

博士論文

高炉スラグを用いたコンクリートの  
塩分浸透抵抗性に関する研究

2018年3月

藤原 齊

岡山大学大学院  
環境生命科学研究科





## 要旨

製鉄の副産物である高炉水砕スラグは、主に微粉化し、コンクリートの結合材として広く用いられてきた。本研究では高炉スラグを結合材および細骨材に用いた場合、モルタルおよびコンクリートへの塩分浸透性にどのような影響を与えるか検討を行った。3年間の長期の塩水浸漬試験および、新しい実験方法である薄片供試体を用いた短期の塩化物イオン浸透試験および非定常・電気泳動試験を行い、塩分浸透に対する抵抗性を確認した。さらに、鉄筋コンクリート供試体を用い、高炉スラグを用いたモルタルおよびコンクリート中の鋼材が、実際どのように腐食するかを鋼材腐食試験によって、高炉スラグの塩分浸透抑制効果を確認した。

3年間の長期の塩水浸漬試験（以下、浸漬法と呼ぶ）では、高炉スラグを微粉末として結合材として用いても、細骨材として用いても、コンクリートおよびモルタルの遮塩性は向上した。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、遮塩性は更に高まった。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つれて見掛けの拡散係数は小さくなった。一方、高炉スラグを用いたコンクリートは、浸漬期間による拡散係数の変化は小さかった。モルタルおよびコンクリートで、高炉スラグを結合材と細骨材を併用すると見掛けの拡散係数は小さくなり、モルタルの見掛けの拡散係数が最も小さくなることが分かった。高炉スラグを用いた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り、その後水中養生を行ってもリカバリーできないことが分かった。

薄片供試体を用いた塩化物イオン浸透性試験（以下、薄片法と呼ぶ）では、浸漬法と同様に、高炉スラグを微粉末として結合材として用いても、細骨材として用いても、コンクリートおよびモルタルの遮塩性は向上した。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、遮塩性は更に高まった。薄片法によっても、蒸気養生を行ったコンクリートの見掛けの拡散係数は大きくなった。薄片法から求めたモルタルの見掛けの拡散係数は、浸漬法から求めた見掛けの拡散係数と同様の傾向を示し、モルタルの塩化物イオン浸透抵抗性は、薄片法によっても評価することができる。浸漬法では、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を併用すると、拡散係数は最も小さくなったが、薄片法ではこの傾向が得られない場合がある。薄片法によると、水結合材比によらず、砂岩砕砂を用いた場合に比べて、高炉スラグ細骨材を用いた場合の方が、可溶性塩化物イオン量が多くなった。薄片法によると、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、材齢が7日から28日に長くなると飽和塩化物イオン量は大きくなり、拡散係数は2分の1以下に小さくなった。薄片法において、増粘剤を用いたモルタルは、遮塩性が低くなる場合があるが、結合材に高炉スラグ微粉末を用いると、

遮塩性の低下は抑制された。薄片法によると、結合材および細骨材に高炉スラグを用いたモルタルに蒸気養生後水中養生を行うと、遮塩性が高くなった。電気泳動法において、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した。高炉スラグが塩化物イオン浸透性に与える影響について電気泳動法を用いて評価する場合、浸漬法を用いた場合よりも遮塩性を低く評価する傾向があった。電気泳動法から求めたコンクリートの実効拡散係数は、蒸気養生を行うと大きくなることが分かった。生産工場の違いが塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響は、生産工場Aの高炉スラグ細骨材のみ実効拡散係数が大きくなり、その他の工場のもは同程度の実効拡散係数になった。また、いずれの工場の高炉スラグ細骨材も、砂岩砕砂を用いたコンクリートよりも実効拡散係数が小さくなることが分かった。

高炉スラグを用いたコンクリートの鋼材腐食試験では、高炉スラグを結合材または細骨材に用いると、ひび割れのないモルタル中の鋼材の腐食は抑制され、また、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、微細なひび割れを生じていても鋼材の腐食を抑制する効果があることを確認した。高炉スラグ細骨材を用いると水結合比が65%のコンクリートでは、細骨材に砂岩砕砂のみの水結合比が35%のコンクリートと同程度の鋼材腐食抑制効果があることが分かった。高炉スラグ微粉末を用いると、配合によっては、鋼材が腐食する傾向があり、一方、高炉スラグ細骨材は、使用量が増えるほど、鋼材の腐食を抑制する効果があることが分かった。

以上のことから、高炉スラグを細骨材に用いた場合でも、微粉末として用いた場合と同様にモルタルおよびコンクリートの塩分浸透性を抑制する効果があることが明らかになった。高炉スラグを結合材と細骨材の両方に用いた場合には、より高い塩分抑制効果があることが分かった。一方で、蒸気養生を行うと、蒸気養生を行わない場合に比べて遮塩性が低下することも分かった。高炉スラグを微粉末として結合材に多量に用いた場合には、中性化が速くなる欠点が知られているが、細骨材として用いれば、中性化が速くなることもない。よって、適量な高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を結合材および細骨材に用い、適切な養生を行うことによって、鋼材腐食に対して高い耐久性を持つコンクリートを製造できることが可能であることが明らかとなった。

## 目 次

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第1章 序論                             |    |
| 1-1 本研究の背景と目的                      | 1  |
| 1-2 本論文の構成                         | 2  |
| 第2章 従来の研究                          |    |
| 2-1 塩分浸透性                          | 4  |
| 2-1-1 浸せきによる塩化物イオン浸透性試験            | 4  |
| 2-1-2 電気泳動法による塩化物イオン浸透性試験          | 6  |
| 2-2 コンクリート中の鋼材腐食                   | 7  |
| 2-2-1 四電極法                         | 8  |
| 2-2-2 分極抵抗法                        | 9  |
| 2-2-3 tafel 外挿法                    | 9  |
| 2-3 天然骨材                           | 9  |
| 2-4 高炉スラグ                          | 10 |
| 2-4-1 鉄鋼スラグの種類と発生量                 | 10 |
| 2-4-2 鉄鋼スラグの有効利用                   | 10 |
| 2-4-3 高炉スラグの特徴                     | 11 |
| 第3章 高炉スラグを用いたコンクリートの塩水浸漬試験         |    |
| 3-1 概要                             | 14 |
| 3-2 使用材料及び配合                       | 14 |
| 3-3 試験方法                           | 15 |
| 3-4 実験結果および考察                      | 16 |
| 3-4-1 モルタルの塩化物イオン浸透性               | 16 |
| 3-4-2 コンクリートの塩化物イオン浸透性             | 38 |
| 3-5 本章のまとめ                         | 60 |
| 第4章 薄片を用いた塩化物イオン浸透性試験および非定常・電気泳動試験 |    |
| 4-1 概要                             | 61 |
| 4-2 使用材料及び配合                       | 61 |
| 4-3 練混および養生方法                      | 65 |
| 4-4 薄片供試体を用いた塩化物イオン浸透性試験           | 65 |
| 4-4-1 薄片供試体を用いた塩化物イオン浸透性試験の原理      | 65 |
| 4-4-2 拡散方程式の差分化                    | 66 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 4-4-3  | 評価方法  | 67  |
| 4-5    | 非定常・電気泳動試験  | 68  |
| 4-6    | 実験結果および考察   | 71  |
| 4-6-1  | 薄片供試体を用いたモルタルの塩化物イオン浸透試験                              | 71  |
| 4-6-2  | 薄片法および浸漬法から求めたモルタルの拡散係数の関係                            | 76  |
| 4-6-3  | 薄片供試体を用いたコンクリートの<br>塩化物イオン浸透性試験                       | 78  |
| 4-6-4  | 薄片法および浸漬法から求めたコンクリートの<br>拡散係数の関係                      | 84  |
| 4-6-5  | 高炉スラグが可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量に<br>与える影響                 | 86  |
| 4-6-6  | 高炉スラグを用いたモルタルにおいて水中養生期間が塩化物<br>イオン浸透性に与える影響           | 94  |
| 4-6-7  | 高炉スラグ，増粘剤および養生方法がモルタルの塩化物<br>イオン浸透性に与える影響             | 98  |
| 4-6-8  | 非定常・電気泳動試験  | 113 |
| 4-6-9  | 非定常・電気泳動試験および浸漬法から求めたモルタル<br>およびコンクリートの拡散係数の関係        | 120 |
| 4-6-10 | 高炉スラグ細骨材の生産地の違いが非定常・電気泳動法<br>から求めたコンクリートの実効拡散係数に与える影響 | 122 |
| 4-7    | 本章のまとめ  | 124 |

## 第5章 高炉スラグを用いたコンクリートの鋼材腐食試験

|       |                                  |     |
|-------|----------------------------------|-----|
| 5-1   | 概要                               | 126 |
| 5-2   | 使用材料及び配合                         | 126 |
| 5-3   | 練混および養生方法                        | 130 |
| 5-4   | 試験方法                             | 130 |
| 5-4-1 | 四電極法，分極抵抗法，分極曲線法に使用した<br>供試体作成方法 | 130 |
| 5-4-2 | 四電極法                             | 132 |
| 5-4-3 | 分極抵抗法（交流インピーダンス法）                | 133 |
| 5-4-4 | 分極曲線法（tafel 外挿法）                 | 133 |
| 5-4-5 | 鋼材腐食促進試験                         | 134 |
| 5-4-6 | 発錆限界塩化物イオン量試験                    | 139 |

|        |                                    |     |
|--------|------------------------------------|-----|
| 5-5    | 実験結果および考察                          | 145 |
| 5-5-1  | 四電極法を用いた鋼材腐食試験                     | 145 |
| 5-5-2  | 分極抵抗法による鋼材腐食試験                     | 148 |
| 5-5-3  | 分極曲線法による鋼材腐食試験                     | 154 |
| 5-5-4  | ひび割れを入れていないモルタルを用いた鋼材腐食促進試         | 163 |
| 5-5-5  | 予め微細なひび割れを入れたコンクリートを用いた<br>鋼材腐食促進試 | 170 |
| 5-5-6  | 発錆限界塩化物イオン量試験                      | 178 |
| 5-6    | 本章のまとめ                             | 189 |
| 第6章 結論 |                                    | 190 |
| 参考文献   |                                    | 193 |



## 第1章 序 論

### 1-1 本研究の背景と目的

戦後から高度成長期にかけて大量に生産され、我々の生活や経済活動を支えてきたコンクリート構造物は今後急速に老朽化が進み、これらを効率的に維持管理・活用していくことは管理者やコンクリート技術者にとって最大の課題となっている。

コンクリート構造物の劣化の原因の一つとして塩害がある。塩害は、コンクリート中の鋼材の不働態被膜が塩化物イオンにより破壊され、鋼材腐食が促進し、腐食生成物（錆）の体積膨張がコンクリートにひび割れを引き起こすことや、鋼材の断面減少等を伴うことにより構造物の性能が低下する現象である。コンクリート表面にひび割れ等の変状が現れた時点では、すでに多くの塩化物イオンがコンクリート中に浸透し、内部鋼材が相当量腐食している。さらに一旦ひび割れが発生し、塩分・酸素などが直接鋼材表面に達する状態では、鋼材腐食、構造物劣化が加速度的に進行するという特徴を有する。

特に中国地方の山間部の高速府道路では、冬季に凍結防止剤（塩化ナトリウム）が多量に散布され、中国自動車道などでは各地の橋梁で塩害劣化が顕在化している。劣化が顕著になった鋼橋 RC 床版については、既設床版を撤去して PC プレキャスト床版に取り替える床版取替工事や、劣化を広範囲に打ち換える大規模な補修工事が実施されている<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結合材として用いると、長期強度の増進、塩化物イオンの浸透抵抗性の向上、アルカリシリカ反応の抑制等の長所があるとされている反面、高炉スラグ微粉末を多量に使用すると若材齢での強度が低下、硬化後の中性化が進行しやすい等の短所となることが知られている<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、円柱供試体による長期の塩水浸漬試験、薄片による短期の塩化物イオン浸透試験および非定常・電気泳動試験、鋼材腐食試験を行い、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に対する

高い抵抗性を確認した。

## 1-2 本論文の構成

全6章で構成されている。論文の構成を示す。

### 1章 序論

本研究の背景と目的について、および論文の構成について述べた。

### 2章 従来の研究

コンクリートの塩分浸透抵抗性およびコンクリート中の鋼材腐食に関する従来の研究について調査した結果を示し、コンクリートの構成材料である骨材の利用状況および高炉スラグの特性について述べた。

### 3章 高炉スラグを用いたコンクリートの塩水浸漬試験

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。

### 4章 薄片を用いた塩化物イオンの塩化物イオン浸透性試験および非定常・電気泳動試験

見掛けの拡散係数を求めるには、土木学会の浸漬法をもちいると、浸漬期間が91日以上必要となり、試験期間が数ヶ月かかり長期になる。本章は2mmのスライス薄片を用いて、4週間の短い浸漬期間で表面塩化物イオン濃度、見掛けの拡散係数を求められることを示した。高炉スラグ細骨材を用いると塩分浸漬中に拡散係数が小さくなり、薄片で求めた拡散係数の値は安全側となることを示す。また、電気化学的試験で、同じ供試体を非定常・電気泳動法により拡散係数を求め高炉スラグの塩化物イオン抵抗性を確認した。

### 5章 高炉スラグを用いたコンクリートの鋼材腐食試験

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、塩化物イオン浸透性が低いことが知られているが、少ない塩化物イオン量で鋼材の腐食が生じ始めるとも言われている。本章は、実際に鉄筋コンクリートの供試体を用い、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およびモルタル中の鋼材腐食に与える影響を調べたものである。電気化学的試験である、四電極法、分極抵抗法、分極曲線法による試験および、



ひび割れのないモルタル供試体および人工的にひび割れを導入したコンクリート供試体を用いた鋼材腐食促進試験により，鋼材腐食に対する抵抗性を調べた。その結果，高炉スラグ微粉末を結合材の一部として用いた場合には，高炉スラグ微粉末の使用量に伴い鋼材の腐食は単調に抑制されるのではなく，ある量よりも多くの高炉スラグ微粉末を用いると鋼材が腐食しやすくなる傾向があるのに対し，高炉スラグ細骨材の場合は，使用量が増えるほど，鋼材の腐食は抑制されることを明らかとした。

## 6章 結論

本研究で得られた結果を総括し，本論文の結論とした。

## 第2章 従来の研究

### 2-1 塩分浸透性

コンクリートの塩分浸透に対する指標として塩化物イオンの拡散係数が用いられる。塩化物イオンは、コンクリートの細孔溶液中に固定化をとめないながら濃度勾配を駆動力として移動する。この塩化物イオンの拡散の速さを測定する試験方法として、長期間かかる「土木学会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）」および短時間で求めることができる「土木学会電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）」がある。

#### 2-1-1 浸せきによる塩化物イオン浸透性試験<sup>5)</sup>

コンクリート標準示方書（以下、示方書と称す）[施行編]（2002年制定）では、塩化物イオンのコンクリート中への侵入に伴う鉄筋腐食に関する照査を行うために、コンクリートの配合設計にあたって、予定配合コンクリートの見掛けの拡散係数の予測をすることが求められる。そして、この見掛けの拡散係数は、種々の実構造物や自然暴露供試体から得られた見掛けの拡散係数のデータを水セメント比の関係で回帰分析して得られた式から予測するのが一般的である。このようにして予測される見掛けの拡散係数は、その予測のベースが多数の実構造物であるため、予測結果の中には材料や種類の配合だけでなく環境要因、施行要因などがすべて包含され、ある程度実状に即した値となるが、一方で、値が大きくばらつくデータの中からの予測であることもまた、事実である。そこで、このような推定式から拡散係数を予測するのではなく、実構造物に使用されるコンクリートと同等のコンクリートの見掛けの拡散係数を試験によって直接測定し、その結果に基づき、実際に使用されるコンクリートの値を予測することができれば、より合理的かつ信頼性の高い照査が可能になると考えられる。「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）（JSCE-G 572-2003）」は以上のような経緯から制定されたものであり、示方書に基づいてコンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の照査を行う際に用いる見掛けの拡散係数を直接求める試験方法を規定するものとして、位置づけられている。

この方法は、塩化ナトリウム水溶液にコンクリート供試体を浸漬し、コンクリート内部の塩化物イオンの浸透状況から塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求める方法である。このような試験環境における塩化物イオンの浸透は、通常、その移動流束が時間経過に対して一定でない非定常状態で生じる。また、**図 2-2**に示すように、塩化物イオンはコンクリート細孔溶液中にあって、コンクリート組織中への塩としての固定化や電氣的な吸着をとめないながら濃度勾配を駆動力として移動する。すなわち、実際にコンクリート中を移動する塩化物イオンは、**図 2-1**に示す細孔溶液中の塩化物

イオンであるが、コンクリート中からこの塩化物イオンのみを抽出することはそれほど容易ではない。そこで、多くの場合、細孔溶液中の塩化物イオンのほか、固定や吸着されている塩素すべてを含めた、いわゆる全塩化物イオンを測定して、塩化物イオンの浸透状況を求めることがなされる。また、示方書においても、鋼材の腐食発生の指標としてコンクリート中の全塩化物イオンの量が定められていることから、この全塩化物イオンのコンクリート中における分布をもとに算出される塩化物イオンの拡散係数を、見掛けの拡散係数  $D_{ap}$  として定義することが実用的である。

見掛けの拡散係数  $D_{ap}$  を算出する際には (2.1) 式に示す Fick の第 2 法則を用いる。この拡散方程式を、表面における塩化物イオン濃度、および拡散係数を時間によらず一定として解いた場合の解は (2.2) 式で表され、この式を用いると、任意の時間と場所におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度を予測することができる。なお (2.2) 式の塩化物イオン濃度は、コンクリート中の液相における塩化物イオン濃度ではなく、コンクリート単位体積あたりの全塩化物イオン量を示す。したがって、(2.1) 式における塩化物イオンの拡散係数は固定された塩化物を含む見掛けの拡散係数  $D_{ap}$  と定義される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{ap} \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) \quad (2.1)$$

ここで、 $D_{ap}$  : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数、 $x$  : コンクリート表面からの距離、 $t$  : 時間である。

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \quad (2.2)$$

ここで、 $C(x, t)$  : 深さ  $x$  (cm)、時刻  $t$  (年) における全塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $C_0$  : 表面における塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $D_{ap}$  : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $\operatorname{erf}$  : 誤差関数である。ただし、

$$\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \quad (2.3)$$

(2.1) 式を用いて塩化物イオンの浸透予測を行うためには、コンクリート表面における塩化物イオン濃度  $C_0$  と見掛けの拡散係数  $D_{ap}$  を特定する必要がある。ある時間が経過したときのコンクリート中の全塩化物イオン濃度分布の測定値がある場合には、測定された全塩化物イオン濃度分布を (2.2) 式で回帰分析することで  $C_0$  と  $D_{ap}$  を求めることができる。(図 2-2)

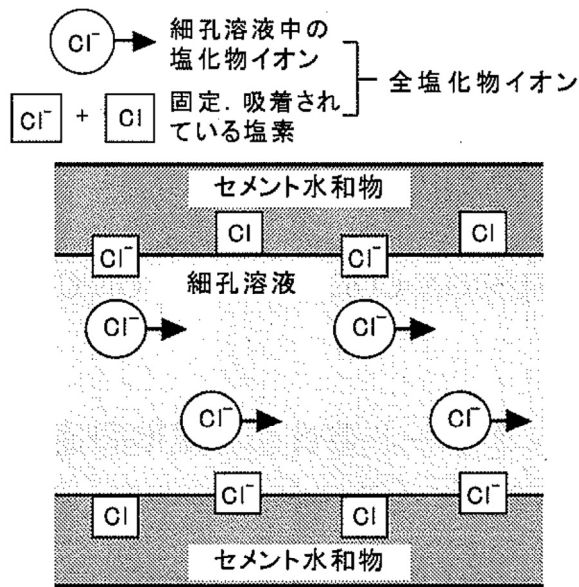


図 2-1 全塩化物イオンの構成

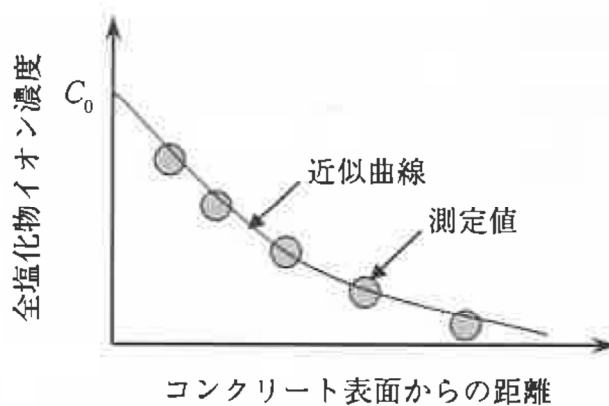


図 2-2 コンクリート中の全塩化物イオン濃度分布の回帰分析

### 2-1-2 電気泳動法による塩化物イオン浸透性試験<sup>6)</sup>

土木学会規準（案）で規定する電気泳動法は、電場に電圧を印加することによってイオンの移動が加速されることを利用して、短時間でコンクリート中の塩化物イオン拡散係数を測定する試験方法である。本方法は、鋼繊維など導電性の材料を含むコンクリート以外の一般のコンクリートに適用可能である。特に、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が大きく、JSCE-G 572-2003 に規定される浸せき方法による試験で塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めようとすると浸せき期間が著しく大きくなるよう

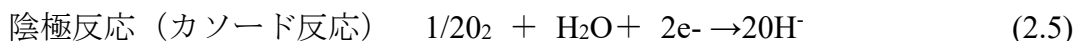
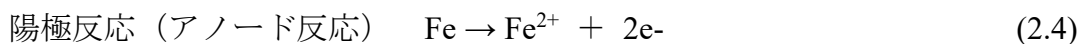
なコンクリートに対して、有効と記述されている。また、これによって、今後開発される高耐久性能の新材料に対しても、短期間に拡散係数を求めることができ、その性能評価がやりやすくなることも期待できるとしている。しかし、本試験で求められる拡散係数は、実効拡散係数と呼ばれるもので、厳密には示方書で規定され、コンクリート構造物の耐久性照査に用いる見掛けの拡散係数とは異なる。このため、土木学会規準（案）には附属書を添付し、実効拡散係数を見掛けの拡散係数へ変換する方法についても示している。

電気泳動法では、コンクリートの細孔溶液中を電場と仮定し、外部電圧を印加することによって、負電荷を有する塩化物イオンを電氣的に陽極へ連続的に移動させる。そして、陽極側に移動した塩化物イオン量の測定結果から、陽極側への塩化物イオンの移動が定常状態に達したとみなされた時の塩化物イオンの移動流束（単位時間・単位面積あたりのイオン移動量）を用いて、拡散係数を算出するものである。この際、定常状態では塩化物イオンの電気泳動に影響を及ぼす固定化などの要因は除外できるものと仮定している。定常状態の判断は、陽極側の塩化物イオン濃度の増加割合が、時間に対して一定になったときとしている。また、実効拡散係数（ $D_e$ ）の計算に必要な定常状態のイオンの移動流束は、「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）」に示した式から、簡便に計算することができる。

## 2-2 コンクリート中の鋼材腐食<sup>7)</sup>

コンクリートの強アルカリ環境下において、鉄筋はその表面が、厚さ3nm程度の水和酸化物（ $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ）から成る不動態皮膜に覆われており、腐食から保護されている。

コンクリートの中性化や塩害によって、鉄筋表面の不動態が破壊されると、鉄筋表面に局部電池が形成され、図2-3に示す、次のような反応が生じて、陽極領域から鉄イオン（ $\text{Fe}^{2+}$ ）が遊離し、腐食電流が流れ鉄筋の腐食が進行する。



更に、陽極領域で生じた鉄イオンは、陰極領域で生じた水酸化物イオン（ $4\text{OH}^-$ ）と反応し、

次のような反応を生じて、赤錆が生成される。



これらの鋼材腐食を調べる方法として、電気化学的な測定方法である、四電極法、分極抵抗法およびtafel外挿法があげられる。

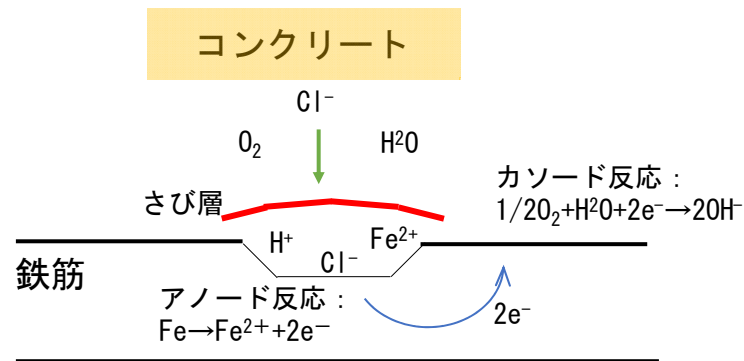


図 2-3 コンクリート中の鋼材腐食

### 2-2-1 四電極法<sup>8)</sup>

一般に、電気抵抗の大きい乾燥したコンクリート中では鉄筋の腐食は生じないが、抵抗の小さい湿潤なコンクリート中では腐食が生じやすい。四電極法では、かぶりコンクリートの電気抵抗を測定することによって、その腐食性および鉄筋の腐食進行のしやすさについて評価する電気的方法である。

図 2-4 に四電極法の測定方法を示す。

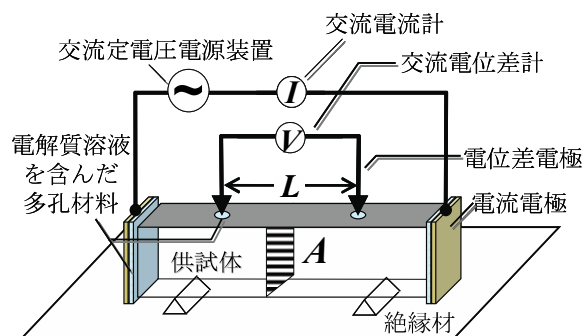


図 2-4 四電極法の測定方法

## 2-2-2分極抵抗法

分極抵抗とは、鉄筋表面上の反応抵抗、すなわち腐食反応に対する反応抵抗を意味している。抵抗値が大きいほど腐食反応が生じにくい。分極抵抗法とは、コンクリート表面に当てた外部電極から内部鉄筋に微弱な電流または電位差を負荷したときに生じる電位変化量または電流変化量から、腐食速度と反比例の関係にある分極抵抗を求め、内部鉄筋の腐食速度を推定しようとする電気化学法である。図2-5に分極抵抗の測定方法を示す。

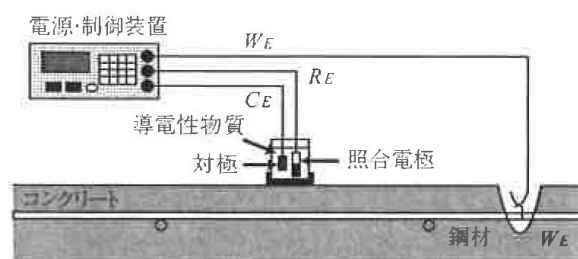


図 2-5 分極抵抗の測定方法

## 2-2-3 Tafel外挿法

過電圧が大きい領域において、腐食速度を評価するものがTafel外挿法である。アノードおよびカソードの平衡電位から、それぞれの反応に応じた仮想のアノード分極曲線およびカソード分極曲線が描かれる。このとき、両反応のバランスする点、すなわち、電位、電流密度が、それぞれ自然電位および腐食速度に相当するものである。ここで、これらの仮想の分極曲線は、実際に計測することはできないが、過電圧を与えたときの分極曲線は、これらの仮想の分極曲線と接するような形となる。すなわち、数100mVの過電圧を与えたときの、分極曲線の接線から、腐食速度を求めることができる。

分極曲線は、腐食速度の算定だけでなく、その形状から、現在生じている腐食反応の状態が分かる。すなわち、アノードおよびカソード分極曲線からは、アノード反応およびカソード反応の生じやすさを判断することができる。具体的には、アノード分極曲線によって、鉄筋が不動態状態にあるか、活性な状態にあるかが判断でき、カソード分極曲線からは、酸素の供給が十分であるか、不足しているかを判断することができる。

## 2-3 天然骨材<sup>9)</sup>

骨材はコンクリート容積の約7割を占める極めて重要な構成材料である。骨材供給

量は戦後の経済成長に合わせて急激に増加し、平成2年には9億トンを超えたが、その後は徐々に減少し、平成17年では約5.5億トンの供給量となっている。このうち、コンクリート用に使用されている量は約4億トンである。

コンクリート用骨材としては、昭和40年代は良質な川砂利、川砂の使用が主流であったが、急激な需要増と河川の河道維持のための採取規制等により供給が追いつかず、次第に陸砂利・山砂の割合が増加し、さらに砕石の割合が増加してきている。

近畿・中国・四国地方の細骨材はこれまで、瀬戸内海の家砂に大きく依存していた。しかし、瀬戸内海の生態系に与える影響や環境保全の観点から、瀬戸内海に面している自治体は家砂の採取を禁止した。この対応として、九州の家砂や海外（主に中国）からの輸入砂が増加したが、中国は平成19年4月から、砂の海外輸出を禁止した。このため現在では、砕砂の増産やマサの利用、さらにはスラグ骨材の利用等、様々な対応に迫られている。

## 2-4 高炉スラグ

### 2-4-1 鉄鋼スラグの種類と発生量

鉄鋼スラグは、鉄や鋼の製造工程で副産物として生成される。鉄鋼スラグは、鉄鉱石から銑鉄を製造する際に発生する高炉スラグと、銑鉄からリン、炭素などを除去し鋼を製造する際に発生する製鋼スラグに大別される。高炉の製鉄工程で1,000kgの銑鉄がつくり出されるとき、約300kgの高炉スラグが副産物として生成される。また、転炉や電気炉の製鋼工程で1,000kgの粗鋼がつくり出されるとき、約100kgの製鋼スラグが副産物として生成される。

高炉スラグは、銑鉄を製造する高炉で約1,500℃の高温で熔融された鉄鉱石の鉄以外の成分と、石灰石やコークスの中の灰の一部と一緒に分離回収されたものである。また、約1,500℃の熔融状態の高炉スラグは、冷却方法によって徐冷スラグと水砕スラグに大別される。製鋼スラグは、高炉で作り出される銑鉄を、ミルスケール、鉄鉱石および生石灰を副原料に、転炉で精錬する工程で生成する転炉系スラグと、合金鉄および生石灰を副原料に、スクラップを電気炉で精錬する際に生成する電気炉系スラグに大別される。

### 2-4-2 鉄鋼スラグの有効利用

鉄鋼スラグの国内での年間使用量は毎年約3,500万トンである。鉄鋼スラグの成分は、天然の岩石や土や砂とほぼ同等であり有害物質を含まず工業製品として安定している。鉄鋼スラグは特徴に応じてセメントの原料、路盤材、コンクリート骨材等の製品に加工され主に土木建築分野で広く利用されている。



鉄鋼スラグは天然の岩石や海砂・川砂の代替材として使用され天然資源の節約となる。また、セメントの原料として活用することにより、燃料の節約と二酸化炭素の発生が抑制されることから、鉄鋼スラグ製品は、環境への負荷を低減させるリサイクル資材としてますます脚光を浴びている。そして、さらなる可能性が模索され積極的な用途開発が促進されている。

### 2-4-3 高炉スラグの特徴

高炉から排出されたスラグは、約 1,500°Cの熔融状態にあり、その冷却方法によって徐冷スラグと水砕スラグに分類される。徐冷スラグは、熔融スラグを冷却ヤードに流し込み、自然放冷と適度の散水により徐冷処理することで、結晶質で岩石状のスラグとなる。水砕スラグは、熔融スラグに加圧水を噴射するなど急激に冷却処理することにより、ガラス質で粒状のスラグとなる。表 2-1<sup>10)</sup> に高炉スラグの化学成分分析結果の一例を示す。

表 2-1 高炉スラグの化学成分例 (%)

単位：%

| 化学成分                           | 高炉スラグ | (参 考)  |          |       |
|--------------------------------|-------|--------|----------|-------|
|                                |       | 普通セメント | 高炉セメントB種 | 安 山 岩 |
| SiO <sub>2</sub>               | 33.8  | 21.1   | 25.3     | 59.6  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.4  | 5.2    | 8.5      | 17.3  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.4   | 2.8    | 1.9      | 3.1   |
| CaO                            | 41.7  | 64.2   | 55.8     | 5.8   |
| MgO                            | 7.4   | 1.5    | 3.0      | 2.8   |
| SO <sub>3</sub>                | 0.8 * | 2.0    | 2.0      | -     |

\* は硫化物 S のみの数値

#### a) 高炉徐冷スラグ

高炉徐冷スラグの外観は、表面は粗面、気孔があり、角張っている。粒子密度は天然碎石よりもやや小さい（絶乾密度：2.2~2.6g/cm<sup>3</sup>）。これは凝固の過程で発生するガスが逃げ切れずスラグ中に残ってしまうためであり、空隙を多く含み吸水率はやや高い。高炉徐冷スラグは熔融状態のスラグを冷却ヤードなどに放流する際の層厚や散水などによる冷却方法によって密度や吸水率などの物理特性が変化するため、一定の範囲で製鉄所間、製造ロット間のばらつきが存在する。


高炉徐冷スラグの化学組成は一般に、CaO および SiO<sub>2</sub> の 2 成分を主成分としている。特に自然界の土や石の成分に比べ石灰の含有が多く、その他には Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO な

どが含まれる。

高炉徐冷スラグは、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 等をほとんど含まないため、コンクリート構造物のひび割れや崩壊の原因となるアルカリ骨材反応を抑制する。 $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ を含んでいるため、珪酸石灰肥料（ケイカル）となる。スラグが水と接触すると微量の  $\text{CaO}$  や  $\text{SiO}_2$  が溶け出し、スラグ表面に緻密な水和物を形成する（水硬性）。さらにアルカリ性の雰囲気のもとでは、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  も加わった水和物を形成し、スラグ粒子をつなぐ結合材となって固結する（潜在水硬性）。以上のような性質を持っていることから、道路用路盤材、コンクリート用粗骨材、セメントクリンカー原料（粘土代替）、稲作用肥料などの利用がなされている。

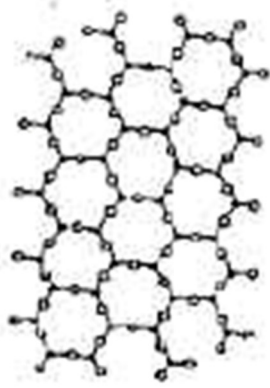
## b) 高炉水砕スラグ

高炉水砕スラグの粒子はガラス質であり、形状も凹凸が激しく角張った形状をしている。また、密度等の物性はスラグ温度、冷却水量、水圧をコントロールすることにより、軟質で軽いものと、硬質で重いものを造り分けることができる。硬質のものはコンクリート細骨材として用いられるのが一般的であり、土木用には軟質のものが用いられる。

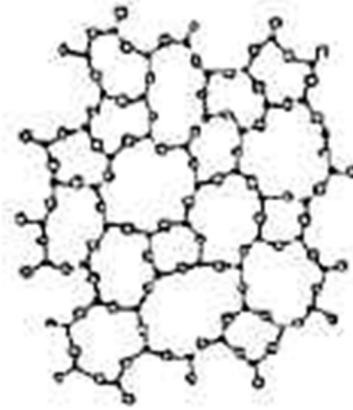
高炉水砕スラグはガラス質であるため、活性が強く、アルカリ性水溶液のもとでは水和物を生成して硬化する性質がある。これを潜在水硬性といい、高炉水砕スラグの大きな特徴となっている。高炉水砕スラグでは、熔融スラグが急激に冷却され、結晶を生成する時間的余裕がないため、 2-6<sup>11)</sup> に示すようなガラス構造となっている。ここにアルカリ刺激が存在すると、網目構造が切断され、網目構造中に包含されていた  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  などにより、ポルトランドセメントと同様の水和反応が起こり、 $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  系および  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  系の水和物が生じて固結する。これが潜在水硬性である。高炉水砕スラグ単体で固結するためには、次のような条件が揃うことが必要とされている。

- ・ 高炉水砕スラグ層に適度の水分が存在する。
- ・ 高炉水砕スラグ層がある程度の密度に保たれている。
- ・ 高炉水砕スラグ層の間隙水がアルカリ性（pH11程度）に保たれている。

一般に粒子がガラス質の場合では、塩基度（ $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ）が大きいほど水硬性が高い。高炉水砕スラグは他に、塩化物を含まない、非アルカリ骨材反応などの性質がある。これらの性質より、高炉セメント原料、コンクリート用細骨材、珪酸石灰肥料などとして利用されている。



(a) 結晶状態



(b) ガラス状態

図 2-6 高炉水砕スラグの網目構造

### 第3章 高炉スラグを用いたコンクリートの塩水浸漬試験

#### 3-1 概要

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。

#### 3-2 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、砂岩砕砂(密度: 2.64g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 1.78%)および高炉スラグ細骨材(密度: 2.72g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 0.58%)を用いた。粗骨材には、硬質砂岩碎石(最大寸法 20mm, 密度: 2.74g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 0.49%)を用いた。練り混ぜ水には、水道水を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた。コンクリートおよびモルタルの水結合材比は、50%とし、コンクリートの単位水量は 175 kg/m<sup>3</sup> で一定とした。コンクリートの配合を表 3-1, モルタルの配合を表 3-2 に示す。

表 3-1 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 3-2 コンクリートの配合

| W/B<br>(%) | GGBF/B<br>(%) | BFS/S<br>(%) | 空気量<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |     |     | 高性能<br>減水剤<br>(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

### 3-3 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。コンクリートの練混ぜには、容量が100リットルの強制二軸ミキサーを使用した。練混ぜは、粗骨材、細骨材および結合材を投入後、30秒の空練りを行い、水および混和剤を加えて120秒間の本練りを行った。モルタルの練混ぜには、ホバート型モルタルミキサーを使用した。供試体の作製は、100×150mmの円柱供試体を用いた。モルタルは、100×200mm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、100×200mm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、2012年制定土木学会コンクリート標準示方書[施行編]<sup>12)</sup>に示されている方法に従い行った。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°Cの速さで65°C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100×150mm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。

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）」に準拠し、見かけの拡散係数を求めた。塩化物イオンの見かけの拡散係数を次式に示す。

$$C(x,t) - C_i = C_{a0} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \quad (3.1)$$

ここに、 $C(x, t)$ は、浸漬面からの距離が  $x(\text{mm})$ で、浸漬期間が  $t(\text{年})$ における全塩化物イオン量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )で、 $C_i$ は、初期に含有される全塩化物イオン量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )で、 $C_{s0}$ 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( $\text{kg}/\text{m}^3$ )で、 $D_{ap}$ は、浸せき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。

### 3-4 実験結果および考察

#### 3-4-1 モルタルの塩化物イオン浸透性

図 3-1 は、結合材に普通ポルトランドセメントおよび細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルの全塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は 50%としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンは供試体表面から 30mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 100mm 程度まで塩化物イオンが検出されており、浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間が 3 年で  $3.52\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $2.43\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $2.65\text{cm}^2/\text{年}$  となり、1 年と 3 年では少し小さくなっている。

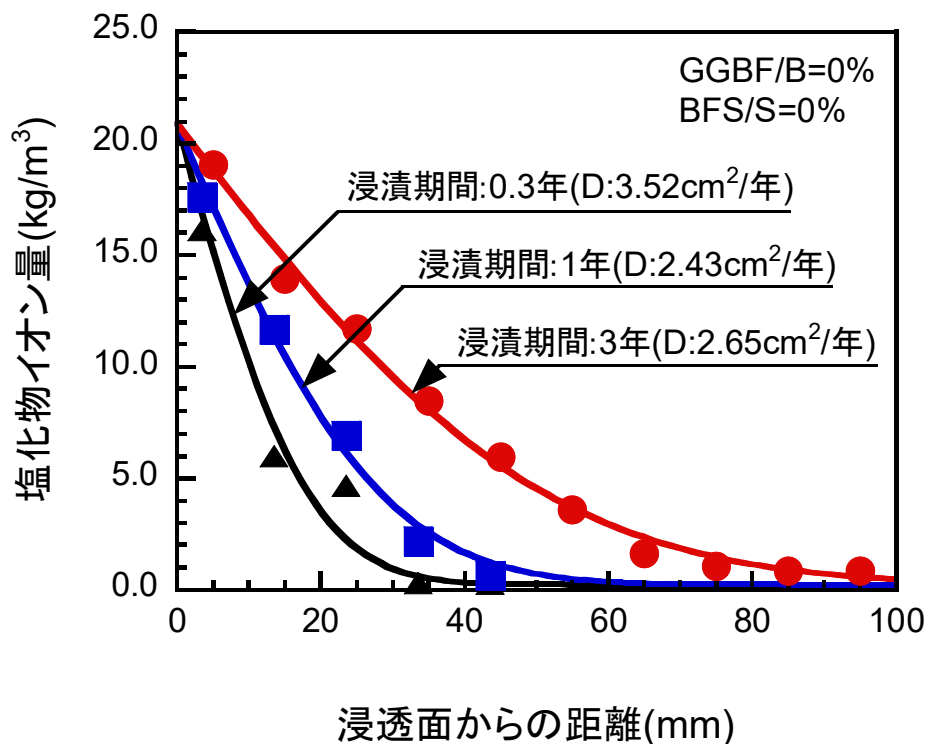


図 3-1 普通ポルトランドセメントと砂岩砕砂を用いた  
モルタルの塩化物イオン量分布

図 3-2 は、結合材に高炉スラグ微粉末を 30%および細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルの全塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は 50%としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 15mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 35mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間が 0.3 年で  $0.68\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $0.60\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $0.55\text{cm}^2/\text{年}$  となり、同程度である。浸漬期間 3 年で、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 1/5 程度になっている。

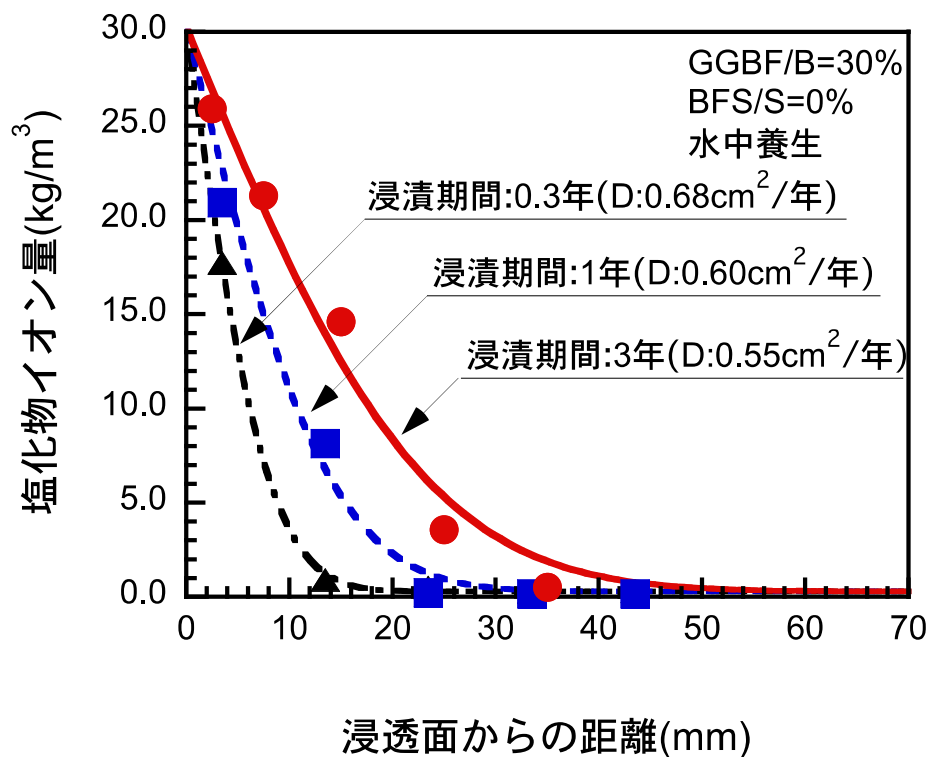


図 3-2 高炉スラグ微粉末と砂岩砕砂を用いた  
モルタルの塩化物イオン量分布

図 3-3 は、結合材に高炉スラグ微粉末を 60%および細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルの全塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は 50%としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 10mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、深さ 30mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが

分かる。拡散係数は、浸漬期間が 0.3 年で  $0.54\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $0.24\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $0.26\text{cm}^2/\text{年}$  であり、浸漬期間 1 年および 3 年のものは同程度であることが分かる。浸漬期間 3 年で、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 1 / 10 程度になっている。

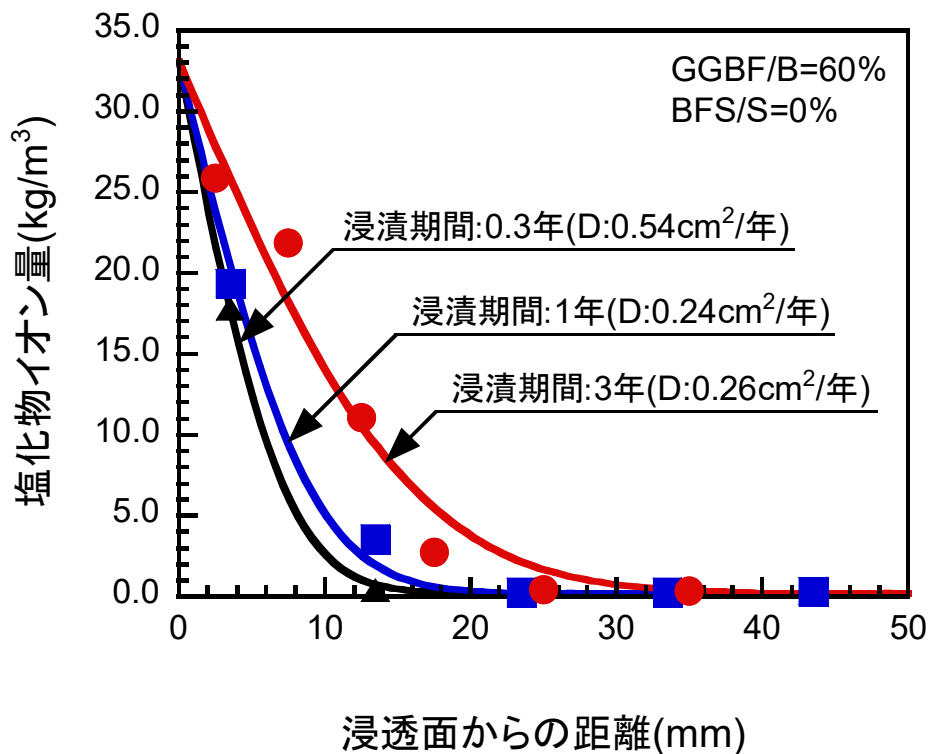


図 3-3 高炉スラグ微粉末と砂岩砕砂を用いた  
モルタルの塩化物イオン量分布

図 3-4 は、結合材に普通ポルトランドセメントおよび細骨材に高炉スラグ細骨材を 33.3% 用いたモルタルの全塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は 50% としている。図中の ▲, ■ および ● は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年, 1 年 および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 20mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 50mm 程度まで塩化物イオンが検出されており、浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間が 0.3 年で  $1.39\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $1.48\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $0.92\text{cm}^2/\text{年}$  になっており、3 年で小さくなっている。浸漬期間 3 年で、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 1 / 3 程度になっている。



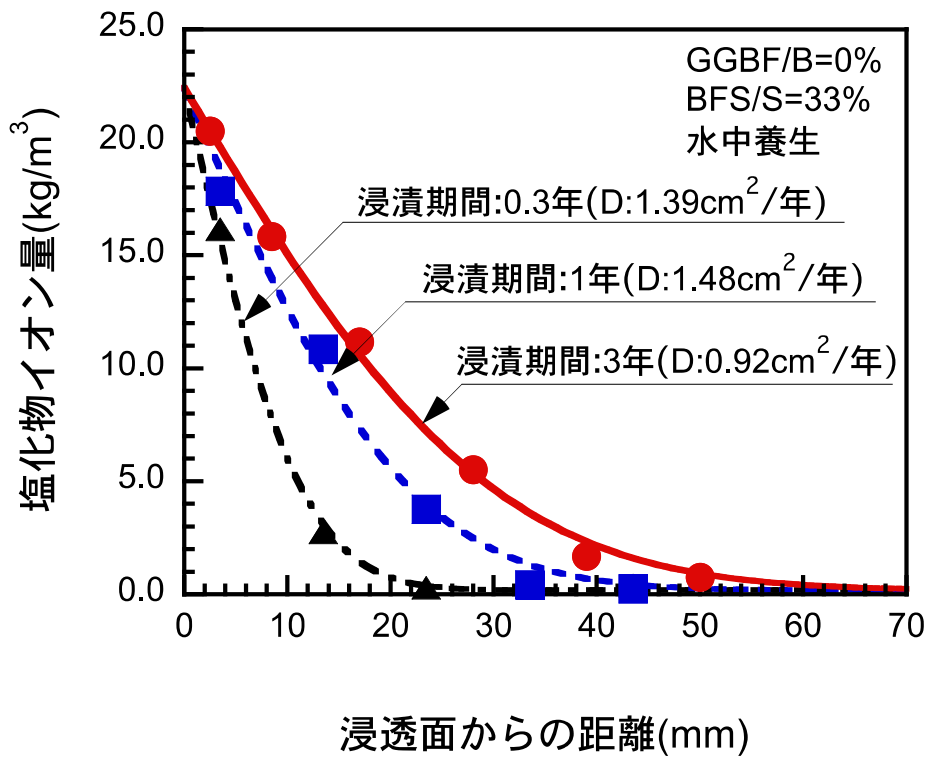


図 3-4 普通ポルトランドセメントと高炉スラグ細骨材を用いた  
モルタルの塩化物イオン量分布

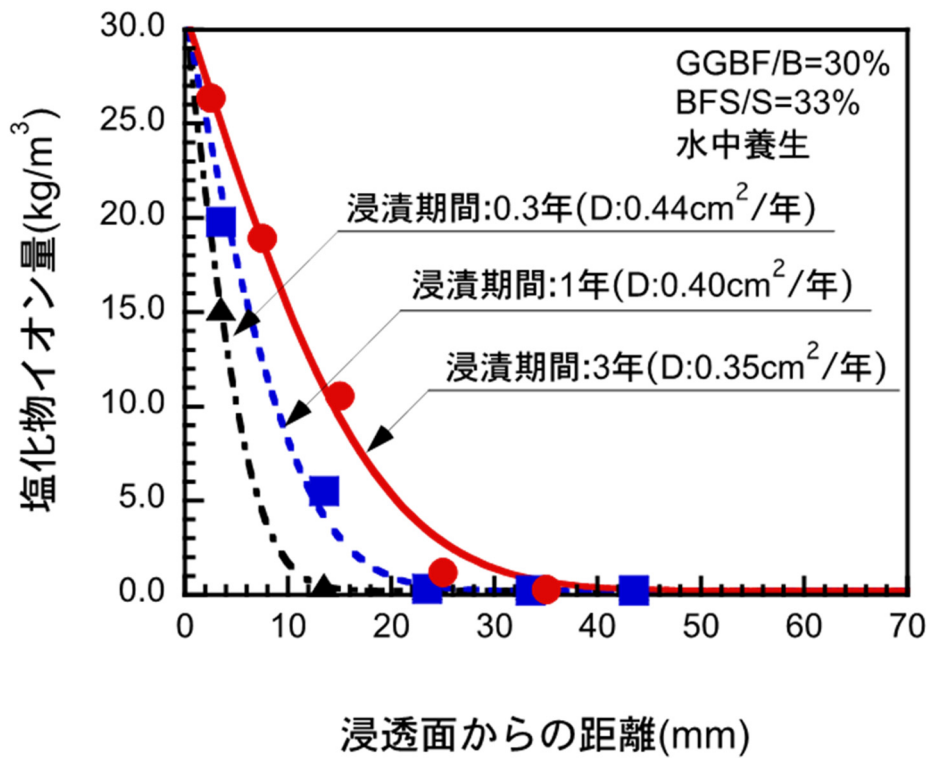


図 3-5 高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いた  
モルタルの塩化物イオン量分布

図 3-5 は、結合材に高炉スラグ微粉末を 30%および細骨材に高炉スラグ細骨材を 33.3%用いたモルタルの全塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は 50%としている。図中の▲, ■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年, 1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 10mm 程度までで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 30mm 程度までで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、0.3 年で  $0.44\text{cm}^2/\text{年}$ , 1 年で  $0.40\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $0.35\text{cm}^2/\text{年}$  となり、同程度である。浸漬期間 3 年で、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 1/7 程度になっている。

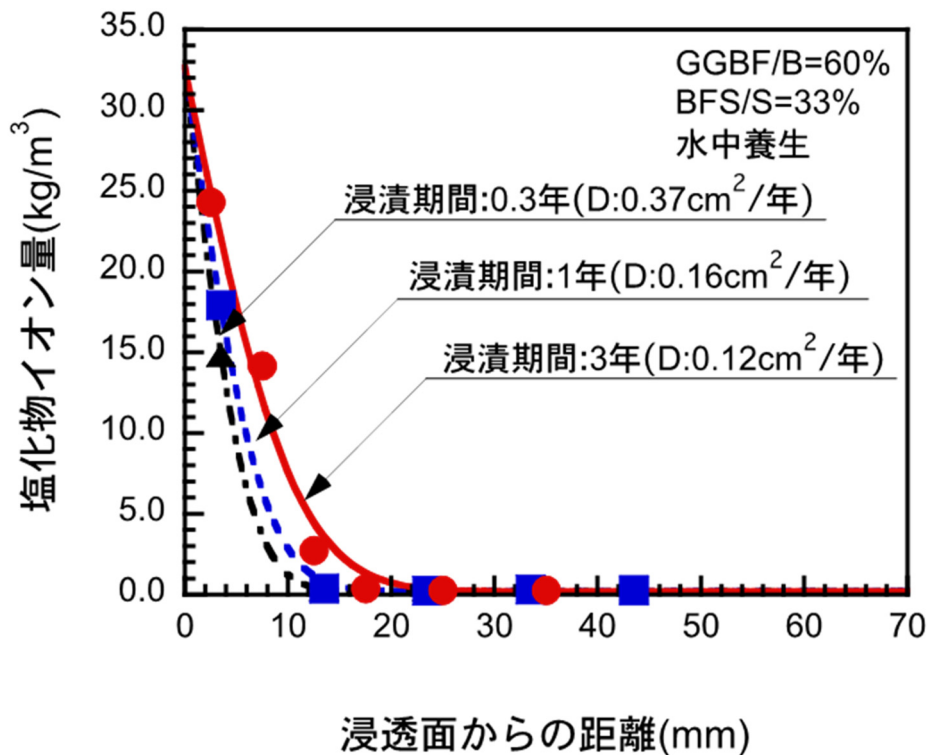


図 3-6 高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いた  
モルタルの塩化物イオン量分布

図 3-6 は、結合材に高炉スラグ微粉末を 60%および細骨材に高炉スラグ細骨材を 33.3%用いたモルタルの全塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は 50%としている。図中の▲, ■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年, 1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 10mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 20mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位

置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間が 0.3 年で  $0.37\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $0.16\text{cm}^2/\text{年}$ 、および 3 年で  $0.12\text{cm}^2/\text{年}$  となっており、浸漬期間 1 年および 3 年で、少し小さくなり、同程度である。浸漬期間 3 年で、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  $1/20$  程度になっている。

図 3-7 は、結合材に普通ポルトランドセメントおよび細骨材に高炉スラグ細骨材を 66.7% 用いたモルタルの全塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は 50% としている。図中の ▲、■ および ● は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 15mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 40mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置は深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間が 0.3 年で  $0.68\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $1.03\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $0.58\text{cm}^2/\text{年}$  となっている。浸漬期間 3 年で、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  $1/5$  程度になっている。

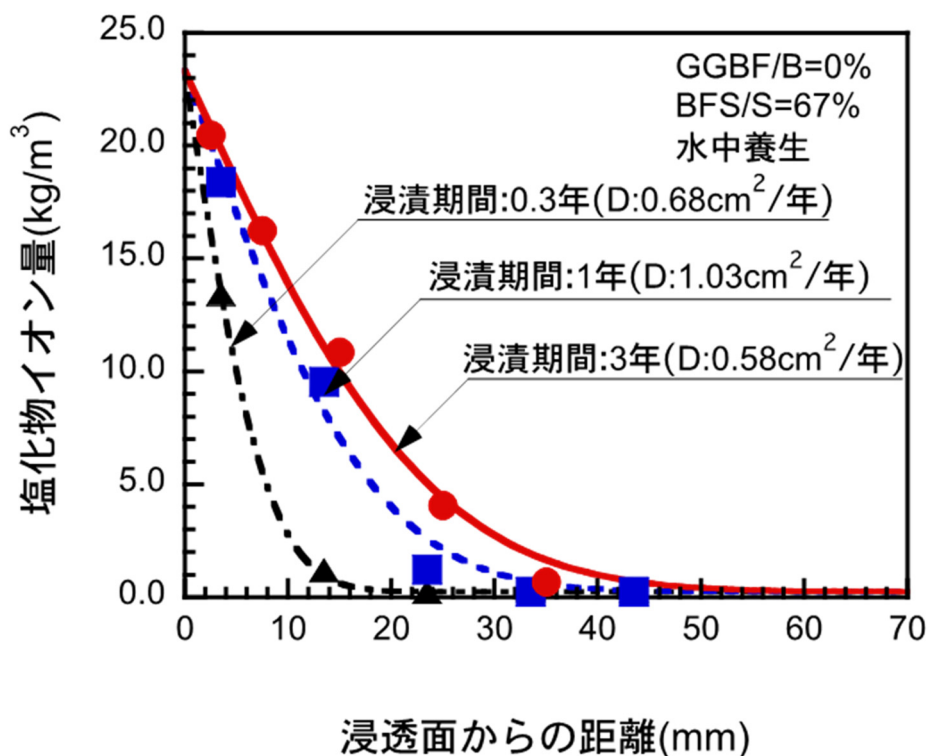


図 3-7 普通ポルトランドセメントと高炉スラグ細骨材を用いた  
モルタルの塩化物イオン量分布

図 3-8 は、結合材に高炉スラグ微粉末を 30% および細骨材に高炉スラグ細骨材を

66.7%用いたモルタルの全塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は50%としている。図中の▲, ■および●は, それぞれ塩水浸漬期間が0.3年, 1年および3年の結果を示している。浸漬期間0.3年で塩化物イオンが供試体表面から10mm程度まで検出されている。また, 浸漬期間3年では, 供試体表面から30mm程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は, 浸漬期間0.3年で $0.41\text{cm}^2/\text{年}$ , 1年で $0.23\text{cm}^2/\text{年}$ および3年で $0.25\text{cm}^2/\text{年}$ となり, 1年および3年で少し小さくなっている。浸漬期間3年で, 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1/10程度になっている。

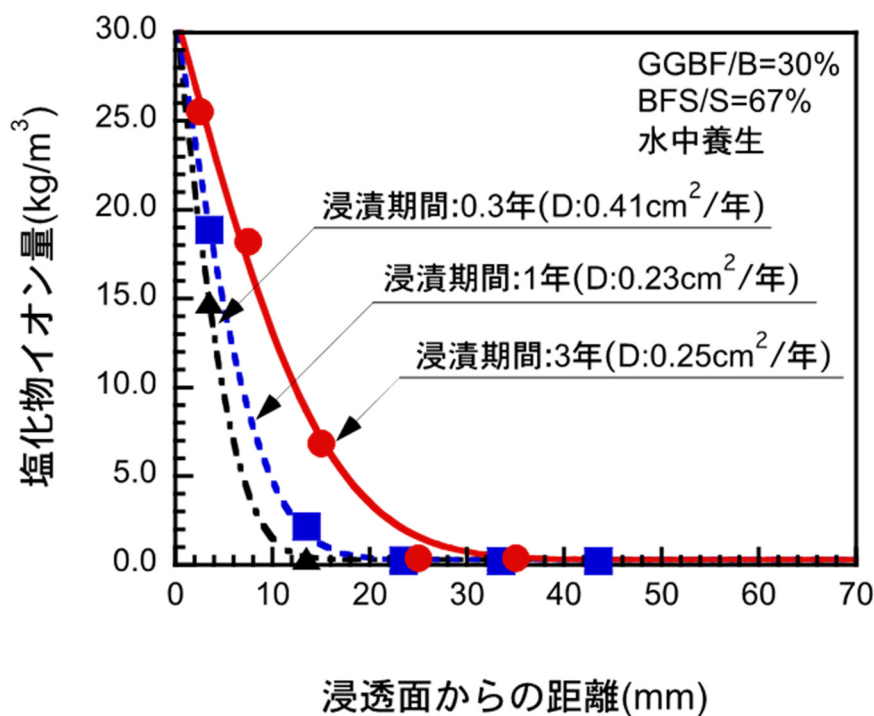


図 3-8 高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いた  
モルタルの塩化物イオン量分布

図 3-9 は, 結合材に高炉スラグ微粉末を 60%および細骨材に高炉スラグ細骨材を66.7%用いたモルタルの全塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は50%としている。図中の▲, ■および●は, それぞれ塩水浸漬期間が0.3年, 1年および3年の結果を示している。浸漬期間0.3年で塩化物イオンが供試体表面から5mm程度まで検出されている。また, 浸漬期間3年では, 供試体表面から20mm程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は, 浸漬期間が0.3年で $0.21\text{cm}^2/\text{年}$ , 1年で $0.18\text{cm}^2/\text{年}$ および3年で $0.11\text{cm}^2/\text{年}$ となり, 同程度である。浸漬期間3年で, 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1/25程度になっている。

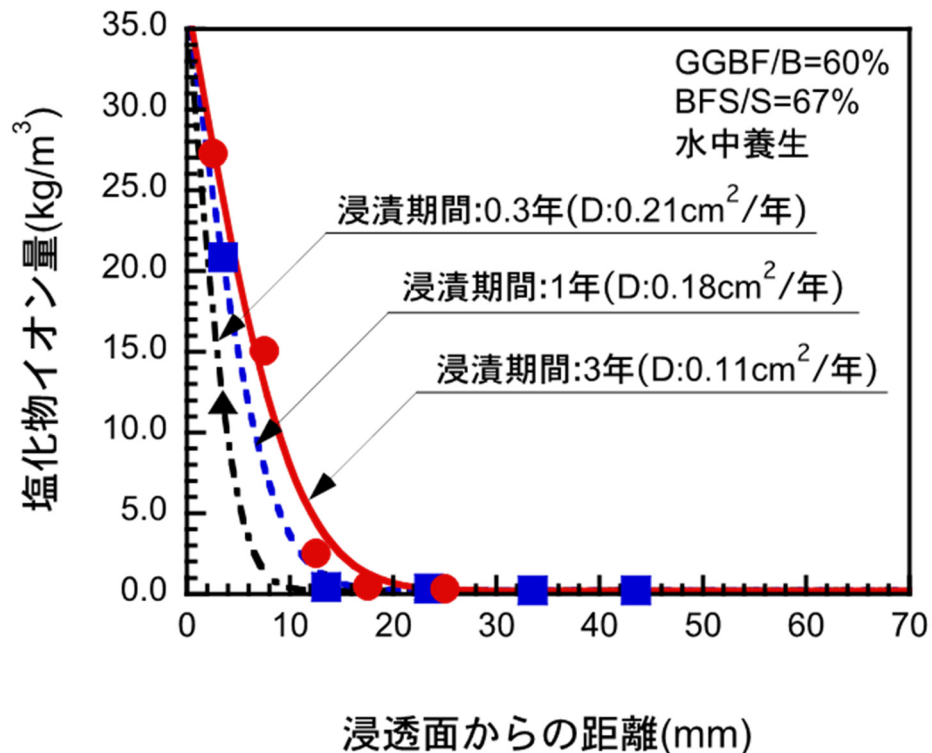


図 3-9 高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いた  
モルタルの塩化物イオン量分布

図 3-10 は、結合材に普通ポルトランドセメントおよび細骨材に高炉スラグ細骨材を 100%用いたモルタルの全塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は 50%としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 10mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 30mm 程度までの位置で塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間が 0.30 年で  $0.48\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $0.50\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $0.32\text{cm}^2/\text{年}$  となり同程度である。浸漬期間 3 年で、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 1/8 程度になっている。

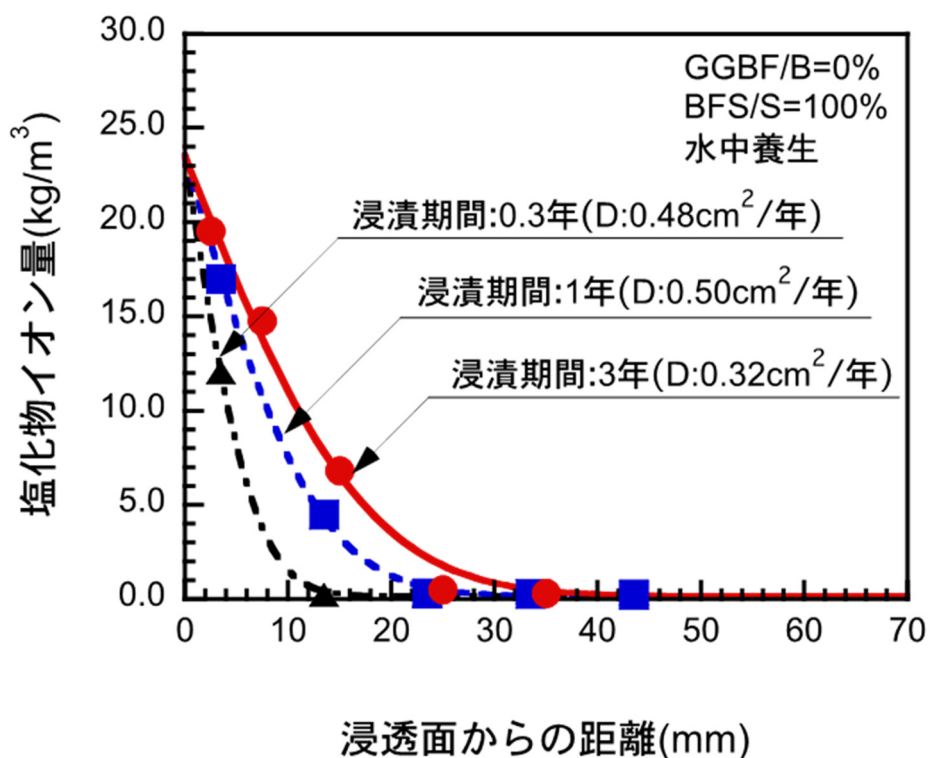


図 3-10 普通ポルトランドセメントと高炉スラグ細骨材を用いた  
モルタルの塩化物イオン量分布

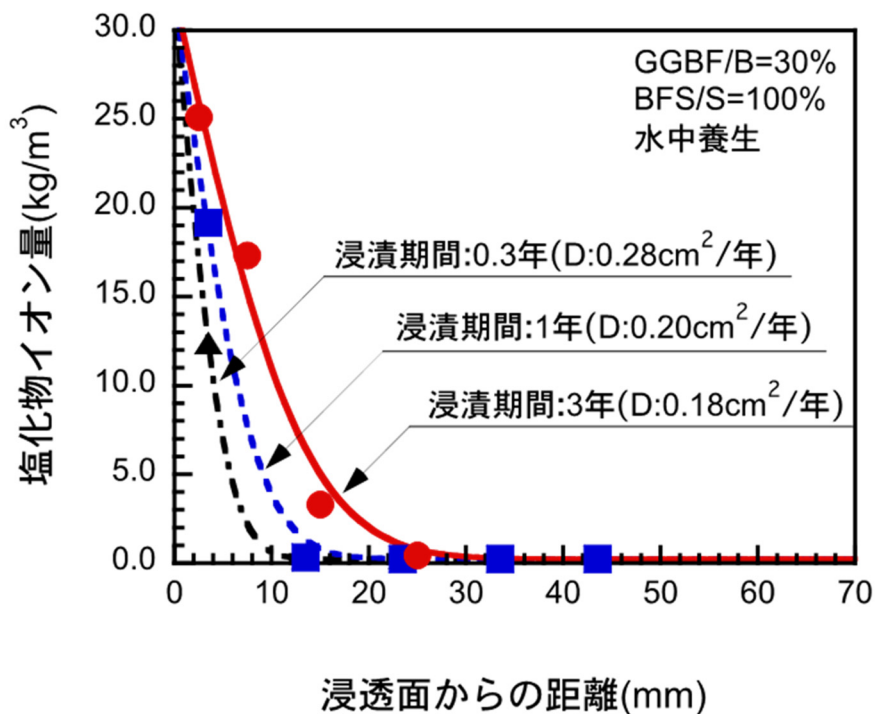


図 3-11 高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いた  
モルタルの塩化物イオン量分布



図 3-11 は、結合材に高炉スラグ微粉末を 30%および細骨材に高炉スラグ細骨材を 100%用いたモルタルの全塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は 50%としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 10mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 20mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間が 0.3 年で  $0.28\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $0.20\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $0.18\text{cm}^2/\text{年}$  となり、同程度である。浸漬期間 3 年で、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 1 / 15 程度になっている。

図 3-12 は、結合材に高炉スラグ微粉末を 60%および細骨材に高炉スラグ細骨材を 100%用いたモルタルの全塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は 50%としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。塩水浸漬期間 0.3 年、1 年および 3 年のものは、塩化物イオンが供試体表面から 10mm 程度までも検出されていない。拡散係数は、浸漬期間が 0.3 年で  $0.50\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $0.14\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $0.05\text{cm}^2/\text{年}$  となり、小さくなっている。浸漬期間 3 年で、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 1 / 50 程度にもなり、最も小さい。

図 3-13 は、配合別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。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ことが分かる。

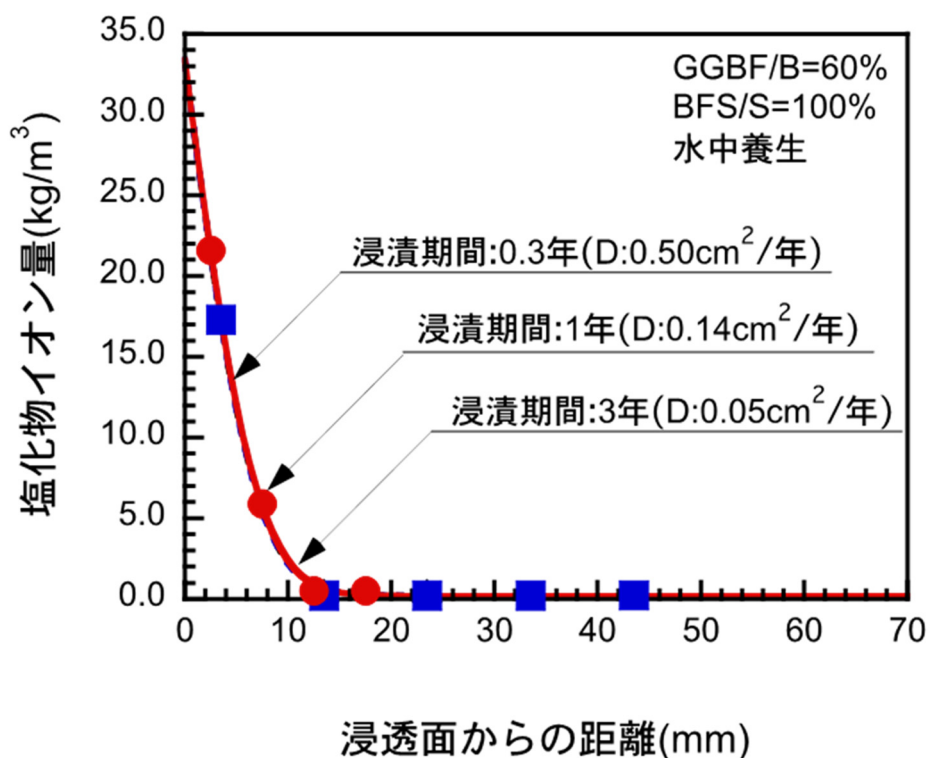


図 3-12 高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いた  
モルタルの塩化物イオン量分布

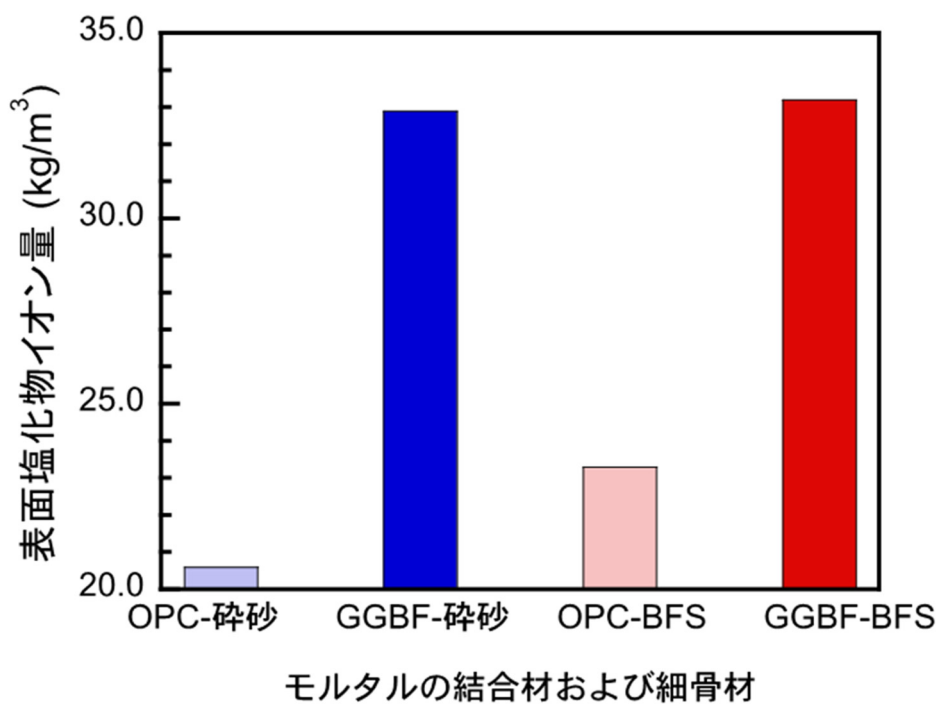


図 3-13 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がモルタルの  
表面塩化物イオン量に与える影響



図 3-14 は、質量パーセント濃度で 10% の塩化ナトリウム水溶液に 3 年間浸漬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。図中の■, ▲および●は、それぞれ、結合材に高炉スラグ微粉末を質量比で 0%, 30% および 60% 用いた結果である。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ても表面塩化物イオン量に大きな差はない。しかし、結合材に用いる高炉スラグ微粉末量が多くなるにつれて表面塩化物イオン量が多くなり、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、結合材に微粉末として用いた方が大きいことが分かる。

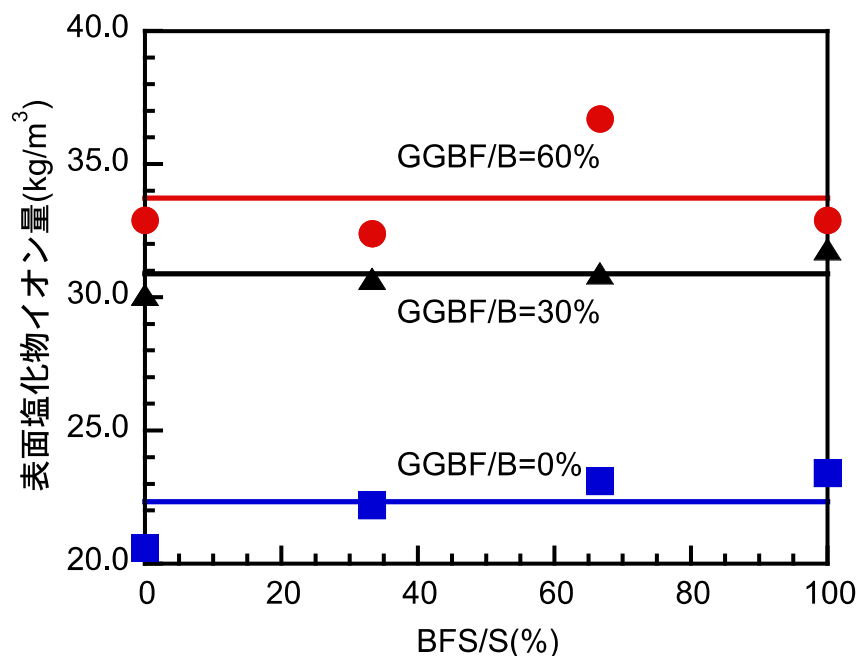


図 3-14 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がモルタルの表面塩化物イオン量に与える影響

図 3-15 は、配合別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。図中の●は高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材、○は普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ細骨材、■は高炉スラグ微粉末および砂岩砕砂、□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、細骨材に砕砂を用いたもの、結合材に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ものおよび結合材に高炉スラグ微粉末を用い、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および細骨材の両方を用いたものは、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。

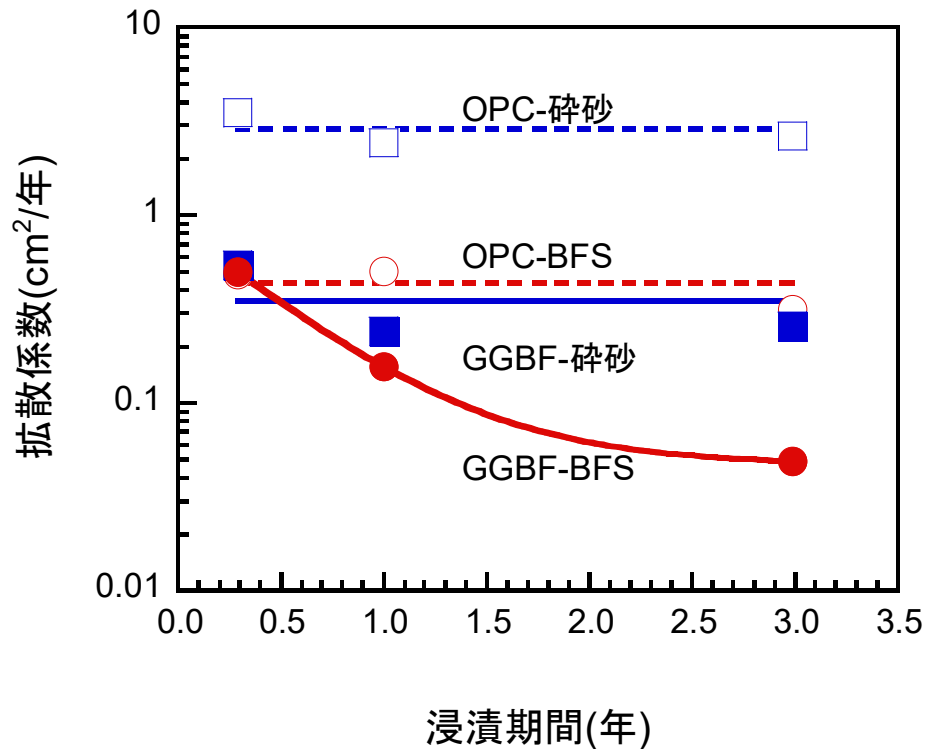


図 3-15 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が  
モルタルの拡散係数の経時変化に与える影響

図 3-16 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。図中の■、▲および●は、それぞれ、結合材に高炉スラグ微粉末を質量比で 0%、30%および 60%用いた結果である。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。細骨材に 100%高炉スラグ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の見かけの拡散係数を得ることが分かる。

図 3-17 は、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルにおいて、結合材への高炉スラグ微粉末の置換率が、塩化物イオン浸透深さに及ぼす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高いほど、塩化物イオンの浸透深さは小さくなることが分かる。硝酸銀噴霧の様子を写真 3-1～写真 3-3 に示す。

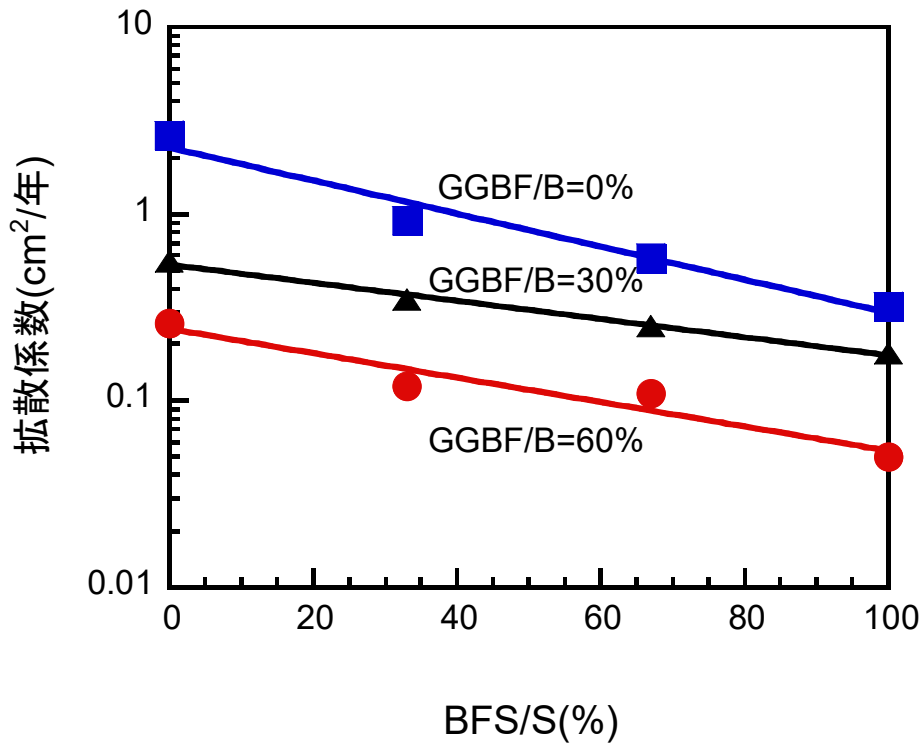


図 3-16 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が  
モルタルの拡散係数に与える影響

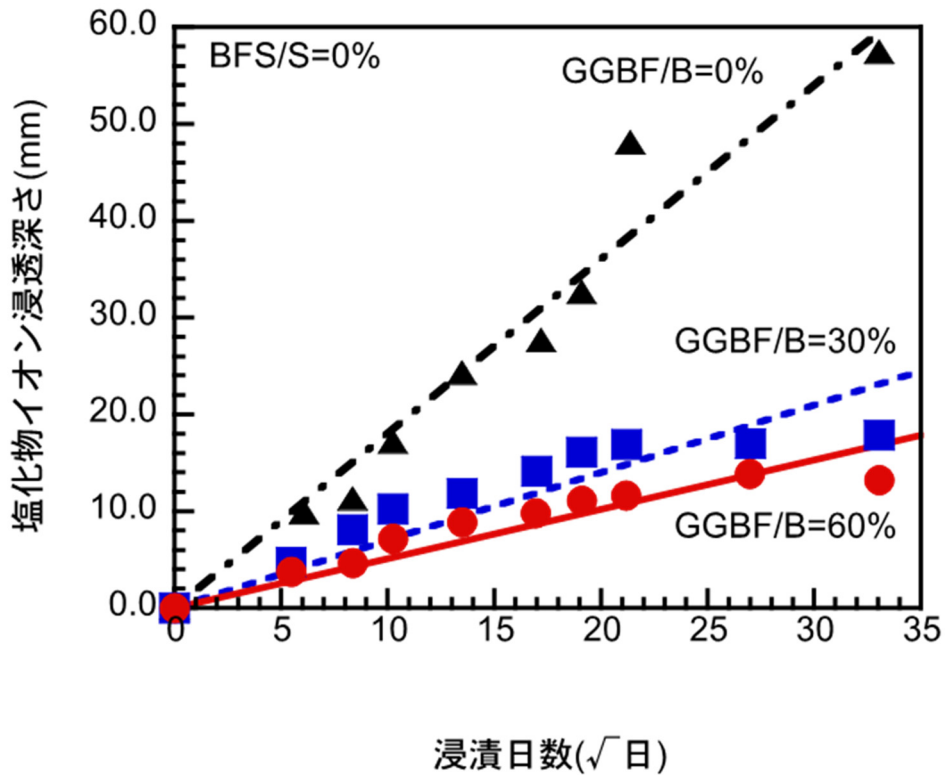


図 3-17 高炉スラグ微粉末がモルタルの塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響  
(BFS/S=0%の場合)

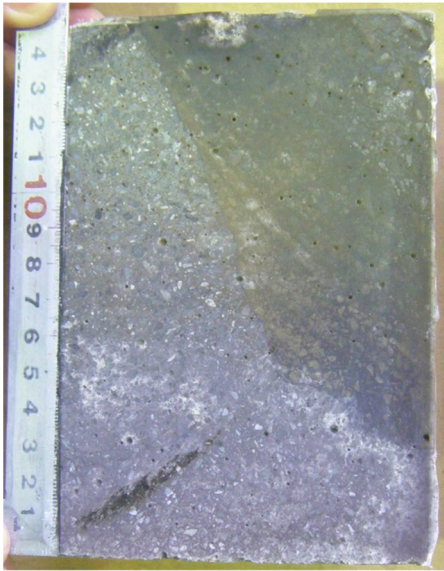


写真 3-1 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=0%, BFS/S=0%)

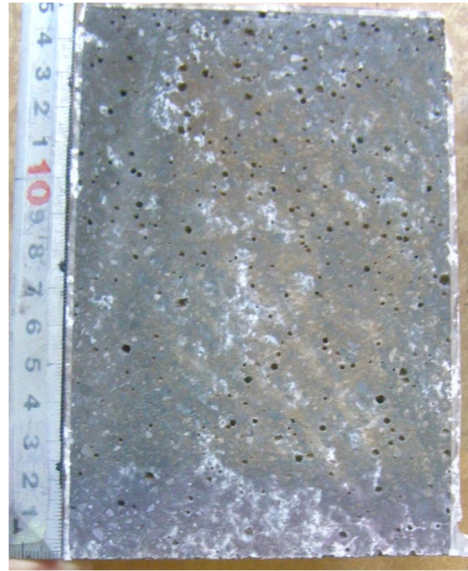


写真 3-2 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=30%, BFS/S=0%)



写真 3-3 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=60%, BFS/S=0%)

図 3-18 は、細骨材に質量比で 33.3%高炉スラグ細骨材を用いたモルタルにおいて、結合材への高炉スラグ微粉末の置換率が、塩化物イオン浸透深さに及ぼす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高いほど、塩化物イオンの浸透深さは小さくなることが分かる。硝酸銀噴霧の様子を写真 3-4～写真 3-6 に示す。



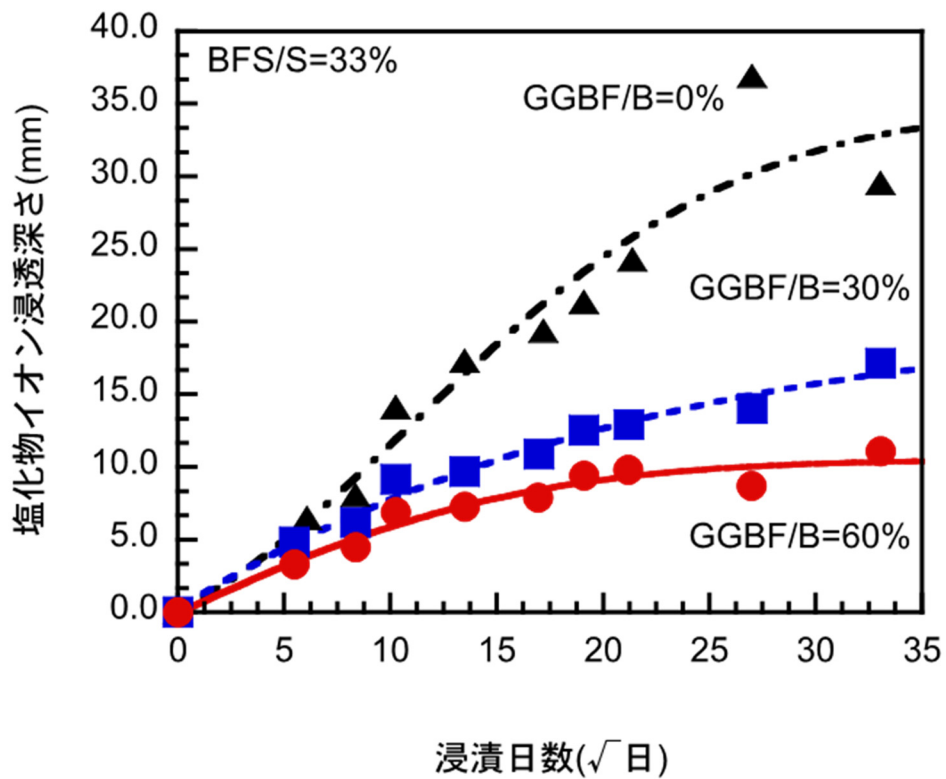


図 3-18 高炉スラグ微粉末がモルタルの塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響 (BFS/S=33%の場合)

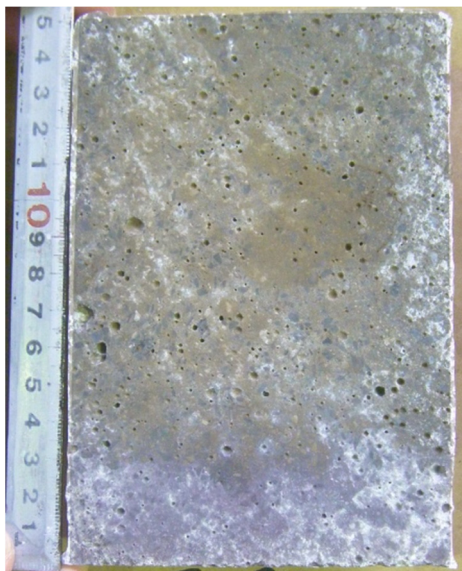


写真 3-4 硝酸銀噴霧の様子 (GGBF/B=0%, BFS/S=33%)

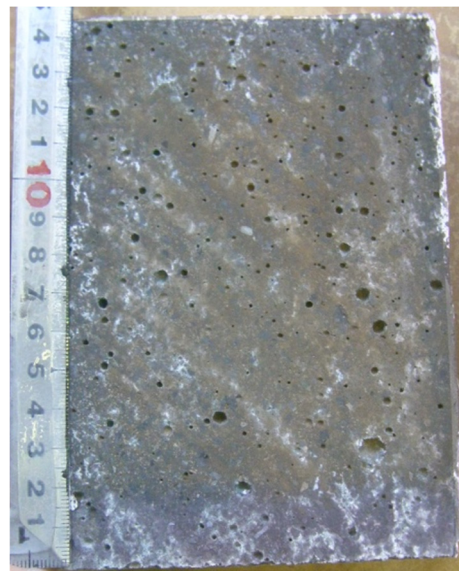


写真 3-5 硝酸銀噴霧の様子 (GGBF/B=30%, BFS/S=33%)



写真 3-6 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=60%, BFS/S=33%)

図 3-19 は、細骨材に質量比で 66.7%高炉スラグ細骨材を用いたモルタルにおいて、結合材への高炉スラグ微粉末の置換率が、塩化物イオン浸透深さに及ぼす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高いほど、塩化物イオンの浸透深さは小さくなることが分かる。硝酸銀噴霧の様子を写真 3-7～写真 3-9 に示す。

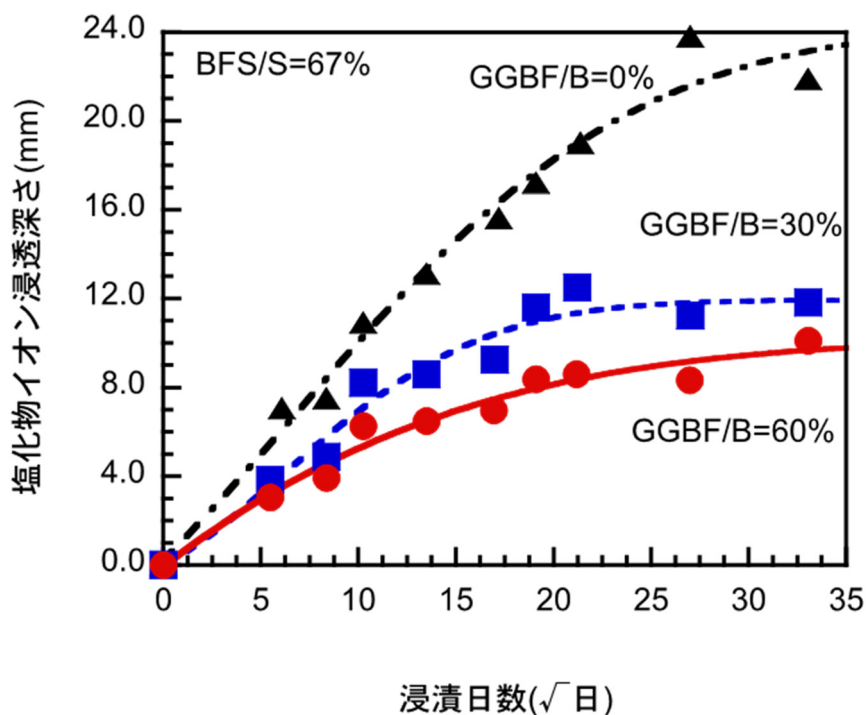


図 3-19 高炉スラグ微粉末がモルタルの塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響  
(BFS/S=67%の場合)



写真 3-7 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=0%, BFS/S=67%)

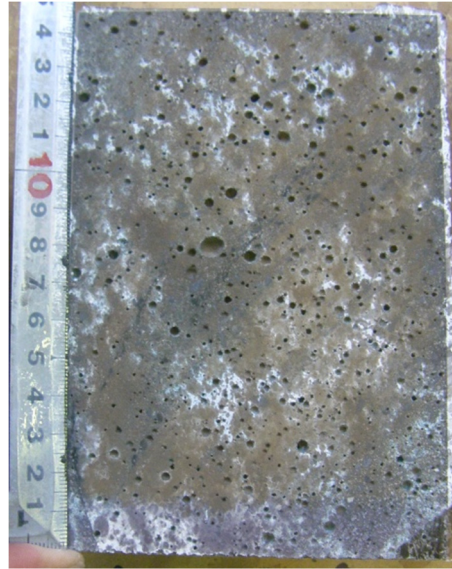


写真 3-8 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=30%, BFS/S=67%)

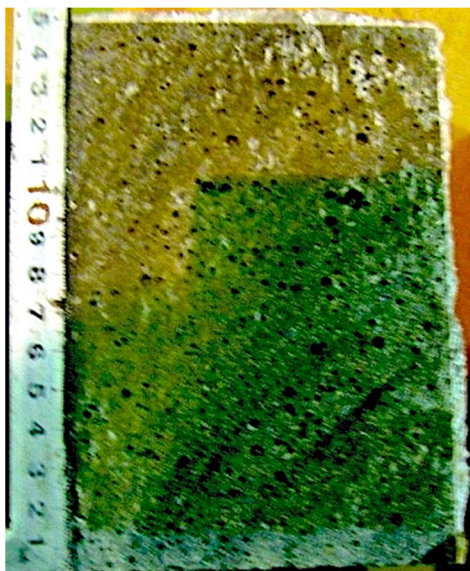


写真 3-9 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=60%, BFS/S=67%)

図 3-20 は、細骨材に質量比で 100%高炉スラグ細骨材を用いたモルタルにおいて、結合材への高炉スラグ微粉末の置換率が、塩化物イオン浸透深さに及ぼす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高いほど、塩化物イオンの浸透深さは小さくなることが分かる。硝酸銀噴霧の様子を写真 3-10～写真 3-12 に示す。

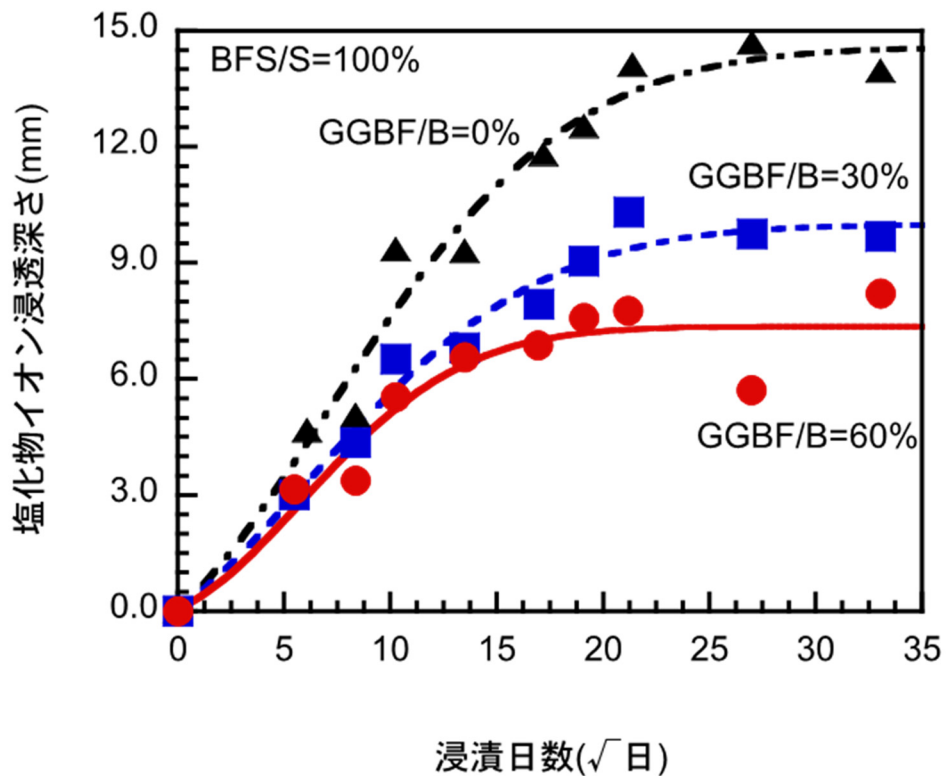


図 3-20 高炉スラグ微粉末がモルタルの塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響 (BFS/S=100%の場合)



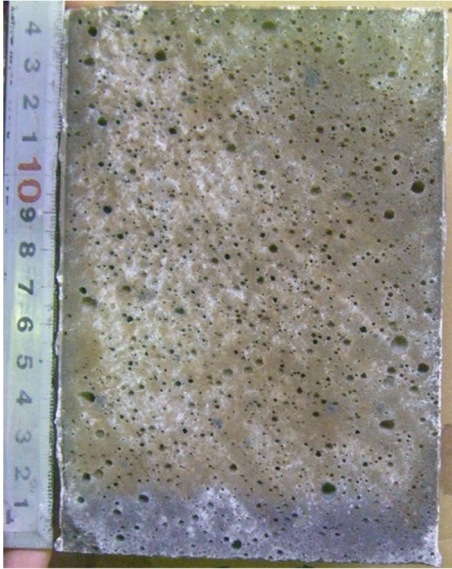


写真 3-10 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=0%, BFS/S=100%)

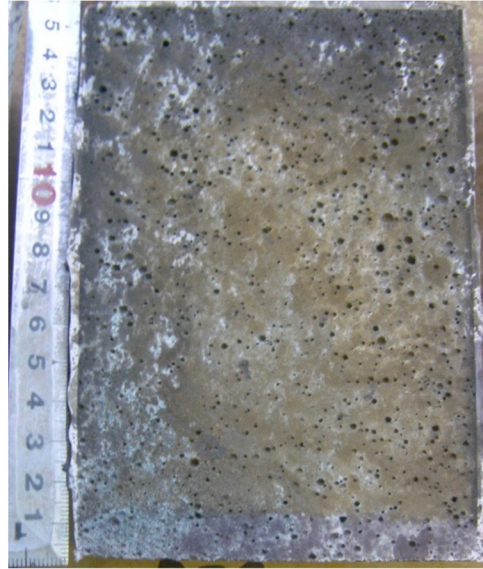


写真 3-11 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=30%, BFS/S=100%)

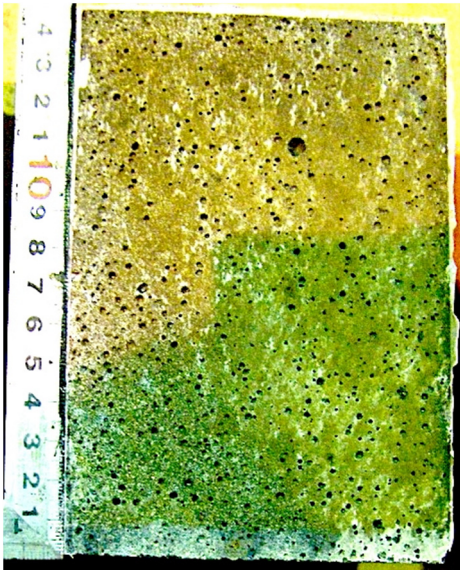


写真 3-12 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=60%, BFS/S=100%)

図 3-21 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及ぼす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。この図より、高炉スラグ細骨材の置換率が高いほど、塩化物イオン浸透深さが小さくなることが分かる。

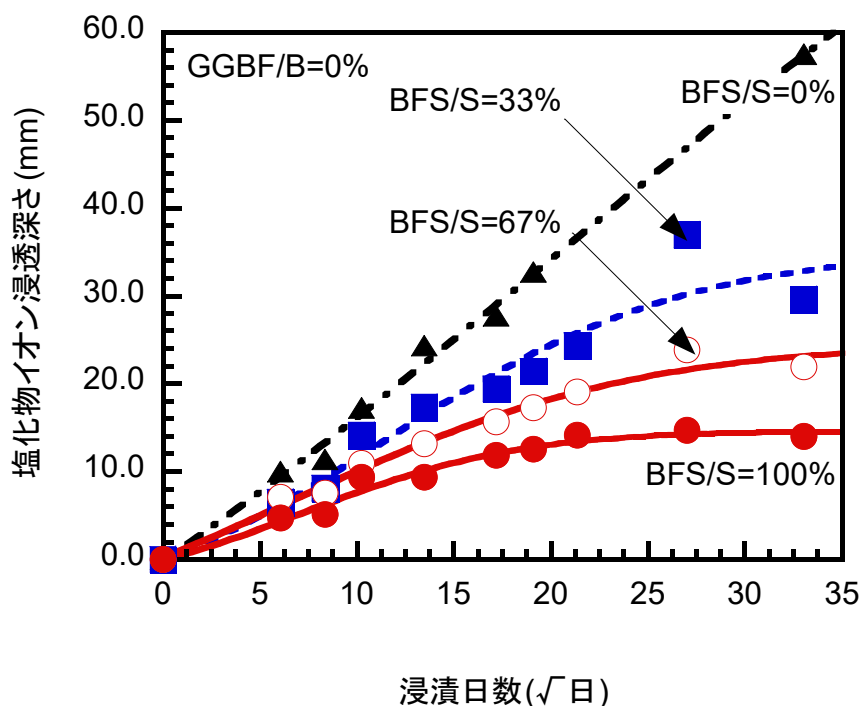


図 3-21 高炉スラグ細骨材がモルタルの塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響 (GGBF/B=0%の場合)

図 3-22 は、結合材に質量比で 30%高炉スラグ微粉末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及ぼす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。この図より、高炉スラグ細骨材の置換率が高いほど、塩化物イオン浸透深さが小さくなることが分かる。

図 3-23 は、結合材に質量比で 60%高炉スラグ微粉末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及ぼす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。この図より、高炉スラグ細骨材の置換率が高いほど、塩化物イオン浸透深さが小さくなっているが、細骨材が 33%および 67%は同程度であることが分かる。

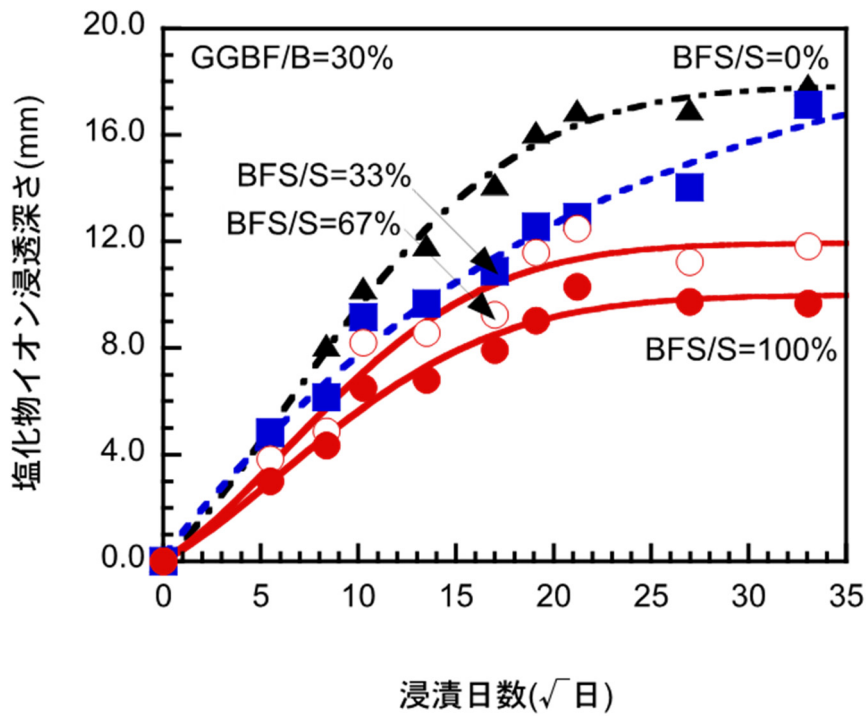


図 3-22 高炉スラグ細骨材がモルタルの塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響 (GGBF/B=30%の場合)

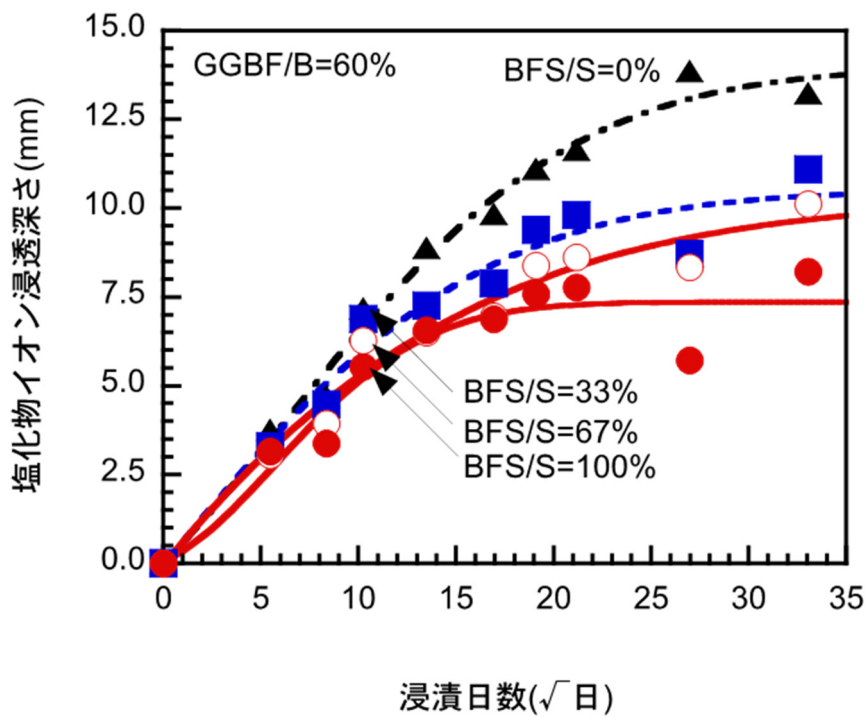


図 3-23 高炉スラグ細骨材がモルタルの塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響 (GGBF/B=60%の場合)

### 3-4-2 コンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性

図 3-24 は、結合材に普通ポルトランドセメントおよび細骨材に砂岩砕砂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。水結合材比は 50%および養生は水中養生としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 20mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 50mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの浸透量が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間が 0.3 年で  $1.62\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $1.46\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $1.30\text{cm}^2/\text{年}$  となり、同程度である。

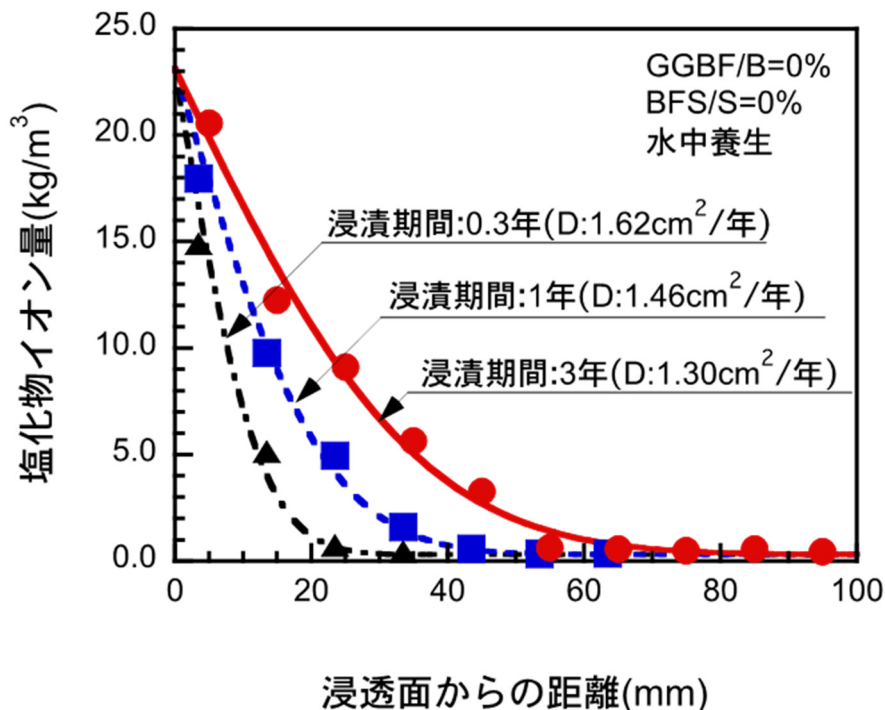


図 3-24 普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用いた  
コンクリートの塩化物イオン量分布（水中養生の場合）

図 3-25 は、結合材に高炉スラグ微粉末を 60%および細骨材に砂岩砕砂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。水結合材比は 50%および養生は水中養生としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 5mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 20mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの浸透量が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間が 0.3 年で  $0.31\text{cm}^2/\text{年}$



年, 1 年で  $0.41\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $0.30\text{cm}^2/\text{年}$  となり, 同程度である。普通ポルトランドセメント及び砂岩砕砂のものに比べ,  $1/4$  程度に小さくなっている。

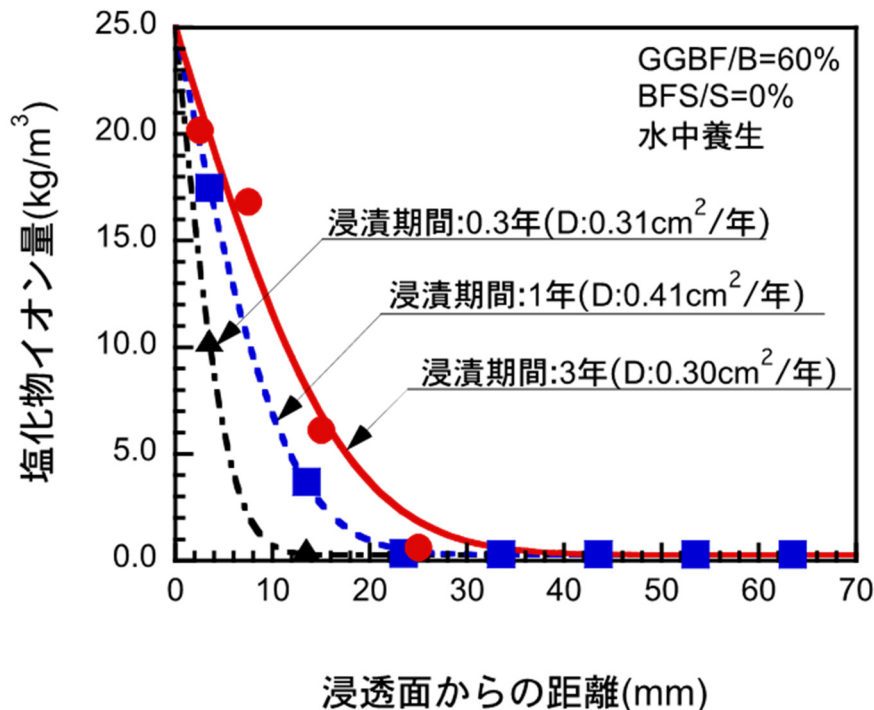


図 3-25 高炉スラグ微粉末および砂岩砕砂を用いた  
コンクリートの塩化物イオン量分布 (水中養生の場合)

図 3-26 は, 結合材に普通ポルトランドセメントおよび細骨材に高炉スラグ細骨材を 100%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。水結合材比は 50%および養生は水中養生としている。図中の▲, ■および●は, それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年, 1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 5mm 程度まで検出されている。また, 浸漬期間 3 年では, 供試体表面から 25mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は, 浸漬期間が 0.3 年で  $0.39\text{cm}^2/\text{年}$ , 1 年で  $0.32\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $0.52\text{cm}^2/\text{年}$  となり, 同程度である。普通ポルトランドセメント及び砂岩砕砂のものに比べ,  $1/3$  程度に小さくなっている。

図 3-27 は, 結合材に高炉スラグ微粉末を 60%および細骨材に高炉スラグ細骨材を 100%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。水結合材比は 50%および養生は水中養生としている。図中の▲, ■および●は, それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年, 1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間が 1 年であっても

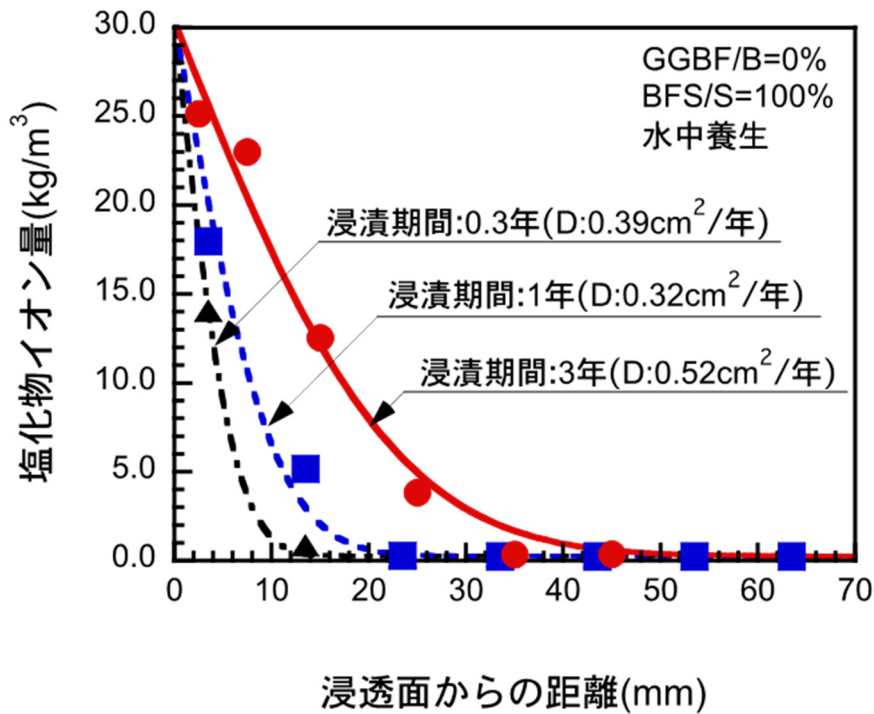


図 3-26 普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ細骨材を用いた  
コンクリートの塩化物イオン量分布（水中養生の場合）

塩化物イオンが供試体表面から 10mm の位置よりも中に侵入していないことが分かる。拡散係数は、浸漬期間 0.3 年で  $0.15\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $0.17\text{cm}^2/\text{年}$ 、および 3 年で  $0.12\text{cm}^2/\text{年}$  となり、同程度である。普通ポルトランドセメント及び砂岩砕砂のものに比べ、1/10 程度と最も小さくなっている。

図 3-28 は、結合材に普通ポルトランドセメントおよび細骨材に砂岩砕砂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。水結合材比は 50% および養生は蒸気養生後気中養生としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 30mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 70mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間 3 年で  $3.07\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $2.61\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $2.00\text{cm}^2/\text{年}$  となり、少し小さくなっている。浸漬期間 3 年で、普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用い水中養生のものに比べ、2 倍弱と大きくなっている。

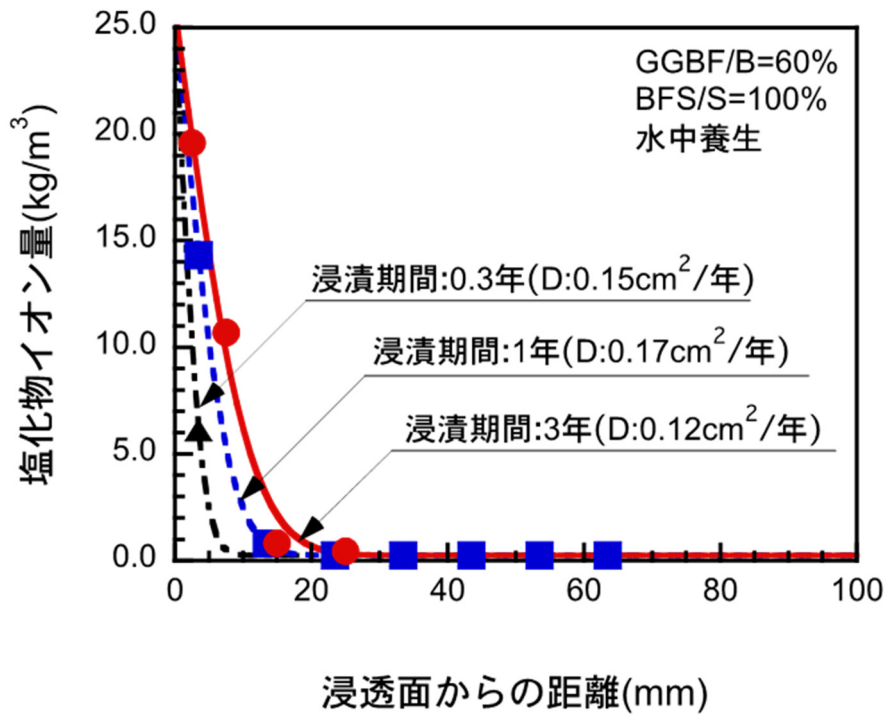


図 3-27 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いた  
コンクリートの塩化物イオン量分布（水中養生の場合）

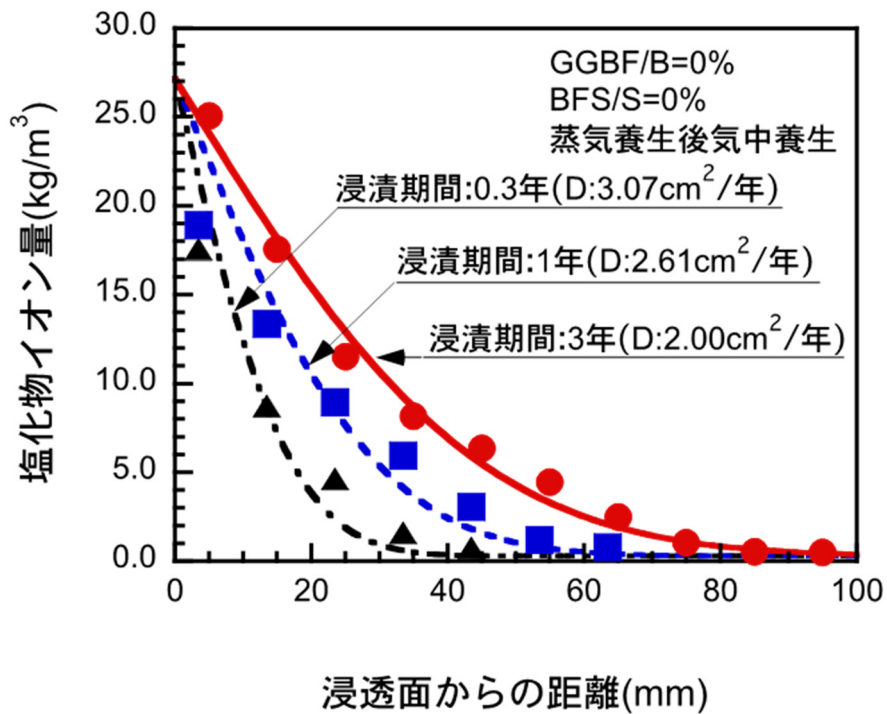


図 3-28 普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用いた  
コンクリートの塩化物イオン量分布（蒸気養生後気中養生の場合）

図 3-29 は、結合材に高炉スラグ微粉末を 60%および細骨材に砂岩砕砂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。水結合材比は 50%および養生は蒸気養生後気中養生としている。図中の▲, ■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年, 1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 30mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 50mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間 0.3 年で  $0.80\text{cm}^2/\text{年}$ , 1 年で  $1.04\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $0.52\text{cm}^2/\text{年}$  となり、少し小さくなっている。浸漬期間 3 年で、普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用い水中養生のものに比べ、1/3 程度に小さくなっている。

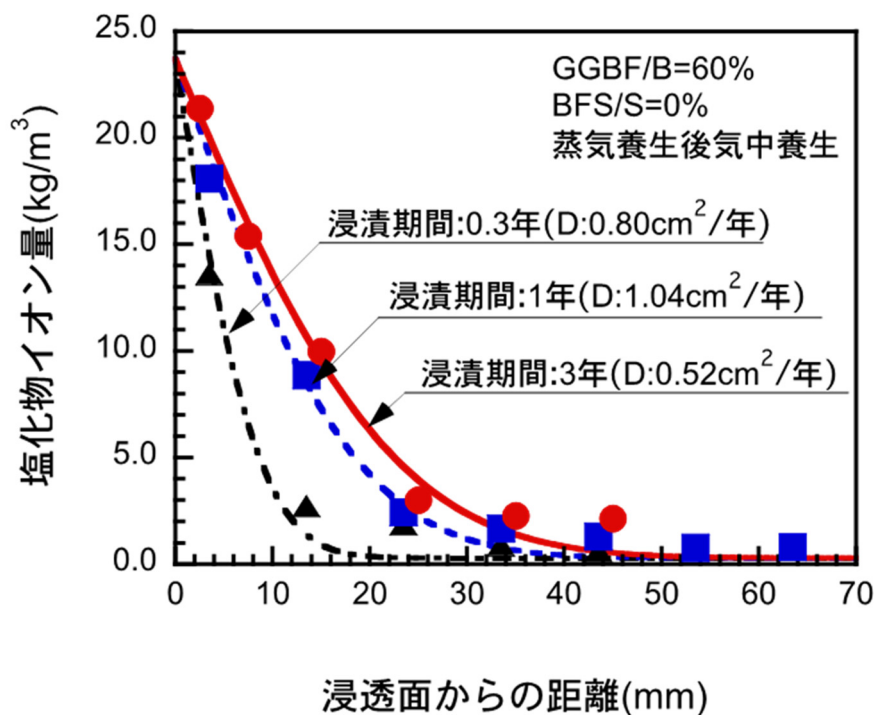


図 3-29 高炉スラグ微粉末および砂岩砕砂を用いた  
コンクリートの塩化物イオン量分布 (蒸気養生後気中養生の場合)

図 3-30 は、結合材に普通ポルトランドセメントおよび細骨材に高炉スラグ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。水結合材比は 50%および養生は蒸気養生後気中養生としている。図中の▲, ■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年, 1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 20mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 30mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつ



れて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間が0.32年で $0.97\text{cm}^2/\text{年}$ 、1年で $0.80\text{cm}^2/\text{年}$ および3年で $0.66\text{cm}^2/\text{年}$ となり、同程度である。浸漬期間3年で、普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用い水中養生のものに比べ、1/2程度に小さくなっている。

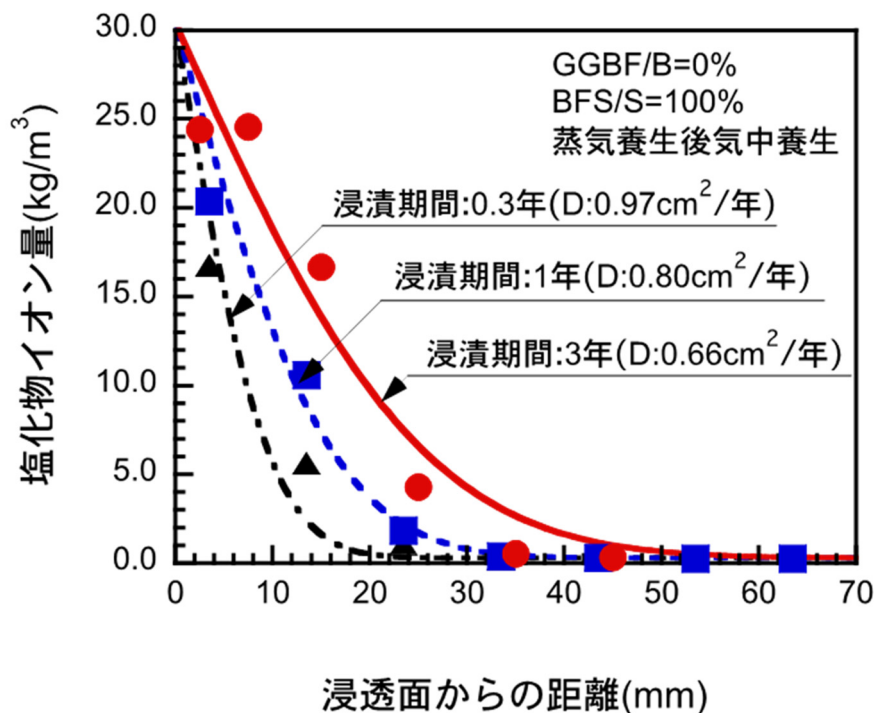


図 3-30 普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ細骨材を用いた  
コンクリートの塩化物イオン量分布（蒸気養生後気中養生の場合）

図 3-31 は、結合材に高炉スラグ微粉末を 60%および細骨材に高炉スラグ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。水結合材比は 50%および養生は蒸気養生後気中養生としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間が 1 年であっても塩化物イオンが供試体表面から 20mm よりも中に侵入していないことが分かる。拡散係数は、浸漬期間 0.3 年で $0.36\text{cm}^2/\text{年}$ 、1年で $0.30\text{cm}^2/\text{年}$ および3年で $0.30\text{cm}^2/\text{年}$ と同程度であることが分かる。浸漬期間 3 年で、普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用い水中養生のものに比べ、1/4程度に小さくなっている。

図 3-32 は、結合材に普通ポルトランドセメントおよび細骨材に砂岩砕砂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。水結合材比は 50%および養生は蒸気養生後水中養生としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオン

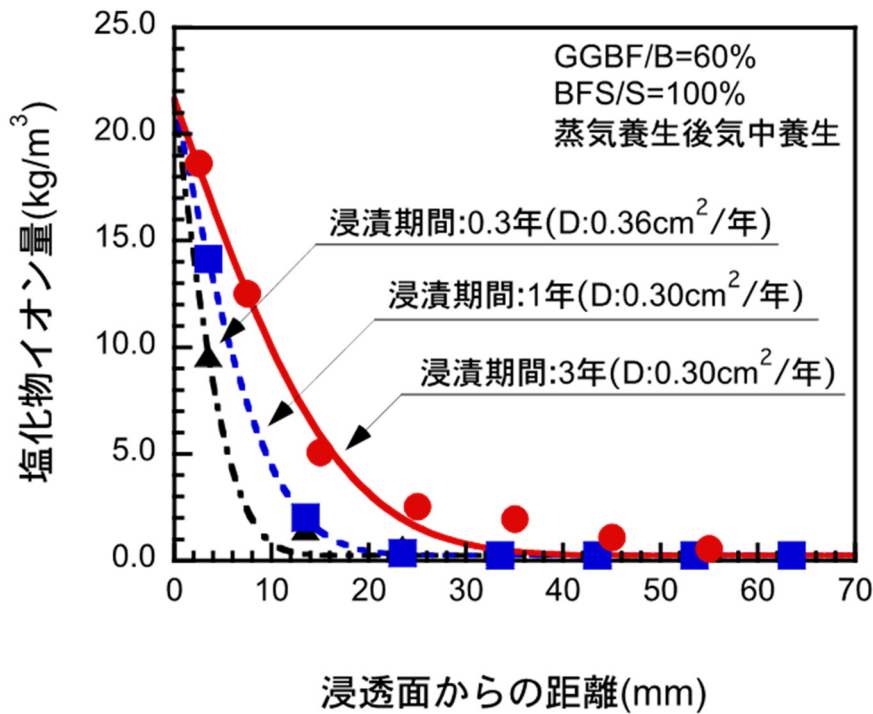


図 3-31 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いた  
コンクリートの塩化物イオン量分布（蒸気養生後気中養生の場合）

が供試体表面から 25mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 80mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間が 0.3 年で  $4.24\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $3.26\text{cm}^2/\text{年}$  および 3 年で  $2.41\text{cm}^2/\text{年}$  となり、少し小さくなっている。浸漬期間 3 年で、普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用い水中養生のものに比べ、2 倍程度に大きくなっている。

図 3-33 は、結合材に高炉スラグ微粉末を 60% および細骨材に砂岩砕砂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。水結合材比は 50% および養生は蒸気養生後水中養生としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが 10mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、深さ 30mm 程度まで塩化物イオンが検出されており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間 0.3 年で  $0.80\text{cm}^2/\text{年}$ 、浸漬期間 1 年で  $0.50\text{cm}^2/\text{年}$  および浸漬期間 3 年で  $0.49\text{cm}^2/\text{年}$  となり、同程度である。浸漬期間 3 年で、普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用い水中養生のものに比べ、1/3 程度に小さくなっている。

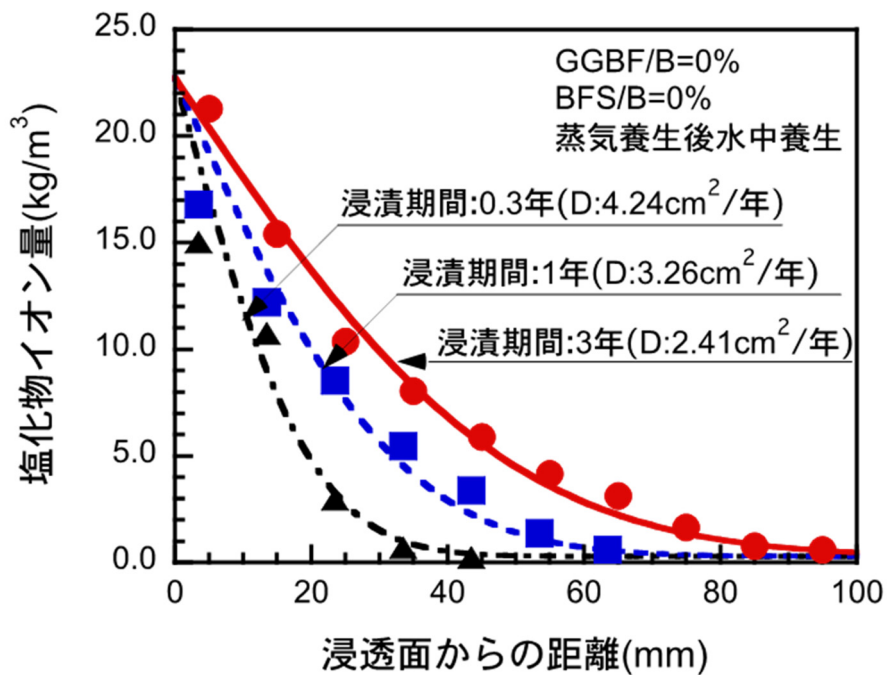


図 3-32 普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用いた  
コンクリートの塩化物イオン量分布（蒸気養生後水中養生の場合）

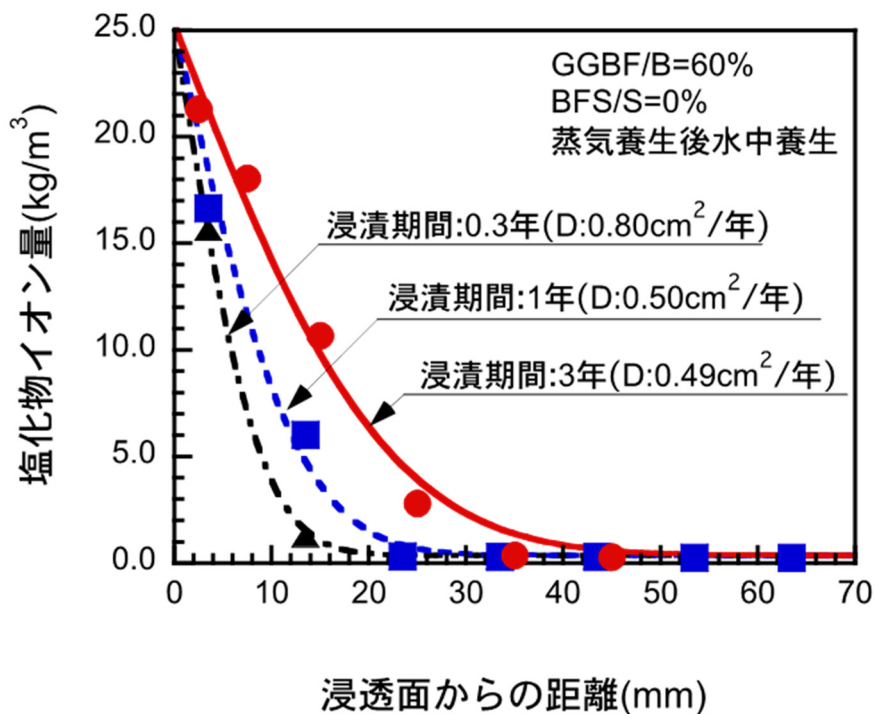


図 3-33 高炉スラグ微粉末および砂岩砕砂を用いた  
コンクリートの塩化物イオン量分布（蒸気養生後水中養生の場合）

図 3-34 は、結合材に普通ポルトランドセメントおよび細骨材に高炉スラグ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。水結合材比は 50% および養生は蒸気養生後水中養生としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間 0.3 年で塩化物イオンが供試体表面から 10mm 程度まで検出されている。また、浸漬期間 3 年では、供試体表面から 30mm 程度まで塩化物イオンが浸透しており浸漬期間が長くなるにつれて塩化物イオンの検出位置が深くなっていることが分かる。拡散係数は、浸漬期間が 0.3 年で  $0.36\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $0.45\text{cm}^2/\text{年}$  および  $0.55\text{cm}^2/\text{年}$  となり、同程度である。浸漬期間 3 年で、普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用い水中養生のものに比べ、1/3 程度に小さくなっている。結合材に高炉スラグ微粉末を 60% および細骨材に砂岩砕砂を用い、蒸気養生後水中養生を行ったものと同程度の値となっている。

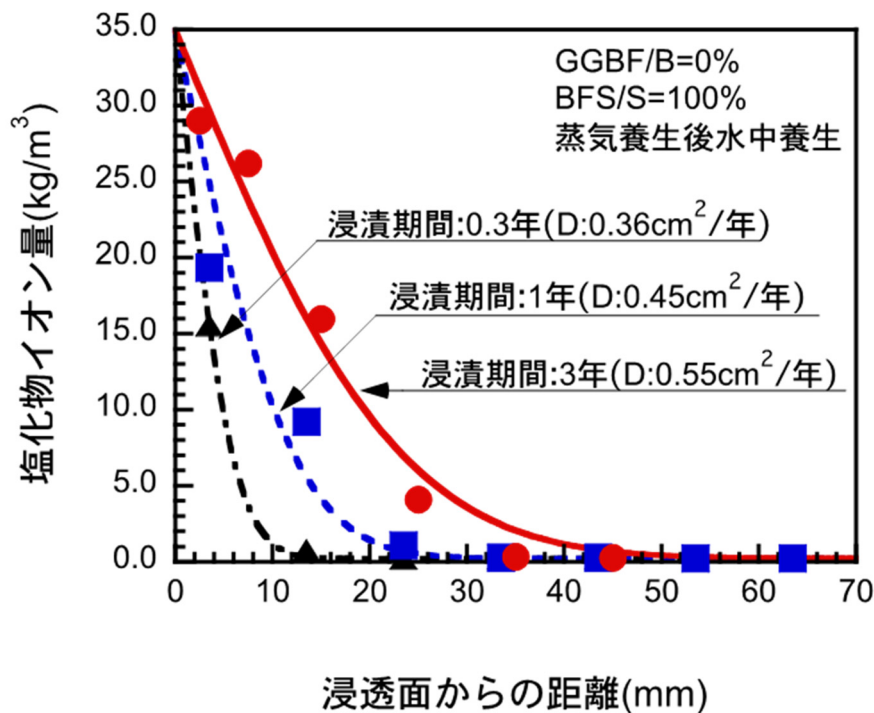


図 3-34 普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ細骨材を用いた  
コンクリートの塩化物イオン量分布（蒸気養生後水中養生の場合）

図 3-35 は、結合材に高炉スラグ微粉末を 60% および細骨材に高炉スラグを 100% 用いたコンクリートの塩化物イオン量の分布を示したものである。水結合材比は 50% および養生は蒸気養生後水中養生としている。図中の▲、■および●は、それぞれ塩水浸漬期間が 0.3 年、1 年および 3 年の結果を示している。浸漬期間が 1 年であっても塩化物イオンが供試体表面から 15mm よりも中に侵入していないことが分かる。拡

散係数は、浸漬期間 0.3 年で  $0.33\text{cm}^2/\text{年}$ 、1 年で  $0.13\text{cm}^2/\text{年}$ 、および 3 年で  $0.20\text{cm}^2/\text{年}$  年となり、同程度である。浸漬期間 3 年で、普通ポルトランドセメントおよび砂岩砕砂を用い水中養生のものに比べ、1/6 程度に小さくなっている。

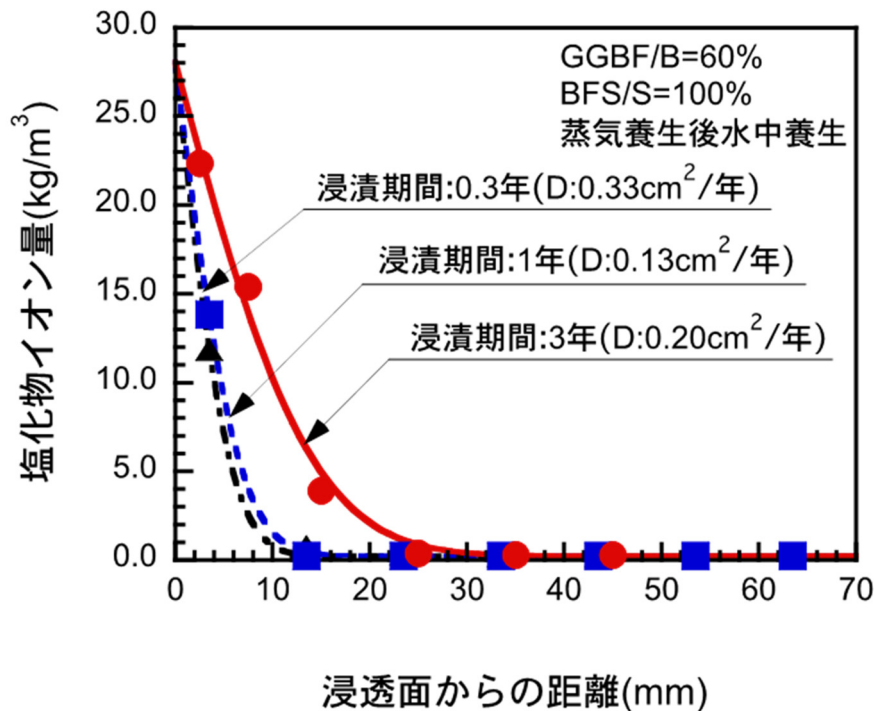


図 3-35 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いた  
コンクリートの塩化物イオン量分布（蒸気養生後水中養生の場合）

図 3-36 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。図中の■、▨および▩は、それぞれ、水中養生期間、蒸気養生後気中養生および蒸気養生後水中養生を行ったコンクリートの塩水浸漬期間が3年間の表面塩化物イオン量の結果を示している。図よりコンクリートの表面塩化物イオン量に養生方法が与え得る影響は小さいと思われる。

図 3-37 は、配合別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。養生は水中養生とする。図中の●は高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材、○は普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ細骨材、■は高炉スラグ微粉末および砂岩砕砂、□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である。図より、コンクリート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。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、高炉スラグを細骨材および微粉末に用いたものは、拡散係数が最も小さくなっていることが分かる。また高炉スラグ細骨材および砕砂を用いたコンクリートお

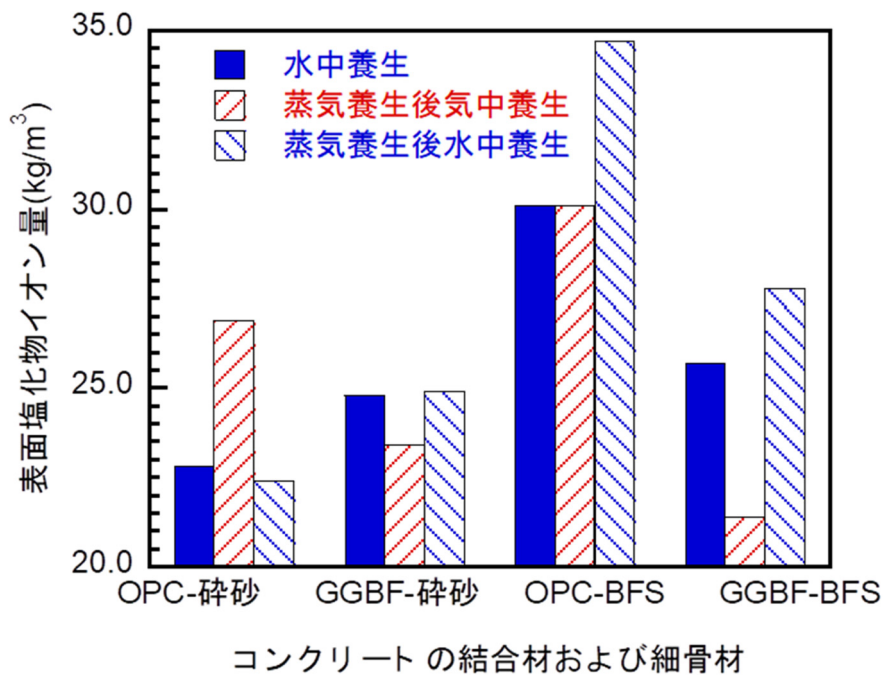


図 3-36 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が  
コンクリートの表面塩化物イオン量に与える影響

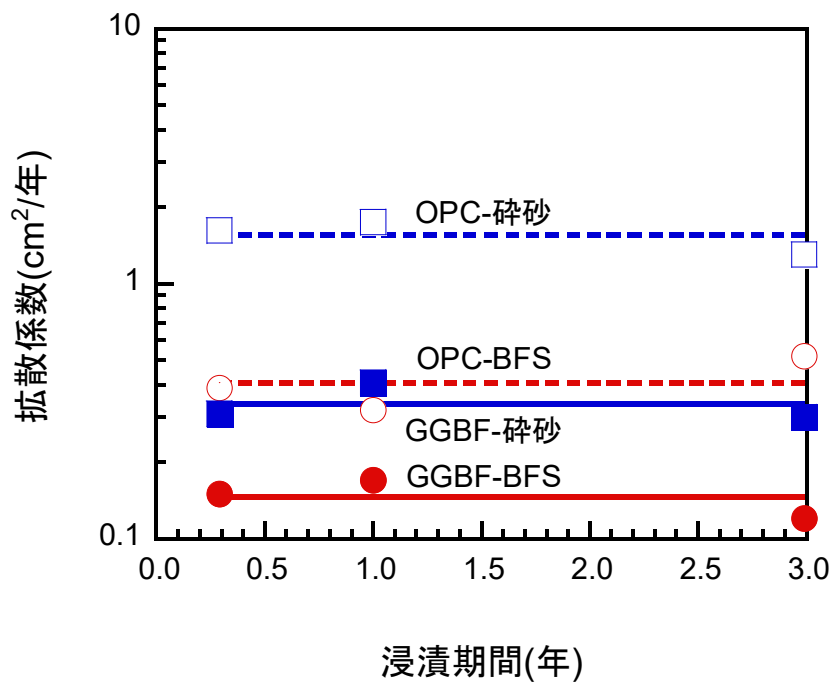


図 3-37 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が  
コンクリートの拡散係数の経時変化に与える影響（水中養生の場合）



よび高炉スラグ微粉末および砕砂を用いたコンクリートは拡散係数が同程度であることが分かる。

図 3-38 は、配合別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。養生は蒸気養生後気中養生とする。図中の●は高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材，○は普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ細骨材，■は高炉スラグ微粉末および砂岩砕砂，□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である。図より、コンクリート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。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、高炉スラグを細骨材および微粉末に用いたものは、拡散係数が最も小さくなっていることが分かる。また高炉スラグ細骨材および砕砂を用いたコンクリートおよび高炉スラグ微粉末および砕砂を用いたコンクリートは拡散係数が同程度であることが分かる。

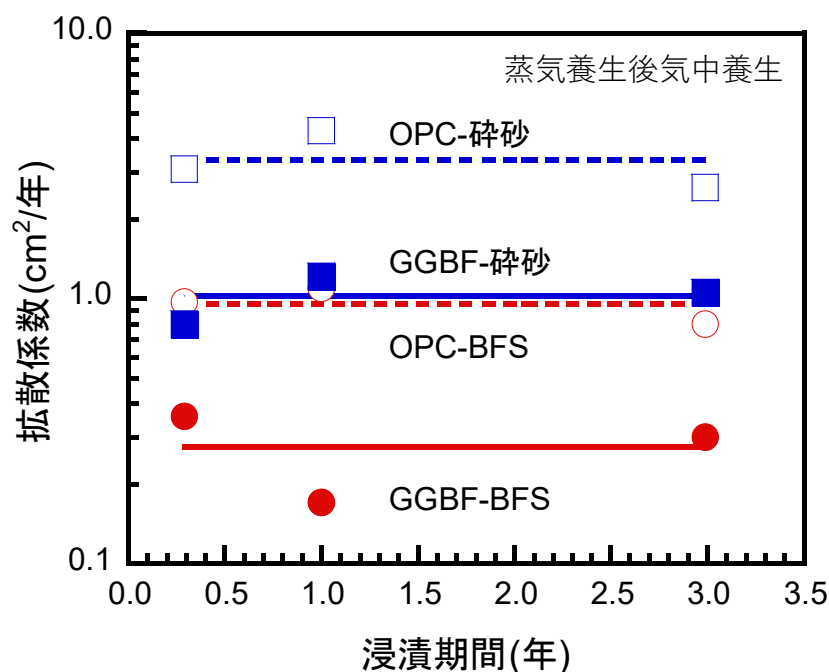


図 3-38 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がコンクリートの拡散係数の経時変化に与える影響（蒸気養生後気中養生の場合）

図 3-39 は、配合別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。養生は蒸気養生後水中養生とする。図中の●は高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材，○は普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ細骨材，■は高炉スラグ微粉末および砂岩砕砂，□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である。図より、コンクリート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。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、高炉スラグを細骨材および微粉末に用いたものは、拡散係数が最も小さくなっていることが分かる。また高炉スラグ細骨材および砕砂を用いたコンクリートおよび高炉スラグ微粉末および砕砂を用いたコンクリートは拡散係数が同程度であることが分かる。

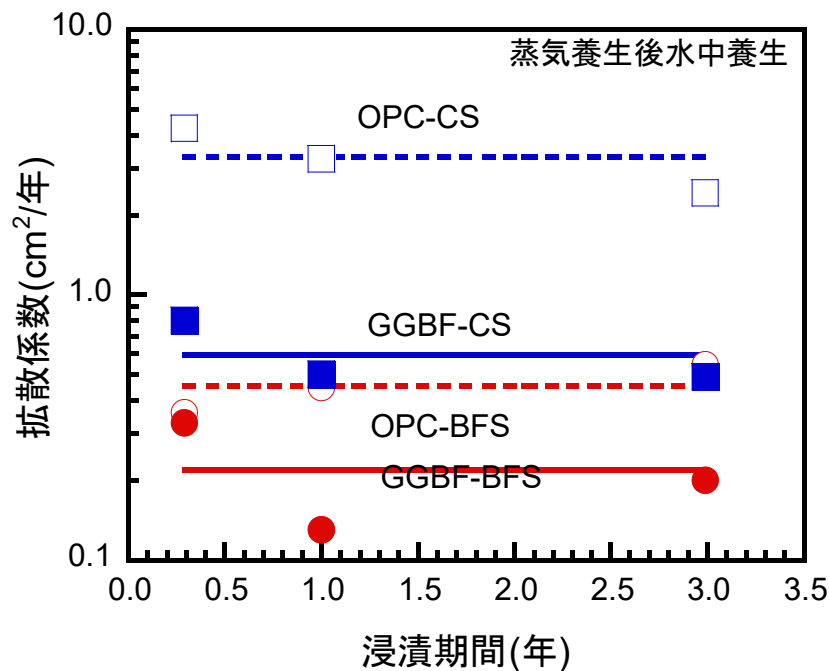


図 3-39 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がコンクリートの拡散係数の経時変化に与える影響（蒸気養生後水中養生の場合）

図 3-40 は、コンクリートの見かけの拡散係数に養生方法が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、水中養生期間、蒸気養生後気中養生および蒸気養生後水中養生を行ったコンクリートの塩水浸漬期間が3年間の見掛けの拡散係数の結果を示している。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 2-16 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。

図 3-41 は、細骨材に砂岩砕砂を用い、結合材には普通ポルトランドのみを用いたコンクリートにおいて、養生方法が塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響を示したものである。図中の●、○および■は、それぞれ、蒸気養生後気中養生、蒸気養生後水中養生および水中養生を行ったコンクリートの結果を示している。この図より、蒸気養生後に気中養生を行ったコンクリートと、蒸気養生後に水中養生を行ったものは、同



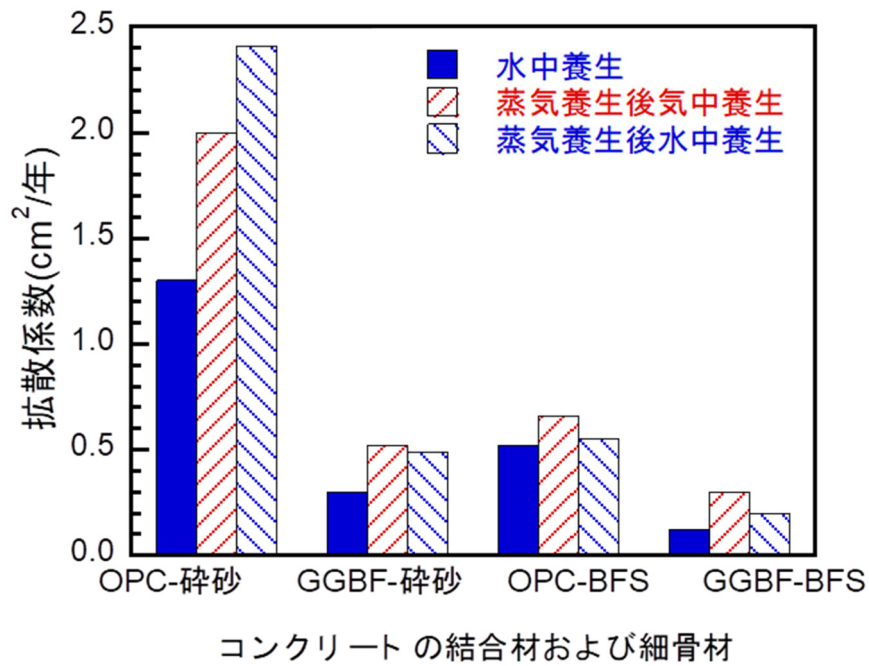


図 3-40 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が  
コンクリートの拡散係数に与える影響

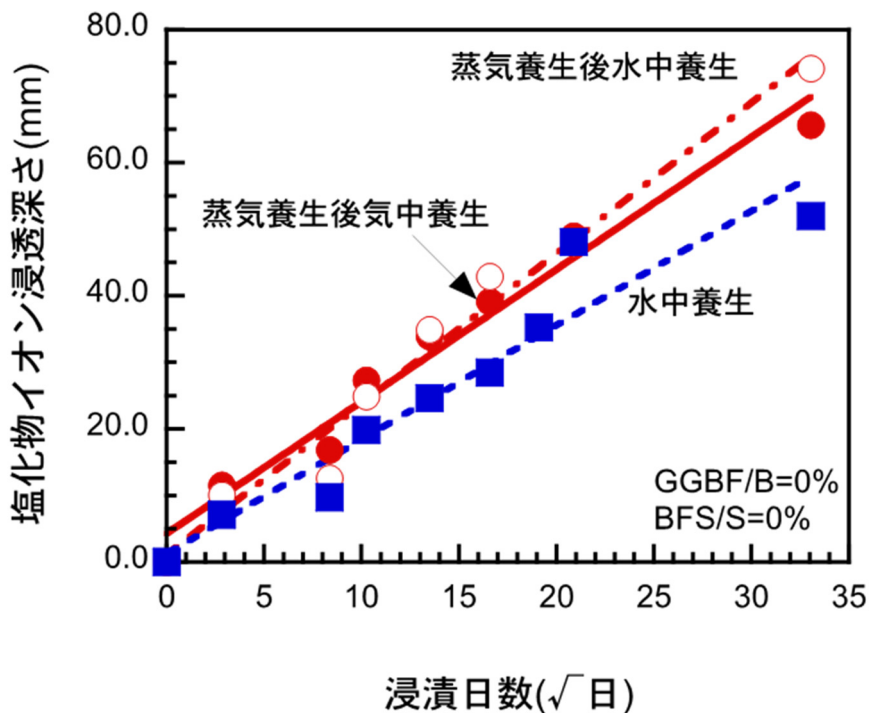


図 3-41 養生方法がコンクリートの塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響  
(細骨材：砂岩碎砂、GGBF/B=0%)

程度の塩化物イオン浸透深さになっていることが分かる。また、水中養生を行ったものの塩化物イオン浸透深さは小さいことが分かる。硝酸銀噴霧の様子を写真 3-13～写真 3-15 に示す。

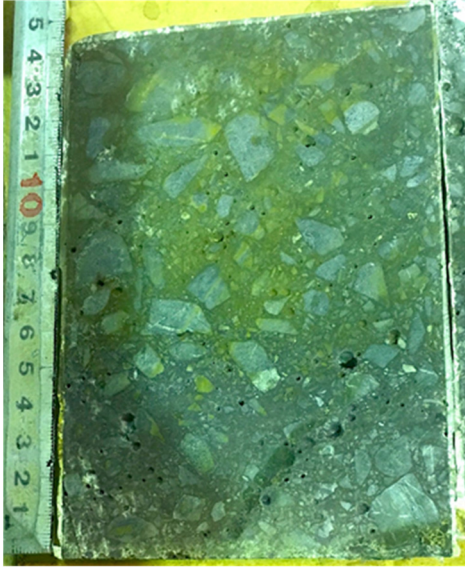


写真 3-13 硝酸銀噴霧の様子  
(OPC, CS, 水中養生)

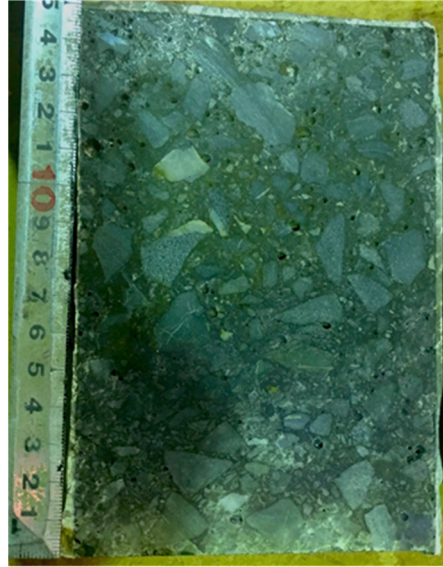


写真 3-14 硝酸銀噴霧の様子  
(OPC, CS, 蒸気養生後気中養生)

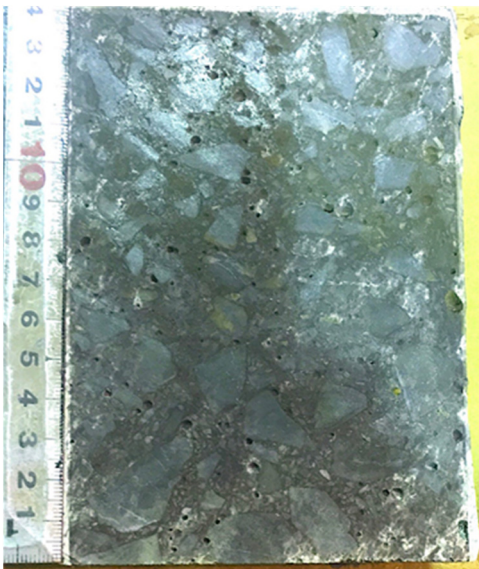


写真 3-15 硝酸銀噴霧の様子  
(OPC, CS, 蒸気養生後水中養生)

図 3-42 は、細骨材に砂岩砕砂を用い、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において、養生方法が塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響を示したものである。図中の●、○および■は、それぞれ、蒸気養生後気中養生、蒸気養生

後水中養生および水中養生を行ったコンクリートの結果を示している。この図より、蒸気養生後に気中養生を行ったコンクリートと、蒸気養生後に水中養生を行ったものは、同程度の塩化物イオン浸透深さになっていることが分かる。また、水中養生を行ったものの塩化物イオン浸透深さは小さいことが分かる。硝酸銀噴霧の様子を写真3-16～写真3-18に示す。

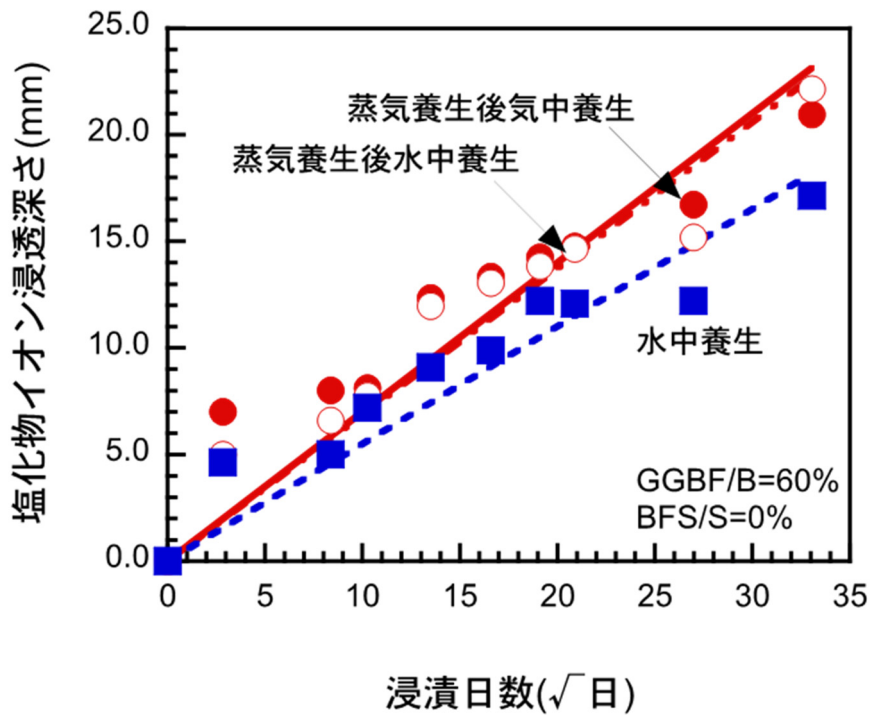


図 3-42 養生方法がコンクリートの塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響  
(細骨材：砂岩砕砂、GGBF/B=60%)

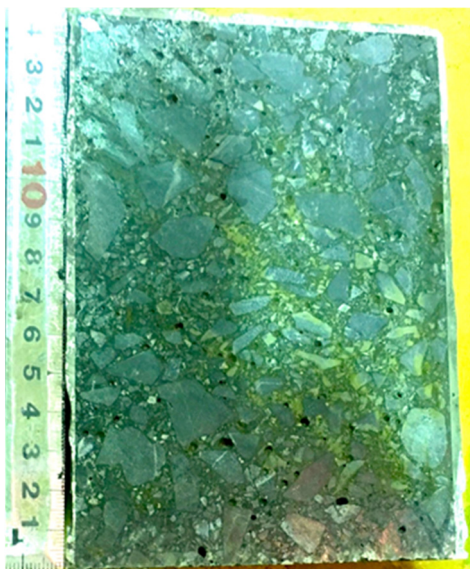


写真 3-16 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=60%, CS, 水中養生)

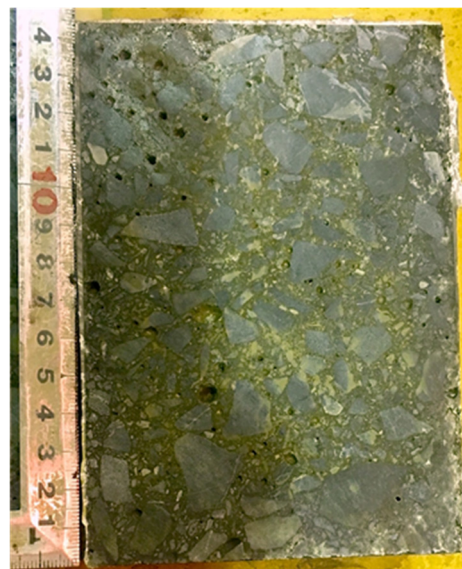


写真 3-17 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=60%, CS, 蒸気養生後気中養生)



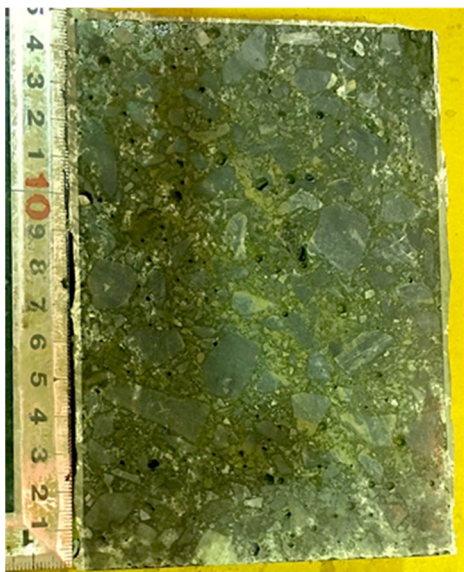


写真 3-18 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=60%, CS, 蒸気養生後水中養生)

図 3-43 は、細骨材に高炉スラグ細骨材を用い、結合材には普通ポルトランドのみを用いたコンクリートにおいて、養生方法が塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響を示

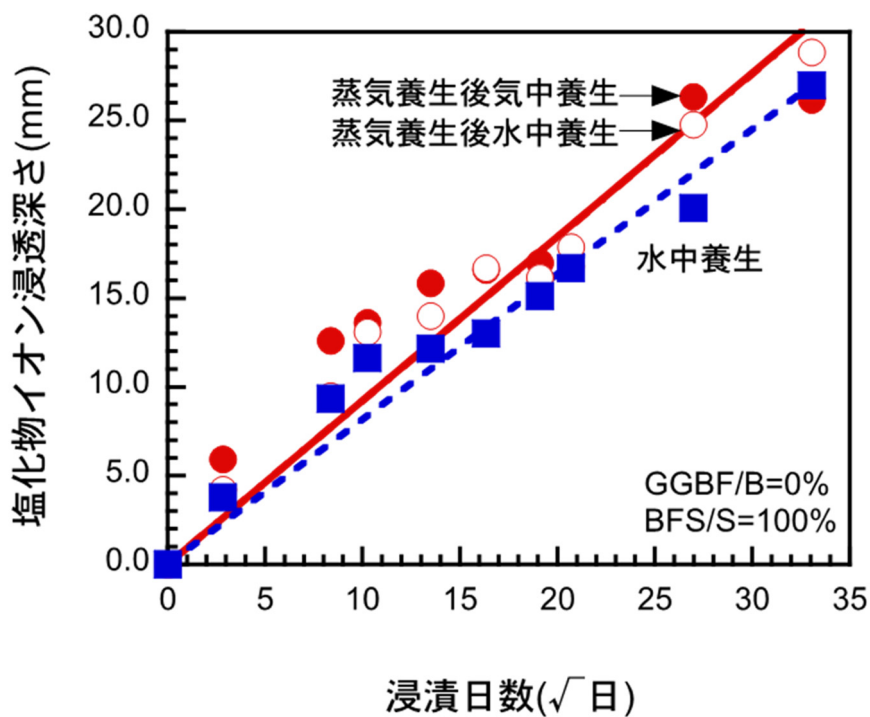


図 3-43 養生方法がコンクリートの塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響  
(細骨材 : BFS、GGBF/B=0%)

したものである。図中の●，○および■は，それぞれ，蒸気養生後気中養生，蒸気養生後水中養生および水中養生を行ったコンクリートの結果を示している。この図より，蒸気養生後に気中養生を行ったコンクリートと，蒸気養生後に水中養生を行ったものは，同程度の塩化物イオン浸透深さになっていることが分かる。また，水中養生を行ったものの塩化物イオン浸透深さは小さいことが分かる。硝酸銀噴霧の様子を写真3-19～写真3-21に示す。

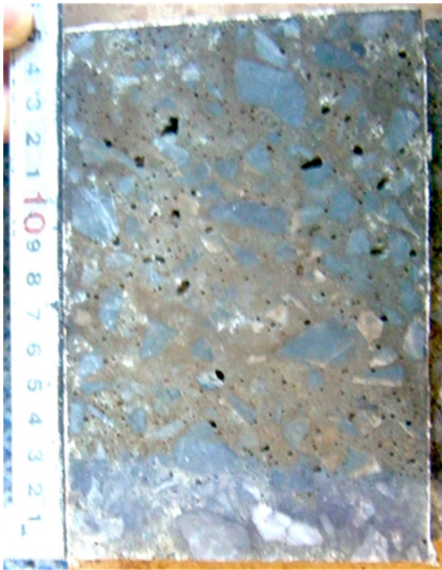


写真 3-19 硝酸銀噴霧の様子  
(OPC, BFS, 水中養生)

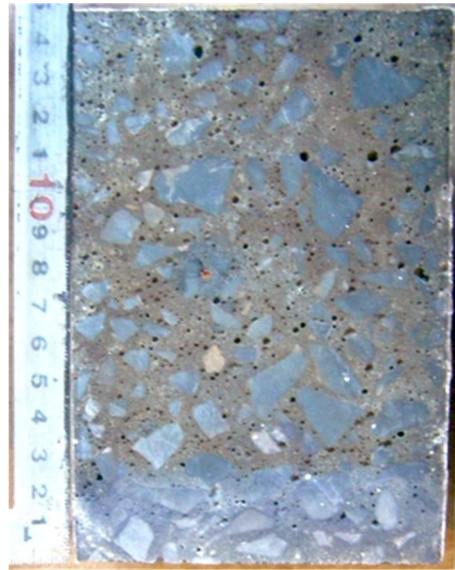


写真 3-20 硝酸銀噴霧の様子  
(OPC, BFS, 蒸気養生後気中養生)

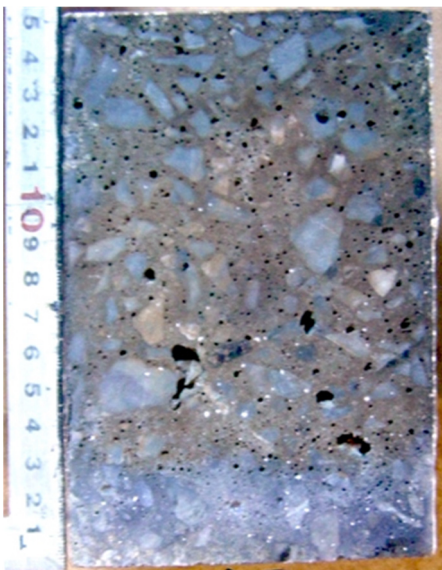


写真 3-21 硝酸銀噴霧の様子  
(OPC, BFS, 蒸気養生後水中養生)

図 3-44 は、細骨材に高炉スラグ細骨材を用い、高炉スラグ微粉末を質量比で結合材に 60%用いたコンクリートにおいて、養生方法が塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響を示したものである。図中の●、○および■は、それぞれ、蒸気養生後気中養生、蒸気養生後水中養生および水中養生を行ったコンクリートの結果を示している。この図より、塩化物イオン浸透深さは最終的に同程度であることが分かる。硝酸銀噴霧の様子を写真 3-22～写真 3-24 に示す。

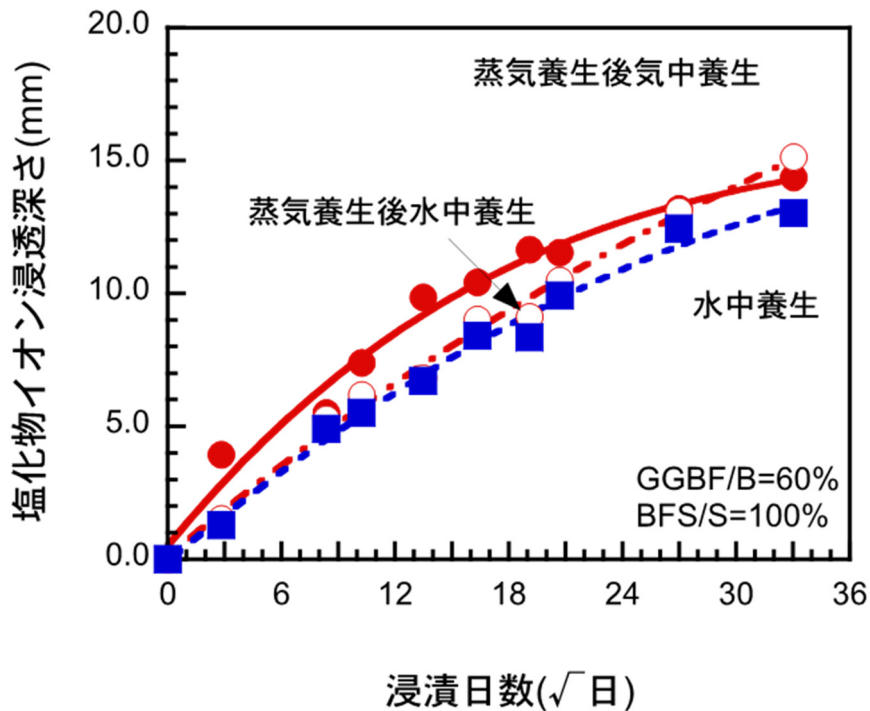


図 3-44 養生方法がコンクリートの塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響  
(細骨材 : BFS、GGBF/B=60%)

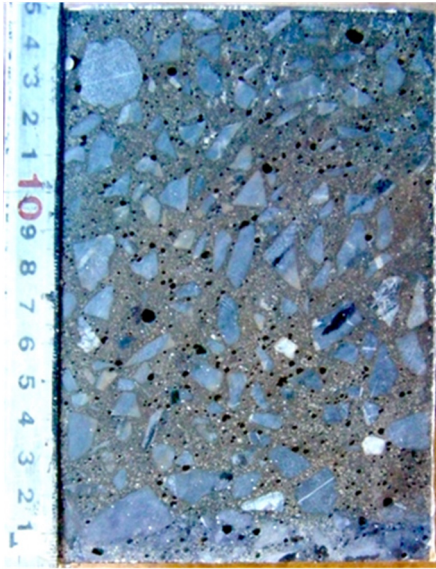


写真 3-22 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=60%, BFS, 水中養生)



写真 3-23 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=60%, BFS, 蒸気養生後気中養生)



写真 3-24 硝酸銀噴霧の様子  
(GGBF/B=60%, BFS, 蒸気養生後水中養生)



図 3-45 は、水中養生を行った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及ぼす影響を示したものである。水結合材比は 50%としている。この図より、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたものに比べ、塩化物イオン浸透深さが非常に小さくなっていることが分かる。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を小さくすることができる。

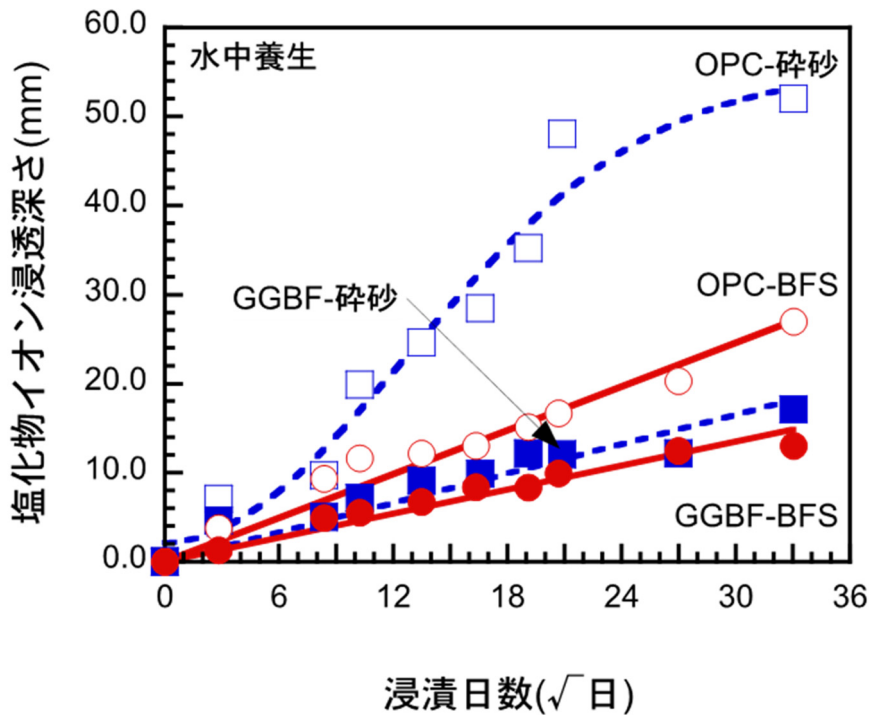


図 3-45 高炉スラグ微粉末がコンクリートの塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響（水中養生の場合）

図 3-46 は、蒸気養生後に気中養生を行った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及ぼす影響を示したものである。水結合材比は 50%としている。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、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたものに比べ、塩化物イオン浸透深さが非常に小さくなっていることが分かる。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を小さくすることができる。



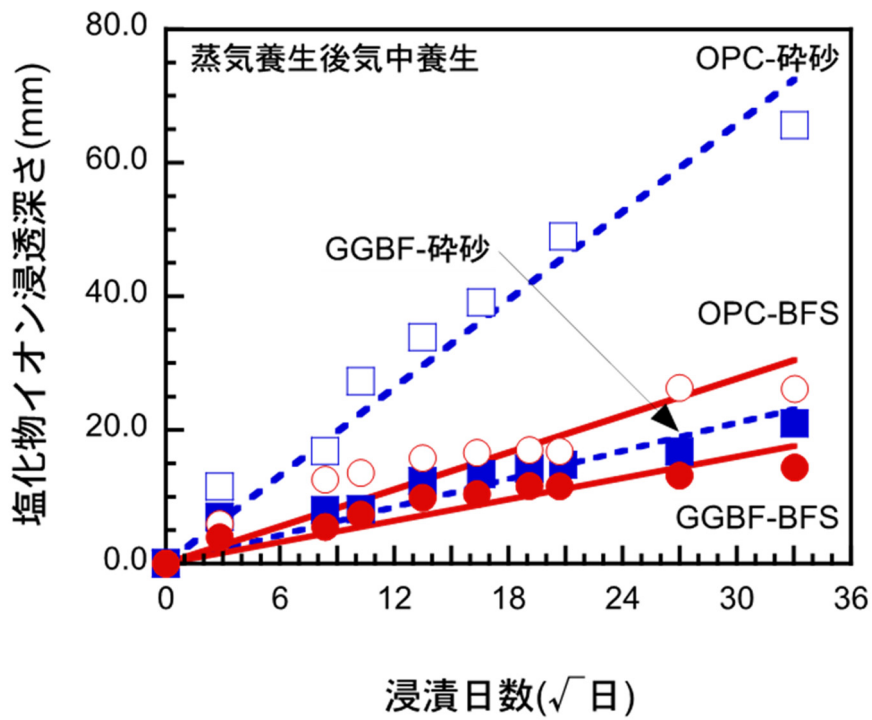


図 3-46 高炉スラグ微粉末がコンクリートの  
塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響（蒸気養生後気中養生の場合）

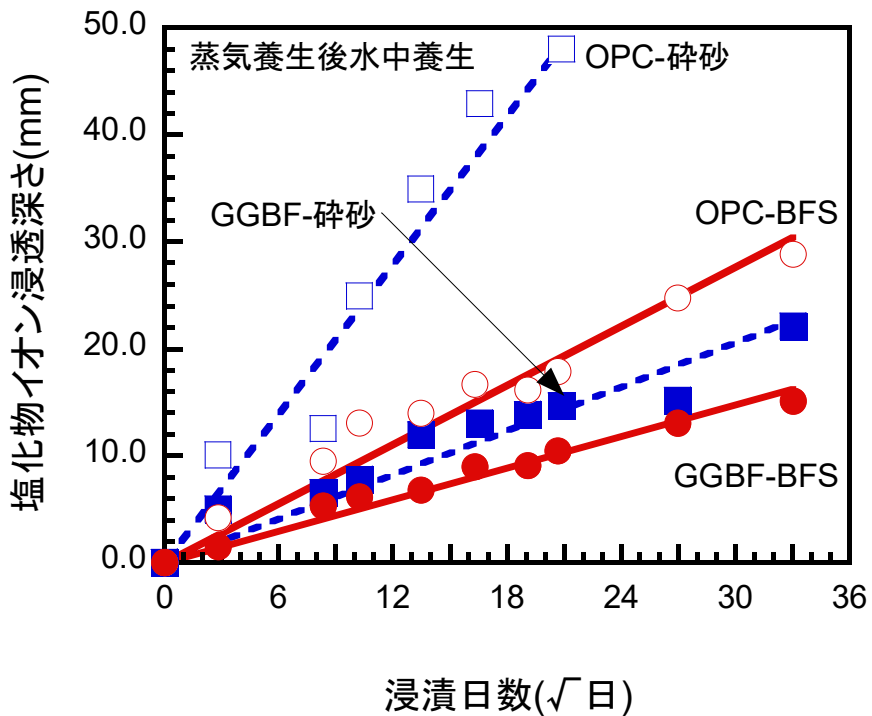


図 3-47 高炉スラグ微粉末がコンクリートの  
塩化物イオン浸透深さに及ぼす影響（蒸気養生後水中養生の場合）

図 3-47 は、蒸気養生後に水中養生を行った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及ぼす影響を示したものである。水結合材比は 50%としている。この図より、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたものに比べ、塩化物イオン浸透深さが非常に小さくなっていることが分かる。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を小さくすることができる。

### 3-5 本章のまとめ

- ・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。
- ・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。
- ・モルタルおよびコンクリートで、高炉スラグを結合材と細骨材の両方に用いると見掛けの拡散係数は小さくなり、モルタルの見掛けの拡散係数が最も小さい。
- ・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。

## 第4章 薄片を用いた塩化物イオン浸透性試験および非定常・電気泳動試験

### 4-1 概要

コンクリートの塩化物イオン浸透性を評価する際に塩水浸漬試験が用いられるが、低水結合材比や高炉スラグを用いた遮塩性が高いコンクリートの場合、塩水浸漬法は長期の試験期間を要する。そこで、本章では、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたモルタルおよびコンクリートを使用して、短期間に塩化物イオン浸透性を評価することを目的とし、薄片および非定常・電気泳動法を用いた塩化物イオン浸透抵抗性試験を検討した。

そのため、薄片法では、浸漬試験を3年間行った供試体を用いて薄片供試体を作成し試験を行った。非定常・電気泳動法は、浸漬法と同じ配合の供試体を用いて試験を行った。また、その他の配合についても薄片法を用いて塩化物イオン浸透抵抗性を検討した。

### 4-2 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:  $3.15\text{g/cm}^3$ , ブレーン値: 3,  $350\text{cm}^2/\text{g}$ )および高炉スラグ微粉末(密度:  $2.89\text{g/cm}^3$ , ブレーン値:  $4.150\text{cm}^2/\text{g}$ )を用いた。細骨材には、砂岩砕砂(密度:  $2.64\text{g/cm}^3$ , 吸水率: 1.78%)および高炉スラグ細骨材(密度:  $2.72\text{g/cm}^3$ , 吸水率: 0.58%)を用いた。粗骨材には、硬質砂岩碎石(最大寸法 20mm, 密度:  $2.74\text{g/cm}^3$ , 吸水率: 0.49%)を用いた。練り混ぜ水には、水道水を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤および増粘剤を用いた。コンクリートおよびモルタルの水結合材比は35%および50%とした。

薄片法に用いたコンクリートの配合を表 4-1, モルタルの配合を表 4-2 に示す。薄片供試体を用いて水結合材比, 高炉スラグ, 養生方法, および増粘剤がモルタルの塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響を検討する試験に用いたモルタルの配合を表 4-3 に示す。非定常・電気泳動試験に用いたコンクリートの配合を表 4-4 および表 4-5, モルタルの配合を表 4-6 に示す。試験に用いた産地別の高炉スラグ細骨材の表面乾燥密度および吸水率を表 4-7 に示す。

表 4-1 薄片法に用いたコンクリートの配合

| W/B<br>(%) | GGBF/<br>B<br>(%) |  | BFS/S<br>(%) | Air<br>(%) | s/a<br>(%) | Unit content (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |     |     | 高性能<br>減水剤<br>(B×%) |      |
|------------|-------------------|--|--------------|------------|------------|-----------------------------------|-----|------|-----|-----|---------------------|------|
|            |                   |  |              |            |            | W                                 | B   |      | S   |     |                     | G    |
|            |                   |  |              |            |            |                                   | OPC | GGBF | CS  | BFS |                     |      |
| 50.0       | 0.0               |  | 0            | 2.0        | 50.5       | 175                               | 350 | 0    | 925 | 0   | 941                 | 0.25 |
|            |                   |  | 100.0        |            |            |                                   |     |      | 0   | 953 |                     |      |
|            | 60.0              |  | 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:砂岩砕砂,  
BFS:高炉スラグ細骨材(破砕前)

表 4-2 薄片法に用いたモルタルの配合

| W/B<br>(%) | GGBF/<br>B<br>(%) | BFS/S<br>(%) | Air<br>(%) | Unit content (kg/m <sup>3</sup> ) |       |       |       |       |
|------------|-------------------|--------------|------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            |                   |              |            | W                                 | B     |       | S     |       |
|            |                   |              |            |                                   | OPC   | GGBF  | CS    | BFS   |
| 50.0       | 0.0               | 0.0          | 2.0        | 270                               | 540   | 0     | 142,2 | 0     |
|            |                   | 33.3         |            |                                   |       |       | 948   | 488   |
|            |                   | 66.7         |            |                                   |       |       | 474   | 977   |
|            |                   | 100.0        |            |                                   |       |       | 0     | 146,5 |
|            | 30.0              | 0.0          |            |                                   | 141,0 | 0     |       |       |
|            |                   | 33.3         |            |                                   | 940   | 484   |       |       |
|            |                   | 66.7         |            |                                   | 470   | 968   |       |       |
|            |                   | 100.0        |            |                                   | 0     | 145,2 |       |       |
|            | 60.0              | 0.0          |            |                                   | 139,7 | 0     |       |       |
|            |                   | 33.3         |            |                                   | 932   | 480   |       |       |
|            |                   | 66.7         |            |                                   | 466   | 960   |       |       |
|            |                   | 100.0        |            |                                   | 0     | 144,0 |       |       |

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

表 4-3 薄片法に用いたモルタルの配合

| W/B<br>(%) | GGBF/B<br>(%) | Unit content (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |      |       | 高性能<br>減水剤<br>(B×%) | 増粘剤<br>(B×%) |      |
|------------|---------------|-----------------------------------|-----|------|------|-------|---------------------|--------------|------|
|            |               | W                                 | B   |      | S    |       |                     |              |      |
|            |               |                                   | OPC | GGBF | CS   | BFS   |                     |              |      |
| 50.0       | 0             | 300                               | 600 | 0    | 1350 | 0     | 0                   | 0            |      |
|            |               |                                   |     |      | 0    | 135,0 |                     | 0            |      |
|            | 50.0          |                                   | 300 | 300  | 0    | 135,0 |                     | 0            | 0.02 |
|            |               |                                   |     |      |      |       |                     | 0            | 0.02 |
| 35.0       | 0             | 210                               | 600 | 0    | 1350 | 0     | 0.3                 | 0            |      |
|            |               |                                   |     |      | 0    | 135,0 |                     | 0            |      |
|            | 50.0          |                                   | 300 | 300  | 0    | 135,0 |                     | 0            | 0.02 |
|            |               |                                   |     |      |      |       |                     | 0            | 0.02 |

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

表 4-4 非定常・電気泳動法に用いたコンクリートの配合

| W/B<br>(%) | GGBF/<br>B<br>(%) | BFS/S<br>(%) | Air<br>(%) | s/a<br>(%) | Unit content (kg/m <sup>3</sup> ) |      |      |     |     | 高性能<br>減水剤<br>(B×%) |      |     |
|------------|-------------------|--------------|------------|------------|-----------------------------------|------|------|-----|-----|---------------------|------|-----|
|            |                   |              |            |            | W                                 | B    |      | S   |     |                     | G    |     |
|            |                   |              |            |            |                                   | OPC  | GGBF | CS  | BFS |                     |      |     |
| 50.0       | 0.0               | 0            | 2.0        | 50.5       | 175                               | 350  | 0    | 924 | 0   | 942                 | 0.25 |     |
|            |                   | 100.0        |            |            |                                   |      |      | 0   | 956 |                     |      |     |
|            | 60.0              | 0            |            |            |                                   | 50.0 | 140  | 210 | 908 |                     |      | 0   |
|            |                   | 100.0        |            |            |                                   |      |      |     | 0   |                     |      | 939 |

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

表 4-5 高炉スラグ細骨材の産地別コンクリートの配合

| S<br>種類    | W/B<br>(%) | Air<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |       |                       |
|------------|------------|------------|------------|-------------------------|-----|-----|-------|-----------------------|
|            |            |            |            | W                       | C   | S   | G     | マスター<br>グレニウム<br>6520 |
| 砕砂         | 35.0       | 2.0        | 42.0       | 149.2                   | 443 | 760 | 108,4 | 5.54                  |
| 千葉 BFS     |            |            |            | 139.8                   |     | 776 |       |                       |
| 福山 BFS     |            |            |            | 132.9                   |     | 817 |       |                       |
| 倉敷 BFS     |            |            |            | 113.6                   |     | 822 |       |                       |
| 加古川<br>BFS |            |            |            | 126.8                   |     | 800 |       |                       |
| 君津 BFS     |            |            |            | 130.8                   |     | 819 |       |                       |
| 名古屋<br>BFS |            |            |            | 128.4                   |     | 810 |       |                       |

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

表 4-6 非定常・電気泳動法に用いたモルタルの配合

| W/B<br>(%) | GGBF/<br>B<br>(%) | BFS/S<br>(%) | Air<br>(%) | s/a<br>(%) | Unit content (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |       | 高性能<br>減水剤<br>(B×%) |      |
|------------|-------------------|--------------|------------|------------|-----------------------------------|-----|------|-------|---------------------|------|
|            |                   |              |            |            | W                                 | B   |      | S     |                     |      |
|            |                   |              |            |            |                                   | OPC | GGBF | CS    |                     | BFS  |
| 50.0       | 0.0               | 0            | 2.0        | 50.5       | 270                               | 540 | 0    | 1,422 | 0                   | 0.25 |
|            |                   | 100.0        |            |            |                                   |     |      | 0     | 1,470               |      |
|            | 60.0              | 0            |            | 50.0       |                                   | 216 | 324  | 1,397 | 0                   |      |
|            |                   | 100.0        |            |            |                                   |     |      | 0     | 1,445               |      |

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

表 4-7 産地別コンクリートの表乾密度および表面水率

| S<br>種類 | 表乾密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 表面水率<br>(%) |
|---------|------------------------------|-------------|
| 砕砂      | 2.64                         | 0.20        |
| 千葉 BFS  | 2.66                         | 1.43        |
| 福山 BFS  | 2.78                         | 2.23        |
| 倉敷 BFS  | 2.73                         | 4.73        |
| 加古川 BFS | 2.70                         | 3.08        |
| 君津 BFS  | 2.78                         | 2.49        |
| 名古屋 BFS | 2.74                         | 2.84        |

#### 4-3 練混および養生条件

コンクリートの練混ぜには、容量が 100 リットルの強制二軸ミキサーを使用した。練混ぜは、粗骨材、細骨材および結合材を投入後、30 秒の空練りを行い、水および混和剤を加えて 120 秒間の本練りを行った。モルタルの練混ぜには、ホバート型モルタルミキサーを使用した。

表 4-1 および表 4-4 に示すコンクリートは、打設後 24 時間以内の初期養生方法では、室内での養生または、蒸気養生を用いた。蒸気養生は、2012 年制定土木学会コンクリート標準示方書 [施行編]<sup>12)</sup> に示されている方法に従い行った。打込み後 3 時間型枠内に静置した後、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。蒸気養生後は水中養生および気中養生を所定の期間行った。表 4-2、表 4-5 および表 4-6 に示すコンクリートおよびモルタルの初期養生は、室内養生を行った。初期養生後に水中養生を行ったコンクリートおよびモルタル供試体は、コンクリート打込み後、24 時間常温で型枠内養生を行った後に脱型し、所定の期間まで水中養生を行った。表 4-3 に示すモルタルの初期養生は、蒸気養生および恒温室養生を行った。恒温室養生では、翌日まで 20℃の恒温室内にて型枠内で養生を行い、蒸気養生では、型枠打込み後 4 時間 20℃で静置後、2 時間で 50℃まで昇温させ、4 時間 50℃で保持した後、室温まで自然冷却を行った。脱型後は、いずれの初期養生を行ったモルタルも水中養生を行った。

#### 4-4 薄片供試体を用いた塩分イオン浸透性試験

##### 4-4-1 薄片供試体を用いた塩化物イオン浸透性試験の原理



供試体内に浸透する塩化物イオン量は最終的には飽和するため、供試体の厚さが異なっても、塩化物イオン濃度の最終値は等しくなる。この最終値を表面塩化物イオン濃度とし、塩化物イオン量と浸漬期間の関係を次式 (4.1.1) に示す。

$$C(t) = \frac{C_{\infty} \cdot t}{C_0 + t} \quad (4.1.1)$$

ここに、 $C(t)$ ：浸漬期間 $t$ （日）における塩化物イオン濃度、 $C_{\infty}$ ：塩化物イオン濃度の最終値（表面塩化物イオン濃度）、 $C_0$ ：初期塩化物イオン濃度である。

供試体の厚さにより塩化物イオン量の経時変化が異なるのは、塩分浸透が拡散現象であるため、中心部まで塩分が浸透するのに要する時間が異なるためである。拡散現象に従うのであれば、厚みが異なっても同一の供試体の拡散係数は等しくなる。

#### 4-4-2 拡散方程式の差分化

塩化ナトリウム水溶液に浸漬させたスライス薄片の塩化物イオンの浸透イメージを図 4-1 に示す。縦軸は塩化物イオン濃度  $u$ ，横軸をスライス薄片の短辺  $x$  とすると、初期の段階 A では表面部分のみ浸漬している塩化物イオンが、時間  $t$  の経過とともに中心部分に向かって浸透し、完全飽和状態 C となる。これは塩化物イオン量の拡散方程式は、Fick の第 2 法則を用いて次式 (4.1.2) で示される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4.1.2)$$

ここに、 $D$ ：拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )， $u$ ：塩化物イオン量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $x$ ：浸漬面からの距離 ( $\text{mm}$ )， $t$ ：浸漬期間（時間）である。

差分法を用い、時間微分は前進差分および、空間微分は中心 2 階差分を用いて拡散方程式 (3.1.2) を差分化し、 $\lambda = \frac{D\delta t}{\delta x^2}$  とおくと次式 (3.1.5) となる。

$$\frac{u(x, t + \delta t) - u(x, t)}{\delta t} \cong D \frac{u(x - \delta x, t) - 2u(x, t) + u(x + \delta x, t)}{\delta x^2} \quad (4.1.3)$$

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\delta t} = D \frac{u_{i-1}^n - 2u_i^n + u_{i+1}^n}{\delta x^2} \quad (4.1.4)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N, n = 0, 1, \dots)$$

$$u_i^{n+1} = u_i^n + \lambda (u_{i-1}^n - u_i^n + u_{i+1}^n) \quad (4.1.5)$$

境界条件として

- ・ディリクレ境界条件

$$\frac{u_0^n + u_1^n}{2} \cong u(0, t_n) = 0, \quad \frac{u_N^n + u_{N+1}^n}{2} \cong u(L, t_n) = 0$$

$$u_0^n = -u_1^n, \quad u_{N+1}^n = -u_N^n$$

- ・ノイマン境界条件

$$\frac{u_0^n - u_1^n}{2} \cong \frac{\partial u(0, t_n)}{\partial x} = 0, \quad \frac{u_N^n - u_{N+1}^n}{2} \cong \frac{\partial u(L, t_n)}{\partial x} = 0$$

$$u_0^n = u_1^n, \quad u_{N+1}^n = u_N^n$$

- ・周期的環境条件

$$u_0^n = u_N^n, \quad u_{N+1}^n = u_1^n$$

とする。

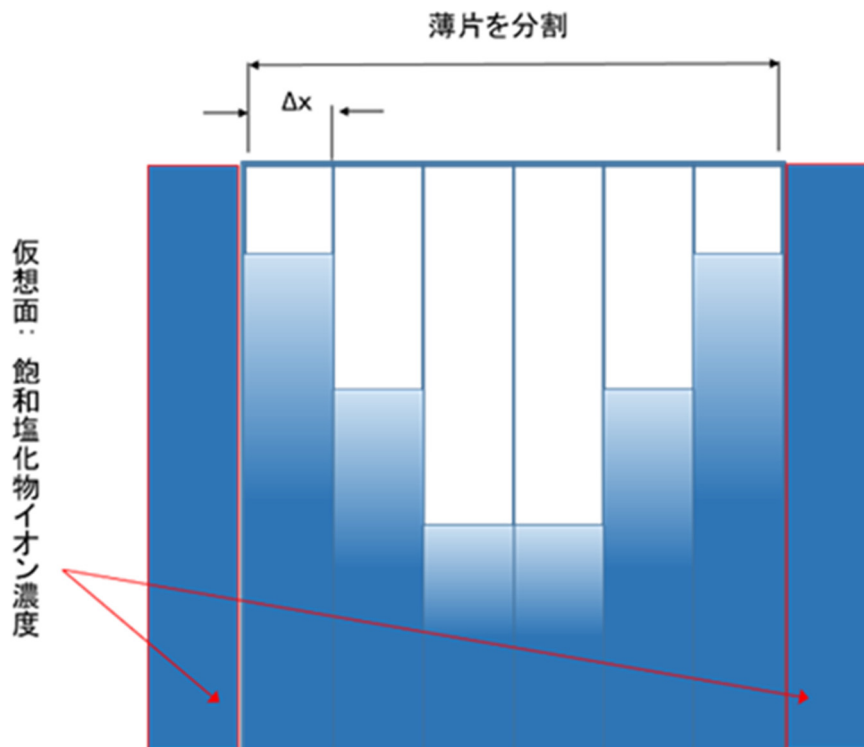


図 3-1 薄片供試体の塩化物イオン現象の様子

#### 4-4-3 評価方法

モルタルは 40mm×40mm×160mm の型枠へ打込み，脱型後 2mm の薄片試験体を作

製した。薄片供試体は、試験開始の3日前から前日に作製し、スライス後は、試験開始まで再び20℃の水中で養生を行い、質量パーセント濃度で10%の塩化ナトリウム水溶液に薄片供試体を浸漬させ試験を行った。薄片供試体を浸漬させる様子を写真4-1に示す。浸漬期間を0日から28日とし、この期間内に5点以上の浸漬期間を設けるように薄片供試体を塩水中から採取した。薄片供試体を採取した後、JIS A 1154:2011「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」により、コンクリートの全塩化物イオン含有量の測定を行った。

表4-1および表4-2に示した配合の薄片供試体は、1,092日の塩水浸漬試験に用いた供試体の、塩化物イオンが浸透していない部分を用いて作製した。

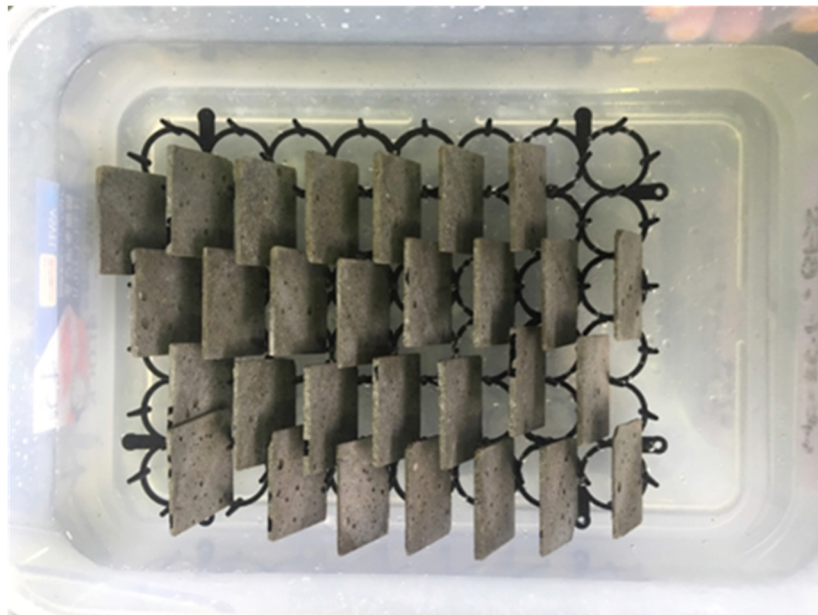


写真4-1 薄片供試体を用いた塩水浸漬試験の様子

#### 4-5 非定常・電気泳動試験<sup>13)</sup>

非定常・電気泳動試験の概略図を図4-2に示す。試験には、 $\phi 100 \times 50 \text{mm}$ の円盤状の供試体を用いた。実験では、コンクリートおよびモルタルの $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 円柱供試体を作製し、所定の養生（水中養生、蒸気養生後気中養生および蒸気養生後水中養生）を行った後、筒状の塩ビ管に円柱供試体を入れ、供試体と塩ビ管の隙間をエポキシ樹脂で埋め完全に硬化させた。その後湿気式コンクリートカッターを用いて上下25mm部分を除いた中心部分を用いて $\phi 100 \times 50 \text{mm}$ の円盤状の供試体をそれぞれ3つずつ作製した。成形した供試体は、24時間以上真空飽水処理を行った後、電気泳動用のセル容器に設置した。陽極側にモル濃度0.3mol/Lの水酸化ナトリウム水溶液を、陰極側に質量濃度10%の塩化ナトリウム水溶液を充填し、直流電圧30.0Vを印加した。

試験の様子を写真 4-2 に示す。通電後、供試体を取り出した後、割裂した面に対して硝酸銀水溶液を噴霧し、塩化物イオン浸透深さを測定した。通電時間は、塩化物イオンが供試体を貫通して陽局側溶液まで到達しないように調整して行った。配合や養生方法によって塩化物イオンの浸透しやすさが異なるため、通電時間はそれぞれ様子を見ながら実験を行った。通電時間と塩分浸透深さの関係から、塩化物イオン浸透速度  $k$  (mm/時) を求めた(図 4-3)。塩化物イオンの実効拡散係数  $D$  (cm<sup>2</sup>/年) は下式で求める。

$$D = k \frac{R(T+273)}{zF} \frac{L}{\Delta\phi} \frac{24 \cdot 365}{100} \quad (1)$$

ここに、気体定数  $R(=8.31\text{J/mol/K})$ , 通電中の陰極側溶液の温度平均値  $T$  (°C), 塩化物イオンの電化の絶対値  $z(=1)$ , ファラデー定数  $F(=9648.3\text{C/mol})$ , 塩化物イオン浸透速度  $k$  (mm/時), 円盤状供試体厚さ  $L$  (mm), 供試体にかけた電圧  $\Delta\phi$  (V) とする。なお、今回の実験は、室温が約 20°C に管理された恒温室内で実施した。

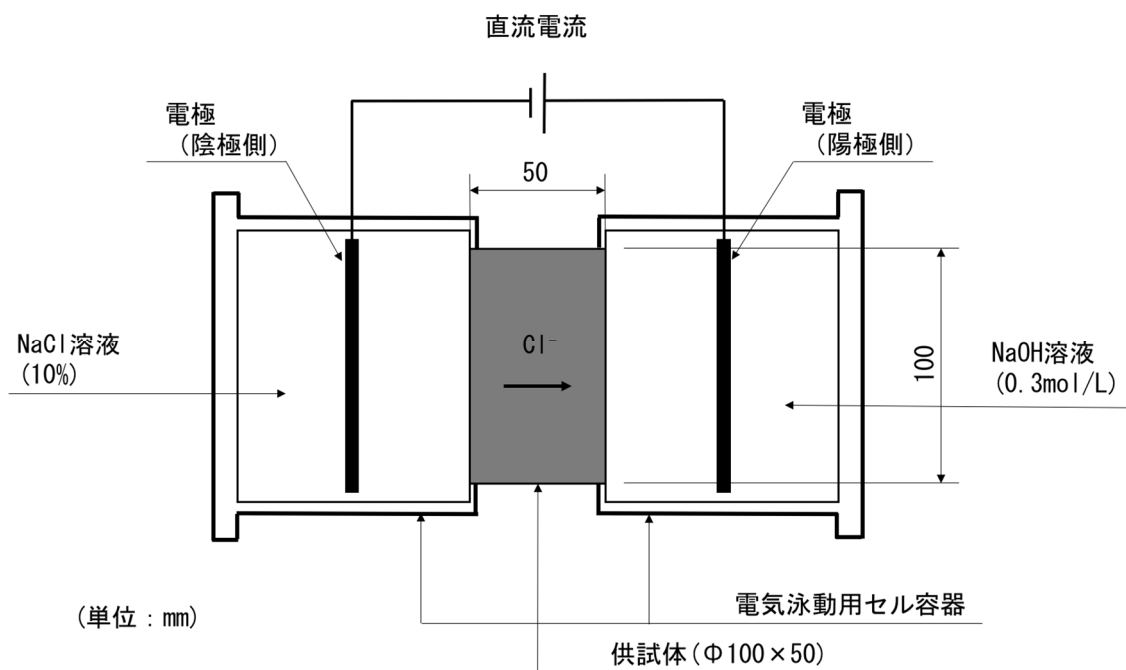


図 4-2 非定常・電気泳動試験の概略図

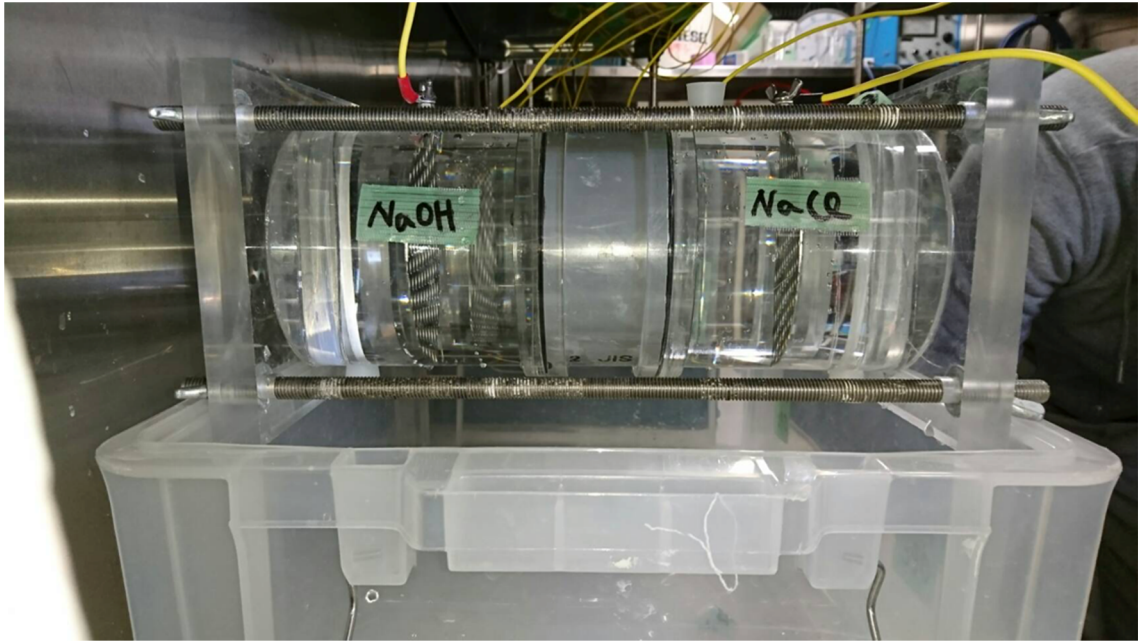


写真 4-2 非定常・電気泳動試験の様子

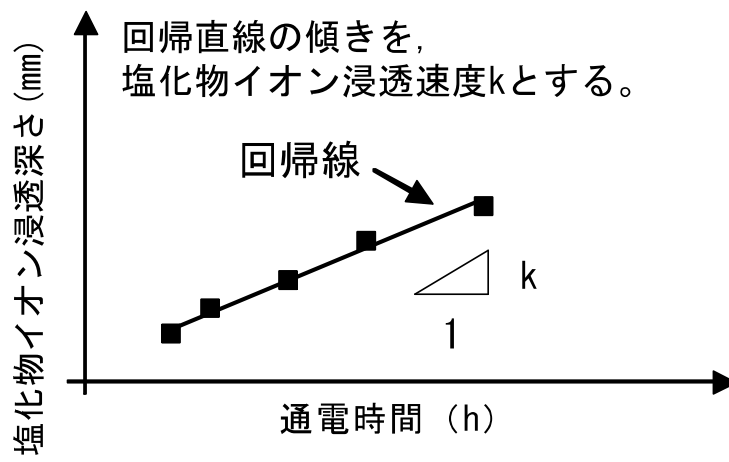


図 4-3 塩化物イオン浸透速度  $k$  の算出方法<sup>9)</sup>

## 4-6 実験結果および考察

### 4-6-1 薄片供試体を用いたモルタルの塩化物イオン浸透性試験

図 4-4 は、W/B=50%で細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタル薄片において、高炉スラグ微粉末が塩化物イオン浸透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、結合材中の高炉スラグ微粉末の使用量が 0%、30%および 60%の塩化物イオン量の経時変化を示している。高炉スラグ微粉末の使用量が多くなるに連れて塩化物イオン量の増加が遅くなっていることがわかる。また、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたモルタルは、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたものに比べて、飽和塩化物イオン量が大きくなっている。

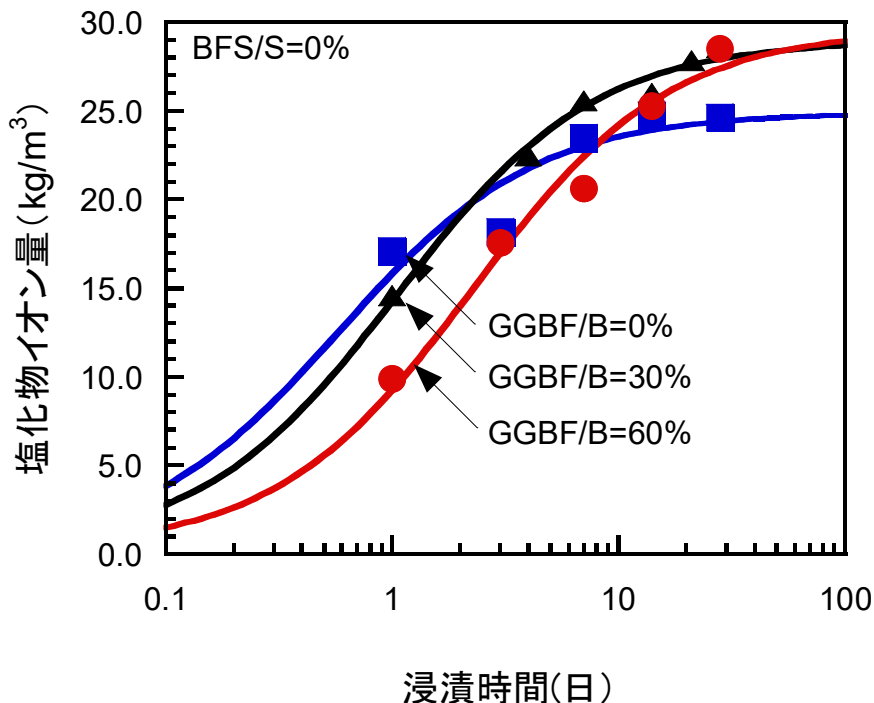


図 4-4 高炉スラグ微粉末がモルタルの薄片の塩化物イオン量に与える影響  
(W/B=50%, BFS/S=0%の場合)

図 4-5 は、W/B=50%で細骨材に高炉スラグ細骨材を質量比で 33%用いたモルタル薄片において、高炉スラグ微粉末が塩化物イオン浸透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、結合材中の高炉スラグ微粉末の使用量が 0%、30%および 60%の塩化物イオン量の経時変化を示している。高炉スラグ微粉末の使用量が多くなるに連れて塩化物イオン量の増加が遅くなっていることがわかる。また、結合材に高炉スラグ微粉末 30%用いたモルタルのみ飽和塩化物イオン量が大きくなっている。

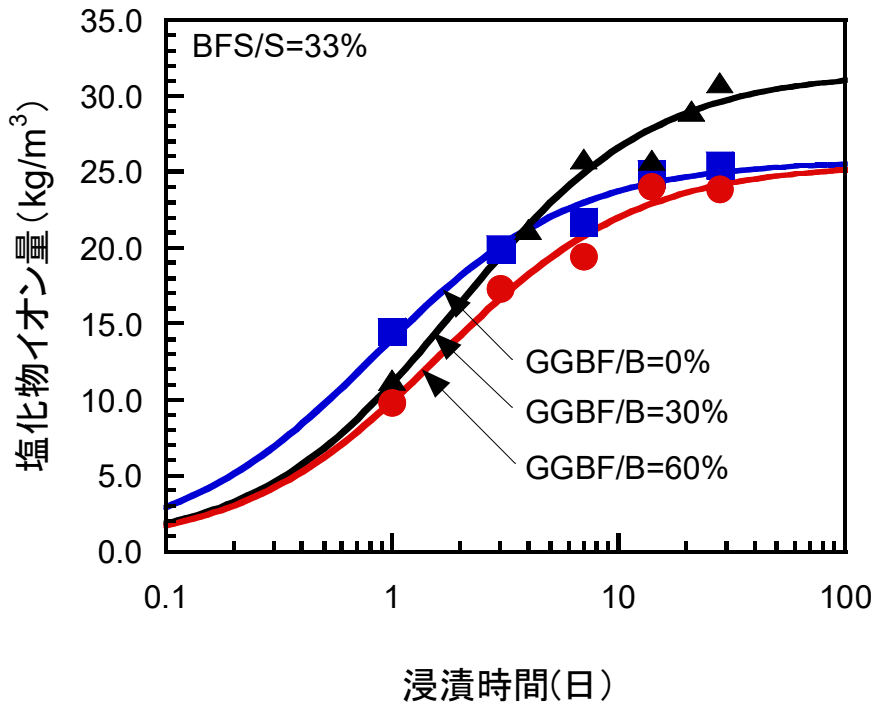


図 4-5 高炉スラグ微粉末がモルタルの薄片の塩化物イオン量に与える影響  
(W/B=50%, BFS/S=33%の場合)

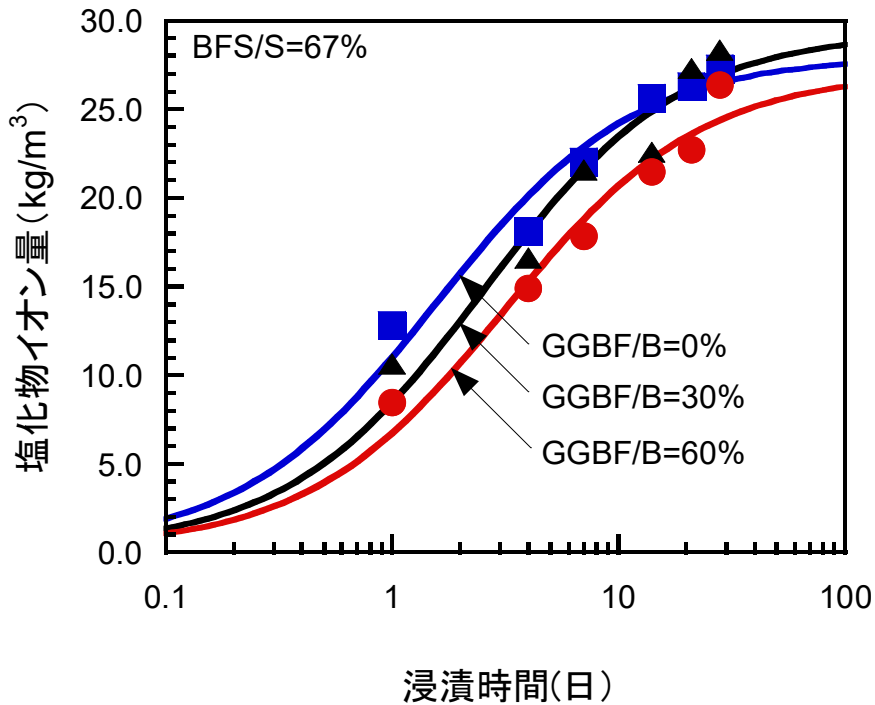


図 4-6 高炉スラグ微粉末がモルタルの薄片の塩化物イオン量に与える影響  
(W/B=50%, BFS/S=67%の場合)



図 4-6 は、W/B=50%で細骨材に高炉スラグ細骨材を質量比で 67%用いたモルタル薄片において、高炉スラグ微粉末が塩化物イオン浸透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、結合材中の高炉スラグ微粉末の使用量が 0%、30%および 60%の塩化物イオン量の経時変化を示している。高炉スラグ微粉末の使用量が多くなるに連れて塩化物イオン量の増加が遅くなっていることがわかる。

図 4-7 は、W/B=50%で細骨材に高炉スラグ細骨材を質量比で 100%用いたモルタル薄片において、高炉スラグ微粉末が塩化物イオン浸透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、結合材中の高炉スラグ微粉末の使用量が 0%、30%および 60%の塩化物イオン量の経時変化を示している。高炉スラグ微粉末の使用量が多くなるに連れて塩化物イオン量の増加が遅くなっていることがわかる。

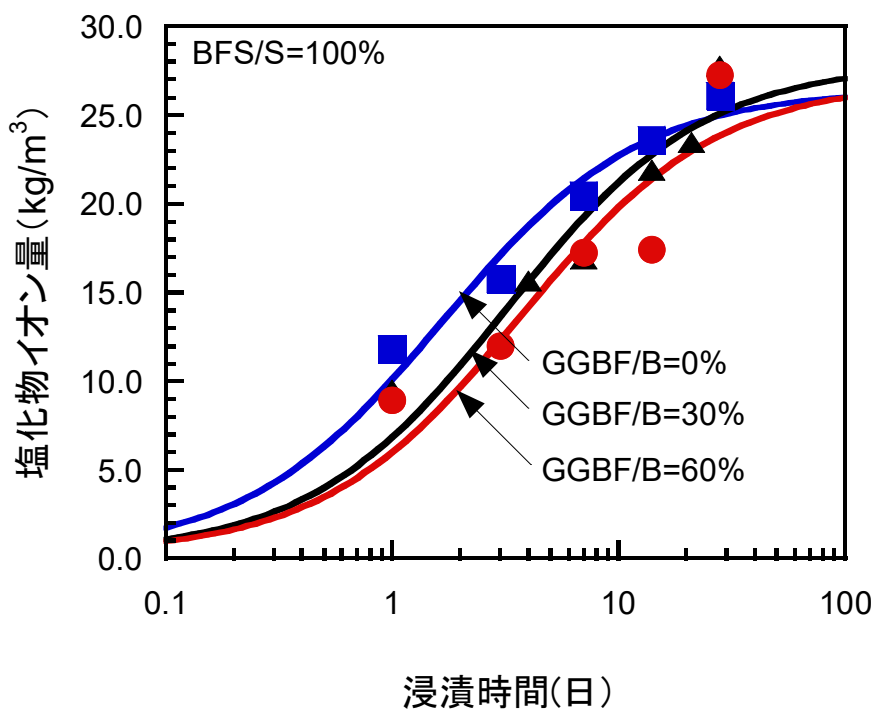


図 4-7 高炉スラグ微粉末がモルタルの薄片の塩化物イオン量に与える影響  
(W/B=50%, BFS/S=100%の場合)

図 4-8 は、W/B=50%で結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が塩化物イオン浸透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、細骨材中の高炉スラグ細骨材の使用量が 0%、33%、67%および 100%の塩化物イオン量の経時変化を示している。高炉スラグ細骨材の使用量が多くなるに連れて塩化物イオン量の増加が遅くなっていることがわかる。

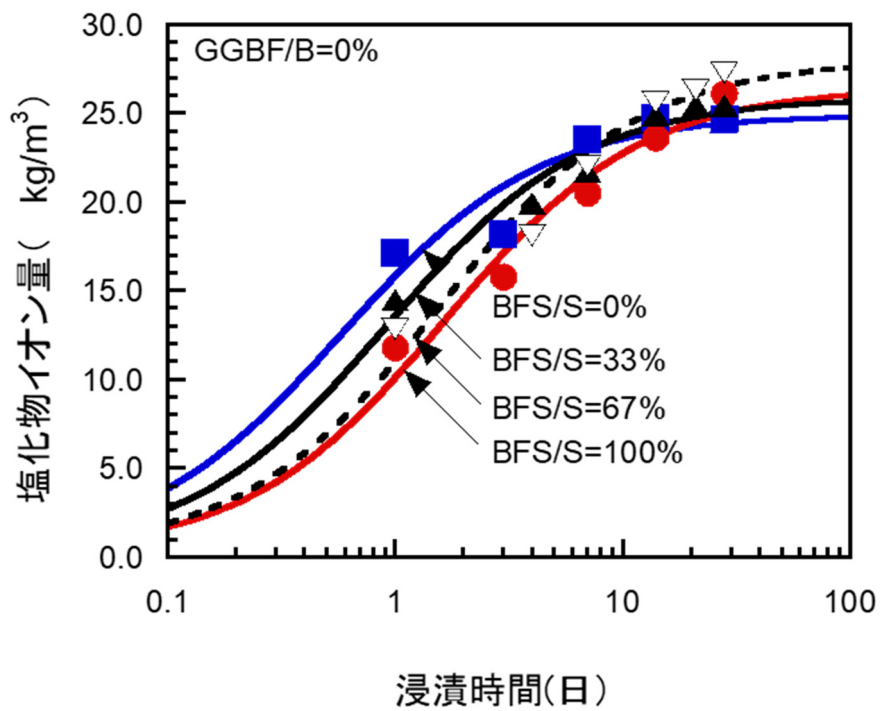


図 4-8 高炉スラグ細骨材がモルタルの薄片の塩化物イオン量に与える影響  
(W/B=50%, GGBF/B=0%の場合)

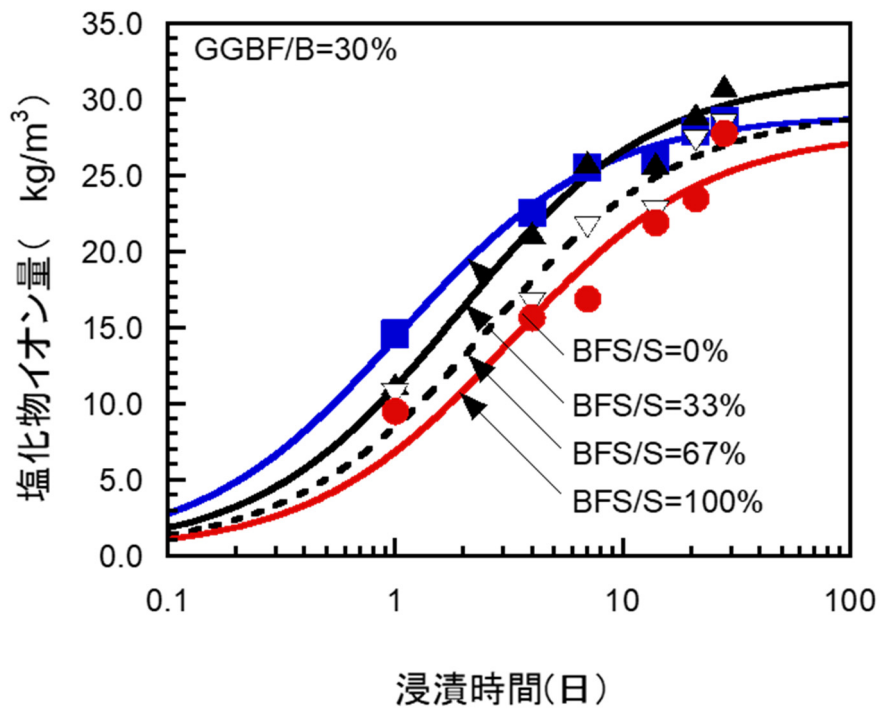


図 4-9 高炉スラグ細骨材がモルタルの薄片の塩化物イオン量に与える影響  
(W/B=50%, GGBF/B=30%の場合)

図 4-9 は、W/B=50%で結合材に高炉スラグ微粉末を質量比で 30%用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が塩化物イオン浸透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、細骨材中の高炉スラグ細骨材の使用量が 0%, 33%, 67%および 100%の塩化物イオン量の経時変化を示している。高炉スラグ細骨材の使用量が多くなるに連れて塩化物イオン量の増加が遅くなっていることがわかる。

図 4-10 は、W/B=50%で結合材に高炉スラグ微粉末を質量比で 60%用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が塩化物イオン浸透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、細骨材中の高炉スラグ細骨材の使用量が 0%, 33%, 67%および 100%の塩化物イオン量の経時変化を示している。高炉スラグ細骨材の使用量が多くなるに連れて塩化物イオン量の増加が遅くなっていることがわかる。

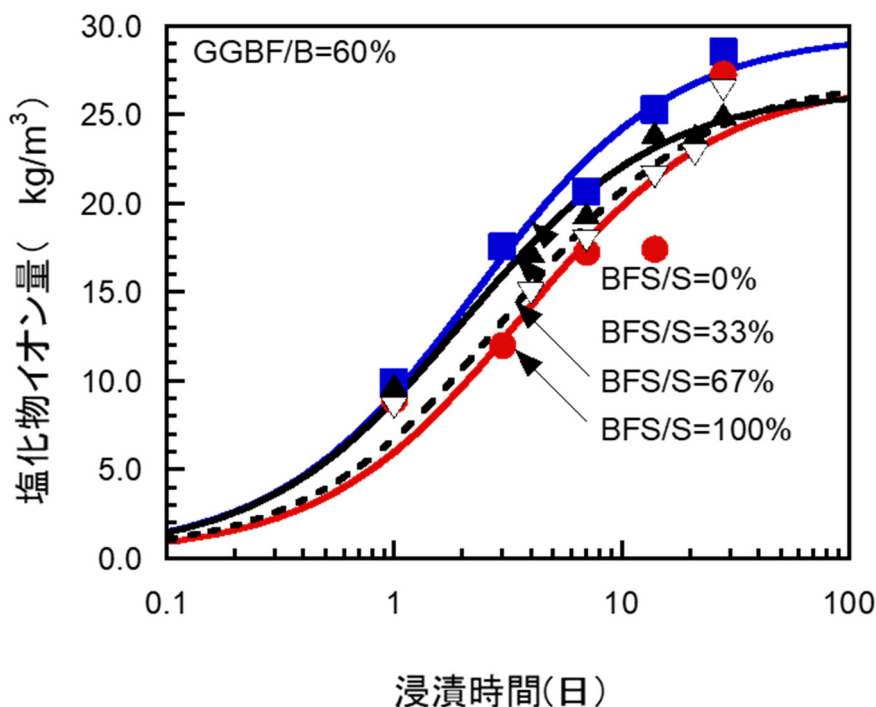


図 4-10 高炉スラグ細骨材がモルタルの薄片の塩化物イオン量に与える影響  
(W/B=50%, GGBF/B=60%の場合)

図 4-11 は、W/B=50%で高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が塩化物イオン浸透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もちいており、結合材には普通ポルトランドセメントを用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。■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もちいており，結合材には高炉スラグ微粉末を用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。結合材に普通ポルトランドセメントを用い，結合材には普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに比べて，結合材もしくは細骨材に高炉スラグを用いると，塩化物イオン量の増加が同程度になっていることが分かる。また，結合材と細骨材の両方に高炉スラグを用いた場合が最も塩化物イオン量の増加が遅くなる。

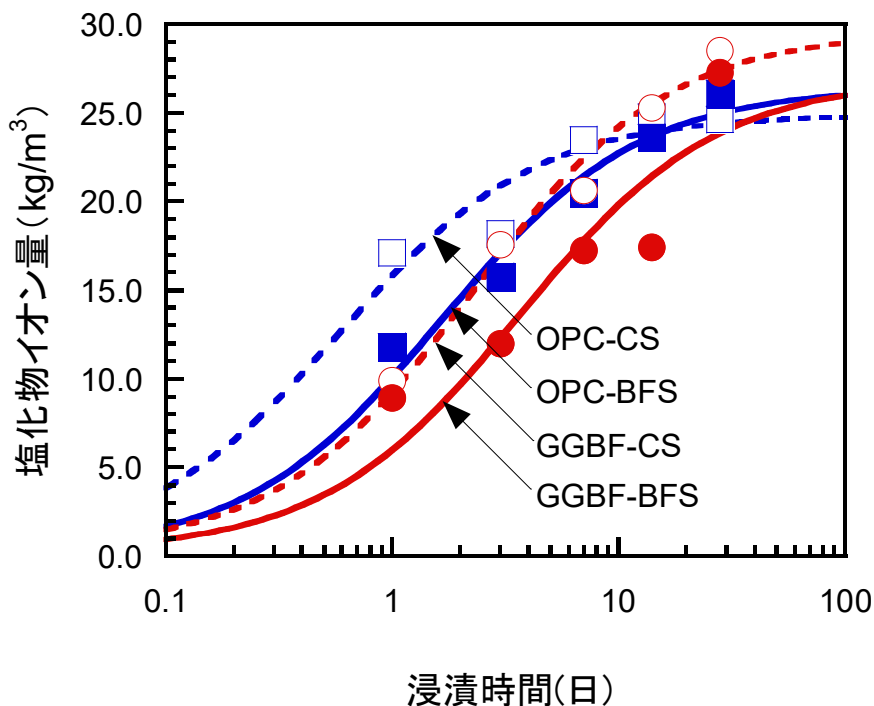


図 4-11 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がモルタルの薄片の塩化物イオン量に与える影響 (W/B=50%の場合)

#### 4-6-2 薄片法および浸漬法から求めたモルタルの拡散係数の関係

図 4-12 は，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薄片から求めた拡散係数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，結合材中の高炉スラグ微粉末の使用量が 0%，30%，および 60%の拡散係数を示している。結合材に高炉スラグ微粉末を用いても，細骨材に高炉スラグ細骨材を用いても，モルタルの拡散係数は小さくなる事が分かる。

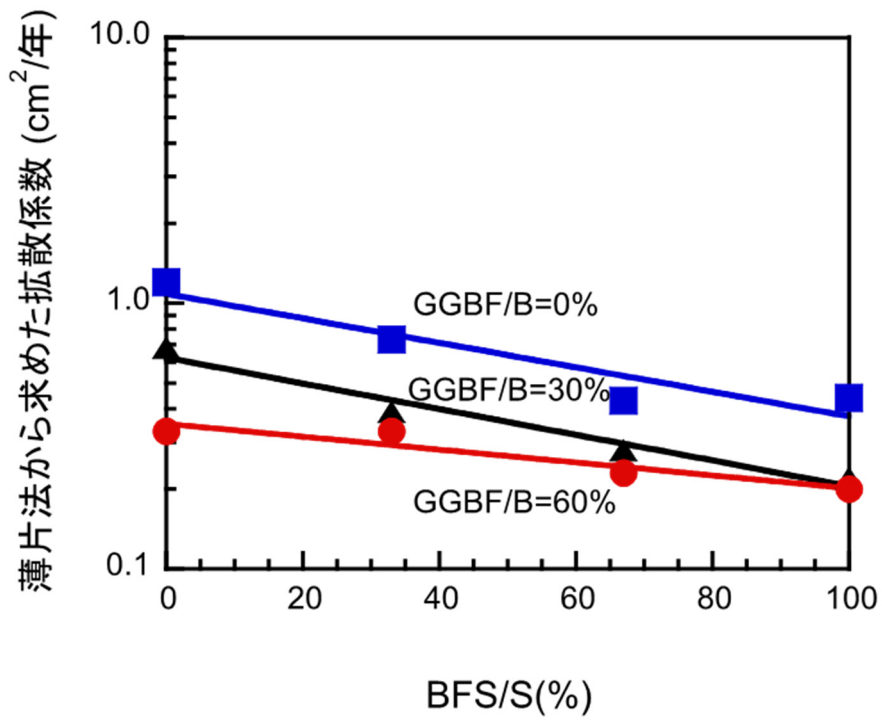


図 4-12 薄片法から求めた拡散係数 (W/B=50%のモルタルの場合)

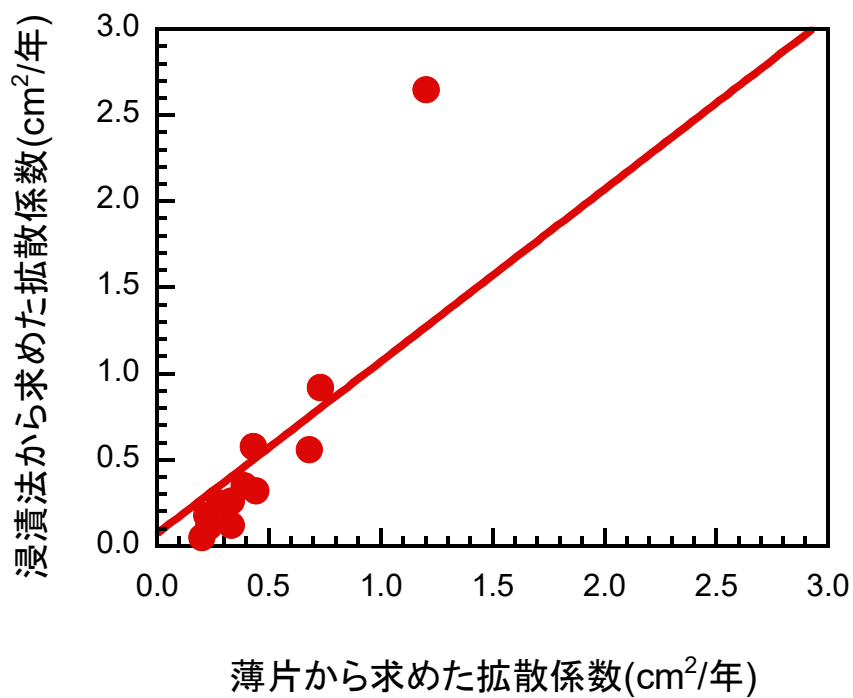


図 4-13 薄片法および浸漬法から求めた拡散係数の関係 (W/B=50%のモルタルの場合)

図 4-13 は、薄片からおよび浸漬法から求めたモルタルの見掛けの拡散係数の関係を示したものである。薄片から求めた拡散係数は、浸漬法から求めた見掛けの拡散係数と同じ傾向にあることが分かる。

図 4-14 は、薄片および浸漬法から求めたモルタルの見掛けの拡散係数の関係を示したものである。■および■は、それぞれ、浸漬法および薄片法から求めた拡散係数を示している。高炉スラグを結合材および細骨材のいずれかに用いた場合に拡散係数が小さくなり、高炉スラグを結合材および細骨材の両方に用いるとさらに拡散係数が小さくなる傾向が、浸漬法と薄片法の両方の試験方法で得られた。薄片法は、浸漬法と同傾向の拡散係数を求めることができることが分かる。

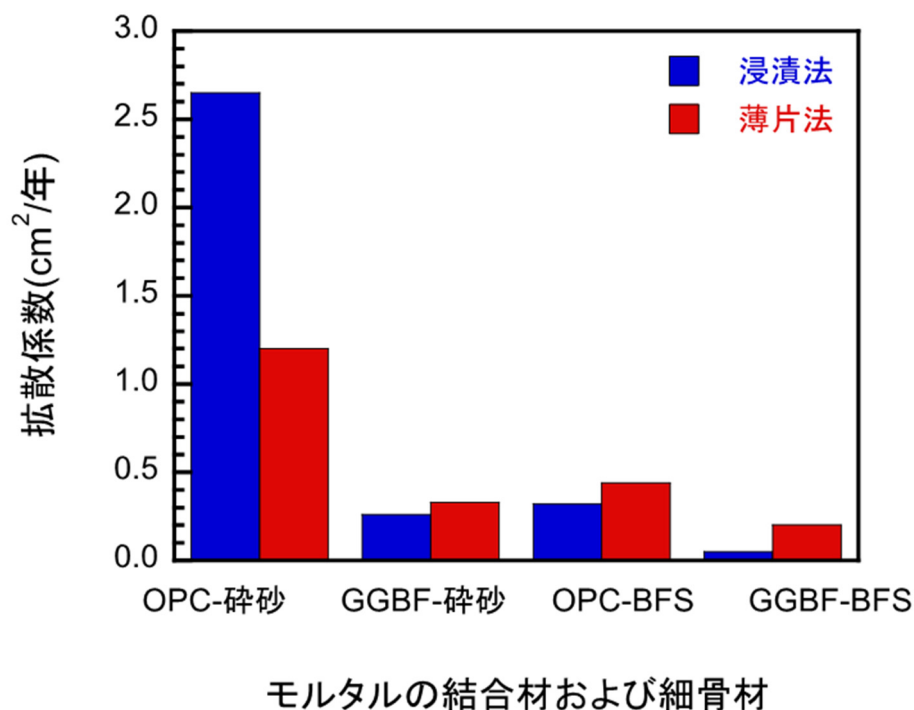


図 4-14 薄片法および浸漬法から求めた拡散係数の関係に高炉スラグが与える影響 (W/B=50%のモルタルの場合)

#### 4-6-3 薄片供試体を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透性試験

図 4-15 は、W/B=50%および水中養生で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塩化物イオン浸透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、細骨材に砂岩碎砂および高炉スラグ細骨材をもちいており、結合材には普通ポルトランドセメントを用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。○および●は、それぞれ、細骨材に砂岩碎砂および高炉スラグ細骨材をもちいており、結合材には高炉スラグ微粉末を用いた薄片供試体の塩化物イオン量

の経時変化を示している。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コンクリートに比べて、細骨材に高炉スラグを用いると、塩化物イオン量の増加が同程度であることが分かる。また、結合材と細骨材の両方に高炉スラグを用いた場合が最も塩化物イオン量の増加が遅くなることが分かる。

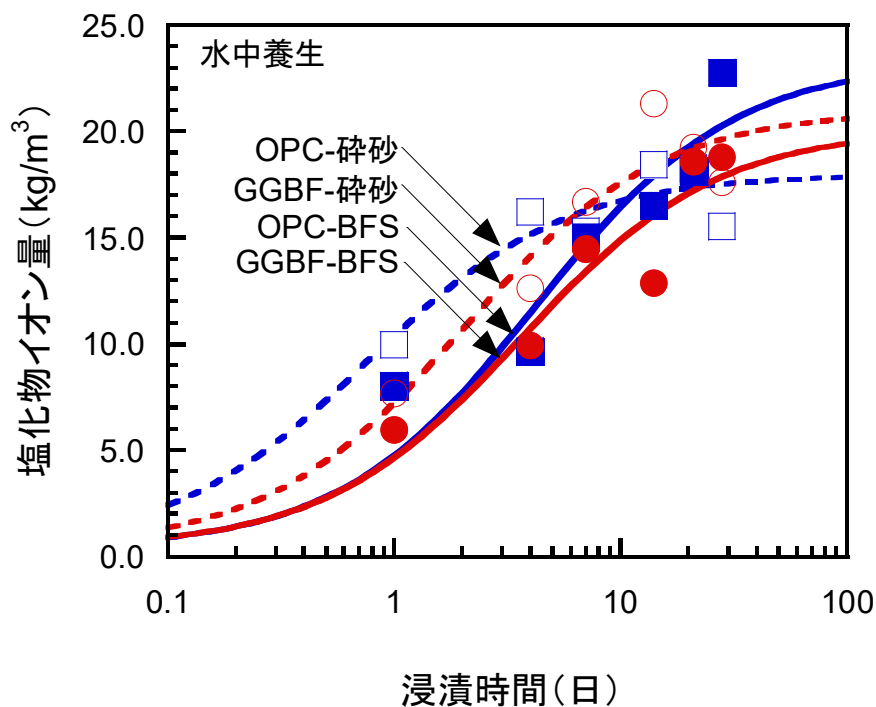


図 4-15 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がコンクリートの薄片の塩化物イオン量に与える影響(水中養生の場合)

図 4-16 は、W/B=50%および蒸気養生後気中養生で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塩化物イオン浸透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もちいており、結合材には普通ポルトランドセメントを用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。○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もちいており、結合材には高炉スラグ微粉末を用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。結合材に普通ポルトランドセメントを用い、結合材には普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに比べて、結合材および細骨材に高炉スラグを用いると、塩化物イオン量の増加が同程度に遅くなることが分かる。



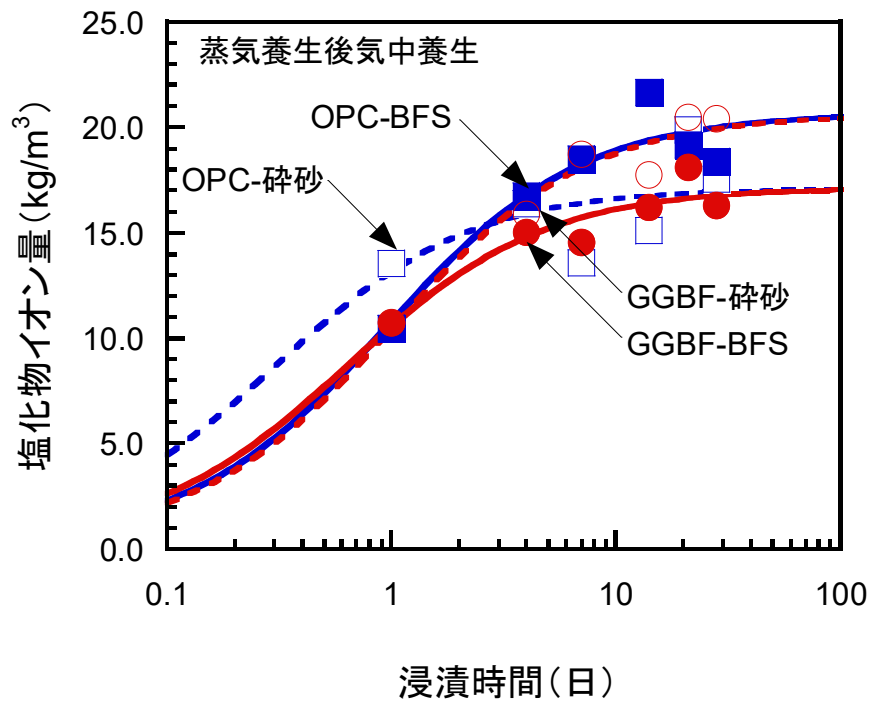


図 4-16 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がコンクリートの薄片の塩化物イオン量に与える影響(蒸気養生後気中養生の場合)

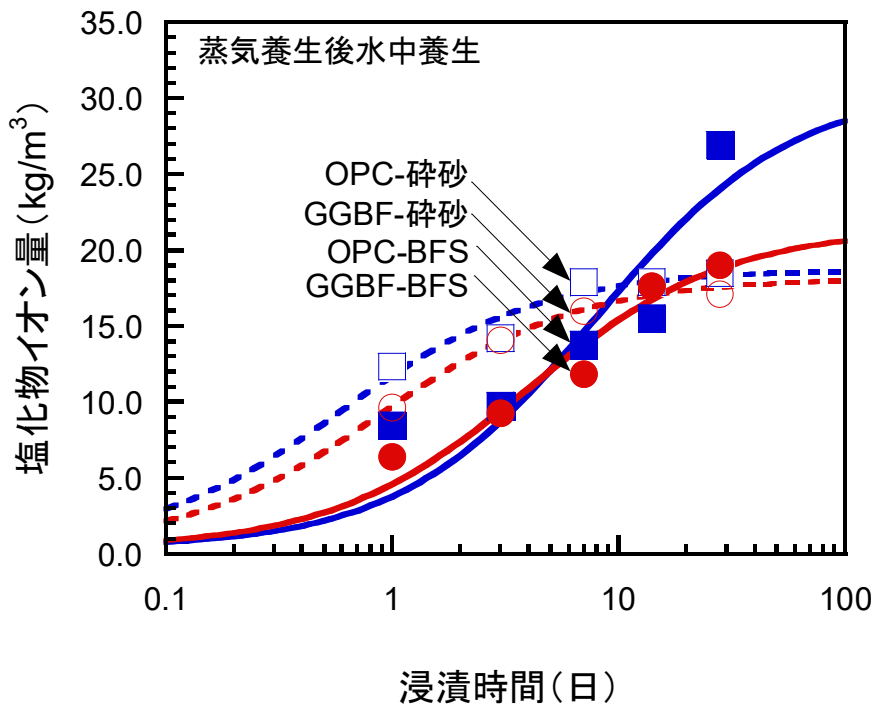


図 4-17 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がコンクリートの薄片の塩化物イオン量に与える影響(蒸気養生後水中養生の場合)

図 4-17 は、W/B=50%および蒸気養生後水中養生で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塩化物イオン浸透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もちいており、結合材には普通ポルトランドセメントを用いた薄片供試体の塩化物イオン量の分布を示している。○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もちいており、結合材には高炉スラグ微粉末を用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。結合材に普通ポルトランドセメントを用い、結合材には普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに比べて、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いると、塩化物イオン量の増加が同程度に遅くなることが分かる。

図 4-18 は、W/B=50%で、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コンクリートにおいて養生方法が塩化物イオン浸透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、蒸気養生後気中養生、蒸気養生後水中養生および水中養生の薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。養生条件による影響は少ない。

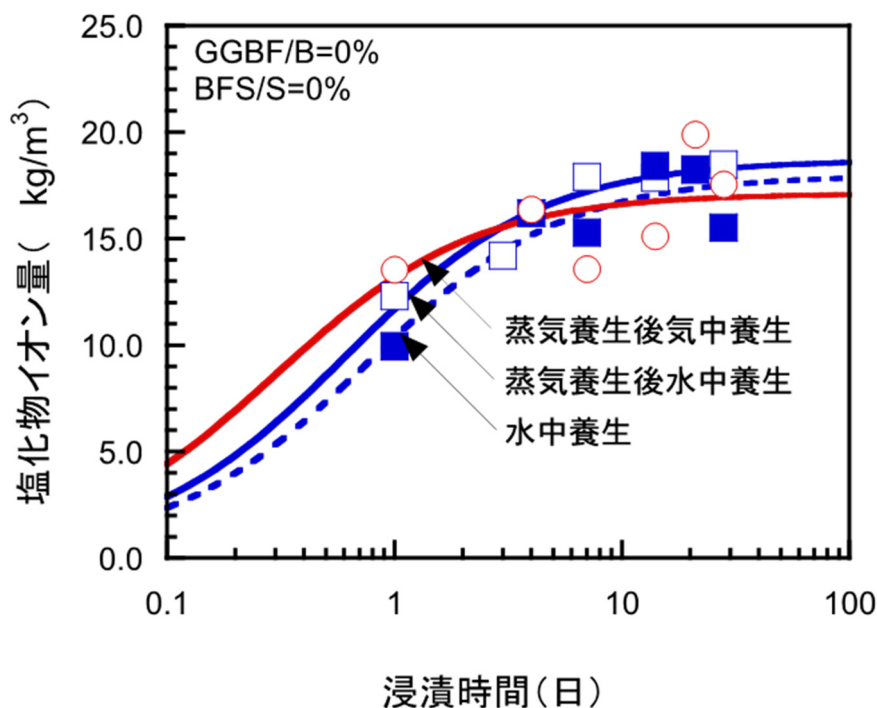


図 4-18 養生方法がコンクリートの薄片の塩化物イオン量に与える影響  
(GGBF/B=0%, BFS/S=0%の場合)

図 4-19 は、W/B=50%で、結合材に普通ポルトランドセメントを用い、細骨材には高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートにおいて養生方法が塩化物イオン浸透に与

える影響を示したものである。図中の○、□および■は、それぞれ、蒸気養生後気中養生、蒸気養生後水中養生および水中養生の薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。水中養生を行ったコンクリートが最も塩化物イオン量の増加が遅い。また、蒸気養生を行うと塩化物イオン量の増加が遅くなるが、飽和塩化物イオン量は大きくなっていることが分かる。

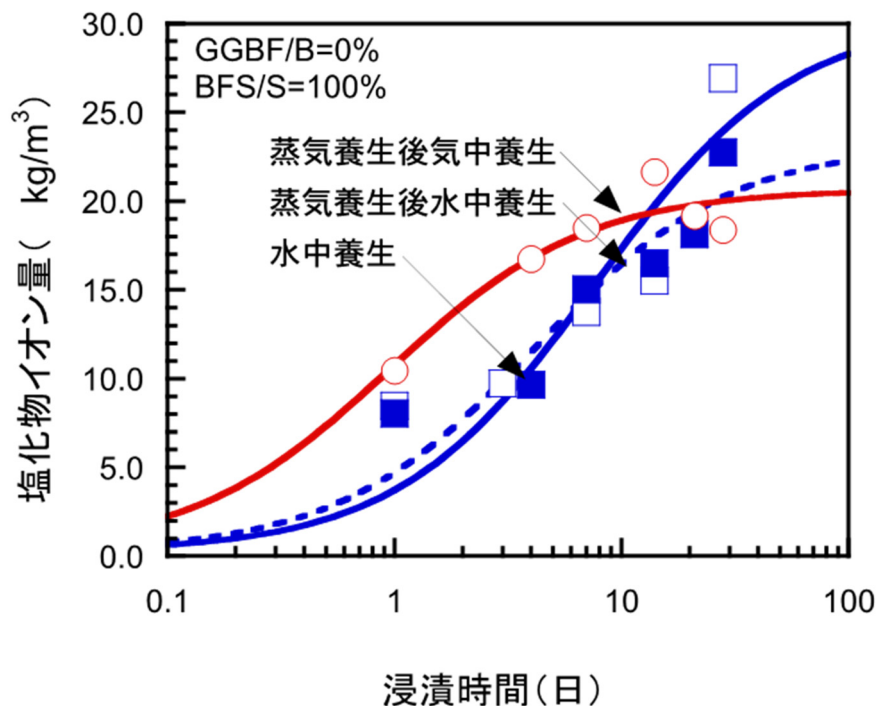


図 4-19 養生方法がコンクリートの薄片の塩化物イオン量に与える影響  
(GGBF/B=0%, BFS/S=100%の場合)

図 4-20 は、W/B=50%で、結合材に高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には砂岩砕砂を用いたコンクリートにおいて養生方法が塩化物イオン浸透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、蒸気養生後気中養生、蒸気養生後水中養生および水中養生の薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。水中養生を行ったコンクリートが最も塩化物イオン量の増加が遅い。蒸気養生による影響は少ない。

図 4-21 は、W/B=50%で、結合材に高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートにおいて養生方法が塩化物イオン浸透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、蒸気養生後気中養生、蒸気養生後水中養生および水中養生の薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示し

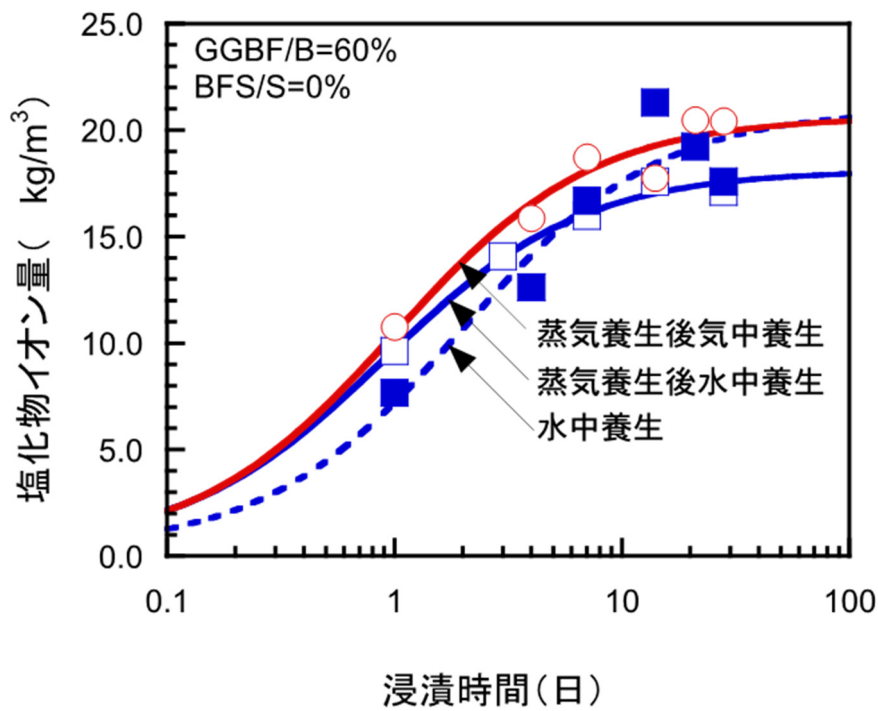


図 4-20 養生方法がコンクリートの薄片の塩化物イオン量に与える影響  
(GGBF/B=60%, BFS/S=0%の場合)

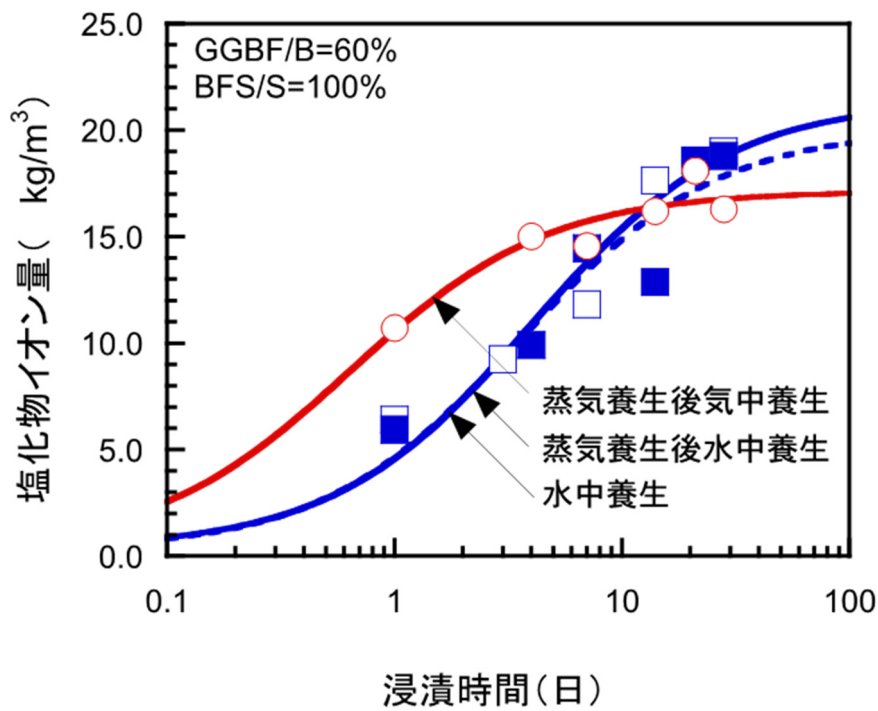


図 4-21 養生方法がコンクリートの薄片の塩化物イオン量に与える影響  
(GGBF/B=60%, BFS/S=100%の場合)

ている。水中養生および蒸気養生後水中養生を行ったコンクリートが最も塩化物イオン量の増加が遅いことが分かる。

#### 4-6-4 薄片法および浸漬法から求めたコンクリートの拡散係数の関係

図 4-22 は、コンクリートの見かけの拡散係数に養生方法が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、水中養生期間、蒸気養生後気中養生および蒸気養生後水中養生を行ったコンクリートの拡散係数の結果を示している。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、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。

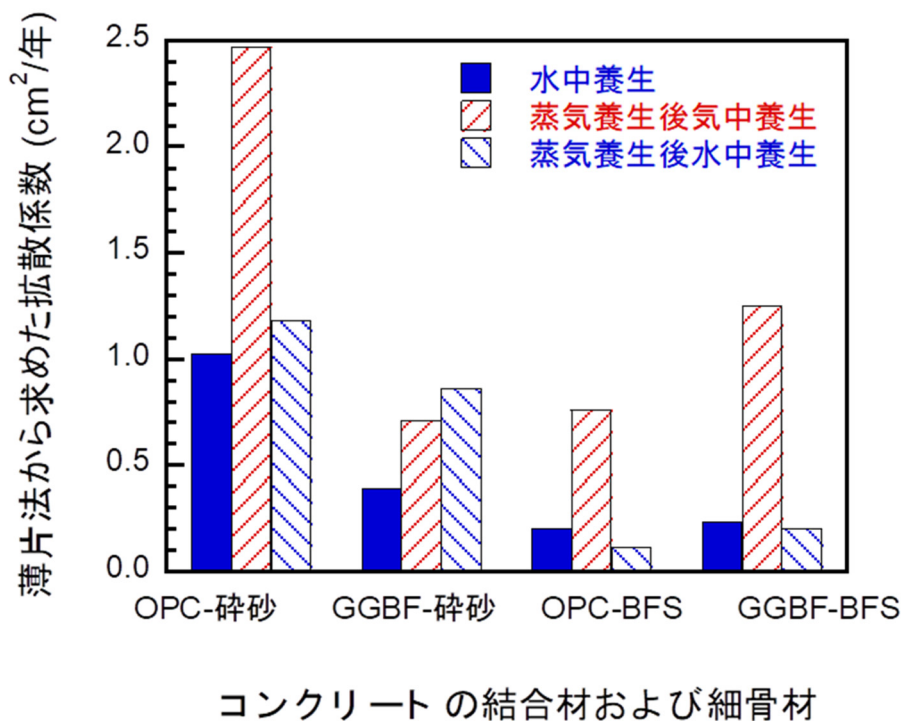


図 4-22 薄片法から求めた拡散係数 (W/B=50%のコンクリートの場合)

図 4-23 は、薄片からおよび浸漬法から求めたコンクリートの見掛けの拡散係数の関係を示したものである。薄片から求めたコンクリートの拡散係数は、図 4-13 に示すモルタルの結果と比べて、ばらつく傾向があることが分かる。

図 4-24 は、水中養生を行ったコンクリートにおいて、薄片および浸漬法から求めた拡散係数の関係を示したものである。■および■は、それぞれ、浸漬法および薄片法から求めた拡散係数を示している。薄片で求めた拡散係数は、高炉スラグを細骨材にのみ用いた場合の拡散係数が大きめの値になっている。そのため、高炉スラグ拡散係数に与える影響が、薄片法では浸漬法と異なる傾向となることが分かる。

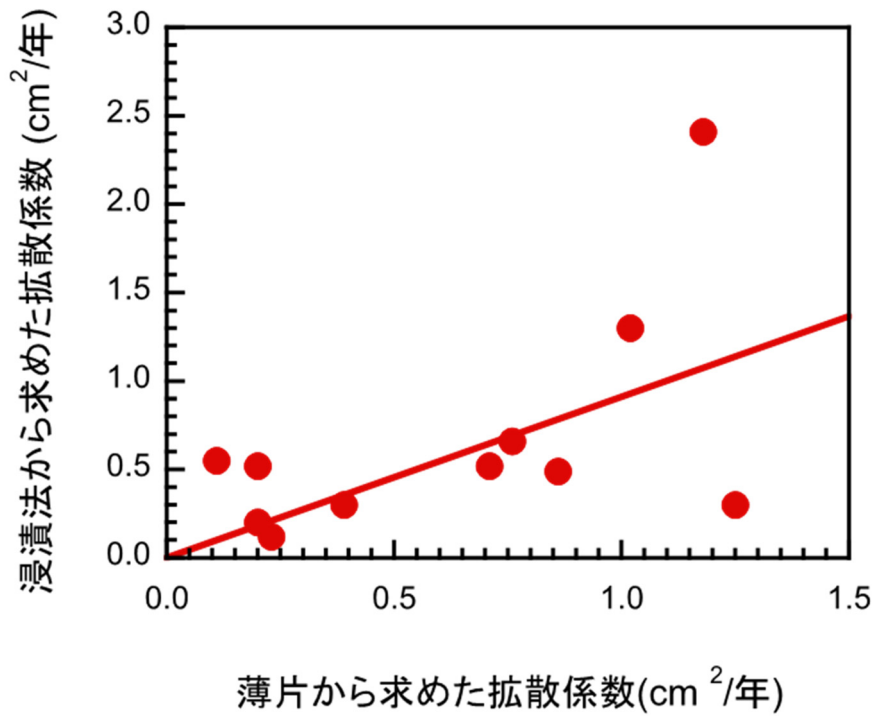


図 4-23 薄片法および浸漬法から求めた拡散係数の関係  
(W/B=50%のコンクリートの場合)

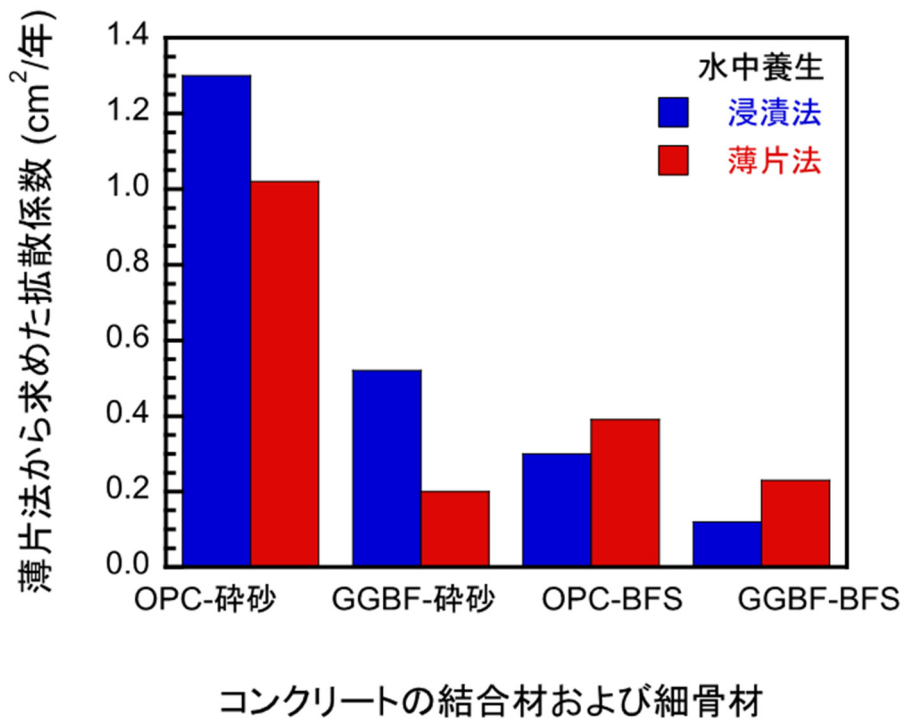


図 4-24 薄片法および浸漬法から求めた拡散係数の関係  
(水中養生の場合)

図 4-25 は、蒸気養生後気中養生を行ったコンクリートにおいて、薄片および浸漬法から求めた拡散係数の関係を示したものである。■および■は、それぞれ、浸漬法

および薄片法から求めた拡散係数を示している。薄片から求めた拡散係数は、高炉スラグを結合材および細骨材の両方に用いた場合の拡散係数が大きな値となっている。そのため、高炉スラグ拡散係数に与える影響が、薄片法では浸漬法と異なる傾向となることが分かる。

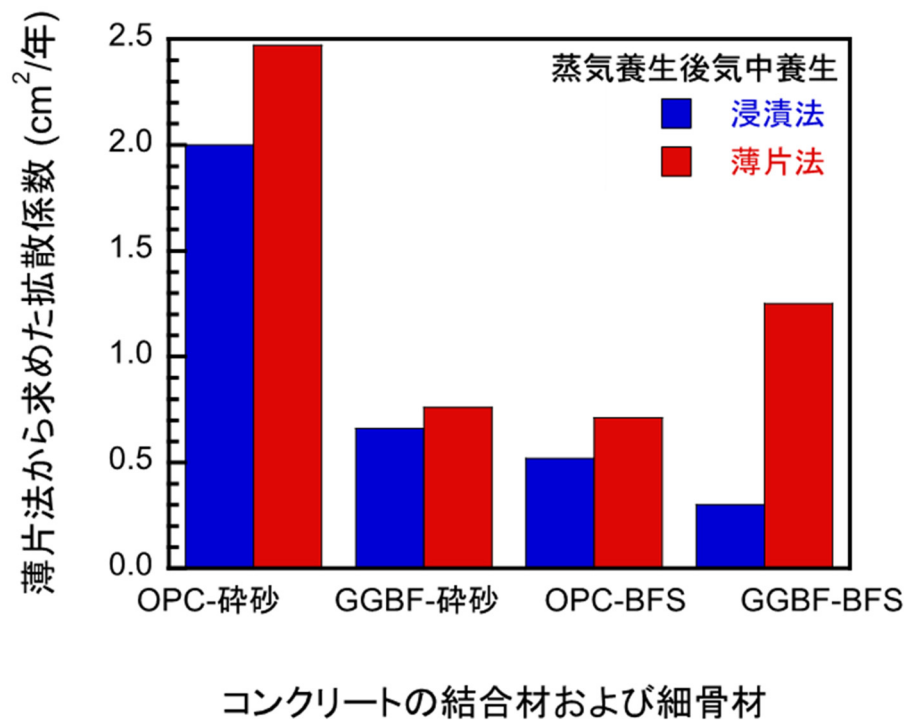


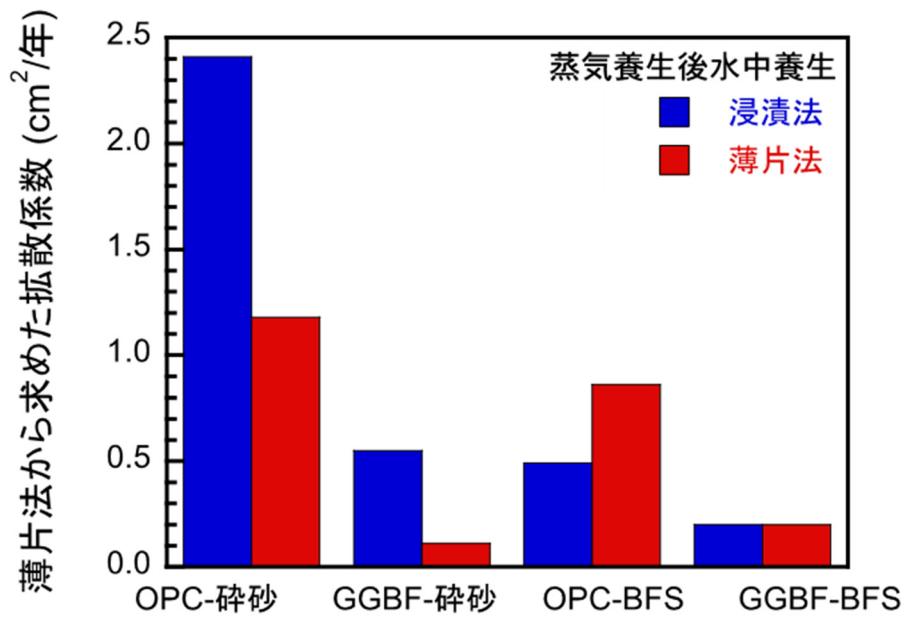
図 4-25 薄片法および浸漬法から求めた拡散係数の関係  
(蒸気養生後気中養生の場合)

図 4-26 は、蒸気養生後水中養生を行ったコンクリートにおいて、薄片および浸漬法から求めた拡散係数の関係を示したものである。■および■は、それぞれ、浸漬法および薄片法から求めた拡散係数を示している。薄片から求めた拡散係数は、高炉スラグを細骨材にのみ用いた場合の拡散係数が大きな値となっている。そのため、高炉スラグ拡散係数に与える影響が、薄片法では浸漬法と異なる傾向となることが分かる。

#### 4-6-5 高炉スラグが可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量に与える影響

図 4-27 は、水中養生期間 7 日で、W/B=50%および結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が、薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の□および■は、それぞれ、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタル薄片供試体の可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量の経時変化を示しており、○および●は、それぞれ、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた





### コンクリートの結合材および細骨材

図 4-26 薄片法および浸漬法から求めた拡散係数の関係  
(蒸気養生後水中養生の場合)

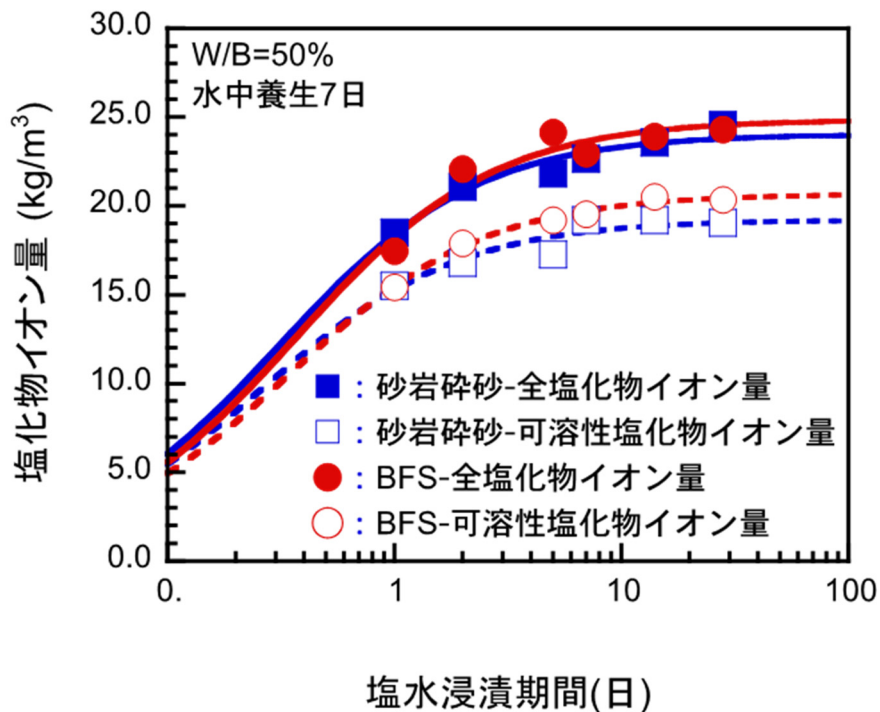


図 4-27 高炉スラグ細骨材がモルタルの全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量に与える影響 (W/C=50%で養生期間が7日の場合)

モルタル薄片供試体の可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量の経時変化を示している。細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルに比べて、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたものの方が、塩水浸漬期間2日以降、可溶性塩化物イオン量が大きい傾向があることが分かる。全塩化物イオン量の分布は、細骨材の種類に関わらずいずれの塩水浸漬期間においても、ほぼ同程度の値となっている。

図4-28は、養生期間14日で、W/B=50%および水中結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が、薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の□および■は、それぞれ、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタル薄片供試体の可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量の経時変化を示しており、○および●は、それぞれ、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタル薄片供試体の可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量の経時変化を示している。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルよりも、塩化物イオン量の増加が遅くなっていることが分かる。塩水浸漬期間5日目を境に、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルのほうが、細骨材に砂岩砕砂を用いたものよりも、可溶性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、飽和塩化物イオン量は、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルと細骨材に砂岩砕砂を用いたものは同程度の値になっている。

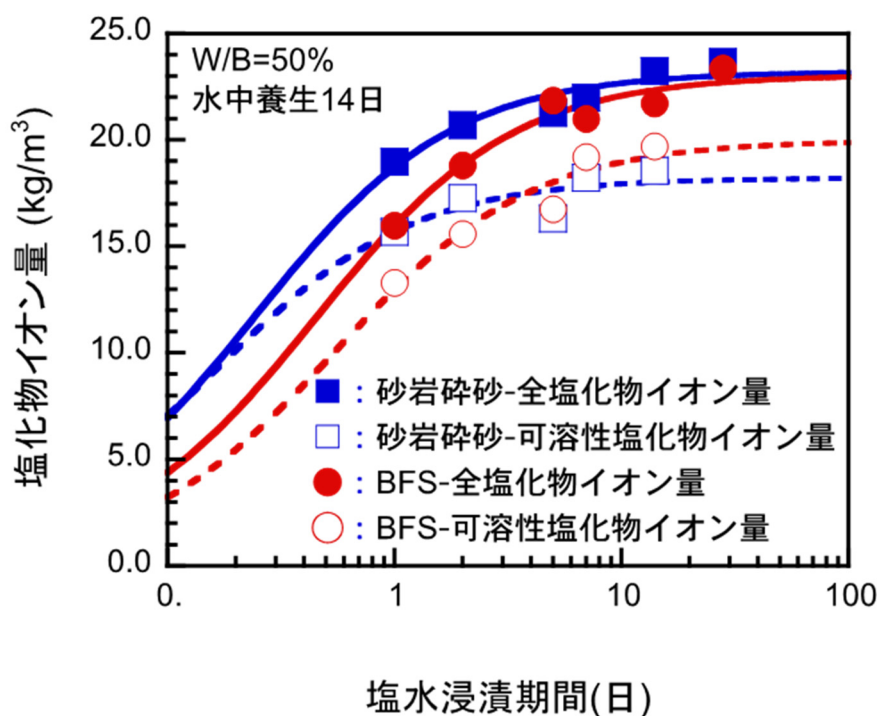


図 4-28 高炉スラグ細骨材がモルタルの全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量に与える影響 (W/C=50%で養生期間が14日の場合)

図 4-29 は、水中養生期間 28 日で、W/B=50%および結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が、薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の□および■は、それぞれ、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタル薄片供試体の可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量の経時変化を示しており、○および●は、それぞれ、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタル薄片供試体の可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量の経時変化を示している。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは細骨材に砂岩砕砂を用いたものに比べて、塩化物イオン量の増加が遅くなっていることが分かる。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、塩水浸漬期間 2 日目を境に、可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量が、細骨材に砂岩砕砂を用いたものよりも大きくなる傾向があることが分かる。また、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの飽和塩化物イオン量は、細骨材に砂岩砕砂を用いたものよりも  $5\text{kg/m}^3$  程度大きくなっている。

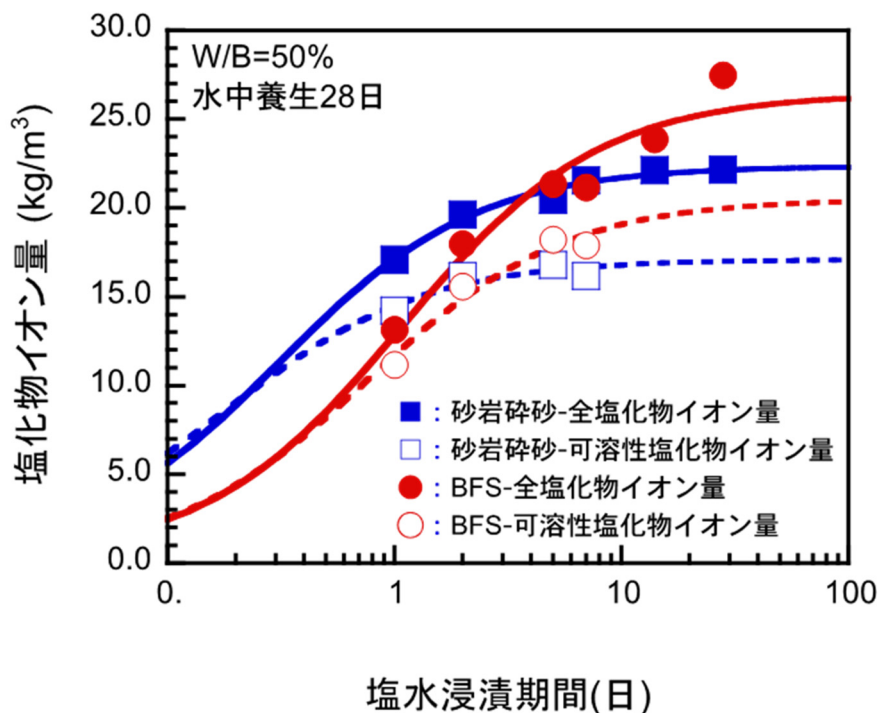


図 4-29 高炉スラグ細骨材がモルタルの全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量に与える影響 (W/C=50%で養生期間が 28 日の場合)

図 4-30 は、水中養生期間 7 日で、W/B=35%および結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が、薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす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

を用いたモルタル薄片供試体の可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量の経時変化を示しており、○および●は、それぞれ、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタル薄片供試体の可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量の経時変化を示している。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、細骨材に砂岩砕砂を用いたものよりも、塩化物イオン量の増加が遅くなっていることが分かる。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、塩水浸漬期間2日目を境に、可溶性塩化物イオン量が、細骨材に砂岩砕砂を用いたものよりも大きくなる傾向がある。また、飽和塩化物イオン量は、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルと細骨材に砂岩砕砂を用いたものは同程度の値になっている。

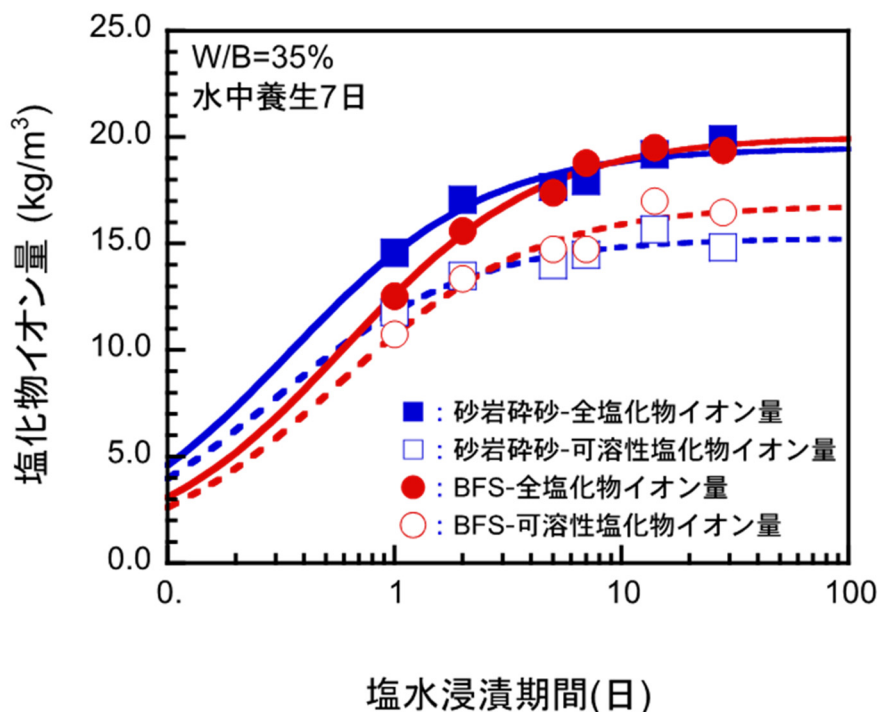


図 4-30 高炉スラグ細骨材がモルタルの全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量に与える影響 (W/C=35%で養生期間が7日の場合)

図 4-31 は、水中養生期間 14 日で、W/B=35%および結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が、薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の□および■は、それぞれ、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタル薄片供試体の可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量の経時変化を示しており、○および●は、それぞれ、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタル薄片供試体の可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量の経時変化を示している。高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、塩水浸漬期間5日目を境に、

可溶性塩化物イオン量が、砂岩砕砂を用いたものよりも大きくなる傾向があることが分かる。また、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの全塩化物イオン量は、砂岩砕砂を用いたものとほぼ一定値になっている。

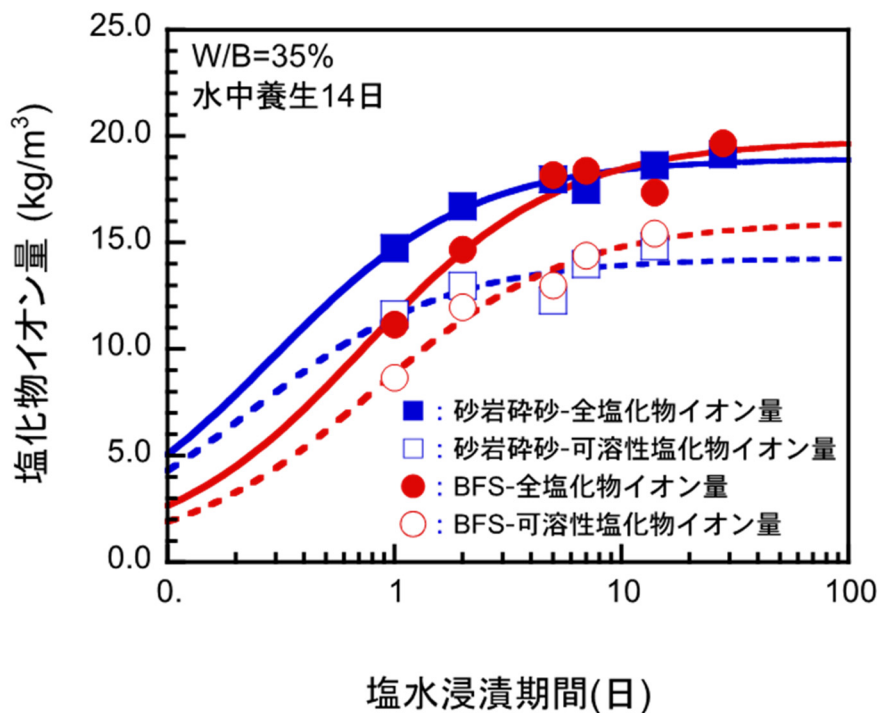


図 4-31 高炉スラグ細骨材がモルタルの全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量に与える影響 (W/C=35%で養生期間が14日の場合)

図 4-32 は、水中養生期間 28 日で、W/B=35%および結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が、薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の□および■は、それぞれ、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタル薄片供試体の可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量の経時変化を示しており、○および●は、それぞれ、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタル薄片供試体の可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量の経時変化を示している。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、細骨材に砂岩砕砂を用いたものに比べて、塩化物イオン量の増加が遅くなっていることが分かる。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、塩水浸漬期間 28 日目を境に、可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量が、細骨材に砂岩砕砂を用いたものよりも大きくなる傾向があることが分かる。

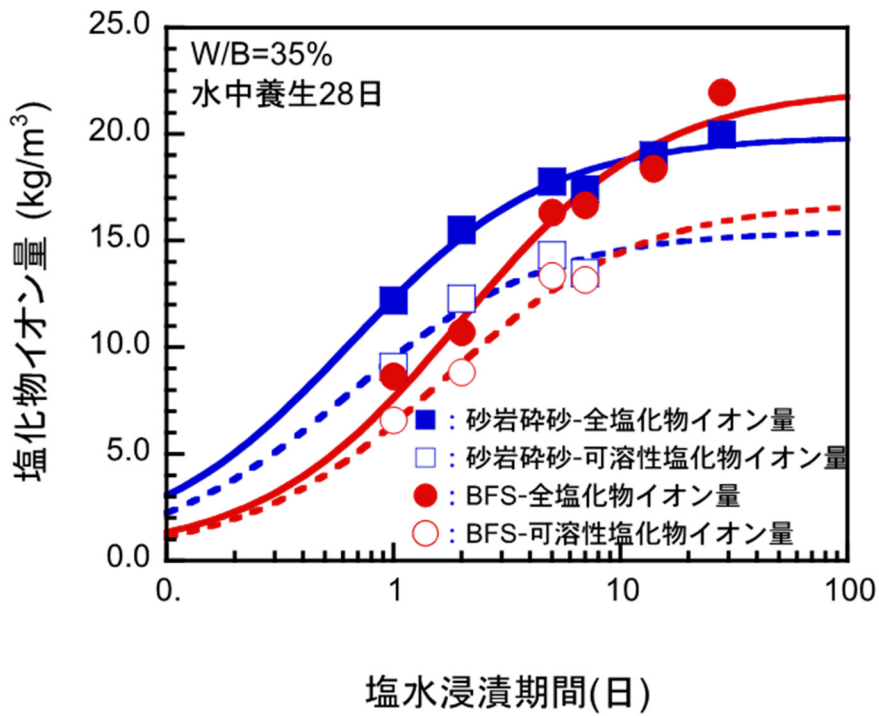


図 4-32 高炉スラグ細骨材がモルタルの全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量に与える影響 (W/C=35%で養生期間が 28 日の場合)

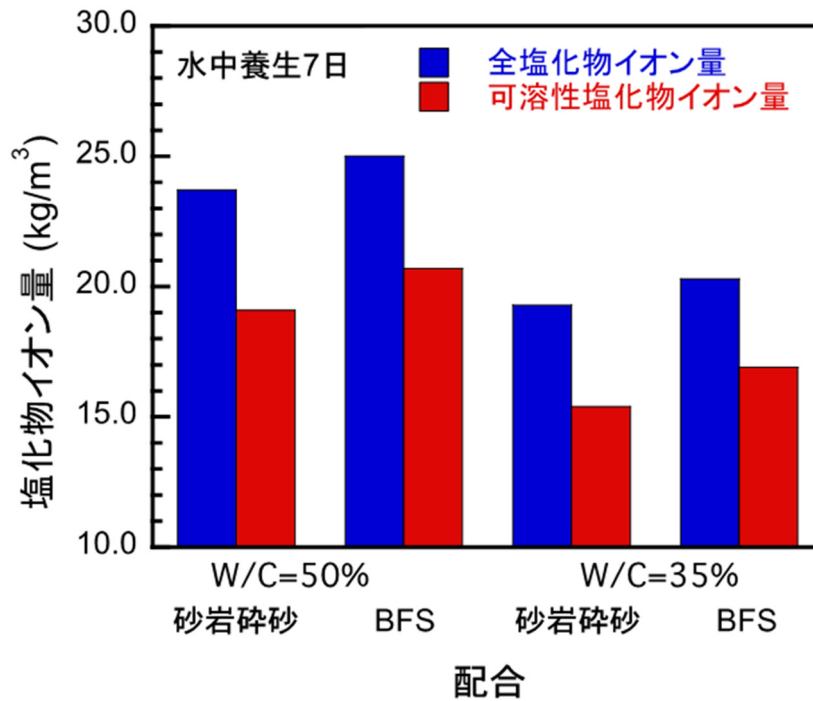


図 4-33 高炉スラグ細骨材がモルタルの全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量に与える影響 (水中養生 7 日の場合)



図 4-33 は、水中養生期間 7 日で、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が、薄片の飽和塩化物イオン量に及ぼす影響を示したものである。図中の■および■は、それぞれ、モルタルの全塩化物イオン量および可溶性塩化物イオン量を示している。水結合材比に関わらず、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは細骨材に砂岩砕砂を用いたものに比べて、全塩化物イオン量および可溶性塩化物イオン量が大きくなる傾向がある。また、細骨材に関わらず、水結合材比が小さい方が、全塩化物イオン量および可溶性塩化物イオン量が小さくなっている。

図 4-34 は、水中養生期間 7 日で、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が、可溶性塩化物イオン量に及ぼす影響を示したものである。図中の■は、モルタルの全塩化物イオン量に占める可溶性塩化物イオン量の割合を示している。水結合材比に関わらず、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは細骨材に砂岩砕砂を用いたものよりも、全塩化物イオン量に占める可溶性塩化物イオン量の割合が大きくなる傾向がある。また、水結合材比による全塩化物イオン量に占める可溶性塩化物イオン量の割合への影響は無いことが分かる。

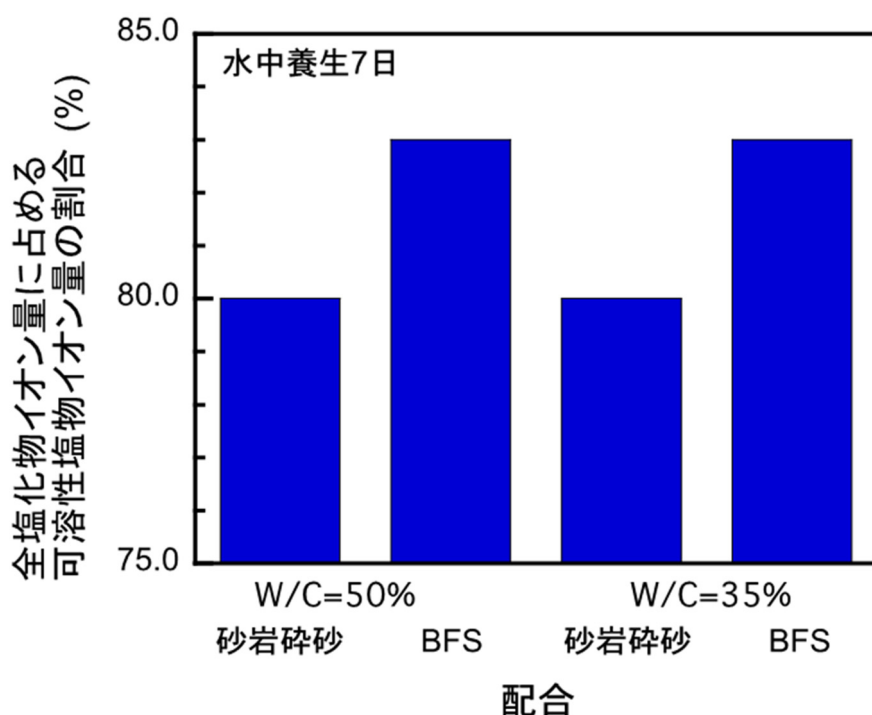


図 4-34 高炉スラグ細骨材がモルタルの可溶性塩化物イオン量の割合に与える影響(水中養生 7 日の場合)



#### 4-6-6 高炉スラグを用いたモルタルにおいて、水中養生期間が塩化物イオン浸透性に与える影響

図 4-35 は、W/B=50%で、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において、水中養生期間が薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の▲、■および●は、それぞれ、水中養生期間が、7日、14日および28日のモルタル薄片の塩化物イオン量の経時変化を示している。水中養生期間に関わらず、いずれの塩水浸漬期間においても塩化物イオン量の増加率はほぼ同じであることが分かる。

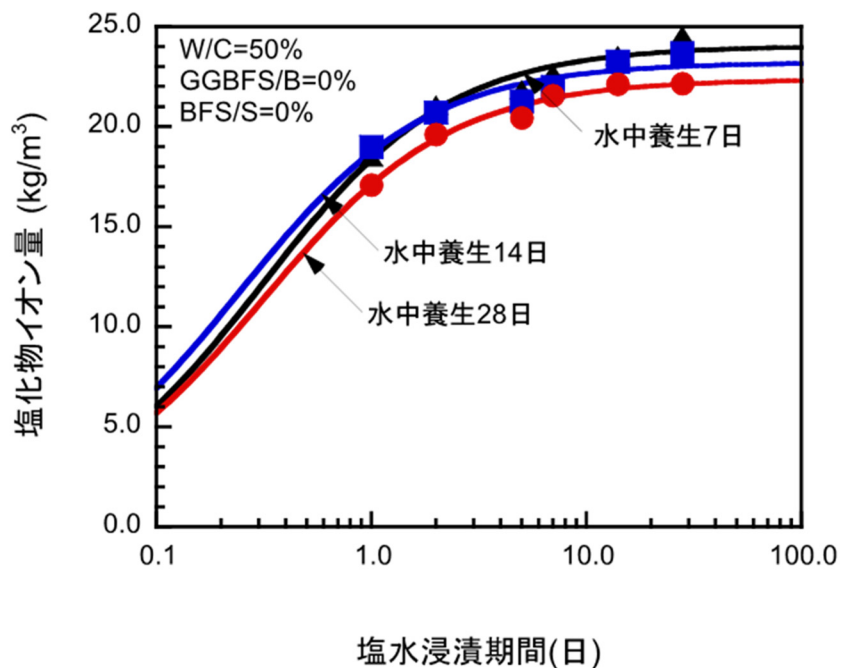


図 4-35 養生期間がモルタルの塩化物イオンの浸透に与える影響  
(W/C=50%, GGBF/B=0%, BFS/S=0%の場合)

図 4-36 は、W/B=50%で、結合材に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において、水中養生期間が薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の▲、■および●は、それぞれ、水中養生期間が、7日、14日および28日のモルタル薄片の塩化物イオン量の経時変化を示している。水中養生期間が長くなるにつれて、塩化物イオン量の増加が遅くなっていることが分かる。また、水中養生期間が28日のモルタルは、飽和塩化物イオン量が若干、大きくなっていることが分かる。

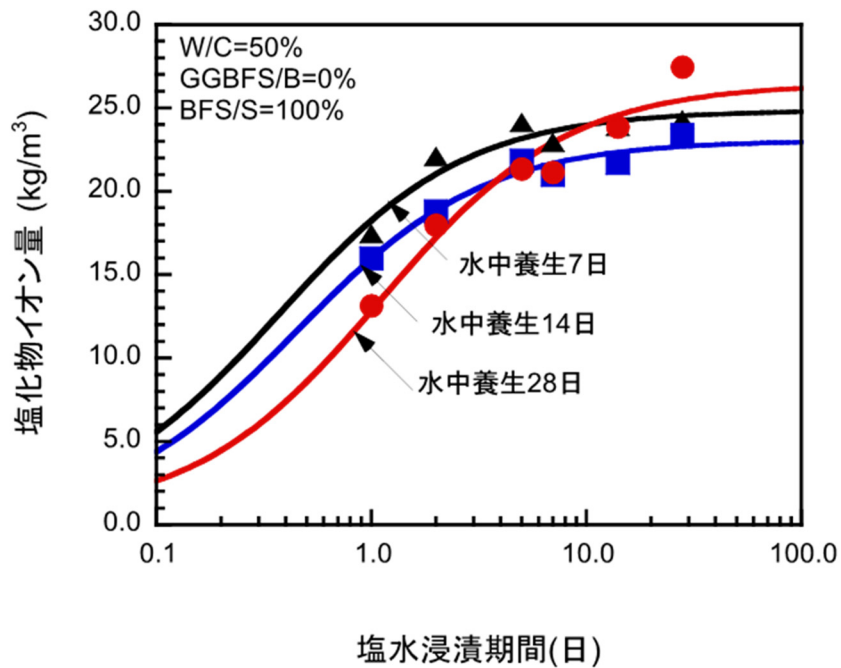


図 4-36 養生期間がモルタルの塩化物イオン浸透に与える影響  
(W/C=50%, GGBF/B=0%, BFS/S=100%の場合)

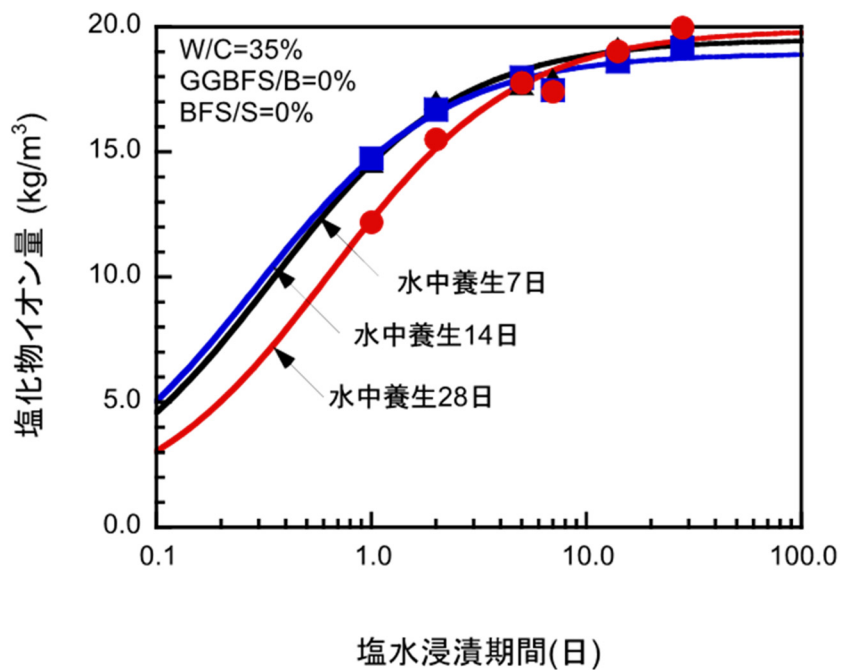


図 4-37 養生期間がモルタルの塩化物イオン浸透に与える影響  
(W/C=35%, GGBF/B=0%, BFS/S=0%の場合)

図 4-37 は、W/B=35%で、結合材に普通ポルトランドセメントを用い、細骨材に砂岩砕砂用いたモルタルにおいて、水中養生期間が、薄片への塩化物イオン浸透に及ぼ

す影響を示したものである。図中の▲、■および●は、それぞれ、水中養生期間が、7日、14日および28日のモルタル薄片の塩化物イオン量の経時変化を示している。水中養生期間が28日のモルタルは、水中養生期間7および14日のモルタルよりも、塩化物イオン量の増加が遅くなることが分かる。また、飽和塩化物イオン量は水中養生期間に関わらずほぼ同じ値になっている。

図 4-38 は、W/B=35%で、結合材に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において、水中養生期間が、薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の▲、■および●は、それぞれ、水中養生期間が、7日、14日および28日のモルタル薄片の塩化物イオン量の経時変化を示している。水中養生期間が28日のモルタルは、水中養生期間7および14日のモルタルよりも、塩化物イオン量の増加が遅くなっており、飽和塩化物イオン量も、水中養生期間が28日のモルタルが、水中養生7日および14日のものよりも大きくなっている。

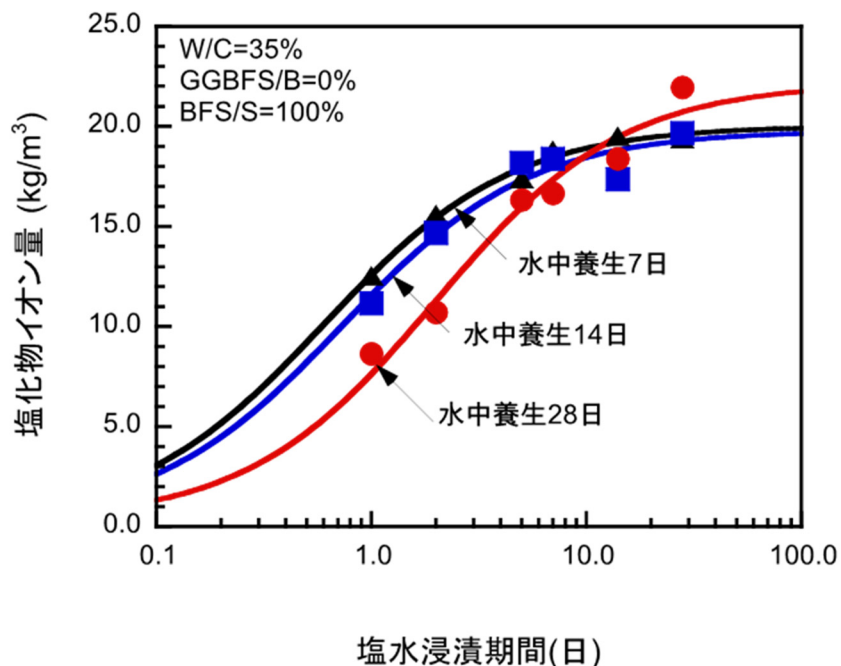


図 4-38 養生期間がモルタルの塩化物イオン浸透に与える影響  
(W/C=35%, GGBF/B=0%, BFS/S=100%の場合)

図 4-39 は、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が飽和塩化物イオン量に及ぼす影響を示したものである。図中の□および■は、それぞれ、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルの、水結合材比 50%および 35%の飽和塩化物イオン量を示しており、○および●は、それぞれ、細骨材に高炉ス

ラグ細骨材を用いたモルタルの、水結合材比 50%および 35%の飽和塩化物イオン量を示している。いずれの水結合材比の場合も、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、水中養生期間 28 日目で飽和塩化物イオン量が大きくなっている。一方、細骨材に砂岩砕砂を用いたものは、水中養生期間に関わらず飽和塩化物イオン量はほぼ一定となった。

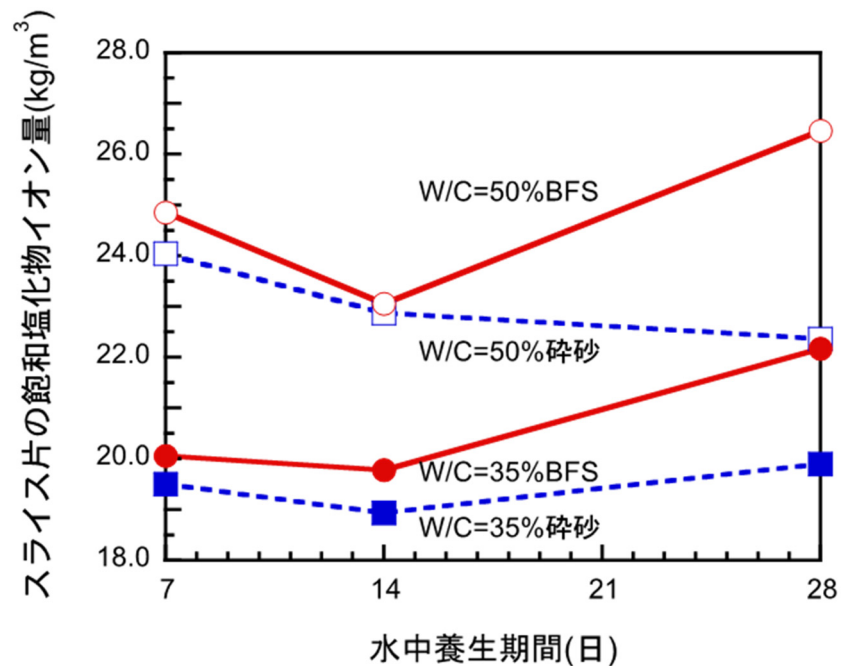


図 4-39 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がモルタルの飽和塩化物イオン量とその経時変化に与える影響

図 4-40 は、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルにおいて、高炉スラグ細骨材が、見掛けの拡散係数に及ぼす影響を示したものである。図中の□および■は、それぞれ、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルの、水結合材比 50%および 35%の見掛けの拡散係数を示しており、○および●は、それぞれ、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの、水結合材比 50%および 35%の見掛けの拡散係数を示している。いずれの水中養生期間においても、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは細骨材に砂岩砕砂を用いたものに比べて、見掛けの拡散係数が小さいことが分かる。いずれの水結合材比においても、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、水中養生期間が長くなるに連れて見掛けの拡散係数が小さくなっており、水中養生 7 日のモルタルと、水中養生 28 日ものを比べると、見掛けの拡散係数は半分以下の値になっていることが分かる。一方、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルは、水結合材比が 35%のもののみ、水中養生期間 28 日で拡散係数が小さくなっている。

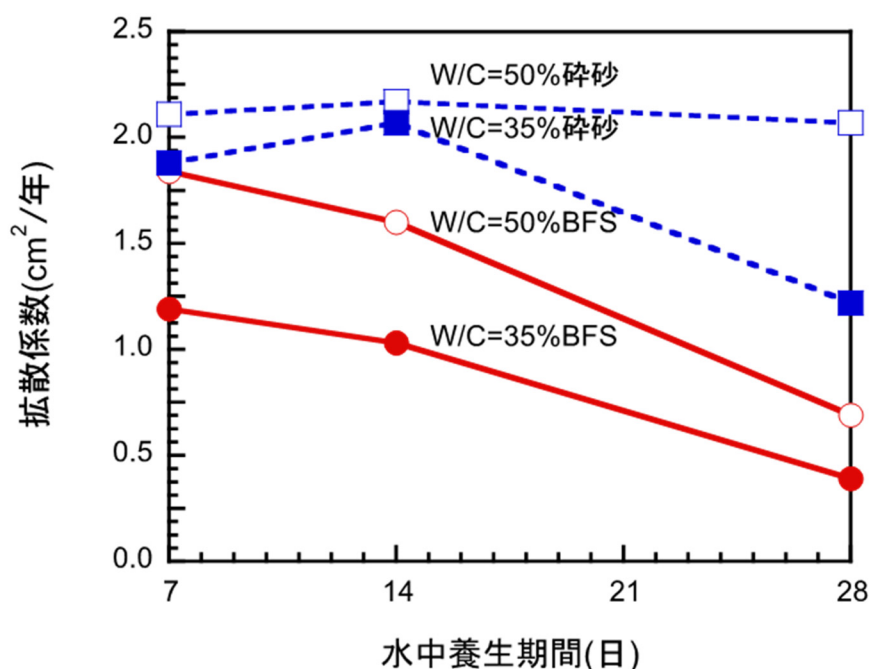


図 4-40 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がモルタルの見掛けの拡散係数とその経時変化に与える影響

#### 4-6-7 高炉スラグ、増粘剤および養生方法がモルタルの塩化物イオン浸透性に与える影響

図 4-41 は、W/B=50%のモルタルにおいて、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が、薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす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、結合材には普通ポルトランドセメントを用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。●は、細骨材に高炉スラグ細骨材を用い、結合材には高炉スラグ微粉末を用いた結果を示している。結合材に普通ポルトランドセメントを用いた場合は、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルと高炉スラグ細骨材を用いたものの塩化物イオン量の経時変化はほぼ同であることが分かる。一方、細骨材に高炉スラグ細骨材を用い、結合材には高炉スラグ微粉末を用いたモルタルは、細骨材にのみ高炉スラグを用いたものに比べて、飽和塩化物イオン量は大きくなっていることが分かる。

図 4-42 は、W/B=35%のモルタルにおいて、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が、薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす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、結合材には普通ポルトランドセメントを用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。●は、細骨材に高炉スラグ細骨材を用い、結合材には高炉スラグ微粉末を用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。結合材に普通ポルトランド

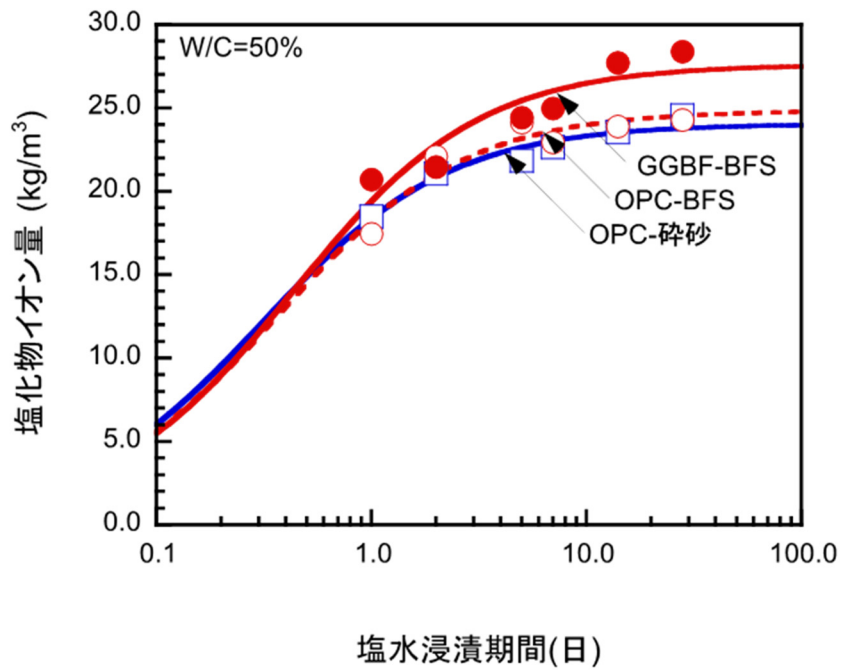


図 4-41 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がモルタルの薄片の塩化物イオン浸透に与える影響  
(W/C=50%の場合)

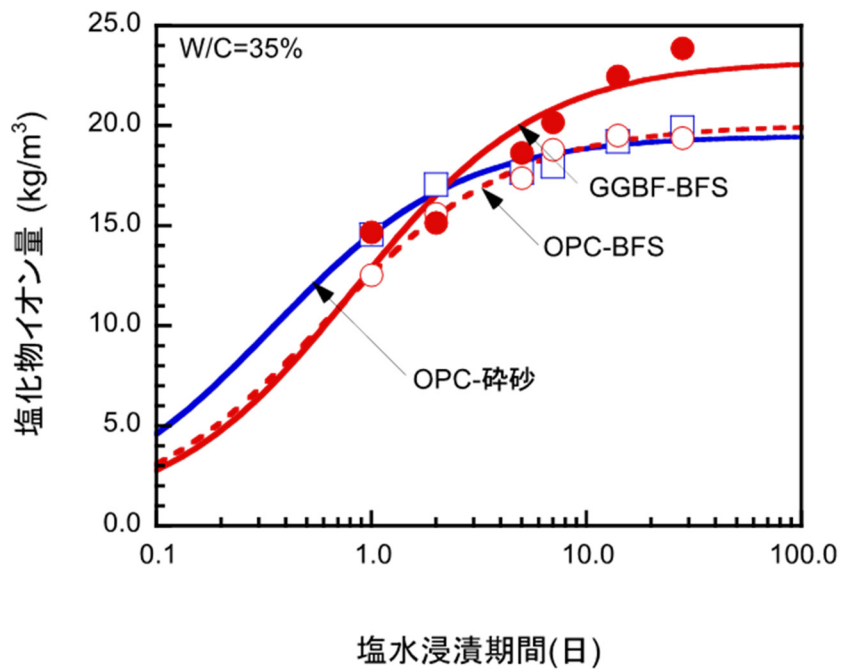


図 4-42 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がモルタルの薄片の塩化物イオン浸透に与える影響  
(W/C=35%の場合)



セメントを用いた場合，細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルに比べて，細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたものの方が，塩化物イオン量の増加が遅くなっていることが分かる。一方，細骨材に高炉スラグ細骨材を用い，結合材には高炉スラグ微粉末を用いたモルタルは，細骨材にのみ高炉スラグを用いたものに比べて，高炉スラグ微粉末を用いたモルタルは飽和塩化物イオン量大きくなっていることが分かる。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のこれらの傾向は，水結合材比 50%のモルタルのものよりも，より顕著になっている。

図 4-43 は，W/B=50%で，細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルにおいて，増粘剤が薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の□および■は，それぞれ，増粘剤を用いていないモルタルおよび増粘剤を用いたモルタルで，結合材には普通ポルトランドセメントを用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。○および●は，それぞれ，増粘剤を用いていないモルタルおよび増粘剤を用いたモルタルで，結合材には高炉スラグ微粉末を用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。増粘剤を用いたモルタルは，結合材の種類に関わらず，増粘剤を用いていないものよりも塩化物イオン量の分布および飽和塩化物イオン量が大きくなっている。

また，高炉スラグ微粉末を用い増粘剤なしのモルタルと，普通ポルトランドセメントを用い増粘剤ありのモルタルは，ほぼ同じ傾向を示している。

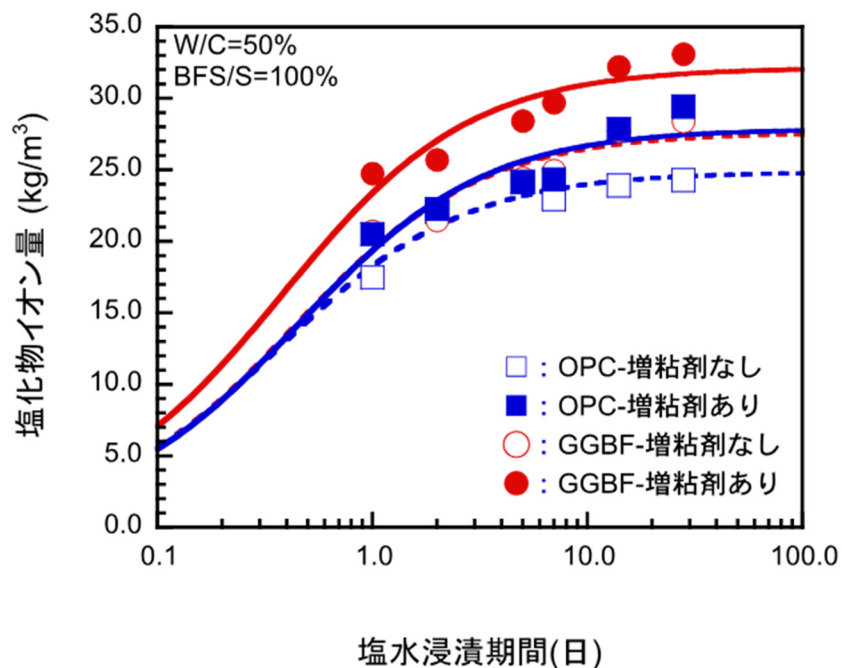


図 4-43 増粘剤がモルタルの薄片の塩化物イオン浸透に与える影響  
(W/C=50%の場合)



図 4-44 は、W/B=35%で、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルにおいて、増粘剤が薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の□および■は、それぞれ、増粘剤を用いていないモルタルおよび増粘剤を用いたモルタルで、結合材には普通ポルトランドセメントを用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。○および●は、それぞれ、増粘剤を用いていないモルタルおよび増粘剤を用いたモルタルで、結合材には高炉スラグ微粉末を用いた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルへの場合、増粘剤を用いたモルタルは、増粘剤を用いていないものに比べて塩化物イオン量の分布および飽和塩化物イオン量が大きくなっていることが分かる。結合材に高炉スラグ微粉末を用いたモルタルでは、増粘剤の有無に関わらず、塩化物イオン量の分布および飽和塩化物イオン量は同程度になった。また、増粘剤を用いた場合、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに比べて、結合剤に高炉スラグ微粉末を用いたものの方が、塩化物イオン量の増加が遅くなっている。

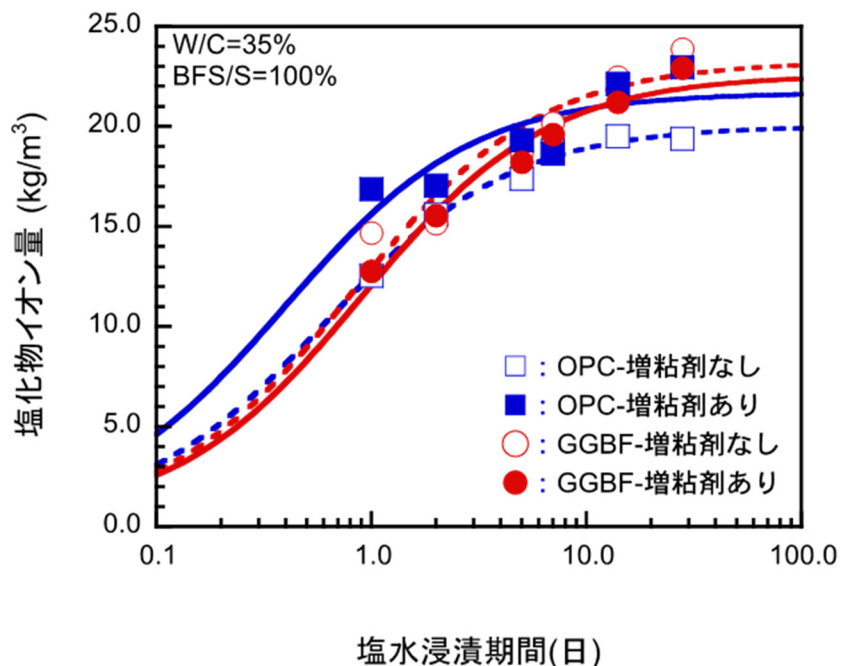


図 4-44 増粘剤がモルタルの薄片の塩化物イオン浸透に与える影響  
(W/C=35%の場合)

図 4-45 は、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルにおいて、養生方法が薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の□および■は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行った水結合材比 50%のモルタル薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。○および●は、それぞれ、水中

養生および蒸気養生後水中養生を行った水結合材比 35% のモルタル薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。水結合材比に関わらず，蒸気養生後水中養生を行ったモルタル薄片供試体の方が，水中養生を行ったものよりも塩化物イオン量の増加は速く，飽和塩化物イオン量は大きくなっている。

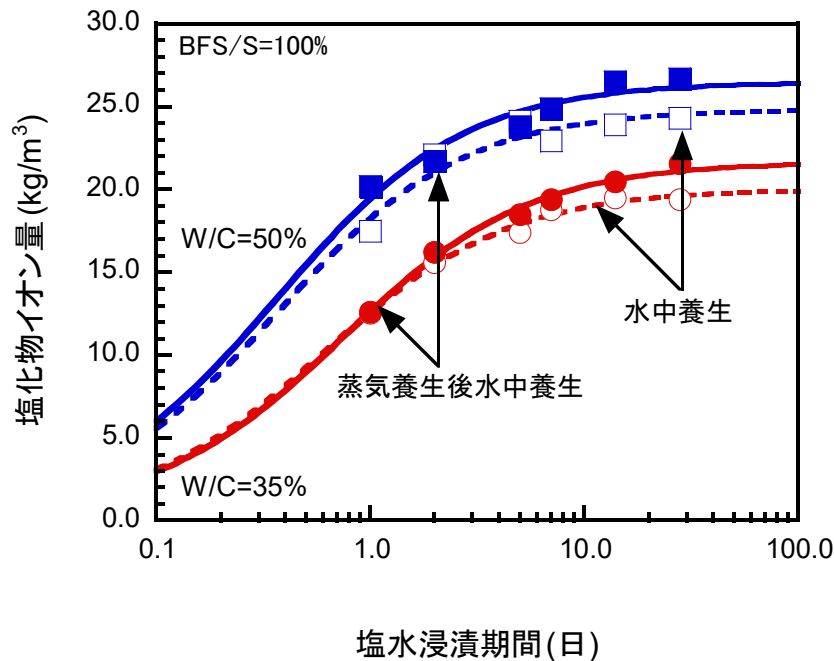


図 4-45 養生方法が高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの塩化物イオン浸透に与える影響

図 4-46 は，結合材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において，養生方法が薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の□および■は，それぞれ，水中養生および蒸気養生後水中養生を行った水結合材比 50% のモルタル供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。○および●は，それぞれ，水中養生および蒸気養生後水中養生を行った水結合材比 35% のモルタル供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。水結合材比に関わらず，蒸気養生後水中養生を行ったモルタル薄片供試体の方が，水中養生を行ったものよりも塩化物イオン量のが遅くなっている。塩水浸漬期間 7 日目を境に，蒸気養生後水中養生を行ったモルタルが，水中養生を行ったものの塩化物イオン量分布よりも大きくなっており，飽和塩化物イオン量も大きくなっている。

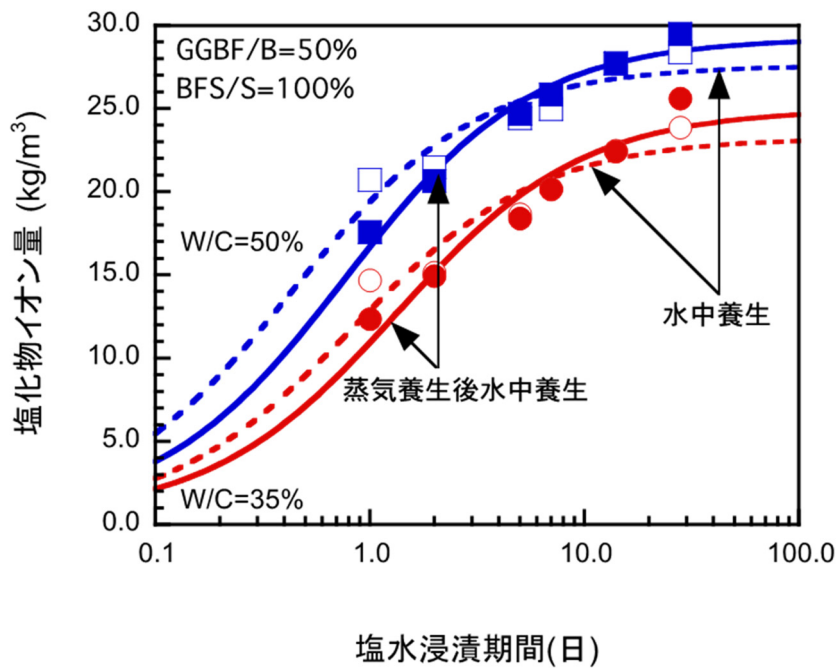


図 4-46 養生方法が高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの塩化物イオン浸透に与える影響

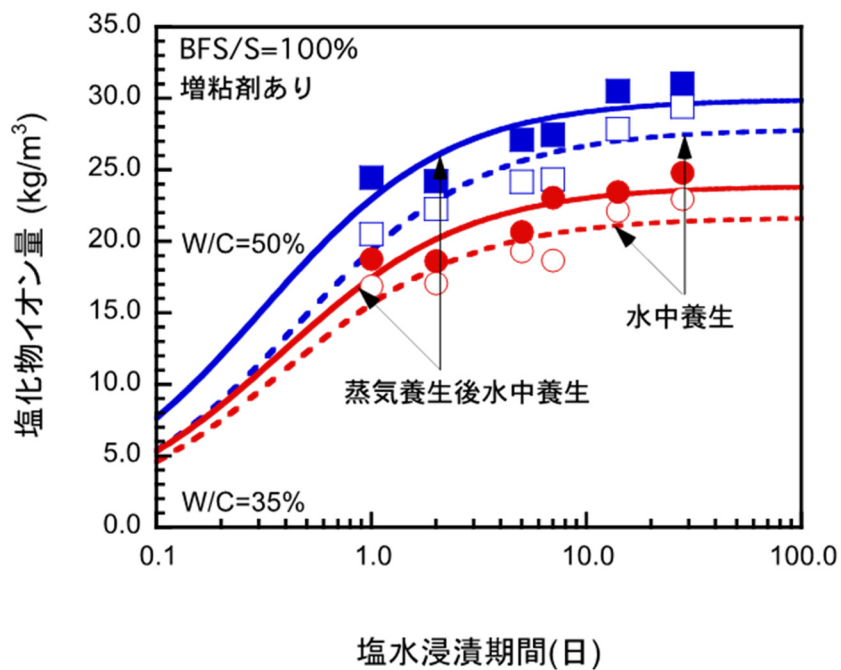


図 4-47 養生方法が増粘剤を用いたモルタルの塩化物イオン浸透に与える影響 (BFS/S=100%の場合)

図 4-47 は、細骨材に高炉スラグ細骨材を用い、増粘剤を用いたモルタルにおいて、養生方法が薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の□お

よび■は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行った水結合材比 50%のモルタル薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。○および●は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行った水結合材比 35%のモルタル薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。水結合材比に関わらず、蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの方が、水中養生を行ったものよりも塩化物イオン量の分布および飽和塩化物イオン量が大きくなっている。

図 4-48 は、結合材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、増粘剤を用いたモルタルにおいて、養生方法が薄片への塩化物イオン浸透に及ぼす影響を示したものである。図中の□および■は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行った水結合材比 50%のモルタル薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。○および●は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行った水結合材比 35%のモルタル薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示している。水結合材比が 35%のモルタルにおいて、蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの方が、水中養生を用いたものに比べて塩化物イオン量の増加が遅くなっており、飽和塩化物イオン量が大きくなっている。一方、水結合材比 50%のモルタルでは、養生方法に関わらず、塩化物イオン量の分布は同程度になっている。

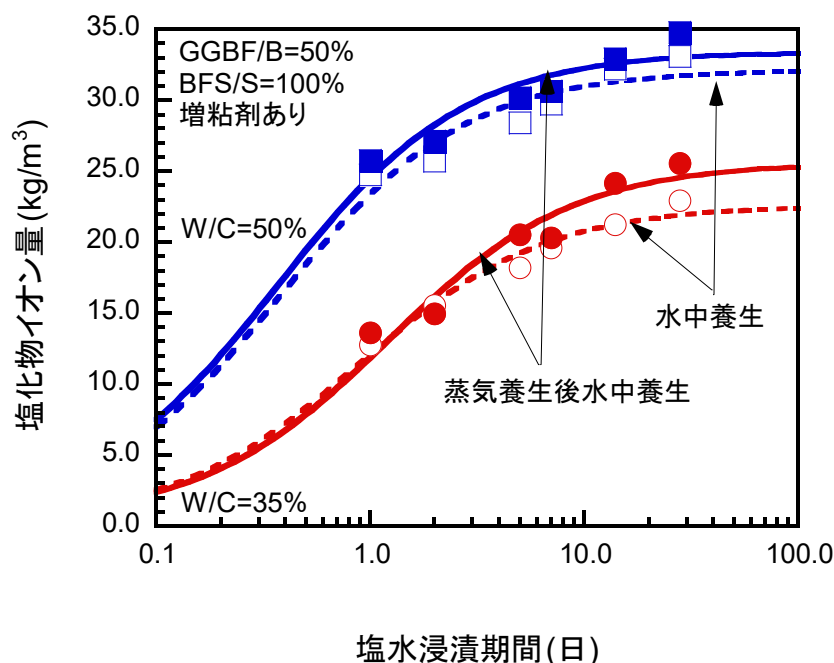


図 4-48 養生方法が高炉スラグ微粉末がおよび増粘剤を用いたモルタルの塩化物イオン浸透に与える影響 (BFS/S=100%の場合)

図 4-49 は、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が、薄片の飽和塩化物イオン量に及ぼす影響を示したものである。図中の■および■は、それぞれ、水結合材比 50%および 35%のモルタルの飽和塩化物イオン量を示している。水結合材比に関わらず、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、細骨材に砂岩砕砂を用いたものに比べて飽和全塩化物イオン量が大きくなる傾向がある。結合材と細骨材の両方に高炉スラグを用いたモルタルは、細骨材にのみ高炉スラグを用いたモルタルよりもさらに飽和塩化物イオン量が大きくなっている。

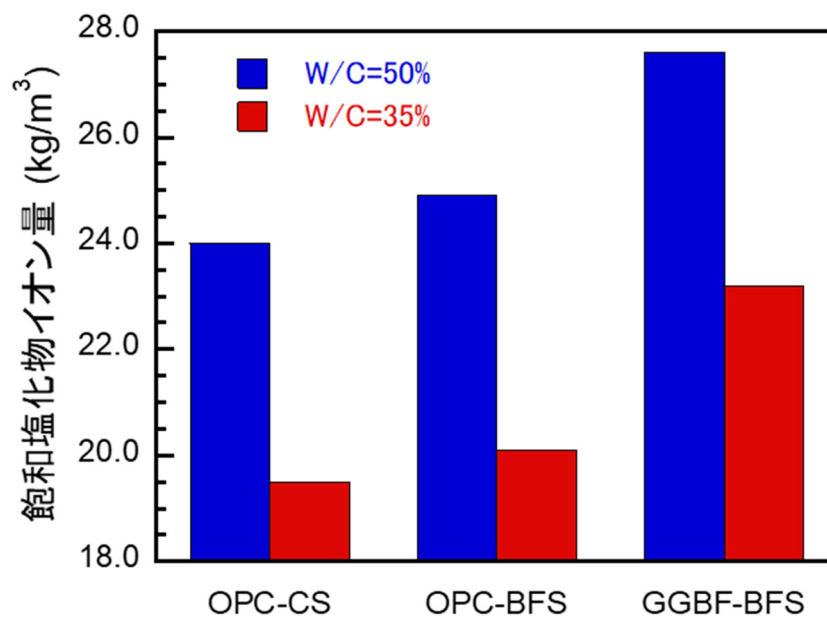


図 4-49 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がモルタルの飽和塩化物イオン量に与える影響

図 4-50 は、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルにおいて、増粘剤が薄片の飽和塩化物イオン量に及ぼす影響を示したものである。図中の■および■は、それぞれ、増粘剤を用いていない場合および増粘剤を用いた場合のモルタルの飽和塩化物イオン量を示している。水結合材比は 50%および 35%で、結合材には普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いている。いずれの水結合材比のモルタルにおいても、結合材に普通ポルトランドセメントを用いた場合は、増粘材を用いると飽和塩化物イオン量が大きくなっている。一方、結合材に高炉スラグ微粉末を用いた場合には、増粘材を用いることで飽和塩化物イオン量は小さくなっている。また、これらの傾向は、水結合材比が小さい方が小さい。

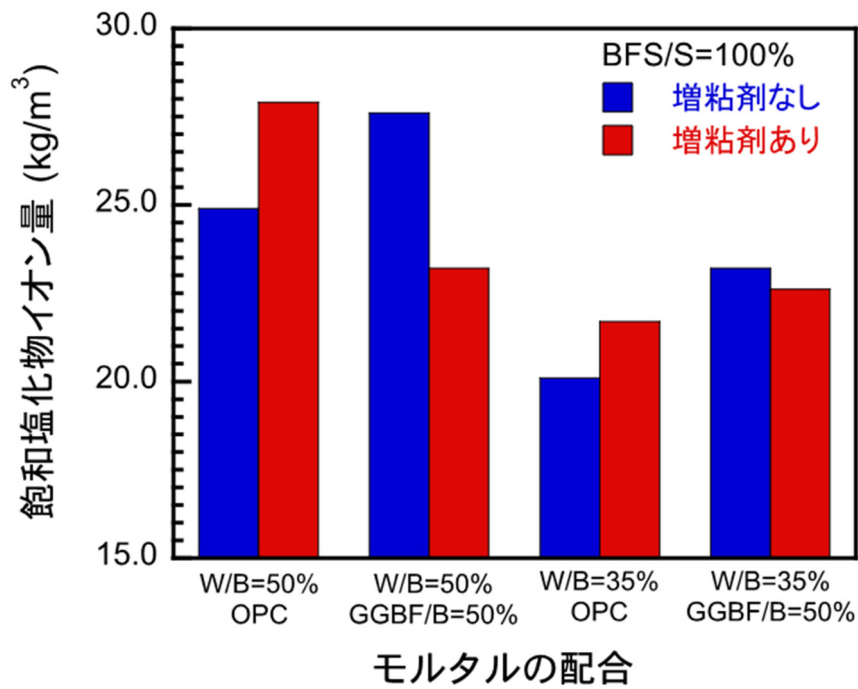


図 4-50 増粘剤がモルタルの飽和塩化物イオン量に与える影響  
(BFS/S=100%の場合)

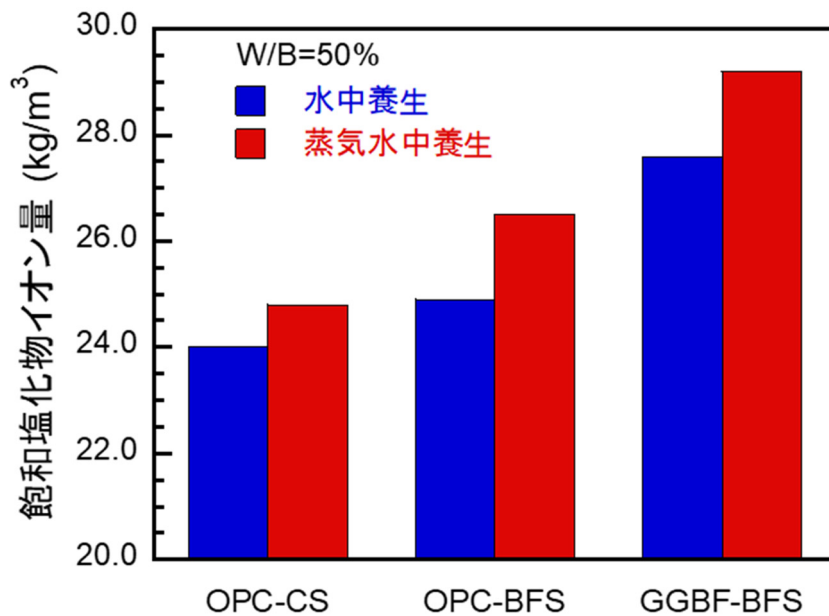


図 4-51 養生方法がモルタルの飽和塩化物イオン量に与える影響  
(W/B=50%の場合)

図 4-51 は、水結合材比 50% のモルタルにおいて、養生方法が飽和塩化物イオン量に及ぼす影響を示したものである。図中の■および■は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの飽和塩化物イオン量を示している。いずれの配合のモルタルにおいても、蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの方が、水中養生を行ったもののよりも飽和塩化物イオン量が大きくなっている。

図 4-52 は、水結合材比 35% のモルタルにおいて、養生方法が飽和塩化物イオン量に及ぼす影響を示したものである。図中の■および■は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの飽和塩化物イオン量を示している。いずれの配合のモルタルにおいても、蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの方が、水中養生を行ったもののよりも飽和塩化物イオン量が大きくなっている。

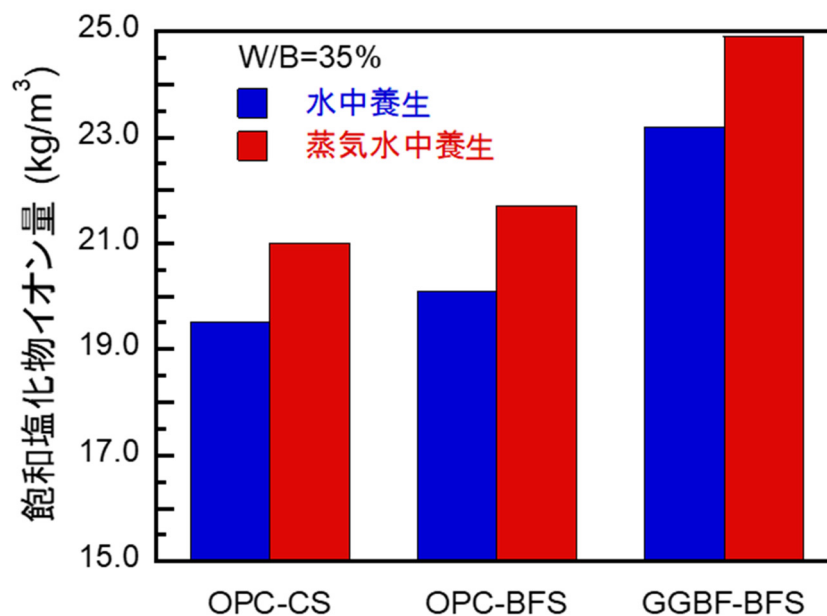


図 4-52 養生方法がモルタルの飽和塩化物イオン量に与える影響  
(W/B=35%の場合)

図 4-53 は、水結合材比 50% で、結合材に高炉スラグ微粉末を用い、細骨材におよび高炉スラグ細骨材を用い、増粘剤を用いたモルタルにおいて、養生方法が飽和塩化物イオン量に及ぼす影響を示したものである。図中の■および■は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの飽和塩化物イオン量を示している。いずれの配合のモルタルにおいても、蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの方が、水中養生を行ったものよりも飽和塩化物イオン量が大きくなっている。



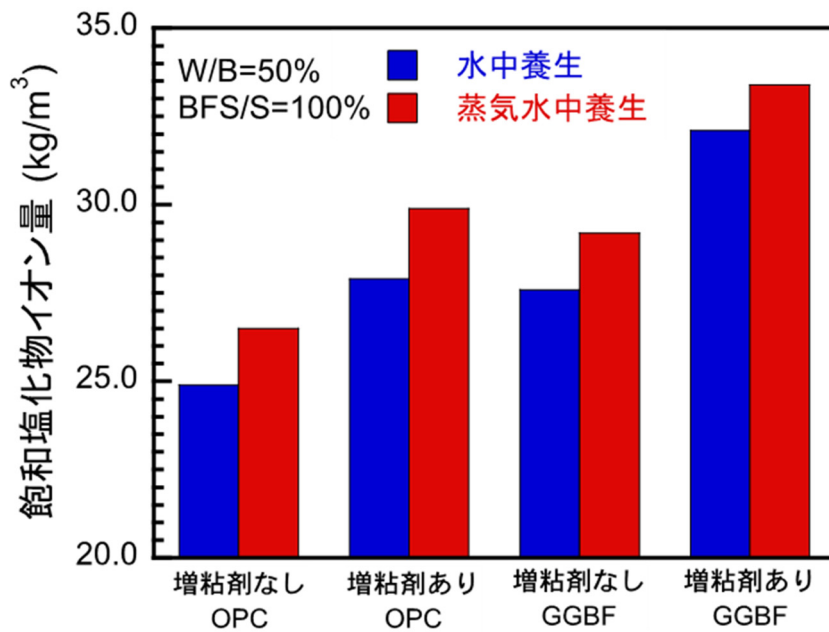


図 4-53 養生方法がモルタルの飽和塩化物イオン量に与える影響  
(W/B=50%, BFS/S=100%, 増粘剤ありの場合)

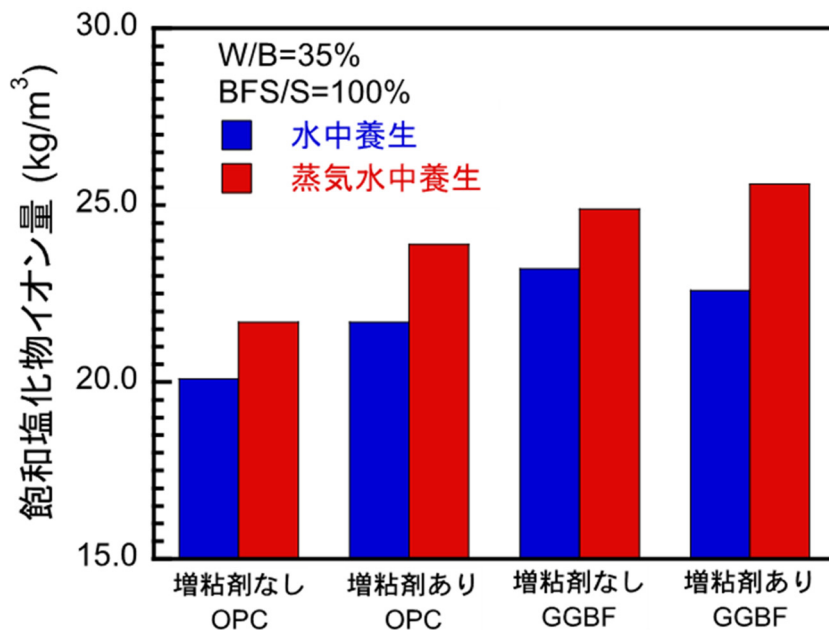


図 4-54 養生方法がモルタルの飽和塩化物イオン量に与える影響  
(W/B=35%, BFS/S=100%, 増粘剤ありの場合)

図 4-54 は、水結合材比 35%で、結合材に高炉スラグ微粉末を用い、細骨材におよび高炉スラグ細骨材を用い、増粘剤を用いたモルタルにおいて、養生方法が飽和塩化

物イオン量に及ぼす影響を示したものである。図中の■および■は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの飽和塩化物イオン量を示している。いずれの配合のモルタルにおいても、蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの方が、水中養生を行ったものよりも飽和塩化物イオン量が大きくなっている。

図 4-55 は、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が、薄片の見掛けの拡散係数に及ぼす影響を示したものである。図中の■および■は、それぞれ、水結合材比 50% および 35% のモルタルの見掛けの拡散係数を示している。水結合材比に関わらず、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、細骨材に砂岩砕砂を用いたものに比べて見掛けの拡散係数が小さくなる傾向がある。結合材と細骨材の両方に高炉スラグを用いたモルタルは、細骨材にのみ高炉スラグを用いたモルタルよりもさらに見掛けの拡散係数が小さくなっている。この傾向は、水結合材比が 35% のモルタルにおいてより顕著である。

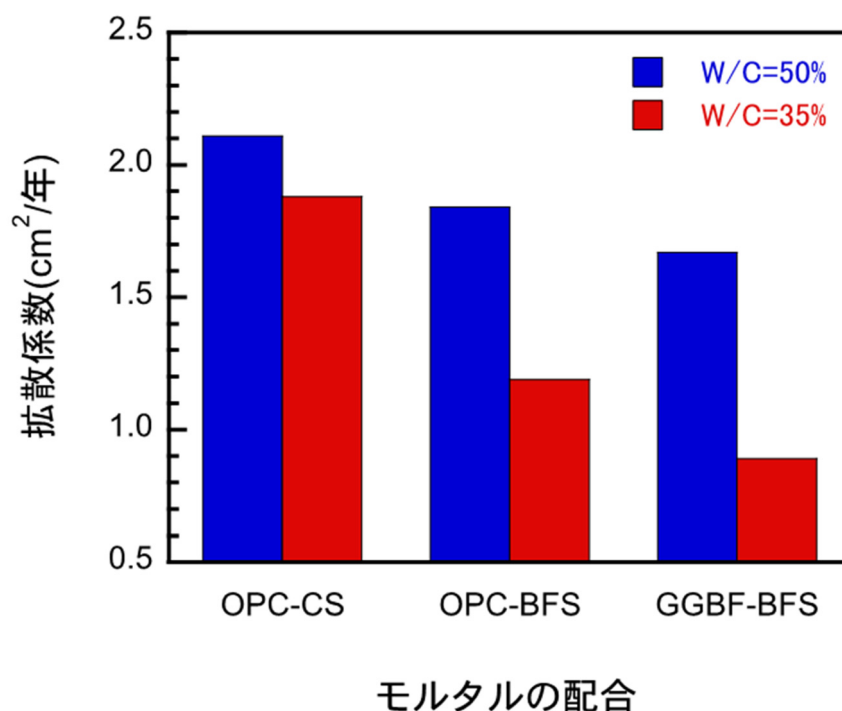


図 4-55 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がモルタルの見掛けの拡散係数に与える影響

図 4-56 は、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルにおいて、増粘剤が薄片の見掛けの拡散係数に及ぼす影響を示したものである。図中の■および■は、それぞれ、増粘剤を用いていない場合および増粘剤を用いた場合のモルタルの見掛けの拡散係数を示している。水結合材比は 50% および 35% で、結合材には普通ポルトランドセメン

トおよび高炉スラグ微粉末を用いている。水結合材比が 50% のモルタルにおいて、増粘剤の見掛けの拡散係数への影響はなくほぼ同程度の値になった。しかし、水結合材比が 35% のモルタルでは、結合材に普通ポルトランドセメントを用いた場合のみ、増粘剤を用いると見掛けの拡散係数が大きくなっている。

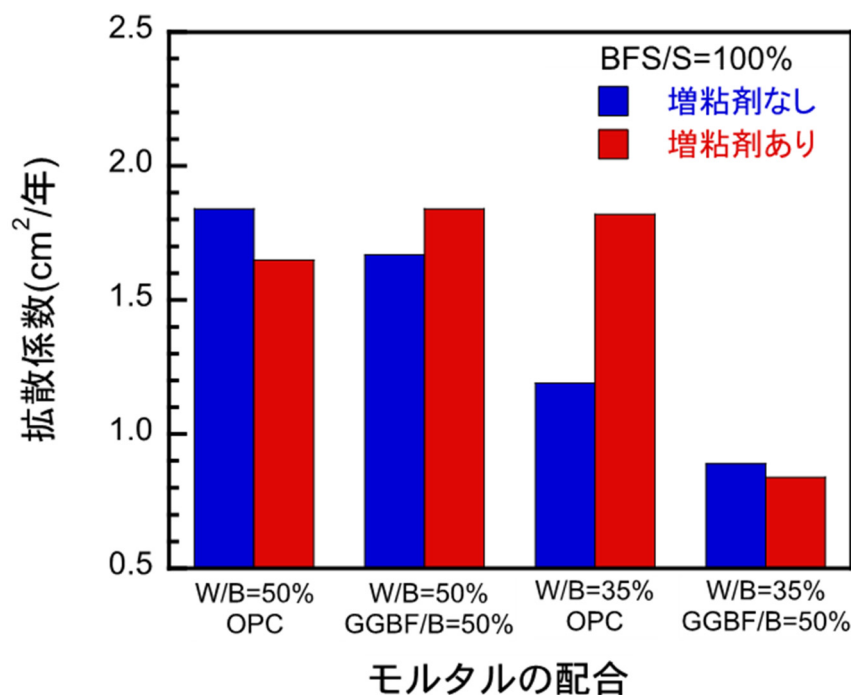


図 4-56 増粘剤がモルタルの見掛けの拡散係数に与える影響 (BFS/S=100%の場合)

図 4-57 は、水結合材比 50% のモルタルにおいて、養生方法が見掛けの拡散係数に及ぼす影響を示したものである。図中の ■ および ■ は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの見掛けの拡散係数を示している。結合剤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は、蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの方が、水中養生を行ったモルタルよりも見掛けの拡散係数が大きくなっている。結合材に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は、養生方法に関わらず、見掛けの拡散係数が同程度になる傾向がある。一方、結合材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は、蒸気養生後水中養生を行ったモルタルは、水中養生を行ったものよりも見掛けの拡散係数が小さくなっている。

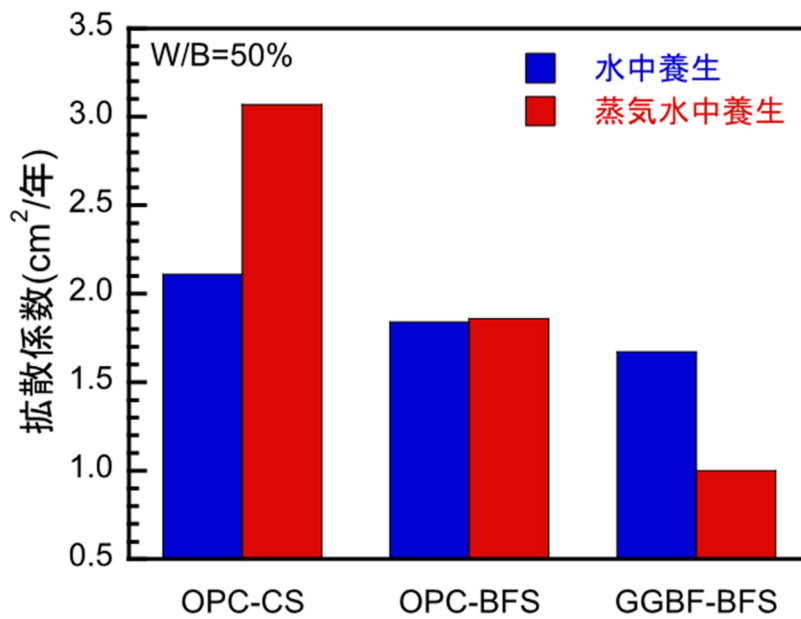


図 4-57 養生方法がモルタル見掛けの拡散係数に与える影響  
(W/B=50%の場合)

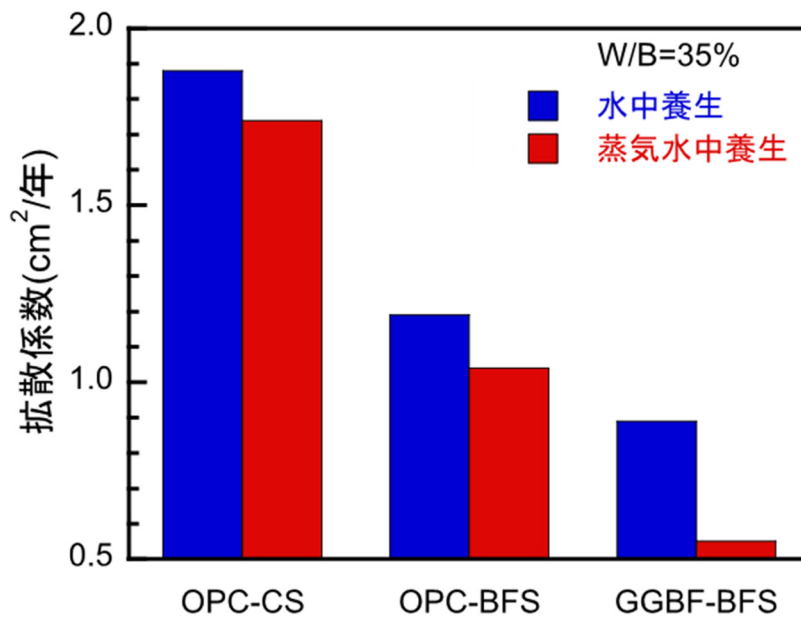


図 4-58 養生方法がモルタルの見掛けの拡散係数に与える影響  
(W/B=35%の場合)

図 4-58 は、水結合材比 35%のモルタルにおいて、養生方法が見掛けの拡散係数に及ぼす影響を示したものである。図中の■および■は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの見掛けの拡散係数を示している。いずれの配合のモルタルにおいても、蒸気養生後水中養生を行ったモルタルは、水中養生を行った

ものよりも見掛けの拡散係数が小さくなっている。この傾向は、結合材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に最も顕著に表れている。

図 4-59 は、水結合材比 50%で、高炉スラグ細骨材を用い、増粘剤を用いたモルタルにおいて、養生方法が薄片の見掛けの拡散係数に及ぼす影響を示したものである。図中の■および■は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの見掛けの拡散係数を示している。増粘剤を用いたモルタルの場合、蒸気養生の影響は、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルでは、見掛けの拡散係数が大きくなっている。一方、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたものは、増粘剤を用いると、見掛けの拡散係数が蒸気養生の影響を受けにくくなっている。

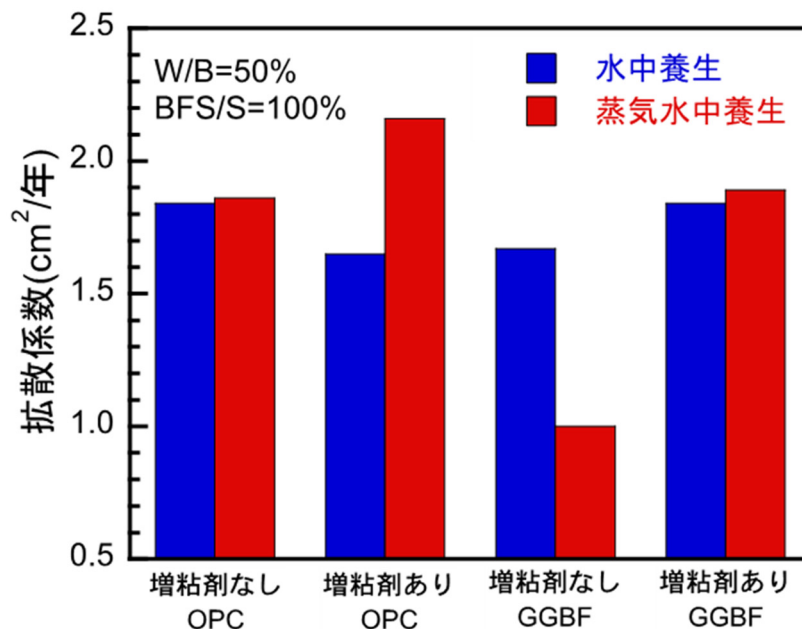


図 4-59 養生方法がモルタルの見掛けの拡散係数に与える影響  
(W/B=50%, BFS/S=100%, 増粘剤ありの場合)

図 4-60 は、水結合材比 35%で、高炉スラグ細骨材を用い、増粘剤を用いたモルタルにおいて、養生方法が薄片の見掛けの拡散係数に及ぼす影響を示したものである。図中の■および■は、それぞれ、水中養生および蒸気養生後水中養生を行ったモルタルの見掛けの拡散係数を示している。結合材に普通ポルトランドセメントを用い、増粘剤を用いたモルタルのみ、養生の影響を受けていない。その他の配合では、蒸気養生を行うことで見掛けの拡散係数が小さくなっている。

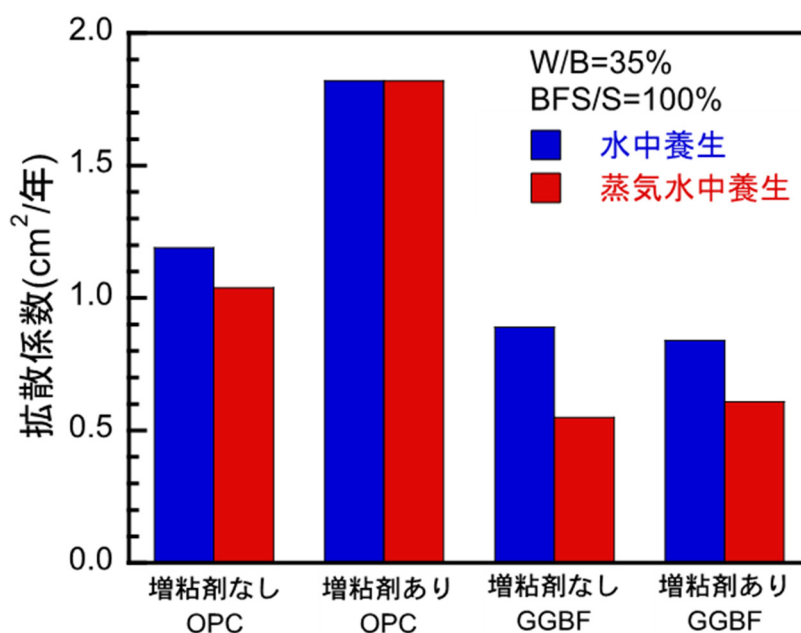


図 4-60 養生方法がモルタルの見掛けの拡散係数に与える影響  
(W/B=35%, BFS/S=100%, 増粘剤ありの場合)

#### 4-6-8 非定常・電気泳動試験

図 4-61 は、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塩化物イオン浸透性を示している。□および■は、それぞれ、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には砂岩砕砂を用いた結果である。○および●は、それぞれ、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には高炉スラグ細骨材を用いた結果である。この図より、細骨材よりも結合材に高炉スラグを用いる方が、遮塩性が高くなることが分かる。また、結合材と細骨材の両方に高炉スラグを用いる場合が最も遮塩性が高くなる。

図 4-62 は、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塩化物イオン浸透性を示している。□および■は、それぞれ、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には砂岩砕砂を用いた結果である。○および●は、それぞれ、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には高炉スラグ細骨材を用いた結果である。養生は水中養生を行った。この図より、細骨材よりも結合材に高炉スラグを用いる方が、遮塩性が高くなることが分かる。また、結合材に高炉スラグ微粉末を用いる場合、細骨材の種類に関わらず遮塩性は同程度である。

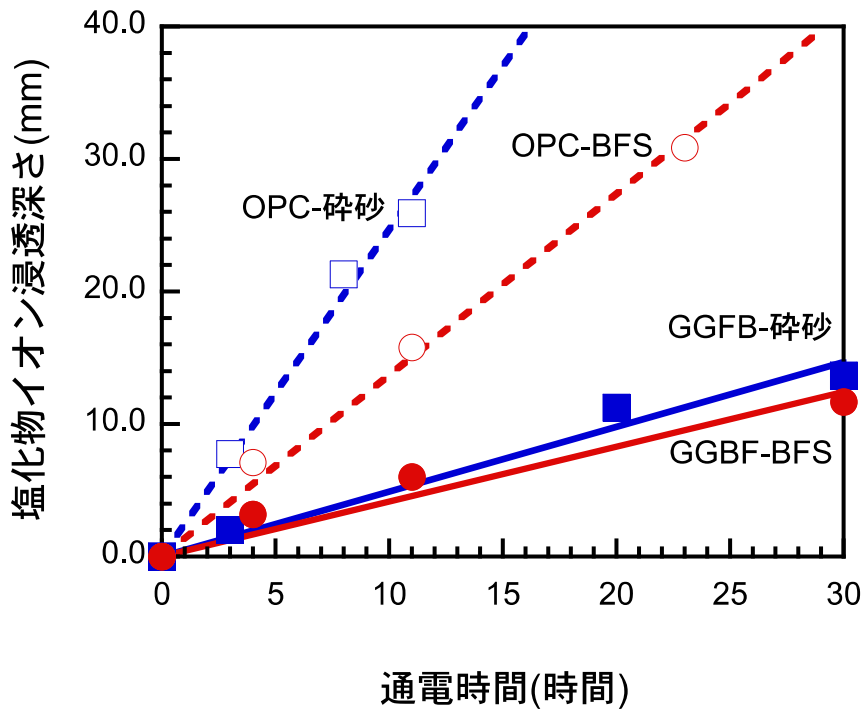


図 4-61 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がモルタルの塩化物イオン浸透深さに与える影響

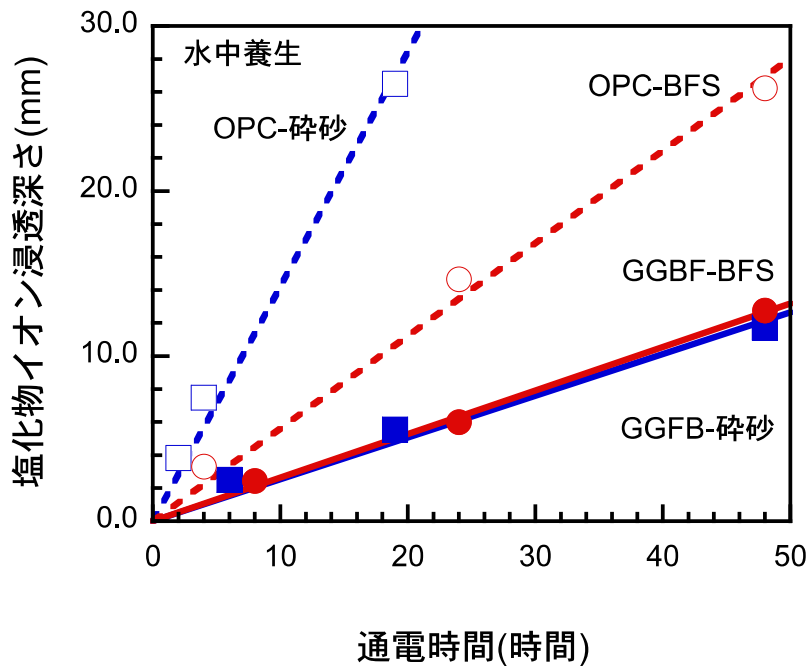


図 4-62 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がコンクリートの塩化物イオン浸透深さに与える影響(水中養生の場合)



図 4-63 は、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塩化物イオン浸透性を示している。□および■は、それぞれ、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には砂岩砕砂を用いた結果である。養生は蒸気養生後気中養生を行った。○および●は、それぞれ、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には高炉スラグ細骨材を用いた結果である。この図より、細骨材よりも結合材に高炉スラグを用いる方が、遮塩性が高くなることが分かる。また、結合材と細骨材の両方に高炉スラグを用いる場合が最も遮塩性が高くなる。

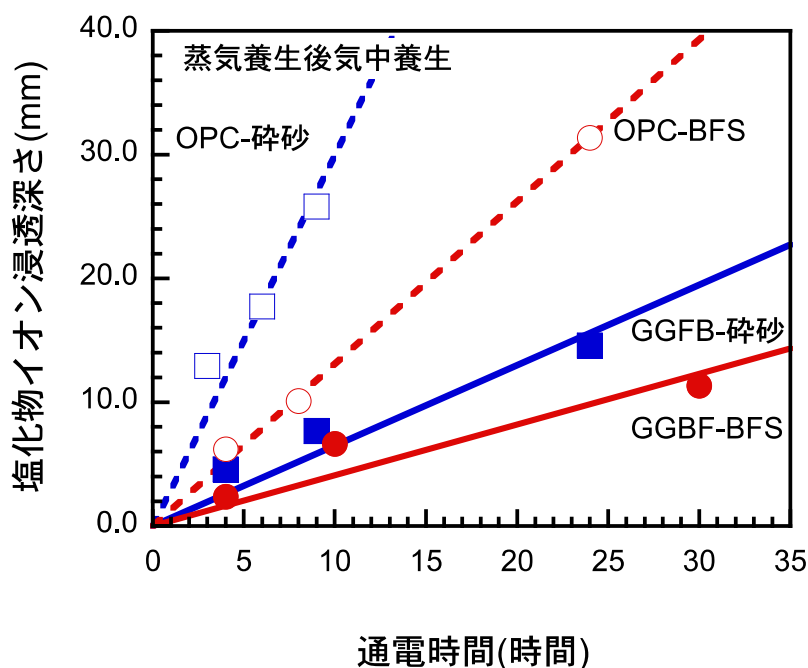


図 4-63 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がコンクリートの塩化物イオン浸透深さに与える影響(蒸気養生後気中養生の場合)

図 4-64 は、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塩化物イオン浸透性を示している。□および■は、それぞれ、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には砂岩砕砂を用いた結果である。○および●は、それぞれ、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には高炉スラグ細骨材を用いた結果である。養生は蒸気養生後水中養生を行った。この図より、細骨材よりも結合材に高炉スラグを用いる方が、遮塩性が高くなることが分かる。また、結合材に高炉スラグ微粉末を用いる場合、細骨材の種類に関わらず遮塩性は同程度である。

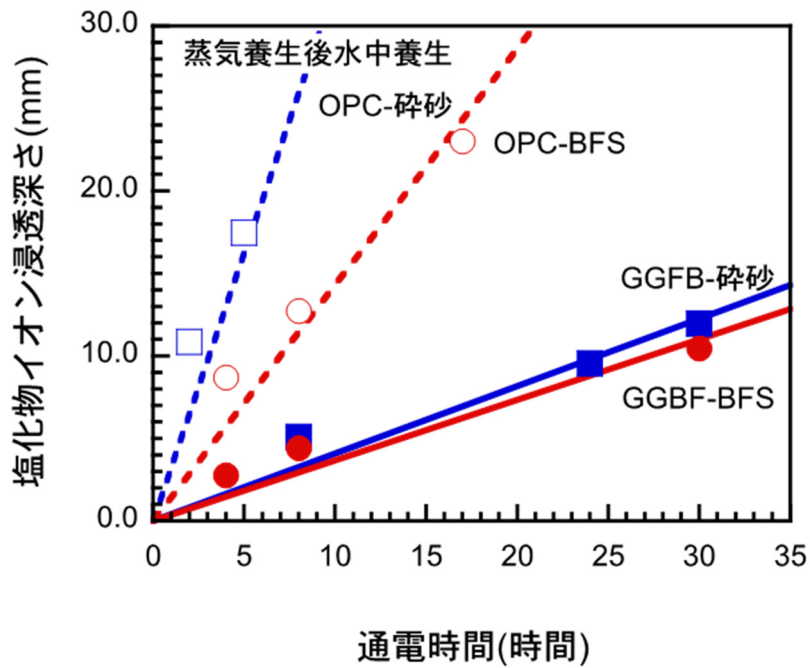


図 4-64 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がコンクリートの塩化物イオン浸透深さに与える影響(蒸気養生後水中養生の場合)

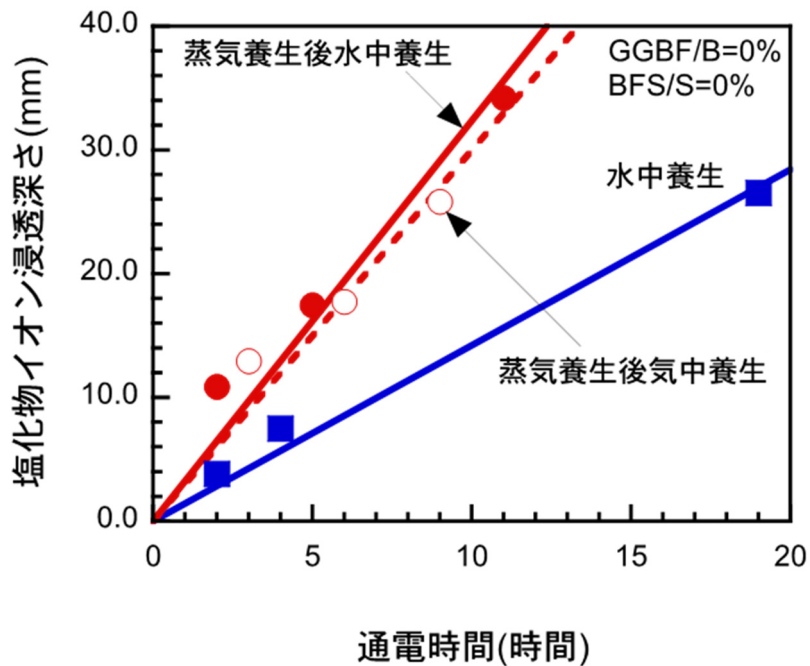


図 4-65 養生方法がコンクリートの塩化物イオン浸透深さに与える影響(普通ポルトランドセメントと砂岩砕砂を用いた場合)

図 4-65 は、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おいて、養生方法が塩化物イオン浸透性に与える影響を示している。■, ○および●は、

それぞれ、水中養生、蒸気養生後気中養生および蒸気養生後水中養生を行った結果である。この図より、水中養生を行ったコンクリートが最も遮塩性が高いことが分かる。蒸気養生を行うことでコンクリートの遮塩性は低くなり、その後水中養生を行っても遮塩性は高くない。

図 4-66 は、高炉スラグ微粉末をおよび砂岩砕砂を用いたコンクリートにおいて、養生方法が塩化物イオン浸透性に与える影響を示している。■、○および●は、それぞれ、水中養生、蒸気養生後気中養生および蒸気養生後水中養生を行った結果である。この図より、水中養生を行ったコンクリートが最も遮塩性が高いことが分かる。蒸気養生を行うことでコンクリートの遮塩性は低くなり、その後水中養生を行うと遮塩性はある程度は回復する。

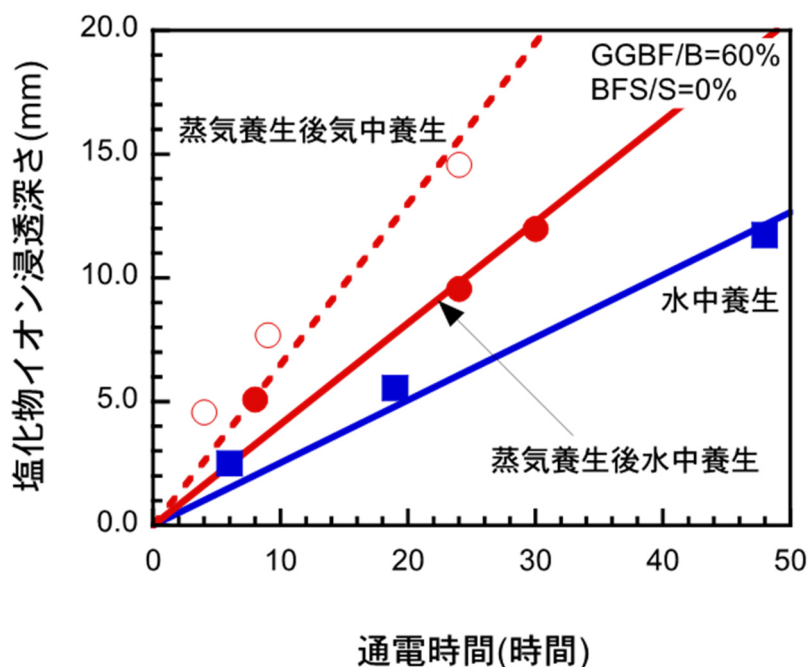


図 4-66 養生方法がコンクリートの塩化物イオン浸透深さに与える影響  
(高炉スラグ微粉末と砂岩砕砂を用いた場合)

図 4-67 は、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートにおいて、養生方法が塩化物イオン浸透性に与える影響を示している。■、○および●は、それぞれ、水中養生、蒸気養生後気中養生および蒸気養生後水中養生を行った結果である。この図より、水中養生を行ったコンクリートが最も遮塩性が高いことが分かる。蒸気養生を行うことでコンクリートの遮塩性は低くなり、その後水中養生を行っても遮塩性は高くない。

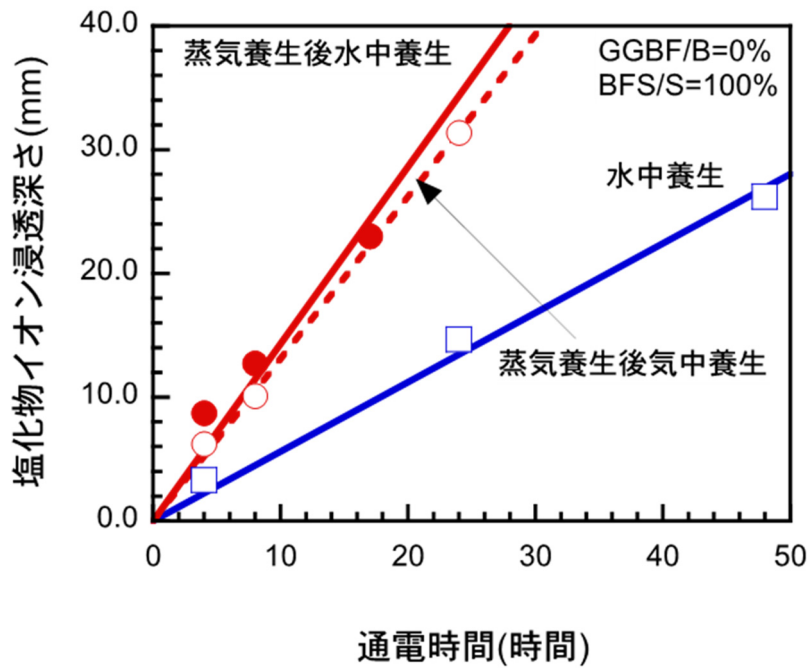


図 4-67 養生方法がコンクリートの塩化物イオン浸透深さに与える影響  
(普通ポルトランドセメントと高炉スラグ細骨材を用いた場合)

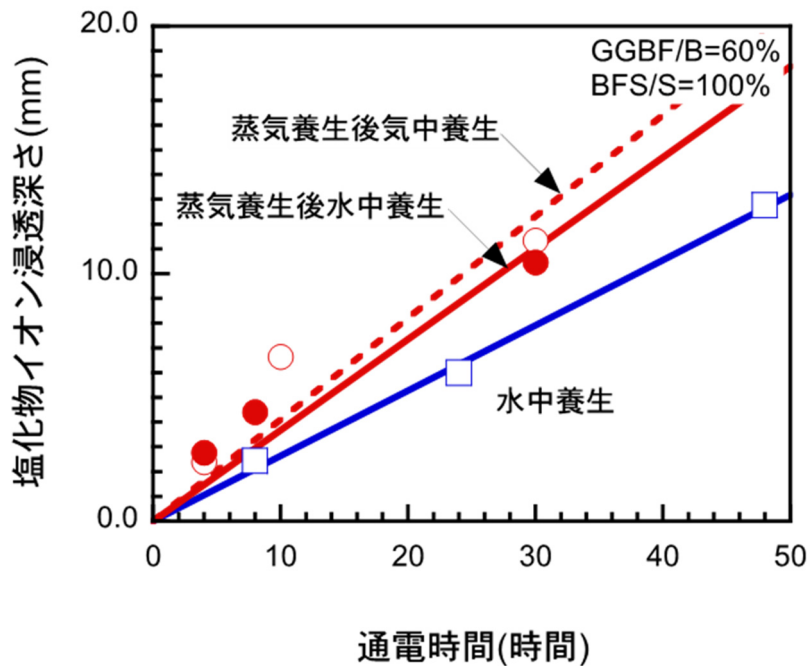


図 4-68 養生方法がコンクリートの塩化物イオン浸透深さに与える影響  
(高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いた場合)

図 4-68 は、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において、養生方法が塩化物イオン浸透性に与える影響を示している。■、○および●は、

それぞれ、水中養生、蒸気養生後気中養生および蒸気養生後水中養生を行った結果である。この図より、水中養生を行ったコンクリートが最も遮塩性が高いことが分かる。蒸気養生を行うことでコンクリートの遮塩性は低くなり、その後水中養生を行っても遮塩性は高くない。また、図 4-65、図 4-66 および図 4-67 に示した配合のコンクリートに比べて、最も養生の影響を受けにくいことが分かる。

図 4-69 は、普通ポルトランドセメント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の関係を示している。□および■は、それぞれ、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルおよびコンクリートの結果である。○および●は、それぞれ、細骨材に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結果である。この図より、いずれの細骨材を用いた場合もモルタルよりもコンクリートの方が塩化物イオン浸透は遅いことが分かる。

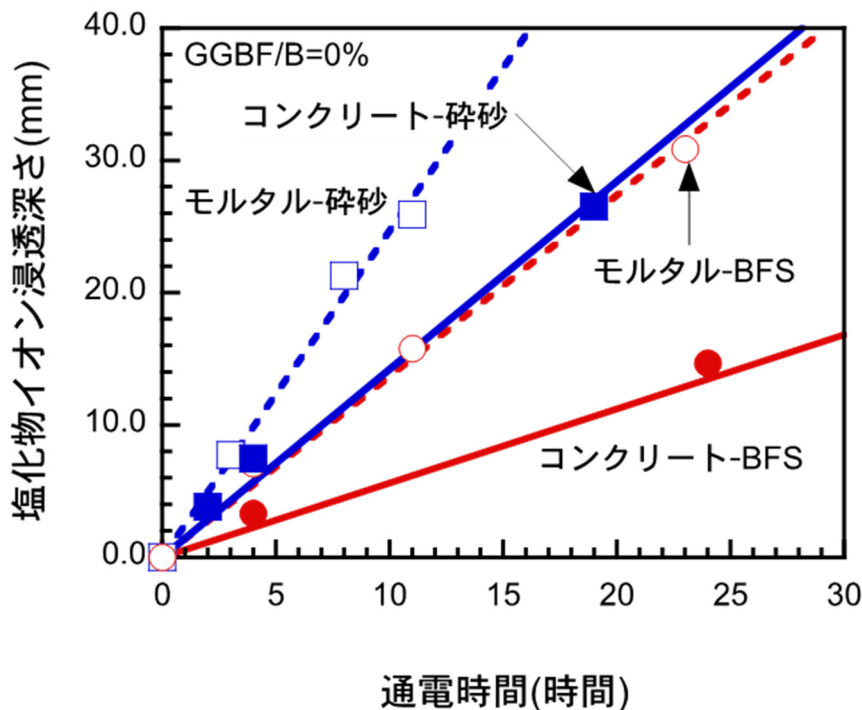


図 4-69 モルタルおよびコンクリートの塩化物イオン浸透性の関係  
(普通ポルトランドセメントを用いた場合)

図 4-70 は、高炉スラグ微粉末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の関係を示している。□および■は、それぞれ、細骨材に砂岩砕砂を用いたモルタルおよびコンクリートの結果である。○および●は、それぞれ、細骨材に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結果である。この図より、いずれの細骨材を用いた場合もモルタルよりもコンクリートの方が塩化物イオン浸透は

遅いことが分かる。

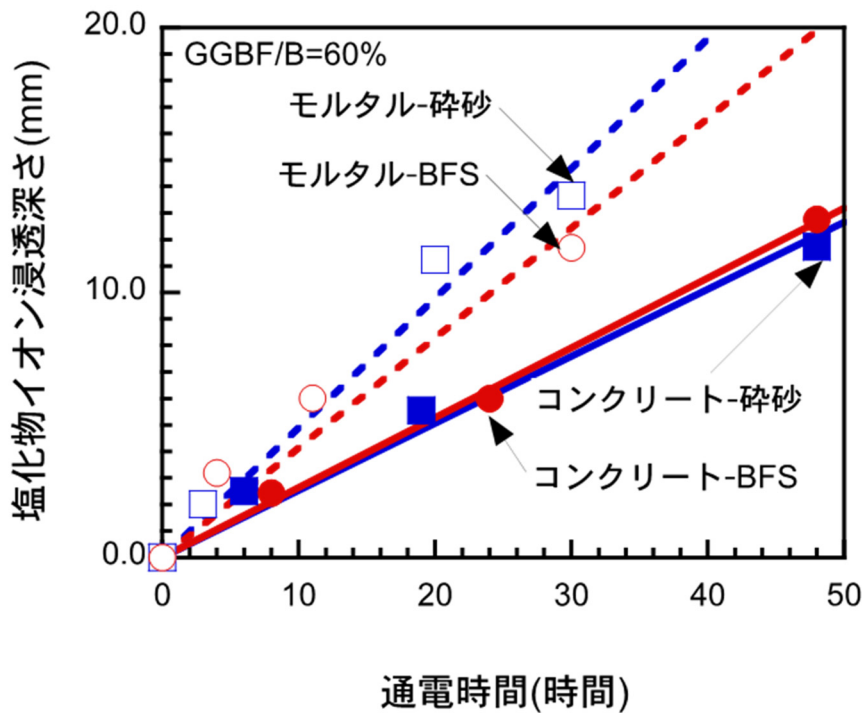


図 4-70 モルタルおよびコンクリートの塩化物イオン浸透性の関係  
(高炉スラグ微粉末を用いた場合)

#### 4-6-9 非定常・電気泳動法および浸漬法から求めたモルタル

##### およびコンクリートの拡散係数の関係

図 4-71 は、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を示している。この図より、高炉スラグを用いると拡散係数が小さくなり、細骨材よりも結合材に高炉スラグを用いる方が遮塩性は高くなる。結合材に高炉スラグ微粉末を用いる場合は、細骨材に砂岩砕砂を用いる場合も高炉スラグ細骨材を用いる場合も、同程度の遮塩性がある。

図 4-72 は、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において、養生方法が拡散係数に与える影響を示している。図中の■、▨および▩は、それぞれ、水中養生期間、蒸気養生後気中養生および蒸気養生後水中養生を行ったコンクリートの拡散係数の結果を示している。この図より、高炉スラグを用いると遮塩性が高くなり、細骨材よりも結合材に高炉スラグを用いる方が遮塩性は高くなる。結合材に高炉スラグ微粉末を用いる場合は、細骨材に砂岩砕砂を用いる場合も高炉スラグ細骨材を用いる場合も、同程度の遮塩性能がある。蒸気養生を行うことでコンクリートの拡散係数は大きくなる。結合材に高炉スラグ微粉末を用いていれば、蒸気養生を

行ったあとに水中養生を行えば拡散係数はある程度小さくなる。

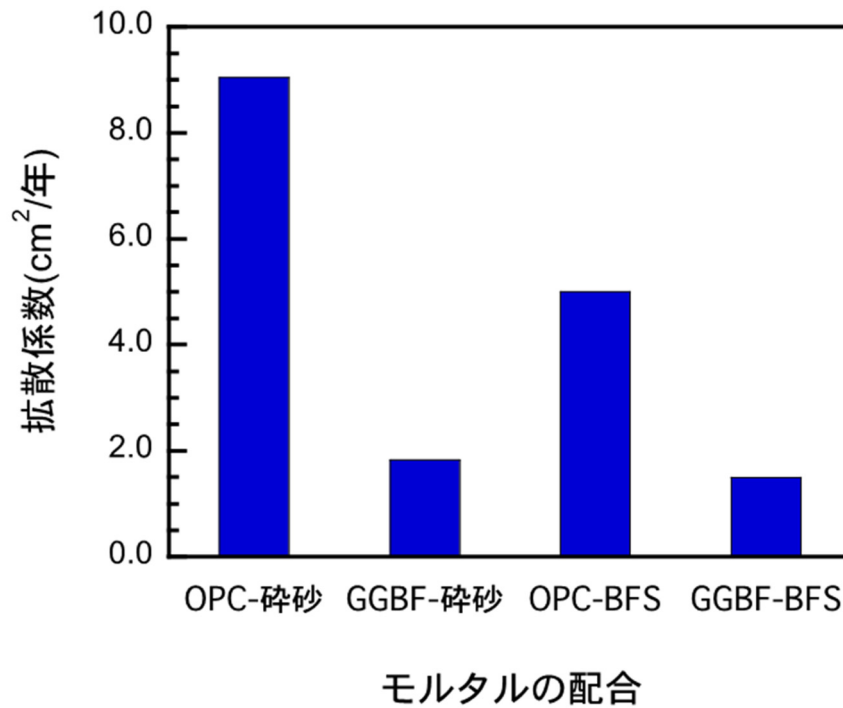


図 4-71 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がモルタルの拡散係数に与える影響

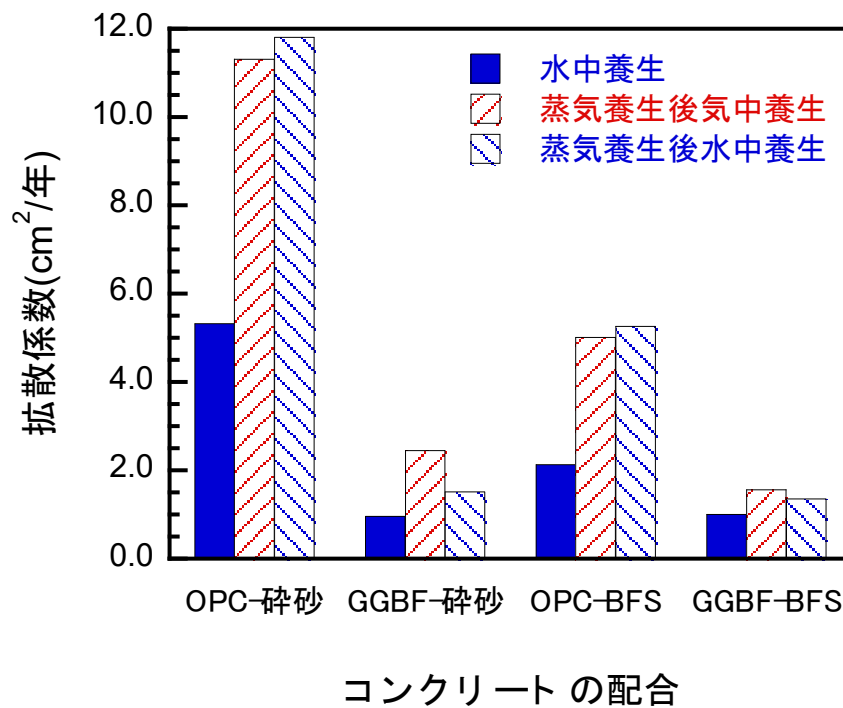


図 4-72 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの養生方法の拡散係数に与える影響



図 4-73 は、非定常電気泳動方および浸漬法から求めたモルタルの拡散係数の関係を示している。この図より、非定常電気泳動法から求めたモルタルの拡散係数は、浸漬法から求めた拡散係数よりも大きめの値になることが分かった。

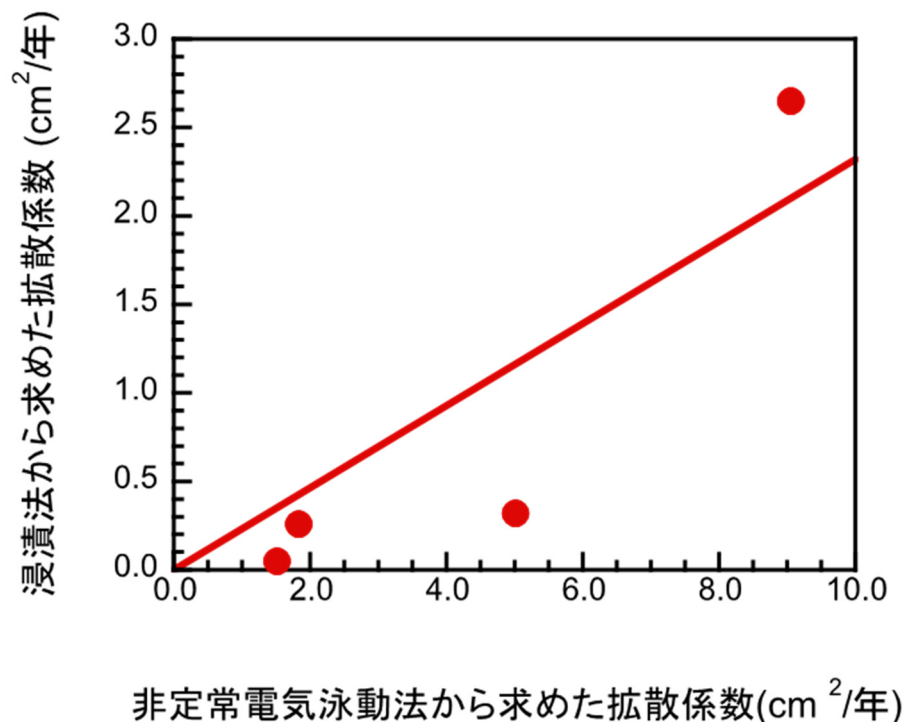
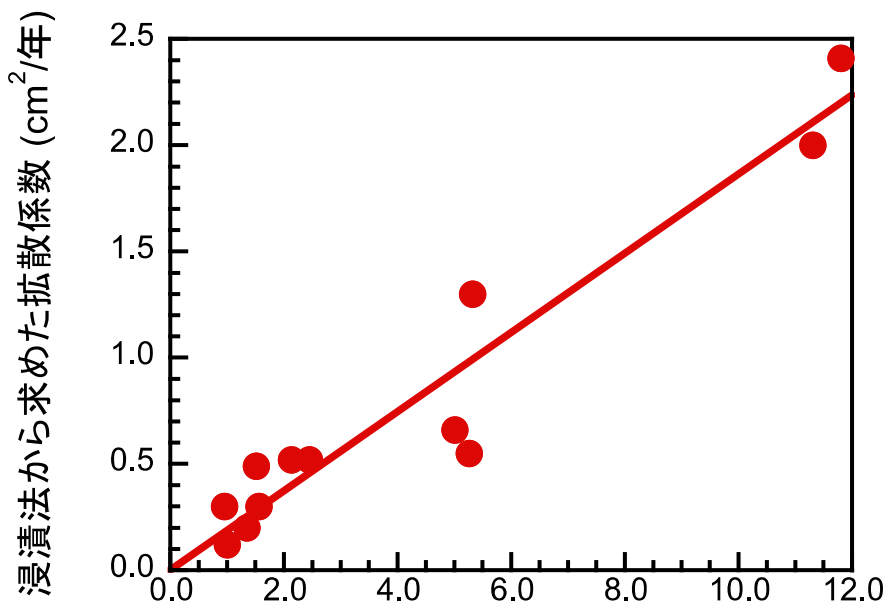


図 4-73 非定常電気泳動法および浸漬法で求めた拡散係数の関係  
(モルタルの場合)

図 4-74 は、非定常電気泳動方および浸漬法から求めたコンクリートの拡散係数の関係を示している。この図より、非定常電気泳動法から求めたコンクリートの拡散係数は、浸漬法から求めた拡散係数と同様の傾向になることが分かる。

#### 4-6-10 高炉スラグ細骨材の生産地の違いが非定常・電気泳動法から求めたコンクリートの実効拡散係数に与える影響

図 4-75 は、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートにおいて、高炉スラグ細骨材の生産地の違いが、塩化物イオン浸透深さに与える影響を示している。図より、A 工場の高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのみ、他の生産工場の高炉スラグ細骨材を用いたものよりも塩化物イオン浸透抵抗性が低いことが分かる。しかし、A 工場の高炉スラグ細骨材は、砂岩砕砂を用いたコンクリートよりも塩化物イオン浸透抵抗性が高い。



非定常電気泳動法から求めた拡散係数(cm<sup>2</sup>/年)

図 4-74 非定常電気泳動方および浸漬方で求めた拡散係数の関係  
(コンクリートの場合)

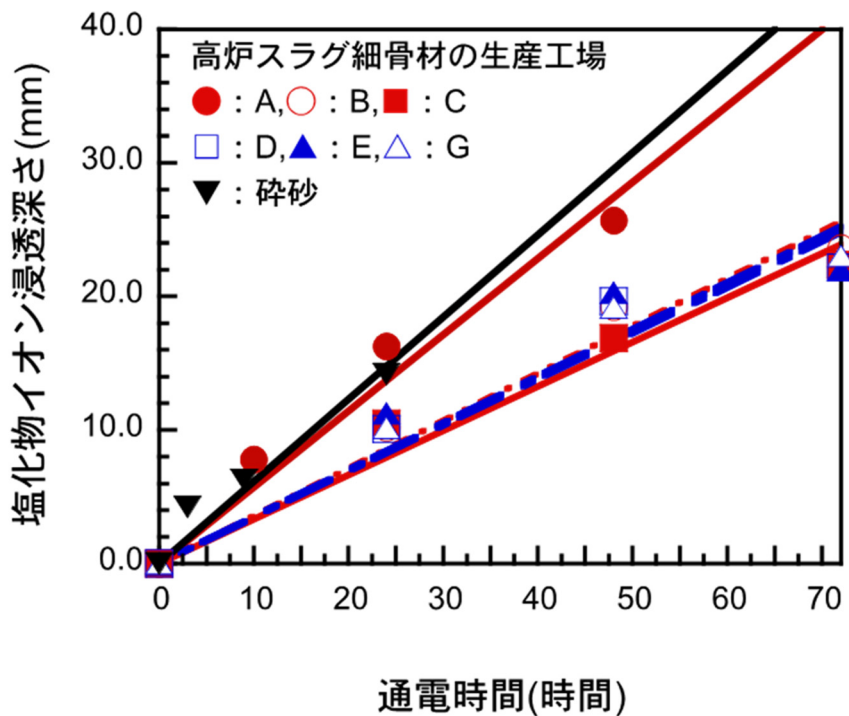


図 4-75 高炉スラグ細骨材の生産地の違いが塩化物イオン浸透深さに与える影響

図 4-76 は、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートにおいて、高炉スラグ細骨材の生産地の違いが、実効拡散係数に与える影響を示している。図より、A 工場の高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのみ、他の生産工場の高炉スラグ細骨材を用いたものよりも実効拡散係数が大きくなることが分かる。B, C, D, E, および G 工場の高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの実効拡散係数は同程度の値である。

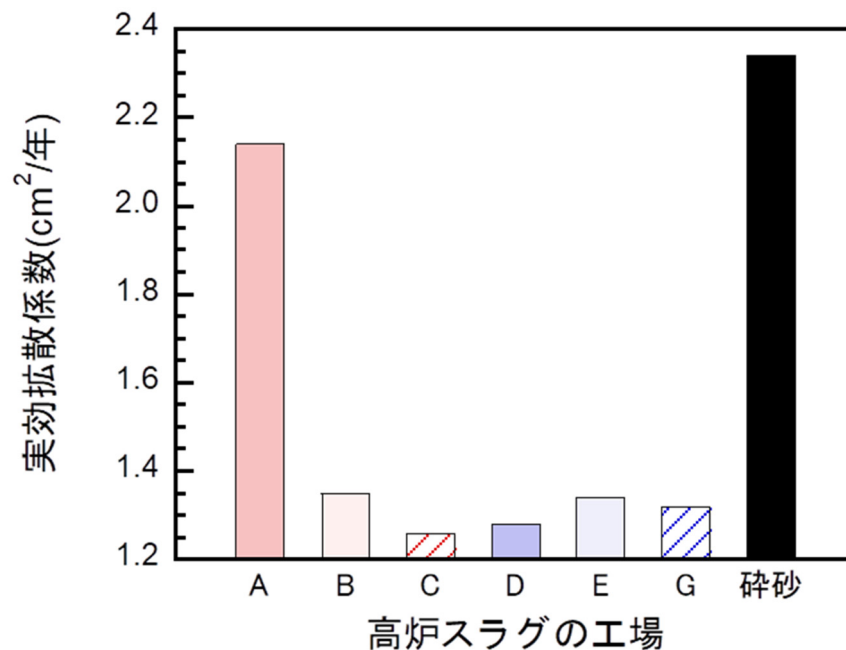


図 4-76 高炉スラグ細骨材の生産地の違いが実効拡散係数に与える影響

#### 4-6 本章のまとめ

- ・ 薄片法において、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。
- ・ 薄片法から求めた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。
- ・ 薄片法から求めたモルタルの見掛けの拡散係数は、塩水浸漬法から求めた見掛けの拡散係数と同様の傾向を示しており、モルタルの塩化物イオン浸透抵抗性は、薄片法で評価することができる。
- ・ 浸漬法では、高炉スラグを用いる場合、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を併用すると最も拡散係数が小さくなるが、薄片法ではこの傾向が得られない場合がある。
- ・ 水結合材比に関わらず、砂岩砕砂を用いた場合に比べて高炉スラグ細骨材を用い

た場合の方が、モルタルの可溶性塩化物イオン量が多くなる。

- 高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、材齢が7日から28日に長くなると飽和塩化物イオン量は大きくなり、拡散係数は1/2以下に小さくなる。
- 増粘剤を用いたモルタルは、遮塩性が低くなる場合があるが、結合材に高炉スラグ微粉末を用いると、遮塩性の低下は抑制される。
- 結合材および細骨材に高炉スラグを用いたモルタルに蒸気養生後水中養生を行うと、遮塩性が高くなる。
- 電気泳動法において、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。
- 高炉スラグが塩化物イオン浸透性に与える影響について電気泳動法を用いて評価する場合、浸漬法を用いた場合よりも遮塩性を低く評価する傾向がある。
- 電気泳動法から求めたコンクリートの実効拡散係数は、蒸気養生を行うと大きくなる。
- 生産工場の違いが塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響は、生産工場Aの高炉スラグ細骨材のみ実効拡散係数が大きくなり、その他の工場のもは同程度の実効拡散係数になった。また、いずれの工場の高炉スラグ細骨材も、砂岩砕砂を用いたコンクリートよりも実効拡散係数が小さくなる。

## 第5章 高炉スラグを用いたコンクリートの鋼材腐食試験

### 5-1 概要

高炉スラグ微粉末をコンクリートの結合材に用いた場合、塩分浸透を抑制する効果があることが知られている<sup>3)</sup>。しかし、高炉スラグ微粉末を用いると、鋼材の腐食発生塩分量が普通ポルトランドセメントのみを用いた場合よりも小さくなることも報告されている<sup>14)</sup>。一方、高炉スラグ細骨材も、塩分の浸透を抑制する効果があることが報告されている<sup>15)</sup>。

本章では、コンクリートの鋼材腐食に高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材が与える影響を検討した。電気化学的試験である、四電極法、分極抵抗法、分極曲線法による試験および、ひび割れのないモルタル供試体および人工的にひび割れを導入したコンクリート供試体を用いた鋼材腐食促進試験により、鋼材腐食に対する抵抗性を調べた。

### 5-2 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:  $3.15\text{g/cm}^3$ , ブレーン値:  $3,350\text{cm}^2/\text{g}$ ), 高炉スラグ微粉末 4000(密度:  $2.89\text{g/cm}^3$ , ブレーン値:  $4.150\text{cm}^2/\text{g}$ )を用いた。細骨材には、砂岩砕砂(密度:  $2.64\text{g/cm}^3$ , 吸水率:  $2.00\%$ )および高炉スラグ細骨材(密度:  $2.77\text{g/cm}^3$ , 吸水率:  $0.69\%$ )を用いた。粗骨材には、硬質砂岩碎石(最大寸法 20mm, 密度:  $2.72\text{g/cm}^3$ , 吸水率:  $0.53\%$ )を用いた。発錆限界量試験には、細骨材に硬質砂岩砕砂(密度:  $2.64\text{g/cm}^3$ , 吸水率:  $1.78\%$ )および高炉スラグ細骨材(密度:  $2.72\text{g/cm}^3$ , 吸水率:  $0.58\%$ )を用いた。粗骨材には、硬質砂岩碎石(最大寸法 20mm, 密度:  $2.74\text{g/cm}^3$ , 吸水率:  $0.49\%$ )を用いた。練り混ぜ水には、水道水を用い、混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた。コンクリートの水結合材比は、 $35\%$ および $65\%$ とした。コンクリートの配合を表 5-1 および表 5-2, モルタルの配合を表 5-3 に示す。

5-1 コンクリートの配合

| W/B<br>(%) | GGBF/B<br>(%) | BFS/S<br>(%) | Air<br>(%) | s/a<br>(%) | Unit content (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |     |         | 高性能<br>減水剤<br>(B×%) |     |
|------------|---------------|--------------|------------|------------|-----------------------------------|-----|------|-----|---------|---------------------|-----|
|            |               |              |            |            | W                                 | B   |      | S   |         |                     | G   |
|            |               |              |            |            |                                   | OPC | GGBF | CS  | BF<br>S |                     |     |
| 35.0       | 0.0           | 0            | 2.0        | 42.0       | 175                               | 500 | 0    | 717 | 0       | 1,020               | 0.6 |
|            | 15.0          |              |            | 41.8       |                                   | 425 | 75   | 711 |         |                     |     |
|            | 30.0          |              |            | 41.6       |                                   | 350 | 150  | 705 |         |                     |     |
|            | 45.0          |              |            | 41.4       |                                   | 275 | 225  | 700 |         |                     |     |
|            | 0             | 33.3         |            | 42.0       |                                   | 500 | 0    | 485 | 243     |                     |     |
|            |               | 66.7         |            | 42.0       |                                   |     |      | 247 | 493     |                     |     |
|            |               | 100.0        |            | 42.0       |                                   |     |      | 0   | 752     |                     |     |
|            | 15.0          | 100.0        |            | 41.8       |                                   | 425 | 75   | 0   | 746     |                     |     |
|            | 30.0          |              |            | 41.6       |                                   | 350 | 150  | 0   | 740     |                     |     |
|            | 45.0          |              |            | 41.4       |                                   | 275 | 225  | 734 |         |                     |     |
|            |               |              |            | 42.0       |                                   | 269 | 0    | 798 | 0       |                     |     |
|            | 15.0          | 0            |            | 41.9       |                                   | 229 | 40   | 795 |         |                     |     |
| 30.0       | 41.8          |              | 188        | 81         | 792                               |     |      |     |         |                     |     |
| 45.0       | 41.7          |              | 148        | 121        | 789                               |     |      |     |         |                     |     |
|            | 33.3          |              | 42.0       | 269        | 0                                 | 540 | 270  |     |         |                     |     |
|            | 66.7          | 42.0         | 275        |            |                                   | 549 |      |     |         |                     |     |
| 100.0      | 42.0          | 0            | 837        |            |                                   |     |      |     |         |                     |     |
| 15.0       | 100.0         | 41.9         | 229        | 40         | 0                                 | 834 |      |     |         |                     |     |
| 30.0       |               | 41.8         | 188        | 81         | 0                                 | 831 |      |     |         |                     |     |
| 45.0       |               | 41.7         | 148        | 121        | 828                               |     |      |     |         |                     |     |
|            |               | 41.7         | 148        | 121        | 828                               |     |      |     |         |                     |     |

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

表 5-2 発錆限界塩化物イオン量試験に用いたコンクリートの配合

| W/B<br>(%) | GGBF/B<br>(%) | BFS/S<br>(%) | Air<br>(%) | Unit content (kg/m <sup>3</sup> ) |       |       |       |       |
|------------|---------------|--------------|------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            |               |              |            | W                                 | B     |       | S     |       |
|            |               |              |            |                                   | OPC   | GGBF  | CS    | BFS   |
| 50.0       | 0.0           | 0.0          | 2.0        | 270                               | 540   | 0     | 142,2 | 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          |            |                                   | 139,7 | 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:砂岩砕砂, BFS:高炉スラグ細骨材(破砕前)



表 5-3 発錆限界塩化物イオン量試験に用いたモルタルの配合

| W/B<br>(%) | GGBF/B<br>(%) | BFS/S<br>(%) | Air<br>(%) | Unit content (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:砂岩砕砂, BFS:高炉スラグ細骨材(破砕前)

### 5-3 練混および養生方法

コンクリートの練混ぜには、容量が 100 リットルの強制二軸ミキサーを使用した。練混ぜは、粗骨材、細骨材および結合材を投入後、30 秒の空練りを行い、水および混和剤を加えて 120 秒間の本練りを行った。打設後 24 時間以内の初期養生方法では、コンクリート打込み後、24 時間常温で型枠内養生を行った後に脱型し、材齢 7 日まで水中養生を行った。鋼材腐食試験に用いたモルタルは、上記の練混ぜで作ったコンクリートを練混ぜ直後に 5mm のふるいを用いてウェットスクリーニングして、モルタル部分のみとしたものを用いた。

発錆限界塩化物イオン量試験に用いたコンクリートの練混ぜには、容量が 100 リットルの強制二軸ミキサーを使用した。練混ぜは、粗骨材、細骨材および結合材を投入後、30 秒の空練りを行い、水および混和剤を加えて 120 秒間の本練りを行った。モルタルの練混ぜには、ホバート型モルタルミキサーを使用した。打設後 24 時間以内の初期養生方法では、コンクリートは室内での養生または、蒸気養生を用いた。蒸気養生は、2012 年制定土木学会コンクリート標準示方書 [施行編]<sup>5)</sup> に示されている方法に従い行った。打込み後 3 時間型枠内に静置した後、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。蒸気養生後は水中養生および気中養生を所定の期間行った。モルタルの初期養生は、室内養生を行った。

初期養生後に水中養生を行ったコンクリートおよびモルタル供試体は、コンクリート打込み後、24 時間常温で型枠内養生を行った後に脱型し、所定の期間まで水中養生を行った。

### 5-4 試験方法

#### 5-4-1 四電極法，分極抵抗法，分極曲線法に使用した供試体

供試体には、寸法100×100×400mmの角柱供試体に、R13の鉄筋を1本、D19の鉄筋を1本、計2本配筋し、細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。この時、水セメント比をそれぞれ、35%および65%、高炉スラグ微粉末の割合をそれぞれ0%、15%、30%および45%、高炉スラグ細骨材の割合を0%、33.3%、66.7%、および100%として計20本の供試体を作成した。供試体は、脱型後、鉄筋に電線を取り付け、その後、鉄筋露出面のコンクリートおよび鉄筋をエポキシ樹脂で覆った。エポキシ樹脂乾燥のため7日間気中養生した後、供試体は水中養生を行った。作成した供試体およびコンクリート中の背筋は、写真5-1，図5-1および図5-2に示す。



写真 5-1 四電極法、分極抵抗法および分極曲線法に用いた供試体の導線設置面

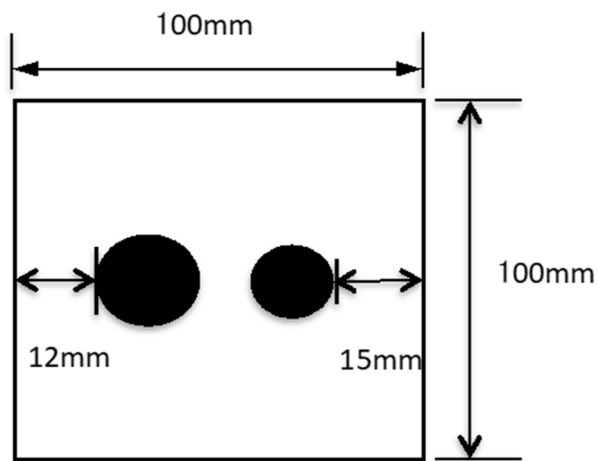
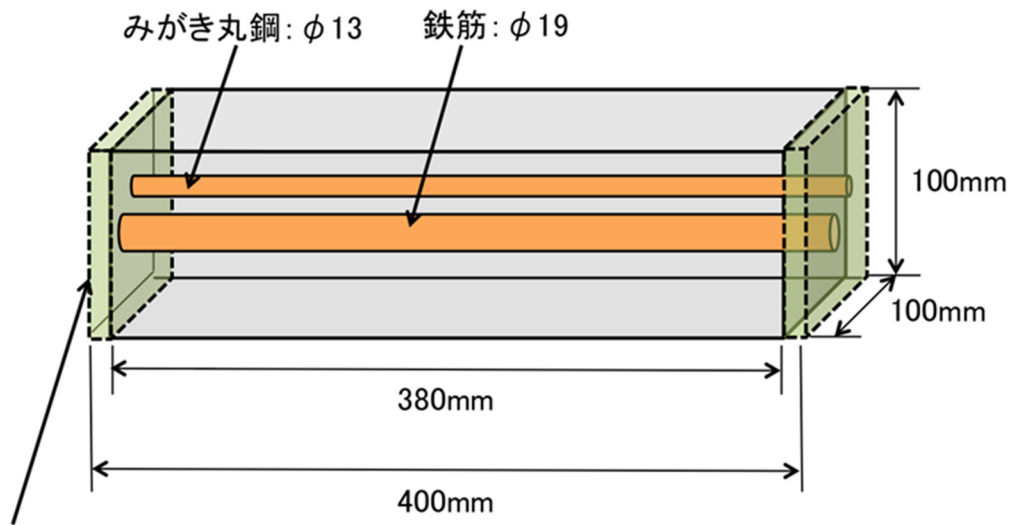


図 5-1 四電極法、分極抵抗法および分極曲線法に用いた供試体の鉄筋配置図(断面)



エポキシ樹脂  
コーティング部分

図 5-2 四電極法、分極抵抗法および分極曲線法に用いた供試体の鉄筋配置図

#### 5-4-2 四電極法

四電極法は、4つの電極をまとめたセンサを当て両端の電極に交流を流して、内側の2本の電極で電位差を測り電気抵抗を測定する。センサをあてる供試体の表面に存在する水分で測定結果に大きく影響してくる。そのため、供試体は水中につけて置き、測定の際に水中から取り出し表面の水分量を一定にし、測定を行った。また、測定の際はコンクリートの表面が平でないとき正確な値が測定できず、測定器と鉄筋の位置関係でも測定値が変わってくるため、打設面を除く、鉄筋と平行な三面で測定を行い、その平均値を抵抗値とした。試験の様子を図 5-3 に示す。

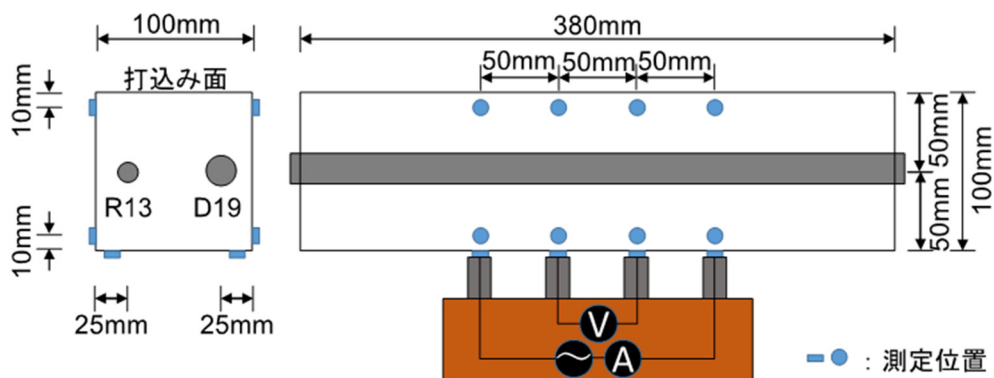


図 5-3 四電極法の試験概略図

### 5-4-3 分極抵抗法(交流インピーダンス法)

1つの供試体に R13 および D19 の鉄筋が、合計 2 本入っているため、それぞれ分極抵抗値について測定を行った。分極抵抗の測定方法として、照合電極に飽和塩化銀電極(Ag/AgCl)を、電解質溶液に水酸化カルシウム(Ca(OH)<sub>2</sub>)を用いて交流インピーダンス法を行った。AC 振幅を 10mV とし、開始周波数および終了周波数を、それぞれ、20kHz および 0.1mHz とした。実験の様子を、図 5-4 に示す。

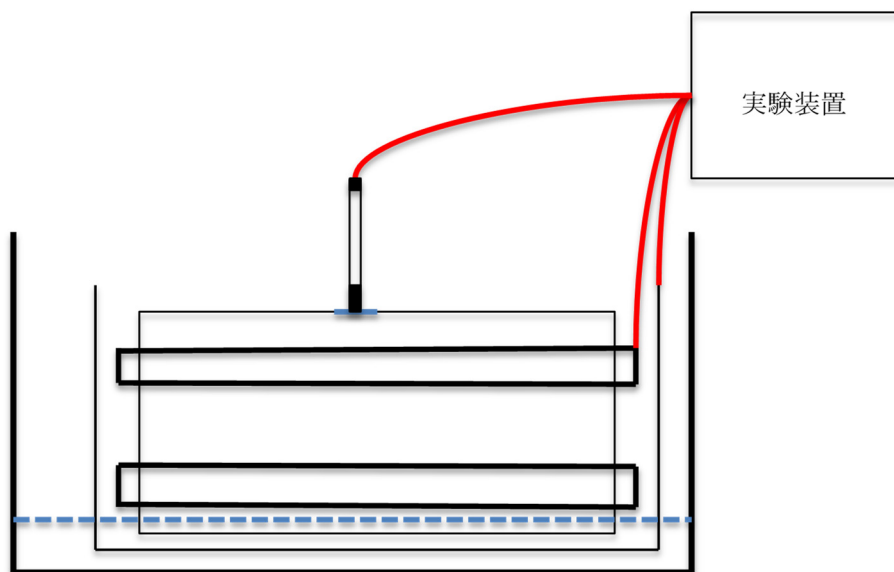


図 5-4 分極抵抗法の実験の様子

### 5-4-4 分極曲線法(tafel 外挿法)

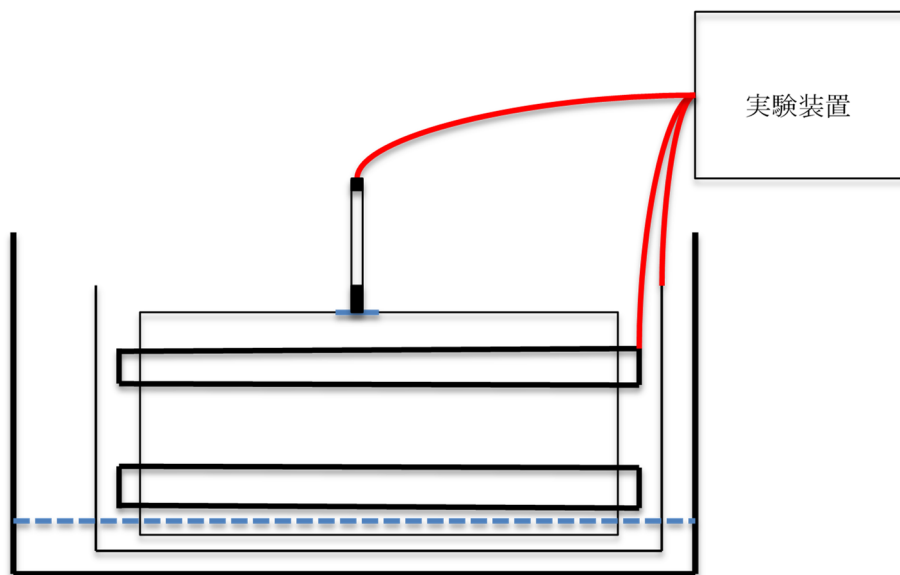
1つの供試体に、R13 および D19 の鉄筋が合計 2 本入っているため、R13 と D19 それぞれについてアノード分極曲線およびカソード分極曲線を測定した。

アノード分極曲線の測定は、飽和塩化銀電極(Ag/AgCl)を参照電極とし、鉄筋要素の電位を 20mV/min で強制的に貴へ変化させ、その時流れる電流を記録した。予め、使用する供試体の自然電位を測定しておき、自然電位および自然電位に+200mV した値を、それぞれ、測定の開始電位および終了電位とした。

カソード分極曲線の測定は、飽和塩化銀電極(Ag/AgCl)を用い、鉄筋要素の電位を 20mV/min で強制的に電位を卑へ変化させ、その時流れる電流を記録した。予め、使用する供試体の自然電位を測定しておき、自然電位および自然電位に-200mV した値を、測定の開始電位および終了電位とした。

また、アノード分極曲線およびカソード分極曲線ともに、電解質溶液は水道水(H<sub>2</sub>O)を使用した。測定時、図のように供試体の測定する鉄筋が上面にくるよう鉄板の上に

供試体を置き測定を行った。実験の様子を，**図 5-5** に示す。



**図 5-5** 分極曲線の実験様子

#### 5-4-5 鋼材腐食促進試験

試験には，ひび割れのないモルタル供試体および，人工的に予めひび割れを入れたコンクリート供試体の 2 種類を用いた。ひび割れのないモルタル供試体の型枠には， $40 \times 40 \times 160\text{mm}$  の鋳物を用いた，ひび割れを入れたコンクリート供試体の型枠には， $\phi 115 \times 200\text{mm}$  の円盤状塩ビ管を用いた。コンクリートおよびモルタル供試体には磨き丸鋼  $\phi 13$  を用いた。材齢 7 日間の水中養生期間終了後，コンクリート供試体は湿気式コンクリートカッターを用いて，鉄筋のかぶりが  $25\text{mm}$  になるように成形し，モルタル供試体は，鉄筋露出部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。**図 5-8** に示すように，材齢 14 日で，コンクリート供試体のみ圧縮試験機を用いて，割裂引張試験と同じ要領で，鉄筋の配筋方向に対し垂直方向に荷重を載荷し，肉眼で観察することがほぼ限界である  $0.1\text{mm}$  の微細なひび割れを生じさせた。型枠および試験体を**写真 5-2**，**写真 5-3**，**写真 5-4**，**写真 5-5**，**図 5-6**，**図 5-7** および**図 5-8** に示す。

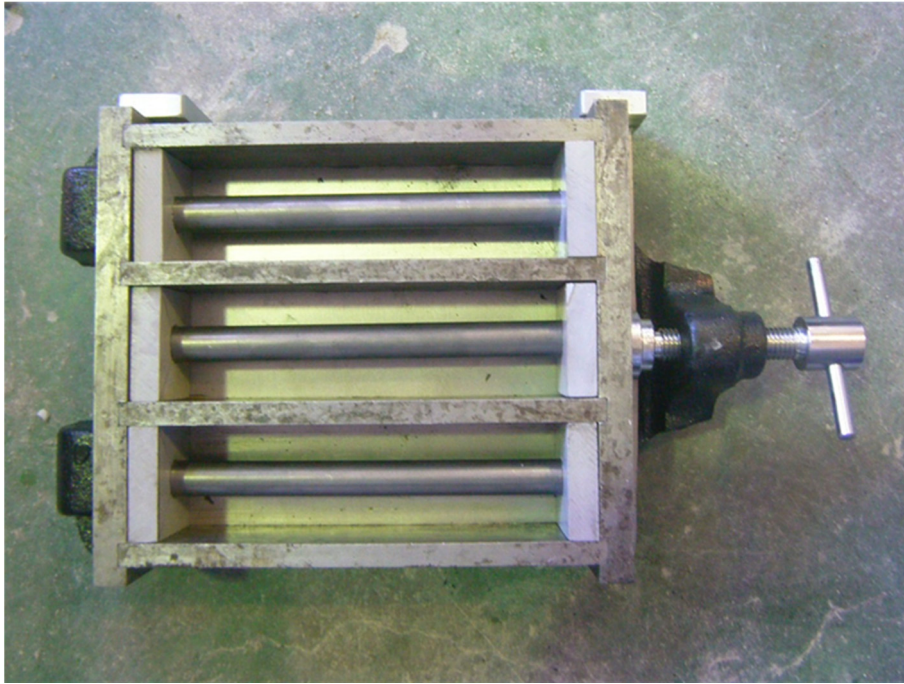


写真 5-2 ひび割れのないモルタル供試体の型枠

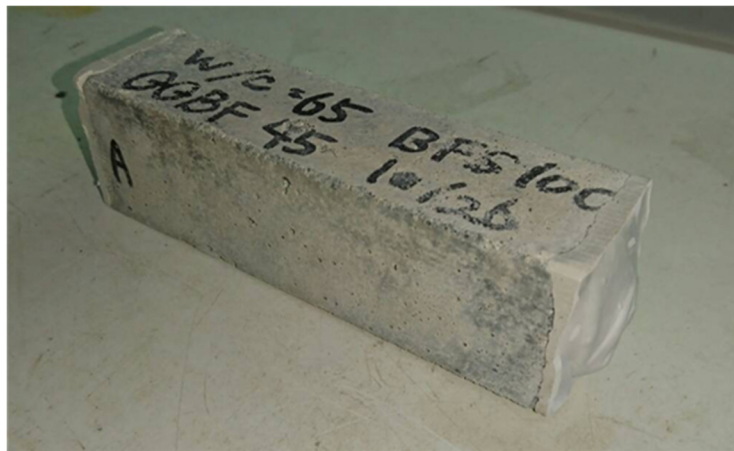


写真 5-3 ひび割れのないモルタル供試体



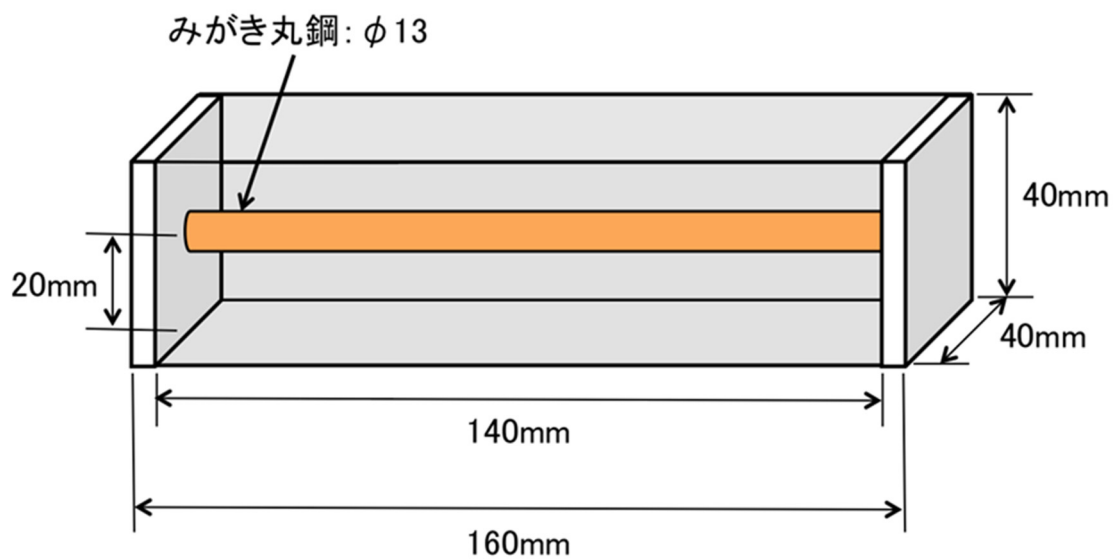


図 5-6 ひび割れのないモルタル供試体の概略図

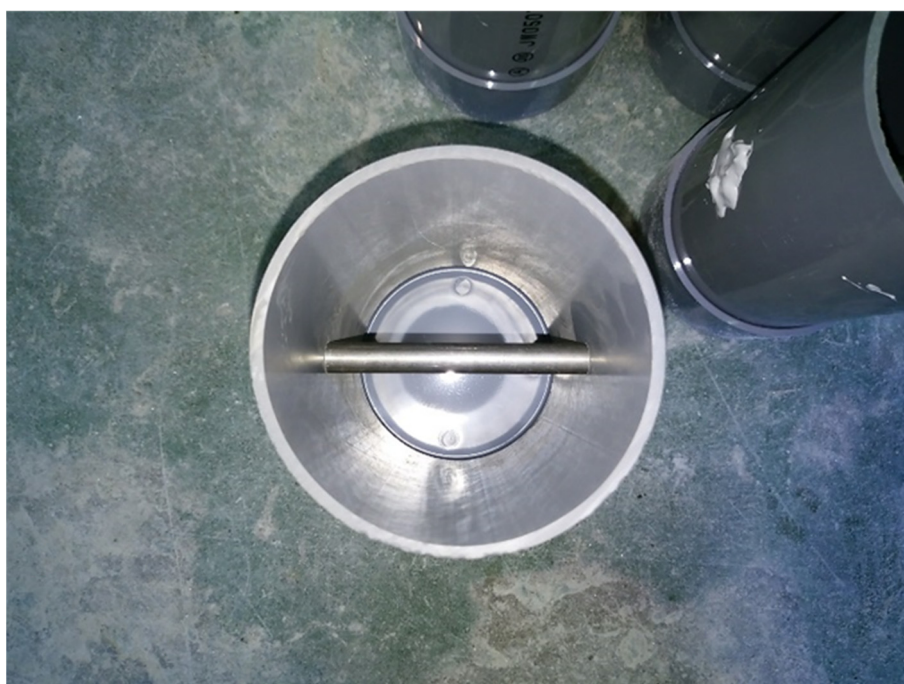


写真 5-4 予めひび割れを入れたコンクリート供試体の型枠

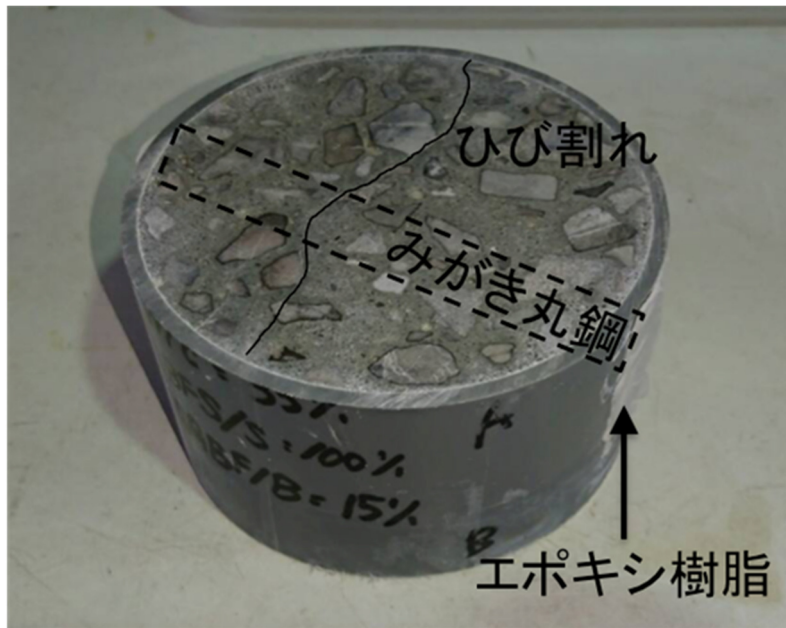


写真 5-5 予めひび割れを入れたコンクリート供試体

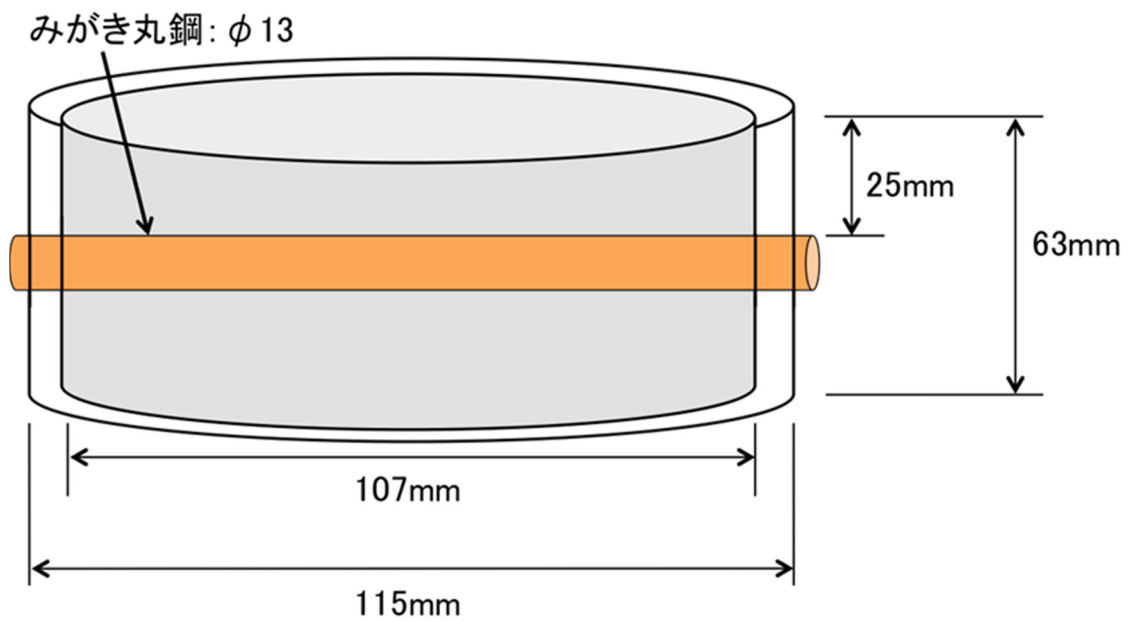


図 5-7 予めひび割れを入れたコンクリート供試体の概略図

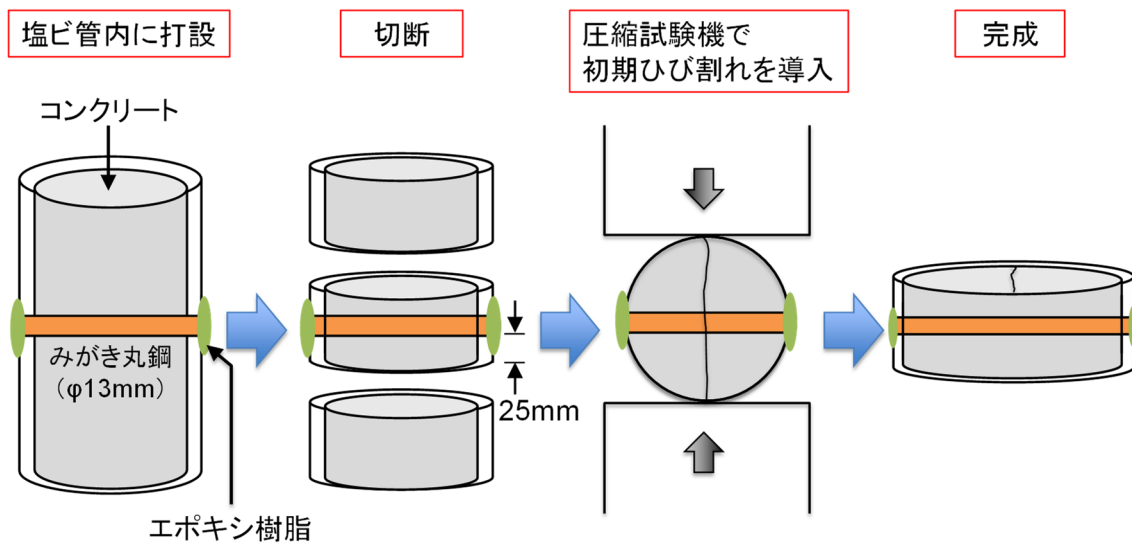


図 5-8 ひび割れもあるコンクリート供試体の作成方法

ひび割れを入れていないモルタル供試体も、予めひび割れを入れたコンクリート供試体も、材齢 14 日から試験を行った。密閉可能なタッパー容器内に入れて試験を行い、この時、供試体のモルタルおよびコンクリート面がタッパー容器内の面と接しないように、供試体と容器の間にプラスチック製の棒を挟み、供試体と容器間に一定の間隔を確保した。鋼材腐食促進を、開始より 3 ヶ月は、質量パーセントで 10% の塩化ナトリウム水溶液に供試体下面から 1 cm まで浸漬し、その後、塩水より取り出し、3 ヶ月の期間乾燥状態においた。さらに、質量パーセントで 10% の塩化ナトリウム水溶液に供試体下面から 1 cm まで 1 ヶ月浸漬し、その後、塩水より取り出し、3 ヶ月の期間乾燥状態においた。またさらに、質量パーセントで 10% の塩化ナトリウム水溶液に供試体下面から 1 ヶ月浸漬し、その後、塩水より取り出し、3 ヶ月間乾燥した後、試験終了とした。80℃程度までは温度が高いほど、鋼材の腐食速度が速くなることから、塩水への浸漬および感想は、いずれも温度が  $40 \pm 2^\circ\text{C}$  の定温槽内で行った。給水期間から乾燥期間への切り替え時には、供試体底面に付着した塩水は拭き取った。図 5-9 に鋼材腐食促進の方法を示す。

試験終了後、供試体内から鋼材を取り出し、鋼材の腐食面積率および質量減少率を算出した。鋼材の質量減少率は、質量パーセント濃度で 10% のクエン酸二アンモニウム水溶液を用いて、鋼材の腐食生成物を除去された量を元の鋼材の質量で除して求めた。

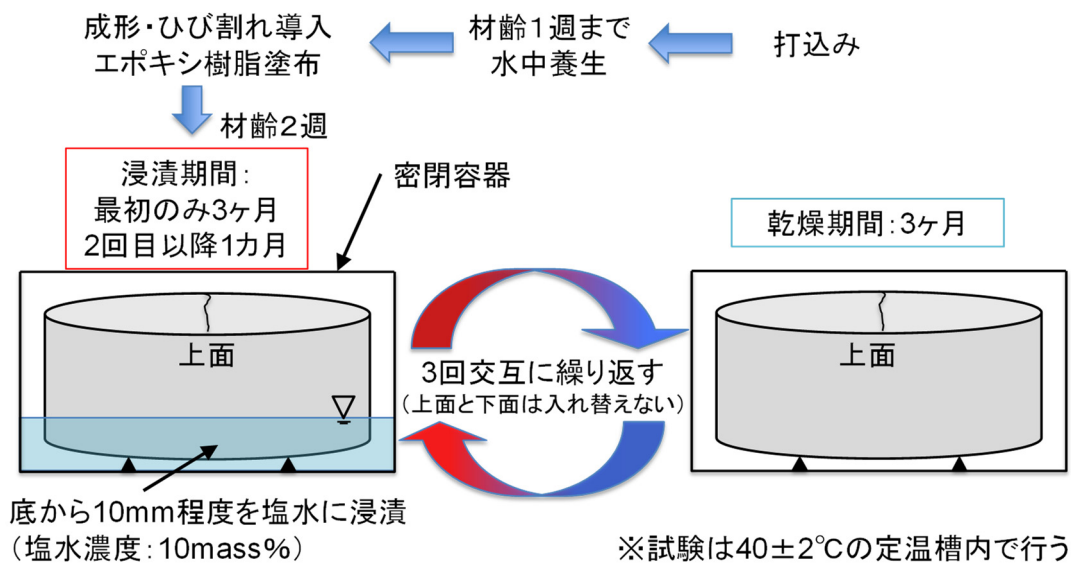


図 5-9 鋼材腐食促進の方法

#### 5-4-6 発錆限界塩化物イオン量試験

試験に用いたコンクリートおよびモルタルの供試体形状は角柱供試体とし、寸法は100×100×400mmとした。供試体内部には、異型鉄筋のD19を、コンクリートはかぶりを25mmとし、モルタルはかぶりを13mmとして配置した。それぞれ14日間の養生期間終了後に、側面4面をエポキシ樹脂系表面被覆材で被覆し、乾燥させた。供試体の配筋位置を図5-10、図5-11、図5-12および図5-13に示す。また、試験中の供試体の様子を写真5-6、写真5-7および写真5-8に示す。

図5-14に角柱供試体への塩化物イオン浸透方法を示す。塩化ナトリウム水溶液は質量パーセント濃度で10%とした。供試体内部の鉄筋への塩化物イオンの浸透位置を限定するために、供試体中央に塩化ナトリウム水溶液を供給するプラスチック製のタンクを設置した。タンクと供試体の接合部分は、エポキシ樹脂で接着した。タンクにはメモリが付いており、タンク内の塩化ナトリウム水溶液の減少状況が確認できるようになっている。また、タンクには開閉可能な蓋がついており、タンク内の供試体表面の様子を目視で確認することができる。なお、供試体は室内に静置した。

試験期間は、供試体に鉄筋腐食が発生するまでとする。鉄筋腐食の発生は、タンク内の塩化ナトリウム水溶液の減少およびタンク内の供試体表面への錆の発生を確認した時とする。供試体にひび割れが発生した様子を写真5-9に示す。試験期間終了後は、塩化ナトリウム水溶液は取り出し、タンクは取り外した。タンク下に位置する試験体を対象として、塩化物イオン量測定部位のエポキシ樹脂をグラインダーを用いて除去した。その後、乾式カッターを用いて供試体を切断または、グラインダーを用いて削り出した後、JIS A 1154:2011「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」により、塩化物イオン含有量の測定を行い、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)」<sup>4)</sup>に準拠し、見かけの拡散係数を求めた。塩化物イオンの見かけの拡散係数を次式に示す。

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

(3-1)

ここに、 $C(x, t)$ は、浸漬面からの距離が  $x(\text{mm})$ で、浸漬期間が  $t(\text{年})$ における全塩化物イオン量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )で、 $C_i$ は、初期に含有される全塩化物イオン量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )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( $\text{kg}/\text{m}^3$ )で、 $D_{ap}$ は、浸せき試験による見かけの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{年}$ )で、 $\operatorname{erf}$ は、誤差関数である

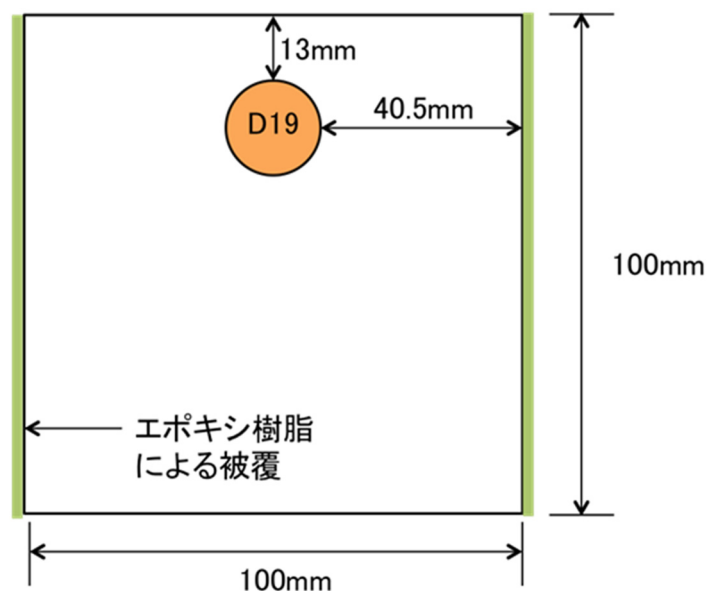


図 5-10 発錆限界塩化物イオン量試験に用いたモルタル供試体の断面図

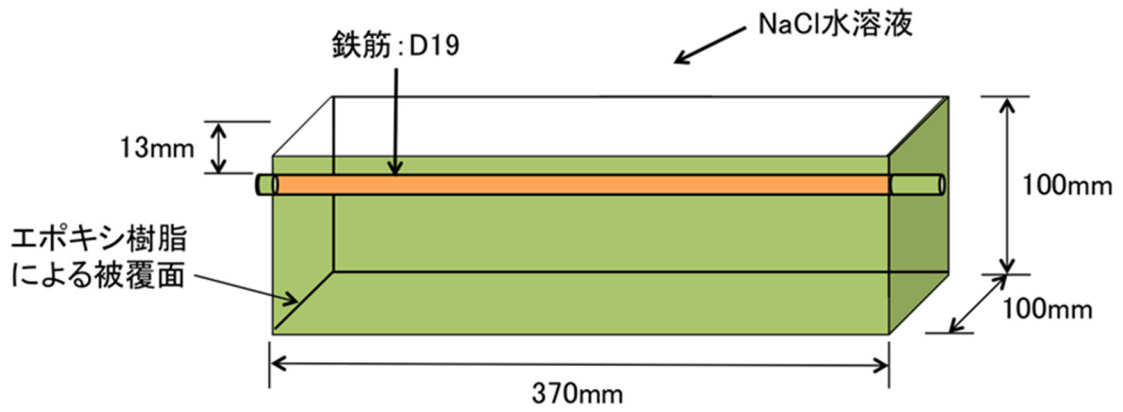


図 5-11 発錆限界塩化物イオン量試験に用いたモルタル供試体の全体図

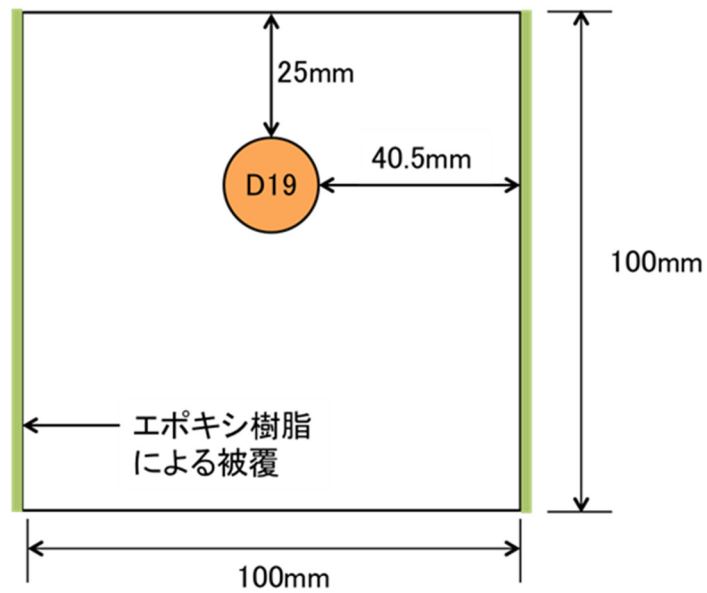


図 5-12 発錆限界塩化物イオン量試験に用いたコンクリート供試体の断面図

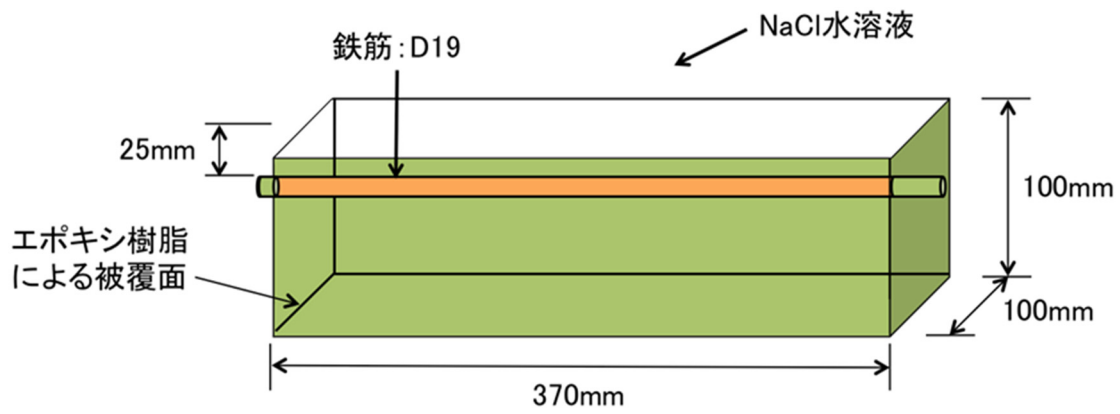


図 5-13 発錆限界塩化物イオン量試験に用いたコンクリート供試体の全体図

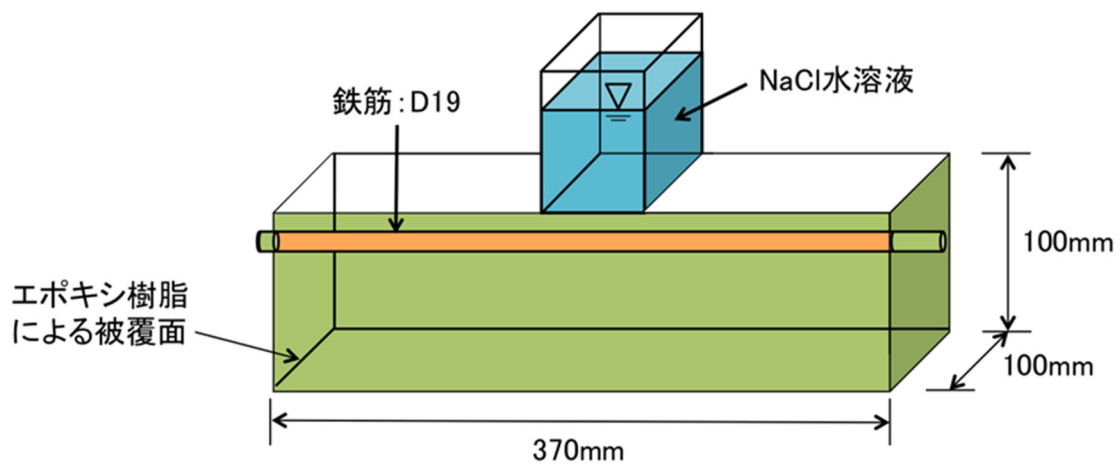


図 5-14 発錆限界塩化物イオン量試験状況



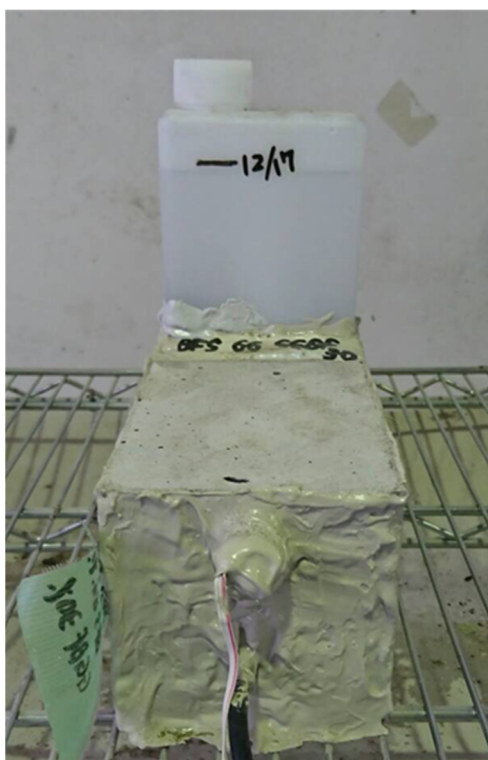


写真 5-6 発錆限界塩化物イオン量試験の様子(前面)



写真 5-7 発錆限界塩化物イオン量試験の様子(側面)

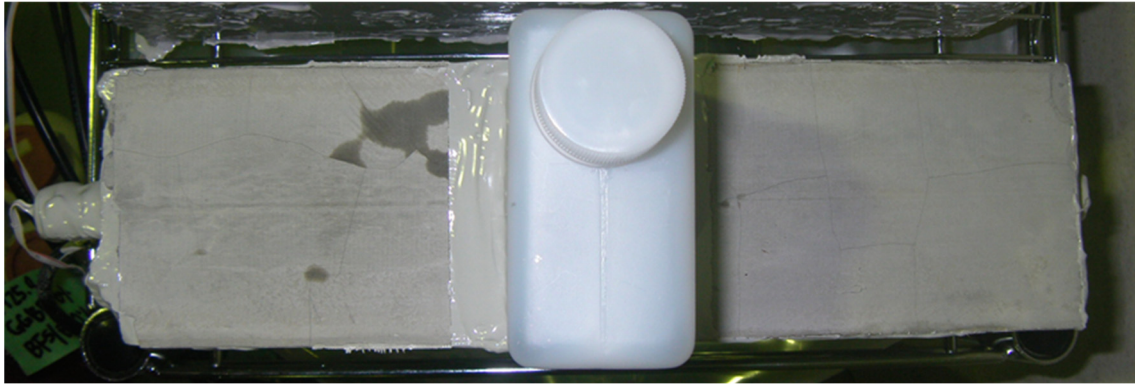


写真 5-8 発錆限界塩化物イオン量試験の様子(上面)



写真 5-9 ひび割れ発生のため発錆限界塩化物イオン量試験終了  
になった供試体

## 5-5 実験結果および考察

### 5-5-1 四電極法を用いた鉄筋腐食性の評価

図 5-15 は、水セメント比が 35% および 65% のコンクリートにおいて高炉スラグ細骨材の量がコンクリートの抵抗率に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。図中の●および■は、それぞれ、水セメント比が、35% および 65% の時の結果である。この図より、水セメント比が、35% および 65% のコンクリートは、いずれも細骨材中の高炉スラグ細骨材の割合が増加するにつれ抵抗率が大きくなる。また、水セメント比 35% のコンクリートは、水セメント比が 65% のコンクリートより抵抗率が大きくなることが分かる。

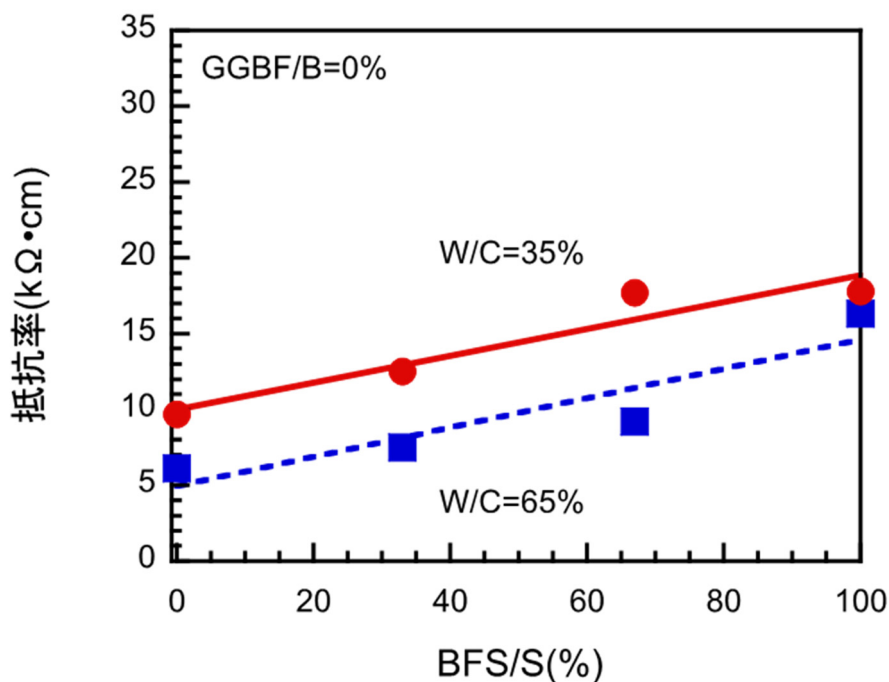


図 5-15 高炉スラグ細骨材が抵抗率に与える影響  
(W/C=35, 65%の場合)

図 5-16 は、水セメント比が 35% および 65% のコンクリートにおいて高炉スラグ微粉末の量が抵抗率に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、砂岩砕砂を用いた。図中の●および■は、それぞれ、水セメント比が、35% および 65% の時の結果である。この図より、水セメント比が、35% および 65% のコンクリートは、いずれも結合材中の高炉スラグ微粉末の割合が増加するにつれ抵抗率が大きくなる。また、水セメント比 35%

のコンクリートは、水セメント比が 65% のコンクリートより抵抗率が大きくなることが分かる。

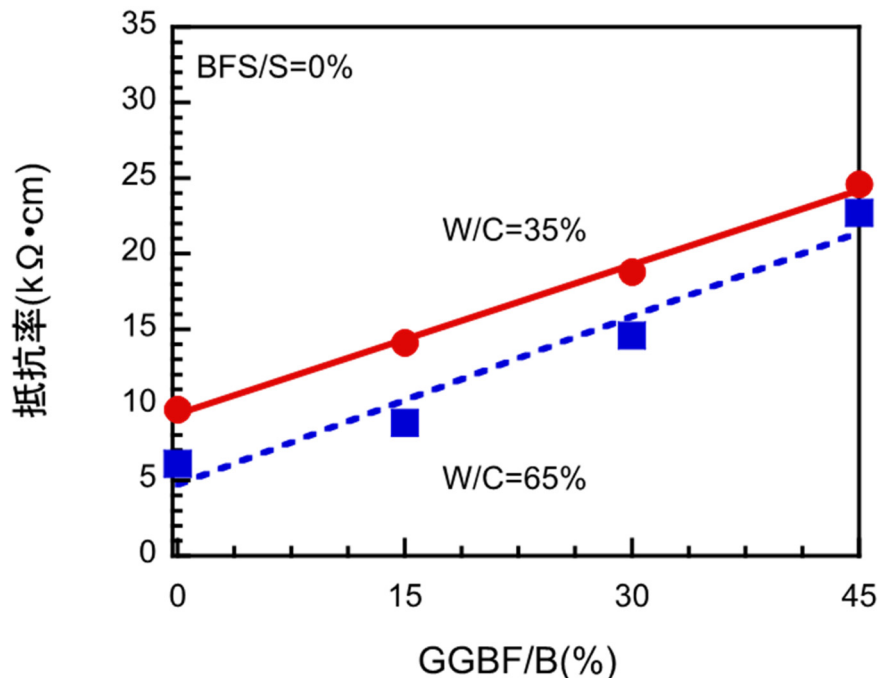


図 5-16 高炉スラグ微粉末が抵抗率に与える影響  
(W/C=35, 65% の場合)

図 5-17 は、水セメント比が 35% のコンクリートにおいて、結合材中の高炉スラグ微粉末の量が抵抗率に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。図中の●および■は、それぞれ、細骨材に、高炉スラグ細骨材および砂岩砕砂を用いた時の結果である。この図より、細骨材にそれぞれ、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は、いずれも結合材中の高炉スラグ微粉末の割合が増加するにつれ抵抗率が大きくなる。また、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートより抵抗率が大きくなることが分かる。

図 5-18 は、水セメント比が 65% のコンクリートにおいて、結合材中の高炉スラグ微粉末の量が抵抗率に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。図中の●および■は、それぞれ、細骨材に、高炉スラグ細骨材および砂岩砕砂を用いた時の結果である。この図より、水セメント比が、35% および 65% の

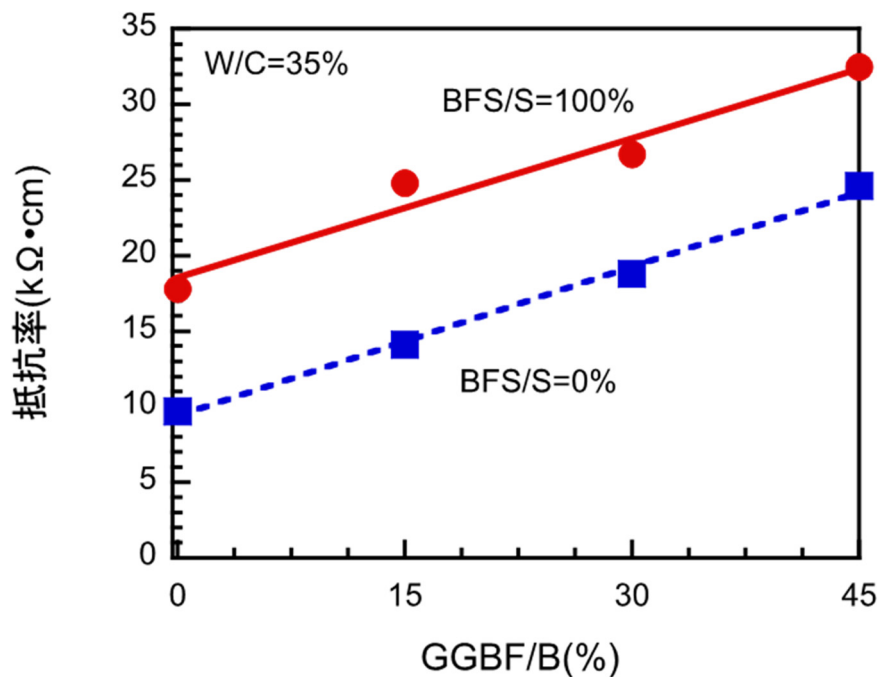


図 5-17 高炉スラグ微粉末, 高炉スラグ細骨材が抵抗率に与える影響  
(W/C=35%の場合)

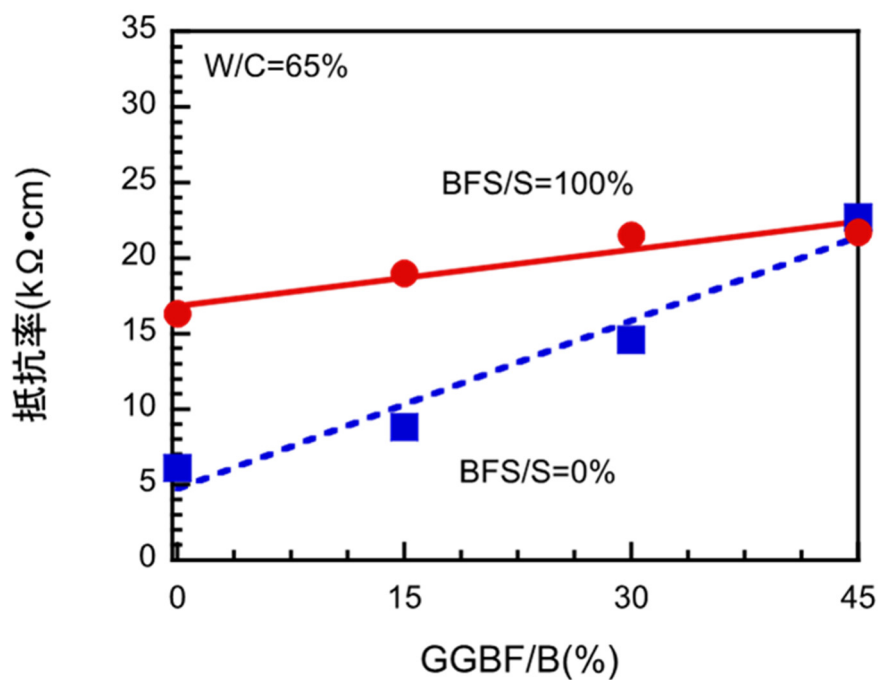


図 5-18 高炉スラグ微粉末, 高炉スラグ細骨材が抵抗率に与える影響  
(W/C=65%の時)

コンクリートは、いずれも結合材中の高炉スラグ微粉末の割合が増加するにつれ抵抗率が大きくなる。また、水セメント比 35%のコンクリートは、水セメント比が 65%



のコンクリートより抵抗率が大きくなるが、高炉スラグ微粉末が45%の時に抵抗率が同程度になることが分かる。

図5-19は、水セメント比が35%のコンクリート（無鉄筋）において細骨材中の高炉スラグ細骨材および結合材高炉スラグ微粉末の量が抵抗率に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。図中の▲、▽、■、および●は、それぞれ、高炉スラグ微粉末を、0%、10%、20%および40%用いた結果である。この図より、結合材に高炉スラグ微粉末を、それぞれ、0%、10%、20%および40%用いたコンクリートは、いずれも細骨材中の高炉スラグ細骨材の割合が増加するにつれ抵抗率が大きくなる。また、結合材中の高炉スラグ微粉末の割合が20%および40%のコンクリートは、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より抵抗率が大きくなるが、結合材中の高炉スラグ微粉末の割合が10%のコンクリートは、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より抵抗率が小さくなることが分かる。

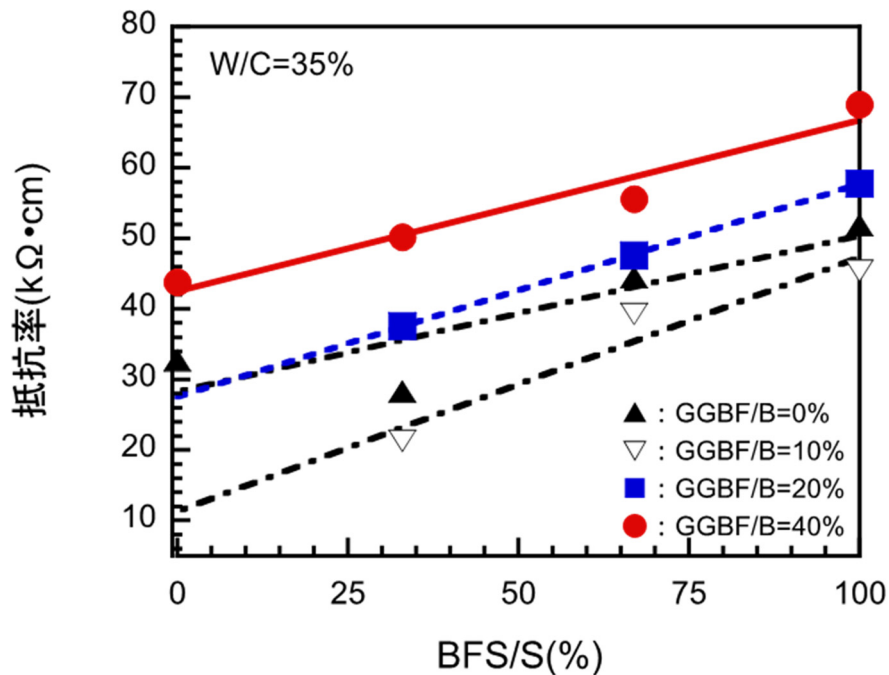


図5-19 高炉スラグ細骨材，高炉スラグ微粉末が抵抗率に与える影響  
(W/C=35%, 無鉄筋の場合)

#### 5-5-2 分極抵抗法による鉄筋腐食抵抗性の評価

図5-20は、水セメント比が65%および35%のコンクリートにおいて高炉スラグ微粉末の量が鉄筋（R13）の分極抵抗値に与える影響を調べた結果である。結合材に、

普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、高炉スラグ細骨材を用いた。図中の●および■は、それぞれ、水セメント比が、35%および65%の時の結果である。この図より、水セメント比が、35%および65%のコンクリートは、いずれも結合材中の高炉スラグ微粉末の割合が増加するにつれ分極抵抗値が大きくなる。また、水セメント比35%のコンクリートは、水セメント比が65%のコンクリートより分極抵抗値が大きくなることが分かる。

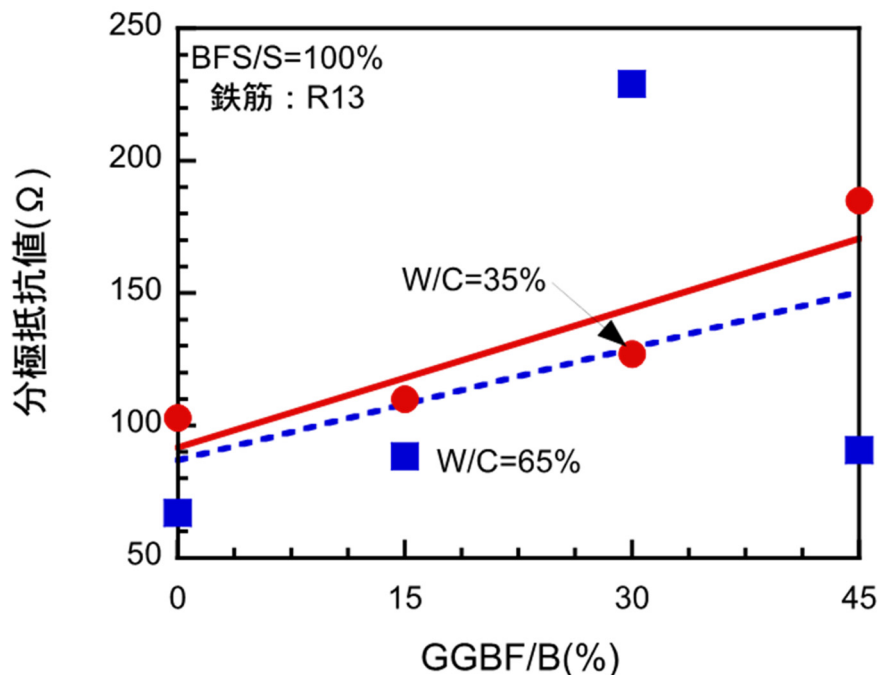


図 5-20 水セメント比、高炉スラグ微粉末が分極抵抗値に与える影響  
(BFS/S=100, 鉄筋 : R13 の場合)

図 5-21 は、水セメント比が 65%および 35%のコンクリートにおいて高炉スラグ微粉末の量が鉄筋 (D19) の分極抵抗値に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、高炉スラグ細骨材を用いた。図中の●および■は、それぞれ、水セメント比が、35%および65%の時の結果である。この図より、水セメント比が、35%および65%のコンクリートは、いずれも結合材中の高炉スラグ微粉末の割合が増加するにつれ分極抵抗値が大きくなる。また、水セメント比35%のコンクリートは、水セメント比が65%のコンクリートより分極抵抗値が大きくなることが分かる。

図 5-22 は、水セメント比が 65%のコンクリートにおいて細骨材中の高炉スラグ細骨材および結合材高炉スラグ微粉末の量が鉄筋 (R13) の分極抵抗値に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を



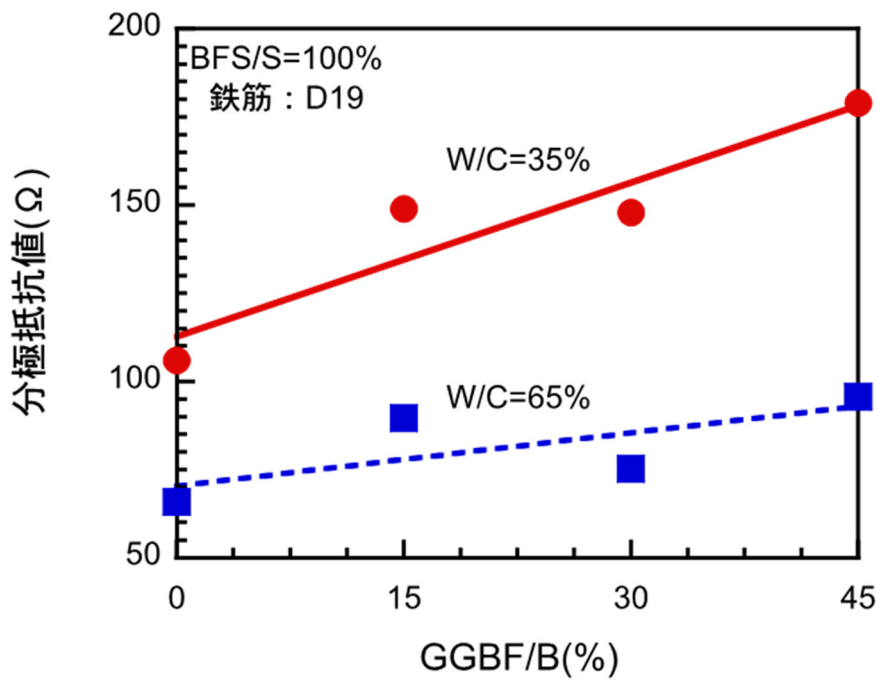


図 5-21 水セメント比, 高炉スラグ微粉末が分極抵抗値に与える影響  
(BFS/S=100, 鉄筋 : D19 の場合)

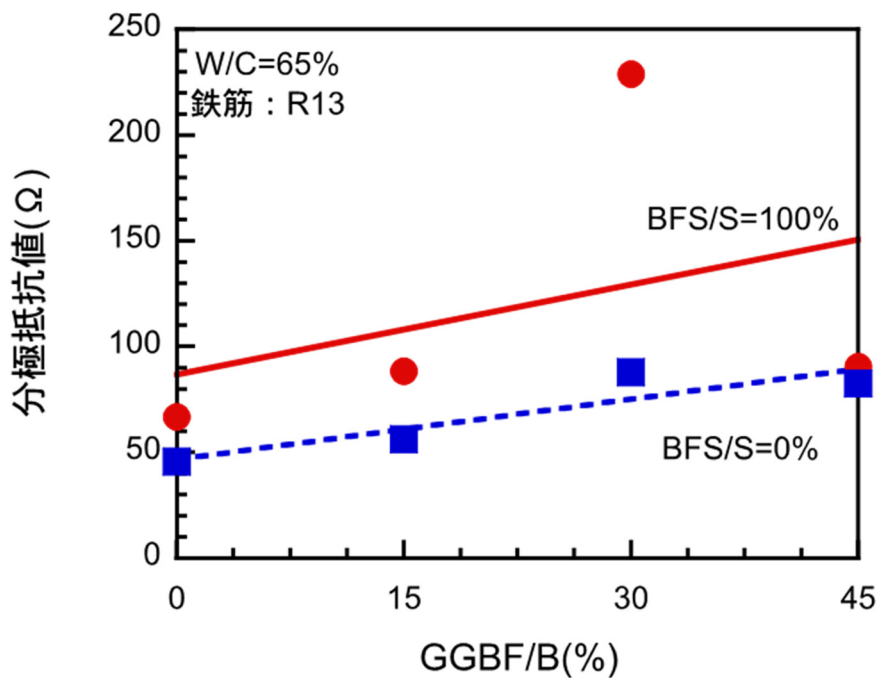


図 5-22 高炉スラグ細骨材, 高炉スラグ微粉末が分極抵抗値に与える影響  
(W/C=65%, 鉄筋 : R13 の場合)

用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。図中の●および■は、それぞれ、細骨材に高炉スラグ細骨材および砂岩砕砂を用いた時の結果である。

この図より、細骨材にそれぞれ、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は、いずれも結合材中の高炉スラグ微粉末の割合が増加するにつれ分極抵抗値が大きくなる。また、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートより分極抵抗値が大きくなることが分かる。

図 5-23 は、水セメント比が 65% のコンクリートにおいて細骨材中の高炉スラグ細骨材および結合材高炉スラグ微粉末の量が鉄筋 (D19) の分極抵抗値に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。図中の ● および ■ は、それぞれ、細骨材に高炉スラグ細骨材および砂岩砕砂を用いた時の結果である。この図より、細骨材にそれぞれ、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は、いずれも結合材中の高炉スラグ微粉末の割合が増加するにつれ分極抵抗値が大きくなる。また、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートより分極抵抗値が大きくなることが分かる。

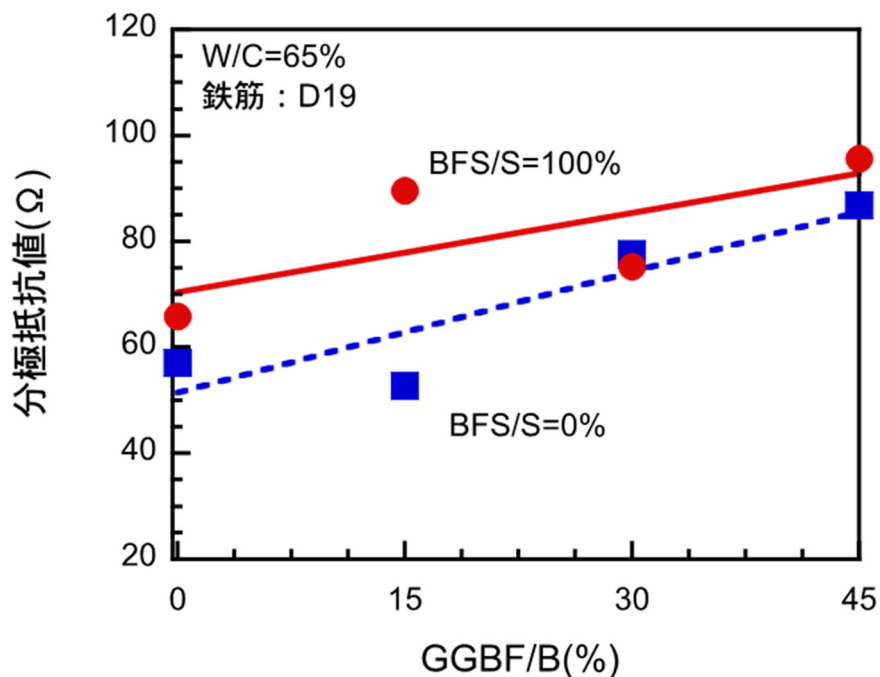


図 5-23 高炉スラグ細骨材、高炉スラグ微粉末が分極抵抗値に与える影響  
(W/C=65%, 鉄筋 : D19 の場合)

図 5-24 は、水セメント比が 35% のコンクリートにおいて細骨材中の高炉スラグ細骨材および結合材高炉スラグ微粉末の量が鉄筋 (R13) の分極抵抗値に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。図中の ● および ■

は、それぞれ、細骨材に高炉スラグ細骨材および砂岩砕砂を用いた時の結果である。この図より、細骨材にそれぞれ、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は、いずれも結合材中の高炉スラグ微粉末の割合が増加するにつれ分極抵抗値が大きくなる。また、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートより分極抵抗値が大きくなることが分かる。

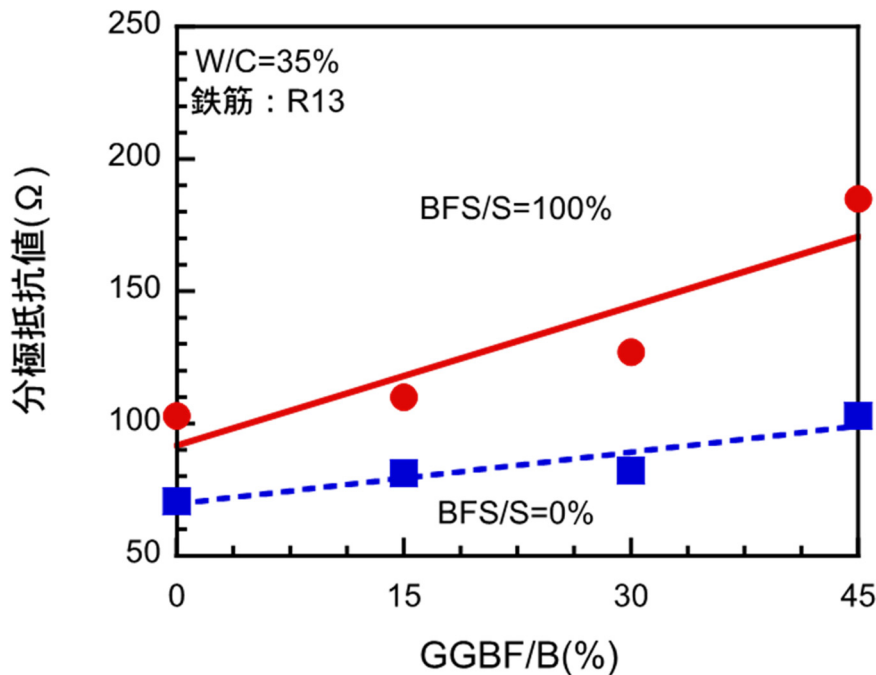


図 5-24 高炉スラグ細骨材，高炉スラグ微粉末が分極抵抗値に与える影響  
(W/C=35%，鉄筋：R13 の場合)

図 5-25 は、水セメント比が 35% のコンクリートにおいて細骨材中の高炉スラグ細骨材および結合材高炉スラグ微粉末の量が鉄筋 (D19) の分極抵抗値に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。図中の●および■は、それぞれ、細骨材に高炉スラグ細骨材および砂岩砕砂を用いた時の結果である。この図より、細骨材にそれぞれ、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は、いずれも結合材中の高炉スラグ微粉末の割合が増加するにつれ分極抵抗値が大きくなる。また、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートより分極抵抗値が大きくなることが分かる。

図 5-26 は、水セメント比が 65% および 35% のコンクリートにおいて高炉スラグ細骨材の量が鉄筋 (R13) の分極抵抗値に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材

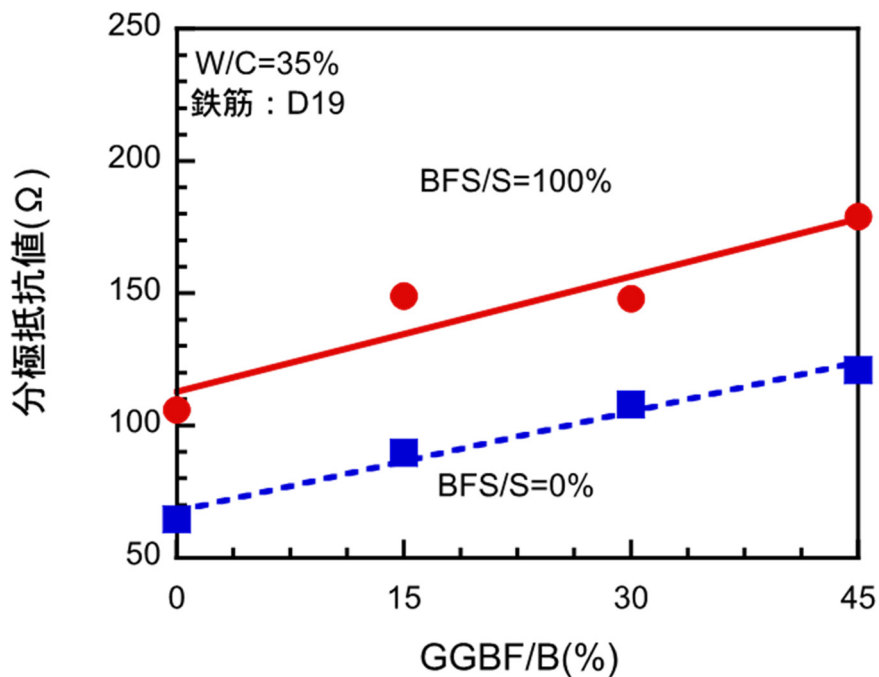


図 5-25 高炉スラグ細骨材，高炉スラグ微粉末が分極抵抗値に与える影響  
(W/C=35%，鉄筋：D19 の場合)

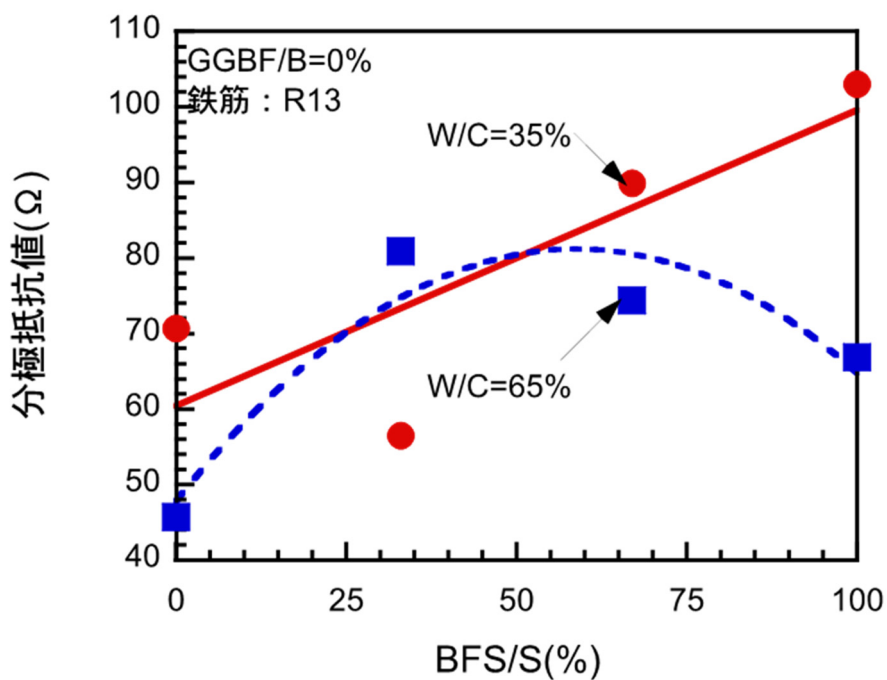


図 5-26 水セメント比，高炉スラグ細骨材が分極抵抗値に与える影響  
(GGBF/B=0%，鉄筋：R13 の場合)

を用いた。図中の●および■は、それぞれ、水セメント比が、35%および65%の時の結果である。この図より、水セメント比が、35%のコンクリートは、高炉スラグ細骨

材の割合が増加するにつれ抵抗率が大きくなる。水セメント比 65% のコンクリートは、高炉スラグ細骨材の割合が 33.3% を超えると分極抵抗値は減少している。

図 5-27 は、水セメント比が 65% および 35% のコンクリートにおいて高炉スラグ細骨材の量が鉄筋 (D19) の分極抵抗値に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。図中の ● および ■ は、それぞれ、水セメント比が、35% および 65% の時の結果である。この図より、水セメント比が、35% のコンクリートは、高炉スラグ細骨材の割合が増加するにつれ抵抗率が大きくなる。水セメント比 65% のコンクリートは、鉄筋が R13 の場合と同様に、高炉スラグ細骨材の割合が 33.3% を超えると分極抵抗値は減少している。

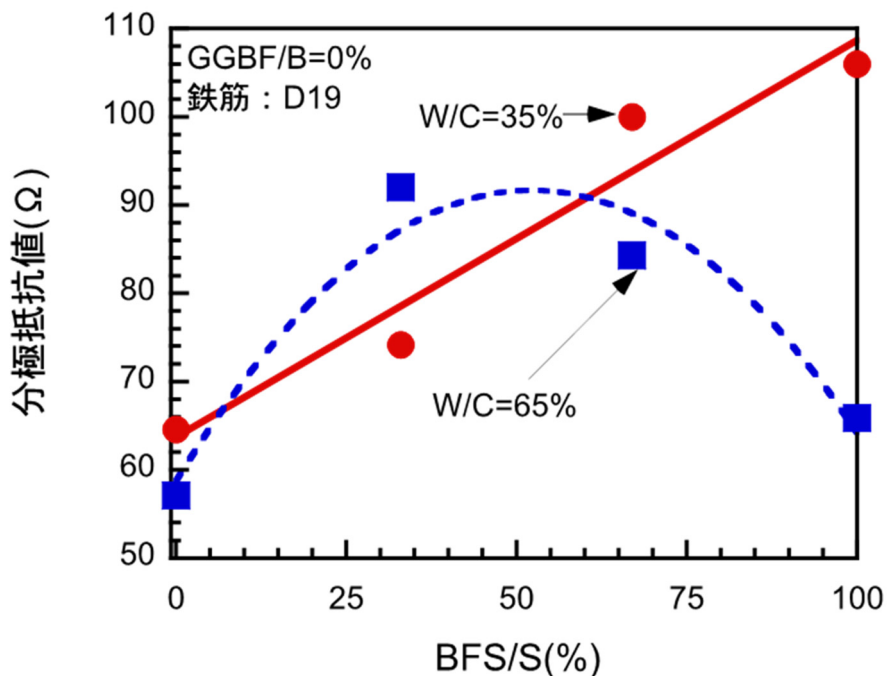


図 5-27 水セメント比, 高炉スラグ細骨材が分極抵抗値に与える影響  
(GGBF/B=0%, 鉄筋 : D19 の場合)

### 5-5-3 分極曲線法による鉄筋腐食性の評価

図 5-28 は、水セメント比が 65% のコンクリート内の鉄筋 (D19) において、高炉スラグ微粉末の量が分極曲線に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、砂岩砕砂を用いた。図中の □, △, ▽, および ○ は、それぞれ、高炉スラグ微粉末の量が、0%, 15%, 30% および 45% 用いた結果である。この図より、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートより、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのアノード

腐食電流が流れやすくなっている。よって不動態皮膜が弱くなっていることが分かる。

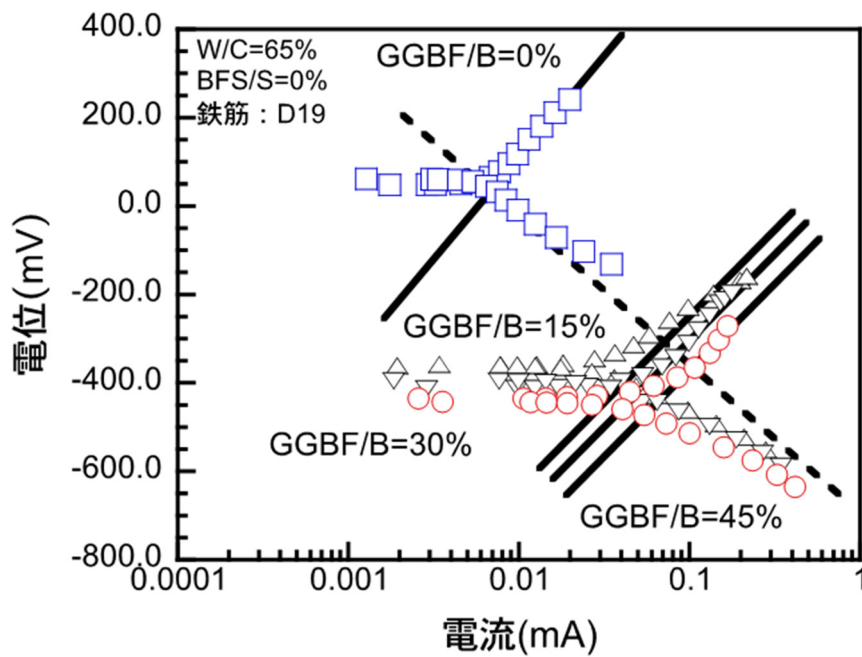


図 5-28 高炉スラグ微粉末が分極曲線に与える影響  
(W/C=65, BFS/S=0%, 鉄筋 : D19 の場合)

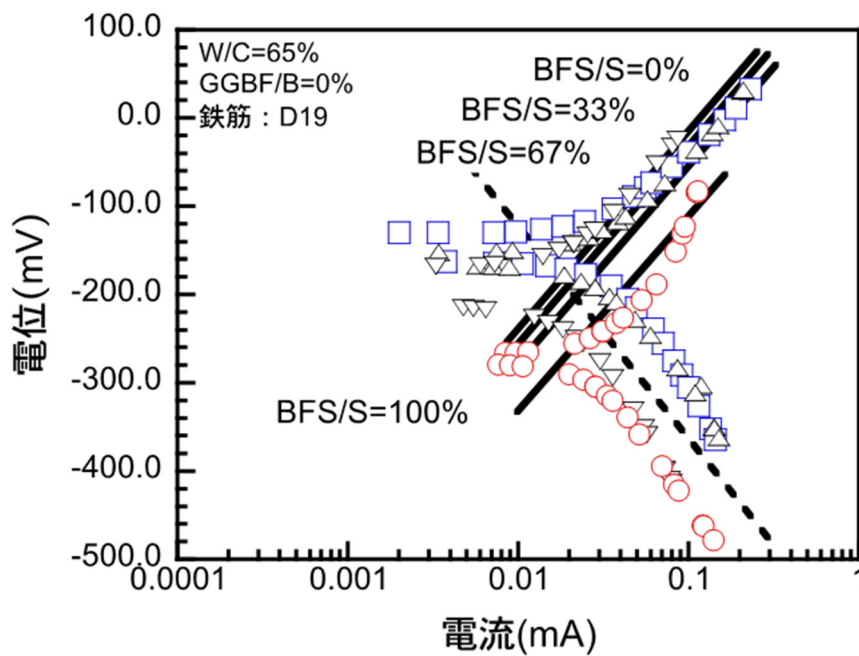


図 5-29 高炉スラグ細骨材が分極曲線に与える影響  
(W/C=65, GGBF/B=0%, 鉄筋 : D19 の時)

図 5-29 は、水セメント比が 65%のコンクリート内の鉄筋 (D19) において、高炉スラグ細骨材の量が分極曲線に与える影響を調べた結果である。結合材には普通ポルトランドセメントを用いた。図中の□, △, ▽, および○は、それぞれ、高炉スラグ細骨材の量が、0%, 33.3%, 66.7%および 100%用いた結果である。この図より、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートより、結合材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのアノード腐食電流が流れやすくなっている。よって不動態皮膜が弱くなっていることが分かる。

図 5-30 は、水セメント比が 65%のコンクリート内の鉄筋 (D19) において、高炉スラグ微粉末の量が分極曲線に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、高炉スラグ細骨材を用いた。図中の□, △, ▽, および○は、それぞれ、高炉スラグ微粉末の量が、0%, 15%, 30%および 45%用いた結果である。この図より、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートより、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのアノード腐食電流が流れやすくなっている。よって不動態皮膜が弱くなっていることが分かる。

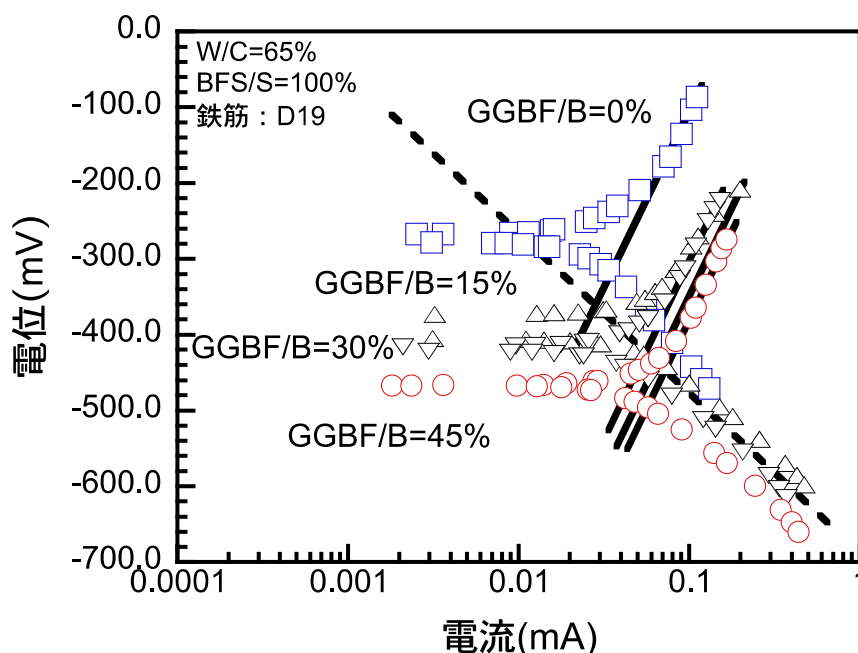


図 5-30 高炉スラグ微粉末が分極曲線に与える影響  
(W/C=65, BFS/S=100%, 鉄筋 : D19 の場合)

図 5-31 は、水セメント比が 65%のコンクリート内の鉄筋 (R13) において、高炉スラグ微粉末の量が分極曲線に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルト



ランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、砂岩砕砂を用いた。図中の□, △, ▽, および○は、それぞれ、高炉スラグ微粉末の量が、0%, 15%, 30% および 45% 用いた結果である。この図より、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートより、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのカソード腐食電流が流れにくくなっている。よって酸素供給量が少なくなっていることが分かる。

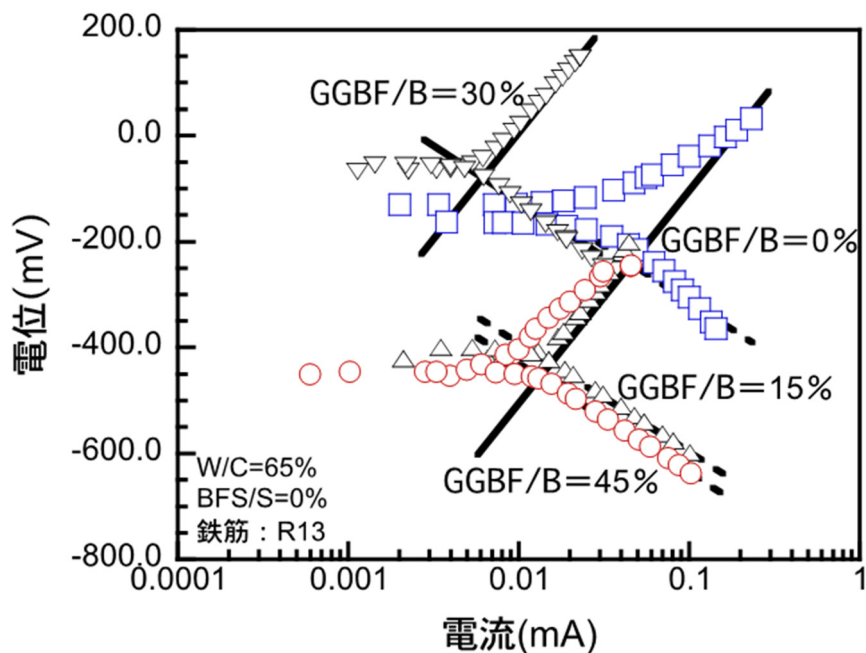


図 5-31 高炉スラグ微粉末が分極曲線に与える影響  
(W/C=65, BFS/S=0%, 鉄筋: R13 の場合)

図 5-32 は、水セメント比が 65% のコンクリート内の鉄筋 (R13) において、高炉スラグ細骨材の量が分極曲線に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。図中の□, △, ▽, および○は、それぞれ、高炉スラグ細骨材の量が、0%, 33.3%, 66.7% および 100% 用いた結果である。この図より、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートより、細骨材に高炉スラグ細骨材を 100% 用いたコンクリートのアノード腐食電流が流れにくくなっている。よって不動態皮膜が強くなっていることが分かる。細骨材に高炉スラグ細骨材を 33% および 67% 用いたコンクリートのアノード腐食電流は、同程度となった。また、カソード腐食電流が流れにくくなっている。よって酸素供給量が少なくなっていることが分かる。

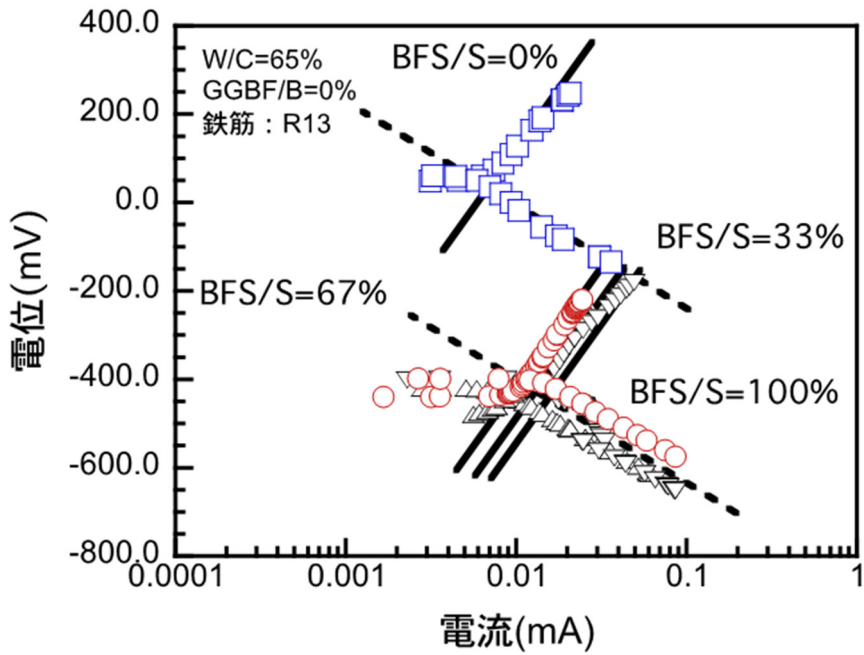


図 5-32 高炉スラグ細骨材が分極曲線に与える影響  
(W/C=65, GGBF/B=0%, 鉄筋: R13 の時)

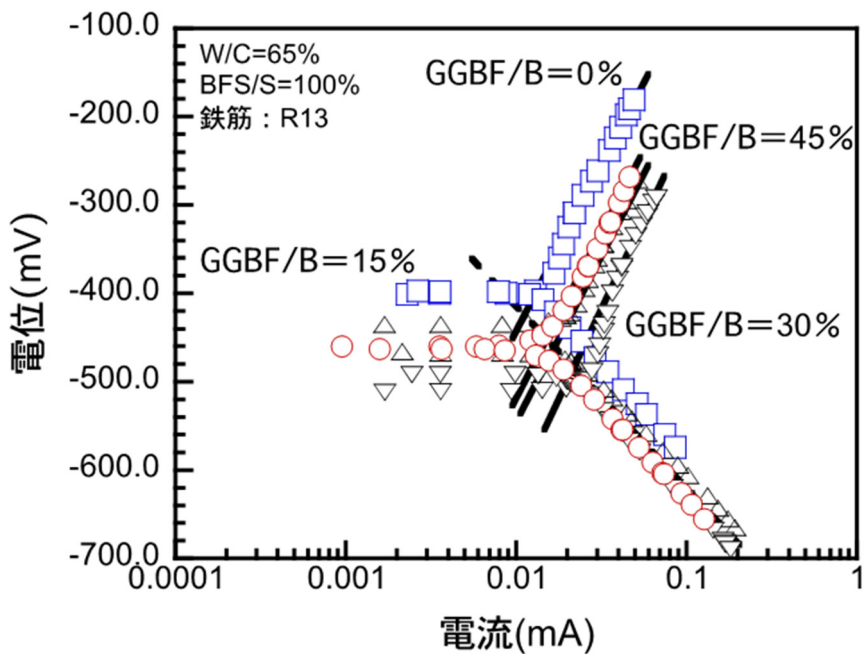


図 5-33 高炉スラグ微粉末が分極曲線に与える影響  
(W/C=65, BFS/S=100%, 鉄筋: R13 の場合)

図 5-33 は、水セメント比が 65% のコンクリート内の鉄筋 (R13) において、高炉スラグ微粉末の量が分極曲線に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポル

トランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、高炉スラグ細骨材を用いた。図中の□, △, ▽, および○は、それぞれ、高炉スラグ微粉末の量が、0%, 15%, 30%および45%用いた結果である。この図より、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートより、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのアノード腐食電流が流れやすくなっている。よって不動態皮膜が弱くなっていることが分かる。

図 5-34 は、水セメント比が 35% のコンクリート内の鉄筋 (D19) において、高炉スラグ微粉末の量が分極曲線に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、砂岩砕砂を用いた。図中の□, △, ▽, および○は、それぞれ、高炉スラグ微粉末の量が、0%, 15%, 30% および 45% 用いた結果である。この図より、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートより、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのカソード腐食電流が流れにくくなっている。よって酸素供給量が少なくなっていることが分かる。しかし、アノード腐食電流が流れやすくなっているため、不動態皮膜が弱くなっていることが分かる。

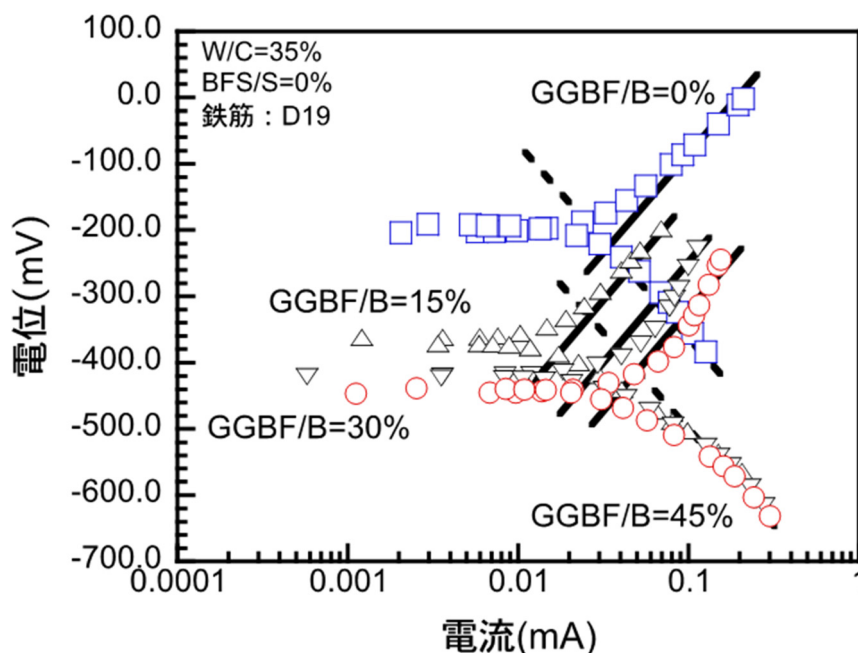


図 5-34 高炉スラグ微粉末が分極曲線に与える影響  
(W/C=35, BFS/S=0%, 鉄筋 : D19 の場合)

図 5-35 は、水セメント比が 35% のコンクリート内の鉄筋 (D19) において、高炉スラグ細骨材の量が分極曲線に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポル

トランドセメントを用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。図中の□, △, ▽, および○は、それぞれ、高炉スラグ細骨材の量が、0%, 33.3%, 66.7% および 100% 用いた結果である。この図より、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートより、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのカソード腐食電流が流れにくくなっている。よって酸素供給量が少なくなっていることが分かる。しかし、アノード腐食電流が流れやすくなっているため、不動態皮膜が弱くなっていることが分かる。

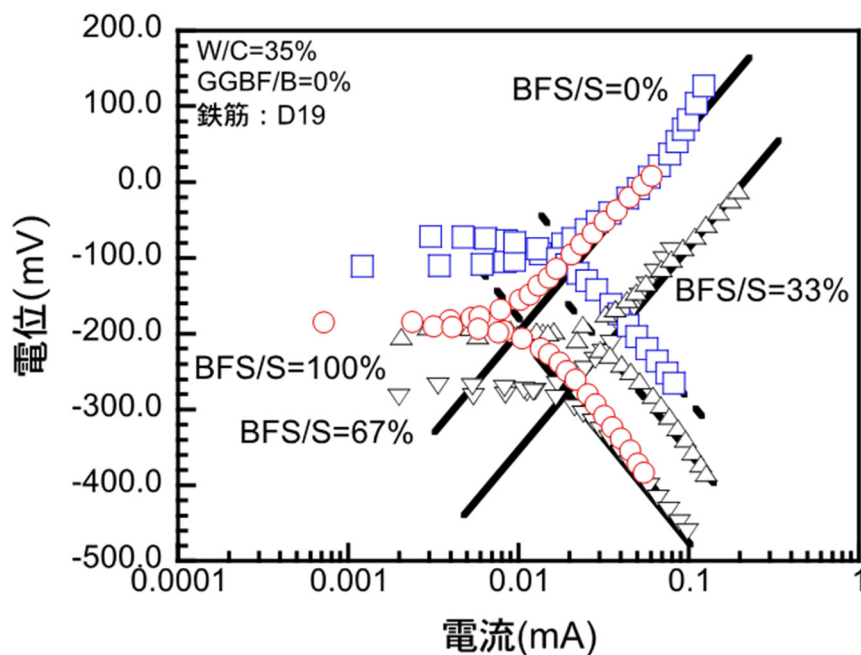


図 5-35 高炉スラグ細骨材が分極曲線に与える影響  
(W/C=35, GGBF/B=0%, 鉄筋 : D19 の時)

図 5-36 は、水セメント比が 35% のコンクリート内の鉄筋 (D19) において、高炉スラグ微粉末の量が分極曲線に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、高炉スラグ細骨材を用いた。図中の□, △, ▽, および○は、それぞれ、高炉スラグ微粉末の量が、0%, 15%, 30% および 45% 用いた結果である。この図より、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートより、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのアノード腐食電流が流れやすくなっている。よって不動態皮膜が弱くなっていることが分かる。

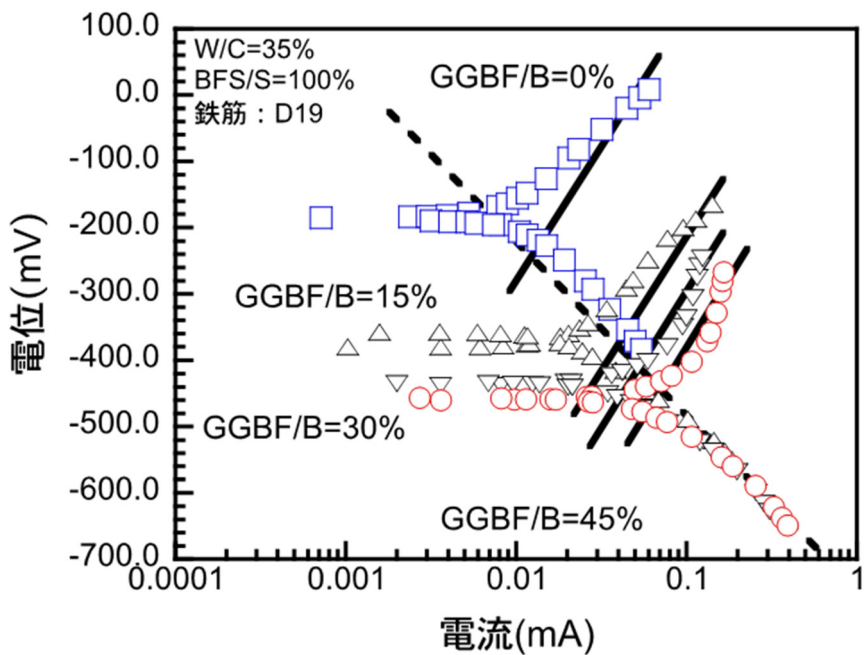


図 5-36 高炉スラグ微粉末が分極曲線に与える影響  
(W/C=35, BFS/S=100%, 鉄筋 : D19 の場合)

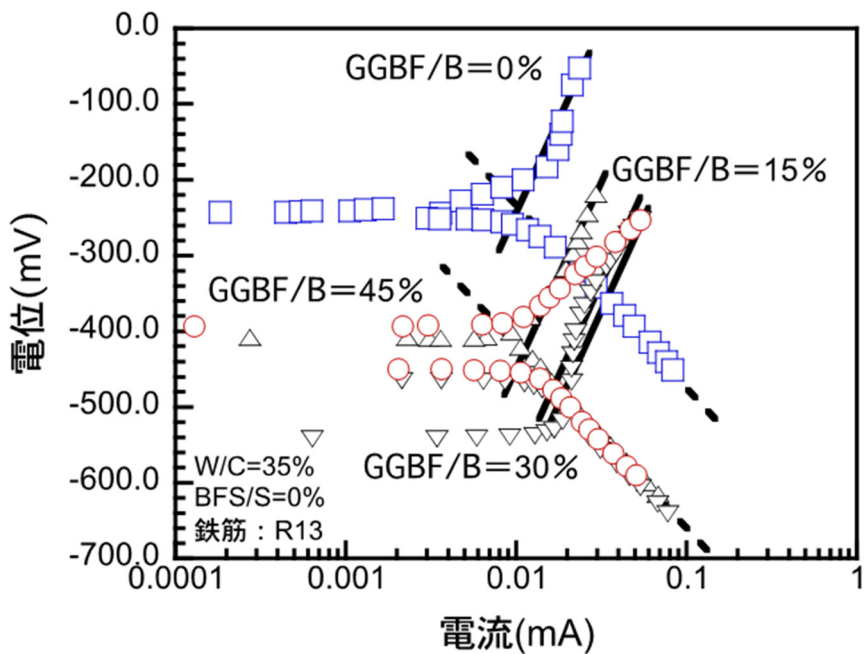


図 5-37 高炉スラグ微粉末が分極曲線に与える影響  
(W/C=35, BFS/S=0%, 鉄筋 : R13 の場合)

図 5-37 は、水セメント比が 35% のコンクリート内の鉄筋 (R13) において、高炉スラグ微粉末の量が分極曲線に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポル

トランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、砂岩砕砂を用いた。図中の□, △, ▽, および○は、それぞれ、高炉スラグ微粉末の量が、0%, 15%, 30% および 45% 用いた結果である。この図より、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートより、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのアノード腐食電流が流れやすくなっている。よって不動態皮膜が弱くなっていることが分かる。

図 5-38 は、水セメント比が 35% のコンクリート内の鉄筋 (R13) において、高炉スラグ細骨材の量が分極曲線に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材には、砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた。図中の□, △, ▽, および○は、それぞれ、高炉スラグ細骨材の量が、0%, 33.3%, 66.7% および 100% 用いた結果である。この図より、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートより、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのカソード腐食電流が流れにくくなっている。よって酸素供給量が少なくなっていることが分かる。

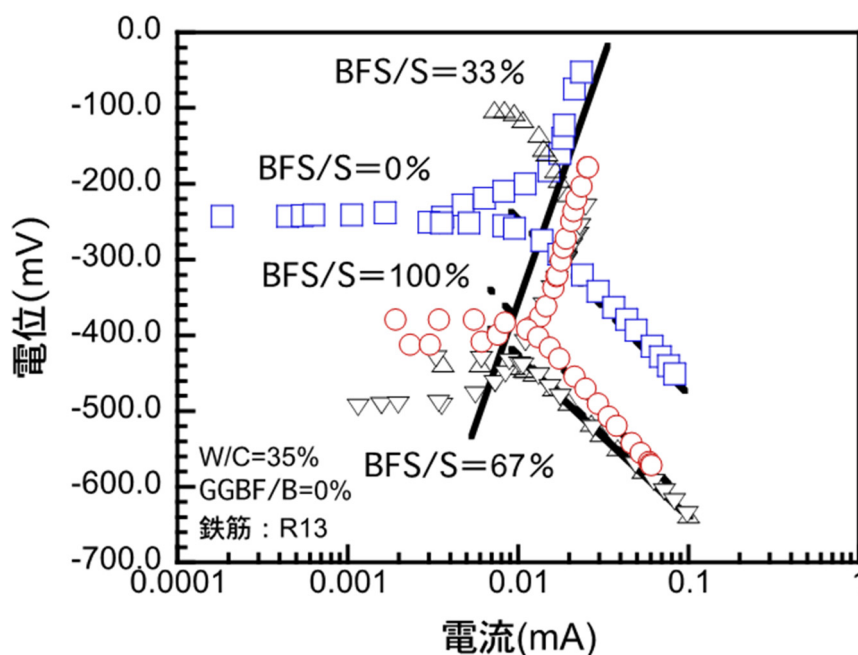


図 5-38 高炉スラグ細骨材が分極曲線に与える影響  
(W/C=35, GGBF/B=0%, 鉄筋 : R13 の時)

図 5-39 は、水セメント比が 35% のコンクリート内の鉄筋 (R13) において、高炉スラグ微粉末の量が分極曲線に与える影響を調べた結果である。結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。細骨材には、高炉スラグ細骨材を用いた。図中の□, △, ▽, および○は、それぞれ、高炉スラグ微粉末の量が、0%, 15%, 30% および 45% 用いた結果である。この図より、結合材に普通ポルトランドセ



メントを用いたコンクリートより、結合材に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのアノード腐食電流が流れやすくなっている。よって不動態皮膜が弱くなっていることが分かる。

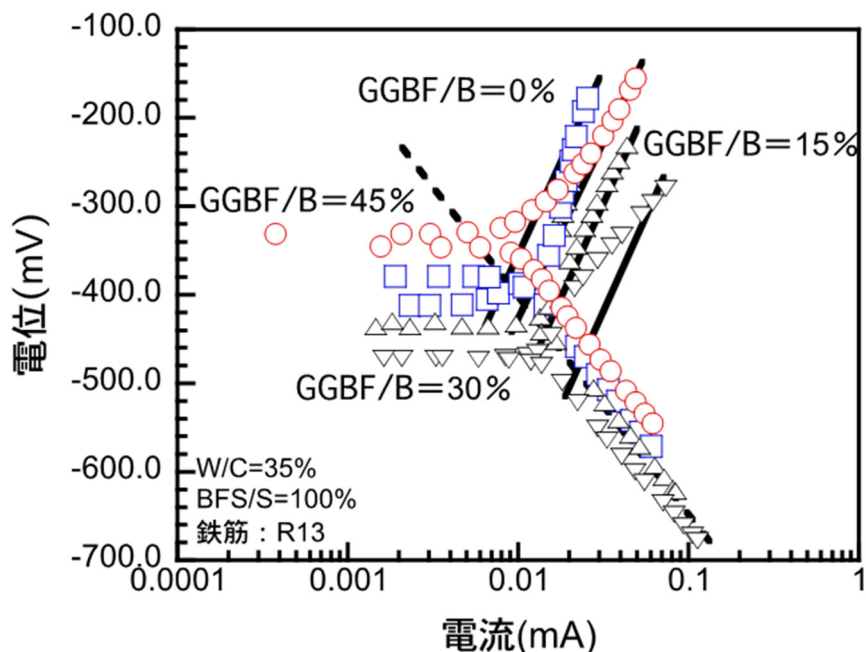


図 5-39 高炉スラグ微粉末が分極曲線に与える影響  
(W/C=35, BFS/S=100%, 鉄筋: R13 の場合)

#### 5-5-4 ひび割れを入れてないモルタルを用いた鋼材腐食試験

図 5-40 は、水結合材比が 65%のコンクリートから 5mm ふるいを用いて採取したモルタルにひび割れを入れずに、腐食促進試験を行い、試験後にモルタルから取り出した鋼材の腐食状況を写真で示したものである。細骨材に砂岩砕砂が用いられ、結合材に普通ポルトランドセメントのみが用いられているものは、著しい腐食を生じており、膨張した錆が鋼材全体を覆っていることが分かる。これに対して、高炉スラグが微粉末として用いられたものも、細骨材として用いられたものも、点錆程度のものは発生しているが、大きな腐食はない。

図 5-41 は、図 5-40 に示した鋼材の腐食面積率を高炉スラグ微粉末量との関係で示したものである。■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場合の結果を示している。図より、結合材および細骨材に高炉スラグを用いていないモルタルにおける鋼材の腐食面積率が 100%であるが、結合材および細骨材に高炉スラグを用いた場合には、鋼材の腐食面積率は 0.3%以下でほとんど鋼材腐食は生じていないことが分かる。



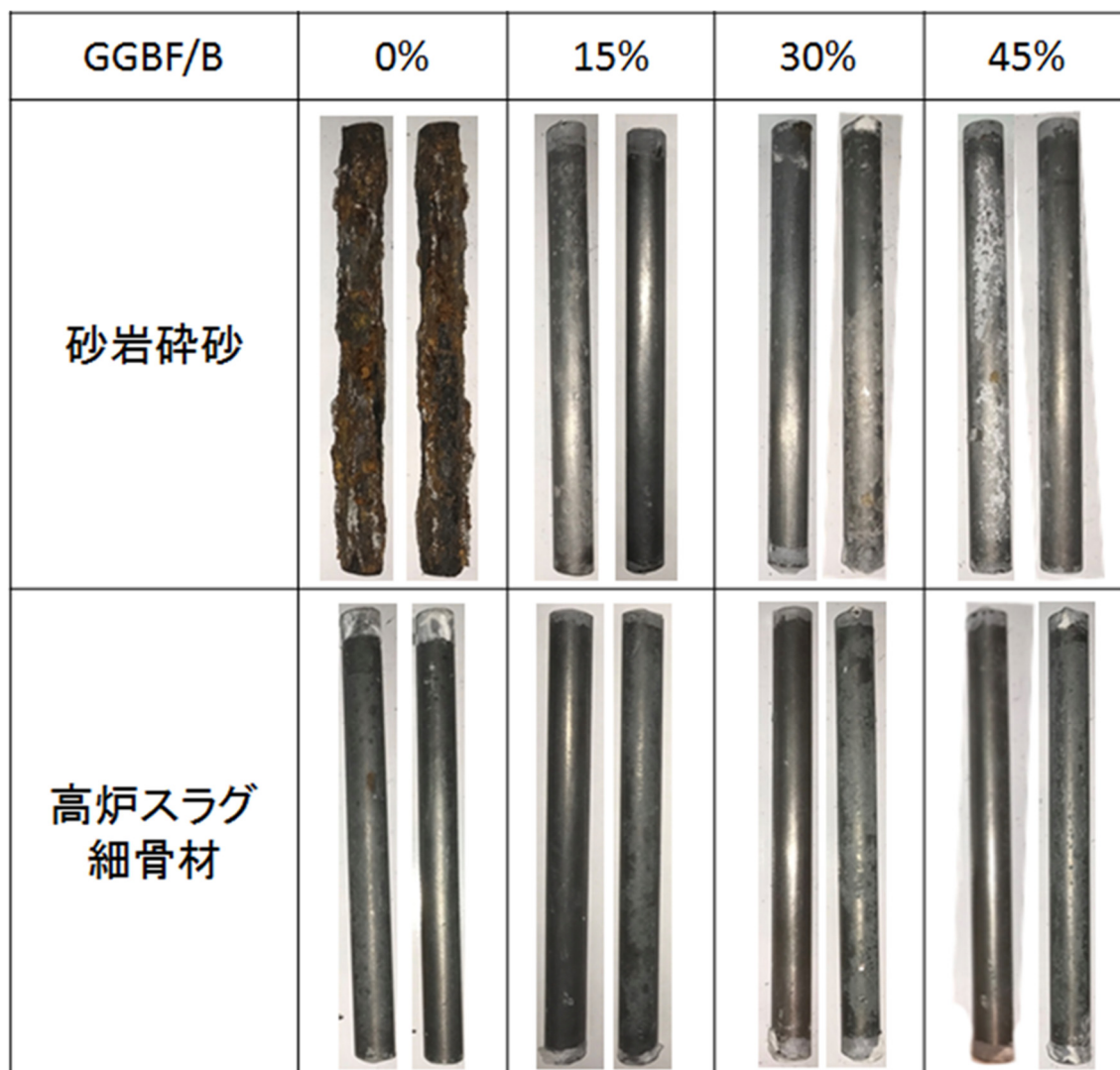


図 5-40 ひび割れのないモルタル供試体中の鋼材腐食に高炉スラグ微粉末が与える影響 (W/B=65%)

図 5-42 は、図 5-40 に示した鋼材の質量減少率を高炉スラグ微粉末量との関係で示したものである。■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場合の結果を示している。図より、結合材および細骨材に高炉スラグを用いていないモルタルにおける鋼材の質量減少率が 17%であるが、結合材または細骨材に高炉スラグを用いた場合には、鋼材の質量減少率は 0.3%以下でほとんど腐食していないことが分かる。高炉スラグが鋼材の質量減少率に与える影響は、図 4-5 に示す鋼材の腐食面積率と同じ傾向が分かる。

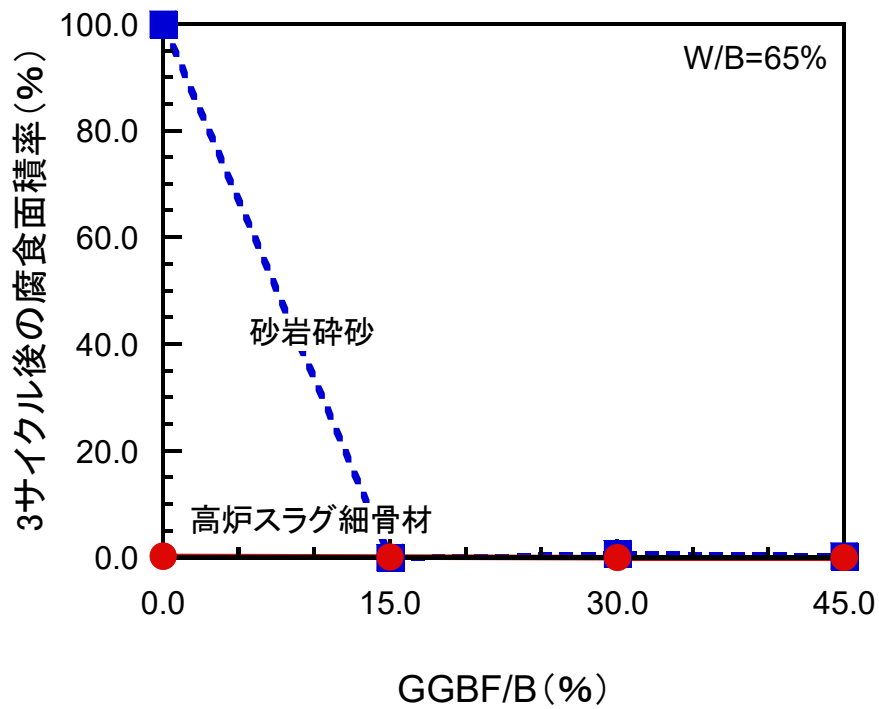


図 5-41 ひび割れのないモルタル供試体中の鋼材の腐食面積率に高炉スラグ微粉末が与える影響 (W/B=65%)

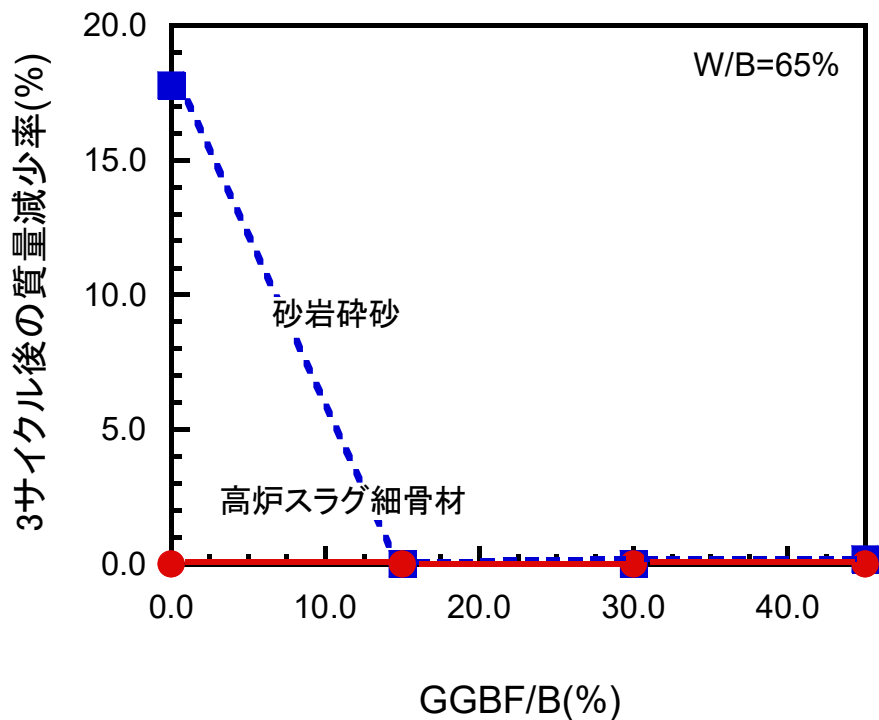


図 5-42 ひび割れのないモルタル供試体中の鋼材の質量減少率に高炉スラグ微粉末が与える影響 (W/B=65%)

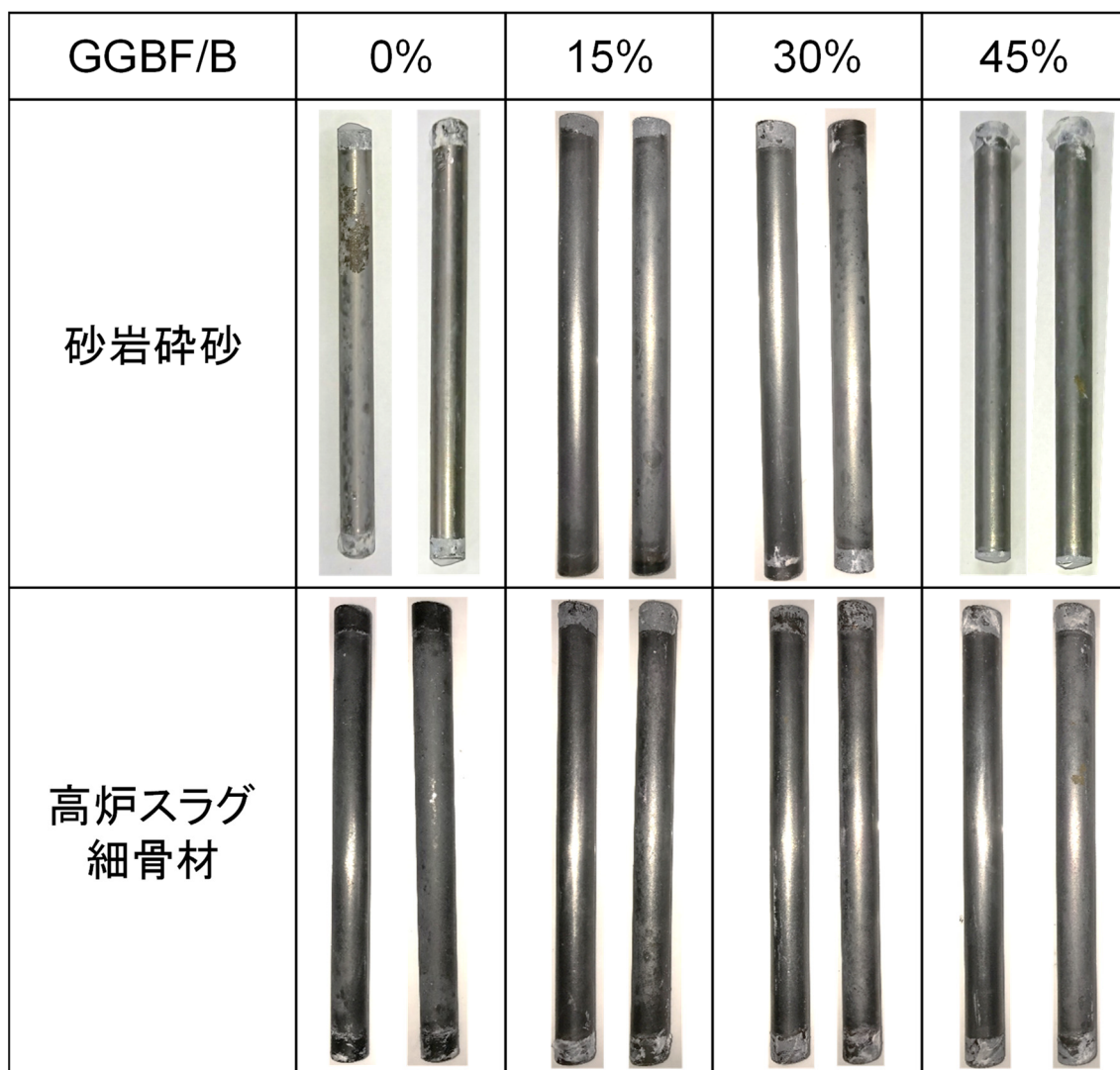


図 5-43 ひび割れのないモルタル供試体中の鋼材腐食に高炉スラグ微粉末が与える影響 (W/B=35%)

図 5-43 は、水結合材比が 35% のコンクリートから 5mm ふるいを用いて採取したモルタルにひび割れを入れずに、鋼材腐食試験を行い、試験後にモルタルから取り出した鋼材の腐食状況を写真で示したものである。細骨材に砂岩砕砂を用い、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用いたものは、鋼材に腐食が生じているが分かる。これに対して、結合材または細骨材に高炉スラグを用いた場合には、鋼材はほとんど腐食しておらず、錆は発生していない。

図 5-44 は、図 5-43 に示した鋼材の腐食面積率を高炉スラグ微粉末量との関係で示したものである。■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場合の結果を示している。図より、結合材および細骨材に高炉スラグを用いていないモルタルにおける鋼材の腐食面積率は 8.3% であるが、結合材または細骨

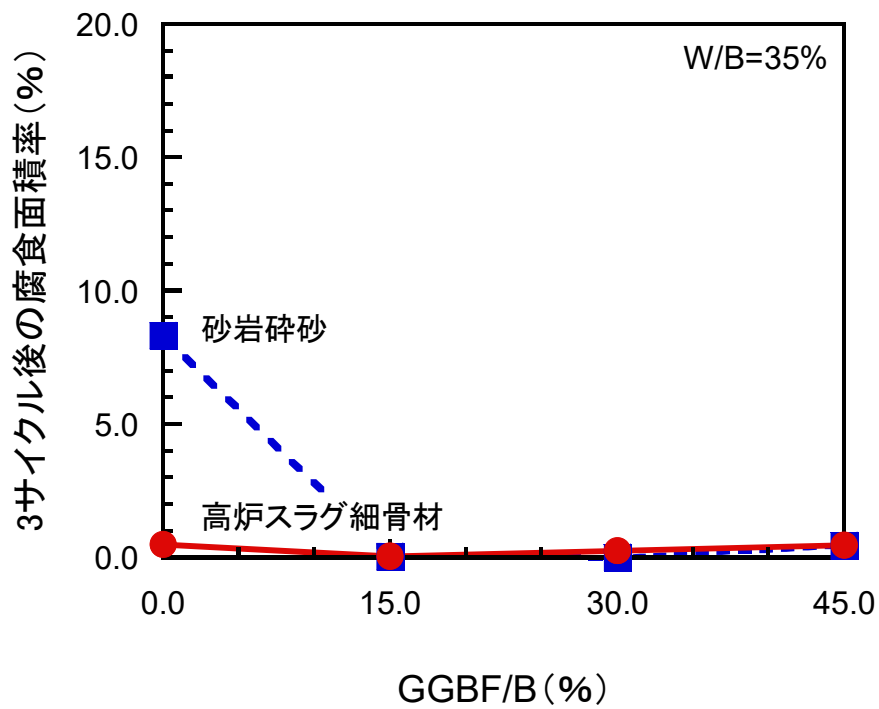


図 5-44 ひび割れのないモルタル供試体中の鋼材の腐食面積率に高炉スラグ微粉末が与える影響 (W/B=35%)

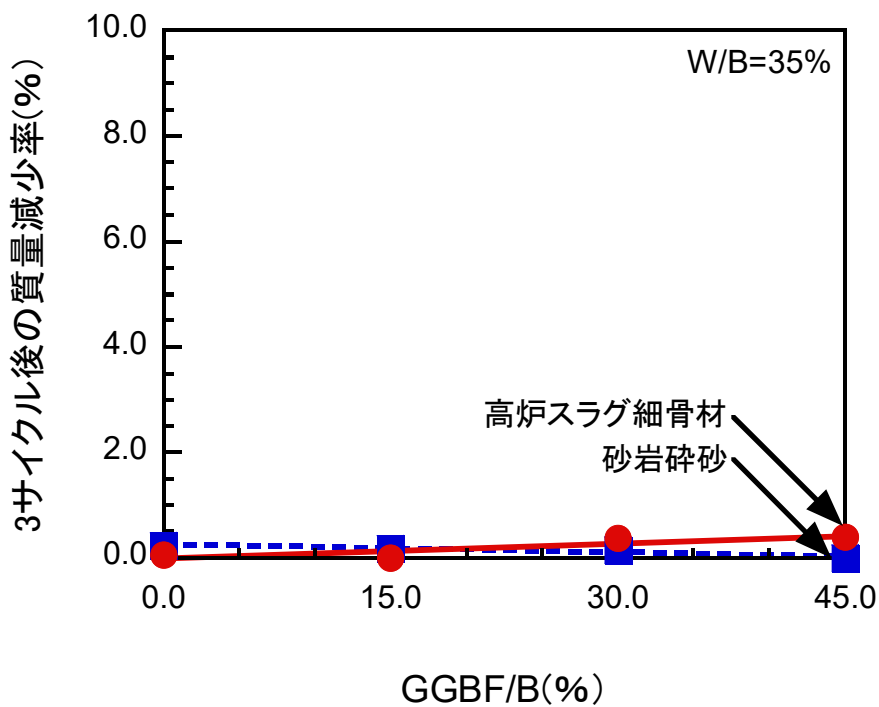


図 5-45 ひび割れのないモルタル供試体中の鋼材の質量減少率に高炉スラグ微粉末が与える影響 (W/B=35%)

材に高炉スラグを用いた場合には、鋼材の腐食面積率は 0.5%以下と非常に小さいこ

とがわかる。

図 5-45 は、図 5-43 に示した鋼材の質量減少率を高炉スラグ微粉末量との関係を示したものである。■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場合の結果を示している。図より、結合材および細骨材への高炉スラグの使用の有無に関わらず、鋼材の質量減少率は 0.4%以下と非常に小さいことが分かる。図 4-9 に示す鋼材の腐食面積率では、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鋼材の腐食面積率が 8.3%であったが、図 4-10 では、鋼材の質量減少率のごくわずかであることが分かる。









| BFS/S   | 0%  | 33%   | 67%  | 100%  |
|---------|---|---|--|---|
| W/C=65% |   |   |   |   |
| W/C=35% |  |  |  |  |

図 5-46 ひび割れのないモルタル供試体中の鋼材の質量減少率に高炉スラグ細骨材が与える影響

図 5-46 は、コンクリートから 5mm ふるいを用いて採取したモルタルにひび割れを

入れずに、腐食促進試験を行い、試験後にモルタルから取り出した鋼材の腐食状況によって、高炉スラグ細骨材がモルタル中の鋼材の腐食を抑制する効果に与える影響を写真で示したものである。これらのモルタルの結合材には、普通ポルトランドセメントのみが用いられており、細骨材は、高炉スラグ細骨材と砂岩砕砂が所定の割合で混合されており、水結合材比によらず、高炉スラグ細骨材の割合が大きくなるにつれ、錆の発生が少ないことがわかる。

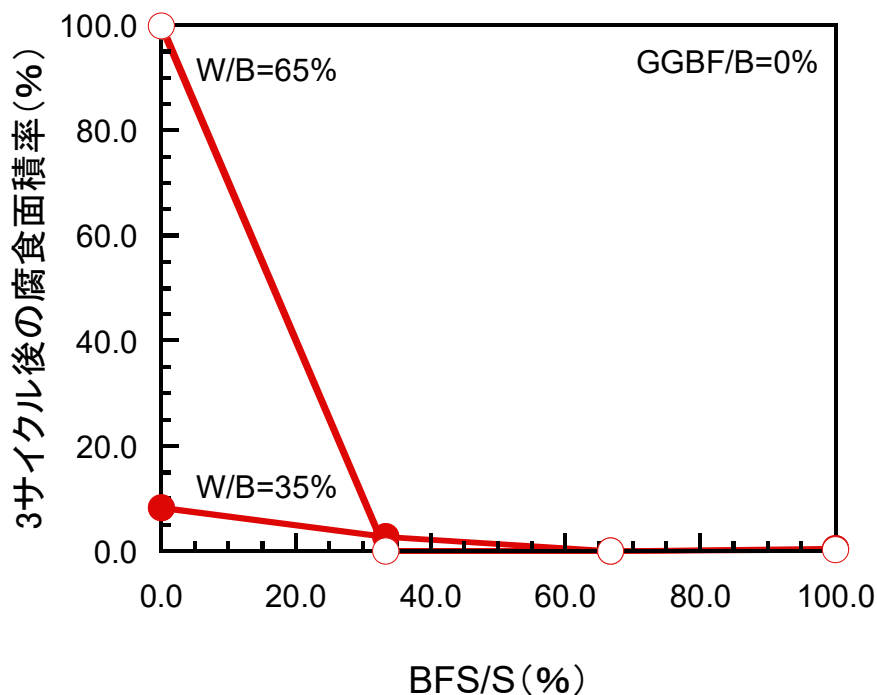


図 5-47 ひび割れのないモルタル供試体中の鋼材の腐食面積率に高炉スラグ細骨材が与える影響

図 5-47 は、図 5-46 に示した鋼材の腐食面積率と高炉スラグ細骨材量との関係を示したものである。○および●は、それぞれ、水結合材比が 65%および 35%の結果を示している。図より、水結合材比が 65%のモルタルにおいて、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いていないものは、腐食面積率が 100%であるが、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた場合には、腐食面積率は 0.4%以下である。水結合材比に関わらず、細骨材中の高炉スラグ細骨材の使用量が増加するにつれて、腐食面積率が小さくなることが分かる。

図 5-48 は、図 5-46 に示した鋼材の質量減少率と高炉スラグ細骨材量との関係で示したものである。○および●は、それぞれ、水結合材比が 65%および 35%の結果を示している。図より、細骨材に砂岩砕砂のみを用いた場合には腐食による鋼材の質量



減少率は17%であるが、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いることで、鋼材の質量減少率は0.1%と小さくなっている。

高炉スラグ微粉末もしくは高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、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、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、4分の1以下になる<sup>2)</sup>。一方、高炉スラグ微粉末を結合材の40%用いた場合、発錆限界塩分量は、高炉スラグ微粉末を用いないものの90%程度と報告されている<sup>2)</sup>。したがって、高炉スラグを用いた場合に、鋼材の腐食が抑制される効果は、塩分の浸透が抑制される効果が大きいためと考えられる。

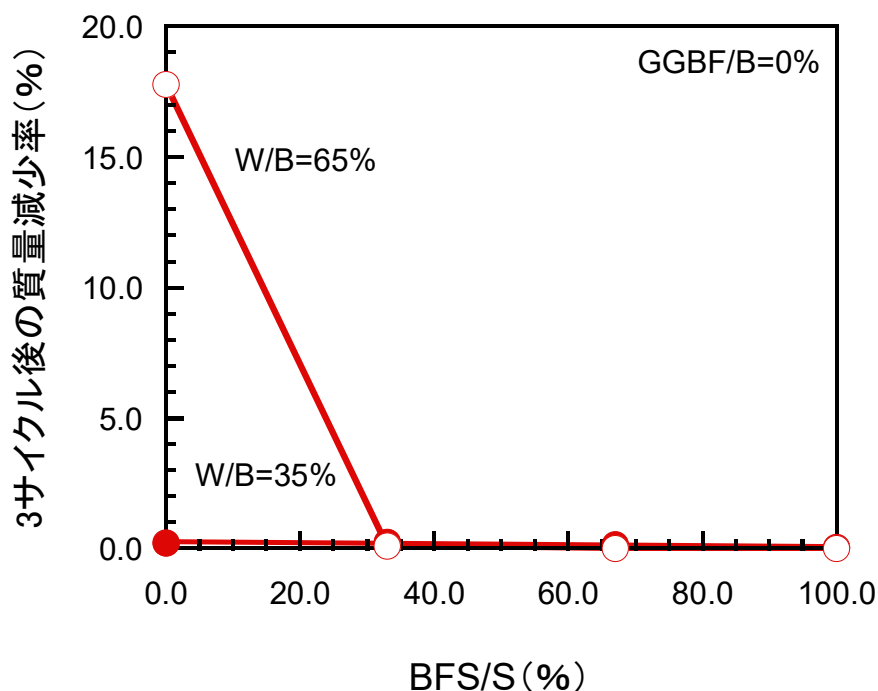


図 5-48 ひび割れのないモルタル供試体中の鋼材の質量減少率に高炉スラグ細骨材が与える影響

#### 5-5-5 予め微細なひび割れを入れたコンクリートを用いた鋼材腐食試験

図 5-49 は、水結合材比が 65%のコンクリートに予め微細なひび割れを入れて腐食促進試験を行い、試験後にコンクリートから取り出した鋼材の腐食状況を写真で示したものである。細骨材に砂岩砕砂が用いられているものは、結合材に含まれる高炉スラグ微粉末の量が増えても、鋼材表面の全面に錆が発生していることが分かる。これに対して、高炉スラグ細骨材が用いられているものは、鋼材表面の半分程度しか錆が発生しておらず、とくに塩水浸漬時に上面となっている部分には錆が発生していない。高炉スラグ細骨材を使用した場合、ひび割れを通じても塩分が浸透しにくいいため、塩



水に近い下面側のみが腐食したと思われる。

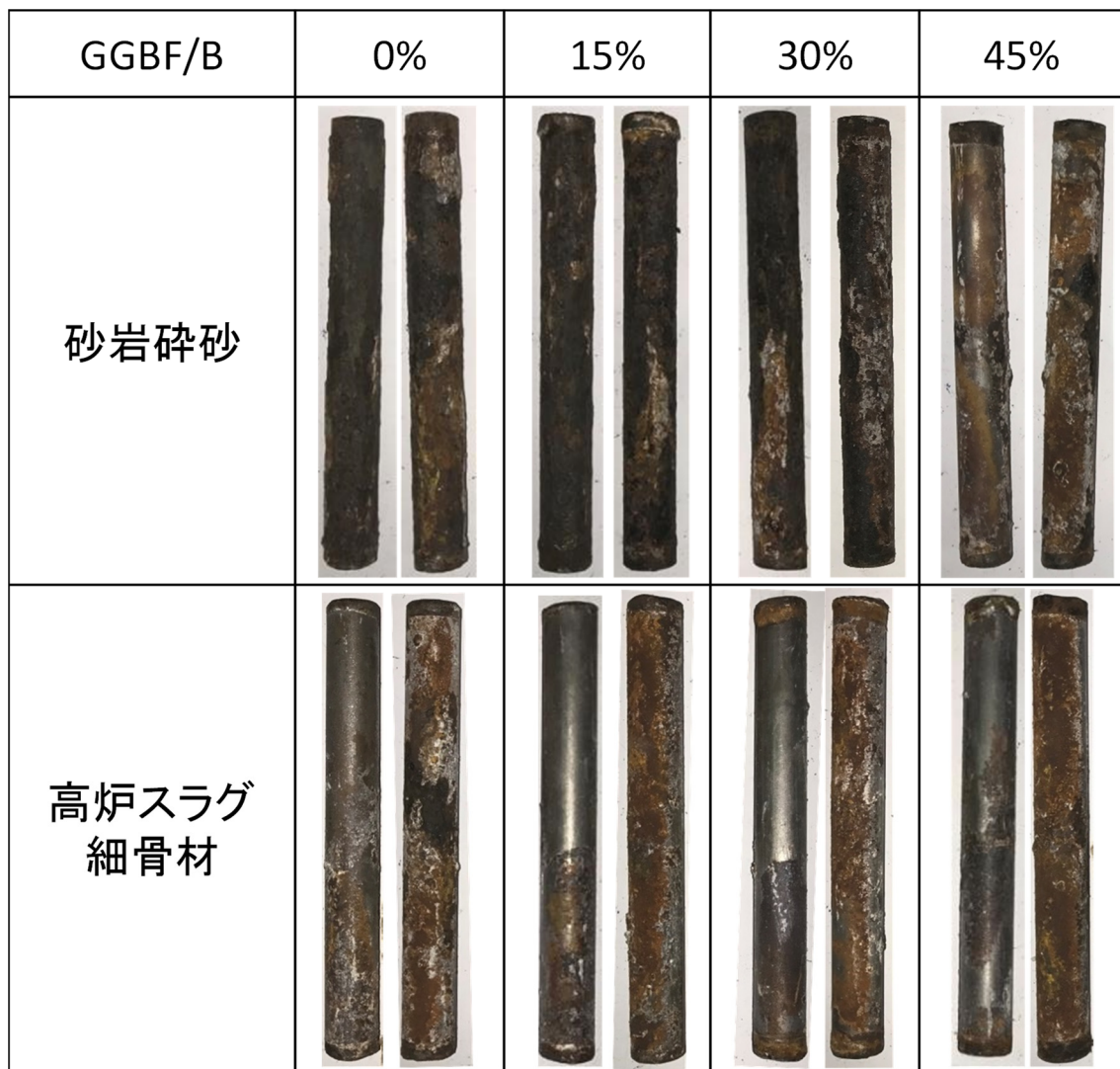


図 5-49 ひび割れのあるコンクリート供試体中の鋼材腐食に高炉スラグ微粉末が与える影響 (W/B=65%)

図 5-50 は、図 5-49 に示した鋼材の腐食面積率を高炉スラグ微粉末量との関係で示したものである。■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場合の結果を示している。図より、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた場合には、腐食面積率が小さくなっている。細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートは、結合材に高炉スラグ微粉末を 45%使用したもの以外は、腐食面積率が 100%であり、高炉スラグ微粉末を 45%使用したものは、腐食面積率が 92%となっていることが分かる。これに対して、高炉スラグ細骨材を用いたものは、結合材の高炉スラグ微粉末を使用量に関わらず、錆による腐食面積率は 60%に抑えられていることが分かる。

図 5-51 は、図 5-49 に示した鋼材の錆の量を質量減少率で示し、高炉スラグ微粉末量との関係で示したものである。■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場合の結果を示している。図より、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの場合、細骨材に砂岩砕砂を用いた場合に比べて、高炉スラグ細骨材を用いた場合には質量減少率が 1/4 程度に小さくなっていることが分かる。細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートは、結合材中の高炉スラグ微粉末の使用量が増加するにつれて、鋼材の質量減少率は小さくなっており、普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べて、高炉スラグ微粉末を 45% 用いた場合は、鋼材の質量減少率は 1/3 以下の値になっている。高炉スラグが鋼材の質量減少率に与える影響は、結合材に高炉スラグ微粉末を 45% 用いる場合と、細骨材に高炉スラグ細骨材を質量比で 100% 用いた場合では同程度の効果があることが分かる。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた場合は、高炉スラグ微粉末の量に関わらず、質量減少率は小さくなっている。図 5-50 に示した鋼材の腐食面積率では、細骨材に砂岩砕砂を用いたコンクリートは、高炉スラグ微粉末の量に関わらず腐食面積率は同程度であったが、錆の発生量は、高炉スラグ微粉末を用いることで抑制されることが分かる。また、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた場合は、質量減少率および腐食面積率への高炉スラグ微粉末の影響は同じ傾向になることが分かる。

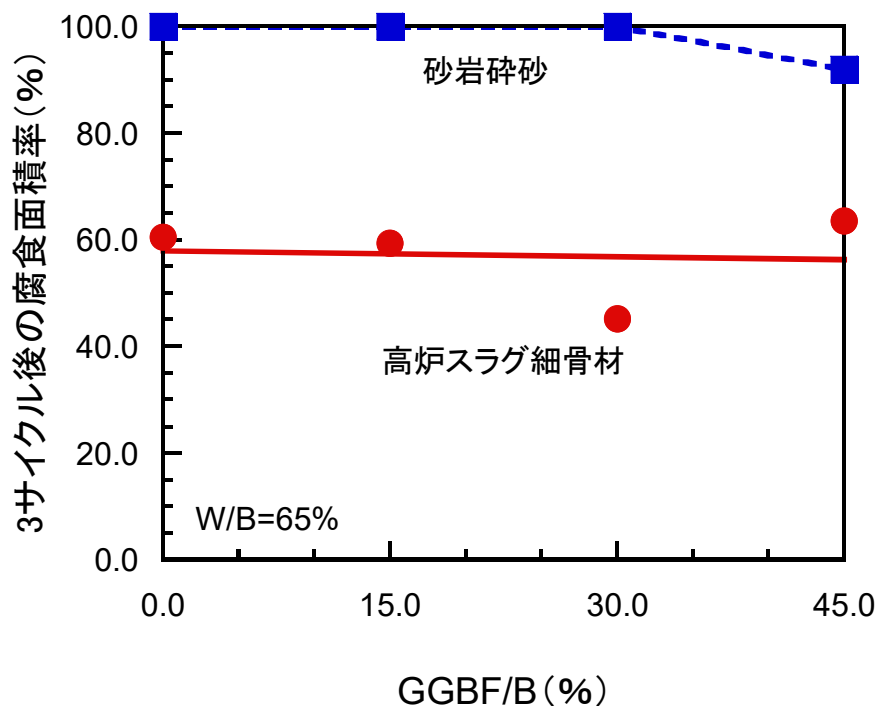


図 5-50 ひび割れのあるコンクリート供試体中の鋼材の腐食面積率に高炉スラグ微粉末が与える影響 (W/B=65%)

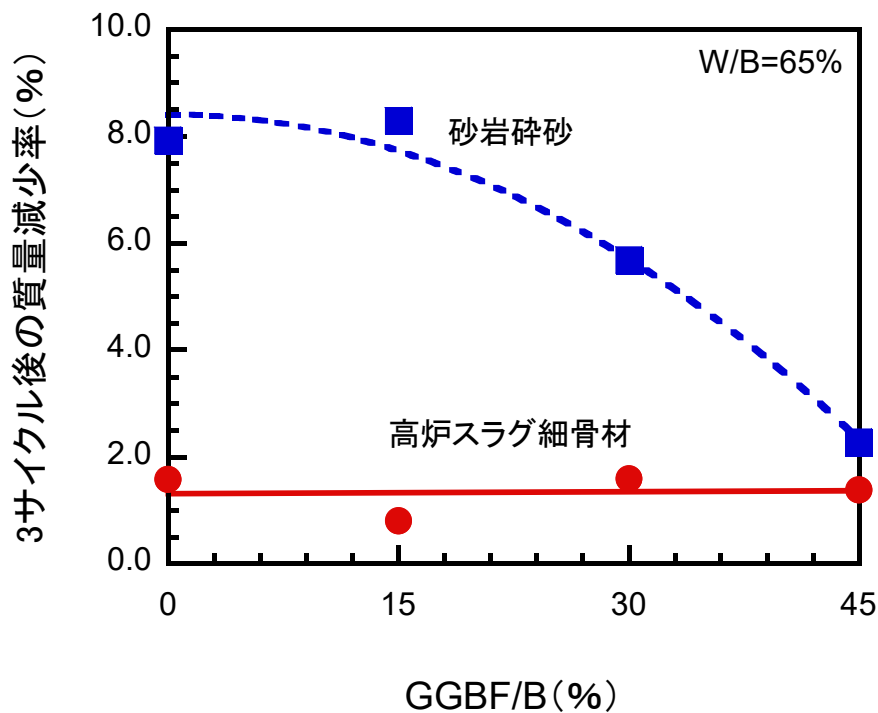


図 5-51 ひび割れのあるコンクリート供試体中の鋼材の質量減少率に高炉スラグ微粉が与える影響 (W/B=65%)

図 5-52 は、水結合材比が 35%のコンクリートに予め微細なひび割れを入れて腐食促進試験を行い、試験後にコンクリートから取り出した鋼材の腐食状況を写真で示したものである。細骨材に砂岩砕砂を用いた場合および高炉スラグ細骨材を用いた場合を比較した結果を示している。図より、図 4-14 に示す、水結合材比が 65%の場合に比べると、細骨材に砂岩砕砂が用いられているものであっても、鋼材表面の全面に錆が発生しているものはない。しかし、細骨材に高炉スラグ細骨材が用いられているものは、さらに錆の発生量が抑えられていることが分かる。また、細骨材に砂岩砕砂が用いられているものであっても、高炉スラグ細骨材が用いられているものであっても、結合材に高炉スラグ微粉末が 45%用いられたものは、錆の発生量が多いことが分かる。

図 5-53 は、図 5-52 に示した鋼材の腐食面積率を高炉スラグ微粉末量との関係で示したものである。■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場合の結果を示している。図より、高炉スラグ微粉末の使用量が結合材の 30%までであれば、高炉スラグ微粉末の使用量に比例して、鋼材に発生する錆が少なくなっているが、高炉スラグ微粉末が結合材の 45%の場合は、鋼材の錆の腐食面積が増加している。とくに、高炉スラグ細骨材が用いられている場合は、高炉スラグ微粉末を結合材の 45%用いると、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合よりも腐食面積率大きいことが分かる。

図 5-54 は、図 5-52 に示した鋼材の質量減少率を高炉スラグ微粉末量との関係で示









| GGBF/B       | 0%   | 15%  | 30%   | 45%  |
|--------------|--|--|---|--|
| 砂岩砕砂         |   |   |   |   |
| 高炉スラグ<br>細骨材 |  |  |  |  |

図 5-52 ひび割れのあるコンクリート供試体中の鋼材腐食に高炉スラグ微粉末が与える影響 (W/B=35%)

したものである。■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場合の結果を示している。鋼材の腐食による質量減少率で示した場合には、高炉スラグ微粉末の使用量が増えるにつれて、質量減少率は小さくなっている。高炉スラグ微粉末を45%用いた場合に、鋼材の腐食が生じているが、ごく小さい値である。このことは、錆が鋼材表面に薄く広がり、深さ方向には侵入していないが、今後、鋼材腐食が進行する傾向があると思われる。

図 5-55 は、コンクリートに予め微細なひび割れを入れて、腐食促進試験を行い、試験後にコンクリートから取り出した鋼材の腐食状況を写真で示したものである。これらのコンクリートの結合材には、普通ポルトランドセメントのみが用いられている。図より、細骨材は、高炉スラグ細骨材と砕砂が所定の割合で混合されており、腐食促

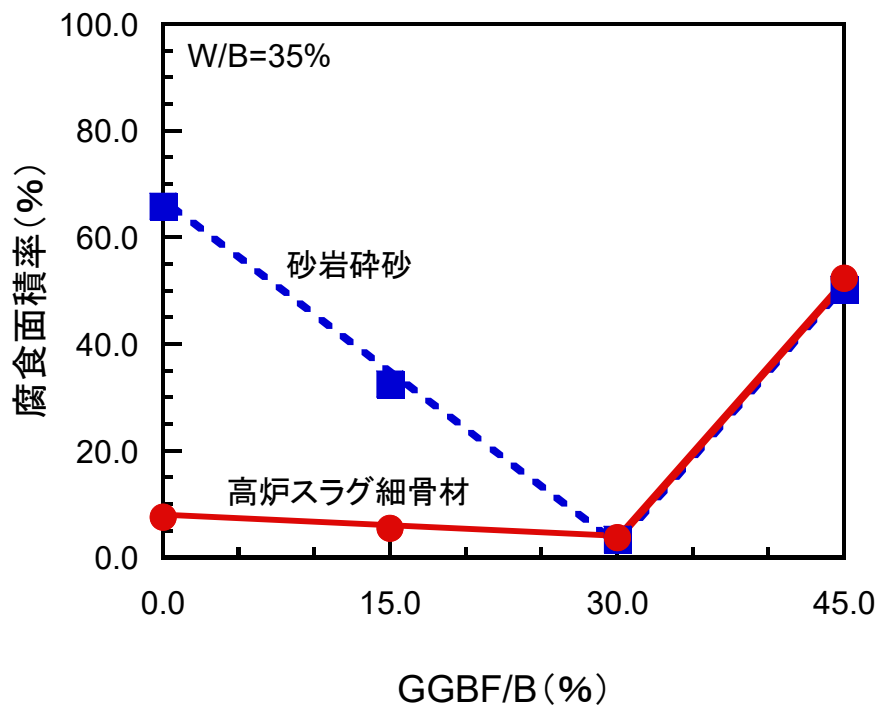


図 5-53 ひび割れのあるコンクリート供試体中の鋼材の腐食面積率に高炉スラグ微粉末が与える影響 (W/B=65%)

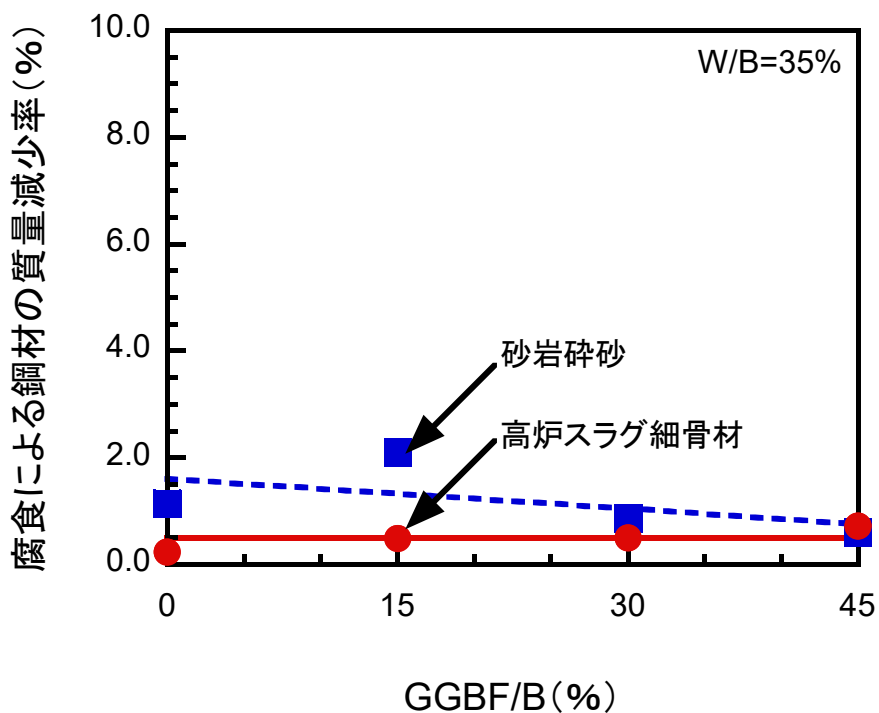


図 5-54 ひび割れのあるコンクリート供試体中の鋼材の質量減少率に高炉スラグ微粉末が与える影響 (W/B=35%)

進試験後の鉄筋の錆の防錆効果に高炉スラグ細骨材の影響を示している。図より、水



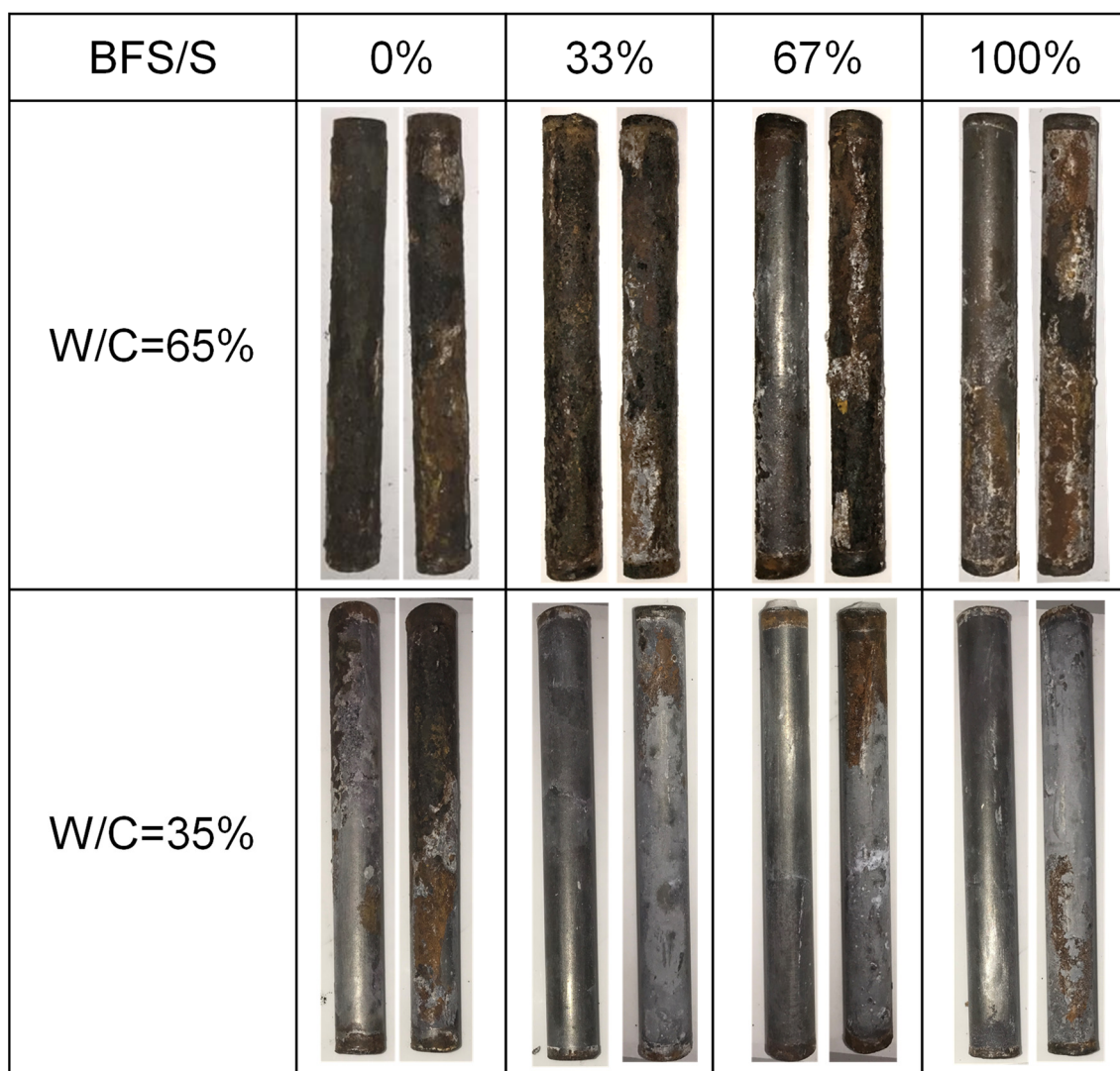


図 5-55 ひび割れのあるコンクリート供試体中の鋼材の質量減少率に高炉スラグ細骨材が与える影響

結合材比に関わらず，高炉スラグ細骨材の割合が大きくなるにつれ，錆の発生量が少なくなることが分かる。

図 5-56 は，図 5-55 に示した鋼材の腐食面積率を高炉スラグ細骨材量との関係で示したものである。○および●は，それぞれ，水結合材比が 65%および 35%の結果を示している。図より，細骨材中の高炉スラグ細骨材の使用量が増えるに連れ，鋼材に発生する錆が少なくなっていることが分かる。とくに，水セメント比が 35%の場合は，高炉スラグ細骨材を細骨材の 3 分の 1 用いれば，鋼材の錆の腐食面積は，高炉スラグ細骨材を用いていない場合の 10 分の 1 以下に抑えられていることが分かる。

図 5-57 は，図 5-55 に示した鋼材の質量減少率を高炉スラグ細骨材量との関係で示したものである。○および●は，それぞれ，水結合材比が 65%および 35%の結果を

示している。図より、細骨材中の高炉スラグ細骨材の使用量が増えるに連れ、鋼材の腐食が抑制されていることが分かる。

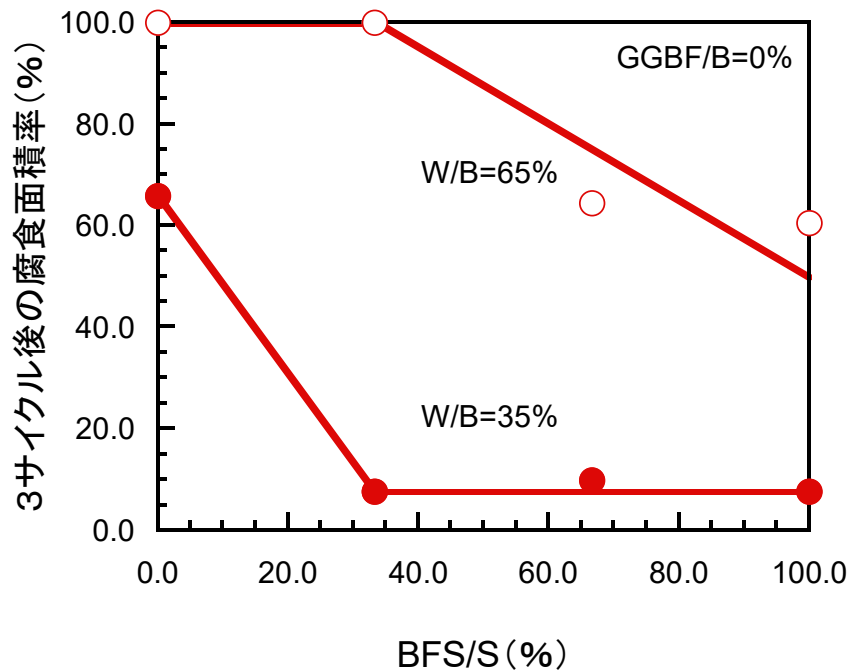


図 5-56 ひび割れのあるコンクリート供試体中の鋼材の腐食面積率に高炉スラグ細骨材が与える影響

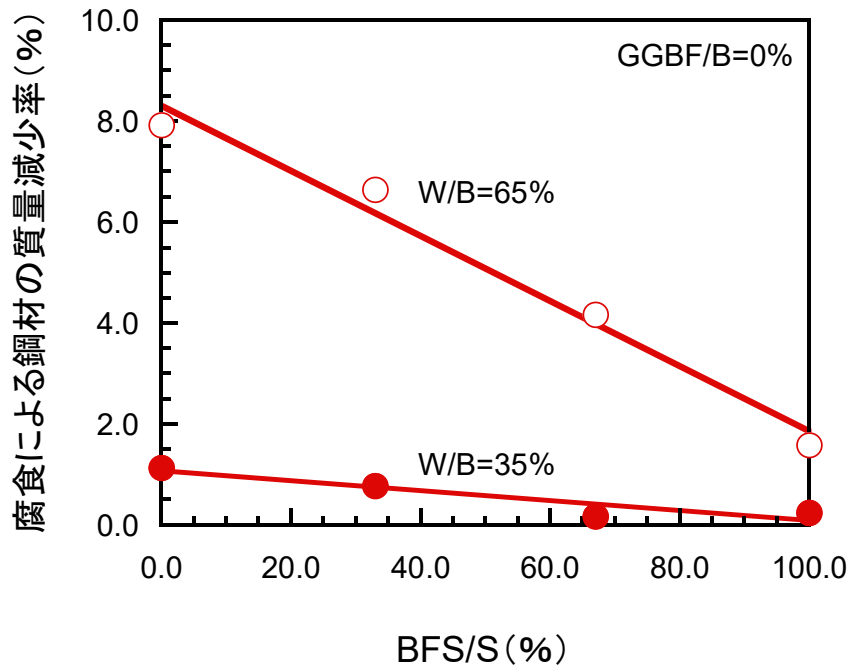


図 5-57 ひび割れのあるコンクリート供試体中の鋼材の質量減少率に高炉スラグ細骨材が与える影響



### 5-5-6 発錆限界塩化物イオン量試験

図 5-58 は、水結合材比が 50% のコンクリートで、発錆によりコンクリート供試体にひび割れが生じ、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のコンクリート内の塩化物イオン量分布を示したものである。結合材には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。図中の●、○および■は、それぞれ、蒸気養生後水中養生、蒸気養生後気中養生および水中養生を行った結果を示している。図中の黒い直線は、鉄筋位置である浸透面からの距離 25mm を示しており、鉄筋位置での塩化物イオン量を発錆限界塩化物イオン量とする。図より、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コンクリートの場合、蒸気養生を行うと発錆限界塩化物イオン量が大きくなるが、蒸気養生後水中養生をおこなうことで、水中養生のみを行った場合の発錆限界塩化物イオン量と同程度の値になる。

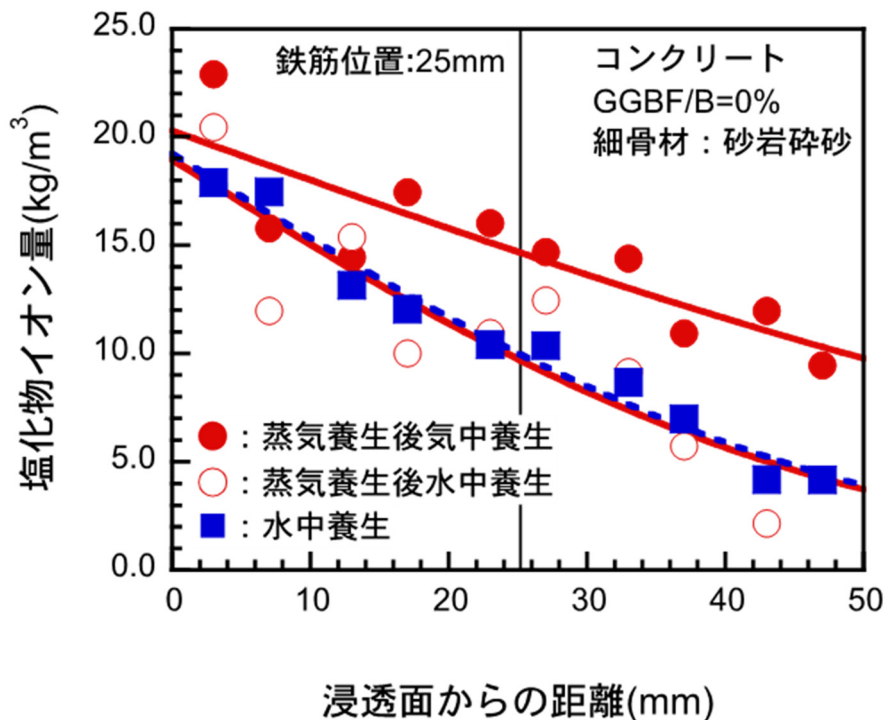


図 5-58 発錆限界塩化物イオン量試験終了時のコンクリートの塩化物イオン分布(普通ポルトランドセメントセメントと砂岩砕砂を用いた場合)

図 5-59 は、水結合材比が 50% のモルタルで、発錆によりモルタル供試体にひび割れが生じ、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のモルタル内の塩化物イオン量分布を示したものである。細骨材には砂岩砕砂を用いた。図中の■、○および●は、それぞれ、結合材中の高炉スラグ微粉末の使用量が 0%、30% および 60% 用いた結果を示している。図中の黒い直線は、鉄筋位置である浸透面からの距離 13mm を示して

おり、鉄筋位置での塩化物イオン量を発錆限界塩化物イオン量とする。図より、結合材中の高炉スラグ微粉末の使用量が増えるにつれて、発錆限界塩化物イオン量が小さくなっていることが分かる。

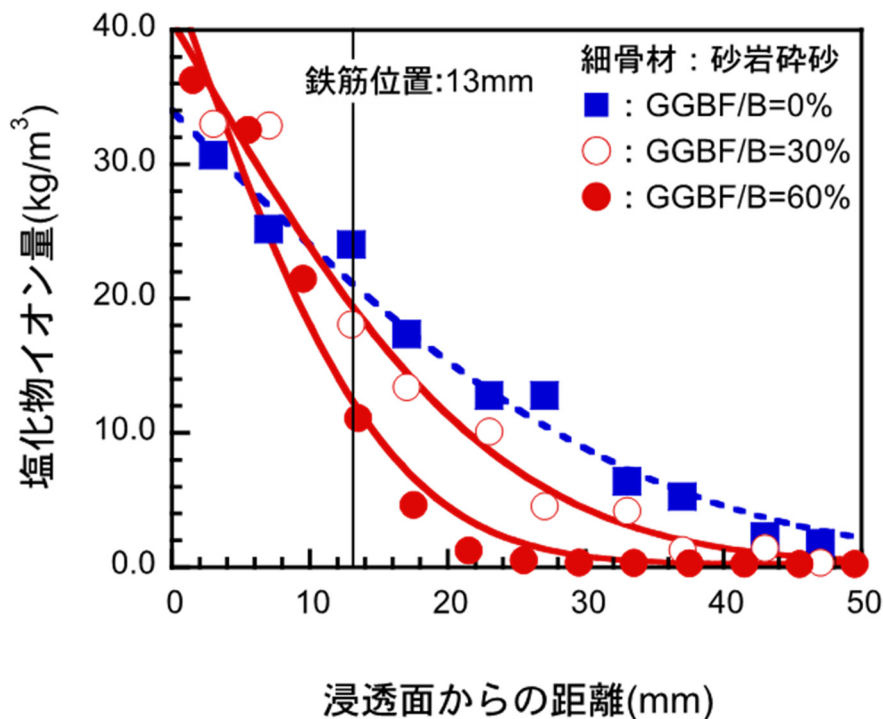


図 5-59 発錆限界塩化物イオン量試験終了時のモルタルの塩化物イオン量への高炉スラグ微粉末の影響(砂岩砕砂を用いた場合)

図 5-60 は、水結合材比が 50% のモルタルで、発錆によりモルタル供試体にひび割れが生じ、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のモルタル内の塩化物イオン量分布を示したものである。結合材には普通ポルトランドセメントを用いた。図中の□、■、○および●は、それぞれ、細骨材中の高炉スラグ細骨材の使用量が 0%、33%、67% および 100% 用いた結果を示している。図中の黒い直線は、鉄筋位置である浸透面からの距離 13mm を示しており、鉄筋位置での塩化物イオン量を発錆限界塩化物イオン量とする。図より、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いると、発錆限界塩化物イオン量が小さくなっていることが分かる。

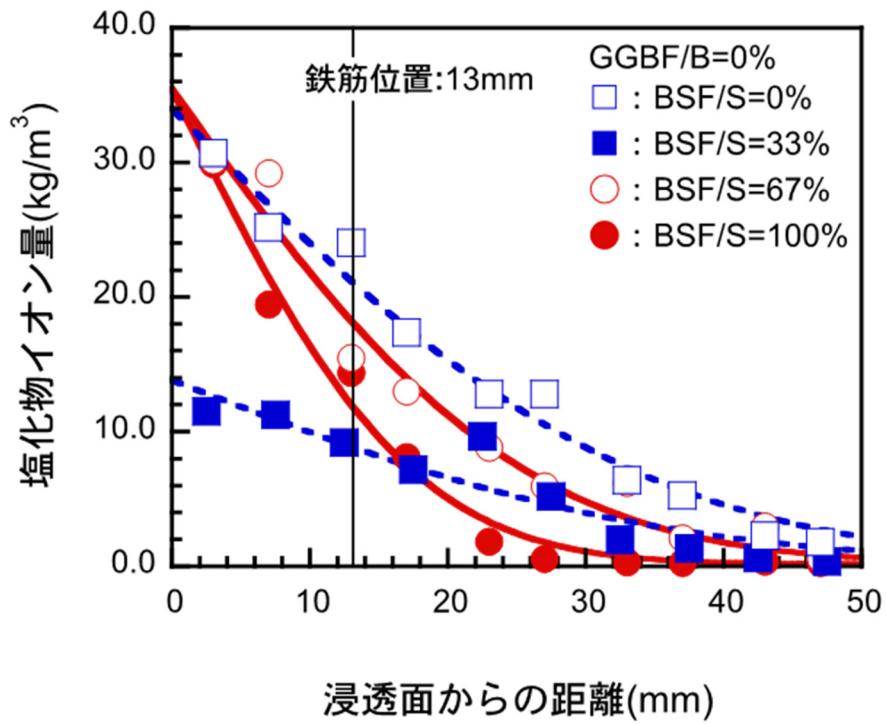


図 5-60 発錆限界塩化物イオン量試験終了時のモルタルの塩化物イオン量分布への高炉スラグ細骨材の影響(砂岩砕砂を用いた場合)

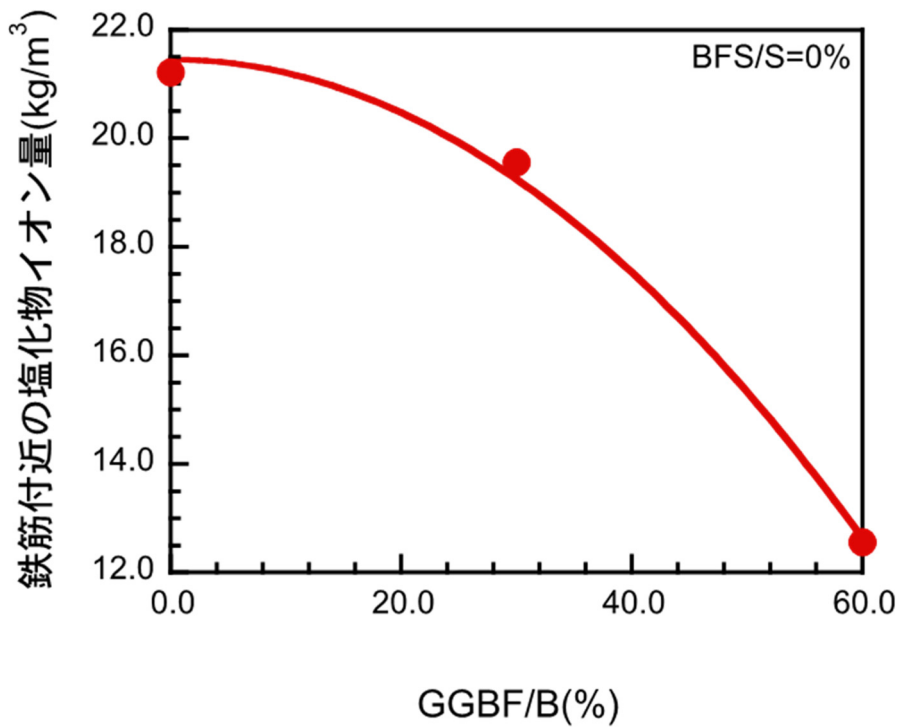


図 5-61 発錆限界塩化物イオン量試験終了時のモルタルの鉄筋付近の塩化物イオン量への高炉スラグ微粉末の影響

図 5-61 は、図 5-58 に示したモルタルの発錆限界塩化物イオン量を示したものである。図より、結合材中の高炉スラグ微粉末の使用量が増加するにつれて、発錆限界塩化物イオン量は小さくなるのが分かる。

図 5-62 は、図 5-59 に示したモルタルの発錆限界塩化物イオン量を示したものである。図より、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いると、発錆限界塩化物イオン量はばらついており、傾向は見られない。

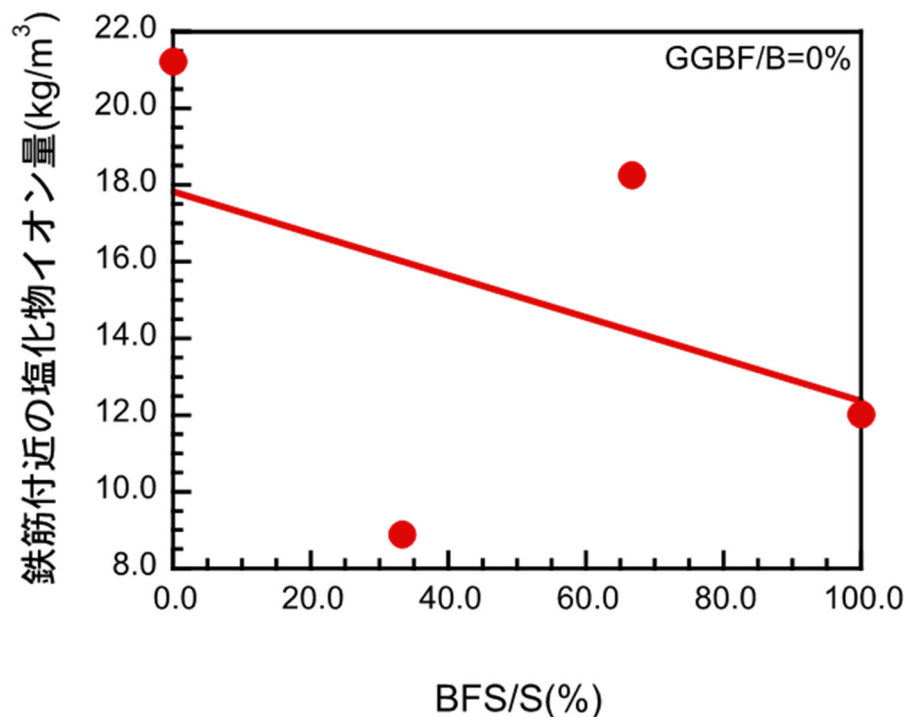


図 5-62 発錆限界塩化物イオン量試験終了時のモルタルの鉄筋付近の塩化物イオン量への高炉スラグ細骨材の影響

図 5-63 は、水結合材比は 50% のコンクリートで、浸漬法および発錆限界塩化物イオン量試験の関係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、細骨材には砂岩砕砂を用い、水中養生を行った。図中の●は、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のコンクリート内の塩化物イオン量分布の実験値を示したものである。図中の直線は、3 年間の浸漬試験から得られた見掛けの拡散係数を用いて、発錆限界塩化物イオン量試験期間終了時における塩化物イオン量分布を算出したものである。図より、算出した値および実験値は同様のプロファイルになり、実験値のプロファイルの方が大き目の値になることが分かる。

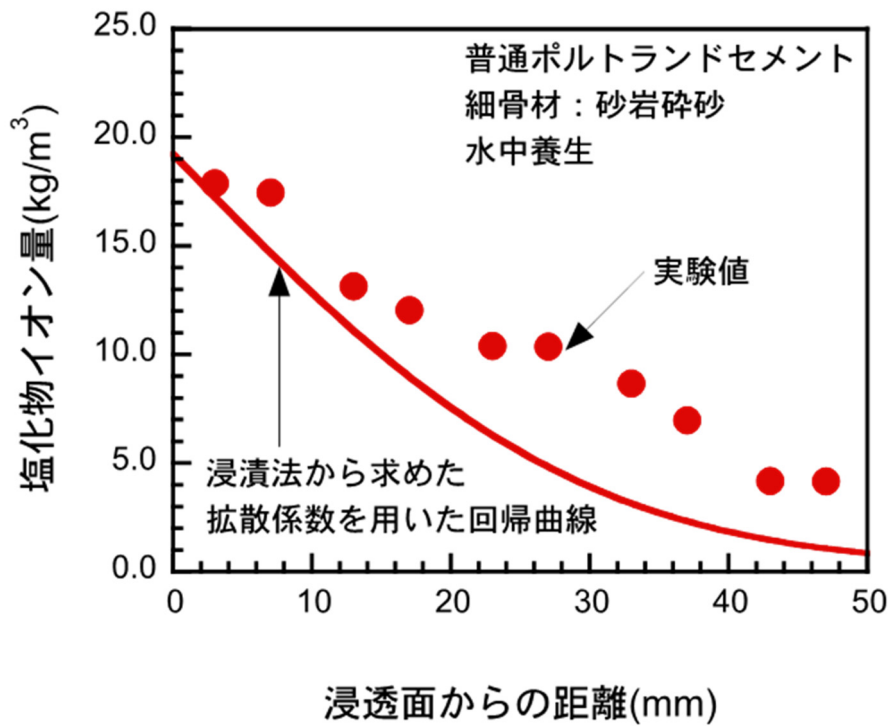


図 5-63 浸漬法および発錆限界塩化物イオン量試験の関係(普通ポルトランドセメントと砂岩砕砂を用いたコンクリートの場合、水中養生)

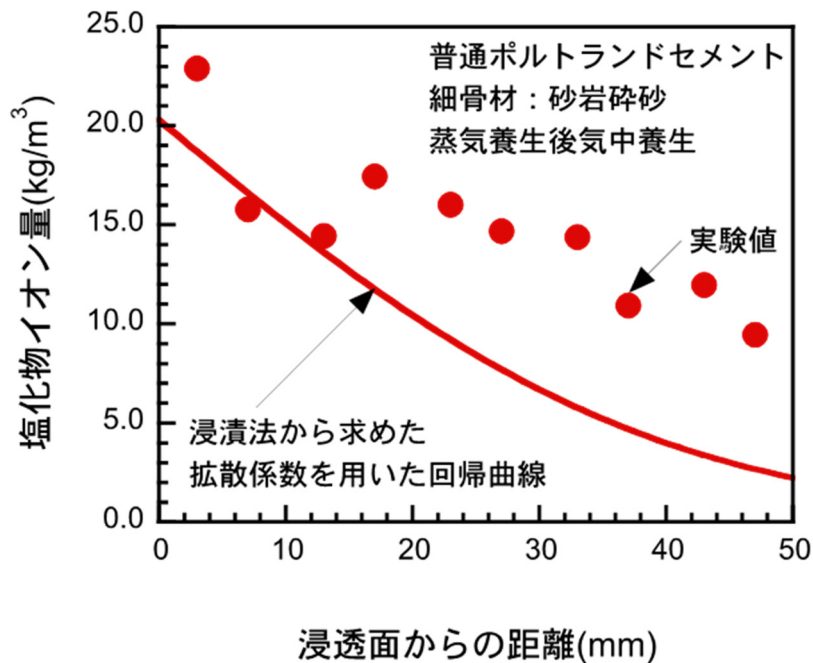


図 5-64 浸漬法と発錆限界塩化物イオン量試験の関係(普通ポルトランドセメントと砂岩砕砂を用いたコンクリートの場合、蒸気養生後気中養生)

図 5-64 は、水結合材比は 50% のコンクリートで、浸漬法および発錆限界塩化物イオン量試験の関係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、細骨材には砂岩砕砂を用い、蒸気養生後気中養生を行った。図中の●は、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のコンクリート内の塩化物イオン量分布の実験値を示したものである。図中の直線は、3 年間の浸漬試験から得られた見掛けの拡散係数を用いて、発錆限界塩化物イオン量試験期間終了時における塩化物イオン量分布を算出したものである。図より、算出した値および実験値は同様のプロファイルになり、実験値のプロファイルの方が大き目の値になることが分かる。

図 5-65 は、水結合材比は 50% のコンクリートで、浸漬法および発錆限界塩化物イオン量試験の関係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、細骨材には砂岩砕砂を用い、蒸気養生後水中養生を行った。図中の●は、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のコンクリート内の塩化物イオン量分布の実験値を示したものである。図中の直線は、3 年間の浸漬試験から得られた見掛けの拡散係数を用いて、発錆限界塩化物イオン量試験期間終了時における塩化物イオン量分布を算出したものである。図より、算出した値および実験値は同様のプロファイルになり、実験値のプロファイルの方が大き目の値になることが分かる。

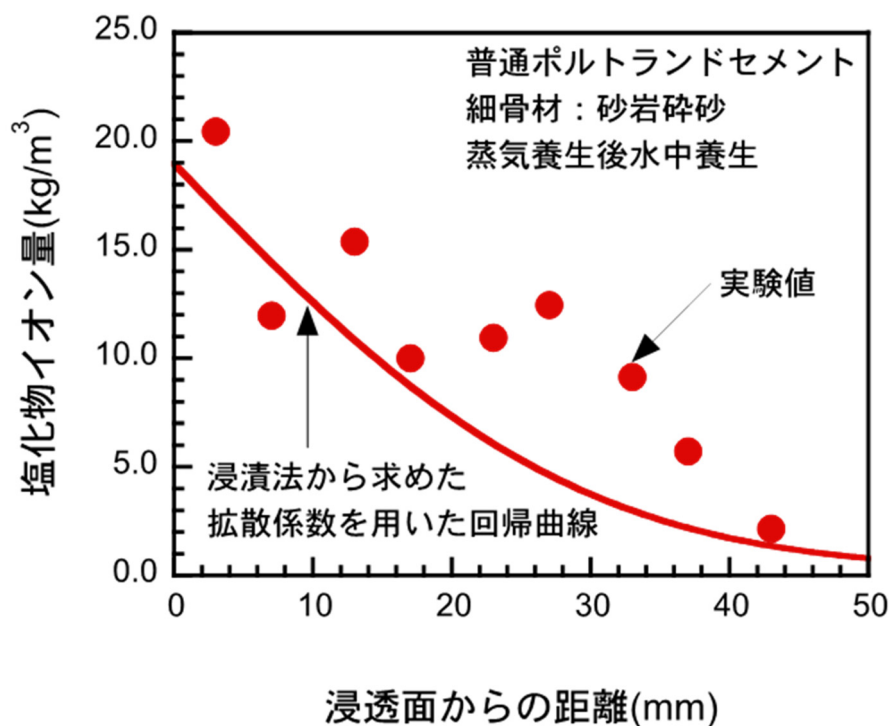


図 5-65 浸漬法から求めた見掛けの拡散係数と発錆限界塩化物イオン量試験の関係 (普通ポルトランドセメントと砂岩砕砂を用いたコンクリートの場合、蒸気養生後水中養生)



図 5-66 は、水結合材比は 50% のモルタルで、浸漬法および発錆限界塩化物イオン量試験の関係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、細骨材には砂岩砕砂を用いている。図中の●は、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のモルタル内の塩化物イオン量分布の実験値を示したものである。図中の直線は、3 年間の浸漬試験から得られた見掛けの拡散係数を用いて、発錆限界塩化物イオン量試験期間終了時における塩化物イオン量分布を算出したものである。図より、算出した値および実験値は同様のプロファイルになることが分かる。

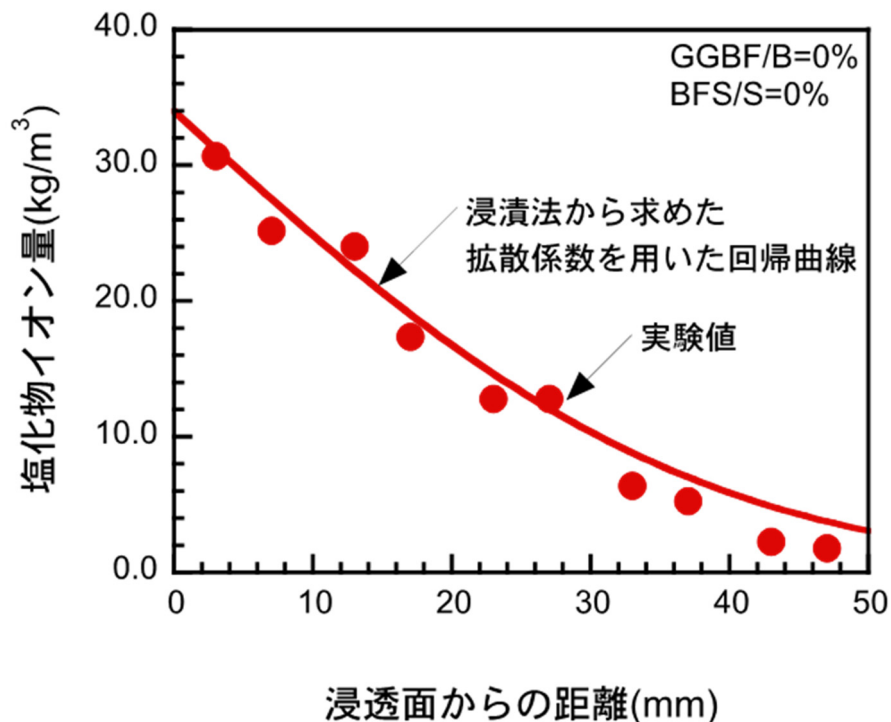


図 5-66 浸漬法と発錆限界塩化物イオン量試験の関係 (GGBF/B=0%、BFS/S=0%のモルタルの場合)

図 5-67 は、水結合材比は 50% のモルタルで、浸漬法および発錆限界塩化物イオン量試験の関係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、細骨材には質量比で高炉スラグ細骨材を 33% 用いている。図中の●は、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のモルタル内の塩化物イオン量分布の実験値を示したものである。図中の直線は、3 年間の浸漬試験から得られた見掛けの拡散係数を用いて、発錆限界塩化物イオン量試験期間終了時における塩化物イオン量分布を算出したものである。図より、算出した値および実験値は同様のプロファイルになり、実験値のプロファイルの方が大き目の値になることが分かる。



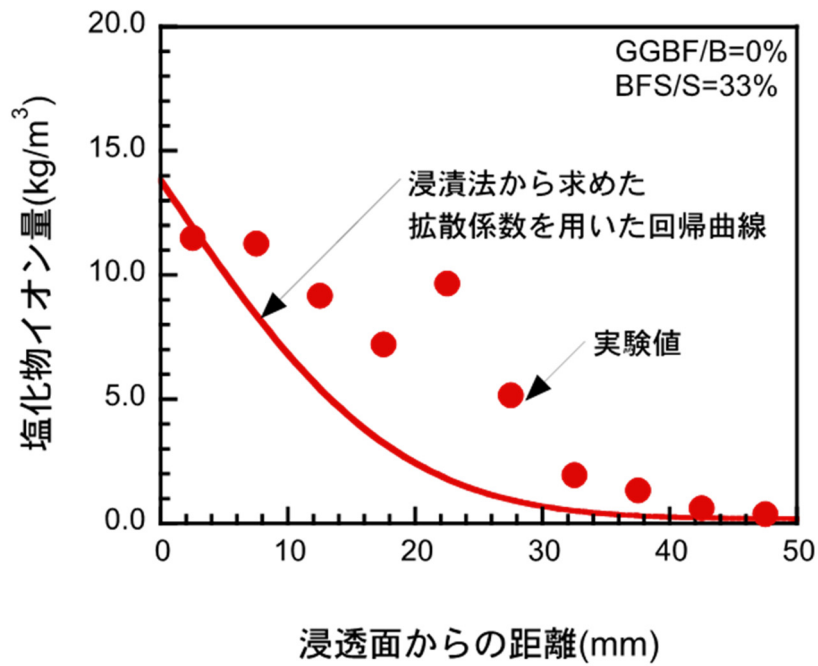


図 5-67 浸漬法と発錆限界塩化物イオン量試験の関係 (GGBF/B=0%、BFS/S=33%のモルタルの場合)

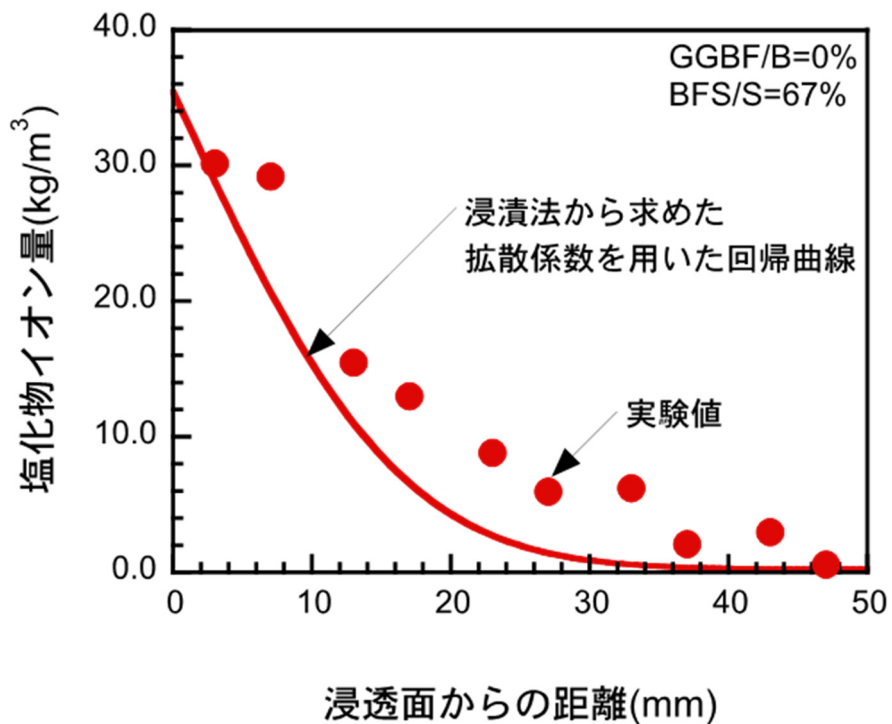


図 5-68 浸漬法から求めた見掛けの拡散係数と発錆限界塩化物イオン量試験の関係 (GGBF/B=0%、BFS/S=67%のモルタルの場合)

図 5-68 は、水結合材比は 50% のモルタルで、浸漬法および発錆限界塩化物イオン量試験の関係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、細骨材には質量比で高炉スラグ細骨材を 67% 用いている。図中の●は、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のモルタル内の塩化物イオン量分布の実験値を示したものである。図中の直線は、3 年間の浸漬試験から得られた見掛けの拡散係数を用いて、発錆限界塩化物イオン量試験期間終了時における塩化物イオン量分布を算出したものである。図より、算出した値および実験値は同様のプロファイルになり、実験値のプロファイルの方が大き目の値になることが分かる。

図 5-69 は、水結合材比は 50% のモルタルで、浸漬法および発錆限界塩化物イオン量試験の関係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、細骨材には質量比で高炉スラグ細骨材を 100% 用いている。図中の●は、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のモルタル内の塩化物イオン量分布の実験値を示したものである。図中の直線は、3 年間の浸漬試験から得られた見掛けの拡散係数を用いて、発錆限界塩化物イオン量試験期間終了時における塩化物イオン量分布を算出したものである。図より、算出した値および実験値は同様のプロファイルになることが分かる。

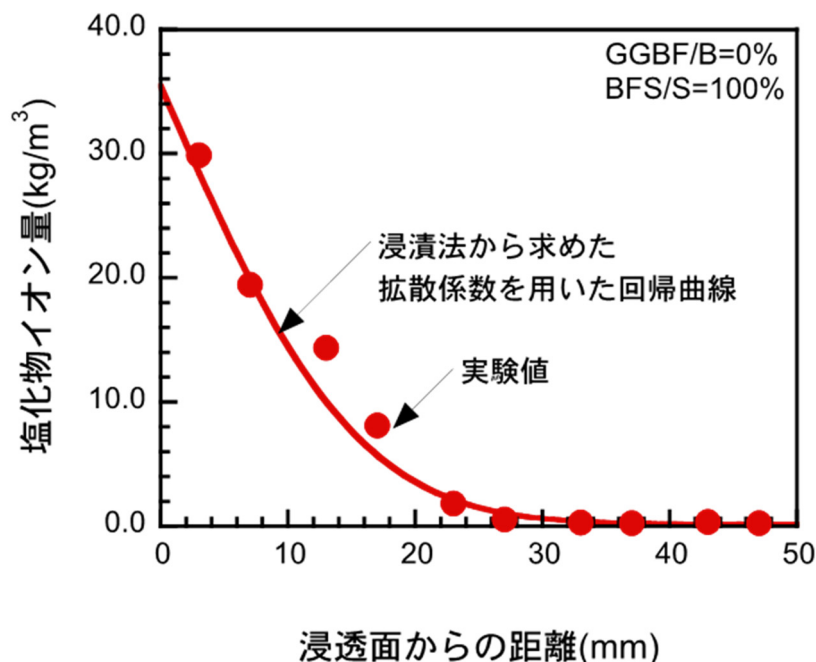


図 5-69 浸漬法と発錆限界塩化物イオン量試験の関係 (GGBF/B=0%、BFS/S=100% のモルタルの場合)

図 5-70 は、水結合材比は 50% のモルタルで、浸漬法および発錆限界塩化物イオン

量試験の関係を示したものである。結合材に質量比で 30%高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には砂岩砕砂を用いている。図中の●は、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のモルタル内の塩化物イオン量分布の実験値を示したものである。図中の直線は、3年間の浸漬試験から得られた見掛けの拡散係数を用いて、発錆限界塩化物イオン量試験期間終了時における塩化物イオン量分布を算出したものである。図より、算出した値および実験値は同様のプロファイルになり、実験値のプロファイルの方が大き目の値になることが分かる。

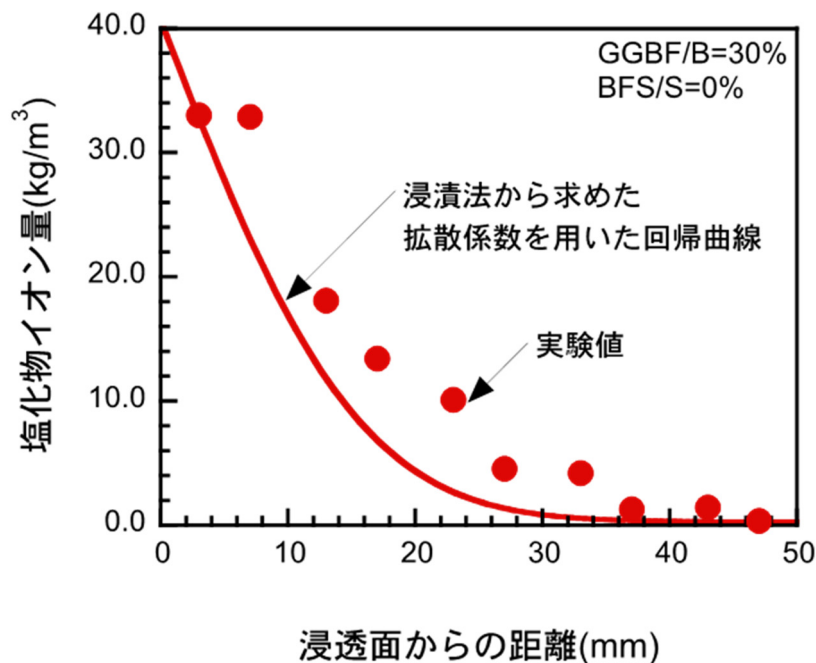


図 5-70 浸漬法と発錆限界塩化物イオン量試験の関係 (GGBF/B=30%、BFS/S=0%のモルタルの場合)

図 5-71 は、水結合材比は 50%のモルタルで、浸漬法および発錆限界塩化物イオン量試験の関係を示したものである。結合材に質量比で 60%高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には砂岩砕砂を用いている。図中の●は、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のモルタル内の塩化物イオン量分布の実験値を示したものである。図中の直線は、3年間の浸漬試験から得られた見掛けの拡散係数を用いて、発錆限界塩化物イオン量試験期間終了時における塩化物イオン量分布を算出したものである。図より、算出した値および実験値は同様のプロファイルになることが分かる。

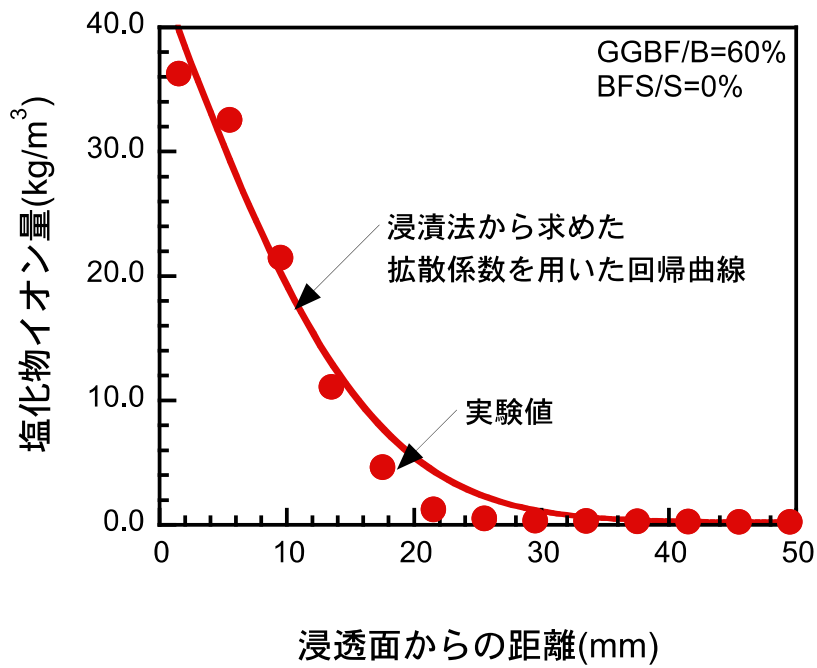


図 5-71 浸漬法と発錆限界塩化物イオン量試験の関係 (GGBF/B=60%、BFS/S=0%のモルタルの場合)

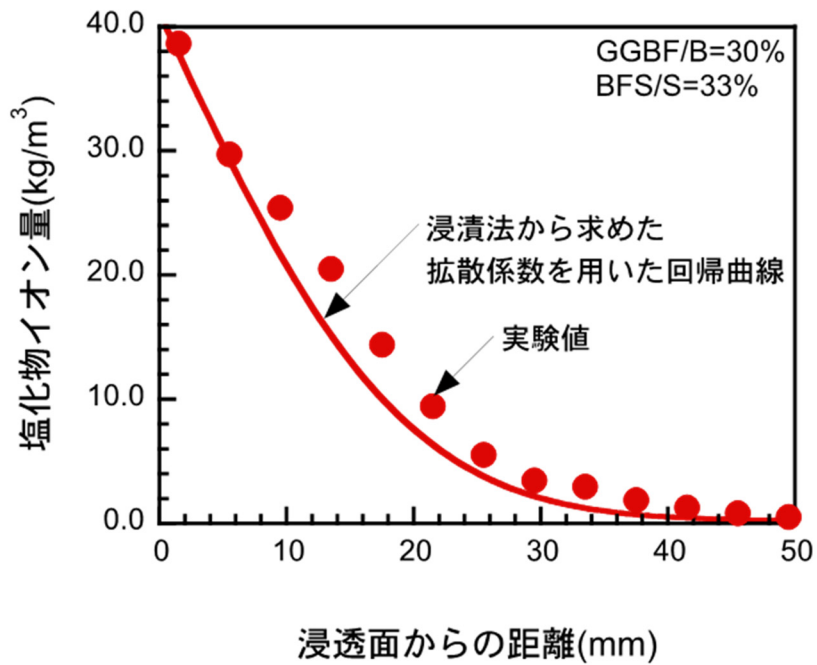


図 5-72 浸漬法と発錆限界塩化物イオン量試験の関係 (GGBF/B=30%、BFS/S=33%のモルタルの場合)

図 5-72 は、水結合材比は 50% のモルタルで、浸漬法および発錆限界塩化物イオン量試験の関係を示したものである。結合材に質量比で 30% 高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には質量比で 33% 高炉スラグ細骨材を用いている。図中の●は、発錆限界塩化物イオン量試験終了となった時のモルタル内の塩化物イオン量分布の実験値を示したものである。図中の直線は、3 年間の浸漬試験から得られた見掛けの拡散係数を用いて、発錆限界塩化物イオン量試験期間終了時における塩化物イオン量分布を算出したものである。図より、算出した値および実験値は同様のプロファイルになることが分かる。

## 5-6 本章のまとめ

- ・ 高炉スラグを結合材または細骨材に用いると、ひび割れのないモルタル中の鋼材の腐食は抑制される。また、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、微細なひび割れを生じていても、鋼材の腐食を抑制する効果がある。
- ・ 高炉スラグ細骨材を用いると水結合材比が 65% のコンクリートでは、細骨材に砂岩砕砂のみの水結合材比が 35% のコンクリートと同程度の鋼材腐食抑制効果がある。
- ・ 高炉スラグ微粉末を多く用いると、配合によっては、鋼材が腐食する傾向がある。一方、高炉スラグ細骨材は、使用量が増えるほど、鋼材の腐食を抑制する。

## 第6章 結論

本研究では、高炉スラグを結合材および細骨材に用いた場合、コンクリートおよびモルタルへの塩分浸透性にどのような影響を与えるか検討を行った。3年間の長期の塩水浸漬試験および薄片供試体を用いた短期の塩化物イオン浸透試験、非定常・電気泳動試験を行い、塩分浸透に対する抵抗性を確認した。さらに、実際に鉄筋コンクリートの供試体を用い、高炉スラグを用いたモルタルおよびコンクリートの鋼材腐食に対する効果を確認した。以下に本研究で得られた結果を述べ、本論文の結論とする。

### 1) 高炉スラグを用いたコンクリートの塩水浸漬試験について

- ・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。
- ・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。
- ・モルタルおよびコンクリートで、高炉スラグを結合材と細骨材の両方に用いると見掛けの拡散係数は小さくなり、モルタルの見掛けの拡散係数が最も小さい。
- ・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。

### 2) 薄片を用いた塩化物イオン浸透性試験および非定常・電気泳動試験について

- ・薄片法において、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。
- ・薄片法から求めた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。
- ・薄片法から求めたモルタルの見掛けの拡散係数は、塩水浸漬法から求めた見掛けの拡散係数と同様の傾向を示しており、モルタルの塩化物イオン浸透抵抗性は、薄片法で評価することができる。
- ・浸漬法では、高炉スラグを用いる場合、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を併用すると最も拡散係数が小さくなるが、薄片法ではこの傾向が得られない場合がある。
- ・水結合材比に関わらず、砂岩砕砂を用いた場合に比べて高炉スラグ細骨材を用いた場合の方が、モルタルの可溶性塩化物イオン量が多くなる。

- ・ 高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、材齢が7日から28日に長くなると飽和塩化物イオン量は大きくなり、拡散係数は1/2以下に小さくなる。
- ・ 増粘剤を用いたモルタルは、遮塩性が低くなる場合があるが、結合材に高炉スラグ微粉末を用いると、遮塩性の低下は抑制される。
- ・ 結合材および細骨材に高炉スラグを用いたモルタルに蒸気養生後水中養生を行うと、遮塩性が高くなる。
- ・ 電気泳動法において、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。
- ・ 高炉スラグが塩化物イオン浸透性に与える影響について電気泳動法を用いて評価する場合、浸漬法を用いた場合よりも遮塩性を低く評価する傾向がある。
- ・ 電気泳動法から求めたコンクリートの実効拡散係数は、蒸気養生を行うと大きくなる。
- ・ 生産工場の違いが塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響は、生産工場Aの高炉スラグ細骨材のみ実効拡散係数が大きくなり、その他の工場のもは同程度の実効拡散係数になった。また、いずれの工場の高炉スラグ細骨材も、砂岩砕砂を用いたコンクリートよりも実効拡散係数が小さくなる。

### 3) 高炉スラグを用いたコンクリートの鋼材腐食試験について

- ・ 高炉スラグを結合材または細骨材に用いると、ひび割れのないモルタル中の鋼材の腐食は抑制される。また、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、微細なひび割れを生じていても、鋼材の腐食を抑制する効果がある。
- ・ 高炉スラグ細骨材を用いると水結合材比が65%のコンクリートでは、細骨材に砂岩砕砂のみの水結合材比が35%のコンクリートと同程度の鋼材腐食抑制効果がある。
- ・ 高炉スラグ微粉末を多く用いると、配合によっては、鋼材が腐食する傾向がある。一方、高炉スラグ細骨材は、使用量が増えるほど、鋼材の腐食を抑制する。

以上のことから、高炉スラグを細骨材として用いた場合でも、微粉末として用いた場合と同様にモルタルおよびコンクリートの塩分浸透性を抑制する効果があることが明らかになった。高炉スラグを結合材と細骨材の両方に用いた場合には、より高い塩分抑制効果があることが分かった。一方で、蒸気養生を行うと、蒸気養生を行わない場合に比べて遮塩性が低下することも分かった。高炉スラグを微粉末として結合材に多量に用いた場合には、中性化が速くなる欠点が知られているが、細骨材として用いれば、中性化が速くなることもない。よって、適量な高



炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を結合材および細骨材に用い、適切な養生をおこなうことによって、鋼材腐食に対して高い耐久性を持つコンクリートを製造することが可能であることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 本荘清司, 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) 依田彰彦: 資源の有効利用とコンクリート, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート, コンクリート工学, Vol.34, No.4, pp72-82, 1996.4
- 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
- 5) コンクリート委員会・基準関連小委員会: 土木学会基準「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)(JSCE-G-572-2003)」の制定, 土木学会論文集 No.767/IV-64, 11-16, 2003.8
- 6) コンクリート委員会・基準関連小委員会: 土木学会基準「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)(JSCE-G-571-2003)」の制定, 土木学会論文集 No.767/V-64, 1-9, 2004.8
- 7) 社団法人 日本コンクリート工学協会, コンクリート診断技術' 16[基礎編], pp191-200
- 8) 皆川浩, 齋藤佑貴, 榎原彩野, 久田真: 電極の設置条件が 4 プローブ法による体積抵抗率の測定結果に及ぼす影響についての基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp1087-1092, 2009
- 9) 片平博, 渡辺寛, 天然骨材資源の低品質化の現状と課題, コンクリート工学, Vol.46, No.5, pp.20-23, 2008.5,
- 10) 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), pp53, 2017.3
- 11) 財) 沿岸開発技術センター, 鉄鋼スラグ協会: 港湾工事用水砕スラグ利用手引書, 1989
- 12) 土木学会: 2012年制定 コンクリート標準示方書[施工編], pp355-356, 2013.3
- 13) 北山良, 河野広隆, 久田真, 渡辺博志, 急速塩分浸透性試験のための非定常状態の塩化物イオン濃度分布状態の把握, コンクリート工学年次論文集, pp837-841, Vol26, No.1, 2004
- 14) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書改定資料ー基本原則編・設計編・施工編ー, コンクリートライブラリー138, pp.72-73, 2013.3
- 15) 藤井隆史, 細谷多慶, 杉田篤彦, 綾野克紀: 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, コンクリート

工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.637-642, 2015.6

## 謝 辞

本論文は、著者が岡山大学大学院環境生命科学研究科環境科学専攻博士後期課程の在学中に行った研究をとりまとめたものです。本研究を進めるにあたり、終始、懇切なる御指導と御教示をくださいました岡山大学教授の綾野克紀先生に、心から感謝の意を表します。また、実験の遂行および論文作成に多大なご助言をいただいた岡山大学准教授の藤井隆史先生に、心から感謝の意を表します。さらに、学内でお出会いするたびに、励ましの声をかけていただき、本論文の審査をしていただいた岡山大学教授の前野詩朗先生に、深く感謝の意を表します。同じく、本論文を審査していただいた岡山大学准教授の比江島慎二先生に、深く感謝いたします。

研究に際して、ランデス株式会社の製造施設において、2次製品を試作していただき、協力していただいたランデス株式会社の細谷多慶部長、松本匡司リーダーには、厚く御礼申し上げます。

実験の遂行に際し、ご尽力頂きました岡山大学空間デザイン学研究室の堀水紀さん、中山敦郎君、山本理紗さん、毎月、先生のスケジュールを送って頂いた三木敦子さん、および学生諸子に、深く感謝の意を表します。

そして、岡山大学大学院後期博士課程に入学する機会を与えてくださった、但南建設株式会社の衣川義弘社長、役員の方々、業務が忙しいのにも関わらず3年間、見守って頂いた但南建設株式会社の社員の皆様に、深くお礼申し上げます。

最後に、岡山大学大学院で学ぶことを応援してくれ、家のことを守ってくれた家内、息子たちに心から感謝します。

2018年 3月