

地震時の路線構造物の破壊に対する車両の走行安全度評価法について

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  
 京都大学大学院 学生会員 ○石川 裕

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評価法を提案する。路線構造物の破壊確率の解明など今後に残された問題も多いが、ここでは構造物の破壊確率が与えられたとして、走行安全度の評価手法の開発に重点を置いて研究を行なった結果を報告する。

2. 理論解析モデルによる走行安全度評価

まず、比較的簡単な理論モデルを用いて解析し、走行安全度の基本特性を調べる。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<sub>0</sub>とし、L+d<sub>0</sub>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(破壊箇所に突入しない)事象をβ、車両がL+d<sub>0</sub>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とするとき、地震時に車両が安全である確率は、

$$P(\beta) = P(\beta|C)P(C) + P(\beta|\bar{C}) = 1 - P(\beta|C)P(C) \quad \dots\dots (1)$$

で与えられる。また、L+d<sub>0</sub>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、

$$P(\beta|C) = 1 - P(\beta|\bar{C}) \quad \dots\dots (2)$$

となる。式(1)、(2)中右辺に現われるP(β|C)は、L+d<sub>0</sub>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<sub>0</sub>)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(β|C)は次式のように求められる。

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

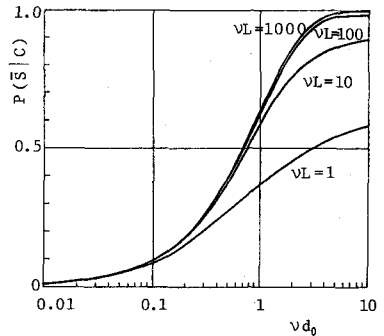


図1. 理論解析モデルによる車両の危険確率

この結果からわかるように、車両の地震時走行安全度は、L、λ、d<sub>0</sub>の3つのパラメータに支配される。式(3)より算出したP(β|C)を図1に示した。

### 3. シミュレーションモデルによる評価と鉄道への応用例

以上の考え方を鉄道列車の走行安全度の問題に応用して考える。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存在し、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依って変化する。一方、車両の位置が独立であれば、先の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ダ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から停止距離も異なる。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 $\lambda$ は次式から決定する。

$$\lambda = \bar{\lambda} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \quad \text{ただし、} \bar{\lambda} \text{ は平均破壊}$$

発生率の基準値、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  はそれぞれ構造、地形、地盤条件による係数、また $\lambda_4$  は震度による係数である。ここでは、実際の軌道を参考にこれらの係数を定め、また地震は(A)  $M=6.4$  (B)  $M=8.0$  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なう。これらについても実際のダイヤを参考に諸定数を設定した。

#### (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。(ア)危険列車数 $N_d$ の分布：これは想定した地震に対する被害の規模をあらわす尺度となる。(イ)危険列車数 $N_d$ をその時刻における被害区間内の全列車本数 $N_t$ 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 $P(\delta|C)$ に対応する。(図2) (ウ)軌道破壊突入時の列車速度 $v_f$ の列車最高速度 $v_{max}$ に対する比の分布(図3)：これは被害の程度を把握するための尺度となる。

これらを総合的に勘案して、安全対策を考えていくべきと考えられる。

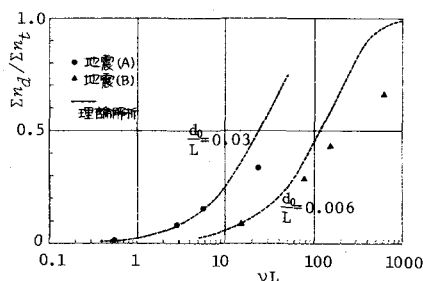


図2. シミュレーションによる列車危険率 (理論解析との比較)

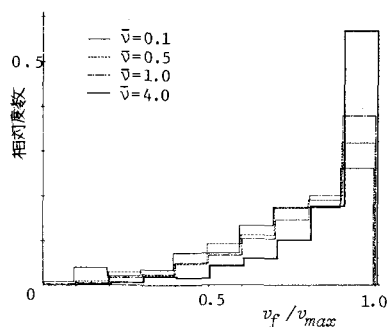


図3. 地震(B)に対する $v_f/v_{max}$ のヒストグラム