

2018年インドネシア・スラウェシ島地震における液状化による地盤流動の要因に関する考察

吉田 雅穂¹・Hendra SETIAWAN²・宮島 昌克³・小野 祐輔⁴・
幸左 賢二⁵・芹川 由布子⁶・府波 ひなの⁷

¹正会員 福井工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)
E-mail: masaho@fukui-nct.ac.jp

²Non-member Tadulako University, Lecturer, Faculty of Engineering
(Bumi Tadulako Tondo Campus, Palu, Central Sulawesi, 94118, Indonesia)
E-mail: hendra3909@gmail.com

³正会員 金沢大学教授 理工学域環境デザイン学類 (〒920-11927 石川県金沢市角間町)
E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 鳥取大学教授 工学部社会システム土木系学科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山南町南4-101)
E-mail: ysk@tottori-u.ac.jp

⁵正会員 九州大学名誉教授 (〒658-0032 神戸市東灘区向洋町中3-1-52-1210)
E-mail: kosakenji@yahoo.co.jp

⁶正会員 松江工業高等専門学校助教 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町14-4)
E-mail: serikawa@matsue-ct.jp

⁷非会員 金沢大学 金沢大学理工学域環境デザイン学類 (〒920-11927 石川県金沢市角間町)
E-mail: hina_snowdrop@stu.kanazawa-u.ac.jp

2018年インドネシア・スラウェシ島地震は、島中部のPalu市を中心に死者・行方不明者4,340人、家屋損壊68,451棟という甚大な被害をもたらした。現地調査の結果、Balaroa, Petobo, Jono Oge, Sibalatyaの4地区において液状化による大規模な地盤流動が発生し、人的・家屋被害の主たる要因であったことを確認した。また、現地で行った測量、常時微動観測、スウェーデン式サウンディング試験、土質試験の結果や収集資料の分析によって、上記4地区で発生した地盤流動の要因を考察した結果、地表面は比較的緩勾配であったが軟弱な砂質土層と豊富な地下水が甚大な地盤流動被害を引き起こした可能性を示した。

Key Words : the 2018 Sulawesi Earthquake, liquefaction, ground flow, field investigation

1. はじめに

2018年9月28日(金)18時2分(現地時間)、インドネシアのスラウェシ島中部を震源とするマグニチュードMw7.5の地震が発生した。図-1に震度分布¹⁾を示す。震源から約77km離れた中部スラウェシ州の州都である人口約35万人のPalu市に被害が集中し、地震動、津波、液状化による地盤流動によって死者・行方不明者4,340人、負傷者4,438人、避難民172,635人、68,451棟の家屋被害が発生した²⁾。本研究では、このうち液状化に伴う地盤流動に着目し、現地調査(2018年11月、2019年2月、4月、7月、10月)で行った測量、常時微動観測、手動式のスウェーデン式サウンディング試験、土質試験

の結果や収集資料の分析によって、その要因を考察する。

2. 液状化による地盤流動

(1) 概説

本研究では図-2に示すPalu市のBalaroaとPetobo, Sigi県のJono OgeとSiballayaの計4地区を対象とした。これまで国内外で発生した液状化による大規模な地盤流動としては、1964年アラスカ地震におけるTumagain heightsの事例³⁾が有名である。その規模は、幅2,500mで長さ180~360mの地盤変位であったが、今回の事例は、その流動範囲や変位量を大きく上回り、数多くの家屋が液状化

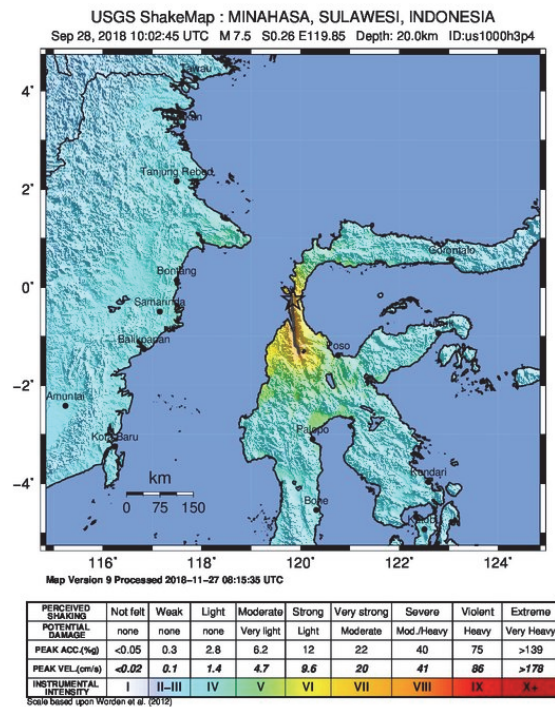

図-1 震度分布¹⁾

表-1 対象地区

地区名	地盤流動の影響範囲		地震前の平均勾配(%)
	面積(km ²)	最大距離(km)	
Balaroa	0.38	0.9	3.8
Petobo	1.48	2.5	2.1
Jono Oge	1.80	3.5	1.9
Sibalaya	0.57	1.1	3.3

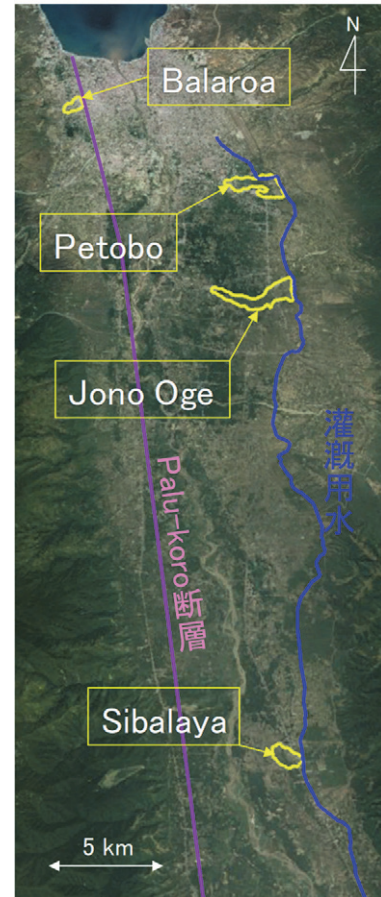


図-2 対象地区

による泥流に流され埋没し、未だ地中で行方不明の方が多数存在するという点で過去に例のない被害といえる。

一方、対象地区には液状化現象を表す *Nolodo* という言葉が古くから伝わっている。*Nolodo* は現地語で泥の中に落ち込むことを意味し、Palu 市の山岳地に住んでいた *Kaili* 族にこの *Nolodo* を言い伝える文書が残っている⁴⁾。したがって、同地区では過去にも同様の被害が繰り返し発生していたことが推測できる。

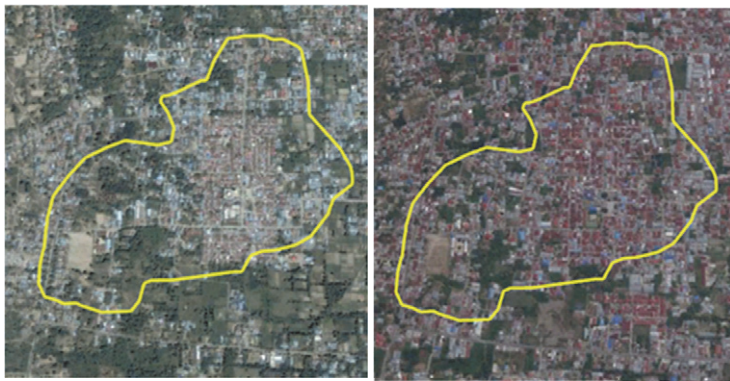
本章では表-1 に示す 4 地区で発生した液状化に伴う地盤流動被害の概要を示し、その要因について考察する。なお、本章で示す被害写真は 2018 年 11 月の現地調査によるものである。

(2) Balaroa 地区

図-3 は地震約 13 年前 (2005 年 3 月 5 日)、地震約 1 ヶ月前 (2018 年 8 月 17 日)、地震 4 日後 (2018 年 10 月 2

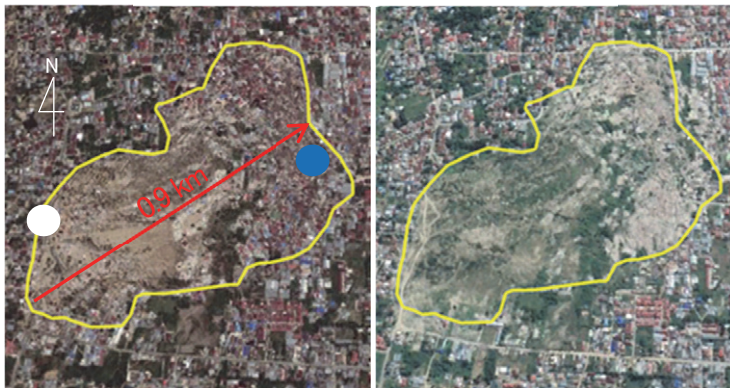
日)、地震約 9 ヶ月後 (2019 年 6 月 25 日) の Google Earth による空中写真であり、(c)中の赤色矢印で流動の方向と最大距離約 0.9 km を示す⁵⁾。図中の黄色い枠が空中写真より判読した地盤流動の影響範囲であり、Google Earth の機能により算出した面積は約 0.38 km²、地震前の流動方向の平均勾配は約 3.8% である⁶⁾。住民へのヒアリング調査によれば、同地区は 1980 年代に沼地を埋め立てて宅地開発されており、(a)の 2005 年と(b)の 2018 年の比較より家屋 (赤色の屋根より判別) が非常に増加している。しかし、(c)より上流側は土砂で埋没し、下流側には泥流で押し流された家屋が重なり合っている。(d)の地震 9 ヶ月後には、上流の堆積土砂には植生が繁茂し、下流では家屋が撤去され屋根を示す赤色の分布が減少している。

図-4 は最上流側 (図-3(c)白色丸) の約 6m の滑落崖を北方向から撮影したものであり、住民へのヒアリング調査によれば、南北に走る道路の西側が地震発生から約



(a) 約13年前

(b) 約1ヶ月



(c) 4日後

(d) 約9ヶ月

図-3 Balaraa地区の空中写真



図-7 被災後の家屋



図-8 被災後の家屋 (Google Street View)



図-4 上流側の滑落崖



図-5 滑落崖の上流側



図-6 下流側の家屋被害

30秒後に突然沈下した。付近に川はなく1週間ほど降雨がなかったが、国の地質調査機関 Banad Geolog⁴⁾の資料によれば地下水位は0.7mと非常に浅い。

図-5は滑落崖西側の道路を西方向に眺めており、約3%傾斜の舗装には流動直交方向に引張亀裂が多数発生し、周囲の家屋の基礎や壁が破壊されていた。

図-6は下流側(図-3(c)青色丸)の様子であり泥流で下流に流されて破壊した家屋が多数点在しており、地下水位は地表面で確認できるほど浅い。同地区は他地区と比べて流動範囲は狭いが住宅密集地であったため人的被害と住家被害が最も多かった。また、図-7は同地区に立地していた第2著者の実家の場所であるが、図-8のGoogle Street Viewに示すように地震前は平屋であったが、屋根が見えないほどの土砂で埋没してしまった。なお、流動が停止した下流最端部は、地表面に3.8mの左横ずれの水平変位が生じた断層線⁷⁾と(図-2参照)一致しており、

同地区の地盤に大きなせん断変形が生じたことが液状化の発生に影響を与えた可能性がある。

以上より、同地区の地盤流動は、地下水位が非常に高い若齢の埋立地盤、3%を超える地表面勾配、断層運動による地盤のせん断変形が、甚大な地盤流動を発生させた要因と考えられる。

(3) Petobo 地区

図-9は地震約1ヶ月前(2018年8月17日)と地震4日後(2018年10月2日)のGoogle Earthによる空中写真であり、(b)中の赤色矢印で流動の方向と最大距離約2.5kmを示す⁹⁾。流動範囲の面積は約1.48km²、地震前の平均勾配は約2.1%である⁹⁾。

流動範囲の上流端(青色線)には図-10に示す土堤の灌漑用水が南から北方向に整備されており、西側に広がる耕作地に水を供給していた。また、地下水は0.5mで

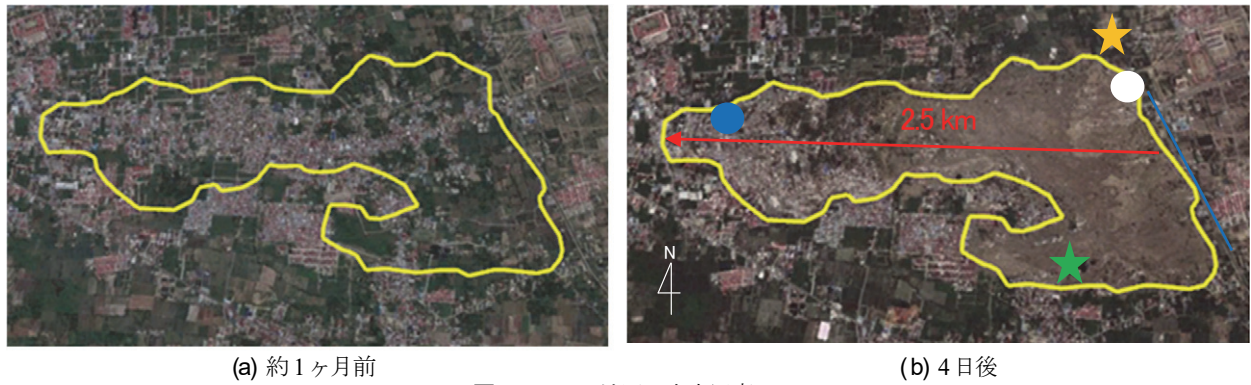


図-9 Petobo 地区の空中写真

あり⁴⁾, Balaroa 地区と同様に非常に浅い。最上流側(白色丸)には図-11 に示す滑落崖が生じ, そこを基点に表層地盤が階段状にすべり破壊を生じていた。同地区は前述の Balaroa 地区ほどの家屋密集地ではないが, 東西に走る道路沿いの家屋が流動した土砂に流され多数被災した。下流側(青色丸)では図-12 に示すように平屋の屋根が埋没するほどの土砂が堆積していた。

以上より, 同地区の地盤流動は, 地下水位が非常に高く, 斜面上部にある用水からの豊富な水の供給と, 2%を超える地表面勾配が, 甚大な地盤流動を発生させた要因と考えられる。

(4) Jono Oge 地区

図-13 は地震約1ヶ月前(2018年8月17日)と地震4日後(2018年10月2日)の Google Earth による空中写真であり, (b)中の赤色矢印で流動の方向と最大距離約 3.5 km をす⁵⁾。流動範囲の面積は約 1.8km²と4地区で最大であるが, 地震前の平均勾配は約 1.9%と最も小さい⁶⁾。

同地区も Petobo 地区と同様に, 流動範囲の上流端(青色線)に灌漑用水が流れていた。また, 流動範囲北側の境界(水色破線)には小河川が流れ, 流動範囲の下流側(白色四角)には泥流が線状に流れている様子が確認でき, 流動範囲(黄色線)が昔は河川であったかに見える(図-14)。なお, 同地区は図-14 に示すようにトウモロコシや米の耕作地であり住宅地は少ない。

図-15 に示す最上流側(白色丸)の滑落崖と表層地盤の階段状すべり破壊と, 図-16 に示す中流部(青色丸)での家屋の埋没状況は Petobo 地区と同様であった。

以上より, 地表面勾配は他地区と比べると小さいが, Petobo 地区と同様に流動範囲の上流端は, 扇状地末端の同一標高の傾斜変換線付近に位置し, 扇状地で伏流していた地下水が豊富に地表付近に分布していた⁸⁾と推測され, 用水からの豊富な水の供給と相まって, 軟弱で飽和した地盤が甚大な地盤流動を発生させた要因と考えられる。



図-10 灌漑用水



図-11 上流側の滑落崖



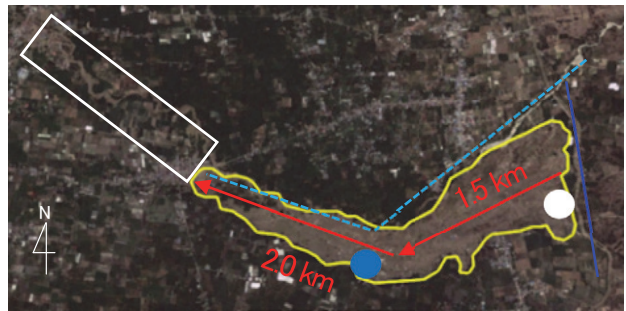
図-12 下流側の家屋被害

(5) Sibalaya 地区

図-17 は地震約4ヶ月前(2018年5月19日)と地震10ヶ月後(2019年7月25日)の Google Earth による空中写真であり, (b)中の赤色矢印で流動の方向と最大距離約 1.1 km を示す⁵⁾。流動範囲の面積は約 0.57 km², 地震前の平均勾配は約 3.3%である。



(a) 約1ヶ月前



(b) 4日後

図-13 Jono Oge 地区の空中写真

流動範囲の上流端（青色線）には灌漑用水があり、これは Petobo 地区と Jono Oge で示した用水の上流部にあたり、流路の幅や深さがより大きい。図-18 に示す取水堰（図-17 の白色四角）が破壊し、その下流の土堤が決壊して地表面の傾斜方向（図-17 の左方向）に大量の水が流出した痕跡が見られた（図-19）。図-17 の中央には南北に走る道路があるが、流動範囲にある道路（緑色枠線）が地盤流動と共に西側に約 0.3 km 移動した（紫色枠線）。また、その道路に隣接していた家屋等はそのままの状態でも道路と共に移動していた。図-20 が Google Street View で確認した移動前の家屋であり（緑色枠線内）、図-21 が移動後の同じ家屋である（紫色枠線内）。その周辺にも同様に移動してきた家屋があり、いずれも基礎や構造体に損傷はあるが倒壊するには至っていなかった。図-22 に示すように、周辺には上流から移動してきた耕作地に亀裂が入りブロック状となっており、表層下部の地盤の移動によって表層地盤が引きずられるような力を受けたと推測する。その結果、図-21 に示すように家屋や道路がそのままの状態でも移動する現象が生じた。

以上より、同地区の地盤流動は、Petobo 地区や Jono Oge 地区と同様に用水からの豊富な水の供給と、3%を超える地表面勾配が、甚大な地盤流動を発生させた要因と考えられる。

3. 液状化した地盤の動特性

2019 年 2 月の現地調査において、図-23 に示す Balaroa 地区の地盤流動範囲の外側も含めるように 100m 毎に流動方向 12 点、流動直交方向 8 点の合計 20 点において常時微動観測を行った。

計測機器は GPL-6A3P（株式会社ミットヨ）であり、サンプリング周波数は 100Hz、計測時間は 12 分間とし、記録した常時微動から各観測点の H/V スペクトルを求めた。まず、観測記録の中で明らかなノイズが含まれる



図-14 中流部の地盤流動



図-15 上流側の滑落崖



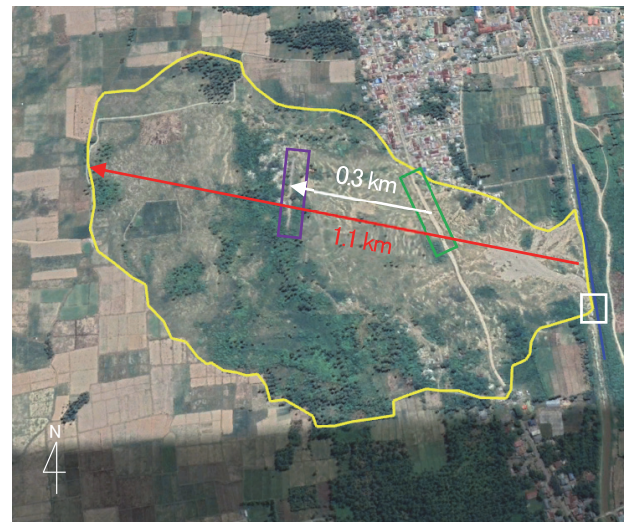
図-16 下流側の家屋被害

箇所を除くようにして 40.96 秒の区間を 5 個以上選定し、その各成分のフーリエスペクトルを求め、ノイズの影響を減らすため加算平均し、さらにバンド幅 0.8Hz の Parzen Window により平滑化した。最後に、水平 2 成分のスペクトルを相乗平均した値を鉛直成分で除すことで H/V スペクトルを求めた。

求めた H/V スペクトルの平均からピークを読み取り



(a) 約4ヶ月前



(b) 約10ヶ月後

図-17 Sibalaya地区の空中写真



図-18 灌漑用水



図-19 灌漑用水から流下方向



図-20 被災前の家屋 (Google Street View)



図-21 被災後の家屋



図-22 表層地盤の変状

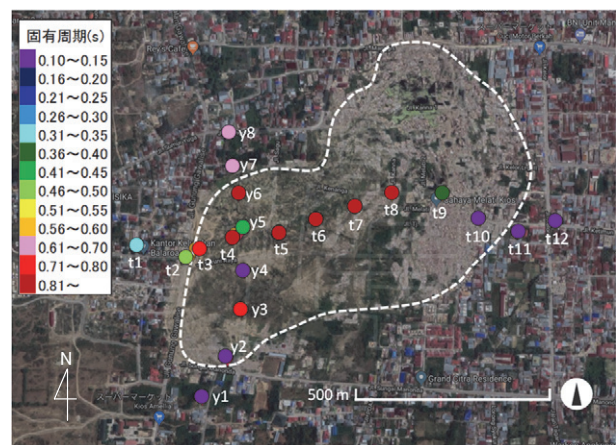


図-23 Balaroa地区の卓越周期

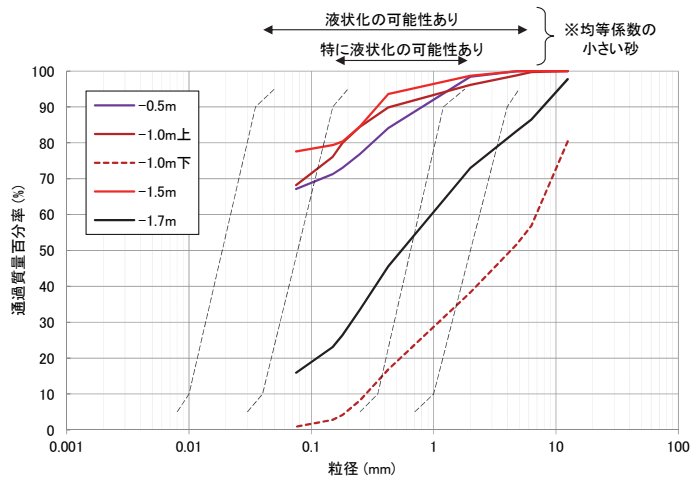
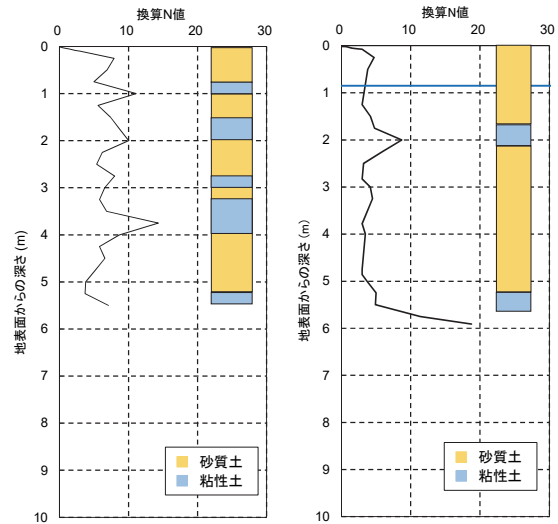


図-24 土の粒径加積曲線



(a) 上流部

(b) 中流部

図-25 スウェーデン式貫入試験の結果

卓越周期を求め、観測点毎に色分けした結果を図-23に示す。なお、t1, t3, t10の観測点では走行車両の影響でH/Vスペクトルのばらつきが大きく、t1, t2のH/Vスペクトルは平坦でピーク周期の読み取りが困難であったが、微細な形状から卓越周期を決定した。同図より、地盤流動範囲内は外部より長周期が卓越する傾向であり、特にt4からt8では0.8秒以上を示し、中央部における軟弱な土層の存在を明らかにした。

4. 液状化した土の物理的・力学的特性

2019年7月の現地調査において、Petobo地区で液状化した土の物理的および力学的特性を調べるため、土のサンプリングと粒度試験、ならびに、手動式のスウェーデン式貫入試験機を実施した。

図-24は同地区の上流部の流動範囲外(図-9(b)の橙色星印)において、採取した土の粒径加積曲線であり、同図には港湾施設の技術上の基準・同解説⁹⁾に記されている均等係数が小さい場合の液状化の可能性の高い粒度分布の範囲も示した。なお、粒度試験では沈降分析は実施していない。

土は地表面下1.7mまでの地層が露頭していた場所の地表から0.5m間隔で採取したが、地層境界が存在した深度1mではその上下で採取した。互層地盤であるため所々に細粒分の多い粘性土が介在するが、液状化の可能性のある砂質土を含む地盤であることを明らかにした。

図-25は手動式のスウェーデン式貫入試験機(株式会社西日本試験機、S-215)を用いて「JIS A 1221: スウェーデン式サウンディング試験方法」に準拠して換算N値と土質(砂質土と粘性土)、地下水位(青色線)を推定

した結果を示す。測定位置はPetobo地区の上流部(図-9(b)の橙色星印)と中流部(図-9(b)の緑色星印)である。

上流部は流動範囲外に位置し、図-25(a)に示すように土質は砂質土と粘性土の互層、深度5mまでの平均換算N値は7.2であり、地下水は確認できなかった。2018年11月の現地調査において、同地点近くの滑落崖(図-4参照)から上流側に約20m離れた地点にある建物のコンクリートスラブ上で微動観測を行った結果、求めたH/Vスペクトルは明瞭なピークのない平坦な形状であり、同地盤が硬質な地盤であったことを確認している。また、下流側の流動範囲外で行った常時微動観測の結果も上記と同様に硬質地盤であった。一方、中流部は地盤流動範囲内ではあるが流動した土や瓦礫の影響の少ない境界部で試験を行った結果、図-25(b)に示すように土質は主に砂質土、深度5mまでの平均換算N値は3.9、地下水は0.85mであった。以上より、地盤流動の発生した中流部は、その上下流の流動範囲外の地盤と比較して、地下水位の高い軟弱な砂質土地盤であることを明らかにした。

Masonら¹⁰⁾は、Petobo, Jono Oge, Sibarayaの3地区で発生した地盤流動の上流側の起点は、若齢で比較的勾配のある扇状地の末端であり、その境界に灌漑用水が整備されると示している。前述の調査結果は、上流部の地下水位の深い硬質地盤は扇状地の、中流部の地下水位の浅い軟弱な砂質土地盤は氾濫原の特性を示すものであり、同地区の地形的特性と調和的である。

インドネシア国家防災庁が2018年10月12日にインターネットで公開した地盤流動の動画¹¹⁾によれば、表層地盤は植生を残したまま、固体状と液体状の土が混ざり合った状態で地すべりの様に水平移動していることが確認できた。本章の結果より液状化層の深さを特定すること

は困難であるが、地下水位以深の軟弱な砂質土が液状化し、土層に介在する粘性土による不透水層が過剰間隙水圧の消散を妨げて長時間の液状化状態を引き起こし、さらに、緩勾配ではあるが扇状地下流にある氾濫原の地表面が誘因となり、広範囲で移動距離の長い表層地盤の流動が発生したと考察する。また、地表面勾配が1%以下のほぼ水平な地盤であっても液状化層と非液状化層の層境界面の傾斜が地表面の地盤流動に影響を与えた事例¹²⁾があるため、このことも当該地盤における現象一要因であった可能性があると推測される。しかしながら、数100m以上の大変形を引き起こした主たる原因については未解明であり、今後の更なる地盤調査によりそのメカニズムを明らかにする必要がある。

5. おわりに

本研究は2018年インドネシア・スラウェシ島地震においてBalaroa, Petobo, JonoOge, Sibalayaの4地区で発生した液状化に伴う大規模な地盤流動に着目し、その特徴を現地調査や地震前後の空中写真より分析した。また、常時微動観測やスウェーデン式サウンディング試験の原位置試験や土質試験によって対象地盤の特性を調査した。その結果、地表面勾配が4%未満の緩勾配地盤において、流動範囲の面積が最大1.8km²、距離が最大3.5kmの地盤流動被害が発生していたことを明らかにした。その要因として、Balaroa地区では、地下水位が非常に高い若齢の埋立地盤と、流動範囲下流部で発生した断層運動による地盤のせん断変形の影響を示した。また、Petobo, JonoOge, Sibalayaの3地区では、地盤流動上流側の起点が若齢で比較的勾配のある扇状地の末端であり、その境界に灌漑用水が整備され、下流には地下水位の浅い軟弱な砂質土を含む平地が広がっている地形要因が、甚大な地盤流動被害に影響を与えたことを示した。

謝辞：現地調査ではTadulako Universityの教職員の方々の協力を得た。Muhammadiyah University, YogyakartaのAgus Setyo Muntohar教授に現地調査の資料を提供頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) United States Geological Survey: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4/shakemap/intensity> (2019年9月10日閲覧)
- 2) Badan Nasional Penanggulangan Bencana: <https://bnpb.go.id/infografis-gempabumi-m74-tsunami-sulawesi-tengah> (2019年9月10日閲覧)
- 3) Seed, H. B. and Wilson, D. D.: The Turnagain Heights Landslide in Anchorage, Alaska, Soil Mechanics and Bituminous Materials Research Laboratory, UC Berkeley, 37 p., 1967.
- 4) Irsyam, M. and 10 researchers: Skype Meeting GEER HATTI PUSGEN on Palu Earthquake 2018 8 Oct 2018, 28p., 2018.
- 5) Irsyam, M. and 16 researchers: Damages Associated with Geotechnical Problems in 2018 Palu Earthquake, Indonesia, Keynote Paper presented in 20th Southeast Asian Geotechnical Conference & 3rd AGSSEA Conference, 15 p., 2018.
- 6) 小野祐輔, 宮島昌克, 幸左賢二, 吉田雅穂, Hendra Setiawan, 野口竜也: 2018年インドネシア・スラウェシ地震の現地調査報告, 第9回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム論文集, pp. 278-282, 2019.
- 7) Miyajima, M., Setiawan, H., Yoshida, M., Ono, Y., Kosa, K., Oktaviana, I. S., Martini and Irdhiani: Geotechnical damage in the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia, *Geoenvironmental Disasters*, Short Report, Vol. 6, No. 1, 2019.
- 8) 小俣雅志, 足立敏之, 山越隆雄, 松井健一, 岩松敏男, 高岸且, 本島千帆, 奥泉優, 和田湖人: 2018年インドネシアスラウェシ島の地震によって発生した大規模流動現象, 日本地球惑星科学連合2019年大会, HDS14-P07, 2019.
- 9) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 上巻, p. 204, 1989.
- 10) Mason, B. et al. (GEER Members and HATTI Members): Geotechnical Reconnaissance: The 28 September 2018 M7.5 Palu-Donggala, Indonesia Earthquake, GEER-061, 2019.
- 11) 毎日新聞: インドネシア地震: 液状化泥流は想像絶する破壊力, 毎日動画, <https://video.mainichi.jp/detail/video/5847925401001> (2019年9月10日閲覧)
- 12) 吉田雅穂, 宮島昌克, 北浦勝: 液状化領域の空間分布推定法の提案とほぼ水平な地盤における流動予測への適用, 土木学会論文集, No. 638/III-49, pp. 155-166, 1999.

(2019.11.12 受付, 2020.1.27 修正, 2020.2.16 受理)

FACTORS TO LIQUEFACTION-INDUCED GROUND FLOW DURING THE 2018 SULAWESI EARTHQUAKE, INDONESIA

Masaho YOSHIDA, Hendra SETIAWAN, Masakatsu MIYAJIMA, Yusuke ONO,
Kenji KOUSA, Yuko SERIKAWA and Hinano FUKAWA

The 2018 Sulawesi earthquake occurred on September 28th, at 18:02 local time (10:02 UTC) with moment magnitude M_w of 7.4, centered 26 km north of Donggala, Central Sulawesi in Indonesia. Field investigations were conducted to find a mechanism of liquefaction-induced large ground flow in some different sites, such as Balaroa and Petobo districts in Palu city and Jono Oge and Sibalaya villages in Sigi district. As a result, it was shown that loose sandy soil layer and much amount of ground water influenced the displacement of large ground flow there.