

論文 ごみ溶融スラグ細骨材および廃瓦骨材を用いた高炉セメント B 種コンクリートの塩分浸透性に関する研究

村岸 祐輔^{*1}・小川 由布子^{*2}・大石 浩史^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨: ごみ溶融スラグ細骨材および廃瓦骨材を用いた高炉セメント B 種コンクリートをマッシブな海洋構造物に適用することを想定し, 圧縮強度, 細孔構造および塩化物イオンの拡散係数を温度履歴の影響の観点から検討した。この結果, 高温履歴を受けると圧縮強度が低下傾向にあったが, 20℃養生下ではごみ溶融スラグ細骨材および廃瓦骨材を用いた場合増加傾向を示した。また, 塩化物イオンの拡散係数も高温履歴の影響で大きくなるが, ごみ溶融スラグ細骨材および廃瓦骨材の併用により低減した。

キーワード: ごみ溶融スラグ細骨材, 廃瓦骨材, 高炉セメント B 種コンクリート, 塩化物イオンの拡散係数

1. はじめに

一般廃棄物のひとつにごみ溶融スラグがある。ごみ溶融スラグをコンクリート用細骨材としての利用するために, ごみ溶融スラグ細骨材の基礎物性やごみ溶融スラグ細骨材を置換したコンクリートの基礎物性が検討^{1),2)}されてきた。また, 屋根瓦の製造時に発生する年間約 10,000 t/年の規格外瓦は, 内部養生機能を有しており自己収縮の抑制, 強度増進および耐久性の向上などが報告^{3),4)}されている。

一方, 近年, 高炉セメント B 種を用いたコンクリート (BBC) がマスコンクリートにも多用されている。BBC は養生を十分行えば, 塩分拡散係数が低下し⁵⁾, さらに鉄筋腐食発生限界塩分濃度が高くなる⁶⁾ことも明らかとなり, 既にこれらの結果が 2012 年制定コンクリート標準示方書に取り入れられている。しかし, マスコンクリートを想定した高温履歴の塩分拡散係数等に対する影響を検討した研究は少ない。

そこで, 本研究はごみ溶融スラグ細骨材および廃瓦骨材を用いた水セメント比 40% の BBC をマッシブな海洋構造物に適用することを想定し, 圧縮強度, 細孔構造および塩化物イオンの拡散係数を温度履歴の影響の観点から検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料とその物理的性質を表-1 に示す。セメントは高炉セメント B 種を用いた。細骨材には石英粗面岩砕砂 (S), ごみ溶融スラグ細骨材および島根県産廃瓦細骨材を使用し, 粗骨材には石英粗面岩砕石 (G) および島根県産廃瓦粗骨材を用いた。廃瓦骨材は 5-13mm 寸法のもの

を廃瓦粗骨材として, 5mm 以下のものを廃瓦細骨材として用い, これらは 7 日間以上吸水させ, 表乾状態に調節して用いた。混和剤は, 高性能 AE 減水剤としてポリカルボン酸系化合物, AE 剤として特殊アニオン界面活性剤を用いた。

2.2 配合

本研究は, 単位水量を 165kg/m³ とした配合をシリーズ I, 単位水量を 150kg/m³ とした配合をシリーズ II とする。

2.2.1 シリーズ I

配合表を表-2 に示す。単位水量は 165kg/m³ とし, 水結合材比は 40%, 細骨材率 (s/a) は 45% の一定とした。ごみ溶融スラグ細骨材および廃瓦細骨材置換率は全細骨材容積の 30% および 15% 置換とした。廃瓦粗骨材置換率は廃瓦細骨材 15% 置換の吸水量と同量になるように 12% とした。なお, 全粗骨材容積は一定とし, 寸法 5mm-15mm と 15mm-20mm の砕石は, 容積比 4:6 として混合使用した。廃瓦粗骨材は, 寸法 5-15mm の粗骨材に対して容積置換している。配合名は, 表-2 に示すとおり, それぞれ BB40, BB40MS, BB40PCFA, BB40MSPCFA, BB40PCCA, BB40MSPCCA とした。目標スランプおよび空気量は, 12±2.5cm および 4.5±1.0% とした。それぞれ高性能 AE 減水剤および AE 剤で調節した。各配合のフレッシュコンクリートの試験結果を表-3 に示す。高性能 AE 減水剤の使用量は, セメント質量に対し, 0.3~0.6% であった。

2.2.2 シリーズ II

シリーズ I の BB40MSPCFA に限定して配合設計を行った。配合表を表-2 に示す。単位水量は 150kg/m³, 細骨材率は 44.5%, 目標スランプは 15±2.5cm とした。その他の諸条件は同様とした。フレッシュコンクリートの

*1 広島大学 工学研究科 社会基盤環境工学専攻 (学生会員)

*2 広島大学 工学研究院 社会環境空間部門助教 博士(工学) (正会員)

*3 防衛省 中国四国防衛局 (正会員)

*4 広島大学 工学研究院 社会環境空間部門特任教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

使用材料	種類	性質	記号
セメント	高炉セメントB種	密度：3.04g/cm ³ ，比表面積：3840cm ² /g	C
	石英粗面岩砕砂	密度：2.60g/cm ³ ，吸水率：2.28%	S
細骨材	廃瓦細骨材	密度：2.26g/cm ³ ，吸水率：8.92%	PCFA
	ごみ溶融スラグ	密度：2.77g/cm ³ ，吸水率：0.42%	MS
	石英粗面岩砕石1505	密度：2.64g/cm ³ ，吸水率：0.76%	G1505
粗骨材	石英粗面岩砕石2015	密度：2.65g/cm ³ ，吸水率：0.75%	G2015
	廃瓦粗骨材	密度：2.27g/cm ³ ，吸水率：9.20%	PCCA
	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系化合物	-
混和剤	AE剤	特殊アニオン界面活性剤	-

表-2 配合

配合名	W/B (%)	MS 置換率 (%)	PCFA 置換率 (%)	PCCA 置換率 (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
							W	C	S	PCFA	MS	G1505	G2015	PCCA
シリーズⅠ (W=165kg/m ³)														
BB40	40	0	0	0	4.5	45.0	165	413	766	0	0	380	572	0
BB40MS	40	30	0	0	4.5	45.0	165	413	536	0	245	380	572	0
BB40PCFA	40	0	15	0	4.5	45.0	165	413	651	100	0	380	572	0
BB40MSPCFA	40	30	15	0	4.5	45.0	165	413	421	100	245	380	572	0
BB40PCCA	40	0	0	12	4.5	45.0	165	413	766	0	0	335	504	97
BB40MSPCCA	40	30	0	12	4.5	45.0	165	413	536	0	245	335	504	97
シリーズⅡ (W=150kg/m ³)														
BB40MSPCFA	40	30	15	0	4.5	44.5	150	375	438	102	252	403	602	0

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

フレッシュ試験項目	シリーズ		シリーズⅠ											シリーズⅡ	
	配合名		BB40		BB40MS		BB40PCFA		BB40MSPCFA		BB40PCCA		BB40MSPCCA		BB40MSPCFA
空気量 (%)	マスコン 模擬養生	20℃ 養生	4.0	5.0	3.9	3.9	4.5	4.3	5.0	4.4	4.0	3.8	3.9	3.8	5.2
スランプ (cm)			13.5	12.0	13.0	9.0	10.0	11.5	14.0	11.5	12.0	11.0	11.0	12.0	17.5
練上がり温度 (°C)			14.0	19.9	16.8	13.3	14.0	20.1	13.8	20.3	15.7	13.9	15.3	14.9	22.0

試験結果を表-3に示す。高性能 AE 減水剤の使用量は、セメント質量に対し、1.3%であった。

2.3 コンクリートの練混ぜおよび養生条件

2.3.1 シリーズⅠ

コンクリートの練混ぜは、公称容量 0.10m³ の二軸強制練りミキサを用いて行った。養生条件は、マスコンクリート温度上昇⁷⁾を模擬した温度履歴を与えるマスコン模擬養生(_h)と 20℃一定とする 20℃養生(₂₀)の 2 条件とし、両条件ともに封緘状態とした。マスコン模擬養生は 3 配合ずつ打込みを行ったので、打込み時間差によるセメントの水和度の差を極力小さくするために、練混ぜ後直ちに 10℃の環境室内で冷却した。3 配合目の打込み直後から環境室内にて図-1 のようなマスコンクリート内部温度変化を模擬した温度履歴を与えた。この際、環境室内の相対湿度は 90%とした。20℃養生は、練混ぜ後直ちに 20℃±1℃の恒温室内で養生した。練上がり温度は表-3に示すとおりであった。

2.3.2 シリーズⅡ

広島県生コンプラントの実機を用いて練混ぜを行った。養生条件は発泡スチロールを用いて材齢 7 日まで封緘状態の供試体を簡易的に断熱養生し、その後、室温 20℃、相対湿度 60%の環境下で封緘および曝露状態とする断熱封緘養生および断熱気中養生と、20℃の水

中養生の 3 条件とした。簡易断熱養生期間の供試体温度を図-1に示す。

2.4 試験項目

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験には円柱供試体 φ100mm×200mm を用い、JIS A 1108 に準拠して行った。試験材齢は 1, 3, 7 および 28 日とした。

(2) 細孔径分布試験

細孔径分布試験には材齢 28 日における供試体のモルタル部を採取した 2.5-5.0mm の試料を用い、水銀圧入式ポロシメータによって細孔径分布を測定し、累積細孔径容積を算出した。

(3) 急速塩分浸透性試験

急速塩分浸透試験⁸⁾では、電気泳動により塩化物イオンを電位勾配によりコンクリートの細孔溶液中を浸透させ、塩化物イオンの拡散係数を求めた。直流定電圧は 40V、通電時間は 12, 24 および 36 時間とした。供試体には、所定の養生を行った材齢 28 日の円柱供試体 (φ100mm×200mm) の上下 25mm を切断、除去した残部を高さ 50mm に切断したものをを用いた。図-2 に電気泳動試験装置概要図を示す。塩分浸透深さは硝酸銀溶液の噴霧により、外周面から白色化する境界位置の距離を測定した。

(4) 浸せきによる塩化物イオンの見かけの拡散係数試験

浸せきによる見かけの拡散係数試験は、土木学会基準⁹⁾に準拠して行った。供試体は、所定の養生を行った材齢28日にて、急速塩分浸透試験の場合と同様、φ100mm×200mmの供試体の上下25mmを切断、除去し、高さ50mmの供試体を3体作製し、打込み面側の断面1面以外をエポキシ樹脂にて被覆した。エポキシ樹脂が硬化した後、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液に浸せきした。浸せき期間182日に取り出した供試体を割裂し硝酸銀水溶液の噴霧により、塩化物イオンの浸透深さを確認した。硝酸銀水溶液を噴霧していない供試体から、暴露面より約2.5mmずつオイルカッターで試料を10箇所採取し、イオンクロマトグラフィーにより塩化物イオン濃度を測定した。フィックの第2法則に基づいた拡散方程式の解を用いて得られた塩化物イオン濃度分布を回帰分析し、コンクリートの表面の全塩化物イオン濃度および塩化物イオンの見かけの拡散係数を同時に算出した。

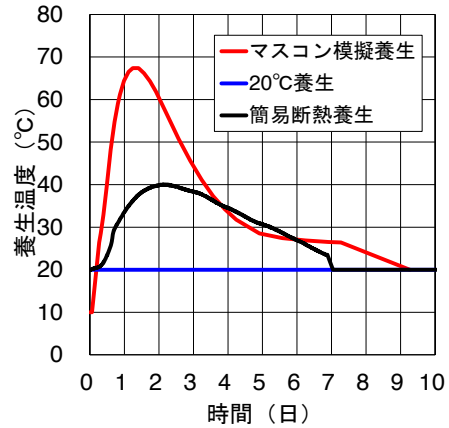


図-1 養生温度(シリーズI,II)

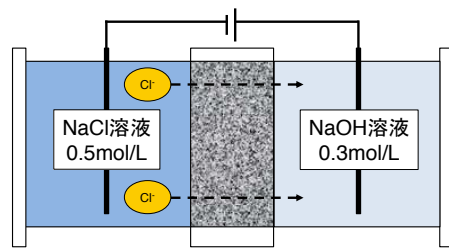


図-2 電気泳動試験機の概要図

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度

3.1.1 強度発現に対する養生温度の影響 (シリーズI)

各配合の圧縮強度発現を図-3に示す。マスコン模擬養生した場合において、材齢1日以降の圧縮強度の増加割合は小さくなっているが、20°C養生した場合には、材齢1日以降の圧縮強度の増加割合は大きい。マスコン模擬養生は材齢7日まで高温環境下にあるため、セメントの水和が促進され、20°C養生した場合よりも強度発現が早くなったと考えられる。材齢28日の強度は、養生条件にかかわらず同程度となった。

3.1.2 ごみ溶融スラグおよび廃瓦骨材の影響(シリーズI)

各養生条件のBB40の材齢28日強度に対する強度比を図-4に示す。BB40の材齢28日強度に対して、20°C養生した場合、BB40PCFA_20を除く4配合の材齢28日の圧縮強度は大きいですが、マスコン模擬養生した場合、BB40PCFAを除く4配合の材齢28日の圧縮強度はBB40より小さい。20°C養生においては最大で8%の強度増加が得られたが、高温養生下においては、ごみ溶融スラグ細骨材の潜在水硬性および廃瓦骨材の内部養生による強度増加はみられなかった。

3.1.3 単位水量の影響 (シリーズII)

温度条件が異なるがBB40MSPCFAの圧縮強度に及ぼす単位水量の影響を表-4に示す。また、図-4にそれぞれの条件における水中養生に対する強度比を示す。水中養生の場合、シリーズIIの圧縮強度はシリー

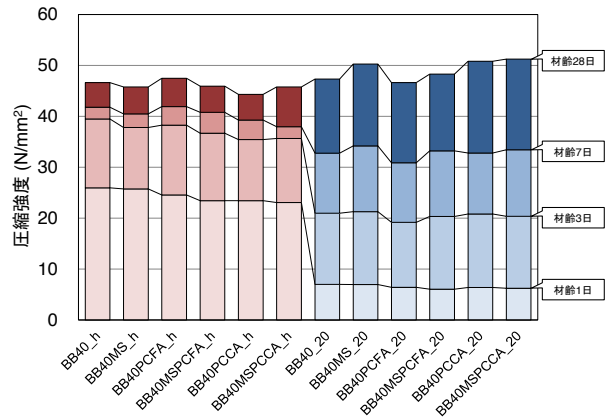


図-3 各配合の圧縮強度 (シリーズI)

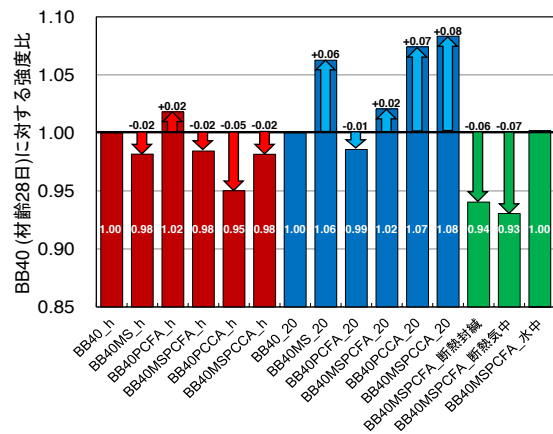


図-4 BB40に対する強度比 (材齢28日)

ズ I と同等の強度が得られたが、断熱養生した場合、BB40_20 に比べ強度低下した。単位水量減少による影響は、表-4 に示すように、ほとんどなく、どの単位水量においても、養生温度の影響により最大で 7%強度低下する結果となった。

3.2 累積細孔容積

材齢 28 日時点における各配合の累積細孔容積を 50nm 以上および 50nm 以下の空隙に分けて図-5 に示す。総累積細孔容積は、マスコン模擬養生した場合の BB40 と比較すると、BB40MS_h の一例を除けば、ごみ熔融スラグ細骨材および廃瓦骨材を用いることにより大きくなった。20℃養生した場合の BB40 と比較すると、BB40PCFA_20 を除けば、ごみ熔融スラグ細骨材および廃瓦骨材を用いることにより総累積細孔容積は小さくなった。特に、廃瓦粗骨材のみを用いた場合において顕著であった。シリーズ II の総累積細孔容積は、シリーズ I に比べて大きくなる傾向にあるが、養生条件の違いによる影響はなかった。

3.3 塩分浸透抵抗性

3.3.1 急速塩分浸透性試験による塩化物イオンの拡散係数

急速塩分浸透性試験による塩化物イオンの拡散係数は式(1)⁸⁾を用いて算出した。

$$D = \frac{kRT}{zF} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad (1)$$

ここで、 D は塩化物イオン拡散係数(cm^2/year)、 k は塩分浸透速度(cm/year)、 R は気体定数($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)、 T は試験温度(K)、 z は価数、 F はファラデー定数(C/mol)、 ϕ は電位(V)、 x は供試体厚さ(cm)を表す。塩分浸透速度は、通電時間と浸透深さの関係を一次式で近似し、その傾きから算出した。式(1)を用いて算出した塩化物イオンの拡散係数を図-6 に示す。シリーズ I において、マスコン模擬養生した場合の塩化物イオンの拡散係数は 20℃養生の場合と比べて大きくなっており、養生温度が高いと塩分浸透抵抗性が小さくなった。また、廃瓦骨材の有無にかかわらずごみ熔融スラグ細骨材を用いた場合、塩化物イオンの拡散係数が小さくなる傾向がみられた。一方、シリーズ II の簡易断熱封緘養生した BB40MSPCFA の塩化物イオン拡散係数は、最高温度 40℃の温度履歴を受けているが、シリーズ I の 20℃養生のそれよりも小さく、単位水量の減少による効果と考えられる。これは、セメントペーストの減少により骨材の単位容積が増加することにより、熱の影響以上に、塩化物イオンの移動に対する粗骨材による遮蔽効果が高まったためと考えられる¹⁰⁾。

表-4 材齢 28 日強度 (シリーズ II)

配合	BB40MSPCFA (W=150 kg/m^3)			BB40MSPCFA (W=165 kg/m^3)	
	養生条件	断熱封緘	断熱気中	水中	マスコン模擬
圧縮強度 (N/mm^2)	44.5	44.0	47.4	45.9	48.3
水中養生に対する強度比	0.94	0.93	1.00	0.97	1.02

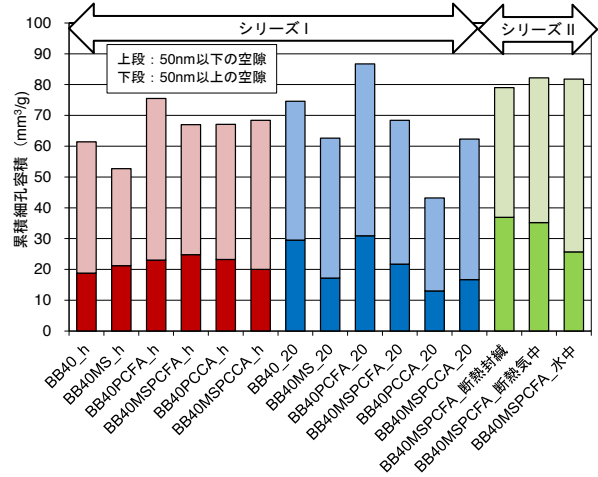


図-5 各配合の累積細孔容積

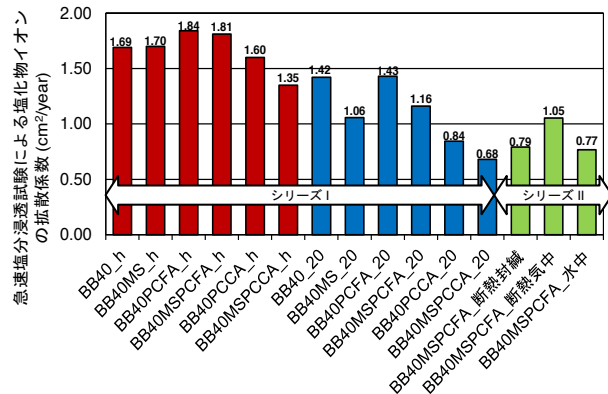


図-6 急速塩分浸透試験による塩化物イオンの拡散係数

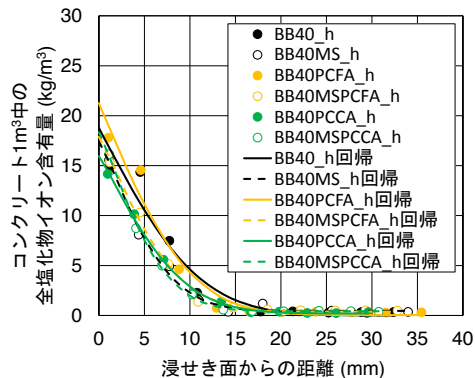


図-7 塩化物イオン濃度分布 (マスコン模擬養生)

3.3.2 塩化物イオン濃度分布 (浸せき試験)

イオンクロマトグラフィーにより全塩化物イオン濃度分布を養生条件別に図-7 および図-8 に示す。浸せきによる塩化物イオンの見かけの拡散係数は式(2)⁹⁾

を用いて算出し、式(2)で回帰結果を図-7 および図-8 に付記し、各配合の塩化物イオンの見かけの拡散係数を図-9 に、表面塩化物イオン濃度を図-10 に示す。

$$C(x,t) = C_{a0} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (2)$$

ここで、 x は暴露面から全塩化物イオン濃度を測定した箇所までの距離(mm)、 t は浸せき期間(=0.499 年)、 $C(x,t)$ は距離 x (mm)、浸せき期間 t (年)において測定された全塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_{a0} はコンクリート表面における全塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_i は初期含有全塩化物イオン濃度(kg/m³)、 D_{ap} はコンクリートの見かけの拡散係数(cm²/年)、 erf は誤差関数を表す。BB40MS_20、BB40PCCA_20 および BB40MSPCCA_20 は浸せき期間が 182 日に達していないため、その他の配合のみで検討を行った。図-10 に示すとおり、マスコン模擬養生した場合の表面塩化物イオン濃度(平均値:18.3kg/m³)は、20℃養生の場合(平均値:22.5kg/m³)に比べて小さいが、浸せき面から 15mm 以上浸透している。これは、高温養生することにより連続空隙が多く生じる¹¹⁾ため、塩化物イオンが浸透しやすくなったと考えられる。

3.3.3 浸せきによる塩化物イオンの見かけの拡散係数

マスコン模擬養生において、廃瓦骨材を混入することにより塩化物イオンの見かけの拡散係数が小さくなったが、20℃養生においてその傾向は認められなかった。また、ごみ熔融スラグ細骨材を混入すると、温度条件にかかわらず見かけの拡散係数は小さくなった。参考値として、2007 年および 2012 年制定コンクリート標準示方書の塩化物イオンの拡散係数の予測値^{12),13)}を図-9 に付記する。本研究の見かけの拡散係数は、2012 年制定示方書の予測値(0.08)より著しく大きくなり、2007 年制定示方書の予測値(0.30)に近い結果となった。

3.3.4 塩化物イオンの拡散係数の換算に関する検討

2012 年制定示方書では、電気泳動による塩化物イオンの実効拡散係数を見かけの拡散係数に換算する係数(k_1k_2)を W/C の関数で提示している¹²⁾。一方、本研究では、急速塩分浸透試験による塩化物イオンの拡散係数を求めている。そこで、この拡散係数に対する浸せきによる塩化物イオンの拡散係数の比(D_{ap}/D)を求め、その結果を表-5 に示す。本研究の D_{ap}/D と k_1k_2 は、結果として同等の値となった。

3.4 塩化物イオンの拡散係数に対する細孔構造の影響

塩化物イオンの拡散係数について、物質透過性に寄与する¹⁴⁾とされている 50nm 以上の累積細孔容積に着目して検討する。急速塩分浸透試験によって得た塩化物イオンの拡散係数と 50nm 以上の累積細孔容積を図

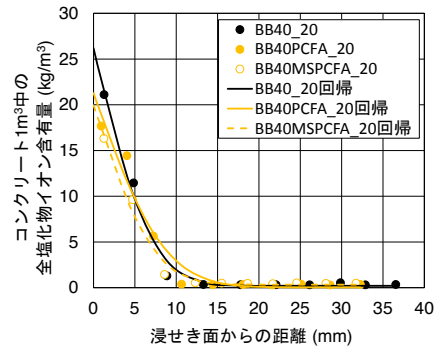


図-8 塩化物イオン濃度分布 (20℃養生)

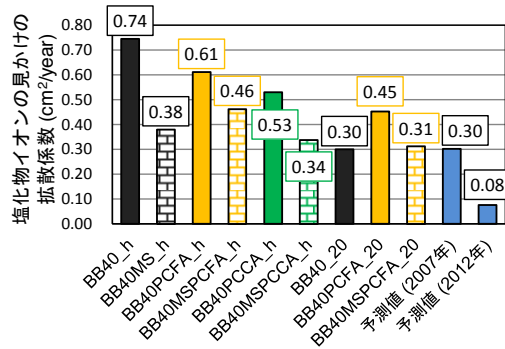


図-9 浸せきによる塩化物イオンの拡散係数

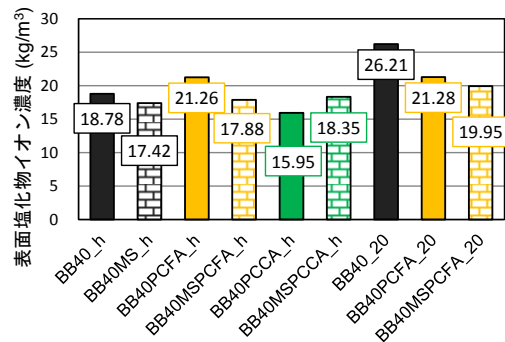


図-10 算出した表面塩化物イオン濃度

表-5 急速塩分浸透試験および浸せきによる塩化物イオンの拡散係数

配合名	急速塩分浸透試験による塩化物イオンの拡散係数 D (cm ² /year)	浸せきによる塩化物イオンの拡散係数 D_{ap} (cm ² /year)	D_{ap}/D	D_{ap}/D 平均値 (養生条件別)	参考値 k_1k_2
BB40_h	1.69	0.74	0.44	0.31	0.27
BB40MS_h	1.70	0.38	0.22		
BB40PCFA_h	1.84	0.61	0.33		
BB40MSPCFA_h	1.81	0.46	0.26		
BB40PCCA_h	1.60	0.53	0.33		
BB40MSPCCA_h	1.35	0.34	0.25		
BB40_20	1.42	0.30	0.21	0.27	
BB40PCFA_20	1.43	0.45	0.32		
BB40MSPCFA_20	1.16	0.31	0.27		

k_1k_2 : 2012 年制定コンクリート標準示方書により定義されている値 $k_1k_2=0.14\exp(1.6W/C)$

図-11 に示す。シリーズ I の 20℃養生した場合、塩化物イオンの拡散係数と累積細孔容積は線形の関係にあり、細孔容積が小さくなるほど塩化物イオンの拡散係数も小さくなる。シリーズ I のマスコン模擬養生およびシリーズ II においては、塩化物イオンの拡散係数と累積細孔容積の関係は、明確な線形関係が得られてい

ないが、全体的には同一の細孔容積に対し、シリーズ I のマスコン模擬養生の塩化物イオンの拡散係数は大きく、シリーズ II の塩化物イオンの拡散係数は小さい。50nm 以上の累積細孔容積に大きな差がないことを考慮すると、前者は高温履歴により、硬化体組織が粗になり空隙の連続性が高まったためと考えられる。後者の場合、50nm 以上の細孔容積が大きいにもかかわらず、塩化物イオンの拡散係数が小さいのは、前述のとおり骨材の容積が多くコンクリートとしての遮塩性が向上したためと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で明らかになった事項をまとめると以下のとおりである。

- (1) 圧縮強度は、ごみ熔融スラグ細骨材および廃瓦骨材を用いても顕著な強度低下はみられない。マスコン模擬養生した場合、BB40_20 に比べて材齢 28 日強度は 3~6% 小さくなった。
- (2) 各配合の総累積細孔容積は、マスコン養生した場合、同程度であったが、20℃養生した場合にごみ熔融スラグ細骨材および廃瓦骨材の混入によって小さくなった。
- (3) 急速塩分浸透性試験および浸せきによる塩化物イオンの拡散係数は、両養生条件において、ごみ熔融スラグ細骨材および廃瓦骨材の混入によって小さくなり、試験方法にかかわらず同様の傾向がみられた。
- (4) 急速塩分浸透性試験による塩化物イオンの拡散係数は、総じてマスコンを模擬した 70℃に近い高温履歴を受けて大きくなるが、40℃の簡易断熱温度履歴を受けても、単位水量が 165kg/m³ から 150kg/m³ となることによって、W=165kg/m³ の 20℃の場合より小さくなる傾向が見られた。

参考文献

- 1) 北辻政文, 藤居宏一: ごみ焼却灰熔融スラグのコンクリート用細骨材への適用に関する基礎的研究, 農業土木学会論文集, No.192, pp.1-8, 1997.12
- 2) 小川由布子, 川村和正, 半井健一郎, 佐藤良一: ごみ熔融スラグ細骨材を用いたコンクリートの力学特性に対する養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1585-1590, 2013.7
- 3) 鈴木雅博, 丸山一平, 川畑智亮, 佐藤良一: 廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの変形と拘束応力に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.651-656, 2007.7

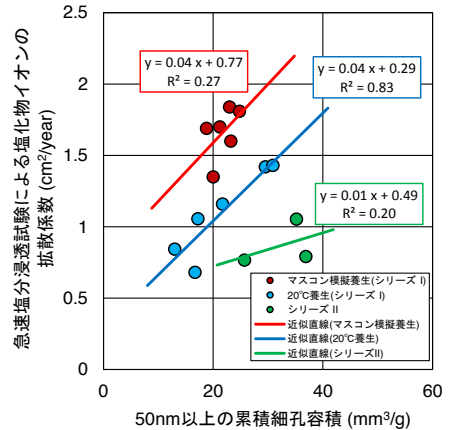


図-11 急速塩分浸透試験による塩化物イオンの拡散係数と 50nm 以上の累積細孔容積の関係

- 4) 重松明, 温品達也, 木村守, 佐藤良一: 廃瓦粗骨材の内部養生による高炉 B 種コンクリートの性能向上について, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.205-210, 2009.7
- 5) 高鳴笛, 濱田秀則, 村上英明, 檀康弘, 伊代田岳史: 高炉セメントコンクリートの塩化物イオン拡散係数に関する実験的検討, 土木学会西部支部研究発表会, V-043, pp.829-830, 2009.3
- 6) 堀口賢一, 松元淳一, 丸屋剛: 混合セメントの鋼材腐食発生限界濃度に関する考察, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 第 V 部門, pp.201-202, 2012.9
- 7) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp.242-245, 2008.11
- 8) 渡辺豊, 河野広隆, 渡辺博志: コンクリートの急速塩分浸透性試験による塩化物イオン拡散係数の算定について, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.663-668, 2002.7
- 9) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書[規準編], 土木学会規準および関連規準, pp.372-400, 2013.11
- 10) 久田真, 大即信明, N. B. Diola, 桐山和晃: コンクリート中の塩化物イオンの電気泳動に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文集, No.599, V-40, pp.71-80, 1998.8
- 11) 内藤大輔, 五十嵐心一: 養生温度による毛細管空隙構造の変化の定量評価コンクリート, 工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.561-566, 2008.7
- 12) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.154-156, 2013.3
- 13) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編], pp.111-113, 2008.4
- 14) 田澤栄一, 佐伯昇: コンクリート工学-微視構造と材料特性, 技報堂出版株式会社, p27, 1998.10