

地震時の路線構造物の破壊に対する走行車両の安全度評価法

京大工学部 正員 後藤尚男

京大工学部 正員 亀田弘行

京大大学院 学生員 黒木隆宏

1. まえがき

地震が発生したときの路線構造物の破壊に対する走行車両の安全性を評価するための解析を行ってきたが、そこでは破壊地点も列車も点として考えていた。今回、列車長を考慮し、破壊も路線方向にある有限な長さをもつものと考えて解析を行なった。

2. 理論モデルによる解析

いま、種々の条件が一樣である一方向路線を考え、地震動によって路線に破壊が生じる可能性がある区間を L 、単位長さ当たりの平均破壊発生率を λ とし、破壊の発生はポアソン過程に従うものとする。そして、列車長を l_t 、破壊長を確率変数 L_{fi} ($i=1,2,\dots,r$) とする。また、後藤・亀田・浅田によると、盛土の地震時における破壊長は最大 300 m となり、 L に比べてはるかに小さいとみなせるので、 $L \gg l_{fm}$ の範囲で解析を行う。ただし、 l_{fm} は L_{fi} の取りうる最大値である。さて、走行車両が破壊箇所に入らないか、進入してもそのときの速度が v 以下である事象を S 、走行車両が破壊箇所に入る事象を D 、車両が $L+d+l_t$ 区間に入るという事象を C とし、破壊箇所の数、走行車両の先端の位置、破壊の手前の位置の確率変数をそれぞれ K 、 X_t 、 X_{fi} ($i=1,2,\dots,r$) とする。いま次式で定義されるような、車両が破壊箇所に入る確率 $R_0(\nu, L, d, v)$ を考える。

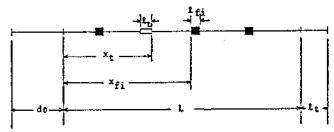


図-1 理論解析モデル

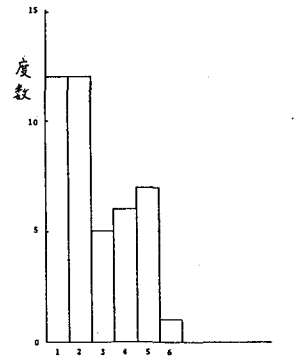


図-2 地震時における盛土の連続破壊長のヒストグラム

$$R_0(\nu, L, d, v) = P(S|C) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\nu L)^k}{k!} e^{-\nu L} \{1 - P(S|C \cap K=k)\} \quad (1)$$

ところで $d_f(v)$ を通常走行速度 v_m から v に減じるまでの停止距離とすると、 $P(S|C \cap K=k)$ は次のようにあらわされる。

$$P(S|C \cap K=k) = k! \{ P(X_t + d_f(v) < X_{f1} | C \cap K=k) + P(X_{f1} < \dots < X_{fr} < X_t - l_t) \cap (X_t + d_f(v) < X_{f1} < \dots < X_{fr}) | C \cap K=k \} + P(X_{f1} < X_t - l_t | C \cap K=k) \quad (2)$$

ここで、列車の位置は $L+d+l_t$ 区間で一樣にランダムとすると次のようになる。

$$R_0(\nu, L, d, v) = e^{-\nu L} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\nu L)^k}{k!} \left[1 - \frac{k!}{(2k+1)! (L+d+l_t)^k} L^k \sum_{j=0}^k k C_j (-1)^j \{ 2 \cdot (L-j l_{fm})^{2k+1} + (2k+1)(d-d_f(v))(L-j l_{fm})^{2k} + (k-1)(L-d_f(v)-l_t-j l_{fm})^{2k+1} \} \right] \quad (3)$$

ただし、 $l_{f0} = (L-d_f(v)-l_t)/l_{fm}$ 、 d は v_m による停止距離

Hiroyuki KAMEDA, Takahiro KUROKI, Hisao GOTO

ここで、 l_0 の上限を l_0 としたのは次のような理由による。破壊は区間 L 内で起こると考えているから、破壊の長さの総和は L より大きくなることはない。したがって、破壊個数 n が大きくなると破壊長 l_i の上限は l_0 より小さくなる。このことを取り入れると解析が煩雑に過ぎるので、本解析ではすべての l_i の上限を l_0 として計算を行なった。これが原因で $l_0 > (L - d_f(v) - l_0) / l_{fm}$ を超えると算出された確率の値が負になるので、 $l_0 = l_0$ までで計算を打切るものとする。

次に車両が制動を開始してから構造物が破壊するまでの余裕時間 t_0 を考慮すると、

$$P(D; v, L, d, t_0) = \frac{1 + d_f + l_0}{L + d_0 + l_0} R_0(v, L, d, 0) \quad (4)$$

ただし、 d_0 : 通常走行速度 v_0 に対する停止距離

d_f : 時間 t_0 だけ制動が作動した後の停止距離

3. 危険確率の上界

上界を求めるには次のようにする。まず、破壊は L 区間内に平均 n 個発生するから L を n 等分し、その小区間に破壊が必ず1つ発生すると考える。破壊が連続したり、近接したりすると車両が2つ以上の破壊にひかれることになり危険確率が低くなるので、最も危険になるように考えて破壊が小区間の中央で発生するものとする。すると、上界は次式であらわされる。

$$P_u = \frac{d + l_0 + l_{fm}/2}{L/v} \quad (5)$$

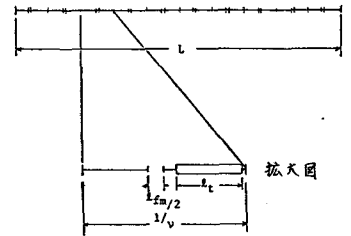
4. 計算結果と考察

計算を行うにあたり、列車長は 400 m とする。破壊長は 150 m が平均であるが、少し長めを考えて、 200 m とする。 $L = 20\text{ km}$ として行なった計算結果を図-4に示す。図-4を見ると、 v_d が小さくなると $P(D|C)$ が上界を超えてしまっている。このため、 $P(D|C)$ は信頼できる範囲だけをとり、 v_d が小さくなると上界に漸近するようにグラフを修正する。それが図-5である。なお、図-5で点線であらわされたグラフは列車長と破壊長を考慮しないときの危険確率である。

5. おわりに

破壊長と列車長を考慮した危険確率は、破壊長と列車長を考慮しないときより高くなっている。また、 $d \approx 0$ であっても危険確率は0にはならず、 v_d に依存している。このことより、列車長と破壊長の影響はかなり大きいと言える。

参考文献 1) Kameda, H., Goto, H., and Ishikawa, Y., "Risk Assessment of Running Vehicles Against Randomly Occurring Structural Failures During Earthquakes," Proceedings of the 7th WCEE, Vol. 1, Sept., 1980, pp. 363-370. 2) 後藤尚男・龜田弘行・浅岡克彦：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、第15回地震工学研究発表会講演概要、土木学会耐震工学委員会編、昭54.7, pp. 85-88.



1 1 破壊箇所

□ 列車

図-3 上界を求めるためのモデル図

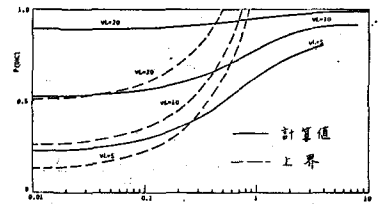


図-4 危険確率の計算値及び上界

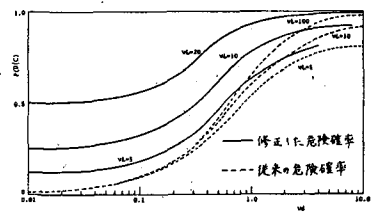


図-5 危険確率の修正図