

# 論文 コンクリート中への塩分浸透過程および蓄積量に関する 解析的検討

山田義智\*1・大城武\*2・樹田佳寛\*3

要旨：本研究は、飛来塩分量とコンクリート中への塩化物イオン浸透速度の関係を表す式を提案した。そして、この提案式を境界条件としてコンクリートの水セメント比、中性化状況、打設後の経過時間等を考慮する拡散解析モデルを提案した。この拡散解析モデルを用いた解析結果と暴露実験結果とを比較し、本拡散解析モデルの有効性を確認した。

キーワード：塩化物イオン浸透速度、蓄積塩化物イオン量、拡散方程式、F.E.M.

## 1. はじめに

海風により運ばれる塩化物イオン(飛来塩分)が、コンクリート中に浸透するメカニズムは未解明であり、塩化物イオンの拡散解析に際して重要となる境界条件の設定が難しい。また、コンクリートの水セメント比、中性化状況、打設後の経過時間等によっても塩化物イオンの拡散性状は異なり、コンクリート中の塩化物イオンの正確な分布量を推定するのは難しい問題である。

本研究は、飛来塩分によりコンクリート表面に到達する塩化物イオンのコンクリート中への浸透を表すモデルを提案し、飛来塩分量と塩化物イオン浸透速度の関係を定式化する。さらに、コンクリートの水セメント比、中性化状況、打設後の経過時間等を考慮する事が可能な拡散解析モデルを提案する。そして、本モデルを用いた解析結果と暴露実験結果との比較を行い、本拡散解析モデルの有効性を検討する。

## 2. コンクリート中への塩化物イオン浸透状況

暴露構造物は、沖縄県本部町備瀬と国頭村辺土名の海岸沿いに設置されている。両暴露構造物のコンクリート調合を表-1にまとめて示す。表-2に両暴露構造物の各方位の2年間の平均飛来塩分量を示す。表-3には10年目の備瀬暴露構造物の各方位に位置するコンクリートの中性化深さを示す。辺土名暴露構造物では、中性化深さが6年目で最大値2mm程度であり、中性化は進行していなかった。

図-1に両暴露構造物のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を経過年毎に示す。縦軸は全塩分濃度(Cl:コンクリート重量比)を示し、横軸はコンクリート表面を起点とする塩化物イオン測定位置を示す。図より、飛来塩分量に対応してコンクリート中の塩化物イオン濃度も上昇していることが分かる。表層部の塩化物イオン分布には特徴があり、中性化にともない塩化物イオン濃度のピークがより内部層へ移動する事を示唆している。また、表面から塩化物イオン濃度のピーク位置までの濃度分布は不規則となる。

表-1 暴露構造物のコンクリート調合

	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				AE (%)
				W	C	S	G	
備瀬	18	4	63	183	291	937	900	2.91
辺土名	18	4	62.5	184	295	877	929	2.95

表-2 飛来塩分量 単位:mg/cm<sup>2</sup>\*year

備瀬				辺土名	
北	東	南	西	北西	南東
28.58	11.45	6.98	7.22	92.75	2.58

表-3 中性化深さ 単位: mm

経過 年数	梁部材 (mm)				スラブ	
	北側	東側	南側	西側	上部	下部
10年	11.0	15.9	14.0	13.0	3.5	9.8

\*1 琉球大学助手 工学部環境建設工学科, 工修 (正会員)

\*2 琉球大学教授 工学部環境建設工学科, Ph.D. (正会員)

\*3 宇都宮大学教授 工学部建設学科, 工博 (正会員)

図-2は、単位時間に外部よりコンクリートに浸透する塩化物イオン量(塩化物イオン浸透速度)の積分値(蓄積塩化物イオン量)と暴露期間の関係を示す。縦軸は蓄積塩化物イオン量( $\phi 10 \times 12.5\text{cm}$ のコア中の量:全塩分)であり、横軸は暴露期間である。図-2より、飛来塩分量の少ない辺土名南東面側に比べ、備瀬南、北側の両面では飛来塩分量に対応して蓄積塩化物イオン量が多くなる。しかし、辺土名北西面側では、備瀬北面側に比べて飛来塩分が多いのにも関わらず蓄積塩化物イオン量は等しいか、若干低くなる結果が得られた。これより、コンクリート表面に到達した塩化物イオンの全てがコンクリート中に浸透するのではない事が分かる。また、暴露期間にともなう蓄積塩化物イオン量は増加の傾向を示すが、次第にその増加量が減少する。従って、塩化物イオン浸透速度 $I$ ( $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{year}$ )は経過時間 $t$ にともなって指数的に減少する関数で表すのが適当であり、この関係を式(1)に示す。式(2)は蓄積塩化物イオン量 $Q$ ( $\text{g}$ )を表す式である。ここで、 $I_0$ ( $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{year}$ )は初期塩化物イオン浸透速度、 $T$ ( $\text{year}$ )は暴露期間である。なお、ここで用いた実測データで、備瀬暴露実験に関しては既発表(文献[1])である。

$$I = I_0 e^{-bt} \quad (1)$$

$$Q = \int_0^T I_0 e^{-bt} dt = \frac{I_0}{b} (1 - e^{-bT}) \quad (2)$$

塩化物イオン浸透速度の減衰性を表す係数 $b$ は中性化の進行程度と相関がある。中性化速度が遅いと係数 $b$ 値は大きく、塩化物イオン浸透速度の経年にもなう減少が大きい。逆に、中性化速度が速いと係数 $b$ 値は小さく、塩化物イオン浸透速度の経年減少が小さくなる[1]。従って、同じ飛来塩分量であっても中性化速度の速い場合の方が蓄積塩化物イオン量は大きな値となる。

高い水セメント比のコンクリートが乾湿繰り返し環境下で中性化する場合、中性化しない場合より細孔量が多くなる[2]。また、コンクリートが中性化すると吸水量が多くなる[3]。よって、塩化物イオンの浸透が細孔量や吸水に依存している事を考えれば、上述の結果は妥当と言える。

### 3. 飛来塩分量と塩化物イオン浸透速度の関係

飛来塩分量 $q$ ( $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{year}$ )中の塩化物イオンは、コンクリート表面より細孔を介して浸透する。コンクリート内部に浸透する塩化物イオンは、コンクリート表面で細孔入り口に相当する面積に直接達したものとする。ここで、任意の飛来塩分量 $q$ がコンクリート表面に達したとき、塩化物イオンが浸透する状態となっている細孔入り口に相当する面積と、コンクリート単位表面積との割合を有効面積率 $n$ (%)とする。この有効面積率 $n$ の最大値は、コンクリート単位表面積において、全ての細孔入り口に相当する面積が占める割合であり、これを飽和面積率 $m$ (%)とする。ここで、細孔を円筒形と仮定すると、細孔入り口に相当する面積は、表層部の細孔量と比例関係になる。

コンクリート打設直後において、有効面積率 $n$ に、単位面積あたりの浸透速度 $H$ ( $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{year}$ )を乗じたものが初期塩化物イオン浸透速度 $I_0$ ( $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{year}$ )となり、次式で表せる。

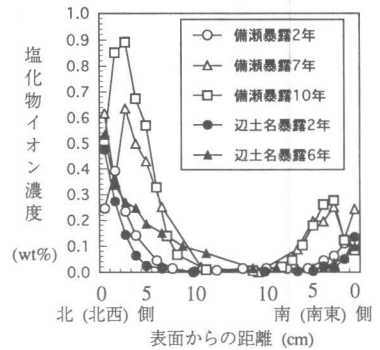


図-1 塩化物イオン分布

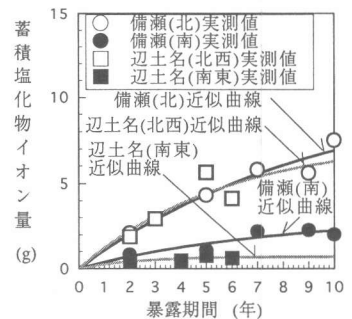


図-2 蓄積塩化物イオン量

$$I_0 = Hn \quad (3)$$

飛来塩分量の増加ともなう有効面積率 $n$ の増加率 $dn/dq$ は、まだ塩化物イオンが到達していない未有効面積率 $(m-n)$ に比例するものと考えて次式で表す。ここで、 $k$ は比例定数である。

$$\frac{dn}{dq} = k(m-n) \quad (4)$$

式(4)は変数分離形であり、条件 $n|_{q=0} = 0$ を考慮して解き、式(3)に代入すると次式が得られる。この式が初期塩化物イオン浸透速度 $I_0$ と飛来塩分量 $q$ との関係を示す。

$$I_0 = Hm(1 - e^{-kq}) \quad (5)$$

両暴露構造物より得られた蓄積塩化物イオン量を式(2)にて近似し、それより得られる初期塩化物イオン浸透速度 $I_0$ を対応する飛来塩分量毎に整理し、図-3にプロットする。このプロット点を式(5)で近似すると $Hm = 17.1$  (mg/cm<sup>2</sup>\*year)、 $k = -0.071$  (cm<sup>2</sup>\*year/mg)が得られ、その近似曲線を図-3中に実線にて示す。ここで、上式の $Hm$ 値は沖縄県における温度環境および水セメント比63%のコンクリートから得られた結果である。そこで、文献[5]の結果より、各水セメント比毎に表面から37mm深さまでの平均細孔量を計算し、水セメント比63%の細孔量割合が1.0となるように各水セメント比の平均細孔量の割合を求め、飽和面積率 $m$ の水セメント比による影響を考慮できるようにすると、任意の水セメント比における初期塩化物イオン浸透速度と飛来塩分量との関係が以下の式で表せる。

$$I_0 = \left(0.379\left(\frac{w}{c}\right) - 6.84\right) \left(1 - e^{-0.071q}\right) \quad (6)$$

水セメント比70%,40%時の初期塩化物イオン浸透速度と飛来塩分量関係を上式にて求め、図-3中に示す。これより、水セメント比が小さいと同じ飛来塩分量であっても初期塩化物イオン浸透速度は小さくなるのが分かる。なお、浸透速度 $H$ 、比例定数 $k$ は環境や調査等の影響を受けることが予想されるが、今回これらを同定するに足りうる実験データがなく、本研究では上式の値を固定して用いる。

塩化物イオン浸透速度 $I$ は、式(1)において初期塩化物イオン浸透速度 $I_0$ が材令ともなって指数的に減少するものとして表されている。ここで、式(1)を次のように変形する。

$$I = I_0 e^{-bt} = I_0 (1 - e^{-bt}) \quad (7)$$

文献[4]において、コンクリート表面濃度 $C_0$  (%)は、飛来塩分量 $q$ と時間 $t$ の関数として定式化され、浸漬実験および浸漬・乾燥繰り返し実験により、次式が成り立つことが確認されている。

$$C_0 = \frac{q}{\gamma} (1 - e^{-\beta t}) \quad (8)$$

ここで、式(8)の飛来塩分量 $q$ の何割りかが初期塩化物イオン浸透速度 $I_0$ であり、 $\gamma$ 、 $\beta$ 、 $b$ が実験係数であるので、式(5)、(7)、(8)より塩化物イオン浸透速度 $I$ は次式で表される。

$$I = Hm(1 - e^{-kq}) - \alpha C_0 \quad (9)$$

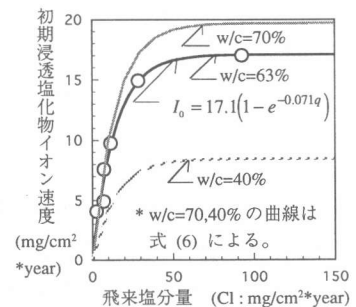


図-3 飛来塩分量と初期浸透塩化物イオン速度の関係

式 (9) の右辺第二項は経年による塩化物イオン浸透速度の減少効果を表す。ここで、 $\alpha$  (mg/cm<sup>2</sup>\*year) は洗い流し作用の程度を表す流失定数と称する。また、飽和面積率  $m$  値の材令にともなう変化も考えられるが、本モデルではこの値を一定とし、式 (9) の右辺第 2 項で  $m$  値の材令にともなう変化の影響も含めて評価する。

#### 4. 塩化物イオン拡散解析モデル

本拡散解析モデルは、境界条件を式 (9) の塩化物イオン浸透速度  $I$  を与えるノイマン型の条件とした。これにより、飛来塩分量とコンクリートに浸透する塩化物イオン量の関係が明確にされ、水セメント比の影響や経年による影響等を考慮することが可能になる。さらに、移動する濃度ピーク位置を考慮できるように、拡散係数を表層部と内部で使い分け、内部側での拡散係数は暴露期間とともに低下するモデルとした。これにより、塩化物イオンの濃度分布が精度良く表せる。

塩化物イオン濃度分布を表す非定常拡散方程式を式 (10) に示す。ここで、境界条件はコンクリート表面で塩化物イオン浸透速度  $I$  を与えるノイマン型の境界条件であり、他方の境界条件も境界面で流束 0 のノイマン型の境界条件を与えた。初期条件はコンクリート打設時に既に存在している塩化物イオン量  $C_i$  とした。ここで、 $t$  は経過時間、 $x$  はコンクリート表面からの距離である。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (10)$$

初期条件:  $c|_{t=0} = C_i$

境界条件:  $I|_{x=0} = Hm(1 - e^{-kq}) - \alpha C_0$ ,  $\frac{\partial c}{\partial x}|_{x=end} = 0$

ここで、拡散係数は、図-4 に示すように表面から中性化に従い移動するピーク濃度位置までは初期拡散係数  $D_0$  (cm<sup>2</sup>/year) の 20 倍とし、ピーク濃度位置以深では経過時間とともに指数的に減少することとした。従っ

て、拡散係数は位置  $x$  と時間  $t$  の関数となり、次式で表せる。また、拡散係数は位置  $x$  に関してステップ関数となり、式 (10) の拡散係数  $D$  は、定数項として扱える。

$$\left. \begin{aligned} D(x, t) &= 20D_0 & (x \leq x_p) \\ D(x, t) &= D_0 e^{-\beta t} & (x > x_p) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$x_p$  は塩化物イオン濃度のピーク位置を表し、暴露実験の実測結果より中性化深さの約 1.5 倍の深さとして定めている。この結果と岸谷の中性化式 [6] と組み合わせると以下のように表す。

$$\left. \begin{aligned} x_p &= 1.5x \sqrt{\frac{\frac{w/c}{100} - 0.25}{0.3(1.15 + 0.3 \frac{w/c}{100})}} & (w/c \geq 60) \\ x_p &= 1.5x \left\{ 0.3 \left( 4.6 \frac{w/c}{100} - 1.76 \right) \right\} & (w/c < 60) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここで、初期拡散係数  $D_0$  は、温度 25℃ における各水セメント比毎の値を文献 [6] より得て、以下の式で近似した。

$$D_0 = 0.0343e^{0.077w/c} \quad (13)$$

本解析では式 (10) の数値解析手法として、空間に対しては有限要素法、時間に関しては差分法

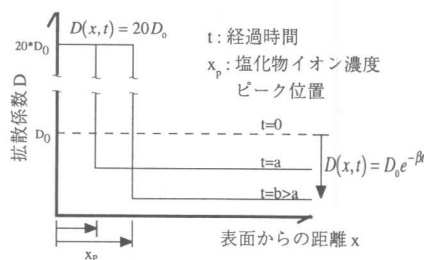


図-4 拡散係数の経年低減関数の概略

( $\theta$ 法)により離散化し、これを式(14)に示す。時間刻みは0.1年、空間刻みは0.25cmである。

$$\left(\theta[K] + \frac{1}{\Delta t}[C]\right)\{\phi(t + \Delta t)\} = \left(-1 - \theta[K] + \frac{1}{\Delta t}[C]\right)\{\phi(t)\} + \{F\} \quad (14)$$

ここで  $\{\phi\}$  は節点塩化物イオン濃度ベクトル、 $[K]$  は拡散項係数行列、 $[C]$  は時間項係数行列、 $\{F\}$  は境界条件による既知項で一般に流束ベクトルと呼ばれる。 $\theta$ の値は0.52とした。

本解析では、洗い流し作用を表す流失定数 $\alpha$ と拡散係数の経年低下を表す定数 $\beta$ が未知数となる。これらの値は、式(15)の応答関数 $R$ を最小とするように修正シンプレックス法にて求める[7]。ここで、 $f(x_i, t, \alpha, \beta)$ は塩化物イオン濃度分布の解析仮定値、 $g(x_i, t)$ は実測値である。

$$R = \sum_i^n [g(x_i, t) - f(x_i, t, \alpha, \beta)]^2 \quad (15)$$

ここで、 $x_i$ はコンクリート中での位置を表し、 $t$ はコンクリート打設後の経過時間を表す。

備瀬における各方位の10年間の暴露実験データを用いて同定したところ、流失定数の $\alpha$ 値は0.26~0.63が得られ、低減定数 $\beta$ は0.19~0.29の値が得られた。以後の解析に当たって、 $\alpha$ 、 $\beta$ 各々の係数値は中間値である $\alpha = 0.45$ 、 $\beta = 0.24$ の値を用いる。

## 5. 拡散解析モデルの検討

### 5.1 水セメント比による拡散性状の違い

水セメント比による拡散性状の違いの計算結果を図-5に示す。ここで、飛来塩分量は備瀬北側の値を用い、経過10年目を想定した。水セメント比が高い程、濃度のピーク位置が内部側に移動し、内部側においても塩化物イオン濃度が高い。水セメント比が低い場合は、塩化物イオンの内部側での濃度上昇割合は少ない。これは、既往の研究にて確認されている事実と一致する。

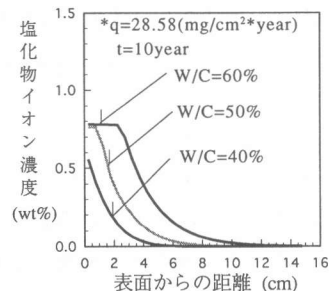


図-5 W/Cによる拡散性状比較

### 5.2 中性化による拡散性状の違い

飛来塩分環境を備瀬北側と同じとし、水セメント比を60%を用い、岸谷式に従って中性化が進行する場合と、中性化が進行しない場合について経過5年目、10年目の解析結果を図-6に示す。中性化が進行する場合、塩化物イオン濃度のピーク位置は経過時間とともによりコンクリート内部に移動し、中性化が進行しない場合にはピーク位置はコンクリート表面にあり、その濃度も高い。これは、図-1で示した備瀬、辺土名の実測結果と対応する。

図-7には、中性化が進行する場合としない場合の蓄積塩化物イオン量を示す。式(9)で分かるように、塩化物イオン浸透速度 $I$ は、表面濃度 $C_0$ が高くなると減少する。中性化が進行しない場合の表面濃度 $C_0$ は高く、塩化物イオン浸透速度 $I$ の減少量が大きくなり、蓄積塩化物イオン量が少なくなる。

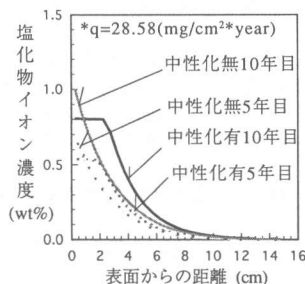


図-6 中性化による拡散性状比較

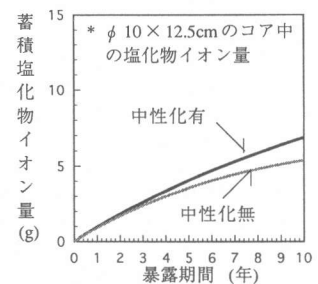


図-7 中性化による蓄積塩化物イオン量比較

### 5. 3 解析結果と実測結果の比較

図-8に経過10年目の備瀬北側及び南側、経過5年目の辺土名北西側の塩化物イオン濃度分布の実測値と解析値を示す。ここで、辺土名北西側ではほとんど中性化が見られないので $x_p=0$ とした。本解析値は、異なる飛来塩分環境下における実測結果を良く表す。図-9には、上述の部位における蓄積塩化物イオン量の実測値と解析値を示す。図-9より、飛来塩分量が最も多い辺土名北西側の蓄積塩化物イオン量( $\phi 10 \times 125\text{cm}$ のコア中)は、備瀬北側の値に比べると、5年目までは僅かに多いが、それ以降は次第に少なくなる。この理由は、飛来塩分量がある値から多くなっても塩化物イオン浸透速度は増えないことや、辺土名北西側では中性化が進行していないことが影響している為である。

図-10に水セメント比65,55,45%で457日経過したコンクリート中の塩化物イオン濃度分布の実測値と解析値を比較する。なお、暴露場所は国頭村辺野喜で、海岸から約350m程離れた位置に供試体は設置され、その場所の飛来塩分量は $q=0.59$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{year}$ )である。解析値は実験値をよく表しており、本拡散解析モデルは、水セメント比の違いを考慮できる。

### 6. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 飛来塩分量が少ない場合は、その増加量に対応して初期塩化物イオン浸透速度も増加するが、飛来塩分量がある値より多くなると初期塩化物イオン浸透速度はある値に収束する。
- (2) 蓄積塩化物イオン量は、飛来塩分量および中性化に影響を受け、その増分量は次第に減少する。
- (3) 飛来塩分量と塩化物イオン浸透速度の関係を示す提案式を境

界条件とし、中性化や水セメント比、経過年にもなう拡散係数の低下を考慮した拡散解析を行い、実測値と比較したところ、提案式および本拡散解析モデルの有効性が確認された。

**謝辞：**本研究の一部は、文部省科学研究費補助金 基盤研究C (研究代表者：大城武，課題番号07650667)にて実施いたしました。記して感謝の意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 谷川伸 他：厳しい塩害環境下での鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関する研究(アクリルゴム系防水塗膜の効果)，日本建築学会構造系論文集，No.487,pp.11-19,1996.9
- 2) 佐伯竜彦 他：中性化によるコンクリートの微細組織の変化，土木学会論文集，No.420,pp.33-42,1990.8
- 3) 森永繁 他：暑中コンクリートの養生方法に関する研究(その2)，日本建築学会研究報告中国・九州支部，No.36, pp.33-36,1996.3
- 4) 梶田佳寛 他：コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10, No.1, pp493-498,1988.6
- 5) 地濃茂雄 他：コンクリート表層部の劣化と補修に関する考察，コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム論文報告集，pp23-30,1996.10
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事
- 7) 山田義智 他：飛来塩分量とコンクリート中への塩分浸透過程に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.1, pp973-978,1995.6

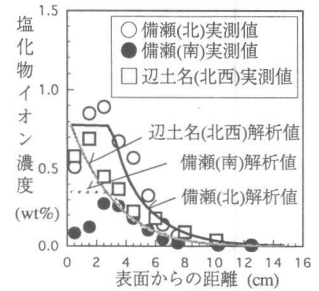


図-8 実験値と解析値の比較 (塩化物イオン分布)

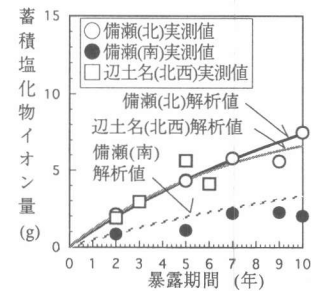


図-9 実験値と解析値の比較 (蓄積塩化物イオン量)

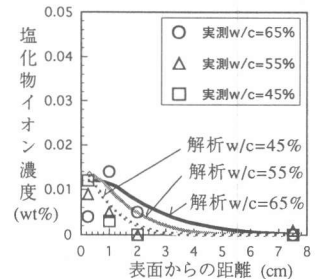


図-10 実験値と解析値の比較 (w/cによる影響)