

液状化判定のための性能規定とリスクマネジメント

Performance Regulations and Risk Management for Liquefaction Assessments

正 垣 孝 晴 (しょうがき たかはる)

防衛大学校 建設環境工学科

吉 津 考 浩 (よしづ たかひろ)

防衛大学校 #51理工学研究科前期課程

1. はじめに

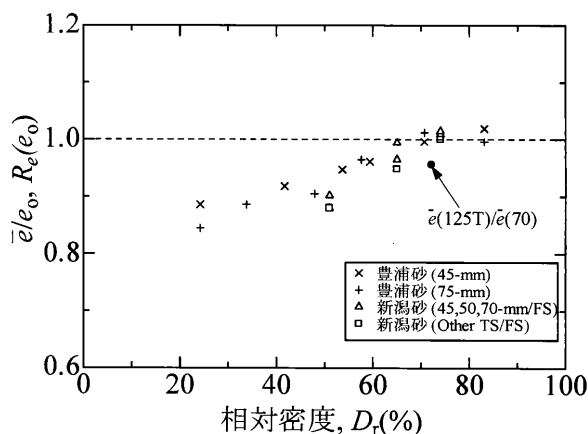
2011年東北地方太平洋沖地震は、津波のみでなく地震動による激甚な地盤災害をもたらした。特に、関東地方では、若年埋立て地盤の液状化に起因したライフラインや戸建住宅等の被害が著しい。このような地盤に対する地震時の液状化評価は、簡易なものとして粒径や N 値等を用いる方法がある。一方、精緻な検討としては、一般的に地盤工学会が規定する乱れの少ない試料採取法 (JGS-1221, 1222, 1223) とこれで採取した試料に対する繰返し三軸試験 (JGS-0541) によって行われる。そして、これらの基準は液状化判定のための性能規定の調査・試験法として実務で用いられている。しかし、このような検討から液状化に対して安全であると判定された地盤が液状化した事例も報告されている。

細粒分含有率 F_c が少ない新潟砂のような地盤に対する乱れの少ない試料採取法は、凍結サンプリング FS が良いとされている。しかし、FS はその費用が高額なため、特別なプロジェクトを除き一般の実務で用いることは少ない。吉見ら¹⁾は、新潟砂に対するチューブサンプリング TS の結果から、 $N < 20$ の地盤では、密度増加に起因して、液状化強度を過大評価することを示している。正垣・金田²⁾は、豊浦砂に対する相対密度 D_r を変化させた一連の繰返し三軸試験とチューブ貫入のモデル試験から、チューブ貫入前の原位置の間隙比 e 、繰返し回数 20 回の応力振幅比 R_{L20} 、初期せん断剛性率 G_0 を推定する方法を提案している。さらに、FS で得た試料や N 値等の地盤強度の精緻な検討から、新潟女池³⁾、新潟空港³⁾ の砂地盤に対して、この提案法の適用性を示している。

本稿では、豊浦砂と自然堆積砂に対して試料採取法 (JGS-1221, 1222, 1223) と試験法 (JGS-0541) に加え、その評価法の精度を明らかにし、それらに対するリスクマネジメントの現状と自然災害に対する個人の対処法について考察する。

2. 試料採取法の基準とその精度

図一¹²⁾は初期間隙比 e_0 に対する半割チューブの貫入で採取した試料の間隙比の平均値 $\bar{e}$ の比 $\bar{e}/e_0 (= R_e(e_0))$ を D_r に対してプロットしている。また、新潟女池で 45-mm, 50-mm, 70-mm サンプラーの $R_e(e_0)$ の結果⁴⁾ (Δ) に加え、他の TS ($\square$) も同図に併せて示している。新潟砂のデータのうち、 D_r が最も小さい $D_{r51\%}$ の試料

図一1 $R_e(e_0)$ と D_r の関係 (豊浦砂と新潟砂)²⁾

に対して、45-mm, 50-mm, 70-mm サンプラーの $R_e(e_0)$ (Δ) は 0.9, 他の TS ($\square$) は 0.88 であり、TS で採取した e は FS のそれより小さく、チューブ貫入による間隙比の減少が明らかである。しかし、 $D_{r71\%}$ と $D_{r83\%}$ の $R_e(e_0)$ はほぼ 1 であり、FS の e と同等である。また、 $D_{r72\%}$ の ($\bullet$) で示す $\bar{e}(125T)/\bar{e}(70)$ は、70-mm に対する 125-mm の TS (125T) の $\bar{e}$ の比である。このプロットの $R_e(e_0)$ は 0.96 であり、三重管サンプラーである 125 T の試料の乱れが懸念される。

豊浦砂を用いたモデル試験結果である図一¹²⁾に示す $R_e(e_0)$ ($\times$, $+$) は、 $D_r > 70\%$ の領域でほぼ 1 であるが、 $D_{r59\%}$, 53% , 42% , 34% , 24% の $R_e(e_0)$ はそれぞれ 0.96, 0.94, 0.92, 0.88, 0.85 となり、 D_r が小さくなると $R_e(e_0)$ も小さくなる。このような挙動にチューブ径は依存していない。 $D_r > 55\%$ にプロットされる新潟砂²⁾ (Δ , $\square$) は自然堆積土であることや、複数の供試体の乾燥密度の平均値から D_r を求めたことを反映して $R_e(e_0)$ の変動が大きいが、半割チューブの結果と同じ傾向であると判断される。このことは、チューブサンプリングで採取した試料の間隙比の変化は、自然地盤や半割チューブのモデル地盤にも依存しないことを示している。図一1の結果として、試料採取法 (JGS-1221, 1222, 1223) は、 $D_r < 70\%$ の砂に対して地盤内の状態と大きく異なる試料を採取することを示している。一方で、図一1に示す R_e と D_r の関係を用いることで、TS で採取した試料の D_r に基づいて原位置の e , D_r , G_0 , R_{L20} が推定できる可能性がある。

表一¹²⁾は、このような考えから豊浦砂で構築された

表—1 原位置 e , D_r , R_{L20} , G_0 の推定式²⁾

式	相関式	相関係数
(1)	$Re=1.214-0.00205D_r-0.0000147D_r^2$	0.963
(2)	$RD_r=0.076+0.013D_r-0.0000051D_r^2$	0.991
(3)	$RR_{L20}=e^{(0.01579Dr-1.101)}$	0.948
(4)	$RG_0=0.209\ln D_r+0.114$	0.991

原位置の e , D_r , R_{L20} , G_0 の推定式とその相関係数である。表—1 の各相関式の右辺に測定値を代入して求めた値（表—1 の相関式の左辺）を測定値に乗ずることで、それぞれの原位置の値が推定できる。すなわち、表—1 の相関式の左辺 (Re , RD_r , RR_{L20} , RG_0) は、測定値から原位置の e , D_r , R_{L20} , G_0 を求めるための補正係数である。これらの回帰式は相関係数が0.95以上と高いことから、データに対する回帰式の説明性も高い。

3. 液状化判定の動的三軸試験法の基準と課題

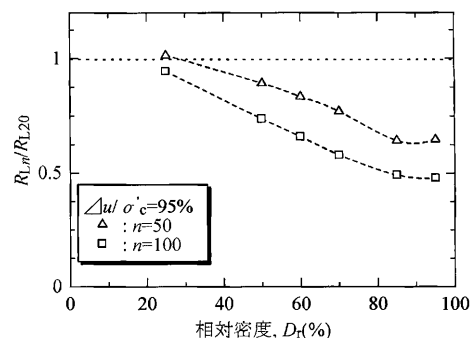
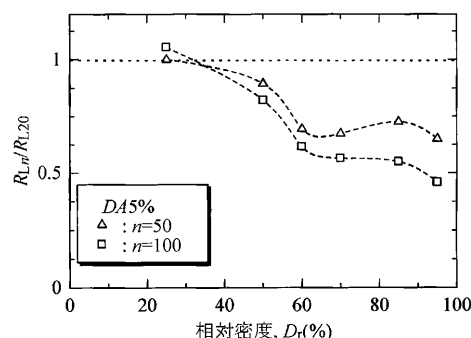
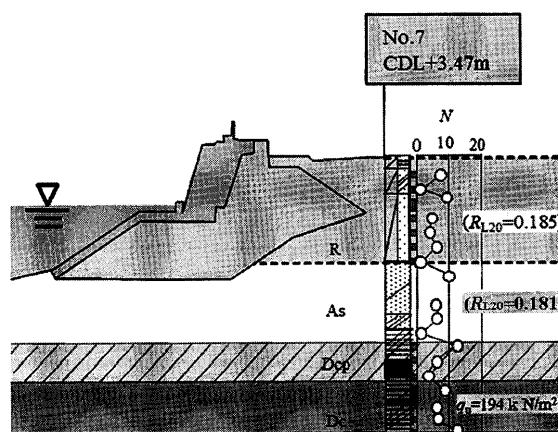
採取試料から繰返し三軸試験を行い液状化判定を行う方法がある。この場合、応力振幅比 ($\sigma_d/2\sigma'_c$) は、両振幅のせん断ひずみ $DA5\%$ 下の20回 (R_{L20}) の値が D_r , コーン抵抗, N 値等と関係付けられ、液状化の予測が行われている。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震のように地震動が3分程度と長く続く場合は、20回の繰返し回数では実現象と対応しないことが危惧される。 $DA5\%$ の妥当性も同様である。このような観点から、液状化強度に及ぼす D_r と繰返し回数 N_c の影響を検討した。

図—2 は、 $\Delta u/\sigma'_c$ が95%下で得た豊浦砂の R_{L20} に対する R_{L50} と R_{L100} の比を D_r に対してプロットしている。これらの比は、 D_r が大きくなると小さくなり、 $D_r50\%$ 下の R_{L50}/R_{L20} と R_{L100}/R_{L20} は、それぞれ、0.89と0.73である。図—2 の曲線は、 $\Delta u/\sigma'_c$ が95%下で得た R_{L20} に対する R_{L50} と R_{L100} の低減係数を D_r をパラメータにして求める図として利用できる。

図—3 は $DA5\%$ 下の R_{L20} に対する R_{L50} と R_{L100} の比を D_r に対してプロットしている。これらの比は、 D_r が大きくなると小さくなり、 $D_r50\%$ 下の、 R_{L50}/R_{L20} と R_{L100}/R_{L20} は、0.89と0.82である。これらの曲線は、 $DA5\%$ 下の R_{L20} に対する R_{L50} と R_{L100} の低減係数を求める図として利用できるが、 $DA2\%$ と 10% に対する同様な図も一連の研究の中で準備している。図—2 と 3 の結果は、2011年東北地方太平洋沖地震のような地震動が長く続く場合の液状化現象の解釈に利用できると考えているが、体系的な検討は今後の課題である。

4. TS による密度増加が動的強度特性に及ぼす影響

3章で述べた液状化試験に関する今後の課題の扱いは、地震動の特性に関連した今後の極めて大きな問題である。したがって、本章では、2章で述べた TS による密度変化に焦点を当てた検討を行う。

図—2 液状化強度比と D_r の関係 ($\Delta u/\sigma'_c=95\%$)図—3 液状化強度比と D_r の関係 ($DA=5\%$)

図—4 地盤構成と代表的護岸構造 (関西港湾)

図—4 は関西のある港湾（以降、関西港湾と表記）の地盤構成と代表的な護岸形式を示している。関西港湾の護岸の構造体は、図—4 に示すように沖積砂 As やその上層の埋土層 R に基礎底面を置いている。沖積砂層の N 値は1～33の範囲であり、その平均値 $\bar{N}$ は12と“相対的に中位の地盤”である。また、PS 検層の S 波速度 V_s は、140～185 m/s と N を反映して比較的に遅い地盤である。

沖積砂と埋土層から TS で得た試料の粒径加積曲線の範囲を図—5 に示す。また、豊浦砂²⁾、新潟女池²⁾、新潟空港³⁾の砂を含めた土粒子密度 ρ_s と粒度特性の結果を表—2 に示す。関西港湾の砂の平均粒径 D_{50} の範囲は、0.2～0.3 mm 程度であり、均等係数 U_c や曲率係数 U_c' に関しても、豊浦砂²⁾ や新潟女池²⁾、新潟空港³⁾ と同等である。また、埋土層の粗粒分は、沖積砂と同等の粒度分布を示すが、最大11%の F_c を含む（沖積砂は8%程

報 告

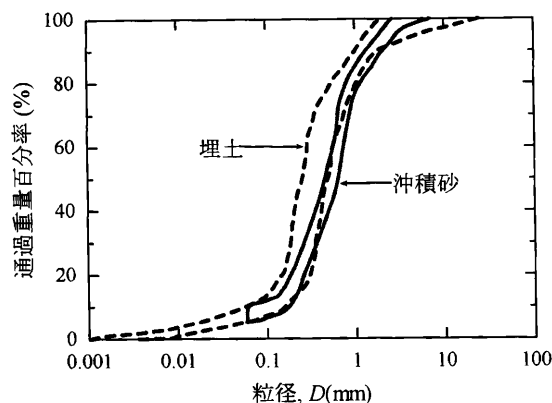


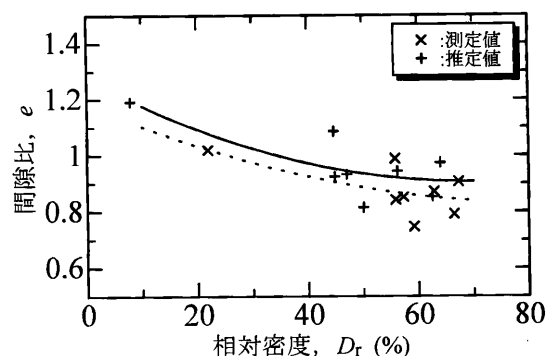
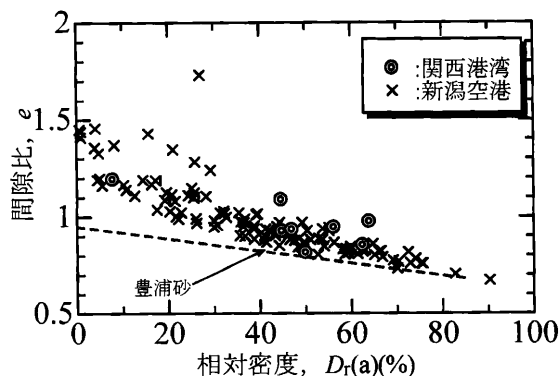
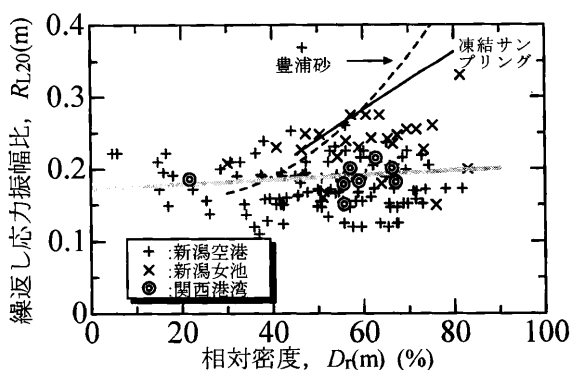
図-5 粒径加積曲線 (関西港湾)

表-2 粒度特性

試 料	豊浦砂	新潟空港	新潟女池	関西港湾
				埋土(沖積砂)
土粒子 密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.653	2.693	2.693	2.630~2.649 (2.609~2.638)
間隙比 e	0.69~0.95	0.73~0.91	0.73~0.91	0.75~1.02 (0.79~0.91)
礫分 (%)	0	0~0.4	0~0.4	0~10.0 (0~0.2)
砂分 (%)	100	93.2~99.1	93.2~99.1	85.3~96.3 (91.7~95.7)
粘土分(%)	0	0.6~6.8	0.6~6.8	3.9~10.7 (4.5~8.3)
最大粒径 (mm)	0.85	0.85~4.75	0.85~4.75	0.85~19.00 (2.0~4.75)
50%粒径, D_{50}	0.24	0.24~0.34	0.24~0.34	0.21~0.30 (0.30~0.33)
均等係数, U_c	1.5	1.5~2.2	1.5~2.2	1.7~3.9 (1.9~2.2)
曲率係数, U_c'	0.94	1.0~1.2	1.0~1.2	1.7~2.6 (1.1~1.2)

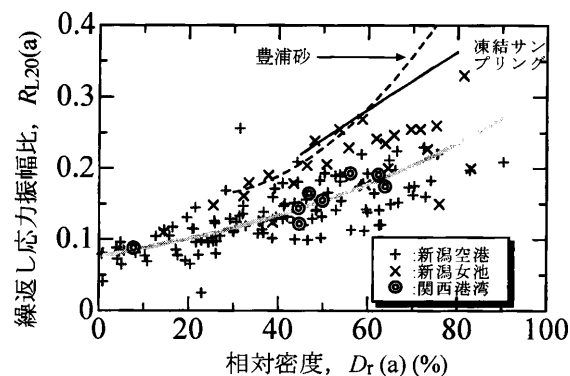
度)ことを反映して、この領域の分布特性は若干異なっている。

図-6は、 $D_r < 70\%$ の測定値に対する e と D_r の関係である。測定値(×)に対して表-1の式(1)と(2)を用いて推定した原位置の値(+)を記号を変えてプロットして、それらに対する回帰曲線も破線と実線で示している。表-1に示す式(1)と(2)から得た原位置の e と D_r は、測定値を、それぞれ大と小に見積もるため、推定値は、測定値に対するプロットと近似曲線を左上にシフトすることになる。 e と D_r に関する原位置の推定値を図-7に示す。同図には、図-6の推定値(+)に加え、新潟空港³⁾(×)と豊浦砂²⁾の結果を併せて示しているが、豊浦砂は細粒分を含まないため、新潟空港と関西港湾のプロットを包括する下限に位置している。同じ砂の場合、 D_r と e は負の関係にある。 $D_r < 70\%$ の領域で提案法²⁾で推定した値より、TSで得た D_r と e の値は、それぞれ、大と小に見積もることになる。原位置の推定値を用いた e と D_r は、 e で0.08大きく D_r で13%小さい負の関係にあり、その平均的傾向は新潟空港で用いた砂と同様である。すなわち、提案法で推定した D_r と e の関係は、堆積地の異なる関西港湾の砂に対しても同様な

図-6 e と D_r の関係 (関西港湾)図-7 e と $D_r(\text{in-situ})$ の関係 (関西港湾)図-8 R_{L20} と D_r の関係 (測定値)

傾向を示した。

図-8と9は、 R_{L20} と D_r の関係であり測定値と原位置の結果を示している。豊浦砂²⁾、新潟女池で行われたFS⁴⁾、TSとしての新潟女池(×)²⁾と新潟空港³⁾(+)の結果が関西港湾(●)に併せてプロットされている。TSで得た新潟女池(×)と新潟空港(+)のプロットから得た回帰曲線は、豊浦砂や新潟女池から得たFSのそれらの下に位置するが、測定値(図-8)の R_{L20} は D_r に対してほぼ一定と判断され、関西港湾のプロット(●)の位置は、新潟空港(+)と新潟女池(×)のそれらと同じ傾向である。図-9の D_r と R_{L20} の値は、表-1に示す式(2)と(3)を用いて推定した原位置の値である。 R_{L20} は D_r とともに大きくなり、関西港湾の結果(●)は、新潟空港(+)と新潟女池(×)のプロットの回帰曲線の近傍に位置している。FSの D_r の範囲(45~80%)に相当する新潟女池(×)が同じ堆積地で

図-9 R_{L20} と D_r の関係(推定値)

あるFSに対応する R_{L20} であるが、この R_{L20} はFSのそれより0.05~0.13小さい。FSは3つの異なる深度の限られた結果であるので、基準値としての判断も困難である。図-9の×と+のプロットから得た回帰曲線は、 F_c の値やサンプリング方法の差を反映して、豊浦砂とFSの下に位置するが、同じ右上がりの傾向を示している。すなわち、提案法で推定した D_r と e の関係は、新潟女池、新潟空港と遠く離れた堆積地の異なる関西港湾に対しても適用できると判断される。

図-10⁵⁾は、図-8に示す R_{L20} の測定値とこの値から推定した原位置の R_{L20} (図-9)から求めた液状化安全率 F_L の比の頻度分布を、正規分布を仮定して近似した曲線として示している。分布形の形状は堆積地の土性によって大きく異なり、液状化の発生確率もそれを反映することになる。しかし、平均値のみを見ても推定値による F_L は24%(新潟空港)と38%(新潟女池)低下しており、図-8の測定値は液状化発生を過小評価することが分かる。1章で述べた2011年東北地方太平洋沖地震の液状化現象の説明性は、このような状況を主因の一つとして反映していると推察される。

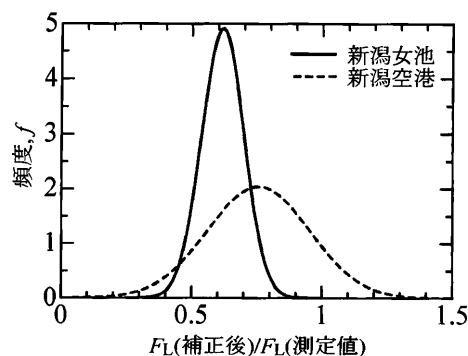
以上のことは、液状化を判定する技術は、まだ十分に成熟していないことを意味する。現象を予測できないことは、平穏な生活維持のための安心・安全は、お金や保険で補えないことも示している。あらゆる事象やその分析・評価・判断は、事象やそれに関係する材料特性の認識の程度や水準が変動するため、必ずリスクを伴うことになる。したがって、自然災害等のリスクを回避し軽減するためには、個人個人がリスクの存在を自覚し、自己責任のもとで行動することが不可欠であることが分かる。

本稿では、試料採取法と繰返し三軸試験の精度を具体的なデータで示し、災害の軽減のためには、性能規定の精度の向上とそれらを実設計等へ組込むことや制度化(法制化)が不可欠であることを示した。

6. おわりに

本稿の主要な結論は、以下のとおりである。

- 1) 液状化判定のための性能規定の一法として用いられている地盤工学会基準である砂の試料採取法と繰返

図-10 液状化安全率比の正規分布曲線⁵⁾

し三軸試験の問題点と課題を明らかにした。前者は、試料採取時の密度増加に起因して、 e を過少に D_r 、 R_{L20} 、 G_0 を過大に測定することを定量的に示した。後者は、液状化現象の精緻な解釈のために、応力振幅比に及ぼす D_r と N_c の影響を検討した。 $\Delta u/\sigma'_c$ が95%下の R_{L20} に対する R_{L50} と R_{L100} の比は、 D_r 50%下で0.89と0.73であり、 DA 5%下においては、同様に0.89と0.82であった。これらの関係は、今後地震動の特性に応じた液状化強度の補正法として検討したい。

- 2) 関西港湾の堆積・埋土砂に対し、 e と D_r の測定値は、推定値に対して e で0.08小さく D_r で13%大きかった。推定法は、堆積地の異なる砂や埋土砂の動的特性を統一的に説明できた。
- 3) 液状化強度の値は、液状化安全率や破壊確率に大きく影響することを具体的に示した。あらゆる事象やその分析・評価・判断は、事象やそれに関係する材料特性の認識の程度や水準が変動するため、必ずリスクを伴うことになる。したがって、自然災害等のリスクを回避し軽減するためには、個人個人がリスクの存在を自覚し、自己責任のもとで行動することが不可欠であることを示した。

参 考 文 献

- 1) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K. and Hosaka, Y.: Evaluation of liquefaction resistance of clean sands based on high-quality undisturbed samples, *Soils and Foundations*, 29, (1), pp. 93~104, 1989.
- 2) Shogaki, T. and Kaneda, K.: A feasible method, utilizing density changes, for estimating in-situ dynamic strength and deformation properties of sand samples, *Soils and Foundations*, 53, (1), pp. 64~76, 2013.
- 3) 正垣孝晴・古川 健・佐藤 葵・菅野高弘: 密度変化を考慮した原位置の動的強度推定法の新潟砂への適用性, 第55回地盤工学シンポジウム論文集, pp. 213~220, 2010.
- 4) Shogaki, T., Sakamoto, R., Nakano, Y. and Shibata, A.: Applicability of the small diameter sampler for Niigata sand deposits, *Soils and Foundations*, 46, (1), pp. 1~14, 2006.
- 5) 正垣孝晴: 性能設計のための地盤工学, 鹿島出版会, pp. 303~309, 2012.

(原稿受理 2013.4.5)