

[討議・回答]

松島 学
松井邦人 共 著
関 博
堤 知明

“Fick の拡散方程式の係数の同定” への討議・回答

(土木学会論文集, No. 520/V-28 1995年8月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

宮川豊章 (京都大学)

Toyoaki MIYAGAWA

コンクリート構造物は、適切に設計・施工された場合、本来きわめて耐久性に富む構造形式であるが、近年、塩害、中性化、アルカリシリカ反応などによる劣化事例が数多く報告されている。中でも塩害は、海砂の使用に加えて、我が国が海岸延長の長い島国であるという立地条件、さらにはコンクリートへの塩化物イオンの浸入・浸透速度が従来考えられていたよりもはるかに大きかったこと等、によって重大な社会問題となっており、診断、補修・補強を含めた種々の検討がなされている。

構造物の力学的な安全性を検討するうえで、使用する荷重とこれに抵抗する耐荷力の両者を比較検討することが重要であるように、耐久性を検討するうえでは、環境作用とこれに対する抵抗性能……たとえば劣化因子浸透、腐食速度、耐荷力低下、汚れなどに対する抵抗性……を比較検討することがきわめて重要である。塩害においては、環境作用としては、鋼材を腐食させる物質である塩化物イオンのコンクリート表面への到達があり、その後生じる塩化物イオンのコンクリート中への浸透が初期の劣化メカニズムを大きく支配している。したがって、塩害の主たる原因であるコンクリート中における鋼材腐食を検討するためには、コンクリート中における塩化物イオンの移動現象を定量的に把握することが要求される。

塩化物イオンのコンクリート中における移動過程は、マクロには拡散過程で記述できることが知られており、見かけの拡散係数を用いた種々の検討が行われた。例えば、見かけの拡散係数によって、古くは Browne¹⁾による寿命推定モノグラムの提案がなされている。また筆者は、部材の劣化メカニズムを検討したうえで、水セメント比などを要因として、拡散方程式を利用した寿命推定を行っている²⁾。したがって、実構造物においてコンクリート中の塩化物イオン濃度を測定し、拡散過程を支配する拡散係数などの種々の係数を固定することは、コンクリート構造物の耐久性、供用可能期間等を検討するう

で、きわめて有効な手法である。

拡散現象そのものについては、我が国においても、大即ら³⁾がコンクリート中における塩化物イオンの拡散現象について定量的な報告をし、片脇⁴⁾が拡散現象と腐食劣化程度との関係についての報告を行っている。また、武若⁵⁾は、海中暴露実験および実構造物における実測値から、海中、飛沫帯および大気中における塩化物イオンの拡散過程についての検討結果を報告している。しかし、これらの報告は拡散およびこれに起因する腐食現象についての解明が中心であり、実構造物における拡散係数などの同定に関する方法論的な検討の結果をとりまとめたものではなかった。

拡散係数の同定手法については、永野⁶⁾による正規確率紙を用いた方法などが報告されたが、実構造物について統計的な算定方法についてふれた報告は、横田⁷⁾のものが最も初期のものの一つであろう。横田らは、構造物の管理上から、既設のコンクリート構造物中の塩化物イオン量から塩化物イオン拡散係数を算定する必要性を述べ、我が国での最初期における方法論的検討を含めた結果を報告している。著者らのノートもその延長線上にあると言って良い。

これらの拡散に対する検討および拡散過程を考慮した耐久性の検討は、工学的にきわめて重要であり、塩害防止あるいは補修効果の検討における有効な手法となり、現在幅広く用いられている。しかし、以上のような検討の中心は、見かけの拡散係数等によるマクロな現象把握に基づくものであり、まだ種々の問題を有しているのも事実である。それらの問題点のうち、ここでは、特に重要と考えられる塩化物イオンの固定に関するものを述べ、併せて、表面塩化物イオン量の推定、塩害劣化メカニズムに関する問題点などにもふれた。

塩化物イオンのコンクリート中における存在形態は、概念的には、腐食に関与すると考えられる遊離塩分と、腐食には関与しないと考えられる固定塩分の2種類に分

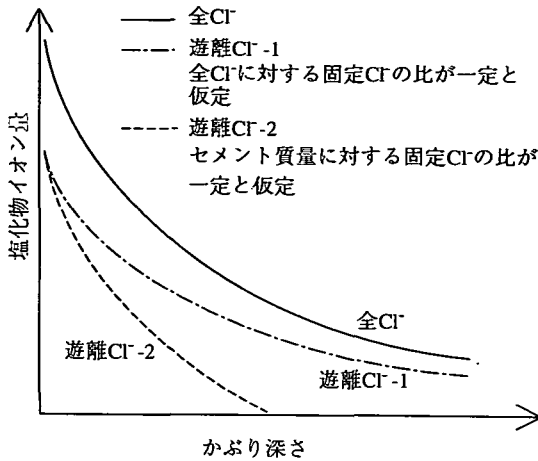


図-1 遊離塩化物イオン量の分布形状

けることができ、例えば、既に触れた武若ら⁹⁾の報告では、前者を可溶性塩分、後者を全塩分から可溶性塩分を差し引いたもの、という形でそれらの分離を試みている。鋼材腐食問題で重要であるのは遊離した塩化物イオンであるが、これが可溶性塩分と同一のものであるかどうかについては、まだ確証がないのが実状である。言い換えれば、鋼材の塩化物腐食に関与する塩化物イオンは、規定された方法⁹⁾、つまり熱水によって抽出される塩化物イオンいわゆる可溶性塩分と同一であるとは限らないものと考えられる。

固定された塩化物イオンは拡散移動しないと考えられ、拡散に関与する塩化物イオンは遊離塩化物イオンであろうと推定される。したがって、拡散問題で取り扱っている塩化物イオンとは、本来遊離した塩化物イオンであるにもかかわらず、その点についての議論があまりなされていないのが現状である。もっとも、腐食に関与する塩化物イオンを、全塩分であるとすれば、全塩分は可溶性塩分よりも値が大きいため安全側であるといえる場合も多いであろう。しかし、塩化物イオンの固定と拡散が同時に生じる場合、塩分の濃度勾配と遊離した塩分の濃度勾配は必ずしも一致せず、拡散係数が見かけ上小さくなることもありえ、余寿命推定においては必ずしも安全側の評価とはならない場合もあり得る。

塩化物イオンの固定量は、セメント質量に対する比⁹⁾、コンクリート質量に対する比、あるいは全塩分量に対する比などで表わされる場合が多い。図-1の塩化物イオン濃度分布の概念図に示すように、塩化物イオン固定量の考え方が異なる場合、拡散にかかわると考えられる遊離塩化物イオン濃度勾配は変化する様子が認められる。以上のような固定量の表現方法および濃度分布は、塩化物イオンの固定メカニズムから本来定まってくるものであ

る。しかも、固定に対してコンクリートの中性化や硫酸塩の影響があることが知られている⁹⁾。したがって、固定メカニズムに基づいた腐食発生に関する臨界塩化物イオン濃度、孔隙水中の塩化物イオン濃度の検討¹⁰⁾などが明確とならなければ、見かけの拡散係数等を定めても、腐食挙動を明確に定量化したとは言えないであろう。

また、コンクリート表面濃度は、拡散係数の算定およびかぶり位置での塩化物イオン濃度変化の推定のうえできわめて重要な要因であるが、実構造物でこれを直接測定することは困難であり、現在は表面層における塩化物イオン濃度で代用している。さらに、鋼材の存在により、鋼材表面にポーラスな遷移帯が生じる可能性があるとともに、鋼材より奥に拡散しようとする塩化物イオンがせき止められ、鋼材表面における塩化物イオン濃度は、鋼材を含まないコンクリート中を拡散する場合よりも大きくなる可能性もある。

コンクリート表面への塩化物イオンの供給およびコンクリート中への浸入は、海からの距離、風向き、雨がかり、周囲の地形などの環境条件によって大きく左右される。このため、拡散係数の同定を行った対象構造物以外の構造物に対して、同定された表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数を適用することには若干の問題があるものと考えられる。

しかも、塩化物イオン量がきわめて重要な支配要因となるのは、腐食発生に至る過程であり、それ以降の腐食速度については、酸素供給量などの要因が大きな支配要因となり、塩化物イオンの拡散過程によっては記述できないことはよく知られているところである⁹⁾。したがって、塩化物イオン量と鋼材の腐食減量を単純に結びつけることはできず、酸素の拡散、コンクリートの電気抵抗などを考慮したうえで初めてその解釈が可能である。

したがって、塩害防止あるいは補修効果の検討を行う場合に当たっては、コンクリート構造物における塩化物イオンの拡散過程を正しく把握したうえで、以上のような問題点に対する検討を今後も続けるべきであろうと考えるものである。

参考文献

- 1) R.D. Browne: Design prediction of the life for reinforced concrete in marine and other chloride environments, *Durability of Building Materials*, Vol. 1, No. 2, pp.113-126, 1982.7.
- 2) 例えば、T. Miyagawa: Durability design and repair of concrete structures: chloride corrosion of reinforcing steel and alkali-aggregate reaction, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 43, No. 156, pp.155-170, 1991.9.
- 3) 大即信明, 森好生, 下沢治: 海洋環境におけるコンクリートの塩素含有量, セメント・コンクリート, No. 421, pp. 30-37, 1982.3.

4) 片脇清士, 山内幸裕: プレストレストコンクリート構造物の腐食に関する研究, 土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集 第 V 部, pp.269-270, 1982.10.
 5) 武若耕司, 松本進: コンクリート中への塩分拡散過程の推定に関する研究, 土木学会第 41 回年次学術講演会講演概要集 第 V 部, pp.569-570, 1986.11.
 6) 永野宏雄, 内藤隆史: 飛沫帯にあるコンクリート中への塩素浸透に関する拡散理論の応用, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 7, pp.85-88, 1985.5.
 7) 横田優, 浮田和明, 重松俊一, 藤枝正夫: 拡散理論に基づいた海岸部塩分汚染環境評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, pp.443-446, 1987.6.
 8) 日本コンクリート工学協会: 硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法, JCI-SC 4, 1987.4.
 9) 例えば, W. Richartz: *Die Bindung von Chlorid bei*

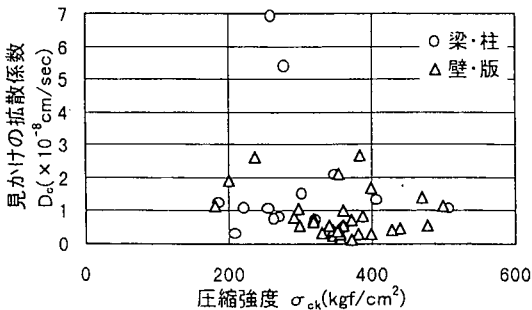
der Zement erhärtung, Zement-Kalk-Gips, Heft 10, pp.447-456, 1969.
 10) 例えば, 米澤敏男, V. Ashworth, R.P.M. Procter: コンクリート中の鋼材腐食における塩素イオンの限界量について, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 8, pp.141-145, 1986.6.
 11) C.L. Page: *Barriers to the prediction of service life of metallic materials*, Problems in Service Life Prediction of Building and Construction Materials, Martinus Nijhoff Publishers, pp.59-74, 1985.
 12) 土木学会: コンクリート構造物の維持管理指針 (案), 1995.10.

(1996.2.20 受付)

▶ 回答者 (Closure) ————— 松島 学 (東電設計) ・ 松井邦人 (東京電機大学) ・ 関 博 (早稲田大学) ・

堤 知明 (東京電力)

Manabu MATSUSHIMA, Kunihito MATSUI, Hiroshi SEKI
and Tomoaki TSUTSUMI



図一 圧縮強度と見かけの拡散係数

塩化物イオンのコンクリート中における移動過程は、マクロには拡散過程で記述できることが知られており、筆者らの論文もその考え方に沿って Fick の拡散方程式を採用している。筆者らの拡散係数の同定手法は、永野、横田らの延長上にある手法で、人為的な誤差の発生や、計算の簡便さに優れていると思う。この手法は、見かけの拡散係数によるマクロ的な現象として取り扱ったものであり、ご指摘のように種々の問題点も含んでいる。しかし、私どもの研究は、この手法が正しいと考えた場合、数学的に表面塩化物イオン量と見かけの拡散係数を求める手法について説明しており、ご指摘の問題までは踏み込んで行われていない。

次に、ご指摘のコンクリート中の塩化物イオンの浸透について著者らの考え方を述べさせていただく。コンクリート中における塩化物イオンの形態は、腐食に関与する塩化物イオンと固定されていない腐食に関与しない塩

化物の 2 つに分けられると思う。塩化物の挙動を把握するには、可溶性塩化物イオン量の拡散係数を求めることが重要である。しかし、実際の構造物の浸透を考えると、使用時の荷重等による微細なひび割れの影響、施工による欠陥、あるいはそこまで行かなくてもコンクリートの品質の不均一性があり、次元拡散方程式の適用すら実構造物には問題がある場合が多い。さらに、構造物の耐久性診断をおこなうのは多くが既に塩化物イオンが浸透し、鉄筋が腐食し、軸方向のひび割れが発生した後であり、このひび割れの影響によって次元拡散の影響が乱されてしまう。筆者らの論文 (1) でも、室内試験ではコンクリートの水セメント比は拡散係数に影響するが、実構造物ではその影響が上記の問題の中に内在されてしまうことを指摘している。このように実構造物では、施工時によるひび割れにより塩化物イオンの浸透は、複雑な挙動を示し、コンクリート中の塩化物の移動は拡散のみでは表せない、複雑な構造になっている。実際の診断等に用いる手法として、Fick の拡散方程式のモデルを用いている限り、入力に当たる塩化物を正確に把握しても、拡散に関する係数等の評価の精度は、高くないのではないかと思う。さらに、現状の可溶性塩化物イオン量の測定が難しく、実務的には問題が多いかと思う。したがって、現状では可溶性塩化物イオン量の指標として全塩化物イオン量をとらえ、全塩化物イオン量を利用して見かけの拡散係数を求めることが実用的と思う。

このように、基礎的研究としては、塩化物イオン量の内、可溶性塩化物の挙動を調べることは重要であるが、現状の研究レベルを考え、実務的な面からは全塩化物イ

オン量を利用した見かけの拡散係数の評価で行うのが妥当ではないかと考える。

影響因子の実データに基づく定量評価, 土木学会論文集, No. 544/V-32, pp.33-41, 1996. 8.

(1996. 9. 18 受付)

参考文献

- 1) 堤知明, 白井伸一, 安田登, 松島学: 塩分劣化に関する