

# 論文 高炉スラグがコンクリートの塩分浸透性に与える影響

藤原 斉\*1・堀 水紀\*2・細谷 多慶\*3・藤木 昭宏\*4

**要旨:** 3年間の塩水浸漬試験結果から、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの塩分浸透性について検討を行った。高炉スラグを微粉末にして結合材の一部として用いても、摩砕処理を行い細骨材として用いても、モルタルおよびコンクリートの塩分浸透性は小さくなる。とくに、高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を併用したモルタルは、3年間浸漬させたものの塩分分布が、0.3年間浸漬させたものと変わらないほど、遮塩性が高くなることを確認した。また、高炉スラグの使用に関係なく、蒸気養生を行ったコンクリートの遮塩性は、水中養生を行ったものよりも劣ることを示した。

**キーワード:** 高炉スラグ細骨材, 高炉スラグ微粉末, 表面塩化物イオン量, 見掛けの拡散係数, 蒸気養生

## 1. はじめに

コンクリート表面に付着する塩分は、沿岸部において海洋から飛来するものや、積雪寒冷地で道路に散布される凍結防止剤によるものがある。中国地方の山間部の高速道路など、多量に散布される凍結防止剤による塩害によって、多くの鋼橋 RC 床版の劣化が生じている<sup>1)</sup>。沿岸部だけでなく、積雪寒冷地においても、塩分浸透に対して高い抵抗性をもったコンクリートが求められている。

高炉スラグは、高炉で鉄鉱石を熔融・還元する際に発生する副産物である。高炉から生成する熔融スラグに多量の圧力水を噴射することにより急冷した水砕スラグは、セメント原料、コンクリート用細骨材、土木用途などに利用されている<sup>2)</sup>。高炉水砕スラグを粉末にした高炉スラグ微粉末をコンクリートの混和材として用いると、長期強度の増進、塩化物イオンの浸透抵抗性の向上、アルカリシロカ反応の抑制等の長所があるとされている<sup>3)</sup>。また、高炉水砕スラグを粒度調整した高炉スラグ細骨材をコンクリートの細骨材として用いると、乾燥収縮の低減、凍結融解抵抗性および中性化抵抗性の向上など、コンクリートの品質が改善されることが確認されている<sup>4)</sup>。

本研究は、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの塩化物イオン浸透性について、3年間の塩水浸漬試験の結果から検討を行ったものである。本論文では、高炉スラグを微粉末として用いても、細骨材として用いても、コンクリートの塩化物イオン浸透性は小さくなることを示す。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

結合材には、普通ポルトランドセメント（密度：

3.15g/cm<sup>3</sup>, ブレーン値：3,350cm<sup>2</sup>/g）および高炉スラグ微粉末（密度：2.89g/cm<sup>3</sup>, ブレーン値：4,150cm<sup>2</sup>/g）を用いた。細骨材には、硬質砂岩砕砂（表乾密度：2.64g/cm<sup>3</sup>, 吸水率：1.78%）および高炉スラグ細骨材（表乾密度：2.72g/cm<sup>3</sup>, 吸水率：0.58%）を用いた。粗骨材には、硬質砂岩砕石（最大寸法：20mm, 表乾密度：2.74g/cm<sup>3</sup>, 吸水率：0.49%）を、混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた。本実験に使用したモルタルおよびコンクリートの配合を表-1 および表-2 に示す。水結合材比は、モルタルおよびコンクリートのいずれも50%とし、コンクリートの単位水量は175kg/m<sup>3</sup>で一定とした。

### 2.2 試験方法

試験は、JSCE-G 572-2013「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」に準拠して行った。試験には、φ100×150mmの円柱供試体を用いた。モルタルは、φ100×200mmの円柱型枠へ打込み後、24時間後まで型枠内で養生を行い、脱型後は、水中養生を材齢7日まで行った。コンクリートは、φ100×200mmの円柱型枠へ打込み後、脱型までの間、室内での養生もしくは蒸気養生を行った。蒸気養生は、打込み後3時間静置した後、1時間あたりに20℃の速さで65℃まで昇温させ、その後4時間保持した後、自然冷却によりコンクリートの温度を下げた。打込みから24時間で脱型し、水中養生を材齢7日まで行った。水中養生完了後、湿式コンクリートカッターを用いてφ100×150mmの円柱供試体に成型した。供試体は、円形の切断面1面以外の面をエポキシ樹脂で被覆した。エポキシ樹脂を完全に硬化させるために材齢14日まで気中に静置した。エポキシ樹脂が完全に硬化した後、質量パーセント濃度で10%の塩化ナトリウム水溶液に浸漬させた。浸漬開始後、0.3

\*1 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻 (学生会員)

\*2 岡山大学大学院 環境生命科学研究科資源循環学専攻

\*3 ランデス (株) 技術部 博(工) (正会員)

\*4 ランデス (株) 技術部研究所 博(工) (正会員)

表-1 モルタルの配合

W/B (%)	GGBF/B (%)	BFS/S (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	B		S	
					OPC	GGBF	CS	BFS
50.0	0.0	0.0	2.0	270	540	0	1,422	0
		33.3					948	488
		66.7					474	977
		100.0					0	1,465
	30.0	0.0			1,410	0		
		33.3			940	484		
		66.7			470	968		
		100.0			0	1,452		
	60.0	0.0			1,397	0		
		33.3			932	480		
		66.7			466	960		
		100.0			0	1,440		

OPC：普通ポルトランドセメント，GGBF：高炉スラグ微粉末，CS：硬質砂岩砕砂，BFS：高炉スラグ細骨材

表-2 コンクリートの配合

W/B (%)	GGBF/B (%)	BFS/S (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					高性能減水剤 (B×%)	
					W	B		S			G
						OPC	GGBF	CS	BFS		
50.0	0.0	0.0	2.0	50.5	175	350	0	925	0	941	0.25
		100.0						0	953		
	60.0	0.0		50.1		140	210	909	0		
		100.0						0	937		

OPC：普通ポルトランドセメント，GGBF：高炉スラグ微粉末，CS：硬質砂岩砕砂，BFS：高炉スラグ細骨材

年（105日），1年（365日）および3年（1,092日）で塩化ナトリウム水溶液から取り出し，深さ方向に試験片を切り出した後，それぞれの試験片に含まれる塩化物イオン量を，JIS A 1154: 2012「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 モルタルの塩化物イオン浸透性

図-1 から図-4 は，質量パーセント濃度で 10%の塩化ナトリウム水溶液に 0.3 年間，1 年間および 3 年間浸漬させたモルタルの全塩化物イオン量分布を示したものである。なお，図中の曲線は，フィックの第 2 法則に基づく式(1)を用いて回帰して求めたものである。

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

ここに， $C(x,t)$ は，供試体表面から距離  $x$  (cm) の位置で，浸漬期間  $t$  (年) において測定された全塩化物イオン量 (kg/m<sup>3</sup>)， $C_{a0}$  および  $D$  は，それぞれ，未定係数として非線形最小二乗法によって求められる表面塩化物イオン量 (kg/m<sup>3</sup>) および塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)， $C_i$  は，浸漬前から含有する全塩化物イオン量 (kg/m<sup>3</sup>) である。

図-1 に示されるように，結合材に普通ポルトランドセメントを用い，細骨材には砂岩砕砂を用いたモルタル

を 3 年間塩水に浸漬させると，供試体表面から 100mm の位置まで塩化物イオンが検出されている。また，このときの塩化物イオンの見掛けの拡散係数は，2.65cm<sup>2</sup>/年となっている。これに対して，図-2 に示す細骨材に砂岩砕砂を用い，結合材の 60%に高炉スラグ微粉末を用いたモルタルを 3 年間浸漬させたものは，供試体表面から 30mm 程度の位置までしか塩化物イオンが検出されておらず，見掛けの拡散係数も 0.26cm<sup>2</sup>/年と，普通ポルトランドセメントのみを結合材に用いたモルタルの見掛けの拡散係数の 10 分の 1 程度になっている。また，図-3 は，結合材には普通ポルトランドセメントを用い，細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの塩化物イオン量の分布を示したものであるが，高炉スラグ細骨材を用いた場合でも，供試体表面から 30mm 程度の位置までしか塩化物イオンが検出されておらず，見掛けの拡散係数も 0.32cm<sup>2</sup>/年と小さな値となっている。さらに，図-4 は，結合材の 60%に高炉スラグ微粉末を用い，細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの塩化物イオン量の分布を示したものであるが，0.3 年間，1 年間および 3 年間浸漬させたモルタルの塩化物イオン量の分布はほぼ同じで，0.3 年以降，塩化物が供試体表面から 10mm の位置より中に侵入していないことが分かる。なお，3 年間浸漬させた結果を基に塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めると 0.05cm<sup>2</sup>/年となり，普通ポルトランドセメントと砂

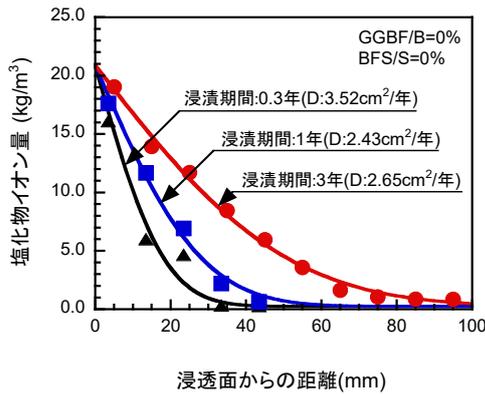


図-1 普通ポルトランドセメントと砂岩砕砂を用いたモルタルの塩化物イオン量分布

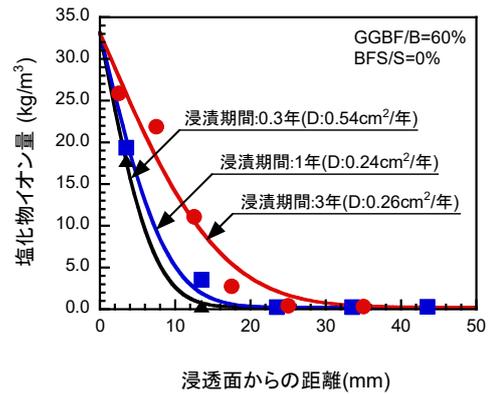


図-2 高炉スラグ微粉末と砂岩砕砂を用いたモルタルの塩化物イオン量分布

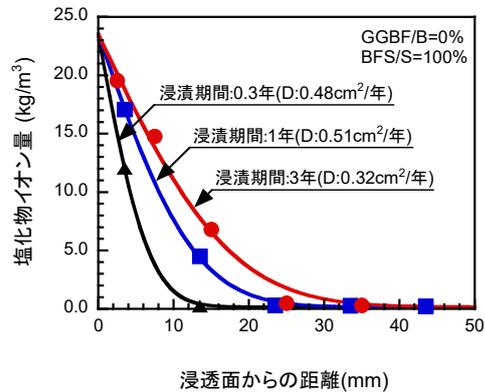


図-3 普通ポルトランドセメントと高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの塩化物イオン量分布

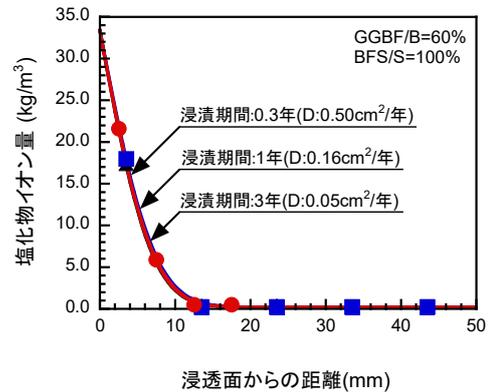


図-4 高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの塩化物イオン量分布

岩砕砂を用いたモルタルの50分の1以下になっている。高炉スラグは、微粉末として用いても、細骨材として用いても、モルタルの遮塩性能を高める効果があり、高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を併用することで、その効果はより高くなることはいえる。

図-5は、図-1から図-4に示したモルタルの表面塩化物イオン量を示したものである。モルタルの表面塩化物イオン量は、3年間浸漬させたモルタル中の塩化物イオン量分布を、式(1)によって回帰して得られた $C_{a0}$ で、浸透面からの距離 $x$ が0の位置の塩化物イオン量である。この図より、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用いたものに比べて、表面塩化物イオン量が大きくなる傾向がある。図-6は、モルタルの表面塩化物イオン量に与える高炉スラグ微粉末量および高炉スラグ細骨材量の影響を示したものである。結合材に含まれる高炉スラグ微粉末量が同じであれば、高炉スラグ細骨材の使用量が増えると、表面塩化物イオン量は若干増加する傾向にある。一方、結合材に用いる高炉スラグ微粉末の使用量が多くなるにつれて表面塩化物イオン量が多くなる。結合材の60%に高炉スラグ微粉末を用いたモルタルは、高炉スラグ微粉末を用いていないものに比べて

表面塩化物イオン量が $10\text{kg/m}^3$ 程度多くなっている。モルタルの表面塩化物イオン量に与える影響は、高炉スラグを細骨材として用いるよりも、微粉末として用いた方が大きいことが分かる。

図-7は、図-1から図-4に示したモルタルの見掛けの拡散係数の経時変化を示したものである。結合材に普通ポルトランドセメントを用い、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルの見掛けの拡散係数は、浸漬期間に関係なく、ほぼ一定の値となっているが、高炉スラグを微粉末または細骨材として用いたものは、浸漬期間が長くなるに連れ、見掛けの拡散係数が小さくなっている。式(1)に示されるフィックの第2法則は、モルタルまたはコンクリートの見掛けの拡散係数が、浸漬期間や塩化物イオン量に関係なく一定の値であると仮定しているが、高炉スラグを用いた遮塩性能の高いモルタルでは、見掛けの拡散係数を一定と見なすことができないことが分かる。

図-8は、モルタルの見掛けの拡散係数に与える高炉スラグ微粉末量および高炉スラグ細骨材量の影響を示したものである。塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、高炉スラグを微粉末として用いた場合も、細骨材として用いた場合も小さくなる。また、結合材に高炉スラグ微粉末を60%用い、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルの見

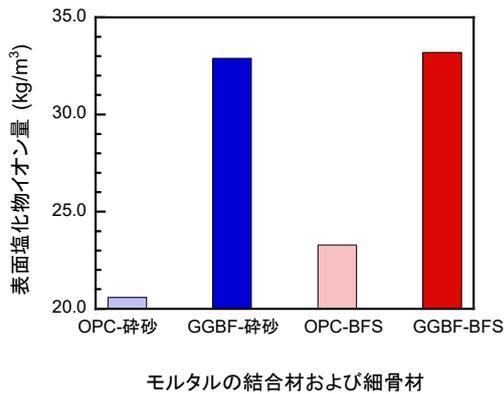


図-5 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が表面塩化物イオン量に与える影響

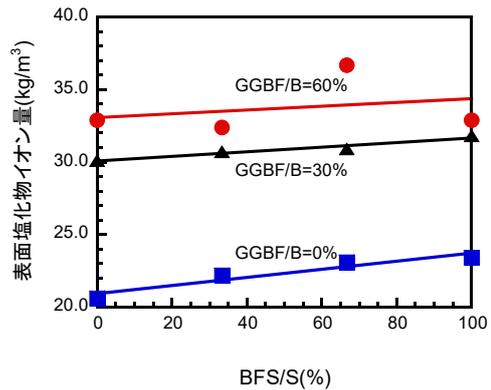


図-6 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が表面塩化物イオン量に与える影響

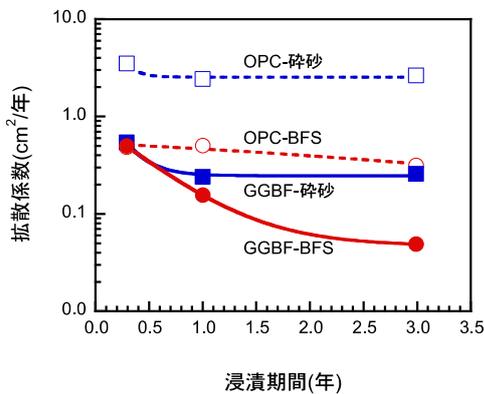


図-7 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が拡散係数の経時変化に与える影響

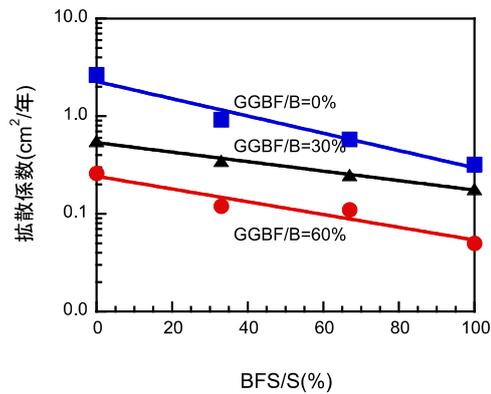


図-8 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がモルタルの拡散係数に与える影響

掛けの拡散係数と、普通ポルトランドセメントのみを結合材に用い、細骨材に全て高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの見掛けの拡散係数がほぼ同じ大きさになっている。高炉スラグを微粉末または細骨材として用いたモルタルの見掛けの拡散係数は、図-7 に示したように、浸漬期間の経過とともに小さくなる傾向がある。従って、図-8 に示した傾向も、浸漬期間の経過とともに、より顕著になるものと思われる。

### 3.2 コンクリートの塩化物イオン浸透性

図-9 から図-12 は、質量パーセント濃度で 10% の塩化ナトリウム水溶液に 0.3 年間、1 年間および 3 年間浸漬させたコンクリートの全塩化物イオン量の分布を示したものである。図-9 に示す結合材に普通ポルトランドセメントを用い、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートを 3 年間浸漬させて求めた塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、 $1.30\text{cm}^2/\text{年}$  である。図-1 に示したモルタルの場合には、供試体表面から 100mm 程度の位置まで塩化物イオンが検出されたのに対し、コンクリートの場合には、供試体表面から 60mm の位置までしか塩化物イオンは検出されていない。また、見掛けの拡散係数を比較しても、モルタルよりもコンクリートの方が小さくなっている。

図-10 は、細骨材に砂岩砕砂を用い、結合材の 60%

に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの全塩化物イオン量の分布を示したものである。3 年間浸漬させても、供試体表面から 30mm 程度の位置までしか塩化物イオンが検出されておらず、見掛けの拡散係数も  $0.30\text{cm}^2/\text{年}$  と、普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用いたコンクリートに比べて高い遮塩性能をもったものになっている。また、図-11 は、結合材には普通ポルトランドセメントのみを用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの全塩化物イオン量の分布を示したものである。高炉スラグを細骨材として用いた場合にも、3 年間浸漬させた供試体の見掛けの拡散係数は  $0.52\text{cm}^2/\text{年}$  と小さな値となっている。コンクリートにおいても、結合材もしくは細骨材に高炉スラグを用いることで、普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用いたコンクリートに比べて遮塩性能が高まるのが分かる。また、これらの見掛けの拡散係数は、図-2 および図-3 に示した 3 年間浸漬させたモルタルの見掛けの拡散係数の  $0.26\text{cm}^2/\text{年}$  および  $0.32\text{cm}^2/\text{年}$  と比較しても、ほぼ同程度の値であることが分かる。

図-12 は、結合材の 60% に高炉スラグ微粉末を用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの全塩化物イオン量の分布を示したものである。コンクリート

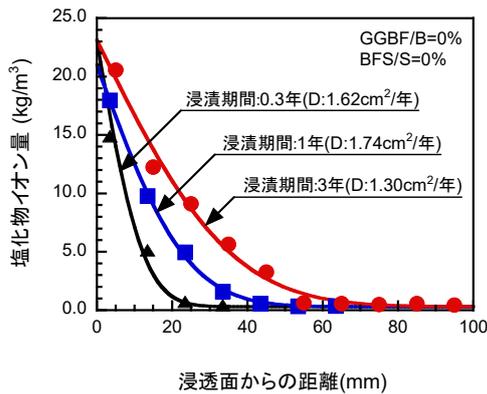


図-9 普通ポルトランドセメントと砂岩砕砂を用いたコンクリートの塩化物イオン量分布

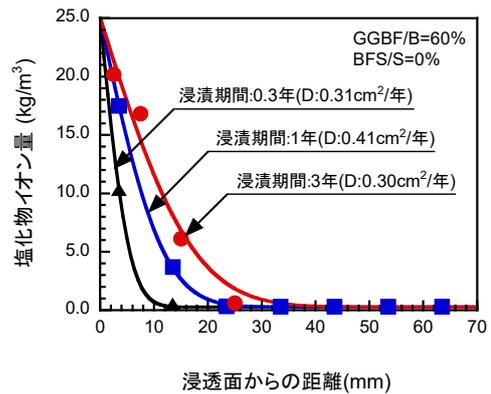


図-10 高炉スラグ微粉末と砂岩砕砂を用いたコンクリートの塩化物イオン量分布

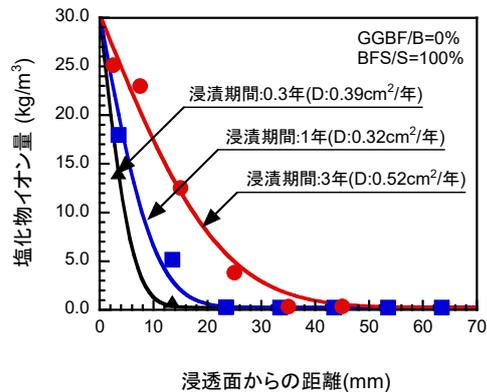


図-11 普通ポルトランドセメントと高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの塩化物イオン量分布

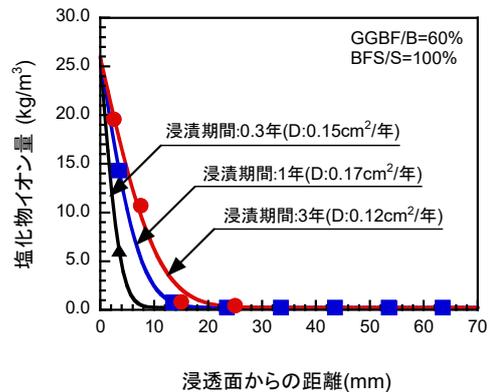


図-12 高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの塩化物イオン量分布

の場合においても、高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を併用することで、より高い遮塩性能が得られている。ただし、図-4に示す3年間浸漬させたモルタルの見掛けの拡散係数と比較すれば、コンクリートの見掛けの拡散係数の方が大きくなっている。高炉スラグ微粉末及び高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、モルタル部の遮塩性能が高くても、粗骨材とモルタルの界面を通して塩化物イオンが浸透するために、モルタルよりもコンクリートの見掛けの拡散係数は大きくなるものと推察される。一方、図-9に示す普通ポルトランドセメントと砂岩砕砂を用いた場合には、粗骨材とモルタルの界面から浸透する塩化物イオンよりも多くの塩化物イオンがモルタル部を通して浸透する。したがって、粗骨材が入ることで、モルタル部が少なくなり塩化物イオンの浸透を阻害され、コンクリートの方がモルタルよりも遮塩性能が高くなると思われる。

図-13は、図-9から図-12に示したコンクリートの表面塩化物イオン量を示したものである。この図より、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用いたものに比べて、表面塩化物イオン量が大きくなる傾向があることが分かる。また、図-14は、コンクリ

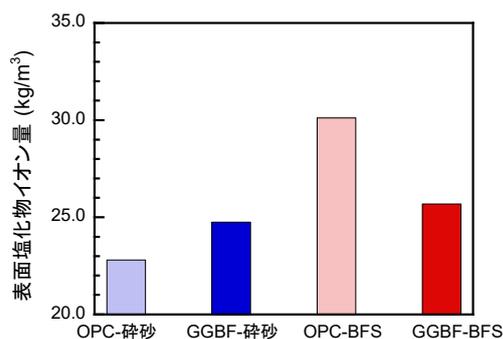
ートの表面塩化物イオン量に養生方法が与える影響を示したものである。コンクリートの表面塩化物イオン量に養生方法が与える影響は小さいと思われる。

図-15は、図-9から図-12に示したコンクリートの見掛けの拡散係数の経時変化を示したものである。図-7に示したモルタルの見掛けの拡散係数の経時変化に比べて、コンクリートでは高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いた場合でも経時変化は小さく、見掛けの拡散係数はほぼ一定の値と見なすことができる。

図-16は、コンクリートの見掛けの拡散係数に配合および養生方法が与える影響を示したものである。コンクリートの見掛けの拡散係数は養生方法に関わらず、図-8に示すモルタルの見掛けの拡散係数と同様に、高炉スラグを微粉末として用いた場合も、細骨材として用いた場合も小さくなる。また、水中養生を行ったコンクリートの見掛けの拡散係数が最も小さく、蒸気養生を行うことで、見掛けの拡散係数が大きくなり、遮塩性能が低下することが分かる。

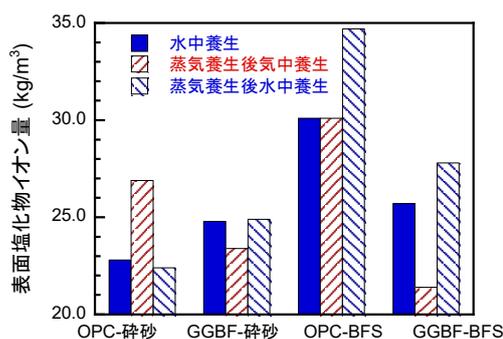
#### 4. まとめ

本論文では、高炉スラグを用いることでコンクリートの遮塩性が改善されることを示した。以下に、実験によ



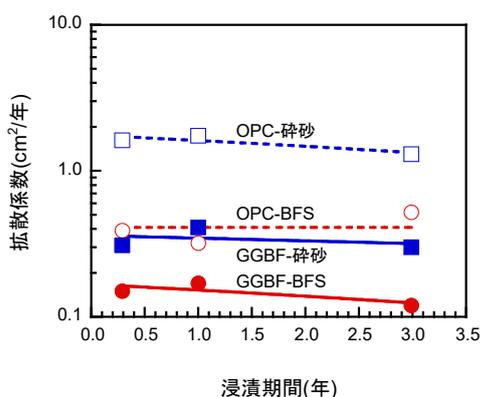
コンクリートの結合材および細骨材

図-13 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がコンクリートの表面塩化物イオンに与える影響



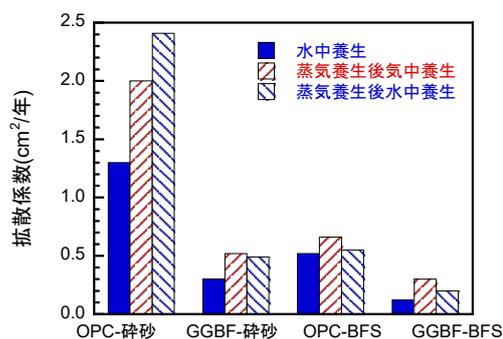
コンクリートの結合材および細骨材

図-14 養生方法がコンクリートの表面塩化物イオン量に与える影響



浸漬期間(年)

図-15 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がコンクリートの拡散係数の経時変化に与える影響



コンクリートの結合材および細骨材

図-16 養生方法がコンクリートの拡散係数に与える影響

って得られた知見を示し、本論文のまとめとする。

- (1) 高炉スラグを微粉末として結合材に用いても、細骨材として用いても、モルタルおよびコンクリートの遮塩性は向上する。また、高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を併用することで、遮塩性はさらに高まる。
- (2) 普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用いた場合、モルタルに比べてコンクリートの方が塩化物イオンの見掛けの拡散係数は小さくなる。一方、結合材の一部に高炉スラグ微粉末を用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた場合には、モルタルに比べてコンクリートの方が見掛けの拡散係数は大きくなる。
- (3) 高炉スラグを用いたモルタルでは、浸漬期間が長くなるに連れて見掛けの拡散係数は小さくなる。一方、コンクリートの場合には、高炉スラグを用いた場合にも、浸漬期間による見掛けの拡散係数の変化は小さい。
- (4) コンクリートの見掛けの拡散係数は、蒸気養生を行うと大きくなる。

## 謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：NEDO）によって実施した。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 本莊清司, 藤原規雄, 葛目和宏, 牧博則: 凍結防止剤による鋼橋 RC 床版の塩害劣化メカニズムに関する考察, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.14, pp235-242, 2014.10
- 2) 鉄鋼スラグ協会: 鉄鋼スラグ統計年報, 平成 27 年度版, 2016.7
- 3) 土木学会: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針, コンクリートライブラリー, No.86, 1993.7
- 4) 齋藤和秀, 木ノ下光男, 伊原俊樹, 吉澤千秋: 高炉スラグ細骨材を利用した耐久性向上コンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.139-144, 2009.6