

令和6年能登半島地震による新潟市内を対象とした複数液状化判定式の比較

長岡技術科学大学大学院 非会員 ○安達 和希
長岡技術科学大学 正会員 志賀 正崇
長岡技術科学大学 正会員 池田 隆明

1. はじめに

1-1. 研究背景

2024年1月1日、石川県能登地方を震源とするモーメントマグニチュード (Mw) 7.5の令和6年能登半島地震が発生した。¹⁾この地震により、震源から150km以上離れた新潟県新潟市においても広範囲で液状化被害が確認された。新潟県²⁾の報告によると、2025年8月29日時点で新潟市内の住宅被害は25,209棟に達している。また新潟市では、1964年新潟地震においても大規模な液状化が発生しており、その経験を契機として、1970年代以降、液状化被害の抑制を目的とした複数の簡易液状化判定法の開発および改良が継続的に進められてきた。

現行の液状化判定法は大別して簡易法と詳細法に分けられる。前者には、微地形区分に基づく手法³⁾⁴⁾、粒度分布に基づく手法、またFL法（応力法）などが含まれる。一方で、後者は数値解析を伴う全応力法と有効応力法に区分される。この中でもFL法は、ボーリング調査および標準貫入試験によるN値を用いて簡便に計算できることから、日本国内で広く用いられている。しかし、FL法については国内の複数の組織が指針等にそれぞれの算出式を規定しており、その結果算出されるFL値にわずかな差異が生じる場合がある。こうした差異は、判定結果を用いた液状化ハザードマップのゾーニングと対策要否の判定や地震後の復興計画に影響を及ぼす可能性がある⁵⁾。

1-2. 研究目的

本稿の目的は、国内で広く用いられている道路橋示方書⁷⁾および建築基礎構造設計指針⁸⁾における、標準貫入試験（SPT）N値を用いた液状化強度 R_L の算定式に着目し、どのような地盤パラメータ条件下で両者の評価差が顕在化するかを明らかにすることである。さらに、令和6年能登半島地震で液状化が発

生した新潟市内の地点におけるボーリング柱状図およびSPTデータを用いて、両算定式の評価差が実地盤でどのように表れるかを比較検討し、算定式比較で得られた傾向の再現性を検証する。

2. 液状化強度 R_L 計算式の簡易的な感度分析

2-1. 感度分析の概要

本稿で検討対象とした判定法は、平成29年度道路橋示方書（2017年、以下、道示法）および平成31年度建築基礎構造設計指針（2019年、以下、建築法）である。両判定法はFL値の算出方法が異なり、液状化強度の計算式ならびに地震時作用する外力を求める際のパラメータの取り扱いに相違がある。本稿では、手法間の差異要因を明確化するため、SPT N値 N 、有効上載圧 σ'_v 、細粒分含有率 F_C を主要評価項目とし、これらが液状化強度 R_L に及ぼす影響を評価することとした。外力条件に関する詳細な影響評価は本稿の対象外とした。さらに、地下水位や平均粒径 D_{50} 等や、事前判定に要する D_{10} 等の間接的なパラメータについては、式の適用上必要なもののみ前提値として与え、評価項目には含めない。また記号の対応として、道示法の「繰返し三軸強度比」および建築法の「動的せん断強度比」はいずれも R_L と表記する。表-1には、両手法におけるSPT N値から R_L を求める計算過程を示す。表中の①～③は、①N値の拘束圧依存性の取り扱い、② R_L の細粒分含有率依存性の取り扱い、③補正後のN値から R_L への変換に対応する。

2-2. $N - R_L$ 関係

図-1、図-2に $\sigma'_v = 20, 60$ kPaにおけるSPT N値と R_L の関係（以下、 $N - R_L$ 関係）を示す。各図には、道示法および建築法について、 F_C を5, 10, 20, 30, 40, 50%と変化させた場合の $N - R_L$ 関係曲線を示した。

表-1 2手法の液状化強度 R_L に関するパラメータの比較

道路橋示方書 (2017)		建築基礎構造設計指針 (2019)
① $N \rightarrow N_1$ (拘束圧補正)	$N_1 = \frac{170N}{\sigma'_v + 70}$	$N_1 = \sqrt{\frac{100}{\sigma'_v}} N$
② $N_1 \rightarrow N_a$ (細粒分補正)	$N_a = C_{F_c}(N_1 + 2.47) - 2.47 \quad (D_{50} < 2 \text{ mm})$ $C_{F_c} = \begin{cases} 1.0 & (F_c \leq 10\%) \\ (F_c + 20)/30 & (10\% < F_c \leq 40\%) \\ (F_c - 16)/12 & (40\% < F_c) \end{cases}$	$N_a = N_1 + \Delta N_f$ $\Delta N_f = \begin{cases} 0 & (F_c \leq 5\%) \\ 1.2(F_c - 5) & (5\% < F_c \leq 10\%) \\ 0.2(F_c - 10) + 6 & (10\% < F_c \leq 20\%) \\ 0.1(F_c - 20) + 8 & (20\% < F_c \leq 50\%) \end{cases}$
③ $N_a \rightarrow R_L$ (補正 N 値 から液状化 強度への変換)	$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{(0.85N_a + 2.1)/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6}(N_a - 14)^{4.5} & (N_a \geq 14) \end{cases}$	$R_L = 0.45 \times 0.57 \left\{ \frac{16\sqrt{N_a}}{100} + \left(\frac{16\sqrt{N_a}}{85} \right)^{14} \right\}$

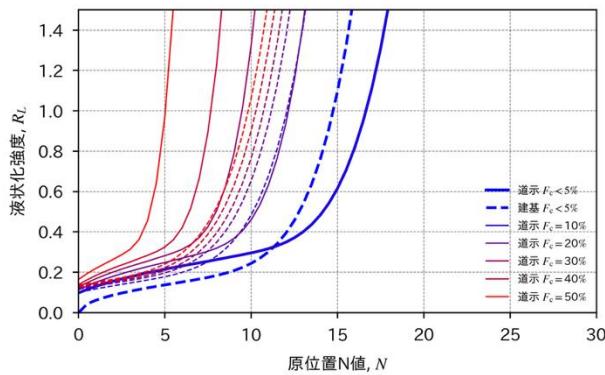


図-1 $\sigma'_v = 20 \text{ kPa}$ における細粒分含有率 F_c ごとの原位置 N 値と液状化強度 R_L の関係

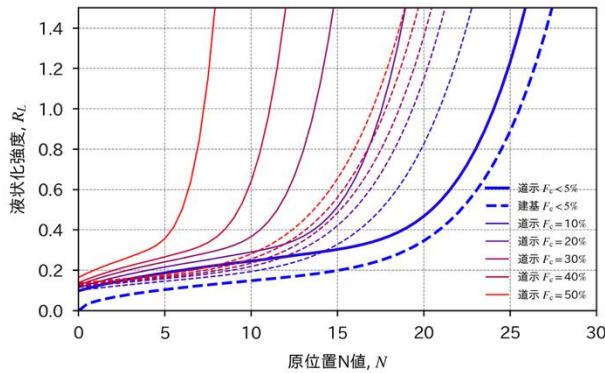


図-2 $\sigma'_v = 60 \text{ kPa}$ における細粒分含有率 F_c ごとの原位置 N 値と液状化強度 R_L の関係

図-1 ($\sigma'_v = 20 \text{ kPa}$) では、N 値が 12 以上かつ F_c が 5%未満の場合に、道示法の方が建築法より小さい R_L を与える。逆に N 値が 12 未満の場合は、この傾向は逆転し、道示法の方が大きい R_L を与える。以後、この道示法と建築法の R_L の大小関係が入れ替わる协会の N 値を N_c と呼ぶ。 F_c に関しては、道示法の方が F_c の增加に対する R_L の増加幅が顕著であり、 F_c が 30%

を超えると広い N 値範囲で N_c が消失し、道示法の方が一貫して高い R_L を与える傾向が顕著である。図-2 ($\sigma'_v = 60 \text{ kPa}$) では全ての N 値において道示法の方が建築法を上回る R_L を与えることが分かる。さらに、 σ'_v の上昇に伴い N_c はより大きい N_c へシフトする。総じて、いずれの図においても、 F_c の変化に対する R_L の感度は道示法の方が高い。

2-3. $N - R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ 関係

図-3、図-4 に、 $\sigma'_v = 20, 60 \text{ kPa}$ における、建築法の液状化強度 $R_{L(AIJ)}$ に対する道示法の液状化強度 $R_{L(JRA)}$ の比 ($R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$) と SPT N 値の関係を示す。両図では、 F_c を 0% から 50% の範囲で 5% 刻みに設定している。各曲線の淡色区間は、建築法または道示法のいずれか一方の R_L が 0.4 を超える範囲を示す。実務では、主として L1 地震動クラスの強震動を対象に FL 法が適用されるため、評価の焦点は $R_L < 0.4$ の場合であることが多い。このため、本稿では $R_L > 0.4$ の範囲を淡色化して区別して表示した。

図-3 ($\sigma'_v = 20 \text{ kPa}$) では、 $F_c = 0\%, 5\%$ においては全体的に増加傾向を示し、N 値が 12 を超えると $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ は 1 を超える。この箇所は、前項の N_c に相当する。また、 F_c が 10%~40% では、N 値が 7.5 未満の領域で概ね 1 を下回る傾向を示し、その後 N 値の増加に伴い $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ は上昇するものの、 F_c が高いほど小さい N 値でピークを示し、上昇から下降の傾向へ転じる。さらに $F_c > 30\%$ では、図中全ての N 値において $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ が 1 未満となる。なお、 $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ が最も大きくなるのは $F_c = 10\%$ である。

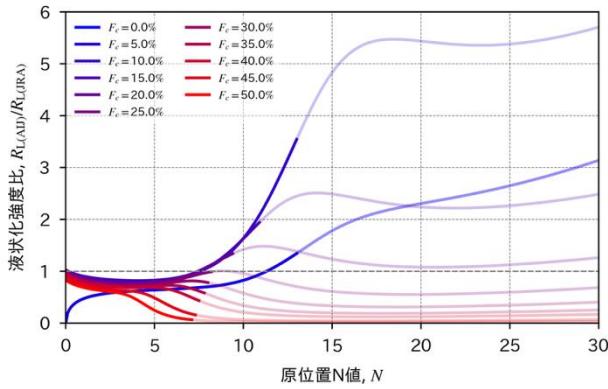


図-3 $\sigma'_v = 20 \text{ kPa}$ における細粒分含有率 F_c ごとの原位置 N 値と液状化強度比 $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ の関係

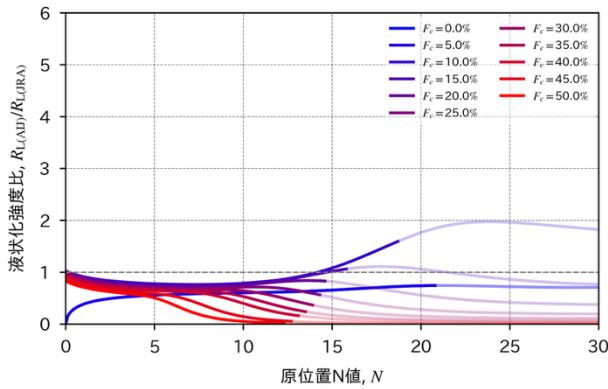


図-4 $\sigma'_v = 60 \text{ kPa}$ における細粒分含有率 F_c ごとの原位置 N 値と液状化強度比 $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ の関係

図-4 ($\sigma'_v = 60 \text{ kPa}$) は図-3 と同様の関係を示すが、変動幅が小さく、 N 値が 14 未満の領域では $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ は 1 を下回る。また $F_c = 10\%, 20\%$ では $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ は一部の N 値で 1 を上回るが、それ以外の F_c では全体として $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)} < 1$ にとどまる。

2-4. $N - F_c - R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ 関係

図-5、図-6 に、 $\sigma'_v = 20, 60 \text{ kPa}$ における、 $N - F_c$ 平面上での比 $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ の分布を、図-3, 4 とは異なる表現で示す。図中の色が白に近いほど比は 1 に近づき、両手法の液状化強度 R_L は近い値を取ることを示す。色が濃くなるほど比は 1 から離れ、両手法の差異が大きいことを示す。比が 1 を上回る場合は建築法 > 道示法となり、赤色の傾向を示す。また各手法で $R_L = 0.4$ となるラインを黒い点線で記した。

図-5 ($\sigma'_v = 20 \text{ kPa}$) では、低 N 値全体の領域と、高 N 値かつ高 F_c の領域で $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)} < 1$ となり、道示法の R_L が相対的に大きくなる。一方、高 N 値か

つ低 F_c の領域では、 $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)} > 1$ となり建築法の R_L が相対的に大きくなる傾向が見て取れる。また、図-3 で示した通り、 $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ の値が最大となるのは $F_c = 10\%$ である点が再確認できる。さらに、 $R_L < 0.4$ の領域に着目すると、ほとんどの場合で道示法の値が大きくなる傾向にあることがわかる。

図-6 ($\sigma'_v = 60 \text{ kPa}$) では、 $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)} < 1$ の領域が一層広がる。特に、 $R_L < 0.4$ の範囲ではほとんどの条件下で道示法の R_L が大きくなる傾向にある。

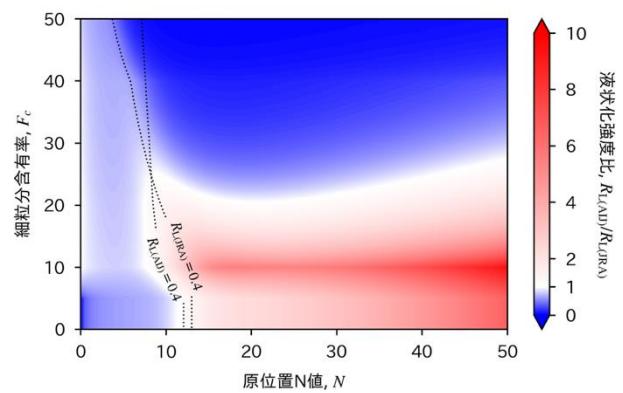


図-5 $\sigma'_v = 20 \text{ kPa}$ における細粒分含有率 F_c と原位置 N 値に対する液状化強度比 $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ の関係

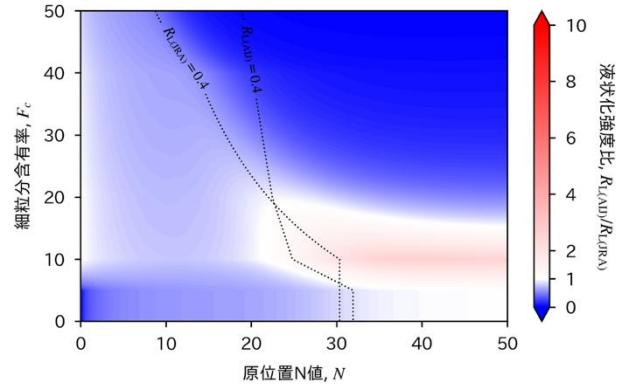


図-6 $\sigma'_v = 60 \text{ kPa}$ における細粒分含有率 F_c と原位置 N 値に対する液状化強度比 $R_{L(AIJ)}/R_{L(JRA)}$ の関係

3. 代表地点での液状化判定結果の比較

本稿では、令和 6 年能登半島地震に際し、対象地点とした寺尾（新潟砂丘の辺縁部）およびときめき（信濃川旧河道）における現地調査で地表面変状が確認された各 1 地点を対象地点として選定し、道示法および建築法に基づく液状化判定を実施した。両地点の柱状図、深度-N 値分布、深度-FL 値分布を図-7、図-8 に示す。地下水位並びに地震動条件⁹⁾については表-2 に示す。周辺ボーリング資料に基づく地質

断面図の検討は本稿では実施していないため、柱状図の土質分類に基づく事前判定は行わず、全層を対象に液状化判定を行った。物性値については、道路橋示方書の標準値を用いた。

表-1 地下水位と地表面加速度における条件⁹⁾

地点	地下水位 (測定時) (m)	地下水位 (液状化判定時) (m)	地表面 加速度 (m/s ²)
寺尾	0.30	0.00	2.47
ときめき	2.04	0.00	2.17

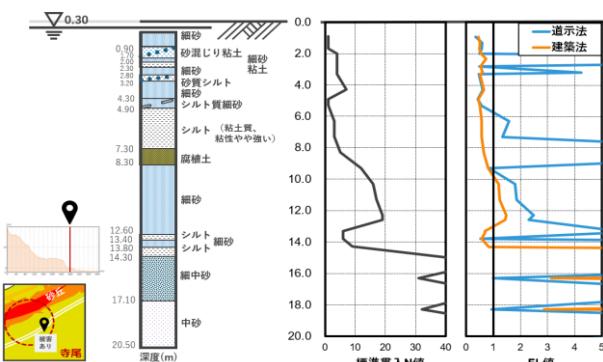


図-7 寺尾（変状あり）における柱状図、深度-N値、深度-FL値分布

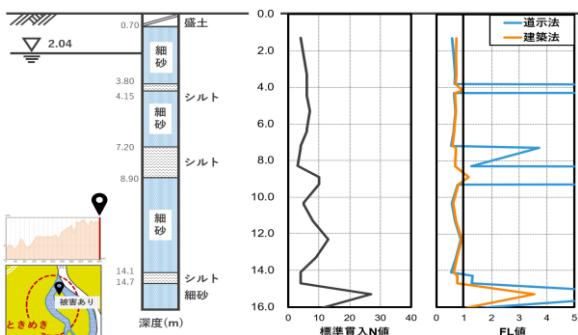


図-8 ときめき（変状あり）における柱状図、深度-N値、深度-FL値分布

図-7と図-8に示すように、両地点はいずれも液状化が確認された地点であり、判定結果でFL値が1を下回る土層が存在することから、確認した事実と判定結果は整合することが示された。加えて、道示法と建築法の比較では、細粒分含有率が高いシルト層や砂混じり粘土層において、道示法の方が相対的に高いFL値（局所的な上昇）を示す傾向が確認できる。この傾向の要因として、感度分析が示す通り、両手法における F_C への感度の差異が挙げられる。同一のN値および σ'_v の条件下で F_C を変化させた場合、図-1, 2

の道示法における R_L の変動幅は建築法を上回る。さらに F_C が高くなるにつれて道示法の、 $N - R_L$ 曲線の傾きの増加が顕著になるため、算出されるFL値の変動幅が拡大することが考えられる。

4. 結論

本稿では、現在実務で使用されている2つの液状化判定法におけるFL値の評価差に着目し、計算式の入力パラメータに関する感度分析と、令和6年能登半島地震で液状化が確認された新潟市内2地点を対象とするケーススタディを実施した。

感度分析では、道路橋示方書および建築基礎構造設計指針を対象に、SPTN値、有効上載圧 σ'_v 、細粒分含有率 F_C が液状化強度 R_L （繰返し三軸強度比および動的せん断強度比）に及ぼす影響を評価した。結果として、道路橋示方書は F_C に対する感度がより高いことや、とくに $R_L < 0.4$ の領域では道路橋示方書の方がより大きい R_L を与える傾向が強いことが確認できた。さらに、これらの傾向は代表地点における液状化判定結果でも同様の結果を反映し、FL値の算定において細粒分含有率 F_C の設定が手法間の判定結果の評価差に大きく影響を与える要因であることが示された。

参考文献

- 内閣府:令和6年版 防災白書 | 特集2 第1章 第2節 被害の概要:防災情報のページ。能登半島地震の被害概要, 2025. https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r06/honbun/t2_1s_02_00.html, [2025-9-26 閲覧].
- 新潟県:被害状況等（第103報・8月29日発表）, <https://www.pref.niigata.lg.jp/sec/kikitaisaku/jishin-20250829.html>, [2025-9-28 閲覧].
- 国土交通省:地形区分に基づく液状化の発生傾向図等, https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_tk_000038.html
- 松岡昌志, 若松加寿江, 橋本光史:地形・地盤分類 250mメッシュマップに基づく液状化危険度の推定手法, 日本地震工学会論文集, Vol.11, №2, pp.20-39, 2011.
- 山崎浩之, 善功企, 小池二三勝:粒度・N値法による液状化の予測・判定に関する考察, 港湾技術研究資料, No.914, 1998.
- 安田進, 石田栄介, 細川直行:液状化のハザードマップにおける作成方法の現状と今後のあり方, 土木学会論文集A1（構造・地震工学）, Vol.65, No.1, pp.188-194, 2009.
- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説(V 耐震設計編), 丸善出版, 2017.
- 日本建築学会:建築基礎構造設計指針, 丸善出版株式会社, 2019
- 志賀正崇, 池田隆明:令和6年能登半島地震による新潟市内で観測された強震動記録の簡易分析, 地震工学研究発表会, 2025