

(122) 車両载荷のもとでの道路橋の地震荷重について

京都大学大学院 学生員 北 啓之
 京都大学防災研究所 正員 亀田 弘行
 京都大学大学院 学生員 盛川 仁

1. はじめに 現行の道路橋の耐震設計基準では道路橋に多大な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。しかし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。本研究では車両が载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¹⁾、橋梁上での車両の载荷位置、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载荷車両の動的効果について考察する²⁾。あわせて都市高速道路の実態荷重に基づいて、地震時に活荷重がどのような状態になり得るかを確率論的に扱うことのできる活荷重モデルを提案する。

2. 橋梁-車両連成モデル 橋梁モデルはスパン長23m程度の都市高速道路高架単純桁橋1スパン分をプロトタイプとし、図1に示すような水平2方向の地震動を受ける20自由度線形モデルを用いた。車両モデルには、橋梁に与える影響が大きいと考えられる積載量10~12tonクラスの大型トラックを、ローリングとピッチングからなる2自由度回転倒立振り子としてモデル化したものを用いた。なお渋滞時を想定しているため、車両は静止しているものとする。

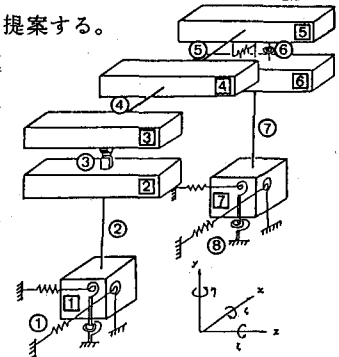


図1 橋梁モデル

図2は特に注目すべき橋梁-車両連成系の振動モード(積載率 $r=1.0 \times 4$ 台の場合)である。1次モードと6次モードは、いずれも橋梁単独系では1次モードに相当するが、前者は橋梁と車両が同位相で振動するモード(共振モード)であり、後者は逆位相で振動するモード(制振モード)である。

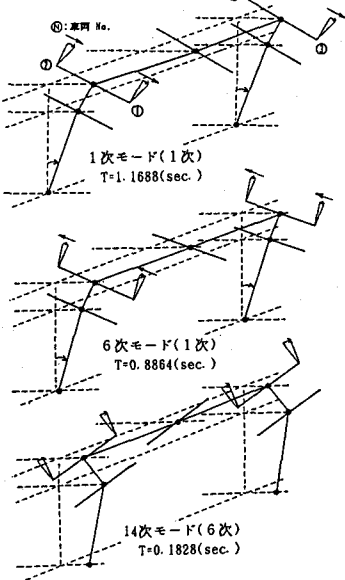


図2 橋梁-車両連成系振動モード (カッコ内は橋梁単独系での次数)

3. 载荷車両が橋梁の地震荷重に与える動的効果 図3は、橋軸直角方向入力の場合の基礎底面せん断力の周波数応答特性を積載率 r の種々の値に対して示したものである。静的载荷は車両の動特性を考慮しない場合で、積載率の増加とともに応答の極大値は大きくなっている。動的载荷は車両と橋梁の動的連成を考慮する場合で、積載率 $r=0.6$ までは静的载荷の場合と同様に積載率 r の増加とともに共振モードの極大値は大きくなる。しかし、積載率が $r=0.6$ を越えると共振モードは長周期側に移動しつつその極大値を小さくし、0.8秒付近で制振モードの成長がみられる。なお0.2秒付近に現れる極大値は連成系14次モード(橋脚の2次モードに相当)である。

図4は同じ地震動入力を与えた場合の基礎底面せん断力に関する橋梁単独系と橋梁-車両連成系の時刻歴応答を比較したもので、(a)図(積載率 $r=0.75 \times 4$ 台)では共振モードが卓越し、橋梁単独系と比較して約30%の応答の増幅が、(b)図(積載率 $r=1.25 \times 4$ 台)では制振モードが卓越し、約25%の応答の低減が見られる。このように橋梁-車両連成系の応答は同じ入力に対するものであっても積載率の違いに敏感に反応して変化する。また、積載率が同じであっても入力の卓越周期、バンド幅によって応答の様子は違ったものになる。

図5は $r=1.0$ を越えない3種の積載率をもつ車両を載荷した橋梁に対し、様々な卓越周期の入力を与えた場合の基礎底面せん断力の最大応答値を入力地震動の最大速度で正規化したものである。右下がりのグラフとなっているのは、短周期側で橋梁単独系6次モードや基礎の振動モードが励起されるためであると考えられる。静的載荷の場合には一般に橋梁単独系の応答を上回っている。動的載荷の短周期側ではAパターン($r=0.66 \times 4$ 台)の場合、静的載荷をも上回る応答の増幅を示す。Bパターン($r=0.85 \times 4$ 台)、Cパターン($r=1.00$)の場合は、橋梁単独系の応答を上回っているものの静的載荷の場合の応答を上回るまでには至っていない。長周期側ではもつぱら系全体域のモード(橋梁1次モード)が支配的になる。そのため、静的載荷の場合の応答に関しては橋梁単独系を上回るもののその割合は小さくなり、動的載荷の場合の応答に関しては、全てのパターンで橋梁単独系を下回っている。

図8は積載率と入力の変化が橋梁-車両連成系に与える影響を総合的に把握するために作成したものである。横軸に入力地震動の卓越周期、縦軸に積載率をとり、基礎底面せん断力、または橋脚下端曲げモーメントに関して橋梁単独系の最大応答値に対する橋梁-車両連成系の最大応答値の割合をコンター図によって表している。(a)図は狭帯域の入力を与えた場合の基礎底面せん断力の応答であるが、積載率や入力の卓越周期に極めて敏感に反応して応答が変化していることがわかる。図の右下に応答の増幅率が非常に大きな部分が見られる。これはこの部分が共振モードの影響が最も強く現れる領域であるためと考えられる。狭帯域の入力の場合には単一のモードのみが励起されるため橋脚下端曲げモーメントに関しても基礎底面せん断力とほとんど同じ傾向の結果となる。(b)図は広帯域の入力を与えた場合の基礎底面せん断力の応答である。(a)図に比べて等高線の間隔が広くなり右下にあった応答の増幅が生じる部分が無くなっている。短周期側に見られる増幅は連成系14次モードが共振モードであるためと考えられる。(c)図は広帯域の入力を与えた場合の橋脚下端曲げモーメントの広帯域の入力の場合には複数のモードが同時に励起されるため基礎底面せん断力の応答と橋脚下端曲げモーメントの応答の間には違いが見られる。

4. 地震荷重と組合わせるための活荷重のモデル化の試み

橋梁上の車両の載荷状態は確定的に与えられないため、地震時に活荷重がどのような状態になり得るかを確率論的に扱うことのできる活荷重モデルを考える。

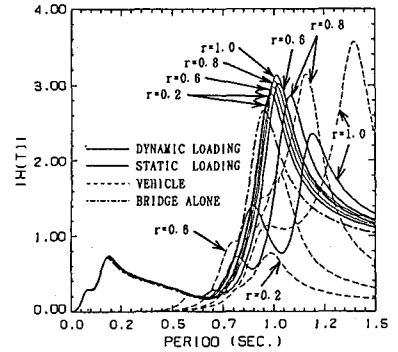


図3 積載率による基礎底面せん断力の周波数応答関数の変化(橋軸直角方向入力)

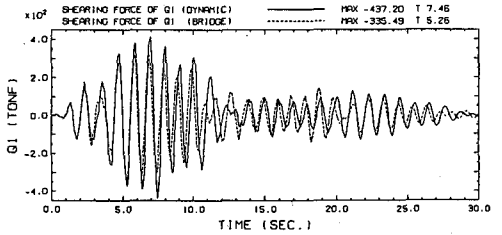


図4(a) 基礎底面せん断力の時刻歴(橋軸直角方向入力, $r=0.75 \times 4$ 台)

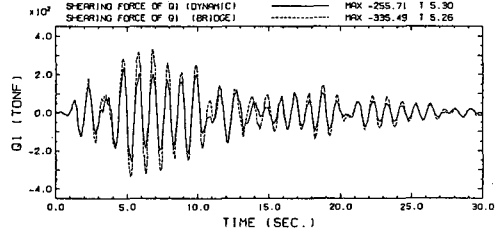


図4(b) 基礎底面せん断力の時刻歴(橋軸直角方向入力, $r=1.25 \times 4$ 台)

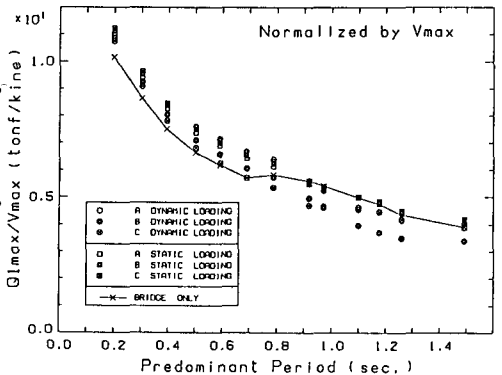


図5 基礎底面せん断力の最大応答特性(橋軸直角方向入力)

表1 車種別特性値 r : 占有率比

大動車	非換載車	ν_{10}	ν_{11}	橋梁上の大型車の台数		重量		占有率(車間隔)
				m_{10}	m_{11}	μ_{10}	σ_{10}	
	換載車	ν_{10}	ν_{11}	m_{10}	m_{11}	μ_{11}	σ_{11}	d_1
	その他の車両	$1 - \nu_{10}$		m_0		μ_0	σ_0	$r d_0$

このモデルでは発生確率が極めて低い地震との組合せを考慮するので、荷重の確率密度分布の裾部ではなく通常の荷重状態に注目している。モデル化においては(1)渋滞時の荷重列を対象とし、(2)荷重列を決定づける車重、車長、車間距離の各要素のうち車重のみを確率変量として扱い、それ以外は確定値として扱った。橋梁上の車両の全重量の分布は車種別の車重の分布モデルが与えられれば、解析的には多重たたみ込み積分により求められるが、その解析解を得ることは困難であるので、より簡便なモデル化を行う。そこで車重の分布モデルとして正規分布を仮定し、車種は阪神高速道路公団設計荷重委員会(HDLC)の報告³⁾を基にして大型車両を「大型車」、乗用車、中・小型トラック等を「その他の車両」として2分類し、さらに大型車は重量の分布モデルより「空車」、「積載車」に分類する。トレーラーは混入率が低いこと、分散が大きいことから除いている。橋梁の地震応答に及ぼす影響では、車両の全重量だけではなく大型車の載荷台数も重要となるため、モデルは橋梁上の車両の全重量と大型車の台数の同時分布という形で与える。以上より1車線のモデルを表1に示す記号を用いて、

$$f_{HT,Z}(m_T, Z) = \sum_{m_{T0}=0}^{m_T} \left\{ \frac{(m_T + m_p)!}{m_{T0}! (m_T - m_{T0})! m_p!} \cdot \nu_{T0}^{m_{T0}} \cdot \nu_{T1}^{(m_T - m_{T0})} \cdot (1 - \nu_{T1})^{m_p} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(Z - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \right\} \dots (1)$$

となる。ただし、大型車を取り除いたところにその他の車両がかわりに載荷されるものとすれば、

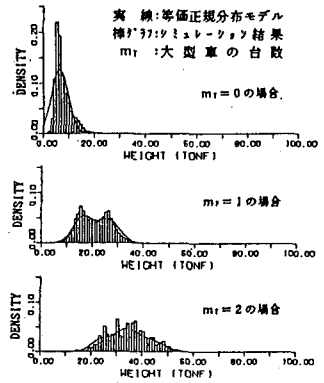
$$0 \leq m_T \leq \left[\frac{L}{d_T} \right], \quad m_p = \left[\frac{L - d_T(m_{T0} + m_{T1})}{r d_T} \right]$$

ここで[]はガウスの記号である。(1)式を等価正規分布モデルと呼ぶことにする。実際の都市高速道路は多車線からなっているから、等価正規分布モデルを複数車線とするためにたたみ込み積分を用いて、

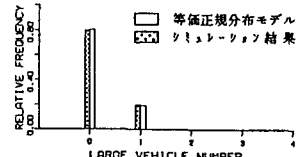
$$f_{HT,Z}(m_T, Z) = \sum_{m_{T2}} \int_{-\infty}^{\infty} f_{HT1,Z1}(m_T - m_{T2}, Z - Z_2) \cdot f_{HT2,Z2}(m_{T2}, Z_2) dZ_2 \dots (2)$$

によって2車線モデルとすることができるが、より簡略化されたモデルとして等価正規分布モデルにおいて橋梁長を車線数倍して求めた等価車線長モデルを利用することができる。

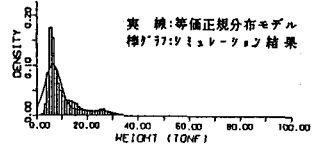
5. 本解析に用いるデータと数値計算例 図6はHDLCによって調査された重量の頻度分布から1車線道路についてモンテカルロ・シミュレーションを用いてコンピュータ内に荷重列を発生させ、5万回の試行を行ってその荷重列の橋梁上の部分の全重量の発生頻度と等価正規分布モデルを比較したもので、同モデルの適合性の良さがわかる。そこで等価正規分布モデルを規定する各種のパラメータを変化させて解析を行った結果以下のようなことが明らかになった。



(イ) 大型車の台数を条件とする全重量の条件付分布

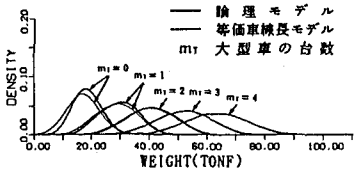


(ロ) 大型車の台数に関する周辺分布

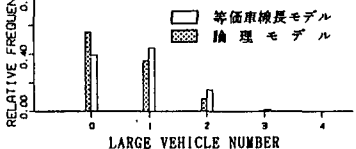


(ハ) 全重量に関する周辺分布

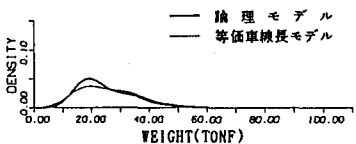
図6 等価正規分布モデルとシミュレーションによる解析結果との比較(橋梁長28mの場合)



(イ) 大型車の台数を条件とする全重量の条件付分布



(ロ) 大型車の台数に関する周辺分布



(ハ) 全重量に関する周辺分布

図7 4車線のたたみ込み積分による解析結果と等価車線長モデルの比較(橋梁長15mの場合)

4)大型車の台数を条件とする全重量の条件付分布

- 空積比によってその分布形状は大きく変化する。
- 大型車の台数が同じでも橋梁が長いほど、また橋梁長が同じでも大型車の台数が多いときほど、中心極限定理により滑らかな分布形状となる。

ロ)大型車の台数に関する周辺分布 ○大型車混入率が大きいほど、また橋梁が長いほど大型車が数多く載荷される確率が高くなる。

ハ)全重量に関する周辺分布 これは図6(イ)の条件付車重分布を(ロ)図の大型車数の確率関数を重み係数として加えて求められるもので、(ハ)図ようになる。

図7は(2)式を基にした4車線の橋梁上の車両の全重量と大型車の台数の同時分布と等価車線長モデルを比較したもので、等価車線長モデルが活荷重の傾向をよく表しているといえる。

6. 道路橋の地震応答に対する影響

以上のモデルを大型車が橋梁の四隅に1台ずつ載荷されている場合の地震応答に関する研究に当てはめた一例を示す。等価車線長モデルを基にして大型車1台当りの平均重量分布を求め、4台の場合の $\mu \pm \sigma$ の範囲を書き込んだものが図8である。(a)図では荷重状態の橋梁の応答が橋梁単独系に比べて増加する部分が $\mu \pm \sigma$ の範囲の大部分を占めている。しかも応答が30%~40%の増加をする部分を完全に含んでいることは興味深い点である。また(b)図では大部分が応答が減少する領域となっているにもかかわらず、 $\mu \pm \sigma$ の範囲には、14次モードにより短周期側で応答の増大する部分が含まれている。同様に(c)図でも応答の増加の程度は先の(a),(b)図に比べて小さいものの $\mu \pm \sigma$ の範囲の約半分が応答が増加する領域によって占められている。

このように大型車が4台載荷されている場合には、全領域に対して応答が増加する領域の割合に比べて、 $\mu \pm \sigma$ の領域に対して応答が増加する領域の占める割合は大きいものであることがわかる。

参考文献 1)林・亀田:道路橋の地震荷重評価における載荷車両の影響,京大耐震研究室報告No87-1,1987.4
 2)亀田・北:載荷車両の動的効果を考慮した道路橋の地震応答特性,京大防災研究所年報,1989
 3)阪神高速道路公団:設計荷重(HDL)委員会報告書 第2編,1984.3

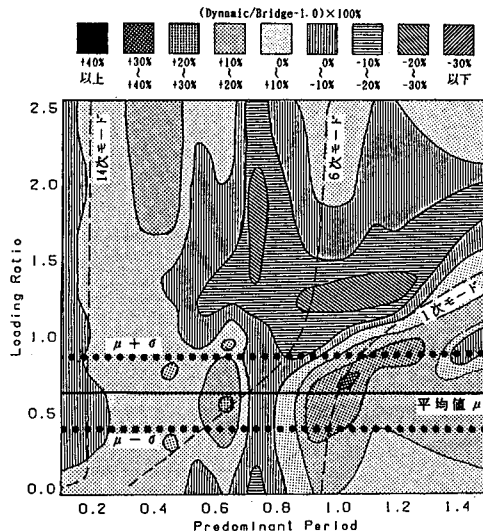


図8(a) 基礎底面せん断力に対する積載率と卓越周期の影響(狭帯域入力の場合)

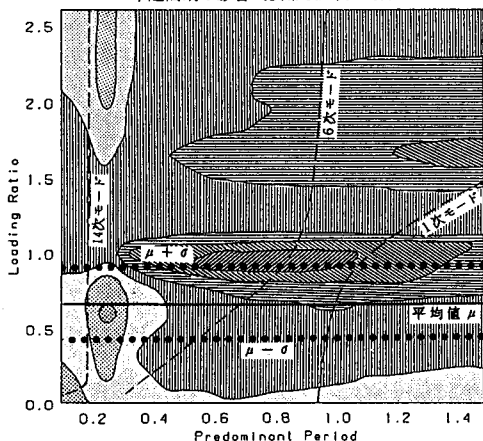


図8(b) 基礎底面せん断力に対する積載率と卓越周期の影響(広帯域入力の場合)

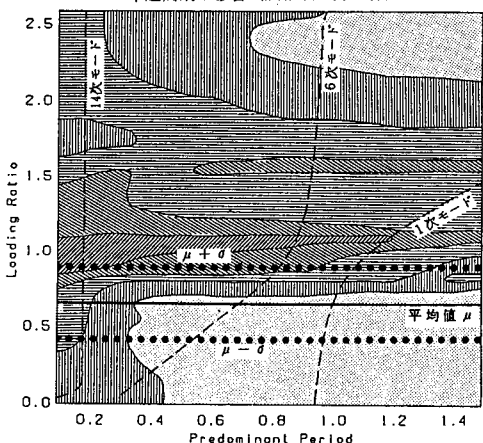


図8(c) 橋脚下曲げモーメントに対する積載率と卓越周期の影響(広帯域入力の場合)