

I-527

不確定構造系の確率有限要素法による地震応答解析

(株)ピー・エス 正会員 ○石田邦洋
 山口大学 工学部 学生員 玉井知孝
 山口大学 工学部 正会員 中村秀明
 山口大学 工学部 正会員 浜田純夫

1. まえがき

近年、構造物の最適設計や信頼性あるいは安全性が重視されるようになり、安全性・機能性を保持するとともに、経済性をぎりぎりまで追求した設計が要求されるようになった。そこで従来のような確定論的な構造解析では十分といえなくなっており、構造物に含まれる不確かさを考慮した構造解析が必要となってきた。ここに従来の設計法に代わり新しい設計法として不確定要因を定量的に評価し、安全性を確保する確率有限要素法を用いた設計法が注目されている。

そこで、本研究では動的問題における確率有限要素法の定式化と、その適用例として橋梁の耐震設計に本手法を用いた場合について示す。本研究では、地震時における免震橋梁の挙動を確率有限要素法により把握し、支承のパネ定数および土の動的性質を含む材料特性のバラツキが橋梁の挙動にどのような影響をおよぼすかを検討した。

2. 解析理論

解析は確率有限要素法を用いて行う。この方法では、解析対象となるモデルの運動方程式を確率変数で微分することにより1次変動率を、さらに微分することで2次変動率を求めることができる。確率有限要素法の基礎を与えるテイラー展開による近似理論解析として構造応答が確率変数 X_1, X_2, \dots, X_n の関数として、

$$Y = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \dots\dots\dots(1)$$

が与えられる場合、これを期待値 $\bar{X} = \{\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n\}$ のまわりでテイラー展開すると次のようになる。

$$Y = g(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\bar{X}} (X_i - \bar{X}_i) \dots\dots\dots(2)$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial^2 g}{\partial X_i \partial X_j} \right)_{\bar{X}} (X_i - \bar{X}_i)(X_j - \bar{X}_j) + \dots$$

ここで、 $(\cdot)_{\bar{X}}$ は微分を $(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n)$ で評価することを意味するが、それらの微分値が与えられるような滑らかな関数である場合に、本手法の適用範囲は限られる。また、式(2)の右辺第3項、すなわち X の2次の項までを考慮すれば、期待値 $E[Y]$ 、分散 $\text{Var}[Y]$ は、

$$E[Y] = g(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial^2 g}{\partial X_i \partial X_j} \right)_{\bar{X}} \text{Cov}[X_i, X_j] \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{Var}[Y] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\bar{X}} \left(\frac{\partial g}{\partial X_j} \right)_{\bar{X}} \text{Cov}[X_i, X_j] \dots\dots\dots(4)$$

のようになる。 $\text{Cov}[X_i, X_j]$ は確率変数 X_i, X_j の共分散である。ここで2次近似法を用いる場合には確率変数 X_n の2次から4次までのモーメントが必要となるが実際の構造系に内在する不確定性を確率変数として表すとき3次以上のモーメントを同定するには、多大の労力を必要とするので分散に対しては式(4)のように2次モーメントで打ち切り、これを期待値の2次近似とした。

3 橋梁のモデル化

本研究の解析例として用いた橋梁モデルは道路橋の免震設計ガイドライン(案)で取り上げられているI種地盤上の3径間連続PC合成桁橋でこの橋梁より1橋脚を取り出して行う。モデルは地盤の回転を考慮に入れたロッキング・スウェイモデルを用いた。モデルの不確定要因として免震支承のパネ定数、地盤の水平バ

ネ、回転バネの3要素に加え、地盤のバネ定数の相関係数を変化させて解析を行った。表1に解析条件を示す。入力地震波はI種地盤用標準波形の修正開北橋記録の最大加速度を100galに修正したものを、解析は複素応答法で行った。

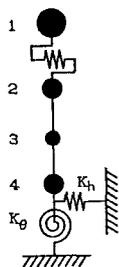


図1 ロッキング・スエイモデル

表1 解析条件

	支承部の 変動係数	地盤定数の 変動係数	水平バネと回転バネ の相関係数
Example 1	10	10	1.0
Example 2		20	
Example 3		30	
Example 4	20	10	
Example 5		20	
Example 6		30	
Example 7	30	10	
Example 8		20	
Example 9		30	

4. 解析結果と考察

解析モデルの質点1における不確定要因の変位分散に対する寄与率を示したものが図2である。それぞれの寄与率は、任意の時刻における各不確定要因が寄与する分散の絶対値の和で各分散の寄与値の絶対値を割ったものである。

支承バネの変動
 地盤の回転バネの変動
 地盤の水平バネの変動
 水平バネと回転バネの相関係数による変動

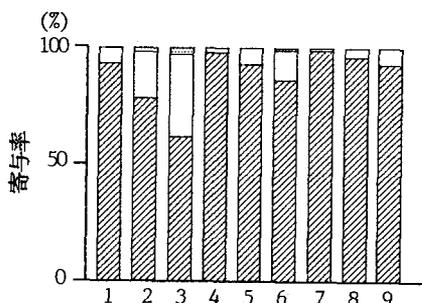


図2 変位分散の最大量に対する不確定要因の寄与率 (質点1)

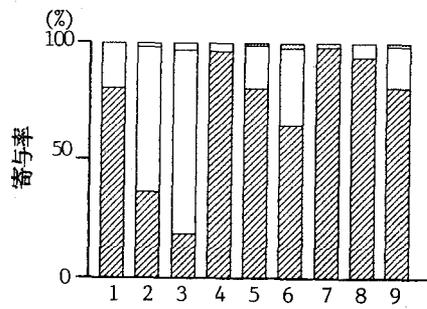


図3 変位分散の最大量に対する不確定要因の寄与率 (質点2)

図2より質点1の変位のバラツキにおよぼす影響は全般的に支承バネの寄与率が高いこと、水平バネと回転バネでは水平バネのバラツキが寄与する割合は低いということがわかる。また不確定要因とした地盤バネの相関係数にかかわる分散は全体に占める割合は非常に低く、支承バネの寄与率は地盤バネの変動係数によって変化する。また、支承バネの変動が一定の時、地盤の回転バネの変動が2倍、3倍になるからと言って、必ずしもその影響が2倍、3倍になるとは限らないことがわかる。また、支承バネの変動係数が大きくなると地盤のバネ定数の変動の影響はほとんどなくなる。図3は質点2の場合である。図より回転ばねの変動係数が10%から20%に増加すると質点2に回転バネの変動の影響が増大することがわかるが、支承バネの変動係数が20%、30%と増加するとやはり支承バネの変動が大きな割合を占める。また、図2,3ともに、水平バネの変動が変位分散に寄与する割合は低い。

6. 結論

本手法の適用例として橋梁モデルを用いたが、その結果上部工の変位分散に寄与する不確定要因は支承バネの変動が大きく影響し、他の不確定要因の変動係数が大きくなってもその変動係数はほぼ一定値を示す。また、地盤の水平バネの変動、および地盤のバネ定数の相関の影響は上部工、橋脚上端の応答の変動にほとんど寄与しないことなどがわかった。本手法では得られた応答の期待値や分散から変化後の応答を予測することが出来る。