

II-8 道路橋の実働荷重と疲労設計

建設省土木研究所 国 広 哲 男

1. 疲労の影響を考慮する必要がある部材

通常の橋梁において、その各部材に作用する応力は主として自重等の死荷重による応力と、自動車等の活荷重による応力とであるが、前者はほぼ一定値であるのに対して後者は交通状態によって時間とともに変化する値である。一般に作用応力の平均値の大きさ（応力レベル）よりも応力の変動幅の大きさ（応力レンジ）の方が構造部材の疲労強度に与える影響が大きい。したがってコンクリート橋の主桁や長大鋼橋の主桁のように全荷重中死荷重の占める割合の大きな部材では繰返し応力の変動幅が小さいので、設計上疲労が問題になることはほとんどないが、鋼橋の床版や床組では全荷重中活荷重の占める割合が大きいので、疲労による強度低下を無視しえない場合が出てくる。

床版や床組は上述のように全設計荷重中活荷重の占める割合が大きいうえに、その橋の供用期間中数百万回にわたって自動車輪荷重の影響を直接に受ける部材であるので、本来からいえばその設計は疲労強度を考慮して行なわれるべきものである。

現在までの日本の道路橋示方書^{1), 2), 3)}では繰返し荷重による疲労の影響は考慮されていない。しかしながら最近の道路橋では以下に列挙するような傾向が見られるようになり、疲労に対して考慮を払うことの必要性が叫ばれはじめた。

- 1) 高強度鋼を使用する場合が非常に多くなり、設計荷重により橋梁に生ずる応力の値が大きくなってきた。この高強度鋼、とくにその溶接継手部は静的強度は大きい、疲労強度はこれに比例して大きくならないという性質を示す。
- 2) 高強度鋼の使用、解析法の発達、構造の進歩により橋梁の軽量化が促され、設計荷重作用時の全応力のうち死荷重応力の占める割合が減り、活荷重応力の占める割合が大きくなってきた。すなわち活荷重による応力の変動幅が大きくなってきた。
- 3) 交通量の激増にともない繰返し載荷の回数は増加の一途をたどっている。
- 4) 疲労強度の低下をきたす溶接継手が輪荷重の直接載荷をうける部材にまで使用されるようになってきた。

道路橋に通常用いられる鋼床版は主げたの上フランジとして主げた作用の一部を受け持ち、同時にその上に直接載荷される自動車輪荷重を支える床版としての機能を有するもので、鋼床版部材に生ずる繰返し応力の平均値が高いうえにその変動幅も大きい。しかも鋼床版のデッキプレート、縦リブおよび横リブの組立てには通常溶接接合が用いられるので、その設計には疲労の影響を考慮する必要がある。

とくに鋼材の溶接接合部は施工不良による欠陥、熱による母材の変質、冷却中に導入される残留応力等のために、強度上一種の弱点となり、表面の仕上げのいかんによっては母材に比べて疲労強度がかなり低下するのが普通である。

以下においてはまず、道路橋における疲労設計の一般的な手順についての著者の考え方を述べ、さらに道路橋の各種部材の中でもっとも疲労が問題になる鋼床版についての疲労設計の方法を示す。

2. 疲労設計の手順

疲労を考慮して設計を行なう場合に必要なのは応力の変動幅、繰り返し回数など繰り返し荷重に関するデータおよび部材の疲労強度である。

繰り返し荷重に関する諸値を定めるにはまず対象とする橋梁の寿命を予想し、この寿命の間にその橋梁がうける応力振幅とその繰り返し数を予想する。このような応力振幅と繰り返し数に対してその橋梁が疲労破壊を起こさないかどうかを検討すればよいわけである。

設計という実務上から次のような手順をふめばよいと考える。

- ① その橋の全供用期間中に作用する繰り返し荷重の影響（応力振幅と繰り返し数）を、基本荷重すなわち設計示方書に示された T 荷重あるいは L 荷重が、ある換算等価繰り返し数で繰り返して載荷する影響におきなおして考える。
- ② このような等価繰り返し数に相当する疲労強度を $S-N$ 線図から求める。この $S-N$ 線図は各種の部材についての疲労試験の結果をともにして求められることはいうまでもない。
- ③ このようにして求めた疲労強度にある程度の安全度を見込んで応力振幅の許容値を定める。
- ④ 静的な設計計算によって求めた基本荷重（ T 荷重あるいは L 荷重）による応力がこの応力振幅の許容値を上回らないように断面を決める。

3. 繰り返し応力の振幅と繰り返し数

(1) 疲労に関する諸性質

鋼部材に一定の応力振幅で繰り返し載荷を与えた場合の実験結果を、縦軸に応力振幅、横軸に破断（あるいはクラック発生）の繰り返し数をとった両対数グラフにプロットすると、これらの点は直線上にのってくる。すなわち応力振幅を S_r 、破断の繰り返し数を N とすると次の関係が成立する。

$$\log S_r = A - K \log N \dots\dots\dots (1)$$

ここに A : 常数, K : 両対数グラフ上での $S-N$ 直線の勾配

一方実際の構造物に生ずる応力はランダム波形のものである。このような場合の疲労被害については Miner の累積疲労被害法則がよく知られている。これは構造物に S_i なる応力振幅で繰り返し荷重を与え、破壊が繰り返し数 N_i で起こったとき S_i の応力振幅 1 回の疲労被害は $1/N_i$ だと考え、この応力振幅 S_i での実際の繰り返し数が n_i だとすると $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$ のとき破壊が起こるとするものである。この法則は全繰り返し数を N_t 、 S_r の応力振幅の生ずる確率を $P(S_r)$ 、 S_r の応力振幅での破壊繰り返し数を $N(S_r)$ とすると次式のように書き改められる。

$$\int \frac{N_t \times P(S_r)}{N(S_r)} dS_r = 1 \dots\dots\dots (2)$$

(2) 繰り返し応力の振幅と繰り返し数を推定するために必要なデータ

橋の供用期間中に作用する繰り返し応力の大きさと繰り返し数を推定するためには実橋の各部材に

ついでの実交通下における応力の大きさとその頻度の測定結果が非常に有用であるが、現在のところ道路橋における応力頻度の実測結果は非常に少ない。これは主としてこの種の測定が非常にむづかしいことと、このための適当な測定装置が少ないということのためである。

したがって比較的測定がしやすく、われわれが容易に入手し得る資料をもとにして、供用期間中に橋に作用する繰返し応力とその繰返し回数を推定する必要がある。建設省では3年ごとに全国道路交通状況調査を行っており、車種別の交通量を実測している。この調査結果を参考にすれば橋の供用期間中の車種別の全交通量を推定することができよう。

このデータをもとにし、これとそれほど実測例は多くないが輪荷重の大きさ別の頻度分布、車両通過位置などの測定結果とを結びつけることによって、橋の供用期間中の車種別の全交通量と応力頻度との関係を推定することが可能となると思われる。

(3) 橋梁の寿命

疲労を考慮して設計をおこなう場合、まず決定しなければならない重要な事項は対象とする道路橋の寿命を何年にしたらよいかということである。道路橋の寿命は何年かという点に関しては英国では120年としているようであるが⁴⁾、他の国においては定説はない。

昭和40～42年度に供用を停止した国道における道路橋の供用年数と架換え理由の調査結果⁵⁾をみると、実際の橋の寿命は30～40年というのがもっとも多い。架換えの理由としては橋の寿命に達し、構造上の欠陥が生じたことによるものよりも交通量の増大による交通容量の不足、道路線形や河川の改良に伴うものが非常に多い。このような実情を考慮すると、設計時に想定する供用年数はあまり長くとも意味がない。

建設省の委託にもとづき道路協会で作成した道路橋技術基準(案)⁶⁾ではこれらのことを考慮して一応「橋の設計供用年数は50年を目標とする」としている。

(4) 交通量

1車線あたりの1日交通量を $N(Y)$ (Y :年)とすると橋梁の寿命中の全交通量は $N_{\text{tot}} = \int 365 \cdot N(Y) dY$ となる。

実際問題として橋梁設計時に $N(Y)$ を正しく推定するのは非常にむづかしい。基本交通容量は1車線1時間当たり2,500台⁷⁾となっており、これを日交通量になおすと60,000台となるが、交通量の時間帯による差がかなりあるので、1日1車線当たり20,000台位が最大であろう。

そこで設計時に $N(Y)$ を決めるには道路構造令に定める道路の区分ごとに20,000台程度以下の値を適宜決めてやることになる。

(5) 輪荷重の頻度分布と基本荷重に対する等価繰返し数

図-1は全国39地点における昭和45年～47年の実測結果を集計整理したもので、わが国における平均的な輪荷重分布と考えてよい。

前述の(2)式における N_i 、 S_i 、 $P(S_i)$ が任意の値をもつ応力履歴が橋梁に与える疲労の影響は、基準となるべきある応力振幅 S_b での何回の繰返し载荷に相当するかを求め、このときの基準応力振幅での繰返し数を等価繰返し数 N_{eq} と呼ぶことにする。

道路橋の設計の基本活荷重である T 荷重に対する等価繰返し数 N_{eq} はこの結果を用い、以下に述

べるような方法で求めることができる。
 道示によると、 $T=20$ の後輪荷重は8tonであるから、この8tonを基本輪荷重と考え、8tonに換算した等価繰返し数を求めることにする。前述のMinerの法則が成立つものとし、(2)式より次式が得られる。

$$\frac{N_{eq}}{N_t} = \int_{T_{min}}^{T_{max}} P(T) \cdot \left(\frac{T}{8}\right)^{1/K} \cdot dT \dots\dots\dots (3)$$

ここに N_{eq} : 等価繰返し数
 T : 輪荷重
 $P(T)$: T の載る確率
 K : $S-N$ 曲線の勾配($K=0.18$ とする。参考文献⁸⁾参照)

この式を見ればわかるとおり輪荷重の大きさは疲労に対して非常に大きな影響をもつことがわかる。すなわち T と $(T/8)^{1/K}$ の関係を示すと図-2のようになる。この図より基本輪荷重の1.5倍の12tonが1回作用することは8tonの約10回分の疲労被害に相当することがわかる。いま(3)式中の T と $P(T)$ の関係として各地における輪荷重の頻度分布の測定結果⁹⁾(全国集計値は図-1に示す)を用いることにして等価繰返し数を求めると N_{eq}/N_t の値は0.03~0.1となり、それぞれの地点でかなり差のあることが判明した。

(6) 輪荷重の通過位置の分布と基本荷重に対する等価繰返し数

橋梁のある部材に注目するとき、その部材への活荷重の影響は荷重の載荷位置によって異なることはいうまでもない。この場合にも基本荷重($T=20$ または $L=20$)が任意の位置に載荷した場合の影響を、基本荷重が注目している部材にもっとも大きな応力を生ぜしめるような位置に載荷した場合の影響に、すなわち設計計算に際して考慮した載荷状態に換算して考える。ある載荷位置に基本荷重が載る確率とそのとき部材に生じる応力とから、全通過交通が注目している部材へ及ぼす繰返し載荷の影響は基本とした載荷位置にある基本荷重の何回分の繰返しの影響に等しいかを計算で求めることができる。すなわちいま基本荷重として $T=20$ を考えることにすると、自動車の通過位置別の通過頻度分布がわかっておれば、これを別用して基本となる載荷位置に $T=20$ があるとして上述の等価繰返し数 N_{eq} に乗ずるべき補正係数 C を次式により求めることができる。

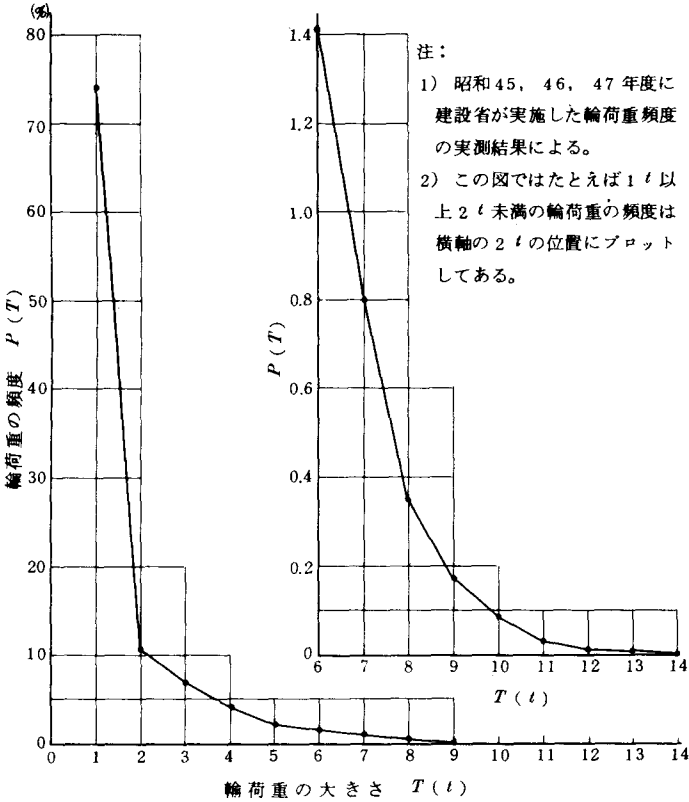


図-1 輪荷重の大きさと頻度の関係

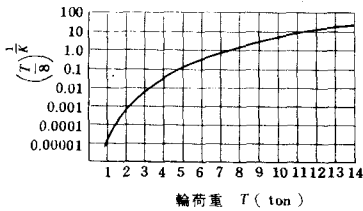


図-2 輪荷重による疲労累積被害率(8tonを基準にした場合)($K=0.18$)

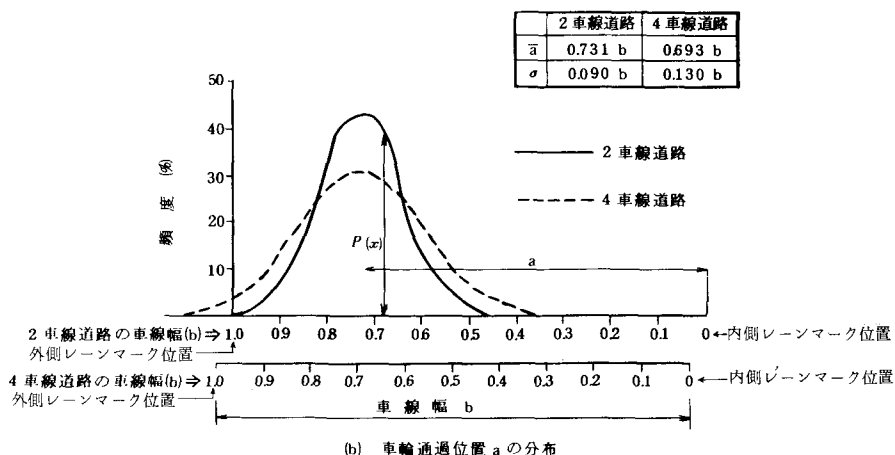
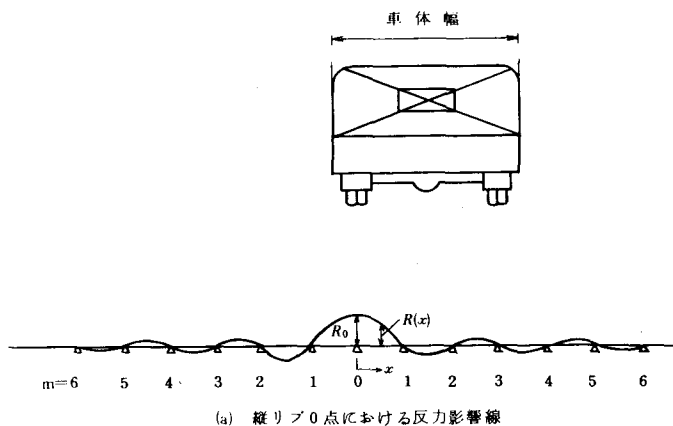


図-3 縦リブの反力の影響線と車輪通過位置

$$C = \int \left(\frac{R(x)}{R_0} \right)^{1/K} \cdot P(x) dx \quad (4)$$

ここに C : N_{eq} に乗すべき補正係数

R_0 : 基本荷重が基本載荷位置にあるときの部材の応力 (図-3(a)参照)

$R(x)$: 基本荷重が任意の位置 x に載荷したときの部材の応力 (図-3(a)参照)

$P(x)$: $R(x)$ が生じる確率

K : $S-N$ 線図の勾配

(4)式を用いて橋の供用期間中における自動車の通過位置の影響を考慮した場合の等価繰返し数は $C \times N_{eq}$ として求められる。

図-3(b)によると車線内における自動車の左側車輪の橋軸直角方向の通過位置は、 b を車線の幅とすると内側レーンマークから測って $0.73 \cdot b$ (2車線の場合) または $0.69 \cdot b$ (4車線の場合) の位置を平均とし、2車線の場合 $0.090 \cdot b$ および4車線の場合 $0.130 \cdot b$ をそれぞれ標準偏差とする正規分布を示す。これらは車線幅が3.5 m内外の国道上において実測されたものである。今車線幅 $b=3.5$ m

とすると標準偏差は2車線の場合31.5cm, 4車線の場合45.5cm となり, 輪荷重通過位置の分布は図-3(b)に示すように2車線(図-3(b)の実線)の場合には4車線(図-3(b)の点線)の場合より輪荷重通過位置が狭い範囲となっている。これは前者の方が後者より道路全幅が狭いためである。(4)式中の $R(x)$ と $P(x)$ との関係はこのような自動車通過位置の実測結果をもとにして定めることができる。

4. 等価繰り返し数の計算例—鋼床版縦リブの場合—

(1) 輪荷重通行位置が一定の場合の等価繰り返し数

橋の供用年数を50年とし, 1車線当たりの日交通量を10,000台/日とすると橋の供用期間中における1車線当たりの全交通量 N_{td} は 182.5×10^6 台となる。橋上を通過する車両はすべて2軸車であるとし, その左右いずれか片側の車輪はすべて注目している縦リブ上を通過するものとする。橋の供用期間中に注目している縦リブ上を通過する輪荷重の総数 N_{tw} は 365×10^6 輪となる。

このような通過輪荷重の中にはいろいろな大きさのものがまじっている。いま通過輪荷重の大きさ別の頻度分布として図-1を用いることにする。これから定められた $P(T)$ を用いて(3)式によって等価繰り返し数 N_{eq} が求められる。実際の計算に当っては $P(T) \cdot (T/8)^{1/K}$ は必ずしも T で積分できるとはかぎらないので, 積分できない場合には直接数値計算をおこなえばよい。

いま $K=0.18$ として数値計算をおこなうと輪荷重の等価繰り返し数 N_{eq} は 12.05×10^6 となる。

(2) 輪荷重の通行位置が一定でない場合

前述したように実際に道路上を走行している車両の輪荷重の通行位置は必ずしも一定ではないので上記(1)で求めた等価繰り返し数に, 輪荷重の通過位置が一定していないという補正をおこなったものが, 疲労を検討するときの繰り返し数となる。

鋼床版の縦リブの反力の影響は一般に図-3(a)のようになる。注目している縦リブ0から x の位置に輪荷重が載る場合の反力は $R(x)$ となり, $R(x)$ は常に注目している縦リブの反力 R_0 より小さい。

いま輪荷重通過位置の平均値が注目している縦リブの位置と一致すると考える(図-3参照)。図-3(a)に示した縦リブの反力の影響線 $R(x)$ と図-3(b)の輪荷重の通過位置別の頻度分布 $P(x)$ とから(4)式によって上記(1)で求めた等価繰り返し数に乘すべき補正係数 C を求めることができる。実際の計算に当っては(4)式の $(R(x)/R_0)^{1/K} \cdot P(x)$ は必ずしも x で積分できるとはかぎらないので, 積分できない場合には直接数値計算をおこなえばよい。

輪荷重通過位置に関する補正係数 C には縦リブ間隔が関係する。わが国において用いられている鋼床版の縦リブの間隔は30~35cmのものがほとんどである。

輪荷重通過位置として図-3(b)に示すものを用い縦リブ間隔を変化させて C を計算してみると図-4となる。図-4より C に対しては縦リブ間隔はそれほど大きな影響を与えないが, 車線数はかなり大きな影響を与えることが分る。すなわち C の値は2車線の場合約0.21, 4車線の場合約0.15となる。

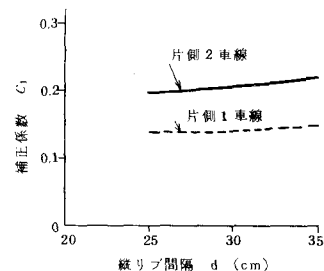


図-4 縦リブ間隔と補正係数 C との関係

(3) 設計に用いる等価繰返し数 $C \cdot N_{eq}$

図-1及び図-3(b)を用いて、縦リブ間隔30～35cmの通常の縦リブの疲労設計に用いる等価繰返し数 $C \cdot N_{eq}$ と1車線当りの日交通量 N 及び橋の耐用年数 Y との関係の求めると図-5となる。この図を用いれば極めて簡単に設計に用いる等価繰返し数を求めることができる。

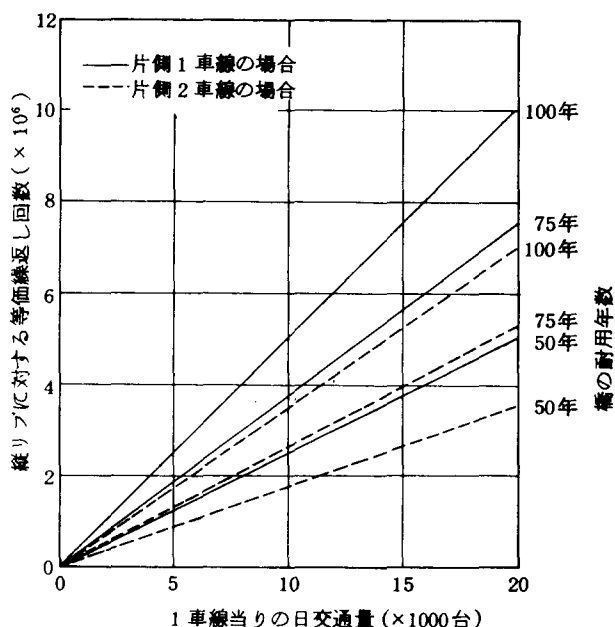


図-5 日交通量-耐用年数-等価繰返し数の関係(縦リブ間隔32cm)

5. 結 論

道路橋の疲労設計は、橋梁の各部材に生ずる実働応力の大きさとその回数を基本にしておこなうという理念に立つべきと考える。このような理念にもとづく疲労設計の手順を明らかにした。設計という実総上からは、橋梁の寿命中に生ずる種々な大きさと異なった回数の実働応力の影響が設計に用いる基本荷重($T-20$ あるいは $L-20$)が何回繰返して作用したときの影響に等しいかといういわゆる等価繰返し数を求める方法によるのが便利である。本報告においてはこのような等価繰返し数を求める方法を示した。

等価繰返し数を求めるためには作用する応力の大きさの確率分布を知る必要がある。部材に生ずる応力の大きさの確率分布は、通過荷重の大きさと輪荷重通過位置の確率分布から求めることを提案し道路上における実交通下での実測結果にもとづいてこれら2つの確率分布を明らかにした。

設計に用いる基本荷重による応力が、このような等価繰返し回数だけ作用したときに部材が疲労によって損傷を受けるか否かを、 $S-N$ 線図を用いてチェックすればよい。

道路橋の各種部材の中でも鋼床版のような部材では、従来からの全設計荷重による応力の制限のほ

かに、活荷重によって生ずる床作用としての応力にも何らかの制限を加える必要がある。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説, 昭和48年2月, 日本道路協会
- 2) 鉄筋コンクリート道路橋示方書, 昭和39年6月, 日本道路協会
- 3) プレストレストコンクリート道路橋示方書, 昭和43年3月 日本道路協会
- 4) The Design and Specification for Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 2, BS Draft Code, 72/13234 DC, 1972
- 5) 国広哲男, 太田 実: 橋の耐荷力と寿命 土木学会誌 Vol.55 1970年11月
- 6) 道路橋技術基準(案), 道路 1971年11月
- 7) 道路構造令の解説と運用 昭和45年10月 日本道路協会
- 8) 白石隆義: 溶接技術者のための疲労の知識 溶接技術 1969年7月~11月
- 9) 国広哲男, 朝倉 肇, 井上啓一: 設計活荷重に関する研究——交通荷重の実態と橋梁設計への適用——土木研究所資料第701号 昭和46年11月