

群馬大学工学部 正会員 杉山 隆文
 Univ. of New Brunswick Bremner, T. W.
 群馬大学工学部 正会員 辻 幸和

1. まえがき

高強度や高耐久性などの特性を有するハイパフォーマンスコンクリートは、一般に高い遮塩性を持つと考えられている。そのために、従来の拡散セル法などの試験では、その塩分拡散係数を算定するために必要なデータを得るまで、長い試験期間を要する。そこで、短期間に、ハイパフォーマンスコンクリートの塩分拡散係数を求めることができる、新しい試験方法が必要である。その一つとして、ある一定の直流電圧を持つ電場において、塩素イオンがコンクリート中で電氣的泳動を行うことに着目する試験方法が考えられる。そして、塩素イオンの移動が定常状態に達した場合のフラックスを測定して、塩分拡散係数を算定する。

本研究では、塩素イオンの電氣的泳動を利用した促進試験から、コンクリートの塩分拡散係数を算定する手法を提案し、従来の拡散セル法によって、Fickの第一法則を用いて求めた塩分拡散係数と比較した⁽¹⁾。

2. 電気化学的考察

本試験方法では、コンクリート中の細孔溶液を電解質溶液の一部と考え、負電荷を持つ塩素イオンが電氣的にコンクリート中を陽極に向かって移動する。コンクリートに直流電圧を用いて電気を流す本試験では、塩素イオン以外に、溶液相に存在する全てのイオンについても同様な電気化学的移動が起こる。また、電極では酸化・還元反応も同時に発生する。その概略を図-1に示す。電解質溶液中あるいは電極で発生する電気化学的な応答は、印加する直流電圧

や電位勾配の大きさ、または使用する電解質溶液および電極の種類に少なからず影響を受ける。図-1では、電極での反応について、水の電気分解だけを示した。従って、ある電場の条件下に置かれたコンクリート中で、電氣的泳動を行う塩素イオンのフラックスおよびその測定においては、電解質溶液または電極での電気化学的な応答による影響が、少なくなるような試験条件を設定して、試験を行う必要がある。

3. コンクリートの塩分拡散係数の算定

ある電解質溶液中において、ある特定なイオン（ i ）が、 x 方向の1次元にだけ電気化学的に移動する場合、次式のようなNernst-Planckの式が適用できる。

$$J_i = D_i C_i \frac{zF}{RT} \frac{\partial E(x)}{\partial x} - D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad (1)$$

ただし、 J_i は x 方向のフラックス（ $\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ ）、 D_i は拡散係数（ cm^2/s ）、 C_i は移動を開始する領域におけるイオン i の濃度（ mol/L ）、 z はイオン i の電荷、 F はファラデー定数、 R は気体定数、 T は絶対温度、 $\partial E(x)/\partial x$ は電位勾配（ V/cm ）、そして $\partial C_i/\partial x$ は濃度勾配（ $\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{cm})$ ）である。

この式を用いて、本試験よりコンクリートの塩素イオンに対する拡散係数を求めるために、次のことを仮定した。(1)第2項の濃度勾配による塩素イオンの拡散は、電位勾配による塩素イオンの電氣的泳動に比べて小さく無視することができる。(2)塩素イオンの電氣的泳動においては、共存イオンによる静的相互作用を受けず、電位勾配にだけ応答して移動する。(3)塩素イオンの移動は定常状態にあるものとし、塩素イオンを固定する C_3A は全て塩素イオンによって飽和されている。従って、コンクリート中の電位勾配は、塩素イオン

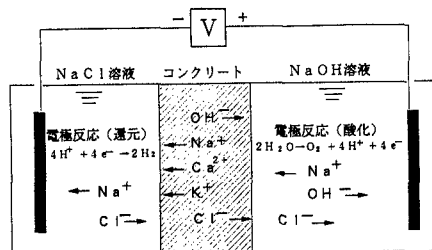


図-1 試験中に起きる電気化学的応答

の移動方向に1次直線で表すことができる。(4)陰極側の塩素イオン濃度は一定である。また、陽極側の塩素イオン濃度は十分小さい。以上のことを仮定して、コンクリートの塩素イオンに対する拡散係数は、式(1)の第1項だけを考慮して、次式で表せるものとする。

$$D_{cl} = \frac{RT}{z_{cl} F C_{cl} (\frac{\Delta E}{l})} J_{cl} \quad (2)$$

ただし、 $(\Delta E/l)$ は厚さ1cmの試験体を用いた場合の電位勾配(V/cm)である。

4. 塩分拡散係数の比較

図-2は、コンクリート中を電気的泳動または拡散した塩素イオンのフラックスを求めるために行った試験の結果である。(a)は直流電圧を15Vとして塩素イオンの電気的泳動を利用した促進試験の結果、(b)は拡散セル法の試験結果である。ただし、試験体は普通ポルトランドセメントを用いた、同バッチ内のコンクリート(W/C=0.6、粗骨材の最大寸法:12.5mm、単位粗骨材容積:331ℓ/m³)である。また、いずれの場合も、コンクリートの厚さは37.5mmである。(a)より、15Vの直流電圧

を用いることによって、塩素イオンのコンクリート中の移動は、試験開始より2日後に定常状態に達している。一方、(b)より、濃度勾配だけによる塩素イオンの拡散では、定常状態になるまで約45週間も要している。さらに、拡散セル法における塩素イオン濃度の時間に対する増分値は、電気的泳動による塩素イオン濃度の増分値よりも数オーダー程度小さい。ここで、定常状態における塩素イオン濃度の経時変化より、回帰直線式を求め、その傾きから塩素イオンのフラックスを算定した。そして、(a)の電気的泳動については式(2)、(b)の拡散についてはFickの第一法則を用いて、それぞれコンクリートの塩分拡散係数を算定した。図-3は、電気的泳動より決定した拡散係数と拡散セル法より決定した拡散係数を比較している。なお、著者らの研究以外のデータを用いて算定した、コンクリートの塩分拡散係数も含めてグラフに示した。限られたデータしかないため明確には言えないが、塩素イオンの電気的泳動を利用した促進試験の結果より、式(2)を使って算定したコンクリートの塩分拡散係数は、従来の拡散セル法より求めた塩分拡散係数と比較的一致している。従って、本試験方法を用いて、比較的短期間にコンクリートの塩分拡散係数を算定することが可能である。しかし、さらに精度良くコンクリートの塩分拡散係数を求めるためには、試験条件について検討する必要がある。また、印加する直流電圧がコンクリートへ与える影響については、今後検討する必要があるが、本研究で用いた直流電圧(15V)および試験期間(5日程度)を考慮すると、特にコンクリートの細孔構造へ及ぼす影響は小さいと思われる。

5. あとがき

本研究では、コンクリートの塩分拡散係数を比較的短期間に算定できると考えられる、塩素イオンの電気的泳動を利用した新しい試験方法および算定式を提案した。

参考文献

(1)Sugiyama, T.: Permeability of Stressed Concrete, Ph.D. Thesis, Univ. of New Brunswick, 1994, pp. 151-56

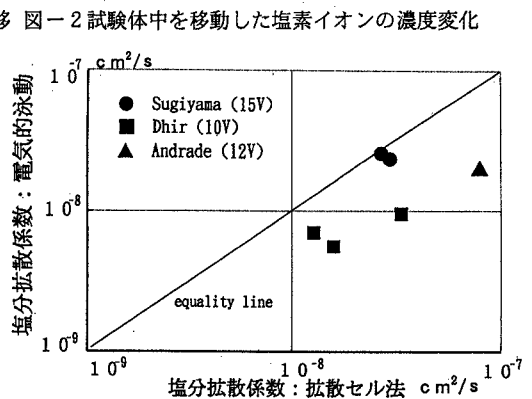
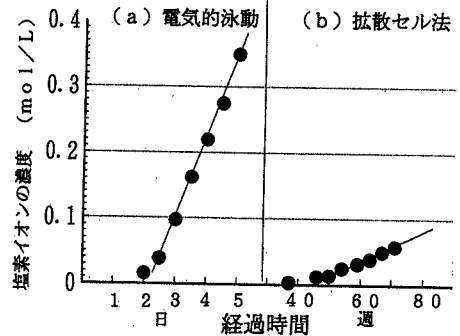


図-3 塩分拡散係数の比較