

令和6年能登半島地震における地盤流動に関する現地調査からの考察

－ 地盤流動特性と地盤流動対策の概念 －

常田賢一

(一社) 地域国土強靱化研究所 顧問、大阪大学 名誉教授

概 要

令和6年能登半島地震において、地盤工学的に特筆されるのは、石川県内灘町の液状化に起因する地盤流動および地盤流動に起因する住宅などの被害である。本文は、令和6年2月下旬に実施した内灘町の地盤流動に関する調査結果およびその考察である。なお、現時点の限られた情報の範囲ではあるが、内灘町の傾斜地の5断面を中心とした地盤流動状況、住宅などの被害の実態に基づいて、傾斜地の特性、地盤の変状特性、地盤のずれの規模、県道8号などの地盤流動の抑制要因、地盤流動変位量の算定方法、地盤流動対策の概念を報告する。

目 次

1. はじめに	2
2. 調査地域および傾斜地の特性	2
3. 地盤流動の発生および被害の特性	4
3.1 地盤流動による地表部の変状形態	4
3.2 県道8号の変状特性	4
3.2.1 道路の移動とずれ変位	5
3.2.2 道路の隆起とずれ変位	5
3.2.3 道路の沈下と噴砂・隆起	6
3.3 県道8号の沿道の変状特性	6
3.3.1 住宅地・住宅の隆起・沈下・傾斜	6
3.3.2 交差道路の隆起とずれ変位	7
3.4 野地傾斜地における地盤流動の基本性状	7
3.5 液状化・地盤流動の抑制要因	9
3.5.1 地盤流動被害の差異と要因抽出	9
3.5.2 県道8号の舗装・路床構造による抑制	10
3.5.3 建築物等の基礎構造による抑制	10
3.5.4 道路などの盛土構造による抑制	11
3.5.5 水路の護岸構造による抑制	11
3.5.6 傾斜地上端付近の砂丘の隣接地盤構造による抑制	12
4. 地盤特性および傾斜地の地盤モデル	12
5. 地盤流動対策の視点	13
5.1 地盤流動の発生機構	13
5.2 地盤流動変位量の関係要因および影響度	14
5.3 地盤流動対策の視点	16
6. まとめ	16

参考文献

1. はじめに

令和6年能登半島地震において、地盤工学的に特筆されるのは、石川県内灘町の液状化に起因する地盤流動（側方流動とも呼ばれる。）および地盤流動に起因する住宅などの被害である。

液状化は1964年新潟地震で顕在化し、その後、道路橋を始めとして耐震設計法が整備、改定されて現在に至っている。他方、液状化に起因する地盤流動は、1983年日本海中部地震を契機として、浜田ら¹⁾が指摘した地盤変状である。現在までの約40年間において、1995年兵庫県南部地震では、湾岸埋立地の護岸部の地盤流動変位により、道路橋の橋桁が落下したことからの、道路橋示方書²⁾では杭基礎に作用する流動力の算定式が規定されるなどの取り組みはあるものの、液状化と比較して頻度が少なく、そのため被害が目立たないため、社会的関心は高くはないまま現在に至っていたのが実状である。

そのような状況にあって、今次の地盤流動による住宅地などの被害により、改めて、地盤流動が注目されたが、今後の復旧・復興に向けて、具体的な液状化および地盤流動の対策が必要とされている。

本文は、2月27日に実施した、内灘町の地盤流動に関する調査結果および考察である。現時点の限られた情報の範囲ではあるが、内灘町の傾斜地の5断面を中心とした地盤流動状況、住宅などの被害の実態に基づいて、傾斜地の特性、地盤の変状特性、地盤のずれの規模、県道8号などの地盤流動の抑制要因などの知見を報告する。

なお、本文の内容は、文献3および文献4に投稿中であるが、事例の詳細は文献4を参照されたい。

2. 調査地域および傾斜地の特性

調査地域は、図-1の中央部の内灘砂丘の東側（図の下側）を南北に縦貫する県道8号沿いであり、鶴ヶ丘2丁目付近、西荒屋地区の西荒屋交差点付近および室地区の水門付近の3地域である。

地盤流動では傾斜地が対象であるが、傾斜方向に横断面を設定したのは、図-2の断面1、図-3の断面2、断面3、断面4および図-4の断面5の5断面である。いずれもほぼ県道8号と交差する方

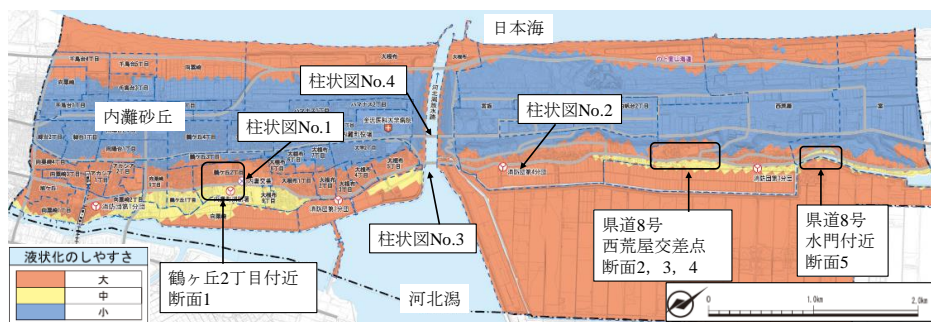


図-1 内灘町の液状化マップと調査地域：文献5に加筆



図-2 鶴ヶ丘2丁目付近：調査断面1
Google Earth（2022.5）に加筆



図-3 西荒屋交差点付近：調査断面2～4
Google Earth（2022.5）に加筆

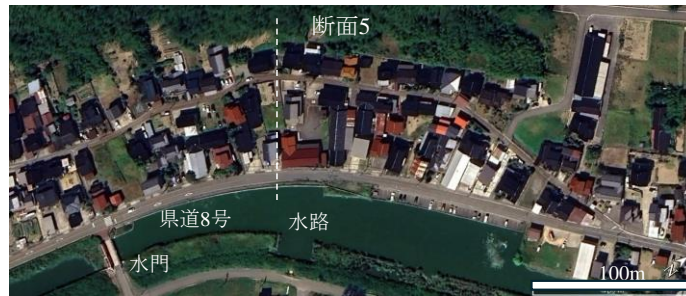


図-4 水門付近：調査断面5：Google Earth（2023.8）に加筆

向である。特に、断面5は水路護岸の影響に着目しているが、断面1～4とはやや条件（傾斜地長、勾配など）が異なる。

各断面では、国土地理院：GIS Maps⁶⁾により、今次の地震の発生前の地図上に表示される標高（0.1m単位）を読み取り、また、県道8号の西端（座標0.0、砂丘方向が+）からの水平距離を計測して傾斜地の断面図を作成したのが図-5である。

図-5から、断面1～4の地域の傾斜地の特性は、下記の通りである。なお、断面5は差異を付記。

- i) 干拓地端の標高は0.4～0.8m。
- ii) 干拓地端から県道8号（幅8m）東端までの距離は58～97m。最大で100m程度。
- iii) 断面1～4の県道8号の標高は1.9～2.3m。概ね2.0m。水路護岸の断面5は0.6m。
- iv) 県道8号西端から傾斜地上端までは108～164m。概ね150m程度。断面5は78m。
- v) 傾斜地上端の標高は4.0～5.9m。最大で6m程度。断面5は3.9m。
- vi) 断面1～4の傾斜地全体の平均勾配は $0^{\circ}51' \sim 1^{\circ}21'$ （1.5～2.4%）。断面5は $2^{\circ}23'$ （4.2%）。
- vii) 県道8号砂丘側傾斜地の平均勾配は $0^{\circ}54' \sim 1^{\circ}25'$ （1.6～2.5%）。断面5は $2^{\circ}23'$ （4.2%）。

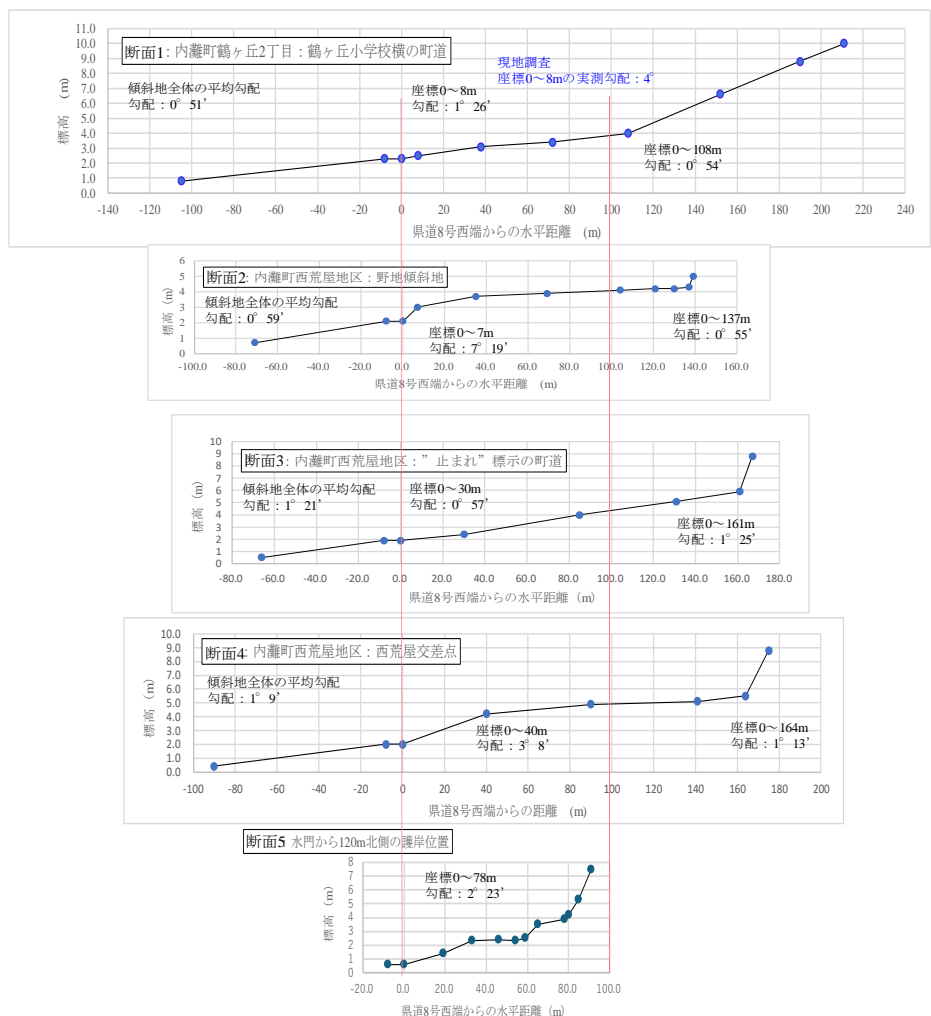


図-5 断面1～5の傾斜地の概況：断面5は護岸（座標-8m）に隣接

3. 地盤流動の発生および被害の特性

3.1 地盤流動による地表部の変状形態

今次の強震観測結果⁷⁾によれば、内灘町に隣接する津幡（震央距離 94km）および金沢（同 120km）の三成分合成の最大加速度は、それぞれ 195.2gal および 224.3gal であり、震央距離で津幡と金沢のほぼ中間にある内灘町の地震動規模は概ね 200gal 程度と推測される。

地盤流動の一般的な地盤変状は、**写真-1** のように、液状化の発生を示す噴砂、表層の亀裂・ずれ・ずり落ち・段差・陥没などである。なお、これらの変状は局所的であり、住宅などの被害に直接的に関わるが、さらに、**写真-2** のような広域的、面的な変状の発生も地盤流動の特徴である。

そのため、地盤流動による地盤変状、被害は、液状化だけの場合よりも複雑で広域にわたる。



写真-1 地盤流動の局所変状：矢印は概ねの傾斜方向

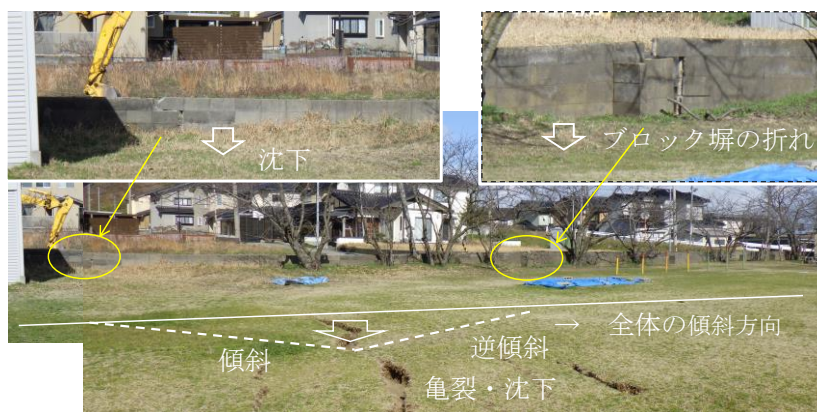


写真-2 地盤流動の広域的・面的な変状

3.2 県道8号の変状特性

内灘町の地盤流動は、内灘砂丘の東側を南北に縦貫する県道8号のほぼ東西方向、横断方向に発生しているのが特徴であるが、県道8号の変状には下記の3形態がある。

- i) 道路の移動とずれ変位
- ii) 道路の隆起とずれ変位
- iii) 道路の沈下と噴砂・隆起

3.2.1 道路の移動とずれ変位

写真-3は断面2付近の道路および両側の沿道の状況である。砂丘側の沿道で20cm程度、干拓地側の沿道で数cm（推定）の水平ずれ変位が発生しているが、道路自体の変状は皆無であり、僅かな移動に留まっている。

この写真と類似の状況は他の随所で見られており、県道8号による地盤流動の抑制が示唆される。ここで、地盤流動が道路（舗装と路床で1m程度の層厚）で抑制されていることから、地盤流動の発生深度は数m以内の浅層と推測される。



写真-3 県道8号と沿道の変状：西荒屋交差点付近：断面2

3.2.2 道路の隆起とずれ変位

写真-4は道路自体が隆起した数少ない事例であるが、道路は地盤流動により干拓地側に押し上げられて40cm程度蛇行し、砂丘側と干拓地側の道路の高低差は約110cmであり、大規模変状である。

本例は、地盤流動の規模が大きく、写真-3とは異なり、道路で抑止できない規模の地盤流動の場合は、道路が直接的に影響を受けることを示唆する。



写真-4 道路の隆起による干拓地側への変状

3.2.3 道路の沈下と噴砂・隆起

写真-5は道路自体が沈下した数少ない箇所であるが、砂丘側の沿道では多量の噴砂があり、それが原因と推測される。なお、砂丘側の沿道の駐車場の土留めが道路側に傾斜しており、写真-3と同様に、道路が地盤流動を抑制している様子が見られる。なお、右上の写真の噴砂は、粒径が揃った、細かいきれいな砂である。



写真-5 道路の沈下と沿道の噴砂・隆起

3.3 県道8号の沿道の変状特性

内灘町の地盤流動では、県道8号の沿道に特異な変状が発生しているが、沿道の住宅地・住宅などおよび交差道路の変状は、下記の通りである。

3.3.1 住宅地・住宅の隆起・沈下・傾斜

写真-6 は道路の砂丘側に隣接する駐車場の隆起とそれに起因する背後の傾斜・逆傾斜による駐車場と店舗の沈である。

このような県道8号の砂丘側の沿道の隆起による住宅などの被害は随所で見られている。

なお、現地調査では住宅などの被害に関係する地盤の流動規模を把握するために、隆起した側溝、コンクリート版などの変形の計測を実施している（写真-7参照）。これらを含めた現地の状況によれば、隆起量、水平変位量について、道路に隆起・沈下が発生しない場合、次のi)～iii)の特徴がある。



写真-6 駐車場などの隆起・沈下・傾斜：断面1付近

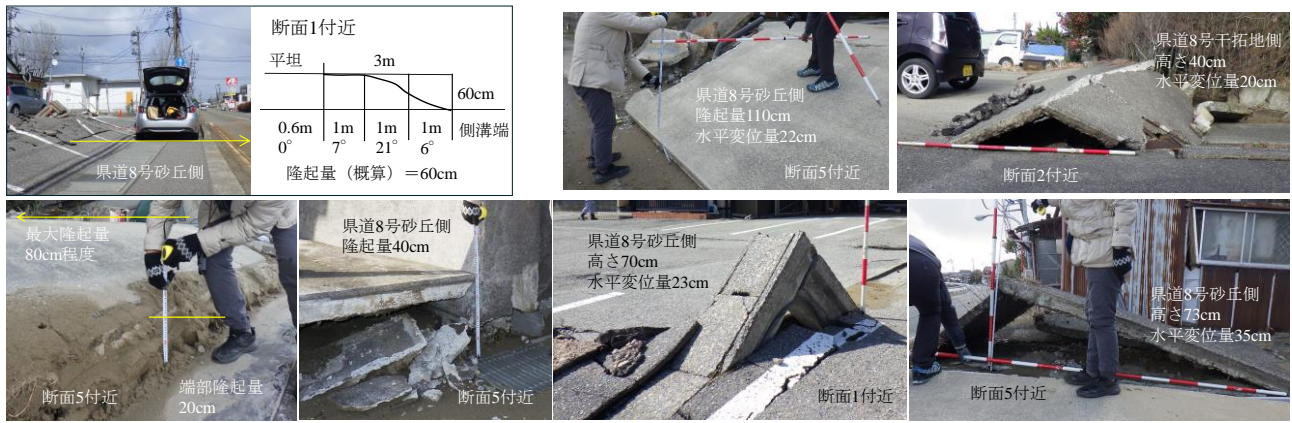


写真-7 表層地盤の隆起量、水平変位量を把握するための変状計測

- i) 砂丘側の水平変位量は、概ね 20～35cm。
- ii) 干拓地側の水平変位量は、全体的には概ね数 cm (目視推定)。
- iii) 砂丘側の隆起量は、大きくとも概ね 60～110cm。

上記の通り、視覚的に変状が顕著に見えるが、水平変位量はたかだか 35cm 程度以下である。しかし、その程度でも住宅などの被害は大きい。

3.3.2 交差道路の隆起

県道8号と交差する道路は、地盤流動による地盤変状が明瞭に出現することから調査している。

写真-8 は断面3で県道8号と交差する町道であるが、現地調査時点でも地震直後の隆起状態にあった。そのため、折損して突出した側溝の形状を計測したが、突出長は 62cm 程度であるものの、水平変位量は 27cm 程度である。

上記の県道8号と交差する道路の隆起からも、県道8号の砂丘側での流動抑制が示唆される。



写真-8 交差道路の隆起：西荒屋地区、断面3

3.4 野地傾斜地における地盤流動の基本性状

現地調査において、住宅などの構造物が無い野地(草地)状態の傾斜地(本文では、野地傾斜地と呼ぶ。)があり、亀裂幅、亀裂分布などの変状計測を実施している。

対象は断面2であるが、図-6が傾斜地の全景であり、県道8号西端から砂丘端に至る概ね140mの範囲である。

当該の野地傾斜地の亀裂などの概測は図-7の通りであり、明確な変状は亀裂の6箇所(亀裂①～⑥)と車道端(ずれ20cm)の7箇所であるが、それらは離散的な分布が特徴である。なお、最上端の亀裂⑥は道路端から95mである。



図-6 野地傾斜地の概況：Google Earth(2023.8)に加筆

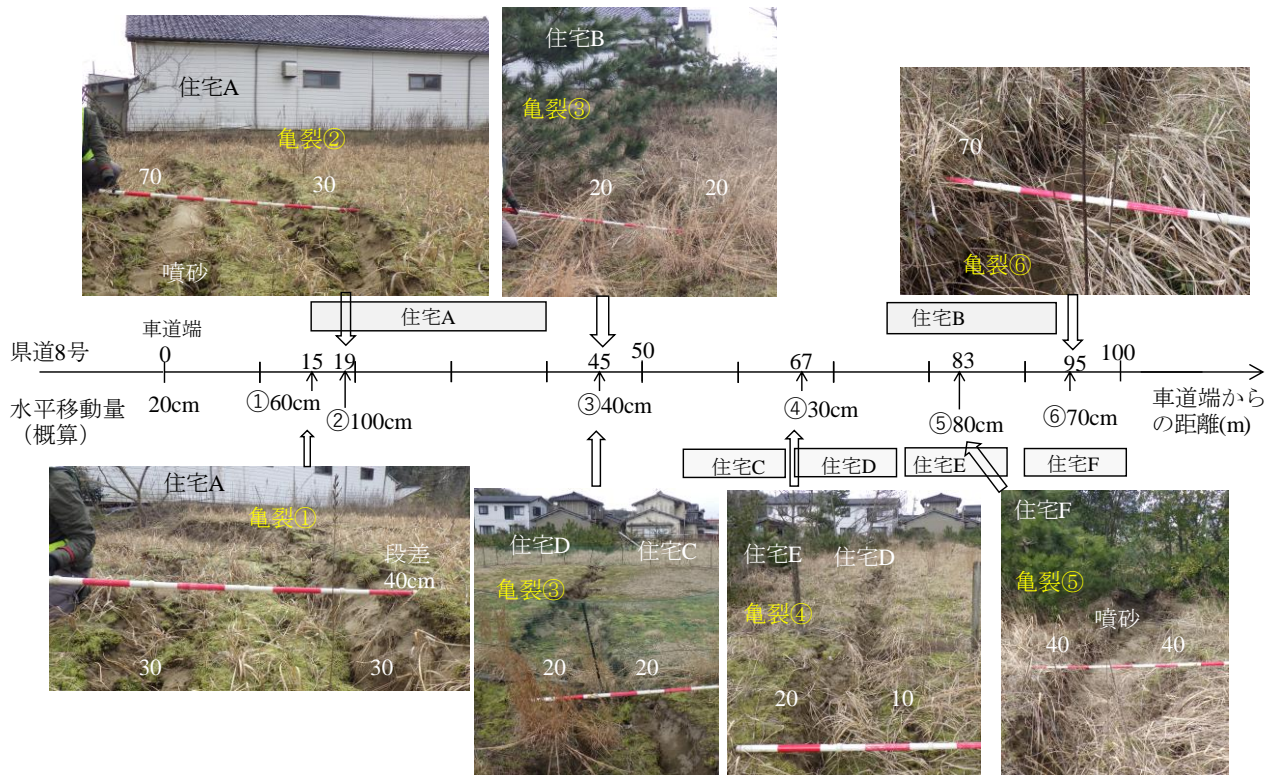


図-7 野地傾斜地の亀裂などの状況と亀裂幅の計測：写真中の数値の単位はcm

野地傾斜地の亀裂・ずれの発生状況によると、それらの分布は図-8で整理できる。つまり、地盤流動発生形態は「亀裂・ずれが発生した7箇所と傾斜地上端（砂丘端）を境界として、傾斜地上端からずれ土塊ブロック B①～B⑦があり、各土塊の上端と下端のずれ量の差異がマイナス（-）の場合、土塊は引張状態にあり、プラス（+）の場合、土塊は圧縮状態にある。」と想定できる。なお、±がゼロの場合は、土塊ブロックは剛体的な移動をしていることになる。

ここで、地盤流動により発生する明確な亀裂、段差などの変状は、連続しているのではなく、離散的に発生している。つまり、現地の実現象は、地盤流動の発生は傾斜地の全長を幾つかの土塊ブロックに分離し、各土塊ブロックが圧縮、剛体移動、伸張していることになる。

他方、本文5章で後述する、地盤流動変位量の算定式は、地盤流動変位量を連続的分布としているが、傾斜地の全長を土塊ブロックとして、その中で圧縮、伸張が発生しているとしている点が、上記の実現象と違うことになる。

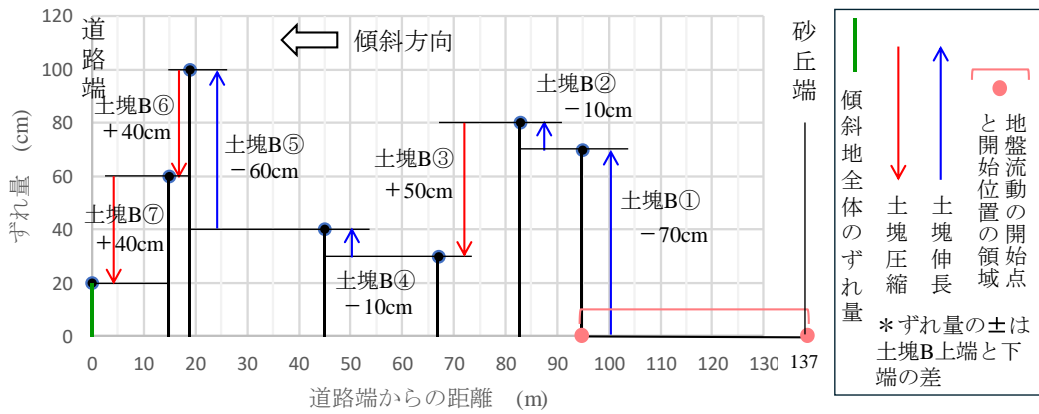


図-8 野地傾斜地の亀裂・ずれの発生形態

3.5 液状化・地盤流動の抑制要因

現地調査では、地盤流動による住宅などの被害が地区により異なることに着目し、地盤流動の抑制要因に関して調査している。

3.5.1 地盤流動被害の差異と要因抽出

面的な現地調査を実施した図-9の西荒屋地区では、概ねではあるが、赤枠内で被害が大きく、緑枠内で被害が僅か、皆無である傾向が見られる。つまり、緑枠の区域では地盤流動の抑制が示唆されるが、本文では、

- i) 県道8号の舗装・路床構造
- ii) 建築物等の基礎構造
- iii) 道路などの盛土構造
- iv) 水路の護岸構造
- v) 傾斜地上端付近の砂丘の隣接地盤構造

の5要因に着目し、該当事例により、地盤流動の抑制性を考察している。



図-9 地盤流動による被害の地域的な差異：西荒屋地区

3.5.2 県道8号の舗装・路床構造による抑制

県道8号は道路の舗装（表層・基層・路盤）と路床により、基礎地盤を人工的に改変・造成した構造（舗装・路床構造と呼ぶ。）である。そのため、通常、舗装・路床構造は層厚が1m程度であるが、縦断方向に連続する長尺な構造であることから、表層部の地盤流動の外的作用に対してどのような力学的な状態にあったかを解明することが課題となる。

地盤流動に対して、県道8号の存在は、写真-9のなどの多くの事例からも示唆される通り（図-9では県道8号の干拓地側は緑の枠で表示）、相応の抑制構造であることがわかるが、この点は今後の当該地の地盤流動の特徴である。



写真-9 県道8号が地盤流動を抑制していると推測される事例

3.5.3 建築物等の基礎構造による抑制

地盤流動対策には、地盤流動の発生あるいは発生した地盤流動を抑止、抑制する地盤改良、杭基礎の強化などがあるが、構造物基礎が地盤流動の抑制に関わると推測される現地状況が見られている。

写真-10は西荒屋小学校の西側（砂丘側）であり、写真上は校舎の背後（図-9のゾーンB）に相当しており、住宅あるいは地盤、道路に変状、損傷が見られない、あるいは皆無である。他方、写真下は小学校のグラウンドの背後（図-9のゾーンBの右）に相当しており、地盤流動による地盤変状、住宅の被害が発生している。

本事例からは、校舎が杭基礎（未確認：確認が必要）であるとする、それが地盤流動の抑制に関わったと推測でき、力学的には十分考えられることである。



写真-10 校舎が地盤流動を抑制していると推測される事例

3.5.4 道路などの盛土構造による抑制

液状化の対策の一つとして、初期の有効応力を増加させる液状化層の上載荷重の増加が考えられるが、同様な状態にあり、地盤流動が抑制されたと推測される現地がある。

写真-11は、図-9のゾーンCの下（東側）にある道路盛土の砂丘側と干拓地側の比較である。ゾーンCの住宅は被害が皆無であるのに対して、道路盛土の干拓地側は噴砂が見られると共に、道路、宅地の沈下・段差・亀裂が見られている。

本事例からは、道路盛土が液状化の発生、その結果としての地盤流動の抑制に関わったと推測でき、力学的には十分考えられることである。



写真-11 道路盛土が地盤流動を抑制していると推測される事例

3.5.5 水路の護岸構造による抑制

地盤流動の発生は、傾斜地以外に港湾部、河川部の護岸のような地表面形状、高さが急変する箇所でも想定されている。そのため、護岸と地盤流動の相関を把握するため、図-1の水門付近（断面5）で調査している。

当該箇所は、干拓地の水路が県道8号に隣接しているが、写真-12が護岸およびその背後（砂丘側）の県道8号と沿道の状況である。同写真の通り、県道8号の砂丘側の沿道に隆起などの変状が発生しているものの、護岸および県道8号には特別な変状が見られない。これは、今次の地盤流動の規模では、構造的に堅固な護岸（鋼矢板基礎：推定）による地盤流動の抑制が示唆される。



写真-12 護岸による地盤流動の抑制が推測される事例

3.5.6 傾斜地上端付近の砂丘の隣接地盤構造による抑制

現地調査によれば、**図-9**のゾーンAにおける住宅の被害が皆無である。**写真-13**は、ゾーンAの前面の干拓地側の道路である。砂丘側の道路端を境としてずれ・沈下が発生しているが、砂丘側の住宅の変状は皆無であるのに対して、道路から干拓地側の宅地では段差・沈下・傾斜が発生している。

上記のゾーンAは、傾斜地の上部に当たり、砂丘に隣接する地盤構造にあるが、標高が高く、土被りが厚く、液状化し難い砂丘の影響を受けて、液状化、さらに地盤流動が抑制されていると推察される。



写真-13 砂丘近傍で地盤流動の抑制が推測される事例

4. 地盤特性および傾斜地の地盤モデル化

(一財) 国土地盤情報センターが今次の能登半島地震の復興支援のために公開している地盤情報⁸⁾では、調査地域の近傍の情報は限られているが、4地点(**図-1**参照)の柱状図を選定している。そして、4地点の柱状図(概ね深度25mまでを抜粋)のT.P.0.0mを対応させると**図-10**が得られる。

同図からは、内灘砂丘の東側に繋がる傾斜地について、下記の地盤特性が想定できる。

『傾斜地の地盤は、河北潟のシルト質粘土層の上に、砂層(細中砂あるいは中砂)が堆積しており、砂層の上部は緩く、下部(N値が20超を想定)は締まっており、砂層は砂丘に向かって深くなるとともに、砂層の下部の締め固まった層が厚くなり、他方、上部の液状化、側方流動が発生しやすい緩い層が薄くなる。』

さらに、内灘砂丘の東側の傾斜地は、南北方向に類似の地形・地盤が形成されたと想定し、本文2章の傾斜地の構造特性を考慮し、さらに、4つの柱状図を内灘砂丘の南北方向に重ねて、断面1は傾斜地の上部、柱状図4は県道8号付近、柱状図2および柱状図3は県道8号から干拓地の範囲に対応させると、**図-11**の傾斜地地盤モデルが例示できる。

今後、必要に応じて地盤調査が実施されると、傾斜地の地盤構造が明らかになると、思われるが、現時点で入手できる公開資料からは、**図-11**がほぼ妥当な想定と考えられる。

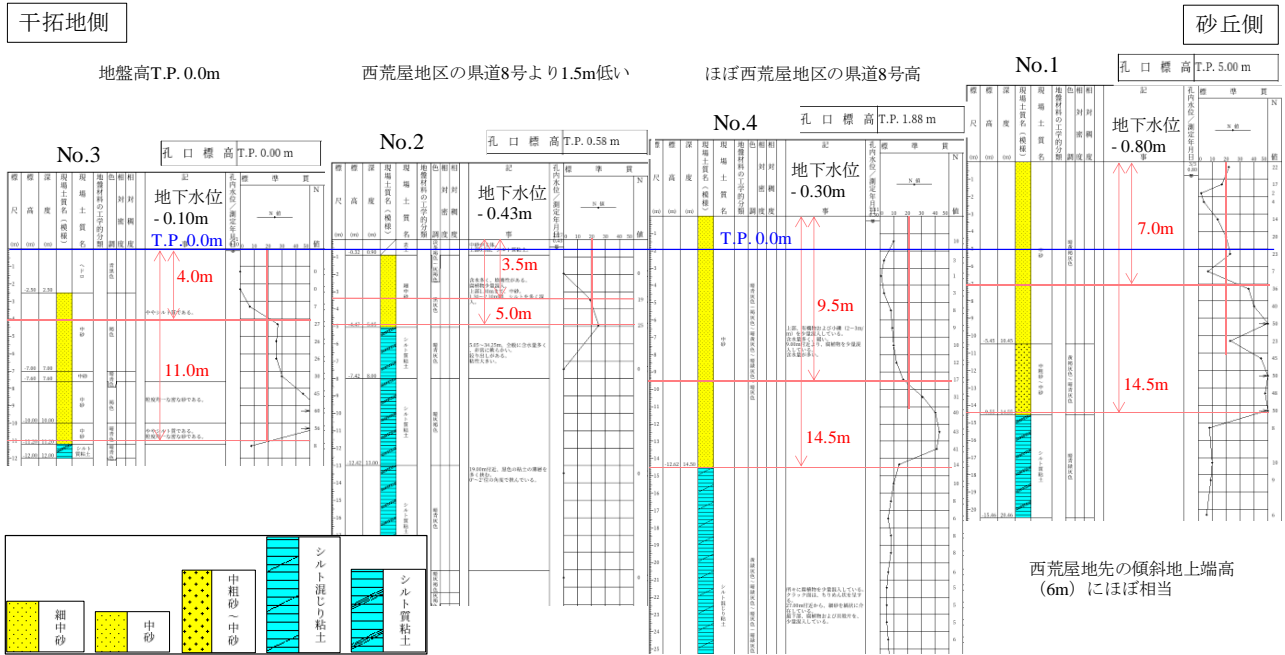


図-10 4地点の柱状図の相対比較：文献8に加筆

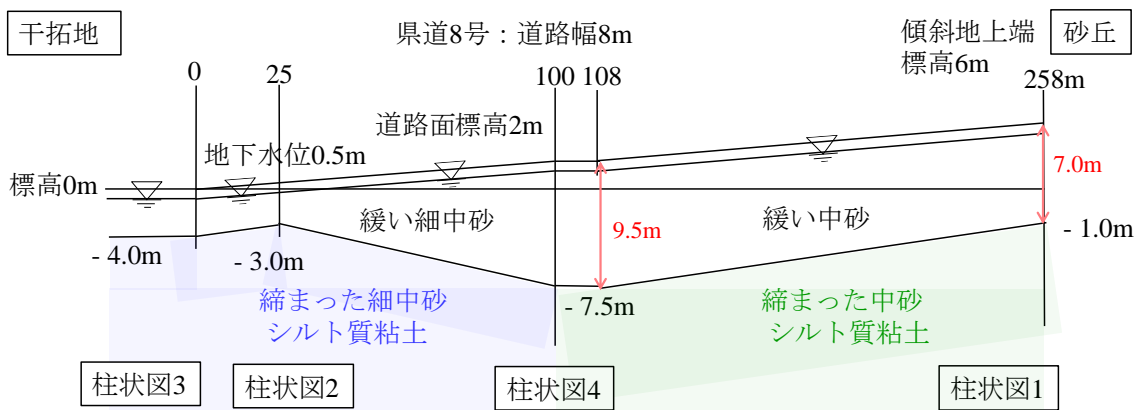


図-11 内灘砂丘の東側隣接の傾斜地の地盤モデルの想定例

5. 地盤流動対策の視点

効果的な地盤流動対策を立案するためには、地盤流動の発生特性、その影響要因と影響度の理解が必要である。本章では、地盤流動の発生機構、影響要因・影響度を明らかにして、有効な対策とするための視点を検討する。

5.1 地盤流動の発生機構

図-12は、現地調査の結果に基づいた傾斜地の地盤流動の発生機構の想定である。同図の主旨は、下記の通りである。

- i) 液状化層の存在範囲は、地盤流動の発生の可能性がある、地盤流動範囲であること。
- ii) 液状化層は液状化の発生程度が異なる（例えば、液状化の発生程度が大きい＝液状化に対する抵抗率 F_L が小さい）が、地盤流動も液状化の発生程度の影響を受けること。
- iii) 構造物などに対する地盤流動の作用には、流動変位量と流動力があり、流動変位量は液状化の発生程度が大きいほど大きく、流動力は液状化の発生程度が小さいほど大きいこと。

- iv) 液状化した液状化層の支持力の低下・喪失・流動の影響により、表土層には噴砂・噴水および亀裂・段差・ずれ・沈下・隆起・傾斜などの地盤変状が、局所的あるいは面的に発生すること。
- v) 表土層上の住宅などは、液状化では沈下・傾斜、地盤流動では沈下・隆起・傾斜の被害を受けること。

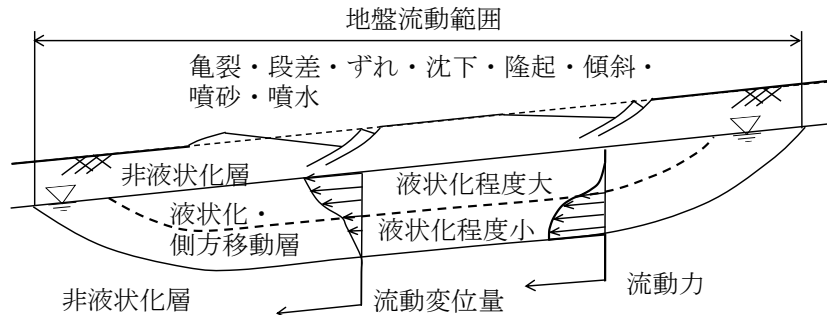


図-12 傾斜地の液状化・地盤流動の発生機構の概念図

5.2 地盤流動変位置量の関係要因および影響度

地盤流動による構造物への影響である流動変位置量について、濱田ら（1986）¹⁾は液状化層厚（ H : m）および地表面あるいは液状化層下面のうちの最大勾配（ θ : %）による推定式(1)を提示している。

$$D = 0.75\sqrt{H^3\theta} \quad (1)$$

また、東・常田・松本・東畑（1992）⁹⁾は、地盤流動に関する大型土槽模型振動台実験^{10),11)}に基づいて、地表面の流動変位置量が、地盤流動範囲、液状化層厚、表層の非液状化層厚および地表面の勾配の4つの要因に関わることを提起している。

そして、図-13の傾斜地地盤モデルにおいて、地盤流動範囲の上端を自由、下端を固定として、地盤流動範囲水平長を2区分し、流動範囲の中央および上端の流動変位置量の算定式(2)~(5)を提案している。

また、同図で併記した地盤流動変位置量の分布について、式(1)は傾斜地の位置に拘わらず一定であるのに対して、式(2)~(5)は傾斜地の目的とする位置（この場合は、傾斜地の中央あるいは上端）によって異なることの違いがある。なお、式(2)~(5)では、傾斜地の上端の変位置量が最大と見なした場合であり、傾斜地の下方に向かって傾斜地の全長の土塊ブロックは縮小すると想定している（本文、3.4の考察を参照）。

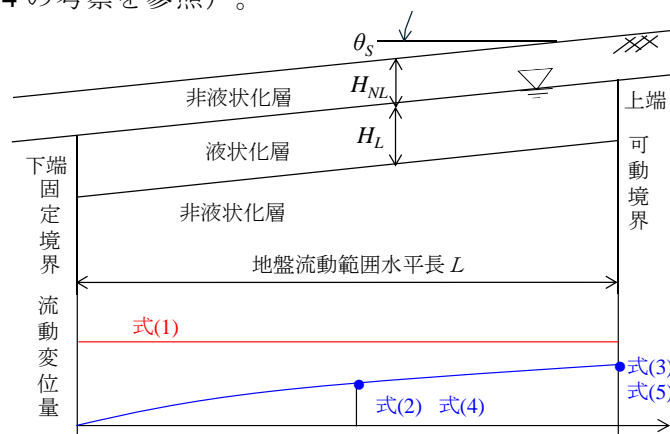


図-13 地盤流動に関わる4要因および算定式^{1),9)}による流動変位置量分布のイメージ

[L=10~100m の場合]

流動範囲の中央

$$D = 1.73 \times 10^{-5} \cdot L^{1.94} \cdot H_L^{0.298} \cdot H_{NL}^{-0.275} \cdot \theta_s^{0.963} \quad (2)$$

流動範囲の上端

$$D = 2.07 \times 10^{-5} \cdot L^{1.96} \cdot H_L^{0.295} \cdot H_{NL}^{-0.276} \cdot \theta_s^{0.978} \quad (3)$$

[L=100~1,000m の場合]

流動範囲の中央

$$D = 1.29 \times 10^{-5} \cdot L^{1.99} \cdot H_L^{0.280} \cdot H_{NL}^{-0.243} \cdot \theta_s^{0.995} \quad (4)$$

流動範囲の上端

$$D = 1.70 \times 10^{-5} \cdot L^{1.99} \cdot H_L^{0.278} \cdot H_{NL}^{-0.242} \cdot \theta_s^{0.995} \quad (5)$$

ここに、 D ：地表面の流動変位量（m）、 L ：地盤流動範囲水平長（m）、 H_L ：液状化層厚（m）、 H_{NL} ：表層の非液状化層厚（m）、 θ_s ：地表面の勾配（%）

例えば、**図-5**の横断地形および**図-11**の傾斜地地盤モデルに基づいて、**図-14**の傾斜地地盤モデルを想定する。同モデルにおいて、式(3)、(5)式および式(1)による流動変位量を算定し、比較する。 H_{NL} ：0.5mとして、傾斜地の勾配が $1^\circ 49'$ （ θ_s ：3.17%）および 1° （同1.75%）の場合、 H_L ：9mおよび3m、 L ：95mおよび166mの組合せごとに地盤流動変位量を算出した結果が**表-1**である。

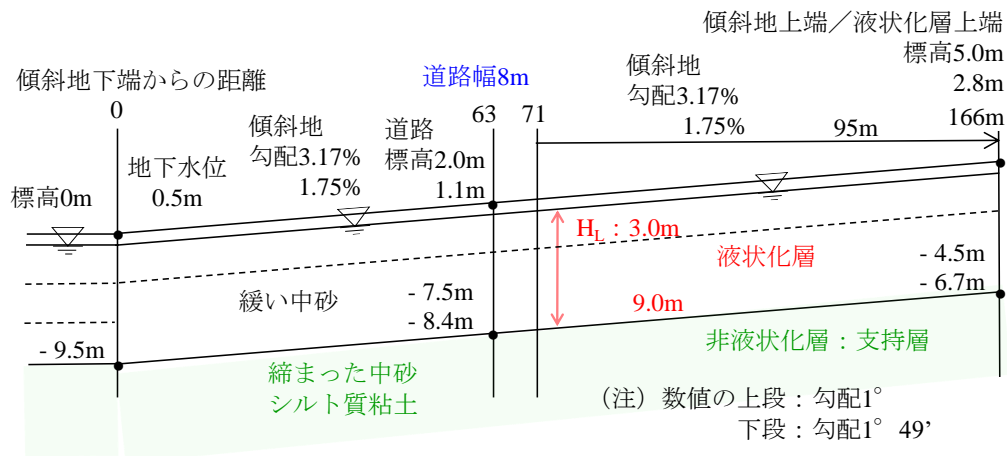


図-14 地盤流動変量の試算のための傾斜地地盤モデル

表-1 傾斜地の条件による地盤流動変位量の比較

	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	
	傾斜地勾配 1°49'				傾斜地勾配 1°				
θ_s (%)	3.17				1.75				
H_L (m)	9		3		9		3		
L (m)	95	166	95	166	95	166	95	166	
H_{NL} (m)	0.5				0.5				
D (cm) ①	111	305	81	225	62	169	45	125	
備考*1	0.36		0.36		0.37		0.36		
濱田らD(cm) ②	330		191		271		159		
備考*2	2.97	1.08	2.36	0.85	4.37	1.60	3.53	1.27	
*1 : D (L=95m) / D (L=166m)				*2 : D② / D①					

同表のC-5は、断面2の県道8号砂丘側の野地傾斜地（**図-6**参照）で、液状化層厚を緩い中砂層

の9mとした場合に相当する。野地傾斜地で確認された上端の亀裂⑥のずれ変位量70cm（図-7あるいは図-8参照）に対して、式(2)では62cmと算定される。なお、同一条件による濱田らの式(1)では271cmである。

さらに、本文の3.2.1の“地盤流動の発生に関わる液状化層厚が数m以内”に相当させた、液状化層厚が3mの場合、C-7の45cmになる。

5.3 地盤流動対策の視点

式(2)～(5)によると、地盤流動量は4つの要因に関わるが、見方を変えると、流動変位量を抑止あるいは抑制する方法は、次の4つが想定できる。

方法1：流動範囲水平長（ L ）を低減。

方法2：液状化層厚（ H_L ）を低減。

方法3：表層の非液状化層厚（ H_{NL} ）を増加。

方法4：地表面の勾配（ θ_s ）を低減。

さらに、式(2)～(5)の各要因の「べき指数」の大小は、各指標の影響度を意味するが、べき指数が最も大きい（2程度）地盤流動範囲水平長の低減が最も効果的であり、次に勾配（1程度）を減ずること、さらにべき指数の絶対値がほぼ同じ（0.3程度）である、液状化層厚の低減、非液状化層厚の増加が、対策の効果、優先順位になる。

ここで、現地調査で推測された県道8号の地盤流動抑制に関して、表-1の L ：166mは断面2の干拓地端から野地傾斜地の上端の亀裂⑥までの水平距離であり、 L ：95mは県道8号西端から亀裂⑥までの水平距離であるが、後者に対する前者の流動変位量の比率0.36は、県道8号による地盤流動の抑制を示す。言い換えると、県道8号は方法1の“傾斜地を仕切る”機能を発揮しており、地盤流動量を36%に低減していると言える。つまり、県道8号が無ければ、地盤流動による発生変位量は、今次の3倍に至った可能性があることになる。

なお、広域的に発生する地盤流動については、各種の対策を性能評価の最適化の視点¹²⁾から考えることが必要であり、有効である。つまり、個別の住宅の液状化対策は「箇所・地点最適」で対応が可能であるが、広域的に発生する地盤流動に対する対策は、まちづくり、地域づくりによる「地域最適」の視点、姿勢が必要となる。

6. まとめ

令和6年能登半島地震による内灘町の地盤流動に関する現地調査の結果、下記が特筆できる。

- 1) 地盤流動が発生した傾斜地は、勾配が2～3%程度であり、極めて緩い。
- 2) 地盤流動により、地表面では局所的な亀裂などおよび広域的な傾斜などの変状が発生する。
- 3) 流動域内では、土塊ブロックの圧縮、伸張による亀裂などが離散的に発生している。
- 4) 県道8号の損傷・移動が皆無、砂丘側沿道の隆起などが顕著な事例が多く、県道8号による地盤流動の抑制が示唆される。
- 5) 県道8号の地盤流動抑制からは、地盤流動の発生深度は数m以内の浅層と推測される。
- 6) 地盤流動の水平変位量は概ね20～35cm、隆起量は大きくとも概ね60～110cmである。
- 7) 県道8号の舗装・路床構造、建築物等の基礎構造、道路などの盛土構造、水路の護岸構造、傾斜地上端付近の砂丘の隣接地盤構造は、液状化、地盤流動を抑制すると推測される。
- 8) 地盤流動変位を抑止、抑制する対策は、i) 流動範囲水平長の低減、ii) 液状化層厚あるいは液状化の発生程度の低減、iii) 表層の非液状化層厚の増加、iv) 地表面の勾配の低減が考えられる。
- 9) 地盤流動対策は地域最適の姿勢が有効である。

なお、今後の課題は、次の4点が例示できる。

- 1) 地盤流動に関する危険度評価および危険度マップの作成の要否
- 2) 地域最適による地盤流動対策の立案および実施
- 3) 地盤流動の評価方法の設計基準類への反映
- 4) その他

最後に、現地調査などでは、(一財) 土木研究センターの島 馨氏、土橋聖賢氏およびアジア航測(株)の小野田敏氏の協力を得ており、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 濱田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察，土木学会論文集，N0.376/III-6，pp.211-220，1986.
- 2) (公社)日本道路協会：道路橋示方書V 耐震設計編，pp.110-113，2017.
- 3) 常田賢一・島 馨・土橋聖賢・小野田 敏：令和6年能登半島地震による液状化・地盤流動の現地調査からの知見－内灘町の地盤変状および住宅被害に基づく地盤流動特性および対策方法の考察－，地盤工学会誌，寄稿，pp.1-4，2024。(令和6年4月4日：投稿，採択)
- 4) 常田賢一・島 馨・土橋聖賢・小野田 敏：令和6年能登半島地震による液状化・地盤流動の現地調査からの知見－内灘町の地盤変状および住宅被害に基づく地盤流動特性および対策の考察－，地盤工学ジャーナル，報告，pp.1-15(令和6年4月11日：投稿)。
- 5) 内灘町：内灘町：液状化マップ，
https://www.town.uchinada.lg.jp/uploaded/life/1734_5630_misc.pdf > (参照 2024.3.1) 入手先<
- 6) 国土地理院：GIS Maps，入手先<<https://maps.gsi.go.jp/>> (参照 2024.3.1)
- 7) (国研)防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET, KiK-net)，
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> > (参照 2024.3.1) 入手先<
- 8) (一財)国土地盤情報センター：災害復旧支援 地盤情報緊急公開サイト NGiC，入手先<
<https://publicweb.ngic.or.jp/emergency-1/>> (参照 2024.3.1)
- 9) 東 拓生・常田賢一・松本秀應・東畑郁生：液状化による地盤流動量の簡易予測，土木学会年次学術講演会，講演概要集，第3部，47巻，pp.262-263，1992.
- 10) 松本秀應・常田賢一・佐谷祥一：液状化による地盤流動に関する模型実験，第25回土質工学研究発表会，pp.1045-1046，1990.
- 11) 松本秀應・常田賢一・佐谷祥一：液状化に伴う流動特性に与える境界条件の影響の検討，第21回地震工学研究発表会，pp.269-272，1991.
- 12) 常田賢一：防災・減災、国土強靱化のための性能評価の最適化の実務－個別最適から全体最適への展開－，(一社)地域国土強靱化研究所，東京官書普及(株)，330p. 2023.

以上