

道路橋単純支持長方形床版の疲労信頼性解析

鳥取大学工学部 正会員 高岡宣善
鳥取大学工学部 正会員 白木 渡
鳥取大学工学部 正会員 松保重之

鳥取大学工学部 学生員○柴崎和人
吉本組(株) 松本孝之

1. まえがき 近年、我国において道路橋床版が破損するという事故が多発し問題となっている。この破損現象の原因としては、設計荷重以上の過大な輪荷重の載荷と走行台数の増加による輪荷重の移動繰り返し作用が考えられ、これらが広義の疲労破損の誘因として認識されるようになってきた。しかし現行の道路橋示方書においては、このような床版の疲労についてはほとんど考慮されておらずその安全性、信頼性に対する十分な検討が望まれる。本研究は以上のことを十分に考慮し、道路橋床版を対象として、疲労に対する信頼性の評価を行なおうとするものである。解析に際して対象とする床版は図1に示している単純支持長方形床版である。

2. シミュレーション手法に基づく床版の疲労損傷の評価 本研究では、床版の疲労損傷の評価をシミュレーション手法によって行なう。シミュレーションに際して必要な活荷重のモデル化は阪神高速道路公団の活荷重実態調査データを用いて行なう。また、疲労を評価するためのS-N曲線式は、松井らによって行なわれた輪荷重走行試験機による疲労実験より得られたS-N曲線式(1)および式(2)を用いる。ここに、Pは荷重、 P_s は押し抜きせん断耐力で床版の設計の違いによって異なる値をとる。本研究における疲労信頼性解析では荷重と断面力との関係を線形であると仮定して式(3)および式(4)によって Q_y-N 線、 $M_{xy}-N$ 線を考える。ここにA、B、 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 、 α_1 、 α_2 は版の状態および設計条件によって決まる係数である。この式(3)、(4)を使って、マイナーの理論により累積疲労損傷度Dを求める。安全性の照査としては、JSCE指針やNDP規則で用いられている $D \leq 1$ とVeritasの基準の $D \leq 0.2$ で安全性の照査を行なった。以下にシミュレーション方法の概要を示す。疲労解析におけるシミュレーションとしては、自動車荷重が床版上を走行する状態を考慮して実働荷重を移動させることにより、着目点に対する荷重の応答値を求める。この際、着目点および平均走行位置は図1に示してあるA点および破線である。そしてS-N曲線とマイナー則より疲労損傷度を求める。この操作を所定の期間繰り返し行ない、得られた値に統計的处理を施すことにより実働活荷重による床版の累積疲労損傷度の確率特性値を求める。

3. 等価繰り返し回数による安全性の評価 シミュレーション手法では長期間の累積疲労損傷度を求めることは時間的に困難であるため、本研究では等価繰り返し回数を用いた別の手法でも疲労安全性の評価を行なう。等価繰り返し回数とは、ランダムに走行するランダムな自動車荷重の載荷回数を、床版支間中央を走行するある基準の自動車荷重の載荷回数に換算したものである。この手法でも前提としてマイナー則が成立するものとする。S-N線式(5)が与えられた場合に、荷重が1回作用することによる疲労損傷度Dは $D = 1/N$ で定義されるとすると、2組の応力(σ_0 , σ_1)とそれらに対応する疲労寿命(N_0 , N_1)の関係は式(6)で表される。この式はある応力 σ_1 が N_1 回作用した場合の損傷度が、基本応力 σ_0 が N_0 回作用した

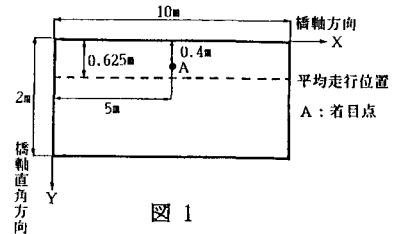


図 1

破壊に対するS-N曲線

$$\log(P/P_s) = -0.08921 \log N + \log 1.0181 \quad (1)$$

使用限界に対するS-N曲線

$$\log(P/P_s) = -0.0984 \log N + \log 1.0161 \quad (2)$$

$$\log(P/P_s) = A \log N + \log B \quad (3)$$

$$Q_y = \alpha_1 P \quad M_{xy} = \alpha_2 P \quad (4)$$

$$\log(Q_y) = A_1 \log N + \log B_1$$

$$\log(M_{xy}) = A_2 \log N + \log B_2 \quad (5)$$

$$\log \sigma = k \log N + \log C \quad (6)$$

$$N_0 = (\sigma_1 / \sigma_0)^m \cdot N_1 = (\sigma_1 / \sigma_0)^m \cdot N_1 \quad (7)$$

$$N_{eq} = \sum (\sigma_i / \sigma_0)^m \cdot n_i$$

最終破壊に対して

$$N_{eq} = \int_0^{\beta} \left(\frac{\eta(x)}{\eta(x)_{max}} \right) P_{(x)} dx \times \int_0^{\beta_{max}/P} \left(\frac{P}{P_0} \right) P_{(p)} dP \times (1+i) \times \left(\frac{Q_{ymax}}{Q_{y0}} \right) \times NT \quad (8)$$

使用限界に対して

$$N_{eq} = \int_0^{\beta} \left(\frac{\eta(x)}{\eta(x)_{max}} \right) P_{(x)} dx \times \int_0^{\beta_{max}/P} \left(\frac{P}{P_0} \right) P_{(p)} dP \times (1+i) \times \left(\frac{M_{xymax}}{M_{xy0}} \right) \times NT \quad (9)$$

場合の損傷度と等価であることを意味している。構造物に応力 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ がそれぞれ $n_1, n_2, \dots, n_n$ 回作用したとすると、基本応力 σ_0 に換算した等価繰返し回数 N_{eq} は式(7)で表される。ここで基本とするS-N曲線にはシミュレーション手法による評価の際に用いたものと同じものを使用し、疲労の評価式も変動荷重および通行位置の変動が考慮されている松井の提案する式を使用した。この場合の等価繰返し回数 N_{eq} を求める式は(8), (9)である。そして基本荷重 P_0 による疲労寿命 N_f を求め式(10)から荷重および走行位置の変動を考慮した疲労寿命 T_f を求める。

ここに
 $\eta(x)$: 着目点に関する影響係数
 $P(x)$: 通行位置に関する確率密度関数
 α, β : 通行位置の境界位置
 m : S-N曲線の傾きの絶対値の逆数
 P : 任意の輪荷重
 P_0 : 基本輪荷重
 P_{max} : 最大輪荷重
 $P(p)$: 輪荷重に関する確率密度関数
 i : 衝撃係数
 Q_{vo} : 床版支間中央に1つの基本輪荷重が作用する時の主梁断面に作用する最大垂直せん断力
 Q_{vmax} : 通常走行時の平均輪荷重通行位置に基本輪荷重を作用させた時、主梁断面に作用する最大垂直せん断力
 M_{xvo} : 床版支間中央に1つの基本輪荷重が作用する時の着目断面の最大ねじりモーメント
 M_{xymax} : Q_{vmax} と同様な載荷状態で発生する着目断面の最大ねじりモーメント
 NT : 一日の交通量

$$T_f = N_f / N_{eq} \quad (10)$$

4. 数値計算例および考察 実際の数値計算では、床版の異方性を考慮した場合を考え、表1に示す5個のCaseについて解析を行なった。結果の一例を以下に示す。図2は耐用期間25年、Case4の場合の異方性度 $D_x/D_y=0.6 \sim 1.0$ の変化に伴う累積疲労損傷確率の変化を図示したものである。この図から異方性度が1.0から0.6に変化するに従って、せん断力による累積疲労損傷確率は急激に高くなっているが、ねじりモーメントによる累積疲労損傷確率はあまり変化していないことがわかる。このことから次のように疲労の進展が説明できる。まず、等方性に近い状態の床版にねじりモーメントによるひびわれが発生する。そしてひびわれが進につれ床版の異方性度が増し、せん断力による影響が大きくなり、最終的にせん断破壊に至る。次にシミュレーション手法と等価繰返し回数法との解析結果を比較する。表2は両手法から得られた疲労寿命を、昭和39年道路橋示方書に基づいて設計された等方性版について各Caseごとに示した表である。ただし、シミュレーション手法による疲労寿命の計算は、累積疲労損傷度 $D \geq 1$ となる確率が0.5となるように定めた。この表よりシミュレーション手法による疲労寿命と等価繰返し回数法による疲労寿命ではかなりの差があり、特に破壊限界についてはその差が大きいことがわかる。原因としてはシミュレーションから得られた1ヶ月間の累積疲労損傷度のある期間の累積疲労損傷度に換算する際の誤差が挙げられる。また、他の原因としては次のようなことが考えられる。シミュレーション手法および等価繰返し回数法はS-N曲線から累積疲労損傷度および等価繰返し回数を求める。このS-N曲線(5)を変形すると N は式(11)で表わすことができる。式中の m はS-N曲線の傾きであり使用限界では10.66、破壊限界では11.21と大きな値である。そのため A_i がわずかに違うだけで N にはかなりの影響が出てくる。シミュレーション手法と等価繰返し回数法では計算段階における A_i が異なるために、得られた結果に差が出てくるものと考えられ、 m の値が使用限界より大きい破壊限界ではその差がより大きくなることが予想できる。

表 1

	衝撃係数 平均値	走行分布 標準偏差	載荷幅
Case 1	0.2	0.3m	50cm
Case 2	0.4	0.3m	50cm
Case 3	0.2	0.1m	50cm
Case 4	0.2	0.3m	25cm
Case 5	0.2	0.3m	75cm

太実線: 破壊損傷度0.2のせん断累積疲労損傷確率
細実線: 破壊損傷度1.0のせん断累積疲労損傷確率
太虚線: 破壊損傷度0.2のねじりモーメント累積疲労損傷確率
細虚線: 破壊損傷度1.0のねじりモーメント累積疲労損傷確率

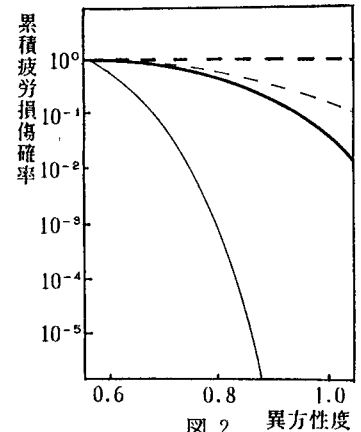


図 2 異方性度

表 2

	シミュレーション手法		等価繰返し回数法	
	使用限界	破壊限界	使用限界	破壊限界
Case 1	210年	98000年	78年	302年
Case 2	50年	25000年	15年	54年
Case 3	250年	75000年	64年	106年

$$N = (C/S)^m = \sum A_i^m = A_1^m + A_2^m + \dots + A_n^m \quad (11)$$

参考文献

- 1) 阪神高速度道路公団設計活荷重委員会: 活荷重実態調査資料1983~1984
- 2) 松井繁之: 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究, 昭和59年11月