

インドネシア・パル市で発生した大規模地盤流動に関する一考察

長岡技術科学大学 熊谷泰知
長岡技術科学大学 池田隆明

1 はじめに

2018年9月28日10時02分(UTC)にインドネシア共和国のスラウェシ島中部でMw7.5の地震が発生した¹⁾。Palu市内では複数の地域で大規模な地盤流動が生じ、最も大きい地盤流動で範囲は約3.5km×1.5kmにまで達した。大規模地盤流動範囲に共通している特徴は地表面の勾配が小さい緩斜面で発生したことであり、前述での最大流動エリアの傾斜は1.9%と報告されている。コン被害の特徴として、大規模地盤流動は断層が近いこと、農業用水路が存在していることが挙げられている。また、図2の地形を見るとパル市の左右には急峻な山が存在していること、どの被害地域も緩斜面であったことが挙げられている。大規模地盤流動の発生メカニズムの一つとして、kiyota(2020)らは現地の地盤状況等から被圧地下水が地震によって破壊された不透水層を突き破って流入したのではないかと考えている²⁾。そこで本検討では、地震時に不透水層が破壊されるか、いくつかの解析ケースを考え解析的に評価していく。

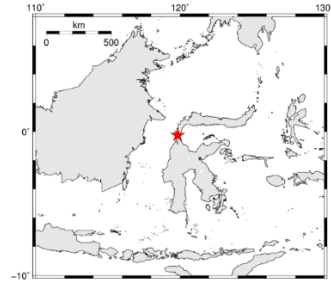


図2 震源(文献1より作成)

3. 検討方法

解析地点は図2に示すA地点とした。選定理由として、比較的地盤調査結果が多いためである。地震応答解析手法には一次元有効応力解析手法(YUSAYUSA)を使用した³⁾。

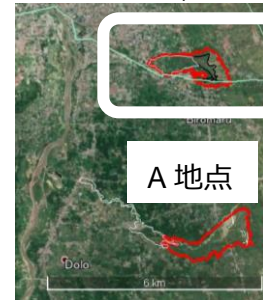


図3 解析検討地点

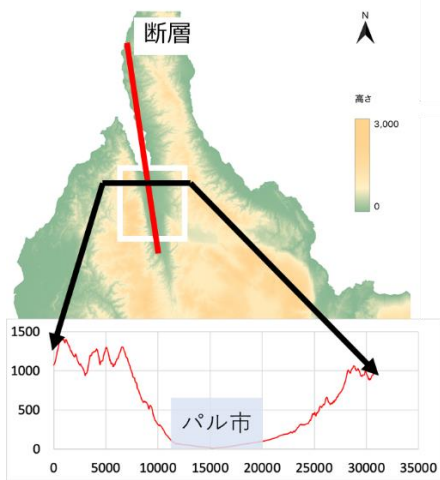


図1 地形図

2 地震概要

今回の地震は、震央0.256°S 119.846°E、震源深さは約20kmであり、起震断層はPalu-Koro断層と考えられ、左横ずれによるものである¹⁾。この地震によって死傷者は4340人、負傷者は約1万以上であり、倒壊した家屋は約9000棟で、多くは大規模地盤流動によって地中に埋もれたと報告されている²⁾。また、本震の前には前震がいくつか発生しており、最大でマグニチュード6.1で本震の約3時間前に発生した。それに加え、余震が一週間以上続いたと報告されている。また、図2の地形を見るとパル市の左右には急峻な山が存在しており、被圧地下水が存在していることがわかる。

4. 地盤モデルについて

地盤モデルは現地ボーリング試験結果をN値に基づいて分けモデル化を行った。解析に必要な地盤パラメータは密度とせん断波速度(V_s)、動的変形特性である。密度は土質区分に基づく標準値を使用する⁶⁾。当該地点ではPS検層が行われていないため推定式(1)を使用した⁴⁾。

$$\text{粘性土層} : V_s = 100N^{1/3} \quad (1a)$$

$$\text{砂質土層} : V_s = 80N^{1/3} \quad (1b)$$

地盤のせん断ひずみとせん断応力の非線形関係は双曲線モデルで表現する。本検討では様々な室内試験結果に基づき砂質土について提案された値をH-Dモデルに適用させ⁵⁾、地震動はG.L. -6.5mの工学的基盤にE+F入力した。

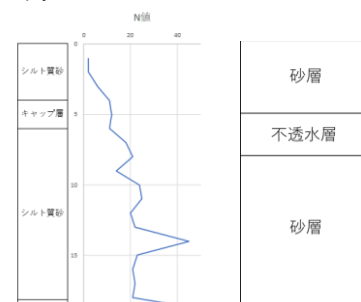


図4 地盤モデル

表 1 地震応答解析に用いる地盤モデル

層	Vs	ρ	G0	Φ	Bu	Bp
1	100	19.5	19500	14	13.0	0.250
2	100	19.5	19500	7	10.0	5.300
3	222	21.0	103496	40		
4	217	19.5	91823	15	10.0	12.00
5	224	19.5	97843	13	10.0	12.00
工学的基盤	-21.0		400			

5. 入力地震波について

図4のAB-13地点では地震観測が行われており地表における地震動記録が得られている(6)。しかし地表での観測記録であることから逆増幅解析を行い、基盤波形を求めて使用する。図3に観測された地表面での加速度時刻歴を示す。

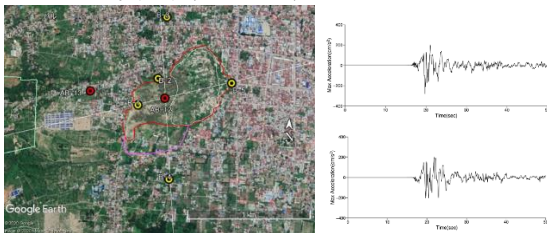
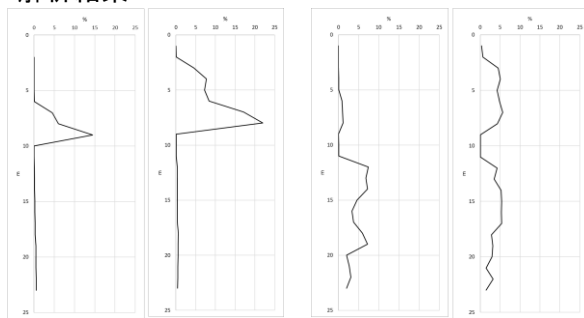


図5地震観測地点

6. 解析結果



(case1, case2, case3, case4)

図6 解析ケース

各解析ケースを比較すると、不透水層ではほとんどひずみが発生していない。そこで、不透水層の上部層下部層で発生したせん断ひずみについて比較し、考察していく。case1, case2では不透水層より上部の層で10%を超えるひずみが発生している。それに対して、case3, case4では不透水層の上部下部では5%程度のひずみしか発生していない。これらのことを踏まえると、不透水層の上部層が大きく、地盤全体に影響を及ぼしているのではないかと考えられる。液状化発生により、ひずみが大きく発生すると、直下および直上の層にまで影響を及ぼすのではないかと考えられる。今回の地盤流動は不透水層により閉じ込められていた被圧地下水が、上部層の液状化により、不透水層に綻びが生じてしまい、被圧地下水からの流入が始まり、今回の流動が発生したのではないかと考えられる。

以上のことを踏まえると液状化の発生の有無が流動に大きく影響していることがわかる。そこで非流動域での簡易液状化判定を行い、非流動域でも液状化が発生しているかについて調べた。簡易液状化判定

とは地震動レベルに応じた荷重と、N値と細粒含有率を用いて評価される強度を用いて実施した。対象地点は図2に示す通り、流動域近傍である。結果としては、非流動域におけるFL値は1を超えており、液状化しないという判定結果となった。このことを踏まえると非流動域では液状化が発生しなかったため、不透水層が損傷せず、被圧地下水の流入が発生しなかったのではないかと考えられる。

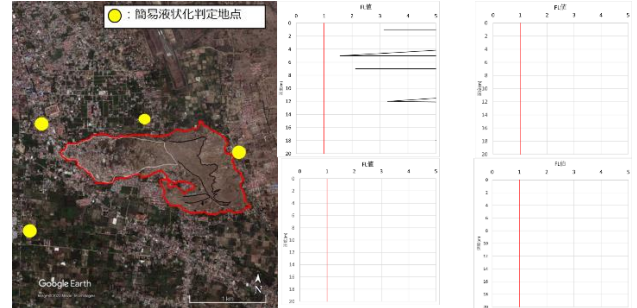


図7 簡易液状化判定

7. まとめ

今回の検討では2018年スラウェシ島地震にて発生した大規模地盤流動の発生メカニズムに関する考察を、解析的手法を用いて評価した。結果として、不透水層より上部の液状化が流動の発生に寄与しているのではないかとという結果が得られた。今後の展望としては、その他の解析ケースを考えること等が挙げられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19KK0108 および JSPS 科研費 JP18H01519, の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4/executive>
- 2) Kiyota, T. Furuichi, H., Risqi F. H., Tada, N., and Hasbullah, N., Overview of long-distance flow-slide caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia, Soils and Foundations, 60, 3, pp.722-735, 2020.
- 3) 吉田望, 東畑郁生 (1991) : YUSAYUSA-2・SIMMDL-2 理論と使用法, 佐藤工業 東京大学 https://www.jasdim.or.jp/gijutsu/jisuberi_gaiyo/index.html
- 4) (社) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 平成14年3月.
- 5) 古山田耕司, 宮本裕司, 三浦賢治 : 多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性, 第38回地盤工学研究発表会, pp.2077-2078, 2003.
- 6) JICA: Brief explanation of “Nalodo” assessment and mitigation, presentation material in National Workshop on Joint Research, Assessment and Mitigation of Liquefaction Hazards (Lesson learned from the 2018 Palu earthquake), 2019.4) <https://www.bo-sai.co.jp/Sulawesi.html>