

やさしい 知識

繰返し非排水三軸試験 について

つばたくにはる
坪田 邦治*

Key Word 地盤材料, 土質定数, 液状化, 繰返し回数

1. はじめに

一般的に、20m 以浅の沖積層の砂地盤は、地震が発生したときには、地震動によって砂粒子のかみ合いがはずれ、水中に浮かんでいるようになり、土が本来持っている強さが失われた状態となる。

また、砂粒子の間に存在している地下水は、急には水の逃げ場がないために、高い圧力（過剰間隙水圧）を有した状態となり、外に出されることになる。このことで、地表面に噴砂、噴水が生じ、「液状化」が発生し沈下が生じることとなる。

実際に、2003 年十勝沖地震における液状化が生じた事例を写真-1 に示す。この写真では、直径 1.6m 程度の円形状に噴砂が見られ、噴砂口も明瞭に確認できた。このように、大規模な地震が発生すると、埋立土や沖積砂質土層においては、液状化が発生することが多いとされている。

ここでは、繰返し非排水三軸試験方法を用いて、「液状化に対する抵抗力」を求める試験について判りやすく解説する。

2. 液状化検討の対象となる地盤条件

我が国における代表的な基準を対象として、液状化判定の必要があると考えられる地盤条件を表-1 に整理した。これらをまとめると、以下のように整理できる。

- ①液状化の対象層は、地下水位が GL-10m 以浅にある飽和砂質土で、20m 以浅を対象とする。一部、洪積層であっても、 N 値が極端に低い場合には検討対象としている。
- ②透水係数 (k) について、 $k \geq 3 \times 10^{-2}$ (m/s) を確認した場合には液状化しないと判断すること



写真-1 2003 年十勝沖地震における十勝港における液状化の代表的事例（撮影：著者）

が可能としている。

- ③細粒分含有率 (F_c) について、 $F_c \leq 35\%$ を主として対象としている。
- ④粒度と N 値による検討で判定が難しい場合には、繰返し非排水三軸試験による予測・判定を行う。この場合は、砂質土を対象として、乱れの少ないサンプリングを行い、繰返し非排水三軸試験を実施し、原地盤の液状化強度比 (R_{max}) を求める。一方、地盤の地震応答計算を実施し、原地盤内に生じる最大せん断応力比 (L_{max}) の分布を求め、 $F_L = R_{max}/L_{max}$ によって判断する。ここで、 $F_L \leq 1.0$ であれば液状化すると予測する。
- ⑤前項によって、地盤のごく一部が液状化すると判定された場合には、その液状化によって、地盤全体および構造物に被害が生じるかどうかを、地盤の沈下、変状、すべり破壊などのポイントから総合的に判断して、対策工の必要性を判断することとなる。

*中部土質試験協同組合（ジオ・ラボ中部）理事長

なお、液状化の判定方法に関して、2011年東北太平洋沖地震の際の東京湾沿岸、利根川流域等を含む広範囲の調査の結果、従来の判定法で液状化予測判定が可能と判断されている。これは、地震による地震動の継続時間が長かったことも、液状化を助長させたと考えられたが、液状化が発生した地点で、「液状化しない($F_L > 1.0$)」という「見逃し」がなかったことから、今のところ従来法で適用可能とされていることによる¹⁾。

3. 繰返し非排水三軸試験

原地盤の液状化強度特性を求めるためには、地盤工学会基準の「土の繰返し非排水三軸試験方法」(以下、試験法)(JGS 0541-2009)²⁾を用いる。

地震発生時に生じる繰返し応力の振幅と周期は不規則であるが、これらを一つ一つ室内試験で再現することは困難なことから、試験法では、等方圧密した供試体の軸方向に、一定振幅の繰返し荷重を非排水条件で载荷して、原地盤の液状化強度特性を求めている。

こうして得られた液状化強度特性は、原位置における液状化強度特性そのものではないが、その良い指標となると考えられている。

(1) 試験供試体

試験法によれば、供試体の標準径は、 $\phi \geq 5\text{cm}$ (砂質土)、 3.5cm (粘性土)とし、供試体の高さは、 $h = (1.5 \sim 2.5) \times \phi$ と規定されている。

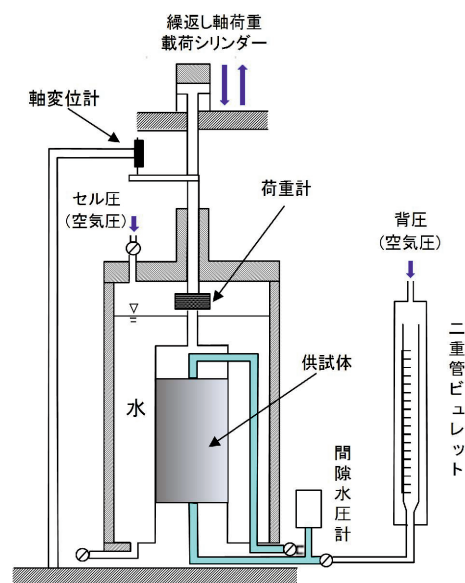


図-1 標準的な繰返し三軸試験装置
(荷重計が三軸セル内にある形式)

(2) 試験手順の概要

調査地で採取された砂質土の試料は、現地でドライアイス等を用いて、冷凍させた後に、試験室に運搬する。これは、砂質土の場合には、運搬時の少しの振動でも、液状化して原位置の状態とは全く異なってしまうこと等による。

- ①凍結成型機等を用い、凍結状態のまま、所定(例えば、 $\phi = 5\text{cm}$ 、 $h = 10\text{cm}$)の供試体に仕上げる。
- ②供試体を凍結したままセル内に設置(図-1)して、セル内で融解させる。

表-1 代表的な基準における液状化判定の必要がある地盤条件

発行機関	日本道路協会	日本建築学会	日本港湾協会	運輸省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所
基準類	道路橋示方書 V 耐震設計編	建築基礎構造設計指針	港湾の施設の技術上の 基準・同解説	鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計
発行年	平成24年3月	平成13年10月	平成19年9月	平成11年10月
対象構造物	橋梁	建築物	港湾施設	鉄道施設
対象深度	・地下水位が地表より10m以内 ・地表より20m以内の飽和土層	・地表より20m以内の沖積層 (飽和土層)	・飽和砂質土(深度20mまで) (海面下では海底面から)*	・地下水位面が現地盤面から10m以内 ・現地盤面から20m以内
判定根拠	・粒度試験(1試料/1m) ・液性限界・塑性限界試験	・代表的ボーリング孔の各砂質 土層で物理試験(1試料/m*)	・粒度試験(1/1m)	・粒度試験(頻度は記載無し)
土質判定条件	・50%粒径 $D_{50} \leq 10\text{mm}$ ・10%粒径 $D_{10} \leq 1\text{mm}$ ・細粒分含有率 $F_c \leq 35\%$ (注: $F_c \geq 35\%$ の場合には、 塑性指数 $I_p \leq 15$ を対象)	・細粒分含有率 $F_c \leq 35\%$ ・この他以下の土層も対象とする ①埋地地盤、人工造成地盤等では、 粘土分 $\leq 10\%$ 、または 塑性指数 $I_p \leq 15$ ②細粒土を含む礫層、透水性の 低い土層に囲まれた礫層	(第1STEP) ・均等係数の大きい砂 $U_c \geq 3.5$ (付図は省略) ・均等係数の小さい砂 $U_c < 3.5$ (付図は省略) ・透水係数 $k \geq 3 \times 10^{-2}\text{m/s}$ を確認し た場合、液状化しないと判定 (第2STEP) ・地震応答解析、動的試験による	・50%粒径 $D_{50} \leq 10\text{mm}$ で、 かつ粒径 $D_{10} \leq 1\text{mm}$ ・細粒分含有率 $F_c \leq 35\%$ 、これを超えて いても、粘土分含有率 $P_c \leq 15\%$
備考	・本示方書の地表面とは、完成時 における地表面 ・換算N値算定:調査時を基準 ・レベル1地震動に対しても 液状化判定を実施 注*)本示方書では、 F_c 表記	注*)日本建築学会:建築基礎設計 のための地盤調査計画指針、 p.27、平成7年、	・20m以深でも、その層で液状化が 発生した場合に構造物に重大な 損傷が生じると判断される場合 ・明らかに上部20m以浅の土層と連 続する層であると判断される場合 注*)液状化対象土層の追加検討層	・N値が極端に低い場合は、洪積層で も乱さない試料を採取し、室内土質試 験等を実施し、判定を行う対象とする。

- ③ここで、一定の背圧（一般的には、 100kN/m^2 以上を標準）を加えたままで、間隙水圧係数 B 値 ≥ 0.95 を確認する。その後、所定の圧密応力 σ'_c まで等方圧密する。このとき、軸方向圧密圧力（ σ'_{ac} ）と側方向圧密圧力（ σ'_{rc} ）の比は、以下の値を満足させる必要がある。

$$0.98 < (\sigma'_{ac} / \sigma'_{rc}) < 1.02$$

- ④この後に、繰返し荷重を与えて、軸荷重、軸変位、間隙水圧を計測する。また、セル圧が変動する場合には、連続的に記録することが必要となる。なお、第1波は、圧縮荷重とする。
- ⑤一般的には4供試体を準備し、繰返し回数20回の液状化強度比を挟むように、4種類の軸荷重を設定する。ここが、試験技術者の「腕の見せ所」といっても過言ではない。繰返し回数が200回を超えるか、 $(\Delta L/H_c) \times 100 \geq 5\%$ となったら、試験を終了する（ ΔL ：繰返し载荷中の供試体軸変位量、 H_c ：圧密後の供試体高さ）。
- ⑥これらの試験手順を繰返し、供試体の両振幅ひずみ（ DA ）が1～5%に、あるいは過剰間隙水圧比が95%になる繰返し応力振幅比と繰返し回数の関係を求め、相関図を作成する（図-2）。この図から、繰返し回数15～20回に相当する繰返し応力振幅比（ $DA=5\%$ あるいは過剰間隙水圧比95%）を算出し、液状化強度としている。

(3) 試験結果のチェックポイント

繰返し軸荷重は、 $DA = 2\%$ に到達するまで以下の2点を満足する必要がある。

(繰返し軸荷重の制限)

- ①等方応力状態から定義した圧縮荷重の片振幅 P_c と伸張荷重の片振幅 P_E の和（ $P_c + P_E$ ）の変動が10%以下であること。
- ② $0.9 \leq P_c/P_E \leq 1.1$

これらの点を考慮すると、表-2の事例の場合には、上記の②を満足していないことが判る。このときの軸応力をみると、図-3のように軸差応力の0点移動が見られ、伸張側よりも圧縮側に移動していることが判る（なお、これは極端な事例であるが、当組合のデータではないことにご留意）。

このような場合は、図-4（b）のように、理想的な状態（5%以内）からはずれていることが予測される。試験供試体の特性にも関連するかもしれないが、このような試験とならないように留意したい。

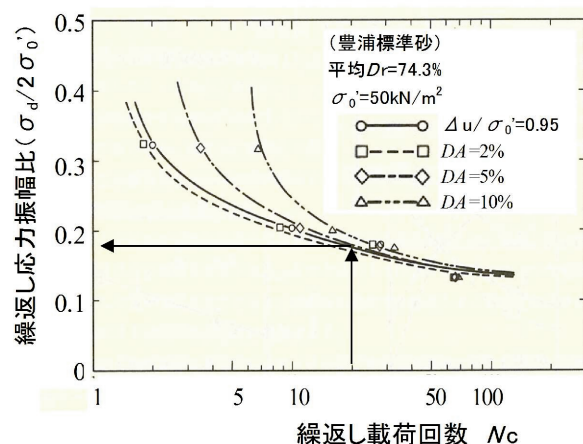


図-2 繰返し応力振幅比～繰返し载荷回数

表-2 圧縮・伸張荷重の比のチェック

軸ひずみの両振幅	圧縮・伸張荷重の比 (P_c/P_E)
$DA \leq 1\%$	1.14
$DA = 1\%$	1.54
$DA = 2\%$	1.44
$DA = 5\%$	1.09
$DA = 10\%$	1.13

チェックポイント-1

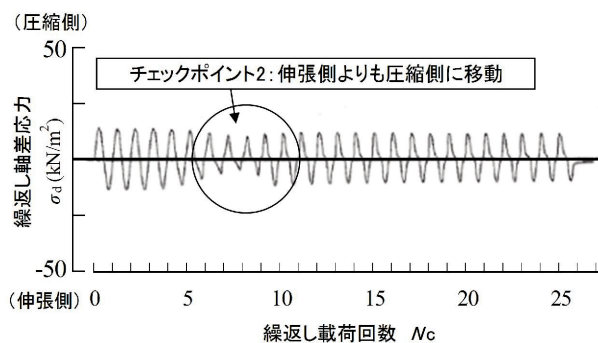


図-3 繰返し軸差応力の0点移動の極端な事例

4. 繰返し三軸試験における繰返し回数⁵⁾に加筆

石原は、液状化に必要な不規則な応力比について、一様な振幅の荷重パターンを20回の繰返しで代表させるというルールを定め、新潟地震（ $M=7.5$ ）における液状化現象を検証している³⁾。

一方、吉見は、複数の飽和砂供試体に対する非排水繰返し三軸試験結果から、繰返し回数15回に対応するせん断応力比の値を液状化抵抗とよんで

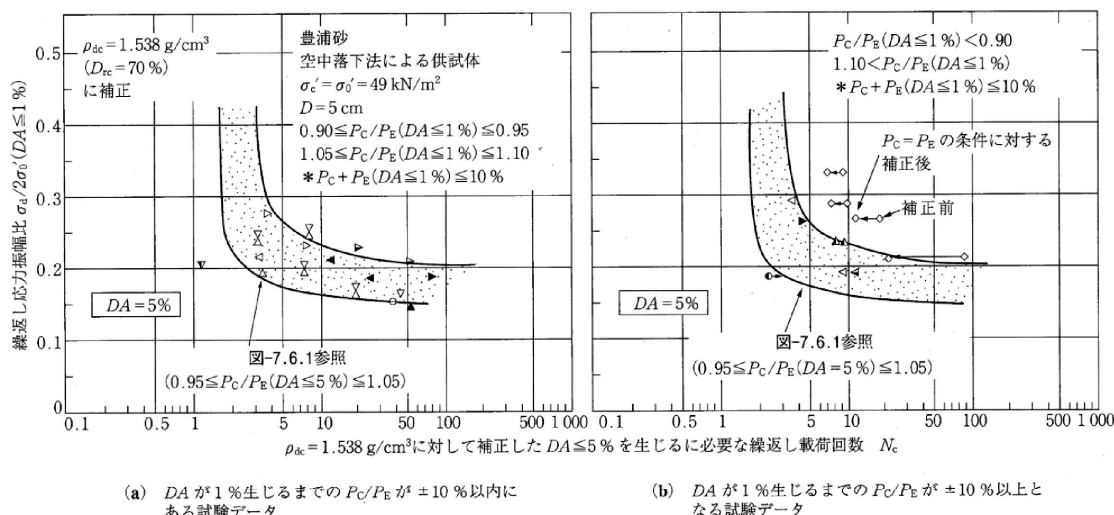


図-4 繰返し軸荷重の対称性が試験結果に及ぼす影響²⁾

いる⁴⁾。

これらによって、今日まで多くの土木および建築関係の研究者が、 $N_c = 15 \sim 20$ 回に対する繰返し応力比を用いて液状化の検討を行い、多くのデータが蓄積されているといえる。

一定振幅の繰返しせん断応力の作用によって、繰返しせん断破壊（液状化）に至る繰返し回数は、繰返し軸差応力の片振幅（ σ_d ）の大きさに依存することが知られており、 σ_d が大きい程、少ない繰返し回数でせん断破壊（液状化）に至る。

同一の拘束圧下で σ_d の大きさを変えた一連の試験を行えば、 σ_d と液状化に至る繰返し回数 N_c の関係を得ることができる。

しかし、繰返し軸差応力の片振幅 σ_d を試験時の拘束圧 σ_c で除した、繰返しせん断応力比 $R_L = (\sigma_d/2\sigma_c)$ に置き換えると、拘束圧に依存しない繰返しせん断（液状化）強度比 R_L と繰返し回数 N_c の関係を表すことができる。この $R_L \sim N_c$ 関係を液状化強度曲線（図-2）としている。

試験結果を両対数グラフにプロットすると、 $N_c \geq 5 \sim 50$ の範囲では直線状となり、次式で表すことができる。

$$R_L = a (N_c/N_{c0})^b$$

ここで、 a , b , N_{c0} : 曲線パラメータ

上式によれば、土の繰返しせん断破壊（液状化）に対する抵抗力 R_L （強度）は、地震動によるせん断応力の繰返し回数 N に依存することになり、静的なせん断強度のように一定の数値として表すことができない。そこで、石原は、我国の観測地震

波の分析に基づいて、代表的な地震動のせん断応力繰返し回数 $N_{c0}=20$ 回^{注1)}と定め、 $N_{c0}=20$ に対応する液状化強度曲線の応力比 R_{L20} をもって、地盤が保有する液状化強度比と考えることを提案した。これにより、上記の $R_L \sim N_c$ の関係は、以下のように表記される。

$$R_L = R_{L20} (N_c/20)^b$$

R_{L20} : 繰返し回数 20 回で液状化に至る応力比

b : 液状化強度曲線の両対数グラフ上の勾配

R_{L20} を地盤が保有する繰返しせん断強度比^{注2)}（または液状化強度比）と呼ぶことにしている。

但し、簡略化のため R_{L20} から添字の 20 を取り除いて、 R_L と表記することが一般的である。

また、龍岡等によれば上式の指数 b の代表値は $b=-0.17$ であるとしている⁶⁾。

注¹⁾ 当時の観測地震波による有意なせん断応力の繰返し回数は最大で 10 ～ 15 回であったが、この繰返し回数は震源断層で放出されるエネルギー（モーメントマグニチュード）と震源までの距離に依存することが知られており、石原はマグニチュード $M=8$ 程度を想定して 20 回としたようである。少し大きすぎるのではとの見解もあったが、東北の大地震を経験した今日では適切な設定値であると評価される。

注²⁾ 道路橋示方書では、 R_{L20} から添字の 20 を除いて R_L と表記し、繰返し三軸強度比¹⁾としている。

5. まとめ

本報告では、繰返し非排水三軸試験方法について、①液状化検討の対象となる地盤条件、②試験方法と試験結果のチェックポイント、③試験結果評価における繰返し回数について解説した。

①では、最新の基準である道路橋示方書 耐震設計編を中心に、その他の指針・基準・標準に対して、対象深度、判定根拠、土質判定条件等について比較表を作成した。

②では、試験結果のチェックポイントについて詳述した。読者が試験結果を評価する際に参考となれば幸いである。

③では、実務で用いられている液状化強度比 R_L を算出する際に用いられている $N_c = 15 \sim 20$ について詳述した。

東北大震災以後、多くの繰返し非排水三軸試験が実施されている。これらの試験結果がより適切に調査・設計に適用され、社会資本整備に貢献していくことを祈念してまとめとしたい。

〈引用・参考文献〉

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，8章地震時に不安定となる地盤の影響，pp.132～149，2012
- 2) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説-二分冊の2-，pp.730～746，2009
- 3) 石原研而：土質動力学の基礎，p.272，鹿島出版会，1995
- 4) 吉見吉昭：砂の乱さない試料の液状化抵抗～N値～相対密度関係，土質工学会，土と基礎 vol.42-4，p.64，1994
- 5) 安達健司：EXCESS/Win プログラム解説書，pp.1～8，2013
- 6) 龍岡文夫，安田進，岩崎敏男，常田賢一：Normalized Dynamic Undrained Strength of Sands Subjected to Cyclic and Random Loading，土質工学会論文報告集，vol.20，No.3，pp.1-16，1980
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，8章地震時に不安定となる地盤の影響，pp.138～141，2012
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，4章設計地震動，pp.23～25，2012

コラム-1

凍結試料の成形について

現場でサンプリングチューブに採取した砂質土の試料は、現地でドライアイス等を用いて、冷凍させた後に試験室まで運搬される。

試験室では、凍結したまま成形するが、このとき写真-2のような成形機を使うと、砂質土であれば3分程度で成形(写真-3)可能であり、試料を極力乱すことなく成形する。



写真-2 凍結試料成形機の例



写真-3 成形後の試料
(端面成形前)

コラム-2

道路橋示方書 2012 年改訂版における主要ポイント

①条文中に規定された繰返し三軸強度比 R_L の算定式には、凍結サンプリングによる試料を用いた非排水繰返し三軸試験結果及び兵庫県南部地震を含む事例に基づき、砂質土と礫質土に分類して算定することを求めている⁷⁾。

・砂質土・礫質土の区分基準：

砂質土： $D_{50} < 2\text{mm}$ ，礫質土： $\geq 2\text{mm}$

②従来、液状化判定をレベル2地震動に対してのみ行い、レベル1地震動の土質低減係数 D_E は、レベル2地震動に対して求めた液状化に対する抵抗率 F_L に応じて設定することとされていた。

今回の改訂では、レベル1地震動の D_E を設定することができるようにするために、レベル1地震動に対する液状化の判定を行うように規定された。このときの設計水平震度の標準値は、平成2年の道路橋示方書に規定されていた値が採用されている⁷⁾。

③平成23年に発生した東北地方太平洋沖地震は海洋性のプレート境界型の地震とされている。今後、南海トラフ大地震のように、プレート境界型の大地震発生の逼迫性も公表されていること等を受け、プレート境界型の大地震による地震動を推定した結果をもとに、レベル2地震動(タイプI)が見直され、新たな地域別補正係数として $c_{12}=1.2, 1.0, 0.8$ が設定された⁸⁾。