

DEMを用いた高速道路走行車両の地震時挙動について

坂根大介¹・土岐憲三²・清野純史³

¹学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

²フェロー会員 工博 立命館大学 理工学部（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

³正会員 工博 京都大学 工学研究科（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）

1. はじめに

走行中の自動車に地震動が作用すると、自動車の走行や運転者になんらかの影響を及ぼすことは容易に理解される。また、2004年9月5日に紀伊半島沖と東海道沖で発生した地震後に実施したアンケートによれば、自動車を思い通りに制御できず車線をはみ出してしまう運転者がいた。

しかしながら、道路システムの構造上の耐震性や機能上の耐震性について検討を行っている研究や通常の自動車衝突の挙動解析に関する研究は多々あるが、走行中の自動車に対する地震時挙動解析に関する研究は十分であるとは言い難い。地震動による影響で自動車事故が起き、道路が機能しなくなった場合、それに伴って大渋滞が発生したり、救助活動や物資の補給、緊急車両の通行などを妨げたり、また運転者や同乗者への人的被害が発生することは十分に考えられる。さらに、トンネル内で事故が起き、火災が発生した場合には特に危険な状況となることが懸念される。

そこで、本研究では、特に高速道路走行中の自動車が地震発生の際にどのような挙動を示すのかを数値解析によって求め、地震発生の際の自動車事故防止のためにはどのような交通管制が必要かを検討するための基本的な情報を得ることを目的としている。

2. 車両の挙動解析手法

(1) 解析に用いるモデル

本研究では解析の対象を全て剛体とし、車両―道路部は図-1のようにモデル化する。片側2車線、中央分離帯を挟んだ全4車線で、そこを車両が通行す

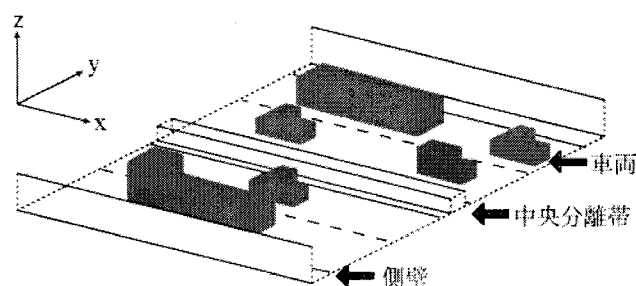


図-1 解析に用いるモデル

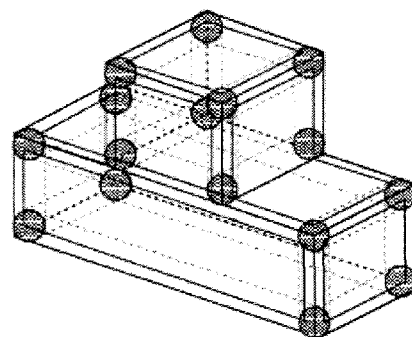


図-2 DEMを用いる際の車両モデル

る。なお、中央分離帯と追越車線の間には側帯を、走行車線の左側には路肩、側壁を設ける。

(2) 解析手法

本研究では、解析手法¹⁾として個別要素法(以下DEMと略す)²⁾を用いる。DEMを用いることにより、接触力は要素が接触したときに発生させる仮想のばねとダッシュポットを介して伝えられる。ただし、接触点を厳密に要素の角とすると、特に3次元での解析では接触判定が非常に複雑となる。そこで、

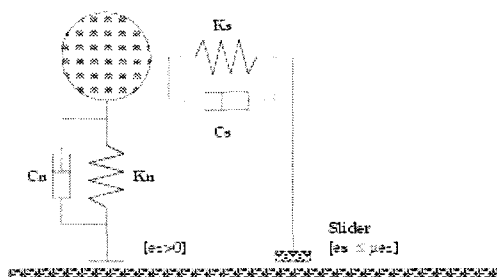


図-3 ばね及びダッシュポットのモデル化（球と面の接触パターン）

図-2 に示すように適当な半径を用いて、車両の頂点を 1/8 球、車両の辺を 1/4 円柱と仮定し、同様に、道路部についても頂点および辺をそれぞれ 1/8 球、1/4 円柱とする。この仮定により、車両と車両、車両と道路部との接触は全て、球と球、球と面、球と円柱、円柱と円柱の 4 つのパターンに分類でき、要素間の接触判定を簡便化することができる。

(3) 接触パラメータ

DEM では、要素間に仮想のばねとダッシュポットおよびスライダーを設けて数値解析を行なう（図-3）ため、ばね定数（ K_s , K_n ）、減衰係数（ C_s , C_n ）、動摩擦係数 μ の値をそれぞれ決定する必要がある。しかし、車両の接触時における力のやりとりのための仮想ばね等の諸元については、現時点ではこれらの値を理論的に決定することはできず、実験等により求めなければならない。そこで、本研究では以下のようにしてこれらの値を決定することにした。

垂直方向のばね定数 K_n 、垂直方向の減衰係数 C_n については、Kerckhoff らによる自動車の固定壁前面衝突実験³⁾を再現し、跳ね返り速度が実験値と等しくなるように決定した。この実験によると、重量 2427 ~ 2429 lbs. ($\approx 1100\text{kg}$) の自動車を速度 19.9 mph ($\approx 32.0\text{km/h}$) で固定壁に前面衝突させると、最大衝撃加速度が 32G であり、跳ね返りの速度は 1.7 mph ($\approx 2.7\text{km/h}$) で、その衝突時間は 85 msec であった。ここで、本研究では車両挙動が現実的なものでなければならないため、この実験より得られている 3 つの情報（最大衝撃加速度、衝突時間、跳ね返り速度）のうち、衝突時間と跳ね返り速度が実験結果と一致するように、 K_n および C_n を決定した。

接線方向のばね定数 K_s については接触する 2 要素のもつ材料特性の違いを考慮するため、道路部はコンクリート、車両は鉄と仮定し、それぞれのポアソン比⁴⁾から次式により決定した。

$$K_s = \frac{K_n}{2(1+\nu)} \quad (a)$$

なお、接線方向の減衰係数 C_s については 0 とする。これは、永井⁵⁾によれば要素が非接触状態から接触状態に移移する場合を考えたとき、 C_s の大きさによっては過大な減衰力が要素に作用し、 Δt が小さければ小さいほど解の安定性が得られなくなる可能性が高まることになる。そこで、このような過大な減衰力が要素に作用するのを防ぐために C_s を 0 とする。また、動摩擦係数 μ は一定であると仮定し、竹園ら⁶⁾による解析例の値を用いる。

表-3.2 接触パラメータ

	道路部との 接触時	車両同士の 接触時
μ	0.800	0.500
$C_s (\text{kN} \cdot \text{sec}/\text{m})$	0.0	0.0
$C_n (\text{kN} \cdot \text{sec}/\text{m})$	4.286×10^1	4.286×10^1
$K_s (\text{kN}/\text{m})$	6.776×10^2	6.254×10^2
$K_n (\text{kN}/\text{m})$	1.626×10^3	1.626×10^3

3. 地震時の車両挙動

(1) 入力地震波

入力地震波は 1995 年の兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で記録された加速度波形を用い、図-1 に示す絶対座標系の x 方向に EW 成分、y 方向に NS 成分、z 方向に UD 成分を入力する。ただし、解析にあたっては道路部全体の入力ではなく車両への慣性力入力とし、すべての成分において計算時間短縮のため主要動部分である 7.2 秒後から入力するものとし、17.2 秒までの 10 秒間の解析を行う。

(2) 車両を 1 台用いたとき

図-1 の y 方向の変位に着目し、車両が本来の走行ラインからどのくらい逸脱するのかを車両の重心の y 座標によって評価する。また、乗用車 1 と乗用車 2 は車線幅から車幅を引いて求められる余裕幅の半分値である 0.9m を越えると車線を逸脱し、同じくトラックとバスは 0.5m を越えると車線を逸脱するもの

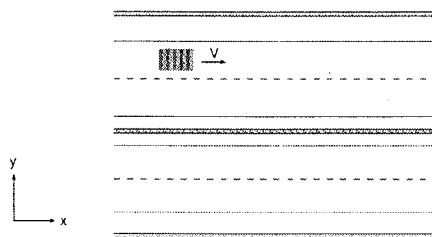


図-4 解析モデル図（車両1台）

と考えられ、それらの値を解析結果と同じ図中に“border”として示す。なお、乗用車1と乗用車2は区別せずに乗用車とする。これは解析結果に影響を及ぼすであろう車両重量や摩擦係数等のパラメータは車両後部の形状以外、すべて同じものを用いているためである。

a) 車両形状の違いによる比較

ここでは、4種類の車両形状によってどのような違いがあるのかを検討し、車両重量の違いがy方向変位にどのような影響を及ぼすのかを確認する。初期状態は100km/hでブレーキやハンドル操作は行わず、車両は等速運動をしているものとする。得られた結果は次のとおりである。

- 乗用車の変位は60cm程度で、トラックとバスの変位はほとんど変わらず、64cm程度である。
- 重量が重いほど変位は大きくなる傾向にあるが、大きな差異は見られない。

これらより、y方向変位は車両重量にほとんど依存しないことが確認された。これは、車両が受ける加速度は車両重量に比例すると同時に、摩擦力も重量に比例するためである。すなわち、y方向変位はタイヤと路面間の摩擦係数と重力加速度のみに依存する。また、乗用車の車線逸脱の可能性は低い、トラック及びバスについては逸脱の可能性が高いことも確認された。

b) 速度変化による比較

ここでは、乗用車を用い、その走行速度の違いがy方向変位にどのような影響を及ぼすのか検討した。ここでも車両は減速や加速は行わず、0km/h、40km/h、80km/h、及び120km/hの4つの速度で各々等速運動をしているものとする。得られた結果を以下に示す。

- 速度が変化してもy方向に関して同じような軌跡を描く。
- どの速度でも車線逸脱の可能性はほとんどない。

これは、x方向とy方向を合わせた変位は当然ながら速度に比例するが、y方向に等しい加速度を受けているのでy方向のみに着目すれば等しい変位量が得られるからである。なお、0km/hから120km/hまでに3cm程度の変位量の差が認められるが数値解析上の誤差と判断した。

c) ブレーキの有無による比較

地震発生の際にブレーキを踏む運転者は、山崎ら⁷⁾の実験によれば30人中2人と少ない。しかし、実際にブレーキを踏む運転者がいないとは考え難いのでブレーキの有無でどのような違いがあるか検討した。ところで、我が国では運転者が自動車の進行方向前方に障害物を認めてから制動をかけ始める反応時間を、判断時間としての1.5秒と反動時間としての1.0秒を足した、2.5秒として制動停止視距を求めている⁸⁾しかし、本研究では、地震の場合には対象物を認めて判断する時間はないと考えて反動時間の1.0秒を運転者の反応時間とした。よって、地震動を入力してから1秒後にブレーキをかけることとする。また、急ブレーキをかけてタイヤの回転が止まった際にハンドルが全く効かなくなるという事実から、本シミュレーションにおいてもブレーキをかけた場合には縦方向の摩擦力の大きさに応じて横方向の摩擦力が小さくなるようにした。得られた結果は以下のとおりである。

- ブレーキをかけた場合の乗用車のy方向変位はおよそ80cm、トラック及びバスは95cm程度である。
- 乗用車において、車線を逸脱する可能性は非常に低いものの、残り10cm程度で車線の端まで変位する。
- トラック及びバスはブレーキをかけない場合では逸脱量は10cm程度であったが、ブレーキをかけた場合にはおよそ45cmに達する。
- ブレーキをかけない場合に対する相対変位量はトラック及びバスの方が乗用車よりも大きくなる。

乗用車、トラック、バス、すべての車両でブレーキをかけた場合の方がブレーキをかけない場合より変位が大きくなった。これはブレーキをかけた場合にはy方向の摩擦力が小さくなったためである。また、トラック及びバスは乗用車よりもブレーキをかけている時間が長いにより大きな変位量が得られた。乗用車については、変位量が多くなるものの

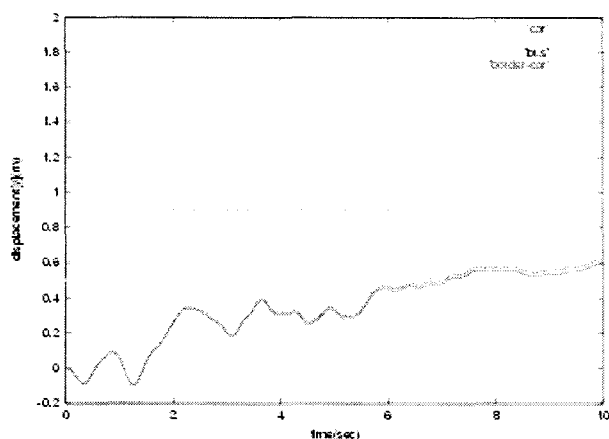


図-5 y 方向変位 (車両形状の違いによる比較)

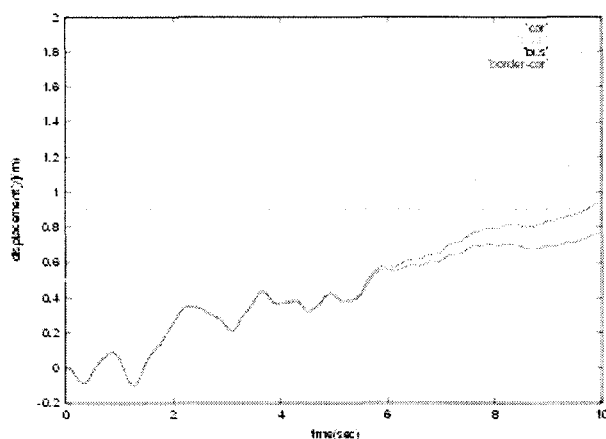


図-7 y 方向変位 (ブレーキをかけた場合)

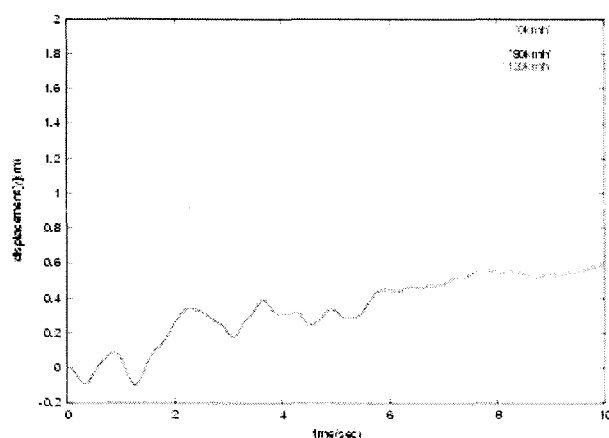


図-6 y 方向変位 (速度変化による比較)

逸脱するまでに至らない。しかし、バス及びトラックについては逸脱量が 14cm から 45cm と 3 倍以上になり危険性が高まる。

(3) 様々な状況を仮定したときのシミュレーション

道路部分が隆起したとき、陥没したとき、また、道路に落下物がある場合のシミュレーションを行った。

4. まとめ

本研究では、地震時における高速道路走行中の自動車挙動についての検討を行った。その結果、乗用車よりもトラックやバスの方が危険であること、運転者の反応によって車線を逸脱する危険性が高いことが確認された。

今後は自動車のより詳細なモデル化や運転者の反応特性をできる限り実際の運転者に近づけること、そして様々な地震型に対して解析を行う必要がある。

参考文献

- 1) 永井克実. 強震動による高架橋被災時の列車事故に関する研究. 京都大学修士論文, 2003.
- 2) 木山英郎, 藤村尚. カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析. 土木学会論文報告集, 第 333 号, pp. 137-146, 1983.
- 3) John F.Kerkhoff, Stein E.Husher, Michael S.Varat, Alison M.Busenga, and Kevin Hamilton. An Investigation into Vehicle Frontal Impact Stiffness, BEV and Reported Testing for Reconstruction. SAE Transactions Journal of Passenger Cars, Vol. 102, pp. 1456-1484, 1993.
- 4) 土木学会コンクリート委員会. [平成8年制定]コンクリート標準示方書 設計編. 土木学会, 1996.
- 5) 永井克実. 地震時における高架橋被災時の列車挙動に関する研究. 京都大学卒業論文, 2001.
- 6) 竹園茂男, 感本広文, 後藤健. 車両の二次元衝突 (衝突中のタイヤ力を考慮した場合). 日本機械学会論文集(C 編), 65 巻, 630 号, pp. 248-255, 1999.
- 7) F.Yamazaki, Y.Maruyama. Driving Simulator Experiment on the Behavior of Automobile Drivers under Seismic Motion. Proceedings of the 8th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, CD-ROM, 6p, 2001.12
- 8) 巻上安爾, 福本武明, 荻野正嗣, 塚口博司. 道路工学. 理工図書株式会社. 2002.