

論文 積層条件が 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及ぼす影響

李 晨*1・寺西 浩司*2・丛 启宾*1・梶田 秀幸*3

要旨: 本研究では、積層幅および1層当たりの積層高さを変化させて実機 3D プリンターでモルタル積層試験体を作製し、これらの変化要因が層間の付着強度、吸水特性および中性化深さに及ぼす影響を検討した。その結果、(1) 層間付着強度は、積層幅が小さいと高くなり、積層幅がノズル内径より小さい場合に、一体打ちの場合の引張強度と同等以上となる、(2) 水分は層間から浸透し、そこからさらに内部に広がっていく、(3) 中性化は層間を含む表層全体に均一に進行し、中性化深さは、積層幅が大きいほど大きくなる、などの知見を得た。

キーワード: 3D プリンター、層間付着強度、吸水試験、中性化、積層幅、積層高さ

1. はじめに

我が国の建設分野で少子高齢化により労働力の減少が進行する状況下において、3D プリンティング技術を用いた建設現場の省人化は、労働力不足問題を解決する有効な解決策になり得るものと考えられる。また、建設 3D プリンティングの導入は、このほかにも、工期短縮、建設コストの削減、デザインの自由度拡大などの多くのメリットをもたらす可能性を潜在的に秘めている。

現在、建設 3D プリンティング技術の中で主流となっている方式は、フレッシュ状態のモルタルを押し出して積層していくことで構造物を造形する材料押し出し方式である¹⁾。しかし、この手法を使用する場合、層間が不連続になるため、この部分のモルタルの強度や耐久性が低下する懸念がある。この点に関して、例えば、Panda ら²⁾は、3D プリントされたジオポリマーセメントの層間付着強度について検討を行い、ギャップタイム（上層を積層するまでの空き時間）が長くなるほど、ノズルの移動速度が速くなるほど、また、層表面からノズルまでの距離が大きくなるほど、層間付着強度が低下することを報告している。

また、層間の耐久性に関して、Zhang ら³⁾は、3D プリントされたモルタル積層体の空隙分布および耐久性を調査し、3D プリントした場合は、連続した空隙が層間に集中し、一体打ちの場合に比べて乾燥収縮が小さくなり、中性化抵抗性は高くなるが、凍結融解抵抗性や塩害抵抗性は低下すると報告している。一方、Malan ら⁴⁾は、3D プリントされたモルタル積層体の場合、層間の中性化が先行して進行することはないが、全体として、一体打ちの場合より中性化抵抗性が低下することを示している。

このように、3D プリントされた積層体の層間の付着強度や耐久性に関しては、積層条件やプリンティング材料などにより様々に変化するものと考えられ、必ずしも十分に明確になっているとはいえない。

本研究では、ノズルからモルタルが吐出される際の積層圧や層が押しつぶされる度合いなどが積層体の層間の付着強度や耐久性に大きな影響を及ぼすのではないかと考えた。そして、このような想定の下に、積層幅や1層当たりの積層高さを変化させて実機 3D プリンターでモルタル積層試験体を作製し、これらの要因が層間付着強度に及ぼす影響を検討した。また、層間部分のモルタル組織の緻密さや物質移動抵抗性の把握を目的として吸水試験や促進中性化試験を実施した。

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、3D プリンターに内径 25mm の円筒型ノズルを用いたことを踏まえ、積層幅の設定値を、ノズル内径より小さい 20mm、およびノズル内径よりも大きい 35、50mm の計 3 水準に変化させた。また、1層当たりの積層高さ（以下、単に積層高さという）を 17 および 10mm の 2 水準とした。

2.2 モルタル

本実験では、プリンティング材料として、プレミックス材に対して水を質量比で 17% 添加したモルタルを使用した。フロー値は 145 であった。

2.3 プリント試験体

本実験では、ガントリー型の 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 にその平面形状を

*1 名城大学 理工学研究科建築学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 名城大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 前田建設工業 (株) ICI 総合センター ICI テクノロジーセンター 建設材料グループ 主幹 (正会員)

表-1 実験要因とその水準

要因	水準
積層幅 (設定値) (mm)	20, 35, 50
積層高さ (mm)	17, 10

示す。プリント試験体は、積層高さの異なる2種類を、積層幅の異なる試験体を一体として作製した。試験体の作製にあたっては、図中の矢印を起点としてノズルを始動させ、モルタルの吐出量を一定としたうえで、積層幅が位置ご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立面を示す。ベース部分を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17mmのケースでは3層、10mmのケースでは5層とした。

2.4 ノズルの移動速度

プリント試験体の作製にあたっては、図-3 に示すような長方形の積層断面を仮定し、積層幅の設定値に応じて次式によりノズルの移動速度を定めた。

$$V = Q / (h \times w) \quad (1)$$

ここに、V:ノズルの移動速度 (mm/min), h:積層高さ (mm), w:積層幅 (mm), Q:吐出量(=3.29×10⁶mm³/min)。

上式からわかるように、吐出量Qおよび積層高さhが一定の場合、図-4 に示すように、ノズルの移動速度Vが遅いほど積層幅wは大きくなる。

2.5 供試体

表-2 に試験項目、供試体寸法および供試体本数を示す。

(1) 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 中に赤線で示す位置から供試体を切り出した。積層幅ごとに4本ずつ切り出した供試体(長さ400mm)のうちの1本は、モルタルの硬化後にコンクリートカッターで50mmごとに切り分けて、そのそれぞれを層間付着強度試験の供試体とした。残りの3本の供試体については、それぞれを100mmと300mmに切り分けて、100mmの部分を吸水試験、300mmの部分を促進中性化試験の供試体とした。

図-5 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) 一体打ち供試体

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。層間付着強度試験、吸水試験、促進中性化試験の供試体は、2層に分けて型枠

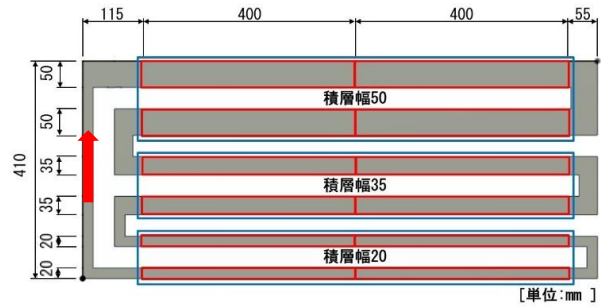


図-1 プリント試験体の形状(平面)

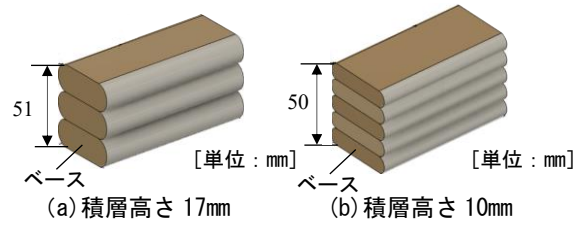


図-2 プリント試験体の形状(立面)

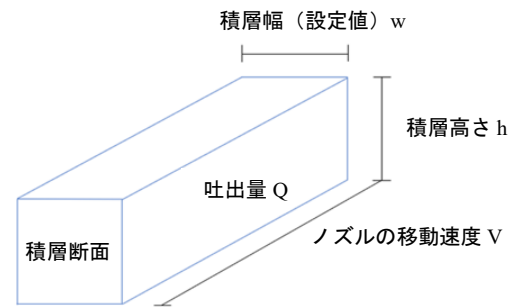


図-3 仮定した積層断面

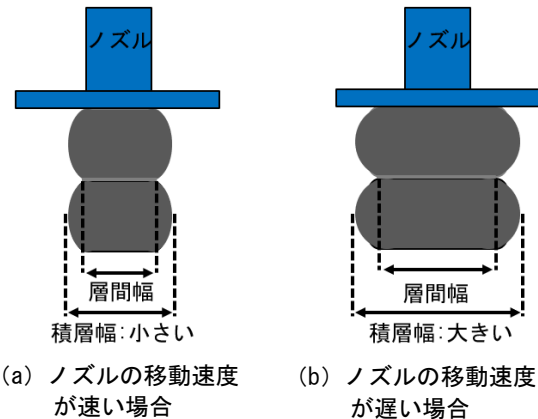


図-4 積層幅とノズルの移動速度の関係

表-2 試験項目、供試体寸法および供試体本数

試験項目	供試体種別	供試体寸法* (mm)	ケースごとの供試体本数(本)
層間付着強度試験	プリント供試体	w×h×50	5
	一体打ち供試体	25×34×50	5
吸水試験	プリント供試体	w×h×100	3
	一体打ち供試体	25×34×100	3
促進中性化試験	プリント供試体	w×h×300	3
	一体打ち供試体	25×34×300	3
圧縮試験	一体打ち供試体	φ100×200	3

*w:積層幅, h:積層高さ

にモルタルを打ち込み、層ごとに突き棒で突いたうえでジッキングを行って作製した。また、圧縮試験の供試体は JIS A 1132 に準拠して作製した。なお、標準養生した一体打ち供試体の 28 日圧縮強度は 69.8N/mm²であった。

2.6 試験方法

(1) 層間付着強度試験

図-6 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により求めた。

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

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)。

(2) 吸水試験

図-7 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。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-8 に示す位置で吸水深さ、および層間から周辺への吸水部分の広がり(以下、吸水幅という)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)。

(3) 促進中性化試験

図-9 に、促進中性化試験におけるシール面および中性化深さの測定位置を示す。本実験では、積層された供試体の片方の側面以外をエポキシ樹脂でシールし、温度 20°C、相対湿度 60%、CO₂濃度 5% の環境下に存置して促進中性化させた。そして、図-5 中に示した中性化深さの測定日ごとに、軸方向と直角に供試体を端部から約 50mm の位置で割裂していき、その割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、層間および各層の中間高さ(以下、層中間という)位置の中性化深さを測定した。

3. 実験結果とその考察

3.1 層間付着強度試験の結果

(1) 積層幅および層間幅

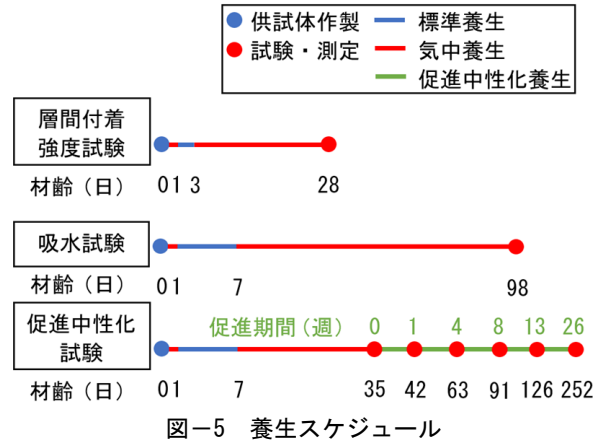


図-5 養生スケジュール

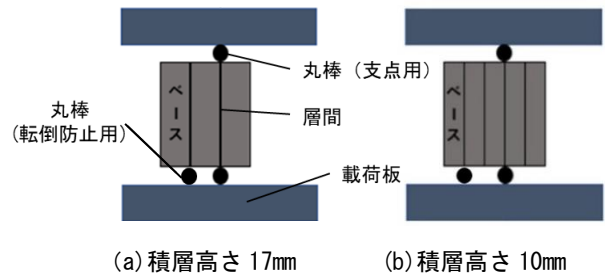


図-6 層間付着強度試験の概要

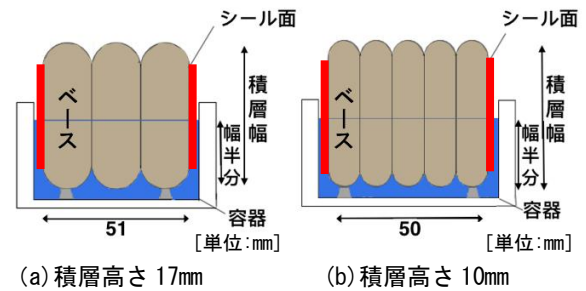


図-7 吸水試験の概要

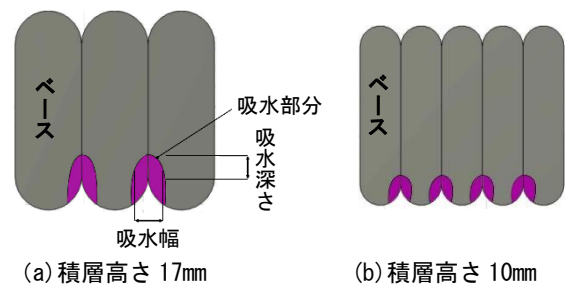


図-8 吸水状況の測定位置

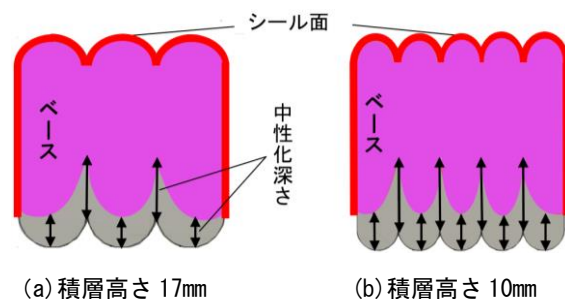


図-9 中性化深さの測定位置

図-10に、層間付着強度試験のプリント供試体に対する積層幅および層間幅の測定結果（平均値）を示す。プリント試験体の作製にあたって積層幅を厳密に制御することは困難であったため、実際の積層幅は、積層高さが10mmの場合に、20mmのケースで設定値よりやや大きくなり、35および50mmのケースで設定値よりやや小さくなった（ただし、設定値との差が大きいとはいえなかったため、以降の考察では、積層幅に関して、設定値を用いて結果を表示する）。

また、積層高さが17mmの場合よりも10mmの場合のほうが積層幅と層間幅の差が小さくなった。これは、積層高さが低いほうが、積層された楕円状のモルタル層断面の扁平度が高くなるため、円形断面で吐出されたモルタル層が積層時により強く押しつぶされることが原因と考えられる。

(2) 層間付着強度

図-11に、層間付着強度の測定結果を箱ひげ図により示す。層間付着強度は、積層幅が20mmの場合に最も高くなり、ばらつきは見られるものの、一体打ちの場合の割裂引張強度と同等以上の値となった。このことから、積層幅が20mmの場合、層間が引張力に対する弱点になる可能性は低いものと考えられる。一方、積層幅が35および50mmの場合、層間付着強度は、一体打ちの場合の割裂引張強度よりも低い値となった。また、これらの結果に対して、積層高さは明確な影響を及ぼさなかった。

図-12に、層間付着強度と層間幅の関係を示す。同図から、層間付着強度は、積層高さにかかわらず、層間幅により一義的に表されるものと考えられる。

なお、以上のような結果となった理由としては、一つの仮説として、次のような機構を考えることができる。すなわち、積層幅が20mmでノズル内径(φ25mm)より小さい場合は、図-13(a)にイメージを示すように、モルタル層の幅全体に対して積層時に圧力が作用する。それに対し、積層幅が35および50mmでノズル内径より大きい場合は、図-13(b)に示すように、ノズルの外側に相当する部分に対する積層時の圧力は小さくなり、そのことが層間付着強度の低下を招く原因となる。なお、このことは、換言すると、積層幅より内径の大きいノズルを使用すれば、高い層間付着強度を確保できる可能性が高いことを示唆している。

3.2 吸水試験の結果

(1) 吸水状況

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)。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部分である。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。このことと同写真の状況を考え合わせると、水分は、プリ

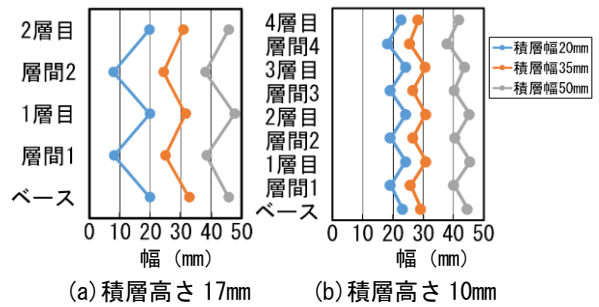


図-10 積層幅および層間幅

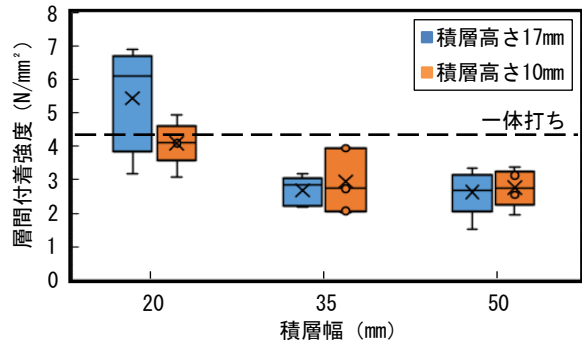


図-11 層間付着強度

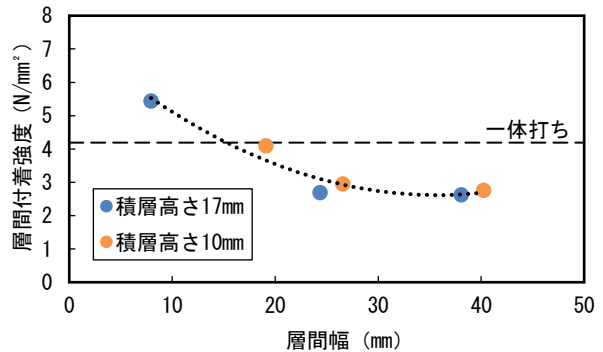


図-12 層間付着強度と層間幅の関係

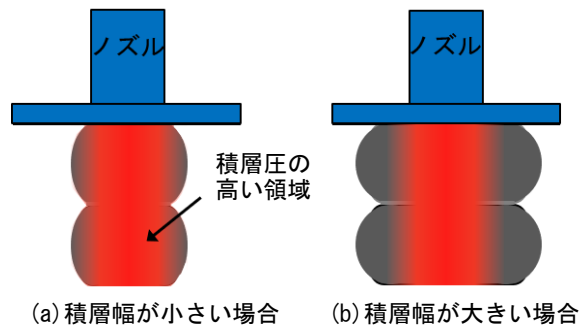


図-13 積層幅と積層圧の関係

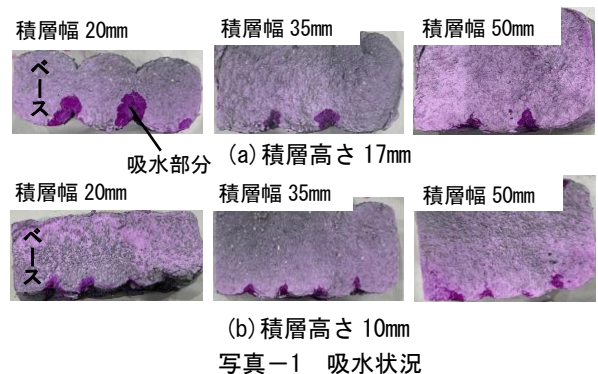


写真-1 吸水状況

ント供試体の表層全体から浸透したのではなく、層間から浸透し、そこからさらに内部に広がったものと推察される。

図-14 および図-15 に、割裂面で測定した層間における吸水深さおよび吸水幅を示す(240分経過後)。ここで、積層高さ 17mm、積層幅 50mm のケースにおける 1 層目の値を、原因は定かではないものの、全体の傾向から見て外れ値と判断すると、図-14 より、積層高さが 10mm の場合のほうが 17mm の場合よりも全体として吸水深さが小さく、層間の物質移動抵抗性が高くなっていることがわかる。また、図-15 に示した吸水幅は、図-14 と類似した傾向になっており、吸水深さが大きいほど吸水幅も大きい傾向となることがわかる。

(2) 吸水速度係数

図-16 に、吸水速度係数と積層幅の関係を示す。吸水速度係数は、積層高さが 17mm と 10mm の場合でほぼ同じ値になっており、このことは、供試体の層間からの吸水総量が同じであることを意味している。一方で、積層幅が 17mm の場合のほうが層数が少ないため、1 層当たりの層間からの吸水量は積層高さが 17mm の場合のほうが多いことになり、この傾向は図-14 および図-15 から窺い知ることができる。また、吸水速度係数は、積層幅が 50mm の場合にやや大きくなっている。すなわち、積層幅が大きくなると、物質移動抵抗性が低く、組織がポーラスになっている。そして、この傾向は、層間付着強度の傾向と一致している。

3.3 促進中性化試験の結果

写真-2 に、促進中性化試験の割裂面における中性化状況を示す(促進期間 26 週)。ここで、同写真における割裂面下端の赤紫色に呈色していない部分が中性化した部分である(割裂面上端の呈色していない部分はフェノールフタレイン溶液を吹きかけていない部分である)。なお、一体打ちの場合、促進期間 26 週においても、供試体の割裂面に中性化部分は見られなかった。写真-2 から、二酸化炭素は、吸水試験における水の浸透の場合とは異なり、プリント供試体の層間を含む表層全体に比較的均等に浸入していることがわかる。

図-17 に、層間および層中間における中性化深さを示す(促進期間 26 週)。層中間の積層高さ 17mm のデータは他と異なる特異な傾向となったが、全体としては、上述の通り、層中間と層間の中性化深さに明確な相違は見られなかった。この点において吸水試験の場合と明らかに異なる結果となった理由は定かではないが、低水セメント比のセメント硬化体中の空隙内では、空気に比べて水のほうが圧倒的に移動しにくい⁹⁾ことが関係している可能性がある。

また、中性化深さは、図-17 によると、最大でも 2mm

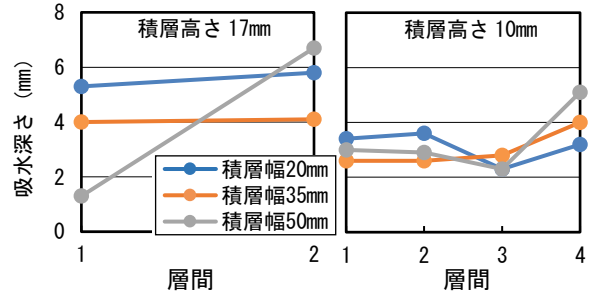


図-14 吸水深さ

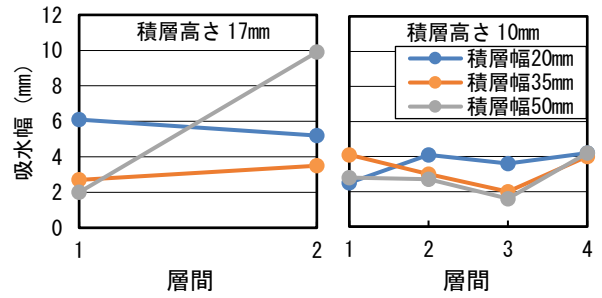


図-15 吸水幅

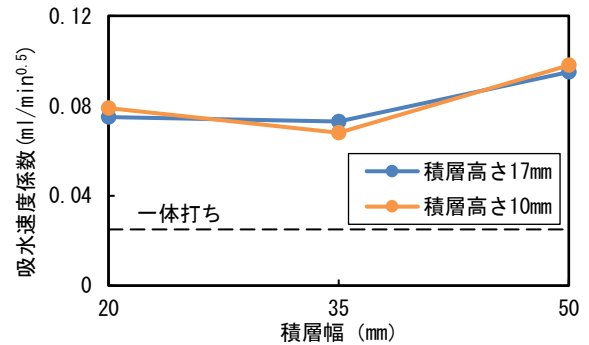


図-16 吸水速度係数と積層幅の関係

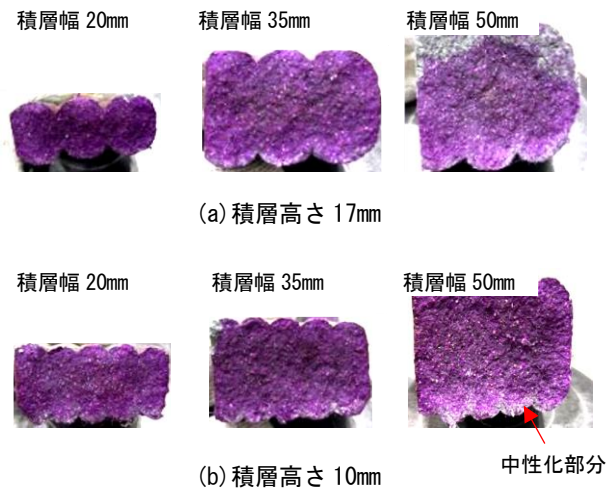


写真-2 中性化状況

程度であり、十分に小さな値であったが、その値には積層幅による差が見られた。すなわち、中性化深さは、積層幅が大きいほど大きくなった。これは、3.1 (1) でも述べたように、積層幅が大きいほど、円形断面で吐出され

たモルタル層が積層時により強く押しつぶされることにより、積層時の表層部分（すなわち側面）の組織が粗くなり、二酸化炭素が浸入しやすくなることが原因と考えられる。

図-18 に、中性化深さ（促進期間 26 週）と吸水速度係数の関係を示す。同図からわかるように、両者の間には正の相関が見られ、中性化深さは、吸水速度係数の増加とともに直線的に増大している。すなわち、表層部分のモルタル組織の緻密さや物質移動抵抗性の度合いが吸水試験、促進中性化試験のいずれによっても捉えられたといえる。

4. まとめ

本研究では、積層幅および1層当たりの積層高さを変化させて実機 3D プリンターでモルタル積層試験体を作製し、これらの変化要因が層間の付着強度、吸水特性および中性化深さに及ぼす影響を検討した。本研究により得られた知見は、以下の通りである。

(1) 層間付着強度は、積層幅が小さいと高くなり、積層幅が 20mm でノズル内径 (φ25mm) より小さい場合、一体打ちの場合の引張強度と同等以上となる。これは、積層幅がノズル内径より小さい場合、モルタル層の幅全体に対して積層時に圧力が作用するためと考えられる。なお、積層高さは層間付着強度に対して明確な影響を及ぼさない。

(2) 吸水試験の結果によると、水分は層間から浸透し、そこからさらに内部に広がっていく。また、層間からの吸水量は積層高さが高いほうが多くなる。一方、吸水速度係数は、積層幅が大きい場合にやや大きくなる。

(3) 中性化は、層間を含む表層全体に均一に進行する。また、中性化深さは、積層幅が大きいほど大きくなる。これは、円形断面で吐出されたモルタル層が積層時により強く押しつぶされることにより、表層部分の組織が粗くなり、二酸化炭素が浸入しやすくなることが原因と考えられる。

謝辞

本研究の実施に際し、JSPS 科研費 21K04344 の助成を受けた。ここに付記して感謝の意を表します。

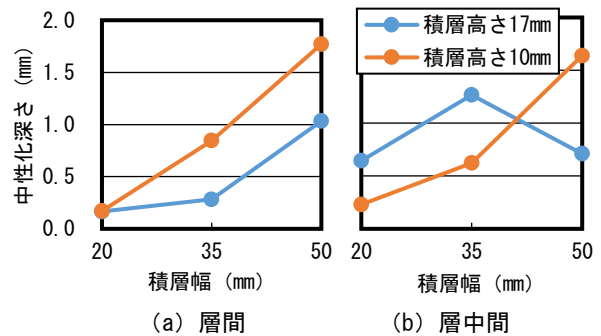


図-17 中性化深さと積層幅の関係

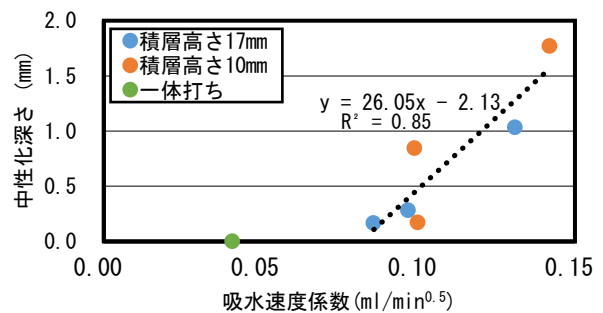


図-18 中性化深さと吸水速度係数の関係

参考文献

- 1) 石田哲也, 木ノ村幸士: 3D プリンティング技術がもたらす建築産業へのインパクト, コンクリート工学, Vol.58, No.1, pp.45-51, 2020.1
- 2) Panda, B., Paul, S. C., Mohamed, N. A. N., Tay, Y. W. D. and Tan, M. J.: Measurement of Tensile Bond Strength of 3D Printed Geopolymer Mortar, Measurement, Vol.113, pp.108-116, Jan.2018
- 3) Zhang, Y., Zhang, Y. S., Yang, L., Liu, G. J., Chen, Y. D., Yu, S. W. and Du, H. J.: Hardened Properties and Durability of Large-scale 3D Printed Cement-Based Materials, Materials and Structures, Vol.54, No.45, Feb.2021
- 4) Malan, J. D. M., Rooyen, A. S. V. and Zijl, G. P. A. G. V.: Chloride Induced Corrosion and Carbonation in 3D Printed Concrete, Durability of Concrete Infrastructure, Vol.7, No.1, Dec.2021
- 5) 葛山育海, 寺西浩司: コンクリートの表層品質試験結果に対する試験方式などの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1612-1617, 2020.7