

ネパール・ゴルカ地震によるバクタプルの歴史的煉瓦造 住宅建築の被害状況と常時微動性状に関する調査研究

Observation Study on Damage Situations and Ambient Vibration Characteristics of Historical
Masonry Buildings in Bhaktapur after the 2015 Gorkha Earthquake in Nepal

竹内雅人¹・星野隼人¹・向井洋一²・山本直彦³・増井正哉⁴・宮内杏里⁵

Masato Takeuchi, Hayato Hoshino, Yoichi Mukai, Naohiko Yamamoto,
Masaya Masui and Anri Miyauchi

¹神戸大学大学院生 建築学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市六甲台町1-1)

Graduate Student, Kobe University, Dept. of Architecture

²神戸大学大学院准教授 建築学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市六甲台町1-1)

Associate Professor, Kobe University, Dept. of Architecture

³奈良女子大学大学院准教授 住環境学専攻 (〒630-8506 奈良市北魚屋西町)

Associate Professor, Nara Women's University, Dept. of Residential Architecture and Environmental Science

⁴京都大学大学院教授 共生文明学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町)

Professor, Kyoto University, Dept. of Cultural Coexistence

⁵北電技術コンサルタント (〒930-0858 富山県富山市牛島町13-15)

Engineer, Hokuden Engineering Consultants Co. Ltd.

The 2015 Gorkha earthquake in Nepal caused serious damage to many historical masonry buildings. By observing the seismic-damaged buildings during this earthquake, which were in the old town of Bhaktapur in the Kathmandu valley of Nepal, damaged buildings distributions were seen locally and intensively in the specified area. To evaluate vibration characteristic of the masonry buildings, micro-tremor measurements at the residential buildings which were placed in the observation area in Bhaktapur were carried out. This report focuses on the historical construction-style masonry buildings in Nepal about their dynamic properties under ambient vibrations.

Keywords: *Micro-tremor measurement, Historical masonry structure, Gorkha Nepal earthquake*

1. はじめに

2015年4月25日に発生したネパール・ゴルカ地震は、ネパール・カトマンズの北西約80km、深さ15kmを震源とするMw7.8の大地震であり、カトマンズ盆地を中心とする地域の多くの煉瓦造建築物に甚大な被害を生じた。地震被害に関する詳細情報は、ネパール政府の災害リスク低減ポータルサイト：Nepal Disaster Risk Reduction Portal (<http://drrportal.gov.np/>) において報告されている。本調査研究では、2015年10月に、ユネスコ登録の世界文化遺産「カトマンズ盆地」の中で、首都カトマンズの東約12kmに位置する旧都であり、バクタプル王宮広場から東に向かう旧街道を中心に旧市街全体が世界遺産として登録されているバクタプルにおいて、旧市街東縁部のエリアを中心に建物被害調査を実施しており¹⁻³⁾、震災約1年半後の2016年9月、並びに、約2年半後の2017年9月にも、被災地の復興状況について定点調査を行っている。2016年の調査時より、調査エリア内では、震災後に残存した建物、並びに震災後に再建された（再建中の）建物を対象とした常時微動計測調査を併せて実施してきた。本報では、2017年に実施した、構造種別や破壊状況の異なる計22棟の

建物における常時微動計測による振動特性調査の結果について報告を行う^{4,5)}。各建物では、2台の加速度計を用いて、屋上階（上層階が崩壊した建物については最上階床）と地表面との2点で、同時刻での常時微動計測を行っており、伝達関数（地盤－最上階間の加速度振幅比のスペクトルより推定）より、建物の卓越振動数と振幅の増幅率について検証を行っている。

(1) 調査地域

煉瓦造住宅建物の常時微動計測は、西はバクタプル王宮広場から、旧市街のメインストリートに沿って、東はダッタトラヤ広場に至る地域内で実施しており、大半の建物は、ダッタトラヤ広場を中心とする旧市街地東端部で、地震により比較的多くの建物が集中的に倒壊・甚大損傷を受けたエリアに位置する。バクタプルの旧市街地は北側を流れるカサン（Kasan）川と南側を流れるハヌマンテ（Hanumante）川の流域に挟まれた丘陵地であり、地質構成としては、表層土の下にシルト系粘土、泥炭、軟弱な粘土質の層があるとされており、表層地盤は比較的軟弱である。図1に示すように、ダッタトラヤ広場の南側のエリアでは、地震により隣接する多くの建物群が一斉に全壊・倒壊しており、2015年10月の調査時には、倒壊建物の瓦礫が撤去され、数ブロックにわたり空き地が広がる状態であった。



図1 甚大な建物被害が集中的に発生したダッタトラヤ広場の南側のエリア（2015年10月の様子）

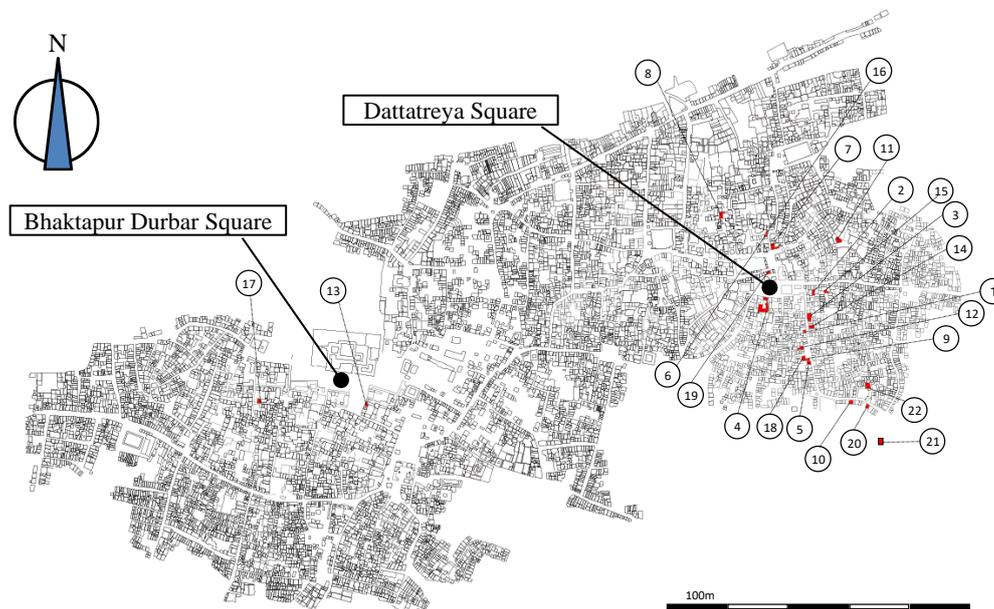


図2 常時微動計測を行った建物の所在分布

(2) 調査建物と計測方法

常時微動計測を行った建物の所在分布を図2に示す。これら22棟の建物については、構造形式と現況から大きく、「Group1：歴史的煉瓦造建物（記号：His.）」、「Group2：RC枠組補強煉瓦造建物（記号：RC.）」、「Group3：再建途中の建物（RC枠組補強煉瓦造建物）（記号：Re.）」のグループに分類した。Group1：歴史的煉瓦造建物に該当するものは10棟（建物1：His.01～建物10：His.10）、Group2：RC枠組補

強煉瓦造建物に該当するものは8棟（建物11：RC.01～建物18：RC.18）、Group3：再建途中のRC枠組補強煉瓦造建物に該当するものは4棟（建物19：Re.01～建物22：Re.04）である。計測器にはIMV社製の加速度計（HM-0013）を用い、サンプリング周波数100Hzで、計測時間を200秒とし、各計測点では3軸方向の同時測定を行った。道路に面した建物正面ファサードに平行な「間口」方向をY方向とし、奥行方向をX方向とした。角地の建物については、主要な道路と平行な方向を間口方向（Y方向）とした。得られた加速度データのFFT解析を行い、それぞれの建物の屋上の地盤に対する加速度のフーリエ振幅スペクトル比を求め、10Hz程度までの低振動数域において、ピーク値を示す振動数を1次固有振動数であると推定した。ノートパソコンのクロックと2台のセンサークロックをあらかじめ同期させておき、計測開始時間のタイムスタンプにより各センサーによる計測データ間の同期処理を行っている。計測データ数16384（=2¹⁴）に対するFFT結果に対して、周波数領域でHanning Windowによる平滑化処理を50回行った。

2. 常時微動計測結果

(1) Group1：歴史的煉瓦造建物

図4にGroup1：歴史的煉瓦造建物10棟（His.01～His.10）の建物外観を示す。バクタブルの旧市街地の典型的な煉瓦造住宅建築は、3～5層の建物が多数であり、壁や柱は煉瓦積み、開口部周りや床組、小屋組は木造骨組により構築されている。図4に典型的な歴史的煉瓦造建物の構造断面を示す。都市部の住宅では、もともと3階建てであったものが、増築により4階建てないし5階建てになったものが見られる。このような建物では、4、5層目の増築時にRCの梁や床スラブを増築部に用いている事例もある。計測建物のうち、His.01、His.02、His.08、およびHis.10については、地震時に受けた大被害（これらは、主に小屋組部や建物上層階における甚大被害である）が、計測段階ではまだ未修復の状態であった。なお、His.03の建物については、地震により屋上階が破壊されていたが、計測段階では伝統的な構法により既に補修がなされていた。

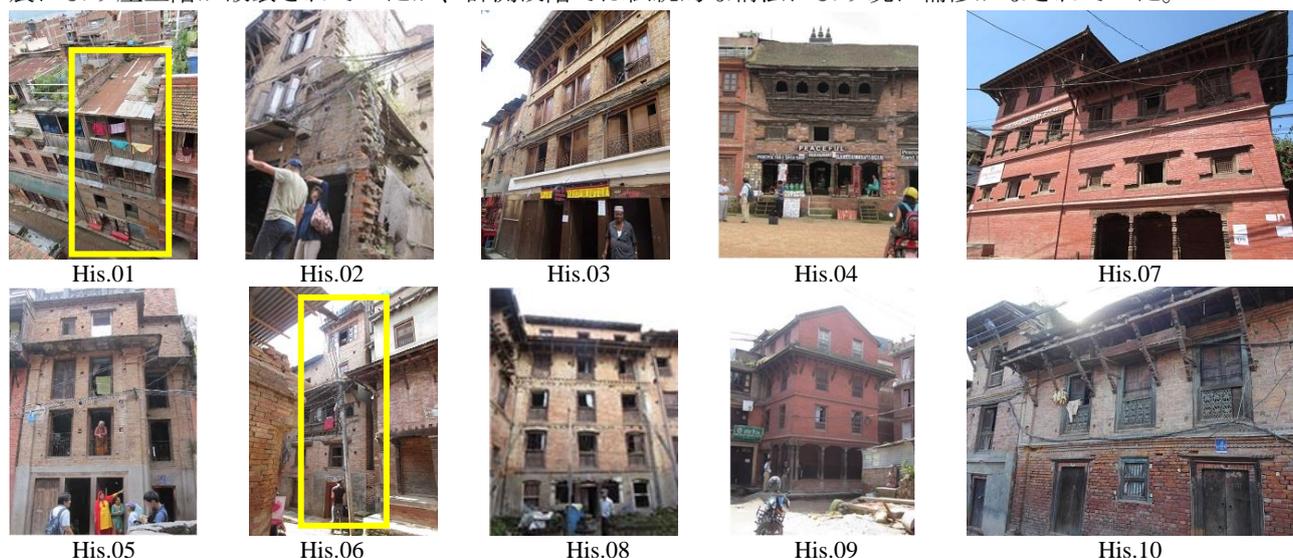


図3 Group1：歴史的煉瓦造建物の外観

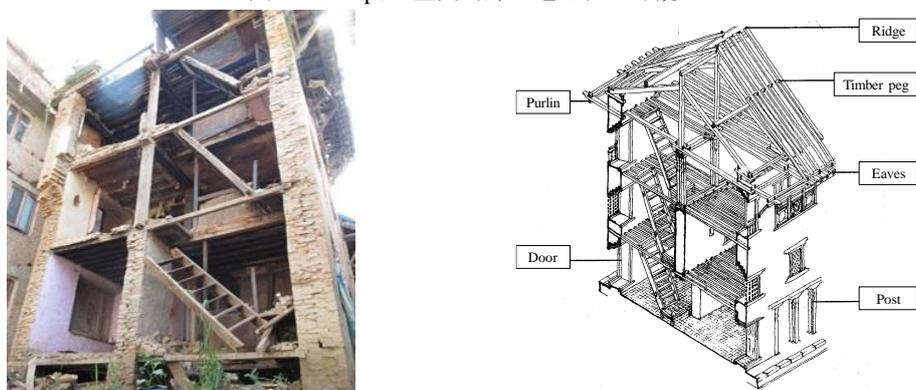


図4 ネパールの歴史的煉瓦造建物の断面（右図はUNESCO Manual 文献6)からの引用転載）

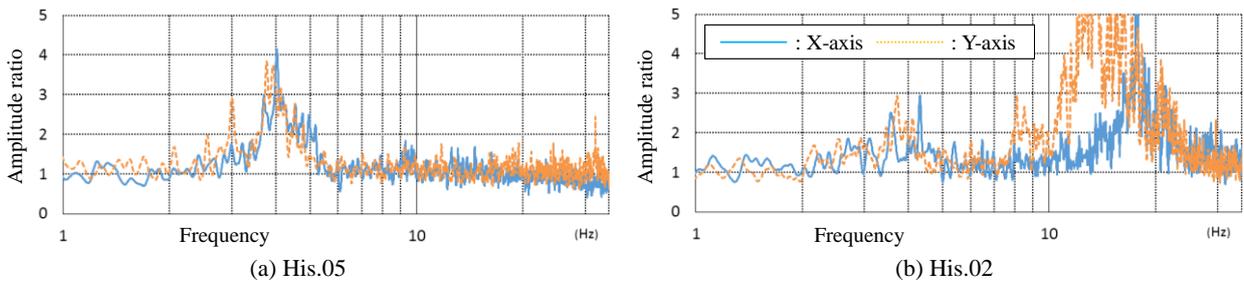


図5 フーリエ振幅スペクトル (Group1)

Group1の建物の常時微動計測結果について、振幅スペクトル比の典型的な例を図5に示す。これらは、His.05と His.02の結果であり、この2例のように、大きく2種類の異なる傾向が見られた。一方は、His.05に見られるように、卓越振動数が主として1Hz～10Hzの範囲のみに専ら観測されるものであり、50Hzまでの範囲においても、この卓越振動数のところで最大の振幅比が生じているケースである (図5(a))。他方は、1Hz～10Hzの範囲に見られる卓越振動数以外に、10Hzを超える高周波数域においても振幅比が大きくなる周波数帯が見られるケースである (図5(b))。この後者のケースは、地震による損傷を受け、計測時に損傷を負った状態であった建物に共通する傾向として観測された。なお、この性状については、次章において建物上部の計測位置での計測方向間での振動の位相特性の観点から、より詳しく検証するものとする。

(2) Group2 : RC枠組補強煉瓦造建物

図6にGroup2 : RC枠組補強煉瓦造建物8棟 (RC.01～RC.08) の建物外観を示す。1988年にネパール・サガルマタ県南部で発生したネパール・インド国境地震⁷⁾後から約30年の間に、RC骨組補強をもつRC枠組補強煉瓦造建物の建設が推奨され、歴史的な都市部でも徐々に普及しつつあった。典型的なRC枠組補強煉瓦造建物は、床組みと柱梁がRC造で建設され、壁面が1層積みの煉瓦造により構築されるものである。Group2の計測建物には、2015年の地震前にすでに建設されていたものと、地震後に建設されたものの両方を含んでおり、後者に該当するものは、RC.05とRC.06である。地震前のRC枠組補強煉瓦造建物の柱断面サイズは、9 x 9インチであったが、地震後は新基準に従い、12 x 12インチで建設されている。

Group2の建物の常時微動計測結果について、振幅スペクトル比の典型的な例を図7に示す。これらは、RC.04とRC.05の結果である。Group2の建物に関しては、地震前と地震後の建設建物のいずれについても、RC.04 (図7(a))と同様の振幅スペクトル比の性状を示している。地震後新築のRC.05 (図7(b))についても、10Hzを超える高周波数域において1次振動数の卓越振幅比よりも大きな振幅比が生じる周波数帯が見られたが、この原因については、現段階では明らかにすることはできていない。

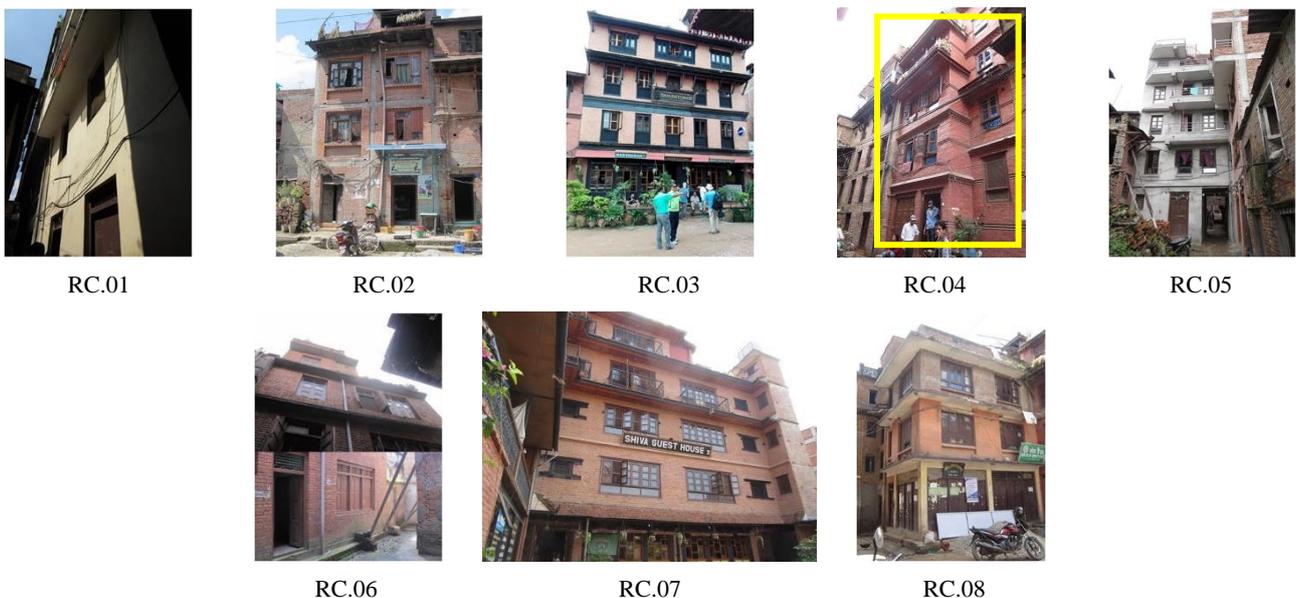


図6 Group2 : RC枠組補強煉瓦造建物の外観

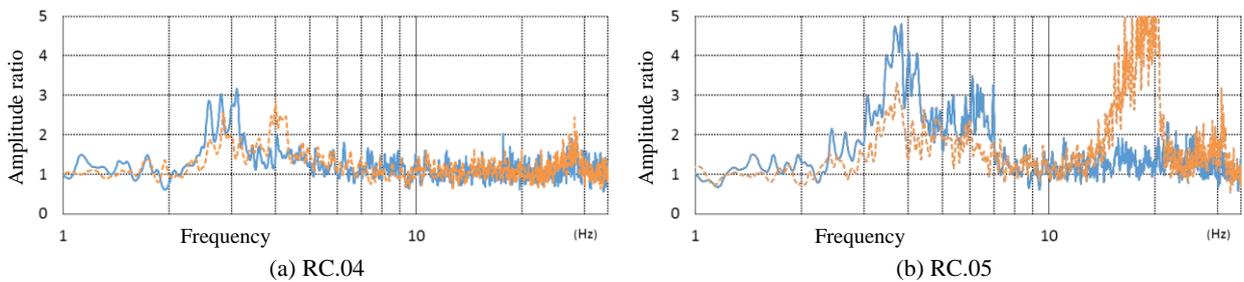


図7 フーリエ振幅スペクトル (Group2)

(3) Group3 : 再建途中の建物 (RC枠組補強煉瓦造建物)

図8にGroup3 : 再建途中の建物 (RC枠組補強煉瓦造建物) 4棟 (Re.01~Re.04) の建物の外観を示す。これらの建物はいずれも地震後に元の被災建物が解体撤去され、再建が進められたもので、計測段階において建設中のものである。柱の断面サイズは、新基準に従い、12 x 12インチで建設されている。

Group3の建物の常時微動計測結果について、振幅スペクトル比の典型的な例を図9に示す。これらは、Re.02と Re.03の結果である。Re.03 (図9(b)) に関しては、3Hz~15Hzにわたる範囲の周波数帯において、振幅比が大きくなる傾向が見られるが、その他の建物に関しては、こうした傾向は見られない。なお、Group3の建物に関しては、10Hzを超える高周波数域において、1次振動数の卓越振幅比よりも大きくな振幅比が生じるような傾向は見られなかった。



図8 Group3 : 再建途中の建物 (RC枠組補強煉瓦造建物) の外観

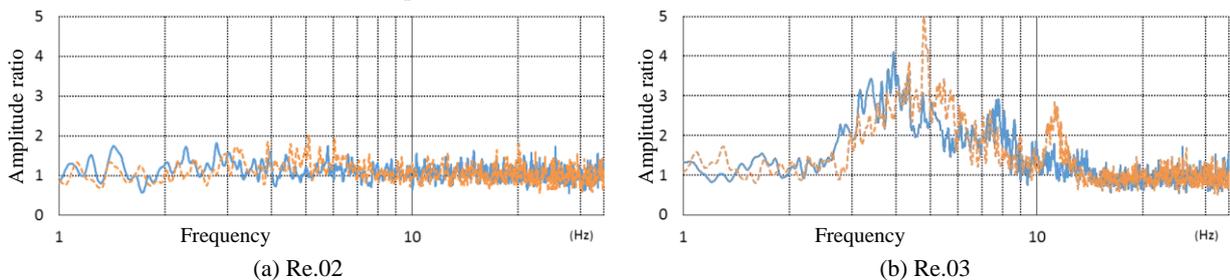


図9 フーリエ振幅スペクトル (Group3)

以上、全22棟の計測建物のフーリエ振幅スペクトル比から、それぞれ、1~10Hzの範囲に見られるピーク値を建物の卓越振動数 (1次固有振動数) と考え、奥行方向 (X方向)、間口方向 (Y方向) についてそれぞれ調べた。調査を行った全建物について卓越振動数をプロットしたものを図10に示す。またそれぞれの卓越振動数での振幅比の値についてプロットしたものを図11に示す (なお、His.07と Re.01については、1~10Hzの範囲に明確なピーク値を特定できなかったため、プロットをしていない)。これらの図より今回調査した建物の1次固有振動数、及び振幅比については、構造形式や計測方向 (間口方向、奥行方向)、損傷状態、などによる明確な差異があまりが見られず、1次固有振動数は平均で4.22Hz (奥行方向)、4.38Hz (間口方向) であり、振幅比は3.05 (奥行方向)、2.88 (間口方向) であった。

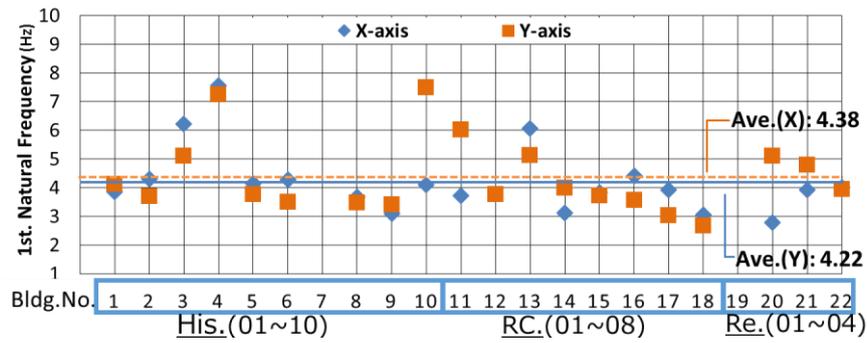


図10 各建物の卓越振動数の分布

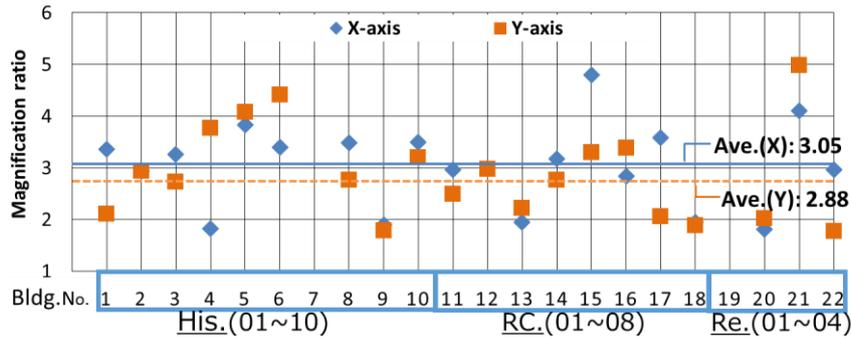


図11 各建物の卓越振動数での振幅比の分布

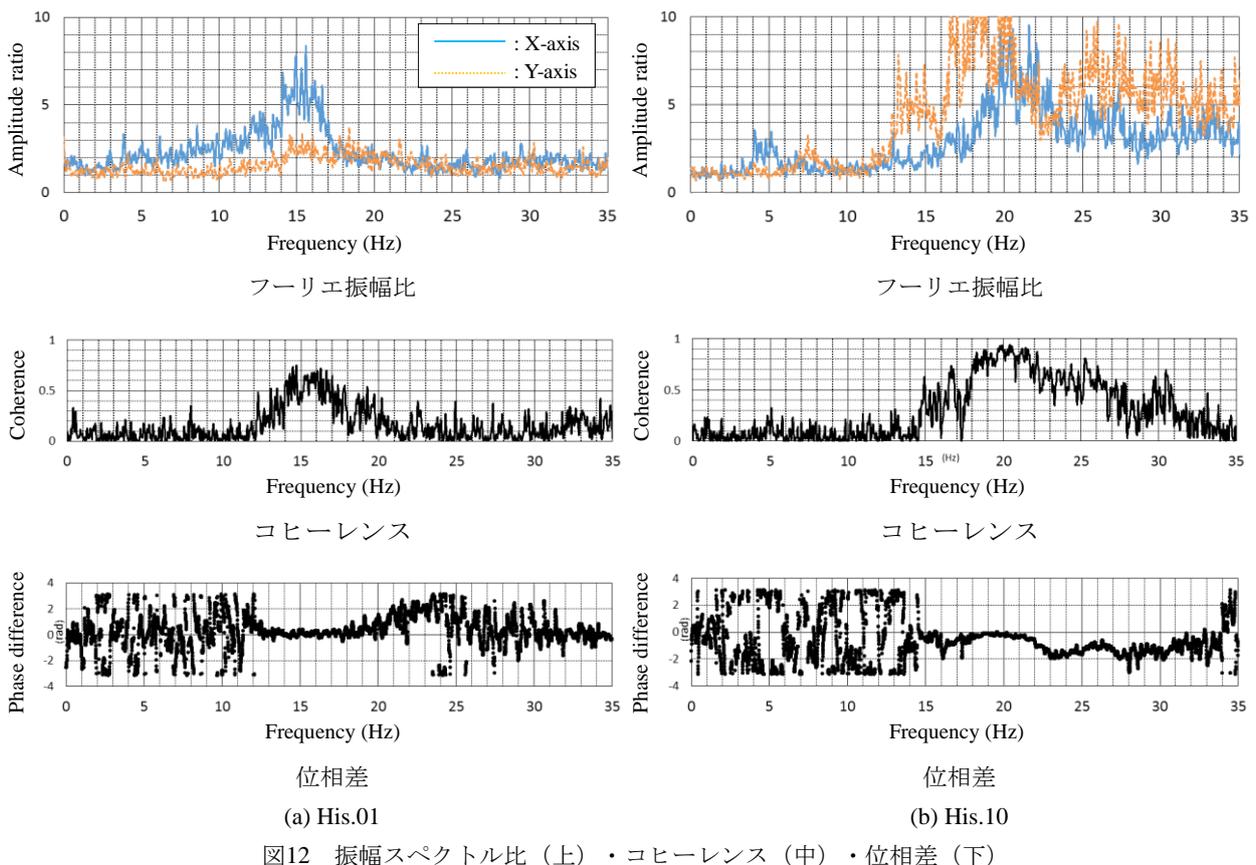


図12 振幅スペクトル比 (上) ・コヒーレンス (中) ・位相差 (下)

3. 高振動数域における振幅比の卓越する振動数帯がある建物について

Group1の歴史的煉瓦造建築物の振幅スペクトル比の中で、いくつかの建物では、10Hz~30Hz程度の高振動数域において、振幅比の卓越する振動数帯を生じるケースが見られた。そこで、この振動数帯において、

最上階の奥行方向（X方向）、間口方向（Y方向）の振動データの位相関係を調べた。Group1の調査建物のうち、高振動数域における振幅比の増大が見られた建物は、His.01、His.02、His.07、His.08、His.10であり、これらの建物の最上階応答のX-Y方向間のデータのコヒーレンスと位相差を検証した。図12にこれらの建物のうち、His.01とHis.10における、振幅スペクトル比、コヒーレンス、位相差をそれぞれ並べて示す。

図12において、振幅比の卓越が見られる15Hz～20Hzの振動数帯におけるコヒーレンスと位相差を見ると、最上階での奥行方向（X方向）、間口方向（Y方向）の水平振動の位相に強い相関が共通して見られることが分かった。そこで、高振動数域において、奥行方向（X方向）、ないし、間口方向（Y方向）で振幅比が3程度を超える振動数帯が見られる建物について「増幅有り」とし、また振幅比の卓越が見られる振動数帯において、コヒーレンスが0.7を超える振動数領域が見られ、かつ、その領域での位相差がほぼ同位相または逆位相（0または $\pm\pi$ (rad) 程度）となるものを「相関有り」として、表1に計測を行った全22棟の建物について、これらの結果をまとめた（建物の状態、層数、軒高、基準階床面積を併せて示す）。

表1を見ると、高振動数域で振幅比の卓越が見られる建物に関しては、いずれも最上階での奥行方向（X方向）、間口方向（Y方向）の振動成分の位相についても強い相関を有する傾向が共通して見られることが確認できる。さらに、Group1の歴史的煉瓦造建物のうち屋根部分や上層部の水平構面に破壊を生じている建物（例として、該当する損傷状況を図13に示す）において、このような傾向が共通して観測されている（ただし、His.02に関しては、明確な屋根部分の構面に破壊は確認されていないが、隣接建物が倒壊し、屋上階部分にも一部亀裂が生じているなどの損傷が見られた）。

表1 高振動数領域における振幅比が卓越する振動数帯の有無と最上階平面振動の位相状態

建物 No.	損傷状態	層数	軒高 (m)	基準階床面積 (m ²)	高振動数帯での振幅比の卓越	X-Y方向間での位相相関
Group1						
His.01	大破	5	11.90	75	X方向、Y方向に有	有
His.02	大破	5+T	10.98	200	X方向、Y方向に有	有
His.03	修復	4+T+P	8.24	180	無	無
His.04	軽微	4+T+P	8.85	520	無	無
His.05	軽微	4+ T+P	9.15	200	無	無
His.06	小破	5+T	11.43	85	無	無
His.07	軽微	3+T	6.75	190	X方向に有	無
His.08	大破	5	10.98	190	X方向、Y方向に有	有
His.09	軽微	4	10.68	160	無	無
His.10	甚大破壊	2	5.07	65	X方向、Y方向に有	有
Group2						
RC.01	軽微	5+T	10.68	195	無	有
RC.02	大破	4	10.07	58	無	無
RC.03	軽微	4+ T+P	10.98	325	無	無
RC.04	軽微	5+T	11.19	175	無	無
RC.05	地震後新築	5+T	12.81	210	Y方向に有	無
RC.06	地震後新築	4+T	9.60	70	無	無
RC.07	軽微	5+T	14.18	410	無	無
RC.08	軽微	3+T	7.02	82	無	無
Group3						
Re.01	地震後新築	4	10.98	200	無	無
Re.02	地震後新築	3+T	8.24	170	無	無
Re.03	地震後新築	4	10.98	175	X方向、Y方向に有	無
Re.04	地震後新築	4	10.98	244	無	無

(注) 階数の「+T」は、屋上テラス仕様、「+P」は、ペントハウス有。



図13 屋根部分の構面の破壊の事例 (His.01)

4. まとめ

本報では、ネパールのバクタプル市の旧市街地における東縁エリアを調査対象地とし、2015年ネパール・ゴルカ地震による震災から約半年後の2015年10月より、3年にわたって継続的に実施してきた被災地調査の結果のうち、震災から約2年半後の2017年9月に実施した建物の常時微動計測結果とその考察を示した。調査対象地の中でも特に建物被害が集中したエリアを中心に、震災後も残存した建物と震災後に再建された（または再建中の）煉瓦造住宅建物を対象とし、これらの振動性状の特徴を調べるため、計22棟の建物において常時微動計測を行い、得られた加速度応答データのスペクトル解析により、それぞれの建物の固有振動数と振幅の増幅比を推定した。

その結果、RC枠組補強の有無や、破壊状況の相違、建物規模の相違等による1次固有振動数の差異は比較的小さく、大半の建物の卓越振動数が概ね3Hz～5Hzの範囲に分布することとともに、卓越振動数での振幅比も大半の建物で概ね3倍程度の値となる結果となった。さらに、屋根部分ないし上層階の水平構面に大きな損傷や破壊を生じていた建物では、10Hz程度を超える高振動数域に振幅比の卓越する振動数帯が見られるとともに、この振動数帯においては建物上部の計測階で、奥行方向と間口方向の水平振動データの位相に強い相関を持つ傾向が共通して確認された。

謝辞：本研究の一部は、科研費・基盤研究(B)海外学術調査（課題番号15H05225）、並びに平成29年度神戸大学都市安全研究センター公募型プロジェクト課題により実施したものである。

参考文献

- 1) 向井洋一・山本直彦・増井正哉・宮内杏里：2015年ネパール・ゴルカ地震におけるバクタプル市の伝統的煉瓦造建築物群の被災分布に関する調査研究，神戸大学都市安全研究センター研究報告，20，pp.236-235，2016.
- 2) Mukai, Y., Yamamoto, Y., Masui, M. and Miyauchi, A. : Observation of Damaged Buildings and the Distribution on the South East Area of the Old Town in Bhaktapur, Proc. Intl. Conf. on Earthquake Engineering and Post Disaster Reconstruction Planning, Bhaktapur, Nepal, pp.236-243, 2016.
- 3) Ohsumi, T., Mukai, Y and Fujitani, H : Investigation of Damage in and Around Kathmandu Valley Related to the 2015 Gorkha, Nepal Earthquake and Beyond, Geotechnical and Geological Engineering, 34(4), pp.1223-1245, 2016.
- 4) 竹内雅人・星野隼人・向井洋一・山本直彦・増井正哉・宮内杏里：2015年ネパール地震によるバクタプル市の被災建物状況と震災後復興に関する調査研究，神戸大学都市安全研究センター研究報告，22，pp.175-192，2018.
- 5) Takeuchi, M., Hoshino, H., Mukai, Y., Yamamoto, N., Masui, M. and Miyauchi, A. : On study for damage detection of non-engineered masonry structures - Micro-tremor measurement of damaged buildings by the 2015 Gorkha Earthquake in Nepal, Proc. 7th World Conference on Structural Control and Monitoring (7WCSCM), Qingdao, China, 2018.
- 6) UNESCO : Heritage Homeowner's Preservation Manual : Kathmandu Valley World Heritage Site, Nepal, UNESCO Bangkok and UNESCO Kathmandu, p.57, 2006.
- 7) 藤原悌三・佐藤忠信・久保哲夫・村上ひとみ：1988年ネパール・インド国境地震の災害調査，京都大学防災研究所年報，32A，pp.71-95，1989.