

塩害を受けるコンクリート道路橋の耐久性評価

岡村 甫* 小窪幸恵**

高知工科大学 社会システム工学科

〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

E-mail: *okamura.hajime@kochi-tech.ac.jp **kokubo.sachie@kochi-tech.ac.jp

要旨: 我国の社会基盤施設の老齢化に伴い、維持管理技術や耐久性への関心、必要性はますます高まっている。構造物の性能評価を行うための研究は現在多くの機関で進められている。しかし、これらの多くは個別部材・構造物を対象としており、国や県といったある機関単位で管理する複数構造物の評価を対象としているものは少ない。筆者らは、維持管理予算や計画の立案に必要となる、構造物全体のマクロな耐久性評価システムの構築を試みている。その第一歩としてコンクリート橋梁に対する塩害劣化を対象として研究を進めている。システムの概要と、その精度を左右する劣化メカニズムに対する検討、そしてアウトプットとしての劣化シミュレーション、維持管理費試算の例を示す。

Abstract: Currently, simulation system for concrete deterioration that brings the possibility of evaluating the performance of the concrete structures is now under researching by many institutes. Most of the simulation systems are intended for an individual structure or single member. Based on these facts, it is necessary for all structures that are managed by organization such as country or prefecture to establish the system that is able to evaluate the performance of the structure and maintenance cost. The authors proposed the system with the methodology to compute the total maintenance costs for chloride attack by probabilistic way in preceding paper [1]. In order to improve the system, modelling of chloride penetration was proposed.

1. はじめに

社会基盤構造物の成熟と老朽化に伴い、効率的な維持管理システムの構築が意識され始めて久しい。構造物のライフサイクルコスト(LCC)やアセットマネジメントといった維持管理上の手法は、大量の構造物を少ない人員で低コストに維持しなければならないという社会の要請と相まって、その効率的な実施が試みられてきた。しかし、現状において現実的なLCCの提案、アセットマネジメントの例はまだ少ない。一方、研究の分野においても、劣化進行の理論的研究の蓄積をいかに実構造物の設計・維持管理に繋げるかが一つの争点となっており、より実践的な研究形態の必要性が高まっている。

筆者らが進めている耐久性評価システムは、個別部材・構造物を対象とするものではない。通常、個別構造物の耐久性を評価する場合、なんらかの点検を必要とするが、本システムは点

検過程を経ることなく、ある地域に存在する構造物全体の状況を定量的に把握するシステムである。点検結果はシステムの精度を向上させるためには用いるが、点検結果を用いて劣化状況の把握を行うのではない。必要最低限の点検で適切な維持管理計画を立て、その実行がシステム全体の改善にフィードバックされるものを目指しており、それを総合的マネジメントシステムと位置づけている。

一方、筆者が専門とするコンクリート材料において、その耐久性能に最も致命的な影響を与えるとされる劣化の一つが“塩害”である。我国は、四方を海に囲まれた島国であり、当然のことながら海からの飛来塩分を受ける範囲が広い。また、気象環境の面でも塩害を助長する要因は多く、太平洋側に襲来する台風、日本海側の冬期季節風により多くの塩分がコンクリート構造物に付着・浸透し、内部鉄筋の腐食原因となっている。

2 . 総合的マネジメントシステムの概要

総合的マネジメントシステムの概要について以下に説明する。

実用に耐えうる総合的マネジメントシステムとは、簡単なインプットデータを元に、マクロな劣化予測が可能で、かつ維持管理業務で使用可能な精度を必要とする。簡易性と使用精度のバランスは各劣化要因に与えられるばらつきと劣化メカニズムそのものによって左右される。

システムの手順を図1に示す。まず、図中で対象構造物の形状・寸法、材料特性、劣化外力値等のばらつきを考慮して与え、保有構造物の形式、経過年毎に対する劣化予測を行う。劣化シミュレーションシステムは、各劣化モデルと構造物がその劣化状況に至る確率計算機能から成る。これにより、与えられた全構造物が各劣化状況に至る確率を算出し、将来のある時点における全構造物の性能確率分布が得られる。劣化状況毎の補修計画の仮定を行い、

維持管理コストの算出が可能となる。これを繰り返すことで維持管理計画の最適化が図られる。検証と各部へのフィードバックによりシステム全体の精度向上がなる。このように、検証による精度向上機能をシステムに組み込むことで将来的な改善機能の役割を果たす。

次項では、劣化シミュレーションの精度を左右する劣化モデルについて述べる。

3 . 塩害劣化メカニズム

塩害劣化は(1) 潜伏期、(2) 進展期、(3) 加速期、(4) 劣化期の四つの劣化過程からなり、最終の劣化期以降を使用不可能、つまり更新・補修・補強により劣化期以前の状態に改善してあるべき過程と定義する。上記四つの期間を定義する4つの限界状態を以下に示す。

限界状態 1: 鉄筋腐食開始

限界状態 2: ひび割れ発生

限界状態 3: コンクリートかぶりの剥落

限界状態 4: 使用不可能との判断

筆者らは、潜伏期を表面塩分一定として解いた Fick の拡散式により、潜伏期以降の劣化過程は潜伏期間に比例して進行すると仮定して劣化予測を行ってきた [1] しかしながら、外部からの飛来塩分を受ける場合、表面塩分量は時間に対して増加するはずである。潜伏期間に対する予測精度を向上させるため以下の検討を行っている。

3 . 1 . 潜伏期

潜伏期とは、供用開始からコンクリート内部の鉄筋が腐食を開始するまでの期間である。コンクリート中への塩化物イオンの浸透現象は、拡散理論に基づくものとして Fick の拡散方程式の解を用いて塩化物イオン濃度を推定するのが一般的である。本研究では、表面の塩化物イオン量が時間の平方根に比例して増加するとして解いた式 1 [2] [3] を用いることとする。

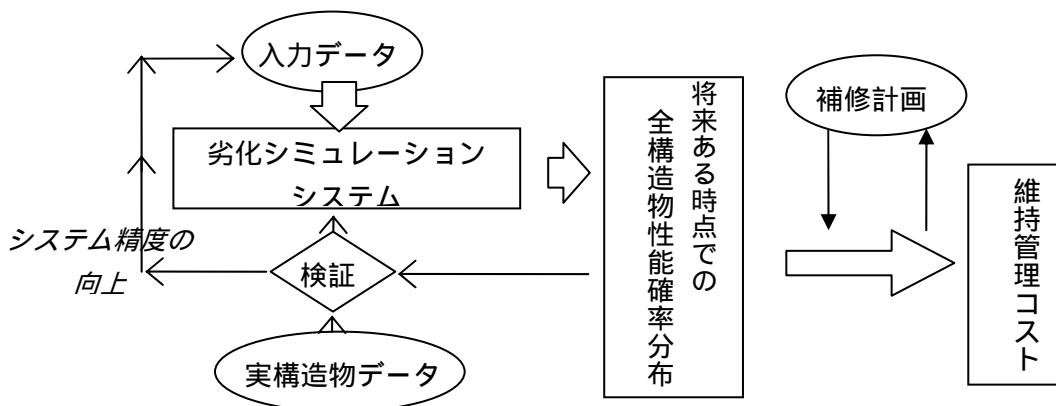


図1 総合的マネジメントシステム概念

$$C(x,t) = S\sqrt{t} \left[\exp\left(-\frac{x^2}{4D \cdot t}\right) - \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D \cdot t}} \left\{ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \right\} \right]$$

式 1

$C(x,t)$: 距離 x 時間 t の塩化物イオン濃度, kg/m^3

S : 表面塩化物イオン濃度係数, $\text{kg/m}^3 \cdot \text{t}$

D : 見かけの拡散係数, cm^2/year

t : 時間, 年

x : コンクリート表面からの深さ, cm

$\operatorname{erf}(s)$: 誤差関数

式 1 より塩分の進入から鉄筋位置において腐食限界塩化物イオン量に達するまでの時間を算出する。

(1) 腐食限界腐食限界塩化物イオン濃度は、平均を 1.8 kg/m^3 、標準偏差を 0.2 とする[4]

(2) 鉄筋コンクリート主筋は、橋軸方向に配置された主筋とそれを取り巻く帯筋とからなる。既存構造物の多くが、主筋の外側に帯筋を配しており、このため塩分による腐食は主筋よりも帯筋の方が早く開始するものの、構造的な欠陥となり得るのは主筋である。

図 2 は、1938 年に建設された鉄筋コンクリート橋の主鉄筋を、電磁誘導方式の非破壊鉄筋探査機でかぶり調査を行った結果である。

主筋のかぶりは約 20mm から 100mm まで分布し、やや対数正規分布の形に近い。これを参考に、かぶりの分布を対数正規分布とし、平均を 1.68mm 、標準偏差を 0.14 とする。

(3) コンクリート内の塩分移動は、濃度差拡散の他に乾湿繰返しの際に生じる水の移動に伴って起こり、その他にも化学的な固定や吸着などが複雑に絡んだ現象である。このように複数の移動機構による実現象での塩分浸透を単純な拡散式(式 1)で表すために拡散係数を見かけの拡散係数として考える必要がある。

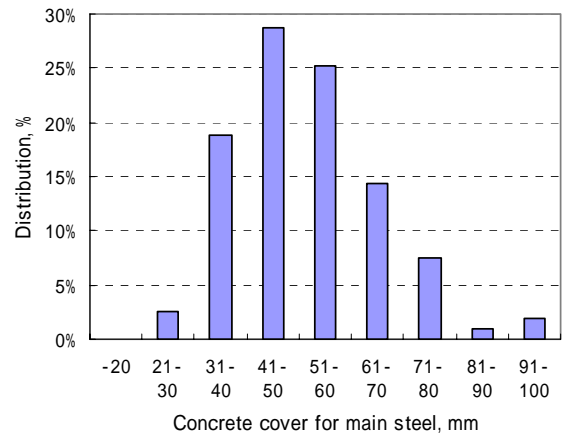


図 2 主筋に対するかぶりの分布

土木学会示方書[4]では見かけの拡散係数として、セメント種毎に水セメント比の関数として提示されている。これは、実験、調査等のコア採取から得られた塩分濃度から拡散方程式を回帰分析して得られた見かけの拡散係数である。従って、同じ水セメント比に対してかなり大きなばらつきを持っている。

一方、コンクリート内部の水分が塩分移動に及ぼす影響は大きく、見かけの拡散係数は水分移動、すなわち乾湿繰返し等の環境条件により変化すると思われる。これを確認するために、東京大学にて開発された、無機複合材料の物質平衡・移動解析システム DuCOM [5] を使用して外部環境を変化させた場合の見かけの拡散係数に対する考察を行った。

DuCOM に対するインプットデータとして、表面塩化物イオン量については、式 1 の境界条件と同様に時間の平方根で増加する(式 2)とし、高知県の気象データを元に温度と湿度変化を考慮した条件で解析を行った。

$$C_0 = S\sqrt{t} \quad \text{式 2}$$

C_0 : 表面塩化物イオン量, kg/m^3

解析結果より得られた塩分濃度分布に対して式 1 の D と S を適当に変化させることで、最も適合のよい D を見かけの拡散係数とした。その結果得られた知見を以下に示す。

1. 見かけの拡散係数は水セメント比の増加とともに図 3 のように増加する。これは既存の調査結果と一致する。

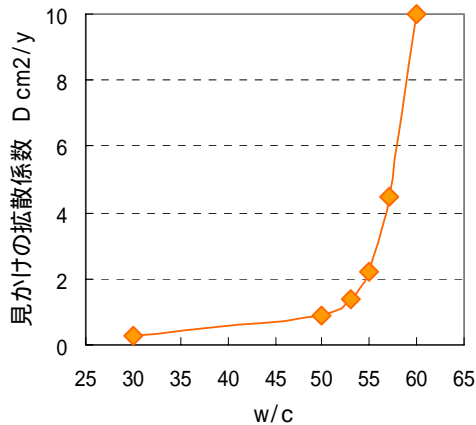


図3 見かけの拡散係数と水セメント比の関係 (S=0.9 で表面塩分を与えた場合)

2. 境界に与える塩分量を変化させた場合、境界塩分量が小さい場合は見かけの拡散係数が大きくなり、表面塩化物イオン濃度係数 0.9 から見かけの拡散係数が一定となった。(図4)

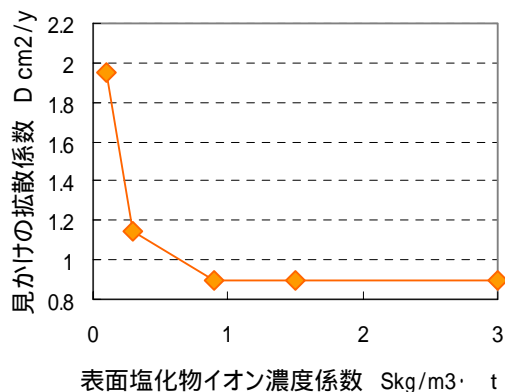


図4 見かけの拡散係数と境界塩分量の関係 (水セメント比 50%)

図4による見かけの拡散係数は水セメント比 50%の場合である。水セメント比 50%の場合、約 10 年間の解析結果において見かけの拡散係数はほぼ一定であるものの、水セメント比を 60%とした場合の解析結果では、見かけの拡散係数は経時変化するなど図4とは全く違う傾向を示す。見かけの拡散係数は、他の要因との関係に不明な点も多いため現在も検討をつづけている。

(4)境界塩分量、すなわちコンクリート表面の塩化物イオン濃度は前述したように式2で表される。土木学会示方書[4]等では、表面塩化物イオン濃度が時間に対して一定と仮定

してあるが、飛来塩分が継続的に構造物に到達する場合、表面塩分は増加傾向を示すはずである。一方、表面塩分量は地域区分と海岸距離の影響を受けることが広く知られているが、同一地域においても海岸距離以外に風速、風向、海岸形状の影響を大きく受けるとスパキットは報告している[6]。例えばスパキットの計算では、高知県安芸市の海岸から 100m 地点の表面塩化物イオン濃度係数 S は 1.5 となるのに対して、同地点から東へ約 20km の奈半利町内の海岸距離 30m 地点で S=1.2 としている。これは各地点の風速と海から飛来塩分の運搬に有効となる風向、そして海岸形状の影響によるものであり、単純に海岸距離のみで飛来塩分量の大小を述べることはできないことを示している。

見かけの拡散係数同様に行った DuCOM による解析結果から、コンクリート表面に境界条件として与えるための表面塩化物イオン濃度係数と塩分浸透後の塩分濃度分布を表現する表面塩化物イオン濃度係数は異なるという結果を得た。これは、コンクリート表面において外部環境よりも高濃度の塩分が集まる擬似吸着と呼ばれる現象が報告されており、合理的な結果であるといえる[7]。

表面塩化物イオン濃度係数についても、見かけの拡散係数とともに現在研究を進めている。

3.2. 潜伏期以降

潜伏期以降の劣化過程は潜伏期間に比例と仮定すると前述した。

潜伏期間を左右する塩分の浸透は、外部から飛来する塩分環境ならびに温度や湿度等の気象環境、コンクリート材料の性質と内部鉄筋までのかぶり特に大きな影響を及ぼす。しかし、これらは潜伏期以降、すなわち腐食開始からひび割れ発生、その後の劣化過程にも同様に大きな影響を与えるため、塩害劣化過程を潜伏期に比例するとして扱うことが可能であると思われる。

4. 特定地域に存在する複数橋梁に対する劣化予測

[1] では、2003 年までに架設された国道コンクリート主桁に対して、将来の塩害劣化の予測と維持管理費の試算を行った。なお、この際の潜伏期間の算出は表面塩分を一定とした場合の Fick 式の解を用いた。Fick 式を構成する、表面塩分量、かぶり、見かけの拡散係数、腐食限界塩化物イオン量、そして潜伏期以降の進展期、加速期、劣化期を算出するための潜伏期の倍数にたいしてばらつきを設定し、国土交通省が保有するコンクリート橋梁主桁の建設年と構造形式、本数をインプットすることで図 5 に示すように現存する桁が経過年毎にどの劣化過程に至るかをシミュレートした。図 5 は、[8] で規定された塩害地域区分 2 (沖縄の海岸から 100m 以上、日本海側特定地域の海岸から 100m-200m まで、その他地域の海岸から 100m まで) における既存主桁の劣化予測である。

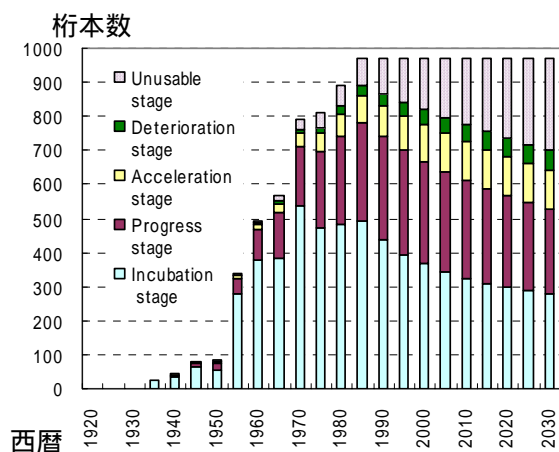


図 5 劣化予測の計算結果
(1984 年以前の国道コンクリート主桁)

図 6 では、図 5 の結果に対し、進展期から劣化期に移った時点で電気防食工法にて補修を行うとして計上した維持管理費である。電気防食工法は、主桁一本につき 1200 万円とし、維持費として年間 12 万円で計算した。

4 . まとめ

コンクリート構造物の総合的マネジメントシステムの概要と、塩害劣化メカニズムに対する考察、そして具体的なシステムのアウトプツ

維持管理費 (百万円)

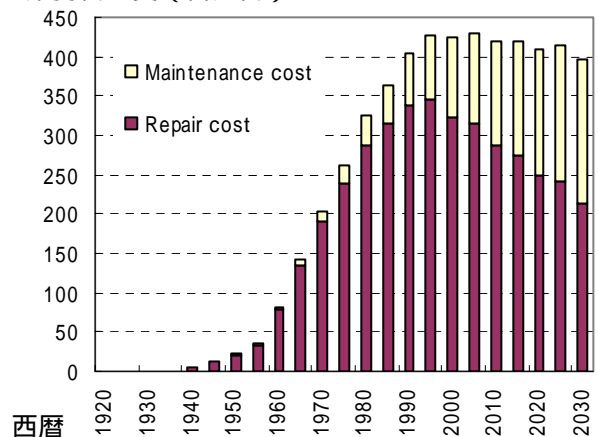


図 6 図 5 に対する維持管理費の予測結果

ト (劣化予測と維持管理コスト予測) の例を示した。本システムの実用性は劣化予測精度と簡易性のバランスに左右される。

劣化精度の向上には、検証データが必要であり、現在高知県内の実構造物の調査を行っている。今後、これらデータによる劣化予測、そしてシステム全体の精度を向上させるとともに、実用可能な形への改善を進めていく。

参考文献

- [1] Nasu S, Okamura H, Kokubo S. Maintenance and Management of Concrete Bridges. IABMAS'04 Kyoto, with CD-Rom, 2004.
- [2] 丸屋剛, 宇治公隆, コンクリートへの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1 p.597-602, 1989
- [3] 川村力 他, 鉄道構造物の調査に基づくコンクリート中への塩化物イオン浸透に関する研究, 土木学会論文集 No.781/ -66, p.193-204 2005
- [4] (社)土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書施工編, 2002
- [5] <http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/ja/>
- [6] Swatekititham S, Okamura H, Life-span Simulation for RC Structures under Japan Oceanography, The second International Congress 2006, Fib, Naples
- [7] 石田哲也「微細空隙を有する固体の変形・損傷と物質エネルギーの生成・移動に関する連成解析システム」1999 年東京大学学位論文
- [8] (社)日本道路協会: 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説, 1984