

塩害環境下にある鉄筋コンクリート床版橋の 期待ライフサイクルコスト最小化による維持管理計画

大嶋 健太*・田中 滋士**・中山 隆弘***

(平成21年10月31日受理)

Maintenance Planning of Reinforced Concrete Deck Bridge under Chloride Contaminated Environment based on Minimizing of Expected Life-Cycle-Cost

Kenta OHSHIMA, Shigeto TANAKA and Takahiro NAKAYAMA

(Received Oct. 31, 2009)

Abstract

A maintenance planning method of a reinforced concrete deck bridge under chloride contaminated environment based on minimizing of the expected total life-cycle cost, namely the expected total LCC while maintaining the allowable lifetime reliability is developed. With this method, a lifetime optimization methodology for planning of the inspection and repair of the bridge that deteriorate over time is able to be numerically discussed.

In this study, the effects of the timing of the inspection and repair of structures on the total life-cycle cost was especially investigated on the basis of the relationship between the amounts of the corrosion of steel rods and the crack width of the concrete.

Key Words: reinforced concrete deck bridge, chloride contaminated environment, structural reliability, expected life-cycle-cost, maintenance planning

1. 緒言

2010年8月に完成予定のオーストラリア・クイーンズランド州・ブリスベン川を跨ぐ第2ゲートウェイ橋では、300年の長期に及ぶ設計耐用年数が採用され、鉄筋コンクリートのかぶり厚を55mmとすれば、300年の耐久性が確保できるとの報道がなされている。

一方、わが国の高度成長期に建設された橋梁の多くはそれほどの長寿命を想定して建設されておらず、現在、それらの多くが人間で言えば老齢期を迎え、財政難に喘ぐ多くの地方自治体では、それらの維持管理費の捻出が財政上の重要課題のひとつになっている。例えば広島県が管理する

橋長2m以上の3536橋の橋梁に限ってみても、その中の1500橋程度が昭和31年～昭和45年に建設されたもので、その中には架設後50年を経過しているものが多い¹⁾。

本研究はそのような状況に鑑み、鉄筋コンクリート橋梁(以下では鉄筋コンクリートをRCと称する)の合理的維持管理計画を立てる際の参考に供するために行った基礎的研究であり、主な目的は橋梁の健全性の判断に構造信頼性理論を導入し、橋梁の供用期間における期待ライフサイクルコスト(以下では、期待LCCと称する)を最小にするような維持補修・補強計画手法を確立することにある。

本研究で、敢えて信頼度、具体的には信頼性指標によって橋梁の健全性を評価しようとする試みの背景には、構造

* 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

** パシフィックコンサルタント株式会社社会政策本部行政マネジメント部

*** 広島工業大学工学部都市建設工学科

物の安全性評価に対する国際標準である ISO2394 の存在がある。すなわち、構造物の安全性の評価は設計の時点のみでなく、供用開始時から供用終了時のいつの時点においても同一の指標で表すことが望ましいと判断したことによるものである。また、後述するように、橋梁のある時点における健全性を確定論的に推定することは、これまでの行政等における調査結果から考えて極めて難しいということも大きな理由のひとつである。ただし、橋梁全体の信頼性指標を計算する手法ははまだ確立されていないので、本研究では、床版そのものの破壊をそのまま橋梁上部工の破壊とみなせる小規模な RC 床版橋を研究対象とした。

近年、橋梁の合理的維持管理手法に関する研究は国内外で多数行われているが、わが国では構造信頼性理論に基づく研究は意外に少なく、筆者らは小幡の研究²⁾以外には知らない。例えば宮本ら³⁾は実務への適用を大前提として、主桁、横桁、支承、床版、舗装面など、橋梁全体の健全度が念頭に置いて、エキスパートシステムと遺伝的アルゴリズムによって既存橋梁の最適維持管理計画を行う手法を提案しているが、構造信頼性理論についての言及はなく、ライフサイクルコストの導入については今後の課題としている。

2. 橋梁の維持・補修計画の現状と課題

本論に入る前に、地方自治体における橋梁の維持管理計画に関わる問題について言及しておく。

ひとつは橋梁の経年変化における劣化予測の問題、他のひとつは健全性評価の問題である。

2.1 RC 橋の健全度と劣化曲線図

図-1 は広島県によって調査された支間長が 15m 以上の RC 橋の主桁および横桁の健全度と供用開始年からの経過年数（以下では「橋齢」と称する）との関係を示したものである。図中の R は相関係数で、色違いは県内地域の違いを表している。

参考のために、写真-1～写真-3 に、それぞれ健全度が 3, 2, 1 に対応する主桁の写真を一部示しておく。因みに、3, 2, 1 と判定された桁は、それぞれ損傷が大きく対

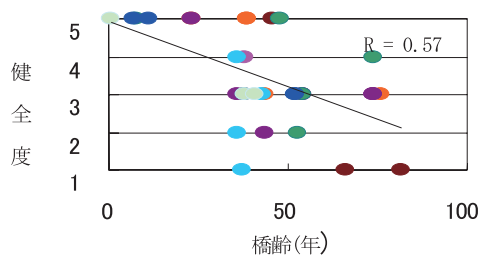


図-1 橋齢と健全度との相関性

策を検討する必要がある、損傷がかなり大きく、健全度 1 に進展する可能性がある、損傷が著しく緊急対応の必要があると看做された桁である。



写真-1 健全度 3 の RC 主桁



写真-2 健全度 2 の RC 主桁



写真-3 健全度 1 の RC 主桁

図-1 より明らかなようにデータには大きなばらつきがあり、両者の相関性はかなり低いことが理解できる。

橋齢と健全度との相関性が低い原因については、①汀線からの距離や風速・風向に關係する塩分濃度、②交通量、③凍結防止剤の散布量、④設計・施工基準、⑤使用材料、⑥施工の良否などが考えられるが、分析するためのバックデータはほとんど無いと言っても過言ではない。

したがって、原因の究明は極めて困難であるが、本研究では、いずれは前述した主目的とも関連することなので、可能な範囲でそれらがどの程度健全度に関係するか検討してみた。

その結果、ある程度予想できたことではあるが、汀線からの距離が短い沿岸部の橋梁の健全度は低く、沿岸から遠く離れた県北部の橋梁の健全度は比較的高い傾向が認められた。その傾向を示す結果が図-2 である。しかし、その傾向とは逆の傾向を示す場合があることも同図より分かる。

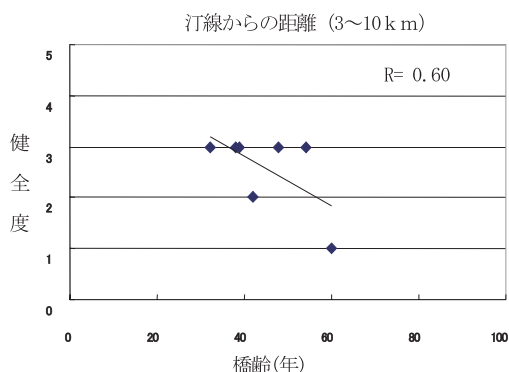


図-2 汀線からの距離と健全度との関係

次に、交通量の影響については平日12時間の重量車両（バスおよび普通貨物車）に対する調査（平成2年度～17年度のデータで日平均値）によるデータから分析したが、図-3に一例を示したように、交通量が多い東広島地域と少ない芸北地域の橋梁の健全度を比較してみても顕著な傾向は認められない。

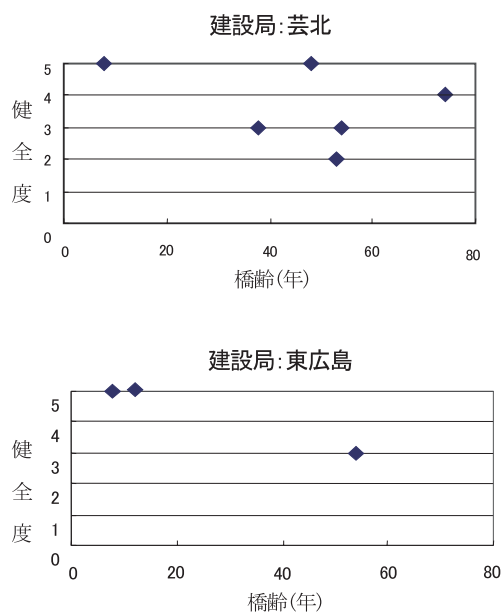


図-3 重量車の交通量と健全度との関係

凍結防止剤の散布による影響も大きいと考えられるが、広島県の場合のデータはないため、中国縦貫自動車道の広島県北部の調査データを図-4(a), (b)に示し、凍結防止剤の散布量と健全度の相関性が低いことを指摘しておく。図-4(a)の横軸は縦貫道の区間(A～V)を表しているが、B地域は凍結防止剤の使用量が多いにも関わらず主桁に損傷のある橋梁が少なく、逆にT地域では防止剤の使用量が少ないものの損傷の見付かった橋梁が多いことが分かる。両者の相関性については図-4(b)によってより具体的に理解できる。両者の相関係数は0.19と非常に小さい。

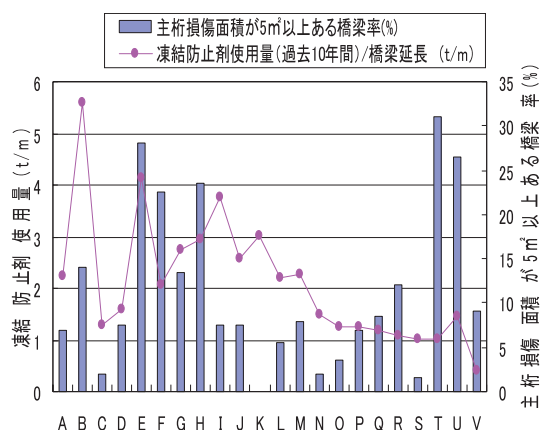


図-4(a) 凍結防止剤と健全度との関係

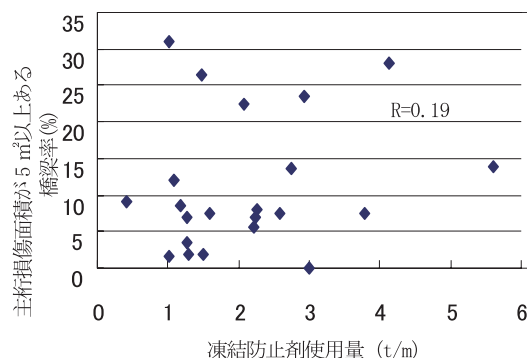


図-4(b) 凍結防止剤と健全度との関係

なお、1960年代当時、西日本地域では海砂が大量に使用された上にポンプ車の性能も悪く、締固め不良が多かったとの関係者の指摘がある。図-1に示したように橋齢が40年代の橋の健全度が特に大きくばらついているのもっとも大きな原因は、前述した要因の⑤（使用材料）と⑥（施工の良否）ではないかとの推測ができる。

2.2 換算橋齢の提案^{4),5)}

橋梁の健全度に経過年数が大きく関係することは極めて自然な現象と言えるが、その他の要因に支配されることは前節で述べた通りである。

本研究ではひとつの試みとして、橋齢に加え、汀線からの距離 d (km)、交通量 q (台/日) などの影響を考慮するために、それらの影響を考慮した補正係数 a を導入した「換算橋齢」という新たな概念を提案することを目的に、次式によって健全度と換算橋齢との関係について検討してみた。

$$\text{換算橋齢 (tr)} = a (d, q, \text{etc}\cdots) \times \text{経過年(年)} \quad (1)$$

ただし、今回は汀線からの距離 d (km) のみの影響を考慮するに止まった。

2.3 換算係数

まず、換算係数が $a(d) = ad + b$ と表せるものとして、

図-1よりも健全度と橋齢との相関性ができるだけ高くなるようにa(d)の右辺に含まれる係数a, bを試行錯誤的に求めた。そして、それによって式(1)の換算橋齢を計算した。その結果をまとめて図にしたものが図-5である。

図の通り、今回の結果による限り、汀線から橋梁の建設地点までの距離のみで補正係数を算定しても健全度と換算橋齢との相関性は相関係数が4%程度高くなっただけで、他の要因を考慮しなければならないことがある程度明確になった。

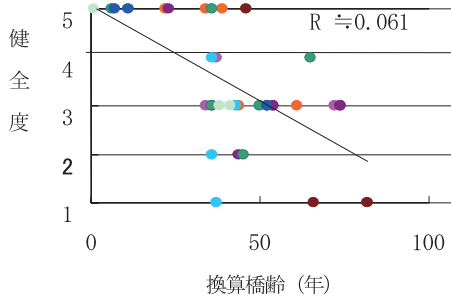


図-5 換算橋齢と健全度との相関性

3. 期待ライフサイクルコストの算定式

本研究室で開発中の構造信頼性理論に基づく橋梁の維持管理計画の支援ソフト「HITLCC」では、わが国の関係者にも良く知られている Prof.Frangopol らの考え方⁶⁾を参考にしている。すなわち、構造部材の供用期間における期待総費用、すなわち期待LCC (CT) が、初期建設費用 C_I 、点検費用 C_{INS} 、維持管理費用 C_{MAIN} 、補修・補強費用 C_{REP} 、期待破壊損失費用 C_F によって式(2)のように与えられるものとしている。

$$C_T = C_I + C_{INS} + C_{MAIN} + C_{REP} + C_F \quad (2)$$

なお、 C_F は供用期間における部材の破壊確率と橋梁の再建費用との積で与えられるが、本研究では、まず二次モーメント法によって床版の信頼性指標 β を計算し、それによって破壊確率を算出している。

さて、上述の Prof.Frangopol らは、橋梁点検時にわずかな損傷でも発見されれば直ちに補修を行うとして期待LCCを算定する方法を提案しているが、著者らは補修の必要性の判断を、塩害による鉄筋の腐食によるコンクリートのひび割れ幅で、また補強の必要性の判断を床版の信頼性指標によって行う方法を提案している。

本論文では、その点についてのみやや詳細に述べておくが、その他の点については図-6に示す通り、基本的に参考文献5)に従っているため、期待LCCを計算するアルゴリズムの詳細については同文献を参照していただきたい。

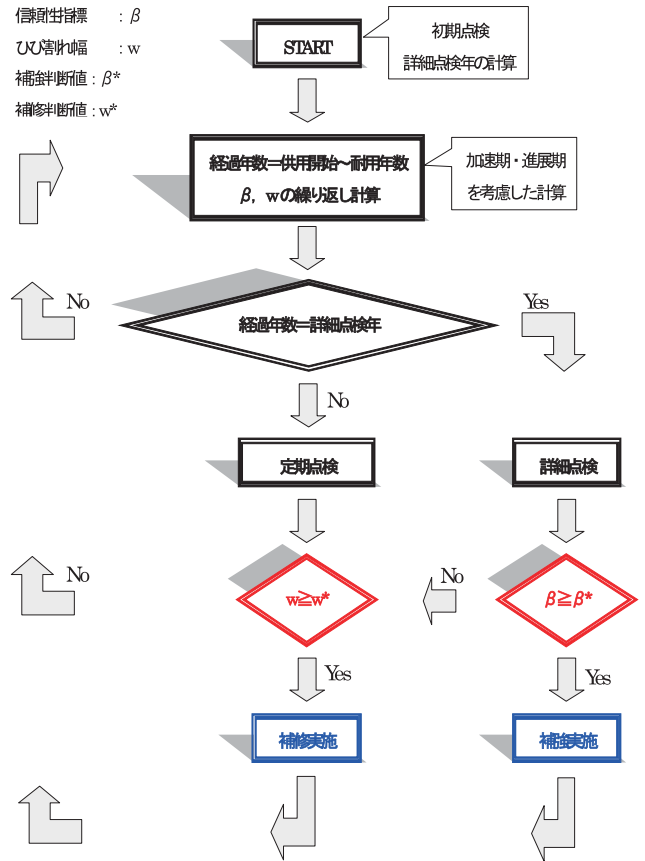


図-6 解析のフローチャート⁷⁾

まず、塩害を受ける鉄筋コンクリート部材は、式(3)で与えられる Fick の拡散方程式を解いて得られる鉄筋の位置における塩化物イオン濃度が鉄筋の腐食限界濃度に達したときに始まる腐食と仮定して、供用開始後あるいは補修・補強後の鉄筋の腐食時期を計算した。

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right) + C_{(x,0)} \quad (3)$$

式中、

$C_d = C_{(x,t)}$: コンクリート表面より x (cm)の位置における t (年)目の塩化物イオン濃度(kg/cm^3)

$C_{(x,0)}$: 供用開始年あるいは補修・補強年におけるコンクリート表面より x (cm)の位置における塩化物イオン濃度(kg/cm^3)

ただし、本研究では $1.2(\text{kg}/\text{cm}^3)$ としている。

γ_{cl} : 補正係数

C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度(kg/cm^3)

erf: 誤差関数

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

参考のために、コンクリート標準示方書⁸⁾に与えられているデータを使って計算した結果を図-7に示す。

この図は鉄筋のかぶりを5cmとしたときの例であるが、

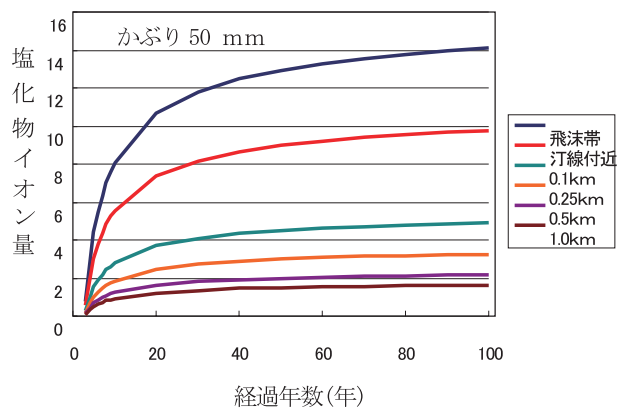


図-7 鉄筋位置における塩化物イオン濃度の経年変化

5 cm 程度では飛沫帯や汀線付近の RC 部材が、開始後、非常に早い時期に腐食が始まる可能性があることが理解できる。本研究では、腐食が始まった後は一定の腐食率で鉄筋断面積が減少するものと仮定し、同時にさびによる鉄筋の膨張のためにかぶりコンクリートにひび割れが発生するものとした。

さらに、鉄筋の腐食量とかぶりコンクリートのひび割れ幅に関する関らの研究⁸⁾に従い、ある時期のコンクリートのひび割れ幅を推定した。両者の関係式は式(4)の通りである。

$$Wc = Wc_1 + Wc_2 = \frac{\gamma}{\pi(\rho-1)} \left(\alpha_0 \beta_0 \frac{0.22 \{ (2c+d)^2 + d^2 \}}{E(c+d)} f_c^{\frac{3}{2}} + \alpha_1 \beta_1 \frac{(c+d)}{(5c+3d)} w \right) \quad (4)$$

式中、

Wc : 鉄筋腐食量 (mg/mm²)

Wc_1 : ひび割れ発生時点の鉄筋腐食量 (mg/mm²)

Wc_2 : ひび割れ発生後の鉄筋腐食量 (mg/mm²)

γ : 鋼の密度 (7.85mg/mm³)

ρ : 腐食生成物の体積膨張率 =3.0

c : かぶり厚さ (mm)

d : 鉄筋の直径 (mm)

w : ひび割れ幅 (mm)

E : コンクリートのヤング率 (N/mm²)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

なお Wc_1 及び Wc_2 の式に含まれる補正係数 α_0 、 α_1 、 β_1 、 β_2 については同参考文献を参考にして頂きたい。

この式に基づいて鉄筋断面積の減少率 (／年) によって鉄筋の腐食が始まって以降のある時期における腐食量を計算すれば、かぶりコンクリートのひび割れ幅を計算できる。したがって、本研究では補修を行う判断をひび割れ幅とし、それによって補修時期を決めている。一方、補強時期につ

いては部材の信頼性指標が指定した信頼性指標 (以下では目標信頼指標と称する) 以下になるとした。そして、このような前提条件の下で LCC を最小にする維持修繕計画を最適計画とみなした。

4. ケーススタディ

4.1 解析モデル

解析対象は、わが国の道路橋設計示方書に依る許容応力度設計法¹⁰⁾(TL-14) で設計された橋長 5.100m、総幅員 4.200m の RC 単純床版橋で、オルゼンの図表を用いた簡易的手法で設計されたものである。因みに、本解析結果に大きく関係するかぶり厚さは 6 cm で、床版厚は 300cm、コンクリートの許容圧縮応力度は 8 N/mm² である。また、主鉄筋は SD295A で、その許容応力度は 140N/mm² である。

4.2 解析ケース

今回は、主として、かぶり厚、定期点検間隔が期待 LCC に及ぼす影響を検討するため、かぶり厚については 4 cm、5 cm、6 cm の 3 ケースを、定期点検間隔については 3 年、5 年、8 年の 3 ケースを考えた。

なお、設計供用期間は 100 年とし、補修の必要性の判定を行うのに必要なひび割れ幅については、目視でも発見が可能とされている 0.04mm、補修の必要性の判定を行うのに必要な許容信頼性指標については、国際標準である ISO2394 を参考にして、使用限界状態に対する値である 1.5 とした。

4.3 考慮した不確実性と初期の信頼性指標

床版の信頼性指標に関わる不確実性については、作用荷重、材料強度、構造解析、施工等、様々なものが考えられるが、今回は破壊モードとしてコンクリートの圧縮破壊のみを考えたので、作用荷重については死荷重のみの不確実性を¹⁰⁾、強度についてはコンクリートの圧縮強度と鉄筋の降伏点の不確実性のみを考慮した。さらに、その確率分布についても正規分布するものと仮定した。

大きな問題となるのが、活荷重の不確実性の影響であるが、本研究では文献¹⁰⁾の村越らの研究に倣い、設計活荷重の大きさを実態調査との関係を考慮し、確率量と考えるのではなく、パラメータ解析による検討に留めている。その結果、信頼性指標の算定は単純な 2 次モーメント法で行うことができる。

まず、コンクリートの圧縮強度の平均値は上述の許容応力度が設計基準強度 (非超過確率 5% の値)、材料安全率を 3、変動係数を 0.2 と仮定して計算した。

さらに、死荷重による最大曲げ圧縮応力度については、設計書の値が非超過確率が 95% の値であるとし、変動係

数については村越らの研究を参考にして0.02と仮定した。活荷重によるそれは、前述の村越らの研究に従い、設計計算書の値をそれぞれ a 倍、すなわち1.0倍、1.5倍、2.0倍、2.5倍とすることとした。ただし、ここでは $a=1.0$ とした場合の結果のみを示す。

4.4 鉄筋の腐食率および費用に関する仮定

本解析に必要な費用については、設計計算書を提供していただいた建設コンサルタント等の協力により、次のように設定した。

- 具体的には、
- 初期建設費：158万円
- 点検費用：60万円
- 維持管理費用：6万円
- 補修・補強費用：257万円
- 再建費用：250万円

なお、補修方法については、補修の必要性の判断を0.4mmとしたことから注入工法によるものとし、また、社会的割引率については、わが国の国土交通省の費用・便益分析マニュアルに示されている0.04を用いた。

4.5 解析結果および考察

許容応力度設計法に基づいて策定されているわが国の現行の道路橋示方書も、港湾構造物の新たな設計基準(11)と同様、いずれは限界状態設計法に基づくものに改訂される可能性が高い。その場合は、多くの現存する橋梁の安全性を信頼性指標で評価し、コードキャリブレーションによって、安全性照査式の部分安全係数を定める必要がある。

したがって、期待LCCに関する解析結果を示す前に、まず今回の解析により、これまであまり検討されることなかったと思われるわが国の道路橋示方書で設計されたRC床版橋の供用開始後の信頼性指標が約3.9程度であるとの結果が得られた。因みに前述の村越らは、本研究と同様、許容応力度設計法に基づいて策定されているわが国の現行の道路橋示方書によって設計された鋼道路橋の主桁の信頼性指標を計算し、支間中央部の曲げ引張破壊および曲げ圧縮破壊に対し、約4.0の値を得ている。

あくまでコンクリートの圧縮強度の変動係数を0.2としたときの結果ではあるが、RC橋についても、鋼橋についても、それらの使用限界状態における信頼性指標は4.0前後ではないかと思われる。

次に、5.2で述べた各ケースに対する解析結果をまとめたものが表-1である。

同表より、期待LCCがもっとも小さくなるケースは、かぶり厚を6cmとし、定期点検間隔を8年としたケースである。この結果によって、直ちに、例えば、広島県等に

おける現行の定期点検間隔である5年よりも8年の方が望ましいとする結論にはならないが、今後、現存する橋梁のモニタリングを通して、合理的な点検間隔を決める必要があるだろう。

さらに、図-8は、供用開始後から設計供用期間である100年までのRC床版の信頼性指標と橋齢との関係を示したものである。

図より、補修のおおよそのタイミングや回数を知ることができる。例えば、かぶり厚を薄くすれば、供用期間に補修を行う回数が増えることを直感的にも分かるが、同図から、かぶり厚を6cm、定期点検間隔を8年としたときには2回の補修を、それらをそれぞれ4cm、3年としたときには3回の補修を行う必要があることを理解できる。

表-1 ライフサイクルコスト

	Ci	Cpm	Cins	Crep	Cf	LCC
ケース	初期費用	予防保全費用	詳細点検費用	補修・補強費用	破壊費用	ライフサイクルコスト
CASE1	158	42.52	20.97	16.09	1.33	238.91
CASE2	158	26.46	20.97	14.74	1.34	221.51
CASE3	158	17.55	20.97	13.8	1.35	211.66
CASE4	158	42.52	22.59	16.46	1.39	240.96
CASE5	158	26.46	22.59	15.06	1.39	223.51
CASE6	158	17.55	22.59	16.85	1.38	216.38
CASE7	158	42.52	26.26	17.09	1.50	245.37
CASE8	158	26.46	26.26	16.56	1.50	228.79
CASE9	158	17.55	26.26	17.24	1.50	220.56

単位：万円

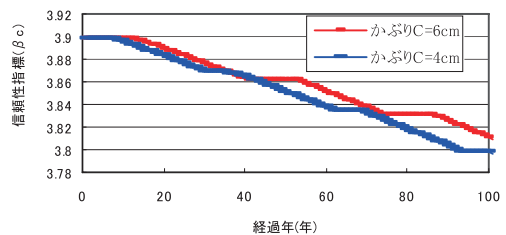


図-8 期待LCCが最小となる場合の信頼性指標の経時変化と補修のタイミング

5. 結言

近年、これまでのように事後保全的手法に依存する方法では将来に亘って老朽化した多くの社会基盤施設を維持補修していくことに財政上の困難を感じている地方自治体では、すでにアセットマネジメントの必要性から予防保全的方法に計画をシフトさせつつあるようである。

ただし、劣化曲線の不確実性や健全性の定量化において、今後委ねられている課題も少なくない。例えば鉄筋コンクリート橋のかぶりが剥離し、腐食した鉄筋が見える状態のまま何年も経過しているものの、機能的には大きな問題にならず、日常的な自動車走行に何ら支障を来していない

橋梁も数多い。

したがって、今後、損傷度と構造部材の機能性との関係
を定量的に表し、その成果を維持管理計画に反映することが
重要である。

本研究は、そのような現状に鑑みてなされた基礎的研究
であり、得られた成果を要約すれば、次の通りである。

1. 現行の許容圧縮応力度で設計された RC 床版橋の圧縮
破壊（使用限界状態）に対する信頼性指標は、コンク
リートの圧縮応力度が正規分布に従い、その変動係数
を 0.2 とした場合には 3.9 程度である。この結果は、
土木研究所の村越らによる、同じく現行の道路示方書
に従って設計された鋼 I 桁橋の信頼性指標 4.0 程度と
ほぼ一致している。
2. 現行の設計体系は、橋梁の耐久性を想定した、換言す
れば、設計供用期間における安全性照査までを行う体
系になっていないが、本研究のような手法によれば、
コンクリート内部への塩化物の拡散、鉄筋コンクリー
トの腐食開始時期および腐食率等を考えて、目標年ま
での信頼性を定量的に評価できる。
3. 設計供用期間における補修や補強のタイミングを適切
に決めることにより、橋梁の信頼性管理と、それに必
要な期待ライフサイクルコストが算定できる。
ただし、構造設計体系の中に耐久性設計を導入するた
めには、本研究で対象としたような塩害による床版の
劣化のみでなく、交通車両によるひび割れ幅の増大な
ど、今後の研究により解決しなければならない課題が
多いことを付記しておかねばならない。

謝 辞

荒谷建設コンサルタント（株）岡本晋氏および加藤昌文
氏には今回の解析モデル橋梁の設計計算書を提供して
いただくと共に、補修費についてもご教示いただいた。
広島県建設技術センター新田勉氏には、同橋梁の再建費用に
ついての資料を提供していただいた。ここに記して謝意を表
したい。

また、これまで研究室で研究初期の解析プログラムの開
発やその後の改良に携わってくれた新谷大吾氏（国土交通
省四国地方整備局）、景山茂氏（国土交通省中国地方整備
局）、福島康訓氏（国土交通省中国地方整備局）、山本康之

氏（常石ホールディングス株式会社）、山崎雅夫氏（株式
会社エイト日本技術開発）、田島稔朗氏（日本コムシス株
式会社）、高原周平氏（前田建設工業株式会社）に心より
御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 広島県橋梁維持管理検討委員会報告書，広島県土木部
道路保全室，2007. 3.
- 2) 小幡卓司：橋梁の損傷度・余寿命および UC と再建設
費用を考慮した BMS 構築に関する研究，土木学会論
文集 A, Vol.64, No.2, 488-501, 2008. 6.
- 3) 宮本文穂，河村圭，中村秀明：Bridge Management
System(BMS) を利用した既存橋梁の最適維持管理計画
の策定，土木学会論文集，No.588/IV-38, pp.191-208,
1998. 3.
- 4) 中山隆弘，大嶋健太：鉄筋コンクリート橋梁の維持管
理計画における構造信頼性理論の活用，第 23 回信頼
性シンポジウム講演論文集，pp.72-77, 2008.12.
- 5) 中山隆弘，大嶋健太，高原周平：鉄筋コンクリート橋
の橋齢と健全性との相関性に関する基礎的研究，土木
学会中国支部研究発表会発表概要集，I -37, 2008. 5.
- 6) Frangopol, D.M., Lin, K.-Y. and Estes, A.C. : Life-Cycle
Cost Design of Deteriorating Structures, Jour. of
Struct. Eng., Vol.123, No.10, ASCE, pp.1390-1401, Oct.,
1997.
- 7) 田中滋士：期待ライフサイクルコストの最小化による
鉄筋コンクリート橋梁部材の維持・補修計画に関する
基礎的研究，広島工業大学大学院，工学研究科，修士
論文，2006. 2.
- 8) 土木学会：平成 11 年度版コンクリート標準示方書〔施
工編〕-耐久性照査型，2001. 1.
- 9) 元路寛，関博：鉄筋腐食によるコンクリートのひび割
れ発生状況およびひび割れ幅に関する研究，土学会論
文集，No.669/V-50, pp.161-171, 2001. 2.
- 10) 鉄筋コンクリート床版橋（上部工）の設計計算書，川
田テクノシステム
- 11) 村越潤，清水英樹，有馬敬育：鋼 I 桁橋の信頼性指標
 β の評価と部分係数に関する基礎検討，構造工学論文
集 Vol.53A, 2007. 3.

