

(148) 耐震解析のための橋梁-車両連成系のモデル化とその動特性

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 室野 剛隆
 阪神高速道路公団 正員 鈴木 巖
 三菱重工(株) 正員 佐々木伸幸

1. はじめに

これまで、渋滞状態にある橋梁に地震動が作用した時の橋梁-車両間の動的相互作用に関する研究を行ってきたが¹⁾、これらの研究では、橋梁を20自由度線形モデルに、車両を倒立振り子形モデルとして扱ってきた。しかし、実際の地震時の橋梁上の車両はこれらの研究で扱われてきた倒立振り子形車両モデルよりはるかに複雑であることが、阪神高速道路梅田入路の付替えのために廃止されるのを機会に行われた振動試験²⁾よりわかった。そこで、本研究では道路橋の耐震設計に役立つ結果を得るために、車両の複雑な動的機構を反映したより詳細なモデルを構築して、橋梁-車両連成系の地震応答解析の精度向上の一環として行ったものである。

2. 橋梁-車両連成モデルの概要

図-1は、文献1)で扱った橋梁車両連成系の橋軸直角方向の1次モードである。この図では、車両4台は倒立振り子として扱われている。ところが、実際には車両は複雑な挙動をするのに、このように倒立振り子として車両を扱ったことに問題があることが車両を載荷した実橋における試験からわかってきた。以下本文では車両モデルの改良を中心にその後の研究結果を述べる。

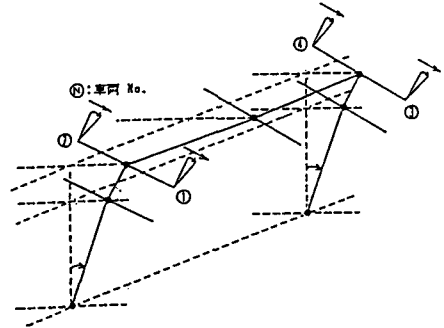


図-1 橋梁-倒立振り子車両連成モデルの振動モード

3. 車両モデル

実際の車両には様々な動的エレメントが存在し、橋梁上の車両は複雑な振動性状を示す。そこで、これらの車両の動特性が橋梁の地震応答に与える影響を評価できるように、車両を図-2のように詳細にモデル化した。このモデルは3つの節点(F, R, C)及び6つのエレメント(①~⑥)から構成されている。車両のシャーシを2分割して前部を節点F、後部を節点Rとしてモデル化しており、積荷は全て節点Cのみに載荷されるものとする。節点Cはキャビンを表している。一方、エレメント①はキャブサスペンション(キャビンの懸架ばね及びスタビライザー)を回転バネ及びダッシュポットでモデル化したものである。エレメント②と③はそれぞれフロントとリアのサスペンション、ショックアブソーバ、タイヤの鉛直方向の剛性を回転バネとダッシュポットでモデル化している。エレメント④と⑤はそれぞれフロントとリアのタイヤの横方向の剛性を水平バネ

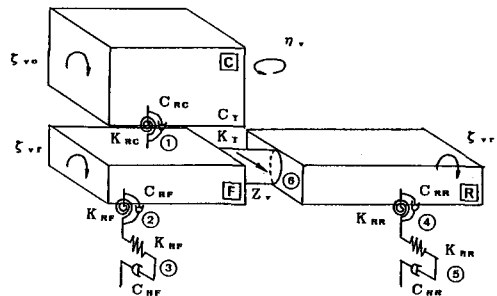


図-2 5自由度車両モデル

とダッシュポットでモデル化している。エレメント⑥はシャーシのねじれの効果をねじれ剛性を持った、重さを無視できる棒でモデル化している。このようにして構築された車両モデルには、節点F、R、Cの水平変位（並進）とx軸回りの回転（ローリング）が許されており、また車両全体としてのy軸回りの回転（ヨーイング）がある。ところが、並進には各節点間に拘束条件があるので、この力学モデルは5自由度系となる。なお、渋滞時を想定しているので車両は全て停止状態と考えて、ピッチング、バウンシングは考慮していない。

4. 車両の横方向振動モード

図-3は、5自由度車両モデルの固有値解析より得た振動モードのうち、1次、2次、3次モードを示したものである。これらの図から各振動モードの特徴をまとめると以下ようになる。

1次モードは、車両前部が大きく振動する。そして積載率が小さいときは節点Rは剛な状態にあり、節点Rのローリングの回転角は小さいが、積載率が大きくなると慣性モーメントが大きくなり、節点Rのローリングの回転角が節点Fの回転角を上回ることになる。2次モードでは車両後部が大きく振動するモードであり、積載率が大きくなると、節点FとRのローリングの回転方向が反対方向に生じて、シャーシのねじれが大きくなっている。3次モードではキャビン（節点C）のみが大きく振動する。

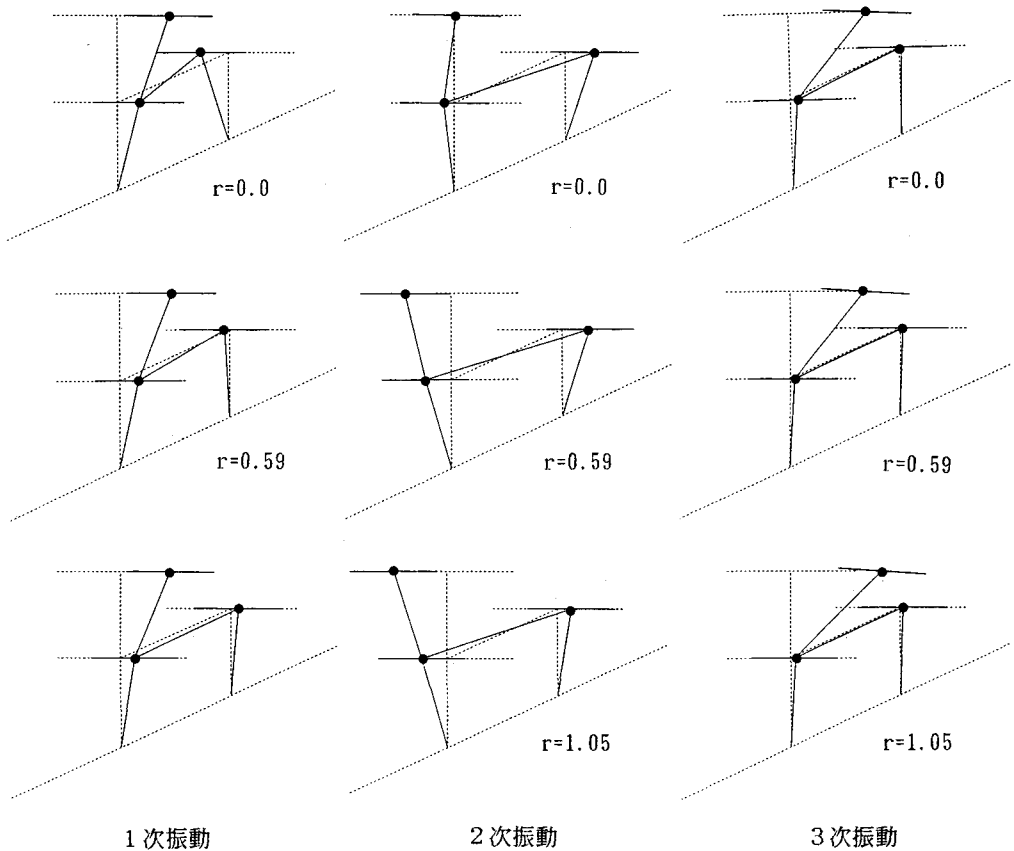


図-3 車両モデルの振動モード図

表-1に、車両モデルの刺激係数を示す。積載率が小さいと2次振動の刺激係数が最も大きい、積荷が多くなると車両の重量と慣性モーメントが大きくなり、車両後部のローリングが生じやすくなり、その結果車両後部のローリングの回転角が大きい振動モード（1次、4次）の刺激係数が卓越してくることになる。ただし、各モード間での刺激係数の値に差があまりないので、地震時には車両は複雑な挙動をするものと考えられる。

次に図-4は、数値解析と振動試験から得られた積載率と1次、2次固有振動数との関係を表したものである。1次モードは振動モードの特徴からわかるように、主に車両前部が大きく振動し、車両の振動特性を支配することになる。ところが、車両前部には積荷は存在せず、積荷の状態が振動性状に与える影響は小さい。このために、固有振動数は積載率が大きくなってほぼ一定になる。一方、2次モードは主に車両後部が大きく振動し、節点Rが車両の振動特性を支配することになる。このために、荷台に存在する積荷の状態によって車両の振動の様子は大きく変わる。つまり、積荷が多くなると車両後部の慣性モーメントが大きくなり、積載率とともに固有振動数が大きく低下する。しかし、積載率が1.0に近づくと車両前部も大きく振動し始め、2次振動数は1次振動数に漸近する。

表-1 車両モデルの刺激係数

| mode No. | participation factor (刺激係数) | | |
|----------|-----------------------------|------------------------|------------------------|
| | r = 0. 0 | r = 0. 5 9 | r = 1. 0 5 |
| 1-st | 4.14110 ⁻² | 8.70210 ⁻² | 9.34010 ⁻² |
| 2-nd | 6.05510 ⁻² | 2.97110 ⁻² | 1.78310 ⁻² |
| 3-rd | -2.12010 ⁻² | -2.24310 ⁻² | -1.10410 ⁻² |
| 4-th | 1.05610 ⁻² | 6.24310 ⁻² | -9.52510 ⁻² |
| 5-th | -5.11110 ⁻⁴ | 2.03510 ⁻⁴ | -4.05510 ⁻³ |

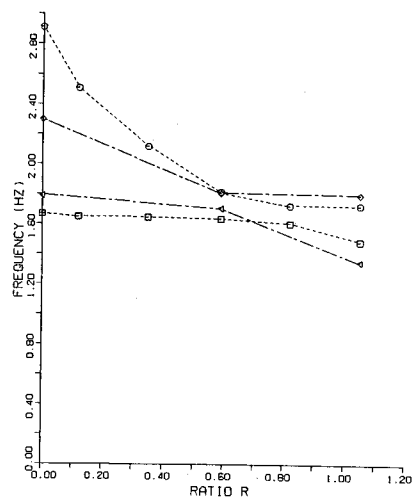


図-4 積載率と振動数の関係

5. 改良された橋梁-車両連成モデルの振動特性

橋梁モデルには従来の研究¹⁾から用いてきた20自由度線形モデルに文献2)の試験橋梁の諸元を用いたもの、車両モデルには上記の5自由度系モデルを用いて振動解析を行った。また、数値解析結果と振動試験結果とを比較して、モデルの妥当性を検討できるように、振動試験と同じように2台の車両を橋梁に載荷して橋梁-車両連成系モデルを構築した。なお、渋滞時を想定しているの、車両は全て停止しているものとする。

①複素固有値解析

図-5は、固有値解析から得られた連成系の振動モードのうち、主要な2つのモードを示したものである。橋梁を上から見たときに、橋梁の節点の最大変位が1となるように正規化したものであり、橋梁の振動モード図の下に車両の振動モード図を示す。連成系1次モードは、橋梁の両橋脚が同位相で振動し、しかも橋梁と載荷車両が同方向に振動するモードであり、連成系3次モードは、橋梁の両橋脚が同位相で振動し、しかも橋梁と載荷車両が逆方向に振動するモードである。つまり、橋梁自体は両橋脚が同位相で振動するモード（橋梁1次モード）であっても、載荷車両の位相で2つのモードに分かれる。

②周波数応答解析

図-6は、数値解析から得られた共振曲線と実橋振動試験から得られた共振曲線を示したものである。（ただし、数値解析結果のものは周期が0.40から0.90秒までを、実験結果のものは周期が0.50から0.90秒までを示している）橋梁単独系には、0.62秒付近にピークがある。これは両橋脚が同位相で振動するモード（橋梁1次モード）に同調するピークである。ところが、車両が載荷されると、橋梁-車両連成系の共

振曲線は1つのピークが分離して、2つのピークを持つ形状となっている。長周期側のピークは、連成系1次モードに同調するピークであり、積載率が大きくなるとともに、そのピークの高さを低くしながらさらに長周期側へと移行している。短周期側のピークは、連成系3次モードに同調するピークであり、積載率が大きくなるとともに、そのピークの高さを高くしながら、長周期側に移行する。ただし、積載率 $r=0.0$ のときには、連成系3次モードの成長が不十分なためにピークが現れていない。また、橋梁単独系と連成系の共振曲線を比較すると連成系の共振曲線が橋梁単独系のそれを常に下回っている。このことは、載荷車両がダイナミック・ダンパーとして作用して橋梁の応答を低減させていることがわかる。つまり、本研究で用いた橋梁の1次固有周期が約0.6秒であり、これは車両の1次固有周期の領域とほぼ一致する。このために、大きく振動するキャビンが橋梁の応答を低減させる方向に作用したと考えられる。

以上のような結果は振動試験より得られた結果と比較して、固有周期やピークの高さなどで若干の違いがあるものの、ほぼ合致するものであった。このことより本研究で構築した連成系のモデルの妥当性を得られたものと考えられる。

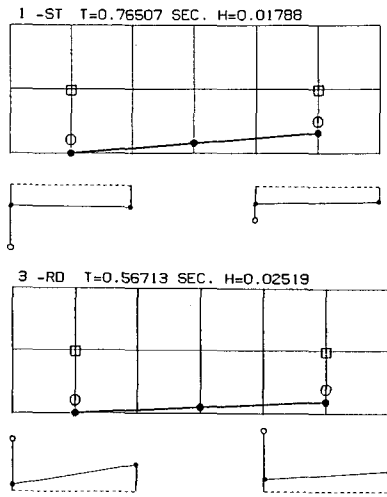


図-5 改良された連成モデルの振動モード図

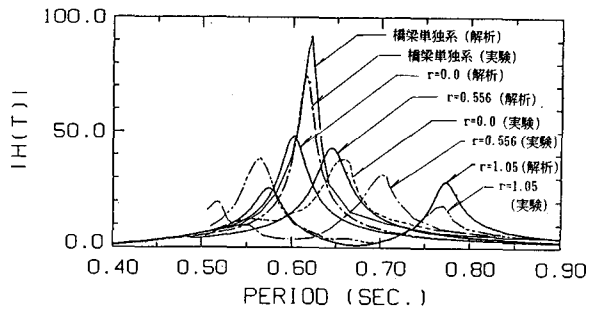


図-6 橋梁及び連成系の共振曲線

5. まとめ

本研究では、車両モデルを5自由度系の力学モデルとして構築して、車両の振動特性を明らかにした。その結果、車両には前部が大きく振動するモード（車両1次モード）、後部が大きく振動するモード（車両2次モード）、キャビンのみが大きく振動するモード（車両3次モード）などが存在する。しかも、各モードの刺激係数の差が小さいから、地震時には複雑な挙動を振る舞うと考えられる。次に、この車両モデルを用いて、橋梁-車両連成系のモデルを構築して、固有値解析と周波数応答解析を行い、載荷車両は常にダイナミック・ダンパーとして作用して橋梁の応答を低減させることが分かった。ただし、載荷車両が橋梁の応答に与える影響を般的に評価するには、橋梁の1次固有周期と車両の1次固有周期とが大きく異なる場合も含め、より広いパラメータ領域で検討を行うことが必要で、今後この方向で研究を進める計画である。

参考文献

- 1) 亀田弘行、北 啓之、盛川 仁：載荷車両の動的効果を考慮した道路橋の地震荷重、土木学会構造工学論文集、1990年3月
- 2) 加賀山泰一、亀田弘行、佐々木伸幸：車両載荷状態での道路橋の水平振動実験、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第一部p1278-1279、1990年9月