特集>>>　新しい建設材料

セメントを使わないコンクリートを用いた天然石材調建材

T-*e*Concrete を用いて CO_2 排出量とコストを抑えた，意匠性に優れる T-razzo の開発

大　脇　英　司・岡　本　礼　子・渡　邉　悟　士

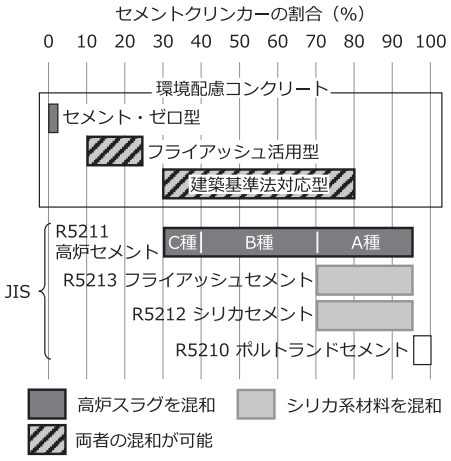
コンクリート分野でも地球温暖化への対応が求められる。著者らはコンクリートの材料製造に係る CO_2 排出量を最大で 80％削減できる環境配慮コンクリートを開発してきた。このコンクリートは高炉スラグを用いるため白色に近く，着色性に優れることを明らかにして天然石材調建材を開発した。舗装ブロックとして十分な性能を有することを確認して建築物に適用し，従来と同様の手順，効率で製造，施工できることを実証した。産業副産物である高炉スラグの多用により，低炭素社会とともに循環型社会の構築への貢献が期待される。また，従来の白色セメントより安価であり，コスト面での貢献も期待できる。

キーワード：コンクリート，温室効果ガス，低炭素，高炉スラグ微粉末，擬石，テラゾー

1. はじめに

地球温暖化の問題は国際社会における喫緊の課題であり，COP25[1]などでも検討が続いている。コンクリート分野も例外ではなく，例えばポルトランドセメント（いわゆるセメント）を産業副産物で置換して温室効果ガスの排出を抑制する試みが行われている[2]。主な温室効果ガスである CO_2 の排出原単位は，産業副産物の方がポルトランドセメントより小さいため，CO_2 排出量を削減できる。このようにコンクリートに用いる産業副産物は混和材と呼ばれ，銑鉄の精製過程で排出される高炉スラグ微粉末や火力発電所等から排出される石炭灰であるフライアッシュなどが用いられる。

混和材を予めポルトランドセメントに混合したものを混合セメントと呼び，JIS（日本産業規格）に規定がある。著者らは JIS に示される範囲を超えて積極的に混和材を用いる環境配慮コンクリート T-*e*Concrete を開発してきた[2]。**図―1**のように“セメント・ゼロ型”，“フライアッシュ活用型”，“建築基準法対応型”を用意している。“セメント・ゼロ型”はポルトランドセメントを使わず高炉スラグ微粉末を刺激材（カルシウム系化合物の混合物）で硬化させるコンクリートであり，材料製造に起因する CO_2 排出量を最大で 80％削減する[3), 4)]。“フライアッシュ活用型”は高炉スラグ微粉末に加え，フライアッシュも同時に利用する。この２つは土木学会「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」[5]を満たすコンクリートである。“建築基準法対応型”は高炉セメントを用いたコンクリートに相当し，建築基準法の指定建築材料として使用できる。



図―１　環境配慮コンクリートの配合の特徴

用途や目的に応じてより多くの混和材を使用することで，CO_2 削減による低炭素社会の構築だけでなく，副産物の活用による循環型社会の構築にも貢献できる。

最も混和材の利用率が高い“セメント・ゼロ型”は青灰色であるポルトランドセメントを使用せず，高炉スラグ微粉末を使用する。硬化後に白色を呈することから着色に好適である。これを活かして意匠性に優れた天然石材調建材 T-razzo を開発した[6]。本報では“セメント・ゼロ型”の環境配慮コンクリート（以後，分類を併記しないときは“セメント・ゼロ型”を指す）の着色性と，開発した天然石材調建材の性能および建築物への適用について報告する。

2. 環境配慮コンクリートの着色性

(1) 評価方法

環境配慮コンクリートから砂や砂利などの骨材を除いたペースト（以下“ゼロ”）に顔料を添加して着色性を評価した。評価には“ゼロ”と顔料粉末との色差（顔料との相違）と，顔料の添加前後の“ゼロ”の色差（“ゼロ”の変化）を用いた。

色はCIE1976$L^*a^*b^*$色空間（JIS Z 8781-4）で測定した。L^*（明度指数），a^*とb^*（色座標）による3次元座標で表現する。L^*は明（値が大きい）⇔暗（値が小さい）を表し，a^*は赤（大）⇔緑（小），b^*は黄（大）⇔青（小）を表す。色差は2色の座標間の距離で示す。$L^*a^*b^*$座標系では色差が等しい2色の組合せは，知覚差異（心理上の色の相違）も等しい。

(2) 材料および配合

ペーストに使用した材料と配合を**表―1**に示す。カラーコンクリートの製造に一般的に用いられる白色セメントのペースト（以下“白色”）と比較した。顔料は赤，青，水，橙，緑，褐，黒の7色のコンクリート用顔料を用いた。一般的な添加効果を参考に，添加の上限を5.0%とした。ペーストを練り混ぜて，内寸が75 mm × 50 mm × 10 mmの角型容器に打ち込んだ。材齢28日まで室温で封かん（密封）養生を行い，型枠に接していた底面（75 mm × 50 mm）を測定面として測色した。

顔料を加えない“ゼロ”と“白色”の（L^*，a^*，b^*）は，それぞれ（81.6，−2.2，2.0）と（92.0，−2.1，5.2）であり，ポルトランドセメントのペーストの（60.5，−1.76, 4.0）と比較して，十分に“白い”と判定した。

(3) 着色性について

“ゼロ”と“白色”に顔料を添加し，顔料との相違を色差（ΔE^*_{ab}, 式（1））で示した。分光色差計（NF333: 日本電色工業製）を用いて試験体あたり15か所のL^*，a^*，b^*を測定し，平均値を求めてΔE^*_{ab}を算出した。

$$\Delta E^*_{ab} = [(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

ただし，L^*，a^*，b^*は試験体の測定値，
L_0^*，a_0^*，b_0^*は添加した顔料の測定値

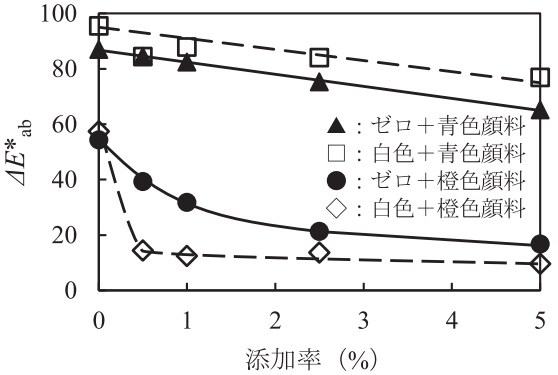
着色効果は顔料により異なった（**図―2**）。橙色の場合，“白色”では0.5%添加すると顔料との色差が15程度に小さくなるが，それ以上に添加量を増やしても色差は小さくならない。一方，“ゼロ”では添加量を0～5%に増やしていくと次第に色差が小さくなり，添加量5%で“白色”とほぼ同程度の色差となった。“ゼロ”では添加量の加減により色調を変化させることができる。同様の傾向は，赤，緑，褐，黒の顔料でもみられた。他方，青色の顔料を添加した場合は，“ゼロ”，“白色”ともに着色（顔料との色差を小さくすることが）できたが，色差は橙色の場合より大きい（**図―2**）。水色の顔料でも同様の傾向であった。“青色系”の顔料粉末と同じ色にすることは困難であるが，実用的には着色できることが分かった。“ゼロ”に7色の顔料をそれぞれ添加したときの色の変化は，従来のセメントの場合[7]と同様に，顔料の添加量にほぼ比例した（**図―3**）。

このように“ゼロ”は従来のコンクリート用の顔料を用いて着色が可能であり，添加量によって着色の程度を自在に制御でき，また，変化を予測できることから，色彩設計も合理的にできることが明らかになった。

表―1　着色性を検討したペースト材料と配合

（質量比）	水	粉体（P）			顔料の添加率（Pの外割）
		WPC	BFS	St	
ゼロ	35.9		77	33	0.5 ～ 5.0%
白色		100			

WPC：白色ポルトランドセメント，BFS：高炉スラグ微粉末，St：刺激材

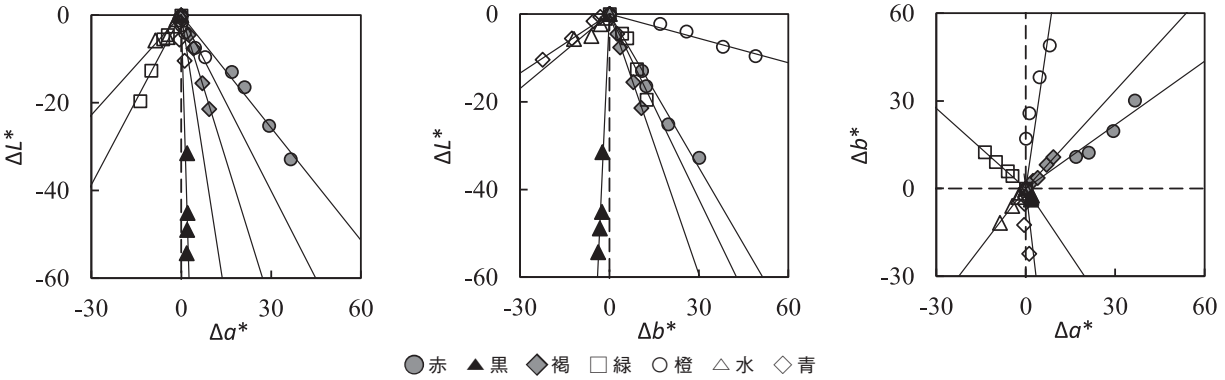


図―2　顔料添加率と色の変化（顔料の色を基準）

3. 天然石材調建材の開発

(1) 意匠性の付与について

コンクリートの意匠性の向上には着色するほか，表面に骨材を露出させる，陰影や光沢を与えるなどの方法がある。これらは洗い出し，ショット仕上げ，研磨仕上げなどと呼ばれる。また，コンクリートの型枠に凹凸や文様を付け，製品の表面に石材や木材の肌合いや，レンガやタイルの幾何学模様を施すこともできる。



図―３　各種の顔料を添加した時の“ゼロ”の色の変化（顔料添加前の“ゼロ”の色を基準）

環境配慮コンクリートが優れた着色性を持つことを活かし，顔料や骨材の吟味や研磨仕上げにより天然石材調の建材（擬石）を製造することを検討した。

(2) 材料および配合

環境配慮コンクリートは工事現場で型枠に打込む“現場打ちコンクリート”として開発したが，天然石材調建材はコンクリート製品（二次製品）として工場で製造する。既存の設備を活用するため，製造方法は従来と同様とした。すなわち，①所定の材料，配合でコンクリートを練り混ぜた後，型枠に打ち込んで振動機で締め固める。②室温で十数時間の養生と60℃で2時間程度の蒸気養生を行い，翌日まで室温で養生して脱型する。③研磨面（平板の場合は型枠に接していた底面）に粗削り，気泡の穴埋め（必要に応じ），仕上げ研磨を施す，との手順とした。脱型や研磨作業が工程に沿って進められるよう，化学混和剤の種類や量を調整して凝結時間や強度発現性を最適化した。また，意匠性を高めるため骨材の岩種や粒度，配合量，細骨材と粗骨材の割合（細骨材率）を調整した。顔料を使用せずに白御影石調とした配合例を**表―２**に示す。これを基本に，顔料の添加や骨材種類の変更により多様な表情を演出できる（例えば，**写真―１**）[8]。

(3) 性能確認試験

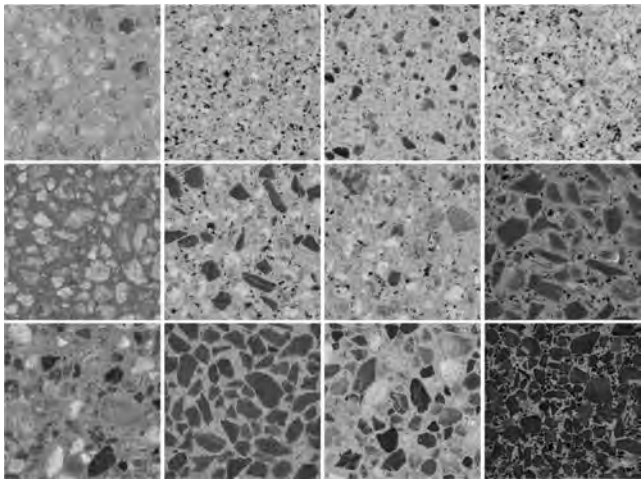
天然石材調建材を舗装ブロックとして適用するため，白御影石調の試験体（**表―２**）により性能を確認した。まず，JIS A 5371:2016「プレキャスト無筋コンクリート製品」の附属書B（規定）「舗装・境界ブロック類」に基づき圧縮強度と曲げ耐力を評価した。圧縮強度試験には20℃で28日間封かん養生したφ100×200 mmの円柱供試体を用い，曲げ耐力試験には研磨仕上げを施した300×300×60 mmの平板を用いた。次に，耐摩耗性とすべり抵抗性について性能を確認した。耐摩耗性はコンクリート床の耐摩耗性評価の例[9]を参考に，JIS K 7204:1999「プラスチック―摩耗輪による摩耗試験方法」に準じて100×100×10 mmの平板の研磨仕上げ面を評価した。試験条件は摩耗輪：H22，荷重：9.8 Nとし，500回転後の質量と厚さの減少量を測定した。すべり抵抗性は，インターロッキングブロック舗装技術協会JIPEA-A-TM6「インターロッキングブロックのすべり抵抗試験方法―ポータブルスキレッドレジスタンステスターによる―」[10]により確認した。150×150×25 mmの平板を用い，散水により湿潤状態とした研磨仕上げ面を試験した。

試験の結果を**表―３**に示す。圧縮強度は，材齢28日において43.6 N/mm^{2}であった。JIS A 5371附属書Bでは平板製品の圧縮強度の規定がないため，同書にある境界ブロックとインターロッキングブロックの値（17

表―２　白御影石調の天然石材調建材の配合例

W/P	細骨材率	空気量	単位量（kg/m^3）					
			水	粉体P		骨材		化学混和剤
			W	BFS	St	S	G	
32.5%	50%	6.0%	165	392	116	781	781	3.64

BFS：高炉スラグ微粉末，St：刺激材，S：花崗岩砕砂，G：花崗岩砕石.



写真―１　顔料や骨材の調整によるバリエーションの例

表―３　天然石材調建材の性能確認試験の結果

評価項目		試験結果	評価基準	判定
圧縮強度		43.6 N/mm^2	（参考）17 ～ 32 N/mm^2 以上	適
曲げ耐力	ひび割れ荷重 ひび割れ耐力	13.9 kN 0.83 kN･m	12.0 kN 以上 0.72 kN･m 以上	適
耐摩耗性	質量減少量 厚さ減少量	1.29 g 0.23 mm	（参考）一般的なコンクリートの質量減少量：2.2 g	適
すべり抵抗性	BPN 値	70	歩行者系道路 40 以上，その他 60 以上	適

～ 32 N/mm^2 以上）を参照した。天然石材調建材はこれに対して十分な圧縮強度を有していた。曲げ耐力は，出荷時期を勘案して材齢 14 日にて評価した。曲げひび割れ荷重は 13.9 kN，曲げひび割れ耐力は 0.83 kN･m であった。これらは JIS A 5371 附属書 B「推奨仕様 B-1 平板」における普通平板に対する規定値 12.0 kN および 0.72 kN･m を上回った。耐摩耗性は材齢 28 日にて評価した。質量減少量は 1.29 g であり，水セメント比が 50％の一般的なコンクリートの質量減少量が 2.2 g[9] であったことに比べて小さく，耐摩耗性に優れることが考察された。すべり抵抗性（BPN 値）は供用時の材齢を考慮し，材齢 91 日にて評価した。天然石材調建材の BPN 値は 70 であり，舗装用のインターロッキングブロックに求められる性能（歩行者系道路に使用する場合 40 以上，その他の場合 60 以上[10]）を満足した。このように，天然石材調建材は舗装ブロックとして適切な性能を持つことが確認できた。

また，天然石材調建材には意匠材としての耐久性も要求される。重要な色調の変化（変色）に着目して検討した。白御影石調（**表―２**）と，これに赤色顔料を添加したサクラ御影石調の天然石材調建材を座面にしてベンチを試作した（**写真―２**）。これらを神奈川県横浜市と東京都世田谷区の屋外で試用し，設置直後の色を基準とした色差（ΔE^*_{ab}）の経時変化を測定した。設置後 450 日における色差は白御影石調，サクラ御影石調とも 4 程度であり，十分な耐色性を有していた。

写真―２　天然石材調建材を用いたベンチの試作例

写真―３　開発した天然石材調建材の建築物への適用
（上：エントランスピロティ，下：屋外階段）

（4）天然石材調建材の適用

白御影石調の研磨仕上げとした天然石材調建材の平板（**表―２**）を，大成建設㈱技術センターの研究開発棟のエントランスピロティと屋外階段の約 70 m^2 に敷設した[11]。従来の擬石製品や天然石材と同様の設計，施工手順で良好に施工することができた（**写真―３**）。製造手順は 3.（2）項と同様であり，平板の寸法はピロティでは 147 ～ 297 × 1495 × 60 mm，階段の踏面では 297 × 1397 × 75 mm とした。ピロティでは，打込みによる成形が可能であることを活かし，種々の幅の平板を作製してデザイン性のある床面とした。天然石材調建材は十分な寸法精度と寸法安定性を有し，また，“石飛び”（骨材の剥離）や角欠けなどの欠陥もなく，設計に従って施工することができた。前述のように天然石材調建材は舗装ブロックとして十分な性能を有するが，階段の踏面ではさらに歩行時の安全性を高

めるため，すべり止めの溝と端部の面取りを追加した。型枠を所定の形状にすることで，天然石材のような複雑な切削加工を必要とせず，設計に応じて成形できることを確認した。また，型枠は転用できるため全製作数に対して加工する必要がなく，生産性の向上も期待できる。

4. おわりに

環境配慮コンクリートの着色性を確認し，その特徴を活かした天然石材調建材を開発した。また，舗装ブロックとして十分な性能を有することを確認して建築物に適用した。得られた知見を以下にまとめる。

・環境配慮コンクリートは顔料の添加量に応じた着色が可能であり，色彩設計も効率的にできる。
・天然石材調建材は，舗装ブロックとして十分な性能を有する。
・天然石材調建材は所要の寸法精度を有し，製造や運搬，施工時の欠陥もなく，従来と同様の手順，効率で建築物に適用できる。また，複雑な形状を合理的に実現できる。

これまでカラーコンクリートや擬石製品に使用された白色セメントは，現在では全てが輸入され，コストも高い傾向にある。一方，環境配慮コンクリートは産業副産物である高炉スラグ微粉末を主成分とするため材料コストの低減が期待でき，着色性や成形性に加えてコストの面からも幅広い活用が期待できる。

天然石材調建材という環境配慮コンクリートの新たな活用法の開発により，低炭素社会，循環型社会の構築への貢献が一層進むことを期待している。

JCMA

《参考文献》

1）気候変動に関する国際連合枠組条約，第 25 回締約国会議，https://www.cop25.cl/#/（2020.1.10 確認）.
2）大脇英司，岡本礼子，松元淳一，渡邉悟士：混和材を大量に使用したコンクリートと事例，コンクリート工学，Vol.57，No.1，pp.71-74，2019.
3）荻野正貴，大脇英司，白根雄二，中村英佑：複数の環境に約 2 年間暴露した低炭素型のコンクリートの強度と耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.220-225，2014.
4）宮原茂禎，荻野正貴，大脇英司，堀口賢一，坂本淳，丸屋剛，中村英佑：環境配慮コンクリートによる二次製品工場のスラブ施工，土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集，V-121，pp.241-242，2016.
5）土木学会コンクリート委員会：混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー 152，土木学会，2018.9.
6）岡本礼子，大脇英司，渡邉悟士，伊中成篤，長嶋貴男，田中裕美，高橋健吾，真保亨一：環境配慮コンクリートを用いた発色性に優れたコンクリートの検討，土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集，V-15，2019.
7）山口信，平井孝之，近藤正一：顔料混入セメント系材料の色彩，力学的特性および遮熱・断熱特性に関する基礎的検討，セメント・コンクリート論文集，pp.618-625，Vol.67，No.1，2013.
8）渡邉悟士，大脇英司，黒岩秀介：環境配慮コンクリートを用いた建築仕上材の開発，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.553-554，2019.
9）日本建設業連合会材料施工専門部：機能性建築材料の性能調査結果 15. コンクリート表面強化剤，http://www.nikkenren.com/kenchiku/kinou.html（2020.1.10 確認）.
10）インターロッキングブロック舗装技術協会：インターロッキングブロック舗装設計施工要領 4 版，インターロッキングブロック舗装技術協会，2013.8.
11）阪井由尚，太田貴士，杉山智昭，成田仁：地球環境に配慮した既存ストック活用型の研究開発棟増改築工事，コンクリート工学，Vol.57，No.10，pp.785-790，2019.

［筆者紹介］

大脇　英司（おおわき　えいじ）
大成建設㈱　技術センター
社会基盤技術研究部　材工研究室
主幹研究員

岡本　礼子（おかもと　れいこ）
大成建設㈱　技術センター
社会基盤技術研究部　材工研究室
副主任研究員

渡邉　悟士（わたなべ　さとし）
大成建設㈱　技術センター
都市基盤技術研究部　構造研究室
主任研究員