

I-173

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
鳥取大学工学部 正会員 白木 渡
鳥取大学工学部 正会員 松保 重之

鳥取大学大学院 ○学生員 山口 和範
鳥取大学大学院 学生員 杉村 重憲

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。

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

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。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。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。ここで、 $h_X(x)$ の平均および分散を $f_X(x)$ の破壊領域のそれと一致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。このことは $h_X(x)$ を数回更新することにより達成される³⁾。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。

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

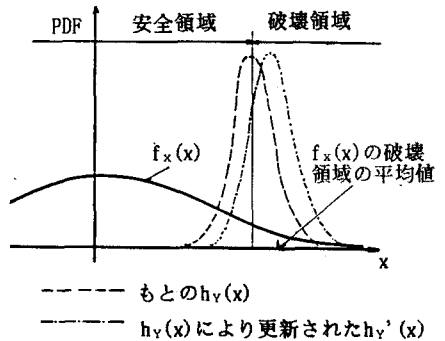


Fig. 1 1次元の場合の繰り返し高速モンテカルロ手法の基本概念図

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車種に種類分けされており、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。すなわち、それぞれの車種が限定されれば同時確率密度 $f_{WL}(W, L)$ で表わされる車列全体の確率特性が決定される。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る。まず、効率化シミュレーションの手法¹⁾を

Table 1 車種分類

車種番号	車種分類	車種流入率
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

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する。次に、道路橋の破壊確率を効率的に評価

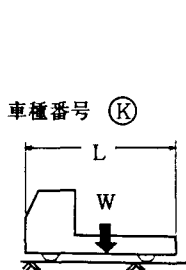


Fig. 2 車両の確率変数

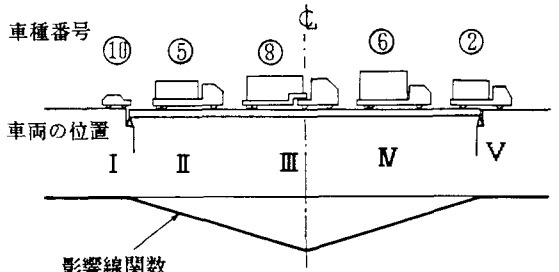


Fig. 3 道路橋における車種を限定した車列例および影響線関数

する方法として繰り返し高速モンテカルロ法を適用するのだが、適用方法としては残りの車種を限定する手法 (Fig. 3参照) と残りの車種を限定しない手法 (Fig. 4参照) の2通りが考えられる。車種を限定する手法は車列全体の確率特性 $f_{WL}(W, L)$ が評価できるのでかなり良い効率化ができるが、着目する車両の台数が増えると車種の組合せが莫大な数にのぼり非効率になる。しかし、破壊確率が非常に小さく車種の組合せが限定し易い場合や、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。また車種を限定しない手法は中央に載荷する積載トレーラーの確率特性 $f_{WL}(W, L)$ しか評価できず他の車両に関しては通常のモンテカルロシミュレーションを適用するので1回のシミュレーションの効率化は車種を限定した場合より劣るが、組合せを考慮しないでよいので組合せが多いときには有効な手法となる。また、ここでは式 (2) における破壊基準関数 $g(x)$ を式 (3) で表わすことにする。ここに、 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。

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を載荷することにして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。また、積載トレーラーが載荷したときの破壊確率は車種を限定しない手法で求める。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600tm, 800tmおよび1,000tmとして計算する。20,000回のシミュレーションによりTable 3の結果を得たが、 $M_d=1,000tm$ のとき破壊確率 P_f の誤差の範囲が 10^{-6} のオーダーであるので通常の効率化シミュレーション¹⁾ より効率な手法といえる。

5. あとがき 本研究により道路橋の最大活荷重応答の評価に繰り返し高速モンテカルロ法を適用すると効率的なシミュレーションが行えることを示した。また、本研究における車種を限定しない手法は参考文献2) の手法と等価な手法であるが、たたみ込み積分をしなくてすむことや、支間中央に載荷する積載トレーラーの車長の影響を考慮して破壊確率を評価できる点で優れていると思われる。

$$g(W, L) = M_d - L(W, L) \tag{3}$$

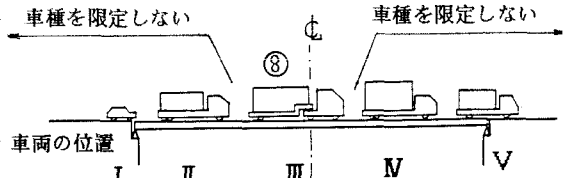


Fig. 4 道路橋における車種を限定しない車列例

Table 2 異なる車列状態の破壊確率

車列状態					破壊確率 P_f	統計誤差 $S_{IE}(\%)$	Ⅳの位置の車種の 混入率 $\times P_f$
Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ			
⑩	⑨	⑧	①	②	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^{-6}
*	*	*	⑨	*	0.2035×10^{-3}	2.82	0.3350×10^{-4}
*	*	*	⑩	*	0.1154×10^{-3}	2.30	0.7218×10^{-4}

Table 3 積載トレーラーが載荷したときの破壊確率

設計曲げ モーメント	破壊確率 P_f	統計誤差 (%)
600 tm	0.294×10^{-1}	1.95
800 tm	0.133×10^{-2}	2.10
1000 tm	0.224×10^{-4}	4.18

(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、土木学会論文集、第398号/1-10, 1988-10.
3) 白木渡・G. I. Schuffellar：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.