

武蔵工業大学
清水建設(株)正会員 星谷 勝
正会員 ○石井 清

§1. はしがき

地盤を波動伝播する地動は基礎の名点で異なった振幅、位相ずれを持って基礎版に入射してくる。基礎版は地盤と比べれば相対的に十分剛いことからこれらの地動を拘束する効果がある。この効果は入力損失の効果と呼ばれており、実際には周辺地盤の動きに対して高い振動数成分を除去するローパスフィルターとしての動きを示す¹⁾。実測データより入力損失の効果を検討する場合、地盤の記録と基礎上の記録が基礎資料となるが、基礎上の波形には上記の効果の他に構造物の質量効果(動的相互作用の効果)が入っている。このため構造物の質量効果が小さい大型地下タンクなどの実測データをもとに入力損失効果の検証が行われているが、一般の土木建築構造物を対象とするときには、構造物の質量効果と入力損失の効果を分離する方法が必要となる^{2),5)}。本研究では構造物の応答をモーダル解析を用いたZ変換-逆Z変換による漸化式で表し³⁾、入力地表面の波形に線形の入力損失フィルターが作用したものとする(図-1参照)。ここで系のパラメータをモンテカルロ法³⁾により抽出し入力損失フィルターをカルマンフィルターを用いて同定する⁴⁾。結果は数多くの試行の中から、実測データとモデルによる応答の推定値の自乗誤差が最小となるものを選ぶ。

§2. 解析方法

多自由度系の応答はモーダル解析とZ変換-逆Z変換を適用することによって以下の形の漸化式によって表せる³⁾。

$$\ddot{X}_k = \Phi A_1 \Phi^{-1} \ddot{X}_{k-1} + \Phi A_2 \Phi^{-1} \ddot{X}_{k-2} + \Phi B_1 \ddot{f}_k + \Phi B_2 \ddot{f}_{k-1} \quad (1)$$

ここで、 $\ddot{X}_k$ は系の応答ベクトル、 $\ddot{f}_k$ は未知の有効入力、 Φ はモーダルマトリクス、 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 は系の特性によって定まるベクトルである。また、添字 k は時間のステップを表す(時間きさみを Δt とすれば時間 t は $t=k\Delta t$ となる)。さらに、有効入力 $\ddot{f}_k$ は地表の地動 $\ddot{u}$ に対する線形フィルターの出力と仮定し、フィルターをMAモデルで表現する⁴⁾。

$$\ddot{f}_k = \sum_{i=1}^m a_i \ddot{u}_{k-i+1} \quad (2)$$

ここで、 a_i はMAモデルの係数である。

(2)式を(1)式に代入して整理すると次式の形に書き表わすことができる。

$$Y_k = \ddot{X}_k - \Phi A_1 \Phi^{-1} \ddot{X}_{k-1} - \Phi A_2 \Phi^{-1} \ddot{X}_{k-2} = C_k \left\{ \ddot{U} \right\}_k \quad (3)$$

ここで、

$$\left\{ \ddot{U} \right\}_k^T = \left(\ddot{u}_k, \ddot{u}_{k-1}, \dots, \ddot{u}_{k-m} \right), \quad C_k \text{は } a_i, \Phi B_1, \Phi B_2 \text{によって定まるマトリクス。}$$

(3)式を(4)式の形に新たな観測方程式とし、(5)式を信号方程式とすれば、カルマンフィルターが構成できる⁴⁾。

$$Y_k = F_k^T C_k + W_k \quad (4)$$

$$C_k = I \ C_{k-1} \quad (5)$$

ここで、 W_k は観測過程に含まれるホワイトノイズ、 I は単位マトリクスである。

いま、地表および構造物の観測波形が得られているものとすれば、モンテカルロ法により構造物モデルのパラメータをシミュレートし、系の定数を既知と仮定することによって、(4)、(5)式よりカルマンフィルターを構

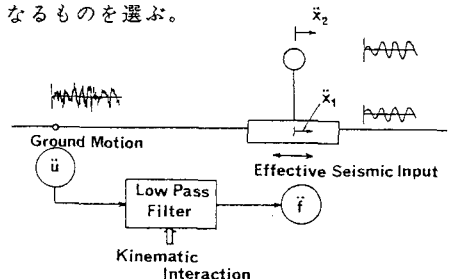


図-1 解析モデルの概念図

成する。 C_k の最尤推定値が与えられれば、 a_i が定まり未知のフィルターが求まる。また、最終結果として数多い試行の中から、実測データとモデルによる応答の計算値の自乗誤差の平均値が最小のものを選ぶ。下記の計算例では次式により誤差を評価した($\tilde{x}_1$ はモデルによる $\ddot{x}_1$ の推定値)。

$$\varepsilon^2 = E \left[\left(\ddot{x}_1 - \tilde{x}_1 \right)^2 \right] \tag{6}$$

§3. 計算例1—解析手法の検証(図-2)

解析手法の適用性を検討するために2つの1自由度系にホワイトノイズが作用している例を検討する。ここで最初の1自由度系が図-1の入力損失フィルターに、2番目のフィルターが構造系に対応する。いま、2番目の1自由度系の固有振動数 f_0 、減衰定数 h をそれぞれ0.8~1.2Hz、0.05~0.15の一樣乱数としてシミュレートし、1番目の系を同定した。200回の試行の結果得られた1番目の系の伝達関数を図-3に示す。また、2番目の系として $f_0=1.01\text{Hz}$ 、 $h=0.102$ が得られた。さらに図-4にはシミュレートされた構造系パラメータの分布と自乗誤差を示している。この例では、自乗誤差はただ1つの極小値を持っている。

§4. 計算例2—実測データへの適用

実測データへの適用性を示すためRC4階建校舎⁵⁾の地震記録波形を用いて入力損失フィルターを同定した。ここで、構造系を2自由度系として校舎の屋上と基礎の波形を用い、他に地盤(GL=0.5m)の波形を用いた。構造系は基礎の重量を3200ton、上部構造を1600ton、ばね剛性を地盤ばね3000t/cm、建屋ばね1200t/cmとし、減衰定数は1次20%、2次20%として重量には±10%、ばね剛性には±30%、減衰には±50%の幅を与えた。入力損失フィルターを表すMAモデルの項数は時間さきみを0.01secとして50項とした。シミュレーション回数1500回の解析結果を図-5に示す。構造系は1次3.1 Hz、2次6.1 Hz、減衰定数は1次0.19、2次0.11と

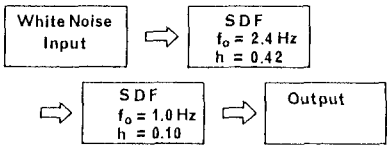


図-2 計算例 1

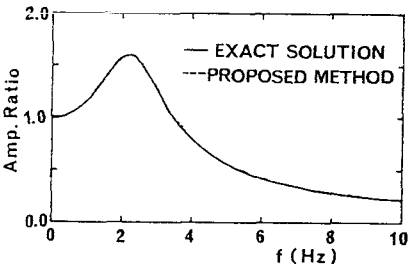


図-3 1番目のSDFの伝達関数

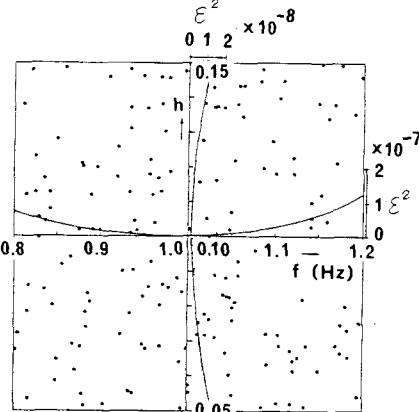


図-4 構造系のパラメータの分布と自乗誤差

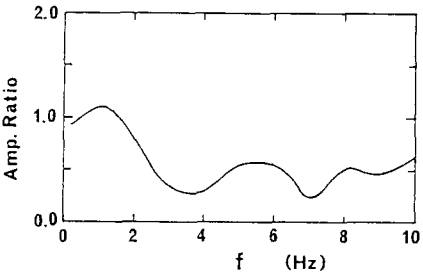


図-5 計算例 2 の入力損失フィルター

§5. まとめ

本研究では実測資料より入力損失効果を定量的に評価する方法について検討した。基礎上の波形には入力損失効果の他に構造物の質量効果が入っている。本方法は両者についてモンテカルロ法とカルマンフィルターを組み合わせ誤差を最小にする方法である。簡単な計算例より本方法の適用性を検討し、実測データへの適用を試みた。

参考文献 1)山原;地震時の地動と地震波の入力損失、建築学会論報、No.165(1969)、No.167(1970).
 2)M.Hoshiya and K.Ishii,Evaluation of Kinematic Interaction of Soil-Foundation Systems by a Stochastic Model., Int. Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering(印刷中)、(1983). 3)尾坂、高岡、星谷;土木構造設計法、(4)、土木学会編、新体系土木工学12、技報堂出版、(1981). 4)有本;カルマン・フィルター、産業図書、(1977). 5)星谷、石井;RC4階建校舎の実測データに基づく入力損失効果の検討、土木学会論報、第327号、(1982).