

自動車荷重と橋梁・地盤振動の同期モニタリング

Monitoring of bridge and ground vibration synchronized with bridge weigh-in-motion

小塩達也*, 森田俊樹**, 深田宰史***, 山田健太郎****, 梶川康男*****

Tatsuya OJIO, Toshiki MORITA, Saiji FUKADA, Kentaro YAMADA, Yasuo KAJIKAWA

*工修, 名古屋大学助手, 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**工修 トピー工業(株), (〒441-8510 豊橋市明海町) 【前 名古屋大学大学院】

***博(工), 金沢大学大学院助手, 自然科学研究科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

****Ph.D. 名古屋大学教授, 環境学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

*****工博, 金沢大学大学院教授, 自然科学研究科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

Environmental problems around bridge such as ground vibration or low frequency noise are caused by an interaction of bridge vibration and vehicles. A method of structural-environmental monitoring such as bridge vibration and ground vibration monitoring cooperated with bridge weigh-in-motion was proposed. This synchronized monitoring method gives us information about “input” to a bridge and “output” from it. It also gives traffic condition or truck type on bridge and these effects on bridge or its surrounding environment. Based on continuous monitoring data for one week on a highway bridge, relationship between axle weights of 9544 trucks and of over 20000 axles and vibration level caused by these trucks were shown.

Key Words: Bridge Weigh-in-Motion, bridge vibration, truck load, vibration level

キーワード: Bridge Weigh-in-Motion, 橋梁振動, 環境地盤振動, 自動車荷重

1. はじめに

自動車の走行によって橋梁に生じる振動が、橋梁周辺の環境に好ましくない影響を与える事例が報告されている。例えば、橋梁から地盤に振動が伝達され、不快な振動を生じたり、橋梁振動が低周波音を生じさせたりして近隣の住民が苦情を訴える事例もある。これらの振動騒音現象の共通点として、車両が橋梁に走行する際に生じていることが挙げられる。橋梁振動への車両の影響に着目した研究として、解析における車両のモデル化に関する研究¹⁾²⁾、車両のサスペンション構造に着目した測定³⁾などが行われている。徳永・日野⁴⁾らは、高架道路周辺の交通振動と苦情要因について測定およびアンケートによる調査を行い、苦情被害の評価方法について提案している。

橋梁を振動源とする環境振動・騒音をモニタリングする際、これまでの一般的な評価方法は、振動を受ける側の値、すなわち構造システムの出力値、応答値について着目し、観測をおこなうことが多く、交通量を調査することはあっても、橋梁を振動させる外力として大型車両側の情報を観測することは行われていない。一方で、車両の構造や走行速度、軸重、総重量、交通状況が橋梁振動に与える影響は小さくないと考えられる。そこで、橋梁や地盤の振動メカニズムだけでなく、荷重の情報を応答値と同時に得ることは被害の実態把握や振動メカニズムの解明という点で非常に有効であると考えられる。

本研究では、自動車の形態、種類、荷重状態とその車両が走行

する際の橋梁や地盤の応答値を同時にモニタリングする手法を提案し、実橋梁において、1週間の長期モニタリングを行った。

自動車荷重の測定については、著者らが開発した支点反力を用いた Bridge Weigh-in-Motion(以下 BWIM)⁵⁾を用い、走行速度、軸間距離、軸重、車種を求めた。BWIM の出力データから車両が橋梁上を単独で走行するケースを抽出し、同時に測定した橋梁の応答値、地盤の応答値の連続データから振動加速度レベル、最大加速度を検出し、総重量、軸重などとの関係について調査を行った。

2. 測定方法

2.1 測定対象橋梁および測定点

本研究で測定対象とした橋梁は、東名阪自動車道、長島インターチェンジ東にある「小島高架橋」の一部である。橋梁の概要図を図1に示す。主に着目する径間は、支間35mを有する5主桁の鋼単純鉄桁(A2-P10間)で、上下線分離構造である。この橋梁の西には長島インターチェンジ、東側は木曽川橋梁がある。

図2に橋梁および地盤振動に関する測定点の配置を示す。本研究では、T型のP10橋脚に着目し、橋脚まわりを重点的に測点を配置した。主桁では、P10橋脚を中心としてA2-P10径間とP10-P9径間の支間中央にそれぞれ鉛直方向に振動加速度計を設置した。P10橋脚においては、橋脚天端に3箇所(両張り出し部と脚柱上)それぞれ3軸方向の加速度計を設置し、地盤上では、橋脚基部と官民境界に加速度計を設置した。可動支承の可動状況を

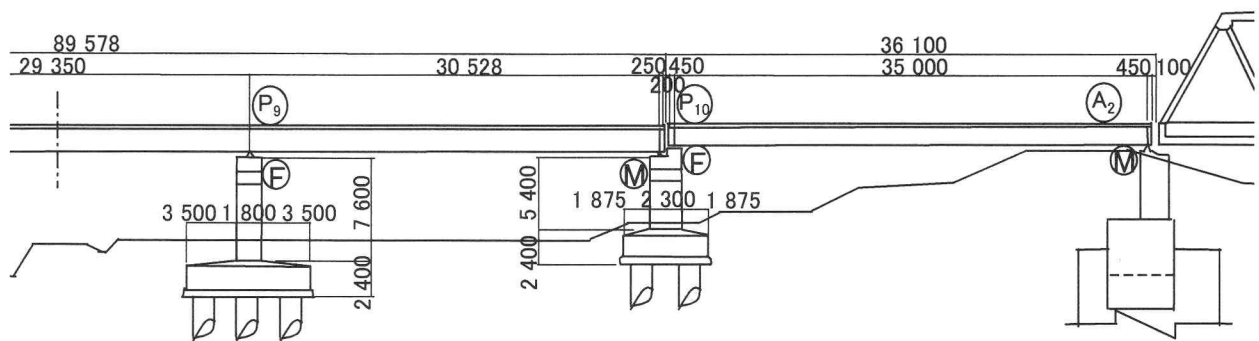


図1 対象橋梁の概要

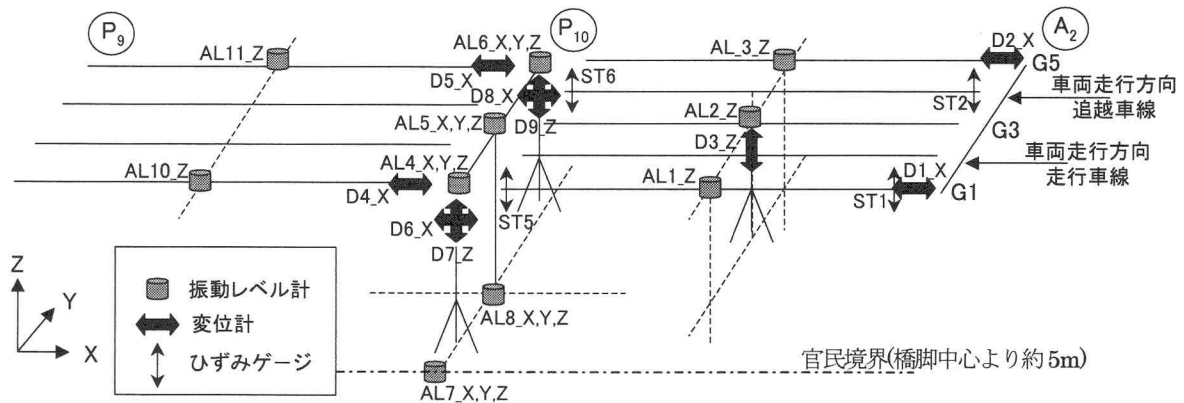


図2 測点配置図

観測するため、端主桁可動支承の橋軸方向変位を計測した。P10 橋脚では、T 型橋脚の両張り出し部の橋軸および鉛直方向の変位、A2-P10 径間の支間中央の鉛直変位を計測した。また、筆者らが 2001 年度に実施した支点反力を用いた BWIM の測定点をそのまま用い⁵⁾、写真 1 に示すように端垂直補剛材に貼付したひずみゲージにより上下線合わせて 4 車線を走行する大型車両の軸重を測定した。

2.2 記録・分析方法

測定は、200Hz のサンプリング周波数で 28 分間連続波形を測定、2 分待機のインターバルで合計 168 時間(1 週間)の連続波形をハードディスクに記録した。

端垂直補剛材のひずみの連続波形から、筆者らが開発した BWIM プログラム⁵⁾を用い、軸重、走行速度、車種、総重量などを時刻歴データの形で出力した。キャリブレーションには 25ton のトラック 2 台(3 軸リーフサスペンション車および 4 軸エアサスペンション車)を用いた。過去の測定⁵⁾と同様に、キャリブレーション値のばらつきは、軸重で 20~30%、総重量で 20%程度のばらつきがある。

着目する車線を四日市方向走行車線とし、この車線に 1 台のみ車両が走行し、かつ他の車線に車両が走行していない状況を BWIM の出力データから抽出した。着目する車両が橋梁に進入した時刻以前の 5 秒間と進入後 10 秒間、合計 15 秒間の応答波形を測定データから切り出し、その車両単独による応答波形とした。

各点の応答値波形に対し、振動の大きさを評価するため、JIS で振動の強弱を評価する値として規定されている振動加速度レベル波形を計算した。したがって、1/3 オクターブバンド補正及

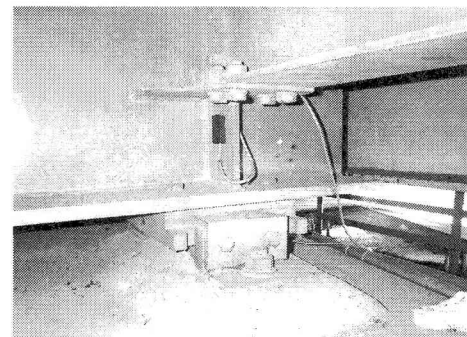


写真1 端垂直補剛材のひずみゲージ

び振動成分の方向による補正等の人体感覚に対する補正は行っていない。

3 測定結果

3.1 測定対象橋梁の振動特性

一般供用下における 28 分の連続測定により得られた主桁中央の鉛直加速度データから計算したパワースペクトルによれば、本橋梁の固有振動数は曲げ振動 1 次が 2.6Hz、ねじれ振動 1 次が 3.7Hz となった。減衰定数 h は 2.6Hz で約 0.04~0.06、3.7Hz で約 0.02~0.04 であった。

3.2 車両総重量と振動加速度レベル

走行車線と追越車線における交通流について、1 週間の大型車

両の総重量頻度分布を図3に示す。約8ton, 15tonにピークが見られ、分布形状は走行、追越ともほぼ同じになった。着目した車線で測定された全走行台数は24046台、最大値は75tonである。このうちの約4割の9554台が単独走行と判定された。大型車両が単独で測定橋梁上を走行する際の、主桁中央における振動加速度レベルの時刻歴波形の例を図4に示す。大型車両が測定径間に進入し、橋梁の振動が大きくなり、振動加速度レベルが増大することがわかる。一般的な振動公害を扱う場合には、振動レベル L_{10} 値が用いられることが多いが、本研究では、図に示すように、単独走行時の振動加速度レベル波形のピーク値(最大値)をその車両による応答の代表値として位置付けた。

大型車両が単独で走行車線を通過した際の主桁中央、橋脚天端、橋脚基部及び官民境界における地盤の最大振動加速度レベルと車両総重量の関係を図5-a~hに示す。値のばらつきが大きい、分布の下限値の包絡線では、重量が大きくなると振動加速度レベルが大きくなっている。一方、分布の上限値はおおむね一定値を示しており、車両重量が小さい場合でも比較的大きな振動加速度レベルを発生させる車両が存在していると考えられる。振動加速度レベルの大きさは、主桁中央の鉛直加速度がもっとも大きく、

上限値が95dB程度であった。橋脚天端では橋軸方向の振動レベルが大きく上限の包絡線で90dBとなり、鉛直方向よりも橋軸方向の振動レベルが10dB程度大きくなっている。これは、可動支承が摩擦による拘束を受け、橋梁のたわみ振動によって橋脚が橋軸方向に押され、橋軸方向の変位が生じていることによるものと考えられる。橋脚基部の地盤では橋軸、鉛直方向ともに上限値で約90dB、橋脚よりも約5m離れた官民境界では上限値が80dBとなった。上限、下限の包絡線はともに橋梁から離れるにしたがって小さくなり、橋梁から発せられた振動が減衰していることが確認された。

車両重量と振動加速度レベル、走行台数との関係を濃淡表示による頻度分布の形で図6-a~dに示す。スライス幅は1ton, 1dbとした(以下同様)。支間中央の鉛直加速度では、車両総重量の頻度分布のピーク値である8ton, 15tonの位置でそれぞれ約78dB, 80dBの振動加速度レベルとなった。これらの2つの頻度ピークは、橋脚天端・橋脚基部の橋軸方向において72dB, 75dB、官民境界では約65dB, 70dBと低下し、橋梁、橋脚・橋脚基部、官民境界とおおむね5dBずつ振動加速度レベルが低下した。

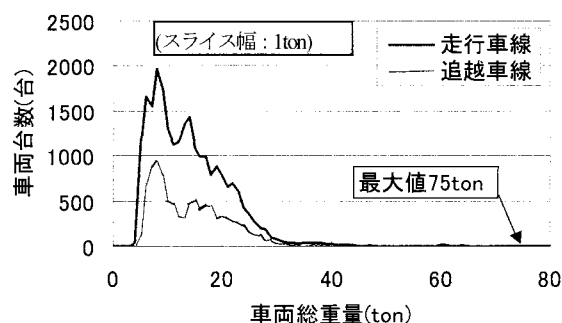


図3 大型車両通行台数(一週間)

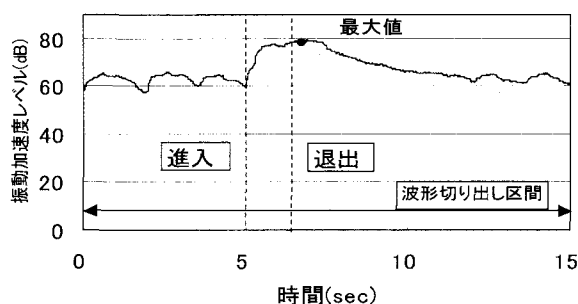


図4 振動加速度レベル波形の例(AL11-Z 主桁中央鉛直加速度)

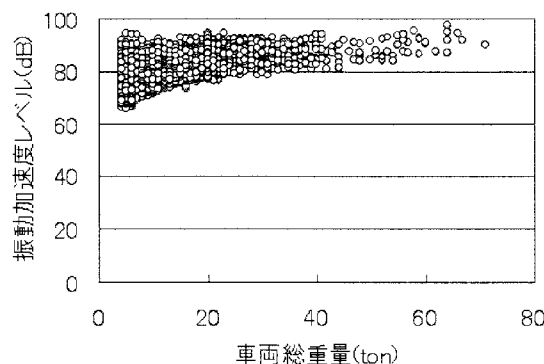


図5-a 振動加速度レベルと車両総重量(AL10-Z 支間中央鉛直)

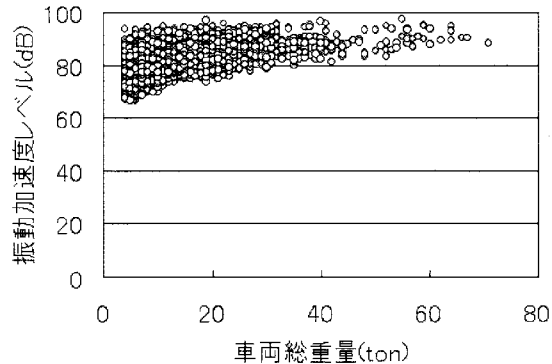


図5-b 振動加速度レベルと車両総重量(AL11-Z 支間中央鉛直)

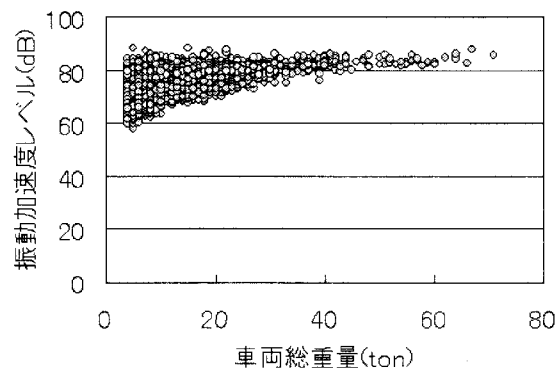


図5-c 振動加速度レベルと車両総重量(AL5-X: 橋脚天端、橋軸)

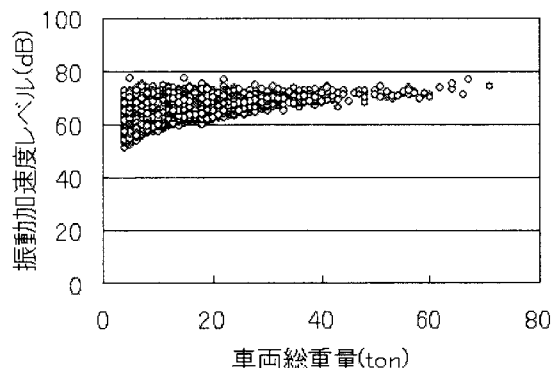


図5-d 振動加速度レベルと車両総重量(AX5-Z: 橋脚天端、鉛直)

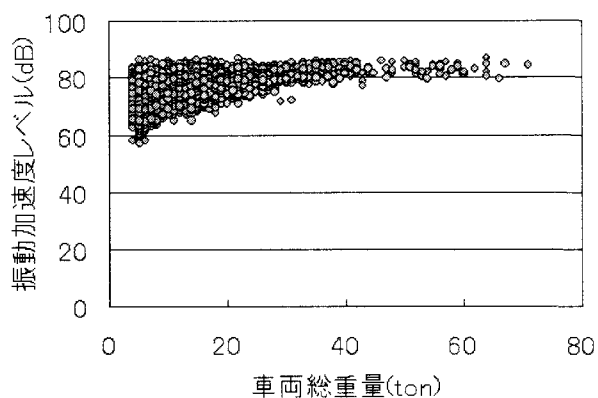


図5-e 振動加速度レベルと車両総重量(AL8-X：橋脚基部，橋軸)

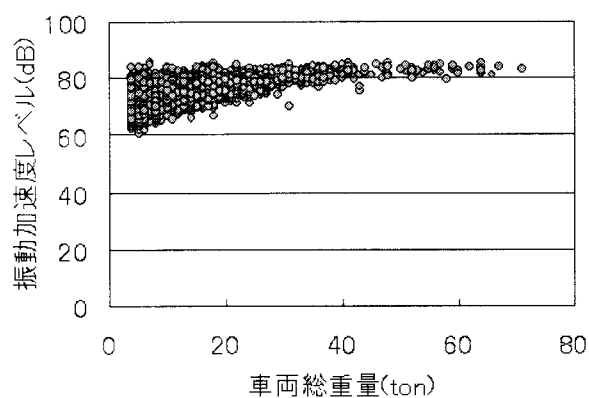


図5-f 振動加速度レベルと車両総重量(AL8-Z：橋脚基部，鉛直)

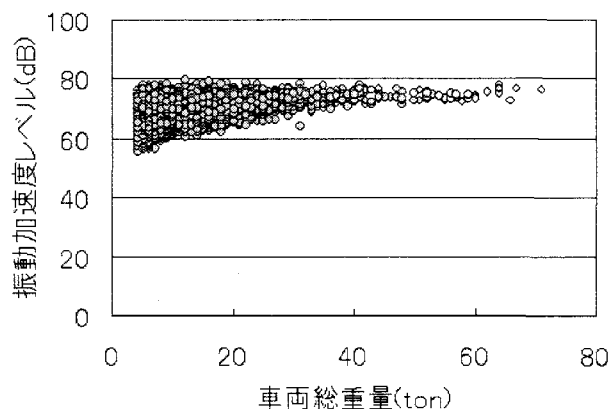


図5-g 振動加速度レベルと車両総重量(AL7-X：官民境界，橋軸)

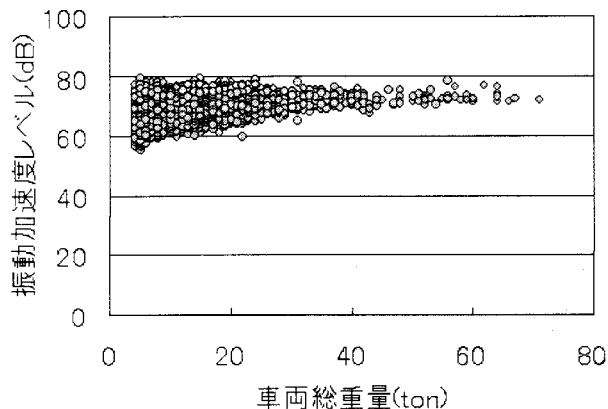


図5-h 振動加速度レベルと車両総重量(AL7-Z：官民境界，鉛直)

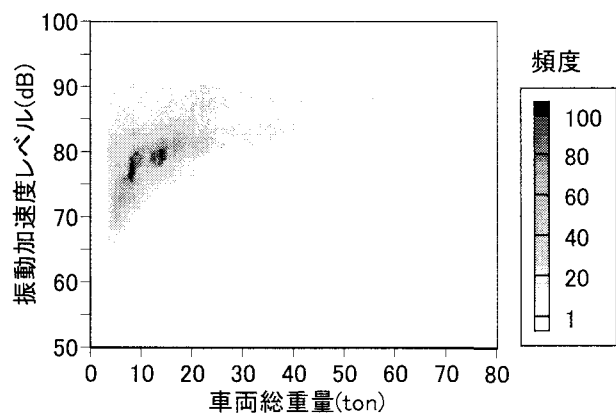


図6-a 振動加速度レベルと車両総重量(AL11-Z：支間中央，鉛直)

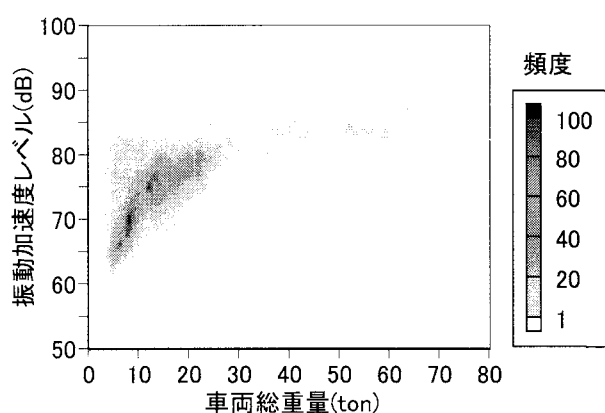


図6-b 振動加速度レベルと車両総重量(AL5-X：橋脚天端，橋軸)

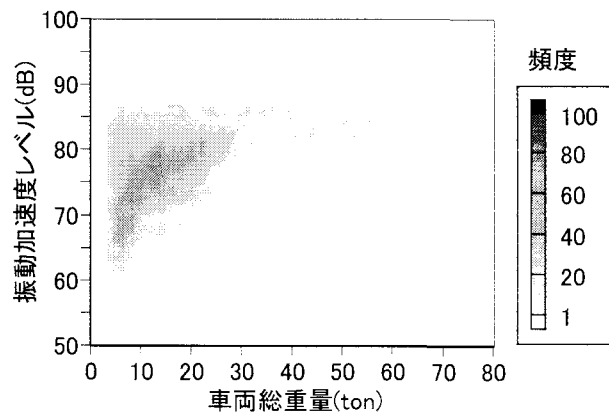


図6-c 振動加速度レベルと車両総重量(AL8-X：橋脚基部，橋軸)

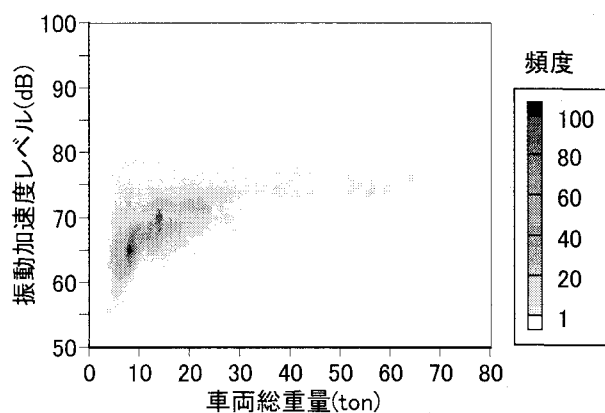


図6-d 振動加速度レベルと車両総重量(AL7-X：官民境界，橋軸)

3.3 車種別の振動加速度レベルの頻度分布

主桁中央における振動加速度レベル最大値の相対頻度分布を図7に示す。相対頻度分布は比較的鋭いピークを持つ単峰の分布となり、最頻値は80dB、最大値は95dBであった。図6-aの頻度分布のピークをみると、車両総重量が8tonで振動加速度レベルが77dB、15tonで80dBを示している。総重量の頻度分布特性は、車種ごとの特性をもつといわれている⁵⁾。そこで、BWIMで14種類に判定された車種を2軸車両、3,4軸車両(トレーラーを除く)、トレーラー類の3種類に分類し、振動加速度レベルの頻度分布を求めた。9556台中、2軸車類は5092台、3軸車類4175台、トレーラー類289台という構成となっている。

各車種ごとの支間中央鉛直加速度の振動加速度レベルと車両総重量の関係を図8～10に示す。図8の2軸車類は総重量の最頻値が8tonであり、このときの振動加速度レベルが77dBとなった。車両総重量の分布範囲は、4～15ton程度と狭いが、振動レベルの分布範囲は、67～92dBと比較的広い。2軸車類は軸距、走行速度のばらつきも他の車種よりも大きいので、これらの要素が複合して影響し、振動加速度レベルのばらつきを大きくしていると考えられる。

これに対し3,4軸車両の分布である図9を見ると、車両総重量の分布範囲がより広くなり、上限値は2軸車類と変わらないが、下限値が2軸車両よりも高くなっている。頻度ピークの位置は、18ton、81dBであった。トレーラー類は総重量の分布範囲が広がる一方で、振動加速度レベルの分布範囲は狭くなった。ピーク位置は、36ton、86dBである。車種により総重量の振動加速度レベルの下限値および頻度ピーク値が総重量の増加に伴って大きくなるが、振動加速度レベルの上限値は92～95dBと下限値ほど

大きくは変化しなかった。

3.4 通過車両の軸重と加速度ピーク値

2軸の大型車両が通過したときの、橋脚天端の加速度と橋脚上にある主桁端垂直補剛材のひずみ波形を図11に示す。車軸が橋梁を退出した瞬間、垂直補剛材のひずみ量が急激に変化する。加速度の波形をみると車軸が橋梁を退出した瞬間、すなわち、伸縮装置を乗り越えた瞬間に大きな加速度を生じている。このときに観測される振動数は40Hz程度であった。多数の波形を観察した結果、衝撃の発生回数は、車軸の数と一致していることを確認した。そこで、軸重が伸縮装置を乗り越える際の加速度最大値(以下、加速度とする)を測定データから切り出し、軸重と加速度との関係について比較した。分析に用いた総軸数は21749軸である。なお、軸重とは、本来、タイヤ接地荷重の軸ごとの合計値と定義され、質量である車両総重量に対して、力の単位で表記すべきものであるが、ここでは慣例に従って、ton単位で表記する。

1週間の単独走行車両の、橋脚天端と橋脚基部の地盤における軸重と加速度の関係を図12に示す。図中の式および直線は、最小2乗法による回帰直線である。値のばらつきはあるものの、軸重と加速度の間は正の相関関係にあることを示している。この傾向は、官民境界においても同様であった。

大型車両の構造上、前輪の操舵輪はシングルタイヤ、後軸はダブルタイヤとなり、同じ軸重の場合、タイヤの接地王が異なることになる。そこで、BWIMのデータから軸重を前軸(シングルタイヤ)と後軸(ダブルタイヤ)に分け、軸重と加速度を比較した。

橋脚天端での橋軸方向加速度について、軸重と加速度に関する頻度分布を図13に示す。

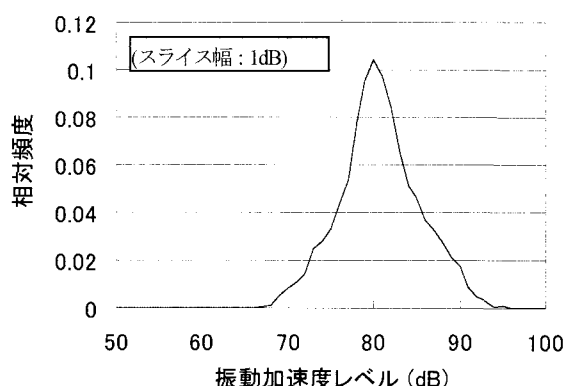


図7 振動加速度レベルの相対頻度分布(AL11-Z: 支間中央、鉛直)

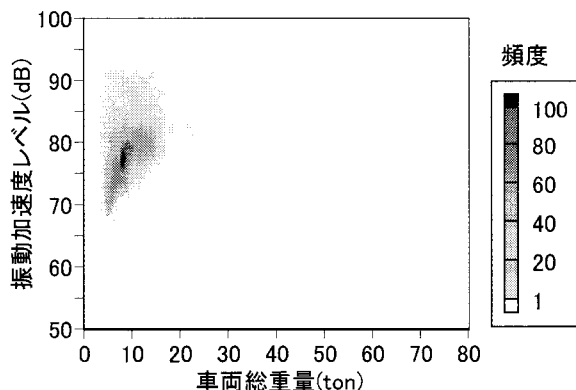


図8 振動加速度レベルと車両総重量(2軸車類, AL11-Z)

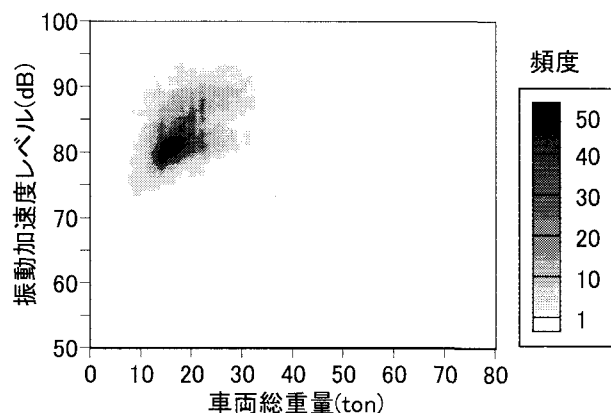


図9 振動加速度レベルと車両総重量(3,4軸車類, AL11-Z)

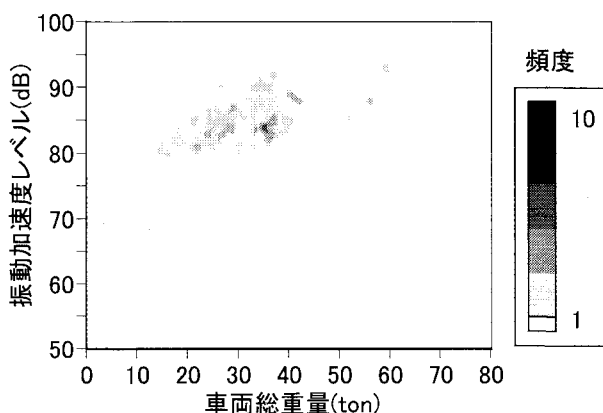


図10 振動加速度レベルと車両総重量(トレーラー類, AL11-Z)

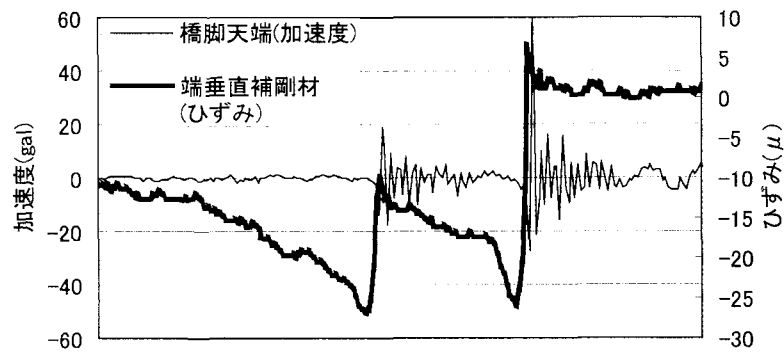


図 11 車両通過時の波形(端垂直補剛材, AL5-X: 橋脚天端橋軸加速度)

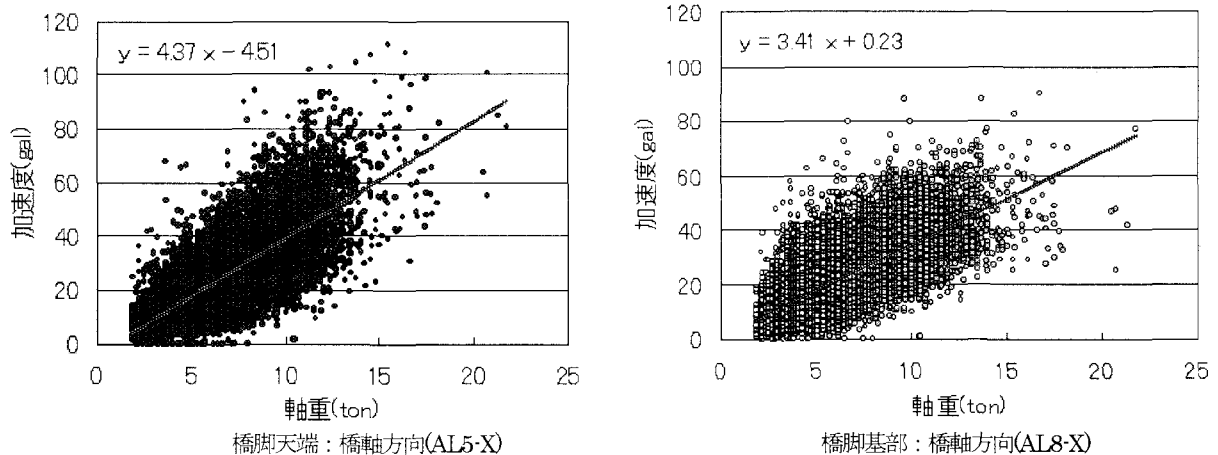


図 12 加速度と軸重

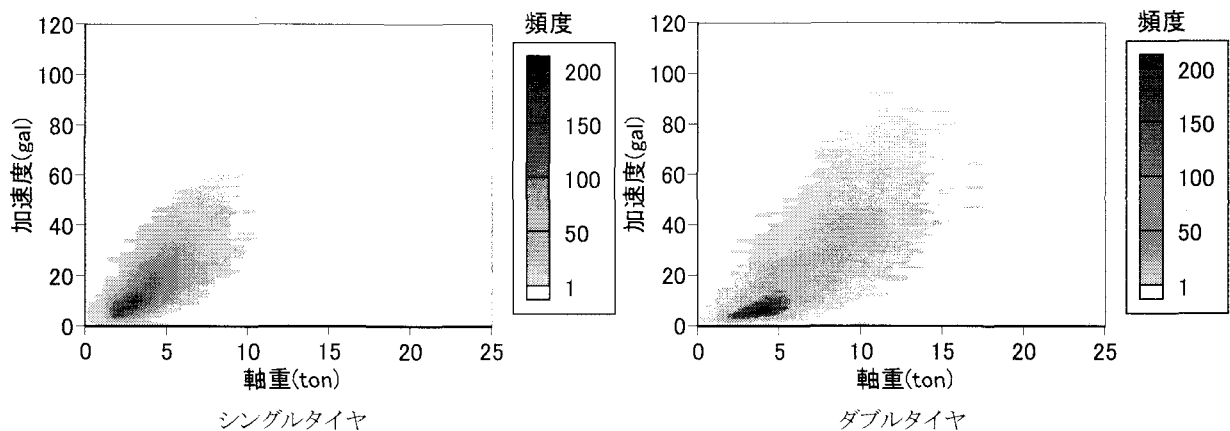


図 13 橋脚天端の加速度と軸重(AL5-Z)

分布の上限値、下限値の包絡線はシングル、ダブルともに変わらない。一方、空車状態と考えられる軸重 5ton 以下のダブルタイヤでの分布を見ると、同じ重量のシングルタイヤに比べて、分布のピーク位置が小さくなっている。これは、シングルタイヤとダブルタイヤの接地圧の違いが影響していると考えられる。

3.5 走行速度の影響

本研究で分析対象とした 9544 台の走行速度の頻度分布を図 14 に示す。測定橋梁は自動車専用道路上にあり、信号による停止や、渋滞はなく、測定期間の一週間を通じて交通が安定している。

走行速度と車両総重量の頻度分布を図 15 に示す。車両総重量が比較的小さいものは走行速度の分布幅が広いが、20ton を超えるような重量車になると速度が低下する傾向がある。

走行速度が振動レベル、加速度に与える影響を調べるため、調査対象とした車両について、クラス分類を行い、そのクラス内の平均の振動加速度レベル、加速度を算出した。図 16, 17 にそれぞれ総重量・走行速度に対する振動加速度レベルの平均値、軸重・走行速度に対する加速度の平均値を示す。クラス分類は、振動加速度レベルでは総重量 10ton, 走行速度 10km/h 刻み、加速度では、軸重 2ton, 走行速度 10km/h 刻みとした。

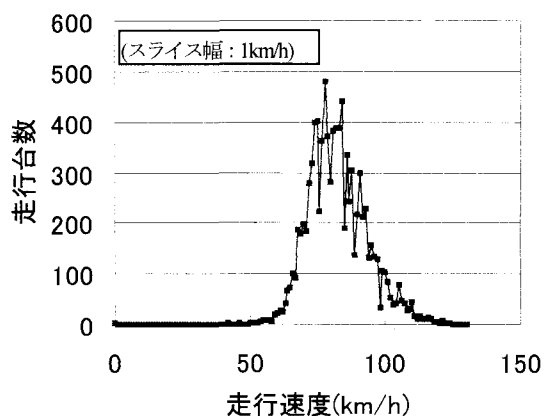


図 14 走行速度の頻度分布

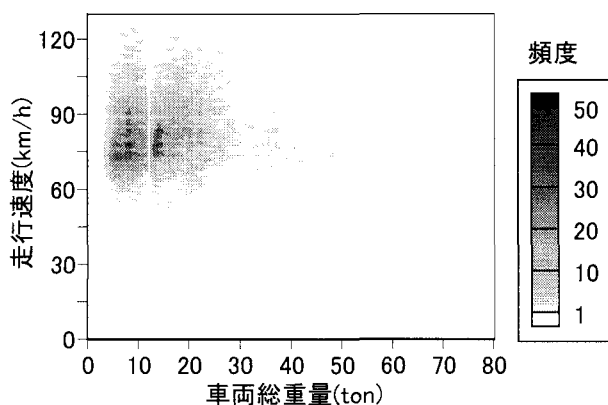
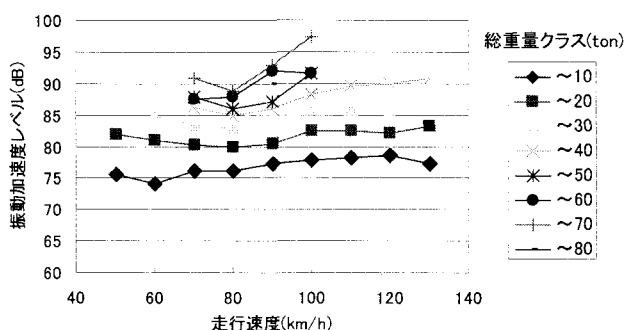
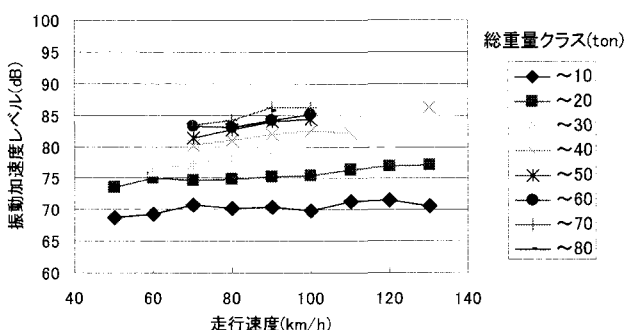


図 15 走行速度と車両総重量

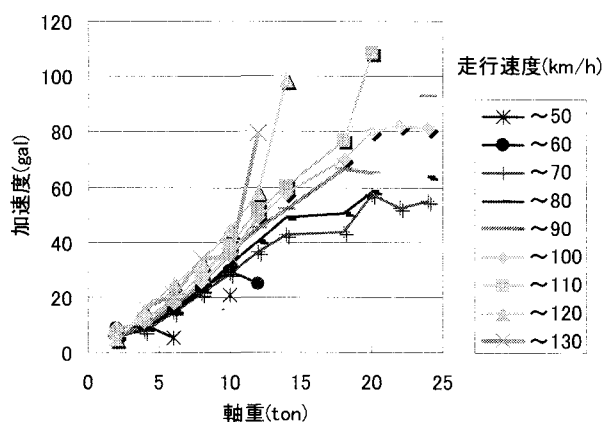


桁支間中央、鉛直(AL11-Z)

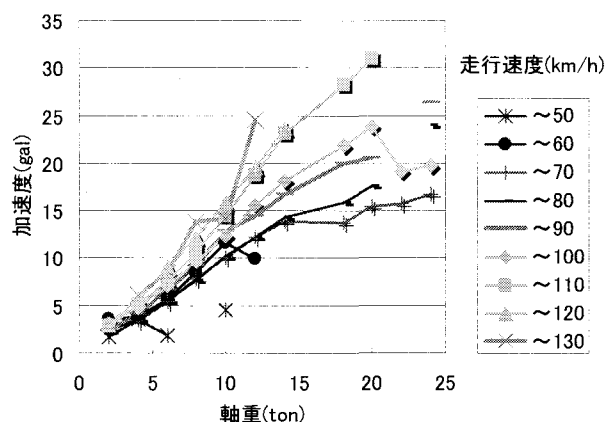


橋脚天端、橋軸(AL5-X)

図 16 総重量と走行速度に対する振動加速度レベルの平均値



橋脚天端：橋軸(AL5-X)



官民境界：橋軸(AL7-X)

図 17 軸重と走行速度に対する加速度の平均値

図 16 によれば、車両総重量、走行速度が大きいくほど、振動加速度レベルの平均値が大きくなる。一般的なトレーラーを除く大型車両の総重量である 30ton までの総重量クラスでは、車両総重量が 10ton 増加すると振動加速度レベルが 3~5dB 程度増加している。車両総重量が 40ton 以上のクラスでは、それ以下のクラスに比べてクラス間の振動加速度レベルの違いが小さくなっている。また、橋梁支間中央のグラフでは、車両総重量 20tonf 以上のクラスで走行速度 80km/h の場合に振動加速度レベルがやや低下する傾向が見られた。

図 17 によれば、軸重と加速度との間には、ほぼ線形の関係が

あると考えられる。また、走行速度が大きくなると同じ軸重であっても加速度が増加した。

3.6 過積載車両の影響について

法令上、この橋梁上を走行できる車両は総重量が 36ton、軸重が 10ton である。今回測定した試験車両は車両総重量が 25ton、最大軸重が 9ton 程度であり、3、4 軸のリジッドフレーム形式の車両としては軸重、車両総重量ともに法令上の制限値である。トレーラー等で特別に認可された場合も考慮すると車両総重量 44ton が上限値となる。しかし、図 16、17 の観測結果によれば、

総重量が 50ton 以上であったり、軸重が 10ton を超えるような過積載車両が存在し、これらの車両によって大きな振動加速度レベルや加速度が生じている。

図 5, 12 のように、個々の車両の測定値にはばらつきがあるものの、それぞれのクラスでの平均的な振動加速度レベル、加速度を考えた場合、図 16 によれば、40 トン以上のクラス、つまり、過積載(が予想される)車両がない場合、振動加速度レベルは支間中央で 5~10db、橋脚天端で 3~4db 程度低下することになる。また、図 17 によれば、軸重最大値が 10ton に制限された場合には、すべての車両を通じての最大加速度は、およそ半分になることが予想される。

一方で、図 3 に示したように、車両総重量の頻度分布のピークを与えるような“一般的な車両群”は総重量 20tonf 以下に分布している。重量のクラス分けをしなければ、図 6 から分かるように、全事象を通じての平均的な応答値が 20tonf 以下の車両群による値に近づくのは明らかである。

つまり、振動加速度レベル、加速度の極めて大きいケースに着目すれば、過積載車両の影響が大きく、発生頻度の高いケースでは 20tonf 以下の車両群の影響が大きいといえる。

したがって、橋梁とその周辺環境に生じる振動が問題となる場合、実際に走行している自動車荷重を把握し、苦情発生要因の荷重側の条件(積載状態、軸重等)を検討することにより有効な対策を講じることができると考えられる。

4 まとめ

本研究では、BWIM と構造物や環境振動などのモニタリングを同期する測定方法を提案し、実橋梁において、1 週間の自動車荷重、橋梁振動、橋梁周辺の地盤振動のモニタリングを行い、橋梁上を単独で走行する自動車の荷重と橋梁・地盤振動の関係について調査を行った。以下に本研究で得られた内容を述べる。

- ・単独走行車両による振動加速度レベル波形におけるピーク値の車両重量に対する下限値・平均値は車両総重量に対して正の相関があり、総重量が増加するにしたがって大きくなる。
- ・振動加速度レベル波形のピーク値は総重量に対してばらつきが比較的大きいが、総重量が増加するにしたがい、ばらつきが小さくなる。
- ・2 軸車類による振動加速度レベル波形のピーク値はトレーラーを除く 3,4 軸車類やトレーラー類に比べてばらつきが大きく、総重量が比較的小さい場合でも、大きな振動加速度レベルを記録する場合がある。
- ・軸重に対応して発生する加速度の値は、軸重とほぼ線形関係にある。
- ・軸重が伸縮装置を通過した際に生じる加速度ピーク値は 5ton 以下の観測値では軸重を同じとした場合、シングルタイヤによる加速度の値がダブルタイヤよりもやや大きい傾向がある。
- ・車両の走行速度が増加すると、振動加速度レベルのピーク値、加速度ピーク値はともに増加する傾向がある。
- ・振動加速度レベル、加速度ピーク値の大きいケースでは、過積載車両の影響しており、橋梁や地盤の振動問題では、これら過積載車両の影響を考慮することが必要であると考えられる。

本研究で示した荷重・構造物の同期モニタリングという手法は、橋梁の振動を発生源とする環境問題について、橋梁への入力と橋梁からの出力の情報を同時に取得できるため、より詳細な現象の理解を行うことができると考えられる。

また、今日では、大量のデータを比較的低コストで測定でき、データの保存やデータ処理についても PC の発達により容易となっている。そこで、本研究のように連続モニタリングを行い膨大なデータを分析することで、短時間での応答のみの観測や、荷重車試験による検証(再現)実験だけでは得られないデータ、例えば、特殊な過積載車両や、複数の車両が連行した際の影響など、についても把握することができる。

地震や風などの自然現象と違い、自動車荷重は、道路がその輸送機能を発揮する際に必ず生じる現象であり、道路管理者によるコントロールが可能な項目でもある。したがって、振動、騒音、大気汚染など、道路が発生源となる環境問題について本研究で示したような自動車(荷重)との同期モニタリングを行うことにより、これらの環境問題の根本の発生要因としての交通側の要因を把握し、環境対策に反映させることが可能になると考えられる。

謝 辞

本研究をすすめるにあたり、日本道路公団桑名管理事務所、中部支社名古屋技術事務所には多大なるご協力をいただきました。また、センサー設置作業等については(有)愛測エンジニアリングにご協力いただきました。機材類につきましては株式会社フジエンジニアリングにご協力いただきました。さらに、金沢大学土木建設工学科梶川研究室、名古屋大学都市環境学専攻山田研究室の学生諸君には大変お世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川谷充郎, 小松定夫, 佐々木孝: 走行自動車荷重を受けるプレートガーダー橋の動的応答特性に関する研究, 土木学会論文集, No.392/ I -9, pp351-358, 1998
- 2) 川谷充郎, 山田靖則, 嶽下裕一: 3 次元車両モデルによる桁橋の動的応答解析, 土木学会論文集, No.584/ I -42, pp.79-86, 1998
- 3) 佐藤弘史, 間沢利明, 大石哲也, 西川和廣, 玉越隆史, 竹之内博行: 道路交通振動に与える車両サスペンションの影響, 橋梁振動コロキウム '01 論文集, pp.181-185, 2001.10.
- 4) 徳永法夫, 日野泰雄, 西村昂: 高架道路における交通振動と苦情要因に関する研究, 橋梁と基礎, pp.51-56, 1998.3
- 5) 小塩達也, 山田健太郎, 若尾政克, 因田智博: 支点反力による BWIM を用いた自動車軸重調査と荷重特性の分析, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.743-753, 2003.4
- 6) COST 323 (1999): European WIM Specification, Final Report (2003 年 9 月 12 日受付)