

建設用3Dプリンティングにおける 顔料を用いた積層体の色評価に関する研究

宮 澤 友 基^{*1} 梶 田 秀 幸^{*1}
南 浩 輔^{*1}

要 旨

建設用3Dプリンティングは、省人化や無人化施工の実現性を高める手段として注目されている。また、自由度の高い造形や積層痕を内外装デザインの一つとして意図的に作り出すことができる。さらに、材料に顔料を組み合わせることで、造形物のデザイン性や用途の幅が広がり、よりデザインの自由度を向上させることが可能だと考えられる。しかし、積層痕を有する造形物（以下、積層体）を、目標の色調とするためには、試験練り等に加えてモックアップの作製ならびに発色の確認など多くの労力を要する。

本研究では、顔料を用いた積層体と保管や測定が容易な円柱供試体の材齢経過に伴う色の変化の関係性を把握するため、屋内環境下で材齢約1.8年まで色の測定を行った。その結果、材齢7日時点の積層体と円柱供試体の $\Delta L^*a^*b^*$ を測定することで、それ以降の色の変化を円柱供試体のみで確認できる可能性がある。また、材齢9か月時点では、屋外と屋内に暴露した積層体の $L^*a^*b^*$ 値の測定結果の差は極めて小さく、屋外に暴露された積層体においても円柱供試体による色の把握が可能と考えられる。

キーワード 3Dプリンティング・付加製造技術／カラーモルタル・コンクリート／顔料／色差

目 次

- | | |
|---------|-----------------|
| 1. はじめに | 4. 屋外暴露した顔料を用いた |
| 2. 実験概要 | 積層体との比較 |
| 3. 実験結果 | 5. まとめ |

A STUDY ON COLOR EVALUATION OF LAMINATED OBJECTS USING PIGMENTS IN 3D PRINTING FOR CONSTRUCTION

Yuki MIYAZAWA Hideyuki KAJITA
Kosuke MINAMI

Synopsis:

3D printing for construction is attracting attention as a means of increasing labor saving and automation, and allows flexible shapes and lamination marks to be incorporated into design. Adding pigments to materials can further improve the flexibility of design and application for molded objects. However, achieving the desired color in laminated objects requires considerable effort, such as test mixing, mockup creation, and color checking.

In this study, color measurements were conducted for up to 1.8 years indoors to clarify the relationship between color changes in pigmented laminated objects and easily handled cylindrical test pieces over time. The results suggest that by measuring the $\Delta L^*a^*b^*$ values of both at seven days, subsequent color changes can be monitored using only cylindrical test pieces. Furthermore, the color difference between laminated objects exposed outdoors and indoors for nine months was small, indicating that cylindrical test pieces can also be used to assess color changes in outdoor-exposed laminated objects.

* 1 本店 ICI テクノロジーセンター 建設材料グループ

1. はじめに

近年、海外のみならず本邦においても、建設分野における革新的な付加製造技術として、コンクリートやモルタルといったセメント系材料を用いた 3D プリンティング技術（以下、3DCP）が注目を集めている¹⁾。建設分野では、建設就労者が供給制約下で減少する中、生産性を維持・向上するため、建設工事の自動化・省人化に資する技術が強く求められる状況となっている。このような社会背景のもと、3DCP による施工は、従来の施工方法と比較して、PC 上で設計した 3D モデルから機械により直接構造物を出力することができ、省人化や無人化が可能となる。また、型枠不要の施工方法は、構造物として直線的な形状にとらわれることがなくなるため、意匠設計によるデザインの自由度向上や構造設計の合理化が期待される。さらに、一般的な 3DCP を用いた造形物は側面に積層痕が現れることから、この積層痕を内外装のデザインの一つとして意図的に造形し、特徴的な仕上げとすることも試みられている²⁾。加えて、使用材料に着色用の顔料を組み合わせることでカラーコンクリート・モルタルとすることで、造形物のデザイン性や用途の幅が拡がり、よりデザインの自由度を向上させることが可能だと考えられる。

一方、積層痕を有する造形物（以下、積層体）に顔料を使用して、目標とする色調にするためには、事前の試験練りによる発色性の確認や、積層体表面の凹凸がある状態での色の測定のためのモックアップ作製、経時変化による色変化の確認など多くの労力を要することとなる。また、カラーコンクリートやモルタルの発色性に関する研究例³⁾はあるものの、3DCP 分野においては、材料特性や積層体の耐久性といった点に注目する研究⁴⁾が

多く、3DCP の使用材料に顔料を用いたモルタルの発色性に関する報告は少ない。

著者らは既往の研究^{5),6)}において、3DCP を用いて作成した積層体と圧縮強度試験などで一般的に用いられる円柱供試体を日射や風雨の影響を受けない屋内環境に存置して材齢ごとに色を測定し、それぞれの色の経時変化の確認や、円柱供試体により積層体の色を推定する方法の検討などを実施してきた。本研究では、既往の研究⁶⁾からさらに材齢が経過した積層体と円柱供試体の色の経時変化やその色差を把握するため、材齢約 1.8 年まで色の測定を実施し、測定結果と積層体の色の管理方法について検討した。

さらに、屋外環境に暴露した積層体の色変化を把握するため、既往の研究⁵⁾で作製した積層体を屋外暴露し、色の測定を行った結果についても報告する。

2. 実験概要

本研究では、顔料の添加率や混合割合を変えたモルタルを用いた、凹凸面を有する積層体と平滑面を有する円柱供試体の材齢に伴う色の変化を含めて評価した。評価対象は、顔料未添加の灰色（ブレン）、青色、緑色および青と緑の顔料を混合した青緑色とした。

2.1 使用材料および調査

使用材料を表-1 に示す。本試験では、既往の研究^{2),5),6)}で実績のある 3DCP 材料を改良し、発色性を高めたものを用いた。顔料は粉体系の 2 色を使用し、3DCP 材料を構成する結合材である白色ポルトランドセメント（WPC）に対して質量比で顔料添加率を設定し、外割で添加した。顔料の調査を表-2 に示す。練混ぜは 3DCP 材料および顔料を投入後 15 秒空練りし、練混ぜ水を投入した後、120 秒の本練りを行った。WPC に対する顔料添加率および混合割合は、単色で添加したフレッシュ状態のモルタルを目視で確認し、同程度の発色となるよう単色の添加率を青：8%、緑：5%とし、混合色である青緑は、青の混合割合を高めることで発色を調整した。

表-1 使用材料

材料	略称	備考
プレミックス材料	P	結合材種類： 白色ポルトランドセメント(WPC)
着色顔料	青	B 無機顔料, 密度:3.8g/cm ³
	緑	G 無機顔料, 密度:5.2g/cm ³
練混ぜ水	W	上水道水

表-2 顔料の調査

調査No.	調査記号	顔料添加率 (WPC×%)	顔料混合割合 (B:G)	目視による 発色
①	ブレン	0	—	灰色
②	1%添(B:G=1:0)	1	1:0	青色
③	3%添(B:G=1:0)	3		
④	5%添(B:G=1:0)	5		
⑤	8%添(B:G=1:0)	8		
⑥	1%添(B:G=0:1)	1	0:1	緑色
⑦	3%添(B:G=0:1)	3		
⑧	5%添(B:G=0:1)	5		
⑨	3%添(B:G=2:1)	3	2:1	青緑色
⑩	5%添(B:G=2:1)	5		
⑪	8%添(B:G=2:1)	8		
⑫	8%添(B:G=3:1)	8	3:1	
⑬	8%添(B:G=4:1)	8	4:1	

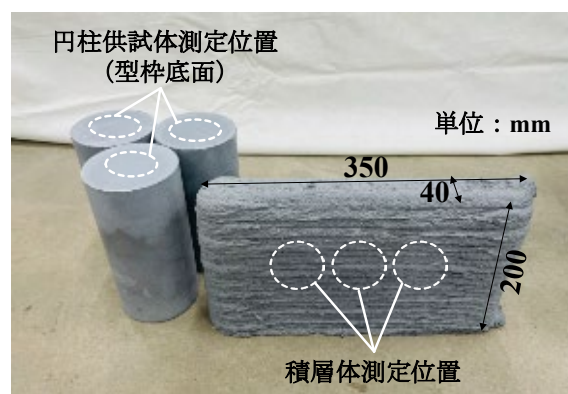


写真-1 作製した積層体および円柱供試体

2.2 試験体の作製

試験体は、各調合で積層体1体、円柱供試体（Φ100×200mm）3体を作製した。作製した積層体および円柱供試体を写真-1に示す。積層体の作製には著者らが開発したガントリー式3Dプリンタ²⁾を使用して造形した。円柱供試体はJIS A 1132（コンクリートの強度試験用供試体の作り方）に準拠して作製した。養生条件は、積層体は積層後翌日まで湿布養生とし、円柱供試体は翌日に脱型後、それぞれ20℃、60%RHの恒温恒湿環境下で気中養生とした。試験体の暴露環境として、材齢1～200日間は養生条件と同一の恒温恒湿環境のまま存置し、材齢201日以降は空調設備のない屋内環境に暴露した。

2.3 試験体の色彩の計測方法

本研究における色の評価は、JIS Z 8781-4（測色—第4部：CIE 1976 L*a*b*色空間）に示されるL*a*b*色空間を用いることとした。測定には、色彩色差計（KONICA MINOLTA製）を使用し、材齢1, 7, 28, 200, 400, 484, 546, 600および645日（約1.8年）におけるL*, a*およびb*を測定した。測定環境は20℃、60%RHの恒温恒湿環境下とし、材齢400日以降の測定についても少なくとも測定2日前に試験体を恒温恒湿室環境に移動してから測定を実施した。測定の様子を写真-2に、使用した色彩色差計の主な測定条件を表-3に示す。測定ヘッドは、比較的広い測定面積を平均して測定する場合に有効なΦ50mmの遮光筒を使用した。採用した理由は、本研究の積層体が積層痕を有し、その一部を特定して測定することが難しいためである。測定は写真-1に示す位置で行い、積層体は3箇所を1回ずつ計3回の測定とし、円柱供試体は型枠底面を1回ずつ計3体の測定結果の平均とした。

3. 実験結果

L*a*b*色空間の立体イメージ⁷⁾を図-1に、L*a*b*色空間の値の表す意味を表-4に示す。L*a*b*色空間では、明度をL*、色彩と色相を示す色度をa*b*で表している。また、本研究では基準として積層体のL*a*b*値から円柱供試体の値を差し引いた値を、それぞれΔL*, Δa*, Δb*（以下、ΔL*a*b*）とし、各値の正負の表す意味を表-5に示す。

ここで、色差を評価するうえで、各L*a*b*値はどの程度の差があると異なる色として認識できるか、事前の色見本および試験練り時の工学者判断を踏まえて定義した。すべての指標において、色差の絶対値が3.0未満の値は、差や変化がほとんどないとして評価した。

3.1 測色結果および材齢の影響

積層体および円柱供試体のL*a*b*値の測定結果を図-2に示す。凡例では、積層体の結果を「調査記号_積」、円柱供試体の結果を「調査記号_円」とした。積層体および

円柱供試体のL*a*b*値の差ΔL*a*b*の結果を表-6に、材齢7日のΔL*a*b*_7dを基点とした各材齢（T日）のΔL*a*b*_Tdの差を図-3に示す。

(1) L*（明度）について

図-2（上段）より、L*は、すべての水準で35～60の範囲となり、明るさが中間付近を示す結果となった。また、積層体（実線）の方が円柱供試体（破線）より値が小さい結果となった。これは、色自体が円柱供試体の方が明るいことが一因だと考えられる。また、測色において、円柱供試体の測定面は平滑であることに対し、積層体の測定面は3DCPの特徴である積層痕による凹凸が存在し、測定面と押し当てた遮光筒との間にわずかに隙間ができてしまった。これにより、外部からの光の入り込みや、外部への反射光の漏れが、積層体の測定結果に影響を与えた要因の一つではないかと考えられる。材齢546～600日にかけてL*が減少する傾向がみられた。今回、測定材



写真-2 色測定の様子

表-3 色彩色差計の主な仕様

照明・受光工学系	大面積拡散照明 垂直受光方式
測定用光源	パルスキセノンランプ
測定径	Φ50mm
観察条件	CIE2°視野等色閑 数近似： (x2λ, yλ, zλ)
観察光源	D65

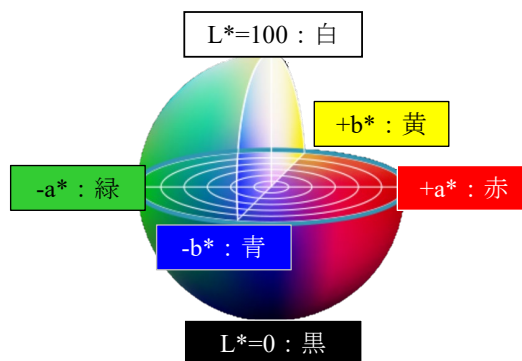


図-1 L*a*b*色空間の立体イメージ

表-4 L*a*b*色空間の値の表す意味

記号	属性	L*a*b*値の表す意味	
L*	明度	0：暗い(黒)	100：明るい(白)
a*	色度	負の値：緑寄り	正の値：赤寄り
b*		負の値：青寄り	正の値：黄寄り

表-5 ΔL*a*b*における正負の表す意味

L*_n - L*_m	正の値	負の値
ΔL*_n-m	積層体の方が明るい	積層体の方が暗い
Δa*_n-m	積層体の方が赤寄り	積層体の方が緑寄り
Δb*_n-m	積層体の方が黄寄り	積層体の方が青寄り

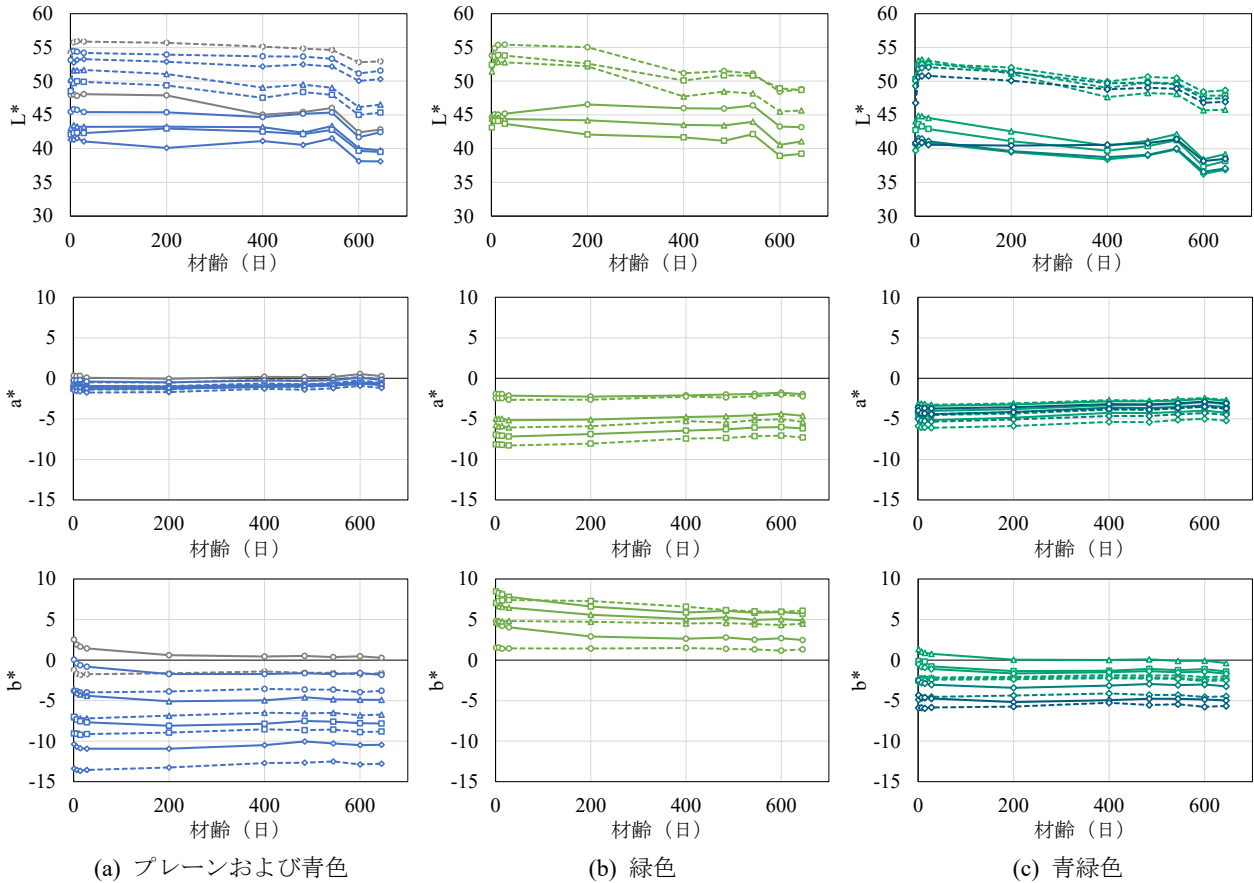
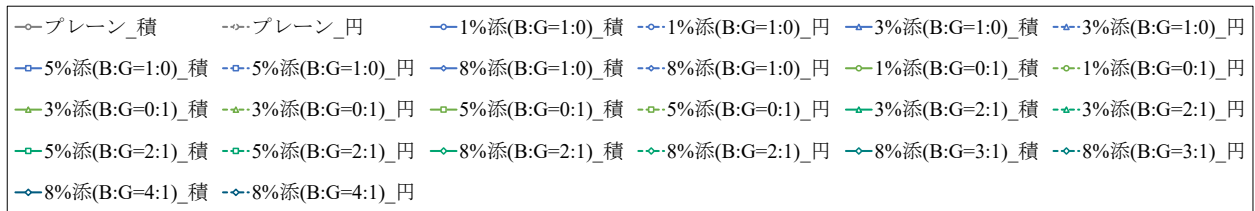


図-2 積層体および円柱供試体の $L^*a^*b^*$ 値

齢 200 日以降は空調設備のない屋内環境に暴露しており、屋内環境の湿度や 20℃、60%RH 環境へ移動してから測定するまでの期間が L^* の測定結果に影響を及ぼしたと考えられる。既往の研究⁸⁾においても、吸湿過程における相対湿度が 85～100%、放湿過程における相対湿度が 55～100%の範囲において、相対湿度が大きくなるほど L^* の値が小さくなる傾向が大きいことが示されている。

図-2（上段）より、材齢の影響として、積層体および円柱供試体において、(a)プレーンおよび青色の調合における L^* は、材齢 546 日までは大きい変化はみられなかった。(b)緑色および(c)青緑色の調合における L^* は、1%添(B:G=0:1)_積を除いた積層体および円柱供試体において材齢 7 日まででわずかに上昇し、7 日以降は 400 日まで減少する傾向であった。

図-2（上段）および表-6 より、 ΔL^* は、材齢 1～7 日にかけてすべての調合で減少し、7 日以降はプレーンおよび 1%添(B:G=1:0)でわずかに減少、それ以外の調合でわずかに増加する傾向であり、400 日以降はすべての調合で大きな変化がない結果となった。図-3 に示す材齢 7 日の Δ

L^*_7d を起点とした各材齢の ΔL^*_Td との差は、緑の顔料を用いた 1%添(B:G=0:1) および 3%添(B:G=0:1)を除き、その差は 3.0 未満となった。したがって、積層体と円柱供試体の L^* に値の差はあるが、その差の増減傾向は材齢 7 日以降はほぼ同程度であった。

(2) a^* （緑赤の色度）について

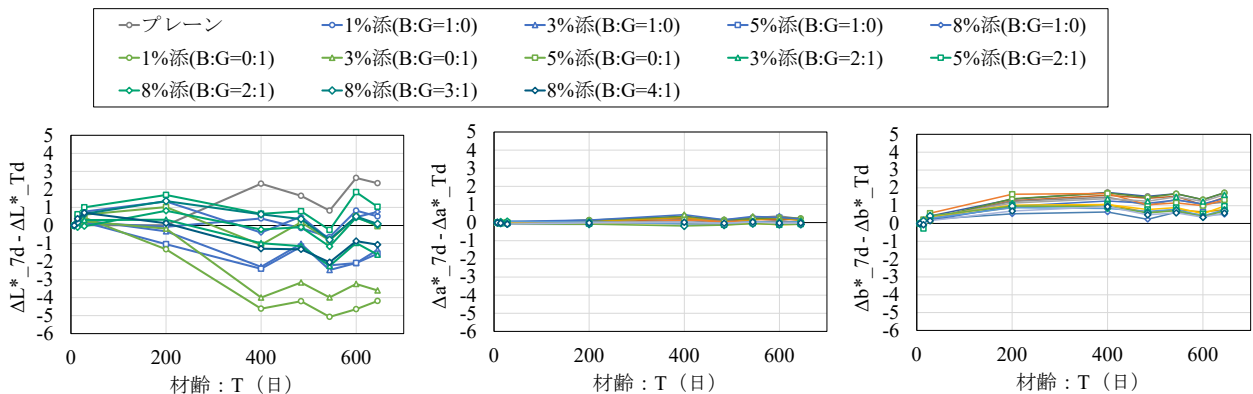
図-2（中段）より、 a^* は、緑の顔料を用いた緑色および青緑色の調合において、積層体（実線）および円柱供試体（破線）ともに、緑寄りを表す負の方向の結果となった。また、積層体より円柱供試体の値がわずかに小さく、緑寄りであった。(a)プレーンおよび青色の調合においては、積層体および円柱供試体ともに 0 付近であり、赤緑の要素がほとんどない結果となった。

材齢の影響として、積層体および円柱供試体において、すべての調合で a^* は材齢 1 日から値に大きな変化はなかった。

Δa^* は、すべての調合で 1.2 以下（表-6 参照）であり、図-3 に示す材齢 7 日の Δa^*_7d を起点とした各材齢の Δ

表-6 積層体および円柱供試体の $L^*a^*b^*$ 値の差 $\Delta L^*a^*b^*$

色差	材齢 (日)	調合記号												
		プレーン	1%添 (B:G=1:0)	3%添 (B:G=1:0)	5%添 (B:G=1:0)	8%添 (B:G=1:0)	1%添 (B:G=0:1)	3%添 (B:G=0:1)	5%添 (B:G=0:1)	3%添 (B:G=2:1)	5%添 (B:G=2:1)	8%添 (B:G=2:1)	8%添 (B:G=3:1)	8%添 (B:G=4:1)
ΔL*	1	-6.31	-7.65	-7.15	-6.43	-8.79	-9.15	-6.96	-9.28	-6.75	-7.54	-10.30	-8.64	-5.90
	7	-7.77	-8.62	-8.15	-7.41	-11.44	-9.79	-8.19	-9.50	-8.21	-8.66	-11.72	-10.32	-9.51
	14	-8.09	-8.63	-8.33	-7.66	-11.61	-10.32	-8.25	-9.79	-8.40	-9.27	-11.62	-10.49	-9.88
	28	-7.78	-8.77	-8.44	-7.59	-12.20	-10.22	-8.41	-10.10	-8.51	-9.66	-11.69	-10.96	-10.21
	200	-7.79	-8.54	-7.82	-6.37	-12.77	-8.47	-8.01	-10.52	-8.53	-10.35	-12.54	-11.67	-9.63
	400	-10.09	-9.01	-5.86	-5.01	-11.04	-5.18	-4.19	-8.43	-7.23	-9.31	-11.50	-10.93	-8.22
	484	-9.41	-8.47	-7.13	-6.24	-11.93	-5.59	-5.03	-9.68	-7.06	-9.44	-11.63	-10.67	-8.19
	546	-8.59	-7.97	-5.68	-5.19	-10.66	-4.72	-4.20	-8.67	-5.96	-8.41	-10.56	-9.53	-7.47
	600	-10.41	-9.44	-6.06	-5.33	-11.90	-5.15	-4.94	-10.00	-7.24	-10.51	-12.16	-10.82	-8.64
	645	-10.12	-9.12	-6.80	-5.84	-12.19	-5.60	-4.58	-9.46	-6.59	-9.69	-11.74	-10.41	-8.44
Δa*	1	0.70	0.55	0.35	0.16	0.25	0.54	0.82	1.20	-0.05	0.58	0.96	0.80	0.38
	7	0.60	0.51	0.37	0.16	0.38	0.51	0.95	1.13	-0.11	0.48	1.04	0.84	0.61
	14	0.60	0.53	0.35	0.15	0.40	0.52	0.90	1.12	-0.07	0.51	0.98	0.87	0.64
	28	0.57	0.55	0.37	0.19	0.46	0.53	0.89	1.11	-0.14	0.51	0.96	0.91	0.69
	200	0.46	0.47	0.31	0.10	0.47	0.38	0.81	1.18	-0.15	0.54	1.02	0.93	0.63
	400	0.36	0.35	0.07	-0.11	0.23	0.16	0.51	0.99	-0.15	0.53	1.12	1.02	0.59
	484	0.45	0.42	0.26	0.17	0.45	0.36	0.79	1.08	-0.07	0.60	1.11	0.98	0.64
	546	0.31	0.32	0.10	0.01	0.37	0.29	0.61	1.06	-0.17	0.51	0.98	0.90	0.58
	600	0.34	0.33	0.01	-0.12	0.26	0.23	0.67	1.05	-0.10	0.61	1.02	0.95	0.63
	645	0.38	0.36	0.15	0.05	0.44	0.29	0.75	1.11	-0.12	0.57	0.98	0.94	0.63
Δb*	1	3.72	3.85	3.42	2.06	3.01	3.31	2.40	1.44	3.65	2.41	2.18	2.39	1.56
	7	3.59	3.43	3.01	1.75	2.85	2.87	1.83	0.97	3.26	1.86	1.59	1.93	1.26
	14	3.48	3.36	2.93	1.69	2.78	2.80	1.81	0.75	3.12	2.14	1.60	1.78	1.33
	28	3.17	3.15	2.78	1.45	2.62	2.61	1.64	0.39	2.93	1.49	1.30	1.50	1.10
	200	2.23	2.15	1.77	0.85	2.31	1.48	0.86	-0.67	2.12	0.83	0.71	0.95	0.56
	400	1.85	1.84	1.53	0.68	2.21	1.16	0.56	-0.72	1.87	0.80	0.75	0.97	0.32
	484	2.07	2.01	1.98	1.13	2.62	1.40	0.70	-0.08	2.02	1.08	0.91	1.34	0.77
	546	1.93	1.91	1.67	0.97	2.23	1.20	0.51	-0.18	1.77	0.97	0.81	1.21	0.66
	600	2.26	2.39	1.93	1.11	2.38	1.53	0.73	-0.04	2.03	1.31	1.17	1.55	0.91
	645	1.87	1.96	1.81	0.98	2.34	1.15	0.42	-0.36	1.65	0.89	0.82	1.22	0.68

図-3 $\Delta L^*a^*b^*_{7d}$ を基点とした $\Delta L^*a^*b^*_{Td}$ の差

a^*_{Td} との差についてもほぼ 0 で変化がなかった。したがって、積層体と円柱供試体における a^* の差はほとんどなく、経時変化によっても Δa^* はほとんど変化しなかった。

(3) b^* (青黄の色度) について

図-2 (下段) より、 b^* は、青の顔料を用いた青色および青緑色の調合において、積層体 (実線) および円柱供試体 (破線) とともに、青寄りを表す負の方向の結果となった。プレーンにおいては 0 付近、緑の顔料を用いた緑色においては黄寄りを表す正の方向を示す結果となった。既往の研究³⁾においても、緑の顔料を用いたモルタルは黄寄りを示している。また、5%添(B:G=0:1)の材齢 200 日以降を除いて、積層体より円柱供試体の b^* が小さく、青寄りであった。

材齢の影響として、すべての調合において、円柱供試体の b^* にほとんど変化はなく、積層体の b^* は、材齢 200 日までは経時に伴ってわずかに減少し、それ以降はほと

んど変化がない傾向となった。

図-2 (下段) および表-6 より、 Δb^* は、顔料の違いによる明確な差はなかったが、プレーンおよび顔料添加率の小さい 1, 3% 添加の調合においてわずかに大きい傾向がみられた。また、材齢 200 日まで減少傾向となり、それ以降ほとんど変化はなかった。図-3 に示す材齢 7 日の Δb^*_{7d} を起点とした各材齢の Δb^*_{Td} との差は、すべての調合で 2.0 以下となった。したがって、積層体と円柱供試体における b^* の差の増減傾向は材齢 7 日以降ほぼ同程度であった。

3.2 顔料を用いた積層体における色の管理方法に関する検討

3.1 節より、積層体と円柱供試体において、 a^* の差はほとんどなく、 L^* と b^* は差があるものの、材齢 7 日以降の挙動は積層体および円柱供試体でほぼ同様であることがわかった。したがって、本研究の条件において、顔料を



写真-3 顔料を用いたグラデーションを有する 3DCP 壁



写真-4 材齢 9 か月が経過した 3DCP 壁の近影

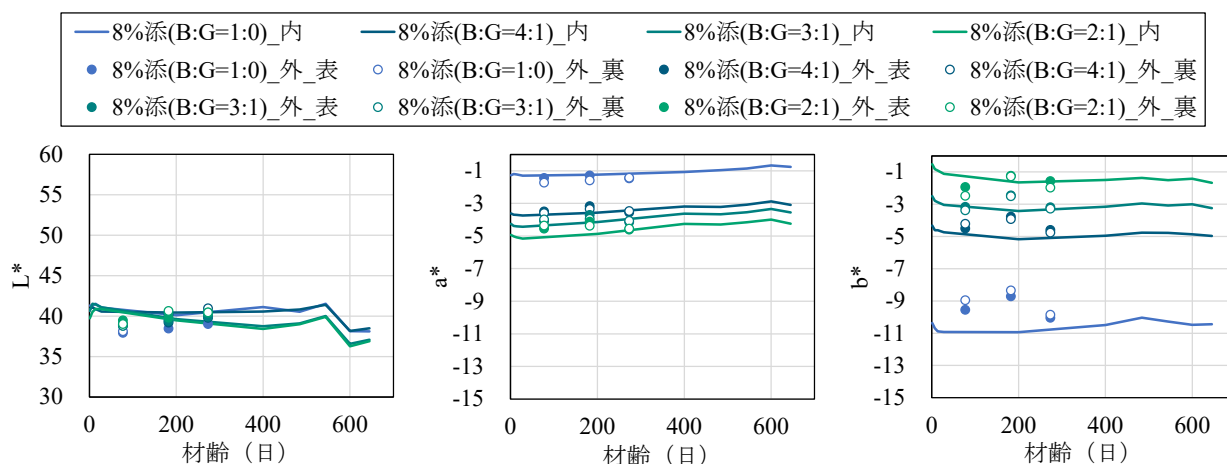


図-4 屋内と屋外それぞれに暴露した積層体における $L^*a^*b^*$ 値の比較

用いた積層体の色やその変化は、材齢7日時点の積層体と円柱供試体の $\Delta L^*a^*b^*$ を測定することで、それ以降は保管や測定が容易な円柱供試体のみで色の把握ができる可能性があることがわかった。また、より精度よく色の変化を把握することが求められる場合は、材齢200日まで積層体と円柱供試体の $\Delta L^*a^*b^*$ を確認しておく必要がある。

ただし、明度 L^* においては、前述した通り、測定結果に湿度や含水比が影響を及ぼすため、積層体および円柱供試体が暴露される環境条件に注意する必要がある。

ここで、円柱供試体による積層体の色の把握ができる可能性があることはわかったものの、円柱供試体を保管や測定する手間は残ってしまう。理想的な管理方法としては、顔料を使用した積層体の将来的な色を、例えば材齢28日の円柱供試体の色から推定できることである。そうすることで、積層体のモックアップ作製手間や、円柱供試体の保管および色測定も省くことができ、積層体に顔料を使用する際に必要な労力を少なくできると考えられる。今後も、屋内暴露した試験体の色測定を継続し、経時変化の傾向を把握することで、円柱供試体から積層体の色を推定する方法を検討していく。

4. 屋外暴露した顔料を用いた積層体との比較

2, 3 章では、日射や風雨、粉塵などの屋外環境条件を

排して実験を行ったが、実際に屋外環境に暴露した積層体の色変化を把握するために、青および緑の顔料を用いたグラデーションを持つ積層体を組み合わせた 3DCP 壁「WAV3D®」^{5),9)} を作製した。屋外に設置した 3DCP 壁を写真-3 に示す。本積層体は、顔料添加率を一律で 8% とし、青緑の顔料を B:G=1:0~1:2 の混合割合の範囲で設定した。屋外への設置は作製から 2.5 か月経過した時点で行った。色の測定は 2.3 節と同様に $L^*a^*b^*$ 色空間を用いて、設置場所にて材齢 2.5, 6 および 9 か月に晴れまたは曇りの日に測定を実施した。測定は、写真-3 に写っている面を表面（西面）、反対側を裏面（東面）とし、各積層体の面で 6 箇所を 1 回ずつ計 6 回の測定結果の平均とした。

屋内および屋外において共通の調査となる 8% 添 (B:G=1:0)、8% 添 (B:G=4:1)、8% 添 (B:G=3:1)、8% 添 (B:G=2:1) の 4 調査において、3 章で示した積層体（屋内暴露積層体）の測定結果を「調査記号_内」、3DCP 壁に用いた屋外暴露積層体を「調査記号_外_表または裏」とし、それぞれを比較した結果を図-4 に示す。各調査における $L^*a^*b^*$ 値の経時変化は 3 未満であった。屋内暴露積層体との差においても、8% 添 (B:G=1:0) の b^* で差が認められるが、すべての調査で 3 未満となりほぼ同様の $L^*a^*b^*$ 値を示す結果となった。 L^* においては、屋外暴露積層体は屋内暴露積層体と比較してわずかに増加する傾向となった。こ

れは、写真-4 に示す材齢 9 か月の測定時の 3DCP 壁の近影からもわかる通り、表面にわずかに白華が発生していることが原因だと考えられる。

材齢 9 か月時点では、屋内と屋外環境による $L^*a^*b^*$ 値の差はほとんど確認されなかったが、屋外環境においては白華の進行や日射による劣化、粉塵などの付着などによる色の変化が考えられるため、引き続き色の測定を継続し、屋外暴露した試験体の経過を確認していく予定である。

5. まとめ

3DCP において、顔料を添加した材料で作製した積層体を、日射や風雨の影響を受けない屋内環境で材齢ごとに色を材齢約 1.8 年まで測定し、それぞれの色の経時変化の確認や、円柱供試体による積層体の色の把握や管理方法について検討した。また、屋外環境に暴露した積層体との比較を実施し、それぞれの $L^*a^*b^*$ 値の差や色の変化を確認した。この結果、以下の知見を得た。

- (1) 明度を表す L^* は、円柱供試体より積層体の値が小さく、暗いことを示した。1%添(B:G=0:1) および 3%添(B:G=0:1)を除き、積層体と円柱供試体の L^* に値の差はあるが、その差の増減傾向は材齢 7 日以降ほぼ同程度であった。
- (2) L^* において、材齢 546~600 日にかけてすべての割合で 2~3 程度減少する傾向がみられ、これは存置環境の相対湿度や、測定前に異なる相対湿度の測定環境に試験体を移動するタイミングが測定結果に影響を及ぼしている。
- (3) 色度を表す a^*b^* において、 a^* は、積層体と円柱供試体に大きな差はなく、材齢による変化も非常に小さい。 b^* は、積層体において材齢 200 日までは材齢の経過に伴ってわずかに減少する傾向がみられ、円柱供試体は材齢による変化はほとんどなかった。積層体と円柱供試体における b^* の差の増減傾向は材齢 7 日以降ほぼ同程度であった。
- (4) 顔料を用いた積層体の色やその変化は、材齢 7 日時点の積層体および円柱供試体の $\Delta L^*a^*b^*$ を把握しておく必要はあるが、それ以降は保管や測定が容易な円柱供試体のみで色の把握ができる可能性がある。また、より精度よく色を把握することが求められる場合は材齢 200 日以降が望ましい。

- (5) 屋外環境に暴露した積層体は、材齢 9 か月時点では、屋内との $L^*a^*b^*$ 値の差はほとんどなかったが、明度に関しては、白華による L^* の増加傾向が認められた。

参考文献

- 1) 3D プリンティング技術の土木構造への適用に関する研究小委員会(364 委員会)成果報告書、土木学会、コンクリート技術シリーズ、序、I-1、II-1-9、2023.10
- 2) 宮澤友基、梶田秀幸：建設用 3D プリンティング材料における仕上げ材としての可能性に関する一考察、2022 年日本建築仕上学会大会研究発表論文集、pp.95-98、2022.10
- 3) 陣内浩、小山善行：顔料を用いた水結合材比の異なるモルタルに関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集 第 84 巻 第 765 号、pp.1367-1375、2019.11
- 4) 李晨、寺西浩司、丛启宾、梶田秀幸：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、日本コンクリート工学年次論文集、Vol.46、No.1、pp.2065-2070、2024.6
- 5) 宮澤友基、梶田秀幸、南浩輔：建設用 3D プリンティング材料における着色顔料を用いた積層体の色調評価に関する検討、2024 年日本建築仕上学会大会研究発表論文集、pp.105-108、2024.10
- 6) 宮澤友基、梶田秀幸、南浩輔：建設用 3D プリンティングにおける顔料を用いた積層体の色推定に関する研究、2025 年日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.1553-1554、2025.9
- 7) コニカミノルタ株式会社：「色色雑学」、コニカミノルタ株式会社ホームページ（2025.8 取得、<https://www.konicaminolta.jp/instruments/knowledge/color/section2/2-02/>）
- 8) 劉靈芝、菅野拓、塚越雅幸、田中亨二：セメントペーストの表面明度に及ぼす水分環境変化の影響、日本建築学会構造系論文集 第 75 巻 第 655 号、pp.1595-1600、2010.9
- 9) 前田建設工業株式会社：ニュースリリース、3D プリンティングを用いた建設部材構築技術「WAV3D」の開発・国内初適用、2024.10（2025.8 取得、<https://www.maeda.co.jp/news/2024/10/16/5544.html>）