

載荷車両の動的効果を考慮した 道路橋の地震荷重

SEISMIC LOAD OF HIGHWAY BRIDGES UNDER
DYNAMIC EFFECT OF VEHICLE LOADING

亀田弘行*・北 啓之**・盛川 仁***

By Hiroyuki KAMEDA, Hiroyuki KITA
and Hitoshi MORIKAWA

The effect of vehicle loading on the seismic load of highway bridges is discussed. Urban expressways that are subjected to frequent traffic congestions are of primary concern. For this purpose, it is assumed that a bridge is loaded with heavy trucks at the moment of earthquake occurrence. The subject is dealt with as a dynamic interaction problem between bridge structures and vehicles. The vibration modes pertinent to the effect of vehicle loading are identified. The result of earthquake response analysis is examined extensively by comparing the responses of bridge-vehicle system and those of bridge-alone for various conditions of input earthquake motions and truck weight. From these results, the effect of vehicle loading on the seismic loads is made clear. On this basis, some comments are made on bridge design.

1. まえがき

現行の道路橋耐震設計基準では道路橋に被害を与えるような大地震と交通渋滞とが同時に生起する確率は小さいという前提により、地震時における活荷重の影響は考慮しなくてよいことになっている¹⁾。しかし都市域で常に渋滞が発生しているという今日の交通事情を考えれば、必ずしもこうした前提が妥当であるとはいえない。本研究では車両が載荷された状態での道路橋について、車両の重量を支配する積載率、橋梁上での車両の載荷位置、および入力地震動の特性を種々変化させて地震応答解析を行い、橋梁の地震荷重に対する載荷車両の動的効果について考察する。

載荷車両が道路橋の地震荷重に与える影響としては次の2つの側面が考えられる。1つは『載荷車両の重量により桁重量が増加することに起因する効果(静的効果:static effectと呼ぶ)』である。静的効果は主として橋梁の地震荷重を増幅する方向に働く。もう1つは『載荷車両と橋梁の間にタイヤや緩衝ばね等の減衰機構が存在することに起因する効果(動的効果:dynamic effectと呼ぶ)』である。卓越するモードによって載荷車両の存在は橋梁の地震荷重を増幅させる場合と低減させる場合がある。実際の振動においてはこれらの効果が複雑に影響し合っている。本研究は車両の載荷条件や入力条件等を様々に変化させてシミュレーションを行いどの様な条件下での効果が卓越するかを定量的に把握することにより、都市高速道路の耐震設計や総合的な地震防災対策に寄与することを目的とする。これまで本研究の進展に従い、いくつかの報告を行ったが²⁾³⁾⁴⁾本論文はそれらを取りまとめて総合的な考察を行うものである。

- * 工博 京都大学教授 防災研究所都市施設耐震システム研究センター (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)
** 京都大学大学院(防災研究所都市施設耐震システム研究センター) (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)
*** 京都大学大学院(防災研究所都市施設耐震システム研究センター) (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

2. 橋梁・車両の基本モデルとその特性

2.1 橋梁のモデル化

載荷車両が橋梁の地震応答に与える影響は活荷重/死荷重(比)が大きいほど顕著になると考えられる。従って本研究課題は長大橋梁よりも、都市高速道路橋のような通常規模の橋梁においてより重要な問題となる。このような観点から、本研究ではスパン長23m 4車線、桁重量 325tonfの比較的短スパンの道路橋をプロトタイプとして図-1に示すような振動モデルを作成した。モデルは線形モデルであり7つの節点と8つのエレメントによって構成されている。節点間に拘束がありまた上下動を考慮していないため、20自由度モデルとなっている。減衰諸元の算出にあたっては、橋梁モデルを1つの節点とそれに接続するエレメントからなる構成要素に分解し、各要素毎に減衰定数を与え再びそれらを組合せる方法を用いた。各要素の減衰特性がかなり異なるため複素固有値⁵⁾の手法によりモード分解と応答計算を行った。表-1に橋梁の固有周期、減衰定数、及び刺激係数を示した。モデル化の詳細については文献²⁾を参照されたい。

2.2 車両のモデル化

車両のプロトタイプには11tonf積クラスの大型トラックを設定し、ローリングとピッチングからなる非連成2自由度回転倒立振子としてモデル化した。バウシング振動は考慮しない。また、渋滞時を想定しているため車両は全て停止しているものとする。車両の載荷位置については、桁の路面をスパン方向に3等分×4車線、計12分割し様々な車両配置での応答計算が可能にしてあるが、本研究では4隅に同じ積載率を持つ車両をそれぞれ1台ずつ計4台の対称載荷の場合を中心に考察をすすめた。これらの大型車両の間は軽量車両で埋められていて、その影響は無視できるものと想定した。

また車両には積荷が存在し、その量を積載率(loading ratio) r なるパラメータにより評価する。積載率 $r=0.0$ は積荷の無い状態を表し $r=1.0$ は法規上の満載状態を表す。以上のような車両と橋梁のモデル

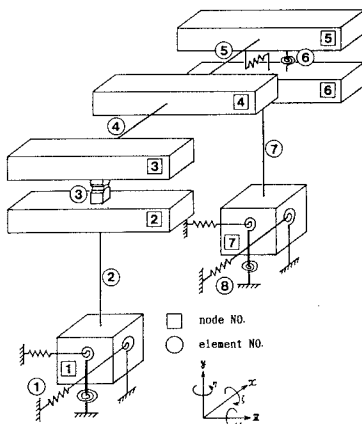


図-1 橋梁-車両連成モデル

表-1 橋梁単独系の振動モード

モード	周期 (SEC.)	減衰定数	刺激係数			
			固定支承側		可動支承側	
			LG	TR	LG	TR
1-ST	0.9346	0.0797	0.0	0.1385	0.0	0.1417
2-ND	0.9245	0.2265	0.4447	0.0	0.0497	0.0
3-RD	0.5517	0.4038	0.0246	0.0	0.5317	0.0
4-TH	0.2764	0.1615	0.0	0.2673	0.0	0.2688
5-TH	0.2412	0.1054	0.0	0.0010	0.0	0.0010
6-TH	0.1770	0.2510	0.0	0.1807	0.0	0.1797

LG = 橋軸方向、TR = 橋軸直角方向、刺激係数は絶対値

を結合することにより橋梁-車両連成系を構成する。これに加え車両による質量増加の影響のみを調べるため、車両を剛体と考え、桁上に剛結されているものとする仮想的な状態をも解析する。前者を動的載荷 (dynamic loading)、後者を静的載荷 (static loading) と呼ぶ。図-2 に積載率に対する車両の重量変化、ローリング、ピッチング周期の変化を示す。

2.3 橋梁-車両連成系の振動モード

積載率 $r=1.0$ なる車両を4台対称載荷した場合の主要な振動モードを図-3に示す。図中() 内に示される数字はそのモードに対応する橋梁単独系での振動次数である。連成系1次モードと連成系6次モードは共に橋梁単独系における1次モードに相当するが橋梁と車両の振動の位相が異なっている。連成系1次モードでは橋梁と車両が同位相で振動しており、連成系6次モードでは逆位相で振動している。従って前者が励起された場合に

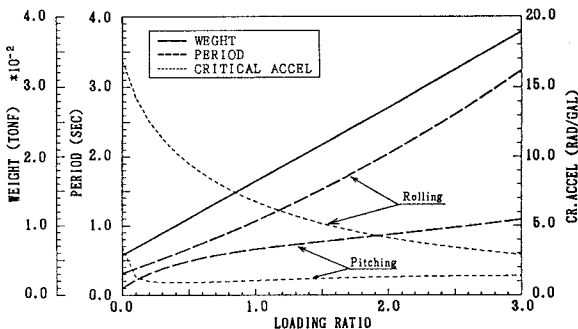


図-2 車両の積載率と重量、振動周期の関係

は車両の存在は橋梁の地震荷重を増大させ、後者が励起された場合には車両はあたかもダイナミックダンパーのように動き橋梁の地震荷重を低減させる。以後、連成系1次モードを共振モード (amplifying mode)、連成系6次モードを制振モード (controlling mode) と呼ぶ。共振モードと制振モードの周期が接近していることが橋梁と車両の相互作用を複雑にしている原因の一つである。連成系14次モードは橋梁6次モードに相当するが、これも一種の共振モードであると考えられる。

3. 橋梁-車両連成系の応答特性

3.1 周波数応答特性

(1) 橋軸直角方向入力の場合

図-4 は積載率による基礎底面せん断力の周波数応答の変化を見るものである。橋梁単独系の応答では0.95秒付近に1次モードが存在するほか、0.2秒付近に6次モード、0.1秒付近に10次モード (基礎の振動モード) の極大がある。橋梁-車両連成系においては積載率にかかわらず、0.7秒以下の短周期側では橋梁単独系の応答と一致し0.7秒以上の長周期側では静的載荷と動的載荷で積載率による応答の変化が全く異なる。仮想的状態である静的載荷の場合、周波数応答曲線の形状は基本的に橋梁単独系と同様の傾向を示すが、積載率の増加と共に1次モードは長周期側へ移動すると共に極大値を大きくする。一方、より現実に近い動的載荷の場合、積載率 $r=0.7$ までは積載率の増加と共に連成系1次モード (=共振モード) が成長しており、1.0秒以上の周期では静的載荷の場合の応答さえも上回っている。橋梁と車両が共振することにより動的な励振効果が現れるためであると考えられ、連成系の地震応答が橋梁単独系の応答を越える可能性があることを示唆している。積載率 $r=0.7$ 以上では共振モードは長周期側へ移動しつつその極大値を小さくし、逆に連成系6次モード (制振モード) が成長している。従ってここでは共振モードと制振モードが共存することになる。さらに積載率を大きくすると、制振モードは橋梁単独系における1次モードよりやや長周期側にほぼ同じ高さで収束する。

一方、車両の応答は二つの極大を持っている。1つは連成系1次モードの振動に、もう1つは6次モードに同調するものである。積載率が比較的小さく車両と共振モードの固有周期が近い場合には共振モードのピークが成長し、積載率の増加により車両と共振モードの固有周期の差が大きくなると共振モードのピークは低下し、制振モードが卓越するようになる。また、0.5秒以下の短周期側では車両の応答がほとんどでていない。従って短周期成分の入力を行った場合車両の動的影響は現れないと考えられる。

(2) 橋軸方向入力の場合

図-5 は基礎底面せん断力の周波数応答である。橋梁単独系では0.9秒付近にある極大が橋梁2次モードにあたる。このモードの減衰定数の大きさのために橋軸直角方向でのものよりなだらかな形状となっている。また、0.1秒付近に橋梁7、8次モードの極大が存在する。

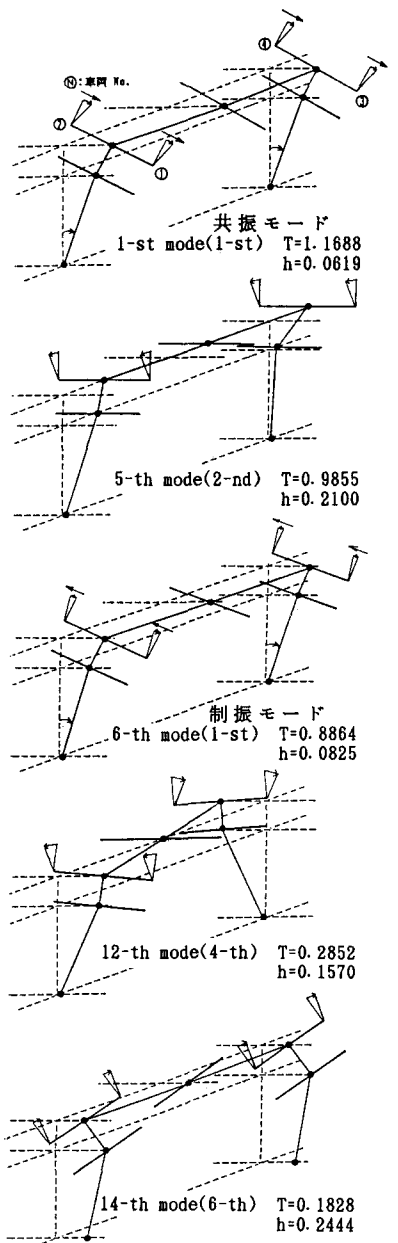


図-3 橋梁-車両連成系の振動モード (カッコ内は橋梁単独系の次数)

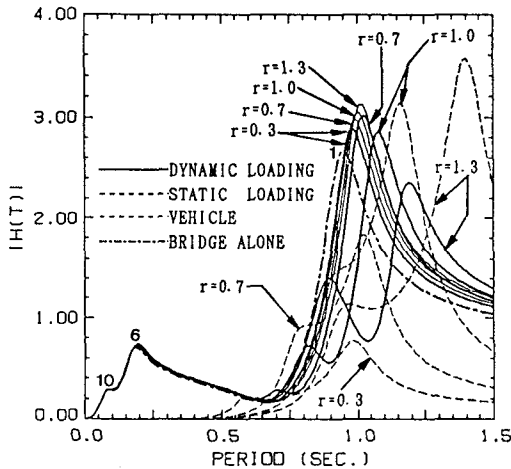


図-4 積載率による基礎底面せん断力の周波数応答関数の変化(橋軸直角方向入力)

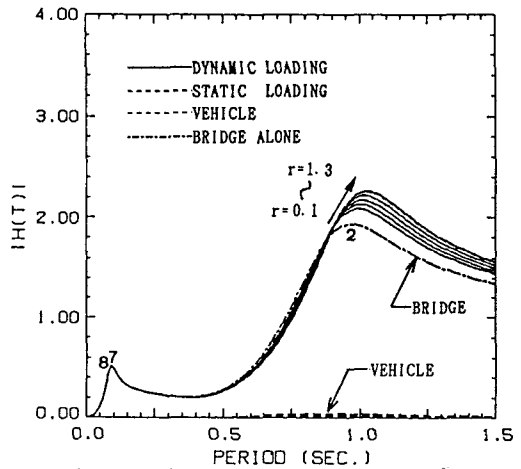


図-5 積載率による基礎底面せん断力の周波数応答関数の変化(橋軸方向入力)

橋梁-車両連成系の特性は静的荷重の場合とほぼ一致しており、橋梁2次モードは積載率の増加と共に長周期側へ移動しつつピークが増大する。また車両は、橋軸直角方向入力の場合に比べほとんど揺れない。このことより橋軸方向振動では車両の動的影響は極めて小さく、静的な効果のみを認めることができる。また、短周期側では静的荷重、動的荷重共に橋梁単独系の特性とほぼ一致しており、高次モードには車両の影響がないことがわかる。

以上は基礎底面せん断力の周波数応答関数に関する考察であるが、橋脚下端曲げモーメントの周波数応答は短周期側のモードの形状が若干異なることを除けば橋軸直角方向入力、橋軸方向入力の場合共に、基礎底面せん断力と同じ傾向の応答を示す³⁾。

3.2 時刻歴応答特性

この節では荷重車両が橋梁の地震荷重に与える影響について時間軸上で考察する。図-6、図-7、図-9は様々な入力、積載率について行った応答解析で得られた時刻歴の中から特徴のある例を選んだものである。なお、入力にはバンド幅の異なる3種のスペクトルから卓越周期を変えてそれぞれ13個の模擬地震動を発生させたものを用いた。応答時刻歴各図(a)では車両の振動(太線)と動的荷重の場合の上部構造相対変位の振動(細線)の間の位相差の有無を見ると共に、橋梁単独系の場合の上部構造相対変位の時刻歴(破線)との比較により車両荷重による上部構造の振動の変化を見る。橋脚下端曲げモーメントの応答は主として上部構造相対変位に支配されるため、上部構造相対変位に関する考察は橋脚下端曲げモーメントにも適用できるとみても良い。図(b)は動的荷重の場合(実線)と橋梁単独系の場合(破線)の基礎底面せん断力の時刻歴を重ね書きしたものである。

(1) 橋軸直角方向入力の場合

図-6、図-7は狭帯域の入力を行った場合の時刻歴で、それぞれ共振モード、制振モードが卓越する場合である。図-6では積載率 $r=0.75$ の車両を4台対称荷重し、卓越周期 $T=1.099$ 秒の入力を行った。同図(a)を見ると車両の荷重により上部構造相対変位の振動周期が延びていることと共に、車両と上部構造が同位相で振動していることがわかる。従って動的な励振効果が卓越し、上部構造相対変位の振動は橋梁単独の場合に比べて最大応答値で43%増加している。これを受けて同図(b)に見られるように、基礎底面せん断力についても30%応答が増幅している。

図-7は制振効果が卓越する例である。これは積載率を $r=1.25$ とし図-6と同じ入力を与えたときの応答である。同図(a)より車両と上部構造が逆位相で振動していることがわかる。従って制振効果が卓越し、橋梁単独系の応答に比べ上部構造相対変位、基礎底面せん断力は共に約25%低減している。

このように入力と同じであっても車両の積載率が異なると応答の様相は大きく違うことがわかる。また積載率が等しくても入力が異なると、励振効果と制振効果の現れ方が違ってくる。

以上をまとめると載荷車両による静的な増幅効果、動的な励振効果、動的な制振効果は種々の形で組み合わせられて出現しており、その大小関係によって最終的な応答強度が決まっている。この関係を図-6、図-7の2種のケースについて概念的に示すと図-8のようになる。

(2) 橋軸方向入力の場合

図-9は積載率 $r=0.66$ の車両4台が対称載荷された橋梁に対して橋軸方向にやや広帯域の入力を行った場合の時刻歴である。なお、この図における車両の時刻歴は橋軸直角方向入力の場合の10倍のスケールで表示している。同図(a)より車両のピッチング振動は上部構造の水平変位と逆位相で振動しているが橋軸方向の車両振動振幅は橋軸直角方向の約100分の1しかないため車両の動的効果は認められず、主に桁重量を増加させることによって橋梁の振動を増幅させていることがわかる。

3.3 最大応答特性

(1) 橋軸直角方向入力の場合

図-10～図-11ではいずれも横軸に入力地震動の卓越周期を、縦軸に各断面力力の最大応答値を入力地震動の最大速度で正規化した値をとっている。図中の実線は橋梁単独系の場合の応答を示しており記号は表-2に示す載荷パターンの場合の応答である。また図-10におけるEQ 1～EQ 4で示した結果は実地震動に対する応答である。

図-10は橋脚下端曲げモーメントに関する図である。橋梁単独系の応答に関しては卓越周期 0.8秒付近にピークが見られるなど橋梁1次モードの応答

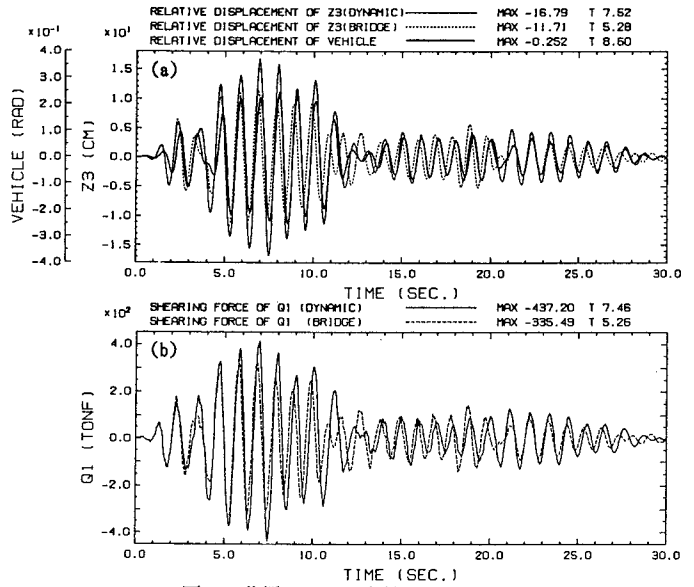


図-6 共振モードが卓越する場合の時刻歴 (橋軸直角方向狭帯域入力, $r=0.75 \times 4$ 台)

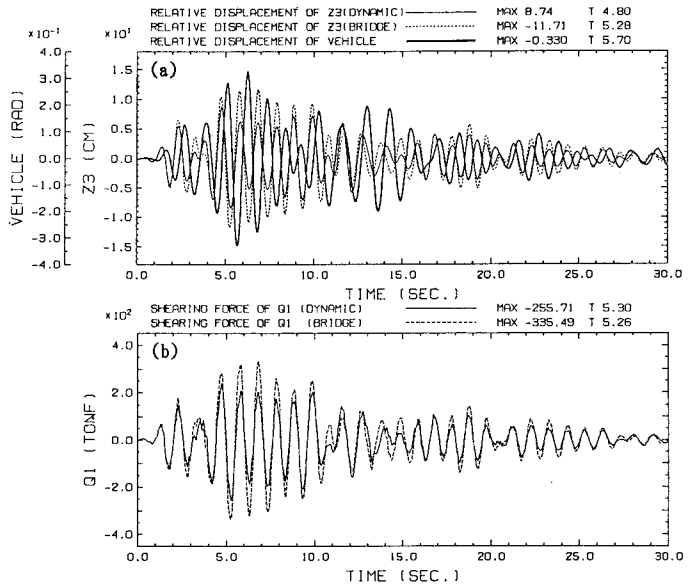


図-7 制振モードが卓越する場合の時刻歴 (橋軸直角方向広帯域入力, $r=1.25 \times 4$ 台)

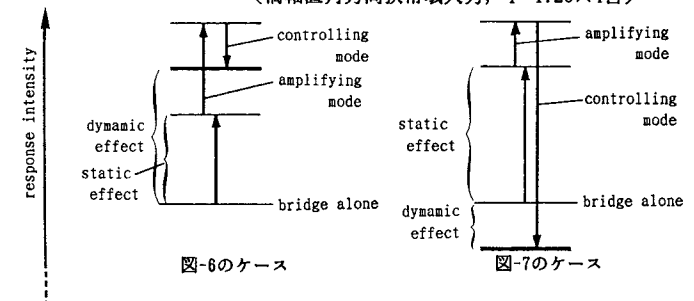


図-8 車両載荷の影響の概念図 (図-6, 図-7に対応)

に負うところが大きく、橋梁全体系の振動特性を反映して通常の共振曲線に近い形状となっている。それに対し、図-11に示す基礎底面せん断力では応答は左上がりの形状で、橋梁6次モード（橋脚の2次モード）及び橋梁10次モード（基礎の振動モード）といった高次モードによる影響が目立っている。すなわち局所的な振動特性が卓越しているといえる。

橋梁単独系での応答特性が主に系全体の振動特性と局所的な振動特性の2通りの特性から構成されているのに対応して車両による影響もそれに応じて2通り存在する。系全体の振動特性が現れている応答（橋脚下端曲げモーメント）に関しては、静的荷重する

と車両の静的な増幅効果により、車両の総重量の大きい荷重パターンほど橋梁単独系の応答を大きく越える。動的荷重とした場合は、長周期側で荷重パターンによって橋梁単独系の応答を上回る場合と下回る場合がある。車両があまり振動しない短周期側では静的荷重、動的荷重共に橋梁単独系の応答に収束している。また、実地震動を入力した場合の応答に関しては模擬地震動と比較して同様の傾向を示していることがわかる。局所的振動特性が現れている応答（基礎底面せん断力）に関しては、静的荷重とすると橋梁単独系の応答を周期にかかわらず越え、動的荷重すると短周期側で荷重パターンによらず橋梁単独系の応答を上回り、長周期側で下回る傾向を示す。ただし最も長周期側ではAパターンに関しては橋梁単独系の応答を上回っている。ここで示されるような車両の影響は周波数応答特性とも良く符合する。

(2) 橋軸方向入力の場合

図-12は橋軸方向入力に対する基礎底面せん断力の応答である。動的荷重の場合と静的荷重の場合の応答が完全に一致している。3.1(2)でみたように橋軸方向振動では車両はほとんど剛体的にふるまい、質量増加の効果、すなわち静的効果が卓越することがここでも確認できる。

3.4 橋梁単独系に対する地震荷重の増減（橋軸直角方向）

これまでの考察で橋軸方向の応答に対する荷重車両の影響は比較的単純であるが、橋軸直角方向入力の場合には、応答は車両の積載率や入力地震動の性質によって様々に変化することがわかった。この節では橋梁単独系に対する応答の増減の度合という観点より、橋軸直角方向の応答に与える荷重車両の影響についてさらに詳細に検討する。図-13～図-16は入力と積載率の影響を総合的に把握するために、横軸に入力地震動の卓越周期を、縦軸に積載率をとり、車両を動的荷重した場合の各断面力の最大応答値 ($R_{dynamic}$) を橋梁単独系での最大応答値 (R_{bridge}) で正規化して得られた値 ($(R_{dynamic}/R_{bridge}-1) \times 100\%$) より作成した応答増減率コンター図である。図中にある破線は積載率による共振モード（図-3における連成系1次、14次モード）の固有周期の変化を表し、一点鎖線は制振モード（連成系6次、12次モード）の固有周期の変化を表している。

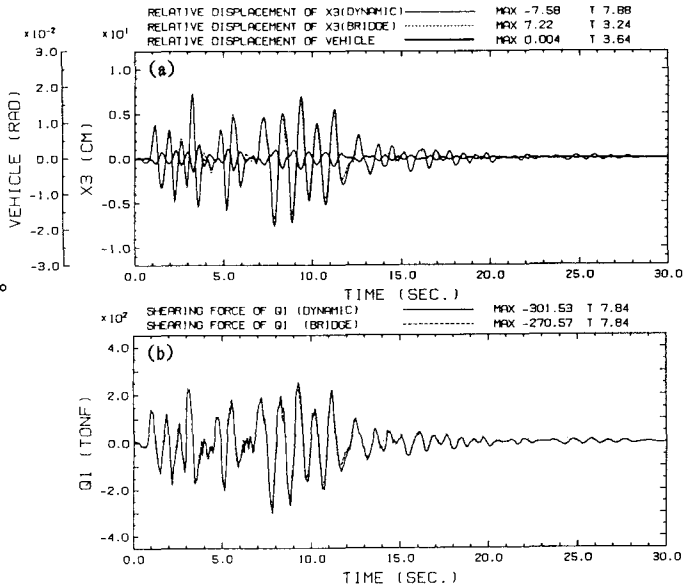


図-9 静的増幅効果が卓越する場合の時刻歴（橋軸方向広帯域入力， $r=0.68 \times 4$ 台）

表-2 車両荷重パターン

pattern	A	B	C	D
積載率	0.66	0.85	1.00	2.27
荷重位置	対称	対称	対称	非対称
総重量(tonf)	50.12	58.12	64.40	29.44
rollong(sec)	0.79	0.94	1.07	2.35
pitching(sec)	0.55	0.61	0.66	0.92

図-13は狭帯域の入力を行った場合の橋脚下端曲げモーメントの応答である。連成系1次モード（共振モード）のライン上の積載率の小さい部分では制振モードがほとんど成長していないため動的な制振効果はほとんど存在しないが、桁重量増加が小さく、3.1(1)でも考察したように車両の固有周期との間にずれがあるために、共振モードの励起の度も小さく、応答の増幅率は余り大きくない。積載率が $r=0.7$ 前後では車両との固有周期が接近し、共振モードが成長するため応答の増幅率が最大になる。積載率をさらに大きくすると車両と橋梁の固有周期の間に再びずれが生じ、共振モードが低減すると共に制振モードが成長するため、応答の増幅率は小さくなる。一方、連成系6次モード（制振モード）のライン上では、積載率が小さい場合には制振モードが成長しないため、応答は0~10%程度の低減率にとどまっている。積載率が $r=0.7$ を越える辺りからは制振モードが徐々に励起され始め、応答が20~30%低減する部分も現れる。さらに積載率を大きくし $r=1.8$ 以上になると、制振モードの固有周期のライン上にもかかわらず、わずかではあるが応答増を生じる部分がある。これは入力との相対的な関係により制振モードが橋梁の地震応答を増加させる例である。橋梁-車両連成系の応答には共振モードと制振モードの相対的な貢献の度合いが反映され、車両載荷の影響の複雑さがかがえる。

図-14は橋軸直角方向に狭帯域の入力を行ったときの基礎底面せん断力の応答である。せん断力の場合には、短周期側で共振モード（図-3での14次モード）の影響により応答の増幅が生じているが、長周期側での傾向は曲げモーメントとほぼ同じである。すなわち狭帯域入力の場合には単一のモードのみが励起されるため、曲げモーメント、せん断力にかかわらず応答は似通ったものとなる。

図-15は橋軸直角方向に広帯域入力を行った場合の橋脚下端曲げモーメントの応答である。積載率 $r=0.6$ 以下では0.4秒以下の短周

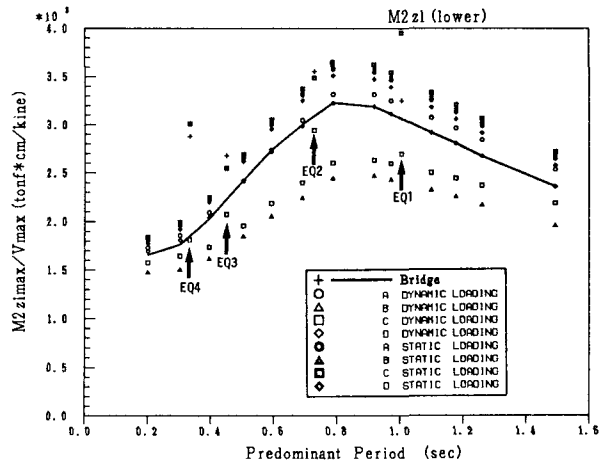


図-10 橋脚下端曲げモーメントの最大応答特性（橋軸直角方向広帯域入力）

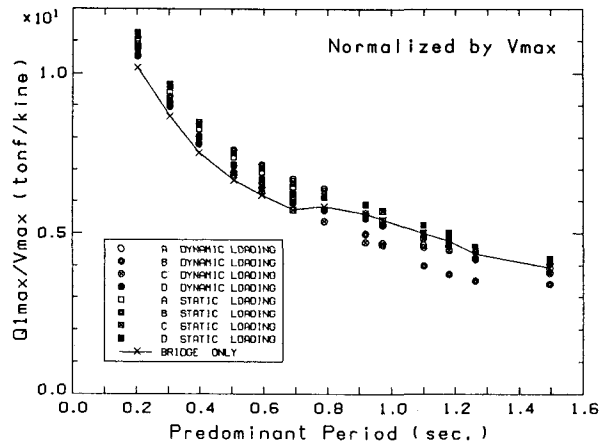


図-11 基礎底面せん断力の最大応答特性（橋軸直角方向広帯域入力）

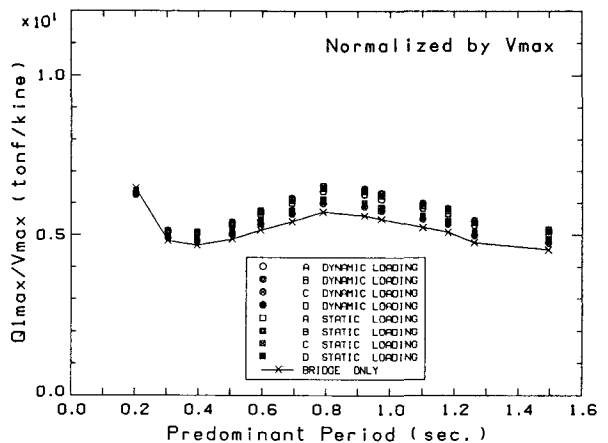


図-12 基礎底面せん断力の最大応答特性（橋軸方向広帯域入力）

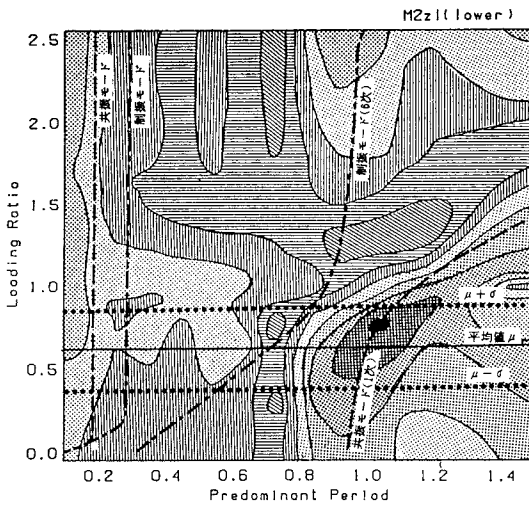
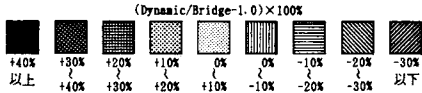


図-13 橋脚下端曲げモーメントに対する積載率と卓越周期の影響（橋軸直角方向狭帯域入力）

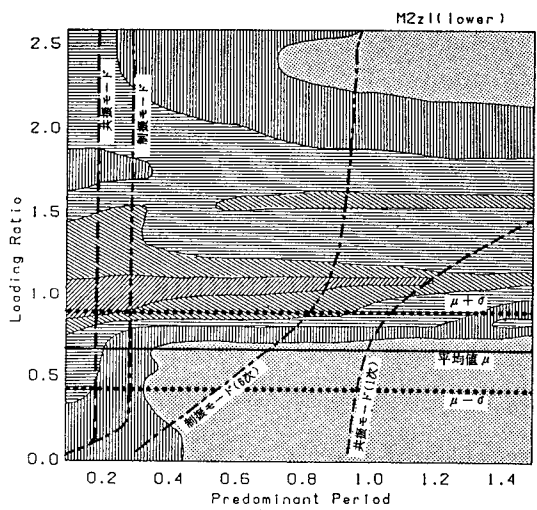


図-15 橋脚下端曲げモーメントに対する積載率と卓越周期の影響（橋軸直角方向広帯域入力）

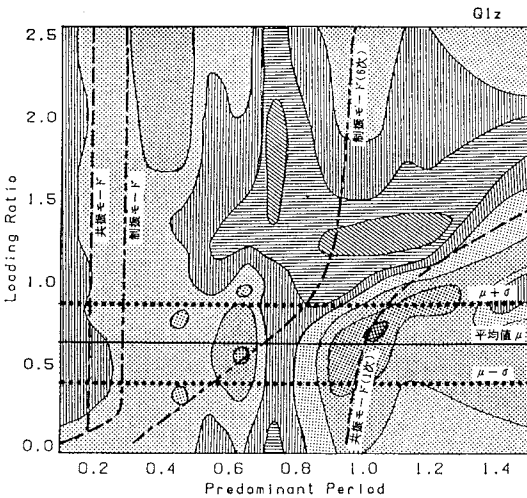


図-14 基礎底面せん断力に対する積載率と卓越周期の影響（橋軸直角方向狭帯域入力）

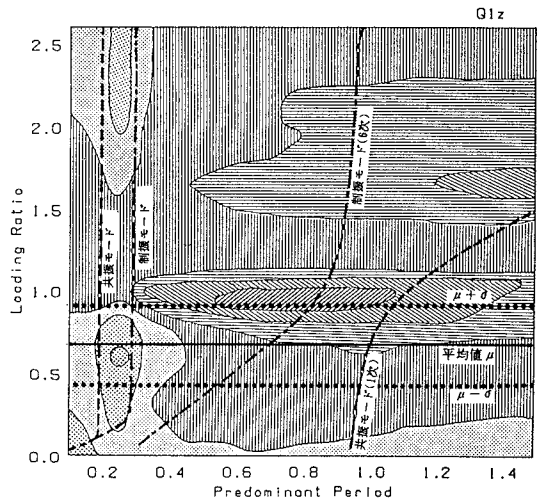


図-16 基礎底面せん断力に対する積載率と卓越周期の影響（橋軸直角方向広帯域入力）

期入力の場合を除いて応答の増幅が起こっている。この増幅は広帯域の入力の場合、たとえその卓越周期が短周期側にあるといえども長周期の入力成分が0ではないため、共振モードがあるていど励起されることによる影響である。また、積載率 $r=2.1$ 以上、入力の卓越周期 0.8 以上での応答の増幅は、狭帯域入力の場合と同様に入力との相対的關係により制振モードが橋梁の地震応答を増幅させている部分である。

図-16は広帯域の入力を行った場合の基礎底面せん断力の応答である。長周期側で応答の増幅が生じる範囲が橋脚下端曲げモーメントの場合に比べて小さくなっている。それに対して 0.3秒付近で短周期側の共振モードの励起による応答の増幅ははっきりと現れる。

広帯域入力の場合には複数のモードが同時に励起されて、それらが曲げモーメントやせん断力に及ぼす

相対的な影響が異なるため両者の応答は違った様相を示す。また応答の増幅、低減の度合も狭帯域入力の場合に比べて小さくなる。

4. 車両荷重の実態との対比

本研究で行った応答解析は4台の大型トラックが対称載荷された場合に限ったものである。しかし現実の橋梁上での荷重状態は、ある確定したものというわけではない。従って地震荷重と活荷重の組合せを考えるためには橋梁-車両連成系の振動の基本特性を知ると共に、地震時に活荷重がどのような状態になり得るかを知らなければならない。著者らは本論文とは別に、阪神高速道路HDL委員会⁶⁾の報告をもとに渋滞時の都市高速道路における活荷重を確率論的に取り扱うことのできるモデルを作成した⁴⁾。図-13~図-16における横軸に平行な実線は、都市高速道路橋上の載荷車両の台数と全重量の同時確率分布より大型車4台載荷の場合の1台あたりの平均重量(μ)を求め積載率に換算して記入したもので、点線は $\mu \pm \sigma$ の範囲を示している。

図-13、図-14に見られる狭帯域入力の場合には、 $\mu \pm \sigma$ の範囲に占める応答増加部分の割合が大きく、しかも共振モードの励起により増幅率の最も大きい部分を完全に含んでいることがわかる。

広帯域入力を行った場合の橋脚下端曲げモーメントの応答(図-15)では増幅率は小さいものの $\mu \pm \sigma$ の範囲の約半分が増幅域となっている。同じく広帯域入力の場合の基礎底面せん断力の応答(図-16)では $\mu \pm \sigma$ の範囲の大部分で応答の低減が生じているが、短周期側にある最も増幅率の高い部分を含んでいる。基礎底面せん断力の場合には、短周期側の応答の絶対量が大きい(図-11)この応答増は無視できるものではない。

以上のことから、大型車両4台載荷の場合には実際に生起する確率の高い積載率の範囲で、応答の増幅が生じやすいことがわかる。

5. 道路橋の地震時挙動に対する載荷車両の影響に関する考察

5.1 地震荷重評価について

本研究により、大型車両載荷時における道路橋の地震荷重の動的特性をかなりの程度明かにできたと考えられる。ただ、ここでは大型車両の載荷状態を橋面4隅に対称に載荷した場合のみを扱っているため、種々変動する交通の実態を含めて耐震設計上の判断をするためにはなお検討すべき項目がとり残されている。特に、他の載荷状態に対する応答解析を行うと共に交通荷重の確率論的扱いをさらに進め、その結果と併せて総合的な判断を行うことが必要であろう。詳細な定量的評価はそれらの作業を経て得られるべきものであるが、現段階での総括としては定性的に以下のようなことを指摘できよう。

まず、橋軸直角方向地震荷重については、大型車両の載荷により場合によっては橋梁単独系と比較して、橋脚躯体または基礎に対し、地震荷重が40%程度も増加する場合がある。ただしこれは、共振モードが強く励起されるように橋梁のロックンク振動と車両のローリング振動の固有周期が接近し、かつ入力地震動が狭帯域の特性を有し、その卓越周期が一致するという特殊な場合に限られる。その他の場合には、制振モードが励起されるなど、車両の存在が橋梁の地震荷重を著しく増加させるケースは少ないようである。ただ、ここで扱ったような通常規模の橋梁において、共振モードが最も強く励起されるような車両の積載率が $r=0.5\sim 1.0$ と、最も出現しやすい領域となっていることには十分に注意すべきであろう。これらの結果は、いずれも橋梁-車両系の動的連成効果によるものであり、車両の質量が橋梁の質量に付加されたことによる静的効果は少ない。

次に、橋軸方向地震荷重については、地震動下では車両のピッチング振動が励起され難いため、車両の存在は質量増加という静的効果として現れる。従って、橋軸方向の問題では橋桁に車両質量を剛体的に付加した単純な扱いでよいことになり、本研究で対象とした4両載荷の場合には、積載率により桁重量を10

～25%増しで考えることになる。しかしこの場合でも、車両のブレーキが地震時にどの程度有効に作用して、車両の水平慣性力が橋桁に伝達されるかなど、なお検討を要する問題も残されている。

5.2 道路橋の耐震設計上の問題

以上の考察より、道路橋の設計地震荷重や既存橋梁の耐震対策において車両をどう扱うべきかという観点から、現段階で次のような事項を指摘できよう。

まず、本研究から予測される車両による地震荷重の増加は、少なくとも弾性限度の照査という観点からは無視し得ないと考えられる。従って、大型車両の存在が橋梁の地震時の損傷をある程度大きくすることは十分有り得ると考えられる。この点を制御することを目指すならば、弾性限照査用の地震荷重評価に車両の影響を加味することが検討されるべきであろう。しかしその場合でも、車両は路線延長に一樣に載荷されるわけではないから、各レベルの載荷状態の発生確率と併せた評価が必要である。

一方、橋梁の終局的な耐震性能は非弾性領域でのエネルギー吸収に依存するところが多いのであるが、非弾性領域では橋梁系の剛性が変化するため、橋軸直角方向振動の橋梁-車両連成系モードが励起されても、それが橋梁の崩壊につながるほど極端に成長するとは考え難い。従って、橋梁-車両の動的連成振動が橋梁崩壊の主要な原因になるとは考えなくてよいであろう。ただ、橋梁自体の終局的な変形性能が不十分な場合に、車両の存在がその静的効果によって橋梁の崩壊の危険を助長することは十分考えられ、それは本研究の結果からは橋軸方向でより顕著に現れるであろう。

6. 結 論

本研究では橋梁のプロトタイプとして径間23mの高架単純桁橋1スパン分を、載荷車両として大型トラックを考え、積載率（法規上の満載時を1.0とする。）や入力地震動を様々に変化させて応答解析を行い、種々の条件下で載荷車両が道路橋の地震荷重に及ぼす影響を考察した。以下に得られた結果を述べる。

- (1) 橋梁単独系及び橋梁-車両連成系の固有値特性を解析し、以下のような結果を得た。橋梁単独系として1次モードでも車両との位相差により連成系では1次、6次の2つのモードが存在することがわかった。前者は橋梁と車両が同位相で振動し橋梁の地震荷重を増幅させる共振モードであり、後者は橋梁と車両が逆位相で振動し橋梁の地震荷重を低減させる制振モードである。積載率によっては両モードの固有周期は接近しており、橋梁-車両連成系の応答を複雑にする一因となっている。また高次モードにも共振モード、制振モードに相当する振動特性を持つモードが存在することがわかった。
- (2) 周波数応答特性に関する考察により共振モード、制振モードによる橋梁と車両の振動間のエネルギー交換の様相を知ることができた。地震動を入力した際の時刻歴応答特性、及び最大値応答特性の多くは周波数応答特性からの説明が可能であった。
- (3) 時刻歴応答特性に関する考察により橋梁の振動と車両の振動の位相差と励振効果、制振効果の現れ方の関係を知ることができた。また積載率、あるいは入力のわずかな変化によって橋梁の地震応答が大幅に変化することがわかった。
- (4) 最大応答特性に関する考察では、最大応答の周期特性が変化し支配モードが変わっていく様相を観察した。またコンター図を用いての考察により橋梁-車両連成系の応答に対する積載率、入力地震動の卓越周期、入力のバンド幅等の影響を明かにした。
- (5) 車両の載荷台数と全重量の同時確率分布を応答解析結果にあてはめた結果、大型車両4台の対称載荷に限定した場合であるが、応答増の生じやすい積載率と実際の都市高速道路橋上で生じやすい積載率が共通の範囲に入ることがわかった。
- (6) 現段階での研究結果に基づいて、地震荷重評価および道路橋の耐震設計の立場から載荷車両の取扱い方についての総括を行った。

本研究で得られた成果をさらに充実したものにするためには、今後さらに多くの検討を要する。本文中にもいくつかの事項を指摘したが、それ以外に現在構想されているものに、動的モデルの実験的検証と、ライフライン地震工学の観点からの解析がある。前者については実橋における試験に参画する機会が近く実現する見込みである。後者の問題は、高架橋が連続する都市高速道路において、本研究で扱った問題が特に重要であるとの認識によるものである。これらについても順次研究を進める予定である。

最後に本研究にあたっては阪神高速道路公団より多大の援助を頂いた。また元京都大学大学院の林 泰三氏（現神戸市勤務）にはプログラムの作成、結果の解釈等において協力を頂いた。ここに深謝の意を表す。なお本研究における数値計算には京都大学大型計算機センターのFACOM-M382/VP200システムを用いたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V、耐震設計編、1980年5月。
- 2) 林 泰三・亀田弘行：道路橋の地震荷重評価における載荷車両の影響、京大耐震研究報告、No. 87-1、1987年4月。
- 3) 亀田弘行・北 啓之：載荷車両の動的効果を考慮した道路橋の地震応答特性、京都大学防災研究所年報、第32号、B-2、1989年4月。
- 4) 北 啓之・亀田弘行・盛川 仁：車両載荷のもとでの道路橋の地震荷重について、第20回地震工学研究発表会講演概要、pp. 485～488、1989年7月。
- 5) W. C. Hurty, and M. F. Rubinstein: Dynamics of Structures, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1964.
- 6) 阪神高速道路公団・(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 実態調査資料集、阪神道路公団設計荷重(HDL)委員会報告書、第4編、活荷重分科会報告、1984年3月。

(1989年10月2日受付)