

ライフサイクルコストおよび施工猶予を考慮した橋梁アセットマネジメントシステムの構築*

Creating a Bridge Management System Considering Life Cycle Cost and Renewal Period*

宮田将門**・森田絵里***・那須清吾****

By Masato MIYATA**・Eri MORITA***・Seigo NASU****

1. はじめに

国・地方公共団体は厳しい財政状況にある中、橋梁アセットマネジメントシステム= Bridge Management System (以下 BMS) の導入による新たな維持・管理手法が注目されている。2008 年現在、国や地方自治体などでは BMS を開発・導入し使用を開始、あるいは導入の検討が積極的に行われつつある状況ではあるものの、現状では BMS がいまだ開発途上であり十分に機能していない、または BMS の必要とする機能がきちんと整理されていない状況であり、日本国内ではそれほどの普及に至っていない。

本稿では、高知県内で BMS が十分に運用されていない理由・問題点を明らかにし、その理由や問題点を克服するために既存 BMS の機能を改善し、運用レベルを目指したシステムの基本構造を提案する。

2. 既存 BMS の問題点と機能改善の提案

(1) 両 BMS の基本構造と問題点

国土交通省では、財団法人道路保全技術センターが開発を行った BMS¹⁾ (国交省 BMS) を使用している。橋梁定期点検結果²⁾ を基に現在の健全度を推定し、補修実施橋梁の選定や必要予算の集計、予算要求に必要な資料作成を支援することを目的としている。補修実施橋梁の選定においては、優先順位付けを行っているが健全度の悪い部材が多いものほど優先順位が上位になる。一方、高知県では、高知県の管理する道路にかかる橋梁を対象に BMS (県庁 BMS) の導入を試行中である。機能としては橋梁の劣化予測、補修工法の選定及び費用算出があり、供用期間 (供用開始から 100 年間としている) 内では、設定した同じ工法を繰り返す仕様となっている。しかしながら、BMS においては、ライフサイクルコス

*キーワード: 施工計画・管理、維持管理計画

**学生員、修 (工)、名古屋大学大学院環境学研究所

(名古屋市千種区不老町、TEL 052-789-3828、

E-mail miyata@urban.env.nagoya-u.ac.jp)

***非会員、学 (工)、高知工科大学大学院工学研究科

****正員、博 (工)、高知工科大学大学院工学研究科

ト解析 (以下、LCCA) の方法論および内容が重要である。現場の劣化現象を十分に再現できていない場合、LCC 最小化により選定した工法が結果的には供用期間内に最も費用が最小に出来ない場合が懸念される。国交省 BMS では、優先順位の設定ができるものの、仮に高欄や伸縮装置など落橋につながる危険部位でなくてもそれらが劣化していた場合は優先順位が上位になる。しかし、現場においては、主桁や床版といった主要部材の劣化に注目して補修の優先順位を決定すると考えられる。また、県庁 BMS の場合は優先順位についての仕組みが未整備であるが、予算制約が実際に存在しているため、今後の改善が必要である。

(2) BMS と予算管理者・現場管理者の視点の違い

国交省 BMS を調査して把握できた点は、BMS を使用することで次回補修および補修の優先順位を決定することができるが、実際に現場で対象橋梁を点検している現場管理者からすると、自分たちの考えている補修すべき橋梁の補修優先順位と、BMS の決定する優先順位にはズレが生じることである。実際に、補修を行おうと考えている橋梁が、BMS における優先順位が最上位のものではない場合も多く、BMS のロジックが現場管理者のロジックと一致していないことが考えられる。ただし、塩害の初期段階では、コンクリート表面上の損傷など、現場技術者が目視点検で確認出来る現象がないことから、劣化の進展状況を必ずしも把握できていないと考えられる。コンクリート内部で進展している塩分の内部拡散や鉄筋の腐食現象は、コア採取などを行わない限り、それぞれの現象の物理的モデルにより予測し、現場の維持管理に反映するしかない。

(3) BMS への機能改善の提案

本稿では、県庁 BMS を対象に機能改善の提案を行うことで、今後の BMS の在り方を提案する。本稿においては、コンクリート橋梁の塩害劣化現象を対象に、既往研究やコンクリート標準示方書に基づく物理モデルと、定期点検により把握した劣化状況により、現在の劣化状況を推定するとともに、今後の劣化がどの様に進行するかを予測する。また、劣化の段階に応じて、様々な補修

工法を組み合わせた供用期間内の長期補修計画を作成する。補修計画は、2種類以上の補修工法を組み合わせる場合や、単純に1種類の補修工法を繰り返す場合も想定する。

長期補修計画ごとにLCCを算出し、劣化の段階毎に、選択する計画毎の供用期間内のLCCを比較する。予算制約が無い場合、LCCが最小になる長期補修計画を選択することで、全橋梁群の合計LCCを最小にする全体補修計画を得ることが出来る。しかし、予算制約がある場合、全ての橋梁の最適な長期補修計画を選択することは出来ないことから、補修に着手する優先順位を決定する必要がある。予算制約の中で最適な優先順位を決定する為には、優先順位に従って長期補修計画を実施した場合、どの橋梁が現在の劣化段階に留まらず次の劣化段階に進み、結果的に次の劣化段階での最適な長期補修計画を選択することになるのかを考える必要がある。選択された優先順位において、橋梁毎に現在の劣化段階から次の劣化段階に進むか否かの判別は、当該橋梁の劣化状況に応じ、現在の劣化段階から次の劣化段階に進むまでの猶予期間を予測することで可能となる。

以上の全ての情報が得られれば、任意の優先順位および任意の予算制約において、全ての橋梁がどの劣化段階で補修が開始されるかが確定し、その劣化段階に対応したそれぞれの最適な長期補修計画も確定する。任意の優先順位から、例えばもっとも全橋梁の長期補修計画の合計LCCが小さい組み合わせを選択することで、最適な優先順位が確定することとなる。

3. 橋梁の劣化予測

橋梁の劣化モデルには様々なアプローチがあり、PONTIS BMS³⁾や従来日本で開発されたBMSおよびBMSの為の基礎研究では、例えば津田ら⁴⁾の研究で示されているように、マルコフ推移確率等を代表とする、過去の目視点検結果に基づいた統計的な劣化予測モデル

点検を開始しているが、全教量の把握には数年を要し、更に過去の履歴がないため統計的な予測は困難である。

橋梁における劣化現象は、疲労、中性化、アルカリ骨材反応、そして塩害など、様々な劣化要因の複合であると考えられる。しかしながら現段階では複数の劣化要因を統合して橋梁を評価することは非常に難しいため、本稿では塩害劣化に着目した劣化の定義を行うこととする。また、鉄筋コンクリート構造物の塩害においては、目視では確認することのできない塩化物イオンの鉄筋コンクリート浸透から、コンクリート表面にひび割れが発生し剥落するまでの一連のメカニズムの表現は統計的な劣化予測では難しく、力学的なメカニズムで劣化予測を行う必要がある。力学的な劣化予測モデルでは、塩害ならば個々の橋梁に対して塩害に影響する海岸からの距離などの環境データを用いて劣化予測の後にLCCの算出を行うことができるため、個々の橋梁ごとに詳細な必要予算の推移を行うことが可能である。本稿では、塩害の劣化予測を、Fickの第2法則(式-1)および鉄筋の断面減少率等^{5) - 8)}(式-2)を利用し潜伏期、進展期、加速期、劣化期を表現することとする(図-1)。なお、両BMSにおいても力学的モデルの導入が行われており、これから順に述べる概念は国交省BMSでは一部採用されている。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) + C(x,0) \quad (1)$$

$C(x,t)$: 深さ x (cm) ,

時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_0 : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

erf : 誤差関数

$C(x,0)$: 初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

$$V_{\text{reduction}} = \frac{4ac}{\phi \gamma_{\text{Fe}}} \cdot e^{-\frac{\alpha t}{a}} \quad (2)$$

$V_{\text{reduction}}$: 体積減少率

a : 腐食量とひび割れ幅を関係づける係数= 1500 (mg/cm^3)

c : 腐食による初期のひび割れ幅= 0.005 (cm)

ϕ : 鉄筋径= 1.3 (cm)

γ_{Fe} : 鉄筋の単位体積質量= 7850 (mg/cm^3)

t : 時間 (年)

α : 腐食速度とひび割れ幅の関係づけ係数= 220 ($\text{mg/cm}^3/\text{年}$)

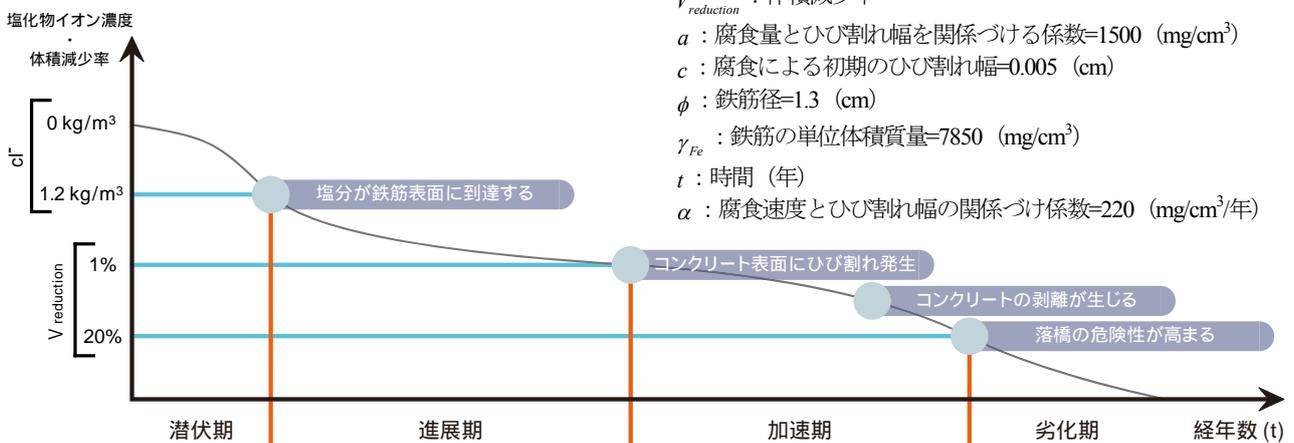


図-1 塩害による橋梁の劣化ステージと代表的な現象

橋、栗の浦橋、江の川橋、須川橋（全てRC-T桁橋）をシミュレーションの対象とする。図-2は穴内橋における劣化予測の結果である。現在は加速期であることが判定できる。また、塩化物イオンの分布は橋梁の中心と両端では異なるため、今回は橋梁の20%は加速期に入る直前の値としている。それらを加重平均し、橋梁としての塩化物イオン濃度を求めた（表-1）。なお、江の川橋については、海岸よりの距離が遠いために劣化進行が遅く、供用期間内に劣化ステージが変わることはなかったため、以降補修対象にはしない。

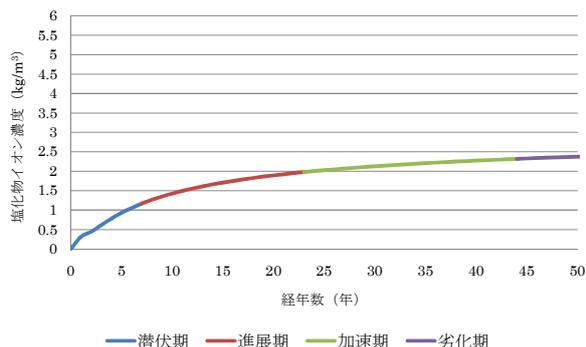


図-2 穴内橋の劣化予測

表-1 対象橋梁の現在の塩化物イオン濃度

橋梁名	部分塩化物イオン濃度 (kg/m³)	加速期直前塩化物イオン濃度 (kg/m³)	全体塩化物イオン濃度 (kg/m³)
安芸市2号橋	1.75	6.22	5.33
穴内橋	1.98	2.27	2.21
栗の浦橋	1.98	2.26	2.21
江の川橋	0.96	-	0.96
須川橋	1.75	6.22	5.33

表-2 現劣化ステージと次ステージまでの猶予年数

橋梁名	現劣化ステージ	次ステージまでの猶予年数 (年)
安芸市2号橋	加速期	2
穴内橋	加速期	9
栗の浦橋	加速期	9
江の川橋	潜伏期	-
須川橋	加速期	2

4. 補修工法費用の算出

工法の費用算出に関しては、ショーボンド建設株式会社坂元氏へのインタビューおよび国土交通省新技術情報提供システム (NETIS) ⁹⁾ 内の申請情報をもとに算出した。以下、全断面修復工法、部分断面修復工法、表面保護工法、電気化学的防食工法それぞれの費用算出式を示す。各橋梁の面積、主桁数などは図面より計算を行った。

$$APR_{Cost} = AU \times MG \times 150000 \quad (3)$$

APR_{Cost} : 全断面補修工法の費用

AU : 主桁底面積

MG : 主桁数

$$PR_{Cost} = APR_{Cost} \times 0.2 \quad (4)$$

PR_{Cost} : 部分断面修復工法の費用 (全断面の2割と仮定)

$$SC = AU \times AS \times MG \times 20000 \quad (5)$$

SC : 表面保護工法の費用

AU : 主桁底面積

AS : 主桁両側面積

MG : 主桁数

$$CP = AU \times 80000 \quad (6)$$

$$rCP = AU \times 25 \quad (7)$$

$$eCP = AU \times 7000 \quad (8)$$

CP : 電気化学的防食工法初期費用 (1年目のみ)

rCP : 1年あたりの電気代 (1年目以降毎年)

eCP : 電源交換費用 (20年に一度交換)

5. LCCA および優先順位の決定

現状あるいは今後に対して適用可能な補修方法を定めた (表-3)。工法によっては、塩化物イオン濃度が初期値に戻るものもあれば、電気防食のように変化のないものもあり、補修によっては劣化進行過程ステージが戻る可能性もある。例えば断面修復のみであれば塩化物イオンは10年以内に再劣化をし、現状と変わらない劣化ステージに入ってしまう。結果的にはそれ以外の工法を適用する必要がある。それらを考慮した上で、穴内橋に最適なシナリオは電気防食を現ステージ内に適用することにより、LCCを最小化でき (図-3)、1年あたり566,211円となる。

表-3 各ステージにおける適用推奨補修工法

	適用推奨補修工法
潜伏期	表面保護工法、電気化学的防食工法
進展期	電気化学的防食工法
加速期	電気化学的防食工法 (部分的な断面修復工法を含む)
劣化期	断面修復工法 (早急に行う必要がある)

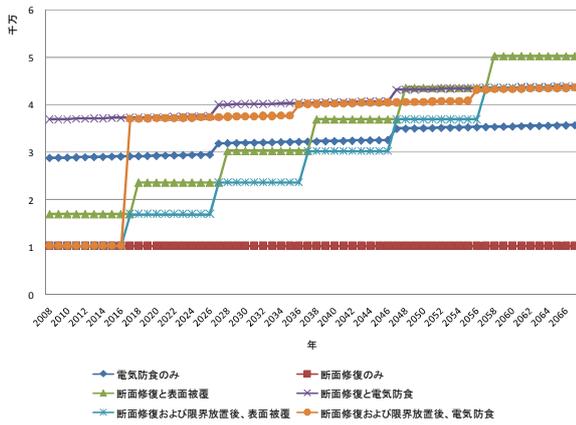


図-3 穴内橋 LCCA の結果

江の川橋を除く、現ステージでの維持修繕計画の合計費用は、7,915 万円となった。次ステージでの費用は 10,033 万円となり、現ステージでの補修が最も望ましい結果となった(図-4)。

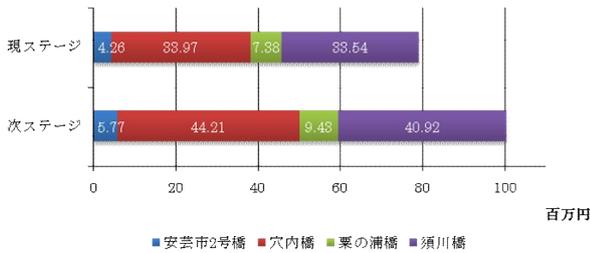


図-4 現および次ステージでの最小総補修費用

予算制約を考慮する場合には、各橋梁の LCCA 結果を利用して、補修工法の組み合わせを行う。条件として、ステージの移行に伴う LCC の変化を考慮し、算出を行う(式-9)。今回は1年で5橋のための維持修繕費が一千万円と仮定し、積み立てを可能と仮定しシミュレーションを行う。4橋における順序の組み合わせは24通りである。その24通り全てを仮に現ステージの猶予期間内、予算で行うことができる組み合わせは限られてくる事が分かる。また、一千万円では全ての橋梁を現ステージ内で行うことができない事が分かる。最も総費用を低くするための優先順位は、次の6通りであった。

$$\sum_{i=1}^4 L_j^i \quad (9)$$

L_j^i : 橋梁 i における j 期の LCC 最小化修繕計画
 j : 各劣化ステージ (潜伏、進展、加速、劣化)

- i. 安芸市2号橋→穴内橋→粟の浦橋→須川橋
- ii. 安芸市2号橋→穴内橋→須川橋→粟の浦橋
- iii. 穴内橋→安芸市2号橋→粟の浦橋→須川橋
- iv. 穴内橋→安芸市2号橋→須川橋→粟の浦橋
- v. 粟の浦橋→安芸市2号橋→穴内橋→須川橋
- vi. 粟の浦橋→安芸市2号橋→須川橋→穴内橋

上記6通りであれば、総費用は、86,533,614 円に総費用は収まる。これは現ステージで全て実施可能な場合と比べて7,379,730 円の出資が必要となる。

6. おわりに

本稿では、塩害における物理モデルの導入を行い、現状の劣化状況を把握し、供用期間内に今後行う補修を LCC および劣化ステージの移行に伴う費用の変化という視点から、補修の優先順位を設定することができた。今後は本稿での BMS の概念をアプリケーションとして開発し、より多くの橋梁に対してシミュレーションを行うと共に、地方自治体でもより安価に行うことができる BMS を目指す。

参考文献

- 1) 財団法人道路保全技術センター：橋梁マネジメントシステム,
<http://www.hozen.or.jp/center/business/kyouryouhozen.html>
- 2) (財) 海洋架橋・橋梁調査会：道路橋マネジメントの手引き, 2004
- 3) U.S. Department of Transportation : Asset Management Primer, 1999
- 4) 津田 尚胤ほか：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集 No.801 1-51, pp.69-82, 2005
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書施工編, 1999
- 6) 守分 敦郎ほか：塩害を受けた栈橋に対する表面処理工法の設計法に関する検討, 土木学会論文集 No.534 6-30, pp.109-123, 1996
- 7) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会, 1998
- 8) 古玉 悟ほか：栈橋の維持補修マネジメントシステムの開発, 港湾技研資料 No.1001, 2001