

3D プリンティング積層したモルタルの圧縮下における内部ひび割れ進展状況の観察

太平洋セメント(株) ○黒澤 真一 河野 克哉 大森 寛人
 北海道大学大学院 橋本 勝文 中瀬 皓太

1. はじめに

著者らは既往の研究で、3D プリンターにより積層造形したモルタル（以下、積層体）の強度異方性について検討し、積層間の空隙に沿って荷重が作用する場合、強度が低下することを確認している。本稿では、X線 CT 装置を用いて、積層体を圧縮载荷した際の内部のひび割れ進展状況を観察し、積層で生じる打ち重ね面や内部空隙が圧縮特性に与える影響を検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料ならびに積層体の作製方法

本実験に使用した材料を表 1 に、モルタルの配合を表 2 にそれぞれ示す。結合材は、早強ポルトランドセメントと石粉を使用し、細骨材は、珪砂を使用した。前述の材料を予め混合して、粉体を容量 15L のホバートミキサにより空練り後、水、高性能減水剤および消泡剤を添加して練り混ぜ、モルタルとした。

モルタル積層体は、図 1 に示すガントリー式の 3D プリンターで作製した。モルタルをカートリッジへ充填し、カートリッジを 3D プリンターにセットして積層した。積層条件は、ノズル直径 14mm、射出幅 16mm、層厚 8mm、積層速度 30mm/s、流量 0.2L/min として、高さ 100mm×幅 100mm×長さ 400mm の積層体を作製した。積層体は、温度 20℃、湿度 70% の環境下において気中養生を材齢 7 日まで行い、その後、図 2 に示すようにコア抜きにより φ50×100mm の円柱供試体を作製した。また、比較として、流込み成型による供試体作製を行い、積層体と同じ条件で気中養生した。

2. 2 X線 CT の概要

X線 CT の測定原理を図 3 に示す。対象物に X 線を照射し、対象物の密度の違いによって異なる X 線の吸収量を検出器で計測し、モルタル部分や空気層を判別し画像処理する。測定条件は、管電圧 100kV、管電流 200 μA、画像サイズ 2864×2864pixel、解像度 28.05 μm/pixel とした。積層体からコア抜きした円柱供試体の圧縮強度を測定（気中養生 7 日で圧縮強度 50N/mm²）し、そ

表 1 使用材料

材料	種類	記号	密度	概要
結合材	早強ポルトランドセメント	C	3.14	太平洋セメント社製
	石粉	L	2.71	比表面積 8,160cm ² /g 45 μm ふるい残分 4.0%
細骨材	珪砂	S	2.62	最大粒径 0.3mm, F.M.=0.84
混和剤	高性能減水剤	SP	-	ポリカルボン酸系
	消泡剤	De	-	非イオン系粉末

表 2 配合表

W/P (%)	単体量 (kg/m ³)				外割添加量 (P×%)	
	W	C	L	S	SP	De
40	366	914	457	457	0.25	0.20

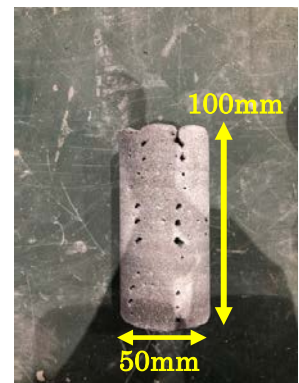
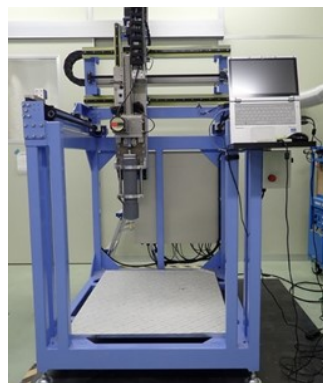


図 1 3D プリンター 図 2 コア抜き後の供試体

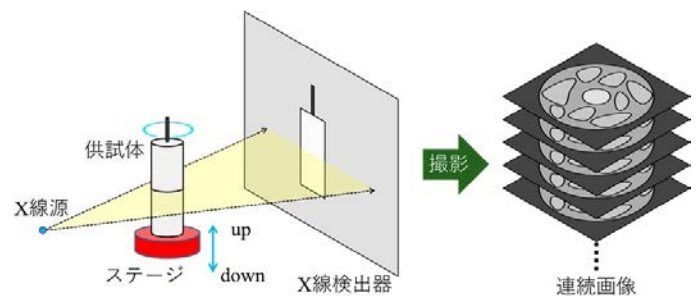


図 3 X線 CT の測定原理

キーワード 3D プリンティング, X線 CT, 圧縮強度, 圧縮载荷

連絡先 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株) 中央研究所 TEL: 043-498-3893

の圧縮強度の 10%、30%、60%の応力を荷重速度 5N/mm²/min の条件で、荷重試験機で荷重後、除荷して CT 撮影を行い、ひび割れの発生状況を観察した。また、流込み供試体は圧縮強度（気中養生 7 日で圧縮強度 63N/mm²）の 100%の応力を荷重した。

3. 実験結果

3. 1 圧縮荷重前の供試体内部画像

圧縮荷重前の円柱供試体の縦断面画像を図 4 に示す。左図の流込み供試体と比較して、右図の積層体は黒い線状の縞模様の空気層が水平方向に断続的に存在しており、積層による打ち重ね面が不均一となっていることが明確に判断できる。また、積層面の厚さや深さは場所によって異なることが判明した。

3. 2 圧縮荷重後のひび割れ評価

圧縮強度の 10%の応力荷重時の横断面画像を図 5 に示す。画像は供試体上面から約 10mm の位置を示している。荷重前と荷重後の画像を比較した結果、荷重によるひび割れの発生は確認できなかった。圧縮強度の 30%の応力荷重時の縦断面画像を図 6 に、横断面画像を図 7 に示す。横断面は上面から約 11mm の位置を示している。図 6 より、荷重前には、存在しなかったひび割れが荷重後に確認された。供試体上面の積層間の凹みから、積層間の空隙を介して、ひび割れが発生していることがわかる。また、図 7 の横断面画像では、積層間の空隙からひび割れが進展する状況を観察できた。圧縮強度の 60%の応力荷重時には 30%の荷重時よりも、ひび割れが多く発生した。各供試体の圧縮応力と変位の関係を図 8 に示す。流込み供試体は、荷重の増加に伴い変位が直線的に増加したが、積層体は、荷重初期に荷重が増加せず、変位のみ大きくなり、荷重が増すにつれて変位が曲線状に増加する傾向を示した。これは、荷重直後は積層間の空隙の影響で小さな応力で変位し、荷重が進むにつれて、積層面どうしが接触し圧縮に対する抵抗が働き、このような挙動を示したと推察される。3D プリンターで作製する積層体の強度を評価する上では、積層のプロセス（積層手順、積層幅、厚さの設定方法、積層のタイミング等）の違いによって積層間の空隙の状況が変化する。これらの影響を考慮した試験や設計の方法を確立（標準化）することが課題となる。

4. まとめ

3D プリンターにより積層体を作製し、X 線 CT 画像によりひび割れの進展状況を観察した。その結果、圧縮強度の 30~60%程度の応力によって積層間の空隙を介してひび割れが進展することが確認され、圧縮応力と変位の関係では積層体特有の挙動を示した。

参考資料

- 1) 黒澤真一, 千石理沙, 星健太, 河野克哉, 前堀伸平: 3D プリンターで作製したモルタル積層体の強度特性の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, V-132, 2021.

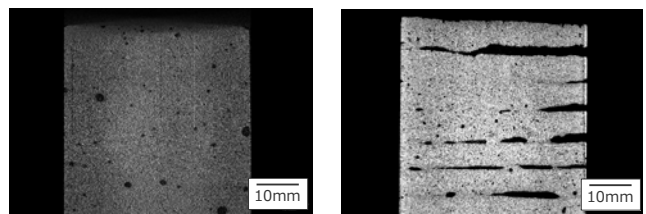


図 4 圧縮荷重前の縦断面画像
(左: 流込み 右: 積層体)

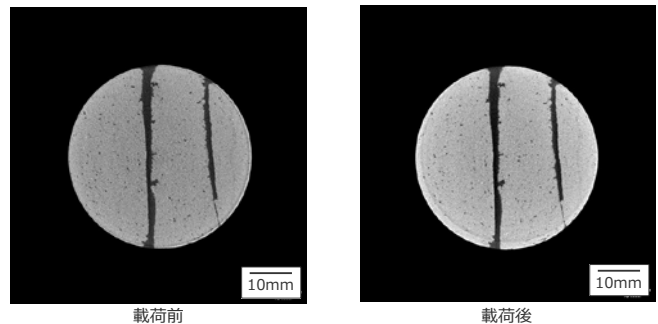


図 5 圧縮強度の 10%の圧縮荷重時の横断面画像

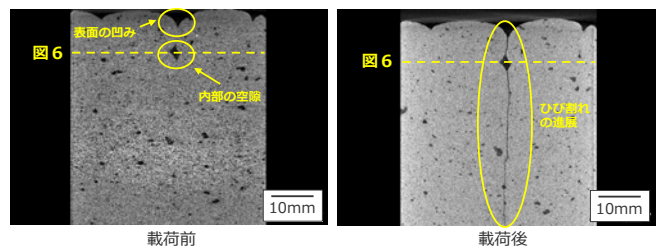


図 6 圧縮強度の 30%の圧縮荷重時の縦断面画像

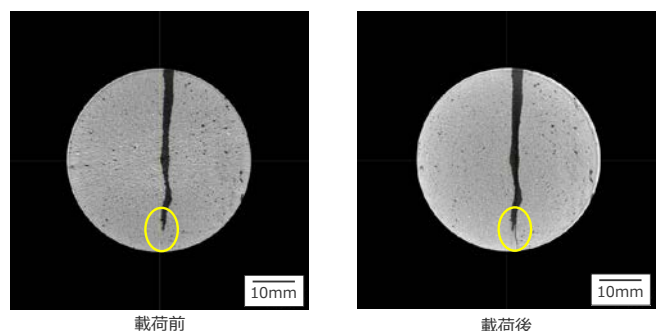


図 7 圧縮強度の 30%の圧縮荷重時の横断面画像

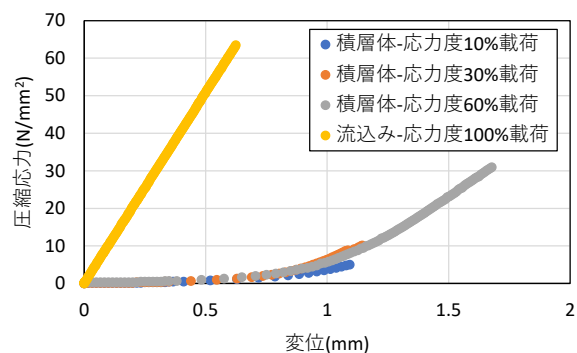


図 8 圧縮応力と変位の関係