

論文 時間依存型材料モデルの改善による3Dプリント中の積層安定性評価解析の再検討

田中 俊成^{*1}・吉田 昂平^{*2}・山本 悠人^{*2}・木ノ村 幸士^{*1}

要旨: 既報で構築した建設用3Dプリンティングの積層安定性評価解析では、積層可能高さを過小評価する課題があり、評価精度向上を目的として検討を行った。既往の材料試験では、型枠内で静置した材料で材料物性の時間依存変化を評価したが、この方法では、気中で静置される積層用材料の材料物性の時間依存変化を1/12~1/8程度に過小評価していたことを明らかにした。それを踏まえ時間依存型材料モデルの評価方法を改善し、解析における積層可能高さの過小評価傾向が解消された。一方、積層可能高さや面外変位分布の評価精度にはさらなる改善の余地を見出し、時間依存型材料モデルや、解析における層要素の拘束方法に関する今後の課題を考察した。

キーワード: 3Dプリンティング, 積層安定性, 積層安定性評価解析, 時間依存, 面外変位分布

1. はじめに

1.1 積層安定性解析（積層解析）の概要

建設用3Dプリンティング（以下、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し出してプリントし、層状に積み重ねて立体形状を造形する¹⁾。3DPではプリントした層が過大に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。したがって3DPにより部材を製造する際には、製造計画の段階で、十分な安定性を有する積層条件を事前に定めて、プリントを実施することが求められる。

積層安定性には、造形物の形状、高さ、積層インターバルなどの積層条件と、配（調）合や温湿度で変化する材料性状が影響するため、十分な積層安定性を有する積層条件を計画するのは容易ではない。そこで筆者らは既報²⁾において、有限要素法に基づきプリント時の種々の影響を複合的に考慮する積層安定性評価解析（以下、積層解析）を構築した。

積層解析は将来的には、設計と製造のスムーズな連携に役立てることを目指している。例えば、これまでにない形状や大きさの造形物の製造を検討するときに、積層安定性が確保できるような積層条件や材料性状を解析で効率的に絞り込むというような活用を目標とする。

1.2 積層解析の現状

既報²⁾において、積層中に発生する2つの崩壊モード、すなわち下部が塑性化して崩壊するモードと、上部が大変形して崩壊するモードのうち、どちらが発生するかは積層解析で予測できることを確認した。しかし、特に上部が大変形して崩壊するモードにおいて、積層可能高さ（積層実験では崩壊が発生する高さ、積層解析では計算が発散する高さを指す）を実験よりも過小に評価してし

てしまう課題があった。

そこで本研究は、上部が大変形して崩壊する場合の積層可能高さ評価の高精度化を目的とし、積層解析の過小評価要因の分析・改善を行い、積層実験と再現解析によりその効果を確認した。

2. 過小評価の要因分析と要素試験による影響検証

2.1 過小評価の要因分析

本論文後半で述べる修正後の積層解析と区別するため、既報で構築した積層解析を従来法と呼ぶこととし、以下では従来法における材料物性の評価方法を概説する。従来法では、弾塑性モデルの材料構成則（塑性モデルはMohr-Coulombの破壊規準）を採用しているが、ヤング係数 E と粘着力 C について、図-1に示す時間依存型材料モデル（以下、時間依存モデル）で考慮することが特徴である。以降では、物性 X という表記をヤング係数 E または粘着力 C を指す略称として扱う。積層用材料は、プリント前はホッパーやホース内でせん断を受けて流動性

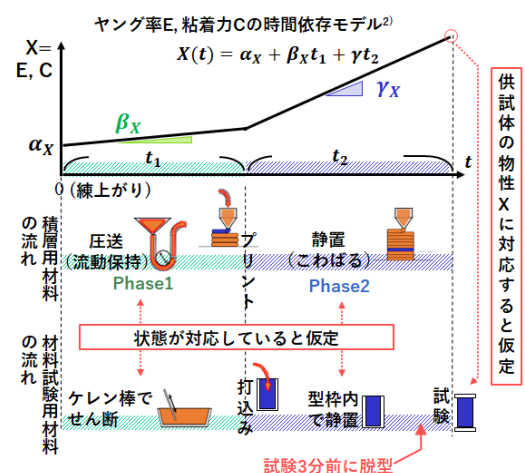


図-1 従来法の時間依存モデルの概要

*1 大成建設（株） 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室 博（工）（正会員）

*2 大成建設（株） 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室（正会員）

を保持するが (Phase1), プリント後は静置されてこわばっていく (Phase2)³⁾。従来法では, この2段階の状態変化を2直線で表現する時間依存モデルを採用した (次式, 図-1 上部)。

$$X(t) = \alpha_X + \beta_X t_1 + \gamma_X t_2 \quad (X = E, C)$$

ただし, $t = t_1 + t_2$ かつ $t_1, t_2 \geq 0$ (1)

ここで, $X(t)$ は注目時刻 t における物性 X の値である。 α_X は練上がり直後 ($t = 0$) の $X (= E, C)$ 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。 $\alpha_X, \beta_X, \gamma_X$ を時間依存モデル定数と呼ぶ。 t_1 は練上がりからプリントまでの時間 (Phase1 に相当), t_2 はプリントから注目時刻 t までの時間である (Phase2 に相当)。

時間依存モデル定数を求めるために, 材料試験に用いる材料 (以下, 材料試験用材料) に与える状態は以下のとおりである (図-1 下部)。練上がりから打込みまでは材料にケレン棒 (モルタル練混ぜ時のかき落とし作業などに使用する工具であり, 全長 1020mm, 刃幅 95mm のものを使用) でせん断を与えて流動性を保持する。この状態が, 積層用材料の Phase1 の状態に対応すると仮定している。次に, 事前に決めた時刻に鋼製型枠へ打込み, その後は型枠内で静置し, 試験の3分前に脱型をして, 事前に決めた時刻に一軸圧縮試験をする。材料試験用材料の打込みから試験までの状態が, 積層用材料の Phase2 の状態に対応すると仮定している。そして, これらの対応関係をもとに, 供試体の物性 X が図-1 上部のモデル式によって表現されるものと仮定する。

材料試験では, 練上がりから打込みまでの時間 (t_1 として扱う) と打込みから試験までの時間 (t_2 として扱う) を変動させた 9 体の供試体について物性 X を測定し, 9 組の (t_1, t_2, X) を最もよく表現する時間依存モデル定数 $\alpha_X, \beta_X, \gamma_X$ を最小二乗法による回帰分析で求めた。

以上の手順により従来法で評価される積層用材料の γ_X は, 材料試験の結果から得られる打込みから試験までの X の変化率として求めたものである。しかし, 厳密には積層用材料は, プリント後は気中で静置されるのに対し, 材料試験用材料は, 打込み後の大部分の時間は型枠内で静置されるという違いがある。後者の状況では, 気中乾燥による表面のこわばりが抑制され, 解析において積層用材料の Phase2 における時間依存変化を過小評価している可能性があることを, 既報の考察において指摘した⁴⁾。

2.2 要素試験による影響検証

静置状況が材料物性の時間依存変化に与える影響を確認するために, 図-2 に概要を示す 2 パターンの条件で

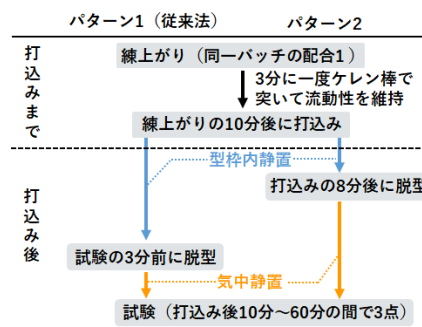


図-2 要素試験のパターン概要

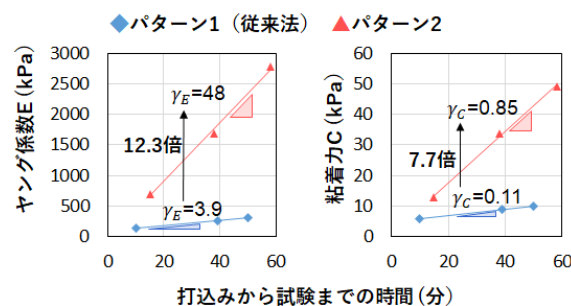


図-3 静置状況が材料物性の時間依存変化に与える影響

要素試験を実施した。パターン1, 2で, 打込みまでの流れは共通であり, 同一バッチの配 (調) 合1 (3.1(1))と同配 (調) 合) を練上がりから 10 分後に鋼製型枠に 3 体ずつ打ち込んだ。打込み後は, パターン1 では従来法と同様に試験の3分前に脱型を行い, パターン2 では一律に打込みの8分後に脱型を行った。なお, 打込み後の脱型が早すぎると, 供試体が自立せず崩れてしまう例があったため, 事前検討で供試体の崩壊が起きなかった時間として, 8分後を脱型時期に選定した。

図-3 に, 2 パターンの方法で評価したヤング係数 E , 粘着力 C の時間依存変化を示す。グラフ中には, 近似直線の傾きとして求めた γ_E, γ_C の値を示した。パターン1 に比べて, パターン2 では, γ_E で 12.3 倍, γ_C で 7.7 倍という結果となった。静置状況は時間依存変化に大きく影響しており, 従来法では積層用材料の時間依存変化を過小評価していたことが明らかになった。3.2 で示す材料試験の流れでは, 静置状況の扱いを修正することとした。

3. 積層実験, 材料試験, 時間依存モデルへの回帰

3.1 積層実験

(1) 共通の積層条件

3DP には内径 25mm のノズルを有する 3D プリンタを使用し, 1 層の高さは 10mm とした。

3DP 材料には, 普通セメントベースのモルタルを使用した (以下, 3DP モルタル)。3DP モルタルの基本的な配 (調) 合や練混ぜ方法は既報²⁾の配 (調) 合1と同様である。ただし, 短繊維の有無により, 短繊維を含まない

表－1 積層実験のケース

ケース名	造形モデルの形状	造形モデルの寸法	列数×1列の吐出幅	配（調）合（短繊維有無）	積層インターバル	1層目プリント時刻（練上がりから）	外気温，練上がり温度(℃)
Case-1	中空四角柱	長辺×短辺 750×500 (mm)	1列×35mm	配（調）合1（短繊維無し）	45s/層	9分	27.0±0.2, 30.4
Case-2			2列×25mm	配（調）合1（短繊維無し）	45s/層	24分	28.0±0.5, 29.3
Case-3			1列×35mm	配（調）合2（短繊維有り）	30s/層	8分	34.0±0.5, 30.4

ものを配（調）合1，短繊維（長さ12mmのPVA繊維）を0.3 vol. %混入したものを配（調）合2とする。また，高性能 AE 減水剤の量は適宜調整し，練上がり時のベーンせん断抵抗が積層造形に適した0.4kPa~1.0kPaの範囲⁵⁾に収まるようにした。

各実験ケースで，材料を1バッチ練り混ぜて，そこから積層実験用材料と材料試験用材料に分けて使用した。

(2) 積層実験のケース

表－1に詳細を示す3ケースの積層実験を実施した。積層実験は，造形物が崩壊した時点，あるいは，積層実験用材料をすべて積層した時点で終了とした。

(3) 積層実験中の形状計測と変形観察

積層実験中は造形物の周囲からビデオカメラ3台で積層途中の造形物の崩壊状況を記録した。また，Case-3の積層実験時には，3D スキャナ（点群密度2.1点/mm²，測定精度0.1%）を造形物の片側の長辺正面に1台配置し，積層完了時の面外変位を計測した。

3.2 材料試験

以降に示す，材料試験，時間依存モデルへの回帰，積層解析の一連の流れを従来法と区別して修正法と呼ぶ。

図－4に示す流れで，各ケースの積層実験で9体供試体を用いて材料試験を実施した。材料試験における作業の順番と方法は，従来法と同様であるが，脱型の時期を打込みから8分後とした点のみが異なる。

一軸圧縮試験の実施方法，およびその結果からの各供試体のヤング係数 E と粘着力 C の取得方法は従来法と同様である。

3.3 時間依存モデルへの回帰

時間依存モデルは，従来法と同様に式(1)とした。また，時間依存モデル定数 α_X ， β_X ， γ_X を求める回帰分析の方

表－2 解析B（修正法）用の時間依存モデル定数※

材料パラメータ		Case-1	Case-2	Case-3
ヤング係数 E	α_E (kPa)	156	109	14.4
	β_E (kPa/min)	0.47	1.49	7.3
	γ_E (kPa/min)	8.4	7.7	48.1
	R^2	0.88	0.96	0.97
粘着力 C	α_C (kPa)	3.1	2.87	2.6
	β_C (kPa/min)	0.010	0.036	0.15
	γ_C (kPa/min)	0.15	0.14	0.97
	R^2	0.92	0.93	0.92

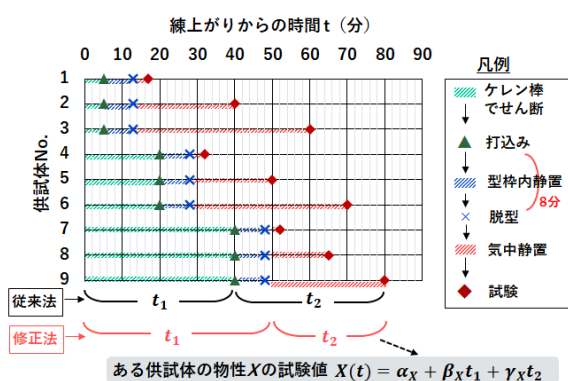
※解析A（従来法相当）： γ_E を1/12倍， γ_C を1/8倍とした

法も従来法と同様とした。ただし，2章の検討結果から，型枠内静置の間の時間依存変化は気中静置の間の時間依存変化よりも小さいことを考慮して，図－4下部に示したように，材料試験用材料における練上がりから脱型までの状態が積層用材料のPhase1の状態に対応すると解釈し，練上がりから脱型まで時間を t_1 とし，この間の X の変化率が β_X に相当するものとした。また，脱型から試験までの状態が積層用材料のPhase2の状態に対応すると解釈し，脱型から試験までの時間を t_2 とし，この間の X の変化率が γ_X に相当するものとした。

修正法の材料試験における時間 t_1 には，せん断を受ける状態に加えて，型枠内静置の状態が含まれているため， β_X は実際の積層用材料よりも大きくなる可能性があるが，本論文の主眼が積層可能高さの過小評価の改善であるため，本論文ではその影響は無視することとした。表－2には，各ケースの時間依存モデル定数の値と，回帰結果を示す。既報では γ_E ， γ_C の値がそれぞれ0.46~2.27(kPa/min)，0.022~0.023(kPa/min)だった（ベースとなる配（調）合は本論文と同一）。それに対し，本論文で修正法により評価された γ_E ， γ_C は既報を大きく上回る結果となった。

4. 有限要素法による再現解析

修正法による再現解析として，Case-1，Case-2，Case-3の積層解析を行った。解析方法は従来法と同様で概要は以下のとおりである。1層ごとにメッシュを生成し，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た。また，ステップを更新するごとに，積層済みの層のメッシュそれぞれのヤング係数 E と粘着力 C を，式(1)に基づき更新する。実際の積層体では早くに積層された層からこわばりが進行するため，物性 X には空間的



図－4 材料試験の流れ

な分布が生じる。ここで式(1)で、ある注目時刻 t における各層の物性 X の違いを考えると、早くに積層された層ほど t_1 (Phase1 の時間) が小さく、 t_2 (Phase2 の時間) が大きくなり、それに応じて物性 X の差異が表現される。すなわち、解析では任意の解析ステップにおいて、式(1)により求められる物性 X が各層で異なることで、物性 X の空間的な分布が考慮される。

比較のため、従来法相当の再現解析として Case-1, Case-2, Case-3 のそれぞれについて、 γ_E を表-2 の 1/12 倍に、 γ_C を 1/8 倍にして積層解析を行った。解析の最大高さは積層高さ 800mm までとした。

以下では、従来法相当の再現解析を解析 A、修正法による解析を解析 B と呼ぶ。以降の議論の補足として、解析 A、解析 B とともに、新しい層の要素は、積層済みの層の変形によらず設計モデル上の位置に発生させ、下層の上面の節点と上層の下面の節点を共有とした。この設定の妥当性については、5.4 で論じる。

5. 積層実験と再現解析の結果・考察

5.1 3 ケースの全体傾向

図-5 に実験、解析 A、解析 B の積層可能高さの比較を示す。実験では、Case-1, Case-2, Case-3 の順に 240mm で崩壊、460mm で崩壊、590mm まで積層しても崩壊せず、という結果となった(崩壊状況は後述する)。それに対し、解析 A ではいずれのケースも積層可能高さを過小評価し、解析 B ではいずれのケースにおいても積層可能高さを過大評価する結果となった。修正法において、時間依存モデルの評価方法を改善したことで、積層可能高さを過小評価する傾向は解消された。なお、評価精度の観点については、5.4 で論じる。

5.2 各ケースの傾向

(1) Case-1

図-6 に Case-1 の積層実験と解析 B の結果概要を示す。積層実験では、積層高さ 230mm までは視認できる変

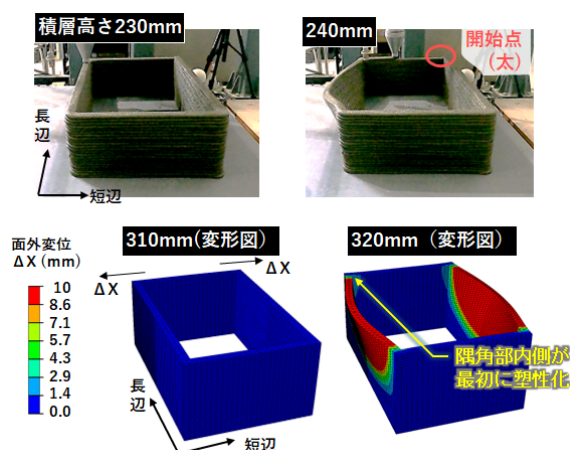


図-6 Case-1 の積層実験と解析 B の結果概要

形はなかったが(図-6 左上)、積層高さ 240mm の時点で、一方の長辺の上部が急激に外側にたわみ、崩壊に至った(図-6 右上)。解析 B では、積層高さ 310mm までは長辺外側への変位は 1.0mm 以下であったが(図-6 左下)、積層高さ 320mm の時点で長辺の上部から外側へたわみが増大し、隅角部の内側が塑性化して解析が発散した(図-6 右下)。

解析 B では、実験と比べて崩壊に至る層数は大きかったものの、急に長辺の上部が外側にたわみ崩壊に至る崩壊のモードは一致していた。実験において写真左側の長辺のみで変形が進んだのは、写真右側の長辺の一端に、積層の開始点(=終点)があったことが原因の可能性はある。この位置では材料の幅が他の位置よりも太くなっていた。これは、次の層に移る高さ方向の移動の際に、材料の吐出が瞬間的には止まらず、吐出量が局所的に設計よりも多くなることによる。その影響により、左側の長辺よりも右側の長辺の方が拘束条件が強くなったため、右側の長辺は同時には倒れなかったと考えられる。

(2) Case-2

図-7 に Case-2 の積層実験と解析 B の結果概要を示す。実験における崩壊の挙動は、Case-1 と同様であった。積層高さ 450mm までは視認できる変形はなかったが(図-7 左上)、積層高さ 460mm の時点で一方の長辺の上部が急激に外側にたわみ、崩壊に至った(図-7 右上)。

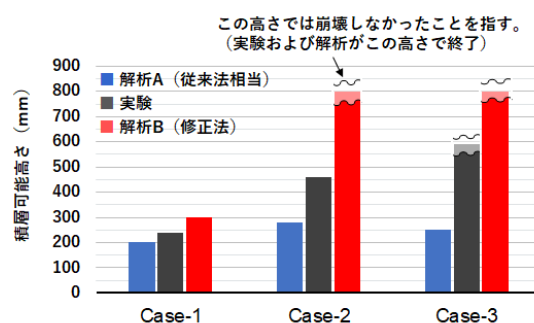


図-5 実験、解析 A、解析 B の積層可能高さの比較

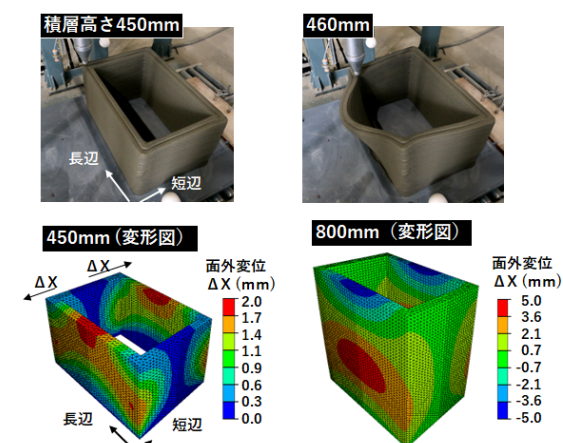


図-7 Case-2 の積層実験と解析 B の結果概要

解析 B では、積層高さが 300mm を超えたあたりから、長辺上部が面外変位の最大位置となり、積層高さが 450mm の時点で長辺上部の面外変位の値は 2mm 程度となったが（図-7 左下）、この時点で面外変位が急激に増大することはない、積層高さ 800mm となっても大変形することはない（図-7 右下）。

(3) Case-3

図-8 に Case-3 の積層実験と解析 B の結果概要を示す。また、図-9 には、図-8 内に示した抽出位置（長辺中央）における面外変位を整理した。

積層実験では、積層高さ 590mm まで崩壊することなく積層が完了した（図-8 左上）。3D スキャンにより一方の長辺側の面の面外変位（設計面との差分）を測定したところ、高さ方向の中央付近では正側にたわみ（最大変位+7.0mm）、最上部付近では負側にたわむ（最小変位-3.0mm）の負側へのたわみとなる、樽型の変位分布をなしていた。（図-8 右上、図-9）。

解析 B では、積層実験が終了したのと同じ積層高さ 590mm の時点で、長辺側における最大の面外変位は 1.4mm 程度であり、積層実験と比べ面外変位は小さかった（図-8 左下、図-9）。また、変位分布の形状は、最大の面外変位が最上部付近で発生する逆つりがね型の変位分布となっており、積層実験とは異なっていた。解析 B は積層高さ 800mm まで大変形することなく完了し、この時の変位分布は、積層実験における積層高さ 590mm 時点の変位分布と同じ樽型の形状を示した。ただし、最大変位は+1.4mm であり、積層実験の 20%の大きさであった（図-8 右下、図-9）。積層実験と解析 B における面外変位分布の相違については、5.4 で考察する。

5.3 崩壊と面外変位のモードについての考察

3 ケースの積層実験および解析 B の結果から、矩形の造形物の積層において、長辺側の面外変位分布は、逆つ

りがね型の分布を経て樽型の分布となる遷移傾向が見られた。最初に逆つりがね型の分布を取るの、以下の理由による。矩形の造形物では、内側への変位が隅角部で拘束されているため、積層高さが低い段階から隅角部は外側に変形する。積層高さが高くなるにつれ、部材の連続性から長辺も（および短辺もわずかに）外側に変位するようになる（図-7 左下で確認できる）。その後は隅角部および底面から離れた長辺上部でたわみが増加しやすくなるため、長辺上部でたわみが最大となり、逆つりがね型の面外変位分布となる。それから樽型の分布になるのは、以下の理由による。3DP では、機械制御により常に正規の位置に材料が吐出されるため、下層が外側に変位していると上層は相対的にその内側に積み重ねられることになる。ある程度まで下層が外側に変位した後は、徐々に内側に戻るよう上層が積み重ねられていくことで樽型の変位分布形状となる。

Case-1, Case-2 の積層実験で、長辺の上部が外側に倒れて崩壊に至ったのは、逆つりがね型の変位分布の段階で、長辺上部の面外変位に起因して隅角部内部に発生する曲げ応力により、塑性化が生じたためと考えられる。一方、Case-3 の積層実験では、Case-1,2 に比べて γ_E が大きいため逆つりがね型の変位分布の段階でのたわみが抑えられ（ヤング係数 E はたわみに影響）、加えて γ_C が大きいため隅角部での塑性化が起きず（粘着力 C は Mohr-Coulomb の破壊規準を構成）、そのまま積層を継続できた結果、樽型の変位分布に至ったと考えられる。

以上より、積層に至る層数（Case-1）や、崩壊が起きるか否か（Case-2）、面外変位分布の遷移タイミングや面外変位の大きさ（Case-3）など定量指標については解析 B と実験で乖離が見られたものの、積層実験で起こり得る崩壊や面外変位のパターンについては、定性的には再現できていると判断する。

5.4 定量評価の高精度化における今後の課題

5.1 で確認したとおり、修正法により積層可能高さの過小評価は改善することができた一方で、5.2, 5.3 で述

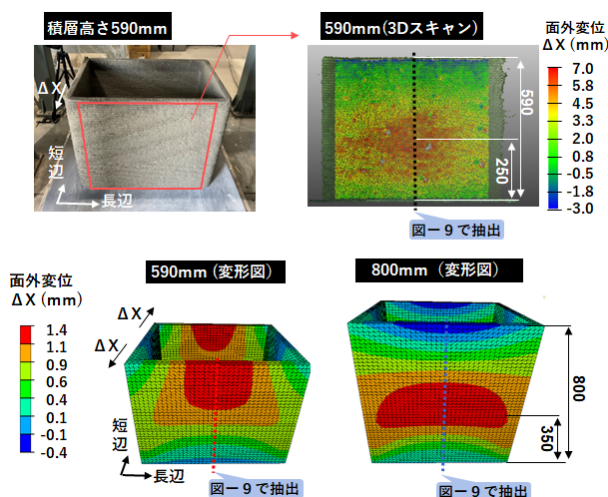


図-8 Case-3 の積層実験と解析 B の結果概要

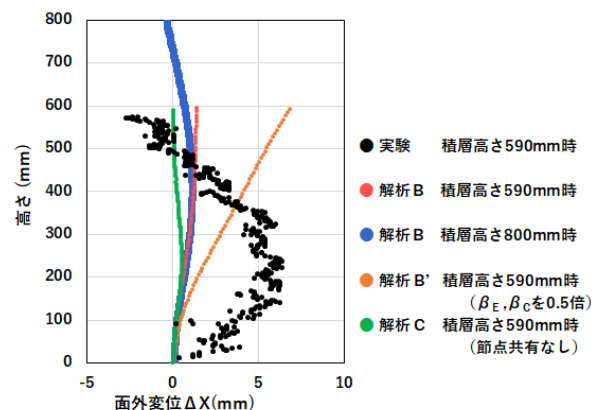


図-9 Case-3 の長辺中央の面外変位

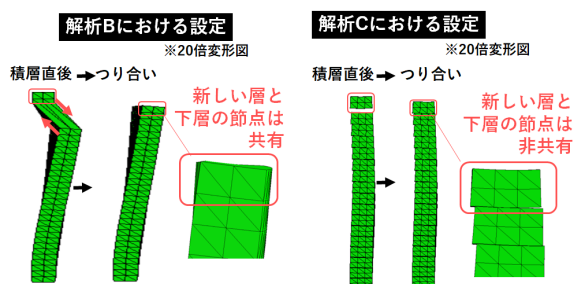


図-10 解析 B と解析 C における層要素の拘束モデル

べたとおり、実験で見られた積層可能高さや面外変位分布を高精度に再現するには至らなかった。本節ではその理由を考察し、評価精度のさらなる改善に向け課題を整理した。

まず、全ケースにおいて、解析 B で評価した積層可能高さが積層実験の結果を上回っていたこと、Case-3において面外変位が積層実験よりも小さかったことから、修正法の時間依存モデルでは積層実験用材料の時間依存変化を過大に評価している可能性が考えられる。具体的には、3.3 で述べたように β_x を積層用材料よりも過大に見積もっている可能性がある。そこで、解析 B の条件から、 β_E と β_C を 0.5 倍にした解析 B'を行った。図-9 に示すように、解析 B'では、解析 B と比べて面外変位の最大値は顕著に増大したが、変位分布の形状は逆つりがね型のままであった。よって、積層実験と解析 B における面外変位分布の相違は、単に時間依存モデルと実際の材料挙動の差異だけでは説明ができない。

次に、FEM における層要素の拘束方法について考えた。図-10 左には、解析 B において新しい層を発生させた直後とつり合い後の 20 倍変形図を示した。4.で述べたとおり、解析 B では、新しい層は設計上の位置に発生し、下層要素と上層要素は節点が共有の設定になっている。これにより、つり合い計算においては、下層要素と上層要素が互いに引っ張り合い、下層の面外変位が引き戻されるような動きになるため、積層実験と比べて変位が小さくなると考えられる。また、逆つりがね型の変位分布を取っているとき、上層は、外に広がった下層に引っ張られるため、積層実験の状況と比べ、内側に戻るような樽型の変位分布形状には遷移しにくいものと考察できる。

そこで、より実験状況に近い条件として、図-10 右のように、新しい層を設計上の位置に発生させ、下層との節点は非共有とする、解析 C を行った（下層との接触後はすべりを拘束した）。層要素の拘束設定以外の材料モデルなどは、解析 B と同様である。その解析結果を図-9 に緑線で示した。解析 C では、59 層目の時点で樽型の変位分布に遷移していることが分かる。同じ材料モデルでありながら、解析 B よりも樽型の変位分布に遷移するのが早くなっていることから、変位分布の遷移タイミング

の再現という観点では、解析 B の拘束モデルよりも解析 C の拘束モデルの方が適切だと考えられる。一方、解析 C でも、最大変位は依然として実験よりも小さく、最大変位の再現という観点からは前述したとおり、材料モデルの見直しも同時に必要なことが示唆される。

以上より、時間依存モデルの過大評価の改善と、解析における上層と下層の拘束モデルの改善を同時に実装することで、積層安定性の定量評価をより高精度化できる可能性が高く、今後この改善に取り組んでいく。

6. おわりに

本論文では以下の知見が得られた。

- (1) 従来の積層安定性評価解析では、材料試験において、型枠内で静置した材料で材料物性の時間依存変化を評価したが、この方法では気中に静置される積層用材料の材料物性の時間依存変化を 1/12~1/8 程度に過小に評価していた。
- (2) 時間依存型材料モデルの評価方法を改善したところ、積層可能高さの過小評価傾向は改善された。
- (3) 矩形の造形物の積層実験において、長辺側の面外変位の分布は、逆つりがね型の分布を経て、樽型の分布となる傾向が見られ、この変位分布の傾向は改善後の積層安定性評価解析により再現できた。
- (4) 実験で得られた積層可能高さや面外変位分布とは乖離が見られた。時間依存型材料モデルにおける β_x （プリント前の材料物性の変化率）の過大評価の改善と解析における層要素の拘束モデルの改善により、評価精度をさらに向上できる可能性がある。

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) 田中俊成，吉田昂平，山本悠人，木ノ村幸士：有限要素法に基づく 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検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.2011-2016，2024.7
- 3) Zhanzhao, L. et al.: Fresh and Hardened Properties of Extrusion-Based 3D-Printed Cementitious Materials: A Review, Sustainability 12, No. 14, 5628, Jan. 2020.
- 4) 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，Vol.41，pp.20_1-20_6，2008
- 5) 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