

# (129) 交通渋滞下での橋梁-車両連成系の地震応答特性

○京都大学大学院 渡辺泰介  
 京都大学防災研究所 亀田弘行 阪神高速道路公団 南荘 淳  
 鉄道総合技術研究所 室野剛隆 京都大学大学院 荻野宏之

## 1. 要旨

現行の道路橋示方書では、地震と交通渋滞の同時発生は稀という前提のもとで、地震荷重と活荷重の組み合わせは考慮していない。しかし都市部での慢性的な渋滞が問題となっている昨今の交通事情を考えると、この前提は必ずしも妥当であるとは言えない。そこで本研究は、大型車両が停留している橋梁に地震動が作用した場合に、車両の存在が橋梁の応答に及ぼす影響を明らかにしようとするものである。本研究に先立って、橋梁1径間をモデル化し車両モデルを規則的に載荷して、弾性域での橋梁車両間の相互作用の問題について検討してきた<sup>1)</sup>。本研究では新たに橋梁を5径間にわたってモデル化し、車両を規則的に載荷したうえで、弾性応答解析、弾塑性応答解析と橋軸方向に地盤条件が変化した場合の弾性応答解析を行なった。さらに車両列を実交通荷重列調査に基づいてシミュレートし、より現実に近い状況での弾性応答解析を行った。

## 2. 解析モデル

単柱式橋脚をもつ4車線単純桁橋(桁重量325t)5スパン分を、図-1のようにモデル化した。また車両モデルは、ダンプトラック(車重9.1t, 標準積載量9.5t)と11tトラック(車重8.3t, 標準積載量10.5t)を図-2のようにモデル化したものを用いた。なお、車両モデルについては実験結果との対応が確認されている。載荷車両の動的な影響は、橋軸直角方向の振動の際に問題となることが明らかにされているので、本研究では橋軸直角方向の振動のみを対象とした。

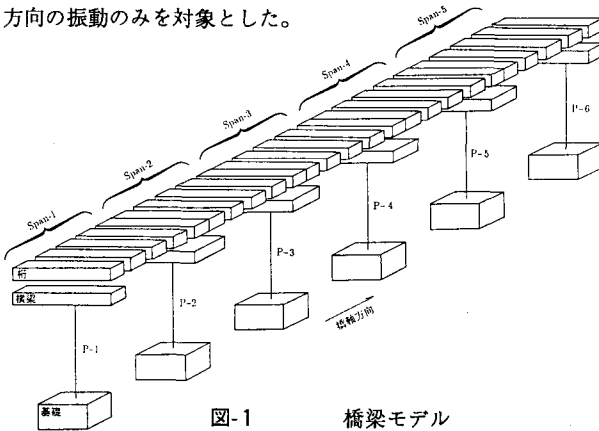


図-1 橋梁モデル

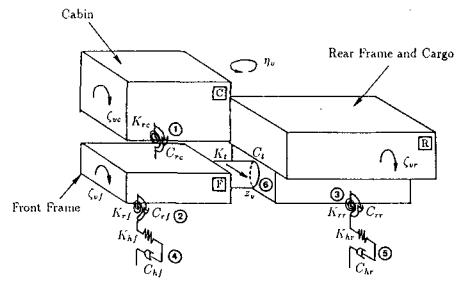


図-2 車両モデル

## 3. 弾性応答解析

固有値解析・周波数応答解析・時刻歴応答解析を行なった結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 橋梁の橋軸直角方向変形の橋軸方向分布に関する主要なモードは、図-3に挙げるように「全径間が同位相で一体となって振動するモード」「各径間の桁が水平面内で回転するモード」の2種類に大別される。1次・8次モードなどが前者に含まれる。後者は位相差をもった入力に対して励起されやすく、2次・5次モードなどが含まれる。
- 2) 橋梁と車両が同位相で振動するモードでは車両は橋梁の応答を増加させる働きをし、逆位相で振動するモードでは応答を低減させる働きをする。
- 3) 車両の1次振動数(車種・積載率により1.0-2.0Hzと変化)を大体の境界として、それより長周期の橋梁では、橋梁の応答は載荷車両の存在により増幅され、短周期の橋梁では低減される傾向がある。



図-3 橋梁の主要なモード (□基礎 ○横梁 ●桁)

#### 4. 弾塑性応答解析

橋脚の復元力に弾塑性履歴特性を取り入れた、橋梁-車両連成系の弾塑性地震応答解析を行なった。図-4・図-5・図-6は3種類の卓越周期を持つ入力に対しての、橋脚における塑性率（最大変位/降伏変位）や最大応答増減率と入力の最大加速度との関係を示したものである。ここで「最大応答増減率」とは、橋梁単独系に対する橋梁-車両連成系の応答の増減を百分率で表わしたものである。入力の最大加速度と共に塑性率（図-4）が大きくなると、曲率の最大応答増減率（図-5）は負から正、又は正から負へと変化しており、車両が橋脚の変形に与える影響が増幅効果から低減効果へ、あるいはその逆へと変化していることが分かる。この傾向は、剛性劣化に伴う橋梁の振動周期の増大に起因するものである。また、橋脚が塑性域にはいると、入力の卓越周期の違いによる車両の影響のばらつきが弾性域に比べると小さくなり、車両の影響が弾性域ほど顕著には現われなくなってくる。これは履歴減衰による効果と考えられる。一方、曲げモーメントの最大応答増減率（図-6）をみると、いずれの入力に対しても、塑性率が大きくなるにつれて車両の影響は小さくなり、最大応答増減率は0%に収束する。これは、塑性域に入ると履歴制御によって力の増大が頭打ちにされるためである。

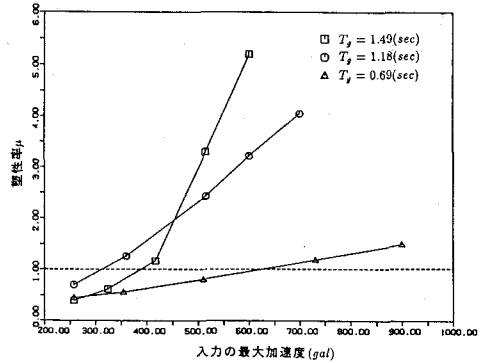


図-4 塑性率と入力の最大加速度の関係

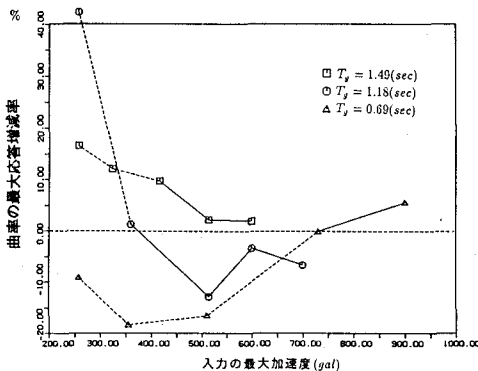


図-5 曲率の最大応答増減率と入力の最大加速度の関係

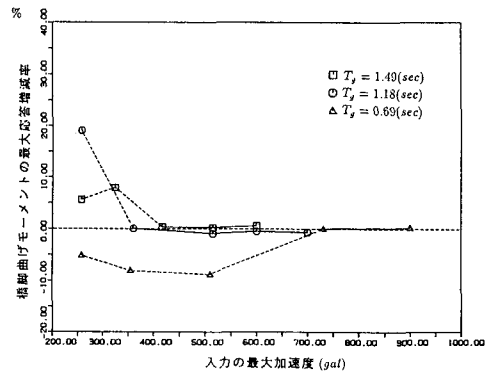


図-6 曲げモーメントの最大応答増減率と入力の最大加速度の関係

#### 5. 地盤条件を変化させた解析

橋軸方向に地盤条件を変化させて、橋梁単独系、橋梁-車両連成系の弾性応答解析を行なった。地盤モデルは実際の地質資料を参考に作成した1次元モデルで、橋軸方向の地盤変化としては橋脚ごとに基盤までの深さが変わる場合を考え、基盤への一様な入力に対する地表での応答（これが橋梁への入力となる）をSHAKE<sup>2)</sup>を用いて求めた。ここでは図-7・図-8に挙げる、各橋脚における基盤までの深さが一様に变化する地盤モデルを用いた場合の解析結果について述べる。図-9は、橋梁単独系において、基盤面の傾斜をパラメトリックに変化させて時刻歴応答解析を行なった場合の、橋脚5の基礎底面せん断力のスペクトルである。傾斜が大きくなるにつれて橋軸方向2次モード（図-3）が励起され、それに対応したピークが成長していくのが分かる。図-10に、同じケースでの基礎底面せん断力の最大応答値を示す。傾斜が大きくなるにつれて2次モードの影響を受け、傾斜が0°のときの応答から大きく変化している。図-11は基盤の傾斜を8°とし、橋梁に車両を乗せた場合の基礎底面せん断力の最大応答値である。積載率（実際の積載量/標準積載量） $r$ の増加に伴い、連成系全体が長周期化するため応答は小さくなる傾向がある。



図-7 地盤モデル

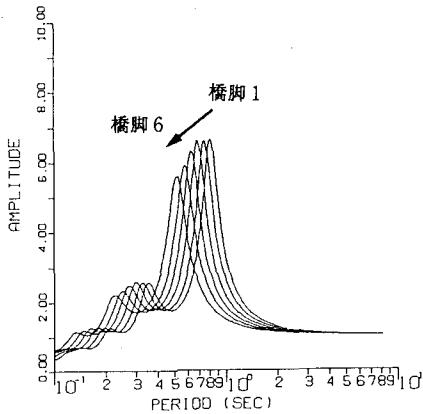


図-8 地盤モデルの伝達関数 ( $\theta = 8^\circ$ )

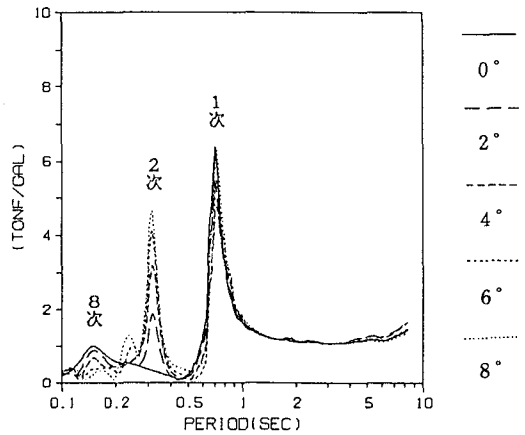


図-9 基礎底面せん断力のスペクトル比 (橋梁単独系)

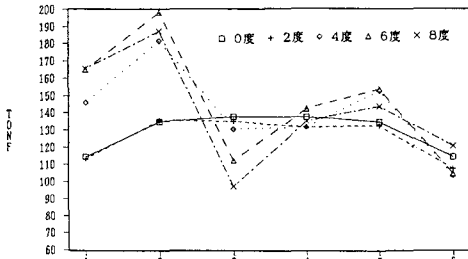


図-10 基礎底面せん断力の最大応答値 (橋梁単独系)

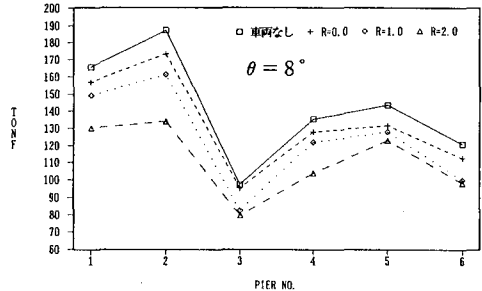


図-11 基礎底面せん断力の最大応答値 (橋梁-車両連成系)

## 6. 実交通荷重列に基づいた解析

以上の解析においては車両は橋梁上に規則的に載荷してきたが、より現実的なものとして、実交通荷重列調査<sup>3)</sup>(HDL委員会, 1984)に基づいてシミュレートした車両列を用いた解析を行なった。まず、渋滞を「通常渋滞」と「突発渋滞」の2種類に分類する。通常渋滞とは、主として日中に交通量の増加に伴って発生する渋滞であり、車種は乗用車が主で大型車は少ない、また車両の平均速度は10-20km/h前後、といった特徴を持つ。1ヶ月あたり約50~70回発生し、その継続時間は1~3時間に及ぶ。それに対して突発渋滞は、事故・工事などの理由で車線がふさがれるために起こる渋滞で、昼夜の区別なく起こり、車両の平均速度は0-10km/hなので通常渋滞よりも車間距離が短く荷重密度が高い。特に大型車の混入率が高い深夜に突発渋滞が発生すると、より厳しい荷重条件となる。阪神高速道路では、昭和57年度の1年間に約50回の発生が報告されている。

ここでは上記2種の渋滞を表-1のようにモデル化し、これをもとに、乱数を用いて車両の種類・配列・重量を決定し車両列を発生させた。図-12・図-13に、モデルに用いた車両の重量分布を挙げておく。空車・積載車それぞれに対応するピークを持った、双峰分布となっている。そして、先の2種の渋滞と3種類の入力と組み合わせ、表-2に挙げる7つのケースにおいて弾性域での解析を繰り返し行なった。最大応答増減率の頻度分布を図-14に示す。ケースBは車両による増幅効果が卓越する場合、ケースEは低減効果が卓越する場合である。入力条件・荷重条件によりグラフの形状

表-1 渋滞のモデル化

	平均速度 (km/h)	車間距離		大型車混入率
		平均値	分散	
通常渋滞	10	8.05	3.93	20%
突発渋滞	2	3.66	1.92	40%

表-2 解析ケース

	狭帯域		広帯域
	$T_p = 1.18(sec)$	$T_p = 0.92(sec)$	$T_p = 1.18(sec)$
通常渋滞+通常走行	○	○	○
突発渋滞+通常走行	○	○	○
通常渋滞+通常渋滞	○		

は異なるが、いずれのケースでも最大値は正の値を示し、車両によって応答が増幅される可能性があることを示唆している。しかし、異なる荷重状態にある各径間の応答量が橋梁間の拘束により平均化されるためか、従来のように1径間の橋梁モデルに車両モデルを規則的に載荷した場合の解析結果ほど、車両による影響は顕著ではない。

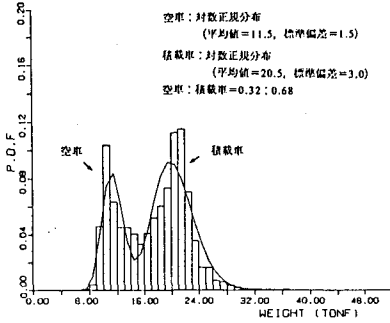


図-1 2 11tトラックの重量分布

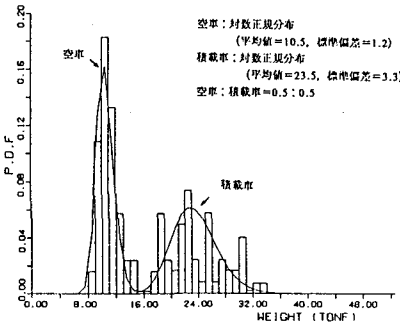


図-1 3 ダンプトラックの重量分布

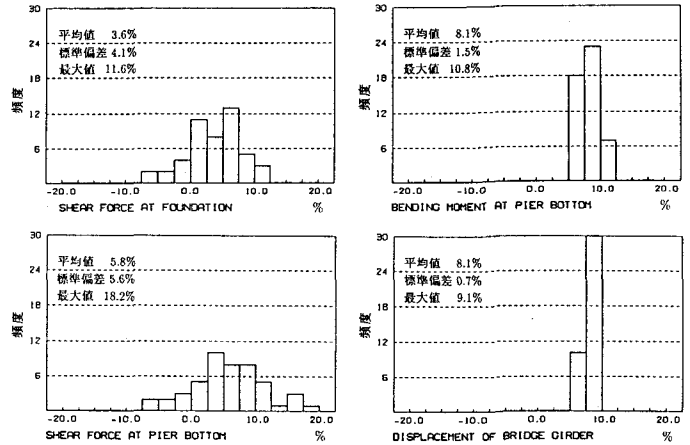


図-1 4 最大応答増減率の頻度分布 (ケースB)

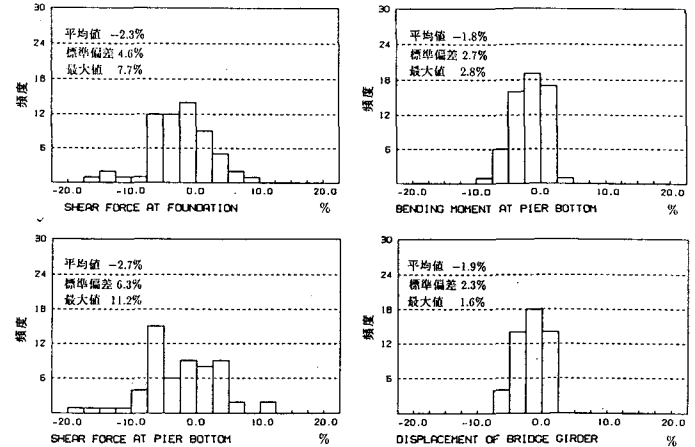


図-1 4 最大応答増減率の頻度分布 (ケースE)

## 7.まとめ

以上の解析により、橋梁の地震応答に対する車両の影響として、次のことが明らかになった。

- 1) 弾性域においては、入力地震動その他の条件による違いはあるが、基礎底面せん断力・橋脚曲げモーメントに関して概ね1~2割の応答の増加が予想される。
- 2) 塑性域においては、桁の水平変位等に関して車両の影響が現われるが、その影響は弾性域ほど顕著ではない。

## 【参考文献】

- 1) 阪神高速道路公団, (財)防災研究会: 橋梁-載荷車両連成系の地震応答と高架橋の耐震設計への影響に関する研究(その2)報告書, 平成4年3月
- 2) P.B.Schnabel, J.Lysmer, and H.B.Seed: SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, ERRC 1972.12
- 3) 阪神高速道路公団, (財)阪神高速道路管理技術センター: 阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究, 昭和61年12月