

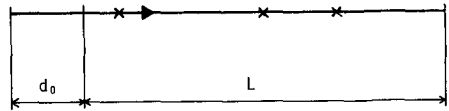
地震時の路線構造物の破壊に対する車両の走行安全度評価法について

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. まえがき 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、図1のように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、その平均破壊発生率を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d₀とし、L+d₀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ふ。そして車両が安全である(破壊箇所に突入しない)事象をS、車両がL+d₀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、



▶ : 車両
 × : 構造物破壊点

図1 理論解析モデル

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

で与えられる。また、L+d₀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、

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

となる。式(1)、(2)中右辺に現われるP(S|C)はL+d₀区間にある1単位の車両の危険確率であり、次のように求められる。

$$P(\bar{S}|C) = \begin{cases} e^{-\lambda(L+d_0)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda L)^k}{k!} \left[1 - \frac{1}{(k+1)(L+d_0)} \left\{ 2L + \frac{(k+1)d_0^2}{L} \right\} \right] & (L > d_0) \\ e^{-\lambda(L+d_0)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda L)^k}{k!} \left[1 - \frac{2L}{(k+1)(L+d_0)} \right] & (L < d_0) \end{cases} \quad \dots (3)$$

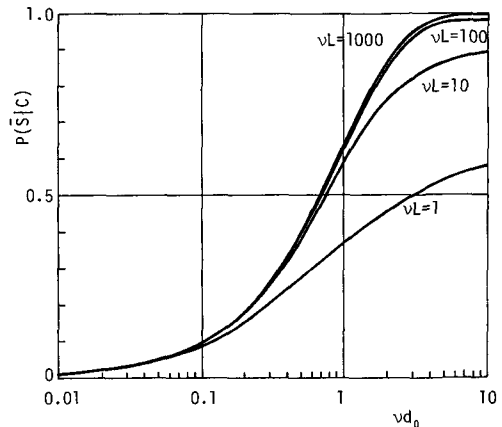


図2 理論解析モデルによる車両危険確率

この結果からわかるように、車両の地震時走行安全性は λ , μ , 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 $P(10)$ を図2に示した。なお、複数車両や複線の場合でも、車両の位置や路線構造物の破壊位置が独立であれば、式(3)の結果を組合せることにより車両危険確率を求めることができる。そして式(3)の $P(10)$ は複数車両(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も考えられる。地震時走行安全性を支配する上記のパラメータのうち、 λ は地震の性質で決まるものであり、 μ , d_0 が工学的に制御しうる変数である。具体的には、図2横軸の λd_0 をできるだけ小さくすることにより、 $P(10)$ を十分に小さくすることが課題となる。

3. シミュレーションモデルによる評価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よって変化する。一方、列車の位置に関して実際に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。したがって以上のような条件をすべて考慮した理論解析を行うのは困難であり、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。大部分のモデルパラメータの決定は、今後の研究に待たねばならないが、以下にシミュレーションモデルの考えたと予備的に計算を行った結果を示して、これらの手法の有用性を検討する。

(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 を次式から決定する。

$$\lambda = \bar{\lambda} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4$$

ただし、 $\bar{\lambda}$ 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、

地盤による係数、また λ_4 は震度による係数である。すなわち区間 i における平均破壊発生率 $\lambda^{(i)}$ 、区間長を $l^{(i)}$ とすると、その区間での軌道破壊数はポアソン分布に従い、その確率関数は次式で与えられる。

$$P_k(k) = \frac{(\lambda^{(i)} l^{(i)})^k}{k!} e^{-\lambda^{(i)} l^{(i)}}$$

ただし k は軌道破壊個数の確率変数である。一方、破壊位置については区間長 $l^{(i)}$ が一様分布であると考え。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。ここでは各種の条件設定は以下のように行った。

○地震の想定：地震(A) $M=6.4$, 地震(B) $M=8.0$ の2とおりとし、いずれの場合も路線は震源域を通過すると考える。この場合、震度V以上の地域に含まれる路線長は地震(A)では48km, 地震(B)では338kmであり、そのうち震度VI以上の地域に含まれる路線長は地震(A)では12km, 地震(B)では149kmである。

○破壊発生率 λ の設定：路線方向に変化する λ の値を精度よく推定するためには、現段階では資料が非常に少く(盛土については文献¹⁾が参考になる)、大部分は今後の研究に待たねばならない。ここでは、本シミュレーションモデルの基本特性を検討することを目的として暫定的に以下のような値を用いた。

- $\bar{\lambda}$ は0.1, 0.5, 1.0, 4.0 km¹の4通り。
- λ_1 の値は盛土を基準とし、盛土で1.0, 切土で0.1, 高架橋および橋梁で0.01, トンネルで0.001とした。
- 地形の影響は不明のため $\lambda_2=1$ とした。
- λ_3 の値は、道路橋耐震設計指針²⁾における地盤種別によって第一種~第四種地盤でそれぞれ0.9, 1.0, 1.1, 1.2とし、さらに極端な軟弱地盤地域を考慮し、これについては $\lambda_3=1.5$ とした。
- λ_4 の値は、震度VI以上の地域で1.0とし、震度Vの地域では、震度VI, IVとの境界でそれぞれ $\lambda_4=1.0, 0$ となるよう比例配分した。

路線方向の構造物や地盤の分布は実際の路線を参考にして定めたが、震度V以上の区間におけるこれらの割合

は表1のとおりである。

(2)シミュレーションにおける危険判定

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。その際列車の停止距離 d_0 は次式によって決定する。

$$d_0 = (v_0/\alpha)^\beta$$

ただし v_0 は地震発生時の列車速度、 α 、 β は定数であり、ここでは $\alpha=154.1$ 、 $\beta=0.392$ を用いた。また、地震発生時の列車の位置、速度を事例を参考に設定することとし、駅付近での速度の低下なども考慮した。

(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：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。(2)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、その期待値は式(3)の $P(31)$ に対応する(図3)。(3)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4)：これは被害の程度を把握するための尺度となる。

(4)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)路線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1/2および1/4となるように速度を制限した場合を考える。また第四種および軟弱地盤上の盛土の α を第三種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)場合についてシミュ

表1 構造物および地盤条件の構成比

	構造物					地盤条件				
	盛土	切土	高架橋	橋梁	トンネル	第一種	第二種	第三種	第四種	軟弱地盤
地震(A)の場合	52%	11%	15%	5%	17%	14%	38%	26%	7%	15%
地震(B)の場合	26%	3%	54%	2%	15%	15%	36%	45%	0%	5%

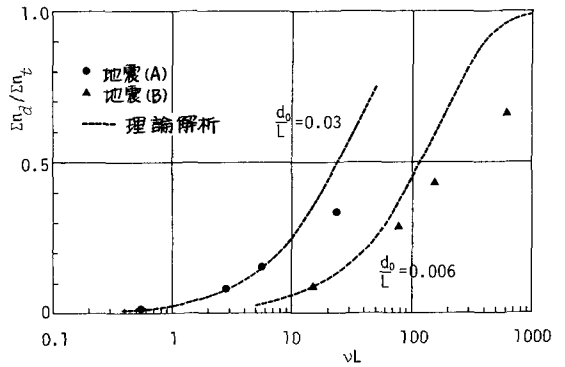


図3 シミュレーションにおける列車危険確率 (理論解析との比較)

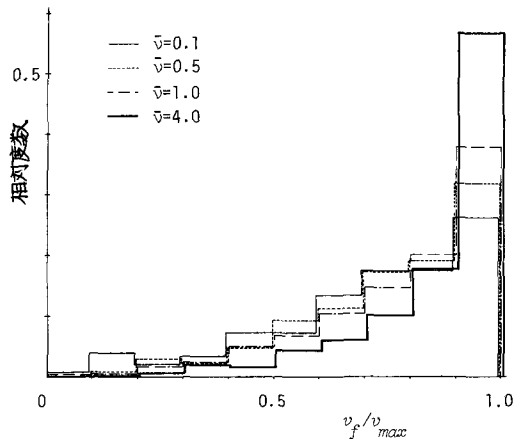


図4 地震(B)に対する v_f/v_{max} のヒストグラム

レーションを行った。これらの結果を図5に示した。図中の縦軸は列車危険確率の期待値 r を理論解析における強化前の $P(d|c)=r_0$ 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、かつ停止距離が大まいとまにのみ効果がみられるという結果になっている。

4. むすび

本研究で対象とした問題は、例題で扱った鉄道列車のみでなく、高速道路における地震時の走行安全性などとも関連すると考えられる。路線構造物の地震時挙動は、そこを走行する車両の安全性確保と密接に関わり合っており、本研究の方法によって走行安全性の程度の評価、安全対策の効果判定などに関する有用な情報が得られるものと期待される。本文中にも述べたように、例題中で用いたパラメータの値は大抵仮定が多く、得られた結果について定量的な判断を行える段階ではないが、これらの定性的傾向は、地震時の走行安全性と支配する諸要素を明確に示している。今後さらに細部の検討を行うと共に、より有用な手法に改善して行きたいと考えている。

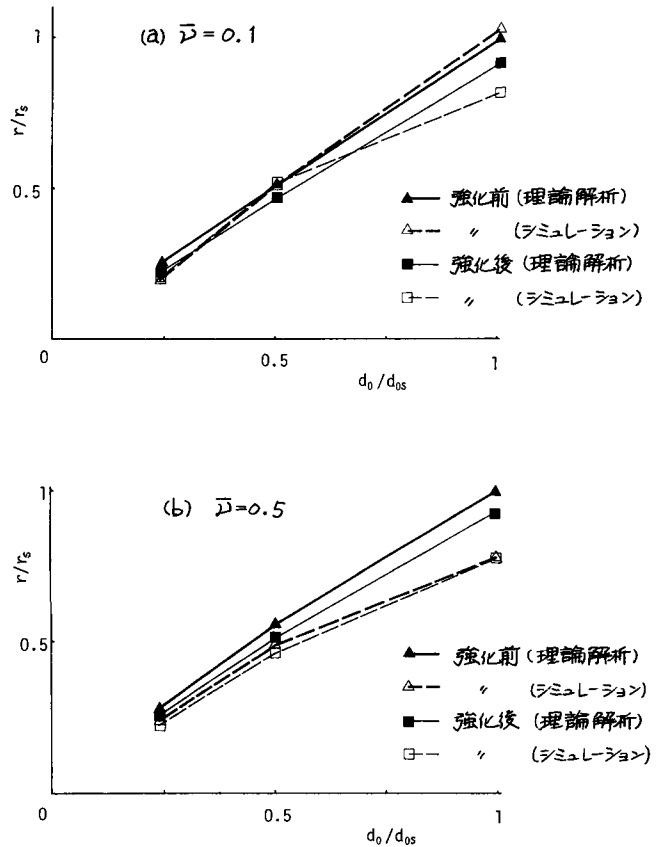


図5 安全対策の効果

[参考文献]

- 1) 後藤・豊田・茂岡：地震時における盛土被害の統計解析とシミュレーション，土木学会第15回地震工学研究発表会，昭54.7.
- 2) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針，昭47.