

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02631

研究課題名(和文)ネパール・ポカラの地理特性が地盤災害リスクに及ぼす影響評価と防災への反映

研究課題名(英文)Risk assessment associated with geotechnical problems Pokhara City, Nepal

研究代表者

清田 隆 (Kiyota, Takashi)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：70431814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ネパール・ポカラ地域の地理特性に起因する地盤災害リスクの評価を目的とし、現場調査技術を活用して調査を実施した。調査対象は、アルマラ地区の地盤陥没、および市街地の液状化リスク評価である。アルマラ地区の地盤陥没の要因として、当該地は浸食されやすい地盤で構成されている事、および水みちとなる旧河道が存在していることが示された。また、表面波探査と簡易動的貫入試験から将来の陥没発生箇所を評価できる可能性を示した。ポカラ市街地では、液状化発生の可能性が高いと懸念されていた地区の踏査と原位置試験を行った。その結果、当該地区は地下水面との比高が高く、液状化のリスクは非常に低いことが判った。

研究成果の概要(英文)：In order to assess the risk associated with sinkhole problem and earthquake-induced liquefaction in Pokhara, Nepal, a series of field survey, including surface geological reconnaissance, were conducted in Armala area and the city area. A number of sinkholes have been occurring in Armala area since November 2013. Although immediately after the sinkhole event, most of the sinkholes were backfilled by using local sandy and gravelly soils, they were re-activated during the rainy season. The surface geological reconnaissance suggested that the sinkholes are distributed along the old Duhuni Khola or the old Kali Khola. The results also indicate that it would be possible for cavities to be detected by using mini-ram sounding and surface wave test. In the city area, liquefaction assessment was conducted by means of mini-ram sounding. It was found that the city area has a low potential for liquefaction because of soil condition and deep ground water table.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤陥没 表面波探査 UAV 動的コーン貫入試験 液状化

1. 研究開始当初の背景

ネパール第二の都市・ポカラでは、2013年11月より多数の陥没孔が出現している。陥没孔は住宅地とその周辺の田畑で発生しており、周辺の約50世帯が移転を余儀なくされた。本研究の準備段階として、代表者らは2014年6月に現場調査を実施したが、地元政府は発生した陥没孔を単純に埋め戻しているだけであった。陥没発生地域を流下する地下水は相当の濁度を示し、埋戻し土も細粒流出していたことから、将来的に陥没の発生は継続するものと考えられ、早期のメカニズム解明が必要であった。また、ポカラは1800年代から時折地震を起こしている断層群の活動空白地帯に位置し、将来の地震リスクが高い地域でもある。ポカラ市街地は低地であることから地震時の液状化被害が懸念されていたため、そのリスク評価が必要であった。

2. 研究の目的

本研究は、ヒマラヤ山脈から供給される独特の地盤と地形で構成されるポカラにおいて、上記の地盤災害リスクの評価を行うことを目的とした。陥没孔については、発生メカニズムとその予測手法を検討するため、表面波探査とラムサウンディングを主体とした現場調査、および UAV による地形判読を実施した。また、市街地における液状化リスクについては、既存のリスク評価において液状化の発生が懸念されているエリアを対象に、ラムサウンディングにより地盤の液状化可能性を検討した。

3. 研究の方法

本研究における現場調査は、予備調査を含め、2014年～2017年にかけて計7回実施した。調査地の概要を図1に示す。

陥没孔の分布域の特定や調査範囲の決定に際して、入手可能な地形図は最も縮尺が小さいもので5万分の1であり、詳細な地形や地質の把握は困難であった。このため、UAVを利用した地形図作成を行った。調査地上空を高度150m～500mから4K/25fpsの動画撮影を行った。撮影された動画を15フレーム毎に切り出し静止画に変換した後、同一物体を撮影した複数の写真から対象物体の形状を推定 (Structure from Motion, SfM) して、3次元の地形データ (DSM, Digital Surface Model) を構築した。

陥没孔の発生メカニズムの推定には地盤内部構造を把握することが重要である。本研究では、地盤の緩みを把握する目的でレイリー波を利用した表面波探査を行い、地盤内のせん断波速度分布を推定した。また、地盤強度を直接的に把握するため、ミニラムを使用した動的貫入試験も実施した。なお、ミニラムは市街地における液状化リスク評価に対しても利用した。

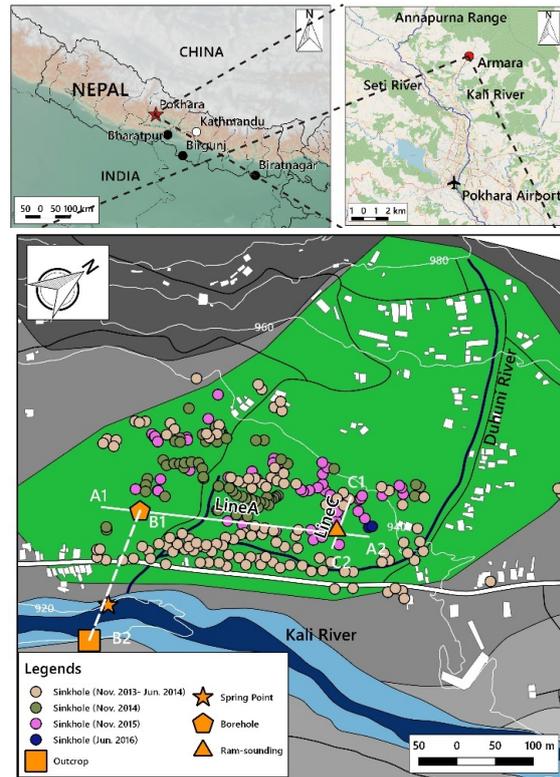


図1 調査地と陥没孔発生地点の概要図

4. 研究成果

(1) UAV を用いた地形判読と現場踏査

UAVにより作成された地形モデルは絶対座標を持たないため、本研究では高精度のDGPS(Differential Global Positioning System)を用いて、地上に設置した9個のターゲットの緯度、経度及び標高の計測を行った。これらを用いて地形モデルの全点に対してアフィン変換を行い、点群に絶対座標を与えた。図2に解析の結果であるDSMと正射画像(オルソフォト)を示す。

現地踏査とDSMによる地形把握から、現地は主にKali川による河岸段丘とDuhuni川による扇状地から構成されていることが判明した。特にDSMの傾斜角の変化から河岸段丘は年代が古いものから4種に分けられると考えられた。

(2) 表面波探査結果

測線位置と計測結果を図3,4に示す。表面波探査は異なる時期において5回実施した。測線の位置は、陥没孔の発生状況と比較検証が可能な地点に設置した。また地元住民の農作業や表層の状態などを考慮しているため、測線の長さ、開始点は調査年月ごとに若干異なる。図4の縦軸(深度)のスケールは表面波探査の測線展開長から15mに設定している。Line A1'は初期に陥没孔が集中的に発生した場所に位置している。Line Aは途中道路を挟むためLine A1とLine A2に分割されている。なお、各せん断波速度分布の右下にあら

る数字は凡例の番号と対応する。

2015年に実施したボーリング（図3参照）ではGL-2mまではシルト層が広がり、GL-4mまで砂礫層が広がる。またGL-7.5mまでは粘土層が存在するが、それ以深GL-10mまでは空洞が確認された。N値は、地表からGL-3mまでは15~18程度であり、それ以深では50以上であった。

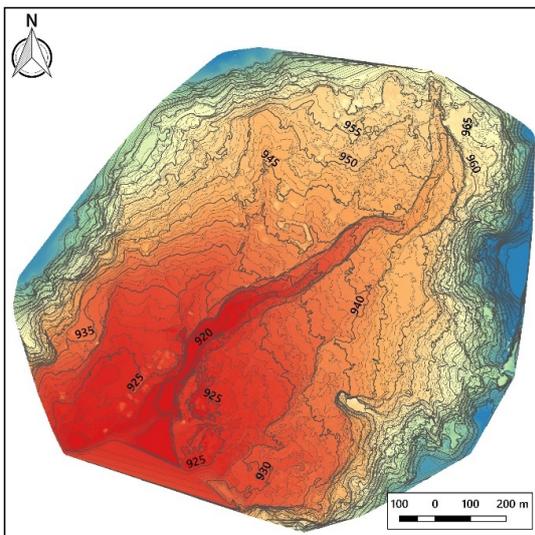
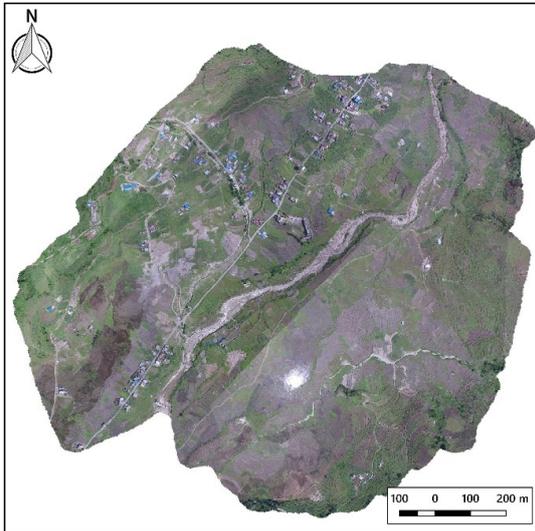


図2 UAVによる正射画像(上)とDSM(下)



図3 表面波探査測線位置

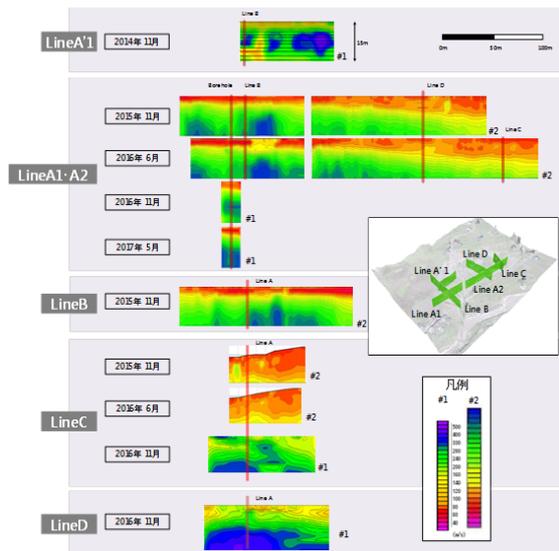


図4 表面波探査の実施結果

Line A1, A2の検層結果においても、この境界面は明瞭に表れている。2015年11月と2016年6月のLine A1, A2の結果では距離程が進むほど、この境界面の深度が増している。しかし、DSMから作成したLine A1, A2の標高分布では、地盤標高と境界面(赤と黄)の深度変化はほぼ同じ割合である。このためボーリング地点でGL-4m付近に存在した粘土層は、その標高を保ちながらLine D、Line Cまで広がっていると考えられ、その上の砂礫層はLine D、Line Cに近づくにつれて厚みを増していると考えられる。なお、Line B、Line C、Line DとLine A1, A2の交差点において、せん断波速度分布は概ね整合的である。

ボーリングで空洞が発見されたLine A1, A2のGL-7.5m~10mのせん断波速度分布は、計測時期によって大きく異なっている。2015年11月、2016年6月、2017年5月において、該当位置のせん断波速度は200~240m/sである一方、2016年11月では400m/sを超える。また分布の形状も異なり、2015年11月、2016年6月はせん断波速度の低い領域が周囲と比較して下に落ちくぼんでいるように見える。一方、2016年11月は330m/s程度の高せん断波速度の領域が空洞位置に存在し、その下のせん断波速度は240m/s程度と小さくなっている。この原因の詳細は不明であるが、計測時期により空洞の構造(充填状況)が変化した可能性も考えられる。

(3) ミニラムサウンディング結果

測定位置と結果を図5、図6に示す。RAM 1~3は2016年11月に実施し、RAM 4~9は2017年5月に実施された。図6のオレンジ色の線は貫入不能深さを表し、濃い灰色で表されている範囲は表面波探査の結果から推定された砂礫層である。またボーリングで発見された空洞を緑色で記す。なお、換算N値は全てトルクを考慮した粘性土の式を用いている

ため、砂礫層の位置では実際の N 値はより高い値である可能性がある。またトルクレンチで計測可能な最大値が 100N・m であり、ロッドがこの値を超えても回転しない場合にはトルクを 100N・m として計算した。

RAM 1 では GL-2m までは換算 N 値が 10 以下であるが、それ以降は 20 程度まで上昇する。RAM 2, 3 でもこの傾向は顕著であり、RAM 2 では GL-6m、RAM 3 では GL-10m 付近から換算 N 値の上昇が見られる。しかし、RAM 1 においてボーリングで空洞が存在した位置では、N 値の低下は確認されなかった。一方、2017 年 5 月の調査では、RAM 4 の GL-2m~3m においてロッドが自沈した。RAM 4 は全体的に換算 N 値が 5 前後と非常に低く、その範囲は GL-13m 程度まで分布している。一方、RAM 5, 7, 8 はいずれもロッドの打撃回数が 200 回を超えたため、それぞれ 2.6m, 8.6m, 6.0m で貫入を終えている。RAM 9 は GL-2m で一旦換算 N 値が 20 程度になった後、GL-3~4m で換算 N 値は 1~2 と低下した。その後、GL-6m で最大値 30 を記録した後、GL-14m まで換算 N 値が 10 を下回る層が分布している。

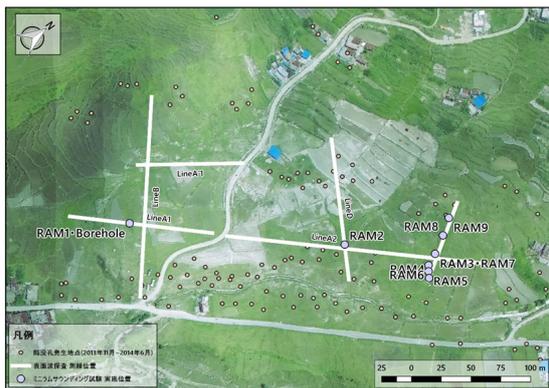


図 5 ミニラムサウンディング調査位置

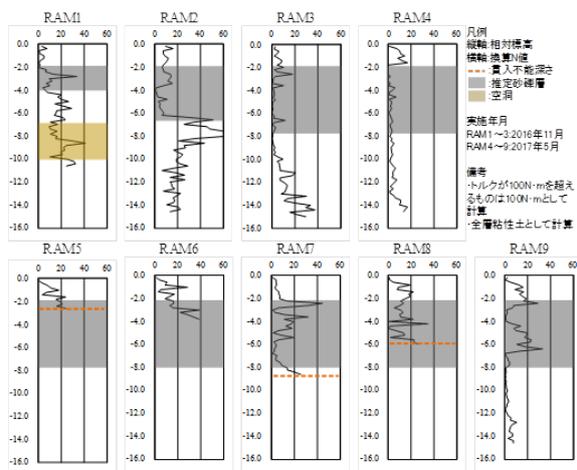


図 6 ミニラムサウンディング試験結果

(4) 陥没孔発生メカニズムの推定

現場踏査とボーリングにより確認された地層区分を考慮すると、調査地（アルマラ地区）の形成過程は以下のように推定される。

1. 更新世から完新世にかけて Seti 川上流部で発生した土石流によって Pokhara 段丘と Ghachok 段丘が形成された。この際 Kali 川が閉塞され、現在のアルマラ地域は湖であったと考えられる。
2. その後の土石流によって上流からシルトや砂が供給され湖底に堆積した。(ボーリングにおける GL-4m 以深のシルト層と粘土層に相当)
3. 湖の水位が低下し、Kali 川は現在の位置よりも北側に流路を変えながら流れた。この際 Kali 川上流からの礫層が堆積した。
4. Duhuni 川上流で発生した土石流によって砂から礫を含む堆積物が形成された。

上記より、推定される陥没孔発生メカニズムとして以下の 2 つが挙げられる。

- ① 現場では、2012 年ごろより河道掘削が行われた。これにより地盤内の動水勾配が増加した結果、上記 2 の湖成シルト・粘性土層に挟まれた砂層内の地下水流速が上昇し、それによって細粒分が流出し、砂層の上方に空洞が広がり陥没が生じた。
- ② 地下水面の低下に伴い、シルト層の上面に水みちが形成される。その後シルト層が下刻され、上部の礫質土との間に空洞が生じ、空洞がある程度大きさに成長した時点で崩壊し、陥没孔となった。

これらの仮定と各種地盤調査との整合性を検証する。図 7 に示す断面 AD における標高分布を図 8 に記す。使用した DSM は 2016 年 6 月に UAV で撮影されたものである。



図 7 断面図 (図 8,9) の位置と推定旧河道

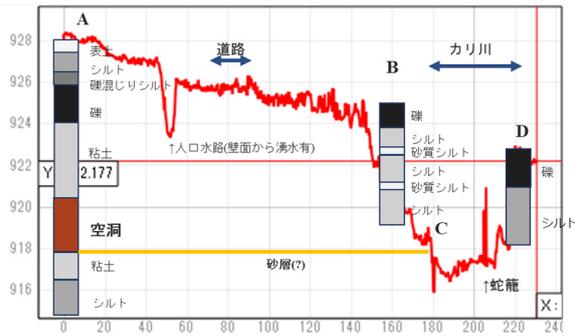


図8 断面ADの地盤構成

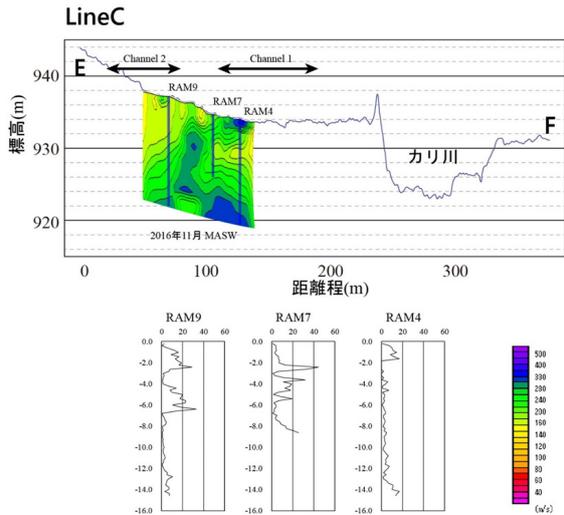


図9 断面EFの原位置地盤調査結果

まず地点Aで確認された空洞は、地点B、地点Dで発見されたシルト層の標高と整合的である。また地点D付近で発見されたパイピング痕の下面は、空洞の下面の高さとほぼ同じであると考えられる。現場で確認された砂層からの水の滲出が見られた地点Cの高さも、空洞の下面の高さとほぼ等しい。このため、断面ADにおいて標高918m付近に砂層が連続的に存在することが判る。この砂層は、メカニズム①で記したような陥没孔発生の原因の一つであると考えられる。

一方、この砂層の標高を図4の表面波探査のLine A1の結果と照合すると、せん断波速度200m/s付近であることが分かる。この砂層が同じ標高に分布していたと仮定すると、Line Aの地表面標高変化から、この砂層領域はLine Aの距離程が大きくなる(右に進む)につれてその深度を増加させ、Line Dとの交点ではGL-15m、Line Cとの交点ではGL-20m程度に存在すると考えられる。

一方、メカニズム②で示した上部の砂礫層とシルト層の境界面は、前述の表面波探査結果のようにほぼ全域に渡って見られる。またカリ川の旧河道が存在した場所は粒径が大きい礫が堆積しやすく、そのため地下水流が付近と比較して速かったと考えられる。これよ

り、発生当初の陥没孔の発生位置はカリ川旧河道を表すと考えられる。図7に示すように、陥没孔の発生箇所は大きく分けて3つのエリアに分かれ、それぞれ現在のカリ川河道にほぼ平行である。ここで図9に断面EFにおける標高分布と原位置地盤調査結果を記す。表面波探査測線Cの結果は推定旧河道の位置と整合的である。Channel 1とChannel 2に相当する範囲では、せん断波速度200m/sの低速度領域が深度10m程度まで広がっている。またこの区間で行われたミニラム試験のRAM4とRAM9においても、ロッドの自沈あるいはほぼ換算N値が0の深度が存在した点も共通である。一方、推定旧河道に挟まれた領域では、のせん断波速度が300m/s程度と高い層が上に位置している。RAM7の結果も、GL-8mで貫入不能となっており、元の地山である比較的硬いシルト質の地盤が残存していると推定される。

このように、今回の研究対象地としたアルマラ地域は、更新世から完新世の湖成堆積層とその後のカリ川の河道の変遷によって、シルトあるいは粘土が透水性の高い砂層や礫層に挟まれる形となったと推定される。そして、2012年頃に行われたカリ川の河道掘削工事によって地盤内の動水勾配が増加したことにより地盤内部の浸透流の流速が上昇し、シルト・粘土層が上下から浸食される形となったと考えられる。

(5) 市街地における液状化リスク評価

ポカラ市街地は低地にあり、特に図10に示す地域では、その地形から液状化の危険性があることがUNDP (2009)によって示されていた。本研究では、この液状化リスクが高いとされる地域において、ミニラムサウンディング試験を実施した。

図10と11にそれぞれ調査位置図とミニラムの結果を示す。なお、ミニラムは50m程度離れた2地点で実施し、調査深度は11mと5mである。

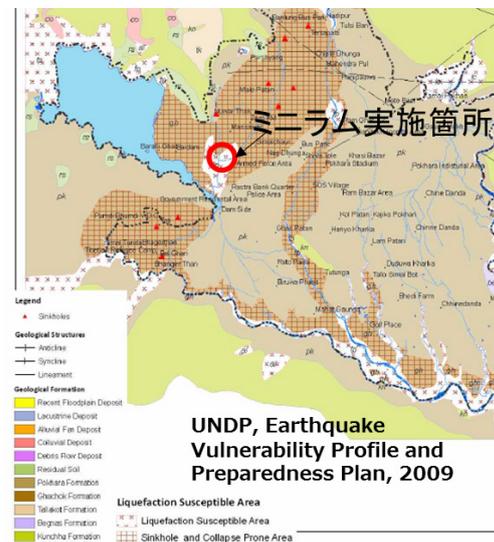


図10 液状化を対象としたミニラム調査箇所

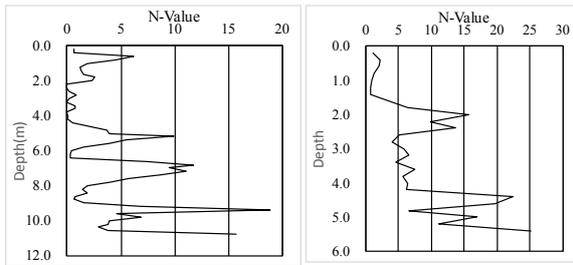


図 11 ミニラムサウンディング試験結果

結果より、当該地は N 値 10 以下程度の地盤で構成されており、深度によって N 値 3 回以下の非常に緩い状態を呈する。しかし、ロードの付着する土質は粘性土であり、地下水位は今回の調査では確認されなかった。

当該地域には小河川が流れているが、液状化リスクが懸念される地域の標高は河道と比べて数 m~10m 程度高く、地下水位はかなり低いところにあるものと考えられる。結果として、当該地区を構成する地盤種別、および地下水位の観点からは、液状化の発生リスクは非常に低いことが確認された。

既存の液状化評価は地形判読によるものであったが、研究は原位置調査を踏まえたリスク評価の重要性を示す好例となった。

(6) まとめ

本研究では、ネパール・ポカラ地域の地理特性に起因する地盤災害リスクの評価を目的とし、現場調査技術を活用して調査を実施した。調査対象は、アルマラ地区の地盤陥没、および市街地の液状化リスク評価である。アルマラ地区の地盤陥没の要因として、当該地は浸食されやすい地盤で構成されている事、および水みちとなる旧河道が存在していることが示された。また、表面波探査と簡易動的貫入試験から将来の陥没発生個所を評価できる可能性を示した。ポカラ市街地では、液状化発生の可能性が高いと懸念されていた地区の踏査と原位置試験を行った。その結果、当該地区は地下水面との比高が高く、液状化のリスクは非常に低いことが判った。

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 6 件)

1. Pokhrel, R. M., Kiyota, T., Kuwano, R., Chiaro, G., Katagiri, T. and Arai, I. (2015): Preliminary field assessment of sinkhole damage in Pokhara, Nepal, International Journal of Geoenvironment Case Histories, Vol. 3, Issue 2, pp. 113-125.
2. Chiaro, G., Kiyota, T., Pokhrel, R. M., Goda, K., Katagiri, T. and Sharma, K. (2015): Reconnaissance report on geotechnical and structural damage caused by the 2015 Gorkha Earthquake, Nepal, Soils and Foundations, Vol. 55, No. 5, pp. 1030-1043.

3. 志賀正崇, 清田隆, 桑野玲子 (2017): UAV と表面波探査によるネパール・ポカラの地盤陥没メカニズムの調査, 生産研究, Vol. 69, No. 6, pp. 67-72.

[学会発表] (計 8 件)

1. Pokhrel, R.M., Kiyota, T., Kuwano, R., Chiaro, G., Katagiri, T. (2015): Site investigation of sinkhole damage in the Armala area, Pokhara, Nepal, International Conference on Geotechnical Engineering, Colombo.
2. Kuwano, R., Kiyota, T., Pokhrel, R. M., Katagiri, T., Ikeda, T., Yagiura, Y., Yoshikawa, T. and Kuwano, J. (2016): Investigation into the multiple recent sinkholes in Pokhara, Nepal, The 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016), UK.
3. 志賀正崇, 清田隆, 桑野玲子, 片桐俊彦, 池田隆明, 柳浦良行, 武政学, 吉川猛, Pokharel, R. M., 小長井一男 (2017): ネパール・ポカラにおける地盤陥没被害の概要と現地調査, 第 52 回地盤工学研究発表会, 名古屋.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://www.gdm.iis.u-tokyo.ac.jp/research_field.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

清田 隆 (KIYOTA, Takashi)
 東京大学・生産技術研究所・准教授
 研究者番号：7 0 4 3 1 8 1 4

(2)研究分担者

桑野 玲子 (KUWANO, Reiko)
 東京大学・生産技術研究所・教授
 研究者番号：8 0 3 1 2 9 7 4

(3)連携研究者

- ・池田 隆明 (IKEDA, Takaaki)
 長岡技術科学大学・工学研究科・教授
 研究者番号：4 0 4 4 3 6 5 0
- ・片桐 俊彦 (KATAGIRI, Toshihiko)
 東京大学・生産技術研究所・技術専門職員
 研究者番号：7 0 7 2 4 4 5 9

(4)研究協力者

- ・柳浦 良行 (YAGIURA, Yoshiyuki)
 基礎地盤コンサルタンツ株式会社