

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K20872

研究課題名(和文) 常時微動観測に基づく超高層ビルの層間損傷定量評価手法の開発と適用性検討

研究課題名(英文) Development and applicability examination of a method to evaluate story-by-story damage of super high-rise buildings based on ambient noise measurement

研究代表者

王 欣 (Wang, Xin)

東北大学・災害科学国際研究所・助教

研究者番号：90610626

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、超高層ビルの構造安全性を精度よく評価することを目指し、常時微動(地震動以外の常に存在する微小振動)を用いて超高層ビルの上構造のみまたは各層の応答性能の評価手法を開発し、手法の適用性と応用限界などを実観測データに基づいて検討した。

本研究では、従来の建物の応答は周波数領域において固有振動数が異なる振動モードの足し合わせの視点を覆して、波動伝播の視点から時間領域の解析手法(逆重畳法)を超高層ビルの常時微動記録から、建物の上部構造の水平方向に強い揺れをもたらすせん断波の伝播時間(速度)を抽出する手法を提案した。振動モードにより解析手法の有効性と応用限界および常時微動への適用性を検討した。

研究成果の概要(英文)：In this study we proposed a method to perform high-precision structural health monitoring of super high-rise buildings based on the wave-propagation method to extract the shear-wave velocity traveling within the upper structure and each inter story from ambient noise vibration measurement (which is the always existing micro vibration other than seismic motions). This method overturned the viewpoint of the traditional method in which the vibration of a building structure is regarded as the superimposition of modes with different natural frequencies as it regard the building response based on the wave-propagation aspect. Based on the changes of shear-wave velocity traveling within each story, the story-by-story response property can be quantitatively evaluated. The response property of the upper structure without the effect of soil-structure interaction can be extracted, based on which the deterioration and damage of the upper structure can be evaluated accurately.

研究分野：地震工学

キーワード：超高層ビルのヘルスマニタリング 波動伝搬理論 常時微動観測 層間被害評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災において東京・新宿と大阪・咲洲では、超高層ビルが10分間、1mほどの長時間かつ大振幅の振動が生じた。構造的な被害を受けた報告が少ないが、日本の超高層ビルは東日本大震災で初めて体験して、超高層ビルの特有の新しい災害が浮き彫りになった。将来、発生が懸念されている南海トラフの連動型超巨大地震では、長周期地震動と共振しやすい超高層ビルの揺れが、東日本大震災よりもさらに大きく、長く続く可能性が指摘されている。

超高層ビルの構造安全性を早期かつ適切に把握するため、検査診断手法がますます重視されている。基礎と地盤の相互作用により生じた応答成分が含まれるため、上部構造のみさらに各層の応答性能の評価が困難であることが実情である。特に、振動の伝わり方が複雑かつ、被害パターンが多様な超高層ビルの耐震改修・補強を実施するに当たっては、建物構造の全体の損傷評価は十分ではなく、各層の損傷を定量的に評価する技術が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、波動伝播理論に基づいて、建物の水平方向の応答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点に着目し、逆重畳法を用いてせん断波速度を抽出し、その低下から各層の水平方向の地震動に抵抗する能力（せん断剛性）の低減の評価に取り組んでいる。波動伝播の視点から解析すると、上部構造の振動は基礎と地盤の相互作用の影響がなく、各層および上部構造の損傷状況が評価できる。

建物の応答は、単純に曲げモードかせん断モードで振動する建物がほとんどなく、曲げモードとせん断モードの足し合わせ、

即ち曲げ-せん断モードで振動する建物が多い。超高層ビルは層によって振動モードが異なる場合も多い。層の振動モードが異なると、層の境界でせん断波の伝播条件が変わるため、せん断波は反射、透過が発生し、入射波が反射波と透過波の干渉も生じることによって、境界条件が変わる場合にせん断波速度の抽出法の有効性と適用限界を明らかにする。

本研究は、2次元曲げ-せん断フレームモデルを用いて、層の振動モードが異なる場合、層の境界におけるせん断波の反射、透過、干渉現象を数値シミュレーションにより解明し、反射波や透過波が入射波との干渉は、せん断波伝播時間の抽出への影響を検討する。超高層ビルにせん断波の伝播経路（基礎から屋上まで）が長いので、伝播経路の途中から風や人間活動などにより生じるノイズ成分が多く混入されるため、低層部分と屋上の記録の相関性が弱くなる可能性がある。本研究ではせん断波速度を精度よく抽出するため、必要な観測技術および観測データの整理手法を検討する。各層の損傷評価を多くの超高層ビルに実施するため、構造材料（S造、RC造、SRC造）、構造形式（ラーメン造、ブレース造）、低層棟および制震と免震装置の有無により振動モードを解明し、各層のせん断波速度を抽出してしながら、振動モードによってせん断波抽出手法の有効性と適用限界を実証する。

3. 研究の方法

各層に曲げばねとせん断ばねが設置され、層毎のせん断モードと曲げモードが再現できる2次元フレームモデルを用いて、モデル1：建物全体は曲げ-せん断モード；モデル2：低層部分は曲げモード、この上は曲げ-せん断モード；モデル3：中間層は曲げモード、その他は曲げ-せん断モードで振動して、せん断波の境界条件が異なる三つの

モデルを構築し、振動モードが異なる場合、せん断波の反射、透過および干渉現象を数値シミュレーションして、振動モードが異なる場合、せん断波速度の抽出の有効性の予備的検討を実施する。超高層ビルの常時微動記録には、伝播経路（高さ）が長いので風や人間活動等により生じたノイズが多く混入された時にせん断波伝播時間を精度よく抽出するため、必要な観測技術およびデータの整理手法を検討する。常時微動観測記録から抽出したせん断波伝播時間を地震記録およびモデルから抽出した結果と比較して、ノイズ成分の相互相関性が低いという特性を利用して、精度の良い解析手法を開発し、観測機材の感度と分解能によってせん断波速度の抽出に対する常時微動観測に必要な機材の最低限な観測能力を解明する。構造材料、構造形式、低層棟および制震と免震装置の有無により、超高層ビルの常時微動を観測し、逆重畳法により解析されたせん断波の反射、透過と干渉を2次元フレームモデル1～3の数値解析結果と比較して、それぞれの振動モードを解明し、層毎のせん断波速度を抽出する。波動干渉が存在する場合、せん断波伝播時間の抽出への影響および振動モードが異なる場合、せん断波速度の抽出手法の有効性と適用限界を超高層ビルの常時微動観測に基づいて実証する。

4. 研究成果

本研究では、超高層ビルの各層のヘルスマニタリング高度化を最終目標とし、常時微動観測に基づく対象建物の各層でせん断波の伝播時間と速度の抽出を行った。更に、対象建物の観測記録からの解析結果を基にせん断剛性分布により振動モード（せん断波伝播の境界条件）が異なるフレームモデルを用いて数値シミュレーションした結果と比較して、超高層ビルの各層間でせん断波の伝播時間（速度）を常時微動記録から

抽出する手法の適用性および適用条件について検討した。

逆重畳法を用いて常時微動記録からせん断波伝播時間（速度）を抽出する手法は超高層ビルに適用できる。しかし、ある層間にせん断変形が生じず、単純に曲げモードで振動する場合、この層の見かけ上のせん断剛性が無限大と認められ、観測記録から抽出したせん断波の伝播時間が0になり、層間でせん断波の伝播速度が抽出できない場合（図1）があることが分かった。

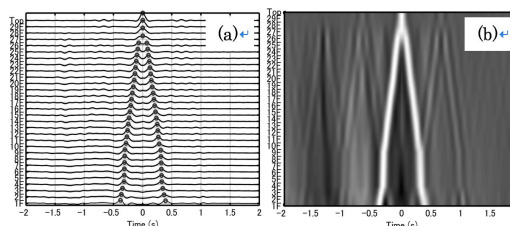


図1 低層部に曲げモードで振動するモデル

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 4 件）

畠山智貴、王欣、大野晋、源栄正人、長期連続観測記録に基づく鉄筋コンクリート造中低層建物の振動特性変動評価、日本建築学会技術報告集、2017年10月号に掲載決定。【査読有】
Xin Wang, Susumu Kurahashi, Hao Wu, Hongjun Si et al., Building damage concentrated in Longtoushan town during the 2014 Ms6.5 Ludian earthquake, Yunnan, China: examination of cause and implications based on ground motion and vulnerability analyses, Journal of seismology, published online: 2017. DOI 10.1007/s10950-017-9659-z. 【査読有】
王欣、2014年中国魯甸地震における被害が龍頭山鎮に集中した原因分析、平成27年度東北地域自然災害科学研究集会、東北地域災害科学研究 第52巻、251-256、2016。【査読無】

王欣、正木和明、入倉孝次郎、源栄正人、久田嘉章、常時微動の鉛直アレィ観測に基づく超高層ビルにおける1次元波動伝播解析および層間せん断波速度の抽出、日本建築学会構造系論文集、第80巻、第718号、pp. 1859-1868、2015年【査読有】

〔学会発表〕（計 14 件）

Masato Motosaka, Susumu Ohno, K. Mitsuji, Xin Wang, T. Hatakeyama, Development of structural health monitoring system combined with earthquake early warning system for real-time earthquake information navigation, 16th World Conference on Earthquake, January 12, 2017, Santiago Chile.

Xin Wang, Masuaki Masaki, Kojiro Irikura, Building damage evaluation based on changes of story-by-story shear-wave velocities extracted from a 1D vertical ambient noise observation system, 16th World Conference on Earthquake, January 11, 2017, Santiago Chile.

Ashish Shrestha, Ji Dang, Xin Wang, Preliminary study on image processing based on real-time displacement monitoring methods using smart devices, Japan Association for Earthquake Engineering Annual Meeting, 2016年9月27日、高知工科大学.

畠山智貴、王欣、大野晋、源栄正人、長期連続観測記録を利用した中低層既存建築物の振動特性評価-東北地方太平洋沖地震による振動特性の変動、日本地震工学会・大会、2016年9月27日、高知工科大学.

畠山智貴、王欣、大野晋、源栄正人、長期連続観測記録を利用した中低層

既存建築物の振動特性評価-構造ヘルスマモニタリングシステムの精度向上に向けた構造別差異の検討-、日本地震工学会・大会、2016年9月27日、高知工科大学.

Xin Wang, Kazuaki Masaki, Kojiro Irikura, Masao Motosaka, Changes of Dynamic Parameters Before and After Aseismic Reinforcement, English Session in Japan Association for Earthquake Engineering Annual Meeting, September 27, 2016, 高知工科大学.

畠山智貴、源栄正人、王欣、大野晋、連続観測に基づく実存建築物の振動特性評価、日本建築学会大会（九州）2016年8月25日、福岡大学.

Xin Wang, Kazuaki Masaki, Kojiro Irikura, Masato Motosaka, Combining frequency- and time-domain methods to fully extract dynamic parameters of building structures from 1D ambient vibrations measurement array、日本建築学会大会（九州）、2016年8月25日、福岡大学.

Kazuaki Masaki, Shozo Tagashira, Xin Wang, Hao Wu, and Kojiro Irikura, Evaluation of shear wave velocity in buildings for seismic capacity assessment using microtremor measurement, 5th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, August 16, 2016, Taipei, Taiwan.

Xin Wang, Shozo Tagashira, Kazuaki Masaki, and Kojiro Irikura, A method of detecting degradation parts of buildings using vertical measurement array: application to super high-rise buildings, 5th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology

on Seismic Motion, August 16, 2016,
Taipei, Taiwan.

畠山智貴、源栄正人、王欣、大野晋、
連続観測に基づく実存建築物の固有
振動特性の長期モニタリング、第 79
回日本建築学会東北支部研究報告会、
2016 年 6 月 19 日、東北大学。

Ashish Shrestha, Ji Dang, Xin Wang,
Feasibility of smart devices in structural
vibration measurement, Annual Meeting
of Japan Association for Earthquake
Engineering, 2015 年 11 月 19 日、東京
大学生産技術研究所。

Xin Wang, Susumu Kurahashi, Hao Wu,
Hongjun Si, Ji Dang, Qiang Ma,
Guoliang Lin, Kojiro Irikura, Why
building damage concentrated in
Longtoushan Town during the 2014
Ludian earthquake, Yunnan, China,
Annual Meeting of Japan Association for
Earthquake Engineering, 2015 年 11 月
19 日、東京大学生産技術研究所。

王欣、入倉孝次郎、正木和明、久田嘉
章、源栄正人、常時微動の鉛直アレイ
観測に基づく超高層ビルにおけるせ
ん断波伝播の解析、日本地震学会 2015
年度秋季大会、2015 年 10 月 27 日、神
戸国際会議場。

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：

発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

王 欣 (WANG, Xin)
東北大学・災害科学国際研究所・助教
研究者番号：90610626

(2) 研究分担者

()
研究者番号：

(3) 連携研究者

()
研究者番号：

(4) 研究協力者

入倉 孝次郎 (IRIKURA, Kojiro)
愛知工業大学・地域防災研究センター・
客員教授
研究者番号：10027253

源栄 正人 (MOTOSAKA, Masato)
東北大学・災害科学国際研究所・教授
研究者番号：90281708