解析モデルの概要
Fig.5 Overview of the analytical model

表-4 積層実験における崩壊状況と解析との対応

Table 4 collapse conditions in piling-up experiments and analysis

ケース名	円筒 1	円筒 2	角筒 1	角筒 2
積層実験	 28 層目 (下部が塑性化)	 37 層目 (上部が大変形)	 27 層目 (長辺上部が大変形)	 37 層目 (下部の角が塑性化)
解析 (変形図)	 26 層目(変形倍率 5 倍)	 28 層目(変形倍率 5 倍)	 24 層目(変形倍率 5 倍)	 59 層目(変形倍率 5 倍)
解析 (塑性領域図)	 26 層目	 28 層目	 24 層目	 45 層目

してこわばらせる方法をとったが、実際に 3D プリントされた材料は気中にて静置されるため、表面が乾燥することによるこわばりの影響も加わるようになる。特に 1 列でプリントした円筒 2 は、2 列でプリントした他の 3 ケースよりも比表面積が大きいという形状的な要因に加え、円筒 2 の実験時は外気温、練上がり温度ともに最も高かった(表-1)ため、3DP モルタルのこわばりに対する、表面の乾燥の影響も大きかったと推測できる。これにより円筒 2 では他のケースと比較して、実際に 3D プリントされた材料と材料試験で評価した材料物性の差が大きくなったため、大変形に至る層数に差が開いた可能性がある。

角筒 1 の積層実験では、27 層目積層時に長辺の上部(矢印 3 付近)が外側に倒れるように大変形し、崩壊に至った。解析(変形図)では、24 層目の前後で実験と同様に長辺上部で急速に変形が進み、実験と同様に外側へ倒れるように大変形し、25 層目で計算が収束に至らず発散した。塑性領域図を見ると、塑性領域は角外側や底面の長辺側外縁部に留まっております、壁の内部に向かって連結するような塑性領域は発達していなかった。したがって、すべり破壊する前に面外への変形に耐えられなくなり、崩壊に至ったものと考えられる。

角筒 2 の積層実験では 37 層目積層時に下部外側の角(矢印 4 付近)で塑性化し、下から崩れるように崩壊した。解析(変形図)では、59 層目の前後で実験と同様に下部から崩れるような変形が急速に進み、60 層目で計算が収束に至らず発散した。大変形に至るタイミングは実験の方が 40%早かったが、塑性領域図を見ると、45 層目の前後で、外側の角部から短辺側にかけて塑性領域が斜め上方向へと 3 次元的に連結し始めていた。その状況に加え実験ではフィラメント内にエントラップドエアが混入して弱点部が形成されるなどして、解析よりも早く崩壊に至った可能性がある。他にも、角筒 2 は β_E , β_C , γ_E , γ_C が 4 ケースの中で最も大きかった(すなわち時間依存性の強い敏感な)配合であるため、ヤング係数 E や粘着力 C の測定でもばらつきが出やすく、加えて 3D プリントに用いた材料と材料試験に供した材料で状態に差が生じやすかったと推察できる。これらの要因により解析と実験で大変形に至る層数の差が大きくなった可能性も考えられる。

以上より、本論文の材料パラメータの決定方法や解析方法により、実験における崩壊モードを予測できる可能性があることを確認した。ただし、4 ケースを通して、実験で大変形が最初に起きた付近の崩壊

モードは解析と一致していたものの、解析上の仮定と異なり、必ずしも対称的な崩壊ではなかった。実験上は、応力集中箇所の中でも、エントラップドエアのフィラメントへの混入などにより形成された局所的な弱点部が先行して崩壊するためと考えられる。また、本論文のケースの中でも崩壊に至るタイミングには一部ずれがあった。円筒 2 の考察で述べたように、材料試験の改良により改善できる可能性があるが、角筒 2 の考察で述べたように積層実験自体の誤差もあることから、今後検証ケースを増やし、解析と実験の整合を慎重に確認していく必要がある。

5.2 面外変位

図-6 には、S-DIC で得られた計測対象面の 3 次元座標から、撮影視野の奥行方向に向かって 1 断面を切り出し、高さ方向の面外変位の分布を示した（図中の立体図赤矢印の距離）。ここでは、円筒 1 の 25 層目（図-6(a)）と角筒 1 の 24 層目（図-6(b)）の結果を示す。対象断面は、円筒 1 については S-DIC の撮影範囲の中央付近、角筒 1 については長辺側の中央とした。図中には実験データと近い層数の解析結果も比較として示した。なお、実験・解析ともに面外変位の測定位置はフィラメント断面の凸頂点部分とした。実験の変位分布に見られるがたつきは材料の射出幅の変動影響を含むためである。

円筒 1（図-6(a)）の解析では樽型の変位分布となっていた。実験では、変位の極大点がやや上部に偏っているため歪ではあるが樽型の変位分布を示す傾向は解析と一致している。また、最大変位も付近の層

数の解析結果（22 層目、25 層目）と同等の値となっていた。

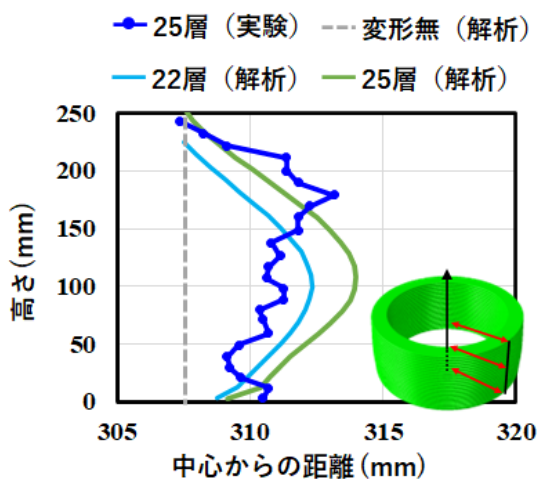
角筒 1（図-6(b)）の解析では 20 層目から 24 層目にかけて特に上部の面外変位が増大している。実験でも、下部に比べ上部の面外変位が大きいという変位分布の傾向が見られた。また、実験の 24 層目の最大変位は、付近の層数の解析結果（20 層目、24 層目）の中間的な値となっていた。

以上より、崩壊前の変位分布や最大変位は、実験と解析で概ね整合しており、本論文の材料パラメータの決定方法や解析方法の有効性を示唆する結果が得られた。

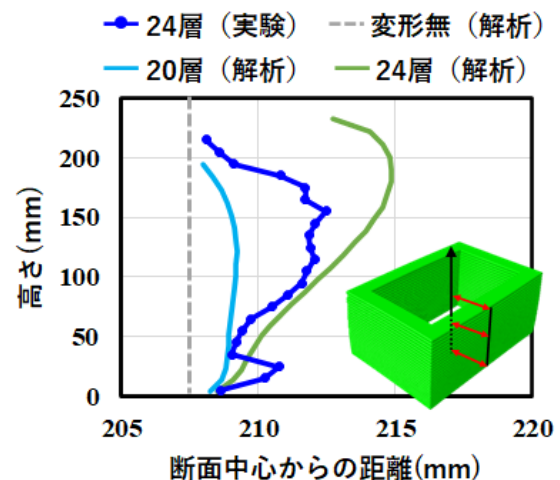
6. おわりに

本論文では以下の知見が得られた。

- (1) 3DP モルタルの材料性状を FEM で扱うための材料構成則として弾塑性モデルを用いた。ヤング係数 E と粘着力 C は時間依存型モデルとした。
- (2) ヤング係数 E と粘着力 C は一軸圧縮試験により求めた。打込み時刻と試験時刻を複数振った試験を実施して、試験結果を時間依存型モデルにより回帰した。推定精度はいずれも $R^2 \geq 0.80$ を満たした。
- (3) FEM による解析は、1 解析ステップごとに 1 層分のフィラメントのメッシュを積層するステップ解析とした。各層のメッシュに与える材料物性は、プリント速度やプリント開始時刻を考慮



(a) 円筒 1



(b) 角筒 1

図-6 面外変位の測定結果と解析結果

Fig.6 Results of out-of-plane displacement measurement and analysis

し、解析ステップごとに時間依存型モデルにより更新した。

- (4) 積層実験において、円筒 1 と角筒 2 では下部が塑性化して大変形に至り、円筒 2 と角筒 1 では上部が先に大変形して崩壊に至った。解析ではこれらの崩壊モードを再現していた。
- (5) 崩壊前の変位分布や最大変位は実験と解析で概ね整合していた。

参考文献

- 1) 木ノ村幸士，田中俊成，張文博，井坂匠吾：建設 3D プリンティング技術の可能性と用途拡大に向けた研究開発，コンクリート工学，Vol.61，No.7，pp. 600-607，2023.7
- 2) Wolfs, R. J. M., Bos, F. P. and Salet, T. A. M.: Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing, Cement and Concrete Research, Vol.106, pp.103-116, 2018
- 3) 小倉大季，阿部寛之，菊地竜：3D プリンティングに用いるセメント系材料の積層安定性評価手法に関する検討，土木学会全国大会第 75 回学術講演会講演概要集，V-102, 2020.9
- 4) 張文博，村田哲，木ノ村幸士：建設 3D プリンティング材料の品質評価指標に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1534-1539，2022.7
- 5) 田中俊成ほか：インバート工への建設用 3D プリンティングの適用に向けた基礎的検討，トンネル工学報告集，第 33 巻，I-19, 2023.11
- 6) 内山久雄監修，内村太郎著：ゼロから学ぶ土木の基本地盤工学，オーム社，2013
- 7) 山本佳城ほか：高強度コンクリートの打込み上面に生じるこわばりの測定方法，大成建設技術センター報，第 41 号，20, 2008