

3Dプリンティングモルタルの施工時安定性に関する解析

An Analysis on Stability of 3D Printing Mortal During Construction

○飯田渉介¹, 長沼一洋², 田嶋和樹², 白井和貴³

Shosuke Iida¹, Kazuhiro Naganuma², Kazuki Tajima², Kazutaka Shirai³

Abstract: Time dependencies on the material properties of early age 3D printing mortal are formulated referring to the existent experimental results. A finite element analysis was conducted to evaluate the stability of a mortal cylindrical wall during construction by 3D printing. It is demonstrated that the analysis result simulated well the actual deformation behavior of 3D printed cylindrical wall.

1. はじめに

近年、建設分野において3Dプリンティング技術が活用され始めており、施工の省力化に大きな貢献が期待されている。一方、プリンターのノズルから吐出されるモルタルは柔らかいため、施工中に不安定化する懸念がある。そこで、本研究では壁の施工時における構造安定性を解析的に検討し、既往の実験結果と比較することで解析手法の適用性を検討した。

2. 未硬化時のモルタルの圧縮応力～ひずみ関係

コンクリートの圧縮応力～ひずみ関係式が未硬化時のモルタルに適用できるかを調べるため、既往の研究¹⁾²⁾で行われた若材齢モルタルの実験結果と比較した、Fig.1 に打設後の経過時間が異なる圧縮応力～ひずみ曲線を示す。一般的に圧縮強度点まではFafitis-Shahモデル³⁾よりSaenzモデル⁴⁾の方が実験結果との対応性が良い。Saenzモデルは普通強度コンクリートに適し、応力の上昇に伴って剛性が低下するため、未硬化時のモルタルのように低強度に対する適合性が良いと言える。

3. 打設後の経過時間とモルタルの力学特性の関係

既往の研究¹⁾²⁾で得られている若材齢モルタルのヤング係数、圧縮強度、圧縮強度時のひずみ、圧縮軟化域の剛性（負勾配）と打設後の経過時間の関係をFig.2に示す。図中には最小二乗法による回帰式と実験値との比率から求めた変動係数Rを示す。ヤング係数と圧縮強度の関係はほぼ比例関係にある。圧縮強度時のひずみは一次式と二次式の回帰式を比較すると二次式の方が変動係数は小さく対応性が良いと言える。圧縮軟化域の剛性と経過時間の関係は二次曲線で近似が可能と言える。

4. 円筒壁の施工時の構造安定性の解析

有限要素法(FEM)による非線形解析により、3Dプリンティングによる円筒壁の施工実験¹⁾の変形挙動の予測を試みた。解析ではFig.2に示した回帰式に基づく未硬化モルタルの圧縮特性の時間依存性と幾何学的非線

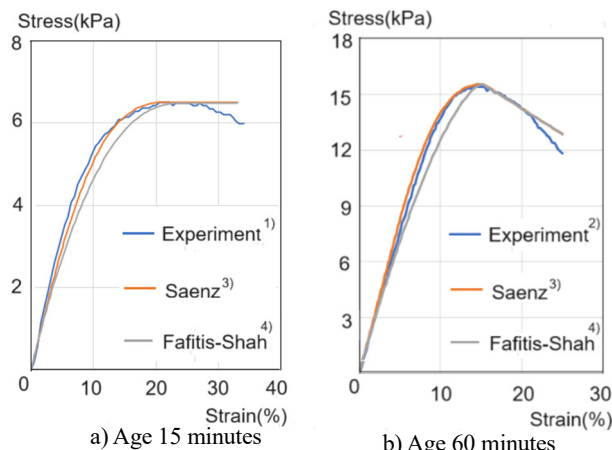


Fig.1 Comparison of compressive stress – strain curves

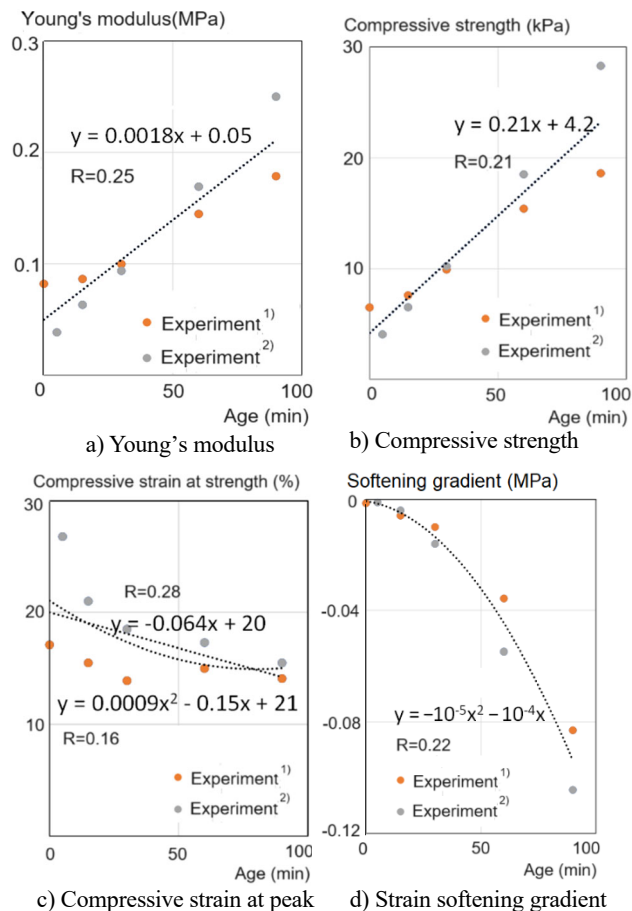


Fig.2 Relationships between compression properties and material age

1: 日大理工・学部・建築 2: 日大理工・教員・建築 3: 北海道大学・教員・建築

形性を考慮した。円筒壁は直径500mm,厚さ40mmで,解析では壁の鉛直断面を軸対称要素でモデル化した。実験における1層分のモルタル厚10mm,幅40mmを厚さ方向2分割,幅方向8分割とし,施工過程を再現するため要素を1層ずつ順次積み上げながら自重を載荷した。モルタルの単位体積重量は2070kg/m³,施工速度は1層あたり0.31分である。

Fig.3に6層,20層,26層の施工完了時点における鉛直方向圧縮応力分布と変形モードを示す。6層完了時には鉛直方向に僅かに沈下している。20層完了時には高さ方向の中央付近が外側にやや膨らみ始め,26層完了時には9層付近を中心に外側への変形が約8mmに達している。27層の施工後には横方向の変形が急増して解析が不安定化した。実験では同一条件で施工された5体が25~31層で崩壊していることから,解析でも実際の施工時の安定性を再現できていると言える。

壁が外側に変形する原因としては,自重による鉛直方向ひずみの増大により,半径方向および円周方向にはポアソン効果による膨張ひずみが生じ,円の直径が大きくなることで外側に変形するものと考えられる。

比較のため,幾何学的非線形を考慮しない解析も実施したが,ほぼ同様の結果となったことから,形状の変化が不安定化に及ぼす影響は小さいと言える。また,円筒ではなく一枚壁として解析すると,下部が両側に均等に膨らみ,片側のみに膨らむ現象は生じなかった。

Fig.4に26層完了時の半径方向変位量の高さ方向の分布を示す。実験では13層付近で変位は約12mmで最大となるが,解析では9層付近で最大となり,変位は約8mmに留まっている。この差異の原因として,解析では底面の変位を完全固定としているが,実験では底面で横方向の変位が多少生じていると考えられる。

Fig.5に解析による頂部の沈下量と7層目の半径方向変形量の変化を示す。積層数の増加に伴い徐々に変形の度合いが大きくなっていることが分かる。

5. まとめ

材料非線形と幾何学的非線形を考慮したFEMにより3Dプリンティングによるモルタル円筒壁の施工過程を再現した。若材齢モルタルの圧縮特性の継時変化は既往の実験に基づき回帰式を誘導し,それを用いて解析を行った。その結果,実験と同様に円筒壁の中腹部が外側に膨らみ,直径の約半分の高さまで施工すると不安定になることが分かった。なお,変形モードには実験と解析で若干の違いがあり,その原因としては底面の拘束条件の違いなどが考えられる。

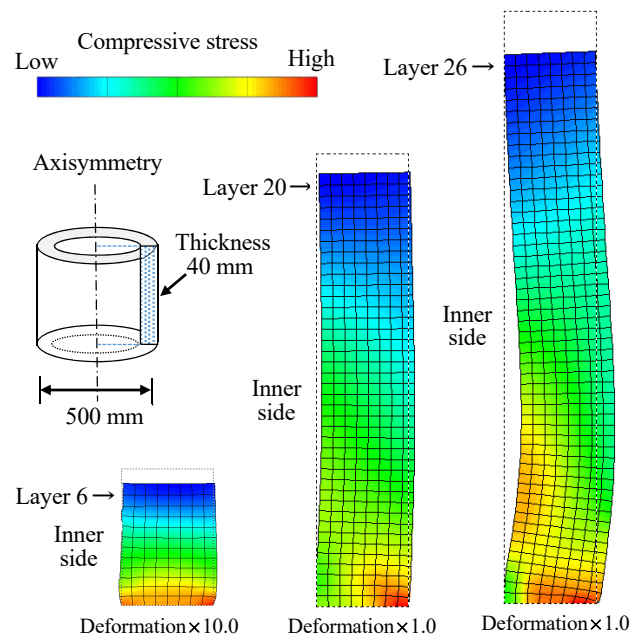


Fig.3 Vertical compressive stress distributions and deformation modes at 6, 20 and 26 layers (Analysis)

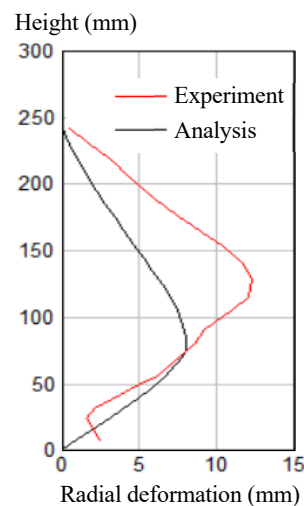


Fig.4 Radial deformation along vertical direction

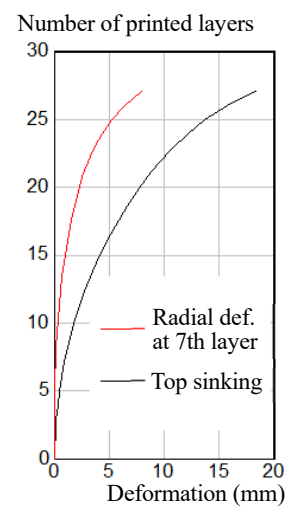


Fig.5 Deformation by layer accumulation (Analysis)

謝辞

本研究はJSPS 科研費JP21K18173(研究代表者:白井和貴)の支援を受けました。また若材齢モルタルの力学特性の検討では2023年度日本大学理工学部建築学科卒業生の印南佑香氏(現株式会社奥村組)の協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Wolfs, R.J.M., et al.: Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103344, 2019.
- 2) Wolfs, R.J.M., et al.: Early age mechanical behavior of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cement and Concrete Research*, 106, pp.103-116, 2018.
- 3) Fafitis, A., et al.: Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, *ACI*, No. SP-87, pp.213-232, 1985.
- 4) Saenz, L. P.: Discussion of Equation for the Stress-strain Curve of Concrete by Desayi and Krishnan, *ACI Journal*, Vol.61, pp.1229-1235, Sep.,1964.