

2車線道路橋の疲労設計荷重に用いる 同時載荷係数の検討

森 猛¹

¹正会員 工博 法政大学教授 工学部土木工学科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2)
E-mail : mori@k.hosei.ac.jp

重交通路線に位置する鋼道路橋を中心に疲労が原因と考えられる損傷事例が数多く報告されており、道路橋示方書では2002年3月の改訂版より疲労安全性照査を陽な形で行うように規定された。その具体的な方法は「鋼道路橋の疲労設計指針」によるものとされている。同指針で用いられている疲労設計荷重は、T荷重を基本とし、その重量をT荷重補正係数、同時載荷係数と衝撃係数で補正することとされている。本論文では、橋上に複数の車両が同時に載ることによる応力の増分が疲労耐力に及ぼす影響を考慮するための同時載荷係数について検討した結果を示す。

Key Words : fatigue design load, simultaneous loading factor, highway bridge, Monte-Carlo simulation

1. はじめに

従来、道路橋については鋼床版を除いて疲労照査の必要はないとされてきた。旧道路橋示方書¹⁾によれば、この理由を「道路橋においては、鉄道橋と比べた場合、設計応力に占める活荷重応力の割合が小さく、また設計活荷重に相当する活荷重が載荷される頻度が小さいため、・・・」としている。このような疲労に関する条項が記載されたのは、1980年からであり、それ以前の活荷重の状況や橋梁形式、使用鋼材などを総合的に判断して設定されたものと考えられる。しかし、トラックの大型化に伴う重量化や大型車交通量の増加など、当時の検討では想定しなかった過酷な交通状態が生じ、そのような路線に位置する鋼道路橋を中心に1980年代から疲労が原因と考えられる損傷事例が数多く報告されている²⁻⁵⁾。また、SM570鋼までの鋼材規格は1973年版の示方書から示されていたものの、先に述べた検討が行われた当時は橋梁用鋼材としてSS400あるいはSM400鋼が最も広く用いられていた。しかし、現在ではSM490Y鋼が主流であり、SM570鋼が用いられることも少なくない。鋼材の静的強度が増すと、活荷重により生じる応力が相対的に増加するが、溶接継手の疲労強度は鋼材の静的強度に依存しない。そのため、疲労に対してより厳しい状況となっている⁶⁾。

このような状況のもと、道路橋示方書では2002

年3月の改訂版より疲労安全性照査を陽な形で行うように規定された。その具体的な方法は「鋼道路橋の疲労設計指針」⁷⁾によるものとされている。この指針で用いられている疲労設計荷重は、T荷重を基本とし、その重量(200kN)をT荷重補正係数、同時載荷係数、そして衝撃係数で補正することとされている。同時載荷係数とは、橋上に複数の車両が同時に載ることによる応力の増分を考慮するためのものである。

同時載荷係数については、既に三木ら^{8),9)}あるいは坂野ら^{10),11)}によっても検討されている。これらの研究では、自動車荷重列のモンテカルロシミュレーション¹²⁾を利用して、同時載荷係数に対する影響線の形状、長さ、交通量、大型車混入率などの影響について検討した結果が報告されている。

本研究では、三木ら・坂野らと同様の手法を用いるものの、従来の研究では十分ではないと考えられる2車線道路橋の同時載荷係数に対する支配因子やその影響度を定量的に明らかにした上で、その算定式を提案する。

2. 同時載荷係数の定義と求め方

(1) 同時載荷係数と疲労損傷度

同時載荷係数(γ_{T2})は、交通量が比較的多い橋梁について、橋上に複数の車両が同時に載ることによ

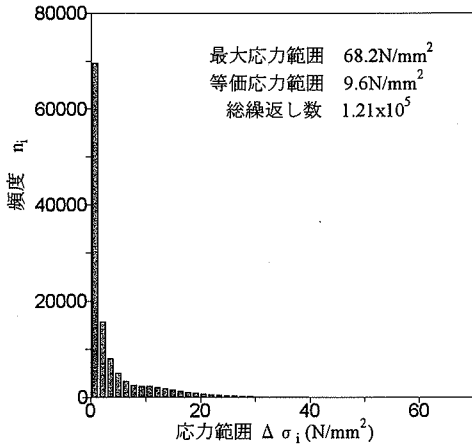


図-1 応力範囲頻度分布の例

る応力の増分が疲労耐力に及ぼす影響を考慮するためのものである。その値は、対象とする橋梁で想定される様々な車両の走行により生じる疲労損傷度 (Ds) と、同じ車両が同時載荷することなく走行する場合の疲労損傷度 (Di) の比で表される。なお、疲労損傷度は後述の式(1)より求める。

$$\gamma_{12} = (Ds/Di)^{1/3}$$

ここで3乗根とするのは、後述するように疲労損傷度が応力範囲の3乗に比例することを考慮し、同時載荷の影響をT荷重重量(200kN)に乗じる係数として表現するためである。

対象とする橋梁で想定される様々な車両の走行により生じる疲労損傷度は、車両走行のモンテカルロシミュレーションに基づく応力変動解析を利用して求める。すなわち、交通流を交通量、走行速度と車種構成で代表し、自動車の配列、重量および車間距離を確率変数として自動車荷重列のモンテカルロシミュレーション¹²⁾を行い、荷重列が道路橋上を通過する際に生じる応力変動を解析する。解析された応力変動は、レインフロー法により応力範囲の頻度分布に変換される。図-1は応力範囲頻度分布の解析例を示したものである。なお、これらの解析は著者らが開発した疲労安全性評価プログラム¹³⁾を利用して行う。疲労損傷度は、次式より求めることができる。

$$\sum (\Delta \sigma_i^3 \times n_i) \quad (1)$$

$\Delta \sigma_i$: 応力範囲頻度分布に含まれる応力範囲成分
 n_i : $\Delta \sigma_i$ の頻度

なお、疲労損傷度はマイナー則で用いる疲労損傷比

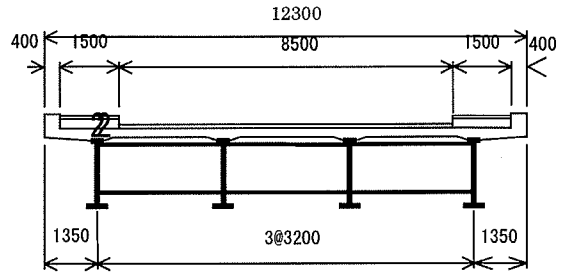


図-2 2車線道路橋の断面

という意味で用いられることもあるが、ここでは式(1)から計算されるものを疲労損傷度と呼ぶ。

同時載荷がない場合の疲労損傷度は、文献⁸⁾に示されている線形重ね合わせ法を利用して求める。なお、荷重列のシミュレーションあるいは線形重ね合わせ法においても、第1車線と第2車線の車両走行は独立という仮定を用いる。

(2) 解析対象

本研究で対象とする2車線道路橋では、橋軸方向に加えて橋軸直角方向の車両同時載荷も生じる。また、着目部材に生じる応力は、車両がどの車線を走行するかによって異なる。ここでは、同じ車両が各車線を走行する際に生じる応力の比(最も高い応力が生じる車線を基準とする)を車線応力比と呼ぶ。図-2は一般的な桁形式の2車線道路橋の断面を示したものであるが、4本の主桁の内、内桁の車線応力比は0.7程度、外桁ではほぼ0となる。車線応力比が0ということは、橋軸方向の同時載荷のみを考えればよい、すなわち1車線道路橋と同じになることを意味している。3本主桁あるいは5本主桁であれば、中央の桁の車線応力比は1.0となる。ここでは、車線応力比を0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0として解析を進める。

橋上を走行する車両が同じであっても、着目する位置の応力変動はその位置での応力の影響線の形状や長さによって変化する。ここでは、図-3に示す9つの形状の影響線を対象とした。Aは単純桁橋の支間中央での曲げモーメント、Bは単純桁橋の支間1/4点での曲げモーメント、Cは3径間連続桁橋の側径間中央での曲げモーメント、Dは3径間連続桁橋の中央径間中央での曲げモーメント、Eは3連トラスの斜材の軸力、Fは3連トラスの下弦材の軸力、Gは3径間ゲルバー桁橋の中央径間中央での曲げモーメント、Hはアーチ橋のアーチ材軸力、Iはアーチ橋の補剛桁の曲げモーメントの影響線である。影響線の基線長Lは20~400mとし、表-1に示すように、各々の形状の影響線につき3ないし4つの基線長を用いている。

表-1 影響線の種類と基線長

影響線の長さ	影響線の種類								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
20m	○	○	○	○	○		○		
50m	○	○	○	○	○		○	○	○
100m	○	○	○	○	○	○	○	○	○
200m	○	○	○	○	○	○	○	○	○
400m						○			○

また、影響線の縦距は、いずれの場合も、その最大値が 10 kN あたり 1N/mm² となるように設定した。なお、これらの中には非現実的な影響線形状と基線長の組み合わせもあるが、ここでは同時載荷係数を左右する支配因子を明らかにする目的で、あえてこのような組み合わせも対象としている。

(3) 解析条件

橋上には様々な形式の車両が走行するが、ここでは表-2 に示す 8 形式に車両を分類することとした。これは、設計活荷重が 20 トンから 25 トンに変更された際に、既設橋梁の耐力評価を行うために用いられたものである¹⁴⁾。実際には、4 軸や 6 軸のトレーラーなど、ここで示した以外の車両も存在し、橋上を走行する。しかし、橋梁の設計時に実交通を非常に高い精度で予測することが困難なことを考えあわせれば、あまり多くの種類に分類することは無意味とも考えられる。表-2 には、各形式車両の重量特性を表す最大重量、最小重量、平均重量、標準偏差、分布形も示している¹⁴⁾。なお、ここで示す車両の内、中型トラック以上の車両が大型車と定義されることが多い。ここでもこの定義に従う。

これら 8 形式の車両の構成比は、いくつかの測定結果^{12), 14), 15)}を参考に、表-3 に示すように設定した。大型車混入率は 5%, 20%, 32.5%, 40%, 60% となる。交通量は 1 車線あたり 500~2500 台/hr、車両の走行速度は 50~100km/hr とする。

(4) シミュレーションに用いる車両台数の検討

自動車荷重列のモンテカルロシミュレーションを利用して疲労損傷度の解析を行う際、シミュレーションに用いる車両台数が問題となる。時間交通量を両車線とも 1000 台、時速を 50km/hr、車線応力比を 1.0、影響線形状を A で基線長 L を 50m とした条件で、シミュレーション台数を 1 車線あたり 50 台~100 万台と変化させて疲労損傷度の解析を行った。また、1 つのシミュレーション台数につき 3 回の解析を行った。これらの解析から求めた車両 1 台あたりの疲労損傷度とシミュレーション台数の関係を図-4 に示す。シミュレーション台数が比較的少ない場合には、

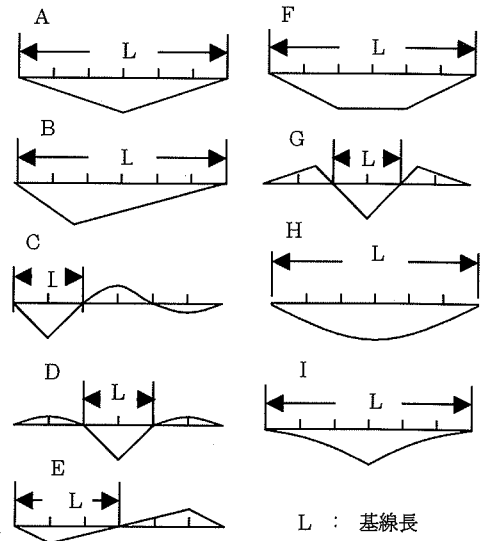


図-3 影響線の形状

シミュレーション台数やシミュレーションの番号による疲労損傷度のばらつきが大きい。しかし、10 万台以上の領域では、シミュレーション台数やシミュレーションの番号によらず、疲労損傷度がほぼ一定となっている。そのため、以後の解析においては、シミュレーション台数を 1 車線あたり 10 万台とすることとした。

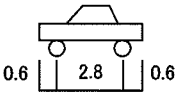
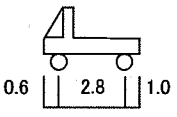
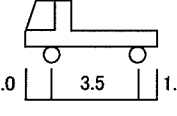
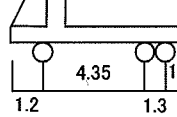
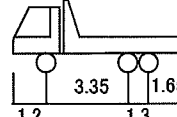
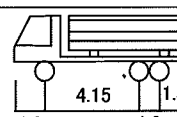
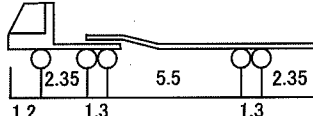
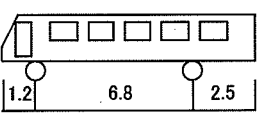
3. 同時載荷係数の計算結果と算定式

(1) 基線長、交通量、車速の影響

図-5(a)~(c)は、影響線形状 A・大型車混入率 40%・車線応力比 0 として、それぞれ基線長、交通量、車速をパラメータとして整理した同時載荷係数 γ_{T2} を示している。基線長が長く、また交通量が多くなるにしたがって、 γ_{T2} の値も増加している。基線長や交通量が増加することにより、橋上（基線上）に同時に載る車両の台数は増加する。その結果、発生する応力が大きくなり、 γ_{T2} の値も大きくなったものと考えられる。車両の走行速度については、それが高くなれば車間距離が長くなり、基線上に同時に載る車両の台数が減少するため、 γ_{T2} の値は減少している。

以上のように、車線応力比 0 の場合の同時載荷係数は、1 車線あたり基線上（橋上）に同時に載る車両の台数によって変化するものと考えられる。この基線上に同時に載る車両の平均台数を 1 車線平均同時載荷台数 (NS_1) と呼ぶ。 NS_1 は基線長、交通量、車速を用いて以下のように求めることができる。

表-2 車両分類

小型車	乗用車 C	平均重量：12.7kN 最大重量：30.4kN 最小重量：2.0kN 分布形：対数正規 標準偏差：3.5kN	車長 4.4m 車幅 1.50m		軸重比 1軸目:50.2% 2軸目:49.8%
	小型トラック ST	平均重量：35.5kN 最大重量：122.6kN 最小重量：9.8kN 分布形：対数正規 標準偏差：12.8kN	車長 4.4m 車幅 1.40m		1軸目:23.9% 2軸目:76.1%
大型車	中型トラック MT	平均重量：59.5kN 最大重量：179.5kN 最小重量：15.7kN 分布形：対数正規 標準偏差：24.5kN	車長 6.0m 車幅 1.60m		1軸目:19.6% 2軸目:80.4%
	大型トラック LT	平均重量：164.3kN 最大重量：443.4kN 最小重量：37.3kN 分布形：対数正規 標準偏差：61.7kN	車長 8.5m 車幅 1.95m		1軸目:14.1% 2軸目:54.8% 3軸目:31.1%
	大型ダンプ LD	平均重量：192.5kN 最大重量：607.2kN 最小重量：53.0kN 分布形：対数正規 標準偏差：93.6kN	車長 7.5m 車幅 1.95m		1軸目:11.7% 2軸目:44.3% 3軸目:44.0%
	タンクローリ TR	平均重量：135.6kN 最大重量：330.6kN 最小重量：38.3kN 分布形：対数正規 標準偏差：61.9kN	車長 8.0m 車幅 1.95m		1軸目:13.7% 2軸目:54.2% 3軸目:32.1%
	セミトレーラ TT	平均重量：243.1kN 最大重量：850.5kN 最小重量：50.0kN 分布形：対数正規 標準偏差：126.7kN	車長 14.0m 車幅 2.05m		1軸目:6.4% 2軸目:18.5% 3軸目:18.3% 4軸目:29.4% 5軸目:27.3%
	バス BS	平均重量：135.8kN 最大重量：183.4kN 最小重量：66.7kN 分布形：対数正規 標準偏差：23.6kN	車長 10.5m 車幅 2.0m		1軸目:37.1% 2軸目:62.9%

$$NS_1 = \frac{\text{基線長} \times (1 \text{ 車線あたりの時間交通量})}{\text{車速}}$$

NS_1 が 1 以下の場合、平均的には橋上に複数の車両が同時に載ることはない。一方、 NS_1 が 1 以上になれば、車両が影響線上に同時に載る可能性が高くなる。このため、 NS_1 が大きくなるにしたがって、発生する応力が増加し、 γ_{T2} の値も増加するものと予想される。

影響線形状 A・大型車混入率 40% という条件で解析した γ_{T2} と NS_1 の関係を図-6 に示す。ここでは、基線長、車両走行速度と時間交通量を変えて解析した

結果を示しているが、これらの違いによる γ_{T2} の相違は認められない。また、 NS_1 が 1 以下の領域では、 γ_{T2} はほぼ 1 である。一方、 NS_1 が 1 以上の領域では γ_{T2} が NS_1 に比例して増加する傾向がみられる。

車線応力比が 1.0 の場合についても同様の検討を行った。車線応力比が 0 でない場合には、2 車線合わせて基線上（橋上）に同時に載荷する車両の平均台数を考える必要がある。ここでは、これを 2 車線平均同時載荷台数 (NS_2) と呼ぶ。 NS_2 は基線長、時間交通量 (2 車線合計)、車速を用いて次式で求めることができる。

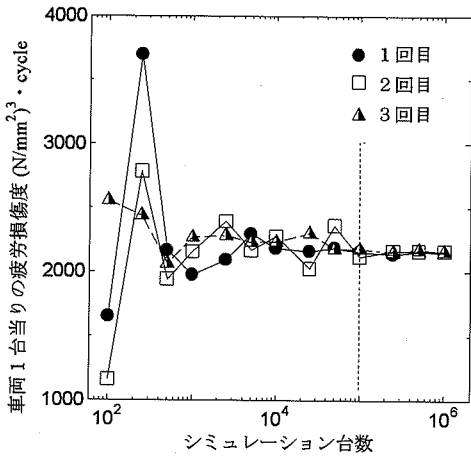


図-4 シミュレーション台数の検討

表-3 車種構成比

車種	大型車混入率				
	5%	20%	32.5%	40%	60%
C	0.776	0.653	0.551	0.490	0.327
ST	0.174	0.147	0.124	0.110	0.073
MT	0.020	0.081	0.131	0.161	0.242
LT	0.016	0.063	0.103	0.127	0.190
LD	0.005	0.018	0.030	0.037	0.056
TR	0.003	0.011	0.017	0.021	0.032
TT	0.005	0.021	0.034	0.042	0.063
BS	0.001	0.006	0.010	0.012	0.017

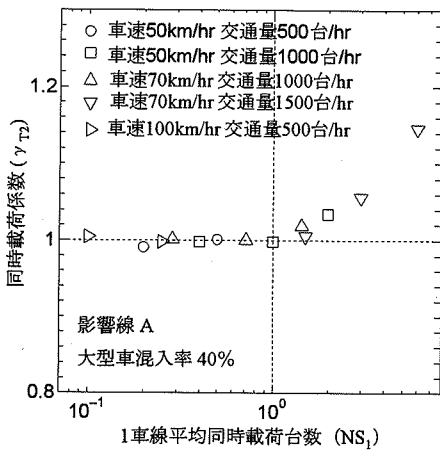
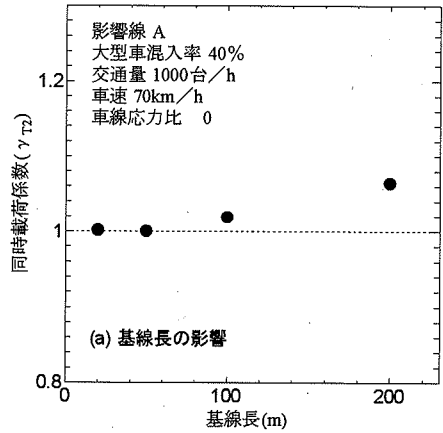


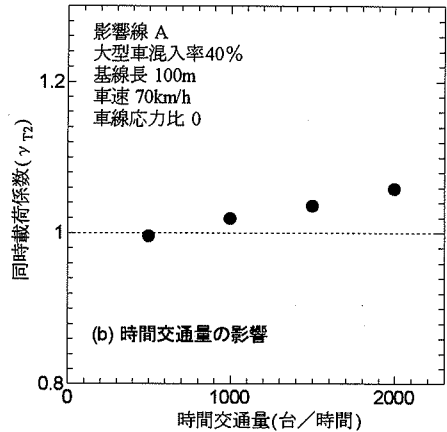
図-6 同時載荷係数と
1車線平均同時載荷台数の関係

$$NS_2 = \frac{(\text{基線長}) \times (2 \text{車線合計の時間交通量})}{(\text{車速})}$$

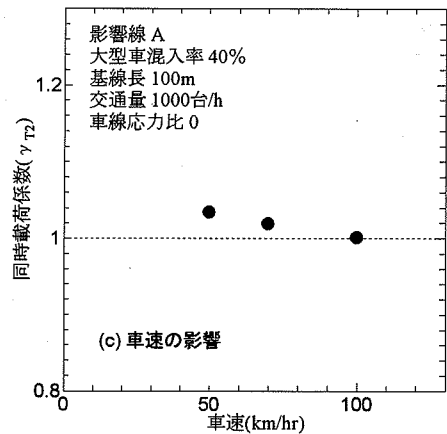
図-7に影響線形状A・大型車混入率40%・車線応力比1.0という条件で解析した γ_{T2} と NS_2 の関係を示す。 NS_2 が増加するにしたがって、曲線的に γ_{T2} が増加する傾向がみられる。ここでも、基線長、車両走行速



(a) 基線長の影響



(b) 時間交通量の影響



(c) 車速の影響

図-5 同時載荷係数に対する基線長、
時間交通量と車速の影響

度と時間交通量を変えて解析した結果を示しているが、 γ_{T2} と NS_2 はほぼ一つの曲線関係で与えられており、それらが γ_{T2} に及ぼす影響は NS_2 で考慮できるといえる。

(2) 交通の方向と交通量比の影響

図-8に各車線の車両交通の方向が同じとなる場合

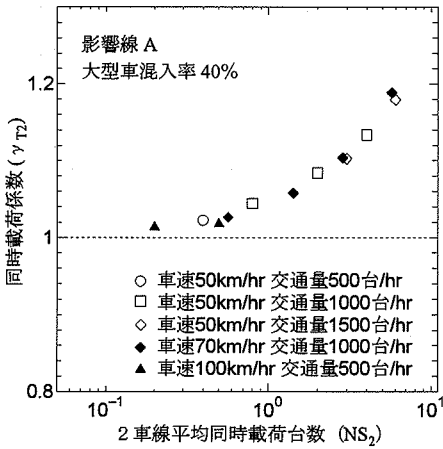


図-7 同時載荷係数と
2車線平均同時載荷台数の関係

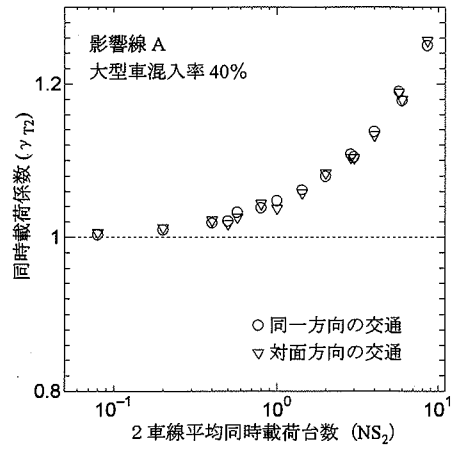


図-8 交通の方向の影響

(同方向交通) と異なる場合 (対面交通) の γ_{T2} と NS_2 の関係を示す。同方向交通と対面交通による同時載荷係数の差はほとんどなく、この影響は考慮しなくともよいと考えられる。

図-9 に各車線の交通量の比 (総交通量を 10 とした時の車線ごとの交通量の比, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2) を変化した場合の同時載荷係数 γ_{T2} と 2車線平均同時載荷台数 NS_2 の関係を示す。なお、ここではシミュレーション台数を 2車線合わせて 20万台としている。交通量比 8:2 の場合に γ_{T2} の値が若干小さくなっているものの、それ以外の交通量比では、 γ_{T2} の値がほぼ同じとなっている。したがって、8:2 のような特殊な場合を除いて、交通量比が同時載荷係数に与える影響は考慮しなくてもよいと考えられる。

以後の解析においては、対面交通、交通量比 5:5 を基準とする。

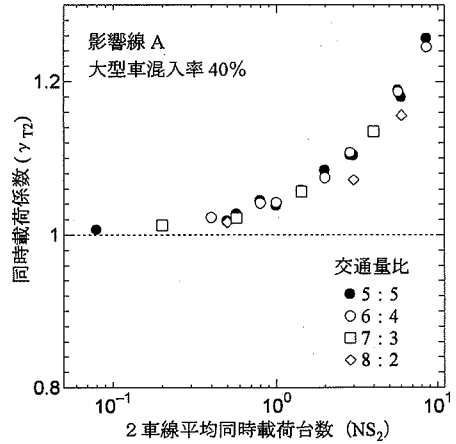


図-9 交通量比の影響

(3) 大型車混入率の影響

図-10(a)~(d) に影響線形状 A と B において大型車混入率 (α) を 5~60% と変化させたときの γ_{T2} と NS_2 の関係を示す。いずれの大型車混入率においても、 NS_2 が小さい領域では $\gamma_{T2}=1.0$ 、また NS_2 が比較的大きい領域では γ_{T2} と $\log(NS_2)$ は曲線関係にあり、ここでは $NS_2 \geq 0.1$ での γ_{T2} と $\log(NS_2)$ の関係を 2次曲線で近似する。ただし、 $NS_2 < 0.1$ では $\gamma_{T2}=1.0$ とする。

$$\gamma_{T2} = a \cdot \{\log(NS_2/0.1)\}^2 + 1.0 \quad (2)$$

図-10 中の曲線は、 NS_2 が 0.1 以上の領域の γ_{T2} - NS_2 関係を大型車混入率別に片対数紙上において 2次曲線で近似したものである。いずれの大型車混入率においても影響線形状 A と B の γ_{T2} - NS_2 関係はほぼ一

致しており、影響線形状 A と B は区別しないものとした。

図-11 に 2次曲線の係数 (a) と大型車混入率 (α) の関係を示す。a の値は、大型車混入率の増加にもなって大きくなっている。これは、大型車混入率が高くなると大型車どうしの同時載荷の機会が増え、その結果発生する応力も大きくなるためと考えられる。a と α の関係は両対数紙上でほぼ直線関係にあり、これを最小自乗法で近似すると、次式が得られる。

$$a = 0.078 \cdot \alpha^{0.291} \quad (3)$$

(4) 影響線の面積の影響

図-12 に、大型車混入率 40% として、正負交番しない形状の影響線 F, H, I で求めた γ_{T2} と NS_2 の関係を示す。また、これらの γ_{T2} - NS_2 関係を 2次曲線回帰して求めた 2次曲線の係数を表-4 に示す。同表には

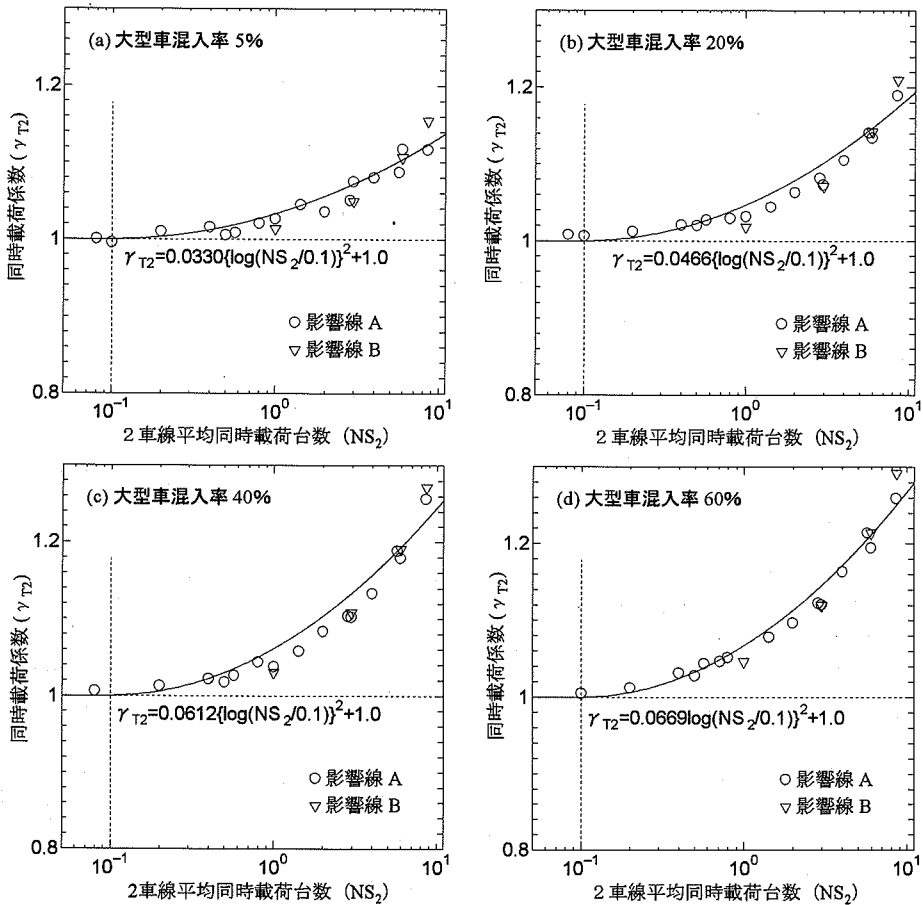


図-10 同時載荷係数に対する大型車混入率の影響

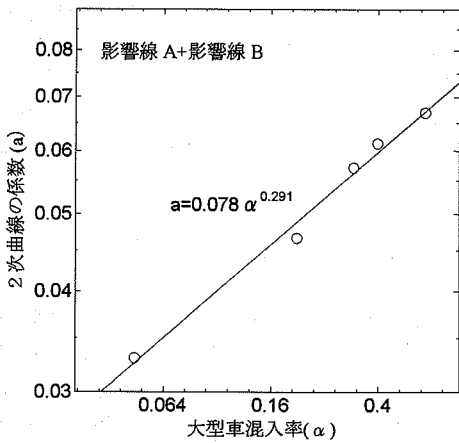


図-11 大型車混入率の影響

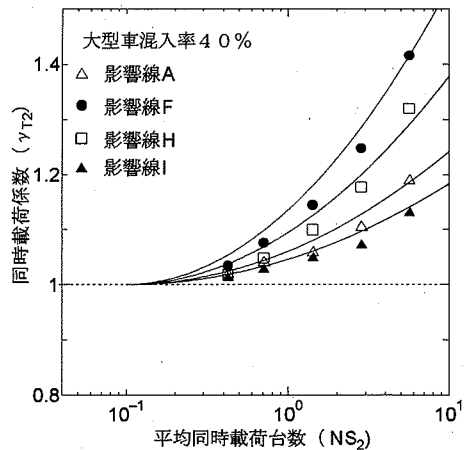


図-12 影響線形状の影響

影響線 A・B での係数，大型混入率を 20%，60% としたときの係数の値も示している。影響線 F，H での係数の値は，影響線 A・B よりも大きくなっている。一方，影響線 I については，係数の値が影響線 A・B に比べて小さくなっている。これは，車両が橋上を走

表-4 γ_{T2} - NS_2 関係を表す 2 次曲線の係数

大型車混入率	A, B	F	H	I
20%	0.0463	0.1067	0.0679	0.0348
40%	0.0603	0.1350	0.0944	0.0457
60%	0.0657	0.1483	0.1082	0.0497

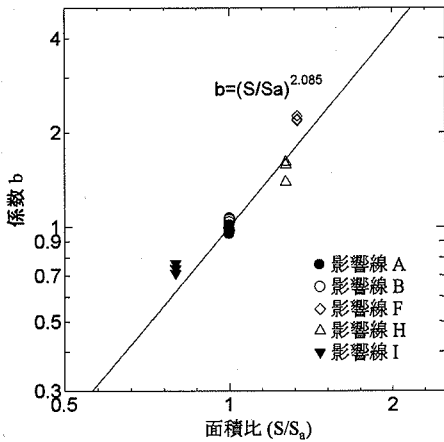


図-13 影響線面積の影響

行した際に発生する応力がその影響線の縦距に比例するためである。前節で示したように、2次曲線の係数の値は、大型車混入率にも影響される。そのため、大型車混入率の影響と影響線形状の影響とを区別する必要がある。ここでは、それぞれの影響線について大型車混入率ごとに、影響線 F, H, I で求めた係数 a の値を、影響線 A・B に基づいた大型車混入率の影響を表す係数の値 (式(3)) で除し、これを係数 b とおく。したがって、 γ_{T2} - NS_2 関係は次式で表される。

$$\gamma_{T2} = a \cdot b \cdot \{\log(NS_2/0.1)\}^2 + 1.0 \quad (4)$$

ここでは、影響線 A の面積 (S_a) に対する各影響線の面積 (S) の比 (S/S_a) を用いて、係数 b を整理することを考えた。図-13 に係数 b の値と S/S_a の関係を示す。この関係を両対数紙上において 1 次式で近似すると、次式が得られる。

$$b = (S/S_a)^{2.085} \quad (5)$$

(5) 影響線の正負交番の影響

図-14 に正負交番する形状の影響線 C, D, E, G について、大型車混入率を 40% とした場合の 2 車線同時乗荷係数 (γ_{T2}) と 2 車線平均同時乗荷台数 (NS_2) の関係を示す。図中には、影響線 A・B での関係も示している。影響線 C での γ_{T2} の値は、 NS_2 の増加とともに大きくなっているが、影響線 A・B での γ_{T2} より小さい。影響線 D, G においても同様である。また、影響線 E では、 NS_2 が 10 以上で γ_{T2} の値が 1 以上となっている。このように正負交番する形状の影響線 C, D, E, G において、正負交番しない影響線 A・B よりも γ_{T2} の値が小さくなる原因は、 NS_2 が増加しても、車両が

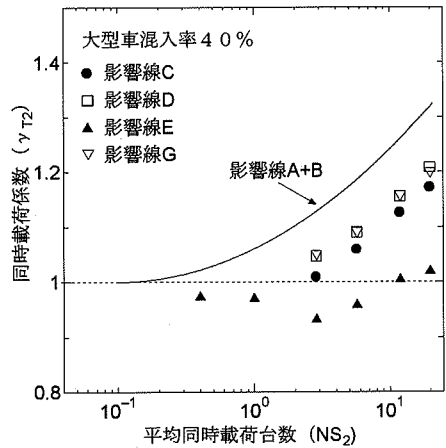


図-14 交番する影響線形状の同時乗荷係数

影響線縦距の正と負の両方の部分に乗荷することにより、互いに応力を打ち消し合い、発生する応力が小さくなるためと考えられる。また、 NS_2 がある一定の値以上になると、この打ち消し合う効果よりも同じ符号の影響線部分での同時乗荷の影響が大きくなり、 γ_{T2} の値は増加しているものと考えられる。以上より、影響線の正負交番は、 γ_{T2} が 1 を越える NS_2 の値を大きくし、その NS_2 の値は負の影響線の面積 (S_m) と正の影響線の面積 (S_p) の比 (S_m/S_p) および負の影響線部分の数に依存すると考えた。

図-14 に示した正負交番する形状の影響線 C, D, E, G の γ_{T2} と NS_2 の関係を 2 次曲線で近似する。ただし、2 次曲線の係数は大型車混入率の影響を考慮した係数 a と影響線の面積の影響を考慮した係数 b の積 ($a \cdot b$) を用いる。この近似式から $\gamma_{T2} = 1.0$ となるときの NS_2 の値を求める。正負交番しない形状の影響線では $NS_2 = 0.1$ のとき $\gamma_{T2} = 1.0$ となるので、 $\gamma_{T2} = 1.0$ となる位置と ($NS_2 = 0.1$) とのずれ量を c とすれば、次式が得られる。

$$\gamma_{T2} = a \cdot b \cdot [\log\{NS_2/(c+0.1)\}]^2 + 1.0 \quad (6)$$

$S_m/S_p = 0$ のとき $c = 0$ である。図-15 (a) に影響線の負の部分数が 1 つの場合の c と S_m/S_p との関係を、図-15 (b) に負の部分数が 2 つの場合の c と S_m/S_p との関係を示す。なお、それぞれの影響線で複数のプロットがあるのは、他の大型車混入率 (20%, 60%) についても同様の検討を行ったためである。図-15 に示す c - (S_m/S_p) 関係を最小自乗法で直線近似すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \text{負の部分数が 1 つ} & c_1 = 4.382(S_m/S_p) \\ \text{2 つ} & c_2 = 0.2045(S_m/S_p) \end{aligned} \quad (7)$$

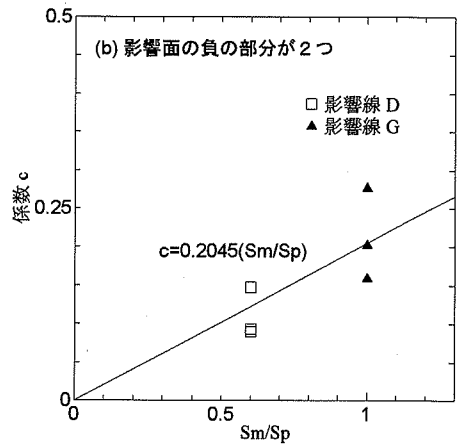
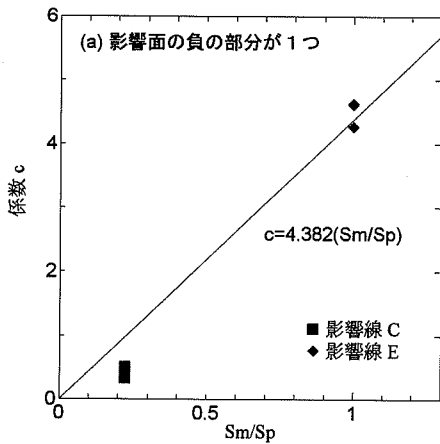


図-15 影響線交番の影響

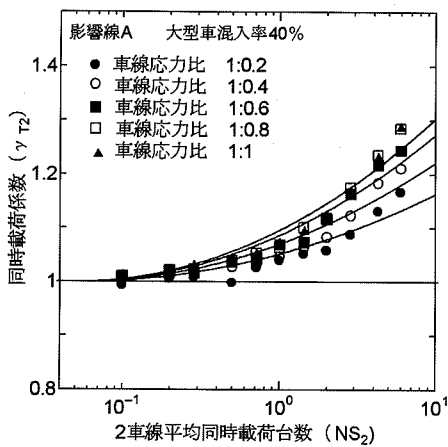


図-16 同時載荷係数と車線応力比の関係

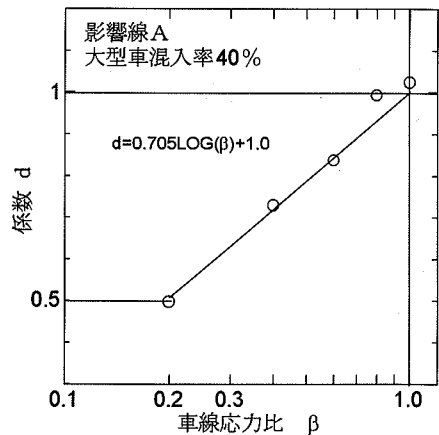


図-17 車線応力比の影響

(6) 車線応力比の影響

図-16に影響線A, 大型車混入率40%という条件で, 車線応力比(β)を0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0としたときの γ_{T2} と NS_2 の関係を示す。図中の曲線は(3)節と同様に, NS_2 が0.1以上の区間のデータを車線応力比別に片対数紙上において2次曲線で近似したものである。車線応力比0.2の場合には, 2次曲線ではなく, 直線で近似した方がよいようにも見えるが, ここでは2次曲線で近似した。また, 車線応力比0.2の場合には, 車線応力比0での同時載荷係数に近い値となっている。

車線応力比(β)の増加にともなって, 2次曲線の係数も増加している。2次曲線の係数は, (3)節と(4)節で示した大型車混入率と影響線の面積にも影響をされる。そこで, 大型車混入率と影響線の面積の影響を区別する必要がある。ここでは, 車線応力比ごとに求めた2次曲線の係数を, 大型車混入率の影響を考慮した係数aと影響線の面積の影響を考慮した

係数bの積($a \cdot b$)で除し, これを係数dとおく。したがって, γ_{T2} - NS_2 関係は, 次式で表すことができる。

$$\gamma_{T2} = a \cdot b \cdot d \cdot \{\log(NS_2/c + 0.1)\}^2 + 1.0 \quad (8)$$

図-17に係数(d)と車線応力比(β)との関係を示す。両者の関係は片対数紙上で直線関係にあり, このd- β 関係を最小自乗法で近似すると, 次式が得られる。

$$d = 0.705 \cdot \log(\beta) + 1.0 \quad (9)$$

ただし, $\beta \geq 0.2$ とする。他の形状の影響線に付いても同式を適用する。

(7) 同時載荷係数の算定式と精度

2車線道路橋の同時載荷係数に影響を及ぼす因子としては, 2車線平均同時載荷台数(NS_2), 大型車混入率(α), 対象とする影響線の面積と影響線Aの面

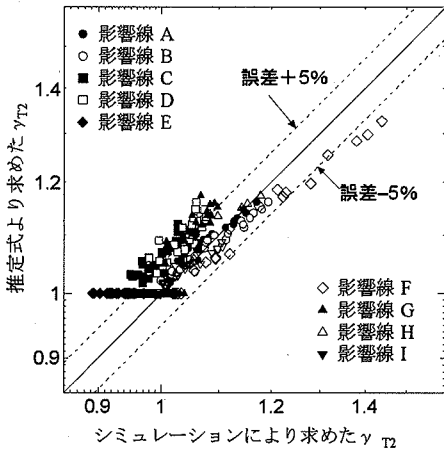


図-18 同時載荷係数算定式の精度

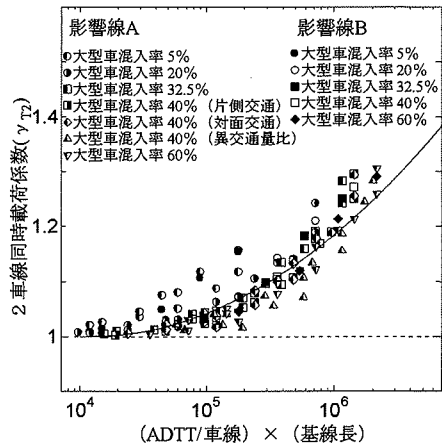


図-19 ADTTで整理した同時載荷係数

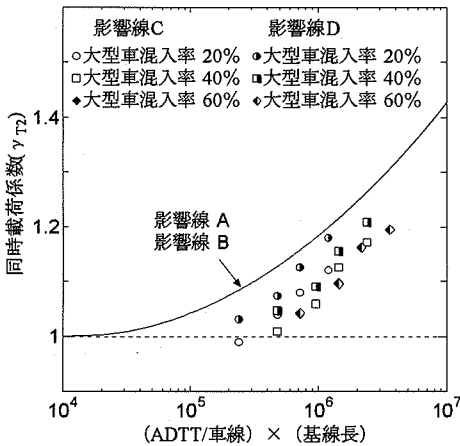


図-20 ADTTで整理した同時載荷係数 (影響線 C, D)

積との比 (S/S_a)、負の影響線の面積と影響線の正の面積との比 (S_m/S_p)、車線応力比 (β) が挙げられる。以上の因子の影響を考慮し、次式を 2 車線道路橋の同時載荷係数の算定式として提案する。

$$\gamma_{T2} = 1 \quad (NS_2 < 1.0) \quad (10)$$

$$\gamma_{T2} = a \cdot b \cdot d \cdot [\log\{NS_2 / (c_i + 0.1)\}]^2 + 1.0 \quad (NS_2 \geq 1.0)$$

$$a = 0.078 \cdot \alpha^{0.291}$$

$$b = (S/S_a)^{2.085}$$

$$c_1 = 4.382 (S_m/S_p) \quad (\text{負の部分が 1 つ})$$

$$c_2 = 0.2045 (S_m/S_p) \quad (\text{負の部分が 2 つ})$$

$$d = 0.705 \cdot \log(\beta) + 1.0$$

図-18 に式 (10) から求めた γ_{T2} の推定値とシミュレーションにより求めた γ_{T2} との関係を示す。なお、こ

表-5 同時載荷係数 (疲労設計指針)

	$L \leq 50m$	$L > 50m$
$ADTT \leq 2000$	1.00	1.00
$ADTT > 2000$	1.00	1.10

れらの中には各係数を求めるために使用したもの以外のデータも含んでいる。図中の破線は誤差 5% 以内の領域を示している。推定値は、概ね誤差 5% の範囲内にある。

4. 同時載荷係数算定式の単純化

同時載荷係数 γ_{T2} は 2 車線平均同時載荷台数に依存することを示した。これは、基線長、2 車線合計の時間交通量と車速で表すことができる。ここでは、1 日・1 車線あたりの大型車交通量 ($ADTT/lane$) と基線長 (L) で同時載荷係数を整理する。同時載荷係数に影響を及ぼす他の因子については、安全側を考え、大型車混入率 20%、車速 50km/hr、車線応力比 1.0 とした。また、影響線の形状は $A \cdot B$ とした。このような条件で同時載荷係数の算定式を求めると、次式が得られる。

$$\gamma_{T2} = 0.05 \{\log(8.33 \times 10^{-5} \cdot L \cdot ADTT/lane)\}^2 + 1.0 \quad (11)$$

ただし、 $\gamma_{T2} \geq 1.0$

この式で求めた同時載荷係数と先のシミュレーション解析から求めた同時載荷係数を比較したものが図-19 である。このような関係から判断して、「鋼道路橋の疲労設計指針」では、正負交番しない形状の影響線について表-5 で同時載荷係数を与えることとされた。

正負交番する形状の影響線で得られた同時乗荷係数の計算結果と式(11)から求められる同時乗荷係数を比較したものを図-20に示す。式(11)に比べて、計算結果は横軸の値を右におよそ3倍平行移動した位置にある。これは、基線長あるいは大型車交通量が約3倍となったときに正負交番しない影響線と同時乗荷係数が等しくなることを意味している。そのため、同指針では、正負交番する影響線を有する部材について、基線長や日大型車交通量によらず、1.0とおくこととされた。

5. まとめ

本研究で得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 基線長が長くなるにしたがって、また交通量が增加するにしたがって同時乗荷係数の値も大きくなる。
- (2) 基線長、時間交通量と車速が同時乗荷係数に及ぼす影響は、平均同時乗荷台数というパラメータを用いることにより整理できる。
- (3) 平均同時乗荷台数が増加すれば、同時乗荷係数は片対数紙上で2次曲線的に増加する。
- (4) 大型車混入率が増加すれば、同時乗荷係数の値も増加する。
- (5) 影響線の面積が大きくなれば同時乗荷係数の値も大きくなる。
- (6) 影響線が正負交番する場合、影響線の負の面積(S_m)と正の面積(S_p)の比が大きくなるにしたがって、同時乗荷係数も1を上回る平均同時乗荷台数の値が大きくなる。また、この平均同時乗荷台数の増加量は影響線の負の部分の数により異なる。
- (7) 第1車線と第2車線の交通の方向、交通量の割合は同時乗荷係数にほとんど影響を与えない。
- (8) 第1車線と第2車線の応力の比が大きくなるにしたがって、同時乗荷係数は増加する。
- (9) 以上の影響を定量的に明らかにした上で、2車線道路橋の同時乗荷係数を評価するための算定式を示した。

以上のような検討結果に基づき、また単純化を計り、「鋼道路橋の疲労設計指針」に示される同時乗荷係数が設定された。なお、ここで提案した2車線道路橋の同時乗荷係数の算定式は、本論文中で示した条件下で求めたものである。したがって、車両の形式が大きく異なるなど、異なる交通条件に対しての本

提案式の適用性については不明である。

謝辞：同時乗荷係数算定式の単純化や同時乗荷係数を与えるための数表の作成は、日本道路協会・疲労設計WG(主査：三木千壽氏)において行われたものである。同時乗荷係数の検討に対しては、特に同WGの幹事の方々から貴重なご意見を賜った。また、本論文の作成に対しては、法政大学大学院の卒業生である徳山大地、在校生である福井勝治、両氏に協力いただいた。ここに記して深謝します。

参考文献

- 1) 日本道路橋協会：道路橋示方書・同解説，丸善，1990。
- 2) 西川和廣：道路橋における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，第17巻，第8号，pp.19~23，1983。
- 3) 三木千壽，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。
- 4) 日本道路協会：鋼橋の疲労，丸善，1997。
- 5) 多田宏行：橋梁技術の変遷，鹿島出版会，2000。
- 6) 森猛，山口英治：鋼I断面合成桁橋梁の疲労寿命に対する支間長と使用鋼材の影響，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1271~1280，2000。
- 7) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002。
- 8) 三木千壽，杉本一朗，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。
- 9) 三木千壽，館石和雄，杉本一朗：道路橋の疲労照査のための荷重に関する一考察，土木学会論文集，No.432，pp.63~68，1991。
- 10) 坂野昌弘，三上市蔵，宮川欣也：大型3乗平均重量と同時乗荷係数を用いた道路橋疲労設計荷重の設定，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1063~1070，1992。
- 11) 坂野昌弘，三上市蔵，堀研也：都市高速道路橋の疲労照査に用いる同時乗荷係数の提案，構造工学論文集，Vol.41A，pp.855~863，1995。
- 12) Miki, C., Goto, Y., Mori, T. and Yoshida, H. : Computer Simulation Studies on The Fatigue Load and Fatigue Design of Highway Bridges, 土木学会論文集，No.356，pp.37~46，1985。
- 13) 森猛，梶原仁，長谷川洋介：JSSC指針に基づく鋼構造物の疲労安全性照査プログラムの開発とその応用，鋼構造論文集，第2巻第8号，pp.37-45，1995。
- 14) 建設省土木研究所：土木研究所資料第2682号，既設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究III，1988。
- 15) 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。

(2003. 6. 6 受付)

SIMULTANEOUS LOADING FACTOR FOR FATIGUE DESIGN LOAD OF HIGHWAY BRIDGES WITH TWO TRAFFIC LANES

Takeshi MORI

A lot of fatigue damage has been reported in steel highway bridges sustaining great number of heavy trucks, and the fatigue assessments have been specified explicitly from the revised edition of "the Design Specification for Steel Highway Bridges" in March 2002. A concrete manner of the assessments is specified in "the Fatigue Design Recommendations for Steel Highway Bridges". Fatigue design load specified in the Recommendations is based on the T load whose weight is modified by T-load correction factor, simultaneous loading factor and fatigue impact factor.

In this paper, the simultaneous loading factor has been discussed, which is considering the effect of the increment of the stress on fatigue behavior by simultaneous multi-presence of vehicles on the bridge.