Ｉ－５２　平成17年度　土木学会北海道支部　論文報告集　第62号

社会基盤構造物の維持管理におけるシステム同定の適用

Study on applicability of system identification method for the maintenance of infrastructures

北海道大学大学院工学研究科　正　員　小幡卓司 (Takashi Obata)
北海道大学工学部土木工学科○学生員　澤崎　渉 (Wataru Sawasaki)
北海道大学大学院工学研究科　Ｆ会員　林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

１．まえがき

今日におけるわが国の社会基盤構造物の現状は、ほぼ全てが壮年期から老年期を迎えつつあり、その老朽化が今後急速に進むことが懸念されている[1)]。社会基盤施設の老朽化は必然であり、いずれ寿命を迎えることは自然の理ではあるが、適切な維持管理ならびに補修・補強を行うことによる基盤施設の延命・長寿命化は、予防的投資による高い経済効率が期待できるのみならず、環境保護や廃棄物削減の実現も可能と考えられる。この維持管理に際しての社会基盤構造物の現状における損傷度あるいは耐荷力の把握は、寿命の判定や補修の必要性等を検討する上で極めて重要である。

一方、構造物の状態を把握する手法の一つとして、システム同定による逆解析手法が知られている[2~8)]。この方法は、構造物への入力とその応答から、質量、粘性減衰および剛性を同定するもので、通常はアクティブ制御において制御対象の構造特性を求めるために用いられている。

従来から、損傷の増大に伴い構造物あるいは材料の剛性が低下するといった観点から、振動等のモニタリングに基づいたシステム同定に関する研究が盛んに行われてきた。本研究では、社会基盤構造物の現状における構造特性を把握するために、地震動を入力としてその応答を観測し、状態方程式から非線形最小２乗法を用いた同定手法を適用して質量･減衰･剛性の各パラメータを求めることを試みた。したがって、本研究はその結果をここに報告するものである。

２．解析手法

同定問題には様々なモデルが存在し、モデル出力が測定された出力にできるだけ一致するように、与えられたモデルに含まれるパラメータの調整を行う。本研究では動的モデルを記述する一般的な方法である状態方程式に基づく状態空間モデルを構築し、ブラックボックスの同定を進めていく。

一般に、他自由度系の運動方程式は、以下のように表される[6, 7)]。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t)+\mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t)+\mathbf{K}\mathbf{x}(t)=\mathbf{f}(t)\quad\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot(1)$$

ここで、**M, C, K** はそれぞれ質量、減衰、剛性の各マトリックス、$\mathbf{x}(t)$ は構造物の変位応答、$\mathbf{f}(t)$ は外力ベクトルである。式(1)から、2つの状態変数、

$$\mathbf{x}(t)=\mathbf{y}_1(t)\qquad \dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{y}_2(t)\quad\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot(2)$$

を用いて変形すると、

$$\dot{\mathbf{y}}(t)=\mathbf{A}\mathbf{y}(t)+\mathbf{B}\mathbf{f}(t)\quad\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot(3)$$

$$\mathbf{x}(t)=\mathbf{H}\mathbf{y}(t)+\boldsymbol{\upsilon}(t)\quad\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot(4)$$

ここで、

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -\mathbf{K}/\mathbf{M} & -\mathbf{C}/\mathbf{M}\end{bmatrix}\qquad \mathbf{B}=\begin{bmatrix}0\\ 1/\mathbf{M}\end{bmatrix}$$

であり、**H**は可観測である状態量に対してのみ 1 で他は 0 のマトリックス、$\boldsymbol{\upsilon}(t)$は観測誤差ベクトルである。一般に、式(3)は状態方程式、式(4)は観測方程式あるいは出力方程式と呼ばれる。観測系を含むシステムの数学モデルは、式(3)と式(4)から次式のように表すことができる[8)]。

$$\mathbf{x}=\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta})+\boldsymbol{\upsilon}(t)\quad\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot(5)$$

ここでθ は同定対象となる未知パラメータである。本研究では、このθ を非線形最小 2 乗法を用いて同定する。この手法は、まず初期値$\theta^{(0)}$を設定し、繰り返しステップ$k=0, 1, 2,\cdot\cdot$において修正量$\Delta\theta^{(k)}$を設定し、新しい推定量$\theta^{(k+1)}=\theta^{(k)}+\Delta\theta^{(k)}$を求めて収束判定を行い、評価基準の最小値を探索する方法である。評価関数は、重み付き最小 2 乗法で通常用いられる次式を用いることとした。

$$J=\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}))^T\mathbf{W}(\mathbf{x}-\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}))\quad\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot(6)$$

ここで、**W** は状態観測量の重要度や信頼性によって決定される重み行列であり、通常は対角マトリックスが用いられる。本研究では、非線形最小化手法としてガウス・ニュートン法を採用し、MATLAB にてプログラミングを行い解析を実施した。

３．解析結果とその考察

同定対象は図-1 に示すような単純な 1 自由系のモデルである。まずこの構造体に適当な質量、剛性、減衰値を設定し、順解析を行う。地震動を入力し、線形時不変モデルの時間応答を求め、システムマトリックスの確認を行う。次に図-2 に示すようなプログラムフローでシステムマトリックスの同定を行い、同定結果と設定した剛性、減衰値の比較、検討を行う。なお、質量マトリックスは既知である

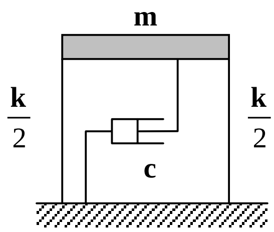

図-1 1 自由度系モデル

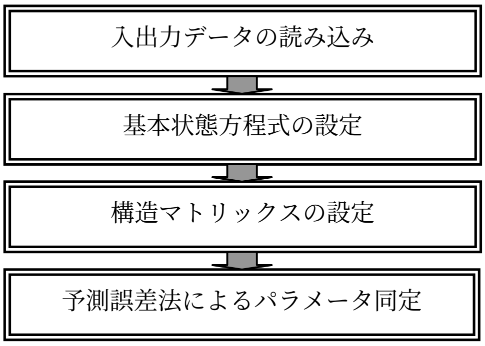

図-2 プログラムフロー

表-1 同定パラメータ

	初期設定	同定結果
質量（kg）	19.2	ー
剛性(kg/cm^2)	9248	9258
減衰	2.085	2.1

こととし、入力地震波は 1993 年の釧路沖地震における千代田大橋の橋軸方向加速度を用いた。図-3 に入力地震波の波形を示す。設定したパラメータと同定プログラムから得られた剛性、減衰値を表-1 に示した。これを比較したところわずかな誤差があるもののほぼ正確な値が得られており、プログラムが正しく動作してパラメータ同定が行われているものと判断できる。

また、順解析から得られた応答と同定したシステムマトリックスに地震波を入力し、シュミレーションした応答を図-4,5 に示す。これらを比較すると波形がほぼ一致していることが分かる。したがって逆解析により求められたシステムマトリックスの誤差は許容範囲内であり、予測誤差法による状態方程式の同定が正常に機能しているものと考えられる。

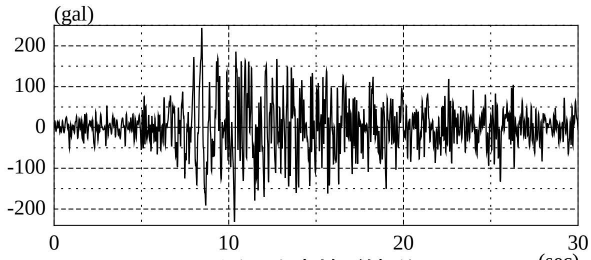

図-3 入力地震波形

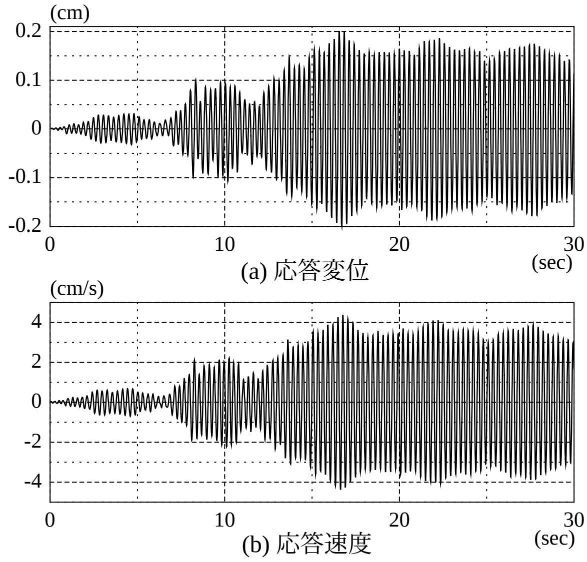

図-4 順解析

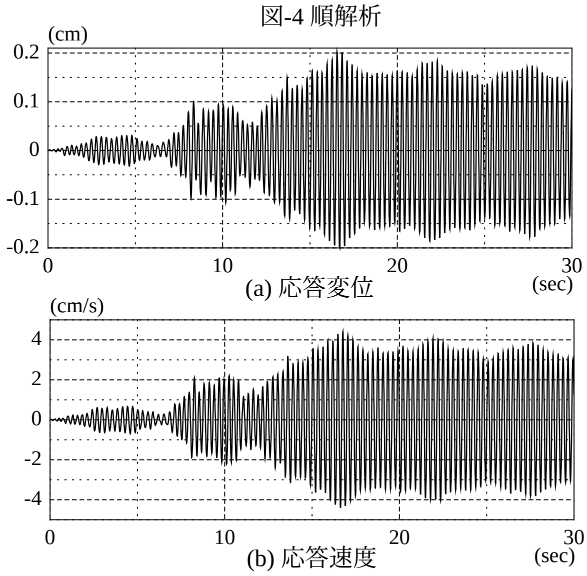

図-5 同定モデル

４．あとがき

以上のように、本研究は社会基盤構造物の現状における構造特性を把握するために、地震動を入力としてその応答を観測し、状態方程式から非線形最小 2 乗法による同定手法を適用し、減衰・剛性等のパラメータを求めることを試みたものである。

解析結果から状態空間モデルは動的モデルの同定問題に適しており、シミュレーション結果からその性能を把握することが可能である。なお今回は一自由度のモデルでの解析を行ったが複雑なパラメータを持つモデルの同定によりその実用性はさらに期待できるものになると考えられる。

【参考文献】

1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.1-10，1994.
2) 松井邦人，栗田哲史：応答加速度波を用いた構造特性の同定，構造工学論文集，Vol. 35A，pp.689-698，1989.
3) 丸山収，相沢洵，星谷勝：ARMA モデルによる既存構造物の動特性の同定，土木学会論文集，No.416/I-13，pp.439-447，1990.
4) 大野豊，磯田和男監修：数値計算ハンドブック，オーム社，1990.
5) 中川徹，小林義夫：最小二乗法による実験データ解析，東京大学出版会，1982.
6) 白石昌武：入門現代制御理論，啓学出版，1987.
7) 足立修一：MATLABによる制御のためのシステム同定，東京電機大学出版局，1996.
8) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，土木学会，2000.