

外部環境統合型のコンクリート内部の物質移動予測モデルの構築

コンクリート研究室 佐藤 友希
指導教員 中村 文則

1. はじめに

沿岸部では、海水由来の水滴や海水気泡が破裂するときには発生する海水粒子(飛来塩分)が飛来している。この塩分がコンクリート構造体に浸透し、内部の鉄筋を腐食させることで損傷が生じる塩害が発生する。この対策として、コンクリート内部での塩化物イオンの浸透予測計算が行われている。

そこで、外部で塩分が発生・輸送される過程と構造体に到達し、内部に塩化物イオンが移動する過程を統合し、塩害劣化の浸透予測精度向上に起因するかを検討することを目的とする。

2. 境界における実験

2.1 実験施設

実験施設は、長岡技術科学大学内の海岸付近の飛来塩分と風を再現できる風洞施設である。施設内は送風機と飛沫発生装置を設置し、供試体に塩分作用を加えられるようにした。

2.2 供試体概要

実験に用いた供試体の配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、水は水道水、細骨材は川砂、粗骨材は碎石、混和剤はマイクロエア 303A とポゾリス No.70 を使用した。寸法は、直径 100mm × 高さ 200mm の円柱である。部黒面以外は水分と塩分の侵入を防ぐために、気密防水テープで密封した。脱型後は 142 日間の水中養生の後、105 日間の気中養生を恒温室(気温 20 度、湿度 50%)で行い、乾燥状態のコンクリートを使用した。実験直前 8 日間は計測室で気中養生を行った。型枠面を暴露面とし、その面が送風機を向くように設置した。

2.3 実験方法

送風機で、飛沫発生装置から噴射される濃度 3% の塩水を供試体に向けて飛ばすことで供試体に飛沫を作用させる。暴露時間は 1 回 120 分とした。

表-1 示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		水	セメント	砂	砂利	混和剤内訳(希釈後)	
マイクロエア 303A	ポゾリス No. 70						
50.0	41.9	154	308	756	1080	2.46	3.08

表-2 実験ケース

case	作用内容		
Case1	塩分	分析	
Case2	塩分	降雨	分析
Case3	塩分	湛水	分析

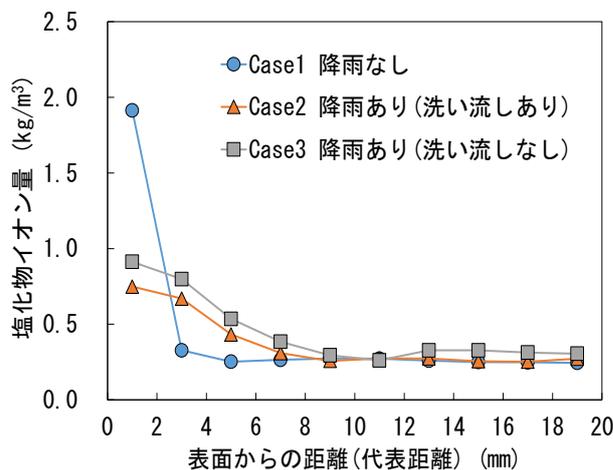


図-1 実験結果

暴露終了後は、3本の供試体をそれぞれの異なる Case1~3 の条件で保管した。Case1 は降雨なし、Case2 は降雨ありで、降雨がある日に屋外環境に 11 時間暴露させ洗い流しがあるもの、Case3 は降雨があるものの洗い流しが発生しない場合を再現したものである。これらは表-2 にまとめた。作用手順は左から右である。

条件を満たした後、暴露面の表面から 2mm ずつ削り、粉末の試料を採取した。その試料を各層 5g ずつ計量し、JIS A 1154 に則って塩化物イオンを抽出し、イオンクロマトグラフ法を用いて、塩化物イオン量を計測した。

2.4 実験結果

実験結果を図-1 に示す。2mm 間隔で塩化物イオン量を計測したため、その中央長さを代表距離とした。

図に示すように、Case1 では、表面から 1mm の位置で塩化物イオン量が 1.91kg/m^3 と最も高くなっている。表面から 3mm 以上離れると、 0.3kg/m^3 程度まで急激に低下した。降雨を 11 時間作用させた Case2 では、1mm での量が最も高いものの、3mm と 1mm の塩化物イオン量を比較すると 1 割ほどしか減っておらず、深さ方向に対して緩やかに低下した。これは洗い流しのない降雨を作用させた Case3 も同様の傾向を示した。さらに、表面から 10mm 以上の範囲では、 0.3kg/m^3 程度となっている。これは、降雨なしでも同様の値であるため、暴露前の供試体に含まれている塩化物イオン量であると考えられる。

したがって、飛来してきた塩分は、暴露面を含む 2mm までの深さに分布し、この面に洗い流しの有無にかかわらず水分が到達すると、水分の侵入とともに付着した塩分の一部が内部に侵入することがわかる。さらに、降雨のように表面を流れる水分の場合は、一部が洗い流されることが分かった。

3. 統合モデルの計算概要

本研究では、既存に開発された外部での飛来塩分発生・輸送される外部での塩分移動解析と、内部で液状水とともに移動する自由塩化物イオンの浸透、付着塩分の侵入モデルを組み合わせた塩分移動解析を用いて、実橋梁を対象とした長期での塩化物イオンの浸透計算を行い、合理的な劣化予測が可能かどうか確認を行った。

3.1 外部モデル⁽¹⁾

外部モデルでは、塩分の発生と輸送の計算を行う。飛来塩分の発生は、飛来塩分が修正ブシネスク方程式で構築した波が砕波する際に発生するとし、総発生量 c_t を波の砕波による運動エネルギー M_D に比例すると式(1)で算出する。

$$c_t = a_g \cdot M_D \quad (1)$$

ここに、 a_g : 比例定数($\text{mg}\cdot\text{s}/\text{m}^4$)、である。

飛来塩分の輸送は、ナビエ・ストークス方程式で構

造物周辺の風況に応じた塩分の拡散に加え、粒子自体の沈降を考慮するために、式(2)の 3 次元の移流・拡散方程式モデルを用いて表現する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_x) \frac{\partial c}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial c}{\partial z} \right) - Q_c \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 c : 大気中の飛来塩分濃度(mg/m^3)、 x, y, z : 3次元座標(m)、 u, v, w : x, y, z 方向の風速(m/s) : w_x : 海岸からの距離に応じた飛来塩分粒子の沈降速度(m/s)、 Q_c : 飛来塩分の発生量($\text{mg}/\text{m}^3/\text{s}$)、 v_t : 乱粘性係数である。

3.2 内部モデル⁽²⁾

内部モデルでは、浸透計算を行う。塩化物イオンの移動は、液状水中の濃度拡散移動流速 J_{difCl} に加え、液状水中に溶解している自由塩化物イオンが液状水の移動にともなって輸送されると考え、液状水の移動流速 J_l を用いて式(3)で表す。

$$\frac{\partial C_{\text{total}}}{\partial t} = -\text{div}(J_{\text{difCl}} + \frac{C_f}{\rho} J_l) \quad (3)$$

ここに、 C_{total} : コンクリート単位体積中の全塩化物量(kg/m^3)、 C_f : 液状水単位体積中の自由塩化物イオン量、 ρ : 液状水の密度(kg/m^3)である。

3.3 境界モデル

境界では、天候が変化することで塩分の侵入方法が変化すると計算する。これは塩分が飛来する乾燥時と、降雨が作用する湿潤時に分ける。

乾燥時は、西⁽³⁾が提案の到達塩分に実験係数を掛けることで、塩分が内部に拡散するとした式(4)で到達塩分が侵入する。

$$J_{\text{difCl}} = -K_{cl} D_{cl} \frac{C_{\text{free}}(0) - \beta C_{\text{air}}}{h_{cl}} \quad (4)$$

湿潤時は、降雨により作用する塩化物イオン濃度が 0% の液状水が内部に侵入する。そのため、塩化物イオンの侵入はないとして計算を行う。

3.4 統合モデルの計算条件

統合モデルを反映させた橋梁は、新潟県上越地方の名立大橋である。この橋梁は、汀線から約 40m の重塩害地域で 2001 年から供用されている。この橋梁

の表面には撥水加工が施されており、今回の計算モデルに直接利用できないため、同時期に同地域に作成された暴露供試体から 2005・2010 年に採取したコア供試体の計測値⁽⁴⁾と比較した。

計算条件を表-3 に示す。外部環境は、気象庁からダウンロードした温度を整理したものと名立大橋近くの気象ステーションで観測した降雨履歴、外部モデルによって求めた飛来塩分を変動させた。この到達塩分量は 2 時間間隔で求めているため、計算時間間隔は 2 時間とした。到達塩分量を内部塩化物イオン量に変換するための実験係数 β は 2010 年における表面から最も近い計測値に合うように各ケースで定めた。

3.5 計算結果

外部環境の変動を与えたものを図-2 に示す。これより、点で示した計測値と線で示した解析値は距離が深くなるほど塩化物イオン量が少なくなるという同様の傾向を示している。そして、表面に最も近い計測値は 2005, 2010 年ともに計測値と同じような値を示し、一般に鉄筋が配置されている内部でも、計測値と解析値はほぼ一致した。

4. 結論

境界における塩分・降雨作用を加えた実験より、コンクリートが乾燥状態にあるとき付着塩分に及ぼす環境作用の影響について以下のことが分かった。

- (1) 表面に到達した飛来塩分は付着するが、短期間ではコンクリート中には浸透せず、2mm の範囲に分布する。
- (2) コンクリート表面に塩分が付着した状態で、降雨などにより表面から水分が浸入すると、表面に付着した塩分の一部がコンクリート中に浸透する。
- (3) 水分作用が、降雨のようにコンクリート表面を液状水が流れる場合、コンクリート表面に付着した塩分の一部は離脱する。

既往の研究で開発された飛来塩分の解析法・付着塩分の侵入モデル・コンクリート中の塩分移動解析法を組み合わせることで以下のことが確認できた。

- (1) 実構造物における長期的な塩分浸透性状を再現

表-3 計算条件

配合	単位水量(kg/m ³)	160
	単位セメント量(kg/m ³)	476
材料パラメータ	V_0	0.0935
	B	39997
	C	0.5
	K_V	0.0260
	K_l	0.000521
	K_{lp}	0.0260

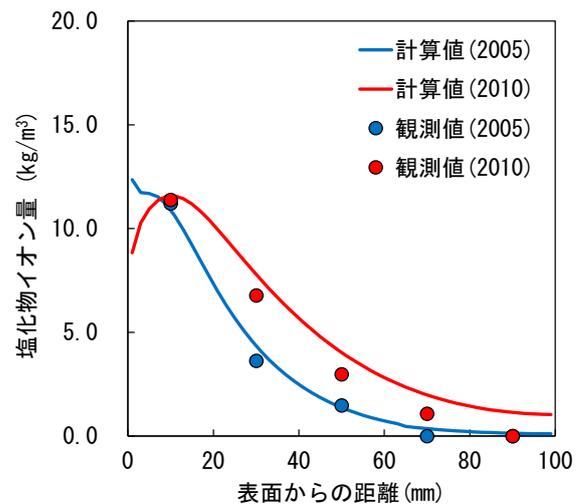


図-2 計算結果の比較

できた。

【参考文献】

- (1) 中村文則・下村匠・大原涼平・細山田得三, 飛来塩分の予測シミュレーション技術の開発と構造物の長期的な塩害環境作用の評価への適用, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.75, No.2, pp.60-79, 2019
- (2) 小林悟志・下村匠, コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.831-836, 2002
- (3) 西利明, ひび割れを有するコンクリート中における水分移動現象のモデル化, 長岡技術科学大学, 1999.2
- (4) 中村文則・下村匠, (一財)日本建設情報総合センター研究助成事業 コンクリート構造物の維持管理に応用した CIM の構築とその有効活用報告書, 平成 29 年 9 月