# 停滞現象を考慮可能な塩分浸透の簡易算定手法の構築

東京大学大学院 学生会員 〇鎌田 知久 東京大学生産技術研究所 フェロー会員 岸 利治

### 1. はじめに

コンクリート中への塩化物イオンの浸透は,拡散則 の概念から時間の経過とともに進行するものと考えら れてきた.しかし,浸透が早期に停滞する事例が報告さ れており,示方書で想定している浸透現象と実環境で 生じている現象が実際には大きく乖離していることが 知られている.そのため,このような構造物を対象に従 来の拡散則を用いて塩化物イオンの浸透予測を行う場 合,5年,10年先の浸透は評価できているように見えて も,50年さらに100年先の浸透に対しては,停滞現象 を表現できない以上,過度に安全側,すなわち不経済な 評価にならざるを得ない.

そこで本研究では、耐久設計に用いる簡易法として、 塩化物イオンの浸透が停滞することを表現可能な塩分 浸透算定手法の構築を試みる.さらに、既往の文献で報 告されている塩分分析の結果と解析結果を比較するこ とで構築した算定手法の合理性を検討した.

#### 2. 塩分浸透の算定プロセス

本研究で構築する塩分浸透算定手法は,拡散だけで なく塩分浸透の主な機構である移流も考慮する.移流 と拡散の浸透機構を算定するにあたり,本手法では,こ れら二つの浸透を個々に評価する(図-1).まず,移流に よる塩分浸透が液状水の浸透に支配されていると仮定 し,液状水の浸透が停滞する深さと停滞に要する時間 を算定する.そして,移流による塩分浸透分布をコンク リート中への液状水浸透分布と従来示方書式で用いら れる拡散方程式の解析解を便宜的に使用して移流によ る浸透を表現するように修正を加えた式を用いて求め る.拡散による塩分の浸透分布は,混和材の置換率の概 念を導入し,置換率係数と示方書式に修正を加えた式 を用いて求める.最終的に,移流と拡散双方の塩分浸透 を足し合わせることで,移流と拡散を考慮した塩分浸 透分布を算定する.



図-1 塩分浸透の算定プロセス

#### 3. 停滞現象を考慮した塩分浸透算定手法

#### 3. 1 液状水の浸透停滞深さ及び停滞時間の算定

コンクリート中への液状水の浸透は,式(1)に示すワ ッシュバーン<sup>1)</sup>の式を用いて表現されることが多い.

$$L = \sqrt{\frac{r\gamma \cos\theta}{2\mu} \cdot t}$$
(1)

ここで,L:浸透距離,r:細孔径,γ:表面張力,θ:接 触角,μ:粘性係数,t:時間である.しかし,本式では 浸透が停滞することを表現することはできない.そこ で本研究では,液状水の浸透がある速度以下になると 停止するものと便宜的に仮定して,毛管張力(式(2))と粘 性摩擦力(式(3))の関係から式(4),(5)を導出し,これを用 いて液状水の浸透停滞深さと停滞時間を算定する.

$$\Delta P_c = \frac{2\gamma \cos\theta}{r} \tag{2}$$

$$\Delta P_f = \frac{8\mu LV}{r^2} \tag{3}$$

ここで、 $\Delta P_c$ :毛管張力、 $\Delta P_f$ :粘性摩擦力、V:浸透速度である.

キーワード 拡散,移流,液状水浸透,停滞現象,塩分浸透算定手法

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 Be403 TEL. 03-5452-6098(58090) E-mail:tkamada@iis.u-tokyo.ac.jp

$$L_{mean} = \frac{\gamma cos\theta}{4\mu} \times \frac{r}{V_{lim}} \tag{4}$$

$$t_{lim} = \frac{2\mu}{\gamma r \cos\theta} \cdot L_{mean}^2 \tag{5}$$

ここで、L<sub>mean</sub>:液状水浸透停滞深さ、V<sub>lim</sub>:浸透停滞速 度、t<sub>lim</sub>:浸透停滞時間である.式中の細孔径 r は式(6) より便宜的に算出する.このrが水セメント比や使用材 料,養生条件により変化することで、液状水の浸透停滞 深さや時間が変化するようになっている.

$$r = 500 \times W/C \times \beta \times \omega \tag{6}$$

ここで、W/C:水セメント比,β:養生係数,ω:混和材 係数である.本研究では,養生係数βは気中養生で5.0, 封緘養生で2.0,水中養生で1.0と設定した.また,混 和材係数ωは,普通セメントを使用した場合は1.0,フ ライアッシュ,高炉スラグ微粉末を混和した場合は0.5 とした.

### 3.2 移流による塩分浸透の算定

移流による塩分浸透は便宜的に拡散方程式の解析解 を用いて表現する.式(7)は移流による浸透が支配的な 空隙に対して理論上完全に浸透した場合の塩分浸透を 表現している.

$$C_{ad}(L, t) = \varphi_{ad} \cdot \left\{ \gamma_{cl} \cdot \left[ C_0 \left( 1 - erf \frac{L}{2\sqrt{D_{ad} \cdot t}} \right) \right] \right\}$$
(7)

ここで、 $C_{ad}(L,t)$ :深さL,時間tにおける移流により 浸透した理論上の塩分量、 $D_{ad}$ :移流による浸透を表現 するための塩化物イオンの等価拡散係数、 $\varphi_{ad}$ :移流が 支配的になる空隙の割合(本研究では 0.8 に設定)、 $C_0$ : 表面塩分量、 $C_i$ :初期塩分量、 $\gamma_{cl}$ :予測の精度に関する 安全係数(1.0)であるである.上式のみでも塩分浸透を算 定することは可能であるが、実際には移流による浸透 は様々な抵抗因子により抑制されるため、これを無視 することはできない.そこで、コンクリート中への液状 水の浸透分布が正規分布形であり、且つ式(4)で求めた 深さで停滞するものと仮定して、式(8)から液状水の浸 透分布を算出し、これを式(7)に乗ずることで抵抗因子 により抑制された移流の浸透を表現する.ここで、図-2 は、液状水浸透分布の一例であり、液状水浸透停滞深さ が 2cm の場合を示している.

以上より、最終的に移流による塩分浸透は式(9)を用

いて算定する.

W(L)

$$=1-\int_{-\infty}^{L}\frac{1}{\sqrt{2\pi {s_d}^2}}exp\left(-\frac{(t-L_{mean})^2}{2{s_d}^2}\right)dt$$
(8)

ここで,W:深さLにおける移流による液状水の浸透 確率,L:表面からの距離,t:確率変数,sd:標準偏差 である.

$$C_{ad}(L,t) = C_{ad}(L,t) \cdot W(L) \tag{9}$$

ここで, C<sup>ad</sup>(L,t): 液状水の浸透分布を考慮した時間 t, 深さLにおける移流により浸透した塩分量である.

移流による塩分の浸透は,式(5)で求めた時刻まで浸 透するものと考え,時刻 tim 以降は塩分浸透分布が変化 しないものと仮定することで移流による塩分浸透の停 滞を表現するものとした.



図-2 液状水浸透分布の一例(停滞深さ:2cm)

#### 3.3 拡散による塩分浸透の算定

拡散による浸透は、中村ら<sup>2</sup>により、空隙壁面との電 気的相互作用により極微小な空隙では停滞する可能性 があることが光学的に確認されている.この際、拡散が 停滞する条件として空隙壁面のゼータ電位が最も重要 となる.ゼータ電位は、混和材を高置換率で使用するこ とで負の値を示すことが知られている<sup>3)</sup>.そのため、拡 散による塩分浸透の算定に際して、混和材の置換率の 概念を導入するため、式(10)に示す置換率係数を用いた.

$$R = 1 - \int_{-\infty}^{P} \frac{1}{\sqrt{2\pi s_d^2}} exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2s_d^2}\right) dt$$
(10)

ここで, R:置換率係数, P:置換率, t:確率変数, u: 平均, s<sub>d</sub>:標準偏差である. 図-3, 4 は, フライアッシ ュ(以下 FA)と高炉スラグ微粉末(以下 BFS)を置換した 場合における置換率係数の値の変動を示している. 松 永ら<sup>3)</sup>の実験結果を参考にして, FA は 20%, BFS は 70% の置換率で混和材を使用することで置換率係数 R の値 がおよそ 0 になるように設定した.



移流と拡散双方を考慮した塩分浸透に関しては,式 (9)から求まる移流による塩分浸透と式(12)から求まる 拡散の塩分浸透を足し合わせることで算出する.以下 にその式を示す.

 $C(L, t) = C'_{ad}(L,t) + C'_{dif}(L, t)$  (14) ここで、時間 t、深さLにおける塩分量である.

### 4. 実験結果と解析結果の比較

高橋ら4が実施した塩分分析の結果(プロット3))と 本研究で構築した算定手法より求めた解析結果(実線) を比較したものを図-5 に示す. 図中(a)から(c)はフライ アッシュ内割 20%置換(F1), (d)から(f)は外割で 30%置 換したコンクリート(F2)であり、(g)から(i)は普通セメン トのみを使用したコンクリート(B0)の結果を示してい る.表-1に設定したパラメータの一例を示す.本結果の 塩分浸透は停滞しており、従来の示方書式を用いた場 合,この様な条件を表現すできない.一方で,構築した 算定手法の解析結果を見ると、浸透分布が概ね一致し ており, 停滞現象を表現できていることが分かる. よっ て,本研究で構築した手法は,実現象をより厳密に捉え ることができており,従来の手法と比較してより合理 的であるといえる.ただし、B0に関しては、解析上、 拡散による塩分の浸透フロントが移流の浸透フロント に追いついていないため,フロントが停滞しているよ うに見えているが、拡散は時間の経過と共に徐々に進 行している. そのため, 今後より長期の結果と比較して B0の浸透が停滞しているか否かを確認する必要がある.

次に Takahashi et al.<sup>5)</sup>が実施した塩分分析の結果と解 析結果を比較したものを図-6 に示す.本分析に用いら れた供試体は水中養生が施されていたため,移流によ る浸透は生じないものと仮定し,拡散のみを考慮して 塩分浸透分布を算定した.結果を見ると,解析結果が分 析結果を概ね再現できていることが分かる.しかし,過 度に安全側に評価している結果も見られる.これは,表 面塩化物イオン濃度を一定に設定してことが原因であ ると考えられる.よって,表面塩化物イオン濃度を経時 的に変化させることでより精度よく浸透を再現するこ とができると思われる.そのため、今後は表面塩化物イ オン濃度の経時変化についても検討を進め,実現象を より正確に再現できるように改善を加えていきたい.



#### 図-4 BFS を混和した場合の置換率係数の変動

そして、上記した置換率係数 R に拡散による浸透が 支配的な空隙における塩分浸透を表現している式(11) を乗じることで拡散による塩分浸透を算定する(式(12)). 実環境では、コンクリートは不飽和な状態にあり、拡散 は微小な空隙に残存している溜まり水を移動場として いるものと思われる.そこで、基本的には細径における 拡散係数を用いることとするが、内部が飽水状態にあ る場合には、式(13)に示すように細径における拡散係数 に加えて太径における拡散係数を足し合わせたものを 使用する.

$$C_{dif}(L, t) = \varphi_{dif} \cdot \left\{ \gamma_{cl} \cdot \left[ C_0 \left( 1 - erf \frac{L}{2\sqrt{D_{dif} \cdot t}} \right) \right] \right\}$$
(11)

ここで, C<sub>dif</sub>(L,t):時間 t, 深さLにおける拡散により浸 透した塩分量, D<sub>dif</sub>:拡散による浸透を表現する塩化物 イオンの拡散係数, φ<sub>dif</sub>:拡散が支配的になる空隙の割 合(本研究では 0.2 に設定)である.

$$C'_{dif}(L, t) = C_{dif}(L, t) \cdot R$$
(12)

ここで, C'dit(L,t): 置換率の概念を考慮した時間 t, 深さ Lにおける拡散により浸透した塩分量である.

$$D_{dif} = D_{dif(small)} + D_{dif(large)}$$
(13)

ここで、D<sub>dif(small</sub>):細径における塩化物イオンの拡散係 数、D<sub>dif(large</sub>):太径における塩化物イオンの拡散係数で ある.



# 5. まとめ

本研究では塩分の浸透が停滞する現象を考慮可能な 塩分浸透算定手法の構築を試みた.構築した手法では, 移流と拡散を個々に評価し,移流は液状水の浸透停滞 深さと停滞時間に加えて液状水の浸透分布を,拡散は 混和材の置換率の概念を導入した置換率係数を導入す ることで,移流と拡散それぞれの停滞を表現した.

既往の文献で報告されている塩分分析の結果と構築 した算定手法から求めた解析結果を比較したところ, 浸透が停滞している条件を概ね良好に再現できること を確認した.表面塩化物イオン濃度の経時変化などを 加味することが可能になれば,より精度よく実環境の 塩分浸透現象を表現できるのではないかと思われる.

# 参考文献

1) 中村兆治, 酒井雄也, 岸利治: コンクリートへの塩

化物イオン浸透停滞の機構に関するガラス製マイ クロ/ナノ複合チップを用いた光学的実験による 検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.841-846, 2013

- 2) 松永正吾,佐々木謙二,星野裕美,佐伯竜彦:セメント系硬化体のゼータ電位に関する基礎的研究, 第26回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, 2008
- 3) 高橋佑弥,井上翔,秋山仁志,岸利治:実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.32, No.1, pp.803-808, 2010
- Takahashi, Y., Ishida, T.: Modeling of Chloride Transport Resistance in Cement Hydrates by Focusing on Nanopores, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 14, No. 11 pp. 728-738, 2016