

高炉スラグ混和材高含有コンクリートの橋梁下部工への適用

Construction of Bridge Substructures Using Concrete Highly Containing Blast Furnace Slag Powder Using Blast Furnace Slag as Fine Aggregate

大屋戸理明*1 藺井孫文*2 國岡大亮*3 秋山 博*4 榊原弘幸*5

概 要

環境負荷低減と産業副産物の利用推進を目的として、高炉スラグ微粉末を高含有し高炉スラグ細骨材を用いた環境配慮型コンクリートを橋梁下部工へ適用した。室内実験と実機実験により、その性能が発現することを確認した。対象部材はラーメン式橋台である橋梁下部工の土中に埋設される底版で、コンクリート体積はおよそ 200m³である。実施工のコンクリートについてフレッシュ性状と強度発現性を確認し、所定の目標性能を満足していることが確認できた。なお、中性化の進行に対しては、評価式による試算の結果、十分な性能を有していると推測された。

key words : 高炉スラグ微粉末、高炉スラグ細骨材、CO₂排出量、産業副産物、施工事例

1. はじめに

建設分野では環境負荷の低減が課題となっており、特にセメントの製造過程での CO₂ 排出量を削減することに注目が高まっている。加えて、循環型社会の構築に向け、産業副産物の利用の推進が求められており、これらを背景として、高炉スラグ混和材の利用が進められている。

国内では高炉スラグ微粉末（以下、BF と称す）は、結合材全体に対する使用率が 40～45%の高炉セメント B 種が多く利用されている。より大きな CO₂ 排出削減が期待できる BF 使用率 60～70%の高炉セメント C 種は、市場での流通が少ないので、入手の容易な BF を混和材として高含有させる方法が採られる。BF 高含有コンクリートは、幾つかの建設会社が主導して開発が進められているが、各社ごとに混和材の種類や量などの仕様が相違することが実施上の課題となっている。

これを軽減するためには、JIS 製品などの汎用的な材料を用い、個々の適用物件に対して特別な配慮が不要な、統一的な手順に基づく材料設計・施工が可能で仕組みづくりが求められる。当社を含む 13 の建設会社が共同で開発した環境配慮型コンクリート「CELBIC」¹⁾は、この考えに基づいている。一般に普及している BF を用いており、実験結果に基づき調合設計・施工マニュアル（以下、マニュアルと称す）が整備され、日本建築総合試験所から建設材料技術性能証明を取得している。

筆者らは今回、環境負荷低減と産業副産物の利用推進

を目的として、土木構造物である橋梁下部工に環境配慮型コンクリートを適用した。BF 高含有コンクリートに加え、細骨材として BF と同じく産業副産物である高炉スラグ細骨材（以下、SBF と称す）を適用した。汎用的な材料を用い統一的な手順に基づく材料設計・施工が可能な、マニュアルの考え方を準用した。ここではその概要を示し、今後の類似の取り組みへむけた参考資料とする。

2. 事前試し練り

2.1 試験概要

今回適用する環境配慮型コンクリートが、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと同等の性能を有することの確認を目的として、事前試し練りを実施した。試し練りの実施時期は秋季（標準期）である。まず、室内実験により、フレッシュ性状と強度発現性を確認した。ついで、スケールアップによる影響を確認するため、実機実験を行った。これらの結果をもとに、フレッシュ性

表-1 目標性能

試験項目	試験方法	目標性能
スランプ	JIS A1101	12.0±2.5cm*
空気量	JIS A1128	4.5±1.5%*
コンクリート温度	JIS A1156	5～35℃
圧縮強度**	JIS A1108	30N/mm ² 以上
* 現場着で評価（練上がり直後の目標性能は工場の実績により管理）		
** 圧縮強度試験は材齢 28 日（標準養生）で実施		

*1 Michiaki OYADO

技術本部技術研究所 主席研究員

*2 Magofumi SONOI

技術本部技術研究所 主任研究員

*3 Daisuke KUNIOKA

名古屋支店工事部土木課

*4 Hiroshi AKIYAMA

土木事業本部土木本部 技術部長

*5 Hiroyuki SAKAKIBARA

技術本部 顧問

状（スランプ、空気量）を目標値とするための化学混和剤量の調整を行い、実施配合を決定した。

適用するコンクリートの目標性能を表-1に、使用材料を表-2に、配合表を表-3に示す。結合材として普通ポルトランドセメントとBF4000（JIS A 6206 適合品、表-4）を使用し、後者の使用率は結合材全体の70%とした。スランプの目標値は12cmである。骨材絶乾密度、吸水率、粗粒率を表-5に示す。

2.2 室内実験

適用コンクリートの強度算定式を導出することを目的とし、当該生コン工場の高炉セメントB種の標準配合を参考として室内実験を実施した。施工対象部材の設計基準強度は24N/mm²（普通コンクリート）であり、室内実験の呼び強度として24、27、30N/mm²の3種類を設定した。設計仕様では水セメント比を55%以下と指定しているため、呼び強度24N/mm²のコンクリート（W/B=57%）は実施の対象外であるが、強度算定式導出のために呼び強度24N/mm²についても試し練りを実施している。

室内実験では、強制2軸ミキサ（容量50L）を用いた1バッチ当り40Lの試し練りを行った。材料の投入順序は、骨材半量→C→BF→骨材残り半量→W+Adとし、練混ぜ時間は空練り15秒、W+Ad投入後は90秒とした。呼び強度24N/mm²の試し練りでは、練上がり直後にフレッシュ性状試験を実施し、その後に圧縮強度試験用の供試体を採取した。呼び強度27N/mm²と30N/mm²の試し練りでは、練上がりの直後と、現地着を想定した練混ぜ60分後の2回、フレッシュ性状を確認し、60分後の確認の後に圧縮強度試験用の供試体を採取した。硬化コンクリートの圧縮強度試験は、標準養生した供試体を用い、特に初期材齢での強度発現の経過を確認するため、試験材齢で7日、14日、21日、28日、56日の5水準について実施した。

フレッシュ性状の試験結果を図-1に示す。スランプは練混ぜ直後でやや大きめであったが、施工時を想定した経過時間60分で目標性能（表-1）を満足した。過去の研究²⁾でも経過時間60分でスランプの低下は1cm程度とほとんどロスがなく、今回も同様であった。空気量も過去の研究²⁾と同様、練混ぜ直後で目標性能に近く、60分後の変化もほとんど見られなかった。コンクリート温度は21℃

表-2 使用材料

名称	種類	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	C
混和材	BF 4000（石こう添加あり）	BF
細骨材	砂岩砕砂	S1
	山砂	S2
	高炉スラグ細骨材	SBF
粗骨材	砂岩砕石 1505	G1
	砂岩砕石 2010	G2
化学混和剤	AE 減水剤、減水剤	Ad

表-3 配合表

呼び強度	W/B (%)	水		結合材 B		細骨材		粗骨材		化学混和剤 Ad × C (%)	
		W		C	BF	S1	S2	SBF	G1		G2
24	57	167		88	205	430	210	221	487	487	2.93
27	52	167		96	225	417	202	216	487	487	3.21
30	49	167		102	239	409	200	210	487	487	3.41

単位：記載ないものは kg/m³

表-4 高炉スラグ微粉末（BF）の品質

品質	JIS A 6206 規格値	試験値
密度 (g/cm ³)	2.80 以上	2.88
比表面積 (cm ² /g)	3500 以上 5000 未満	4120
活性指数 (%)*	55/75/75 以上	71/96/108
フロー値比 (%)	95 以上	98
酸化マグネシウム (%)	10.0 以下	6.40
三酸化硫黄 (%)	4.0 以下	2.03
強熱減量 (%)	3.0 以下	1.07
塩化物イオン (%)	0.02 以下	0.006

* 材齢 7日/28日/91日の順に表記

表-5 骨材絶乾密度、吸水率、粗粒率

	S1	S2	SBF	G1	G2
絶乾密度 (g/cm ³)	2.61	2.51	2.69	2.64	2.64
吸水率 (%)	0.96	1.79	1.06	0.89	0.79
粗粒率 (%)	2.70	2.71	2.23	6.45	7.01

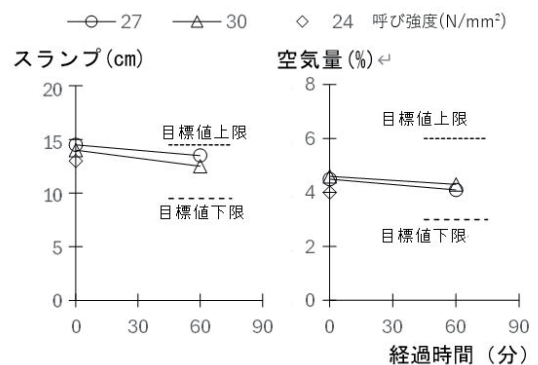


図-1 フレッシュ性状の試験結果

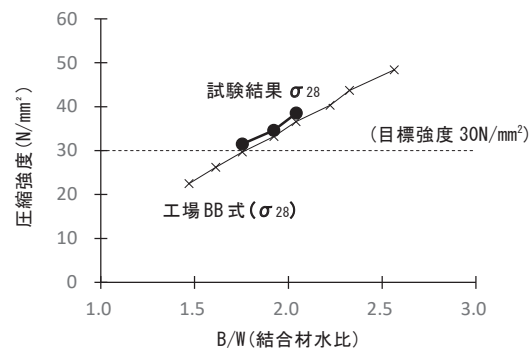


図-2 B/W と圧縮強度の関係（室内実験）

(試験室温度 22°C) で、同様に目標性能を満足した。

B/W と圧縮強度の関係を、当該生コン工場の高炉セメント B 種強度算定式 (BB 式) と比較して図-2 に示す。今回の試験結果では、全ての B/W で BB 式よりも強度が高い結果となった。圧縮強度の経時変化を図-3 に示す。材齢 28 日圧縮強度 σ_{28} は、全ての呼び強度・W/B で目標とする 30N/mm^2 を上回った。材齢 28 日の強度を基準とした圧縮強度比の経時変化を、グラフから読み取った既往の実験値³⁾と比較して図-4 に示す。材齢 28 日以降で既往の値より高めとなっている。既往の研究⁴⁾では SBF 使用コンクリートは潜在水硬性があり、天然砂使用時よりも長期材齢で 5~18%程度高いとの報告がある。今後の長期性状について確認を行う予定である。

2.3 実機実験

室内実験で確認した性能が実機でも同様に発現することを確認するため、W/C \leq 55%の呼び強度 27、 30N/mm^2 のコンクリートを対象として実機実験を実施した。強制 2 軸ミキサ (容量 3.0m^3) を用い、1 バッチ当り 1.0m^3 として、呼び強度 27、 30N/mm^2 の順に実施した。工場の実績により、材料は一括投入とし、練混ぜ時間は 25 秒とした。使用材料と配合は、室内実験と同じであり、C と BF は累加計量を行っている。

練上がり直後にフレッシュ性状を確認し、60 分後にフレッシュ性状が目標性能を満足していることを確認したのち、圧縮強度試験用の供試体を採取した。硬化コンクリートの圧縮強度の確認時期、コンクリートの試料採取および供試体作製方法・養生方法は、室内実験と同一とした。

フレッシュ性状の試験結果を図-5 に示す。スランプは練上がり直後で目標値中央値に対してやや低めであり、施工時を想定した経過時間 60 分でさらに 1cm 程度低下したが、いずれも目標性能を満足した。経過時間 60 分で 1cm 程度のスランプの低下は、過去の研究⁵⁾と同様であった。空気量は目標値内でやや多めであり、経過時間 60 分で若干増大したがその差は小さく、コンクリート温度が 28~29°C (外気温 26°C) であったことも含め、いずれも目標性能を満足した。

圧縮強度の経時変化を図-6 に示す。グラフから読み取った既往の呼び強度 33N/mm^2 の実験値⁶⁾ (標準期実機実験、BF70、標準養生) を併記した。材齢 28 日以前で W/B=52% (呼び強度 27) と W/B=49% (呼び強度 30) の差が小さく、この原因は特定できていないが、どちらも目標強度の 30N/mm^2 を材齢 21 日で上回った。材齢 28 日の強度を基準とした圧縮強度比の経時変化を、同様に既往の実験値と比較して図-7 に示す。室内実験と同様、材齢 28 日以降で既往の値と比較して高めとなっており、長期での強度増進が伺われる。

室内実験・実機実験の結果を踏まえ、以下の理由により、実施工コンクリートの呼び強度を 27N/mm^2 と設定した。配

合強度式は、室内実験結果 σ_{28} が BB 式を上回っている (図-2) ことから、BB 式を採用した。

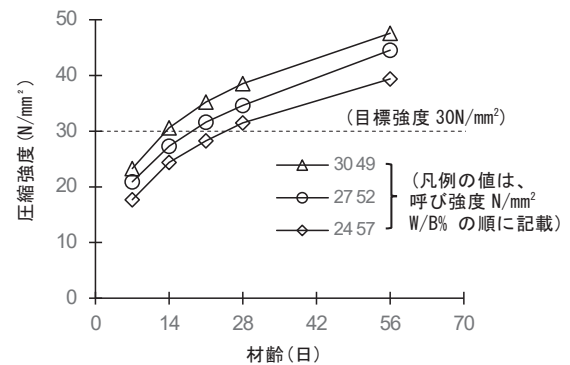


図-3 圧縮強度の経時変化

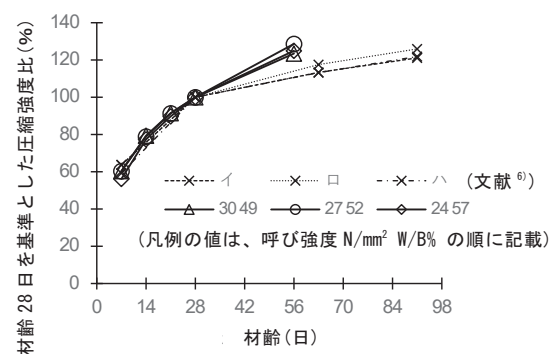


図-4 圧縮強度比の経時変化

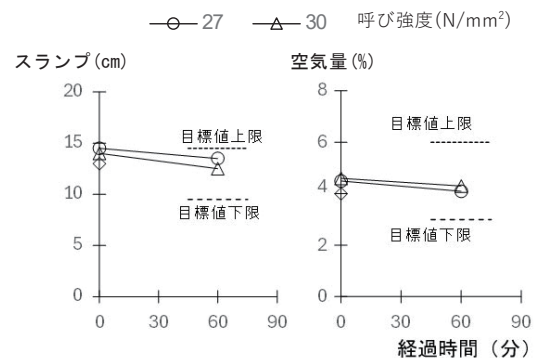


図-5 フレッシュ性状 (実機実験)

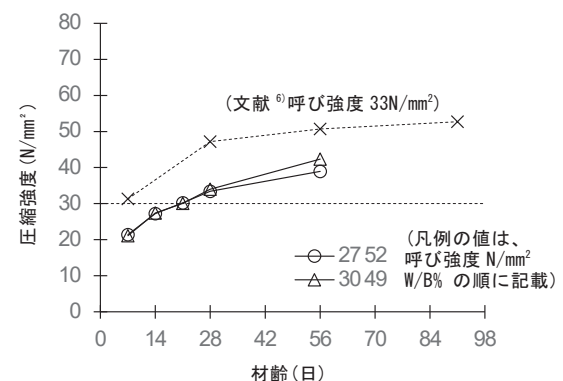


図-6 圧縮強度の経時変化 (実機実験)

- (1) フレッシュ性状はいずれも目標性能を上回った。
- (2) 呼び強度 27N/mm² の室内実験結果と実機実験結果が概ね一致した。
- (3) 呼び強度 27N/mm² の室内実験結果と実機実験結果は、材齢 3 週以降、目標強度 30N/mm² を上回った。

なお、今回準用した CELBIC のマニュアルは、建築構造物への適用を想定して作成されている。今回の対象部材は土木構造物であり、建築設計で用いられる構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ は考慮していない ($_{28}S_{91}=0N/mm^2$ ここに、構造体 σ_{91} =標準養生 $\sigma_{28-28}S_{91}$ かつ $_{28}S_{91} \geq 0$)。

3. 実施工

3.1 実施工の概要

今回のコンクリートの適用対象部材は、土中に埋設される橋梁下部工であるラーメン式橋台（ボックスカルバート型）の底版部分（図-8、A1、A2 橋台と併せて 2 部材）である。対象の部材は 8.00×12.39×1.00(m) で、2 部材合計体積は約 200m³ である。当該部材は天端が計画地盤高からの深さ約 600mm の土中に埋設される。底版下の土壌は、深さ約 4.4m の範囲で深層混合処理による地盤改良を実施している。底版の補強鉄筋は、軸方向鉄筋の芯かぶり設計値が 150mm であり、実かぶり 115mm を確保している。施工場所は国内の温暖地域であり、秋季（標準期）にコンクリート工事を実施した。A2 橋台の打設を午前に行い、同日午後に A1 橋台の打設を行った。

実施コンクリートの目標性能、使用材料ならびに配合は試し練り（呼び強度 27N/mm²）と同様である。試験方法は、A2 橋台の打設前と A1 橋台の打設前に、運搬時の性状変化を考慮して実施工現場にて実施し、その後に圧縮強度試験用の供試体を採取した。

3.2 試験結果、施工状況

受入れ時検査結果を表-6 に示す。スランプ、空気量とも、目標性能を満足している。コンクリート温度も目標性能（5~35℃）の範囲内にある。圧縮強度試験結果を、実機実験結果と併せて図-9 に示す。 σ_7 は実機実験結果（呼び強度 27N/mm²）と比較して小さいが、 σ_{28} は実機実験結果とほぼ等しく、目標性能 30N/mm² を上回った。

打設状況を写真-1 に、打設後の状況を写真-2 に示す。4.25m³ アジテータ車（積載 4m³）によりフレッシュコンクリートを輸送した。運搬時間は約 10 分で、1 車あたりの荷卸しは 10 分前後であった。打設はピストン式コンクリートポンプ圧送（ロングブーム仕様）によって行った。ポンプ車の最大吐出量は 160m³/h、吐出圧は 8.5~13.0MPa である。施工時の吐出圧力はおよそ 2~3MPa で、全車平均の圧送速度は 30~40m³/h であり、圧送性は良好であった。圧送中の管内閉塞や材料分離、ポンプ圧の急増等の不具合は見られなかった。今回は標準期の施工であるが、既往

の報告⁷⁾では暑中施工の BF 高含有コンクリートのポンプ圧送が問題なく施工できたとされている。打設前日午後

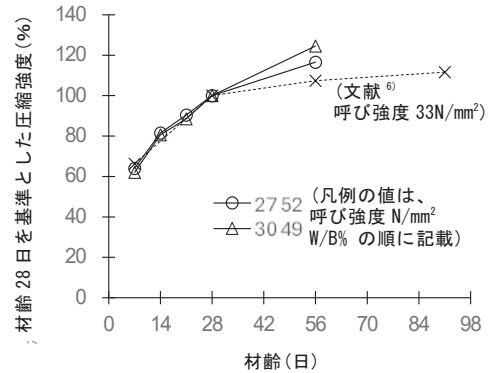


図-7 圧縮強度比の経時変化

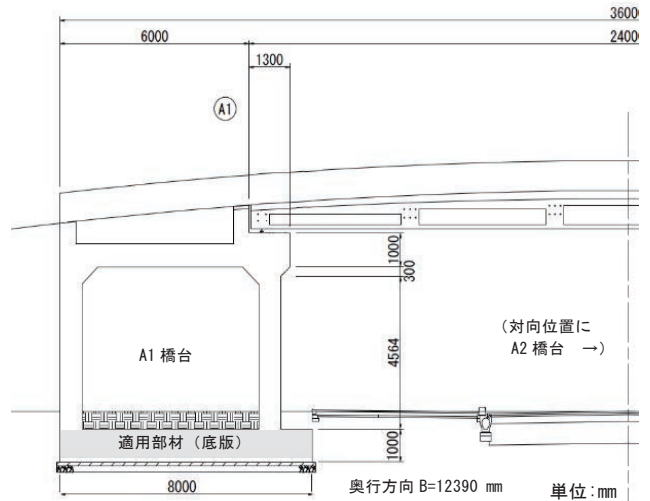


図-8 適用構造物一般図

表-6 受入れ時のフレッシュ状況(実施工)

	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
目標性能	12.0±2.5	4.5±1.5	5~35
A2 橋台	12.5	5.6	22 (外気温 20)
A1 橋台	14.0	5.5	24 (外気温 23)

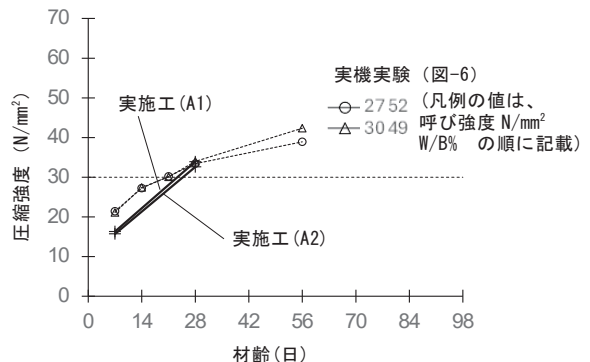


図-9 圧縮強度試験の経時変化（実機実験と実施工）

から当日まで、天候は晴れ（前日午前は雨天）、気温は当日の最低気温が 17.7℃、打設開始時刻（午前 9 時）で 21.6℃、最高気温が 23.8℃である（気象庁データによる）。既往の報告によると、BF コンクリートの発熱量は低熱ポルトランドセメントによる予測値と近いとされており¹⁾、コンクリート温度による影響は小さいと考えている。

ブリージングについては、BF 使用率 0～70%を対象とした既往の研究では、BF 使用率の増加に伴って減少すると報告されている¹⁾。使用率 70%の今回のコンクリートでも若干のブリージング水が確認されたが、品質上問題は生じない範囲と判断している。

打設後については、A2 橋台は 2 日間養生後の 5N/mm² の強度発現を確認した後に脱型し、上面と側面の一部を除いて 4 日後に埋戻しを行っている。A1 橋台は同じく 2 日後（一部 4 日後）に脱型を行い、同様に 14 日後に埋戻しを行っている。当日を含む 7 日間の日平均気温平均値は 19.8℃である（気象庁データによる）。既往の研究⁸⁾によれば、BF 使用率 70%の柱・壁などのせき板の存置期間（強度 5N/mm² の発現に要する日数）は、平均気温 20℃の場合、呼び強度 18、24、30N/mm² の場合でいずれも 1 日前後である。また、湿潤養生期間の目安は 1.5～2 日である。今回は BF 使用時の初期養生が重要であることを考慮し、これらより若干の余裕を確保して養生を行った。

4. 耐久性の評価、環境負荷低減効果

4.1 中性化

BF 使用コンクリートは、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、一般に中性化の進行が早いとされている。2022 年版土木学会示方書設計編を参照し、中性化に伴う鋼材腐食に対する照査を今回の適用部材について行った。この結果を以下に示す。

$$\gamma_i \cdot y_d / y_{lim} = 0.72 \leq 1.0$$

ここに、

$$y_{lim} = c_d - c_k$$

$$c_d = c - \Delta c_e$$

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t}$$

$$\alpha_d = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$$

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \cdot W/B$$

$$B = C_p + k \cdot A_d$$

式中の変数の定義は示方書による。中間変数、および計に用いた諸定数は以下のとおりである。これ以外の変数は、示方書に記載の一般的な値を用いた。設計耐用年数 100 年に対する中性化深さは 50mm であり、これに対してかぶりは十分大きく、かつ完成後は土中に埋設されるので、中性化に対して余裕があると考えられる。

y_{lim} : 腐食発生限界深さ (=75mm)

c_d : 耐久性照査に用いるかぶりの設計値 (=100mm)

c_k : 中性化残り (=25mm 安全側の値を設定)

c : かぶり (=115mm)

Δc_e : かぶりの施工誤差 (=15mm)

y_d : 中性化深さの設計値 (=49.1mm)

α_d : 中性化速度係数の設計値 (=4.91mm/√年)

t : 中性化に対する設計耐用年数 (=100 年)

α_k : 中性化速度係数の特性値 (=2.36mm/√年)

W : 単位水量 (=167kg)

C_p : 単位ポルトランドセメント量 (=96.0kg)

k : 混和材の種類による係数 (=0.7)

A_d : 単位混和材量 (=225.0kg)

今回の適用対象は土木構造物であり、上記では土木学会示方書を用いて中性化に対する照査を行ったが、マニュアルでは建築学会の指針に準じた検討⁹⁾が行われている。本適用例でも同様に、上記の土木学会示方書の照査に加え、建築学会の指針に準じて確認を行った。文献⁹⁾では C 種クラス BF コンクリートに対し、腐食確率 20%、設計かぶり厚さ 70mm、計画供用期間 100 年の場合、所要の中性化速度係数は 6.02mm/√年であり、促進中性化試験結果から導かれた所要の W/B は 80.7%となる。本適用例では耐久性照査に用いるかぶりの設計値は 100mm、W/B は 52%であり、完成後は土中に埋設されるので、中性化に対して十分な余裕があると考えている。



写真-1 打設状況図



写真-2 打設後の状況

表-7 CO₂ 排出削減効果*1

	単体量 (kg/m ³)	原単位 (kg-CO ₂)	排出量*3 (t-CO ₂)
24-12-20N *2 (当初設計仕様)	C(293) S(835)	C(772) ¹²⁾ S(3.7) ¹³⁾	45.9
27-12-20BF (本事例)	C(96) BF(225) S(619) SBF(216)	BF(35.6) ¹²⁾ SBF(2.4) ¹³⁾	17.0
削減量(t-CO ₂) / 削減率(%)	-	-	28.8 / 62.9

*1 結合材と細骨材の削減効果

*2 結合材は全量普通ポルトランドセメント想定

*3 200m³分に換算

4.2 環境負荷低減効果

本事例により削減できた CO₂ 排出量の試算結果を表-7 に示す。なお、この検討では SBF を用いたことによる削減効果を含んでいる。日本全体の温室効果ガス排出量全体¹⁰⁾の10億8500万 t-CO₂や、建設分野総排出量¹¹⁾297万 t-CO₂と比べてわずかな量であるが、削減率は6割以上と高くなっている。今後適用例が増えれば無視できない効果を発揮しうると期待できる。

5. まとめ

環境負荷低減と産業副産物の利用推進を目的として、BFを高含有し SBF を用いた環境配慮型コンクリートを橋梁下部工へ適用した。実施工に先立って試し練りを行い、配合強度式を決定した。フレッシュ性状は目標性能を満足した。圧縮強度も同様であったが、材齢28日よりも長期の強度増進が認められた。

実施工はラーメン式橋台である橋梁下部工の土中に埋設される底版に適用した。実かぶりは115mmを確保している。合計200m³のコンクリート打設において、フレッシュ性状試験と圧縮強度は目標の性能を満足し、圧送性・発熱量とも良好であった。

BF 高含有コンクリートに懸念される中性化の進行に対しては、評価式による試算の結果、かぶりが確保されていることもあり、十分な性能を有していると推測された。CO₂ 削減率は6割以上あり、今後適用例が増えれば決して無視できない効果を発揮しうると期待された。

なお、今回は対象が土木構造物であること、その他実施上の都合から、建築物への適用を想定した「CELVIC」にはない仕様としている。具体的には、(1)スランプ目標値12cm(マニュアル最小値15cm)、(2)SBFの使用、(3)C・BFの累加計量、(4)₂₈S₉₁=0N/mm²の4点である。中性化の照査では、土木・建築の両面から検討を行った。配合強度式の決定法をはじめとするマニュアルの知見を活用して施工が可能となった。今回使用したコンクリートの長期性状の確認については今後の課題である。

【参考文献】

- 古川雄太：高炉スラグ微粉末の混合率を変化させた環境配慮型のコンクリートの諸性状に関する研究、東急建設技術研究所報、47、pp.1-8、2021.
- 新田ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状 その3 室内実験における計画調合とフレッシュコンクリート、日本建築学会学術講演梗概集、1270、pp.539-540、2019.
- 林ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状 その5 室内実験における圧縮強度および静弾性係数、日本建築学会学術講演梗概集、1272、pp.543-544、2019.
- 石東昇、梶田佳寛、李榮蘭：高炉スラグ細骨材の性状とコンクリート圧縮強度への影響に関する実験、日本建築学会構造系論文集、76-667、pp.1541-1546、2011.9
- 野中ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状 その11 実機実験におけるフレッシュコンクリート、日本建築学会学術講演梗概集、1236、pp.471-472、2020.
- 菌井ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状 その13 実機実験における圧縮強度、日本建築学会学術講演梗概集、1238、pp.475-476、2020.
- 新谷岳、土師康一、田中徹、椎名貴快：高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの現場適用、コンクリート工学、56-3、pp.240-245、2018.3
- 金子ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状 その16 型枠存置および湿潤養生期間、日本建築学会学術講演梗概集、1241、pp.481-482、2020.
- 古川ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状 その17 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐久設計基準強度、日本建築学会学術講演梗概集、1242、pp.483-484、2020.
- 2022年度温室効果ガス排出・吸収量(詳細)、環境省・国立環境研究所、p.1、2024.4
- 2022年度CO₂排出量調査報告書、日本建設業連合会、p.2、2023.11
- 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、日本建築学会、p.164、2017.9
- 高橋茂、藪田和哉、高橋守男、三石尚道、岸本和彦：コンクリート関連産業のJIS Q 13315-2に基づく環境負荷インベントリデータの算定 ②コンクリート用材料の製造における環境負荷の算定、コンクリート工学、56-11、pp.948-955、2018.10