

第Ⅲ部門

緩傾斜地における地表面勾配の局所的变化と液状化被害の関連

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○大橋 俊介
 三重大学生物資源学研究科 正会員 田中 宣多

京都大学防災研究所 正会員 上田 恭平
 京都大学防災研究所 正会員 渦岡 良介

1. はじめに

2024年1月1日16時10分に発生した令和6年能登半島地震(M7.6)によって、震源から約100km離れた石川県河北郡内灘町においても、震度5弱であったが、液状化被害が多数確認された。さらに、地表面が緩く傾斜しているところにおいて、地盤が水平に大きくすべる側方流動が多く見られた。内灘町西荒屋地区では図-1のA地点で複数の段差を伴う亀裂が発生し、B地点で斜面の押し出しや地盤の隆起が発生していた。県道8号より砂丘側の亀裂や隆起などの被害を含んだ測線(図-1)の断面¹⁾(図-2)から、左端からA地点まではほぼ平坦で、A地点からB地点までは一様な勾配の緩い傾斜であり、B地点から県道8号まではほぼ平坦であることがわかる。

本研究では実際の地形に見られるような局所的な勾配変化のある緩傾斜地盤のモデルで有効応力解析を行うことで、地表面形状が局所的な被害に及ぼす影響を評価することを目的とする。

2. 数値解析の概要

ひずみ空間多重せん断モデルを土の構成則とする、土水二相系のu-p定式化に基づく2次元有限要素有効応力解析プログラムであるFLIP(Finite element analysis of Liquefaction Program)(ver.7.4.3)²⁾を用いて解析を行った。まず、重力の影響を考慮した自重解析(静的解析)を行い、排水条件下で300秒間の地震応答解析(動的解析)を行った。

解析に用いたメッシュと境界条件を図-3に示す。地表面は、図-2をもとに簡略化して、左右50mの区間(左端~A, B~右端)が水平地盤で、その間の60mの区間(A~B)が5%傾斜している。さらに柱状図³⁾をもとに、緩い砂層、粘土層、固い砂層の3層にわけ、固い砂層の層厚はどれも13mとし、粘土層の層厚はどれも14.5mとし、地下水面勾配はそれぞれの場所における地表面勾配の半分になるように、左端~AとB~右

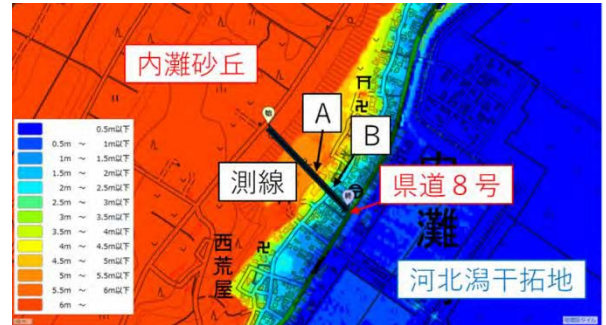


図-1 西荒屋地区の断面図作成測線¹⁾に加筆

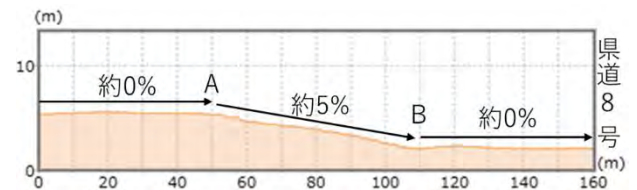


図-2 西荒屋地区の測線断面図¹⁾に加筆

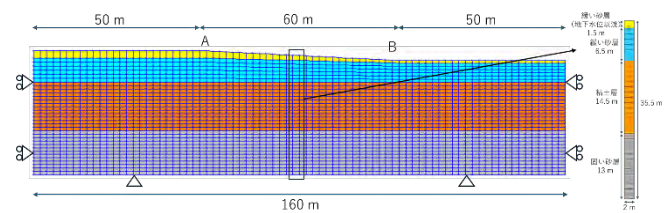


図-3 有限要素メッシュ

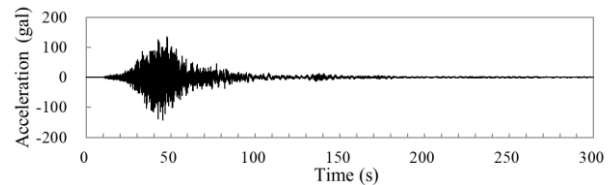


図-4 入力地震動

端の区間は0%傾斜、A~Bの区間は2.5%傾斜と設定することにした。黄色の層と水色の層の境界が地下水面である。側方境界は鉛直ローラーとし、底面は固定境界とした。また、地下水面の境界条件は、自重解析時も地震応答解析時も水圧ゼロ境界とした。地盤のパラメータは、N値、有効上載圧 σ'_v 、および細粒分含有率 F_c を用いて簡易設定法⁴⁾により設定した。

入力地震動は、震央距離108.8kmの地点である石川県河北郡内灘町大学で観測された東西方向の300秒間の地震波⁵⁾(図-4)である。

3. 解析結果と考察

加振終了時 ($t = 300$ s) のコンター図では、地表面勾配の異なる境界がわかりやすいように地表面形状をデフォルメして白線で表示している。

(1) 水平方向変位

水平方向変位コンター図 (図-5) から、地表面が水平な区間では変位が生じず、A 地点と B 地点の間の傾斜部分で大きな流動が発生していることが確認された。

これは、傾斜によりせん断ひずみの蓄積のしかたに違いがあるためだと考えられる。図-6 の液状化層での応力ひずみ関係を見ると、水平な区間はせん断応力が正と負の間を往復するため、せん断ひずみも正と負を往復している。一方、A 地点と B 地点の間では初期せん断応力の影響で、ほぼ常に正のせん断応力が作用し続けるため、せん断ひずみが一方方向に累積している。

(2) 水平方向ひずみ

水平方向ひずみコンター図 (図-7) から、A 地点では正のひずみであることから膨張し、B 地点では負のひずみであることから収縮していることがわかった。このように、地表面勾配の転換点のみ大きなひずみが発生していることが確認された。これらのひずみ分布は A 地点と B 地点の間の傾斜でのみ地盤が下流方向に流動していることに起因すると考えられる。

(3) 鉛直方向変位

鉛直方向変位コンター図 (図-8) から、地盤全体が下降傾向にある中で、A 地点では特に大きな沈下が生じている一方、B 地点では上昇していることがわかった。これらの結果を実現象として解釈すると、A 地点における膨張方向のひずみが亀裂を引き起こし、B 地点における収縮方向のひずみが隆起を引き起こすと考えられ、実際の内灘町西荒屋地区で観測された亀裂や隆起の地盤被害の発生メカニズムを説明できる。

4. 結論

局所的な勾配変化のある緩傾斜地盤のモデルで有効応力解析を行った結果、緩傾斜であったとしても、傾斜によって初期せん断応力が働くことで、傾斜部のみ下流方向への流動が生じることがわかった。さらに、傾斜部のみが流動することで、地表面勾配が変化する境界では凸部で引張ひずみと地盤の下降、凹部で圧縮ひずみと地盤の上昇が局所的に発生した。この結果は、内灘町で実際に確認された液状化被害の特徴である地盤の亀裂や隆起と一致していた。

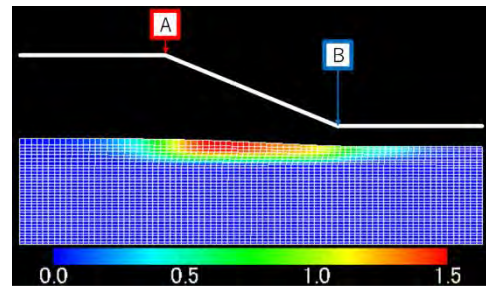


図-5 水平方向変位コンター図

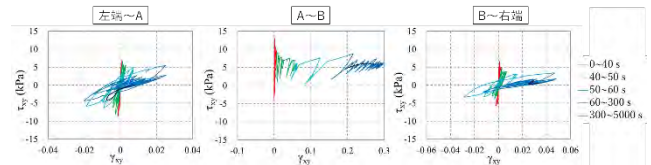


図-6 液状化層での応力ひずみ関係

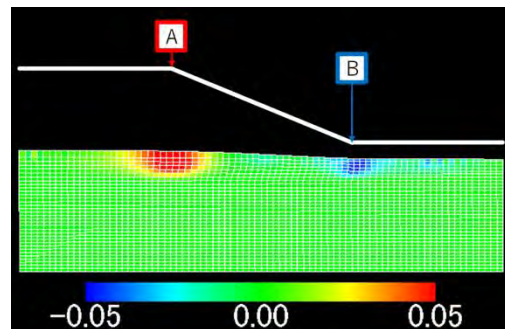


図-7 水平方向ひずみコンター図

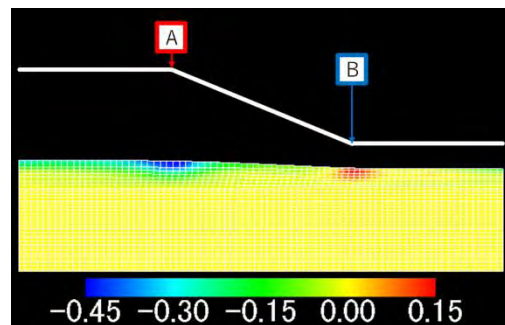


図-8 鉛直方向変位コンター図

謝辞：本研究は京都大学防災研究所共同研究（令和6年度一般共同研究 2024GC-01）の成果による。また、金沢大学の小林俊一准教授には専門的な知見を提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土地理院：地理院地図/GSI Maps, <https://maps.gsi.go.jp/>
- 2) Iai,S., Tobita,T., Ozutsumi,O. and Ueda,K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.35, No.3, pp.360-392, 2011.
- 3) 国土地盤情報センター：令和6年能登半島地震地盤情報緊急公開サイト, <https://publicweb.ngic.or.jp/emergency-1/>
- 4) 植村一瑛, 一井康二, 井合進: 液状化解析プログラム FLIP のカクテルグラスモデル簡易パラメタ設定法 (暫定版), 第57回地盤工学研究発表会, 20-11-4-05, 2022.
- 5) 気象庁：強震観測データ, https://www.data.jma.go.jp/eqe/v/data/kyoshin/jishin/2401011610_noto/index.html