

模型振動実験データを用いたせん断多層モデルの構造パラメータ同定

Parameter Identification of Shear Frame Model from Shaking Table Model Tests Data

栗田哲史* ・ 松井邦人** ・ 新延泰生***

Tetsushi KURITA, Kunihiro MATSUI and Yasuo NIINOBE

*正会員 工博 東電設計(株) 技術開発本部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

**フェロー Ph.D. 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

***正会員 工博 東洋大学教授 工学部環境建設学科 (〒350-0815 埼玉県川越市鯨井 2100)

This paper presents structural identification of shear frame models, which were tested on a shaking table. Random excitation test data were used to identify structural parameters in frequency domain. Genetic algorithm coupled with a modified Marquardt method was employed for parameter identification. The identified stiffness showed an excellent agreement with that obtained from a static test. Effect of sensor arrangement on identified results was theoretically investigated and compared with the experimental results by changing the number of sensors and their locations. Good agreement between the theory and the experiment was observed. It was found that the 1st floor was the most important sensor location among all possible locations.

Key Words : parameter identification, shaking table model test, shear frame model, optimal sensor location

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、構造物の重要度に応じてその耐震性評価を行うことが求められている¹⁾。これにはヘルスモニタリングシステム²⁾という考え方が応用できるものと考えられる。昨今、シビルインフラストラクチャのヘルスモニタリングは、社会的にも関心の高いところである。構造物のヘルスモニタリングを行う手段として構造同定は有効な手法の一つであると考えている。

一般に、観測量から構造モデルの決定を目指す構造同定の結果は、ターゲットとした構造物の応答を最も良く表現するものとして得られる。しかし、得られた同定結果が妥当な値であるかどうかの判断は非常に難しく、同定結果の信頼度を高めるためには、他の方法で構造特性を確認できる実験等によるデータを用いた検証を積み重ね、同定解析の特性を把握していくことが重要であると考えている。これまでに動的問題を対象とした構造同定の理論的研究は数多くなされ³⁾、また実問題への適用も同様に報告されている^{4)~6)}。しかし、過去に模型振動実験のデータを用いて構造同定を行った例はあまり多くない。幾つか例を挙げると、Distefano and Pena-Pardo⁷⁾は鋼製のフレーム構造を対象として、振動台による地震波励起の記録を用いて線形および非線形の構造パラメータの同定を行っている。また、水野、田辺⁸⁾は RC の 2 層ラーメン模型を対象として起振実験を行い、構造物の剛性低下の様子を同

定している。更に、静的載荷試験との比較も行っている。吉田等⁹⁾は、アクティブマスダンパーによる制震モデルの実験に際して、柔なフレーム構造の動的パラメータの同定を行っている。Shinozuka and Ghanem¹⁰⁾は、鋼製 5 層モデルの起振実験データから数種類の同定手法を用いて動特性を求め、各手法の比較を行っている。これら実験データを用いた構造同定においても、同定結果を他の手段で求めた結果と比較する事はほとんど行われていない。

一方、一般構造物の構造パラメータを同定する場合、全自由度に対する計測点を設けることは現実的には不可能である。そこで、可能な限り少ない計測点で精度良い同定結果が得られる方策を考える必要がある。最適な計測点配置に関する理論的研究は、幾つか報告されている^{11)~12)}。著者等¹³⁾も既に同定パラメータの既知パラメータ誤差に対する感度を用いて、最適な計測点配置を評価する手法を提案している。しかし、理論を実用化するためには、実際の観測データを用いて検証を行う必要がある。

以上の様な背景に基づき、本研究は、せん断多層モデルを対象として振動台による起振実験を行い、その観測記録を用いて構造パラメータの同定を行っている。同定結果と静的載荷試験等の結果を比較し、両者の関係についての検討を行った。更に、多層構造の同定を行うにあたり、計測点の配置が同定結果に及ぼす影響についても検討している。

2. 模型振動実験

2.1 実験概要

模型振動実験の対象としたモデルは図-1 に示す通り、水平力に対してせん断変形する3層および5層のフレーム構造である。各層は柱材を厚さ1mm、幅19mmのリボン鋼、床材を厚さ10mmの鋼製プレートとし、両者の質量比を十分大きくして振動時に柱の質量の影響が表れないようにした。また、各層の質量、剛性が均一となるように設計している。

振動台による加振実験は、正弦波入力による共振実験および地震波入力実験をそれぞれのモデルに対して行った。入力地震波には、時間縮尺および最大加速度を調整したEl Centro 波のNS 成分を用いた。また、3層モデルについては、静的な水平載荷実験を行い各層の剛性を求めた。更に、予備的な実験として同一材料の1層モデルを用いて共振実験、自由振動実験および水平載荷実験を行い、多層モデルの実験結果を用いて構造パラメータの同定を行う際の参考値とした。観測記録は、各層中央部と振動台の水平加速度を記録した。

2.2 実験結果

(1) 1層モデル (予備的实验)

1層モデルを用いて行った静的な水平載荷試験の結果の荷重-変位関係を図-2 に示す。実験は約0.5kgf刻みで最大8kgf までの載荷および除荷によって行った。図中には最小二乗法による回帰式も併せて示している。この式からモデルの剛性を求めた。また、図-3 に示す共振曲線から固有振動数を求め、質量を与えて剛性を算定した。更に、共振曲線のピーク値が $1/2h$ となる関係から減衰定数を求めた。更に、図-4 に示す自由振動実験の結果から、フーリエ解析により固有振動数を求めた。減衰定数については、最初に包絡線

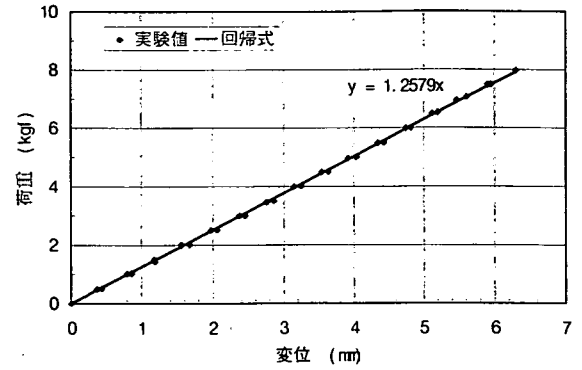


図-2 1層モデルの荷重-変位関係

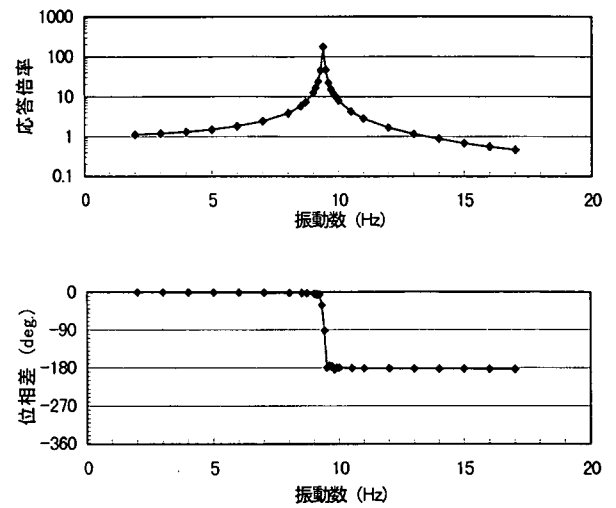


図-3 1層モデルの共振曲線

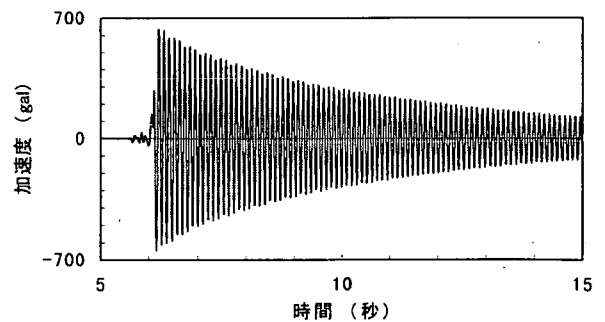
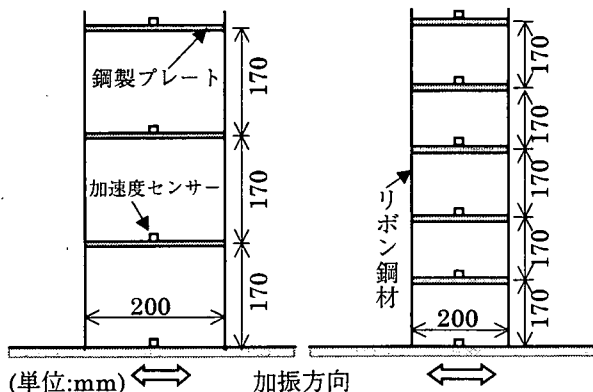


図-4 1層モデルの自由振動記録



(1) 3層モデル (2) 5層モデル

図-1 実験モデル

表-1 1層モデルの動的特性値

実験	固有振動数 (Hz)	減衰定数	剛性 (kgf/cm)	減衰係数 (kgf・s/cm)
水平載荷	9.2	-	12.579	-
共振実験	9.4	0.0029	13.037	0.001280
自由振動	9.4	0.0029	13.037	0.001280

の最小二乗回帰により振幅の対数減衰率を求め、次にその値を減衰定数に変換した。

以上3種類の実験から求めた動的特性値を表-1にまとめる。水平載荷試験の結果とその他の実験結果との間で剛性に3%程度の差異が見られるが、共振実験と自由振動実験の結果は減衰、剛性共に完全に一致している。また、減衰定数は非常に小さいことが分かる。一層モデルでは、各実験結果の間の差異は小さく、安定している。

(2) 3層モデル

3層モデルに対して行った静的な水平載荷試験によって得られた各層の荷重-変位関係を図-5に示す。ここで、載荷点は第3層として、ロードセルにより荷重を計測した。また、各層の平衡状態からの水平変位は、光学の変位計により計測した。力の釣り合い式を図中の回帰式に当てはめ、各層のせん断剛性を求めた。3層モデルの共振実験によって得られた共振曲線を図-6に示す。共振曲線から得られた固有振動数は1次から順に3.9Hz、11.4Hz、16.3Hzであった。地震波入力実験の結果得られた各層加速度応答の振動台入力加速度に対するフーリエスペクトル比を図-7(細線)に示す。特に平滑化処理は行っていないが、フーリエスペクトル比は非常に滑らかで、観測ノイズが小さいことが分かる。また、3次までのピークが明瞭に表れている。スペクトル比から読み取った固有振動数は1次から4.0Hz、11.6Hz、17.1Hzであり、共振実験の結果との間に若干の差異が認められる。更に、自由振動実験では、4.0Hz、11.5Hz、16.4Hzと共振曲線の場合に近い結果が得られている。

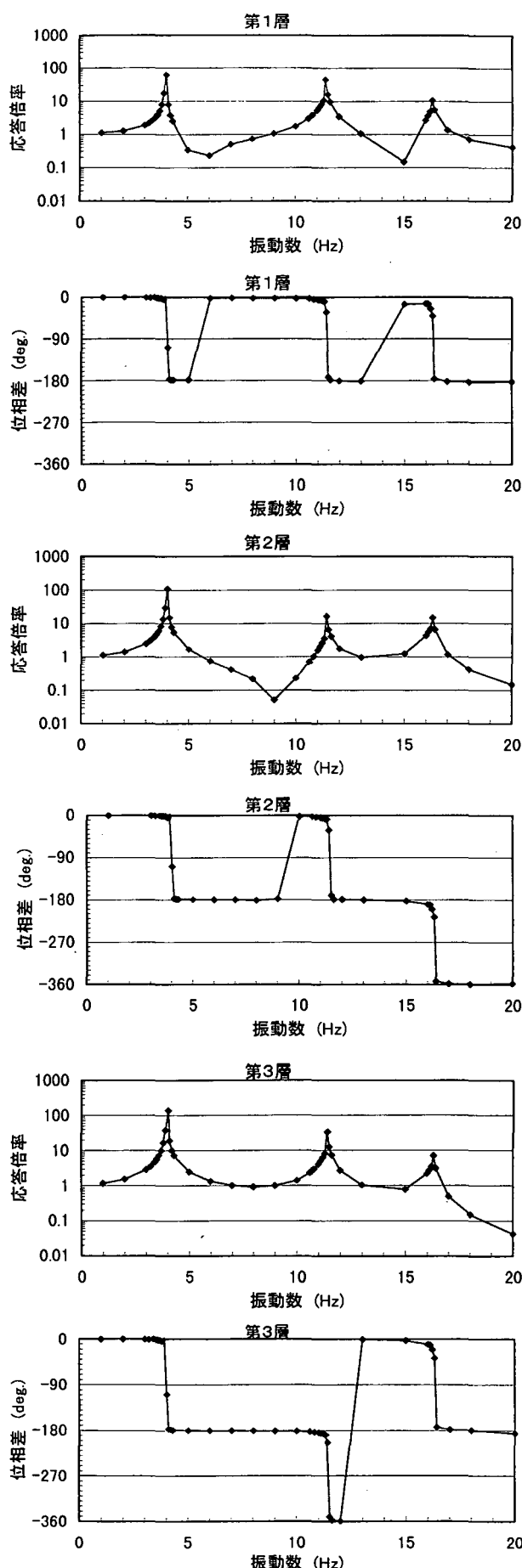


図-6 3層モデルの共振曲線

3. 3層モデルの動的構造パラメータ同定

3.1 同定手法

同定問題の評価関数が多峰性を呈する場合、一般的

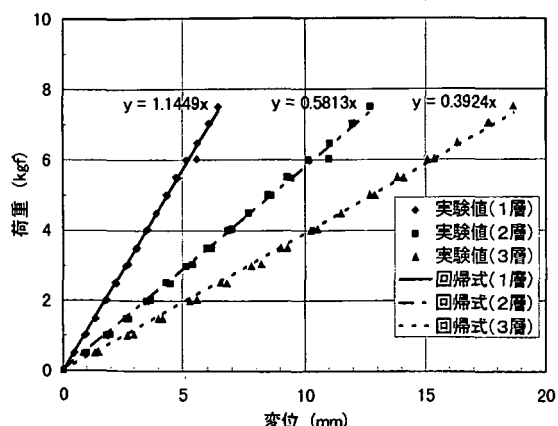


図-5 3層モデルの荷重-変位関係

最適化手法である勾配法系の方法を用いて同定を行うと、解は初期値に依存し局所解に陥る可能性が高い。一方、遺伝的アルゴリズム¹⁴⁾¹⁵⁾（以下 GA と表す）または、シミュレーテッドアニーリング¹⁶⁾の様な自然知能システムと呼ばれる大域探索型的手法では、勾配法と比べて多くの解析時間を要するが局所解に陥ることなく最適解を捉えることができる。しかし、この様な大域探索型的手法は最適解の近傍までは比較的早い段階で到達するが、最適値にはなかなか収束しないという性質がある。対する勾配法系的手法は、最適値近傍から最適値への収束が非常に速い特性がある。そこで、本研究では両者の利点を組み合わせたハイブリット手法を採用した。即ち、初めに GA を用いて最適解近傍の値を求める。続いて、この値を初期値として勾配法により最適解までの収束計算を行う。

以下の検討では、各層の重量は精密に計測して既知とし、同定すべき未知パラメータを各層の減衰係数と剛性とした。また、評価関数は周波数領域で、観測記録のフーリエスペクトル比と理論伝達関数それぞれの対数振幅の残差を最小とするよう次式の通り定式化した。

$$J = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^N \left[\sum_{i \in A} w_i \{ \ln |R_i(\omega_m)| - \ln |H_i(\omega_m)| \}^2 \right] \quad (1)$$

ここで、

- $R_i(\omega_m)$: 観測データのフーリエスペクトル比
- $H_i(\omega_m)$: 理論伝達関数
- w_i : 重み係数
- A : スペクトル比の組み合わせの集合

式(1)は系の自由度が大きくなると多峰性を示す。従って、勾配法を用いて同定を行う時には、通常その初期値を変動させて何種類か解析を行い、最適解の探索を行う。しかし、効率的に初期値の選定を行うためには、ある程度の経験を要する。本研究で採用した GA と

表一2 GA の解析条件

総世代数	30
個体数	50
線列長 (bit)	12
交叉方法	一点交叉
交叉率	0.5
突然変異率	0.1
突然変異の種類	ビット置換方式
エリート戦略	有り
解の探索範囲	減衰係数(kgf・s/cm) 0.00001 ~ 0.0002 剛性 (kgf/cm) 10.0 ~ 15.0

勾配法とのハイブリット法は、この様な任意性が介在する余地を除くことができ合理的である。式(1)において振幅で無く、その対数値を用いた理由は、伝達関数のピーク付近と谷の部分では両者の間に数桁に及ぶ非常に大きい差が有ることに起因している。式(1)で単純に振幅の残差のみを用いるとピーク付近の残差が評価関数の中で支配的となる。これを回避して谷の部分のデータを十分生かすためには、両者の差が小さくなる振幅の対数値を用いる事が有効である。また、以下の検討では重み係数 $w_i = 1.0, (i \in A)$ として解析を行った。

本研究で用いた GA の解析条件を表一2 に示す。ここで、遺伝子はパラメータを離散化する方式を採用し、エリート戦略には適応度の最も高い1個体を次世代に必ず残す手法を用いた。また、適応度は評価関数の逆数とした。本研究で用いたハイブリット法では、GA に対して収束判定を行わず、常に総世代数が 30 世代に達した時点で勾配法に切り替える事とした。この条件設定の根拠は、別途実施した数値シミュレーションによる検討の結果、個体数 50 の時、総世代数 30 世代で殆どの個体が真値近傍に収束した事から、第一段階の推定精度としては十分と判断した事による。解の探索範囲は予備的実験として実施した1層モデルの結果を参考に決定した。勾配法には Gauss-Newton 法と最急降下法との折衷である修正 Marquardt 法⁷⁾を用いた。

3.2 同定結果と考察

ここでは、3 層モデルを用いて、各層の減衰係数と剛性を同定した結果を対象として議論を進める。観測量は、全層と振動台の加速度記録を用いている。解析周波数帯は、2.0Hz~18.0Hz とした。表一3 に同定結果を示す。表には参考のため、水平載荷試験の結果も

表一3 同定結果

パラメータ	同定結果	水平載荷試験
c1 (kgf・s/cm)	0.0000	-
c2 (kgf・s/cm)	0.0000	-
c3 (kgf・s/cm)	0.0050	-
k1 (kgf/cm)	12.582	11.449
k2 (kgf/cm)	13.367	11.808
k3 (kgf/cm)	13.589	12.049

表一4 非減衰時の固有振動数 (Hz)

次数	同定結果	水平載荷試験
1 次	4.17	3.95
2 次	11.80	11.16
3 次	17.15	16.15

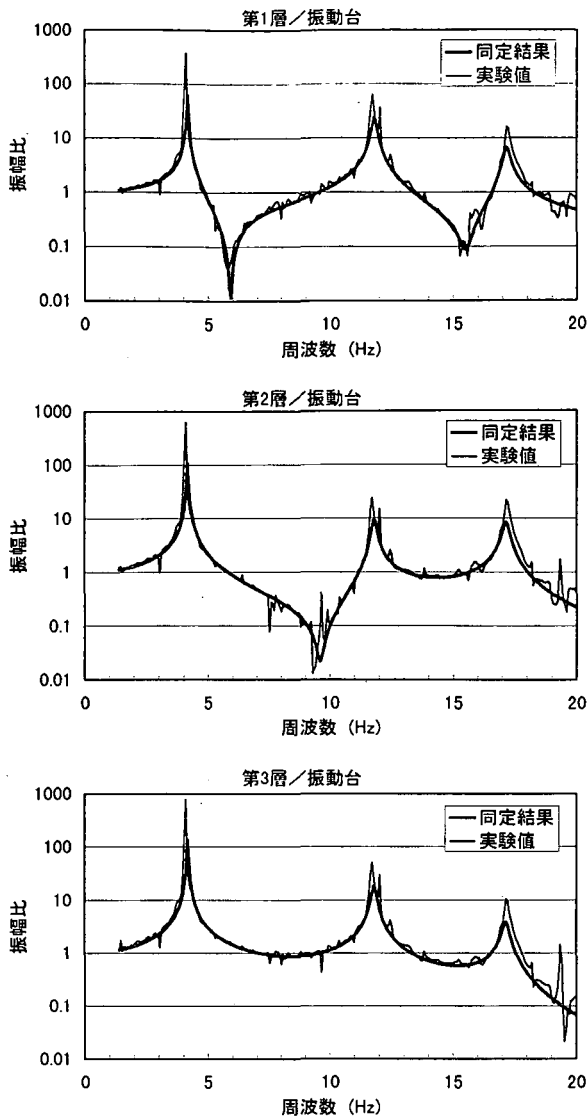


図-7 観測記録のフーリエスペクトル比と同定結果から求めた理論伝達関数との比較

併せて示している。GA と修正 Marquardt 法とのハイブリット同定手法は、局所解に陥ることなく安定して解が得られた。後述する5層モデルの場合においても、安定性は確認された。表より、減衰係数が非常に小さい事が分かる。減衰係数が0.0となっている層もあるが、これは減衰係数が極めて小さい為、十分な解像度が無く同定することが難しくなっているものと思われる。一方の剛性は、設計上は全層均一であるが同定結果は上層ほど大きくなっている。これは、水平載荷試験の結果と同様の傾向である。剛性は、同定結果、水平載荷試験結果共に、それぞれ一層モデルの実験結果に良く対応している。同定結果を用いて計算した理論伝達関数と実験データのフーリエスペクトル比との比較を図-7に示す。両者はピーク付近だけでなく谷の部分についても非常に良く一致している。この時の理

論伝達関数と観測記録のフーリエスペクトル比との残差を観測ノイズと考えると、その標準偏差は第1層/振動台：0.37、第2層/振動台：0.43、第3層/振動台：0.39と非常に小さい値となっている。

同定結果と水平載荷試験の結果を用いて固有値解析を行い、得られた非減衰時の固有振動数を表-4に示す。3次は1Hzの差が有るが、1次および2次については、両者は非常に良く一致している。また、水平載荷試験の結果から求めた固有振動数は共振曲線の結果に近い。

4. 計測点と同定結果の関係

4.1 3層モデル

3層モデルの地震波入力実験によって得られた記録を用い、解析に用いる観測記録のフーリエスペクトル比の組み合わせを変えて、パラメータを同定した結果を表-5に示す。ここで、第1層から上層に向かって順に計測点1→3としている。表中の平均残差二乗和は、収束時の残差二乗和を計測点数で除したもので、各計測点の平均的残差二乗和を表すものである。これによると、計測点として第3層のみを用いた時に残差二乗和が最小となっている。しかし、この時の同定結果は、全点計測を行った時の同定結果との差異が最大となっている。

前節でも指摘した通り、減衰係数については0.0となっている層も有るため、以下では剛性のみを対象として計測点配置と同定結果の変動量との関係を調べる。いま、全点計測の場合を基準として、各計測点配置における各パラメータ(剛性)のずれ量の平均値を、その計測点配置の同定結果のずれ量として定義する。計測点配置とずれ量の関係を図-8に示す。また、図には同定パラメータ(剛性)の質量誤差および観測ノイズに対する感度を用いて理論的に推定した、同定パラ

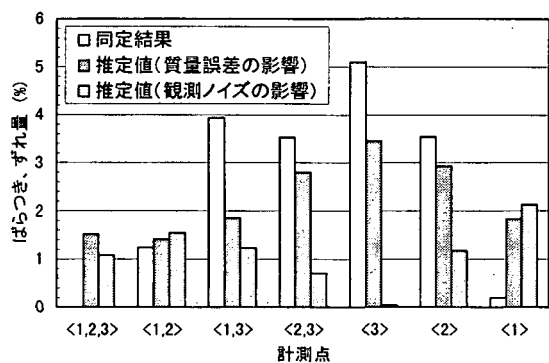


図-8 3層モデルの計測点の違いによる同定結果のずれ量と誤差の感度から推定したばらつきとの比較

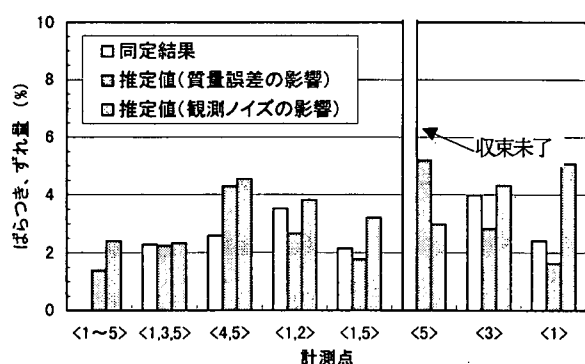
表一5 3層モデルの計測条件別同定結果

計測点	c1	c2	c3	k1	k2	k3	平均残差 二乗和
1,2,3	0.0000	0.0000	0.0050	12.582	13.367	13.589	37.45
1,2	0.0000	0.0000	0.0052	12.584	13.521	13.247	42.43
1,3	0.0000	0.0000	0.0048	12.006	12.883	14.083	31.33
2,3	0.0000	0.0000	0.0129	11.714	13.689	13.762	47.08
3	0.0003	0.0005	0.0006	11.700	13.071	14.414	19.36
2	0.0000	0.0000	0.0062	11.968	13.812	13.260	38.87
1	0.0000	0.0000	0.0059	12.602	13.354	13.542	40.68

表一6 5層モデルの計測条件別同定結果

計測点	c1	c2	c3	c4	c5	平均残差 二乗和
1,2,3,4,5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0041	88.47
1,3,5	0.0015	0.0017	0.0000	0.0019	0.0002	83.86
4,5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0050	0.0137	70.94
1,2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0031	0.0041	113.04
1,5	0.0002	0.0000	0.0000	0.0023	0.0058	84.65
5	*****	*****	*****	*****	*****	*****
3	0.0100	0.0000	0.0000	0.0105	0.0000	85.85
1	0.0026	0.0041	0.0016	0.0010	0.0000	92.29

計測点	k1	k2	k3	k4	k5
1,2,3,4,5	10.814	11.902	13.139	12.671	12.313
1,3,5	10.602	11.456	13.238	12.471	12.729
4,5	10.291	11.565	13.105	12.950	12.655
1,2	10.465	11.181	12.709	12.671	12.931
1,5	10.577	11.350	13.104	12.709	12.717
5	*****	*****	*****	*****	*****
3	10.318	11.685	13.415	12.149	12.861
1	10.768	11.074	12.991	12.662	12.747

図一9 5層モデルの計測点の違いによる同定結果の
ずれ量と誤差の感度から推定したばらつきとの比較

メータのばらつきを併せて示している。同定パラメータのばらつきは、各パラメータの変動係数の平均値としている¹³⁾。

$$(\text{ばらつき}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{COV}(x_i) \quad (2)$$

ここで、

N : 未知パラメータの総数

$\text{COV}(\cdot)$: 変動係数

各パラメータの変動係数の計算に必要な分散は以下の式で求めている^{18),19)}。

$${}_M \Sigma_{XX} = \Lambda_{XY}^T \Sigma_{YY} \Lambda_{XY} \quad (3)$$

$${}_N \Sigma_{XX} = \Gamma_{X\varepsilon}^T \Sigma_{\varepsilon\varepsilon} \Gamma_{X\varepsilon} \quad (4)$$

ここで、

$M \Sigma_{XX}$: モデルパラメータ誤差に影響される同定パラメータの分散・共分散行列

$N \Sigma_{XX}$: 観測ノイズに影響される同定パラメータの分散・共分散行列

Λ_{XY} : 同定パラメータのモデルパラメータ誤差に対する感度行列

Γ_{Xe} : 同定パラメータの観測ノイズに対する感度行列

Σ_{YY} : 既知パラメータの分散・共分散行列

Σ_{ee} : 観測ノイズの分散・共分散行列

式(3)、(4)はモデルパラメータ誤差および観測ノイズが誤差伝播則により、同定結果にばらつきを生じさせることを表している。

同定パラメータの質量誤差および観測ノイズに対する感度は、全層計測時の同定結果を用いて計算している。また、各質量間および各観測ノイズ間に相関は無く、従ってそれぞれの共分散は0.0であると仮定した。ばらつき量を計算する為には、既知として与える質量の分散と観測ノイズの分散が必要であるが、いま実際の値は不明である。従って、任意の値を与えて傾向のみを把握することとする。ここでは、全層で質量は変動係数：0.05、観測ノイズの分散：100.0 として与えている。故に、図に示しているばらつきの絶対値に関する議論はできず、以下の検討では計測点の組み合わせ間の相対的關係のみに着目している。

図より、計測点として第1層と第3層を用いた時の同定結果のずれ量が大きくなっていることのみが推定値と異なるが、その他の計測点配置と同定結果のずれ量については推定値の傾向と良く一致している。また、二種類の推定値の間では、質量誤差の影響から推定した同定結果のばらつきの方が、実際の同定結果のずれ量の傾向との対応が良い。特に、第3層の観測記録のみを用いた時に、観測ノイズの影響から推定したばらつきが非常に小さくなり、実際の同定結果との対応が悪い。また、前節で求めた観測ノイズの標準偏差が極めて小さかった事から考えて、観測ノイズによる実際の影響は非常に小さく、同定結果を大きく左右するに至っていないものと思われる。更に、第1層の観測記録を用いた場合、実験の同定結果のずれ量小さく、ばらつきの推定値（質量誤差の影響）も同様に小さい。これらの結果より、構造パラメータの同定を行うに際して、第1層の観測点を用いることが重要であることが分かる。

4.2 5層モデル

更に計測点の多い場合に拡張して、5層モデルの実験結果に対して計測点配置と同定結果に関する検討を行った。解析に用いる観測記録の組み合わせを変えてパラメータ同定を行った結果を表-6に示す。ここで、第5層の記録のみを用いた場合には、収束未了で解が得られなかった。繰り返し計算の回数は最大100回に設定しており、その他のケースでは10回以内に収束している。3層モデルの場合と同様、最上層の観測記録のみではパラメータ同定が難しい事が分かる。表より、平均残差二乗和が最小となったのは、計測点として第4層と第5層の記録を用いた場合であるが、他のケースとの差はあまり大きくない。

3層モデルと同様に、全点計測の場合を基準として各計測点配置の同定結果のずれ量を図-9に示す。また、同定パラメータの質量誤差および観測ノイズに対する感度を用いた同定結果のばらつきの推定値も示している。ここで、収束解の得られなかった第5層の記録のみを用いて同定した結果は、ずれ量を ∞ としている。3層モデルの場合と同様、実験記録を用いて同定した結果のずれ量と計測点配置の関係は理論による推定値の傾向と良く一致している。また、5層モデルの場合も3層モデルと同様、第1層の記録を用いた時に全層の記録を用いた時の同定結果からのずれ量が小さくなり、第1層が計測点として重要であることが再確認された。更に、最適な計測点配置を評価するにあたり、同定パラメータの各種誤差、特に既知パラメータ誤差に対する感度を用いてばらつきを推定する手法が有効であることが示された。

5. まとめ

本論は、せん断多層モデルを対象として振動台による起振実験記録を用いて構造パラメータの同定を行った。同定結果は、静的試験等による結果との比較を行い、両者の関係についての検討を行った。更に、計測点の配置が同定結果に及ぼす影響について検討した。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 起振実験記録を用いて同定した構造パラメータは、静的な載荷試験等により求めた結果と良く一致した。
- (2) 同定手法として、大域探索型のGAと勾配法の修正Marquardt法とのハイブリット法を採用し、局所解に陥る事なく、安定して最適解が得られた。
- (3) 実験データを用いた解析において、計測点として最上層のみを用いた場合、構造パラメータの同定を行うことは難しい。一方、最下層のみを用いた場合には、安定した解が得られた。この結果は、著者等が既に提案している理論を用いて解析した結果と良く整合しており、理論の実用性が確認さ

れた。

- (4) 全層の記録を用いた場合の同定結果を基準として、各計測点配置における同定結果の偏差を求めると、同定パラメータに対する質量誤差の感度から推定した同定結果のばらつきと良く一致する傾向を示した。

謝辞

模型振動実験を行うにあたり、(有) SK エンジニアリングの小山幸作氏および中村勝利氏の御助力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」，土木学会誌，Vol.81，pp.(1)-(10)，1996年2月。
- 2) 山本鎮男：建築物のヘルスマニタリング，地震工学振興会ニュース，pp.6-10，1997年7月。
- 3) Ghanem, R. and Shinozuka, M. : Structural-system identification. I: Theory, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.121, No.2, pp.255-264, February 1995.
- 4) Benedetti, D. and Gentile, C. : Identification of model quantities from two earthquake responses, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, pp.447-462, 1994.
- 5) Loh, C. H. and Tou, I. C. : A system identification approach to the detection of changes in both linear and non-linear structural parameters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, pp.85-97, 1995.
- 6) Distefano, N. and Pena-Pardo, B. : System identification of frames under seismic loads, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol.102, No.EM2, pp.313-330, April 1976.
- 7) 水野卓哉，田辺忠顕：RC 構造物の振動パラメータ同定に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，日本コンクリート工学協会，10-3，pp.485-490，1988。
- 8) 吉田郁政，黒瀬浩公，福井史朗：制震実験モデルのパラメータ同定，第 22 回地震工学研究発表会講演概要，土木学会，pp.847-850，1993 年 5 月。
- 9) 吉田郁政，栗田哲史，黒瀬浩公，福井史朗，家村浩和：実験モデルおよび地盤の動特性の同定，第 44 回応用力学連合講演会講演予稿集，pp.273-274，1994 年 12 月。
- 10) Shinozuka, M. and Ghanem, R. : Structural-system identification. II: Experimental verification, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.121, No.2, pp.265-273, February 1995.
- 11) Shah, P. C. and Udwadia, F. E. : A methodology for optimal sensor locations for identification of dynamic systems, *Transactions of the ASME*, Vol.45, pp.188-196, March 1978.
- 12) Udwadia, F. E. : Methodology for optimum sensor locations for parameter identification in dynamic system, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.120, No.2, pp.368-390, February 1994.
- 13) Kurita, T. and Matsui, K. : Optimum sensor location for dynamic structural identification, *Proceeding of The Third Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics*, Vol.2, pp.1117-1122, September 1996.
- 14) 北野宏明 編：遺伝的アルゴリズム，産業図書，1995 年 4 月。
- 15) L. デービス 編：遺伝アルゴリズムハンドブック，森北出版，1994 年 9 月。
- 16) Laarhoven, P. J. M. van and Aarts, E. H. L. : *Simulated Annealing: Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- 17) 中川徹，小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析，東京大学出版会，1982 年 5 月。
- 18) 栗田哲史，松井邦人：既知パラメータに影響される同定パラメータの信頼性領域，土木学会論文集，No.537/I-35, pp.267-275, 1996 年 4 月。
- 19) 栗田哲史，松井邦人：観測ノイズに影響される同定パラメータの信頼性領域，土木学会論文集，No.563/I-39, pp.189-196, 1997 年 4 月。

(1998 年 4 月 24 日 受付)