

荷重分配作用を考慮した道路橋疲労荷重シミュレーション解析

関西大学工学部 坂野 昌弘
関西大学工学部 三上 市蔵
関西大学大学院 ○宮川 欣也

1. はじめに

現行の道路橋示方書¹⁾では一般に疲労の影響を考慮しなくてよいと規定されており、従って、疲労照査用の設計荷重は設定されていない。疲労破壊は日常的に繰り返される荷重の変動によって生じるものであるため、疲労設計荷重は構造物が日常的に受けている変動荷重を代表するものでなければならない。しかしながら、道路橋の場合、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。

道路橋の疲労被害は主に大型車によって生じるものである。我国では大型車の混入率が高いことから、複数車両の同時載荷が疲労被害に及ぼす影響に着目した研究がいくつか行われている。藤野ら²⁾は確率過程論に基づく交通流モデルを用い、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、混入状況については十分に考慮されているとはいえない。また、三木ら³⁾は車両の配列、重量および車間距離を確率変量としたシミュレーションによって車両の同時載荷が疲労被害に及ぼす影響について検討を行い、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検討の余地が残されている。

著者ら⁴⁾は疲労設計荷重として等価大型車重量を考え、それを同時載荷係数と大型車重量の3乗平均値によって表す方法について検討した。その結果、車線内では同時載荷の影響がほとんど現れないような短い支間でも複数車線になると同時載荷の影響が大きく現れること、およびその影響の現れ方が主桁間の荷重分配作用により影響されることがわかった。本研究では、そのような荷重分配作用の影響に特に着目して種々の荷重分配ケースについて交通荷重シミュレーション解析を行い、荷重分配作用と等価大型車重量および同時載荷係数の関係について検討した。

2. 解析方法

(1) 交通荷重シミュレーション

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基本的な考え方は、文献^{4) 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、モンテカルロ法により自動車荷重列を発生させる。ここでは、車両モデルとして大阪市内の実測値を参考に図-1に示すような5種類を仮定した⁶⁾。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については空車と積載車の2つのピークをもつことから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、乗用車と小型トラックの重量分布は対数正規分布を仮定した。

疲労が問題となるのが大型車の混入率が高い場合であることから、大型車が大部分(2軸大型トラック25%、3軸大型トラック50%、トレーラートラック10%、合計85%)を占める車種構成を仮定した。このような交通流は都市間的高速道路で深夜に生じるケースに相当する。車頭時間間隔は図-2に示す自由度3のアーラン分布⁷⁾、走行速度は大型車の多い高速交通流を想定して図-3に示すような平均速度70km/h、標準偏差10km/hの正規分布を仮定した。

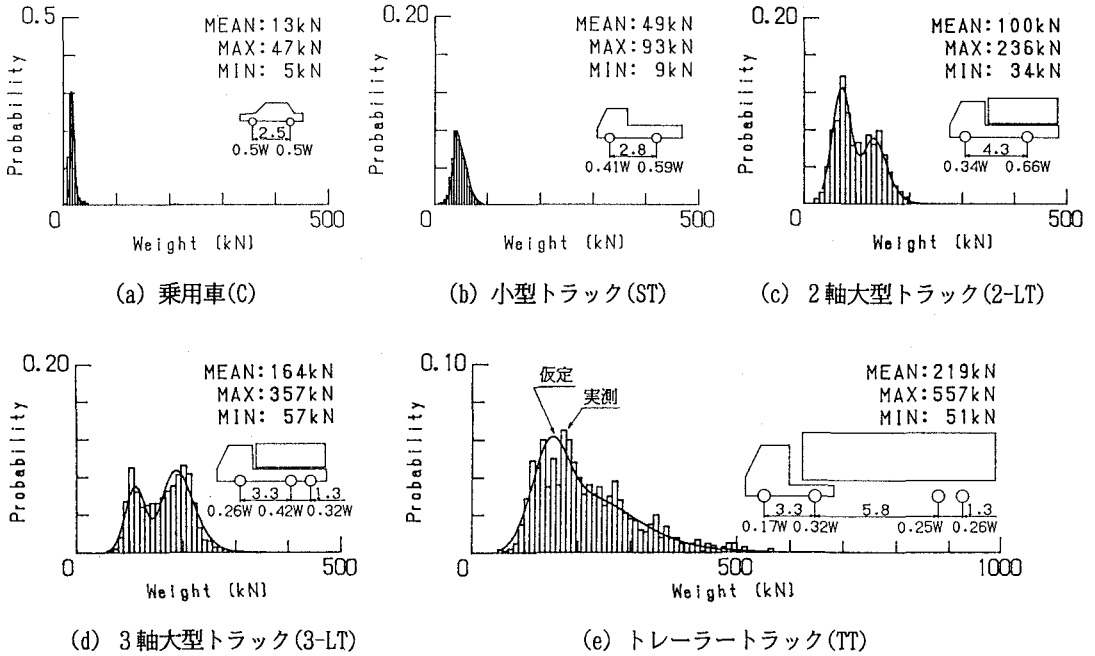


図-1 各車両モデルおよびその重量分布

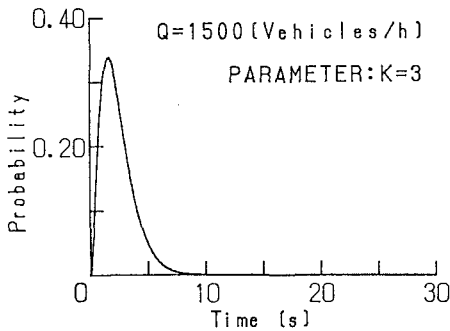


図-2 車頭時間間隔

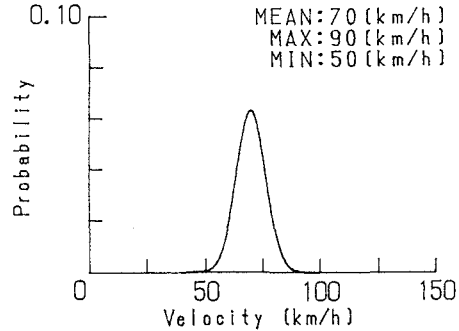


図-3 速度分布

(2) 橋梁形式

解析対象橋梁として高架橋等によく見られる図-4に示すような2車線を支持する3主桁橋を想定し、5つの荷重分配ケースを仮定した。構造形式は単純桁で支間は30mである。表-1に各ケースの荷重分配係数と荷重分配係数比を示す。分配ケース1は類似の形式の橋梁について測定された各主桁のたわみ量⁸⁾に基づいて設定されたものである。分配ケース2と3は分配ケース1の値を適当に変化させたものである。分配ケース0は各車線がそれぞれ1本の主桁で支持されている(すなわち1車線1主桁橋×2)を仮定した場合、分配ケース4は両方の車線が1本の桁で支えられている(すなわち2車線1主桁橋)を仮定した場合である。表-1の荷重分配係数比は各主桁に対する走行車線と追越車線の荷重分配係数の小さい値と大きい値の比であり、ケース0では分配係数比=0.0、ケース4では1.0となる。

表-1 各ケースの荷重分配係数と荷重分配係数比

Distribution Case	Girder No.	Lateral Distribution Factors		Ratio of Lateral Distribution Factors
		Traffic Lane	Passing Lane	
0	①	0.00	0.00	—
	②	1.00	0.00	0.00
	③	0.00	1.00	0.00
1	①	0.39	0.13	0.33
	②	0.39	0.35	0.90
	③	0.22	0.52	0.42
2	①	0.30	0.10	0.33
	②	0.50	0.40	0.80
	③	0.20	0.50	0.40
3	①	0.35	0.10	0.29
	②	0.45	0.30	0.67
	③	0.20	0.60	0.33
4	①	0.00	0.00	—
	②	1.00	1.00	1.00
	③	0.00	0.00	—

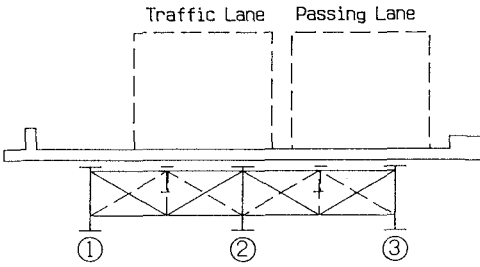


図-4 3主桁橋の横断面図

(3) 荷重分配作用を考慮した等価大型車重量

等価大型車重量の概念および基本的な考え方については文献4)で提案した。複数車線を支える多主桁橋の場合には主桁間の荷重分配作用によって1本の車線の荷重が複数の桁に伝わり、逆に1本の桁には複数の車線の荷重が伝達される。従って、複数車線の同時載荷の影響を考える上で、荷重分配作用は非常に重要なものであるといえる。以下に、等価大型車重量を算定する上でどのように荷重分配作用を考慮するか、その方法について述べる。

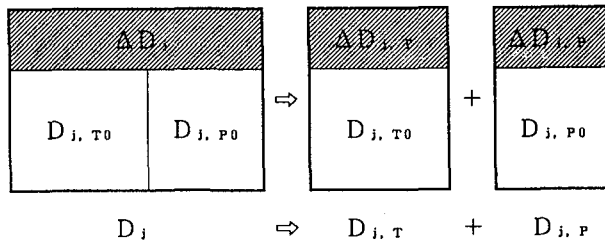


図-5 荷重分配作用を考慮した等価大型車重量の考え方

各車線で交通量、車種構成、走行速度や車両の重量分布が全く同じとは限らないことから、車線ごとに疲労設計荷重（すなわち等価大型車重量）が設定できることが望ましい。そこで、そのような算定法について図-5を参考に説明する。走行および追越の両車線を走行する自動車荷重列によって主桁jに生じる全疲労被害D_jは、式(1)より計算できる。

$$D_j = \sum_{i=1}^N \{ (M_{r,i,j})^3 \cdot n_i \} \quad (1)$$

ここに、M_{r,i,j}は両方の車線を走行する荷重列によって主桁jに生じる曲げモーメント変動範囲であり、n_iはM_{r,i,j}の頻度、Nは頻度分布の分割数である。

走行車線を走行する車両列のみにより主桁jに生じる疲労被害D_{j,T0}、追越車線を走行する車両列のみに

より主桁 j に生じる疲労被害 $D_{j, P0}$ は、式(2)によりそれぞれ計算できる。

$$\left. \begin{aligned} D_{j, T0} &= \sum_{i=1}^U \{ (M_{r,i,j,T})^3 \cdot n_i \} \\ D_{j, P0} &= \sum_{i=1}^V \{ (M_{r,i,j,P})^3 \cdot n_i \} \end{aligned} \right\} (2)$$

ここに、 $M_{r,i,j,T}$ 、 $M_{r,i,j,P}$ はそれぞれの車線を走行する荷重列のみによって主桁 j に生じる曲げモーメント変動範囲、 U 、 V はそれぞれの頻度分布の分割数である。

従って、両方の車線を走行する車両の同時載荷によって生じる疲労被害の増分 ΔD_j は、式(3)で表すことができる。

$$\Delta D_j = D_j - (D_{j, T0} + D_{j, P0}) \quad (3)$$

各車線ごとに等価大型車重量を求めるためには、この ΔD_j を各車線に分配してやる必要がある。ここでは、 $D_{j, T0}$ と $D_{j, P0}$ の比を用いて式(4)のように配分する方法を提案する。

$$\left. \begin{aligned} \Delta D_{j, T} &= \Delta D_j \times \left\{ \frac{D_{j, T0}}{D_{j, T0} + D_{j, P0}} \right\} \\ \Delta D_{j, P} &= \Delta D_j \times \left\{ \frac{D_{j, P0}}{D_{j, T0} + D_{j, P0}} \right\} \end{aligned} \right\} (4)$$

$D_{j, T0}$ と $D_{j, P0}$ の比は、両方の車線の交通条件が全く同一ならば、それぞれの荷重分配係数の3乗の比と同じになる。主桁 j に生じる全疲労被害 D_j は、 $\Delta D_{j, T}$ と $\Delta D_{j, P}$ を用いて式(5)のように各車線に合理的に分配することができる。

$$\left. \begin{aligned} D_{j, T} &= D_{j, T0} + \Delta D_{j, T} \\ D_{j, P} &= D_{j, P0} + \Delta D_{j, P} \end{aligned} \right\} (5)$$

さらに、 $D_{j, T}$ 、 $D_{j, P}$ をそれぞれの車線を走行した大型車の台数 $N_{LT,j,T}$ 、 $N_{LT,j,P}$ で割れば、それぞれの車線について式(6)のように等価モーメント範囲 $M_{r,e,q,j,T}$ 、 $M_{r,e,q,j,P}$ が得られる。

$$\left. \begin{aligned} M_{r,e,q,j,T} &= (D_{j, T} / N_{LT,j,T})^{1/3} \\ M_{r,e,q,j,P} &= (D_{j, P} / N_{LT,j,P})^{1/3} \end{aligned} \right\} (6)$$

以上より、各車線に対する等価大型車重量 $W_{e,q,j,T}$ および $W_{e,q,j,P}$ は、式(6)の $M_{r,e,q,j,T}$ 、 $M_{r,e,q,j,P}$ を生じるような2軸あるいは3軸トラック1台の重量として求めることができる。

(4) 同時載荷係数の定義

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 ($W_{e,q}$) と同時載荷が起こらない場合の等価大型車重量 ($W_{e,q}'$) の比として式(7)のように定義される⁴⁾。

$$\gamma = W_{e,q} / W_{e,q}' \quad (7)$$

$W_{e,q}'$ 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なるように設定して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。

2車線の同時載荷の影響を表す2車線同時載荷係数 γ_2 は、全体の同時載荷係数 γ と車線内での同時載荷

の影響を表す1車線同時乗荷係数 γ_1 から、式(8)により求められる。

$$\gamma_2 = \gamma / \gamma_1 \quad (8)$$

3. 解析結果および考察

(1) 疲労被害と等価大型車重量

表-2~6に、各ケースについて求めた各主桁の疲労被害と等価大型車重量を示す。なお、今回は走行、追越の両車線の交通条件は全く同一と仮定した。 $\Delta D_j / (D_j - \Delta D_j)$ は、2車線の同時乗荷を考慮しない場合の疲労被害($D_j - \Delta D_j = D_{j, T0} + D_{j, P0}$)に対する2車線の同時乗荷によって生じる疲労被害の増分(ΔD_j)の比を表す。桁に生じる全疲労被害 D_j でみると、ケース1と3では荷重分配係数そのものの値が大きい外桁③が最も大きくなっており、中桁の疲労被害が常に大きいとは限らない。しかし、 ΔD_j および $\Delta D_j / (D_j - \Delta D_j)$ でみると中桁②がいずれも最大であり、2車線の同時乗荷の影響に関しては中桁が最も厳しい条件下にあるといえる。

等価大型車重量に関しては、両車線で同一条件であることにより、 $W_{eq, j, T}$ と $W_{eq, j, P}$ は一致している。等価大型車重量の値の大小関係は $\Delta D_j / (D_j - \Delta D_j)$ の大小関係と全く対応しており、全てのケースで中桁②が大きくなっている。ケース4の等価大型車重量は、この橋梁形式に関する上限値と考えられる。

表-7に、同時乗荷が生じないようにして求めた疲労被害と等価大型車重量(W_{eq}')を示す。 W_{eq}' は表-2の値とほぼ等しいことから、支間30m程度では車線内の同時乗荷の影響がほとんど現れないことがわかる。

表-2 疲労被害と等価大型車重量
(分配ケース0)

Girder No.		①	②	③
D_j (kN・m) ³		—	1.32×10^{13}	1.32×10^{13}
$D_{j, T0}$ (kN・m) ³		—	1.32×10^{13}	—
$D_{j, P0}$ (kN・m) ³		—	—	1.32×10^{13}
ΔD_j (kN・m) ³		—	—	—
$\Delta D_j / (D_j - \Delta D_j)$		—	—	—
$D_{j, T}$ (kN・m) ³		—	1.32×10^{13}	—
$D_{j, P}$ (kN・m) ³		—	—	1.32×10^{13}
$N_{LT, j, T}$		—	8540	—
$N_{LT, j, P}$		—	—	8540
$M_{req, j, T}$ (kN・m)		—	1156	—
$M_{req, j, P}$ (kN・m)		—	—	1156
$W_{eq, j, T}$ (kN)	2-LT	—	170	—
	3-LT	—	167	—
$W_{eq, j, P}$ (kN)	2-LT	—	—	170
	3-LT	—	—	167

表-3 疲労被害と等価大型車重量
(分配ケース1)

Girder No.		①	②	③
D_j (kN・m) ³		1.01×10^{12}	2.00×10^{12}	2.56×10^{12}
$D_{j, T0}$ (kN・m) ³		7.86×10^{11}	7.86×10^{11}	1.41×10^{11}
$D_{j, P0}$ (kN・m) ³		2.91×10^{10}	5.68×10^{11}	1.86×10^{12}
ΔD_j (kN・m) ³		1.91×10^{11}	6.51×10^{11}	5.61×10^{11}
$\Delta D_j / (D_j - \Delta D_j)$		0.23	0.48	0.28
$D_{j, T}$ (kN・m) ³		9.70×10^{11}	1.16×10^{12}	1.81×10^{11}
$D_{j, P}$ (kN・m) ³		3.59×10^{10}	8.41×10^{11}	2.38×10^{12}
$N_{LT, j, T}$		8540	8540	8540
$N_{LT, j, P}$		8540	8540	8540
$M_{req, j, T}$ (kN・m)		484	515	277
$M_{req, j, P}$ (kN・m)		161	462	654
$W_{eq, j, T}$ (kN)	2-LT	182	194	184
	3-LT	179	190	181
$W_{eq, j, P}$ (kN)	2-LT	182	194	184
	3-LT	179	190	181

表-4 疲労被害と等価大型車重量
(分配ケース2)

Girder No.	①	②	③
D_j (kN·m) ³	4.58×10^{11}	3.69×10^{12}	2.23×10^{12}
$D_{j, T0}$ (kN·m) ³	3.58×10^{11}	1.66×10^{12}	1.06×10^{11}
$D_{j, P0}$ (kN·m) ³	1.32×10^{10}	8.48×10^{11}	1.66×10^{12}
ΔD_j (kN·m) ³	8.76×10^{11}	1.18×10^{12}	4.65×10^{11}
$\Delta D_j / (D_j - \Delta D_j)$	0.24	0.47	0.26
$D_{j, T}$ (kN·m) ³	4.42×10^{11}	2.44×10^{12}	1.34×10^{11}
$D_{j, P}$ (kN·m) ³	1.64×10^{10}	1.25×10^{12}	2.09×10^{12}
$N_{LT, j, T}$	8540	8540	8540
$N_{LT, j, P}$	8540	8540	8540
$M_{req, j, T}$ (kN·m)	373	659	250
$M_{req, j, P}$ (kN·m)	124	527	626
$W_{eq, j, T}$ (kN)	2-LT	182	193
	3-LT	179	189
$W_{eq, j, P}$ (kN)	2-LT	182	193
	3-LT	179	189

表-5 疲労被害と等価大型車重量
(分配ケース3)

Girder No.	①	②	③
D_j (kN·m) ³	6.96×10^{11}	2.23×10^{12}	3.60×10^{12}
$D_{j, T0}$ (kN·m) ³	5.68×10^{11}	1.21×10^{12}	1.06×10^{11}
$D_{j, P0}$ (kN·m) ³	1.32×10^{10}	3.58×10^{11}	2.86×10^{12}
ΔD_j (kN·m) ³	1.15×10^{11}	6.61×10^{11}	6.34×10^{11}
$\Delta D_j / (D_j - \Delta D_j)$	0.20	0.42	0.21
$D_{j, T}$ (kN·m) ³	6.80×10^{11}	1.72×10^{12}	1.29×10^{11}
$D_{j, P}$ (kN·m) ³	1.59×10^{10}	5.09×10^{11}	3.47×10^{12}
$N_{LT, j, T}$	8540	8540	8540
$N_{LT, j, P}$	8540	8540	8540
$M_{req, j, T}$ (kN·m)	430	586	247
$M_{req, j, P}$ (kN·m)	123	391	741
$W_{eq, j, T}$ (kN)	2-LT	180	191
	3-LT	177	187
$W_{eq, j, P}$ (kN)	2-LT	180	191
	3-LT	177	187

表-6 疲労被害と等価大型車重量
(分配ケース4)

Girder No.	①	②	③
D_j (kN·m) ³	—	4.00×10^{13}	—
$D_{j, T0}$ (kN·m) ³	—	1.32×10^{13}	—
$D_{j, P0}$ (kN·m) ³	—	1.32×10^{13}	—
ΔD_j (kN·m) ³	—	1.36×10^{13}	—
$\Delta D_j / (D_j - \Delta D_j)$	—	0.52	—
$D_{j, T}$ (kN·m) ³	—	1.32×10^{13}	—
$D_{j, P}$ (kN·m) ³	—	1.32×10^{13}	—
$N_{LT, j, T}$	—	8540	—
$N_{LT, j, P}$	—	8540	—
$M_{req, j, T}$ (kN·m)	—	1328	—
$M_{req, j, P}$ (kN·m)	—	1328	—
$W_{eq, j, T}$ (kN)	2-LT	—	195
	3-LT	—	191
$W_{eq, j, P}$ (kN)	2-LT	—	195
	3-LT	—	191

表-7 同時載荷の生じない場合の疲労被害と等価大型車重量 (分配ケース0)

Girder No.	①	②	③
D_j (kN·m) ³	—	1.36×10^{13}	1.36×10^{13}
$D_{j, T0}$ (kN·m) ³	—	1.36×10^{13}	—
$D_{j, P0}$ (kN·m) ³	—	—	1.36×10^{13}
ΔD_j (kN·m) ³	—	—	—
$\Delta D_j / (D_j - \Delta D_j)$	—	—	—
$D_{j, T}$ (kN·m) ³	—	1.36×10^{13}	—
$D_{j, P}$ (kN·m) ³	—	—	1.36×10^{13}
$N_{LT, j, T}$	—	8540	—
$N_{LT, j, P}$	—	—	8540
$M_{req, j, T}$ (kN·m)	—	1168	—
$M_{req, j, P}$ (kN·m)	—	—	1168
$W_{eq, j, T}$ (kN)	2-LT	—	171
	3-LT	—	168
$W_{eq, j, P}$ (kN)	2-LT	—	171
	3-LT	—	168

(2) 同時載荷係数

表-8に各ケースについて求めた全体の同時載荷係数 γ 、1車線同時載荷係数 γ_1 、および2車線同時載荷係数 γ_2 を示す。 γ は全て表-7の W_{eq} を基準に求められ、ケース0の場合 $\gamma = \gamma_1$ となる。ケース1~4の γ_2 はケース0の γ_1 を用いて求めることができる。 γ_1 については表-2と表-7を比較しても明らかのようにほぼ1.0であり、支間30m程度の単純桁では車線内の同時載荷の影響は無視できる程度である。 γ_2 の値は全てのケースで外桁①、③に比べて中桁②で大きくなっており、中桁では同時載荷の影響が大きく現れることを示している。

表-8 1車線同時載荷係数 γ_1 と2車線同時載荷係数 γ_2

Distribution Case	Girder No.	γ	γ_1	γ_2
0	①	—	—	—
	②	0.99	0.99	1.00
	③	0.99	0.99	1.00
1	①	1.07	0.99	1.08
	②	1.13	0.99	1.14
	③	1.08	0.99	1.09
2	①	1.07	0.99	1.08
	②	1.13	0.99	1.14
	③	1.07	0.99	1.08
3	①	1.05	0.99	1.06
	②	1.12	0.99	1.13
	③	1.06	0.99	1.07
4	①	—	—	—
	②	1.14	0.99	1.15
	③	—	—	—

図-6は、荷重分配係数比に対して2車線同時載荷係数 γ_2 をプロットしたものである。図中の△印は主桁①、○印は主桁②、□印は主桁③、■印は分配ケース0、●印は分配ケース4を示す。荷重分配係数比が大きいほど γ_2 は大きくなっており、ケース4が γ_2 の上限値となっている。 γ_2 と荷重分配係数比の関係は、ケース0の点を通り、ケース4の点で水平になるような放物線で表すことができる。

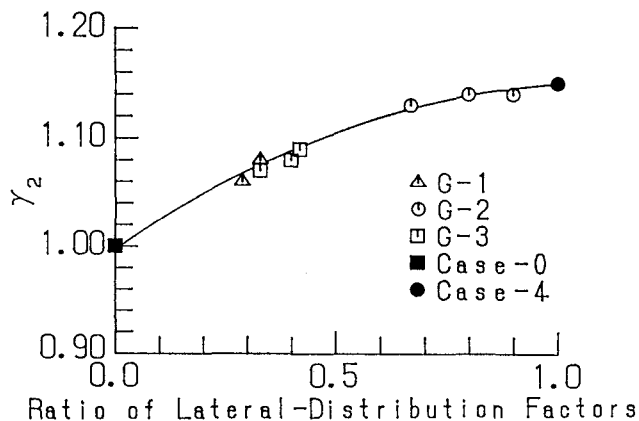


図-6 γ_2 と荷重分配係数比の関係

4. おわりに

2車線3主桁橋(支間30m)を対象として種々の荷重分配ケースについて交通荷重シミュレーション解析を行い、荷重分配作用が等価大型車重量および同時載荷係数に及ぼす影響について検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 複数車線を支持する多主桁橋に対し、主桁間の荷重分配作用を考慮して等価大型車重量を各車線ごとに求める方法を示した。
- (2) 各主桁に生じる全疲労被害で比較すると必ずしも中桁の値が最大になるとは限らないが、2車線の同時載荷によって生じる疲労被害に関しては中桁の値が最大となる。
- (3) 各車線に対する荷重分配係数の比が大きいくほど2車線同時載荷係数の値は大きくなり、両者の関係は分配係数の比が0.0の点を通り1.0の点で水平になるような放物線で表すことができる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(I共通編・II鋼橋編)，1990。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 坂野昌弘・三上市藏・宮川欣也：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，構造工学論文集，Vol. 38A, pp. 1063-1070, 1992。
- 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荷重の研究，構造工学論文集，Vol. 32A, pp. 597-608, 1986。
- 6) 阪神高速道路公団：設計荷重(HDL)委員会報告書，1984。
- 7) 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，1-200, 1983。
- 8) 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。