

京都大学工学部 正会員 亀田弘行

京都大学工学部 正会員 後藤尚男

八千代エンジニアリング 正会員 山口博之

1. まえがき 前報¹⁾において地震時における走行車両の安全性が走行路とそれを支える路線構造物の強度、破壊点と走行車両の相対位置および走行速度と制動性能によって支配されることを考慮して地震時の車両の安全性評価法を提案した。そこでは路線方向の構造物の破壊を確率過程として、車両が破壊箇所に入るとする確率を理論的およびシミュレーションから求め、またシミュレーションでは進入速度の確率分布を求めた。その後、理論解析を拡張して、進入速度の確率分布を求めるようにし、また構造物破壊の余裕時間をも考慮できるようにした。またシミュレーションモデルもこれに応じて拡張したので報告する。

2. 理論モデルによる走行車両の安全性評価法 理論モデルは次のような仮定を用いて理想化した上で解析する。いま種々の条件が一緒である一方向路線を考え、地震動によって路線に破壊点が生じる可能性のある区間をし、単位長さあたりの平均破壊発生率を λ とし、破壊点の発生は路線方向にポアソン過程に従うものとする。破壊点の発生は、地震動を感じた走行車両が非常制動を開始してから時間 t_a 後に生じるものとする($t_a \geq 0$)。速度 v からの制動距離 d を次式であらわす。

$$d = (v/\alpha)^2 \quad (\alpha, \text{は定数}) \quad (1)$$

通常走行速度を v_m とすると、制動作動時間 t を経た後の走行速度 $v(t)$ と移動距離 $y(t)$ の関係は、(1)式より次式であらわせる。 $t=t_a$

$$y(t) = d\{1 - (v(t)/v_m)^2\} \quad (2)$$

上式を時間 t で微分し初期条件($t=0$; $v(0)=v_m$)で解くと、次式が得られる。

$$v(t) = v_m(1 - t/t_a)^{1/2} \quad (3)$$

ここに t_a は速度 v_m に対する停止時間である。さて走行車両が破

壊点に進入しないか、進入してもそのときの速度が v 以下である事象を $\bar{D}$ 、走行車両が破壊点に進入する事象を D 、車両が $L+d$ 区間に入るという事象を C とし、破壊点の個数、走行車両の位置、破壊点の位置の確率変数をそれぞれ K , X_t , X_{fi} ($i=1, 2, \dots, k$) とする。いま次式で定義される確率関数 $R_b(\lambda, L, d, v)$ を考える。

$$R_b(\lambda, L, d, v) = P(\bar{B} \cap C) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda L)^k}{k!} e^{-\lambda L} \{1 - P(B \cap K=k)\} \quad (4)$$

ところで $d_f(v)$ を速度 v_m から v に減じた後の停止距離とすると、 $P(B \cap K=k)$ は次のようにあらわされる。

$$P(B \cap K=k) = k! \left\{ \sum_{i=1}^k P(X_{f1} < X_{f2} < \dots < X_{fi} < X_t) \cap (X_t + d_f(v) < X_{fi+1} < \dots < X_{fk}) \mid C \cap K=k \right\} + P(X_{fk} < X_t \mid C \cap K=k) \quad (5)$$

ここで走行車両の位置は $L+d$ 区間で一様にランダムとすると、次の結果が得られる。

$$i) \ L \geq d_f(v); \ R_b(\lambda, L, d, v) = \frac{1}{\lambda L + d_f(v)} [\lambda L + \lambda d_f(v) - 2 - (\lambda L + \lambda d_f(v) - 2) e^{-\lambda d_f(v)}] = P_1(\lambda, L, d, v) \quad (6)$$

$$ii) \ L < d_f(v); \ R_b(\lambda, L, d, v) = \frac{1}{\lambda L + d_f(v)} [\lambda L + \lambda d_f(v) - 2 + (\lambda L - \lambda d_f(v) + 2) e^{-\lambda L}] = P_2(\lambda, L, d, v) \quad (7)$$

さて時間余裕 t_a がある場合は図-1に示すように F 区間に存在する車両は無条件に安全である。時間余裕 t_a を考慮した危険確率 $P(D; \lambda, L, d_0, t_a)$ は R_b を用いて次式であらわされる。

$$P(D; \lambda, L, d_0, t_a) = \frac{L + d_r}{L + d_0} \cdot R_b(\lambda, L, d_r, 0) \quad (8)$$

ここに d_0 は速度 v_m に対する停止距離、 d_r は時間 t_a だけ制動が作動した後の停止距離である。

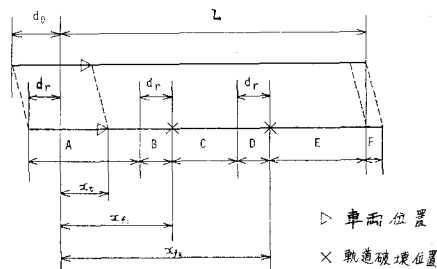


図-1 理論モデル

(8)式は(6), (7)式より次のようにあらわされる。

$$i) L \geq dr; P(D; \nu, L, d_0, t_a) = \frac{1}{\nu L + \nu d_0} [\nu L + \nu dr - 2 - (\nu L + \nu dr - 2)e^{-\nu dr}] \quad (9)$$

$$ii) L < dr; P(D; \nu, L, d_0, t_a) = \frac{1}{\nu L + \nu d_0} [\nu L + \nu dr - 2 + (\nu L - \nu dr + 2)e^{-\nu L}] \quad (10)$$

図-2 に時間余裕 t_a をパラメータとした時の危険確率 $P(D)$ を示す。ただし、 γ は、 $\alpha = 154.0$, $\delta = 2.551$ とした。

3. 進入速度の確率分布 破壊点への進入速度の分布関数は以下のようにならわされる。

$$F_{V_f}(v_f) = P(V_f \leq v_f | D) = 1 - P(V_f > v_f) / P(D) \quad (11)$$

これは R_b を用いて次のように書き改められる。

$$F_{V_f}(v_f) = 1 - R_b(\nu, L, dr, v_f) / R_b(\nu, L, dr, 0)$$

$$= \begin{cases} 1 - R_1(\nu, L, dr, v_f) / R_1(\nu, L, dr, 0) & ; L > dr \\ 1 - R_1(\nu, L, dr, v_f) / R_2(\nu, L, dr, 0) & ; dr \geq L > d_f(v_f) \\ 1 - R_2(\nu, L, dr, v_f) / R_2(\nu, L, dr, 0) & ; d_f(v_f) \geq L \end{cases}$$

確率密度は(12)~(14)式を v_f で微分して、

$$f_{V_f}(v_f) = \begin{cases} (1/\nu m) R_1(\nu, L, dr, v_f) / R_1(\nu, L, dr, 0) & ; L > dr \\ (1/\nu m) R_1(\nu, L, dr, v_f) / R_2(\nu, L, dr, 0) & ; dr \geq L > d_f(v_f) \\ (1/\nu m) R_2(\nu, L, dr, v_f) / R_2(\nu, L, dr, 0) & ; d_f(v_f) \geq L \end{cases}$$

$$R_1 = (\nu L / \nu m)^{\delta-1} \{ \gamma \nu d_0 / (\nu L + \nu dr) \} [1 + (\nu L - \nu dr) \exp(-\nu dr)] \quad (18)$$

$$R_2 = (\nu L / \nu m)^{\delta-1} \{ \gamma \nu d_0 / (\nu L + \nu dr) \} [1 - e^{-\nu L}] \quad (19)$$

図-3 に進入速度の確率密度の一例を示した。

4. シミュレーションモデルによる安全性評価法 以上の理論

解析による方法をもとに鉄道列車の地震時における走行安全性評価法へ適用するためシミュレーションモデルを用いた。先の研究においてモンテカルロ法を用いたシミュレーションモデルが開発されており、本研究では時間余裕 t_a を考慮するため若干のモデルの改良を行った。時間余裕 t_a は、 $t_a/t_0 = 0.12$, $t_a/t_0 = 0.24$ となるように設定した。想定地震は、地震(A) $M=6.4$, 地震(B) $M=8.0$ の2種類の地震である。各地震、各 t_a に対して、盛土の平均破壊発生率の基準値 $\bar{\nu}$ を0.1, 0.5, 1.0, 4.0の4種を用い、それぞれ100回のシミュレーションを行った。図-4はこのシミュレーションによる計算結果と理論解析による危険確率を示したものである。平均破壊発生個数 νL が大の時若干の差異を生じるものの良く一致している。図-5はシミュレーションの計算結果による進入速度のヒストグラムと理論解析による確率密度を示したものである。

5. むすび 本研究では、地震時における走行車両の安全性に対して、

時間余裕の影響が大きいことが判明した。すなわち地震の早期検知がさらに走行車両の安全性を増加させるといえよう。また、走行車両の制動性能が与える影響は今後の課題となるであろう。おわりに、本研究に対し種々討論して頂いた京都大学大学院生石川裕氏に感謝する次第である。

参考文献 1) 後藤尚男・亀田弘行・石川裕：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、第15回地震工学研究発表会講演概要、昭54.7, pp. 89-92。

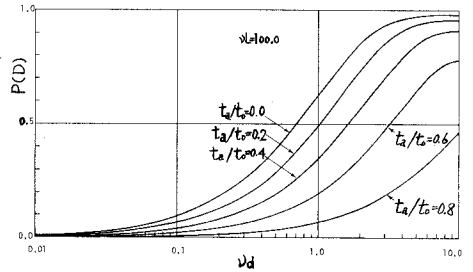


図-2 理論解析モデルによる危険確率

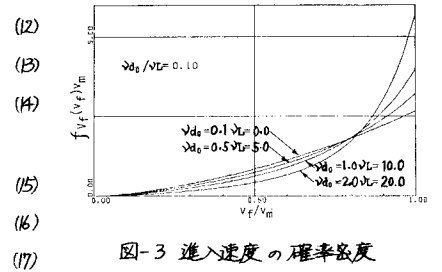


図-3 進入速度の確率密度

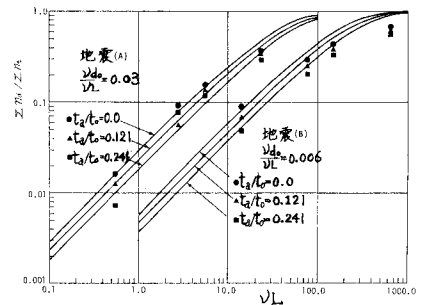


図-4 シミュレーションモデルによる危険確率

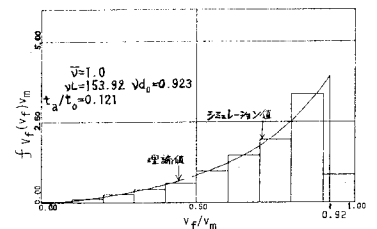


図-5 進入速度のヒストグラム