

環境配慮型コンクリート（高炉 A 種相当コンクリート）の床部材への適用に関する実験的研究

Experimental study on the application of environment-conscious concrete (concrete equivalent to blast furnace cement type A) to floor members

長井 智哉*

Tomoya Nagai

中村 雄太*

Yuta Nakamura

木村 仁治*

Yoshiharu Kimura

ボンマハーサイ パラミ*

Phommahaxay Palamy

要 約

本論文では、地上構造物への環境配慮型コンクリートの普及を目指し、物流倉庫の床スラブで使用される膨張材や収縮低減剤を用いた高炉セメント A 種相当コンクリートの諸性状について室内実験を通して確認した。膨張材および収縮低減剤の単体使用または併用に関わらず、普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種のみを使用したコンクリートと比べ、フレッシュ性状や強度性状について大きな差はなく、膨張材および収縮低減剤の組合せにより、高炉セメント A 種相当コンクリートの乾燥収縮率を低減できることを確認した。さらに、耐摩耗性についてはセメント種類によらず、表面強化剤による補強効果を発揮することを確認した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 実験計画
- § 3. 実験結果
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

地球温暖化対策として、国内においては 2050 年のカーボンニュートラルの実現に向けて、産業副産物である高炉スラグをセメントの一部に置換させた環境配慮型コンクリートの開発・実用化が進んでいる¹⁾。しかし、置換する高炉スラグ量が多くなるにつれ、中性化抵抗性と収縮ひび割れ抵抗性が劣る懸念があることから、高炉セメント B 種（以下 BB）以上の置換量で製造される環境配慮型コンクリートは、地下構造物のみに適用されることがほとんどである。そこで、筆者らは、建築物の地上構造物で広く適用可能な環境配慮型コンクリートとして、異種セメントを混合して製造する高炉セメント A 種相当コンクリート（以下 BA コン）の開発・実用化を進めてきた²⁾。本研究では、地上構造部への BA コン適用普及に向けて、近年需要が増加しており、コンクリートの打込数量も見込むことができる物流倉庫の床スラブに着目し、実際に物流倉庫の床スラブの調合で使用される、石灰石骨材、膨張材および収縮低減剤を BA コンに使用した場合のコンクリートの諸性状について、室内実験を通

して得られた結果を報告する。

§ 2. 実験計画

2-1 コンクリートの使用材料および調合

コンクリートの使用材料を表一に、調合を表二に示す。実験に使用するコンクリートは、普通ポルトランドセメント（以下 N）を使用したコンクリート（以下 N コン）、N と BB を混合させて製造する BA コン（高炉スラグ含有量：20～25%）、および BB を使用したコンクリート（高炉スラグ含有量：40～45%、以下 BB コン）をそれぞれ基準調合とした。実験に用いた N と BB は、それぞれセメントメーカー主要 3 社の製品を等量混合して

表一1 コンクリートの使用材料

材料	記号	産地・銘柄
水	W	上水道水
セメント	N	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm^3 、A、B、C社等量混合
	BB	高炉セメントB種 表乾密度 3.04g/cm^3 、A、B、C社等量混合
細骨材	S1	静岡県掛川市産陸砂 表乾密度 2.59g/cm^3 、粗粒率2.61
	S2	茨城県桜川市産硬質砂岩砕砂 表乾密度 2.62g/cm^3 、粗粒率2.81
粗骨材	G	栃木県佐野市産石灰岩碎石 表乾密度 2.70g/cm^3 、実積率60.5%
混和材	Ex1	膨張材（石灰系）密度 3.16g/cm^3
	Ex2	膨張材（エトリンガイト・石灰複合系、低添加型）、密度 3.08g/cm^3
混和剤	SP	高性能AE減水剤標準型 I 種 （ポリカルボン酸系化合物）
	Sr	収縮低減剤（ポリエーテル誘導体）
表面強化剤	SE	表面強化剤（ケイ酸塩系）

* 技術研究所建築技術グループ

表－2 調査

NO.	調査記号	セメント 混合率(%)		W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)								Sr (kg/m ³)	SP (%)	フレッシュコンクリート		
		N	BB			W	N	BB	Ex1	Ex2	S1	S2	G			スランブ (cm)	空気量 (%)	C温度 (℃)
1	N	100	-	55	51.0	170	309	0	0	0	632	272	915	0	0.90	16.5	5.0	22
2	N-Sr					170	309	0	0	0	632	272	915	6	0.90	17.0	4.8	22
3	N-Ex1-20					170	289	0	20	0	632	272	915	0	0.90	17.5	3.0	23
4	N-Ex1-25					170	284	0	25	0	632	272	915	0	0.90	18.0	5.5	23
5	N-Ex1-Sr					170	289	0	20	0	632	272	915	6	0.90	18.0	4.8	22
6	N-Ex2-Sr					170	289	0	0	20	632	272	915	6	0.90	17.0	4.8	23
7	BA	50	50	55	51.0	170	155	155	0	0	627	272	915	0	0.65	17.5	5.5	23
8	BA-Sr					170	155	155	0	0	627	272	915	6	0.65	15.0	4.9	22
9	BA-Ex1-20					170	145	145	20	0	627	272	915	0	0.70	17.5	4.5	23
10	BA-Ex1-25					170	142	142	25	0	627	272	915	0	0.65	17.0	5.0	23
11	BA-Ex1-Sr					170	145	145	20	0	627	272	915	6	0.65	17.5	4.7	23
12	BA-Ex2-Sr					170	145	145	0	20	627	272	915	6	0.65	17.5	4.7	23
13	BB	-	100	55	50.0	170	0	309	0	0	624	270	915	0	0.70	17.5	4.5	23
14	BB-Sr					170	0	309	0	0	624	270	915	6	0.80	19.0	4.8	23
15	BB-Ex1-20					170	0	289	20	0	624	270	915	0	0.80	20.0	4.3	23
16	BB-Ex1-25					170	0	284	25	0	624	270	915	0	0.70	17.0	4.7	23
17	BB-Ex1-Sr					170	0	289	20	0	624	270	915	6	0.80	18.5	4.5	23
18	BB-Ex2-Sr					170	0	289	0	20	624	270	915	6	0.80	19.5	4.7	23

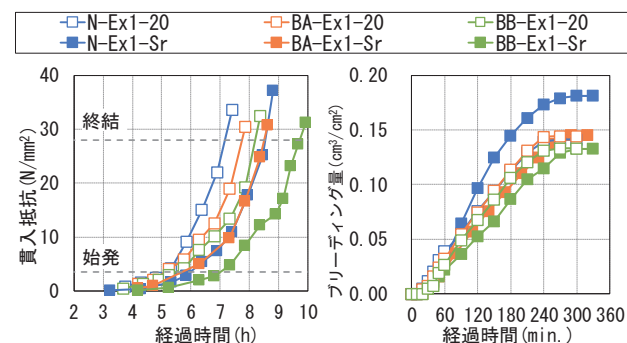
使用した。床スラブは収縮ひび割れが特に発生しやすく、使用するコンクリートの乾燥収縮率を制御する必要があるため、乾燥収縮率を低減できる石灰岩碎石、膨張材、収縮低減剤を組み合わせた調査について検討を行った。また、床スラブの表面品質を向上させるために使用される表面強化剤を、促進中性化試験および耐摩耗試験で使用した。単位水量は 170kg/m³、水結合材比（以下 W/B）を 55% とし、すべての調査で石灰岩碎石を使用し、膨張材および収縮低減剤を単体使用または併用した調査について実験を行った。膨張材は結合材として計算し、セメントの内割りとして、収縮低減剤は単位水量の内割りとしてそれぞれ添加した。目標スランブは 18.0±2.5 cm、目標空気量は 4.5±1.5% とした。

2-2 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表－3 に示す。高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、早期の収縮ひび割れ抵抗性が劣る懸念があるが、初期材齢の湿潤養生期間を長くすることでひび割れ発生材齢を遅くする可能性がある³⁾。そこで、長さ変化試験においては、基長の測定材齢を 7 日のほか、材齢初期から乾燥が開始する条件を想定し、脱型翌日に基長を測定する（材齢 1 日）水準についても試験を行った。また、促進中性化試験では、一般的に使用される 100×100×400 mm の供試体の側面からの中性化深さの測定に加え、実施工を想定したコンクリートのこて押え面のブリーディング等による中性化深さの影響を検討するため、φ100×200 mm の円柱供試体の上面押え面からの中性化深さについても試験を行った。こて押えの方法については、各供試体に試料を詰めた後、ブリーディング消失のタイミングで 1 回金鋸により押さえた。さらに、物流倉庫の床スラブにおいてよく用いられるケイ酸塩系表面強化剤が、N コン、BA コン、BB コンの膨張材 20 kg/m³ 使用調査のそれぞれに

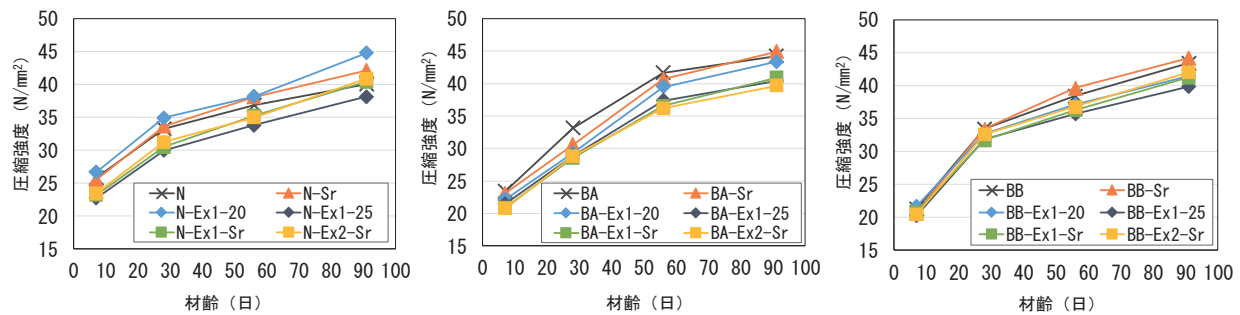
表－3 試験方法および試験項目

試験項目		試験方法
フレッシュ コン クリ ート	スランブ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
	ブリーディング	JIS A 1123
	凝結時間	JIS A 1147
硬化 コン クリ ート	圧縮強度	JIS A 1108 標準養生 材齢7,28,56,91日
	静弾性係数	JIS A 1149 標準養生 材齢28,56,91日
	簡易拘束膨張	JCI-S-009-2012
	長さ変化	JIS A 1129-3 基長：材齢1日、7日 測定：乾燥期間 1,2,3,4,8,13,26,53週
	促進中性化	JIS A 1153 供試体サイズ： 100×100×400mm φ100×200mm 促進材齢： 100×100×400mm：1,4,8,13,26週 φ100×200mm：1,8,26週 表面強化剤：無,SE
	耐摩耗	JIS K 7204 供試体サイズ：φ100×10mm 測定材齢：91日 表面強化剤：無,SE

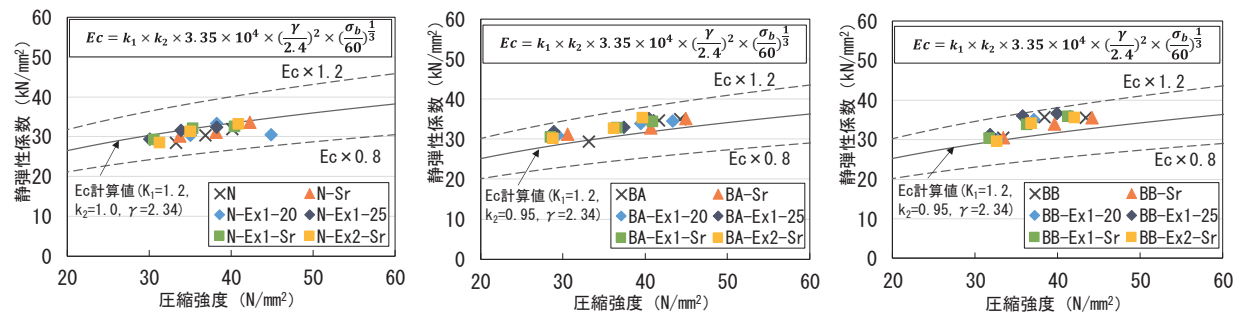


図－1 凝結試験結果

図－2 ブリーディング試験結果



図一三 圧縮強度試験結果



図一四 圧縮強度と静弾性係数の関係

対する中性化抵抗性および耐摩耗性に及ぼす影響についても検討を行った。なお、表面強化剤は、セメント種類問わず、標準使用量 (100 g/m^2) を促進中性化試験では乾燥を開始する材齢4週時に、耐摩耗試験では材齢7日に測定面に刷毛により塗布し、以降は気中養生とした。

§3. 実験結果

3-1 フレッシュ性状

(1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの結果を表一2に示す。スランプおよび空気量は、BA-Srの調合の場合に、スランプの目標値を外れたが、他はいずれも目標値の範囲内であった。

(2) 凝結時間

凝結試験の結果を図一1に示す。凝結時間は、始発時間が5時間50分から7時間40分、終結時間が7時間50分から10時間10分の範囲でNコン、BAコン、BBコンの順に遅くなり、いずれも収縮低減剤の使用により凝結時間が遅延する傾向が見られた。

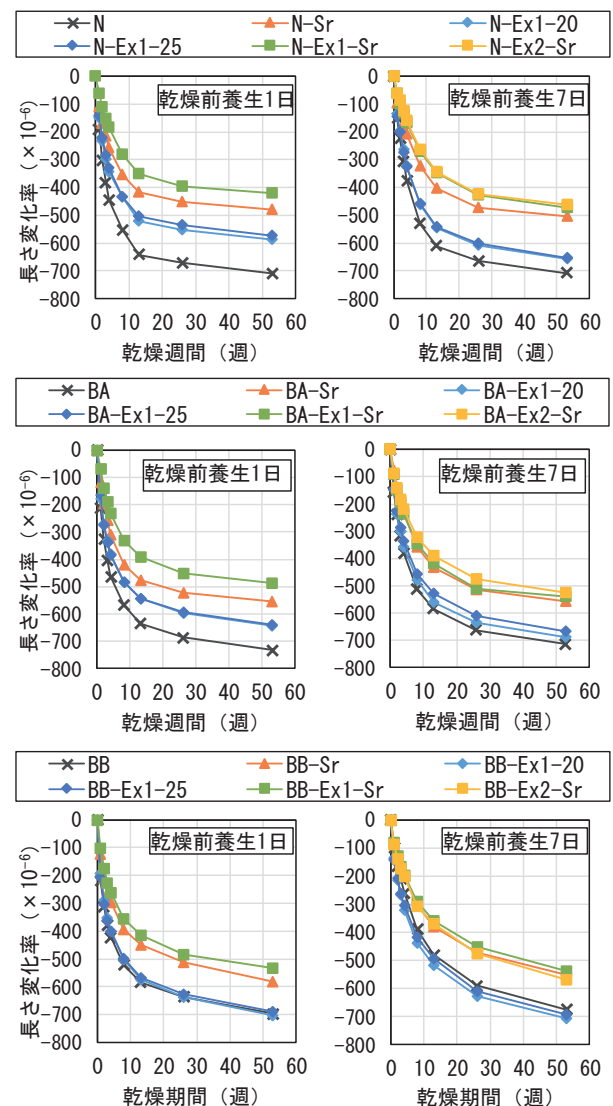
(3) ブリーディング

ブリーディング試験の結果を図一2に示す。ブリーディング量は、N-Ex1-Srで他より若干大きくなったが、いずれの水準も $0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 以下と小さいことから、セメント種類の違いや収縮低減剤の使用による影響は小さいと考えられる。

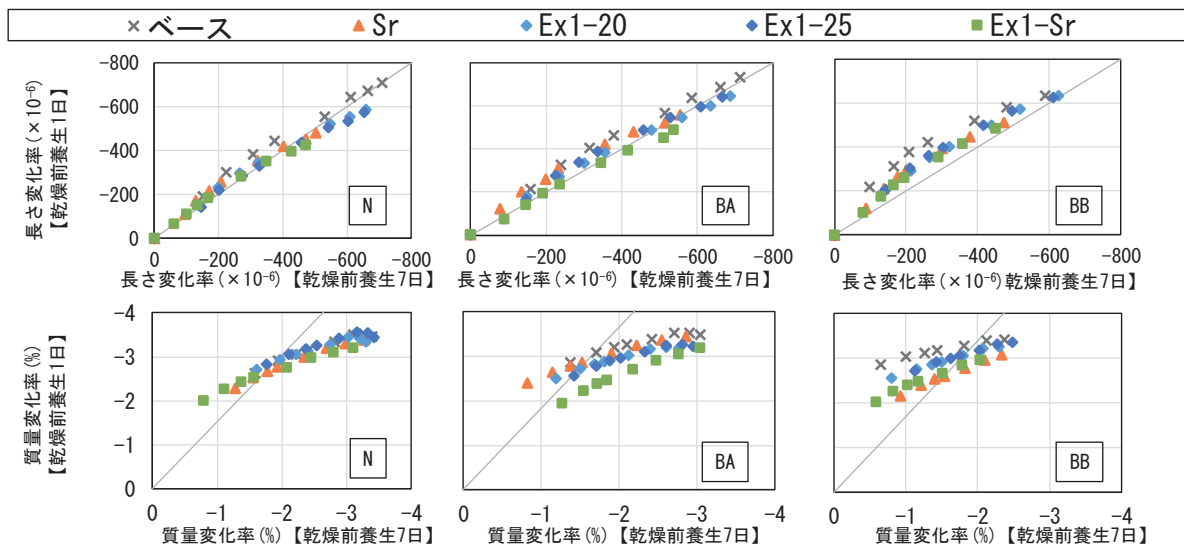
3-2 硬化性状

(1) 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を図一3に示す。圧縮強度は、同



図一五 長さ変化率測定結果



図－6 乾燥前養生 7 日と 1 日の長さ変化試験結果の関係

一セメントで比較すると、いずれの調合も概ね同程度の強度は出ているものの、膨張材と収縮低減剤を併用した調合または膨張材を 25 kg/m^3 使用した調合においてわずかに圧縮強度が低下する傾向が見られた。これは、膨張材をセメントの内割りで調合したことにより強度発現に寄与するセメントが減少したためと考えられる。また、膨張材 20 kg/m^3 単体使用の調合で強度低下が生じなかったのは、空気量が他に比べ少なかったことが影響したと考えられる。

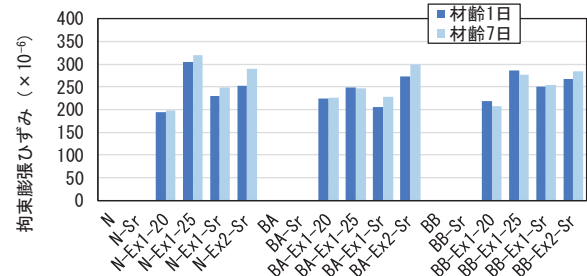
(2) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図－4 に示す。静弾性係数は、図中に併記した建築工事標準仕様書・同解説 JASS5⁴⁾（以下 JASS5）に示される建築学会予測式に沿って推移し、セメントの種類の違いや膨張材、収縮低減剤の単体または併用使用に関わらず、すべての値が $\pm 20\%$ の間に入る結果であった。

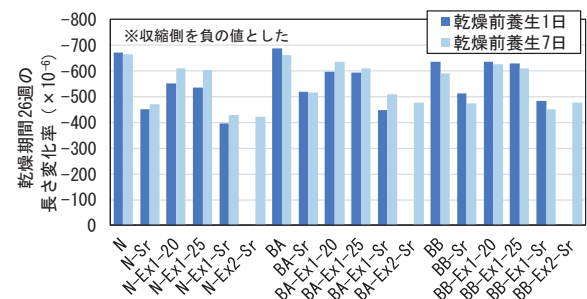
3-3 耐久性状

(1) 長さ変化

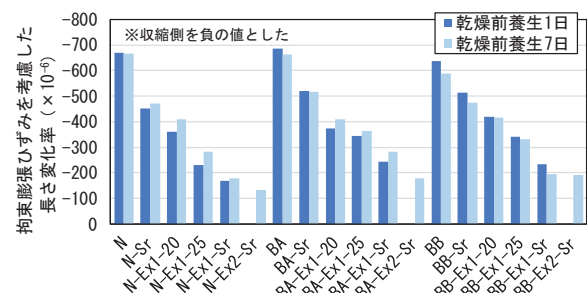
各セメントの長さ変化率の測定結果を図－5 に示す。乾燥前養生の期間および膨張材、収縮低減剤の単体または併用使用に関わらず、乾燥期間 53 週での長さ変化率は、N コン < BA コン < BB コンであった。乾燥前養生 7 日と 1 日の長さ変化試験結果の関係を図－6 に示す。なお、図－6 での結果は、表－3 の測定材齢での測定結果をプロットした。N コン、BA コンでは、乾燥前養生期間によらず長さ変化率が概ね同程度となるのに対し、BB コンでは、乾燥初期において、乾燥前養生が 1 日の方が、7 日のものより長さ変化率が大きくなる傾向が見られ、その差は乾燥期間 4 週程度をピークに徐々に縮まり、53 週時点においては同程度の長さ変化率に収束した。質量変化率については、乾燥前養生が 1 日の方が、7 日のものより質量減少が大きく、それは N コン < BA コン < BB コンの順でより顕著に見られ、乾燥期間が経つほどその差



図－7 簡易拘束膨張試験結果



図－8 乾燥期間 26 週の長さ変化率



図－9 拘束膨張ひずみを考慮した長さ変化率

は縮まった。これらのことから、BB コンの長さ変化率は、湿潤養生期間の長さに影響を受けやすく、若材齢時の湿潤養生期間を十分に取れなかった場合、材齢初期の乾燥収縮率の増大が進行しやすくなると考えられる。

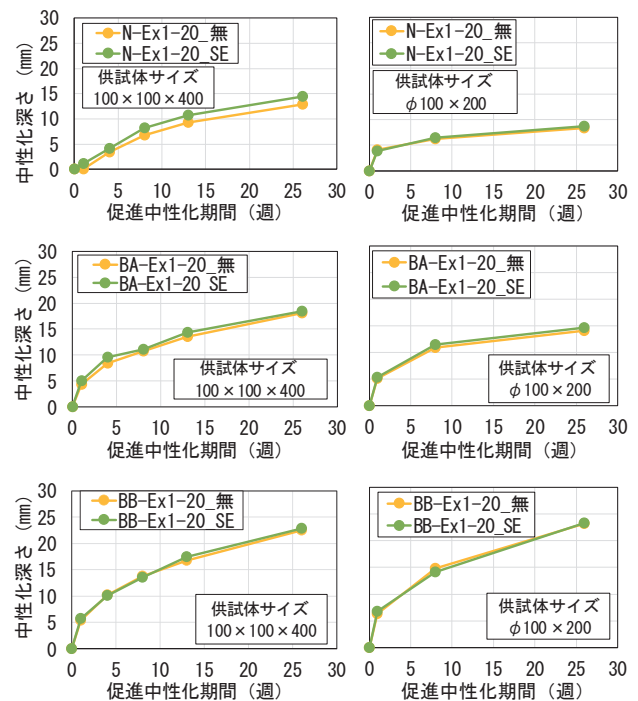
また、簡易拘束膨張試験結果を図－7 に、乾燥期間 26 週の長さ変化率を図－8 に、拘束膨張ひずみを考慮した

乾燥期間 26 週の長さ変化率を図—9 に示す。なお、拘束膨張ひずみを考慮した長さ変化率は、材齢 1 日、7 日の拘束膨張ひずみに乾燥前養生 1 日、7 日の長さ変化率（乾燥期間 26 週）をそれぞれ足し合わせて算出した。拘束膨張ひずみは、材齢 1 日と 7 日とではほぼ差はなく、材齢 1 日で膨張量の増大は概ね収束した。BA コンと BB コンの拘束膨張ひずみおよび乾燥期間 26 週の長さ変化率は、N コンのそれぞれの調合に対して $\pm 50 \times 10^{-6}$ 程度の範囲の差となった。図—9 より、N コンおよび BA コンでは乾燥前養生 1 日より 7 日の方が、長さ変化率が大きいことに対し、BB コンでは乾燥前養生 1 日の方が、長さ変化率が大きい結果となった。N コン、BA コンでは、湿潤養生期間の違いによる水の拡散係数に差がないことに対し、BB コンでは湿潤養生期間が短いほど水の拡散係数が大きくなる⁵⁾ことから、図—6 にもある通り、質量変化率に差が生じ、BB コンでは乾燥前養生 1 日の長さ変化率が大きくなったと推察される。また、膨張材と収縮低減剤を併用した際の長さ変化率の低減効果について、N コンおよび BB コンでは確認されたが、BA コンの併用調合（BA-Ex1-Sr）では確認できなかった。これは、BA-Ex1-Sr の拘束膨張ひずみが N コンおよび BB コン比べて小さいためであるが、JASS5 に示されている膨張材を使用した際の標準的な収縮低減効果（ 150×10^{-6} ）は得られていること、また、膨張材の種類違いである BA-Ex2-Sr では N、BB 調合と同等の結果が得られていることから、BA コンについても膨張材と収縮低減剤を併用した際の長さ変化率の低減効果はあると考えられる。今回の結果については測定のみならず一因として考えらえるが、石灰系の膨張材を使用した際の BA の特性を含めて今後の課題とする。基準調合とした BA コン、BB コンは、N コンと同様に、乾燥収縮率を低減する材料の組合せにより、JASS5 に示される低収縮等級 2（ 500×10^{-6} 以下）および低収縮等級 3（ 400×10^{-6} 以下）を実現することが確認された。

(2) 中性化抵抗性

促進中性化試験の結果を図—10 に示す。N コンに比べ BB コンの中性化深さは大きく、BA コンは N コンと BB コンの中間程度の結果であった。供試体形状による比較をすると、BB コンでは供試体形状にかかわらず同等の結果であったのに対し、N コンおよび BA コンでは、促進中性化期間が長くなるほど $\phi 100 \times 200$ mm の中性化深さの方が小さくなる傾向が見られた。これについては今後も検討を続ける必要があるが、実施工を想定した供試体によるこて押え作業の方が、コンクリート表面が緻密となり、中性化抵抗性が影響を受けたと考えられるため、実施工においても同様の現象が起きる可能性があると考えられる。また、セメントの種類によらず、表面強化剤の有無による中性化深さは同等であった。このことから、ケイ酸塩系の表面強化剤による中性化抵抗性の寄与が小さいことが考えられる。

鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解



図—10 促進中性化試験結果

表—4 中性化速度係数および中性化深さ 20 mm, 30 mm に達する年数

調合	供試体形状	表面強化剤	定数A	中性化深さ 20mm に達する年数	中性化深さ 30mm に達する年数
N-Ex1-20	100×100×400	無	2.54	60	135
		SE	2.84	48	107
	φ100×200	無	1.64	142	320
		SE	1.71	132	296
BA-Ex1-20	100×100×400	無	3.54	31	69
		SE	3.62	29	66
	φ100×200	無	2.75	51	114
		SE	2.87	47	105
BB-Ex1-20	100×100×400	無	4.40	20	45
		SE	4.47	19	43
	φ100×200	無	4.55	19	42
		SE	4.58	18	41

説⁶⁾によると、温度 20℃、湿度 60% RH の大気中の中性化深さは、以下の式(1)で表される。

$$C = A \sqrt{CO_2 / 5.0} \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、C：中性化深さ (mm)

CO_2 ： CO_2 濃度 (%)

A：中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{週}}$)

t：材齢

また、中性化に対する設計劣化外力として、 CO_2 濃度の標準値を、屋内 0.1%、屋外 0.05% としている。JASS5 では、床スラブにおける最小かぶり厚さを、非腐食環境および計画供用期間の級が短期の腐食環境で 20 mm、計画供用期間の級が標準～長期の腐食環境で 30 mm としている。式(1)より算出した中性化速度係数および中性化深さ 20 mm, 30 mm に達する年数を表—4 に示す。表面強化剤によらず、今回の試験で得られた中性化深さ

20 mm に達する年数は、供試体形状 $100 \times 100 \times 400$ mm の場合、N コンで 48～60 年、BA コンで 29～31 年、BB コンで 19～20 年、供試体形状 $\phi 100 \times 200$ mm の場合、N コンで 132～142 年、BA コンで 47～51 年、BB コンで 18～19 年、中性化深さ 30 mm に達する年数は、供試体形状 $100 \times 100 \times 400$ mm の場合、N コンで 107～135 年、BA コンで 66～69 年、BB コンで 43～45 年、供試体形状 $\phi 100 \times 200$ mm の場合、N コンで 296～320 年、BA コンで 105～114 年、BB コンで 41～42 年となった。

(3) 耐摩耗性

耐摩耗試験後の外観状況を図-11 に、摩耗減厚の結果を図-12 に示す。なお、耐摩耗試験は材齢 91 日に実施した。表面強化剤の塗布に関わらず、摩耗減厚は、BA コン < N コン < BB コンの順に大きくなった。これは、材齢 91 日の圧縮強度が N コン > BA コン > BB コンであったが、N の供試体のこて押え作業が不十分であったことにより、ごく表層にブリーディング水が浮き、密度が粗な層が生じてしまったことが原因と考えられる。また、表面強化剤に着目を見ると、N コン、BA コン、BB コンともに SE < 無塗布となり、セメント種類によらずコンクリート表面の補強効果を確認した。

§ 4. まとめ

地上構造物への環境配慮型コンクリートの普及を目指し、物流倉庫の床スラブで使用される材料を用いた高炉セメント A 種相当コンクリートの諸性状について室内実験を通して確認した。以下に得られた知見を示す。

- ・凝結時間は、N コン、BA コン、BB コンの順に遅くなり、いずれも収縮低減剤の使用により凝結時間が遅延する傾向が見られた。
- ・ブリーディング量は、いずれの水準も $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 以下と小さかった。
- ・圧縮強度は、同一セメントで比較すると、いずれの調査も概ね同程度の強度は出ているものの、膨張材を使用した調査において、セメント内割置換のため、わずかに圧縮強度が低下する傾向が見られた。
- ・全ての調査の静弾性係数は、概ね JASS5 に示される建築学会予測式に従って推移した。
- ・BA コン、BB コンにおいても N コンと同様に、膨張材、収縮低減剤の組合せにより乾燥収縮率の低減を実現することが可能である。
- ・BB コンの長さ変化率は、N コンや BA コンに比べ湿潤養生期間の長さに影響を受けやすく、若材齢時の湿潤養生期間を十分に取れなかった場合、材齢初期の乾燥収縮率の増大が進行しやすくなると考えられる。
- ・表面強化剤の中性化抵抗性への影響は認められなかった。
- ・耐摩耗試験では、セメント種類によらず表面強化剤による補強効果を発揮することを確認した。

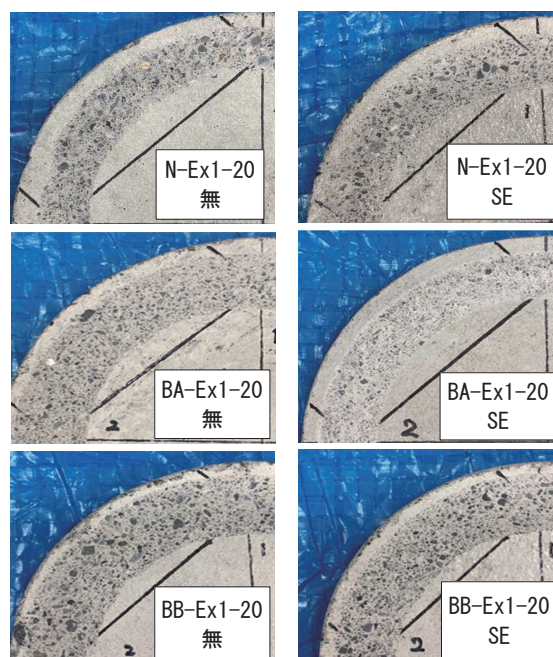


図-11 耐摩耗性試験後の外観状況

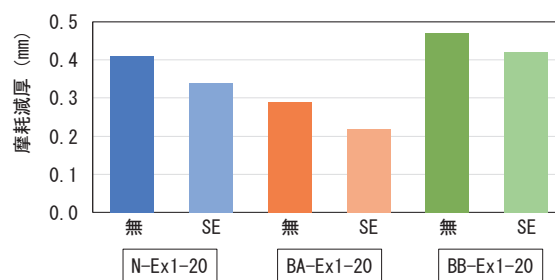


図-12 摩耗減厚

謝辞. 本報は、戸田建設との共同研究成果の一部である。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 金子樹ら：セメント混合による高炉セメント A 種相当コンクリートに関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，pp. 201-206, 2018
- 2) 右田周平，久須美真悟，木村仁治，長井智哉：異種セメントを混合して製造した高炉 A 種相当コンクリートの性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，pp. 1078-1083, 2023
- 3) 佐藤幸恵ら：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの各種力学特性に及ぼす石灰石微粉末と湿潤養生の影響，日本建築学会構造系論文集，No. 683，pp. 1-7, 2013 年 1 月
- 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，2018
- 5) 伊代田岳史ら：高炉コンクリートの耐久性における養生敏感性，コンクリート工学年次論文集，pp. 111-116, 2008
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説，2016