

鉄筋コンクリート橋梁部材のライフサイクルコストに関する信頼性工学的アプローチ

日本コムシス(株) 正会員 ○田島 稔朗
 広島工業大学工学部 フェロー会員 中山 隆弘

1. はじめに

高度経済成長期を経て、わが国の社会基盤構造物の整備は急速に進み、現在、国道を初めとする主要道路に架かる橋梁は、全長15m以上の主要なものだけでも約13万橋、これより小さなものは数え切れないほど架設されている。その中、2026年度には橋齢50年以上の橋梁が約5割を占めるほどに膨れ上がるとされており、それらの補修・補強対策費が新設橋梁の建設費を圧迫する事態になることが予想される。

したがって、事後保全という、更新や維持・補修に対するこれまでの考え方を改め、設計、施工、メンテナンスに必要な、橋梁の供用期間において必要な総費用をライフサイクルコスト¹⁾(以下、LCC)としてとらえ、事業の経済性を検討し、事業全体のコストを削減しようとする考え方が近年注目されている。

本研究では、著者らが構築してきたLCCの解析ソフト(ここでは単にHITLCCと略称する)に、岡村ら²⁾の調査によって得られたRC構造物に関するデータも活用して、LCCによる鉄筋コンクリート橋梁部材の維持管理計画の検討を行った。同時に、F社によって開発されたDIALLCにより算定したLCCとの比較、検討を行うことも本研究の目的のひとつである。

2. コンクリート構造物の劣化予測式

HITLCCでもDIALLCでも、コンクリート打設からt年後におけるコンクリート内部の塩化物イオン濃度はフィックの拡散方程式から得られる式(1)により求められるとしている。

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

式中、

$C_{(x,0)} = 0$ (kg/cm³)

$C_{(x,t)}$: コンクリートの打設後t(年)の深さx(cm)における塩化物イオン濃度(kg/cm³)

γ_{cl} : 安全係数

C_0 : 表面塩化物イオン濃度(kg/cm³) erf: 誤差関数

D_d : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm²/年)

本研究では、鉄筋が配置された位置におけるある時点の塩化物イオン濃度を計算し、その値が鉄筋の腐食限界塩化物イオン濃度に達したときから、ある一定の割合で鉄筋の腐食が始まると仮定している。そして、それによって鉄筋の断面積が減少し、部材の信頼度(本研究では信頼性指標 β で評価している)が低下するとしている。

3. LCCの算定方法

3.1 HITLCC

筆者らが開発したHITLCCでは、わが国でも良く知られたProf.Frangopolの考え方を参考にし、供用期間における期待総費用LCC(以下では単にLCCとする)が、初期費用 C_I 、点検費用 C_{INS} 、維持管理費用 C_{MAIN} 、補修・補強費用 C_{REP} 、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。

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

紙面の都合で詳細を述べることはできないが、本システムの特徴は① C_F は(部材の破壊確率×破壊時の総費用)として算定する、②補修の必要性についてはひび割れ幅で、補強の必要性は目標信頼性指標によって判断する、③コンクリートのひび割れ幅は鉄筋の腐食量との関係³⁾から算定するの3点にある。

3.2 DIALLC

HITLCCとの比較の意味で用いたDIALLCでは、塩害の劣化予測結果に基づいて算出される腐食発生率にコンクリート表面積を乗じた面積を補修面積として確率的な計算を行い、予測された補修面積に単位面積当りの補修費を乗じたコストに、建設費などの初期コスト、足場などの仮設費および経費などを加えた費用に物価上昇率を考慮してLCCが評価されている。LCCの算定式は式(3)の通りである。

$$LCC = LC_I + LC_m \quad (3)$$

式中、LCC: ライフサイクルコスト、 LC_I : 初期コスト、 LC_m : 維持管理費で、 $LC_m = (\text{コンクリート表面積} \times \text{腐食発生率} \times \text{工事単価} + \text{足場仮設費}) \times \text{物価上昇率} + \text{経費}$ である。

HITLCCと大きく異なる点は、破壊時の費用について全く考慮されていない点である。

4. 解析条件

4.1 対象モデル

本研究では、これまで

筆者らが一貫して用いてきた、Prof.Frangopolらが解析例として用いた支間長18.3mの等断面T形鉄筋コンクリート桁(図-3)を解析対象モデルとした。鉄筋径は35mm、鉄筋本数は8本である。また水セメント比は55%とし、設計耐用年数は100年とした。

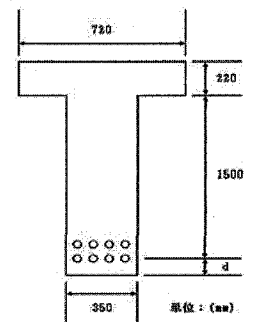


図-3 解析対象モデル

4.2 劣化要因に対する条件

表-1 に示した諸量はすべて正規確率分布に従うものとし、解析ケースは、それらの平均値 μ と標準偏差 σ を用いて、すべて $\mu-2\sigma$, $\mu-\sigma$, 平均値, $\mu+\sigma$, $\mu+2\sigma$ の5 ケースを考えた。

表-1 環境条件

	平均値	標準偏差	解析ケース				
			1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
鉄筋腐食限界塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	1.8	0.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
かぶり (mm)	47.86	1.38	45.1	46.48	47.86	49.24	50.62
表面塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	3.0	1.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0

4.3 補修と補強の判断値

前述の通り、補修の要否の判断についてはコンクリートのひび割れ幅で行い、0.10(mm), 0.15(mm), 0.20(mm)の3 ケースを想定した。また、補強の要否の判断については信頼性指標で行い、2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0の5 ケースを考えた。

4.4 諸費用

諸費用については、初期費用を150万円、定期点検費用を1万円/回、詳細点検費用を10万円/回、補修費用を100万円/回、補強費用を200万円/回、破壊損失費用を10000万円と仮定した。なお、詳細点検回数は0~7回とし、定期点検は1年ごとに行うこととした。なお、社会的割引率 r は0.04とした。

5. 解析ケース

5.1 HITLCCによる解析

①補修の基準-ひび割れ幅-：補修の判断を行うひび割れ判断値を0.1(mm), 0.15(mm), 0.2(mm)の3 ケースとした。その他の主な設定条件としては、詳細点検回数を3回、補強の判断を行う信頼性指標を2.6、かぶりを47.9(mm)とした。

②詳細点検回数：詳細点検回数を0~7回の8 ケースとした。その他の設定条件については、信頼性指標を2.6、補修の判断を行うひび割れ幅を0.1、かぶりを47.9(mm) (実測値の平均値²⁾)とした。

5.2 HITLCC と DIALLC との比較のための解析

鉄筋腐食限界イオン濃度については、1.4(kg/m³), 1.6(kg/m³), 1.8(kg/m³), 2.0(kg/m³)の4 ケースとした。その他の設定条件については、かぶりを47.9(mm), 表面塩化物イオン濃度を3.0(kg/m³)とした。

6. 解析結果

6.1 HITLCCによる解析結果

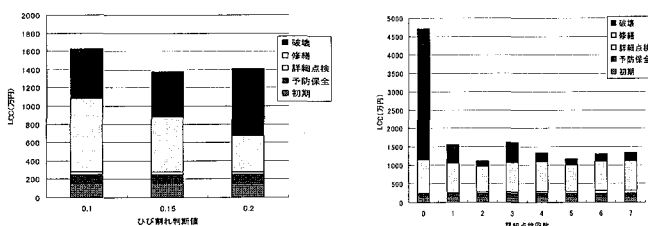


図-4 HITLCCによる解析結果

①補修の基準-ひび割れ幅-がLCCに与える影響

図-4より、補修の判断に関するひび割れ幅とLCCとの関係が理解できる。これより、ひび割れ幅が

0.15(mm)に達したときに補修を行うとしたときのLCCが最小となった。今回の解析結果による限りではあるが、より微細なひび割れ幅である0.1(mm)の時に補修を行う方が望ましいとの結果は得られなかった。

②詳細点検回数がLCCに与える影響

図-4より分かるように、詳細点検を1回も行わなかった場合にLCCが最大になった。これは詳細点検を1回も行わなかったため、破壊確率が高くなり、破壊費用が高くなったためである。詳細点検回数2回~7回では、LCCの値で見るとほぼ一定の値となる傾向が得られた。このように本システムによれば、詳細点検回数とLCCとの関係を定量的に検討できる。

6.3 HITLCC と DIALLC との比較

表-2に示す通り、HITLCCで算出したLCCから、破壊費用を引いたコストでそれぞれのシステムによるLCCを比較することができる。鉄筋腐食限界イオン濃度によらず、HITLCCによるLCCとDIALLCによるLCCがほぼ同程度の値になった。

表-2 HITLCC と DIALLC の関係

HITLCCによる解析結果						
鉄筋腐食限界イオン濃度 (kg/m ³)	ひび割れ幅	初期	予防保全	詳細点検	修繕	LCC
1.4	0.15	150	100	30	600	880
1.6		150	100	30	600	880
1.8		150	100	30	600	880
2.0		150	100	30	500	780
DIALLCによる解析結果						
鉄筋腐食限界イオン濃度 (kg/m ³)	工法	経過年数				
		80	85	90	95	100
1.4	断面修復 + 表面被覆	943	948	954	958	961
1.6		886	891	897	900	904
1.8		809	814	820	824	827
2.0		708	714	720	725	728

7. おわりに

LCCによる構造物の最適設計の重要性は理解されつつあるが、その算定法等については、今後の研究の余地が大いに残されている。例えば、補修や補強の判断をどのようなタイミングで行えばいいのか、詳細点検はどのような間隔で行うべきか等の点についての議論は極めて不十分のように思われる。他のシステム(DIALLC)との比較の結果、本研究で構築したシステム(HITLCC)は、今後、上述の問題に対する検討に対して活用できるとの見通しが得られた。

なお、高知工科大学の小窪幸恵様からは、かぶりの実測値等の統計資料について丁寧にご教示いただいた。また、本研究の実施に当たっては平成18年度科学研究費基盤研究(C) (研究代表者：中山隆弘)の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献：1) 伊庭孝充, 松島 学, 関 博, 川田秀夫：塩害を受けるRC構造物のライフサイクルコスト算定手法に関する基礎的研究, 土論, No.704/I-50, pp.1-11, 2002.5. 2) 岡村 甫, 小窪幸恵：塩害を受けるコンクリート道路橋の耐久性評価, 21世紀COEプログラム高知工科大学報告書, pp.32-36, 2006. 3) 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, 土論, No.669/V-50, pp.161-171, 2001.2.