

液状化強度比

Liquefaction Strength Ratio

安 田 進 (やすだ すずむ)

東京電機大学教授 理工学部

1. 液状化強度比とは

液状化強度比に関してまず簡単な定義をしてみる。針金を立てて万力で挟み左右に繰返し曲げると、何回か繰返ししたところで針金がポキンと折れる。繰返し曲げる振幅を大きくすると早く切れる。同様に、飽和した砂に非排水状態で繰返しせん断力を与えると、何回か繰返ししたところで大きく変形して液状化してしまう。繰返しせん断力の振幅が大きいと早い回数で液状化するし、小さいとなかなか液状化しない。

そこで、繰返し三軸試験装置を用いて、例えば4本程度の供試体に対して異なった大きさの一定振幅のせん断力を与え、液状化するまで繰返してみる。そして液状化した回数と繰返しせん断応力比（繰返しせん断応力を拘束圧で除した値）とをプロットしてみる。これが図一1の①に示す一般的に行われている液状化試験方法であり、得られる曲線を液状化強度曲線と呼んでいる。そして、この曲線から、例えば20回の繰返しで液状化する繰返しせん断応力比を読みとると液状化強度比 R_L が求まる。

同じ定義の液状化強度比は図一1の②に示した方法でも求まる。この場合は所定の回数として例えば20回という値をあらかじめ決めておき、やはり4本程度の供試体に異なった大きさのせん断力を与える。そして20回目の载荷時における軸ひずみ振幅を読みとってプロットし、例えば、繰返し三軸試験で両振幅軸ひずみが5%

となる時の応力比を読みとれば液状化強度比 R_L が求まる。

以上がまず簡単な定義であるが、後述するように液状化時点の判断や所定の繰返し回数のとり方などにいくつかの考え方がある。なお、この用語もいくつかの異なった呼び方をされている。地盤工学会発行の「土質試験の方法と解説」や「液状化対策の調査・設計から施工まで」では液状化強度比と呼ばれている。設計基準類において、道路橋示方書・同解説では繰返し三軸強度比、建築基礎構造設計指針では液状化抵抗比、鉄道構造物等設計標準では液状化強度比と呼ばれている。

2. 液状化強度比が用いられるようになった経緯

1964年に起きたアラスカ地震と新潟地震で液状化による被害が発生した事を受けて、米国のSeed（シード）らは液状化現象を繰返し三軸試験で再現する事を試みた。まず、飽和した緩詰め砂に、拘束圧を一定にして矩形波の繰返しせん断力を与えたところ、間隙水圧が上昇し液状化が発生した¹⁾。そこで、繰返し軸差応力を変えて実験を繰返して、繰返し軸差応力と液状化発生回数の関係を得た。そして、密度や拘束圧を変えて実験を行い、拘束圧と10サイクルで液状化する軸差応力との間に直線的な比例関係があり、その傾きは密なほど急な事を見いだした。

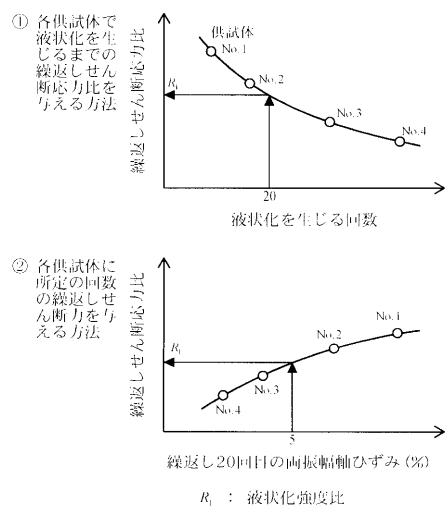
このような実験結果に基づき、ある繰返し回数で液状化する強度を繰返し軸差応力そのものではなく、拘束圧で除した比で示せば拘束圧の影響を除けると考えられ、強度比で表す事が行われるようになった。また、繰返し三軸試験だけでなく、繰返し単純せん断試験や繰返しねじりせん断試験なども行われるようになり、繰返し応力振幅比（「土質試験の方法と解説」）や応力比（「液状化対策の調査・設計から施工まで」）と呼ばれるようになってきている。

3. 適用にあたり留意すべき事項

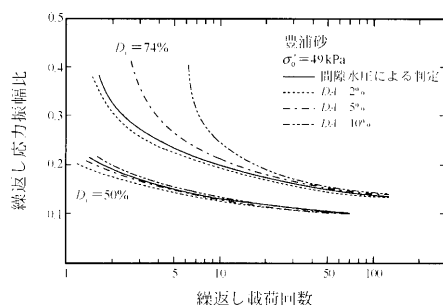
液状化強度比に関し、試験結果を整理する時や実際の地盤における液状化の予測に適用する場合の留意事項を述べてみる。

(1) 液状化発生時点の選定

最初に述べた針金がポキンと折れるのと違い、液状化の場合はその発生時点の定義が簡単ではない。繰返し三



図一1 液状化強度比の求め方



図—2 豊浦砂の液状化強度曲線例

軸試験により緩詰めと密詰めの豊浦砂に対し繰返し非排水三軸試験を行った例を図—2に示す。これには両振幅軸ひずみが2%, 5%, 10%となった時点および過剰間隙水圧比が1や一定値となった時点をとってプロットしてある。緩くてきれいな砂では、ある程度の繰返し回数になると間隙水圧が急増し拘束圧まで達するし、また丁度その頃にひずみ振幅が急増する。したがって、上記の四つの時点をとった液状化強度曲線はほぼ一致する。これに対し、密な砂では間隙水圧もひずみも急増しなくなり、四つの時点も大きく異なってくる。細粒分を多く含む砂でも異なる。

このため、どの時点で液状化したと判断するか液状化の研究の初期段階から議論が盛んに行われてきた。我が国では昭和50年代の初めに液状化試験が実務に取り入れられるようになり、種々の土で試験が多く行われるようになった。その際、過剰間隙水圧比よりはひずみをもとにした方がどんな土でも液状化発生時点を定義できるとの理由により、繰返し三軸試験で5%程度の両振幅軸ひずみになった時点を液状化と判断することが広まった。現在の「土質試験の方法と解説」では、試験結果の整理方法として、両振幅軸ひずみ DA が1, 2, 5%になった回数と、過剰間隙水圧が有効拘束圧の95%になった時の繰返し回数をとって整理するようになっている。

ただし、1995年兵庫県南部地震以降に話題になっているレベル2地震動のもとでは、大きな変形まで許しても良いとの発想で、5%よりは10%程度の大きなひずみでとった方が良いとの意見も出てきている。なお、過剰間隙水圧比が95%という状態では、地盤は液状化には至っておらず、液状化が発生する過剰間隙水圧比100%の状態と比較した場合、地震後の沈下量は大きく異なっている可能性もあるので、95%で液状化したと誤解しない事が必要と思える。

(2) 液状化強度比を求める繰返し回数

今まで述べてきたように液状化強度比を求める試験では、通常、一定振幅の正弦波型の繰返しせん断力を与える。ところが、地震時にはランダムな波形のせん断力が加わるため、この間の補正が必要となる。補正を行わないためには地震波そのものを供試体に与えて試験をすれば良いのであるが、設計ではいくつかのタイプの地震波を用いる事が多いため、いちいち試験するのは手間がかかる。このため一定振幅の繰返しせん断力を与えている。

さて、補正する方法には、単に実効値的な補正係数を

乗じる方法と、液状化強度曲線を利用して累積損傷度の考えに基づいて計算する方法とがとられている。前者の場合、液状化強度曲線から液状化強度比を読みとる回数を設定せねば補正係数も求まらない。そこで、実際の地震波での有効回数をもとにしようとの考えが出てくる。ただし、この有効回数も簡単には設定できない。日本では最近設計地震動を海洋型と内陸直下型に分けることが行われているが、前者の方が一般に有効波数は多い。また、地震のマグニチュードが大きいと波数も多いといえる。このような事で、なかなか決め難いが日本では20回や15回あたりが最も良く用いられている。

回数を設定した後の補正係数に関しては、正弦波とランダム波で比較実験を行った結果を利用している。この値は衝撃型と振動型の波形で異なることが明らかにされている。ただし、他にも密度や粒径などの要因の影響もあると思われるが、あまり実験は行われてきていない。

なお、内陸直下型の地震動に対して、20波のような多い回数ではなく、3波程度の回数をとるべきとの意見も良く聞く。その場合は波形の補正係数も変える必要があることを注意する必要がある。

(3) 液状化強度曲線に与える拘束圧の影響

液状化試験を行う場合は等方の拘束圧を加える事が多い。特に繰返し三軸試験では等方の拘束圧しか実験できない。ところが実際の地盤内では異方応力にある事が多いので、この補正を行う必要がある。これに関しては繰返しねじりせん断試験でかなり実験も行われて、それで得られた補正係数を実務でも用いている。なお、サンドコンパクションパイル工法などで締め固めた場合は K_0 がかなり大きくなるので、この事も加味した方が良い。

4. 最近の動向

液状化強度比に関連した事で最近の動向を二つほど挙げてみる。

(1) 地震応答解析への用い方

有効応力法による地震応答解析では過剰間隙水圧の発生に関する定数を決めることが必要になる。そこで、液状化強度曲線そのものを利用し、それにフィッティングするように定数を決めることが良く行われる。この場合には液状化強度比の値は不要となる事もある。

(2) 液状化後の変形

レベル2地震動に対する設計などで、液状化の発生だけではなく、液状化による構造物や地盤の変形を推定する必要が生じてきている。このため、液状化強度比を求める事だけでなく、液状化による変形に関するパラメータを求める試験方法の開発が必要となっている。

参 考 文 献

- Seed, H. B., Lee, K. L.: Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, ASCE, Vol. 92, SM6, pp. 105~134, 1966.

(原稿受理 2004.4.6)