

2025年度 地盤工学に関わる実務者報告会：石川地区

Marine

令和6年能登半島地震に伴う内灘町の地盤 変状範囲の抽出と変状メカニズムの考察

Laboratory

②内灘町室地区におけるX線CT及び 室内土質試験に基づく変状メカニズムの考察

R&D

Disaster

川崎地質株式会社
佐々木朋子

Ground

1

目次



1. 研究概要
2. サンプルング試料の観察結果及び密度の傾向
3. 室内土質試験結果及び考察
4. まとめ

1. 研究概要



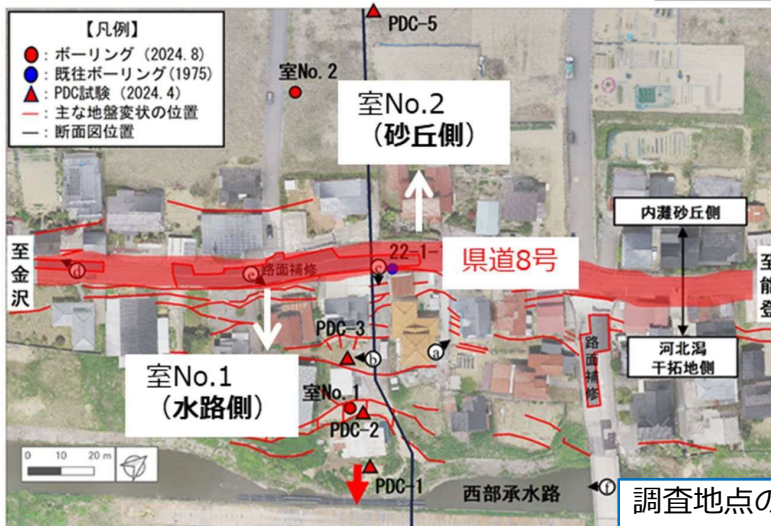
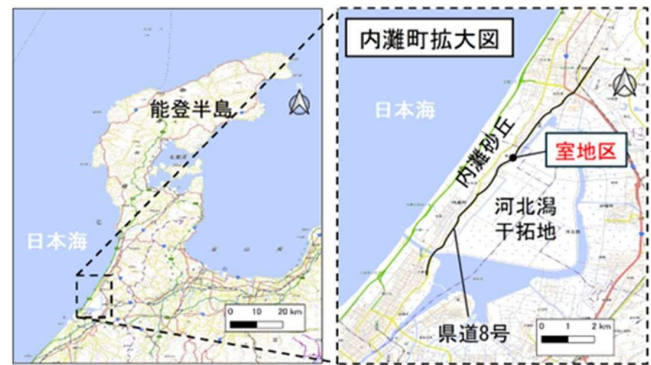
＜調査地点及び被害の概要＞

石川県河北郡内灘町室地区

→令和6年能登半島地震で甚大な被害発生

→県道を挟んだ片側50m程度の範囲内で

地盤の変状に違いあり



県道より砂丘側では
目視可能な変状がほぼ無し

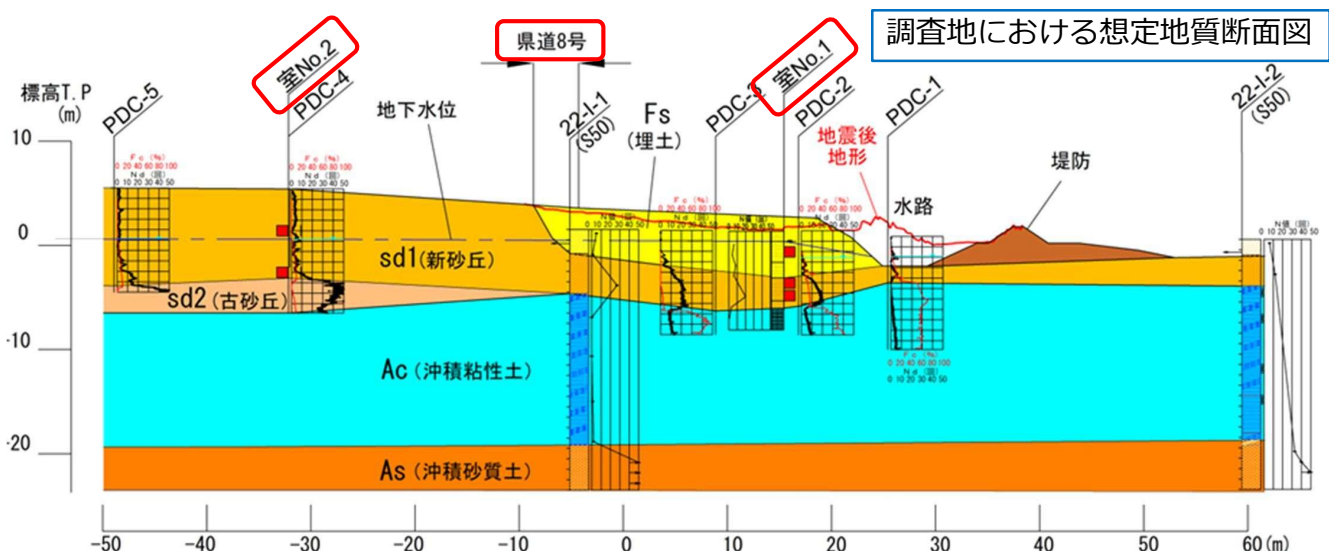


県道より水路側では
液状化に起因する大きな地盤
変状（側方流動）有り

調査地点の平面図及び変状分布図

3

1. 研究概要



液状化の可能性がある地層

- ・表層から4m程度の厚さで分布するN値10未満の埋土層（Fs）の砂
- ・その下位に位置するN値20未満を示す砂丘層（Sd1）の砂

現地調査による地盤変状：県道8号から水路側のみで確認

→地盤変状を引き起こした主たる液状化層は、水路側だけに分布する埋土層である

可能性 ⇒ 液状化範囲の確定や変状状況の違いの説明にはより詳細な調査が必要

4

1. 研究概要



<研究の主旨>

内灘町室地区における変状発生メカニズム解明の一環として水路側及び砂丘側に分布する砂層に着目し、当該地点で乱れの少ない試料を採取して以下を把握する。

- 深度方向の試料観察及び密度傾向（X線CT画像による）
- 物理特性及び力学特性

▶▶ 液状化の発生範囲や水路側と砂丘側との変状状況の違いについての考察を行う。

<サンプリング概要>

- ✓ 各試料の採取地点：
県道8号を挟んだ両側を水路側及び砂丘側
- ✓ 試料採取時期：
2024年8月（地震発生後7ヶ月経過時点）
- ✓ 試料採取方法：GSサンプリング

表1 サンプリング試料一覧

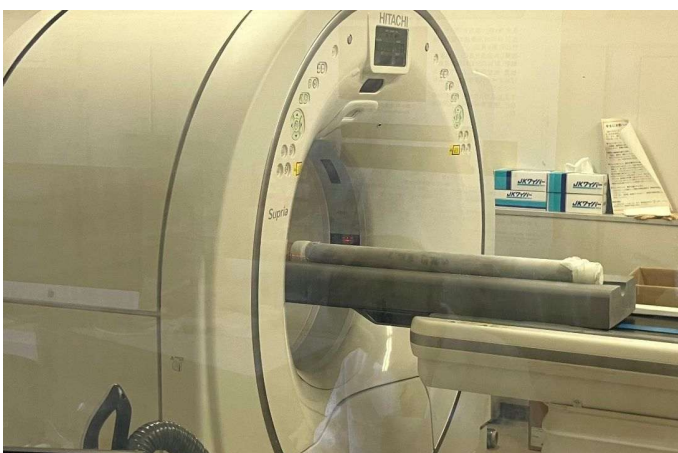
地点及び地層	試料名 (直径 70mm)	深度 (GL- m)
水路側 埋土層 (Fs)	室 No.1 S-1	1.50~2.50
水路側 砂丘層 (sd1)	室 No.1 S-2	4.50~5.50
	室 No.1 S-3	5.70~6.70
砂丘側 砂丘層 (sd1)	室 No.2 S-1	3.50~4.50
	室 No.2 S-2	7.50~8.50

5

2. サンプリング試料の観察結果及び密度の傾向



(1) 試料観察とCT画像による考察



CT画像取得のための使用装置

- ・ 医療用CT装置
- ・ 幅及び高さ500mm, 長さ1500mm
⇒産総研 地質調査総合センター様のご協力による

撮影条件

- ・ 管電圧：80 kV
- ・ 管電流：250 mA
- ・ 画像分解能：0.625 mm/pixel

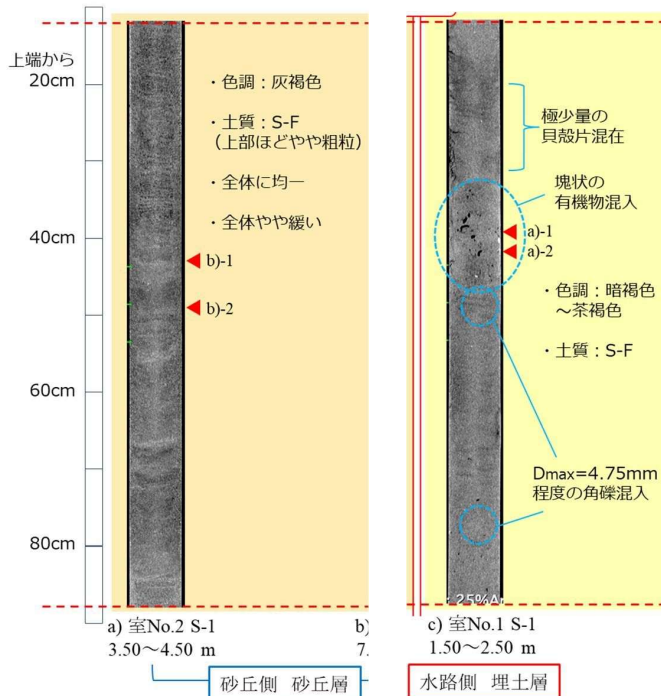
6

2. サンプル試料の観察結果及び密度の傾向

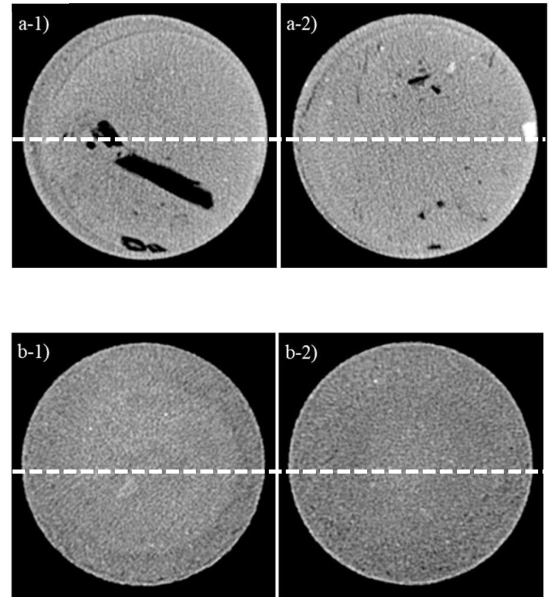


(1) 試料観察とCT画像の目視による考察

CT画像の例：砂丘側砂丘層及び水路側埋土層



- ▶ 黒く映っているところ：低密度
- ▶ 白く映っているところ：高密度

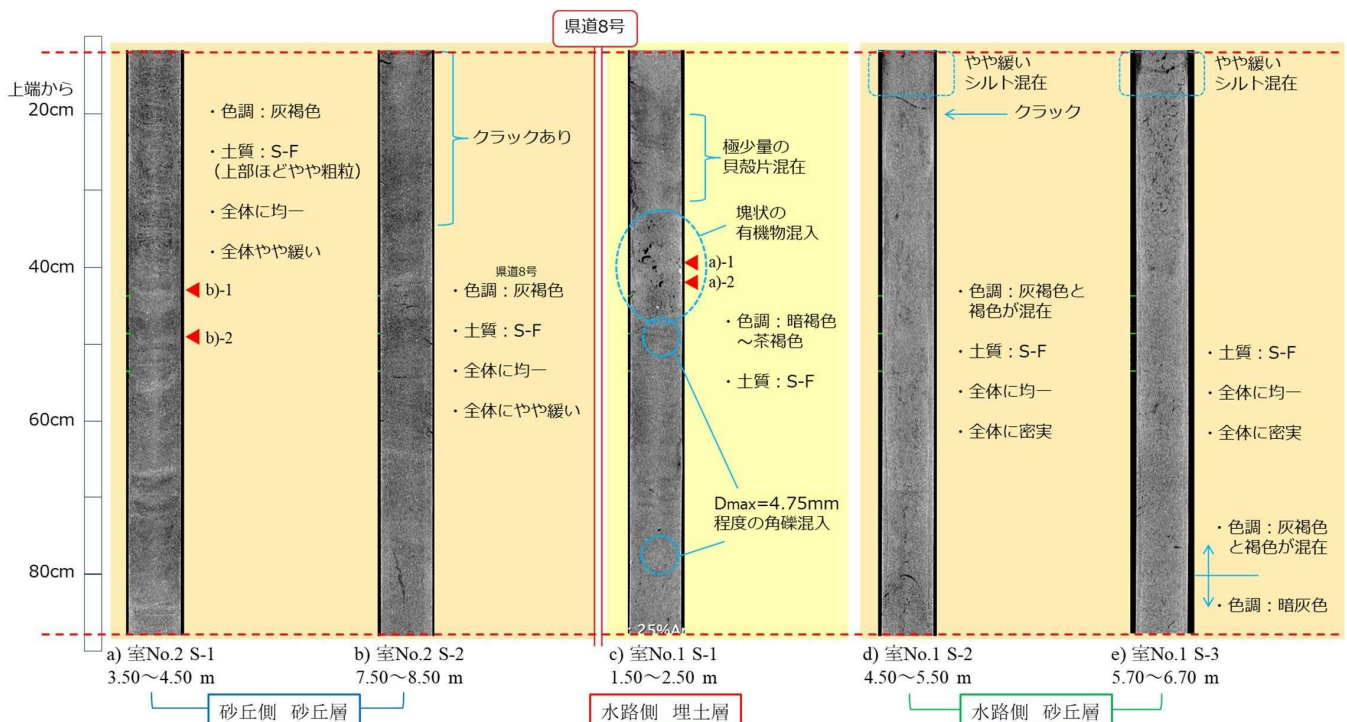


7

2. サンプル試料の観察結果及び密度の傾向



(1) 試料観察とCT画像の目視による考察

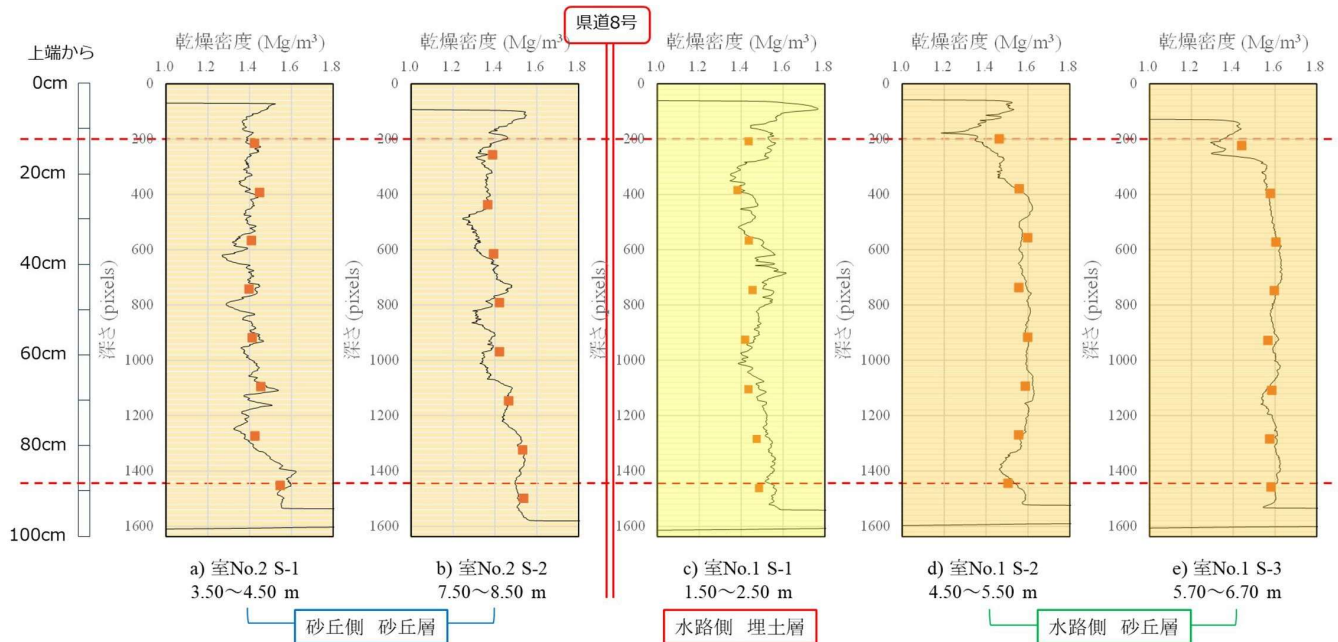


8

2. サンプル試料の観察結果及び密度の傾向



(2) 密度分布の傾向

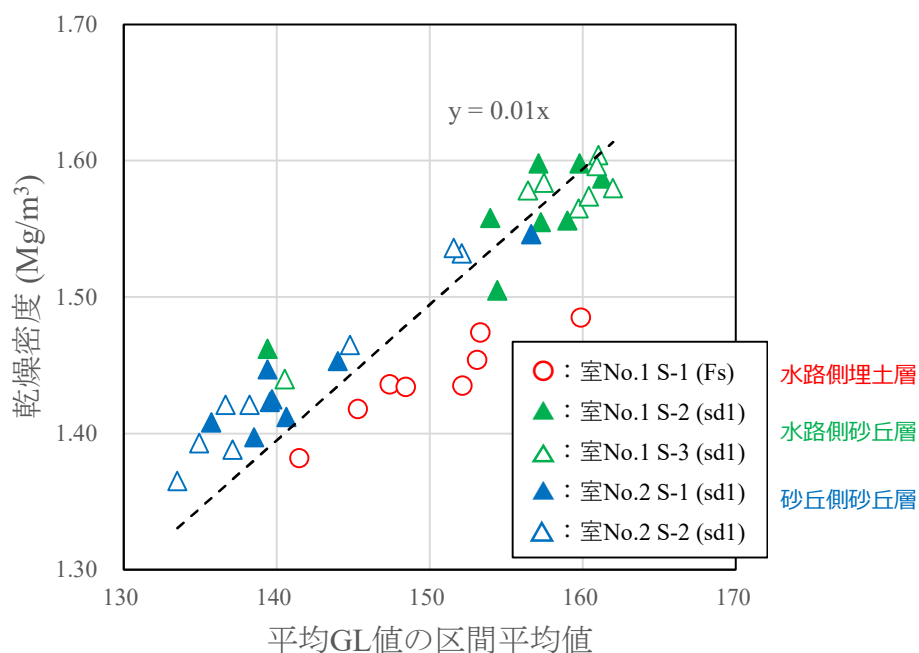


9

2. サンプル試料の観察結果及び密度の傾向



(2) 密度分布の傾向



平均GL値：断面方向に構成したCT画像に対して、画像の明るさを示すGL値を算出し、その合計を断面積で除したもの。

10

2. サンプル試料の観察結果及び密度の傾向



密度分布の差異に関する考察

＜深度方向の規則的な密度分布について＞

- ・水路側（埋土層及び砂丘層）：縞状の堆積構造なし
- ・砂丘側（砂丘層）：縞状の堆積構造が失われていない

＜各層の形成（堆積）過程の見地からの考察では・・・＞

- ・水路側埋土層：縞状の構造なし（密度分布の小刻みな変動あり）
→埋め立て時の手法による影響
→混入物として認められた有機物や貝殻片の影響
- ・水路側砂丘層：縞状構造なし（密度分布一定），色調の混在
→飛来した砂が汀線付近の水中で一定の沈降速度で堆積した影響
→縞状構造形成後，埋土層の施工などの上載荷重や振動の影響
- ・砂丘側砂丘層：縞状構造あり
→風成堆積時の風速等の違いによる深度方向の縞状の密度差

⇒ 水路側では，液状化に伴う地盤内の流動や攪乱の影響の可能性あり

11

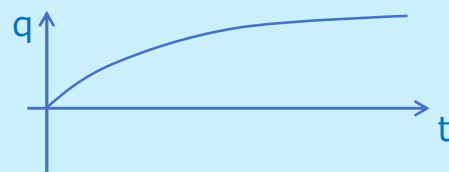
3. 室内土質試験結果及び考察



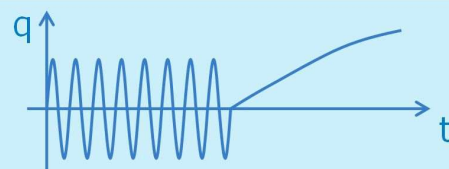
＜実施した室内土質試験＞

- ・物理試験（土粒子密度，粒度，最小・最大，湿潤密度）
→物性の把握
- ・液状化試験（三軸）
→液状化特性の把握
- ・単調載荷試験（三軸Cub条件）
→繰返し載荷後の変形特性に関する傾向の把握

① 単調載荷のみ
（一般的な三軸圧縮試験）



② 液状化+単調載荷
（載荷履歴を含む強度特性の把握）



12

3. 室内土質試験結果及び考察（物理試験）



＜試験方法と一覧＞

表3 各試料の物理特性

地 点			水路側		砂丘側	試験方法
地 層			埋土層	砂丘層	砂丘層	
試 料 名			室 No.1 S-1	室 No.1 S-2～S-3	室 No.2 S-1～S-2	
深 度		m	1.50～2.00	4.50～6.70	3.50～8.00	
湿 潤 密 度	ρ_w	Mg/m ³	1.784	1.829	1.721	JIS A 1225
乾 燥 密 度	ρ_d	Mg/m ³	1.405	1.488	1.388	//
土粒子の密度	ρ_s	Mg/m ³	2.654	2.649	2.670	JIS A 1202
含 水 比	w	%	27.0	22.9	24.5	JIS A 1203
最 大 粒 径	D_{max}	mm	2	2	2	JIS A 1204
細粒分含有率	F_c	%	5.4	8.4	6.8	//
平 均 粒 径	D_{50}	mm	0.224	0.267	0.218	//
均 等 係 数	U_c		2.0	2.9	2.6	//
最 小 密 度	ρ_{min}	Mg/m ³	1.214	1.173	1.206	JIS A 1224
(最大間隙比)	e_{max}		(1.186)	(1.258)	(1.214)	
最 大 密 度	ρ_{max}	Mg/m ³	1.553	1.522	1.562	//
(最小間隙比)	e_{min}		(0.709)	(0.740)	(0.709)	
相対密度(参考)	D_r	%	62	92	58	

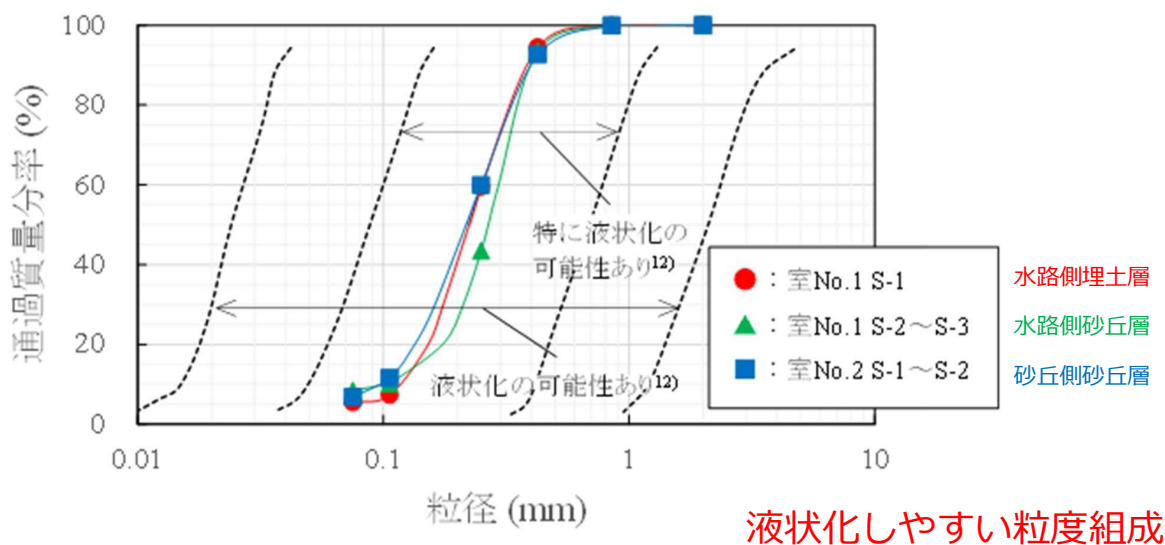
- ▶ 密度：水路側砂丘層のみ高密度，その他はやや緩い
- ▶ 粒度組成：3試料ともほぼ同じで粒径幅が小さい砂主体

13

3. 室内土質試験結果及び考察（物理試験）



＜試験試料の粒径加積曲線＞



12) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），平成30年5月，pp.410-411，2018.

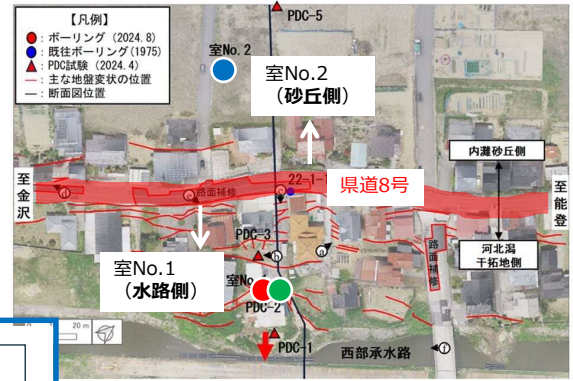
14

3. 室内土質試験結果及び考察（液状化試験）

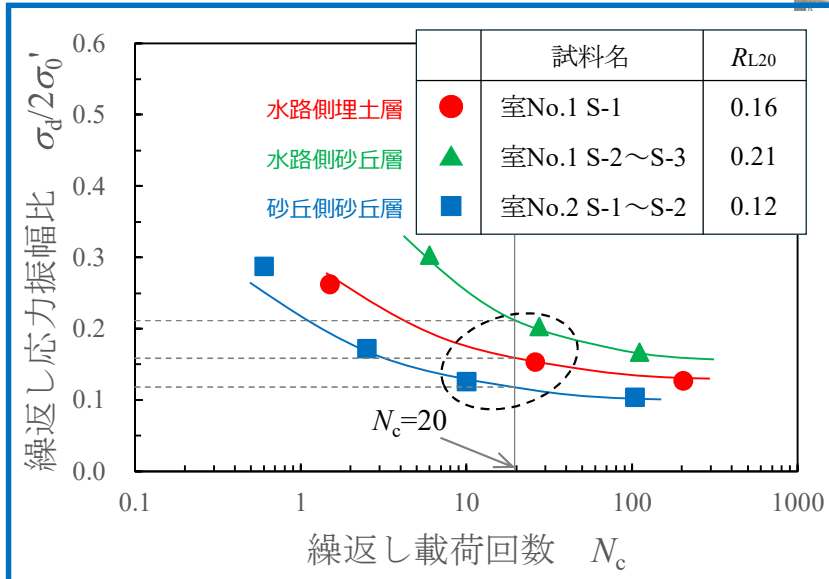


＜液状化試験結果（RL～Nc曲線）＞

- ・ 密度高→RL20高
- ・ 水路側より砂丘側の方がRL20高
(水路側：地震時変位大きい)
- ・ 全体：一般的に低いRL20の傾向



RL20 :
繰返し载荷回数が20回の
ときの繰返し応力振幅比

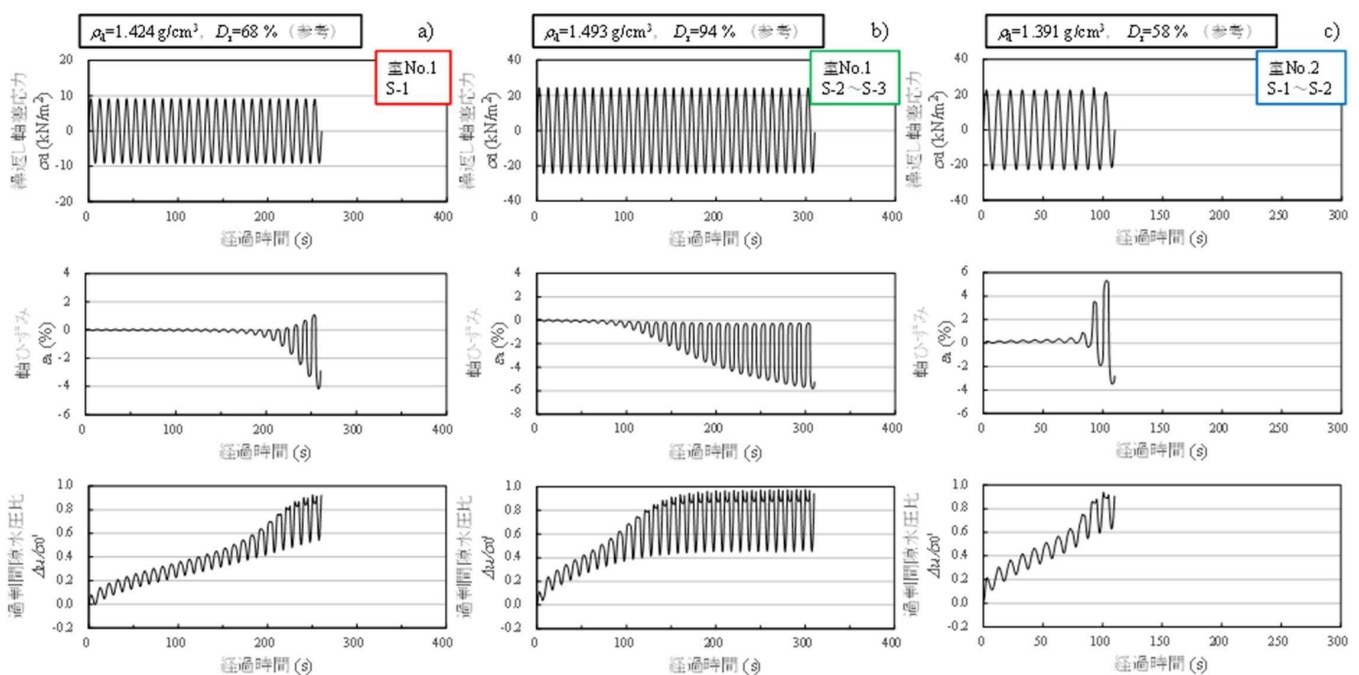


15

3. 室内土質試験結果及び考察（液状化試験）



＜液状化試験結果（波形記録）＞



水路側埋土層

水路側砂丘層

砂丘側砂丘層

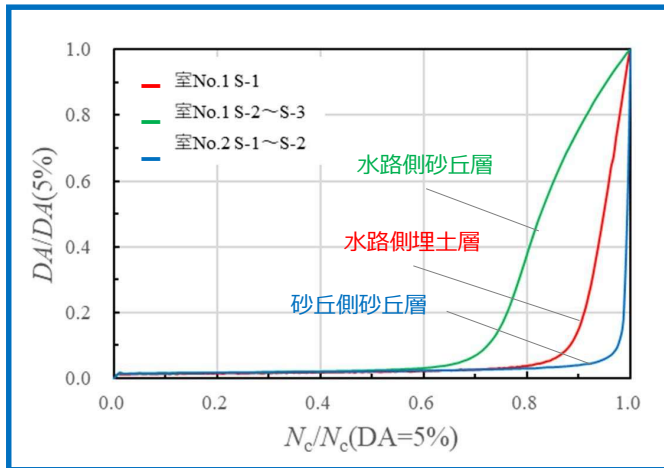
16

3. 室内土質試験結果及び考察（液状化試験）

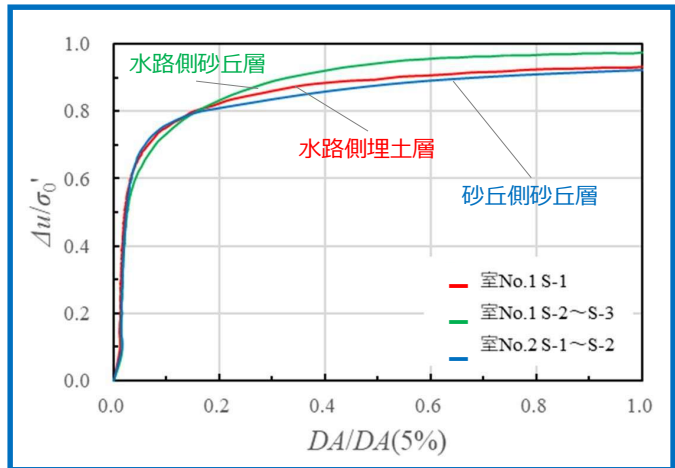


＜液状化試験結果＞

載荷の進行に伴う変位の発達状況



繰返し載荷中の過剰間隙水圧の推移



- 水路側砂丘層
比較的緩やかにひずみが伸びている
- 砂丘側砂丘層
液状化に至る直前でひずみが発生している
⇒変位の発生から液状化までの時間が短い

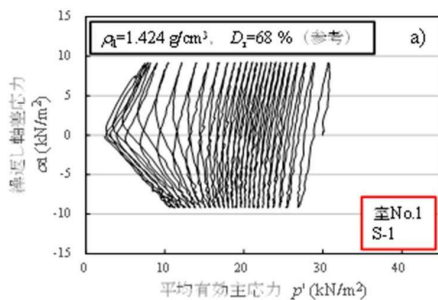
- 水路側砂丘層
過剰間隙水圧の上昇に伴って変位が発生
- 水路側埋土層と砂丘側砂丘層
水圧の上昇前に変形が卓越している
⇒典型的な緩い砂試料で見られる挙動

17

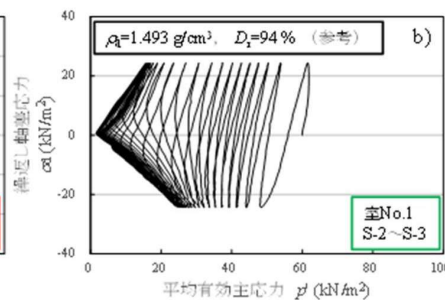
3. 室内土質試験結果及び考察（液状化試験）



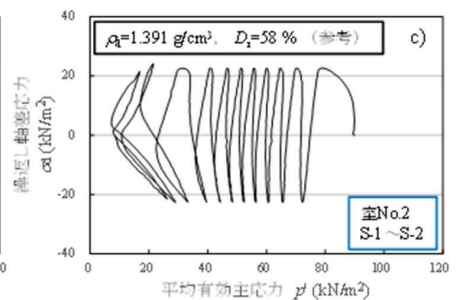
＜液状化試験結果（有効応力経路）＞



水路側埋土層



水路側砂丘層



砂丘側砂丘層

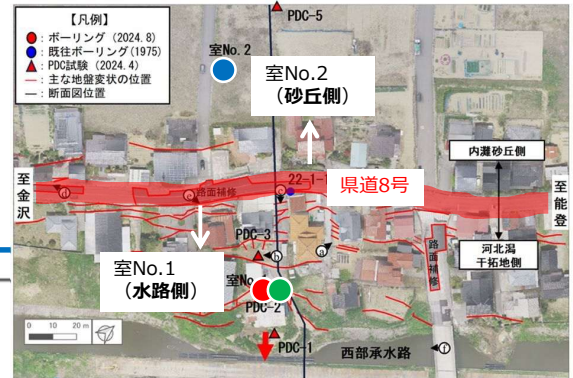
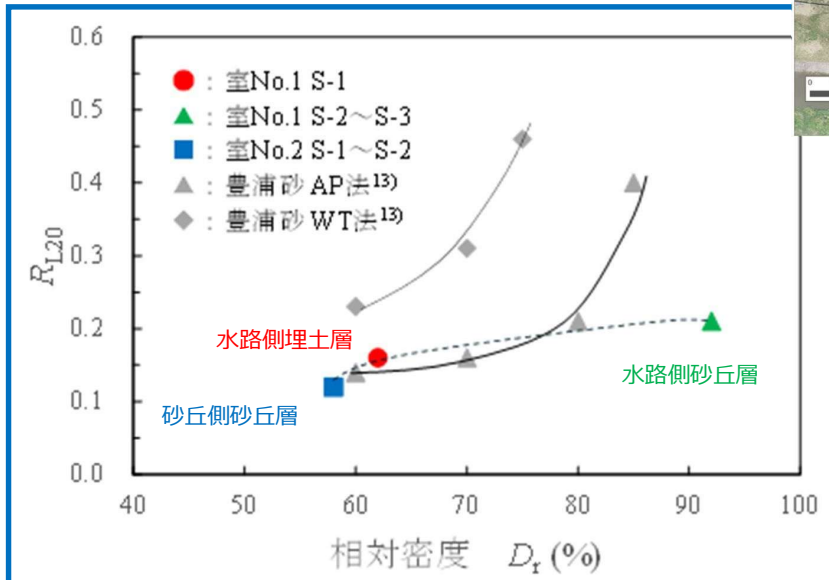
18

3. 室内土質試験結果及び考察（液状化試験）



＜液状化試験結果＞

（RL20と相対密度との関係）



・水路側砂丘層

⇒同じような土質の再構成
供試体と比較すると、密度増加に対する強度の伸びが鈍い

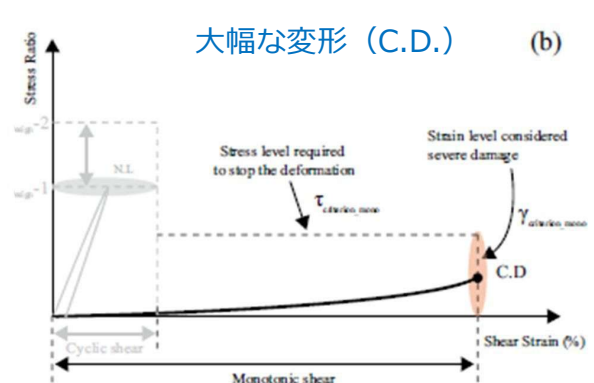
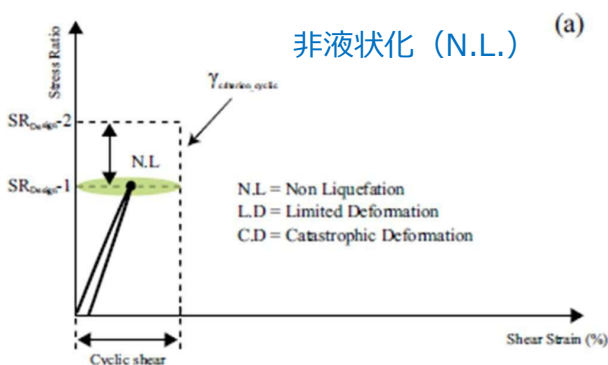
13) Tatsuoka, F., et al. : Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, Soils and Foundations, Vol.26, No.3, pp.23-41, 1986.

19

3. 室内土質試験結果及び考察（単調載荷試験）



＜試験の主旨＞



液状化後の強度・変形特性の評価

⇒液状化による変形の程度について

大まかな仕分け要⇒以下の2つに分類する

- ・明らかに安全な状態（延性変形状態）
- ・液状化した場合に重大な被害をもたらす可能性あり

Toyota, H. and Kazama, M. : Liquefaction traces on the Shinano River left bank after the 1964 Niigata Earthquake - Liquefaction research issues suggested by geoslicer survey results -, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.10, No.10, pp.253-258, 2024.

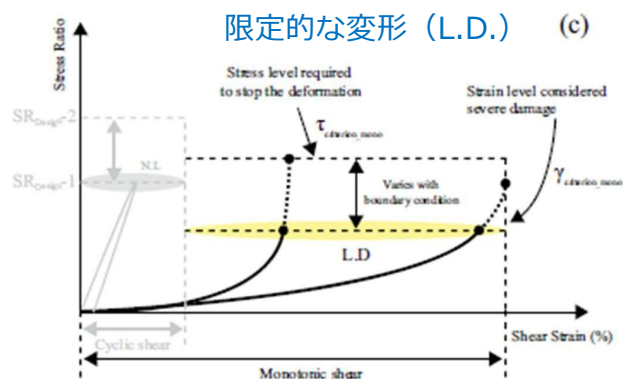
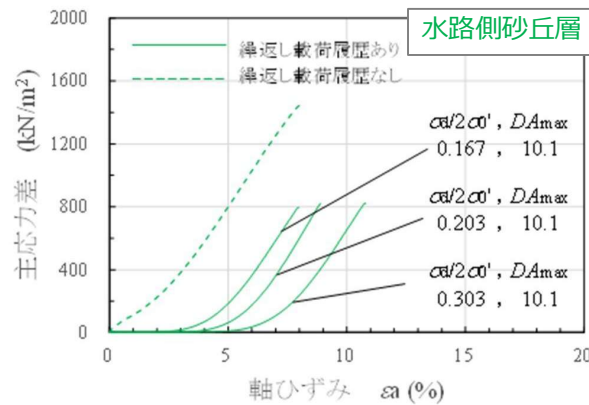
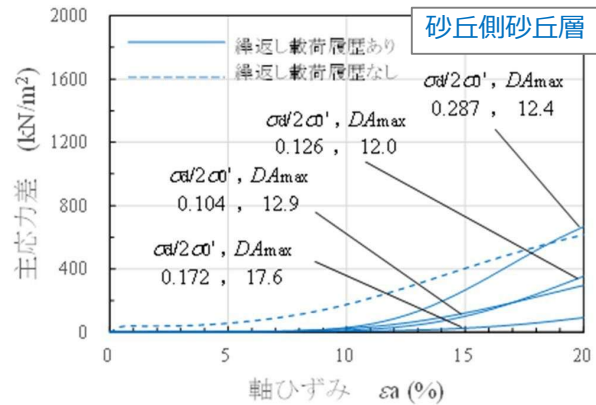
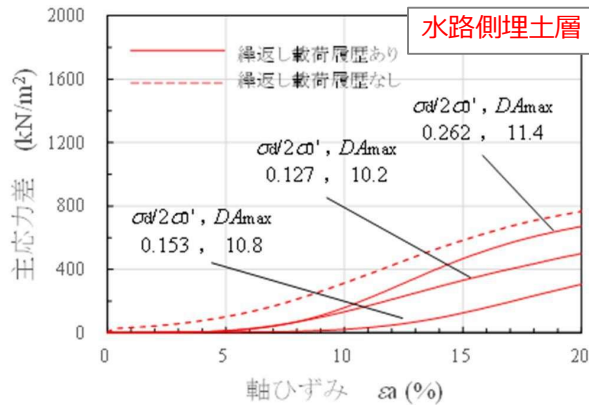


Fig. 3. Schematic diagram of liquefaction assessment.

20

3. 室内土質試験結果及び考察（単調載荷試験）



＜結果の傾向＞

- ・水路側埋土層と砂丘側砂丘層：大幅な変形
- ・水路側砂丘層：限定的な変形
- ▶液状化強度と同傾向（強度の発現程度はやや異なる）
- ▶同じ砂丘層でも水路側と砂丘側とは全く異なり、砂丘側砂丘層は液状化した際に重大な被害が想定される。

21

3. 室内土質試験結果及び考察



＜試料観察及び室内土質試験結果まとめ＞

- ・現地の被害水路：水路側→大，砂丘側→小
- ・縞状構造：水路側埋土層と水路側砂丘層→無
砂丘側砂丘層→有
- ・密度：水路側砂丘層→密
水路側埋土層と砂丘側砂丘層→緩
- ・液状化強度：次の順に強い
水路側砂丘層→水路側埋土層→砂丘側砂丘層
- ・繰返し載荷後の単調強度
水路側埋土層と砂丘側砂丘層は変形によるダメージ大

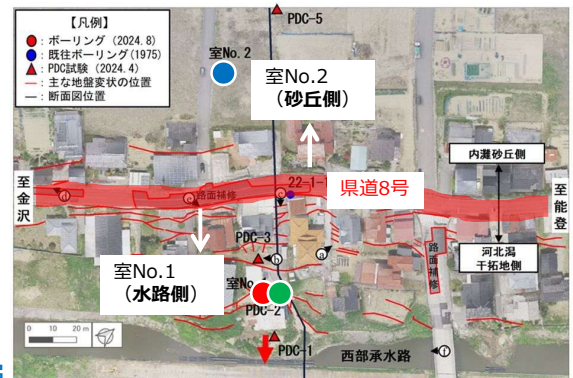


表 5 試料観察及び室内土質試験結果の比較

地点及び地層	試料名	深度 (m)	現地の被害の程度	本研究の検討結果					
				CT 画像の縞状構造	深度方向の密度分布	密度 (Dr参考)	工学的分類	液状化強度	繰返し載荷後の応力回復の程度
水路側 埋土層	室 No.1 S-1	1.50～2.50	大	なし	変動あり	低 (62%)	(S-F)	0.16	低
水路側 砂丘層	室 No.1 S-2～S-3	4.50～6.70	大	なし	変動なし	高 (92%)	(S-F)	0.21	高
砂丘側 砂丘層	室 No.2 S-1～S-3	3.50～8.00	小	あり	変動あり	低 (58%)	(S-F)	0.12	低

22

4. まとめ

＜水路側と砂丘側との変状状況の違いについて＞

▶砂丘側で変状が小さかった点について

砂丘側砂丘層は、堆積時に形成された縞状の堆積構造が比較的明確

→ 堆積時の状態がある程度保持されている

⇒砂丘側砂丘層の3.50～4.50 m及び7.50～8.50 mの範囲では、

液状化は発生していないと推定。

▶砂丘側砂丘層の液状化強度（RL20）が最も低く一般的にもかなり低い

⇒それにも関わらず大きな変状（液状化・側方流動）が生じなかった理由

・ 比較的浅い深度に地下水位が存在する水路側と比較して、県道8号の

砂丘側では地下水位がGL-5 m程度と深く有効上載圧が大きかった。

・ 地表面が概ね平坦で地盤内に作用する偏圧が小さかったことによって

地震動の作用による液状化及び側方流動が生じなかった。

▶砂丘側砂丘層の強度特性

→低密度で液状化強度・単調強度共に低強度 ⇒ 飽和時の変形挙動に懸念

23

4. まとめ

＜液状化の発生範囲について＞

▶現地における噴砂や側方流動の状況と各種地盤調査の結果による

⇒埋土層における液状化とそれに伴う側方流動が主要因と推察。

（水路側埋土層は液状化発生深度に含まれる）

▶CT画像を用いた観察によると

・ 水路側砂丘層：堆積構造なし、砂丘側砂丘層：堆積構造あり

⇒液状化の発生範囲は、水路側埋土層のみでなく水路側砂丘層にも及ぶ

可能性があることが確認された。

- 1) 窪田ら：令和6年能登半島地震による内灘町室地区の液状化被害メカニズム解明に向けた調査報告（その1, 自然災害科学J.JSND 43-3(2024), pp.631-639, 2024.
- 2) 窪田ら：令和6年能登半島地震による内灘町室地区における液状化被害（その3）, 第59回地盤工学研究発表会発表講演集, Paper No.25-13-1-03, 2024.
- 3) 一般財団法人国土情報センター：令和6年能登半島地震〔復旧支援〕地盤情報緊急公開サイト, <https://publicweb.ngic.or.jp/emergency-1/>, 2024年 6 月28日.
- 4) PDCコンソーシアム：ピエゾドライブコーン（Piezo Drive Cone）の調査原理・特徴, <https://www.pdc-cons.jp/pdc/summary.html>
- 5) 藤則雄：北陸の海岸砂丘, 第四紀研究, Vol. 14, No. 4, pp.195-220, 1975.
- 6) 窪田ら：令和6年能登半島地震による内灘町室地区の液状化被害メカニズム解明に向けた調査報告（その2）, 自然災害科学J.JSND 43-3(2024), pp.641-648, 2024.
- 7) 利藤房雄：乱れの少ない試料のサンプリング技術, 応用地質技術年報, No.36, 2017.
- 8) Otani, J., et al. : Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 2, pp. 111-118, 2000.
- 9) 菊池ら：マイクロフォーカスX線 CT スキャナの地盤工学への適用性の検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1125, 2006.
- 10) 平ら：ボーリングコアのX線CTスキャン解析による東北地方太平洋沖地震における地盤液状化層の同定, 地質学会誌, Vol.118, No.7, pp.410-418, 2012.
- 11) Toyota, H. and Kazama, M. : Liquefaction traces on the Shinano River left bank after the 1964 Niigata Earthquake – Liquefaction research issues suggested by geoslicer survey results –, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.10, No.10, pp.253-258, 2024.
- 12) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻）, 平成30年5月, pp.410-411, 2018.
- 13) Tatsuoka, F., et al. : Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, Soils and Foundations, Vol.26, No.3, pp.23-41, 1986.
- 14) 青柳ら：大小様々な液状化ひずみ履歴を与えた複数回液状化試験と消散エネルギーを用いた分析, 土木学会論文集A, Vol.72, No.4, pp.I_167-I_176, 2016.