

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 金沢大学 大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-11927 石川県金沢市角間町)
E-mail: bunka.h22@gmail.com

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, Sibatya 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、手動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特長を考察した結果、地表面は比較的緩勾配であったが軟弱な土層と豊富な地下水によって甚大な地盤流動被害を引き起こしたことを示した。

Key Words: the 2018 Sulawesi Earthquake, liquefaction, ground flow, soil 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 Mw 7.5 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 万人のパル市に被害が集中し、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、現地調査で行った測量、手動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。



図-1 震度分布¹⁾



図-2 対象地区

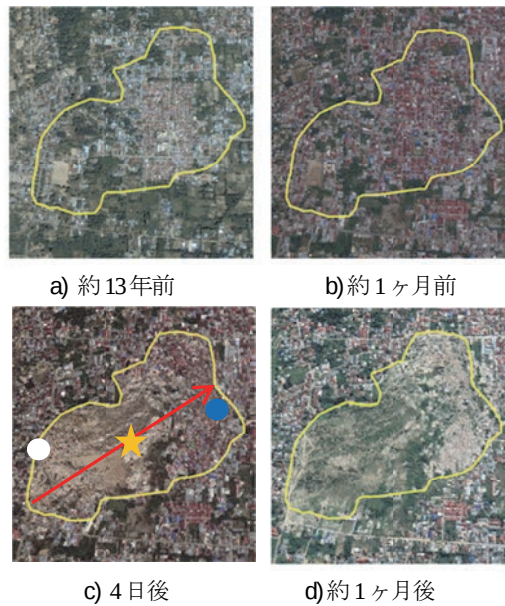


図-3 Balaroa 地区の空中写真



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



図-7 被災後の家屋



図-8 被災前の家屋 (Google Street View)

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 Sibalaya 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ターナゲンハイツの事例³⁾が有名である。その規模は、幅 2500m 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 Nologo という言葉が古くから伝わっている。Nologo 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 Nologo 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。

本章ではこの 4 地区で発生した液状化に伴う地盤流動被害の特長を示し、その要因について考察する。

(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、図 c 中の赤色矢印で流動の方向と距離 940m を示す⁵⁾。図中の黄色い枠が空中写真より判読した流動範囲であり、面積は約 38 万 m²、地震前の平均勾配は約 3.8% である⁶⁾。同地区は 1980 年代に沼地を埋め立てて宅地開発された所であり、図 a の 2005 年と図 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、図 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。図 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-3c 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 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 Geologi⁴⁾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。



a) 約 1ヶ月前



b) 4日後

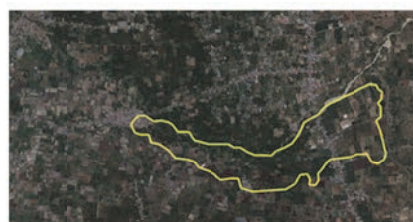
図-9 Petobo 地区の空中写真



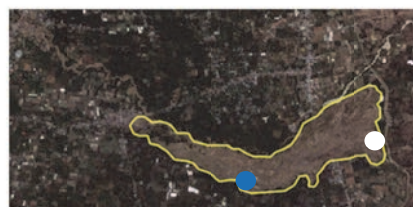
図-11 上流側の滑落崖



図-12 下流側の家屋被害



a) 約 1ヶ月前



b) 4日後

図-13 Jono Oge 地区の空中写真



図-10 灌漑用水



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

図-6 は下流側（図-3c 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、図 b) 中の赤色矢印で流動の方向と距離約 2,100m を示す⁵⁾。流動範囲の面積は約 150 万 m^2 、地震前の平均勾配は約 2.1%である⁶⁾。

流動範囲の上流端（青線）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 であり⁴⁾、Balaroa 地区と同様に非常に浅い。最上流側（白丸）

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、図 b) 中の赤色矢印で流動の方向と距離約 3,115m を示す⁵⁾。流動範囲の面積は約 180 万 m^2 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のように見える（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）



図-17 Sibaraya 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

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と推測され⁹⁾、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。

(5) Sibaraya 地区

図-17に地震約4ヶ月前(2018年5月19日)の Google Earth による空中写真を示す。同地区の地震後の画像は公開されていないため、図中の流動範囲(黄色線)は推測結果である。地震前の平均勾配は約3.3%であり、白矢印が流動方向である。

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、規模が大きい。図-18に示す取水堰(白色四角)が破損し、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(白色破線)があるが、流動範囲にある道路(緑色線)が地盤

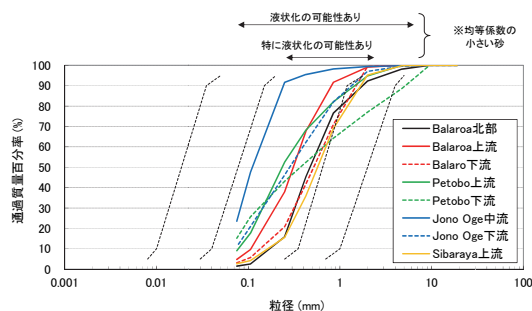


図-23 噴砂の粒径加積曲線

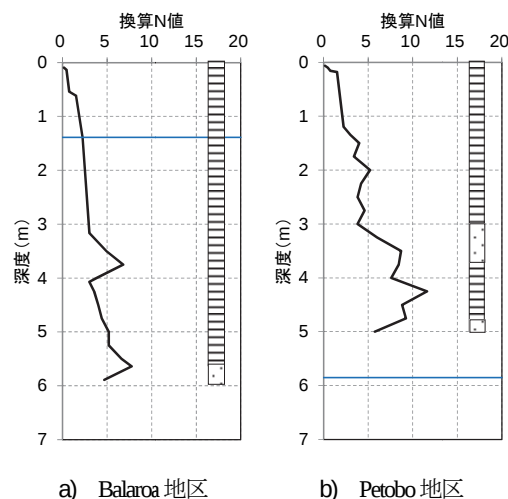


図-24 手動式スウェーデン式サウンディング試験の結果

流動と共に西側に約350m移動した(赤色線)。また、その道路に隣接していた家屋等はそのままの状態と移動していた(緑色丸から赤色丸へ)。図-20が Google Street View で確認した移動前の家屋であり(図-17の緑色丸)、図-21が移動後の同じ家屋である(図-17の赤色丸)。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至っていない。図-22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。

以上より、同地区の地盤流動は、上流側の取水堰と土堤の破壊によって灌漑用水から大量の水が供給され続けたことが、甚大な地盤流動を発生させた要因と考えられる。

3. 液状化した土の特性

図-23は各地区で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。同図より、いずれも均等係数が小さく、平均粒径が 0.1~0.5mm、細粒分含有率が 1~24%の範囲にあることが分かった。

この中で液状化による噴砂として確認されているのは、Balaroa 地区北部でヒアリング調査した住民の自宅の庭で確認された噴砂（黒色線）のみであり、その他は前章で示した 4 地区の地盤流動の範囲内において表層地盤から採取した土である。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¹⁰⁾によれば、移動する表層地盤は固体状と液体状の土が混ざり合った状態と確認できるため、採取した試料が液状化した土か否かの判断は難しい。しかし、いずれも液状化の可能性ありの範囲に入っていることは明らかである。

図-24 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）を推定した結果の一例を示す。測定位置は Balaroa 地区の中流部（図-3 c)の星印）と Petobo 地区の上流部（図-9 b)の星印）である。

貫入音より土質判定を行った結果、両地区とも表層は粘性土という分類を行ったが、この点に関しては、今後、採取した試料の土質試験の結果を考慮して補正する予定である。仮に一般的な粘性土の軟弱地盤の定義を適用すれば、Balaroa 地区は軟弱な換算 N 値 4 以下の層が深さ 3m まで続き、地下水位は 1.4m であった。一方、Petobo 地区は流動後の上流部の地盤であったためか、換算 N 値 4 以下の層は深さ 1.5m までであり、地下水位は 5.9m であった。

以上より、土質判定に課題があるものの、液状化の可能性の高い軟弱な土層が存在していたことを明らかにした。

4. おわりに

本研究では 2018 年インドネシア・スラウェシ島地震において発生した、液状化に伴う大規模な地盤流動に着目し、Balaroa, Petobo, Jono Oge, Siblatya の 4 地区で現地調査を行った。その結果、地表面は比較的緩勾配であったが、軟弱な土層と豊富な地下水の存在が甚大な地盤流動被害を引き起こした要因であることを示した。

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る。

参考文献

- 1) United States Geological Survey : <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4/executive> (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) H.B. Seed and S.D. Wilson: The Turnagain Heights Landslide in Anchorage, Alaska, Soil Mechanics and Bituminous Materials Research Laboratory, UC Berkeley, 37p., 1967.
- 4) Masyhur Irsyam and 10 reserchers: Skype Meeting GEER HATTI PUSGEN on Palu Earthquake 2018 8 Oct 2018, 28p., 2018.
- 5) Masyhur Irsyam and 16 reserchers: Damages Associated with Geotechnical Problems in 2018 Palu Earthquake, Indonesia, Keynote Paper presented in 20th Southeast Asian Geotechnical Conference & 3rd AGSSEA Conference, 15p., 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) Masakatsu Miyajima, Hendra Setiawan, Masaho Yoshida, Yusuke Ono, Kenji Kosa, Ida Sri Oktaviana, Martini and Irdhiani: Geotechnical damage in the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia, Geoenvironmental Disasters, Short Report, 2019, 6:1, 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) 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)

(Received July 1, 2019)

(Accepted November 1, 2019)

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

Masaho YOSHIDA, Hendra SETIAWAN, Masakatu 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. A field investigation was 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 clarified that loose soil layer and much amount of ground water influenced the displacement of large ground flow there.