

地震動が高速道路走行中の車両の追従挙動に与える影響について

京都大学工学部	学生員	○村上 凌一
京都大学大学院工学研究科	学生員	Rishi Ram Parajuli
京都大学大学院工学研究科	正会員	清野 純史
阪神高速道路株式会社	正会員	八ツ元 仁

1. 研究の背景・目的

今後発生することが予想されている南海トラフ巨大地震では、大都市を走る高速道路のような車両密度の高い場所における大規模な事故の発生等にも十分に注意を払う必要がある。また、災害時における高速道路の輸送ルート等の役割を考えても、事前の対策を講じることが不可欠である。

そこで、本研究では、交通流の安定性が、各車両が前方車両との相対関係を調節することで保たれていることから、車両の追従挙動に着目する。まず、新しい追従挙動モデルの検討を行う。次に、水平方向の地震動が追従挙動に与える影響を検討する。

2. 車両の運動

2.1. 車両の基本運動と解析モデル

本研究では、車両前後方向をx軸、左右方向をy軸、上下方向をz軸として、それぞれの座標軸に関する並進運動と回転運動の6自由度の運動を考える。6自由度の車両挙動を解析するにあたっては、文献¹⁾で示されている図-1に示すモデルを使用した。図-1において下のバネはタイヤの剛性を、上のバネはサスペンションのバネをそれぞれ表している。また、車輪ごとの各パラメータはすべて等しいものとする。また、タイヤの力学モデルとしてマジックフォーミュラモデル¹⁾を用いた。

2.2. 車両の運動方程式

本研究では、水平方向と鉛直方向に関して運動方程式を解くことによって各車両の運動を求めた。6つの運動のうちz軸方向の並進運動以外を記述するために用いた座標系と車両モデルを図-2に示す。ここで、水平方向に関する車両の運動方程式を式(1),(2)に示す。また、図-1の車両モデルをもとに、鉛直方向に関する運動方程式を式(3),(4)に示すように記述した。

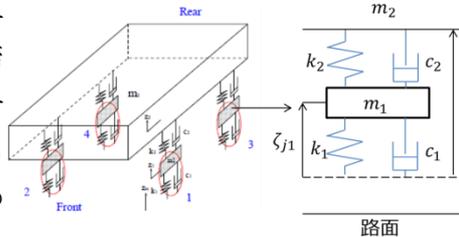


図-1 車両モデル

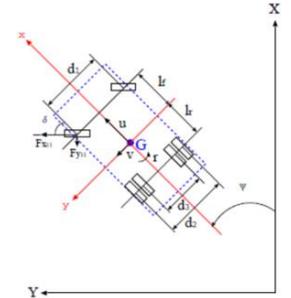


図-2 座標系

$$m(\dot{u} - vr + \ddot{x} \cos \psi + \ddot{y} \sin \psi) = \sum_i \sum_j (F_{xij} \cos \delta_{tij} - F_{yij} \sin \delta_{tij}) - \mu mg = \sum_i \sum_j F'_{xij} - \mu mg \quad (1)$$

$$m(\dot{v} + ur - \ddot{x} \sin \psi + \ddot{y} \cos \psi) = \sum_i \sum_j (F_{xij} \sin \delta_{tij} + F_{yij} \cos \delta_{tij}) = \sum_i \sum_j F'_{yij} \quad (2)$$

ここで、 u, v はそれぞれ x, y 軸速度、 r はヨー角速度、 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。 δ_{tij} は前輪操舵角である。また、 \ddot{x}, \ddot{y} は地震による地動加速度である。

$$m_1(\ddot{\zeta}_{i1} + \ddot{z}_{in}) + c_{i1}\dot{\zeta}_{i1} + c_{i2}(\dot{\zeta}_{i1} - \dot{\zeta}_{i2}) + k_{i1}\zeta_{i1} + k_{i2}(\zeta_{i1} - \zeta_{i2}) = 0 \quad (3)$$

$$m_2(\ddot{\zeta}_{g2} + \ddot{z}_{in}) + \sum_{j=1}^4 c_{j2}(\dot{\zeta}_{j2} - \dot{\zeta}_{j1}) + \sum_{j=1}^4 k_{j2}(\zeta_{j2} - \zeta_{j1}) = 0 \quad (4)$$

ここで、 ζ_{ij} はバネ下、バネ上の地面に対する相対変位を表し、 \ddot{z}_{in} は地動加速度である。

3. 追従挙動モデル

ここで追従挙動モデルとは、後続車両が先行車両との車間距離や相対速度などの変化を刺激(入力)とし、これに対応して反応(加速度)を出力するものとする。本研究では、新しい追従挙動モデルとして、魚群行動の自律分散機構モデル²⁾の車両走行への適用を考える。このモデルの定式化を以下に示す。

$$m_i \cdot \ddot{x}_i(t) = F_{i1} + F_{i2} \quad (5)$$

$$F_{i1} = a_1(|\dot{x}_i(t)| - a_2)(|\dot{x}_i(t)| - a_3)\dot{x}_i(t) \quad (6)$$

$$F_{i2} = \sum b_i(r_{ij}) \frac{x_j - x_i}{r_{ij}} + \sum c_i(r_{ij}) \frac{\dot{x}_j(t) - \dot{x}_i(t)}{M_c} \quad (7)$$

$$r_{ij} = |x_j(t) - x_i(t)| \quad (8)$$

キーワード：地震, 高速道路, 追従挙動, 車両
 連絡先：〒615-8540 京都市西京区京都大学桂

本研究で、自律分散機構モデルを車両走行に適用するにあたって、式(5)の F_{i1} を車両が自由走行するための力、式(5)の F_{i2} の第1項目の個体間誘引力を車間距離を調節する作用、第2項目の成群力を車両間の相対速度を調節する作用と考えることとした。

また、自律分散機構モデルの適用にあたって、式(9)で示される既往のHellyモデルとの比較を行った。 $\dot{x}_{n+1}(t+T) = a_1\{\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)\} + a_2\{x_n(t) - x_{n+1}(t)\} - a_3$ (9) ここで、 T は反応遅れ時間、 a_1, a_2 は定数、 a_3 は目標車間距離である。その結果を図-3に示す。図-3は、相対速度と車間距離の時間推移を表している。図中の赤線が1,2号車間、青線が2,3号車の関係を表す。自律分散機構モデルの方が時間の経過に対して変動が小さくなっているため、時間とともに、より交通流が安定に向かっていると判断し、本研究での解析に用いるモデルとした。

4. 車両挙動の解析

4.1. 解析条件

本研究で用いる入力波は、半波長の中で500galを超えている時間(以下超過時間と呼ぶ)が、それぞれ0.5,1.0,2.0秒となるように周期を約3,5,8秒とし、加速度の最大値が600gal、継続時間が25秒の正弦波とし、それらを車両前後方向、左右方向に作用させた。また、走行車両台数は3台とし、全車両が走行車線上にあるとし、先頭から1,2,3号車とした。前後方向に関して、入力波が周期8秒の場合のみ、2号車だけが揺れの影響を受けた場合についても考えた。考察に用いたサンプルの初期条件としては、車速は先頭から22.0,19.2,24.8m/sで、車間距離は1,2号車間は43.4m、2,3号車間は43.2mとした。

4.2. 解析結果

4.1で記述した条件のもと、車両左右方向、前後方向に関して数値解析で車両の挙動を求めた。左右方向に関して、周期約3秒から車線内での横滑りが確認され、5秒を超えると車線を外れる挙動を見せた。ここで、路肩または隣の車線に飛び出すかの違いが見られたが、それは500galの加速度を最初に、正の値または負の値で超えるかの違いである。また、全車一様に横滑りするため、追従挙動に影響は見られなかった。

車両の前後方向に関しては、結果を図-4に示す。

図中の赤線が1,2号車間、青線が2,3号車の関係を表す。周期約5秒から追従挙動に関して、車間距離の調節に支障をきたし始めた。また、2号車のみが揺れの影響を受ける場合の方が、車間距離の調節に大きな影響が確認された。また、図中の黒線は空走距離であり、反応遅れ時間と車速の積で表され、理論的に追突回避に必要とされる距離である。

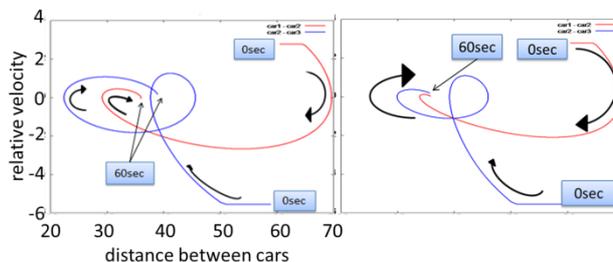


図-3 車間距離と相対速度の時間推移(左がHellyモデル、右が自律分散機構モデル)

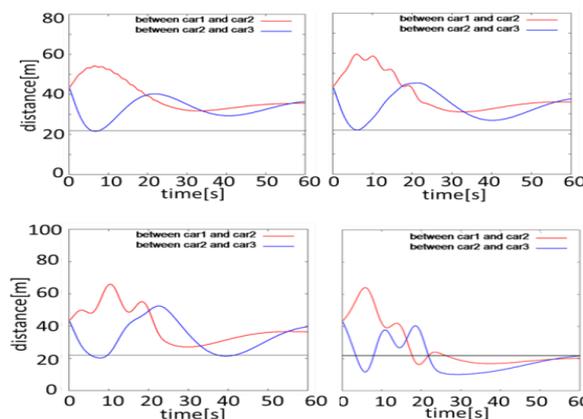


図-4 車間距離の推移(1段目左から入力波の周期約3秒、5秒、2段目左から周期8秒について全車両が影響を受ける場合、2号車のみが影響を受ける場合)

5. 結論

本研究では、新しい追従挙動モデルの提案、水平方向に揺れが作用した場合の車両挙動の検討を行った。モデルの適用であるが、自律分散機構モデルは追従挙動モデルとしての要件を満たす。また、車両挙動であるが、長周期の成分が卓越するほど影響は大きく、左右方向、前後方向ともある周期を超えたときから、それぞれ側面衝突、追突の危険性が増すことが分かった。また、安定した車列の中で、その1部のみが挙動を乱す方が、追従挙動に現れる影響は大きいことが分かった。

参考文献 1)安部正人：自動車の運動と制御,山海堂,1991
2)三宮信夫,島田亮,中峯浩：魚群行動における自律分散機構のモデリング,vol.29,No.2,pp211~219,1993