

着目点載荷と渋滞荷重列の組合せによる道路橋の 最大活荷重特性の解析

ANALYSIS OF LIFETIME MAXIMUM LIVE LOAD FOR HIGHWAY BRIDGES BASED ON
COMBINATION OF TARGET VEHICLE AND TRAIN OF CONGESTED VEHICLES

久保雅邦*・亀田弘行**

By Masakuni KUBO and Hiroyuki KAMEDA

Probabilistic analysis of live load for highway bridges is made by applying vehicle load models measured on an urban expressway. In the analysis, the probability distribution of lifetime maximum response is estimated numerically by convolution integral based on combination of target vehicle on viewed point and train of congested vehicles. Additionally, the stochastic properties of live load are examined theoretically by using truncated exponential distributions for each vehicle load, and results show that upper bounds of vehicle loads especially of large size trucks and trailers are dominant to the lifetime maximum response and that the extrapolating multiplication of powered probability distribution can not be sufficiently applied to estimate it.

Keywords: highway bridge, target vehicle, live load, probability distribution

1. 緒 論

近年、高速道路を中心とする道路網の整備に伴って、自動車交通が急速に増加するとともに車両の大型化や重量化が進んできた。その結果、既設の道路橋においては苛酷な自動車荷重が要因の1つとなって橋梁部材の損傷や劣化が発生し、その補修や補強対策¹⁾が橋梁技術者にとって大きな課題となっている。また、新設の橋梁に対しては、自動車荷重の実態を踏まえて橋梁部材の安全性や使用性を向上させる必要があり、たとえば現行の設計法から限界状態設計法へ移行する中で、関連する学協会等によって自動車荷重のあり方が検討されている。

道路橋の自動車荷重によるこれらの問題に関しては、橋梁部材の損傷や劣化のメカニズムを明らかにするとともに、荷重や荷重効果の実態特性をできるだけ正確に把握し、そのうえで橋梁部材の安全性や使用性の大きさを定量的に予測する必要がある。ここ数十年の間に、この方面の研究²⁾が大きく進展してきたと思われるが、その中でも自動車荷重の実態調査^{3)~5)}が積極的に行われ、活

荷重のモデル化をはじめとする基礎的な資料が整理されたことの意義は大きい。したがって、道路橋の維持管理のみならず合理的な設計を行ううえで、これらの成果を活用することが望ましく、そのための解析手法を確立することが当面の課題と考えられる。

いま、橋梁部材の疲労問題を除いて考えると、一般にその安全性や使用性に対してはある期間における最大応答が問題になる。また、床版や床組のように個々の車両がほぼ単独に影響する部材に比べて、主桁などの主構造では渋滞時のような活荷重列としての荷重が大きな意味をもつ。しかも、高速道路のような交通条件下においては、渋滞時の活荷重列が少しずつ移動するという特性があり、このような荷重条件のもとで橋梁の最大応答を精度良く評価しなければならない。

従来、このような最大応答を求める方法としては、活荷重列が特殊な場合を除いて、モンテカルロシミュレーションによる方法⁶⁾が最も容易で確実とされているが、対象とする期間が長くなると、一般にはそのために膨大な計算時間を必要とする。したがって、これまでの方法では比較的短い期間の応答をシミュレーションによって算出し、これにべき乗則を適用して必要な最大応答を推定する方法が用いられてきた。また、藤野ら⁷⁾は変換過程の理論を用いて、自動車列のフローを考慮した最大応

* 正会員 工修 総合技術コンサルタント 技術部課長
(〒533 大阪市東淀川区東中島3-5-9)

** 正会員 工博 京都大学防災研究所教授 都市施設耐震システム研究センター (〒611 宇治市五ヶ庄)

答の推定にあたり、シミュレーションが容易なブロック渋滞の結果を近似的に利用することを提案し、さらにこの考えを発展させて、着目点の直上に大型車などを荷重させるシミュレーションによってより効率的な推定⁹⁾が可能なることを示した。しかしながら、シミュレーションによるこれらの方法では、活荷重特性の大まかな意味を理解することができても、最大応答の分布の裾部を推定する精度が必ずしも良くないことや、個々の荷重特性が最大応答に与える影響を説明するために十分な情報を得にくいという問題がある。たとえば、各車両の車重分布にはそれぞれ上限値があり、これが最大応答の上限値に寄与することは容易に推察されるが、その根拠を明確にする必要がある。そのためには、活荷重の一般的な特性に基づいて最大応答を理論的に求め、それらの関連性を明確にする必要があると考えられる。

以上のことから、本研究では主として高速道路の活荷重列による橋梁部材の最大応答を求めることを目的として、理論的な解析手法を開発し、これを用いて最大応答の確率分布における裾部の特性を明らかにした。本研究の方法では、橋梁上の活荷重列を着目点荷重とそれ以外の渋滞荷重列とに分離して考え、前者についてはモデル化された車両重量の確率分布関数を利用し、後者についてはシミュレーション法によって応答の確率分布を求める。さらに、たたみ込み積分を用いて、これらの組合せに基づく最大応答の確率分布を求める。従来の解法に比べて、分布の裾部を求める場合に十分な精度があり、かつ必要とする計算時間を大幅に減少することができた。ただし、着目点荷重の考え方は藤野らの効率化シミュレーションと同様であり、本研究ではこれにたたみ込み積分を導入して理論解析を展開した。

このように、たたみ込み積分を用いて道路橋の最大活荷重特性を解析する方法については、これまでに久保・石田・北沢⁹⁾が実態荷重モデルによる評価を示した。これと並行して、活荷重の分布モデルに解析可能な理論モデルを採用して同様の評価を行うことにより、最大活荷重の確率分布における特徴的な諸性質を理論的に理解し得ることが亀田¹⁰⁾により提案され、久保・亀田によりこの問題についてさらに総合的に研究を進めることにした。本論文では、こうした研究成果をとりまとめて、最大活荷重特性の解析を示す。

2. 活荷重列とはりのモデル化

(1) 対象とする活荷重列と応答の種類

道路橋の自動車荷重によって橋梁部材に発生する断面力や変形を解析的に求めるには、着目する部材ごとに、それぞれの影響線関数を利用するのがよい。しかも、橋梁部材の安全性や使用性に対しては、それぞれ支配的な

応答の種類や荷重の載荷状態が異なり、それらの特性に応じて解析モデルを作る必要がある。その際、構造物の各諸元が確定値として与えられており、荷重効果の線形性が成り立つものと仮定してこれらの応答を計算する。これに対して、構造諸元が確率量として与えられる場合や、荷重効果の線形性が成立しない範囲の応答を問題にすべき場合もあるが、これらについてはここでの解析の対象外とする。

いま、一般によく用いられている支間長を有する桁橋の主桁に着目すると、曲げモーメントの最大値が支配的な荷重効果の1つとなり、そのような荷重状態は渋滞時に発生する可能性が大きい。そこで、高速道路における渋滞時の自動車荷重を想定し、図-1に示すように各車両の重量をそれぞれ1個の集中荷重にモデル化して活荷重列をつくる。荷重の載荷位置を各車両の中央点とし、荷重 x_{i-1} と x_i との間隔 h_i は近似的に交通流の車頭間隔を表わすものとする。すなわち、荷重 x_{i-1} の車長とそれに続く車間距離の和によって与えられる。また、添字 i ($i=1, 2, \dots, N$) は1回の活荷重列に含まれる荷重の順番を表わし、その合計台数を N とおく。本論文では代表的に支間中央点に着目し、このような活荷重列を受ける単純ばりの曲げモーメントを求める。なお、各車両の重量を1つの集中荷重にモデル化する場合と、各軸位置で軸重荷重にモデル化する場合とを比較すると、単純桁の曲げモーメントに着目する場合には両者の差が小さいことが知られている⁴⁾。

活荷重列に含まれる各車両が等速度 V で少しずつ移動し、その先頭から最後尾までが橋梁上を通過する渋滞の距離と時間を、それぞれ1回の渋滞長 L および渋滞時間 T とする。橋梁の供用期間 T_0 のように比較的長い期間を考えると、その間には渋滞時の活荷重列が突発的にあるいは日常的に繰り返し発生することになり、その回数を単位期間当たりの発生回数 N_0 によって与える。ここで、各変数 V, L, T および T_0, N_0 の値は、簡単のために確定量とする。しかも、一般には将来的な社会の変化に伴って自動車荷重の特性も推移するが、ここでは活荷重列に含まれるすべての荷重特性は変化しないものと仮定する。さらに、最大応答を求める意味から、渋滞時の活荷重列によって発生する応答のみに着目し、渋滞していないときの荷重状態を無視する。また、少しずつ

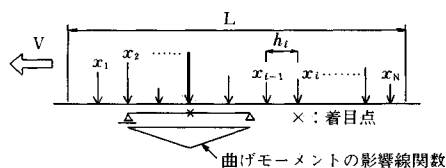


図-1 移動する荷重列を受ける単純ばり

移動する活荷重列を対象にするが、静的応答に比べて動的応答の影響は小さいものとして無視する。

(2) 活荷重列のモデル

まず、1車線上の活荷重列に着目して、そこに含まれる各車両の車種分類を表わす番号 k とその車種混入率 ϕ_k ($k=1, 2, \dots, K$) が確定値として与えられるものとする。 K は車種分類の個数を表わす。各車両の活荷重列への混入が確率的に独立であるとすれば、活荷重列の任意の位置において次式が成り立つ。

$$\sum_{k=1}^K \phi_k = 1.0 \dots \dots \dots (1)$$

さらに、車種別の車両重量 W_k ($k=1, 2, \dots, K$) は確率変数として、それぞれの確率密度関数 $q_k(x)$ ($x_{kL} \leq x \leq x_{kU}$) が与えられるものとする。ここに、 x_{kL} 、 x_{kU} は車種 k の車重分布の下限値と上限値をそれぞれ表わす。

活荷重列の例題として、ここでは阪神高速道路において調査した結果に基づき、最終的に整理された荷重のモ

デル¹⁾を用いることにする。表一に示す渋滞の発生特性と表二に示す車種分類および車両重量のモデル、さらに表三に示す車長 C_k のモデルと表四に示す車間距離 D のモデルを用いる。車両重量と車長のモデルでは、それぞれの確率分布が上下限值によって裾切りされており、上下限值の間で確率密度関数の積分値が1.0になるように修正する。ただし、同表に示す車両重量の平均値 μ と標準偏差 σ は、いずれも裾切りしない一般的な分布範囲における値を示す。なお、表二と表三に示す車種分類のうち、大型車とトレーラーを合わせて大型車類とよぶことにする。

表二に示した車両重量のモデルについて、その分布範囲を図示すると図二のようになる。また、すべての車種を考慮した車両重量の確率分布、つまり活荷重列の中で任意の車両を取り出したとき、その車両重量の確率分布は図三のようになる。同図の縦軸は車両重量の補間累積分布²⁾、つまり1.0から累積分布関数を引いた値を示している。これらの図から明らかなように、たとえば車両重量が40 (tf) 以上になる車種は、大型車類の中でも車種 $k=6$ と $k=8$ の2つに限定される。しかも、着目点載荷が40 (tf) 以上になる回数は、活荷重列に含まれる車両の合計台数 N の約1000分の1ということになる。

表一 渋滞の発生特性

供用期間 T_0 (年)	50
渋滞回数 N_0 (回/月)	50
渋滞長 L (km/回)	50
渋滞時間 T (h/回)	2.5

表二 車種別の車種混入率と車両重量のモデル

車種分類 (k)	車種混入率 ϕ_k	車両重量 W_k (tonf)				
		分布形	平均値 μ	標準偏差 σ	下限値 x_{kL}	上限値 x_{kU}
1 大型車 2 軸空車	0.0181	NÖR	7.36	1.90	3.5	14.0
2 大型車 2 軸積載車	0.0134	LÖG	14.05	2.32	7.6	20.0
3 大型車 2 軸過積載車	0.0001	EXP	3.14	3.14	20.0	40.0
4 大型車タンデム軸空車	0.0490	NÖR	11.21	1.89	5.8	17.8
5 大型車タンデム軸積載車	0.0902	LÖG	19.77	3.18	11.5	30.0
6 大型車タンデム軸過積載車	0.0006	EXP	2.24	2.24	30.0	57.0
7 トレーラー空車	0.0112	NÖR	14.60	3.50	5.2	22.6
8 トレーラー積載車	0.0174	LÖG	26.98	8.63	13.7	80.0
9 中型車	0.1745	LÖG	5.11	3.01	0.9	20.0
10 乗用車	0.6255	LÖG	1.31	0.34	0.5	3.2

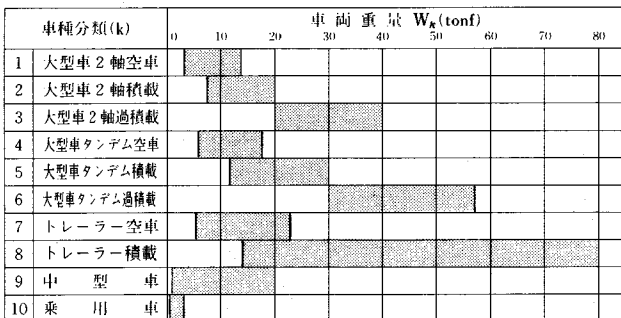
表三 車種別の車長のモデル

車種分類 (k)	分布形	車長 C_k (m)			
		平均値	標準偏差	下限値	上限値
1, 2, 3 大型車 2 軸	BET	8.73	1.86	5.3	12.0
4, 5, 6 大型車タンデム軸	BET	10.44	1.23	6.4	12.0
7, 8 トレーラー	BET	13.55	1.97	9.7	18.0
9 中型車	BET	6.21	1.58	3.5	12.0
10 乗用車	BET	4.00	0.38	3.0	5.0

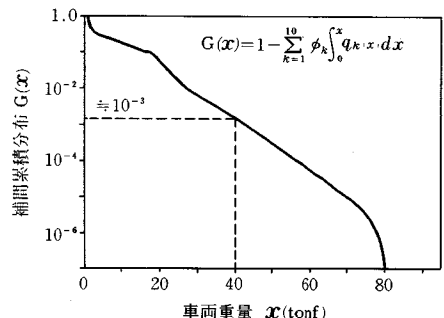
表四 車間距離のモデル

走行速度 V (km/h)	車間距離 D (m)		
	分布形	平均値	標準偏差
20	LÖG	8.05	3.93

(注) NÖR: 正規分布, LÖG: 対数正規分布, EXP: 指数分布, BET: ベータ分布



図二 車種別の車両重量の分布範囲



図三 車両重量の確率分布

ところで、1回の活荷重列に含まれる車両台数 N の確率関数を $p_N(n)$ ($n=0, 1, 2, \dots$) とすれば、渋滞長 L と上記した車頭間隔 h_i の確率特性に対して、理論的には次式を利用してこれを求めることができる。

$$p_N(n) = \text{Prob}[N=n] \\ = \text{Prob}\left[\sum_{i=1}^n h_i \leq L\right] - \text{Prob}\left[\sum_{i=1}^{n+1} h_i \leq L\right] \dots (2)$$

ただし、 $p_N(0) = \text{Prob}[h_i > L]$ ($n=0, 1, 2, \dots$)
ここに、 $\text{Prob}[\cdot]$ は確率を表す。

もし、活荷重列に含まれる車両の車頭間隔が指数分布に従うとすれば、上記の $p_N(n)$ はポアソン分布になることはいうまでもない。ところが、前記したように本論文での車頭間隔は車長と車間距離の和によって与えられており、その分布は指数分布にならない。したがって、式(2)を用いて $p_N(n)$ を誘導しなければならないが、これを解くことは必ずしも容易ではない。しかも、ここで対象とする N の値が非常に大きいため、 $p_N(n)$ を正確に求めたとしてもその変動係数は非常に小さくなり、近似的に確定値としても十分な分布になることは容易に理解することができる。

そこで、本論文では1回の活荷重列に含まれる車両台数 N として、簡単のために次式に示す期待値を確定的に与えることにする。

$$N = \frac{L}{\sum_{k=1}^K \phi_k \cdot \bar{c}_k + \bar{d}} \dots (3)$$

ここに、 \bar{c}_k は車種 k の車長 C_k の平均値、 \bar{d} は車間距離 D の平均値を表す。さらに、単位期間に発生するすべての渋滞に含まれる車種 k の車両のうち、その重量が x 以上になる台数を n_{kx} とし、次式によってこれを確定的に求めることにする。

$$n_{kx} = N_0 \cdot N \cdot \phi_k \cdot \int_x^\infty q_k(x) dx \dots (4)$$

式(4)の n_{kx} において $x=0$ の場合を改めて n_k と表記し、表-1~表-4の値を式(3)と式(4)に代入して N と n_k を求め、これらをまとめて表-5に示す。

なお、ここでは単位期間として1か月を考えることにする。もちろん、単位期間としてこれ以外に1日あるい

表-5 渋滞時に発生する車両台数

N (台/回)		3,635.6	
$\sum n_k$ (台/月)		181,780	
車種 k の車両台数 n_k (台/月)			
n_1	3,290	n_6	109
n_2	2,436	n_7	2,036
n_3	18	n_8	3,163
n_4	8,907	n_9	31,721
n_5	16,397	n_{10}	113,703

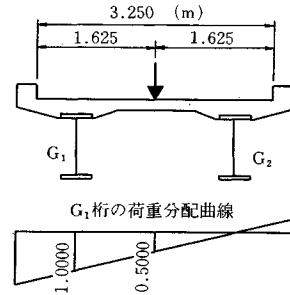


図-4 橋梁のモデル (1車線モデル)

表-6 G₁ 桁における活荷重の設計曲げモーメント (1車線モデル)

	支間長 l (m)		
	40	60	80
M^* (tf·m)	238.4	446.5	712.4

は1年などを設定することもできるが、基本的には求めようとする最大応答とその再現期間との関係はどの場合でも同じ結果を与える。ただし、再現期間の1/10以下にするのが、解析的には都合が良い。

(3) はりのモデル

具体的な橋梁のモデルとして、図-4に示すような1車線の有効幅員をもつ支間長 $l=40, 60, 80$ (m) の単純桁を考える。同図の影響線は主桁に対する荷重の横分配を表す。活荷重列が載る橋軸直角方向の位置を車線中央とし、 G_1 桁に着目してその応答を求める。

図-4に示した有効幅員に道路橋示方書のL-20荷重¹³⁾を載荷し、同じく G_1 桁の支間中央点における活荷重の設計曲げモーメント M^* を表-6に示す。ただし、 M^* には衝撃係数を含んでいる。

3. 着目点載荷と渋滞荷重列の組合せによる応答解析

(1) 着目点載荷と渋滞荷重列の組合せ

図-1に示したように、1回の活荷重列が橋梁上を移動するときの応答の変化は時間関数となり、渋滞時間 T の中のある時点でその最大値が出現する。同様にして、他の活荷重列による応答の中からそれぞれの最大値が出現し、ここでの応答解析の目的はこの最大値を確率的に推定することにある。

単位期間に発生するすべての活荷重列による応答の最大値を M_0 とおくと、 M_0 が発生しているときに橋梁上に載荷しているすべての荷重 x_i と、その作用点における荷重の横分配を考慮した影響線縦距 η_i とを用いてこれを求めることができる。

$$M_0 = \sum_{i=1}^n \eta_i \cdot x_i \dots (5)$$

ここに、記号 $\sum_{(k)}$ は橋梁上に載荷しているすべての荷重について合計することを表わす。このように、活荷重列の確率特性と構造物モデルの影響線関数を用いて、想定される荷重状態と式(5)による応答をモンテカルロシミュレーションによって繰り返し計算し、その中から最大応答を確率統計的に求めることができる。その際、図-1に示したように各荷重が集中荷重であり、かつ着目する曲げモーメントの影響線関数が橋軸方向に直線変化するために、応答の最大値は着目点の直上にある荷重が載荷しているときに出現する。しかも、通常そのような荷重としては、大型車種のうち比較的重い車両による荷重を考えればよい。

本研究の解析方法では、このような考え方に加えて、荷重の確率分布が与えられていることを利用する。つまり、着目点の直上に載荷している荷重のみによる応答の確率分布は、その荷重の確率分布を荷重から応答への変換係数に応じて線形変換することによって容易に求めることができる。さらに、着目点の直上以外に載荷している活荷重列による応答を、別途、シミュレーションによって求めるものとし、これらを加算することによって必要とする最大応答の確率分布を算出する。

なお、以下の議論では着目する曲げモーメントを表-6に示した設計曲げモーメント M^* で正規化し、これを曲げモーメント比として定義する。最大値 M_0 に対しては、次式によって Y_0 を定義し、 Y_0 の確率分布を求める。

$$Y_0 = \frac{M_0}{M^*} \dots \dots \dots (6)$$

そこで、着目点上にある荷重が載荷している状態のみを考える。その車種が k であり、かつその車両重量が x_c 以上である事象を E_{kx} とし、事象 E_{kx} が発生しているという条件のもとで、そのときの曲げモーメント比を Y_{kx} とおく。図-5に示すように、橋梁上の荷重を着目点上の荷重とそれ以外の荷重列との2つに分離し、前者による曲げモーメント比を $Y_{kx}^{(1)}$ 、後者による曲げモーメント比を $Y_{kx}^{(2)}$ とすれば、重ね合わせの原理からこれらの和によって Y_{kx} を求めることができる。

$$Y_{kx} = Y_{kx}^{(1)} + Y_{kx}^{(2)} \quad (k=1, 2, \dots, K) \dots \dots \dots (7)$$

(2) 最大応答の確率分布

図-5の右側に示した関数 $g_{kx}(y)$ と $h_k(y)$ は、それぞれ $Y_{kx}^{(1)} = y$ 、 $Y_{kx}^{(2)} = y$ となる確率密度関数を表わす。ここで、 $g_{kx}(y)$ は車種 k の車両重量が x_c 以上となる確率密度関数に対して、分布のパラメーターを線形変換することによって求める。また、 $h_k(y)$ は図-5(b)に示した荷重状態、つまり着目点上に車種 k の車両が載荷しているという条件のもとで、着目点上以外の渋滞荷重列をシミュレーションして求める。したがって、 $Y_{kx} = y$ となる確率密度関数を $f_{kx}(y)$ とすれば、式(7)

の関係から次のたたみ込み積分によってこれを求めることができる。ただし、積分範囲を便宜的に $[0, \infty]$ として表記するが、当然ながら $g_{kx}(y)$ と $h_k(y)$ の有意義な分布範囲には有限の上下限值があり、それに応じて積分を行えばよい。

$$f_{kx}(y) = \int_0^\infty g_{kx}(y-t) \cdot h_k(t) dt \quad (k=1, 2, \dots, K) \dots \dots \dots (8)$$

さらに、式(8)の結果から、 Y_{kx} の累積分布関数 $F_{kx}(y)$ を次式によって求める。

$$F_{kx}(y) = \int_0^y f_{kx}(y) dy \quad (k=1, 2, \dots, K) \dots \dots \dots (9)$$

表-5からもわかるように、境界値 x_c の値を適切に設定すれば、着目している各事象 E_{kx} が対象とする期間内に、少なくとも1回以上発生する確率はきわめて1.0に近い。また、各事象 E_{kx} は独立に発生すると考えられるため、すべての Y_{kx} 中の最大値を Y_x とし、その累積分布関数を $F_x(y)$ とすれば、式(4)と式(9)の結果を次式に代入してこれを求めることができる。

$$F_x(y) = \prod_{(k)} [F_{kx}(y)]^{n_{kx}} \dots \dots \dots (10)$$

ここに、記号 $\prod_{(k)}$ は着目している事象 E_{kx} が存在する車種についてののみ合計することを表わす。したがって、式(10)において $x_c=0$ とした場合を改めて $F_0(y)$ と表記すれば、これは曲げモーメント比の最大値 Y_0 の累積分布関数にはかならない。

なお、本研究の方法ではモデル化された車両重量の確率分布関数を利用するために、ここで行う活荷重列のシミュレーションは着目点以外の渋滞活荷重列に対してのみ必要となる。その際、シミュレーションの技法としてはブロック渋滞と同様の扱いでよく、また実用的に問題となる最大応答の再現期間としては高々1000年程度以下のため、この範囲の応答に対しては $h_k(y)$ の分布の中心部が必要となり、その裾部の性状に関する精度への要求は厳しくない。このことから、シミュレーションに必要な計算時間は従来の効率化シミュレーションに比べ

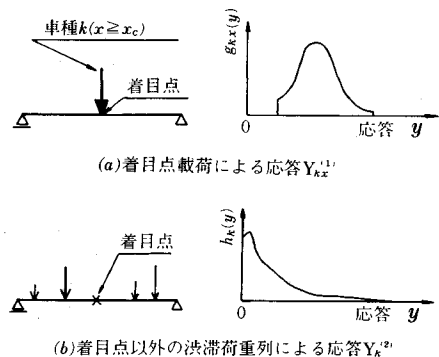


図-5 着目点載荷と渋滞荷重列

て大幅に少ない。

(3) 複数の走行車線と走行モードの場合

一般の道路橋では複数の走行車線があり、ある主桁の着目点に対しては複数車線上の活荷重列による影響を考慮しなければならない。その際、着目する主桁の荷重分配曲線を利用して各車線の影響を加えるにあたって、最も影響の大きい車線に対象とする重い車両を載荷し、それ以外の車線にはシミュレーションによってそれぞれの活荷重列を載荷すれば、前記した1車線上の活荷重列の場合を容易に拡張することができる。また、内桁のようにいくつかの車線が同程度の影響を有する場合には、それぞれの車線に着目して同じような解析を行い、その結果影響の大きい方を採用すればよい。

一方、複数の走行モードを考える場合、たとえば通常渋滞と突発渋滞、あるいは車種混入率の内訳が異なる渋滞をいくつか考えるような場合には、それぞれの走行モードごとに最大応答を求め、さらにそれらの中から最大値を求めるようにすれば、前記した最大応答の推定法を拡張して適用することができる。

4. 解法の精度と計算時間の検討

シミュレーションによって求めた確率密度関数 $h_k(y)$ の一例を図-6に示す。計算に要するcpu時間は着目車種と支間長によって多少異なるが、シミュレーション回数にほぼ比例する。この例では50000回のブロック渋滞を載荷しており、必要な計算時間は同図に示すように高々数100秒にすぎない。なお、計算にはACOS 430を使用した。

同図によれば、曲げモーメント比の分布の中心はほぼ0.0~0.05に存在しており、渋滞荷重列のみによる応答は比較的小さいことを表わしている。当然ながら、支間長が短いほどこの傾向が強いが、支間長 $l=60$ や 80 (m) の場合でもこれとほぼ同様の結果となった。

車両重量の境界値 x_c の値と着目する曲げモーメント比 y の値を変えて、式(10)の $F_x(y)$ と $F_0(y)$ の比を求めると図-7のようになる。これは、両者の相対誤差によって最大応答の推定に有意義な車両重量の範囲、言い換えれば最大応答に大きく寄与する車種をどの程度に限定してよいかを示している。すなわち、相対誤差の許容値をたとえば0.05とした場合に、 $y \geq 1.4$ のような範囲の応答に着目するならば $x_c \approx 40$ (tf)、つまり図-2に示したように $k=6$ と $k=8$ の車種のみを着目点上に載荷すれば十分といえる。さらに、 $y \geq 1.6$ を対象とするならば $x_c \approx 67$ (tf) となり、 $k=8$ のトレーラーのみを着目点上に載荷すればよいことがわかる。逆に、 $y \geq 1.2$ のように低いレベルを対象とするならば、 $x_c \approx 25$ (tf)、車種として $k=3, 5, 6, 8$ の4つを考慮しない

と十分な精度の推定ができないことを示している。この結果は、本研究の解法だけでなく従来の効率化シミュレーションにおいて、対象とすべき車種および車重の範囲を示している点で意味があると考えられる。

なお、図-7の結果は単位期間を1か月とした場合、つまり月最大応答の確率分布を求める場合の相対誤差と車重の境界値との関係を示しており、単位期間に応じてこの結果は変化する。たとえば、単位期間を1年にすると図-7の曲線は全体的に x_c の小さい方へ移動し、 $y \geq 1.4$ に対しては $x_c \approx 28$ (tf) となる結果が得られた。

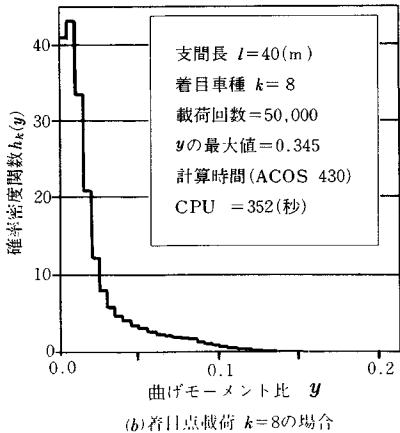
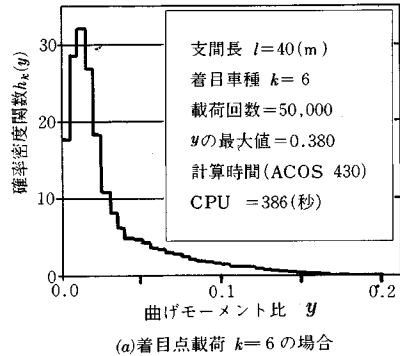


図-6 シミュレーションによる $h_k(y)$ の例

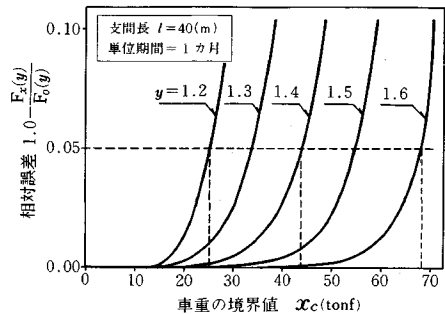


図-7 車重の境界値 x_c と $F_0(y)$ の相対誤差の関係

次に、本解法による解析結果と従来の効率化シミュレーションによる解析結果との比較を図-8の確率紙に示す。着目点載荷を $x_c=40$ (tf) とし、効率化シミュレーションでは Hazen の方法によってその経験確率分布を求めた。また、式 (8) と (9) の数値積分はガウスの積分公式を用いて行った。

同図からこれら2つの解法を比較すると、分布を推定する精度はよく一致しているが、計算時間において明らかに本解法が有利といえる。本解法では式 (8), (9) の演算に154 (秒)、図-6に示した $h_k(y)$ の演算に738 (秒) 要しているのに対して、効率化シミュレーションでは5000 (回) の着目点載荷を行うのに10853 (秒) 要している。この差が非常に大きいことはいうまでもないが、しかも本解法によればより分布の裾部まで、つまりより長い期間における応答の再現期待値を推定することができる。この裾部をどの程度まで推定することができるかは、図-6に示した確率密度関数 $h_k(y)$ のシミュレーション回数に依存する。この計算を増加することによって裾部の推定精度が向上するが、その場合でも本解法に必要な計算時間は比較的少なくてすむ。

本解法と効率化シミュレーションのそれぞれにおいて、必要なcpu時間と x_c との関係を図-9に示す。

5. 供用期間における最大活荷重の考察

(1) 指数分布モデルによる理論解

図-8の結果からも明らかのように、曲げモーメント比がある程度のレベルを超えて大きくなると、曲線が上側に変曲してある点に漸近する傾向がみられる。そこで、車重分布の上限値がこのような傾向をもたらすことを確認するために、裾切りした指数分布を用いて $g_{ex}(y)$ と $h_k(y)$ をモデル化し、理論的にこれらのたたみ込み積分を行って曲げモーメント比の確率分布を求め、その影

響を検討する。

着目点上の車種として $k=8$ のトレーラーを考え、 $x_c=50$ (tf) の車重分布を対象にしてこの荷重による曲げモーメント比 Y_1 を求めると、図-10 (a) に示すよう

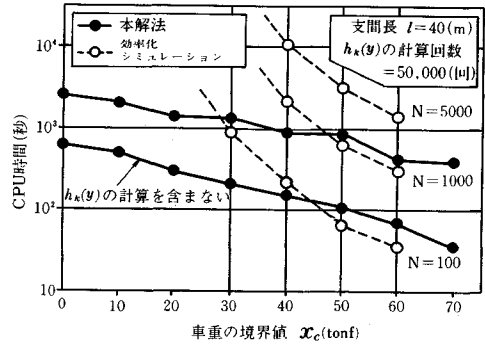
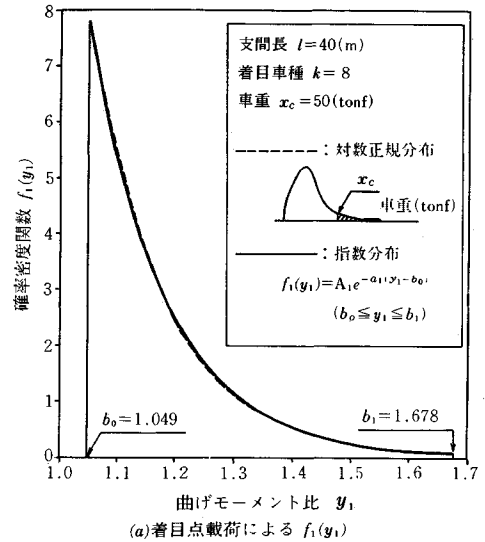


図-9 車重の境界値 x_c と計算時間の関係 (ACOS 430 使用)



(a) 着目点載荷による $f_1(y_1)$

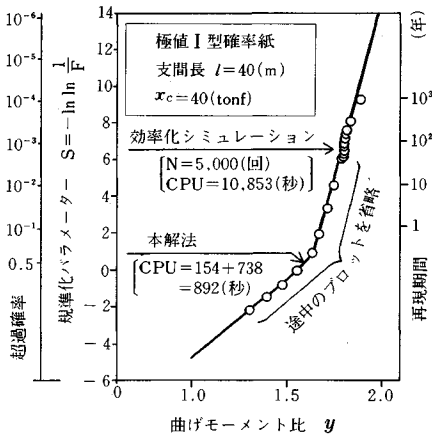
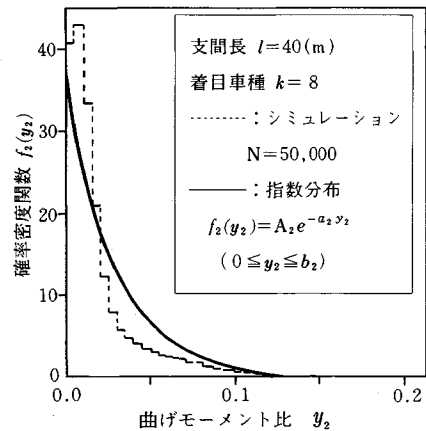


図-8 従来の解法との比較



(b) 渋滞荷重列による $f_2(y_2)$

図-10 指数分布による $f_1(y_1)$ と $f_2(y_2)$ のモデル

に対数正規分布の裾部を用いた確率密度関数が得られる。これに次式に示す指数分布を合わせて、 $Y_1 = y_1$ となる確率密度関数を $f_1(y_1)$ とする。

$$f_1(y_1) = \begin{cases} A_1 e^{-a_1(y_1 - b_0)} & : b_0 \leq y_1 \leq b_1 \\ 0 & : y_1 < b_0, b_1 < y_1 \end{cases} \dots (11)$$

ここに、 $A_1 = \frac{a_1}{1 - e^{-a_1(b_1 - b_0)}}$

一方、着目車種 $k=8$ に対する渋滞荷重列をシミュレーションして曲げモーメント比 Y_2 を求め、図-10(b) に示すように次の指数分布 $f_2(y_2)$ を確率紙を用いてあてはめ、モデル化する。

$$f_2(y_2) = \begin{cases} A_2 e^{-a_2 y_2} & : 0 \leq y_2 \leq b_2 \\ 0 & : y_2 < 0, b_2 < y_2 \end{cases} \dots (12)$$

ここに、 $A_2 = \frac{a_2}{1 - e^{-a_2 b_2}}$

なお、あてはめた指数分布のパラメーターを表-7 に示す。

いま、 $Y = Y_1 + Y_2$ となる曲げモーメント比 $Y = y$ の確率密度関数 $f_0(y)$ は、式 (11) と式 (12) を用いてたたみ込み積分を行えば、次のように理論的にこれを解くことができる。ただし、 $|b_1 - b_0| > |b_2|$ の場合とする。

$$f_0(y) = \int_0^\infty f_1(y-t) \cdot f_2(t) dt \dots (13)$$

- (1) $y < b_0, b_1 + b_2 \leq y; f_0(y) = 0$
 - (2) $b_0 \leq y < b_0 + b_2$
 - (3) $b_0 + b_2 \leq y < b_1$
 - (4) $b_1 \leq y < b_1 + b_2$
- $$f_0(y) = \frac{A_1 A_2}{a_1 - a_2} \left\{ \begin{aligned} & e^{-a_2(y - b_0)} - e^{-a_1(y - b_0)} & (2) \\ & e^{-a_1(y - b_0 - b_2) - a_2 b_2} - e^{-a_1(y - b_0)} & (3) \\ & e^{-a_1(y - b_0 - b_2) - a_2 b_2} - e^{-a_2(y - b_1)} & (4) \end{aligned} \right. \dots (14)$$

式 (14) の結果は、たとえば $f_2(y_2)$ を固定して $f_1(y - y_2)$ を移動させながら、それらの重なり合う部分を

表-7 指数分布のパラメーター

着目点 載荷	車重の境界値 x_c (tonf)	50
	車重の上限值 x_u (tonf)	80
	A_1	7.703
	a_1	7.640
	b_0	1.049
渋滞荷 重列	b_1	1.678
	シミュレーション回数	50,000
	A_2	36.0
	a_2	36.0
	b_2	0.5

積分して求めることができる。結果の $f_0(y)$ を図-11 に示す。この中で、①と④の点がそれぞれ関数 $f_0(y)$ の上下限値を表わし、②と③の点がそれぞれ関数の変曲点を表わす。

(2) 車重分布の上限值が及ぼす影響

式 (14) と図-11 の結果は、唯一回の着目点載荷と渋滞荷重列による応答の確率密度関数を表わす。これを式 (9) と式 (10) に従って積分し、図-12 に示すように月最大の曲げモーメント比 Y_0 の確率分布を求める。ただし、この例では着目点載荷の台数 $n_{kr} = 52$ (台/月) となる。同図には車種 k の車重分布の上限值を

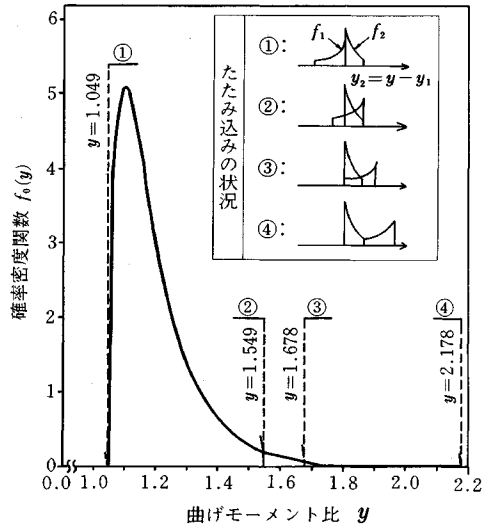


図-11 たたみ込み積分による $f_0(y)$ の結果

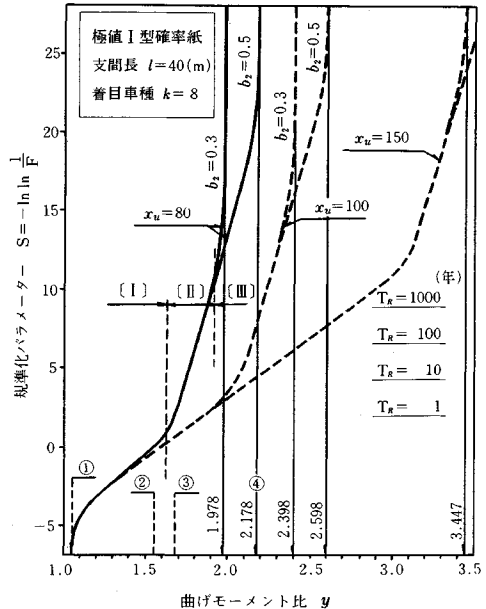


図-12 月最大曲げモーメント比 Y_0 の確率分布

えた結果、および $f_2(y_2)$ の上限値を変えた結果をも合わせて示す。

この結果から、 $y=1.6\sim 1.7$ 付近にある曲線の変曲点は、着目点載荷の上限値 x_u に起因することがわかる。大型車類の上限値を、たとえば $x_u=150$ (tf) のように大きくすると、それにつれて変曲点が図の右側へほぼ平行移動している。さらに、その上側の変曲点は $f_2(y_2)$ の上限値に起因している。

同図に示す [I] と [II] の範囲は $x_u=80$, $b_2=0.3$ の場合の曲線において、着目する変曲点の下側と上側を表わす。[I] では着目する大型車類のみが支配的となり、[II] では車重が上限値に近い大型車類と渋滞荷重列の組合せ効果が支配的となり、いわゆる Turkstra の法則¹⁴⁾ 的な考え方が成立している。もし、[I] と [II] の境界をはさんで活荷重の特性を推定する場合、つまり、変曲点の下側だけを用いて確率分布を求め、これを直線的に外挿して将来の再現期待値を求めると、変曲点の上側の部分に対しては過大な推定をすることになる。通常、道路橋活荷重の再現期間としては、同図に示す $T_R=1\sim 1000$ (年) 程度が対象となり、再現期待値は [II] の範囲に入る。したがって、このような長い期間における再現期待値を推定する場合には、変曲点の上側の応答を求めたうえでこれを外挿しなければならない。また、[III] の範囲は着目点載荷と渋滞荷重列のそれぞれが上限値に

近い場合を表わしている。しかし、最大応答の実用性からみると、この範囲の重要性は低い。

なお、本論文では着目点載荷と渋滞荷重列のそれぞれに裾切りした指数分布をあてはめたが、このことよって式 (8) と式 (9) の積分を解くことができる。さらに、指数分布によれば上記のような2変数の場合だけでなく、3変数以上の和に対しても必要な積分を解くことができる。

(3) 支間長による最大活荷重の比較

本解法を用いて、支間長 $l=40, 60, 80$ (m) の単純ばりにおける曲げモーメント比の比較を図-13に示す。いずれも $x_c=40$ (tf) とし、車種 $k=6, 8$ の着目点載荷と渋滞荷重列を用いた。また、図-6の結果と同じく、50000 (回) の渋滞荷重列を載荷して $h_k(y)$ を求めた。

この図から明らかなように、同一の再現期間に対する曲げモーメント比の値は支間長が小さいほど大きくなる。つまり、設計活荷重に比べてより苛酷な自動車荷重となっている。たとえば、供用期間 $T_0=50$ (年) の最大値における10%フラクタイル値、すなわち475年再現期待値でみると、支間長 $l=40\sim 80$ (m) の曲げモーメント比は表-8に示すように $y=1.86\sim 1.58$ に変化しており、その差が約18%もある。ただし、これらの結果はあくまで図-4に示したような1車線のモデルに、表-1~表-4に示した活荷重列のモデルを載荷した場合に限定されることはいうまでもない。多数車線の場合および活荷重列の特性を変えた試算については、今後の重要な課題と考えられる。

6. まとめ

本研究では、主として高速道路における活荷重評価を目的として、確率論的な評価手法を開発するとともに、具体的な荷重特性について検討した。得られた成果と今後の課題とをまとめる。

(1) 道路橋の活荷重列を着目点載荷と渋滞荷重列の組合せとして考え、たたみ込み積分を用いてその最大応答を推定する手法を開発した。

(2) 本解法と従来の効率化シミュレーションによる方法とを比べたところ、推定精度と計算の効率化において、本解法が非常に有効な結果を得た。

(3) 供用期間における最大活荷重による応答に対して、大型車などの車両重量の上限値が支配的となり、その影響によって確率分布に変曲点が生じ、その前後で確率特性が大きく変化することを理論的に示した。

(4) 比較的長い期間の最大活荷重を推定する場合に、着目する応答の上限値に漸近しない範囲の結果を外挿すべき乗則を適用すれば、結果の推定精度が必ずしも良くないことを示した。

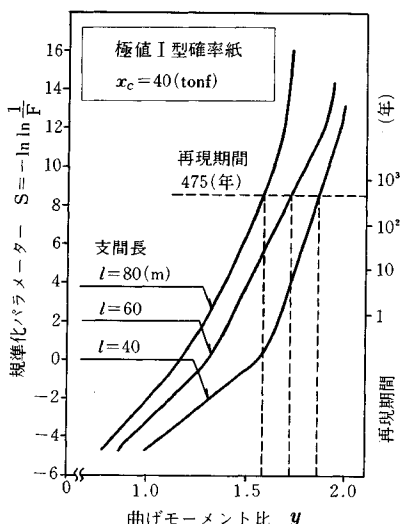


図-13 支間長による曲げモーメント比の比較

表-8 曲げモーメント比の再現期待値 (1車線モデル)

		再現期間 T_R (年)		
		1	50	475
支間長 l (m)	40	1.68	1.79	1.86
	60	1.45	1.63	1.73
	80	1.30	1.48	1.58

しかしながら、本研究では1車線のモデルと特定の活荷重列のみを用いて検討したにとどまっております、このような解析を多数車線および活荷重列の特性を変えた場合についても適用し、活荷重特性のより広範な分析を今後の課題として行う必要がある。

謝 辞：本研究は、阪神高速道路公団設計荷重委員会における調査研究に多くの示唆を得た。多大なご指導をいただいた京都大学名誉教授 小西一郎委員長をはじめ委員各位、ならびに阪神高速道路公団の関係各位に対し深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 阪神高速道路公団・阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路における土木構造物補修事例集，昭和57年3月。
- 2) 第4回信頼性ワークショップ資料集，信州大学土木工学科編，1987年7月。
- 3) 金井道夫・佐藤和徳：橋梁活荷重の信頼性解析，土木研究所資料，第1865号，昭和57年7月。
- 4) 阪神高速道路公団・阪神高速道路管理技術センター：設計荷重委員会報告書（第2編）阪神高速道路における活荷重実態調査と荷重評価のための解析，昭和59年3月。
- 5) 松井繁之・神原康樹・前田幸雄：道路橋の自動車荷重に関する諸量の特性について，土木学会関西支部年次講演会，I-29，昭和61年5月。
- 6) 藤野陽三・伊藤 学・遠藤元一：シミュレーションに基づく道路橋設計活荷重の評価，土木学会論文報告集，第286号，1979年6月。
- 7) 藤野陽三・高田和彦：自動車列のフローを考慮した活荷重の確率論的解析手法，構造工学論文集，Vol.31A，1985年3月。
- 8) 高田和彦・藤野陽三：道路橋最大活荷重評価のためのコンピューターシミュレーションの効率化，構造工学論文集，Vol.32A，1986年3月。
- 9) 久保雅邦・石田良三・北沢正彦：道路橋の活荷重による最大応答の一評価法，土木学会関西支部年次講演会，I-49，昭和62年5月。
- 10) 亀田弘行：構造物に作用する荷重の特性・限界状態との関連，昭和62年度講習会テキスト「限界状態設計法」第2章，昭和62年4月，土木学会関西支部。
- 11) 阪神高速道路公団・阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究，昭和61年12月。
- 12) Schueller, G. I., 小西一郎・高岡宣善・石川 浩（共訳）：構造物の安全性と信頼性，丸善，昭和59年11月。
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，昭和55年2月。
- 14) Turkstra, C. J. : Theory of Structural Design Decisions, Solid Mechanics Study No.2, University of Waterloo, Canada, 1972.

(1988.1.13・受付)