

飛来塩分量の経時的变化に対する塩害照査法の検討

Method for prediction of salt damage with Chronological change of airborne salt content

北海道大学工学部

○学生員

東城佑樹(Yuki Tojo)

北海道大学大学院工学研究院

正会員

ヘンリーマイケル(Michael Henry)

1. 背景

地球温暖化は、近年では世界共通問題として知られており、IPCC の報告によると 2100 年までの 80 年間で地球表面温度が平均 2 度～5 度上昇するとされている。

地球温暖化が引き起こす現象に、海面上昇や気候変化がある。海面上昇は主に海水の熱膨張とグリーンランドや南極大陸における氷の融解が原因であり、気候変化は海水蒸発量の増加等による気流の変化が原因である。

海面上昇や気候変化は、日常生活を支える社会資本に影響を及ぼすことが懸念されており、1 つとして塩害が挙げられる。塩害は、橋梁の性能を低下させる現象であり、風や水飛沫などにより運ばれる飛来塩分がコンクリート表面に吸着し、その一部がコンクリート内部へ侵入することに始まる。侵入した塩化物イオンは内部で拡散し、鋼材位置に到達すると鋼材周りの防食被膜を破壊して、鋼材の腐食を促進させる。その結果、鋼材自体の体積が減少して荷重に対する安全性が低下し、また生じた錆は周囲のコンクリートを圧迫してひび割れを引き起こす。

飛来塩分量は周辺環境の影響を受けるため、橋梁の設計や維持管理においては、地域環境に基づいて塩害に対する危機管理と対策が施される必要がある。

しかし、従来の塩害照査に用いられている方法は、環境変化に伴う塩害リスクの変化が十分に考慮されていない。特に地球温暖化による将来の海面上昇や気候変化が見込まれている今、飛来塩分量の経時的变化を考慮したより高精度な塩害予測法が求められている。

本研究では、環境変化に対応した塩害照査法を提案するため、大気中塩分量の経時的变化に依存した鋼材位置での塩分濃度算出式を考案する。次に、暫定的な初期環境と環境変化シナリオを設定し、各環境要因と塩害耐用年数変化の関係性について考察する。

2. 塩害照査式の考案

(1)従来の塩害照査式

従来、橋梁の設計・維持管理における塩害照査には、次の式(1)が用いられている。

$$\left(\frac{C}{C_{lim}}\right) \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 C_{lim} : 鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 [kg/mm³]

C : 鋼材位置での塩化物イオン濃度[kg/mm³]

鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{lim} [kg/mm³]は、セメントの種類と水セメント比 W/C によって値が異なる、普通ポルトランドセメントの場合は式(2)から求められる。

$$C_{lim} = -3.0 \left(\frac{W}{C}\right) + 3.4 \quad (2)$$

また、鋼材位置における塩化物イオン濃度 C [kg/mm³]は、構造内部における塩化物イオン拡散式(3)で求める。

$$C = C_0 \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.1c}{2\sqrt{Dt}}\right)\right] \quad (3)$$

ここに、 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度 [kg/m³]

c : かぶり厚[mm]

D : 塩化物イオンに対する拡散係数[cm²/年]

t : 経過時間[年]

コンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_0 [kg/m³]は、コンクリート示方書に定められている、海岸からの距離と地域に基づいた関係表より求められる。

また、拡散係数 D [cm²/年]はセメントの種類により値が異なり、普通ポルトランドセメントの場合は関係式(4)から求められる。

$$\log_{10} D = 3.0 \left(\frac{W}{C}\right) - 1.8 \quad (4)$$

ここに、 W/C : 水セメント比、である。

しかし、この従来の照査法には、環境変化に対応した塩害照査に適用できない問題点が2つある。まず、塩分濃度拡散式(3)は、フィックの第二法則を C_0 が時間によらず一定という条件で解いた結果式である。従って、本式は C_0 が経時的な変化を示す場合の塩害照査に有用であるとは言えない。また、表面塩化物イオン濃度 C_0 が、橋梁と海岸線との距離及び地域区分のみに基づいて決定されている点にも問題がある。 C_0 の経時的变化は、海岸侵食による距離の変化だけでなく、気候変動による風条件の変化にも影響を受けると推測できる。

そこで本研究では、 C_0 の経時的变化に対応した濃度拡散式の開発と、風条件も考慮した新たな C_0 推定法の導入を試みる。

(2)考案する塩害照査式

海岸侵食と風条件を取り入れた表面塩化物イオン濃度 C_0 の算定法として、次の式(5)を適用する¹⁾。

$$C_0 = 0.988(1.29ru^{0.386}d^{-0.952})^{0.379} \quad (5)$$

ここに、 r : 海風率[%](=海風の吹く時間 / 風の吹く時間)

u : 地上 10[m]における平均風速[m/s]

d : 橋梁から海岸線までの距離[km]

また、(3)式に代わる新たな塩分濃度拡散式について

はフィックの第二法則を有限差分法で解き、式(6)を得た。

$$C_x^{t+1} = C_x^t + D \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (C_{x+1}^t - 2C_x^t + C_{x-1}^t) \quad (6)$$

ここに、 x : コンクリート表面からの深さ[mm]

t : 経過時間[年]

C_x^t : t 年後の深さ x [mm]における塩化物イオン濃度[kg/mm³]

D : 塩化物イオンに対する拡散係数[cm²/年]

式(6)に与える C_0^t は、式(5)で求めた t 年後の表面塩化物イオン濃度 $C_0(t)$ とする。

3. 考案式による将来の塩化物イオン濃度の算定

次に、適用式(5)、本考案式(6)と環境変化シナリオを用いて、 t 年後の鋼材位置における塩化物イオン濃度 C_x^t をシナリオごとに算出する。ただし、式(5)に関して、現時点では IPCC シナリオに基づいた将来の海面上昇量、風速、及び海風比率の予測データが手元に無いため、本稿では環境変化シナリオを暫定的に設定し、各環境要因の変化と塩分濃度変化の関係性のサンプルを得たい。

(1)構造条件の設定

本検討で用いる橋梁のコンクリート特性は、次の通りである。セメントの種類は一般的な普通ポルトランドセメントとし、水セメント比は 50[%]、設計耐用年数は 50[年]と、いずれも標準的な値とする。また、かぶり厚は塩害が激しい地域の最小設計値 50[mm]とし、 D は式(4)より 1.65[cm²/年]、 C_{lim} は式(2)より 1.9[kg/mm³]とそれぞれ算出した。

(2)環境条件の設定

式(5)に含まれる 3 つの環境要因 r , u , d について、表 1 の通り、それぞれ $t=0$ における初期値を 2 種類、50 年後の変化量を 2 種類設定し、計 64 パターンのシナリオを用意する²⁾。

初期条件については、飛来塩分量が多い環境と比較的少ない環境を想定し、8 種類の初期環境 A~H を用意する(図 1 参照)。変化量については、 d は海岸浸食による減少、 r , u の値は気候変化による激しい増加と緩やかな増加の二種類ずつとした。 r , u の値は気候変化によって減少することも考えられるが、本稿では各環境要因 r , u , d の絶対的な変化量と C_x^t の関係性を考察することが目的であるため、増減の違いには着目しない。また、50 年間における 1 年ごとの値の増減は任意に設定し、初期値と最終値の間で次第に最終値に近づくような変化を設定した。

加えて、初期環境ごとに経時的環境変化がない場合を 8 パターン想定し、計 72 パターンにおけるコンクリート内部の塩化物イオン濃度を算定、耐用年数減少量を比較する。

(3)計算条件の設定

本計算では新規設計する橋梁を想定し、式(6)においては初期内部濃度が 0、すなわち $C_x^0 = 0$ とする。これは、

[表 1] r , u , d の暫定的な条件設定

変数	初期値	変化量
r [%]	20[%]	+5[%]
		+25[%]
	45[%]	+5[%]
		+25[%]
u [m/s]	2[m/s]	+1[m/s]
		+3[m/s]
	5[m/s]	+1[m/s]
		+3[m/s]
d [km]	0.5[km]	-0.02[km]
		-0.09[km]
	0.1[km]	-0.02[km]
		-0.09[km]

[表 2] 初期環境別の劣化予測シナリオ数 n と平均耐用年数 T_{ave} [年]

	A	B	E	F
シナリオ数($T_i < 50$)	2	4	4	6
平均耐用年数 T_{ave} [年]	49.3438	45.6563	48.2813	41.7815

現時点で実際の橋梁の塩分濃度分布データが手元にないためであるが、もし濃度分布データがあれば、式(6)は設計のみならず維持管理にも有用な拡散式である。

また、式(6)においては $\Delta t=0.25$ [年]、 $\Delta x=10$ [mm] と設定する。本式は、塩分濃度に限らず一般的な濃度拡散を表す式であり、スケールにより Δt と Δx は様々なパターンが考えられる。本計算では予め $\Delta x=10$ [mm] と設定し、式(6)による Δt 年後の鋼材位置での塩化物イオン濃度が、式(3)による Δt 年後の鋼材位置での塩化物イオン濃度と等しくなるように設定したところ、 $\Delta t=0.25$ [年] となった。

(4)算定結果

初期条件ごとに、9 種類のシナリオに基づいた鋼材位置での塩化物イオン濃度の経年変化のグラフを次頁の図 1 に示す。ただし、凡例は $t=50$ において濃度が高い順に並んでいる。

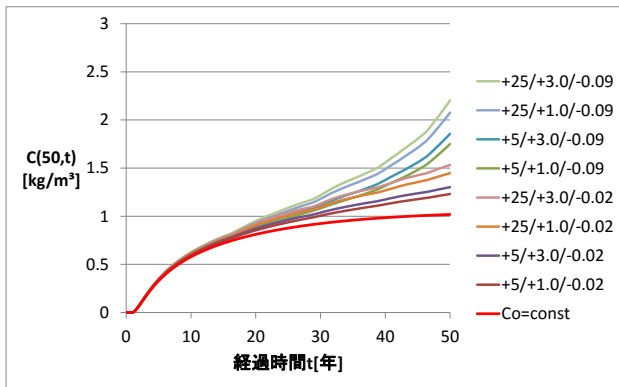
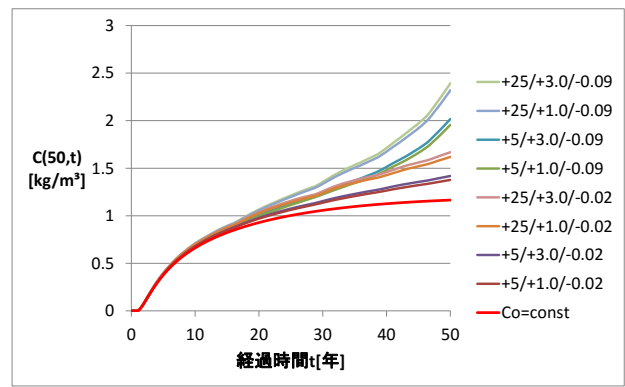
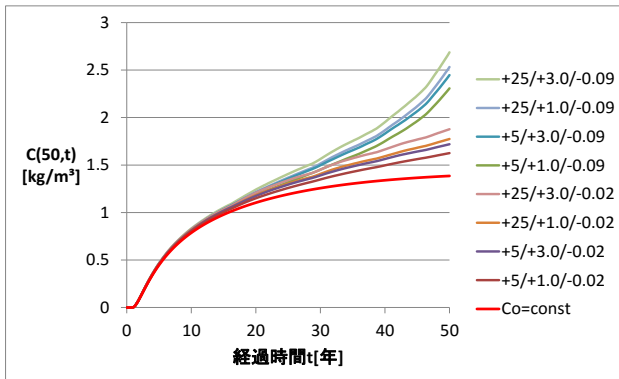
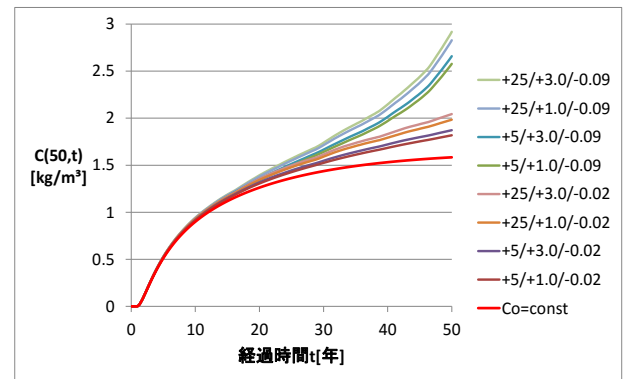
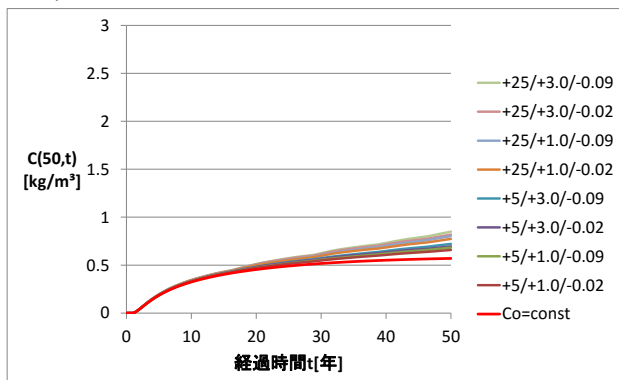
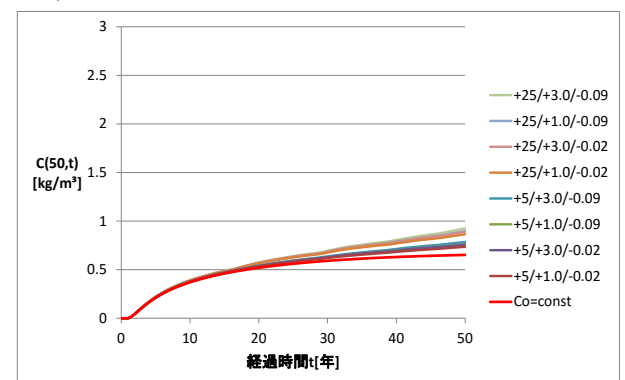
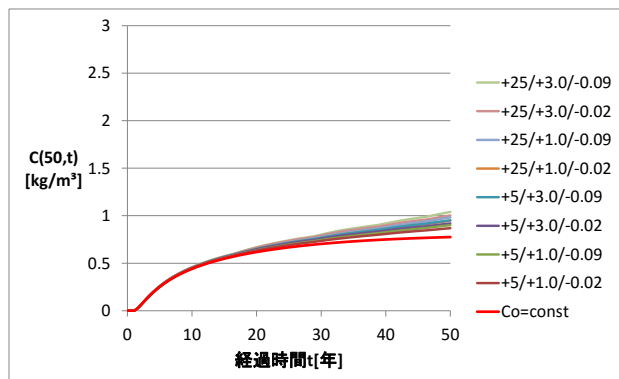
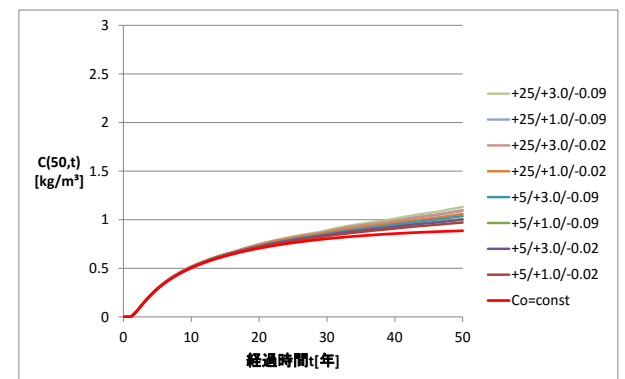
4. 考察

まず、図 1 より、濃度変化の傾向は大きく A,B,E,F と C,D,G,H に分かれている。C,D,G,H の 4 種類の初期環境にある橋梁は、どれも海岸からの距離が 0.5[km] であり、50 年間においては全てのシナリオで式(1)を満たしている ($C_{50}^t < C_{lim}=1.9$) ことから、塩害による劣化の心配は無いと考えられる。

しかし、A,B,E,F の 4 種類の初期環境において、50 年以内に鋼材位置での塩分濃度が C_{lim} を上回るシナリオが確認できる。これは全て海岸から 0.1[km] の位置にある橋梁であり、海岸に近い橋梁は環境変化の影響をより強く受け、塩害劣化を生じる可能性があると考えられる。

次に、劣化の危険性がある A,B,E,F に絞り、初期環境別に、予測耐用年数 T が 50 年を下回るシナリオ数 n と、8 種類全てのシナリオの平均予測耐用年数 T_{ave} を考える(表 2 参照)。ただし、シナリオごとの予測耐用年数 T について、 $T \geq 50$ ならば $T=50$ とする。

2) 各環境要因の暫定的なデータ設定は、参考文献 2) 飛来塩分量全国調査Ⅲ-調査結果およびデータ- 内の実際のデータ傾向に基づいたものである。

A) 鋼材位置における濃度変化【 $r=20$, $u=2.0$, $d=0.1$ 】E) 鋼材位置における濃度変化【 $r=20$, $u=5.0$, $d=0.1$ 】B) 鋼材位置における濃度変化【 $r=45$, $u=2.0$, $d=0.1$ 】F) 鋼材位置における濃度変化【 $r=45$, $u=5.0$, $d=0.1$ 】C) 鋼材位置における濃度変化【 $r=20$, $u=2.0$, $d=0.5$ 】G) 鋼材位置における濃度変化【 $r=20$, $u=5.0$, $d=0.5$ 】D) 鋼材位置における濃度変化【 $r=45$, $u=2.0$, $d=0.5$ 】H) 鋼材位置における濃度変化【 $r=45$, $u=5.0$, $d=0.5$ 】

[図 1] 初期環境 A~H 別にみる鋼材位置での濃度変化【初期条件】

上表から、最も劣化が予測されるシナリオ数が多いのは F の初期環境にある橋梁であり、平均耐用年数もいちばん短い。平均で 8 年以上も耐用年数が短縮し、中でも最も激しいシナリオでは約 16 年の短縮が予測されて

いる。F で劣化が予測されるシナリオは、海岸との距離が 0.01[km]に大きく縮まる 4 ケースと、海岸侵食は少ないが海風率が 70[%]まで増大する 2 ケースである。

次に、B と E の初期環境にある橋梁を比較すると、

どちらも劣化が予測されるシナリオ数とその種類は同じであるが、平均耐用年数は B のほうが 3 年程度短い。そこでこの 2 種類の初期環境をみると、海風率は B のほうが激しく、風速は E のほうが激しいことが分かる。これより、風速が小さくても海風が多く吹く初期環境にある橋梁は、塩害劣化がより早く起こると考えられる。

最後に A と E を比較すると、平均耐用年数にほぼ差は見られないものの、劣化が予測されるシナリオ数は E の方が 2 ケース多い。シナリオ別に見ると、A,E 共に塩害劣化を起こすシナリオは海風率が 45[%]まで上昇するケースであるのに対し、E のみに塩害劣化を起こすシナリオは、海風率の上昇は少ないが風速が増加するケースである。A と E の初期環境の違いは、A よりも E の風速が強いという点のみであるから、もともと風が激しい場所にある橋梁は、風速増加による塩害劣化が起りやすくなると言える。

5. 結論

本検討で環境要因 r , u , d と塩害劣化の関係性として得られたことを以下に示す。

- 1) 橋梁と海岸の距離 d の影響が最も大きく、特に海岸近くにある橋梁は、距離の減少や海風率の増加による塩害劣化を生じやすい。
- 2) 橋梁の初期環境においては、風速 u よりも海風率 r が大きい地点の方が、環境変化による塩害劣化を生じやすい。
- 3) 風速 u が大きい環境にある橋梁は、海風率のみならず風速の増加による塩害劣化を生じやすい。

本関係性は、暫定的な環境予測シナリオを用いており、実際の予測シナリオがこのような環境変化を示すとは限らない。しかし、初期環境の違いと各変化量の大小が塩害劣化に与える影響の傾向は、実際の予測データにも適用することが出来るだろう。

塩害劣化リスクを下げるためには、予測データに基づいて設計・維持管理の際に何らかの人為的な対策を講じる必要がある。本検討より、1 つの対策として橋梁をできるだけ海岸から離れた位置に設計する方法が考えられるが、他の要因である海風率 r 、風速 u については人為的な操作ができない。そのため、今後はセメントの種類や水セメント比 W/C [%]等の配合条件、かぶり厚 c [mm]等の構造条件の違いが塩害劣化に及ぼす影響を検討していきたい。

また、本検討では各シナリオにおける耐用年数減少量を定値として求めたが、実際の環境変化や塩分濃度拡散は多くの不確定要素を含むため、耐用年数減少量は確率的に分布する傾向があると考えられる。そのため、今後は Monte Carlo Simulation を用いた確率計算を行い、塩害リスクを確率的に評価する照査法を考えたい。

参考文献

- 1) 吉田郁政, 秋山充良, 他 2 名: Sequential Monte Carlo Simulation を用いた維持管理のための信頼性評価手法, 2009
- 2) 藤原稔, 箕作光一, 他 1 名: 飛来塩分量全国調査(III)-調査結果およびデータ集-, 1988
- 3) 加藤佳孝, 伊代田岳史, 他 2 名: 鉄筋コンクリートの材料と施工, 2012
- 4) 朝倉啓仁, 田口史雄: 差分法による数値解析を用いたコンクリート部材の塩分浸透解析, 2004