

圧縮ひずみ硬化特性を有するセメント系材料のメタマテリアル技術の開発

東京大学 正会員 ○大野 元寛, 非会員 西條 圭祐, フェロー会員 石田 哲也

1. はじめに

物質の内部構造を制御することで材料本来の性質を超えた機能を付与する技術をメタマテリアル技術と呼ぶ。これまでに負の屈折率や負のポアソン比など、自然界には存在しない新たな機能を有する人工物質が実現されてきた。力学性能に関しては、強度・剛性の異方性の発現と制御、延性・靱性の向上などが可能であることが示され、Mechanical metamaterials と呼ばれる研究領域が切り拓かれている¹⁾。

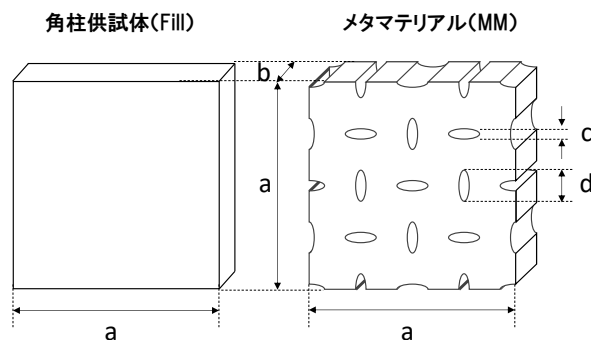
筆者らは、セメント系材料を用いた構造体の cm スケールの内部構造をデザインすることで、材料自体では実現不可能な力学性能の獲得を試みている。本稿では、圧縮ひずみ硬化特性を有するセメント系材料のメタマテリアル技術の開発について紹介する。

2. 実験概要

本研究で検討した実験シリーズの概要を図-1 に示す。負のポアソン比を示すセメント系材料のメタマテリアル²⁾から着想を得て、規則的に配置された楕円型の空洞を有する構造体を作製した。圧縮を受けた構造体にひび割れが発生した後も、構造体が内側に絞られるように変形することでひずみ硬化が発現することを狙った。また、比較実験のために空洞を持たない角柱供試体も作製した。

使用材料は普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 25%の短繊維補強モルタルである。繊維混入率は 1.0 vol.%とした。細骨材には最大粒径 2.0mm の陸砂を使用し、フレッシュ性状の調整のために高性能 AE 減水剤を混和した。

図-2 に供試体作製に用いた 2 種類の手法を示す。角柱供試体 (Fill-C) とメタマテリアル供試体 (MM-C) は型枠打設によって作製した。まず、市販の熱溶解積層方式の 3D プリンタと水溶性樹脂のフィラメントを用いて型枠を作製した。次に、作製した型枠にフレッシュモルタルを打設し、硬化後に水に浸漬させて型枠を溶解して除去した。これにより、複雑な内部構造を有する供試体を高い寸法精度で作製できる。



ID	作製法	配合			寸法 (mm)			
		水セメント比	砂セメント比	繊維混入率 (vol.%)	a	b	c	d
Fill-C	型枠打設	0.25	0.20	1.0	100	35	-	-
MM-C	型枠打設				100	35	5	15
MM-P	3D プリント				200	40	10	30

図-1 実験シリーズの概要

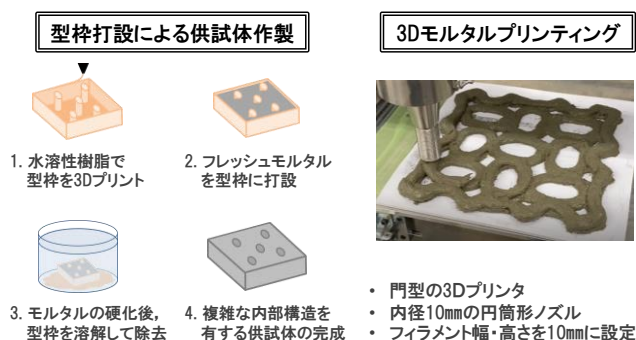


図-2 2種類の供試体作製法

また、メタマテリアル供試体 (Fill-P) はセメントモルタルの 3D プリンタを用いて直接造形した。

作製した供試体は材齢 3 日で圧縮試験に供した。載荷中の供試体の表面変位・ひずみはデジタル画像相関法 (Digital Image Correlation: DIC) で測定した。DIC 解析に必要な供試体表面のランダムパターンは、白黒スプレーを用いて塗布した。また、メタマテリアル供試体の応力は厳密には空洞の存在を考慮すべきだが、簡便のため角柱供試体と同一の計算方法とし、図-1 の寸法 $a \times b$ の面積で載荷重を除して求めた。

キーワード メタマテリアル, セメント系材料, 3D プリンティング, ひずみ硬化

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学コンクリート研究室 TEL 03-5841-7498

3. 実験結果と考察

図-3 に各供試体の応力-ひずみ曲線を示す。ひずみは DIC 解析から得られた供試体の高さ方向の変位から算出した。角柱供試体 (Fill-C) では圧縮ひずみ 0.24% で最大応力 64MPa を示した直後、ひび割れが局所化して脆性破壊した。一方、型枠打設したメタマテリアル供試体 (MM-C) では、圧縮ひずみ 0.60% で最大応力 21MPa を示した直後、5MPa まで応力が低下した。その後、ひずみの増加と共に応力が緩やかに上昇し、圧縮ひずみ 5.9% で応力が 16MPa まで回復した。すなわち、ポストピーク挙動において圧縮ひずみ硬化が発現した。また、3D プリントしたメタマテリアル供試体 (MM-P) では、圧縮ひずみ 0.14% で最大応力 15MPa を示した後、明確なひずみ硬化は見られなかった。ただし、ポストピークにおいても顕著な軟化挙動を示すことなくひずみが増加し、MM-C と同様に高い変形性能を示した。

図-4 に応力-ひずみ曲線上の各点における MM-C 表面の最大主ひずみ分布を示す。応力のピークに対応する①では、楕円型空洞の端部を起点として線状の高ひずみ領域が鉛直方向に伸びている。応力がピークを示した直後、巨視的なひび割れが対角線上に発生および進展し、応力が急激に低下して②の状態に至る。②における最大主ひずみ分布からは、線状の高ひずみ領域に沿ってひび割れが生じていることが分かる。その後、ひずみの増加と共に楕円型空洞が閉口して、噛み合いが生じることで応力が増加し、③の状態に達する。続いて、もう一方の対角線上に巨視的な斜めひび割れが発生・進展し、同様に楕円型空洞の閉口に伴い応力が上昇して④に至る。したがって、巨視的なひび割れの発生・進展とひび割れの閉口に伴う噛み合いが、ポストピークにおける圧縮ひずみ硬化のメカニズムであることが分かった。

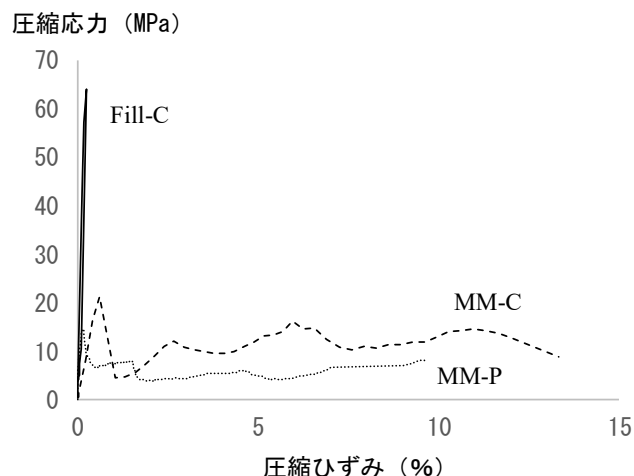


図-3 各シリーズの応力-ひずみ曲線

一方、MM-P では楕円型空洞の造形精度が低く、噛み合いが十分に生じなかったと考えられる。今後、さらなるプリント精度の向上が求められる。

4. まとめ

本研究では、セメントモルタル硬化体における cm スケールの内部構造をデザインすることで、ポストピークにおける圧縮ひずみ硬化特性を獲得できることを実証した。今後は、より効果的な内部構造を検討することで、通常の圧縮ひずみ硬化特性 (巨視的な初期ひび割れ発生後も荷重が増加する特性) を有するメタマテリアルの開発を目指す。

謝辞

本研究は、筆頭著者へ授与された令和元年度土木学会吉田研究奨励賞の研究として実施しました。

参考文献

- 1) Surjadi, J.U. et al., Mechanical metamaterials and their engineering applications, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 21, 1800864, 2019.
- 2) Xu, Y. et al., Cementitious cellular composites with auxetic behavior, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 111, 103624, 2020.

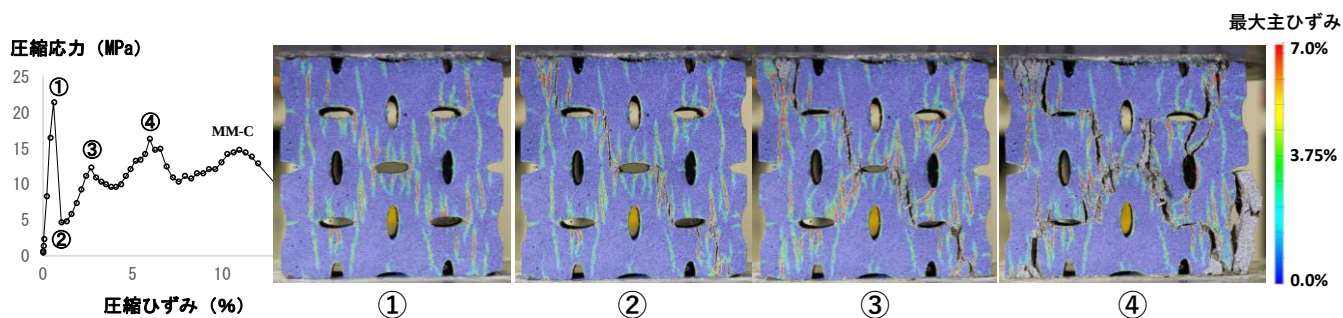


図-4 応力-ひずみ曲線上の各点におけるメタマテリアル供試体 (MM-C) 表面の最大主ひずみ分布