

京都大学大学院 学生会員 ○石川 裕

京都大学工学部 正 会 員 後藤尚男

京都大学工学部 正 会 員 亀田弘行

1. 序

地震時における走行車両の安全性は、走行路とそれを支える路線構造物の強度のみでなく、破壊地点と走行中の車両の相対位置、走行速度などによっても支配される。そして路線構造物の破壊の危険度は構造形式、地盤条件などによって異なり、また、破壊は路線方向にランダムな位置に発生すると考えられる。さらに、地震発生時刻をあらかじめ確定することはできないので車両の位置もランダムである。したがって、地震時における車両の走行安全性は確率・統計的に評価することが必要となる。そこで本研究では以上の諸点を考慮した車両の走行安全度解析法を提案する。用いるパラメータの中には今後の研究によって値を定めるべきものが多いが、ここでは走行安全度の解析手法の開発に重点を置いて研究を行った結果、および、いくつかの主要なパラメータ値を変動させた場合の相対的な安全性向上効果を検討した結果を報告する。

2. 理論解析モデルによる走行安全度解析

まず、走行安全度の基本特性は次のような比較的簡単な理論モデルを用いて解析できる。すなわち破壊の危険度が一律な1方向路線を考え、地震により被害を受ける区間長を L 、平均破壊発生率を λ とし、走行路の破壊は路線に沿ってポアソン過程で発生するとみなす。また車両の停止距離を d_0 とし、 $L+d_0$ 区間に1単位の車両(1両または1編成)が存在する場合を扱う。そして車両が安全である(破壊箇所に入らない)事象を S 、車両が $L+d_0$ 区間に入る事象を C 、走行路の破壊個数を表わす確率変数を K とすると、地震時に車両が安全である確率は、

$$P(S) = P(S|C)P(C) + P(\bar{C}) = 1 - P(\bar{S}|C)P(C) \quad \cdots (1)$$

で与えられる。また、 $L+d_0$ 区間に確実に1単位の車両が存在する場合の安全確率は、

$$P(S|C) = 1 - P(\bar{S}|C) \quad \cdots (2)$$

となる。式(1)(2)中右辺に現われる $P(\bar{S}|C)$ は $L+d_0$ 区間にある1単位の車両の危険確率であるが、また同区間に複数の車両(平均停止距離 d_0)が存在する場合に、それらのうち危険な車両が占める割合の期待値と考えてもよい。 $P(\bar{S}|C)$ は次式のよう求められる。

$$P(\bar{S}|C) = \begin{cases} e^{-\lambda \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(L+d_0)^k}{k!}} \left\{ 1 - \frac{1}{(k+1)(L+d_0)} \left\{ 2L + \frac{(k+1)(L+d_0)^{k+1}}{L^k} \right\} \right\} & (L \geq d_0) \\ e^{-\lambda \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(L)^k}{k!}} \left[1 - \frac{2L}{(k+1)(L+d_0)} \right] & (L < d_0) \end{cases} \quad \cdots (3)$$

この結果からわかるように、車両の地震時走行安全性は、 L 、 λ 、 d_0 の3つのパラメータに支配される。式(3)より算出した $P(\bar{S}|C)$ を図1に示した。

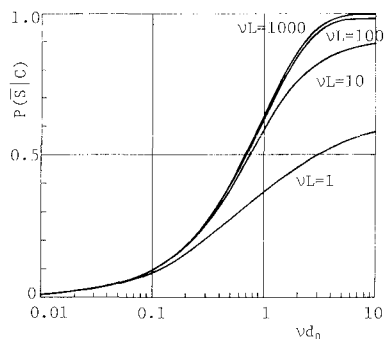


図1. 理論解析モデルによる車両の危険確率

3. シミュレーションモデルによる解析と鉄道の地震時安全性解析への応用例

以上の考え方を鉄道列車の走行安全度の問題に應用して考える。この場合、走行路破壊は軌道破壊、車両は鉄道列車に対応する。現実の路線では盛土や橋梁など各種構造物が混在し、また地盤条件なども場所によって異なり、さらに地震動や震央距離も全路線について一定とは考えられないので、その破壊発生率は路線に沿って変化する。一方、車両の位置が独立であれば、上記の1車両モデルを上下両方向や複数車両の問題に簡単に拡張でき

るが、実際には鉄道列車は一定タイヤに従って走行しており独立とは考えられない。また、列車位置によって速度が変化するため停止距離も異なる。以上のような条件をすべて考慮した理論解析を行なうのは困難であり、以下のようにモンテカルロ法を用いたシミュレーションを併用するのが有効であると考えられる。

1) 軌道破壊のシミュレーションモデル

軌道を構造、地形、地盤の各条件ごとに分割する。そして各条件が一樣とみなせる区間では軌道破壊はポアソン過程に従って発生すると考える。このとき、その平均発生率 λ は次式から決定する。

$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4$ ただし、 λ_1 は平均破壊発生率の基準値、 $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ はそれぞれ構造、地形、地盤条件による係数、また λ_4 は震度による係数である。ここでは実際の軌道を参考にしてこれらの係数を定め、また地震は(M)=6.4 (B)=8.0の2とおりを設定した。以上の条件下でモンテカルロ法によって破壊位置を決定する。

2) シミュレーションにおける列車危険判定

地震発生時刻はランダムであるので、乱数を用いてその時刻を決定し、それから列車位置、速度を決定する。各列車の進行方向前方の軌道破壊地点がその列車速度から求められる停止距離以内にあるかどうかで危険判定を行う。これらについても実際のタイヤを参考に諸定数を決定した。

3) 列車安全対策のための評価の方法

以上のような手順により得られる結果から地震時における列車危険度は次のような指標で表わされると考えられる。
(1) 危険列車数 N_d の分布。(2) N_d をその時刻における被害区間内に入っている全列車数 N_t で割った N_d/N_t の分布。これは地震時に被害区間に入っている列車の危険確率を意味し、その期待値は先に示したPBIにに対応する。(図2) (3) 軌道破壊突入時の列車速度の列車最高速度に対する比 v/v_0 の分布。

4) 列車安全対策の効果

地震時における列車安全対策としては、(a)列車の停止距離を小さくする。(b)線路構造物の破壊発生率を小さくする。の2通りが考えられる。そこで地震(B)に対し、停止距離 d_0 が最高速度のときの値 d_{00} の0.5倍、0.24倍となるように速度を制限した場合を考える。また軟弱地盤上の盛工の λ_2 を普通地盤の場合と同じ値に低下させた(以下これを強化後と呼ぶ)場合についても検討した。これらの結果を図3($\bar{v}=0.1$)、図4($\bar{v}=0.5$)に示した。図中の縦軸は列車危険確率の期待値 $\bar{r}$ を理論解析における強化前の $PBI(v_0)$ で除した値をとっている。これらの図において、列車の停止距離の減少と共に危険度は直線的に下がっていくが、構造物の強化に関しては、破壊発生率が小さく、かつ停止距離が大きいときのみ効果がみられるという結果になっている。現段階では計算したデータ数も少なく、PBIが小さい場合についてはシミュレーションの回数をさらに増加させる必要もあるので、結果の判定には今後の検討が必要であると考えられる。

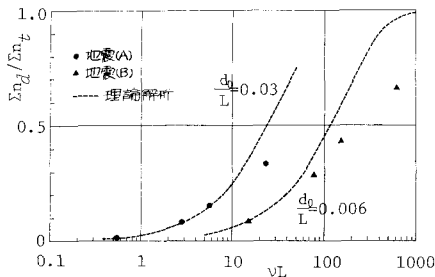


図2. シミュレーションによる列車危険確率 (理論解析との比較)

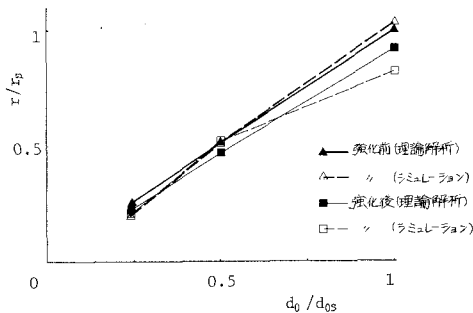


図3. 列車安全対策の効果 ($\bar{v}=0.1$)

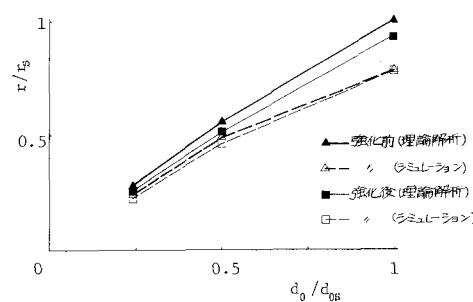


図4. 列車安全対策の効果 ($\bar{v}=0.5$)