

一般財団法人 新潟県建設技術センター

令和6年度 研究助成事業

「令和6年能登半島地震で顕在化した新潟県内の
地盤リスク定量的評価に関する事業」

報告書

2025年3月15日

長岡技術科学大学 環境社会基盤系 助教

志賀 正崇

1. 現地調査

本事業では、2024年1月の地震発生から2025年3月までに表1-1に示すように計12回の現地調査を実施した。この現地調査では、本事業の調査対象地である新潟市のほか、同様の地形と被害形態が見られた金沢市・内灘町も含んでいる。

表 1-1 現地調査の実施日と調査対象地

日付	調査対象地
2024年1月1日	(地震発生)
2024年1月2日~4日	新潟市、氷見市、七尾市、穴水町、 金沢市、内灘町
2024年1月5日	新潟市
2024年1月11日~12日	新潟市
2024年2月20日	金沢市、内灘町
2024年2月24日~27日	七尾市、輪島市、珠洲市、 金沢市、内灘町
2024年3月5日~7日	金沢市、内灘町
2024年4月2日	新潟市
2024年9月8日~9日	輪島市、珠洲市、 金沢市、内灘町
2024年10月4日~6日	輪島市、穴水町、能登町、珠洲市、 内灘町
2024年11月26日~27日	内灘町
2024年11月29日~30日	内灘町 、輪島市、七尾市

新潟市西区寺尾上では県道16号線の北東側(砂丘高地)で舗装の圧縮ひび割れや破壊が顕著であった(図1-1や図1-2)。また県道16号線に平行に走る街路でも舗装の引張亀裂や建物の傾斜が確認できた(図1-3)。地震発生から1日後でも傾斜や変形が徐々に進行していると地元の証言が得られた。

同区寺尾東では、県道16号線の南東側の低地に向かって低層住宅や商店の基礎地盤の滑動・沈下や、舗装の亀裂・破壊が確認できた(図1-4や図1-5)。また、南東側に直行する生活道路においても、地盤や舗装に亀裂や局所的な不陸が生じ(図1-6)、住宅も沈下・傾斜の被害があった。加えて、控え壁や鉄筋による補強がないブロック塀の転倒も見られた(図1-7)。一方で北側でかつ急勾配の砂丘地盤がせり出している箇所では変状は見られなかったが、後背湿地に相当すると考えられる低地では噴砂が生じていた(図1-8)。

寺尾東の県道16号線の南側50mに平行する道路沿いでは、ブロック塀の転倒はみられるものの地盤変状・液状化の痕跡は確認されなかった(図1-9)。液状化しやすい地盤はこの付近までは連続していないと考えられる。



図 1-1 新潟市西区寺尾上の県道 16 号線の歩道部不陸



図 1-2 同区寺尾上の県道 16 号線の歩道部不陸 (遠景)



図 1-3 同区寺尾上の建物の傾斜



図 1-4 同区寺尾東での舗装部流動



図 1-5 同区寺尾東での低層住宅の基礎部沈下



図 1-6 同区寺尾東の生活道路における舗装の不陸と亀裂



図 1-7 同区寺尾東での未補強ブロック塀の転倒



図 1-8 同区寺尾東での駐車場内での噴砂



図 1-9 同区寺尾東での県道 16 号に並行する道路沿いでのブロック塀の転倒と顕著な変状のない舗装面

同区寺尾では新潟西郵便局が建物周辺部の舗装の亀裂や沈下が顕著であった（図 1-10 や図 1-11）。同郵便局は地下駐車場を有するため（図 1-12）、液状化した地盤が建物躯体を浮力を作用させ、構造物が浮上し周辺土砂が基礎の下に移動した可能性が考えられる。また県道 16 号線の北側地盤（宅地・道路）では、隆起や圧縮の痕跡が多数確認された（図 1-13 や図 1-14）。より標高が高い砂丘斜面中部には、引張亀裂やその補修痕が見られるため、液状化に伴う小規模の流動が発生し、比較的厚い路盤を有する県道で流動が止められ（図 1-15）、圧縮・隆起が生じたと考えられる。

また中央区川岸町付近では、グラウンドや駐車場で噴砂が確認されたものの（図 1-16 や図 1-17）、1964 年新潟地震で見られた構造物の転倒や沈下といった大規模な地盤変状は確認されなかった。新潟市東区では 1964 年新潟地震で主に旧河道で液状化が発生したが、2024 年 1 月 10 日時点では、明瞭な噴砂痕跡や地盤変異、建物・電柱の変状は確認されなかった。

西区の信濃川左岸地域では、治水地形分類図上で旧河道に分類される地域とその周辺で、液状化による地盤変状や構造物被害が多数見られた。西区ときめきでは、空き地において直径 4m、深さ 70cm 程度の巨大な噴砂孔が形成された（図 1-18）。同区立仏では道路の噴砂や側溝の不陸、家屋の傾斜が広く観測された（図 1-19 や図 1-20）。同区鳥原でも、住宅の沈下・傾斜が多く見られ、屋根同士が接触しているケースも見られた（図 1-21 図 1-22）。また同区善久では、住宅の沈下・傾斜、道路のひび割れが見られた。上越新幹線橋脚周辺でも噴砂が確認されたが、橋脚被害は確認できなかった（図 1-23）。

西区大友周辺では西川の自然堤防の一部が崩壊し、中野小屋郵便局周辺が被害を受けた（図 1-24）。また、古い木造構造物の一部が倒壊していた（図 1-25）。

このように、令和 6 年能登半島地震では新潟市内の西区、中央区、江南区を中心に液状化被害が見られた。筆者らの調査で液状化被害が確認できた地域を図 1-26 に示す。図 1-26(左)には背景地図として、国土地理院の数値標高モデル、また図 1-26(右)には国土地理院発行の治水地形分類図を乗せている。西区寺尾上、寺尾東、寺尾といった地区は、標高 40m 程度の新潟砂丘の南西側辺縁部に位置している。一般的に砂丘は均質な粒径の砂が堆積することが多い。また地下水位も辺縁部の標高が 0m に近いことから、砂丘軸直下と比較して、地下水位が相対的に高くなりやすい傾向にある。同様に西区ときめき、立仏、鳥原、善久などの地区は、前述のように信濃川の旧河道にあたり、流下中にゆるく堆積した砂地盤が飽和した状態で存在したことから、こちらも液状化しやすい状態であったと推察される。



図 1-10 新潟西郵便局での舗装の亀裂・沈下



図 1-11 新潟西郵便局での舗装の亀裂・沈下



図 1-12 新潟西郵便局の地下駐車場



図 1-13 西区寺尾での地下駐車場の土間コンクリートの隆起



図 1-14 同区寺尾での県道 16 号線に向かった宅地路盤の移動と舗装の圧縮破壊



図 1-15 同区寺尾での県道 16 号線南側での圧縮の痕跡



図 1-16 中央区川岸町付近での噴砂



図 1-17 北陸ガスグラウンドでの噴砂



図 1-18 西区ときめきでの噴砂孔



図 1-19 同区立仏での歩道上での噴砂



図 1-20 同区立仏での側溝の変形と電柱の傾斜



図 1-21 同区鳥原での屋根が衝突した住宅



図 1-22 同区鳥原での傾斜した住宅



図 1-23 同区善久での新幹線橋脚周辺の噴砂



図 1-24 同区大友の中野小屋郵便局周辺の自然堤防上の亀裂



図 1-25 同区大友で柱端部が崩壊した木造小屋

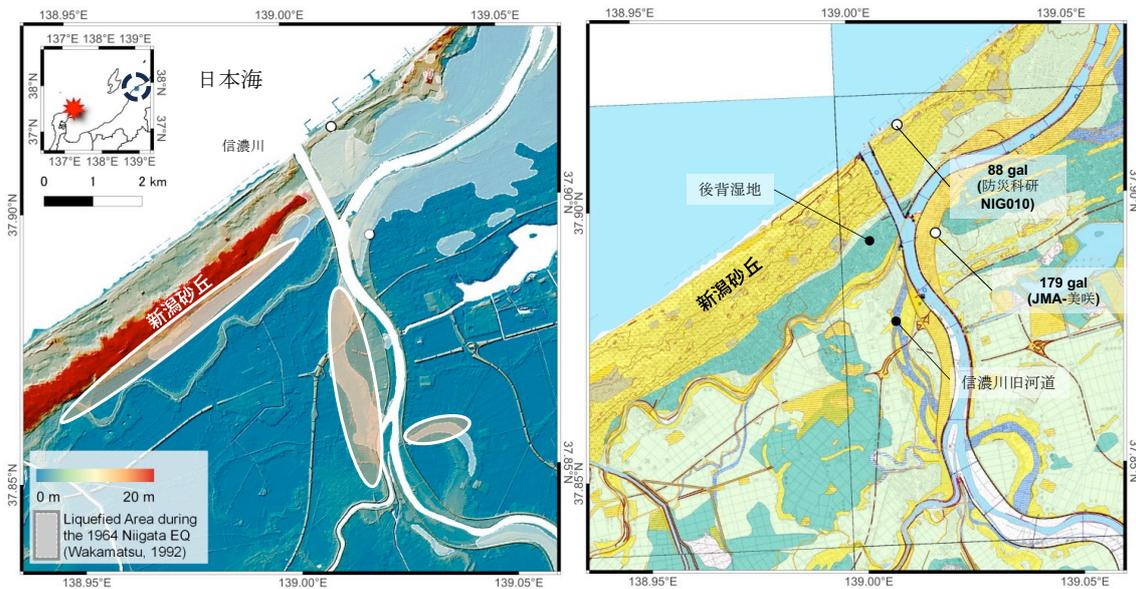


図 1-26 (左) 国土地理院数値標高モデルと被害地域 (白枠線で囲った範囲) (右) 周辺の治水地形分類図

2. 地震動

図 2-1 に新潟市周辺の公共の地震観測点の位置を、図 2-2 から図 2-5 にそれぞれの地震観測点で観測された時刻歴波形と加速度応答スペクトルを示す。水平方向の最大加速度は JMA 新潟空港の NS 成分で観測された 169.4 cm/s^2 であり、NIG010 の EW 成分が最も小さく 74.3 cm/s^2 であった。また速度波形に着目すると、後続波が主要動と同じ程度の速度振幅を有している点特徴的である。また、加速度応答スペクトルに関しては、いずれの観測地点でも 0.4 秒から 0.7 秒程度にピークを有し、NIG010 と比較すると他の 3 地点ではその周期帯の振幅が大きくなっており、局所的なサイト特性の影響が出ている可能性が示唆される。



図 2-1 新潟市周辺の地震観測点の位置

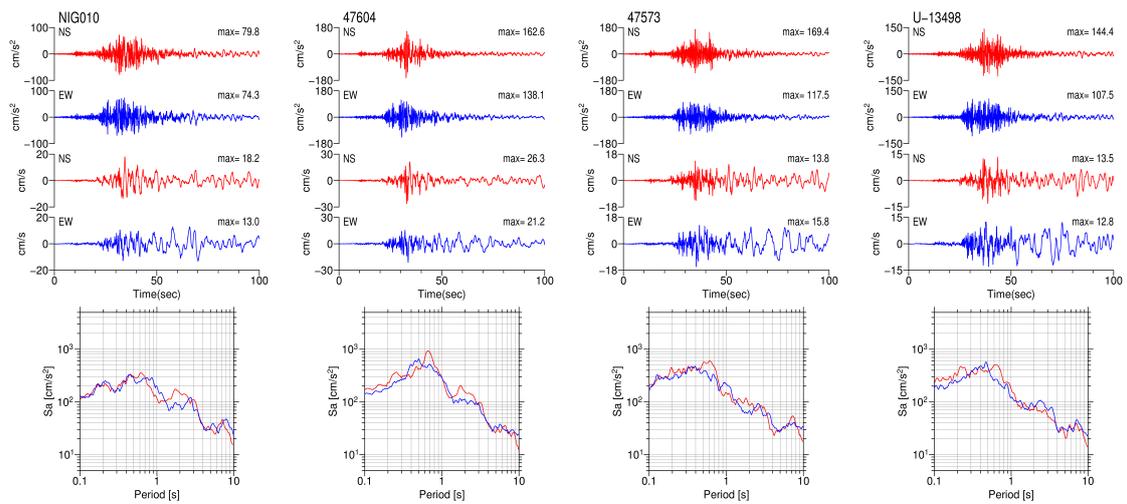


図 2-2 K-NET 新潟 (NIG010)

図 2-3 JMA 美咲 (47604)

図 2-4 JMA 新潟空港 (47573)

図 2-5 港湾・新潟港 (新潟-U)

3. 高精度中空ねじり試験装置の構築

中空ねじり試験装置は、土に作用する応力やひずみを制御することによって、種々の条件下における応力やひずみの出方（力学特性）を調べる試験装置である。土質試験、特に中空ねじり試験装置のような力学試験装置は国内でも製造会社が限られてきており、製作や維持管理に関するノウハウが失われつつある。本事業では、液状化試験が可能な試験をほぼ1から構築することをサブ目的とし、長岡技科大高田晋博士の協力のもと、中空ねじり試験装置の再構築と改良を行った。本年度は、主に载荷装置・制御盤に関する、再構築と改良を実施している。現時点では液状化試験を実施することはできていないが、装置の取り付けは概ね終了した段階にある。

载荷装置に関しては、大別してステッピングモーターやサーボモーターを使用したひずみ制御を行うものと、ペロフラムシリンダーを用いる応力制御を行うものがある。今回の装置では、液状化中の供試体の状況をより丁寧に追うため、ひずみ制御式を選択した。既存装置にはサーボモーターが付属せず、ラック・ピニオン式の载荷機構が残っていたため、他の試験装置からサーボモーターの移植を行うべく、3次元CADにより図面を起こした（図3-1）。この設計図面に基づいて、载荷装置マウントベースに追加工を行い（図3-2）、モーターの取り付けが成功した。

また制御盤に関しては、既存装置から利用可能なパーツが少なかったため、多くの設計・配置の見直しを行った。まず旧制御盤から不要と思われるパーツを除去し、一時的な解体を実施した（図3-3）。ここから、複数のパーツの組み込みを行ったが、ここでは代表例として真空槽・脱気水槽の取り付けを挙げる。

真空槽・脱気水槽とは、土の試験体（供試体と呼ぶ）の中に供給する水を扱う部分である。特に液状化などの実験では、乾燥した土に水をあとから通し、土間隙が完全に水に満たされた状態（飽和状態）とする必要がある。しかし、通常供試体の中に単なる蒸留水を通すだけでは完全飽和の状態とならず、蒸留水から空気を抜く脱気というプロセスを加える必要がある。真空槽・脱気水槽はこの蒸留水から空気を抜き続けるために存在する装置であり、常時大気圧（100kPa）程度の圧力が作用することから、製作時に緻密な管理が求められる。

本事業では、槽の底部、頂部、側面部を別々に発注した後（図3-4）、それぞれに配管等の加工を施し、最後接合を行った。特に槽の底部であるアクリル底板については、側面パイプに接着固定する関係上、マイナス公差で設計を行い、速乾性のアクリル専用接着剤で接着を行った。その後、漏気や漏水がないかどうかの確認を入念に実施し（図3-5）、購入した2基のアクリル水槽の設置を行った（図3-6）。

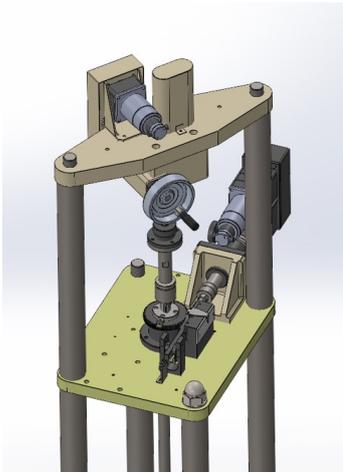


図 3-1 3次元 CAD による検討

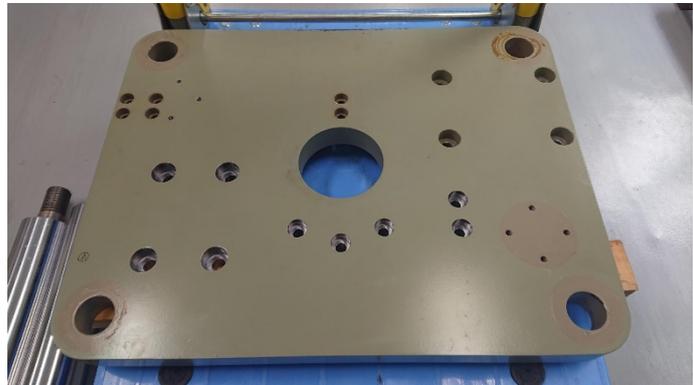


図 3-2 追加工後のベースの様子

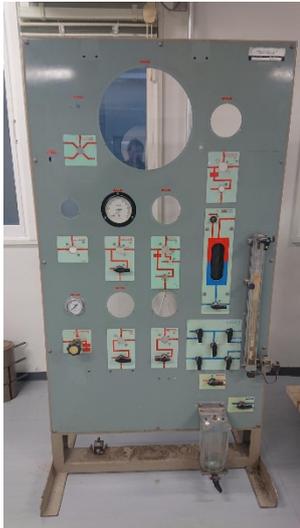


図 3-3 3次元 CAD による検討

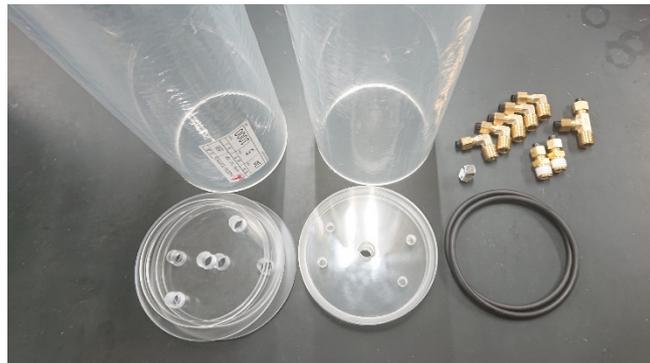


図 3-4 購入したアクリル製の真空槽・脱気水槽パーツ



図 3-5 水槽の漏れの確認



図 3-6 設置が完了した真空槽・脱気水槽

4. 既存液状化判定による定量的な評価

図 5-1 から図 5-4 に西区寺尾と西区ときめきにおけるそれぞれの N 値分布と、表層での液状化に起因する変状が確認された地点（以降簡易的に被害地点と呼ぶ）と近傍の確認されていない地点（以降無被害地点と呼ぶ）での液状化判定結果を示す。判定法と土質分類に対応する物理指標については平成 29 年度版道路橋示方書に準じた。また、地下水面の位置については孔内水位をそのまま用いた。また土質分類に基づく液状化対象層の判定は実施していない。また入力加速度は JMA 美咲で観測された最大 2 成分合成水平加速度である 179 cm/s^2 を用いた。

寺尾の無被害地点では砂丘を構成する細砂が表層から G.L. -20m 程度まで分布しているものの、N 値は表層でも 10 程度と高く、地下水位も低かった点が見て取れる（図 5-1）。一方、被害地点では、表層地盤が粘土～シルト～細砂の互層となっており、N 値も G.L. -10m 程度まで 10 を下回っている軟弱層が分布している（図 5-2）。液状化判定の結果では、この中でも G.L. -5.3m と -13.3m において FL 値が 1 を下回る深度が存在した。今後どの深度の層が液状化を発生させうるのかについては、水平方向の地盤構造を確認しながら検討を行っていく。

ときめきの無被害地点では、地下水面は地表面に存在し、N 値が 10 を下回る層が表層から G.L. -4.5m 程度までと、G.L. -7.0m から G.L. -12.5m まで存在するものの大部分が粘性土で構成される地盤構造となっている（図 5-3）。しかし、G.L. -4.22m から G.L. -7.47m に砂質土が存在し、FL 値が 1 を下回っている深度も存在する。この地点では大規模な噴砂や住宅の不同沈下などの挙動は確認されていないことから、この FL 値と実現象が合わないいわゆる「空振り」地点であると言える。

一方、ときめきの被害地点では、全体として砂質土で構成され N 値も 10 を下回る層が G.L. -12.0m まで存在している（図 5-4）。また FL 値が 1 を下回る層は G.L. -7.0～-12.5m 程度に集中して見られる。全体として、4 地点のボーリングと標準貫入試験結果は、被害地点では FL 値が 1 を下回る深度が存在し、少なくとも被害実態と FL 値の結果は符合する形となった。しかし周辺では低層住宅の庭先やピロティでの不同沈下も多くの地点で見られた点や、上越新幹線橋脚には変状が見られなかったことから、特に深い深度での液状化発生には疑問が残る。このため、地層の連続性や、FL 値が 1 を下回った深度が本当に液状化したのかについてはより詳細な検討が必要である。

図 5-5 と図 5-6 に横軸に換算 N 値 (N_1) を、縦軸に繰返しせん断応力 (L) と繰返し三軸強度比 (R_L) をプロットして記した $N_1 - L$ 関係を示す。図 5-6 は、図 5-5 の一部を拡大したものである。また、下記に示す道路橋示方書における N_1 と R_L の関係式(1)から(3)を黒い実線で示した。実線は細粒分含有率 F_c が 10%以下、20%、30%、40%の 4 ケースに対応する線を描いた。黒い実線を境目として、左上側は推定される地盤強度よりも地震外力が大きい範囲であり、右下側は地盤強度より地震外力が小さい範囲である。

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{(0.85N_a + 2.1)/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6}(N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases} \quad (1)$$

$$N_a = C_{FC}(N_1 + 2.47) - 2.47 \quad (2)$$

$$C_{FC} = \begin{cases} 1 & (0\% \leq F_c < 10\%) \\ (F_c + 20)/30 & (10\% \leq F_c < 40\%) \\ (F_c - 16)/12 & (40\% \leq F_c) \end{cases} \quad (3)$$

また、両図の灰色のシンボルは、土木研究所の報告において、2011年東北地方太平洋沖地震の際に観測された無被害地点と被害地点における N_1 と L の値をプロットしたものである。シンボルの図形ごとに、丸は液状化が発生した地点、三角は丸地点の近傍で液状化が発生した地点、四角は液状化が発生しなかった地点を示す。色付きのシンボルは、図5-1から図5-4の液状化判定結果のうち、FL値が最も低い3深度のみを抜き出してプロットしたものであり、オレンジの丸は液状化が発生した地点、青い四角は液状化が確認されなかった地点を示す。

図5-5に着目すると、2024年能登半島地震でのプロットは、換算N値では10以下の比較的低い範囲に分布していることが見て取れ、2011年東北地方太平洋沖地震でのプロット分布の内部に位置している。無被害地点のプロットは最も低い R_L を与える $F_c \leq 10\%$ の実線よりも上、 $F_c = 30\%$ の実線よりも下に位置している。また図5-6の被害地点に着目すると、寺尾は $F_c = 20\%$ 上に位置している一方、ときめきのプロットはばらついており、中砂の層はFL値が1以上となる領域に位置している。いずれの図も、2024年能登半島地震のケースのような換算N値が低く(10以下)、地震時せん断応力比も低い(0.1~0.3)程度の領域は、細粒分含有率の設定値によってFL値が大きく変化するを示唆する。

5. まとめ

本事業では大きく4つの観点から令和6年能登半島地震で発生した新潟市内の液状化特性の影響を議論した。現地調査では、主に新潟砂丘南西側辺縁部と信濃川旧河道で液状化によるものと見られる地盤変状や構造物被害が確認された。また一部地域では自然堤防周辺でも被害が見られた。また地震動に関しては、0.4から0.7秒の加速度応答が大きくなる波形であったが、同じ市内でも倍半分程度の振幅の差が見られた。3点目の高精度中空ねじり試験装置の改良・開発に関しては、いわゆるロストテクノロジーとなりつつある地盤力学試験装置について、製作工程に関するノウハウを重ね、実験装置の改良を行うことができた。また、4点目の既存液状化判定を用いた検討では、今回の被害地点のRとLの関係は、現行判定式でFL=1のラインにかなり近く位置することが分かった。この結果は小さな入力地震動の差や、原位置地盤調査に基づく物理パラメータによって判定結果が変わりうることを意味し、原位置調査やサイト特性の事前評価の重要性を明らかとした。今後は、より詳細な原位置調査や室内試験を通して、新潟市内の地盤リスクのさらなる定量化と当該地震における被害メカニズムの解明を進めていく。

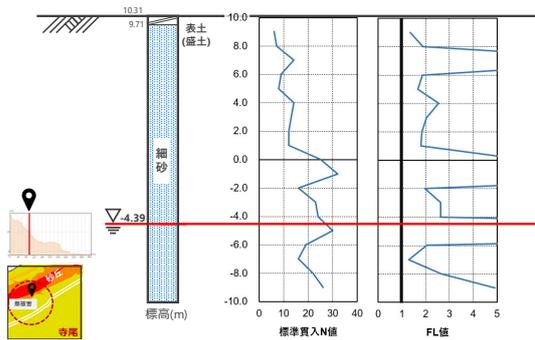


図 5-1 西区寺尾の無被害地点での土質分類, 標準貫入 N 値, FL 値

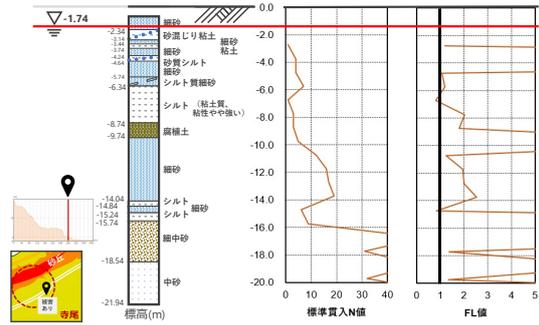


図 5-2 西区寺尾の被害地点での土質分類, 標準貫入 N 値, FL 値

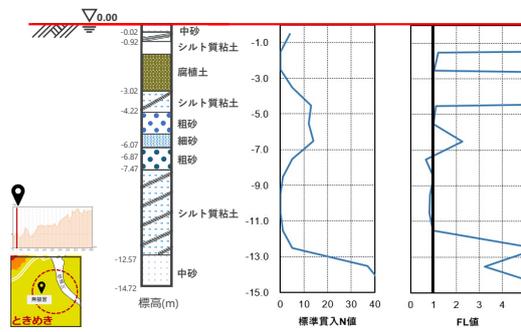


図 5-3 西区ときめきの無被害地点での土質分類, 標準貫入 N 値, FL 値

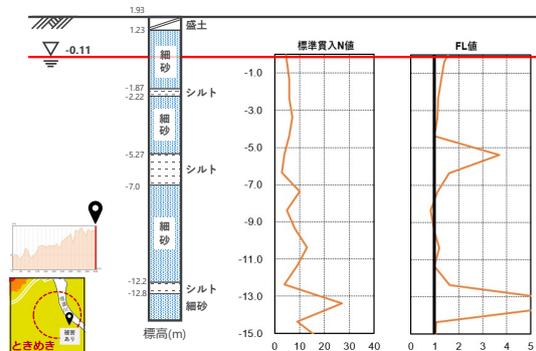


図 5-4 西区ときめきの被害地点での土質分類, 標準貫入 N 値, FL 値

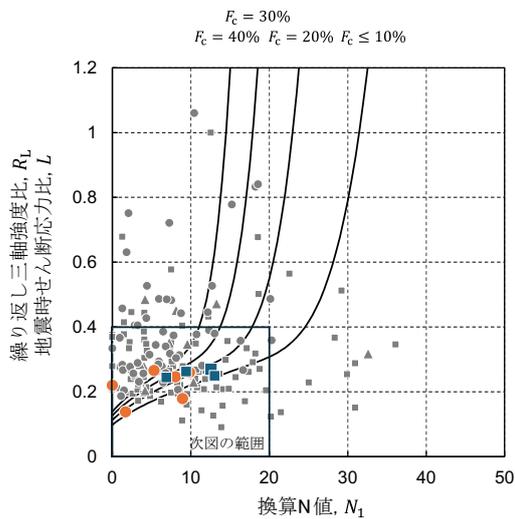


図 5-5 2011 年東北地方太平洋沖地震と 2024 年能登半島地震での N_1 - L 関係

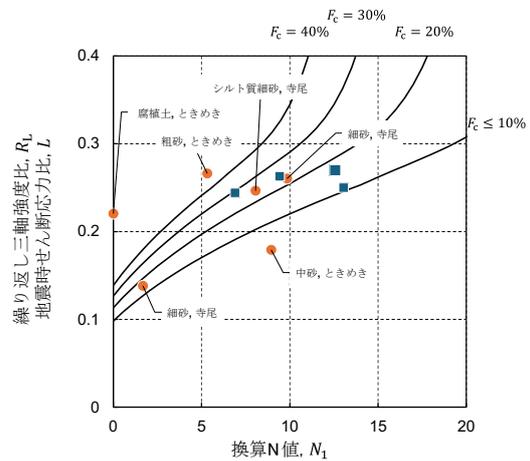


図 5-6 2011 年東北地方太平洋沖地震と 2024 年能登半島地震での N_1 - L 関係 (拡大図)