

旧河道内における液状化・非液状化地点の地震時挙動の比較

長岡技術科学大学 大学院 非会員 ○HE DUO
東京都立大学 正会員 志賀 正崇
長岡技術科学大学 正会員 池田 隆明・高田 晋

1. はじめに

令和 6 年能登半島地震では、新潟市内で広範囲に液状化被害が発生した．図-1 に、新潟大学災害・復興科学研究所¹⁾の被害調査報告に示された液状化被害地点の分布を示す．同地区では旧河道内の複数地点で噴砂や地盤変状が確認された一方、同じ旧河道内に位置する曾野木小学校の校庭では、地表に明瞭な噴砂が認められなかった．このように、同様の地形条件を有する狭い範囲内でも、液状化被害の発生状況に差異が生じている．

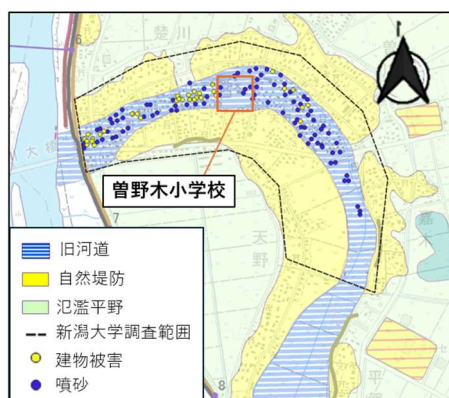


図-1 天野地区の液状化分布

この差異に関わる要因として、地点間の入力地震動、地層構造などの地盤構成、粒度分布や液状化抵抗などの地盤特性、地下水位の違いなどいくつかのシナリオが想定できる．また、地表の噴砂の有無には、地中での液状化発生の有無だけでなく、液状化は発生したが地表付近の地盤の影響で噴砂が生じなかった可能性もある．

本研究では、曾野木小学校およびその周辺を対象に、同一旧河道内における局所的な液状化被害の差異をもたらす要因を検討することを目的とする．本報告は、研究の足掛かりとして、現地調査により地点間の地盤条件の違いを把握するとともに、調査結果に基づく地盤モデルを用いた地震応答解析を行った結果をまとめたものである．特に、現地調査によって把握される地盤条件に着目し、それらが地盤応答や

過剰間隙水圧の発生に及ぼす影響を考察した．

2. 現地調査の実施概要と結果

2.1 調査目的及び調査地点

液状化被害の発生状況の差異に関わる地盤条件を把握するとともに、校庭で噴砂が発生しなかった要因を検討するため、曾野木小学校で現地調査を実施した．調査では、地層構成、地下水位および地盤の強度特性を把握し、地点間の比較を行うとともに、数値解析に用いる地盤モデルの基礎資料を得ることを目的とした．

調査地点の選定にあたっては、天野中前川原自治会の地区長から提供された資料²⁾を参照し、噴砂が確認された中庭と、噴砂が確認されなかった校庭を対象とした．同一敷地内における両地点の地盤条件を比較することで、噴砂の有無に関わる要因を検討する．図-2 に調査位置と、噴砂の確認位置を示す．

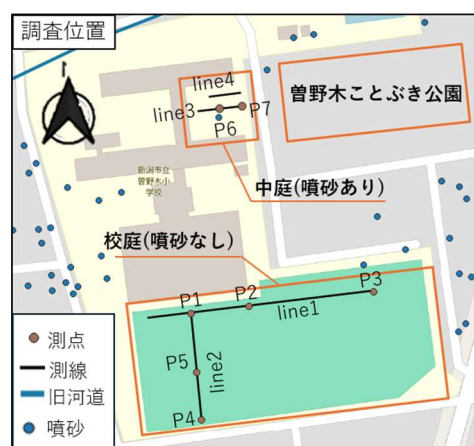


図-2 調査位置

2.2 調査手法

現地調査では、校庭および中庭において簡易動的コーン貫入試験 (PDCPT) およびスクリーウエイト貫入試験 (SWS) を実施した．限られた調査時間と実施条件の下で、複数地点の地盤の硬軟を比較するため、比較的簡便に実施できる両試験を採用した．校

庭および中庭では表面波探査(MASW)も実施し、地盤のせん断波速度分布を把握した。各測点は、併せて実施した表面波探査の測線上に配置した。なお、MASWの結果については、紙面の都合で割愛する。

これらの結果を用いて、校庭と中庭の貫入抵抗の深度分布を比較した。また、校庭については、協力会社が実施したボーリング調査資料(P5 測点付近)を併せて用い、地層構成や地下水位を整理した。

2.3 調査結果

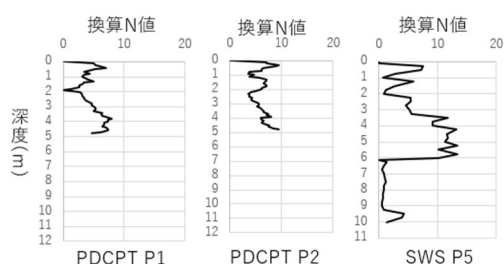


図-3 校庭貫入試験結果

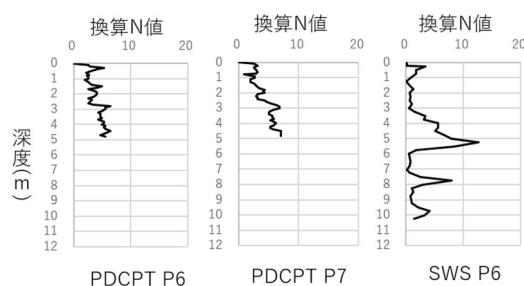


図-4 中庭貫入試験結果

図-3 と図-4 に、校庭と中庭の代表的な貫入試験結果を示す。貫入抵抗は、各試験の結果から標準貫入試験の N 値に相当する換算 N 値として整理した。その他の測点でも概ね同様の傾向が認められた。校庭では、地表面から深度 1m までの換算 N 値が中庭に比べて大きく、やや硬質な表層が認められた。一方、中庭の表層は相対的に軟弱であり、噴砂の有無が異なる地点で、表層地盤の硬さに差異が確認された。この硬質な表層は、学校建設や校庭整備に伴う人工的な締固めによって形成された可能性がある。

参考までに、『建築基礎構造設計指針』および『道路橋示方書』に基づく液状化判定によると、前者では深度 1.6m の判定点のみで液状化の可能性があると判定されたのに対し、後者では深度 0.6~4.8m の判定対象範囲全体で液状化の可能性があると判定された。判定方法によって対象となる深度範囲は異なる

ものの、地表で噴砂が確認されなかった校庭についても、地中で液状化が生じた可能性を検討する必要がある。

以上の結果から、校庭で噴砂が確認されなかった機構として、硬質な表層が下部地盤の地震応答を抑え、液状化の発生を抑制した可能性と、地中では液状化が生じたものの、硬質な表層の変形が小さく、噴砂の経路となる亀裂等が生じにくかった可能性を想定できる。

これらの調査結果を地盤モデルに反映し、地盤構成の違いが地震時の応答に及ぼす影響を数値解析により検討した。

3. 数値解析

3.1 解析手法の概要と目的

本研究では、一次元地震応答解析プログラム YUSAYUSA2⁵⁾ を用いた。本プログラムは、水平成層地盤を対象に、土の非線形性を考慮した全応力解析および有効応力解析を行い、各深度の加速度、せん断ひずみ、過剰間隙水圧などの応答を求めるものである。

解析では、前節で想定した、硬質な表層が下部地盤の応答を抑制するシナリオと、表層自身の変形を抑えることで噴砂の発現に影響するシナリオに着目した。有効応力解析に先立ち全応力解析を行い、表層条件の違いが表層および下部地盤のせん断ひずみに及ぼす影響を比較した。次に、有効応力解析により、過剰間隙水圧の上昇に伴う地盤応答の変化を調べ、その際の表層の変形と併せて、想定したシナリオとの整合性を検討した。

3.2 地盤モデルの構築と解析パラメータの設定

解析に用いた地盤モデルの土質区分および V_s 分布を図-5 に示す。地層構成と土質区分は校庭のボーリング資料に基づき、地表面から深度 20m までを層厚 0.5 m の 40 層に分割した。 V_s には、中庭付近の曽野木ことぶき公園の微動探査結果を用いた。地下水位はボーリング資料では GL-0.85m であり、解析では GL-1.0m とした。

密度 ρ は土質区分に応じて設定し、砂質土では 1.8 t/m^3 とした。初期せん断剛性 G_0 は $G_0 = \rho V_s^2$ により算定した。土の非線形性には双曲線モデルを、履歴特性には Masing 則を用いた。図-7 に、これらに基づくせん断剛性比 G/G_0 および履歴減衰定数 h のひずみ依存性を示す。基準ひずみ γ_r は砂質土で 0.10% 、粘性土・有機質土で 0.18% とし、せん断強度 τ_f は $\tau_f = G_0 \gamma_r$ により設定した。また、Rayleigh 減衰を併用し、質量比例係数 $\alpha = 0$ 、剛性比例係数 $\beta = 0.001 \text{ s}$ とした。液状化に関するパラメータは、Ishihara ら⁴⁾の液状化強度曲線へのフィッティングにより設定した(図-6)。

入力地震動には、令和 6 年能登半島地震時に校庭の南方約 200m で観測された加速度記録を、DYNEQ³⁾により引き戻した波を用いた。引き戻し計算では、上記の基本モデルと共通の地層構成および対応する地盤パラメータを用い、得られた地震動を YUSAYUSA2 に入力した。

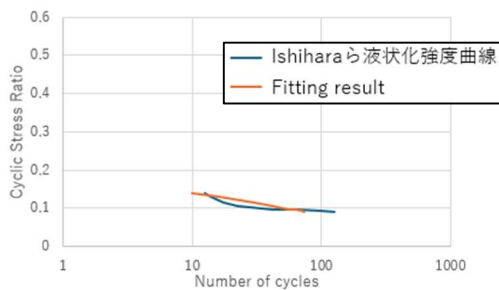


図-6 液状化強度曲線

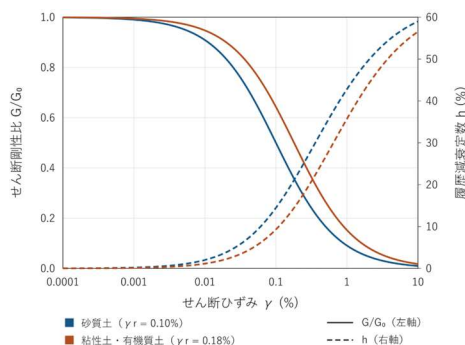


図-7 解析に用いた地盤の非線形特性

3.3 解析ケースの設定

硬質な表層が下部地盤の応答を抑制する可能性と、

表層自身の变形を抑える可能性を検討するため、表-1 のように表層の厚さおよび V_s を変化させた計 7 ケースを設定した。

case1 は、前節で構築した地盤モデルを変更せずに用いる基本ケースとし、各ケースの応答を比較する基準とした。基本モデルの地表面から深度 2m までの V_s は約 117 m/s である。その他のケースでは、表層の厚さを深度 $0 \sim 2 \text{ m}$ および $0 \sim 4 \text{ m}$ 、 V_s を $100, 250, 400 \text{ m/s}$ に設定した。これらの V_s は、それぞれ軟弱な表層、やや硬い表層、硬質な表層を想定した比較条件である。

同じ V_s で表層厚さを変えたケースを比較し、表層条件の変更による影響が及ぶ深度範囲を調べる。また、同じ表層厚さで V_s を変えたケースを比較し、表層の硬軟に対する応答の

	深度	$V_s(\text{m/s})$
case1	original	117
case2	0~2m	100
case3		250
case4		400
case5	0~4m	100
case6		250
case7		400

表-1 ケース設定

感度を検討する。各ケースについて全応力解析および有効応力解析を行い、表層と下部地盤のせん断ひずみ、ならびに過剰間隙水圧を比較する。

3.4 解析結果

3.4.1 全応力解析

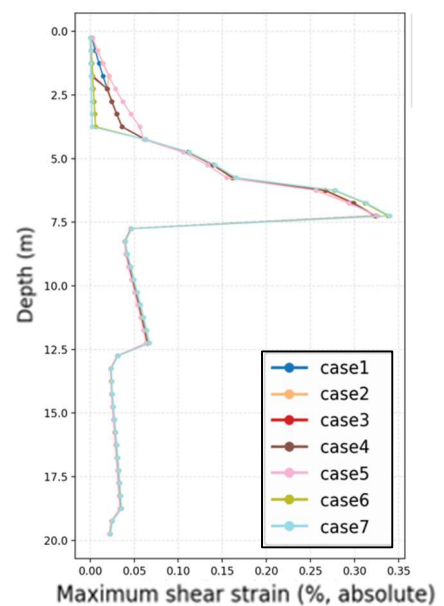


図-8 全 7case 深度ごと最大ひずみ

有効応力解析に先立ち、全応力解析により表層条件の違いが地盤応答に及ぼす影響を検討した。図-8に全7ケースの最大せん断ひずみの深度分布を示す。各ケースとも、液状化想定層とした深度3~7m付近でひずみが大きくなったが、表層の厚さおよび V_s の変更による同層付近の応答の差は小さかった。

一方、地表面から深度4m程度までのひずみは、各ケースとも下部のひずみが集中する部分に比べて小さく、表層の V_s を大きくしたケースではさらに小さくなる傾向が見られた。この結果から、硬質な表層では変形が抑えられ、噴砂の経路となる亀裂等が生じにくかった可能性が考えられる。次に、有効応力解析を行い、過剰間隙水圧の上昇および液状化の発生状況を確認するために実施した。

3.4.2 有効応力解析

図-9に全7ケースの最大過剰間隙水圧比の深度分布を示す。最大過剰間隙水圧は概ね深度とともに増加し、最大過剰間隙水圧比は液状化想定層内の深度6m付近で約0.5となった。いずれのケースも過剰間隙水圧比は1.0に達しなかった。また、表層の厚さおよび V_s を変更しても、最大過剰間隙水圧と最大過剰間隙水圧比の深度分布に顕著な差は認められなかった。

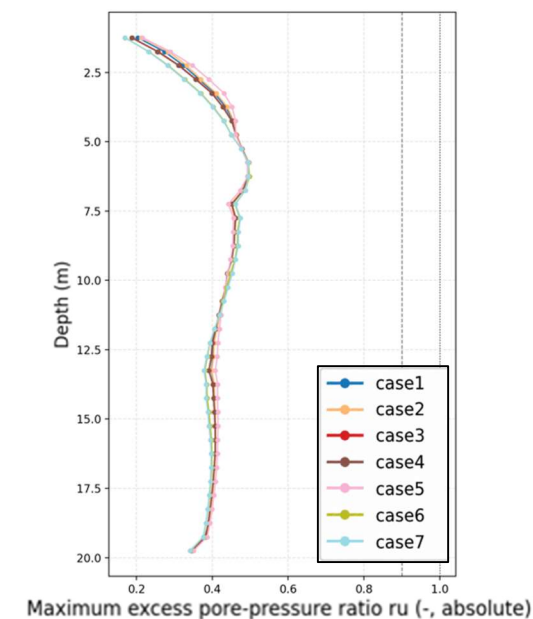


図-9 全7case 深度ごと過剰間隙水圧比

4. 結論及び考察

本研究では、曾野木小学校の校庭と中庭を対象に、噴砂の有無に関わる要因を現地調査および数値解析から検討した。現地調査では、噴砂が確認されなかった校庭に、中庭よりも硬質な表層が認められた。

全応力解析では、表層条件を変更しても下部地盤の応答の差は小さく、硬質な表層が下部の応答を抑制する効果は限定的であった。一方、表層の V_s を大きくすると表層自身のせん断ひずみが小さくなり、硬質な表層が地震時の変形を抑えることが示された。有効応力解析では、最大過剰間隙水圧比は約0.5であり、完全液状化に至らなかった。したがって、下部で液状化が生じた際にも表層の変形が抑えられるかについては、検討を要する。また、液状化層が薄かった可能性や、入力地震動の大きさによって水圧上昇が限定的となった可能性も考えられる。今後は入力地震動について引き続き検討する。

参考文献

- 1) 新潟大学災害・復興科学研究所：“2024年能登半島地震による新潟市域の液状化被害” 2024年6月
- 2) 増田進：共有資料，天野中前川原自治会，2025年6月
<https://drive.google.com/drive/u/0/folders/0AOeazPKt6Px2Uk9PVA>
- 3) 吉田望：“DYNEQ A computer program for Dynamic response analysis of level ground by Equivalent linear method”，2020年4月
- 4) KENJI ISHIHARA, YASUYAKI KOGA：“CASE STUDIES OF LIQUEFACTION IN THE 1964 NIIGATA EARTHQUAKE”，1981年9月
- 5) 吉田望，東畑郁生：“YUSAYUSA-2 SIMMDL-2 理論と使用法”，2020年5月
- 6) 国土地理院：“微地形分類図”，地理院地図（GSI Maps），
<https://maps.gsi.go.jp/>
- 7) OpenStreetMap contributors：“OpenStreetMap”，
<https://www.openstreetmap.org/>

謝辞

本研究の現地調査に際しては、曾野木小学校ならびに新潟市教育委員会の皆様に多大なるご協力を賜りました。ここに記して深く感謝の意を表します。