

論文 低水セメント比領域に着目したコンクリート中の塩分浸透および液状水移動に関する熱力学連成解析の高度化

高橋 佑弥*1・石田 哲也*2・岸 利治*3

要旨: 低 W/C の緻密なコンクリート材料を主対象として、既存の熱力学連成解析システムの適用性について把握した後に、塩分移動可能閾空隙半径のモデルと、空隙壁面と空隙水との間の摩擦抵抗のモデルを導入することで、低 W/C コンクリートにおける特徴的な高い塩分遮蔽特性を再現することを試みた。修正モデルを用いて、既往の塩水浸せき試験の再現解析を行った結果、新たなモデルの正当性を確認するとともに、塩分移動可能空隙の閾値と空隙壁面の摩擦抵抗の両者を考慮して初めて、長期での塩分浸透の停滞が再現可能となることを示した。

キーワード: 塩化物イオン, 液状水移動, 低水セメント比, インクボトル空隙, 壁面摩擦

1. はじめに

塩化物イオンの浸透に伴う鋼材腐食照査の枠組みが示方書¹⁾に実装され、実務設計における耐久性照査の適用が進んでいる。現行示方書の基本的な考え方は、Fick の拡散則に基づく塩分浸透予測を中心としているが、高品質で緻密なコンクリートの長期塩分浸透が、単純な拡散則に従うか否かについては、未だ定説をみない。例えば大城ら²⁾は、混和材を用いた塩分浸透抵抗性の高い構造物において、拡散則では説明の出来ない塩分浸透状況があることを示し、その構造物について、著者ら³⁾は、液状水浸潤深さが塩分浸透深さを支配している可能性があることを実験的に示している。緻密な空隙構造をもつコンクリートの塩分浸透予測を行う場合には、一般的な拡散・移流則に加えて、その緻密性に起因する新たなメカニズムを考慮する必要があると思われる。

熱力学連成解析システム DuCOM⁴⁾は、水和反応と空隙構造形成、水分移動と塩分移動・固定化を互いに連成させて計算し、コンクリート中の塩分浸透現象について材齢初期から長期までの挙動を精緻に追跡することを可能にしている。これまで、様々な環境条件や混和材の影響等について検証がなされているが、その多くは、40～55程の水セメント比(以下、W/C とする)で行われており、より緻密な低 W/C の領域については検証事例が少ないのが現状である。

そこで本研究では、低 W/C セメント材料において支配的となる、微小なサイズの空隙中で起こる物質移動現象に着目して既往モデルを改良し、低 W/C コンクリート材料に特徴的な高い塩分遮蔽特性を評価・再現することに取り組んだ。

2. 熱力学連成解析システムと塩分浸透解析

2.1 既往モデル⁴⁾の適用限界の把握

まず、既往モデル⁴⁾の適用限界とその要因について検討を行った。普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを、W/C30%から60%まで5%刻みで計7パターン再現して塩分浸透計算を行い、見かけの拡散係数の変化について検討した。解析は、スランプ8cm、空気量5%のもとでの標準的な配合を用い、養生および浸せき条件は、1日脱型後7日まで水中養生、28日まで気中養生後、3%NaCl水溶液に浸せきさせる条件とした。そして、材齢1年時点と15年時点での結果について、解析で得られた塩化物イオン分布に対して見かけの拡散係数を計算した。結果を、示方書式¹⁾とともに、図-1に示す。なお、示方書式の値は、様々な材齢や環境条件下で測定された塩化物イオン分布に対して計算された拡散係数の平均的な値を表しているものであるため、厳密な定量比

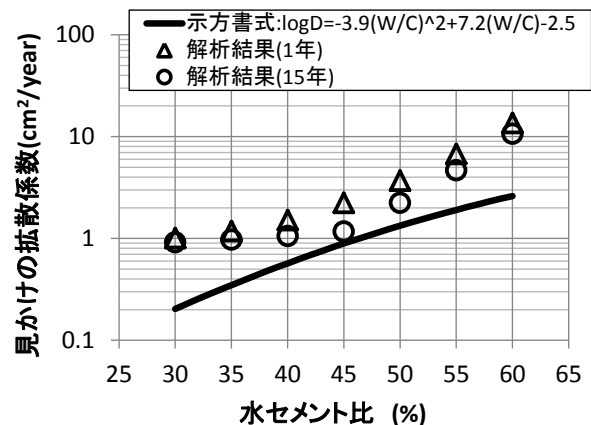


図-1 見かけの拡散係数の比較

*1 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 修士(工学) (学生会員)

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

*3 東京大学 生産技術研究所 教授 博士(工学) (正会員)

較検討の対象としてではなく、W/Cの変化に対する拡散係数の大まかな挙動を示すものとして参照している。見かけの拡散係数 D_a は表面塩化物イオン濃度 C_0 一定の境界条件下での Fick の拡散方程式の解析解(式(1))を用いて回帰分析を行い、算出した。

$$C(x,t) - C_i = (C_0 - C_i) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 $C(x,t)$ は深さ $x(\text{cm})$ 、時刻 $t(\text{年})$ における全塩化物イオン濃度 (kg/m^3) 、 C_i は初期含有全塩化物イオン濃度 (kg/m^3) 、 C_0 は表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3) 、 D_a は見かけの拡散係数 $(\text{cm}^2/\text{年})$ 、 $\operatorname{erf}(s)$ は誤差関数である。

図-1を見ると、これまでも検証実績の多い W/C40~55%では、示方書式と同程度の拡散係数の変化を解析で再現しているが、より低 W/C の 30%程度の範囲では、示方書式で見られるような顕著な拡散係数の減少を表現できていないことがわかる。より緻密なコンクリートの合理的な塩分浸透予測を達成するためにはこの点について、改良を行う必要があることがわかる。

2.2 既往モデル⁴⁾の概要

ここで、既往モデル⁴⁾について概観する。本研究で用いる熱力学連成解析では、毛細管空隙およびゲル空隙の空隙径分布を、それぞれ形状係数 $V(r)$ で定義している。

$$V(r) = 1 - \exp(-Br) \quad (2)$$

ここで、 r ：空隙半径 $[\text{m}]$ 、 B ：関数形状を決定するパラメータ $[1/\text{m}]$ であり、 $1/B$ が空隙ピーク径を表す。このような空隙径分布において、空隙形状を円筒状と仮定すると、ケルビン半径や吸着水層厚さ等を考慮して気液界面存在径 r_c $[\text{m}]$ が算定できる。そして r_c 以下の大きさの空隙にある空隙水の総量を表す飽和度 S_c は以下の式(3)であらわされる。

$$S_c = \int_0^{r_c} dV = 1 - \exp(-Br_c) \quad (3)$$

更に、モデルでは r_c 以下の大きさの空隙に連結する r_c よりも大きな、インクボトル状の空隙に閉じ込められた水についても考慮に入れており、それに相当する水量を表す飽和度 S_{ink} については、温度や乾湿の履歴に応じた時間依存挙動が考慮されている。従って、それらを総じた総量として飽和度 S_{tot} が定義される。

$$S_{tot} = S_c + S_{ink} \quad (4)$$

すると、単位ペースト体積当たりの空隙水量 W $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ は以下の式(5)であらわされることとなる。

$$W = \phi \cdot S_{tot} = \phi \cdot (S_c + S_{ink}) \quad (5)$$

ここで、 ϕ ：空隙率であり、式(6)で示されるように毛細

管空隙率 ϕ_{cp} とゲル空隙率 ϕ_{gl} の和で定義される。

$$\phi = \phi_{cp} + \phi_{gl} \quad (6)$$

以上より算定される空隙水量を用いて、塩分移動総量は以下の式(7)で表される。

$$J_{ion} = - \left(\frac{W}{\Omega} \cdot \delta \cdot D_{ion} \right) \cdot \nabla C_{ion} + W \cdot \mathbf{u} \cdot C_{ion} \quad (7)$$

ここで、 J_{ion} ：塩分の移動量 $[\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}]$ 、 Ω ：屈曲度、 δ ：収斂度、 C_{ion} ：空隙水中の塩分濃度 $[\text{mol}/\text{l}]$ 、 \mathbf{u} ：水流速度ベクトル $[\text{m}/\text{s}]$ である。

以上、塩分移動モデルの概要を示したが、式(3)において r_c 以下のすべての大きさの空隙を考慮しているということは、既往モデル⁴⁾では、コンクリート中のゲル空隙および毛細管空隙にある液状水の全てが、塩分の移動に寄与するという意味をしている。換言すると、どんなに小さな空隙中でも、塩分が浸透可能であるという仮定が設けられているのである。しかしながら、既往の研究^{5,6)}等から、壁面とイオンとの電氣的相互作用や、水和物生成の過程における構造的な要因等により、液状水で満たされているとしても、塩分が浸透し得ない小さな空隙が存在することが推察される。特に、低 W/C の緻密なコンクリートでは、相対的により小さな空隙の量が多い為、この影響が大きくなることも予想される。そこで、この点に着目し、次章にてモデルの修正を行うこととした。

3. 既往モデルの修正

3.1 塩分移動閾空隙半径の導入

(1)修正モデル式の導出

前章を踏まえ、本研究では、ある閾値となる空隙半径（以下、閾空隙半径とする） r_{thre} $[\text{m}]$ 以下の大きさの空隙には、たとえ水が存在していても、電氣的および構造的な要因により、塩分が移動できないのではないかと考えた。そこで、このような機構を考慮可能なように r_{thre} を用いて既往モデルの修正を行った。

空隙径分布 $dV/d\ln r$

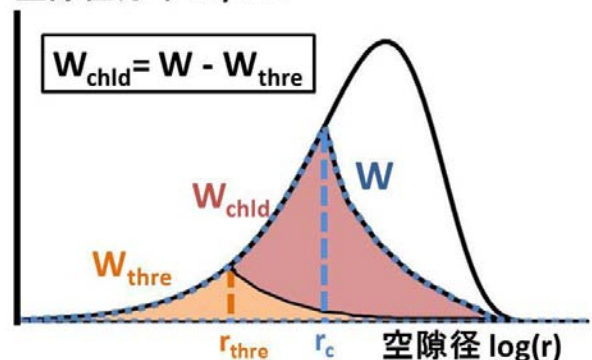


図-2 閾空隙半径と塩分移動に関する液状水量

以下、 r_{thre} を導入した場合の塩分移動量の導出について示す。空隙水全体量 W のうち、 r_{thre} の存在により、塩分の移動に寄与できない分の水量を $W_{thre}[\text{m}^3/\text{m}^3]$ とすると、 r_{thre} 以下の大きさの空隙量および、それらの空隙に連結するインクボトル空隙量から W_{thre} は W と同様に以下の式(8)で表される。

$$W_{thre} = \phi(S_{thre} + S_{thre_ink}) \quad (8)$$

そして、ここで、塩分移動が可能な空隙水量を W_{chld} [m^3/m^3] とすると、気液界面存在径 r_c と閾空隙半径 r_{thre} の大小関係より、 W_{chld} は以下式(9)の様に定式化することができる。それぞれの水量の関係のイメージについては図-2に示す。

$$\begin{cases} W_{chld} = W - W_{thre} & (r_c > r_{thre}) \\ W_{chld} = 0 & (r_c < r_{thre}) \end{cases} \quad (9)$$

気液界面存在径 r_c が閾空隙半径 r_{thre} よりも小さな場合には、存在する空隙水はすべて塩分移動に寄与できないため、塩分移動量は0となる。低 W/C の緻密なコンクリートについて考えると、空隙ピーク径が小さい為、 r_{thre} よりも小さな空隙の量が相対的に多く、 W_{chld} の値は著しく小さくなると考えられる。よって、 r_{thre} を考慮することにより、低 W/C になるにつれて急激に塩分浸透が停滞する現象が、再現可能になるのではないかと考えられる。

ここで、式(7)中のパラメータの一つに屈曲度 Ω がある。屈曲度 Ω は、式(10)の形で示されている。

$$\Omega = -1.5 \tanh\{8.0(\phi - 0.25)\} + 2.5 \quad (10)$$

本パラメータは、低 W/C 領域で空隙率が小さい場合に、空隙率の減少以上に塩分移動が低減することを表現するパラメータとして導入しているものである⁴⁾。しかし本研究で提案する閾空隙半径 r_{thre} を導入すれば、塩分移動に与える微細な空隙構造の影響が、物理的イメージに即してより直接的に考慮されることになる。換言すれば、屈曲度 Ω という巨視的パラメータによって簡便かつ等価に表現していた微細空隙中の塩分移動低下を、本研究では細孔構造モデルに立脚して直接評価することを試みたのである。

以上の検討より、本研究では、最終的に塩分移動量について式(11)に示すように定式化した。

$$J_{ion} = -(W_{chld} \cdot \delta \cdot D_{ion}) \cdot \nabla C_{ion} + W_{chld} \cdot \mathbf{u} \cdot C_{ion} \quad (11)$$

以下、本式を修正モデル式として用いて解析検討を行う。

(2) 閾半径パラメータ値の決定

本項では、閾空隙半径 r_{thre} の値について検討を行う。

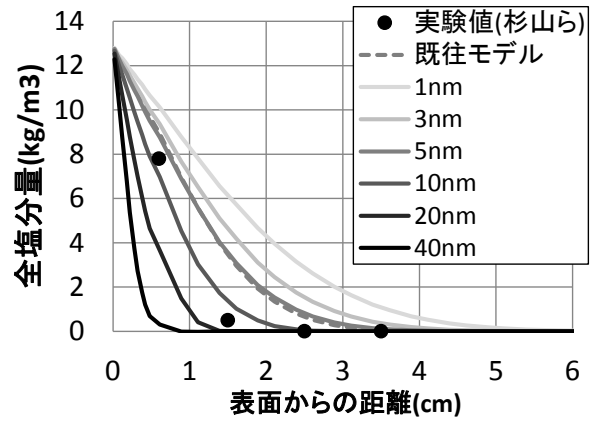


図-3 r_{thre} に関する感度解析結果

Yoshida ら⁵⁾は、水和反応に伴う空隙構造形成について、それぞれのセメント粒子から析出した外部生成層内の空隙への入り口を形成するような外部生成層間の構造（境界空隙）が、物質移動量と大きく関連することを指摘しており、その際の境界空隙の大きさは、10nm から 20nm 程度を想定している。また、後藤ら⁶⁾をはじめとして、セメント空隙壁面の電気二重層のイオン移動への影響について議論がされているが、塩化物イオンが、実際には複数の塩化物イオンおよび水分子が集合し、大きさ数 nm のクラスター状で存在していると考えられることと考え合わせると、塩化物イオン移動に対しては、数 nm 程度の閾空隙径が存在するのではないかと考えられる。

以上のような既往の検討のもと、 r_{thre} をパラメータとして塩分浸透についての感度解析を行い、実験結果との比較を行った。ここで行った解析および比較には、次章における検証解析のうち、杉山ら⁷⁾の $W/C30\%$ の実験条件と結果を用いた。（解析の詳細は 4.1 節に示す。）感度解析を行った結果を図-3 に示す。閾空隙半径は、既往の検討^{5,6)}を参考に 1nm から 40nm を設定した。図-3 から判断すると、 r_{thre} の値としては 10nm 程度が妥当な値であることが分かる。さらに 10nm という値は、既往の研究において示されている寸法と大きく矛盾しない。

以上の検討から、本研究では 10nm を閾空隙半径 r_{thre} として用いることとした。但し、このパラメータ値は、細孔壁面も電荷等の影響を受けると考えられるため、セメント種類や混和材の有無により変わりうる。今後検証解析を重ねることにより、必要に応じて修正を行い、よりその妥当性を高める必要がある。

また、閾空隙半径 r_{thre} は、ケルビン半径と比較することで、閾空隙半径が液状水で満たされるときの相対湿度（以下、RH）を算出することができる。 $r_{thre}=10\text{nm}$ に対応する RH は、吸着水層厚さを考慮した上で計算すると約 86% である。空隙内が乾燥し RH がこの値以下まで下がると、モデル計算上、塩分移動が可能な空隙水同士の連

結が無くなり塩分移動が生じないこととなる。本計算結果の妥当性については、実験や解析を通じた総合的な検証が今後望まれる。

3.2 壁面抵抗の考慮

液状水の移動量(移流)は、塩分移動量と直接的に関連しているため、塩分浸透予測精度の向上のためには、液状水移動についても、モデルの精緻化が必要である。

岡崎らの研究⁸⁾により、コンクリート内の微小空隙中の空隙水の移動について非ダルシー性を示すことが明らかになっており、その機構によって、緻密なコンクリート内で、液状水の浸透がある深さで停止し得るのではないかと考えられている。空隙水の非ダルシー性は、細孔溶液と細孔壁面間の摩擦抵抗力により発現し、その際の力のつり合いは、円管状を仮定した空隙において、次のような式(12)にて表現される。

$$\tau_{yield} = \frac{r_{lim}}{2} \cdot \nabla P \quad (12)$$

ここで、 τ_{yield} ：壁面抵抗に関するパラメータ定数[N/m²]、 r_{lim} ：限界空隙半径[m]、 P ：空隙水圧[N/m²]である。式(12)は壁面抵抗パラメータ τ_{yield} を決定した場合に、ある水圧勾配 ∇P 下で、液状水が移動できる限界空隙半径 r_{lim} が決定されることを示している。空隙の半径が、 r_{lim} 以下の場合には、水圧と摩擦抵抗が釣り合い、液状水が移動しないことを意味している。この摩擦抵抗の概念を既往モデルに導入することで、微小空隙中の液状水移動の挙動をより正確に再現することを試みた。

空隙中の水の流量 q は透水係数 K_l を用いて以下式(13)の様に一般的に表される。

$$q = -K_l \nabla P \quad (13)$$

そして透水係数 K_l は、本研究で用いる解析で、以下式(14)のように表されている⁴⁾。

$$K_l = \frac{\rho \phi^2}{50\eta} \left(\int_0^{r_c} r dV \right) \quad (14)$$

ここで、 ρ ：水の密度、 ϕ ：空隙率、 η ：水の粘性である。式(14)中では、空隙径分布を r_c まで積分することで、空隙中の不飽和状態を表現している。本研究では、この積分範囲の下端に式(12)より算定される r_{lim} を設け、改めて透水係数を定義することで、 r_{lim} 以下の大きさの空隙中の水は、圧力勾配 ∇P のもとでは移動しないことを考慮可能にした(式(15))。なお、 r_{lim} が r_c よりも大きな場合には、透水係数は0となると考えた。

$$\begin{cases} K_l = \frac{\rho \phi^2}{50\eta} \left(\int_{r_{lim}}^{r_c} r dV \right) & (r_c > r_{lim}) \\ K_l = 0 & (r_c < r_{lim}) \end{cases} \quad (15)$$

緻密なコンクリートでは、相対的に r_{lim} 以下の空隙の量が多い為、より K_l の値は小さくなると考えられる。また、不飽和なコンクリート構造体の表面に水が接触し水圧が作用した場合、一般に、構造物表面から深部に至るにつれて、水圧勾配 ∇P は小さくなると考えられ、それに伴って r_{lim} は増大する。ある程度の深さまで達すると r_{lim} が r_c を上回る事となる。すると、空隙水の移動が完全に止まり、岡崎ら⁸⁾の提案する液状水浸透の停滞が再現されるのではないかと考えられる。また、 τ_{yield} の値は、C/S等の空隙壁面の性質などにより変化すると考えられるが、本研究では、岡崎らの研究⁸⁾において示された4.0[N/m²]を採用することとした。今後、材料に応じた値を実験結果等から導出し、設定する必要がある。

4. 修正モデルによる検証解析

4.1 塩水浸せき試験の再現解析

前章にて修正した2つのモデルの妥当性を確認するために、既往の塩水浸せき試験について再現解析を行った。本節では、低W/Cを含み、且つ、異なるW/Cでの比較が可能な杉山ら⁷⁾と細川ら⁹⁾の塩水浸せき試験について、修正モデルを用いて再現解析を行った結果を示す。実験および解析の配合を表-1および表-2に、塩水浸せき試験条件を表-3に示す。

杉山ら⁷⁾の実験について、実験で得られた塩化物イオン分布と既往モデルおよび修正モデルを用いた解析による塩化物イオン分布を図-4に示す。また、それぞれの

表-1 杉山らの実験および解析配合

W/C (%)	単体量 (kg/m ³)				Air (%)
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
30	172	573	649	653	4.5
40	172	430	669	723	4.5
50	162	324	799	711	4.5
60	160	267	852	712	4.5

表-2 細川らの実験および解析配合

W/C (%)	単体量 (kg/m ³)				Air (%)
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
30	160	533	749	889	4.5
40	160	400	799	975	4.5
50	160	320	830	1011	4.5

表-3 塩水浸せき試験条件

	養生条件	NaCl 濃度	浸漬期間
杉山ら	1日脱型→13日水中→28日気中	3%	1年
細川ら	標準水中養生28日	3%	2年

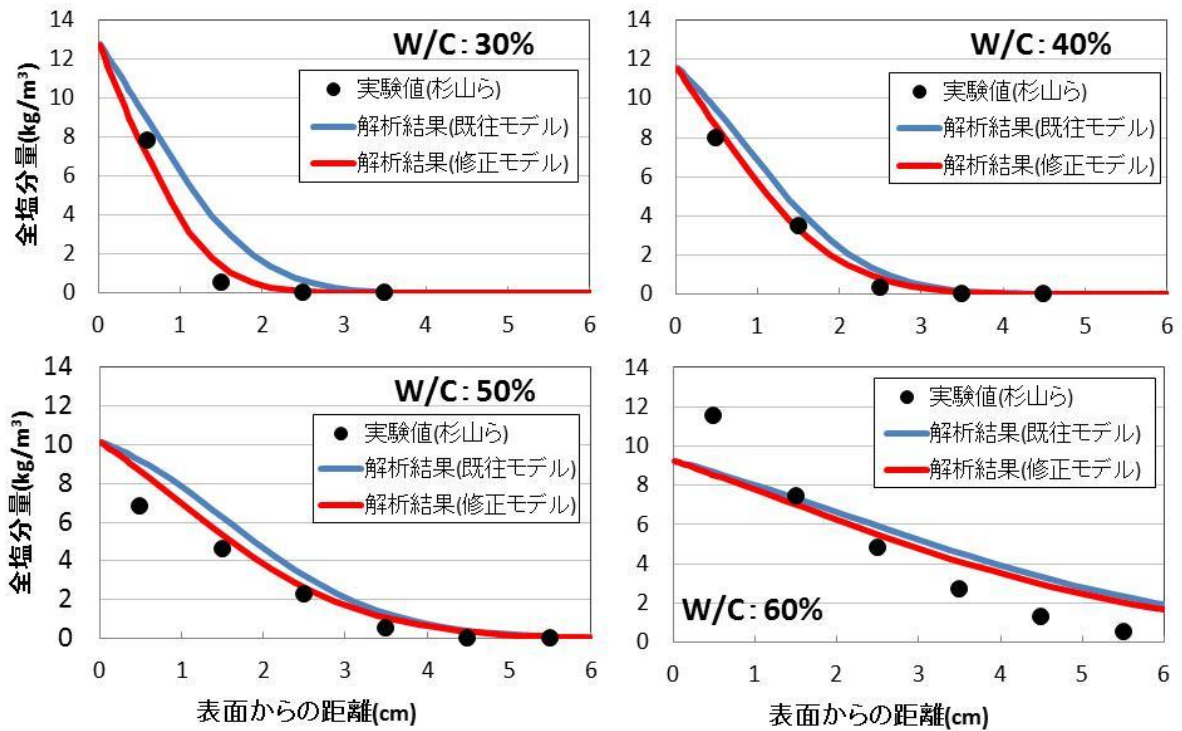


図-4 杉山ら⁷⁾の実験の塩化物イオン分布比較結果

実験について、見かけの拡散係数を式(1)を用いて計算した結果を、図-5 および図-6 に示す。図-4 の結果より、既往モデルでも概ね良好に実験を再現出来ていた W/C40~50%では、実験の再現性が高まり、本研究の主要対象である低 W/C の 30%では、特に塩分浸透深さが抑制され、解析精度が高まっていることがわかる。これは、低 W/C であるほど、空隙構造が緻密で、塩分移動や液状水移動に関する限界径である r_{thre} や r_{lim} よりも小さい空隙の割合が相対的に多く、本モデル修正の影響が大きくなるからであると考えられる。見かけの拡散係数についても、特に低 W/C で、より大きい精度向上が見られる。但し、実験結果で見られるような、より小さな拡散係数を再現するためには、検証解析を重ねることで、それぞれ決定したパラメータについて精査をする必要があると思われる。また、W/C60%について、塩分浸透深さに乖離が見られるが、この点については、他の試験結果も参照しながら、解析の妥当性について更なる検証を進める必要があると考えている。

4.2 長期の塩分浸透解析

前節の検討は 2 年以下の比較的短期の解析の検討であったが、構造物の寿命予測の為には、より長期の解析を行う必要がある。しかし、現在、検証可能な低 W/C かつ長期の実際の測定結果が乏しい為、ここでは、解析上でモデル修正の有無の影響について検討を行った。

ここでは、十分に大きな時間として浸せき材齢 64 年を設定し、前節で示した杉山ら⁷⁾の実験の W/C30%の場合の配合・養生条件を設定して、それぞれのモデル修正

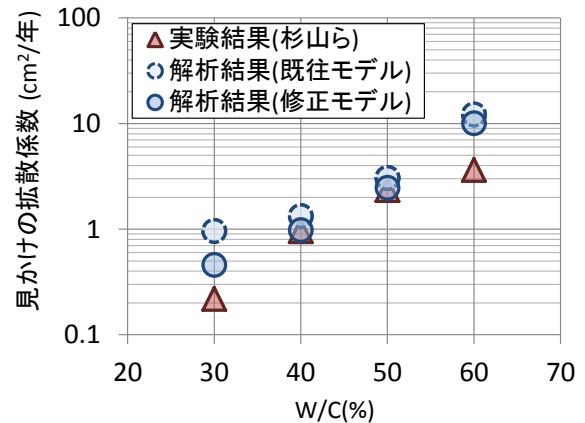


図-5 見かけの拡散係数比較結果(杉山ら⁷⁾の実験)

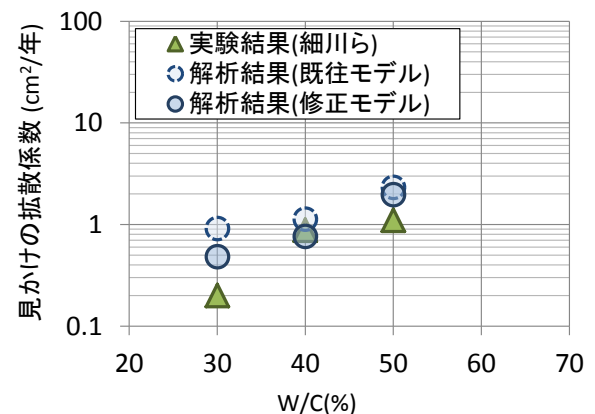


図-6 見かけの拡散係数比較結果(細川ら⁹⁾の実験)

の影響について比較を行った。なお、ここで、塩水浸せきにより表面に作用する水は、現時点では、RH の境界条件を 99.9%に設定することで表現している。比較結果

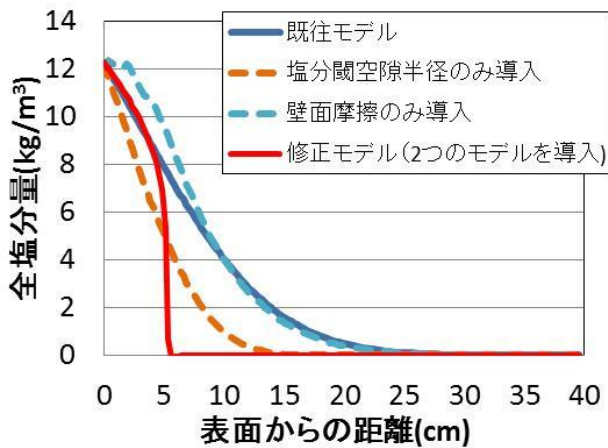


図-7 長期の浸透解析結果(杉山ら⁷⁾W/C30%)

を図-7に示す。図-7をみると、塩分移動可能閾空隙半径、壁面摩擦抵抗それぞれのモデルを片方だけ適用した場合には、十分に塩分浸透を抑制できてはいないが、両者を作用させて初めて、構造物表面での顕著な塩分浸透停滞を解析することが可能となっている。この点について以下のような解釈が考えられる。

塩分移動可能閾空隙半径のみを作用させた場合について考えると、浸せき材齢初期には、内部のRHの小さな領域では、塩分移動が可能な空隙水量 W_{chld} は0である。しかし、境界面から水が作用する条件下で、水圧勾配によって少しずつ水は浸透し続けるため、時間をかけて、徐々に内部のRHが上昇し含水量が増加する。十分に長い時間が経過後には、閾値を超える空隙中にも液状水が存在するようになり、コンクリートの深部まで塩分が浸透する結果となる。一方、壁面摩擦抵抗のみを作用させた場合には、ある程度の深さで透水係数 K_f が0となり、液状水の移動は止まるものの、塩分移動に関する閾空隙半径 r_{thre} を考慮していない為、微小空隙中の僅かな空隙水を媒体として、長期にわたって塩分が浸透し続ける結果となる。よって、この場合でも、長期で見ると塩分浸透が継続して止まらない解析結果になる。両者のモデルが機能して初めて、「あるRH以下では塩分が移動せず、且つ、水の浸透が止まるために、塩分浸透も抑制される」という、緻密なコンクリートに特徴的な高い塩分遮蔽特性を再現可能になるのではないかと考えられる。

今後は、このシナリオや結果の定量的な妥当性を確かめるため、長期材齢での試験結果および実構造物測定結果を採集し、検証を蓄積する必要があると考えている。

5. まとめ

本研究では、低W/C領域のコンクリートを対象とし、その塩分浸透解析の実現性を高めるために、既往熱力学モデルの修正を行った。まず既往のモデルを用いた解析

から、低W/C領域で修正の必要があることを示した。そして、その領域での解析精度向上を目的として、塩分移動可能閾空隙半径と、空隙壁面と空隙水との壁面摩擦項の2つのモデルを既往モデルに新たに導入した。その結果、短期解析、長期解析ともに低W/Cで塩分浸透が大きく抑制される現象を再現することを可能にし、塩分移動可能閾空隙半径による塩分移動が可能なRH下限の存在と、壁面摩擦による液状水浸透の停滞の相乗作用によって、塩分浸透の停滞が生じている可能性があることを示した。今後は、検証データを増やすことで、設定したパラメータの妥当性を確認する必要があると考えている。

参考文献

- 1) (社)土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書「設計編」、2007.3
- 2) 大城良信ら：海洋環境下における石炭灰を使用したRC構造物の施工報告、コンクリート工学年次論文集、Vol.23, No.1, pp.789-794, 2002
- 3) Takahashi, Y., Kishi, T., Yamada, Y.: 「Chloride ion ingress and its dependence on liquid water penetration in fly-ash concrete」, 『Proceedings of the 2nd International Conference on Durability of Concrete Structures ICDCS2010』, pp.285-292, Sapporo, 2010.11
- 4) Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T.: MULTI-SCALE MODELLING OF STRUCTURAL CONCRETE, Taylor and Francis, 2008
- 5) Yoshida, R., Kishi, T.: Proposal of new approach for determination of pore continuity and suitable intrusion pressure based on step-by-step mercury intrusion porosimetry test, 1st International conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Vol.2, pp.1455-1464, 2008
- 6) 後藤誠史, 茂啓二郎, 高木達雄, 大門正機：セメント硬化体の細孔径分布とイオンの拡散, セメント・コンクリート論文集, Vol.36, pp.49-52, 1982
- 7) 杉山隆文, 辻幸和：電気泳動試験による高強度フライアッシュ人工骨材(HFA骨材)コンクリートの塩分浸透評価, 材料, Vol.52, No.2, pp.198-203, 2003
- 8) 岡崎慎一郎, 浅本晋吾, 岸利治：分子シミュレーションによる微小空隙中の液状水挙動の検証, 土木学会論文集E, Vol.65, No.3, pp.311-321, 2009
- 9) 細川佳史ら：各種セメント系材料を用いた相組成・空隙構造が異なるコンクリートの各種環境条件下における塩化物イオン拡散係数, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1027-1032, 2009