

論文 3D プリントしたモルタル積層体の力学特性および耐久性評価

張 文博^{*1}・木ノ村 幸士^{*1}・田中 俊成^{*1}

要旨：著者らは、3D プリンティング技術の開発と実用化を進めている。本報では、実用化に向けて開発した配合を対象に、積層体から採取した供試体の力学特性および耐久性について、突固め作製した供試体と比較しながら評価を行った。また、屋外暴露試験を実施し、暴露期間中の表層透気性と細孔径分布を定期的に計測した。その結果、積層体の異方性が圧縮強度、割裂引張強度、曲げ強度に現れることが確認された。また、積層体の収縮ひずみ、中性化および塩分浸透抵抗性は突固め供試体と同等以上であることがわかった。さらに、屋外暴露 1 年後には表層透気係数は小さくなり、細孔構造も緻密化する傾向が見られた。

キーワード：3D プリンティング、収縮ひずみ、促進中性化、塩分浸透、表層透気性、細孔径分布

1. はじめに

建設業における 3D プリンティング（以下、3DP）技術は、プリントシステムや材料の開発が進み、実適用されるケースが増えてきている¹⁻³⁾。3DP 技術は造形の自由度が高く、複雑な形状を効率的に製作できるため、従来の方法では実現が難しいデザインや形状の構築が可能である。さらに構造的な性能⁴⁻⁶⁾や耐久性の向上⁷⁾が期待される。とした研究結果が示されているため、建設プロジェクトにおいて新たな可能性を提供している。

3DP 技術の普及に向けては、積層材料の選定と品質管理が重要な要素と位置付けられる。つまり、プリント積層に求められるフレッシュ性状を保ちながらも、原材料の調達やコスト削減を考慮した配合検討が重要な課題となっている。

本稿では、上記を踏まえ、広く流通し、比較的安価な原材料を用いたプリント配合を採用した。それを用いて積層体を作製し、その力学特性、収縮特性、促進中性化および塩分浸透抵抗性などを検証し、特に積層製作で避けられない積層境に着目して考察を行った。また、屋外で暴露した積層体の表層透気性と細孔径分布を定期的に計測し、それらの変化についても考察した。

2. 試験概要

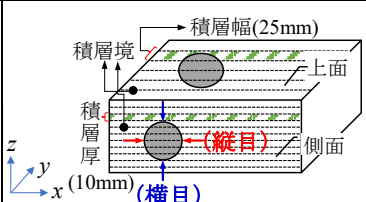
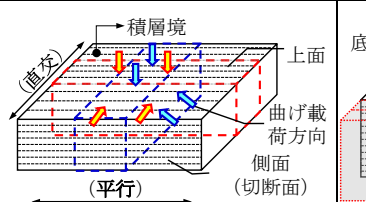
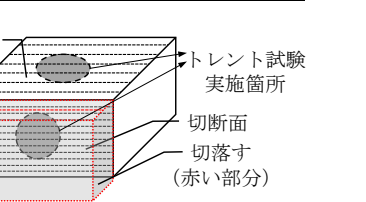
2.1 使用材料、配合および供試体の製作

プリント材料として、粉体に普通ポルトランドセメントと膨張材を、細骨材に最大粒径 2.5mm の砕砂を用いた。収縮ひび割れを防止するために、長さ 12mm、直径 40 μ m の有機短繊維（以下、短繊維）を添加した。水結合材比は質量比で 28%、短繊維の体積添加率は 0.3% である。

練混ぜにはパン型強制練りミキサーを使用し、積層製作にはガントリー式 3D プリンタ⁵⁾を用いた。事前に作成した 3 次元モデルをツールパスデータに変換し、積層プログラムで制御して自動造形を行った。積層幅を 25mm、積層厚を 10mm、ノズル移動速度を 100mm/秒に設定して連続で積層を行った。また、プリント作業は室内環境で温湿度をコントロールせずに行い、温度は 20～28℃、湿度は 40～60%RH で変動した。積層中には攪拌状態の試料を対象にベーンせん断試験（JGS 1411-2012 に準拠）を実施し、その値を著者ら⁸⁾が提案した安定的な積層が可能な範囲（ベーンせん断強度：0.4kPa～1.0kPa）に収まるように管理した。

表 1 にブロック製作の詳細を示す。プリント方向は同一であるが、用途に応じて寸法のみが異なる 3 パター

表 1 供試体の作製詳細および試験項目

積層ブロック	パターン 1（コア採取）	パターン 2（角柱切出し）	パターン 3（片面切出し）
供試体の採取方法			
寸法	上面採取用:W475×D425×H200mm 側面採取用:W475×D225×H400mm	W475×D425×H100mm	W225×D275×H150mm
合計 プリント時間	上面採取用:30 分/体 側面採取用:35 分/体	16 分/体	8 分/体

*1 大成建設(株) 技術センター社会基盤技術研究部材工研究室 博(工) (正会員)

ンのブロックを製作した。パターン1とパターン2のブロックはそれぞれコア採取と角柱切出し用で、パターン3のブロックは屋外暴露試験に供した。また、積層体と比較検討するため、同バッチの試料を用いて、JISA1132(2020)に準拠して鋼製型枠で突固め供試体も作製した。

作製した積層ブロックと突固め供試体は、ビニールシートで24時間簡易養生を行った。材齢1日で湿式法により供試体の採取を行い、脱型した突固め供試体と共に3日間、湿潤状態で密封養生を行った。なお、過去に実施した試験結果より、材齢1日で切出しを行っても問題のない十分な強度が出ることを確認している。

2.2 室内試験概要

表-1に、実施した試験項目をまとめて示す。押出積層により作られた積層体は、 x 、 y 、 z の三方向で異方性が存在することが知られている^{3,9)}。積層ブロックは、突固めで作製した供試体のように均質ではなく、複数の積層境を有する試験体と見なすことができる。これらの積層境は、積層体の弱部になる可能性があると考えられるため、それに着目して検討を進めた。また、実用化に際しては、荷重や劣化因子の作用方向も考慮し、本研究では、表-1に示すように複数の積層面を対象に試験を行った。

以下、各項目の詳細について説明する。

(1) 圧縮強度・ヤング係数・割裂引張強度（パターン1）

試験は、積層ブロックの上面と側面から採取したコアを対象とした。3日間湿潤養生したコアは、 $20^{\circ}\text{C}\cdot 70\%\text{RH}$ の恒温恒湿室で養生し、各試験材齢で研磨して $\phi 100\times$ 長さ 200mm に成形した。材齢4日、7日と28日において、JISA1108に準拠した圧縮強度試験を各3本（ヤング係数試験は材齢28日のみ実施）、またJISA1113に準拠した割裂引張試験を材齢28日において各3本実施した。

なお、割裂引張強度は、載荷方向をプリント方向に平行（縦目）および直交（横目）の2方向で行った。

(2) 曲げ強度（パターン2）

曲げ強度試験は、プリント方向に平行または直交する方向（赤点線および青点線）で切り出した2種類の供試体を対象とした。また、それぞれの載荷方向は上面と側面の2方向とした。供試体の寸法は $100\times 100\times 400\text{mm}$ とし、3日間湿潤養生した後、 $20^{\circ}\text{C}\cdot 70\%\text{RH}$ の環境で気中養生した。材齢28日において、JISA1106に準じた載荷試験を3本ずつ行った。なお、積層体の上面に載荷する際には、荷重が均等に作用するよう、あらかじめ石膏でキャッピングして試験を実施した。

(3) 収縮ひずみ（パターン2）

積層体の収縮ひずみ試験は、材齢1日で平行および直交方向に沿って、それぞれ $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体を切出し、さらに3日間湿潤養生した後、 $20^{\circ}\text{C}\cdot 60\%\text{RH}$ の恒温恒湿室に移して保管した。JISA1129-2を参考に、

コンタクトゲージ法により収縮ひずみを測定した。材齢4日に標点距離が 300mm となるようにゲージプラグを貼付し、その翌日から基長を測定した。積層供試体と突固め供試体の両方とも底面と両側面の3側線で計測を行い、各3本の供試体を用いて計測を行った。

(4) 促進中性化（パターン2）

積層体の促進中性化試験は、パターン2に示すプリント方向と平行する方向のみで供試体を採取し、その上下面および両側面を対象に実施した。比較対象の突固め供試体は、両側面で促進試験を行った。促進試験は、JISA1153を参考に、材齢28日まで $20^{\circ}\text{C}\cdot 70\%\text{RH}$ の環境で養生した後に開始した。試験面以外の4面は、すべてアルミニウム箔で密封し、 $20^{\circ}\text{C}\cdot 60\%\text{RH}$ 、二酸化炭素濃度が5%の条件で促進を行った。

中性化深さは、供試体の長さ方向に直角に割裂し、割裂面における両促進面で計測した。計測は、1促進面につき6等分した5箇所で行った。また、各試験は各3本の供試体で計測を行った。

(5) 塩化物イオン浸透（パターン1）

材齢1日に、積層ブロックの上面と側面からそれぞれ $\phi 100\text{mm}$ のコアを採取し、3日間湿潤養生を行った。その後、JSCE-G 572-2018に準拠して、コアの片端面から距離 25mm の箇所を切断し、さらに $20^{\circ}\text{C}\cdot 70\%\text{RH}$ の環境で材齢28日まで気中養生した。養生が終了する直前に、浸漬面以外のすべての面をエポキシ樹脂で被覆した。気中養生後の供試体は、温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の水中であらかじめ24時間静置した後、温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中で浸漬を開始した。

浸漬期間半年と1年でコアを1本ずつ取り出し、塩化物イオン浸透面から幅 50mm 、深さ 40mm の供試体を切り出し、EPMAの分析面とした。幅 50mm としたのは、積層体を複数観察できるようにするためである。

EPMA面分析では、試料に照射する電子線の直径を $100\mu\text{m}$ とし、上記の $50\times 40\text{mm}$ の試料面をステージスキャン法により $100\mu\text{m}$ 間隔で動かすことで 500×400 箇所の面分析を行った。各照射箇所の目的元素の量は、特性X線の強度をカウント数で表し、カウント数から濃度への変換は、目的元素の濃度が既知の標準試料で予め作成した検量線を用いて行った。本研究では、塩水浸漬面から同一深さで得られた塩素の平均値を求め、塩素の濃度プロファイルを作成した。

2.3 屋外暴露試験概要

各供試体は、材齢28日までに $20^{\circ}\text{C}\cdot 70\%\text{RH}$ の環境で養生を行い、その後屋外暴露を開始した。暴露試験は神奈川県横浜市内の敷地で行い、暴露直前および暴露1年後に以下の試験を実施した。

(1) 表層透気試験（パターン3）

表-1 に示すパターン 3 に基づき、3 体の積層ブロックを作製した。材齢 1 日に、各ブロックの手前から 2 列目と 3 列目の積層境に沿って切断し、切断面を有する積層供試体を作製した。また、比較用として、鋼製型枠を用いて 150×150×530mm の突固め試験体を 2 体作製し、それらを長さの中央から切断した。切断して得られた計 4 体の供試体のうち 3 体を試験対象とした。各供試体は底面を上向きに配置し、雨水が直接作用するように屋外で暴露した。トレント法による表層透気試験の実施箇所は、各供試体の切断面と底面の中心の一ヶ所とした。なお、トレント試験の後に、四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法（案）（JSCE-G 581-2018）の B 法を参考に 4 点 WENNER プローブ方式電気抵抗計を用いて同じ箇所での電気抵抗率を計測した。

(2) 細孔径分布試験（パターン 2）

試験は、積層ブロックの表面と内部を対象に実施した。表面は積層体の側面、内部は表面から 100mm 離れた箇所とし、いずれも厚み 10mm の試料を切り出して分析した。試験は、測定範囲 300～0.003 μ m の水銀圧入式ポロシメータを用いて実施した。試料は 24 時間以上アセトンに浸漬して水和を停止させ、アスピレーターで乾燥させた後、5mm 角の粒状に切断加工した。その後、1 週間凍結真空乾燥機で乾燥させ、ポロシメータ分析を行った。材齢ごとに表面と内部一ヶ所ずつ分析を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 室内試験の結果

(1) 圧縮強度・ヤング係数

図-1 に圧縮強度の結果を示す。材齢 4 日では、突固め供試体（C）と積層体コア（P）は同等な圧縮強度を有している。材齢が進むにつれて圧縮強度は増加し、積層体コアは突固め供試体より低くなる傾向がみられる。また、積層体上面コアと比較して側面コアの強度は若干高い傾向があるが、両者の間に有意な差は認められない。

写真-1（a）に圧縮破壊後の状況を示す。積層体コアは、突固め供試体と同様に、荷重方向に対しておよそ 30° の面に沿って破壊したが、破断面に着目すると、いくつかの積層境でひび割れの進展が確認される。材齢の経過に伴ない、マトリックスが高強度になるほど、ひび割れが積層境で進展しやすく、破壊に至るまでのひび割れ進展の抵抗性が低下することで、突固め供試体に比べ圧縮強度の伸びが小さくなったと考えられる。

なお、突固め供試体の材齢 28 日のヤング係数は 28.5kN/mm²であるのに対し、積層体の上面と側面コアの結果はそれぞれ 25.9kN/mm²と 28.4kN/mm²であり、上面コアでヤング係数が小さくなった。

(2) 割裂引張強度

図-2 に割裂引張強度の結果を示す。

突固め供試体に比べて、横目荷重した積層体の割裂引張強度は約 150%増加したが、縦目荷重の場合は約 15%の低下が見られた。また、割裂引張強度に及ぼす積層体コアの採取方向の影響はほとんどなかった。突固め供試体では、短繊維がランダムに配向するのに対し、横目荷重した場合、荷重方向に対して短繊維が直角方向に配置されていることが目視で確認できたため、その架橋効果は耐力向上の一因であると考えられる。一方、縦目荷重の場合は、プリント方向に沿って荷重が作用すること、また、短繊維が架橋しないことから、中央の積層境で破壊が生じ、強度が若干低下したと推測される。

(3) 曲げ強度

図-3 に曲げ強度の試験結果を示す。

プリント方向と平行に切り出した積層角柱では、荷重面の違いによらず、突固め供試体の強度の約 1.3 倍となった。これも、上述のように短繊維がプリント方向に沿って一様に配向したためと考えられる。

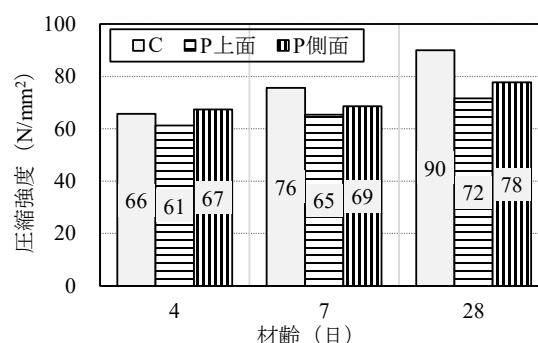


図-1 圧縮強度



(a) 圧縮破壊（上面コア）(b) 曲げ破壊（直交切出し）
写真-1 圧縮と曲げ破壊状況の一例（材齢 28 日）

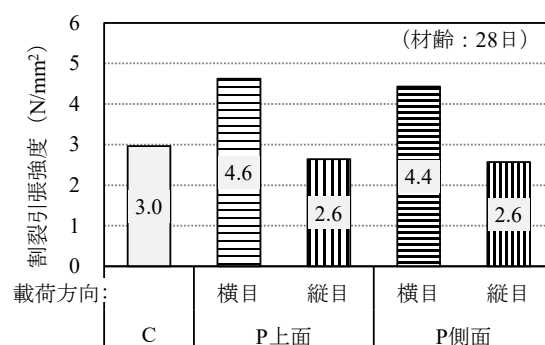


図-2 割裂引張強度

しかし、プリント方向と直交して積層角柱を切り出した場合、荷重方向によって曲げ強度に大きな差異が見られた。上面から荷重した際には、平行に切り出した供試体とほぼ同等の曲げ強度を示したが、側面から荷重した場合には、突固め供試体よりも曲げ強度が低下した。後者は、平行に切り出した場合と比較して、直交して切り出した供試体には多くの積層境を有しており、短繊維の架橋効果も期待できないことが低下の要因であると考えられる(写真-1(b))。一方、前者の結果については、要因が定かではなく、今後追加実験を行い、再確認する予定である。

(4) 収縮ひずみ

図-4 と図-5 に、乾燥期間中のひずみと質量変化率の経時変化をそれぞれ示す。ひずみは、各供試体において底面と両側面の計3測線で計測したが、計測面の違いによらずほぼ同等な値を示した。なお、図-4 には供試体3体、1体あたり3測線の全体の平均値を示している。

図-4 と図-5 とともに、プリント供試体と突固め供試体で傾向に違いはなく、乾燥材齢とともにひずみと質量変化率が増加し、収束に向かって増加速度が徐々に減少することがわかる。今回の試験に用いた配合は、水結合材比が28%であるため、図-5 のように質量変化率は小さく、乾燥収縮自体も小さい可能性がある。図-4 には、自己収縮によるひずみが含まれていることから、自己収縮が高い割合を占めている可能性がある。なお、今回の試験では自己収縮自体は計測していないことから、今後追加検討する予定である。

(5) 促進中性化

写真-2 に、促進26週間後の中性化状況を示す。黄色矢印で示された箇所では、積層境に沿って中性化が局所的に進行している。これは積層体に特有の現象であり、特に積層境での密着度の違いによって発生しやすいと考えられる。また、積層体の両側面では中性化が全体的に少なかったのに対し、上面ではやや中性化が進行している。積層体の上面はプリント時の最上面であり、上載圧による圧密を受けないため、隣接する積層(列間)の密着度が他の層に比べて小さいことが要因と考えられる。また、積層底面は作製パレット(プリント基盤面となる平板)からの拘束を受けることで、列間の密着度が小さく、積層境に沿って中性化が進行しやすいと考えられる。

図-6 に、中性化深さの経時変化および中性化速度係数を示す。これらの結果は、写真-2 に示すように計測面を6等分した5点で評価するものであり、一部の積層境での中性化の進行は計測結果に反映されていない。同図から、積層体の中性化速度係数は、突固め供試体より小さくなる傾向が見られる。積層体は、写真-2 に示すように特に上面と底面の積層境で中性化が一部局所的に

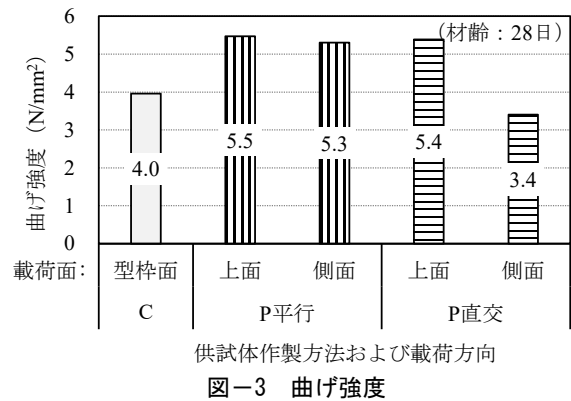


図-3 曲げ強度

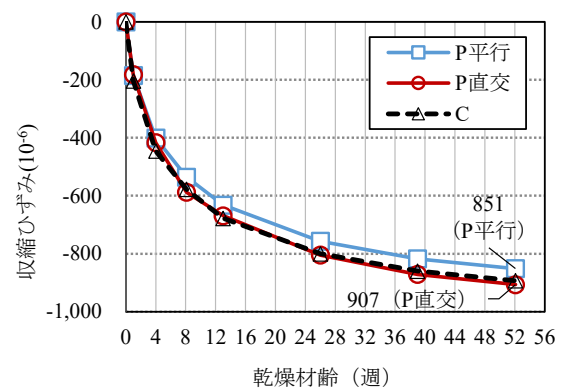


図-4 収縮ひずみの経時変化

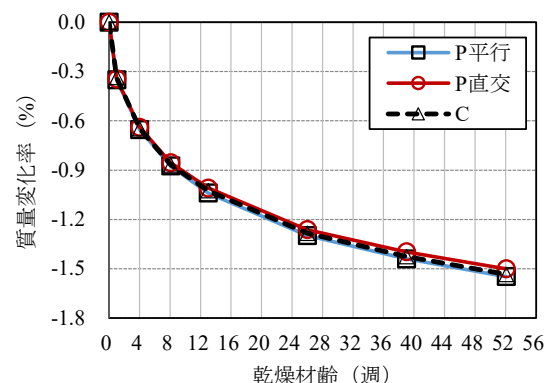


図-5 乾燥収縮中の質量変化率

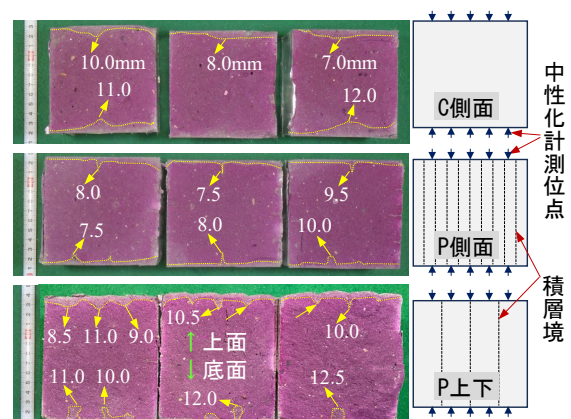


写真-2 中性化状況 (材齢: 26 週)

進行したが、全体としては突固め供試体より中性化しにくくなっている。これは、プリント製作において、材料

を単に下層の上に載せるだけでなく、ノズルの押出圧によって下層が圧密され、マトリックスの密度が増やすとともに、積層境の密着度が高くなるためであると考えられる。⁹⁾なお、上面および底面の積層境の密着度の改善については、プリント中に微振動を加えるなど補助的な対策を行なうことが有効であると考えている。

(6) 塩化物イオン浸透

浸漬期間半年と1年の塩化物イオン浸透状況の EPMA 画像を写真-3 に示す。図中の矢印は積層境の位置を示す。塩化物イオン浸透については、積層境での局所的な浸透は見られなかった。これには浸漬期間中に積層境で水和が進んだ影響が含まれると考えられるが、いずれにせよ、塩化物イオンの浸透は浸漬面から深さ 20mm 程度に限られる。

EPMA で得られた塩化物イオンの質量濃度と、圧縮試験で計測した見掛け密度から、単位体積当たりの塩化物イオン濃度を計算した。その結果を図-7 に示す。同じ浸漬期間の場合、積層体の側面と突固め供試体の塩化物イオン浸透挙動はほぼ同様であるが、積層体の上面での浸透深さはやや深くなっている。

また、これらの結果を用いて Fick の第二法則に基づいて計算した塩化物イオンの見掛けの拡散係数を合わせて図-7 に示す。各拡散係数には差異があるものの、いずれも小さい値である。なお、コンクリート標準示方書[設計編, 2022 年]の P.171 に記載されている見掛けの拡散係数の予測式に基づき、普通ポルトランドセメント、水セメント比 0.30、設計耐用年数1年で算出した塩化物イオン拡散係数は 0.52 であり、実験結果より求めた突固め供試体の値と概ね整合している。

3.2 屋外暴露試験の結果

(1) 表層透気性

図-8 に屋外暴露前後の表層透気係数と電気抵抗率の計測結果を示す。計測は、高周波式水分計によって表面含水率が 5.5%以下であることを確認してから実施した。

突固め供試体の結果に着目すると、暴露前では切断面が底面より透気係数が高く、暴露1年後ではその差異がほぼなくなり、両者とも「優」の領域に入った。暴露前の底面と切断面の差異は、突固め製作によるものと考えられる。また、暴露1年後で「優」評価に上がったのは、比抵抗の増大と関係していると考えられる。つまり、暴露期間中の降水によって水分が補給され、水和反応によって内部の細孔構造が緻密化したためと推測される¹⁰⁾。

これに対して、積層体の切断面は暴露前から透気係数が小さく、暴露1年後では前述した原因でさらに緻密化したと考えられる。しかし、積層体の底面においては、暴露前では透気係数の測定値にばらつきが大きく、評価として「一般」から「極劣」の範囲に分布し

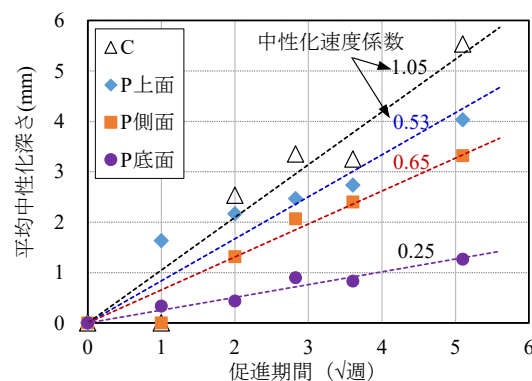


図-6 促進中性化の結果

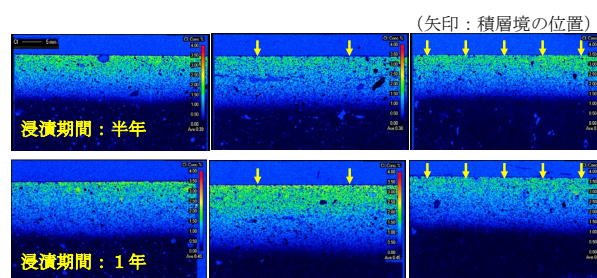


写真-3 塩化物イオン浸透の EPMA 画像

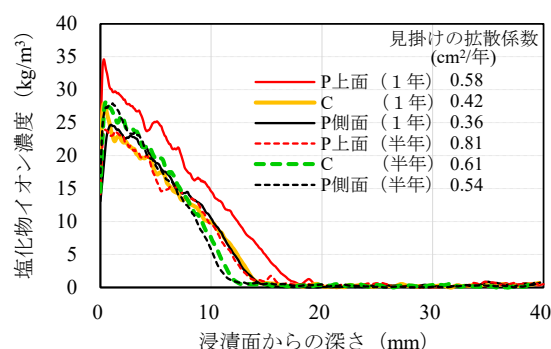


図-7 塩化物イオン濃度分布

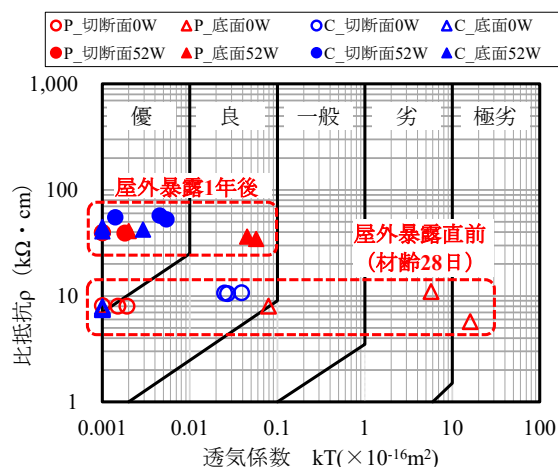
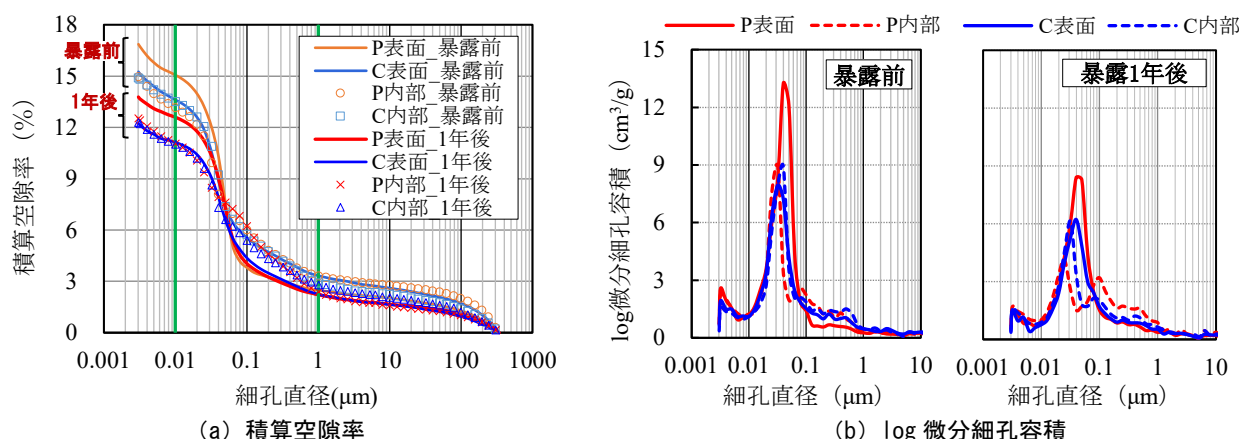


図-8 表層透気性試験の結果

た。積層体の底面では、プリント製作時に作製パレットの拘束を受けて積層境の密着度が低く、トレント試験の結果に影響したと考えられる。また、暴露1年後ではば



図－9 細孔容積分布の結果

らつきが小さくなり、「良」以上になった。暴露中において表層が緻密化されることで、その透気抵抗性が改善されたと推測される。

(2) 細孔径分布

図－9 に積算空隙率の結果を示す。図－9 (a) から、時間の経過とともに、 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ の空隙率が顕著に減少していることがわかる。図－9 (b) には、細孔径分布の変化を示す。特に、積層体の表面ではその傾向が顕著である。暴露期間中の降水の影響により水和反応が進行し、 $0.05\mu\text{m}$ 付近の毛細管空隙が減少して空隙構造の連続性が複雑化したと考えられる。このような細孔構造の小径化および複雑化は、前述した表層透気抑制性能の向上に寄与すると考えられる。今後、屋外暴露を継続し、定期的に分析を行う予定である。

4. まとめ

本研究の範囲内において得た知見を以下にまとめる。

- 1) 積層体コアの圧縮強度と割裂引張強度には異方性が存在し、特にプリント方向で割裂した場合、その異方性が顕著に現れた。
- 2) プリント方向に平行な場合の曲げ耐力は、突固め供試体より約 1.3 倍高くなった。
- 3) 積層体の収縮特性は、突固め供試体と同等であった。
- 4) 積層体は、突固め供試体と概ね同等以上の中性化抵抗性と塩化物イオン浸透抵抗性を有していた。
- 5) 積層体および突固め供試体ともに、屋外暴露 1 年後には、細孔構造が緻密化する傾向が見られた。また、積層体については、表層透気抵抗性が向上することを確認した。

参考文献

- 1) 北村勇斗，石関嘉一，藤村博，浜地克也：建設用 3D プリンタで製造したプレキャストブロックの大型土木構造物への適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.2017-2022，2024。

- 2) J. Teixeira, et al.: A road map to find in 3D printing a new design plasticity for construction - The state of art, Frontiers of Architectural Research, Vol.12, Issue2, pp.337-360, 2023.
- 3) 日本コンクリート工学会:3D プリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会報告書，pp.41-69，2021。
- 4) 監物希美，松田聡美，竹市八重子，東大智：3D プリンティングで外枠を構築した梁の曲げ・せん断載荷試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.2053-2058，2024。
- 5) 木ノ村幸士，張文博，川端康平，河村圭亮：3D プリンティングで外殻を構築したデモ橋脚の交番載荷試験による性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1528-1533，2022。
- 6) 山本悠人，木ノ村幸士，村田哲，ほか：3D プリンティング外殻による RC はりのせん断耐力向上効果の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，V-24，pp.351-356，2024。
- 7) 阿部寛之，小倉大季，山本伸也，菊地竜：屋外暴露した 3D プリンティング積層体の力学特性および耐久性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.2005-2010，2024。
- 8) 張文博，村田哲，木ノ村幸士：建設 3D プリンティング材料の品質評価指標に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1534-1539，2022。
- 9) 横山勇氣，浅生空海，田中俊成，木ノ村幸士：3D プリンティングモルタルのフレッシュ性状が水分移動抵抗性と層間付着強度に及ぼす影響の微視的評価検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，V-24，pp.477-482，2024。
- 10) 関博，宮田克二，北峯博司，金子雄一：比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験的一考察，土木学会論文集，No.451，V-17，pp.49-57，1992。