

鋼床版部材を用いた走行車輛の輪重推定

Estimation of Traffic Loads using Strain Recording in Orthotropic Steel Deck

小塩達也*, 山田健太郎**, 貝沼重信***, 小幡敏幸****, 古市亨*****

Tatsuya OJIO, Kentaro YAMADA, Shigenobu KAINUMA, Toshiyuki OBATA, Toru FURUICHI

* 工修 三菱重工業株式会社広島製作所 製鉄機械設計部土木建築設計課 (前名古屋大学大学院)
(〒733 広島市西区観音新町 4-6-22)

** Ph.D. 名古屋大学大学院 教授 工学研究科 土木工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

*** 工修 名古屋大学大学院 助手 工学研究科 土木工学専攻 (同 上)

**** 建設省中部地方建設局名古屋国道工事事務所 (前同名古屋国道工事事務所)
(〒467 名古屋市瑞穂区神穂町 5-3)

***** 東洋技研コンサルタント株式会社 (〒556 大阪市浪速区日本橋 4-5-21)

Heavy traffics cause fatigue damages in members of bridges. For rational management of bridge structures, it is necessary to know the frequency of trucks and their weight. In this research a way to estimate wheel loads passing on bridge in service was developed. Stress measurement was carried out for 24 hours using an automatic measuring system. The wheel loads of each vehicle were estimated by comparison between the measured strain obtained from strain gauges attached at longitudinal ribs of orthotropic steel deck and the calculated strain using finite element method. The frequency of wheel loads for 24 hours were presented.

Key Words : traffic load, fatigue, orthotropic steel deck, longitudinal rib

1. まえがき

高度経済成長期から大量に建設された橋梁は、21 世紀中盤にはその半数以上の橋が橋齢 50 年を超えるようになる。老朽化してゆく橋梁群を合理的に維持管理するには、橋梁をライフライン上の要としてとらえ、その重要度と健全度に応じて対策をとることが必要となる。各路線での橋梁の劣化被害の予測を確実なものとするために、路線ごとの交通荷重が簡便に把握できることが望ましい。大型車の割合、車重の大きさと頻度、各車種の混入率など、大型交通荷重の実態を把握することで、その路線の重要度を知り、橋梁が受ける損傷を予測できる。そこで、一般的な車両重量計を用いた大規模な交通荷重実態の把握も試みられている¹⁾。また、橋梁の部材で、自動車荷重によって生じるひずみ等を測定し、自動車走行による応答値から自動車荷重を推定する方法が研究されている。Moses²⁾らは橋梁部材に発生する応力の時刻歴応答波形より、自動車荷重を推定する方法を提案した。三木³⁾は鋼橋の部材を用いて車両重量等を推定する手法を示している。本研究で行う荷重推定の原理は、Moses らが提案した方法に習い、部材の影響線と、通過

荷重に対する実測応力値をもとに、橋梁上を通過する自動車荷重を推定するものである。車両、車輪単位での荷重を推定するには、輪荷重に敏感な部材に着目する事が望ましく、自動車の車輪を直接支える床版はこの点で輪荷重の推定に適している。鉄筋コンクリート床版においては、床版に生じたひび割れの開閉量の変化を測定し、通過輪重を推定する方法を示した、松井らの研究⁴⁾がある。これに対し、鋼床版は応力解析により影響線、影響面を把握する事が容易であり、鋼部材であることから応力測定も通常用いられるひずみゲージで可能である。そこで、本研究は鋼床版の縦リブに着目し、自動車走行時のひずみ波形を測定、これを解析することで、走行車輛の速度、輪重、軸距などの荷重状態を推定し、交通荷重の実態を把握するシステムの構築を目的としている。

2. 鋼床版部材での実働応力測定

(1) 測定に用いた橋梁

鋼床版デッキプレートを橋軸方向に補剛する縦リブの曲げ応力は、特にリブ直上を走行する自動車の輪重毎にピークを持つ応答波形を示す⁵⁾。この応力波形を測定、

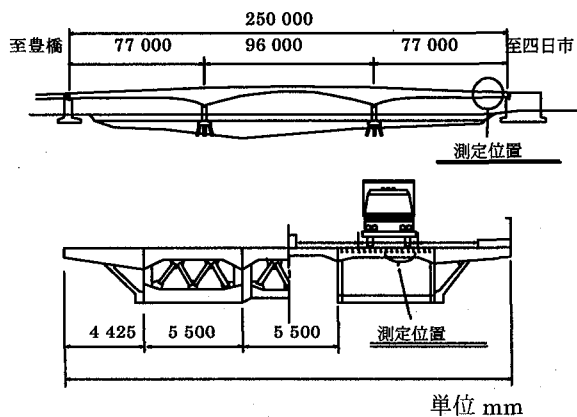


図1 測定に用いた橋梁

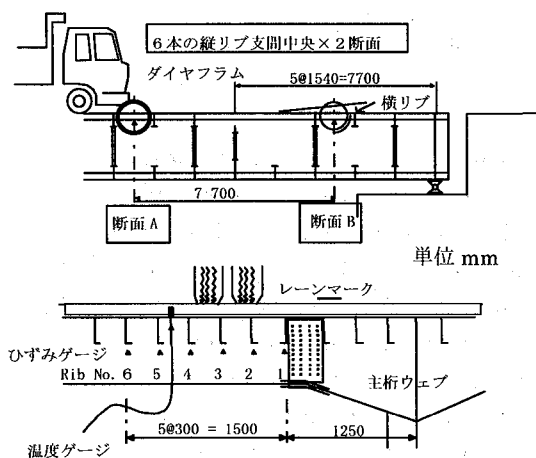


図2 ひずみゲージ貼付位置

解析することにより、走行した輪重を推定することが可能であると思われる。

本研究で応力測定の対象とした一般国道 23 号線港新橋は、昭和 39 年に供用が開始された橋長 251m の 3 径間連続の鋼床版箱桁橋である^{6), 7)}。この橋の交通量は多く、日交通量約 10 万台であり、大型車混入率約 50% と重量的にも厳しい交通条件下にある。港新橋の側面図及び一般断面図を図 1 に示す。車線数は上下線合わせて 6 車線で、上下線共に歩道がある。箱桁内には 7.0 m ~ 7.7 m 毎にダイヤフラムがあり、その間を 1.40 ~ 1.54 m 毎に 4 本の横リブが配置されている。縦リブは開断面のバルブプレート (JIS 規格での「球平鋼」) であり、縦リブ間隔は 0.30 m ~ 0.35 m である。

(2) 応力測定位置の選定

測定位置とひずみゲージ貼付状況を図 2 に示す。縦リブには直上の輪重による床版としてのたわみによる応力 (以下、床版系応力とする) の他に、主桁上フランジとしての曲げ応力 (以下、主桁系応力とする) も発生する。輪重推定のためには、測定応力から主桁系応力成分を除去し、対象輪重による床版系応力を用いて輪重を評価する必要がある。そこで、測定位置は主桁曲げモーメ

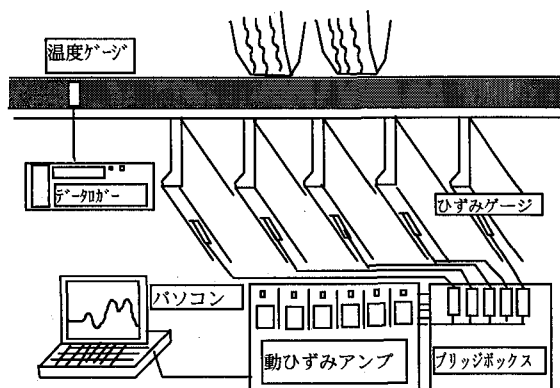


図3 測定システム

ントの小さい桁端部に近い床版パネルとし、車両のジョイント通過による衝撃が少ないと考えられる橋梁の出口側端部に決定した。

また、測定は 7.7 m 離れた 2 断面で行い、2 断面でのピーク発生時間差より走行速度を推定した。ひずみゲージは、橋軸直角方向の走行位置を推定するため、中央車線走行車輛の左輪重下となる 6 本の縦リブ下端に貼付した。また、アスファルト舗装の温度を測定するため、デッキプレート上 2 cm 程度のアスファルト舗装内に温度ゲージを設置した。

(3) 応力測定の概要

測定システムの概念図を図 3 に示す。ひずみゲージからの信号を動ひずみアンプで増幅し、デジタル動ひずみ計によりデジタルの時刻歴データとして記録し、 GPIB 回線を通じてパソコンのハードディスクに記録した。

1) 夏期の計測 (1996 年 7 月 29 日)

測定対象は 2 軸と 3 軸の荷重車 2 台 (時速 30, 60 km で走行速度を指定)、および任意に選別した一般大型車両とした。これらの車両による測定データをテストデータとして、輪重推定の推定プログラムを開発した。

2) 秋期の計測 (1996 年 10 月 16 ~ 17 日)

いずれかの縦リブのひずみがあるレベルを超えた場合にひずみ波形を短時間計測し、これを一台分の計測ファイルとする測定システムを開発した。サンプリングは計測した 2 断面の距離と平均車速から、サンプリング時間 5 msec (0.005 秒) で 2.5 秒間計測した。計測は 24 時間にわたって自動計測したが、今回は記憶装置の都合で、毎時 30 分を測定、残りの 30 分間でパソコンへデータを転送した。荷重車は 3 軸車のみを 12 回走行させた。

3) 冬期の計測 (1996 年 12 月 8 日 ~ 10 日)

計測日に夜間の通行止めが可能であったため、指定した載荷位置で荷重車 (2 軸、3 軸車) を停止させて応力を測定する静的載荷試験 (8 日深夜 ~ 9 日早朝) を行なった。また、秋期応力測定と同じシステムで 29 時間の長期間測定を行った。荷重車は静的載荷試験で用いた車両、積載状態でいった。

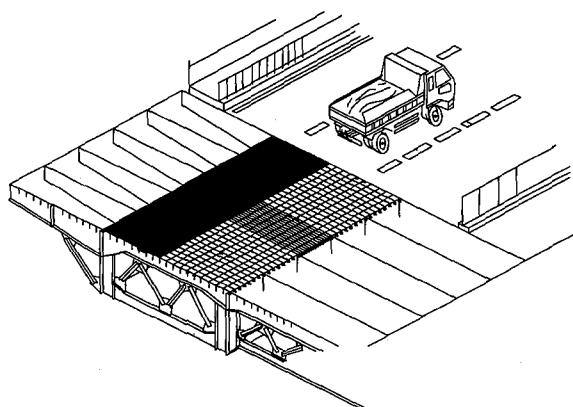


図4 有限要素モデルと実構造

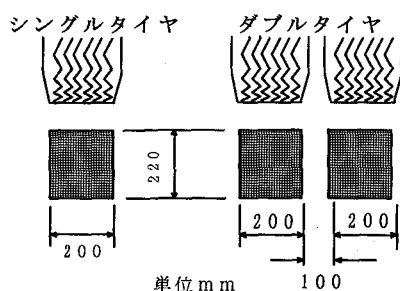


図5 タイヤ接地面の形状

3. 輪重推定方法の確立

(1) 使用した鋼床版の応力解析

縦リブ曲げ応力の影響面を求めるため、鋼床版主桁ウェブ間 5.5m、ダイヤフラム間 7.7m の鋼床版パネルを有限要素プログラム上 (COSMOS/M) で図4に示すようにモデル化した。デッキプレートは4節点シェル要素とし、横リブ、縦リブ及び、ダイヤフラムの一部を3次元はり要素とした。境界条件は、主桁ウェブ位置を全面拘束とし、ダイヤフラムと横リブに付加された補強トラスの格点位置で鉛直方向節点変位を拘束した。主構造部材である主桁上フランジ応力は応力解析上は無視し、床版のみの部分モデルとしている。節点数は1443個、要素数はシェル要素1368個、梁要素862本であり、最小メッシュの大きさはシェル要素で5×11cm、梁要素で長さ11cmである。なお、デッキプレートは鋼板としての剛性のみを評価し、アスファルト舗装は考慮していない。

モデル化した範囲のデッキプレート上の各節点に単位荷重を載荷し、着目するリブの応力影響面を作成した。次にタイヤによる分布荷重を図5に示すように、シングルタイヤについて22×20cm、ダブルタイヤについては22×20cmを10cm間隔で2面と仮定し、それぞれのタイヤが1tonfの輪重をもつとしてこれらの単位荷重による応力影響面を作成した。

(2) 輪重推定の原理

- ・ 走行速度、走行位置、軸間距離及び車種の判別
- 測定した6本のリブでのひずみ波形のうち、いずれか

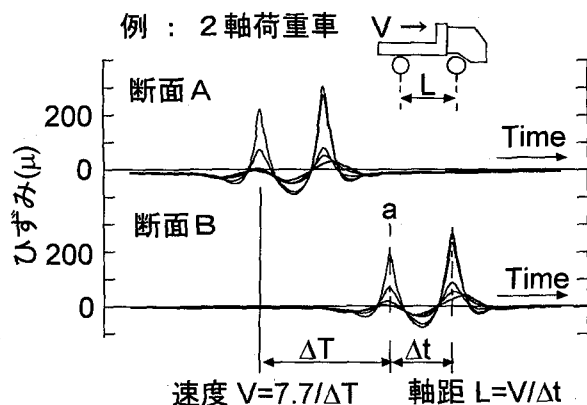


図6 2軸荷重車による波形の例

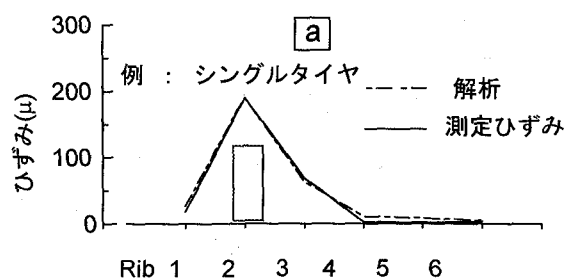


図7 B断面を前輪が通過する時のひずみ分布

のリブでピークが生じたときを輪荷重の通過時刻とし、2断面間で車輪通過の発生パターンを比較する。これから同じ車輪の通過時刻を判定し、2断面の時間差から走行速度を計算した。また、同一車両のピーク発生の時間差から軸間距離を計算する。この例を、2軸の荷重車の場合について図6に示す。この図は各断面で6点ある測定点の応答波形を重ねて表示した。2軸荷重車が断面Aを通過後、 ΔT 時間後にB断面を通過する様子がよくわかる。車種判定はピーク発生間隔から得られた軸距のパターンを、大型自動車のカタログ値などを参考にして作成した軸数、軸距のリストと照合して行う。車種(たとえば3軸車なら3軸前タンデムローリー、3軸後タンデム貨物車等)により、操舵輪が2軸であるかどうかを判定し、前がタンデム軸の車であれば前2輪がシングルタイヤ、後はダブルタイヤというようにタイヤ形状を判定する。

精度よく輪重を推定するには、断面通過時の車輪の位置を推定する必要がある。車輪の通過した位置は最大応答を示したリブ付近にあり、車輪の中心位置(以後走行位置とする)は少なくともそのリブの左右のリブ間にある。各リブの曲げ応力の影響面から、単位輪重に対する任意の走行位置での隣り合うリブの応力分布が計算できるので、実測された波形での車輪通過時の応力分布の形状を解析による応力分布形状と比較し、走行位置を推定する。今回の推定では、走行位置を5cm単位で仮定し、最小2乗法を用いて、最も分布形状に近い走行位置

をタイヤの推定走行位置とした。図6の測定波形中から前輪通過時の6本の縦リブの実測応力分布を、推定走行位置での解析によるひずみ分布に重ねたものを図7に示す。この図は、最大ひずみを生じた2番目のリブのひずみ値に合うように解析側を定数倍し、リブ間のひずみ比の相似性を示したものである。

・主桁系応力の取り扱い

実測に用いた鋼床版は、主桁フランジとしても機能するため、主桁の曲げ応力による圧縮力を受ける。測定位置を桁端部にとることで、この主桁系応力は床版系応力に対して小さくなるものの、橋面上の交通の状態によっては無視できない場合もある。また、長時間の自動測定の期間中に、昼夜間の橋面温度の変化による温度応力などによって、ひずみゲージの0点（橋面に自動車荷重がない時を基準）が見かけ上移動する事も考えられる。しかし、主桁系応力の影響線は床版系応力の影響線に対し2つの測定断面の位置ではなだらかな形状であり、車両1台が測定点の前後を通過する程度の時間内では大きく変動がなく、また、ひずみゲージの0点の移動も急激に生じる事はないと考えられる。そこで、これらの応力成分の値は輪重が測定断面を通過する前後数 m 程度の範囲では一定値であると仮定し、この範囲内でひずみの変化率が0に近くなる、すなわち波形が平らになる時のひずみ値を平均することで得られると考えた。図6の断面Bの波形はこの操作を各測点の波形ごとに行ったものである。

・輪重推定

輪重値は6本のリブのうち最も大きいピークを示しているリブでの測定値と、推定した走行位置、タイヤ形状で輪重が1tonfとしたときの解析応力値との比を基に推定する。最大値を示すリブのみを輪重値の推定に用いるのは、横方向同時載荷、すなわち推定する輪重以外の車輪が隣を走行する場合の影響を無視できるようにするためである。図7からわかるように、この鋼床版の場合、走行位置が縦リブ2本分（60cm）程度測定点から離れると、その測定点の曲げ応力にはほとんど影響がない事がわかる。

各輪の軸距が十分離れていれば、各輪によるピーク値は独立であると考え、ピーク時刻での実測応力値と、解析応力値との比を推定輪重値とする。しかし、軸距が短い場合は、各輪の応力値は前後の車輪の輪重に影響されるため、実測のピーク応力値から前後の輪重の影響を除去する必要がある。車輪iが直上を通過するときに測定されるピーク応力値 σ_i は、次のa、bの和である。

- a. 着目する車輪iを単独で載荷したときの応力値 σ_{ii}
- b. 車輪iが直上を通過する時点で隣接輪jを単独で載荷した場合の応力値 σ_{ij} 、ここで、jの載荷位置は測定点から車輪i-jの軸間距離だけ離れている。

$$\sigma_i = \sigma_{ii} + \sum_{i \neq j} \sigma_{ij} \quad (\text{式1})$$

σ_{ij} は、隣接輪jの直上単独載荷時の応力値を用いて次のように表される。

$$\sigma_{ij} = K_{ij} \sigma_{jj} \quad (\text{式2})$$

ここで K_{ij} は測定点直上載荷時の値を1として無次元化した応力影響面より得られる。これは、車輪iが直上にある時点の車輪jの位置（推定走行位置、推定軸距を考慮）を載荷点とする影響値である。ここで、 $K_{ii}=1$ である事を考慮すれば、次のマトリクス方程式が得られる。

$$\{\sigma_i\} = [K_{ij}]\{\sigma_{ii}\} \quad (\text{式3})$$

この方程式を解く事により、隣接軸による相互干渉を受けたピーク応力値 σ_i を、各車輪が単独で走行した場合の応力値 σ_{ii} に分解できる。分解した応力値と、単位輪重による解析応力値との比を推定輪重とする。

4. 荷重車の輪重推定結果と考察

(1) 動的載荷試験

輪重推定に用いる解析応力値は、舗装の効果などを考慮していないので、輪重を実測した車両に対し応力測定、輪重推定を実施し、キャリブレーションを行う。荷重車は荷重車は2軸および3軸のダンプトラックを用い、砂利を積載して一般的な積載状態の上限程度に調整した。荷重車の形態と、タイヤの接地状態を図8に示す。

荷重の実測は一般的な計量所で行った。計量は、計量台に前軸のみ、後軸のみ載荷し、軸重を測定、軸重の半分を輪重とする。3軸車後輪は後前軸のみの載荷ができないため、後2軸の重量、後後軸の軸重を計量し、後前軸重は（後2軸の重量）-（後後軸重）とした。

荷重車は、一般車の通行規制を行なわず、通常の供用下で時速30km～60kmで走行させた。

(2) 静的載荷試験

測定対象車線を車線規制し、荷重車を通常の走行位置に停止させ、ひずみを測定、輪重を推定する。この試験は冬期の深夜のみ行なっている。

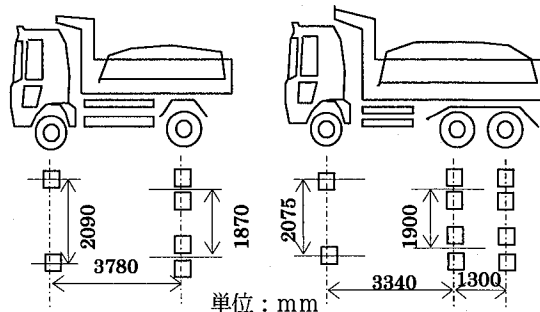


図8 荷重車の形態とタイヤの接地状況

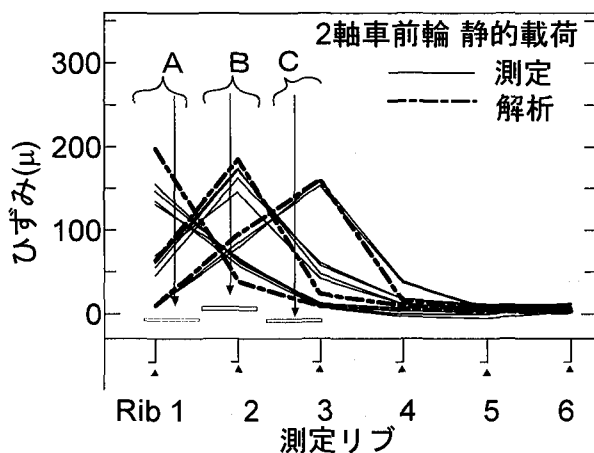


図9 輪重直上載荷時の各リブのひずみ分布

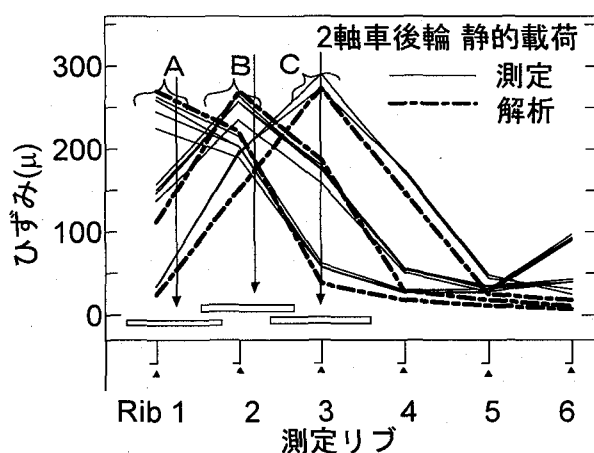


図10 輪重直上載荷時の各リブのひずみ分布

(3) 軸距，走行位置

推定軸距は 3 軸荷重車の後輪のタンデム軸距 1.3m，3 軸荷重車の前後軸間 3.34m，2 軸荷重車の軸距 3.78m に対して，誤差 10cm 以下の精度で推定された。推定走行位置は，荷重車走行時のビデオ撮影，静的載荷試験での載荷位置と比較して，±5cm の誤差で一致した。

静的載荷試験の結果から，2 軸荷重車の車輪が着目断面に載荷点 A，B，C で載荷されたときの 6 本のリブのひずみ分布を図 9，図 10 に示す。載荷位置 A で解析と実測のひずみ分布にずれが見られたことを除けば，ひずみ分布の形状は解析と実測でほぼ一致している。6 本のリブのひずみ分布は，その断面のたわみ形状と相似形であると考えられる。前輪のシングルタイヤと後輪のダブルタイヤとは載荷幅が異なるため，たわみ形状も異なり，ひずみ分布の形状が前輪と後輪で異なってくる。

(4) 荷重車の輪重推定結果と考察

荷重車の推定輪重値の平均と計量所での実測輪重値の比較を表 1 に示す。また，推定輪重値と実測輪重値の関係を図 11a～d に示す。

表 1 荷重車の推定輪重値及び総重量の平均

	軸種	推定値 平均 tonf	標準 偏差 tonf	実測値 tonf	実測 推定平均
2 軸荷重車					
夏期	前輪	4.16	0.44	3.57	1.17
	後輪	9.06	0.70	7.61	1.19
	総重量	26.45	1.81	22.47	1.18
冬期	前輪	2.56	0.47	3.79	0.68
	後輪	6.79	0.45	8.19	0.83
	総重量	18.69	1.52	23.97	0.78
冬期 静的	前輪	3.25	0.24	3.79	0.86
	後輪	7.83	0.29	8.19	0.96
	総重量	22.17	1.05	23.97	0.92
3 軸荷重車					
夏期	前輪	3.54	0.46	2.84	1.25
	後輪	5.37	0.49	4.46	1.20
	後輪	4.82	0.43	4.02	1.20
	総重量	27.46	2.06	22.80	1.20
秋期	前輪	2.64	0.32	2.64	1.00
	後輪	4.21	0.49	4.07	1.03
	後輪	3.95	0.54	3.45	1.14
	総重量	21.61	2.45	20.31	1.06
冬期	前輪	2.23	0.46	2.81	0.79
	後輪	3.85	0.52	4.71	0.82
	後輪	3.64	0.36	4.23	0.86
	総重量	19.44	2.43	23.89	0.81
冬期 静的	前輪	2.67	0.23	2.81	0.95
	後輪	4.10	0.00	4.71	0.87
	後輪	4.13	0.04	4.23	0.98
	総重量	21.81	0.55	23.89	0.91

1) 動的載荷試験

- 同じ載荷条件であっても，ひずみ値は一定の値を示さず，推定輪重値は 1tonf のオーダーでばらつきが見られた。ばらつきの主な要因としては，大型車両は走行時の緩衝装置上の荷重の上下動により，タイヤ接地圧が変動し，輪重値が変動していることが考えられる⁸⁾。
- 実測／推定平均の値は，アスファルト舗装の温度が低い冬期ほど大きくなっている。鋼床版部材はデッキプレート上のアスファルト舗装の温度により発生応力度が変化することが報告されている⁸⁾。本研究での応力解析では舗装の影響を考慮していないため，低温時に床版の剛性が増加し，実測ひずみ値が小さくなった場合には，輪重値を小さく推定することになる。

2) 静的載荷試験

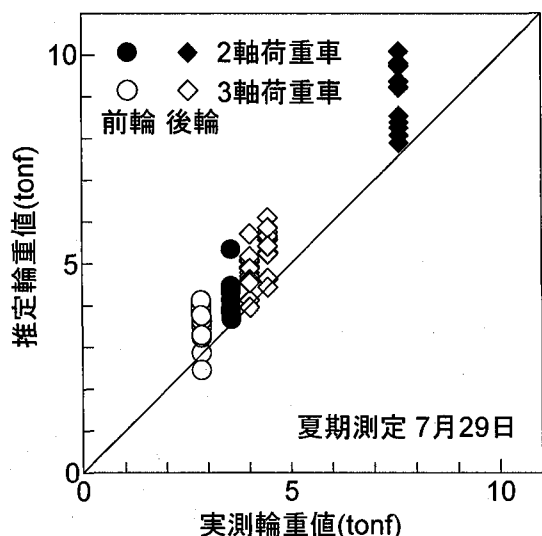


図 11a 荷重車輪重値・夏期

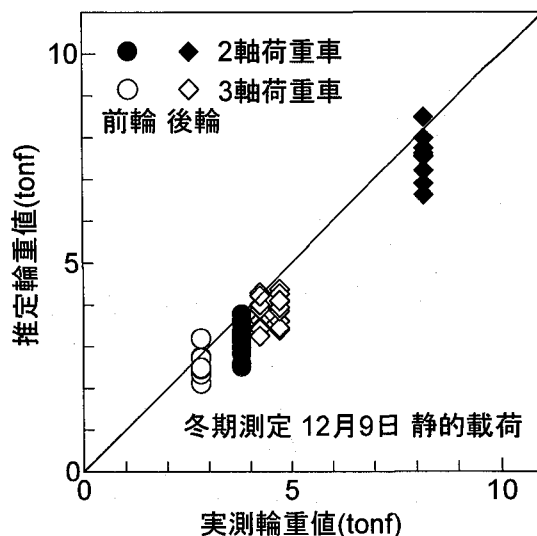


図 11d 荷重車輪重値・冬期

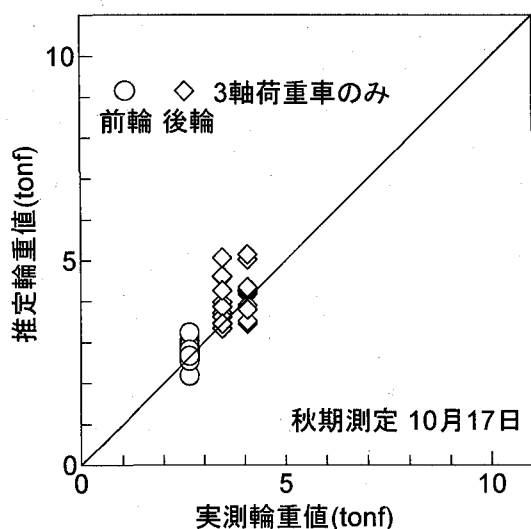


図 11b 荷重車輪重値・秋期

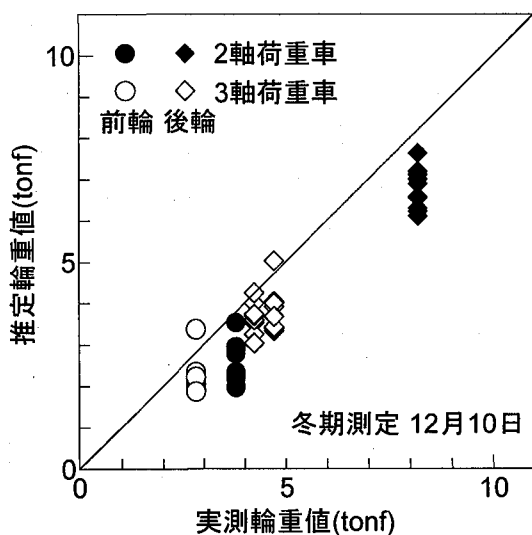


図 11c 荷重車輪重値・冬期

舗装の温度は動的載荷試験時より低かったが(動的：10～11時，9～12℃に対して，静的：2時～5時，5～8℃程度)，動的載荷時よりも大きい推定輪重値を示し，ばらつきも少なかった．このような静的載荷時の推定輪重値の増加，すなわち，ひずみ応答値の増加は，文献8)の報告にあるように，動的載荷時には粘弾性体であるアスファルト舗装が，載荷速度に依存した弾性的な剛性を持つが，荷重が低速で移動または停止する際には，載荷速度が高いときよりも粘性体的に変形し，弾性体としての剛性が低下する性質によるものであると考えられる．

荷重停止時の精度が走行時と異なるということは，推定精度が載荷速度によって変化することも考えられ，渋滞時等で生じる一般車の低速走行時と通常の走行時では，推定精度が異なってくることも考えられる．

3) アスファルト舗装の温度と推定精度

夏期，秋期および冬期の測定期間中に，図3に示したB断面付近のアスファルト舗装内部の温度ゲージにより舗装の温度を測定した．測定した舗装温度の24時間の変化を図12に示す．午前12時の時点でそれぞれ，夏期36.1℃，秋期26.4℃，冬期13.6℃であった．アスファルト舗装の温度と推定輪重／実測輪重の関係を図13に示す．低温になるにつれて発生応力が小さくなるため，推定輪重が低下していることがわかる．同じ温度での輪重のばらつきの範囲は各推定輪重の平均に対して1～2割程度であった．推定に用いた解析値はアスファルト舗装の剛性を考慮しないものであるから，推定輪重と実測輪重の比は，解析応力値(アスファルトなし)／実測応力値(アスファルトあり)とほぼ等価であると考えて良い．また，ほぼ30℃を超える高温領域では，推定輪重値の温度依存性が小さくなる傾向がある．これは，30℃を超える温度域で，アスファルト舗装の床版剛性に対する寄与率が小さくなったためと考えられ，前述の鋼床版での応力測定(報告8)と傾向が一致する．

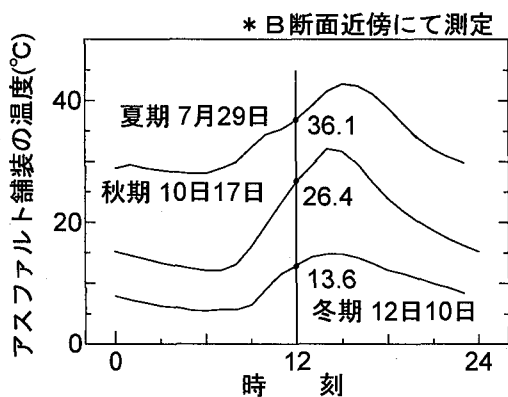


図 12 アスファルト舗装の一日の温度変化

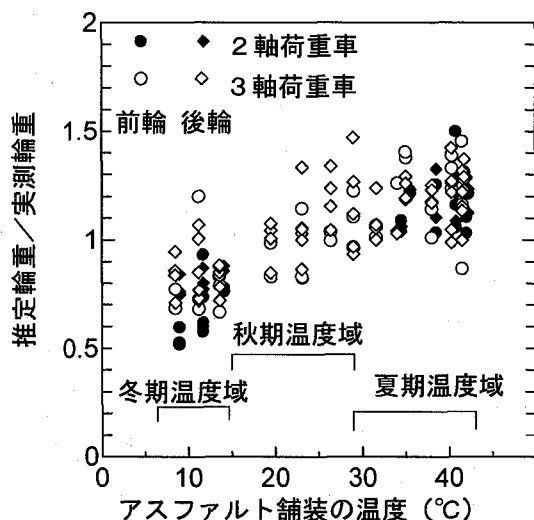


図 13 舗装の温度と推定輪重／実測輪重

(4) 荷重車の推定結果のまとめ

以上、本研究の測定、推定方法により、走行車両の軸距や輪重の推定が可能であることが示された。

また、夏、秋、冬の3回の応力測定を通じて、推定輪重値は推定値の平均に対して1~2割程度のばらつきがあり、さらにこの値がアスファルト舗装の温度に依存して変化することが確認された。

推定値のばらつきや季節変動には以下のような要因が考えられる。

a. 解析側の条件、推定システム側の精度

応力影響面を算出する際の精度（アスファルト舗装、拘束条件の評価）、タイヤ形状、接地圧分布、デッキプレートへの荷重分配の仮定や、走行位置の推定の精度等が輪重の推定精度に関係する。

b. 荷重側の条件、輪荷重の実測値の精度

たとえば、計量所における車両重量と軸重の計測では、別々に計量した軸重の合計と別に計量した総重量とは必ずしも一致せず、0.01~0.40tonfの誤差を生じていた。従って、推定の真値とする実測重量値も、比較的大きい測定誤差があることになる。また、重量計測時と実走行

時では、車両の緩衝装置上の動きなどにより、タイヤ接地圧は常に変化している。さらに、ウェイトとした砂利の偏載、橋面上の舗装の不整や横断勾配の影響によっても、実際の輪重は変化すると考えられる。

しかし、夏、秋および冬期の推定結果から、推定輪重値にはばらつきや温度による推定精度の変化があるものの、一般車の輪重を推定するには、荷重車輪重の実測値／推定値の平均的な値を推定値に対する係数とし、推定値を補正することで、一般車両の輪重推定が可能であると考えられる。ところで、走行車両による床版系の応力は荷重の載荷速度によって変化し、例えば、時速10kmと時速60kmの走行速度では、発生応力度が異なるといった報告^{7),8)}がある。しかし、今回の動的載荷試験での荷重車の走行速度30km~60km程度の範囲では、載荷速度による輪重値の定量的な変化は確認されず、載荷速度の影響があったとしても、推定輪重値のばらつきの範囲に含まれていると考えられる。

5. 一般車両の推定結果

・輪重値の補正

前述したように、輪重の推定値は、アスファルト舗装の温度の影響を受ける。そこで、秋期、冬期の一般車の推定輪重の集計に際し、荷重車の推定結果から実測値／推定値の値（図13で比較した値の逆数）の平均的な値を補正係数として推定値を補正した。この補正係数を輪重補正係数と呼ぶことにする。ここで、秋期測定では推定値と実測値がほぼ一致すると考え、輪重補正係数を1.0とし、冬期測定では1.2とした。

今回の補正は簡便に秋期、冬期と測定した季節ごとに補正を行ったが、荷重車を用いた測定は、一般車両の測定と平行して、供用下で行うことができるので、測定時に十分な数のキャリブレーションを行えば、載荷速度やアスファルト温度などに応じた補正も可能であると考えられる。

(1) 車種別の集計結果

・車種別台数と総重量平均値

複数の車両による軸間距離のパターンから前軸（車頭）、軸数、車種を判別するプログラムを作成した。これを用いて、秋期12時間+冬期12時間の計24時間に得られたデータを用いて輪重推定を行い、車種分類を一台毎に判定し、輪重、総重量、軸距等の頻度分布を作成した。輪重値は前述の補正係数を乗じた値を推定値とした。分類した車両約9300台について、軸距の平均値、輪重、総重量の平均値、混入率を表2に示す。この表での混入率は判別が可能であった全測定車両に対する割合である。2軸車両は軽量のものが多いため、今回のシステムでは測定されない車両が多く、重量が大きいもののみが測定されている。重量、頻度の大きい3軸トラック類は、一般的に貨物輸送の中心となっている車種である。また、測定点が中京工業地帯の臨港部であることから、総重量

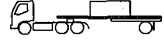
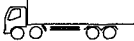
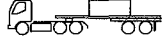
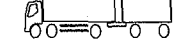
が大きいセミトレーラー類も多い。今回の測定では、記憶装置の都合で大型車の全数を測定することはできなかったが、全交通量に対する大型車混入率をたとえば50%（この路線の実績値）とすると、測定台数から逆算しても、総交通量は約 $9300 / 0.5 = 18600$ 台/車線となり、この路線の重交通の程度がわかる。

なお、全測定車両中の最大総重量は6軸セミトレーラーの72.94tonfであった。

・各輪の輪重平均値

測定台数が100台を超える車種で平均輪重値が4tonfを超えるものに、5軸および6軸のセミトレーラートラックがあった。これらの車種は、圧延鋼板ロールや鋼部材等、特に重量物を運搬することが多い。車両制限令による軸重制限が10tonf、輪重値にして5tonfであり、これらの車種は、軸重制限の上限値に軸重を調整した積載状態で走行することが多いと思われる。

表2 一般車両の集計結果

車 種 分 類	第 n 軸距 Ln (m)					第 n 輪重 Wn (tonf)						総重量 tonf (標準 偏差)	台数 混入 率 %
	L1	L2	L3	L4	L5	W1	W2	W3	W4	W5	W6		
2-1 2軸小型貨物 	2.59					2.05	2.24					5.42 (3.26)	213 2.30
2-2 2軸貨物 	4.60					3.39	2.26					7.22 (3.42)	3028 32.69
3-1 3軸タンク・トラクター 	3.28	1.28				2.39	3.30	2.98				17.11 (6.41)	550 5.94
3-2 3軸貨物後タデム 	5.49	1.25				2.27	3.56	2.48				16.58 (5.10)	1801 19.45
3-3 3軸ローリー前タデム 	1.67	3.67				2.40	2.22	3.61				16.06 (5.59)	427 4.61
3-4 3軸貨物前タデム 	1.68	5.71				1.67	1.75	2.90				12.59 (3.08)	1075 11.61
3-5 3軸セミトレ 2+1 	3.70	8.52				2.28	3.44	3.32				18.02 (4.81)	556 6.00
4-1 4軸セミトレ 2+2 	3.28	6.66	1.31			2.71	3.33	3.25	2.85			24.22 (8.83)	783 8.45
4-2 4軸セミトレ 3+1 	判定されず												0 0.00
4-3 4軸前後タデム 	1.40	4.51	1.18			1.75	1.38	2.45	2.51			16.07 (6.20)	351 3.79
5-1 5軸セミトレ 3+2 	3.07	1.32	6.75	1.25		2.40	3.11	3.15	4.12	4.05		33.40 (14.03)	180 1.94
5-2 5軸セミトレ 2+3 	2.95	5.45	1.25	1.23		2.39	2.94	2.39	2.44	1.73		23.78 (8.76)	10 0.11
5-3 3軸後タデム+2軸トレー 	4.70	1.28	5.71	2.41		2.10	3.52	3.28	3.23	3.18		30.61 (10.32)	37 0.40
5-4 3軸前タデム+2軸トレー 	1.69	5.19	4.11	4.19		1.78	1.79	3.06	2.24	2.16		22.09 (5.05)	27 0.29
6-1 6軸セミトレーラー 3+3 	3.02	1.31	5.55	1.25	1.23	2.65	3.66	3.62	4.05	4.14	3.39	43.02 (14.38)	224 2.42
合計 9262 台 / 24 時間													

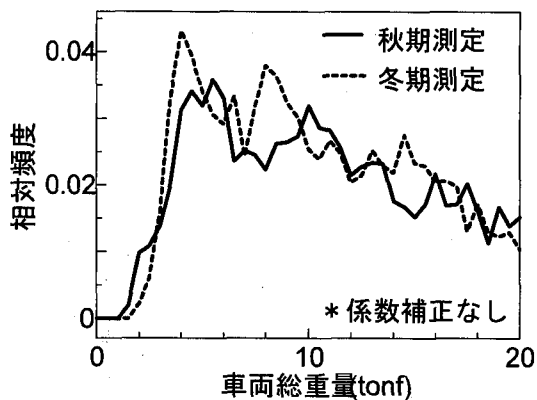


図 14 車両総重量の相対頻度分布

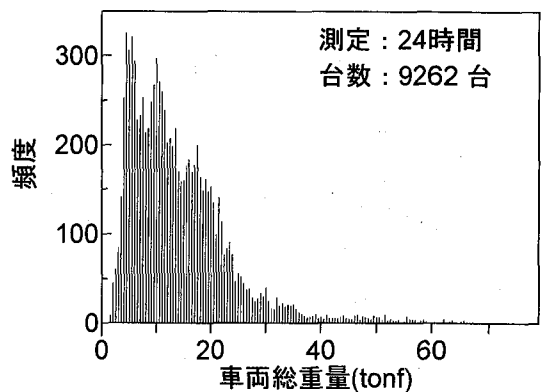


図 16 総重量頻度分布

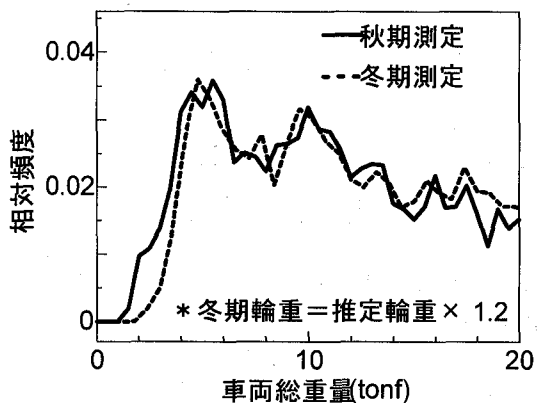


図 15 車両総重量の相対頻度分布

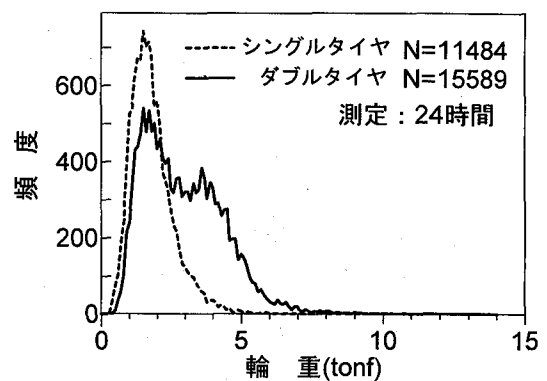


図 17 輪重の頻度分布

(2) 全車種の集計結果

1) 総重量の頻度分布

全 24 時間、9262 台について、輪重、総重量、走行位置、軸距、走行速度のデータを集計し、それぞれの頻度分布を作成した。輪重値の補正方法の検証のため、秋期、冬期の総重量の相対頻度分布の最頻値の周りを、補正前、補正後でそれぞれ図 14、図 15 に示す。

補正により、分布形状はほぼ一致した。測定日はともに平日であり、交通のパターンが同じと考えられる。頻度分布形状が相似形となるとことから、この補正方法で、秋、冬 2 回の測定結果の集計が可能であると判断した。

測定車両 9262 台について集計した総重量頻度分布を図 16 に示す。これは峰をいくつか持つ分布形状を示している。総重量は車種ごとに特徴的な分布の峰を持つため、このような形状が現れると考えられる。

2) 輪重の頻度分布

シングルタイヤ 11484 個、ダブルタイヤ 15589 個について集計した輪重の頻度分布を図 17 に示す。シングル、ダブルタイヤ共に、最頻値は 1.5tonf 程度であった。大型車両の輪重値は車両構造令の軸重制限 10tonf により、5tonf が法的な上限の輪重値となる。シングルタイヤは主に前輪であり、車両の操舵装置の関係から一般にダブルタイヤである後輪より輪重値は少なく、空車、積

載の状態による変化が少ない。これに対してダブルタイヤは、駆動輪および積載荷重を支える車輪であり、車両の積載状態に依存して変化することが多い。

輪重頻度分布にはこれらの車両構造による分布形状の違いが現れ、シングルタイヤでは単峰分布、ダブルタイヤでは双峰分布となっている。

3) 走行位置

走行位置の頻度分布を図 18 に示す。走行位置はタイヤ中心で整理した。最頻値はシングルタイヤ、ダブルタイヤともにリブ 2 とリブ 3 の間にあるが、シングルとダブルでは 10cm 異なる。この差は、大型車の前後輪でのトレッド（自動車左右輪の接地点の幅）の差によるものであると見られる。

分布形状は、シングル、ダブルタイヤともに最頻値から 30cm 右に小さい峰があった。測定地点でのアスファルト舗装はわだち掘れが確認されており、車線規制を行った冬期の静的載荷試験時に、橋面上でアスファルト舗装のわだち掘れの位置を計測したところ、図 19 のようであった。測定した場所では、車線幅が狭いため、交通量が多いときなど、左車線の車両を意識すると、輪重を計測した中央車線では、右よりに走行する傾向がある。したがって、走行位置分布の最頻値はダブルタイヤが図 19 のようにわだちの 2 つの谷に完全に載るような場合であり、右側の小さい峰は、車両が右より走行する際に、

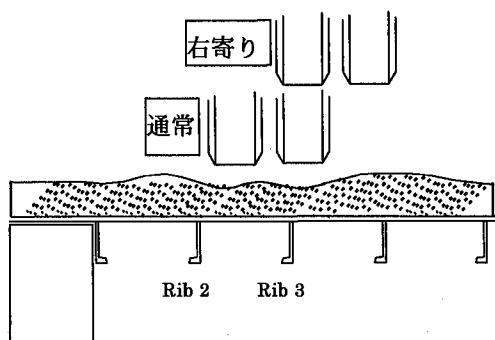


図 19 アスファルト舗装のわだち掘れ

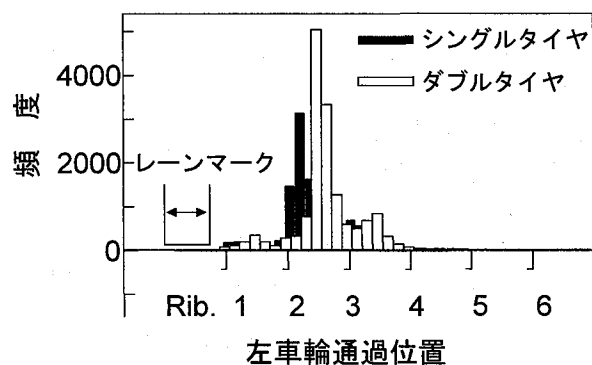


図 18 走行位置頻度分布

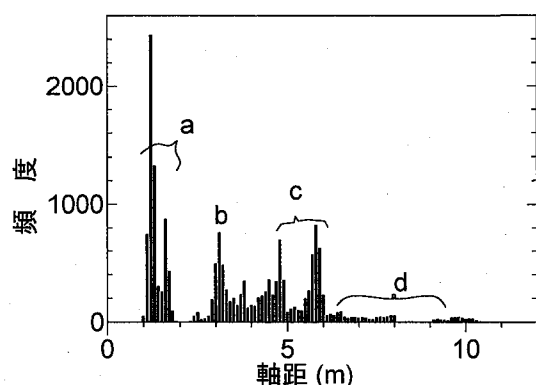


図 20 軸距頻度分布

後輪ダブルタイヤの左側が、わだちの右側の谷に載った場合であると考えられる。

4) 軸距

測定全車両について軸距の頻度を集計したものを図 20 に示す。車両の軸距は車種ごとに特徴的な値を持ち、軸距の頻度分布は、測定車両中の車種の構成割合によって形が決まる。一般的な車両形態から類推すると、図の分布の峰は以下のような車両によるものと考えられる。

a) 2m 以下：1.3m 程度が後輪タンデム、1.8m 程度が前輪タンデム軸間。

表 3 輪重が 5 トンを超える車両の数

車 種	過積載 台	総数 台	過積載率 %
2-1 2 軸小型貨物	0	213	0.0
2-2 2 軸貨物	115	3028	3.8
3-1 3 軸ダンプ・トラクター	77	550	14.0
3-2 3 軸貨物後タンデム	263	1801	14.6
3-3 3 軸ローリー前タンデム	51	427	11.9
3-4 3 軸貨物前タンデム	29	1075	2.7
3-5 3 軸セミ 2+1	35	556	6.3
4-1 4 軸セミ 2+2	156	783	19.9
4-2 4 軸セミ 3+1	0	0	
4-3 4 軸前後タンデム	9	351	2.6
5-1 5 軸セミ 3+2	70	180	38.9
5-2 5 軸セミ 2+3	1	10	10.0
5-3 3 軸後タンデム+2 軸トレー	10	37	27.0
5-4 3 軸前タンデム+2 軸トレー	1	27	3.7
6-1 6 軸セミトレー 3+3	94	224	42.0
合 計	911	9262	9.8

b) 3m 程度：2 軸車、トラクター、ダンプなど短い 3 軸車の前軸と後軸間。

c) 5m 程度：長い 3 軸車の前後軸、セミレーラーのトラクター・トレーラーの軸間。

d) 9m 程度：長めのセミトレーラーのトラクター後軸とトレーラー軸間。

なお、測定中に、一部の一般車両を同時にビデオ撮影し、車種判定の結果などを検証したが、おおむね良好であった。

5) 5tonf を超える輪重について

車両制限令による最大輪重 5tonf を超える輪重を持つ車両を過積載車両と仮定し、法令制限の超過率を車種別に集計した。測定された過積載車数、車種別の超過率を表 3 に示す。ここで、車種別の過積載率は、車種別測定総数に対する過積載の割合である。セミトレーラー類や 3 軸車類は特に過積載率が高く、これらは台数も多い。すなわち、法令制限の上限付近に貨物を搭載した車両が頻繁に走行しているのが分かる。

法令制限値を超える輪重を示す車両を過積載車両と仮定すると、過積載車は全測定車両 9262 台中、911 台、全測定車両に対する過積載率は 9.8% であった。

6. まとめ

1) 鋼床版部材を用いた交通荷重状態の推定方法を構築した。この方法では、鋼床版上に 2 断面の測定断面を設け、同じ断面の隣り合う複数の縦リブにひずみゲージを貼付し、走行荷重によるひずみの時刻歴応答波形を測定した。この波形のピーク時刻から、輪荷重の断面通過時刻を検出し、断面通過時刻より、走行速度、軸距を推定し、軸距の発生パターンにより、先頭輪、

車種、タイヤ形状を判定した。また、断面通過時刻におけるひずみ状態と応力解析によって得られた応力影響面との比較により、走行位置、輪重を推定した。

2) 荷重車を用いた動的載荷試験、静的載荷試験を行い、本研究で確立した推定方法の有効性を示した。走行速度、軸距、走行位置は精度よく推定できることが示された。また、荷重車の既知輪重に対する推定結果の分析などから、大型車両の走行時には輪重値が変動すること、また、載荷速度、およびアスファルト舗装の温度によって縦リブの発生応力に変化することが示された。さらに、荷重車の推定結果に基づくキャリブレーションを一般車両の測定と平行して多数行うことで、測定時に十分な数のキャリブレーションを行えば、載荷速度やアスファルト温度などに応じた補正も可能であることを示した。

3) 大型車両が測定点を通過するたびに、ひずみの自動測定を行うシステムを試験的に構築し、長時間の連続自動測定を行った。測定車線における大型車の車種別混入率、総重量頻度分布、走行位置頻度分布など、測定点における大型車交通の特性を把握した。測定地点では、測定されただけでも1日9000台/車線程度の大型車が通行しており、この中では3軸車種の頻度が最も高かった。また、積載制限値に近い輪重を持つセミトレーラー類が多数走行しており、頻度、重量ともに、道路構造物が厳しい活荷重条件下にあることが判明した。

謝 辞

本研究では、建設省名古屋国道工事事務所、道路保全センターのご理解とご協力、進藤泰男氏をはじめとする東洋技研コンサルタントの皆様、東京測器研究所、名古屋大学山田研究室の学生の皆様のご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪神道路公団、(財)阪神高速道路管理技術センター：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、阪神高速道路公団 設計荷重(HDL)委員会報告書、1984
- 2) Moses, F., : Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges, Transportation Engineering, Proceedings of ASCE, Vol.105, No.TE3, May 1979, pp.233-249
- 3) 三木, 米田, 村越, 吉村：走行車輛の重量測定、橋梁と基礎、1987-4, pp.41-44
- 4) 松井, EL-HAKIM：RC床版のひび割れの開閉量による輪荷重の測定に関する研究、構造工学論文集, Vol.35A, 1989-3, pp.407-418
- 5) 土木学会鋼構造委員会 鋼床版の疲労小委員会:鋼構

造シリーズ4 鋼床版の疲労

- 6) 神谷, 上条：港新橋の設計と施工について、橋梁、1965-4, pp.20-29
- 7) 建設省中部地方建設局名古屋国道工事事務所,財団法人 国土開発技術センター：昭和63年度 一般国道23号港新橋耐荷力検討業務委託 報告書、1989-3
- 8) 名古屋高速道路公社:鋼床版の合理化と耐久性向上に関する調査研究 報告書、1995-10
- 9) 池田, 米塚：車両重量調査結果の解析, 土木技術資料, 30-9, 1988-9, pp.29-34
- 10) 守屋, 松井, 谷垣, 大野：活荷重実測結果に基づく設計軸重に関する考察, 土木学会第50回年次学術講演会概要集 I -287, 1995-9, pp.574-575
- 11) 松井, 守屋, 谷垣：近畿管内11路線における交通荷重実態調査, 土木学会第50回年次学術講演会概要集 I -305, 1995-9, pp.610-611

(1997年9月26日受付)