# 2015年ネパール・ゴルカ地震による 高速道路盛土部とその周辺部の亀裂及び段差の 発生原因に関する考察

志賀 正崇<sup>1</sup>・小長井 一男<sup>2</sup>・Rama Mohan POKHREL<sup>3</sup>・池田 隆明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 大学院生 横浜国立大学 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5) E-mail:shiga-masataka-ft@ynu.jp

2フェロー会員 横浜国立大学 教授(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ケ谷区常盤台79-1)

E-mail:konagai-kazuo-gh@ynu.ac.jp

<sup>3</sup>国際会員 Earth Investigation and Solution Pvt. Ltd. 代表取締役社長(TU Rd, Kirtipur 44618, Nepal) E-mail:pokhrelrmohan@gmail.com

<sup>4</sup>正会員 教授 長岡技術科学大学 大学院工学研究科(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1) E-mail:ikeda@vos.nagaokaut.ac.jp

2015年4月に発生したMw7.8のネパール・ゴルカ地震では中部盆地地域と北部山岳地域において多くの 地盤災害が発生した.特に首都カトマンズでのハイウェイの谷埋め盛土と周辺の丘陵地では谷側に滑り落 ちる方向に土塊が動き,最大長さ400mに渡って亀裂及び段差が生じた.この地盤変状の発生メカニズム を検討するために,筆者らは現地において表面波探査,標準貫入試験,簡易コーン貫入試験と放射性炭素 年代測定を行った.これらの結果と既往の報告から現地には地下2~3mと4~9mに有機質土層と砂層が存在 することが判明した.

Key Words : 2015 Gorkha earthquake of Nepal, Kathmandu, Ground Fractures, Settlement, Field Investigation

#### 1. はじめに

2015年4月25日,ネパール連邦民主共和国(以下ネパー ル)ゴルカ郡においてMw7.8のネパール・ゴルカ地震が発 生した.震源地は首都カトマンズ(Kathmandu)の北北西 67kmに位置し震源の深さは8.2kmであり,ネパール中部 の広い範囲が最大でレベル9(メルカリ震度階)の揺れに 襲われた.また5月12日にはカトマンズの東北東71kmの ドラカ(Dolakha)郡においてMw7.3の余震が発生し<sup>1)</sup>,本震 と余震を含めた公式発表による犠牲者は2015年12月時点 で8891人,被害損失額は71億ドルと推計されている<sup>2</sup>.

この地震においてはネパール各所で地震による被害が 報告されており,カトマンズの北約60kmのランタン (Langtang)では雪,破砕した氷河氷,岩石の混合した重 力流が発生し,集落が壊滅した<sup>3</sup>.

一方,首都のカトマンズでも地震による被害が発生した.図-1はPALSAR2によって得られた,2014年11月7日から2015年5月8日までの長期的な地盤変動を位相変化で表現した結果である<sup>4</sup>.図-1の見方は色調が青から赤,



Analysis by GSI from ALOS-2 raw data of JAXA

図-1 JAXA の人工衛星 ALOS-2 搭載の PALSAR2 による InSAR 画像(参考文献4より取得・加筆)



図-2カウサルター近郊の地盤変状の概要と先行調査(背景地図は Bing Sattelite を使用)

黄,緑と変化するに従い,地表面が衛星から遠ざかる方向に変化したことを表し、判定に青から緑、黄、赤と変化するに従い,地表面が衛星に近づく方向に変化したことを意味する.図-1中には周囲とは異なった色調パターンとなっている場所が2箇所存在し、その地点では特に被害が顕著であった.

地域1で示された場所は、歴史的建造物が多く立つダ ルバール広場(Darbar Square)周辺であり、RC柱と焼成煉 瓦の壁からなる中層構造物の多くが倒壊した.

一方で地域2で表された東部のカウサルター(Kausalter) 近郊では、ハイウェイの谷跨ぎ盛土の一部に段差が生じ、 同時に周辺の丘陵地にも亀裂が生じた. 図-2に発生した 地盤変状の概要を示す.変状が発生した地点はトリプバ ン国際空港から2キロ南西に位置し、標高は約1300mで ある.付近は低層構造物が密集する比高10m程度の丘と、 田畑や沼が広がる浅い谷とが交互に連続する地形からな り、舗装された片側2車線のアラニコハイウェイが東西 を横切っている.

変状が発生したのは幅400m程度の浅い谷を跨ぐ盛土 区間であり、この区間は通常盛土区間と補強盛土擁壁区 間に分けられる.通常盛土区間は北側が1割勾配の法面, 南側は重力式擁壁であった.地震時には亀裂は南東から 北西方向にハイウェイを斜めに横切るように形成され, その後北東部にてハイウェイに平行な方向に延伸し,全 長は400m程度であった.また亀裂の上盤側と下盤側の 相対変位は,ハイウェイ付近で発生した亀裂においては 最大1.3m程度の鉛直変位が卓越していたが,ハイウェイ 北側の丘陵部では鉛直変位はほとんどなく,10~20cmの 亀裂が発生していた.

本研究ではカウサルター近郊で発生した地盤変状の発 生メカニズムを検討するために,現地において表面波探 査,標準貫入試験,簡易コーン貫入試験と放射性炭素年 代測定を行った.

# 2. 先行研究・報告

筆者らは地震から1か月後の2015年5月に現地調査を行った.この時,段差は全体として南東から北西に向かって道路を横切る形で存在し,段差の延長は最大で400m 程度である点,垂直変位は最大で2m程度ある点,さらに道路の中央線沿いに取った縦断面の表面形状を見ると, 盛土は全体として谷側に滑り落ちる方向に滑動しているものの,谷中央部では30cm程度の盛り上がりが存在している<sup>5</sup>.

エイト日本技術開発は、2015年5月に土木学会調査団

の一員として被害調査を行い、ハイウェイの被害箇所は 段差が道路横断方向に最大で1.0m~1.5m程度発生し、道 路周辺の地盤にもクラックや段差が生じていることを報 告している<sup>9</sup>.

また清田らは地震から1週間後と2015年7月に調査に入り,通常盛土区間が補強盛土擁壁区間よりも沈下が大きかった点,微動計測による卓越周波数において被害地点の方が無被害地点と比較して低く出ている点を調査結果として挙げている<sup>9</sup>.

さらにJICAによって道路被害復旧のための地盤調査と して、ボーリング並びにPS検層が実施された.この報 告によれば、ハイウェイ直下の地質構造は上から表土、 第2砂質土層、第2粘性土層、第3砂質土層、第4粘性土層 の順に存在する.被害箇所近傍の層厚とN値を表-1に示 す.坑内水位は深さ4m~13mに存在し、盛土の標高が最 も低い地点よりも東側で最も浅かった<sup>8</sup>.

また米国の地盤工学極大災害調査連合(GEER)による 報告では図-1のTrench-2の地点において,地下2.25mに砂 脈が発見されたことが記されている<sup>9</sup>(図-3).またTrench-1の地点では黒綿土と呼ばれる暗色のシルト質粘性土が 地下2mから採取された.

しかしながらこうした既往の研究,報告では変状の原因となった土層は特定されておらず,現状では発生メカ ニズムを考慮した対策工は取られていない.このような 現状から,筆者らは2015年から継続的に,表面波探査, 標準貫入試験,簡易動的コーン貫入試験並びに炭素年代 測定を実施し,弱層の検討を行った.

分類	層厚	N值
第2砂質土層	1m	10前後
第2粘性土層	3m~7m	5前後
第3砂質土層	2m~9m	10~15
第4粘性土層	1m~5m	20前後

表-1 JICAボーリングデータによる現地地盤構造の概略

## 3. 表面波探查

表面波探査は人工的な震源(ハンマー打撃など)により生成される表面波を直線上に配置した複数の受信機(ジオフォン)を用いて観測し,得られた波形データから表層地盤の速度構造を推定する技術である.探査は図 -4で示した直交する2測線(Line1, Line2)上で2015年12月に 実施した.測線長は測線1が71m,測線2が208mである.

本調査では、24個の受信機を使用し、1mのインター バルで設置した.振動の発生源はカケヤを用い、端部の ジオフォンから所定の間隔だけ離れた場所で打撃した. 今回の調査においては道路に現れたクラックに垂直な方 向に対して、地盤構造の変化があると考えられるため、 測線は観測されたクラックを横断する形で,現地の住民 の移動の妨げとならない地点を選定した.また,泥炭の せん断弾性係数は砂や粘土の無機質土と比較して小さな 値となる研究結果<sup>10</sup>もあるため,有機質土が採取された BH-3の強度情報(N値)を解析結果のキャリブレーショ ンに用いることが許される距離内に測線を設定した.

図-5に表面波探査から推定された測線1,測線2のS波 速度分布を示す.図-5中に挿入したN値分布はJICAによ る調査結果(BH-3)である.以下にこの結果の解釈を 記す.

- 測線1では段差発生位置の左右において3m以深のS 波速度分布が明瞭に変化している.具体的には座 標原点から14mの地点でS波速度は最大240~260m/s程 度を示しているのに対し(図-5中①),谷側では58m の地点で140~150m/s程度を示している(②).
- 2. 測線1では地下2m付近に全体として低S波速度層が 広がり,そのS波速度は最小値で110~120m/s程度で ある(③).
- 3. 測線2では座標原点から30m離れた地点から軟弱層が 広がり始め、一番厚い地点では深さ2mから5mの範 囲にS波速度が140m/s以下の層が広がっている(④).

これらの結果をまとめると、両測線において深さ 2~3m程度の深さに存在する低S波速度層は、両測線によって挟まれる地域に広範囲にわたって存在していると推察される.またこの層が存在する範囲は地表面に段差が 生じた範囲とも一致することが言える.



図-4 実施した表面波探査,標準貫入試験,簡易コーン貫入試験の位置図(背景地図は Bing Satellite を使用)



# 4. ボーリング・標準貫入試験

ボーリング調査は前述の JICA によるボーリングの位置 関係と、機材搬入のスペースを検討した結果、図-4に示 す5地点において行った.図-4中に示すBHと記した点 の内、1から4までが2015年8月にJICAによって行われ たもの、5から9までが筆者らが2016年12月と2017年4 月に実施したボーリングである.緯度経度、標高と掘削 深さ、地下水面の値を表-2に示す.また採取された試料 については土粒子密度試験、含水比試験、粒度試験、 液性限界・塑性限界試験を行った.

表-2 ボーリングの基本仕様と孔内水位

名称	緯度	経度	標高	孔内水位
BH-5	N27.6751	E85.3649	1304.2m	-7.3m
BH-6	N27.6752	E85.3643	1304.4m	-6.0m
BH-7	N27.6756	E85.3634	1297.2m	-4.4m
BH-8	N27.6753	E85.3629	1300.6m	-7.0m
BH-9	N27.6737	E85.3622	1302.4m	

## 5. 簡易コーン貫入試験

今回の調査では標準貫入試験から得られるN値を補完 する観点から,2017年5月に簡易コーン貫入試験を図-4 中に示した2か所で行った.緯度経度と標高,貫入深度 を表-3に示す.

表-3 簡易コーン貫入試験の基本仕様と貫入深度

名称	緯度	経度	標高	貫入深度
DCPT-1	27.6751	85.3634	1304.6m	3.9m
DCPT-2	27.6755	85.3636	1303.9m	7.9m

#### 6. 炭素年代測定

ボーリングからは代表的な層毎に計 60 点のサンプリ ングを行った.また同時に鍵層の位置を検討すること, 並びに形成過程を把握すること目的として,発見された 8 点の有機質土層について放射性炭素年代測定を実施し た.放射性炭素年代測定は考古学や地質学の分野で幅広 く使用されており,サンプル中に含まれる放射性同位体 14C の質量と半減期曲線からその試料の形成年代を測定 する手法である.8 点の試料の内年代が特定された7点 の有機質土の採取位置と得られた較正年代を表-4 に示す.

表-4 炭素年代測定を行った試料の採取位置と較正年代

ボーリング 名称	採取深さ	較正年代(2標準偏差内)
BH-5	1.92m 1.00m	9754BC( 3.7%)9720BC
	-1.65111~-1.90111	9694BC(91.7%)9321BC
BH-8	5.20m 5.44m	10691BC(66.6%)10568BC
	-3.52111~-3.44111	10549BC(28.8%)10475BC
BH-8	-5.43m~-5.50m	10426BC(2.9%)10396BC
		10353BC(1.2%)10331BC
		10290BC(4.4%)10252BC
		10239BC(87.0%)10004BC
BH-8	5 (5 579	10198BC(85.8%)9984BC
	-3.03111~-3.78111	9940BC(9.6%)9885BC
BH-8	-5.81m~-5.97m	11245BC(95.4%)11116BC
BH-9	-2.84m~-3.00m	13123BC(95.4%)12506BC
BH-9	-3.20m~-3.40m	10567BC(3.1%)10536BC
		10475BC(92.3%)10161BC

#### 7. 断面図による考察

以上の調査を元に図-6に示す断面図を作成した.断面 はハイウェイ盛土部東側の丘陵地から谷へのアプローチ 部を横切る位置にあり,BH-7からBH-9を通っている.

BH-7においては表層から 1m 程度シルト層が存在した のち,深さ 2m 付近に紀元前 9500 年頃を起源とする有機 質土層が堆積している.またその下には N 値が 10 程度 のシルト層を挟み,深さ 4m から厚さ 0.5m~1.0m 程度の 砂層が存在している.この砂層は前述の GEER のトレン チ調査によって発見された砂脈の標高と整合的である.

断面に沿う地表標高はハイウェイに近づくほど高くなっており, BH-7 とハイウェイの標高差は約5mである. そのハイウェイの近くで行われた DCPT-1とBH-3 はいずれも同じようなN値分布を示しており,表層2m程度までは5前後であるものの,地下3m付近に急激にN値が高くなる土層が存在する.これはBH-7のN値が10程度のシルト層と同一の層であり,ハイウェイ北側の地盤は谷へ向かって1°ほどの緩やかな傾斜を持つ構造を示すと考えられる.

また JICA による調査では BH-3 においても地下 0.8m~2.0m付近に有機質土層が存在し、GEERによって黒 綿土が採取された地点もほぼ同じ高さに存在する. これ も BH-7 に存在した有機質土層を考慮すると、地盤の谷 への緩やかな傾斜を表すと推察される.

一方,表面波探査による測線2で発見された地下 2~5mの低S波速度帯は,標準貫入試験によるとN値は 10を超えている.S波速度とN値に正の相関があること



図-6 ハイウェイを横断する A<sub>i</sub>B<sub>i</sub>地質断面図

を考慮すると、この解釈には追加の調査を要する.

また BH-9 では, 深さ 3m に有機質土層, 深さ 6m~9m に砂層が存在することが判明した. 年代測定からは有機 質土は上層が紀元前 13000 年頃, 下層が紀元前 10300 年 頃と算出された. また深さ 4.6m から 5.0m には粘性土に 粗砂が混入したサンプルが採取された.

以上のような結果から,弱層として機能し得る土層として以下の2層が挙げられる.

まず,地下 2m~3m 付近に存在する有機質土層である. これは年代測定から紀元前 10000 年前後に形成された土 であることが判明した.この時代は旧カトマンズ湖が干 上がった時期と重なり<sup>11</sup>,干上がる過程で湖畔の植物が 死骸が堆積したために形成され,カトマンズ盆地の広範 囲に存在すると考えられる.また平野らの研究<sup>13</sup>では有 機質土は地震時のせん断歪みが増加しやすい特性がある ことが判明しており,今回のカウサルターにおいても, 同種の土が地震動によって軟弱化しうるのかについては, 繰り返しせん断試験や他の有機質土との物理特性の比較 を元にして,今後の検討を重ねる必要がある.

また別の土層として地下 4m-9m 程度に存在する砂・ シルト質土層も挙げられる.これは2地点から砂脈痕が 確認されており、谷側に向かって地層の傾斜が見られる ことから、地震時における液状化の可能性が考えられる ためである.果たしてその下に分布する地下水面下のシ ルトが砂脈に含まれているか、また当該地点の地震動が どの程度であったかなどにも踏み込んで、今後液状化の 可能性について検証していく必要がある.

## 8. 結論

2015年4月のネパール・ゴルカ地震によって発生した カトマンズのカウサルター近郊で発生した,地盤変状に ついて表面波探査,標準貫入試験,簡易コーン貫入試験, 炭素年代測定を行った.その結果,地下 2~3m に砂層, 地下 4~9m にシルト層が存在することが明らかとなった.

しかしながらこれらの2層が弱層として機能し得るか どうかについては、微動計測によるカトマンズのアメリ カ地質調査所で観測された地震波形を用いたカウサルタ ーの変状箇所での地震動の推定や、ボーリングやハンド オーガーによって採取された再構成試料を元にした力学 試験、得られた物理特性と同様の土で発生した災害の検 証などから、さらに精査してゆく必要がある.

謝辞:本論文の執筆にあたっては東京大学生産技術研究 所清田隆准教授を含む土木学会調査団の皆様からの貴 重なご意見をいただきました.またJICA社会基盤・平和 構築部の中村明博士,島田和輝様,讃井一将様,日本工 営道路橋梁部の西尾俊彦様には当該地域における貴重な 地盤調査の資料をご提供いただきました.現地でのボー リング調査の管理,並びに試料の計測に当たっては,基 礎地盤コンサルタンツの青山翔吾様にご協力をお願いい たしました.炭素年代測定に当たっては,東京大学総合 博物館年代測定室にご指導いただきました.ここに感謝 の意を表します.

#### 参考文献

- 1) USGS: Magnitude 7.8 Earthquake in Nepal & Aftershocks, http://www.usgs.gov/blogs/features/usgs\_top\_story/magnitude-7-8earthquake-in-nepal (2017.08.30閲覧)
- 2) USAID : NEPAL EARTHQUAKE FACT SHEET #1, FISCAL YEAR (FY),

https://www.usaid.gov/sites/default/files/documents/1866/ 12.23.15%20-%20USAID-

DCHA%20Nepal%20Earthquake%20Fact%20Sheet%20% 231%20%281%29.pdf (2017.08.31 閲覧)

- 3) 山崎新太郎、八木浩司、若井明彦、福岡浩:2015年ネパ ール・ゴルカ地震でランタン村を壊滅させた雪・氷・岩 石なだれ、地質学雑誌 Vol.122, No.9, 2016
- 国土地理院:2015年4月25日ネパールの地震活動の 伴う地殻変動-合成開ロレーダー(SAR)解析による地 殻変動, http://www.gsi.go.jp/cais/topic150429index.html (2017.08.30閲覧)
- Konagai, K., Pokhrel, R. M., Matsubara, H., Shiga, M., : Geotechnical aspect of the damage caused by the April 25<sup>th</sup>,

2015 Gorkha earthquake of Nepal, JSCE Journal of Disaster FactSheets, FS2015-E-0002, 2015

- 6) 株式会社 エイト日本技術開発:2015年ネパール・ゴ ルカ地震 被害調査報告,2015
- 清田隆,池田隆明,合田且一朗, Rama Mohan POKHREL, Gabriele CHIARO,片桐 俊彦: 2015年ネ パール・ゴルカ地震による道路の地盤災害調査報告, 土木学会論文集A1(構造・地震工学) 72(4), I\_934-I\_939, 2016
- JICA:ネパール国カトマンズ盆地都市交通改善プロ ジェクト, 2015
- GEER : Geotechnical Field Reconnaissance: Gorkha(Nepal) Earthquake of April 25 2015 and Related Shaking Sequence, Geer Association Report No. GEER-040,2015
- 10) 荻野俊寛,高橋貴之,及川洋,三田地利之,対馬 雅己:ベンダーエレメント試験および繰返し載荷試 験による泥炭のせん断弾性係数,地盤工学ジャーナ ルVol.4, No.1, pp125-133,2008
- 酒井治孝:ヒマラヤ山脈とチベット高原の上昇プロ セスーモンスーンシステムの誕生と変動という視点 からー,地質学雑誌,第111巻 第11号, pp 701-716, 2005.
- 12) 平野光孝,古関潤一,佐藤剛司,三平伸吾:鉄道盛 土の下に堆積している腐植土の地震時変形特性,生 産研究,66巻6号,pp515-519,2014

(2017. ??. ??受付)

# DISCUSSION OF THE POTENTIAL CAUSE OF GROUND FRACTURES THAT APPEARED IN THE 2015 GORKHA EARTHQUAKE, NEPAL DIAGONALLY ACROSS ONE HIGHWAY SECTION CROSSING A SHALLOW VALLY

# Masataka SHIGA, Kazuo KONAGAI, Rama Mohan POKHREL and Takaaki IKEDA

The Mw7.8 Gorkha earthquake struck the central region of Nepal on April 25th, 2015 and caused a large number of slope failures, soil liquefactions, extensive damage to buildings and earthen structures etc. in mountains and urban areas. One section of the Araniko Highway that connects Kathmandu to China crosses a small valley at Kausaltar with an embankment. This section has sunken during the earthquake. To elucidate the cause of this ground deformation, shallow soil profiles are explored using the surface wave tomography, standard penetration tests, dynamic cone penetration tests and radiocarbon dating. The deduced soil profile suggests the presence of two weak soil layers that spread beneath the cap surface soil.