

□ 令和6年能登半島地震に伴う 地盤の液状化と今後の対策

金沢大学 理工研究域 准教授 小林 俊一

1. はじめに

砂上の楼閣という比喩がある。我々の社会や生活を支える道路や鉄道、水道やガス、電気や通信など、社会インフラに関わる設備や施設はそのほとんどが地盤の上に建設されている。また我々が居住する住宅も地盤の上に建設されている。つまり、日常の社会活動や生活は文字通り地盤によって支えられている。このためひとたび地盤の安定性が失われれば、その上に建設された社会インフラや住宅などの建造物の安定性も失われ、日常の社会活動や生活が脅かされることになる。2024年1月1日の能登半島地震（M=7.6）では多くの地盤災害により、地盤の安定性の喪失に起因する人的および物的被害が発生した。本報では、特に地盤の液状化現象に焦点を当て、その特徴を報告する。

なお本報告の地図は国土地理院の地理院地図¹⁾、地理院タイル²⁾、基盤地図情報³⁾を使用し、1/50000旧版地形図はスタンフォード大学のリポジトリ⁴⁾を利用した。

2. 地盤の液状化現象

地盤が建造物を支えるメカニズムを理解するためのキーワードは「せん断抵抗」である。人が水の上を歩けないことは子供でも知っている。瓶の中に液体を注ぐと、液体は瓶の形に追従して溜ま

る。このように液体は形のゆがみ（＝「せん断変形」あるいは「ずれ変形」）に対して抵抗できない。言い換えれば液体のせん断強度はほぼゼロである。これに対して地盤はせん断に抵抗することで建造物を安定的に支持する。もし土のせん断強度を超える力が作用するとき、地盤は破壊し、建造物の安定性が失われる。

地盤の液状化とは、地盤内の水圧上昇によって土のせん断強度がほぼゼロまで低下する不安定現象であり、以下の3つの条件が満たされるときに発生する。

- 【土粒子の状態】緩い砂地盤であること。
- 【間隙の状態】間隙が水で飽和されていること。
- 【作用する外力】地震のように短い時間に激しい繰返しせん断が作用すること。

また地盤の液状化は地震中から直後の間に生じる一時的な状態である。地震後には地盤中の水が外に排出することで、地盤内の水圧は元の状態に戻り、土はせん断強度を回復する。

もし3つの液状化発生条件から1つ以上が改善できれば、液状化発生の危険性を下げられる可能性があるため、これらに基づく各種の液状化対策工法が開発されている。

3. 令和6年能登半島地震による地盤の液状化発生地点とその特徴

地震規模と液状化発生の関係については、栗

林・龍岡の式⁵⁾ $\log_{10}R=0.77M-3.6$ が提案されている。ここに R [km] は液状化限界震央距離、 M は気象庁マグニチュードである。能登半島地震に関する液状化限界震央距離 $R \approx 178.6$ [km] の範囲と主な液状化確認地点（筆者調べ）を図1に示す。微地形分類と液状化可能性の関係⁶⁾と5次メッシュ（250m 平方）微地形分類⁷⁾および現地踏査結果を統合し、液状化確認地点の微地形の特徴を

表1に示す。微地形や液状化発生状況は局所性が高く、同一のメッシュや地区でも大きく変化する可能性があるため注意されたい。このほか輪島市や珠洲市では埋戻し土の液状化でマンホールが車道の路面の突出した例が見られた（図2）。複合災害に備えた避難経路の確保（特に津波）に懸念があるため必要な対策が望ましい。



図1 令和6年能登半島地震の液状化限界震央距離 R と主な液状化確認地点（筆者調べ）

表1 液状化確認地点の微地形

地盤種別	液状化の発生傾向	微地形	液状化発生地点の地名
自然地盤	強い (5/5)	旧河道	新潟市西区善久・鳥原、羽咋市大川町
		砂丘縁辺部	新潟市西区寺尾、金沢市粟崎、内灘町向粟崎・鶴ヶ丘・大根布・宮坂・西荒屋・室、かほく市大崎・内日角・七窪、宝達志水町柳瀬
		砂丘間低地・砂州間低地	かほく市内高松
	やや強い (4/5)	三角州・海岸低地	高岡市伏木、高岡市吉久、輪島鳳至町
		自然堤防	新潟市西区善久・鳥原
中程度 (3/5)	砂州・砂礫州	氷見市栄町※1、珠洲市蛸島町※1・川尻町・正院町・野々江町・上戸町・宝立町鶴飼、輪島市門前町道下 (※1：藤 ⁸⁾ によれば砂丘に分類)	
人工改変地	強い (5/5)	埋立地	射水市港町、加賀市潮津、あわら市吉崎、その他港湾地域
		低地（湿地）上の盛土造成地	高岡市横田町



図2 車道路面に突出したマンホール

4. 各地の液状化被害

4.1 内灘砂丘縁辺部の液状化

内灘砂丘は宝達志水町大海川河口から金沢市粟崎町浅野川河口まで、延長約 20 km、幅 1.5 ～ 2.0 km、最高標高 61.3 m に達する砂丘である。砂丘の南部、かほく市内日角から金沢市粟崎までは旧砂丘に新砂丘が重畳する二重砂丘で、旧砂丘の形成は縄文時代早期～前期、新砂丘の形成は古墳時代初期頃と考えられる。また南側ほど新砂丘が厚く金沢市粟崎では大半が新砂丘であるのに対し、内灘町大根布より北側では旧砂丘の前面または上

位を薄く被覆する程度である⁸⁾。内灘町大根布からかほく市大崎にかけては砂丘を掘削して砂を採取し、隣接する河北潟国営干拓事業（事業開始 1963年、干陸完了1971年）に利用した。

図3に示すように内灘砂丘南部の液状化確認地点は金沢市粟崎からかほく市七窪まで潟湖側の縁辺部の帯状に点在するが、特に内灘町宮坂～かほく市大崎では街区一帯で液状化が発生して側方流動を含む激しい地盤変状が生じた。

かほく市大崎付近の地形と液状化被害状況を図4に示す。オレンジ色の線は断面測線 AB の位置である。大崎地区の集落は標高 2 ～ 7 m 程度の平坦面に位置する。地区には北東から西南に平行する3本の道路が走っており、中央の道路が石川県道8号松任宇ノ気線である。同じ範囲の旧版地形図（1/50000 地形図「津幡」、1909年測図）を図5に示す。かつての砂丘の横断勾配は潟湖側の方が急であったこと、旧地形図の道路がほぼ県道8号線に対応すること、また旧汀線がほぼ現在の干拓地側の道路位置に対応することが分かる。A点の標高はもともと約40mであったことから、現集落が位置する平坦面は大規模な掘削の跡地であることが分かる。

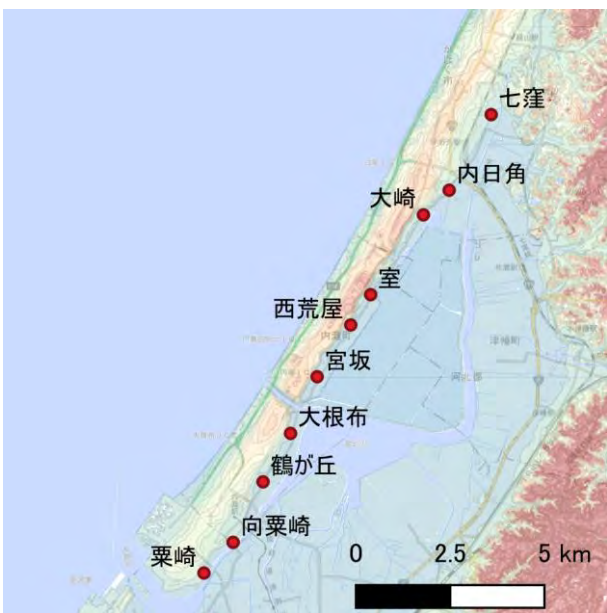


図3 内灘砂丘（南部）の液状化確認地点

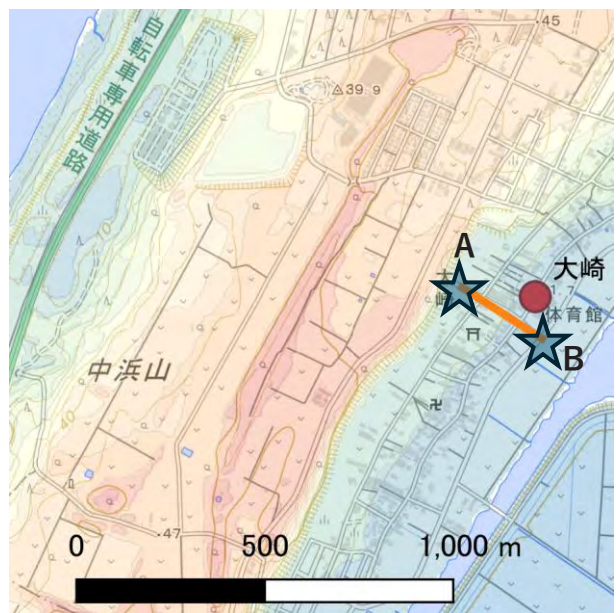


図4 かほく市大崎付近の地形図

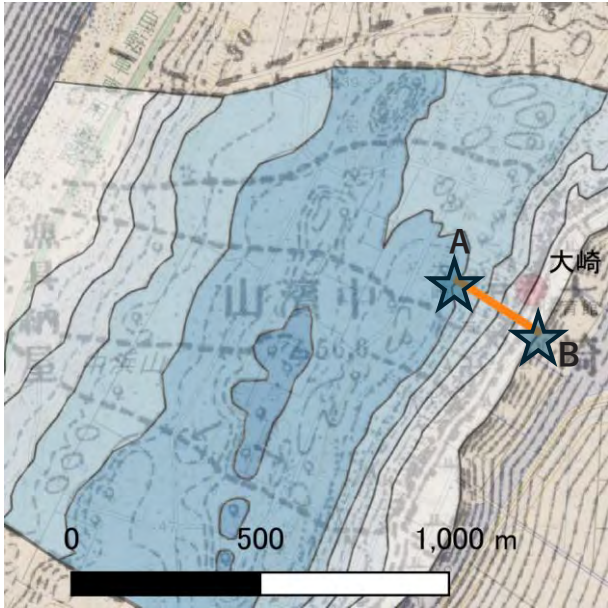


図5 かほく市大崎付近の旧版地形図

かほく市大崎の液状化発生状況を図6に示す。断面測線 AB 間は距離250m、AB 両点の標高はそれぞれ6.81m、1.19m、また区間 ACD の平均勾配は約0.9%、区間 DEB の平均勾配は約3.9%である。図中の破線は地表面のクラック位置を表す。液状化の発生は区間 CDEB で確認したが、特に区間 DE では E 側への側方流動により宅地が県道にせ

り出す特徴的な地盤変状が見られた。写真 a～d は県道8号線沿いの状況である。県道沿い砂丘側の建物では、砂丘側に大きく不同沈下したものが散見され、湧水も確認できた。

4.2 富山県高岡市伏木地区の液状化

伏木地区は江戸時代には北前船の寄港地、明治以降には日本海側の代表的港湾として発展した地区である。ここでは古くからの市街地に液状化被害が見られた。図7は液状化確認地点（筆者）と標高の関係で、各マーカーは液状化痕跡（赤色）、液状化関連被害（黄色）、無被害（青色）を表す。今回の地震では液状化被害は標高 1～2m の海岸低地（緑色エリア）と、それに隣接する標高2～3m の海岸砂州（薄いオレンジ色エリア）の内陸側に集中し、海岸砂州上や背後の丘陵（標高4m以上：赤色エリア）では確認できなかった。液状化確認地点の多くは1809年作成の伏木村絵図⁹⁾で「新開所」と示された場所に位置する。また液状化した A 地点の石碑には、一帯が1838年に低湿地に開かれた新村との説明書きがある。これらから元々は江戸時代の新田開発地域であると推

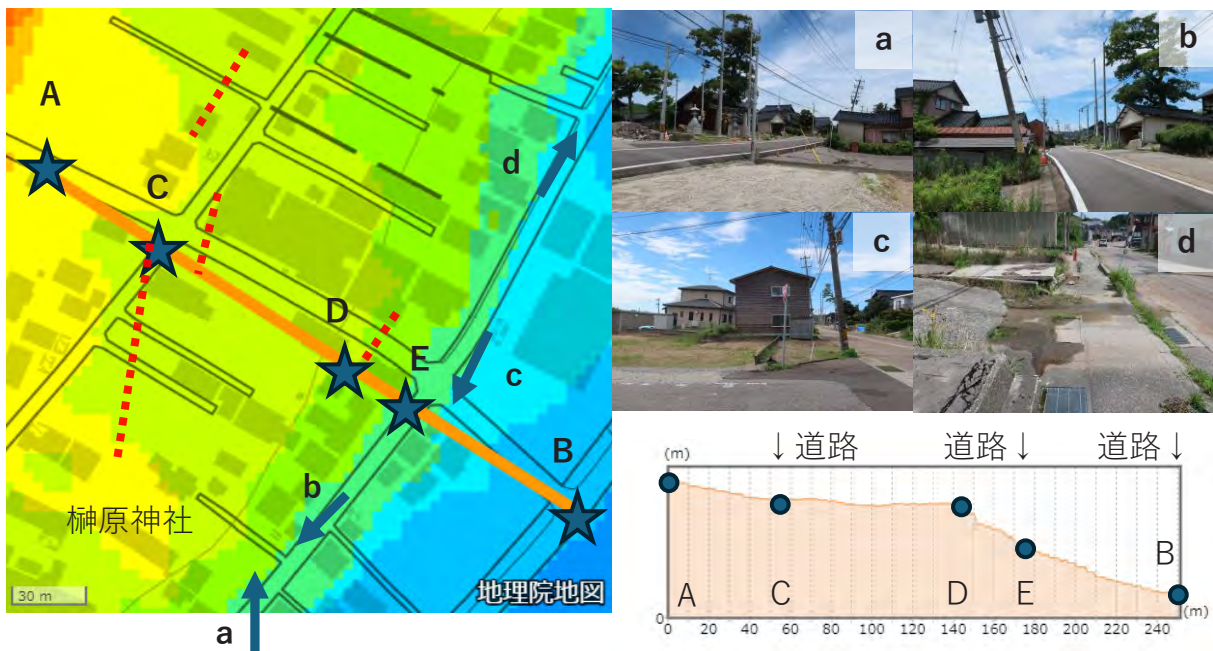


図6 かほく市大崎の液状化発生状況

測される。一方1930年修正測図の1/50000地形図「富山」(図8)には新田開発の痕跡を全く留めない。ボーリング調査結果¹⁰⁾によれば、非液状化地点B(標高2.48m)では、深度2.20m~6.50mにN=4~33で相対密度rd3(中ぐらい)のシルト混じり砂層が見られ、液状化地点C(標高1.48m)では深度1.20m~2.70mにN=5で相対密度rd2(緩い)のシルト質細砂層、深度2.70m~4.50mに

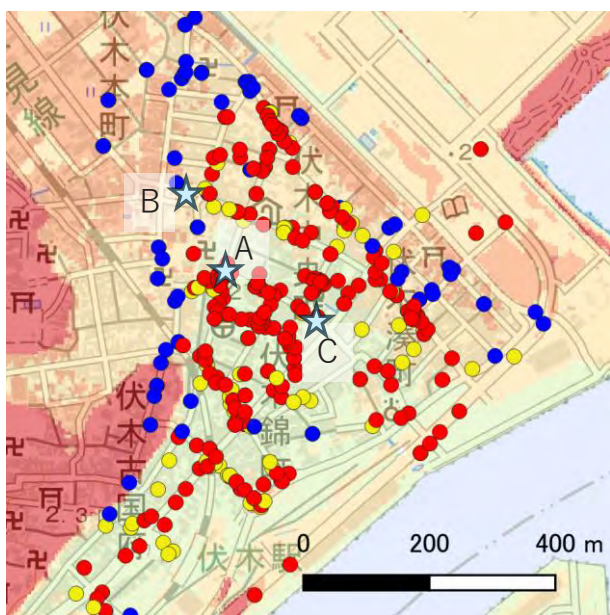


図7 伏木地区液状化確認地点と標高の関係

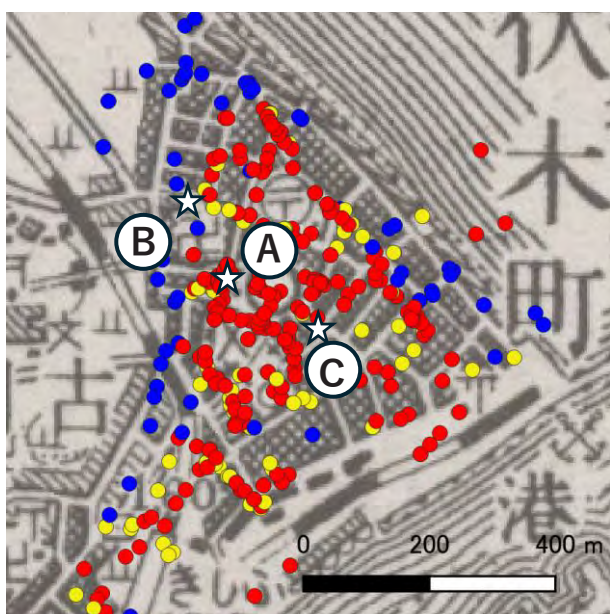


図8 旧版地形図と伏木地区液状化確認地点

N=8で相対密度rd2(緩い)の礫混じり砂層があり、含水が多く崩れやすいとの報告がある。地下水位高さの詳細は不明であるが、液状化の有無にこれらの土質条件の違いが影響したとみられる。

高岡市のハザードマップ¹¹⁾によると、伏木市街地の液状化のしやすさは中位(6段階中4、やや起こりにくい)の評価である。また2007年能登半島地震では万葉ふ頭埋立地以外は無被害で、市街地の開発年代も古い。これらの状況から、事前の液状化ハザードが十分認知されていなかった可能性がある。近代以前に市街化された地域では、明治以前に遡る土地来歴の考慮も必要であることを示唆する。

5. 地盤の再液状化

液状化後の地盤は緩い状態で再堆積する。このため過去に液状化した地盤は、今回と同等あるいはそれ以上の地震動で再液状化が発生すると考えてよい。

能登半島地震で再液状化が確認された地点をいくつか紹介する。なお入力地震動が極めて大きかった奥能登地域は割愛する。金沢地震(1799, M=6.4)では、金沢市粟崎、内灘町根布、宮坂、荒谷、かほく市大崎で液状化を示唆する記録¹²⁾、また飛越地震(1861, M=7.3~7.6)では、高岡市伏木、吉久での液状化の記録がある¹³⁾。濃尾地震(1889, M=8.0)では、かほく市や内灘町の一部で液状化が報告されており¹⁴⁾、内高松(かほく市)では135年前と同一箇所でも再液状化したとの指摘がある¹⁵⁾。新潟市西区の液状化確認地点は新潟地震(1964年, M=7.5)の液状化箇所と重複するとの指摘がある¹⁶⁾。なお過去の全国各地の液状化履歴は若松による精力的な調査成果¹⁷⁾に詳しい。

6. おわりに

2024年1月能登半島地震(M=7.6)による地盤

の液状化について概観した。地震規模が大きく、石川県、富山県、新潟県、福井県の広い範囲で地盤の液状化が発生し、宅地を中心に多くの被害が発生した。

内灘町やかほく市の一部では、地盤の液状化のために側方流動を含む大規模な地盤変状が発生し、宅地と道路に著しい被害を引き起こした。富山県高岡市伏木地区の液状化は、近代以前の土地来歴を考慮する必要性を示唆した。奥能登地域では埋戻し土の液状化により車道にマンホールが突出し、複合災害時の避難経路の確保（特に津波）に課題を残した。さらに多くの地点で地盤の再液状化が確認され、その中には1889年濃尾地震と同一地点での再液状化や、金沢地震・飛越地震に関する歴史資料の記述内容と整合する液状化地点もあった。液状化履歴による地盤の強度増加は期待できないので、過去の液状化発生地点では将来にわたって再液状化が懸念される。

ところで、液状化発生の有無は入力地震動の大きさに圧倒的な影響を受ける。北陸地方でも過去多くの地震が発生している。今回は液状化の発生を免れた地点でも、能登半島地震と同等以上の地震動が入力すれば液状化が発生することは十分にありうる。全国各地においても、地震の不確定性に注意し、各地域の想定シナリオに応じた事前の対策・対応が必要である。

【参考文献】

- 1) 地理院地図：<https://maps.gsi.go.jp/> (2024.10.5 閲覧)
- 2) 地理院タイル「淡色地図」：<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2024.10.5 閲覧)
- 3) 基盤地図情報 数値標高モデル：<https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem> (2024.10.5 閲覧)
- 4) Japan 1:50,000: Stanford Digital Repository <http://stanford.maps.arcgis.com/apps/SimpleViewer/index.html?appid=733446cc5a314ddf85c59ecc10321b41> (2024.10.5 閲覧)
- 5) 栗林栄一・龍岡文夫(1975): Brief Review of Liquefaction during Earthquake in Japan, 土質工学会論文報告集, 15 (4), 81-92.
- 6) 国土交通省都市局都市安全課 (2021): リスクコミュニケーションを取るための液状化ハザードマップ作成の手引き, https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_tk_000044.html (2024.10.5 閲覧)
- 7) 若松加寿江・松岡昌志 (2020): 地形・地盤分類250m メッシュマップの更新, 日本地震工学会誌, 40, 24-27
- 8) 藤 則夫 (1975): 北陸の海岸砂丘, 第四紀研究, 14 (2), 195-220
- 9) 射水市新湊博物館 HP: 石黒伸由関係資料「伏木村絵図」, <https://shinminato-museum.jp/docs/nobu/5039/> (2024.10.5 閲覧)
- 10) 高岡市 HP: 令和6年能登半島地震 液状化対策について, <https://www.city.takaoka.toyama.jp/gyosei/sangyo-business/92/11151.html> (2024.10.5 閲覧)
- 11) 高岡市 HP: 高岡市地震防災マップ https://www.city.takaoka.toyama.jp/gyosei/kurashi_tetsuzuki/anzen_anshin/8/1/8242.html (2024.10.5 閲覧)
- 12) 寒川 旭 (1986) 寛政11年:(1799年) 金沢地震による被害と活断層, 地震 2 (39), 653-663
- 13) 内閣府 (2008): 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書, 1858飛越地震, 2.1節 平野部の被害.
- 14) 村松郁栄・小見波正隆 (1992): 濃尾地震 (明治24年) 当時のアンケート調査回答集, 防災科学技術研究所研究資料, 155, 1-841
- 15) 若松加寿江・吉田 望・陶野郁雄・青山翔吾 (2024): 令和6年能登半島地震による液状化発生地域の土地条件と液状化履歴 (その2. 能登半島地域), 日本地震工学会 HP https://www.jaee.gr.jp/jp/wp-content/uploads/2024/01/20240101noto_wakamatsu_no2.pdf (2024.10.5 閲覧)
- 16) 石川敬祐・安田進 (2024): 2024年能登半島地震 地震被害調査一速報02ー, 土木学会地震工学委員会 地震被害調査小委員会 HP https://committees.jsce.or.jp/eec205/system/files/Ishikawa_TDU_2024NotoEq_02.pdf (2024.10.5 閲覧)
- 17) 若松加寿江 (2011): 日本の液状化履歴マップ 745-2008, 東京大学出版会