

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

概要:本研究は、疲労荷重を受ける道路橋 RC 床版を対象に、ライフサイクルコスト(以下 LCC)の算定手法を示すものである。一般に構造物の LCC は、初期建設費用、維持管理費用、および破壊に対するリスクの費用(リスクコスト)の和で表される。その中でも、リスクコストは破壊確率に(RC 床版が)破壊した場合の損失コスト(床版撤去、再建設、および便益損失コスト)を乗じた費用であり、確率論としての評価が必要とされるものである。本研究では、RC 床版のリスクコスト算定において必要とされる破壊確率を求めるため、コンクリートの材料強度のばらつき、施工のばらつき、静的押抜きせん断強度評価式の誤差、および輪荷重走行疲労強度評価式の誤差を用いて疲労破壊確率の算出手法の提案を行っている。

Key Words: ライフサイクルコスト、押抜きせん断強度、疲労、ワイブル関数

1. はじめに

道路橋床版は耐久性に関して最も過酷な条件下に置かれているコンクリート構造物の一つである。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。基本的な対策の一つに床版厚の増厚により床版の押抜きせん断強度を増加させることがあるが、死荷重の増加にもつながり、主桁や下部構造の断面にまで影響する。

道路橋の床版厚の変遷に着目すると、経済性を重視して一時的に薄くなる傾向もあったが、床版の破損事例が生じ始めると一転して増加の方向に向かい、その傾向は現在も続いている。特に、性能照査型設計法が注目されている現在では耐久性も強く配慮されるようになり、そのような場所によってはかぶり厚の増加とも相まって床版厚の増加をもたらしている。また、性能照査設計法における基本概念は何よりもライフサイクルコスト(以下 LCC)の最小化にある。本来 LCC は構造物全体に対して算定することが理想的であるが、橋梁のように部材数の多い構造物で全体の LCC の最小化を図ろうとすると極めて多くの不確定要因が介在することになる。床版という一部材に関してでさえも、疲労および塩害等による劣化など、物理的要因と化学的要因の双方を考慮した LCC の最小化となると、その算出は極めて複雑になる。本研究は物理的要因すなわち疲労を対象として 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。本来リスクコストは繰返し荷重による損傷、塩害などによる鉄筋の劣化による損傷、コンクリート材料の劣化による損傷、これらの複合的な要因による損傷など、損傷が生じる全ての可能性を検討して定めるべきであるが、その場合は計算が非常に複雑になる。さらに、各劣化要因間の因果関係の定量化も必要となる。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 (床版撤去、再建設、および便益損失コスト)、 p : 破壊確率、 C_{ws} : 廃棄コスト、 pC_{ls} : リスクコスト



藤岡靖

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。損失コストには様々なものがあり、その主なものに便益損失コストがあり、床版撤去コストや再建設コストなどがある。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。中には誤差に関する資料が存在しない物理的性質もある。例えば現場コンクリートの強度は、生コン出荷時の強度の他に施工および養生による影響を受け、実際の強度は異なってくる。このような施工が強度に及ぼす影響についてのデータはほとんどなく、推測に頼らざるを得ないのが現状である。当然ながらそのような関連データが得られていれば、そのデータを持って解析を行うことになるが、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

(1) 疲労破壊確率の概略について

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。当然のことながら、この誤差は評価式の誤差に含まれていると考えることもできる。

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_{ftg}) 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。

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

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

$p(F_{ftg})$: 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。) ¹⁾

k : 定数 (= 0.07835) ¹⁾

N : 荷重通過回数

である。

(2) Weibull 関数に対する生存確率

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。

これらの未知数は、3つのデータ群から代表点を選定し、それらを連立方程式の条件として決定される。この方法を分割和法という³⁾。3個のデータ群は種々選択できるが、正規分布の性質を重視し、さらに大きいデータより小さいデータが重要であることも考慮して、平均値、平均値から小さい方向の標準偏差(σ)、および標準偏差の2倍(2σ)の3点を選点とし、係数を求める方法を適用した。すなわち、次の3式から3個の定数が求められる。

$$F_w(m) = 0.5 \quad (5)$$

$$F_w(m - \sigma) = 0.15866 \quad (6)$$

$$F_w(m - 2\sigma) = 0.02275 \quad (7)$$

m を1とし、これらの条件を満足する μ 、 ϕ および γ の値は結果的に式(8)～(10)に示されるように標準偏差 σ と直線関係になる。

$$\mu = -3.76\sigma + 0.996 \quad (8)$$

$$\phi = 4.1\sigma \quad (9)$$

$$\gamma = 4.52 \text{ (定数)} \quad (10)$$

また、これらを図示すると図-1 のようになる。要するに、正規分布に基づいて標準偏差 σ を求め、さらに式(8)～(10)を適用すると Weibull 関数を一義的にかつ簡易的に求めることができる。ただし、ここでは Weibull 関数を相対化したことから標準偏差は相対標準偏差すなわち変動係数となる。

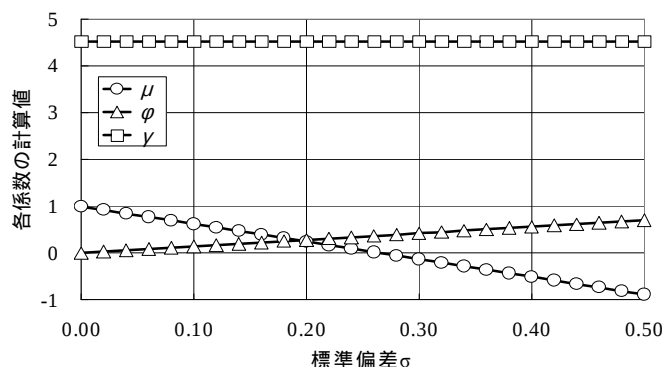


図-1 標準偏差と各係数の関係

(3) 材料強度のばらつき

実験室で行う床版の静的押抜きせん断強度試験はコンクリートの材料強度が適切に評価されているとの前提条件で実施され、強度評価式はそれ

をもとに求められている。すなわち、実験には材料強度のばらつきがないものと仮定している。したがって、評価式に対する床版強度の実際のばらつきは、床版強度以外の評価、例えば材料強度などにおいてばらつきが生じるか、あるいは評価式の不完全さから生じるものと考えることができる。

生コン工場出荷時のコンクリート強度については近年極めて多くのデータが提供されている。全国の各生コン工場内で蓄積されたコンクリート強度のデータの他に、生コン工場監査会議による監査が毎年行われており、そこではコンクリート強度の抜き取り検査も実施されている。そのデータ³⁾によればある県の平成14年の62工場(県内の95%を含む)の28日強度の平均値は、呼び強度の1.441倍、標準偏差は0.144、変動係数は10.0%であった。また、土木学会コンクリート標準示方書によれば、コンクリートの圧縮強度の予測値に関する安全係数は次式で与えられている。

$$\gamma_p = \frac{1}{1 - 1.645V / 100} \quad (11)$$

ここで、 V : 変動係数(%)

(4) 施工のばらつき

施工によるコンクリート強度のばらつきに関するデータはほとんど得られていない。しかしながら、どのような施工をした場合でも理論的には生コン工場出荷時の強度を超えることはない。したがって、確率分布関数は $x = 1.0$ のとき最大値となる。実際に、現場のコンクリート強度が生コン工場出荷時の強度となるのは極めて入念な施工に頼らなければならない。締固め不足による空気量の増加は 2～3%と考えることができ、実際は不法加水やその他不適切な施工も懸念されるが、不法な施工についてはここでは論じないこととする。

また、過去に行った実験データによると⁴⁾、現在の管理方法と施工方法からは最頻値は 0.96 程度となることが判明している。図-2 にその根拠とした実験データを棒状バイブレータの振動時間と圧縮強度比の関係として示す。

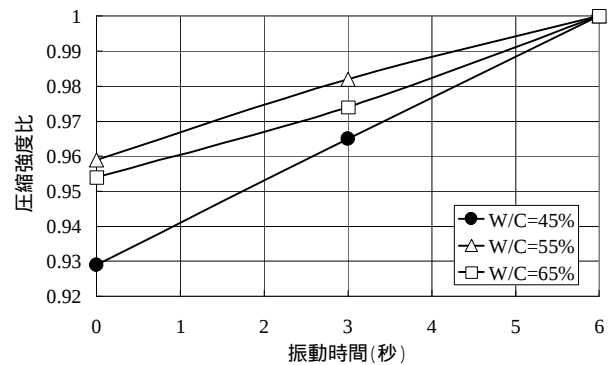


図-2 棒状バイブレータの振動時間と圧縮強度比

(5) 静的押抜きせん断強度評価式のばらつき

床版の静的押抜きせん断強度の評価式はこれまでに数多く提案され、コンクリート標準示方書などの規準にも与えられている。これらはあくまでも実験式に基づいたものであり、当然ながら評価式には実験式との間に誤差が生じる。この誤差に関する報告は既に行っており⁵⁾、コンクリート標準示方書、ACI Building Code、角田の評価式、松井の評価式などに対し平均値と誤差の変動係数を示した。しかしながら、この場合のばらつきにはコンクリート強度のばらつきをも含んで評価されていることになり、本研究では新たに評価式を变形することにより対処した。すなわち、コンクリートの材料的なばらつきと床版の押抜きせん断強度発現のメカニズムの誤差 (= 評価式のばらつき) を区別できるように次の手法を提案した。まず、松井式を簡略的に記述すると下記のようになる。

$$P = \tau_{s,max} \cdot A + \sigma_{t,max} \cdot B \quad (12)$$

ここで、 P ：押抜きせん断強度

$$\tau_{s,max} = 0.252\sigma_c - 0.00246\sigma_c^2 \text{ (コンクリートの最大せん断強度)}$$

$$\sigma_{t,max} = 0.583 \cdot \sigma_c^{2/3} \text{ (コンクリートの最大引張強度)}$$

A, B ：各応力が作用する面積

σ_c ：コンクリートの圧縮強度

式(12)の右辺において $\sigma_c^{2/3}$ を共通項とするために、 $\sigma_c = 30 \text{ N/mm}^2$ 付近で $\sigma_{t,max} = \tau_{s,max}$ となることを条件とすると、

$$\tau_{s,max} = 1.193\sigma_c^{2/3} \quad (13)$$

となる。したがって式(12)は次のように変形でき、これをここでは松井変形式と称する。

$$P = 1.193\sigma_c^{2/3} A + 0.583\sigma_c^{2/3} B \quad (14)$$

$$= \sigma_c^{2/3} (1.193A + 0.583B) \quad (15)$$

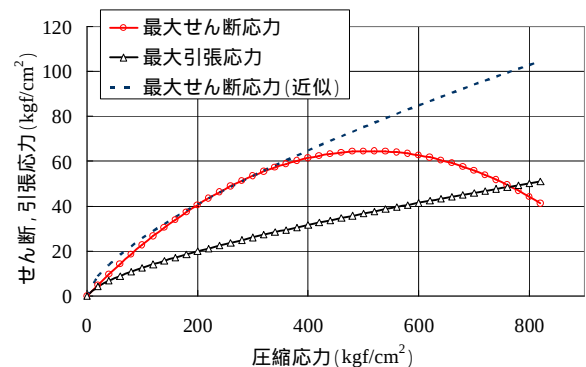


図-3 圧縮応力と最大せん断力、最大引張応力の関係

図-3 に圧縮強度と最大せん断強度および最大引張強度の関係を示すが、この方法により近似した場合でも 40 N/mm^2 程度まではほとんど同じ値になることがわかる。

(6) 輪荷重疲労試験の評価式のばらつき

松井は輪荷重走行試験を用いて疲労強度を示している。この中で押抜きせん断強度部分の軸直角方向のひび割れ間隔を幅とする帯板のせん断強度式の部分をそのまま用いた場合の S-N 曲線を示している⁶⁾。この中には帯板の強度推定値のばらつきは含まれている。また、一方では松井自身が提案している押抜きせん断強度の推定値を用いても、あまり差のないことを考えると、この帯板のせん断強度推定値のばらつきも同等と考えられる。輪荷重走行試験は実施に多大な時間を要することなどでデータ数は限られてしまう。したがって、現状におけるデータを用いることとした。その結果、輪荷重走行試験による疲労強度のばらつきは変動係数で 20%と推定した。

また、松井の実験結果から S-N 曲線の式は次のようになる。

$$\log \left(\frac{P}{P_0} \right) = -0.07835 \log N + \log 1.2366 \quad (16)$$

ここで、 P_0 は貫通ひび割れ間隔幅の梁に対するせん断強度

(7) 換算繰返し回数

交通荷重に関するデータは国土交通省(旧建設省)、日本道路公団、阪神道路公団などで計測されている。松井はこれらの結果から荷重頻度分布を対数正規分布(平均値 1.943、標準偏差 0.509)に適用して、次式で示している。

$$P_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} \exp \left\{ -\frac{(\ln x - \bar{x})^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (17)$$

この結果によれば 1 日平均 1 台の軸重 30tf の車両が走行している。この 30tf は最近の道路公団の調査によればさらに少なくなっているようである⁷⁾。これはタイヤの性能から長距離走行が困難なことによるものである。また、このような荷重頻度はもともと道路交通法に違反しており、取締まりが強化されれば必然的に少なくなる。一方、1 日 1 台の軸重 30tf の車両が走行すれば、図-4 のような頻度分布になる。

これらに対応する損傷度はマイナー則を用いて 30tf から 20tf までの損傷度を 30tf を基準として求めた。

この結果、損傷度は表-1 のように求まる。この損傷度に交通量を乗じるとそれぞれの 30tf に相当する台数の交通量となる。この和が結局 1 日に通過する 30tf の台数として求めることができる。なお、これを式で表すと次のようになる。

$$N_{eq}(30) = \sum_{i=20}^{30} \left\{ \left(\frac{i}{30} \right)^{1/k} \cdot \frac{f(i)}{f(30)} \right\} \quad (18)$$

ここで、 $k = 0.07835$ 、 $f(x)$ は対数正規分布関数である。この結果から 100 年間(36500 日)の通過回数は 1 日当たりの損傷度 4.352 に 36500 を乗じ、さらにタンデムで 2 倍することを考慮すれば N は 317696 回となる。なお、これは

表-1 損傷度の計算

軸重(tf)	単位回数 当たりの損傷度	一日当たり の通過回数	損傷度 ×
30	1.000	1.000	1.000
29	0.649	1.249	0.810
28	0.415	1.565	0.649
27	0.261	1.968	0.513
26	0.161	2.482	0.400
25	0.098	3.140	0.306
24	0.058	3.987	0.231
23	0.034	5.078	0.171
22	0.019	6.489	0.124
21	0.011	8.320	0.088
20	0.006	10.700	0.061
合計			4.352

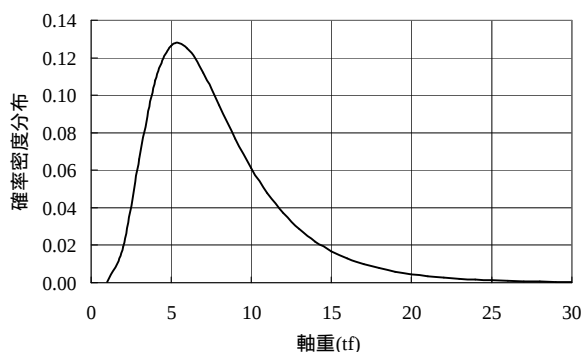


図-4 荷重頻度分布

左右の荷重を合わせた軸重であり輪荷重走行試験における荷重はその半分となる。従って式(18)の荷重はこの軸重の半分となる。

(8) モンテカルロ法による破壊確率の推定方法

本研究のように少なくとも4個の確率変数が組み合わされているとき、またそれらが必ずしも同一の確率分布でないときにはモンテカルロシミュレーションが有効である。この方法も近似的な手法であり、数値実験でもある。本研究では少なくとも破壊確率を 10^{-4} 程度まで検討する必要があるものの、数値実験回数は極力少なく済む方法として、データ数 N を大きくすることを検討した。そして計算結果を1つの Weibull 分布関数に近似することとした。

ここでは要因の数を i で表し、 m_i は要因 i の平均値を表している。1 から N までの整数を乱数発生させると、それぞれの値の生存確率は $i / (N+1)$ の値になり、それを y_i とする。前述の式により求めた係数 μ 、 β 、 m および y_i の関数から、その生存確率に相当する確定値 x を次式により求める。

$$x_i = \mu + \beta \cdot \exp \left[\frac{\ln \{ -\ln(1 - y_i) \}}{m} \right] \quad (19)$$

同様の手法を要因数だけ繰返し、総合評価の際にはそれぞれの確定値を乗じて全体の確定値 X を求める。 X は変動係数を用いて相対化しているので、全体の平均値を求める際には絶対値に戻す必要がある。さらに、静的強度の評価式中におけるコンクリート強度には $(2/3)$ が乗じてあるように、要因によってはべき乗で表現される場合も考えられ、その場合は影響度合いもべき乗で考慮しなくてはならない。これをモデル化すると式(20)のように表現され、本研究の例を具体的に示すと式(21)のようになる。

$$X = m_1 x_1^{c_1} \cdot m_2 x_2^{c_2} \cdot m_3 x_3^{c_3} \cdot m_4 x_4^{c_4} \quad (20)$$

$$= 1.44 x_1 \times x_2 \times 0.927 x_3^{2/3} \times x_4 \quad (21)$$

この X 中の x_i の標準偏差は絶対標準偏差を用いることになる。また、 X の平均値と標準偏差および変動係数はモンテカルロシミュレーションにより求めるときは乱数の発生によりわずかながら異なる。ここではモンテカルロシミュレーションを行うためにデータ数 N を $N = 1,000 \sim 50,000$ として乱数を発生させ、平均値を求めた。図-5は乱数の発生試行回数を10, 20, 30回と繰返した時に得られる確定値 X の期待値 m が、データ数によってどのようなばらつきを示すかを変動係数によって示したものである。このように、いずれの試行回数においても、データ数を増加させることで得られる値のばらつきが小さくなることがわかる。特に N を10,000以上とすると変動が極めて小さくなる。当然 N は大きいほど理想的であるが、 N が50,000付近になると汎用のパソコンでの処理能力の限界となった。ここでは $N = 10,000$ としてのシミュレーション結果を用いることとした。その結果、定義域 X の平均値は1.257、標準偏差は0.284、変動係数は22.6%となった。この結果から疲労破壊に対するばらつきは確率密度関数で示すと式(22)となり、図-6のようになる。

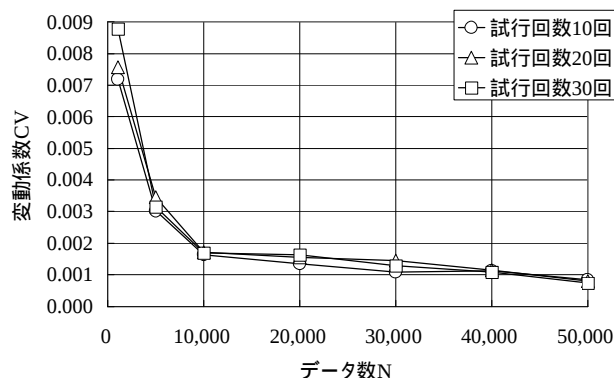


図-5 データ数と平均値 m の変動係数の関係

$$f(x) = 4.88 \left(\frac{x-0.146}{0.927} \right)^{3.52} \exp \left\{ - \left(\frac{x-0.146}{0.927} \right)^{4.52} \right\} \quad (22)$$

また、確率分布関数は式(23)および図-7のようになる。

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x-0.146}{0.927} \right)^{4.52} \right\} \quad (23)$$

3. 各コスト評価モデル

(1) 橋梁の設計条件と各コストの取扱い

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-2 にモデル橋梁の設計条件を示す。これは地方都市における一般国道に架橋する標準的な橋梁を想定したものである。

初期建設コストについては、床版厚によって下部構造のコストにまで影響が及ぶため、床版厚の影響は大きい。維持管理コストについては補修コストと補強コストに分けられるが、本研究では継続的な補強が行われていないことを前提とした。これは、補強がその時点でLCCを検討して行われるものであり、建設時には補強を前提としてLCCを検討することはほとんどない。このようなことから供用期間中には補強を行わないと仮定した。

また、補修は主として材料の化学的劣化を防ぎ、材料耐久性の増加につながるものである。したがって、疲労荷重を受ける場合は補修が破壊確率に大きい変化を与えるものではないと考えられる。以上のような観点から、各コストの中から初期建設コスト C_{it} とリスクコスト pC_{ls} のみをターゲットとした。

さらに本研究で対象としたのはRC床版に限定したコストであり、特に床版厚を要因として着目した。これはRC床版に用いられるコンクリート強度の範囲が現行ではあまり変化しないことによる。

(2) 初期建設コスト

建設コストを算出するには多くの条件が必要であるが、計算を簡便にするために、RC床版を有する橋梁形式として非合成連続プレートガーダー橋とした。架橋位置は都市と都市を結ぶ地方の幹線道路とし、一方向当たりの大型車の設計交通量を都市部一般の交通量を考慮して1,000台以上2,000台未満とした。床版厚は、シミュレーションにおいて14cm～35cmとした。

(3) 損失コスト

損失コスト C_{ls} は、繰返し荷重により損傷を受けた床版を撤去するための廃棄コスト C_{ws} 、更新するための再建設コスト、および当該道路を走行する車両台数による便益損失コストが含まれる。

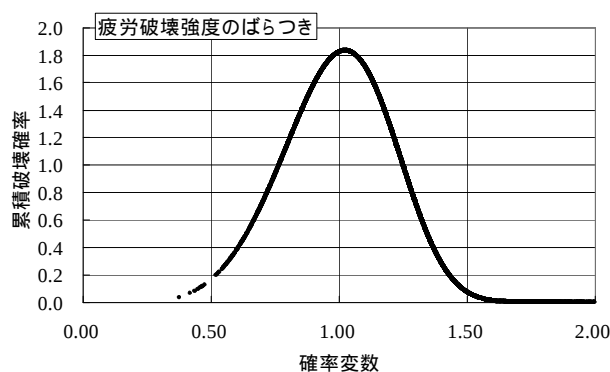


図-6 床版の疲労破壊強度の確率密度

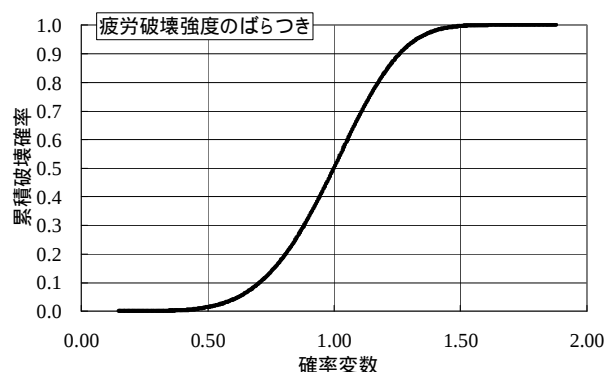


図-7 床版の疲労破壊強度の確率分布

表-2 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径間連続非合成鉄桁	
	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
		橋脚	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		

1) 廃棄コスト

廃棄コスト C_{ws} は、床版を取り除くための費用であり、高欄撤去工事、床版切断工事、アスファルト舗装撤去工事、伸縮継手撤去工事、床版撤去工事、処分費がある。

2) 再建設コスト

再建設コストは、床版等の撤去後に新たに床版等を架設するための費用であり、床版新設工事、高欄新設工事、排水工事、舗装工事、伸縮継手工事がある。損失コスト C_{ls} を表-3 に示す。

なお、床版には一般に、グレーチング床版、プレキャスト RC 床版、プレキャスト PC 床版、鋼床版等の種類があるが、再建設後の床版が新設時と同等の性能を有し、大幅な耐久性の向上は目的としないことを前提とすることや、従来からの研究データが豊富であることなどから、ここではプレキャスト RC 床版のコストを採用した。

3) 便益損失コスト

橋梁床版架替え時の便益損失コストは、迂回路の設定条件として全面通行止めを行う場合と片側交互通行を行う場合の各々について求めた。なお、車種別の交通量は平日を基準とし、「平成 11 年度道路交通センサス、一般交通量調査、箇所別調査票(24時間調査)」から台数を抽出した。車種別の時間価値原単位は平成 15 年度の値を使用した。

なお、各種コストを表-3 に示す。

表-3 各種コスト(単位:千円)

床版厚さ (cm)	初期建設コスト			損失コスト			廃棄コスト (=床版撤去)
	上部工	下部工	合計	床版撤去	床版更新	合計	
14	362,019	109,091	471,110	83,751	107,574	191,325	83,751
17	371,791	109,091	480,882	86,575	116,068	202,643	86,575
20	384,849	110,052	494,901	89,400	124,562	213,962	89,400
23	390,616	113,802	504,418	92,225	133,055	225,280	92,225
27	407,963	114,442	522,405	96,000	144,380	240,380	96,000
31	423,724	120,296	544,020	112,484	155,705	268,189	112,484
35	441,409	120,296	561,705	116,245	167,030	283,275	116,245

4. ライフサイクルコストとその考察

静的押抜きせん断強度の算出においては、下記の松井による有効幅を考慮した押抜きせん断耐力評価式を用いた。

$$Psx_0 = 2B(\tau_{\max} \cdot X_m + \sigma_{t\max} \cdot C_m) \quad (24)$$

ここに、

Psx_0 : はり状化した床版の静的せん断破壊強度

B : はりの有効幅

$\tau_{\max}$: コンクリートの最大せん断応力度

X_m : 主鉄筋断面の中立軸深さ

$\sigma_{t\max}$: コンクリートの最大引張応力度

C_m : 主鉄筋のかぶり深さ

また、S-N 曲線については次式を用いた。条件としては最も過酷な条件を考慮して水張り状態 ($C = 1.2366$, $k = 0.07835$) とした。

$$\log(P_0 / Psx) = -k \cdot \log N + \log C \quad (25)$$

さらに、表-1 の荷重頻度をもとに 2 軸が 100 年間に通過する回数 N と損傷度 4.352 を乗じた値を損傷度として求めた。次にこの損傷度を式(24)に代入し、耐用期間までは床版が生存する荷重の最小値 P_0 を算出し、これを寿命 100 年相当荷重とした。これは、 P_0 が床版に作用した場合、理論上ではちょうど 100 年後に床版が押抜きせん断破壊することになる。この P_0 に疲労破壊のばらつきの平均値である 1.257 を乗じた値を疲労強度とした。この値は式(2)における F_{total} に相当する。次いで F_{total} の作用荷重 147kN に対する比率を求め、これを確率変数 x とした。この確率変数 x を式(23)に代入し破壊確率 $F_{(x)} (= p)$ を求めた。表-4 には実際に求めた一般国道における各コストの結果を示す。

表-4 100 年間の各コスト(一般国道の場合)

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	1,231,020	592,670	191,325	734,590	404,905	83,751	1,289,451	959,766
17	480,882	1,231,020	592,670	202,643	214,330	118,898	86,575	781,787	686,355
20	494,901	1,231,020	592,670	213,962	61,030	34,069	89,400	645,331	618,370
23	504,418	1,231,020	592,670	225,280	9,455	5,310	92,225	606,098	601,953
27	522,405	1,231,020	592,670	240,380	4,137	2,342	96,000	622,542	620,747
31	544,020	1,231,020	592,670	268,189	964	554	112,484	657,468	657,058
35	561,705	1,231,020	592,670	283,275	215	124	116,245	678,165	678,074

また、表-4 では便益損失コスト、床版撤去コストおよび再建設コストの和に破壊確率を乗じてことでリスクコストを求め、それに初期建設コストおよび最終廃棄コストを加えて LCC を求めている。

表-5 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-4 よりリスクコスト pC_{Is} 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。

図-8 には RC 床版厚とリスクコストの関係を図-9 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、それ以上の床版厚の増加は LCC が徐々に増加する傾向を示した。

表-5 床版厚と安全係数および破壊確率の関係(一般国道の場合)

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	145.6	0.990	0.51646
17	310.2	192.0	1.306	0.14950
20	390.3	241.6	1.643	0.04224
23	527.3	326.4	2.220	0.00649
27	595.5	368.6	2.507	0.00281
31	723.2	447.6	3.045	0.00064
35	858.7	531.5	3.615	0.00014

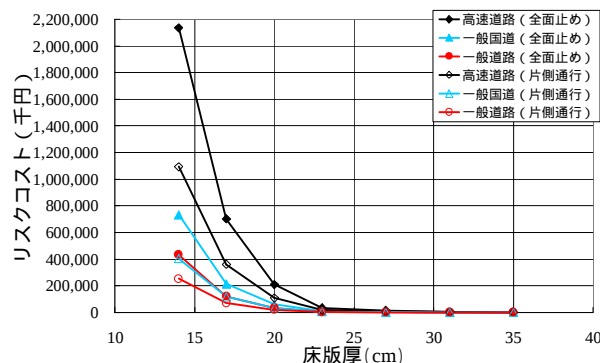


図-8 床版厚とリスクコストの関係

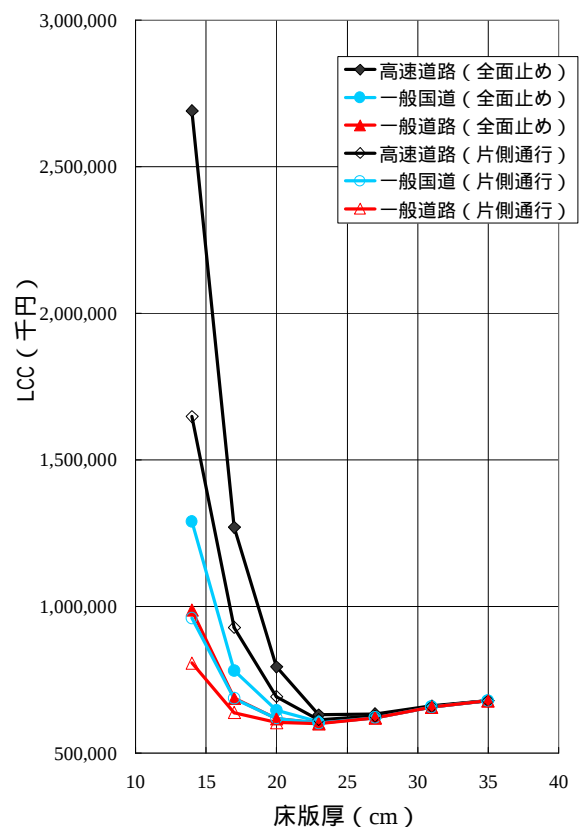


図-9 床版厚と LCC の関係

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。性能照査設計法では設計方法の多様性から LCC を一つの拠り所としており、従来の橋梁の主桁間隔に対応した RC 床版に対し LCC を求めた。ここでは現行示方書に基づいているため、床版厚は主桁間隔に対応している。特に LCC の中で最も煩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、コンクリートの製造過程から床版の疲労まで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 の算出方法を示した。

また、確率関数として Weibull 関数を用いた。これは Weibull 分布が RC 床版の疲労破壊が含む多種の要因のよう、種々の分布を含むような複雑なシステムの寿命のモデルとして適しているためである。

その結果、本研究で仮定した条件に限れば、LCC を最小とする最適床版厚は交通量の増加に伴い若干大きくなる傾向を示すが、概ね 23cm 程度となった。

現行の示方書では各床版厚などの設計値の根拠は必ずしも明らかにされていない。本研究では、破壊確率を算出して RC 床版が被る損失を考慮している。そのため、そのばらつきを要因ごとに適切な評価をすることでリスク低減がなされと考えられ、併せて供用期間中の床版の有する性能を評価することでリスクマネジメントが可能となる。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリートライブラリー No.104, pp.91-93, 2002.1.
- 2) 沼倉三郎:測定値計算法, 森北出版, pp.183-185, 1956.1.
- 3) 山口県生コンクリート品質管理監査会議:平成 14 年度全国統一品質管理監査報告書, p.70, 2003.5.
- 4) 松尾英治:コンクリートの性状と塩分浸透に関する基礎的研究, 九州大学卒業論文, 1991.3.
- 5) 浜田純夫, 松尾栄治, 藤岡 靖:実験結果に基づく RC 床版の押抜きせん断強度算定式の安全係数, 土木学会論文集 No.676 / V-51, pp.51-63, 2002.5.
- 6) Shigeyuki Matsui, Keigyoku Tei: Researches and Japanese Development on Highway Bridge Slabs and Contribution of Wheel Running Machines, Proceedings Third International Conference on Concrete Under Severe Condition, pp.992-1008, 2001.6.
- 7) 石井孝男, 篠原修二:東名高速道路の交通荷重測定と荷重特性について, 土木学会論文集 No.453 / VI-17, pp.163-170, 1992.9.