

ネパール・パタン市における煉瓦造建物の振動特性調査

Vibrational Characteristics of Brick Masonry Buildings in Patan, Nepal

梅村恒¹・谷口仁士²・神谷太啓³

Hisashi Umemura, Hitoshi Taniguchi and Hirotaka Kamiya

¹名古屋工業大学准教授 建築・デザイン工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Associate Professor, Nagoya Institute of Technology, Dept. of Architecture and Design

²立命館大学教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒603-8341 京都市北区小松原北町 58)

Professor, Ritsumeikan University, Ritsumeikan Global Innovation Research Organization

³旭化成ホームズ株式会社 集合住宅本部 (〒163-0936 東京都新宿区 2-3-1 新宿モノリス 17 階)

Asahi Kasei Homes Corporation

Microtremor observations were carried out in two old timber framed and one modern Reinforced Concrete (RC) framed brick buildings to investigate the vibrational characteristics of the buildings in historical city, Patan, Nepal. In a building where the floors are not rigid enough, brick walls seem to be vibrating independently and the vibration as a building is very complex with many predominant frequencies. Generally, floors made of wood and soil are not so rigid such that the rigid floor assumption is not met in many buildings. Even in modern RC buildings, at least one wall is attached to the next building and the vibration is affected by, in many cases, old and fragile buildings.

Key Words: *microtremor observation, brick masonry buildings, Nepal Patan*

1. はじめに

ユネスコ世界遺産に登録されているネパール・カトマンズ盆地の南西部に位置するパタン市は、同盆地における七つの重要な歴史遺産の一つとして挙げられているダルバール広場を中心に、多くの歴史的建造物が点在する古都である。カトマンズ盆地は、急激な人口の流入に伴って景観が破壊されつつあるとして 2003 年に危機遺産に登録されたが、ネパール政府による保護活動が評価され、2007 年に解除されている¹⁾。

カトマンズ盆地は比較的地震活動の活発な地域にあるが、建物の多くは無補強の煉瓦造であり耐震的とは言えない。過去の地震で度々大きな被害を受けており、特に 1934 年の地震では盆地内の建造物の約 20% が倒壊する壊滅的な被害を被った²⁾。近年、人口の増大に伴って建物の数が増え、さらに多くの建物に不合理な増築がなされており、近い将来に予測される地震では、過去の例を大きく上回る規模の災害の発生が懸念される。ネパールのように観光産業が主要な収入源となっている地域において、地震によって観光資源が被害を受けると、地域経済が深刻なダメージを受ける可能性がある。特に近年のパタン市のように多くの人口を支える観光資源を地震災害から守ることは、貴重な文化遺産を継承することと同様に重要な課題である。

本研究では、近い将来に地震による大きな災害が発生することが予測されている歴史都市パタンにおいて、文化遺産の地震災害軽減のための方法を模索するために、同地域に分布する建物の状況について調査し、特にその振動特性を把握することを目的とする。

2. 対象建物

2.1 建物の分布

市内の建物の大部分が木骨煉瓦造で、新しい建物の一部が鉄筋コンクリート (RC) 造架構の枠組み煉瓦造である。建物は非常に密集して建てられており、市内の交通渋滞 (図 1 左) から人口増加の激しさが窺われ



クラクションは鳴りっぱなし、空気は排気ガスで霞んでい
る。人口増加問題の深刻さを窺わせる。



ダルバール広場周辺は交通が規制され、古都の佇まいを見
せる。

図1 市内の様子

る。建物の多くは増改築が繰り返されており、複雑な平面形状になっている。地盤の不同沈下のために傾いているものや、過去の地震又は増築時に損傷したと思われるもの、煉瓦や漆喰の劣化したものも多数見られる。ダルバール広場(図1右)に面して、18世紀以前に居住用宮殿として建てられたチョークと呼ばれる木骨煉瓦造の建物群がある。約20メートル四方の正方形の平面を持つ建物で、精緻なレリーフが施されており、格式の高い建築であることがわかる。

ここでは、パタン市内の木骨煉瓦造の古い建物2棟と、建設中のRC造枠組み煉瓦造の典型的な建物1棟について、調査結果を報告する。

2.2 建物概要

Sundari Chowk (建物 I) 1647年に宮殿として建てられた、木骨煉瓦造3階建ての木骨煉瓦造建物である。

外観を図2に示す。階高は約3.5m、スパンは約20mで、中央に中庭を持ち、平面形状はほぼ正方形である。調査時には補修作業が行われており、床の一部が木の骨組みだけになっている。北側はほぼすべて、南側は一部、隣の建物と接続している。

Lalitapur Pati (建物 II) 17世紀に建設された、2階建ての細長い平面を持つ煉瓦造建物である。外観を図3に示す。無補強の煉瓦壁と木造の梁、土と石の床で構成される。外壁には大きさにばらつきのある煉瓦が使われており、多数の修復跡、煉瓦や接合材料の劣化が見られる。床面や屋根は大きく歪んでい
る。このように構造的には劣化が著しく、耐震性能は心許ないが、窓枠等には精緻な彫刻がなされて
おり、現在も集会所として利用されている。

建設中の民家 (建物 III) RC枠組み+煉瓦造壁4階建ての、新築工事中の建物である。外観と内部、周囲の状況を図4に示す。壁の一部は未完成である。東側が隣の建物と接しており、非常に細長い建物の端部の1スパンのようにも見える。コンクリート部分の歪みは大きく、表面にジャンカが見られる。また、隣の建物は不同沈下或いは経年劣化のためか、当該建物方向に傾斜しているように見える(同図左)。3棟隣りに接続している建物の壁面が明らかに孕み出しており、材木で応急修理をただけの状況である(同図右)。

3. 常時微動測定

測定には日本航空電子製サーボ型加速度計JA-19MA40を用いた。水平2方向をセットにして6点、合計12チャンネルの同時観測を行った。0.004V/galと、常時微動の観測のためには感度が小さいので、500倍の増幅器を併用した。サンプリング周波数は200Hzとした。

電力を必要としたので、安定した電力が得られる昼間に観測を実施した。建物Iでは改修工事が行われて



正面入口。木と石の彫刻が美しい壮麗な建物である。



中庭には見事な彫刻が施された沐浴場がある。

図2 Sundari Chowk 外観と中庭



正面入口。向かって左側にはヒンズー教の祠が付属している。



地盤沈下や経年劣化のために建物が歪んでいる。2階窓枠には精緻な彫刻がある。

図3 Lalitapur Pati 外観



全景。右隣の建物がよりかかっているように見える。



RC 造骨組と建設中の壁。



隣接する建物群。孕み出す煉瓦を木の棒で押さえている。

図4 新築RC枠組み建物

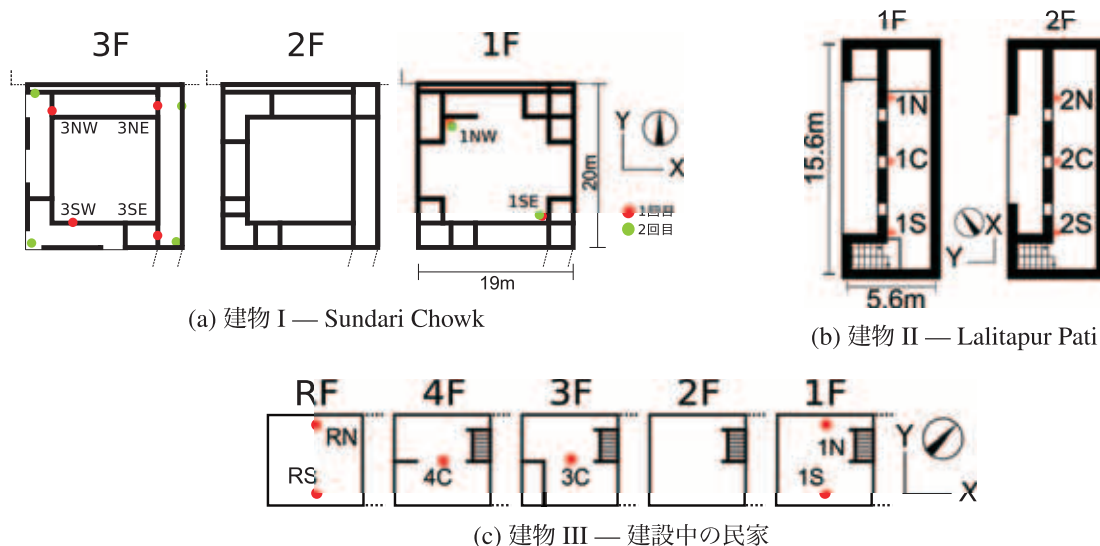


図5 平面図(壁位置のみ)とセンサの配置

いる最中であり、建物Ⅱでは北側の道路の交通量が大変多く、建物Ⅲは新築工事の最中と、いずれも常時微動測定には厳しい条件であった。ノイズ部分を除いても十分な長さのデータが得られるよう、20分間の観測を数回行った。

以下に、各建物におけるセンサの配置について述べる。

建物Ⅰ 簡単な平面図を図5(a)に示す。実線は煉瓦造の壁、上部と右下の点線は隣接建物との接続を示す。計測は2回に分けて実施した。それぞれの回におけるセンサの配置を同図に示す。

建物の形状は比較的単純であるが、所々壁が抜けており、さらに補修のために一部の床が抜かれて骨組だけになっている。また中央は大きな吹き抜けの中庭となっているため、建物としての一体性は低く、複雑な振動性状が予測された。

建物Ⅱ 平面図とセンサの配置を図5(b)に示す。小規模で単純な平面形状をしている。西側に交通量の多い道路があり、不同沈下が見られるため、1階の振動の時間及び空間的なばらつきが大きいことが予測された。さらに、木製の梁で支えられ、石と土でできた2階床の剛性が不明なため、1階、2階で各3点合計6点の同時観測を行った。

建物Ⅲ 平面図とセンサの配置(2回分)を図5(c)に示す。ただし、精確な壁の位置や寸法などの情報は無い。比較的小さな(約5m四方)正方形の平面であり、RC造の骨組と床スラブを持つため、他の2棟よりも剛性が大きいことが予測されるが、壁が未完成であることや、東側(図では右側)の壁が隣の建物に接していることがどのように影響するか不明である。

4. 観測結果

得られたデータを4096点(約20秒)毎に分割し、ノイズが比較的小さいと考えられる20セットを選んで、フーリエ変換してアンサンブル平均を求めた。得られたスペクトルに、バンド幅0.2Hz相当のHanningウィンドウによる平滑化を施したものを検討の対象とする。スペクトルに表れる各々のピークについて、どのような振動に対応するものか分析する。

建物Ⅰ

フーリエ振幅スペクトルを図6に示す。(a)と(b)が一回目(内側の架構)、(c)と(d)が二回目(外側の架構)の記録である。測定中は交通振動が気になったが、振幅の大きな時間帯を避けてスペクトルを計算することにより、一階のデータは安定している。(b)において一回目の3SW(3階の南西)のY方向の振幅が大きくなっているのは、測定中に行われていた建物の修復作業の影響と考えられる。一方X方向((a)の3SW)は壁の面内方向で拘束されるため、作業の影響は小さい。

3階のスペクトルにはいずれも多くピークが見られ、複雑な振動をしていることがわかる。木と土で

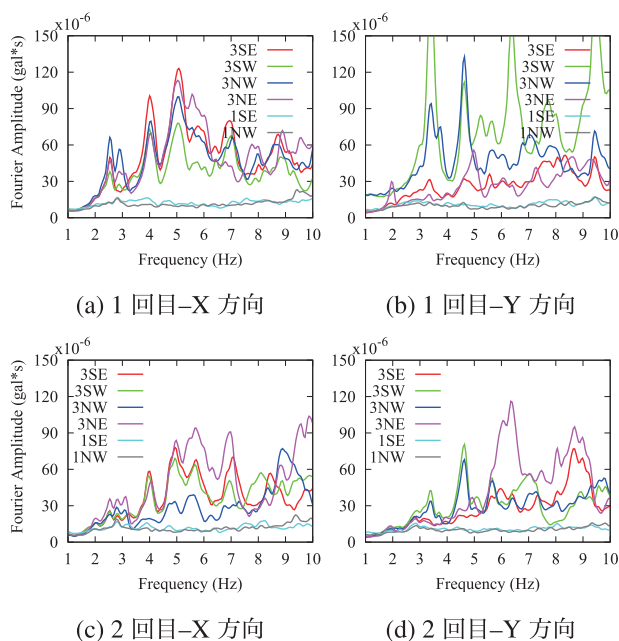


図 6 建物 I のフーリエ振幅スペクトル

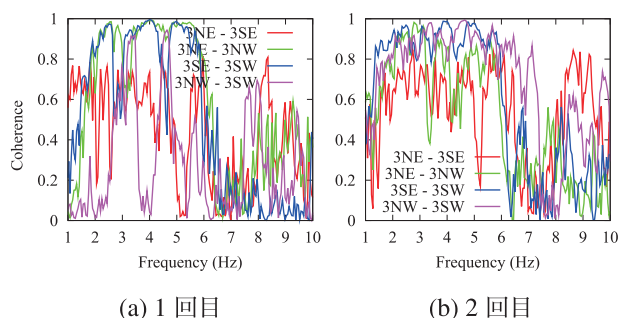


図 7 壁の面内方向のデータのコヒーレンス (建物 I)

きた床の剛性は小さく、さらに修復作業のために一部土が取り去られて木の骨組が露出している状態なので、各々の壁が独立して振動している状況が考えられる。ここで、壁がどの程度一体的に振動しているのか調べるため、壁の面内方向に位置する 2 センサのデータのコヒーレンスを計算したものを図 7 に示す。コヒーレンスのグラフによって、周波数ごとに、2 点がどの程度相関を持って揺れているか知ることができる。例えば (a) で 3NE-3SE と記したものは、北東のセンサの Y 方向と南東のセンサの Y 方向、3NE-3NW は北東の X と北西の X のコヒーレンスであり、それぞれ東の壁と北の壁の揺れの一体性を表す。同図 (a) を見ると、3NE-3NW、3SE-3SW が他の 2 記録と比べて大きい。つまり、内側の架構においては、北側と南側の壁は比較的一体的な振動をしていると言える。一方南北方向の壁については、西の壁の上に 3SW センサを置けなかったこと、修復作業の影響を受けてしまったために西側の壁については不明だが、東側の壁の一体性が低いことがわかる。同様に同図 (b) から、外側の架構についても 3NE-3SE が小さくなっており、東側の壁の一体性が小さい。図 5(a) に示すように南東及び北東に建物が接続しており、これらの建物の影響を受けて壁が変形している可能性がある。

建物 II

フーリエ振幅スペクトルを図 8 に示す。一階の 1C の X、Y 方向、1N の Y 方向の振幅が大きくなっているが、交通振動の影響を受けた可能性がある。X 方向には壁が多いために振幅が小さく、固有周波数が大きくなっている。スペクトル形状の違いは多少見られるものの、2 階の各点で振幅は近く、南北方向の壁はほぼ同一の振動をしている。

Y 方向の 2 階にははっきりしたピークが表れるが、場所によって振幅が異なっている。これらのピークがどのような振動に対応するのか調べるために次の操作を行う。

2 点の振動をそれぞれ F 、 G としたとき、 $P = (F + G)/2$ 、 $T = (F - G)/2$ をそれぞれ求める。 P 、 T はそ

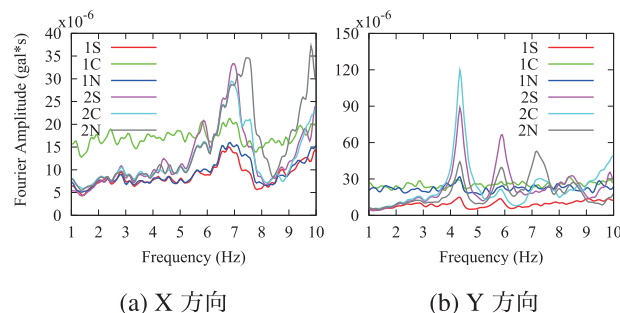


図 8 建物 II のフーリエ振幅スペクトル

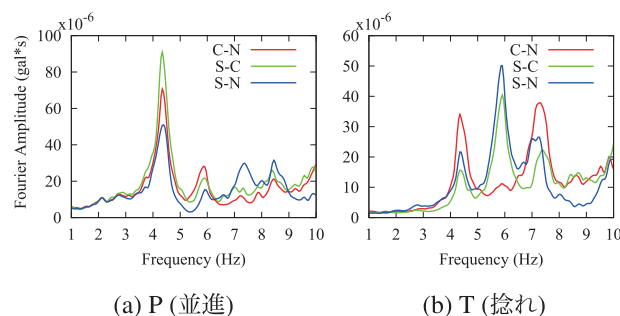
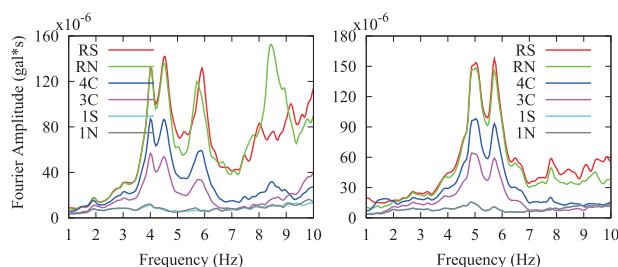


図 9 並進捻れ強調スペクトル (建物 II, Y 方向)



(a) X 方向 (b) Y 方向
図 10 建物 III のフーリエ振幅スペクトル

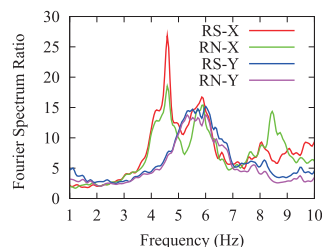


図 11 最上階と一階のスペクトル比 (建物 III)

れぞれ、揺れの並進成分と捻れ成分が強調された波形になると考える。2 階の N, C, S のデータについて相互にこの操作を行ない、フーリエ変換したものを図 9 に示す。図 8 の 4.3Hz 付近に見られるピークについては、(a) で強調されているため並進のピークと考えられる。5.8Hz 付近のピークは複雑で、S-C 及び S-N に関しては (b) が大きくなるが、C-N では (a) が比較的大きい。このことは、C と N に関しては並進の振動が卓越するが、C の位置よりも南側で建物が折れ曲がるような振動モードが 5.8Hz 付近に存在することを示唆している。南側に石造の階段があって相対的に剛であり、床面の剛性があまり高くないために、このような振動モードが表れたものと考えられる。

建物 III

フーリエ振幅スペクトルを図 10 に、屋上と一階のスペクトル比を図 11 に示す。フーリエスペクトルには X, Y 方向ともに低い周波数で山が二つ見られるが、比を取るとそれぞれ一つになり、1 次の固有振動数は X 方向で 4.5Hz, Y 方向で 5.5Hz 付近にあることがわかる。地盤の振動によって二つに割れている可能性もあるが、スペクトル比を見るとピークが十分に高い割には山の形が複雑であり、東側に接合する隣の建物の固有振動の影響を受けているとも考えられる。Y 方向では 1 次固有振動数以外に明瞭なピークは見られないが、X 方向では 5.8Hz 付近にピークがある。5.8Hz では屋上と 3 階の振幅の比が 1 次モード付近よりも大きくなっていることから、垂直方向の 2 次モードの固有振動数と見られる。捻れ振動に関しては、はっきりとしたピークは見られない。隣接建物による拘束の効果と考えられる。

5. まとめ

歴史都市ネパール・パタン市における建物の地震防災について考えるため、同市内の歴史的建造物 2 棟と典型的な新築建物 1 棟を選び、常時微動計測を行って振動の特性を調べた。古い建物には煉瓦や接合材料の劣化が多く見られる。床剛性の低い建物では壁ごとに固有振動が見られ、壁自体がばらばらに変形しているような振動も観測された。木骨煉瓦造建物では床の面内変形と見られる振動が観測され、木と土でできた床の剛性があまり大きくない場合があることがわかった。新しい建物の一部は RC 造枠組み煉瓦造であり、木骨煉瓦造と比較すると耐震的であると考えられるが、コンクリートの質は一般にあまり良くない。コンクリートの床スラブは剛で一体的な振動をするが、ほとんどの場合他の建物と接合しているか壁を接して建てられているので、隣接建物の影響を受けて複雑な振動をしている。

これらのことから、対象地域の建物の多くについて、十分な剛性を持たない部材が使われていると考えられ、耐震性能が大幅に不足していることが推測される。近い将来に予測される地震に備えるためには、現地の大半の建物で使われる煉瓦造壁の強度を明らかにして、厳しい経済状況の中でも最善の工法が使われる道筋を早急に探る必要がある。

謝辞

現地での調査は、立命館大学鈴木祥之教授、京都大学清野純史教授、立命館大学 Hari Parajuli 博士、京都大学辰巳氏のご指導、ご協力の下に実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) UNESCO World Heritage Centre, <http://whc.unesco.org/en/news/356/>
- 2) カトマンズ渓谷の伝統的集落ブンガマティの変容と脆弱性の増大に関する研究、歴史都市防災論文集, Vol.3, pp.195-202, 2009.6