

走行車両の地震応答解析における 車両パラメータの影響

丸山 喜久¹・山崎 文雄²

¹学生会員 東京大学大学院社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

我が国の高速道路では、1995年兵庫県南部地震以降、高速道路地震計ネットワークを構築している。しかしながら、高速道路構造物は現在の地震時通行止め基準程度の地震動では被害が発生しないことも近年の研究で明らかとなってきた。したがって、地震時通行規制の緩和の検討が可能になるものと考えられる。規制の緩和を行う前には、地震時に運転者が走行困難に感じて事故を起こす可能性も否定できず、地震動が車両に与える影響を調べる必要がある。そこで、本研究では、6自由度車両モデルを作成し、地震応答解析を行った。さらに、複数の車種を想定した2次元車両モデルを作成し地震応答解析を行い、地震動特性や車両タイプの違いに基づいて車両の応答を評価した。

Key Words : vehicle model, seismic response analysis, expressways, model parameters

1. はじめに

我が国の高速道路では、料金所付近の事務所内に地震計を設置しており¹⁾、これらの地震計によって記録された最大加速度 (PGA) を指標として、地震発生後の高速道路構造物の被害有無を確認するために、地震時通行規制が実施されている。現在の基準は、PGAが80Gal以上で通行止めとなっている。しかしながら、現在の地震時通行規制の基準程度の地震動では、高速道路構造物に被害が発生しないということも近年の研究²⁾で明らかになりつつある。したがって、現状の基準では、通行規制の効率性が失われるものと考えられ、地震時通行規制基準の見直しの検討が必要であると考えられる。基準の見直しの検討を行うにあたっては、高速道路走行中の車両の運転者が地震発生時に運転操作を誤り、それが原因として交通事故が発生する可能性についても考慮すべきと考えられる。

したがって、本研究では6自由度車両モデルを作成し、走行車両の地震応答解析を行った。また、6自由度車両モデルの応答が、車両の平面運動のみを考慮した2次元車両モデルの応答と比較して、あまり違いが見られないことから、複数の車種を想定した2次元車両モデルを構築し、地震応答解析における車両モデルのパラメータの影響について検討した。

2. 6自由度車両モデルを用いた車両の地震応答解析

(1) 車両の運動方程式

図-1に車両の基本運動を示す。ここでは、車両の重心位置を原点に車両の前後方向をx軸、左右方向をy軸、上下方向をz軸とする³⁾。この座標を基準とすると、運動の自由度はそれぞれの座標軸の並進方向と回転方向の6自由度になる。とくに、x軸回りのモーメントをローリング運動、y軸回りのモーメントをピッチング運動、z軸回りのモーメントをヨーイング運動と呼ぶ。このとき、進行方向 (x軸) 並進運動、横方向 (y軸) 並進運動の運動方程式は以下になる³⁾。

$$\begin{aligned} m(\ddot{u} - vr) &= \sum_i \sum_j (F_{xij} \cos \delta_{ij} - F_{yij} \sin \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{xij} \\ m(\ddot{v} + ur) &= \sum_i \sum_j (F_{xij} \sin \delta_{ij} + F_{yij} \cos \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{yij} \end{aligned} \quad (1a,b)$$

ここで、 u はx軸方向速度、 v はy軸方向速度、 r はヨー角速度、 m は車両の慣性質量である。 δ_{ij} は車両固定座標とタイヤの向きとの角度差 (前輪操舵角) を表す。また、 F_{xij} はタイヤに作用する駆動・制動力、 F_{yij} はタイヤの横力である。インデックスの i はタイヤの前後輪を表し、 j は左右を表している。例えば、 F_{x11} は左前輪に作用する駆動・制動力である。これらの力を算出するためには、マジックフォーミュラモデル⁴⁾という、非線形モデルを採用している。また、z軸回りの回転運動は、以下のように記述できる。

$$I_z \ddot{\psi} = (F'_{y11} + F'_{y12})l_f - (F'_{y21} + F'_{y22})l_r + (-F'_{x11} + F'_{x12})\frac{d}{2} + (-F'_{x21} + F'_{x22})\frac{d}{2} \quad (2)$$

式(2)の l_f は車両重心位置と前輪車軸間の距離, l_r は後輪車軸間の距離, d は左右のタイヤ間距離 (トレッド) である。

また, ロール角は式(3), ピッチ角は式(4)のモーメントの釣り合い式から計算される。

$$\phi(K_\phi - mgh) = m(\dot{v} + ur)h \quad (3)$$

$$\theta K(l_f^2 + l_r^2) = m(\dot{u} - vr)h \quad (4)$$

ここで, ϕ はロール角, K_ϕ はサスペンションロール剛性係数, θ はピッチ角, K はサスペンションバネ定数である。また, ヨー角は以下のように表される。

$$\psi = \int r dt \quad (5)$$

以上までで, バウニング運動以外の5つの自由度に関する運動は記述ができた。バウニング運動に関しては図-2に示す1/4車両モデルを使用した³⁾。下のバネはタイヤの剛性を, 上のバネはサスペンション剛性をそれぞれ表している。また, 上の質点 (バネ上) は車両本体質量を下の質点 (バネ下) はタイヤ質量を表している。前輪と後輪のバネ下の固有振動数は通常ほぼ等しいことから, このように車両を1/4に分割したモデルが上下振動を表す際には使用されている³⁾。このモデルをもとに, 車両の上下方向の運動方程式を記述すると, 式(6)のようになる。

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{\xi}_1 + \ddot{z}_{in}) + c_1\dot{\xi}_1 + c_2(\dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_2) \\ + k_1\xi_1 + k_2(\xi_1 - \xi_2) = 0 \\ m_2(\ddot{\xi}_2 + \ddot{z}_{in}) + c_2(\dot{\xi}_2 - \dot{\xi}_1) + k_2(\xi_2 - \xi_1) = 0 \end{aligned} \quad (6a,b)$$

ここで, z_{in} は路面からの上下動変位入力である。 ξ_1 , ξ_2 は, それぞれバネ下, バネ上の地面に対する相対変位を表す ($z_1 = \xi_1 + z_{in}$, $z_2 = \xi_2 + z_{in}$)。

(2) 車両の地震応答解析

本研究では, 以上までで構築された6自由度の車両モデルに地震動を入力しなくてはならない。そこで, 水平成分に関しては式(1)の車両の加速度を表す項を, 地震動を加味した絶対加速度に変えることで, 地震動を加味した。式(7)に地震動の影響

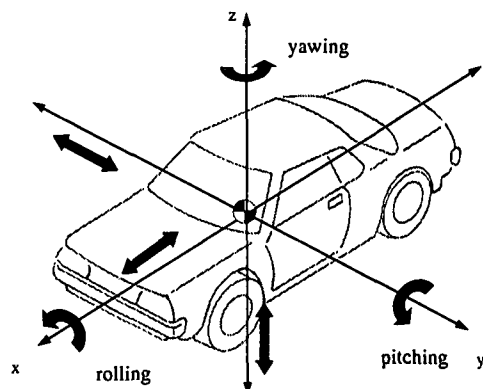


図-1 車両の基本運動

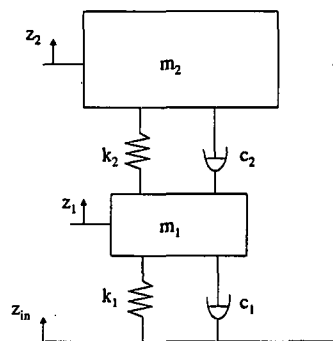


図-2 1/4 車両モデル

を考慮した車両水平成分の運動方程式を示す。

$$\begin{aligned} m_2(\dot{u} - vr + \ddot{x} \cos \psi + \ddot{y} \sin \psi) = \\ \sum_j \sum_i (F_{xij} \cos \delta_{ij} - F_{yij} \sin \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{xij} \\ m_2(\dot{v} + ur - \ddot{x} \sin \psi + \ddot{y} \cos \psi) = \\ \sum_j \sum_i (F_{xij} \sin \delta_{ij} + F_{yij} \cos \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{yij} \end{aligned} \quad (7a,b)$$

ここで, $\ddot{x}$, $\ddot{y}$ は, それぞれ絶対座標系でのX, Y方向の地震による地動加速度である。式(1)の m にはバネ上質量を用いた。

地震動の鉛直成分に関しては, 式(6)の $\ddot{z}_{in}$ に地動加速度を代入した。また, ピッチング, ローリング, 上下運動が生じるとタイヤの接地荷重に変化が生じることも本研究では考慮している。

車両の地震応答解析を5つの実際の地震記録を用いて行った。入力はその3成分の記録である。入力地震動には, 1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録, 1940年インペリアルバレー地震のEI Centro記録, 2000年鳥取県西部地震のK-NET江府記録, 1985年メキシコ地震のSCT記録, 1987年千葉県東方沖地震の東京大学生産技術研究所千葉実験所記録を使用した。また, 車両初速度は100km/hとした。図-3に車両横方向に入力した地震動成分の5%減衰の加速度応答スペクトルを示す。ここでは, 各地震動記録のPGAを300cm/s²にスケールアップしている。これによると, メキシコSCT記録は低振動数

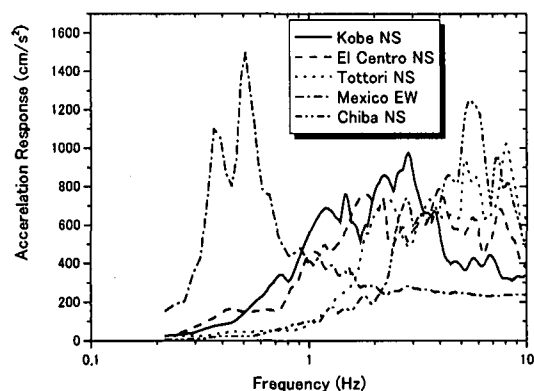


図-3 入力地震動（PGA=300cm/s²）の加速度応答スペクトル（5%減衰）

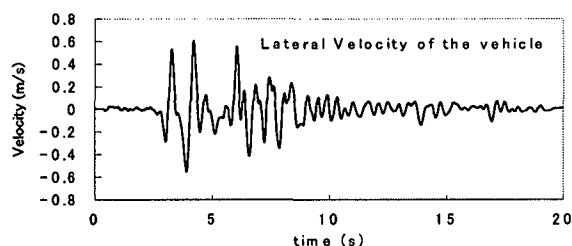


図-4 神戸波 PGA800cm/s²入力時の車両の横速度

域の成分が大きく、逆にK-NET江府記録や千葉県東方沖地震の記録は高振動数域の成分が大きい。

図-4に、地震応答解析の例として神戸波PGA800cm/s²入力時の車両の横速度を示す。これによると、地震動の影響で車両が激しく横に揺さぶられていることが分かる。図-5に、車両横方向に加えた地震動の最大加速度（PGA）と車両の横速度最大値の関係を示す。これによると、入力地震動により車両の応答量にはかなりの違いがあることが分かる。また、メキシコSCT記録のような、低振動数域の大きい地震動が入力されると車両は大きな応答を示し、逆にK-NET江府記録や千葉県東方沖地震の記録のような高振動数域の大きい地震動が入力されると応答量は小さくなる。また、この関係はほぼ線形の関係にあることが確認できる。これは、本研究で用いているマジックフォーミュラモデルの線形域で車両が常に応答しているためであることを確認している。図-6に車両に加えた地震動の計測震度と車両横速度最大値の関係を示す。これによれば、入力地震動による車両の応答量の違いはあまり見られず、計測震度は車両の応答量を表すのに適した地震動指標であると思われる。

3. 2次元車両モデルを用いた車両の地震応答解析

以上までで述べた6自由度車両モデルの地震応答解析結果と、前後・左右・ヨーイング運動の平面運動のみを考慮した3自由度モデルの地震応答解析を比較する。図-7に神戸波PGA800cm/s²入力時の6

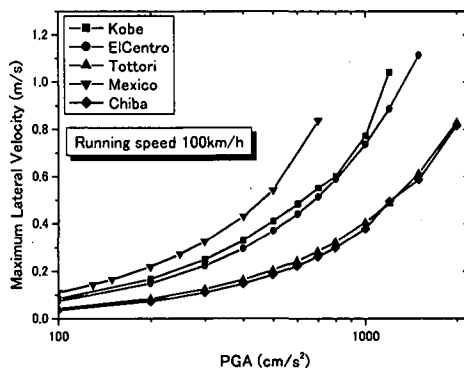


図-5 車両横方向に加えた地震動の最大加速度と車両横速度最大値の関係

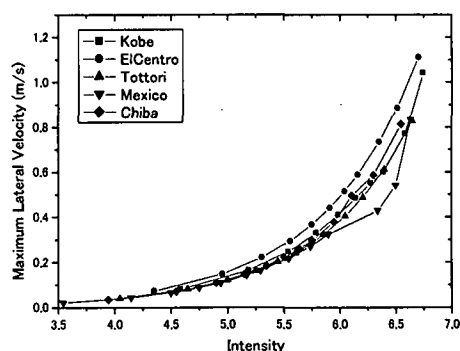


図-6 車両に加えた地震動の計測震度と車両横方向最大値の関係

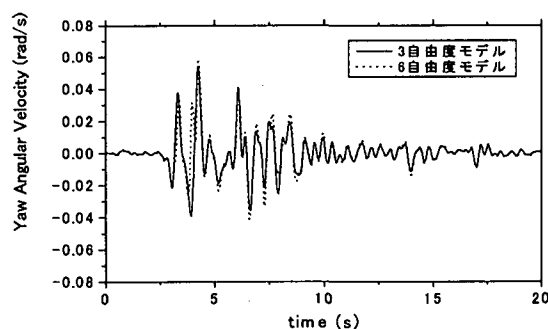
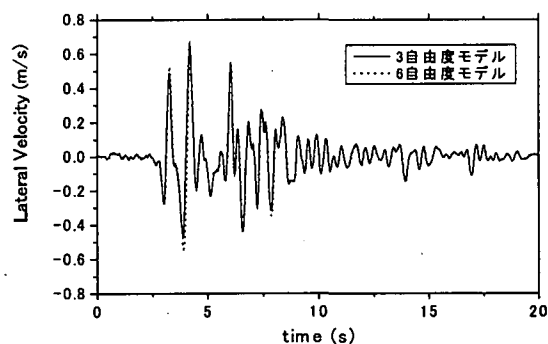


図-7 6自由度モデルと3自由度モデルの横速度（上）、ヨー角速度（下）の比較

自由度車両モデルと3自由度モデルの横速度、ヨー角速度の比較を示す。これによると、応答の最大値には若干の違いが見られるが、全体としてはほ

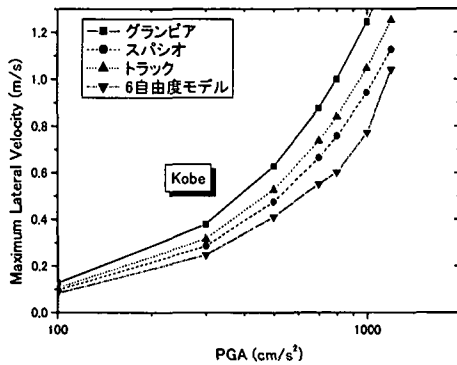


図-8 神戸波入力時の車両横方向入力地震動 PGA と 車両横速度最大値の関係

ば変わらないことが確認できる。つまり、車両の応答の傾向を見るには、平面運動のみを考慮する3自由度モデルでも充分であることが分かる。

さらに、6自由度モデルでの検討にあるように、車両の応答はマジックフォーミュラモデルの線形域での応答にとどまっていることから、タイヤの横力を以下のように定めた³⁾。

$$F_{yf} = -K_f \beta_f \quad (8a)$$

$$F_{yr} = -K_r \beta_r \quad (8b)$$

ここで、 f , r はそれぞれ前輪、後輪を表し、 β は横滑り角を表す。

このような、簡便なモデルであれば様々な車種の車両モデルのパラメータが比較的容易に入手できる。本研究では、Songpol⁹⁾が使用している複数の車種を想定したモデルのパラメータを使用した。図-8に神戸波をそれぞれの車両モデルに入力したときの、車両横方向に加えた地震動PGAと車両横速度最大値の関係を示す。これによると、車両モデルのパラメータの影響で入力地震動が同じでも、車両モデルの応答量にかなりの違いがあることが分かる。図-9にグランビアを想定した車両モデルについて、入力地震動のPGAと車両横速度最大値の関係、計測震度と車両横速度最大値の関係を示す。これによれば、6自由度モデルのときと同様にPGAに対しては入力地震動によるバラツキが見られるが、計測震度に関してはあまり見られない結果となった。

4. 結論

本研究では、6自由度車両モデルを構築し地震応答解析を行った。車両の応答量は、入力地震動を同じ最大加速度を示すようにスケールリングして入力しても、入力地震動によってかなり違いが見られることが確認された。とくに、低振動数域の大きい地震動を入力した場合に、車両の応答量が大きくなることが分かった。しかし、地震動指標と

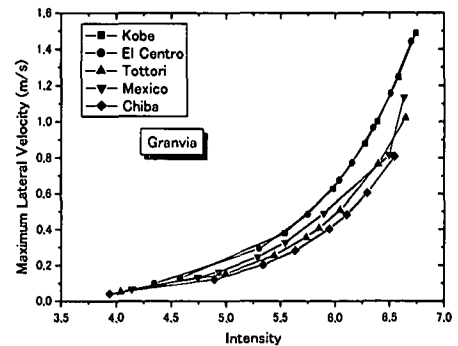
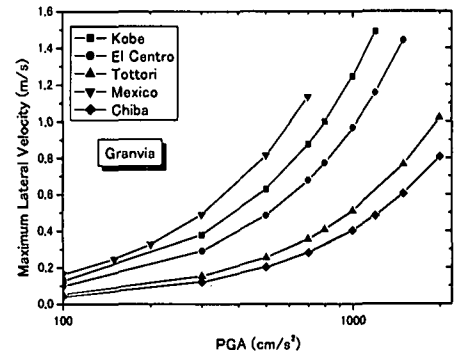


図-9 入力地震動 PGA (上)、計測震度 (下) と車両横速度最大値の関係 (グランビア, 3 自由度モデル)

して計測震度を選ぶと、入力地震動による応答量の違いは見られなくなった。

さらに、6自由度モデルと平面運動のみを考慮した3自由度モデルの応答量にそれほど大きな差が見られないことから、複数の車種を想定した3自由度モデルを構築し地震応答解析を行い、車両モデルのパラメータの影響を調べた。その結果、同じ地震動を入力しても、車種により応答量に違いが見られたが、一つの車種に注目した場合、6自由度モデルのとき同様、計測震度が最もよく車両の応答量を表現できることが確認された。しかしながら、今後はさらに、入力地震動を幅広く考慮することなどが結論づけるには必要となるであろう。

参考文献

- 1) 丸山喜久, 山崎文雄, 本村均, 浜田達也: 常時微動のH/Vスペクトル比を用いた地震動推定法の提案, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.261-272, 2001.
- 2) 山崎文雄, 大西淳一, 田山聡, 高野辰雄: 高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 3, 3491-3496, 1998.
- 3) 安部正人: 自動車の運動と制御, 山海堂, 1991..
- 4) E. Bakker, H.B. Pacejka, L. Linder: A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies, Society of Automotive Engineers (SAE) paper No. 890087, 1989.
- 5) P. Songpol: 橋梁主塔まわりの気流が自動車の走行に及ぼす影響に関する実験的な研究, 東京大学博士論文, 2001.