

階層型解析手法に基づく構造物の動的解析手法の開発

Development of Dynamic Structure Analysis Method based on Multi-Scale Analysis

市村強*, 生出佳**, 寺田賢二郎***, 堀宗朗****

Tsuyoshi ICHIMURA, Kai OIDE, Kenjiro TERADA, Muneo HORI

*正会員 博士(工学) 助手 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

**学生会員 修士(工学) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

***正会員 PhD. 助教授 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

****正会員 PhD. 教授 東京大学地震研究所 (〒113-0032 文京区弥生 1-1-1)

A new analysis method is developed for predicting dynamic structural responses with high accuracy and spatial resolution. Estimation of dynamic behavior of complicated structure requires a huge amount of computation. Our method takes advantage of multi-scale analysis for reducing such a computation. In this paper, we present the formulation of this new analysis method, the application of it into a simulation of simple structure and the comparison between this method and conventional methods are presented to verify the performance of our method.

Key Words : *Dynamic Structural Analysis, Multi-scale Analysis*

1. はじめに

震災の軽減を図るために、構造物の動的応答を詳細に求めることの意義は大きいと考える。従来から構造物の動的解析のために多くのモデルが提案されており、実務においても用いられている。例えば、多質点系モデルやロッキングスウェイモデルなどの簡易なモデル、連続体要素による詳細なモデルを用いたもの¹⁾²⁾³⁾などがある。線形解析、モード解析だけでなく、より精度よく動的応答をもとめるために非線形解析などもそれぞれで行われている。簡易なモデルを用いると、計算負荷はかからないが、精度・分解能の劣化を免れない。一方、詳細なモデルでは高精度・高分解能な解析を行うことができるが、計算負荷が膨大となり、解析が不可能になる場合すらある。解析の高精度化・高分解能化のためには、この計算負荷を大幅に軽減することが必要とされる。そこで、本研究では、構造物の動的解析の膨大な計算負荷を軽減するために、階層型解析手法を拡張した新しい手法を提案し、基礎的な検討を行った。

2. 階層型解析手法に基づく動的解析手法

図-1 に示すような構造物の動的応答解析を行うことを考える。この構造物の詳細な動的応答を求めるためには、本来、コンクリート、鉄筋、骨材の影響などをすべて考慮して高分解能なモデルを作成し、応答解析を行う必要がある(図-2 参照。本論文ではこのような高分解能なモデルを詳細モデルと呼ぶことにする)。しかし、このような高分解能なモデルを用いて、土木構造物・建築構造物などの三次元大規模構造物の動的応答

解析を行うためには膨大な計算量が必要とされる。したがって、この計算量を軽減するために、階層型解析手法⁴⁾⁵⁾を導入する。階層型解析手法に基づく動的解析手法の概要を以下に示す。

1. まず、この詳細モデルと等価な材料特性、幾何形状特性などを持つ低分解能なモデル(グローバルモデル)を構築する(図-3 参照)。このグローバルモデルを用いて構造物全体の低分解能な動的応答解析を行う。
2. 次に、より詳細な情報を得たい領域について、その着目領域のローカルモデルとグローバルモデルで得られた解を用いて、より高分解能な応答解析を行う(図-4 参照)。

このように、まず低分解能なモデルを用いて全体の低分解能な応答をもとめ、この応答とローカルな領域の高分解能なモデルを用いて高分解能な応答を求めるという手順を踏むことにより、一度に必要とされる計算量を大幅に減少させて高分解能な解を得ることができる。

本論文では、この階層型解析手法に基づく動的解析手法のうち、高分解能なモデルから等価な低分解能なモデルを構築する手順を示し、簡単な数値実験を通して本手法の有効性を示す。

3. 階層型解析手法

本研究で提案している階層型解析手法の定式化を示す。ここで解くべき問題は、図-2 に示す複雑な構造をもつビルのモデルだとすると、この詳細モデルを生成してそのまま解析するには膨大な計算量が必要となっ

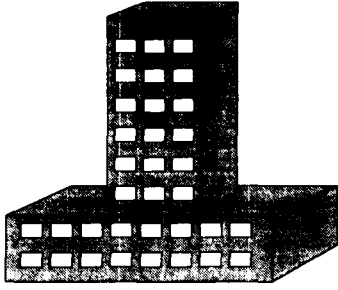


図-1 対象となる構造物

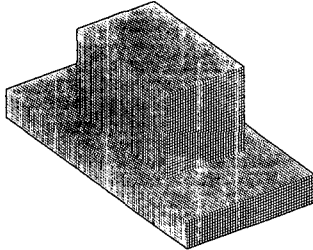


図-2 詳細モデル

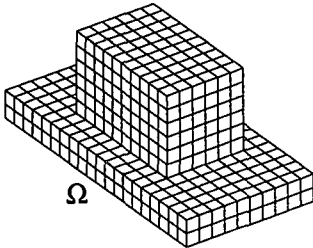


図-3 グローバルモデル

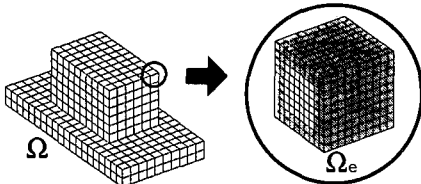


図-4 ローカルモデル

てしまう。そのため、このような詳細なモデルから材料特性及び幾何形状などの性質を抽出して、図-3のような粗い分解能のモデル（グローバルモデル）を再構成して振動解析などを加え、低分解能な応答解析を行うことが一般的である。本論文では、「詳細なモデルから材料特性及び幾何形状などの性質を力学的背景に基づいて抽出して、粗い分解能のモデルを再構成する」手法を階層型解析手法として提案している。

3.1 有限要素による階層的な領域分割

図-1 に示すように、均質な線形弾性体の一部に介在物が存在するような複合構造を持つ構造物を考える。ここでは、材料が分布する物理的な領域と数学的な近似領域とを区別し、有限要素法における領域分割（空間の離散化）の階層化を定義する。

まず、複合構造部分と同程度の大きさを持つ有限要

素を用いて、この物体を覆う数学領域 Ω を次式のように M^0 個に分割する（図-3）。

$$\Omega = \bigcup_{e=1}^{M^0} \Omega_e$$

ここで、複合構造部分の物理領域 e^0 は数学領域 Ω_{e^0} と一致しており、通常の有限要素近似の単位である。この分割を分割 [0]、生成されるメッシュをグローバルメッシュ、有限要素はグローバル要素と呼ぶことにする。さらに、グローバル要素 $e^0 \in \{1, 2, \dots, M^0\}$ については、次式のようにさらに M^1 個の領域 ($e^1 \in \{1, 2, \dots, M^1\}$) に分割する（図-4）。

$$\Omega_e = \bigcup_{i=1}^{M^1} \Omega_e^{(i)}$$

これを分割 [1] と呼び、対応するメッシュをマイクロメッシュ、要素をマイクロ要素と便宜上呼ぶことにする。ここで定義した部分領域 Ω_{e^0} 、 Ω_{e^1} は開領域であり、それぞれの境界 $\partial\Omega_{e^0}$ 、 $\partial\Omega_{e^1}$ により囲まれている。

このような階層的な領域分割は、サブストラクチャ法におけるサブストラクチャリング⁶⁾と等価であり、近似関数を導入する数学領域を重ね合わせることで、階層的な近似を可能にした手法が s-アダプティブ有限要素法（重合メッシュ法）⁷⁾であると見なされる。しかし、前者には複合構造の等価剛性を与えるという考え方はなく、後者はズームング法的な側面が強調され、低次のアイソパラメトリック要素の性能向上を意識したものではない。本研究で提案する拡張した階層型解析手法では空間分解能の異なる複数の要素を重ね合わせることで、複数の材料からなる任意の幾何学的特性を有する複合構造の平均的な力学挙動を与えるものである。次節では、本節の階層型領域分割を用いて構造物の等価な要素剛性を作成する。

3.2 均質化要素の定式化

静的問題において仮想仕事の原理により与えられるグローバル要素 e についての変分方程式は、

$$\int_{\Omega_e} (\delta \mathbf{u})^T \mathbf{D} \partial \mathbf{u} d\mathbf{v} = \int_{\partial\Omega_e} (\delta \mathbf{u})^T \mathbf{t} ds, \quad \forall \delta \mathbf{u} \in V$$

$\mathbf{u}$ は変位関数ベクトルであり、形状関数 N_e を用いて変位ベクトル $\mathbf{d}_e$ と $\mathbf{u}_e = N_e \mathbf{d}_e$ の関係がある。 $\delta \mathbf{u}$ は試験関数、 $\mathbf{D}$ は弾性定数テンソル、 $\mathbf{t}$ は境界上に与えられる応力ベクトル、 Ω_e は要素の領域、 $\partial\Omega_e$ は要素の境界を表し、さらに、

$$\partial = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \end{bmatrix}$$

である。今、変位関数 u が以下のように分解できるものとする。

$$u = N^0 d^0 + N^1 d^1 \quad (1)$$

ここで、 $(\cdot)^0$ は空間分解能の粗いグローバル要素の成分であることを示し、 $(\cdot)^1$ は空間分解能の細かいローカルメッシュの成分であることを示す。このとき、グローバル要素 e の要素剛性方程式は

$$\begin{bmatrix} K_e^{00} & K_e^{01} \\ K_e^{10} & K_e^{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_e^0 \\ d_e^1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_e^0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

となる。ここに、

$$\begin{cases} K_e^{00} = \int_{\Omega_e} (B_e^0)^T D B_e^0 dv, \\ K_e^{01} = \int_{\Omega_e} (B_e^0)^T D B_e^1 dv = (K_e^{10})^T, \\ K_e^{11} = \int_{\Omega_e} (B_e^1)^T D B_e^1 dv, \\ F_e^0 = \int_{\partial\Omega_e} (N_e^0)^T t ds \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 B_e は B マトリクス、 N_e は形状関数である。今、ミクロ節点変位ベクトル d_e^1 が、グローバル節点変位ベクトル d_e^0 を用いて

$$d_e^1 = -X_e d_e^0 \quad (4)$$

と表すことができたとすれば、式 (2) の第 2 式に代入して、任意のグローバル節点変位ベクトルについて恒等的に成り立つべき方程式として、

$$X_e = [K_e^{11}]^{-1} K_e^{10} \quad (5)$$

が得られる。これは、式 (4) に戻せば、

$$d_e^1 = -[K_e^{11}]^{-1} K_e^{10} d_e^0$$

を意味するので、式 (2) の第 1 式は、要素 Ω_e の要素剛性方程式、

$$K_e^H d_e^0 = F_e^0 \quad (6)$$

となる。ここで、

$$K_e^H = K_e^{00} - K_e^{01} [K_e^{11}]^{-1} K_e^{10} \quad (7)$$

が所望の要素剛性行列である。

式 (5) の各列ベクトルは、均質化法における特性変位関数に対応しており、分割 [0] の各要素 Ω_e 内での大域的な変形のもとでの基本変形 (特性) を表す特性モードと呼ぶことにする。ただし、均質化法における特性変位関数は、ミクロ領域内に一様に分布するグローバル (平均) 的な単位基本変形 (ひずみ) に対応したものであるのに対して、特性モードは分割 [0] の要素レベルでの基本的な大域的節点変位モードの応答である。したがって、結果として得られる要素剛性行列 (6) は、

複合構造の影響を補正項 $-K_e^{01} [K_e^{11}]^{-1} K_e^{10}$ に持っており、平均的な剛性で見なすことができる。このように、得られた要素と均質化法との類似から、この要素の剛性行列を均質化要素剛性行列 (homogenized element stiffness matrix) と呼ぶことにする。

実際のインプリメンテーションに際しては、多少注意を要する。例えば、式 (3) の各剛性行列は同一の物理領域上での積分で表されているため、複合構造を示す物性 D の空間的に不連続に分布することを許容しなければならない。すなわち、 K_e^{00} を含む全ての積分計算はミクロメッシュ分割の要素を単位として行わねばならないことになる。しかし、通常の有限要素においてこのような積分を行っても、変位はあくまでも $H^1(\Omega_e)$ 内のなめらかな関数で近似されるので、複数材料の不連続分布により生ずる不連続ひずみの近似は一様には収束しないことが知られている。これに対して、均質化要素においては、 K_e^{00} は通常の有限要素法における剛性行列と同一形式で要素内の不連続変形を許容しないが、ミクロ変位により $C^0(\Omega_e)$ 以下の連続性を実現することができる。これに関わる剛性部分が、補正項 $-K_e^{01} [K_e^{11}]^{-1} K_e^{10}$ である。

3.3 動的解析への適用

均質化要素によって設定されるグローバルモデルの要素 e の動的問題に対する運動方程式は、一般的な動的問題の運動方程式と同様に、次式で表される。

$$M_e \ddot{d}_e + C_e \dot{d}_e + K_e d_e = F_e \quad (8)$$

ここに、 M_e は質量マトリクス、 C_e は減衰マトリクス、 K_e は剛性マトリクス、 $\ddot{d}_e$ 、 $\dot{d}_e$ 、 d_e は加速度ベクトル、速度ベクトル、変位ベクトル、 F_e は外力ベクトルである。ここで、構造物の詳細な幾何学的情報は、剛性行列のみに反映されると仮定して、式 (8) 中の剛性マトリクス K_e には前節で求めた均質化要素剛性 (式 (7)) を用いることにする。ただし、 M_e 、 C_e には同じ幾何学的情報を用いて単なる体積平均を用いることにする。

4. 適用例

図-5 に示す 10 層ラーメン構造の動的応答解析を例にして、本論文で提案している均質化要素による動的応答解析手法の有効性を検討する。対象構造物を忠実にモデル化した (A) 詳細モデル、(B) 均質化要素モデル、物性を体積平均でもとめた (C) 簡易モデル、良く用いられている方法によってモデル化した (D) 線形多自由度モデルの 4 種類を用いる。また、入力波の成分の影響をみるため、三種類の強震波形を入力波として用いた。本数値実験では、Intel Xeon 2.20GHz Dual Processor の CPU、3072MB のメモリを搭載した計算機を用いた。

各モデルの詳細を以下に示す。簡単のため、二次元平面ひずみ問題を考える。質量マトリクスは、集中質量マトリクスとした。減衰はレーリ減衰を考え、質量の0.4倍とした。時間積分は、本解析手法の基礎的検討を行う上で取り扱いが簡便な中心差分法を用いた。(A) 詳細モデル。

図-5 のラーメン構造を詳細に図-6 a) のようにモデル化した。以下、このモデルを詳細モデルと呼ぶ。コンクリートの物性はヤング率 2.8×10^4 (MN), 密度 2350 (kg/m^3), ポアソン比 0.2 を用いた。 10×10 (cm) の線形一次要素を用いて離散化をおこなった。要素数は 320 となった。クーラント条件により計算時間間隔は 2×10^{-4} (sec) とした。このモデルによる応答を参照解として、各モデルによる応答結果の精度の検討を行う。

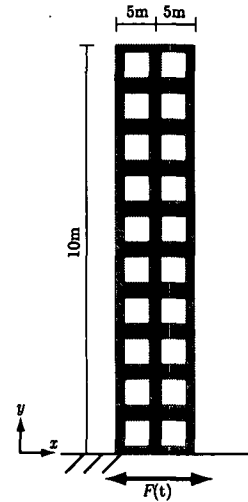


図-5 対象となる10層ラーメン構造

(B) 均質化要素モデル。

図-6 a) の詳細モデルに本手法を適用して図-6 b) のような低分解能なモデルを構築した。このモデルで離散化に使われている要素は、図-6 a) の詳細モデルと同じ分解能を持つローカルメッシュから式 (7) に基づきつくられたもので、詳細モデルと等価な構造・物性をもっている。以下、このモデルを均質化要素モデルと呼ぶ。要素数は 20 、クーラント条件により計算時間間隔は 1×10^{-3} (sec) とした。

(C) 簡易モデル。

図-6 a) の詳細モデルの構造・物性を均質なものとして単純に体積平均して図-6 c) のような簡易モデルを構築した。以下、このモデルを簡易モデルと呼ぶ。体積平均の結果、ヤング率 1.792×10^4 (MN), 密度 1504 (kg/m^3), ポアソン比 0.128 を用いた。この物性をもつ線形一次要素により離散化した。均質化要素モデルと同じく要素数は 20 とし、クーラント条件により計算時間間隔は 1×10^{-3} (sec) とした。均質化要素法モデルと簡易モデルは動的解析の際に扱う自由度数は同じであるが、均質化要素モデルは式 (7) に基づき、詳細モデルと等価な構造・物性を用いている。これに対し、簡易モデルは単純に構造・物性を体積平均することによって詳細モデルと等価な剛性をもとめようとしているところに違いがある。

(D) 線形多自由度モデル。

一般のラーメンの水平振動では、近似的にせん断系として扱っても全体の応答性状を十分よくあらわせることが知られており、ラーメン構造からせん断系への置換には武藤の D 値法、固定法⁸⁾などがよく用いられる。これらの方法はある外力分布を想定し、これに応ずる層間変形と層せん断力から層の等価バネ係数をもとめるものである。本論文では、図-6 a) の詳細モデルを武藤の D 値法⁸⁾を用いて、図-6 d) のように線形多自由度モデルに変換した。計算時間間隔は均質化要素モデルと均質化モデルの場合と同じ 1×10^{-2} (sec) とした。

入力波として以下の3波形を考える。

1. 兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で得られた強震波形の東西成分 30 秒間（以下、神戸波と呼ぶ）。
2. 鳥取県西部地震の際に新見で得られた強震波形の東西成分 30 秒間（以下、鳥取波と呼ぶ）。
3. 深部で発生した地震の強震波形の東西成分 30 秒間（1999 年 8 月 21 日午前 5 時 33 分に北緯 34.0 、東経 135.5 、深さ 70km で発生した地震。M5.4。龍神で観測された）（以下、深部波と呼ぶ）。

ここで行う解析は全て線形であり、説明の便宜のため最大変位をそれぞれ 1 に正規化した強震変位波形を用いる。強震変位波形とフーリエ変位振幅スペクトルは、それぞれ図-7 のようになっている。

以上の3地震波形、4モデルを用いて各々30秒間の動的応答解析を行った。入力波はモデル下端に水平振動として変位 ($F(t)$) で入力した（モデル下端の上下成分は変位 0 で固定した）。計算にかかった CPU 時間は、詳細モデル、均質化要素モデル、簡易モデル、線形多自由度モデルの各々で、7分、1分、1分、1秒となった。詳細モデルにかかった計算時間と比較して、均質化要素モデル、簡易モデル、線形多自由度モデルの各々で、 $1/7$ 、 $1/7$ 、 $1/420$ となった。詳細モデルと均質化要素法の計算量を比較すると、要素数で 10 倍以上、計算時間で 7 倍の差がある。今回は簡単な二次元の構造物の計算を行っているため、両者の差は大きくないが、より複雑で大規模な三次元実構造物のシミュレーションを行う場合にはこの差は非常に大きくなる。

入力波に対する4モデルの時刻歴応答とフーリエ変位振幅スペクトルを図-8に示す。図中の(A), (B), (C), (D)は、それぞれ詳細モデル、均質化要素モデル、簡易モデル、線形多自由度モデルを示している。データは各モデルの10階部分（図中の点 α ）において取得した。以下の議論は、この α で得られたデータにより行うが、その他の階で得られたデータにおいても同様な

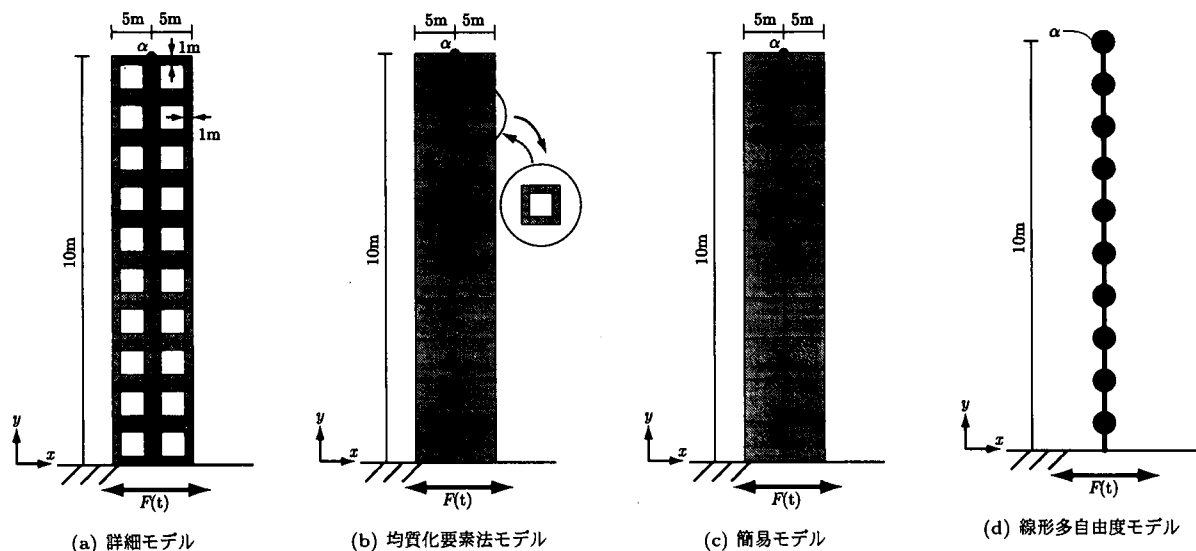


図-6 解析に用いたモデル

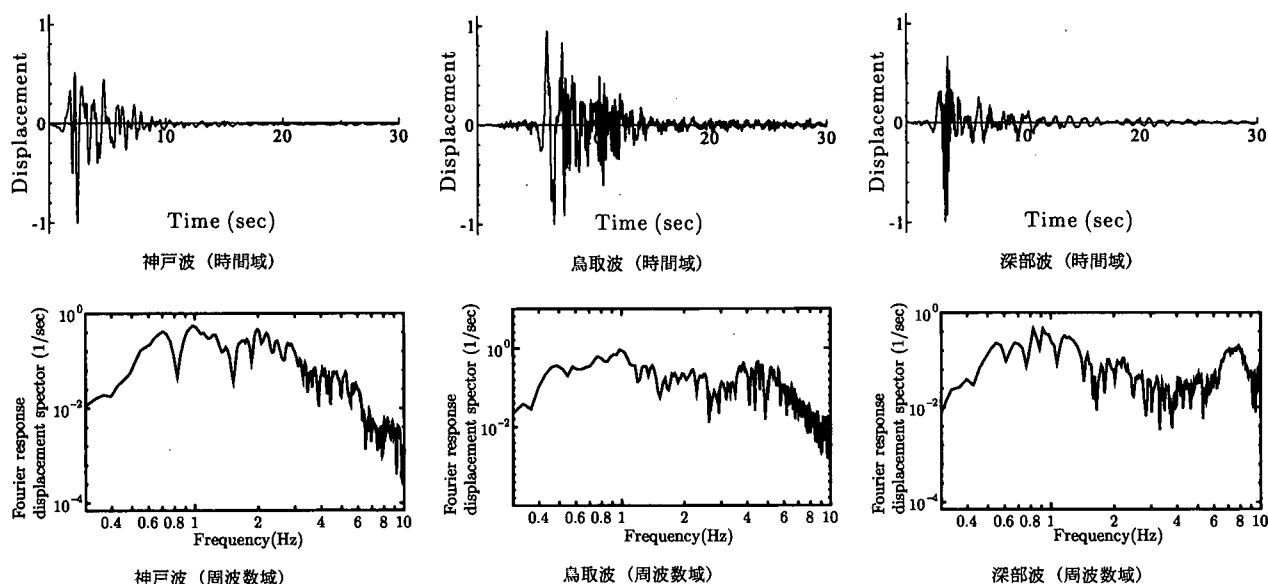


図-7 入力地震波形

結果が得られている。

まず、時刻歴波形についてみる。全ての入力波について、詳細モデルと均質要素モデルの応答が良好な一致をしていることがわかる。線形多自由度モデルの応答は初期位相は詳細モデルと良好に一致するものの、その後、差が大きくなっている。一方、簡易モデルは線形多自由度モデルに比べて詳細モデルの応答に近い。この傾向は地震波に関わらず一致してみられる。

以上のことをフーリエ変位振幅スペクトルにより考察する。簡単のため、各スペクトルを定数分だけ移動させて図化している。全ての入力波のケースで詳細モデルと均質化要素モデルのフーリエ変位振幅スペクトルは長周期側から短周期 8 (Hz) 程度までの全般に渡って良好な一致をしている。線形多自由度モデルのスペクトルは、1 (Hz) を超える領域で大きく異なっている。この理由は、武藤の D 値法自体が一次振動系に近い変

形形状を仮定して層の等価バネ係数をもとめているためであると考えられる。一方、簡易モデルは単純な体積平均によって物性をもとめたため、このような制限がなく、高次モードの再現が可能である。そのため、2 (Hz) 程度の短周期側でも精度を保つことが出来ている。

次に、簡易モデルと均質化要素モデルで扱っている自由度の数が同じであるにもかかわらず、応答の精度が異なることについて考える。簡易モデルでは、高分解能なモデルの構造・物性を体積平均して、均質な構造・物性の低分解能な要素の作成している。一方、本論文で提案している均質化要素法は構造物・物性を均質としていない。簡易モデルでは、「詳細モデルから低分解能な均質な構造・物性をもつ要素を作成」しているが、均質化要素法モデルでは、「詳細モデルから低分解能ではあるが、複雑な構造・物性をそのまま保持した等価な構造・物性を作成」している。そのため、高次

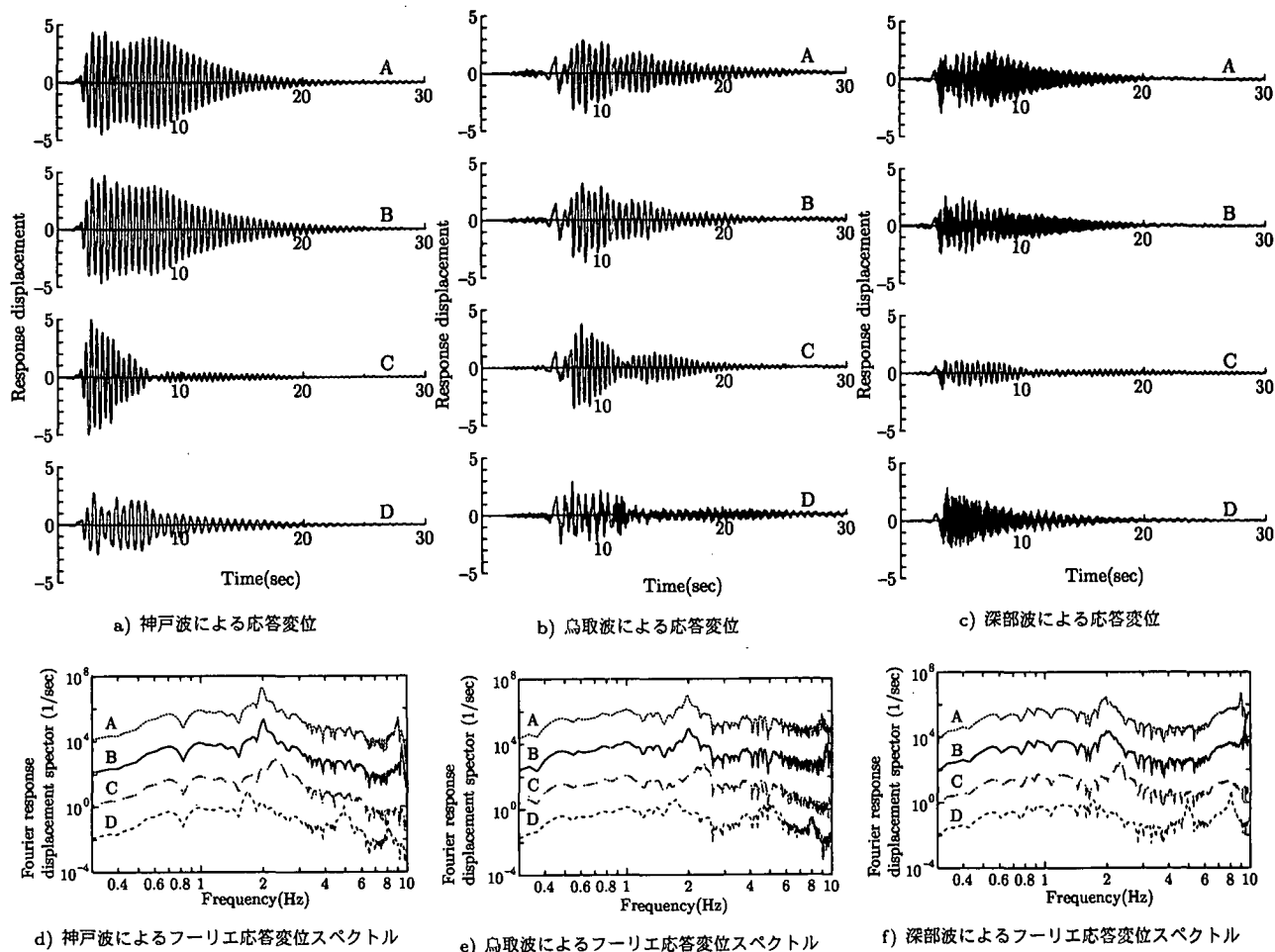


図-8 応答変位波形・フーリエ応答変位スペクトル

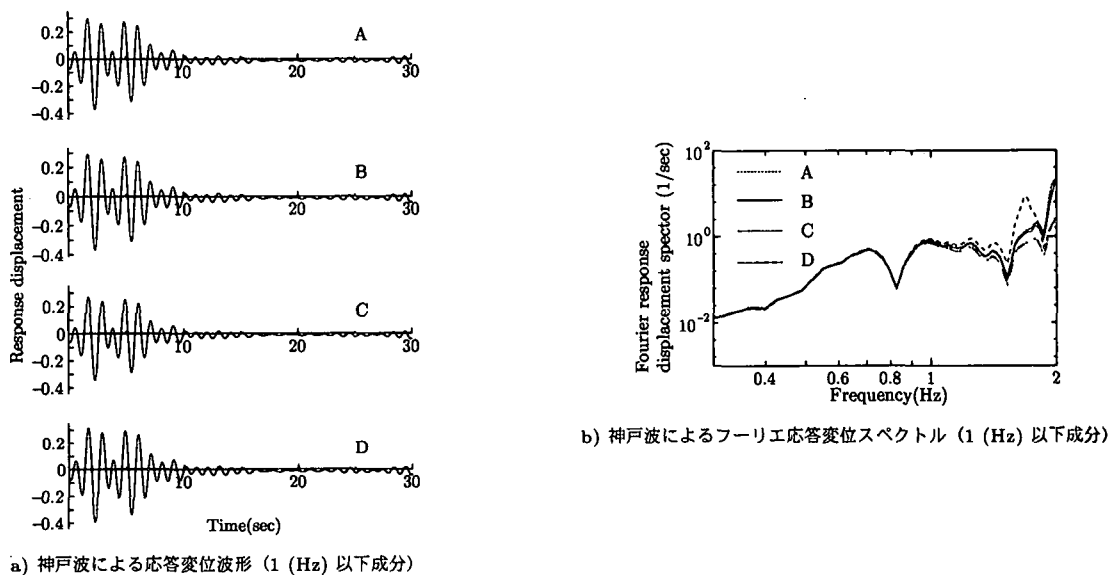


図-9 低周波領域の応答変位波形・フーリエ応答変位スペクトル

モードに影響を及ぼす複雑な構造が簡易モデルでは均質化されてしまい応答にあらわれてこなくなる。一方で、均質化要素モデルでは、低分解能ではあるが、複雑な構造・物性をそのまま保持しているため高次モードに影響を及ぼす複雑な構造を表すことが出来ており、

詳細モデルと同様な応答を示している。

図-9に神戸波による各モデルの応答成分の時刻歴波形(図-9 a)とフーリエ変位振幅スペクトル(図-9 b)を示す。図中の(A),(B),(C),(D)は、それぞれ詳細モデル、均質化要素モデル、簡易モデル、線形多自

由度モデルを示している。フーリエ変位振幅スペクトルは、1 (Hz) 以下の成分においては4モデルとも良好に一致している。このことから長周期側の応答解析を行う際には、どのモデルを使っても同様な結果が得られることがわかる(図-9 a)に神戸波を入力した際の各モデルの時刻歴応答の周波数成分1 (Hz) 以上を切除したものを図示した)。しかし、1 (Hz) を超えると、線形多自由度モデルの精度が失われ、2 (Hz) を超えると簡易モデルの精度も失われる。この傾向は全ての入力波に共通している。以上のことから、長周期であれば簡便な方法によっても詳細な解析を行ったのと同様の結果が得られる。しかし、それ以上の高周波成分を考慮した応答解析を行わなければならない際には、より高度なモデル化が必要とされ、計算量が膨大となる。このような中で、より高周波領域までを簡易モデルと同等な計算量で再現できる本手法の意義は大きいと考える。

5. まとめ

詳細な動的応答解析を行うために必要とされる膨大な計算量を軽減するために、新しい階層型解析手法を提案した。また、簡単な数値実験を通して、必要とされる精度を保ちつつ計算量を減らすことが可能であることが確認された。計算量を軽減させるために、詳細なモデルを簡単なモデルに置き換えて解析を行うことは従来からよく行われている。これら従来法との比較を通して本手法の有効性を示した。また、「複雑なモデルを低分解能に帰着させる手法」という観点からすれば、本手法は従来のアプローチを力学的な視点から厳密化したものであると位置付けることもできる。今後は以下の点を念頭に本手法の拡張を図っていきたいと考えている。

1. 本論文では、グローバルモデルを用いた解析までしか行っていないが、さらに詳細な情報を得たい領域については、その着目領域のローカルモデ

ルとグローバルモデルで得られた解を用いて、より高分解能な応答解析を行うことが可能であるので、この手法の開発を図る。

2. 非線形性を加味した解析を行う。
3. 既存の手法との比較検討を通して、本手法の有効性・妥当性を詳細に検討する。
4. 三次元構造物・より大自由度の問題・より複雑なモデルにおいて本手法の有効性を検討する。

参考文献

- 1) 北村春幸：解析モデルの分類と弾性解析モデル建築技術, **615**, 5, pp.256-262, 2001.
- 2) 柴田明德：最新 耐震構造解析, 森北出版, 2001.
- 3) 土木学会：：阪神大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証 - 検討課題と将来像 コンクリート技術シリーズ, 2000.
- 4) 生出佳, 寺田賢二郎, 市村強：構造物の動的解析のための均質化要素法の開発, (投稿準備中)。
- 5) T. Ichimura and M. Hori: Macro-Micro Analysis for Prediction of Strong Motion Distribution in Metropolis, *J. Struct. Mech. Earthquake Eng.*, JSCE, No. 654/ I-52, pp. 51-61, 2000.
- 6) (例えば) Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L., *The Finite Element Method, Fifth Edition*, Volume 1 The Basis, Fifth Edition, Butterworth-Heinemann, 2000.
- 7) Fish, J. and Markolefas, S., Adaptive s-method for liner elastostatics, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **104**, 1993, pp. 363-396.
- 8) 武藤清：耐震設計シリーズ 4 構造物の動的解析, 丸善, 1976.

謝辞

本研究は著者らが社会技術研究地震防災研究グループ所属時に行われたものであり、メンバー各位から貴重なご意見・ご示唆をいただきました。また、防災科学技術研究所による K-NET によって得られたデータを解析のために用いました。匿名の査読者の方々より有益なご意見をいただきました。ここに記して感謝いたします。

(2002 年 4 月 19 日 受付)