

〈一般研究課題〉 3Dプリンティングに用いる建設材料としての
モルタルの開発

助成研究者 名城大学 寺西 浩司



3Dプリンティングに用いる建設材料としての モルタルの開発

寺西 浩司
(名城大学)

Development of Mortar as Construction Materials for 3D Printing

Kohji Teranishi
(Meijo University)

Abstract :

In extrusion-based 3D construction printing, there is concern that the interlayers may not fully integrate, resulting in structural and durability weaknesses. Therefore, in this study, the effects of layer width, layer height, and gap time on the interlayer strength and water absorption properties of 3D-printed mortar laminates were investigated. The findings are as follows: (1) In 3D printing, by appropriately setting the combination of layer width and layer height, it is possible to prevent the interlayers from becoming weak points under tensile and shear stress. (2) Within the range of up to 20 minutes of gap time, increasing the gap time does not decrease the interlayer bond strength and the interlayer shear strength.

1. はじめに

押出し方式の建設3Dプリンティングでは、プリンティング材料に対して、ポンプで輸送管内をノズルまで押し出される段階で押し出し可能な流動性(押し出し性)が要求される一方で、ノズルから吐出された後の段階では、積層された層の自立性が要求される。そこで、本研究では、トレードオフの関係にあるこれら2つの性能を両立させるために、高いチクソトロピー性(力が加わると軟化し、消失すると凝固する性質)を付与した3Dプリンティング用モルタルを開発した。

また、押出し方式の建設3Dプリンティングは層を積み上げていく工法であるため、層間が一体

化しにくく、構造上や耐久性上の弱点となることが懸念される。そこで、本研究では、積層幅、積層高さおよびギャップタイム(上層を積層するまでの空き時間)が3Dプリントされたモルタル積層体の層間強度や吸水特性に及ぼす影響を調べた。本報では、これらのうちの2つ目の課題について検討した結果を主に報告する。

2. 実験概要

2.1 実験要因とその水準

表1に実験要因とその水準を示す。本実験では、積層幅の設定値を、3Dプリンターの円筒型ノズルの内径と同一の25mm、および35、45mmの3水準に変化させた。また、積層高さを10および15mmの2水準に変化させた。このほかに、ギャップタイムを0、10、20分の3水準とした。

表1 実験要因とその水準

要因	水準
積層幅 (mm)	25, 35, 45
積層高さ (mm)	10, 15
ギャップタイム (分)	0, 10, 20

表2 使用材料

材料	仕様
水	上水道水
セメント	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm ³)
細骨材	揖斐川産川砂(最大寸法2mm, 表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 1.52%)
微細繊維	ポリオレフィン繊維(密度 0.96g/cm ³ , 平均繊維長 0.6mm以下, 繊維径 10μm)
混和剤	ダイユータンガム(汎用品, 80 メッシュパス)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸コポリマー

2.2 モルタル

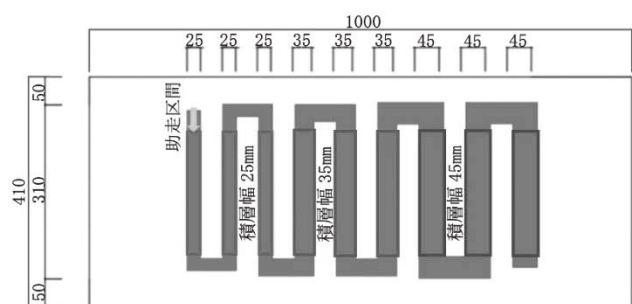
表2および3にモルタルの使用材料および調査を示す。実験には、建設3Dプリンティング材料に要求される押出し性、自立性および閉塞抵抗性(モルタルの押出し時における輸送管内での閉塞に対する抵抗性)を同時に満足させることを目的として筆者らが開発したモルタルを使用した。なお、フロー値は130±10とした。また、28日圧縮強度は94.1N/mm²であった。

表3 調合

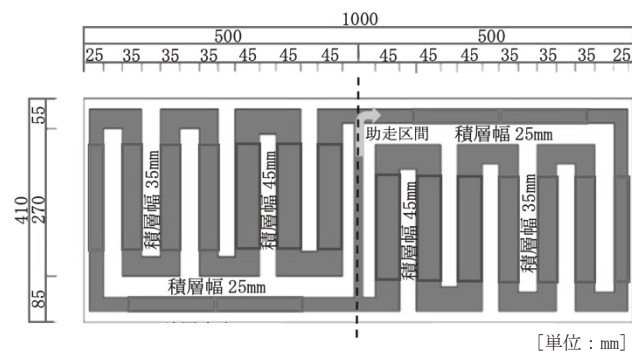
水セメント比 (%)	砂セメント比	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)		高性能AE減水剤 (C×%)	繊維 (Vo1%)	ダイユータンガム (C×%)
			セメント	細骨材			
30	1.5	275	290	435	1.7	0.2	0.06

2.3 プリント試験体

本実験では、ガントリー式3Dプリンターを使用してプリント試験体を作製した。図1にプリント試験体の平面形状を示す。ギャップタイム0分の場合、積層幅の異なる供試体を一体とし、積層高さごとにプリント試験体を作製した。一方、ギャップタイム10および20分の場合、積層高さおよび積層幅の異なる供試体を一体とし、ギャップタイムごとにプリント試験体を作製した。なお、プリント試験体の作製にあたっては、モルタルの吐出量を一定としたうえで、積層幅が位置ご

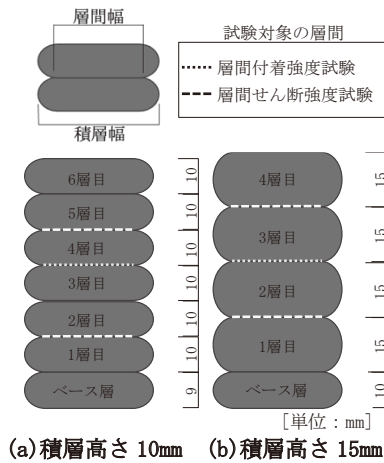


(a) ギャップタイム 0 分



(b) ギャップタイム 10 および 20 分

図1 プリント試験体(平面)



(a)積層高さ 10mm (b)積層高さ 15mm
図2 プリント試験体(断面)

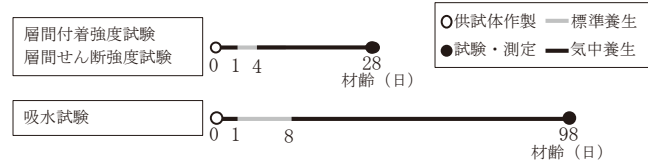


図3 養生スケジュール

表4 試験項目、供試体寸法および供試体本数

試験項目	供試体種類	供試体寸法*(mm)	ケースごとの供試体数(本)
層間付着強度試験	プリント供試体	w×h×50	3
	一体打ち供試体	35×60×50	3
層間せん断強度試験	プリント供試体	w×h×30	3
	一体打ち供試体	35×60×30	3
吸水試験	プリント供試体	w×h×100	2
	一体打ち供試体	35×60×100	2
圧縮強度試験	一体打ち供試体	φ100×200	3

* w : 積層幅, h : 総積層高さ

とに設定した値になるようにノズルの移動速度を調整しながら、所定の層数のモルタルを積層した。

図2にプリント試験体の断面を示す。ベース層を1層分設けたうえで、その上に試験に使用するための層を積み上げた。ベース部分を含む層数は、積層高さが10mmのケースでは7層、15mmのケースでは5層とした。また、付着強度試験およびせん断強度試験では、図中の点線および破線で示した層間を試験対象とした。プリント試験体の作製にあたっては、ギャップタイム10および20分のケースであっても原則として連続して積層し、これらの試験対象の層間のみでギャップタイムに相当する時間間隔を空けて上層を積層した。

2.4 プリント供試体

モルタルが硬化する前に、プリント試験体の、図1中に枠で示した位置から各積層幅のモルタル片を切り出した。そして、硬化後に、これらのモルタル片をコンクリートカッターで適宜切り分けて、各種試験のための供試体(以下、プリント供試体という)を取得した。図3に養生スケジュールを示す。気中養生は、恒温恒湿室(温度20℃、相対湿度60%)内で行った。

2.5 試験項目および試験方法

表4に、試験項目、供試体寸法および供試体本数を示す。一体打ち供試体は、プリント試験体と同じモルタルを使用し、型枠を用いて作製した。

a. 層間付着強度試験

図4に層間付着強度試験の概要を示す。試験にあたっては、プリント試験体から供試体を切り出した際の切断面を載荷面とした。そして、上下の載荷板と供試体の間の層間の位置に鋼製の丸棒(φ9mm)を挟み込み、その丸棒を支点として割裂試験を行い、層間付着強度を測定した。層間付着強度は次式より求めた。

$$\sigma = 2P / \pi A \quad (1)$$

ここに、 σ : 層間付着強度(N/mm²)、P : 最大荷重(N)、A : 割裂面の面積(mm²)。

b. 層間せん断強度試験

JSCE-G 553に準拠して直接2面せん断試験を行った。図5に試験概要を示す。試験にあたっては、層間付着強度試験と同様に、供試体の切断面を載荷面とし、2つの破壊予定面がいずれも層間

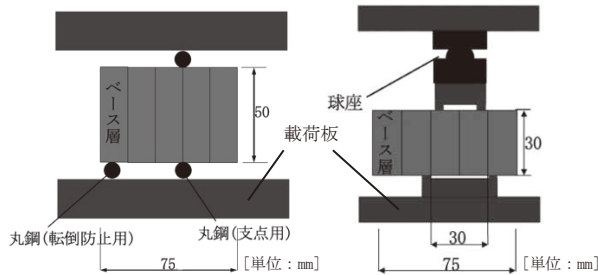


図4 層間付着強度試験 図5 層間せん断強度試験

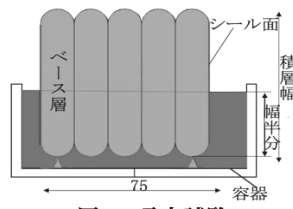


図6 吸水試験

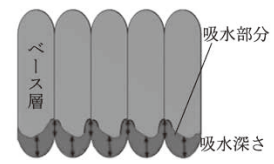


図7 吸水深さの測定位置

となるように荷重した。また、せん断強度は次式より求めた。

$$\tau = P / 2bh \quad (2)$$

ここに、 τ :せん断強度 (N/mm²)、P:最大荷重 (N)、h:供試体の高さ (mm)、b:供試体の幅 (mm)。

c. 吸水試験

図6に吸水試験の概要を示す。積層された供試体の両側面(図中の供試体の上下面)以外の面をエポキシ樹脂でシールしたうえで、供試体を幅半分の深さまで水中に浸漬させ、30分ごとに240分後まで質量の増分(すなわち吸水量)を測定した。そして、吸水量の測定結果を次式にフィッティングさせて吸水速度係数¹⁾を算出した。

$$D = Q / \sqrt{t} \quad (3)$$

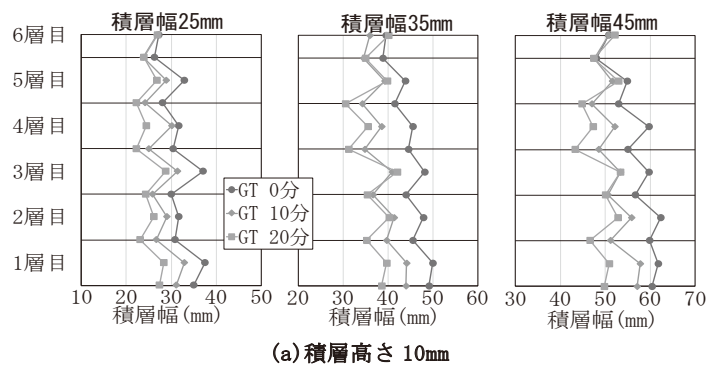
ここに、D:吸水速度係数 (ml/min^{0.5})、Q:吸水量 (ml)、t:経過時間 (min)。

また、240分経過後の供試体を中央で割裂し、現像剤を割裂面に噴霧し、図7に示すように層間位置および各層の中央位置(以下、層中間という)で吸水深さを測定した。

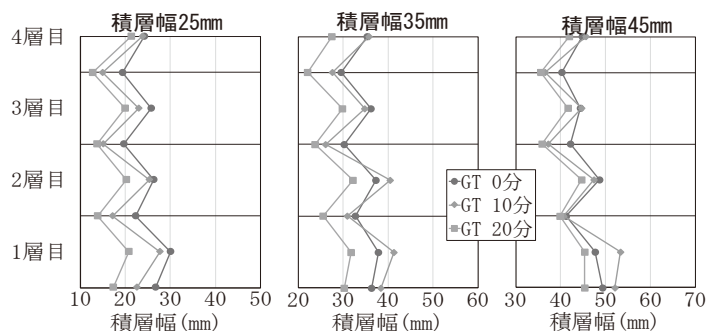
3. 実験結果とその考察

3.1 積層幅および層間幅

図8に、プリント供試体の積層幅および層間幅(図2参照)の測定結果を示す。図中には、層間付着強度試験、層間せん断強度試験および吸水試験の計8個の供試体の平均値を、ベース層を除いて示してある。いずれのケースにおいても、下層部の幅がやや大きくなっており、その度合いは、筆者らが過去に実施した類似の実験²⁾(以下、筆者らの過去の実験という)の場合よりも大きかった。このことから、本実験では、筆者らの過去の実験²⁾よりもモルタルの静的降伏応力が小さかったものと推察される。また、プリント供試体の積層幅および層間幅は、ギャップタイ



(a) 積層高さ 10mm



(b) 積層高さ 15mm

図8 積層幅および層間幅

ム(GT)が増加するほど全体的に小さくなった。ギャップタイムが長いケースでは、モルタルの静的降伏応力が増大したものと考えられる。

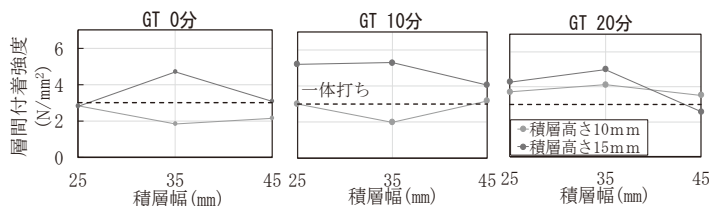


図9 層間付着強度と積層幅の関係

3.2 層間付着強度

図9に、層間付着強度と積層幅の関係を示す。層間付着強度は、積層高さが15mmの場合に、全体として10mmの場合より高くなり、一体打ちの場合の割裂引張強度より高い値となった。また、積層幅が層間付着強度に及ぼす影響は明確ではなかった。この結果は、筆者らの過去の実験²⁾における、積層幅が大きいと層間付着強度が低くなるとの結果と異なるものである。これは、3.1節に上述したように、本実験では、筆者らの過去の実験²⁾に比べてモルタルの静的降伏応力が小さかったため、積層圧が低くなると考えられるノズルの外側部分においても、内側部分と同等の付着強度が得られたことが一因ではないかと推測される。

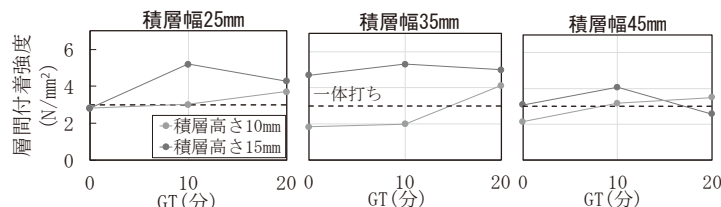


図10 層間付着強度とギャップタイムの関係

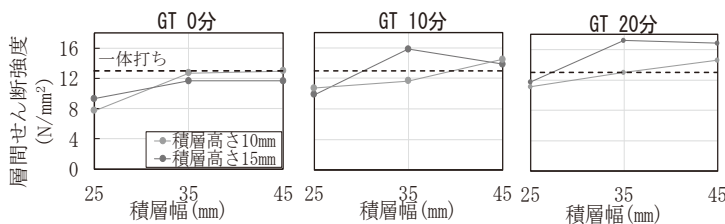


図11 層間せん断強度と積層幅の関係

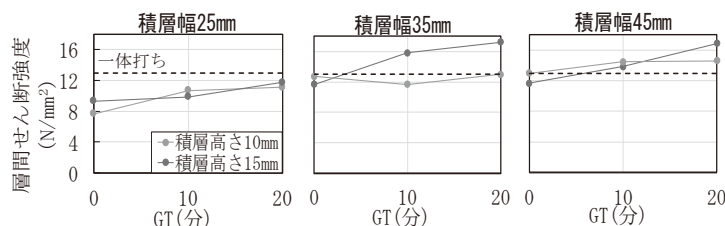


図12 層間せん断強度とギャップタイムの関係

図10に、層間付着強度とギャップタイムの関係を示す。本実験で検討したギャップタイム20分までの範囲では、ギャップタイムが増加しても層間付着強度が低下する様子は見られなかった。また、積層高さが10mmの場合は、ギャップタイムの増加につれて、むしろ層間付着強度が増大する傾向となった。この点に関しては、前述のように、ギャップタイムが大きいケースほど、モルタルの静的降伏応力が高かったため、大きな積層圧で層間が形成されたことが一因ではないかと考えられる。

3.3 層間せん断強度

図11および12に、層間せん断強度と積層幅およびギャップタイムの関係を示す。これらの図からわかるように、層間せん断強度は、積層幅が大きいほど、ギャップタイムが増加するほどやや大きくなった。また、図12からわかるように、層間せん断強度は、積層幅が25mmの場合、一体打ちの場合のせん断強度よりも低くなった。しかし、積層幅が35および45mmの場合は、一体打ちの場合のせん断強度と同程度か、ギャップタイムが長い場合は一体打ちよりも大きな値となった。このほか、積層高さは、層間付着強度の場合とは異なり、層間せん断強度に対して大きな影響を及ぼさなかった。

なお、3.2節および本節の考察結果は、3Dプリンティングにおいて積層幅と積層高さの組合せを適切に設定すれば、引張およびせん断方向の応力に対して層間が弱点にならないようにすることができることを示唆している。

3.4 吸水試験結果

写真1に、吸水試験の割裂面における吸水状況を示す(240分経過後、ギャップタイム10分の場合)。ここで、割裂面において濃い赤色に呈色した部分が吸水した領域である。なお、一体打ちの場合、供試体の割裂面に吸水部分は見られなかった。プリント供試体の場合、写真1からわかるように、筆者らの過去の実験²⁾の場合と同様に、水分は主に層間から浸透している。ただし、本実験では、積層高さ10mm、積層幅25mmのケースのように、層間からの吸水が内部で広がって隣接する吸水領域が重なり合い、層中間を含む表層全体に連続した吸水領域が形成されるケースも多く見られた。

図13に割裂面で測定した吸水深さの分布を示す(240分経過後、ベース層は除く)。データのばらつきが大きく、本実験の範囲では、積層幅、積層高さ、ギャップタイムが吸水深さの分布に及ぼす影響は明確にならなかった。

図14および15に、吸水速度係数と積層幅およびギャップタイ

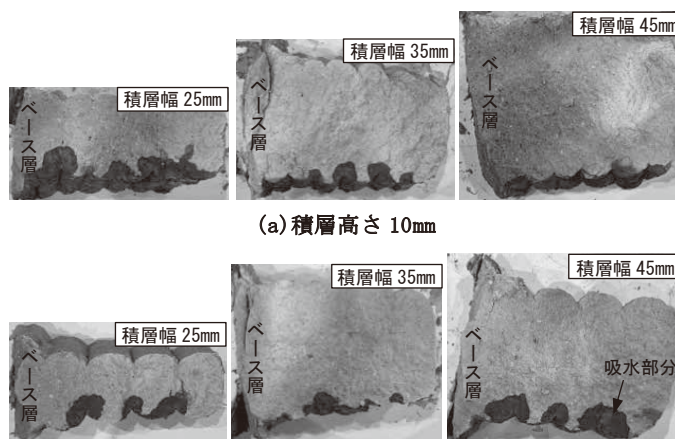


写真1 吸水状況

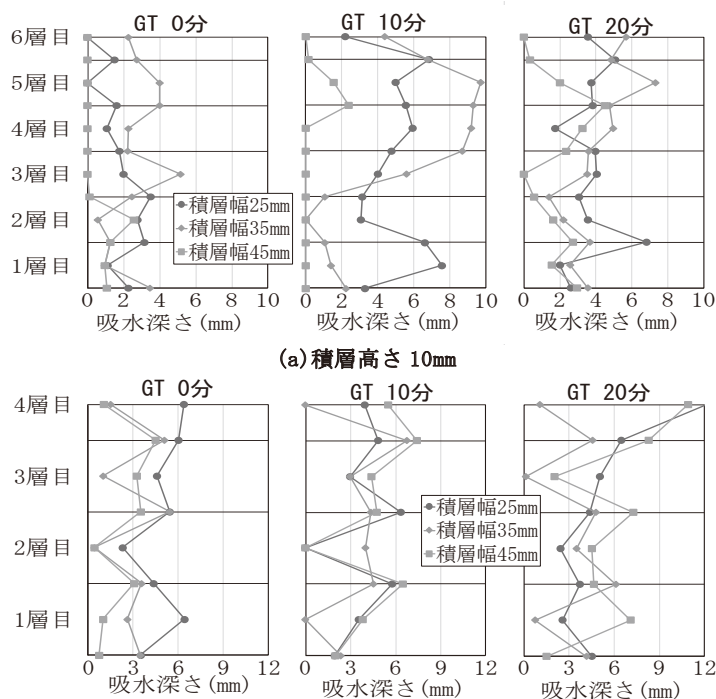


図13 吸水深さ

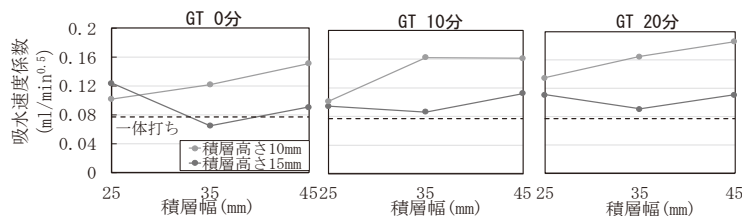


図14 吸水速度係数と積層幅の関係

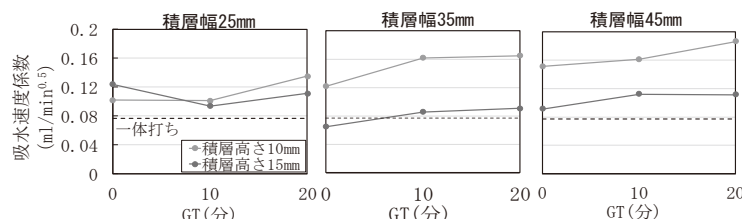


図15 吸水速度係数とギャップタイムの関係

ムの関係を示す。吸水速度係数は、積層高さが10mmの場合の方が15mmの場合よりも大きくなったが、これは、積層高さが10mmの場合の方が供試体の層間数が多いことに起因するものと考えられる。また、吸水速度係数は、全体として、積層幅が大きいほど、ギャップタイムが長いほど大きい傾向となっている。吸水速度係数が大きいほど表層部分のモルタル組織がポーラスになっていると考え、この傾向は、層間の強度の傾向と合致しておらず、この点については今後さらに検討を要する。

4. まとめ

(1) 3Dプリンティングにおいて積層幅と積層高さの組合せを適切に設定すれば、引張およびせん断方向の応力に対して層間が弱点にならないようにすることができる。

(2) ギャップタイム20分までの範囲では、ギャップタイムが増加しても、層間付着強度および層間せん断強度は低下しない。

参考文献

- 1) 寺西浩司, 葛山育海: 異なるタイプの吸水試験および透気試験によるコンクリートの表層品質の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1751-1756, 2019.7
- 2) 丛启宾, 寺西浩司, 李晨, 前田周磨, 生野雅弥, 梶田秀幸, 宮澤友基: 3Dプリントされたモルタル積層体の層間付着強度および耐久性に対する積層条件の影響(その1および2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1329-1332, 2023.9