# 研 宪 報告

令和 7 年 4 月 11 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 : 愛媛大学大学院理工学研究科

氏 名 : 横山 勇気

研究課題名:3DP 製モルタル積層体の物質移動抵抗性に施工方法が及ぼす影響に関する基礎的研究

助成金額: 100 万円

研究実施期間:自 令和6年4月1日 ~ 至 令和7年3月31日

研究報告 令和6年度 土木分野 No.11

3DP 製モルタル積層体の物質移動抵抗性に施工方法が及ぼす影響に関する基礎的研究

Fundamental study on influence of printing pass on mass transfer resistance of 3D printed mortar

愛媛大学大学院 理工学研究科 環境建設工学講座 助教 横山 勇気

### (研究計画ないし研究手法の概略)

本研究では、図-1 に示すマスブロック (650mm×270×300mm) を材料押出し方式の 3D プリンタを用いて作製した. 積層幅, 厚は 25mm, 10mm とした. 積層パスは, セメント 系フィラメントを単一方向に積層する場合 (単一:写真 1(a)) と,各層が直角に交差す るように積層した場合(直交:写真 1(b))の 2種類とした.同一の積層パスであったとして も,フレッシュ性状や実験室内の温度などの 実験条件の僅かな違いにより, マスブロック 間で個体差が生じる可能性も考えられたた め、各積層パスで3体ずつ、合計6体のマス ブロックを作製した. コアサンプルの採取に おいては、採取する高さによって積層体の自 重による圧密の影響が変化する可能性も考え られたため、同一のマスブロックの中で3種 類の異なる高さからコアサンプルを採取し た. その後,表-1に示す要領で全ての試験に 共通する準備を進めた.

表-2 に試験項目ごとの準備の概要を示す. 表中の供試体名は、「(積層パスの種類-マスブロックの識別番号) - (コアサンプルの採取箇所)」の順で示す.

## a) 粗大空隙の立体構造解析

表-2 に示す材齢で供試体内の粗大空隙の構

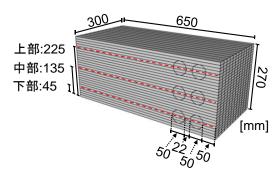


図-1 マスブロックの形状・寸法, コアサンプルの採取位置



写真-1 積層パスの種類

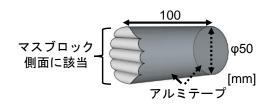


図-2 供試体の形状・寸法

造を把握するため、 $\mu X$ 線 CT スキャナによる撮影を実施した.表示画素数は 1000 pixels×1023 pixels、1 画素サイズは  $50\mu m$  である.撮影には「(単一-1、2、3) - (上部、中部、下部)」と「(直交-1、2、3) - (上部、中部、下部)」の計 18 体の供試体を用いた.粗大空隙の解析対象は、マスブロックの側面に該当する箇所から内部方向に約 90mm とした.撮影時には 0.5mm 厚のアルミニウム製のフィルタを用いることで、低エネルギーの X線を除去し、アーチエフェクトの 1 種であるビームハードニングの発生を低減した.  $\mu X$ 線 CT スキャナによる撮影後、二値化処理を行った画像の重ね合わせにより粗大空隙の立体構造を把握するとともに、最小半径が  $100\mu m$  以上の空隙を対象とした累積空隙量を算出した.

表-1 マスブロック作製後の共通する試験準備の概要

材齢	準備内容		
1日	マスブロックの作製後、材齢1日時点でラップにより封緘し、室内に静置.		
28 日	① ラップを取り外した後、マスブロックの長辺側の側面において、積層体の底面か		
	ら 45, 135, 225mm(下,中,上部)の位置よりコアサンプルを採取(各マスブ		
	ロックで 6 体, 合計 36 体). その後, マスブロックの側面から内部方向に 100mm		
	の位置を湿式で切断し、コアサンプルを φ50mm×100mm の供試体に成形.		
	② 供試体に付着した水分をウエスで拭き、20℃の室内で 1~2 時間乾燥させた後、マ		
	スブロックの側面に該当する箇所以外の面をアルミテープでシールし(図-2),		
	所定の材齢まで 20℃の室内に静置.		

表-2 試験項目ごとの準備の概要

試験項目	供試体名と供試体数	試験準備	
(1) 粗大空隙		材齢 5~6 か月時点で試験	
の立体構造解	「(単一-1, 2, 3) - (上部, 中部, 下部)」×1	を実施	
析	「(直交-1, 2, 3)-(上部, 中部, 下部)」×1 		
		材齢 3~4 か月における恒	
(2)水分浸透		温恒湿器内での乾燥終了	
抵抗性(吸水	「(単一-1, 2, 3) -(上部, 中部, 下部)」×1	後、供試体の温度を室温へ	
量,水分浸透深	「(直交-1, 2, 3)-(上部, 中部, 下部)」×1	戻すために約1時間,密閉	
さ)		容器内で室温にて静置さ	
		せた後、試験を実施	

#### b) 水分浸透抵抗性(吸水量,水分浸透深さ)

表-2 に示す試験準備の後、実験室内の温度と同じ 20℃に調整した水に供試体を一面浸せきした. JSCE-G 582 に準拠し、浸せき直前と、浸せき開始から 5, 24, 48 時間時点で供試体の質量を測定し、浸せき直前と所定の浸せき時間における質量の差分から吸水量を算出した. 浸せき開始から 48 時間時点では、質量を測定した後、図-3 に示すような割裂面が形成されるように載荷試験機を用いて供試体を割裂し、速やかに現像剤を割裂面に噴霧することで、水分浸透深さを測定した. 水分浸透深さの測定箇所は、図-3 に示すように 3 点とした. マスブロックの側面に該当する箇所の凸部から、現像剤により発色した領域を水分浸透深さと定義し、ノギスで計測した値の平均値を用いて評価した. 供試体の側面から内部方向に 10mm



図-3 割裂面のイメージ図

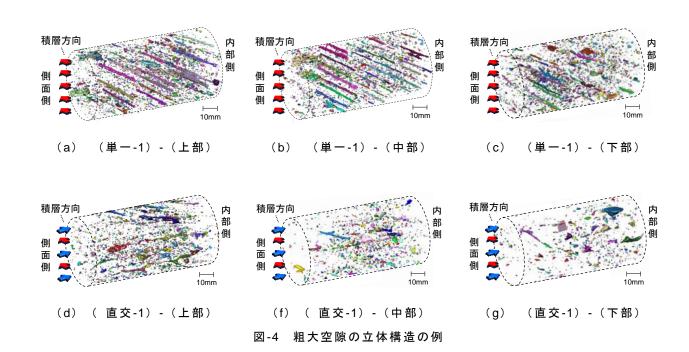
の深さの範囲は,乾燥の影響を強く受けることで水分が過剰に供試体内部へ浸透する可能性 が考えられたため,本検討では測定の対象外とした.

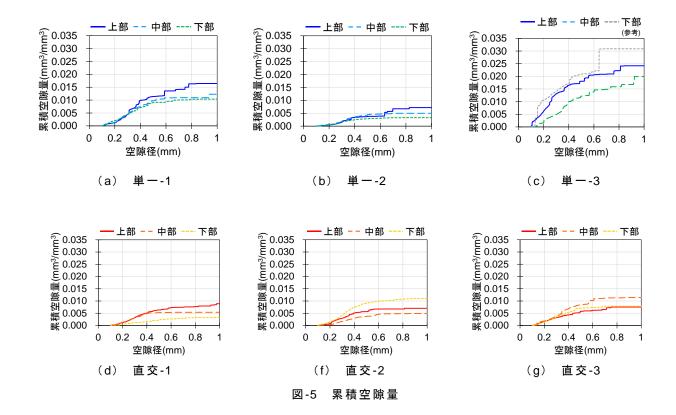
#### (実験調査によって得られた新しい知見)

### (1) 粗大空隙の立体構造,累積空隙量

図-4 に粗大空隙の立体構造の例を示す。まず、単一の場合に着目すると、コアサンプルの採取位置によらずクロスポイント空隙が形成されていることが確認できる。クロスポイント空隙は、列界面と層界面の交差箇所に形成される。本検討では、円断面のノズルを用いており、セメント系フィラメントの断面は隅角部に丸みを帯びた形状となる。ゆえに、層界面と列界面の交差位置では、隅角部同士が隣接し、粗大空隙が残存しやすく、クロスポイント空隙が形成されやすいと考えられる。

続いて、コアサンプルの採取位置による差異に着目する.図-4より、採取位置が中部や下部においては、上部に比べて、クロスポイント空隙の直径が減少するとともに、クロスポイント空隙が形成されない箇所も見られる。図-5に示す累積空隙量においても、単一の積層パスで作製した全てのマスブロックにおいて、コアサンプルの採取位置が低下するに伴い、累積空隙量が減少している。セメント系フィラメントは、適度な自立性と形状保持性を有しているものの、ノズルから吐出された直後に硬化はしない。そのため、上の層が積層されることにより、下の層は圧密され僅かに変形が生じ、累積空隙量が減少したと考えられる。加えて、練混ぜ直後よりセメントの水和反応が進行し、時間の経過に伴いモルタルの粘性が高まるため、積層体の上部ほど粘性が高いモルタルが吐出されることや、マスブロックの底部は基盤面と接着し、変形が拘束されているが、積層体の高さが高くなるに伴い、拘束による影響が低減し、列界面が水平方向に広がりやすくなることなどもコアサンプルの採取箇所による差異が見られた要因として挙げられる。単一の積層パスの中で累積空隙量を比較すると、単一-2に比べ、単一-1、3の累積空隙量が多い。単一-1、3は単一-2と比較し、積層直前の粘性が高く、こわばりが強いために、界面部分に粗大空隙が形成されやすい状態であったと推察した。





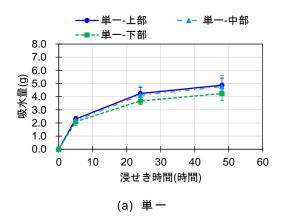
直交の場合は、図-4より、コアサンプルの採取位置によらず、全ての供試体にてクロスポイント空隙が形成されていることが確認できるが、図-5より、コアサンプルの採取位置による累積空隙量の明確な差異は見られない。直交ではセメント系フィラメントの方向が1層ごとに直角に入れ替わるため、下層のフィラメントの水平方向の広がりが、上層のフィラメントにより拘束される効果があると考えられる。そのため、直交の場合には、上部における列界面の水平方向への広がりが低減され、採取位置による明確な差異が見られなかったと推察した。単一と直交の累積空隙量を比較した場合も明確な差異は確認できず、積層パスが累積細孔量に及ぼす影響は小さい可能性が示唆された。

なお、(単一-3) - (下部) の粗大空隙量が多い要因として、マスブロックの下部に該当する箇所において積層が中断したことが挙げられる. 積層の中断が粗大空隙の形成に顕著な影響を与えていた可能性を考慮し、他の供試体と同列で扱うことは不適切であると考え、以降の議論においてグラフには参考として掲載、もしくは測定結果として取り扱わずに各評価指標を算出することとし、考察からは除外した.

#### (2) 水分浸透抵抗性(吸水量,水分浸透深さ)

図-6 吸水量の経時変化を示す.本検討結果より、単一の場合(図-6(a))と比較し、直交の場合(図-6(b))の吸水量が多く、積層パスによる差異が確認できる.コアサンプルの採取箇所による差異に着目すると、積層パスにかかわらず上部の場合に吸水量が多く、中部または下部においては吸水量が小さい傾向が見られる.

図-7 に浸せき開始から 48 時間時点の水分浸透深さの測定結果を示す. 吸水量と同様に、単一の場合と比較して、直交の場合は水分浸透深さが大きく、測定結果のばらつきも大きい. コアサンプルの採取位置による影響については、単一の場合は、上部から下部になるにつれ水分浸透深さが小さくなり、ばらつきも減少している. 直交の場合は、水分浸透深さが最も大きいのは単一と同様に上部であるが、中部の水分浸透深さが最も小さく、採取位置による明確な差異は見られない.



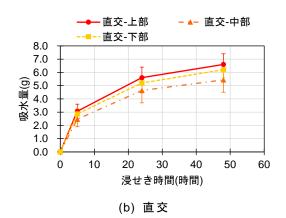


図-6 吸水量の経時変化

ここで、積層パスの種類による差異が吸水量や水分浸透深さに見られた要因を考察する. 図-8 に積層体内の物質移動のイメージ図を示す. 単一の場合(図-8(a))は、セメント系フィラメント内の物質移動が積層体全体の物質移動抵抗性に影響を及ぼすと考えらえる. 一方、直交の場合(図-8(b))は、単一と同様にセメント系フィラメント内での物質移動も生じるが、供試体の表層部から内部方向に形成されているクロスポイント空隙の連続性が支配的要因となり、3次元的な移行経路になると考えられる. これらの考えに基づくと、

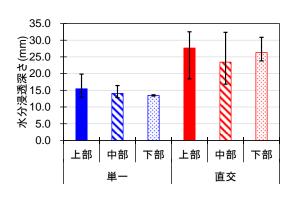


図-7 水分浸透深さ(浸せき開始から 48 時間時点)

水分がセメント系フィラメントの内部を浸透した場合(図-8(a))と比較し、クロスポイント空隙を浸透した箇所では、水分浸透深さが部分的に増加する可能性が高く、かつ測定箇所によって水分浸透深さにばらつきが生じやすくなると考えられる.

続いて、積層パスの種類により、コアサンプルの採取位置が水分浸透抵抗性に及ぼす影響が異なる要因について考察する。積層パスとして、単一の場合のみを取り扱った既往の研究では、上部に比べ、中部や下部ではセメント系フィラメントの自重による圧密の影響を受けるため、粗大空隙量が減少するとともに、クロスポイント空隙の連続性が低下することで、吸水量や水分浸透深さが減少することが報告されている。本検討でも同じ要因によって、単



セメント系フィラメント内の 空隙が支配的要因

(a) 単一の場合



クロスポイント空隙の 連続性が物質移動の支配的要因

(b) 直交の場合

図-8 積層体内の水分移行経路のイメージ図 (積層体の鉛直方向の断面図)

一の場合ではコアサンプルの採取位置による差異が見られたと考えられる.加えて、積層体の上部ほどモルタルの粘性が高まることや、単一で積層した場合の積層体の上部における列界面の拡大なども採取位置による影響が見られた要因として挙げられる.

直交の場合は、層ごとに積層方向が直角に交差することから、積層体の上部における列界面の水平方向への広がりが低減される。そのため、積層体の高さが累積空隙量や、クロスポイント空隙の空隙径、連結性などに及ぼす影響が低減され、採取位置による明確な差異が見られなかったと推察した。

本研究で得られた知見を以下に記す.

- (1) µX線 CT 画像を用いて積層体内部に形成される粗大空隙の立体構造を分析した結果,積層パスにより粗大空隙の形状や形成箇所に違いが見られ,単一の場合は,積層体の高さ方向により粗大空隙量と粗大空隙の連続性が変化することを確認した.累積空隙量には積層パスによる明確な差異は見られなかった.
- (2) 吸水量と水分浸透深さにおいても積層パスによる差異が見られた. 積層パスの種類により,クロスポイント空隙の形成方向と吸水方向の位置関係が変化し,積層体内の水分移行経路の特徴にも違いが生じることが,水分浸透抵抗性に積層パスによる差異が見られた要因として挙げられる.

本検討の範囲内では、積層パスが水分浸透抵抗性に対して有意に影響を及ぼすと考えられ、物質移動抵抗性を確保するためには、劣化因子の侵入方向と同一方向にクロスポイント空隙が形成されないようにすることが重要と思われる. なお、コアサンプルの採取方向によって、劣化因子の侵入方向とクロスポイント空隙が形成される方向の位置関係が変化する点に留意する必要がある.

#### (発表論文)

1) 横山勇気,田中俊成,木ノ村幸士:積層パスが 3D プリンティングモルタルの粗大空隙構造と水分浸透抵抗性に及ぼす影響,AI・データサイエンス論文集,2025.(採択済)