

サスペンション構造が異なった車両走行による高架橋の振動特性

Vibration characteristics of highway bridge due to running vehicles with different suspensions

梶川康男^{*}, 深田宰史^{**}, 林下貴彦^{***}, 山田健太郎^{****}, 小塩達也^{*****}

Yasuo Kajikawa, Saiji Fukada, Takahiko Hayashishita, Kentaro Yamada, Tatsuya Ojio

^{*}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)^{**}博士 (工学), 金沢大学大学院助手, 自然科学研究科 (同上)^{***} 金沢大学大学院, 自然科学研究科 (同上)^{****}Ph. D., 名古屋大学大学院教授, 環境学研究科 (〒464-8603 名古屋市中種区不老町)^{*****}工修, 名古屋大学大学院助手, 環境学研究科 (同上)

The problem of the traffic vibration is complicated because of many vehicles parameters as velocity, weight and suspension and so on. Recently it is clearly shown that the traffic vibration of the bridge is reduced due to running vehicle with air suspensions. However it is not clear whether the traffic vibration upon the Highway Bridge and that of the surrounding environment is reduced. Therefore, in this study using the vehicle with leaf suspensions and with air suspensions we investigated the influence of the traffic vibration upon Highway Bridge and that of the surrounding environment.

Key Words: air suspension, traffic vibration

キーワード: エアサスペンション, 交通振動

1. はじめに

高架橋を発生源とする交通振動では, 加振源となる車両のパラメータ^{1) 2)} (車種, 走行速度, 走行車線, 車両総重量, 卓越振動数, 減衰特性等) が, 橋梁-橋脚-地盤という伝播経路と受振側の家屋に与える影響が大きく, これらの振動系における振動特性の違いから各測点での応答は大きく異なる. この車両パラメータが数多くあるために, 振動問題を複雑化させているといえる.

特に, 最近の車両は, エアサスペンションが搭載され積荷の高品質輸送と走行安定性を向上させている. これは, 車両パラメータの中でも減衰機構を向上させたものである. この車両減衰機構の向上が橋梁の振動を低減する効果があるといわれ³⁾, 試験橋梁における走行実験の結果⁴⁾についても述べられている. しかし, エアサスペンション (エアサス) 車両が走行した場合と従来の板ばね構造によるリーフサスペンション (リーフサス) 車両が走行した場合の実際の高架橋やその周辺環境における振動計測事例がないため, 地盤上での応答にどのような差が生じるのか, どのような周波数帯が伝播するのか不明である.

そこで本研究では, リーフサス車両とエアサス車両を用いて, それぞれの車両が走行した際の各伝播経路における応答がどれだけ異なるのか実験的に比較検討した.

2. 実験概要

2.1 対象橋梁と測点配置

本研究における対象橋梁は, 東名阪道上り線の小島高架橋の一部である支間長 35m, 5 主桁を有する単純鋼 I 桁橋 (A2-P10 間) である. 図-1 に一般図を示す. また, 図-2 に対象橋梁における測点配置図を示す.

本実験では, T 型の P10 橋脚に着目して測点を配置した. 主桁においては, A2-P10 径間の支間中央にそれぞれ鉛直方向に加速度計 (AL1~AL3) 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 (AL4~AL6) を設置するとともに, 地盤上では, 橋脚基部と官民境界に加速度計 (AL7~AL8) を設置した. なお, ここで設置した加速度計はすべて振動レベル計 (RION, VM-52) を用い, 人体感覚補正フィルターをかけずに加速度出力している. また, 可動支承の可動状況を観測するため, 耳桁の支承の橋軸方向変位 (D1, D2) を計測した. P10 橋脚においては, T 型橋脚となっているため, 地盤を不動点とした両張り出し部の橋軸および鉛直方向の変位 (D6~D9) を計測した. また, A2-P10 径間における G3 桁の支間中央の鉛直変位 (D3) も計測した. さらに, P10 橋脚上を通過する車両の通過時刻を把握するために A2-P10 径間の G1 桁と G4 桁における端垂直補剛材に生じる鉛直方向ひずみ (ST1~ST4) を測定した⁵⁾.

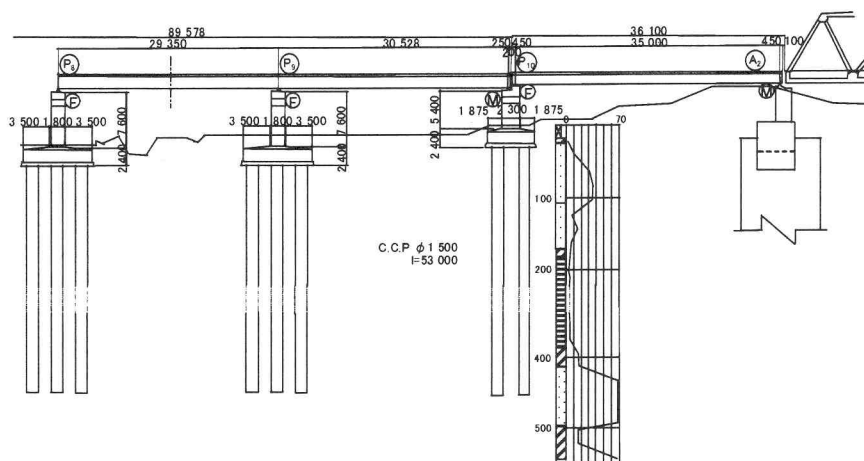


図-1 対象橋梁の一般図

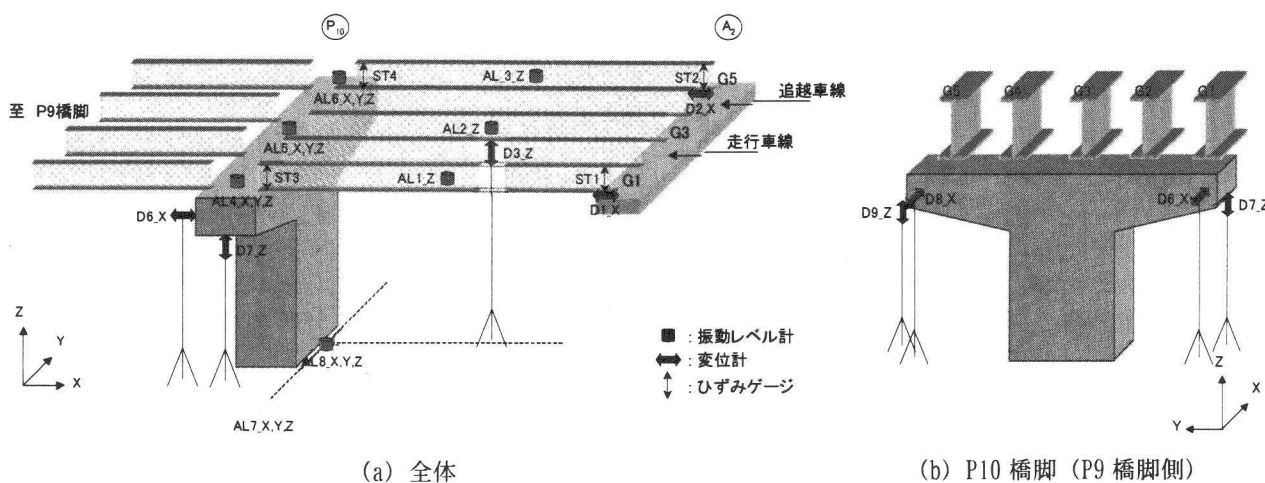


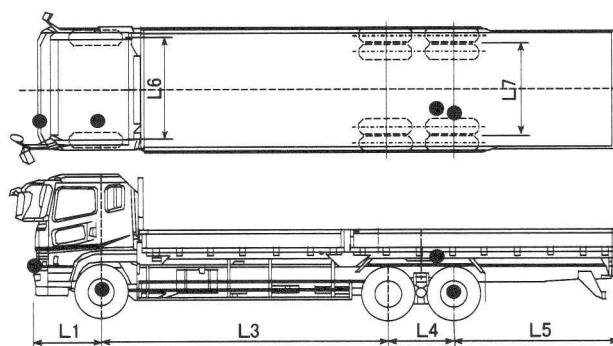
図-2 測点配置図

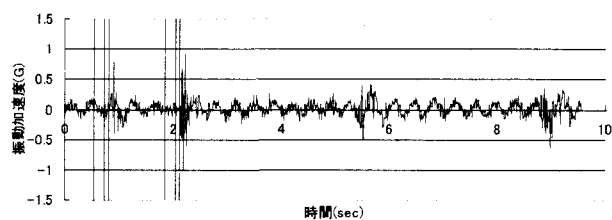
2.2 試験車両の概要

本実験で用いた試験車両は、リーフサスを有した車両（三菱、FU50JUZ）とエアサスを有した車両（いすゞ、CYJ51W3）の2台を用いた。各試験車両の諸元を表-1に、一般図を図-3に示す。試験車両はどちらも、車両の大型化に伴い近年急速に普及している245kN車両を用いた。リーフサス車は3軸であり、エアサス車は前輪2軸、後輪2軸の4軸車両で後輪2軸部がエアサспенションを搭載している。試験車両の測点配置としては、前輪、後輪のばね上およびばね下の4箇所（4箇所）に圧電型加速度計を設置した。試験車両の測点配置図を図-3に付記した。

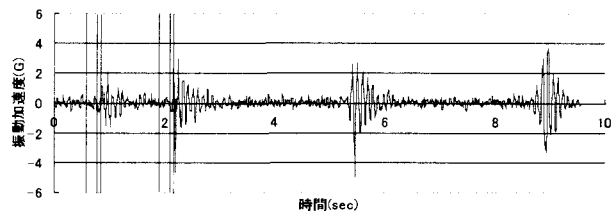
表-1 車両諸元

	リーフサス	エアサス
総重量	kN 239.904	241.276
前軸（エアサスは2軸分）	kN 79.135	100.303
後軸（2軸）	kN 160.769	140.973
全長	mm 11975	11990
ホイールベース L2+L3+L4	mm 7190	7335
オーバーハング前 L1	mm 1370	1400
前輪2軸間 L2	mm —	1850
前輪後輪間 L3	mm 5870	4275
後輪2軸間 L4	mm 1320	1210
オーバーハング後 L5	mm 3355	3195
トレッド前 L6	mm 2050	2080
トレッド後 L7	mm 1845	1870

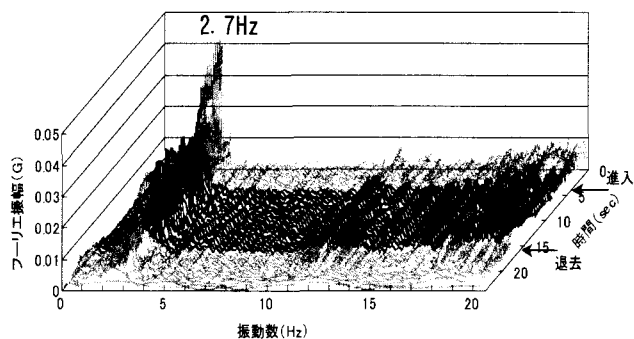




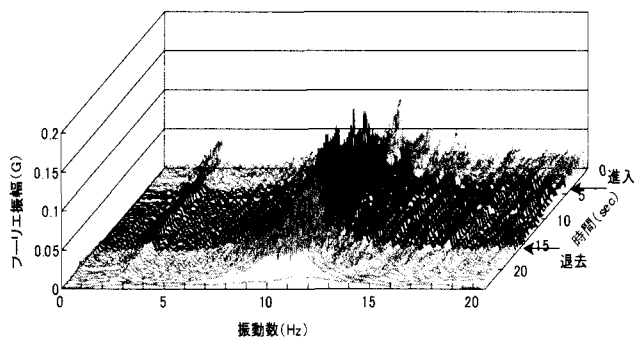
(a) 後輪ばね上の加速度



(b) 後輪ばね下の加速度

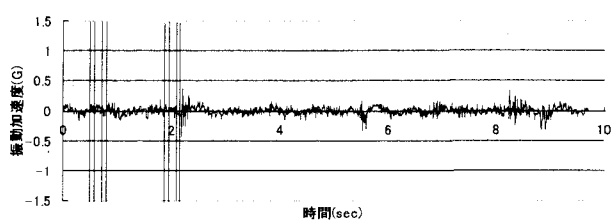


(c) 後輪ばね上のランニングスペクトル

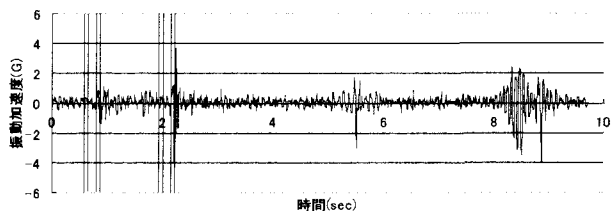


(d) 後輪ばね下のランニングスペクトル

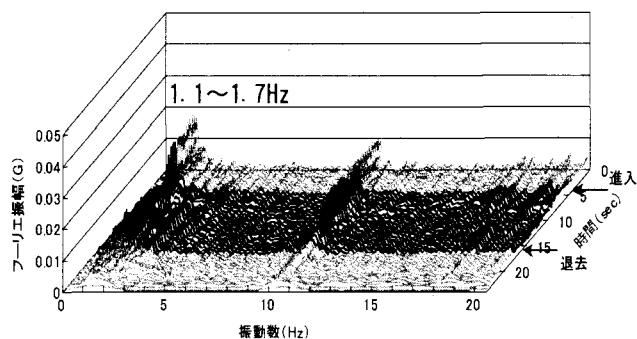
図-4 リーフサス車両の応答



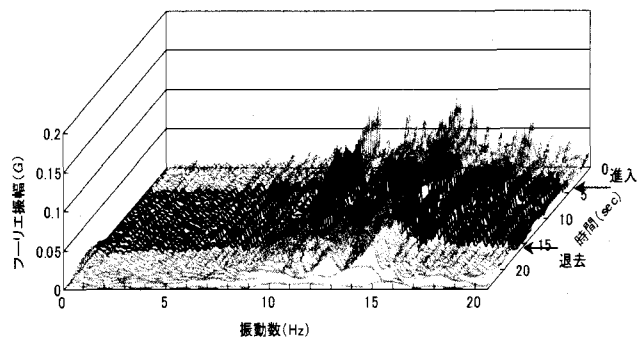
(a) 後輪ばね上の加速度



(b) 後輪ばね下の加速度



(c) 後輪ばね上のランニングスペクトル



(d) 後輪ばね下のランニングスペクトル

図-5 エアサス車両の応答

2.3 実験内容

本実験では、リーフサス車両とエアサス車両を用いて試験車走行実験を行った。

実験内容として、走行速度 (80, 100km/h)、車線 (走行車線、追越車線) をパラメータとして、単独走行および連行走行させた。なお、交通規制は行わず、一般車の交通量が少ない時間帯に実験を行った。

3. 実験結果

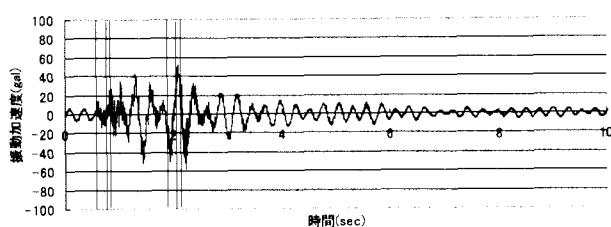
3.1 車両の振動特性

リーフサス車両およびエアサス車両が走行車線を100km/hで走行した場合を例にとり、図-4にリーフサス車両、図-5にエアサス車両の後輪ばね上とばね下の加速度波形とランニングスペクトルを示す。なお、図-4

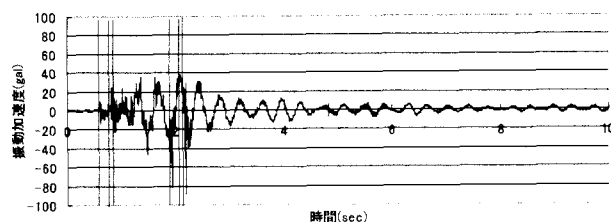
(a) (b) および図-5 (a) (b) に示した直線は端垂直補剛材のひずみから得られた各車軸の通過時刻を示す。

これにより、図-4 (a) と図-5 (a) の後輪ばね上加速度波形においては、リーフサス車両において、進入および退去のジョイント通過時に約 1G の加速度を記録している。一方、エアサス車両においては、エアサスペンション機能の効果が表われ 0.4G 程度となっており、後輪ばね上の振動加速度が小さくなっている。また、図-4 (c) と図-5 (c) に示したランニングスペクトルは、リーフサス車両が 2.7Hz に大きな卓越が見られるのに対して、エアサス車両は、1.1Hz~1.7Hz に広く分布している。

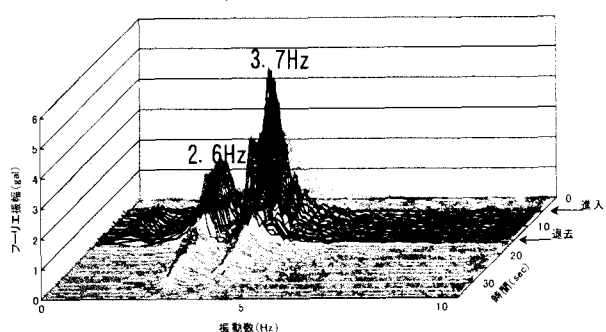
図-4 (b) と図-5 (b) のリーフサス車両とエアサス車両の後輪ばね下の加速度波形において、進入および退去のジョイント通過時の最大加速度で比較すると有意な



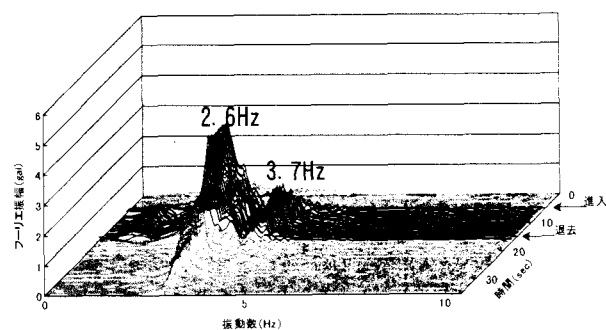
(a) G1 桁の加速度



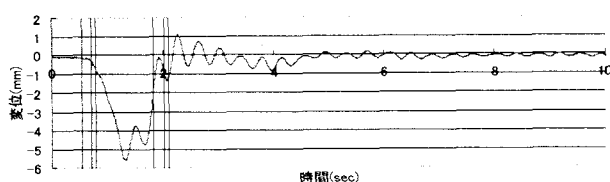
(b) G3 桁の加速度



(c) G1 桁のランニングスペクトル

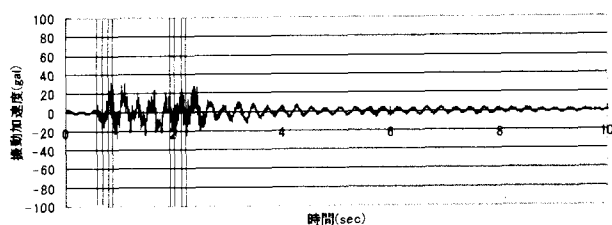


(d) G3 桁のランニングスペクトル

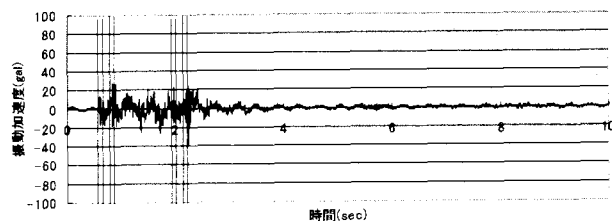


(e) G3 桁の鉛直変位

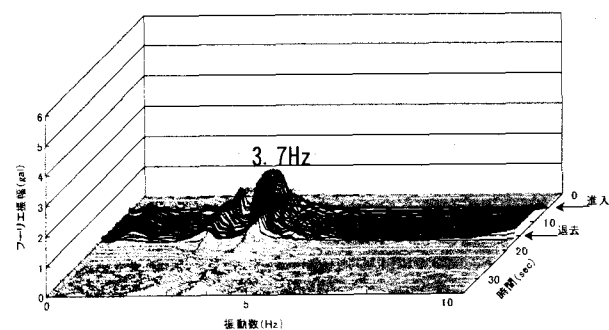
図-7 リーフサス車両走行時の応答



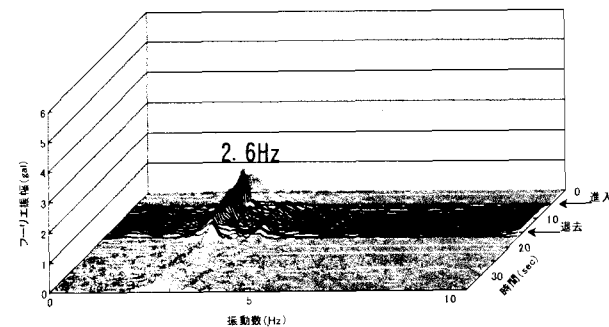
(a) G1 桁の加速度



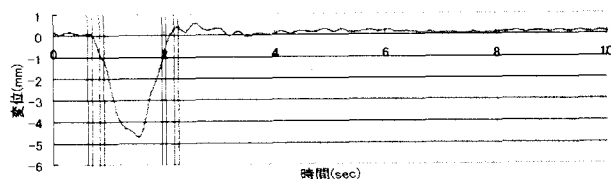
(b) G3 桁の加速度



(c) G1 桁のランニングスペクトル



(d) G3 桁のランニングスペクトル



(e) G3 桁の鉛直変位

図-8 エアサス車両走行時の応答

表-2 振動数および減衰定数

走行速度	車線	リーフサス				エアサス			
		たわみ1次		ねじれ1次		たわみ1次		ねじれ1次	
		f(Hz)	h(%)	f(Hz)	h(%)	f(Hz)	h(%)	f(Hz)	h(%)
80km/h	走行車線	2.64	5.5	3.68	3.5	2.68	4.7	3.74	1.5
	追越車線	2.64	3.3	3.88	2.6	2.63	3.8	3.72	1.3
100km/h	走行車線	2.63	3.8	3.72	2.1	2.65	3.6	3.73	1.7
	追越車線	2.62	4.6	3.80	3.0	2.68	3.5	3.73	2.1

表-3 D3 の鉛直変位における動的増幅率

走行速度	車線	リーフサス	エアサス
80km/h	走行車線	1.226	1.047
	追越車線	1.124	1.040
100km/h	走行車線	1.234	1.066
	追越車線	1.219	1.036

差は見られないが、エアサス車両では、若干減衰が大きくなっていることがわかる。図-4 (d) と図-5 (d) に示したランニングスペクトルから、リーフサス車両は、板ばね特有の 10Hz を中心とした山型の分布となっており、時間的な変動はあまり見られない。一方、エアサス車両では多くの卓越が見られる。本来、ばね下系はリーフサス車両もエアサス車両も同じ構造であるが、エアサス車両では、ばね上系にエアサスを搭載している。ばね上振動は 1.1Hz~1.7Hz の範囲で時間的に変動しているため、ばね下振動との動的相互作用により、ばね下振動においても 10Hz~20Hz の範囲で時間的に多くの振動数が卓越したものと考えられる。どちらの車両も一般的に言われているばね下の分布領域 10Hz~20Hz の範囲といえる。

図-4 (a) (b) および図-5 (a) (b) を比較すると後輪ばね下の加速度振幅はリーフサス車両とエアサス車両では同程度であるが、後輪ばね上に伝播する際、エアサス車両ではエアサスペンションの効果によって衝撃力が軽減されていることがわかる。

3.2 桁上の応答

リーフサス車両およびエアサス車両が走行車線を 100km/h で走行した場合を例にとり、図-6 に示した主桁、橋脚、橋脚直下および官民境界の地盤における応答波形を示し、それぞれ伝播経路に沿って以下考察する。なお、卓越振動数、減衰定数の同定には ERA⁽⁶⁾ を用いた。200Hz サンプリングのデータから 400 個用いてハンケル行列を作成し、その行と列のサイズを 3:1 とした。また、特異値分解後の採用次数は 32 とした。

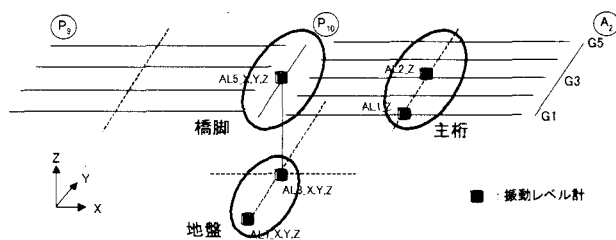
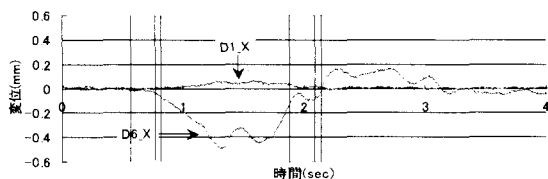
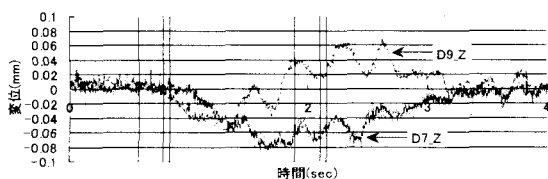


図-6 伝播経路の概略図



(a) 測点 D1 と D6 における橋軸変位



(b) 測点 D7 と D9 における鉛直変位

図-9 リーフサス車両走行時の応答

G1 桁および G3 桁支間中央における加速度波形 (図-2: AL1_Z, AL2_Z) と G3 桁支間中央における変位波形 (図-2: D3_Z) をそれぞれ図-7 および図-8 に示す。なお、同図に示した直線は端垂直補剛材のひずみから得られた各車軸の通過時刻を示している。

これより、加速度と変位の動的振幅は、エアサス車両が走行した場合の方が小さくなっていることがわかる。G1 桁と G3 桁の加速度波形のランニングスペクトルから卓越振動数としては、2.6Hz のたわみ 1 次振動と 3.7Hz のねじれ 1 次振動がどちらも卓越しているが、エアサス車両走行時の方がたわみ 1 次振動の卓越がかなり小さくなっている。また、どちらの車両の場合も進入と同時に卓越が増加していき、退去してから小さくなっている。

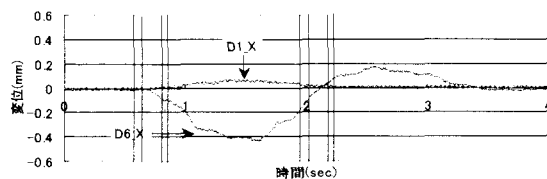
また、各車両が走行したときの加速度波形から卓越振動数と減衰定数を ERA により求め、表-2 にまとめた。これより、たわみ 1 次振動およびねじれ 1 次振動の減衰定数は、リーフサス車両走行時の方が大きい傾向にある。この理由は、後節にて詳述する。

リーフサス車両とエアサス車両がそれぞれ走行した場合の鉛直変位における動的振幅量の違いについて表-3 では、リーフサス車両とエアサス車両が走行速度と車線を変化させて単独走行した場合の G3 桁支間中央における鉛直変位 (図-2: D3_Z) の動的増幅率⁽⁷⁾を示した。これより、リーフサス車両は、動的増幅率が 1.1~1.2 程度であるが、エアサス車両は、1.0~1.1 程度となっており、その違いが顕著に表われている。

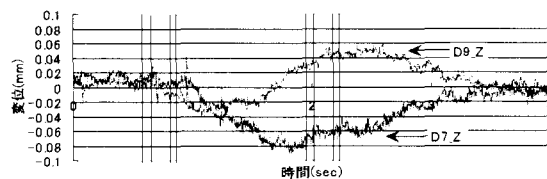
3.3 橋脚の変位応答

リーフサス車両およびエアサス車両が走行した場合の P10 橋脚の橋軸方向変位挙動に着目する。なお、P10 橋脚における支承はすべて鋼製支承 (黄銅支承板支承) であり、A2-P10 間の単純径間側は固定支承となっている。

図-9 (a) および図-10 (a) は、リーフサス車両およびエアサス車両が走行した場合の測点 D1 (A2 側 G1 可動支承) と D6 (P10 橋脚 G1 側) における橋軸方向変位を示している。なお、同図に示した直線は端垂直補剛材のひずみから得られた各車軸の通過時刻を示している。



(a) 測点 D1 と D6 における橋軸変位



(b) 測点 D7 と D9 における鉛直変位

図-10 エアサス車両走行時の応答

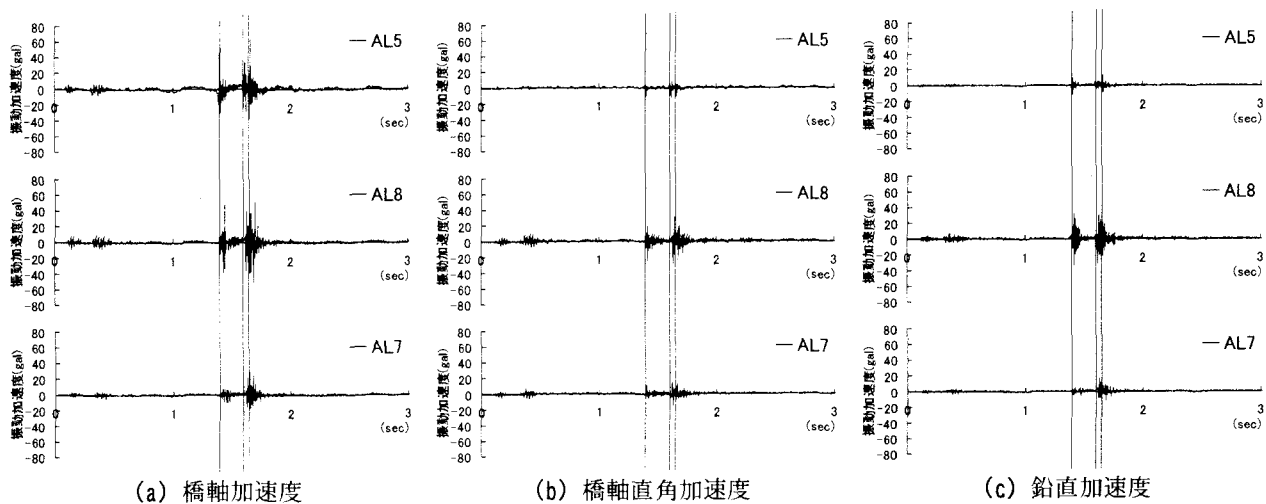


図-11 リーフサス車両走行時の応答

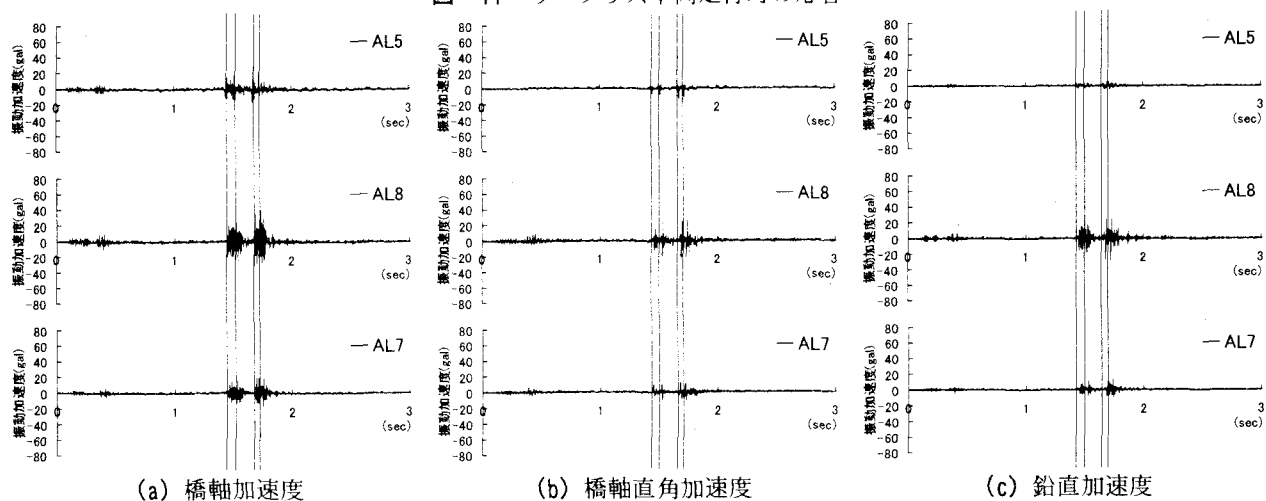


図-12 エアサス車両走行時の応答

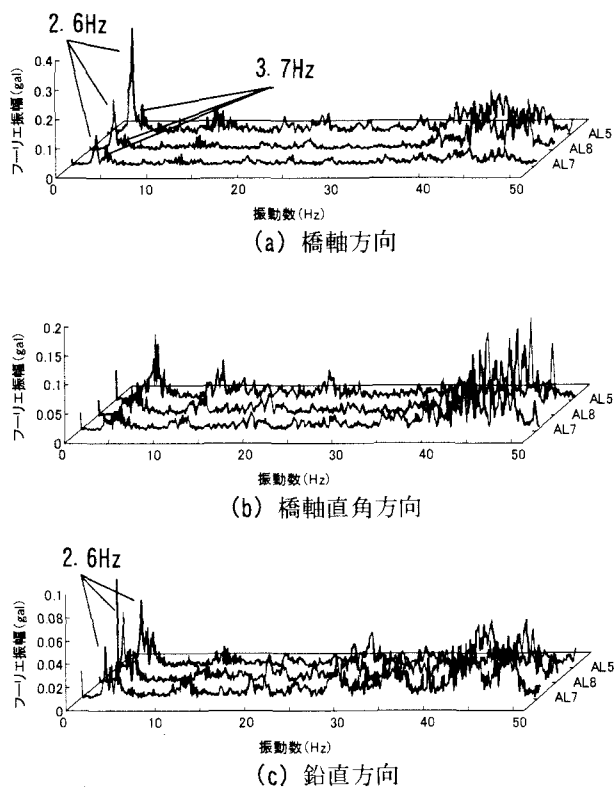


図-13 リーフサス車両走行時のスペクトル波形

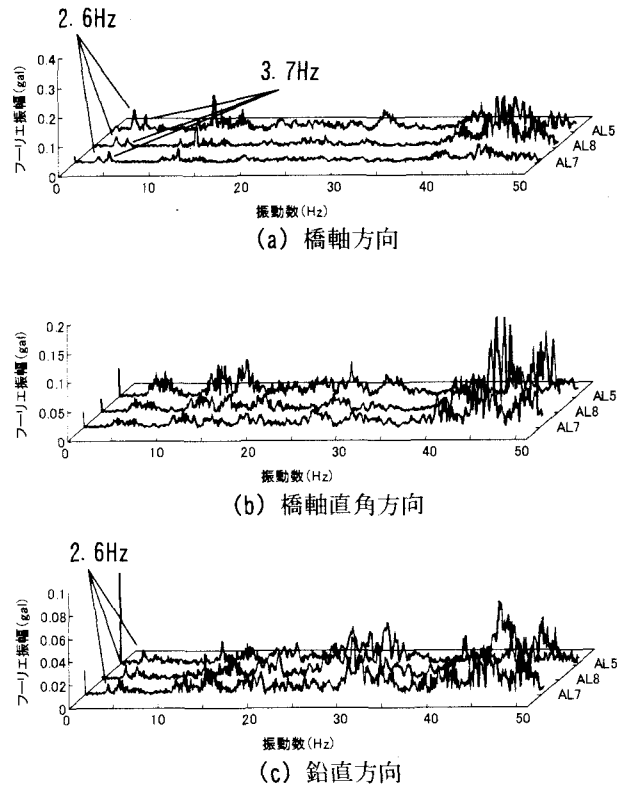


図-14 エアサス車両走行時のスペクトル波形

D1では、ほとんど移動量がないが、D6では、たわみに伴う橋軸方向の変位が可動支承より大きいことがわかる。すなわち可動支承においては、摩擦により移動量が拘束されているため、橋脚がかわりに橋軸方向へ動いている。これらの変位はたわみやねじれ振動の成分がほとんどであり、この振動数領域ではリーフサス車両に比べてエアサス車両の振動加速度が小さいのでエアサス車両走行時において動的成分が小さい。

また、表-3で示したようにたわみ1次振動およびねじれ1次振動の減衰定数は、リーフサス車両走行時の方が大きい傾向にある。この理由として、リーフサス車両が走行した場合、主桁が大きく加振され、それに伴い可動支承の代わりとなって橋脚が大きく振動することで振動エネルギーを吸収し、減衰が大きくなった。

図-9(b)および図-10(b)は、リーフサス車両およびエアサス車両が走行した場合の測点D7(P10橋脚G1側鉛直)とD9(P10橋脚G5側鉛直)における鉛直方向変位を示している。これより、各車両が走行車線を走行した場合T型橋脚横梁が逆位相で変位していることがわかる。また、G1側とG5側での変位の最大値に位相のずれがあり、複雑な変位挙動を示していることがわかる。

3.4 伝播経路における加速度応答

図-11～図-14にリーフサス車両およびエアサス車両が走行した場合の伝播経路(図-6:橋脚天端AL5→橋脚基部AL8→官民境界AL7)に沿った各測点の3軸方向の加速度波形とそのスペクトル波形を示す。なお、図-11、図-12に示した直線は端垂直補剛材のひずみから得られた各車軸のP10橋脚通過時刻を示している。

図-11および図-12より各車両が走行した場合、P10橋脚は橋軸方向に大きく振動していることがわかる。こ

れらの各波形をリーフサス車両およびエアサス車両と比較すると、橋軸方向のAL5とAL8においてエアサス車両走行時の加速度振幅が低減している。各波形の衝撃的な振動波形は各車両の車軸の通過時刻と同期していることがわかる。特に後輪後軸が通過した時刻に大きな振幅が見られる。

また、図-13および図-14より橋脚天端上における3軸方向の加速度スペクトルをリーフサス車両およびエアサス車両で比較すると、どちらの車両が走行した場合もばね下振動数領域10Hz～20Hzの卓越振動数のフーリエ振幅はそれほど差異がないが、たわみ1次(2.6Hz)およびねじれ1次(3.7Hz)の卓越振動数においてエアサス車両の方が小さくなっている。これは、エアサス車両は、ばね下振動に対しては、リーフサス車両と同程度の加速度振幅となっているのに対して、ばね上振動に対する加速度振幅は小さくなっているためと考えられる。

次にリーフサス車両およびエアサス車両が走行した場合の官民境界における地盤上の3軸方向の加速度波形(図-11、図-12:AL7)に着目する。

地盤上における加速度は橋脚天端と同様に橋軸方向が大きな振幅となっている。地盤に伝播している主な卓越振動数としては図-13および図-14より、橋軸方向では、たわみ1次(2.6Hz)およびねじれ1次(3.7Hz)が大きく卓越し、高周波領域では、ばね下振動数領域10Hz～20Hzと40Hz以上で卓越が見られる。橋軸直角方向では、橋脚固有の卓越振動数と考えられる4Hz～5Hzさらに、ばね下振動数領域10Hz～20Hzと40Hz以上で卓越が見られる。鉛直方向では、たわみ1次(2.6Hz)が大きく卓越し、高周波領域では、ばね下振動数領域10Hz～20Hzと30Hz以上で卓越が見られる。

また、地盤上の3軸方向の加速度スペクトルを伝播経

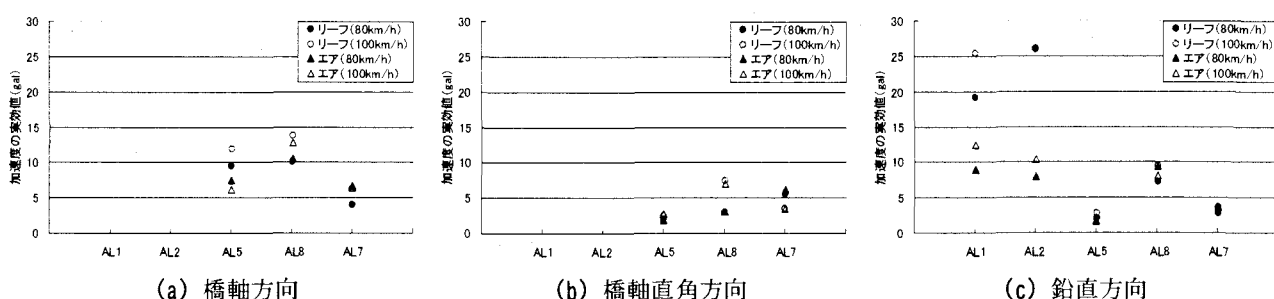


図-15 加速度の最大実効値(走行車線走行時)

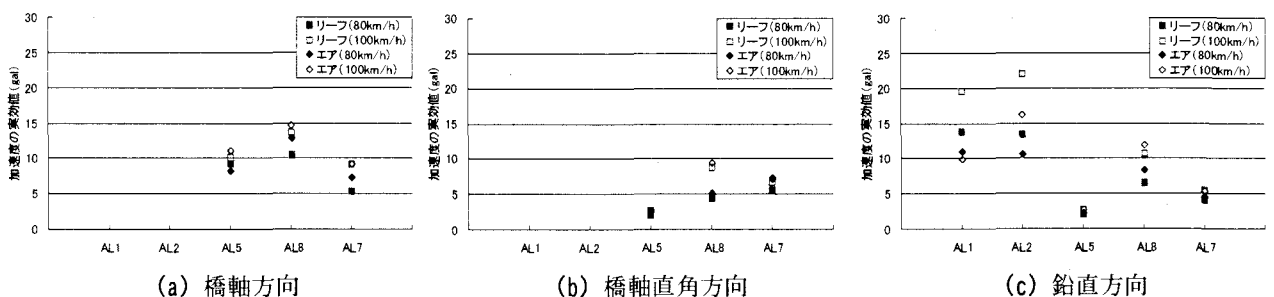


図-16 加速度の最大実効値(追越車線走行時)

路上 (AL5→AL7) で見ると、橋脚天端から地盤まで概ね同成分の周波数が伝播しており、リーフサス車両およびエアサス車両で比較すると、どちらもばね下振動数領域 10Hz～20Hz の卓越振動数のフーリエ振幅はそれほど差異がないと考えられるが、たわみ 1 次 (2.6Hz) およびねじれ 1 次 (3.7Hz) の卓越においてエアサス車両の方が明らかに小さくなっている。

3. 5 伝播経路での加速度の最大実効値

リーフサス車両とエアサス車両がそれぞれ 80km/h、100km/h で走行車線および追越車線を走行した際の伝播経路上の各測点における加速度の最大実効値を図-15 および図-16 にまとめ、各測点での影響について考察する。

まず、主桁上 (AL1, AL2) に着目する。車両ばね上振動数に近い卓越振動数を有する主桁上では、エアサス車両による低減が顕著に見られる。

次に、橋脚天端 (AL5) に着目する。橋脚天端では、エアサス車両走行による主桁のような大きな低減は見られず、リーフサス車両と同様な傾向を示している。特に、走行車線、追越車線ともに、3 軸方向の中で橋軸方向が大きな値となっている。

橋脚基部 (AL8) においては、走行車線、追越車線ともに、リーフサス車両とエアサス車両の走行による差が見られない。また、橋脚天端の値に対して、増幅している。さらに、橋軸方向と鉛直方向において、大きな値を示している。

官民境界における地盤上 (AL7) では、走行車線、追越車線ともに、リーフサス車両とエアサス車両の走行による差が見られない。

橋脚や地盤上において、リーフサス車両とエアサス車両の走行による差が見られない理由として、図-4、図-5 の加振振動数に対して、橋脚から地盤に伝播する過程で、図-13、図-14 で示したような 30Hz 以上の高周波領域が大きく卓越していることが要因と考えられる。

4. まとめ

本研究では、リーフサス車両とエアサス車両が走行した際の交通振動による高架橋とその周辺環境への影響について実験的に調べた。

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

(1) 車両側の後輪ばね上の計測からエアサス車両の加速度振幅はリーフサス車両に比べて大きく低減されていた。

(2) 車両ばね上振動数に近い卓越振動数を有する上部構造では、エアサス車両の走行による加速度や変位などの動的振幅の低減が見られた。

(3) 車両側の後輪ばね下測点から、リーフサス車両は、板ばね特有の 10Hz を中心とした山型の分布となっており、時間的な変動はあまり見られなかった。一方、エア

サス車両では、時間的に多くの振動数が卓越していた。

(4) 橋脚天端や地盤上における加速度スペクトルから、エアサス車両は、ばね上振動数に近い振動数領域では、フーリエ振幅に差が見られたが、ばね下振動数領域 10Hz～20Hz におけるフーリエ振幅ではばね上振動ほど両車両の差が明確ではなかった。

(5) 橋脚天端や地盤上におけるリーフサス車両とエアサス車両の最大実効値に差が見られなかった。この理由として、橋脚や地盤に伝播する過程において、30Hz 以上の高周波領域が大きく卓越していたことが要因と考えられる。

本実験は、4 軸のエアサス車両、3 軸のリーフサス車両を試験車として用いた結果を述べたが、車両構造の違いにより各測点の応答はばらつく結果となった。したがって、今後は、一般車の走行状態を長期にわたり計測して数多くサンプルすることにより、車両と各測点の応答の関係を統計的に処理する必要があると考えられる。また、これらの結果は対象とした橋梁およびその周辺地盤により異なる結果を得る場合もあることを付記しておく。

謝辞

本実験におきまして、日本道路公団名古屋支社の方々にご協力頂いた事をここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 讃岐康博、梶川康男、深田宰史、枚本正信：プロフィールメータでの測定路面から実路面への近似法の提案、構造工学論文集、Vol. 47A, pp. 399-410, 2001. 3.
- 2) 深田宰史、梶川康男：短スパン PC 橋の環境振動特性、橋梁振動コロキウム '01 論文集, pp. 167-174, 2001. 10.
- 3) 辻靖三、足立義雄、大西博文、桐越信：新版 道路環境、山海堂, pp. 197-201, 2002. 6.
- 4) 佐藤弘史、間瀬利明、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.
- 5) 因田智博、若尾政克、山田健太郎、小塩達也：支点反力を用いた Bridge Weigh-in-Motion の開発と交通荷重測定、土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, I-725, pp. 1449-1450, 2002. 9.
- 6) Juang, J.N. and Pappa, R.S.: An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction, Journal of Guidance, Vol. 8, No. 5, pp. 620-627, Sept.-Oct., 1985
- 7) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析、技報堂出版, pp. 39-42, 1993. 10.

(2003 年 9 月 12 日受付)