

漏水の影響を受ける実構造物の中性化と塩化物イオンの濃縮

大成建設土木技術研究所 正会員 ○武田 均

同上 正会員 丸屋 剛

1.はじめに

漏水を伴う実構造物では、漏水の影響を受ける部位、部材に局所的に塩害による損傷が顕在化するという傾向がある。これは、漏水によって供給される高濃度の塩化物イオンによる劣化の典型的な現象であるが、漏水の影響は常に同様でなく現在漏水している部分もあれば過去に漏水の影響を受けていたと考えられる箇所も多い。このような漏水が関係する塩害では、高濃度の塩化物イオンの蓄積もさることながら、中性化も進んでいる場合が散見される。中性化による塩化物イオンの濃縮のために鋼材の腐食が促進されたと考えられる場合もある。本研究は、コンクリートの中性化に伴う塩化物イオンの移動・蓄積を実構造物のデータに基づいて検討したものである。

2.中性化による塩化物イオンの濃縮

2.1 中性化による塩化物イオンの固定率の変化

本研究では、塩化物イオンの固定率 (FixFac) を丸屋らの研究¹⁾を参考にして、式(1)に示すように固定塩化物イオン (C_{fix}) と自由塩化物イオン (C_{free}) の和に対する固定塩化物イオンの比として定義し、全塩化物イオン濃度の関数とした。

$$FixFac = \frac{C_{fix}}{C_{fix} + C_{free}} \quad (1)$$

さらに、中性化による塩化物イオンの固定率の変化は、佐伯らの研究²⁾を参考にしてコンクリート中の pH の関数とした。中性化によるコンクリート中の pH 分布の変化については、二酸化炭素の移動、セメント水和物との化学反応および細孔中のイオン平衡などを考慮した物理化学的なモデル^{2), 3)}が提案されているが、本研究では、中性化に関するいわゆる $\sqrt{t}$ 則に基づいてコンクリート中の pH の分布を評価した。図-1 に示したように、コンクリート表面の pH および中性化判定の際の境界の pH を仮定することによって、実構造物の調査で得られた中性化深さ (y) と供用期間とから算出される中性化速度係数 ($\alpha = y/\sqrt{t}$) によりコンクリート中の pH の分布を評価した。 $\sqrt{t}$ 則をフィックの拡散則で表現すれば、中性化速度係数 α と $[H^+]$ の拡散係数 D_H 、コンクリート表面の $[H^+]$ との関係は図に示したとおりとなり、中性化速度係数によってコンクリート中の pH の分布を計算することができる。なお、ここでは、コンクリート表面が乾燥している期間に中性化が進行し、湿潤期間には中性化の進行が停滞することとした。

図-1 は、コンクリート内部の pH の分布を示すグラフである。縦軸は $pH(=-\log C_H)$ の値（4 から 14）を示し、横軸は表面からの深さ x (cm) の値（0 から 8）を示す。グラフには、5年、10年、20年、27年という経過時間に応じた pH 分布の曲線が描かれている。表面の pH は約 6.5 から始まり、時間とともに深さ方向に上昇していく。また、中性化速度係数 α の値も示されている。図中には、 C_H bound と中性化境界の pH の値も示されている。また、 $C_H(x,t) = C_H0 \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_H \cdot t}} \right) \right]$ という式と、 $\alpha = 2\sqrt{D_H} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left[1 - \frac{C_H(x,t)}{C_H0} \right]$ という式も示されている。

C_H : $[H^+]$ 濃度 ($pH=-\log C_H$), D_H : $[H^+]$ の拡散係数

図-1 コンクリート内部の pH の分布

2.2 塩化物イオンの移動に及ぼす中性化の影響

本研究では塩化物イオンの移動計算にフィックの第 1 法則を適用し、自由塩化物イオンのフラックスを、

キーワード 塩害, 中性化, 複合劣化, 維持管理, コンクリート

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株)土木技術研究所 TEL045-814-7228

式(3)のように定義した.

$$F_{cl} = F_{cl,conc} + dF_{cl} \quad (3)$$

ここに, F_{cl} : 自由塩化物イオンのフラックス,
 $F_{cl,conc}$: 自由塩化物イオンの濃度勾配によるフラックス, dF_{cl} : 自由塩化物イオンの疑似吸着によるフラックス

中性化による塩化物イオンの濃縮量を推定する場合に, 塩化物イオンの固定率の変化のみを考慮する場合には, 塩化物イオンの固定率の分布の関係を仮定することによって中性化による塩化物イオンの濃縮が表現される. すなわち, 固定塩化物

が液層中に解離されることによって, 液層中の自由塩化物イオン濃度が上昇し, 自由塩化物イオンの濃度勾配を駆動力とする拡散が促進される. ついで, 未中性化域では, 液層中の塩化物イオン濃度に比例して塩化物イオンが固定されるため, 見掛け上, 全塩化物イオンは中性化のフロントで濃縮されることになる. しかし, 実構造物の塩化物イオン濃度分布を調査した場合に, コンクリート中の塩化物イオン濃度が環境の塩化物イオン濃度と比較してかなり高くなる場合がある. 既往の研究において, コンクリート表層における塩化物イオンの濃縮に対して, 陰イオンである塩化物イオンが細孔表面の正の電荷に引き寄せられて外部からコンクリート内部に浸透する機構が提案されている¹⁾. 疑似吸着による塩化物イオンの移動は常に外部から内部へと向かう. 式(3)に示した第2項が疑似吸着に対応し, 本研究では, 疑似吸着によるフラックスの増分を式(4)で考慮した.

$$dF_{cl} = A \cdot C_{free}(x-1, t) \cdot \frac{[C_{OH}(x, t) - C_{OH}(x-1, t)]}{C_{OH}(x, t)} \quad (4)$$

ここに, $C_{OH}(x, t)$: pHから計算される時刻 t , 深さ x における $[OH^-]$, $C_{free}(x-1, t)$: 時刻 t , 深さ $x-1$ における自由塩化物イオン濃度, A : $[OH^-]$ 濃度勾配の疑似吸着への影響度を表す係数

式(4)は, 液層の pH の勾配が大きいほど, また, 液層中の pH が小さいほど疑似吸着の影響が大きくなることを仮定したものである. 中性化部と未中性化部では細孔表面のチャージが変化し, 疑似吸着の影響がより大きくなる可能性があると考えられる.

3. 実構造物の調査例

海底トンネルの漏水痕部で観察された塩化物イオン濃度分布と本手法の計算結果を図-2 に示す. この構造物は, 竣工後 27 年を経過し, 漏水の影響を受ける部分では高濃度の塩化物イオンが含有されていた. 図に示した調査地点での中性化深さは 24mm であった. 一方, 漏水の影響を受けない部位では, 塩化物イオンはほとんど蓄積されておらず, 中性化深さは 35mm 程度であった. 本手法による計算値は, 調査結果と良く一致している. この例では, 疑似吸着を考慮せずに, この例における塩化物の濃縮量を再現することは困難であった.

参考文献 1) 丸屋, Somnuk, 松岡: コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化, 土木学会論文集, No.585/V-38, pp.79-95, 1998.2

2) 佐伯, 植木, 嶋: 塩害と中性化の複合による塩化物イオンの浸透予測モデルの構築, 土木学会論文集, No.697/V-54, pp.131-142, 2002.2

3) 石田, 前川: 物質移動則と化学平衡論に基づく空隙水の pH 評価モデル, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.203-215, 2000.5

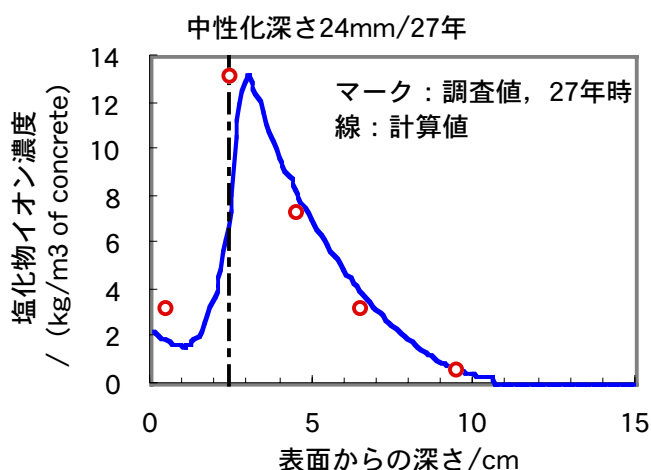


図-2 実構造物のデータと計算結果