

低炭素型コンクリートの床スラブへの適用に関する実験的検討 —標準期における施工性・表層品質・乾燥収縮ひび割れ抵抗性の評価—

吉野 玲^{*1}・鈴木 好幸^{*2}

CO₂排出量を削減するために、高炉スラグを用いた低炭素型コンクリートの適用が推進されている。本報告では、低炭素型コンクリートの施工性、表層品質および乾燥収縮ひび割れ抵抗性の評価を目的として、標準期において床模擬試験体を作製し、各種測定を行った。施工性に関して、高炉スラグの混合量が増えるほど凝結時間が遅延し、仕上げ完了までの時間も遅延することを確認した。表層品質に関して、仕上げ方法を鏡面仕上げとした場合は高炉スラグを混合しても品質に大きな影響が無いことを確認した。乾燥収縮ひび割れは高炉スラグを混合することで長期的に進展する傾向を確認したが、混合率 20%では普通コンクリートと変わらないことを確認した。

キーワード：低炭素型コンクリート、高炉スラグ、床押さえ、スラブ、乾燥収縮ひび割れ

1. はじめに

環境省の報告¹⁾によると、我が国の 2023 年度 CO₂ 排出量は、約 10 億 1,700 万トンで、2022 年度比で 4.2% (約 4,490 万トン) の減少、2013 年度比では 27.1% の減少 (約 3 億 7,810 万トン) となっており、過去最低値を記録している。しかしながら、地球温暖化の影響により、世界的に海面水温が上昇傾向であり、日本近海でも 2024 年における年平均海面水温が統計開始以来最も高い値となるなど²⁾、持続可能な社会の実現に向けては、さらなる CO₂ 排出量削減策が継続して求められている。

経済産業省は、地球温暖化対策の有効な手段として普通ポルトランドセメントと比べて CO₂ 排出量原単位の小い混合セメントの利用を促進している³⁾。

混合セメントのひとつである高炉セメントは JIS R 5211 において、高炉スラグの分量によって A、B、C 種の 3 種類に分類されている。日本建築学会では、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 (以下、JASS5)⁴⁾ において、それぞれの高炉セメントの特性と用途が示されており、高炉セメント A 種および B 種は普通ポルトランドセメントと同様な工事への適用が提案されている。また、近年、建設会社が主体となり、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を構造体の部位に合わせて混合率を設定して組み合わせた低炭素型コンクリートの開発が進められている^{例えば 5)}。

普通ポルトランドセメントの CO₂ 排出量原単位は 772kg-CO₂/t であるが、高炉スラグ微粉末の CO₂ 排出量原単位は 35.6kg-CO₂/t であることから⁶⁾、セメントに対

する高炉スラグの混合割合が大きいほど、CO₂ 削減効果は大きくなる。一方で、凝結時間が遅延する傾向があることなどが報告されており⁷⁾、施工性に影響を及ぼすことが考えられる。

本報告では、高炉スラグを使用した低炭素型コンクリートの構造物への適用を促進するために、低炭素型コンクリートの施工性、コンクリート硬化後の美観、表層品質および乾燥収縮ひび割れ抵抗性を把握することを目的とした。具体的には、近年建設数が増加している物流倉庫や工場の大面積の床をターゲットとして、高炉セメント A 種 (以下 BA) 相当のコンクリート BA および高炉セメント B 種 (以下 BB) を使用したコンクリートを用いて床模擬試験体を作製し、打込み時および硬化後に各種測定を実施することで確認した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの使用材料および調合

表 1 にコンクリートの調合および使用材料を示す。物流倉庫や工場の床コンクリートを想定し、粗骨材に石灰砕石を使用し、膨張材を 20kg/m³ 混合した呼び強度 27N/mm² のコンクリートをベースとして、セメント種類を変更した。セメント種類は、普通ポルトランドセメント (以下 N)、既往の文献⁸⁾ を参考に、N と BB を質量比で 55:45 の割合で併用し、高炉スラグの量を約 20% とした BA および BB の 3 種類とした。なお、BB に含まれる高炉スラグの分量は、JIS R 5211 において、30 を超え 60 以下 (質量%) と規定されているが、一般的に市

*1 建築研究部 *2 脱炭素技術開発部

表－１ 調査表および使用材料

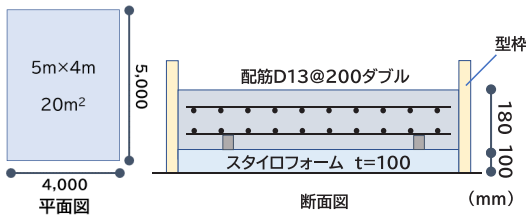
水準	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)							
			W	C		S		G	Ad	Ex
				N	BB	S1	S2			
N	52.5	44.4	171	326	－	542	242	1013	3.49	20
BA	52.5	44.6	171	180	146	544	245	1013	3.49	20
BB	51.0	44.3	168	－	329	539	239	1013	3.52	20

【使用材料】水(W)：地下水、密度 1.00g/cm³、セメント(C)：普通ポルトランドセメント(N)、密度 3.15g/cm³、
高炉セメントB種(BB)：密度 3.04g/cm³、細骨材(S1)：行方産砂、密度 2.58g/cm³、細骨材(S2)：佐野産砕砂、密度 2.69g/cm³、
粗骨材(G)：佐野産石灰砕石、密度 2.70g/cm³、混和剤(Ad)：AE 減水剤、混和材(Ex)：膨張材、密度 3.16g/cm³

販されている BB のスラグ分量は 40 ～ 45% 程度である⁹⁾。
目標スランブは 15 ± 2.5cm、目標空気量は 4.5 ± 1.5%
とした。

2.2 床模擬試験体の作製

図－１に作製した床模擬試験体の概要を示す。コンクリート種類毎に 5m × 4m の床模擬試験体を作製した。試験体の作製は空調制御のない屋内で、標準期を想定して 2024 年 10 月 30 日に実施した。作製日の屋内環境は平均気温 18℃、平均湿度 37% であった。コンクリートの打込みはコンクリートポンプを用い、床押さえはハンドトロウエルを用いて表面が鏡面になるまで仕上げた。床押さえの施工および仕上げ完了のタイミングは土間工の判断とした。コンクリート打込み翌日から、散水とシートによる湿潤養生を 5 日間行い、材齢 6 日目から気中乾燥を開始した。



図－１ 床模擬試験体の概要

表－２ 施工性の確認に関する試験項目

試験項目	準拠規格
スランブ試験	JIS A 1101
コンクリート温度	JIS A 1156
空気量	JIS A 1128
ブリーディング試験	JCI-S-015（現場環境にて実施）
凝結試験	JIS A 1147（現場環境にて実施）
圧縮強度試験	JIS A 1108（材齢 28 日に実施）

表－３ フレッシュ試験および 28 日圧縮強度試験結果

水準	スランブ (cm)	空気量 (%)	CT (℃)	28 日圧縮強度 (N/mm²)
N	14.5	4.2	22	32.3
BA	14.5	4.6	22	31.4
BB	16.5	4.2	22	33.6

3. 施工性・美観の評価

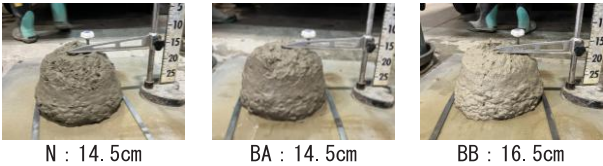
表－２に施工性を確認するために実施した試験項目を示す。ブリーディング試験および凝結試験は、コンクリートポンプの筒先から採取したコンクリートをサンプルとし、床模擬試験体の作製と同一環境下で実施した。美観に関しては、目視で定期的に外観の確認を行った。

3.1 コンクリートの物性試験の結果

フレッシュ試験結果および材齢 28 日圧縮強度の結果を表－３に示す。スランブは、N および BA を使用したコンクリートでは 14.5cm で、BB のみ 16.5cm であった。スランブ試験の様子を写真－１に示すが、スラグの混合量が増えるほどコンクリートの色味が白くなった。また、すべての水準で、材齢 28 日における圧縮強度が呼び強度を満足していることを確認した。

3.2 施工性の評価

表－４にブリーディング試験結果を示す。ブリーディ



写真－１ スランブ試験

表－４ ブリーディング試験結果

水準	ブリーディング量 (cm³/cm²)	打込みから ブリーディング終了までの時間 (h:mm)
N	0.05	2:30
BA	0.06	3:30
BB	0.10	4:00

ング量は N、BA が同等で BB がやや多い結果となった。また、ブリーディング終了までの時間はスラグ置換量に伴い遅延した。図－２に凝結試験結果を示す。凝結時間はスラグの混合量が多くなるほど遅延し、N と比べて BA では約 1 時間、BB では約 2 時間遅延した。

表－５に各コンクリートの打込みから床押さえ工程着手までの経過時間および各工程における貫入抵抗値を示す。アマ出し（円盤でノロを集める作業）の開始は、N

のタイミングが少し遅かったが、セメント種類に依らずブリーディングが終結したタイミングで行われていた。また、BBではブリーディング量が多かったものの、ブリーディング水の除去等を行わずにアマ出しを開始した。

中間押さえ（金ごてで表面を押さえる作業）開始時の貫入抵抗値は、セメント種類に依らず1～2N/mm²に達した時点であることが確認できた。

最終仕上げ（金ごてあるいはプラごてで表面を鏡面にする作業）開始時の貫入抵抗値は、NとBAで概ね一定だが、BBでは約12N/mm²であった。また、最終仕上げ完了時の貫入抵抗値はBA、BBともに終結（28.0N/mm²）を超えていた。表－5には各工程における仕上げ回数（こてを往復させた回数）を併記しているが、Nと比べてスラグを混合したコンクリートの最終仕上げの仕上げ回数が増えていた。

3.3 美観の評価

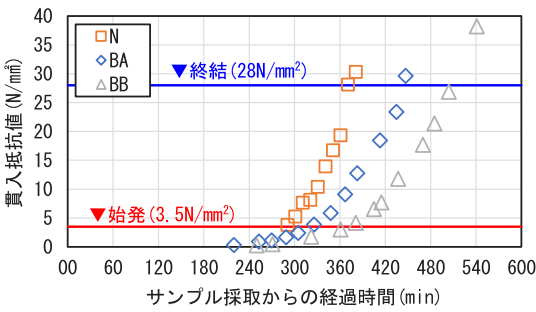
写真－2に、仕上げ終了直後、材齢1ヶ月および材齢4ヶ月の床面の様子を示す。仕上げ終了直後はスラグ混合による色味の違いが顕著であったが、材齢が経過するにつれてコンクリートが乾燥し、色の違いが徐々に目立たなくなることを確認した。

4. 表層品質の評価

表層品質を確認するために実施した試験項目を表－6に示す。主に表層の緻密さを判定するための非破壊試験として、含水率の経時変化の確認および材齢3か月経過時に透気試験を行った。表層と内部の肌別れの有無を確認し、構造体としての健全性を判定する目的で引張試験を実施した。また、材齢3か月経過時にコアを採取し、摩耗抵抗性の確認およびマイクロスコープを用いた断面観察を行った。

4.1 非破壊試験の結果

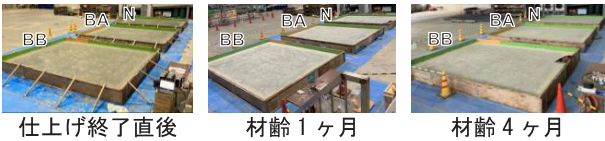
図－3に、含水率の経時変化を示す。3水準とも、湿潤養生終了直後からおおむね材齢28日にかけて値が急激に低下し、その後はいずれも4.5%付近に値が収束していく傾向が確認できた。湿潤養生終了直後は表層の急激な乾燥により、コンクリートの違いによる値の違いが顕著に確認されたが、その後の値の推移の傾向は3水準とも同様であった。床コンクリートの含水率は、仕上げ回数や、仕上げ後の湿潤養生の有無によって異なることが報告されている^{11,12)}。本実験では、押さえ工程の開始



図－2 貫入抵抗値と経過時間の関係

表－5 各コンクリートの打込みから床押さえ工程着手までの経過時間および各工程における貫入抵抗値

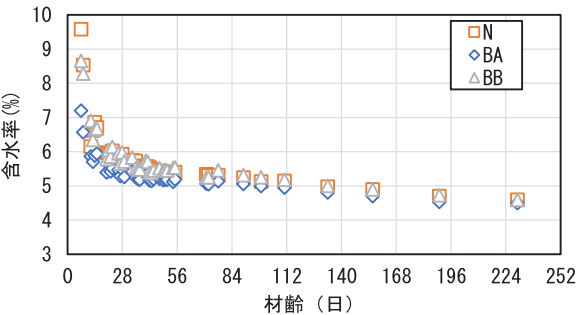
水準	項目	打込み	アマ出し	中間押さえ	最終仕上げ	仕上げ完了
N	打込みからの経過時間 (h:mm)	0:00	3:50	4:00	5:00	5:30
	貫入抵抗値 (N/mm ²)	－	1.7	2.3	5.1	13
	仕上げ回数 (回)	－	1	6	4	－
BA	打込みからの経過時間 (h:mm)	0:00	3:30	4:30	5:40	7:50
	貫入抵抗値 (N/mm ²)	－	0.28	1.1	5.8	35 (推定)
	仕上げ回数 (回)	－	1	5	6	－
BB	打込みからの経過時間 (h:mm)	0:00	4:00	6:00	7:15	9:00
	貫入抵抗値 (N/mm ²)	－	0.25	1.8	12	38
	仕上げ回数 (回)	－	1	3	6	－



写真－2 美観の変化

表－6 表層品質の確認に関する試験項目

項目	測定方法・備考
非破壊試験	含水率測定 高周波容量式水分計を用いて材齢7日から230日まで定期的に測定。1水準につき9点測定。
	透気試験 ダブルチャンバーによるトレント法 ¹⁰⁾ を用いて材齢3か月経過時に測定。1水準につき6点測定。
破壊試験	引張試験 日本建築士学会会式引張試験参照。引張試験機を用いて材齢3か月経過時に測定。1水準につき4点測定。
	摩耗試験 コアを採取し、JIS K 7204に準拠して実施。1水準につき2回測定。
	断面観察 コアを採取し、マイクロスコープを用いて断面を観察。



図－3 含水率の経時変化

タイミングや仕上げ回数は各水準で異なっていたものの、最終的な仕上げを鏡面仕上げに統一したこと、仕上げ後の湿潤養生を同じ条件で実施したことが要因で、高炉スラグの混合量の違いが含水率の経時変化に及ぼす影響が小さかったと考えられる。

表－７に、透気試験で得られた透気係数の結果を示す。透気試験は、コンクリート構造物の透気性を判定する試験であり、試験によって得られる透気係数が小さいほど透気性が高く、緻密な構造物であることを示している。各水準での透気係数に大きな違いはなく、鏡面仕上げまで押さえた場合は、高炉スラグの混合量と構造物の緻密さに大きな相関が無いことを確認した。

4.2 破壊試験の結果

表－８に引張試験結果、写真－３に各コンクリートの代表的な箇所の破断の様子を示す。コンクリートの違いによる引張強度の違いは見られず、破断の状況は、すべてコンクリートの凝集破壊であった。

採取したコアをマイクロスコープで断面観察した様子を写真－４に示す。各コンクリートとも、表層のモルタル層と内部の肌別れは確認されなかった。このことから、高炉スラグを混合した場合であっても、ブリーディング終了後に押さえ工程を開始するなどの仕上げ工程の管理を行うことで表層剥離などの不具合を防ぐことができると考えられる。

摩耗試験で得られた摩耗減量および摩耗深さを図－４、５に示す。摩耗減量、摩耗深さともにコンクリートの違いによる差は見られず、鏡面仕上げまで押さえた場合は、高炉スラグの混合量と摩耗抵抗性との相関は無いことが確認できた。

5. 乾燥収縮ひび割れ抵抗性に関する評価

5.1 評価方法

乾燥収縮ひび割れ抵抗性を確認するために実施した試験項目を表－９に示す。長さ変化率の測定は、既往の文献¹³⁾を参考とし、φ10×20cmの円筒型枠に埋め込みひずみ計を設置して測定する方法とした。コンクリート打込み後、20℃60%の恒温恒湿室で材齢6日まで封かん養生した後に脱型し1日間水中養生したのちに乾燥開始とした。

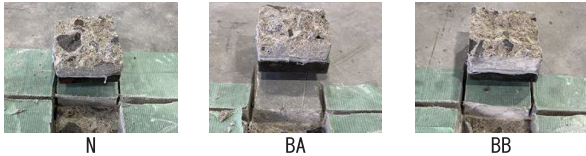
膨張量の測定は、既往の文献¹⁴⁾を参考とし、φ10×20cmのブリキ製の円筒鋼製型枠の中央部にひずみゲージを張り付け、コンクリートを打込んだ直後から材齢7

表－７ 透気係数結果

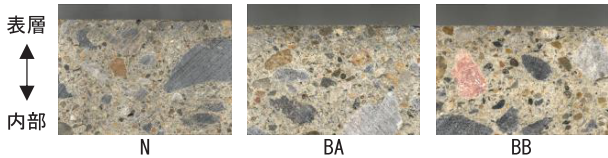
水準	透気係数 kT 値 (×10 ⁻¹⁶ m ²)
N	1.55
BA	1.55
BB	1.31

表－８ 引張試験結果

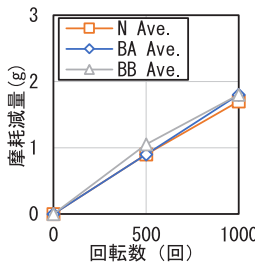
水準	引張強度 (N/mm ²)
N	3.2
BA	3.2
BB	3.2



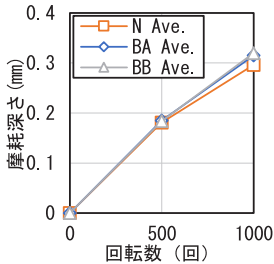
写真－３ 各コンクリートの破断の様子



写真－４ 断面観察の様子



図－４ 摩耗減量



図－５ 摩耗深さ

表－９ 乾燥収縮ひび割れ抵抗性の確認に関する試験項目

試験項目	準拠規格
長さ変化率測定	埋込み型ひずみ計による簡易測定方法 ¹³⁾ 20℃60%恒温恒湿室で乾燥期間 51 週まで測定
膨張量測定	軽量型枠法 ¹⁴⁾ 20℃60%恒温恒湿室での測定
拘束ひび割れ試験	JIS A 1151 参照 20℃60%恒温恒湿室および床模擬試験体と同環境で気中養生



写真－５ 拘束ひび割れ試験体の気中養生の様子
(20℃ 60%環境)

日まで 20℃ 60%の恒温恒湿室内で計測を行った。

得られた長さ変化率と最大膨張量を足し合わせることで、乾燥収縮ひずみを把握した。

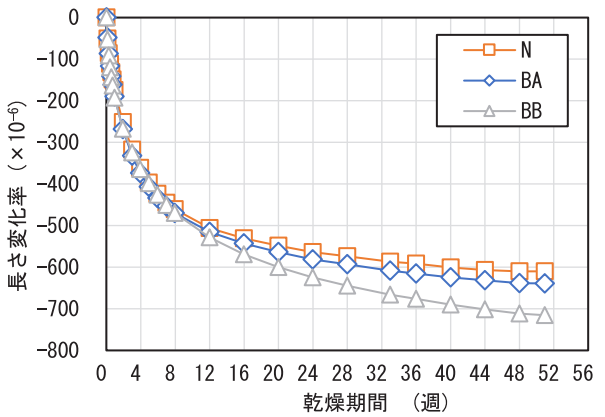
拘束ひび割れ試験体は、JIS A 1151 に示される拘束器具を用いて作製した。1 水準につき 2 体作製し、コンクリート打込み後から材齢 7 日までは床模擬試験体と同一の環境で湿布養生を施した。脱型後、一つは 20℃ 60%の恒温恒湿室で、一つは床模擬試験体と同じ環境で、試験体を立たせて気中養生を開始した（写真－5）。ひび割れの発生タイミングを把握するために、拘束型枠にひずみゲージを貼り付け、ひずみの変化量を記録した。また、ひび割れが発生した際に目視でひび割れ幅の計測を行った。

5.2 評価結果

図－6 に、乾燥期間 51 週までの簡易測定方法で測定した長さ変化率の結果を示す。JASS5 において、構造体コンクリートに用いられる乾燥収縮ひずみの判定は乾燥期間 26 週に行うことが推奨されているが、高炉スラグの混合による長期的な影響を確認するために、本実験では乾燥期間 51 週まで延長して評価することとした。乾燥期間 8 週までは、いずれのコンクリートも長さ変化率に大きな違いはないが、それ以降は、特に BB の長さ変化率が他 2 水準と比べて進展する傾向が確認できた。乾燥期間 51 週において、N と BA の長さ変化率の差が 30×10^{-6} 程度であるのに対し、N と BB の長さ変化率の差は 100×10^{-6} 程度であった。N は乾燥期間 26 週から 51 週にかけて長さ変化率が 40×10^{-6} 程度進展しており、BA では 50×10^{-6} 程度、BB は、 80×10^{-6} 程度の進展が確認できた。高炉スラグを混合したコンクリートは、N と比べて長さ変化率が長期的に伸びる特徴があることを確認したが、BA では、その差は僅かであることが確認できた。

表－10 に各コンクリートの最大膨張量と、乾燥期間 51 週における乾燥収縮ひずみ(最大膨張量+長さ変化率)を示す。各コンクリートでの最大膨張量に違いはあるものの、 30×10^{-6} 程度の差であり、3 水準とも同等の膨張量を確保できることを確認した。乾燥期間 51 週での乾燥収縮ひずみは、N と BA が同等であり、BB が他の 2 つと比べて 90×10^{-6} 程度の差が生じていた。

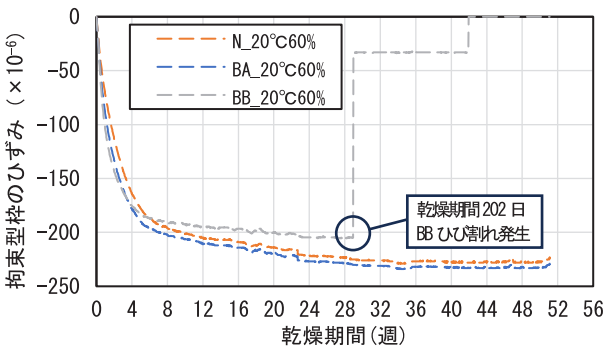
拘束ひび割れ試験による拘束型枠のひずみを図－7、8 に示す。20℃ 60% 環境では乾燥期間 53 週まで、現場環境では乾燥期間 34 週まで観察を行った。乾燥期間 202 日において、20℃ 60%環境で気中養生していた BB 試験体の中央に幅 0.10mm の貫通ひび割れが発生したことを



図－6 長さ変化率測定結果

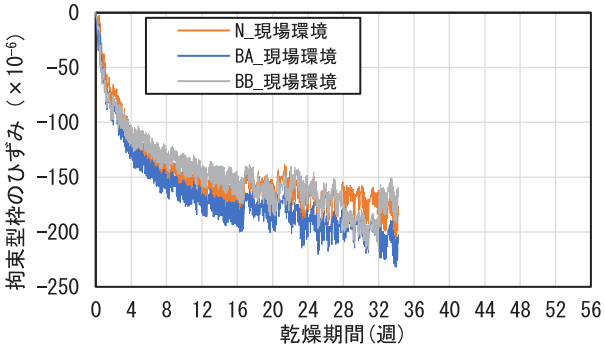
表－10 乾燥期間 51 週における乾燥収縮ひずみ

記号	最大膨張量 ($\times 10^{-6}$)	乾燥期間 51 週に おける長さ変化率 ($\times 10^{-6}$)	乾燥期間 51 週に おける乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)
N	153	-610	-457
BA	188	-639	-451
BB	166	-715	-549



図－7 拘束ひび割れ試験

拘束型枠のひずみ (20℃ 60% 環境)



図－8 拘束ひび割れ試験

拘束型枠のひずみ (現場環境)

確認した。20℃ 60%環境では N, BA の方が拘束型枠のひずみが先行しているものの、BB のひび割れ抵抗性が劣っていたことを確認できた。現場環境で気中養生を施

した試験体に関しては、いずれのコンクリートも、観察期間中にひび割れの発生は確認されなかった。

6. まとめ

本報告では、コンクリートが仕上げ面となる物流倉庫や工場などの床へ高炉スラグを混合したコンクリートを適用した場合に、施工性、美観、表層品質および乾燥収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす影響を確認した。標準期において、空調制御の無い屋内環境にて床模擬試験体を作製し、各種評価試験を行った結果について、得られた知見を以下に示す。

- (1) 高炉スラグの混合率が大きくなるほどブリーディング量の増加およびブリーディング終了時間の遅延が確認された。また、凝結時間も遅延する傾向で、Nと比べた場合、BAでは約1時間、BBでは約2時間遅延することを確認した。
- (2) 高炉スラグの混合率が大きくなるほど凝結時間が遅延する影響に加えて、仕上げ回数が増加することで高炉スラグの混合量が増加するほど鏡面仕上げ完了までの時間が遅延した。
- (3) 仕上げ直後は、床表面の色味の違いが顕著であったが、材齢が経過するにつれて表面が乾燥し、材齢1か月を経過するとコンクリートの違いによる外観の違いは見られなくなった。
- (4) 鏡面仕上げまで押さえた場合、高炉スラグの混合量の違いと含水率の経時変化、透気係数および摩耗抵抗性には相関が無いことを確認した。
- (5) 引張試験およびコアを採取し断面観察を行うことでコンクリート表層と内部の肌別れの有無を確認した。いずれのコンクリートにおいても肌別れは確認されず、ブリーディング終了時から押さえを開始するなど、押さえ工程を管理することで肌別れを防止できると考えられる。
- (6) 乾燥収縮ひずみについて、高炉スラグを混合することで乾燥収縮ひずみが長期的に進展する傾向が確認されたが、N、BAの差は僅かであった。BBは乾燥期間51週の時点で、N、BAと比較して約 90×10^{-6} 乾燥収縮ひずみが進展しており、拘束ひび割れ試験の一部条件において、BBのみひび割れが生じていた。

参 考 文 献

- 1) 環境省；報道発表資料，2023年度の我が国の温室効果ガス排出量及び吸収量について
https://www.env.go.jp/press/press_04797.html
(2025.10入手)
- 2) 気象庁；臨時診断表，2024年の日本近海の年平均海面水温が過去最高を更新
https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/rinji/2025/01/rinji_sst_202503.html (2025.10入手)
- 3) 経済産業省；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
- 4) 日本建築学会；建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2022
- 5) 小林利允 他：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. 75，2011
- 6) 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
- 7) 村井克綺 他：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いた環境配慮型コンクリートの諸性状，日本建築学会技術報告集，Vol.28，No. 69，pp550-555，2022
- 8) 金子樹 他：普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の混合使用により高炉セメントA種相当としたコンクリートに関する研究，日本建築学会構造系論文集 第86巻783号，p.674-685，2021
- 9) 鉄鋼スラグ協会；鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用（2025年版），2025
- 10) R.J.Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete on site, Materials and Structures, Vol.25, pp358-365, 1992
- 11) 藤井祐太郎 他：塗り床の耐動荷重性とコンクリート床下地の表層品質の関係，日本建築学会構造系論文集，Vol. 86，No. 781，pp361-370，2021.3
- 12) 野中英 他：弱材齢コンクリート床下地の放出水分量の現場測定・管理に関する研究 その5～8，日本建築学会2024年度年次大会学術講演概要集，pp1487-1491，2024.8
- 13) 百瀬晴基 他：乾燥収縮迅速評価システムの開発，コンクリート工学，Vol. 47，No. 10，pp10_22-10_29，2009.10
- 14) 辻埜真人 他：軽量型枠法による膨張コンクリートの品質管理，清水建設研究報告，第89号，2012.1

Experimental study on the application of low-carbon concrete to slabs

- Evaluation of workability, surface quality, and drying shrinkage resistance during the standard period -

Rei YOSHINO, Yoshiyuki SUZUKI

As a measure to reduce CO₂ emissions, the use of low-carbon concrete with blast furnace slag is being promoted. This report aimed to evaluate workability, surface quality, and resistance to drying shrinkage when using low-carbon concrete. As for workability, it was confirmed that, as the mixing ratio of blast furnace slag increased, the setting time was delayed, and the completion time was delayed. As for surface quality, no significant correlation was observed with the blast furnace slag content for mirror finishes. As for resistance to drying shrinkage, an increasing trend over the long term was confirmed with the addition of blast furnace slag, but, at a 20% slag content, the difference compared to OPC (Ordinary Portland Cement) concrete was found to be small.

Low-carbon concrete, Blast furnace slag, Floor finishing, Slab, Drying shrinkage.