

Title	建築構造物系の動特性同定手法に関する研究
Author(s)	古川, 忠稔
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3161898
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

建築構造物系の動特性同定手法に関する研究

1999年

古川 忠稔

建築構造物系の動特性同定手法に関する研究

1999年

古川 忠稔

建築構造物系の動特性同定手法に関する研究

目 次

第1章 序論	1
1. 1 研究の位置づけおよび目的	1
1. 2 既往の研究	3
1. 3 論文の構成および概要	7
参考文献	9
第2章 本研究で用いた建築構造物系動特性の同定手法	11
2. 1 緒言	11
2. 2 既存の同定手法	11
2. 2. 1 既存同定手法の概略	11
2. 2. 2 カーブフィット法	13
2. 2. 3 ハーフパワー法	15
2. 2. 4 自己相関関数法	16
2. 2. 5 RD(Random Decrement)法	18
2. 2. 6 拡張カルマンフィルタ法	18
2. 2. 7 EK-WGI 法	20
2. 2. 8 適応拡張カルマンフィルタ法	20
2. 3 本研究において提案する新たな同定手法	22
2. 3. 1 適応フィルタ及び適宜重み付け手法 (AF-AWP)	23
2. 3. 2 状態空間表示に基づく予測誤差法(PEM-SS)	24
参考文献	27
第3章 線形1自由度系構造物動特性の同定 (データにノイズを含まない場合) ...	29
3. 1 緒言	29
3. 2 データ長 50 秒程度の場合の各手法同定精度の検討	29
3. 2. 1 検討対象モデルおよび数値計算手法	29
3. 2. 2 同定計算結果および考察	31
3. 3 データ長6秒の場合の各手法同定計算精度の検討	37
3. 3. 1 検討手法および検討条件	37
3. 3. 2 同定計算結果	38
3. 3. 3 時間領域手法の推定パラメータ初期値依存性に関する検討	38
3. 3. 4 対象モデルの固有周期の影響に関する検討	39
3. 4 予測誤差法による1自由度系構造物動特性の同定に関する追加検討	42
3. 4. 1 解析モデルおよび解析に用いる諸量	42

3. 4. 2	同定計算手法	42
3. 4. 3	解析結果と考察	43
3. 5	まとめ	54
	参考文献	55
第4章 線形1自由度系構造物動特性の同定 (データにノイズを含む場合)		57
4. 1	緒言	57
4. 2	観測ノイズのみを含む場合の同定精度の検討	57
4. 2. 1	検討条件	58
4. 2. 2	同定計算結果および考察	58
4. 3	入力と観測の両方にノイズを含む場合の同定精度の検討	66
4. 3. 1	検討条件	66
4. 3. 2	同定計算結果および考察	66
4. 4	まとめ	71
	参考文献	74
第5章 線形多自由度系構造物動特性の同定		75
5. 1	緒言	75
5. 2	RD法による2層せん断型モデルの同定	77
5. 2. 1	各次モード応答波形の分離法	77
5. 2. 2	数値計算例	79
5. 3	状態空間表現に基づく時間領域の各手法による同定	81
5. 3. 1	数値計算モデルおよび計算条件	81
5. 3. 2	解析結果	83
5. 4	まとめ	84
	参考文献	86
第6章 非線形多自由度系構造物動特性の同定		87
6. 1	緒言	87
6. 2	バイリニア復元力を有する多層系への適用	87
6. 2. 1	PEM-SS法のバイリニア復元力特性を有する系への適用	87
6. 2. 2	検討対象モデル	90
6. 2. 3	観測サンプリング周期による同定精度の検証	91
6. 2. 4	データ観測チャンネル数および観測位置に関する検討	93
6. 3	トリリニア復元力特性を有する多層系への適用	95
6. 3. 1	PEM-SS法のトリリニア復元力特性を有する系への適用	95
6. 3. 2	検討対象モデル	97
6. 3. 3	同定計算結果および検討	98
6. 4	まとめ	101
	参考文献	103

第7章 実構造物における観測結果への適用とその評価	105
7. 1 緒言	105
7. 2 線形モデルを用いた場合の適用例	
六層実構造物での観測データを用いた動特性の同定	105
7. 2. 1 検討対象建物および観測記録の概要	105
7. 2. 2 線形1自由度モデルを用いた同定	107
7. 2. 3 線形多自由度モデルを用いた同定	110
7. 2 非線形モデルを用いた場合の適用例	
兵庫県南部地震の観測記録を用いた実免震構造物系動特性の同定	112
7. 2. 1 対象構造物の概要および観測記録	112
7. 2. 2 同定モデル	114
7. 2. 3 同定手法および結果の概要	115
7. 2. 4 速度波形の比較による同定結果の検討	116
7. 2. 5 トリリニア型モデルを用いた同定	118
7. 2. 6 免震建物の同定計算結果のまとめ	120
参考文献	120
第8章 結論	121
発表論文	124
Appendix A	128
謝辞	130

第1章 序論

1. 1 研究の位置づけおよび目的

建築構造の耐震設計技術は、コンピューターを用いた解析手法の進歩に伴い、長足の進歩を遂げた。すなわち、入力地震動に関する研究や、建築構造のより精密モデル化とその解析手法の進歩、あるいは地盤と建物系の動的連成に関する研究成果等を踏まえ、今日では超高層建築物をはじめ、入力地震動を著しく低減する免震建築物、あるいはアクティブやパッシブの制震(振)機構や装置を組み込んだ建築物が実現されている。

高層建築物や免震建築物はそれ自体の長周期特性により入力地震動を低減する機構であるとともに、ある程度以上の入力地震動に対しては、構造体の履歴減衰や、免震層に組み込まれた各種ダンパーによりエネルギー吸収を行うことを前提に設計されている。そのため、これらの建築構造物は事前に詳細な動的解析が行われ、想定される入力地震動に対して十分安全であることを確認してから建設される。また、制震(振)機構や装置を組み込んだ建築物についても、機構や装置の開発、選択や配置計画、あるいは能力等の決定において、また特にアクティブ制震(振)においては、制御アルゴリズム構築のため対象構造物の高精度のモデル構築とこれを用いた動的解析が必要不可欠である。

しかし、設計時に想定されたこれらの建物の動特性が、現実では大きく異なっていた場合、どのような結果が待ち受けているであろうか。最悪の場合には、建物は入力地震と共振し、かつ入力エネルギーを効率的に吸収できない事態となり、その結果は悲劇的な結末となる可能性を否定できない。

もちろん、これらの建物については、事前に部材や接合部レベルといった部分実験や縮小モデルを用いた動的あるいは静的な実験を通じ、あらゆる面でその能力の検証がなされている。しかし、部材実験は実スケールで行うものの地震時の入力状態を完全に再現できるとは言い切れない。また、縮小モデル実験においても、近年巨大な振動台が多数建設されて、かなりの大縮尺で動的な実験が可能となったものの、特殊な建物をのぞき実大サイズの実験を行うことは不可能である。

そのため、これらの建築構造物は、その建設後も必要に応じて加振実験や地震観測、微動観測が実施されて、その特性の検証を行うことが重要である。すなわち、建築構造物の耐震安全性の向上は、図1.1に示すように解析手法・実験・観測(実建物の被災調査を含む)の3つの有機的な連携によって実現されるものであると考えられる。

本論文においては、実構造物系の何らかの動的な入力と応答を観測した場合、観測データより構造物系動特性を高精度に同定可能な手法の開発が重要であるとの認識にたち、既存の構造物系動特性同定手法について、数値計算により各手法の適用性、推定精度、あるいはデータに混入するノイズの影響等について包括的な検討を行なう。さらに、構造物の非線形系動特性をも同定可能な新たな同定手法の提案を行うとともに、数値計算による既存手法との比較検討を通じて、本提案手法の適用性と精度の検証を行なう。さ

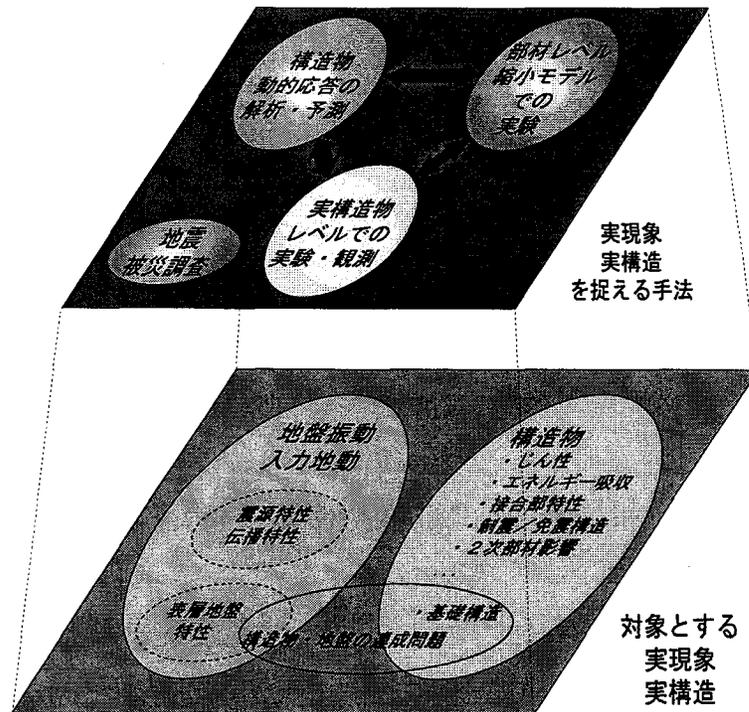


図1.1 建築構造物の耐震安全性を高めるための手法と対象現象および構造

らに、実構造物系の地震観測記録を用いて、本提案手法により非線形系を含む実構造物系動特性の同定を実施する。これらの結果は構造物のより現実的なモデリング手法の発展と、実構造物の特性の真の把握に結びつくものであり、ひいては解析手法と実験手法のさらなる発展につながるものである。

対象とするシステムの入出力信号の観測値に基づいて、ある評価規範のもとで、そのシステムをもっともよく記述する数学的モデルを決定することは、一般にシステム同定(System Identification)と呼ばれている¹⁾。その意味で、建築構造物系の動特性推定はシステム同定に他ならない。システム同定において対象システムの数学モデルを作成する場合には、モデル構造が既知であるホワイトボックスモデリングと、対象に関する物理的な情報や事前情報を用いないブラックボックスモデリングの2つのアプローチがある²⁾。建築構造物系の振動問題は通常運動方程式に従うので、その意味においてはシステム同定のうちのホワイトボックスモデリングによるアプローチの1種であり、通常運動方程式の各項、たとえば質量や減衰特性、あるいは復元力特性といったパラメータによりモデル特性を記述できる数学モデルであることが多い。したがって建築構造物動特性の同定作業は図1.2³⁾に示すように

- 1) システムの構造を表す構造モデルの定式化(構造同定)
- 2) 1)のシステムの振る舞いを決定するパラメータの推定(パラメータ同定)

の2つの段階に分けることができる。この構造同定とパラメータ同定は1対のものであるが、システムを忠実に表現するため複雑な構造モデルの定式化を行うと、同定パラメータ数が増えてパラメータ推定が困難となる。

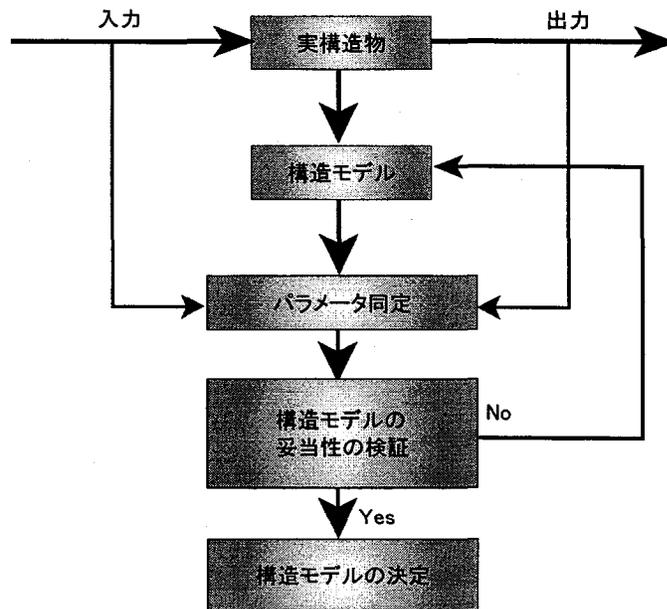


図1. 2 建築構造物動特性の同定作業

一方、単純なモデルで定式化を行った場合には、パラメータ推定は容易になるが、その反面システムの重要な特徴を取り逃す恐れが高くなる。また、図には示していないが、入出力データに混入するノイズの影響についても、場合によっては十分注意を払うことが必要である。ただし本研究では、1)については概ね同定対象とする構造物毎にほぼ適切なモデルを構築可能であるとの前提にたち、主に2)に着目した研究を行った。

1. 2 既往の研究

建築構造物系動特性の同定は、通常加振実験や微動観測、あるいは地震観測等により対象系の振動を観測し、この観測波形をもとに実施される。

対象構造物の線形性を仮定した場合の同定手法は、

- 1)周波数領域の推定手法、
- 2)インパルス応答の推定手法、
- 3)パラメトリックモデル（状態方程式など）を用いた同定手法

の3種類に分類できる。これらのどの手法を用いるかは、どのような入力を用いるかに多分に依存する。

たとえば不平衡質量型起振機を用いて建築構造物を強制加振するのであれば、通常、入力と応答は定常

外力とそれに対する定常応答であり、必然的に周波数領域の推定手法を用いることが多い。特に電動型不平衡質量型起振機による加振実験は、昭和40～50年代にかけて主に中～高層建築物を対象として多数実施された。その成果は参考文献⁴⁾にまとめられている。たとえば、市之瀬ら⁵⁾は設計時の想定と実構造物の振動特性を比較検討するために、29階建高層ビルの振動実験を行い、共振曲線から固有周期とハーフパワー法による減衰定数の算定を行うとともに、モード形の推定を行っている。さらに起振機の強制停止による自由振動計測も実施している。武藤ら⁶⁾は、特に1次固有周期が長い超高層建物を対象として、振り子式起振機と不平衡質量型起振機を併用して振動実験を行い、共振曲線と自由振動の両観測結果を用いたモード特性の推定と計算値との比較を行っている。また、小堀ら⁷⁾⁸⁾は起振機による振動実験結果より、高次モードまで測定された固有振動数と低次の振動モード形のみが測定可能であった場合に、逐次近似法あるいは最小2乗法によって、測定された振動特性に最も良く合致する振動特性となる質量及び剛性のパラメータを決定する手法を示し、構造物基礎の並進と回転を考慮したせん断型構造物系のパラメータ推定を行った。さらに、モード解析で得られる共振曲線と実験的に得られた共振曲線を適合させることで構造物系のパラメータ推定を行う手法⁹⁾を示した。

常時微動入力や風応答時のように入力が未知であるがホワイトノイズ的と仮定出来る場合は、自己相関法によるインパルス応答の推定が可能である。鈴木ら¹⁰⁾は9層純鉄骨造建物各層の常時微動観測記録より周波数伝達関数を推定することでモード形状を求め、さらに屋上階の微動観測の自己相関関数から減衰定数を推定している。又木ら¹¹⁾は、同一建物の振動実験結果と微動観測結果から得られる固有振動数と減衰定数を比較することで、固有振動数については微動観測結果による推定値が数%高めに推定され、減衰定数は0.5%程度の誤差におさまっておりやや小さめとなるとの結論を得ている。また、常時微動観測は簡便に実施可能なため、構造物の固有周期算定のみを行い基礎地盤の影響や構造物の現状調査に用いられることも多い^{12)~14)}。さらに、近年ではRD法によりスペクトル計算を用いることなく簡便に対象構造物のインパルス応答を推定することが可能となり適用例が増えている。田村ら¹⁵⁾は、1質点系モデルを用いた数値計算によりRD法のデータ重ね合わせ個数と精度の関係を明らかにするとともに、2自由度系モデルに対しても、バンドパスフィルターにより各モード成分の振動を分離することで各モードの減衰定数を算定する手法を示した。また、森田ら¹⁶⁾は、同一モデルを用いた数値計算と実建物で測定した微動観測記録を用いてRD法、カーブフィット法、ハーフパワー法、および自己相関関数法による減衰定数の算定を行い、RD法以外の手法ではアンサンブル平均する一つの区間の長さにより減衰定数が50%~100%程度も過大評価する場合があることを明らかにした。

地震入力のように対象構造物系への入力の非定常性が強い場合には、構造物の物理モデル(運動方程式)の特性を決定する剛性や減衰といったパラメータ、あるいはモード特性(固有周期と減衰定数)やモードマトリクス等を直接操作して、実際の観測波形と物理モデルによる応答計算の結果が一致するようにパラメータを操作することがよく行われる。ただし、建築構造物は一般に多自由度系であり、いたずらにモデルの次数を上げると正しい解を得ることが困難となることも多く、通常対象建物を1~2自由度系と仮定し低次モー

ドのみの特性を推定することも多い。また、物理モデルのかわりにブラックボックスモデルであるARモデルやARX、ARMAXモデル等を用いる場合もある。さらに、地震入力の場合は入力の性格上過渡応答を無視できない場合も多いが、入力と応答のそれぞれを周波数領域に変換し、それらの比を求めることで応答倍率を求めて周波数領域の手法による解析を行う場合も多い。構造物の地震入力と応答を用いた解析と設計モデルの検討は、建築構造物に設置した地震計の地震観測記録が次第に多く得られようになったこともあり、昭和50年代頃より増加している。たとえば横山ら¹⁷⁾は14階建プレハブ集合住宅の地震観測結果よりフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比を算定し、これらを設計モデルの固有周期あるいは増幅特性と比較することで振動モデルの妥当性を検討している。武藤ら¹⁸⁾は、高層RC造アパートの地震観測記録と、同一入力による設計モデルにより応答計算値との比較を行い良好な一致を確認することで設計モデルの妥当性を検証している。特に1978年(昭和53年)の宮城県沖地震時には、仙台市内の地震観測が実施されている建築物で多数の強震観測波形が得られたこともあり、多くの成果が得られた^{19)~21)}。特に志賀ら^{22),23)}は、東北大学工学部建設系建物の地震観測記録と、部材の弾塑性変形を考慮した応答計算結果を対比させることでモデルの非線形領域での検討を行っている。井上ら²⁴⁾は地盤内観測を含めた大阪大学工学部建設棟の地震観測記録を用いてパワースペクトル比を算出し、基礎の並進と回転運動を考慮したフレーム応答解析結果より得られる周波数応答との比較を行なった。J. L. BeckとP. C. Jennings²⁵⁾は、線形構造物モデルのモードパラメータを推定値とし、推定結果に基づく応答予測値と実地震観測記録との誤差を用いて、重み付き最小2乗法によりパラメータを同定する手法を示し、42階建鉄骨構造物の地震記録を用いて低次モードのパラメーターの同定を行った。G. H. Mcverry²⁶⁾は、構造物地動入力に対する多自由度系の伝達関数と地震観測記録のフーリエ変換より得られた周波数伝達関数の最小2乗近似により、周波数領域で構造物動特性を同定する手法を示し、9層鉄筋コンクリート造建物の地震観測記録を用いて低次モードパラメーターの同定を行った。小堀ら²⁷⁾は、地震時の地動と構造物内、および構造物内の2点間の増幅特性より、構造物のモード特性を推定する手法を示し、RC造建物の地震観測記録を用いてパラメータ推定を行った。

さらに近年、地震応答観測記録や地震前後の微動観測記録を用いて対象構造物の健全度判定の資料とする動きや、地震時や強風時の建物応答を積極的に制御することで応答を低減する制震(振)構造に関する研究が活発化するに従い、主に線形領域であるが精度の高い振動モデルの同定を行う手法に関する研究が盛んになっている。近藤ら²⁸⁾は、構造物損傷前後のモード特性の変化に着目し、多変量ARMAモデルにより全体損傷検出を行ったのち、損傷前後のモード形の曲率変化より損傷層を検出し、全体損傷検出で同定したモード特性の変化を逆摂動方程式により各部材の力学特性の変化と結びつけることで損傷箇所を検出する手法を示し、振動台実験により効果を検証した。Yun, C.-B.ら²⁹⁾は、多入力多出力型ARMAXモデルを用いて逐次パラメータ推定を行う手法を示し、数値計算によりノイズの混入した場合における推定精度の検討を行うとともに、構造物模型の振動台実験観測記録を用いて同手法の適用性の検討を行った。森本ら³⁰⁾は、ARMAXモデルを用いて構造物入力及び出力加速度よりモード特性を推定し、得られたモード情報よりニューラルネットワークによりモデル各層の剛性を推定する手法を示し、数値計算による検証を行っている。

さらに山田³¹⁾は地震応答予測を目的とし、構造物モデルに取り付けられたAMD加振時の応答を用いて構造物の低次モード特性の推定を行っている。斐³²⁾は、構造物模型の振動実験結果と既存建物の地震観測記録を用いて、部分空間法による同定を行い、最小実現された状態方程式のシステムマトリクスの固有値解析からモード特性の推定と、同定された状態空間モデルの応答計算結果と実観測記録を比較することで同手法の適用性を検討した。

これらの動特性の推定手法が概ね線形モデルを仮定していたのは、振動実験、微動観測、地震観測記録ともに概ね振動レベルが小さく、構造物の非線形挙動を再現し得ない振動レベルであったり、線形システムを基本とした制御アルゴリズム構築に用いられるものであったためである。しかし、近年地盤を含めて建物の地震観測体制がさらに充実するに従い、ますます強い加速度レベルの地震動の観測データも蓄積されてきており、その中には建物が非線形領域まで入った可能性があるものもあると考えられる。そこで今後は構造物の非線形特性をも推定できる推定アルゴリズムの重要性がますます高まることが予想される。これまで建築・土木分野において、構造物の動的非線形を考慮した動特性の同定手法としては、例えば和泉³³⁾による、Invariant Imbedding手法を用い観測量と予測値の誤差の重み付き2乗和が最小となる条件でパラメータ推定を行う手法や、データを時間領域に細分割し、各データセットをARMA過程と仮定し、微小時間における線形特性値の変化を推定する手法、Safak³⁴⁾による離散時間適応フィルタリングによるアプローチ、星谷^{35),36)}による拡張カルマンフィルタ法の適用がある。さらに近年では中村³⁷⁾、あるいは松井³⁸⁾によるニューラルネットワークによるアプローチや、Sato T et. al.³⁹⁾によるカルマンフィルタとニューラルネットワークの併用手法がある。Sato⁴⁰⁾はさらに、 H_{∞} フィルタに忘却要素を組み込んだ適応型 H_{∞} フィルタによる同定手法を開発し、時変あるいは非線形システムを対象として数値計算により効果の検証を行っている。また、曾根⁴¹⁾は強震応答記録のウェーブレット解析により応答の不連続性を検出し、建築物の累積損傷を推定する試みを行っている。さらに、来田⁴²⁾は運動方程式の増分型表示に対して、増分剛性を多重解像度解析におけるスケーリング関数の線形結合として近似することでブラックボックス的に構造物の減衰係数と履歴曲線を求める手法を提案し、数値計算でこの手法の適用性の検討を行っている。

これらの中で、比較的適用例の多い拡張カルマンフィルタ法を用いた同定アプローチは、本来状態変数の推定手法であるカルマンフィルタのアルゴリズムを用い、状態空間モデルの状態変数中に同定対象パラメータを組み込むことでパラメータ推定の同定手法へと拡張したものである。この手法は状態空間モデルに基づく手法であるため多入力多出力系への適用が簡単で、かつ各種ノイズの考慮も可能である。特に星谷³⁵⁾が開発したEK-WGI法は重み付きグローバルな繰り返しにより同定効果と精度を高める手法であり適用例も多い。しかし、実際にこのアプローチによる同定を行うためには、少なくとも状態量と同定パラメータの初期値としてこれらの平均値と分散の比率を指定する必要があるが、初期値の与え方によってはパラメータが発散することもあり、確実度の高い同定を行うためにはかなり熟練を要する。また、状態変数中に推定パラメータを組み込むため、状態方程式が非線形となり、この非線形状態方程式を線形化して遷移行列を作成するため、同定対象モデル毎に遷移行列を計算する必要があり、また特に多自由度系の場合には非常に複雑

な遷移行列となることが多い。

その他の手法については、例えばニューラルネットワークを用いた同定手法は最適なネットワーク構造を求めするために中間層の設定等に多くの試行錯誤が必要であり、またネットワーク構造と物理的な構造物の動特性の関係が明確でない。また、来田によるウェーブレット変換を用いた同定手法は事前の履歴曲線の仮定を必要としないで履歴曲線を算定できるが、推定精度へのノイズ混入の影響が大きく今後さらなる検討が必要と思われる。以上、いまだ非線形構造システムの同定手法については研究すべき課題が多く、適用範囲が広く、取り扱いが容易でかつ対ノイズ特性の優秀な同定手法の開発が強く望まれている。

1. 3 論文の構成および概要

本論文は、実構造物の動的な入力と応答を観測して、観測データより非線形性を有する動特性を精度良く同定する手法を提案するとともに、数値解析を通じて提案手法の妥当性や推定精度について包括的に検討し、さらに、実構造物の地震観測記録を用いて、本提案手法に基づく実構造物系動特性の同定を実施するもので、以下の8章から構成されている。

第1章では、研究の背景と目的及び既往の研究について述べている。

第2章では、既往の同定手法を示すとともに、本研究での提案手法である適応フィルタ及び適宜重み付け手法 (AF-AWP) と、状態空間表示に基づく予測誤差法 (PEM-SS) の定式化を示している。

第3章では、第2章で示した各種同定手法を線形1自由度モデルに適用し、動特性同定の数値計算を通じて各手法の基本的な特徴を明らかにしている。

第4章では、PEM-SSは、既往手法と比較して同定精度に及ぼす観測記録混入ノイズの影響が些少であり、混入ノイズ条件によらず高精度の同定が可能であることを明らかにしている。

第5章では、インパルス応答の推定手法であるRD法を導入して、線形2層せん断モデルを採用した場合には、2次モードまでの固有周期と減衰定数を同定する手法を提案し、数値計算を通じて既往のバンドパスフィルター併用手法より優位であることを明らかにしている。さらに、線形3層せん断モデルを採用して、本提案手法を含む各手法を適用し、PEM-SSでは、推定パラメータの初期値依存性の問題についても、他の状態空間表示に基づく手法に含まれる問題を逸脱しないとの結論を得ている。拡張カルマンフィルタ系のAF-AWPでは、既往同定手法であるEK-WGIと比較すればやや同定精度と適用性が劣るものの、推定パラメータの収束は極めて早く、短い計算時間で同定が可能であるとの結果を得ている。

第6章では、非線形系同定を可能とするようにPEM-SSを拡張した手法を提案し、バイリニア型とトリリニア型復元力特性を有する多自由度モデルを用いて、数値計算による適用性と同定精度の検討について述べている。その結果、十分短いサンプリング周期のデータを用いることで同定精度を高めることが可能であるが、

推定パラメータ数の増加に伴い、誤ったパラメータ値に収束する場合のあることが明らかとしている。

第7章では、実構造物の地震観測記録を用いた同定計算について示している。適用2例のうち、1例は6階建ての実験棟を対象とし、線形多層せん断型モデルを用いた同定について示している。他の例では免震建築構造物を対象とし、特に免震層に非線形復元力特性を設定した多自由度モデルとして、兵庫県南部地震における観測記録を用いて同定をし、提案手法の適用妥当性を明らかにしている。

第8章では、本論文の結論を述べ、各章で明らかになった諸成果をまとめている。さらに、多自由度かつ複雑な復元力特性をもつ建築構造物の動特性推定方法に関して今後の展望を述べている。

第2章からの本研究のフローを図1. 3に示す。

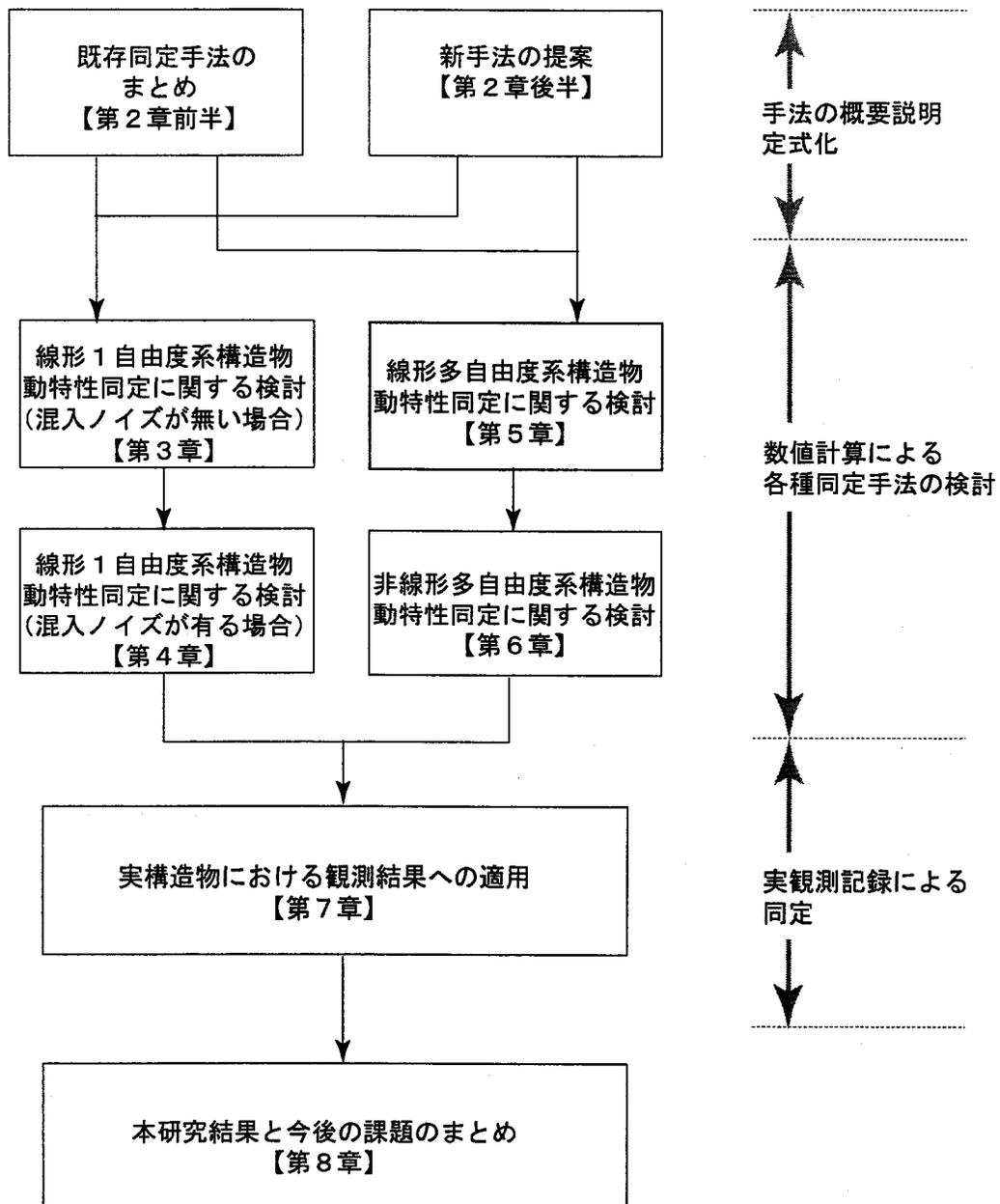


図1. 3 本研究のフロー

参考文献

- 1) 相良節夫, 秋月影雄, 中溝高好, 片山徹: システム同定, 計測自動制御学会, 1981年2月
- 2) 足立修一: MATLABによる制御のためのシステム同定, 東京電気大学出版局, 1996年11月
- 3) 斉藤芳人: 地震時における構造物の瞬間最適予測制御に関する研究, 武蔵工業大学博士論文, 1995年12月
- 4) 日本建築学会: 建築構造物の振動実験, 丸善, 1978年
- 5) 市之瀬紘一他: 朝日東海ビル振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1971年, pp. 643-644
- 6) 武藤 清他: 世界貿易センタービル振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1970年9月, pp. 399-400
- 7) 小堀鐸二, 南井良一郎, 鎌田輝男: 振動実験による構造物系のパラメータ評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1972年10月, pp. 573-574
- 8) 小堀鐸二, 鎌田輝男: 振動実験による構造物系のパラメータ評価 (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1977年10月, pp. 761-762,
- 9) 小堀鐸二, 鎌田輝男, 岡野創: 起振機実験に基づく構造物の振動特性の推定について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1981年9月, pp. 853-854
- 10) 鈴木敏夫他: 9層純鉄骨造建物の振動実験 (その2 常時微動波測定結果からの建物の動特性推定), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1970年9月, pp. 403-404
- 11) 又木義弘, 木下勝弘: 常時微動測定による振動特性の評価について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1973年, pp. 867-868
- 12) 大場新太郎: 常時微動測定による中低層建物の振動特性 —地盤条件および基礎形式の相違が固有周期に及ぼす影響—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1978年9月, pp. 625-626
- 13) 藤本一郎他: 軟弱地盤上に建つひび割れの多いSRC9階建ビルの常時微動測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1980年9月, pp. 719-720
- 14) 阿部良洋他: 宮城県沖地震の前後に於ける常時微動の測定からみた建物の剛性低下について (その4 振動周期の伸びと建物の基礎形式), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1980年9月, pp. 723-724
- 15) 田村幸雄, 佐々木 淳他: RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第454号, 1993年12月, pp. 29-38
- 16) 森田高市, 神田 順: 常時微動による減衰定数評価手法に関する考察, 構造工学論文集, Vol. 42B, 1996年3月, pp. 553-560
- 17) 横山晶好他: 14階建プレハブ集合住宅の振動実験と地震観測 (その2 地震観測), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1975年10月, pp. 503-504
- 18) 武藤 清他: 高層RC造アパートの地震観測記録とその解析 (その4 シミュレーション解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1975年9月, pp. 507-508
- 19) 上田周明他: 宮城県沖地震における仙台鉄道管理局庁舎のSMAC強震計記録とその解析 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1978年9月, pp. 525-526
- 20) 蓮田常雄他: 宮城県沖地震における仙台鉄道管理局庁舎のSMAC強震計記録とその解析 (その2 建物の応答解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1978年9月, pp. 527-528
- 21) 川村政美他: 1978年宮城県沖地震によるSRC造18階建家の地震観測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1978年9月, pp. 529-530
- 22) 志賀敏男, 柴田明徳他: 東北大学工学部建設系建物における強震応答の実測と解析 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1979年9月, pp. 449-450
- 23) 志賀敏男, 柴田明徳他: 東北大学工学部建設系建物における強震応答の実測と解析 (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1979年9月, pp. 451-452
- 24) 井上 豊, 河野允宏, 馬場研介: 観測地震動による構造物地盤系動特性の評価について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1980年9月, pp. 717-718

- 25) J. L. Beck and P. C. Jennings: Structural Identification Using Linear Models and Earthquake Records, Earthqu. Eng. Struct. Dyn., Vol. 8, 1980, pp.145-160
- 26) G. H. Mcverry: Structural Identification in the Frequency Domain from Earthquake Records, Earthqu. Eng. Struct. Dyn., Vol. 8, 1980, pp.161-180
- 27) 小堀鐸二, 鎌田輝男: 地震応答観測波形による構造物の振動特性推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1981年9月, pp.851-852
- 28) 近藤一平, 濱本卓司: 振動台実験のランダム応答データを用いた多層建築物の損傷検出, 日本建築学会構造系論文集第473号, 1995年7月, pp.67-74
- 29) Yun C.-B., Lee H.-J., and Lee C.-G.: Sequential Prediction-Error Method for Structural Identification, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 2, 1997.2, pp.115-122
- 30) 森本恭行, 大西克保, 水野啓示朗, 松井徹哉: ARMAXモデルとニューラルネットワークを用いた構造物の振動システム同定-学習に伝達関数データを使用する場合-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1構造I, 1996年9月, pp.467-468
- 31) 山田聖治, 山田就康, 西谷 章: 地震応答予測を目的としたAMDによる振動モード特性の同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2構造II, 1996年9月, pp.951-952
- 32) 斐 起煥, 鈴木祥之: 部分空間法による構造物系の動力学特性の同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2構造II, 1998年9月, pp.763-764
- 33) 和泉正哲他: 振動システムの同定について-1自由度非線形振動系の場合-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, 1981年9月, pp.823-824
- 34) Safak, E et. al: Recorded Seismic Responce of Pacific Park Plaza. II: System Identification, J. Struct. Vol.118, No. 6, ASCE, 1992, pp. 1566-1589
- 35) 星谷 勝, 斉藤悦郎: 拡張カルマンフィルターを用いた同定問題の各種振動系への応用, 土木学会論文報告集, 第339号, 1983年11月, pp.59-87
- 36) 星谷 勝, 斉藤悦郎: 建設技術者のためのデータ解析と応用-カルマンフィルタを中心として-, 鹿島出版会, 1991年7月
- 37) 中村充, S. F. Masri: ニューラルネットワークを用いた損傷検出に関する研究, 構造工学論文集, Vol.43B, 1997年3月, pp.531-539
- 38) 松井徹哉, 水野啓示郎: ニューラルネットワークによる構造物のノンパラメトリックシステム同定と振動応答予測, 建築構造設計のための力学の新展開, 建築学会近畿支部構造力学部会, 1997年7月, pp.75-87
- 39) Sato, T et. al :Structural Identificaion Using Nural Network And Kalman Filter Algorithms, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.14, No.1, 1997.4, pp.23s-32s
- 40) K. Qi and T. Sato : H_∞ Filtering Technique and Its Application to Structural System Identification, Proc. of the Second World Conference on Structural Control Vol. 3, Wiley, 1998.7, pp. 2149-2158
- 41) 曾根, 山本他: 強震記録のウェーブレット解析による履歴復元力特性を有する建築物の累積損傷の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第476号, 1995年10月, pp.67-74
- 42) 来田義弘: ウェーブレットによる非線形構造システムの同定, 日本建築学会構造系論文集 第504号, 1998年2月, pp.43-48

第2章 本研究で用いた建築構造物系動特性の同定手法

2. 1 緒言

線形1自由度系の同定手法はこれまでも数多く提案されており、実構造物への適用例も数多く報告されている。本研究は、最終的に多自由度かつ複雑な復元力特性を有する建築構造物系に対しても、その応答記録より対象建物の真の動特性を推定する手法を提案することを目指しており、その意味では線形1自由度系の構造物動特性の同定手法だけでは本研究の意図を実現するものとはなり得ない。しかし線形1自由度システムは本章以降の各章で検討が行われる各種システムのうちもっとも基本的なものであり、各同定手法の基本的な特性を調べるためには非常に有効であると考えられる。付け加えると、各同定手法の適用性あるいは精度の検討を行う際に、同定にあたり多自由度かつ複雑な復元力特性を有するモデルによる比較検討を行うと、しばしば検討時に必要な設定パラメータや推定パラメータ数が多くなり、同定計算結果よりそれぞれの同定手法の基本的な特性を抽出することが非常に困難になることも少なくない。

現実に多自由度かつ複雑な復元力特性を有する建築構造物の同定を行う際にも、対象モデルを線形1自由度と仮定することで対象モデルの1次の等価固有周期や等価減衰定数など、対象構造物の諸特性のうち非常に重要なパラメータを推定できる場合も多く、この情報はさらに詳細な対象構造物の同定を行うにあたり重要な事前情報となることが少なくない。

上記の観点より、本章ではまず2.2節において、これまでに提案されている各種の線形1自由度系構造物動特性の同定手法を整理する意味も含め、本研で用いた既存の同定手法を列挙し、概略を示す。

つぎに、多自由度かつ複雑な復元力特性を有する建築構造物系の建築構造物の動特性を精度良く同定可能と考えられる手法として、2.3節において新たに2つの手法を提案し、この手法の概略を述べるとともに定式化を行う。

なお、本章で取り上げる各種同定手法は、手法の適用にあたり、対象モデルの線形性やモデルが1自由度であることが必要条件であるもの、あるいはこれらに依存しないものなど様々であるが、本章ではすべての同定手法について対象モデルとして線形1自由度系を採用することを念頭において記述を行う。

2. 2 既存の同定手法

2. 2. 1 既存同定手法の概略

既存の各種同定手法は、大別すると下記に示す3つに分類されることが考えられる。

(1) 周波数領域の推定手法

(2) インパルス応答の同定手法

(3) 状態空間表示に基づく同定手法

以下、上記 (1) ~ (3) の分類にしたがって各手法の概略を示す。

(1) 周波数領域の同定手法

周波数領域の同定手法は、いずれも入力及び観測記録を時間領域から周波数領域へと変換し、これらの比から入力と応答間の伝達関数や応答倍率をもとめ、これらと理論的な伝達関数や応答倍率との間で何らかのフィッティングを行うことにより対象モデルの動特性を算定する手法である。周波数領域の各手法は、時間領域から周波数領域へのデータ変換を伴うことより、基本的に対象モデルの線形性が前提条件となるが、対象モデルが多自由度である場合においても多自由度の伝達関数あるいは応答倍率を用いてフィッティングを行うことが可能である。

時間領域で観測されるデータを周波数領域へ変換するには、通常高速フーリエ変換(FFT)が多く用いられるが、この場合には

1) 同定に用いるデータ長が短い場合にはスペクトル推定の精度が悪化する¹⁾

2) フィッティング周期帯に対しサンプリング周期が十分小さくないとエイリアシング²⁾の影響をうける

等の現象に十分注意する必要がある。1) についてはMEM (最大エントロピー法) を用いてスペクトルを算出する、2) については時間領域あるいは周波数領域で何らかの平滑化を行う、などの手法により対処可能であるが、特に平滑化を行う際には、平滑化の程度により振幅ピークのスペクトル形状がかなり変動することがあり注意が必要である。本研究では、周波数領域の同定手法として代表的手法であるカーブフィット法を2. 2. 2 に、ハーフパワー法を2. 2. 3 に示す。

(2) インパルス応答の同定手法

同定対象モデルが線形であることが明らかな場合、対象システムの単位インパルス応答 $g(t)$ が推定可能であれば任意外力 $f(t)$ に対するシステムの応答 $y(t)$ は(2.1)式で推定することができる。

$$y(t) = \int_0^t g(t-\tau)f(\tau)d\tau \quad (2.1)$$

また、単位インパルス応答のラプラス変換は、よく知られているように伝達関数に他ならない。したがって、対象システムのインパルス応答を精度よく推定可能であれば、システムの線形性を仮定する限り任意外力に対する応答と周波数特性の両者を求めることが可能となる。

ただし、建築構造物を同定対象とした場合、入力として単位インパルスを適用するのは実際には難しいことが多く、2. 2. 4 に示す自己相関関数法、あるいは2. 2. 5 に示すRD法により間接的に対象システムのインパルス応答を推定することが多い。この場合、自己相関関数法については入力波がホワイトノイズとの仮定が必要となる。またRD法については入力波が十分なデータ長を有する期待値0のランダム確率過程波であることが前提条件である。これらの条件は入力として地震波を想定した場合には適用がやや難し

いが、一般に常時微動や風による振動については入力をほぼ定常ランダム過程入力と見なすことができ、また十分なデータ長のデータを得ることが可能である。したがって、これらインパルス応答の推定手法は上記の常時微動観測や風による振動観測時の概略の減衰定数や固有周期の算定に広く用いられている。

ただし、通常の手順としては対象建物のインパルス応答を推定した後、最小2乗法近似により対数減衰率を推定することがほとんどで、この処理によりインパルス応答に含まれる高次モードの情報は除去されることが多い。

(3) 状態空間表示に基づく同定手法

近年では、建築・土木分野を含め各種工学領域において、状態空間表示に基づく時間領域の同定手法の研究が精力的になされている。状態空間表示を用いることは、以下に示す利点があると考えられる。

- 1) 多入力多出力系を容易に扱うことができる。
- 2) 状態空間表示により、内部変数である状態量と、外部から測定可能な観測量とを分離して考慮できる。
また、ノイズについても、状態ノイズと観測ノイズに分けて考慮できる。
- 3) 建築構造物に限らず、物理モデルは微分方程式で表されることが多いが、これは連続型の状態方程式で表すことが容易であり、また、ひとたび状態方程式に変換してしまえば、あとは、どの様な物理モデルについても、ほぼ同様の手順で同定が可能となり、適用範囲が広い。

さらに、時間領域で同定を行うことの利点としては、以下のものが考えられる。

- 1) 観測記録は時刻歴で得られるが、これを周波数領域へと変換することによる誤差の混入をさけることができる。
- 2) 周波数領域では考慮の難しい非線形システムの同定が可能となる。

本節では、状態空間表示に基づく各種時間領域の既存各種同定手法について、最初に拡張カルマンフィルター法 (Extended Kalman Filter: EKF)の概略を2. 2. 6 に示す。さらに拡張カルマンフィルタ系の同定手法であり、建築・土木分野でこれまで適用事例の多いEK-WGI法の概略を2. 2. 7 に示し、併せて拡張カルマンフィルター法の初期値依存性の低減が期待できる手法である改良手法の適応拡張カルマンフィルタ法(Adaptive EKF)を2. 2. 8 に示す。

2. 2. 2 カーブフィット法³⁾

1自由度系の基礎に地動 $y_0(t)$ が作用する場合の運動方程式は、図2.1より(2.2)式に示す様になる。ここに y は基礎に対する相対変位とする。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{y}_0 \quad (2.2)$$

ここで、(2.3)式を代入すると(2.4)式が得られる。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, 2h\omega_0 = \frac{c}{m} \quad (2.3)$$

$$\ddot{y} + 2h\omega_0\dot{y} + \omega_0^2 y = -\ddot{y}_0 \quad (2.4)$$

入力としては複素形の調和地動を考え、 $y_0 = a_0 e^{ipt}$ とすると、特解を $y = C e^{ipt}$ とおいて(2.4)式に代入すると(2.5)式を得る。

$$y = \frac{\left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2}{1 - \left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2 + 2h\left(\frac{p}{\omega_0}\right)i} \cdot a_0 e^{ipt} \quad (2.5)$$

(2.5)式より、構造物の相対変位倍率は次のように表される。

$$\frac{y}{y_0} = \frac{\left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2\right\}^2 + 4h^2\left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2}} \cdot e^{-i\theta} = \left|\frac{y}{y_0}\right| \cdot e^{-i\theta} \quad (2.6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2h\left(\frac{p}{\omega_0}\right)}{1 - \left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2}$$

(2.6)式から得られる変位応答倍率 $|y/y_0|$ と、変位応答の位相遅れを図2. 2(a),(b)に示す。

同様に解いて、構造物の絶対加速度の定常応答解は(2.7)式となる。

$$\ddot{Y} = \ddot{y} + \ddot{y}_0 = -2h\omega_0\dot{y} - \omega_0^2 y = \frac{1 + 2h\left(\frac{p}{\omega_0}\right)i}{1 - \left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2 + 2h\left(\frac{p}{\omega_0}\right)i} \cdot (-a_0 p^2 \cdot e^{ipt}) \quad (2.7)$$

よって、絶対加速度倍率は(2.8)式となる。

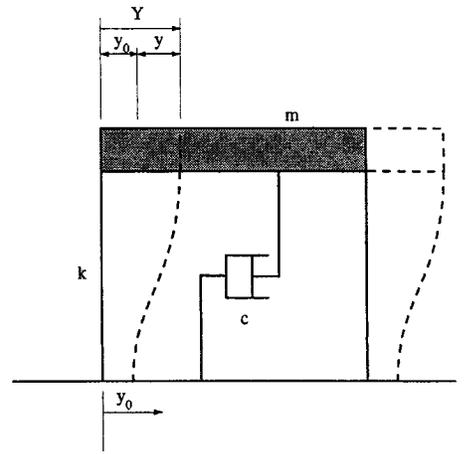
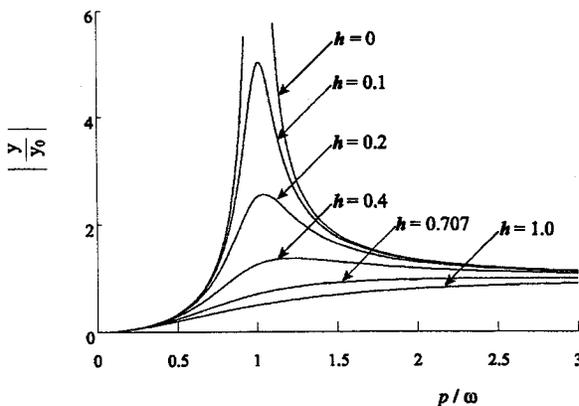
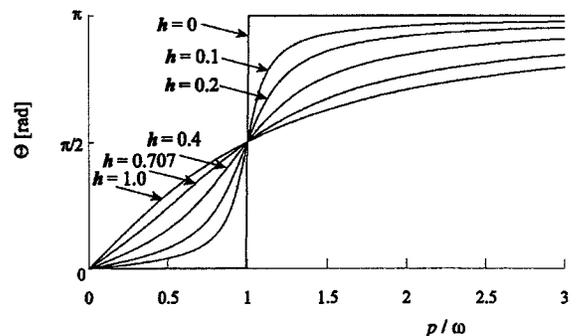


図2. 1 1自由度系モデル



(a)変位応答倍率



(b)変位応答の位相遅れ

図2. 2 調和地動に対する変位応答倍率および変位応答の位相遅れ

$$\frac{\ddot{y}}{y_0} = \sqrt{\frac{1 + 4h^2\left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2\right\}^2 + 4h^2\left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2}} \cdot e^{-i\theta} = \left| \frac{\ddot{y}}{y_0} \right| e^{-i\theta'}$$

$$\theta' = \tan^{-1} \frac{2h\left(\frac{p}{\omega_0}\right)^3}{1 - \left(1 - 4h^2\right)\left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2} \quad (2.8)$$

ただし、これらの応答倍率は厳密には入力定常な調和波動と見なせる場合に成立するものであることに注意を払う必要がある。例えば、入力が起振機の場合や、地盤の常時微動などの場合は、ほぼ調和波あるいは定常振動に準ずるものと見なすことができ、上記の変位応答倍率により1自由度系の主たる動特性である固有周期あるいは減衰定数を推定することができる。

2. 2. 3 ハーフパワー法⁴⁾

1自由度系の変位あるいは加速度の応答倍率が何らかの測定により得られたとする。測定結果で得られた応答倍率曲線の共振振幅の $1/\sqrt{2}$ のところを横線を引き、この曲線との交点 ω_1, ω_2 とする。(ただし、 $\omega_2 \geq \omega_1$ とする)このとき、 $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ として

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega_0 - \Delta\omega/2 \\ \omega_2 &= \omega_0 + \Delta\omega/2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

が成り立つと仮定する。ただし、ここに $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ である。さらに $\Delta\omega/\omega_0$ が微小量であるとする

$$1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2 = 1 - \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad (2.10)$$

$$1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_0}\right)^2 = 1 - \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 = -\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad (2.11)$$

そこで、(2.6)式において h と $\Delta\omega/\omega_0$ が同程度の微小量とし、それより高次の微小を無視すると ω_1, ω_2 とも(2.12)式を満足する。

$$X = \left| \frac{y}{y_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 + 4h^2}} \quad (2.12)$$

ここで、共振時の角振動数を ω_r 、振幅を X_r とすると、 $\omega_r = \omega_0$ より

$$X_r = \left| \frac{y}{y_0} \right| = \frac{1}{2h} \quad (2.13)$$

であるから、 $X = X_r/\sqrt{2}$ に(2.12)式と(2.13)式を代入して

$$h = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad (2.14)$$

を得る。同様に加速度応答倍率についても、(2.8)、(2.10)あるいは(2.11)式より

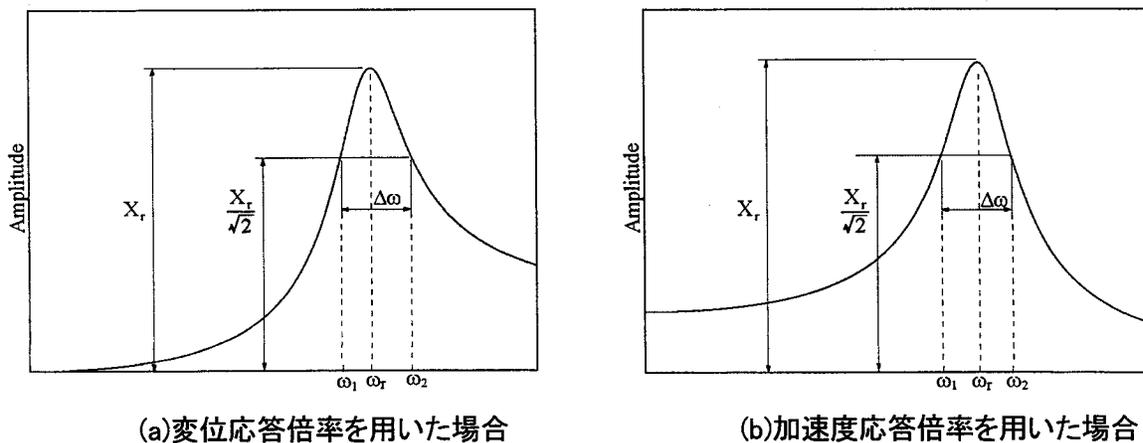


図2. 2 ハーフパワー法説明図

$$X = \left| \frac{\ddot{Y}}{\ddot{y}_0} \right| = \sqrt{\frac{1 + 4h^2}{\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 + 4h^2}} \quad (2.15)$$

また、共振時の振幅 X_r は

$$X_r = \left| \frac{\ddot{Y}}{\ddot{y}_0} \right|_{\omega_r = \omega_0} = \frac{\sqrt{1+4h^2}}{2h} \quad (2.16)$$

であるから、 $X = X_r/\sqrt{2}$ に(2.15)と(2.16)式を代入して

$$h = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad (2.17)$$

を得る。

実際に応答倍率が得られた場合のハーフパワー法による減衰定数の算定手法イメージを図2. 2に示す。

2. 2. 4 自己相関関数法⁵⁾

構造物に対する入力ホワイトノイズと仮定出来る場合、すなわち平均値 $E\{X(t)\} = 0$ 、であり、また、全周波数にわたり、一定のパワースペクトルをもつ、すなわち $S(\omega) = S_0$ と仮定出来る場合における1自由度系の定常応答を考える。ここでパワースペクトル密度 $S(\omega)$ 、平均値0のランダムな定常地動 $\ddot{y}_0 = -\alpha(t)$ が作用する1自由度系の運動方程式(2.18)式となる。

$$\ddot{y} + 2h\omega_0\dot{y} + \omega_0^2y = \alpha(t) \quad (2.18)$$

ここに、ランダム定常地動は(2.19)～(2.21)式の条件を満足する。

$$E\{\alpha(t)\} = 0 \quad (2.19)$$

$$E\{\alpha(t)\alpha(t+\tau)\} = R_\alpha(\tau) \quad (2.20)$$

$$R_\alpha(\tau) = E\{\alpha(t)\alpha(t+\tau)\} = S_0\delta(\tau) \quad (2.21)$$

地動加速度が単位インパルスの場合、1自由度系の単位インパルス応答は(2.22)式で与えられる。

$$g(t) = \frac{1}{\omega_0'} e^{-h\omega_0' t} \sin(\omega_0' t) \quad (2.22)$$

ここに、 $\omega_0' = \sqrt{1-h^2} \omega_0$:減衰固有角振動数[rad/sec]である。

定常応答 y は、 $t = -\infty$ からの寄与を考え、また $t < \tau$ でインパルス応答は $g(t-\tau) = 0$ となることを考慮すると、(2.23)式となる。

$$\begin{aligned} y &= \int_{-\infty}^t \alpha(\tau) g(t-\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha(\tau) g(t-\tau) d\tau \\ &= \int_0^{\infty} \alpha(t-\tau) g(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2.23)$$

応答 $y(t)$ の自己相関関数 $R_y(t)$ は(2.23)(2.20)(2.21)式、及びデルタ関数の性質を考慮すれば

$$\begin{aligned} R_y(t) &= E[y(t)y(t+\tau)] \\ &= E\left[\int_0^{\infty} \alpha(t-\tau_1) g(\tau_1) d\tau_1 \int_0^{\infty} \alpha(t+\tau-\tau_2) g(\tau_2) d\tau_2 \right] \\ &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} E[\alpha(t-\tau_1)\alpha(t+\tau-\tau_2)] g(\tau_1) g(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \\ &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} R_{\alpha}(t+\tau_1-\tau_2) g(\tau_1) g(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \\ &= S_0 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \delta(t+\tau_1-\tau_2) g(\tau_1) g(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \\ &= S_0 \int_0^{\infty} g(\tau_2-t) g(\tau_2) d\tau_2 \end{aligned} \quad (2.24)$$

であるから、ホワイトノイズ地動に対する応答の自己相関関数は(2.25)式となる。

$$R_y(\tau) = \frac{S_0}{4h\omega_0} e^{-h\omega_0|\tau|} \left(\cos \sqrt{1-h^2} \omega_0 |\tau| + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \sin \sqrt{1-h^2} \omega_0 |\tau| \right) \quad (2.25)$$

ここで、初期変位 d_0 が与えられた場合の自由振動解は、減衰定数 $h < 1$ の領域で(2.26)式

$$y(t) = d_0 e^{-h\omega_0 t} \left(\cos \sqrt{1-h^2} \omega_0 t + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \sin \sqrt{1-h^2} \omega_0 t \right) \quad (2.26)$$

で表されることを勘案すると、応答の自己相関関数を求めることにより、初期変位が有る場合の自由振動解の相似形が得られることがわかり、応答の自己相関関数より減衰定数や固有周期の算定が可能となる。

2. 2. 5 RD(Random Decrement)法^{6),7),8)}

(2.27)式に示すように、非減衰固有角振動数 ω_0 、減衰定数 h の1質点系に、期待値0のランダム確率過程である外力 $f(t)$ が作用するものとする。

$$\ddot{y} + 2h\omega_0\dot{y} + \omega_0^2y = f(t) \quad (2.27)$$

この場合の応答 $y(t)$ の一般解は、(2.28)式のように自由振動解 $d(t)$ とランダムな外力による強制振動解 $r(t)$ の和の形で表される。

$$y(t) = d(t) + r(t) \quad (2.28)$$

ただし、

$$d(t) = A \exp\left(\left(-h + i\sqrt{1-h^2}\right)\omega_0 t\right), \quad r(t) = \int_0^t f(\tau)g(t-\tau)d\tau \quad (2.29)$$

ここで、 A は初期条件によって決定される定数であり、 $g(t)$ は単位インパルス応答関数である。

応答 $y(t)$ の期待値は自由振動解と強制振動解のそれぞれの期待値の和で表されるから

$$E[y(t)] = E[d(t)] + E[r(t)] \quad (2.30)$$

ここで、ランダム応答成分 $r(t)$ の期待値は

$$E[r(t)] = \int_0^t E[f(\tau)]g(t-\tau)d\tau \quad (2.31)$$

であるから、外力が期待値0のランダム確率過程、つまり $E[f(\tau)] = 0$ であるならば、(2.32)式が成り立つ。

$$E[r(t)] = 0 \quad (2.32)$$

応答 y の時刻歴の標本が数多く存在するときには、応答の y の時系列波形を $t=0$ において極大値となるように並べ、これを時刻軸を揃えて重ね合わせれば、和 $\Sigma y(t)$ のうち、ランダム成分の和 $\Sigma r(t)$ は(2.32)式より0に近づき、自由振動成分の和 $\Sigma d(t)$ だけが残る。したがって、この重ね合わせ波形はランダムな極大値 P の和 ΣP を初期振幅とする自由振動波形となる。

以上のような原理に基づく減衰定数の評価法がRD(Random Decrement)法であり、ホワイトノイズのような期待値0のランダム外力に対する応答波形を極大値を初期値とする数多くの小サンプルに分割し、これを重ね合わせてランダム成分を消去し、自由振動波形を抽出することができる。

なお、RD法の適用にあたり、小サンプルの切り出し法として、時間軸方向に極大値を1つずつずらしながら重ね合わせる方法と、全データを極大値を初期値とする各要素に完全に分割し、小サンプル間のデータの重なりを除去する方法とがあるが、本論文では観測データが比較的短くても多くの小サンプルを抽出できる前者の方法を採用して推定計算を実施している。

2. 2. 6 拡張カルマンフィルタ法^{9),10)}

カルマンフィルタは、本来線形確率システムの状態推定のアルゴリズムとして開発されたものであるが、未

知パラメータを含むシステムの同定手法として用いることが可能である。構造物（システム）に含まれるパラメータの推定問題にカルマンフィルタを用いると、状態方程式の表示形式が非線形になる。拡張カルマンフィルタ(Extended Kalman filter)法は、カルマンフィルタ・アルゴリズムを、状態方程式と観測方程式の表示形式が非線形になるシステムにおいて、両者を基準軌跡回りで線形化することで状態量推定のアルゴリズムを構成したものである。数値解析ではこれまで、以下2. 2. 7 あるいは2. 2. 8 に示す改良アルゴリズム等が提案されている。

以下、拡張カルマンフィルタ法による同定手法について説明する。拡張カルマンフィルタ法は、(2.33)式で表される表示形式が非線形な状態方程式と(2.34)式で表される観測方程式を、状態量の基準軌跡まわりで線形化することによりカルマンフィルタと類似したアルゴリズムを構成したものである。

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) + w(t); \quad t \geq t_0 \quad (2.33)$$

$$y_k = h(x, t) + v(t) \quad (2.34)$$

ここに、 t :時間 t_0 :初期時間 x :状態量 w :システム雑音 y :観測量 v :観測雑音である。

拡張カルマンフィルタ法は、以下に示される(2.35)～(2.40)式を、各ステップ k について繰り返し計算することにより推定値を得る。ただし、状態ノイズについては共分散行列 $Q(k+1)$ 、および状態ノイズ共分散行列の変換行列 $G(k)$ がともに既知であり、観測ノイズについては共分散行列 $R(k+1)$ が既知と仮定する。

まず始めに、予測ルーチンにおいて、(2.35)式により k ステップ目の修正状態量 $\hat{x}(k|k)$ を用い、 $k+1$ ステップ目の予測状態量 $\hat{x}(k+1|k)$ を計算する。そのときの誤差共分散 $P(k+1|k)$ は(2.36)式により計算する。

$$\hat{x}(k+1|k) = \hat{x}(k|k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(\hat{x}, t) dt \quad (2.35)$$

$$P(k+1|k) = \Phi(k+1|k)P(k|k)\Phi^T(k+1|k) + G(k)Q(k+1)G^T(k) \quad (2.36)$$

ここで $\Phi(k+1|k)$ はシステムの遷移行列であり、(2.37)式のように与えられる。

$$\Phi(k+1|k) = I + \Delta t \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}(k|k)} + \frac{1}{2!} \Delta t^2 \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{x=\hat{x}(k|k)} + \dots \quad (2.37)$$

次に、修正ルーチンである(2.38)、(2.39)式により、観測値 $y(k+1)$ を用いることで、予測状態量と誤差共分散行列を修正する。

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + K(k+1)[y(k+1) - M(k+1)\hat{x}(k+1|k)] \quad (2.38)$$

$$P(k+1|k+1) = [I - K(k+1)M(k+1)]P(k+1|k)[I - K(k+1)M(k+1)]^T + K(k+1)R(k+1)K^T(k+1) \quad (2.39)$$

ここで、 $K(k+1)$ はカルマンゲインであり、 $M(k+1)$ は観測方程式の変換行列である。 $K(k+1)$ 、 $M(k+1)$ は以下のように与えられる。

$$K(k+1) = P(k+1|k)M^T(k+1)[M(k+1)P(k+1|k)M^T(k+1) + R(k+1)]^{-1} \quad (2.40)$$

$$M(k+1) = \left. \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}(k+1|k)} \quad (2.41)$$

2. 2. 7 EK-WGI 法

EK-WGI法(Extended Kalman Filter - Weighted Global Iteration Procedure)は、星谷、齊藤^{11)~14)}により開発されたものである。この手法では、初期時刻 $t = t_0$ の推定パラメータの初期値とデータ終了時刻 $t = t_n$ の推定パラメータが一致するまで、拡張カルマンフィルタ・アルゴリズムに誤差共分散行列に重み付けを行いグローバルな繰り返し計算をさせることで、短いデータ長の場合においても同定計算を収束させることが可能となる。そのため、本手法はオンライン推定法である拡張カルマンフィルタ法を用いているが、実際にはオフライン同定手法となる。また、この手法では基本的な推定・修正アルゴリズムが、拡張カルマンフィルタ法と同じものであり、推定パラメータの初期値によっては、真値とかけ離れた初期値を与えると、発散もしくは間違った値へと収束することもあり注意が必要となる。なお、EK-WGI法は前述の拡張カルマンフィルタ法と同様に、システム雑音共分散行列 $\mathbf{Q}(k+1)$ 、システム雑音共分散行列変換行列 $\mathbf{G}(k)$ 、および観測雑音共分散行列 $\mathbf{R}(k+1)$ を既知量として仮定する必要があるが、通常 $\mathbf{Q}(k+1)=0$ と仮定し、状態ノイズを考慮しないアルゴリズムを構成することが多い。

2. 2. 8 適応拡張カルマンフィルタ法

適応フィルタ手法(Adaptive Filtering Procedure)は、A. H. Jazwinski¹⁵⁾により、カルマンフィルタにおける推定パラメータの発散問題を解消する演算手法として開発された。適応フィルタ手法は、状態ノイズ共分散行列を逐次計算することにより、予測誤差共分散行列へ反映させようという手法である。この手法を、C. G. KohやL. M. Seeら¹⁶⁾は、構造物のシステム同定問題においても適用できるように改良し、適応拡張カルマンフィルタ(Adaptive Extended Kalman Filter)法を開発した。

本研究で用いた適応拡張カルマンフィルタ法は、同定パラメータと観測値との予測誤差ベクトル \mathbf{r} を

$$\mathbf{r}(k+1) = \mathbf{y}(k+1) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(k+1|k), t_{k+1}) \quad (2.42)$$

と定義し、 k ステップ目の状態量の推定誤差 $\delta\mathbf{x}(k)$ と $k+1$ ステップ目の状態量の推定誤差 $\delta\mathbf{x}(k+1)$ との関係が、

$$\delta\mathbf{x}(k+1) = \Phi(k+1|k)\delta\mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k+1) \quad (2.43)$$

の関係にあり、さらに $\delta\mathbf{x}(k)$ と観測値の真値と推定観測量との誤差 $\delta\mathbf{y}(k)$ が、

$$\delta\mathbf{y}(k) = \mathbf{M}(k)\delta\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (2.44)$$

の関係にあることから、(2.42)式は、(2.44)式を代入することにより、

$$\mathbf{r}(k+1) = \mathbf{M}(k+1)\delta\mathbf{x}(k+1) + \mathbf{v}(k+1) \quad (2.45)$$

となり、さらに(2.43)式を代入して、

$$\mathbf{r}(k+1) = \mathbf{M}(k+1)\left[\Phi(k+1|k)\delta\mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k+1)\right] + \mathbf{v}(k+1) \quad (2.46)$$

となる。 k ステップ目の推定状態量が $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$ である時、状態量の真値との誤差ベクトル $\delta\hat{\mathbf{x}}(k|k)$ は、

$$\delta\tilde{x}(k|k) = x(k) - \hat{x}(k|k) \quad (2.47)$$

と定義されるので(2.46)式は以下のようなになる。

$$r(k+1) = M(k+1)\Phi(k+1|k)\delta\tilde{x}(k|k) + M(k+1)w(k+1) + v(k+1) \quad (2.48)$$

一般に、 $k+p$ ステップ目の予測誤差ベクトルは、

$$r(k+p) = M(k+p)\Phi(k+p|k+p-1)\delta\tilde{x}(k+p-1|k+p-1) + M(k+p)w(k+p) + v(k+p) \quad (2.49)$$

であり、 $k+p-1$ ステップ目の誤差ベクトルが

$$\delta\tilde{x}(k+p-1|k+p-1) = \Phi(k+p|k)\delta\tilde{x}(k|k) + \sum_{i=1}^{p-1} \Phi(k+p-1|k+i)w(k+i) \quad (2.50)$$

であることから(2.49)式は、

$$r(k+p) = M(k+p)\Phi(k+p|k)\delta\tilde{x}(k|k) + M(k+p)\left[\sum_{i=1}^p \Phi(k+p|k+i)w(k+i)\right] + v(k+p) \quad (2.51)$$

と表される。これを用い、 $k+p$ ステップ目の予測誤差共分散行列は、以下のように表される。

$$\text{COV}[r(k+p)] = E[r(k+p) r^T(k+p)] \quad (2.52)$$

また、誤差ベクトル $\delta\tilde{x}(k|k)$ の平均値が0で、その共分散行列が $P(k|k)$ であると仮定する。すなわち、

$$E[\delta\tilde{x}(k|k)] = 0 \quad (2.53)$$

$$\text{COV}[\delta\tilde{x}(k|k)] = P(k|k) \quad (2.54)$$

であることを考慮したら、(2.51)式は、

$$\begin{aligned} \text{COV}[r(k+p)] &= M(k+p)\Phi(k+p|k)P(k|k)\Phi^T(k+p|k)M^T(k+p) \\ &\quad + M(k+p)\left[\sum_{i=1}^p \Phi(k+p|k+i)G(k+i)Q(k+i)G^T(k+i)\Phi^T(k+p|k+i)\right]M^T(k+p) \\ &\quad + R(k+p) \end{aligned} \quad (2.55)$$

となる。ここで、適応拡張カルマンフィルタ・アルゴリズムでは、

$$\text{COV}[r(k+p)] = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p [r(k+i) r^T(k+i)] \quad (2.56)$$

となる条件を満たす予測誤差共分散行列を用いる。あるデータ長 M について、区間 $k \leq k+p \leq k+N$ では、 $G(k+p)$ と $Q(k+p)$ が変化しないとすれば、(2.55)式は以下のように変形される。

$$\begin{aligned} &M(k+p)\left[\sum_{i=1}^p \Phi(k+p|k+i)GQG^T\Phi^T(k+p|k+i)\right]M^T(k+p) \\ &= \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p [r(k+i) r^T(k+i)] - \text{COV}[r(k+p)|Q=0] \end{aligned} \quad (2.57)$$

ここで、(2.57)式の最後の項は、以下のように定義する。

$$\text{COV}[r(k+p)|Q=0] = M(k+p)\Phi(k+p|k)P(k|k)\Phi^T(k+p|k)M^T(k+p) + R(k+p) \quad (2.58)$$

式(2.57)の左辺について、状態ノイズが各々独立である場合、すなわち、状態ノイズ共分散行列 Q が

対角行列である場合、その対角項ベクトルを $q(k, N)$ とし、また、

$$\{A(k+p)\}_m = \sum_{i=1}^k \{M(k+p)\Phi(k+p|k+i)G\}_m^2 \quad (2.59)$$

を満たす行列 $A(k+p)$ を定義する。

(2.57)式の右辺についても Q と同様に予測誤差が各々が独立であるとして、その対角項を $\varepsilon(k+p)$ とする。

これにより、区間 $k \leq k+p \leq k+N$ について、

$$A^T = [A(k+1), A(k+2), \dots, A(k+N)] \quad (2.60)$$

$$\varepsilon^T = [\varepsilon(k+1), \varepsilon(k+2), \dots, \varepsilon(k+N)] \quad (2.61)$$

とから、 $q(k, N)$ は以下の方程式を満たすことになる。

$$Aq(k, N) = \varepsilon \quad (2.62)$$

ただし、分散値は正の値をとるので、 $q(k, N)$ の各要素が負となる場合、その要素は0とする。

これにより、区間 $k \leq k+p \leq k+N$ において、状態ノイズ共分散行列は更新され、拡張カルマンフィルタ・アルゴリズムに適用される。

2.3 本研究において提案する新たな同定手法

本章冒頭においても述べたように、本研究では多自由度かつ複雑な復元力特性を有する建築構造物系に対しても、その応答記録より対象建物の真の動特性を推定する手法を提案することを目指している。これまで、2.2節においては、既存の同定手法を3種類に大別し、かつ具体的な手法の説明を行った。これらの手法はいずれも原則的には多自由度系の同定に適用可能なものであるが、周波数領域の同定手法とインパルス応答の同定手法は、いずれも対象システムの線形性を前提として成立しており、非線形システムの同定に適用することは困難であると考えられる。これに対し、状態空間表示に基づく時間領域の手法である拡張カルマンフィルタ系の手法は、いずれも非線形の状態方程式と観測方程式による定式化に基づく手法であり、線形システム同定への適用時と同様のアルゴリズムで非線形システムの同定が可能である。

ただし、2.2.6に示した通常型の拡張カルマンフィルタ法は、推定パラメータ数が多い場合には特に長い観測データが必要であることが知られている。EK-WGI法は拡張カルマンフィルタのアルゴリズムをグローバルに繰り返すことでこの必要データ長の問題を解決しているが、この場合においても各予測状態量の平均値と誤差共分散行列初期値の設定に依存した推定状態量の発散、あるいは間違っただけの値への収束などの現象は解決できない。適応拡張カルマンフィルタ法はこのような推定パラメータ発散の初期値依存性を改善するために、状態ノイズ共分散行列を逐次算定することで状態量予測誤差共分散行列の発散を抑制し、かつ推定値の収束性を高めた手法である。ただしこの手法では、同定計算中に推定パラメータが収束域に達した際にばらつきが生じることが報告されている。C. G. Koh や L. M. Seeら¹⁶⁾は、この問題点を推定時間

以前の数個のデータを用いてスムージングすることで解決している。しかし、収束以前の推定値をも平均化するため、初期値からの動的な変動をとらえることができない。

そこで本節では、推定パラメータが真値近傍であれば時間的に長い観測量を必要としないEK-WGI法の長所と、比較的初期条件が厳しくなく収束性が高い適応拡張カルマンフィルタ法の両手法を組み合わせ、さらに収束性と収束域での安定性を高めるべく、2. 3. 1 にて改良アルゴリズム（適応フィルタ及び適宜重み付け手法：AF-AWP）を提案する。さらに、最後に、建築・土木分野ではこれまで殆ど用いられていないが、拡張カルマンフィルタ法に比較して少ないパラメータ初期値数で同定が可能である状態空間表示に基づく予測誤差法(PEM-SS)の概略を2. 3. 2 に示す。

2. 3. 1 適応フィルタ及び適宜重み付け手法 (AF-AWP)

ここで提案する適応フィルタ及び適宜重み付け手法 (AF-AWP)は、適応拡張カルマンフィルタ法の特徴である、推定パラメータへの収束性の速さと、推定パラメータの初期値が真値近傍に設定されていない場合についても収束しやすいという利点を用いてEK-WGI法の収束性を大幅に向上させている。さらに、適応拡張カルマンフィルタ手法の収束安定域に入った時の推定値のばらつきという欠点を、EK-WGI法に見られる推定パラメータの安定性により補うことを目的とした手法である^{17)~19)}。

図2. 3のフローチャートに示されるように、本手法のアルゴリズムは、主に2つの段階に分かれている。第1段階の適応フィルタ部分では、 k ステップ目からウィンドウのデータ長 N_w までを用い、式(2.62)により $q(k, N)$ を計算し、システム雑音共分散行列を更新する。次に、システム雑音共分散行列の適応範囲 M_w 分だけ拡張カルマンフィルタを実行し、推定パラメータを得る。以下この操作を繰り返し、安定域まで収束させる。ここで、推定値が安定域まで収束するのに、 S_n のデータ長必要であったとする。

第2段階のスムージング部分では、まず、誤差

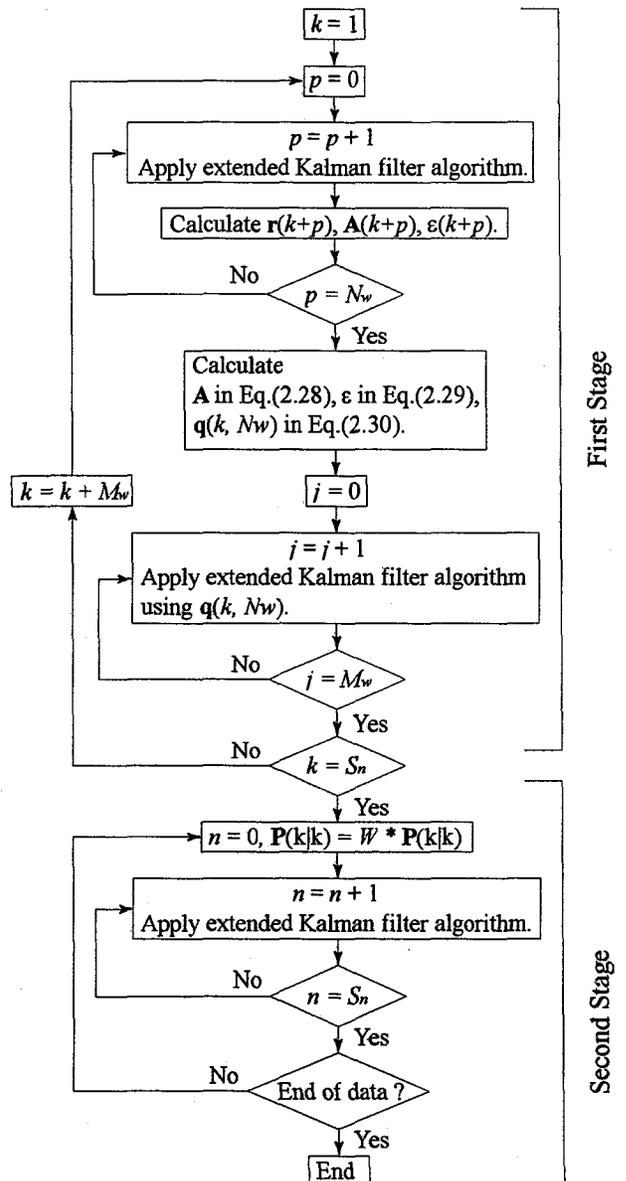


図2. 3 AF-AWP法のフローチャート

共分散行列に重み付けをし、第1段階で求められた推定パラメータの値と、誤差共分散行列を用い、さらに誤差共分散行列にある重み付けを行い、データの続きから、拡張カルマンフィルタを実行する。この時の重みは、各ステップで推定される状態量の変動を見て、発散傾向にあるならば大きく設定し、収束傾向にあれば小さく設定する。つぎに残りデータを、EK-WGI法のように1データ長の終了後に誤差共分散行列に重み付けするのではなく、残りデータを第1段階で要したデータ長 S_n を一区切りに分割して、区間最後の誤差共分散行列に重み付けを行い、次区間の誤差共分散行列の初期値として、拡張カルマンフィルタを実行する。さらに、推定パラメータの初期値と、区間最後の推定パラメータが一致するまで繰り返し計算を行う。この一連の操作により、区間始めでは誤差共分散行列の重み付けの影響で、推定パラメータが一時的に変動するものの、区間中頃から適応拡張カルマンフィルタでは得られなかった、収束域での安定性を得ることができる。

2. 3. 2. 状態空間表示に基づく予測誤差法(PEM-SS)

ある同定実験をおこなった結果、同定対象の有限個の入出力データ

$$\{u_k, y_k; k = 1, 2, \dots, N\} \quad (2.63)$$

が観測されたとする。ただし、多入力多出力の場合においては(2.63)式中の入力量 u 及び観測量 y はすべてベクトルとなる。なお、 N はデータ数とする。このとき、予測誤差 (prediction error) を

$$\varepsilon(k, \theta) = y(k) - \hat{y}(k|\theta) \quad (2.64)$$

と定義する。ここに $\hat{y}(k|\theta)$ は k ステップにおける観測量の推定値であり、 $\hat{y}(k|\theta)$ は同定モデルの選択に依存する。

次に、ある同定モデルを仮定したとき、観測された入出力データをある意味で最もよく表現できる未知パラメータベクトル θ を決定するために、予測誤差の大きさを測る関数

$$l(k, \theta, \varepsilon(k, \theta)) \quad (2.65)$$

を導入し、同定のための評価規範として、たとえば

$$J(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N l(k, \theta, \varepsilon(k, \theta)) \quad (2.66)$$

を定義する。このとき、 k ステップにおけるパラメータ推定値 $\hat{\theta}(k)$ は、 $J(k)$ を最小にすることにより求められる。このように、予測誤差から構成される評価規範を最小にするように推定値を計算する方法は総称して予測誤差法(Prediction Error Method: PEM)^{20), 21)}と呼ばれている。

予測誤差法を状態空間モデルによる線形多自由度せん断型の構造物動特性の同定に適用するためには、たとえば構造物各層の剛性及び粘性減衰係数をパラメータとして、これに適当な初期値を用いて連続型の状態空間モデルである(2.67)式を決める。

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.67}$$

次に、(2.67)式の連続型状態空間モデルを離散化し、かつ状態ノイズと観測ノイズを考慮して(2.68)式に示すイノベーション表現の離散型状態空間モデル^{22),23)}を得る。

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + Bu(k) + \Gamma v(k) \\ y(k) &= C\hat{x}(k) + v(k)\end{aligned}\tag{2.68}$$

ここに v は平均値0で共分散行列が与えられたホワイトノイズベクトルと仮定する。また、 K をカルマンゲインすると $\Gamma = KA$ である。(2.68)式の2つの式より v を消去すると、 y の予測値 \hat{y} は(2.69)式となる。

$$\begin{aligned}\hat{y}(k+1) &= C\hat{x}(k+1) \\ &= C\{(A - \Gamma C)\hat{x}(k) + \Gamma y(k) + Bu(k)\}\end{aligned}\tag{2.69}$$

ここで、(2.64)式の予測誤差を考えて

$$\varepsilon_k = y(k) - \hat{y}(k)\tag{2.70}$$

であるから、観測データ数 N に対応する予測誤差行列 (N 行 \times $2n$ 列) は(2.71)式となる。

本論文では同定のための評価規範として(2.72)式を用いた。これは予測誤差の平均値が0と仮定した場合の予測誤差共分散行列の行列式の値である。

$$E_{N \times 2n} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix}\tag{2.71}$$

$$\begin{aligned}J &= \det\left(\frac{1}{N}(E^T \times E)\right) \\ &= \det\begin{bmatrix} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N E_{k,1}^2 & \cdots & \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N E_{k,1} E_{k,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N E_{k,N} E_{k,1} & \cdots & \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N E_{k,N}^2 \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{2.72}$$

なお、本手法における(2.72)式の評価規範を最小にする問題は非線形最小化問題に帰着し、最適値の選定にはGauss-Newton法²²⁾による収束計算を用いた。(2.73)式に示す推定パラメータベクトルを θ とした場合、(2.74)式のGauss-Newton法による次ステップへの修正ベクトル $\Delta\theta$ は、推定値 \hat{y} の θ によるヤコビアン ϕ を(2.75)式にて求め、この θ 、 ϕ 、及び最小2乗法の重みマトリクス W により(2.76)式を解くことで求められる。

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_d]\tag{2.73}$$

$$\Delta\theta_k = \theta_{k+1} - \theta_k\tag{2.74}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{y}_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \hat{y}_1}{\partial \theta_d} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \hat{y}_N}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \hat{y}_N}{\partial \theta_d} \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

$$(\Phi^T W \Phi) \Delta \theta_k = \Phi^T W (y - \hat{y}) \quad (2.76)$$

ただし、Gauss-Newton法は推定パラメータの初期値 θ_0 が真値の近傍でない場合や、 \hat{y} の非線形性が大きい場合に安定性が悪く、かつ評価基準 J が反復の各ステップで減少することが保証されていないため、ここでは修正ベクトル $\Delta \theta$ に縮小因子 α を導入し、

$$\alpha \Delta \theta_k = \theta_{k+1} - \theta_k \quad (2.77)$$

とおき、

$$J(\theta_{k+1}) \leq J(\theta_k) \quad (2.78)$$

が成立するまで、 $\alpha = 2^{-\ell}$ ($\ell = 0, 1, \dots$) として反復計算を行い次ステップの推定値を算定している。

参考文献

- 1) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，1997年10月，p. 83
- 2) 例えば，得丸英勝，添田 喬，中溝高好，秋月影雄：計数・測定 ランダムデータ処理の理論と応用，培風館，1992年3月，pp. 74-87
- 3) 例えば，柴田明徳：最新 耐震構造解析，森北出版，1981，pp. 20-22
- 4) 例えば，田治見 宏：建築振動学，コロナ社，1965年5月，pp. 53-57.
- 5) 1)と同じ，pp. 177-180.
- 6) 田村幸雄，佐々木 淳他：RD法による建造物のランダム振動時の減衰評価，日本建築学会構造系論文報告集，第454号，1993年12月，pp. 29-38
- 7) 森田高市，神田 順：常時微動による減衰定数評価手法に関する考察，構造工学論文集，Vol. 42B，1996年3月，pp. 553-560
- 8) 古川忠稔，松下剛史，井上 豊：RD法による建築建造物の減衰評価に関する基礎的研究，日本建築学会近畿支部研究報告集，第37号・構造系，1997年7月，pp. 405-408
- 9) 片山 徹：応用カルマンフィルタ，朝倉書店，1983年4月
- 10) 星谷 勝，斉藤悦郎：建設技術者のためのデータ解析と応用—カルマンフィルタを中心として—，鹿島出版会，1991年7月
- 11) 星谷 勝，斉藤悦郎：拡張カルマンフィルタを用いた同定問題の各種振動系への適用，土木学会論文報告集 第339号，1983年11月，pp. 59-67
- 12) M. Hosyiy and E. Saito: Structural Identification by Extended Kalman Filter, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 110, No. 12, 1983. 8, pp. 1757-1770
- 13) 星谷 勝，斉藤悦郎：線形多自由度系の動特性の推定，土木学会論文報告集 第344号，1984年4月，pp. 289-298
- 14) 星谷 勝，斉藤悦郎：常時微動観測記録を用いたEK-WGI法による建物の動特性の推定，土木学会論文報告集 第350号，1984年10月，pp. 263-270
- 15) A. H. Jazwinski : Adaptive Filtering, Automatica Vol. 5, Pergamon Press, 1969, pp. 475-485
- 16) C. G. Koh and L. M. See : Identification and Uncertainty Estimation of Structural Parameters, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 120, No. 6, 1994. 6, pp. 1219-1236
- 17) 古川忠稔，犬丸直明，井上 豊：適応フィルタ及び適宜重み付け手法(AF-AWP)を用いた建造物のシステム同定手法の提案とその応用，構造工学論文集 Vol. 44B，日本建築学会，1998年3月，pp. 385-390
- 18) T. Furukawa et. al. : Identification of Structural Parameters Using Adaptive Filtering and Appropriately Weighted Procedure, Proc. Of the 2nd World Conf. On Structural Control, Vol. 3, 1998. 7, pp. 2141-2148
- 19) 犬丸直明，古川忠稔，井上豊：適応フィルタ及び適宜重み付け手法を用いた建造物のシステム同定，第10回日本地震工学シンポジウム論文集、Vol. 2, 1998年11月，pp. 2461-2466
- 20) L. Ljung : System Identification Theory for the User, Prentice-Hall, 1987
- 21) 足立修一：ユーザのためのシステム同定理論，コロナ社，1993年7月
- 22) 片山 徹：システム同定入門，朝倉書店，1994年5月
- 23) 中山徹，小柳義夫：最小2乗法による実験データ解析，東京大学出版会，1982年5月

第3章 線形1自由度系構造物動特性の同定 (データにノイズを含まない場合)

3. 1 緒言

本章では、第2章で述べた各種同定手法を用いて線形1自由度構造物モデルによる動特性パラメータ推定の数値計算を実施し各手法の同定精度の検証を行う。本章では各手法の基本的な性質を調べることを主な目的とし、同定計算に用いるデータへのノイズ混入については考慮しないものとする。また、構造物への外乱入力としてはホワイトノイズと地震波入力 (El Centro NS)の2種類を用いるが、さらに詳細な検討を行うことを目的として、適宜適当な入力条件による検討をつけ加え、各同定手法の基本的な特性を明らかにする。

3. 2 データ長 50 秒程度の場合の各手法同定精度の検討

3. 2. 1 検討対象モデルおよび数値計算手法

同定対象構造物としては、図3. 1に示す線形1自由度せん断型モデルを用いる。推定パラメータはこの構造物の固有周期および減衰定数 (あるいは剛性および粘性減衰係数) とし、質量を既知として第2章に示した各手法により、数値計算にて同定精度の検討を行った。

同定対象構造物は質量を単位質量、非減衰固有周期1秒、減衰定数 $\gamma=0.02$ となる様、剛性と粘性減衰

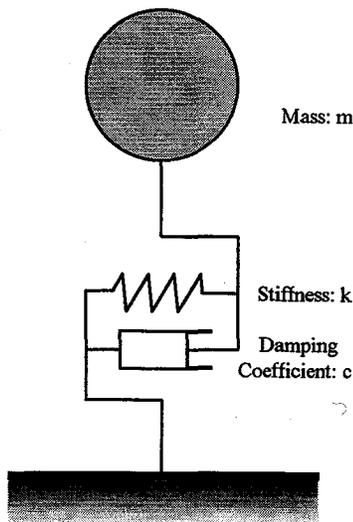


図3. 1 検討対象モデル

表3. 1 検討対象モデル特性値

Model Properties	Value
Mass [kg]	1
Stiffness [kgf/cm]	39.478
Damping Coefficient [kgf sec/cm]	0.251
Damping Natural Frequency [Hz]	0.992
Damping Factor	0.02

表3. 2 入力波検討ケース

Input Acc.	Number of Data	Data Sampling
White Noise	2686	50 [Hz]
El Centro NS Comp.	2500	50 [Hz]

係数を設定した。構造物動特性の設定値を表3.1に示す。構造物への入力は地動入力とし、表3.2に示す入力波を用いる。表3.2に示すホワイトノイズ入力波はサンプリング周波数は50Hz、パワースペクトルが各周波数帯域で概ね一定となるように作成した疑似ホワイトノイズである。また、この入力の最大値は±100galとなるよう振幅調整をした。一方、地震波入力はEl Centro NS(サンプリング周波数50Hz、最大加速度361gal)を振幅調整せずに用いた。モデル応答の時刻歴波形データは、表3.1のモデル特性と、表3.2の入力加速度より、線形加速度法により算定したものをを用いる。その他、各推定法に固有の条件を下記に列挙する。

(1) カーブフィット法

入力加速度と応答絶対加速度波形のそれぞれについてFFTを実施し、振幅スペクトルを算出した。その際、リンク効果低減のため波形データ数以上の後続のゼロを時刻歴データに付加し、データ数が2の階乗となる様調整した。次に算定された両振幅スペクトルより振幅スペクトル比を算定し、このスペクトル比と加速度応答倍率(2.7式)より最小2乗近似により非減衰固有周波数と減衰定数を推定する。その際、最小2乗近似は、全周波数帯ではなく、算定されたスペクトル比のピーク(ほぼ固有周期近傍と考えられる)の周波数を振幅スペクトル比より読みとり、この周波数の半分と倍の間の区間とした。また、振幅スペクトルについては特に平滑化は実施していない。

(2) ハーフパワー法

カーブフィット法と同手順にて加速度振幅スペクトル比を算出し、振幅ピークの点とその両側の振幅がピークの $1/\sqrt{2}$ 倍と成る角振動数をこのスペクトル比より読みとり、これら3点の角振動数より減衰定数を推定した。なお、この手法は固有周期の算定手法ではないが、便宜上振幅スペクトル比のピークにおける周波数を減衰固有周波数とした。

(3) 自己相関関数法

応答の相対変位波形より自己相関関数を求めてコレログラム(correlogram)を描き、コレログラムに対して最小2乗近似を適用して減衰定数を算出した。また、本手法も固有周期の算定手法ではないが、コレログラムのゼロクロス間隔の平均を取り、これを減衰固有周期とした。

なお、通常対数減衰率のカーブフィッティングを実施する際にはしばしば問題となるが、インパルス波形のどの範囲のピーク値を採用するかにより減衰定数算定結果が大きく異なることがある。そこで、本検討では少なくとも4種類以上の異なるピーク区間を用いて減衰定数の算定を行い、最も精度の良かった推定値を減衰定数とした。

(4) RD法

RD法を適用した時刻歴波形は応答の相対変位波形とした。またRD法のデータの切り出し区間は10秒

とし、データの重なりを認める形で自由振動波形成分の抽出を実施した。RD法により推定されたインパルス波形からの減衰定数の推定および固有周期の推定については自己相関関数法と同じ手法を適用した。

(5) EK-WGI法

入力量として入力加速度、観測量としては構造物の相対速度を用いた。また、推定パラメータ平均値の初期値は真値の5倍から0.02倍の値を用いてパラメトリックな同定計算を行い、これらの検討ケースのうちで最も同定精度の良くない値を推定値として採用した。なお状態誤差共分散行列の初期値 P_0 は

$$P_0 = \text{diag.}(0.0, 0.0, 10^3, 10^2) \quad (2.79)$$

を用いた。また、EK-WGIにおけるグローバルな繰り返し回数は最大5回とし、グローバルな繰り返し時の状態誤差共分散行列の重みは $W=1000$ を用いた。

(6) 適応拡張カルマンフィルタ法（以下 Adaptive-EKF とする）

入力量および観測量、推定パラメータ平均値と状態誤差共分散行列に関する条件はEKFと同一とした。状態誤差共分散行列を算定するウィンドウは $N_w=10$ 、カルマンフィルタを実行するウィンドウ長は $M_w=3$ とした。

(7) 適応フィルタ及び適宜重み付け手法（以下 AF-AWP とする）

入力量および観測量、推定パラメータ平均値と状態誤差共分散行列に関する条件はEKFと同一とした。また図2. 3に示す第 I 段階のデータ長を $S_n=300$ 個分とした。その他の条件は Adaptive-EKF と同一とした。また第1段階から第2段階への以降時の状態誤差共分散行列の重みはEK-WGI法と同一の $W=1000$ を用いた。

(8) 状態空間表示に基づく予測誤差法（以下 PEM-SS とする）

入力量と観測量に関する条件はEK-WGI法と同一とした。また推定パラメータの初期値はEK-WGI法における推定パラメータの初期値の平均値と同等となるよう、真値の5倍から0.02倍の値を用いてパラメトリックな同定計算を行い、これらの検討ケースのうちで最も同定精度の良くない値を推定値として採用した。

3. 2. 2 同定計算結果および考察

本節で用いている各種同定手法のうち、周波数領域の同定手法であるカーブフィット法およびハーフパワー法、またインパルス応答の同定手法である自己相関関数法、およびRD法の推定パラメータは固有周期（周波数あるいは角振動数）と減衰定数である。これに対し、状態空間表示に基づく時間領域の各手法はいずれも質量、剛性、及び粘性減衰係数（いわゆるMCK型）により規定される運動方程式より誘導された状態・観測方程式に基づく定式化を行っている。そのため、これらの手法における推定パラメータは剛性と粘性減衰係数となる。そこで、これら手法について同一の指標で精度の比較検討を行うため、状態空間

表3. 3 同定計算結果

Input: White Noise						
Method	Damping Natural Period [Sec]			Damping Factor		
	Exact	Estimated	Rel. Err.[%]	Exact	Estimated	Rel. Err.[%]
Curve Fit	1.00	1.00	0.20	0.020	0.020	0.50
Half Power	1.00	1.03	3.41	0.020	0.010	48.50
Autocorrelation	1.00	1.01	0.81	0.020	0.018	10.50
Random Decrement	1.00	1.01	0.50	0.020	0.007	65.00
EK-WGI	1.00	1.00	0.02	0.020	0.020	0.15
Adaptive-EKF	1.00	1.00	0.02	0.020	0.020	0.15
AF-AWP	1.00	1.00	0.02	0.020	0.020	0.15
PEM-SS	1.00	1.00	0.02	0.020	0.020	0.15

Input: El Centro						
Method	Damping Natural Period [Sec]			Damping Factor		
	Exact	Estimated	Rel. Err.[%]	Exact	Estimated	Rel. Err.[%]
Curve Fit	1.00	1.00	0.20	0.020	0.020	0.50
Half Power	1.00	1.03	3.41	0.020	0.010	48.50
Autocorrelation	1.00	1.01	0.81	0.020	0.022	9.50
Random Decrement	1.00	1.03	3.41	0.020	0.021	5.00
EK-WGI	1.00	1.00	0.02	0.020	0.020	0.15
Adaptive-EKF	1.00	1.00	0.02	0.020	0.020	0.15
AF-AWP	1.00	1.00	0.02	0.020	0.020	0.15
PEM-SS	1.00	1.00	0.02	0.020	0.020	0.15

表示に基づく時間領域の各種同定手法については、推定された剛性値および粘性減衰係数値より減衰固有周期と減衰定数を算定し、精度の比較は減衰固有周期と減衰定数で行った。表3. 3に同定計算結果の一覧を示す。

表3. 3より、減衰固有周期の推定に関しては、どの手法を用いても推定精度の相対誤差は高々数%であり、ハーフパワー法とRD法を除く他のすべての手法で相対誤差精度1%以内に収まっている。ここにもっとも推定精度が低いハーフパワー法とRD法の減衰固有周期算定結果はいずれも1.03秒であり、真値との絶対誤差は0.03秒となる。ただし、本検討の数値計算はすべてデータサンプリング周波数50Hzで実施されており、ナイキスト周波数に対応する周期 $T=0.04$ 秒以内の精度は保証出来ない。表3. 3における減衰固有周期の算定結果の絶対誤差はいずれもナイキスト周波数に対応する周期以内であり、減衰固有周期の推定はいずれの手法によっても、かなり精度良く推定が可能であると結論づけることが出来る。

これに対し、減衰定数の算定結果については、各手法間の推定誤差のばらつきが大きい。ここでは、ホワイトノイズ入力、エルセントロ地震波入力時のいずれのケースにおいてもハーフパワー法による減衰定数算定結果の精度が相対誤差レベルで概ね50%程度となること、RD法については、エルセントロ地震波入力時の減衰定数の推定結果の相対誤差が約5%程度であるのに、ホワイトノイズ入力時の推定精度が相対誤差レベルで約65%と全検討ケース中最低であることがわかる。

その他の検討ケースでは、カーブフィット法による減衰定数の同定結果はホワイトノイズ、地震波入力時のいずれのケースでも相対誤1%以内の精度で推定されていること、自己相関関数法による減衰定数の推定は相対誤差10%程度以内であったことがわかる。さらに状態空間表示による時間領域の4手法（EK-WGI、

Adaptive-EKF, AF-AWP, PEM-SS)については、いずれも相対誤差0.2%以内の精度で推定が行われており、ほぼ真値を推定したと考えられる。以下各手法について詳細に検討を行う。

(1) 周波数領域の手法 (カーブフィット法、ハーフパワー法)

図3. 2および図3. 3にカーブフィット法とハーフパワー法の2手法を適用する際用いた入出力のフーリエスペクトルとスペクトル比を示すとともに、両手法の推定結果を示す。ここで、図3. 2(a)および図3. 3(a)はホワイトノイズ、エルセントロ地震波入力時における入力絶対加速度および応答絶対加速度のフーリエ振幅スペクトルであり、同図(b)はこれらフーリエ振幅スペクトルより算定されたフーリエスペクトル比と、これよりカーブフィット法により得られた絶対加速度応答倍率曲線を示す。さらに同図(c)は同じく算定されたフーリエスペクトル比とその最大振幅および $1/\sqrt{2}$ 振幅にラインをプロットしている、さらに、加速度応答倍率、振幅最大値、および最大振幅の $1/\sqrt{2}$ 振幅値の正解値のプロットも記入している。

図3. 2(a)と図3. 3(a)を比較すると、エルセントロ地震波入力時のフーリエスペクトル比に比較してホワイトノイズ入力時のフーリエスペクトル比はばらつきがかなり大きいことがわかる。しかし、表3. 2(b)および図

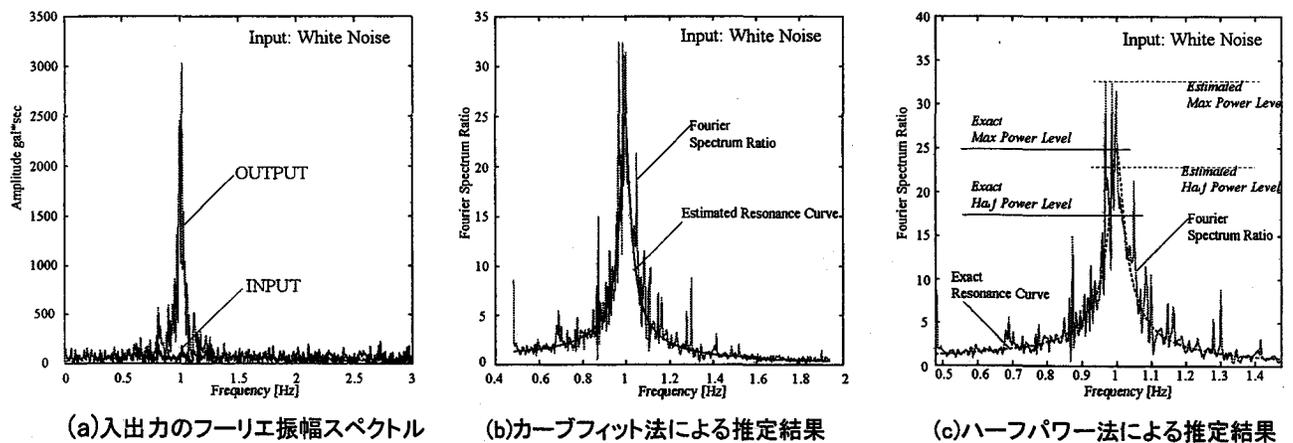


図3. 2 周波数領域の同定手法による推定結果(ホワイトノイズ入力時)

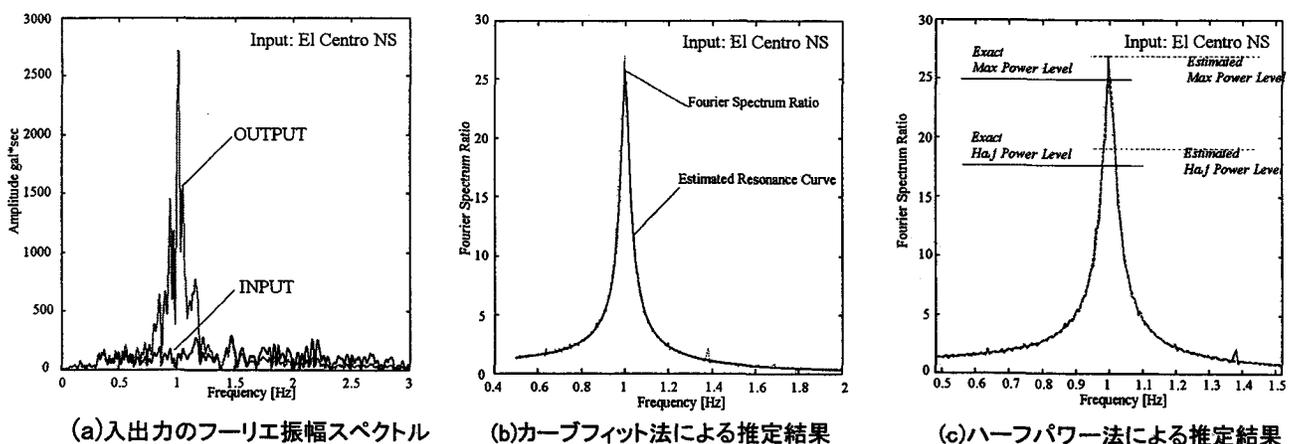


図3. 3 周波数領域の同定手法による推定結果(エルセントロ地震波入力時)

3. 3(b)に示すように、カーブフィット法による同定では、このばらつきにも関わらず精度のよい応答倍率曲線の推定が行われていることがわかる。

ハーフパワー法による推定時には、表3. 3の減衰固有周期の算定は概ね正しいにも関わらず減衰定数の推定結果は相対誤差50%程度となっている。ハーフパワー法による減衰定数の算定には、式(2.16)に示すように最大振幅時の角振動数 ω_0 とこの $1/\sqrt{2}$ 振幅値時の角振動数の差 $\Delta\omega$ のみで決定される。本検討では少なくとも ω_0 は概ね精度よく推定されているので、推定精度低下の要因は、 $1/\sqrt{2}$ 振幅値時の角振動数の推定精度がよくないことに起因する。ここで図3. 2(a)および図3. 3(b)に示すようにホワイトノイズ入力時、エルセントロ地震波入力時のいずれにおいてもフーリエスペクトル比による最大振幅値の読みとり値は真の最大振幅値よりも大きめに推定されており、これがハーフパワー法の推定精度を低下させた原因であると考えられる。また、とくにスペクトル比にばらつきが大きいホワイトノイズ入力時には、スペクトル比より推定された振幅最大値、および最大振幅の $1/\sqrt{2}$ 振幅値は正解値とはかなりかけ離れており、表3. 3に示す推定された減衰定数は偶然真値に近い値となったものであると考えられる。以上より、入出力間のフーリエスペクトル比がほぼ理想的な形で求められる場合以外は、ハーフパワー法の適用は他の手法に比較して減衰定数の推定精度の問題があると結論づけられる。これは、本検討におけるカーブフィット法は共振周波数近傍のフーリエスペクトル比の多数の値を用いるのに比較して、カーブフィット法は振幅ピークとその $1/\sqrt{2}$ 倍の振幅周波数のみの3点のデータから減衰定数を推定するためであると考えられる。現実にはフーリエスペクトル、あるいはその比については通常何らかの平滑化を施す場合が多く、これによりフーリエスペクトル比のばらつきもある程度解消されるため、本検討に比較して推定精度は向上することが多いと推測されるが、その際も平滑化の度合いによってはピーク振幅が真値に比べてかなり大きく低下することもあり注意が必要であると思われる。

以上より周波数領域の2手法については出来ればハーフパワー法を適用するよりカーブフィット法を適用する法が問題が少ないと考えられる。また、カーブフィット法を適用して減衰定数を算定する場合には、少なくとも推定されたフーリエスペクトル比が予想される形とどの程度異なっているかについて事前検討をするべきであると考えられる。

(2) インパルス応答推定手法（自己相関関数法、RD法）

これらの手法はいずれも入力波が定常ランダム過程であるとの前提条件が必要であり、さらに自己相関関数法の場合は入力波がホワイトノイズであるとの条件が必要であり、地震波であるエルセントロ波を用いて動特性の同定を行うことは問題を有している。ただし本検討では他の手法との比較のために、あえて同定計算を実施している。

図3. 4(a)～(d)にホワイトノイズ入力時の応答より推定された同一コログラムに対し、ピーク選択ポイントを変えて最小2乗法近似によりそれぞれ減衰定数を算定した結果を示す。図3. 4に示すように、本検討で自己相関関数法により推定されたインパルス応答は振幅ピーク値が正しく対数減衰率に従う形状とはなっ

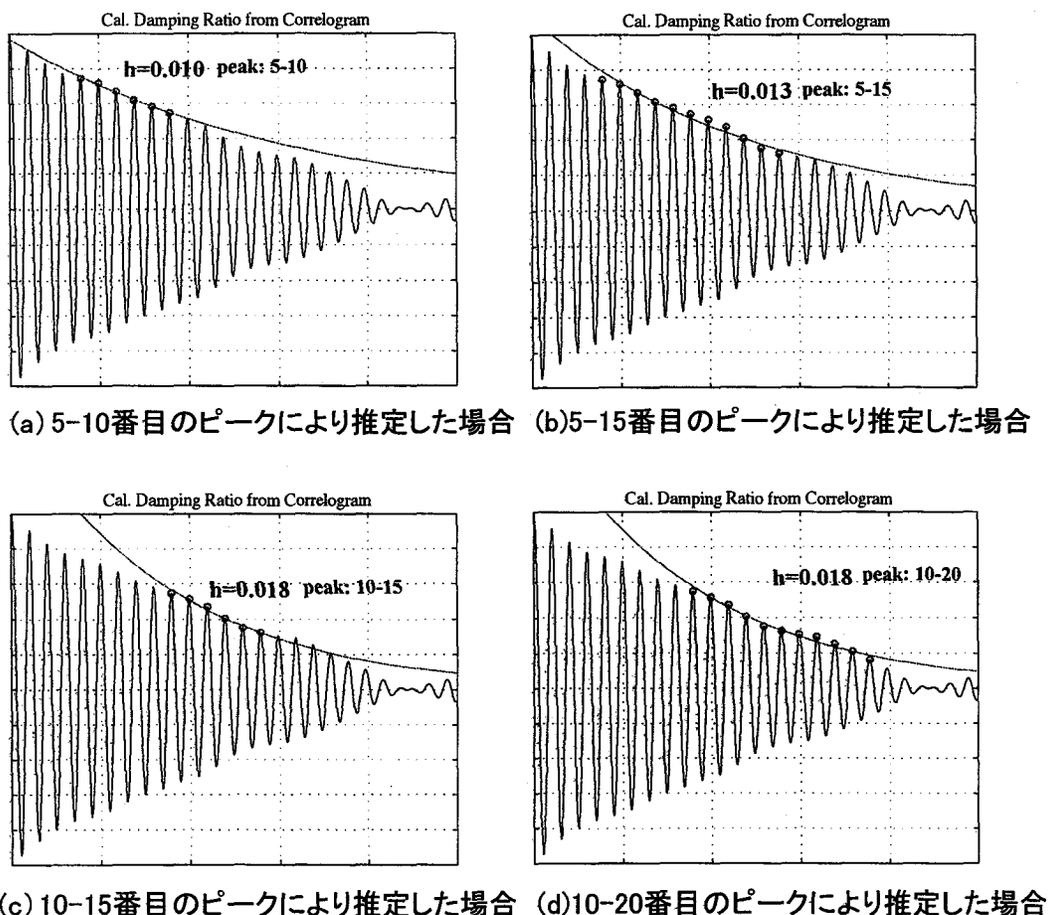
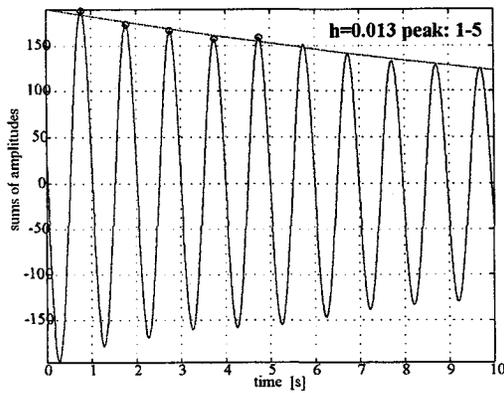


図3. 4 自己相関関数法による減衰定数推定結果 (ホワイトノイズ入力時)

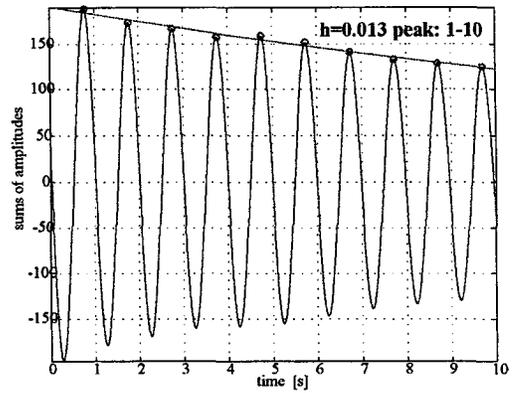
いないことがわかる。その結果、振幅ピークのどのポイントを選択するかによって、カーブフィットにより推定された減衰定数は大きく異なるものとなっている。

図3. 5にホワイトノイズ入力時のRD法による減衰定数の推定結果を、また、図3. 6にエルセントロ地震波入力時のRD法による減衰定数推定結果を、同様にそれぞれピーク選択ポイントを変えた場合について示す。図3. 4～3. 6より、RD法により推定されたインパルス応答は、自己相関関数で推定されたインパルス応答に比較して、やや安定した形状を示していると考えられる。これは、このインパルス応答より推定される減衰定数が、どのピークポイントを選択しても比較的一定となっていることから理解できる。ただし、ホワイトノイズ入力時の減衰定数算定結果は、いずれも真値より小さめとなり、エルセントロ地震波入力時の減衰定数はいずれも真値より大きめとなっている。

著者らは既往の研究¹⁾において対象モデルの固有周期が1秒の場合、推定精度10%以内の精度で減衰定数を推定するためには、自己相関関数法の場合はデータ長500秒程度、RD法の場合は300秒程度が必要であるとの結論を得ている。また、同研究においては、数種の地震波入力を用いた場合のRD法による減衰定数の推定を行ったところ、入力地震波により推定される減衰定数は変動があるものの、オーダーレ

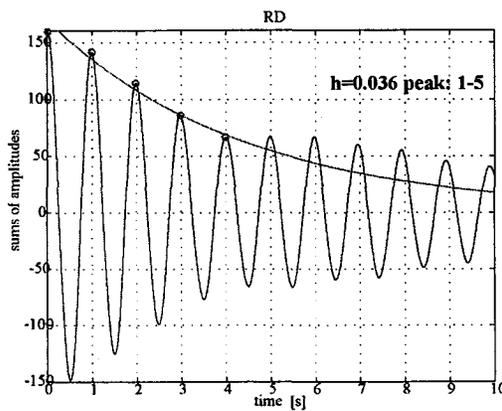


(a) 1-5番目のピークにより推定した場合

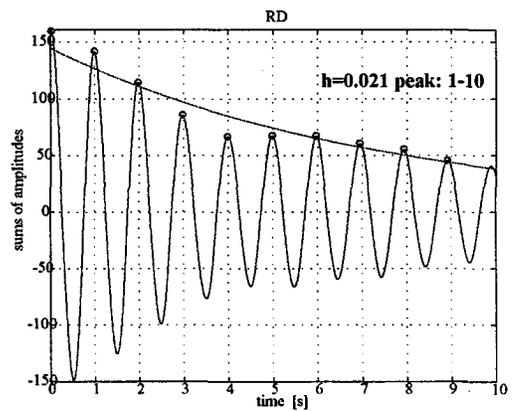


(b) 1-10番目のピークにより推定した場合

図3. 5 RD法による減衰定数推定結果 (ホワイトノイズ入力時)



(a) 1-5番目のピークにより推定した場合



(b) 1-10番目のピークにより推定した場合

図3. 6 RD法による減衰定数推定結果 (ホワイトノイズ入力時)

表3. 4 インパルス応答の推定手法による減衰定数算定結果 (ホワイトノイズ入力1000秒時)

Input: White Noise Sampling 50Hz, Number of data: 50,000 (1000 sec)

Method	Damping Natural Period [Sec]			Damping Factor		
	Exact	Estimated	Rel. Err. [%]	Exact	Estimated	Rel. Err. [%]
Autocorrelation	1.00	1.00	0.200	0.020	0.022	10.000
Random Decrement	1.00	1.00	0.00	0.020	0.020	0.00

ベルでは推定が可能であったとの結論も得られている。これより、本検討における自己相関関数法、あるいはRD法による減衰定数の推定結果は、手法の問題と考えるよりも、入力データ長がやや少ないためであると推測される。

この仮説を検証するため、自己相関関数法、RD法については、これまでの検討ケースと同じサンプリング周期と振幅を有し、データ長1000秒のホワイトノイズ入力による応答計算結果を用いた減衰定数の推定を別途実施した。表3. 4にこの場合の推定結果を示す。表3. 4より入力データ長が1000秒の場合には自

表3. 5 状態空間表示による時間領域の各手法の推定結果(ホワイトノイズ50秒)

Input: White Noise

Method	Stiffness [kgf/cm]			Damping Coefficient [kgf sec/cm]		
	Exact	Estimated	Rel. Err.[%]	Exact	Estimated	Rel. Err.[%]
EK-WGI	39.478	39.479	0.003	0.251	0.251	0.000
Adaptive-EKF	39.478	39.479	0.003	0.251	0.251	0.000
AF-AWP	39.478	39.479	0.003	0.251	0.251	0.000
PEM-SS	39.478	39.478	0.000	0.251	0.251	0.000

表3. 6 状態空間表示による時間領域の各手法の推定結果(エルセントロNS)

Input: El Centro

Method	Stiffness [kgf/cm]			Damping Factor		
	Exact	Estimated	Rel. Err.[%]	Exact	Estimated	Rel. Err.[%]
EK-WGI	39.478	39.479	0.003	0.251	0.251	0.000
Adaptive-EKF	39.478	39.479	0.003	0.251	0.251	0.000
AF-AWP	39.478	39.479	0.003	0.251	0.251	0.000
PEM-SS	39.478	39.478	0.000	0.251	0.251	0.000

自己相関関数法、RD法とも大幅な推定精度の向上が見られる。特にRD法については推定値がほぼ真値と一致している。

以上の検討より、インパルス応答を推定する自己相関関数法、RD法については入出力データのデータ長が他の手法に比較して長時間必要であるが、十分な長さのデータ長があれば、かなりの推定精度で同定可能な手法である可能性があるかと結論づけることが出来る。

最後に時間領域の各手法の推定結果について述べる。時間領域の4手法について、推定された剛性値および粘性減衰係数を表3. 5および表3. 6に示す。同表より、いずれの手法においても剛性値・減衰係数とも十分精度の良い同定結果が得られていることがわかる。これらの手法の推定結果は概ね真値と一致しており、1自由度系の応答に対しノイズの影響を考慮しなくても良い場合であれば、それらの推定結果はほぼ正しいと考えることが出来る。また、これらの手法は入力値が地震波の場合においてもホワイトノイズであった場合でも推定精度はそれほど変わらない。ただし、実際には建物の固有周期近傍帯域の振動数を多く含む入力波でなければ、共振振動成分が少なくなり振幅スペクトル比の計算精度が悪化することが考えられるが、それ以外の場合については概ねどの手法を用いても同定が可能であると結論づけられる。

3. 3 データ長6秒の場合の各手法同定計算精度の検討

3. 3. 1 検討手法および検討条件

3. 2 において十分な推定精度を有すると考えられる周波数領域の2手法(カーブフィット法、ハーフパワー法)と時間領域の4手法(EKF、Adaptive-EKF、AF-AWP、PEM-SS)について、観測データ長が

表3. 7 同定計算結果 (ホワイトノイズ入力6秒)

Method	Damping Natural Period [Sec]			Damping Factor		
	Exact	Estimated	Rel. Err. [%]	Exact	Estimated	Rel. Err. [%]
Curve Fit	-	-	-	-	-	-
Half Power	-	-	-	-	-	-
EK-WGI	1.00	1.00	0.04	0.0200	0.0201	0.28
Adaptive-EKF	1.00	1.00	0.06	0.0200	0.0199	0.49
AF-AWP	1.00	1.00	0.04	0.0200	0.0201	0.28
PEM-SS	1.00	1.00	0.05	0.0200	0.0201	0.30

表3. 8 状態空間表示による時間領域の各手法の推定結果 (ホワイトノイズ6秒)

Method	Stiffness [kgf/cm]			Damping Coefficient [kgf sec/cm]		
	Exact	Estimated	Rel. Err. [%]	Exact	Estimated	Abs. Err.
EK-WGI	39.478	39.465	0.033	0.251	0.252	0.001
Adaptive-EKF	39.478	39.445	0.084	0.251	0.250	0.001
AF-AWP	39.478	39.466	0.030	0.251	0.252	0.001
PEM-SS	39.478	39.454	0.061	0.251	0.252	0.001

短い場合について同定精度の検討を実施した。入力波はホワイトノイズ (サンプリング周期100Hz、データ長6秒) とした。また、時間領域の各手法については、初期値はすべて真値の1.1倍とした。その他、対象モデル等の検討条件については3. 2 と同一とした。

3. 3. 2 同定計算結果

表3. 7に同定結果を示す。まず、周波数領域の同定手法であるカーブフィット法、ハーフパワー法については、入力と出力間の振幅スペクトル比がかなり真値と異なり、その結果固有周期と減衰定数を算定することが出来なかった。これはデータ長がフーリエスペクトル計算に必要な長さを有していないためと考えられる。時間領域の手法については、いずれの手法によっても減衰固有周期、減衰定数のいずれもデータ長50秒の場合と比較してもほぼ同程度の推定精度が得られており、同定計算に必要なデータ長は短くても良いことがわかる。表3. 8に表3. 7の減衰固有周期と減衰定数の算定に用いた剛性と粘性減衰係数の算定結果の一覧表を示す。表3. 8より、剛性の推定結果が、EKFとAF-AWPに比較してAdaptive-EKFとPEM-SS法で若干精度が落ちていることがわかるが、いずれの手法によっても剛性、減衰係数の推定結果の相対誤差は1%以内であり、精度的な問題は少ないと考えられる。

3. 3. 3 時間領域手法の推定パラメータ初期値依存性に関する検討

次に、これら時間領域の同定法に共通する問題であるが、同定結果の精度が初期値に依存する問題が

表3. 9 EK-WGI法およびPEM-SS法の初期値依存性に関する検討結果 (ホワイトノイズ6秒)

Input: White Noise (100Hz 6sec)

Method	Stiffness [kgf/cm]				Damping Coefficient [kgf sec/cm]			
	Exact	Initial	Estimated	Rel. Err. [%]	Exact	Initial	Estimated	Rel. Err. [%]
EK-WGI	39.478	1.974	39.466	0.030	0.251	0.013	0.252	0.398
		3.948	39.466	0.030		0.025	0.252	0.398
		7.896	39.466	0.030		0.050	0.252	0.398
		22.502	39.466	0.030		0.143	0.252	0.398
		26.450	39.466	0.030		0.168	0.252	0.398
		35.530	39.466	0.030		0.226	0.252	0.398
		43.426	39.465	0.033		0.276	0.252	0.398
		59.217	39.466	0.030		0.377	0.252	0.398
		78.956	39.466	0.030		0.502	0.252	0.398
197.390	-	-	1.255	-	-			
PEM-SS	39.478	1.974	39.454	0.061	0.251	0.013	0.252	0.398
		3.948	39.454	0.061		0.025	0.252	0.398
		7.896	39.454	0.061		0.050	0.252	0.398
		22.502	39.454	0.061		0.143	0.252	0.398
		26.450	39.454	0.061		0.168	0.252	0.398
		35.530	39.454	0.061		0.226	0.252	0.398
		43.426	39.454	0.061		0.276	0.252	0.398
		59.217	39.454	0.061		0.377	0.252	0.398
		78.956	39.454	0.061		0.502	0.252	0.398
197.390	39.454	0.061	1.255	0.252	0.398			

あり、適切な初期値を与えないと推定値が発散する。あるいは推定値が間違った値に収束するといった問題が生じる。この問題の検討のため、拡張カルマンフィルタ系で最も初期値依存性が高いと想定されるEK-WGI法と、PEM-SS法の両手法について、同一入力波を用いて、推定値の初期値を真値の0.02倍～5倍の間で数種設定し、推定値の初期値依存性に関する検討を実施した。表3. 9にその結果を示す。表3. 9の結果より、EK(WGI)の初期値が推定値の5倍の場合のみ同定計算が発散して解を求めることが不能になったものの、いずれの手法によっても初期値が真値の0.05倍～2倍の範囲で与えられれば同程度の推定精度で同定計算が可能であると考えられる。一般的に、建築構造物の1次の減衰定数は構造種別により概ねの値は推定されているので、この程度の初期値依存性であれば、特に問題があるとは考えにくい。

3. 3. 4 対象モデルの固有周期の影響に関する検討

対象モデルの固有周期が同定計算に与える影響を考察するために、対象モデルの周期をパラメータとして同定計算を実施した²⁾。対象モデルの固有周期は表3. 10に示すようにこれまでのモデルを含め計4ケー

表3.10 検討対象モデル

	Case1	Case2	Case3	Case4
Mass [kg]	1	1	1	1
Stiffness [kgf/cm]	39.478	986.96	3947.842	15791.367
Damping Coefficient [kgf sec/cm]	0.251	1.257	2.513	5.027
Natural Frequency [Hz]	1	5	10	20
Damping Factor [%]	2	2	2	2

表3. 11 状態空間表示による時間領域の各手法の推定結果(ホワイトノイズ6秒)

Method	Case	Stiffness [kgf/cm]				Damping Coefficient [kgf sec/cm]			
		Exact	Initial	Estimated	Rel. Err. [%]	Exact	Initial	Estimated	Rel. Err. [%]
EK-WGI	Case1	39.478	43.426	39.465	0.033	0.251	0.276	0.252	0.398
	Case2	986.960	1085.656	979.027	0.804	1.257	1.382	1.247	0.796
	Case3	3947.842	4232.626	3832.520	2.921	2.513	2.765	2.373	5.571
	Case4	15791.367	17370.504	14359.682	9.066	5.027	5.529	1.256	75.015
Adaptive-EKF	Case1	39.478	43.426	39.445	0.084	0.251	0.276	0.250	0.398
	Case2	986.960	1085.656	978.863	0.820	1.257	1.382	1.339	6.523
	Case3	3947.842	4232.626	3830.683	2.968	2.513	2.765	2.451	2.467
	Case4	15791.367	17370.504	14270.472	9.631	5.027	5.529	1.856	63.079
AF-AWP	Case1	39.478	43.426	39.466	0.030	0.251	0.276	0.252	0.398
	Case2	986.960	1085.656	979.160	0.790	1.257	1.382	1.243	1.114
	Case3	3947.842	4232.626	3831.518	2.947	2.513	2.765	2.380	5.292
	Case4	15791.367	17370.504	14255.344	9.727	5.027	5.529	1.032	79.471
PEM-SS	Case1	39.478	43.426	39.478	0.001	0.251	0.276	0.251	0.130
	Case2	986.960	1085.656	986.960	0.000	1.257	1.382	1.257	0.029
	Case3	3947.842	4232.626	3947.842	0.000	2.513	2.765	2.513	0.011
	Case4	15791.367	17370.504	15791.367	0.000	5.027	5.529	5.027	0.009

スとした。また、粘性減衰係数は減衰定数に換算して、それぞれのケースで $\epsilon=2\%$ となる様設定した。

各手法による最終ステップの推定パラメータ、真値および真値との相対誤差を、表3. 11に示す。また、各手法における剛性と減衰定数の推定値の収束状況を図3. 7~3. 9に示す。ここで、図3. 7と図3. 8では拡張カルマンフィルタ系の3手法については同定各ステップにおける推定パラメータの収束状況が示されている。なお、図中EK-WGIについては他の手法との比較のため、グローバルな繰り返しのうち最初の1回目の推定値収束状況を示している。また、図3. 9ではPEM-SSにおいては計算各ステップにおける収束状況を示している。なお、PEM-SSについては推定各ステップにおける評価関数の収束状況も示している。

Case 1 においては、剛性、粘性減衰係数を問わず、どの手法においても相対誤差が0.4%以内に同定されておりきわめて推定精度が高い。また、図3. 7(a), 図3. 8(a), および図3. 9(a)に示されるように、どの手法を用いても早い段階で収束している。

Case 2 においては、剛性に関して、どの手法を用いても相対誤差1%以下と、いずれも精度良く同定を行うが、図3. 8(b)に見られるように、拡張カルマンフィルタの収束性が他のカルマンフィルタ系手法に比較して悪くなっている。また、PEM-SS法については繰り返しステップ5回程度でほぼ真値に収束している。粘性減衰係数に関しては、適応拡張カルマンフィルタの相対誤差が5%を超える。AF-AWPでは、相対誤差が1%前後、EK-WGI法とPEM-SS法は相対誤差1%以内と良い値を推定する。Fig. 3. 8(b)に示されるように、適応拡張カルマンフィルタの同定精度が低い理由は、収束域に入ってから推定パラメータのばらつきによるものと考えられる。EK-WGI法を用いると、繰り返し数2回で相対誤差率2%前後に収束し、最終的な推定値は誤差率が1%以内に同定される。

Case 3においては、剛性に関して、PEM-SS法はほぼ真値に収束しているが、拡張カルマンフィルタ系各手法の推定精度は比較的均一で相対誤差は3%前後となる。粘性減衰係数に関しても、PEM-SS法はほ

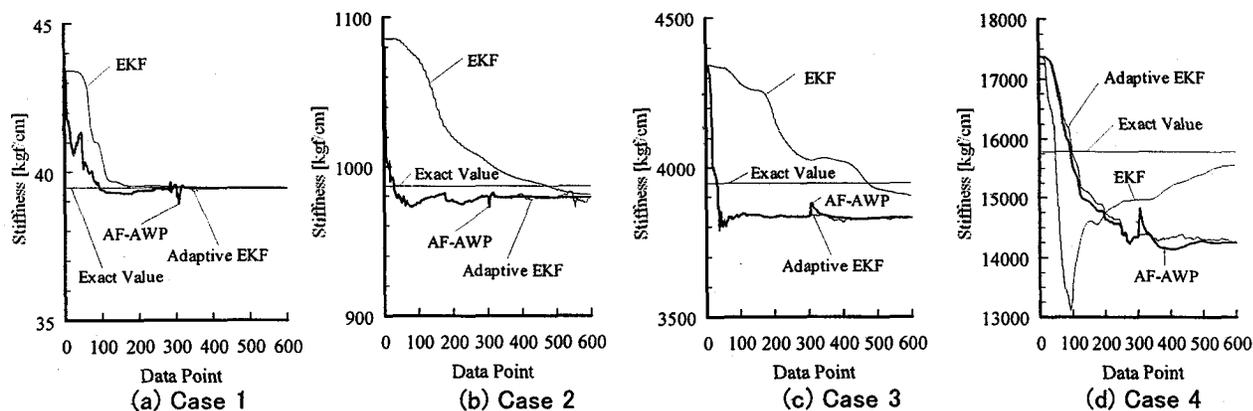


図3.7 カルマンフィルタ系の手法による剛性推定値の収束状況

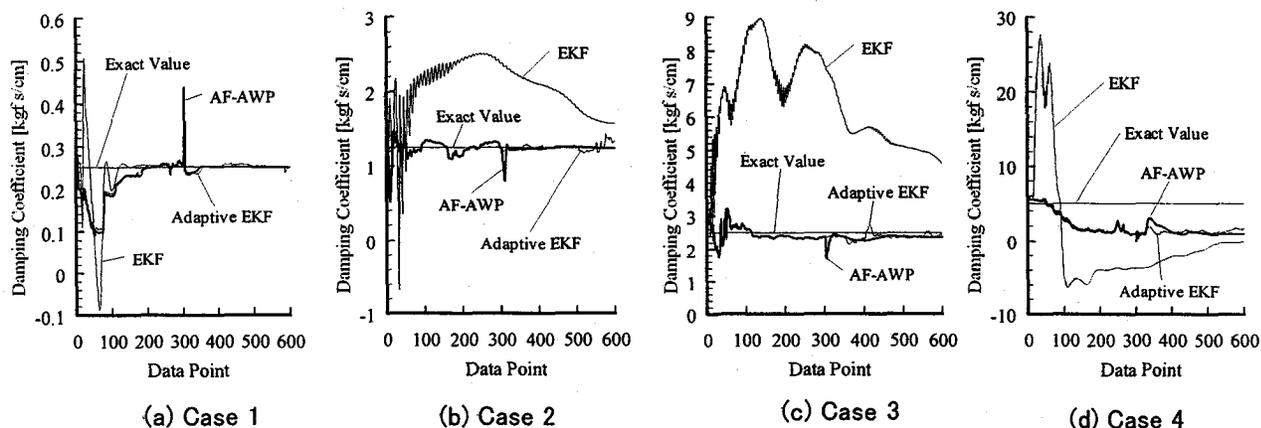


図3.8 カルマンフィルタ系の手法による粘性減衰係数推定値の収束状況

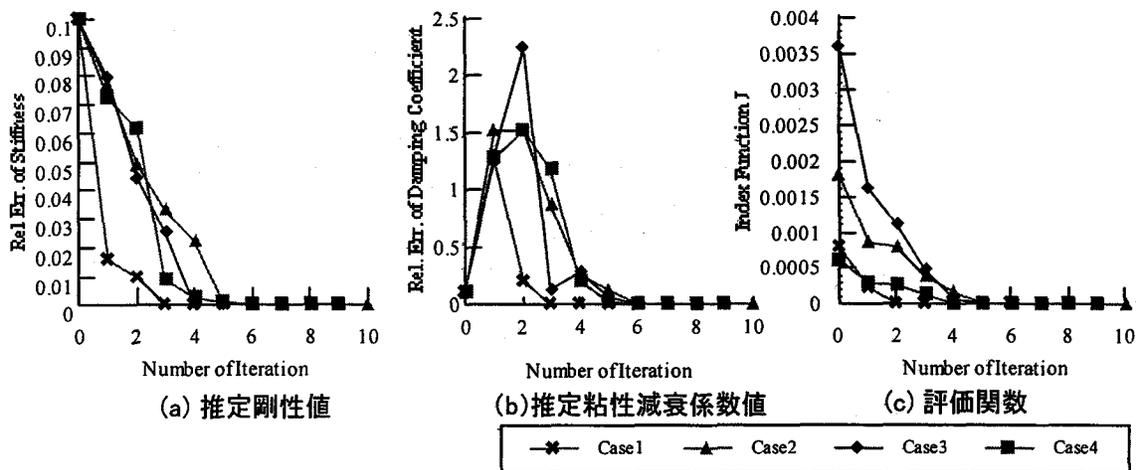


図3.9 PEM-SS法の推定パラメータおよび評価関数の収束状況

ば真値に収束しているが、拡張カルマンフィルタ系ではAdaptive-EKFによる推定が相対誤差2.54%程度と最も良く、その他の手法による推定時の相対誤差は概ね5%程度である。ただし、適応拡張カルマンフィルタの同定精度が良いのは、Fig. 3. 8(c)に見られるように、安定域によるデータのばらつきにより偶然に近い値を推定したためである。

Case 4では、剛性に関して、PEM-SS法はほぼ真値に収束しているが、拡張カルマンフィルタ系各手法

の推定精度は比較的均一である。ただし推定値の相対誤差は9%前後となり推定精度は低下している。粘性減衰係数に関しては、拡張カルマンフィルタ系手法による推定値はすべて真値と違う値へと収束したものの、PEM-SS法の減衰係数推定値はほぼ真値に収束している。Case4において、拡張カルマンフィルタ系各手法の推定精度が低下した原因はサンプリング周波数100 [Hz] に対し、モデルの固有振動数が20 [Hz] と高く、1周期に含まれるデータ数が少ないためであろうと推察される。Case 4の結果から、サンプリング周波数100 [Hz] のデータについては、拡張カルマンフィルタ系の各手法で推定可能な最高固有振動数がおおむね10 [Hz] 前後と考えられる。ただし、これはシミュレーションデータ作成時の応答計算と、拡張カルマンフィルタの遷移行列作成時の離散化の次数の違いによるものと考えられるので、実構造物の観測記録を用いる場合においても同様の現象がみられるかについては不明である。ただし、いずれの手法によってもオーダーレベルでの粘性減衰係数の推定は可能であると結論づけることもできる。

Case 1～Case 4を通して、AF-AWPについて300ステップ目でスパイクが現れる。これは誤差共分散行列の重み付けによるものであり、推定状態量の誤差が大きいため収束を活性化したものである。推定量が次ステップ以降、急激な変動をするものと考えられる。また、PEM-SS法による同定では、推定パラメータのうち剛性についてはいずれのケースでも初期値より真値に向かって推定値が推移するのに対し、粘性減衰係数については初期値より一端大きく乖離し、その後真値に向かって収束が開始されることがわかる。ただしこれは評価関数の設定とPEM-SS法で用いた非線形最小2乗法の性質に依存する問題であることがわかっている。この問題に関する詳細は3. 4 に示す。

3. 4 予測誤差法による1自由度系構造物動特性の同定に関する追加検討

ここでは、3. 3. 4 のPEM-SS法による線形1自由度せん断型モデルの同定計算時にみられた、推定計算中に減衰係数の推定値が真値より一度大きく乖離した後に収束する現象の原因を調べるために、3. 3. 4 と同一モデルを対象とし、種々の入力波条件を用いて同定の数値計算を行い原因を調査した³⁾。

3. 4. 1 解析モデルおよび解析に用いる諸量

本解析では、3. 3. 4 と同一の線形1自由度せん断型モデルを用いて解析を行った。解析モデルは減衰定数を2%、固有振動数が1[Hz],5[Hz],10[Hz],20[Hz]になる様に、表3. 11に示す剛性値と粘性減衰係数値を用いた。入力は表3. 12に示す3種類の入力加速度とした。

3. 4. 2 同定計算手法

表3. 11 解析モデル

Damping Factor	2[%]	Case1	Case2	Case3	Case4
Natural Frequency	[Hz]	1	5	10	20
Mass	[kg]	1	1	1	1
Stiffness	[kgf/cm]	0.251	1.257	2.513	5.027
Damping Coefficient	[kgf sec/cm]	39.478	986.96	3947.842	15791.37

表3. 12 入力波条件

Input	El Centro NS	Kobe NS	Whitenoise-1
Sampling Frequency[Hz]	50	50	100
Data point	2691	9000	600
Max Accelation [Gal]	341.69	818.02	1.73

推定パラメータの初期値は表3. 11の各モデルの真値に対する倍率がそれぞれ0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.67, 0.9, 1.1, 1.5, 2.0, 5.0倍になる値を取り10パターンで同定を試みた。その際、観測量は質点の相対速度応答とした。また本節においては、(2.67)式に示す連続型状態空間モデルをパデー近似⁴⁾と入力1次ホールド仮定により離散化を行い、得られた離散型状態空間モデルから応答を算定した。なお、本節においては、以後各 Case について述べる時、入力、モデルの固有振動数、および初期値の取り方の違いによって、ECase1-00.5, KCase2-1.5, whCase4-5.0のように呼ぶものとする。

3. 4. 3 解析結果と考察

表3. 13にEl Centro NS入力時、表3. 14にJMA-Kobe NS入力時、および表3. 15にWhite Noise-1入力時の同定計算結果を示す。また、評価関数の二次元等高線プロットに計算各ステップにおける推定パラメータの収束状況を重ねあわせたものを図3. 10～図3. 21に示す。なお、パラメータの収束状況は、特に初期値を真値の0.05, 0.5, 2.0, 5.0倍とした場合のみを表示した。

同定を試みた全120ケースにおいて同定不能なケースはわずかに5ケースであった。この5ケース以外は同定計算最終ステップにおける評価関数値は0に収束し、推定パラメータは真値まで収束した。ここで、同定不能であった5ケースについて検討した結果、原因は以下に示す3つのパターンに分類された。

第1のパターンは、図3. 13に示すECase4-2.0 ECase4-5.0における局所的極小値への収束である。同図より、推定パラメータの局所的極小値への収束が確認できる。ただしこの局所的極小値の存在は、同一固有周波数モデルを用いた他の入力波ケースでは確認されておらず、このような局所的極小値は入力波と構造物動特性の何らかの条件の組み合わせで生じるものと考えられる。

第2のパターンは、whCase4-5.0でみられたもので、図3. 21に示すように評価関数面が非常になだらかなために、非線形最小2乗法で評価関数を小さくするパラメータの組を見つけることが不可能となり、同定計算が途中で終了したものである。whCase4-5.0では第2ステップにおいて同定計算が終了している。

第3のパターンは、ECase1-5.0とwhCase2-0.05でみられたもので、同定計算途中において推定された

粘性減衰係数値と剛性値より成立するシステムが不安定となったために、予測誤差を求めるための応答計算が途中で続行不能となったことに起因するものである。ECase1-5.0では10回繰り返し計算時に推定されたシステムが不安定になったため同定計算が終了している。

モデルの固有振動数の違いに着目すると、概して振動数が高くなるほど評価関数の表面がなだらかになること、局所的極小値が存在しやすくなることなどの傾向がみられた。また、初期値の設定方法については、真値に対する倍率があまりに大きいと同定不能となる可能性が高くなると考えられる。さらにこの場合、減衰定数は真値より一端大きく乖離してから再度真値に向かって収束する傾向が強まる。これは本推定計算で用いた非線形最小2乗法(Gauss-Newton法)において、概ね推定パラメータ探索は評価関数面の傾斜が最も大きい方向、すなわちコンタープロットに対し直角方向に行われるためである。

以上より、今後は評価関数値の設定が評価関数面の形状に及ぼす影響に関する検討や、用いる非線形最小2乗法の変更や改良により、さらに局所的極小値への収束を避ける手法の検討が必要であると考えられる。また本研究で提案した同定手法をそのまま用いる場合には、剛性は他の推定手法によってもかなり精度良く推定可能であるので、剛性の初期値は真値近傍に設定し、粘性減衰係数の初期値はシステムの安定性を満足する範囲で真値より小さめに設定することが最も適切であると結論づけられる。

表3. 13 同定計算結 (El Centro NS)

Ratio of Initial to Exact Value	Identified Stiffness [kgf/cm]	Error of Stiffness [kgf/cm]	Identified Damping Coefficient [kgf sec/cm]	Error of Damping Coefficient [kgf sec/cm]	Minimum Performanse Function	Number of Iteration
ECase1						
0.05	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	18
0.1	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	17
0.2	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	14
0.5	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	14
0.67	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	11
0.9	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	9
1.1	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	8
1.5	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	13
2.0	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	15
5.0	0.014	39.464	35.206	34.955	3.817	10
ECase2						
0.05	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	21
0.1	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	18
0.2	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	19
0.5	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	18
0.67	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	12
0.9	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	9
1.1	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	10
1.5	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	12
2.0	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	13
5.0	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	13
ECase3						
0.05	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	23
0.1	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	22
0.2	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	19
0.5	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	17
0.67	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	11
0.9	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	9
1.1	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	9
1.5	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	11
2.0	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	16
5.0	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	12
ECase4						
0.05	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	21
0.1	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	20
0.2	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	18
0.5	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	14
0.67	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	15
0.9	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	9
1.1	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	10
1.5	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	13
2.0	35581.625	19790.258	2.564	2.463	0.015	8
5.0	35583.450	19792.083	2.558	2.469	0.015	12

表3. 14 同定計算結果 (JMA-Kobe NS)

Ratio of Initial to Exact Value	Identified Stiffness [kgf/cm]	Error of Stiffness [kgf/cm]	Identified Damping Coefficient [kgf sec/cm]	Error of Damping Coefficient [kgf sec/cm]	Minimum Performanse Function	Number of Iteration
KCase1						
0.05	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	17
0.1	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	17
0.2	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	15
0.5	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	14
0.67	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	14
0.9	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	9
1.1	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	9
1.5	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	14
2.0	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	14
5.0	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	15
KCase2						
0.05	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	23
0.1	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	22
0.2	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	20
0.5	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	14
0.67	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	11
0.9	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	9
1.1	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	9
1.5	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	11
2.0	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	13
5.0	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	14
KCase3						
0.05	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	24
0.1	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	20
0.2	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	15
0.5	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	15
0.67	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	14
0.9	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	9
1.1	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	9
1.5	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	14
2.0	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	13
5.0	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	13
KCase4						
0.05	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	20
0.1	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	18
0.2	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	17
0.5	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	12
0.67	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	11
0.9	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	9
1.1	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	8
1.5	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	8
2.0	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	9
5.0	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	11

表3. 15 同定計算結果 (White Noise-1)

Ratio of Initial to Exact Value	Identified Stiffness [kgf/cm]	Error of Stiffness [kgf/cm]	Identified Damping Coefficient [kgf sec/cm]	Error of Damping Coefficient [kgf sec/cm]	Minimum Performanse Function	Number of Iteration
whCase1						
0.05	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	13
0.1	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	12
0.2	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	12
0.5	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	10
0.67	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	10
0.9	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	6
1.1	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	6
1.5	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	9
2.0	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	11
5.0	39.478	0.000	0.251	0.000	0.000	13
whCase2						
0.05	49.847	937.113	0.388	0.869	0.006	1
0.1	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	17
0.2	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	17
0.5	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	15
0.67	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	15
0.9	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	9
1.1	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	10
1.5	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	12
2.0	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	15
5.0	986.960	0.000	1.257	0.000	0.000	17
whCase3						
0.05	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	18
0.1	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	16
0.2	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	16
0.5	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	15
0.67	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	11
0.9	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	8
1.1	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	9
1.5	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	12
2.0	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	15
5.0	3947.842	0.000	2.513	0.000	0.000	15
whCase4						
0.05	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	18
0.1	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	18
0.2	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	17
0.5	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	15
0.67	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	11
0.9	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	10
1.1	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	9
1.5	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	12
2.0	15791.367	0.000	5.027	0.000	0.000	16
5.0	79716.641	63925.274	52.477	47.450	0.001	1

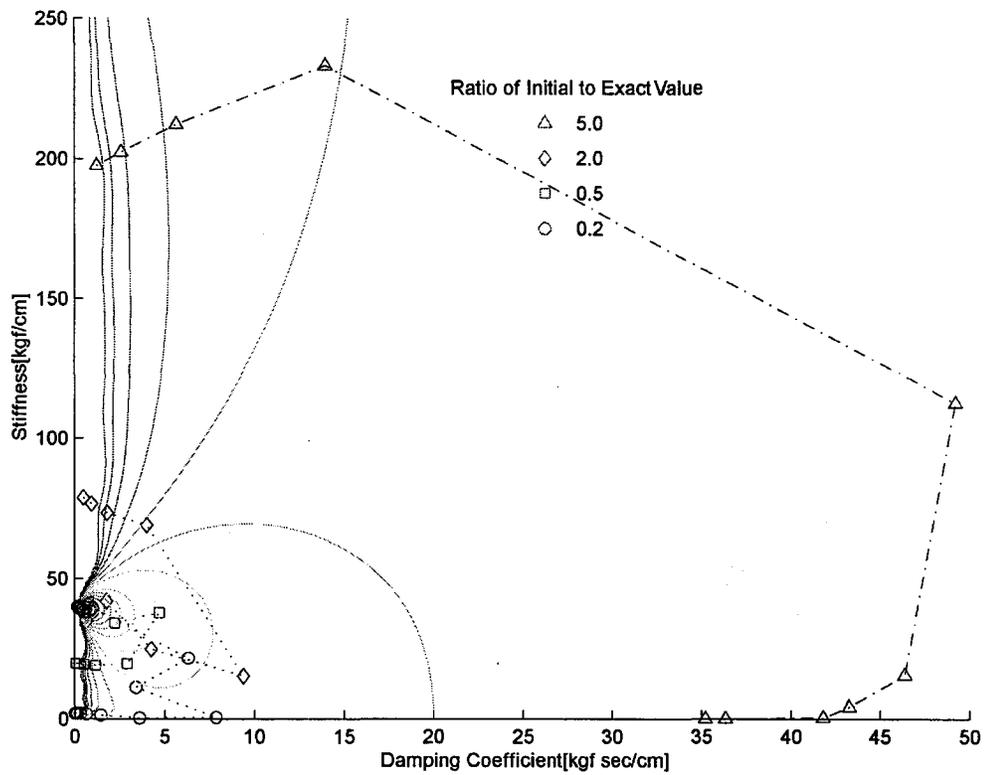


図3. 10 評価関数面のコンターと推定値収束状況プロット
 (固有周波数 1Hz モデル、エルセントロ NS 入力時)

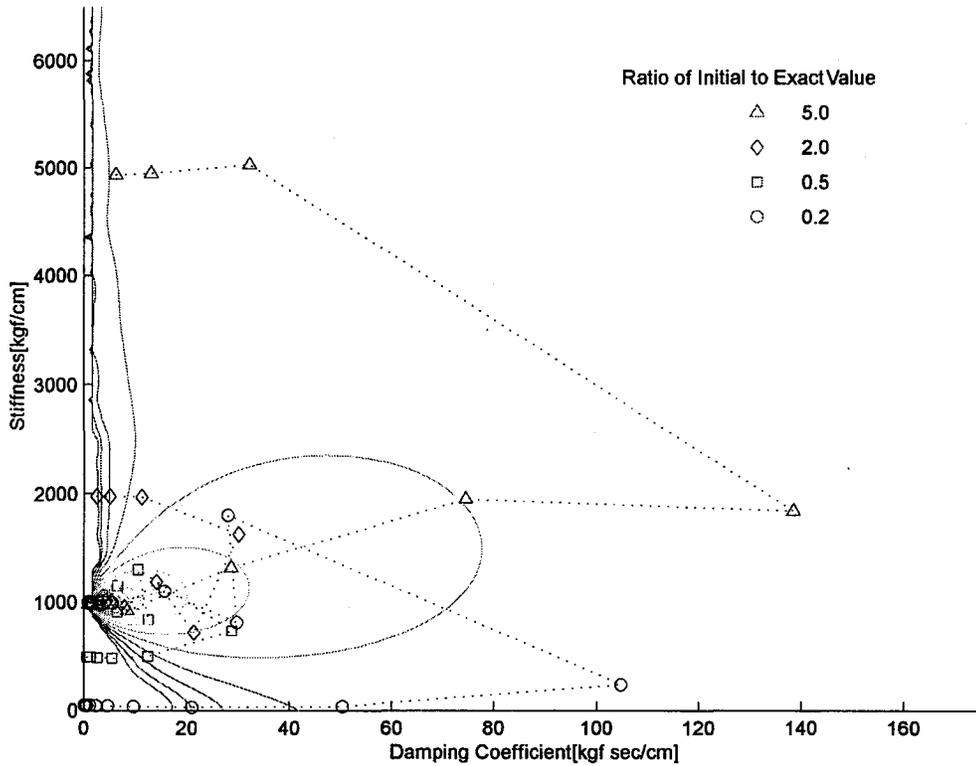


図3. 11 評価関数面のコンターと推定値収束状況プロット
 (固有周波数 5Hz モデル、エルセントロ NS 入力時)

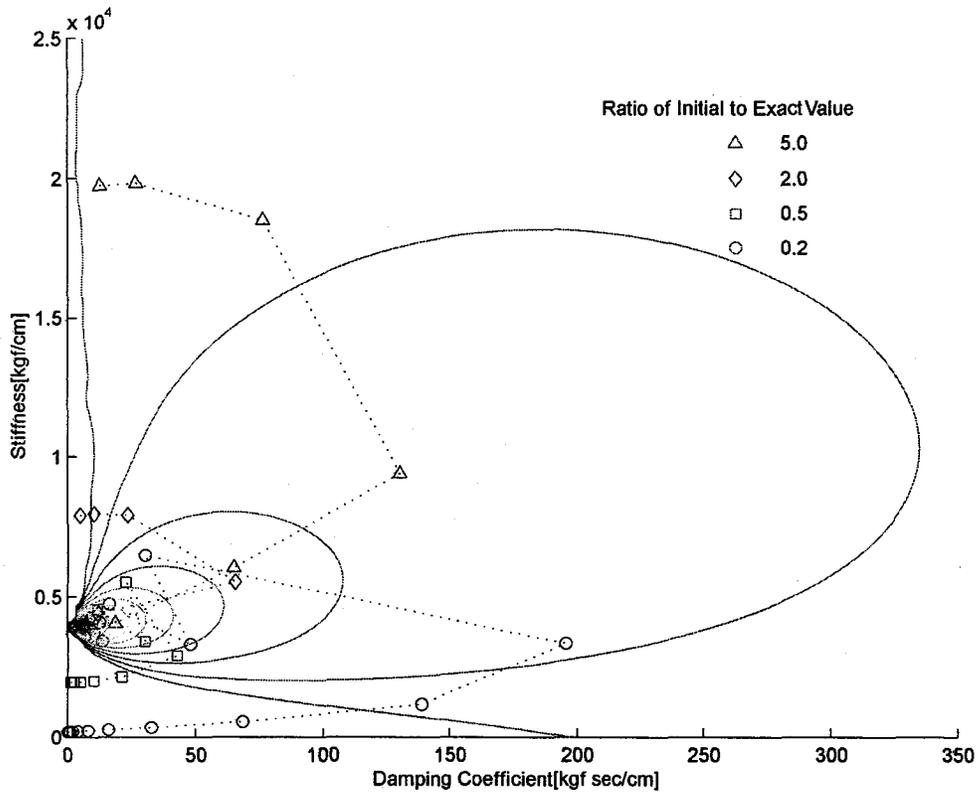


図3. 12 評価関数面のコンターと推定値収束状況プロット
(固有周波数 10Hz モデル、エルセントロ NS 入力時)

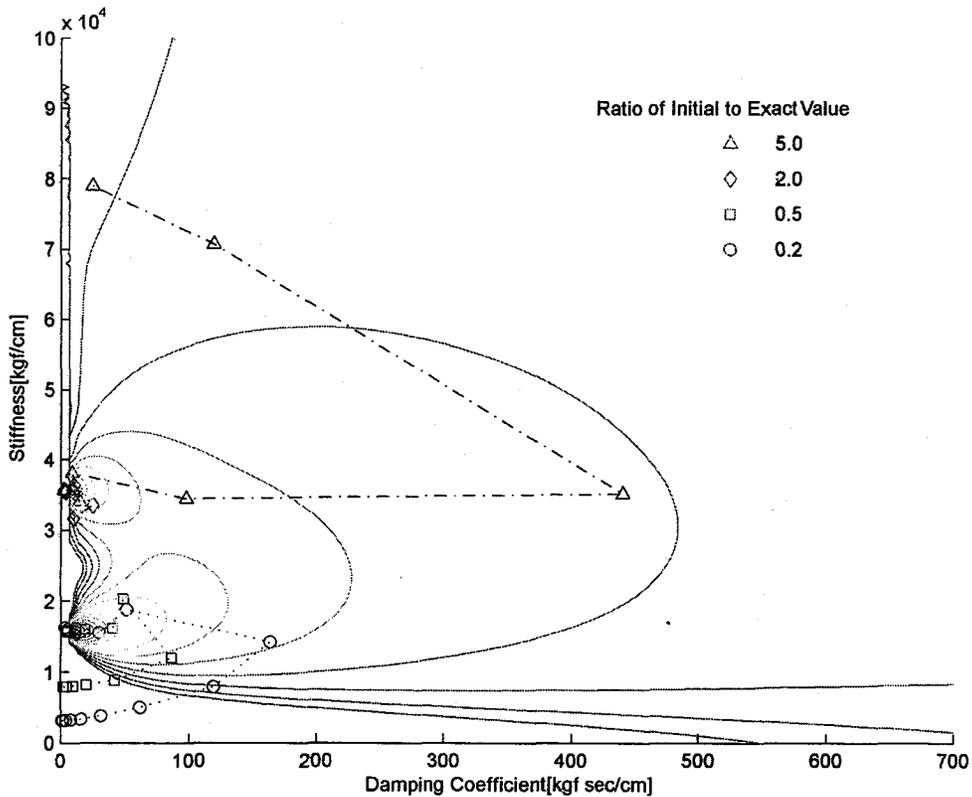


図3. 13 評価関数面のコンターと推定値収束状況プロット
(固有周波数 20Hz モデル、エルセントロ NS 入力時)

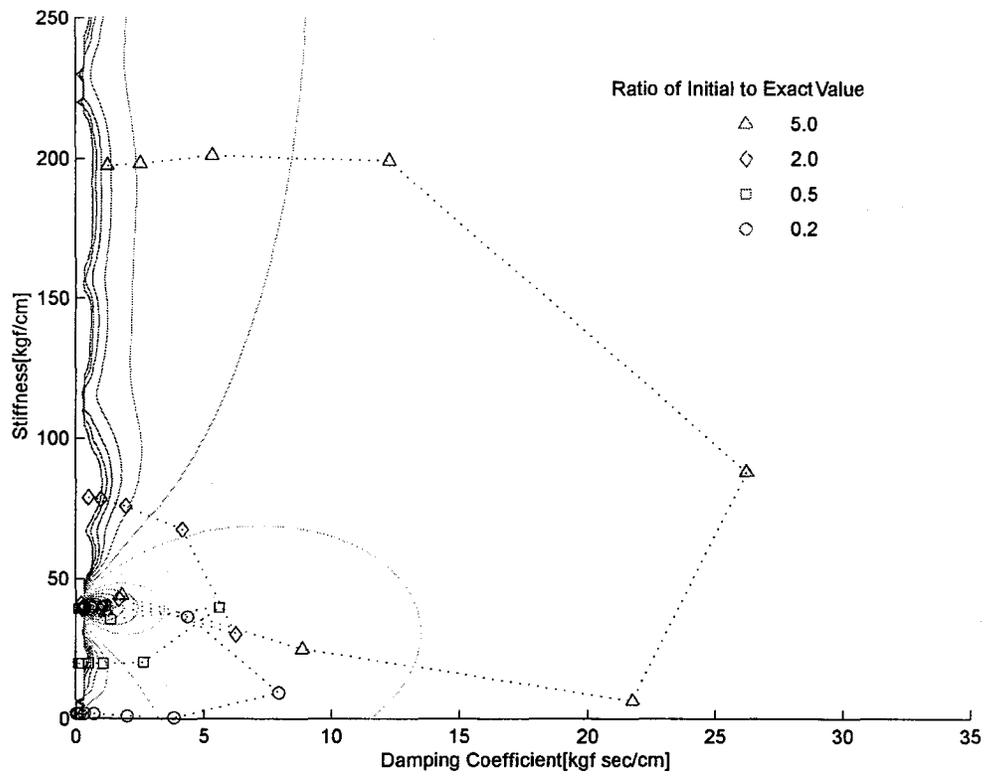


図3. 14 評価関数面のコンターと推定値収束状況プロット
(固有周波数1Hzモデル、JMA-Kobe NS入力時)

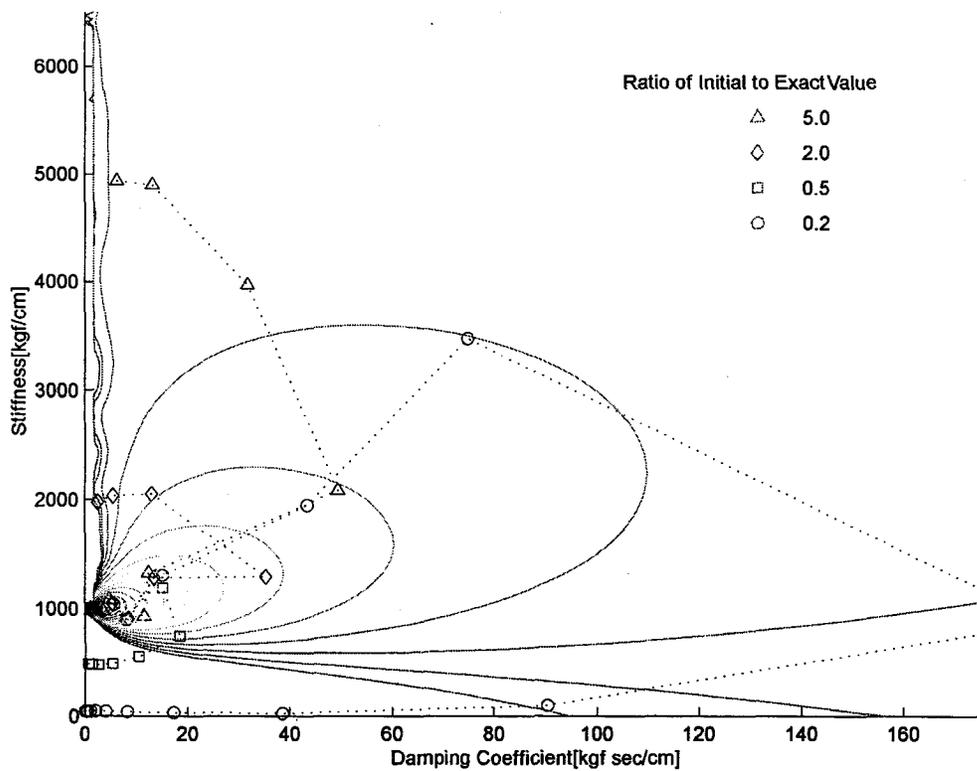


図3. 15 評価関数面のコンターと推定値収束状況プロット
(固有周波数5Hzモデル、JMA-Kobe NS入力時)

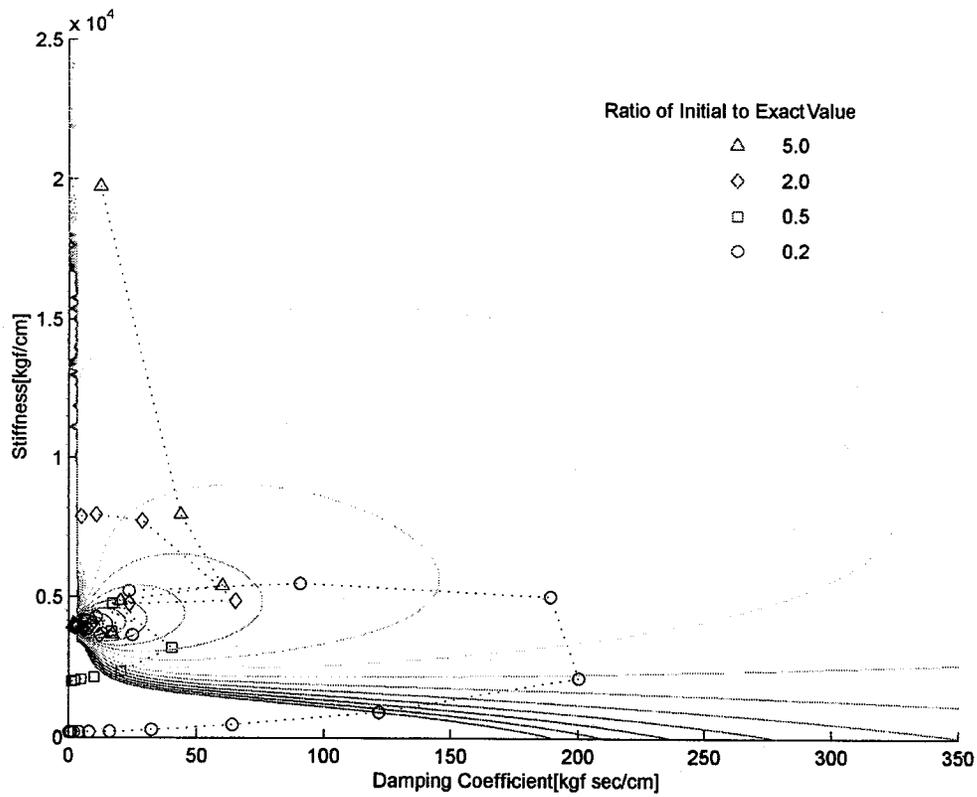


図3. 16 評価関数面のコンターと推定値収束状況プロット
(固有周波数10Hzモデル、JMA-Kobe NS入力時)

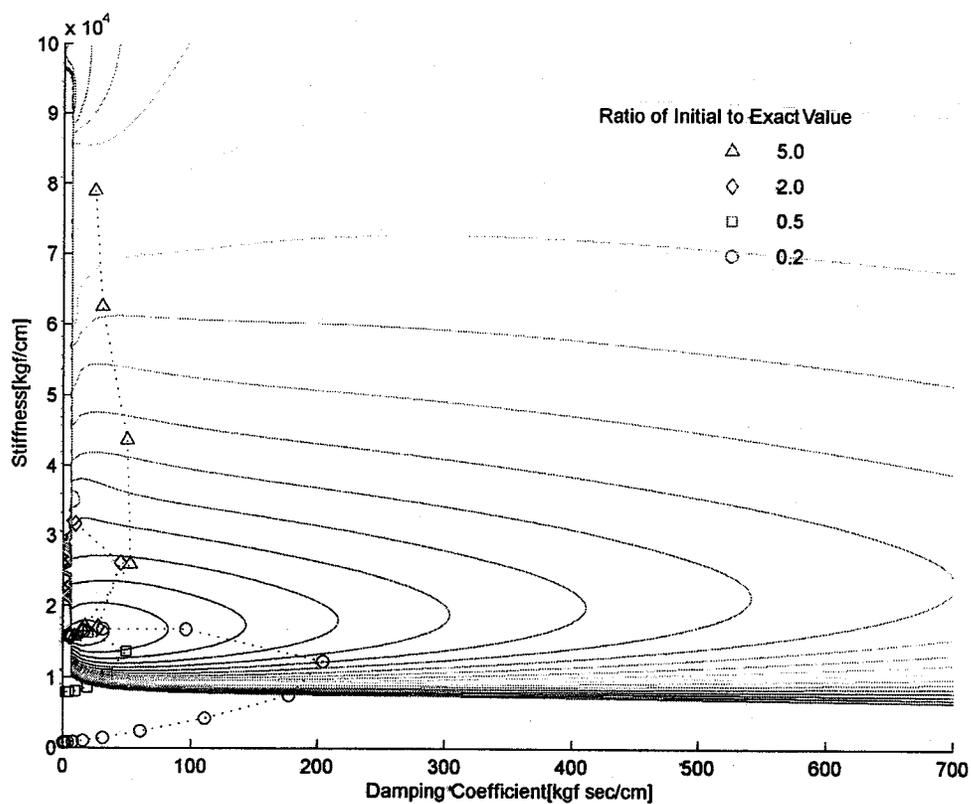


図3. 17 評価関数面のコンターと推定値収束状況プロット
(固有周波数20Hzモデル、JMA-Kobe NS入力時)

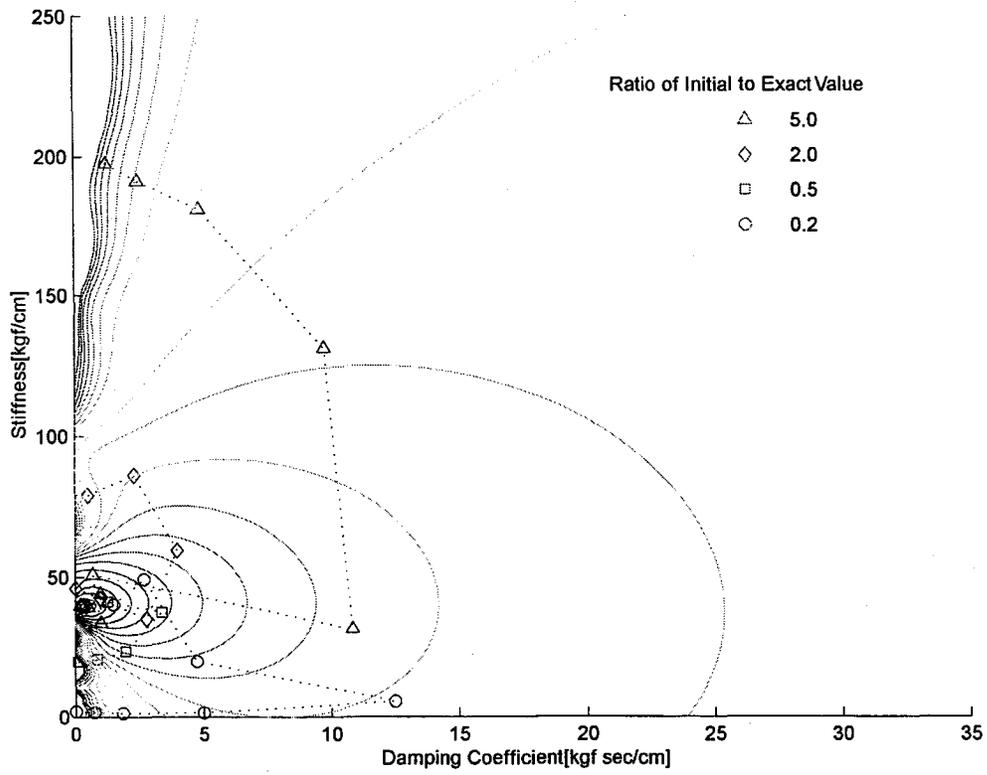


図3. 18 評価関数面のコンターと推定値収束状況プロット
(固有周波数1Hzモデル、White Noise入力時)

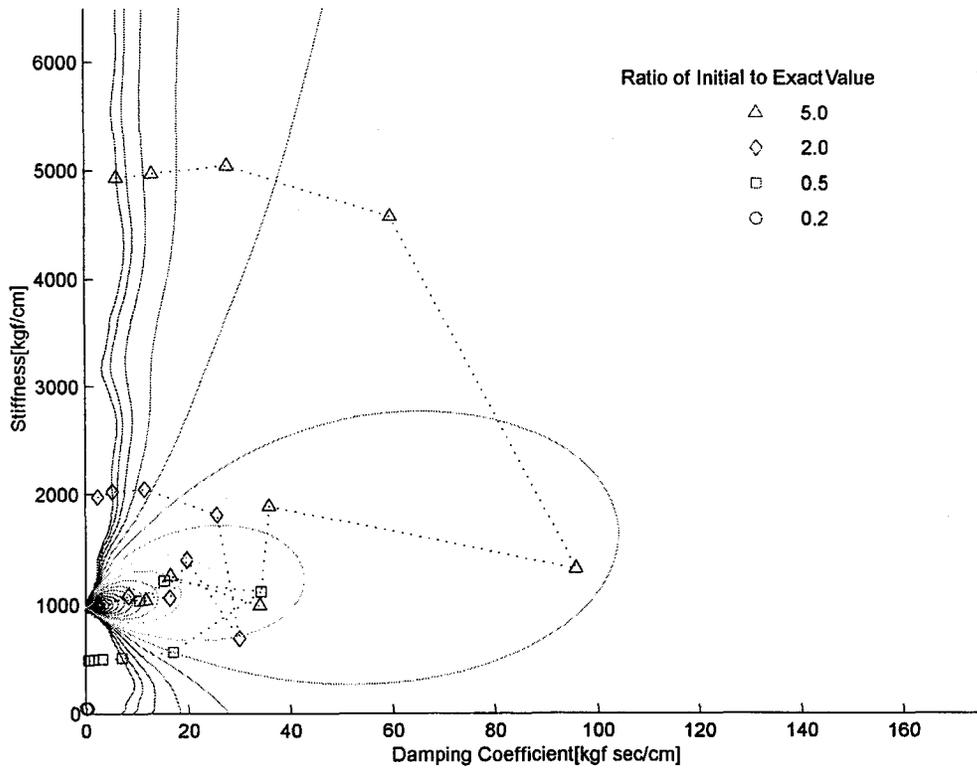


図3. 19 評価関数面のコンターと推定値収束状況プロット
(固有周波数5Hzモデル、White Noise入力時)

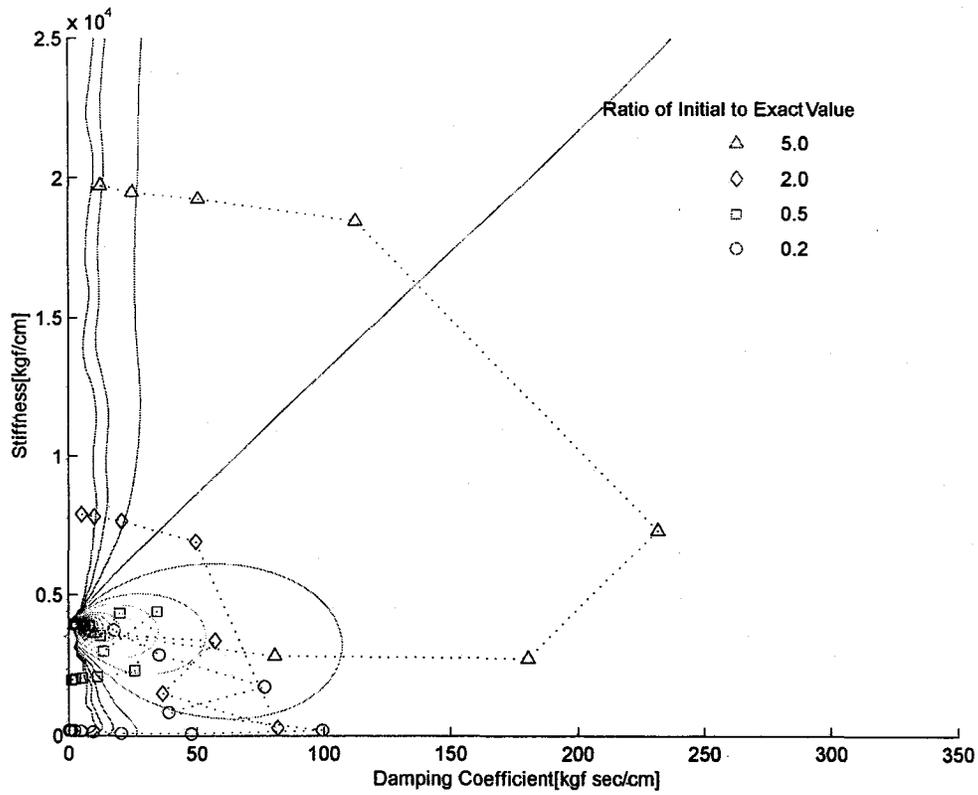


図3. 20 評価関数面のコンターと推定値収束状況プロット
(固有周波数10Hzモデル、White Noise入力時)

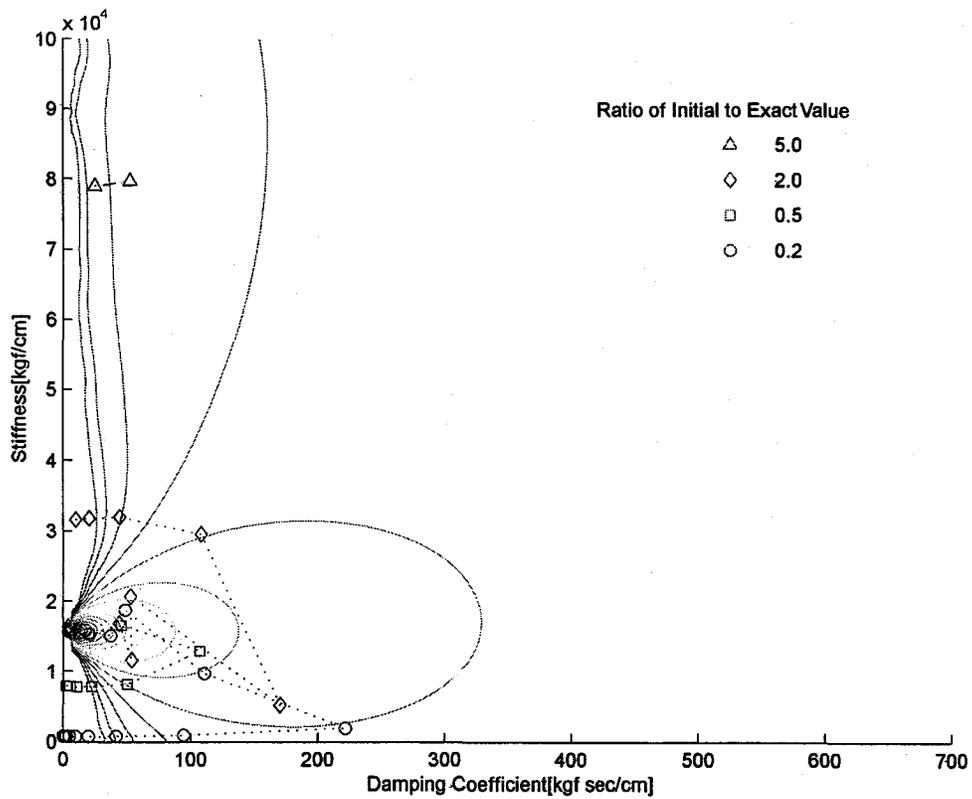


図3. 21 評価関数面のコンターと推定値収束状況プロット
(固有周波数20Hzモデル、White Noise入力時)

3. 5 まとめ

本章の検討の結果以下のことが明らかとなった。

(1)対象構造物固有周期1秒、データ長50秒程度の場合

- ・周波数領域の手法、インパルス応答推定の手法、および状態空間表示による時間領域の手法のいずれを用いても、固有周期（あるいは剛性）の精度のよい推定は可能である。
- ・カーブフィット法、あるいは状態空間表示による時間領域の手法を用いることで粘性減衰定数（あるいは粘性減衰係数）は相対誤差レベル1%程度の精度で推定しうる。
- ・インパルス応答推定法（自己相関関数法、RD法）による同定を行うには、対象構造物固有周期の1000倍程度のデータ長が確保されれば、減衰定数に関しても相対誤差10%程度の推定は可能である。
- ・インパルス応答推定法以外の手法では、入力としてホワイトノイズを用いる場合と、地震波を用いる場合で剛性、減衰とも推定精度に有意な違いはみられない。

(2)対象構造物固有周期1秒、データ長6秒の場合

- ・データ長6秒の場合は、周波数領域の手法の適用は困難である。ただしこれは観測データ長が短くFTにより精度のよいスペクトルの推定ができなかったためである。
- ・状態空間表示による時間領域の手法を用いれば、データ長6秒の場合でもデータ長50秒に比較するとやや推定精度が落ちるものの、いずれの手法によっても剛性あるいは粘性減衰係数とも相対誤差0.1%以下の推定精度で同定が可能である。
- ・状態空間表示による時間領域の手法を適用する場合問題となる、推定パラメータの初期値依存問題は、少なくとも本検討ケースでは推定値が真値の0.05倍～2倍の間で設定されておれば問題ない。

(3)その他

- ・インパルス応答推定法（自己相関関数法、RD法）による同定を行うには、対象構造物固有周期の1000倍程度のデータ長が確保されれば、減衰定数に関しても相対誤差10%程度の推定は可能である。
- ・状態空間表示による時間領域手法を適用する場合、本検討ケースについてはPEM-SS法以外ではサンプリング周期100Hzで対象構造物の固有周波数が高い場合同定精度が悪化した。その割合は対象構造物の固有周期が10Hzで剛性については相対誤差が概ね3%程度、減衰係数については相対誤差が概ね5%程度、対象構造物の固有周期が20Hzと特に高い場合は剛性については相対誤差10～20%程度、減衰係数については相対誤差75%程度である。
- ・PEM-SS法により同定計算を実施する際には、剛性の初期値は可能な限り真値近傍に設定し、減衰係数の初期値はシステムの安定性を満足する範囲で真値より小さめに設定することが精度の良い推定結果につながる可能性が高いと考えられる。

参考文献

- 1) 古川忠稔, 松下剛史, 井上 豊: RD法による建築構造物の減衰評価に関する基礎的研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第37号・構造系, 1997年7月, pp. 405-408
- 2) 古川忠稔, 犬丸直明, 井上豊: 適応フィルタ及び適宜重み付け手法(AF-AWP)を用いた構造物のシステム同定手法の提案と応用, 構造工学論文集Vol. 44B, 1998年3月, pp. 385-390
- 3) 伊藤雅史, 古川忠稔: 予測誤差法を用いた構造物動特性同定手法の適用に関する研究 -線形モデルを用いたシミュレーションおよび実構造物の解析-, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第39号・構造系, 1999年6月, pp. 357-360
- 4) G. J. Borse: Numerical Method with MATLAB(日本語訳版), オーム社, 1998年11月, pp. 159-162

第4章 線形1自由度系構造物動特性の同定 (データにノイズを含む場合)

4. 1 緒言

本章では、入出力データにノイズが混入している場合、混入ノイズが同定精度におよぼす影響についての検討を行う。

本研究も含め、対象モデルの特性推定のため何らかの観測データを用いる場合、対象の挙動をセンサーを用いて計測し、殆どの場合計測量を電気信号等の形に変換し、これを観測データとして用いることになる。通常の実験室レベルの実験の場合は、設備の整った環境で、目的に合致したセンサーやデータ収録機器等を準備して最適な環境で実験を行うことも可能であるが、本研究で対象としている建築構造物の動特性を推定するためには、このような環境で観測データを得ることはしばしば困難である。なぜなら、建築構造物動特性の推定に地震観測データを用いることを想定すると、観測データは対象建物内に設置された地震観測システムにより得られるが、これらの地震観測システムはシステム仕様や設置時期、あるいはその後のメンテナンス等がおのおの異なり、必ずしもノイズ混入率が低い観測データが得られることは保証されない。また、地震応答記録とならんで有力な振動情報と考えられる常時微動観測では、元々振動レベルが低く、観測および収録システムのSN比の限界もあり、観測記録へのノイズの混入はさげがたい。以上より、基本的に観測データにはバイアス、アウトライア(異常値)その他様々なノイズの混入は存在するものとして考えるべきであろう。

これらノイズの混入した観測データは、通常観測記録の時刻歴波形の目視や、周波数変換された情報等を参照しつつ、適切な基線補正手法や帯域阻止フィルタ等の適用によりできるだけノイズの除去が試みられるが、それでもなお完全に混入ノイズのみを削除することは非常に困難である。そこで、地震観測記録のようにデータの計測時間が高々数十秒に限られ、かつ現象の再現性が無い場合、たとえ観測されたデータにノイズが混入しておろうとも、何らかの形で出来る限りデータよりノイズの除去を行うと共に、ノイズの影響の少ない解析手法を適用することで、観測された地震応答記録よりできるだけ多くの情報を引き出す努力が求められると考えられる。

上記のような観点より、ここでは、同定に用いる入力量および観測量に典型的なノイズであるホワイトノイズが混入した場合について、前章までに適用した各同定手法により構造物動特性の推定精度に関する数値計算を実施し、その推定精度や混入ノイズの影響に関する検討を実施した。

4. 2 観測ノイズのみを含む場合の同定精度の検討

表4. 1 入力波条件一覧表

Type	Method	White Noise			El Centro NS
		100 Hz 6 s	50 Hz 50 s	50Hz 1000 s	50 Hz 53.72 sec
Frequency Domain	Curve Fit		○		○
	Half Power		○		○
Impulse Response	Autocorrelation			○	○
	Random Decrement			○	○
State Space Description with Time Domain	EK-WGI	○			○
	Adaptive-EKF	○			○
	AF-AWP	○			○
	PEM-SS	○			○

4. 2. 1 検討条件

第3章で用いたモデル(固有周期1秒、減衰定数2%の1自由度系モデル)に対して、第2章で紹介した各手法を用いて同定計算を実施した。検討に用いる入力波は、第3章で明らかにされた結果に基づき、ホワイトノイズ入力についてはノイズが無い場合にはほぼ真値を推定できる程度のデータ長とした。また、地震時の入力波は前章と同じくエルセントロNSの地震波加速度記録原波形とした。各手法に用いた入力波の一覧を表4. 1に示す。

モデルの応答は、線形加速度法により算出した。ノイズは式(4.1)の条件を満たすようにS-N比(Noise to Signal Ratio)を決定し、S-N比がそれぞれ0%,1%,5%,10%とし(以下Case1,Case2,Case3,Case4とする)、平均値が0で標準偏差1の正規分布に従う疑似ホワイトノイズを観測ノイズに付加した。その他、各手法に固有する計算条件については第3章と同一とした¹⁾。

$$(\text{Noise to Signal Ratio}) = \frac{(\text{Standard Deviation of Gaussian Noise})}{(\text{Standard Deviation of Model's Response})} \quad (4.1)$$

4. 2. 2 同定計算結果および考察

表4. 2と表4. 3に、入力ホワイトノイズの場合の周波数領域の同定手法およびインパルス応答同定手法より同定された減衰固有周期と減衰定数、時間領域の各同定法により同定された剛性および粘性減衰定数より算定した減衰固有周期と減衰定数を示す。また、図4. 1(a),(b)にこの推定結果の相対誤差を棒グラフで示す。さらに、表4. 4と4. 5および図4. 2(a),(b)に入力エルセントロ地震波の場合の同様の算定結果を示す。なお、グラフ中では相対誤差が100%以上に達した場合推定計算に失敗したものと見なし、グラフ化していない。

本検討では、状態空間表示に基づく時間領域の手法を適用した場合、ホワイトノイズ入力時にはAdaptive-EKFのCase4が、またエルセントロ地震波入力時にはAdaptive-EKFのCase3,4とEK-WGIおよびAF-AWPのCase4において推定計算の発散、あるいは間違っ値への収束が生じた。表中で-で表示したものがこれに当たる。また、ホワイトノイズ入力時のAdaptive-EKFのCase4固有周期は、推定計算で求められた減衰定数が負値となり減衰固有周期の算定が出来なかったため空欄とした。

表4. 2 ホワイトノイズ入力時の減衰固有周期算定結果

Method	Damping Natural Period [Sec]								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
Curve Fit	1.000	1.002	0.200	1.004	0.402	1.004	0.402	1.002	0.200
Half Power	1.000	1.003	0.301	1.014	1.420	1.014	1.420	1.014	1.420
Autocorrelation	1.000	0.998	0.200	0.998	0.200	0.998	0.200	0.998	0.200
Random Decrement	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000
EK-WGI	1.000	1.000	0.037	1.000	0.042	1.001	0.074	1.001	0.067
Adaptive-EKF	1.000	1.000	0.033	1.009	0.940	0.977	2.294	0.929	7.147
AF-AWP	1.000	1.000	0.036	1.000	0.001	0.999	0.057	-	-
PEM-SS	1.000	1.001	0.052	1.001	0.055	1.001	0.068	1.001	0.085

表4. 3 ホワイトノイズ入力時の減衰定数算定結果

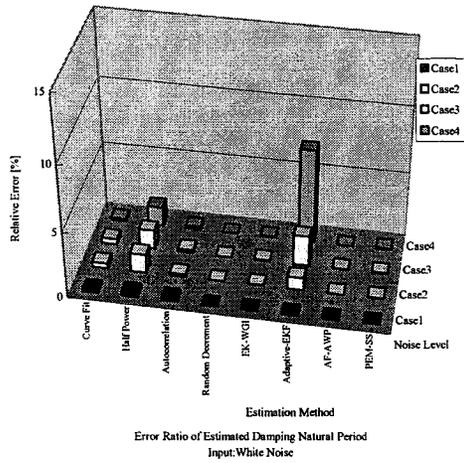
Method	Damping Factor								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
Curve Fit	0.0200	0.0199	0.500	0.0198	1.000	0.0198	1.000	0.0198	1.000
Half Power	0.0200	0.0103	48.500	0.0101	49.500	0.0101	49.500	0.0101	49.500
Autocorrelation	0.0200	0.0215	7.500	0.0215	7.500	0.0216	8.000	0.0216	8.000
Random Decrement	0.0200	0.0203	1.500	0.0202	1.000	0.0210	5.000	0.0230	15.000
EK-WGI	0.0200	0.020	0.285	0.020	0.688	0.021	3.107	0.020	1.508
Adaptive-EKF	0.0200	0.020	0.281	0.103	413.759	0.032	57.758	-0.041	-
AF-AWP	0.0200	0.020	0.283	0.021	5.813	0.022	9.331	5.449	-
PEM-SS	0.0200	0.020	0.300	0.020	0.700	0.020	1.509	0.021	2.721

表4. 4 エルセントロ地震波入力時の減衰固有周期算定結果

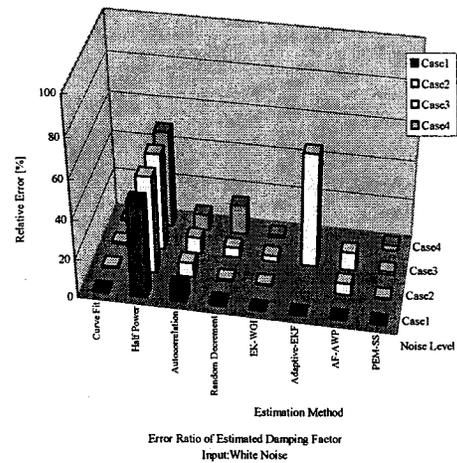
Method	Damping Natural Period [Sec]								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
Curve Fit	1.000	0.999	0.100	0.999	0.100	0.999	0.100	1.001	0.100
Half Power	1.000	1.005	0.503	1.005	0.503	1.005	0.503	1.005	0.503
Autocorrelation	1.000	1.018	1.833	1.018	1.833	1.018	1.833	1.020	2.041
Random Decrement	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000
EK-WGI	1.000	1.000	0.019	1.000	0.019	1.000	0.018	-	-
Adaptive-EKF	1.000	1.000	0.019	0.875	12.462	-	-	-	-
AF-AWP	1.000	1.000	0.019	1.000	0.019	1.000	0.027	-	-
PEM-SS	1.000	1.000	0.020	1.000	0.020	1.000	0.019	1.000	0.018

表4. 5 エルセントロ地震波入力時の減衰定数算定結果

Method	Damping Factor								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
Curve Fit	0.0200	0.0201	0.500	0.0201	0.500	0.0201	0.500	0.0200	0.000
Half Power	0.0200	0.0184	8.000	0.0184	8.000	0.0184	8.000	0.0184	8.000
Autocorrelation	0.0200	0.0239	19.500	0.0239	19.500	0.0240	20.000	0.0240	20.000
Random Decrement	0.0200	0.0210	5.000	0.0200	0.000	0.0190	5.000	0.0173	13.500
EK-WGI	0.0200	0.020	0.131	0.020	0.131	0.020	0.132	-	-
Adaptive-EKF	0.0200	0.020	0.131	0.050	149.423	-	-	-	-
AF-AWP	0.0200	0.020	0.131	0.020	0.131	0.020	0.274	-	-
PEM-SS	0.0200	0.020	0.130	0.020	0.130	0.020	0.131	0.020	0.530

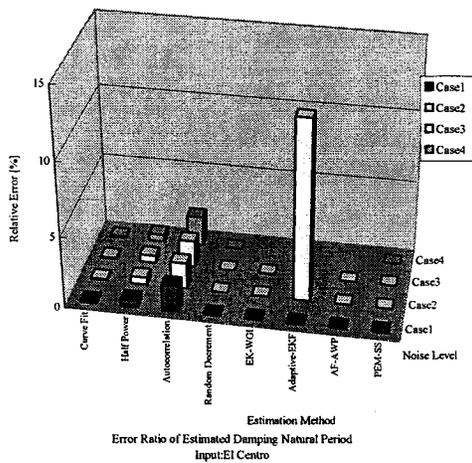


(a)減衰固有周期推定値の相対誤差

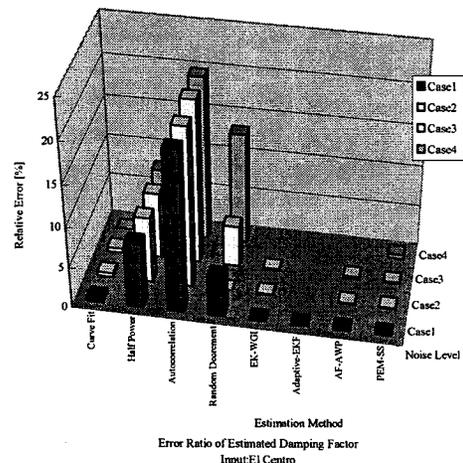


(b)減衰定数推定値の相対誤差

図4.1 ホワイトノイズ入力時の減衰固有周期および減衰定数算定結果



(a)減衰固有周期推定値の相対誤差



(b)減衰定数推定値の相対誤差

図4.2 エルセントロ地震波入力時の減衰固有周期および減衰定数算定結果

(1) 減衰固有周期および減衰定数の同定計算結果の概略

同定計算が実施できたものについては、Adaptive-EKFにおけるホワイトノイズ入力時のCase4、同じくエルセントロ地震波入力時のCase2をのぞくと、固有周期の推定は、ノイズの有無によらず2.5%以内の相対誤差の範囲で推定可能である。この程度の推定精度の差は3.2.1で述べた推定誤差のほぼ同程度と考えられるので、固有周期の算定については概ね精度の良い算定が可能であると考えられる。また、上記のAdaptive-EKFのノイズ混入時のケースについては、同定された減衰定数の相対誤差も100%以上となっており、これらは計算は可能であったものの推定値が真値と異なる値に収束していると考えらるべきであろう。

これに対し減衰定数の算定結果については手法間での精度の差が大きい。全手法中で、カーブフィット法とPEM-SS法についてはどの検討ケースにおいても相対誤差が3%以内で推定が可能であり、特にカーブフィット法については全ケースにおいて相対誤差1%以内での推定が可能であった。その他手法では、概ね時間領域の手法は、ノイズレベルが大きくなるにつれ推定精度の悪化あるいは計算の発散現象が見られ

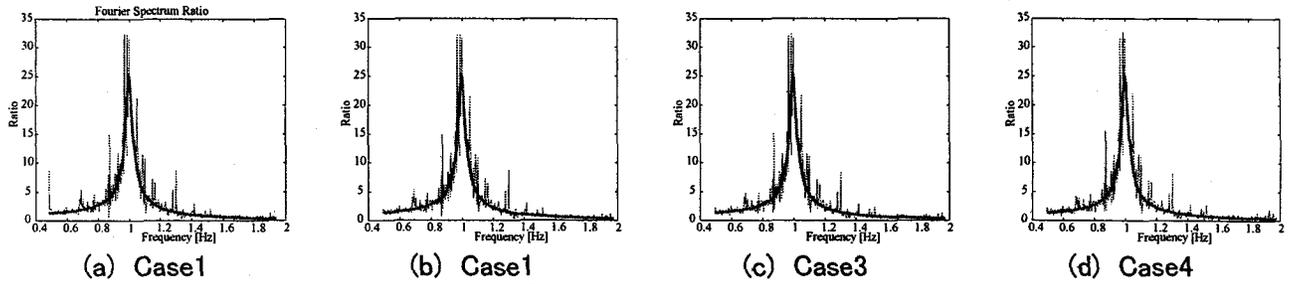


図4.3 ホワイトノイズ入力時のカーブフィット法による算定結果

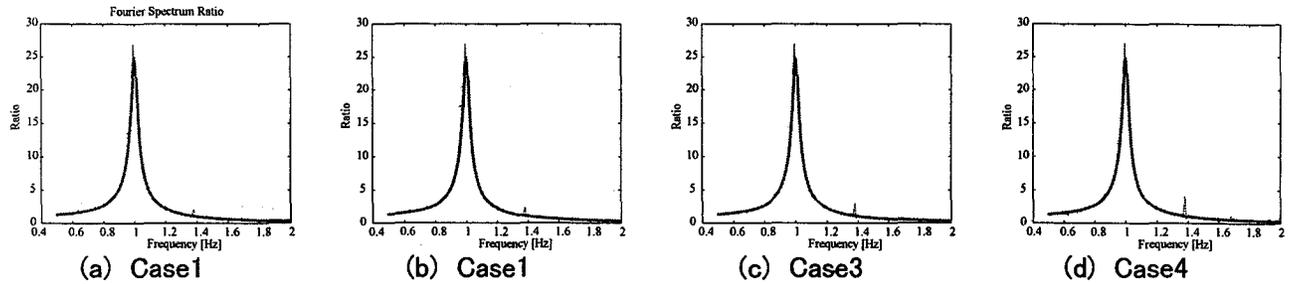


図4.4 エルセントロ地震波入力時のカーブフィット法による算定結果

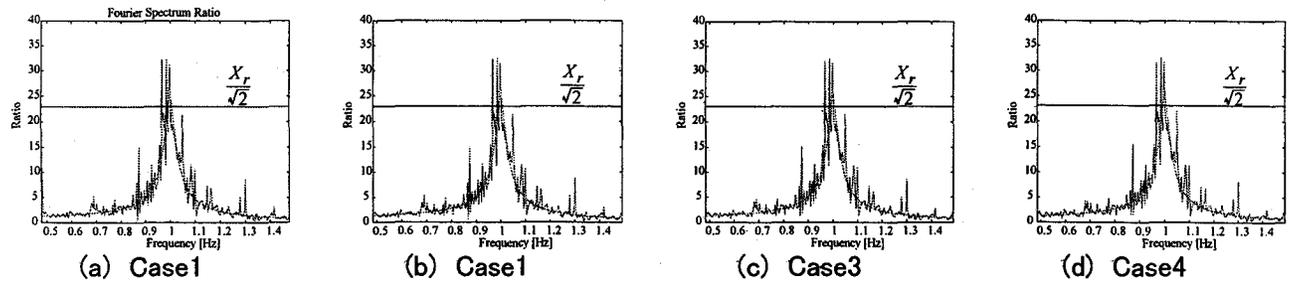


図4.5 ホワイトノイズ入力時のハーフパワー法による算定結果

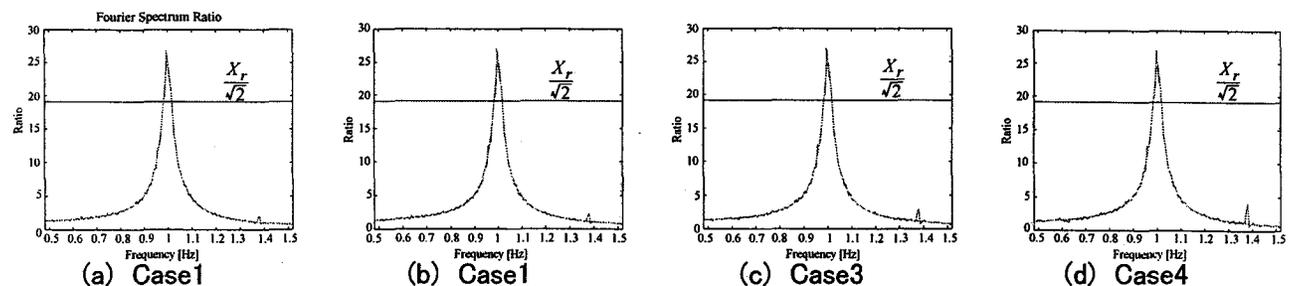


図4.6 エルセントロ地震波入力時のハーフパワー法による算定結果

るが、推定が可能であったケースの大半は数%程度の相対誤差レベルでの推定が可能であった。その他の手法についてはノイズレベルと推定誤差については明確な関連が見られず、むしろ入力の特性和データ長といった他の要因の影響が大きいと推測される。以下、減衰定数の推定結果に着目して各手法ごとに説明する。

(2) 周波数領域の手法

周波数領域の2手法のうち、カーブフィット法についてはホワイトノイズ入力時には、ノイズの無いCase1が他のCaseに比較してやや推定精度が良くなっているが、エルセントロ地震波入力時には減衰定数の推定精度はどのノイズレベルにおいても0.5%と変わらない。また、この推定精度の差は非常に些少なものであり計算誤差の範囲内と考えられる。カーブフィット法は固有周期、減衰定数ともいづれのノイズレベルにおい

でも推定値の相対誤差レベルが高々1%以内となっている。これらよりカーブフィット法は観測ノイズの混入に殆ど影響されず安定して非常に精度の良い推定が可能であると結論づけることができる。

図4. 3(a)～(d)にホワイトノイズ入力時のカーブフィット法により同定された応答倍率曲線を入出力値より得られたフーリエ振幅スペクトル比と重ねて示す。また、図4. 4(a)～(d)にエルセントロ地震波入力時のものを示す。図4. 3および図4. 4より、フーリエ振幅スペクトル比は入力の違いによりかなり様相が異なるものの、観測量に混入するノイズの差違が明瞭に現れる程では無いことがわかる。カーブフィット法においては、フーリエスペクトル比より応答倍率曲線を最小2乗法により近似することで、フーリエスペクトル振幅の変動と、観測量に混入するノイズの影響を除去することが可能であると考えられる。

表4. 3および表4. 5より、ハーフパワー法はノイズの混入率によらず減衰定数同定結果の相対誤差がホワイトノイズ入力時には約50%、エルセントロ地震波入力時には8%と一定の精度で減衰定数が推定されており、ハーフパワー法による推定結果においても、カーブフィット法と同じく混入ノイズレベルによる推定精度の低下はほとんど見受けられない。

図4. 5(a)～(d)と図4. 6(a)～(d)に入出力量より算定されたフーリエスペクトル振幅スペクトル比と、その最大振幅の $1/\sqrt{2}$ 振幅を直線でプロットした図を示す。図4. 5および4. 6より、ハーフパワー法におけるピーク振幅に対する $1/\sqrt{2}$ 振幅値は、入力の違いにより大きく異なっているものの、混入ノイズレベルの影響はほとんど受けていないと考えられ、カーブフィット法については観測量のノイズレベルよりも入力波形の性質が同定精度に大きな影響を及ぼす結論づけることができる。

(3) インパルス応答推定法

自己相関関数法による同定計算では、ホワイトノイズ入力時にはノイズ混入レベルによらず推定された減衰定数の相対誤差は概ね7～8%程度の推定誤差で算定されているのに対し、RD法では相対誤差は1%～15%間とやや変動が大きく、概ね観測量の誤差混入レベルが高いほど推定精度が低下する傾向となる。また、エルセントロ地震波入力を用いた場合については、自己相関関数法の推定結果の相対誤差はやはり観測量のノイズレベルによらず約20%程度と一定であり、RD法の推定結果は0%～13.5%の範囲でばらついている。以上より、インパルス応答の推定法である自己相関関数法とRD法については、自己相関関数法は混入ノイズのレベルに同定精度が左右されないが、RD法についてはノイズレベルが5%を越えると十分な長さのデータ長があっても推定精度が低下し、場合によっては自己相関関数法の推定精度より低下する場合があることがわかる。

表4. 6と表4. 7にこれまでと同一モデルを用いて、周波数領域の手法で用いたデータ長の短いホワイトノイズ (50Hz サンプリング、データ長 50 秒) の入力時の自己相関関数法とRD法による同定計算結果を示す。ここで特に表4. 7の減衰定数同定結果に注目すると、自己相関関数法による同定では、推定精度はやはり混入ノイズレベルの影響を受けず概ね一定であることがわかる。また、データ長1000秒の場合の推定減衰定数の相対誤差が概ね7～8%であるのに対し、データ長100秒時においても相対誤差が概ね10%

表4. 6 ホワイトノイズ入力時の減衰固有周期算定結果（データ長50秒）

Method	Damping Natural Period [Sec]							
	Exact	Case1 Estimated Rel. Err. [%]	Case2 Estimated Rel. Err. [%]	Case3 Estimated Rel. Err. [%]	Case4 Estimated Rel. Err. [%]			
Autocorrelation	1.000	1.004 0.400	1.004 0.400	1.004 0.400	1.004 0.400			
Random Decrement	1.000	1.005 0.500	1.010 1.000	1.005 0.500	1.010 1.000			

表4. 7 ホワイトノイズ入力時の減衰定数算定結果（データ長50秒）

Method	Damping Factor							
	Exact	Case1 Estimated Rel. Err. [%]	Case2 Estimated Rel. Err. [%]	Case3 Estimated Rel. Err. [%]	Case4 Estimated Rel. Err. [%]			
Autocorrelation	0.0200	0.0179 10.500	0.0178 11.000	0.0178 11.000	0.0177 11.500			
Random Decrement	0.0200	0.0070 65.000	0.0110 45.000	0.0150 25.000	0.0180 10.000			

～11%程度と、それほど精度は低下していない。また、ここで検討に用いたデータ長50秒のホワイトノイズとほぼ同じ長さのデータ長であるエルセントロ地震波入力時には、表4. 5に示す減衰定数の推定精度は概ね20%程度と低い。なお、エルセントロ地震波入力時についても混入ノイズの推定精度に対する影響はほとんど見受けられない。

これに対し、RD法の場合はノイズが混入しないケースにおいて同定精度が最低であり、ノイズ混入率が高くなるに従って同定精度が向上する結果となった。さらに、同定精度は相対誤差レベルで10%～65%と変動が大きい。この原因については不明であるが、いずれにしてもRD法の推定精度は混入するノイズレベルにより大きく影響されると考えられる。また、Case4以外では、データ長が長い場合の方が推定精度がよく、一般的にはできるだけ長いデータ長を用いることでRD法における推定精度を向上させることができ、自己相関関数法に比べるとデータ長が推定精度に及ぼす影響が大きいと考えられる。

以上まとめると、

- ・自己相関関数法による同定精度は、入力波の性質の影響をもっとも強く受け、一般的に入力波の性質がホワイトノイズ的であれば、観測ノイズの影響がほとんどなく、また、データ長が推定精度に及ぼす影響もRD法に比較すると小さい。また、その場合の同定精度は相対誤差レベルで概ね10%程度と推定される。
- ・RD法による推定精度は、データ長とノイズ混入レベルの両者の影響は自己相関関数法に比較して大きい。また、十分に長いデータ長がある場合においては、観測データのノイズ混入率が5%以下の場合には自己相関関数法より推定精度が良いが、ノイズ混入率がそれ以上の場合には自己相関関数法より推定精度が低下することがある。
- ・自己相関関数法、RD法とも、ホワイトノイズ、地震波入力時のいずれの検討ケースの場合でも、もっとも誤差混入レベルの高いCase4の場合において推定精度が相対誤差20%以内である。

表4. 8 状態空間表示の時間領域手法によるホワイトノイズ入力時の剛性算定結果

Method	Stiffness [kgf/cm]								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
EK-WGI	39.478	39.465	0.033	39.461	0.043	39.437	0.104	39.442	0.091
Adaptive-EKF	39.478	39.468	0.025	39.160	0.806	41.395	4.856	45.866	16.181
AF-AWP	39.478	39.466	0.030	39.497	0.048	39.542	0.162	0.590	98.505
PEM-SS	39.478	39.453	0.063	39.451	0.068	39.441	0.094	39.428	0.127

表4. 9 状態空間表示の時間領域手法によるホワイトノイズ入力時の粘性減衰係数算定結果

Method	Damping Coefficient [kgf sec/cm]								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
EK-WGI	0.251	0.252	0.398	0.253	0.797	0.259	3.187	0.255	1.594
Adaptive-EKF	0.251	0.252	0.398	1.286	412.351	0.406	61.753	-0.551	319.522
AF-AWP	0.251	0.252	0.398	0.266	5.976	0.275	9.562	8.371	3235.060
PEM-SS	0.251	0.252	0.398	0.253	0.797	0.255	1.594	0.258	2.789

表4. 10 状態空間表示の時間領域手法によるエルセントロ地震波入力時の剛性算定結果

Method	Stiffness [kgf/cm]								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
EK-WGI	39.478	39.479	0.003	39.479	0.003	39.480	0.005	-	-
Adaptive-EKF	39.478	39.479	0.003	51.647	30.825	-	-	-	-
AF-AWP	39.478	39.479	0.003	39.479	0.003	39.473	0.013	-	-
PEM-SS	39.478	39.478	0.000	39.478	0.000	39.479	0.003	39.480	0.005

表4. 11 状態空間表示の時間領域手法によるエルセントロ地震波入力時の粘性減衰係数算定結果

Method	Damping Coefficient [kgf sec/cm]								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
EK-WGI	0.251	0.251	0.000	0.251	0.000	0.251	0.000	-	-
Adaptive-EKF	0.251	0.251	0.000	0.717	185.657	-	-	-	-
AF-AWP	0.251	0.251	0.000	0.251	0.000	0.252	0.398	-	-
PEM-SS	0.251	0.251	0.000	0.251	0.000	0.251	0.000	0.250	0.398

(4) 状態空間表示に基づく時間領域の手法

第3章の結果より、時間領域の各手法については、いずれの手法あるいは入力波の場合でも、ノイズ混入が無いCase1の場合には、減衰固有周期、減衰定数とも相対誤差0.3%以内の精度で推定されることは明らかである。

ノイズの混入レベルが高い場合においても、概ね真値に収束したと考えられる計算結果においては、相対誤差10%以内に収まっており、そのうち殆どの検討ケースでは減衰定数の相対誤差レベルも高々3%程度と非常に精度が高い。これら状態空間表示による時間領域の手法では、特にホワイトノイズ入力時のデータ長は6秒であることを勘案すると、比較的短いデータ長でも、減衰固有周期、減衰定数ともに、適切な初期値を設定して、推定パラメータがほぼ正解と見なせる値に収束した場合には、非常に精度の良い同定が可能であると考えることが出来る。ただし、どのノイズ混入レベルにおいても計算結果が真値近傍に収束したの

は、ホワイトノイズ入力時はEK-WGIとPEM-SSの2手法のみであり、エルセントロ地震波入力時にはPEM-SSのみであった。これに対し、Adaptive-EKFでは、ホワイトノイズ入力時のCase3では、減衰定数の同定精度は相対誤差で約50%程度となり、Case4においては減衰定数が負の値に同定されたため、減衰固有周期が算定出来なかった。また、エルセントロ地震波入力時にはAdaptive-EKFによる同定計算はCase3,Case4の両ケースで推定パラメータの発散現象が生じ、EK-WGI、AF-AWPもまたCase4においては同様の発散現象が生じたため解を求めることが出来なかった。

これら推定パラメータの発散現象が生じた検討ケースについては、同定計算に必要な推定パラメータ平均値の初期値をさらに真値近傍に近くに設定して多数の同定計算を実施したが、いずれも同様な発散現象が生じたため計算を打ち切った。このような発散現象に対処する方法としては、EK-WGI法については予測誤差共分散行列の初期値を変更する。また、Adaptive-EKFやAF-AWPについては予測誤差共分散行列の初期値を変更することとともに、適応フィルタのバンド幅等を変更することで対処可能であることも多い。ただし、これはきわめて時間がかかる作業となることも多く、また一般的な対処法が確立していないため、ここでは推定パラメータ平均値の初期値以外のパラメータを変更することはしなかった。

以上の検討より、本検討結果からは、概ねAdaptive-EKFは同定計算の発散現象が誤差混入レベルに極めて敏感であり、以下AF-AWP法、EK-WGI法、そして最も誤差混入レベルに対して鈍感であるのはPEM-SS法であるとの結論が得られた。

また減衰定数の推定精度は、いずれの手法の場合においても、概ね混入誤差のレベルが高いほど低下している。ただし、これらの手法のうち比較的良い精度で同定が実施できたEK-WGIでは、ホワイトノイズ入力時にもっとも同定精度が悪かったのはノイズ混入レベルがもっとも大きいCase4ではなくCase3のときであり、エルセントロ地震波入力時はノイズ混入レベルによらず同定精度は相対誤差レベルで約0.13%である。これは、PEM-SSが誤差混入レベルが高まるにつれ同定精度が低下する傾向を持つのと対照的である。

状態空間表示に基づく時間領域の各手法の推定精度は、もっとも優秀なPEM-SSの場合、ノイズレベル最大のCase4の場合を含め概ね3%程度の相対誤差以内であり、EK-WGIについても推定計算が収束しておればほぼ同程度の同定精度を確保できると考えられる。ただし、これらの2手法はいずれもグローバルな繰り返し、あるいは収束計算により観測データを何度も使用して同定計算を実施しているのに対し、Adaptive-EKFとAF-AWPは観測データのグローバルな繰り返しは行っていない。その意味でこれら2手法については、推定値の収束速度の高さ、ひいては計算時間の短縮というメリットがあると考えられる。

これら時間領域の手法については、直接の推定パラメータはいずれも剛性と粘性減衰係数であるので、表4. 8と表4. 9にホワイトノイズ入力時の剛性と粘性減衰係数の同定結果を、表4. 10と4. 11にエルセントロ地震波入力時の剛性と粘性減衰係数の同定結果を示す。表4. 8~4. 11より、ホワイトノイズ入力時のAF-AWP法Case4の場合には、推定パラメータが間違った値に収束してしまったと判断でき、エルセントロ地震波入力時には、推定パラメータの同定計算中に解が発散して計算が続行不可能となったと判断できる。また、概ね剛性の推定精度に比較して粘性減衰係数の推定精度は低いことがわかる。さらに、いずれ

の入力波条件においても、各手法とも、ノイズレベルが大きい場合はそれに応じて推定パラメータの相対誤差が増加していること、ただし、そのレベルは概ねAdaptive-EKFが最も大きく、この手法は観測ノイズの影響が最も敏感に出る。反対にEK-WGIとPEM-SSがもつとも観測ノイズの影響を受けにくく、AF-AWPはこの中間程度と考えられる。また、同定計算の収束の確実性という側面では、PEM-SSが最もよく、EK-WGIがこれに続き、以下AF-AWP、Adaptive-EKFと続く順番であると推測される。

4.3 入力と観測の両方にノイズを含む場合の同定精度の検討

4.3.1 検討条件

これまでの検討の前提として、建物等について地動を入力とし、建物応答を観測データとして同定を実施している。すなわち、入力もまたセンサーを用いて観測されるものであり、入力データにも誤差の混入が避けられない。そこで、本節では入力データと観測データの両方にノイズが混入する場合について同定精度の検討を行う。

検討モデル及び入力波については4.2と同一とし、前節では観測データのみに定義した混入ノイズを入力データにも混入する。混入するホワイトノイズのレベルは4.2と同様に0%,1%,5%,10%とした。また、インパルス応答を推定する2手法については入力データを用いないため、4.2と推定結果が全く同じになるが比較検討のため表あるいはグラフに表示する。

4.3.2 同定計算結果および考察

表4.12～表4.15、および図4.7～図4.8に算定結果を示す。減衰固有周期の同定結果については、前節と同様に状態空間表示による時間領域の手法で計算が発散してパラメータを推定できなかったケースと、ハーフパワー法のホワイトノイズ入力時を除き、いずれの検討ケースについても相対誤差2%程度以内で推定がなされており、精度的にはどの手法を用いても問題はあまり生じないと考えられる。ハーフパワー法のホワイトノイズ入力時に同定精度が良くないのは後述するが、フーリエスペクトル比のピークが正しく算定出来なかったことに起因するものであり、ノイズレベル等の問題ではない。以下推定された減衰定数について各手法毎に述べる。

(1) 周波数領域の手法

カーブフィット法については、入力ホワイトノイズの場合は、混入ノイズレベル1%までは4.2の観測データのみノイズ混入の場合と推定精度の違いは見られないが、4.2ではノイズレベル5%のCase3と10%のCase4の両者とも相対誤差が1%であるのに対し、入力波のノイズ混入を考えた場合にはCase3で相対誤差

表4. 12 ホワイトノイズ入力時の減衰固有周期算定結果

Method	Damping Natural Period [Sec]								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
Curve Fit	1.000	1.002	0.200	1.001	0.100	1.001	0.100	1.001	0.100
Half Power	1.000	1.034	3.413	1.002	0.200	0.860	13.993	0.953	4.744
Autocorrelation	1.000	0.998	0.200	0.998	0.200	0.998	0.200	0.998	0.200
Random Decrement	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000
EK-WGI	1.000	1.000	0.037	1.000	0.005	0.998	0.159	0.997	0.331
Adaptive-EKF	1.000	1.000	0.033	1.005	0.549	1.000	0.022	-	-
AF-AWP	1.000	1.000	0.036	1.000	0.043	-	-	-	-
PEM-SS	1.000	1.001	0.054	1.001	0.056	1.001	0.062	1.001	0.072

表4. 13 ホワイトノイズ入力時の減衰定数算定結果

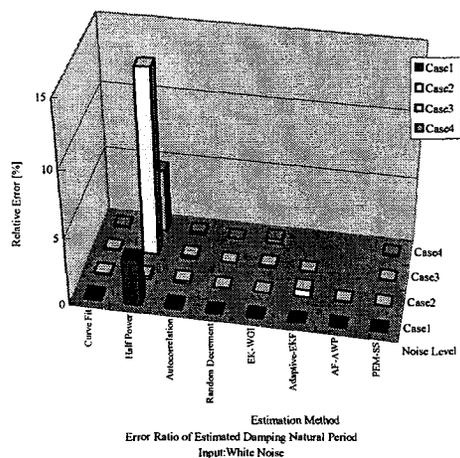
Method	Damping Factor								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
Curve Fit	0.0200	0.0199	0.500	0.0199	0.500	0.0147	26.500	0.0130	35.000
Half Power	0.0200	0.0103	48.500	0.0237	18.500	0.0013	93.500	0.0887	343.500
Autocorrelation	0.0200	0.0215	7.500	0.0215	7.500	0.0216	8.000	0.0216	8.000
Random Decrement	0.0200	0.0203	1.500	0.0202	1.000	0.0210	5.000	0.0230	15.000
EK-WGI	0.0200	0.020	0.285	0.022	8.592	0.029	43.350	0.037	87.446
Adaptive-EKF	0.0200	0.020	0.281	0.022	12.392	0.023	16.972	-	-
AF-AWP	0.0200	0.020	0.283	0.021	5.860	-	-	-	-
PEM-SS	0.0200	0.020	0.301	0.020	0.890	0.019	4.067	0.019	5.650

表4. 14 エルセントロ地震波入力時の減衰固有周期算定結果

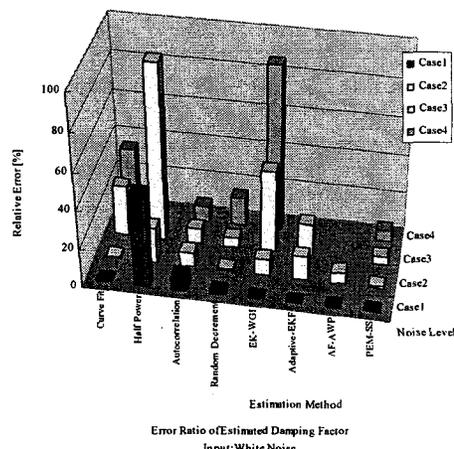
Method	Damping Natural Period [Sec]								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
Curve Fit	1.000	0.999	0.100	1.000	0.000	0.999	0.100	1.001	0.100
Half Power	1.000	1.005	0.503	1.005	0.503	1.005	0.503	1.005	0.503
Autocorrelation	1.000	1.018	1.833	1.018	1.833	1.018	1.833	1.020	2.041
Random Decrement	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000
EK-WGI	1.000	1.000	0.019	1.000	0.016	1.000	0.002	1.000	0.024
Adaptive-EKF	1.000	1.000	0.019	1.015	1.466	-	-	-	-
AF-AWP	1.000	1.000	0.019	1.000	0.017	1.000	0.016	1.001	0.092
PEM-SS	1.000	1.000	0.020	1.000	0.019	1.000	0.016	1.000	0.011

表4. 15 エルセントロ地震波入力時の減衰定数算定結果

Method	Damping Factor								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
Curve Fit	0.0200	0.0202	1.000	0.0200	0.000	0.0196	2.000	0.0190	5.000
Half Power	0.0200	0.0184	8.000	0.0184	8.000	0.0153	23.500	0.0153	23.500
Autocorrelation	0.0200	0.0239	19.500	0.0239	19.500	0.0240	20.000	0.0240	20.000
Random Decrement	0.0200	0.0210	5.000	0.0200	0.000	0.0190	5.000	0.0173	13.500
EK-WGI	0.0200	0.020	0.131	0.020	0.263	0.020	0.245	0.020	0.621
Adaptive-EKF	0.0200	0.020	0.131	0.221	1007.080	-	-	-	-
AF-AWP	0.0200	0.020	0.131	0.020	0.264	0.020	0.629	0.020	2.048
PEM-SS	0.0200	0.020	0.130	0.020	0.267	0.020	0.263	0.020	1.054

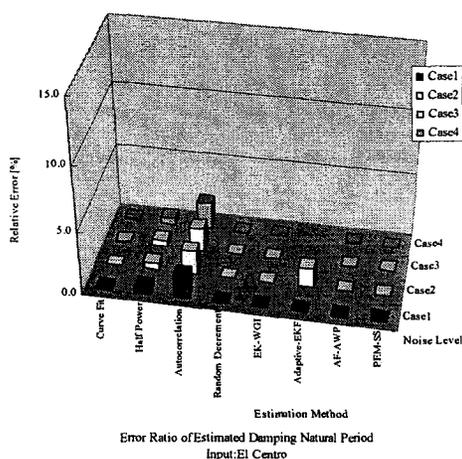


(a) 減衰固有周期算定結果

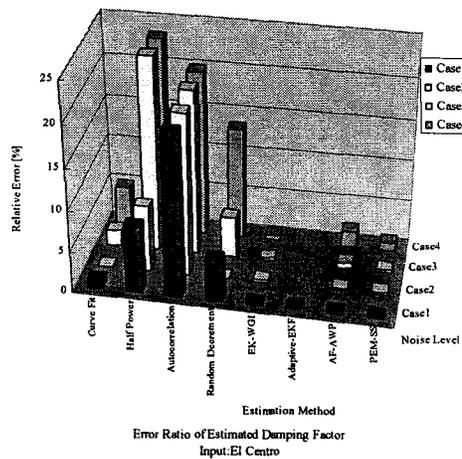


(b) 減衰定数算定結果

図4.7 ホワイトノイズ入力時の算定結果の相対誤差



(a) 減衰固有周期算定結果



(b) 減衰定数算定結果

図4.8 エルセントロ地震波入力時の算定結果の相対誤差

26%、Case4で相対誤差35%と明らかに同定精度が低下する。エルセントロ地震波入力時はホワイトノイズ入力時ほど顕著ではないが、やはりCase4の場合に相対誤差5%程度と減衰定数の同定精度が低下している。また、ハーフパワー法については、ホワイトノイズ入力時には、ノイズ混入レベルに応じて概ね推定精度は悪化し、特にCase4については相対誤差300%以上となる。エルセントロ地震波入力時はこれほど顕著ではないが、やはりノイズ混入レベルに応じて推定パラメータの相対誤差は悪化し、Case4では相対誤差約24%程度となる。

図4.9(a)~(d)、図4.10(a)~(d)にカーブフィット法による同定結果を示すが、いずれの検討ケースにおいても、入出力のフーリエ振幅スペクトルより算定されたスペクトル比と、カーブフィットされた応答倍率曲線はよく一致している。すなわち、ここで生じた推定誤差は入出力に混入するノイズの影響により、スペクト

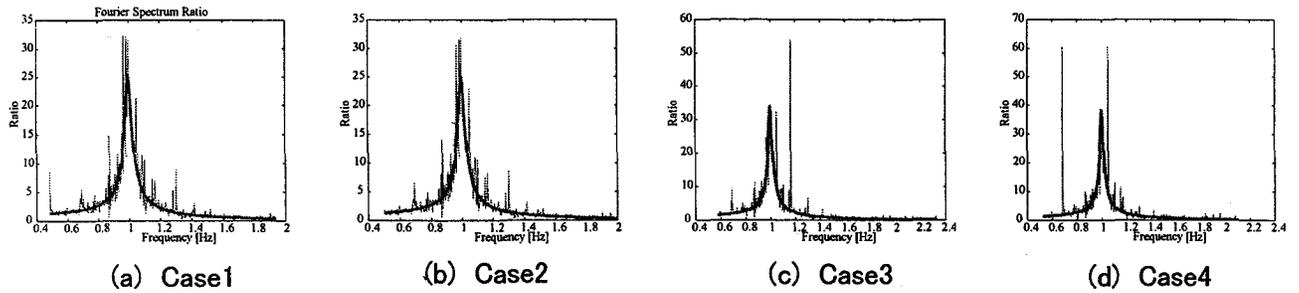


図4.9 ホワイトノイズ入力時のカーブフィット法による算定結果

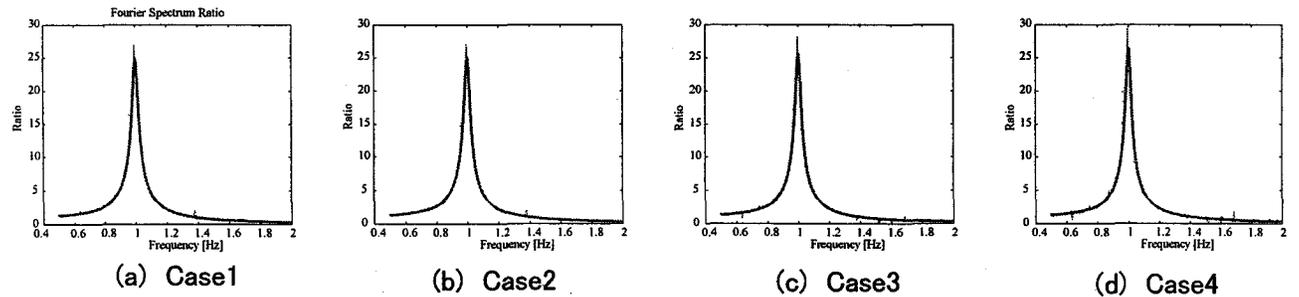


図4.10 エルセントロ地震波入力時のカーブフィット法による算定結果

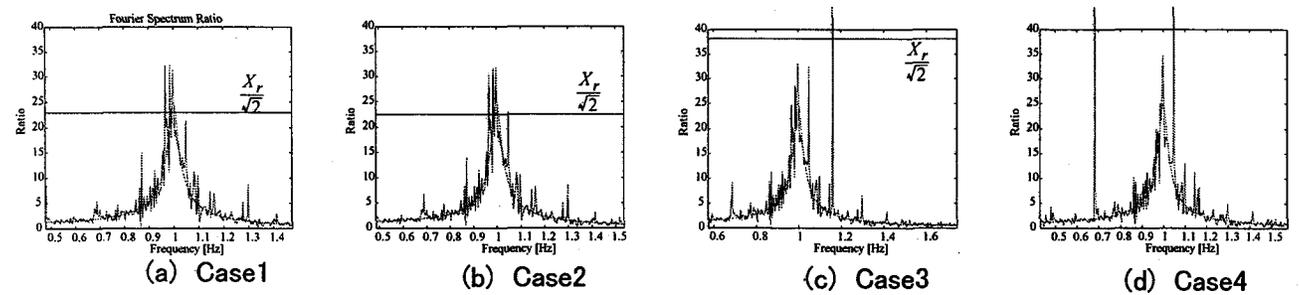


図4.11 ホワイトノイズ入力時のハーフパワー法による算定結果

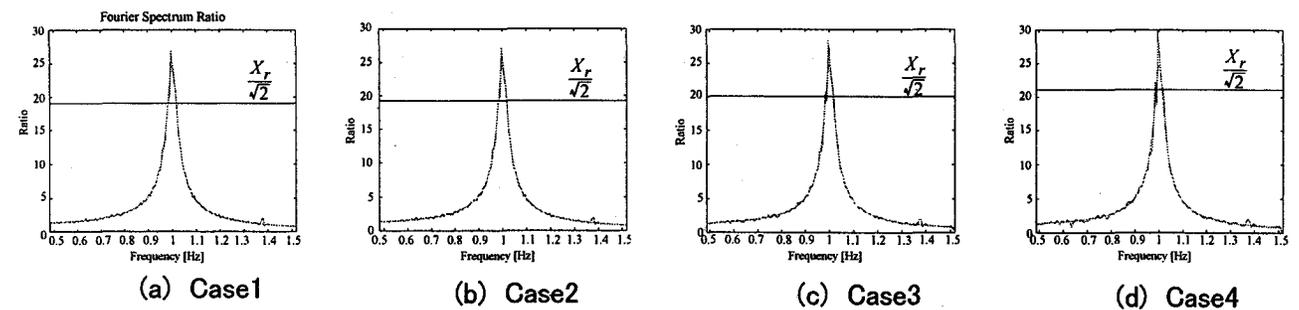


図4.12 エルセントロ地震波入力時のハーフパワー法による算定結果

ル比自体の推定精度が悪化したためと考えられる。また、図4.11(a)~(d)と図4.12(a)~(d)に同じく入出力量より算定されたフーリエスペクトル比と、その最大振幅の $1/\sqrt{2}$ 振幅を直線でプロットした図を示す。図より誤差混入レベルが高い場合、ホワイトノイズ入力時にはスペクトル比の変動により振幅ピークポイントを正しく推定出来なかったため推定精度が悪かったこと、またエルセントロ地震波入力時には振幅ピークのポイントは正しく推定できたものの、フーリエスペクトル比自体がノイズの混入により精度が悪くなったため同定精度が悪化したものと考えられる。

(2) 状態空間表示による時間領域の手法

時間領域の各手法については、減衰固有周期に関してはいずれの手法によっても、同定計算が発散しなかった場合には推定パラメータの相対誤差が1.5%以内で推定されている。これに対し減衰定数は各手法間、入力波の違い、あるいはノイズレベルによりその推定精度が大きく異なる結果となった。

ホワイトノイズ入力時については、ノイズレベルの低いCase2ほどの手法によっても推定値相対誤差概ね10%以内で減衰定数を推定可能であったが、混入ノイズレベルが5%のCase3は同定された減衰定数の相対誤差はPEM-SSで約4%、Adaptive-EKFで約17%、EK-WGIでは約44%程度となった。また、AF-AWPでは計算途中で発散が生じた。ノイズ混入が最も高いCase4の場合には、Adaptive-EKFとAW-AWPは解が算定できず、EK-WPIの推定値の相対誤差は約88%となった。これに対し、PEM-SSの推定値の相対誤差は約5%と、他の手法に比較して最も優秀であった。

表4. 16 ホワイトノイズ入力時の剛性算定結果

Method	Stiffness [kgf/cm]								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
EK-WGI	39.478	39.465	0.033	39.501	0.058	39.637	0.403	39.797	0.808
Adaptive-EKF	39.478	39.468	0.025	39.068	1.039	39.483	0.013	-	-
AF-AWP	39.478	39.466	0.030	39.462	0.041	-	-	-	-
PEM-SS	39.478	39.452	0.066	39.450	0.071	39.444	0.086	39.436	0.106

表4. 17 ホワイトノイズ入力時の減衰係数算定結果

Method	Damping Coefficient [kgf sec/cm]								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
EK-WGI	0.251	0.252	0.398	0.273	8.765	0.361	43.825	0.473	88.446
Adaptive-EKF	0.251	0.252	0.398	0.281	11.952	0.294	17.131	-	-
AF-AWP	0.251	0.252	0.398	0.266	5.976	-	-	-	-
PEM-SS	0.251	0.252	0.398	0.249	0.797	0.241	3.984	0.237	5.578

表4. 18 エルセントロ地震波入力時の剛性算定結果

Method	Stiffness [kgf/cm]								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
EK-WGI	39.478	39.479	0.003	39.482	0.010	39.496	0.046	39.513	0.089
Adaptive-EKF	39.478	39.479	0.003	40.323	2.140	-	-	-	-
AF-AWP	39.478	39.479	0.003	39.481	0.008	39.507	0.073	39.421	0.144
PEM-SS	39.478	39.478	0.000	39.479	0.003	39.482	0.010	39.486	0.020

表4. 19 エルセントロ地震波入力時の減衰係数算定結果

Method	Damping Coefficient [kgf sec/cm]								
	Exact	Case1		Case2		Case3		Case4	
		Estimated	Rel. Err. [%]						
EK-WGI	0.251	0.251	0.000	0.252	0.398	0.252	0.398	0.253	0.797
Adaptive-EKF	0.251	0.251	0.000	2.812	1020.319	-	-	-	-
AF-AWP	0.251	0.251	0.000	0.252	0.398	0.253	0.797	0.246	1.992
PEM-SS	0.251	0.251	0.000	0.252	0.398	0.252	0.398	0.254	1.195

エルセントロ地震波入力時には、同定計算が発散せずすんだものについては、同定計算が間違っただけに収束したと考えられるAdaptive-EKFのCase2を除き、すべてのノイズレベルに対して相対誤差2%程度の精度で推定が可能であった。ただし、どのノイズ混入レベルにおいても計算結果が真値近傍に収束したのは、ホワイトノイズ入力時はPEM-SSのみであり、エルセントロ地震波入力時にはAdaptive-EKF以外の3手法のみであった。推定パラメータの発散現象が生じた検討ケースについては、観測ノイズのみの検討ケースと同様に、同定計算に必要な推定パラメータの平均値の初期値をさらに真値近傍に近い様々な値に変更して同定計算を実施したが、いずれの場合についても同様な発散現象が生じたため計算を打ち切った。

これらの手法における直接の推定パラメータである剛性と粘性減衰係数について、ホワイトノイズ入力時の同定結果を表4. 16と表4. 17に、また、エルセントロ地震波入力時の同定結果を表4. 18と表4. 19に示す。表4. 18, 4. 19より、エルセントロ地震波入力時のAF-AWP法Case2の場合には、推定パラメータのうち剛性については概ね真値近傍に収束したものの、粘性減衰係数が間違っただけに収束してしまっただけがわかる。また、その他の検討ケースについても、入力波によらず剛性については概ね真値近傍の値を推定するのにたいし、粘性減衰係数はノイズレベルが高い場合には正確な同定が難しいことがわかる。ただし、いずれの検討ケースを通じて、PEM-SSは安定して収束し、かつ推定パラメータの相対誤差も高々5%程度以内と極めて優秀な結果となった。

以上より、下記の結論が得られた。

入力と観測の両者にノイズが混入する場合の粘性減衰定数の算定について

- (1)周波数領域の手法では、ハーフパワー法よりカーブフィット法の法がやはり精度の良い推定結果が得られるが、その精度は誤差混入レベルの影響を大きく受ける。これは、誤差により推定されるフーリエスペクトル比の精度が悪化するためである。
- (2)観測ノイズのみの混入時には、概ねインパルス応答の推定手法より周波数領域の推定手法の方が推定精度がよいが、入力にノイズが混入し、特にノイズレベルが高い場合にはこの傾向が逆転する。
- (3)時間領域の手法については、真値近傍に収束した場合には概ね精度の良い推定が可能である。ただし、間違っただけに収束や発散といった現象もノイズレベルが高い場合にはしばしば起きるため、初期値の設定等に注意が必要である。また、推定結果は入力波の特性やノイズレベルによりかなり変動するので、出来れば複数の手法にて同定計算を実施し、それらの結果の比較より推定パラメータを決定することが望ましい。また、時間領域の各手法間では概ねPEM-SSが最も収束性がよく、EK-WGIがこれに次ぐと思われる。

4. 4 まとめ

以上、データにノイズを含む場合についての検討を総括すると、下記のようになる。

観測ノイズ混入時、入力ノイズ混入時の両方に共通すると考えられる事項

- (1)固有周期（剛性）の算定については、いずれの手法によっても、同定計算が実行できれば第3章と同様に概ね精度良く推定することが可能である。
- (2)自己相関関数法による同定精度は入力波の性質に依存する。一般的に入力波の性質がホワイトノイズ的であれば、観測ノイズの影響がほとんどなく、また、データ長が同定精度に及ぼす影響もRD法に比較すると小さい。また、その場合の同定精度は相対誤差レベルで概ね10%程度と推定される。
- (3)RD法については、自己相関関数法に比較してデータ長とノイズ混入レベルの両者が同定精度に及ぼす影響は大きい。また、十分に長いデータ長がある場合においては、観測データのノイズ混入率が5%以下の場合には自己相関関数法より推定精度が良いが、ノイズ混入率がそれ以上の場合には自己相関関数法より推定精度が低下することがある。
- (4)自己相関関数法、RD法とも、ホワイトノイズ、地震波入力時のいずれの検討ケースの場合でも、もともと誤差混入レベルの高いCase4の場合において推定精度が相対誤差20%以内である。これは観測ノイズ混入のみの場合には他の手法と比較して相対的に精度が良くないが、入力に対してもノイズの混入がある場合には他の手法と比較して相対的に精度が良い。
- (5)状態空間表示による時間領域の手法では、ノイズ混入レベルが高い場合においても、概ね真値に収束したと考えられる計算結果においては、相対誤差10%以内に収まっており、そのうち殆どの検討ケースでは減衰定数の相対誤差レベルも高々3%程度と精度が高い。ただし、4. 2と4. 3の検討で全ケースでほぼ真値へ収束したと考えられるPEM-SSでは、概ね入力ノイズ混入時の方が推定精度が悪化しており、条件等してはより厳しいものと考えられる。
- (6)状態空間表示による時間領域の手法では、概ねAdaptive-EKFは同定計算の発散現象が誤差混入レベルに極めて敏感であり、以下AF-AWP法がこれに続く、すなわち、同定計算の収束の確実性という面では、PEM-SSが最もよく、EK-WGIがこれに続く。
- (7)状態空間表示による時間領域の手法では、各手法ともノイズレベルが大きい場合はそれに応じて同定精度が低下する。この同定精度の低下は概ねAdaptive-EKFが最も大きく、この手法は混入ノイズの影響が最も敏感に出る。反対にEK-WGIとPEM-SSがもっとも混入ノイズの影響を受けにくく、AF-AWPはこの中間程度である。
- (8)状態空間表示による時間領域の手法のなかでは、PEM-SSはすべてのケースで収束計算が発散せず、その推定値の相対誤差レベルも最大6%以内であった。

観測ノイズのみ混入時に特有と考えられる事項

- (1)カーブフィット法は観測ノイズ混入に殆ど影響されずに安定して非常に精度の良い推定が可能である。
また、その際の推定精度はホワイトノイズ、地震波入力とも相対誤差レベルで1%以内である。
- (2)ハーフパワー法の推定精度は観測誤差の影響を殆ど受けない。ただし、その推定精度は入出力間のフーリエスペクトル比の形状に大きく左右される。また、同じ周波数領域の手法であるカーブフィット法の方が高い推定精度を期待できる。

入力ノイズと観測ノイズの両者混入時に特有と考えられる事項

- (1)カーブフィット法による減衰定数の算定精度はノイズレベルに応じて低下し、ノイズレベル10%の場合には最大相対誤差35%程度となる。

参考文献

- 1) 犬丸直明, 古川忠稔, 井上 豊: 適応フィルタ及び適宜重み付け手法を用いた構造物のシステム同定, 第10回日本地震工学シンポジウム, Vol. 2, 1998年11月, pp. 2461-2466

第5章 線形多自由度系構造物動特性の同定

5. 1 緒言

本章では、線形多自由度系構造物動特性の同定に関する検討を行う。ここでは、まず基本的事項として、建築構造の解析手法とモデルについて基礎的な事項を述べ、さらにシステムの自由度と次数の関係について述べるとともに、多入力多出力システムの同定に関しての基本的な説明を行う。

建築構造物は、地震時には水平2方向および上下方向の地動を同時に受けて非常に複雑な動きをするが、通常の応答解析では特別な場合を除き水平1方向の振動を取り出して考え、平面振動モデルとして取り扱われることが多い。建築構造物は、一般に基礎を介して地上と、また基礎から最上階まで連続した形状であり、無限のモード次数を有する連続体であるが、想定される解析アプローチとしては

- (1)そのまま連続体として取り扱う
- (2)構造物全体を有限要素法により解析する
- (3)構造体を骨組みモデルとして取り扱う
- (4)構造体を多層せん断型モデルに置換して解析を行う

のいずれかの手法が考えられる¹⁾。この中で(1)は特殊な解析目的や特殊な建築物を対象とする場合を除き、通常の建築設計時に用いられることは少ないであろう。また、(2)も建築構造物に限定するとモデル化および解析の労力が膨大であるため、構造体内部の接合部や部材レベルでの解析は通常実施されるが、建物全体をモデル化することは殆どないと思われる。従って通常の建築設計レベルを想定すると、(3)または(4)の手法により建築構造物のモデル化がなされると考えてよいと思われる。

(3)の骨組みモデルは、柱、梁、壁などの個々の部材を1つの力学的要素と考え、それらの弾性から塑性にわたる挙動を考慮したモデルを用いて解析を行うモデルである。この手法は、後に述べる(4)のせん断質点型モデルに比較すると、部材レベルの詳細な知見を得ることができるが、一般に解析手法、あるいはモデルの作成は複雑となる。これに対し(4)はおおむね構造物各層を一つの集中質量体として仮定し、これが各層位置で水平方向のみ(場合によっては鉛直方向のみ)に移動するとの仮定にたちモデル化を行うものである。このような仮定に基づくモデルは通常せん断質点型モデルと呼ばれることが多い。このせん断質点系モデルは、建物の復元力特性を各層ごとのせん断バネの復元力特性(層剛性、降伏層せん断力)に置き換えて表すもので、建物の地震応答のおおよその性質を調べるのに広く用いられている。

解析モデルの性質としては、(1)は連続型モデルとなるが、それ以外の(2)~(4)はいずれも離散型モデルを仮定して解析を行うこととなる。解析モデルとして離散型モデルを用いると、連続型モデルよりモデルの自由度が縮合されるため、結果として高次モードを表現できなくなる。しかし、より自由度の大きなモデルを用いると、必然的に解析モデルの作成および解析、ひいては結果の検討が膨大な作業量となることも多い。このようなモデルの選択は、解析の目的に応じて行われるものであり、検討あるいは解析の目的に合致する

限りにおいては、できるだけシンプルなモデルを採用することがよい解析結果につながる場合も多いであろう。

また、システム同定の立場からすると、対象（解析）システムの自由度が多い場合、往々にして検討システムを数学的に表現するために必要なパラメータが多くなり、限定された入出力データを用いてこれらのパラメータを同定することは困難な作業となる。特に地震観測データのように、その状況を再現することが不可能であり、かつ観測データが決して豊富では無い状況の中で、同定パラメータの多いモデルを構築してパラメータ推定を行うことは非常に困難を伴うと考えられる。

さらに、これまでの知見より、建築構造物は高さ方向の質量分布は均一でなく、おおむね各層位置に質量が集中し、地震時の振動状況もおおむね低次モードの振動が卓越する振動モードで振動していることが知られている。そこで通常の建築設計では、建物全体の振動を解析するためにはおおむね(4)の多層せん断型モデルとすれば建物全体の概略の挙動を再現可能であると考えられており、日本では高層建築等の動的な解析および設計に広く用いられている。このような現状と、現時点での種々の同定手法の推定能力・精度、および現状で得られている地震観測記録等を勘案すると、現状では構造物を多層せん断型モデルに仮定してその動的特性を推定することが現実的であると考えられる。付け加えれば、今後、建物内部に非常に高密度に観測機器が設置されている建物において適切な地震観測記録が得られることがあれば、本章に記載する各種手法を用いて部材レベルでの同定解析を行うことが可能である。

次に多入力多出力システムの同定について述べる。本論文では、これまでに周波数領域の同定手法、インパルス応答の推定法、あるいは時間領域で状態表示を用いる同定法の大きく3つに分類できる手法による同定を行ってきた。これらの手法はいずれもこの章で対象とする線形多自由度系の同定手法として適用することは原理的には可能である。この事項の詳細はAppendix Aに示すが、一般に式(5.1),(5.2)の状態空間表示で表される線形時不変多自由度システムの伝達関数行列は式(5.3)となる。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5.1)$$

$$y = Cx + Du \quad (5.2)$$

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (5.3)$$

また、単位インパルス応答のラプラス変換は伝達関数に等しいので、インパルス応答と伝達関数は一対一に対応する。従って、状態空間表示に基づく時間領域の同定手法を用いて多自由度線形システムの動特性を同定できれば、式(5.3)により各入出力間の伝達関数（言い換えれば周波数応答関数）を一意に求めることができる。

これに対し、伝達関数行列より状態空間表示を求めることは、その逆に比較すると難しい問題となることが多い²⁾。一般に伝達関数行列 $G(s)$ が与えられたとき、それに対応する状態空間表現 (A, B, C, D) を見いだすことを伝達関数行列の実現問題と呼び、これを解いて得られる (A, B, C, D) を $G(s)$ の実現(realization)と呼んでいる。一つの状態空間表現を正則な座標変換により別の状態空間表現に変形しても伝達関数行列は不変であることからわかるように、与えられた伝達関数行列 $G(s)$ の実現は一意には定まらない。また、特に多入力多出力系については、数値解析的に正しい答えを見いだすことが難しいことが多いようである。さらに、

この様にシステムの状態空間表現が求められなければ、特に対象システムに制御を加える場合において、システムの可制御性や可観測性の問題を明らかにすることはできない。またシステムの一般的な安定論や最適制御理論なども、この状態空間表現と密接な関係があるため適用や検討が非常に困難となる³⁾。

これまで検討してきた1自由系のシステムであれば、質量を既知とすれば、周波数応答を規定するパラメータである固有周期と減衰定数が求められれば、剛性と粘性減衰係数を一意に算定できる。しかし、多自由度系の場合には、剛性分布等を仮定しなければモード周期とモード減衰定数よりモデルの物理量である剛性や減衰係数を求めることは出来ないと考えられる。

以上述べてきた内容に基づき、本章ではまず5.2においてインパルス応答の同定手法のうち近年広く用いられているRD法を用いて、線形2層せん断型モデルを仮定した場合について比較的簡便な手法で各次モードの固有周波数と減衰定数を同定する手法を示し、数値計算によりその推定精度の検討を行う。次に、5.3において線形3層せん断型モデルを用いて、数値計算により既出の時間領域で状態空間表示に基づく各手法により各層の剛性と粘性減衰係数を推定し、その精度の検討を行う。

5.2 RD法による線形2層せん断型モデルの同定

RD法については、入力が定常ランダム過程であり、かつ十分な長さの構造物応答の時刻歴データがあれば精度の良い1次減衰定数の推定が可能であること、また、入力波がややランダム過程でない場合においても、同じくインパルス応答の同定手法である自己相関関数法に比較すると、同定精度がよく、実構造物系動特性の同定に用いる適用範囲がやや広いと考えられる。第2章でも述べたように、インパルス応答による多自由度系の表現は基本的には可能であるが、実際の適用時にはこのインパルス応答より、対数減衰率により減衰定数を推定する事が殆どであり、その意味では本手法は1自由度系の減衰定数評価手法であると考えられる。したがって、本手法を多自由度系に適用するためには、応答の時刻歴波形より各モードの波形を分離する必要がある。そのためには一般に、時刻歴波形に対し各モードの固有振動数周辺帯域のみを通過させるバンドパスフィルターをかけることが行われる。しかし、特に高次モード等で固有振動数が近接している場合ではバンドパスフィルターによる分離が困難であることが予想される⁴⁾。

そこで本節では、応答の時刻歴波形から2層せん断型構造物系のモードマトリクスを推定し、これより応答波形をモード分解する手法を示す。さらに数値計算により、本手法とバンドパスフィルターを用いた従来の手法による各モードの減衰定数の推定を行い、両手法による解析結果の比較検討を行う。

5.2.1 各次モード応答波形の分離法

応答観測波形より各次モード応答波形を分離するため、ここでは以下2つの手法を用いる。

(1) FFTによるバンドパスフィルターを用いた手法

従来から提案されている手法で、FFTによりフーリエスペクトルを算定し、スペクトルをモードの固有振動数周辺のバンド幅で抜き出し、フーリエ逆変換によりモードの時系列波形を作成するものである。以下本手法をバンドパス手法と呼ぶ。

(2) モードマトリクスを推定する手法

構造物を多質点系モデルに置き換え、そのモードマトリクスを用いてモードの時系列波形を分離する手法である。これまで、この手法を適用するためには以下に示す2つの条件があった。

- ① モデルのモードマトリクスが既知である
- ② モデルのモード次数個の時系列波形が必要となる

本手法は、モードマトリクスが未知である多自由度構造物を対象とし、これを2層せん断型モデルと仮定することで、応答の時系列波形より読みとった各次の固有振動数と各層の質量よりモードマトリクスを推定し、モード分解を行うものである。これにより①の条件を

- ①' モデルの質量が既知である

と書き換えることで、より広い分野への適用が可能になると考える。以下、本手法をモード分解手法と呼ぶ。

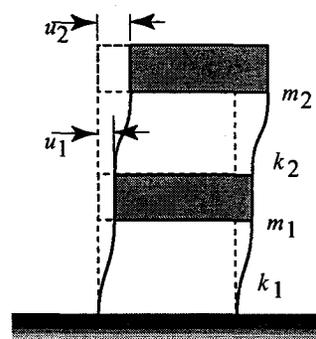


図5. 1 検討対象モデル

モードマトリクスの推定は以下に示す方法により行う。図5. 1に示す線形2層せん断型構造物モデルと、各層の応答の時系列波形が与えられているとする。ここで、モデル各層の質量 m_1 、 m_2 は既知であり、剛性 k_1 、 k_2 は未知量である。また、応答波形のスペクトル解析により、各次の固有円振動数を求めることで、各次の固有値 λ_1 、 λ_2 が推定できるものとする。このモデルがゼロ以外の固有ベクトルを持つためには、固有値の定義より(5.4)式を満足する必要がある。

$$\det \left[-\lambda \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \right] = 0 \quad (5.4)$$

(5.4)式を解くことで各次の固有値が次のように決まる。

$$1 \text{ 次の固有値 } \lambda_1 = \frac{g - \sqrt{g^2 - 4dh}}{2d} \quad (5.5)$$

$$2 \text{ 次の固有値 } \lambda_2 = \frac{g + \sqrt{g^2 - 4dh}}{2d} \quad (5.6)$$

ここに、 $d = m_1 m_2$ 、 $g = m_1 k_2 + m_2 (k_1 + k_2)$ 、 $h = k_1 k_2$ である。さらに $\lambda_1 + \lambda_2 = P$ 、 $\lambda_1 - \lambda_2 = Q$ と置くと

$$Qd = \sqrt{(Pd)^2 - 4dh} \quad (5.7)$$

$$\therefore k_1 = \frac{h}{k_2} = \frac{(P^2 - Q^2)d}{4k_2} \quad (5.8)$$

$P = \frac{\xi}{d}$ より

$$P = \frac{1}{d} \left\{ m_1 k_2 + m_2 \frac{(P^2 - Q^2)d}{4k_2} + m_2 k_2 \right\} \quad (5.9)$$

$$\therefore k_2 = \frac{dP \pm \sqrt{d^2 P^2 - (m_1 + m_2)m_2(P^2 - Q^2)d}}{2(m_1 + m_2)} \quad (5.10)$$

これを(5.8)式に代入することで k_1 が求まり、(5.10)式右辺分子中の正負符号の差により2組の (k_1, k_2) が得られる。モデル各層の応答からローパスフィルターを用いて2次固有振動数を除去したものを、それぞれ μ_1 、 μ_2 としたとき、それぞれの最大値の比

$$U = \frac{\mu_2 \text{ MAX}}{\mu_1 \text{ MAX}}$$

を、このモデルの1次モード形とみなし、2種類の剛性の組それぞれを用いて求めた1次モードの値と比べることで、最終的にどちらか1つの剛性の組およびそのモードマトリクスを正解として決定する。

5. 2. 2 数値計算例

(1)対象モデル

1次モードと2次モードの固有周波数比 f_2 / f_1 が1.2および3.0の2種類の2層せん断型モデルについて、バンドパス手法、モード分解手法を用いて同定の数値計算を実施した。モデルへの入力ホワイトノイズとし、サンプリング周期0.01[sec]で、各層の応答を算出した。表5. 1に各モデル諸量を示す。

(2)算定手法および結果

バンドパス手法では、各モードの固有振動数を中心とした0.6[Hz]幅の通過帯域を定め、通過帯域外のフーリエ振幅スペクトル値を全て1/10,000に落とすことで各モード波形の抽出をおこなった。なお、バンドパス手法・モード分解法の両手法とも、RD法は時間軸方向に極大値を1つずつずらしながら3,000回程程度の十分な重ね合わせを行った。

表5. 2および5. 3に、両検討対象モデルにおける減衰定数の算定結果を示す。振動数比の大きなモデル($f_2 / f_1 = 3.0$)では、バンドパス手法とモード分解手法のいずれにおいても各次のモード減衰定数の同定は十分良い精度で可能であった。ただし、詳細に見るとバンドパス手法よりモード分解手法の方が推定

表5. 1 検討対象モデル諸量

Ratio of f_1/f_2	Natural Frequency [Hz]		Damping Factor	
	1st	2nd	1st	2nd
3	0.686	2.059	1	3
1.2	1.845	2.214	1	1.2

表5. 2 減衰定数推定結果 ($f_2/f_1=3$)

	Band Pass Technique		Modal Technique	
	1st	2nd	1st	2nd
Exact	1	3	1	3
Estimated	0.93	2.91	0.96	2.96
Rel.Err [%]	7.0	3.0	4.0	1.3

表5. 3 減衰定数推定結果 ($f_2/f_1=1.2$)

	Band Pass Technique		Modal Technique	
	1st	2nd	1st	2nd
Exact	1	1.2	1	1.2
Estimated	0.83	1.01	0.87	1.3
Rel.Err [%]	17.0	15.8	13.0	8.3

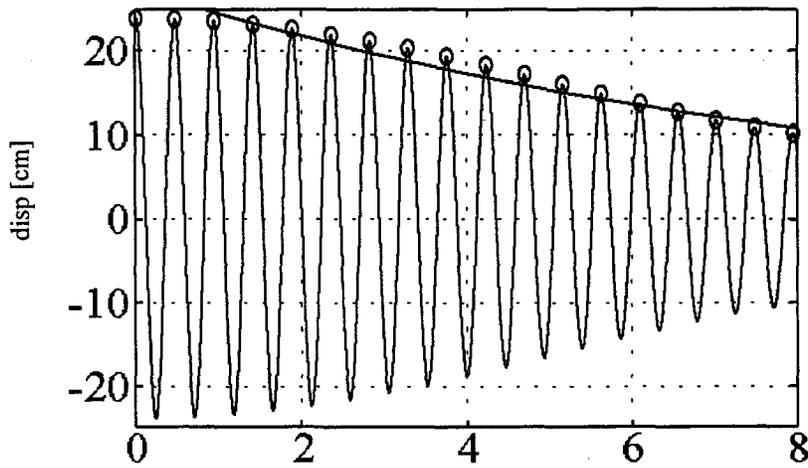


図5. 2 バンドパス手法により推定された2次モードのインパルス応答と対数減衰率曲線 ($f_2/f_1=1.2$)

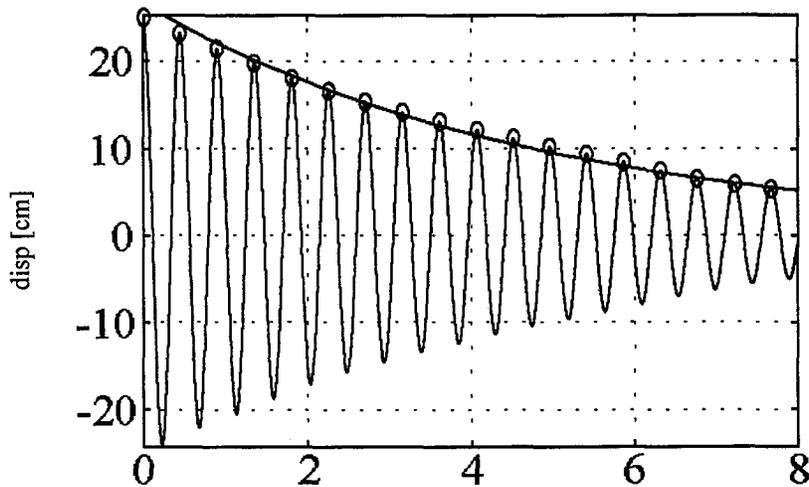


図5. 3 モード分解手法により推定された2次モードのインパルス応答と対数減衰率曲線 ($f_2/f_1=1.2$)

値の相対誤差が小さく、やや推定精度が良いと思われる。さらに、振動数比の小さなモデル ($f_2/f_1 = 1.2$) では、1次モード、2次モードともバンドパス手法ではモード分解手法より大きな誤差が生じた。特に2次モー

ドでは、図5. 2に示すように、RD法で重ね合わせた時系列波形の各極大値は最小2乗近似における包絡線と明らかに一致しない。これは、フィルターの通過帯域の影響を受けたためと思われる。一方モード分解手法では、図5. 3に示すように、時系列波形と包絡線とがほぼ一致しており、より精度のよい推定が行われたと考えられる。

以上の検討結果より、RD法を用いて2層せん断型モデルの動特性を同定するためには、バンドパス手法よりモード分解手法を適用するほうが推定精度が向上し、特に両モードの振動数が近接している場合にはこの差が顕著となることがわかる。ただし、ここに示すモード分解手法は、5. 2. 1 に示したように、同定するために2層せん断型モデル各層の応答観測記録が必要であるのに対し、バンドパス手法の場合は各モード応答が現れる観測位置であれば1ヶ所の観測記録で同定計算を行うことができる。したがって、実際にこれらの手法を適用して同定計算を実施する場合には、観測記録に応じてより適切な手法を選択することが必要であると考えられる。

5. 3 状態空間表現に基づく時間領域の各手法による同定

本節では、第2章で示された各種状態空間表現に基づく時間領域の同定手法により、線形多自由度モデルを用いた同定数値計算より各手法の適用性と同定精度の検討を行う。

これまでも述べた様に、状態空間表現に基づく時間領域の手法は、多自由度系かつ多出力多入力系を容易に扱うことができる手法であるため、これらの同定手法を多自由度系構造物動特性の同定に適用するにあたり、特に大きな手順の変更はない。ここでは、状態空間表現に基づく時間領域の各手法について、3層せん断型モデルを用いた数値計算により検討を実施した。

5. 3. 1 数値計算モデルおよび計算条件

本検討では、図5. 4に示す3層せん断型モデルを用いた同定の数値計算を行った。3層せん断型モデルは1方向入力、ねじれを生じない3自由度モデルである。解析モデルの諸量は、1次、2次、3次のモードに対し減衰定数 h が3.01[%], 8.42[%], 12.17[%]、非減衰固有振動数 f が4.01[Hz], 11.23[Hz], 16.22[Hz]となるモデルを用いた。モデル諸量に対する質量 m 、減衰係数 c 、剛性 k を表5. 4に、各モードの減衰定数および非減衰固有円振動数を表5. 5に示す。なお、同定パラメータは各層の剛性および粘性減衰係数とした。

本解析に用いた応答観測データは、入力に各周波数成分のパワーが $100[\text{gal}^2 \text{sec}]$ となる疑似ホワイトノイズを用い、時間刻み $0.01[\text{sec}]$ 、継続時間 $6[\text{sec}]$ となる応答を、線形加速度法により計算を行い作成した。

各手法とも同定モデルの質量は既知とし、観測量として基礎部に対する全層の相対速度応答及び相対変位応答を用いた。拡張カルマンフィルタ系の各手法における初期条件は、検討条件を同一にするため、推

定パラメータ平均値の初期値は表5. 6に示されるように設定し、また、予測誤差共分散行列 P_0 に関しては以下のように設定した。

$$P_0 = \text{diag.}(1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 10^3, 10^3, 10^3, 10^7, 10^7, 10^7) \quad (5.17)$$

ここで、式(5.17)の右辺において、3項目毎に、基礎部に対する各層の相対変位、基礎部に対する各層の相対速度、各層の減衰係数、各層の剛性に関する自己共分散である。

各拡張カルマンフィルタ手法の初期設定として、Adaptive-EKFとAF-AWPでは、図2. 3のフローチャートにおける各設定値を $N_w=10$, $M_w=3$ とした。また、AF-AWPでは $S_r=300$ とした。EK-WGIにおいては、グローバルな繰り返し数を最大10回とした。

また、PEM-SS法においては、推定パラメータの初期値は各種カルマンフィルタ法における推定パラメータの初期平均値と同一とした。

5. 3. 2 解析結果

表5. 4 検討対象モデル諸量

Story	Mass [t]	Damping Coefficient [tf s/cm]	Stiffness [tf/cm]
1	1.000	0.191	80.000
2	1.000	0.191	80.000
3	1.000	0.191	80.000

表5. 5 検討対象モデルのモード特性値

Mode	Damping Factor	Natural Circular Frequency [rad/sec]
1	0.0301	25.1754
2	8.4200	70.5398
3	12.1700	101.9330

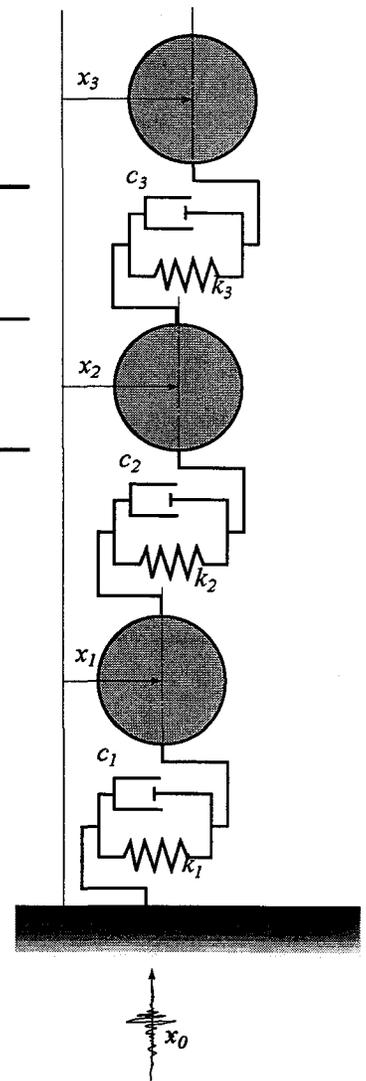


図5. 4 検討対象モデル

各種拡張カルマンフィルタ系手法とPEM-SSによる同定計算結果とその相対誤差を表5. 6に示す。

各種拡張カルマンフィルタ系手法による動特性の同定では、粘性減衰係数は表5. 6に示されるように、EK-WGIとAF-AWPでは1層目と2層目の算定結果が3層目の算定結果に比べ極端に悪く、1層目と2層目とで誤差を打ち消し合うかのような算定結果となっている。Adaptive-EKFではどの層も相対誤差が20%を超える。この理由としては、Adaptive-EKF特有の安定域での振動により、最終的に推定されたパラメータがばらついた為と考えられる。また剛性については表5. 6に示されるように、Adaptive-EKFの相対誤差が1%以内と精度が高く得られている。一方EK-WGIとAF-AWPにおいては、減衰係数とは逆に、1層目と2層目の同定精度に対し3層目の同定精度が低く、誤差率が10[%]弱となる。以上より、本検討結果ではAF-AWPによる各パラメータの推定結果は、概ねEK-WGI法による推定結果と近くなっている。

さらに詳細な検討を行うため、各種カルマンフィルタ系の同定手法による推定結果を固有値解析して求められた各次モードにおける非減衰固有円振動数と減衰定数を表5. 7に示す。同表より、非減衰固有円振動数の推定については、Adaptive-EKFでは各次の振動数とも非常に精度よく推定できたのに比較して、EK-WGIとAF-AWPが1次と3次の振動数を精度よく同定できたが、2次の振動数の推定誤差がやや大きいことがわかる。また、減衰定数についてはEK-WGIとAF-AWPでは1次の減衰定数が非常に精度よく同定され、高次になるほど同定精度が悪化する傾向がみられるが、Adaptive-EKFでは、逆に1次と2次の減衰定数の同定精度が相対誤差15~25%であるのに対して、3次の減衰定数の同定値の相対誤差が約2%と非常に精度のよい推定結果となっている。

また、同じく時間領域の手法であるPEM-SS法については、同定計算の結果、全く真値と等しい同定結果となった。これは、拡張カルマンフィルタ系の手法と比較検討のために、推定値の初期値を真値近傍に設定したため、結果的に推定パラメータが評価関数の極小値に収束せず、真値にただしく収束したためであると考えられる。

第3章での検討結果より、1自由度系の場合であれば各種拡張カルマンフィルタ系の手法とPEM-SS法はほぼ同程度の初期値依存性であり、また入力及び観測データにノイズ混入が無い場合には、これほど大きな推定誤差は生じない。したがって、多自由度線形構造物の動特性を同定するには予測誤差法が最適で

表5. 6 同定計算結果

	Exact value	Initial value	EK-WGI		Adaptive EKF		AF-AWP		PEM-SS	
			Estimated Mean	Rel. Error [%]	Estimated Mean	Rel. Error [%]	Estimated Mean	Rel. Error [%]	Estimated Value	Rel. Error [%]
c_1 [t s/cm]	0.1910	0.0750	0.1529	19.9476	0.1236	35.2880	0.1530	19.8953	0.1910	0.0000
c_2 [t s/cm]	0.1910	0.1250	0.2526	32.2513	0.2320	21.4660	0.2536	32.7749	0.1910	0.0000
c_3 [t s/cm]	0.1910	0.3500	0.1875	1.8325	0.1388	27.3298	0.1850	3.1414	0.1910	0.0000
k_1 [t/cm]	80.0000	50.0000	78.9023	1.3721	79.2320	0.9600	78.7420	1.5725	80.0000	0.0000
k_2 [t/cm]	80.0000	150.0000	81.8675	2.3344	80.3776	0.4720	82.2430	2.8037	80.0000	0.0000
k_3 [t/cm]	80.0000	100.0000	72.4819	9.3976	80.5316	0.6645	72.0369	9.9539	80.0000	0.0000

表5.7 カルマンフィルタ系手法推定値のモード解析結果

		Exact value	EK-WGI		Adaptive EKF		AF-AWP	
			Estimated Mean	Rel. Error [%]	Estimated Mean	Rel. Error [%]	Estimated Mean	Rel. Error [%]
h_1		0.0301	0.0301	0.0000	0.0256	14.9502	0.0300	0.3322
h_2		0.0842	0.0825	2.0190	0.0634	24.7031	0.0820	2.6128
h_3		0.1217	0.1413	16.1052	0.1193	1.9721	0.1411	15.9408
ω_1	[rad/sec]	25.1754	25.0399	0.5382	25.1387	0.1458	25.0360	0.5537
ω_2	[rad/sec]	70.5398	68.5018	2.8891	70.5661	0.0373	68.3656	3.0822
ω_3	[rad/sec]	101.9330	100.9186	0.9952	102.1298	0.1931	100.9525	0.9619

あると結論づけるためには、様々なモデルを用いたさらなる検討が必要であると考えられる。

ただし、各種拡張カルマンフィルタ系手法による同定を行うためには、2章においても記述したように、少なくとも状態量の平均値と予測誤差共分散行列の初期値が必要である。たとえば線形N層せん断型モデルの場合、各層の剛性と粘性減衰係数を推定パラメータとすると状態変数平均値の初期値として最小限必要なパラメータは2N個である。また、状態方程式における各状態量がおのおの独立であると仮定し、さらに推定パラメータを除く状態量の共分散はすべて0と仮定しても、少なくとも共分散行列の対角項内の2N個の共分散マトリクスの要素の初期値を設定する必要がある。すなわち、線形N層せん断型の構造物モデルを用いた同定に拡張カルマンフィルタ系の手法を適用するためには、最小限 $2N+2N=4N$ 個の初期値を決定する必要がある。例えば、線形6層せん断型モデルを仮定した場合には、同定計算を行うために計24個の適切な初期値を決定する必要があることになる。さらに、推定パラメータ以外の状態量についても常に初期値を0と設定して良いわけではないので、この場合にはさらに初期値の設定が困難となる。

これに対し、PEM-SSは推定パラメータの数だけ初期値を設定すればよいので、同じく6層せん断型の場合でも12個の初期値を決定するだけで済み、同定計算を実施する上でのトータルな作業時間は拡張カルマンフィルタ系の手法に比較して大幅に短縮されると考えられる。

以上より、少なくとも実用上の面からみて多自由度系などの推定パラメータ数が多い場合には、拡張カルマンフィルタ系の同定手法よりもPEM-SSを採用して同定計算を実施するのが適切であると考えられる。また、その推定精度も少なくとも拡張カルマンフィルタ系の同定手法と同程度以上を期待できると予想される。

5.4 まとめ

本章では、線形多自由度系構造物の同特性の同定に関して、まず基本的事項として、建築構造の解析手法とモデルについて基礎的な事項を、さらにシステムの自由度と次数の関係について述べ、ついで多入力多出力システムの同定に関しての基本的な説明を行った。

次に、RD法を用いて2層せん断型モデルの動特性を同定する場合に、応答の時刻歴波形から2層せん

断型構造物のモードマトリクスを推定し、これより応答波形をモード分解する手法を示し。さらに数値計算により、本手法とバンドパスフィルターを用いた従来の手法による各モードの減衰定数の推定を行い、両手法による解析結果の比較検討を行った。その結果、バンドパス手法よりモード分解手法を適用するほうが推定精度が向上し、特に両モードの振動数が近接している場合にはこの差が顕著となることが示された。

さらに、3層せん断型モデルを用いて状態空間表示による時間領域の各同定手法の適用性と精度の検討を実施した。その結果、少なくとも実用上の面からみて多自由度系などの推定パラメータ数が多い場合には、拡張カルマンフィルタ系の同定手法よりもPEM-SSを採用して同定計算を実施するのが適切であり、同定精度も少なくとも拡張カルマンフィルタ系の同定手法と同程度以上を期待できるとの結論を得た。なお、本検討中では拡張カルマンフィルタ系の各手法間での推定精度については有意な違いを結論づけるには至らなかった。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築構造力学の最近の発展－応力解析の考え方－，丸善，1987年，pp. 8-9
- 2) 須田信英：線形システム理論，朝倉書店，1993年12月，pp. 85-98
- 3) 電気学会：自動制御理論，オーム社，1992.10，p. 28
- 4) 田村幸雄，佐々木淳，塚越治夫：RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価，日本建築学会構造系論文報告集 第454号，1993年12月，pp. 29-38
- 5) 松下剛史，古川忠稔，井上豊：RD法による建築構造物の減衰評価に関する研究，第47回応用力学連合講演会 講演予稿集，1998年1月，pp. 27-28

第6章 非線形多自由度系構造物動特性の同定

6. 1 緒言

本論文では、これまで各種同定手法による線形構造物系動特性の推定に関して適用性あるいは推定精度に関する検討を行った。それらの手法の殆どはモデルが線形であることが前提条件であるものが多く、これまで建築・土木分野で比較的に多く適用されてきた構造物非線形動特性の推定手法は概ね拡張カルマンフィルタ系の手法である。この手法は状態空間モデルに基づく手法であるため多入力多出力系への適用が簡単で、かつ各種ノイズの考慮も可能である。特に星谷らが開発したEK-WGIは重み付きグローバルな繰り返しにより同定効果と精度を高める手法であり適用例も多い。

本論文では第5章において、上記の拡張カルマンフィルタ系の各手法と、本論文で提案するPEM-SSによる線形多自由度系構造物モデルの同定数値計算を実施し、その結果、特に推定パラメータ数が多い場合においてもPEM-SSは少なくとも拡張カルマンフィルタ系の手法であるEK-WGIと同程度以上の推定精度を有し、かつ推定計算に用いる初期値数が少ないため有利な手法であるとの結論を得ている。この結果より、本章で検討する非線形な復元力を有するモデルの同定を実施する場合においても、推定パラメータ数が多いため、上記のPEM-SSの利点が現れることと推察される。

そこで、本章では、PEM-SSを用いて非線形な復元力特性であるバイリニア型復元力とトリリニア型の特性を有するモデルに関する同定の数値計算を実施し、その適用性と推定精度に関する検討を行う。その際、まずPEM-SSによる非線形多自由度系構造物の同定手法の定式化について説明し、その後で、上記2つの復元力を有する2層系のせん断モデルに対してこの同定手法を適用し、数値実験により同定精度の検証を行う。また、その際さらに種々のパラメータスタディにより、建築構造物への本手法の適用に関する基礎的な検討を行う。

6. 2 バイリニア復元力を有する多層系への適用

6. 2. 1 PEM-SSのバイリニア復元力特性を有する多層系への適用

バイリニア型の復元力特性は図6. 1に示すように初期剛性 k 、弾性限界変位 X_y 、および第二分枝せん断剛性比 α の3つのパラメータによって規定される復元力モデルとなる。多層系の場合は、添え字 i が層を示すものとして、各層ごとに k_i 、 X_{y_i} 、 α_i 、および粘性減衰係数 c_i を定めると、弾塑性復元力 $q_i(x)$ は(6.1)～(6.3)式で表される。

$$q_i = K_i + R_i \quad (6.1)$$

ここに

$$K_i = \begin{matrix} k_i x & : AB, CD \\ \alpha k_i x & : BC, DA \end{matrix} \quad (6.2)$$

$$R_i = \begin{matrix} -(1-\alpha_i)k_i(X_{y_i} - X_{0i}) & : AB \\ (1-\alpha_i)k_i(X_{y_i} - X_{0i}) & : CD \\ (1-\alpha_i)k_i X_{y_i} & : BC \\ -(1-\alpha_i)k_i X_{y_i} & : DA \end{matrix} \quad (6.3)$$

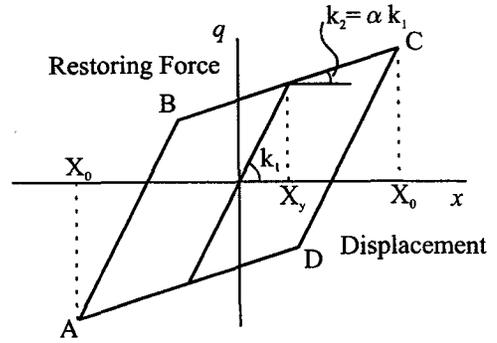


図6. 1 バイリニア系の復元力モデル

ここに X_{0i} は直前の最大塑性変位である。

これより、(6.4)式に示す運動方程式が成り立つ²⁾。

$$M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = -m\ddot{Z} - R \quad (6.4)$$

ここに、

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (6.5)$$

$$M = \text{diag}[m_1, m_2, \dots, m_n] \quad (6.6)$$

$$D = \begin{bmatrix} c_1 + c & -c_2 & & & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & & & -c_n & c_n \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 & & & 0 \\ -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -K_{n-1} & K_{n-1} + K_n & -K_n \\ 0 & & & -K_n & K_n \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$m = [m_1, m_2, \dots, m_n]^T \quad (6.9)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_1 - R_2 \\ R_2 - R_3 \\ \vdots \\ R_{n-1} - R_n \\ R_n \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

である。

以上より、状態量および観測量として各層の変位および速度を用いると、式(6.11)～(6.16)に示すような連続型の状態空間モデルが得られる。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(t)x + B(t)u \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (6.11)$$

ここに

$$x = (x_1, \dots, x_n, \dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n)^T \quad (6.12)$$

$$u = (\ddot{z} \quad 1)^T \quad (6.13)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K(t) & -M^{-1}D \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} & 0_{n \times 1} \\ -1 \\ \vdots \\ -1 \end{bmatrix} - M^{-1}R(t) \quad (6.15)$$

$$C = [I_{2n \times 2n}] \quad (6.16)$$

(6.11)式においては、システム行列 A と制御行列 B に時間依存性があるが状態方程式は線形表示となっている。このモデルは通常、線形時変系(Linear Time-Varying System)モデルと呼ばれる。

ここでは、バイリニア復元力を(6.1)式のように変位の比例項 K とそれ以外の項 R に分離し、この R を(6.4)式の右辺へ移項して見かけ上の外力として扱うことで、本来非線形のシステムを線形時変系モデルとして表現することが可能となっている。モデルが線形状態空間表示であれば、通常の線形モデルとして(6.11)～(6.16)式で示される連続型の状態空間モデルを離散化することが可能となり、(2.68)式と同様な離散型の状態空間モデルを得ることができる。(6.11)式中のシステム行列 A と制御行列 B は時不変(Time-Invariant)ではないが、剛性が一次剛性から二次剛性へ、あるいはその逆へと移り変わらない限りある定数と見なすことが可能である。そこで本節では、この移り変りが生じる都度、改めて離散化を行うことで本手法による同定の数値計算を行った。

なお、本論文では連続型状態空間モデルから離散型状態空間モデルを得るために必要な e^{At} はパデー近似により求め、入力0次ホールドを仮定して状態方程式の離散化を行った。また、弾性から塑性、塑性から弾性への移り変わりは、同定計算各ステップで前ステップの推定値をもとに判定した。

6. 2. 2 検討対象モデル

図6. 2に示す構造物モデルにより、本同定手法による数値計算を行った。モデルの動特性は図中に示す通りとした。また、入力波はホワイトノイズの確定波(10秒)とし、サンプリング周期0.0002秒(5000Hz)の水平加速度として入力した。なお入力波の振幅は、応答が各層とも非線形領域に入る様、最大振幅±50galに設定した。

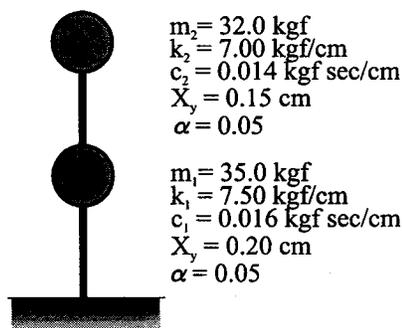


図6. 2 検討対象モデル

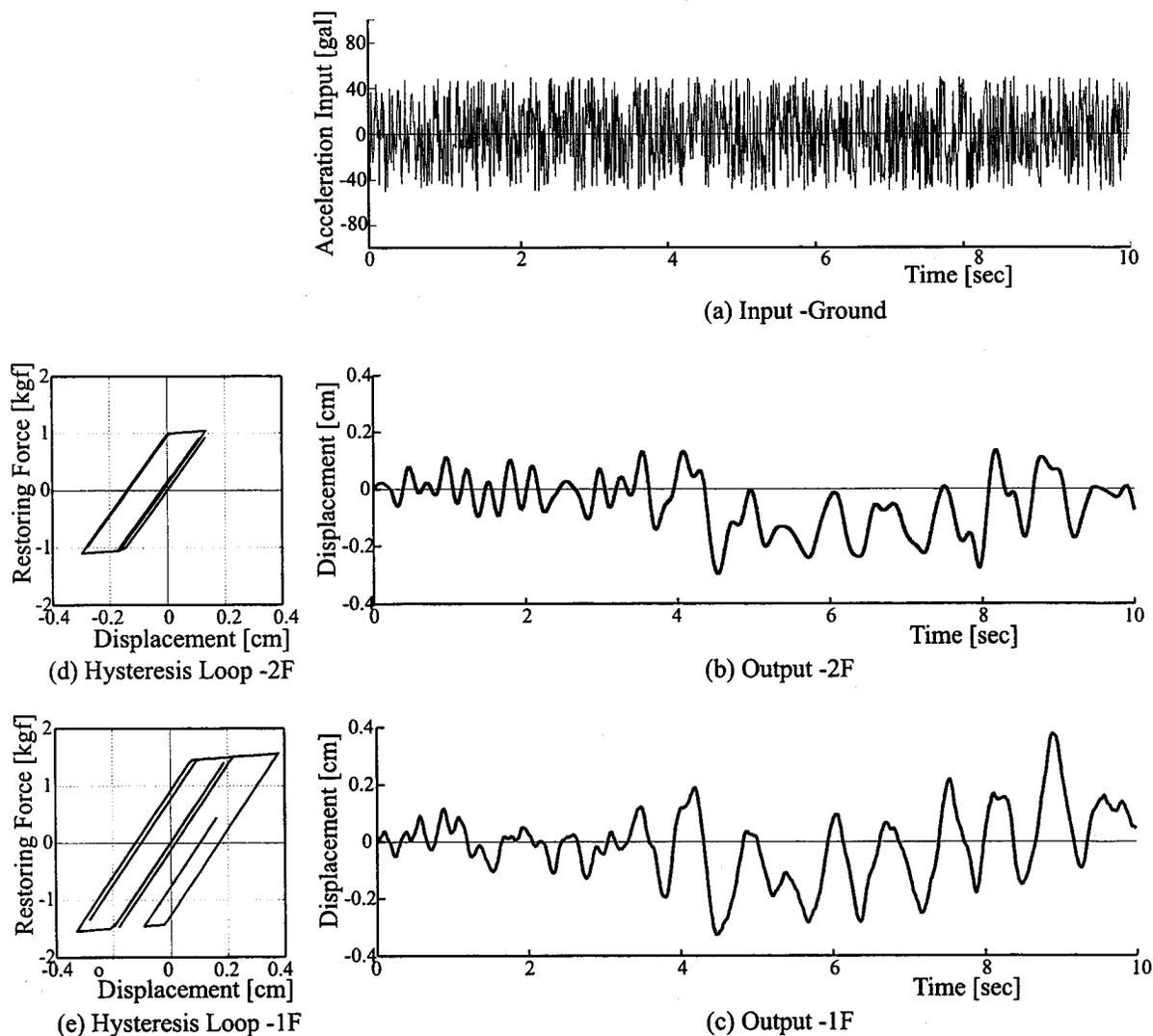


図6. 3 入力加速度と各層の層間変位の時刻歴およびヒステリシスループ

応答は、上記の構造物モデルを(6.4)式の運動方程式にて表し、Newmarkの β 法($\beta=1/4$:平均加速度法)を用いて算定した。入力加速度、各層のヒステリシスループ、および層間変位の時刻歴を図6. 3に示す。

同定用のデータセットはこの応答および入力データを適当なサンプリング周期の波形にダウンサンプリングして作成した。データ長はいずれの検討ケースについても10秒とした。すなわちサンプリング周期100Hzでは1チャンネルあたりのデータ数1000個、1000Hzでは同10000個となる。

なお、本検討においては、各層の質量は既知として、未知パラメータベクトルは各層の初期剛性、弾性限界変位、第二分枝せん断剛性比および粘性減衰係数とした。したがって、図6. 3の構造物モデルでは、推定を行う未知パラメータは計8個となる。

また、(2.68)式の状態空間モデルのイノベーション表現における Γ はゼロ行列として規定し、同定モデルとして考慮できる雑音は観測雑音のみとした。ただし、同定用の入力データ及び応答計算で得られた観測データでは、特にホワイトノイズ等を意図的に混入せず、入出力データに関する誤差混入の問題は特に考慮していない。

6. 2. 3 観測サンプリング周期による同定精度の検証

一般にバイリニア復元力等の非線形系の応答計算を行う際には、剛性の変化時点で時間ステップを細分割する等の手法がとられる。本同定法においても、予測値 \hat{y} の推定ため応答計算を行っており、同様の手法がとられなければ予測値そのものの精度が悪化すると考えられる。そこで、同定精度へのサンプリング周波数の影響を調べるため、Case-Aとしてデータサンプリング周波数をパラメータとした同定計算を実施した。ここでは、観測量として各層の変位・速度が観測され、データはそのサンプリング周波数で計測されたものとして数値計算を実施した。

数値計算の結果得られた推定値および相対誤差を表6. 1に示す。表6. 1より、バイリニア型復元力を有する構造物系の同定を実施する場合には、できる限り高いサンプリング周波数で同定用データ観測を行うことが同定精度の向上に結びつくこと、また検討対象モデルでは、同定精度目標値を概ね10%程度とすればサンプリング周波数500Hz程度、同じく5%程度なら概ね1000Hz程度のサンプリング周波数で観測されたデータセットが必要であることがわかる。

しかし、実際の地震観測等によって得られるデータのサンプリング周波数は概ね100~200Hz程度であり、本検討手法に適用するには不十分である。そこで、次にCase-Bとして、周波数100Hzのデータセットを補間してこれよりサンプリング周波数の高いデータセットを再構築し、このデータセットによる同定精度の検討を試みた。同定モデル、入力および観測量はCase-Aと同じであるが、応答計算結果をダウンサンプリングして一旦100Hzサンプリングのデータとし、その後入力及び観測データをスプライン補間により

表6. 1 同定数値計算結果(Case-A)

Parameters	Exact value	Initial value	Upper :Estimated values / Lower : (Err. Ratio [%])				
			Sampl. 100Hz	Sampl. 200Hz	Sampl. 500Hz	Sampl. 1000Hz	Sampl. 2500Hz
k_1	7.5000	5.0000	7.5470 (0.63)	7.5192 (0.26)	7.5061 (0.08)	7.5026 (0.03)	7.5013 (0.02)
k_2	7.0000	5.0000	8.9690 (0.44)	8.9845 (0.22)	8.9944 (0.08)	8.9975 (0.04)	6.9988 (0.02)
c_1	0.0160	0.0100	0.0053 (66.88)	0.0109 (31.88)	0.0140 (12.50)	0.0151 (5.63)	0.0156 (2.50)
c_2	0.0140	0.0100	0.0193 (37.86)	0.0164 (17.14)	0.0149 (6.43)	0.0144 (2.86)	0.0142 (1.43)
Xy_1	0.2000	0.1000	1.2004 (0.20)	0.2004 (0.20)	0.2002 (0.10)	0.2001 (0.05)	0.2000 (0.00)
Xy_2	0.1500	0.1000	0.1510 (0.67)	0.1506 (0.40)	0.1501 (0.07)	0.1501 (0.07)	0.1500 (0.00)
α_1	0.0500	0.0200	1.0755 (51.00)	0.0638 (27.60)	0.0547 (9.40)	0.0521 (4.20)	0.0510 (2.00)
α_2	0.0500	0.0200	0.0586 (17.20)	0.0517 (3.40)	0.0515 (3.00)	0.0505 (1.00)	0.0503 (0.60)

表6. 2 同定数値計算結果 (Case-B 100Hz サンプリングデータの補間による)

Parameters	Exact value	Initial value	Upper :Estimated values / Lower : (Err. Ratio [%])			
			Sampl. 200Hz	Sampl. 500Hz	Sampl. 1000Hz	Sampl. 2500Hz
k_1	7.5000	5.0000	7.5156 (0.21)	7.4994 (0.01)	7.4976 (0.03)	7.4928 (0.10)
k_2	7.0000	5.0000	6.9802 (0.28)	6.9916 (0.12)	6.9958 (0.06)	6.9973 (0.04)
c_1	0.0160	0.0100	0.0115 (28.13)	0.0148 (7.50)	0.0157 (1.88)	0.0161 (0.62)
c_2	0.0140	0.0100	0.0161 (15.00)	0.0145 (3.57)	0.0141 (0.71)	0.0138 (1.43)
Xy_1	0.2000	0.1000	0.2003 (0.15)	0.2003 (0.15)	0.2004 (0.20)	0.2004 (0.20)
Xy_2	0.1500	0.1000	0.1503 (0.20)	0.1499 (0.07)	0.1499 (0.07)	0.1499 (0.07)
α_1	0.0500	0.0200	0.0623 (24.60)	0.0528 (5.60)	0.0506 (1.20)	0.0494 (1.20)
α_2	0.0500	0.0200	0.0501 (0.20)	0.0499 (0.20)	0.0493 (1.40)	0.0490 (2.00)

200,500,1000,2500Hzの各サンプリング周波数にインターポレーションして同定用データセットを作成した。

数値計算結果を表6. 2に示す。これより、データ収録時のサンプリング周波数は100Hzでも、インターポレーションにより同定用のサンプリング周波数の高いデータセットを作成すれば、実際にそのサンプリング周期でデータを計測した場合と同程度の精度は得られることがわかる。またCase-A, Bとも、各階の1次剛性および弾性限界点は精度良く同定可能であるが、第2分枝せん断剛性比と粘性減衰係数は精度の高い同定が難しいことがわかる。これらの検討を踏まえ、以後の検討は同定精度10%前後を目安とし、データ計測サンプリング周波数を100Hzと想定し、スプライン補間により作成する同定用データのサンプリング周波数を500Hzとして解析を行うこととした。

6. 2. 4 データ観測チャンネル数および観測位置に関する検討

これまででは観測量として全層の変位・速度が観測された場合について検討を実施したが、実際にこの条件で地震観測が実施されることは少ない。そこで、ここでは同定精度に関してデータ観測チャンネル数と、観測位置が及ぼす影響の検討を実施した。検討ケースとしては

1)データ観測2チャンネルの場合

Case1:各層変位を観測

表6. 3 観測データチャンネル数と観測位置をパラメータとした同定数値計算結果

Parameters	Exact value	Initial value	Upper :Estimated values		Initial value	Upper :Estimated values	
			Lower : (Err. Ratio [%])			Lower : (Err. Ratio [%])	
			Case-1 1&2F Disp.	Case-2 1&2F Velo.		Case-3 2F Disp.&Velo.	Case-4 1F Disp.&Velo
k_1	7.5000	5.0000	7.4989 (0.01)	7.5020 (0.03)	6.0000	7.5021 (0.03)	7.4971 (0.04)
k_2	7.0000	5.0000	6.9921 (0.11)	6.9916 (0.12)	5.5000	6.9721 (0.40)	6.9892 (0.15)
c_1	0.0160	0.0100	0.0152 (5.29)	0.0139 (13.23)	0.0150	0.0161 (0.47)	0.0166 (3.90)
c_2	0.0140	0.0100	0.0144 (2.96)	0.0148 (6.00)	0.0130	0.0143 (2.34)	0.0137 (2.08)
Xy_1	0.2000	0.1000	0.2002 (0.11)	0.2000 (0.02)	0.1500	0.1996 (0.19)	0.1999 (0.06)
Xy_2	0.1500	0.1000	0.1500 (0.03)	0.1945 0.31	0.1000	0.1505 (0.32)	0.1506 (0.40)
α_1	0.0500	0.0200	0.0521 (4.26)	0.0529 (5.92)	0.0300	0.0496 (0.72)	0.0496 (0.80)
α_2	0.0500	0.0200	0.0495 (0.93)	0.0523 (4.64)	0.0300	0.0507 (1.32)	0.0519 (3.84)

Parameters	Exact value	Initial value	Upper :Estimated values		Initial value	Estimated Values	
			Lower : (Err. Ratio [%])			Lower : (Err. Ratio [%])	
			Case-5 2F Disp.	Case-6 2F Velo.		Case-7 1F Disp.	Case-8 1F Velo
k_1	7.5000	6.0000	7.5040 (0.05)	7.5035 (0.05)	6.5000	7.4973 (0.04)	7.5004 (0.01)
k_2	7.0000	5.0000	6.9673 (0.47)	6.9791 (0.30)	5.5000	6.9876 (0.18)	6.9962 (0.05)
c_1	0.0160	0.0150	0.0161 (0.77)	0.0151 (5.64)	0.0150	0.0168 (4.91)	0.0139 (12.81)
c_2	0.0140	0.0130	0.0143 (1.82)	0.0147 (5.20)	0.0130	0.0136 (2.56)	0.0146 (4.23)
Xy_1	0.2000	0.1500	0.1995 (0.23)	0.1997 (0.16)	0.1500	0.1998 (0.09)	0.1995 (0.23)
Xy_2	0.1500	0.1000	0.1507 (0.43)	0.1498 (0.16)	0.1000	0.1507 (0.49)	0.1495 (0.34)
α_1	0.0500	0.0300	0.0499 (0.28)	0.0504 (0.79)	0.0300	0.0494 (1.23)	0.0518 (3.57)
α_2	0.0500	0.0300	0.0503 (0.58)	0.0541 (8.16)	0.0300	0.0522 (4.32)	0.0504 (0.82)

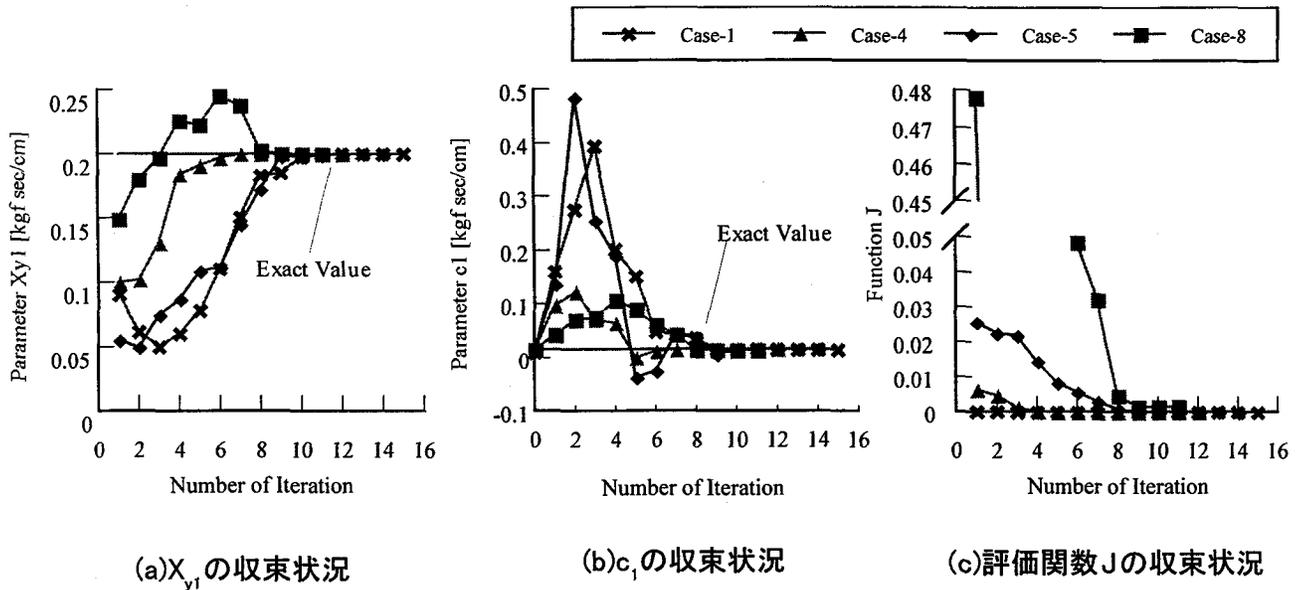


図6.4 推定パラメータおよび評価関数の収束状況

Case2:各層速度を観測

Case3:2層目の変位・速度を観測

Case4:1層目の変位・速度を観測

2)データ観測1チャンネルの場合

Case5:2層目変位を観測

Case6:2層目速度を観測

Case7:1層目変位を観測

Case8:1層目速度を観測

の8ケースについて数値計算を実施した。

同定の数値計算結果を表6.3に示す。ここで、表6.3に示された同定パラメータの初期値について、Case-1~2ではこれまでの検討と同一初期値を用いて同定の数値計算を実施したが、その他ケースにおいては、この初期値で同定の数値計算を実施したところ、計算途中で発散が生じ同定計算が続行不能となった。そこで、Case3~8ではトライアンドエラーによりほぼ正解と見なせる同定値を得られる様、初期値を適宜変更した。

表6.3より、いずれの検討ケースについても、全状態量を観測した場合とほぼ同じ10%程度の精度で同定が可能であることがわかる。また、粘性減衰係数と第2分枝せん断剛性比の精度良い同定が他の動特性の同定に比較して難しいこともこれまでの結果と共通している。ただし、データ観測チャンネル数が少ない場合、同定パラメータの初期値をより真値近傍に設定しなければ、同定計算が発散する可能性が高まることが明らかとなった。

次に、他の推定パラメータに比較して精度の良い推定が可能であった X_{y1} と良い推定精度が得られなかつ

た c_1 及び(2.72)式で定義した評価関数 J の収束状況をCase1,4,5,8の各ケースについて図6. 4(a)~(c)に示す。図6. 4より、いずれの検討ケースでもSS-PEM法の繰返し回数9~10回でほぼ真値近傍に収束していることが分かる。

ここで、推定精度の高かった X_{y1} では、図6. 4(a)に示すように、殆どのケースで推定パラメータは初期値から真値へと安定して漸近しているが、推定精度の低い c_1 では、図46. (b)に示すように、すべてのケースで一旦推定パラメータが初期値よりも真値から乖離し、その後真値近傍に収束している。この真値からの乖離現象は3章の線形モデルを用いた検討の際にもみられたものであり、評価関数の設定と非線形最小2乗法の収束計算に起因するものと考えられる。ただし、初期値を真値近傍に設定したCase4,8ではこの傾向は小さい。

なお、図6. 5(c)より、いずれのケースにおいても評価関数は安定して減少しており、かつ、Case1,4,5,8の順に早い収束を見せている。特にCase1,4では第3ステップまでで、ほぼ評価関数の最小値近傍に収束していることがわかる。

以上より、本数値計算例においては観測チャンネル数や観測位置等による最終的な推定精度の違いはみられなかった。しかし、精度の良い初期値の設定が困難な場合には、可能な限り多くのチャンネル数を用いた観測を実施することが良好な同定結果を得ることにつながる事が明らかとなった。

6. 3 トリリニア型復元力特性を有する系への適用

6. 3. 1 PEM-SS法のトリリニア復元力特性を有する系への適用

本節ではさらに複雑な復元力特性を有する系の同定を実施する。ここでは、トリリニア型復元力特性³⁾を有する2層せん断型モデルによる同定を実施する。本章において検討を行う区間線形で示される非線形復元力特性の他にも、様々な非線形復元力特性があるが、これらを一般的に表すと(6.17)式で表される。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Q(x, \dot{x}, t, \dots) = F(t) \quad (6.17)$$

ここに、 M と C は各々質量マトリクスと減衰マトリクスであり時不変とする。また、 Q は非線形復元力マトリクスとする。多層せん断型モデルを仮定した場合、前節の様にバイリニア型程度の復元力特性であれば、各層の復元力は第1剛性か第2剛性の2通りであるから、復元力ベクトルの各要素、すなわち各層毎の復元力のうち変位に比例する項

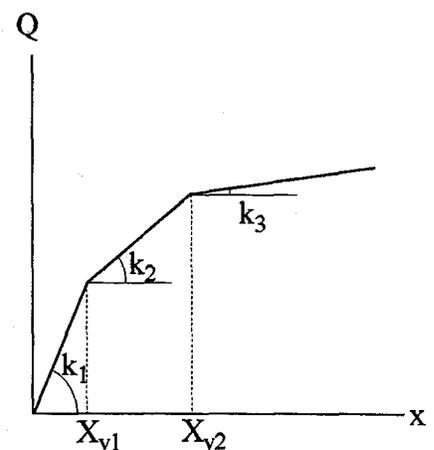


図6. 5 トリリニア型復元力特性説明図

(局所剛性マトリクス)とそれ以外に分離した場合、 n 層せん断型モデルにおける(6.1)式第1項の K マトリクスの組み合わせは高々 2^n 個である。しかし復元力としてトリニア型を仮定すると、組み合わせは 3^n 個となる。さらに曲線型の復元力特性を考えた場合については、この組み合わせは無限となるため、前節の手法では応答計算各ステップにおいて局所剛性マトリクスをいちいち計算する必要が生じる。そこで、本節では(6.17)式の復元力項を右辺に移項し、復元力すべてを見かけ上の外力と見なし応答計算を行う。

図6. 5はトリニア型復元力の説明図である。図に示すようにトリニア型復元力は、せん断型モデル各層ごとに第1剛性 k_1 、第2分枝剛性 k_2 、第3分枝剛性 k_3 (あるいは初期剛性 k_1 、第2第1剛性比 $\alpha_1=k_2/k_1$ 、および第3第1剛性比 $\alpha_2=k_3/k_1$)、第一折れ点 X_{y1} 、および第2折れ点 X_{y2} の計5個のパラメータで規定される復元力特性となる。実際の任意時間ステップにおける復元力 Q は、上記5つのパラメータに加え、直前の折れ曲がり点の情報が必要となるが、これは上記5つのパラメータと過去の履歴の従属関数となるので、実際には上記5つのパラメータと直前ステップの変位及び速度により算定できる。

上述したように、復元力の項は右辺に移動するので、(6.17)式に対応する運動方程式は

$$M\ddot{x} + D\dot{x} = +F(t) - Q(x, \dot{x}, k_1, \alpha_1, \alpha_2, X_{y1}, X_{y2}) \quad (6.18)$$

したがって、状態方程式は

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (6.19)$$

ここに、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & -M^{-1}D \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & \\ \vdots & \\ -1 & -M^{-1}Q \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

となる。すなわち、対象システムの内的な要素としては質量マトリクス M と粘性減衰マトリクス D のみがあり、このシステムに対し真の外力から復元力を減じた見かけの外力 $F(t) - Q$ が作用すると考える。

(6.19)~(6.21)に示す状態方程式の定式化を行うと、システム行列 A および制御行列 B は見かけ上線形時不変である。よって、6. 2節の定式化のように剛性が変化した場合においても、その都度状態方程式の離散化を行う必要がない。また、復元力は前ステップまでの応答計算から算定するものとするれば、区間線形に限らずあらゆる復元力特性に対しても適用可能となる。以下の数値計算例では上述した方式で応答計算および同定計算を行い、本手法適用性の検討を実施した。

6. 3. 2 検討対象モデル

図6. 6に示す構造物モデルにより、トリニア型復元力特性を有する系に対する同定の数値計算を実施した。モデルの動特性は図中に示す通りとした。また、入力波は帯域ホワイトノイズの確定波とした。なお、帯域ホワイトノイズは100Hzサンプリングでデータ長10秒として、平均値0、分散1、最大値±200galとなるガウス分布に従うホワイトノイズとして作成した。

応答の時刻歴は以下の手法で算出した。まず図6. 6の構造物モデルを(6.19)式にて表し、これに対し入力1次ホールドを仮定してパデー近似により離散化を行い離散型の状態空間モデルを作成した。その際、応答計算の精度向上のためサンプリング周期を100Hzから5000Hzへとリサンプリングし、このサンプリング周期を用いて応答計算を実施した。応答計算結果から得られた各層の履歴ループと、基礎に対する各層相対変位の時刻歴を図6. 7に示す。

同定計算に用いる観測量は、モデル各層の相対変位および相対速度とした。またデータセットは前節と同様に、この応答及び

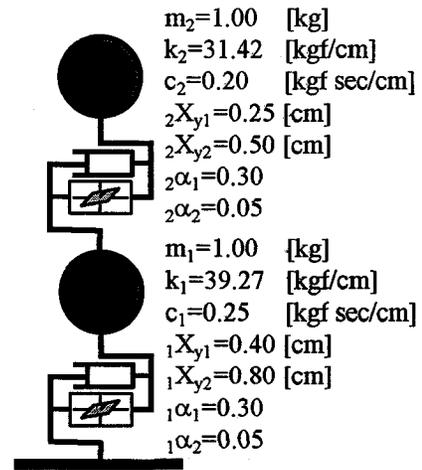


図6. 6 検討対象モデル

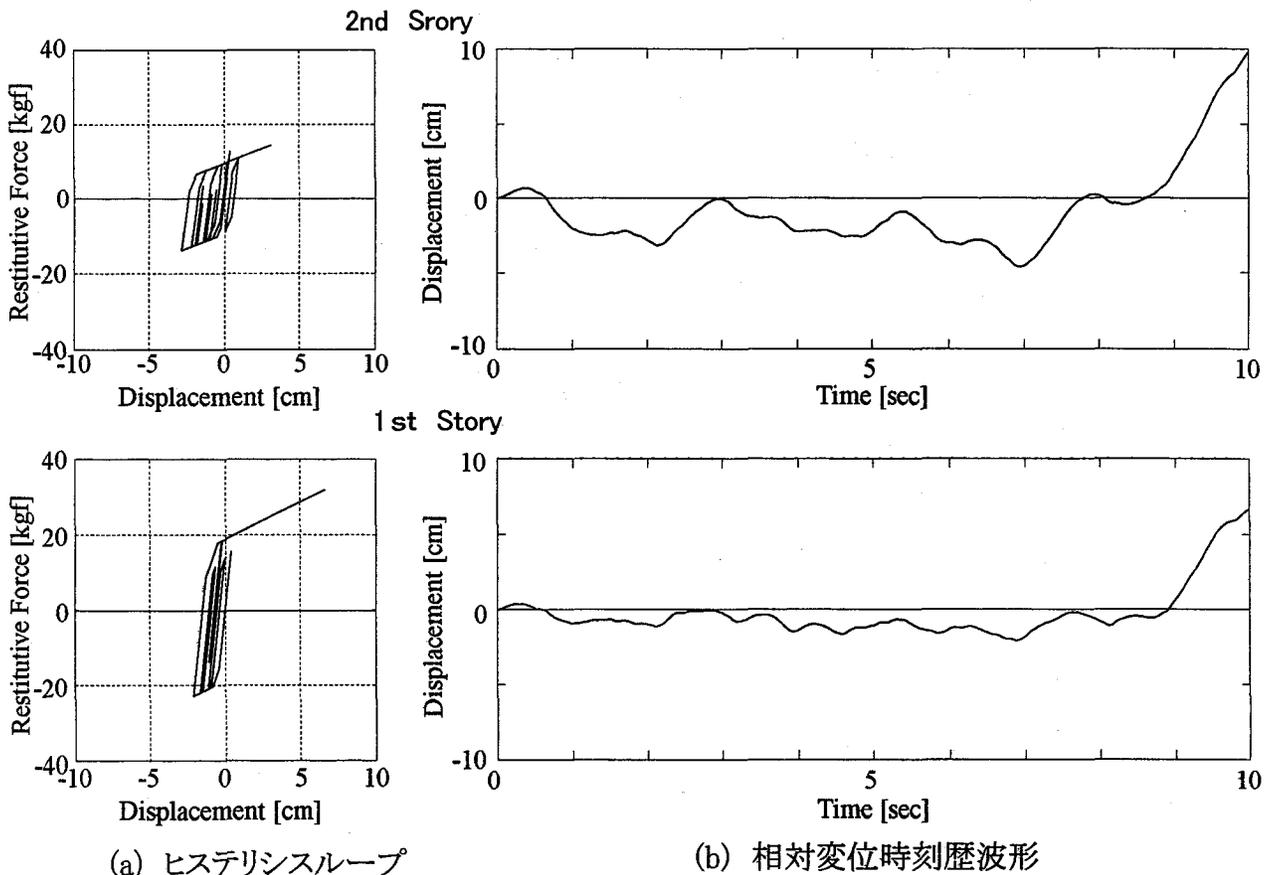


図6. 7 モデル各層のヒステリシスループおよび基礎との相対変位時刻歴波形

入力データを適当なサンプリング周期の波形にダウンサンプリングして作成した。データ長はいずれの検討ケースについても10秒とした。

なお、本検討については、各層の質量および初期剛性を既知とした。したがって推定パラメータの総数は計10個となる。また、推定パラメータの初期値は1)真値の1.5倍、2)真値の1.2倍、の2つのケースについて検討を実施した。なお、同定用の入出力データに混入する誤差は無いものとした。

6. 3. 3 同定計算結果および検討

同定計算結果を表6. 4と表6. 5、および図6. 8と図6. 9に示す。同表および図より推定パラメータの初期値を真値の1.5倍とした1)の検討ケースについては、100Hzサンプリング時には最大約190%、1000Hzサンプリング時においても最大約70%程度の相対誤差となっており、同定精度は低い。ただし、サンプリング周期500Hzの場合についてはすべての推定パラメータについて相対誤差レベルは高々5%以下となっており、精度の良い同定が行われたと考えられる。これに対し、推定パラメータの初期値を真値の1.2倍に設定した検討ケースでは、100Hzサンプリング時の相対誤差最大値は約26%、同様に500Hzサンプリング時で約5%、1000Hzで約2%となっており、推定精度はサンプリング周期に大きく依存している。

前節のバイリニア復元力特性を有する系の同定計算時においては、剛性の推定に比較して粘性減衰と履歴減衰の分離が難しいために、1次剛性および弾性限界点の同定に比較して、粘性減衰係数と第2分枝剛性比の精度の良い推定がやや難しいとの結果が得られたが、トリリニア復元力を有する系においては、本数値計算からは特に各パラメータの推定精度については定性的な傾向は判断し難い。

図6. 10に推定パラメータの初期値を真値の1.5倍とした各検討ケースについて、推定された各パラメータの値を用いて応答計算を実施し、その結果得られた履歴ループと真の履歴ループを同一図上に図示したものを示す。図6. 10より、推定精度が比較的良くなかったサンプリング周期100Hzの場合と1000Hzの場合には特に上層のヒステリシスループがバイリニア型に近い形で同定されており、本来トリリニア型である履歴ループをあたかもバイリニア型で近似した形状となっていることがわかる。この現象はバイリニア型履歴の同定時にも、初期条件の与え方によっては履歴減衰をあたかも等価線形で近似し、履歴減衰と等価な大きさだけ粘性減衰を多めに推定する現象とよく似ており、おそらく非線形最小二乗法により最適なパラメータを算定する際に局所的な極小点に解が収束してしまったことに起因する現象であると考えられる。さらに図6. 11に推定パラメータ初期値を真値の1.2倍とした検討ケースについて同様の図を示す。図6. 11では、いずれの検討ケースにおいても推定された履歴ループは本来のトリリニア型とかなり近い形であり、また、データのサンプリング周期が高いほど真の履歴ループと形状が一致する傾向となっている。したがってこれらの検討ケースにおいては、非線形最小2乗法の解は極小値に収束せずに真値近傍に正しく収束したと考えられる。また、推定誤差は、サンプリング周期が低い場合には履歴の折れ曲がり点付近の応答を正しく推定することができないために生じたものと考えられる。

表6. 4 同定計算結果（初期値を真値の1.5倍とした場合）

Parameters	Exact Values	Initial Values	Result					
			1000Hz		500Hz		100Hz	
			Estimated	Rel.Err.[%]	Estimated	Rel.Err.[%]	Estimated	Rel.Err.[%]
c_1	0.250	0.375	0.2526	1.04	0.2472	1.12	0.2681	7.24
c_2	0.200	0.300	0.1864	6.80	0.1916	4.20	0.1278	36.10
$1X_{y1}$	0.400	0.600	0.4093	2.32	0.3981	0.48	0.3912	2.20
$1X_{y2}$	0.800	1.200	0.8678	8.48	0.8063	0.79	0.9753	21.91
$2X_{y1}$	0.250	0.375	0.2961	18.44	0.2491	0.36	0.2956	18.24
$2X_{y2}$	0.500	0.750	0.8368	67.36	0.4984	0.32	1.4559	191.18
$1\alpha_1$	0.300	0.450	0.2444	18.53	0.2975	0.83	0.2168	27.73
$1\alpha_2$	0.050	0.075	0.0484	3.20	0.0501	0.20	0.0471	5.80
$2\alpha_1$	0.300	0.450	0.0858	71.40	0.3027	0.90	0.0645	78.50
$2\alpha_2$	0.050	0.075	0.0507	1.40	0.0498	0.40	0.0463	7.40
Number of Iteration			10		16		9	

表6. 5 同定計算結果（初期値を真値の1.2倍とした場合）

Parameters	Exact Values	Initial Values	Result					
			1000Hz		500Hz		100Hz	
			Estimated	Rel.Err.[%]	Estimated	Rel.Err.[%]	Estimated	Rel.Err.[%]
c_1	0.250	3.000	0.2485	0.60	0.2469	1.24	0.2424	3.04
c_2	0.200	2.400	0.1966	1.70	0.1917	4.15	0.1472	26.40
$1X_{y1}$	0.400	4.800	0.3992	0.20	0.3979	0.53	0.3810	4.75
$1X_{y2}$	0.800	9.600	0.8023	0.29	0.8055	0.69	0.8747	9.34
$2X_{y1}$	0.250	3.000	0.2497	0.12	0.2492	0.32	0.2381	4.76
$2X_{y2}$	0.500	6.000	0.4993	0.14	0.4981	0.38	0.4754	4.92
$1\alpha_1$	0.300	3.600	0.2990	0.33	0.2980	0.67	0.2717	9.43
$1\alpha_2$	0.050	0.600	0.0501	0.20	0.0501	0.20	0.0502	0.40
$2\alpha_1$	0.300	3.600	0.3007	0.23	0.3020	0.67	0.3293	9.77
$2\alpha_2$	0.050	0.600	0.0499	0.20	0.0498	0.40	0.0504	0.80
Number of Iteration			8		7		12	

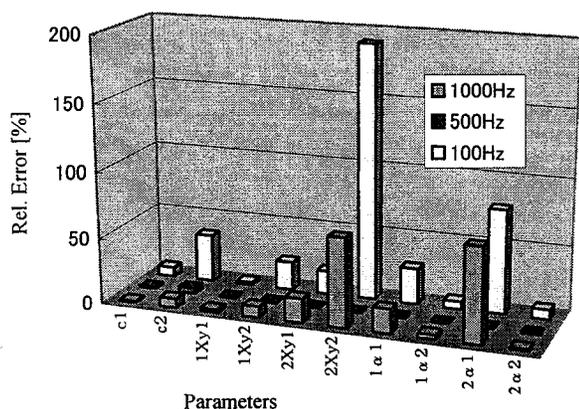


図6. 8 同定計算結果の相対誤差（初期値を真値の1.5倍とした場合）

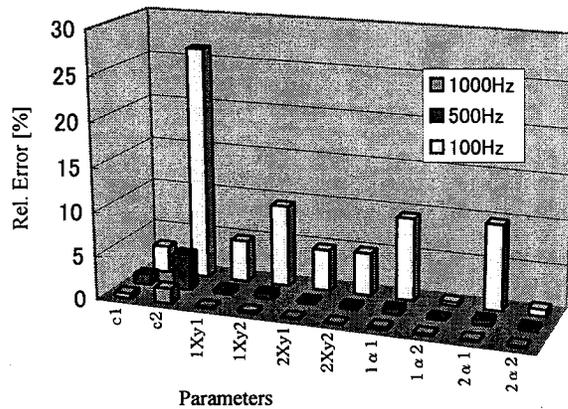


図6. 9 同定計算結果の相対誤差（初期値を真値の1.2倍とした場合）

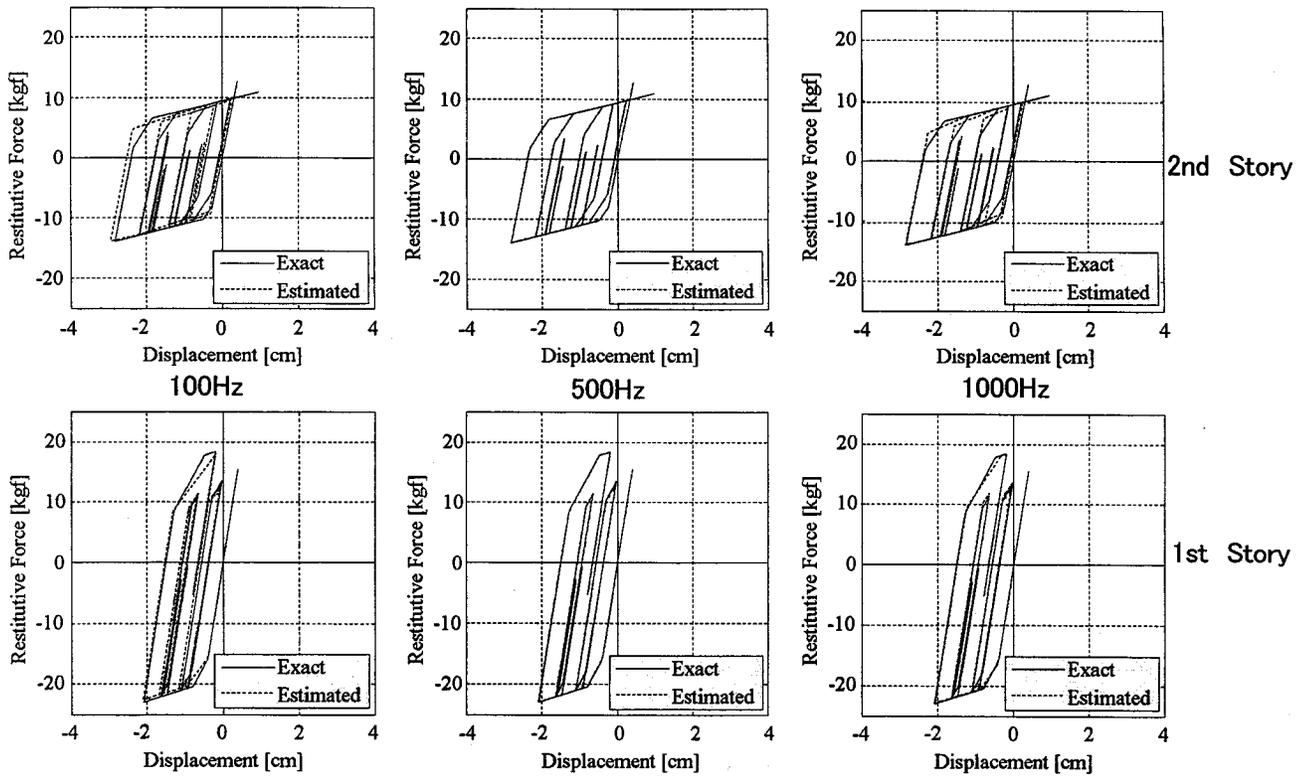


図6. 10 履歴ループの推定値と真値の比較 (初期値を真値の1.5倍とした場合)

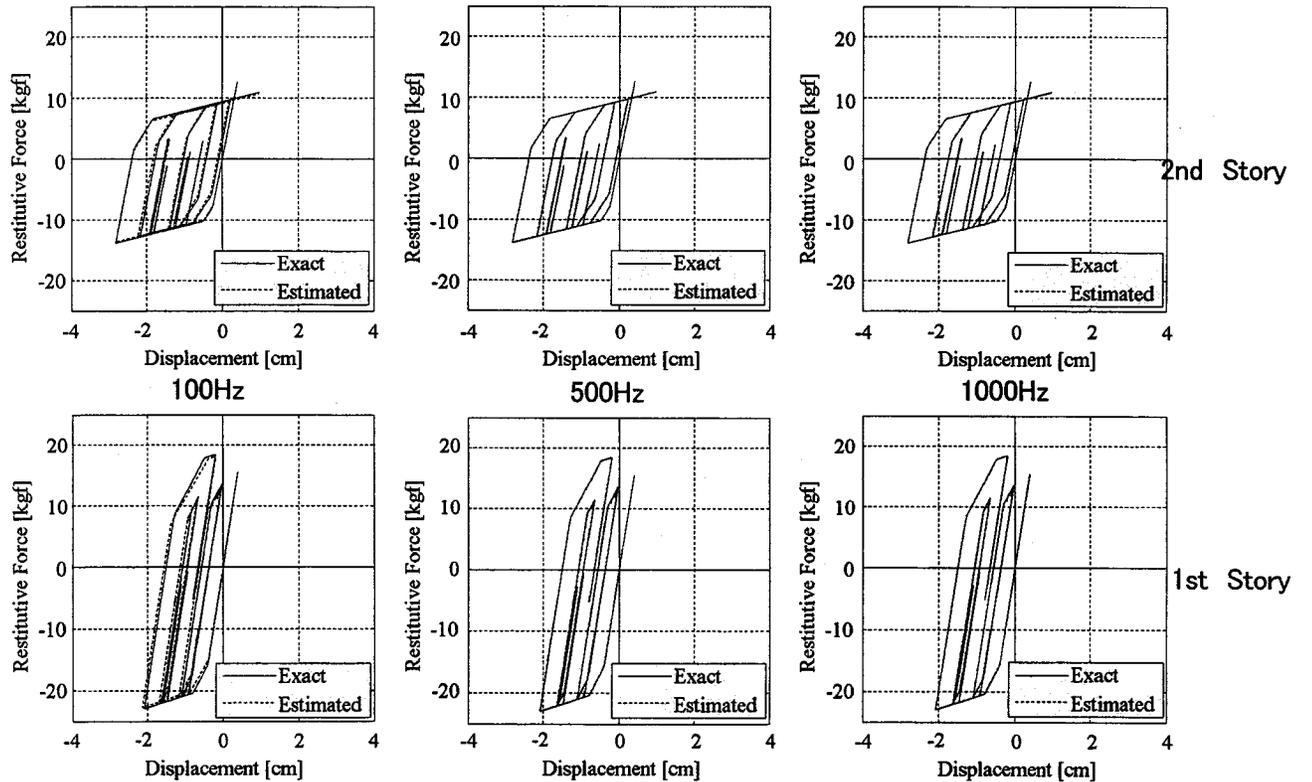


図6. 11 履歴ループの推定値と真値の比較 (初期値を真値の1.2倍とした場合)

以上の検討より、トリニア型の履歴を有する系の同定については以下の様に結論づけることができる。

- 1) 推定値が局所的な極小値に収束することを防ぐためには、可能な限り真値の近傍に初期値を設定することが必要である。
- 2) 本検討ケースの場合については推定パラメータが極小値に収束しなければ、サンプリング周期500 Hzの場合に相対誤差5%以内に、またサンプリング周期1000Hzの場合には2%以内の相対誤差で推定可能である。

ただし、現実の建物を対象として同定計算を実施する場合には、推定パラメータ真値は不明の状態である。そこで、各推定パラメータが真値近傍と考えられる領域内でいくつかの推定パラメータの初期値の組み合わせを事前に作っておき、これらを複数用いて同定計算を実施することが必要となると思われる。また、明らかに非線形性が想定される復元力を有する系においても、第1段階として、線形システムを仮定して同定を行い、その推定結果を基にバイリニア系あるいはトリニア系の復元力特性の初期値を設定することも有効であると考えられる。

6. 4 まとめ

本章では、非線形な復元力特性であるバイリニア型復元力とトリニア型復元力の特性を有するモデルを対象として、PEM-SSによる同定手法の定式化について説明し、その後で、上記2つの復元力を有する2層系のせん断モデルにこの同定手法を適用し、数値実験により同定精度の検証を行った。以下に検討結果のまとめを示す。

バイリニア型、トリニア型復元力特性を有する系の同定計算時に共通すると考えられる事項

- (1) 高いサンプリング周波数の同定用データを用いることで、PEM-SSで精度の高い非線形復元力特性の同定が可能であることが明らかとなった。また、バイリニア型復元力特性を有する系の同定計算より、通常の地震観測データ程度のサンプリング周波数の観測データから、インターポレーションにより高いサンプリング周波数の同定用データを作成することで、精度の良い同定を実施できる可能性があることが示された。

バイリニア型復元力特性を有する系の同定計算時に関する事項

- (1) PEM-SSにより、バイリニア型復元力特性を有する多層系せん断型構造物系の動特性を同定する場合には、1次剛性および弾性限界点に比較して、第2分枝せん断剛性比と減衰係数の精度の高い同定がやや難しいことが明らかとなった。

- (2) 同定用の初期値が精度よく設定できるなら、必ずしも多くのデータ観測チャンネル数は必要ない。本検討ケースに限定すれば、同定用データセットが500Hzサンプリングで収録されておれば、1チャンネルのデータ計測のみで全状態量を観測した場合とほぼ同じ10%程度の精度で推定パラメータが同定可能である。
- (3) 精度の良い初期値の設定が困難な場合には、可能な限り多くのチャンネル数を用いた観測を実施することが良好な同定結果を得ることにつながる事が明らかとなった。

トリリニア型復元力特性を有する系の同定計算時に関する事項

- (1) 推定値が局所的な極小値に収束することを防ぐためには、バイリニア型復元力特性を有する系の同定計算時よりもさらに真値近傍に初期値を設定することが必要である。
- (2) 本検討ケースに限定すれば、推定パラメータが極小値に収束しなければ、サンプリング周期500Hzの場合に相対誤差5%以内に、またサンプリング周期1000Hzの場合には2%以内の相対誤差で同定可能である。

なお、本手法に限らず一般的に同定精度を向上させるためには、同定するパラメータ数を出来るだけ少なくすることが有効であり、例えば、本手法を適用する前に他の手法を併用して粘性減衰や1次のせん断剛性等が事前に精度良く推定されている場合、まずこれを確定値として同定計算を行い、その同定結果を初期値として再度全パラメータの同定計算を実施する事で精度の高い同定を行うことが可能であると考えられる。著者の既往の研究⁹⁾によると、常時微動レベルの振動でも、加振機を用いた本格的な加振実験においても、自由振動観測波形より推定される線形領域での1次の固有周期や減衰定数はあまり大差が無いとの検討結果が得られている。そこで、例えば対象構造物の常時微動観測データより線形モデルとして粘性減衰や1次のせん断剛性等を求め、これより本手法の同定計算の初期値を設定することで同定計算の解の発散を防ぐこともできると考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、柴田明德：最新耐震構造解析，森北出版，1981年6月
- 2) 古川忠稔、橘英三郎、井上豊：予測誤差法による建造物の動的非線形特性の推定—バイリニア多層系せん断モデルの同定—，構造工学論文集 Vol.44B, 1998年3月, pp.375-384
- 3) 例えば、大崎順彦：建築振動理論，彰国社，1996年11月
- 4) 古川忠稔，犬丸直明，井上 豊：鋼構造実大試験体架構動特性の同定に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），B-2 構造Ⅱ，1996年9月, pp.1003-1004

第7章 実建造物の観測結果への適用とその評価

7. 1 緒言

本章では、これまで数値計算を通じて明らかにされた結果に基づき、線形・非線形多自由度系建造物の動特性同定手法として最も適用性が高く、高精度な手法の一つであると考えられるPEM-SSにより、地震観測記録を用いて各種実建築構造物系の動特性の同定を試みる。

7. 2 線形モデルを用いた場合の適用例 六層実建造物での観測データを用いた動特性の同定

7. 2. 1 検討対象建物および観測記録の概要

本節では、栃木県那須郡にある五洋建設株式会社技術研究所内に設置された制振実験棟において得られた地震観測記録を用いて、線形せん断型モデルを仮定した動特性の同定を試みる。同定手法としてはPEM-SSを用いた。

本節において用いた地震は1997年5月12日に発生したマグニチュード5.5の地震であり、震央は北緯

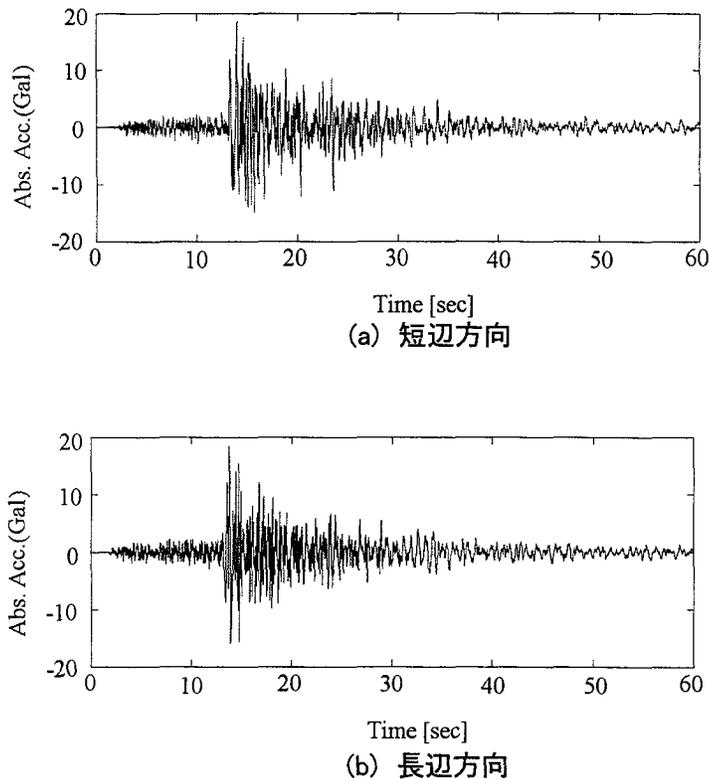


図7. 1 実験棟基礎部における地震加速度記録

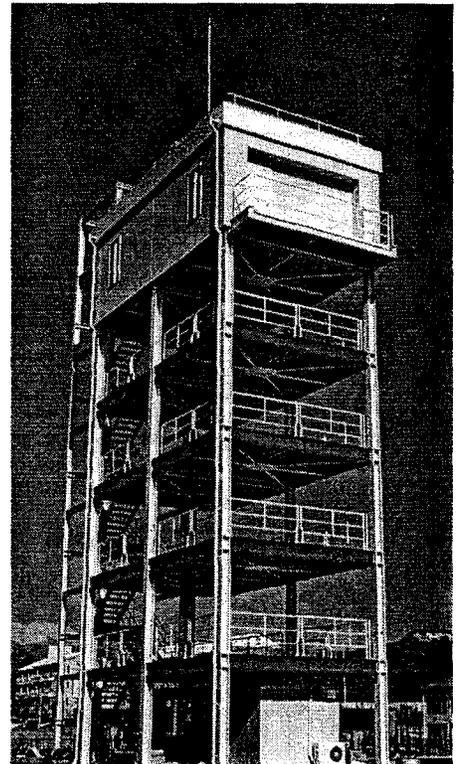


図7. 2 制振実験棟外観

表7. 1 地震観測記録における最大加速度一覧

Longitude Comp.		Transverse Comp.	
Location	Max. Acc.[gal]	Location	Max. Acc.[gal]
RF	51.19	RF	-38.45
6F	44.57	6F	-30.91
5F	68.05	5F	47.96
4F	-77.84	4F	-51.41
3F	-68.95	3F	-55.3
2F	48.03	2F	-38.18
GL-0m	18.2	GL-0m	18.61
GL-30m	-14.51	GL-30m	11.26

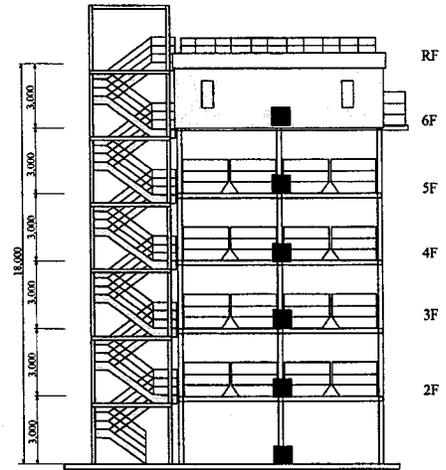
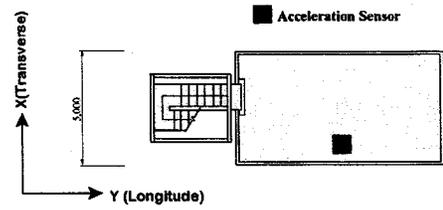


図7. 3 実験棟形およびセンサー配置状況

表7. 2 実験棟各層の重量および剛性（設計値）

Story	Weight (t)	Stiffness [tf/cm]
RF	54.56	14.00
6F	23.81	14.38
5F	18.66	13.87
4F	19.04	16.38
3F	19.41	17.00
2F	19.58	26.76

表7. 3 設計値を用いた固有値解析結果と振動試験結果

Mode	Eigenvalue Analysis of Table 7.2		Result of the Dynamic Test		
	Natural Circular Frequency	Natural Period [sec]	Natural Circular Frequency	Natural Period [sec]	Natural Damping Factor
1st	5.563	1.129	5.592	1.124	0.0003
2nd	17.964	0.350	19.981	0.314	-
3rd	29.603	0.212	29.217	0.215	-
4th	40.417	0.155	-	-	-
5th	48.755	0.129	-	-	-
6th	55.629	0.113	-	-	-

37.0度、東経141.3度の地点である。この地震による制振実験棟基礎部の観測加速度記録を図7. 1に示す。図より最大加速度記録は約18gal程度であり、当該地点での気象庁震度階は概ね2～3程度の地震であると考えられる。

同定対象とした制振実験棟の外観を図7. 2に示す。本構造物は鉄骨造6階建て純ラーメン構造で、6階のみに壁が取り付けられており、その他の階には壁の無い構造となっている。地盤は第1種地盤の砂礫層であり、建物基礎は直接基礎である。なお、本実験棟の6F（壁面のある階）および屋上階には制振装置が取り付けられているが、地震観測時には同装置は停止状態であった。この建物近傍のGL-30mの地盤内と建物1階には水平2成分と上下成分のおのおの計3ch、また建物2階から屋上階には各層中央に水平2chの、計18chのサーボ型加速度計が設置されており、サンプリング周期100Hzにて記録が行われるシステムとなっている。実験棟内のセンサー配置状況を図7. 3に示す。上述した地震時にこの観測システムで観測された各層応答の絶対加速度最大値を表7. 1に示す。表7. 1より、長辺方向、短辺方向とも概ね

最大18gal程度の入力加速度に対して、長辺方向ではRFで最大51gal程度、4Fでは最大77gal程度の応答絶対加速度が得られているのに対し、短辺方向ではこれよりやや応答絶対加速度は小さく、RFで38gal、4Fで51gal程度である。

本検討では、これら水平2成分のうちの長辺方向成分のみの応答記録を用いて実験棟の動特性の同定を試みることにした。これは、長辺方向の応答が短辺方向の応答に比較してやや大きいこと、また後述するが同定用のモデルとしてせん断型モデルを仮定しているが、短辺方向では曲げ変形の影響が長辺方向より大きいと予想されたことによる。

表7. 2に当該建物をせん断型に置換した場合の各層の重量および剛性の設計値を示す。当該建物は建設直後に加振実験¹⁾が行われており、その結果1次～3次の固有角振動数および固有周期と、1次モードの減衰定数が得られている。そこで、表7. 2に設計値による固有値解析より得られた各次モードの非減衰角振動数と非減衰固有周期および上記の加振実験で得られた諸量を示す。また同定に際しては、観測された加速度記録のうち、特に振幅の大きな25秒間(図7.1の0～25秒の間)のデータを切り出し、これより入力および観測データを作成した。建物への入力とは建物1階上の加速度とした。これは当該建物の基礎地盤が第1種地盤であり、地盤と構造物の動的相互作用の影響は少ないと考えたためである。また、観測は建物各層(1自由度系の場合は建物屋上部のみ)の基礎からの相対速度応答とし、各加速度計で得られた絶対加速度記録より相対加速度を求め、これを積分して作成した。その際、大崎の手法²⁾により加速度波形の基線補正のみを行った。

7. 2. 2 線形1自由度モデルを用いた同定

ここでは、多自由度系のモデルを用いた同定に先立ち、予備的な検討として1自由度モデルによる同定解析を行う。図7. 2に示す実験棟を線形1層せん断型モデルに置換とすると、1次モードに関する運動方程式は式(7.1)となる。

$$\ddot{q} + 2h\omega\dot{q} + \omega q = -\beta\ddot{z}_0 \quad (7.1)$$

ここに、 q は1次モードの変位であり、以下 h 、 ω はこのモードにおける減衰定数および非減衰固有円振動数、 β は刺激係数であり(7.2)式で与えられる確定値である。

$$\beta = \frac{-u_1^T M J}{u_1^T M u_1} \quad (7.2)$$

ここに、 u_1 は1次モードの固有ベクトル、 M は質量マトリクスであり、 $J = \{1, 1, \dots, 1\}^T$ とする。 J はモード次数の次元を有する要素がすべて1の列ベクトルである。ここで、 i 点における変位を x_i とし、2次以上のモードによる i 点の実座標変位への影響を無視すると x_i と q の関係は

$$x_i = u_{i1}q \quad (7.3)$$

と近似できる。ただし、 u_{i1} は1次モードの固有ベクトルの i 点に対応する要素である。以上より(7.1)式は(7.3)式に変形される。

表7. 3 同定計算結果一覧 (1自由度モデル)

Initial Value of p	Results of Identification (Initial $\omega=5.563$ [rad/sec], $h=0.02$)			Values of Index Func.
	ω [rad/sec]	h	p	
0.2	5.59868	6.04375E-05	0.33388	3.16050
0.4	5.59895	1.51381E-05	0.60784	2.23440
0.6	5.59940	3.96673E-05	0.87861	1.51070
0.8	5.59641	2.80368E-05	1.09289	1.05970
1	5.60477	1.96713E-05	1.19608	0.91180
1.2	5.59949	2.46813E-05	1.33648	0.70436
1.4	5.59760	8.22635E-06	1.44093	0.59115
1.6	5.59660	1.53894E-05	1.51952	0.52729
1.8	5.61207	2.20650E-05	1.59039	0.52697
2	5.60471	1.22200E-06	1.63663	0.47383
2.2	5.60124	6.64869E-07	1.67163	0.45295
2.4	5.59930	2.13537E-05	1.70132	0.44265
2.6	5.59892	2.97463E-06	1.73104	0.43574
2.8	5.59822	1.45575E-05	1.74912	0.43312
3	5.59767	1.97262E-06	1.76416	0.43144
3.2	5.59729	5.36272E-06	1.77634	0.43084
3.4	5.61935	8.22941E-06	1.42794	0.69962
3.6	5.61197	7.48949E-07	1.43620	0.64445
3.8	5.60768	2.14454E-05	1.44087	0.62028
4	5.60467	1.19885E-05	1.44326	0.60607

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \omega x = -p\ddot{z}_0 \quad (7.4)$$

ただし、ここに

$$p = u_{11}\beta \quad (7.5)$$

したがって、2次以上のモードを無視した場合のPEM-SSによる推定パラメータは h 、 ω 、および p の計3個となる。以上より本検討においては(7.4)式に基づき状態方程式を作成して推定アルゴリズムを構築した。また、推定する3つのパラメータの初期値は、 $h=2$ [%]、 $\omega=5.563$ [rad/sec] とし、 p については0.2~1.4の間でパラメトリックに設定して同定を実施した。ちなみに設計値より算定された固有ベクトルを用いると $p=1.1880$ となる。同定解析結果を表7. 3に示す。

表7. 3より、いずれの初期値ケースにおいても、非減衰固有円振動数 ω は概ね5.59~5.60 [rad/sec]と同定されていることがわかる。また減衰定数 h は $6 \times 10^{-5} \sim 6.6 \times 10^{-7}$ の範囲で同定されており、1次の減衰定数は非常に小さいと考えられる。さらに p は初期値の設定により推定値がかなり変動している。全体的に見ると p は初期値近傍で収束するケースが多く、評価関数面に局所的な極小値が多く存在していると考えられる。ただし、最終的な評価関数値に注目すると概ね p が1.7近辺に収束した検討ケースがもっとも小さい。表7. 3で

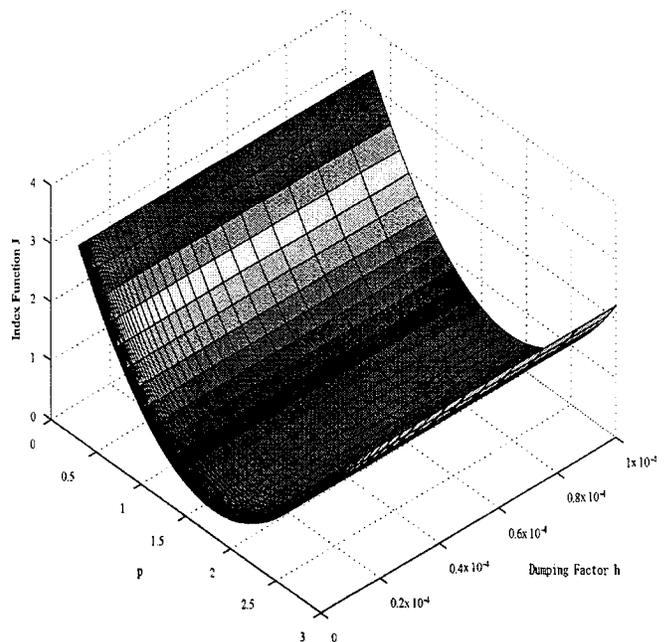
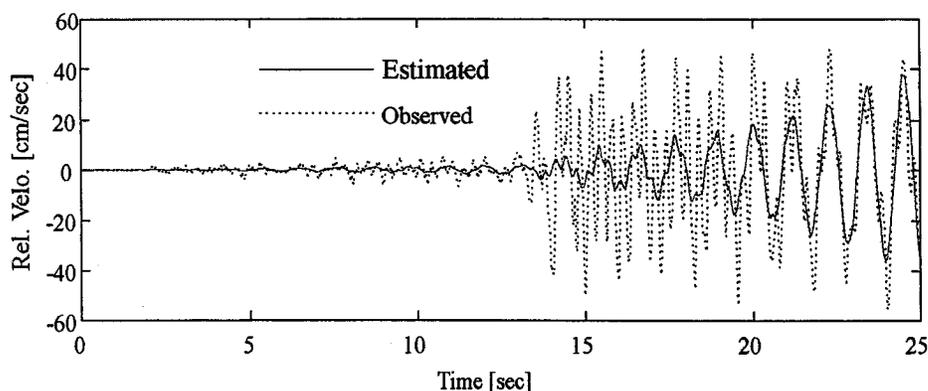
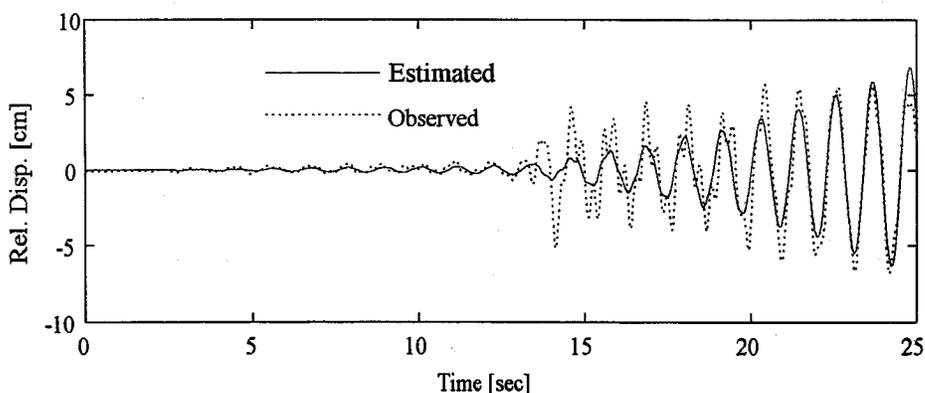


図7.5 h と p をパラメータとした評価関数値



(a) 相対速度応答



(b) 相対変位応答

図7.6 推定結果を用いた応答計算値と観測値の比較(屋上階)

は全同定計算ケース中で最小の評価関数値となった検討ケースをハッチングしている。以上の検討より、これが1次モードの特性推定値と結論づけることができよう。ただし、推定パラメータ h と p は ω に比較して分離が難しい推定パラメータと考えられるので、追加検討として h と p の2つのパラメータのみを推定値とした場合の予測誤差の評価関数値プロットしたものを図7.5に示す。その際、 ω は既知として、表7.3の推定結果で評価関数値が0.5以下となった7ケースの ω の推定結果の平均値とした。図7.5より減衰定数 h がどの範囲でも p が概ね1.7付近で評価関数が最小となること、ただし、 p を固定した場合 h による評価関数の増減はきわめて小さいことがわかる。

図7.6に表7.3で求められた特性値を用いて応答計算を行い、観測記録から得られた相対速度および変位と比較したものを示す。(a)は屋上階の相対速度応答であり、(b)は相対変位応答である。図7.6より、無視した高次モードの影響と考えられる高い振動数領域での応答をのぞくと速度、変位波形とも応答波形は振幅・位相ともある程度実際の応答を再現していると考えられる。以上の検討より、1自由度モデルにより同定は概ね良好に行われたものと考えられる。ただし、本検討対象の構造物の1次モードの減衰定数はきわめて低く、 $h=10^{-7} \sim 10^{-4}$ の範囲でどのような減衰定数を用いても評価関数が殆ど変化しないことを勘案すると、減衰定数の推定精度は他の推定パラメータに比較するとやや精度に疑問が残る結果となった。

7. 2. 3 線形多自由度モデルを用いた同定

モデルは対象構造物各層を質点と仮定した線形6層せん断型モデルとし、各層の質量は既知とする。また推定するパラメータはせん断型モデル各層の剛性と粘性減衰係数の計12個とする。解析に用いるデータは、入力の実験棟1階での絶対加速度応答とし、観測量は実験棟2F～RFの基礎に対する相対速度応答とした。相対速度応答は1自由度モデルと同一の手法で作成した。パラメータの初期値は各層の剛性については設計値とし、各層の粘性減衰係数については一次の減衰定数を0.01とし剛性比例にて計算した値を用いた。既知とした建物各層の重量、推定パラメータの初期値とした各層の剛性および粘性減衰係数を表7. 4に示す。

多自由度モデルによる推定結果を表7. 5に示す。推定された剛性は設計値に比較すると下層部が設計値より小さい値となり、上層部、特に6FとRFについては設計値よりかなり大きい値に推定されている。本検討の対象とした実験棟は前述したように最上階である6Fのみに壁が設置されており、設計値にはこの壁等の影響が反映されていないため推定結果がこのように異なったものと考えられる。また、粘性減衰係数については2Fおよび4～6Fの値が負に推定されており、本実験棟を多層せん断型モデルで仮定したことによるモデル化誤差の影響が現れているものと考えられる。ただし、RFが他の階に比較してかなり大きな減衰係数値と推定されたのは、上述した壁等の影響が現れたものと考えられる。

表7. 4 建物各層の重量と剛性および減衰係数の初期値

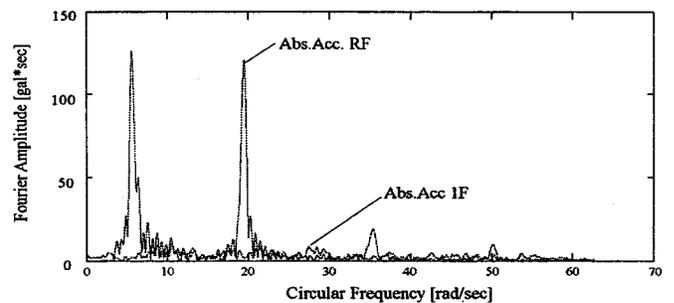
Story	Weight (t)	Initial Stiffness [tf/cm]	Initial Damping Coefficient [tf sec/cm]
RF	54.56	14.00	0.05034
6F	23.81	14.38	0.0517
5F	18.66	13.87	0.04987
4F	19.04	16.38	0.05889
3F	19.41	17.00	0.06112
2F	19.58	26.76	0.09622

表7. 5 建物各層の剛性および減衰係数の推定結果

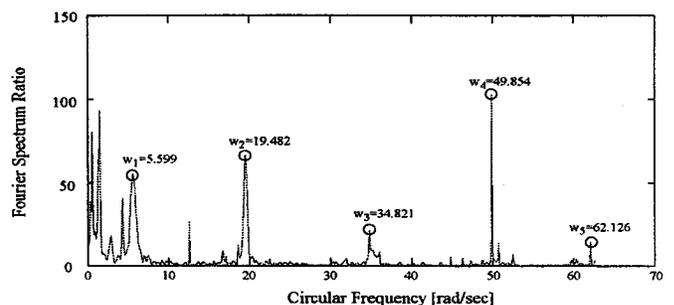
Story	Estimated Stiffness [tf/cm]	Estimated Damping Coefficient [tf sec/cm]
RF	30.94	0.34911
6F	20.81	-0.02998
5F	16.70	-0.01189
4F	17.93	-0.00015
3F	15.86	0.05636
2F	16.14	-0.0593

表7. 6 複素固有値解析結果

Mode	Natural Circular Frequency [rad/sec]	Natural Period [sec]	Natural Damping Factor
1st	5.5918	1.1236	0.00001
2nd	19.5236	0.3218	0.00146
3rd	34.2862	0.1833	0.02660
4th	44.4859	0.1412	0.08123
5th	51.9145	0.1210	0.08061
6th	57.7503	0.1088	0.01559

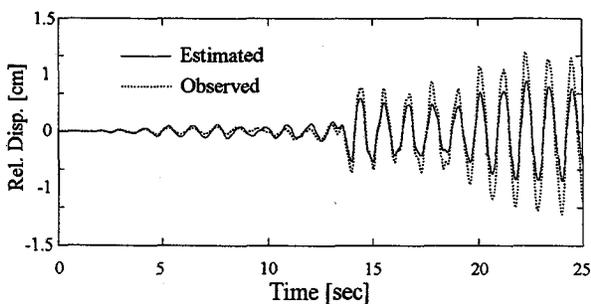
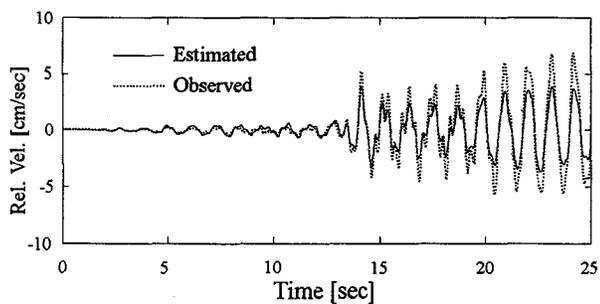


(a) フーリエ振幅スペクトル (1F, RF)

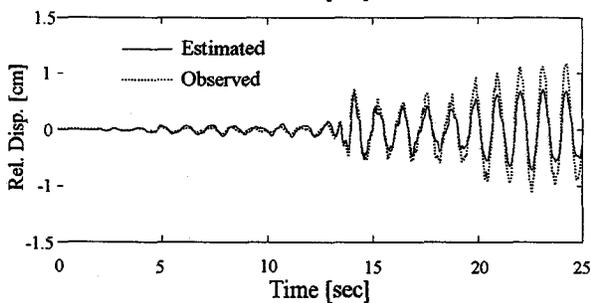
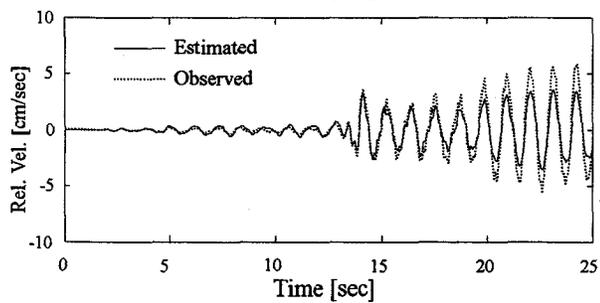


(b) フーリエ振幅スペクトル比

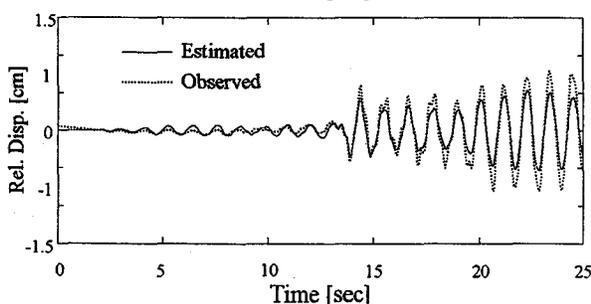
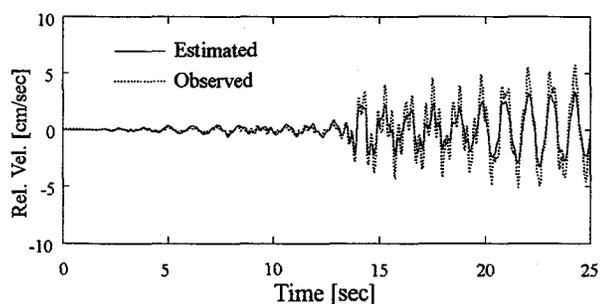
図7. 8 観測波形より算定したフーリエ振幅スペクトルとスペクトル比



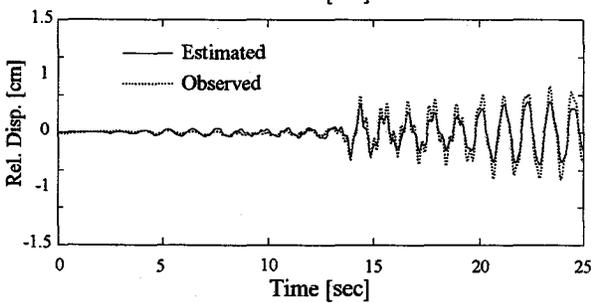
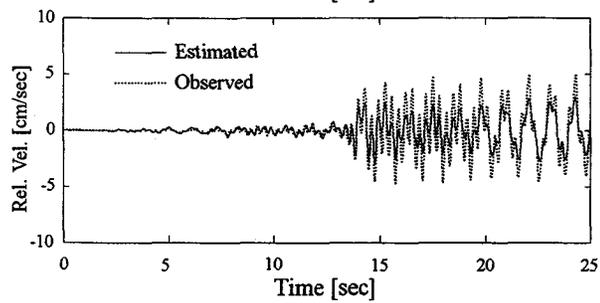
RF



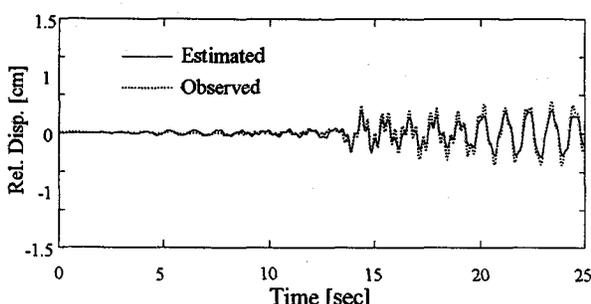
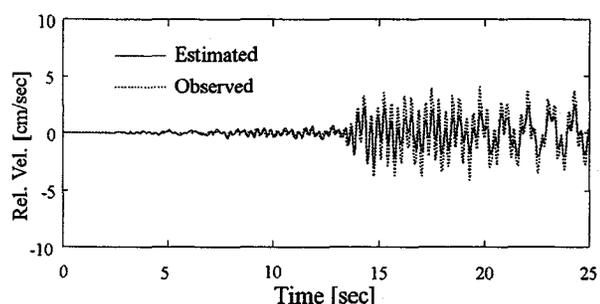
6F



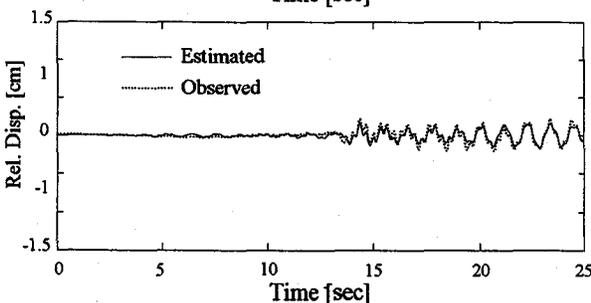
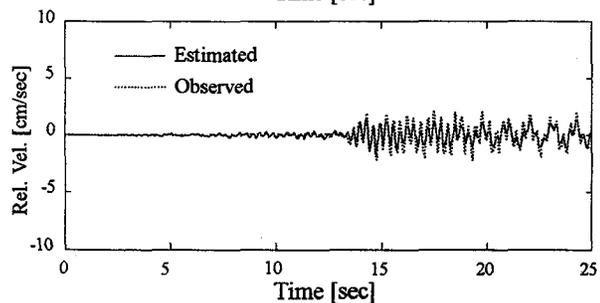
5F



4F



3F



2F

(a) 相対速度応答

(b) 相対変位応答

図7.9 推定結果による応答波形と観測波形の比較

この推定パラメータを持つモデルの各モードでの振動特性を検証するため、推定された剛性および減衰係数を用いて固有値解析をした。その結果を表7. 6に示す。表7. 6より、1次の減衰定数が負値と推定されておるものの極めてゼロに近く、1自由時系モデルによる解析結果とも併せて考えると、1次モードの減衰定数はほぼゼロであると考えられる。その他の次数のモード減衰定数も正值ではあるものの、高次モードも含めいずれも10%以内であり、本実験棟の減衰が極めて小さいものであることが再確認される。

また、各次モードの非減衰固有周期（非減衰固有円振動数）に注目すると、表より1次モードの非減衰固有円振動数は $\omega=5.5972$ [rad/sec]であり、一自由度モデルによる解析結果 $\omega=5.5973$ [rad/sec]と殆ど同一の結果となっている。このことから1次の固有周期は多自由度モデルでも一自由度モデルでも正確に求められることがわかる。なお、実観測加速度より1FとRFのフーリエ振幅スペクトルとこれらのスペクトル比を求めたものを図7. 8に示すが、図7. 8より1～3次の固有円振動数とスペクトル比の振幅ピークはほぼ一致しており、これらモードの固有角振動数の信頼性は高いものと考えられる。

図7. 9(a)～(b)に推定されたパラメータ値を用い応答計算を行い。観測量の時刻歴応答波形と重ねあわせたものを示す。図7. 9の時刻歴波形から、推定パラメータを用いた応答計算で、観測量の波形と同様な波形をある程度再現できていると考えられる。図7. 6に示した一自由度モデルの推定結果による時刻歴応答と比較すると、高次モードに対応する高周波成分の応答も表現されており、実応答を概ね再現していると考えられる。ただし、概ね推定された応答波形は観測波形より振幅が概して小さく、その影響は上層階ほど顕著である。時刻歴波形をさらに詳細に見ると、初期微動領域である0～13秒の領域では概ね推定された応答値は観測値よりも大きく、それ以降の主要動領域ではこれが逆転する。このことはここで用いた線形せん断型モデルでは評価できない何らかの減衰機構の存在や、振幅レベルに依存した減衰特性の変化などの可能性を示唆していると考えられる。

7. 2 非線形モデルを用いた場合の適用例

兵庫県南部地震の観測記録を用いた実免震構造物系動特性の同定

7. 2. 1 対象構造物の概要および観測記録

同定対象構造物は、神戸市北区にある郵政省WESTビル^{3)～5)}である。この建物は、免震装置を基礎部に取り付けた鉄骨鉄筋コンクリート造6階建てで、建築面積8,563m²、延べ床面積46,823m²の建築物であり、免震支承は鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)、積層ゴム(RB)及び鋼棒ダンパーによって構成されている。建物の概要を図7. 10に示す。

同構造物では1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震時に、基礎と1階・6階の絶対加速度が観測されている。これらの記録から1階と6階の相対加速度時刻歴を求め、さらにそれらをフーリエ積分して1階と6階の相対速度応答および相対変位応答時刻歴波形を得た。本研究での同定用のデータセットには、入

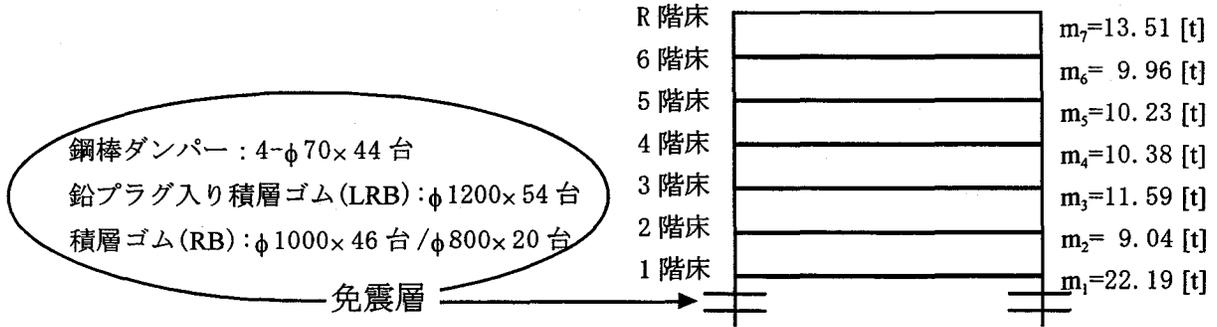
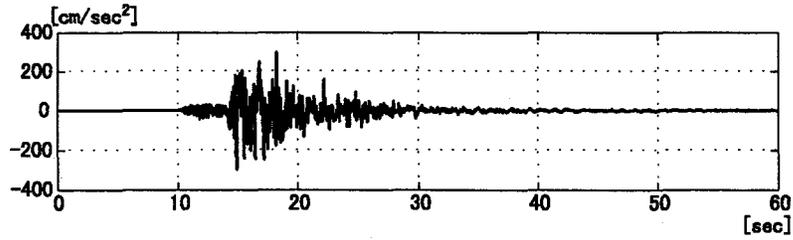
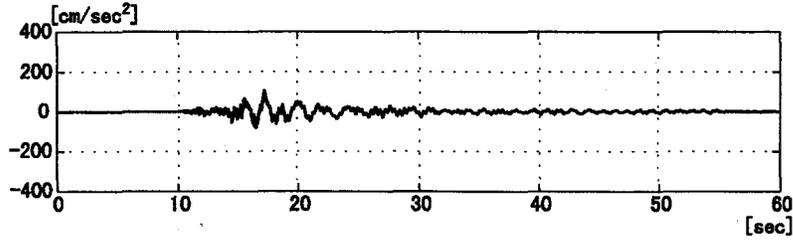


図 7. 10 対象構造物の概要

基礎部分



基礎-1階



基礎-6階

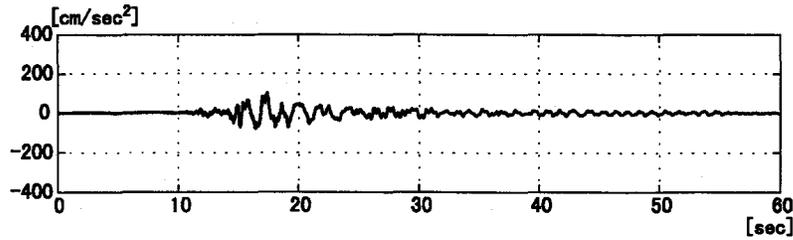
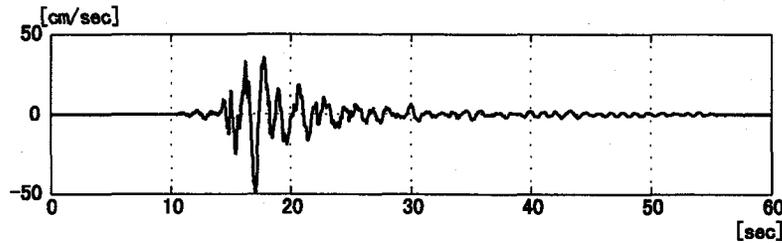


図 7. 11 加速度時刻歴波形(E-W)

相対速度



相対変位

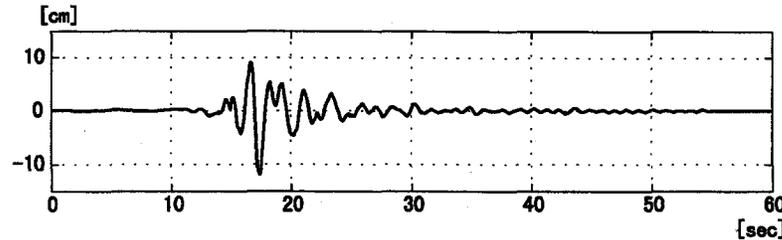


図 7. 12 1階部分の応答時刻歴波形(E-W)

カデータとして基礎の観測絶対加速度時刻歴波形を、観測データとして1階と6階の相対速度応答時刻歴波形(全てE-W成分)の2つを用いた。観測データを相対速度応答データのみとしたのは、相対変位応答データには積分の繰返しによる誤差が大きい可能性があると考えたためである。図7. 11に基礎部分の絶対加速度時刻歴波形、1階部分および6階部分の相対加速度時刻歴波形を、図7. 12に1階部分の相対速度応答時刻歴波形と、さらに積分することにより求めた相対変位応答時刻歴波形を示す。図に示すように基礎と1階部分の相対変位応答の最大値は11.9[cm]と推定された。

7. 2. 2 同定モデル

免震層は上部構造に比較すると剛性が低いので、相対的に上部構造は剛となり概ね剛体的に挙動すると考えられる。図7. 11より、1階部分と6階部分での加速度時刻歴波形は、ほぼ同振幅、同位相であり、上部構造はおおむね剛体的に振動していると考えこともできよう。ここでは、上部構造を1つの剛体とみなした並進1質点系バイリニア型履歴モデル(図7. 13)と、免震層および上部構造各層をせん断型モデルと見なした多層せん断型モデル(図7. 14)の両モデルを用いて同定を実施した。その際、1自由度モデルの場合質量は免震層より上層の全質量とし、バイリニア型の復元力特性を有するモデルとして仮定した。また多層せん断型モデルの場合は、各床を1質点系に置換した。ただし上部構造は弾性とし、免震層のみがバイリニア型の復元力特性を持つものとした。

これら2種のモデルを用いて、パラメータの取り方によるいくつかのケースについてPEM-SSを用いた同定解析を行った。ただし、各層の質量は既知として設計値を用いた。

Case1) 1質点系モデル。免震層の動特性のみが未知。

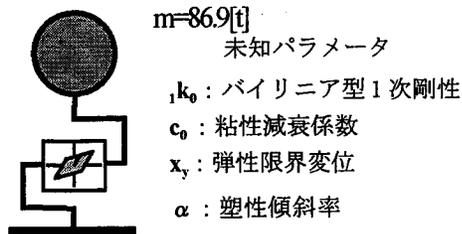


図7. 13 1質点系バイリニア型履歴モデル

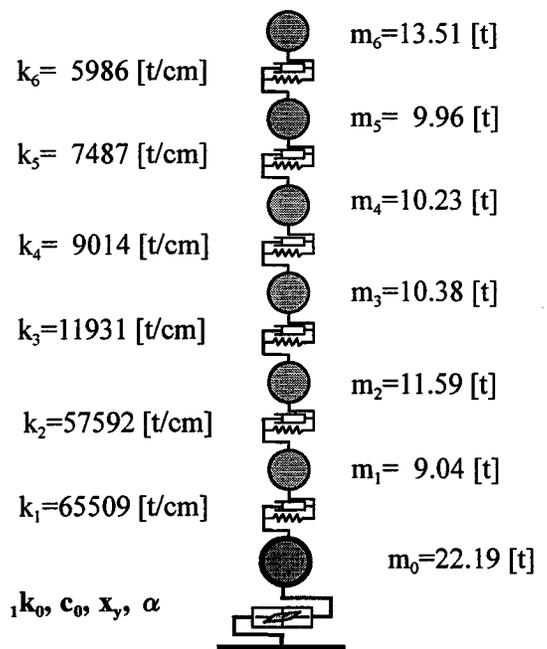


図7. 14 多質点系バイリニア型履歴モデル

Case2) 多質点系モデル。免震層の動特性のみが未知。上部構造の剛性には設計値を用い、粘性減衰係数については剛性比例型の評価法に従った。

Case3) 多質点系モデル。免震層の動特性と上部構造の剛性が未知。上部構造の粘性減衰係数については剛性比例型の評価法に従った。

Case4) 多質点系モデル。免震層の動特性、上部構造の剛性および粘性減衰係数すべて未知とする。それぞれのケースをさらに、

CaseN-1) 免震層の粘性減衰を無視する場合→免震層の減衰はすべて履歴減衰とみなす

CaseN-2) 免震層の粘性減衰を考慮する場合

の2つに分け、全部で8つのケースについて解析した。

上部構造各層の粘性減衰係数を既知として与える検討ケースでは、免震層を固定した場合の上部構造に対し式(7.6)に示す剛性比例型減衰を仮定して設定する。この場合の上部構造の各層剛性、1次モードの固有円振動数と減衰定数は設計書に記されているものを用いた(以下設計値と呼ぶ)。

$$C=2 h / \omega * K \quad (7.6)$$

ここに、 $h=0.0054$: 上部構造の1次減衰定数、 $\omega=9.2$ [rad/sec]: 上部構造の1次固有円振動数とした。

7. 2. 3 同定手法および結果の概要

同定用のデータセットは基礎の絶対加速度応答データおよび1階と6階の相対速度応答データ。観測サンプリング周波数は100[Hz]でデータ長は50[sec](観測波形の10[sec]~60[sec])とした。7. 2. 2 で示した計8つのケースについて、同定計算の各パラメータ初期値と、その結果得られたパラメータ推定値および最終的な評価規範 J_n の値を表7. 7に示す。

全ケース中でもっとも推定パラメータ数の多いCase4では、計算を繰り返すほど免震層および3階の粘性減衰係数が小さくなり、10回を超えると負に収束した。また、予測誤差の評価規範値が他の多自由度モデルの推定結果に比較してかなり大きく、推定された各層の減衰係数の値も現実的には考えにくい値であることから、Case4は観測情報に対して推定パラメータ数が多すぎて正しい推定が不可能となったのではないかと考えられる。

表7. 7より、免震層の粘性減衰を考慮しないとするとでは免震層の弾性限界変位の同定結果が大きく異なることがわかる。本構造物の免震支承に用いられた鋼棒ダンパーの弾性限界変位の設計値は3[cm]となっており、粘性減衰を考慮せずに解析したケースにおいては多くの場合これと近い値が得られている。粘性減衰を考慮した場合の弾性限界変位の推定値は1[cm]弱となっており、免震層内に鋼棒ダンパーより先に弾性限界に達する特性を有する材質があることが考えられ、積層ゴム内の鉛プラグがこれに当たるのではないかと推測される。

表7. 7 同定計算結果

	設計値	初期値	1質点モデル		多質点モデル					
			Case1-1	Case1-2	Case2-1	Case2-2	Case3-1	Case3-2	Case4-1	Case4-2
J_n			0.0133	0.0063	0.7571	0.0470	0.5840	0.0517	23.9080	50.5930
k_0 [t/cm]		500	252	192	753	823	874	765	672	986
c_0 [t*sec/cm]		50		57		72		69		-41
x_y [cm]		1.00	2.55	0.97	2.99	0.93	1.88	0.88	2.49	1.42
α		0.50	0.75	0.82	0.23	0.39	0.25	0.48	0.77	0.45
k_1 [t/cm]	65509	60000					64607	70108	55028	42219
k_2 [t/cm]	57592	50000					29632	27096	22565	40885
k_3 [t/cm]	11931	10000					12956	13068	16589	12665
k_4 [t/cm]	9014	9000					8840	8987	11225	11225
k_5 [t/cm]	7487	7000					9412	9443	6137	6924
k_6 [t/cm]	5986	5000					6784	6561	5387	5523
c_1 [t*sec/cm]		72							635	725
c_2 [t*sec/cm]		60							104	155
c_3 [t*sec/cm]		12							-12	-33
c_4 [t*sec/cm]		10.8							126	40
c_5 [t*sec/cm]		8.4							345	182
c_6 [t*sec/cm]		6							59	43

7. 2. 4 速度波形の比較による同定結果の検討

Case1,2,3の免震層の粘性減衰を考慮した場合としない場合の同定結果を用いて応答解析を行い、1階部分の相対速度応答波形を観測相対速度波形と比較し、10~60[sec]で応答データと観測データとのRMS平均誤差を求めた。

図7. 15~図7. 17より、Case1-1,Case2-1,Case3-1の粘性減衰を考慮しない各同定ケースの解析波形は、主要動(10~30[sec])付近では観測波形とうまく合致しているが、振動が穏やかになると(30[sec]~)周期、振幅ともに観測波形よりも大きくなっている。推定パラメータが増えるほどこの傾向は弱くなるが、いずれの場合についても免震層の粘性減衰を考慮した方がより実際の波形に近い。これに対し免震層の粘性減衰を考慮した場合には、どのモデルの場合についても概ね解析波形と観測波形や良好な一致を示している。ただし詳細に検討すると1自由度モデルによる解析波形は20-25秒付近で観測波形と解析波形が若干不一致を生じているが、多自由度モデルによるCase-2-2およびCase-3-2では全時刻を通じて両者は良好に一致しており、より精度の良い推定のためには免震層の粘性減衰の存在を考慮した多自由度モデルによる同定が最も有効であると考えられる。

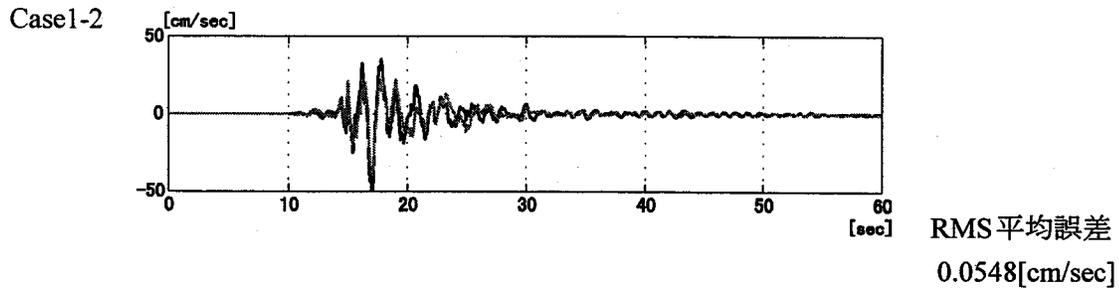
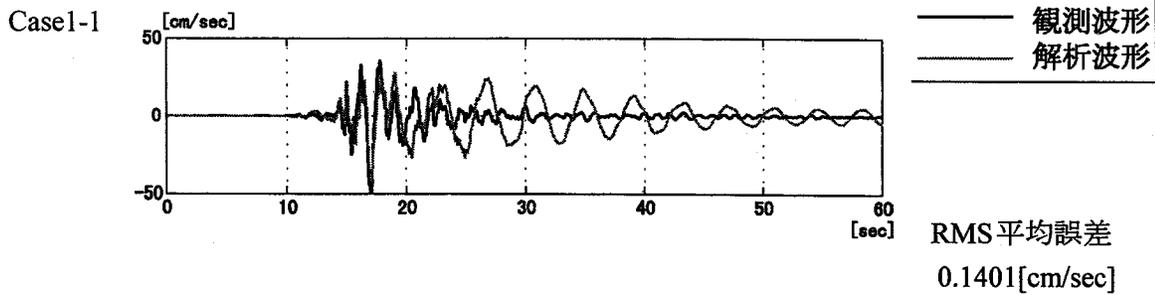


図7. 15 速度波形の比較とRMS平均誤差(Case1)

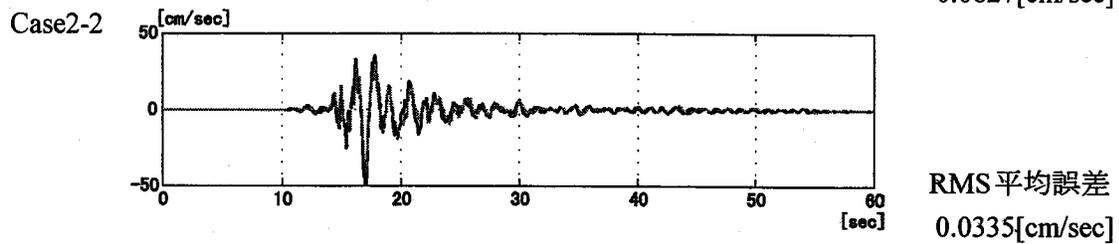
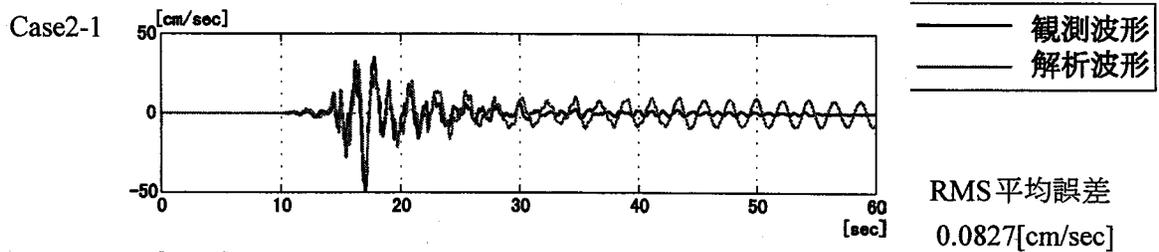


図7. 16 速度波形の比較とRMS平均誤差(Case2)

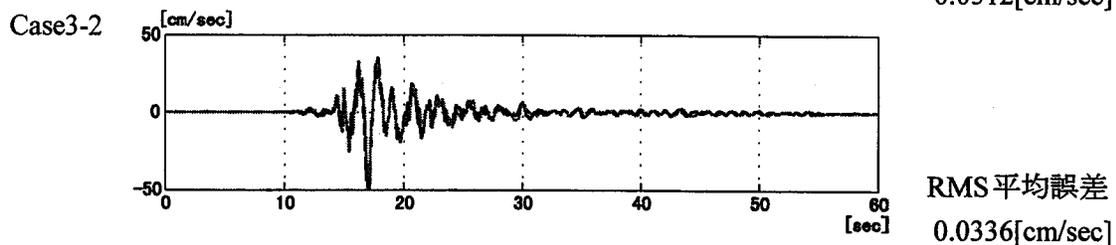
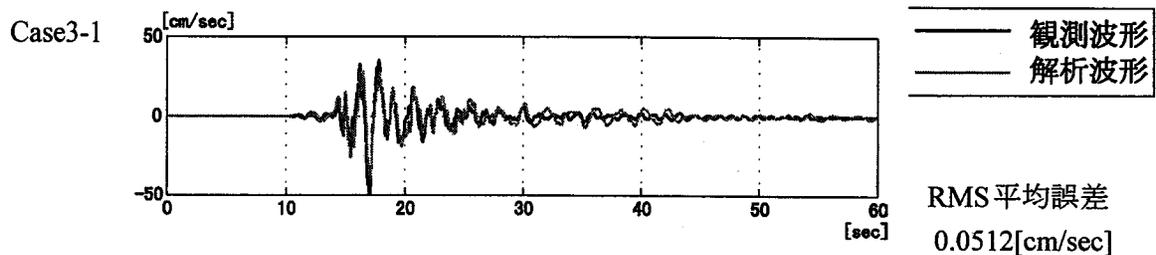


図7. 17 速度波形の比較とRMS平均誤差(Case3)

7. 2. 5 トリリニア型モデルを用いた同定

免震層にバイリニア型の復元力特性を仮定して同定計算を実施した場合には、これまで示したように弾性限界点を実際には2つ存在すると考えられる推定結果を得たこと、また免震層には鋼棒ダンパーと鉛プラグの異なる履歴減衰機構があることより、ここでは6. 3 に示す手法により免震層をトリリニア型の復元力を有する系としてモデル化を行い、同定計算を実施した。

バイリニア型復元力特性モデルを用いた解析から、免震構造物は、免震層上部構造の粘性減衰を剛性比例型とした多質点系モデルでモデル化しても問題は少ないとの結果となっているので、上部構造については剛性比例型の減衰特性とした。また上部構造の剛性には設計値を用いた。免震層の粘性減衰係数は、バイリニア型モデルの同定結果では、免震層の粘性減衰を推定した方がより精度の良い同定結果が得られたが、復元力がトリリニアのループを描くことによって減衰がすべて履歴減衰となる可能性を考え、免震層の粘性減衰係数パラメータとして推定しないCase5-1、パラメータとして推定するものをCase5-2の両者を検討することとした。なお限界変位 X_{y1} および塑性傾斜率 α の右下の数字は、それぞれが第1・第2塑性域に対することを示している。

同定計算結果を表7. 8に示す。表よりCase5-1とCase5-2を比較すると、最終ステップの予測誤差の

表7. 8 同定計算結果(トリリニア型)

	初期値	Case5-1	Case5-2
J_n		0.8260	0.4183
${}_1k_0$ [tf/cm]	500	892	796
c_0 [tf sec/cm]	50	—	60
X_{y1} [cm]	1.00	0.70	0.79
X_{y2} [cm]	3.00	4.82	2.69
α_1	0.50	0.39	0.46
α_2	0.20	0.14	0.22

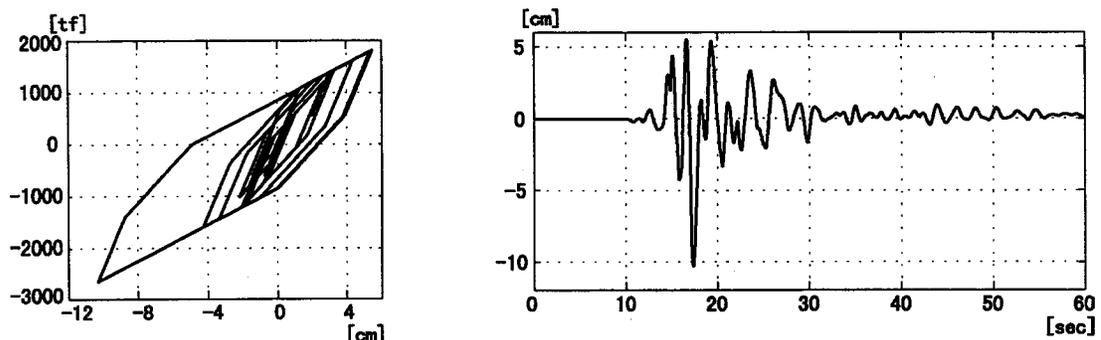


図7. 18 免震層の同定結果に基づくヒステリシスループおよび相対変位時刻歴波形(Case5-2)

評価規範はCase5-1はCase5-2の2倍程度である。また、鋼棒ダンパーの弾性限界変位が概ね3cm程度であることも考慮すると、免震層に粘性減衰の存在を仮定するCase5-2のほうがより精度の高い推定が行われたと結論づけられる。なお、同定されたパラメータを用いた免震層のヒステリシスループと相対変位応答時刻歴波形を図7. 18に示す。

本同定結果をもとに応答計算により得られた1階部分の相対速度応答波形を、観測相対速度波形と比較したもの、及び波形間のRMS平均誤差を図7. 19に示す。併せて、バイリニア型と同モデルを用いた場合も波形の再現性が良かったと考えられるCase2-2の同定結果から求めた相対速度応答波形の比較を図7. 20に再示する。図7. 19および図7. 20より、本検討では、免震層をトリリニア型で仮定した場合よりもバイリニア型で仮定した場合のほうがやや応答の再現性が良い可能性が高い。なお、本検討と併せて、上部構造の剛性をパラメータに加えて、トリリニア型モデルを用いた同定解析も実施したが、同定計算実施中に推定パラメータが発散現象が生じパラメータを推定することは出来なかった。

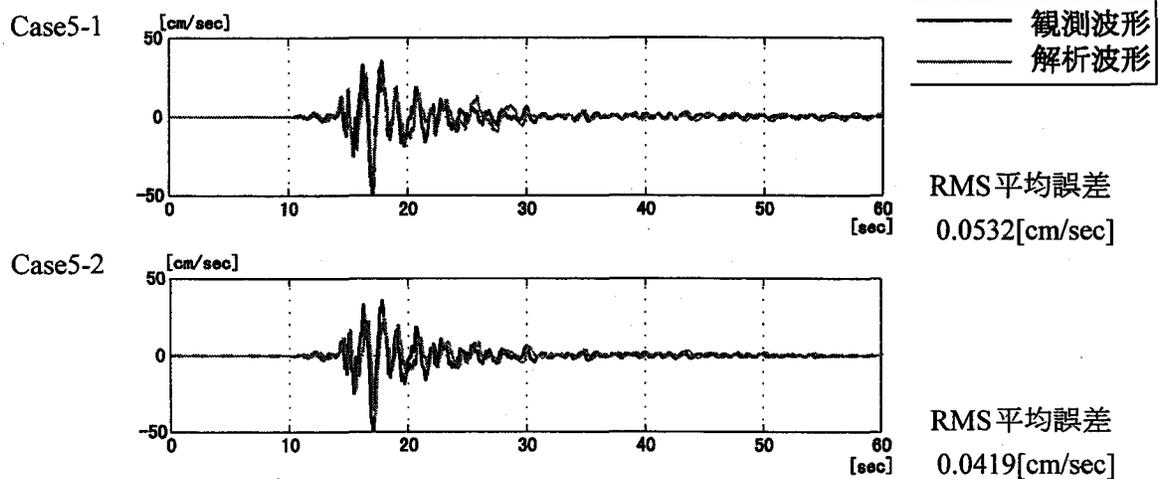


図7. 19 速度波形の比較とRMS平均誤差(トリリニア型)

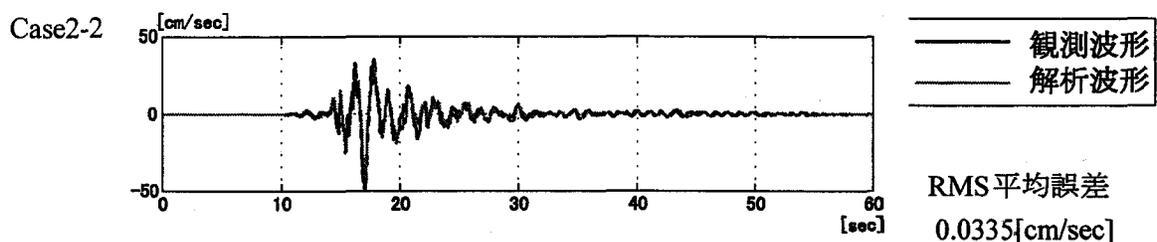


図7. 20 速度波形の比較とRMS平均誤差(バイリニア型)

7. 2. 6 免震建物の同定計算結果のまとめ

兵庫県南部地震の観測記録を用いて免震建物の同定解析を行った結果を以下にまとめる。

- (1)免震建物の動特性を推定する場合には上部構造を1自由度モデルで仮定しても概ね正しい推定結果を得ることができるが、多自由度系モデルを用いることでより精度の高い同定が可能となる。
- (2)本検討ケースの様に、推定パラメータに比較して観測チャンネル数が少ない場合には、モデルの応答を再現できる範囲でできるだけ推定パラメータの総数が少なくなるようにモデル化を行うことが精度の高い同定に結びつく可能性が高い。

(2)に関しては、6章に示したシミュレーションによるバイリニア型復元力特性を有するモデルに同定時には、チャンネル数が少なくてもかなり精度の良い同定解析が可能であったが、現実には免震層にバイリニア型の復元力特性を仮定した検討ケースでは上部構造の推定パラメータを増やすと結果的に推定精度が悪化した。あるいは免震層のモデルとしてはより適切であると考えられるトリリニア型の復元力特性を用いたモデルよりも、やや単純であるが、推定パラメータ数の少ないバイリニア型の復元力特性を用いたモデルの方が結果的に精度の良い推定結果が得られたことよりも明らかである。

ただし、免震装置の復元力特性は実際には極めて複雑であり、ここで仮定した様なバイリニア型あるいはトリリニア型の復元力モデルでは必ずしも装置特性を正しく評価できるモデルであるとは言い難い面もある。たとえばダンパーを含む免震層の繰り返し変形による剛性の変化は表現不可能であることや、地盤を通じて逸散する振動エネルギーなどはここでは粘性減衰としてしか評価不能である。ただし、本検討結果より明らかのように、この検討ケース程度の観測チャンネル数ではこれ以上の詳細なモデルによる動特性の同定は困難であるとも考えられる。

以上の検討を踏まえ、この後さらなる免震建築物の詳細な検討を行うためには、推定パラメータ数が多い場合にもさらに有効な同定手法の開発とともに、さらに多チャンネルの観測装置を有する地震観測の実施が望まれる。

参考文献

- 1) 清水欽也, 古川忠稔, 田村保: 制振実験棟による振動実験(その1) 実験棟の建設と動特性の確認, 五洋建設技術研究所年報 Vol. 24, 1994, pp. 57-60
- 2) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会 PP. 136-138
- 3) 郵政省 WEST ビル, ビルディングレター '93. 3, pp. 103-105
- 4) 郵政省 WEST ビル, ビルディングレター '95. 4, pp. 21-25
- 5) 木原茂: 免震構造の大地震時における制御効果の実証, 建築技術5月号別冊2 制震・, 免震構造マルチガイド, (株)建築技術, 1997年5月, pp. 30-31

第8章 結論

本論文は、実構造物の動的な入力と応答を観測して、観測データより非線形性を有する動特性を精度良く同定する手法を提案するとともに、数値解析を通じて提案手法の妥当性や推定精度について包括的に検討し、さらに、実構造物の地震観測記録を用いて、本提案手法に基づく実構造物系動特性の同定を実施した。

以下に本研究を通じて得られた主な結論を示す。

- (1) PEM-SSは、既往手法と比較して同定精度に及ぼす観測記録混入ノイズの影響が些少であり、混入ノイズ条件によらず高精度の同定が可能である。また、推定パラメータの初期値依存性の問題についても、他の状態空間表示に基づく手法に含まれる問題を逸脱しないとの結論を得た。
- (2) 拡張カルマンフィルタ系のAF-AWPでは、既往同定手法であるEK-WGIと比較すればやや同定精度と適用性が劣るものの、推定パラメータの収束は極めて早く、短い計算時間で同定が可能であるとの結果を得た。
- (3) インパルス応答の推定手法であるRD法を導入して、線形2層せん断モデルを採用した場合に、本研究で提案したモード分解手法を適用して2次モードまでの固有周期と減衰定数を同定する手法は、既往のバンドパスフィルター併用手法より優位であることを明らかにした。特に両モードの振動数が近接している場合にはこの差が顕著となる。
- (4) 本研究で提案したように、非線形復元力を線形部とその他に分割し線形部以外を等価な外力と見なす、あるいは非線形復元力をすべて等価な外力と見なすことで、非線形系を等価な線形時変系に変換することができ、この変換を用いることでPEM-SSによる非線形系同定が可能となる。
- (5) PEM-SSによる非線形構造物系の動特性同定時には、十分短いサンプリング周期のデータを用いることで同定精度を高めることが可能であるが、推定パラメータ数の増加に伴い、誤ったパラメータ値に収束する場合のあることが明らかとなった。

以上が本研究で得られた主な結論であるが、以下に既存同定手法の比較検討を通じて得られた結論を、各手法毎にまとめて記す。

【カーブフィット法】

- (1)入力データにノイズ混入がなければ、応答データにノイズが混入している場合でも精度の良い同定が可能である。本研究では、SN比10%の場合においてもカーブフィット法で同定した減衰定数の相対誤差は1%程度であった。
- (2)カーブフィット法による減衰定数の算定精度は入力データに混入するノイズレベルに応じて低下し、入出力データともSN比が10%の場合には最大相対誤差35%程度となる。

【ハーフパワー法】

- (1)概ねハーフパワー法の推定精度は同じ周波数領域の手法であるカーブフィット法に劣る。
- (2)ハーフパワー法の推定精度は、推定された入出力間のフーリエスペクトル比の形状に大きく左右される。ただし、応答データに混入したノイズの影響は殆ど見受けられない。

【自己相関関数法】

- (1)入力波の性質がホワイトノイズ的であれば、自己相関関数法による推定精度は応答データに混入したノイズの影響がほとんどなく、データ長が推定精度に及ぼす影響もRD法に比較すると小さい。

【RD法】

- (1)入力がホワイトノイズであり、対象構造物固有周期の1000倍程度のデータ長が確保され、かつ混入ノイズが無ければRD法によりほぼ真値と見なせる減衰定数の推定が可能である。
- (2)RD法による推定精度は、データ長とノイズ混入レベルの両者の影響は自己相関関数法に比較して大きい。また、十分に長いデータ長がある場合においても、観測データのノイズ混入率が5%を越えると自己相関関数法より推定精度が低下することがある。

【状態空間表示に基づく時間領域手法全般】

- (1)他の手法に比較して、短いデータ長で同定計算を行うことができる。特に入出力データのノイズ混入が無い場合の1自由度系モデルによる同定計算時には、いずれの手法によっても剛性あるいは粘性減衰係数とも相対誤差0.1%以下の推定精度で同定が可能である。
- (2)状態空間表示による時間領域手法を適用する場合、対象構造物の固有周期に対して十分に高いサンプリング周期のデータを用いることが推定精度の向上に結びつく。

【EK-WGI】

- (1)入出力データのノイズ混入が無い場合の1自由度系モデルによる同定計算時には、推定値初期値が真値の0.05倍～2倍の間で設定されておれば推定パラメータの初期値依存問題は生じない。
- (2)ノイズ混入時には、既存の拡張カルマンフィルタ系手法中ではEK-WGI法がもっとも観測ノイズの影響を受けにくい。特に応答データのみノイズ混入時の場合にはPEM-SSとほぼ同程度の同定精度を有する。

【Adaptive-EKF】

- (1)拡張カルマンフィルタ系の各手法の中で、本手法は極めて推定パラメータの収束が早い。また、入出力データにノイズの混入がなければ、推定精度はEK-WGIとほぼ同等である。

(2)状態空間表示による時間領域の各手法中で、Adaptive-EKF法は、誤差混入レベルに最も敏感に反応して同定計算の発散現象が生じやすい。

本研究で実施した種々の検討結果を総括すると、概ね状態空間表示に基づく時間領域の手法、特にPEM-SSは他の手法に比較して推定精度が良く、多自由度系あるいは非線形系同定への拡張が容易で適用性が高いと考えられる。しかし本検討結果にも示した様に、ある特定の条件、例えば入力観測値のノイズ混入率が低く、応答観測値のノイズ混入率が高い場合には、カーブフィット法の推定精度がPEM-SS法を上回るなど、ただ一つの同定手法が万能な訳ではなく、各手法にはそれぞれ得意とする領域があると考えられる。また、本研究で取り上げた手法の中で比較的精度が良くなかったハーフパワー法についても、起振機による定常応答観測結果に対しては、対象構造物質量や起振機パワーを既知とする必要がなく、かつ計算機による処理を必要とせず簡便に減衰定数を推定できるという利点をもっている。以上まとめると、結論としては建築構造物の振動特性を精度良く同定するためには、同定計算を実施する前に各手法の特色や適用範囲について十分に検討し、それぞれの検討ケースに最適な手法を選択することが重要であり、また場合によっては複数の手法を平行して適用し、同定結果をクロスチェックする等の作業により最善の結果を得られるように努力すべきであると思われる。

一方、精度の高い同定結果を得るためには、同定手法の研究だけでなく、より高精度のセンサーの開発や観測計画に適合したセンサーの選択や配置計画、あるいは観測データの補正やフィルタリングといった技術に関する包括的な理解が必要不可欠であり、これらの有機的な連携によって、さらなる実構造物の動特性の精度の良い同定が可能であると考えられる。

なお、PEM-SSによる同定は、シミュレーションでは観測チャンネル数がそれほど多くなくても非線形系システムの高精度の同定が可能であったが、実免震構造物の非線形動特性推定時は、推定パラメータ数に比較して観測チャンネル数が少ないために、モデル応答を再現できる範囲でできるだけ推定パラメータ数が少なくなるようにモデル化を行うことが結果的に精度の高い同定に結びついた。

今後、免震構造物等を含め構造物系の非線形動特性をより精度良く同定するためには、多チャンネルの観測装置を有する地震観測体制の充実とさらなる地震観測データの蓄積とともに、推定パラメータ数が多い場合にもさらに適応性が高く有効な同定手法の開発が強く望まれる。

発表論文

和文論文

- [1] 予測誤差法による構造物の動的非線形特性の推定
ーバイリニア多層系せん断モデルの同定ー
古川忠稔, 橋英三郎, 井上豊
構造工学論文集 Vol.44B, 1998年3月, pp.375-384
- [2] 適応フィルタ及び適宜重み付け手法(AF-AWP)を用いた構造物の
システム同定手法の提案と応用
古川忠稔, 犬丸直明, 井上豊
構造工学論文集 Vol.44B, 1998年3月, pp.385-390
- [3] 偏心を有する架構建築の地震応答に対する履歴ダンパーの適用効果
山下忠道, 向井洋一, 古川忠稔, 橋英三郎, 花井正実
構造工学論文集 Vol.44B, 1998年3月, pp.283-294
- [4] 適応フィルタ及び適宜重み付け手法を用いた構造物のシステム同定
犬丸直明, 古川忠稔, 井上豊
第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.2, 1998年11月, pp.2461-2466
- [5] 兵庫県南部地震の観測記録を用いた免震構造物の動特性の同定
古川忠稔, 佐野直樹, 松下剛史, 井上豊
第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.2, 1998年11月, pp.2467-2470
- [6] 最適制御理論に基づく複数連結浮体の動揺制御
大山 巧, 長谷部雅伸, 古川忠稔, 古田 均
海岸工学論文集, 第46巻, 1999年, (掲載決定)

英文論文

- [1] Distribution of Structural Damage Around the Mukogawa River Basin Suffered
From the Great Hanshin (Hyogoken Nanbu) Earthquake of January 17, 1995
Tadatoshi Furukawa, Hisanori Morimoto, Kensuke Baba
Proc. Of the 11th World Conf. On Earthquake Eng. (11WCEE), 1996.8, No.729
- [2] Identification of Structural Parameters Using Adaptive Filtering and
Appropriately Weighted Procedure
Tadatoshi Furukawa, Naoaki Inumaru, Hirobumi Ueda, Eizaburo Tachibana, Yutaka Inoue
Proc. of the 2nd World Conf. on Structural Control, Vol.3, 1998.7, pp.2141-2148

- [3] System Identification of Base Isolated Structure by Extended Kalman Filter
Using Recorded Seismic Response Data from the Hyogoken Nambu Earthquake
Takeshi Matsushita, Naoki Sano, Tadatoshi Furukawa, Yutaka Inoue
Proc. of the 2nd World Conf. on Structural Control, Vol.3, 1998.7, pp.2159-2166
- [4] Experimental Study on Vibration Control of Unit-Linked Floating Structures
Tadatoshi Furukawa, Yushi Yamada, Hitoshi Furuta, Eizaburo Tachibana
Proc. of the 1st International Conf. on Advances in Structural Engineering & Mechanics,
1999 (Now Printing)

その他和文発表論文

- [1] アクティブフィンを用いた建造物の風振動制振に関する実験的研究
(その1 アクティブフィンの制御システム)
斉藤勉, 清水欽也, 古川忠稔, 向井洋一, 橘英三郎, 井上豊
日本建築学会大会学術講演会梗概集 (東海), B-1 構造 I, 1994年9月, pp.919-920
- [2] アクティブフィンを用いた建造物の風振動制振に関する実験的研究
(その2 アクティブフィンの制御アルゴリズム)
向井洋一, 古川忠稔, 清水欽也, 斉藤勉, 橘英三郎, 井上豊
日本建築学会大会学術講演会梗概集 (東海), B-1 構造 I, 1994年9月, pp.921-922
- [3] アクティブフィンを用いた建造物の風振動制振に関する実験的研究
(その3 実大実験棟における制振実験)
古川忠稔, 向井洋一, 清水欽也, 斉藤勉, 橘英三郎, 井上豊
日本建築学会大会学術講演会梗概集 (東海), B-1 構造 I, 1994年9月, pp.923-924
- [4] 実大実験棟による振動制御実験 (その1 実験棟の概要)
三好俊康, 清水欽也, 古川忠稔, 田村保
日本建築学会大会学術講演会梗概集 (東海), B-1 構造 I, 1994年9月, pp.943-944
- [5] 実大実験棟による振動制御実験 (その2 HMDによる制振効果の検証)
三好俊康, 清水欽也, 古川忠稔, 田村保
日本建築学会大会学術講演会梗概集 (東海), B-1 構造 I, 1994年9月, pp.945-946
- [6] 風圧力制御による建造物の制振—アクティブフィンシステム—
向井洋一, 古川忠稔, 橘英三郎, 井上豊
計測自動制御学会関西支部シンポジウム「振動と音の制御—次代の制振技術の理論と応用—」
, 1994年9月, pp.95-100

- [7] 兵庫県南部地震による武庫川中流域の震害分布と常時微動特性
古川忠稔, 井上豊
第45回応用力学連合講演会講演予稿集, 1996年1月, pp.27-28
- [8] 兵庫県南部地震による武庫川中流域の震害分布と常時微動特性について
犬丸直明, 古川忠稔, 井上豊
日本建築学会近畿支部研究報告集, 第36号・構造系, 1996年7月, pp.25-28
- [9] 鋼構造実大試験体架構動特性の同定に関する検討
—架構の微動観測及び加振実験結果の比較—
古川忠稔, 犬丸直明, 井上豊
日本建築学会大会学術講演会梗概集(近畿), B-2構造Ⅱ, 1996年9月, pp.1003-1004
- [10] 建築構造物における免震・制震技術
井上豊, 古川忠稔
土木学会, 第1回免震・制震コロキウム講演論文集, 1996年11月, pp.1-4
- [11] RD法による建築構造物の減衰評価に関する基礎的研究
松下剛志, 古川忠稔, 井上豊
日本建築学会近畿支部研究報告集, 第37号・構造系, 1997年7月, pp.405-408
- [12] 多自由度構造物の高次モード減衰評価に関する研究
犬丸直明, 古川忠稔, 井上豊
日本建築学会大会学術講演会梗概集(関東), B-2構造Ⅱ, 1997年9月, pp.739-740
- [13] RD法を用いた多自由度構造物の減衰評価に関する研究
松下剛志, 古川忠稔, 井上豊
第47回応用力学連合講演会講演予稿集, 1998年1月, pp.27-28
- [14] 微動観測を用いた表層地盤の動特性評価に関する一考察
—観測時間の同時性が確保できない場合について—
植田浩文, 古川忠稔, 井上豊
日本建築学会近畿支部研究報告集, 第38号・構造系, 1998年7月, pp.181-184
- [15] 連結型浮体構造物の振動制御に関する実験的研究
古川忠稔, 益田直樹, 古田均, 橘英三郎
日本建築学会近畿支部研究報告集, 第38号・構造系, 1998年7月, pp.285-288
- [16] システムトラスの球継手の疲労強度改善に関する研究
今井克彦, 木下陵二, 辻岡静雄, 古川忠稔
日本建築学会近畿支部研究報告集, 第38号・構造系, 1998年7月, pp.389-392

- [17]予測誤差法を用いた構造物の同定に関する基礎的研究
松下剛志, 古川忠稔, 井上豊
日本建築学会大会学術講演会梗概集 (九州), B-2 構造Ⅱ, 1998年9月, pp.259-260
- [18]微動観測を用いた表層地盤の動特性評価に関する一考察
—観測時間の同時性が確保できない場合について—
植田浩文, 古川忠稔, 井上豊
日本建築学会大会学術講演会梗概集 (九州), B-2 構造Ⅱ, 1998年9月, pp.1049-1050
- [19]予測誤差法による実免震構造物の非線形動特性の推定
—バイリニアせん断型モデル及び実免震構造物の同定—
古川忠稔, 松下剛史, 井上豊
日本建築学会近畿支部研究報告集, 第39号・構造系, 1999年6月, pp.361-364
- [20]予測誤差法を用いた構造物動特性同定手法の適用に関する研究
—線形モデルを用いたシミュレーション解析および実構造物の解析—
伊藤雅史, 古川忠稔
日本建築学会近畿支部研究報告集, 第39号・構造系, 1999年6月, pp.357-360
- [21]予測誤差法を用いた構造物動特性同定手法の適用に関する研究
—各種線形モデルを用いたシミュレーション—
伊藤雅史, 古川忠稔 日本建築学会大会学術講演会梗概集 (中国), 1999年9月発表予定

その他英文論文

- [1]Overview of the Hyogoken-Nanbu Earthquake and Its Damage to Structures
Tadatoshi Furukawa, Yoichi Mukai
IA'96 Proceedings of International Seminar on quasi-Impulsive Analysis, 1996.11, AP4-1~AP4-5

Appendix A 状態空間表示と伝達関数、インパルス応答の関係

今、 n 次の線形定常系があって、その状態方程式と観測方程式が下式(A.1)、(A.2)により与えられるものとする。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (\text{A.1})$$

$$y = Cx + Du \quad (\text{A.2})$$

ここで、 n 次の線形定常系であることより、 x は n 行1列のベクトルであり、入力量 u は r 行1列のベクトルであると仮定する。また、 $t=0$ における状態ベクトルの初期値 $x(0)$ は既知とする。また、観測量は m 個とする。

式(A.1)の左辺のラプラス変換は

$$L[\dot{x}] = sX(s) - x(0) \quad (\text{A.3})$$

であることより、(A.1)式のラプラス変換は式(A.4)となり、 $\det(sI - A) \neq 0$ を仮定すれば、これを变形して式(A.5)を得る。

$$sX(s) - x(0) = AX(s) + BU(s) \quad (\text{A.4})$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1}x(0) + (sI - A)^{-1}BU(s) \quad (\text{A.5})$$

これを(A.2)式のラプラス変換である(A.6)式に代入すると式(4.7)を得る。

$$Y(s) = CX(s) + DU(s) \quad (\text{A.6})$$

$$Y(s) = C(sI - A)^{-1}x(0) + \left\{ C(sI - A)^{-1}B + D \right\}U(s) \quad (\text{A.7})$$

(A.7)式の右辺第1項は、観測量に対する初期値の影響であり、右辺第2項は入力 u に対する応答であると考えられる。そこで、初期値 $x(0)=0$ あるいは、入力開始時より十分に長い時間が経過して初期値の影響が無視できるとすれば、第1項を無視できる。この第2項を G として

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (\text{A.8})$$

とすると、これは入出力間の伝達関数(マトリクス)となり、 m 行 r 列の伝達関数群となる。すなわち伝達関数と状態表示の A, B, C, D マトリクスは1体1に対応する。

次にインパルス応答と伝達関数は、下記のように定義された単位インパルス

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (\text{A.9})$$

ここに、

$$\begin{aligned} \delta(t) &= 0, & t &\neq 0 \\ \delta(t) &= \infty, & t &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

のラプラス変換は、よく知られているように1となる。

初期値 $x(0)=0$ を仮定し、入力 $u(t)$ および観測量 $y(t)$ のラプラス変換をそれぞれ $U(s)$ 、 $Y(s)$ とすれば、式(A.11)が成り立つ

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (\text{A.11})$$

ここで、単位インパルスのラプラス変換は1であることより、

伝達関数 $G(s)$ のシステムに単位インパルスを入力させたときの出力を $y(t)$ とするとそのラプラス変換は

$$Y(s) = G(s) \quad (\text{A.12})$$

すなわち単位インパルス応答のラプラス変換は伝達関数に等しい。

参考文献

福島 弘毅：制御工学基礎論，丸善出版，pp. 50-56

謝辞

本研究を遂行するに当たり、終始丁寧なご指導とご鞭撻はもとより、研究活動に対する姿勢についても御示唆・御指導を賜りました大阪大学工学研究科教授 井上 豊博士、同 橋英三郎博士に深く感謝の意を表します。併せて、数多くの有益な御教示とともに、終始様々な御配慮と御激励を賜りました大阪大学工学研究科教授 今井克彦博士に心から感謝いたします。また、本論文をまとめるにあたり、大阪大学工学研究科教授 大野義照博士、同助教授 馬場研介博士には数多くの有益な御教示を賜りました。ここに謹んで謝意を表します。さらに、本論文をまとめるにあたり、貴重な時間を御割愛下さり御討論頂きました大阪大学工学研究科助手 向井洋一氏に心から感謝の意を表します。

また本研究に対し、田村良治氏（元五洋建設株式会社）、三藤正明博士、田村 保氏をはじめとする五洋建設株式会社技術研究所の方々にはご理解と一方ならぬご支援を頂きました、ここに記して謝意を表します。

以上の方々の他にも、本論文をまとめるにあたり、数多くの方々の御援助と御協力を頂いたことに厚く御礼申し上げます。