

大型車3乗平均重量と同時載荷係数を用いた 道路橋疲労設計荷重の設定

DEFINITION OF FATIGUE DESIGN LOAD FOR HIGHWAY BRIDGES USING ROOT-MEAN-CUBE VALUE OF TRUCK WEIGHT AND SIMULTANEOUS LOADING FACTOR

坂野昌弘*・三上市藏**・宮川欣也***

By Masahiro SAKANO, Ichizou MIKAMI and Kinya MIYAGAWA

Since we have a number of fatigue crackings in highway bridges recently, it should be necessary to establish the effective method of fatigue design for highway bridges. However, it is difficult to define the fatigue design load which causes fatigue damage equivalent to that caused by actual traffic loading because of wide distribution of vehicle weight, various constitution of traffic flow, and random-like sequence of various vehicles. In this study, a definition of fatigue design load for highway bridges is proposed using the root-mean-cube value of truck weights and simultaneous loading factor obtained through computer simulation analyses.

1. はじめに

車両の重量化および交通量の飛躍的な増大等により、1980年代以降、道路橋の各所に疲労損傷が目立ち始めている¹⁾。現行の道路橋示方書²⁾では鋼床版等特殊な場合を除いて一般に疲労の影響を考慮しなくてもよいと規定されているが、今後架設される数多くの橋梁の疲労安全性および損傷を生じた場合の補修・補強に要する膨大なコストを考慮すれば、道路橋に対する設計荷重を含めた体系的な疲労設計法の確立が急務であると考えられる。

疲労破壊は日常的に繰り返される荷重によって生じるものであるため、疲労照査に用いる設計荷重は供用期間中に1回生じるかどうかというような終局強度照査用の活荷重の最大値ではなく、橋梁が日常的に受けている荷重の繰り返しを代表するものでなければならない。しかし、限られた形式・重量の列車が一定のダイヤに従って運行される鉄道橋の場合とは異なり、道路橋では様々な形式および重量の車両が様々な順序および間隔で通行するために、疲労被害に関して実働荷重と全く等価な設計荷重を設定することは容易ではない。

藤野ら³⁾は荷重強度一定の確率点過程を考え、主に車頭間隔に着目して複数車両の同時載荷の影響につい

* 工博 関西大学専任講師 工学部土木工学科 (〒564 大阪府吹田市山手町3-3-35)

** 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (同 上)

*** 関西大学大学院生 博士課程前期課程 (同 上)

て検討しているが、疲労被害に大きく影響する大型車の重量分布や混入状況の影響については十分考慮されているとはいえない。また、三木ら⁴⁾は車両の配列、重量および車間距離を確率変量としたコンピュータ・シミュレーションによって疲労設計荷重の検討を行い、便宜的にT-20荷重を用いた疲労設計荷重を提案しているが、この方法では疲労照査を行う際に交通量に関してもT-20荷重の載荷回数に対する換算が必要となるなど、さらに検討の余地が残されている。

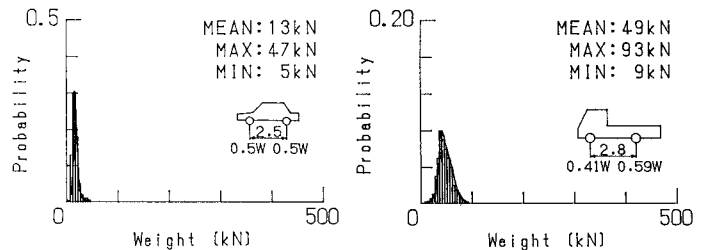
本研究では、実際の交通流によって生じる疲労被害を大型車1台当りに換算し、それと等しい疲労被害を与える1台の大型車として疲労設計荷重を考える。そして、そのような1台の大型車の重量（ここでは等価大型車重量と定義する）を、交通流に含まれる大型車の3乗平均重量と複数車両による同時載荷の影響を表す係数（同時載荷係数）を用いて表す方法を提案する。このような形で疲労設計荷重を定義することにより、車両重量分布、車種混入率などの車両特性と、支間、車線数、荷重分配率などの橋梁特性を分離することが可能となり、また疲労寿命を評価する際に大型車交通量を換算なしでそのまま用いることができるようになる。交通荷重によって生じる疲労被害の算定には、三木ら⁵⁾が行った自動車交通流のシミュレーションの手法を適用する。シミュレーションで用いる交通条件や車両特性については実際の高速道路等で測定されたデータを参考に設定する。

2. 等価大型車重量の算定

(1) 交通荷重のシミュレーション

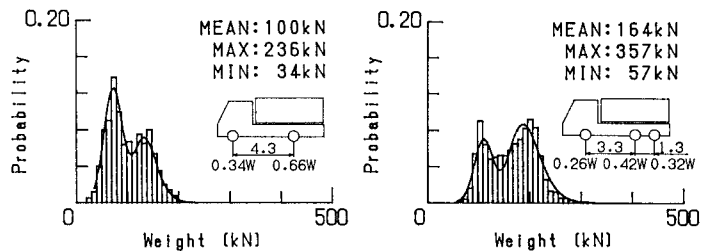
シミュレーションの基本的な考え方は、文献⁵⁾と同様である。すなわち、交通量と車種構成を与え、車両の配列、重量、間隔および速度を確率変量として、モンテカルロ・シミュレーションにより自動車荷重列を発生させる。それぞれの条件は、以下のように設定した。

シミュレーションに用いた車両モデルおよびその重量分布を図-1に示す。車両モデルは、乗用車(C)、小型トラック(ST)、2軸大型トラック(2-LT)、3軸大型トラック(3-LT)、トレーラートラック(TT)の5種類である。各モデルの車軸間距離、軸重比は、大阪市内の幹線道路における自動車荷重特性の測定値⁶⁾を参考に仮定した。また、各車両モデルの重量分布は、阪神高速道路芦屋集約料金所における活荷重実態調査の実測値⁷⁾をもとに仮定した。図中の棒グラフは実測値、曲線は仮定した確率分布を示す。乗用車と小型トラック



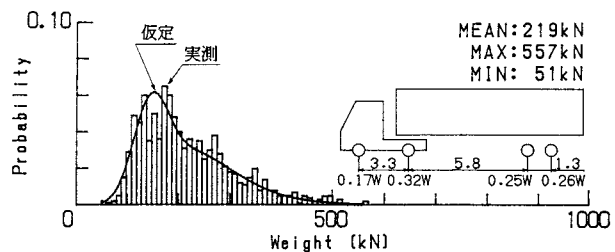
(a) 乗用車(C)

(b) 小型トラック(ST)



(c) 2軸大型トラック(2-LT)

(d) 3軸大型トラック(3-LT)



(e) トレーラートラック(TT)

図-1 各車両モデルおよびその重量分布

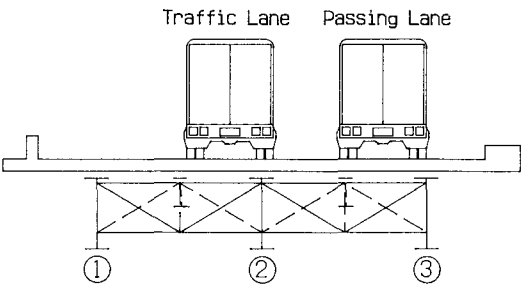
の重量分布は対数正規分布を仮定し、空車と積載車の2つのピークをもつ2軸大型トラックと3軸大型トラック、およびトレーラートラックの重量分布は、正規分布と対数正規分布の2つの分布の重ね合わせで表した。

車種構成は表－1に示す3種類⁵⁾を設定した。車種構成Aは、都市間の高速道路で深夜に生じるような大型車の割合が非常に大きい(85%)交通流、車種構成Bは都市間の高速道路で昼間に生じるような大型車が半分程度(45%)を占める交通流、車種構成Cは都市内の高速道路で生じるような乗用車の割合が大きい(75%)交通流である。疲労が問題となるのは、主として、車種構成A、Bのように大型車の割合が多い場合である。

時間交通量は大型車の多い交通流を想定して1車線あたり1500台と仮定し、車頭時間間隔は自由度3のアーラン分布⁶⁾を仮定した。走行速度は、高速道路における大型車の多い交通流を想定して平均速度70km/h、標準偏差10km/hの正規分布を仮定した。

(2) 橋梁形式

橋梁部材の影響線形状の違いは疲労被害にはほとんど影響しないことが三木ら⁴⁾により報告されている。したがって、本研究では、単純桁橋を対象として、支間、車線数、および主桁間の荷重分配作用が等価大型車重量に及ぼす影響について主に検討する。支間条件は30mと60mの2ケース、車線数は1車線と2車線、また、荷重分配作用については、図－2に示すような2車線、支間30mの3主桁橋を想定した。各主桁の走行車線および追越車線を走行する車両に対する荷重分配率は、各主桁のたわみの実測値から求められた表－2に示す値を用いた⁹⁾。表－2の荷重分配率比は、各車線に対する荷重分配率の小さい値と大きい値の比である。



図－2 3主桁橋の横断面図

表－2 各主桁の荷重分配率および荷重分配率比

Girder No.	Traffic Lane	Passing Lane	Ratio of Lateral-Distribution Factors
①	0.39	0.13	0.33
②	0.39	0.35	0.90
③	0.22	0.52	0.42

(3) 等価大型車重量

シミュレーションによって発生させた自動車荷重列が橋梁上を通過するときに支間中央で生じる曲げモーメント変動を用いて橋梁部材に生じる応力変動を代表させ、それによって生じる疲労被害に対して等価大型車重量を算定する。疲労被害Dは、線形被害則を適用して式(1)のように求められる。

$$D = \sum (M_{r,i}^m \cdot n_i)$$
(1)

ここに、 M_{fi} は曲げモーメント変動範囲、 n_i はその頻度で、曲げモーメント範囲のヒストグラムはレインフロー法により求められる。また、溶接構造部材の疲労寿命曲線の傾きがおおよそ $-1/3$ である¹⁰⁾ことから $m=3$ とする。この疲労被害 D をシミュレーションで発生させた大型車の台数で除し、大型車1台当たりのモーメント変動範囲（等価モーメント範囲）を求める（式(2)）。

$$M_{req} = (D / N_{LT})^{1/3} \quad (2)$$

ここに、 M_{req} は等価モーメント範囲、 N_{LT} は大型車台数である。この等価モーメント範囲を生じるような2軸あるいは3軸トラック1台の重量として等価大型車重量を求めることができる。

表-3に、1主桁橋と仮定して各ケースについて求めた疲労被害 D 、大型車台数 N_{LT} 、等価大型車重量 W_{eq} の値を示す。大型車混入率が高いほど（車種構成 $C \rightarrow B \rightarrow A$ の順）、また、支間が大きい、あるいは車線数の多い方が大きな等価大型車重量が得られており、大型車の同時載荷の影響が等価大型車重量によく反映されていることがわかる。 W_{eq} の比で表すと、支間30mと60mでは1.05倍、1車線と2車線では最大1.15倍程度に大きくなっている。なお、3軸大型車に対する等価大型車重量(3-LT)が2軸大型車に対するもの(2-LT)に比べて若干小さいが、これは3軸大型車の方が後ろの2軸に荷重が集中するために、同じ重量の2軸大型車に比べて生じる曲げモーメント変動が大きい（疲労被害が大きい）ことを反映したものである。

多主桁橋では、桁と車線の相対的な位置関係により、桁によって複数車線の同時載荷の影響の現れ方が異なることが三木ら¹¹⁾によって報告されている。ここでは、各主桁の荷重分配率の違いが等価大型車重量にどのように現れるかについて検討する。それぞれの桁の等価大型車重量は、2車線を通じた車両によって生じた疲労被害を荷重分配率の3乗の比で各車線に分配したのに対して求められる。表-4に、各主桁の疲労被害 D 、大型車台数 N_{LT} 、等価大型車重量 W_{eq} の値を示す。両方の車線に近い中桁(②)の W_{eq} については、荷重分配作用を考慮しない場合（表-3の2車線）に近い値が得られている。外桁(①、③)の W_{eq} は

表-3 等価大型車重量に及ぼす支間および車線数の影響

Number of Lanes	Span Length L (m)	Traffic Constitution	Fatigue Damage D (kN・m) ³	Number of Trucks N _{LT}	Equivalent Truck Weight W _{eq} (kN)	
					2-LT	3-LT
1	30	A	1.32×10^{13}	8540	170	167
		B	6.18×10^{12}	4545	162	159
		C	1.38×10^{12}	1288	150	147
	60	A	1.39×10^{14}	8540	177	175
		B	6.55×10^{13}	4545	170	168
		C	1.49×10^{13}	1288	158	156
2	30	A	4.00×10^{13}	17082	195	191
		B	1.58×10^{13}	9018	177	173
		C	3.23×10^{12}	2560	158	155

は中桁(②)に比べて5～6%程度小さくなっており、車線から遠い桁では複数車線の同時載荷の影響が小さくなることがよく反映されている。

表－4 荷重分配を考慮した場合の各主桁に対する等価大型車重量

Girder No.	Traffic Constitution	Fatigue Damage D (kN・m) ³	Number of Trucks N _{LT}	Equivalent Truck Weight W _{eq} (kN)	
				2-LT	3-LT
①	A	1.01×10^{12}	17082	182	179
	B	4.55×10^{11}	9018	168	165
	C	9.21×10^{10}	2560	152	149
②	A	2.01×10^{12}	17082	194	190
	B	8.80×10^{11}	9018	176	173
	C	1.64×10^{11}	2560	156	153
③	A	2.58×10^{12}	17082	185	181
	B	1.22×10^{12}	9018	170	166
	C	2.19×10^{11}	2560	151	148

3. 同時載荷係数

同時載荷係数 γ は、複数車両の同時載荷が起こる場合の(すなわち、本来の意味の)等価大型車重量(W_{eq})と同時載荷が起こらない場合の等価大型車重量(W_{eq}')の比として式(3)のように定義される。

$$\gamma = W_{eq} / W_{eq}' \quad (3)$$

同時載荷が起こらない場合の等価大型車重量は、全ての車両が橋梁上を単独で走行するように車間距離を支間よりも大きく設定し、シミュレーションを行うことにより求めることができる。表－5に支間30mと60mについて求めた W_{eq}' を示す。支間が大きい方が、支間に対して車両の車軸間距離が相対的に短くなり、集中荷重に近くなるために W_{eq}' が大きくなっている。大型車の混入率が高いほど(C→B→Aの順) W_{eq}' が大きいの、単純に重量の大きい車両の割合が高いことに対応している。

2車線の同時載荷の影響を考慮する場合、1車線同時載荷係数 γ_1 と2車線同時載荷係数 γ_2 、および全体の同時載荷係数 γ との関係は式(4)で表される。

$$\gamma = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \quad (4)$$

表－6に、支間30mと60mの場合の1車線同時載荷係数 γ_1 および主桁間の荷重分配作用を考慮しない場合の支間30mの2車線同時載荷係数 γ_2 を示す。 γ_1 については、大型車の多い車種構成AとBについてみれ

表-5 同時載荷なしの等価大型車重量と大型車重量の3乗平均値

Traffic Constitution	Equivalent Truck Weight Without Simultaneous Loading W_{eq} (kN)				Root-mean-cube Value of Truck Weight W_{RMC} (kN)
	L = 30m		L = 60m		
	2-LT	3-LT	2-LT	3-LT	
A	171	168	174	172	176
B	160	157	167	165	168
C	146	143	152	150	145

表-6 同時載荷係数 γ_1 および γ_2

Traffic Constitution	γ_1		γ_2
	L=30m	L=60m	L=30m
A	0.99	1.02	1.15
B	1.01	1.02	1.10
C	1.03	1.04	1.05

表-7 荷重分配を考慮した2車線同時載荷係数 γ_2

Traffic Constitution	Girder No.		
	①	②	③
A	1.08	1.14	1.09
B	1.04	1.09	1.05
C	1.01	1.04	1.00

ば、支間30mでは0.99および1.01で同時載荷の影響がほとんどないことを示している。支間60mでは30mに比べて若干大きくなっているが、1.02程度である。表-3の W_{eq} では1.05倍ほどに大きくなっているが、表-5に示したように W_{eq}' も大きくなるために、式(3)で定義した同時載荷係数で表した場合には車線内の同時載荷の影響はほとんど無視できる程度となる。 γ_2 については、大型車の割合が大きい車種構成Aでは1.15、大型車が半分程度の車種構成Bでも1.10となり、複数車線に対しては比較的大きな同時載荷係数が得られる。これらの値は、三木ら¹¹⁾が求めた γ_2 に比べて5%程度大きいものとなっている。

表-7に、支間30m、2車線の3主桁橋について荷重分配作用を考慮して求めた2車線同時載荷係数 γ_2 を示す。中桁(②)では、車種構成A、B、Cについて $\gamma_2 = 1.14, 1.09, 1.04$ と、荷重分配を考慮していない場合の γ_2 の値(1.15, 1.10, 1.05)とほとんど変わらない値が得られている。それに比べて、外桁(①, ③)では、 γ_2 は最大でも1.08あるいは1.09と小さい値が得られている。図-3に、 γ_2 と荷重分配率比の関係を示す。 γ_2 と荷重分配率比の関係は各車種構成ごとに直線で表される。したがって、外桁など荷重分配率比が小さい桁に対しては、図-3の関係に従って小さい γ_2 を用いてもよいことになる。

4. 大型車重量の3乗平均

車両の車軸間隔に比べて桁の支間が十分に大きければ、車軸間隔を無視し、1台の車両を1個の集中荷重とみなすことができる。大型車混入率が大きい場合に、各車両が全て単独で(すなわち、同時載荷を生じないという条件で)橋梁上を走行した場合の等価大型車重量は、大型車重量の3乗平均値とほぼ等しくなるこ

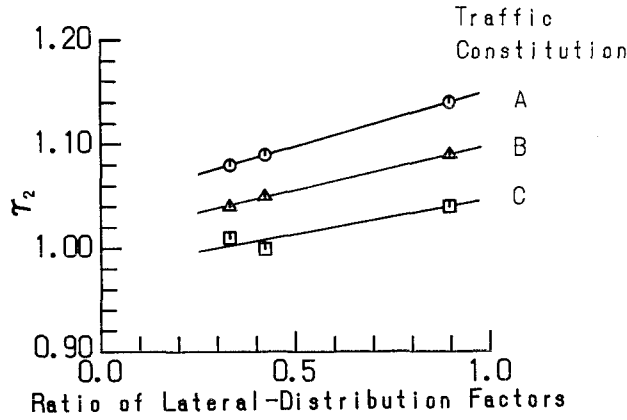


図-3 2車線同時載荷係数と荷重分配率比との関係

とが予想される。大型車重量の3乗平均値 W_{RMC} は、式(5)により簡単に求めることができる。

$$W_{RMC} = \{ \sum (W_{RMCi}^3 \cdot X_i) \}^{1/3} \quad (5)$$

ここに、 W_{RMCi} は各大型車両モデルの重量分布から求めた3乗平均値、 X_i は各大型車モデルの全大型車台数に対する比率である。

各車種構成に対する大型車重量の3乗平均値 W_{RMC} を、同時載荷なしの等価大型車重量 W_{eq} とともに表-5に示す。 W_{RMC} は W_{eq} と同様に、重量の大きい3軸大型トラックやトレーラートラックの相対的な比率が小さくなるにつれ(車種構成がA→B→Cの順)小さくなっている。現実的に疲労が問題となるのは大型車の割合が大きい場合であるから、車種構成AとBについてみると、 W_{eq} に比べて W_{RMC} の方が若干大きめの値となっている。この章の始めで述べたような理由から、大型車混入率が高い場合には、 W_{RMC} は W_{eq} のほぼ上限値と考えることができる。設計荷重として用いることを考えれば多少大きめの値は安全側であり、大型車の重量分布と混入率のみから求められる W_{RMC} の方がシミュレーションによって求められる W_{eq} に比べて求めやすく、また、車両重量や車種構成の変化に対しても簡単に対応できるというメリットがある。したがって、 W_{eq} に代わって W_{RMC} を基本荷重とし、それに対して、表-6および表-7に示したような同時載荷係数を用いることによって、簡便で合理的な疲労設計荷重を設定することが可能となる。

5. おわりに

疲労設計荷重として、交通流によって生じる疲労被害と等価な1台の大型車の重量(等価大型車重量)を考え、それを大型車重量の3乗平均値と同時載荷係数を用いて表す方法について検討した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 等価大型車重量 W_{eq} により、複数車両の同時載荷に及ぼす大型車混入率や桁の支間、車線数、主桁間の荷重分配作用などの影響をよく表すことができる。
- (2) 複数車両の同時載荷が起こらない条件下の等価大型車重量 W_{eq} を計算することにより、 W_{eq} と W_{eq} の比として同時載荷係数を求めることができる。
- (3) 多主桁橋の2車線同時載荷係数 γ_2 と荷重分配率比の関係は直線関係となることから、外桁など荷重分配率比の小さい桁に対しては、それ相当の小さい γ_2 を適用することができる。

(4) 各大型車の重量分布および混入率から求めた大型車重量の3乗平均値 W_{RMC} は W_{eq} とほぼ等しいことから、 W_{RMC} を重量とする1台のトラック荷重を疲労設計荷重の基本荷重として用いることができる。

以上、各車種の重量分布と混入率から簡単に得られる大型車重量の3乗平均値と、桁の支間や車線数、荷重分配率などの橋梁特性によって定められる同時載荷係数を用いることにより、道路橋に対する合理的な疲労設計荷重を設定できることが示された。実用的な同時載荷係数を設定するためには、種々の条件について検討結果を蓄積することが必要と考えられる。最後に、本研究の一部が平成3年度文部省科学研究費補助金（奨励研究(A) 研究代表者：坂野昌弘、課題番号：03750399）によるものであることを付記する。

参考文献

- 1) 三木千寿・坂野昌弘・館石和雄・福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析，土木学会論文集，No. 392/I-9，pp. 403-410，1988.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編），1990.
- 3) 藤野陽三・バルティア，B. K.・三木千寿・伊藤学：車両の同時載荷が道路橋の疲労損傷に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol. 33A，pp. 775-785，1987.
- 4) 三木千寿・杉本一郎・宮崎早苗・森猛：鋼道路橋の疲労照査のための荷重に関する研究，構造工学論文集，Vol. 36A，pp. 975-984，1990.
- 5) 三木千寿・後藤祐司・村越潤・館石和雄：シミュレーションによる道路橋の疲労設計活荷重の研究，構造工学論文集，Vol. 32A，pp. 597-608，1986.
- 6) 関西道路研究会道路橋調査研究委員会：疲労小委員会報告書，1989.
- 7) 阪神高速道路公団：設計荷重(HDL)委員会報告書，1984.
- 8) 久保雅邦・篠塚正宣：自動車交通流の配列に関する確率的考察，土木学会第38回年次学術講演会，I-200，1983.
- 9) 日本道路公団東京第一管理局：供用下における鋼橋の補修方法の検討報告書，1986.
- 10) 日本鋼構造協会：疲労設計指針(案)，JSSCレポート，No. 14，1989.
- 11) 三木千寿・館石和雄・杉本一郎：道路橋の疲労照査のための活荷重に関する一考察，土木学会論文集，No. 432/I-16，pp. 63-68，1991.

(1991年9月30日受付)