3.2 観測に基づく都市の地震被害評価技術の開発

3.2.1 地震動・地震応答の大規模数値解析法の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

都市の表層地盤と構造物群を忠実に表す都市モデルを構築し、大規模数値解析によって 地震動と構造物地震応答を計算する手法を開発する。入力は MeSO-net 等で観測したデー タであり、この観測とのインターフェイスの開発も行う。

(b) 平成25年度業務目的

前年度開発した地震動・地震応答解析コードを利用し、地震被害評価技術の基盤を開発する。 この評価技術は、MeSO-net 等で観測したデータを入力し、建物一棟一棟の地震動と地震応答を計 算する大規模シミュレーションを利用するものである。サブプロジェクト②で計画される地盤– 基礎-建物系の応答の研究と有機的に連携して、個別建物シミュレーションの高度化について検 討を継続する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学地震研究所	教授	堀 宗朗	
東京大学地震研究所	准教授	市村 強	
東京大学地震研究所	准教授	Ψ ラリス	
東京大学地震研究所	准教授	長尾 大道	
東京大学地震研究所	特任研究員	林旭川	
慶應義塾大学	准教授	小國 健二	
国土交通省国土技術政策総合研究所	研究官	壁谷澤 寿一	

(2) 平成25年度の成果

(a) 業務の要約

前年度開発した地震動・地震応答解析コードを利用し、地震被害評価技術の基盤を開発した。 この評価技術は、MeSO-net 等で観測したデータを入力し、建物一棟一棟の地震動と地震応答を計 算する大規模シミュレーションを利用するものである。サブプロジェクト②で計画される地盤– 基礎-建物系の応答の研究と有機的に連携して、個別建物シミュレーションの高度化について検 討を継続した。

(b) 業務の成果

1) 地震動解析手法

a) 3次元地盤モデルの構築の課題

工学基盤の上にある表層地盤での地震動増幅過程は、各種構造物の地震被害を引き起こ す主要な要因の一つである。構造物の固有振動数は 1~10 Hz にあり、10 m のオーダの厚 さと 100 m/s のオーダのせん断弾性波速度を持つ表層地盤では、この振動数の地震動成分 が数倍にも増幅するからである。この過程は、材料非線形性を持つ地盤の波動方程式を解 くことで解析することができる。しかし、増幅の度合いは、地盤の各層の幾何形状に大き く依存する。そして層境界の面を正確に計測することは難しく、この結果、波動方程式を 解く領域となる3次元地盤モデルを構築することは容易ではない。

『全国電子地盤図』(地盤工学会、2014¹⁾)は、地盤工学会が管理・運営する地盤情報の データベースである。地盤工学会による「表層地盤情報データベース連携に関する研究」 (科学技術振興調整費研究「統合化地下構造データベースの構築」の分担研究、代表は防 災科学技術研究所)の中で作成され、全国の地盤情報データベースを統合・連携すること を意図している。各地域において地盤情報データベースに集積された既存の地盤調査情報 と学術的地盤情報を融合させ、250mメッシュ毎の浅層地盤(深度 100m 以浅の沖積層およ び一部の洪積層)の代表的地盤情報を全国統一基準で整備したものである。この『全国電 子地盤図』は、表層地盤を対象とした3次元地盤モデルの構築を促す大きな契機になると 考えられる。250mメッシュという制約はあるものの、表層地盤のボーリングデータが統 ーしたフォーマットで提供され、工学基盤から地表面までをカバーするような3次元地盤 モデルを構築することができるからである。なお、『全国電子地盤図』を使って構築される 3次元解析モデルでも、実際の表層地盤を完全に忠実に再現するものではない。しかし、 地表地形や層境界が影響する局所的な地震動の増幅を、従来にない精度で評価することは 可能であり、地震被害評価という目的には十分であろう。

前年度開発された非線形有限要素法を数値解析に利用することを前提に、『全国電子地盤 図』を利用した3次元地盤モデルとして、本研究では1km四方深さ100m程度の領域を 対象とする。これは10Hzを目途に精度を保証した数値計算を行うためである。この時間 分解能を満たすためには、3次元地盤モデルの要素の寸法は1mを切ることもある。1km 四方深さ100mの対象領域では、解析モデルの自由度が億を超えることになる。大自由度 であることに伴い、解析モデルの要素の品質を確保することにも十分な注意が必要となる。 地表地形や層境界を表すために四面体要素が使われるが、正四面体と大きく異なる形状の 四面体要素が使われると、数値解の精度が落ちることが知られている。すなわち、四面体 の形状の良否が要素の品質を決めるのである。通常、最大の面積を持つ面の平方根と、そ の面からとった面に向かう頂点の高さの比であるアスペクト比が要素品質の指標として使 われる。

b) 3次元解析モデルの構築法

本課題の目的は、250m メッシュから成るグリッドの地盤情報を使って、一定の要素品 質を確保した3次元地盤モデルを自動構築する手法を開発することである。3次元地盤モ デルは、各層内は立方体ソリッド要素を使うが、地表や層境界ではその形状に柔軟に適用 できるよう四面体ソリッド要素を使う。地震動増幅過程の数値解析において10Hzまでの 計算精度を保証する場合、せん断波弾性速度を100m/sとすると、対応する平面波の波長 が10mとなる。この波長を20~10の要素で分割することが必要となる。すなわち要素寸 法の目安は0.5~1mとなる。

大自由度の3次元地盤モデルの自動構築にはバックグラウンドセルを用いる(Ichimura et al., 2009²)。バックグラウンドセルとは、解析領域に被さる同一寸法の立方体セルの集合

である。セル単位で要素生成を行うこととする。地層が概ね平行成層となることを考える と、立方体セルを使った要素生成が3次元地盤モデルの構築に馴染むことは明らかであり、 実際、バックグラウンドセルの立方体セルを立方体ソリッド要素に置き換える場合が多い。 地表地形や層境界を含むセルのみ、要素分割に工夫をすればよいことになる。なお、セル 単位で独立な要素生成が可能となるため、並列処理にも適している。これは隣接するセル であっても、互いの要素生成に影響されないからである。

250 m メッシュのグリッドの地盤情報を使う場合、内挿された層境界が、セルの8つの 端点近くを通ることもある。端点近くを通る層境界を四面体要素の境界とすると、この四 面体要素は扁平となり、アスペクト比が大きくなる。すなわち、3次元地盤モデルの要素 品質が落ちるのである。層境界に忠実に要素生成をすると、アスペクト比が大きな要素を 除くことは極めて難しい。そもそも内挿された層境界には相応の誤差が含まれている。し たがって、忠実に要素生成をする必要はなく、端点から層境界を若干ずらすことは許容で きると考えられる。内挿された層境界そのものを微調整して、過度にアスペクト比の大き い要素が生成されることを防ぐのである。この結果、要素品質の高い3次元地盤モデルを 自動構築することが可能となる。

3次元地盤モデルの自動構築の手順は以下の通りである。

- 対象周波数に対応した寸法のバックグラウンドセルを、対象領域をカバーするように 生成する。
- 2) 生成されたセルの中で、地表面や層境界を含まないセルはそのまま立方体ソリッド要素とする。
- 3) セルが地表面ないし境界面と交差する場合、セルの辺と面の交点を用いて四面体ソリ ッド要素を生成する。要素生成にはデローニ分割を用いる。
- 4)四面体ソリッド要素のアスペクト比が所定の限界値を超える場合、交点の位置を微調 整し、所定のアスペクト比となる四面体ソリッド要素を再度生成する。

c) 東京 23 区の 3 次元地盤モデル

東京23区の一部を対象に、地盤情報データベースを用いて3次元地盤モデルを構築した。 3次元地盤モデルを図1に示す。工学基盤の上に2つの地層を置いたモデルであり、地盤 情報データベースの各メッシュのボーリングデータから、工学基盤と2つの地層に対応す る層を指定し、滑らかな面となる層境界を設定した。具体的には、各メッシュの中心にボ ーリングデータから決まる層境界の深さを置き、この深さを内挿することで層境界を設定 している。





地盤震動応答解析手法を適用して地震動解析を行った。R-O モデルと Mising 則を地盤材料の非線形構成則に用いている(図2参照)。モデルの諸元と材料定数とモデルの概要を表1に示す。3次元地盤モデルの底面に神戸波(JMA, 1995)を入力した結果の一例を図3に示す。比較のため、平行成層を仮定した1次元地盤モデルで計算された地震動も載せてい

表1 構築された3次元地盤モデルの材料定数と諸元

	V _p (m/s)	V _s (m/s)	ρ (kg/m³)	h _{max}	γ _r
1 st layer	1,210	150	1,500	0.25	0.005
2 nd layer	1,380	255	1,800	0.05	8
bedrock	1,770	490	1,900	0.005	∞

a) material parameters of soil layer

b) characteristics of surface layer model

DOF	1,022,630,349
number of nodes	340,876,783
number of elements	252,737,051



図2 地盤材料の非線形構成則として使われた R-O モデルと Mising 則

る。図 3a)は SI (Spectral Intensity, Housner, 1952³⁾)の空間分布であり、図 3b)は1次元地盤 モデルとの差である。図1に示された2つのポイント(Point A と B)での、加速度の水平 2成分と、3次元モデルと1次元モデルの差の2成分を図 3c)と図 3d)に示す。2つのポイン トでは地盤構造が異なるため、当然であるが、3次元と1次元の解析の差には明確な違い がある。『全国電子地盤図』を用いた3次元解析モデルが利用できれば、地盤震動に対しよ り科学的合理性の高い解析が可能となる。





図3 3次元地盤モデルの解析結果:SI値の分布と2地点の加速度波形

2) 地震応答解析手法

a)構造物群都市モデルの構築の課題

構造物群都市モデルは、都市内の建築建物一棟一棟に対して構築された地震応答解析モ デルの集合である。東京 23 区では建築建物の数が 100 万のオーダであり、このオーダの解 析モデルが必要となる。この数の解析モデルを手作業で作ることは不可能である。適切な プログラムを開発し、そのプログラムを使って 100 万オーダの解析モデルを自動構築する ことが必要となる。自動構築に使えるデータとして、建築建物の外形状は地理情報システ ムから、構造種別・年代等は行政データが利用できる。しかし、内部構造や部材の形状・ 特性に関するデータは建築建物の設計図に記載されているが、全ての建築建物の設計図を 入手し、このデータを判読することは現時点では不可能である。この点を考慮し、利用で きるデータから適切な地震応答解析モデルを自動構築することが目的となる。 上記を背景に、本研究では、建築建物の地震応答解析モデルとして、非線形 MDOF モデ ル(Multi-Degree-of-Freedom model、MDOF model)を利用する。非線形 MDOF モデルの設 定は、階数、各層の床質量、各層を結ぶ非線形バネが必要となる。階数や床重量は、地理 情報システムに蓄積された外形状データから設定することが可能である。一方、非線形バ ネの設定は難しい。本研究では、標準的な建築建物を想定し、その非線形バネを使うこと とする。

上記の自動構築の手順は相応に合理的であるが、自動構築された非線形 MDOF モデルの 妥当性を別途検証することが必要である。自動構築の手順の合理性は非線形 MDOF モデル の妥当性の必要条件に過ぎず、十分条件とはならないからである。実際、自動構築された 非線形 MDOF モデルが現実の建築建物とは異なる挙動を示す危険性を完全に消すことは 難しい。本研究では、精度は悪いもののパラメータの数が少なくより堅牢に設定できる非 線形 SDOF モデル (Single-Degree-of-Freedom model、SDOF model)を使って、この危険性 がないことを確認することとする (図4参照)。似通った非線形バネを使うと、両者の解で ある時刻歴応答が概ね似通うことになる。大きく異なるようであれば、設定の難しい非線 形 MDOF モデルに問題があることが示唆される。

非線形 SDOF モデルと非線形 MDOF モデルの解の比較には、入力地震動の特性を考慮す ることが重要である。非線形 SDOF モデルの固有周波数に近い成分が卓越する入力地震動 の場合、他に比べて、非線形 MDOF モデルの解が非線形 SDOF モデルの解に近くなること が予想される。これは、非線形 SDOF モデルの固有モードの周波数と非線形 MDOF モデル







図4 非線形 SDOF モデルと非線形 MDOF モデル

の第一次モードの周波数が近いため、非線形 SDOF モデルの固有モードの周波数の震動が 卓越した解となるからである。また、線形から非線形に遷移する状況も、非線形 SDOF モ デルと非線形 MDOF モデルとで似通ったものとなることが予想される。他の場合、非線形 MDOF モデルと非線形 SDOF モデルの解には相応の違いがあると考えられる。特に、非線 形 MDOF モデルの高次モードの固有周波数が卓越する入力地震動の場合、非線形 SDOF モ デルでは計算できない非線形 MDOF モデルの高次モードが励起されることになり、二つの 解の差が大きくなることが予想される。

b) 非線形 MDOF モデルの自動構築方法

現時点では、都市構造物の外形状の情報を含む地理情報システムが利用できる。この地 理情報システムから、建築建物の高さと各層のフットプリントのデータが与えられたこと を前提に、次の手順で非線形 MDOF モデルを自動構築するプログラムを開発した(図 5)。

- 1) 各層の質量 層の床面積を外形上のデータから計算し、標準的な床厚さと密度を想定 して設定する。
- 2) 各層を結ぶバネの剛性と強度 層毎の床質量の分布を基に、一様・線形分布の他、段 落としを考慮し、標準的な剛性と強度を設定する。

なお、階数は、建築建物の高さから適当な層高さ(3.5m)を設定して階数は計算している。

図 5 開発された非線形 SDOF モデル自動構築のプログラムの概要

本研究では、簡単のため、低層(1~2 階建て)と中層(3~5 階建て)は一様とする。高層 (6 階建て以上)は線形とした。高層の階数が増えるほど、剛性と強度の分布は多様にな る。この結果、パラメータを決めることが難しく、非線形 MDOF モデルの不確定性が大き くなることになる。

都市構造物の外形状の情報の具体的な内容・フォーマットはそれを蓄積する地理情報シ ステムによって異なる。本研究で利用する地理情報システムでは、層の高さの水平面に投 影された2次元ポリゴンとしている。低層の場合、屋上に対応する水平面でのポリゴンで ある。これは建築建物のフットプリントと考えることができる。中層・高層の場合、途中 で層形状が変わると、その水平面でのポリゴンが含まれる。水平面の高さから、そのポリ ゴンが対応する階数は判定できる。ポリゴン情報のフォーマットは CAD の shape フォーマ ットに準拠している。CAD の特性上、ポリゴンを正確に図示するために、ポリゴンの節点 の座標がフォーマットに含まれている。しかし、異なる水平面に置かれたポリゴンが一つ の建築建物の異なる層に対応する、といった情報は含まれていない。さらに面積が大きい 建築建物では、同一の水平面で複数のポリゴンを使って形状を表す場合があるが、隣接す るポリゴンが共通の建築建物を表す、といった情報も含まれていない。このようなポリゴ ンの接続情報がないことは、一つの建築建物に対して非線形 MDOF モデルを自動構築する 大きな支障となる。

開発された自動構築のプログラムでは、上下と水平のポリゴンの接続情報を推定する機能を付加した(図6参照)。上下のポリゴンは、2次元ポリゴン内の節点が共有される場合、 もしくは、十分近い場合、同一の建築建物の異なる層であることとする。この際、上のポ リゴンが下のポリゴンからはみ出ないことを確認する。水平に隣接するポリゴンでは、節 点間の辺が共有される場合、同一の建築建物の隣接した部分であることとする。なお、面 積が大きい建築建物では、独立した複数の構造体を使い、その間をエクスパンションジョ

図6 水平面に置かれたポリゴンの接続情報の推定:

イントで連結する場合が多い。このエクスパンションジョイントで連結された建築建物に 対しては、同一水平面に複数のポリゴンが使われると思われる。

地理情報システムは100万のオーダを超える構造物の情報を含んでいる。ポリゴンの数 もそのオーダにあり、誤情報が含まれている可能性がある。実際、ポリゴンを含む水平面 の高さが間違っている場合が1%以下であるが存在する。国土地理院が管理している標高 のデータ(DEM、Digital Elevation Data)を使ってこの誤情報を除くことができる。また事 物には、駐輪場や物置等、建築建物の付帯施設が含まれる場合もある。ポリゴンの面積が 基準値以下、もしくはポリゴンが過度に細長いといった形状の特徴を使ってこのような付 帯設備を除くことを行っている。

図 5 に示されたように、開発された非線形 MDOF モデル自動構築のプログラムでは、S 造・RC 造・木造の 3 種類の非線形地震応答解析手法のモデルを構築することになる。各々 の解析手法は独自のフォーマット・内容の入力が必要であり、自動構築された非線形 MDOF モデルはこの入力として使えなければならない。この点を考慮して、開発されたプログラ ムは、S 造・RC 造・木造に対応した非線形 MDOF モデルを出力できるようにしている。 なお、構造種別・年代等を含む行政データは将来利用できるようになることを想定してい る。

非線形 MDOF モデルの解の参照に使われる非線形 SDOF モデルは、重量と剛性・強度を 決めればよい。非線形 MDOF モデルと同様に、重量は建築建物のフットプリントから決ま る面積と、高さから決まる階層から設定することができる。剛性は、高さから想定される 固有振動数を基に設定する。同様に強度は限界の変形角(例えば高さの 1/100)に対応し た力とする。

非線形 SDOF モデルの解を参照して非線形 MDOF モデルの解を確認するためには、多数 の入力地震動が必要となる。本研究では K-NET の観測地震動を利用した。非線形解析のた め、入力地震動の数ができるだけ多いことが望ましい。このため、K-NET で報告されてい る観測点の表層地盤平行成層モデルと観測地震動を組み合わせた。すなわち、平行成層モ デルを介して、基盤に入った観測地震動の増幅を計算し、建築建物へ地表面での入力地震 動とするのである。

c) 自動構築された非線形 MDOF モデルの妥当性の検証

開発された自動構築プログラムの性能を検証するため、高さ・面積等が異なる15の建築 建物のデータから自動構築された非線形 MDOF モデルの妥当性を検証した。入力地震動と して、K-NET で観測された最大加速度が一定値以上の1,008の観測波形、増幅を変えるた め15の表層地盤モデルを利用し、1つの非線形 MDOF モデルに15,090の入力地震動を加 えた地震応答解析を行う。この入力地震動の時間域・周波数域での特性は多様である(図 7参照)。

a) 時間域での特性:水平加速度成分のノルム

b) 周波数領域での特性:加速度スペクトルの最大値の分布

図7 非線形 MDOF モデルの妥当性検証に使われた入力地震動

非線形 SDOF モデルとの比較を図8に示す。モデルから換算された建物全体のドリフト 角の分布である。図8a)は非線形 SDOF モデルの値を基準とした相対値、図8b)は絶対値で ある。相対値では10%以下、絶対値でも0.1%を下回る違いである。最も差が出た入力地震 動に対し時刻歴波形を比較した結果を図9に示す。全体の挙動は似通っており、応答のピ ークに若干の差があることがわかる。この差が図8のドリフト角の違いを生むのである。

図8 非線形 MDOF モデルと非線形 SDOF モデルのドリフト角の比較

図9 非線形 MDOF モデルと非線形 SDOF モデルの時刻歴の比較

3) MeSO-net の観測データの利用の検討

a) Taylor 展開を使った MeSO-net 観測データの補間

大地震発生時、都市の構造物群を対象とした即時被害予測は、二次災害を防ぐために重 要である。即時被害予測は、観測された地震波形から構造物に入力される地震動を推定す るプロセスと、推定された入力地震動に対する構造物の応答と損傷を解析するプロセスか らなる。構造物の地震応答解析が一定のレベルに達している今日、第二のプロセスの精度 は被害予測という目的には十分である。したがって、第一のプロセスの精度が即時被害予 測の精度を決めることになる。 MeSO-netの場合、第一のプロセスは、300強の観測点で観測された地震動波形を使って、 首都圏の100万オーダの構造物に対して入力地震動を推定することである。他の地震観測 ネットワークと比較すると MeSO-net は高密度であることは確かであるが、構造物の空間 密度は MeSO-net の観測点密度とは圧倒的に高い。地表面の地震動は、例えば、隣接する 構造物では大きく変わることはないが、地震観測網の密度と構造物の密度の違いは大きく、 首都圏の全構造物に対して、精度を保証した入力地震動を推定することは決して容易では ない。

上記を背景に、本課題では、MeSO-netの地震観測網で得られる地震波形の時刻歴データ を使って、空間分解能で地震動の分布を推定する手法の開発を進めている。基本的なアイ ディアは、地震動を関数と考えてそれを Taylor 展開するものである。

$$u_i(\mathbf{x}^o + \Delta \mathbf{x}; \omega) = u_i(\mathbf{x}^o; \omega) + \sum_p \frac{\partial u_i}{\partial x_p}(\mathbf{x}^o; \omega) \Delta x_p + \sum_p \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_p \partial x_q}(\mathbf{x}^o; \omega) \Delta x_p \Delta x_q + \cdots$$
(1)

ここで左辺の*ui*は周波数領域(ω)での地震動成分であり、振幅と位相を同時に考えるため、複素数としている。右辺が展開された多項式であり、多項式の係数が未知数となる。この係数を、時刻歴データを用いて推定する手法が考案された。2011年東北地方太平洋沖地震で観測された MeSO-net の時刻歴データに考案された手法を適用した結果、約 0.15 Hz 以下の地震動分布を精度良く推定することが可能であることが示されている。

一般的な構造物の固有周波数は 1.0~10 Hz である。構造物の入力地震動の推定という目 的のためには、この周波数領域での地震動成分に対して推定精度を向上しなければならな い。一般に、周波数が高い地震動成分ほど波長は短くなるため、空間的変動は大きいと考 えられ、空間変動が大きい関数を精度良く表すためには、Taylor 展開を打ち切る次数(展 開次数)を上げればよい。しかし、少ない観測データを使って展開次数までの係数を決定 すると、精度が落ちることも自明である。また、数が同じでも、観測点の間の距離が長く なると、精度が落ちることも自明である。したがって、限られた観測点の時刻歴データを 使って、高次の Taylor 展開の係数を高精度で決定することは決して容易な課題ではない。

昨年度、開発された手法では、5 つ以上の観測点を含む領域を考え、この領域にある観 測点をクラスタと称した。上記の課題は、クラスタと Taylor 展開の展開次数の決定と考え ることができる。なお、クラスタの決定では、観測点の数のみならず、その相対位置も考 慮しなければならない。クラスタと展開次数に応じて、信頼できる精度で推定できる地震 動の周波数成分が変わる。逆に言えば、0.15 Hz 以上の周波数成分を超えた高周波数の地震 動を推定するためには、クラスタと展開次数の最適化を図ることが一策となる。

b) スパースモデリングを使った Taylor 展開補間の改良

以上の構想の下、本年度は、Taylor 展開を使った地震動の空間分布の推定をより高い周 波数成分に適用できるようにするため、空間分布の推定に最適となるクラスタと展開次数 を自動的に決定する手法の開発を行った。比較的少数のデータを使って未知数を決定する 方法論は、データ同化の分野で活発に研究されている。本研究では、方法論の一つとして スパースモデリングを採用し、具体的な方法として lasso (least absolute shrinkage and selection operator)を使う。そして lasso に基づくクラスタと展開次数の自動決定を行う。 スパースモデリングとは、比較的少数のデータを使って、多数の未知パラメータから適 当なパラメータを選択・決定し、データを再現する最適のモデルを決定する方法論である。 当然のことであるが、より多くのパラメータを持つモデルを使うと、より良くデータを再 現することができるが、その分、多くのパラメータの決定が難しくなる。すなわち、デー タ再現の改良とパラメータ決定の難しさには、トレードオフの関係がある。スパースモデ リングは、多数のパラメータの中から、データ再現に適すると判断される少数のパラメー タを合理的に選択するところに特徴がある。特にデータが比較的少ない場合、従来の方法 に比べて、パラメータの選択が効率的に行える点は有効である。

前節の式(1)は、観測点間距離を説明変数、地震動データを従属変数とする線形重回帰モ デル

$$u_{i} = \beta_{i}^{0} + \sum_{k=1}^{K} \beta_{ik}^{0} x_{k}$$
⁽²⁾

に帰着する。勿論、 $\beta_i^0 \check{n} u_i(x^o; \omega)$ 、 $\beta_{ik}^0 \check{n} \partial u_i / \partial x_p$, $x_k \check{n} \Delta x_p$ に対応する。和の*K*はクラスタの数の3倍である。lassoでは偏微分係数ベクトルをL1ノルム正則化項に基づく評価関数

$$J = \frac{N}{2} \log(2\pi) |\mathbf{R}| + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N} (u_i^{(n)} - \beta_i^0 - \sum_{k=1}^{K} \beta_{ik}^0 x_k) R_{ij}^{-1} (u_j^{(n)} - \beta_i^0 - \sum_{k=1}^{K} \beta_{jk}^0 x_k) + N\lambda \sum_{k=1}^{K} \left| \beta_{ik}^0 \right|$$
(3)

を最小化することにより、有効な説明変数項のみを自動的に選択することが可能となって いる。ここでRは、式(2)の第n番目の観測データ $u_i^{(n)}$ とその推定値 $\beta_i^0 + \sum_{k=1}^K \beta_{ik}^0 x_k$ の差を観測 ノイズとみなした時の、観測ノイズが従う正規分布の共分散行列マトリクス、|R|はその絶 対値である。最初の二項は観測ノイズの対数尤度であり、最後の項は正規化項と呼ばれる。 なお、 λ はその重みである(図 10 参照)。正規化項が「尖っている」ため、式(3)のJを最適 化する際、必ず一つの β_{ik}^0 が選択されることになる。これが lasso の特徴である。

図 10 lasso の特徴である正規化項のイメージ

なお、逆問題・逆解析の分野では、通常、情報理論に基づくパラメータの選択が行われ る。これは、観測データとモデルを使って推定された値の差を与える誤差関数に、パラメ ータの数の対数を情報エントロピーとして加えた目的関数を最小化する方法である。情報 理論では、パラメータの数の増加は、パラメータが決めづらくなるという意味で、モデル

c) 3 階偏微分係数

図 11 lasso の MeSO-net データへの適用実験によって得られた、正則化パラメ タの調整によって 1~3 階偏微分係数が選択されていく様子

の不確からしさに対応すると考え、これを情報エントロピーとして定量化するのである。 多数のパラメータから適当なパラメータを選択し、目的関数を最小化する。最小化された 目的関数の中で最小値をとるものが、最適なパラメータとなる。パラメータの数が多い場 合、パラメータの組は大きくなり、データが比較的少ない場合、目的関数の有意な最小値 を決定することが難しくなる。

Mathematica を用いて式(3)の数値的最適化アルゴリズムとして最も知られている glmnet (Friedman *et al.*, 2010⁴⁾)を実装し、MeSO-net データへの適用実験を実施したところ、正 則化パラメータ を調整することによって、予想通りに偏微分係数が低階から高階へ順次選 択されていくことを確認した(図 11)。今後は、選択されるクラスタが座標変換に対して 不変であることを考慮した group lasso や、地表における応力釣り合い条件および波動方程 式から導出される拘束条件を事情情報として取り入れるための等式制約付き lasso を実装 し、本格的な地震動分布の推定を実施していく予定である。

(c) 結論ならびに今後の課題

前年度開発した地震動・地震応答解析コードを利用するため、3次元地盤モデルの構築 と構造物群都市モデルの構築を行うプログラム開発を行った。3次元地盤モデルは、『全国 電子地盤図』のメッシュデータを利用することで、地震応答解析の入力には十分な時間分 解能で地震動を計算できる高い空間分解能を確保している。構造物群都市モデルの構築で は、非線形 SDOFモデルを参照して、自動構築された非線形 MDOFモデルの妥当性を検証 した。これは本研究が最終目的とする地震被害評価技術の基盤であり、十分な性能を持つ 地盤と構造の解析モデルを自動構築することが可能となった。地震被害評価技術では、 MeSO-net 等で観測したデータが入力となる場合がある。前年度に引き続き、Taylor展開を 利用した観測データの補間を試み、スパースモデリングに基づく新しい手法の開発を試み た。この手法により、補間に必要な多数の未知パラメータを合理的に決定することが可能 となりつつある。

前年度と本年度で、大規模シミュレーションを利用した地震被害評価技術の基盤(解析 手法、解析モデル、MeSO-netの利用)は整備された。プロトタイプと称すべき現在の地震 被害評価技術を使って実際に東京を対象とした地震被害評価を行い、実用に向けて評価技 術を改良することが今後の方針である。具体的な課題として、より信頼できる解析モデル を構築するため、構造種別等の行政データの利用を図ることが揚げられる。また、サブプ ロジェクト②の地盤-基礎-建物系の応答の研究と有機的に連携して、地震応答の信頼度 等を検証することも課題である。さらに、被害評価を行う対象に社会基盤施設を含めるよ うにすることも課題と考えられる。

(d) 引用文献

- 1) 地盤工学会: 全国電子地盤図, http://www.denshi-jiban.jp/, 2014.
- Ichimura, T., Hori, M. and Bielak, J.: A Hybrid Multiresolution Meshing Technique for Finite Element Three-Dimensional Earthquake Ground Motion Modeling in Basins Including Topography, Geophys. J. Int., Vol. 177, pp. 1221–1232, 2009.
- 3) Housner, G.W.: Spectrum intensities of strong-motion earthquakes, Symposium on earthquakes and blast effects on structures, Los Angeles, CA, 1952.
- 4) Friedman, J., Hastie, T. and Tibshiran, R.: Regularization Paths for Generalized Linear Models via Coordinate Descent, J. Stat. Softw., Vol. 33, Issue 1, http://www.jstatsoft.org/, 2010.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果(発表題目、口頭・ポ	発表者	発表場所	発 表	玉
スター発表の別)	氏名	(学会等名)	時期	際・国
				内の別
APPLICATION OF HIGH	Muneo	THE 4TH AICS	2013 年	国際
PERFOMANCE COMPUTING TO	Hori	INTERNATIONAL	12 月	
SEISMIC STRUCTURE RESPONSE		SYMPOSIUM		
ANLAYSIS(口頭)		(神戸市)		
FAILURE ANALYSIS OF	Muneo	APCOM & ISCM	2013 年	国際
REINFORCED CONCRETE	Hori	2013	12 月	
STRUCTURE MEMBERS USING		(シンガポール)		
PDS-FEM (口頭)				
APPLICATION OF HPC TO	Muneo	COMPDYN 2013,	2013 年	国際
EARTHQUAKE ENGINEERING -	Hori	4th ECCOMAS,	7月	
SEISMIC STRUCTURE RESPONSE		(コス、ギリシャ)		
ANALYSIS AND URBAN AREA				
EARTHQUAKE SIMULATION				
(口頭)				
POSSIBILITY OF HIGH	Muneo	The 1st G-EVER	2013 年	国際
PERFORMANCE COMPUTING	Hori	International	3月	
FOR EARTHQUAKE DISASTER		Symposium		
ASSESEMENT (口頭)		Program		
		(つくば市)		
大規模計算機を利用した地震動と	堀宗朗	秋の大会 地震動	2013 年	国内
地震応答のシミュレーション,原		シミュレーション	9月	
子力学会		と構造評価手法の		
(口頭)		現状とその適用		
		(八戸市)		
都市に対する地震災害インパクト	堀宗朗	日中地震災害復興	2013 年	国際
の評価と防災のための大規模計算		及び防災シンポジ	11 月	
システムの開発(口頭)		ウム(成都、中国)		
Framework of Integrated Earthquake	M. Hori	International	2013 年	国際
Simulation for Pipeline Network		Conference on	10 月	
(口頭)		Advances in Civil,		
		Structural and		
		Environmental		
		Engineering -		
		ACSEE,		

	(チューリッヒ、	
	スイス)	

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文(論文題目)	発表者氏名	発表場所	発表時期	国際・国
		(雑誌等名)		内の別
On the development of	Wijerathne	Journal of	2013年	国際
multi agent system for	Maddegedara	Japan Society		
large urban area	Lalith Lakshman,	of Civil		
evacuation with	Leonel A. Melgar,	Engineers, Ser.		
autonomous navigation	Muneo Hori,	A2 (Applied		
	Tsuyoshi	Mechanics		
	Ichimura, Seizo	(AM))		
	Tanaka			
On the application of	Wijerathne	Journal of	2013年	国際
PDS-FEM for simulating	Maddegedara	Japan Society		
3D wing crack growth in	Lalith Lakshman,	of Civil		
brittle elastic solids	Muneo Hori, Hide	Engineers, Ser.		
	Sakaguchi,	A2 (Applied		
	Tsuyoshi Ichimura	Mechanics		
		(AM))		
On the Development of	Leonel Enrique	Lecture Notes	2013年	国際
an MAS Based	Aguilar Melgar,	in Artificial		
Evacuation Simulation	Wijerathne	Intelligence		
System: Autonomous	Maddegedara			
Navigation & Collision	Lalith Lakshman,			
Avoidance	Muneo Hori,			
	Tsuyoshi Ichimura			
	and Seizo Tanaka			
Fast Numerical	Tsuyoshi	Geophysical	2013年	国際
Simulation of Crustal	Ichimura,	Journal		
Deformation using a	Ryoichiro Agata,	International		
Three-Dimensional	Takane Hori,			
High-fidelity Model	Kazuro Hirahara,			
	Muneo Hori			
Three-dimensional	Tsuyoshi	Journal of	2013年	国際
Nonlinear Seismic	Ichimura, Kohei	Pressure		
Ground Response	Fujita, Muneo	Vessel		
Analysis of Local Site	Hori, Takashi	Technology,		

Effects for Estimating	Sakanoue, Ryo	American		
Seismic Behavior of	Hamanaka	Society of		
Buried Pipelines		Mechanical		
		Engineers		
Parallel scalability	Wijerathne	Lecture Notes	2013年	国際
enhancements of seismic	Maddegedara	in Computer		
response and evacuation	Lalith Lakshman,	Science		
simulations of Integrated	Muneo Hori and			
Earthquake Simulator	Tsuyoshi Ichimura			
HPC Enhanced Large	Wijerathne	Procedia	2013年	国際
Urban Area Evacuation	Maddegedara	Computer		
Simulations with Vision	Lalith Lakshman,	Science		
based Autonomously	Leonel Enrique			
Navigating Multi Agents	Aguilar Melgar,			
	Muneo Hori,			
	Tsuyoshi			
	Ichimura, Seizo			
	Tanaka			

マスコミ等における報道・掲載 なし

(f) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成26年度の業務計画案

前年度までに開発された地震被害評価技術の基盤の実用性の検討を行う。首都圏地震観 測網(MeSO-net)で観測したデータが速やかに入力できることを実用性の目標とする。ま た、社会基盤構造物等にも適用できるよう、地震被害評価技術の拡張を進める。サブプロ ジェクト②の応答の研究と有機的に連携して、個別建物シミュレーションの精度・信頼度 について検討を継続する。