

# 論文 加熱と炭酸化養生を施した $\gamma$ -C<sub>2</sub>S を含む高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの強度発現性と耐凍害性に関する検討

山口 健輔\*1・藤田 和希\*2・金沢 智彦\*3・辻 大二郎\*4

**要旨:** 本研究は、高炉スラグ微粉末高含有セメントに  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S を主成分とする炭酸化混和材を添加したコンクリートについて、プレキャスト製品への適用に向けた物性や耐久性の基礎的な検討を行った。養生は打設後に加熱養生を行い、脱型後に試験材齢まで高濃度炭酸化養生を行った。検討項目は、圧縮強度、炭酸化深さ、細孔径分布、凍結融解および水分浸透速度係数である。本検討の結果、強度発現性や耐凍害性において、プレキャストコンクリートへの適用ができる可能性を見出した。

**キーワード:** 高炉スラグ微粉末,  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S, 炭酸化養生, プレキャストコンクリート, 耐凍害性, 圧縮強度

## 1. はじめに

我国では 2050 年までに温室効果ガスの排出量と吸収量の総和を実質的にゼロにするカーボンニュートラルを宣言した。これを受けて、地球温暖化の要因の一つである二酸化炭素の排出量の削減が急務となっており、各業界において脱炭素社会に向けた研究が活発に行われている。

セメント・コンクリート分野においては、セメント製造時にエネルギー由来と原料由来の CO<sub>2</sub> を多量に排出する。この CO<sub>2</sub> の削減は、セメント使用量を低減することが効果的であることから、高炉スラグ微粉末を混和材として高含有させたセメントを使用したコンクリートの開発が進められてきた<sup>1)</sup>。一方、CO<sub>2</sub> をコンクリートに吸収・固定する技術の一つに、炭酸化混和材としてダイカルシウムシリケート  $\gamma$  相 ( $\gamma$ -C<sub>2</sub>S) の使用がある。この  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S は、水和反応はしないものの、CO<sub>2</sub> と反応して生成するカルサイト等が硬体組織の空隙を埋めて緻密化する性質があり、モルタルやコンクリートの圧縮強度が増進することが報告されている<sup>2)3)</sup>。

さらに最近では、より多くの CO<sub>2</sub> 削減を目的とした、高炉スラグ微粉末の高含有による CO<sub>2</sub> 削減技術と、CO<sub>2</sub> をコンクリート中に固定する技術を組み合わせた環境配慮性能の高いコンクリートの開発が進められている<sup>4)5)</sup>。しかし、特に脱型強度確保のため加熱養生を初期に行うプレキャストコンクリートを対象とした場合は、高炉スラグ微粉末高含有セメントと炭酸化混和材を用いたコンクリートの物性や耐久性についての知見は数少ない。

そこで、本研究では、高炉スラグ微粉末を高含有したセメントと  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S を使用し、加熱養生と高濃度炭酸化養生を施したプレキャストコンクリートについて、強度発現性や耐凍害性に関する検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料, コンクリート配(調)合

コンクリートの使用材料を表-1 に、コンクリートの配(調)合を表-2 に示す。

試験には、高炉スラグ微粉末を 65%高含有させたセメントである高炉セメント C 種を用い、水セメント比は、50, 55, 60, 65%の 4 水準とした。また、炭酸化混和材は、セメントの外割 30%とし細骨材 S に置換した。フレッシュ性状は、スランプ 18.0±2.5cm, 空気量 5.0±1.5% を目標値として、化学混和剤(高性能減水剤, AE 剤, 消泡剤)の添加量で調整した。

### 2.2 養生方法

加熱養生は、コンクリートを型枠に入れた状態で、恒温恒湿槽内で行った。加熱養生条件を図-1 に示す。加熱養生の条件は、前養生温度 20℃で 2 時間、最高温度 45℃で 6 時間保持し、20℃で 12 時間静置した。昇温および降温は 12.5℃/h の勾配で行った。

炭酸化養生は、高濃度中性化促進装置を用いて、所定

表-1 使用材料

材料	記号	主な物性
水	W	水道水
セメント	BC	高炉セメント C 種 密度 2.96 g/cm <sup>3</sup> SO <sub>3</sub> 量 3.50%
混和材	$\gamma$	炭酸化混和材 (主成分 $\gamma$ -C <sub>2</sub> S) 密度 3.09 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	苫小牧錦岡産陸砂 密度 2.67 g/cm <sup>3</sup>
	S2	白老敷生川産砕砂 密度 2.68 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G1	白老敷生川産砕石 密度 2.65 g/cm <sup>3</sup> 最大寸法 15mm
	G2	白老敷生川産砕石 密度 2.65 g/cm <sup>3</sup> 最大寸法 20mm
化学混和剤		高性能減水剤 ポリカルボン酸系
	AE 剤	陰イオン界面活性剤
	消泡剤	ポリアルキレングリコール系

\*1 日鉄セメント(株) 製品開発部 製品開発課 副主幹研究員 (正会員)

\*2 日鉄セメント(株) 製品開発部 製品開発課 研究員 (正会員)

\*3 日鉄セメント(株) 製品開発部 上席研究員 博士(環境学)

\*4 (株)竹中工務店 技術研究所 建設基盤技術研究部 建設材料グループ長 博士(工学)(正会員)

表-2 コンクリートの配(調)合とフレッシュ性状

名称	W/C (%)	s/a (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				添加量 (wt%-C)			フレッシュ試験結果			
				水 W	セメント BC	炭酸化混和材 $\gamma$	細骨材 S*1	粗骨材 G*2	高性能減水剤	AE剤*3	消泡剤*3	SL (cm)	air (%)	温度 (°C)
BC50	50	48.7	20	167	334	100	794	917	0.45	0.60	0.05	21.0	5.7	20.2
BC55	55	49.5	20	167	304	91	826	917	0.35	0.40	0.05	18.0	5.8	19.8
BC60	60	50.1	20	167	278	84	858	917	0.35	0.25	0.05	18.0	5.0	20.4
BC65	65	50.6	20	167	257	77	883	917	0.35	0.20	0.05	17.0	4.6	19.4

※1 S1とS2を6:4の割合で混合した ※2 G1とG2を3.5:6.5の割合で混合した ※3 100倍希釈液を使用

材齢まで20°C、60%RH、CO<sub>2</sub>濃度80%の環境で行った。なお、本検討の養生は、加熱養生を1日間行った後、供試体を脱型し、炭酸化養生を継続して行った。

### 2.3 試験水準

試験項目と試験水準を表-3に示す。試験水準は、水セメント比を因子としてBC50、BC55、BC60、BC65の4水準を基本とした。各試験は、表-3で示す材齢または養生期間まで、炭酸化養生を行った後に実施した。

### 2.4 試験方法

#### (1) 圧縮強度

圧縮強度は、JISA1108に準拠し、φ100×200mmの円柱供試体を用いて測定を行った。前述した加熱養生終了後、材齢1日で脱型強度の測定を行った。以降、表-3に示す所定材齢で圧縮強度を測定した。

#### (2) 炭酸化深さ

炭酸化深さは、図-2に示した様にφ100×200mmの円柱供試体を割裂後、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、側面部分から呈色部までの距離とし、割裂面が赤色に呈色していない場合、供試体の中心部まで炭酸化したとみなした。炭酸化深さの測定は、片側5カ所の合計10カ所とし、その平均値を炭酸化深さとした。

#### (3) 細孔径分布

細孔径分布は、図-3に示した様に、打設面からの炭酸化の進行による影響をなくするため、φ100×200mm円柱供試体の打設面側から50mmまで除去し、切断面側から5mm厚の円板状にスライスした後、さらに円板状の試料を5mm角にカットし測定用試料とした。作製した試料は、多量のアセトンに24時間浸漬し水和を停止させた。その後、45°Cの乾燥機内で24時間乾燥させ、アセトンを気化させた後、凍結乾燥機による真空乾燥処理を行い、水銀圧入式ポロシメータを用いて、細孔径分布と累積細孔容積を求めた。

#### (4) 凍結融解試験

凍結融解試験は、100×100×400mmの角柱供試体を用いてJISA1148を参考に水中凍結融解試験を行い、相対動弾性係数および質量変化を300サイクルまで測定した。養生期間は、加熱養生1日および炭酸化養生27日の28日間とし、2日間20°Cの水中で吸水処理をして、試験を開始した。また、BC50、BC55、BC60の水準では、養生

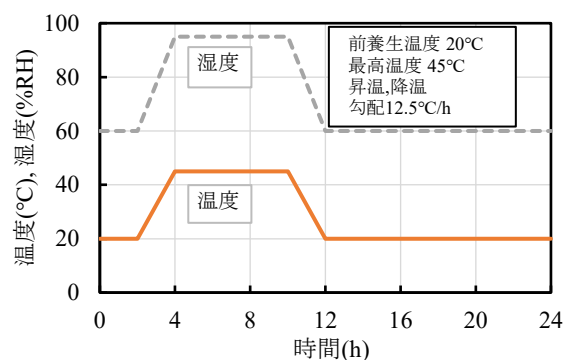


図-1 加熱養生条件

表-3 試験項目と試験水準

試験項目	上段：材齢, 養生期間 (日)						
	1	7	14	21	28	56	91
	下段：炭酸化養生期間 (日)						
	0	6	13	20	27	55	90
圧縮強度	○	○	○		○		BC50 BC55
炭酸化深さ		○	○	○	○	BC50 BC60	BC50 BC55
細孔径分布			BC50 BC65		BC65		BC50
凍結融解					○	BC60	BC50 BC55
水分浸透						BC65	BC60 BC50 BC55

○ : BC50, BC55, BC60, BC65の全水準

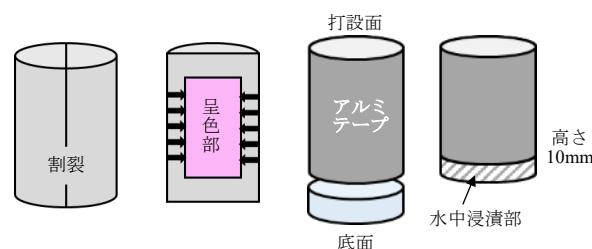


図-2 炭酸化深さ

図-4 水分浸透速度係数

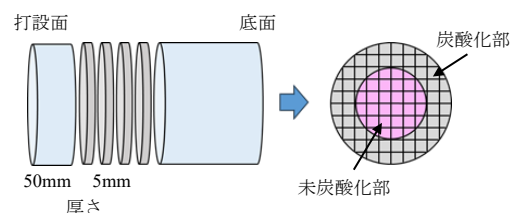


図-3 細孔径分布

期間 28 日での炭酸化深さが小さいことから、炭酸化を更に進行させた後の耐凍害性の把握を目的として、BC50、BC55 は 91 日、BC60 は 56 日まで炭酸化養生を継続した。その後、上記と同様の吸水処理を行い、凍結融解試験を開始した。

### (5) 水分浸透速度係数試験

水分浸透速度係数試験は、JSCE-G 582-2018 を参考にを行った。養生期間は、BC50、BC55 が 91 日まで、BC60、BC65 は、それぞれ 56 日、28 日とした。図-4 に示した様に  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  円柱供試体の底面側 25mm を除去し、供試体を  $40^\circ\text{C}$ 、30%RH の条件で 28 日間乾燥させた。乾燥終了後に、切断面と打設面を除く面をアルミニウム箔テープで覆い、切断面から浸漬高さが 10mm となるよう水に浸漬した。水分浸透深さの測定時期は、浸漬開始から 5 時間後、24 時間後、48 時間後とし、測定は、割裂断面に水分に発色する現像剤を噴霧して両側面から 20mm を除いた 5 カ所とし、その平均値を水分浸透深さとした。水分浸透速度係数は、水分浸透深さを浸漬時間の平方根で除して算出した。なお、BC50、BC55 の供試体は、炭酸化部と未炭酸化部が含まれ、BC60、BC65 においては、全面炭酸化している。BC50、BC55 の炭酸化深さは、それぞれ 27.5、44.4mm であり、底面からも同様に炭酸化が進行したと仮定すると BC50、BC55 は、底面側 25mm を除去しているため、底面にそれぞれ厚さ 2.5、19.4mm の炭酸化の層を含む供試体の評価となる。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 圧縮強度と炭酸化深さ

#### (1) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を図-5 に示す。加熱養生を行った材齢 1 日の圧縮強度は、水セメント比の違いにより、 $7.8 \sim 16.7\text{N/mm}^2$  を示し、水セメント比が小さい程増加する傾向を示した。

加熱養生後に、炭酸化養生を施した材齢 7 日以降の圧縮強度は、BC50、BC55 では材齢 91 日まで、BC60 は材齢 28 日まで、BC65 は材齢 14 日までそれぞれ増加する傾向が見られた。また、BC50、BC55、BC60 では、材齢 28 日で  $40\text{N/mm}^2$  以上の値を示した。一方、BC65 は、材齢 14 日と 28 日の圧縮強度は約  $30\text{N/mm}^2$  と同程度であり、強度発現が停滞した。

プレキャストコンクリート製品では、製造工程の稼働率を確保するため、早期に脱型することが必要となる。このため、加熱養生後の脱型強度が重要となる。建築工事標準仕様書 JASS10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事 2013<sup>9)</sup>では、一般に平打ち方式で、ベッドを立て起こさず部材のみを片側から立て起こす場合、 $12\text{N/mm}^2$  程度の脱型強度が必要とされ、ベッドを  $70 \sim 80^\circ$  まで立て起

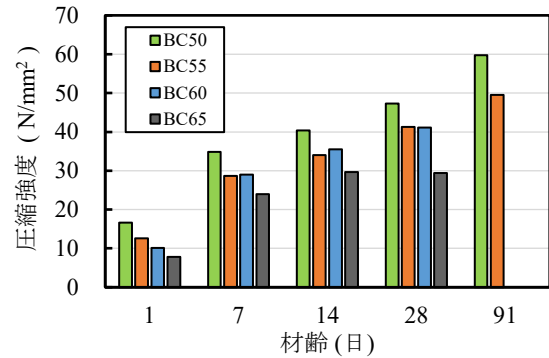


図-5 圧縮強度

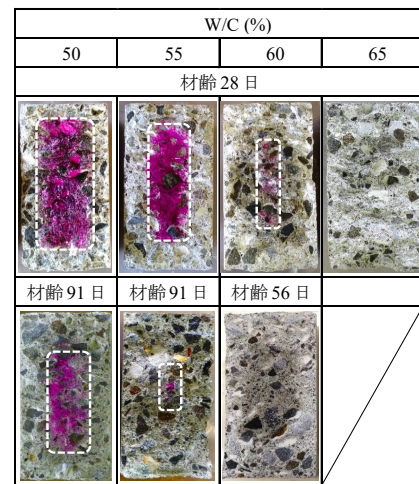


図-6 炭酸化深さ

こしてから吊り上げる場合や堅打ち方式の場合には、 $8 \sim 10\text{N/mm}^2$  程度でよいとされている。BC50、BC55 では、 $12\text{N/mm}^2$  以上を、BC60 では、 $10\text{N/mm}^2$  以上の圧縮強度を示し、脱型に必要な圧縮強度が確認できた。これらの練上り温度約  $20^\circ\text{C}$  の室内試験結果から、圧縮強度において、プレキャストに適用ができる可能性が示唆された。ただし、高炉スラグ微粉末は温度依存性が高く、低温時の強度低下の懸念があるため、今後確認する予定である。

#### (2) 炭酸化深さ

炭酸化深さを図-6 に示す。炭酸化深さは、BC50、BC55、BC60、BC65 の材齢 28 日でそれぞれ 18.5mm、25.3mm、37.8mm、50.0mm 以上であった。BC60 については材齢 56 日で、BC65 は 28 日で供試体の中心部まで炭酸化し、BC50、BC55 の場合では、材齢 91 日においても、それぞれ 27.5mm、44.4mm であり、供試体の中心部までの炭酸化には至らなかった。

次に、炭酸化速度を図-7 に示す。炭酸化速度係数は、炭酸化養生期間と炭酸化深さの関係から求めた。ただし、BC60 の材齢 56 日および BC65 の材齢 28 日については、炭酸化深さが  $50.0\text{mm}$  以上であったが、 $50.0\text{mm}$  として炭酸化速度係数を算出した。図-7 より、炭酸化速度係数は、水セメント比が小さい程小さくなる傾向が見られた。

これは、水セメント比が小さい水準では、緻密な構造を形成したことや、単位セメント量が多くアルカリ量が増加するのに加え、 $\gamma$ - $C_2S$  の炭酸化による緻密化が炭酸化速度を小さくさせたと推察される。

### (3) 炭酸化深さと圧縮強度の関係

炭酸化深さと圧縮強度の関係を図-8 に示す。BC50, BC55, BC60 では、炭酸化深さが進行するといずれの材齢においても強度が増進している。既往の研究<sup>34)</sup>において、 $\gamma$ - $C_2S$  を添加して炭酸化養生を行うことで、空隙率が減少し強度が増進することが報告されており、本検討においても同様の結果が得られている。一方、BC65 では、先に述べた様に、材齢 7 日から材齢 14 日までは、強度が増進しているものの、材齢 14 日から材齢 28 日では圧縮強度が停滞している。この停滞は、比較的早い段階で内部まで炭酸化した BC65 のみに見られた。

BC50 と BC65 の細孔径分布を図-9 に、累積細孔容積を図-10 に示す。なお、BC50 の材齢 14, 91 日、BC65 の材齢 14 日の細孔径測定試料は、図-3 に示した炭酸化部と未炭酸化部を含む試験片であり、これらは区別せず、切り出した角試料をすべて均一に混合縮分し、断面全ての平均値として示している。BC50 の材齢 14, 91 日、BC65 の材齢 14 日の、炭酸化深さから求めた未炭酸化部の面積率は、それぞれ 49.0, 20.2, 14.9% である。BC65 の材齢 28 日の細孔径測定試料は、供試体の中心部まで炭酸化した未炭酸化部の無い試料である。

図-9 より、材齢 91 日における BC50 の細孔径分布は、材齢 14 日に比べ既往の研究<sup>4)</sup>と同様に、炭酸化により粗大化した 1000nm 付近のピークが見られ、これは C-S-H

など水和物の炭酸化によるものと考えられる。また、およそ 600nm 以下の細孔容積は低減し  $\gamma$ - $C_2S$  の炭酸化と水和反応により緻密化したと考えられる。BC65 は、BC50 と同様に 1000nm 付近のピークが見られたが、いずれの材齢も同様な細孔径分布を示した。図-10 より、BC50 の総細孔量は、炭酸化養生期間を長くした材齢 91 日の方が減少していることから、 $\gamma$ - $C_2S$  の炭酸化と水和反応による緻密化により、材齢 91 日まで圧縮強度が増進したものと考えられる。一方、BC65 は、総細孔量に変化が

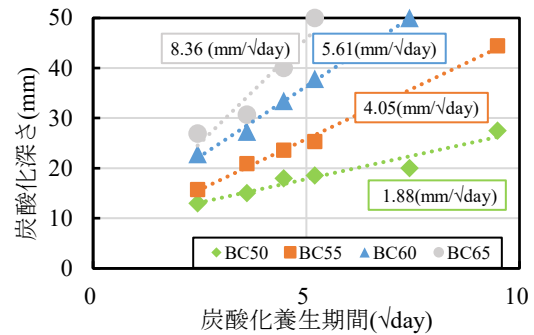


図-7 炭酸化速度

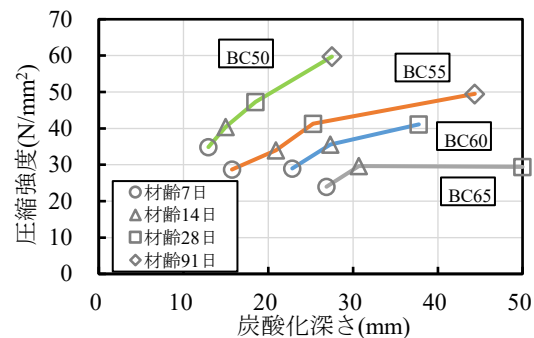


図-8 炭酸化深さと圧縮強度の関係

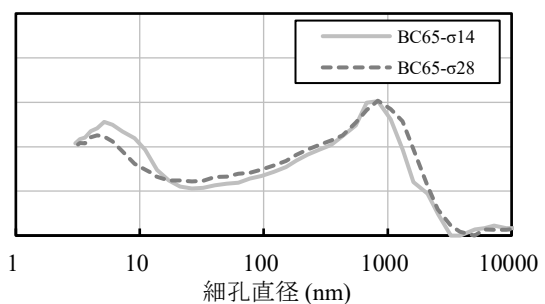
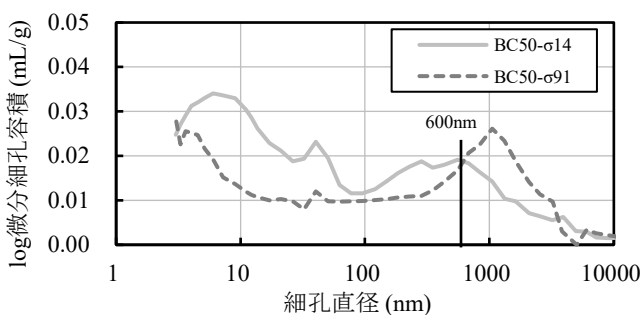


図-9 細孔径分布

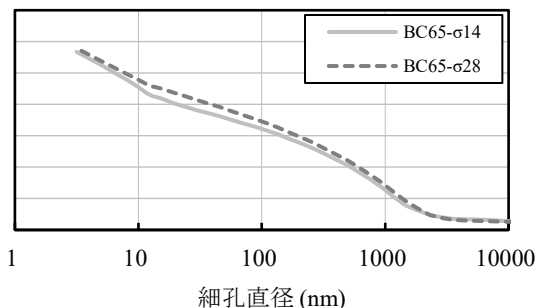
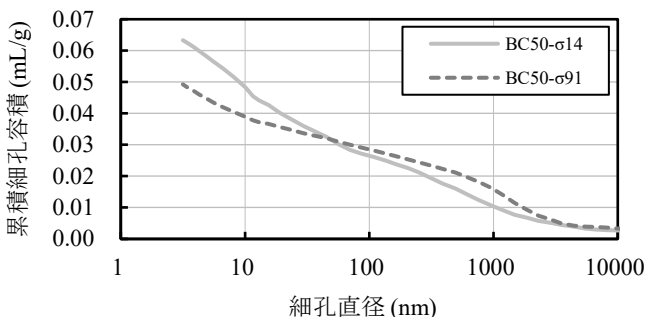


図-10 累積細孔容積

認められなく、材齢が経過しても同じ値となった。BC65 のみに見られた圧縮強度の停滞は、細孔径の試験結果において、空隙構造に変化が見られなかったことから、 $\gamma$ - $C_2S$  の炭酸化和水和反応の緻密化による強度の増進効果が得られなかったことが要因であると考えられる。

炭酸化速度の結果から、炭酸化をより速く内部まで進行させるには、水セメント比を大きくすることが有効である。また、炭酸化養生を施すと強度が増進するものの、BC65 の様な水セメント比の大きい配（調）合では、炭酸化速度が速くなるが、過度に炭酸化させると強度発現が停滞するため、強度の増進を期待する場合は、水セメント比を 60%以下にすることが望ましい。

### 3.2 耐凍害性

#### (1) 水セメント比が耐凍害性に及ぼす影響

水セメント比が相対動弾性係数に及ぼす影響を図-11 に、水セメント比が質量変化率に及ぼす影響を図-12 に、凍結融解 300 サイクルの供試体表面状況を図-13 に示す。なお、図-11、12 の凡例には、炭酸化深さと養生期間を示した。図-11 より養生期間 28 日の相対動弾性係数は、水セメント比が大きくなるほど低下する傾向が見られた。BC50、BC55、BC60 の水準では、凍結融解 300 サイクルで相対動弾性係数はおよそ 80%以上となり、十分な耐凍害性を有していることがわかった。一方、BC65 は、187 サイクルで相対動弾性係数は 60%以下となり、著しく低下した。図-12、13 に示した様に、質量変化率は、水セメント比の増加に伴い大きくなり、供試体の表面状況は、BC50 では、骨材の一部が露出しているのに対して、BC65 は全面に骨材の露出が見られた。

次に、炭酸化の進行が耐久性指数に及ぼす影響を図-14 に示す。養生期間 28 日と炭酸化を更に内部まで進行させた系の耐久性指数を比較すると、水セメント比の小さい BC50 では、炭酸化の進行により若干の改善が見られた。これは、図-10 に示した総細孔量の減少と同様に、 $\gamma$ - $C_2S$  の炭酸化と水和反応により緻密化したためと考えられる。一方、水セメント比の大きい BC60 は、BC50 とは逆に、炭酸化の進行により耐久性指数が 60 以下に低下した。これは、BC60 の場合、表層部分は C-S-H など水和物の炭酸化による分解が生じて水分が侵入しやすくなり、凍結融解作用によって耐久性指数が低下したと推定される。

#### (2) 水分浸透速度係数

水分浸透速度係数の試験結果を図-15 に示す。コンクリート標準示方書設計編 7) の水分浸透速度係数の予測値を関係式(1)より求め、グラフ中に比較として示した。

$$q_p = 32 \cdot (W/B)^2 \quad (0.40 \leq W/B \leq 0.60) \quad (1)$$

図-15 より水分浸透速度係数は、水セメント比が小さい程小さな値を示した。なお、BC50、BC55 は、底面に

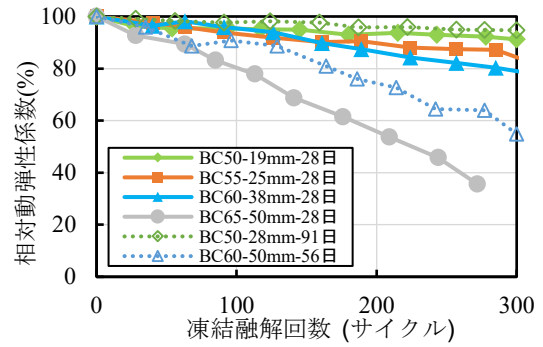


図-11 水セメント比が相対動弾性係数に及ぼす影響

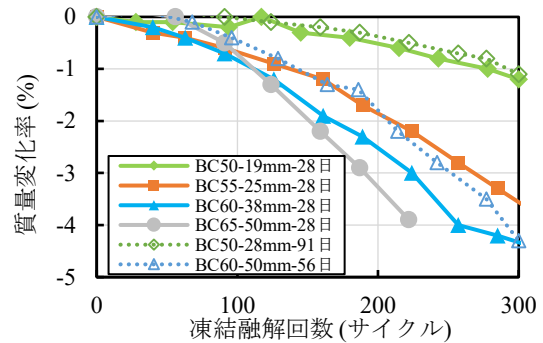


図-12 水セメント比が質量変化率に及ぼす影響

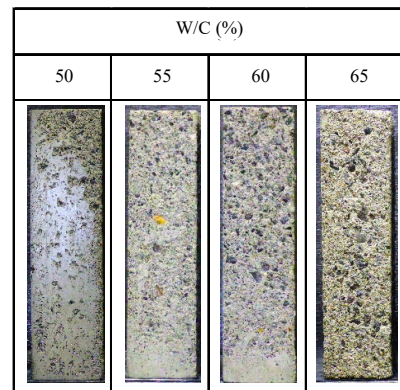


図-13 300 サイクルの供試体表面状況（材齢 28 日）

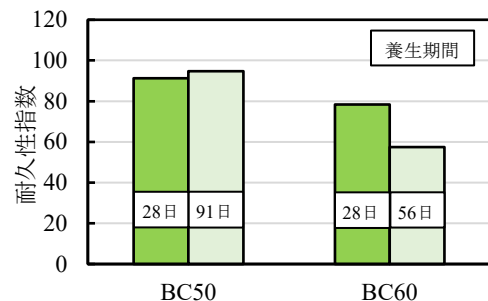


図-14 炭酸化の進行が耐久性指数に及ぼす影響

炭酸化の層があり、この層を含む供試体の圧縮強度は、材齢 91 日まで増進していることから、 $\gamma$ - $C_2S$  の炭酸化と水和反応により緻密化していると考えられる。加えて、炭酸化層は、底面側から 25mm 除去しているため、C-S-H など水和物の炭酸化の影響が小さく、 $\gamma$ - $C_2S$  の炭酸化

により緻密化していると推定される。したがって、水分の浸透速度を低下させる影響があり、水分浸透速度係数はここで得られた結果よりも大きい値を示すと考えられる。試験結果から得られた水分浸透速度係数と予測値を比較すると、同水セメント比において、BC50、BC55は、水分浸透速度係数が予測値より小さい値を示しており、BC60は同程度の値を示した。水分浸透速度係数の予測値は、標準的な湿潤養生が行われたコンクリートの水分浸透速度係数と考えることができ、炭酸化層を含むBC50、BC55とBC60は、一般的なコンクリートよりも同程度以上に水分の浸透を抑制することがわかった。

### (3) 水分浸透速度係数と耐久性指数

水分浸透速度係数と耐久性指数の関係を図-16に示す。なお、BC50、BC55、BC60、BC65の凍結融解試験は、水分浸透速度係数と同一の養生期間で評価した。

図-16より、水分浸透速度係数が小さい程、耐久性指数が大きくなる傾向を示した。BC65の耐凍害性は、水分浸透速度係数が大きいことから、水分が硬化体内部に浸入しやすくなり、浸入した水分が起因となり凍結融解が生じて、耐久性指数が低下したと推察される。

## 4. まとめ

高炉スラグ微粉末高含有セメントに $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sを主成分とする炭酸化混和材を添加し、加熱養生後に炭酸化養生を行ったコンクリートの強度発現性や耐凍害性について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) BC50、BC55では、加熱養生後の1日圧縮強度は、12N/mm<sup>2</sup>以上、BC60では、10N/mm<sup>2</sup>程度を確保でき、プレキャストコンクリートとして適用ができる可能性が示唆された。
- 2) 炭酸化速度は、水セメント比が大きいほど速くなる。炭酸化養生を施すと強度が増進するものの、BC65の様な水セメント比の大きい配(調)合では、過度に炭酸化させると強度発現が停滞する。
- 3) 水セメント比60%以下の相対動弾性係数は、養生期間28日の場合、300サイクルで80%程度を示し、十分な耐凍害性を有する。
- 4) 水分浸透速度係数は、コンクリート標準示方書の予測値と同等かそれ以下となり、水分浸透速度係数が小さいほど、耐久性指数が大きくなった。

## 謝辞

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP21014)を受け、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術および評価技術の開発プロジェクトで得られたものである。関係各位に感謝いたします。

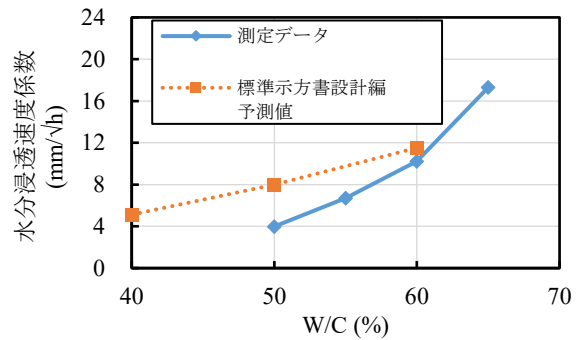


図-15 水分浸透速度係数

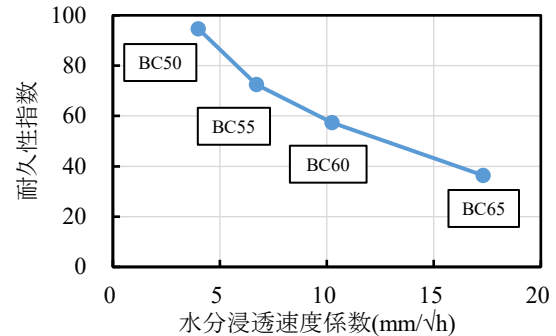


図-16 水分浸透速度係数と耐久性指数の関係

## 参考文献

- 1) 小島正朗, 辻大二郎, 依田和久, 橋本学: エネルギー・CO<sub>2</sub> ミニマムセメント・コンクリートの開発と適用, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.776-781, 2021
- 2) 渡邊賢三, 横関康祐, 坂井悦郎, 大門正機:  $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sを用いたセメント系材料の炭酸化養生による高耐久化, コンクリート工学年次論文集 Vol.26, No.1, pp.735-740, 2004
- 3) 渡邊賢三, 横関康祐, 芦澤良一, 坂田昇:  $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sを用いたコンクリートの力学特性と耐久性, コンクリート工学年次論文集 Vol.27, No.1, pp.811-816, 2005
- 4) 八尋瑠奈, 伊代田岳史, 辻大二郎, 小島正朗: 促進炭酸化養生を施した $\gamma$ C<sub>2</sub>Sを含む高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの基本物性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1096-1101, 2023
- 5) 西岡由紀子, 辻大二郎, 小島正朗: 高炉スラグ微粉末と $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sを含有し様々な温湿度条件で炭酸化養生したモルタルのCO<sub>2</sub>固定と強度発現に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1084-1089, 2023
- 6) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事 2013, pp.78-82, 2013
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書設計編, pp.448-452, 2022