

信頼性工学的手法による RC 橋梁部材の維持・補修計画に関する基礎的研究

国土交通省中国地方整備局
広島工業大学工学部正会員 福島 康訓
フェロー 中山 隆弘

1. はじめに 近年、橋梁の老朽化が重要な社会問題となり、より合理的な橋梁の維持管理計画手法の確立が必要になってきた。本研究では、構造信頼性理論によって構造物の安全性を評価する Frangopol のライフサイクルコスト（以下 LCC と称する）最小化による最適維持管理計画手法¹⁾と関らの鉄筋腐食によるひび割れモデルの研究成果²⁾に基づき、補修及び補強の判断基準が LCC や最適維持管理計画に与える影響を数値的に検討した。具体的には塩害環境下にある RC 橋の主桁の維持補修問題を解析の対象とした。

2. 信頼性設計法を用いた LCC 計画の概要 本研究では、Frangopol の考え方を基本とし、ライフタイムにおける総費用 C_{ET} を構成する要素が、初期費用 C_I 、維持費用 C_{PM} 、点検費用 C_{INS} 、修繕費用 C_{REP} 、破壊損失期待費用 C_F によって、式(1)のように与えられるものとした。この総費用を最小にす

$$C_{ET} = C_I + C_{PM} + C_{INS} + C_{REP} + C_F \quad (1)$$

るように維持補修計画を立てる方法論のひとつについて検討することが本研究の目的である。なお、右辺の各項の詳細は文献 1) を参照していただきたい。

3. 鉄筋位置における塩化物イオン濃度の経年変

塩化物イオンの侵入により、ある時点 t (年) における鋼材位置における塩化物イオン濃度は、フィックの拡散方程式に基づいて式(2)のように与えられる³⁾。

$$C(x, t) = r_{cl} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\} + C(x, 0) \quad (2)$$

ここに、 $C(x, t)$ はかぶりを x (mm) としたときの時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 r_{cl} は安全係数 (=1.3)、 C_0 はコンクリート表面の塩化物イオン濃度、 D_d は塩化物イオンに対する設計拡散係数である。

パラメータの詳細な仮定値については講演当日に譲るが、計算結果の一例を図 1 に示す。

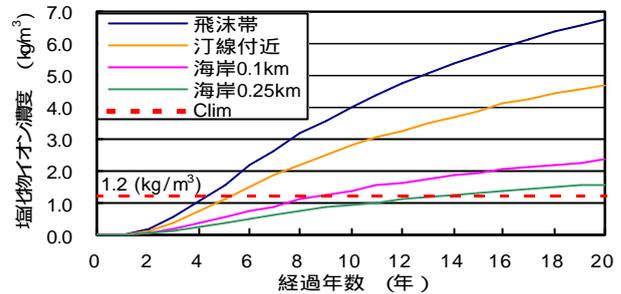


図1 鋼材位置における塩化物イオン濃度の経年変化

4. 異なる修繕パターンを考えた LCC の算定

本研究では、修繕パターンとして、実際の修復工法に基づき、断面修復工法と断面修復後に鋼板を接着する工法を想定した。また、現場における現状に鑑み、補修の要否の判断指標をひび割れ幅とし、補強の要・不要の判断は信頼性指標によって行うものとした。ただし、ひび割れ幅の発見確率は、問題が無いとは言えないが、今回は Frangopol が仮定している損傷度の発見確率と同様の考え方に従った。なお、紙面の都合上詳細については省略するが、本研究ではひび割れ幅と腐食量の関係を表す算定式は関らの研究²⁾に従って式(3)を用いた。

$$W_c = W_{c1} + W_{c2} = \frac{\gamma}{\pi(\rho-1)} \left(\alpha_0 \beta_0 \frac{0.22 \{ (2c+d)^2 + d^2 \}}{E(c+d)} f_c^{2/3} + \alpha_1 \beta_1 \frac{(c+d)}{(5c+3d)} w \right) \quad (3)$$

5. 解析モデルと解析ケース及び解析結果

5.1 解析概要 対象とした構造モデルは図 2 のように Frangopol らが解析例として用いた T 形 RC 桁であり、断面の抵抗曲げモーメントの期待値は 250.0 (kN·m)、初期の信頼性指標は $\beta = 3.48$ である。また、抵抗曲げモーメントの確率分布と変動係数は表 1 のように仮定した。

表 1 抵抗曲げモーメントの分布形および変動係数

抵抗	分布形 正規分布
曲げモーメント	変動係数 0.1

その他の解析条件として、割引率は 0.02、部材の耐用年数は 100 年、1 年目の維持費用は $0.001 C_I$

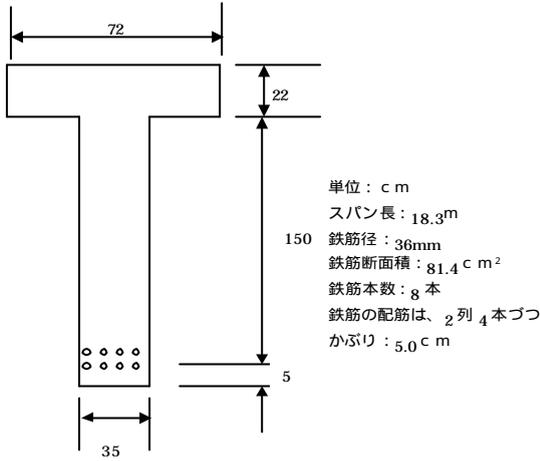


図2 橋梁のRC桁の断面

と仮定した。また、全てのケースにおいて初期費用 C_1 を 158 万円，断面復旧費用 112 万円，断面復旧を含めた鋼板接着による補強費用 157 万円，構造物の破壊時に必要な費用 C_f を 12716 万円とした。

解析ケースは補修及び補強を行うタイミングが LCC に与える影響を検討するために，表 2 に示すような各ケースを考えた。

表2 解析ケース

施工後維持期間	耐用年数	断面減少率(%/年)	補修判断値(mm)	補強判断値
飛沫帯 (5年間)	100年	0.4,0.5,0.6	0.1,0.3,0.5	2.1~3.1
海岸0.1km (9年間)				
海岸0.25km (14年間)				

5.2 解析結果および考察 補修及び補強を行うタイミングが LCC に与える影響を検討するために，断面減少率を 0.5(%/年) 海岸からの距離を 0.1(km) ，施工後の維持期間を 9 年間としたときの解析結果を図 3(a) ~ (c) に示す。同図より，補修を判断するひび割れ幅の値を 0.5mm より小さくし，補強を判断する信頼性指標の値を 2.7~3.0 の間に設定することにより最適な維持管理が行われることが分かる。因みに，これらはいずれの場合も期待 LCC が約 471 万円，最適点検回数が 2 回である。その際の信頼性指標の時間的変化を図 4(a) に示すが，同図より，一回目の点検時(ひび割れ幅 $w=0.42\text{mm}$ ， $\lambda=3.05$)に断面修復のみを選択して耐荷力を維持させるにとどめ，二回目の点検時($\lambda=2.50$)に断面修復と同時に鋼板接着を行うことによる補強により耐荷力を向上させて維持補修補強計画であることが分かる。

なお，図 4(b) は，最適な計画における各要素別費用の詳細を示したものである。さらに，以上のことをまとめ，それぞれの場合の最適な点検回数，最小

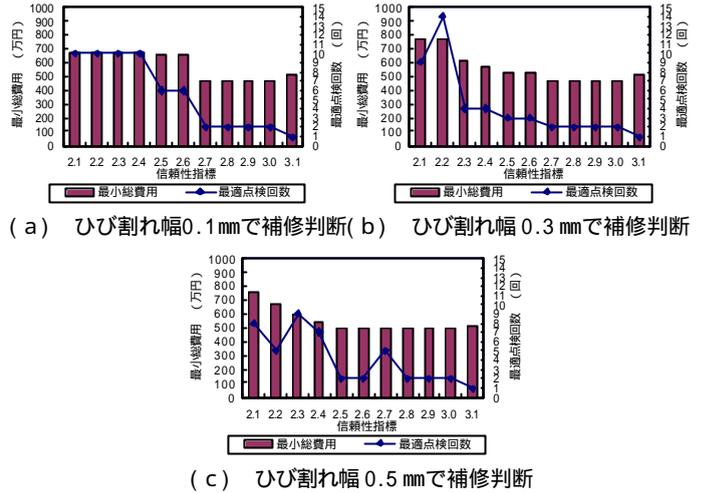
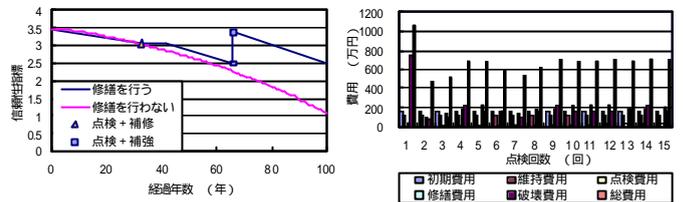


図3 各ケースにおける最小総費用と最適点検回数



(a) LCC の 推移 (b) case139 における各要素別費用の詳細
図4 LCCの変化と信頼性指標 (施工後の維持期間9年)

表3 最適点検回数と最小総費用の比較

施工後維持期間	飛沫帯 5年間		海岸からの距離 0.1(km) 9年間		海岸からの距離 0.25(km) 14年間	
	最適点検回数	最小総費用	最適点検回数	最小総費用	最適点検回数	最小総費用
鉄筋の腐食減少率 0.4 (%/年)	2回	436万円	2回	405万円	1回	377万円
0.5 (%/年)	10回	571万円	2回	471万円	2回	420万円
0.6 (%/年)	9回	669万円	6回	552万円	2回	446万円

総費用を示したものが表 3 である。

6. まとめ 本研究のようなアプローチにより，現場等のデータを蓄積することによって，補修及び補強を行うタイミングや鉄筋の断面減少率，さらには施工後の維持期間と最適な LCC 計画との関係について定量的な説明ができる可能性がある。

[参考文献] 1) Frangopol, D.M, Kai-Yung Lin, Allen C. Estes : Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures, JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING, pp.1390-1401, OCTOBER 1997. 2) 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, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.161-171, 2001.2. 3) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2001.4.