

繰り返し高速モンテカルロ法に基づく道路橋の最大活荷重応答の評価法

鳥取大学工学部 正会員 高岡 宜善

鳥取大学大学院 ○学生員 山口 和範

鳥取大学工学部 正会員 白木 渡

鳥取大学大学院 学生員 杉村 重憲

鳥取大学工学部 正会員 松保 重之

1. まえがき 橋梁部材の安全性や使用性を評価するには、自動車荷重の最大応答を正確に把握する必要がある。これを評価するために最近では活荷重実態調査の結果を基に効率化シミュレーションの手法などを用いた種々の評価法^{1), 2)}が開発されている。本研究では、繰り返し高速モンテカルロ法³⁾が非常に小さな生起確率を求めるのに有効な手法であることに着目し、この手法を適用した道路橋の最大活荷重応答の評価法を提案する。

2. 繰り返し高速モンテカルロ法の基本概念 一般に構造物の破壊確率 P_f は式(1)で与えられる。

$$P_f = \int_{D_f} f_X(x) dx \quad (1)$$

ここに、 D_f は破壊領域、 X は基本確率ベクトル、そして $f_X(x)$ は X の同時確率密度関数である。Importance Sampling の概念を用いれば、式(1)の P_f は式(2)によって数値計算される。

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(g(x_i) \leq 0) \frac{f_X(x_i)}{h_X(x_i)} \quad (2)$$

ここに、 $g(x)$ は破壊基準関数で $g(x) \leq 0$ は構造物の破壊を意味する。また、 $I(\cdot)$ は指標関数(Indicator function)で、 $I(g(x) \leq 0) = 1$ 、 $I(g(x) > 0) = 0$ と定義される。そして $h_X(x)$ は Importance Sampling 密度関数である。また N はシミュレーション回数である。 $h_X(x)$ は破壊確率に最も貢献する領域にサンプリング点を集中するように選ばれるが、式(3)、(4)を満足するように定めると効率的で精度の良いシミュレーションが行える。

$$E_h(x) = E_f(x | x \in D_f) \quad (3)$$

$$E_h(xx^T) = E_f(xx^T | x \in D_f) \quad (4)$$

ここに、 E_h および E_f はそれぞれ $h_X(x)$ および $f_X(x)$ に関する期待値演算、上付の添え字 T はベクトルの転置を意味する記号である。まず通常のモンテカルロ手法により、式(3)、(4)の右辺の $E_f(x | x \in D_f)$ および $E_f(xx^T | x \in D_f)$ の値を推定し、これらの値を用いて Importance Sampling 密度関数が定められる。次に、その確率密度関数により Importance Sampling が実行され、 $E_h(x)$ および $E_h(xx^T)$ の値が更新される。この手順を数回続ければ効率よく精度よい結果を得ることができる。この手順の基本的な考え方を図示したものが Fig. 1 である。

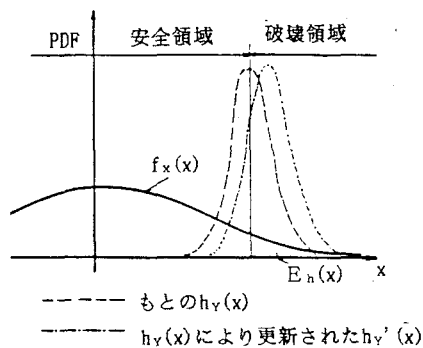


Fig. 1 1次元の場合の繰り返し高速モンテカルロ手法の基本概念図

3. 繰り返し高速モンテカルロ法を適用した道路橋の最大活荷重応答の評価法 活荷重実態調査によると、車両は Table 1 に示す 10 車種に分類分けされており、それぞれの車種の車重 W 、車長 L (Fig. 2 参照) は確率変数として扱われている。また、本研究では突発渋滞のときを想定し車間距離を 2.71m とする。繰り返し高速モンテカルロ法を適用するためには式(1)の $f_X(x)$ を定式化しなければならないので、Fig. 3 に示すような車種を限定した車列について個々に評価する必要がある。このとき効率化シミュレーションの手法⁴⁾を採用し、道路橋の支間中央部に最大曲げモーメントが生じるのは積載トレーラー⑧が支間中央に載ったときと

し、残りの車両については破壊確率に貢献する車種を選ぶことにする。また、ここでは式(2)の破壊基準関数 $g(x)$ を式(5)で表わすことにする。

$$g(W, L) = M_d - L(W, L) \quad (5)$$

Table 1 車種分類

車種番号	車種分類	車種混入率
①	大型車2軸空車	0.0181
②	大型車2軸積載車	0.0134
③	大型車2軸過積載車	0.0001
④	大型車3軸空車	0.0490
⑤	大型車3軸積載車	0.0902
⑥	大型車3軸過積載車	0.0006
⑦	トレーラー空車	0.0112
⑧	トレーラー積載車	0.0174
⑨	中形車	0.1745
⑩	乗用車	0.6255

ここに、 W および L はそれぞれ車重および車長の確率ベクトルであり、 M_d は設計曲げモーメントである。また、 $L(W, L)$ はFig. 3に示す影響線関数である。

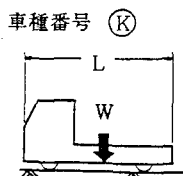


Fig. 2 車両の確率変数

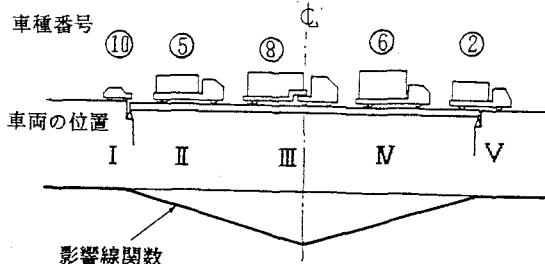


Fig. 3 道路橋における車種を限定した車列例および影響線関数

4. 計算例 道路橋の支間中央部の曲げモーメントに貢献する車両の位置はIII、IV (Fig. 3参照)であるが、既にIIIには積載トレーラー⑧を載荷することになっているのでIVに載荷する車種の影響について考えることにする。そこで、ここではTable 2に示すようにIV以外に載荷する車種を限定し、IVに載荷する車種のみを変化させて車種の影響を評価する。また、ここでは道路橋の支間長を50m、また設計曲げモーメント M_d を900tmとして計算をする。この結果がTable 2であるが、IVにおいて車種⑩、⑤、⑨が道路橋の支間中央部の曲げモーメントに大きく貢献していることを示唆している。これ以外に、I、II、Vに載荷する車種を変えて同様の計算を行ったが、これと同じ傾向が得られた。

Table 2 異なる車列状態による破壊確率

車列状態	破壊確率 P_i	統計誤差 $S_{IE}(\%)$	IVの位置の車種の混入率 $\times P_i$
I II III IV V			
⑩⑨⑧①②	0.1394×10^{-3}	2.60	0.2523×10^{-7}
・ ・ ・ ② ・	0.3600×10^{-3}	2.64	0.4958×10^{-7}
・ ・ ・ ③ ・	0.1215×10^{-2}	3.93	0.1215×10^{-8}
・ ・ ・ ④ ・	0.1830×10^{-3}	3.10	0.8966×10^{-7}
・ ・ ・ ⑤ ・	0.6114×10^{-3}	3.10	0.5515×10^{-4}
・ ・ ・ ⑥ ・	0.2450×10^{-3}	3.00	0.1469×10^{-7}
・ ・ ・ ⑦ ・	0.2060×10^{-3}	2.41	0.2308×10^{-7}
・ ・ ・ ⑧ ・	0.1446×10^{-2}	4.42	0.2515×10^{-8}
・ ・ ・ ⑨ ・	0.2035×10^{-3}	2.82	0.3350×10^{-4}
・ ・ ・ ⑩ ・	0.1154×10^{-3}	2.30	0.7218×10^{-4}

あとがき 道路橋の最大活荷重応答を繰り返し高速モンテカルロシミュレーションで評価するには車種を限定した車列について個々に計算しなければならなかった。しかしながら着目する車両の台数が増えと車の組合せが莫大な数にのぼり非効率である。これは破壊確率に貢献する車両の組を抽出し、それ以外の車両の影響はあらかじめ通常のシミュレーションで評価し、最後にこれと組合せて高速モンテカルロシミュレーションで計算することにより解決できる²⁾。特に、この高速モンテカルロシミュレーションは設計曲げモーメント M_d を大きく設定して組合せが限定し易い場合や計算例のように破壊確率に貢献する車両の組を合理的に判断するのに有力な手法と考えられる。

参考文献 1) 高田一彦・藤野陽三：道路橋最大活荷重のためのコンピュータシミュレーションの効率化、構造工学論文集、Vol.32A, 1986-3。
2) 久保雅邦・亀田弘行：着目点載荷と渋滞荷重列の組合せによる道路橋の最大活荷重特性の解析、土木学会論文、第398号/1-10, 1988-10。
3) 白木渡・G. J. Schuëllar：条件付き破壊確率を用いた繰り返し高速モンテカルロ法とその構造物の動的信頼度評価への応用、構造工学論文集、Vol.35A, 1989-3。