

[1087] コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験

○正会員 梶田佳寛 (建設省建築研究所)
 正会員 友沢史紀 (東京大学工学部)
 正会員 安田正雪 (建設省建築研究所)
 原 謙治 (建設省建築研究所)

1. はじめに

コンクリート中への塩分浸透過程を解析的に取り扱う場合には拡散理論を適用することが多い。その時に問題となるのは拡散係数および境界条件である。既往の調査、研究によれば既存構造物の調査から得られる拡散係数と実験から得られる拡散係数の間には大きな差がある¹⁾ことが報告されている。実構造物と実験とでは、コンクリート中への塩分浸透方法が違うため、適用すべき境界条件も異なることが考えられる。本報告は、コンクリート中への塩分浸透方法の違いによって浸透速度がどのように変わるかを把握することを目的として、実験の状況に適合するような境界条件を設定し、拡散方程式の解を求め実験結果と比較検討したものである。

2. 実験概要

表1 実験計画

2.1 塩分浸透試験方法

塩分浸透試験の方法は、コンクリートが海水に接している場合と飛沫帯にある場合とを想定して、コンクリート供試体をNaCl溶液中へ浸漬して塩分を浸透させたもの(実験Ⅰ)と、NaCl溶液中への浸漬と乾燥とを繰り返して塩分を浸透させたもの(実験Ⅱ)の2種類とした。

要因	水 準	
	実験Ⅰ	実験Ⅱ
塩水浸透試験条件	塩水浸漬(20℃)	塩水浸漬(20℃)4日 乾燥(50℃)3日
水セメント比	45~65 %	50 , 60 %
浸漬水のNaCl濃度	1.5, 3, 6, 12 %	3 %
供試体寸法	15×15×53 cm	10×10×40 cm

実験計画の概要は表1に示すとおりである。

2.2 使用材料およびコンクリートの調合

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は鬼怒川産川砂(絶乾比重2.63, 吸水率2.29%)、粗骨材には青梅産碎石(絶乾比重2.59, 吸水率0.99%)を使用した。コンクリートの調合および性質を表2に示す。

表2 コンクリートの調合および性質

2.3 供試体の作製方法

供試体は、15×15×53cmおよび10×10×40cmの角柱とし、材令4週まで封緘養生して、その後材令6週まで恒温恒湿室に保存した。供試体は、上下および

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	
		セメント	水	細骨材	粗骨材				
Ⅰ	45	39	411	185	663	1030	18.0	3.3	430
	55	42	335	185	739	1017	17.5	3.3	313
	65	44	284	185	792	1006	18.0	3.9	250
Ⅱ	50	41	380	190	702	1004	18.0	3.9	352
	60	45	316	186	799	974	17.0	4.4	289

両端面をエポキシ樹脂を塗布してシールし、両側面から塩分を浸透させるようにした。

2.3 塩分量の測定方法

コンクリート用ドリル (φ10mm) を用いて、両側面の 5~10箇所程度の位置で、深さ方向に供試体の中央部まで 0.5~1.5cm (実験 I) および 1.0cm (実験 II) 毎に穿孔して粉末試料を 10g 程度採取した。採取した試料は、硝酸で溶解した後、チオシアン酸第二水銀吸光度法あるいは電位差滴定法で塩素イオンの定量を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリート中の塩分分布

実験 I で NaCl 濃度 3% 溶液に浸漬した場合および実験 II の結果を、コンクリートの深さ方向における塩素イオン量 (g/cm³) で表すと図 1, 図 2 のようになる。

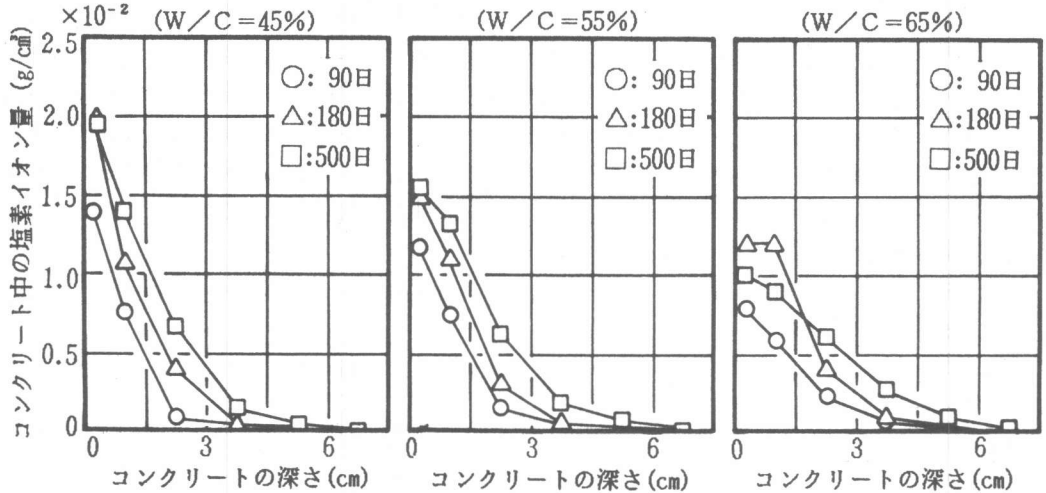


図1 塩分分布 (実験 I)

コンクリート中の塩素イオン量は、表面部分で多く内部に進むに従って少なくなっている。また、実験 I, II とともに比較的短時間に多くの塩素イオンが浸透したことが認められる。これは、NaCl 溶液に供試体を浸漬した際、NaCl 水溶液の吸収にともなって多くの塩分が浸透したためと考えられる。

表面部分の塩素イオン量は、実験 I と II とではほぼ同程度の値であるが、内部では差があり浸漬期間が長くなるにしたがって差が大きくなる傾向にある。実験 I では、塩水浸漬日数が 6 ヶ月になっても、コンクリート表面から 4~5 cm 以上内部では塩分の浸透は非常に少ない。これに対して実験 II では、塩水浸漬

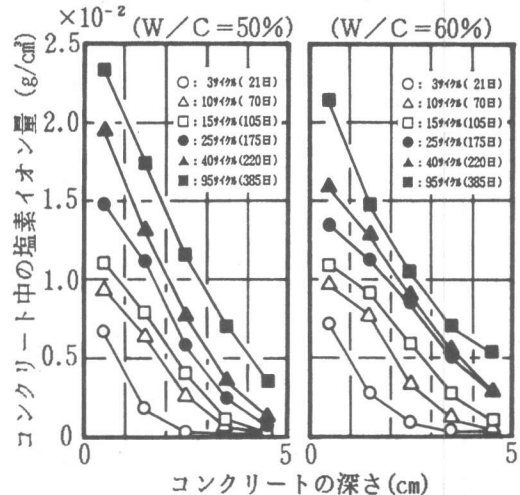


図2 塩分分布 (実験 II)

日数 + 乾燥日数が 140~190 日になると 4~5 cm の深さまで多量の塩分が浸透しているのが認められる。実験 II では NaCl 溶液への浸漬と乾燥とを繰り返しているために、NaCl 水溶液の吸収にと

もなう塩分の浸透の回数が多く、そのため実験 I に比べ多量の塩分が浸透したと考えられる。

3.2 塩分浸透量の経時変化

図 3 は、実験 I で NaCl 濃度 3% 水溶液に浸漬した場合および実験 II において、塩水浸漬日数または塩水浸漬日数 + 乾燥日数に対するコンクリートの表面部分 (0~1cm) の塩素イオン量の経時変化を示したものである。また、図 4 はコンクリート中へ浸透した全塩素イオン量の経時変化である。

図 3、図 4 によれば、実験 I の場合はコンクリートの表面部分 (0~1cm) の塩素イオン量および浸透した全塩素イオン量は試験日数の経過とともに増加する傾向にある。しかし、試験日数が 180 日を越えると増加の割合はゆるやかになり、一定の値に近づく傾向を示す。これに対して実験 II の場合は、増加の割合は急激で、180 日を越しても塩素イオン量は増加し続けている。これは、実験 I では供試体が飽水状態に達した後は、塩素イオン濃度の差によりゆっくり浸透するのに対して、実験 II では乾燥・浸漬の繰り返しにより、水分の移動とともに塩分が浸透し、継続的に塩分が供給されるためと考えられる。

次に水セメント比による塩分浸透状況の差をみると、実験 I、II ともにコンクリート表面部分では水セメント比が小さい方が塩素イオン量が高くなる傾向が認められる。一方、コンクリート内部については、図 1 および図 2 からも水セメント比が大きい方が塩素イオン量が高くなる傾向にあることがわかる。しかし、コンクリート中に浸透した全塩素イオン量は、図 4 から水セメント比による差はほとんど認められない。

3% NaCl 水溶液中の塩素イオン量が 1.82×10^{-2} g/cm³ であることおよび飽水状態のコンクリートの単位容積当たりの含水率が 15~20% であることから、3% NaCl 水溶液がそのままコンクリート中に吸収されると仮定した場合、コンクリート中の塩素イオン量は最大でも 2.73×10^{-3} ~ 3.64

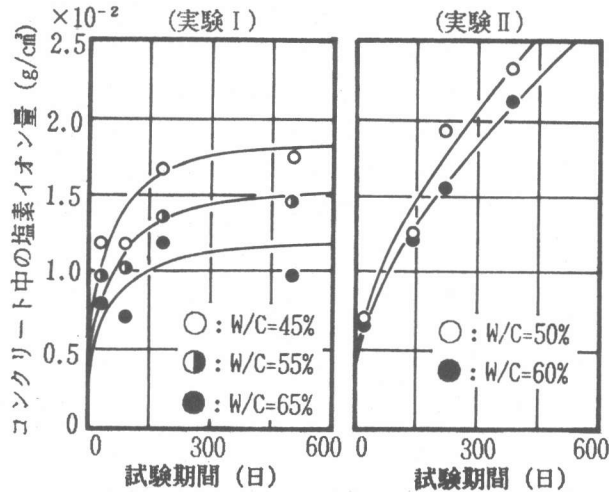


図 3 表面部分 (0~1cm) の塩分浸透量の経時変化

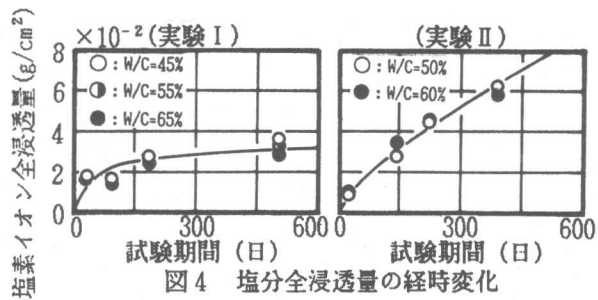


図 4 塩分全浸透量の経時変化

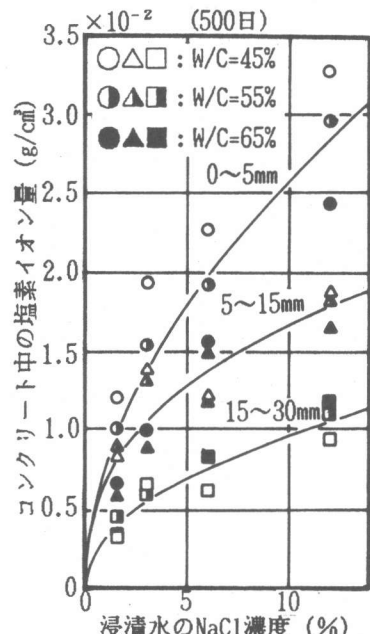


図 5 浸漬水の塩分濃度の影響

$\times 10^{-3}$ 程度であると予想される。しかし、実験結果によると、コンクリートの表面部分の塩素イオン量は $10 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ を越えており、コンクリートの含水率と浸漬水の塩素イオン濃度との積から得られる値の数倍となっている。この理由として、塩水浸漬中に、コンクリートの界面付近で浸漬水の塩素イオン濃度が濃縮されながら浸透していくことが考えられる。

3.3 浸漬水のNaCl濃度の影響

塩水浸漬日数 500日における浸漬水のNaCl濃度とコンクリートの各部分における塩素イオン量の関係(実験 I)を示すと図5のようになる。コンクリート中の塩素イオン量は、浸漬水のNaCl濃度に比例せず、ほぼ平方根に比例しているようである。

4. 拡散方程式と境界条件

塩化物が含まれていない半無限固体のコンクリートの表面に塩素イオンが衝突し、内部に浸透・拡散していく過程は、次のような一次元の拡散方程式で表される。

[基礎式]
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

[境界条件] $C = \phi(t) \quad (x = 0) \dots\dots\dots (2)$

$C = 0 \quad (x = \infty) \dots\dots\dots (3)$

[初期条件] $C = 0 \quad (t = 0) \dots\dots\dots (4)$

ここに C :コンクリート中の塩素イオン量 (g/cm^3) x :コンクリートの表面からの深さ (cm)
 D :拡散係数 (cm^2/day) t :経過時間 (day)

塩分浸透実験によれば、コンクリート中の塩素イオン量は試験日数の増加とともに蓄積されていき、コンクリートの表面部分においても塩素イオン量は時間の経過とともに増加している。条件(2)は、コンクリート表面の塩素イオン量が時間的に変化することを意味している。

また、コンクリート中への塩分浸透に際しては、コンクリートの界面で浸透水の塩分濃度が濃縮される傾向にある。従って、境界条件を考えるにあたってコンクリートの表面部分に、比較的自由に水分・塩素イオンの出入りが可能で、外部の条件によってのみその塩素イオン量が影響され、そこでは深さ方向に塩素イオン量の勾配がない厚さ d の薄い境界層を設定することとした²⁾。

境界層の容積を $V (\text{cm}^3)$ 、塩水に接している面積を $A (\text{cm}^2)$ とすると $V = A \cdot d$ となる。また、境界層の塩素イオン濃度を $C (\text{g/cm}^3)$ とすると、境界層に含まれる塩素イオン量は $C \cdot V (\text{g})$ となる。一方、単位時間に単位面積の境界層に衝突する塩素イオン量を $C_0 (\text{g/cm}^2/\text{day})$ とすると、単位時間に面積 A の境界層から衝突し、吸収・浸透される塩素イオン量は $a \cdot A \cdot C_0 (\text{g/day})$ となる(但し、 a は塩素イオンの吸収率とする)。また、境界層から溶液中に移動し失われる塩素イオン量は、境界層の塩素イオン濃度に比例するものとする、単位時間に境界層から失われる塩素イオン量は $k \cdot V \cdot C (\text{g/day})$ となる(但し、 k は流失速度係数 ($1/\text{day}$) である)。

境界層では次の式が成り立つ。

$$\frac{\partial(CV)}{\partial t} = a \cdot A \cdot C_0 - k \cdot V \cdot C \dots\dots\dots (5)$$

両辺を V でわると次式となる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{a}{d} \cdot C_0 - k \cdot C \dots\dots (6)$$

右辺の第1項は、境界層に吸収される塩素イオン量を示しており、境界層が薄いほど多く蓄積される傾向があることを示している。 $a/d = \alpha$ とおき(6)式を(2)式に代入すると(7)式が得られる。

$$\phi(t) = \frac{\alpha C_0}{k} (1 - e^{-kt}) \dots\dots\dots (7)$$

5. 拡散方程式の解

拡散方程式(1)および境界条件(2)~(4)を解くと次式のようなになる。

$$C = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \phi \left(t - \frac{x^2}{4Du^2} \right) \exp(-u^2) du \dots\dots\dots (8)$$

(8)式に(7)式を代入して整理すると以下のようなになる。

$$C = \frac{\alpha C_0}{k} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \exp(-u^2) du + e^{-kt} \int_0^{\frac{2\sqrt{Dt}}{x}} \frac{1}{u^2} \exp\left(-\frac{1}{u^2} + \frac{kx^2 u^2}{4D}\right) du \right) \right) \dots (9)$$

6. 実験結果への拡散方程式の適用

6.1 拡散係数, 境界条件の設定および計算結果

実験 I (NaCl 3%), 実験 II で, 各試験日数における表面部分の塩素イオン量の実測値の経時変化に(7)式をあてはめ k , $\alpha \cdot C_0$ および $\alpha \cdot C_0/k$ の値を算出すると表 3 のようになる。

表 3 k , $\alpha \cdot C_0$, $\alpha \cdot C_0/k$ および D

実験	W/C (%)	k ($\times 10^{-2}/\text{day}$)	$\alpha \cdot C_0$ ($\times 10^2 \text{g/cm}^3/\text{day}$)	$\frac{\alpha C_0}{k}$ ($\times 10^{-2} \text{g/cm}^3$)	D ($\times 10^2 \text{cm}^2/\text{day}$)
I	45	2.1	2.0	1.0	0.67
	55	2.4	1.9	0.8	1.00
	65	2.1	1.1	0.5	1.33
II	50	0.4	0.6	1.5	2.67
	60	0.5	0.5	1.0	3.33

また, これらの値を用いて塩分の浸透深さから求めた拡散係数 D の値もあわせて示した。

これらの値と(9)式を用いて計算した結果と実測結果との比較を図 6, 図 7 に示す。計算結果と実測結果はよくあっていることがわかる。

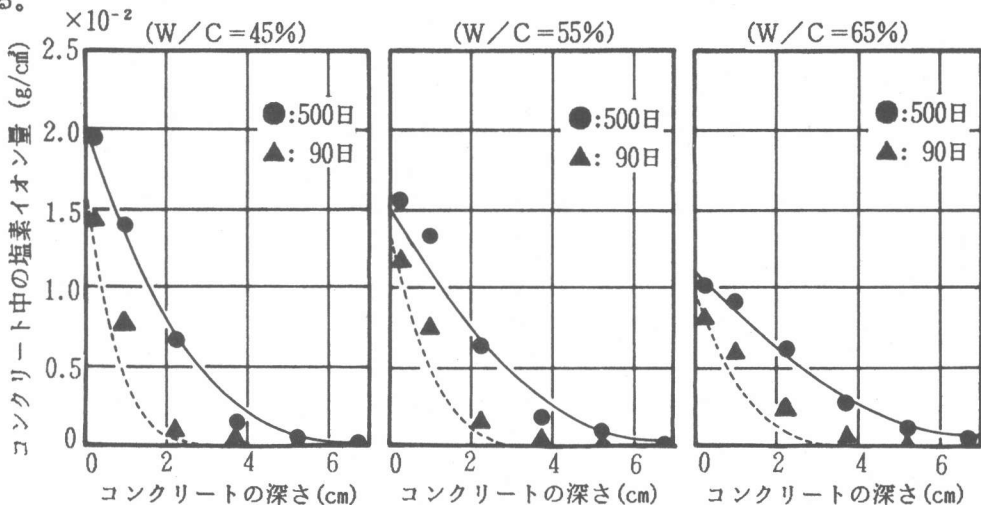


図 6 塩分浸透の計算例 (実験 I)

流失速度係数 k は, 実験 I で $2 \times 10^{-2} / \text{day}$ 程度, 実験 II で $0.5 \times 10^{-2} / \text{day}$ 程度の値となり,

実験Ⅰが実験Ⅱの4～5倍となっている。これは、実験Ⅰが常に塩水中に浸漬されているのに対して、実験Ⅱでは試験期間の約半分が乾燥条件となっていることにより、塩分の流失の時間が短いためと考えられる。

経過時間 t が十分長い場合のコンクリート表面部分の塩素イオン量は、 $\alpha \cdot C_0/k$ で計算されるが、この値は、実験Ⅰで $0.5 \text{ g/cm}^2 \sim 1.0 \text{ g/cm}^2$ 、実験Ⅱで $1.0 \text{ g/cm}^2 \sim 1.5 \text{ g/cm}^2$ となり、実験Ⅱの方が実験Ⅰより大きい。この結果は、実験結果とよくあっている。

さらに $\alpha \cdot C_0/k$ の値を水セメント比別に比較すると、水セメント比が大きくなるにしたがって $\alpha \cdot C_0/k$ は小さくなっており、実験結果の傾向とよくあっている。境界層

の厚さ d は、水セメント比が大きく、空隙の大きいコンクリートでは大きく、水セメント比が小さく緻密なコンクリートでは小さくなると考えれば妥当な結果と言えよう。

6.2 拡散係数

拡散係数の値は、実験Ⅰで $0.7 \text{ g/cm}^2/\text{day} \sim 1.3 \text{ g/cm}^2/\text{day}$ 、実験Ⅱで $2.7 \text{ g/cm}^2/\text{day} \sim 3.3 \text{ g/cm}^2/\text{day}$ となっており、実験Ⅱの方が実験Ⅰよりも大きい。これは、実験ⅡがNaCl水溶液浸漬・乾燥の繰り返しを行っているためNaCl溶液の吸収にともなう塩分浸透の回数が多く、実験Ⅱに比べて多量の塩素イオンが浸透するためと考えられる。

また、実験Ⅰ、実験Ⅱとも拡散係数は、水セメント比が大きくなるにしたがって大きくなる傾向にある。

7. まとめ

今回の実験の結果をまとめると以下のようなものである。

- (1) コンクリート中へ浸透する塩分量および拡散係数は、浸漬継続よりも浸漬・乾燥の繰り返しの方が大きい。
- (2) コンクリート表面部分の塩素イオン量は、浸漬継続、浸漬・乾燥繰り返しのいずれの試験条件においても、水セメント比が大きくなるにしたがって小さくなる傾向にあった。
- (3) 拡散係数の値は、浸漬継続、浸漬・乾燥繰り返しのいずれの試験条件においても、水セメント比が大きくなるにしたがって大きくなる傾向にあった。
- (4) コンクリート中への塩分の浸透を取り扱う上で、表面塩分濃度が時間によって変化するような境界条件を設定した拡散方程式は、塩分浸透の実際の状況を良くシミュレートできる。

〔参考文献〕

- 1) 越川他、コンクリートの塩分浸透速度に関する一考察、セメント技術年報40、昭和61年
- 2) 榊田他、鉄筋コンクリート造建物の塩害調査（その3）、日本建築学会大会梗概集、昭和61年

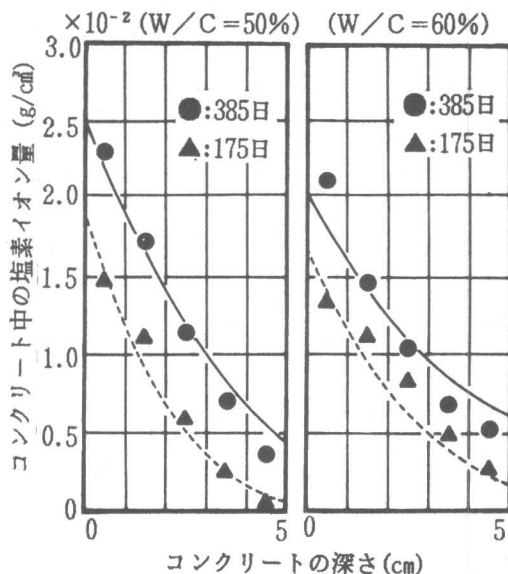


図7 塩分浸透の計算例（実験Ⅱ）