

液状化試験の精度と結果の解釈についての一考察

Study on Accuracy and Evaluation of Liquefaction Tests

三上武子 Takeko MIKAMI (応用地質(株))
一井康二 Koji ICHII (広島大学大学院工学研究院)

性能に基づく耐震設計では、変形量を精度よく評価することが求められており、有効応力解析は有効な手段となる。精度の良い解析を行うためには、液状化試験結果をはじめとした地盤情報の精度に加えて、これらを適切にモデル化する解析技術者の判断力も求められる。しかし、現状では、室内試験の経験や知識が十分でない技術者が試験結果を評価し、解析に利用する事例も少なくないとする。そこで、本稿では、このような解析技術者のために、液状化試験を対象に、試験条件の設定の仕方やデータシートから読み取れる情報、試験結果の評価方法、利用時の注意点について整理した。

キーワード：液状化，液状化強度曲線，試料の乱れ，試験の精度 (IGC : D-07, E-08)

1. はじめに

性能に基づく耐震設計では、液状化した地盤の変形量を解析等により精度よく予測することが求められており、その手法として有効応力解析は有効な手段となる。有効応力解析では、解析に必要な入力パラメータは、液状化試験結果を再現できるように要素シミュレーションを行って設定される。この時、液状化試験の精度とパラメータ設定の適切さが解析結果の精度に影響を及ぼすことになる。パラメータ設定の適切さについては、同一の液状化試験結果を用いても、解析技術者によって設定した入力パラメータは異なり¹⁾、解析結果として得られる構造物の残留変形量の変動係数は、パラメータセットの変動係数に比べて1オーダー大きい²⁾ことが報告されており、解析技術者の判断力が大きく影響する。本来、試料採取～室内試験～設計に至る一連の作業を一人の技術者が担当することが理想的であるが、分業制が進んだ現在では、このような事例はほとんどない。試験者は試料採取地の情報や試験結果の利用目的を知らされないままに機械的に試験を行って結果を提出し、設計者は試料や試験時の情報を知らされないままに、試験者が評価した試験結果を鵜呑みにして設計定数を設定するということがしばしば行われている。

有効応力解析を実施する機会の増加に伴い、液状化試験の実施頻度が増えるとともにその精度が問われるようになった。一方で、解析技術者は試験の経験がないのはおろか、試験についての知識も十分でない場合も少なくない。本稿では、このような解析技術者のために、液状化試験の精度に着目しつつ、試験条件の設定や試験結果

の評価方法、利用時の注意点について述べる。なお、ここでは、原位置からチューブサンプリングにより採取した乱さない試料（以下、不攪乱試料と呼ぶ。）を用いて、JGS0541-2009「土の繰返し非排水三軸試験方法」³⁾（以下、JGS 試験法と呼ぶ。）に準拠して実施された液状化試験結果を有効応力解析に利用する場合を対象とする。

2. 液状化試験の手順と課題

本章では、試験条件を設定する際の考え方や注意事項について、試験の手順に沿って説明する。

1) 試料の取扱い

液状化試験の対象となる砂質土は、運搬時の振動や成形作業による乱れを防止するため、原位置で凍結させて運搬、保管することが多い。凍結－融解を繰り返すと、土の力学的性質に影響を与える^{4),5)}ため、試験者は供試体の作製から試験装置に設置するまでの一連の作業を、供試体が融解しないように迅速に行うように注意を払うが、運搬方法にも気を配る必要がある。運搬に宅配便を用いる場合、振動の問題⁶⁾もさることながら、荷物の積替えのために日中に屋外に放置されるなど温度管理が徹底されず、夏場などでは融解した例もあるため、慎重に利用する。なるべく調査担当者が運搬することが好ましい。

調査担当者が一番頭を悩ます問題は試料を凍結させるか否かの判断であろう。細粒分を多く含む砂を凍結すると体積膨張により土の構造が乱されるが、細粒分を5%以上含む砂質土では凍結を行わない方が望ましい⁷⁾という報

告もあれば、人工的に調整した細粒分を 50%程度含む砂質土の液状化強さについて凍結の影響が見られなかった⁸⁾という報告もあり、細粒分含有率と試料の膨張による乱れの関係は一義的でない。また、細粒分の混入の仕方によっても影響は異なると考えられる。凍結の前には間隙水を十分に排水させなければいけないが、局所的に細粒分が混入している場合は排水が阻害されることがあり、このような場合は凍結させてはならない。最終的には、間隙水の脱水状況で判断することになる。ここで、判断の基準は経験に基づく場合が多く、種々の土質に対する具体的な判断指標は今後の研究課題である。手順としては、既往の地盤調査結果や標準貫入試験時に採取した乱した試料などから、まず事前に、凍結するかどうか判断することとなる。そして、凍結すると判断した場合は、間隙水を排水させ、その排水量を測定する。ここで、排水量が少ない場合は、間隙水が十分に排水されていないので凍結することが不適切となる。

2) 圧密応力の設定

JGS 試験法では、等方圧密した供試体に対して軸方向に繰返し载荷を行うが、等方圧密応力の設定値についての規定はない。原位置での現状の液状化特性の把握が目的の場合、等方圧密応力として原位置の有効上載圧 σ'_v を採用する場合と平均有効主応力 σ'_m を採用する場合があるが、原位置の K_0 値の測定が困難なことや供試体が過圧密になることを避けるため、 σ'_v を採用した方がよい⁹⁾。

3) 繰返し载荷条件の設定

繰返し载荷は応力制御で行うが、軸応力振幅の一様性と対称性は試験結果に影響を及ぼす^{10),11)}ことから、性能の良い試験機を選定する。これについては 4. で述べる。载荷周波数について、JGS 試験法では 0.1~1Hz を標準としているので、試験装置の制御性や作業性を考慮して設定する。論文などで報告されている事例では 0.1Hz を採用している事例が多いようである。まれに、地震の主要動の周波数が数 Hz であることから、地震動と同等の周波数を設定する場合があるが、軸応力振幅の一様性や対称性が確保されない場合、液状化強度を正確に求められないので、実現象の再現だけでなく精度にも着目して試験条件を設定する。

繰返し軸応力振幅の設定については、液状化発生の有無を評価する場合には液状化強度のみがわかればよいので、各種設計指針で規定されている繰返し回数、たとえば道路橋示方書¹²⁾では 20 回、建築基礎構造設計指針¹³⁾では 15 回のときの液状化強度が内挿で求められるように設

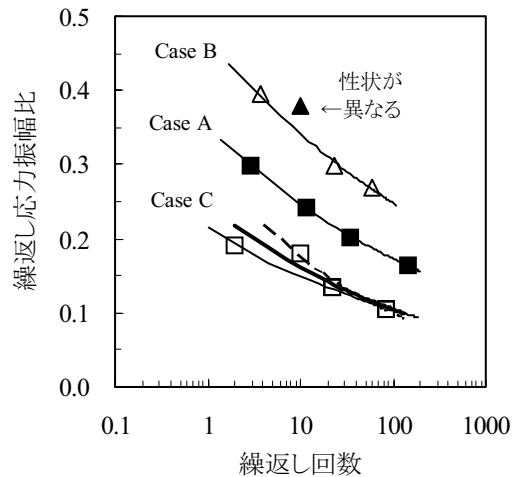


図-1 液状化強度曲線の引き方

定すればよい。JGS 試験法では、両振幅軸ひずみ DA が 5%になる繰返し回数が 5~50 回になるように繰返し軸応力を設定することを目安として示している。一方、有効応力解析に利用する場合は、液状化強度に加えて液状化強度曲線も必要となる。地震動は不規則な波形であるため、広い範囲の繰返し回数に対して液状化強度曲線が一致するように入力パラメータを決める必要があるためである。この観点から考えると、広い範囲の繰返し回数で $DA=5%$ になるように繰返し軸応力を設定した方がよい。1995 年兵庫県南部地震のような衝撃型の地震動では少ない繰返し回数での液状化強度が着目されたが、想定東海・東南海・南海地震や東北地方太平洋沖地震では地震動の継続時間が長く、これに対応した大きな繰返し回数での液状化強度に注目が集まっていることから、解析で想定している地震動の特性に応じた地盤の挙動が得られるように、繰返し軸応力振幅を設定する。実際には、試験者が繰返し軸応力振幅を設定することになるので、解析技術者は試験結果の利用目的を十分に試験者に伝えて、試験を実施するように指示する必要があるだろう。

4) 試験結果の整理

試験結果の報告について JGS 試験法では、 $DA=1, 2, 5%$ における繰返し軸応力振幅比と繰返し回数の関係を報告することとなっているが、液状化強度曲線の引き方については、試験結果の評価の範疇になるため規定はない。液状化強度曲線の引き方については、図-1 に示す Case A のようにばらつきのない結果の場合は平均的に引けばよい。一方、Case B や Case C のようにばらつきがある場合は判断が必要となる。Case B の▲のように明らかに性状が異なると判断できる場合は、このデータを除いて平均

的に引くことになるであろうし、異常値が認められなければ Case C のように平均的に引く（太実線）、下限（安全側）に引く（実線）、上限（危険側）に引く（点線）などが考えられる。引き方についての正解はないので、試験時の状況や結果の利用法を考慮して引くことになる。このとき、どのような判断のもとに引いたかを特記事項に示しておけば、解析結果を評価する際の参考になる。

異常値か否かの判断材料としては、密度、含水比、融解による体積変化、圧密による体積変化、B 値、ひずみや間隙水圧の波形記録の形状、混入物の有無、破壊状況などが参考になる。密度や圧密による体積変化は報告事項であり、通常はデータシートに数値として示されるので解析技術者も情報を入手できるが、混入物の有無や破壊状況についての記述は必須ではないので、解析技術者にも情報が伝わるように、試験者はデータシートに記述するようにする。

なお、実際には、液状化強度曲線は試験者が引く場合が多いと思われるが、試験者には試験結果の利用目的や解析条件などの情報が十分に伝わっていない可能性もあるため、解析技術者はこれをそのまま採用するのではなく、上記に示したデータシートの数値や記述を参考に直さなければならない。

3. 液状化試験の結果の評価

JGS 試験法では、波形記録と液状化強度曲線の 2 種類のグラフを報告することになっている。ここでは、これらの図から読み取れる情報について説明する。

1) 波形記録の読み方

ひずみや間隙水圧の増加の仕方は、試料の相対密度や細粒分含有率によって異なる¹⁴⁾。図-2 に豊浦砂を相対密度 $D_r=50\%$ に作製した供試体と 80% に作製した供試体の軸ひずみの波形記録を示す。両供試体とも繰返し回数 23 回で 5% の両振幅軸ひずみ DA が発生しているが、波形記録の形状は大きく異なっている。 $D_r=50\%$ の供試体は、18 回まではほとんど軸ひずみが発生しないが、20 回を超えたあたりから軸ひずみが急増している。一方、 $D_r=80\%$ の供試体では、载荷の初期から軸ひずみが発生しているがその進行はゆるやかで、 $D_r=50\%$ の供試体のように急増することはない。このように、 $DA=5\%$ に至る繰返し回数が同じでも、 $DA=5\%$ に到達するまでの軸ひずみの増加や $DA=5\%$ 到達後の軸ひずみの増加の仕方は密度によって異なることがわかる。図-3 は細粒分含有率 $F_c=9\%$ と 51% の不攪乱試料の軸ひずみの波形記録である。図-2 と同様に

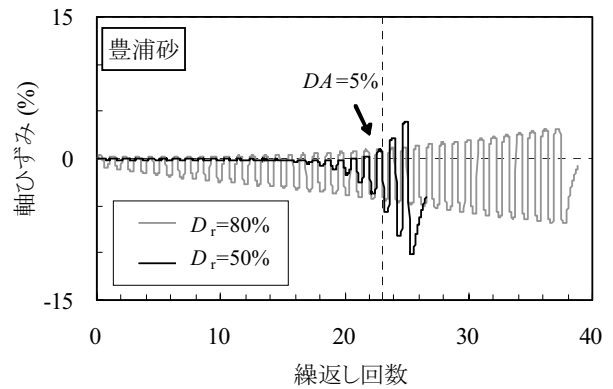


図-2 密度の違いによる軸ひずみの波形記録の比較

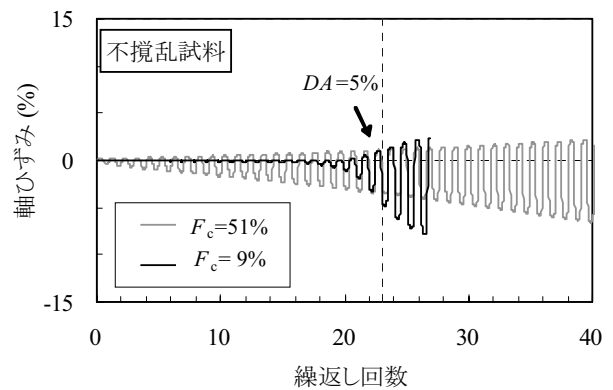


図-3 細粒分含有率の違いによる軸ひずみの波形記録の比較

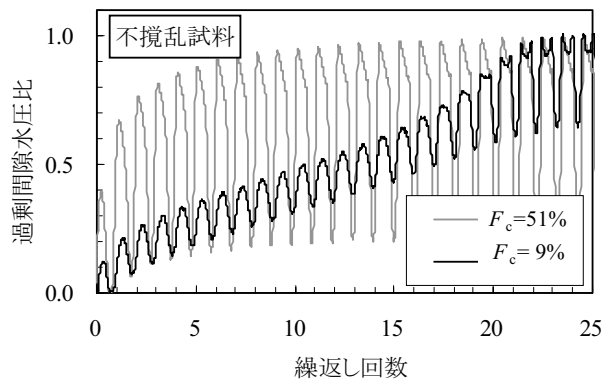


図-4 過剰間隙水圧比の波形記録 ($F_c=9\%$)

両供試体とも $DA=5\%$ に到達した繰返し回数は 23 回であるが、波形記録の形状は細粒分含有率の多寡によって異なっており、細粒分の少ない砂ではひずみが急増するのに対して、細粒分の多い砂では漸増する。このように、相対密度の大小や細粒分含有率の多寡によって、ひずみの増加の仕方が異なるので、解析パラメータを設定する際に反映するようにする。

図-3 に示した供試体の過剰間隙水圧比の波形記録を図-4 に示す。 $F_c=9\%$ の過剰間隙水圧は徐々に増加し、過剰間隙水圧比が 0.7 を超えたあたりから急増して 1 に至っ

ている。これに対応して波形の形状も異なり前半は山が一つ、後半は山が2つになる。前半部分については、三軸試験では繰返し载荷に伴って平均主応力も変動するため間隙水圧も変動し、圧縮側の载荷では正の過剰間隙水圧、伸張側の载荷では負の過剰間隙水圧が発生する。一方、過剰間隙水圧比が1に近づいて変形し始めると圧縮側、伸張側とも繰返し载荷に伴って正のダイレイタンスーが生じる。液状化試験は非排水状態で载荷を行うため、この正のダイレイタンスーは負の過剰間隙水圧に置き換わるので、繰返し軸荷重がピークの際に過剰間隙水圧が下がり、繰返し軸荷重0の時（応力ゼロクロス時）に過剰間隙水圧が最大となる。1サイクルの繰返し载荷中に繰返し軸荷重のピークは圧縮時と伸張時の2回、応力ゼロクロスも2回あるため、山が2つとなる。ただし、細粒分が多くなるとダイレイタンスー特性が明瞭ではなくなるため、 $F_c=51\%$ の過剰間隙水圧比のように1に近づいても山は1つのままで、さらに細粒分の多い粘性土では山の先端が丸くなる。このように、軸ひずみや過剰間隙水圧比の波形記録から、試料の締め具合や粒度特性を、定性的ではあるがある程度読み取ることができる。

2) 液状化強度曲線の読み方

図-5 に豊浦砂 $D_r=50\%$ および 80% の $DA=1\%$, 2% , 5% および過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c=0.95$ （図中の凡例は $u=95\%$ ）で定義した液状化強度曲線を示す。ここで、液状化強度曲線は、異常値はないとして平均的な曲線を設定した。なお、 $D_r=50\%$ については、すべての曲線を示すと煩雑になることから $DA=5\%$ の曲線のみ示した。密詰めの $D_r=80\%$ の液状化強度曲線は緩詰めめの $D_r=50\%$ の上方に位置し、その傾きも大きい。図-5 には $DA=1\%$, 2% , 5% の3種類の軸ひずみで規定した液状化強度曲線を示したが、図-2 に示したとおり緩詰めめの $D_r=50\%$ では軸ひずみが急増するため、いずれの条件で液状化を規定してもほぼ同じような液状化強度曲線が得られ、各々の間隔は狭い。一方、密詰めめの $D_r=80\%$ は軸ひずみが徐々に進行するため、 $DA=1\%$, 2% , 5% の液状化強度曲線の間隔が大きくなる。液状化強度曲線に及ぼす細粒分含有率の影響を図-6 に示す。図中には、それぞれの試料の N 値と有効上載圧 100kN/m^2 相当に換算した N 値 N_1 も示した。これより、両試料の N 値および N_1 はほぼ同等であり、細粒分含有率の違いにともなう砂骨格の間隙比等の違いもありうるが、基本的には細粒分含有率の違いについて比較できる試料である。図より、 $F_c=51\%$ の液状化強度曲線は $F_c=13\%$ の上方に位置し、その傾きは大きく、液状化を規定する条件によって液状化強度曲線の差異が大きいこと

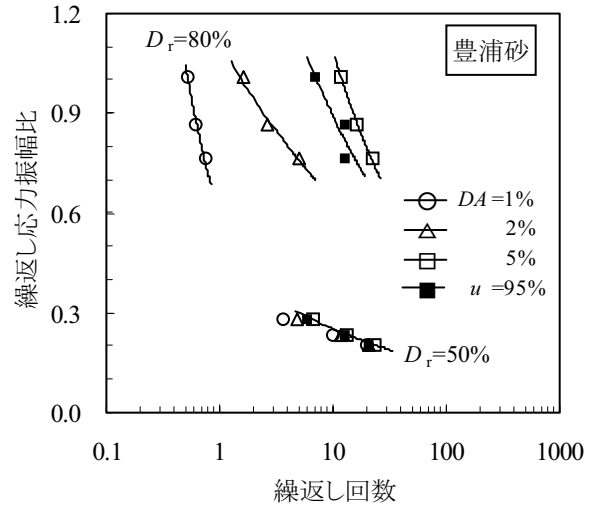


図-5 液状化強度曲線に及ぼす密度の影響

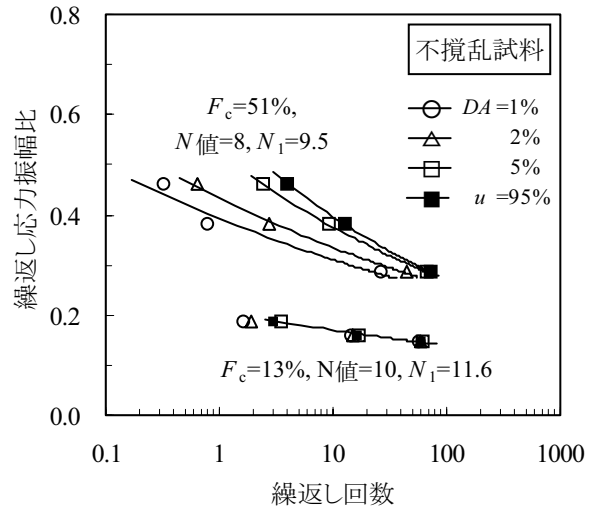


図-6 液状化強度曲線に及ぼす細粒分含有率の影響

がわかる。

このように、液状化強度曲線の傾きや間隔は試料の締め具合や粒度特性の影響を受ける。ところで、 $\Delta u/\sigma'_c=0.95$ と $DA=1\%$, 2% , 5% の液状化強度曲線の位置関係は、細粒分の少ない試料では $DA=2\%$ と 5% の曲線の間に $\Delta u/\sigma'_c=0.95$ の曲線が位置する事例が多いが、細粒分が多くなると $\Delta u/\sigma'_c=0.95$ の曲線が右側に移動するようである。液状化試験では、供試体の下端部で間隙水圧を測定するが、細粒分が多くなると透水係数が低くなり供試体内の間隙水圧が一樣になるのに時間を要するため、下端部で測定された間隙水圧が供試体全体を代表していない³⁾ことなどが理由として考えられる。

4. 液状化試験の結果の利用と課題

1) 液状化を規定するひずみ

液状化を規定する条件として、各種設計指針などでは両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ を採用する例が多いが、明確な規定はない。前述のとおり緩い砂や細粒分の少ない砂では、どのような条件で液状化を規定しても、液状化強度や液状化強度曲線に大きな差はないが、密な砂や細粒分を多く含む砂では異なるため、対象地盤や構造物・地震動の種類、さらには許容変形量などに応じて適切に選定する。JGS 試験法では、 $DA=1\%$ 、 2% および 5% における繰返し応力振幅比と繰返し回数との関係を報告することとし、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c=0.95$ のとき繰返し応力振幅比と繰返し回数との関係の報告は必須ではない。ひずみの大きさと液状化を規定すると、液状化現象とは異なる場合も液状化すると判定されてしまう可能性があるため注意を要する。たとえば、細粒分を多く含む砂では軸ひずみが所定の値に達しても過剰間隙水圧比は 1 にならない場合がある。このような現象は粘土などで顕著となるが、これは繰返し軟化として液状化とは区別して取り扱うようにする。また、密な砂や固結した砂などでも、ひずみが発生しているにもかかわらず過剰間隙水圧比が 1 にならない場合がある。この場合、せん断破壊している可能性がある。せん断破壊すると軸ひずみは急増し、間隙水圧は頭打ちあるいは低下する。また、供試体にはせん断面が発生する。

ひずみで液状化を規定する場合には、液状化強度曲線や軸ひずみの波形記録だけに着目するのではなく、過剰間隙水圧比の波形記録や供試体の観察記録、写真なども併せて確認すると、液状化現象とその他の現象を判別することができる。このように、液状化強度や液状化強度曲線だけに着目するのではなく、個々の供試体の挙動にも着目して、総合的に試験結果を解釈する必要がある。

なお、建築基礎構造設計指針での液状化の規定は、せん断ひずみ $\gamma=5\%$ を採用している。これは $DA=6.7\%$ に相当するが、JGS 試験法のデータシート様式ではこの値の報告はないため、再整理が必要となる。

2) 乱れの影響

砂質土をチューブサンプリングで採取すると乱れの影響が大きく、凍結サンプリングでは良質な試料が採取できるというのが一般的な認識である。しかし、凍結サンプリングはコストが高いことから大型プロジェクト以外では採用が難しく、普及には至っていない。新しいサンプリング手法の開発もあまり進んでいないことから、当

面はチューブサンプリングを利用せざるを得ない。ここでは、チューブサンプリング試料の乱れとその補正の可能性について説明する。図-7 に凍結試料とチューブ試料の液状化強度の比較¹⁵⁾を示す。チューブ試料は 5 種類のサンプラーで採取されているが、ほとんどの試料において凍結試料の液状化強度がチューブ試料のそれを上回っている。この図に示した試料の液状化強度と換算 N 値の関係を図-8 に、細粒分含有率との関係を図-9 に示す。図-8 を見ると、凍結試料では右肩上がりの傾向が認められ、換算 N 値が大きくなると液状化強度も大きくなるが、チューブ試料では換算 N 値にかかわらず液状化強度は 0.15 ~ 0.4 の範囲に分布し、液状化強度の密度依存性が認められず、試料の乱れの影響がうかがえる。一方、図-9 を見ると、細粒分含有率 10%以下では凍結試料とチューブ試料の液状化強度に大きな差が生じているが、細粒分が多くなると液状化強度の差は小さくなる傾向が認められ、

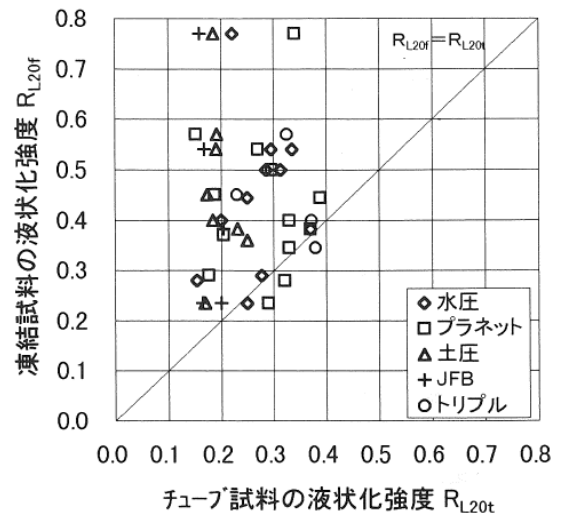


図-7 凍結試料とチューブ試料の液状化強度の比較¹⁵⁾

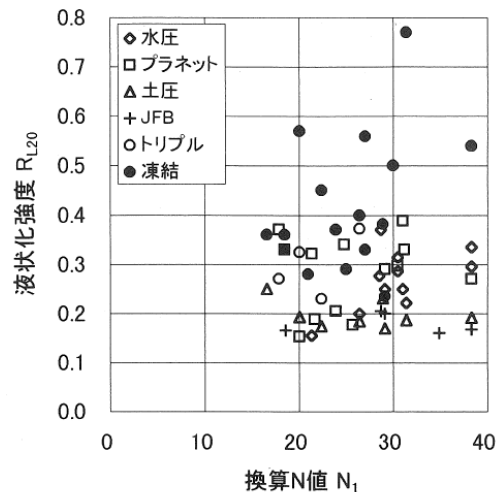


図-8 液状化強度と換算 N 値の関係¹⁵⁾

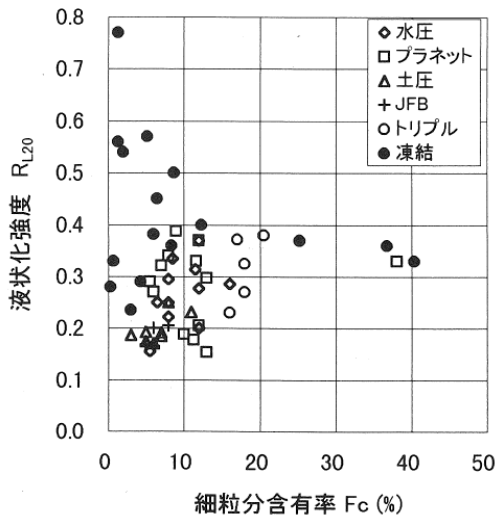


図-9 液状化強度と細粒分含有率の関係¹⁵⁾

細粒分含有率が 20%を超えると両者に明瞭な差は認められない。これは、細粒分が多くなるとチューブ試料の乱れの程度が小さくなることや、凍結試料においては凍結膨張の影響によるものと推察され、凍結サンプリングの適用範囲と考えることができるかもしれない。チューブサンプリングの適用性について、文献 15)では砂地盤の締めまり具合の観点から、以下のようにまとめている。

- ・密な砂地盤（換算 N 値 20 を上回るような）については、直接的な適用は困難である。チューブサンプリングを適用するためには、乱れを補正する方法の確立が必要である。
- ・換算 N 値が 20 を下回るような比較的緩い地盤、細粒分を多く含む地盤に対しては、凍結法との差異は少なく、同等の結果が得られる可能性がある。
- ・換算 N 値が 10 を下回るような非常に緩い地盤については、密度増加のために強度を過大評価する可能性がある。この点については、検討の対象が密な地盤であったためにデータ数が不十分であるが、得られた結果を見る限り、密な地盤における強度の違いに比べてその差は比較的小さいと考えられる。これは、緩い砂の強度がそもそも小さいことが一因と言えよう。

換算 N 値 20 を超える砂地盤については、乱れを補正することを求めているが、補正法について未だ確立された手法はない。乱れの要因は、サンプリングに伴う振動やせん断、応力解放、運搬中の振動、成形時に試料に加わる応力履歴などである。この時の乱れの過程は、まず、微視構造が乱され、さらに乱れが進むと密度が変化すると考えられている。すなわち、密度に変化が生じていなくても乱れている可能性があり、密度を指標に乱れの有

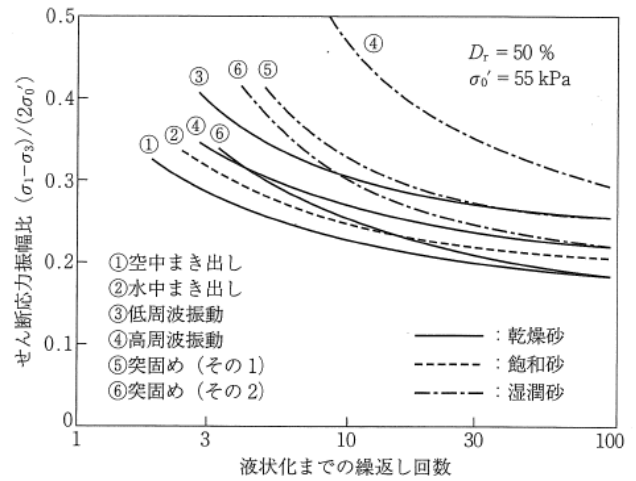


図-10 供試体作製方法が液状化強度に及ぼす影響関係¹⁶⁾

無を判断することは危険である。これは、密度が同じでも微視構造が異なれば液状化強度は異なるためである。一例として、細粒分を含まない砂を様々な方法で相対密度 50%に作製した供試体の液状化試験結果¹⁶⁾を図-10に示す。繰返し回数 20 の時の液状化強度で比較すると最大で約 2 倍の強度差がある。微視構造は地盤の堆積条件や応力・ひずみ履歴などによって左右されるもので単純に定量化することは困難で、液状化を密度の関数として表現することはできない。微視構造の影響は微小ひずみ時の挙動に顕著であることから、初期せん断弾性係数 G_0 を用いて乱れの程度を評価したり補正することが行われている。原位置で測定した G_0 と室内で測定した G_0 を比較して乱れの程度を定量的に評価し、液状化試験結果を補正する方法¹⁵⁾や、液状化試験を行う前に供試体に微小繰返し履歴を与えて G_0 を原位置と同じ値まで増加させて液状化試験を行う方法¹⁷⁾などが提案されている。

3) 試験機の載荷能力

これまであまり注目されることがなかったが、試験機の載荷能力によって液状化強度が異なる可能性がある。液状化して剛性がなくなると試料は無限に変形しようとするが、この試料の変形に試験機が追従できない（ピストンの移動が追いつかない）と、試料には有限の変形しか生じないため液状化強度を高く見積もることになる。液状化試験時に必要な試験機の載荷能力として、ひずみ両振幅とその時に必要な最大ひずみ速度の関係を図-11¹⁸⁾に示す。これによると試験機に求められるひずみ速度は数百%/secにも及ぶため載荷周波数を遅くするなどの対応では改善にならないので、試験機の性能にも注意を払う必要がある。一例として、2種類の試験機から得られた

液状化強度の頻度分布を図-12 に示す。これらは、液状化判定を行うために日本全国から採取した砂地盤の液状化試験結果をまとめたもので、採取地や密度、粒度特性は多種多様である。ランダムに試料をあてがっているため、試験機によって試料の性質に偏りがあるわけではないと仮定して以下の検討を行った。試験機 A の液状化強度の平均値は 0.32、最頻値は 0.25~0.30 である。一方、試験機 B の液状化強度の平均値は 0.24 で試験機 A に比べて 0.08 小さく、最頻値は 0.15~0.20 で棒 2 つ分左に移動している。

次に、両試験機から得られた波形記録の比較を図-13~図-15 に示す。载荷中に必要となるひずみ速度は、ひずみの大きさが同一でも、その時の試料の剛性によって異なると考えられることから、同等な試料で比較を行う必要がある。ここでは、相対密度 $D_r=30\%$ に作製した豊浦砂のデータを示した。試験機 A の繰返し応力比は 0.170 で

試験機 B は 0.176 であることから、载荷条件もほぼ同じである。図-14 に示した軸ひずみの波形記録を見ると、両供試体とも繰返し回数 18 回目付近から軸ひずみが発生し液状化に至っているが、22 回目までは試験機 B の方が試験機 A よりやや大きい軸ひずみが発生している。ところが、23 回目以降は逆転して試験機 B の軸ひずみの方が大きくなり、24 回目の両振幅軸ひずみ DA は試験機 A が 6.4% であるのに対して試験機 B は 21% で約 3 倍となっている。図-15 は図-14 の軸ひずみを微分したものであるが、24 回目のひずみ速度は試験機 B が 100%/sec を超えるのに対して、試験機 A では 10%/sec 程度である。

応力波形を詳細に見るため、図-13 の応力波形から 1 サイクル分を抜き出して図-16 および図-17 に示す。図中の○は理想的な正弦波である。ひずみがほとんど発生していない 10 サイクル目では、両試験機とも理想的な正弦波で载荷できていることがわかる。しかし、数%のひず

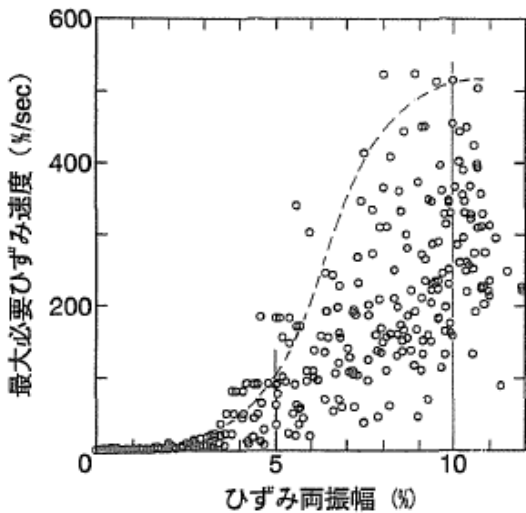


図-11 ひずみ両振幅と必要な载荷速度の関係¹⁸⁾

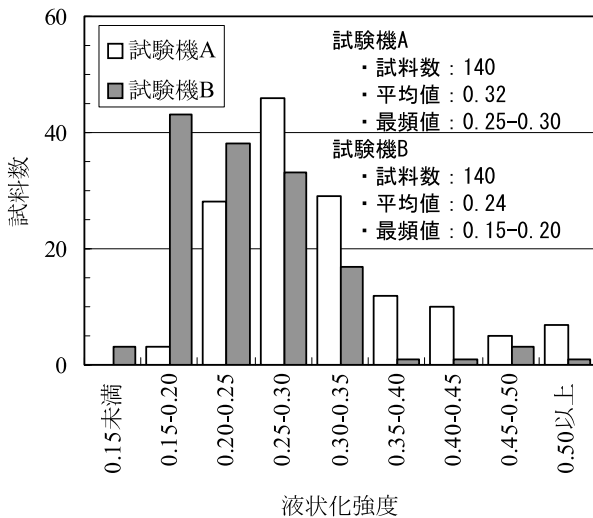


図-12 試験機の違いによる液状化強度の比較

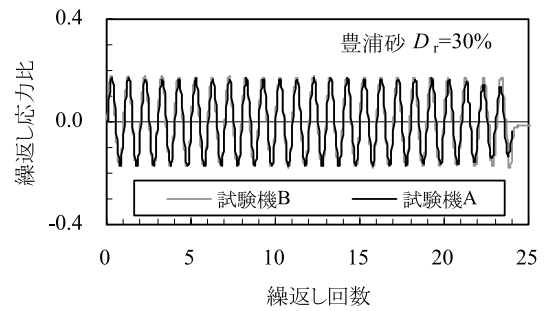


図-13 応力波形の比較

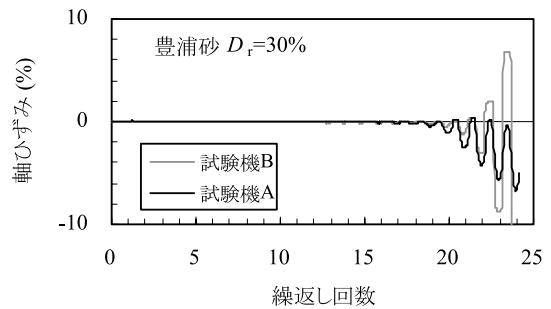


図-14 ひずみ波形の比較

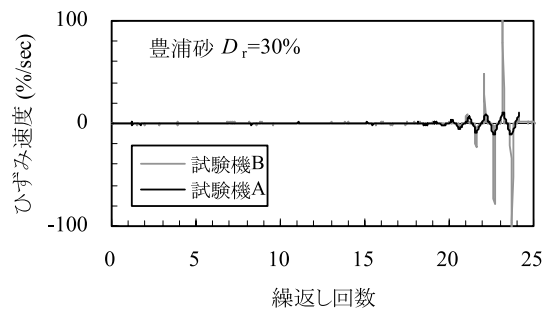


図-15 ひずみ速度の比較

みが発生した 22 サイクル目では、試験機 B ではほぼ理想的な正弦波で荷重が載っているが、試験機 A では振幅が小さいだけでなく形状も乱れていることがわかる。このように、荷重能力が十分でないといずれも速度の不足や載

荷波形の乱れによってひずみを過小評価し、液状化強度を過大評価することになる。

5. 液状化試験結果の精度と結果の解釈のためのチェックシートの提案

以上の議論を踏まえて、液状化試験結果の精度と結果の解釈のためのチェックシートを表-1 に示すように試作した。まだ、試作段階であり、過不足その他の不備があると思われるが、実務で試用し、ご意見をもとに改善していければと考えている。

6. まとめ

本稿では、解析技術者が液状化試験結果を評価・利用する際の着目点や考え方についてとりまとめた。試験結果としてデータシートに記述される液状化強度や液状化強度曲線のみに着目するのではなく、データシートに示された数値や波形記録、供試体の観察記録や写真には様々な情報が含まれているため、これらを読み取る技術を習得し、解析に反映することが重要であり、解析精度の向上につながるものとする。また、その観点から、液状化試験の精度と結果の解釈に役立つようなチェックシートを試作した。今後、このチェックシートをさらに改良し、実務に役立つような形に持っていきたいと考えている。

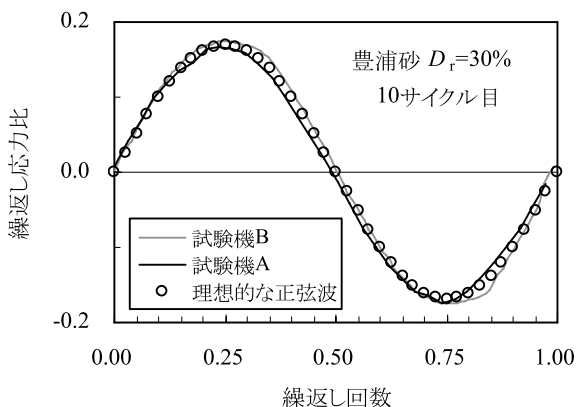


図-16 1 サイクル中の応力波形 (10 サイクル目)

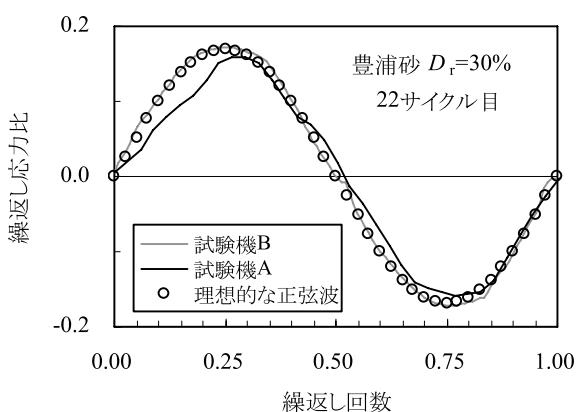


図-17 1 サイクル中の応力波形 (22 サイクル目)

表-1 液状化試験結果の精度と結果の解釈のためのチェックシート (試作版)

項目	内容	チェック結果	
1) 試料の情報	・ サンプリグ方法	サンプリグ方法は対象地盤に対して適切か 乱れの有無とその影響の程度	
	・ 運搬方法	凍結の有無, 脱水状況, 梱包状況, 振動の影響	
2) 試験条件	・ 圧密応力	土被り圧 σ'_v もしくは平均主応力 σ'_m	
	・ 繰返し荷重条件	荷重周波数, 軸応力振幅比の与え方は適切か	
3) 試験結果	・ 結果の整理	異常値の有無, 供試体の破壊状況 液状化を規定する条件	
	・ 波形記録の特徴	密度, 粒度特性の影響と定性的に合致しているか 軸応力波形の乱れの有無	
	・ ひずみの伸び方	密度, 粒度特性の影響と定性的に合致しているか 液状化強度曲線の傾向との整合性	

注) チェック結果欄には、当面、「異常なし」あるいは所見を記入することを考えている。

参考文献

- 1) 三上武子, 一井康二, 植村一瑛, 仁科晴貴: 耐震性検討のための数値解析におけるパラメータ設定についての課題, 地盤工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」, Vol.27, No.1, pp.81-87, 2009.
- 2) 三上武子, 一井康二, 北出圭介, 濱田展寿, 森鼻章治, 米浦大輔, 仁科晴貴: パラメータ設定が液状化解析結果に及ぼす影響, 地盤工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」, Vol.28, No.1, pp.123-128, 2010.
- 3) 地盤工学会編: 地盤材料試験の方法と解説—二分冊の2—, pp.730-749, 2009.
- 4) 青山清道, 小川正二, 川澄修, 田村富雄, 福田誠: 凍結—融解を受けた土の性質, 土と基礎, Vol.25, No.7, pp.41-46, 1977.
- 5) 塚元伸一, 横田耕一郎, 今野政志: 試料の凍結が微小歪領域での G に及ぼす影響について, 第 16 回土質工学研究発表会講演集, pp.569-572, 1981.
- 6) 斉藤勝彦, 久保雅義, 劉剛: 宅急便における荷扱いの現状分析, 日本航海学会論文集, 第 99 号, pp.117-124, 1998.
- 7) 善功企, 山崎浩之: 乱さない砂質土の凍結の有無による液状化強さの比較, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.143-148, 1988.
- 8) 横田耕一郎, 今野政志, 今井常雄: サンプルの凍結が動的せん断強度に及ぼす影響, 土木学会第 33 回年次学術講演会概要集, 第 III 部門, pp.146-147, 1978.
- 9) 運輸省港湾局監修: 埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版), 沿岸開発技術研究センター, p.75, 1997.
- 10) 飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会: 委員会報告 I, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム—室内試験, 原位置試験および試験結果の利用—発表論文集, pp.1-53, 1988.
- 11) 飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会: 飽和豊浦砂の全国一斉非排水繰返し三軸試験の実施と試験結果の解析, 土と基礎, Vol.37, No.4, pp.105-111, 1989.
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書 V 耐震設計編, 2002.
- 13) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001.
- 14) Mikami, T., Ichii, K., Iai, S., Ozutsumi, O., Nakahara, T. and Yokoyama, N.: Modeling of strain increase of liquefied soils in cyclic shear loading considering material characteristics, Proc., International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Tsukuba, pp.1395-1401, 2009.
- 15) 全国地質調査業協会連合会: 全地連「技術フォーラム'98」講演集 別冊 全地連報告 第 1 部「地盤の液状化に関する土木研究所との共同研究」, pp.13-27, 1998.
- 16) Mulilis, J. P., Seed, H. B., Chen, C. K., Mitchell, J. K. and Arulanandan, K. : Effects of sample preparation on sand liquefaction, Proc. ASCE, Vol.103, No.GT2, pp91-108, 1977.
- 17) Tokimatsu, K., Yamazaki, T. and Yoshimi, Y.: Soil liquefaction evaluations by elastic shear moduli, Soils and Foundations, Vol.26, No.1, pp.25-35, 1986.
- 18) 百瀬忍, 中島敬祐, 土屋尚: 繰返し三軸圧縮試験機の性能評価について, 第 31 回土質工学研究発表会講演集, pp.977-978, 1996.

