

報告 LCC を考慮した橋梁の維持管理計画策定システムの開発

二井谷 教治^{*1}・大谷 悟司^{*2}・今野 将顕^{*3}・家入 正隆^{*4}

要旨：橋梁の維持管理費が増加する状況の中、多数の橋梁群を効率よく維持管理するためのツールとして、橋梁維持管理システム（BMS）が各機関で研究開発されている。今回開発したシステムは、これら一般の BMS とは性質を異にし、劣化を受ける個々の橋梁に対して、点検結果による現状評価と劣化過程を踏まえた予測を行い、ライフサイクルコスト（LCC）を考慮した最適な補修・補強計画を策定するものである。塩害を受け対策が施された実橋梁に、本システムを適用したところ、策定された計画と実際の対策とはほぼ一致しており、本システムは、概略の補修・補強計画を立案する場合、十分有用であることが確認された。

キーワード：橋梁，BMS，LCC，補修，補強，劣化予測

1. はじめに

わが国ではこれまで、高度経済成長とともに多数の橋梁が建設されてきており、その数は年々増加してきている。平成 17 年では、橋長 15m 以上の道路橋は、15 万橋近くにもものぼる¹⁾。一方で、これらの橋梁は高齢化が着実に進みつつあるのも事実である。主要道路では、建設後 50 年以上経過した橋梁の数が 10 年後には 4 倍以上になるとの統計データも示されている²⁾。このような状況とともに、これまでストックされてきた社会資本を適切に維持管理することの重要性も年々高まりつつあり、同時に維持管理に費やす費用および労力の負担も増加してきている。これを受け、各機関では橋梁維持管理システム（BMS）が導入されつつある。BMS は、限られた予算の中で、数多くの管理橋梁をどのような順序でどのような対策を行えば最も効果的で効率的であるかを策定するため、管理者の手助けを行うツールとして開発されている³⁾。

これに対して、今回筆者らの開発したシステム（以下、本システムとよぶ）は、個々の橋梁を対象としている点において、一般の BMS とは

性質を異にする。本システムは、塩害あるいは中性化により劣化した、あるいは今後劣化することが予測される個別のコンクリート橋梁について、ライフサイクルコストを考慮した最適な維持管理計画を策定するものである。

本システムの概要については、すでに紹介したが⁴⁾、本稿では、実際の橋梁への適用を試み、その適用性および妥当性について検討を行う。

2. 本システムの概要

図 - 1 に本システムの構成と流れを示す。本システムは個々の橋梁に対して対策を策定するため、まず、既に構築されている橋梁データベースを検索して、諸元や点検結果など対象橋梁の必要なデータをシステムに抽出する。必要事項が蓄積されていない場合には、システムの中で追加入力を行う。

次に、劣化程度の判定を行う。劣化程度の判定は、目視点検結果および詳細点検結果を用い、損傷の有無と損傷程度によって判定する。

つづいて、劣化予測および健全度の評価を行い、対象とする橋梁の予定供用期間に応じて、

*1 オリエンタル建設（株） 技術研究所主任研究員 工修（正会員）

*2 オリエンタル建設（株） 技術部メンテナンスチーム主任研究員

*3 JIP テクノサイエンス（株） システム開発部 工博

*4 JIP テクノサイエンス（株） 事業企画部部長

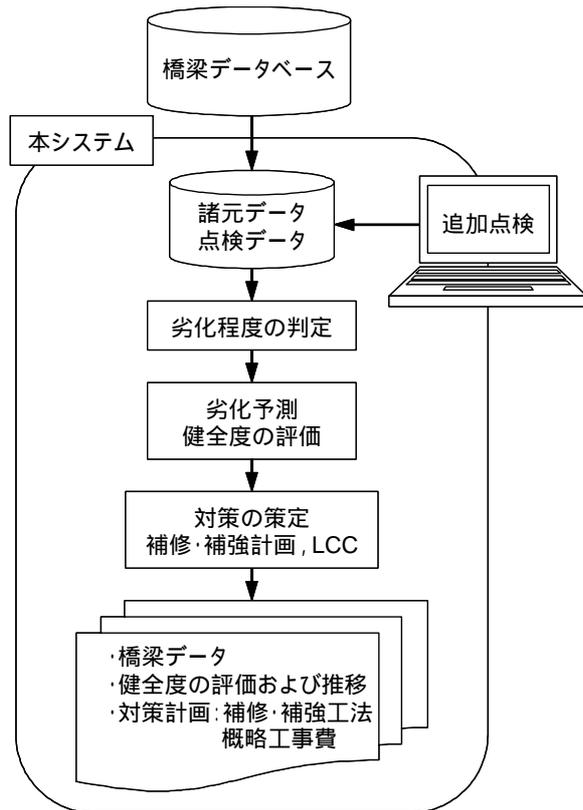


図-1 本システムの構成と流れ

必要となる補修・補強工法とその対策時期およびそれらに要する概略対工事費の可能な全ての組み合わせについて算定し、その中からLCCが最小となる最適な対策を抽出する。

最後に、橋梁のデータおよび上記の結果の概要が帳票形式で出力される。なお、これらの評価判定方法などの詳細については、実際の橋梁への適用事例の中で述べることとする。

3. 実橋への適用事例

3.1 橋梁の概要

先述のように、本システムは、塩害あるいは中性化を受ける橋梁に対して、予定供用期間中必要となる補修・補強計画を、LCCを考慮して最適化するためのツールとして開発した。ここでは、実際に早期劣化損傷を受け、延命化のための対策が講じられてきた橋梁の例を適用し、システムの流れを紹介しつつ、その適用性および妥当性を検証する。

適用する橋梁（以下、A橋とよぶ）は、1974



写真 - 1 A橋の全景

年に供用が開始された、ポストテンション方式のプレストレストコンクリート3径間単純T桁橋である。A橋は、日本海沿岸の入り江をまたぐ位置にあり、特に冬季には、日本海側からの激しい季節風で、直接波しぶきを受けることもある非常に激しい塩害環境下に建設された橋梁である。

A橋は、30年以上前に建設されたもので、当時は外来塩分による塩害という概念が十分浸透しておらず、塩害対策に関する基準類も整備されていなかったものと思われる。したがって、最小かぶりも33.5mmと、一般の環境のものと同等の値となっている。このため、1982年に行われた点検では、早くも塩害による損傷が確認されており、その後、補修・補強が施されている。A橋の全景を写真-1に示す。

3.2 データの入力

最初に必要なデータの入力を行う。データの種類は大きく分けて、橋梁の構造や供用開始時期などの諸元データと点検結果データの2種類である。

橋梁諸元のデータに関しては、既に別途構築されている橋梁データベースがあり、その中に当該橋梁データが蓄積されていれば、その中から必要データを抽出し、連動してシステムにインポートできる。

もう一方の点検データに関しては、目視点検結果が必須であり、含有塩化物イオン量や中性化深さなどの詳細点検結果は、重要な付加データとなる。これらの点検結果についても、すで

表 - 1 A 橋の点検結果

損傷の名称	損傷の程度	損傷要素率	
		損傷要素 全要素	割合
ひびわれ	最大1.2mm	7/30	0.27
剥離・鉄筋露出	-	8/30	0.23
漏水・遊離石灰	-	2/30	0.07
抜け落ち	-	0/30	0.00
補強材の損傷	-	0/30	0.00

に橋梁データベースに必要なデータが蓄積されていけば、自動的にインポートできるが、そうでない場合は、新たに点検結果を入力しなければならない。タブレットパソコンを利用した点検を行えば、点検結果のデータは、システムと連動してインポートできる。なお、点検で取扱う損傷の項目や程度などは、橋梁定期点検要領（案）⁵⁾に準拠して行う。

1982 年に行われた A 橋の点検結果の資料をもとに、橋梁定期点検要領（案）に従ってまとめ直した結果を表 - 1 に示す。ここでは、1 径間目の結果のみ示すが、その他の 2 径間についても、結果は同程度であった。ひび割れ幅は最大 1.2mm、コンクリートの剥離および鉄筋露出もあり、鋼材腐食を伴ったかなりの損傷状況であったと推測される。

3.3 劣化程度の判定

劣化程度の判定では、対象とする橋梁が現時点においてどの程度の劣化状態にあるかを判定する。塩害および中性化による劣化の進行過程は、土木学会の定義⁶⁾に準拠し、点検結果と照らし合わせて評価することによって、現状はどの段階にあるかを判定する。

劣化程度の判定フローと、表 - 1 に示す点検結果をもとに A 橋の劣化程度の判定した結果を図 - 2 に示す。劣化程度は、潜伏期初期～劣化期末期の 8 段階に分割し、劣化程度の評価は、鋼材位置の塩化物イオン濃度、損傷種類および損傷要素率、ひび割れ幅を用いて行う。なお、ここでいう損傷要素率は、損傷要素数/全要素数である。なお、劣化要因が中性化の場合の劣化程度の評価は、鋼材位置の塩化物イオン量の代わりに中性化残りをを用いて行う。

3.4 劣化予測および健全度の評価

次に、適切な対策を策定するために重要となるのが、現状の健全度の評価と以後の劣化予測である。すなわち、劣化程度の判定では、劣化がどの程度進んだかを判定するだけであって、橋梁を安全に供用していくために必要な対策を決定するには、橋梁に本来求められていた性能

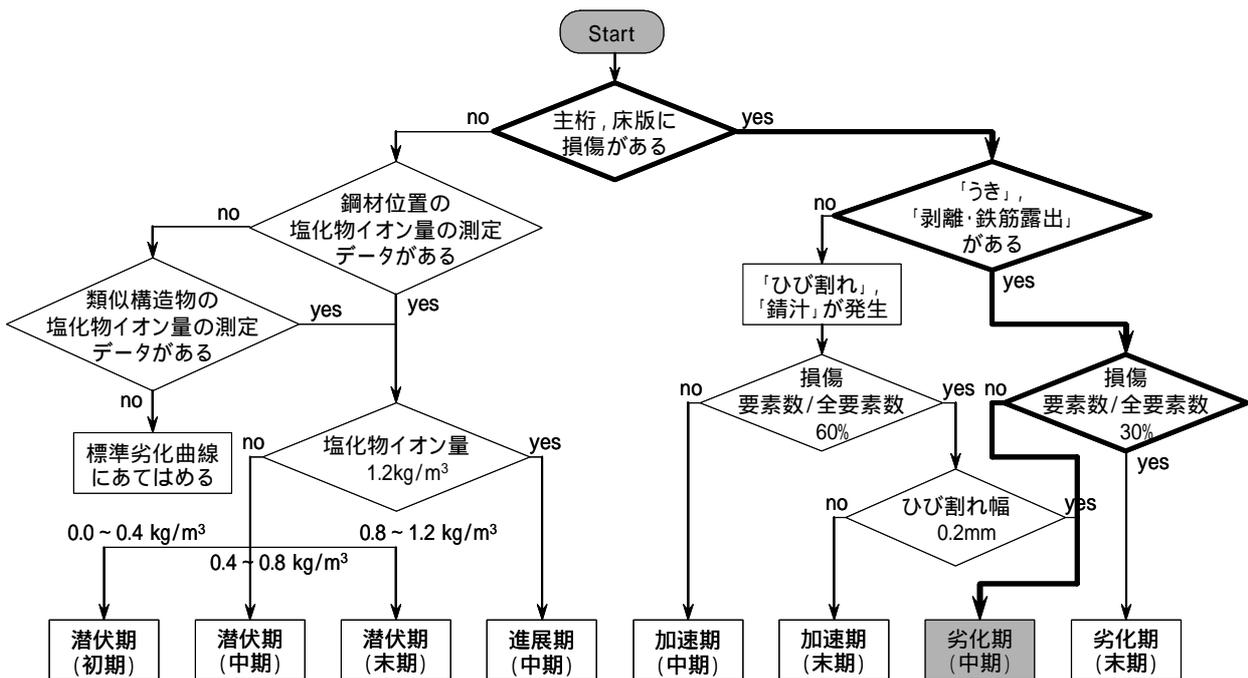


図 - 2 劣化程度の判定フローおよび判定結果

がどの程度低下して、今後どのような速度で低下していくかを予測する必要がある。

本システムにおいては、健全度と供用開始からの経過年数との関係を劣化曲線と定義し、健全度の経年変化を供用開始後の年数の関数として表している。本システムで取り扱う性能は、耐久性能および耐荷性能で、それぞれに対応した劣化曲線を 2 種類用意している。耐久性能の低下は、コンクリート中に浸入する塩化物イオン量あるいは中性化深さによって決まるものとし、鋼材位置での塩化物イオン量あるいは中性化残りと鋼材腐食発生限界値との比較によって、耐久性の健全度を設定する。耐荷性能に関しては、橋梁の曲げモーメントに対する耐荷安全率を指標として健全度の評価を行う。この場合、曲げ破壊抵抗モーメントの低下は、引張鋼材の腐食減量に左右されると仮定する。なお、鋼材の腐食減量は、劣化曲線を設定する際に、酸素の供給速度と酸化反応速度を設定して算定を行っている。

システム内には、これら 2 種類の劣化曲線について、塩害および中性化の劣化要因ごとに、基本となる標準劣化曲線を備えておき、適用する橋梁については、それらを利用して個々の劣化曲線を設定する方法を採用している。点検時の橋梁の供用後年数と、評価した劣化程度に対応した健全度によって、標準劣化曲線を個別の橋梁に適する劣化曲線に補正する。なお、標準劣化曲線は、塩害あるいは中性化によって劣化が予測される環境下の橋梁を想定し、解析的なシミュレーションを行って設定した。

設定した塩害の場合の耐久性および耐荷性の標準劣化曲線を図 - 3 および図 - 4 に示す。耐久性に関する健全度は、鋼材位置の塩化物イオン量が 0kg/m^3 のときを 100 とし、 1.2kg/m^3 になる時点を 0 とする。中性化については、中性化深さが 0mm の場合を 100 とし、中性化残りが 10mm になる時点を 0 としている。一方、耐荷性に関する健全度は、鋼材がまったく腐食しておらず、健全な場合の曲げ破壊安全度を 1.7 と仮定

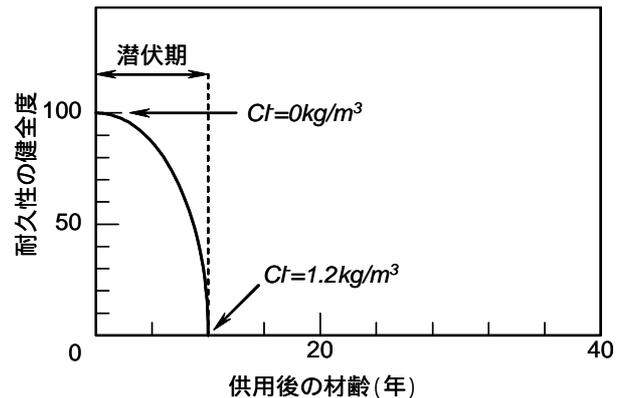


図 - 3 耐久性の標準劣化曲線

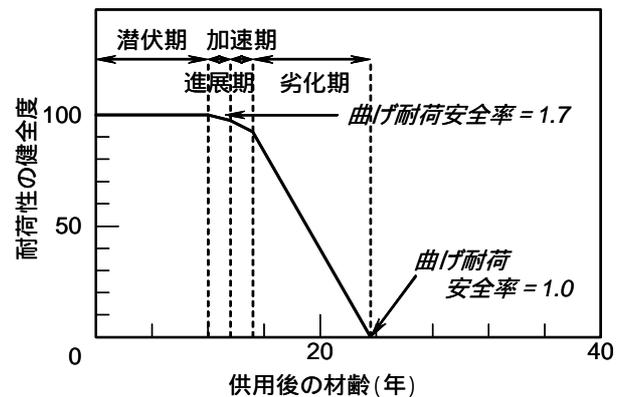


図 - 4 耐久性の標準劣化曲線

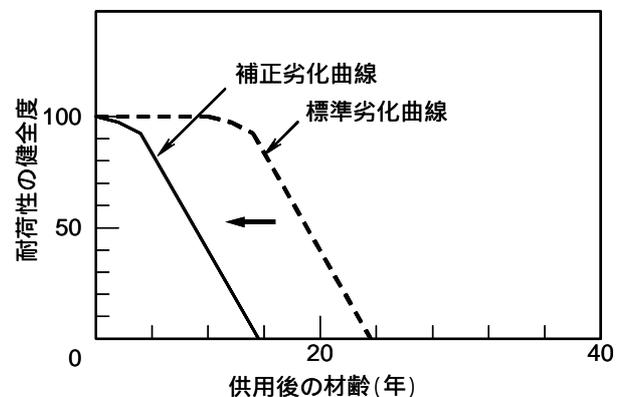


図 - 5 耐荷性の劣化曲線の補正

し、そのときの健全度を 100、鋼材腐食の進行とともに曲げ破壊安全度が低下し、1.0 になった時点を 0 としている。

図 - 5 は、A 橋の供用開始後 8 年目の点検結果に基づいて、標準劣化曲線を A 橋に対する劣化曲線へ補正した結果の概略を示す。本システムによって、自動的に補正した A 橋の劣化曲線では、供用開始後 13 年程度で耐荷性の健全度が 0 になると予測された。健全度 0 とは、設計荷重

満載時の曲げ破壊安全度が 1.0 であることを意味し、13 年以上安全に供用を続けるためには、それまでの間の早期に何らかの対策が要求される。

3.5 補修・補強計画および LCC の算出

本システムに備える補修・補強工法は、劣化過程ごとに設定し、工法の種類および単価は、過去の実績や既往の研究成果を参考にして決定した。また、対策を実施した場合、適用された工法により橋梁の性能が回復したり、性能が維持されたりすることが考えられる。そのため、工法ごとに適用した場合の健全度の回復度およびその後の劣化進行度もあわせて決定した。

次に、策定された対策に応じて、橋梁の予定供用期間を通じて必要となる対策費の総計（LCC）を算出する。一般的に LCC は、割引率やリスクなども考慮する場合があるが、本システムでは、補修・補強工事費および撤去費の総和で算出し、点検費用も含まない。最適な対策の組み合わせの決定方法は、対策を実施する時期を各劣化過程の中間年とし、劣化過程ごとに設定した数種類の補修・補強工法を実施するかどうかの数本の分岐を作成する。この操作を全ての分岐点において同様に繰り返し行い、可能な限りの全てのシナリオについて LCC を算出する。そして、これら全てのシナリオの中から、LCC が最小となる組合せなどを条件として、最適なシナリオを抽出する。なお、対策を実施する分岐点のタイミングは、各劣化期の中間年に加え、選択できる対策は架け替えのみとして、劣化期の末期も考慮した。

表 - 2 は、A 橋において実際に施工された対策と、供用期間を供用後 100 年として LCC を最小にするという条件のもとで、本システムにより選定された対策との比較を示す。実際の施工では、1984～1987 年にかけて第 1 回目の対策が実施され、断面修復工法と表面被覆工法が施されている。さらに、2000～2001 年にかけて第 2 回目の対策が実施され、表面被覆撤去、断面修復工法、表面被覆工法および外ケーブル補強工

表 - 2 A 橋における対策の比較

事項	実際に施工された工法	システムにより選定された工法
供用開始	1974年	
点検実施	1982年	
第1回目の対策	1984～1987年 ・断面修復 ・表面被覆	1982年 ・断面修復 ・表面被覆 ・外ケーブル補強
	2000～2001年 ・表面被覆撤去 ・断面修復 ・表面被覆 ・外ケーブル補強	1994年 ・表面被覆撤去 ・表面被覆
第3回目の対策	-	2008年 ・表面被覆撤去 ・断面修復 ・表面被覆
	未実施	
供用後100年	2074年	

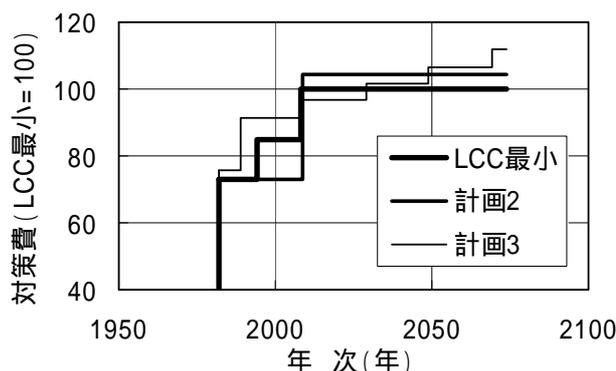


図 - 6 対策の実施による LCC の推移

法が施されている。一方、本システムで策定された対策では、1982 年に第 1 回目の対策が計画され、断面修復工法、表面被覆工法および外ケーブル補強工法が採用されている。つづいて、1994 年に第 2 回目の対策が計画され、表面被覆撤去および表面被覆工法が採用されている。さらに、2008 年に第 3 回目の対策が計画され、表面被覆撤去、断面修復工法および表面被覆工法が採用されている。対策時期については、両者に多少の差異があるものの、2 回目までの対策を通じてのすべての対策種類では、両者はほぼ一致している。また、第 3 回目の対策は、実際の施工でも十分考えられる。これらのことから、実務者が選定して実際に施工されてきた対策と、

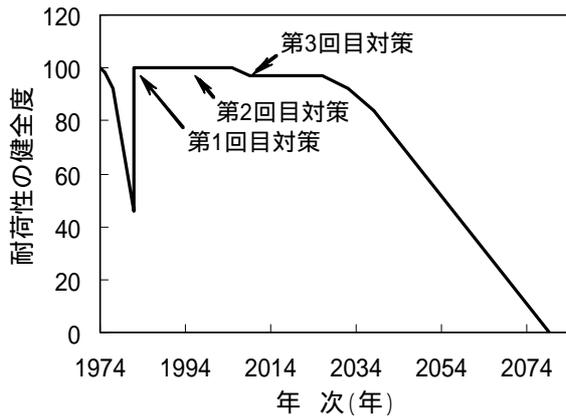


図 - 7 対策による耐荷性の健全度の推移

本システムによって策定された対策計画は、ほぼ同等のものであり、その妥当性が検証された。

本システムで策定された対策を実施したときの、LCC の推移を図 - 6 に示す。なお、対策費は LCC 最小の場合を 100 としたときの値である。図中の LCC 最小 は LCC が最小となる最適な対策計画で、計画 2 および 計画 3 は、LCC が 2 番目および 3 番目の対策計画である。計画 2 は、採用された計画にひび割れ注入を併用した対策であり、計画 3 は、炭素繊維補強工法と電気防食工法を主体とした対策である。なお、電気防食工法では、20 年ごとの更新費が含まれている。

図 - 7 は、本システムにより策定された最適な対策計画を実施したときの、耐荷性の健全度の推移である。表 - 2 に示したように、1982 年の第 1 回目の対策において、外ケーブル補強を実施するため、耐荷性の健全度は 100 に回復する。その後、表面被覆や断面修復を施すことにより延命化を図り、供用開始後 100 年と仮定した供用期間中、健全度を 0 以上に維持する。これにより、曲げ耐荷安全性が確保されることになる。

以上のことから、本システムを活用することにより、劣化した橋梁を対処療法的に対策するのではなく、経済性を考慮した長期的な視野にたった対策計画の立案が容易となる。

4. まとめ

今後、橋梁の高齢化とともに予測される維持管理業務の拡大を視野に入れ、個別の橋梁ごとに点検結果を利用して LCC を考慮した最適な補修・補強計画を策定するシステムを開発した。開発したシステムは、あくまで橋梁の補修・補強計画の立案を手助けするツールであるが、実際の橋梁の例と比較検討した結果、その適用性と妥当性が確認できた。ほんの一例での検証であり、十分なものとはいえないが、本システムが、今後、管理者あるいは施工者が橋梁の維持管理業務を行う場合の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路統計年報 2006，2006.8
- 2) 国土交通省：「更新時代に対応した道路政策の考え方」参照，<http://www.mlit.go.jp/road/ir/kihon/sir85.pdf>
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のアセットマネジメントに関するシンポジウム，委員会報告，pp.155-250，2006.12
- 4) 大谷，二井谷，今野，家入：橋梁の補修・補強概略工事費算出システムについて，土木学会第 61 回年次学術講演会，CD-ROM，2006.9
- 5) 国土交通省 国道・防災課：橋梁定期点検要領（案），2004.3
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [維持管理編] pp.83-84，pp.99-100，2001