

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 28 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻

氏 名 : 西脇 智哉

研究課題名 : 自動補強システムにより構造補強したコンクリート 3D プリント建築部
材の実現

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

自動補強システムにより構造補強した

コンクリート 3D プリント建築部材の実現

Structural concrete 3D printed building members made by automatic reinforcement system

東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 准教授 西脇 智哉

（研究計画ないし研究手法の概略）

本研究は、コンクリート 3D プリンティング（以下、3DCP）により作製される積層体に対して、造形プロセスと並行して補強材を導入することにより、構造性能を備えた 3D プリント建築部材を実現することを目的として実施した。3DCP は、型枠を用いずに自由度の高い形状を造形できるため、従来の建築生産では実現が困難であった意匠性の高い部材や、合理的な形状を有する建築部材の製作に有効な技術である。一方で、積層方式で作製される 3DCP 部材では、その内部に従来の鉄筋コンクリート造と同様の配筋を行うことが難しく、特に地震国である我が国においては、適切な補強方法の確立が実用化に向けた重要な課題となっている。

計画当初は、積層可能な繊維補強セメント系複合材料と自動補強システムを組み合わせ、さらに自由形状部材の構造設計およびメートル級部材の作製までを視野に入れていた。本研究期間ではその中でも、構造補強された 3D プリント建築部材を実現するための中核技術として、JIS に準拠した D4 異形鉄筋を補強材として用いる補強材導入方法の検討に重点を置いた。なお、繊維補強セメント系複合材料については既往研究において積層適用性や補強効果に関する一定の知見を得ていたため、本年度は、モルタル系の 3DCP 材料を対象として、D4 異形鉄筋を用いた補強材導入方法の成立性と力学的有効性を確認することを優先させた。

研究の実施にあたっては、別予算により導入した実機 3DCP（冠力社・GL-3DPRT-D2）を用いて、研究室内で小型から中型の試験体を迅速に作製できる環境を整備した。導入した装置の造形可能範囲はおおむね 70 cm × 70 cm × 高さ 50 cm 程度であり、当初想定した 1 m 級部材の作製には制約があったものの、梁試験体や建築プロダクトの試作を行うには十分な作製環境を構築することができた。これにより、材料条件、造形条件、補強材導入条件を変えながら、3DCP 積層体の作製と評価を繰り返し実施することが可能となった。

補強材には、建築・土木分野で一般に用いられる JIS G 3112 に準拠した D4 異形鉄筋を採用した。D4 異形鉄筋は小径であるため、フィラメント幅が限られる積層体の内部であってもかぶり厚さの確保が相対的に有利であり、補強材として適している。また、表面の節により周囲のセメント系材料との機械的な付着が期待できるなどの利点がある。本研究では、この D4 異形鉄筋を 3DCP 積層体に導入するための補強材挿入機構を新たに開発した。ただし、本機構の詳細なメカニズムについては今後の特許出願を予定しているため、本報告書では具体的な機構原理の記述は控える。なお、本研究期間における試験体作製では、挿入機構そのものの成立性を優先して検証したため、補強材の導入は手動操作により行った。3DCP 装置本体とのプログラム連携については、今後の自動化に向けた検討課題として位置づけている。

開発した挿入機構を用いて、梁長約 50 cm の 3DCP 試験体を作製し、補強材導入の有無による力学性能についての評価を行った。これは、3DCP 積層体に D4 異形鉄筋を導入した場

合の基本的な補強効果を確認するための要素試験体として位置づけられる。力学試験では、補強材導入によるひび割れ後の荷重保持能力および変形性能の変化などに着目した。

さらに、建築分野への展開可能性を検討するため、構造・意匠設計を担当する分担者との協働により、補強材を併用した前衛的な形状の照明器具等の建築プロダクトを設計・作製した。これは、3DCP の自由造形性を活かしつつ、補強材を単なる構造補強要素としてだけでなく、形状保持や部材成立性を支える要素として用いる試みである。この際には、挿入鉄筋に加えて金属網などを用いた新しい造形方法についても検討を行った。これらの検討は、構造性能の向上に関する基礎的検証に加え、意匠性を有する建築部材・建築プロダクトへの展開可能性を探るものである。

（実験調査によって得られた新しい知見）

本研究により、3DCP 積層体に対して JIS 規格に基づく D4 異形鉄筋を導入し、建築部材としての構造性能向上を図る手法について、基礎的な成立性を確認することができた。現在までに実際の構造物に適用されている 3DCP は、積層体を打込み型枠（埋設型枠）として利用し、その内部に通常の鉄筋コンクリートを打ち込む方法を採用する場合が多い。この方法では既存の鉄筋コンクリート造に近い力学性能を確保しやすい一方で、現場での配筋やコンクリート打込み作業が必要となるため、3DCP の特徴である省力化の利点が十分に発揮されず、鉄筋を内包することによる形状の自由度にも制限がある。本研究では、3DCP 積層体そのものに補強材を導入することにより、積層体を単なる型枠ではなく、力学性能を有する建築部材として利用する方向性を検討した点に特徴がある。

第一の知見は、D4 異形鉄筋を 3DCP 積層体の補強材として利用できる可能性を確認したことである。基礎性状として、図 1 に示す D4 異形鉄筋の積層モルタルからの引抜き試験を実施して付着強度を確認した。その結果、図 2 に見られるように、既往の検討で用いた円柱状金属ピン（60s）やその表面に目荒らしを施した金属ピン（60r）と比較して、付着強度が増加した。これは、節による異形形状がセメント系材料との付着を改善したためと考えられる。この結果は、D4 異形鉄筋を 3DCP 積層体内の離散的な補強材として用いる際の付着・定着条件を検討する上で基礎となるものである。

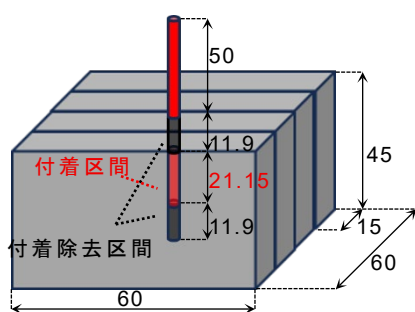


図 1 引抜き試験体

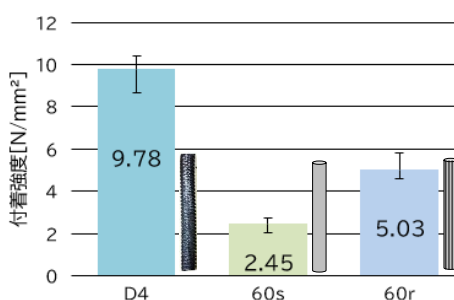


図 2 付着強度

第二の知見は、図 3 に示すように積層体内部に D4 補強材をちどり状に配置した 3DCP 梁試験体を作製し、D4 補強材の導入によってひび割れ後の荷重保持性能および変形性能の改善が確認されたことである。図 4 に梁曲げスパン 45 cm の試験体に対して 3 等分曲げ試験を行って補強材導入の有無による力学挙動を比較した結果を示す。D4 異形鉄筋を導入した試験体では無補強試験体とは異なり、脆性的な破壊をすることなく、ひび割れ発生後にも安定

これらの試作は必ずしも定量的な構造性能評価を目的としたものではないが、3DCP と補強材を組み合わせることで、自由形状、軽量化、透過性、意匠性を備えた建築部材・建築プロダクトへ展開できる可能性を示すものである。



Figure 1 consists of two panels. Panel (a) shows a large, complex, 3D-printed vascular network structure, resembling a dense, interconnected web of tubes, resting on a yellow surface. A blue arrow points from this panel to panel (b). Panel (b) is a close-up view of the 3D-printed vascular network structure, showing the intricate details of the interconnected tubes and the hexagonal mesh pattern on the surface.

以上の検討および試作を通じて、構造設計と意匠設計を統合するための今後の課題が明確になった。当初計画の本格的なトポロジー最適化による大型部材設計には至らなかったが、

D4 異形鉄筋による補強材導入が可能になったことで、今後、力の流れに応じて補強材配置や部材形状を合理化する設計へと展開するための基礎が得られた。特に、3DCP は従来の型枠や配筋作業に制約されない自由な形状を実現できるため、補強材導入方法と構造設計を組み合わせることで、従来の鉄筋コンクリート部材とは異なる合理的な建築部材を設計できる可能性がある。一方で、残された課題の一つに、補強材挿入機構は現段階では手動操作であり、3DCP 装置本体とのプログラム連携には至っていない点がある。この点について、装置開発会社との協議により、造形パスと補強材挿入動作の連携に向けた技術的見通しは得られつつある。

以上より、D4 異形鉄筋を用いた補強材導入機構の開発、梁試験体における力学性能改善の確認、ならびに設計者との協働による建築プロダクト試作を通じて、構造補強された 3D プリント建築部材の実現に向けた基礎的知見を得ることができたと考えている。今後は、FRCC との組合せ、大型部材化、補強材挿入動作の自動化、さらにトポロジー最適化等に基づく構造・意匠統合設計へと発展させる予定である。

(発 表 論 文)

- Haruto Tasaki, Alessandro Pasquale Fantilli, Yao Ding, Kazunori Ohno, Tomoya Nishiwaki, Experimental and Analytical Study of the Flexural Response of 3D Concrete Printed Laminates with Inserted Reinforcements, *fib Congress 2026, Lisbon, Portugal* (in press).
- Haruto Tasaki, Noriyuki Kobayashi, Tomoya Asakawa, Alessandro P. Fantilli, Yao Ding, Ryo Egawa, Kazunori Ohno, Tomoya Nishiwaki, Testing and Modelling Reinforced 3D Concrete Printing, *Structural Concrete* (under review).