

海岸砂丘砂の液状化特性の解明

長岡技術科学大学大学院 非会員 ○平林 千明
長岡技術科学大学 正会員 池田 隆明・高田 晋
東京都立大学 正会員 志賀 正崇

1. はじめに

2024 年 1 月 1 日の石川県能登地方を震源とする令和 6 年能登半島地震¹⁾（以下、2024 年地震）により広範囲に液状化などの地盤被害が発生した。内灘砂丘砂が分布する石川県内灘町の砂丘後背低地部では、液状化地盤が流動し、地盤の隆起や沈下等の地盤変状が発生した²⁾。一方、内灘町と同様に海岸砂丘地帯に位置する羽咋砂丘地帯の石川県羽咋市千里浜周辺では、液状化被害は確認されていない。このことから、同じ海岸砂丘地帯に分布する砂であっても、地盤材料としての液状化特性に違いがある可能性が考えられる。そこで本報告では、内灘砂丘砂の地盤材料としての液状化特性を明らかにすることを目的とした。

図-1 に砂試料の採取地点を示す。液状化が発生した地点の試料として、内灘町の試料 1, 2（砂丘下端部）、3 から採取した。また、液状化が発生しなかった地点の試料として、内灘町の試料 4（砂丘上端部）、羽咋市の試料 5 およびかほく市の試料 6 から採取した。ここで、試料 5, 6 は砂丘の海側の試料である。

試験は、現場密度試験を試料 1, 2, 5、土の粒度試験を全試料、土の繰返し非排水三軸試験(JGS 0541)（以下、液状化試験）を試料 1, 5 およびベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定(JGS 0544)を試料 1 に対して実施した。液状化試験結果については、既往研究の高田ら⁴⁾による豊浦砂および太田ら⁵⁾による内灘町北東部の室地区の砂丘側砂丘層（以降、室地区）の砂の試験結果を比較対象とした。

加えて、試料 1 を採取した黒船神社内では、簡易動的コーン貫入試験を実施した。

2. 密度試験

試料 1, 2, 5 は、砂の原位置における密度を把握するために現場密度試験を実施した。試料 1 では砂置換法による土の密度試験(JIS A 1214)を G.L.-0.8 m の位置で実施し、試料 2, 5 ではモールドを表層に押し込み、採取した土の質量から密度を求める簡易的

な方法を実施した。併せて、土粒子の密度試験(JIS A 1202)を全試料に対して実施した。密度試験結果を表-1 に示す。加えて、試料 1 のみ砂の最小密度・最大密度試験(JIS A 1224)を行い、最大間隙比 $e_{\max}=1.07$ g/cm³, 最小間隙比 $e_{\min}=0.68$ g/cm³, 相対密度 $D_r=78.2\%$ であった。試料 1 と試料 2, 5 では試験方法が異なるため、厳密な比較は難しいものの、試料 1 は $\rho_d=1.49$ g/cm³ で、試料 2 より 0.12 g/cm³ 大きく、 D_r は一般に密であるといわれる 70–100 %程度の範囲内だった。

3. 土の粒度試験

土の粒度試験(JIS A 1204)では、2 mm ふるいを用いた土の水洗いを行うことが規定されているが、本試験では試料に含まれる細粒分の流出を防ぐために水洗いは行っていない。また、規定ふるいに加えて 212 μ m, 25 μ m ふるいを使用した。粒径特性を表-2、粒径加積曲線を図-2 に示す。

試料 1–4 おける分布は、港湾基準に示される特に液状化の可能性が高い範囲⁶⁾の中央付近に位置して

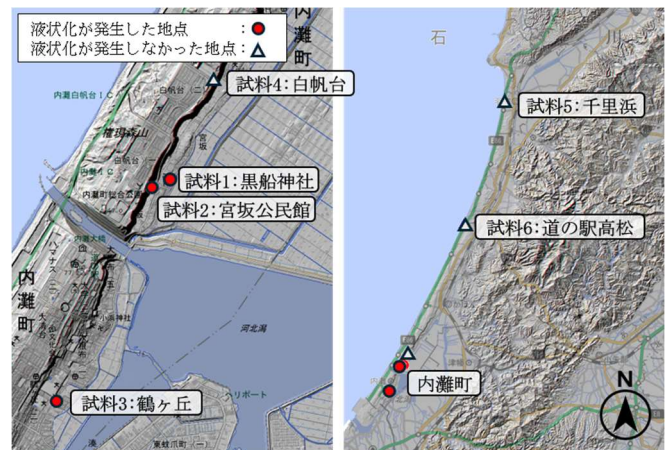


図-1 砂試料の採取地点（地理院地図に加筆³⁾）

表-1 密度試験結果

試料	採取深度 (cm)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)
1	40	1.64	1.49	2.631
2	35–39	1.50	1.37	2.668
3	0	–	–	2.669
3	0	–	–	2.655
5	22–48	1.60	1.43	2.664
6	60	–	–	2.670

いるのに対し、試料 5, 6 は同範囲の下端付近に位置しており、より粒径が小さい。これは、石川県加賀地区の砂丘の砂は主として手取川により供給され、手取川方面からの海岸流や季節風の方角および地形が起因して形成されたとされているため^{7,8)}、能登半島に沿って北上する沿岸流によって堆積する過程でこのような粒径の違いになったと考えられる。また、試料 2 (砂丘下端部) および試料 4 (砂丘上端部) の分布は概ね重なる結果となったが、砂丘上部では 2024 年地震による液状化は発生していないため、粒度のみでは液状化の可能性は説明できず、砂丘下部では地下水位が浅く、砂丘上部では地下水位が深いこと⁹⁾などが液状化の有無に起因したと考えられる。

均等係数 U_c は、試料 1-4 が 1.74-2.30 であるのに対し、試料 5, 6 は 1.21 と 1.28 のため、後者の方が粒径の揃った粒度分布を示している。

4. 液状化試験

(1) 試験条件

現場密度試験を行った試料 1, 5 を対象として、2 mm ふり通過試料を使用した。供試体サイズは $\phi 5 \times 12.5$ cm で、試料を鋼製モールド内に多重ふりを用いた空中落下法より堆積させ、負圧法により自立させた。供試体作製時の乾燥密度 ρ_d は現場密度試験 (表-1) により決定し、これをせん断前の乾燥密度に適用した。飽和過程では、二重負圧状態のもと供試体下部から脱気水を通水し、予備圧密を平均有効主応力 $p'=30$ kPa で 1 時間载荷した。間隙圧係数 $B>0.96$ を確認した後、背圧 200 kPa を約 30 分間载荷する方法で供試体の飽和を促進させた。圧密は $p'=50$ kPa を約 1 時間、排水量が収束するまで载荷した。繰返しせん断は変位制御により载荷し、両振幅ひずみ $DA=5\%$ に達したときに供試体が液状化したと判断した。なお、繰返し载荷開始からせん断過程終了に至るまでの供試体は非排水状態である。

ベンダーエレメント法によるせん断波速度測定は、試料 1 の供試体で行い、せん断波の伝播時間の同定方法を送信波と受信波の立ち上がり点の時間差 (start-to-start) とした。伝播距離の同定方法は、ベンダーエレメント先端間距離 (tip-to-tip) とした。発信波は sin 波を 1 波 ± 10 V を印加し、周波数は 5-60 kHz の範囲で、5 kHz 刻みで段階的に上げた。

表-2 粒径特性

試料	50%粒径 D_{50} (mm)	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'	細粒分含有率 F_c (%)	砂分含有率 S_c (%)
1	242	1.74	1.39	0.88	96.22
2	230	2.24	1.87	0.50	98.93
3	236	2.30	1.87	1.76	93.00
4	230	2.25	1.87	0.26	99.70
5	91	1.21	0.96	1.23	98.58
6	98	1.28	0.95	0.15	99.84

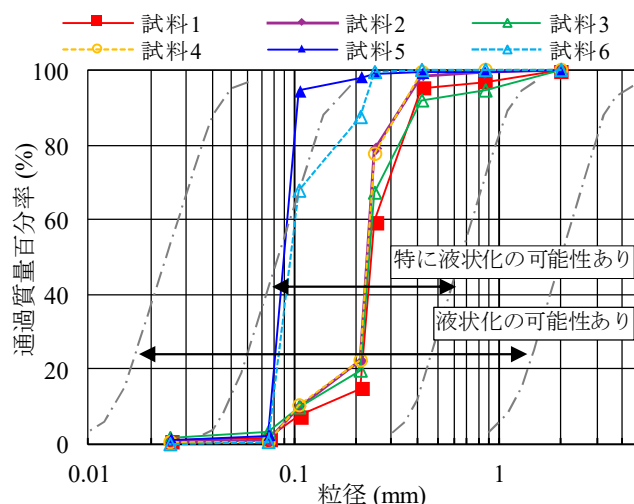


図-2 粒径加積曲線

(2) 試験結果

図-3 に本試験において载荷回数 N_c が 20 回に最も近かった供試体の (a) 試料 1 および (b) 試料 5 について、時刻歴軸ひずみ、時刻歴過剰間隙水圧比、軸差応力 q -平均有効主応力 p' 関係および軸差応力 q -せん断ひずみ ε_s 関係を示す。また、図-4 に繰返しせん断応力振幅比 $CSR (\sigma_d/2\sigma'_c)$ -载荷回数 N_c 関係を示す。本試験の結果を実線、既往研究の豊浦砂⁴⁾および室地区⁵⁾の試験結果を点線で示す。図-4 から読み取った $N_c=20$ 回の液状化強度比 R_{L20} を表-3 に示す。

図-3 より、いずれの結果も繰返し回数の増加に伴い、軸ひずみ、過剰間隙水圧比およびせん断ひずみが増加した。試料 1 では、 $DA=5\%$ に至る直前の軸ひずみが 1 波で急速に発達しており、緩い供試体に特徴的な急激なひずみ増加が確認された。

一方、試料 5 では、軸ひずみの増加は試料 1 と比較して緩やかであるものの、 $DA=5\%$ に達するまでに 2-3 波で、依然としてひずみ増加は急であった。

図-4 より、 $N_c \geq 20$ の範囲では、試料 1 ($D_r=78.2\%$) は豊浦 $D_r=40\%$ および室地区の CSR より同程度かやや低い値にあるため、試料 1 における D_r は大きいものの、豊浦砂に相当するものと比較すると低く、試料

としての液状化強度は低いことが示唆される。 $N_c < 20$ の範囲では、それぞれの試料の CSR の差が大きくなり、試料 1<室地区<豊浦 $D_r=40\%$ の傾向がある。

一方、試料 5 では、CSR の変化に対する N_c の変化が非常に大きく、CSR=0.18 で $N_c=0.9$ 回、CSR=0.13 では $N_c=1000$ 回となった。吉津ら¹⁰⁾は、CSR と N_c の関係に及ぼす D_r と液状化強度の影響について、 D_r が大きくなると、CSR の減少量に対する N_c 増加量が小さくなり、 $D_r=25\%$ ではこの傾向が小さいと報告している。試料 5 と吉津らの $D_r=25\%$ の豊浦砂の曲線形状は似ているため、試料 5 における D_r が小さかったと考えられる。また、 N_c が 1 回付近の CSR が試料 1 よりも小さいが、試料 5 を採取した千里浜周辺では、2024 年地震による液状化被害は発生していないため、現場密度試験を簡易的な方法により実施したことで実地盤よりも D_r が小さな値となっている可能性が考えられる。

せん断波速度測定試験では、各周波数から得られたせん断波速度の平均値は $V_s=144.0$ m/s で、山下ら¹¹⁾による豊浦砂では、 $p'=50$ kPa のとき $V_s=227.262$ m/s であるため、試料 1 の地盤剛性は低いといえる。

5. 簡易動的コーン貫入試験

試料 1 の黒船神社内では入口付近と砂丘側の狛犬前の 2 箇所で簡易動的コーン貫入試験を実施した。

貫入量 Δh における打撃回数 N 回により N_d 値および換算 N 値を次の岡田らの式¹²⁾で求めた。

$$N_d = \frac{10N}{\Delta h}, \text{ 換算}N\text{値} = \begin{cases} 0.66N_d & (N_d \leq 4) \\ 1.1 + 0.3N_d & (N_d > 4) \end{cases}$$

図-5 に(a)入口および(b)狛犬前の深度ごとの換算 N 値と道路橋示方書の FL 法¹³⁾による液状化判定結果を示す。換算 N 値による液状化判定では、Level2 地震動 Type II, III 種地盤、全層砂質土として、本報告で求めた ρ_d , D_{50} および F_c を用いた。 R_{L20} による方法では、液状化試験により求めた $R_{L20}=0.11$ を繰返し三軸強度比 R_L に適用し、これに地震動特性による補正係数 C_w をかけて動的せん断強度比 R を算出した。

入口では、狛犬前と比較して浅層部の N 値が大きく、地下水位は浅いことが確認された。現場密度試験は入口付近で実施しており、 D_r から比較的地盤が密な状態にあったことがわかっているため、それが N 値の大きさに関係していると考えられる。また、液状化判定の換算 N 値を用いた方法では、入口における 0.5 m 付近および 5.0 m 付近で $FL > 1$ 判定となり、狛犬前では、全層にかけて換算 N 値が非常に小さな値のため、 $FL < 1$ となった。また、 R_{L20} を用いた方法では、換算 N 値の大きさを考慮しないため、 R_{L20} が小さな値であることにより、入口および狛犬前の全層で $FL < 1$ となり、液状化する判定となった。2024 年地震では、試料 1 の黒船神社では液状化に伴う噴

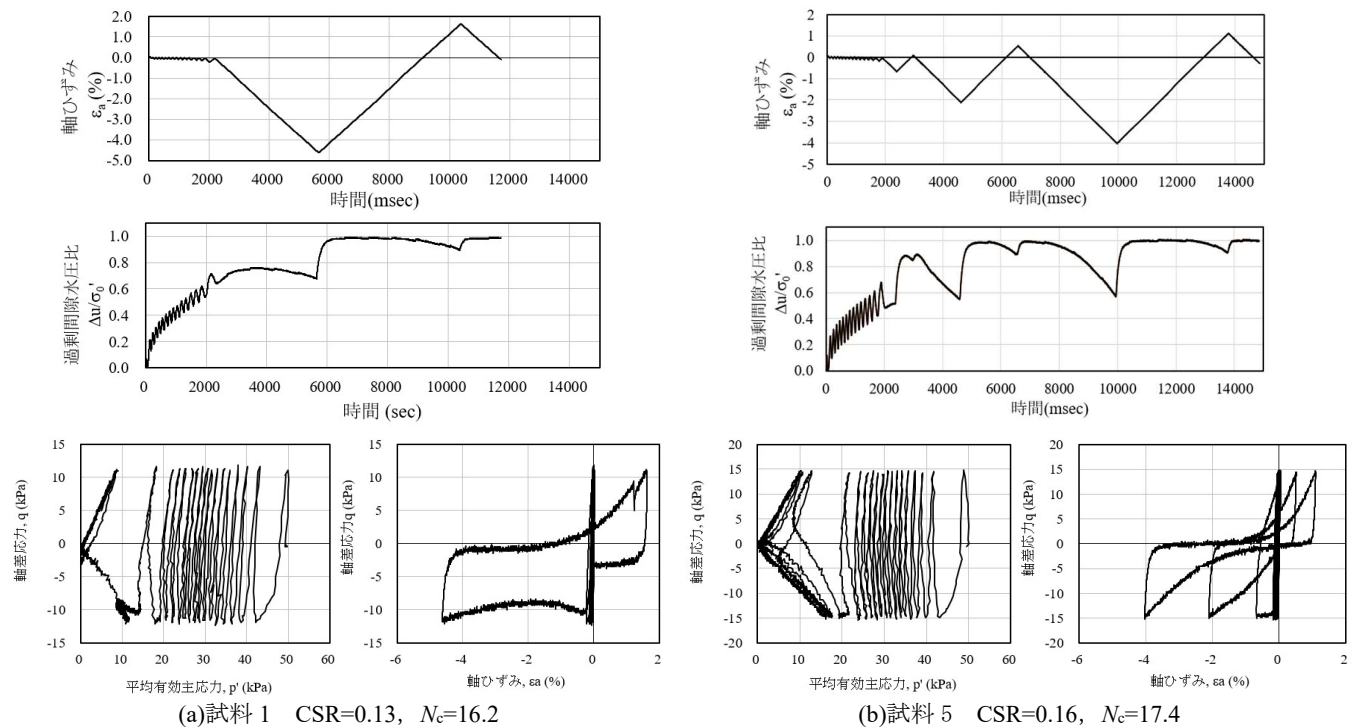


図-3 液状化試験結果

砂や側方流動が発生し、鳥居が転倒するなどの被害が発生したため²⁾、本判定は実際の液状化の発生状況と整合する結果となった。

6. 結論

本報告では、内灘砂丘砂の液状化特性の解明を目的として、内灘町、羽咋市、かほく市の試料を採取し、試料1および試料5の液状化試験を実施した。

粒度特性は、試料1-4は試料5、6と比較して、港湾基準の特に液状化の可能性が高い粒度範囲の中央付近に位置した。液状化強度は、試料1は豊浦 $D_r=40\%$ および室地区より低い値を示し、 R_{L20} を用いた道路橋示方書の液状化判定でも $FL<1$ となったため、2024年地震の液状化発生状況とも整合する結果となった。試料5は N_c が1回付近のCSRが試料1より小さく、低密度時に特徴的な曲線形状であるため、現場密度試験による ρ_d が小さかったと考えられる。2024年地震では、試料5の千里浜周辺で液状化は発生していないため、実地盤における密度は、本報告の値より大きい可能性がある。

今後は、試料1および試料5の D_r を変化させた場合の液状化強度を求めるとともに、採取した他の試料についても液状化強度の検討を予定している。

参考文献

1) 気象庁：令和6年能登半島地震等の関連情報，https://www.jma.go.jp/jma/menu/20240101_noto_jishin.html
2) 清田隆・栗間淳・池田隆明・志賀正崇：令和6年能登半島地震石川中央地域の地震被害調査（速報），<https://www.u-tokyo.ac.jp/content/400238726.pdf>
3) 国土地理院ウェブサイト，<https://maps.gsi.go.jp/>
4) 高田晋・豊田浩史・原忠・中村公一：礫分を含む幅広い粒度を有する宅地地盤の液状化予測に関する検討，地盤工学会ジャーナル Vol.5, No.2, pp.377-390
5) 太田史朗・佐々木朋子・窪田上太郎・風間基樹：令和6年能登半島地震で地盤変状が発生した石川県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，地盤工学会災害調査論文報告集，Vol.3, No.1, pp.124-136, 2025
6) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1979
7) 藤則雄：北陸の海岸砂丘の埋積腐植土層の編年とその生成環境¹⁾，第4紀研究，第10巻，第3号，pp.134-146, 1971.10, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaqua1957/10/3/10_3_134/_pdf-char/en
8) 藤則雄：北陸の海岸砂丘¹⁾，第4紀研究，第14巻，第4号，pp.195-220, 1975.12, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaqua1957/14/4/14_4_195/_pdf-char/ja
9) 石川県かほく市：第3回かほく市液状化対策広報技術検討委員会－七窪地区の地下水位低下工法の検討結果－，2026.6.1, https://www.city.kahoku.lg.jp/001/156/d011629_d/fil/da3iinnkaisiryounanakubo.pdf

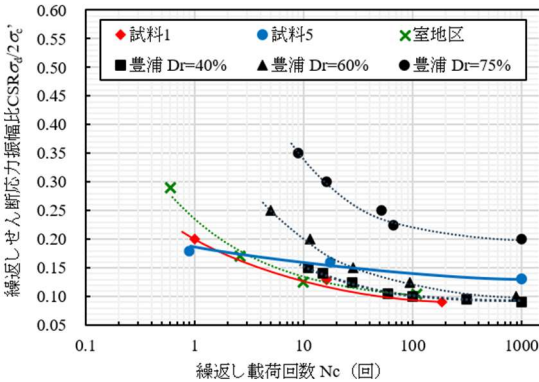


図-4 せん断強度比 $\sigma_d/2\sigma'_v$ -載荷回数 N_c 関係⁴⁾⁵⁾

表-3 液状化強度比 R_{L20}

	試料1	試料5	室地区	豊浦 $D_r=40\%$	豊浦 $D_r=60\%$
R_{L20}	0.11	0.15	0.12	0.13	0.16

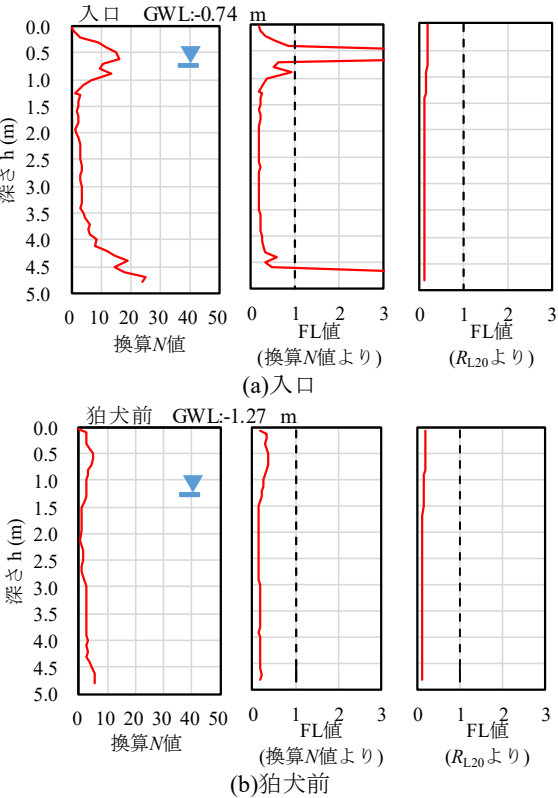


図-5 簡易動的コーン貫入試験結果

10) 吉津考浩・正垣孝晴：豊浦砂の液状化強度に及ぼす相対密度と繰返し回数の影響，土木学会第68回年次学術講演会，III-320, pp.639-640, 2013.9, <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/2013/68-03/68-03-0320.pdf>
11) Yamashita.S・Fujiwara.T・Kawaguchi.T・Mikami.T・Nakata.Y・Shibuya.S：International Parallel Test on the Measurement of G_{max} Using Bender Elements Organized by TC-29, 4th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (IS-Atlanta 2008), 2008.9, https://www.jiban.or.jp/file/e/tc29/be_international_parallel_test.pdf
12) 岡田勝也・杉山友康・野口達雄・村石尚：盛土表層部の土質強度に関する異種のサウンディング試験結果の相関性，土と基礎，Vol.40, No.411, pp.11-16, 1992
13) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編・同解説，丸善出版株式会社，2017 (H29)