

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2018～2020

課題番号：17H04732

研究課題名(和文)非線形波動理論に基づく建築の1次元せん断ビームモデルの構築および被害予測への応用

研究課題名(英文)Development of a One-Dimensional Shear Beam Model for Buildings Based on Nonlinear Wave Propagation Theory and Its Application to Damage Prediction

研究代表者

王 欣(Wang, Xin)

東京理科大学・理工学部建築学科・助教

研究者番号：90610626

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,000,000円

研究成果の概要(和文)：線形状態で建物の1次元成層せん断ビームモデルの各層のヤング係数 $E$ 、せん断剛性 $G$ および密度 $\rho$ を常時微動観測記録から同定する手法を開発した。同定したモデルの剛性は線形から非線形状態への変化と層間相対変位の関係を求めた。非線形波動伝播理論に基づくせん断剛性は線形から非線形状態までの変化過程で波動伝播をシミュレーションし、非線形効果を考慮したインパルス応答(システム関数)を定めることを行なった。インパルス応答と対象地震動の時間領域で畳み込み計算により建物の非線形応答を分析し、建物の各層の被害程度を評価することを試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波動場の再構築の手法で基礎と地盤の相互作用の影響を除く、建物のモデル化の精度を飛躍的に高めるという点で学術的意義が高い。また、地震被害の軽減への真の貢献を果たすという点が挑戦的であると同時に最も社会的意義が高い。得られる知見は強震動予測の次の一環として、震源から建物までの波動伝播の大型シミュレーション計算に適用可能であり、効率的かつ高精度の建築群の被害予測に役割を果たすことが期待できる。今後、理工学と経済学のシミュレーションの連成で、大地震が引き起こす地域・国家の短期・長期の経済被害の評価は、防災投資を算定する上で貢献できる。

研究成果の概要(英文)：A method was developed to identify the Young's modulus  $E$ , shear stiffness  $G$  and density  $\rho$  of each layer of a one-dimensional stratified shear beam model of a building under linear conditions from the records of constant microtremor observations. The stiffnesses of the identified model are related to the change from linear to nonlinear state and the relative displacement between stories. The shear stiffness based on the nonlinear wave propagation theory is obtained by simulating the wave propagation in the process of change from linear to nonlinear state, and the impulse response (system function) considering the nonlinear effect is determined. The nonlinear response of the building is analyzed by convolution calculation in the time domain of the impulse response and the target earthquake ground motion, and the degree of damage of each layer of the building is evaluated.

研究分野：地震工学

キーワード：波動干渉法 波動場の再構築 1次元波動伝搬 インパルス応答 非線形波動伝搬

## 1. 研究開始当初の背景

災害リスク評価を行う際に精度の高い建物の被害予測は最重要な課題の一つであり、被害予測の精度に大きい影響を与える建物被害予測モデルの重要性は近年益々高まっている。現在、観測記録を用いた経験的な被害予測モデルや数値計算による物理モデルなど多くの手法が存在するが、実用上は広範囲でリアルタイム被害予測などの優れた特性を有している。にもかかわらず、現状その精度が巨大地震時の建物被害予測にばらつきが大きいことが実情である。その最大の理由の一つは、建物の支持地盤、基礎および上部構造の三者をそれぞれでモデル化することは困難で基礎と地盤の相互作用の影響を除き、建物の各部のモデル化およびそれぞれの被害評価ができないという問題点を有しているためである。近年、申請者らはこのような問題点を克服し、建物を1次元成層せん断ビームモデル化し、波動伝播理論に基づく革新的な手法を見出した。その主な観点は、建物の水平方向の応答(時間領域の波形)は基礎から上部構造に入射した波動(水平方向に振動して上下方向に伝播するせん断波)が、基礎と屋上の間で反射を繰り返しながら徐々に減衰し、消えるまで振動が続くことである。各層間でせん断波の伝播速度を抽出するため、複雑な波動場から単純な波動場までの波動場の再構築が必要である。申請者は、一つの上昇波と一つの下降波のみで構成された新波動場(逆重畳波)を構築する手法を提案した。本手法は多くの優位点を有すると考えられる。まず、波動場の再構築によって基礎での波動伝播の境界条件が全反射基礎(固定基礎)になり、基礎と地盤の相互作用の影響を除くことができる。また、上部構造の層間で伝播するせん断波の速度を抽出し、各層までのせん断剛性を同定することができる。上部構造の層単位までのモデル化により各層の被害予測が可能である。しかしながら、本手法を建物被害予測へ実用する際に、層間剛性の非線形変化により波動伝播の非線形効果(波の突っ立ち現象)で層間で波動の透過、反射、分散、干渉などの複雑な現象および建物のシステム特性の途中変化は、現状その評価は不明な点があると言わざるをえない。

## 2. 研究の目的

近年申請者が提案した、建物の振動を波動伝播の視点から出発し、波動場の再構築の手法により複雑な建物の振動(元波動場)から境界条件と波動伝播が単純な逆重畳波(新波動場)への置換手法を基礎と地盤の相互作用の影響がなく高精度な建物の1次元成層せん断ビームモデルのシステム同定(各層まで)に適用する。大振幅の地震動の作用で層間せん断剛性の低下によりせん断波伝播の非線形効果(波の突っ立ち現象)が生じるため、建物内で波動伝播の透過、反射、分散および干渉のメカニズムを完全に明らかにする。せん断波伝播の非線形効果を考慮したインパルス応答(システム関数)を計算し、対象地震動(シナリオ地震や歴史地震など)と時間領域の畳み込み計算によって対象建物の非線形応答を分析し、精度よく被害程度を定量的に評価する。

本研究は以上のような背景に基づく既往の研究を踏まえ、研究期間内で以下の4点を明らかにする。(1)線形状態で建物の1次元成層せん断ビームモデルの各層のヤング係数 $E$ 、せん断剛性 $G$ および密度 $\rho$ を常時微動観測記録から同定する手法を開発する。(2)同定したモデルの剛性は線形から非線形状態への変化と層間相対変位の関係を求める。(3)非線形波動伝播理論に基づくせん断剛性は線形から非線形状態までの変化過程で波動伝播をシミュレーションし、非線形効果を考慮したインパルス応答(システム関数)を定める。(4)インパルス応答と対象地震動の時間領域で畳み込み計算により建物の非線形応答を分析し、建物の各層の被害程度を評価する。

## 3. 研究の方法

(1) 線形 1 次元成層せん断ビームモデルの同定および非線形状態でせん断剛性の低下と波動伝播速度の変化関係の解明を実施する。対象建物内で鉛直方向に設置する観測アレーで記録した常時微動記録（線形状態）から波動場再構築の手法を用いて基礎と地盤の相互作用の影響がなく（基礎固定）1 次元成層せん断ビームモデルを同定する。また、地震観測記録を用いて、建物の非線形状態の応答記録（層間最大相対変位）からせん断剛性の低下と波動伝播速度の変化関係を解明する。

(2) 層間せん断剛性は線形状態から非線形状態へ変化する際に波動伝播の非線形効果の発生および層の境界で波動の透過，反射，分散および干渉など複雑な現象（波の突っ立ち現象をシミュレーションし，建物のシステム関数（インパルス応答）の変化を検討する。前述のように小さいレベルの振動により建物の線形状態で波動伝播は明らかとなっているものの，大地震時に建物被害予測に必要なせん断剛性が低下する過程（非線形状態）で波動伝播過程は明確にはなっていない。申請者は線形モデルで波動伝播のシミュレーションを行っていたが，得られた層間最大相対変位とせん断波速度の低下の関係により非線形理論に基づく非線形応答計算の解析環境を整備し，非線形過程で波動伝播のメカニズムおよび波動反射や干渉などのシミュレーションにより層間に被害集中を明らかとする。

(3) 非線形効果を考慮したインパルス応答を対象地震動（予測地震動や歴史地震記録など）を時間領域の畳み込み計算により建物の非線形応答を分析し，建物の層間変位量，最大応答値，吸収したエネルギーなどの評価基準により建物の被害評価を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) 波動場の再構築に与える影響要因

本研究では，地震波干渉法によく使われている逆重畳法（Deconvolution）を利用する。パルス震源を建物の屋上に置き，一つの上昇波（負の時間）と一つの変位波（正の時間）により構成された新しい波動場を構築する。この波場から，波動の伝播時間の読み取りが可能となる。図1に示すように地震動入力時の有効な振動数が幅広い場合，地震動から求めた逆重畳波のパルスの幅が狭くなる。上昇波の屋上から1階までの伝播時間は建物の 1 次固有周期の  $1/4$  であることを検討した。

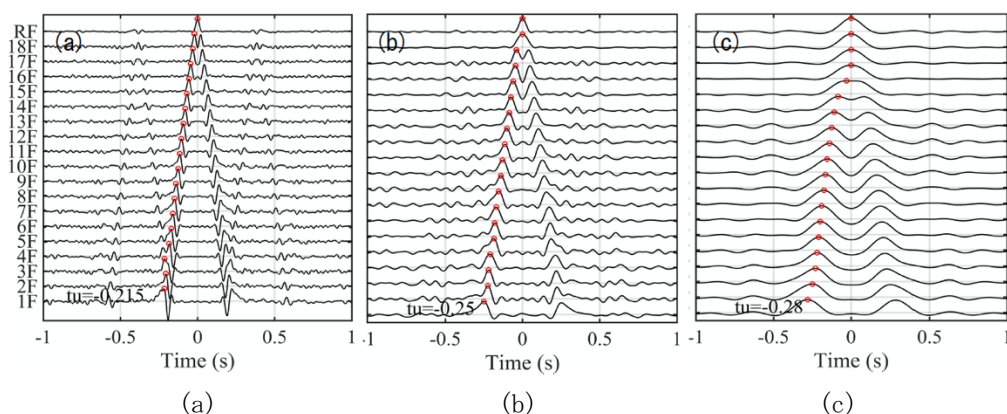


図1 (a) ランダム波 (0.1~100Hz)，(b) 周波数範囲が0.12~20Hz，  
(c) 0.12~2Hzの場合の逆重畳波

(2) 鉄骨造建物の損傷進展と固有周期の変化

1980～90年頃に設計された標準的な18階建て鉄骨造純ラーメン構造の振動台実験のデータを用いて検討した。低次固有振動の周期は損傷による変化の程度が高次モードのより小さいことが分かった。この理由は、損傷はある層に集中する場合、低次モードのモード形に影響が小さいと考えられる。図2に被害の進展とともに1次～4次モードの固有振動数の変化を示す。

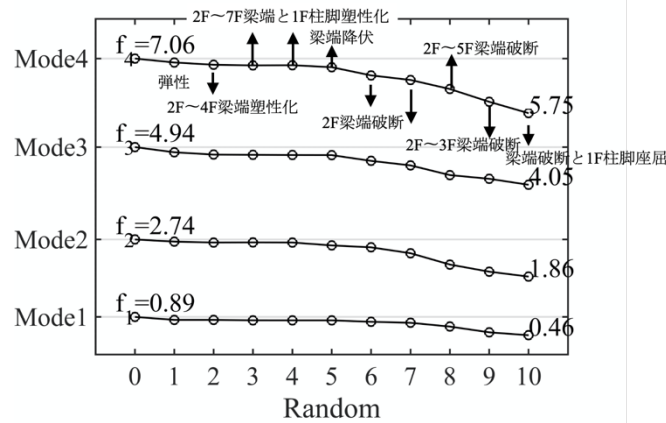


図2 1次モード～4次モードの固有振動数の変動

(3) 曲げ変形を伴う波動の位相速度の分散

柱の軸変形による建物の全体曲げ変形を伴う場合、波動の位相速度が振動数によって変化する分散現象が発生することを確認した。図3にせん断波の位相速度の分散曲線を示す。また、被害によってせん断波速度の低下が見える。

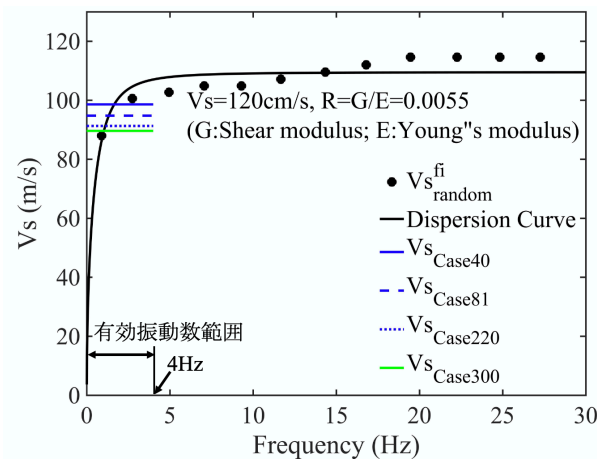
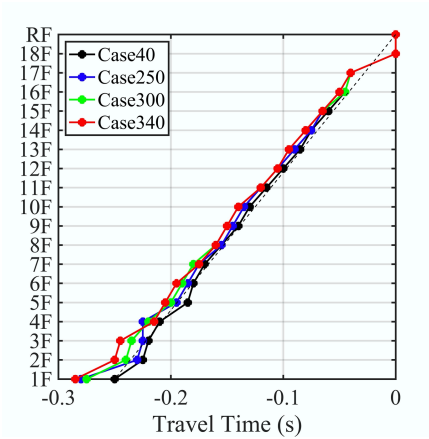


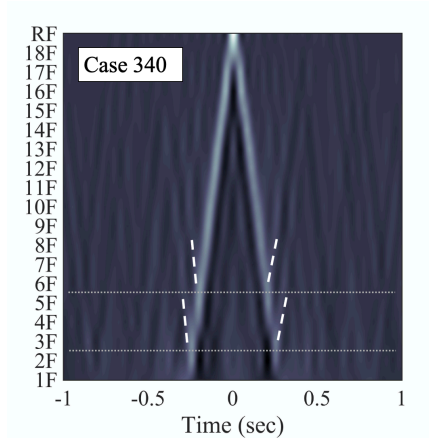
図3 波動伝播速度と理論分散曲線

(4) 鉄骨造建物の損傷進展と各層間の波動伝播時間の変化

逆重畳波の上昇波側について、屋上から各階までの伝播時間の変化を図4(a)に示す。低層部での被害進展とともに波動の伝播時間が伸びる。図4(b)に低層部分に大きい被害を受けた場合の逆重畳波のコンター図を示す。被害が集中した低層部での波動の反射が確認される。



(a)



(b)

図4 (a) 屋上から各階までの伝播； (b) 逆重畳波のコンター図

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shrestha Ashish, Dang Ji, Wang Xin, Matsunaga Shogo	4. 巻 146
2. 論文標題 Smartphone-Based Bridge Seismic Monitoring System and Long-Term Field Application Tests	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002513	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 -
1. 著者名 Shrestha Ashish, Dang Ji, Nakajima Keisuke, Wang Xin	4. 巻 27
2. 論文標題 Image processing?based real time displacement monitoring methods using smart devices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Structural Control and Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/stc.2473	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 -
1. 著者名 FUKUOKA Shintaro, MOTOSAKA Masato, WANG Xin	4. 巻 18
2. 論文標題 An Investigation on Vibration Characteristics and Relevance to Damage on Pile-Heads of a Tilted High-Rise Building with High Aspect Ratio and Pile Foundation Based on Microtremor Observation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Japan Association for Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 5_88 ~ 5_107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5610/jaee.18.5_88	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 HATAKEYAMA Tomoki, WANG Xing, OHNO Susumu, MOTOSAKA Masato	4. 巻 18
2. 論文標題 CHANGE OF NATURAL FREQUENCY OF LOW-RISE BUILDINGS BASED ON LONG-TERM VIBRATION RECORDS	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Japan Association for Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 3_15 ~ 3_25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5610/jaee.18.3_15	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 王欣、永野正行
2. 発表標題 波動干渉法を用いた鉄骨造高層建物の波動伝播速度に関する基礎検討
3. 学会等名 2020年度日本建築学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Xin Wang, Luyao Wang, and Ji Dang
2. 発表標題 FRACTURE IDENTIFICATION OF STEEL STRUCTURES FROM WAVEFORMS USING A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK
3. 学会等名 17th World Conference of Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xin Wang, Masayuki Nagano, Hongjun Si, Wen-Yen Chang, Chun-Hsiang Kuo, Che-Min Lin, Kazunari Suzuki, Tetsushi Watanabe
2. 発表標題 Characteristics of strong ground motions and its corresponding to questionnaire survey to damage of high-rise residential buildings during the 2018 Mw 6.4 Hualien, Taiwan, earthquake,
3. 学会等名 SSA Annual Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Luyao Wang, Xin Wang, Ji Dang,
2. 発表標題 A Convolutional-Neural-Network-Based Damage Detection Method and its Application to a Shake Table Test of an 18-Story Steel Frame Building Structure,
3. 学会等名 SSA Annual Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xin Wang, Yixuan Sun, Hongjun Si, Wen-Yen Chang, and Masayuki Nagano
2. 発表標題 Lessons learned from the 2018 Hualien earthquake: I. characteristics of strong ground motions and its corresponding to damages from questionnaire survey for high-rise residential buildings
3. 学会等名 International Conference in Commemoration of 20th Anniversary of the 1999 Chi-Chi Earthquake (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朝比奈諒, 飛田喜則, 王欣, 永野 正行
2. 発表標題 常時微動・人力加振および強震観測に基づく超高層 RC 造建物の曲げ変形を伴う振動特性
3. 学会等名 2019年度地震工学会・大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高平友博, 飛田喜則, 西浦遼, 王欣, 永野正行
2. 発表標題 傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物の震動特性と 抜け挙動に着目した非免震建物との応答比較
3. 学会等名 2019年度地震工学会・大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村田将一, 王欣, 永野正行
2. 発表標題 近年発生した大地震時の強震記録に基づく国内の超高 層集合住宅を対象とした広域的な非線形地震応答推定
3. 学会等名 2019年度地震工学会・大会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 王欣、王路遥、党紀
2. 発表標題 CNNを用いた波形から鉄骨造建物の梁端破断の検出および振動台実験への応用
3. 学会等名 第十三回日中建築構造技術交流会（蘭州）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 X. Wanga, T. Hatakeyamab, M. Motosakac, S. Ohno
2. 発表標題 Examination of the temperature dependency of natural frequencies of buildings using long-term ambient noise
3. 学会等名 The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 X. Wanga, K. Irikurab, K. Masakib
2. 発表標題 Building damage and retrofit effectiveness evaluation of a SRC building using vertical array measurements of ambient noises
3. 学会等名 The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 X. Wang and K. Irikura
2. 発表標題 CHANGES OF RESPONSE CHARACTERISTICS DUE TO DIFFERENT DAMAGE PATTERNS OF STEEL STRUCTURES
3. 学会等名 Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Dang , A. Shrestha, X. Wang, S. Matsunaga, P. J. Chun and S. Asamoto
2. 発表標題 LOW COST BRIDGE SEISMIC MONITORING APPLYING USED SMART PHONES AND CLOUD SERVER
3. 学会等名 Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering ( 国際学会 )
4. 発表年 2018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