論文 コンクリート中への塩化物イオンの浸透過程に関する研究

ソーンウィーラ*1・山田 義智*2・大城 武*3・長嶺 健吾*4

要旨:本研究は、コンクリート表層部の塩化物イオン量や、外部環境からコンクリート中に 浸透し、蓄積する塩化物イオン量(蓄積塩化物イオン量)の経過時間変化を把握する事を目的と して、コンクリートにおける塩化物イオン収支関係モデルを提案した。このモデルより、コン クリート表層部や蓄積塩化物イオン量の経過時間変化を表す理論式を導いた。そして、この理 論式により乾湿繰返し塩化物イオン浸透促進試験の結果を整理し、提案した塩化物イオン収支 関係モデルと理論式の有効性を確認した。塩化物イオン収支関係モデルと理論式を確立する目 的は、塩化物イオン浸透解析の合理的な境界条件設定に資することである。

キーワード:塩化物イオン、境界条件、浸透過程

1. はじめに

沖縄県をはじめとして, 飛来塩分や海水飛沫 の影響を受ける全国の海岸付近においては, 鉄 筋コンクリート構造物に塩害と呼ばれる早期劣 化を引き起こす可能性が高く, コンクリート中 の塩化物イオン量を精度良く予測する塩化物イ オン浸透解析手法の開発が望まれている。

塩化物イオン浸透解析を行う際に,コンク リート表層部における塩化物イオン量や,外部 環境からコンクリート中に浸透・蓄積する塩化 物イオン量(蓄積塩化物イオン量)の経過時間変 化を把握することは,合理的な境界条件を設定 する上で重要である^{1),2)}。

そこで、本研究は、コンクリート表層部にお ける塩化物イオン量や、蓄積塩化物イオン量の 経過時間変化を把握する事を目的に、コンク リート表面とコンクリート内部での塩化物イオ ンの移動特性を考慮して、塩化物イオンの収支 関係を表すモデルを提案した。このモデルより、 コンクリート表層部の塩化物イオン量や、蓄積 塩化物イオン量の経過時間変化に関する理論式 を導出した。そして、乾湿繰返し塩化物イオン 浸透促進試験で得られた実験結果をこの理論式 で整理・検討する事により,提案する塩化物イ オン収支関係モデルおよび理論式の有効性を確 認した。

なお、本研究で用いた乾湿繰返し塩化物イオ ン浸透促進試験のデータは文献3)の一部を用い た。

2. 塩化物イオンの収支関係モデル

外部環境よりコンクリート中へ浸透する塩化 物イオン量(表面浸透量q_{en}(mg/cm²/day))と, コンクリートより外部環境へ流失する塩化物イ オン量(表面流失量q_{out}(mg/cm²/day))の関係 より,実質的にコンクリート中に浸透・蓄積さ れる塩化物イオン量(実質表面浸透量q_{tr}(mg/ cm²/day))が求まる。これを次式に示す。

$$q_{tr} = q_{en} - q_{out} \tag{1}$$

この実質表面浸透量q_{tr}を経過時間Tで積分し た値が,蓄積塩化物イオン量Q(mg/cm²)であ り,次式で表される。

$$Q = \int_0^T q_{tr} dt \tag{2}$$

式(1)で求まる実質表面浸透量 q_{tr} の値が, コ

*1(株)沖縄構造設計 設計部 博士(工学)(正会員)
*2 琉球大学 工学部環境建設工学科助教授 博士(工学)(正会員)
*3 沖縄職業能力開発大学校校長 Ph.D.(正会員)
*4 沖縄県土木建築部 南部土木事務所技術吏員 修士

ンクリート中への塩化物イオンの浸透解析を行 う際の境界条件となる。

外部環境からコンクリート中に浸透・蓄積する塩化物イオンの収支関係モデルを図-1に示し、その収支式を式(3)に示す。



$$\frac{dC_{sl}}{dt}V = \left\{q_{en} - \left(q_{in} + q_{out}\right)\right\}A \tag{3}$$

ここで、V は表層部体積(cm³), A は表面積 (cm²), C_{s1}は表層部の塩化物イオン量(mg/ cm³), tは時間, dC_{s1}/dtはC_{s1}の単位時間変化 量を各々表す。

内部移動量q_{in}は,表面浸透量q_{en}の一部分が 表層部より内部へ浸透するものであり,時間と ともに指数的に減少するものとして,式(4)で表 す。ここで,指数関数に乗じている係数β(1/ day)を減衰係数と称する。指数関数を乗じた理 由は,時間経過とともにコンクリート内部が乾 燥したり,水和反応の進行で細孔が緻密になる ことにより,塩化物イオンの浸透が経過時間の 進行に伴い低減される事を考慮するためである。

$$q_{in} = k_2 e^{-\beta t} q_{en} \tag{4}$$

k₂は流入係数と称し,1以下の正の値である。 ここで,流入係数k₂の値は,水分の移流が卓越 する乾湿繰り返し環境下の場合や,細孔量の多 い高水セメント比の場合等に大きくなると考え られる。なお,上述の条件の場合,β値は逆に 小さくなると考えられる。 表面流失量 q_{out} は、外部環境や表層部の塩化 物イオン量に依存すると考えた。この値は、表 層部の全塩化物イオン量(C_{sl} V)に流失係数 k_1 (1/day)を乗じ、表面積A(cm²)で除して求め た。ここで、 k_1 値(1/day)は経過時間に依存し ないものと仮定し、次式で表す。なお、コンク リート表面が洗い流される雨掛かりの多い環境 条件下においては、流失係数 k_1 値が大きくなる と考えられる。

$$q_{out} = \frac{k_1 C_{sl} V}{A} \tag{5}$$

式(3),式(4),式(5)より,次の微分方程式が導かれる。

$$\frac{dC_{sl}}{dt} + k_1 C_{sl} = q_l \left(1 - k_2 e^{-\beta t}\right) \tag{6}$$

ここで, $q_l = q_{en}/l$, lは表層部の厚さである。な お,以下において表層部の厚さl=1cm とし, $q_l = q_{en}$ とする。

上式(6)を,初期条件(t=0の時,C_{sl}=0)を考 慮して解くと,次の解を得る。

$$C_{sl} = \frac{q_{l}}{k_{1}} \left(1 - e^{-k_{1}t}\right) - \frac{k_{2}q_{l} \left(e^{-\beta t} - e^{-k_{1}t}\right)}{k_{1} - \beta}$$
(7)

この式(7)が,コンクリート表層部での塩化物 イオン量の経時変化を表す理論式である。

3. 乾湿繰返し塩化物イオン浸透促進試験

3.1 コンクリート配(調)合

塩化物イオンの浸透促進試験については既に 文献3)にて報告しており、ここでは、2章で示 した塩化物イオン浸透に関する理論式の検証の ために一部データを引用した。

データとして用いた試験体のコンクリート配 (調)合を表-1に示す。水セメント比は65%, 55%,45%とした。水セメント比65%および55% の配(調)合においては、フライアッシュを外割 にて、1立方メートル当たり50,75,100kg 混和 した試験体についても検討した。

3.2 乾湿繰返し塩化物イオン浸透促進試験方法 乾湿繰返し塩化物イオン浸透促進試験は,試

配(調)合	Slump	Air	W/B	W/C	S/a	W	質量 (kg/m³)					混和剤 (B×%)		[注]: W/B:水結合材比,W/C:水
番号	(cm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(kg/m°)	С	細骨 S1	·材* S2	G	FA	*1	*2	セメント比, S/a:細骨材率, C:セメント,G:粗骨材,
65-B			65.0		50.0			461	461	921	0	0.25	I	FA:フライアッシュ(南屯炭),
65-F50	10+	4.5 ± 1.5	55.1	65	47.9	179	275	427	427	929	50	0.25	-	$\mathbf{B} = (\mathbf{C} + \mathbf{F}\mathbf{A})$
65-F75	10 ± 25		51.1		43.8			384	384	986	75	0.375	-	*S1:海砂,S2:砕砂,混合比
65-F100			47.7		42.7			368	368	988	100	0.35	-	率S1:S2=1:1
55-B		4.5 ± 1.5	55.0	55	47.6	170 3	309	437	437	964	0	0.25	_	*1:AE減水剤 (リグニンスル
55-F50	12±		47.4		45.1			401	401	975	50	0.25	-	
55-F75	2.5		44.3		40.6			355	355	1040	75	0.375	-	*2: 高性能AE減水剤 (ホリカ
55-F100			41.6		39.6			341	341	1040	100	-	0.70	ルホン酸エーナル糸
45-B	12± 2.5	4.5 ± 1.5	45.0	45	45.0	171	380	400	400	977	0	0.25	_	

表-1 コンクリート配(調)合表

験体を4日間50℃の塩水槽に浸漬した後,乾燥 機で3日間50℃で強制乾燥させ,その後室温に て1日静置した。これを1サイクルとし,所定サ イクル後に直径10cmのコアを抜き取り,これ を1cm間隔でスライスして試験片とし,JCI-SC4に準じ,塩化物イオンの分析を行った。塩 化物イオン浸透面は,コンクリートを打設した 打設面と,その反対側の底面であるが,今回デー タとして用いたのは底面側である。その理由は, 底面側ではブリージングの影響もなく,鋼板型 枠に接しているために表面仕上げが一様と考え られたからである。

4. 収支関係モデルの検討

4.1 内部蓄積塩化物イオン量

表層部を通過し、より内部に流入する単位面 積当たりの塩化物イオン量の時間積分値を内部 蓄積塩化物イオン量Q'(g/cm²)と定義する。式 (4)より、内部蓄積塩化物イオン量Q'は次式で 表される。

$$Q' = \int_{0}^{t} q_{in} dt = \frac{k_2 q_{en}}{\beta} \left(1 - e^{-\beta t} \right)$$
(8)

図-2には、乾湿繰返し塩化物イオン浸透促進 試験で得た内部蓄積塩化物イオン量Q'の経過 時間変化を示す。ここで、図-2(a)は水セメント 比65%でフライアッシュ量を0~100kg/m³の 範囲で変化させた試験体の結果について示した。



図-2 内部蓄積塩化物イオン量の経過時間変化

図-2(b)は水セメント比55%でフライアッシュ 量を0~100kg/m³の範囲で変化させた試験体 とフライアッシュを混和しない水セメント比 45%のベースコンクリート試験体について示し た。図中には,式(8)の近似曲線も併せて示す。

配(調)合	k ₂ q _{en}	β	k ₁	k ₂	$q_l(=q_{en})$	λ
番号	(mg/cm ² /day)	(1/day)	(1/day)		(mg/cm ² /day)	
65-B	0.0924	0.000085	0.00826	0.542	0.1706	0.2874
65-F50	0.0539	0.001028	0.01128	0.353	0.1530	0.4616
65-F75	0.0266	0.001070	0.01702	0.146	0.1827	0.7350
65-F100	0.0141	0.001067	0.01276	0.109	0.1300	0.8066
55-B	0.0545	0.000084	0.00772	0.399	0.1366	0.4102
55-F50	0.0423	0.001071	0.01983	0.167	0.2524	0.5734
55-F75	0.0135	0.001064	0.00843	0.129	0.1048	0.7752
55-F100	0.0066	0.001071	0.00282	0.118	0.0561	0.8377
45-B	0.0486	0.002625	0.01977	0.260	0.1872	0.5779

表-2 諸係数の一覧

図より,内部蓄積塩化物イオン量Q'の経過時 間変化は,式(8)で適切に表せることが分かる。 実測値を式(8)で近似する事により得たk₂_{en}と βの値を**表-2**に示す。

ここで, k₂q_{en}の値は,表層部を通過し,内部 に浸透する塩化物イオンのフラックス量の初期 値を表している。この値は,水セメント比が小 さくなる程,また,フライアッシュ混和量が多 くなる程小さくなることが**表-2**より分かる。

また, βの値は,表層部を通過し,内部に浸 透する塩化物イオンのフラックス量の経過時間 に伴う減少程度を表す係数で,この値が小さい 程フラックス量が低下しない事を示している。 表-2より,βの値が小さい試験体は水セメント 比が比較的に大きく(水セメント比65%,55%), かつ,フライアッシュが混和されていない配 (調)合である。一方,βの値が比較的に大きな



結果となったのは水セメント比45%のベースコ ンクリートとフライアッシュを混和したコンク リートである。これらは、図-3に示すように、 経過時間に伴う強度の発現性も良く、その結果、 内部への塩化物イオンの浸透量が少なくなった ためであると考えられる。

図-4には、各配(調)合の拡散係数の経過時間変化³⁾を示す。図より、水セメント比65%、55%のベースコンクリートは他の配(調)合に比べて拡散係数も大きく、経過時間に伴う拡散係数の低



下もほとんど見られない。このことは、内部へ の塩化物イオン量の供給が大きく、時間ととも に低下しない事を表しており、β値が小さい事 と対応している。

4.2 表層部塩化物イオン量

図-5には、各配(調)合の表層部塩化物イオン 量 C_{sl}(g/cm³)の経過時間変化を示す。図中に は、式(7)の近似曲線も併せて示す。実測値を式 (7)で近似する事により得られた k₁, k₂の値を 表-2に示す。

図-5より, 表層部塩化物イオン量C_{sl}の経過時 間変化は, 式(7)で適切に表せることが分かる。

内部蓄積塩化物イオン量については,水セメ ント比およびフライアッシュ混和量による違い が明確に表れたが,表層部塩化物イオン量C。」の 経過時間変化においては、差異が明確でない。 この理由は、次の様に考えられる。高水セメン ト比の場合は、細孔量も多いため、表層1cmを 越えてより内部に浸透する量も多く、表層には 塩化物イオンがあまり蓄積しない。一方、低水 セメント比の場合やフライアッシュが混和され た場合は、密実であり、表層1cmより内部に浸 透する量も少なく、表層部のより表面側で塩化 物イオン量が多い。そのため、外部へ塩化物イ オンが流失し易くなり,表層には塩化物イオン はあまり多く蓄積されない。その結果、高水セ メント比の場合と低水セメント比(もしくはフ ライアッシュ混和)の場合で表層部の塩化物イ オン量がほぼ等しくなる。つまり、コンクリー ト表層部の塩化物イオン量の経過時間変化は, 表面からの流入・流出量と,表層より内部への 浸透量のバランスによって決まると考えられる。 なお, 表-2に示すk₂q_{en}とk₁の数値関係は, 多 少のばらつきはあるが上述の関係を表している。

一方,式(7)右辺第2項は,βおよびk₁が正値
 であることから経過時間に伴い減少し,その影響が次第に少なくなる。よって,表層部塩化物
 イオン量C_{s1}の収斂値は,q₁/k₁となる。この関係の一例を図-6に示す。この図は,配(調)合65 F100を対象に表-2の係数値を用いている。図



より,式(7)の右辺第2項は,右辺第1項が収斂 値に達する時間を遅らせる作用をしている事が 分かる。この時間遅延効果を係数入で表すと, 式(7)の表層部塩化物イオン量C_{sl}は式(9)で近似 可能であり,この式は,塩化物イオン浸透解析 においてコンクリート表層部で塩化物イオン量 を与える境界条件として用いる事ができる。

$$C_{sl} \simeq \frac{q_l}{k_1} \left(1 - e^{-\lambda k_1 t} \right) \tag{9}$$

ここで, λは, 1以下の正数であり, その値を **表-2**に示す。

4.3 蓄積塩化物イオン量について

コンクリート表面を介して内部に実質的に浸 透する実質表面浸透量 q_{tr}は,式(1)に式(5),式 (9)を考慮して以下のように近似される。

$$\begin{aligned} q_{tr} &= q_{en} - q_{out} \\ &\cong q_{en} - q_{en} \Big(1 - e^{-\lambda k_1 t} \Big) = q_{en} e^{-\lambda k_1 t} \ (10) \end{aligned}$$

式(10)より,実質表面浸透量 q_{tr}の初期値は, q_{en}であり,経過時間とともに減少し,最終的に は0に収束する。式(10)を式(2)に考慮すること により,T時間経過後の蓄積塩化物イオン量 Q の理論式は,次式で表される。

$$Q = \int_{0}^{T} q_{tr} dt = \frac{q_{en}}{b} \left(1 - e^{-bT} \right)$$
(11)

式(11)より蓄積塩化物イオン量Qは、コンク リート単位表面積を通過しコンクリート全体蓄 積される塩化物イオン量と定義される。

式(11)を表-2に示した各係数の値を用いて計 算した結果,図-7に示す様に,計算結果は各配 (調)合のコンクリート中の蓄積塩化物イオン量 の経過時間変化を表す事ができる。従って,コ ンクリート中の蓄積塩化物イオン量は,式(11) に示す上限値(q_{en}/b)を有する指数関数で表さ れ,その時間微分値の式(10)は,塩化物イオン 浸透解析においてコンクリート表面でフラック ス量を与える境界条件として用いる事ができる。

以上の考察より,本研究で提案した塩化物イ オンの収支関係を表すモデルおよび理論式は, 適切であると考えられる。

5. まとめ

本研究は、コンクリート中の塩化物イオンの 収支関係を表すモデル(塩化物イオン収支関係モ デル)を提案した。そして、このモデルを用いて コンクリート表層部の塩化物イオン量や蓄積塩 化物イオン量等の経過時間変化を表す理論式を 導いた。この理論式は、乾湿繰返し塩化物イオ



図-7 蓄積塩化物イオン量

ン浸透促進試験の結果を合理的に説明する事が できた。なお,これらの成果は,塩化物イオン 浸透解析の際の合理的な境界条件設定に資する 事を目的としている。

暴露試験においても、今回提案した塩化物イ オン収支関係モデルおよび理論式が有効である かを確認する必要があり、今後の課題である。

参考文献

- 村田佳寛,友沢史紀,安田正雪,原謙治: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.10-2, pp.493-498, 1988.
- 2)谷川伸、山田義智、大城武、川村満紀: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、日本建築学会構造系論 文集、第487号、pp.11-19、1996.9
- 3) SORN Vira,山田義智,山根茂之,大城武:フ ライアッシュコンクリートの遮塩性と鉄筋の 防食性能に関する研究,コンクリート工学年 次論文報告集,Vol.25, 677-682, 2003.