

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220908

研究課題名(和文)次世代都市モデルの多数地震シナリオ統合地震シミュレーションに基づく被害推定

研究課題名(英文)Assessment of Earthquake Disasters Based on Multiple-Earthquake Scenarios for Next Generation Urban Area Model

研究代表者

堀 宗朗(Hori, Muneo)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：00219205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 85,100,000円

研究成果の概要(和文)：地震災害・被害の予測の高度化のために、本研究は統合地震シミュレーション(Integrated Earthquake Simulation, IES)の利用を前提に、3つの研究課題に取り組むんだ。第一の課題、「次世代都市モデルの構築手法」では、建築建物に加え、橋梁構造物等の社会基盤施設がモデル化できるよう手法が拡張された。第二の課題「多数地震シナリオIESの分析手法の考案」では、IESの大規模の計算結果に対し、地震応答の基本メカニズムに基づいた分析手法を考案した。第三の課題「多数地震シナリオIESの実行」では、多数地震シナリオIESを東京を対象に試行し、実際に実行可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：For a better estimation of earthquake hazard and disaster, this research studies the three targets, taking advantage of Integrated Earthquake Simulation (IES). The first target is the development of next-generation urban model. A new module of automated model construction which is applicable to civil infrastructures such as bridge networks is developed; an existing module is for residential buildings. The second target is the development of an analysis methodology for IES results. A methodology that is based on the fundamental mechanism of seismic response of ground and structure, the amplification of response components of natural frequencies, is established. The third target is the execution of multi-earthquake scenario IES. It is shown that earthquake hazard and disaster in Tokyo Metropolis are computed by using IES, and the results are analyzed, which indicates the applicability of the multi-earthquake scenario IES to actual cities.

研究分野：土木工学

キーワード：地震防災 高性能計算 都市モデル 地震災害・被害予測 地震応答 波動方程式

1. 研究開始当初の背景

地震防災・減災のためには、都市の地震災害・被害を予測することが第一歩となる。従来、地震災害・被害の予測には、過去のデータの統計分析から得られた相関関係式を用いる。有意な相関であれば、数の平方根に比例して相関関係式の精度は向上する。しかし、従来の手法はこれを満たさない。より合理的な地震災害・被害の予測手法が必要とされている。

研究者のグループは、都市の地震災害・被害予測のために、図1に示す IES (Integrated Earthquake Simulation) の開発を進めている。IES は、都市全体の地盤と構造物の地震応答を解析する。IES は高性能計算によって実行可能となっている。

IES の課題は都市の解析モデルの構築である。特に、最新の都市データを使う都市モデル(次世代都市モデル)の構築が望まれる。IES の出力は大規模であり、この計算結果の分析も IES の課題である。この課題を解決した上で、IES による地震災害・被害の予測の可能性を調べる必要がある。

2. 研究の目的

上記を背景に、本研究の具体的な研究の課題は、1) 次世代都市モデルの構築手法の開発、2) 多数地震シナリオ IES の分析手法の開発、3) 多数地震シナリオ IES の実行、の3点である。

3. 研究の方法

次世代都市モデルの自動構築手法の開発では、ラグランジュアンを使うモデル化の理論を構築し、それに基づいて自動構築手法を開発する。ついで IES の計算結果を使って、地震応答の基本メカニズムを考慮した分析手法を考案する。以上の準備の元、多数の地震シナリオに対して、実都市の次世代モデルに IES を実行する。

4. 研究成果

次世代都市モデルの構築手法では、従来の建築建物に加え、道路・鉄道の橋梁構造物や上下水道管・ガス導管等の埋設管構造物という社会基盤施設を対象とできるよう拡張された。構造物の位置・線形・幾何

形状や材料・構造特性のデータを含む複数のデータリソースを使って、データの質・量に合った、適切な詳細度の解析モデル

が、都市の

様々な構造対し、自動的に構築できるようになった。多数地震シナリオ IES の分析手法は、統計分析も容易ではない規模の計算結果を効率的に分析する手法である。固有周期の成分が増大するという地震応答の基本メカニズムに基づき、地盤と構造物の固有周期から災害と被害が予測できる地盤と構造物と、固有周期だけでは予測ができず地震応答解析による災害・被害の予測が必要とされる地盤と構造物が区別できるようになった。

多数地震シナリオ IES は、東京を対象に試行された。適切な計算環境では、実行と分析に日単位の計算ですむことが示された。これは、多数地震シナリオ IES が実都市に適用可能であることを意味している。

1) 次世代都市モデルの構築手法の開発

次世代都市モデルは自動構築を原則とする。都市モデルを構成する3次元地盤モデルの自由度は100万超、構造モデルの数は数10万を超えるからである。自動構築の元となるデータリソースには、地理情報システムに蓄積された地盤のボーリングデータや構造物の形状データ、構造物の設計データ、各種の行政データである。

次世代都市モデルの構築にはより多くのデータを利用するとともに、データを解析モデルに変換する処理の高度化が必要である。利用できるデータの質・量に合わせて、適切な詳細度の解析モデルが構築で

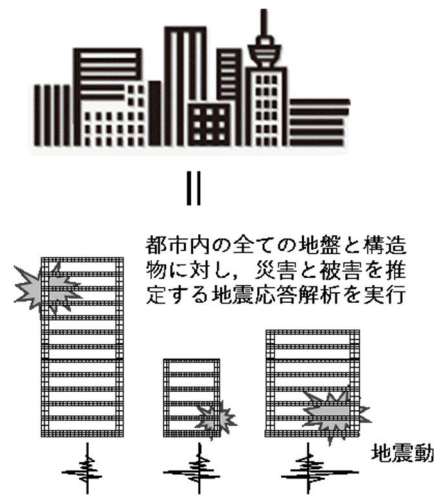


図1. 統合地震シミュレーション(IES)

きるようにすることが処理の高度化の目的である。

地盤の場合、最も詳細度の低い解析モデルは各地層の深さが一定という平行成層モデル、最も詳細度の高い解析モデルは地層の深さが場所ごとに変化する3次元モデルである。構造物の場合、最も詳細度の低い解析モデルは一質点系モデル、最も詳細度の高い解析モデルは3次元ソリッド要素モデルである。一つの地盤や構造物に対し、詳細度が異なる解析モデルを構築できるが、互いに矛盾しない統合した解析モデルとする必要がある。このため、メタモデリング理論を次世代都市モデルの構築に適用した。メタモデリング理論は、連続体の波動方程式をラグランジュアンの停留問題として設定し、ラグランジュアンの未知関数に適切な数理的近似を施すことで、様々なモデリングが可能であることを示す理論である。この理論に基づき、数理的近似の度合いを変えることで、異種かつ詳細度は異なるものの、互いに整合する解析モデルを構築することができるようになった。

次世代都市モデルの自動構築手法は一定のレベルに達し、橋梁構造物や埋設管構造物のような社会基盤施設に対し、利用できるデータの質と量に応じて、詳細度は異なるものの対外に整合する解析モデルが自動構築できるようになった。図2に橋梁構造物の例を示す。なお、図に示された二つの解析モデルの地震応答解析を行ったところ、橋脚や橋桁といった部材の応答の計算結果には差異がなく、地震応答解析の精度は、支承と称される橋桁と橋脚を接合する部材の解析モデルの性能であることが確認された。小型であるものの重要な部材である接合部に対し、メタモデリング理論に基づいた合理的なモデル化の手法を考案し、さらに、構築された解析モデルの性能を調べることでモデル化の手法の有効性も検証した。この結果、橋梁構造物に対して構築される様々な詳細度の解析モデルに対し、その性能を向上することができた。

2) 多数地震シナリオ IES の分析手法の開発

IES の計算結果は大規模である。例えば、10 km 四方、100 m の深さの地盤モデルに対し、10 Hz の応

答解析を行う場合、空間分解能は 10 m となり、地盤モデルの自由度は 100,000,000 を超える。100 s の継続時間では計算結果の出力は 10TB を超える。都市の 100,000 の構造物に対しても同様の出力となり、さらに、地震シナリオの数に比例して出力は増加する。

IES の大規模な計算結果を分析する際、単なる統計分析でも必要なデータ処理の量は膨大となる。地盤・構造物の地震応答という物理過程の計算結果であることを考慮すると、地震応答の基本メカニズムである、「地盤・構造物ともに固有周期に近い成分の応答が増幅される」という特徴を重視する。固有周期に近い成分の増幅が大きいと、被害に至る可能性が高くなるからである。同時に、地盤・構造物に複数の固有周期があり各々、応答の増幅の度合いが異なるため、基本メカニズムでは説明できない複雑な応答を示す場合も少なからずある。すなわち、基本メカニズムの例外があり、このような例外となる地盤・構造物に対して災害・被害を予測するためには地震応答解析が必要である。

分析手法を考案し、その有効性を検証するため、都内の実地域を対象として、9つの地震シナリオに対する 4,691 棟の建築建物での災害・被害の分析を試み

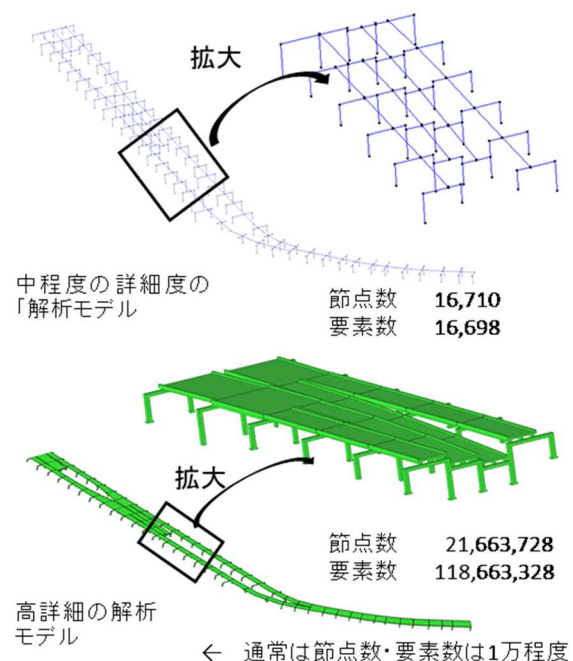


図2. 自動構築された橋梁ネットワークのモデル

た。図 3 に示す。IES の計算結果から、構造物被害の指標となる相関変形角は、地震動から計算される変位応答スペクトルと良い相関関係があることが見出された（変位応答スペクトルは 1 自由度系モデルの固有周期とその変位応答の最大値の関係）。この相関関係を満たす構造物は、基本メカニズムに基づく被害推定が可能である。より重要な点は、この相関関係を満たさない構造物は、基本メカニズムに基づく被害推定が適用できない構造物である。すなわち、地盤の応答も含めて、地震応答解析が必要となる構造物である。

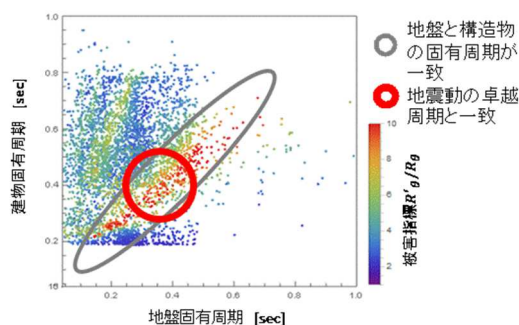
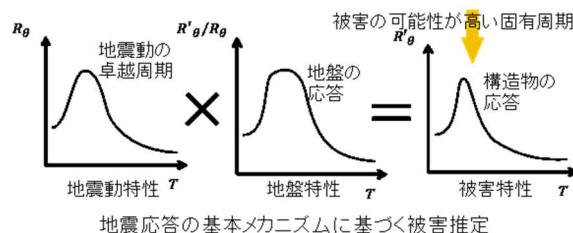
大きな地震動が入力し、地震応答が非線形になる場合の計算結果の分析も行った。地震応答の非線形化は、地盤の一部や構造物の部材が非線形の挙動を示すようになる結果であり、地盤や構造物の固有周期を徐々に長くしていく。この結果、基本メカニズムに基づいた災害・被害の推定を適用できる地盤や構造物は、より限定されることになり、災害・被害の推定に地震応答解析が必要となる地盤や構造物は増えていく。このような地盤や構造物は多数地震シナリオ IES によって抽出することが可能である。

上記の分析手法は、多数地震シナリオ IES の計算結果を可視化することで考案された。地震動の卓越周期に着目すると、地震応答の基本メカニズムに基づいて地盤・構造物の固有周期から概ね被害が推定できる構造物と、基本メカニズムでは被害が推定できない構造物に区別できることがわかる。地震シナリオが変わると、地震動の卓越周期や卓越周期の振幅も変わる。このため、基本メカニズムで被害が推定できる構造物と推定できない構造物の数や分布が変わる。

複数の地震シナリオの計算結果の分析から、1)地震動の卓越周期に依存して、被害が集中する地区は変わること、2)卓越周期の大きさに応じて、被害そのものは勿論、被害集中の程度も変わること、が明確に示された。重要な点は、この二点は一般に了解されているものの、被害集中箇所の特定や被害集中の定量化は困難であったが、多数地震シナリオ IES の計算結果を分析は、この特定と定量化を可能とした。



IESを適用した都市の一部と被害分布の例



分析結果の一例: 赤丸内で、被害指標が大は基本メカニズムの推定可能な構造物、小は地震応答解析が必要な構造物

図3. 多数地震シナリオIESの分析手法とその結果

3) 多数地震シナリオ IES の実行

多数地震シナリオ IES は大規模計算が必要となるため、その実行そのものが挑戦的な課題である。これは、適切な計算環境を準備すれば、一定のサイズの都市に対し、相当数の地震シナリオを想定した災害・被害推定の計算と分析が許容できる時間内に実行できることを示すことである。

多数地震シナリオ IES の実行の課題は、地盤の応答解析と構造物の応答解析の連成の効率が低いことであった。連成とは、地盤の計算結果を構造物の入力に変換することで、この変換速度が遅いと連成の効率が低くなる。地盤の応答解析には、構造物の入力に必要な情報の他、災害評価に必要な情報も含まれている。この情報を拘束で削除することで、連成の効率を上げることができた。

首都直下地震に対する多数地震シナリオ IES を実行した (図 4 参照)。最初に、想定された地震シナリオに対し、非線形有限要素法解析手法を使って各地点での基盤での地震動を計算する。この地震解析では地殻の解析モデルを使う。次に、地殻の解析モデル

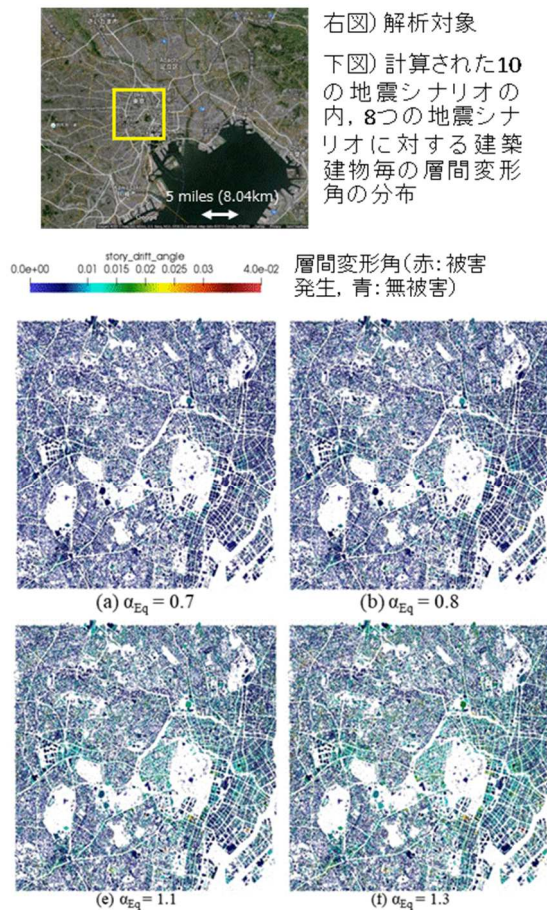


図4. 多数地震シナリオIESの計算結果の例

の節点で計算される地震動の変位時刻歴波形を使って、地盤と構造物の地震応答解析を行う。解析対象の地域には24万3132棟の建築建物と総延長約2,500kmの道路ネットワークがあり、構造物とその地点の地盤に対して解析モデルを自動構築する。この多数地震シナリオIESの計算では、地盤モデルと構造物モデルを使う地震応答解析が連成されている。連成の効率を上げた結果、10~20程度の計算ノードを持つ並列計算機を使う場合、この都市モデルの多数地震シナリオIESは時間単位ないし日単位で実行可能である。

図2の多数地震シナリオIESでは大小10の地震シナリオが設定されている。また、次世代都市モデルの中で、構造物に対しては、利用できるデータの不確実性に対応させた解析モデルが構築されている。建築建物を例に不確実性に対応した解析モデルを説明すると、建築建物は剛性と減衰に関するデータがない場合がおおく、解析モデルの剛性と減衰のパラメ

ータを決定できない。代わりにこのパラメータを確率的な変数とする解析モデルを構築する。剛性と減衰定数の平均値は建築建物の高さから求められることを利用し、剛性と減衰を平均の0.5倍から2.0倍の間で変化させた、計63個の解析モデルを自動構築した。同様に道路橋梁構造物に対しても解析モデルを自動構築した。

被害に対する多数地震シナリオIESの計算結果を可視化することで、入力地震動の卓越周期と、地盤・構造物の固有周期と災害・被害の関係を確認することができた。さらに、この計算結果に分析手法を適用することで、基本メカニズムで概ね被害が推定できる構造物が多い地域と、被害推定に地震応答解析が必要となる地盤・構造物が多い地域の判別を試みている。地震シナリオが一定の大きさを超えると、地盤・構造物とも応答が非線形となるため、基本メカニズムで被害の発生が推定できる構造物は減少する。地震シナリオの大きさと、基本メカニズムでは災害・被害が予測できない地盤・構造物の数を調べ、多数地震シナリオIESを用いた災害・被害予測の必要性を示すことが目的である。

4) 今後の研究課題

現在、IESに地震発生後の都市交通や地域経済の状況を数値解析する手法を組み込みつつある。このような数値解析を行う都市モデルの構築にも、本研究で開発した解析モデル自動構築手法が適用されている。より高度な都市モデルを構築することの他、この数値解析の入力となる被害の計算結果との連成をより効率的なものとするのが課題である。また、次世代都市モデルの自動構築手法は、地震応答解析意外の数値解析やデータ処理に転用することも検討している。

別プロジェクトであるが、2011年東日本大震災の建築建物被害の再現を行い、従来手法に比べ、IESの再現精度が高いことを検証した。同様に、2017年熊本地震での社会基盤施設(道路橋梁構造物)の被害の再現を行っている。また、IESの過去の被害の再現性を基に、多数地震シナリオIESを使う地震災害・被害の予測が、実際にどの程度、

事前の防災対策に有効であることを示す方法を検討中である。

5. 主な発表論文

[雑誌論文] (計5件)

- ① M. Hori, T. Ichimura, L. Maddegedara, H. Ohtani, J. Chen, K. Fujita and H. Motoyama: Application of high performance computing to earthquake hazard and disaster estimation, *Frontiers in Build Environment*, 4:1, 2018, DOI:10.3389/fbuil.2018.0000. (査読有)
- ② S. Tanaka, M. Hori and T. Ichimura: Hybrid finite element modeling for seismic structural response analysis of a reinforced concrete structure, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 10, 3, 2016, 16400157, DOI:1142/S17934311. (査読有)
- ③ K. Fujita, T. Ichimura, M. Hori, L. Maddegedara and S. Tanaka: Scalable multicase urban earthquake simulation method for stochastic earthquake disaster estimation, *Procedia Computer Science*, 51, 1483-1493, 2015, DOI:10.1016/j.procs.2015.05.338. (査読有)
- ④ M. Hori, L. Maddegedara, T. Ichimura and S. Tanaka: Meta-modeling for constructing model consistent with continuum mechanics, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 71, 269-275, 2014, DOI:10.2208/journalofjsce.2.1_269. (査読有)
- ⑤ M. Hori, L. Maddegedara, S. Tanaka and T. Ichimura: Automated model construction for disaster assessment of pipeline network of lifeline, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 7, 3, 2013, 1350039, DOI: 10.1142/S1793431113500395. (査読有)

[学会発表] (計2件)

- ① M. Hori: Development of integrated earthquake simulation with high performance computing, COMP-SAFE, Chengdu, China, keynote lecture, 2017.
- ② M. Hori, H. Motoyama and K. Iiyama: Use of high performance computing for structural and regional seismic response analysis, EASEC-15, Xian, China, keynote lecture, 2017.

[図書] (計2件)

- ① M. Hori (Section Editor of Computational Earthquake

Engineering), *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Springer-Verlag, 2015.

- ② S. Yoshimura, M. Hori, & M. Ohsaki (Eds.), *High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake/Tsunami Engineering*, Springer International Publishing, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀 宗朗 (HORI, Muneo)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号: 00219205

(2) 研究分担者

市村 強 (ICHIMURA Tsuyoshi)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 20333833

マッデゲダラ ラリット (MADDEGEDA Lalith)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 20426290

長尾 大道 (NAGAO Hiromichi)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 80435833