

自由曲面を有する埋設型枠への3Dプリンティング技術の適用

清水建設(株) 技術研究所 正会員 ○山本伸也, 小倉大季, 阿部寛之, 菊地竜

1. はじめに

建設業における3Dプリンティング技術は型枠不要の機械化された施工により, 業界の課題である生産性を向上させることが期待されている。

しかし, 本技術の実用化には課題が多く残されている。様々な造形形状や使用環境に対応できる材料の開発, 造形物の外力に対する構造安全性, 環境作用に対する耐久性の確保, 造形物の出来形確認方法などが例として挙げられる。そのため, 国内では既に種々の造形物が製作されているが¹⁾, 実験的な段階に留まっているケースが多い。

著者らは, 普通コンクリートと同等以上の力学性能および物質移動抵抗性を持つ造形物を製造する3Dプリンティング技術を開発し²⁾, 国内で初めて3Dプリンティング技術を実際に使用される柱の埋設型枠の製造に適用することに至った。本稿では, 著者らが開発した3Dプリンティング技術とその適用に関して紹介する。

2. 開発した3Dプリンティング技術

著者らが開発・適用した3Dプリンティング技術は, 独自の繊維補強モルタル(ラクツム®)をロボットアーム先端に取り付けた押出しノズルから吐出しながら積層していくもので, 3Dプリンティング技術の分類における材料押出方式に該当する。

ラクツムには以下の特長がある。

- 材齢1日で圧縮強度 20 N/mm^2 以上を発現する
- 20°C 封緘養生した場合, 材齢28日で圧縮強度 100 N/mm^2 以上を発現する
- ひずみ硬化により, ひび割れ発生後にも引張力を負担する
- 高さ2m以上積層できる
- 各プリント層の界面が一体化する(図-1参照)
- トレント法による表層透気試験とSWAT法による表面吸水試験の品質グレードは共に「良」に該当する

また, 積層経路をロボットアームに指示するプログラムは造形物の3次元CADデータと積層に関するパラメータから短時間で生成できる。

3. 適用対象

2021年3月現在, ホテル棟とオフィス棟を有する複合施設((仮称)豊洲六丁目4-2・3街区プロジェクト)の建設が



図-1 積層体の切断面



図-2 適用対象の4本の柱

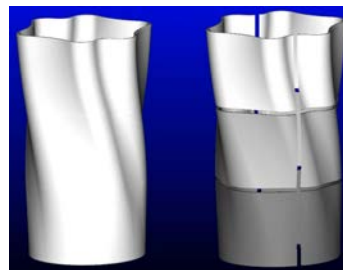


図-3 柱モデルと分割ピース



図-4 埋設型枠の製作状況

進行している。本施設においてホテル棟とオフィス棟は横幅30m, 長さ50mの歩行者用デッキによって地上6mの高さで接続される。このデッキを支える14本のRC柱のうち, 図-2に示す柱4本の埋設型枠の製造に3Dプリンティング技術を適用した。右側2本と左側2本の柱は左右対称の形状になっている。なお, 埋設型枠は非構造体として利用した。

右側2本の柱のモデルを図-3(左)に示す。従来の型枠を用いるコンクリート施工では造形が困難な自由曲面を有している。柱の高さは4.3mであり, 断面は下端から上端に向かって直径2.2mから2.6mに拡幅していく。

4. 埋設型枠の3Dプリンティング

埋設型枠の寸法はロボットアームの可動範囲より大きく, 一度ではプリントできないため, 図-3(右)のように埋設型枠を鉛直方向に3等分(上段・中段・下段), 断面を2等分し, 1本の柱につき計6ピースに分割してプリントし, それらを現場で組み合わせて使用することとした。ピース1体の造形に必要なモルタル量は約450Lであった。なお,

キーワード: 3Dプリンティング, 繊維補強モルタル, 埋設型枠, 3Dスキャン

連絡先: 〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17 清水建設 技術研究所 TEL 03-3820-5504

製造の際は設計モデルに余剰部を付け足してプリントし、そこから圧縮強度試験用コア ($\phi 50 \times 100$) と割裂引張強度試験用コア ($\phi 50 \times 50$) を鉛直方向に抜き出した。

図-4 は埋設型枠をプリントしている様子である。プリント速度 (押し出しノズルの移動速度) は 100 mm/sec 、型枠の厚み (プリント幅) は 70 mm とした。プリントは $20 \pm 5^\circ \text{C}$ に保たれた施設で行った。製造したモルタルのフレッシュ性状のばらつきを、15 打フロー試験とレオロジー試験³⁾により把握し、適切なタイミングで積層することで、不良率 0% の安定した施工をすることができた。

造形した埋設型枠は翌朝までの 15 時間程度、気温 20°C 以上で水分が散逸しない環境で初期養生した。その後、硬化した埋設型枠は屋外で封緘養生した。屋外養生した時期は 11 月下旬から 1 月上旬にあたり、平均気温は 7.3°C であったが、ひび割れは発生しなかった。

埋設型枠と同様の養生をしたコアを材齢 28 日時点で圧縮試験および割裂引張試験に供した。両試験のサンプル数はそれぞれ 72 本 (24 ピース $\times$ 3 本/ピース) である。コアの荷重方向を図-5 に示す。表-1 に試験結果を示す。

5. 埋設型枠の出来形評価

積層した埋設型枠と設計モデルの形状の比較のために、測距精度 $\pm 1 \text{ mm}$ の 3D レーザースキャナを用い、埋設型枠の形状データ (点群) を取得した。埋設型枠の全体の点群を取得するために複数の角度からスキャンを行い、専用のソフトウェアで点群を結合した。点群の結合時に生じる点群のずれは最大 2 mm であった。そして、点群処理用のソフトウェアを用いて埋設型枠の外面の点群と設計モデルとの最短距離を計算し、設計モデルに対する誤差を評価した。なお、計測で得られた点群の間隔は約 3 mm であった。

図-6(左) に上述した誤差をもとに色分けした柱 1 本分の合成後の点群を示す。個々の埋設型枠の点群を点群処理用ソフトウェアを用いて合成し、接合に不具合が無いことを確認した。図-6(右) に誤差のヒストグラムを示す。埋設型枠の外表面と設計モデルの誤差は正規分布に従っており、平均値は 0.02 mm 、標準偏差 σ は 1.41 mm であることがわかった。このような方法で、型枠の出来形と設計モデルの形状の誤差を定量的に評価できた。

6. 現場での施工

養生した埋設型枠は現場に運搬した後、クレーンにより柱の鉄筋の周りに据え付けた。埋設型枠内部へのコンクリートの打込みは上中下の段ごとの計 3 回に分けて行った。コンクリートの打込みに伴う側圧によって埋設型枠にひ

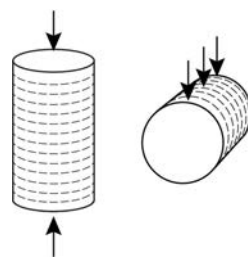


図-5 コア荷重方向

表-1 強度試験結果

圧縮強度	90.8(N/mm ²)
ひび割れ発生強度	5.5(N/mm ²)

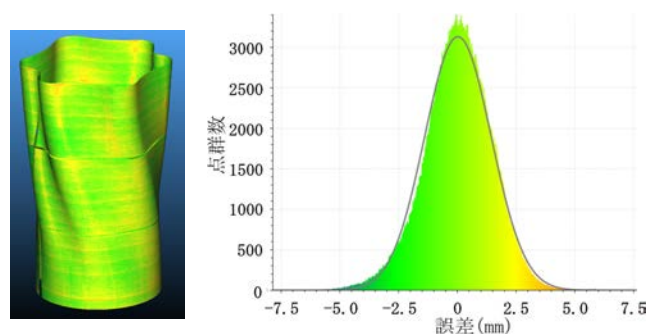


図-6 3D スキャンデータと設計モデルの比較



図-7 打設完了後の柱全景

び割れが発生することはなかった。図-7 は 4 本の柱の打設終了後の状況である。埋設型枠の現場施工が開始されてから 9 日で完了した。

7. おわりに

3D プリンティング技術を実供用される柱の埋設型枠の製造に適用した。その結果、短期間で自由な曲面を有する造形物 24 体を不良率 0% で製造することができた。今後は積層体を構造体として利用できるように、材料・補強方法・利用方法などを検討していく予定である。

参考文献

- 1) 丸屋剛, 石田哲也: 3D プリンティングの技術開発の現状と展望, コンクリート工学, Vol. 59, No. 2, pp. 173-180, 2021
- 2) 小倉大季, 阿部寛之, 田中博一: 3D プリンティングで作製した繊維補強セメント複合材料の力学特性, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, V-101, 2019
- 3) 阿部寛之, 小倉大季, 田中博一: 3D プリンティング技術に用いる繊維補強セメント複合材料の積層性評価, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, V-102, 2019