

疲労荷重を受ける道路橋RC床版のリスクコスト算出法の一提案

広島支店

土木工事部

藤岡 靖

1. はじめに

道路橋床版は直接通過する交通荷重はもとより、凍結防止剤や海岸近くでの飛来塩分等による化学的劣化も受け、耐久性に対しては極めて厳しい環境下にある。

本研究は物理的要因すなわち疲労を対象としてライフサイクルコスト(以下 LCC)の算出方法を提案するものである。

また、本研究は繰返し荷重を受ける RC 床版を対象にリスクコストの検討を行っている。そこで本研究では、繰返し荷重による損傷に限定してその検討方法を示した。その基本式は次のようになる。

$$LCC = C_{it} + C_{mt} + pC_{ls} + C_{ws} \quad (1)$$

ここで、LCC : ライフサイクルコスト

C_{it} : 初期建設コスト

C_{mt} : 維持管理コスト ($C_{mt} = 0$)

C_{ls} : 損失コスト

p : 破壊確率

C_{ws} : 廃棄コスト

上式(1)の pC_{ls} がリスクコストとなる。すなわち、リスクコストとは破壊確率と破壊した場合の損失コストを乗じたものであり、損失コストの期待値と表現される。一方、破壊確率の要因は施工を含めた材料強度、強度評価の誤差などに起因している。本研究では現在判明している範囲内のデータを用いてリスクコストを求めた。

2. 床版の疲労破壊確率

従来の実験的経験によれば繰返し疲労を受ける床版の破壊には多くの要因が含まれており、それらの要因のほとんどが確率変数である。しかし、全ての要因を確率変数に置き換えると解析ができないため、次の仮定を設けた。すなわち RC 床版の疲労強度評価式を対象にし、評価式に含まれる要因を確率変数とみなした。また床版寸法に関しては誤差が小さいとみなした。

さらには、繰返し疲労強度試験から得られる S-N 曲線のばらつきも確率変数である。また、このばらつきには床版の静的押抜き強度のばらつきも含まれているとみなすことができる。さらに、床版の静的強度のばらつきの中にはコンクリートの圧縮強度のばらつきや施工誤差によるばらつきが含まれている。したがって、コンクリートの圧縮強度 (σ_c)、施工誤差によるコンクリートの強度低下 (σ_{ex})、床版の静的押抜きせん断強度評価式 (F_{st})、疲労強度評価式 (F_{fig}) の 4 つをばらつきの主要因として解析の対象とした。なお、これらの要因はお互いに独立事象であることを前提にしており、すべてのばらつきを考慮した疲労強度の評価式 F_{total} は各確率変数を用いて次のように表すことができる。

$$F_{total} = p(\sigma_c) \cdot p(\sigma_{ex}) \cdot p(F_{st}) \cdot p(F_{fig}) \cdot P_{sx} \cdot 10^{a-k \log N} \quad (2)$$

ここで、

F_{total} : 破壊確率を有する床版強度

(= 所定の供用期間を満足する床版強度)

$p(\sigma_c)$: 生コン強度のばらつきから求まる確率変数

$p(\sigma_{ex})$: 施工によるコンクリート強度のばらつきから求まる確率変数

$p(F_{st})$: 床版の静的押抜きせん断強度評価式の不確実性に起因するばらつきから求まる確率変数

$p(F_{fig})$: 床版の輪荷重疲労試験による S-N 曲線のばらつきから求まる確率変数

P_{sx} : 床版の静的押抜きせん断強度

a : 定数 (= $\log C$, 水張り状態を想定し $C = 1.2366$ とする。)

k : 定数 (= 0.07835)

N : 荷重通過回数

である。

次に、実際にこのばらつきを求めるために、Weibull 分布関数を破壊確率の算出に適用した。

本研究では中央値よりも極値を対象にしており、その点からも正規分布は適切ではない。そこで、それぞれの物性に合わせ極値の分布関数を用いることとした。この Weibull 分布関数は、本来は 2 重指数分布であり次式で与えられる。

$$F = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x - \mu}{\phi} \right)^\gamma \right\} \quad (3)$$

また、確率密度関数は次式で与えられる。

$$f = \frac{\gamma}{\phi} \left(\frac{x - \mu}{\phi} \right)^{\gamma-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x - \mu}{\phi} \right)^\gamma \right\} \quad (4)$$

ここで、 μ は位置のパラメータ、 ϕ は尺度のパラメータ、 γ は形のパラメータであり、いずれも確率変数の性質を決定する係数であり未知数である。

その際、データの平均値、標準偏差、および標準偏差の 2 倍の条件を満足する 3 つのパラメータの μ 、 ϕ 、 γ 値が結果的に標準偏差 σ と直線関係で表現されることで、Weibull 関数を一義的にかつ簡易的に求めることができた。

さらに、モンテカルロシミュレーション法による破壊確率の推定方法でシミュレーションを実施した結果、4 つの確率変数が組み合わされた疲労破壊確率を有する床版強度に対して、平均値 1.257、標準偏差 0.284、変動係数 22.6% の値が得られた。

3. 各コスト評価モデル

本研究では具体的な橋梁を例としてシミュレーションを行った。表-1 にモデル橋梁の設計条件を示す。その対象として、道路規格を地方の都市間を結ぶ幹線道路と仮定し、床版厚を 14cm ~ 35cm に変化させた場合のモデル橋梁の設計を行い、式(1)で示す LCC の基本式に従い、初期建設コスト・廃棄コスト・再建設コスト・便益損失コストを具体的に試算しコスト評価を行った。

4. ライフサイクルコストとその考察

RC 床版の押抜きせん断強度および繰返し回数による損傷度により耐用期間中の押抜きせん断強度実験推定値を求め、作用荷重に対する表-2 には RC 床版厚と破壊確率 p の関係を示す。床版厚が大きくなると急激に破壊確率が小さくなり、20cm を超えると破壊確率は極めて小さいものとなった。表-3 よりリスクコスト pC_{ls} は、床版厚が 20cm を超えると破壊確率の影響を受け極めて小さくなった。

表-1 橋梁の設計条件

設計荷重	B活荷重		
重要度の種別	A種		
道路規格	第3種 第2級		
設計速度	60km/h		
橋長	121.0m		
桁長	120.8m		
支間	3×40.0m		
形式	上部工	3径間連続非合成鈑桁	
	下部工	橋台	逆T式橋台
		橋脚	小判壁式橋脚
	基礎工	A1橋台	杭基礎
		A2橋台	杭基礎
全幅員	12.5m		
有効幅員	11.5m		
縦断勾配	1.00% 拌み勾配		
横断勾配	2.00% 拌み勾配		
斜角	90°		
平面線形	直線		
適用示方書	平成14年3月道示		

表-2 床版厚と安全係数および破壊確率の関係

床版厚 t (cm)	せん断幅の強度 P_{sx0} (kN)	疲労強度 F_{total} (kN)	安全係数	破壊確率 p
14	235.2	135.5	0.922	0.65336
17	310.2	178.7	1.216	0.21417
20	390.3	224.9	1.530	0.06371
23	527.3	303.8	2.067	0.01039
27	595.5	343.0	2.334	0.00464
31	723.2	416.6	2.834	0.00114
35	858.7	494.7	3.365	0.00028

表-3 100 年間の各コスト(高速道路の場合)

床版厚 t (cm)	初期建設 コスト (千円)	便益コスト (千円)		床版撤去+ 再建設コスト (千円)	リスクコスト (千円)		最終廃棄 コスト (千円)	LCC (千円)	
		全面止め	片側通行		全面止め	片側通行		全面止め	片側通行
14	471,110	3,077,550	1,481,675	191,325	2,135,763	1,093,077	83,751	2,690,624	1,647,938
17	480,882	3,077,550	1,481,675	202,643	702,504	360,723	86,575	1,269,961	928,180
20	494,901	3,077,550	1,481,675	213,962	209,696	108,026	89,400	793,997	692,327
23	504,418	3,077,550	1,481,675	225,280	34,319	17,737	92,225	630,962	614,380
27	522,405	3,077,550	1,481,675	240,380	15,395	7,990	96,000	633,800	626,395
31	544,020	3,077,550	1,481,675	268,189	3,798	1,986	112,484	660,302	658,490
35	561,705	3,077,550	1,481,675	283,275	926	486	116,245	678,876	678,436

図-1 には RC 床版厚と LCC の関係を示す。いずれの道路においても床版厚 20 ~ 23cm 付近で LCC が最小となり、それ以上の床版の増加は LCC が徐々に増加する傾向を示した。

5. 結論

本研究では、疲労荷重を受ける RC 床版を対象に、LCC の算出方法を提案した。特に LCC の中で最も複雑なリスクコストの計算方法を示したが、その中でも破壊確率の算出に新規性を持たせた。この破壊確率は、種々のばらつきを考慮しており、それらに基づいた疲労破壊強度、リスクコストおよび LCC の算出方法を示している。そのため、ばらつきを要因ごとに適切な評価を行うことで供用期間中の床版の有する性能を適切に評価できるリスクマネジメントが可能となると考える。

Key words: LCC, 押抜きせん断強度, 疲労, ワイブル関数

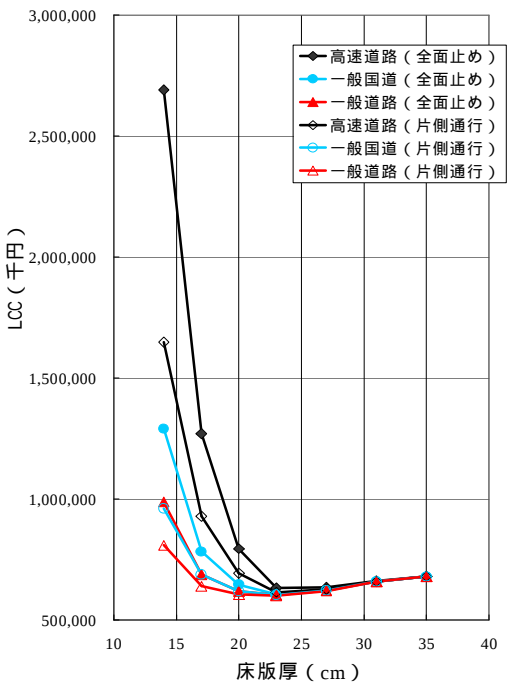


図-1 床版厚と LCC の関係