

FLIP プログラムによる 2024 年能登半島地震における液状化被害の分析

上田恭平*

1. 研究の目的

2024 年 1 月 1 日に発生した令和 6 年能登半島地震 ($M_7.6$) により、震源から約 100 km 離れた石川県河北郡内灘町では、震度 5 弱にもかかわらず、緩傾斜地において液状化に伴う地盤の側方流動によって局所的な被害が見られた。本研究では、実際の現場に存在するような局所的な勾配変化のある緩傾斜地盤モデルを用いて有効応力解析を行うことで、地表面形状が局所的な液状化被害にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的とする。

2. 研究の方法

本研究では、ひずみ空間多重せん断モデルを構成則とする、排水解析機能を組み込んだ 2 次元有限要素有効応力解析プログラム FLIP (Finite element analysis of Liquefaction Program) (ver.7.4.3)¹⁾を用いて解析を行う。

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見られた。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（図-2）から、左端から A 地点まではほぼ平坦であり、A 地点から B 地点までは一様な緩い勾配の傾斜地盤、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。

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、左右 50 m の区間（左端～A、B～右端）を水平地盤、その間の 60 m の区間（A～B）を 5% の傾斜地盤とした。さらに、柱状図³⁾に基づき、緩い砂層、粘土層、固い砂層の 3 層に分け、固い砂層の層厚は一律 13 m、粘土層の層厚は一律 14.5 m とした。地下水位勾配は、それぞれの場所における地表面勾配の半分となるように設定し、左端～A と B～右端の区間は 0%，その間の A～B の区間は 2.5% とした。図-3 において、黄色の層と水色の層の境界が地下水位を示す。側方境界は鉛直ローラー、底面は固定境界とした。また、地下水位の境界条件は、自重解析時および地震応答解析時ともに水圧ゼロ境界とした。入力地震波は、震央距離 108.8 km 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地震波⁴⁾を用いた。

3. 得られた成果

有効応力減少比コンター図（図-4）から、加振終了時には地下水位以下の緩い砂層のほぼ全域で有効応力減少比が大きくなっていることがわかる。このことから、地下水位以下の緩い砂層が液状化層となっていることが確認された。さらに、地表面が水平な区間と比較して、A 地点と B 地点の間では液状化層における有効応力減少比が小さくなっていることがわかる。これは、図-5 に示す液状化層での有効応力経路から明らかなよう、A 地点と B 地点の間

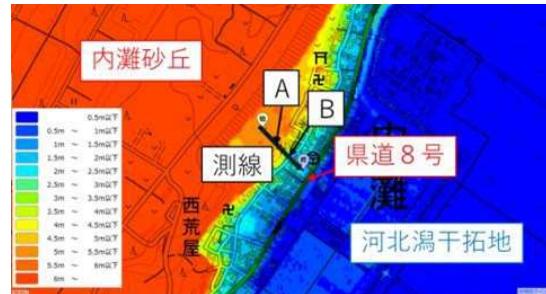


図-1 西荒屋地区の断面図作成測線²⁾に加筆

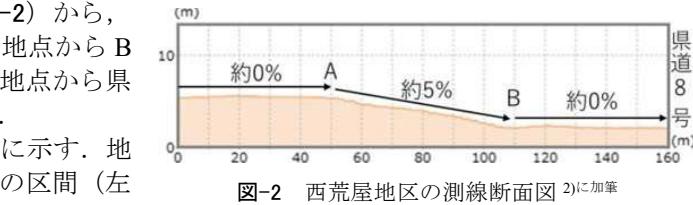


図-2 西荒屋地区の測線断面図²⁾に加筆

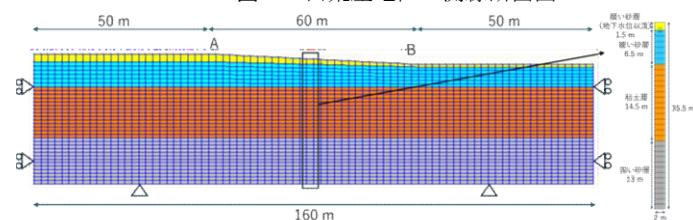


図-3 有限要素メッシュ図

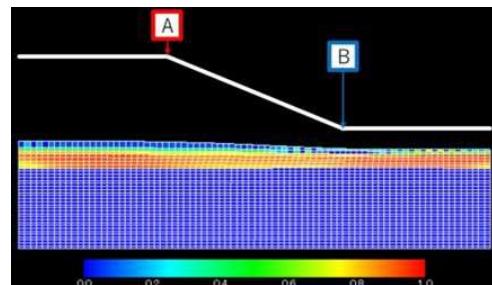


図-4 有効応力減少比コンター図

*京都大学防災研究所・准教授

では傾斜が存在するために初期せん断応力が作用しているためである。液状化が進行すると平均有効拘束圧が減少するが、初期せん断応力があることで、有効応力経路は水平な区間のグラフと比較して上方に位置し、平均有効拘束圧が十分に小さくなる前に破壊線に到達する。その結果、有効応力減少比が水平な区間よりも小さくなっていると考えられる。

水平方向変位センター図（図-6）から、地表面が水平な区間では変位はほとんど見られないのに対し、A 地点と B 地点の間の傾斜部分では顕著な流動が発生していることがわかる。これは、傾斜によってせん断ひずみの蓄積の仕方に差異が生じるためと考えられる。図-7 に示す液状化層での応力ひずみ関係を見ると、水平な区間ではせん断応力が正負に往復するため、せん断ひずみも正負に振動している。一方、A 地点と B 地点の間では初期せん断応力の影響により、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向に累積し続けている。その結果、有効応力減少比が小さいにもかかわらず、A 地点と B 地点の間で大きな変位が生じたと考えられる。

水平方向ひずみセンター図（図-8）から、A 地点では正のひずみを示し膨張している一方、B 地点では負のひずみを示し収縮しており、地表面勾配の変曲点において大きなひずみが発生していることがわかる。これらは、A 地点と B 地点の間の傾斜部でのみ下流方向に流動していることに起因する。鉛直方向変位センター図（図-9）からは、地盤全体が沈下傾向にあり、特に A 地点で沈下量が大きい一方、B 地点では隆起していることがわかる。

これらの解析結果から、現実の現象に照らし合わせると、A 地点では膨張方向のひずみが亀裂の発生を促し、B 地点では収縮方向のひずみが隆起を引き起こすと推察され、実際の内灘町西荒屋地区における亀裂や隆起といった被害状況を説明できると考えられる。

参考文献

- Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O., Ueda, K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 35(3), 360-392, 2011.
- 国土地理院：地理院地図（電子国土 WEB），<https://maps.gsi.go.jp/>（参照 2024 年 11 月 16 日）
- 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/>（参照 2024 年 11 月 1 日）
- 気象庁：強震観測データ，令和 6 年（2024 年）1 月 1 日 16 時 10 分 石川県能登地方の地震，https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/2401011610_noto/index.html（参照 2024 年 12 月 16 日）

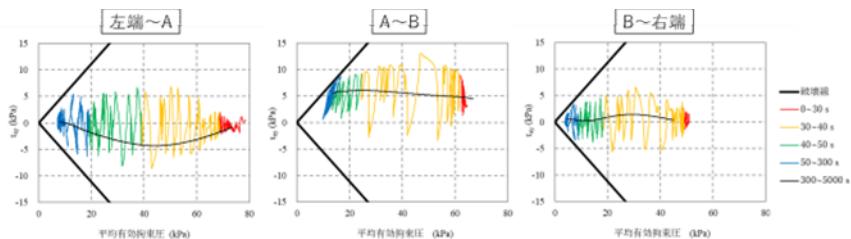


図-5 液状化層の有効応力経路

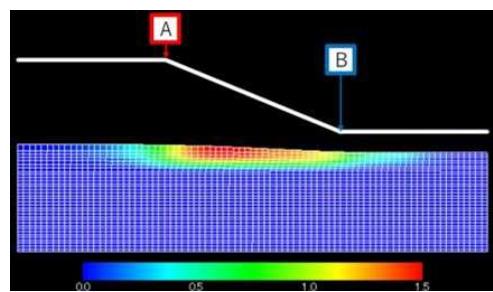


図-6 水平方向変位センター図

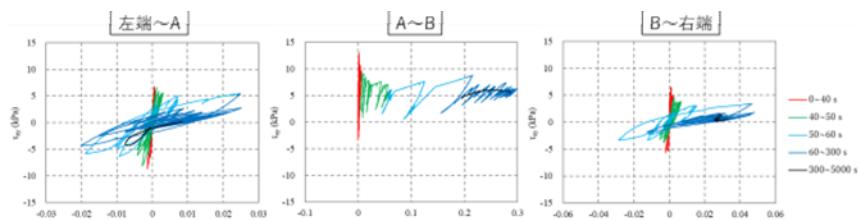


図-7 液状化層のせん断応力～せん断ひずみ関係

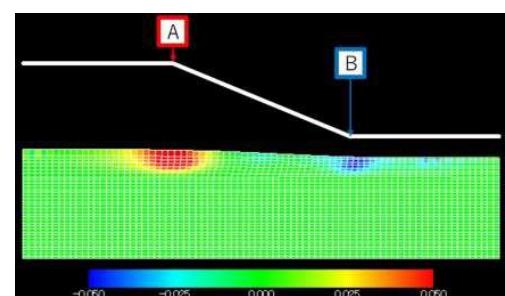


図-8 水平方向ひずみセンター図

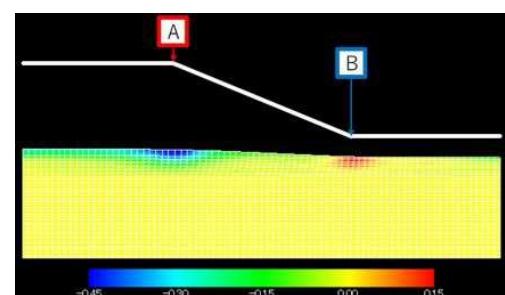


図-9 鉛直方向変位センター図