

室内・屋外暴露試験による3DP積層体の耐久性に関する考察

張 文博*¹・臼井 達哉*¹・田中 俊成*¹・木ノ村 幸士*¹

Keywords : 3D printing, short fiber reinforced mortar, neutralization resistance, chloride penetration resistance, surface air permeability, pore structure

3D プリンティング, 短繊維補強モルタル, 中性化抵抗性, 塩分浸透抵抗性, 表層透気性, 細孔径

1. はじめに

押出方式の3Dプリンティング(以下,3DP)技術は,セメント系材料をノズルから押出して立体形状を積層する技術であり,生産性・安全性の向上や材料ロスの低減などが期待でき,建設業で注目が集まっている^{1,2)}。

著者らは,これまでにセメント系材料を対象とした建設3Dプリンタを開発し,PCデモ橋桁の実証プロジェクト³⁾を行うことで,大型構造物への展開の可能性を具体的に示した。さらに,曲線状の外殻を有した橋脚を3DP技術により構築し,内部コンクリートと一体化した後に交番載荷試験を実施した。積層した外殻によるせん断補強効果やかぶりコンクリートの拘束効果が発揮され,構造性能が向上することを確認した⁴⁾。このような埋設型枠としての利用は,形状の自由度が高い型枠をより簡単に製作できることから,他にも適用事例が多く報告されているところである^{1,2)}。

3DP技術では,従来のコンクリート施工で実施される締固めや仕上げの工程が不要となるうえに積層後に速硬性が要求される。この場合,積層体の緻密性の確認が必要であり,特に各層での積層時間間隔が長くなると層と層の界面で脆弱部が生じやすく,力学性能や

耐久性の低下が懸念される。これまで積層体の力学特性に着目した研究は多く存在するが⁵⁾,耐久性に関する報告はまだ少ない。本稿では,短繊維補強モルタルを用いた3DP積層体の耐久性を検討する目的で,積層ブロックを用いた室内促進試験,および埋設型枠として用いた場合の屋外暴露試験を行った。

2. 試験概要

2.1 配合および試験項目

表-1⁶⁾に示すように,標準配合は水粉体比が31%,繊維の外添加率が2.5vol%である。また,実適用時の気温変動を考慮し,標準配合から単位水量,凝結遅延剤量および微粉末の量を調整して夏期配合を作製した。

標準配合に対して,突固め作製した供試体を温度20℃湿度99%RHで3日間,その後温度20℃湿度70%RHで4日間養生した場合,圧縮強度54.4N/mm²,曲げ強度11.6N/mm²を有していることを確認した。

試験項目を表-2に示す。室内促進試験では,積層ブロックから採取した試験体の促進中性化と塩分浸透試験を行った。屋外暴露試験では,積層しながら外殻を構築した橋脚⁵⁾,および積層したパネルを貼り付けて

表-1 3Dプリンティングに用いた短繊維補強モルタルの示方配合
Table 1 Mix proportions of short fiber reinforced mortar used for 3D printing

配合名称	W/P (%)	単位量(kg/m ³)					外割添加量(P×%)			繊維混入率 (vol%)
		W	P	S1	S2	V	SP	De	Re	
標準配合	31	310	1000	600	350	20	0.20	0.20	1.00	2.5
夏期配合	31	322	1038	623	259	21	0.20	0.20	1.50	2.5

W:水道水, P:速硬性セメント(密度3.08g/cm³,比表面積3970cm²/g), S1:砕砂(密度2.71g/cm³,最大粒形2mm,粗粒率2.86), S2:微粉末(密度2.71g/cm³,比表面積8160cm²/g,45μ残分4.0%), V:分離低減剤(密度1.32g/cm³), SP:高性能減水剤, De:消泡剤, Re:凝結遅延剤, 繊維:ビニロン繊維(呼び長さ15mm,呼び径0.3mm,密度1.3g/cm³)

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室

製作した梁の2種類の部材を用いた。実環境下で1年間暴露した後、中性化深さ試験と表層透気試験を行い、さらに橋脚で採取した試料の細孔構造を分析した。

2.2 試験体の作製方法

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25mm、積層厚10mm、ノズル移動速度60mm/秒とした。また、実用化の状況を想定し、積層は温湿度が変動する実験室で行った。なお、下記促進中性化試験用の積層ブロックには夏期配合、塩分浸透試験用ブロック、橋脚と梁の埋設型枠には標準配合を用いて製作した。

2.2.1 積層ブロック

室内促進試験では、図-1に示すような積層ブロックから供試体採取して行った。物質移動抵抗性の異方性を把握するため、積層ブロックの異なる面を対象として検討を行った。作製方法の詳細を表-3に示す。

促進中性化と塩分浸透試験は、すべて材齢24時間において試験体の採取を行った。促進中性化試験では、列境に沿って試験体を切出し、上下面と左右面でそれぞれに試験を行った。塩分浸透試験では、ブロックの上面と側面にてそれぞれにコアを採取した。

2.2.2 橋脚

橋脚は、図-2のように積層しながら外周の埋設型枠を2列構築した。積層は2ロットに分けて実施し、積層の時間間隔は2時間で、打継処理は行わなかった。橋脚の外殻が硬化した後、ユニット鉄筋を建て込み、内部に高流動コンクリートを打ち込んで施工した。

2.2.3 梁

著者らは、層ごとに積層方向を交互に直交させて製作した積層体は、突固め作製試験体と同等な曲げ強度を有することを確認している⁸⁾。本研究では、同様な積層方法で図-3右側に示す厚さ50mmのパネルを製作し、硬化後に図-3左側に示す梁の設計寸法に合わせて幅300mm、長さ300mmと600mmの2種類のパネルに切断した。その後、幅1500×奥行300×高さ450mmの

型枠の中に、積層時の底面を下向きにパネルを設置し、その上に普通コンクリートを打ち込んで一体化させた。

2.3 室内促進試験項目

2.3.1 促進中性化試験

表-2 本研究で実施した試験項目

Table 2 Test items carried out of this study

試験方法	試験対象	試験内容
室内促進	積層ブロック	促進中性化, 塩分浸透
屋外暴露	橋脚, 梁	中性化, 表層透気性 (トレント), 細孔径分布 (橋脚のみ)

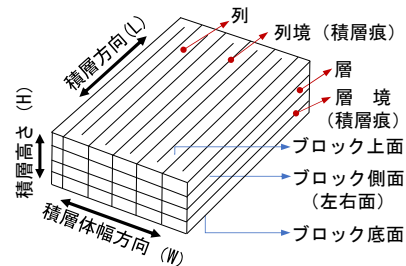


図-1 室内促進試験に用いた積層ブロックの諸元
Fig.1 Specifications of blocks used in accelerated tests

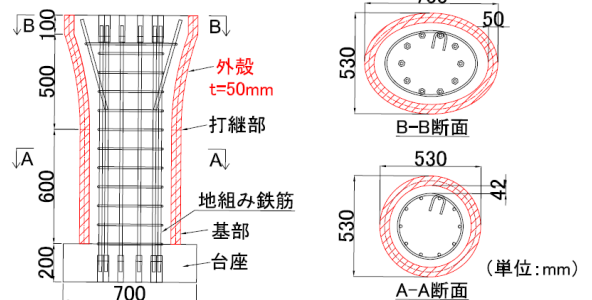


図-2 橋脚の製作詳細

Fig.2 Details of the bridge pier

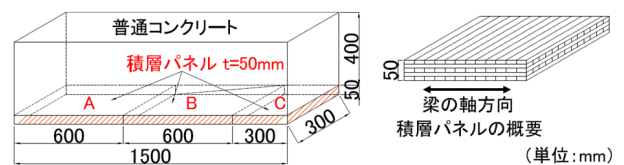


図-3 梁の製作詳細

Fig.3 Details of the beam

表-3 室内促進試験の内容およびその詳細

Table 3 Contents and details of the accelerated test

試験内容	試験項目	使用配合	積層ブロック寸法 (mm)	促進試験用供試体の詳細			試験材齢 (週)
				作製方法	寸法 (mm)	試験数	
促進中性化 (JIS A1153 :2012)	上下面促進	夏期配合	L640×W375×H100	列境に沿って4列分を切出し →試験面以外の面をシール	L640×W100×H100	3	1, 4, 13, 26
	左右面促進		L640×W375×H100		L640×W100×H100	3	
	両側面促進		—	鋼製型枠突固め製作	100×100×400	3	
塩分浸透 (JSCE-G 572-2018) (JSCE-G 574-2013)	上面浸漬	標準配合	L640×W375×H200	積層体ブロック上面からコア採取	φ100×200	1	27,52
	側面浸漬		L640×W200×H350	積層体ブロック側面からコア採取	φ100×200	1	
	上面浸漬		—	鋼製型枠突固め製作	φ100×200	1	

試験項目および試験材齢を表-3 に示す。積層ブロックから採取した試験体は、温度 20℃湿度 99%RH で 3 日間、さらに温度 20℃湿度 60%RH で 4 週間養生した。その後、試験面以外のすべての面をアルミニウム箔で密封し、JIS A1153 : 2012 に準拠して、温度 20℃±2℃、湿度 60±5%RH、二酸化炭素濃度 5±0.2%の条件で促進中性化試験を実施した。所定の材齢にて促進面と隣接した面で試験体を割裂し、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して、同基準に従って供試体ごとに 10 点の中性化深さを測定した。また、鋼製型枠に突き固めて製作した供試体を用いて同様の試験を実施した。

2.3.2 塩分浸透試験

積層ブロックの上面からコアを採取・加工した試験体の一例を図-4 示す。採取したコアは、促進中性化試験体と同じように養生を行った。材齢 3 週間において、JSCE-G 572:2018 に準拠してφ100×150mm の円柱体を成形し、片切断のみを残し、他の面をすべてエポキシ樹脂で被覆した。養生が終了した後に温度 20±2℃ の水中で 24 時間静置した。その後、温度 20±2℃、濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液中に浸漬した。浸漬期間 27 週と 52 週でコアを取り出し、図-4 のように浸漬面の中央付近で EPMA 試験用供試体を切り出した。供試体は、積層痕境を複数観察できるように幅を 50mm とし、塩分浸透深さ方向を 40mm とした。

EPMA 面分析では、試料に照射する電子線の直径を 100μm とし、上記 50×40mm の試料面をステージスキャン法により 100μm 間隔で動かすことで 500×400 箇所（以下、ピクセルと記す）の面分析を行った。各ピクセルの目的元素の量は、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一般的な換算は、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。また、同一浸透深さで得られた 500 ピクセルの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。

2.4 屋外暴露試験項目

橋脚と梁は、約 1 年間屋内で静置させた後、神奈川県横浜市の大成建設技術センター敷地内で屋外暴露試験を開始した。橋脚は実用時を想定して立てて設置し、図-5 に示す「暴露前」と示す面を北西方向に向けて暴露した。梁は、積層パネルを梁の下部型枠として製作した（図-3）が、暴露時には製作時と上下逆転して設置し、図-6 に示すように積層パネルが直接雨水が当たるようにした。屋外暴露前と暴露 1 年後に下記の各試験を実施した。

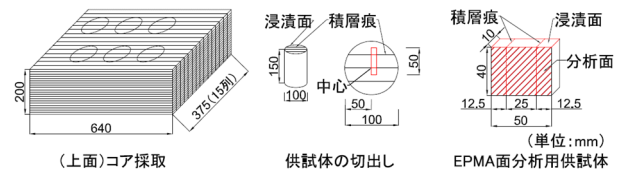


図-4 塩分浸透試験に用いる供試体作製の一例
Fig.4 Preparing method of specimen for chloride penetration test

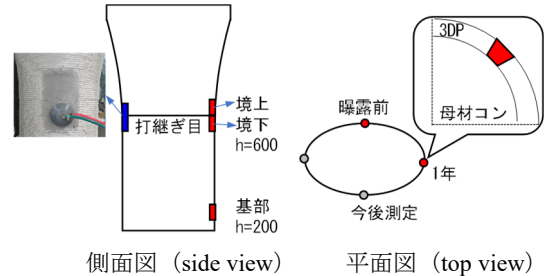


図-5 橋脚埋設型枠における試験実施箇所
Fig.5 Measurement points on embedded formwork of pier

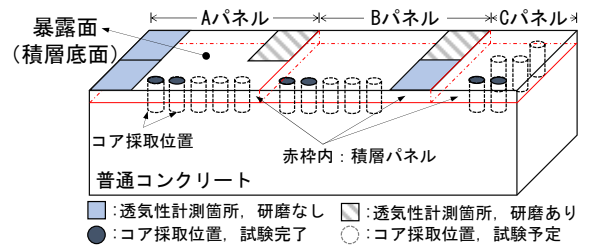


図-6 梁の暴露方向および試験実施箇所
Fig.6 Test overview and measurement points of embedded formwork of beam

2.4.1 中性化深さ

橋脚について、高さ方向積層の均質性や打継ぎ目の影響を考慮し、図-5 に示す基部、打継ぎ目上部と下部の計 3 箇所計測を行った。グラインダーによって高さ 100mm (10 層相当)、幅 100mm、深さ 50mm (2 列相当) 程度の範囲を切削し、中性化深さ試験を実施した。

梁におけるコアの採取箇所を図-6 に示す。暴露面から内部コンクリートに向かってφ50×100mm のコアを採取し、割裂して中性化深さを調べた。

2.4.2 表層透気試験

表層透気試験はトレント法によって実施した。橋脚における計測箇所は、図-5 に示すように打継ぎ目の上下各 150×150mm 範囲内の不陸を研磨して試験に用いた。梁の計測面は、平板上に積層した際の積層底面であったため、ほぼ平坦であったが、隣り合う列の間に積層境が顕在したところの確認された。その影響を検討するため、図-6 に示す研磨あり・なしの計 5 箇所計測を実施した。また、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によって同じ箇所での電気抵抗率を計測した。

2.4.3 細孔径分布試験

試験は、橋脚の中性化深さ試験で切り出した試料を用いて実施した。試験は測定範囲 300~0.003 μm の水銀圧入式ポロシメータを用いた。試料は24時間以上アセトンに浸漬して水和停止し、アスピレーターで乾燥させて5mm角の粒状に切断加工した後、さらに1週間凍結真空乾燥機で乾燥させて分析を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 室内促進試験

3.1.1 促進中性化

コンクリートの中性化進行速度の評価は、式(1)に示す \sqrt{t} 則が良く用いられる。

$$y = b\sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、 y は中性化深さ (mm), t は促進時間 (年), b は中性化速度係数 (mm/ \sqrt{t}) を示す。

中性化深さの平均値を \sqrt{t} で整理した結果を図-7に示す。同図にはそれぞれの回帰直線および中性化速度係数を合わせて示す。積層体(P)は、突固め製作した供試体(C)より中性化速度係数が小さく、さらに促進させる方向によって明らかな差異が見られる。

促進26週後の中性化状況を写真-1に示す。突固め供試体はほぼ均等に中性化していることに対して、積層体では中性化深さが不均一である箇所が散見される。積層体の上下面から促進した場合、積層の列と列の境目で一部中性化が進む様子がみられるが、積層体の左右面から促進した場合は中性化深さが非常に小さくなっていった。突固め製作の場合、鋼製型枠をたたいて試料を充填させるのに対し、プリント製作の場合、ノズルの押出作用によって試料がより密になった可能性が

ある。さらに層間は、積層時の上部自重によって圧密され密着度が高くなったために積層体の左右面はより緻密になったと考えられる。

結果のバラツキを評価するため、図-7に示している各平均値に対する変動係数を求めた。各材齢の変動係数を平均すると、突固め供試体の値は0.12、上下面および左右面促進した積層体の場合はそれぞれ0.37と0.32であって突固め供試体の約3倍となった。この中

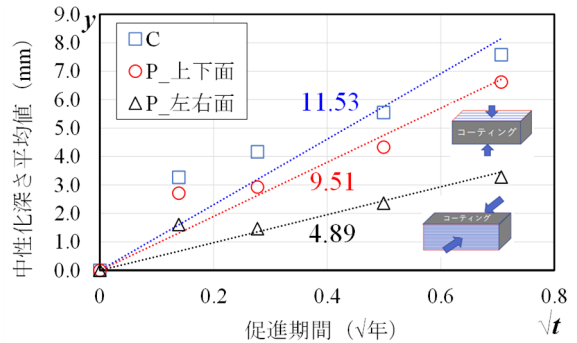


図-7 促進中性化の計測結果

Fig.7 Test results of accelerated carbonation

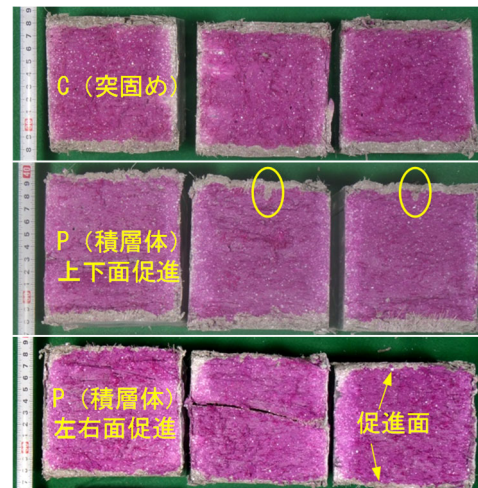


写真-1 促進26週後の中性化状況

Photo.1 Conditions of cross section after 26 weeks of accelerated neutralization

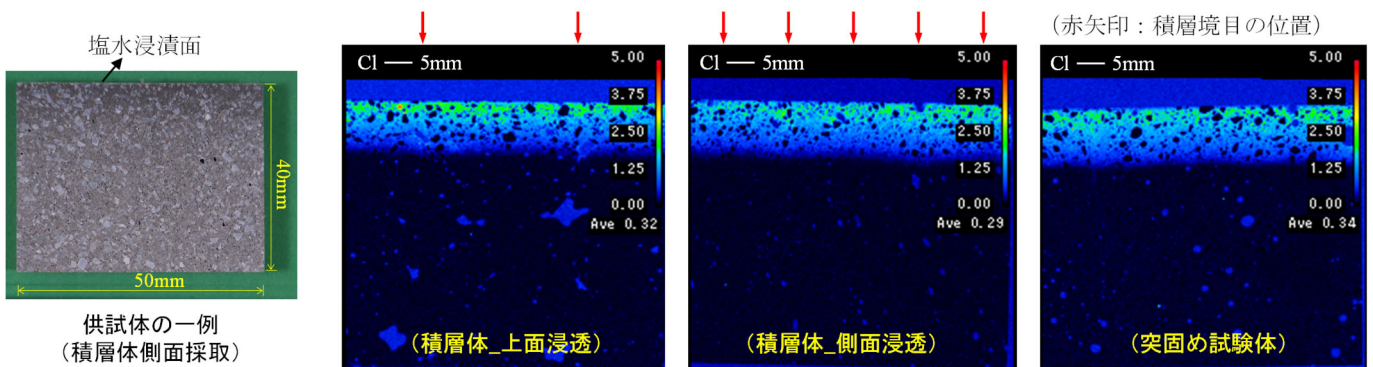


写真-2 塩化物イオンの浸透状況 (浸漬期間: 52週)

Photo.2 Chloride penetration conditions at the age of 52 weeks

性化深さの変動は、積層境で局所的な浸透や表面の凹凸による測定結果のばらつきに起因したと思われる。

3.1.2 塩分浸透試験

浸漬期間 52 週での塩化物イオン浸透状況を写真-2 に示す。また、浸漬期間 27 週と 52 週の塩化物イオン濃度分布を図-8 に示す。同じ浸漬期間の場合、積層体における浸透方向の違いや積層体と突固め供試体の比較でも、浸透深さと濃度勾配についていずれも有意な差異が認められなかった。同配合の積層ブロックから採取したコアの強度試験の結果から、力学特性の異方性が確認されているが⁸⁾、塩化物イオンの浸透が積層境目で進む傾向はみられなかった。3D プリントによって製作した積層体は、突固め作製方法と同等な塩分浸透抵抗性を有しており、面状に均等に浸透している。

図-8 によると、浸漬期間 27 週と 52 週の塩分浸透深さの平均値はそれぞれに 7.9mm と 9.1mm であり、浸漬期間が約 2 倍になったにも関わらず 1mm 程度しか増加せず停滞している。一方で、塩化物イオン濃度については、浸漬面付近において 27 週から 52 週にかけて 0.64% から 1.39% に増加し、これに応じて濃度勾配も大きくなることを見受けられる。

3.2 屋外暴露試験

3.2.1 中性化深さ

図-9 に暴露前後の中性化深さの平均値を示す。同図の上部には、積層体における計測位置を示しており、それぞれ最も中性化しにくいと思われる積層体断面の幾何中心、および中性化が進行しやすいと思われる層間や列間で計測した。ここで、断面幾何中心を積層中央、層間や列間を積層境と呼ぶ。橋脚の埋設型枠は、暴露 1 年後に中性化の進行がほぼ観察されなかった。ただし、切削作業によって中性化していない部分のアルカリが全断面に付着した可能性があることも考えられることから、採取した試料を割裂して積層境の中性化深さについても調べた。その結果、上述の結果と同様、積層中央での中性化が見られず、積層境においても最も深い箇所でも 2mm 程度（写真-3）であった。梁の埋設型枠については、図-9 に示すように暴露前後や積層箇所によって大きな差異があった。屋内で約 1 年間静置した後、積層中央と積層境での中性化深さの平均値はそれぞれ 2.0mm と 4.6mm になったが、屋外暴露 1 年後には 6.4mm と 8.2mm になり、いずれも 4mm 程度進行した。

ここで、橋脚と梁はそれぞれ積層体の側面と底面が暴露面である。これらの結果は、前節で述べた室内促進試験と同様、積層体の層間は密着度が高いが、隣り

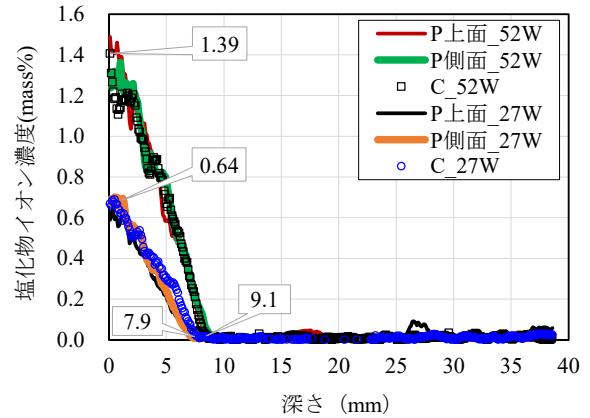


図-8 塩分浸透方向での塩分濃度分布

Fig.8 Concentration distribution of chloride in the direction of penetration

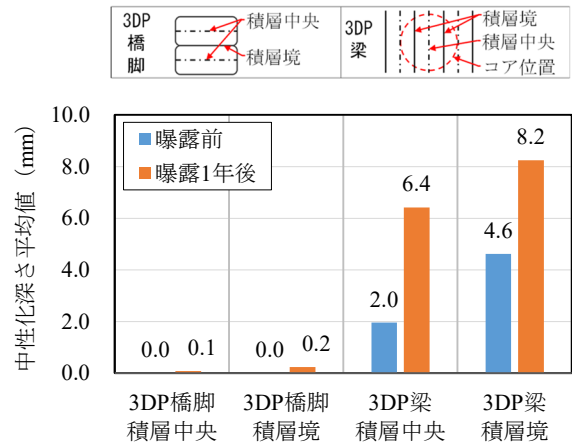


図-9 屋外暴露前後の中性化深さ

Fig.9 Neutralization depth before and after outdoor exposure

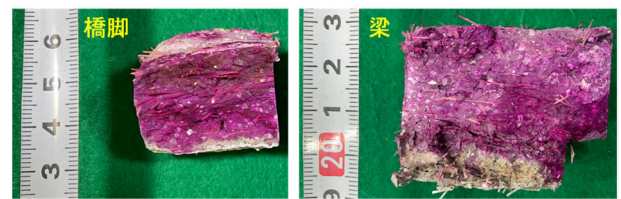


写真-3 暴露 1 年後の積層境での中性化深さ状況

Photo.3 Neutralization depth of laminated boundaries after 1 year exposure

合う列の間では物質移動が生じやすいためであると考えられる。

3.2.2 表層透気係数

暴露前後の表層透気係数と電気抵抗率の計測結果を図-10 に示す。暴露前後の電気抵抗率は 100kΩcm 程度であり、ほぼ同様な範囲に位置している。また、屋外暴露前の表層透気係数は「良」あるいは「一般」の範囲内であったが、暴露 1 年後にすべて「優」の領域に入っており、表層品質が明らかに向上した。このこと

は、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されたためと推測される。

3.2.3 細孔径分布の結果

橋脚の埋設型枠の細孔構造の変化を確認するため、図-11のように細孔径分布を測定した。ここでは、主に毛細管空隙およびゲル空隙である2000nm以下の空隙に着目し、屋外暴露により変化が生じていないか確認を行う。同図より、屋外暴露前の試料は、供試体採取箇所にかかわらず二つのピークが現れ、それぞれ100nm付近と10~30nm範囲内であった。暴露1年後では、いずれも小径側へシフトする傾向がみられた。暴露期間中の降水の影響により水和反応が進んだためと考えられる。屋外暴露試験については、今後も継続し、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) 促進中性化試験では、積層体の上下面と左右面において中性化の進行に異方性が認められたが、突固め作製した供試体に比べて中性化に対する抵抗性が高い傾向がみられた。また、屋外暴露した埋設型枠として使用した積層体においても中性化の進行に異方性がみられた。

(2) 積層製作した試験体は、突固め製作した試験体と同等な塩分浸透抵抗性を有しており、浸漬期間の増加に伴う浸透深さの増加は僅かであった。

(3) 埋設型枠として用いた積層体は、屋外暴露1年後に表層透気係数が向上した。また、細孔構造について、2000nm以下の細孔が小径側にシフトする傾向がみられた。これは、暴露期間中の降水による水分補給により水和反応が進んだためと推測された。

謝辞

本稿の試験体作製にあたり、太平洋セメント(株)より材料を提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 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，2021。
 2) J. Xiao, et al.: Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities, Cement and Concrete Composites, Vol.122, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104115>

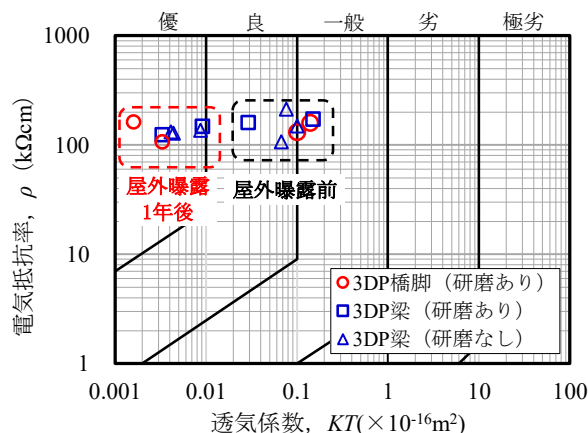


図-10 表層透気係数の測定結果

Fig.10 Results of surface air permeability test

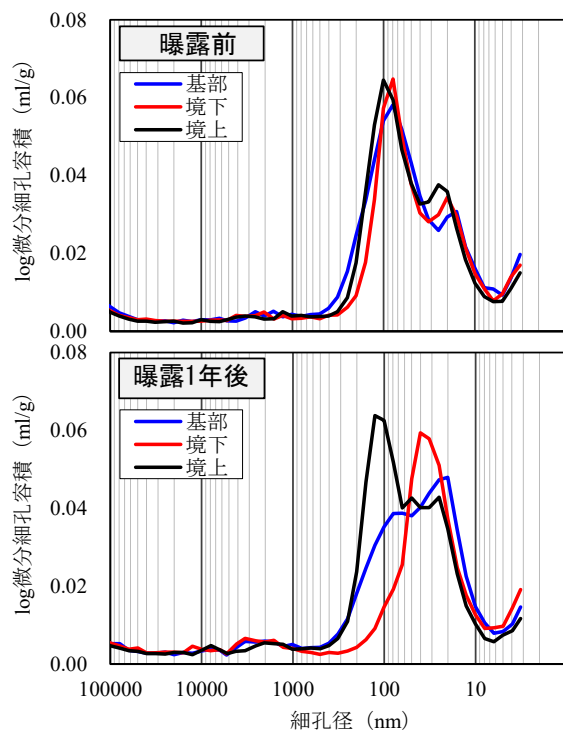


図-11 水銀圧入法による細孔径分布の結果

Fig.11 Results of pore size distribution before and after exposure

3) K. Kinomura, et al.: Application of 3D printed segments designed by topology optimization analysis to a practical scale prestressed pedestrian bridge, Proc. of 2nd Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication -Digital Concrete 2020-, RILEM book series vol.28, pp.658-668, 2020.
 4) 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.
 5) Babafemi, A.J., et al.: A concise review on interlayer bond strength in 3D concrete printing, Sustainability, Vol.13, 2021.
<https://doi.org/10.3390/su13137137>
 6) 前堀伸平, 黒澤真一, 小川洋二, 張文博: 3D プリンティ

- ングに適した短繊維補強モルタルの配合および押出性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1373-1378, 2021.
- 7) 河村圭亮, 川端康平, 白井達哉, ほか: 3D プリンティングで製作した埋設型枠を有する RC 梁部材の曲げ挙動に関する実験的検討, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, V-260, 2022.
- 8) 鈴木三馨, 白井達哉, 木ノ村幸士, 小川洋二: 3D プリンティングで製作した埋設型枠の強度特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1385-1390, 2021.