

報告 高炉スラグ微粉末高置換コンクリートの各種特性に関する実験的検討

池添 弘規*1・江口 康平*2・加藤 佳孝*3・伊東 篤史*4

要旨：近年、環境負荷低減を目的に、高炉スラグ微粉末を70%以上置換したコンクリートの使用が検討されている。しかし、その諸性状は明らかになっていないのが現状である。そこで本検討では、W/B、単位水量を一定とし、高炉スラグ微粉末置換率50~90%のコンクリートのブリーディング特性、強度特性、中性化抵抗性、表層透気係数、塩化物イオン浸透性状について実験的に検討した。その結果、置換率70%以上のものは、ブリーディング発生時間が短期化し、最終的なブリーディング率は小さくなり、強度および中性化抵抗性は高炉スラグを50%置換したものに比べて劣るが、遮塩性は向上することを確認した。

キーワード：高炉スラグ微粉末、高置換、圧縮強度、中性化抵抗性、塩化物イオン浸透性状

1. はじめに

近年、地球規模での環境悪化が問題となっており、地球温暖化の原因物質の一つであるCO₂の排出量削減が、産業界全体で取り組むべき課題として認識されている。建設産業では、コンクリートの構成材料の一つであるセメントの製造過程で、原料由来のCO₂が大量に排出されるため、セメント使用量削減を目的に産業副産物でセメントを置換する混合セメントの利用拡大が推進されている。文献¹⁾より、混合セメントの一種である高炉セメントは、フライアッシュやシリカフェームを使用したセメントより、高炉スラグ微粉末（以下、高炉スラグ）置換率を大きく設定できることから、セメントの使用量を大きく低減でき、環境負荷低減に大きく貢献できるとされている。高炉セメントのうち、わが国で多く使用されているのは高炉セメントB種である。高炉セメントB種を使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメントコンクリートに比べて長期強度の増進や遮塩性に優れており、海洋構造物などに利用されている。しかし、B種以上の置換率の高炉セメントは、結合材中のセメント量が減少することにより、中性化抵抗性が低下することや材齢初期の強度が低いため、その利用はほとんどない。

また、更なる環境負荷低減のための取り組みとして、2016年に我が国で閣議決定された「2030年度温室効果ガス削減目標」の地球温暖化対策計画には、「非エネルギー起源二酸化炭素」の削減施策として混合セメントの利用拡大が織り込まれており、更に混和材料の利用推進が図られている²⁾。このため、高炉セメントC種（置換率60~70%）以上の置換率とした高炉セメントの利用も検討されている。しかし、高炉セメントC種以上の高炉ス

ラグ置換率としたコンクリートの諸特性は明らかになっていない。

そこで本稿では、高炉スラグ置換率を0~90%としたコンクリートのブリーディング特性、強度特性、中性化抵抗性、表層透気係数、塩化物イオン浸透性状について実験的に検討し、その結果を報告する。なお、本稿では、高炉スラグ70%以上の置換率を高置換と定義する。

2. 試験概要

2.1 使用材料と配合

試験には普通ポルトランドセメント(C:密度3.15g/cm³,比表面積3362cm²/g)、石こう無添加の高炉スラグ微粉末(BFS:密度2.91g/cm³,比表面積3937cm²/g,)、細骨材は富士川産川砂(S:密度2.63g/cm³)、粗骨材は秩父産砕石(G:密度2.71g/cm³)を用いた。結合材(B)は普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末の合計を指し、コンクリートの水結合材比(W/B)は50%、単位水量は165kg/m³で一定とし、高炉スラグの置換率は0, 50, 60, 70, 80, 90%の6種類とし、置換率0%のコンクリートをOPC、高炉スラグを置換したものは「B置換率」と表記する(例えば置換率50%のコンクリートはB50)。スランブは12.5±2.5cm、空気量は4.0±1.0%になるように、AE剤及びAE減水剤で調整した。コンクリートの配合表を表-1に、高炉スラグ微粉末の化学組成を表-2に示す。

2.2 ブリーディング試験

ブリーディング試験は練上がり直後のコンクリートを使用し、内径250mm、内高285mmの容器を用いて一定の時間ごとにブリーディング水を取水するJIS A 1128に準拠した測定方法(以下、JIS法)と、内径150mm、

*1 東京理科大学 理工学部土木工学科 (学生会員)

*2 東京理科大学 理工学部土木工学科 助教 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 理工学部土木工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*4 東京理科大学 理工学部土木工学科

表-1 コンクリートの配合

表記	W/B[%]	C/B[-]	BFS/B[-]	s/a[%]	単位量[kg/m ³]					結合材に対する百分率[%]		SL[cm]	Air[%]
					W	C	BFS	S	G	AE剤	AE減水剤		
OPC	50	1	0	45	165	330	0	814	1033	0.0030	0.300	14.0	4.2
B50	50	0.5	0.5	45	165	165	165	876	1026	0.0040	0.250	14.0	4.7
B60	50	0.4	0.6	45	165	132	198	888	1024	0.0035	0.200	9.5	3.9
B70	50	0.3	0.7	45	165	99	231	900	1023	0.0040	0.300	12.5	3.9
B80	50	0.2	0.8	45	165	66	264	913	1022	0.0050	0.300	14.0	4.2
B90	50	0.1	0.9	45	165	33	297	925	1020	0.0055	0.325	14.0	3.7

表-2 高炉スラグ微粉末の化学組成

比表面積 (cm ² /g)	化 学 成 分 (%)														
	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	MnO	S	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	
3937	0.04	34.33	13.61	0.36	43.05	6.12	-	0.62	0.20	0.79	0.26	0.30	0.02	0.004	

内高 300mm の容器を用いて一定の時間ごとにブリーディング水を取水する、「構造物の耐久性を向上するためのブリーディング制御に関する研究委員会」で提案された方法³⁾(以下、委員会法)の2種類の方法で実施した。

2.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して実施した。養生方法に関して、高炉スラグを使用したコンクリートは若材齢時に乾燥を受けると強度発現が鈍化することが報告されている⁴⁾。そこで本検討では、高置換コンクリートの強度特性に与える養生条件の影響を検討するために、水温 20±3℃ の水中に浸せきする標準養生に加え、標準養生 7 日後に気中環境(温度 20℃, 湿度 60%程度)に静置したもの(以下、気中養生)についても実施した。いずれの場合も試験材齢は 7, 14, 28, 56, 91, 182, 365 日とし、本稿は材齢 182 日までの結果を報告する。

2.4 中性化促進試験

中性化促進試験は JIS A 1153 を参考に、標準養生を 28 日間施した 100×100×400mm の角柱供試体を、気中環境で質量変化がなくなるまで放置し、コンクリート用水分計で含水率を測定した結果、4.0±0.1(%)程度であった。以降の検討では、水分計の測定値が 4.0±0.1(%)となった時を乾燥状態とする。乾燥後、設側面を一面残してエポキシ樹脂で被覆し、中性化促進装置(環境温度 20℃, 相対湿度 60%, CO₂ 濃度 5%)に静置した。所定の期間(7, 28, 56, 91, 182, 365 日)促進後、フェノールフタレイン法にて測定した中性化深さより中性化速度係数を算出した(式(1))。本稿は 91 日までの結果を報告する。

$$x_c = \alpha_{acc} \sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、 x_c は中性化深さ(mm)、 α_{acc} は促進試験結果に基づく中性化速度係数(mm/√年)、 t は促進期間(年)である。

また、促進試験の結果を基に実環境の二酸化炭素濃度(CO₂ 濃度=0.03%)に補正した中性化速度係数を式(2)

により算出した⁵⁾。

$$\alpha_k = \alpha_{acc} \sqrt{\frac{[CO_2]}{[CO_2]_{acc}}} \quad (2)$$

ここで、 α_k は実環境での中性化速度係数(mm/√年)、 $[CO_2]$ は実環境の二酸化炭素濃度(%) (=0.03%)、 $[CO_2]_{acc}$ は促進中性化試験の二酸化炭素濃度(%) (=5%)である。

2.5 表面透気試験(トレント法)

表面透気試験は Torrent 試験機⁶⁾を用いた。供試体形状は 150×150×150mm とし、標準養生 28 日後、気中環境でコンクリート用水分計にて測定した表面の含水率の値が 4.0±0.1(%)程度になるまで乾燥させた後、打込み側面を一面残してエポキシ樹脂で被覆し、表層透気係数(以下、kT)を測定した。また、既往の研究⁷⁾では、kT と中性化速度係数は相関関係を有しているとの報告があるので、中性化促進試験と同じ環境に静置し、同様の期間経過後、kT を測定した。試験時期は中性化促進期間 0 (促進前)、促進 7, 28, 56, 91, 182, 365 日時点であるが、本稿は中性化促進期間 91 日までの結果を報告する。

2.6 塩水浸せき試験

塩水浸せき試験は JSCE-G 572-2013 を参考に、150×150×150mm の供試体を用いて、標準養生 28 日後、打設側面を一面残してエポキシ樹脂を被覆し、NaCl 濃度 10% の塩水に 3, 6, 9, 12 ヶ月浸せきした。所定の期間浸せきさせた供試体より試料を採取し、JIS A 1154 に準拠して全塩化物イオン濃度を、同附属書 B に準拠して温水抽出塩化物イオン濃度を測定した。本稿中は、温水抽出塩化物イオンを JCI-SC4 に従い可溶性塩化物イオンと呼ぶ。なお、本稿では浸せき 3 ヶ月の結果を報告する。また、全塩化物イオン濃度分布状況を基に見掛けの拡散係数を式(3)により算出した。

$$C_i(x,t) = (C_0 - C_i) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) \right\} + C_i \quad (3)$$

ここで、 $C_i(x,t)$ は $x(\text{cm})$, $t(\text{年})$ 経過後の塩分濃度(kg/m^3), C_0 は表面の塩化物イオン濃度(kg/m^3), C_i は初期含有塩化物イオン濃度(kg/m^3), D_a は見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), x は塩水浸せき面からの距離(cm), t は経過時間 (年)である。本稿では、 C_i の値は塩化物イオンが浸透していないと思われる箇所の塩化物イオン濃度を配合毎に平均したものを使用した。

2.7 電気泳動試験

電気泳動試験はJSCE-G 571に準拠した。標準養生28日間施した $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体の両端50mmを切断し、中央100mmから $\phi 100 \times 50\text{mm}$ の試験体を2個取り出し試験に用いた。試験体を泳動セルに設置し、陰極側を0.50mol/lのNaCl溶液、陽極側を0.30mol/lのNaOH溶液とした。電極間の印加電圧は15Vとし、通電期間中の陽極側の塩化物イオン濃度を定常状態になるまで測定し、式(4)より実効拡散係数を算出した。

$$D_e = \frac{J_i RTL}{|Z_i| F C_i (\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (4)$$

ここで、 D_e は実効拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), J_i はイオン i の定常状態における流速 ($\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年})$), R は気体定数 ($8.31\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$), T は絶対温度測定値(K), Z_i はイオン i の電荷($\text{Cl}^- = -1$), F はファラデー定数($96,500\text{C}/\text{mol}$), C_i は陰極側のイオン i 濃度測定値(mol/l), $\Delta E - \Delta E_c$ は供試体表面間の測定電位(V), L は供試体厚さ(mm)である。

3. 試験結果

3.1 ブリーディング試験

JIS法と委員会法のブリーディング試験結果をそれぞれ図-1, 図-2に示す。両者を比較すると、最終的なブリーディング率はJIS法の方が全て大きい。但し、委員会法でも最終的なブリーディング率の大小関係はJIS法と同様の順序となっている。置換率の差異に着目すると、B50は途中まではOPCと同程度のブリーディング率であったが、最終的にはOPCより小さく、B60, B70は終始OPCより小さい。しかし、B80, B90では、最終的なブリーディング率はOPCより小さいものの、早期にブリーディング率が増加し、終了時間も早くなる特徴がある。一方、既往の研究⁸⁾では、高炉スラグで置換した場合、OPCよりもブリーディング率は増加すると報告されており、今回の試験結果とは異なっている。これは、高炉スラグの粉末度や石こう添加の有無が関係していると考えられ、今後検討する必要がある。

3.2 圧縮強度試験

標準養生と気中養生の圧縮強度試験結果をそれぞれ図-3, 図-4に示す。まず、標準養生の試験結果では、材齢56日までは、OPCの圧縮強度が最も大きい、材

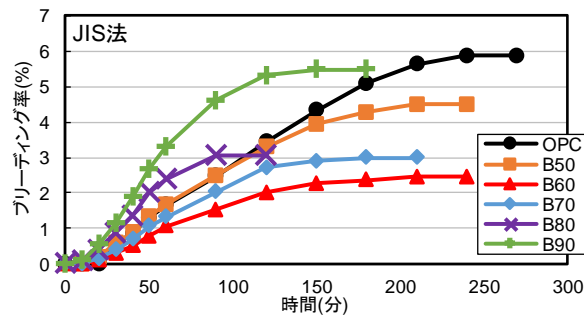


図-1 各種置換率のブリーディング試験結果 (JIS法)

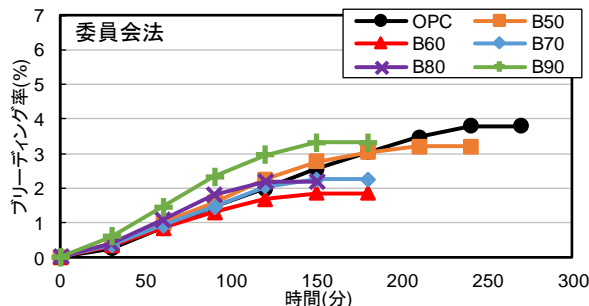


図-2 各種置換率のブリーディング試験結果 (委員会法)

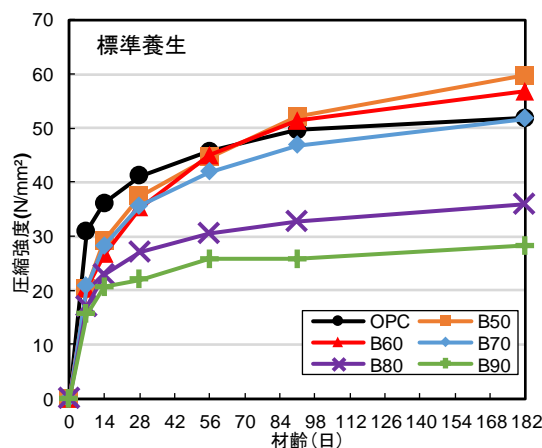


図-3 標準養生の圧縮強度試験結果

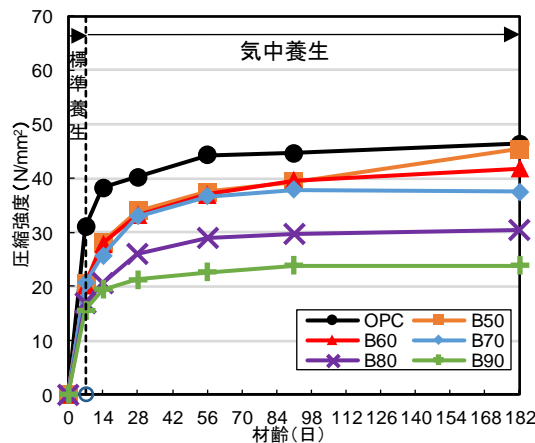


図-4 気中養生の圧縮強度試験結果

齢 91 日時点で、B50、B60 が OPC の圧縮強度を上回り、182 日時点で、B70 と OPC は同程度の圧縮強度となっている。一方、B80、B90 は材齢 7 日の強度も低く、その後の強度発現も小さい。次に、気中養生ではすべての材齢で OPC が最も圧縮強度が大きい。B50、B60、B70 は、養生 91 日までの圧縮強度は殆ど同程度で、養生 56 日から 91 日にかけては強度が殆ど増加していない。しかし、材齢 182 日では、B50、B60 は僅かに強度が増加しており、B50 は OPC と殆ど同程度の圧縮強度となっている。B80、B90 に関しては、標準養生の場合と同様に、B70 までの配合に比べ圧縮強度が顕著に低下している。また、B80 は材齢 28 日、B90 は材齢 14 日以降、圧縮強度が殆ど増加しないことが確認された。

3.3 中性化促進試験

中性化促進試験により測定した中性化深さを図-5 に示す。結果より、置換率が増加すると、中性化深さも大きくなることがわかる。また、B50~B80 までは、置換率が増加すると徐々に中性化深さが増加しているが、B90 は急激に中性化深さが増加する結果となった。

表-2 に式(1)より算出した促進試験時の中性化速度係数 α_{acc} と、式(2)を用いて、促進環境の結果を実環境の二酸化炭素濃度 (CO_2 濃度=0.03%) に補正した中性化速度係数 α_k を示す。また、比較用に土木学会コンクリート標準示方書 [設計編]⁹⁾ に示されている有効水結合材比から中性化速度係数を算出した値 (以下、設計値) を合わせて示す。 α_k と設計値を比べると、OPC、B50、B60、B70 は設計値の方が大きくなったが、B70 は殆ど同じ値、B80、B90 は α_k のほうが大きくなった。

3.4 表面透気試験

中性化促進前後に測定した表層透気係数 kT を図-6 に示す。中性化促進前の kT を見ると、OPC と比較して B50、B60 は小さく、高炉スラグの置換率が 70%以上になると大きくなっている。次に、中性化促進後の kT の変化を見ると、OPC は促進期間によらず kT の変化はほとんどなく、B50、B60、B70 は促進期間が増加するとやや大きくなる。しかし、B80、B90 に関しては、促進期間が増加すると、B80 では徐々に大きくなっており、B90 は急激に大きくなっている。既往の研究¹⁰⁾によれば、高炉セメントはもともと CaO 量が少ないため、セメント水和物である水酸化カルシウムの生成量が少ない。加えて、中性化促進環境化で、二酸化炭素が過剰供給されることにより、 Ca/Si 比の小さい C-S-H と二酸化炭素の反応が促進され、空隙構造が変化する。この化学反応が原因で、二酸化炭素がさらに内部に供給され、中性化抵抗性が小さくなることが報告されている。B50、B60 では、標準養生 28 日で十分な水和物が生成されたことで空隙構造が

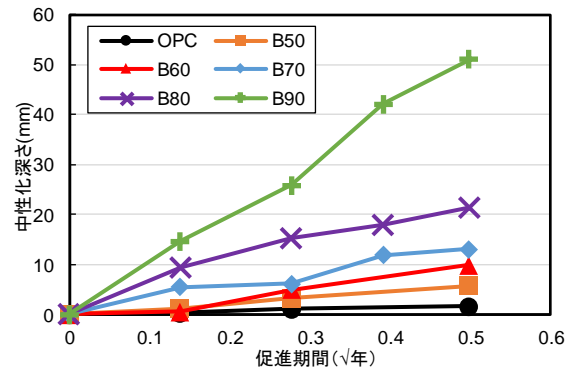


図-5 促進中性化試験による中性化深さ

表-3 各種中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

	OPC	B50	B60	B70	B80	B90
α_{acc}	3.182	11.252	18.391	27.223	46.478	102.790
α_k	0.246	0.871	1.425	2.109	3.600	7.962
設計値	0.930	1.724	1.918	2.126	2.351	2.594

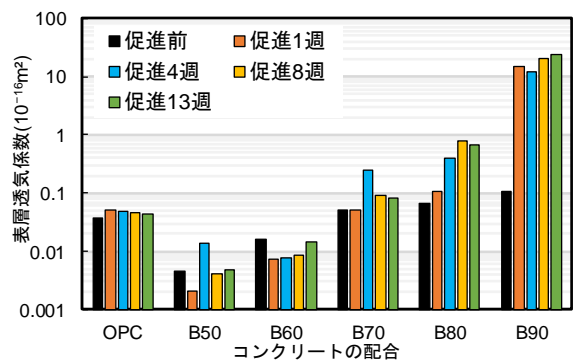


図-6 中性化促進前後の表層透気係数の変化

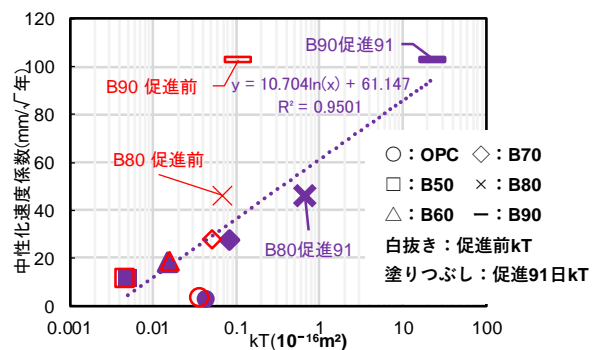


図-7 表層透気係数と中性化速度係数の関係

密となり、二酸化炭素の侵入を抑制することで中性化による水和物の変質が生じなかったため、促進試験後も kT が変化しなかったと考えられる。しかし、B80、90 の場合、材齢 28 日時点の水和物の生成量が少ないため、二酸化炭素が侵入しやすく、中性化によって Ca/Si 比の小さい C-S-H が変質し、更に空隙構造が粗大化したため、 kT が大きくなったと予想される。

図-7 に中性化促進前の kT 、中性化促進期間 91 日時

点の kT と中性化速度係数の関係を示す。結果より、両者ともに、高炉スラグの置換率が増えると、 kT と中性化速度係数はおおきくなっている。また、OPCを除いた B50～B90 の配合を線形近似すると（図中の点線）、中性化促進 91 日後の kT と中性化速度係数の関係は高い相関性が認められた。

3.5 塩水浸せき試験

全塩化物イオン濃度分布および可溶性塩化物イオン濃度分布を図-8、図-9にそれぞれ示す。なお、初期含有塩化物イオン濃度は差し引いている。図-8より、表面から0～1cmの全塩化物イオン濃度は、高炉スラグで置換したものはOPCよりも小さく、B60が最も小さい。また、表面から1cm以深は、高炉スラグで置換した配合はいずれも4.5cm位置と同程度の値となっており、塩化物イオンが浸透していないと考えられる。このことから、塩水浸せき試験3ヶ月時点では、高炉スラグを高置換した場合でも高炉セメントB種と同程度の高い遮塩性を有しているといえる。

図-9より、OPCは表面から0～1cmの領域で全塩化物イオン濃度より小さくなっていることから、塩化物イオンの一部が表層部でセメント水和物に固定化されたと考えられる。一方で、高炉スラグで置換した配合は、可溶性塩化物イオン濃度が全塩化物イオン濃度と殆ど同じ値であることから、塩化物イオンがほとんど固定化されていないことがわかる。既往の研究では、高炉セメントは塩化物イオンの固定化能力が高いといわれているが、今回の検討では固定化が確認されなかった。これは、市販の高炉セメントは石こうが添加されているのに対して、今回の検討では石こう無添加の高炉スラグを使用したことが影響していると考えられる。

3.6 電気泳動試験

電気泳動試験により得られた結果を図-10に示す。OPCとB90は他の配合と比較して、通電7日程度で陽極側に塩化物イオンが検出されている。しかし、より長期間通電したB90の結果を見ると、塩化物イオン濃度の増加割合は他の配合と比較して小さくなった。これは空隙構造が密になっているためと考えられるが、詳細な理由は不明である。また、他の配合に関しては、置換率による明確な傾向は得られなかったが、OPCよりも陽極側に塩化物イオンが検出される時期が遅く、傾きも小さくなっている。これについて、既往の研究¹¹⁾では、高炉スラグを置換すると、空隙の連続性が減少することで、毛管空隙が屈曲して、移動経路が増加すると報告されている。今回の場合でも、高炉スラグ高置換コンクリートは空隙が屈曲し、コンクリート中を通過する塩化物イオンが陽極側に到達するまでの移動距離が増加したため、塩化物

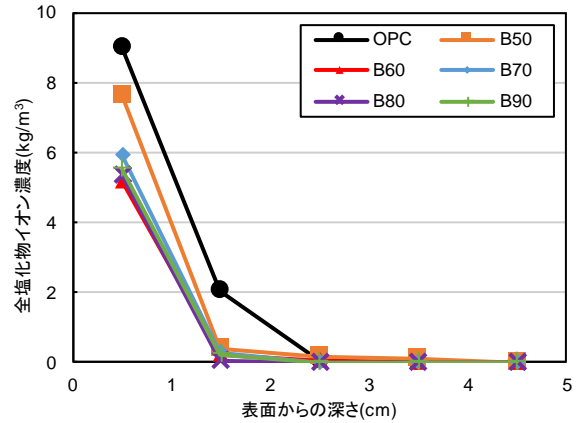


図-8 塩水浸せき試験の全塩化物イオン濃度分布

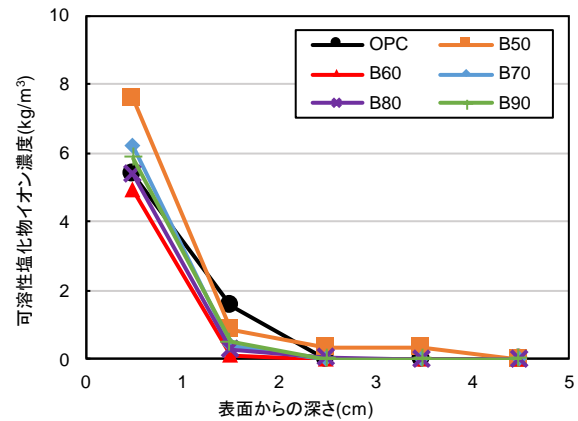


図-9 塩水浸せき試験の可溶性塩化物イオン濃度分布

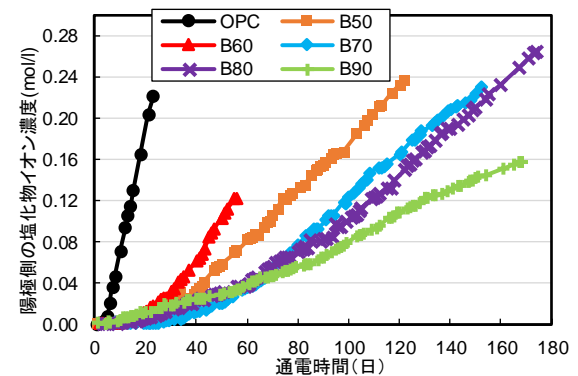


図-10 電気泳動法試験結果

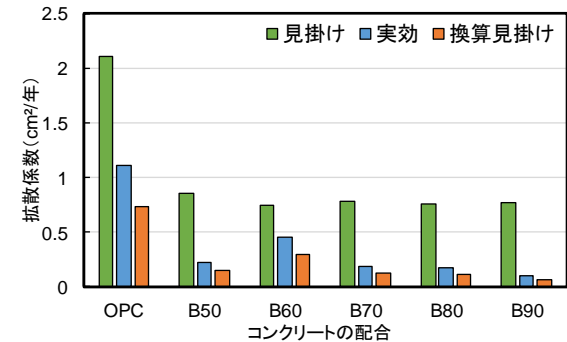


図-11 各種拡散係数の比較

イオンの移動が遅くなった可能性が考えられる。

次に、塩水浸せき試験結果から算出した見掛けの拡散係数(図中見掛け)、電気泳動試験結果から算出した実効拡散係数(図中実効)、および土木学会コンクリート標準示方書〔維持管理編〕¹²⁾に示されている実効拡散係数から見掛けの拡散係数に換算する式を用いて算出した見掛けの拡散係数(図中換算見掛け)を図-11に示す。なお、実効拡散係数から見掛けの拡散係数への換算は、OPCは普通ポルトランドセメントの換算式を用い、高炉スラグで置換したものはすべて高炉セメントB種の換算式を用いた。見掛けの拡散係数の大小関係は、 $OPC > B50 > B70 > B90 > B80 > B60$ の順番となっているが、実効拡散係数および実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数の大小関係は $OPC > B60 > B50 > B70 > B80 > B90$ の順番となっている。また、今回の検討では、実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数が実験値よりかなり小さい。これは、今回の検討では、浸せき期間3か月で拡散係数を算出したため、見掛けの拡散係数を過大評価している可能性がある。そのため、今後、より長期間浸せき試験を実施したもので検討する必要があるが、実効拡散係数の結果より、高炉スラグを高置換したB70、B80、B90は、遮塩性が高いとされるB50と同等以上の遮塩性を有していることが確認された。

4. まとめ

- (1) 高炉スラグで置換した配合は、OPCに比べてブリーディング率は小さくなる。但し、置換率80%以上ではブリーディング率が早期に増加し、終了時間がその他の配合よりも早くなる特徴がある。
- (2) 圧縮強度に関して、高炉スラグ置換率70%以下の場合、標準養生では材齢182日でOPCを上回るが、気中養生では、材齢が長期になってもOPCより強度が低い。置換率80%以上の場合、養生条件に拘わらず強度が低い。
- (3) 置換率50~80%の場合、置換率の増加と中性化速度係数がある程度比例して増加するが、90%置換した場合は、顕著に中性化速度係数が増加する。
- (4) OPCは中性化促進期間によらずkTは殆ど変化せず、置換率50~70%の場合には促進期間の増加によりやや大きくなる。置換率80%以上のkTは促進期間が増加すると、置換率80%では徐々に、置換率90%では急激に大きくなる。
- (5) 塩水浸せき後の塩化物イオン濃度分布状況より、高炉スラグを置換したコンクリートは高い遮塩性を有していることを確認した。
- (6) 電気泳動試験では、高炉スラグで置換した配合は

OPCに比べて、実効拡散係数が小さい。また、70%以上置換したものは、置換率50%と同等以下の実効拡散係数となった。

謝辞：本検討の一部は、鉄鋼スラグ協会の助成を受けて実施した。関係各位に深く感謝する。

参考文献

- 1) 加藤佳孝, 伊代田岳史, 渡部正, 梅村靖弘: 鉄筋コンクリートの材料と施工, 鹿島出版会, pp.24-25, 2012.
- 2) 鉄鋼スラグ協会: 鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用(2017年版), pp.1-8, 2017.
- 3) 日本コンクリート工学会: 構造物の耐久性を向上するためのブリーディング制御に関する研究委員会, pp.252-254, 2017.
- 4) 壇康弘, 伊代田岳史, 大塚勇介, 佐川康貴, 濱田秀則: 高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.431-441, 2009.
- 5) 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(案)・同解説, pp.91-130, 2004.
- 6) R.J.Torrent: A Two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site, Material and Structures, Vol.25, No.6, pp.358-365, 1992.
- 7) 早川健司, 水上翔太, 加藤佳孝: 表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的検討, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.385-398, 2012.
- 8) 伊代田岳史: 高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート, コンクリート工学, Vol.51, No.5, pp.409-414, 2014.5
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書〔設計編〕, pp.143-164, 2012.
- 10) 豊村恵理, 伊代田岳史: 異なる二酸化炭素濃度環境下における炭酸化メカニズムに関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.769-774, 2013.
- 11) 真島耕平, 川原真一, 菊池道生, 佐伯竜彦: 高炉スラグ微粉末およびシリカフェームを用いたセメント系硬化体の塩分浸透性抵抗性, Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, pp.452-459, 2012.
- 12) 土木学会: コンクリート標準示方書〔維持管理編〕, pp.161-183, 2013.