

論文 高炉スラグを用いたコンクリートの中性化, 塩化物イオン浸透性および時間依存性変形に関する研究

藤井 隆史*1・細谷 多慶*2・杉田 篤彦*3・綾野 克紀*4

要旨: 高炉水砕スラグを微粉化して結合材の一部に用いたコンクリートは, ポルトランドセメントのみを用いたものに比べて, 塩化物イオン浸透性は低くなるが, 中性化の進行は速くなる。一方, 高炉水砕スラグをそのまま細骨材として用いたコンクリートの中性化の進行は, 砂岩砕砂を用いたものに比べて遅くなる。また, 塩化物イオン浸透性は, 高炉スラグ微粉末を用いた場合と同様に低くなる。高炉スラグ微粉末を用いた場合に乾燥収縮ひずみに与える影響は小さいのに対し, 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは, 乾燥収縮が小さくなり, クリープも砂岩砕砂を用いたものに比べて小さくなる。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, 高炉スラグ細骨材, 中性化, 塩化物イオン, 乾燥収縮, クリープ

1. はじめに

高炉スラグは, 製鉄所での銑鉄製錬の際に発生する副産物である。高炉水砕スラグは, 高炉から生成する熔融スラグに多量の加圧水を噴射することにより急冷固化させたガラス質のスラグで, その利用率は 100%である。高炉水砕スラグの用途のうち, 約 70%がセメント原料に用いられ, また, 約 10%がコンクリート用骨材として用いられるなど, そのほとんどがコンクリートの材料として利用されている¹⁾。

コンクリートの材料として用いられる高炉水砕スラグの多くは, 高炉セメントの原料や微粉化した高炉スラグ微粉末を混和材として用いる等, 結合材の一部として用いられることが多い。高炉スラグを微粉化し結合材として用いることで, 長期強度の増進, 塩化物イオン浸透抵抗性の向上, アルカリシリカ反応の抑制等の長所がある。しかし, 高炉スラグ微粉末を多量に用いた場合には, 若材齢での強度の低下, 中性化の進行が速くなる等の短所も知られている²⁾。高炉水砕スラグは, コンクリートの強度および耐久性に影響を及ぼす塩化物, 有機不純物, 粘土等を含んでおらず, 細骨材に用いた場合にアルカリシリカ反応を生じるおそれがないことが知られている。高炉水砕スラグを細骨材として用いたコンクリートは, 高炉水砕スラグの表面がガラス質であるため, ブリーディングが多くなる傾向にあるが, 硬化後の強度および耐久性は, 普通骨材を用いたものと概ね同程度であると言われている³⁾。本研究では, 高炉スラグを細骨材および結合材として用いたモルタルおよびコンクリートの中性化, 塩化物イオン浸透性, 乾燥収縮およびクリープについて検討を行った。

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/cm³, ブレーン値: 3,350cm²/g) および高炉スラグ微粉末 (密度: 2.89g/cm³, ブレーン値: 4,150cm²/g) を用いた。細骨材には, 硬質砂岩砕砂 (表乾密度: 2.64g/cm³, 吸水率: 1.70%, 粗粒率: 3.06) および高炉スラグ細骨材 (表乾密度: 2.72g/cm³, 吸水率: 0.58%, 粗粒率: 2.15) 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/cm³, 吸水率: 0.64%) を用いた。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および材齢 28 日における圧縮強度を, それぞれ, 表-1 および表-2 に示す。モルタルの水結合材比は, 50%で一定とした。コンクリートの水結合材比は 40%, 45%および 50%とし, 単位水量は 175kg/m³ で一定とした。

2.2 試験方法

中性化試験には, φ100×50mm の円柱供試体を用いた。供試体は, 材齢 7 日まで水中養生を行った後, 円形の 1 面を残し, 他の円形の 1 面および円周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後, 供試体を温度 20±1℃, 相対湿度 60±5%, 炭酸ガス濃度 5.0±0.2%の条件で試験を開始した。中性化試験および塩化物イオン浸透性試験は, 実施工コンクリートに近づけるために, 養生期間は, 標準的な試験方法より短めの材齢 14 日で開始している。

塩化物イオンの浸透深さの測定には, φ100×50mm の円柱供試体を用いた。供試体は水中養生を材齢 7 日まで行い, 円形の 1 面を残し, 他の円形の 1 面および円周面

*1 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

*2 ランデス (株) 技術部 博士(工学) (正会員)

*3 オリエンタル白石 (株) 大阪支店施工技術部 修士(工学) (正会員)

*4 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻教授 博士(工学) (正会員)

表-1 モルタルの配合および圧縮強度

W/B (%)	BFS/S (%)	GGBF/B (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				28日 圧縮強度 (N/mm ²)	
				W	B		S		
					OPC	GGBF	BFS		CS
50.0	0	0	2.0	270	540	0	0	1,422	36.8
		30			378	162		1,410	44.4
		60			216	324		1,397	41.5
	33	540			0	479	957	43.6	
	67					967	483	46.6	
	100					1,465	0	47.7	

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および圧縮強度

W/B (%)	BFS/S (%)	GGBF/B (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					高性能 減水剤 (B×%)	28日 圧縮強度 (N/mm ²)	
					W	B		S				G
						OPC	GGBF	BFS	CS			
40	0	0	2.0	50	175	438	0	0	879	913	0.50	59.6
		20				350	88		876	909	0.50	64.0
		40				263	175		873	906	0.40	48.5
		60				175	263		869	902	0.30	46.7
	33	263				175	291	590	906	0.40	63.3	
	67						596	294		0.40	69.1	
	100						899	0		0.40	55.0	
45	0	0	41	500	0	0	738	1,102	0.50	42.1		
	100			760	0	50.7						
50	0	0	50	350	0	0	916	951	0.25	41.3		
	60	140		210	908		942	36.7				
	0	350		0	944	951	42.8					
	100	140		210	936	942	37.2					

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

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後、濃度 10% の NaCl 水溶液に浸漬させた。所定の期間浸漬させた後、円柱供試体を割裂し、割裂面に硝酸銀溶液を噴霧して白く変色した長さを測定して塩化物イオン浸透深さとした。また、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かけの拡散係数試験方法(案)」⁴⁾に準拠し、φ100×150mm を用いて見かけの拡散係数を求めた。なお、塩水への浸漬期間は 365 日とした。

乾燥収縮試験には、100×100×400mm の角柱供試体を用いた。コンクリートは、打設後 24 時間型枠内に置き、脱型直後から材齢 7 日まで水中養生を行った。試験は、JIS A 1129-2:2001 に示されるコンタクトゲージ法により、ホイットモア式ひずみ計（検長：250mm，最小目盛り：1/1,000mm）を用いて測定した。試験は、温度 20±2℃，相対湿度 60±5% の恒温恒湿室内で行った。

クリープひずみの測定には、中心に、載荷用の PC 鋼棒を通すため塩化ビニル管（外径 24mm，内径 20mm）が埋め込まれた 100×100×380mm の角柱供試体を用いた。供試体は、脱型直後から材齢 7 日まで水中養生を行

い、その後は、温度 20±2℃，相対湿度 60±5% の恒温恒湿室内に設置した後、材齢 14 日で持続荷重の載荷を行った。供試体への持続荷重の導入には、PC 鋼棒を用いた。各供試体には、初期載荷時の圧縮強度の 20% の応力を載荷した。なお、初載荷時圧縮強度は、クリープ測定用供試体と同じ条件で養生を行った、φ100×200mm の円柱供試体 3 本の平均圧縮強度とした。また、持続荷重の減退を補うために、初載荷後 2 日，9 日，30 日，72 日，128 日および 245 日に持続荷重の再導入を行った。長さ変化の測定には、ホイットモア式ひずみ計（検長：250mm，最小目盛り：1/1,000mm）を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 中性化

図-1 は、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルにおいて、高炉スラグ微粉末の置換率が、中性化に与える影響を示したものである。図中の■，○および●は、それぞれ、高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の 0%，30% および 60% 用いた結果である。この図より、高炉スラグ微粉末の置換率が多くなるほど、中性化深さが大きいことが

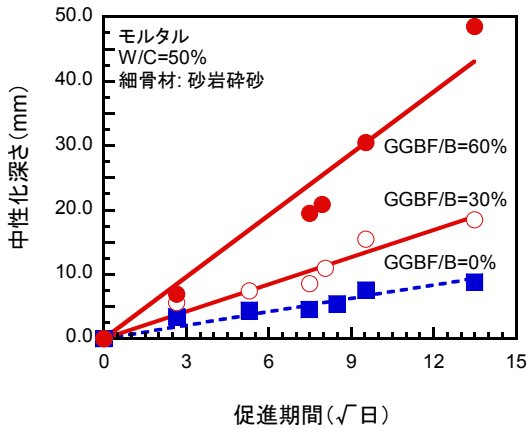


図-1 高炉スラグ微粉末の置換率がモルタルの中性化に与える影響

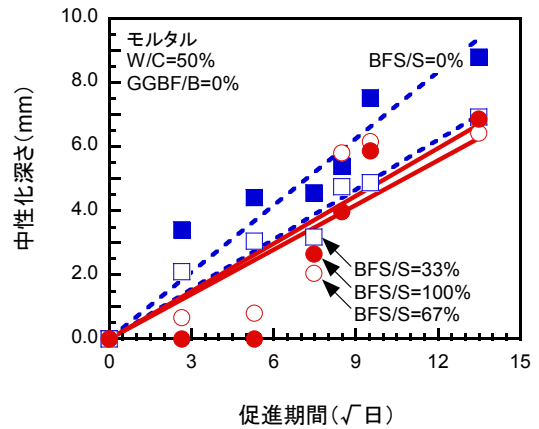


図-2 高炉スラグ細骨材の置換率がモルタルの中性化に与える影響

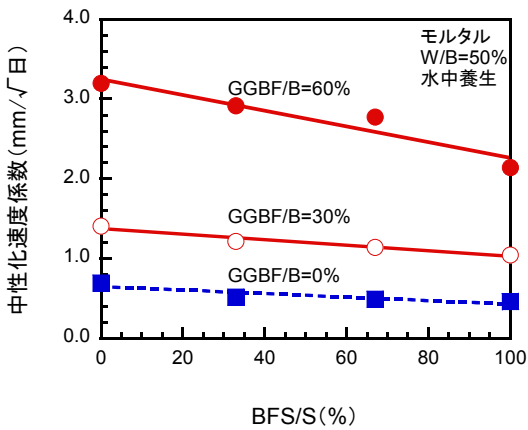


図-3 高炉スラグ細骨材および高炉スラグ微粉末が中性化に与える影響

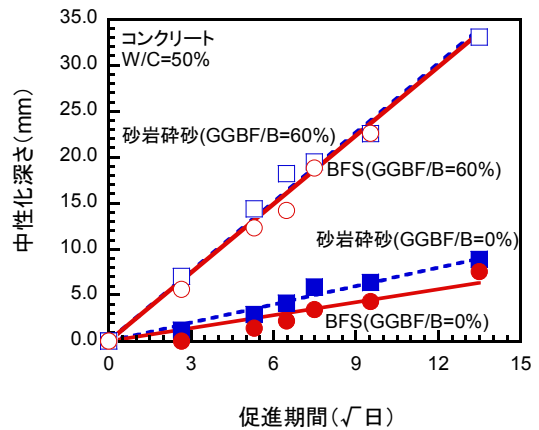


図-4 高炉スラグ細骨材および高炉スラグ微粉末が中性化に与える影響

分かる。高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の60%用いたコンクリートの中性化深さは、高炉スラグ微粉末を用いていないものに比べて5倍程度大きくなっている。

図-2は、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートにおいて、細骨材への高炉スラグ細骨材の置換率が、中性化に与える影響を示したものである。図中の■、□、○および●は、それぞれ、高炉スラグ細骨材を質量比で細骨材の0%、33%、67%および100%用いた結果である。差は小さいが、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたものは、高炉スラグ細骨材を用いていないものに比べ、中性化深さが小さい傾向にある。

図-3は、中性化速度係数と細骨材への高炉スラグ細骨材の置換率との関係を示したものである。中性化速度係数は、図-1および図-2中に示される直線の傾きである。図中の■、○および●は、それぞれ、高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の0%、30%および60%用いた結果である。この図より、中性化速度係数に与える影響は、細骨材への高炉スラグ細骨材の置換率に比べて、結合材への高炉スラグ微粉末の置換率が高い。しかし、高炉スラグ細骨材を多く用いることで、中性化速度係数が小

さくなることが分かる。

図-4は、水結合材比が50%のコンクリートにおいて、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が中性化に与える影響を示したものである。図中の■および●は、それぞれ、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用い、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた結果である。また、□および○は、それぞれ、高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の60%用い、細骨材に砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いたものである。この図より、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートに比べ、高炉スラグ微粉末を用いたものは、中性化の進行は速くなる。一方、高炉スラグ細骨材を用いることで、砂岩砕砂を用いた場合に比べ、中性化の進行が同等かやや遅くなることが分かる。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いると、高炉スラグの潜在水硬性やポズラン反応により、セメントペーストと骨材との境界面が緻密な構造になるため、炭酸ガスが通りにくくなり、中性化の進行が遅くなったと考えられる。

3.2 塩化物イオン浸透性

図-5は、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルにおい

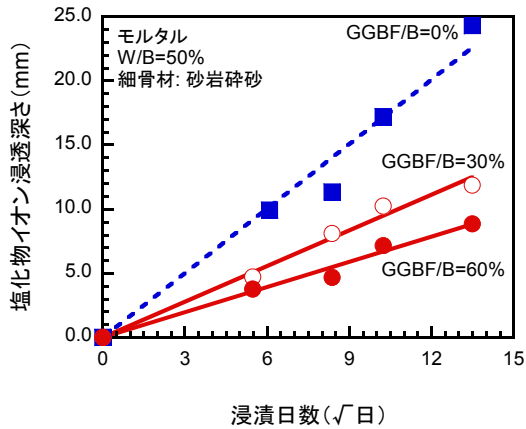


図-5 高炉スラグ微粉末が塩化物イオン浸透深さに与える影響

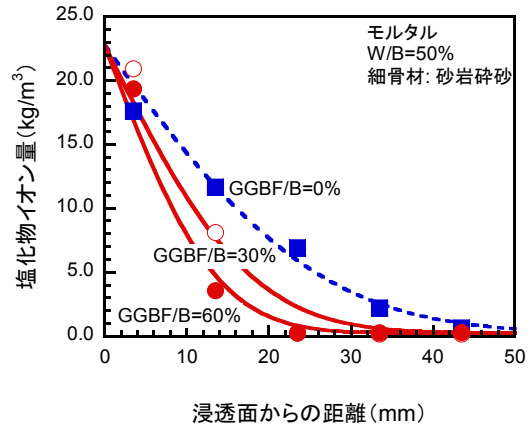


図-6 高炉スラグ微粉末が塩化物イオンの浸透量に与える影響

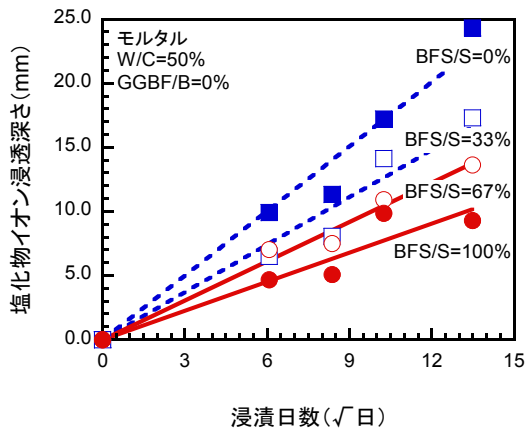


図-7 高炉スラグ細骨材が塩化物イオン浸透深さに与える影響

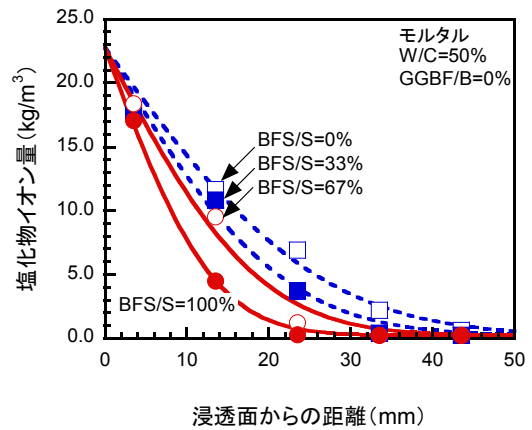


図-8 高炉スラグ細骨材が塩化物イオンの浸透量に与える影響

て、結合材への高炉スラグ微粉末の置換率が、塩化物浸透深さに与える影響を示したものである。この図より、高炉スラグ微粉末の置換率が大きいほど、塩化物イオンの浸透深さは低くなる事が分かる。図-6 は、図-5 に示したモルタルにおいて、浸漬期間が 365 日目における浸透面からの距離と塩化物イオン量の関係を示したものである。この図より、塩化物イオン量の分布からみても、高炉スラグ微粉末の置換率が多いほど、塩化物イオン浸透性が低くなる事が分かる。

図-7 は、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材の置換率が塩化物イオン浸透深さに与える影響を示したものである。この図より、高炉スラグ細骨材の置換率が大きいほど、塩化物イオン浸透深さが低くなる事が分かる。図-8 は、図-7 に示したモルタルにおいて、浸漬期間が 365 日目における浸透面からの距離と塩化物イオン量の関係を示したものである。この図からも、高炉スラグ細骨材の置換率が多いほど、塩化物イオン浸透性が低くなる事が分かる。

図-9 は、図-6 および図-8 に示される塩化物イオン

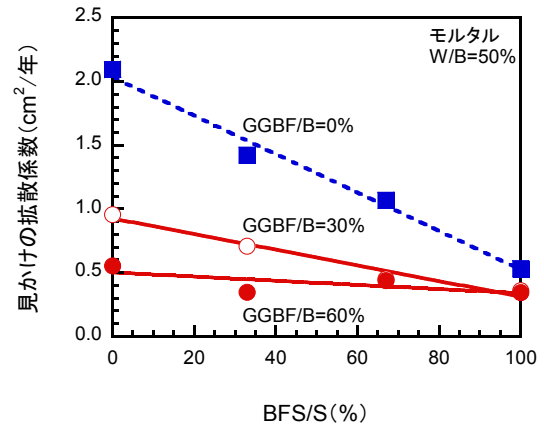


図-9 高炉スラグ細骨材および高炉スラグ微粉末が塩化物イオンの見かけの拡散係数に与える影響

量と浸透面からの距離を次式によって回帰し得られた塩化物イオンの見かけの拡散係数と高炉スラグ細骨材の細骨材への置換率との関係を示したものである。

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

ここに、 $C(x, t)$ は、浸漬面からの距離が x (mm) で、浸

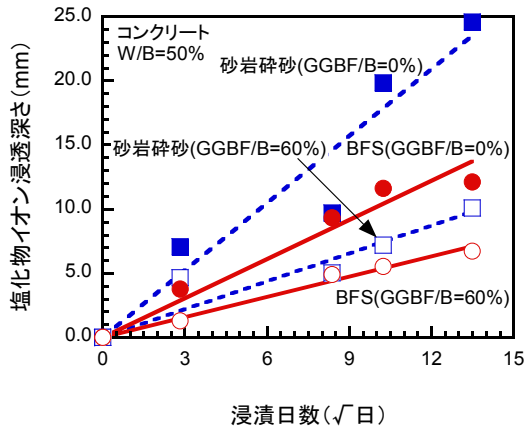


図-10 高炉スラグ細骨材および高炉スラグ微粉末が塩化物イオン浸透深さに与える影響

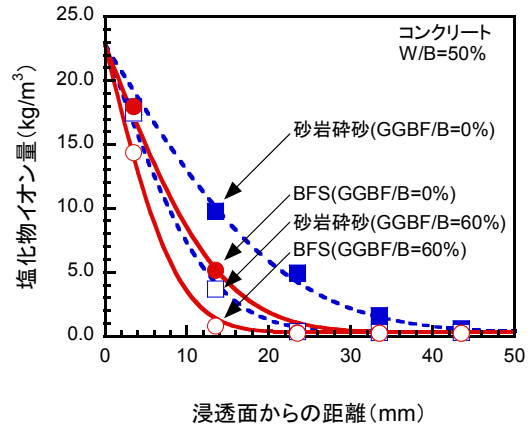


図-11 高炉スラグ細骨材および高炉スラグ微粉末が塩化物イオンの浸透量に与える影響

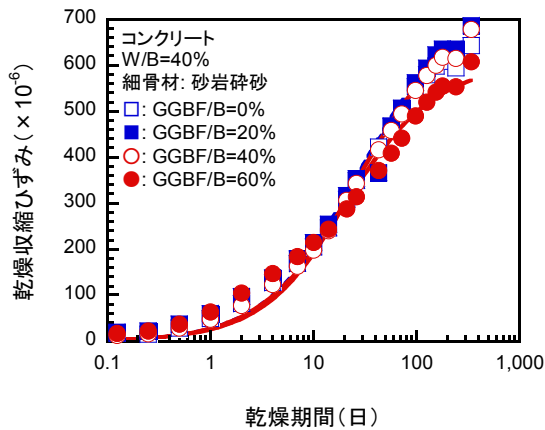


図-12 高炉スラグ微粉末の置換率が乾燥収縮ひずみに与える影響

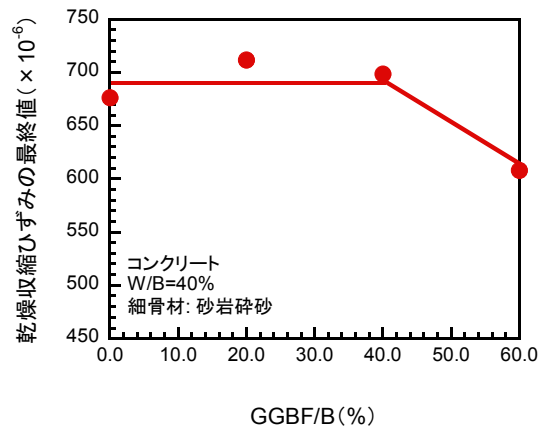


図-13 高炉スラグ微粉末の置換率が乾燥収縮ひずみの最終値に与える影響

漬期間が t (年) における全塩化物イオン量 (kg/m^3) で、 C_i は、初期に含有される全塩化物イオン量 (kg/m^3) で、 C_{a0} は、浸漬試験におけるコンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m^3) で、 D_{ap} は、浸漬試験による見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$) で、 erf は、誤差関数である。この図より、高炉スラグ細骨材および高炉スラグ微粉末のどちらを用いても、塩化物イオンの見かけの拡散係数は、小さくなる事が分かる。細骨材に高炉スラグ細骨材のみを用いることで、高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の 60% 用いた場合と同程度まで、塩化物イオンの見かけの拡散係数が小さくなる事が分かる。

図-10 は、水結合材比が 50% のコンクリートにおいて、高炉スラグ細骨材および高炉スラグ微粉末が塩化物イオン浸透深さに与える影響を示したものである。この図より、コンクリートにおいても、高炉スラグ微粉末を用いると塩化物イオン浸透深さが非常に小さくなる事が分かる。また、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いても、砂岩砕砂を用いた場合に比べ、塩化物イオンの浸透性を低くすることができる。図-11 は、図-10 に示すコンクリートの浸漬期間が 365 日目における浸透面からの距離

における塩化物イオンの量を示したものである。この図より、モルタルの場合と同様、細骨材に高炉スラグ細骨材のみを用いることで、結合材に高炉スラグ微粉末を質量比で 60% 置換した場合と同程度の塩化物イオン浸透抑制効果があることが、塩化物イオン量の分布からも確認することができる。

3.3 乾燥収縮ひずみおよびクリープひずみ

図-12 は、水結合材比が 40% で、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートにおいて、結合材への高炉スラグ微粉末の置換率が、乾燥収縮ひずみの経時変化に与える影響を示したものである。高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなると、乾燥収縮ひずみは、小さくなるが、その差は 100×10^{-6} 未満と小さいものである。図-13 は、図-12 に示す乾燥収縮ひずみと乾燥期間の関係を次式に示される双曲線により回帰し求めた乾燥収縮ひずみの最終値と、結合材への高炉スラグ微粉末の置換率との関係を示したものである。

$$\varepsilon'_{ds}(t) = \frac{\varepsilon'_{ds\infty} \cdot t}{\beta + t} \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon'_{ds}(t)$ は乾燥期間 t (日) における乾燥収縮ひず

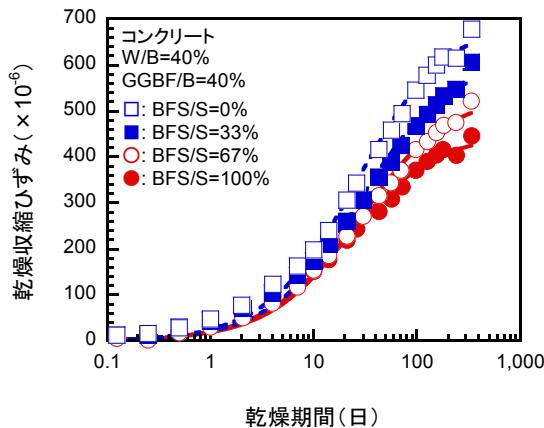


図-14 高炉スラグ細骨材の置換率が乾燥収縮ひずみに与える影響

み ($\times 10^{-6}$) で、 $\varepsilon'_{ds\infty}$ は乾燥収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-6}$) で、 β は乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項である。この図より、高炉スラグ微粉末の置換率が 40% までは、乾燥収縮ひずみの最終値はほぼ一定で、置換率が 40% を超えると、やや小さくなるのが分かる。

一方、図-14 は、細骨材への高炉スラグ細骨材の置換率が、乾燥収縮ひずみの経時変化に与える影響を示したものである。ただし、結合材には高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の 40% 用いている。この図より、高炉スラグ細骨材の置換率が多くなるほど、乾燥収縮ひずみが小さくなっている。また、図-14 に示す乾燥収縮ひずみと乾燥期間の関係を次式に示される双曲線により回帰し求めた乾燥収縮ひずみの最終値と、高炉スラグ細骨材の置換率との関係を示した図-15 から、細骨材への高炉スラグ細骨材の置換率が大きくなるほど、乾燥収縮ひずみの最終値は、直線的に小さくなるのが分かる。細骨材に高炉スラグ細骨材のみを用いることで、砂岩砕砂のみを用いた場合に比べて、乾燥収縮ひずみの最終値が 250×10^{-6} 程度小さくなる。

図-16 は、水セメント比が 45% のコンクリートにおいて、高炉スラグ細骨材がコンクリートのクリープに与える影響を示したものである。図中の■および●は、それぞれ、細骨材に砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた結果である。載荷期間 364 日で、細骨材に砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのクリープ係数は、それぞれ、2.57 および 1.82 となっており、高炉スラグ細骨材を用いると、砂岩砕砂を用いた場合に比べて、3 割程度クリープ係数が小さくなる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・ 結合材に高炉スラグ微粉末を用いると、中性化の進行が速くなる。一方、細骨材に高炉スラグ細骨材を

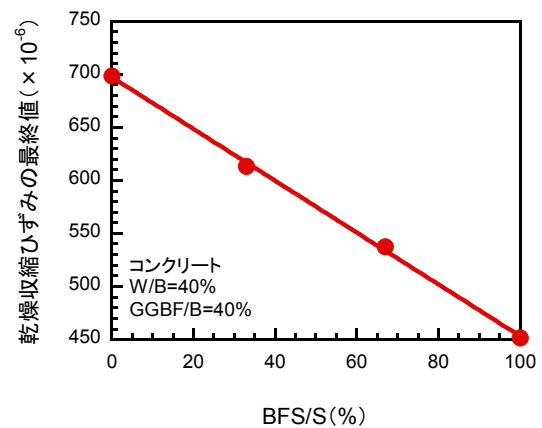


図-15 高炉スラグ細骨材の置換率が乾燥収縮ひずみの最終値に与える影響

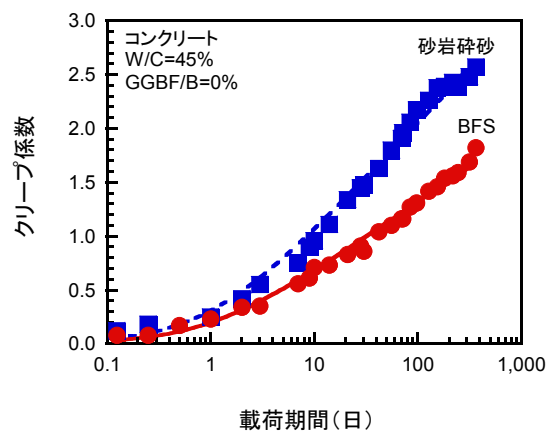


図-16 高炉スラグ細骨材がクリープに与える影響

用いることで、砂岩砕砂を用いたものよりも中性化の進行は、同程度か遅くなる。

- ・ 細骨材に高炉スラグ細骨材のみを用いることで、結合材に高炉スラグ微粉末を質量比で 60% 用いた場合と同程度に塩化物イオン浸透性が抑制される。
- ・ 結合材に高炉スラグ微粉末を用いても、乾燥収縮に与える影響は少ない。しかし、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた場合には、砂岩砕砂を用いたものに比べ、乾燥収縮ひずみが小さくなり、クリープによる変形も小さくなる。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報(平成 25 年度実績)，2014.7
- 2) 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.86，1996.6
- 3) 土木学会：高炉スラグ骨材コンクリート施工指針，コンクリートライブラリー，No.76，1993.7
- 4) 土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書 [規程編土木学会および関連基準]，pp.372-376，2013.11