

高炉スラグ微粉末を使用した環境配慮型コンクリートの実用化

—(仮称)室蘭製作所新工場建設の土間コンクリートへの適用—

高橋 祐一* 正田 雄高**

要 旨

低炭素社会の実現に向け、COP21 のパリ協定(2015 年)において、我が国では、温室効果ガスの排出量を 2013 年比で 2030 年までに 26%削減することを掲げ、2021 年には 46%まで引き上げている。このような中、各ゼネコンが主導し、コンクリート材料に由来する二酸化炭素排出量を削減することを目的として、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末に置き換えた環境配慮型コンクリートを実施工で使用した事例が増えている。

本報では、一般に流通している高炉スラグ微粉末を混和材として使用した環境配慮型コンクリートについて、自社施設である(仮称)室蘭製作所新工場建設の土間コンクリートに適用した事例の紹介と併せて、本工事への適用に向けて実施した調合を決定するための室内実験とフレッシュコンクリートの経時変化を確認するための実機実験のそれぞれの結果について報告する。

1. はじめに

低炭素社会の実現に向け、COP21(2015 年)のパリ協定において、我が国では、温室効果ガスの排出量を 2013 年比で 2030 年までに 26%削減ことを掲げ、2021 年には 46%まで引き上げている。

コンクリート分野において、経済産業省は、普通ポルトランドセメント(以下、N とする)と比べて、エネルギー起源二酸化炭素排出原単位が約 40%小さい混合セメントの利用拡大の方策を示している¹⁾。混合セメントのうち、高炉セメントは、JIS R 5211 として規格化されており、セメント中の高炉スラグ微粉末(以下、BF とする)の分量に応じて A~C 種に分類されている。日本建築学会の「建築工事標準仕様書 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」(以下、JASS 5 とする)では、A 種は N と同様に、B、C 種は杭や地下構造物にそれぞれ適用することを提案している。しかし、建築分野において、高炉セメントは地上構造物で使用されることはほとんどなく、基礎や地下構造の 2 割程度の利用²⁾に留まっている。これは、N と比較して耐久性に課題があることや、多くの生コン工場で標準化されている高炉セメント B 種(BF 分量が 40~45%)以外は、流通が少ないことなどがその理由として考えられる。

このような中、近年ではゼネコンが主導し、二酸化炭素排出量の削減を目的として、BF の分量を C 種相当(60~70%)、もしくはそれ以上とした環境配慮型コンクリートを開発し、実施工で使用した事例が報告されている^{例えば2)、3)}。これに対し、筆者らは、BF を高炉セメント A~C 種の分量に相当する 10~70%の範囲で使用することができる「CELBIC—環境配慮型 BF コンクリート—」を 13 社(表-1)共同で開発している。今後、CELBIC の普及促進を図るためには、実工事への適用を重ねていくことが重要になることから、CELBIC の適用範囲とは一部異なるものの、これに準拠し

た仕様の環境配慮型コンクリートを自社施設である「(仮称)室蘭製作所新工場建設」の土間に適用した。本施設は、洋上風力発電施設関連の仮設鋼構造物等の製作を担うグリーン工場で、竣工後は工場全体の ZEB 化や水素エネルギーの利用・実証を行う予定としている。

本報では、調合を決定するための室内実験、フレッシュコンクリートの経時変化を確認するための実機実験のそれぞれの結果と実工事への適用結果について報告する。

2. 使用する環境配慮型コンクリートの調合条件

本工事における適用部位が土間であることから、当該コンクリートの BF 使用率(N の質量と BF の質量の和に対する BF の質量の割合)は、JIS において高炉セメント A 種の上限に相当する 30%とした。調合管理強度は、設計基準強度(F_c)と同値である 24N/mm^2 とした。目標スランプおよび空気量は、それぞれ 15cm、4.5%とした。また、乾燥収縮率の目標値は、設計図書に記載されている通り 650×10^{-6} 以下とした。

3. 室内実験

3.1 室内実験概要

室内実験は、当該生コン工場が運用する JIS の N を用いたコンクリートの強度算定式と本コンクリートの結合材水比と圧縮強度

表-1 共同研究(CELBIC)への参加会社

青木あすなる建設	浅沼組	安藤ハザマ
○奥村組	熊谷組	鴻池組
○五洋建設	錢高組	鉄建建設
○東急建設	東洋建設	◎長谷工コーポレーション
矢作建設工業	(五十音順、◎:主査、○:WG 幹事)	

* 技術研究所 建築技術開発部

** 建築本部 技術部

表-2 使用材料

名称	種類/産地	記号	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度:3.16g/cm ³
細骨材	砂(陸砂)/北海道白老町	S	表乾密度:2.64g/cm ³
粗骨材	砕石 2005/青森県東通村	G	表乾密度:2.70g/cm ³
混和材	高炉スラグ微粉末 4000	BF	密度:2.91g/cm ³ (せっこう添加なし)
練混ぜ水	地下水	W	—
化学 混和剤	AE 減水剤	AE1	—
		AE2	高機能タイプ

表-3 使用した高炉スラグ微粉末の品質(2021年8月度)

項目	試験結果	JIS A 6206 品質基準 (高炉スラグ微粉末 4000)
密度 (g/cm ³)	2.91	2.80 以上
比表面積 (cm ² /g)	4060	3500 以上 5000 未満
活性度指数 (%)	7 日	73
	28 日	103
	91 日	110
フロー値比 (%)	100	95 以上
酸化マグネシウム (%)	7.1	10.0 以下
三酸化硫黄 (%)	0.0	4.0 以下
強熱減量 (%)	0.2	3.0 以下
塩化物イオン (%)	0.001	0.02 以下
塩基度	1.83	—

表-4 調合

調合記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					AE ^{*1} (B×%)
			W	C	BF	S	G	
24N	54.6	47.7	165	302	—	874	980	1.0
24BF30	54.6	48.1	160	205	88	890	980	1.0
30BF30	47.6	47.1	160	235	101	853	980	1.0
36BF30	41.7	45.8	160	269	115	810	980	0.65

*1 36BF30 は AE2、他は AE1 を使用した。

の関係式とを比較し、調合を決定することを目的として実施した。また、呼び強度 24 に相当するコンクリートについて、乾燥収縮率を確認した。

3.2 使用材料および調合

使用材料を表-2に、BFの品質を表-3に示す。BFは、JIS A 6206(コンクリート用高炉スラグ微粉末)の高炉スラグ微粉末 4000 に適合するものである。調合を表-4に示す。水結合材比は N の呼び強度 24、30 および 36 の水セメント比と同一とした。また、単位水量は、事前の試し練りの結果から N を用いた調合より 5kg/m³ 減じた。化学混和剤は 36BF30 のみ高機能タイプの AE 減水剤を使用し、他は AE 減水剤を使用した。練上がり直後のスランブは運搬ロスで 1cm 見込んで 16cm、空気量は 4.5%とした。

3.3 練混ぜ

練混ぜは、強制二軸練りミキサ(公称容積:60L)により実施した。練混ぜの手順は、水と化学混和剤を除く材料を投入後、30 秒間空練りし、水と化学混和剤を投入して 24N で 60 秒間、他は 90 秒間練り混ぜた後排出し、試験に供した。練混ぜ量は、長さ変

表-5 試験項目および試験方法

対象	試験項目	試験方法	備考
フレッシュ コンクリート	スランブ	JIS A 1101	管理値:16 ^{*1} ±2.5cm
	空気量	JIS A 1128	管理値:4.5±1.5%
	コンクリート温度	JIS A 1156	5℃以上 35℃以下
	塩化物量	JASS 5T-502	0.30kg/m ³ 以下
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108	標準養生:材齢 7・28 日
	長さ変化	JIS A 1129-3	目標値:650×10 ⁻⁶ 以下

*1 目標スランブ 15cm+運搬ロス 1cm

表-6 フレッシュコンクリート試験結果

調合記号	目標 スランブ	目標 空気量	スランブ (cm)	空気量 (%)	塩化物量 (kg/m ³)
24N	15	4.5	17.5	4.8	—
24BF30			17.5	5.1	—
30BF30			16.5	4.9	—
36BF30			16.0	3.9	0.04



24N

24BF30



30BF30

36BF30

写真-1 フレッシュコンクリート試験状況

化試験を実施する 24BF30 で 40L、他は 30L とした。

3.4 試験項目および試験方法

フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートに対する試験項目と試験方法を表-5に示す。塩化物量の試験は 36BF30 を、長さ変化試験は 24BF30 をそれぞれ対象に実施した。

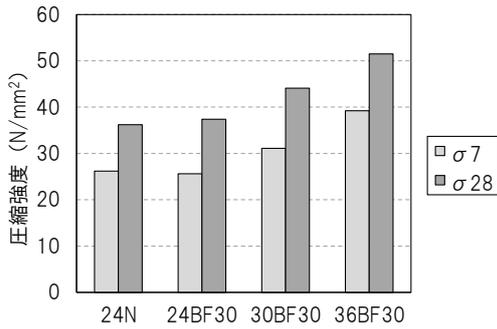
3.5 試験結果

3.5.1 フレッシュコンクリート

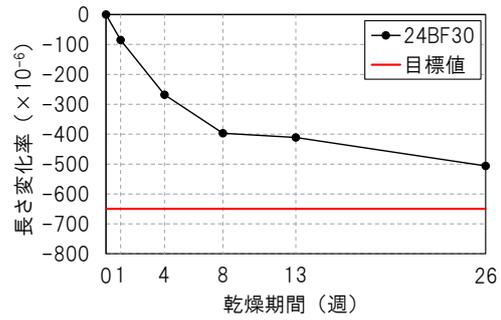
フレッシュコンクリートの試験結果を表-6に、試験状況を写真-1に示す。スランブおよび空気量は、全ての調合で管理値内に収まった。また、36BF30 を対象に実施した塩化物量は基準値を大きく下回った。24N と 24BF30 を比較すると、スランブおよび空気量ともに大きな差はなく、どちらも良好な性状であった。

3.5.2 圧縮強度

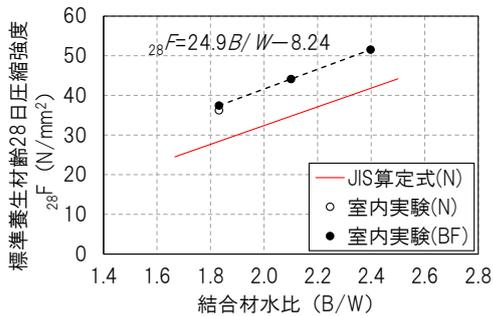
圧縮強度試験結果を図-1に示す。圧縮強度は、全ての調合において材齢 7 日で呼び強度を満足する結果であった。24N と



図一1 圧縮強度試験結果



図一3 長さ変化試験結果



図一2 結合材水比と材齢 28 日圧縮強度との関係

24BF30を比較すると、材齢7日および28日ともに大きな差はみられなかった。結合材水比と材齢28日圧縮強度との関係を図一2に示す。なお、図中には、当該生コン工場が運用するJISのNを用いたコンクリートの強度算定式を併せて示している。BFを使用した3調合の圧縮強度は、水結合材比に関わらず、強度算定式で求められる値を十分に上回った。したがって、BF使用率を30%とした本コンクリートの呼び強度に対応する水結合材比は、Nを使用したコンクリートの水セメント比と同じ値とした。

3.5.3 長さ変化

長さ変化の試験結果を図一3に示す。乾燥期間26週の長さ変化率は 506×10^{-6} となり、目標値である 650×10^{-6} を十分に満足する結果であった。

3.6 室内実験のまとめ

室内実験の結果、BF使用率を30%とした環境配慮型コンクリートは、フレッシュコンクリート性状および圧縮強度ともに所要の品質を十分に確保できることを確認した。また、乾燥収縮率も設計図書に記載されている目標値を十分に満足しており、土間コンクリートに問題なく適用できることを確認した。

4. 実機実験

4.1 実機実験概要

実機実験では、室内実験の結果から決定した24BF30について、フレッシュコンクリートの経時変化と標準養生および現場封

表一7 使用した高炉スラグ微粉末の品質(2021年11月度)

項目	試験結果	JIS A 6206 品質基準 (高炉スラグ微粉末 4000)	
密度 (g/cm³)	2.91	2.80 以上	
比表面積 (cm²/g)	3850	3500 以上 5000 未満	
活性度指数 (%)	7 日	68	55 以上
	28 日	93	75 以上
	91 日	119	95 以上
フロー値比 (%)	102	95 以上	
酸化マグネシウム (%)	7.1	10.0 以下	
三酸化硫黄 (%)	0.0	4.0 以下	
強熱減量 (%)	0.1	3.0 以下	
塩化物イオン (%)	0.001	0.02 以下	
塩基度	1.80	—	

かん養生圧縮強度の確認を目的として実施した。なお、実機実験は2021年11月(冬期に該当)に実施した。

4.2 使用材料および調合

実機実験で使用した材料は室内実験と同じとした(表一2参照)。使用したBFの品質を表一7に示す。調合は、表一4に示す24BF30とした。荷卸し時を想定した経時30分における目標スランプおよび空気量は、それぞれ15cm、4.5%とした。なお、スランプは1cm、空気量は0.5%の運搬ロスを見込んだ。

4.3 練混ぜ

練混ぜは、強制二軸練りミキサを使用して実施した。1バッチあたりの練混ぜ量は 1.5m^3 として、これを2バッチ練り混ぜて計 3.0m^3 製造し、アジテータ車で混合した。また、練混ぜ時間は、全材料を一括で投入して40秒とした。

4.4 試験項目および試験方法

4.4.1 フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験項目および試験方法を表一8に示す。フレッシュコンクリートの試験は、2バッチ目の練混ぜ完了時を経時0分として、それ以降、経時30分、60分、90分後に試験を行った。また、試料を採取する際は、アジテータ車を中速で攪拌した後にコンクリートを排出した。

4.4.2 硬化コンクリート

硬化コンクリートに対しては圧縮強度試験を実施した。供試体

表-8 フレッシュコンクリートの試験項目・試験方法・試験時期

試験項目	試験方法	試験時期(分)			
		0	30	60	90
スランプ	JIS A 1101	○	○	○	○
空気量	JIS A 1128	○	○	○	○
コンクリート温度	JIS A 1156	○	○	○	○
塩化物含有量	JASS 5T-502	○	—	—	—
単位水量	エアメータ法	○	—	—	—
単位容積質量	JIS A 1116	○	○	○	○

表-9 圧縮強度の試験材齢

試験項目	試験方法	養生方法	試験材齢(日)					
			3	5	7	28	56	91
圧縮強度	JIS A 1108	標準養生	—	—	○	○	○	○
		現場封かん養生	○	○	○	—	—	—

表-10 フレッシュコンクリート試験結果

経過時間	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 ^{※1} (°C)	塩化物含有量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	単位容積質量 (kg/m ³)
0分	16.0	4.5	17	13.7	0.02	152	2,339
30分	14.0	3.9	18	14.1	—	—	2,350
60分	13.0	3.8	17	14.0	—	—	2,347
90分	12.5	3.5	18	13.6	—	—	2,339

*1 気象庁:過去の気象データより

の養生方法は、標準養生と現場封かん養生とした。圧縮強度試験の試験材齢を表-9に示す。なお、供試体は荷卸し時を想定して経時30分で採取した。

4.5 実験結果

4.5.1 フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表-10に、試験状況を写真-2に示す。また、スランプと空気量の経時変化を図-4および図-5に示す。荷卸し時を想定した30分では、スランプおよび空気量ともに目標値よりもやや小さい結果であったものの、経時90分でも管理値内に収まった。荷卸し時のスランプと空気量が目標値より小さくなった理由としては、練上がり直後の空気量が小さいことが考えられる。したがって、実際の出荷時には、AE剤により空気量を大きめに調整することで、改善できると考えられる。

4.5.2 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図-6および図-7に示す。標準養生供試体材齢28日の圧縮強度は35.3N/mm²と管理値である24N/mm²を十分に上回った。一方、現場封かん養生供試体の圧縮強度は、材齢3日で8.19N/mm²、材齢5日で13.2N/mm²であり、それぞれ型枠取り外し、湿潤養生打ち切りの判断基準(5N/mm²、10N/mm²)を上回った。



写真-2 フレッシュコンクリート試験状況

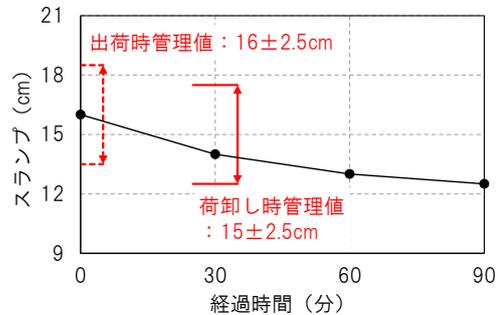


図-4 スランプの経時変化

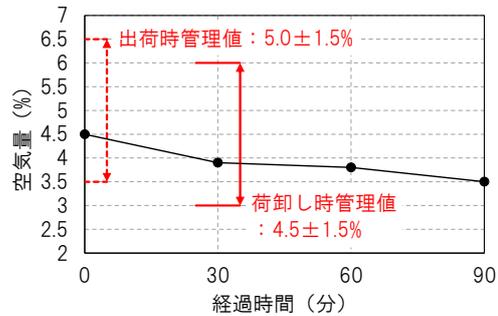


図-5 空気量の経時変化

5. 湿潤養生期間の推定

本工事における適用部位が土間スラブであることから、適切な湿潤用期間を確保するため、コンクリートの強度発現性と積算温度の関係から所定の強度が発現する日数の目安について、文献4)に示されている方法と同一の手順にて試算した。ここで、積算温度は外気温を用いて式(1)により求めた。

$$M = \sum_{t=1}^n (\theta_t + 10) \quad (1)$$

ここに、M:積算温度(° D・D)

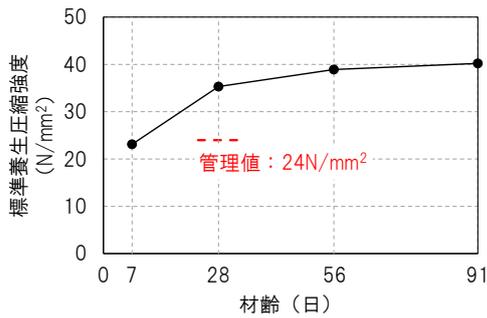


図-6 標準養生圧縮強度試験結果

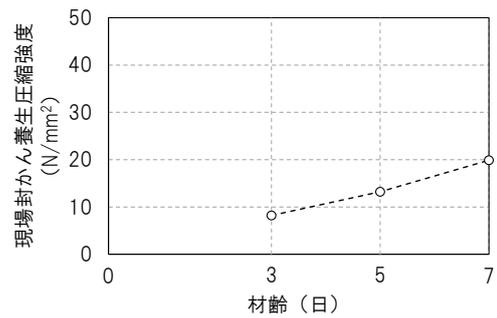


図-7 現場封かん養生圧縮強度試験結果

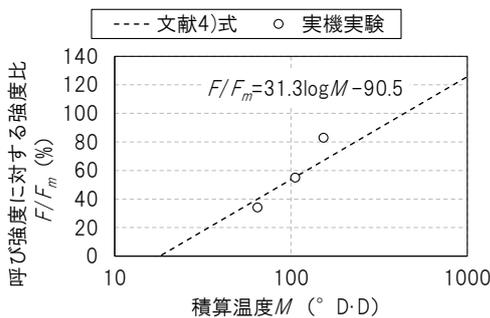


図-8 積算温度と呼び強度に対する現場封かん養生圧縮強度比の関係

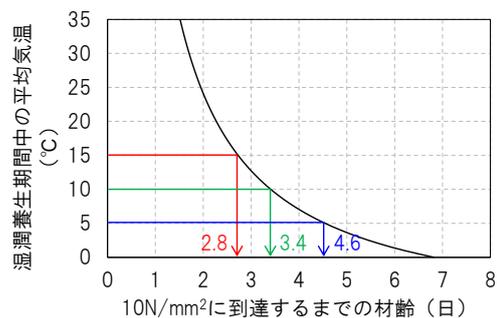


図-9 10N/mm²発現する材齢と湿潤養生期間中の平均気温の関係

z :材齢(日)

θ_z :材齢 z 日における平均気温(°C)

実機実験における積算温度と呼び強度に対する現場封かん養生の圧縮強度比を図-8に示す。図中の式は文献4)に示されている近似式(文献4)式)を示している。実機実験において得られた結果と文献4)式を比較すると、概ね一致していることが確認できる。そのため、以降の検討は文献4)式を用いて実施した。なお、 F_m は呼び強度、 F は現場封かん養生圧縮強度である。文献4)式より、呼び強度24で湿潤養生打ち切りの強度を10N/mm²とした場合について、その強度が発現する材齢と湿潤養生期間中の平均気温の関係を求め、図-9に示すように整理した。これより、湿潤養生期間中の平均気温が5°Cの場合は4.6日程度、10°Cの場合は3.4日程度、15°Cの場合は2.8日程度で、それぞれ10N/mm²を確保できると推定された。

6. 現場適用

6.1 適用概要

環境配慮型コンクリートを適用した建築物および部位の概要を表-11に示す。適用した建築物は、室蘭市に位置する鉄骨造地上2階建ての事務所・鉄骨製作工場で、その一部(塗装棟)の土間コンクリートに3工区に分けて3日間で延べ約288m³を打ち込んだ。調査は室内および実機実験の対象とした24BF30(表-4)

表-11 適用建築物および部位概要

項目	内容
用途	事務所・鉄骨製作工場
構造規模	鉄骨造・地上2階
建築・延べ床面積	13,876.27m ² ・15,579.27m ²
適用部位	土間(塗装棟)

表-12 使用した高炉スラグ微粉末の品質(2022年5月度)

項目	試験結果	JIS A 6206 品質基準 (高炉スラグ微粉末4000)	
密度 (g/cm ³)	2.91	2.80以上	
比表面積 (cm ² /g)	3970	3500以上5000未満	
活性度指数 (%)	7日	66	55以上
	28日	97	75以上
	91日	116	95以上
フロー値比 (%)	102	95以上	
酸化マグネシウム (%)	6.6	10.0以下	
三酸化硫黄 (%)	0.0	4.0以下	
強熱減量 (%)	0.1	3.0以下	
塩化物イオン (%)	0.002	0.02以下	
塩基度	1.83	—	

と同一で、使用材料は表-2に示す通りである。また、BFの品質を表-12に示す。

6.2 打込み状況

コンクリートの打込み状況を写真-3に示す。適用した環境配



写真-3 土間コンクリートの打込み状況

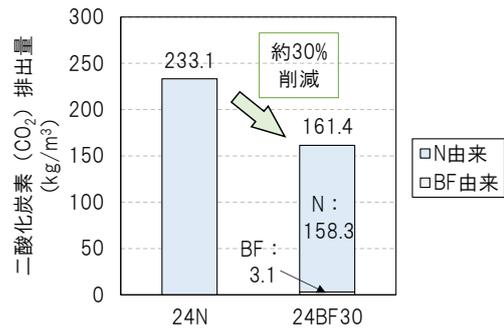


図-10 二酸化炭素(CO₂)削減効果

表-13 フレッシュコンクリートおよび圧縮強度試験結果

打込み日	採取時期	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	材齢28日圧縮強度 ^{*1} (N/mm ²)
5月12日	出荷時	18.0	5.0	16	31.8
	荷卸し時	16.5	5.0	16	
5月16日	出荷時	17.5	5.0	16	32.5
	荷卸し時	16.5	4.6	16	
5月18日	出荷時	17.5	5.1	17	30.9
	荷卸し時	16.5	4.8	17	

*1 標準養生

慮型コンクリートのポンプ圧送性は、一般のコンクリートと同等であり、とくに問題なく打ち込むことができた。

6.3 環境配慮型コンクリートの品質

環境配慮型コンクリートの出荷時および荷卸し時のフレッシュコンクリートの試験結果ならびに標準養生材齢28日の圧縮強度試験結果を表-13に示す。スランブが目標値に対してやや大きいものの、コンクリートの状態も良く、安定していた。また、標準養生供試体材齢28日の結果は、30.9~32.5N/mm²と実機実験よりもやや低いものの、呼び強度を十分に満足した。

6.4 二酸化炭素削減効果

本工事で適用した環境配慮型コンクリートにおける材料由来の二酸化炭素排出量は161.4kg-CO₂/m³で、当該生コン工場の普通ポルトランドセメントのみを用いた標準配合の233.1kg-CO₂/m³に対して約30%(図-10)、今回のコンクリートの総排出量から約21tそれぞれ削減できたと試算される。なお、試算に用いた二酸化炭素排出量原単位は、普通ポルトランドセメント(N)が772kg-CO₂/t、高炉スラグ微粉末(BF)が35.6kg-CO₂/tとした⁵⁾。

7. まとめ

材料に由来する二酸化炭素削減を目的とし、BF使用率30%の環境配慮型コンクリートを自社施設である「(仮称)室蘭製作所新工場建設」の土間に適用した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 環境配慮型コンクリートのフレッシュ性状は、経時変化を含めて良好な性状を確保した。また、材齢28日の圧縮強度は、呼び強度を十分に確保した。

- (2) 環境配慮型コンクリートの長さ変化率は、 506×10^{-6} で目標値である 650×10^{-6} 以下を十分に満足した。
- (3) 環境配慮型コンクリートの施工性は、一般のコンクリートと同等であった。
- (4) 環境配慮型コンクリートを使用したことによる二酸化炭素の削減率は約30%であり、約21tの削減効果と試算された。

【謝辞】

環境配慮型コンクリートを本工事に適用するにあたり、(株)内池建設、(株)ケイホク室蘭生コンクリート工場および(株)栗林商会の各位にご協力をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課：セメント産業における省エネ製造プロセスの普及拡大方策に関する調査－混合セメントの普及拡大方策に関する検討－報告書，2016.3
- 2) 森田康夫，浅岡泰彦，小林利允，一瀬賢一：環境配慮型コンクリートの建築構造物への適用，コンクリート工学，Vol.51，No.7，2013.7
- 3) 辻大二郎，岩清水隆，小島正朗，玉木伸二，井上和政，齋藤和秀，米沢敏男，植木康知：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎躯体への適用，日本建築学会学術講演梗概集(関東)，pp.539-540，2015.9
- 4) 金子樹，鈴木好幸，河野政典，野中英，古川雄太，関新之助：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(関東)，pp.481-482，2020.9
- 5) 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，2017