

令和 3 年 6 月 29 日現在

機関番号：92604

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13817

研究課題名（和文）都市災害シミュレーションのための動特性モデル生成法とその信頼性評価法の開発

研究課題名（英文）Development of Dynamic Model Generation Method and Its Reliability Evaluation Method for Urban Disaster Simulation

研究代表者

飯山 かほり（Iiyama, Kahori）

鹿島建設株式会社（技術研究所）・サステナブルソサイエティラボグループ・上席研究員

研究者番号：90711870

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：都市災害シミュレーションを念頭においた動特性モデルの生成法とその信頼性評価法の開発を目標に、橋梁、建物、地盤を対象に多岐多様なデータから自由度が低く計算効率の高いモデル（高縮約型モデル）を自動生成するための方法を開発した。高縮約型モデルであっても、その低次の動特性が自由度の比較的高くより忠実性の高い低縮約型モデルと同程度であれば適切な応答評価が可能であることを示した。また、都市スケールのシミュレーションにおいても計算コストを抑えてモデルパラメタの不確定性を考慮する効率的な応答評価手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

都市のデジタルデータが今後蓄積され、インフラデータが拡充していった場合、これらのデータ、すなわち都市の状態を目的に応じたモデルに自動で置き換えることができれば、様々な自然災害に対する様々なシミュレーションの連携は容易となり、またこれらの結果は防災から維持管理に至るまで幅広く活用できると考えられる。ただし、シミュレーションに基づく被害推定・予測の信頼性はモデルの忠実性（信頼性）に大きく依存するため、都市災害シミュレーションに適用するモデルには忠実性と合理性（生成・計算効率）を兼ね備えることが求められる。本研究の成果はこれらを解決する一つの手段となる。

研究成果の概要（英文）：

In order to develop a method for generating and evaluating the reliability of dynamic models for urban disaster simulations, we have developed a method for automatically generating models with low degrees of freedom and high computational efficiency from a wide variety of data for bridges, buildings and ground. It was shown that even a model with a low degree of freedom can provide an appropriate response evaluation if its lower-order dynamic characteristics are comparable to those of a detailed model. We also developed an efficient response evaluation method for urban-scale simulations that considers uncertainties in model parameters with low computational cost.

研究分野：地震工学，構造工学

キーワード：モデル生成 地震動シミュレーション データ変換 信頼性評価

1. 研究開始当初の背景

大規模地震動、それに伴う大津波、集中豪雨とこれに伴う河川氾濫から土砂災害といった非常に多岐にわたる自然災害が近年も頻発している。こうした激甚災害では被災要因も複合的で様々な被害状況の想定が必要であることから、各種災害発生からその影響範囲・影響度の推定、それに伴う被害の空間情報の把握、避難行動予測、これらを総合した被害額、経済への影響の推定までを網羅する統合型の高度な被害推定システムの構築が強く望まれる。

現在多くの自治体で採用される被害推定システムは被害関数を利用するものである。この方法は手順の明瞭さや計算負荷の観点から実用性が高く有用である一方、今後起こり得る災害を説明する汎用的な被害関数が存在し得ないことも事実である。他方、近年の計算科学・計算機科学技術の躍進から都市スケールの被害推定もシミュレーションすることが可能となっている。地盤や各種インフラの物理モデルをGIS情報や官・民間所有データを加工し構築したデジタル都市とこれを利用した災害シミュレーションは、その適用範囲に制約を持たない。

このようなシミュレーションシステムは、大きく「モデル生成」と「数値解析」のプロセスに分けられる。このうち「数値解析」に関しては様々な手法があり、その精度・信頼性は過去の研究からも十分に担保されているといえる。このため、シミュレーションに基づく被害推定・予測の信頼性はモデルの忠実性に大きく依存する。しかし、応答を評価する材料となる地盤や構造物のモデル生成において必要な情報が十分に得られることは現状稀である。或いは設計値等十分な情報があれば忠実性の高いFEMモデル等を生成することは技術的には可能であるが、都市の1～100万オーダーの構造物群に対してこの分解能のモデルを採用するのは現実的でない。都市災害シミュレーションに適用するモデルには忠実性(信頼性)と合理性(実用性)の双方を兼ね備えることが求められる。

2. 研究の目的

実用的な動特性モデルの生成法とその信頼性評価法の開発が本研究の目的である。前者の動特性モデルの生成法とは、事前情報として「特徴データ(建物個別の情報)」、「論理データ(設計基準に基づく演繹的情報)」、「経験データ(観測記録に基づく帰納的情報)」を活用した上で、自由度を抑えた「縮約型モデル」を生成するための方法論の開発である。後者の信頼性評価法の開発とは、縮約型モデルの各種特性のゆらぎ(不確定性)がその非線形応答に与える影響を確率論的に評価する方法を開発し、その評価結果をモデルにフィードバックすることで、モデルの信頼性を評価しようとするものである。すなわち、本研究の独自性は活用可能な事前情報を網羅した忠実性・合理性の高い「縮約型動特性モデル」の自動生成を目指す点にある。また、そのモデルを利用した場合に、地震等の応答シミュレーションから得られる応答には、モデル特性のゆらぎの影響がある。モデルの不確定性を、最終的には「信頼性評価指標」として陽に表現することを目的とする。大規模計算を踏まえたモデルパラメタの応答への感度分析方法や、感度・信頼性を効率的に把握するための方法論を検討することが目的である。

3. 研究の方法

既述のように、本研究は動特性モデルの生成法とその信頼性評価法の開発を目的としている。そこで、次の3つをサブテーマとして実施する。なお、本研究ではモデル生成の対象は「構造物あるいは地盤」に、外力(災害)の対象は「地震動」に限定する。

1) 事前情報を利用した縮約型動的モデルの自動生成：断片データを利用する方法

次の情報の利用を考慮したモデル生成を検討、実際にモデル生成可能であることを示す。

特徴データ：GISデータ、DEMデータ、住宅デジタル地図、ボーリングデータ等、通常入

手可能な建物固有の情報

論理データ：設計基準に基づく演繹の情報。各種基準法に示される構造部材の有すべき性能。例えば地域特性，周期特性，地盤特性も考慮。

経験データ：各種データベースに基づく帰納的信息。例えば地盤や建物を対象に近年蓄積された微動観測・地震観測から得られた固有周期や減衰定数や，デザインデータベースに基づく形状情報と構造種別の関係など。経験則も含む。

また，計画当初は

I．高縮約型のMSS (Multi Shear Spring) モデル

特徴データのうち3次元形状データも利用した低縮約型のフレーム系モデルのモデル生成を予定していたが，前者のMSSモデルは質点系モデルを生成することで，これを単純に複数に分割したものとなるため，通常の質点系モデルの生成が可能であることを確認することとした。このモデルの「特性」の検討の代替として，モデルの「対象」を構造物(建物，橋梁)のみでなく地盤にも広げ，その動特性モデルの構築のためのアルゴリズムを開発する。

2) 事前情報を利用した縮約型動的モデルの自動生成：観測データを利用する方法

上記1)のような断片データを利用した縮約型方法に加え，実観測データを利用することでモデルの動特性を把握する方法を検討する。実観測データとしては，主に微動観測記録を対象とする。さらに，近年取得が容易となっている点群データを利用した建物の高縮約型モデル自動生成方法も開発する。地盤については，オープンソースとして得られるボーリング情報を利用して，高縮約型モデルに相当する1次元地震応答解析用モデルを自動生成する手法も開発する。

3) モデルの信頼性評価のための理論構築

まず，感度分析によって高縮約型モデルでも低縮約型モデルの応答を適切に再現できることを確認する。ただし，どのようなモデルであっても設定パラメタにはある程度の不確実性が存在する。このため，この不確実性を加味し確率的に応答を評価する方法を検討する。ただし，都市スケールのシミュレーション(すなわち対象とする領域や規模が大きいことから計算コストをできるだけ抑えることが重要なシミュレーション)を対象とする場合，モンテカルロシミュレーションのように膨大な数の解析を必要とする方法は非現実的である。そこで本研究では，構造物あるいは地盤応答への寄与を詳細モデルの応答解析から効率的に行う方法を検討する。また，感度の高い物理特性や要素特性を多次元確率変数とした確率的応答評価を行い，応答の頻度分布形状に基づくモデルの信頼性評価指標を開発する。

4．研究成果

以下，本研究で得られた成果を「3. 研究の方法」で述べた項目ごとに整理して列挙する。なお，文章中の引用は本研究の業績リストに対応する。

4.1 事前情報を利用した縮約型動特性モデルの生成：断片データを利用する場合

近年ではデジタル化された設計図を利用することで信頼性の高いモデルを自動構築する技術が開発されつつあるが，比較的新しい構造物以外はそもそもデジタル化された設計図がない，あるいは入手困難なケースも多く，さらに古い構造物においては設計図そのものが存在しないものも多い。これを念頭に，断片的なデータのみが利用できることを前提とした高縮約型モデルの自動構築の方法を開発した。通常の方法論では解析モデルを所与として断片的なデータからモデルパラメタを直接推測するが，考案した方法論ではデータの質・量に合わせて適切な解析モデル選択も可能とするため，断片的データを「共通モデリングデータ(CMD)」に変換する方法論を採用した。このCMDは橋梁の構造特性を推定あるいは表現するための普遍的な情報を指し，断片的データをCMDへ，CMDから解析モデルへ，という二段階の変換をふむ。構造

物モデリングにおいては「標準設計」が活用できるため、CMDはこれに準じて設計する。橋梁を例にしたこの手続きの概要は図1、また、詳細なアルゴリズムは割愛するが、橋梁の縮約型動特性モデルの生成用フローは図2のようになる。

生成された簡易立体モデルは、上部構造と下部構造を梁で、支承部をバネでモデル化したものである。この自動構築モデルは、設計図面等が存在しない、あるいは存在してもベクターデータとなっておらず直接的な適用が難しい場合を念頭に、橋梁の長さ、道路の属性・幅員情報、地域特性、道路標高、地盤標高など断片的なデータのみを入力として、その入力パラメタから各種設計基準や経験式に基づき形式、支間割、断面性能を内部で自動計算する方法である。下部構造は材料非線形性を考慮することが望ましいが、形状情報のみから断面性能を設定することは不可能であるため、本研究では土木構造物標準設計の情報を利用し、形状データ（外形）に対応する標準的な断面を推定するための関数を構築した。

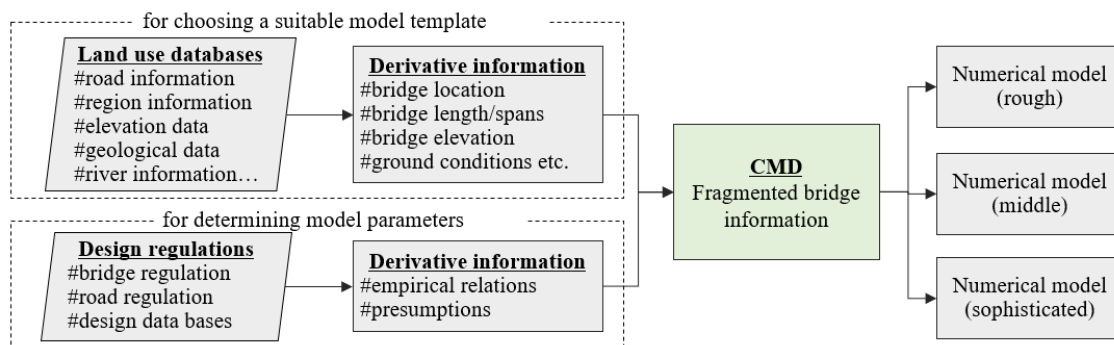


図1 共通モデルを介した各種断片データからのモデル生成システム構成

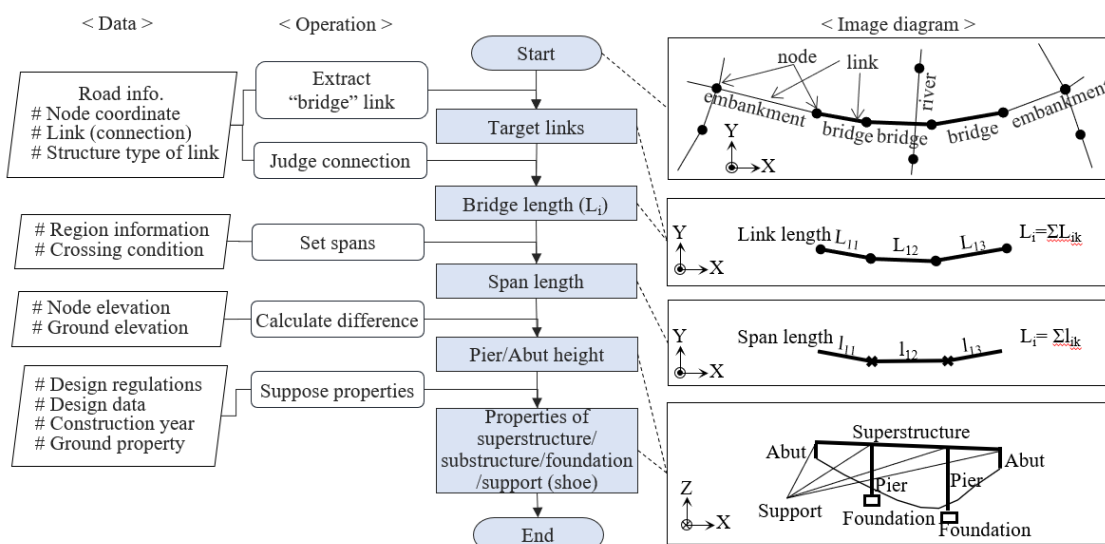


図2 橋梁を例にした各種断片データからのモデル化アルゴリズム

4.2 事前情報を利用した縮約型動特性モデルの生成：観測データを利用する場合

橋梁モデルについては、生成した梁バネモデルが実測記録をどの程度再現できるのか、について検討した。本研究では、いつでも測定できる微動観測記録に着目し、微動観測記録から同定された動特性（振動モード特性）が低縮約型モデル（詳細モデル）に対しどの程度整合するかを検討するため、まずは実観測記録から精度よく構造物の振動モード特性を同定する方法を開発した（盛川ほか、2019）。続いて、単径間～5径間の単純な形状の橋梁を対象に、上部構造重量、支承バネ、下部構造形状を設計値と整合させることによって、1次および水平2次モードまでは縮約モデルであっても概ね設計値と同様の動特性を得られることを確認した（Chenほか2019）。ただし、ここでいう1次は、水平2方向上下1方向の各成分の1次を指す。

建物モデルについては、高さと固有周期の依存性が定式化されており、観測が難しい場合でも高さを精度よく把握できることが縮約モデルの精度向上に役立つ。近年では、航空レーザ計測等から広く点群データが取得され公開されていることを踏まえ、点群データとオープンソースの全国建物ポリゴンデータ（国土地理院基盤地図情報）を利用して、オープンソースの平面ポリゴンデータに点群情報を加えることで、建物高と建物種別を精度よく推定する手法を構築した（飯山ほか，2020）。

地盤については、複数のボーリング情報から解析対象とする位置の縮約型モデルを自動で構築するための方法を開発した（本山ほか，2020）。

4.3 モデルの信頼性評価のための理論構築

1) 感度分析による高縮約型モデルの特徴分析

自動生成した高縮約型モデルのパリテーションを行うために、建物モデルを対象に感度分析を実施した。低縮約型モデルとして、実際の木造家屋を対象に、柱-梁部材を1本ずつモデル化した3次元フレームモデル（約800要素）を設計図面に基づき構築した（Iiyama et al. 2020）。これに対して高縮約型モデル（数十要素）を生成し、質量の変化と振動モード特性との関係に着目した結果、接合部の条件に対し、質量あるいは剛性の変化の感度が高いことを確認した。

2) 不確定性評価の方法検討

地盤を対象に、モデル物性値および形状（幾何条件）の揺らぎを考慮し、8種の不確定パラメタを利用したモンテカルロシミュレーションを実施し、その応答の評価方法に関する基礎的な検討を実施した。本検討は、1次元応答解析を適用した表層地盤の伝達関数の1次ピークの変動に着目した簡便な検討にとどまっているが、多数の入力シナリオやモデルのパラメタ変数による膨大な数の予備解析を実施することで、地盤の非線形応答特性の変動、およびその変動に寄与するパラメタの把握ができる方法論を示した（飯山ほか，2018）。

さらに、都市スケールのシミュレーションに適用可能な方法として、モンテカルロシミュレーションよりもはるかに計算コストの面で優れる点推定の適用を検討した。特に、確率変数が多い場合は点推定でも演算回数が増大することを鑑み、少ない演算回数から信頼性の高い解を得るための方法として、点推定法の理論を拡張した（Iiyama et al.，2019）。この方法により、不確定パラメタの数に対して演算回数を大幅に削減できることを示した。

4.4 まとめ

都市災害シミュレーションを念頭においた動特性モデルの生成法とその信頼性評価法の開発を目標に、橋梁、建物、地盤を対象に多岐多様なデータから自由度が低く計算効率の高いモデル（高縮約型モデル）を自動生成するための方法を開発した。高縮約型モデルであっても、その低次の動特性が自由度の比較的高くより忠実性の高い低縮約型モデルと同程度であれば適切な応答評価が可能であることを示した。また、都市スケールのシミュレーションにおいても計算コストを抑えてモデルパラメタの不確定性を考慮する効率的な応答評価手法を開発した。

ただし、構造物の損傷を数値解析で表現する場合は、モデルの「耐力」が重要となる。これは断片的なデータから得ることは現状では難しく、今後の課題として残される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Iiyama, K., Yoshiyuki, A., Fujita, K., Ichimura, T., Morikawa, H. and Hori, M.	4. 巻 121
2. 論文標題 A point-estimate based method for soil amplification estimation using high resolution model under uncertainty of stratum boundary geometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soil Dynamics and Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 480,490
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Chen Ping Yu
2. 発表標題 Modal Identification of Elevated Bridge through Microtremor and Impact Tests using Frequency Domain Decomposition
3. 学会等名 土木学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 盛川 仁
2. 発表標題 衝撃試験を利用した構造物のモード特性同定におけるFDD法の適用性検証
3. 学会等名 土木学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kahori Iiyama
2. 発表標題 PROBING SEISMIC REINFORCEMENT EFFECT OF A WOODEN HOUSE BASED ON AMBIENT VIBRATION MEASUREMENTS
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯山かほり, 盛川仁, 本山紘希, 堀宗朗
2. 発表標題 伝達関数に着目した入力パラメタに依存するモデル応答の統計的性質に関する検討
3. 学会等名 第15回地震工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯山かほり
2. 発表標題 都市地震シミュレーションの数値解析統合とその利活用に関する基礎的研究
3. 学会等名 第23回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本山紘希
2. 発表標題 地盤モデルの堅牢な構築手法を統合した都市の地震被害シミュレーションの適用例
3. 学会等名 土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------