

3. 名古屋支店改修工事への環境配慮型コンクリートの適用

Application of environment-friendly concrete to Nagoya branch renovation work

新田 稔*1 山崎 順二*2

要 旨

リニューアル工事における脱炭素化や環境配慮型建築物への改修ニーズに対応できる要素技術としての低炭素もしくは副産物利用を主要因とした環境配慮型コンクリートの実装のため、高炉スラグ微粉末高含有コンクリートと高炉スラグ細骨材使用コンクリートの2種類を名古屋支店改修工事に適用した。これらの環境配慮型コンクリートは生コン工場の現有設備を利用して製造することができ、品質面においても JIS に適合したコンクリートとして作業所に受入れられ、ワーカビリティは良好であり、通常生コンクリートと同様に扱うことができるものである。

本報は、最初に、産業副産物に由来する各種スラグ系細骨材を使用した環境配慮型コンクリートの特性を示し、これらの実験結果や研究成果に基づき、名古屋支店改修工事(作)に供給可能な2種類の環境配慮型コンクリートを選定して実施工に適用した事例について報告する。

キーワード：環境配慮型コンクリート／低炭素／資源循環／CO₂排出量

1. はじめに

SDGs にかかる低炭素化への技術的取組みに対するコンクリート材料面からの貢献を主目的として、環境配慮型コンクリートの研究開発をこれまで推進してきた。当社では、「よりよい循環」をキーワードとして掲げた Good cycle Project が公表・推進されており、この取組みのひとつに名古屋支店リニューアル工事が位置づけられている。

そこで、当社のリニューアルブランディングに資する要素技術の実装およびその後の利用促進を目指し、低炭素もしくは副産物利用を主要因とした2種類の環境配慮型コンクリートを本工事に採用することを提案した。

本改修工事に適用した2種類の環境配慮型コンクリートのうち、普通ポルトランドセメント（以下、N）を高炉スラグ微粉末（以下、BF）と置換した低炭素型の「高炉スラグ微粉末高含有コンクリート」は、製鉄所から排出される産業廃棄物である高炉スラグ微粉末をセメントと置換（3R：リユース）することで廃棄物の抑制に寄与し、セメントの製造に由来する二酸化炭素の排出量を最大約60%削減することができる。

他方、資源循環型の「高炉スラグ細骨材使用コンクリート」は、生コンクリートに多用されている人工の砕砂を製鉄所の副産物である高炉スラグ細骨材で全量置換（3R：リサイクル）し、さらに、フレッシュコンクリートの品質改善を目的に火力発電所の副産物であるフライアッシュ

（以下、FA）を混和材として混合使用した、国内でも類をみない環境配慮型コンクリートである。

なお、前者の高炉スラグ微粉末高含有コンクリートは、当社を含むゼネコン13社の共同研究で2021年2月に（一財）日本建築総合試験所の建設材料技術性能証明を取得した「CELBIC-環境配慮型BFコンクリート」を基本として技術展開・応用したものであり、後者は、産業廃棄物抑制と有効利用などを意図して研究開発したものである。

2. 副産物細骨材コンクリートの基礎的性質

2-1. 実験概要

製鉄過程や非鉄金属の製錬により発生する産業副産物に由来する副産物細骨材として、高炉スラグ細骨材（以下、BFS）、電気炉酸化スラグ細骨材（以下、EFS）、フェロニッケルスラグ細骨材（以下、FNS）、銅スラグ細骨材（以下、CUS）を選定した。本実験では、副産物細骨材の種類および混合率の違いがコンクリートの性状に及ぼす影響を調査するための基礎的実験を行った。

2-2. 実験計画

実験に供した細骨材の品質を表-1に示す。副産物細骨材として前述のFNS、CUS、EFS、BFSの4種類と、人工砕砂（以下CS）を使用した。

*1 東京本店建築部 品質管理室 兼 技術研究所 建築材料研究グループ

*2 技術研究所 建築材料研究グループ 兼 大阪本店建築部 品質管理室

ここで、骨材の平衡気乾含水率は、温度 20℃、相対湿度 60%RH の恒温恒湿室内に静置した際の含水率とし、恒温恒湿室内にて表乾状態にした後、質量が恒量になるまで静置し、その後 105±5℃で絶乾状態にして式(1)より算出した。

$$\text{平衡気乾含水率 (\%)} = (\text{Wd}-\text{Wz}) / \text{Wz} \times 100 \quad (1)$$

ここに、Wd：恒量になった時の質量(g)

Wz：絶乾質量(g)

また、比表面積は BET プロット法により相対圧力 30% における吸着量から算定した。なお、これらの比表面積は内部空隙を含んだ値である。

スラグ系細骨材の品質について、表乾密度は、いずれのスラグ系細骨材も CS に比べて大きく、吸水率については FNS が最も大きく、その他は CS よりも小さい。これは、CUS, EFS, BFS 成分中に SiO₂ (ガラス質) が多く含まれていること、さらに CUS, EFS については鉄分を含有しているためである。また、平衡気乾含水率については CS と比較していずれも小さく、比表面積は CUS が極端に小さく、FNS, BFS はほぼ同等であった。

表-1 使用した細骨材の品質

細骨材種類	記号	表乾密度 (g/cm ³)	微粒分量 (%)	吸水率 (%)	平衡気乾含水率 (%)	比表面積 (m ² /g)
砕砂	CS	2.64	4.7	1.78	0.54	6.45
フェロニッケルスラグ細骨材	FNS	3.02	3.6	2.05	0.07	0.51
銅スラグ細骨材	CUS	3.49	3.2	0.30	0.05	0.18
電気炉酸化スラグ細骨材	EFS	3.50	2.0	0.35	—	—
高炉スラグ細骨材	BFS	2.72	3.1	1.36	0.11	0.61

コンクリートの調合概要を表-2に示す。FNS および BFS の混合率は 50%および 100%の 2 種類、CUS および EFS の混合率は 50%のみとした。水セメント比は 50%とし、セメントには N を使用した。粗骨材は最大寸法 20mm の人工砕石を使用した。

フレッシュコンクリートの練上がり時のスランプの目標値を 18±2.5cm、空気量を 4.5±1.5%とし、事前に試し練りを実施して調合を決定した。

2-3. 予備実験の結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの性状

表-3に、練上がり時のフレッシュコンクリートの試験結果を示す。副産物骨材を混合使用することにより一

般にフレッシュコンクリートの空気量がやや増大する傾向にあると考えられたが、本実験では空気量調整剤の使用量を調整することにより、FNS, CUS, EFS, BFS を使用した全てのコンクリートにおいてフレッシュコンクリートの目標値を満足した。

表-2 調合概要

記号	W/C (%)	細骨材種類		混合率 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		S ₁	S ₂			W	C	S ₁	S ₂	CG ₁	CG ₂
CS0	50	CS	—	0	46.9	180	360	826	0	374	564
FNS50			FNS	50	46.9	180	360	413	473	374	564
FNS100				100	49.9	180	360	0	997	445	445
CUS50			CUS	50	47.5	180	360	413	546	374	564
EFS50			EFS	50	49.9	180	360	439	578	445	445
BFS50			BFS	50	41.5	180	360	413	426	374	564
BFS100				100	49.9	180	360	0	898	445	445

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

記号	S ₂ 混合率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	Con 温度 (°C)
CS0	0	20.0	4.7	19
FNS50	50	18.0	4.9	19
FNS100	100	19.5	4.9	25
CUS50	50	17.0	3.3	20
EFS50	50	20.0	4.3	26
BFS50	50	18.0	4.1	21
BFS100	100	20.5	5.2	25

一方、副産物細骨材を使用した調合においては、CS に比べて細骨材自体の保水性が小さいためにブリーディング量が多くなることに懸念される。

そこでまず、予備実験として実施した副産物骨材を 50%混合使用したコンクリートの FNS50, CUS50, BFS50 におけるブリーディング試験を実施した。試験結果を図-1に示す。いずれも CS に比べてブリーディング量が多くなり、CUS と BFS では CS の 2 倍以上に増大しているが、いずれの調合においても、日本建築学会収縮ひび割れ指針(案)に示されるブリーディング量の目標値 0.3cm³/cm² 以下を満足している。一般に、ブリーディング量は細骨材中に含まれる微粒分量が少ない場合に増大する傾向にあるが、この結果は、スラグ系細骨材の微粒分量が CS よりもやや少ないことが要因と考えられる。予備実験の結果から、副産物細骨材を 100%使用した場合にはブリーディング量がさらに増大することが予測される。特に、CUS のブリーディング量は最も大きく、100%での使用は困難であると推察される。

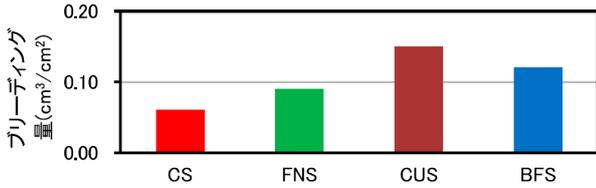


図-1 副産物細骨材のブリーディング量 (50%混合)

(2) 硬化コンクリートの性状

圧縮強度試験結果を図-2に、ヤング係数の測定結果を図-3に示す。両図には、CSを用いたコンクリートの圧縮強度 (48N/mm²) およびヤング係数 (30kN/mm²) に対して、副産物細骨材を使用したコンクリートの圧縮強度およびヤング係数の比率を示している。

圧縮強度比およびヤング係数比は、副産物細骨材の混合率が多いほど増加し、特に、FNSを100%用いたコンクリートの圧縮強度比の増大傾向が大きくなった。圧縮強度およびヤング係数の増進効果には、副産物細骨材の表層部とセメントマトリックスとの反応が生じており、遷移帯が若干でも改善されている可能性があると考えられる。

(3) 収縮ひずみ (長さ変化率)

図-4に、CSを用いたコンクリートの収縮ひずみ (7×10⁻⁴) に対する副産物細骨材を使用したコンクリートの収縮ひずみの比率を示す。砕砂CSを用いたコンクリートに対し、副産物細骨材を用いたコンクリートの収縮ひずみは、混合量に応じていずれも低減され、100%では低減効果が顕著となることが確認できる。このひずみの低減についても、上記のセメントマトリックスと副産物骨材界面の影響とともに、骨材自体の剛性にも関連しているものと推察される。

以上の予備実験の結果から、副産物細骨材を使用したコンクリートは、ブリーディング量が増大する反面、圧縮強度、ヤング係数は混合率が増大するほど大きくなり、かつ、収縮ひずみが低減されることが確認できた。

環境配慮の観点から更に有意なコンクリートを思考するためには、ブリーディング量を低減するための対策を講じる必要があると考える。

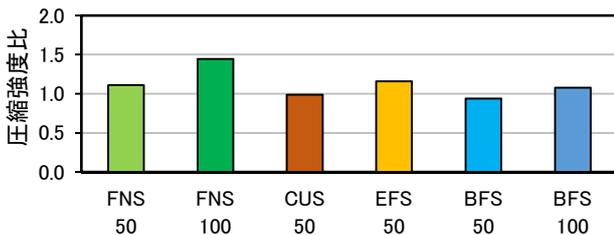


図-2 CSに対する圧縮強度比

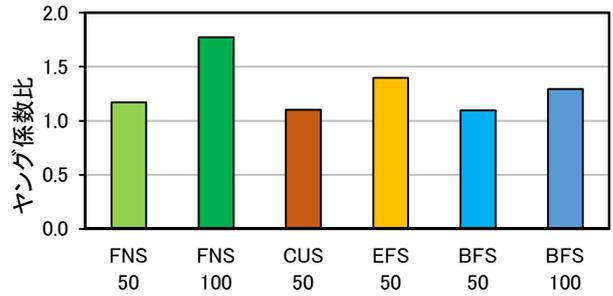


図-3 CSに対するヤング係数比

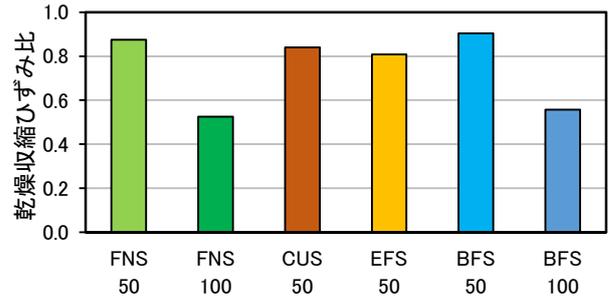


図-4 CSに対する収縮ひずみ比

2-4. ブリーディング量の低減に関する検討

(1) コンクリートの調査概要

副産物細骨材を使用したコンクリートのブリーディング量を低減するための手法として、火力発電所の副産物であるFA(Ⅱ種)を混和材料として副産物細骨材の20vol%の割合で混合使用することとした。また、混合率50%の際にブリーディング量が最も多くなったCUSについては本検討から除外し、実験の対象としたコンクリートは比較用の人工砕砂CSを使用したコンクリートを含んで全7調査とした。

表-4に、実験に供したコンクリートの使用材料を示す。副産物細骨材として、ここではFNS, BFS, EFSの3種類を用いて検討した。その他の材料は予備実験と同様であり、セメントにはNを、比較用の細骨材として砕砂CSを使用した。

表-5に調査の概要を示す。表中の種類記号は、「使用した細骨材-副産物細骨材混合率-フライアッシュ混合率」を表す。全ての調査において、水セメント比を50%、単位粗骨材量を890kg/m³の一定とした。副産物細骨材の混合率はFNSとBFSを100%、EFSのみ50%とした。さらに、副産物細骨材の20vol%をFAで内割置換した。

(2) フレッシュコンクリートの性状

表-6にフレッシュコンクリートの性状を示す。化学混和剤(AdおよびAE)の使用量を調整したが、練上がり状況に示すようにFAを混合することで粘性がやや大きくなる傾向が伺えた。BFS100においては粘性が極めて

大きくスランプおよびスランプフローが小さくなった。FA を 20vol%混合することによって粘性とワーカビリティがやや改善された。

表-4 使用材料

使用材料	記号	骨 材 品 質
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm ³)
フライアッシュ	FA	JIS II 種(密度:2.32g/cm ³ , 強熱減量:1.2%)
副産物 細骨材 (S2)	FNS	フェロニッケルスラグ(密度2.9g/cm ³ , 吸水率2.18%,
	BFS	高炉スラグ(密度 2.72g/cm ³ , 吸水率 0.44%,
	EFS	電気炉酸化スラグ(密度 3.52g/cm ³ , 吸水率0.35%,
砕砂(S1)	CS	硬質砂岩砕砂(表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率1.76%)
砕石	G	茨木産砕石(表乾密度 2.69g/cm ³ , 実積率 58.0%)
混和剤	Ad	高性能 AE 減水剤(標準形)
	AE	空気量調整剤

表-5 調合表

記号	混合率 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						Ad (C×%)	AE
			W	FA	C	S ₁	S ₂	G		
CS	0	49.9	180	0	360	878	0	890	0.8	3A
FNS100	100	49.9	180	0	360	0	987	890	0.6	0.5A
FNS80-20	80	44.4	180	147	360	0	789	890	0.5	30A
BFS100	100	49.3	185	0	370	0	875	890	0.2	1A
BFS80-20	80	43.8	185	143	370	0	702	890	1.0	30A
EFS50	50	49.9	180	0	360	439	581	890	0.7	1A
EFS40-10	40	47.3	180	74	360	439	465	890	0.2	20A

表-6 フレッシュコンクリートの性状

調合	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	練上がり状況
CS	18.5	32.5×31.5	5.0	25.0	良
FNS100	21.5	43.0×42.0	3.7	25.0	やや軟
FNS80-20	18.5	32.5×31.5	3.5	26.0	粘性大
BFS100	17.5	27.0×26.5	4.8	25.0	粗
BFS80-20	19.0	32.5×31.5	4.5	25.0	粘性大
EFS50	18.5	31.0×30.5	3.5	25.0	やや粗
EFS40-10	16.5	28.5×28.0	4.1	25.0	良

(3) ブリーディング量

図-5 にブリーディング試験の結果を示す。予備試験と同様の傾向であり、副産物細骨材を使用することによってCS に比べてブリーディング量は増加している。この要因は、副産物細骨材の密度がCS よりも大きいことや、細骨材表面が滑らかであるためと考えられる。

一方、FA を 20vol%混合することによって副産物細骨材を使用したコンクリートのブリーディング量が大きく改善され、CS コンクリートとほぼ同等となった。この結果から、FA を混合することによるブリーディング量の大きな低減効果が確認できた。

以上、ブリーディング量低減のための検討の結果、副産物細骨材を使用したコンクリートに FA を適切に混合使用することによって、ブリーディング性状が大きく改善され、良好なフレッシュ性状を確保できることが分かった。

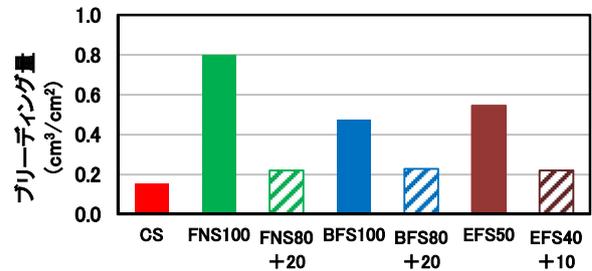


図-5 フライアッシュ使用によるブリーディング量

(4) 副産物細骨材コンクリートの収縮ひずみ

副産物細骨材を使用したコンクリートのブリーディング量を低減するためには、FA の混合が有効であることが確認できた。そこで、FA の混合が副産物細骨材を使用したコンクリートの収縮ひずみに及ぼす影響を評価した。

図-6 に、φ100×200mm 供試体による自由収縮ひずみの測定結果を示す。予備実験と同様に、BFS および FNS において大きな収縮ひずみ低減効果が得られている。また、いずれの調合においても、乾燥初期から 100 日程度までは FA を混合することにより収縮ひずみの増加量が大きくなる傾向が伺えるが、その後の長期材齢においては FA 混合の有無による収縮量が漸近している。

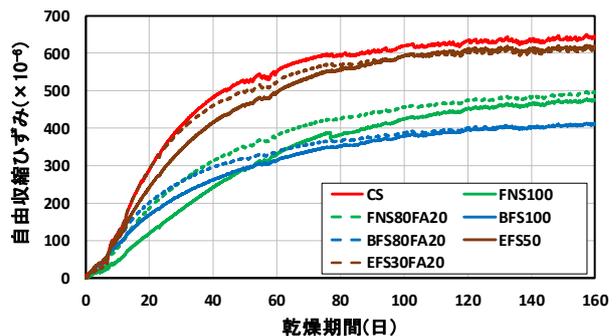


図-6 φ100×200mm 供試体による自由収縮ひずみ

さらに、副産物細骨材コンクリートの実大レベルの壁部材での収縮特性を確認するため、図-7 に示す形状の壁状試験体を作製した。併せて、ブリーディングが収縮ひずみに及ぼす影響を調査するため、高さ方向に 4ヶ所の収縮ひずみを埋込み型ひずみゲージを用いて計測した。

図-8 に、乾燥期間 160 日における自由収縮ひずみの測定結果を示す。壁状試験体においても、副産物細骨材を

使用することによって自由収縮ひずみが低減されることが確認できた。また、高さ方向による自由収縮ひずみの違いつまりブリーディングによる影響は FNS100 を除いてほぼなく、ブリーディング量 $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下のコンクリートにおいては、ブリーディングによる収縮ひずみへの影響は顕著ではないと考えられる。

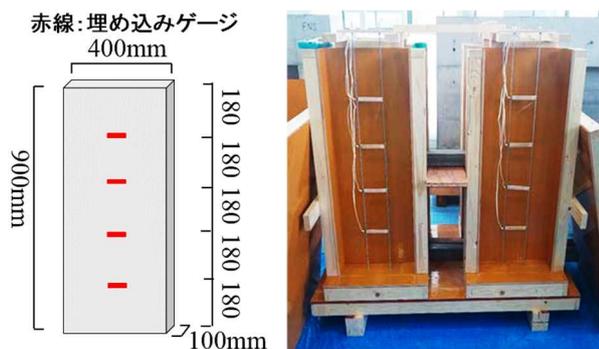


図-7 壁状試験体の形状

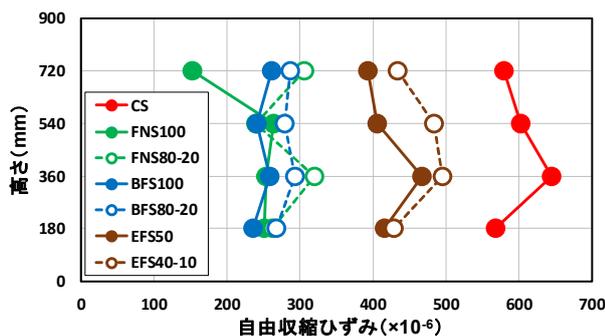


図-8 壁状試験体による高さ別の自由収縮ひずみ

3. 高炉スラグ微粉末高含有コンクリート

高炉スラグ微粉末高含有コンクリートは、当社が 2021 年 2 月に取得した建設材料技術性能証明「CELBIC」の技術を基本としており、具体的には、単位セメント量の 70wt% が BF となるように、N に混和材である BF を混合し、高炉セメント C 種相当のセメントとして生コン工場で製造するものである。しかし、今回の改修工事においては、生コン工場の設備の都合により BB に BF を混合し、高炉セメント C 種相当のセメントとした。これにより、ポルトランドセメントの使用量を最大で 70wt% 程度減少させることができ、その結果、セメント由来の CO_2 排出量を最大で約 60% 程度削減することに繋がる。

4. 名古屋支店改修工事への適用

4-1. 適用の方針

ReQualit のモデル事業として位置付けられた名古屋支店のリニューアル工事において、環境配慮型コンクリ

トを採用するにあたり、まずは地産地消の材料およびレディーミクストコンクリート工場の現有設備で製造できることを最低条件とし、加えて、品質および性能が既往の実験や研究実績によりあらかじめ確認されている環境配慮型コンクリートを選定して本工事に適用することとした。

4-2. 環境配慮型コンクリートの適用部位

本工事では、「高炉スラグ微粉末高含有コンクリート」を建物東面の屋外階段の基礎部に、また、「高炉スラグ細骨材使用コンクリート」を、土材料を表面に塗布する西面ファサードのコンクリート手すりにそれぞれ採用することとした。

4-3. 環境配慮型コンクリートの詳細

ポルトランドセメントを BF と置換した「高炉スラグ微粉末高含有コンクリート」は、本工事においては、BB に BF を混和材として別計量にて混合することにより、高炉セメント C 種相当の BF の含有量 (約 70wt%) を確保した。

また、「高炉スラグ細骨材使用コンクリート」は、砕砂を高炉スラグ細骨材で全量置換し、さらに細骨材の 20vol% を FA で内割置換することで品質改善を図った、前述の実験に含まれる BFS80-20 と同等の水セメント比 50% のコンクリートを実施工に使用することとした。なお、本工事に納入予定の生コン工場は高炉スラグ細骨材 (BFS) を骨材サイロに常備しており、JIS 品のコンクリートの細骨材の一部に使用していることに加え、前章に示した実験結果により砕砂 CS を用いたコンクリートよりも収縮ひずみが低減されることにも考慮して調査を選定した。

4-4. 高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの

性能確認のための試し練り

高炉スラグ微粉末高含有コンクリートは結合材が高炉セメント C 種相当となるため、例えば N や BB と比較して一般に初期強度の発現性が遅延することや長期強度発現の遅れが懸念されるため、室内試し練りにより強度発現性を確認することとした。

試し練りを行ったコンクリートは、工場が JIS 化している BB セメントの標準調査における呼び強度 24, 30, 36 の 3 水準のコンクリートに BF を混合して製造した。

高炉スラグ微粉末高含有コンクリート (BC 相当コン) の材齢 28 日における圧縮強度と結合材水比の関係を図-9 に示す。図中には、工場の BB における B/W- σ 式を併記したが、その工場 BB 算定式よりも約 $5\text{N}/\text{mm}^2$ 安全側の強度発現を示した。この結果から、本工事において使用す

るコンクリートは、JASS 5に基づく調合管理強度に応じた呼び強度を設定することとし、打込み時期に配慮して水結合材比 47% (呼び強度 33 相当) のコンクリートを実施工に使用することとした。

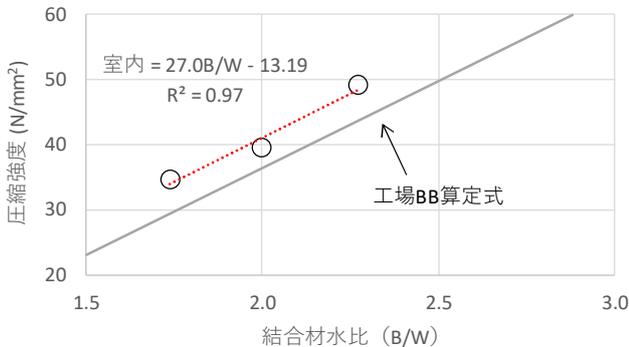


図-9 圧縮強度と結合材水比 (BC 相当コン)

4-5. 実施工

2種類の環境配慮型コンクリートは、生コン工場の現有の設備を使用して製造し、JISA 5308 に示される品質に適合するコンクリートとして作業所に受入れた。打込み時期および打込み量は、高炉スラグ微粉末高含有コンクリートが 2020 年 12 月中旬に約 15m³、高炉スラグ細骨材使用コンクリートは 2020 年 12 月中旬～翌年 2 月の間に約 50m³であった。

生コン工場からの運搬時間は概ね 30 分程度であり、ポンプにて圧送して打込んだ。荷卸し時のフレッシュコンクリートの性状は、いずれもスランプ 21cm～22cm 程度、スランプフローの平均は高炉スラグ微粉末高含有コンクリートが 38cm、高炉スラグ細骨材使用コンクリートが 35cm であり、後者の方がやや粘性が高いコンクリートであることがわかる。施工性についてワーカビリティや圧送性は良好であり、通常の生コンクリートと同様に打込むことができた。

写真-1 に、高炉スラグ微粉末高含有コンクリートを打込んだ外部階段の基礎部の状況を、写真-2 に、高炉スラグ細骨材使用コンクリートを使用した西面の手すり壁を示す。この壁には後に土左官材を塗布するため、型枠に設置した目荒らしシートにより表面処理された後の状況である。



写真-1 外部階段の基礎部



写真-2 西面手すり壁(目荒らし処理後)

6. おわりに

リニューアルブランディングに資する技術開発として研究開発した、脱炭素もしくは SDGs に寄与する 2 種類の環境配慮型コンクリート (高炉スラグ微粉末高含有コンクリート・高炉スラグ細骨材使用コンクリート) を名古屋支店のリニューアル改修工事に適用した。

前者は技術審査証明を取得した「CELBIC」の技術を応用し、普通コンクリートと比較して 60%の削減を実現した低炭素型のコンクリートであり、後者は、副産物の最大限の利用に加え収縮ひずみを普通コンクリートの 50%程度に低減した高品質の環境配慮型コンクリートである。両者とも生コン工場の現有設備で製造でき、特殊な設備を整備する必要が生じなかった。

今後も、納入条件や工場設備などの条件が整うリニューアル工事において環境配慮型コンクリートの積極的活用を推進するとともに、当社のリニューアル工事における脱炭素化や環境配慮型建築物への改修ニーズに応じた ReQuality ブランドとしての実装を展開したい。

【謝 辞】

環境配慮型コンクリートの実施工への適用に際し、名古屋支店改修工事業務所の皆様には多大なるご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 安田慎吾・今本啓一・清原千鶴・原品 武・山崎順二・前田朗：スラグ系細骨材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抑制効果に関する基礎的研究 その 1～2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.381-384, 2019.9
- 2) 安田慎吾・今本啓一・清原千鶴・原品 武・山崎順二・前田朗：スラグ系細骨材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抑制効果に関する基礎的研究 その 3～4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.123-126, 2020.9
- 3) 安田慎吾・今本啓一・清原千鶴・原品 武・山崎順二・加藤猛：スラグ系細骨材を用いたコンクリートの収縮ひずみに及ぼす影響 その 1～2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.165-168, 2021.9