

液状化強度試験

Liquefaction Resistance Test

澤 田 俊 一 (さわだ しゅんいち)

応用地質科 エンジニアリング本部

植 村 一 瑛 (うへむら かずあき)

応用地質科 エンジニアリング本部

三 上 武 子 (みかみ たけこ)

応用地質科 エンジニアリング本部

1. はじめに (「液状化強度」とは)

液状化と言う用語は、「土要素」の状態としての説明と「地盤」の状態としての説明の2つに大別して用いられる¹⁾。ここで説明する「液状化強度」の定義は、非排水条件下で地震などの繰返し応力を受ける飽和土の強度特性²⁾である。「液状化強度」と一口に言うが、その定義には、「過剰間隙水圧が初期の有効応力まで上昇(初期液状化)し、有効応力がゼロになるまでの抵抗」と、「ひずみがある一定値(例えば両振幅軸ひずみ5%)に達するまでの抵抗」の2通りが存在する。一般的に前者は液状化した土によって地盤にすべり破壊が生じるといった安定問題を検討する際の考え方であり、後者は液状化して地盤若しくは構造物に被害があった事例と無かった事例の境界値から定義されている。いずれの考え方にせよ、「液状化強度」とは、土若しくは地盤が液状化するまでの強度特性を指すものであって、液状化した後に、地盤が大変形するような流動特性を表すものではないことに留意する必要がある。

2. 土の繰返し非排水三軸試験 (液状化強度試験)

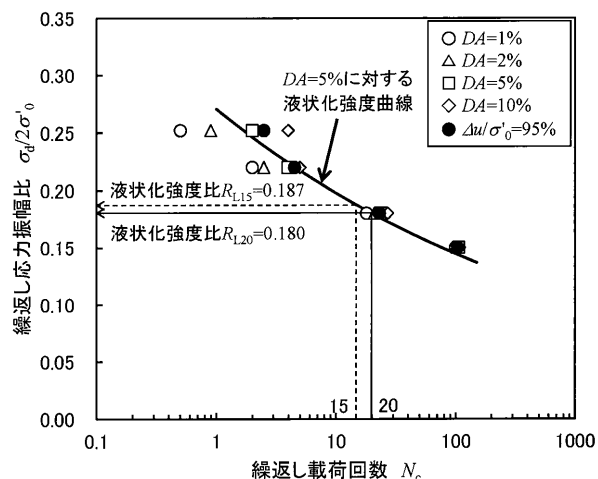
2.1 概要

実務では、「液状化強度」を求めるための試験として地盤工学会基準 (JGS 0541-2009)「土の繰返し非排水三軸試験方法」²⁾が用いられている。本試験は「液状化強度試験」あるいは「液状化試験」という通称で呼ばれることが多い。以降では、「土の繰返し非排水三軸試験」を「液状化強度試験」と表記する。

地震などの実際の繰返し応力の振幅と周期は不規則であり、地盤内の静的な応力状態を含め室内試験で完全に原位置の状態を再現することは困難である。そこで、液状化強度試験では条件を単純化し、飽和供試体を等方応力で圧密した後に非排水条件下で一定振幅の繰返し軸差応力を一定周波数の正弦波で作用させる。なお、基準では、载荷周波数を試験機の性能に応じて0.1~1.0 Hzの間で自由に設定してもよいこととなっている。

2.2 試験から得られる情報

液状化強度試験で得られる情報としては、液状化強度曲線の他、応力-ひずみ関係と有効応力経路(ストレス



図一 液状化強度曲線の一例

パス)がある。

図一に液状化強度曲線の一例を示す。液状化強度曲線は、横軸に「繰返し载荷回数」を対数目盛で、縦軸に「繰返し応力振幅比」を線形目盛で表記した図である。液状化判定に用いられる液状化強度比 R_L は両振幅軸ひずみ(例えば両振幅軸ひずみ $DA=5\%$)や過剰間隙水圧比(過剰間隙水圧 Δu と有効圧密応力 σ'_0 の比で $\Delta u/\sigma'_0=95\%$)によって定義される。

一方、繰返し载荷時の応力-ひずみ関係や有効応力経路(ストレスパス)からは土が持つサイクリックモビリティ(液状化の過程において、粒子構造が再構成されることにより剛性が回復し、完全に流動することなく有限の変形で止まる現象)や変相角(有効応力経路においてダイレイタンスーが負から正に変化する境界の角度)及び内部摩擦角が得られる。

なお、液状化強度曲線を描くためには、3~4 供試体の試験結果が必要となる。このため、不攪乱試料を対象とする場合、少なくともサンプラー 1 本分(70 cm 程度)の乱れの少ない試料が必要となる。

3. 液状化判定への利用上の注意点

液状化強度試験結果は F_L 法³⁾に基づく液状化判定で地盤の動的せん断強度比 R を算定するために利用される。

液状化強度試験は、地震時の地盤の挙動を正弦波の繰

返し軸差応力として載荷する試験であるので、液状化判定に用いる動的せん断強度比 R を算定するためには、(1)式に示すように各種の補正係数が用いられる³⁾。

$$R = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 \cdot R_L \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 C_1 ：液状化強度試験と原位置での単純せん断応力状態との相違に関する補正係数、 C_2 ：地震荷重波形のランダム性に関する補正係数（例えば「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁴⁾では衝撃型の時 $C_2 = 1/0.55$ 、振動型の時 $C_2 = 1/0.70$ ）、 C_3 ：サンプリングから液状化強度試験までの過程中的試料の攪乱に関する補正係数、 C_4 ：サンプリングから液状化強度試験までの過程中的試料の密度化に関する補正係数（ $C_3 \times C_4 = 1.0$ とすることが多い）、 C_5 ：地震動の水平面での二次元性に関する補正係数（ $C_5 = 0.9$ とすることが多い）、 R_L ：液状化強度比

補正係数 C_1 は静止土圧係数 K_0 を用いて、(2)式で与えられる。

$$C_1 = (1 + 2K_0) / 3 \quad \dots\dots\dots (2)$$

沖積地盤では、 $K_0 = 0.5$ と設定して算定する場合がほとんどである。しかし、液状化対策として締固め工法等で地盤改良した地盤では K_0 値が0.5よりも大きくなっていることもあるため、適用にあたっては原位置での地盤条件を考慮して設定することに注意が必要である。

液状化強度比 R_L は液状化強度曲線を基に設定される（図－1 参照）。「道路橋示方書・同解説」⁵⁾では「繰返し回数20回で両振幅軸ひずみ5%に達する繰返し応力振幅比」、「建築基礎構造設計指針」⁶⁾では「繰返し回数15回でせん断ひずみ振幅5%に達する繰返し応力振幅比」と基準によって液状化強度比の定義が異なることに注意が必要である。なお、繰返し回数15回、20回はマグニチュード (M) に換算すると、それぞれ $M = 7.5, 8.0$ に相当する⁷⁾。

4. 液状化試験後の体積ひずみ

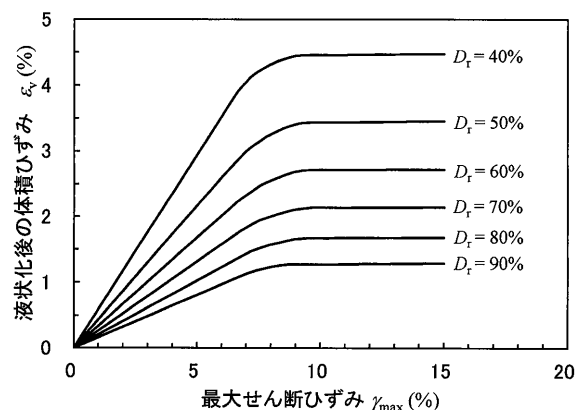
液状化後の再圧密挙動（過剰間隙水圧消散に伴う圧密）を評価するため、液状化強度試験後に排水させて体積収縮量を測定する試験が行われることもある。液状化後の体積ひずみ ε_v は図－2 に示す通り、液状化強度試験時の最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ が8%程度までは単調な増加傾向であり、その後一定値に収束する。また、相対密度 D_r が小さい方が液状化後の体積ひずみ ε_v は大きくなる。

一次元圧密を仮定すると、試験から得られた体積ひずみ ε_v を用いて(3)式により液状化後の過剰間隙水圧消散に伴う圧密による沈下量 D を求めることができる。

$$D = \varepsilon_v \cdot H_L \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 H_L ：液状化層厚

なお、図－2 は細粒分の少ないきれいな砂に対する試験結果から作成された図であり、細粒分を含む試料では液状化後の体積ひずみが大きくなる⁹⁾。そのため、細粒分を含む地盤に対しては体積ひずみを過小評価する場合もあるので注意が必要である。



図－2 液状化後の体積ひずみと液状化強度試験時の最大せん断ひずみの関係⁸⁾

5. おわりに

レベル2地震動の概念が兵庫県南部地震後に導入され、液状化しても構造物に有害となる被害を生じさせない、若しくは構造物の機能保持ができれば良いとの目標を設定する性能設計が実務にも導入されている。これに伴い、レベル2地震動のような大きな外力に対しては液状化するか否の議論のみではなく、液状化後の流動特性を評価することが求められている。従来の液状化強度試験は、液状化発生の有無を評価する液状化判定のために考案された試験法であり、評価するひずみの範囲はせいぜい数%～十数%程度までである。地盤が流動破壊するような大ひずみ領域の土の変形挙動は解明されていない。このため、今後は流動破壊が生じるような大ひずみ領域まで評価ができる試験法の開発も望まれる。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤工学用語辞典，pp. 214～215，2006.
- 2) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説―二分冊の2―，pp. 730～749，2009.
- 3) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田 進：砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例，第5回日本地震工学シンポジウム講演集，pp. 641～648，1978.
- 4) 財日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp. 383～389，2007.
- 5) 財日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp. 134～143，2012.
- 6) 財日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp. 61～72，2001.
- 7) Seed, H. B., I. M. Idriss and I. Arango: Evaluation of liquefaction Potential Using Field Performance Data, J. Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 458-482, 1983.
- 8) Ishihara, K., and Yoshimine, M.: Evaluation of Settlements in Sand Deposit following Liquefaction during Earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 1, pp. 173-188, 1992.
- 9) Tsukamoto, Y., Ishihara, K., and Sawada, S.: Settlement of Silty Sand Deposits following Liquefaction during Earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 44, No. 5, pp. 135-148, 2004.

(原稿受理 2014.1.29)