2015 年ネパール・ゴルカ地震におけるカトマンズ盆地内のクシブ地区被害集中域の表層地盤の物理探査

森 伸一郎[1]・馮 金戈[2]・ 小林 巧[3]・
山田 雅行[4]・山本 英和[5]・バンダリ ネトラ P.[6]

[1]フェロー　愛媛大学准教授　大学院理工学研究科（〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3）
E-mail: mori@ehime-u.ac.jp

[2]正会員　極東興和株式会社（〒114-0023 東京都北区滝野川 7-2-13）（元・愛媛大学学生）
E-mail: k-hyo@kkn.co.jp

[3]学生会員　愛媛大学　大学院理工学研究科（〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3）
E-mail: kobayashi.takumi.14@cee.ehime-u.ac.jp

[4]正会員　ニュージェック　（〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20）
E-mail: yamadams@newjec.co.jp

[5]正会員　岩手大学准教授　理工学部システム創成工学科（〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5）
E-mail: yamamoto@iwate-u.ac.jp

[6]正会員　愛媛大学教授　社会共創学部（〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3）
E-mail: netra@ehime-u.ac.jp

ネパールゴルカ地震（Mw 7.8）は 2015 年 4 月 25 日に発生し，80 万件以上の家屋が全半壊された．地震直後に現地調査を 5 回実施し，Kathmandu Valley（カトマンズ渓谷）全体の被害状況を把握した．破損した建物のほとんどは，無補強レンガ組積造（URBM）と鉄筋コンクリート骨組レンガ充填壁（RCIW）タイプである．特に 3～9 階の RCIW 構造の建物が目立った．建物被害の原因を地震動の観点から検討するために，カトマンズ市内の被害集中地域を中心に，一点微動観測，微動アレイ観測，表面波探査を実施した．地盤の卓越周期の分布と地盤構造を明らかにして，建物被害の原因について考察した．その結果，被害は，主に地盤と建物の共振と独立建物であることが原因であると考えられる．また，被害域では表層に低速度の軟弱層があった．

Key Words: *Nepal Gorkha earthquake, damage, buildings, microtremor array survaey, surface wave exploration*

1. はじめに

2015 年 4 月 25 日，ネパールの首都カトマンズ北西 77km 付近のゴルカ地方の深さ 15km を震源としてネパール・ゴルカ地震（Mw7.8）が発生し，ネパールでは全壊家屋は 80 万棟を越える家屋が全壊した（ネパール政府復興庁データ，2018 年時点）．第 1 著者は地震直後から 5 度にわたり現地調査を実施しカトマンズ盆地内全域の被害調査を実施した．被害建物の多くは，地方では耐震性の低い無補強組積造（URM），カトマンズでは無補強レンガ壁の鉄筋コンクリート骨組造（RCIW）である．

この地震では盆地内部で周期 4 秒の長周期地震動が増幅され，これが特に注目され，主に地震学者により震源過程と深い構造の観点から研究されているが，建物被害は脆弱な建物特性のみならず短周期の地震動成分の増幅特性が深く関わっていると考えられる．

そこで，カトマンズ盆地内の被害集中地域（Khusibu, Gongabu, Sankhu）に着目して表層地盤の地盤増幅の特性を調査してきた．本論文では Khusibu（クシブ）地区に焦点を当てる．ここでは，2015 年に単点微動観測[1)]，

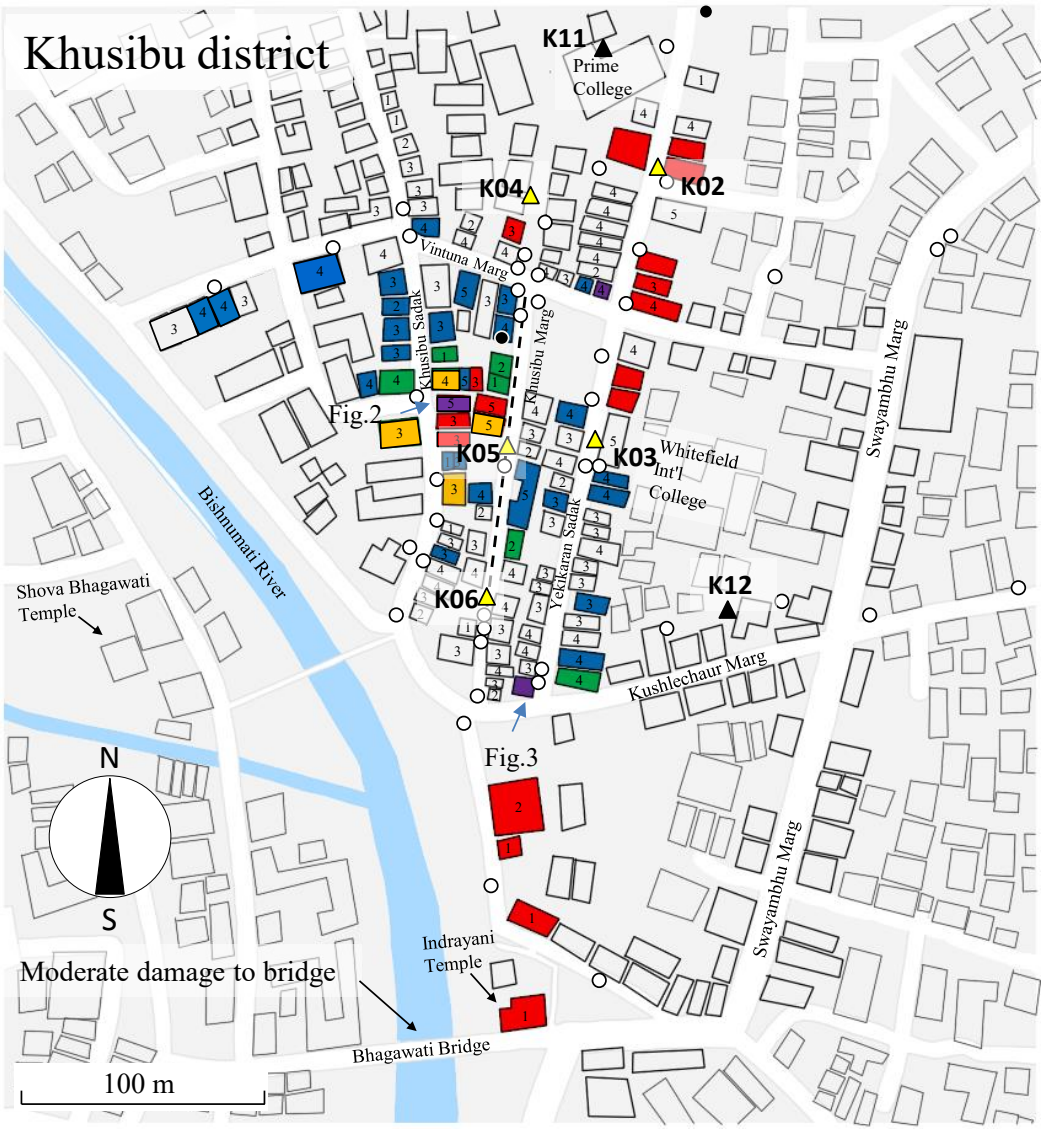
2017年9月には半径0.6mの極小微動アレイ観測と表面波探査を実施し[2)]，2018年9月に半径5mのアレイ観測を実施した．

2. 被害の実態

図-1 に Khusibu 地区における被害グレード別建物被害分布と微動観測，表面波探査，微動アレー探査の各地点を示す． この地区での直後の緊急被害判定は，2015年5月5日，6月25日，EMS98[3)]の判定基準（Grade 1～5を図に表記）に準じて実施し，無被害を Grade 0 として表記・整理した．被害グレードは次のように名付けられている．

Grade 0: No damage （無被害）
Grade 1: Negligible to slight damage （軽微な被害）
Grade 2: Moderate damage （小破）
Grade 3: Substantial to heavy （中破）
Grade 4: Very heavy damage （大破）
Grade 5: Destruction（崩壊）

これら Grade の日本の災害救助法の被害認定区分との



Legend: Damage grade as per EMS98 scale

- Grade 0: No damage
- Grade 1: Negligible to slight damage
- Grade 2: Moderate damage
- Grade 3: Substantial to heavy
- Grade 4: Very heavy damage
- Grade 5: Destruction
- Numbers inside squares: Number of floors
- Microtremor measurement (single)
- Microtremor array measurement (r=0.6 m)
- Microtremor array measurement (r=5.0 m)
- Surface wave exploration line
- Seismograph for interferometry

図-1 Kathmandu 市 Khusibu 地区での被害ランク別被害建物の分布および単点微動測定・微動アレイ測定地点・表面波探査測線の位置

図-2　Khusibu 地区の中央部に位置する重篤な建物被害が集中した地域の状況．G は EMS98 による被害グレードを示す．

対応は，Grade1,2 が一部損壊，Grade3 が半壊，Grade4,5 が全壊に対応する．

図-2 に Khushibu の中央部の被害集中部の状況を示す．倒壊している建物の周囲は RCIW 構造のカトマンズで標準的な建物が G3 や G4 となる重度の被害を受けている．したがって，この地域では地震動が周辺よりも大きかった可能性がある．また，**図-3** に Khusibu 南端の倒壊している建物とその周辺の建物を示す．倒壊している建物の周辺の建物はほとんど被害を受けていない．このような場合，倒壊した建物は周辺建物に比べて有意に耐力が不足していた可能性がある．

図-3　Khusibu 地区南端での無被害やわずかな被害の建物に囲まれた崩壊建物の状況

ネパールゴルカ地震での建物被害は，その多くが無補強組積造の建物で生じており，割合は少ないとは言え RCIW 構造の建物でも生じている．地方とは異なりカトマンズ市内の標準的な建物構造は RCIW 造であり，相対的に耐震性が高いとは言え，階数の増加や柱の欠如など，認可された構造と異なって耐震性が低くなっている建物も少なくない．

したがって，建物被害の原因について，地盤震動が大きいためか，建物応答が大きいためか，建物耐力が低いためか，その特定は困難である．したがって，ある程度の数が集中的に重度の被害を受けている地域に絞れば，地盤震動が周囲より大きいことが原因として考えられる．そのような地域の振動特性や地盤構造を明らかにすることは有意義である．

3.　調査地点および調査方法

図-1 で，○は微動観測，△・▲は微動アレー探査（半径がそれぞれ 0.6 m と 5.0 m）地点である．K02～K06 の極小（r=0.6 m）アレーは 2017 年 9 月に，K11,K12 の半径 5.0 m アレーは 2018 年 9 月に実施した．この図では，微動観測地点は建物との相対位置関係によらず，GPS 座標によって描画しており，誤差が大きいことに注意が必要である．図より中央北端部（K05, K04～05，K02～K03）にカトマンズで一般的な 4～6F の RCIW 造建物に被害が集中していた．K02 の北も倒壊建物があった．

2017 年 9 月に実施した JU-210（白山工業社整）を用いたアレー観測（K02～K06）では，表層 20 m 以浅で Vs が 200 m/s 以下となり，被害重篤な南部では深さ 3～7 m に Vs が 150 m/s 前後の層が認められた．低振動数領域での分散曲線が得られず，反射面が 20 m よりも深い位置にあると推定されたが，深い構造に課題が残っていた．

そこで，2018 年 9 月に南北 2 地点で半径 5.0m の微動アレー観測（K11 と K12）を実施した．半径 5.0 m の円周上 3 台と中心 1 台の計 4 台によるアレーとして実施した．Khusibu の北側（K11）は，Prime College の前庭バスケットボール場でコンクリート敷設されていた．Khusibu の南側（K12）は共同住宅の前庭である．今回の微動アレー観測には固有振動数 4.5Hz の動コイル型の速度計をコンデンサーシャントにより 0.5～20 Hz でほぼ平坦な利得特性を持つ 3 成分の CR4.5 -2S（物探サービス（現・ANET）製）を 4 台用い，データロガーとして 24 ビット AD 変換器を内蔵した GEODAS-15-UDB-24ch（同社製）を用いた．風除けを使用し，100 Hz サンプリングで 1 地点につき 5 分間の測定を 5 回行った．また，センサーの振動子が振動しないようにしてセンサーを含めた総合的な電気ノイズを測定し，SN 比の検討に用いるノイズ記録とした．

4.　地盤の卓越周期分布

単点・アレー微動観測点において H/V スペクトル比法により地盤の卓越周期の分布を求めた．水平動 H，鉛直動 V のそれぞれで SN 比が 2 以上であることを条件とし，H/V スペクトル比の形状で認められるピークとディップの組み合わせが視認できるもののピークを卓越振動数として読み取り，そのような組み合わせが複数ある場合には低振動数の方を地盤の卓越振動数を 1 次卓越振動数として特定する方法を採用する．**図-4** に H/V スペクトルで

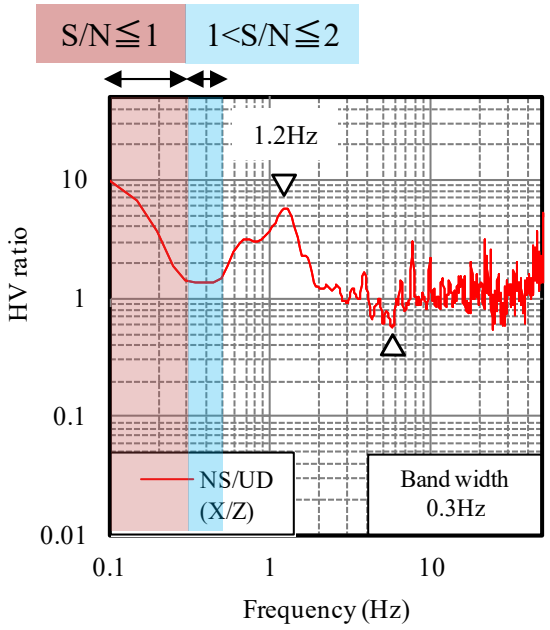


図-4　H/V スペクトル比における有効振動数範囲の決定とピークとディップの組み合わせの特定の一例

の有効範囲とピークとディップの特定の状況の例を示す．

NS 成分，EW 成分，両成分の RMS 値の H/V を求めた．各測定点において両成分に大差なかったので RMS 値より卓越振動数を特定した．

図-5 に Khusibu 地区における南北測線の一次卓越周期分布を示す．Khusibu Marg 通りの南側延長線上の端部の微動測点を基準にして距離を測っており，南側 3 点目がこの通りの入り口である．南で短く 0.7 秒程度であるが，北へ行くほど長くなり，3 階以上建物の被害集中域では 1.2 秒程度となっている．これより北では 1.0～1.3 秒が卓越する．このように狭い範囲で急激に卓越振動数が変化しており，Bishnumati 川の氾濫原と考えられるため地盤構造が比較的急激に変化していると考えられる．

図-6 に H/V スペクトル比の地点別の変化を示す．ピーク振動数については**図-5** に整理したが，この図では，地点 5 から地点 9 までのでは振幅が大きいという特徴がある．特にこの範囲で重篤な被害の位置が重なっている．H/V 比の振幅と地震時の水平動の振幅が大きくなるとことに繋がる可能性がある．また，地点 6，7 は，4Hz 付近にもピークがある．

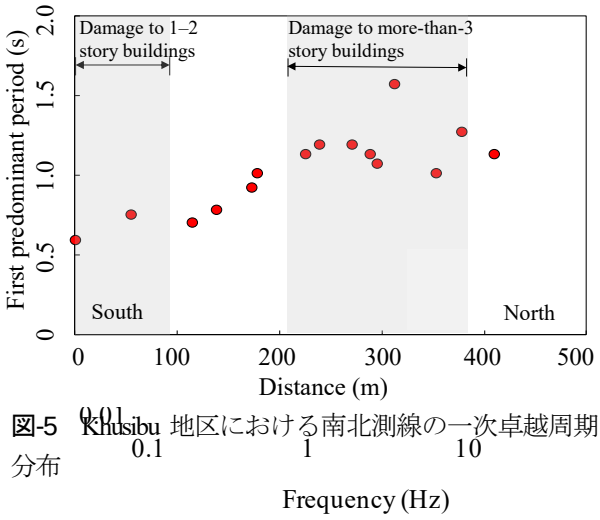


図-5　Khusibu 地区における南北測線の一次卓越周期分布

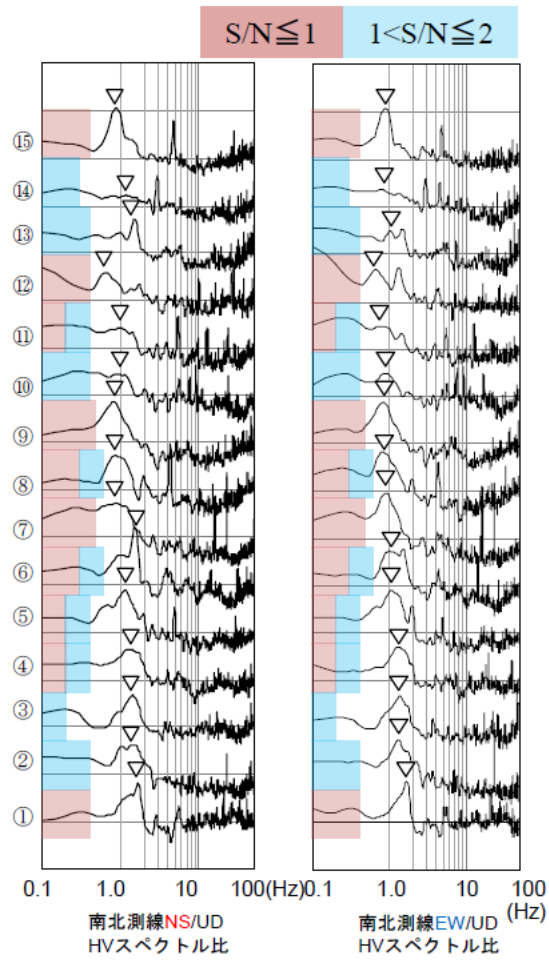


図-6　H/V スペクトル比の地点別の変化（左は NS/UD 成分，右は EW/UD 成分）

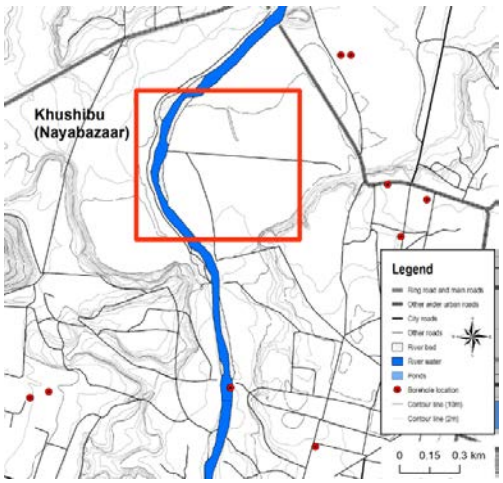


図-7　Khusibu 地区と周辺の地形図と Bishunumati 川

図-7 に Khusibu 地区と周辺の地形図を示すが，Bishunumati 川が蛇行している内側に位置しており，この着目している地区では北に行くほど，河川氾濫堆積層は厚くなり，後背湿地の堆積土粒子はより細粒になることが考えられる．

5. 地盤の微動アレー探査

前述のように 2017 年に半径 0.6m の極小微動アレー探査をこの地区の 5 地点（K02～K06）の道路上で行ったが，深い地盤構造を知る目的で半径 5m の微動アレー探査を地区の南北 2 地点（K11，K12）で実施した．これらの探査地点は図-1 に示している．微動アレー探査の記録は長[4]の微動アレー解析プログラム BIDO を用いて，SPAC 法により表面波の分散曲線を求めた．また，分散曲線から地盤のせん断波速度構造を逆解析により求めるのに，先名・藤原[5]の微動探査解析ツール Tremor Data View を用いた

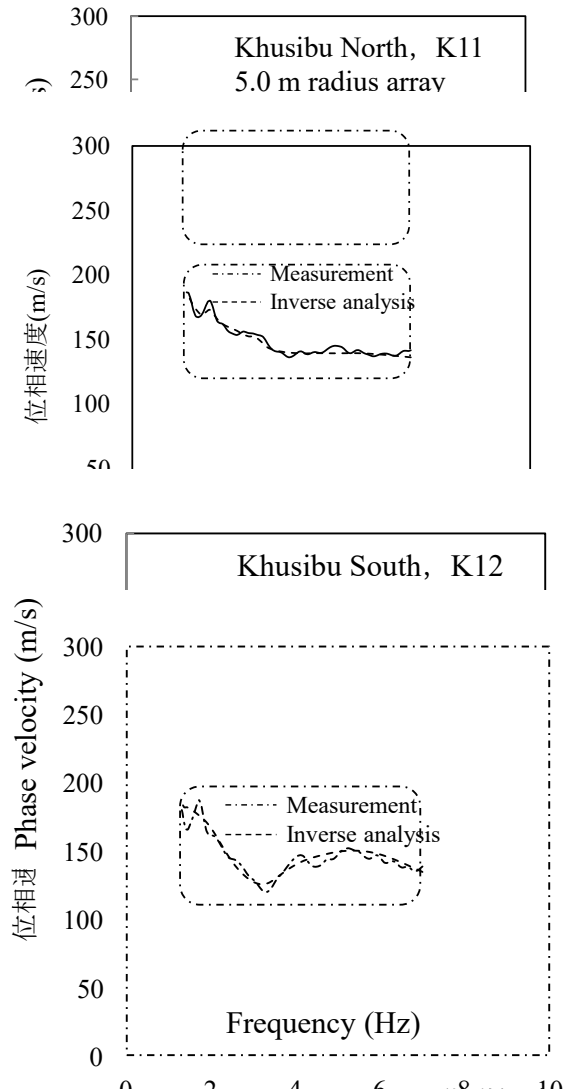
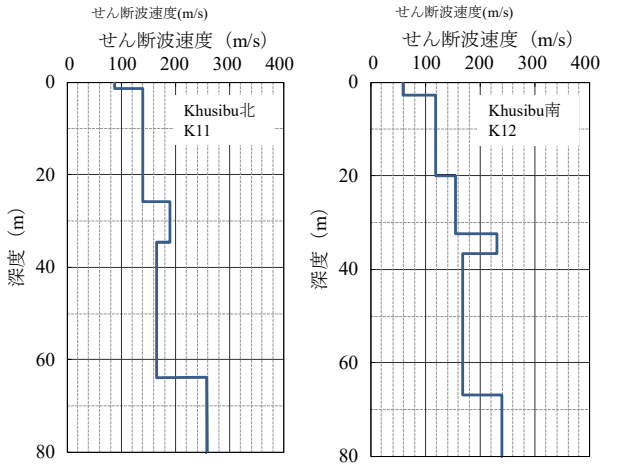


図-8 Khusibu 地区におけるアレー微動測定と SPAC 法によって得られた表面波分散曲線と逆解析により得られた分散曲線



(a) Khusibu North（K11） (b) Khusibu South（K12)

図-9 インバージョンで得られた S 波速度構造

図-8 に SPAC 法により得られた表面波の分散曲線[6]を示す．2 地点ともに 1～7 Hz の範囲で比較的安定した分散曲線が得られたが，1 Hz で位相速度が 200 m/s に至らず，工学的基盤には達していない．

図-9 に逆解析で得られた地盤速度構造[6]を示す．大略，両者に顕著な違いは認められない．南側の K12 では，深さ 20 m より浅い地層で Vs が約 120 m/s と大変小さく，最表層の 3 m は Vs が約 60 m/s と推定されている．深さ 20 m の Vs のコントラストで微動の卓越周期 0.7 秒は説明できそうであるので，20 m より下の約 160 m/s 程度の地層は下方に続くものと考えられる．一方，北側の K12 では深さ 26 m より浅い地層で Vs が 140 m/s と相当小さい．ここを表層とすると固有周期は 0.76 秒となり，図-2 に示した微動による卓越周期 1.2～1.3 秒には達しない．1.2 秒となるためには深さ 46 m，1.3 秒では 50 m となる．Vs でコントラストのある土層が 46～50 m に現れる可能性がある．このようなことから，図-9 の 60 m を超える深さの Vs=240, 260m/s の層は疑わしい．

6. 建物の固有振動特性

Khusibu 地区では，3～5 階建ての RCIW が多い．Nepal の耐震設計基準での固有周期の計算式は，RC 構造の場合，各階高を 3m とすると，$H=0.06H^{0.75}$ であるので，0.31～0.46 s となる．これによれば，Khusibu の北に位置する Khusibu 公園近くで，RCIW の建物の調査を 2019 年 9 月に実施した．3F-RCIW で 2.5Hz，同じく 3.7Hz，などのデータが得られた．固有周期に換算すると，0.40 s と 0.27 s となり，設計値 0.31s に比べて長短に分かれる．カトマンズでの RCIW 構造では，森らより RCIW 構造の回帰式として T=0.08N が得られており，これによれば，3F 建物だと 0.24 s（4.17）となり，Khusibu 地区の建物は固有周期が長めの可能性がある．

いずれにせよ，設計値であると 3～5F の建物も固有振

動数は2～3Hz前後となり，図-5で示したKhusibuの地盤特性は，特に建物が共振するなどという特性は持ち合わせていない．

したがって，Khusibuでは，特に地盤の増幅特性に関係する特性が被害の集中に関わるということは考えにくい．建物の被害集中の原因は，建物にあると言える．

7. 結　論

2015年のゴルカ地震で被害集中域の一つKhusibuで，高密度な微動測定，表面波探査，微動アレー測定を行うとともに，同地区の建物の振動測定を行った．地盤の固有周期は，南で短く0.7秒程度であるが，北へ行くほど長くなり，3階以上建物の被害集中域では1.2秒程度となっている．これより北では1.1～1.3秒が卓越する．

南北ともに前者では20 m以浅で極端にVsが小さかった．後者では46～50 mでVsコントラストのある土層が現れる可能性があるという地盤構造を明らかにしたが，地盤に地域内に大きな違いは無かった．

建物については，平均的なRCIW建物に比べて，同地区はやや長めであり，脆弱であった可能性がある．

Khushibu地区の被害集中は，地盤が局所的な振動特性の違いというわけではないことがわかった．建物の脆弱性による可能性が示唆された．

謝　辞：長 郁夫 博士が開発された微動アレー解析プログラムBIDO，先名重樹 博士が開発された微動解析ツール Tremor Data Viewを使わせて戴きました．本研究は，科学研究費補助金（基盤研究（B）（海外学術調査）課題番号 17H04498：代表 森 伸一郎）によるものです．記して謝意を表します．

参考文献：

1)　森 伸一郎, ラトナ P.トヤナ, 全 邦釘: ネパールのカトマンズ盆地における地盤振動特性, 第53回地盤工学研究発表会発表講演集 CD-ROM, pp.1787-1788, 2018.7.

2)　森 伸一郎，小林 巧，馮 金戈，ネトラ P. バンダリ，山田 雅行，山本 英和：2015年ネパール・ゴルカ地震におけるカトマンズ市内被害集中域の振動特性と地盤構造, 第37回日本自然災害学会学術講演会，pp.53-54，2018.11.

3)　G. Grünthal: European Macroseismic Scale 1998 EMS-98, 16p., 1998.

4)　長　郁夫：微動解析ソフト BIDO，https://staff.aist.go.jp/ikuo-chou/bidodl.html

5)　先名 重樹，藤原広行：微動探査観測ツールの開発 その 1-常時微動解析ツール-，防災科学技術研究所研究資料，第313号，133p.，2008.3.

6)　森 伸一郎，馮 金戈, 小林 巧，山田 雅行，山本 英和, バンダリ ネトラP.：2015年ネパール・ゴルカ地震におけるカトマンズ盆地内のある被害集中域の表層地盤の物理探査，物理探査学会第 140 回(2019 年度春季)学術講演会, 2019.6.

(Received September 10, 2019)
(Accepted November 1, 2019)

GEOPHYSICAL INVESTIGATION OF SURFACE GEOLOGY IN A DAMAGED AREA OF KHUSIBU DISTRICT IN KATHMANDU VALLEY DURING THE 2015 NEPAL GORKHA EARTHQUAKE

Shinichiro MORI, Jinghe FENG, Takumi KOBAYASHI, Masayuki YAMADA, Hidekazu YAMAMOTO, Netra P. BHANDARY

Nepal Ghorka earthquake (Mw 7.8) occurred on April 25, 2015, and over 800,000 houses were destroyed. Immediately after the earthquake, field surveys were conducted five times to grasp the damage situation in the entire Kathmandu Valley. Most of the damaged buildings are reinforced concrete infilled walls (RCIW) type in Kathmandu. In the damage survey conducted along the microtremor observation line passing through the point where the long period ground motion with a period of 4 seconds was prominent, no correlation was found between the damage status of the structure and this long period superiority. Therefore, we focused on single point tremor observation, microtremor array observation and surface wave exploration focusing on the damage concentration area. The damage condition and the shear wave structure of the ground were compared.