

大規模地盤流動が発生したインドネシア・パル市における地盤の地震時挙動の評価

長岡技術科学大学 熊谷泰知
 長岡技術科学大学 正会員 池田隆明
 東京大学生産研究所 正会員 清田 隆

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エシ島中部でMw7.5の地震が発生し、震源近傍のパル市内では複数の地域で大規模な地盤流動が生じた。パル市内における強震動、津波、大規模地盤変動などによる被害は甚大であり、死者4,340人、家屋全壊9,181棟の被害が生じている¹⁾。

本研究では大規模地盤流動近傍域での表層地盤の地震時挙動を解明することを目的として、入力地震動レベルと表層地盤の地震時挙動の関係について解析的評価を試みた。

2. 検討方法

本検討では、大規模流動域近傍の非流動域で行われた地盤調査地点を対象に地震応答解析を行い、入力地震動レベルと表層地盤の地震時挙動の関係を検討する。図2にBalaroa地区の航空写真を示す²⁾。B-4地点が対象地点である。

地震応答解析手法には周波数特性を考慮した等



図2 検討対象地域 (パル市 Balaroa) (文献2を基に作成)

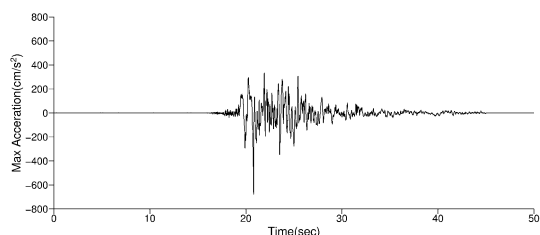


図3 1995年兵庫県南部地震・神戸ポートアイランド G.L.-83mでのN-S成分の地震動時刻歴⁵⁾

価線形解析手法 (Dyneq) を使用した³⁾。

図2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⁴⁾。しかし、デジタルデータが公開されていないため、本地震と同じ内陸地殻内地震である1995年兵庫県南部地震において神戸ポートアイランドのG.L.-83mで観測された地震動波形のN-S成分を入力地震動として使用した⁵⁾。この地震動の最大加速度を50cm/s²から20cm/s²刻みで230cm/s²まで基準化し、地震動レベルと表層地盤の地震時挙動を評価した。図3に最大加速度を基準化する前の地震動の加速度時刻歴を示す。

3. 地盤のモデル化

当該地点の地盤は、G.L.-14mまでは砂質土層、それ以深は砂礫土層で構成されている。ボーリング深度全体にわたり標準貫入試験が行われており、G.L.-6.5m付近でN値は急激に上昇しているため、G.L.-6.5m以深を工学的基盤に、以浅を表層地盤として一次元モデルを構築する。表層地盤はN値に基づき、G.L.-3m、G.L.-5mを境界に3層に区分し、各層を最大厚さ1mになるように再分割する。表1に地盤モデルを示す。

解析に必要な地盤パラメータは密度とせん断波速度(Vs)、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⁶⁾。

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

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

地盤のせん断ひずみとせん断応力の非線形関係

表1 地震応答解析に用いる地盤モデル

No		層厚 (m)	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断波速度 (m/s)
1	砂質土	1.0	19.5	115
2	砂質土	1.0	19.5	115
3	砂質土	1.0	19.5	115
4	砂質土	1.0	19.5	137
5	砂質土	1.0	19.5	137
6	砂質土	1.0	19.5	183
7	砂質土	0.5	19.5	183
	工学的基盤	-	21.0	400

は Hardin-Drnevich モデル (HD 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として $\gamma_{0.5}=0.10\%$, $h_{max}=21\%$ を表層地盤全体に使用した⁷⁾。図-5 に地盤の動的変形特性を示す。地震動は G.L.-6.5m の工学的基盤に E+F 入力した。

4. 解析結果

表層地盤の最大応答値の深度分布を比較する。図 5 に最大加速度, 最大変位, せん断ひずみの深度分布を示す。実際には $50 \text{ cm/s}^2 \sim 230 \text{ cm/s}^2$ まで 20 cm/s^2 刻みで解析を行ったが $70 \text{ cm/s}^2 \sim 230 \text{ cm/s}^2$ まで 40 cm/s^2 刻みでグラフを作成した。

最大加速度の深度分布では, 深度が浅くなるに従い最大応答値に増加傾向が見られ, G.L.-4m 以浅と以深では増加傾向に違いが見られた。

入力地震動レベルが小さい場合, G.L.-3m \sim -5m の最大せん断ひずみが最も大きい, 入力地震動レベルが大きくなると G.L. \sim G.L.-3m の最大せん断ひずみも大きくなる。検討対象地点は非流動範囲だが, 流動が地盤内の層に生じた大規模なせん断ひずみが原因なら, 地震時にある程度の集中したせん断ひずみが発生する可能性が高い。本解析では, 表層地盤内にはせん断ひずみが集中して発生する層は見られず, 基盤と表層地盤の境界部に生

じる最大せん断ひずみは, 最大入力地震動レベル 230 cm/s^2 において, 0.04% 以下であり特筆するものではない。

以上のように, 地盤の地震時挙動には特徴的な傾向はみられないため, 大規模地盤流動は地盤の地震時挙動が主たる原因ではなく, それ以外の原因が複合的に組み合わせられた結果引き起こされたと考えられる。

5. おわりに

本研究では大規模地盤流動近傍域の表層地盤の地震時挙動を解明することを目的として, 入力地震動レベルと表層地盤の地震時挙動の関係について解析的検討を試みた。

その結果, 地盤の地震挙動には特徴的な傾向が見られないことが得られた。今後, AB-13 地点で計測された地震動記録の再現や, 現地調査結果を反映させた地盤モデルの高精度化, 他の地点の地震応答解析などを行い, 大規模地盤流動のメカニズム解明を行う予定である。

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) OCHA, Central Sulawesi disasters killed 4,340 people, final count reveals, <https://reliefweb.int/report/indonesia/central-sulawesi-disasters-killed-4340-people-final-count-reveals>
- 2) 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.
- 3) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K., Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222, 2002.
- 4) BMKG and JICA, 2018: Palu Earthquake strong motion wave form by observation system developed by Japan.
- 5) 神戸市開発局: 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査 (ポートアイランド, 六甲アイランド) 報告書, 1995.
- 6) (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.
- 7) 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.

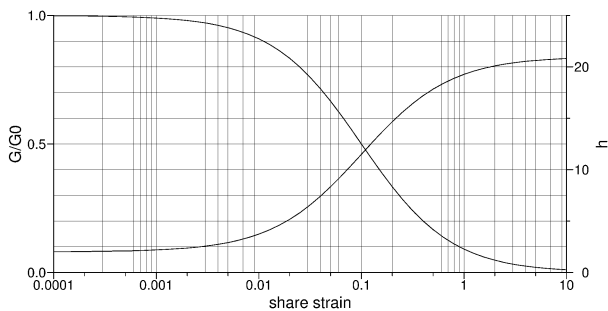


図 4 動的変形特性⁷⁾

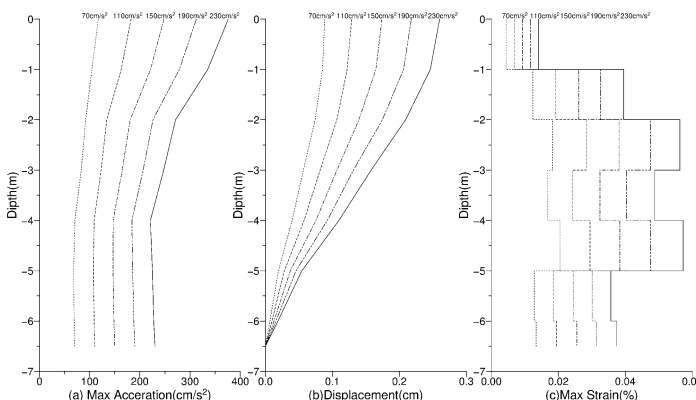


図 5 深度分布