

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15060

研究課題名（和文）3次元プリンティング用セメントモルタルの時間依存構成則および一般化解析手法の構築

研究課題名（英文）Development of time-dependent constitutive laws and generalized analysis methods for 3D printing cement mortar

研究代表者

大野 元寛（OHNO, MOTOHIRO）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：30821970

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：材料押出方式によるセメント系材料の3Dプリンティング技術に対し、積層性（ノズルから打ち出したモルタルフィラメントを何層まで詰めるか、どの程度変形するか）の予測手法および評価手法を提案した。また、3Dプリントしたモルタル硬化体の力学特性と破壊形態に関する実験的研究を通して、モルタルフィラメントの層間付着強度および層間に生じる粗大な空隙が、巨視的な強度と破壊形態を左右することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した積層性の予測手法および評価手法により、積層中の造形物の変形および降伏を的確に予測し、かつ、積層中にリアルタイムに倒壊の前兆を検知することが可能になる。これによって、セメント系材料の3Dプリンティング技術の普及展開に寄与できる。また、3Dプリントしたモルタル硬化体の力学特性と破壊形態に関して得られた知見は、積層体の力学挙動を適切に評価する力学モデルの構築に向けた一歩となる。

研究成果の概要（英文）：This study proposed prediction and evaluation methods for buildability (i.e. how many layers can be stacked or how much deformation occurs in the printed object) in extrusion-based 3D printing of cementitious materials. In addition, through an experimental investigation on hardened 3D-printed cement mortar, it was suggested that the macroscopic mechanical properties and failure mode of printed mortars are governed by the bond strength between deposited mortar filaments and relatively large voids among the filaments.

研究分野：工学

キーワード：3Dプリンティング セメント系材料 積層性 せん断強さ せん断帯 デジタル画像相関法 空隙 破壊力学

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

建設業における設計・施工を劇的に転換しうる技術として、セメント系材料を用いた3Dプリンティング（3DP）技術が耳目を集めている。特に、セメント系材料（主としてセメントモルタル）をインクとして吐出し積層造形する技術について、現在、欧米諸国を中心とした技術開発が活況を呈している。材料押出積層方式の3DP用モルタルには、ノズルから吐出可能な流動性のほかに、吐出後に自立し形状を保持する性能も求められる。また、大型部材・構造物の造形においては、上層の重量によって生じる下層部の変形を、可能な限り抑える必要がある。こうした“積層性”（何層まで積層できるか、どの程度圧密沈下するか）は、従来の型枠打設コンクリートでは要求されない、3DPコンクリート特有の性質であって、その評価および予測手法の確立が求められている。

既往研究の多くは、3DP用フレッシュモルタルの諸物性にもとづき積層性の評価を試みている。具体的には、材料の降伏せん断応力や塑性粘度などのレオロジー的物性や、粘着力や内部摩擦角といった土質力学的物性を実験的に測定し、積層性との関係を議論している。しかし、3DP用モルタルには積層性を高めるために急硬材が添加される場合が多く、そのフレッシュ性状は吐出後の数十分から1時間の間でも劇的に変化する。したがって、ノズルから吐出されるまでは流体的な挙動を示す一方、吐出後は自立し、上層からの重量によって土質材料のように圧密される。さらに、数十分から1時間程度の中に凝結・硬化が急速に進み、2-3時間後にはモルタル硬化体として振る舞うことになる。こうしたダイナミックなフレッシュ性状の経時変化を十分に考慮した積層性の評価手法は、未だ確立されていない。また、急硬材の性質上、その凝結・硬化特性は温度をはじめとした環境条件にも有意な影響を受けることが知られているが、定量的な議論は未だ十分になされていない。

2. 研究の目的

本研究は、材料押出積層方式における積層中の造形物の変形および降伏を、任意の外気温度条件および時空間上での確に予測・評価可能な手法の開発を目指した。また、研究開始当初に想定していた研究対象を拡げ、硬化後の積層体の力学特性についても実験的研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 積層性の予測手法の開発

研究代表者は、過去の研究（2018年度科学研究費助成事業：研究活動スタート支援-18H05915）でベーンせん断試験に基づく積層性の予測手法を提案した。積層体の任意の点に生じるせん断応力が、その点における材料のせん断強さを上回った時に倒壊が生じると仮定したモデルである。せん断応力は上層の自重による鉛直応力に起因し、ミーゼスの降伏条件を仮定した上で材料のせん断強さと比較し、降伏（すなわち積層の限界）を判定する。

本研究では、当該手法の妥当性の更なる検証を行った。具体的には、過去の研究で検証した3DP用セメントモルタル（急硬材を混和したセメントモルタル）に加え、石灰石微粉末ペースト、セメントペースト、セメントモルタル（急硬材を含まない通常のセメントモルタル）について、そのせん断強さの時間変化と温度依存性を実験的に評価した。これにより、急硬材の有無や水和反応の有無がせん断強さの時間発展に与える影響を、定量的に評価することを試みた。また、積層に伴って生じるせん断応力とせん断強さを比較し、積層可能高さを予測した。実測された積層可能高さと予測値を比較し、モデルの妥当性を検証した。

(2) 積層中におけるリアルタイムの積層性評価手法の開発

本研究では、積層中にリアルタイムに倒壊のリスクを検知する手法の開発にも取り組んだ。具体的には、積層体の表面画像を積層中に連続撮影し、デジタル画像相関法（Digital Image Correlation: DIC）を用いて表面ひずみ・変位の分布を分析して、倒壊の予兆を事前に検知するシステムの構築を目指した。

(3) 硬化後の力学特性に関する研究

押出積層方式の3Dプリンティング技術では、モルタルフィラメントの層間の付着強度の低下や、フィラメント間に生じる離隔や空隙が積層体の強度を減少させる可能性が指摘されている。しかし、破壊に至るまでのひび割れの発生や進展に層間が及ぼす影響は、未だ十分に検討されていない。本研究では、3DP技術により作製されたモルタル硬化体に対し、圧縮、曲げ、割裂引張および層間付着強度を測定して力学特性を評価した。また、各試験でデジタル画像相関法による表面ひずみ分布の測定を行い、破壊形態に関する検討を行った。これによって、3Dプリントされたモルタル硬化体の力学特性と破壊形態に関する理解を深めることを試みた。

4. 研究成果

(1) 積層性の予測手法の開発

石灰石微粉末ペースト (LP)、セメントペースト (CP)、セメントモルタル (CM)、3DP用セメントモルタル (3DPCM: 通常モルタルに急硬材等を添加したもの) に対し、異なる温度環境下でのせん断強さの時間発展を測定した。実験の結果、3DPCM 以外の材料では顕著な温度依存性が確認されなかった。この結果から、3DPCM の温度依存性は急硬材の添加によるものであることが明らかとなった。

図 1 に各材料のせん断強さの時間変化を示す。急硬材の効果により、3DPCM では混練後 50 分程度からせん断強さが指数関数的に上昇する。一方、CP および CM のせん断強さでは緩やかな線形の上昇が見られ、LP ではほぼ一定であった。前者は水和反応に伴う凝結の進行によるものと考えられる。したがって、セメント系材料の 3DP における積層性を的確に予測するためには、急硬材およびセメントの水和反応による影響を同時に考慮する必要があることが示された。

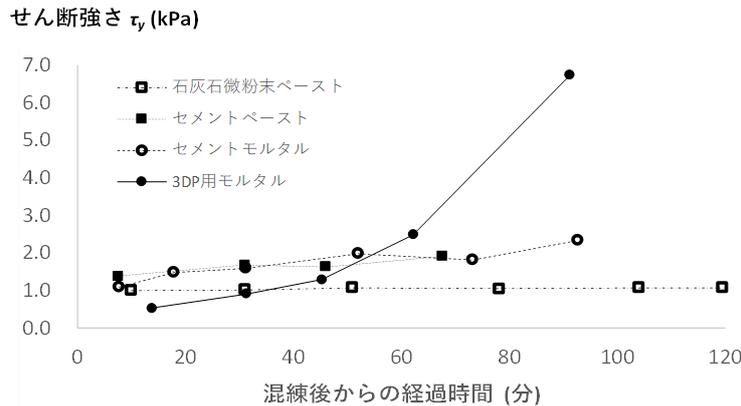


図 1: 各材料のせん断強さの時間変化

研究代表者の過去の研究では、3DPCM の積層性の予測値が実測値を過小評価していた。この原因として、予測モデルのパラメータの評価に課題があったという仮説を立てていた。たとえば、予測ではモルタルの密度を配合から決定していたが、実際にプリントされたモルタルの表面には多くの空隙が見られた。そのため、実際のモルタルの密度を過大評価しており、これが積層性の過小評価につながった可能性があった。また、積層体とベーン試験用のサンプルでは比表面積が大きく異なっていたため、フレッシュモルタルからの水分散逸に有意な差異が生じた可能性があった。積層体でより多くの水分が散逸していれば、急硬材の濃度が相対的に上昇する。これにより、凝結が促進して積層性が高まるが、この効果をベーン試験では捉えられていなかった可能性があった。

本研究で実施した積層試験の結果では、LP の積層性の予測値が実測値を精度良く評価できた。プリントした LP では、せん断強さが時間変化せず、また、3DPCM と比べて空隙の少ない密なフィラメントであった。したがって、上述のパラメータの評価に関する仮説の妥当性が裏付けられた。換言すれば、モデルのパラメータを的確に評価できれば、本モデルが積層性を精度良く予測できることが明らかとなった。

(2) 積層中におけるリアルタイムの積層性評価手法の開発

本研究で実施した積層試験の際、積層に伴って積層体表面に帯状の様子が表れる現象が観察された。このせん断帯は積層中に複数生じ、積層体が倒壊する際には、せん断帯に沿って滑るような変形が生じた。この現象は既往研究では報告されていない、新しい倒壊形態であった。また、せん断帯は最下層から概ね 3-4 層程度の箇所から発生して進展した。これは、最下層に生じるせん断応力が積層体の倒壊の主要因であるとする既往研究の仮説と矛盾している。したがって、積層体の倒壊メカニズムが、当該分野で現在主流となっている仮説が想定しているよりも複雑な機構であることが示唆された。

せん断帯の現象を発見した後、倒壊機構をより詳細に検討するため、プリント中の積層体にデジタル画像相関法を適用し、積層体表面のひずみ・変位の変化を分析した。図 2 に積層体表面の最大主ひずみ分布の発展とせん断帯の発現の様子を示す。せん断帯が肉眼で確認されたのは 35 層目の積層中であつたが、DIC によって生成された表面主ひずみ分布では、31 層目の積層時点で既にせん断帯上の高ひずみ領域が確認できる。また、DIC 上でせん断帯が確認された後でも、35 層目まで (すなわち、肉眼でせん断帯が確認されるまで) は積層体の鉛直方向に有意な変位が生じていないことも確認された。したがって、DIC によりせん断帯が確認された時点で対策を打てば、積層体の倒壊を防ぐことが可能であることが示された。対策の例としては、プリントを一旦停止して、積層体の硬化を待つことなどが考えられる。

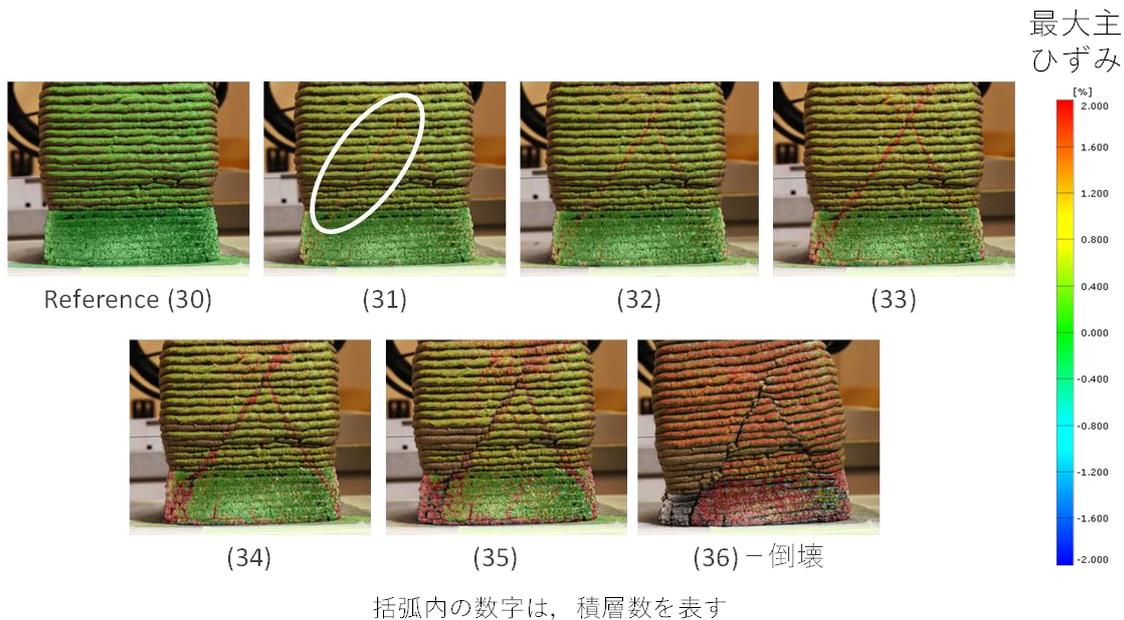


図 2 : 積層体表面の最大主ひずみ分布の発展とせん断帯の発現

以上の結果から、積層中にリアルタイムに倒壊のリスクを検知する手法を提案した。すなわち、積層体の表面画像を積層中に連続撮影し、DIC を用いて表面ひずみ・変位の分布を分析することで、(肉眼での)せん断帯の発現および積層体の倒壊を事前に検知するシステムが構築できる。

(3) 硬化後の力学特性に関する研究

層間付着の影響を評価するための各種力学試験の結果から、3D プリントされた供試体 (プリント供試体) の力学性能が、型枠打設により作製した供試体 (型枠供試体) と比較して低下するケースが確認された。具体的には、層間に垂直に引張力が作用する場合に顕著に強度が低下しており、層間が弱部となってプリント供試体の力学性能を支配している。その結果として、プリント供試体には力学性能の異方性が生じる。この傾向は既往研究での報告と概ね同様であった。

一方、層間に粗大な空隙が存在する場合は、空隙周りに応力集中が生じ、ひび割れの発生箇所と進展方向を左右することが明らかとなった。図 3 に型枠打設供試体とプリント供試体における表面主ひずみ分布の発展を示す。

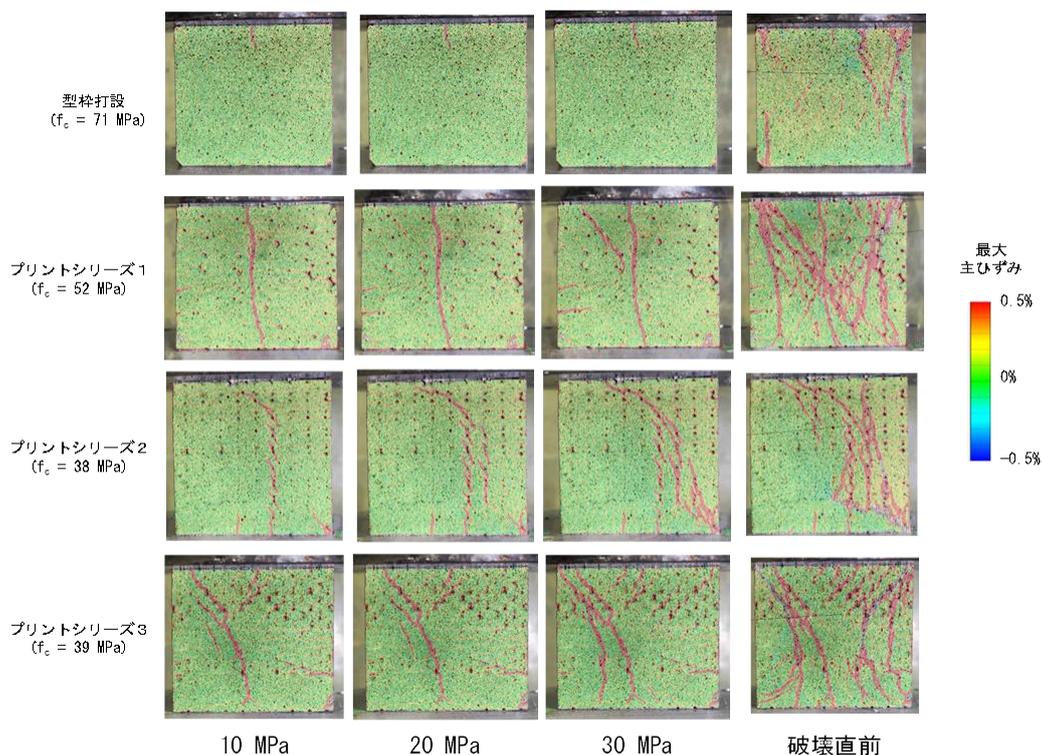


図 3 : 型枠打設供試体とプリント供試体の圧縮試験における最大主ひずみ分布の発展

型枠打設供試体では、破壊直前まで局所的な高ひずみ領域の発現は見られない。一方、プリント供試体では、応力が低い段階でも粗大な空隙の周りに高ひずみ領域が生じていることが分かる。圧縮応力の増加と共に高ひずみ領域も拡大していくが、粗大な空隙を起点として発生および進展していることが分かる。また、先端が尖った形状の空隙に、より多くの高ひずみ領域が見られた。したがって、空隙の近傍に応力集中が生じており、破壊力学におけるき裂や欠陥と同様の役割を果たしていることが明らかとなった。また、粗大な空隙の分布がひび割れの進展方向を左右していることも分かった。粗大な空隙が密に分布している領域では、圧縮応力の増加と共に、それらの空隙を縫うような形で複数の高ひずみ領域の線が進展していく様子が確認された。

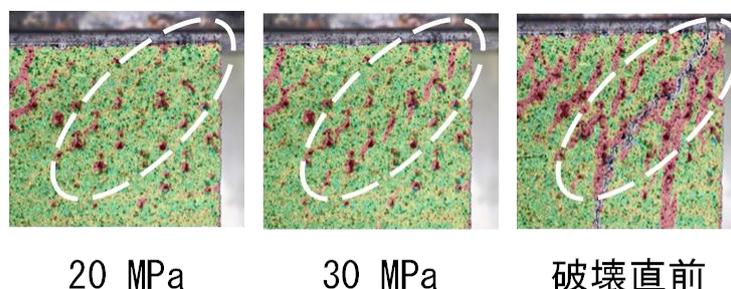


図4：プリント供試体シリーズ3の最大主ひずみ分布の拡大図

以上の結果から、フィラメントの層間に生じる粗大な空隙の寸法、形状および分布が、積層体の巨視的な強度を左右することが示された。これは、3DP 技術を構造部材に適用する際の大きな技術的課題である。たとえば、空隙が密に分布している場合、各空隙周りの応力集中の領域が互いに干渉し、より複雑な応力場を生じる。すなわち、破壊進行領域が重なり合っており、初等的な線形破壊力学の範疇を超えている。また、空隙は3次的に分布しているため、内部の損傷の進行の評価はさらに困難を極める。したがって、3D プリントされた積層体の力学性能を的確に評価するためには、空隙の3次的な分布を適切に評価しつつ、空隙群の影響を平均化して巨視的な力学挙動を評価する力学モデルが必要となる。これは今後の研究課題としたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 西條 圭祐
2. 発表標題 EXPERIMENTAL STUDY ON FAILURE MECHANISM OF FRESH 3D PRINTED MORTAR IN EXTRUSION BASED METHOD
3. 学会等名 The fib Symposium 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅見 仁博
2. 発表標題 押出積層方式の3Dプリンティング技術により作製されたモルタル硬化体の力学特性と破壊形態
3. 学会等名 コンクリート工学年次大会2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>本研究で得られた知見に基づき、以下の書籍の分担執筆を行った。</p> <p>書名：3Dプリンタ用新規材料開発 出版社：株式会社エヌ・ティー・エス 発刊日：2012年1月 執筆箇所：第1編3章4節</p>

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------