

流動性を高めた「クリーンクリート®」の地上構造物への適用

神代 泰道 並木 憲司 植松 俊幸

(東京本店建築事業部)

堀田 和宏 田中 寛人 小林 利充

Application of High-Fluidity Clean-crete to Ground Structure

Yasumichi Koshiro Kenji Namiki Toshiyuki Uematsu

Kazuhiro Hotta Hiroto Tanaka Toshimitsu Kobayashi

Abstract

To solve the problem of CO₂ emissions, Obayashi Corporation developed a low-carbon concrete "Clean-crete". Since its first application in 2010, the cumulative application has reached 300,000 m³. To expand the use of "Clean-crete", it has been applied to exposed concrete wall members of ground structures. When applied, the neutralization resistance was imparted with the highly durable clear paint "Shelt-Clear". In addition, high-fluidity concrete was used to impart the material separation resistance with a fine powder of blast furnace slag. As a result of the application, exposed concrete wall members with excellent esthetics and durability were constructed.

概要

CO₂ 排出量の削減という課題解決のため、大林組は低炭素型のコンクリート「クリーンクリート」を開発し、2010年度に初適用して以来、2020年度までの累計の打込み量は30万m³に達している。今回、クリーンクリートの普及拡大を目指し、地上構造物となるコンクリート打放し壁部材へ適用した。適用に際しては、耐久性に優れるクリヤ塗料「シェルトクリヤ™」により中性化抵抗性を付与した。さらに高炉スラグ微粉末による材料分離抵抗性の付与を期待して、高流動コンクリートとした。その結果、美観と耐久性に優れる打放し仕上げの壁部材を構築することができた。

1. はじめに

地球温暖化に影響を及ぼす温室効果ガス、特に、二酸化炭素(CO₂)排出量の低減は、全世界に課せられた重要課題である。我が国においては、2020年10月に内閣総理大臣の所信表明において、2050年までに温室効果ガスの排出量を全体としてゼロにする、すなわちカーボンニュートラルによる脱炭素社会の実現を目指すことが宣言された。今後、建設業界においてもこれまで以上にCO₂排出量の低減が叫ばれると予想される。

コンクリートに使用されるセメントは、製造時に大量のCO₂を発生させることが知られている。2018年度のセメント関連のCO₂排出量は4,300万トンであり、実に我が国のCO₂排出量の11.37億トンの約3.8%に相当する。

建設業界においてはこれらCO₂削減の課題解決のため、近年、セメント量を削減した低炭素型のコンクリートが開発されるようになってきた。大林組はいち早く低炭素型のコンクリート「クリーンクリート」を開発し¹⁾、2010年度に初適用して以来、Fig. 1に示すように2020年度までの累計の打込み量は30万m³に達している。クリーン

クリートの適用によるCO₂排出量の削減量は、約5万トンに到達すると推計される。

「クリーンクリート」は、結合材のうち、セメントの混合割合を30%以下とし、その他をCO₂排出量が少ない高炉スラグ微粉末などで多量に置き換えたコンクリートである。CO₂排出量を最大で80%削減できるだけでなく、低発熱であるという特長がある。この特長を活かし、温度ひび割れの対策として、主として建築物の地下構造物におけるマスコンクリートに該当する部位・部材に適用されてきた²⁾。一方、クリーンクリートは中性化の進行が速くなる³⁾ため、地上構造物へ適用する場合は、中性化の進行を考慮して、かぶり厚さを設計値よりも大きくするという対策が必要となり、地上構造物への適用は進んでいなかった。

そこで、今回、クリーンクリートの普及拡大を目指し、地上構造物となるコンクリート打放し壁部材への適用に際し、耐久性に優れるクリヤ塗料「シェルトクリヤ」⁴⁾により中性化抵抗性を付与した。さらに高炉スラグ微粉末による材料分離抵抗性の付与を期待して、高流動コンクリートとして検討した。本報では、流動性を高めたクリーンクリートの試し練り結果と建築物への適用結果に

ついて述べる。

2. クリーンクリートの品質

今回、適用する建物は、Fig. 2に示す大林組技術研究所敷地内に建設されるプレゼンテーション用施設「けやきテラス™」であり、このうち、クリーンクリートを適用する部材は、打放し仕上げの壁部材である。

コンクリートの調合計画に際しては、日本建築学会「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針（案）・同解説」を参考とし、耐久設計基準強度を27N/mm²とした。また、今回は打込み時期が冬期であることから、構造体強度補正値は6N/mm²とし、コンクリートの呼び強度を33とした。また、結合材量が多く、コンクリートの粘性が高くなるため、スランプ管理のコンクリートでは、打込み時の豆板等の発生が懸念された。そこで、JIS A 5308の呼び強度とスランプフローの区分に従ってスランプフロー50cmの高流動コンクリート⁵⁾として計画した。なお、空気量は4.5%とした。

呼び強度とスランプフローが同一のコンクリートとクリーンクリートのCO₂排出量を比較すると、クリーンクリートを用いることによるCO₂削減量は177kg/m³となり、削減率は約65%となる。

中性化抑制の対策は、開発したクリヤ塗料「シェルトクリヤ」⁴⁾の適用を検討した。クリヤ塗料による中性化抑制効果を考慮した中性化深さの推定結果をFig. 3に示す。なお、クリーンクリートの中性化速度係数は文献³⁾によった。開発したクリヤ塗料は、下塗り材がエポキシ系、中塗り材および上塗り材がアクリルをベースとした樹脂である。屋外暴露期間20年に相当する促進時間5,000時間の耐候性試験を実施した後に、促進中性化試験を行って、中性化深さの進行を無塗布の場合の0.3倍以下に低減できることを確認したものである⁴⁾。中性化深さの判定基準を屋外はかぶり厚さ、屋内はかぶり厚さ+20mmとする⁶⁾とクリヤ塗料なしの場合、屋外で80年、屋内で62年経過すると判定基準に到達した。クリヤ塗料を新築時のみに塗った場合、経過年数20年までは中性化の低減効果が持続し、それ以降は塗料なしと同程度に進行すると仮定すると、屋外、屋内ともに判定基準に達するまで100年以上となった。さらにクリヤ塗料を20年ごとに塗り替える場合、屋外、屋内ともに判定基準に達するのは200年を超えた。以上の検討の結果、クリヤ塗料を新築時のみに塗布することで、計画供用期間中に必要となる中性化抵抗性を付与できることを確認した。

3. 試し練りの概要

3.1 室内試し練り

コンクリートの呼び強度を33、スランプフローを50cmとして、供給予定のレディーミクストコンクリート工場

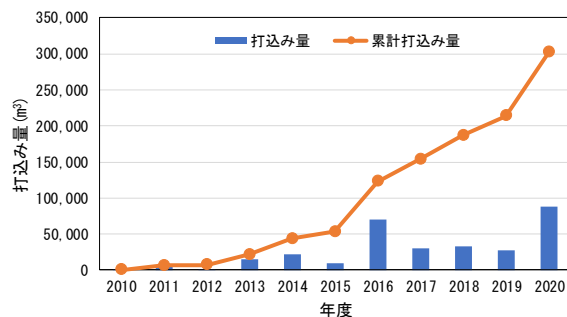


Fig. 1 クリーンクリートの適用実績
Clean-crete Placement Amount



Fig. 2 けやきテラス™の外観パース
Appearance Perspective "Keyaki-Terrace™"

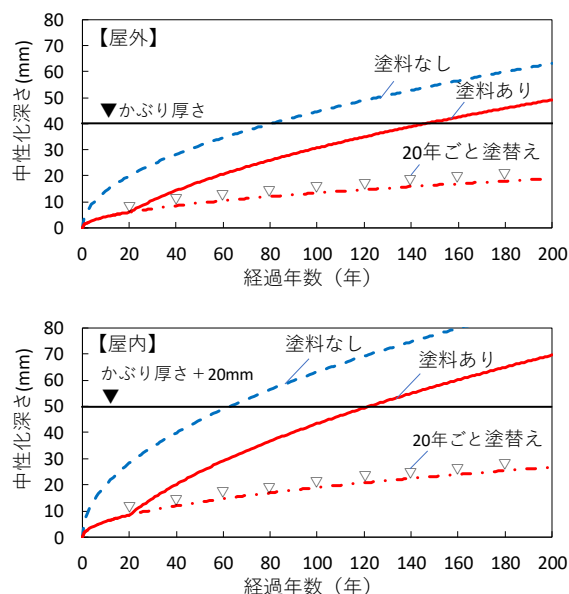


Fig. 3 クリーンクリートの中性化深さの推定結果
Estimation Result of Neutralization Depth of Clean-crete

Table 1 コンクリートの調合
Concrete Composition Table

W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	BS	S	G	SP
43.3	52.7	175	101	304	895	809	3.65

W/B : 水結合材比 s/a : 細骨材率

呼び強度33, スランプフロー50cm, 空気量4.5%

において室内試し練りを実施した。コンクリートの調合をTable 1, 使用材料をTable 2に示す。室内試し練りにお

ける試験項目は、スランプフロー (JIS A 1150) , 空気量 (JIS A 1128) , コンクリート温度 (JIS A 1156) とし、練混ぜから30, 60, 90分で実施した。材料分離抵抗性については、スランプフロー試験の広がりだけでなく、より分離を判定しやすいとされる一輪車内の状況⁵⁾も対象に、試し練りに参加した複数の技術者 (WEBによるリモート立会も含む) が目視により判定した。圧縮強度 (JIS A 1132, JIS A 1108) は、標準養生とし、材齢7, 28日で試験した。

3.2 実機試し練り

室内試し練りを行った呼び強度33, スランプフロー50cmのコンクリートについて、実機試し練りを実施した。試験項目をTable 3に示す。本工事ではレディーミクストコンクリート工場と建設現場の距離から運搬時間が長くなるおそれがあったため、練混ぜから90分以降のフレッシュ性状を確認することとした。圧縮強度は、標準養生と20℃の封かん養生の他に、冬期 (1月) の打込みを想定し、低温下において封かん養生した供試体についても確認した。また、コンクリートの沈降量、ブリーディング量、乾燥収縮率、促進中性化深さについて各種試験を行った。促進中性化試験は、クリヤ塗料による中性化抑制効果を確認するため、塗装の有無により供試体を作製した。材齢7日まで標準養生後、28日間20℃60%RHで気中養生したのち促進中性化試験を開始した。塗布は、気中養生の開始から14日目に行い、塗布量は下塗り, 中塗り, 上塗りを合計して360g/m²とした。また、Fig. 4に示す壁試験体を用いて打込み状況を確認した。試験体のうち、A (網掛けなし) は締固めなし, B (網掛けあり) は締固めありとして、比較した。締固めを行う場合は、振動時間は、スランプフロー50cmであることを考慮して10秒以内とした。振動機の挿入間隔は60cm以下とした。

4. 試し練りの結果

4.1 室内試し練り結果

4.1.1 フレッシュコンクリートの試験結果 Fig. 5にスランプフローおよび空気量の試験結果を示す。ともに練混ぜから90分まで管理値内 (50±7.5cm, 4.5±1.5%) であることを確認した。Photo 1にスランプフローが最大となった60分時の広がりとお輪車内の状況を示す。すべての試験時間において材料分離はなかった。なお、練混ぜ直後に採取した試料の塩化物量は0.01kg/m³であった。今回の結果により、フレッシュ性状が長時間保持できることが分かった。

4.1.2 圧縮強度の試験結果 圧縮強度は、材齢7日で26.8N/mm², 材齢28日で40.5N/mm²であり、材齢28日で呼び強度を満足することを確認した。

Table 2 コンクリートの使用材料
Materials of Concrete

種類	概要
水(W)	地下水
セメント(C)	普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm ³)
混和材(BS)	高炉スラグ微粉末4000 (密度2.89g/cm ³)
細骨材(S)	山砂 (表乾密度2.58g/cm ³) + 砕砂 (硬質砂岩, 同2.64g/cm ³) + 砕砂 (石灰岩, 同2.67g/cm ³)
粗骨材(G)	碎石 (硬質砂岩, 表乾密度2.66g/cm ³)
混和剤(SP)	高性能AE減水剤

Table 3 コンクリートの試験項目 (実機)
Concrete Test Items

項目	方法	備考
スランプフロー	JIS A 1150	練混ぜから180分まで
空気量	JIS A 1128	同上
コンクリート温度	JIS A 1156	同上
ブリーディング量	JIS A 1123	
沈降量	JASS 5 T-503	
乾燥収縮率	JIS A 1129-2	長さ変化試験
促進中性化	JIS A 1153	クリヤ塗装有/無
圧縮強度	JIS A 1108	標準養生 (水中) 封かん養生 (20℃, 5℃, 現場)

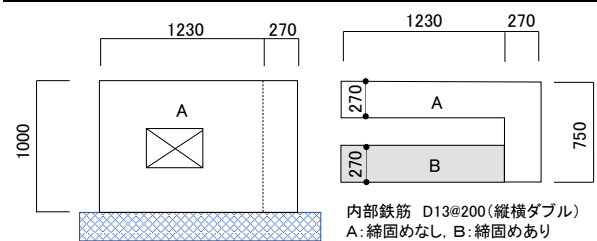


Fig. 4 壁試験体 (左: 立面, 右: 平面)
Wall Mock-Up (Left: Elevation, Right: Plane)

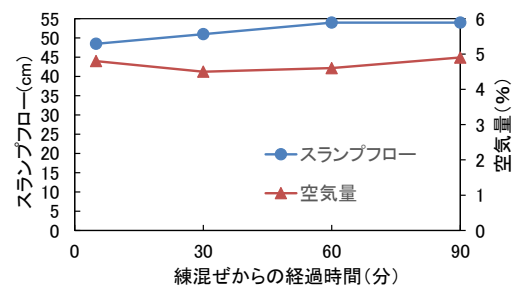


Fig. 5 フレッシュ性状の経時変化 (室内)
Changes of Fresh Properties Over Time (Laboratory Mixing Test)



Photo 1 材料分離抵抗性の状況
Material Segregation Status

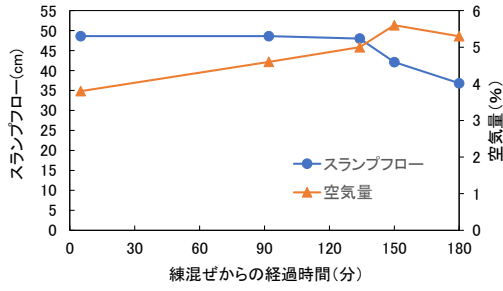


Fig. 6 フレッシュコンクリートの経時変化 (実機)
Changes of Fresh Properties Over Time
(Actual Mixing Test)

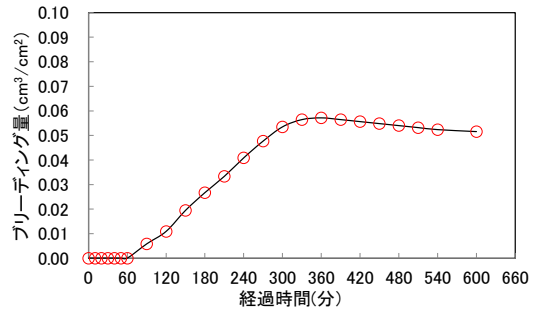


Fig. 9 ブリーディング試験結果
Bleeding Test Result

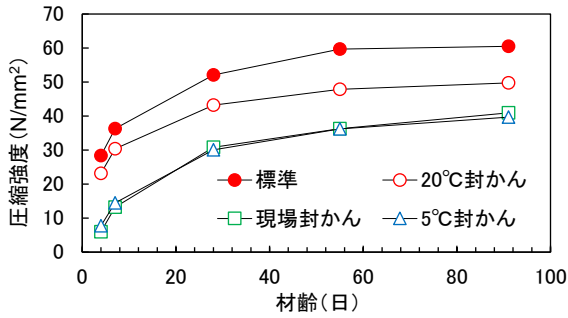


Fig. 7 圧縮強度試験結果
Expression of Compressive Strength

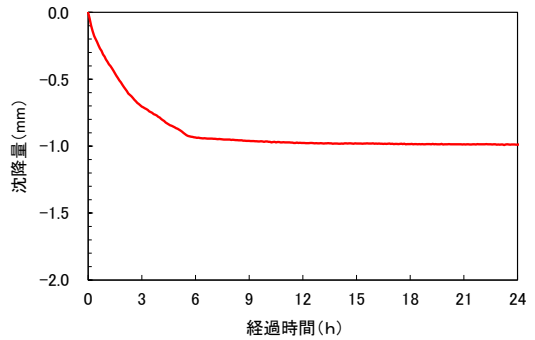


Fig. 10 沈降量試験結果
Settlement Test Result

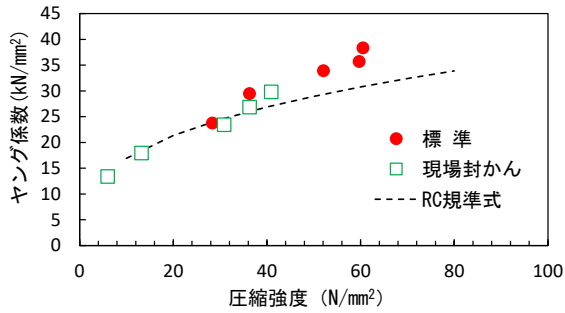


Fig. 8 圧縮強度とヤング係数の関係
Relationship between Compressive Strength and Young's Modulus

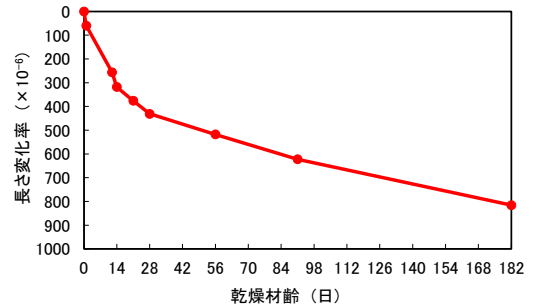


Fig. 11 長さ変化率の測定結果
Drying Shrinkage Test Result

4.2 実機試し練り結果

4.2.1 フレッシュコンクリートの試験結果
フレッシュコンクリートの試験結果として、スランプフローおよび空気量の経時変化をFig. 6に示す。スランプフローは130分までほぼ一定の値を保持したのち緩やかに低下した。180分後は、スランプ22cmまで低下したが、打込みおよび締固めは十分に可能な性状であった。空気量は180分間管理値内であった。練混ぜ直後から180分経過までの時間において材料分離は見られなかった。高流動コンクリートとすることで運搬距離を延ばすことができ、低炭素型のコンクリートの製造に対応できる工場が少ないという課題の対応策となることが示唆された。

4.2.2 硬化コンクリートの試験結果
圧縮強度の発現性状をFig. 7に示す。標準養生の材齢28日の強度は、

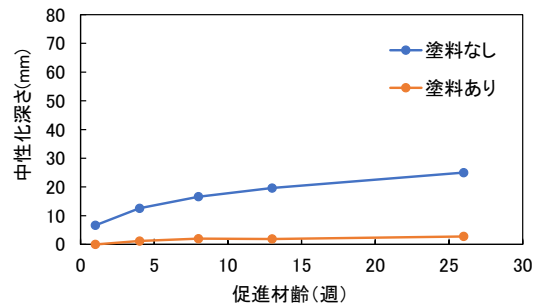


Fig. 12 促進中性化試験結果
Accelerated Neutralization Test Results

52.1N/mm²と調合管理強度を上回った。また、5°Cおよび現場封緘養生の供試体は材齢4日で6N/mm²、材齢7日で13N/mm²となり、この結果から、材齢7日以内に湿潤養生の打ち切りに必要な10N/mm²に到達し⁶⁾、せき板を解体できる時期の目安が得られた。圧縮強度とヤング係数の関係をFig. 8に示す。標準水中養生供試体および封かん供試体ともに圧縮強度とヤング係数の関係はRC規準式でほぼ評価でき、圧縮強度が40N/mm²を超えるとヤング係数はRC規準式で評価される値よりも大きくなる傾向であった。

4.2.3 各種試験結果 ブリーディング量および沈降量の試験結果をFig. 9およびFig. 10に示す。ブリーディング量および沈降量はいずれも測定から6時間で収束し、それぞれ0.06cm³/cm²および1.0mmであった。JASS 5 18節「鋼管充填コンクリート」における充填性を確保するための規定値⁶⁾（ブリーディング量0.1 cm³/cm²以下、沈降量2.0mm以下）を満足することが確認できた。このことからCFT造の充填コンクリートへ適用できる可能性があることが分かった。長さ変化試験の結果をFig. 11に示す。乾燥材齢182日の収縮ひずみは 8.16×10^{-4} であった。乾燥収縮率の結果から修正ベーススマレー法⁷⁾により壁部材のひび割れの発生を予測すると、壁長さ7mに対し2本程度（幅0.28mm）となった。この結果を踏まえ、本工事では誘発目地を3m以内の間隔で設置する計画とした。

促進中性化試験の結果をFig. 12に示す。促進材齢26週の促進中性化深さは、クリヤ塗装なしで25mm、クリヤ塗装ありで2.8mmあり、2章で仮定した0.3倍以下であることを確認した。

4.2.4 壁試験体への打込み結果 壁試験体の打込みは、片側からコンクリートを流し込むことでほぼ平坦に打込むことができた。締固め前のコンクリートの自重による流動勾配は約12%であり、スランプフロー50cmの場合は20%程度とする文献⁸⁾よりも小さかった。これはスランプフローの大きさ以外に使用材料や配筋条件が影響していることが考えられる。Photo 2に壁試験体の仕上り状況を示す。締固めなしとしたAの壁表面では、締固めを行ったBよりも気泡が多く観察された。この結果から今回は打放し仕上げであることを考慮して、締固めを行うこととした。締固めなしとしたAのエリアから採取した材齢91日におけるコア供試体の圧縮強度は43.0N/mm²であり、耐久設計基準強度を上回った。また、同じく材齢91日にてコア供試体を採取して中性化深さを測定したところ、クリヤ塗装（コンクリート打込み後4週間で施工）した箇所では0mmであることを確認した。

5. 地上構造物への適用結果

5.1 打込み状況

建築物の壁部材は、厚さ270（構造厚250）mm、高さ2.4～2.7mであり、壁長さは最長となる部分で1辺11.5mである。打込みは、4層の回し打ちとし、高流動コンクリート

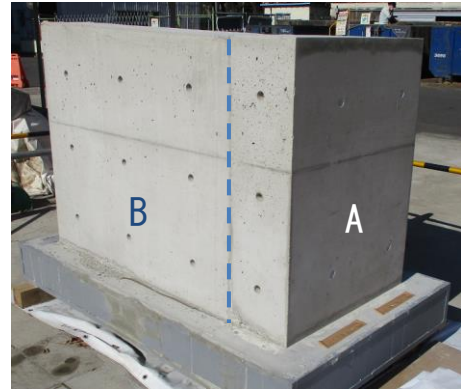


Photo 2 壁試験体の仕上がり状況
Finished Condition of Wall Mock-Up



Photo 3 壁部材への打込み状況
Status of Concrete Placement on Wall Members



Photo 4 建物の外観
Exterior of the Building

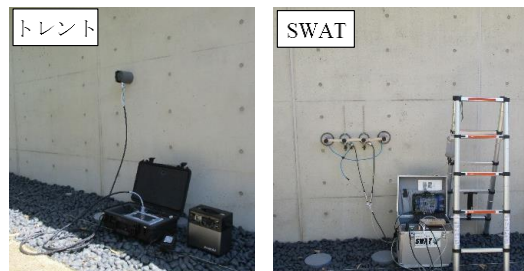


Photo 5 表層品質試験の状況
Status of Surface Quality Test

ではあるが、標準的な方法とした。Photo 3に打込み状況を示す。締固めは、壁試験体の結果を反映し、最下層を15秒以内、それ以外は10秒以内とした。約20m³を約3時間かけて比較的ゆっくりと打ち込んだ。

5.2 仕上がり状況

せき板の解体は、材齢5日にて現場封かん養生供試体で13.1N/mm²を確認できたため、材齢6日で脱型した。材齢28日標準養生の圧縮強度は45.8N/mm²と調合管理強度を上回った。

建物の外観をPhoto 4に示す。豆板やセパレータ周りの沈降ひび割れもなく、美観性に優れた仕上がり状況であった。打込みの約2か月後、コンクリートの含水率が5%以下となったことを確認してクリヤ塗装を行った。

5.3 表層品質の確認

クリヤ塗装から27日後に、外壁面の表層品質試験を行った。試験項目は、表層透気試験（トレント）⁹⁾と表面吸水試験（SWAT）¹⁰⁾であり、前者は、CO₂ガスやO₂ガスの遮断状況の評価するものであり、後者は、雨水などの水分の遮断状況の評価するものである。試験状況をPhoto 5に示す。試験結果をTable 4に示す。表中のグレード区分は、それぞれの文献^{9),10)}に準じた。壁面の表層透気係数および表面吸水速度は、非常に小さい値であり、高い遮蔽性能が得られていることを確認した。今後も定期的にこれらの測定を行い、クリヤ塗料による中性化抑制効果の持続性を確認する予定である。

6. まとめ

環境配慮を目的に、高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のクリーンクリートをコンクリート打放し仕上げの壁部材へ適用した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) スランプフロー50cmの高流動コンクリートとして計画し、練混ぜから90分間において、材料分離はなく、スランプフローおよび空気量は管理値以内であることを確認した。さらに90分以降も180分まで打込みおよび締固め可能なフレッシュ性状を確認できた。
- 2) 標準養生した供試体の圧縮強度は材齢28日において呼び強度を上回った。また、5℃の低温環境下においても材齢7日以内に10N/mm²以上となることが確認できた。
- 3) 比較的ゆっくり打込むことで、材料分離に起因する豆板や沈降ひび割れなどを生じることなく、美観性に優れた打放し仕上げとすることができた。
- 4) クリヤ塗装により中性化抵抗性を付与でき、かぶり厚さを増大することなく、耐久性を確保することができた。

クリーンクリートは低炭素性に優れる一方、中性化の進行が速く、かぶり厚さを設計値よりも大きくするという対策が必要となるため、地上構造物への適用が進みにくかった。今回の実績を基に、クリーンクリートの地上構造物への普及拡大を図りたい。

Table 4 外壁面の塗装後の表層品質

Surface Quality after Clear Coating on the Outer Wall		
測定位置	表層透気係数 kT値(10 ⁻¹⁶ m ²)	600秒時点での 表面吸水速度 (ml/m ² /s)
南面	0.001 (優)	0.025 (良)
西面	0.000 (優)	0.005 (良)
北面	0.000 (優)	0.034 (良)

※カッコ内の表記はグレード区分^{9),10)}

謝辞

適用に当たり関東宇部コンクリート工業株式会社府中工場ならび材料メーカの皆様に多大なご協力をいただいた。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 小林利充, 近松竜一, 溝渕麻子, 一瀬賢一: 低炭素型のコンクリート「クリーンクリート™」の開発, 大林組技術研究所報, No. 75, pp. 1-8, 2011
- 2) 小林利充, 一瀬賢一, 並木憲司: 低炭素型のコンクリート「クリーンクリート」, 大林組技術研究所報, No. 80, pp. 1-4, 2016
- 3) 小林利充, 溝渕麻子, 近松竜一, 一瀬賢一: 混和材を高含有したコンクリートの強度発現および促進中性化に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 118-123, 2012
- 4) 植松俊幸, 堀田和宏, 小林利充, 神代泰道: コンクリート打放しの耐久性を向上する仕上げ材「シェルトクリヤ™」の適用, 大林組技術研究所報, No. 85, pp. 1~2, 2021
- 5) 日本建設業連合会: 高流動性コンクリートの利用ガイドライン, 2020
- 6) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2018
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006
- 8) 依田和久, 松田拓, 古川雄太, 木村仁治, 塩田博之, 太田貴士, 梅本宗宏: 高流動性コンクリートの施工性と躯体の品質評価に関する研究(その2): 実大模擬試験体実験の結果と効果の検討, 日本建築学会技術報告集 第27巻 第65号, pp. 36-41, 2021年2月
- 9) 土木学会: 構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会(335委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演梗概集, コンクリート技術シリーズ, No. 80, pp. 30-36, 2008
- 10) 田島涼, 小松怜史, 細田暁: 注水完了までの時間の差が表面吸水試験の品質評価に及ぼす影響, 土木学会第71回年次学術講演会, pp. 957-958, 2016.9