

色調制御により情報を保存するコンクリートの製造・施工法に関する研究 Production and Construction Method for Information-Embedded Concrete by Using Color Control Technique

○八木澤 遥^{*1}, 藤本 郷史^{*2}
Haruka Yagisawa^{*1}, Satoshi Fujimoto^{*2}

*1 宇都宮大学 大学院地域創生科学研究科 大学院生

Graduate Student, Graduate Program in Architecture and Building Engineering, Utsunomiya Univ.

*2 宇都宮大学 大学院地域デザイン科学部 准教授・博士（工学）

Assoc.Prof., Dept. of Architecture and Urban Design, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

Summary: The purpose of this paper is to develop a technology to store information in cementitious material itself in machine-readable format for a long-term period. This idea enables to mitigate the loss of information stored as design documents, which may happen during the long-term period of storage by owners or designers. We propose an information storage technology by embedding QR codes implemented by color control of cementitious materials. The followings were experimentally verified; fresh properties required for 3D printing application, bonding strength between code modules in order not to degrade the strength of building components, and machine readability of QR code composed of color controlled cementitious materials.

キーワード: 色調制御; QR コード; コンクリート; 3D プリント; 情報の保存

Keywords: color control; QR code; concrete; 3D printing; information storage.

1. はじめに

建築部材には、施工後に目視で材料の種類や劣化の状態等を確認できない箇所が多くある。したがって、建築物を適切に維持保全するためには、維持管理・補修等の担当者が入手・確認できるように、設計・製造・施工時の情報が保存されている必要がある。このような必要性から、設計図書や工事記録は、一般に印刷物やデジタルデータの形で設計・施工者、あるいは所有者により保存される。法令上も保存義務が規定されている。例えば、建築士法では設計図書に15年間の保存義務がある。

以上のような重要性・必要性に関わらず、実際の建築物では情報の保存が十分でないことがある¹⁾。本報では、建築物と設計図書の保管場所が異なるために紛失等の情報の喪失が生じるとの考え方にに基づき、長期に読出し可能な形式で建築部材自体に情報を保存する技術の開発を目標とした。

素朴には、部材への番付なども建築部材自体への情報保存である。近年では、より多くの情報を保存したいという考えから、ICタグを部材に埋設²⁾、添付³⁾する方法が建築分野で提案されている。この方法は、コンピュータシステムと親和性が高く⁴⁾、情報管理が容易という利点がある。他方で、建築物の寿命と比べてICタグを構成する電子部品の寿命が一般に短い⁵⁾ために、ICタグの交換などの手間が生じるなど、長期の情報保存に適さないという課題も指摘²⁾される。コンクリート部材の場合、

埋設したICタグの交換が難しい点で特に課題がある。

QRコード等のシンボル技術も、他産業で情報保存によく用いられる^{例えば6)}。この技術も、コンピュータシステムとの親和性が高いが、ICタグ技術とは異なり、コード自体に電子部品を用いないので、電子部品の故障による情報の喪失がないという利点がある。本報では、この利点に着眼して、QRコードをコンクリート部材の表面部に配置する方法を構想した。なお、シンボル技術による情報保管はICタグと比較して保存可能な情報量が小さいので、部材IDや使用材料・調合設計など、製造・施工時に既知な部材情報を保存することを想定した。

コードによる情報保管技術では、汚れの付着等によって読み取りできなくなる可能性がある⁷⁾。また、建築部材は屋外に面する機会が多いので、塗料等の有機材料を用いてコードを描画すると、紫外線による退色⁸⁾で早期に読み取りできなくなる可能性も高い。そこで、本報では、無機材の材料のみで構成されるセメント硬化体を色調制御してコードを構成する方法を提案する。

建築部材の汚損によりコードが読み取れなくなる場合も考えられる。そこで、コードの奥行き方向の厚みを持たせ、表面を削れば再びコードが現れる方法を考案した。この方法は、コンクリート部材の寸法が他の工業製品と比べて格段に大きく、表面部を多少研んでも部材耐力に影響しないこと⁹⁾に着眼したものである。

以上の着眼と構想に基づいて、本報では、色調を制御

したセメント硬化体で QR コードを作製し、これをコンクリート部材に埋設することで、情報を長期に保管する要素技術を提案する。この要素技術（以下、提案技術）の実現性を実験的に検証することを本報の目的とした。

2. 本報で開発する要素技術の要求条件の整理

2.1 提案技術で想定した製造・施工方法

本章では、提案技術に求められる条件を整理した。想定した2種類の製造・施工の方法を Figure 1 に示す。工場製造型 (Factory Production) では、プレキャストコンクリートを想定した。この方法では、コードの各モジュール (JIS X 0510) に対応する2色の異なるセメント硬化体を配置・接着して QR コードを構成し、これを型枠内に配置してからコンクリートを打込む。

3D プリント施工型 (3D Printing Construction) では、3D プリントコンクリート施工技術¹⁰⁾を想定した。この方法では、色調の異なるセメント系材料を切り替えながら3D プリントし、QR コードが部材表面に現れるように施工する。コンクリートの3D プリント技術は、自由な造形が可能¹¹⁾という利点があるが、一方で、材料の積層部が弱い¹²⁾という構造上の欠点がある。コンクリート3D プリント技術開発分野では、このような欠点があっても採用に至るような、この技術でのみ実現可能な新しい概念・用途の探求が重要と考えられる¹³⁾。3D プリント施工型は、以上の背景を基に、3D プリント技術と色調制御技術の組合せによって部材への情報保存という新しい価値を付与することを企図している。

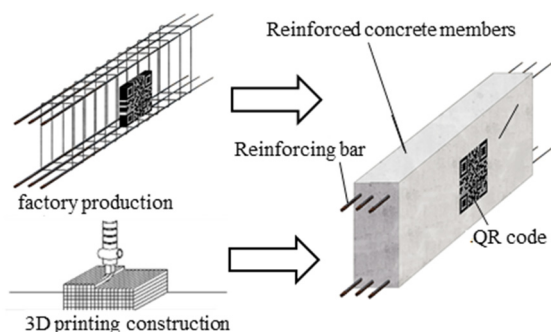


Figure 1 Schematic diagram of production/construction method for information embedded concrete

2.2 本報案技術に対する要求条件

以上の製造・施工方法の想定に基づいて、提案技術に対する要求条件を整理した。Table 1 に要求条件の一覧を示す。いずれの製造・施工技術を想定した場合も、無機系の原材料のみで構成されるセメント系材料によって、表面の研りの有無に関わらず、読み取り可能な QR コードを作製する必要がある (Req.1 参照)。また、QR コードが部材の一部を構成するので、モジュール間の接着部 (工場製造型) や積層部 (3D プリント施工型) が十分な強度

を保持している必要もある (Req.2)。さらに、3D プリント施工型では、Req.1, Req.2 を実現するにあたって、プリント時の筒先からの押し出しや積層ができる適度なフレッシュ性状を有する必要がある (Req.3)。本報では、以上の要求条件について、実験的に検討した。

2.3 要求条件を満たすための方法の選定

2.3.1 色調制御の方法

セメント硬化体の色調制御の手法には、顔料をコンクリートに混入する手法¹⁴⁾、シリカフェーム¹⁵⁾や石灰石微粉末¹⁶⁾等の混和材料によって色調を制御する手法、白華現象を用いる手法¹⁷⁾等が知られている。ここでは、有機材料を用いず、強度低下の可能性が低い混和材料によって色調を制御する方法を選定した。具体的には、シリカフェーム (以下、SF) がセメント硬化体の明度低下を発生させるという報告¹⁵⁾を参考に、SF のセメント置換により色調制御を行うこととした。

2.3.2 強度確保の方法および検討項目の抽出

モジュール間の接合面は通常の建築部材には存在せず、構造的な弱点となる可能性がある。特に、3D プリントコンクリートでは積層部分での強度低下が報告¹²⁾されている。そこで、モジュール間の接着や打込み時間の間隔が接合面強度に与える影響を実験的に検討した。

Table 1 Requirements for proposed method

	Requirements
Req.1	QR code, made of inorganic cement composites modules, even after chipping of surface, shall be readable by widely available QR code reader, i.e.
Req.2	The QR code modules and their bonding shall have sufficient strength, in order not to degrade the strength of building components.
Req.3	The cement composites shall have appropriate fresh properties to extrude and stack in 3D printing.

3. 実験の概要

3.1 実験計画

各実験の手順を Figure 2 に、各実験の因子と水準を Table 2 に示す。実験 A (EXP. A) では、各種の調合因子がセメント硬化体の色調およびフレッシュ性状に与える影響を検討した。水結合材比を 32% とし、シリカフェームの結合材に対する置換率 (SF content, 式 2 参照) R_{SF} および化学混和剤の添加量を因子として、目視観察で適切な調合を選定した。Figure 3 に示すアルミ製型枠を用いて手動で押し出し成型を行い、成型後の形状保持の目視観察によりフレッシュ性状を評価した。さらに、養生条件が色調に与える影響も検討した。

実験 B (EXP. B) では、実験 A で選定した調合において SF 置換率が色調に及ぼす影響を定量した。JIS Z 8722 に準拠し、分光測色計 (M 社製 CR-300) を用いて D_{65} 光源、測色径 8mm, 測定ヘッド 91*201*60mm, 拡散照明垂

直受光方式における $L^*a^*b^*$ 値を計測した。要求条件 1 (Req.1) に述べた通り表面の研り後も QR コードが読み取り可能な必要がある。そこで、表面と内部の色調の違いを観察するために、円柱試験体の表面と切断面 (Figure 3 参照) を各 6 箇所計測した。また、時間経過の影響を検討するために、切断面後と 14 日後の 2 回計測した。

実験 C (EXP. C) では、3D プリント施工型を想定し、モジュールの積層性を評価した。Figure 5 に施工方法と計測の概要を示す。アルミ型枠にセメントペーストを充填し、角棒で押し出して積層した。積層 7 日後に寸法を測定し、式 (1) により積層による形状変化を評価した。

$$\text{Deformation rate } D_i = \frac{d_0 - d_i}{d_0} \quad (1)$$

ここで、 $i=1,2$ 。 D_1 : 鉛直方向の変形率、 D_2 : 水平方向の変形率。
 d_0 : 型枠内寸 $\times N$ 、 d_i : 積層後の寸法 (Figure 4 参照) (mm)

実験 D (EXP. D) では、3D プリント施工型及び工場製造型を想定した試験体を作製し、QR コード専用ソフトウェアにより読取可能か検証した。現場施工型を想定した試験体では、実験 C と同じ方法で積層した。工場施工型を想定した試験体では、Figure 3 (右) に示す型枠に打込み、封かん養生 7 日後に脱型してからエポキシ樹脂により接着し積層した。作製した QR コードをコンクリートに打ち込み、背景色・テクスチャ等の影響も検討した。なお、本報の範囲では、手動の押し出し成型で実験を行ったため、モジュール数が多いと作業負荷が高かった。そこで、総モジュール数の少ないマイクロ QR コード (JIS X 0510) を作製した。試験体の作製後には、デジタルカメラで距離 50cm から撮影した。撮影後には、閾値による二値化処理が QR コードの読み取り精度に与える影響も検討した。

実験 E (EXP. E) では、3D プリント施工型と工場製造型を想定し、モジュール間の接合面 (bonding surface) 強度を評価した。Figure 6 に試験体の概要および加力条件を示す。3D プリント施工型を想定した試験体では、積層

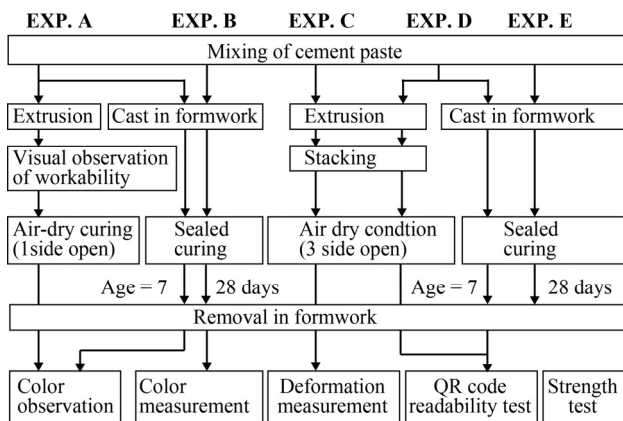


Figure 2 Experimental procedure

時間間隔に相当する打継ぎ時間 t_j の影響を検討した。工場製造型ではモジュール間がエポキシ樹脂で接着する方法を想定した。JIS R 5201 を参考にした曲げ試験を行い、強度および破断面観察により、モジュール間の接合面強度を評価した。

以上の検討を総合して、実験 F では工場製造型を想定した中規模試験体 (90×90×15cm) を作製し、一連の想

Table 2 Experimental factors

	Factors	Levels
EXP. A	Curing condition	Air-dry condition, Sealed condition
	SF content R_{SF} (%)	0, 10, 20, 30
	Amount of chemical admixture ^{NOTE} (C×%)	0, 0.5, 1, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
EXP. B	SF content R_{SF} (%)	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35
	Measurement surface	Surface, Cut surface
	Measurement timing	Immediately after cutting, 14 days after cutting
EXP. C	SF content R_{SF} (%)	0, 30
	Number of stacked	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
EXP. D	Assumed production or construction method	FP: Factory Production 3D: 3D Print Construction
	shape of formwork (FP type only)	3 side open, 2 side open (see Figure 3 right)
	Image correction	Yes, No
EXP. E	Assumed production or construction method	FP: Factory Production 3D: 3D Print Construction
	Method of bonding modules	Epoxy resin adhesion (FP) Time lagged joining (3D)
	Joining time lag t_j (min.)	0.5, 10, 60, 1440

NOTE : AE water reducing agent compliant with JIS A 6204

$$\text{SF content } R_{SF} = \frac{SF}{SF + C} \quad (2)$$

ここで、 C :セメント量、 SF : シリカフェーム量 (kg/m³)

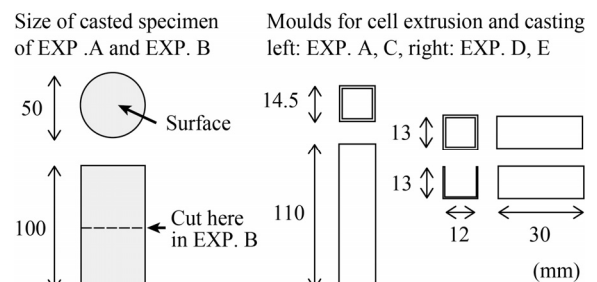


Figure 3 Size of specimen and moulds

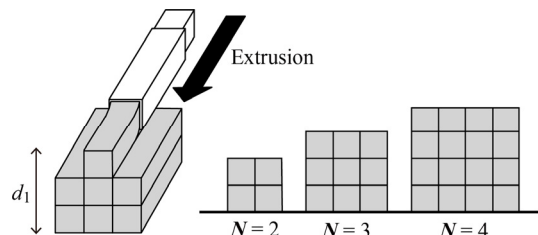


Figure 4 Schematic diagram of experiment D and example of counting number of stacked modules N

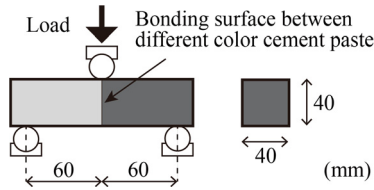


Figure 5 Strength test of bonding between modules

定プロセスによって製造・施工可能であることを確認した。なお、全ての実験でセメントは普通ポルトランドセメント、練混ぜ水は上水道水を用いた。練混ぜ時間は適度な流動性を持つまでとし、室温 20℃で養生した。

4. 各実験の結果及び考察

4.1 フレッシュ性状および色調変化の傾向

押出し成型の様子を Figure 6 (左) に示す。この写真のように、押出し後に角柱の形状を保持した調合を 3D プリントに適する流動性を有すると判定し、以降の実験で採用した。また、シリカフェュームの混和によりセメントペーストの明度が低下することを目視で確認した。

養生条件の異なる押出し成型試験体の写真を比較して Figure 6 (右) に示す。一般に、3D プリントコンクリートでは型枠が不要なため、型枠による水分逸散防止の効果が期待できない。これを想定して気中養生とした場合、SF を混和しても封かん養生した供試体と比べて明度が高かった。SF を混和したコンクリートは気中養生下で強度発現性が他の養生条件と比較して劣るという報告¹⁸⁾がある。本実験でも同様に供試体表面に水分逸散が生じ SF が十分に反応しなかったため明度が低下しなかったと推測される。以上のことから、SF を使用した QR コードモジュールの製造・施工においては、色調制御の観点からも散水等の十分な湿潤養生が必要といえる。

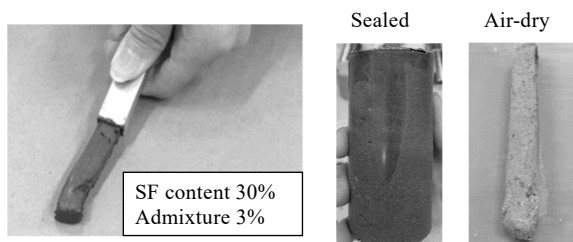


Figure 6. Demonstration of Extrusion molding (left) and specimen color under different curing conditions (right)

4.2 SF 置換率が色調に及ぼす影響の分析

Figure 7~9 に SF 置換率と $L^*a^*b^*$ 色空間における各座標値との関係を示す。いずれの測定時期、測定面においても SF 置換率が増加すると L^* 値は低下した。また、 a^* 値、 b^* 値は、いずれの水準においてもほぼ 0 に近い値で変化しなかった。以上のことから、SF による色調制御は色相と彩度に影響を及ぼさないことを確認した。

本報の条件では SF 置換率 30%において SF 置換率 0%

に対する明度の低下が最も大きく、SF 置換率 0%における L^* の最小値は、SF 置換率 30%における L^* の最大値よりも大きかった。QR コードの読取り精度はモジュール間の色差が明瞭であるほどよいと考えられる。そこで、以後の実験 B~F では SF 置換率 0%, 30%と設定した。

円柱試験体の色調測定面の写真例を Table 3 に示す。他の SF 置換率では測定面の色調がほぼ均質だったのに対して、SF 置換率 35%では一部に斑点があり、SF が練混ぜ時に凝集したと考えられた。通常のコンクリートでは、SF 置換率は 10~20%程度¹⁹⁾であるので、本報の SF 置換率 35%は著しく大きい。このような事情で、化学混和剤を添加してもなお SF を分散できず、SF の反応が進まなかったことから、SF 置換率 35%において明度の低下率が 30%よりも低かったものと考えられる。

4.3 表面と内部の色調の比較

試験体の表面と切断面の色調を比較して、Figure 7, 8 の左右に比較して示す。中央値は表面と切断面でほぼ同等であった。このことから、「表面部を研んでも QR コードの色調が変化しない」という点で Req.2 (2.2 節参照) の前提条件を本提案技術は満足すると考えられる。

4.4 時間経過が色調に及ぼす影響の分析

経過時間の異なる場合の L^* 値を Figure 7, 8 に比較して示す。表面、切断面ともに SF 置換率が同じであれば、中央値の変化は小さかった。このことから、2 週間までの範囲で時間経過による色調変化がないことを確認した。

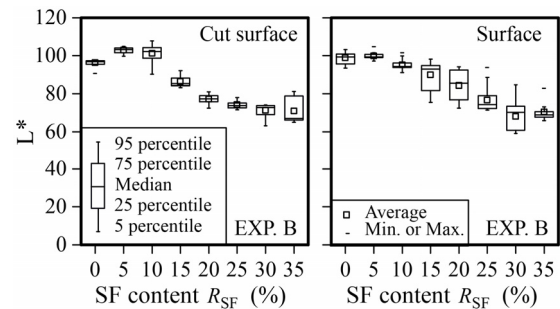


Figure 7 L^* value immediately after cutting the specimen

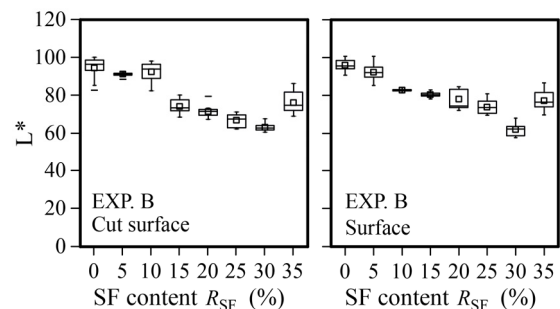


Figure 8 L^* value 14 days after cutting the specimen

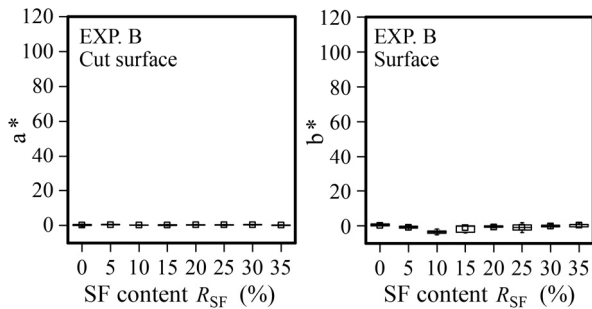


Figure 9. a* and b* values of the cut surface immediately after cutting the specimen

Table 3 Photographs of the color measurement surface

SF content	0 %	10 %	30 %	35 %
Surface				
Cut Surface				

4.5. モジュールの積層性の評価

前節までに選定した調査における積層数と変形率の関係を Figure 11 に示す。SF 置換率 30% の調査では、変形率 D_1 、 D_2 はいずれもほぼ 0% であったが、SF 置換率 30% の調査では最大 12% 程度の変形がみられた。QR コードを成形する観点からは変形率は低いほど良い。QR コード読取りにはエラー補正機能がある²⁰⁾ので、あの程度の変形は許容されると推測されるが、著者らの調べた範囲では、どの程度の変形率まで許容されるか分からなかった。本報の範囲では、Figure 11 に示した以上に変形率を低下する調査を選定できなかつたので、次節以降の実験でも、この調査を用いた。

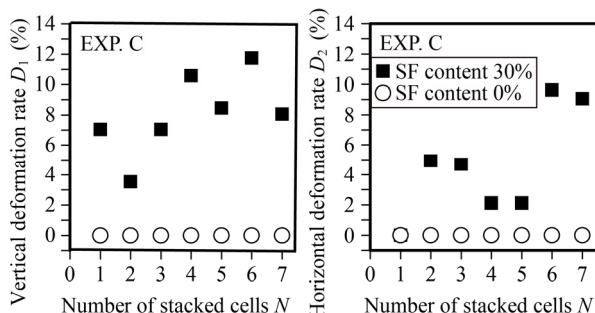


Figure 11 Influence of N on deformation rate

4.6 QR コードの読取り精度に関する分析

実験 D における各試験体の写真および QR コードの読取り精度の定性的な観察結果を Table 3 に示す。工場製造型を想定した試験体では、養生条件に影響する型枠の形状 (Figure 3 右) に関わらず、QR コード部分の画像を切出すと読取り可能であった。しかし、気中乾燥に近い試験体 (3 面解放 : 3 side open) では、カメラの角度や照明

の向きによって読取りに時間を要する場合があったのに対して、湿潤養生に近い試験体 (2 面解放 : 2 side open) の試験体では、安定して QR コードを読取ることができた。Table 3 の写真からも読み取れるように、目視観察でも 2 面解放の水準で白・黒の色差が大きかったことから、4.1 節に述べた理由により、読取り精度の安定性に差が生じたものと推察される。

画像処理により明度差を高めると、3 面解放の試験体の QR コードの読取り安定性は高まった。本報で想定するような建築物の情報保管においては、情報の長期保管性は重要であるが、情報読出しのための多少の手間 (e.g. 切出しや二値化処理などの画像処理) は、許容されると思われる。本結果は、提案技術を用いて情報保管を行おうとする場合に、画像処理などの補完的な技術との組み合わせが有効であることを示唆している。

3D プリント施工型を想定した試験体では、全ての場合で QR コードの情報を読取れなかつた。これは、積層に起因する変形でモジュール間に影が生じたこと、3D プリント施工型では気中養生に近くなり、セメントペーストの色差が十分でなかつたことが原因と考えられる。

Table 3 Photographs of specimen EXP. D and their QR code reading accuracy

	Original image	Remove background	Threshold adjustment
Factory Production Type (3 side open)			
	Readable (Unstable)	Readable (Unstable)	Readable (Stable)
Factory Production Type (2 side open)			
	Readable (Stable)	Readable (Stable)	Readable (Stable)
3D printing Construction Type			
	Unreadable	Unreadable	Unreadable

4.7 モジュール間の接合強度の評価

接合面を含めた試験体の 3 点曲げ強度と、試験後の試験体写真を Figure 10 に示す。3D プリント施工型の打継ぎ時間 1 日を除く全ての試験水準において、セメントペースト部 (SF 添加側) で破壊した。このことから、3D プリント施工型、工場製造型のいずれにおいても接合面の強度が部材強度に影響することはないと判断された。

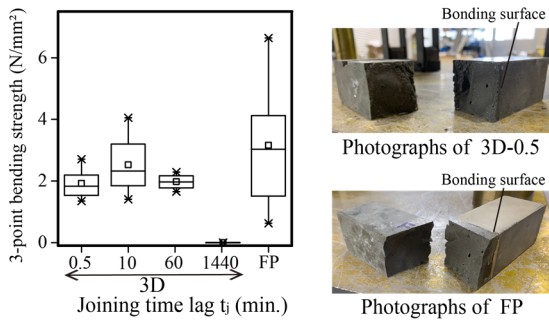


Figure 10 3-point bending strength and photographs of specimen EXP. E after force

4.8 中規模試験体による製造・施工の試行

前節までの試験結果を総合して、工場製造型の中規模試験体 (EXP. F) を作製した。試験体の写真を Table 4 に示す。作製した試験体は、角度や照明の向きによって不安定なこともあったが QR コードを読取可能だった。また、二値化処理して QR コードを切り出した画像では、読取りの安定性が向上した。

Table 4 Photograph of medium-sized specimen and image after binarization

Original image	Threshold adjustment	Remove background
Readable(Unstable)	Unreadable	Readable(Stable)

5. まとめ

セメント硬化体で構成された QR コードの建築部材への埋設による情報保管技術を提案し、その実現性を実験的に検討した。成果は以下にまとめられる。

- 1) 工場製造型では、強度の確保、情報の保管などの要求条件を満足した製造が可能であることを示した。
- 2) 3D プリント施工型では、形状保持・色調制御のための最適なフレッシュ性状・養生条件を発見できず、2.3 節に示す要求条件の一部を満足できなかった。

【謝辞】

本研究では科学研究費 (19K22005, 実施項目 B-1) の成果を利用した。4.4 節の分光測色計の使用にあたっては、国立研究開発法人 建築研究所 鹿毛忠継博士、松沢晃一博士、中田清史博士、田村昌隆博士にご助力・指導いただいた。QR コードの読取りには、クルクル QRQR (アララ株式会社製) を iPhone (iOS 14.6) にインストールして使用した。以上の関係各位に感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 木村宏, 前川甲陽, 古橋秀夫: 建築設計・施工・運営に起因する維持管理上の諸問題 その 1. 建築躯体及び設備 (建築物管理に関する研究), 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 昭和 63 年 10 月
- 2) 日本コンクリート工学会: コンクリートのトレーサビリティ確保技術に関する研究委員会報告書, 2014.6
- 3) 中島史郎, 中島貴文, 根本かおり, 古賀純子: RFID 技術を活用した建物履歴情報管理手法の開発—システムの概要と改修工事における適用事例—, 日本建築学会技術報告集, 第 14 巻, 第 27 号, 17-20, 2008 年 6 月
- 4) 森本和明, 谷明勲, 山邊友一郎, 河村廣: RFID 及びデータベースシステムを利用した建築物情報の管理及び運用に関する研究, 日本建築技術報告集, 第 24 号, 429-434, 2006 年 12 月
- 5) 吉田直樹: 特集: 平成 18 年度日本薬学図書館協議会研究集会 IC タグと識別コード, 薬学図書館 52(1), 22-28, 2007
- 6) 黒澤康雄: GS1 (ジーエスワン) 製品識別コードによる医療トレーサビリティの普及推進, 生体医工学, 53 巻 Supplement 号, 2015
- 7) 山田徳美, 山田晋: バーコードシステムを利用した種子撒き出し実験における発芽個体の効率の追跡調査方法, 日録工誌, J. Jpn. Soc. Reveget. Tech, 41(1), 251-254 (2015)
- 8) 川島健作: 塗料用紫外線吸収剤と光安定剤, 色材, 67 [6], 379-392, 1994
- 9) 横田直倫, 丸山直樹, 近藤拓也, 東山浩士: 部分的に付着が消失した RC はりの曲げ挙動に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, 2014
- 10) Bing Lu, Yiwei Weng, Minyans, Ye Qian, Kah Fai Leong, Ming Jen Tan, : A systematical review of 3D printable cementitious materials, Construction and Building Materials 207(2019), 477-490
- 11) Shanaka Kristombu Baduge, Satheeskumar Navaratnam, Yousef-Zidan, Tom McCormack, Kate Nguyen, Priyan Mendis, Guomin Zhang, Lu Aye : Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods, Structures 29(2021), 1597-1069
- 12) R.J.M. Wolfs, F.P Bos, T.A.M Salet : Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion, Cement and Concrete Research 119(2019), 132-140
- 13) 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設産業へのインパクト, コンクリート工学, Vol. 58, NO. 1, 2020
- 14) 近藤高規: 景観材料としてのカラーコンクリートの適用例, コンクリート工学, pp24-32, 2003
- 15) 近藤高規: カラーコンクリートの着色技術の現状の課題, コンクリート工学, 32 巻, 8 号, 1994
- 16) 長谷川聖史, 小林崇, 若林正憲, 伊達重之: コンクリートの明度及び変化に及ぼす混和材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, 2005
- 17) 松下泰之, 塩沢昌平, 吉田貴彦, 岡本享久: 白華現象によるモルタル表面明度の制御とデザインへの適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, 2014
- 18) 添田政司, 大和竹史, 江本幸雄: シリカフェームコンクリートの養生方法が強度および耐久性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 17, No. 1, 1995
- 19) 服部九二雄, 森井俊廣: シリカフェームを混入したコンクリートの基本的特性, 農業土木学会論文集, 第 172 号, 1994
- 20) 野村政弘, 野田善次郎, 星野裕, 増澤洋一, 藤本義治: QR コード (2 次元バーコード) の開発と生産管理, 日本生産管理学会論文誌, Vol. 8, No. 2, 2002. 3