

カトマンズ盆地の動的なコーン貫入抵抗と 常時微動に関する一調査報告

荒木 功平¹・宮本 崇²・中村 高志³・西田 継⁴・鈴木 猛康³

¹正会員 山梨大学 大学院総合研究部工学域土木環境工学系 (〒400-0016 山梨県甲府市武田 4-3-11)
E-mail:karaki@yamanashi.ac.jp

²正会員 山梨大学 大学院総合研究部工学域土木環境工学系 (〒400-0016 山梨県甲府市武田 4-3-11)
E-mail:Takashi@yamanashi.ac.jp

³正会員 山梨大学 大学院総合研究部工学域土木環境工学系

⁴非会員 山梨大学 大学院総合研究部附属国際流域環境研究センター

ネパールの首都カトマンズ北西 77km 付近を震源として 2015 年 4 月 25 日に Mw7.8 の地震が発生した。そこで、簡易動的コーン貫入試験機及び微動計による現地調査を行った。

簡易貫入試験結果から、河川分岐地点近傍で特に緩い表層土が 200cm 以上連続していることがわかった。既往の被害報告の「Kathmandu のリングロード内では、川沿いの特に川が分岐する地点の軟弱地盤領域に建物被害が点在する」ことと整合すると考えられる。

常時微動観測から、盆地中央部 (Kathmandu・Lalitpur) では概ね 1Hz よりも長い周期にピークを有していることがわかった。一方、盆地北東端部 (Sankhu) では 3~4Hz の短周期帯にピークを有し、構造物被害の要因として表層地盤によるサイト増幅特性の影響が推察された。

Key Words: dynamic cone penetration, microtremor, Kathmandu valley, field survey,

1. はじめに

ネパール (ネパール連邦民主共和国) の首都カトマンズ北西 77km 付近、ガンダキ県ゴルカ郡サウラパニの深さ 15km を震源として 2015 年 4 月 25 日 11 時 56 分 (現地時間) に Mw7.8 (アメリカ地質調査所) の地震が発生した。カトマンズのダルバール広場、ダラハラ塔など歴史的な建造物や世界遺産の寺院の多くが甚大な被害を受けた¹⁾。国連はネパール人口の約 30% (約 800 万人) が被災したと発表 (2015 年 4 月 28 日) した²⁾。

カトマンズ盆地は 1979 年にユネスコの世界遺産 (文化遺産) として登録されていたが、人口が集中し急激に都市化していた (2003 年~2007 年の間危機遺産に指定)。地盤構造は、約 8000 年前までは湖だったことから、平均深さが数百 m になる湖底堆積物及び河川堆積物が広がる上、プレート境界断層の上盤側に存在しており、地震に対し非常に脆弱と考えられている。さらに、ネパールは元々地震が多い地域であるが、建造物は伝統的工法により作られた耐震性の無いレンガ積みが多い。2006 年頃には「中部ヒマラヤ地震ギャップ」として、過去数百年間にわたって巨大地震が無かったカトマンズ周辺及びそ

の西部地域一帯における組織的準備の緊急性が指摘されていた³⁾。

本報告では、カトマンズ盆地の地盤構造に関する知見を得る目的で、2015 年 8 月、2016 年 3 月に簡易動的コーン貫入試験機及び微動計を用いた現地調査 (動的なコーン貫入抵抗と常時微動計測) 結果を取り纏め報告している。

2. 簡易動的コーン貫入試験概要と試験結果

簡易動的コーン貫入試験⁴⁾は、質量 $5 \pm 0.05 \text{ kg}$ のハンマーを $500 \pm 10 \text{ mm}$ の高さから自由落下させ、地盤の動的なコーン貫入抵抗を簡易に求めることを目的としたものである。100mm 貫入させるのに要する打撃回数を N_d 値として記録する。一般的に貫入深さは周囲の摩擦が大きくなる 3m 以浅が適当とされている。貫入中止は 10 回の打撃による貫入量が 20mm 未満である (ただし、本報告では 50 回の打撃による貫入量が 100mm 未満とした)。一方、標準貫入試験から得られた N 値との関連性・換算については、 $N_d = (1 \sim 3) N$ 、 $N_d = 1.5 N$ などが提案され

ている。

図-1 に簡易動的コーン貫入試験調査位置関係（図中に示す (a) ～ (h) の全 8 地点）（Google Earth）を示す。

図-2 に全 8 地点における簡易動的コーン貫入試験結果を示す。地点 (a) ～ (d) , (g) の深さ～ N_d 関係は比較的同様な傾向を示していると考える。

写真-1 に貫入状況・現地状況の一例として Kathmandu の Shova Bhagawati の Vishnumati 川に近い地域（図-2 (b)）での実施状況を示す。建物はレンガ積みが多い。本地点では、地震により大きく傾斜した建物がみられた。

図-3 (a) ～ (h) には図-1 に示した調査地点の概況（Google Earth）を拡大したもの示す。(a) ～ (c) が Kathmandu, (d) , (e) が Lalitpur, (f) が Kirtipur, (g) が Bungamati, (h) が Dakshinkali である。

図-4 (a) ～ (h) に図-3 (a) ～ (h) の各地点の簡易動的コーン貫入試験結果を示す。ただし地点 (e) , (f) は、貫入中止深さは 3m に到達しなかった。

図-2, 図-4 (a) ～ (h) をみると全体的には N_d が 15 以下が多いことがわかる。特に (d) は N_d が 5 以下の特に緩い表層土が 200cm 以上連続する。また, (a) , (c) は N_d が 10 以下の緩い表層土が厚く, 290～300cm ある。一方, (e) は, 1m 以深で $N_d=15\sim25$ が多く, 全 8 地点の中では比較的良好といえる。(f) , (h) は N_d が 20 以上の締まった地盤を含むが, 厚さは薄い (10cm 程度)。これらから, カトマンズ盆地中央部の多くは緩い表層土・緩い地盤が厚く堆積していると唆される。

「Kathmandu のリングロード内は, RC 枠組を有する住宅が多く存在し, 傾いた建物は川沿いの特に川が分岐する地点の軟弱地盤領域に被害が点在する」⁵⁾ ことが報告されている。本調査では川沿い（図-3 (b) など）で写真-1 のような傾斜した建物がみられた。川が分岐する地点（図-3 (d)）における地盤は特に緩い（図-4 (d)）ことがわかった。緩い地盤では液状化現象が懸念される。地下水位が相対的に地表からの距離が近い河川近傍の居住地区では, 移転や地盤改良, 建造物耐震化の必要性は高いと考える。

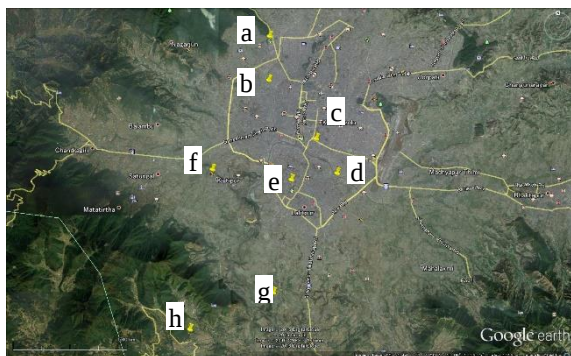


図-1 調査位置関係（Google Earth）

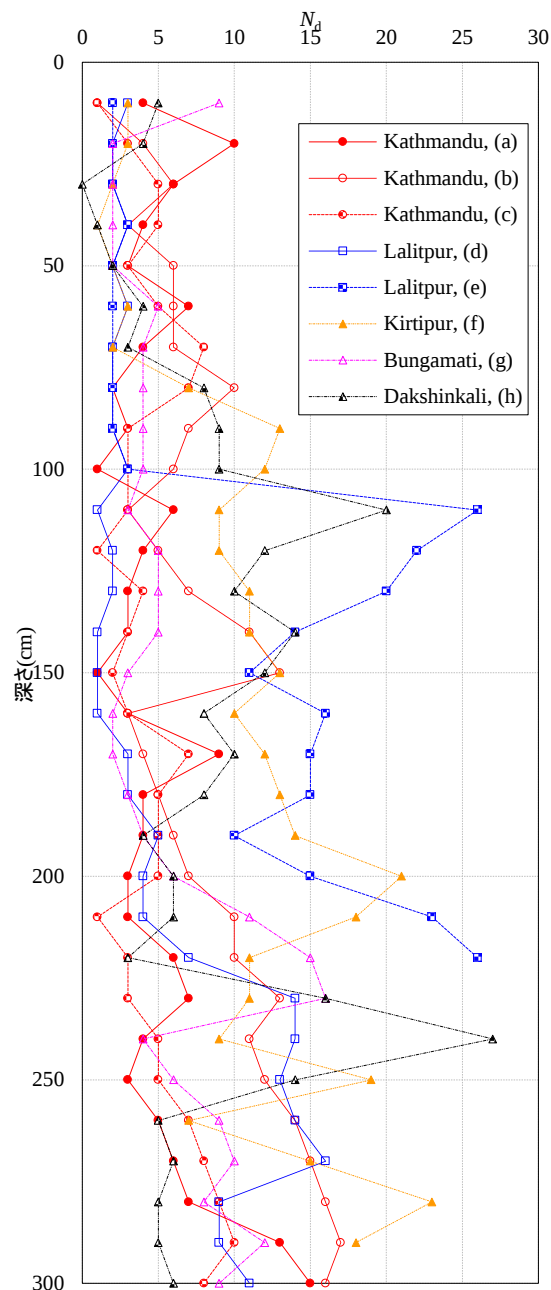
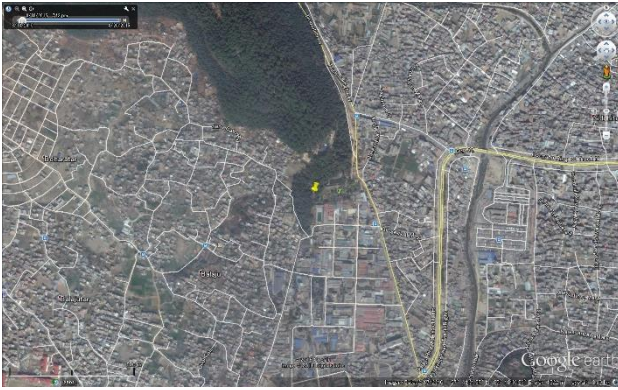


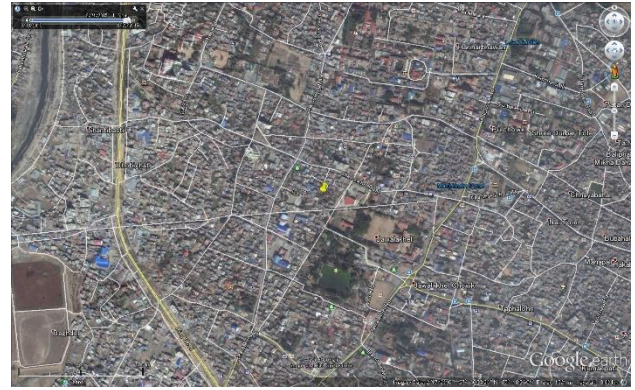
図-2 深さ～ N_d 関係（全 8 地点）



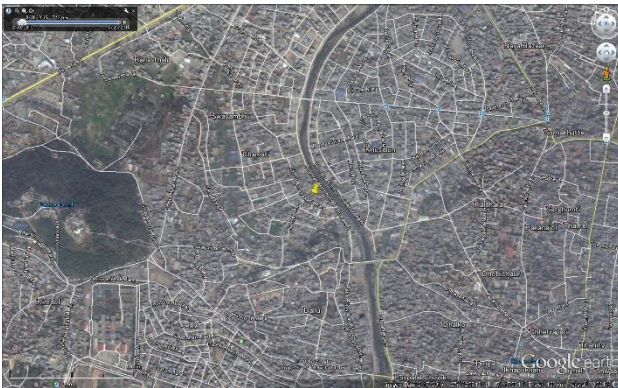
写真-1 貫入状況・現地状況の例



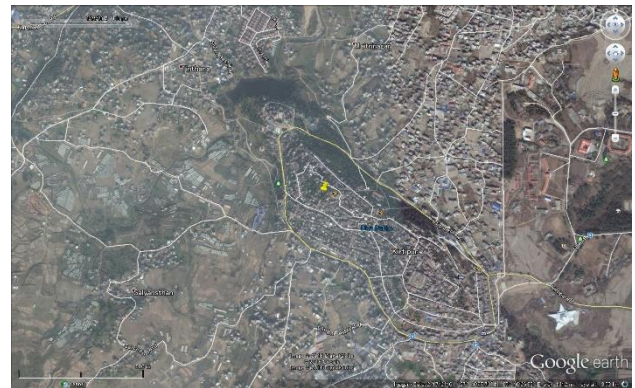
(a) Kathmandu, Balaju Park 近傍



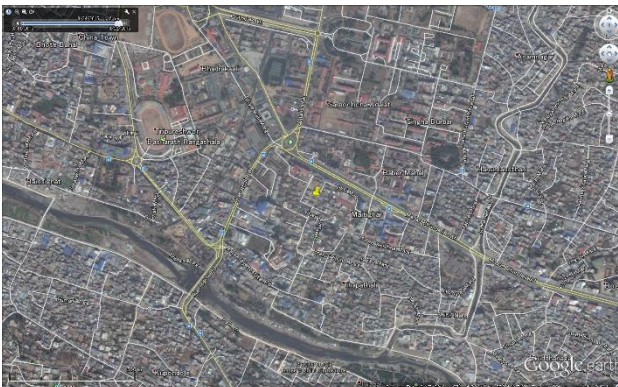
(e) Lalitpur, KISC school 近傍



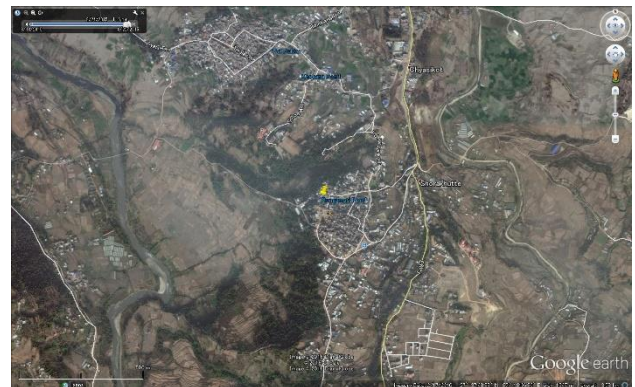
(b) Kathmandu, Vishnumati 川近傍



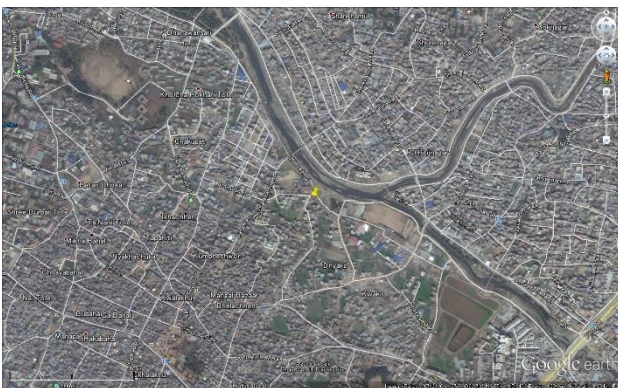
(f) Kirtipur, Uma Maheshwor Temple



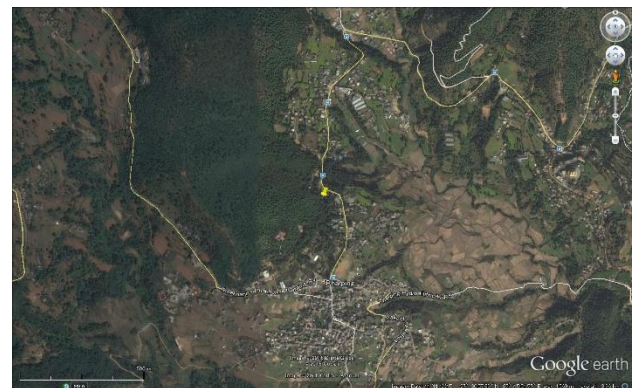
(c) Kathmandu, Hotel Kido



(g) Bungamati, Bungadaya 寺院近傍

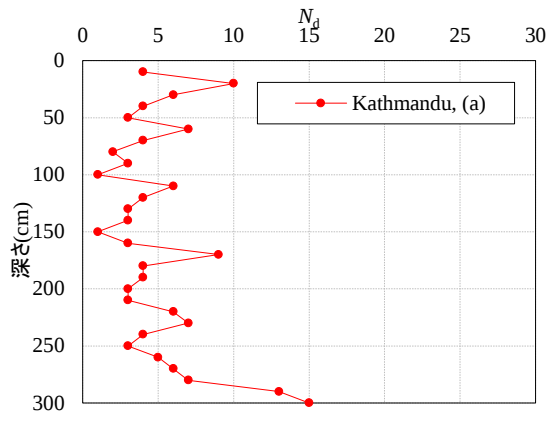


(d) Lalitpur, Bagmati 川近傍

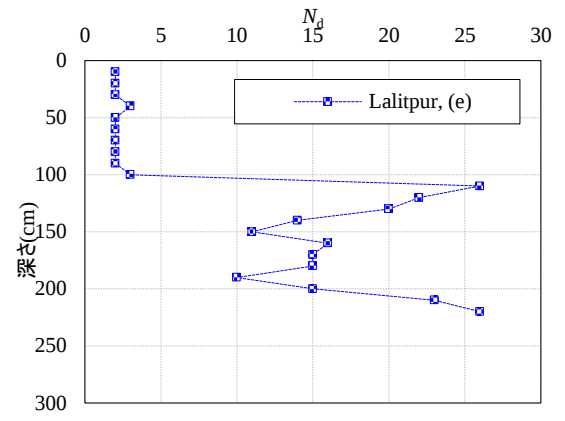


(h) Dakshinkali, Narayan 寺院近傍

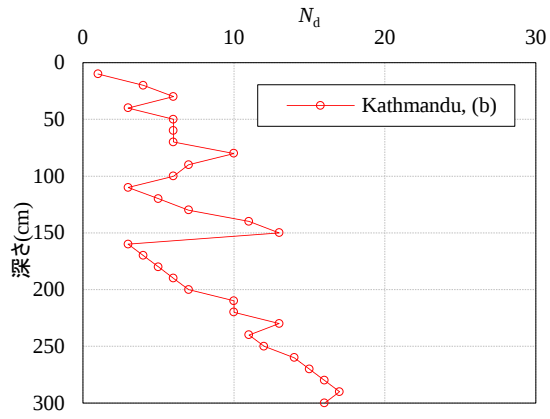
図-3 調査地点ごとの位置概要 (Google Earth)



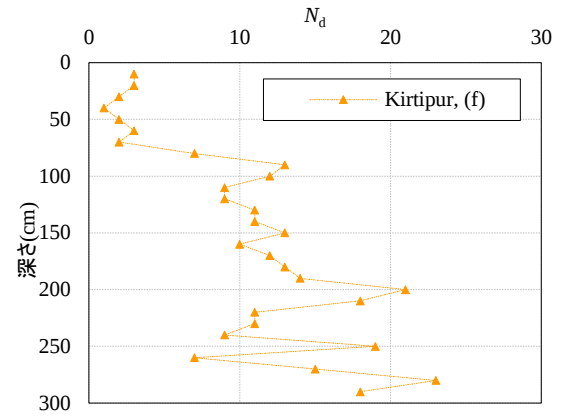
(a) Kathmandu, Balaju Park 近傍



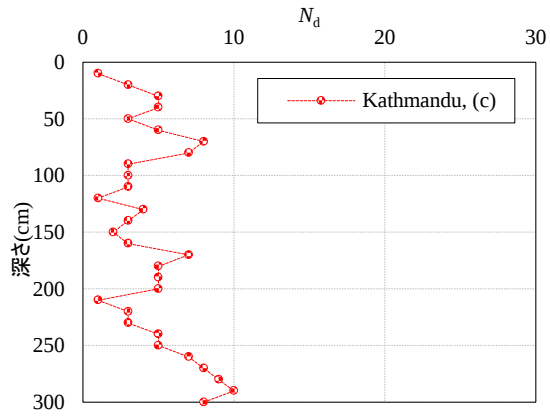
(e) Lalitpur, KISC school 近傍



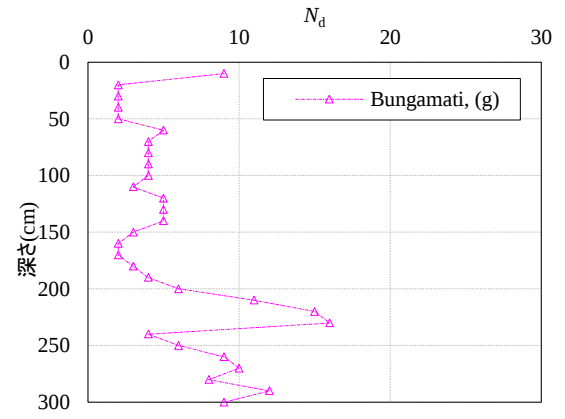
(b) Kathmandu, Vishnumati 川近傍



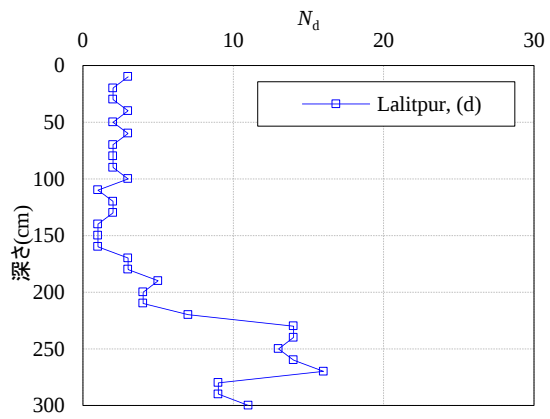
(f) Kirtipur, Uma Maheshwor Temple



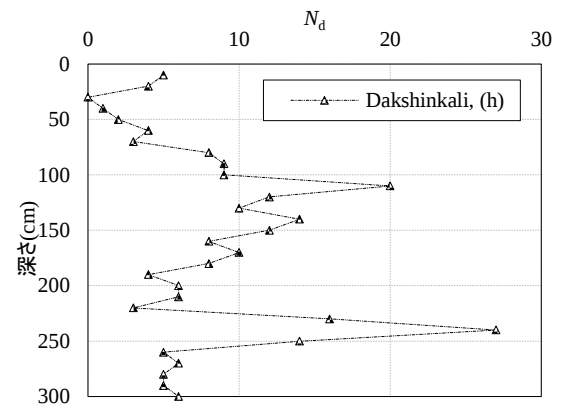
(c) Kathmandu, Hotel Kido



(g) Bungamati, Bungadaya 寺院近傍



(d) Lalitpur, Bagmati 川近傍



(h) Dakshinkali, Narayan 寺院近傍

図-4 深さ～ N_d 関係 (地点ごと)

3. 常時微動観測概要と観測結果

地表構造物の地震動被害に対するサイト増幅特性の影響を検討する目的で、盆地中央部に位置する Kathmandu・Lalitpur と、盆地北東端部に位置し最も甚大な構造物被害⁵⁾が報告されている Sankhu の2地域において、全6地点で常時微動の単点観測を行った。図-5に各観測点の位置を示す。常時微動の3成分記録の水平動/上下動スペクトル比（H/V スペクトル）は、地盤のサイト増幅特性を表現するという観測事実が広く知られており、特にH/V スペクトルのピーク周期は地盤の固有周期として解釈され、防災目的で利用されることが多い⁶⁾。

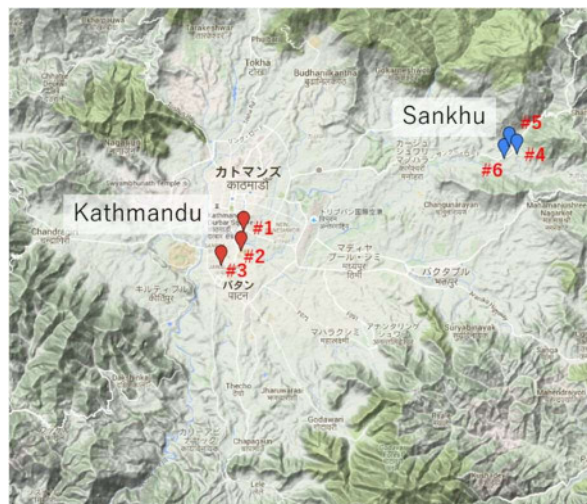


図-5 常時微動の観測点位置 (©2016 Google)

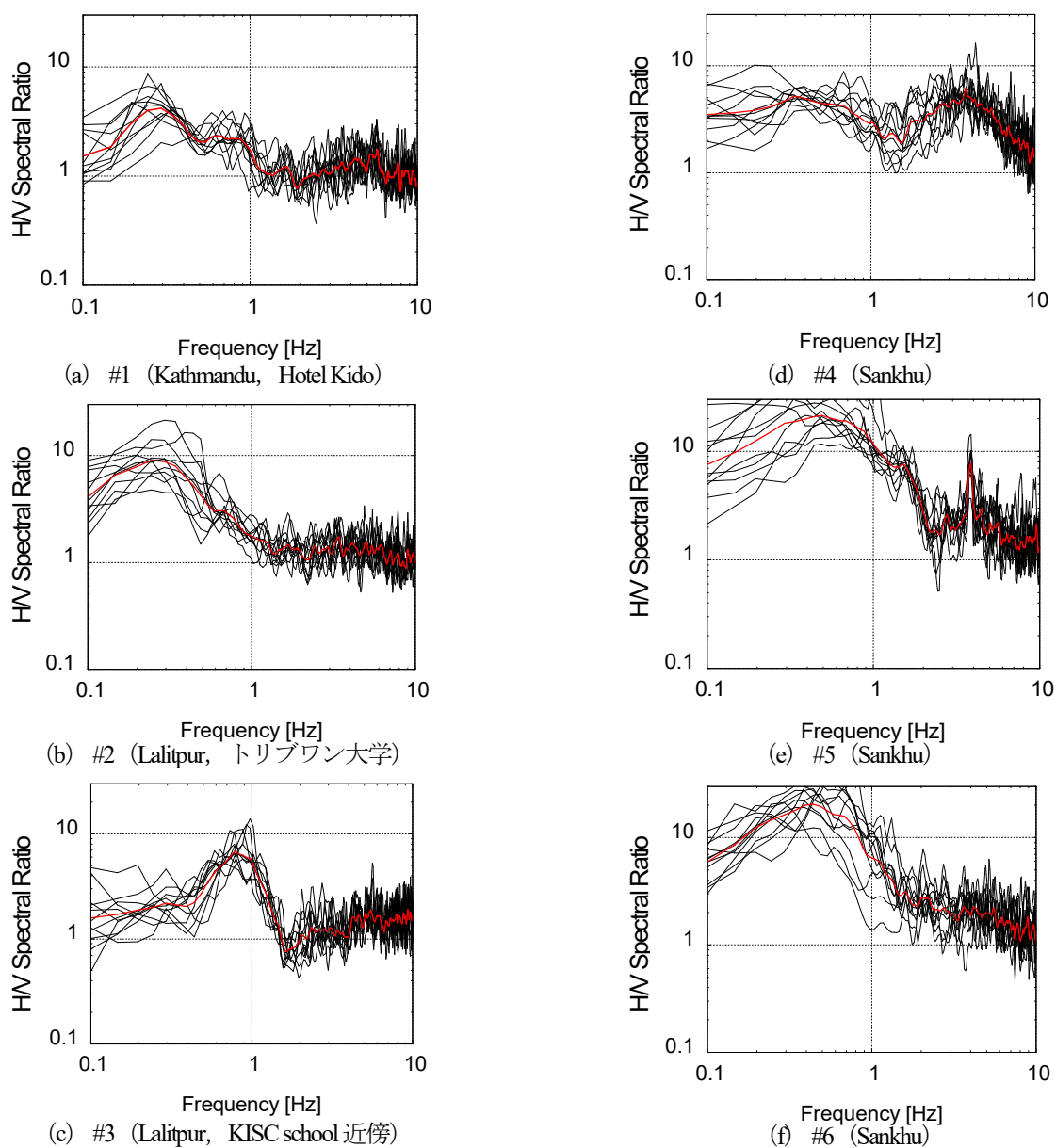


図-6 観測点における H/V スペクトル

データの処理においては、観測時に記録したセンサーのステップ応答から後処理によって計機補正を行っている。

図-6 (a) ~ (f) に各観測点で得られた H/V スペクトルを示す。H/V の導出においては、観測記録から突発的なノイズの影響の少ないセグメントを抽出し、各セグメントにおける速度記録のフーリエ変換の水平動 2 成分の二乗平均と上下動成分の比を求め、それらのセグメント間の平均を算出した。また、観測時とは別に計測したデータロガーのサーキットノイズと観測記録のフーリエスペクトルの比較を図-7 に示す。同図からは、長周期帯では 0.5Hz 程度まではノイズの影響を受けずに観測できているものと判断される。

図-6 (a) ~ (c) の Kathmandu・Lalitpur (盆地中央部) における記録は概ね 1Hz よりも長い周期にピークを有しており、こうした長周期帯に地盤が固有周期を有しているとする、同地域での本震記録が長周期にピークを持つ特性を有していること 7) や、カトマンズ市内の被害が軽微であったこと 5) と整合的である。一方で、図-6 (d) ~ (f) の Sankhu (盆地北東端部) での (d) #4, (e) #5 の記録は 3~4Hz (0.25~0.33 秒) の短周期帯にピークを有しており、同地域における構造物被害の要因としてサイト増幅特性の影響を推察させるものである。

4. 動的なコーン貫入抵抗と常時微動の観測結果に関する一報告

表層地盤が緩い場合などには比較的長い周期が卓越し、表層地盤が固い場合などには比較的短い周期が卓越することが知られている。Kathmandu の Hotel Kido (図-4 (c) と図-6 (a)), Lalitpur の KISC school 近傍 (図-4 (e) と図-6 (c)) では動的なコーン貫入抵抗と常時微動の両方を観測している。動的なコーン貫入抵抗から Hotel Kido (図-4 (c)) の方が KISC school 近傍 (図-4 (e)) より緩かった。常時微動の観測結果から Hotel Kido (図-6 (a)) の方が KISC school 近傍 (図-6 (c)) より長い周期が卓越していた。このことから、比較的緩い地盤で長い周期、比較的固い地盤で短い周期が卓越する傾向がみられたといえる。

5. おわりに

本報告では、カトマンズ盆地の地盤構造に関する知見を得る目的で、2015 年 8 月、2016 年 3 月に簡易動的コーン貫入試験機及び微動計を用いた現地調査 (動的なコーン貫入抵抗と常時微動計測) を行った。

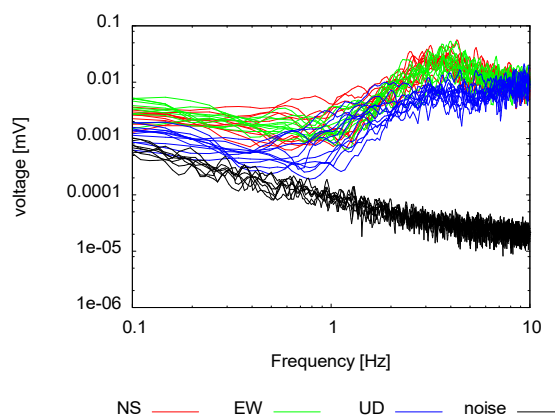


図-7 微動記録のフーリエスペクトルとサーキットノイズのフーリエスペクトルの比較

動的なコーン貫入抵抗を示す簡易動的コーン貫入試験による N_d 値は、カトマンズ盆地中央部の多くにおいて 15 以下を示し、緩い表層土・緩い地盤が広く堆積していることがわかった。特に河川が分岐する地点近傍で N_d 値が 5 以下の特に緩い表層土が 200cm 以上連続していることがわかった。このことは既往の調査報告にある「Kathmandu のリングロード内は、RC 枠組を有する住宅が多く存在し、傾いた建物は川沿いの特に川が分岐する地点の軟弱地盤領域に被害が点在する」5) ことと整合すると考える。緩い地盤が川沿いに多いことは液状化現象が考えられる。

常時微動観測から、盆地中央部 (Kathmandu・Lalitpur) における記録は概ね 1Hz よりも長い周期にピークを有していることがわかった。こうした長周期帯に地盤が固有周期を有しているとする、同地域での本震記録が長周期にピークを持つ特性を有していること 7) や、カトマンズ市内の被害が軽微であったこと 5) と整合的である。また、盆地北東端部 (Sankhu) での記録は 3~4Hz の短周期帯にピークを有することがわかった。構造物被害の要因としてサイト増幅特性の影響が推察される。

Kathmandu と Lalitpur で 1 箇所ずつ簡易動的コーン貫入試験と常時微動の両方を観測した。その結果、比較的緩い地盤で長い周期、比較的固い地盤で短い周期が卓越する傾向がみられた。

今後、組積造に最も影響を及ぼす卓越周期などを明らかにし、建物構造 (木造, RC, 組積造 (レンガ) など) と被害特性 (液状化, 倒壊など), 地盤特性 (N_d 値, 卓越周期など) を関連づけていきたい。

謝辞: 本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構の国際緊急共同研究・調査支援プログラム (J-RAPID) (代表者: 風間ふたば (山梨大学)) により実施された。本研究の一部は、地球規模課題対応国際科学技術

協力プログラム（SATREPS）（代表者：風間ふたば（山梨大学））、国土交通省の河川砂防技術研究開発公募地域課題分野（砂防）（代表者：荒木功平（山梨大学））のご支援をいただきました。ここに深甚の謝意を表します。また、トリブワン大学、現地の関係者など多くの方に多大なご支援・ご協力をいただきました。ここに深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) CNN.co.jp：ネパール地震 観光名所の寺院や塔にも甚大な被害，
<http://www.cnn.co.jp/world/35063763.html>，2015年4月27日，（2016年8月16日閲覧）
- 2) 読売新聞（YOMIURI ONLINE）：ネパール地震死者5100人超…日本隊現地入り，
<http://www.yomiuri.co.jp/feature/matome/20150512-OYT8T50097.html>，2015年4月29日，（2016年8月16日閲覧）
- 3) 吉田勝，B.N.ウブレティ：中部ヒマラヤ巨大地震とカトマンズの危機，
http://www.geocities.jp/gondwanainst/2006president-address/earthquakektm_822fullmsjp.pdf，（2016年8月16日閲覧）
- 4) （社）地盤工学会：地盤調査の方法と解説（訂正第3刷），pp.274-279，2007.
- 5) 防災科学技術研究所：2015年4月ネパール地震（Gorkha地震）第1次被害調査報告，
http://www.bosai.go.jp/saigai/2015/pdf/20150611_01.pdf，（2016年8月19日閲覧）
- 6) 湊文博，秦吉弥，山田雅行，常田賢一，鉦田泰子，魚谷真基：高密度常時微動計測に基づく和歌山県串本町における南海トラフ巨大地震の強震動評価と津波避難に及ぼす影響，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.71，No.4，pp.L123-L135，2015
- 7) Center for Engineering Strong Motion Data，
<http://www.strongmotioncenter.org/>，（2016年8月19日閲覧）

（2016.*.*受付）

A REPORT ON DYNAMIC CONE PENETRATION RESISTANCE AND MICROTREMOR IN THE KATHMANDU VALLEY

Kohei ARAKI, Takashi MIYAMOTO, Takashi NAKAMURA,
Kei NISHIDA and Takeyasu SUZUKI

Collection of documents and field surveys were carried out for the sake of investigating property and structure of surface ground, and analyzing relationship between them and structural damages. Simplified penetration test and microtremor observation were conducted. The results show that assumed soil properties are consistent with damage situation, and there is some possibility for ground structure to have large effects on damage of underground infrastructures.