

報告 高炉スラグ高置換コンクリートの各種特性と乾燥と中性化が物質の移動に対する抵抗性に与える影響に関する実験的検討

大村 志織^{*1}・江口 康平^{*2}・加藤 佳孝^{*3}

要旨：近年、環境負荷低減を目的に、高炉スラグ微粉末の使用が推奨されており、高炉スラグ微粉末を高置換したコンクリートの使用が検討されているが、その諸特性は十分に検討されているとは言えない。そこで、本研究では高炉スラグで 90%まで置換した高置換コンクリートの強度特性および物質の移動に対する抵抗性を検討した。その結果、置換率 80%以上のものは、置換率 50%と比べて、圧縮強度と中性化抵抗性は劣るが、同程度の遮塩性を示した。また、水分浸透試験では、乾燥条件の影響を強く受けることが示唆された。

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

1. はじめに

近年、地球規模で環境悪化が問題になっており、建設産業でも CO₂の排出削減や産業廃棄物の有効利用など環境負荷軽減に努めている。コンクリートの主材料であるセメントは、製造過程で原料由来の CO₂を多く排出することが知られており、セメントの使用量減少のためにセメントの一部を産業廃棄物から生成される結合材で置換する混合セメントの使用が促進されている。混合セメントの中でも、日本で最も使用されているのは高炉セメントであり、他の混合セメントよりも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幅に少なくすることができる。また、高炉セメントに含まれる高炉スラグは、長期強度増進や塩化物イオン侵入の遮蔽効果¹⁾などを有しており、特に高炉セメント B 種（高炉スラグ置換率 30～60%、以下 B 種）が海洋構造物等に広く使用されている。近年では、更なる環境負荷低減のため、高炉セメント C 種（高炉スラグ置換率 60%以上、以下 C 種）や、それ以上の高置換率（本研究では置換率 70%以上）とした混合セメントの使用が検討されている。しかし、

C 種以上の高置換コンクリートでは、硬化体中のセメント量が減少することにより、初期強度や中性化抵抗性の低下することがいくつかの検討で報告^{例えば 2)}されているが、データの蓄積が十分ではないのが現状である。

そこで、本稿は、高炉スラグの置換率を 50～90%に変化させたコンクリートの強度特性、中性化抵抗性、表層透気係数、塩化物イオン浸透性状、水分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. 実験概要

2.1 供試体概要

コンクリート供試体配合およびフレッシュ試験結果を表-1 に示す。実験供試体には、普通ポルトランドセメント（以下、普通セメント：C）は密度 3.15g/cm³、比表面積 3362cm²/g のもの、高炉スラグ微粉末（以下、高炉スラグ：BFS）は密度 2.91g/cm³、比表面積 4180cm²/g の石こう無添加のものを使用した。また、細骨材（以下、S）には表乾密度 2.62g/cm³、吸水率 2.82%の富士川産川

表-1 コンクリート供試体配合およびフレッシュ試験結果

供試体 名称	W/B (%)	BFS 置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)					結合材当たりの 質量百分率(%)		SL (cm)	Air (%)
				W	B		S	G	AE 剤	AE 減水剤		
					C	BFS						
OPC	50	0	45	165	330	0	814	1033	0.0030	0.300	14.0	4.2
B50		50		165	165	165	812	1022	0.0040	0.250	14.5	5.0
B60		60		165	132	198	811	1021	0.0035	0.200	9.5	3.9
B70		70		165	99	231	810	1020	0.0040	0.300	12.5	3.2
B80		80		165	66	264	809	1018	0.0050	0.300	10.0	4.0
B90		90		165	33	296	808	1017	0.0055	0.325	14.0	3.7

*1 東京理科大学 理工学研究科土木工学専攻（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）

砂, 粗骨材 (以下, G) は表乾密度 2.72g/cm^3 , 吸水率 0.581% の秩父産碎石を使用した。コンクリート供試体の配合は, 水結合材比 (以下, W/B) は 50% , 単位水量は 165kg/m^3 , s/a は 45% で一定とした。また, 目標スランプ, 目標空気量はそれぞれ $12\pm 2.5\text{cm}$, $4\pm 1.0\%$ とし, 目標値を満足するように化学混和剤を添加した。結合材は, C のみを使用した OPC に加え, BFS を使用するものは, BFS で 50 , 60 , 70 , 80 , 90% 置換する 5 配合の計 6 配合とした。なお, BFS を置換した供試体の名称は「B 置換率」と表記する (例えば, 置換率 50% のものは, B50)。

2.2 試験項目

(1) 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。供試体形状は $\phi 100\times 200\text{mm}$ の円柱供試体とした。養生方法は, 20°C の水中に浸せきする標準養生とし, 試験材齢は, 7 , 14 , 28 , 56 , 91 , 182 , 365 日とした。

(2) 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 $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体を気中環境に静置した。普通セメントと高炉スラグ高置換コンクリートでは乾燥速度が異なることが考えられたため, 本検討では, 供試体質量が恒量となるまで乾燥させることとした。事前の検討で, OPC および B50~B90 を気中環境にて質量変化がなくなるまで静置したところ, いずれも最終的なコンクリート表面の含水率は 4% 程度となることを確認した。そのため, 本検討では作業の効率化のため, 中性化促進試験および表面透気試験での乾燥程度の判断には表面含水率計を使用し, 2 回以上の測定点で 4% 程度から変化がなくなった時を乾燥終了と判断した。乾燥後, 打込み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 (乾燥温度 20°C , 相対湿度 60% , CO_2 濃度 5%) に静置した。所定の期間 (7 , 14 , 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))。

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

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 ($\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$), 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 CO_2 濃度 ($=0.03\%$) に補正した中性化速度係数を式(2)³⁾より算出した。

$$\alpha_k = \alpha_{acc} \sqrt{\frac{[\text{CO}_2]}{[\text{CO}_2]_{acc}}} \quad (2)$$

ここで, α_k は実環境での中性化速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$), $[\text{CO}_2]$ は実環境の二酸化炭素濃度 ($\% (=0.03\%)$), $[\text{CO}_2]_{acc}$ は促進中性化試験の二酸化炭素濃度 ($\% (=5\%)$) である。

表-2 乾燥条件

乾燥名称	乾燥条件	終了の判断
中性化	CO_2 濃度 5% , 湿度 60%	全面中性化
20°C	温度 20°C , 湿度 60%	質量変化がなくなるまで
60°C	電気炉 温度 60°C	

(3) 表面透気試験 (トレント法)

表面透気試験は Torrent 試験機を用いた。供試体形状は $150\times 150\times 150\text{mm}$ とし, 標準養生 28 日後, 中性化促進試験と同様に, 表面の含水率の値が $4.0\pm 0.1(\%)$ 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。なお, この時の kT の測定深さは式(3)によって計算される⁴⁾。

$$L = 1000 \sqrt{\frac{2kT \cdot P_a \cdot t}{\varepsilon \cdot \mu}} \quad (3)$$

ここで, L は kT の測定深さ (mm), kT はトレント法による表層透気係数 (m^2), P_a は大気圧 (N/m^2), t は試験終了時間 (s), ε はコンクリートの空隙率の想定値 ($=0.15\text{m}^3/\text{m}^3$), μ は空気の粘性係数 ($=2.0\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$) である。即ち, 空隙率が同程度であるにも拘わらず測定深さが異なる場合, 空隙構造が複雑であることを示唆するものである。

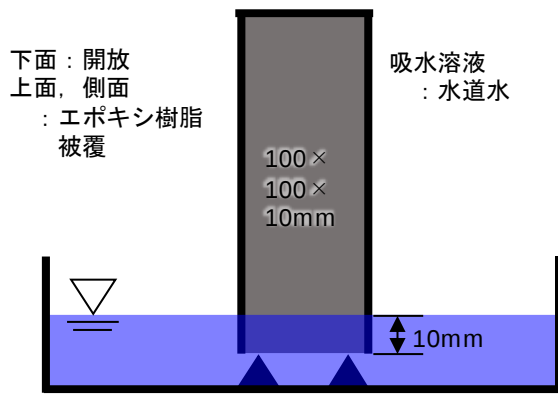
また, 既往の研究⁵⁾では, kT と中性化速度係数は相関関係を有しているとの報告があるため, 中性化促進試験と同じ環境に静置し, 同様の期間経過後, kT を測定した。試験時期は中性化促進期間 0 (促進前), 促進 7 , 14 , 28 , 56 , 91 , 182 , 365 日時点である。

(4) 塩水浸せき試験

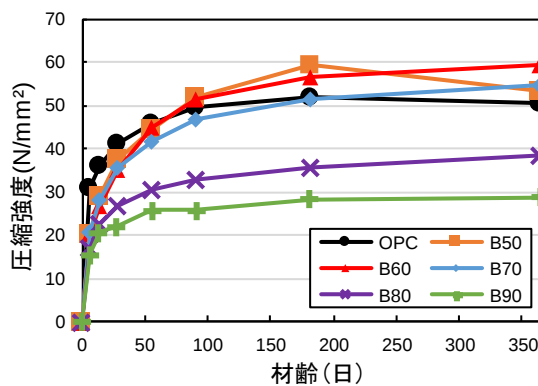
塩水浸せき試験は JSCE-G 572-2013 を参考に, $150\times 150\times 150\text{mm}$ の供試体を用いて, 標準養生 28 日後, 打込み側面を一面残してエポキシ樹脂被覆し, NaCl 濃度 10% の塩水に 3 , 6 , 12 ヶ月浸せきした。所定の期間浸せきさせた供試体から試料を採取し, JIS A 1154 に準拠して全塩化物イオン濃度を測定した。また, 全塩化物イオン濃度分布状況を基に見かけの拡散係数を式(4)により算出した。

$$C_i(x, t) = (C_0 - C_i) \left\{ 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right\} + C_i \quad (4)$$

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 は見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), 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



図一 水分浸透試験方法

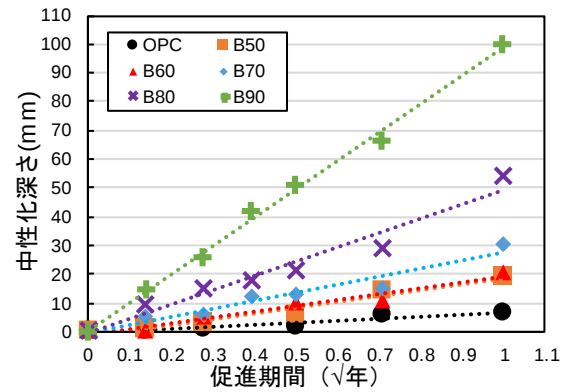


図二 圧縮強度試験

したものを使用した。

(5) 水分浸透試験

水分浸透試験は、JSCE-G 582-2018 を参考にした。ここで用いた配合は、OPC, B50, B70, B80 の 4 配合である。標準養生を 28 日間施した 100×100×400mm の角柱供試体を、100×100×10mm となるように切断した後、打込み時の底面から 25mm を切断除去し、切断した面を試験面とした。その後、表-2 に示す各乾燥条件に供試体を静置した。20℃と 60℃は、24 時間の質量変化が 0.1%以下となった時点を乾燥状態とした。また、既往の研究⁶⁾で中性化が生じると空隙構造が変化することが指摘されており、物質の移動に対する抵抗性が変化することが考えられたため、中性化した部分のみの水分浸透速度についても検討した。水分浸透試験前の中性化条件は、中性化促進試験機内に供試体を静置する。その後、所定の期間ごとに同配合の試験片サンプルの中性化深さをフェノールフタレイン法で測定し、割裂面全体が呈色しないことを確認した後に、水分浸透試験を実施した。乾燥後に試験面を一面残してエポキシ樹脂で被覆した。吸水方法は図-1 に示すように、供試体下端から 10mm の高さまで浸せきした。試験溶液は水道水とし、試験時間は 5, 24, 48 時間の 3 水準とした。



図三 中性化促進試験による中性化深さ

所定の試験時間後、供試体を割裂し、市販の水漏れ検知剤（以下、指示薬）を割裂面に噴霧し、呈色した深さを電子ノギスで、断面の中央部を測定した。各水準 3 供試体を測定し、その平均値を水分浸透深さとした。また、測定した水分浸透深さをを用いて、水分浸透速度係数を算出した（式(5)）。

$$A = \frac{\sum_{n=1}^n (\sqrt{t_i} - \sqrt{t}) * (L_i - \bar{L})}{\sum_{n=1}^n (\sqrt{t_i} - \sqrt{t})^2} \quad (5)$$

ここで、 A は水分浸透速度係数(mm/√hr)、 n はデータ数、 $\sqrt{t_i}$ は i 番目のデータの浸せき時間の平方根(√hr)、 $\sqrt{t}$ は浸せき時間の平方根の平均値(√hr)、 L_i は i 番目のデータの浸透深さ(mm)、 $\bar{L}$ は浸透深さの平均値(mm)である。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度試験

所定の期間、標準養生を施したコンクリートの圧縮強度試験結果を図-2 に示す。OPC は材齢 56 日まで BFS で置換したどの配合よりも圧縮強度は大きい。しかし、B50, B60 は材齢 91 日で、B70 は材齢 365 日で圧縮強度が OPC を上回った。B50 は、材齢 365 日で圧縮強度の低下が見られたが、現時点でその原因は分かっていない。また、B60, B70 では材齢 365 日の時点で圧縮強度の増加が確認でき、長期的な強度増進が続いていると考えられる。B80, B90 の圧縮強度は、材齢 365 日まで徐々に増加しているが、他の配合と比較すると材齢 28 日以降の圧縮強度の増加が小さい。特に、B90 は材齢 365 日時点でも B60 の 1/2 程度までしか圧縮強度が得られなかった。

3.2 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の結果を図-3 に示す。BFS の置換率が増加すると、最終的な中性化深さも増加している。また、B90 は促進期間 1 年の時点で B80 の約 2 倍の中性化深さを示しており、特に中性化に対する抵抗性が低いことが分かる。

表-3 に式(1)、式(2)より算出した中性化速度係数と、

表-3 中性化速度係数

	OPC	B50	B60	B70	B80	B90
α_{acc} (mm/ $\sqrt{\text{year}}$)	6.3	17.9	18.7	27.3	49.0	99.3
α_k (mm/ $\sqrt{\text{year}}$)	0.5	1.4	1.5	2.1	3.8	7.7
50年後の 中性化深さ (mm)	6.3	18.0	18.9	27.5	49.4	100.0

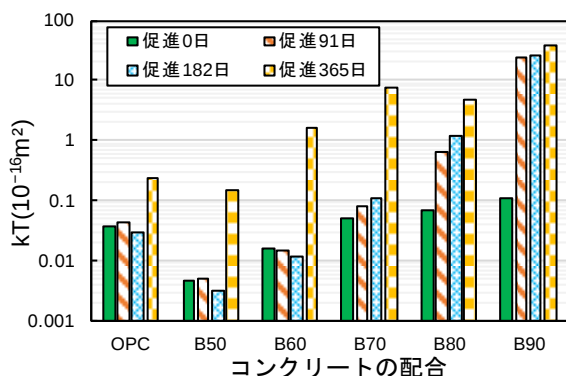
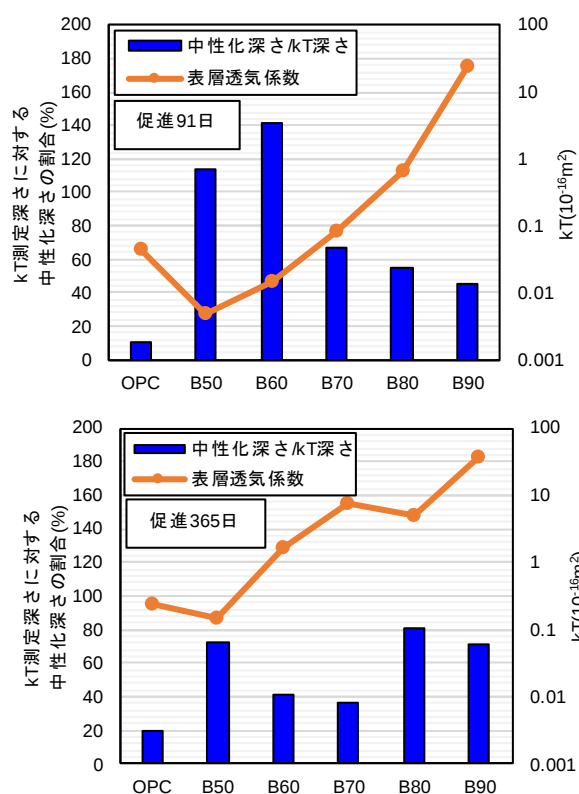


図-4 表面透気試験

土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に示されている中性化深さの設計値の式から耐用年数を50年として算出した中性化深さの予測値を示す。なお、環境作用の程度を表す係数は、乾燥のしやすい環境に用いる1.6を、コンクリートの材料係数は便宜的に全ての配合で1.0とした。中性化深さの予測値では、BFSの置換率60%以下では、50年後も2cm程度であるが、置換率80%以上では5cm以上の中性化深さとなる推定結果となった。

3.3 表面透気試験

トレント法により測定したkTの結果を図-4に示す。OPCとBFSの置換率が70%以下では、促進182日までには促進期間が増加してもkTはあまり変化しなかったが、促進365日で急激に増加した。B50のkTは、促進期間中OPCよりも常に小さかった。一方、BFSの置換率80%以上では別の挙動を示し、B80のkTは、促進期間中は徐々に上昇した。B90に関しては、促進を開始すると急激にkTは増加したが、その後はほとんど変化しなかった。既往の研究⁷⁾では、高炉セメントが促進試験で中性化抵抗性が小さくなるのは、もともとCaO量が少ないため生成される水酸化カルシウム（以下、CH）が少ないこと、C-S-HのCa/Si比が低く、そこから生成される炭酸カルシウムがバテライトになりやすいことが関係していると報告されている。そのため、C-S-Hが中性化により変質すると、空隙構造が粗大化すると考えられる。そこで、中性化が空隙構造の粗大化に与える影響を検討するために、kTと促進91日あるいは促進365日のkTの

図-5 kTとkT測定深さに対する
中性化深さの割合の関係

(上段：促進91日後，下段：促進365日後)

測定深さに対する同促進期間中の中性化深さの割合の関係を図-5に示す。促進91日では、B50とB60はすべてのkTの測定範囲が中性化しているにも関わらず、kTは小さいため、空隙構造が中性化によってそれほど粗大化していないと考えられる。一方、BFSの置換率が増加していくと、中性化深さが占める割合が減少するにも拘らず、kTが大きくなるため、高置換になればなるほど中性化による空隙構造の粗大化がkTに与える影響が大きくなっている可能性がある。中性化促進期間が増加した促進365日の結果では、B50、B60は促進91日と比較すると、kTの測定範囲に未中性化の部分が含まれ、kTが増加している。未中性化部のほうの空隙構造が粗であるため、kTが増加したと考えられ、B50、B60では中性化により空隙構造が粗大化せず密になった可能性がある。また、B70では中性化促進期間が増加すると、kT測定範囲に占める中性化深さは減少するが、kTは増加しており、B50と同様、中性化部より未中性化部のほうが粗な空隙構造を有した可能性がある。一方、高置換であるB80やB90では、kTの測定範囲に占める中性化深さの割合が増加すると、kTも増加しており、中性化が空隙構造を粗大化させていると考えられる。しかし、透気係数試験は大まかな傾向しか捉えられておらず、今後詳細に検討する必要がある。促進365日のkTと中性化速度係数の関係

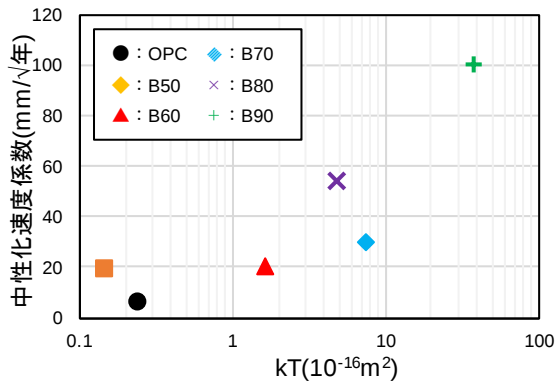


図-6 表層透気係数と中性化速度係数の関係

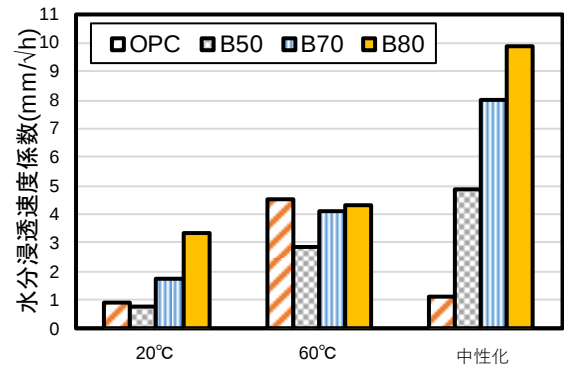


図-9 水分浸透試験

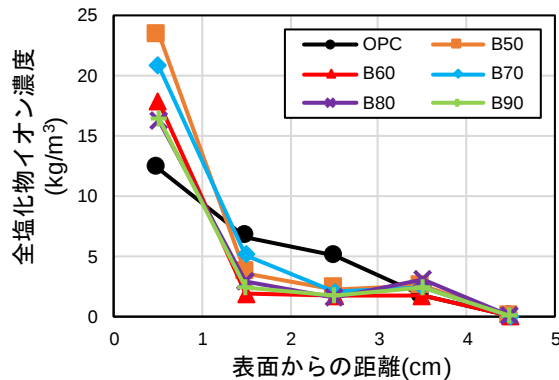


図-7 塩水浸せき試験（浸せき 12 ヶ月）

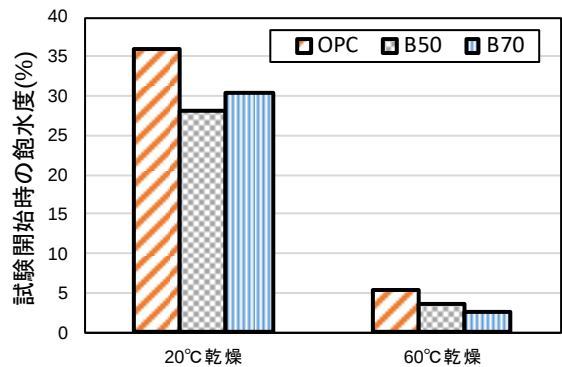


図-10 試験開始時の飽水度

次に、塩水浸せき試験の結果から算出した見かけの塩化物イオン拡散係数を図-8 に示す。見かけの拡散係数の大小は、 $OPC > B70 > B80 > B50 > B90 > B60$ の順番となっている。また、BFS を高置換した B70, B80, B90 は、遮塩性が高いとされる B50 と同等の遮塩性を有していた。

3.5 水分浸透試験

図-9 に各環境で測定した水分浸透速度係数を示す。20°C 乾燥では、OPC と B50 が同程度の水分浸透速度係数を示し、BFS 置換率の増加に伴い、水分浸透速度係数は増加した。一方、60°C 乾燥では、OPC が最も高い値を示し、BFS では置換率の増加に伴い、水分浸透速度係数の増加が見られた。すなわち、乾燥環境により水分浸透速度係数の結果が変化する結果となっていた。そこで、供試体の試験開始前の乾燥状態の影響を簡易的に把握するために、水分浸透開始時の飽水度を図-10 に示す。20°C 乾燥では $B50 < B70 < OPC$ の順で、60°C 乾燥では $B70 < B50 < OPC$ の順で、飽水度が大きくなっている。スラグで置換すると初期の飽水度は小さくなり、OPC よりも乾燥しやすいと考えられる。乾燥のしやすさと、水分浸透のしやすさが、同じ機構で支配されているとすれば、水分浸透速度係数の順列と飽和度の順列は等しくなると考えられるが、両者の順列は一致していない。すなわち、各配合の乾燥過程と水分浸透過程では、異なる物質移動機構になっていることが推察され、今後、詳細に検

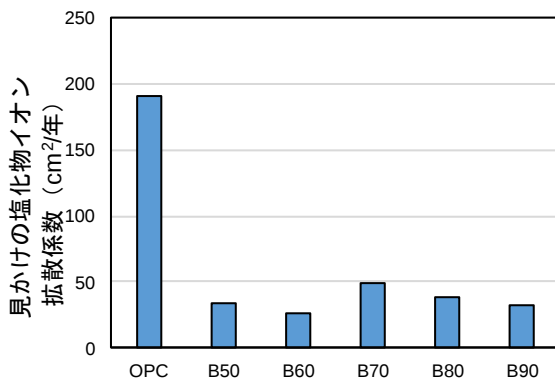


図-8 見かけの塩化物イオン拡散係数

を図-6 に示す。kT が増加すると、中性化速度係数も増加することが分かる。また、BFS の置換率が増加に伴い、kT、中性化速度係数ともに大きくなることが確認できた。

3.4 塩水浸せき試験

図-7 に浸せき 12 ヶ月の全塩化物イオン濃度分布を示す。表面から 0~1cm の全塩化物イオン濃度は、BFS を置換したいずれの配合でも OPC よりも高い濃度を示しており、B50 が最も高い。しかし、1cm 以深は、いずれの置換率も OPC を下回っており、BFS の置換率に関わらず同程度の高い遮塩性を有していると考えられる。

討を進める必要があると考えている。

次に、図-9 に示した 20℃乾燥と中性化後の結果を比較すると、OPC はどちらの環境でも同程度の水分浸透係数を示したが、BFS で置換すると、中性化により水分浸透速度係数が大幅に増加した。これは透気係数の箇所でも説明したように、中性化により空隙構造が粗大化したため、BFS を置換した供試体は水分浸透が促進したと考えられる。

4.まとめ

- (1) 高炉スラグを置換した場合、圧縮強度は置換率 70% 以下で材齢 365 日の OPC の強度を上回った。一方、80%以上は材齢 28 日から圧縮強度の増加が停滞し、置換率 90%に関しては、材齢 365 日で置換率 60% の 1/2 程度の強度となった。
- (2) 中性化促進試験では、高炉スラグの置換率が増加すると、中性化速度係数は増加した。特に、置換率 90% では中性化速度係数の増加が顕著であった。
- (3) 置換率 50~70%では、促進 182 日までは kT はほとんど変化しないが、促進 365 日で急激に増加した。一方、置換率 80%は促進期間増加に伴い kT が徐々に増加し、置換率 90%では促進 91 日で急激に kT が増加し、以降はほとんど変化しなかった。
- (4) 塩水浸せき後の全塩化物イオン濃度分布から、高炉スラグを置換すると、表層では高い塩化物イオン濃度を示す。しかし、表面から 1cm 以深ではいずれの置換率も OPC を下回り、高い遮塩性を有しているといえる。
- (5) 水分浸透試験に関しては、いずれの配合でも 20℃

よりも乾燥条件が厳しい 60℃のほうが水分浸透深さは増加した。高炉スラグを置換した供試体では、中性化すると水分浸透が大幅に促進されることが確認できた。

参考文献

- 1) 加藤佳孝, 伊代田岳史, 渡辺正, 梅村靖弘: 鉄筋コンクリートの材料と施工, 鹿島出版会, p.24, 2012.10
- 2) 土木研究所: 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書 (IV) - 混和材を高含有した低炭素型コンクリートの設計・施工マニュアル (案) - , 2016
- 3) 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
- 4) Torrent, R. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, pp.358-365, 1992
- 5) 早川健司, 水上翔太, 加藤佳孝: 表面透気試験による構造物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
- 6) 原沢蓉子, 本多和博, 伊代田岳史: 異なる炭酸化環境が空隙特性および炭酸化生成物に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014
- 7) 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