20109

日本建築学会大会学術講演梗概集
(関東) 2011年 8月

不確定な構造特性を有する免震建物の地震時限界応答に関するロバスト性解析法

正会員 ○藤田皓平 1*
同 竹脇 出 2**

免震建物 不確定性 ロバスト性
区間解析 地震時限界応答

1. 序 免震構造に採用される種々の積層ゴムアイソレータやダンパーについては，材料物性のばらつき，製作誤差，温度・振動数依存性等に起因した製品のばらつきや経年による特性変化が顕著であり，設計時にはこれらも含めた構造物パラメターの不確定性が免震性能に及ぼす影響について検討を行う必要がある。

ここでは，免震装置や上部構造の種々のパラメターが不確定性を有することを想定した上で，免震建物の設計時に検討すべき応答量の一例としての免震層水平変位及び頂部絶対加速度応答の最大値の上下限値を予測するロバスト性解析法を提示する。本手法を適用することにより，構造物パラメターのばらつきに対する応答のばらつきを高精度に予測することが可能となる。

2. 免震建物のモデル化とアイソレータの不確定性

基礎免震を有する N 層免震建物モデルを検討対象とする(図 1)。上部構造は，各層を 1 質点とみなす多質点系せん断型弾性モデルとする。アイソレータは，線形の復元力特性を有する天然ゴム系積層ゴムアイソレータ(NRB)とし，減衰装置としてはオイルダンパー用いる。

積層ゴムの不確定性に寄与する主たる原因としては製品上のばらつき，温度・振動数変化による変動及び経年変化による特性変化が挙げられる。NRB の温度依存性については，20℃における NRB のせん断弾性係数を基準とすれば，-10℃で 10%程度上昇し，40℃では数%程度低くなるという報告がある。NRB の経年変化としては最大で10%程度の剛性増加が予測されている。

3. Taylor 展開を用いた区間解析法

区間解析法は，ばらつきが想定される物性値や設計パラメター等に対してばらつきの変動幅(=区間モデル)を与えたうえで，目的関数 f の上下限値を推定する方法である。区間解析法において，不確定構造物パラメター $\mathbf{X}$ は次のように定義され，これをインタバル変数と称する。

$$\mathbf{X}^I = \left\{\left[X_i^c - \Delta\underline{X}_i, X_i^c + \Delta\bar{X}_i\right]\right\} \quad (i=1,\cdots,N_x) \tag{1}$$

ここに $(\ )^I$ はインタバル変数を示し，$[a,b]$ により当該変数の下限値 a 及び上限値 b が定義される。また，(1)式において，$(\ )^c$，$\Delta\bar{X}$，$\Delta\underline{X}$ 及び N_x は，それぞれノミナルモデルにおける構造物パラメターのノミナル値，インタバル変数の上側と下側の変動幅及びインタバル変数の個数を表す。通常の区間解析では，目的関数 f は次の制約を満たすものと仮定される。

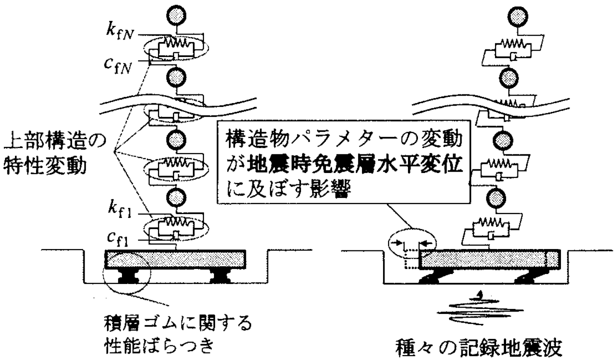

図 1 免震建物における構造物パラメターの不確定性

$$\left\{f(\mathbf{X}): x_i \in X_i^I, i=1,2,\cdots,N_X\right\} \subseteq f(X_1^I, X_2^I, \cdots, X_{N_X}^I) \tag{2}$$

(2)式は，目的関数 f の最大・最小値がインタバル変数の端点で生起することを意味する。即ち，インタバル変数の区間内の構造物パラメターに対する目的関数は，インタバル変数の端点を組み合わせた応答に包含される。

目的関数 f の構造物パラメター $X_i\ (i=1,\cdots,N_X)$ に対する 1 次微係数 $f_{,Xi}$ 及び 2 次微係数の対角成分 $f_{,XiXi}$ を用いた Taylor 展開により目的関数を近似する区間解析法は，従来から知られている。Taylor 展開による 2 次近似において，2 次微係数の非対角成分を無視すれば [1]，目的関数 f の変動項 Δf は次式で表わされる。

$$\Delta f(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{N_X}\left\{f_{,Xi}(X_i - X_i^c) + 1/2\cdot f_{,XiXi}(X_i - X_i^c)^2\right\} \tag{3}$$

4. Taylor 展開に基づく上下限探索によるロバスト性解析

3 節で紹介した区間解析法では，動的な応答を対象とする場合に(2)式の仮定が必ずしも成立するとは限らず，構造物パラメターの不確定性の程度に依存し，目的関数の上下限値を精度よく評価できない場合がある。

目的関数 f を最大化（もしくは最小化）する構造物パラメターの分布を推定することができれば，応答解析を再度実施することで構造物応答に関するロバスト性を高精度に評価することが可能となる。本節では，2 次微係数までを用いた Taylor 展開により近似された目的関数 f の極値を与える構造物パラメターを見出す方法を提示する。インタバル変数 $X_i\ (i=1,\cdots,N_X)$ に対する目的関数の変動項 Δf_i において，$X_i - X_i^c$ を未知変数 dX_i と見なせば，Δf_i は次のように書き換えることができる。

Robustness Evaluation for Earthquake Response of Base-isolated Building under Uncertain Structural Parameters

FUJITA Kohei, TAKEWAKI Izuru

$$\Delta\hat{f}_i\left(dX_i\right)=f_{,X_iX_i}\left(dX_i+f_{,X_i}/f_{,X_iX_i}\right)^2/2-f_{,X_i}{}^2/2f_{,X_iX_i}\quad(4)$$

ここで$\Delta\hat{f}_i$はdX_iに関する2次曲線となっており，(4)式が最大(もしくは最小)となる場合のインタバル変数$d\hat{X}_i$を陽に導くことが可能である。即ち，インタバル変数の変動領域内で$\Delta\hat{f}_i$が極値を有する場合，$\Delta\hat{f}_i$の極値に対応する$d\hat{X}_i$は$-f_{,X_i}/f_{,X_iX_i}$となる。これらの各次の感度$f_{,X_i}$及び$f_{,X_iX_i}$の導出に関しては，ノミナルモデルとなる基準点まわりにおいて評価する方法が考えられるが，ロバスト性評価の精度に問題がある [2]。そこで，インタバル変数X_iに対して$d\hat{X}_i$を求めたうえで，X_iを$d\hat{X}_i$に変更し，基準点を更新する。以下では本提案手法をURP (=Updated Reference Point)法と称する。URP法では，基準点の更新後に現在の基準点回りにおけるインタバル変数X_iに対する目的関数の勾配ベクトルを再計算する必要がある。図2では，近似上限値に対応してインタバル変数を変更し基準点を更新するURP法の概略を図示する。

5. 数値解析例　本節では，基礎免震を有する20層建物を対象に，代表的な入力地震波に対する免震層最大水平変位に関するロバスト性解析を実施する。上部構造物の1層あたりの質量は1024 [t]とし，全層一様とする。上部構造物の層剛性$\mathbf{k}_f$は，免震層固定時の1次モード(1次固有周期 1.6s)が直線形で与えられると仮定する。免震層剛性k_0及び免震層減衰係数c_0は，上部構造を剛体と仮定したうえで，免震層を含めた全体系を1質点とみなした際の1次固有周期が4.0s，1次減衰定数が0.2となるようにそれぞれ設定する。入力地震波は，El Centro NS (1940), Taft EW(1952), Hachinohe(1968), Tomakomai EW(2003), BCJ L2の5波とし，最大速度が50kineとなるように基準化する。

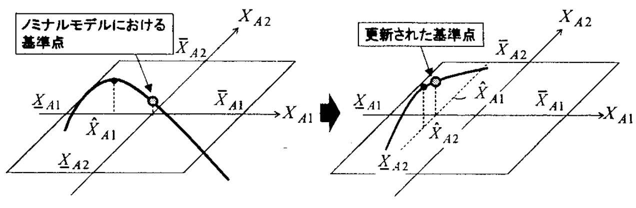

図2　近似上限値に評価点を更新するURP法の概略図

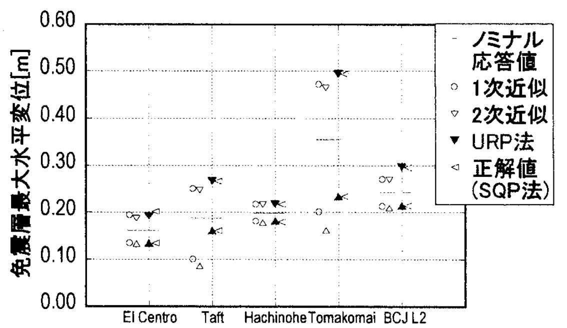

図3　構造物パラメターのばらつきに対する免震層最大水平変位応答の上下限推定値

不確定パラメターXは，免震層減衰係数c_0，免震層剛性k_0，上部構造物構造減衰係数$\mathbf{c}_f$及び層剛性$\mathbf{k}_f$とし，ばらつきの度合いは順に±30%，−15%:＋26%，±10%及び±5%とする。比較対象とする正解値は，ノミナルモデルを初期値として不確定パラメターの変動制約を設けたSQP法による結果を採用する。SQP法では，初期値依存性が問題となることがあるが，後述する例では初期値の設定に関わらず最適解が一致することを確認している。

図3は，種々の方法と提案手法による免震層最大水平変位の上下限値を示す。図4は構造物パラメターの分布性状（横軸: -1が下限,1が上限, 縦軸:下から$c_0, k_0, \mathbf{c}_f, \mathbf{k}_f$の順）を示す。従来の方法に比べて，URP法による上下限値は正解値と良好に一致している。これは，免震層最大水平変位に影響を及ぼすk_0が変動領域内に存在する場合でもURP法が比較的高精度に評価できるためである。

6. 結論　区間解析法においてインタバル変数の変動領域内で目的関数が最大となることを想定したURP法を提案した。数値例では，構造物パラメターの不確定性を考慮した際の免震建物のロバスト性を高精度に評価可能であることを例示し，URP法の有効性を示した。

謝辞　本研究の一部は，日本学術振興会の特別研究員奨励費(No.21・364)及び科研費(No.21360267)による。

参考文献　[1] S. Chen, et al., (2009). "An efficient method for evaluating the natural frequency of structures with uncertain-but-bounded parameters", *Comp. Struct.*, **87**, pp582-590.
[2] K. Fujita and I. Takewaki, "An efficient methodology for robustness evaluation by advanced interval analysis using updated second-order Taylor series expansion", *Eng. Struct.* (submitted)

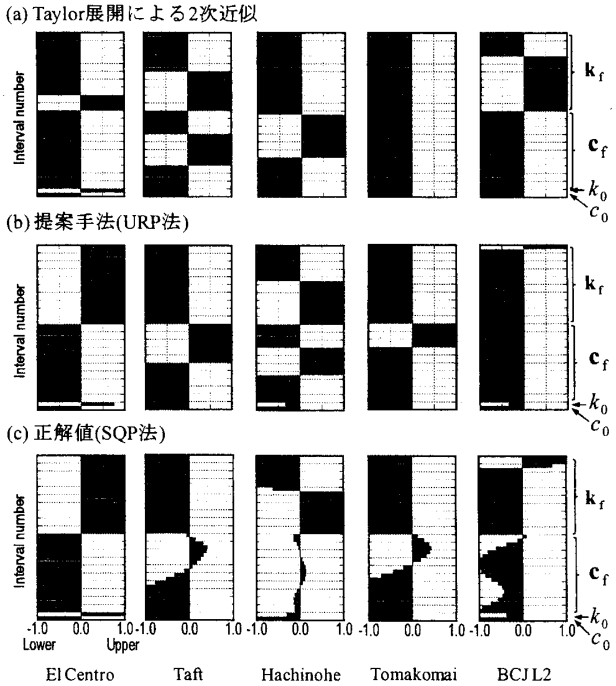

図4　不確定パラメター分布(免震層最大水平変位の上限値)

1* 京都大学大学院工学研究科　日本学術振興会特別研究員DC・工修
2** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻　教授・工博
Grad. Student, Dept. of Urban and Env. Eng., Kyoto Univ., Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science, Mr.Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Archi. Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.