

論文 塩化物イオンの長期浸せき浸透特性および見掛けの拡散係数の低減度予測

温品 達也*1・高橋 佑弥*2・石田 哲也*3

要旨：普通セメント，高炉スラグ微粉末，フライアッシュを用いたモルタルの 3%塩水浸せき試験を 5 年間実施し，高炉スラグ微粉末やフライアッシュの高い遮塩効果を確認した。さらに，拡散係数が経時的に減少することを鑑み，本実験結果を高精度に再現可能な解析手法により 100 年間の塩分浸透計算を実施した。その結果，30 年程度の浸せきによる拡散係数は，一般的な 3 か月浸せき試験で得られた拡散係数に対し，W/B50%において普通セメントでは 5 割程度，高炉スラグ微粉末では 3 割以下まで減少することが明らかとなった。

キーワード：塩害，塩化物イオン，拡散係数，浸せき，高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，モルタル

1. はじめに

塩害制御のために，塩化物イオンの浸透に関する研究が蓄積され，高炉スラグ微粉末やフライアッシュの高い遮塩効果や，塩化物イオン(以下，塩分と称す)の見掛けの拡散係数が経時的に低減する現象が確認されている。また，コンクリート構造物を建設する際の塩害照査においては，土木学会コンクリート標準示方書の設計編などで照査式が示され，広く活用されている。この照査式の拡散係数は，多くの塩水浸せき試験の結果などにに基づき提案されている。一般的に実施される 3 か月～1 年程度の塩水浸せきから得た拡散係数を照査に用いることは，前述した拡散係数の経時的な低減現象を鑑みた場合，過度に安全側の評価であることも考えられる。本研究では，塩分浸透予測技術の高度化のため，普通セメント，高炉スラグ微粉末，フライアッシュを使用した場合の長期の塩水浸せき条件において，塩分の見掛けの拡散係数を実験的に取得する。そして，実験の現象を高精度に再現可能な解析モデルによって，100 年間の塩分浸透計算を行うことで，長期的な拡散係数の低減度を明らかにする。以上より，長寿命化が望まれるコンクリート構造物の塩害に対する照査精度の向上に資することを目的とした。

2. 塩水浸せき実験

本章では，水結合材比や結合材種類を要因として作製したモルタル試験体を長期間塩水に浸せきし，塩分浸透性状や塩分の見掛けの拡散係数を検証した。

2.1 実験条件

(1) 材料・配合

表-1 に示した材料により，表-2 の配合のモルタル試験体を作製した。表-2 中の SP/B は，高性能 AE 減水

剤の添加量(結合材質量%)を示している。結合材は OPC[普通ポルトランドセメント]:100%(N シリーズ)，OPC:60%+BFS[高炉スラグ微粉末]:40%(BB シリーズ)，OPC:85%+FA[フライアッシュ JIS II 種]:15%(FB シリーズ)の 3 種類とした。N・BB シリーズは W/B を 50・40・30・20%とし，OPC-1 および砕砂-1 を使用した。FB シリーズは W/B を 55・40・30%とし，OPC-2 および砕砂-2 を使用した。全ての配合は，単位体積中のセメントペースト体積を一定とするために，細骨材の質量を一定とした。これ以降の実験ケースの呼称は，結合材種類と W/B の組合せによる略記とし，例えば普通セメントの W/C50%では「N50」とする。

(2) 試験体の作製および塩水浸せき方法

試験体は，鋼製型枠を用いた 4×4×16cm の角柱モルタルとし，打込み 1 日後に型枠を取り外して材齢 28 日まで水中養生を行った。その後，1 端面以外の 5 面をエポキシ樹脂で被覆し，3%の NaCl 水溶液中に垂直に設置して，下面から塩分を鉛直上向きに浸透させた。所定の期間の浸せき完了後，エポキシ樹脂を除去し試験体を 1～3mm ピッチで研削，深度 35mm 以降は 10mm 毎に乾式カットし，粉体を順次採取した後に，電位差滴定装置を用いて JCI-SC5 に準拠し全塩分量を測定した。

2.2 実験結果と考察

ここでは，実験で得た深さ方向における塩分浸透量の結果より，結合材比，セメント種類，塩水浸せき期間を要因とした塩分浸透性状や塩分の見掛けの拡散係数について述べる。

(1) 普通セメントの W/C および浸せき期間の要因比較

図-1 に普通セメントを使用したモルタル試験体における，W/C50・40・30・20%，浸せき期間 3 か月・1・2・

*1 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 助教 修士(工学) (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 講師 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

5年(図中では3M・1・2・5Yと記す),それぞれの深さ方向の全塩分量を示す。W/C50%において,塩水5年浸せきによる塩分の浸透深さは6cmとなった。水セメント比が小さいほど,塩分浸透深さは小さく,塩水5年浸せきでは,W/C40%で4cm,30%で3.5cm,20%で1.5cmとなった。

W/C50%では,塩水浸せき期間の経過に伴い塩分の浸透量や浸透深さが大きくなり,3か月浸せきで2cm程度であった塩分浸透深さは,5年浸せきで6cmまで増大した。これに対し,水セメント比が小さくなると,浸せき3か月から5年にわたる塩分浸透深さの増加度は小さくなる傾向にあり,特にW/C20%では塩分浸透深さが浸せき期間の進行に伴いほとんど増加していない。

5年浸せきでは,全ての水セメント比において,表面より深度5mm程度における塩分量をピークに,表面側に向かって塩分量が減少する傾向が認められた。小柳らにより,高炉スラグ微粉末やフライアッシュの塩水浸せきが1年程度の場合では,表面から2mm程度をピークに表面側の塩分量が減少する結果が報告されている。この研究では,浸せきに用いた塩水の初期pHが7.9であったのに対し,1年後の溶液pHが9.2まで増大していたことから,表面部の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶脱により細孔溶液中のpHが低下して,フリーデル氏塩の分解により固定塩分量が減少したのと考えている。なお,小柳らの実験においては,30程度の塩水に対し,4cm角のモルタルバー数体の片方端部を部分的に浸せきしたのみであるため,pHの上昇量は僅かであるものの,塩水量に対し試験体の浸せき部体積は僅かであったことから $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶脱がpH上昇の主因と考えている。今回の実験では,既往の研究では溶脱現象が認められなかった普通セメントにおい

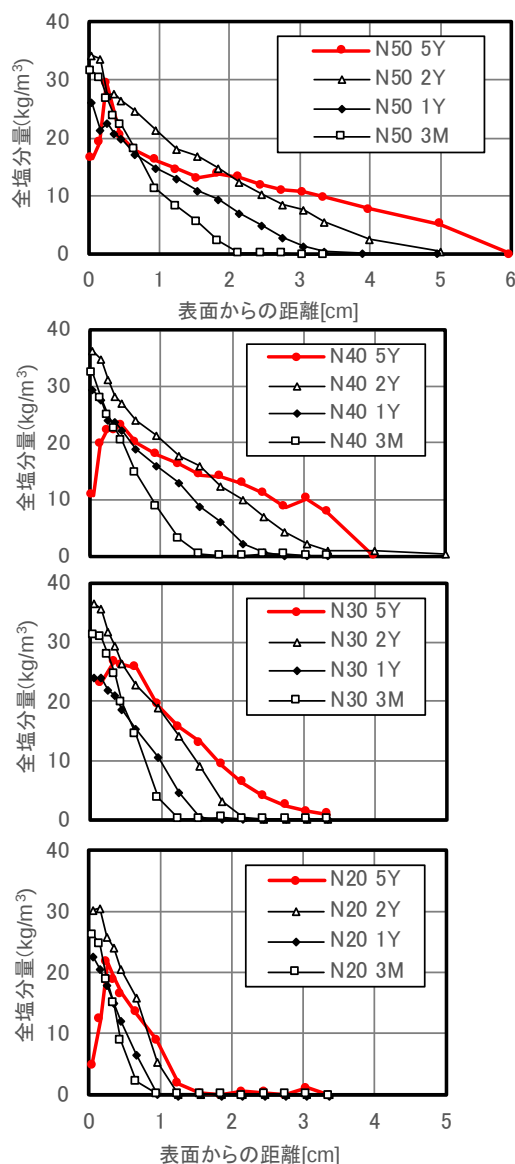


図-1 普通セメント試験体の浸せき結果
(モルタル, W/C=50~20%)

表-1 モルタルに使用した材料の物性

OPC-1	密度: 3.15g/cm ³ , 比表面積: 3400cm ² /g	OPC-2	密度: 3.13g/cm ³ , 比表面積: 3320cm ² /g
BFS	密度: 2.88g/cm ³ , 比表面積: 4430cm ² /g	FA	密度: 2.23g/cm ³ , 比表面積: 3940cm ² /g
砕砂-1	絶乾密度: 2.60g/cm ³ , 吸水率: 1.28%	砕砂-2	絶乾密度: 2.53g/cm ³ , 吸水率: 2.29%

表-2 モルタルの配合および浸せき条件

配合名	W/B (%)	単位体積重量(kg/m ³)					SP/B (%)	3%塩水の浸せき期間				
		W	C	BFS	FA	S		3か月	6か月	1年	2年	5年
N50	50	369	737	-	-	1000	0	○		○	○	○
N40	40	336	840	-	-		0	○		○	○	○
N30	30	293	976	-	-		3.0	○		○	○	○
N20	20	233	1165	-	-		3.5	○		○	○	○
BB50	50	363	436	290	-		0			○	○	○
BB40	40	330	495	330	-		0			○	○	○
BB30	30	287	574	383	-		0			○	○	○
BB20	20	227	682	455	-		3.0			○	○	○
FB55	55	367	567	-	100		0	○	○			○
FB40	40	321	683	-	120		0	○	○			○
FB30	30	278	790	-	139		0	○				○

ても、5年間の浸せきでは、溶脱現象により表層部の固定塩分量が減少したものと考える。

(2) 混合セメントのW/Bおよび浸せき期間の要因比較

図-2に高炉スラグ微粉末をB種相当(BB)およびフライアッシュをB種相当(FB)使用したモルタル試験体における、W/B50・40・30・20%で、浸せき期間はBBとFBで異なるものの3か月～5年とした試験体それぞれの深さ方向の全塩分量を示す。

BBは塩分固定化能力が高いため、深度0～2cm程度の全塩分量が高いものの、5年間におよぶ塩水浸せきにおいても高い遮塩効果を示した。塩分浸透深さで述べると、W/B50%で3.5cm、40%で2.5cm、30%で1.7cm、20%で1.5cm程度となった。水結合材比50%～30%の範囲で、BBの塩分浸透深さをNと比較すると半分程度であった。W/B20%での塩分浸透深さはNと同等であり、水結合材比が20%程度の領域では、高炉スラグ微粉末使用による塩分固定化能力向上よりも、水結合材比低減によるセメント量増加の空隙緻密化が支配的であると考える。

FBはNのW/B50～30%と比較すると、塩分浸透深さは大きく減少し、BBと同等となった。さらに全ての水結合材比においてBBと比較し、特に5年間塩水浸せき時の塩分の浸透量が顕著に低下した。近年の研究において例えばYuやBreugelら²⁾は、3年にわたりフライアッシュを用いたコンクリートを養生した結果、90日間の養生以降もポズラン反応による空隙の緻密化が見られ、3年間養生すれば粗大な空隙がほとんど無くなることを確認している。しかし、ポズラン反応の結果、消費したフライアッシュ粒子の位置に微小な独立空隙が生じることから、総空隙量は同条件の普通セメント単独のケースよりも10%程度多い上に、長期養生における総空隙率の低減度はどちらも同等であると述べている。これらを鑑みると、FBは長期間の塩水浸せきにより、長期的にポズラン反応が進行し、総空隙量が顕著に減少するよりむしろ、空隙の連結性が閉じられることによって、塩分の高い遮断効果を発揮しているものと考えられる。なお、BBは少なくとも1年経過後、FBでは3か月程度の塩水浸せきにより表面部分に溶脱が生じているものと考えられる。

(3) 塩分の見掛けの拡散係数

図-3に塩水5年浸せき時の各結合材およびW/Bごとの塩分の見掛けの拡散係数を示す。この拡散係数は、Fickの拡散方程式の解析解を用いて回帰分析により、見掛けの拡散係数および表面塩分量を算出することで得た。なお、拡散係数の算出は、溶脱現象により固定塩分量が低下している表層箇所を除いて行った。図より、すべての要因において水結合材比が小さくなれば、見掛けの拡散係数は低減することが分かる。さらに、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた場合は、水結合材比

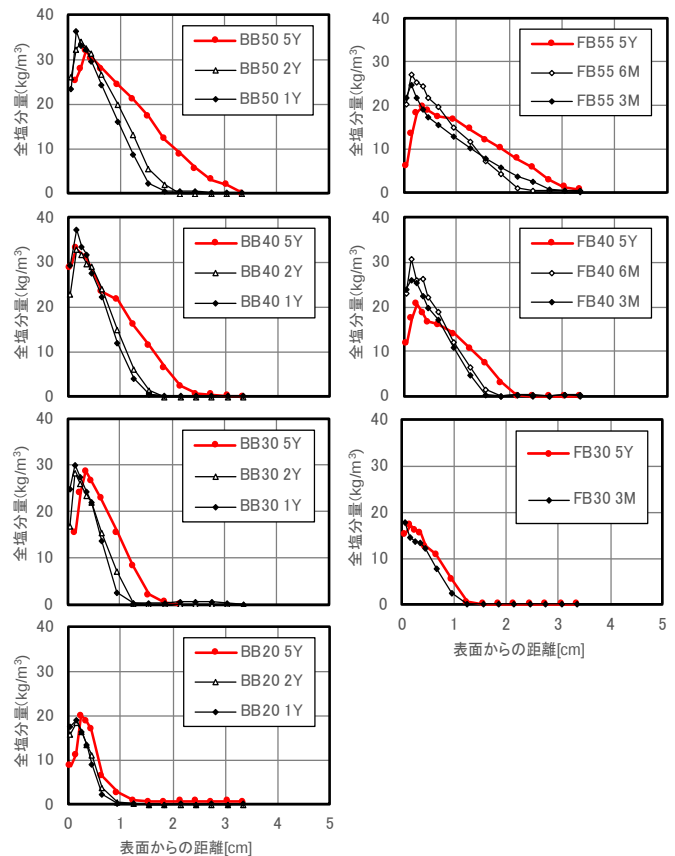


図-2 高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ試験体の浸せき結果(モルタル、W/B=55～20%)

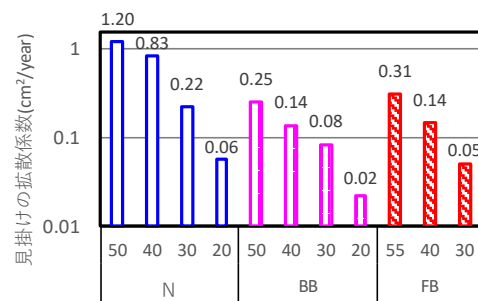


図-3 結合材種類における見掛けの拡散係数(5年浸せき)

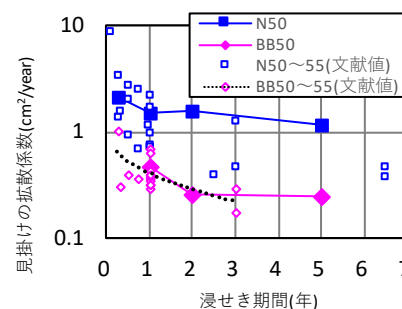


図-4 本研究におけるモルタルの拡散係数と既往研究におけるコンクリートの拡散係数の経時変化

が50%程度でも普通セメントのW/C30%程度の遮塩効果を得られることが分かる。

ここで、図-4に W/B50%の N・BB における浸せき期間ごとのモルタルの見掛けの拡散係数を示す。また、コンクリート標準示方書の照査式は、主にコンクリートや 10%塩水浸せきの実験結果に基づいている。そこで、それらに対し本実験で得た傾向における乖離の有無を検証するために、同図に既往研究³⁾⁻⁹⁾におけるコンクリートの塩水浸せき試験より得られた見掛けの拡散係数も追記した。なお、既往研究には塩水 3%および 10%の試験が混在しているものの、今回参照した範囲では塩分濃度の違いによる傾向差は認められなかった。

図-4に示す実験値では、浸せき期間の経過に伴い拡散係数は小さくなる傾向にあり、浸せき期間が 1 年までは、N および BB とともに既往研究の分布の中央程度の値であった。N50 の 1 年以降の拡散係数に着目すると、モルタルの実験値はコンクリートの文献値よりも拡散係数が大きい傾向にあった。これは、粗骨材の存在が塩分浸透を抑制したためと考える。また BB50 の場合、普通セメントと同様に拡散係数は減少傾向にあり、その経時的な低減度はより大きい結果となった。コンクリートの文献値とモルタルの実験値の経時的な差異はほとんどないと言える。これは、粗骨材の有無よりも、高炉スラグ特有の遮塩効果の影響が拡散係数の減少において支配的であるためと考えた。以上より本論においては、OPC と BB のモルタルおよびコンクリートの実験より得られた見掛けの拡散係数における経時的変化の傾向は顕著な差は無いと判断し、以降はモルタルの実験結果を基に長期的な見掛けの拡散係数の検証を加えた。

3. 解析検証

本章では、前述した長期的な塩水浸せき実験で確認した現象を解析的に再現するための検証を加える。さらに、このモデルを用いて 100 年までの塩分浸透解析を実施し、見掛けの拡散係数の経時的な低減度の予測を試みる。

3.1 解析モデルの概要

本研究の解析検証においては、Maekawa らが開発したマルチスケール熱力学連成解析システム(DuCOM)¹⁰⁾を用い、特に塩分モデルに着目した。本システムは、セメントの水和反応、空隙構造形成、水分保持・移動といった固体形成過程を基本とし、塩分移動、炭酸化、鉄筋腐食等の劣化現象に対するモデルが構築・実装されている。本モデルは、式(1)に示す保存則を基に、時間・空間における系内の温度や間隙水圧などの自由度に関して支配方程式を解く。

$$\frac{\partial S_i(\theta_i)}{\partial t} + \text{div} J_i(\theta_i, \nabla \theta_i) - Q_i(\theta_i) = 0 \quad (1)$$

ここに、 θ_i : 各自由度 i の物理量であり、第一項はポテン

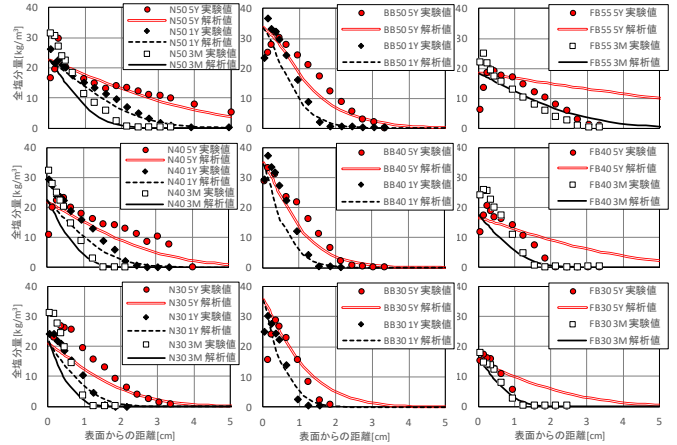


図-5 塩分浸透量の実験値と解析値の比較

シャル、第二項は流束、第三項は生成・逸散を意味する。空隙水中を移動する自由塩化物の質量保存則は式(2)となる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi S C_{cl}) + \text{div} J_{cl} - Q_{cl} = 0 \quad (2)$$

ここに、 ϕ : 空隙率、 S : 空隙の飽和度、 C_{cl} : 空隙中の自由塩化物濃度(mol/l)、 J_{cl} : 自由塩化物の流束(mol/m²・s)、 Q_{cl} : 塩化物イオンの固定量である。本研究において、飽和度 S は 1.0 として計算した。そして、自由塩化物の流束は拡散と移流の両者を考慮し式(3)としている。

$$J_{cl} = -(W_{cl} \cdot \delta \cdot D_{cl}) \nabla C_{cl} + W_{cl} \cdot \mathbf{u} \cdot C_{cl} \quad (3)$$

ここに、 J_{cl} : 自由塩化物の流束ベクトル、 W_{cl} : 塩分移動が可能な空隙水量(m³/m³)、 δ : 空隙の収れん度、 D_{cl} : 塩化物イオンの自己拡散係数(m²/s)、 $\mathbf{u}$: 空隙中の液状水流束ベクトル(m/s)、 C_{cl} : 塩化物イオン濃度(mol/l)である。 W_{cl} において、空隙内に存在する液状水 W のうち、10nm 以下の空隙径については空隙壁面からの電気的吸着や、空隙の連結性・形状などの影響により塩化物イオンが移動しない閾空隙径と仮定し、 W から 10nm 以下の空隙に存在する液状水 W_{thre} を差し引いたものを W_{cl} として塩化物イオンの流束を計算している¹¹⁾。収れん度 δ は、数 μm 以下のセメントペースト中の空隙では、ほぼ 0.01 一定値とした。 D_{cl} は式(4)の数値を用いた。

$$D_{cl} = R \cdot T \frac{\lambda_{cl}}{Z_{cl}^2 \cdot F^2} \quad (4)$$

ここに、 R : 気体定数(J/mol・K)、 T : 絶対温度(K)、 λ_{cl} : 自由塩化物のモル伝導率(=7.63×10⁻³Sm²/mol)、 Z_{cl} : イオンの価数(=1)、 F : ファラデー定数(=9.65×10⁴C/mol)である。

3.2 塩水浸せきにおける実験値と解析値の比較

図-5 に塩水浸せきにおける実験値および同条件での解析値の比較を示す。N は、塩水浸せき 3 か月・1 年・5 年について比較を行った結果、塩分浸透深さの差異は実験値と解析値において非常に僅かであった。浸透塩分量は若干の差異があるものの、実験値を解析により精度良

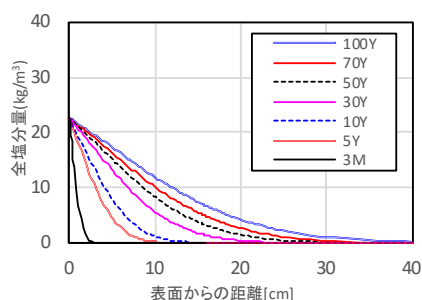


図-6 100年の塩分浸透解析結果(N50)

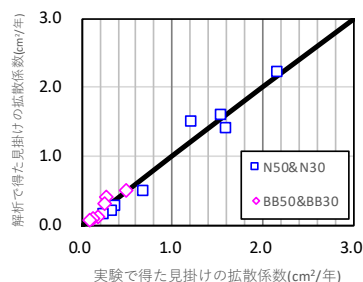


図-7 実験および解析に基づく見掛けの拡散係数の関係

く表現できたと考えた。なお、実験において確認した表面部分の溶脱現象については、本解析モデルで計算対象としていないため、表層の塩分量は実験値と解析値で差が生じている。

BB は、W/B30%の5年浸せき時の塩分浸透深さにおいて実験値と解析値で乖離が生じ、浸透塩分量はW/B40%と同等であった。これは解析結果において、W/B30%の浸透塩分量はセメント質量比ではW/B40%よりも有意に小さくなったものの、単位セメント量はW/B30%で 957kg/m^3 ・W/B40%で 825kg/m^3 であるため、それぞれの積である全塩分量はほとんど変わらない計算結果となった。W/B30%程度の長期浸せきにおいては、BBの水和率や空隙率の長期的な変化に対して、より高度化する余地があるものと考えられる。なお、その他の条件におけるBBの塩分浸透深さおよび浸透量の解析結果は高精度で実験値と合致した。一方FBは、3か月浸せき時の塩分浸透性状は良好に再現できているものの、5年浸せき時の塩分浸透深さは、実験値と解析値で大きく乖離した。これは、先に挙げたYuやBreugelら²⁾の研究で考察したように、FBの長期的な塩分浸透性状に空隙量の低減だけでなく、微細空隙の連結性などが影響したためと考えられる。本解析においては、セメントの鉱物組成比や混和材の置換率、比表面積などから、毛細管空隙、ゲル空隙、層間空隙量を計算し、塩化物イオンが通過可能な最小空隙径¹⁾を考慮した上で、空隙水中を移動する塩化物イオンの質量保存則を解くことによって、NやBBに見られた塩分浸透性状の高精度な再現が可能となっている。FBの長期塩分浸透予測においてはさらに、空隙構造の連続性・連結性や、C-S-Hの形状・形態や固体表面の電気特

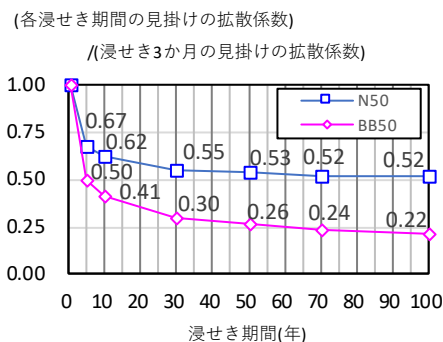


図-8 塩水浸せき期間と拡散係数(W/B=50%)

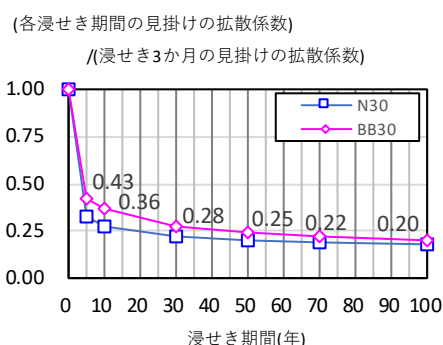


図-9 塩水浸せき期間と拡散係数(W/B=30%)

性の変化¹²⁾等を考慮する必要が考えられ、今後の課題としたい。

3.3 長期塩分浸透解析に基づく拡散係数の低減度予測

NおよびBBの5年間までの塩水浸せきにおいて、解析により塩分浸透深さや塩分浸透量を概ね再現できていることから、本解析モデルを用いて、モルタルの100年間の塩分浸透解析を実施した(図-6)。次に、解析により得た各深度における全塩分量を用い、塩分の見掛けの拡散係数を算出した。図-7の実験および解析値より算出した拡散係数の比較で示すように、両者の拡散係数は概ね良好に合致している。さらに、浸せき期間が100年までの拡散係数の経時変化を図-8および図-9に示す。図-8におけるW/B50%のNおよびBBでは、経時的に拡散係数が減少する傾向にあり、特に浸せき10年程度までの低減度が顕著である。N50については、3か月浸せきの拡散係数に対して、10年浸せきでは6割、30年以降の浸せきでは、5割程度となった。BB50については、3か月浸せきの拡散係数に対して、10年浸せきでは4割、30年以降の浸せきでは、3～2割程度となった。

図-9のW/B30%においてもN・BBともに、拡散係数は経時的に減少する傾向にあった。低減度合いはW/B30%の場合、W/B50%よりも大きい傾向にあり、N30については、3か月浸せきの拡散係数に対して、10年浸せきでは3割、30年以降は2割程度となった。BBについては、3か月浸せきの拡散係数に対して、10年浸せきでは4割、30年以降は3割程度となった。

本解析で計算している主な物理現象は、塩水の移流、塩分の拡散、水和生成物による空隙構造の変化である。したがって、本研究で示した N および BB の見掛けの拡散係数の低減は、飽和条件において移流から拡散へ塩分浸透メカニズムが変化すること、水和進展により空隙が緻密化することによって表現されていると言える。また、50 年程度経過後に拡散係数がほぼ一定となることは、塩水の移流が収束し、塩分の拡散が定常となり、空隙構造もほぼ変化していないためであると考えられる。

4. 結論

- (1) 普通セメント、混合セメント B 種に相当する高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いたモルタルの塩水 5 年浸せきにおける塩分浸透性状を実験的に検証し、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ使用による高い遮塩効果や、見掛けの拡散係数の経時的な減少を確認した。普通セメントでは 5 年程度、高炉スラグ微粉末は少なくとも 1 年経過後、フライアッシュでは 3 か月程度の塩水浸せきにより、表面部分に溶脱が生じることを確認した。
- (2) W/B50 から 30% の 5 年塩水浸せきにおいて、混合セメント B 種に相当する高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いたモルタルの塩分浸透深さは普通セメントの半分程度となった。混合セメントの W/B50% 程度の見掛けの拡散係数は、普通セメントの W/C=30% に相当した。W/B20% では混和材の有無によらず高い遮塩効果を示した。
- (3) マルチスケール熱力学連成解析システムにより、本実験のフライアッシュ使用時を除く、普通セメントや高炉スラグ微粉末における 3 か月～5 年間におよび飽和条件下での塩分浸透性状を高精度に再現できることを確認した。
- (4) 本解析システムにより、100 年までの塩分浸透計算を実施した結果、一般的な 3 か月浸せき試験で得られた拡散係数に対し、30 年程度の浸せきによる拡散係数は、W/B50% において普通セメントでは 5 割程度、高炉スラグ微粉末では 3 割程度まで減少し、W/B30% において普通セメントでは 2 割程度、高炉スラグ微粉末では 3 割程度まで減少した。解析モデルの構成を鑑みると、この拡散係数の低減は、塩水の移流および塩分の拡散ならびに水和生成物による空隙構造の変化を考慮することで表現できることが分かった。

参考文献

- 1) 小柳翔平，高橋佑弥，石田哲也：高炉スラグ微粉末及びフライアッシュを混和したセメント硬化体の

- 材料物性・塩分浸透性状の経時変化に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.109-114，2015
- 2) Zhuqing Yu, Jian Ma, Guang Ye, Klaas van Breugel, Xiaodong Shen : Effect of fly ash on the pore structure of cement paste under a curing period of 3 years, Construction and Building Materials Vol.144, pp.493-501, 2017
 - 3) 鈴木健太，杉山隆文，川北昌宏，志村和紀：フライアッシュコンクリートの塩分浸透性に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.849-854，2008
 - 4) 審良善和，山路徹，岩波光保，横田弘：高炉セメント B 種を用いた港湾コンクリートの塩化物イオン拡散係数および表面塩化物イオン濃度について，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1033-1038，2009
 - 5) 江口康平，武若耕司，山口明伸，久徳貢大：海洋環境下に 3 年間暴露した人工ポズランを用いたコンクリートの耐久性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.682-687，2012
 - 6) 中村英佑，古賀裕久，鈴木聡，渡辺博志：5 年間暴露したコンクリートのひび割れ部の塩分浸透性と鉄筋腐食，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.871-876，2013
 - 7) 鳥田慎也，佐川康貴，山時翔，濱田秀則：電気泳動法の実効拡散係数と浸漬法の見掛けの拡散係数との関係に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.859-863，2013
 - 8) 井口重信，松田芳範：フライアッシュを混和材に用いたコンクリートの遮塩効果に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.753-758，2016
 - 9) 藤原斉，堀水紀，細谷多慶，藤木明宏：高炉スラグがコンクリートの塩分浸透性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.757-762，2017
 - 10) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-scale modeling of structural concrete, Taylor and Francis, 2008.
 - 11) 高橋佑弥，石田哲也，岸利治：微小空隙中の塩化物イオン・液状水移動に着目したセメント硬化体の遮塩性能評価モデル，土木学会論文集 E2，Vol.70，No.1，pp.118-133，2014
 - 12) 石田哲也：RC 構造のマルチスケール統合解析システムの開発経緯と今後の展望，コンクリート工学，Vol.56，No.9，pp.809-816，2018