

付加積層技術を応用した新たなコンクリート施工法の開発 ～開発概要～

大成建設(株) 技術センター

正会員 ○木ノ村幸士  
フェロー会員

村田 哲  
坂本 淳

橋本 貴之  
丸屋 剛

1. はじめに

高齢化する技能労働者の離職や入職者の減少に伴い、建設業の担い手不足は年々深刻化し、生産性の向上は建設業の維持・発展にとって喫緊の課題となっている。

一方で、近年、材料を押し出して積層を繰り返す、付加積層により任意の3次元形状をその場で迅速に製作する3Dプリンティング技術が目覚しく発展し、本技術をセメント系材料に適用した事例が多数報告されている<sup>1)</sup>。型枠不要で迅速かつ正確に複雑形状を製作可能な本技術は、コンクリート工事の工期短縮や省人化、新たな構造形式の実現等につながる可能性を秘める。

著者らは、本技術に適したモルタル材料を開発し、3次元設計データに基づき3次元形状を自動で製作可能な施工システムの開発を進めてきた。本稿では開発した材料、付加積層装置、システムの概要を示すとともに、現状での課題や今後の展望について論じる。

2. 積層材料

(1) 要求性能の設定

付加積層に適した材料の要求性能指標として、既往文献<sup>2)</sup>などを参考に、以下の4点を考慮した。(a)安定的な押し出しに必要な流動保持性 (b)積層後の速硬性 (c)良好な圧送性 (d)自立安定性(高チキソ性)である。

(2) 配合、使用材料ならびに諸特性

付加積層材料としての適否は、モルタルフロー試験(JIS R5201)、二重円筒式回転粘度計によるレオロジー試験(JIS Z 8803)、後述する小型試作機を用いた付加積層による確認ならびに各種強度試験に基づき判断し、本過程を繰り返すことにより配合検討を行った。

選定した配合の一例を表-1に示す。材料には、ポルトランドセメントを主成分とするプレミックス粉体P、最大粒径2.5mmの細骨材S、凝結調整材Rを使用し、各単位量の微調整により短繊維を添加した配合に適宜修正することも可能である。また、凝結の始発時間は、凝結調整材Rの添加率により任意に調整可能である。

表-1の配合は、付加積層に適したモルタルフロー170～180mmを60分間保持可能で、押し出し安定性に優れている<sup>3)</sup>。また、凝結の始発時間は接水から120分程度、終結はその約5分後と高積層に有利な速硬性を有する。20℃相対湿度60%環境暴露での圧縮強度は材齢3日で約60N/mm<sup>2</sup>であった。

3. 付加積層システムの開発

(1) 小型試作機

小型試作機の外観を写真-1に示す。装置の操作制御は、新たに開発した専用ソフトウェアを備えたPCを介して行う。3次元設計データをPC内で層状に分割し、表-1のようなモルタル材料を層状に積層する。ノズルヘッドは250mm×250mmの平面上に自在に軌跡を描くことができ、材料を押し出しながら移動する。ヘッドの移動速度や加速度、吐出量、移動経路等は任意に設定でき、積層中に設定を変更しリアルタイムで制御に反映することも可能である。積層毎にテーブルが下降することにより最大500mmまでの積層が可能である。

表-1 積層材料の配合の一例

| W/P (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |        |
|---------|--------------------------|-----|------|--------|
|         | W                        | P   | S    | R      |
| 30      | 253                      | 844 | 1148 | P×1.5% |



写真-1 小型試作機の外観

小型試作機を用いて製作した積層物の一例を写真-2に示す。ノズル口径は 10mm である。ヘッドの平面移動速度を 120mm/sec とし、高さ方向にひねりを加えた中空正六角形（40 層、一辺 75mm、高さ 200mm）を中断することなく約 5 分で正確に積層することができた。

## (2) 大型試作機

小型試作機の開発過程において、積層中の崩壊を防ぎ高精度の積層を実現するには、ノズル口からの吐出量を定常に保つことが不可欠であるとの見解を得た。

そこで、ポンプの脈動影響を解消し、かつノズル口からの材料の垂れを防止する特殊ノズルを開発し、大型試作機に実装した。大型試作機の外観を写真-3に示す。主要機構は、ノズルヘッドが上昇する点を除き、小型試作機とほぼ同様である。ヘッドの平面移動速度は最大 500mm/sec であり、幅 1.7m×長さ 2.0m×高さ 1.5m の積層物を製作可能である。また、将来の実施工への適用を想定し、汎用的なスクイーズポンプを用いた圧送システムを採用した。特殊ノズルの効果により脈動するスクイーズポンプを用いているにも関わらず、吐出量は定常で安定しており、不連続区間を移動する際も材料が垂れない様子が確認できる（写真-4, 5）。材料が垂れないことから、製作可能形状は一筆書きに限定されることはなく、積層中に一時中断・再開した場合にも吐出量の乱れはなく、安定した積層が可能である。なお、ノズル口径についてはノズル先端を付け替えることにより、任意に調整可能である。

## 4. 今後の課題と展望

材料押出しによる付加積層方式は、層間の付着による一体性の確保や、鋼材等との併用による補強方法の開発が今後の大きな課題である。また、各種要求性能の設定や施工時の品質管理、計測、構造安定性の確保についても、慎重に検討を重ねる必要がある。

一方で、本技術は、生産性向上への寄与に留まらず、従来の型枠工法では実現不可能であった形状最適化手法<sup>4)</sup>を活用した薄肉軽量化構造や新構造形式をコンクリートで具現化する Digital Construction 技術としても、建設業に変革をもたらす中核技術になると考えられる。近未来の実用化に向け、鋭意研究開発を進めていく。

## 謝辞

特殊ノズルの開発・制御にあたり、国立有明工業高等専門学校創造工学科 原稔准教授、岩本准教授に多大なるご尽力を賜りました。ここに深謝いたします。



写真-2 小型試作機を用いた製作物の一例



写真-3 大型試作機の外観



写真-4 安定した吐出量と積層状況



写真-5 不連続区間の空中移動

## 参考文献

- 1) Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L. et al: Digital Concrete: Opportunities and Challenges, RILEM Technical Letters, pp.67-75, (2016)1
- 2) Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., et al.: Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, Material and Structures, Vol.45, No.8, pp.1221-1232, 2012
- 3) 村田哲ら: 高チキソ性材料のフレッシュ性状および硬化物性に関する基礎検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, 2018(投稿中)
- 4) 山崎慎太郎: トポロジー最適化の概要と新展開, システム/制御/情報, Vol.61, No.1, pp.29-34, 2017