

道路橋の限界状態設計法に向けての 活荷重に関する基礎的研究

STUDY ON VEHICLE LOADS FOR HIGHWAY BRIDGES

松井繁之* 神原康樹**

By Shigeyuki MATSUI and Yasuki KANBARA

In near future, the current allowable stress design method for highway bridges will be changed into a limit state design method. For the design method, modellings of loading effects and resistance strengths are the most important works. On the resistance, various existing test results are available. However regarding to load effects, few informations are obtained. Therefore, the authors have studied on live load effects for highway bridges. The field measurements at actual highway bridges were carried out to clarify vehicle load characteristics and traffic flow characteristics. In addition to the measurements, computer simulation analyses have been carried out to discuss the design load spectra of vehicles and traffic flow characteristics. Finally, the authors emphasize to gather more field measurement data to establish reasonable design loads.

1. まえがき

これまで都市高速道路やその他の重交通路線の橋梁床版が破損した事例は数多く報告され、その原因の一つとして過大な輪荷重の通行が指摘されている。一方、渋滞時の実交通下での主桁に発生する最大応力は設計荷重による計算値の高々70%程度であると言われている。しかし、ここ数年前から二次部材の疲労亀裂が新たな問題となっている。このような種々の損傷や実測報告から道路橋構成各部材の安全性が異なっていること、疲労を考慮していないことなどはもちろん理解できるが、現行の部材別の設計荷重が、近年の実交通荷重を正確に反映していないことが大きな原因と考えられる。このため各種損傷原因に対して、構造面から追求するとともに、各道路管理者において自動車荷重実態についての調査も精力的に進められている。

一方、わが国でも抵抗強度や荷重作用のバラツキを考慮した限界状態設計法へと移行するのはそう遠くない。この設計法の確立には、抵抗強度や荷重作用の実態を把握し、バラツキを考慮してモデル化することが重要である。抵抗強度については、これまで種々の実験的研究等が行われその成果が蓄積されているが、荷重作用、特に道路橋にとって最も重要な自動車荷重についてはまだ情報は不十分である。

著者らはこのような観点から自動車荷重特性に関する諸量の調査とそのモデル化、さらに設計活荷重について研究を進めてきた¹⁻³⁾。本論文はその結果を述べるもので大きく分けて次の2つの内容となっている。

(1) 自動車荷重特性の調査とモデル化

鉄道橋と違い道路橋の場合は、自動車の通行位置や間隔等がランダムであり、このバラツキが荷重作用に

* 工博 大阪大学助教授 土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

** 工修 榊駒井鐵工所 橋梁技術部 (〒555 大阪市西淀川区中島2-5-1)

大きく影響する。このため、自動車重量だけでなく交通流に関する諸量（速度、通行位置、到着時間間隔等）についても調査検討した。現場荷重測定では橋を1つのハカリと考えてこの特性を利用した簡便な方法を採用した。同様な考えで、Moses、村越、Peter⁴⁻⁶⁾らの測定法があるが、これらは主桁に橋軸方向で多数のゲージを貼付して、車両の進行に伴うひずみ分布の変化から車両の重量を精度よく測定するものである。筆者らの方法の一つはよく似たものであるが、若干異なっている。

そして、実測結果に既存資料に対する分析結果も加え、自動車の車種別重量と交通流に関してモデル化を行った。

(2) シミュレーションによる設計活荷重の検討

モデル化した自動車荷重特性を用いて渋滞時を想定したシミュレーション解析を行い橋梁部材の最大応答値頻度分布を求め、荷重の特性値を推定した。これを現行の道路橋示方書の設計荷重と比較検討した。

2. 実橋における実自動車荷重の測定と影響因子のモデル化

橋梁の応答を左右する自動車荷重作用は、自動車諸元に関する諸量（重量、軸重比、寸法等）と交通流に関する諸量（自動車の速度、幅員方向での通行位置、到着時間間隔等）との因子からなり、これらの諸因子について明確にする必要がある。著者らは道路橋数橋において24時間づつの実測を行い、これら影響因子の特性を適切な分布関数等で表現することを試みた。ただし、測定できなかったものについては既存の資料を分析しモデル化した。

2. 1 実測した橋梁と調査項目

自動車荷重特性は地域の影響を大きく受けるものと予測され、条件の異なる5橋で測定を実施した。それらの橋梁の特徴と調査内容を表-1に示す。それぞれの測定結果を比較して、荷重特性の違いについても考察したい。

表-1 測定橋梁

	阪堺大橋大阪側 取付道路橋	豊島橋	前池橋	松葉跨線橋	高石大橋	前池橋 (2回目)
形 式	4本主桁 鋼床版プレートガー	6本主桁 活荷重合成桁	3本主桁 活荷重合成桁	4本主桁 活荷重合成桁	3径間連続 部分剛性橋桁	3本主桁 活荷重合成桁
所 在	大阪市住之江区 尼崎明練大和川北詰	大阪府鴻巣市 中央橋状線	和歌山県串本町 国道42号線	大阪府門真市 中央橋状線阪路線部	大阪府道臨海線	和歌山県串本町 国道42号線
支 間	22.7 2.3 m	40.0 m	24.4 m	24.2 3.4 m	60m+78m+60m	24.4 m
有効幅員	6.5 m	10.5 m	7.0 m	10.25 m	28.0 m	7.0 m
車 線 数	2車線	2車線	2車線	3車線	4車線	2車線
実施年月日	S59.6.20~21	S59.7.17~18	S59.11.8~9	S60.7.23~24	S60.11.5~6	S60.11.13~16
交 通 流	交通量・混入率	○	○	○	○	○
	速 度	—	—	○	○	○
	通 行 位 置	—	—	○	○	○
	到着時間間隔	—	—	○	○	○
自 動 車	重 量	○	○	○	○	○
	軸 重 比	○	—	—	○	—
	寸 法	—	—	—	—	—

2. 2 測定方法

(1) 自動車重量に関する測定

自動車をトラックスケールに載せて重量を直接測定するのが最も正確であるが、多数の自動車をこの方法で測定するのは不可能に近い。道路管理者^{7,8)}では軸重計を道路に設置して計測しているが、装置が高価で、かつ、測定点が固定されてしまうという欠点がある。自由に場所を選定し、簡易に計測する方法を開発することも重要な課題の1つである。

本研究では、自動車通過によって発生する橋梁部材のひずみを測定することにより間接的に自動車重量を推定する3つの方法を試みた。これらの方法は基本的に橋梁を1つのハカリであると考えたもので、橋梁の形式や交通状況に応じて、個々の橋梁に適した方法として開発したものである。以下にそれぞれの測定方法

について述べる。

a) 自動車重量を直接推定する方法

支間が短く、橋軸方向で複数の自動車と同時に橋梁に載る可能性が小さい場合のもので、支間中央における横分配影響線を利用して、橋梁部材のひずみ応答値と通行位置から直接的に自動車重量を推定する。

すなわち、自動車重量 W は 式(1)より求められる。

$$W = \gamma \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_s} \cdot W_s \quad (1)$$

ここに、 ε : 通行位置を確認した実測応答値

ε_s : 同じ通行位置での試験車による影響値

W_s : 試験車重量

γ : 車種別補正係数

このとき、推定する自動車の車種、軸配置が試験車のものと異なる場合には、解析によって同軸重による応答値比を車種別補正係数として修正する必要がある。この補正係数の一例を表-2に示す。

ただし、式(1)で判るように、本方法では実測の前に横分配影響線を求めておく必要がある。例えば、支間中央の主桁下フランジのひずみに着目し、重量を正確に計量した試験車を幅員方法で走行位置を変えてできるだけ多く走行させて作成できる。このように実験的に求めるのが簡易で、かつ、経済的である。

さて、交通量が多くなると、各ひずみ応答値と通行位置とを対応させて測定することは困難となる。その場合にはひずみ測定点を複数個にして、複数の応答値と影響線の組合せから、最小自乗法によって通行位置と荷重が同時に求められる。すなわち、式(2)の自乗和を最小にする通行位置と重量が求める値となる。

$$E = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{xi} - \varepsilon_i^*)^2 \quad (2)$$

ここに、 ε_{xi} : 推定値 $= W \cdot f_i(x)$, $f_i(x)$: ゲージ i の位置におけるひずみ影響値

W : 推定する荷重, x : 推定する通行位置, ε_i^* : ゲージ i の実測値

この方法を前地橋で実施した。

b) ひずみ頻度測定とシミュレーション解析によって車種別重量密度関数を推定する方法

交通量が多く、複数の自動車が橋梁に同時に載る可能性がある支間および幅員の大きい橋梁では、応答値波形と各自動車との対応をつけることが困難となり、個々の自動車重量を直接推定できなくなる。そこで、ひずみ測定と平行して行った交通量・混入率等の交通流特性を用いて応答シミュレーション解析を行い、仮定した車種別自動車重量頻度分布によるひずみ応答値頻度分布を求め、これと実測値のひずみ応答値頻度分布とが一致するように車種別重量頻度分布を順次修正して、間接的に重量を求める方法を採用した。

・ひずみ頻度の測定方法

ひずみの測定位置として感度のよい支間中央の主桁下フランジを選定した。この諸点にひずみゲージを貼付し、ヒストグラムレコーダーに結線し、これによって自動的にひずみ頻度を計測した。この計器は、設定した最大ひずみと0との間を32等分割し、測定ひずみの大きさを判定し、適切なスライスレベルに頻度を累積される。大型車の最大重量を80t程度と仮定して、それによるひずみの約10%増し程度のものを最大ひずみにすると、ほぼ完全に全応答値が収録できる。測定したプレートガーダー橋では600 μ 程度でよかった。

この測定でも、試験車を走行位置の最頻位置上を走行させ、それによる応答値がどのスライスレベルに入るか、および、通行位置をある一定間隔毎(20cm程度)に変動させるとどの程度レベルが変動するかを検定しておく必要がある。

・シミュレーション解析の方法

一方、計測した交通流特性を用いてシミュレーション解析を行う。本方法のフローを図-1に示す。それ

表-2 車種別補正係数

対象主桁	G1, G3	G2
3軸As	1.000	1.000
3軸A	1.059	1.076
3軸B	1.050	1.065
3軸Bs	1.116	1.043
2軸	1.016	1.032

それぞれのサブルーチンの内容の概要は次のようである。

① 実測の時間交通量・混入率と、通行位置頻度・到着時間・速度および車種別重量の確率密度関数、さらに、車種別自動車諸元・軸重比をインプットし、これらの各因子の確率特性に従った乱数によって自動車を順次発生させ、ひずみ影響面で表した橋上を進行させる。この時、橋上で前を走る車両の速度が小さく、後続車の速度が大きい場合には重なりが起こる。この場合には、後続車を最小車間距離だけバックさせ、前車と同じ速度で追従させた。到着時間間隔が均一でないで、この処置によって自動車が長く連行することはなかった。

② このひずみ影響面を別途計算し、インプットする。影響面解析には有限要素法による準立体解析を行った。そして、解析値と実測の違いを試験車によって得られた支間中央の影響線での比較によって得られた修正係数で補正した。

③ 自動車重量をそれぞれの構造諸元に従い、輪荷重に分配し、応答を計算する。ただし、最大応答値を得るために、平均速度で、車両が約1m進行する毎に計算する。

④ ①～③を必要車線で繰返し、同じ時刻の車線毎の応答を総和し、全車線による応答値時系列を作成する。

⑤ 得られた応答値時系列から正の極値を順次ピックアップし、ヒストグラムレコーダーと同様に頻度解析を行う。この時系列をレインフロー法で頻度解析すると疲労の照査に使用できる。

⑥ 上記の①～⑤を頻度分布が収束するまで繰返し、解析上の頻度分布を得る。

⑦ この結果と測定値とを比較して、分布の傾向が合致するよう車種別重量頻度分布を変更する。一致すると、その時点の車種別重量が妥当な推定値であると評価することにした。

本方法を、阪堺大橋・豊島橋・前地橋・松葉跨線橋に適用した。

c) 軸重を直接的に求める方法

長大支間の橋梁では、1台の自動車によって発生する主桁のひずみは小さく、また、橋軸方向で多数の車両が同時に載るため、a、b)の方法は適用できない。このような

橋梁では床組部材等に着目し、輪荷重応答値を測定しその結果から自動車全重を推定できる。この方法は3径間連続箱桁橋である高石大橋に適用した。この橋梁ではRC床版を各横桁に打ちおろしており、輪荷重が横桁上に乗ると、その直下付近で腹板に垂直方向のひずみが局部的に発生することに着目した。

高石大橋では、図-2に示すように横桁腹板上部に垂直方向にひずみゲージを多数貼付して、同時にひずみ測定し、応答値の分布から通行位置と輪荷重を同時に求めるようにした。

この測定法による応答値の一例を図-3に示す。この図(a)のように、一般的には大型車については前軸と後軸（タンデム軸の場合もある）による応答の時間変動は2つの独立峰となる。ただし、タンデム軸の場合には2軸で1つの峰となる。また、車長の短い車両で速度が大きい場合には図(b)に示すように前軸のピーク値に後軸の影響が含まれている場合もあった。このような場合には、図中のhの値を前軸のみによる応答値とした。このようにして読み取った前後軸の応答値の比は軸重比になる。最終的に全軸の輪荷重を合計

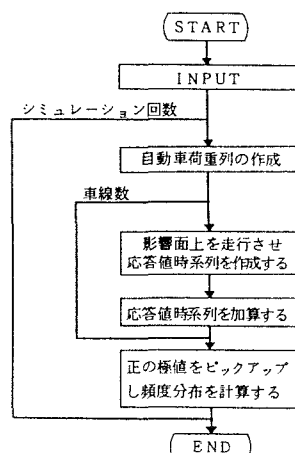


図-1 シミュレーション解析

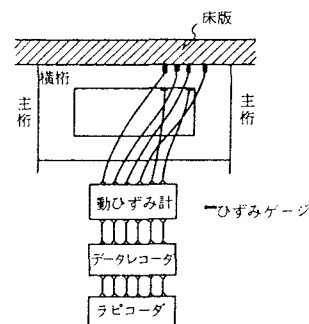


図-2 測定システム

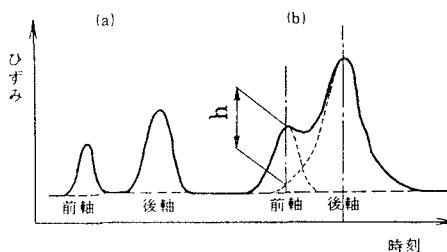


図-3 応答値例

し、2倍して自動車総重量とした。

(2) 交通流に関する測定

ひずみ測定と並行して、橋面上の交通流をビデオに撮影し、このビデオから交通流に関する諸量の測定を行った。ただし、交通量・車種別混入率は測定が簡単であるので現場で測定した。

a) 交通量・車種別混入率……車種別、車線別に時間交通量を観察し車種別混入率を算出した。特に、大型車では車両寸法および軸配置が橋梁部材の応答に大きく影響と考えられるので、表-3に示すように車種を細かく分類した。

b) 速度、到着時間間隔……自動車が橋に入ってから出るまでの時間をビデオ内蔵のストップウォッチを用いて測定し、(スパン長÷測定値)により走行速度を算出した。また、1台の自動車が橋に入ってから次の自動車が橋に入るまでの時間は到着時間間隔となる。

c) 通行位置……ビデオに写る路面にガムテープ等で幅員方向目盛をマーキングしておき、車輪通過位置を読み取った。

(3) 自動車の諸元

自動車諸元表⁹⁾を資料とし分析整理した。軸重比についても分析した。

2. 3 測定結果とモデル化

交通流や自動車諸元に関する諸量について得られた測定結果を3章で述べるシミュレーション解析に用いることができるように分布関数等にモデル化した。以下に具体的な測定結果とそのモデル化について示す。

(1) 自動車重量

a) 前地橋における結果

直接推定する方法によって得た大型車約100台の重量推定結果を図-4に示す。

本橋梁においては1日の交通量が少なく大型車混入率も低いので1日分のデータからは自動車重量特性を明確にできない。そこで、ヒストグラムレコーダを1週間連続で作動させ主桁下フランジのひずみ応答値の度数分布も収録した。この結果を試験車による応答値をキャリブレーション値として重量に換算した。ただし、ほぼ20t以上の重量であると想定されるスライスについて各スライスごとに大型車混入率で分解し、表-2に示した車種別補正係数で補正した。最終結果の重量頻度分布を図-5に示す。

以上の2つの推定重量頻度分布をを比較すると、ほぼ同様の傾向が認められる。すなわち、10t前後、28t前後、44t前後の3つのピークが存在していることがわかる。したがって、本橋梁では交通量は少ないが、大型車は定期便的に走行していると推定できる。

b) 阪堺大橋・豊島橋・前地橋・松葉跨線橋における結果

これらの橋梁ではシミュレーションを用いる方法によって、車種別重量特性を推定することにした。一例として、阪堺大橋について、応答値頻度分布の実測結果とシミュレーションによる2種の結果を図-6～8に示す。計算ひずみ分布(1)は最初のシミュレーションの結果であり、車種別重量特性を阪神高速道路公団⁸⁾で得られている表-4の値を用いたものである。これらの結果では図で明らかなように、高ひずみ領域の応答頻度が現われず、実測結果と異なった。初期のインプット値の内、大型車の平均重量および標準偏差

表-3 車種分類

No.	車 種
1	乗 用 車
2	小型・中型トラック
3	大型2軸トラック
4	大型3軸トラック長床後輪2軸(A)
5	大型3軸トラック短床後輪2軸(As)
6	大型3軸トラック長床前輪2軸(B)
7	大型3軸トラック短床前輪2軸(Bs)
8	大型4軸トラック・トレーラー

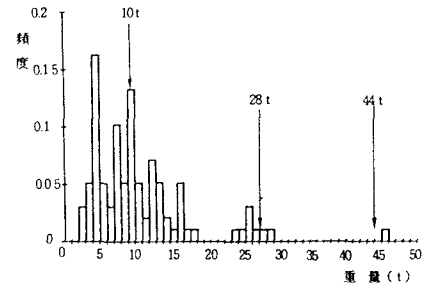


図-4 大型車重量推定結果(100台)

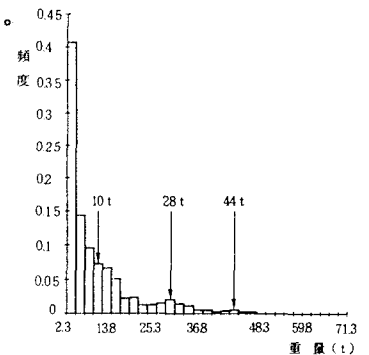


図-5 自動車重量頻度分布

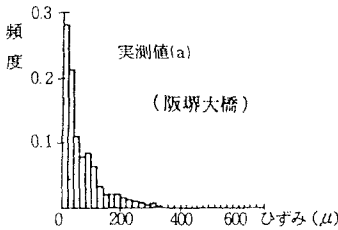


図-6 実測ひずみ分布

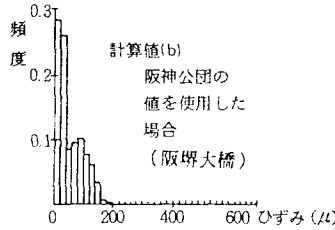


図-7 計算ひずみ分布(1)

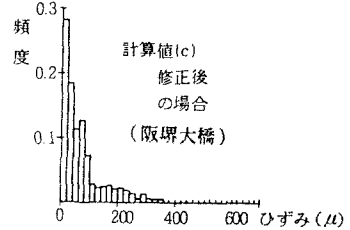


図-8 計算ひずみ分布(2)

が小さ過ぎるためである。そこで、実測の高ひずみ領域の応答値が発生するよう大型車の平均重量および標準偏差を工学的判断で種々に変化させた。最終的に表-5に示した車種別重量特性を用いると、計算ひずみ分布(2)に示す応答値頻度分布が得られた。この結果で、実測結果とほぼ一致していると判断した。厳密に実測値に一致させることは、実測値そのものがわずか1日の測定であるため普遍性がないので、あまり意味をもたない。

同様な計算を豊島橋・前地橋の2橋についても行ったが、表-5の車種別重量特性を用いると頻度分布傾向および最大値の大きさは実測値とほぼ一致した。よって、表-5の頻度分布が共用できることから、ここに示した車種別重量特性は現実存在しうる特性と考えられる。松葉跨線橋についても同様のシミュレーション解析を行ったが、この橋では表-6に示す車種別重量特性ではほぼ妥当と判断された。

c) 高石大橋における結果

軸重から推定する方法によって総数約2900台について重量を推定した。その前に、ひずみ応答値波形の大きさが実際の軸重比に対応することを確認するため、軸重が既知の試験車によるひずみ応答値波形について調べた。結果は表-7に示すように応答波形からの推定軸重比と実軸重比はよい一致を示し、本方法で正確な軸重比が得られることがわかった。

約500台の大型車について軸重比を調べ、各車種別に表-8の結果が得られた。最終的に得られた車種別重量特性は表-9のようになった。

以上の各橋梁の結果と阪神高速道路公団が料金所等の軸重計で実測した結果とを比較すると、一般橋梁上を通行する大型車の重量特性について次のようなことが言える。

高石大橋では和歌山

表-4 阪神高速道路公団の実測結果

車種	分布形	平均(t)	標準偏差(t)
乗用車	一定	1.50	—
小型トラック	一定	3.00	—
中型トラック	LOG	4.97	2.99
大型2軸(空車)	NOR	7.64	2.13
大型2軸(積載車)	LOG	14.18	2.61
大型3軸(空車)	NOR	11.51	2.11
大型3軸(積載車)	LOG	20.30	3.57
トレーラー(空車)	NOR	13.67	2.97
トレーラー(積載車)	LOG	25.60	10.67

※ NOR: 正規分布 LOG: 対数正規分布

表-5 車種別重量特性

車種	分布形	平均(t)	標準偏差(t)
乗用車	一定	1.50	—
小型トラック	一定	3.00	—
中型トラック	LOG	4.97	2.99
大型2軸(空車)	NOR	7.64	2.13
大型2軸(積載車)	LOG	22.00	8.00
大型3軸(空車)	NOR	11.51	2.11
大型3軸(積載車)	LOG	37.00	11.00
トレーラー(空車)	NOR	13.67	2.97
トレーラー(積載車)	LOG	49.00	24.00

※ NOR: 正規分布 LOG: 対数正規分布

表-6 車種別重量特性(松葉跨線橋)

車種	分布形	平均(t)	標準偏差(t)
乗用車	一定	1.50	—
小型トラック	一定	3.00	—
中型トラック	LOG	4.97	2.99
大型2軸(空車)	NOR	7.64	2.13
大型2軸(積載車)	LOG	12.00	8.00
大型3軸(空車)	NOR	11.51	2.11
大型3軸(積載車)	LOG	27.00	11.00
トレーラー(空車)	NOR	13.67	2.97
トレーラー(積載車)	LOG	49.00	24.00

※ NOR: 正規分布 LOG: 対数正規分布

表-7 試験車の軸重比

CASE	前輪の読み取り値(mm)	後輪の読み取り値(mm)	軸重比(前輪:後輪)
1	15.0	46.2	0.245:0.755
2	13.0	41.8	0.237:0.763
3	17.0	44.5	0.276:0.724
4	8.0	23.4	0.255:0.745
5	14.3	43.0	0.250:0.750
平均	13.46	39.78	0.253:0.747
軸重測定結果	6.508t	18.622t	0.259:0.741

表-8 車種別軸重比

車種	軸重比(前輪から)
大型2軸(空車)	0.480, 0.520
大型2軸(積載車)	0.344, 0.656
大型3軸A(空車)	0.402, 0.598*
大型3軸A(積載車)	0.274, 0.726*
大型3軸As(空車)	0.358, 0.642*
大型3軸As(積載車)	0.214, 0.786*
大型3軸B(空車)	0.552*, 0.448
大型3軸Bs(空車)	0.625*, 0.375
大型3軸Bs(積載車)	0.513*, 0.487
トレーラー4軸(空車)	0.350, 0.325, 0.325*
トレーラー4軸(積載車)	0.181, 0.367, 0.452*
トレーラー5軸(空車)	0.244, 0.441*, 0.335*
トレーラー5軸(積載車)	—

※ *: タンデム軸を示す

表-9 車種別重量特性

車種	記号	平均(t)	標準偏差(t)
大型2軸	2	4.11	1.86
大型3軸長床後輪2軸	A	9.37	5.01
大型3軸短床後輪2軸	As	10.26	5.70
大型3軸長床前輪2軸	B	9.01	4.74
大型3軸短床前輪2軸	Bs	7.74	3.04
トレーラー	T	15.43	9.13

※ 長床: 車長の長いもの 短床: 車長の短いもの

側から臨海工業地域へ流入する自動車荷重特性が得られ、大型車重量はあまり大きくはない。これに比べ、阪堺大橋のものは臨海工業地帯から大阪市内・神戸方面へと流出する側の自動車重量特性であり、非常に重量の大きい大型車が通行していた。この阪堺大橋の結果は、車種別混入率が異なる豊島橋や前地橋にも適合性が高いことがわかり、一般国道上では重量の大きな大型車が通行していると結論できる。阪神高速道路の重量特性は都市高速道路のものであり積載違反車の取締りのため、超重量車の通行は少ないことが窺われる。松葉跨線橋の重量特性は阪堺大橋と阪神高速道路との中間的なものであった。

(2) 軸重比

自動車の軸重比は車種によって異なり、さらに積載量、積載位置などによって変化するので、本来はこれらの変動を考慮した確率量として取り扱う必要がある。しかし、本研究では主として全重量に対する応答を考慮しているので軸重比は車種毎では一定とした。表-10は自動車諸元表を分析して得られた値である。ただし、トレーラーについてはトレーラーとトラクタの組合

表-10 車種別軸重比

車種	軸重比 (前輪から)
乗用車	0.500, 0.500
小型トラック	0.412, 0.588
中型トラック	0.355, 0.645
大型2軸 (空車)	0.535, 0.465
大型2軸 (積載車)	0.355, 0.645
大型3軸A (空車)	0.455, 0.271, 0.270
大型3軸A (積載車)	0.259, 0.371, 0.370
大型3軸B (空車)	0.348, 0.349, 0.303
大型3軸B (積載車)	0.262, 0.262, 0.476
トレーラー4軸 (空車)	0.339, 0.338, 0.161, 0.161
トレーラー4軸 (積載車)	0.184, 0.289, 0.264, 0.263
トレーラー5軸 (空車)	0.237, 0.181, 0.181, 0.156, 0.155
トレーラー5軸 (積載車)	0.170, 0.171, 0.171, 0.244, 0.244

表-11 総交通量・大型車混入率

	阪堺大橋	豊島橋	前地橋 (1回目 12時間)	松葉跨線橋	高石大橋	前地橋 (2回目)
合計交通量(台)	19335	31237	2606	40495	20974	3579
大型車混入率(%)	38.5	4.4	28.5	14.4	19.2	10.0
車線数	2車線	2車線	2車線	3車線	2車線	2車線

せがランダムであり、諸元表を分析するのは困難であるので阪堺大橋の鋼床版の横リブのひずみ応答から分析したものを採用した。この結果は表-8に示した高石大橋の結果とほぼ一致しており、実用性があるものと判断している。

(3) 交通流に関する諸量

a) 交通量, 混入率, 自動車配列

各橋における総交通量と大型車混入率を表-11に示す。また、例として松葉跨線橋の中央車線の24時間の交通量・大型車混入率の変動を図-9に示す。

表-12 大型車連行回数

連行台数	外側車線		中央車線		内側車線	
	観測回数	理論回数	観測回数	理論回数	観測回数	理論回数
2	15	11	10	14	25	25
3	2	2	5	3	7	5
4	1	1	1	1	2	2
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0

大型車の連行は橋梁にとって重要な要素となる。この特性を調べるため、実

橋での大型車の連行回数を、各車線あたり約500台づつについて詳細に調べた。大型車の連行特性は車両の混入状態が完全にランダムであると仮定したときの理論値と比較すると、表-12のようになる。

この結果を見るかぎり各測定橋梁とも大きな差異はなく、連行特性は自動車の発生そのものが完全な一様乱数で表現できる確率現象であることがわかった。

b) 速度

自由走行時を対象として松葉跨線橋で各車線約200台、高石大橋で約400台、前地橋では約500台について測定を行った。例として高石大橋における結果を図-10に示す。速度分布の形状を見ると正規分布か対数正規分布の確率密度関数が適合すると思われるので、各結果

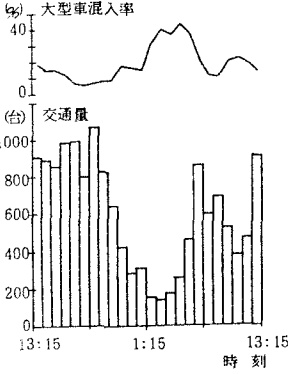


図-9 交通量・大型車混入率

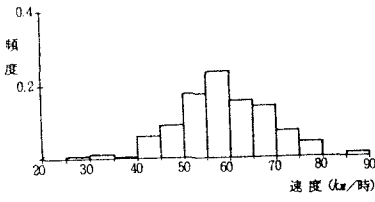


図-10 速度測定結果

表-13 速度分布のカイ二乗検定

分布形	松葉跨線橋		高石大橋		前地橋(2回目)	
	外側車線	中央車線	外側車線	内側車線	北行車線	南行車線
正規分布	3.57	13.58	7.99	41.86	25.01	12.25
対数正規分布	8.48	5.88	11.63	30.75	223.74	58.68
有意水準(5%) のC値	14.1	14.1	15.5	16.9	18.3	18.3

に対し正規分布と対数正規分布についてカイ二乗検定を行った。検定の結果、表-13に示すように対数正規分布より正規分布のほうが適合する場合が多いことがわかった。そこで、3章の解析では速度の分布モデルとして正規分布を用いることにする。

速度の平均値と標準偏差を交通量との関係を調べると図-111のようになり、総じて時間交通量が増加すればこれらは線形関係で小さくなることが認められる。前地橋では縦断勾配があるため、速度が小さくなった。

図-111より平均速度 μ_v と標準偏差 σ_v と時間交通量 Q の関係を式(3)、(4)で表すことができる。

$$\mu_v = 78 - 0.028 Q \quad (\text{km/hr}) \quad (3)$$
$$\sigma_v = 0.16 \mu_v \quad (\text{km/hr}) \quad (4)$$

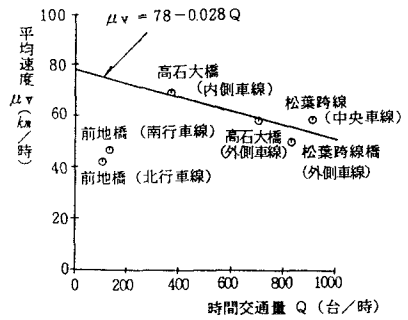


図-111 時間交通量と平均速度

c) 通行位置

通行位置は各車線の右側レーンマークから車両の左側車輪までの距離で表わすことにした。各橋でのビデオ記録で、大型車について、カイ二乗検定によって調べるとほぼ正規分布が適合すると言える。橋梁部材の応答に大きな影響を与えるのは大型車であるので、全車種にこの大型車についての結果を適用しても影響は少ないと考えらる。各測定結果をまとめると表-14のようになり、通行位置と車線幅とは明確な関係は無いようである。全結果を平均すると、通行位置の平均 μ_p 、標準偏差 σ_p と車線幅 B の関係は式(5)、(6)となった。

$$\mu_p = \alpha \cdot B = 0.66 B \quad (\text{m}) \quad (5)$$
$$\sigma_p = \beta \cdot B = 0.048 B \quad (\text{m}) \quad (6)$$

表-14 通行位置

分布形	高石大橋		松葉跨線橋		前地橋(2回目)		平均値
車線幅 B(m)	外側車線	中央車線	外側車線	内側車線	北行車線	南行車線	
α	0.720	0.726	0.649	0.591	0.630	0.620	0.66
β	0.025	0.030	0.073	0.092	0.031	0.036	0.048

d) 到着時間間隔

今回の測定結果は明確な分布関数に当てはまらなかった。しかし、従来から到着時間間隔は指数分布に従うと言われているので、以下では指数分布関数を用いることにした。平均値 μ_T は時間交通量 Q との関係で $3600/Q$ で計算できる。

3. 渋滞時シミュレーションによる最大応答値分布特性

一般に、橋梁部材に終局限界状態を引き起こすのは多数の自動車と同時に載る渋滞時である。そこで、2章で得られた自動車荷重特性を用いて2車線橋梁を対象とした渋滞時の最大応答特性をシミュレーションによって求め、自動車荷重特性の最大応答値に与える影響度について考察し、さらに、限界状態における設計活荷重についても考察を加えた。

3.1 渋滞時最大応答を求めるシミュレーションの方法

所定の車線数の荷重列を作成し、その荷重列中の最大荷重の大型車をみつけ、その大型車を中央に含む約60m程度の荷重列だけを取り出し、それを橋梁上を走行させて、最大応答値を求めるプログラムを作成した。荷重列の作成方法、および、応答値の計算は基本的には2章で述べたものと同じである。

3.2 解析対象の橋梁

対象橋梁は建設省標準設計¹⁰⁾の支間25, 30, 38, 44m、幅員9.2m、4主桁の合成桁(設計番号 1657, 1662, 1670, 1674)とし、各外桁、中桁の支間中央における曲げモーメントに関する応答計算を行った。構造上か

らは支間長の差について考察を行うこととし、幅員、主桁配置、車線幅等は各橋とも同一とした。

3.3 インプットデータ

自動車重量、混入率、通行位置等のインプットデータには2章で得られた荷重モデルを用いた。車両寸法(軸距・輪距)は自動車諸元表を分析し車種別の最頻値である表-15に示す値を用いた。渋滞時の車間距離特性については阪神高速道路⁸⁾の通常渋滞時の特性(平均8.05m, 標準偏差3.93m, 対数正規分布)や突発渋滞時の特性(平均2.71m, 標準偏差1.49m, 対数正規分布)等を用いた。

表-15 軸距・輪距

車種	軸距(m)	前軸から	輪距(m)
乗用車	2.50		1.35
小型トラック	2.75		1.45
中型トラック	4.00		1.65
大型2軸	4.25		1.85
大型3軸A	5.50, 1.30		1.85
大型3軸As	3.25, 1.30		1.85
大型3軸B	1.75, 5.50		1.85
大型3軸Bs	1.75, 3.75		1.85
トレーラー4軸	3.25, 2.75, 1.25		1.85
トレーラー5軸	3.00, 1.30, 6.00, 1.25		1.85

3.4 1回の渋滞における自動車台数とシミュレーション回数

渋滞時の最大応答値はその渋滞列中に存在する大型車の存在確率に依存し、1回の渋滞の長さ、すなわち、その間の自動車台数に依存する。よって渋滞長の設定が重要な条件となる。

阪神高速道路上では、朝夕の最大渋滞長さLの平均値は路線によって0.5~9.4kmと大きく変動している。ここでは最大応答値分布を求めることを主眼としているので、安全側をとって最大の約9kmとした。この時の平均自動車台数は、平均車長をa=6.587m、平均車間距離値にs=8.05mを採用すると、 $Q=L/(a+s)=614.9$ 台となる。よって、1車線あたりの渋滞台数を600台とした。

シミュレーション回数については、試行計算を行った結果2500回程度で最大応答値の確率密度関数が収束すると判断できたので、2500回とした。

表-16 計算ケース

3.5 計算ケース

表-16に示すケースについて計算を行った。

ケース①を基準と考えた。車種別重量特性には表-4の阪神高速道路での車種別重量特性を、車種別混入率には表-17の阪堺大橋における実測値を基準とした。

ケース②は、車種別重量特性の違いを考察するもので、それには阪堺大橋での実測結果を適用した。

ケース③④は、車種別混入率の影響を調べるもので、ケース⑤⑥⑦は、車間距離について考察するためのものである。ケース⑤は突発渋滞時の車間距離特性を、ケース⑥では全車の車間距離を1mの一定値に詰めた。ケース⑦は逆に、自由走行時に相当する大きな車間距離を保持させた場合である。ケース⑦での車間距離の平均値 S_F は、時間交通量を $Q=600$ 台とし、式(3)から平均速度 μv (km/hr)を求めると、式(7)で計算できる。ここでaは平均車長で、阪堺大橋の実測に基づく平均車軸間隔=6.587mとし、車両の先端から前軸までを1m、後軸から車尾までを2mと仮定する9.587mとなる。

よって S_F は94.75mとなる。標準偏差は、到着時間間隔と同様に指数分布すると仮定すると平均値と同一となる。従って、ケース⑦の車間距離については平均値、標準偏差とも94.75mを持つ指数分布と仮定したことになる。

$$S_F = \frac{\mu v \times 1000}{600} - a \quad (7)$$

3.6 結果と考察

各計算結果は1ケース毎にそれぞれ最大応答値の頻度分布として得られるが、各特性の違いによる影響を調べる場合、頻度分布図のままでは比較にくい。よって、極値分布の平均値で比較することにした。この

ケース	車種別重量特性	車種別混入率	車間距離特性	備考
①	阪神高速道路	阪堺大橋	通常渋滞	基準ケース
②	阪堺大橋	"	"	重量特性変化
③	阪神高速道路	阪神高速道路	"	混入率変化
④	"	松葉跨線橋	"	"
⑤	"	阪堺大橋	突発渋滞	"
⑥	"	"	全車1m詰め	車間距離変化
⑦	"	"	自由走行時相当	"

表-17 車種別混入率

車種	阪堺大橋	阪神高速道路	松葉跨線橋
乗用車	48.80	64.51	70.73
小型トラック	8.35	8.92	7.43
中型トラック	6.35	8.92	7.44
大型2軸(空)	7.80	1.75	4.11
"(積)	8.20	1.75	4.11
大型3軸A(空)	7.65	4.05	1.96
"(積)	7.65	4.05	1.96
大型3軸B(空)	1.30	1.69	0.77
"(積)	1.30	1.70	0.77
トレーラー4軸(空)	1.30	1.01	0.18
"(積)	1.30	1.01	0.18
トレーラー5軸(空)	1.00	0.32	0.18
"(積)	1.00	0.32	0.18
大型車混入率	38.50	17.50	14.40

ため、シミュレーションで得られた各最大応答値頻度分布を極値Ⅰ型確率紙にプロットした。図-12に一例として、25mの外桁の結果についてのプロット状況を示す。これらの結果、各最大応答値の分布は式(8)で表される極値Ⅰ型分布に当てはめられることが判った。

$$F_X(x) = \exp \{-e^{-a(x-u)}\} \quad (8)$$

ここに、 a 、 u ：極値Ⅰ型分布のパラメータ

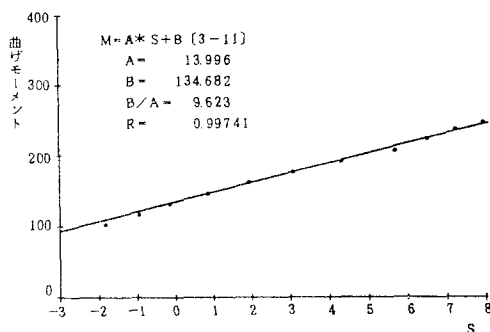


図-12 極値Ⅰ型分布へのあてはめ

以下に各項目別に結果とその考察を示す。

(a) 自動車重量の影響………ケース①とケース②の結果を図-13に示す。阪堺大橋の車種別重量特性を用いた場合は、阪神高速道路のものを用いた場合に比べて約1.6倍程度大きな応答値が発生しており、車種別重量の違いの影響は非常に大きい。この違いは地域と道路規格の違いであると考えてよいであろう。

(b) 大型車混入率の影響………ケース①、②、③の結果を図-14に示す。計算の前では、大型車混入率が大きくなると、大型車の連行、並走頻度が高くなり大きな応答値が発生しやすくなると予測したが、この結果で明らかのように、大型車混入率が松葉跨線橋のもの(14.4%)から、阪堺大橋のように2.7倍(38.5%)になっても平均最大応答値は高々約1.3倍にしか上昇しない。

(c) 車間距離の影響………ケース②、⑤、⑥、⑦の結果を図-15に併記した。この図から、渋滞時には車間距離の変化が応答値に敏感に影響していることがわかる。参考のために、ケース⑥(全車間距離を1mに詰めた場合)のケース⑦(自由走行時の車間距離)に対する比を表-18に示す。これを見ると車間距離を1mに詰めると、自由走行時に比べ約40%(外桁)～47%(中桁)も大きな平均最大応答値が現われる。よって、車間距離も重要な影響因子であると言える。

(d) 支間長の影響………支間長と平均最大応答値の関係は図-13から解るように、ほぼ線形関係にあると判断できる。この傾向から、最大応答値は大きな重量の自動車の混入によって発生し、それが集中荷重的に働いていることが想像される。

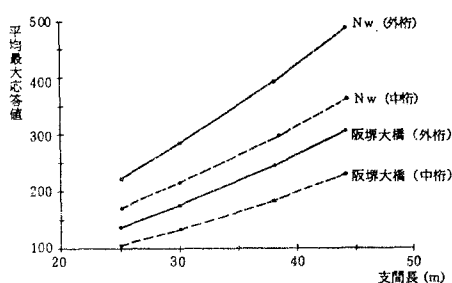


図-13 自動車重量特性の影響

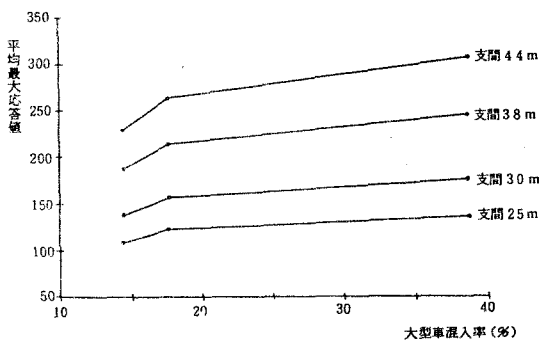


図-14 大型車混入率の影響

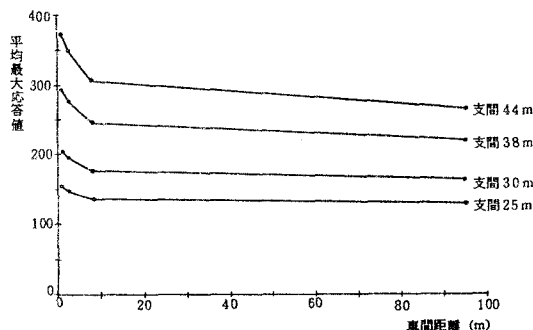


図-15 車間距離の影響

4. 現行設計荷重との比較

現在用いられている道路橋示方書¹⁾ではし荷重を、1等橋で、線荷重を5000kg/m、等分布荷重を350kg/m²と規定している。この値は、昭和31年に規定されたものであり、現在では過小ではないかと言われている。そこで、3章で述べた結果と現行示方書の荷重とを比較し、その違いについて考察する。

表-18 車間距離の影響

支間・替目桁	全車 1mづめ	自由走行時 相当	比
25m	外桁 154.0 中桁 122.4	130.3 97.4	1.182 1.257
30m	外桁 204.1 中桁 158.6	164.5 120.3	1.241 1.318
38m	外桁 292.1 中桁 223.9	219.4 158.1	1.331 1.416
44m	外桁 371.4 中桁 282.3	265.1 191.7	1.401 1.473

表-19 極値I型分布へのあてはめ

比較の方法は、渋滞時シミュレーションから得られた最大応答値が大型車が主桁の中央付近に必ず存在していると考えられ、これが線荷重的に作用し、他の車両が等分布荷重的に影響しているものと考えてよいと思われる。よって、これらの最大応答値は現行示

ケース	25m		30m		38m		44m	
	外桁	中桁	外桁	中桁	外桁	中桁	外桁	中桁
①	0.0572 116.581	0.0745 90.440	0.0503 156.615	0.0598 116.769	0.0347 219.846	0.0448 162.965	0.0278 276.328	0.0366 204.138
②	0.0197 172.675	0.0307 145.653	0.0169 240.889	0.0227 179.238	0.0130 336.990	0.0183 259.459	0.0110 423.435	0.0148 311.067
③	0.0601 105.404	0.0778 81.031	0.0455 135.557	0.0505 102.032	0.0323 186.335	0.0452 139.797	0.0261 232.021	0.0370 172.970
④	0.0575 89.420	0.0777 69.110	0.0434 114.125	0.0631 88.121	0.0365 164.543	0.0474 120.563	0.0285 199.830	0.0382 147.945
⑤	0.0619 129.825	0.0739 100.726	0.0480 173.624	0.0590 132.887	0.0332 248.579	0.0448 189.379	0.0269 317.200	0.0368 241.198
⑥	0.0566 135.328	0.0683 106.420	0.0438 182.642	0.0547 140.987	0.0315 265.347	0.0376 200.285	0.0258 340.826	0.0312 255.311
⑦	0.0584 111.062	0.0816 82.682	0.0494 145.406	0.0622 102.945	0.0330 192.730	0.0467 137.065	0.0280 235.738	0.0361 165.917

※ 上段：a 下段：u

方書と同じ荷重体系で発生しているものと仮定すると、現行示方書の荷重度、すなわち、線荷重を5000kg/m、等分布荷重を350kg/m²として計算される曲げモーメントに対する比を求めると、それらが現行示方書の設計荷重に対する荷重係数となる。ただし、抵抗強度のバラツキについては考慮していないので、厳密な意味での荷重係数とは言えない。

ところで、本研究は限界状態設計法を基本的に考えているので、最大応答値度数分布の累積確率が97.7%（標準正規確率の2σ値）に対応する値で考えることにした。そこで、最大応答値の分布関数から累積確率が97.7%になる応答値を3.6の結果から計算するするが、これらの結果には衝撃が含まれていると考えるのが妥当であろう。よって、活荷重度のみを比較するには上記応答値から衝撃分を差し引く必要がある。しかし、厳密に衝撃分を算定するのは困難である。よって、ここでは現行設計法で与えられている衝撃係数で計算される分を差し引くことにした。

表-19が最終的に得られた衝撃を含まない活荷重モーメントの極値I型分布の特性値である。各ケースについて累積確率97.7%に相当する応答値の荷重係数を計算したものが表-20である。これらを図示すると図-16～18のようになる。外桁に対する結果を実線で、中桁に対しては破線で示した。

これらの結果から次のようなことが考察できる。

① 通常渋滞の状態では、阪神高速道路ではほぼ現行設計荷重程度の換算活荷重状態であるが、阪堺大橋では約2倍にもなっており、橋梁にとっては非常に苛酷な荷重状態である。設計活荷重には地域特性を導入してもよいと考えられる示唆を与えている。

② 支間25m～44m程度の間では活荷重をほぼ一定と考えてもよい。

③ 大型車混入率の変動によって約20%程度、活荷重が変動する。

④ 平均車頭間隔が通常渋滞状態のものから突発渋滞状態のものに縮まると約10%増加する。さらに、約2m縮まるとやはり10%程度増加し、その増加関数

表-20 活荷重比 α

ケース	25m		30m		38m		44m	
	外桁	中桁	外桁	中桁	外桁	中桁	外桁	中桁
①	1.231	1.016	1.184	1.013	1.155	0.995	1.135	1.012
②	2.363	1.877	2.297	1.873	2.189	1.897	2.102	1.885
③	1.108	0.831	1.092	0.920	1.068	0.899	1.036	0.906
④	1.019	0.838	1.012	0.824	0.946	0.801	0.920	0.808
⑤	1.255	1.103	1.263	1.116	1.274	1.103	1.260	1.135
⑥	1.320	1.189	1.344	1.187	1.354	1.214	1.340	1.246
⑦	1.149	0.931	1.110	0.912	1.082	0.878	1.026	0.889

は非線形的である。

⑤ 外桁の結果はどのケースでも中桁よりも大きくなり、現行の標準設計では外桁が苛酷な活荷重作用を受けていると考えられる。

5. 結 論

本研究は橋梁の限界状態設計法を確立するには、荷重作用を明確にすることが基本であるとの観点から進めたものである。そのため、橋梁上の荷重実態についての調査の重要性を強調したい。本基礎研究の主な成果を以下にまとめる。

- (1) 自動車荷重の現場測定法について種々の方法を開発した。これら全ては橋梁を1つのハカリと考えた簡易測定法である。ただし、支間長、交通量、あるいは、橋梁の構造特性によって、使い分けなければならない。
- (2) 実測した橋梁はすべて一般国道上であり、国道上では都市高速道路上よりも重量の大きい大型車が通行していることがわかった。
- (3) そして、実測定荷重特性を用いて橋梁の渋滞時の応答シミュレーションを行い、その応答値と現行設計荷重による応答を比較し、活荷重係数について考察を加えた。大型車の混入率の高い橋梁では、2倍以上にもなることが判明した。
- (4) 自動車荷重は地域特性があり、さらに、交通流の影響が大きいことを示した。
- (5) 以上から、近い将来の限界状態設計法をより合理的にするには、実交通荷重特性を明確にする必要があり、荷重調査を広範かつ早急に行う必要がある。

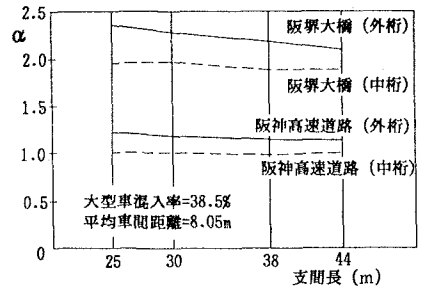


図-16 支間長と α

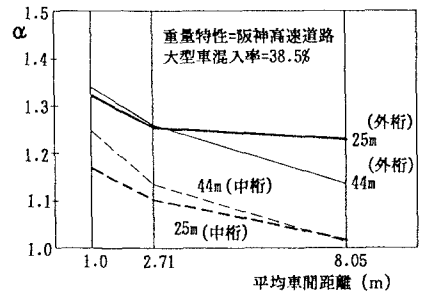


図-17 平均車間距離と α

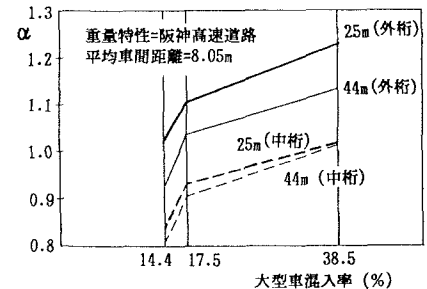


図-18 大型車混入率と α

謝 辞：本研究での現場実測に関して供用中の橋梁を使用させていただいた。建設省近畿地方建設局道路課、大阪府土木部道路課、および、大阪市建設局橋梁課に深甚の謝意を表します。実測およびデータ解析には大阪大学工学部土木工学科橋梁研究室の多数の卒研生の協力を得た。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 松井繁之：合成桁橋の安全性評価と荷重係数の試算、同上 第7章。
- 2) Y.MAEDA, S.MATSUI, Y.KANBARA and T.SUGIMOTO: Modeling of Probabilistic Vehicle Loads on Highway Bridges, Tech. Rept. of the Osaka Univ. Vol.35, No.1813, Oct. 1985.
- 3) 旧阪堺大橋の健全性に関する調査研究委員会：旧阪堺大橋の調査研究報告書、大阪市土木局・長大橋技術研究会、昭和62年3月。

- 4) Fred Moses : Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges, Transportation Engineering Journal, ASCE Vol.105, NO.TE3, May 1979.
- 5) 村越 潤、三木千寿、米田利博：影響線を利用した走行中の車両の重量計測方法、第41回土木学会年次講演会概要集 I-173、昭和61年11月
- 6) Peters R.J. : AXWAY - System to Obtain Vehicle Axle Weights, Proc., 12th ARRB Conf.,12(2), 10-18, 1984.
- 7) (社)日本道路協会・橋梁委員会・総括小委員会・限界状態設計法分科会・荷重検討班：限界状態設計法分科会荷重検討班第1次報告書、昭和61年11月。
- 8) 阪神高速道路公団：設計荷重（HDL）委員会報告書・第2編 活荷重分科会報告（別冊-1）・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61年12月。
- 9) 運輸省陸運局：自動車諸元表 1986年版、日本自動車協会、1986。
- 10) 全日本建設技術協会：建設省制定・土木構造物標準設計第23-28巻・活荷重プレートガーダー、昭和54年3月。
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編、昭和55年2月。

(1988年10月12日受付)