

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 3 年 4 月 30 日現在

機関番号： 1 4 3 0 1

研究種目： 奨励研究

研究期間： 2020 ~ 2020

課題番号： 2 0 H 0 0 9 4 0

研究課題名 コンクリート3Dプリンターを見据えた配合設計および混和材料の検討

研究代表者

平野 裕一 (HIRANO, Yuichi)

京都大学・工学研究科・技術職員

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 460,000 円

研究成果の概要：コンクリートを材料とした3Dプリンターの実構造物への適用を踏まえ、要素技術の一つであるコンクリート材料の配合、吐出方法、力学的性質の観点から検討を実施した。

検討の結果、3Dプリンティングに適した材料の配合を見出した。また、新たな吐出方法を提案した。積層後の自立安定性の検討では、一度に積層が可能な層数の目安の考え方を提案した。力学的性質の検討では、積層面に垂直な方向での圧縮強度は同材料の圧縮強度と同等であるが、その他の方向では小さな値となり異方性が確認された。積層面の剥離に対する抵抗性は、一般的な方法で製作するコンクリートの表面の層を剥離する力の半分程度であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリートを材料とした3Dプリンターは、コンクリートを型枠に詰めることを前提とした製造方法から、型枠を前提としない製造方法に大きく転換しようとするものである。そのため、試験方法自体や試験結果に対する評価には、従来とは異なる視点、体系が必要になる。

また、従来のコンクリート構造物の製造では、型枠を組み立て、練り混ぜたコンクリートをその中に流し込み、固まって所定の強度が出るまで保護(養生)し、型枠を外す、ということを繰り返していく。こうした工程は非常に時間がかかり、多くの労務を要するため、建設現場の生産性の低さの一因となっている。将来的には、建設現場の生産性を大きく上げる可能性を秘めている。

研究分野： コンクリート工学

キーワード： 3Dプリンティング コンクリート材料 成形押し出し方式 圧縮試験 引張剥離破壊試験

## 1. 研究の目的

近年、石膏や樹脂を材料とした 3D プリンターは広まってきているがコンクリートを材料とした 3D プリンターは実用化されていない。いくつかの研究機関では、砂利が入っていないコンクリートであるモルタルを材料とした試験研究が進められているが、コンクリートを材料とした研究は見当たらない。また、特別な混和材料を用いている事例が多い。建設現場に 3D プリンターを適用し、既存の施工方法と置き換えるのであれば、一般的なコンクリート材料に近い材料の方が建設現場により容易に受け入れられるのではないかと考えた。

コンクリートを材料とした 3D プリンターの実現に向けた課題として、適した材料の選定や、層間の付着性や水密性、吐出ノズルの形状や動作方法、コンクリート材料の配送方法や供給方法、施工時間、鉄筋の配置、耐久性や耐震性など多岐にわたる。また、部屋の中に収まるような石膏や樹脂による 3D プリンターとは異なり、大きな構造物の製作を目指すコンクリートの 3D プリンターでは、ポンプ車やクレーン車などの大型重機の自動運転技術も求められる。

そこで、本研究では、実現に向けた要素技術の一つとして、配送時には一定の流動性があり、ノズルから吐出されればその場所に留まるような性質のコンクリート材料および配合設計、吐出方法を検討する。また、特に構造物として力学的な弱点になると考えられる層間の付着性状に関して、圧縮試験、引張試験の力学的試験を実施して、コンクリート材料の性質からのアプローチにより、3D プリンティング技術の実構造物への適用を踏まえた考察を行うことを目的とする。

## 2. 研究成果

以下に、本研究により得られた知見の概要を検討項目別に挙げる。

### (1) コンクリート材料の配合

吐出した際に崩れない性質である自立安定性を目指し、砂利と砂の割合を検討した。形状を安定させるためには砂利が必要であるが、砂利の隙間に砂およびセメント分が満たされる必要があり、適切な砂利と砂の割合が求められる。

セメントと水との混合物はセメントペーストと呼ばれ、砂利と砂を結びつける役割である。また、配送、吐出の際の流動性を担保する役割があり、混合した材料を分離させない役割もある。適切なセメントと水との割合、材料を分離させないで流動性を高める混和材料の添加が必要である。

これらを踏まえ、検討、試験練りを繰り返し、少なくとも 1 つの 3D プリンティングに適した配合を見出した。

### (2) 吐出方法

近年、セメント材料を 3D プリンティング技術に適用する研究は各方面で進められている。ただし、いずれの研究も使用材料は砂利の入っていない、いわゆるモルタルである。吐出方法は、細い先端を持つノズルからセメント材料を押し出して積み上げていく、材料押出方式を採用している。

砂利が含まれるコンクリートでは、圧力を加えながら連続的に材料押出方式で吐出していくことは困難であることが想定された。そこで、コンクリートに適した吐出方法を検討した。

単にノズルから重力により落とす方法、あるいは上面を開口にして重力によりガイドに沿って滑り落とす方法は、吐出した材料が途切れやすく、吐出後の形状が安定しない。そのため、何らかの押し出していく機構が必要であると考えられた。また、吐出口と設置位置が離れていること、ガイドと設置位置との角度があることにより、吐出方向に直角のひび割れが入りやすく、不連続になりやすい。一旦ひび割れが入ってしまうと、吐出後に修復は困難である。そこで、吐出前に一定の成形をした上で、滑らかに押し出していく新たな吐出方式を提案した。

### (3) 一層の高さ

一層の高さは、崩れずに形状を保持できることだけでなく、一度に多く吐出することで層ごとの強度が小さくなってしまいうことを避ける必要がある。そして、砂利の最大粒径や、吐出口の幅が一層の高さを決定する要素になると考えられる。

一層の高さを変えて検討した結果、砂利の最大の大きさと同程度では、吐出方向に直角のひび割れが入りやすく、不連続になりやすい。そのため、ある程度の高さが必要である。しかし、高すぎても崩れやすくなり、空隙が多くなって強度が小さくなることを防ぐ必要もある。

検討、試験練りを繰り返した結果、砂利の最大粒径に比べ吐出口の幅が十分に広い場合の、高さの目安を提案した。

また、この高さの目安による一層の強度に関しては、力学的試験の結果より、一般的に練り混ぜて、十分に締め固めた試験体の強度と同等であることが確認された。

#### (4) 積層後の自立安定性

コンクリートはある程度の時間を経過しないと、硬化しないで変形してしまう性質がある。そのため、その時間が経過するまでに積み上げられる、層の高さが、変形の許容される範囲で決まってくる。また、積層した場合の下部の層では、それより上の層の自重により押しつぶされ、側面が膨らみ、変形してしまう。そして、高く積み上げる場合は、転倒可能性の検討が必要である。これらは、層の幅に関係すると考えられる。

そこで、(1)～(3)のコンクリート材料の配合、吐出方法、一層の高さの検討結果を踏まえ、積層試験により検討した。検討の結果、一度に積層が可能な層数の目安の考え方を提案した。

#### (5) 圧縮強度

硬化後のコンクリートの性質を表す主な指標として、圧縮強度がある。積層構造では、層間が力学的な弱点になると想定される。コンクリート構造物を積層構造で設計・製造する場合、層間が存在することによる力学的性質を把握する必要がある。

そこで、(4)の検討で作製した積層試験体に対し、縦、横、斜め方向に、円柱をくり抜いて試験体を用意し、圧縮試験により検討した。検討の結果、積層面に垂直な方向での圧縮強度は同じ材料で締め固めて製造する一般的な圧縮強度と同等である。しかし、層間の存在のため、横方向では小さな値となり、斜め方向ではさらに小さな値となり、異方性が確認された。そのため、積層構造を構造部材に用いる場合は、積層の方向に留意する必要があると考えられる。

#### (6) 層間の剥離に対する抵抗性

コンクリート構造物の設計では、引張力は内部に挿入した鉄筋が受け持ち、コンクリートに引張力を受け持たせない考え方が一般的である。しかし、積層構造物では、層間が力学的な弱点になり、(5)の検討結果より異方性が存在し、一般のコンクリート構造物の設計をする際の考え方とは異なる考え方が必要になると考えられる。

積層構造物の層間の付着程度を評価する方法として、層間を対象とする引張試験が考えられる。層間に引張力が作用する場合、層間の面に対して垂直に作用する引張力および垂直以外の方向に作用する引張力が考えられる。ほとんどの場合が垂直ではない方向に作用する引張力であると考えられ、この場合、層間の面を引き剥がそうとする力が作用すると考えられる。

そこで、層間に垂直な方向に対する一軸引張試験および引張剥離破壊試験により検討した。引張剥離破壊試験とは、著者が別の研究で開発した、偏心引き剥がし力を作用させる試験方法であり、実現象に近い剥離現象の評価をすることができる。検討の結果、層間の剥離に対する抵抗性は、一般的な方法で製作するコンクリートの表面の層を剥離する力の半分程度であると考えられる。

#### (7) まとめ

コンクリートを材料とした 3D プリンターは、コンクリートを型枠に詰めることを前提とした製造方法から、型枠を前提としない方法に大きく転換しようとするものである。そのため、積層構造物に対する要求性能、試験方法、試験結果に対する評価には、従来とは異なる視点が必要になると考えられる。

本研究において検討した項目は、コンクリートを材料とした 3D プリンターの実現に向けた要素技術のごく一部であるが、検討した内容、その結果を踏まえ提案した内容は、この実現に寄与するものであると考えている。

主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

研究組織（研究協力者）

氏名	ローマ字氏名
----	--------