

不攪乱土の液状化判定試験法の提案

匠技術（株） 正会員 ○ 桑 山 忠

匠技術（株） 曾 布 川 昭 宗

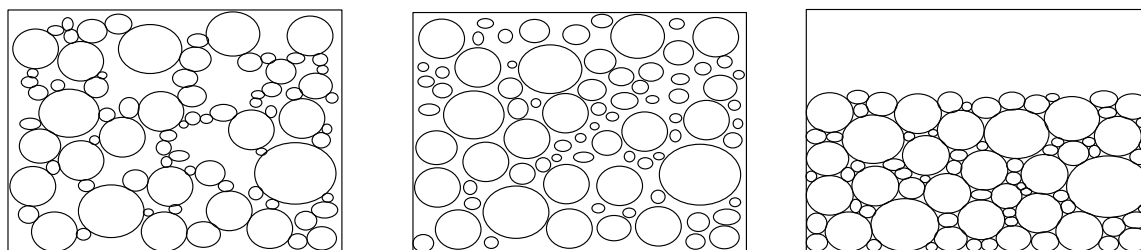
1. はじめに

東日本大震災では東日本各地で大きい被害を被った。その中で液状化現象による被災は東日本全域に渡って発生し、住宅が傾斜したり、斜面崩壊の原因になったりしている。一方、南海トラフに起因する大規模地震の可能性が高まっており、東海から九州までの太平洋側の各都府県で液状化に関するハザードマップが作られるようになり液状化する可能性の高い場所が示されている。しかし、このハザードマップは大部分が土の粒度分布曲線、あるいは標準貫入試験で求められる N 値をもとにした液状化判定法を使って作成されており、不確実性を補う意味から安全を見込んで大きめの範囲を液状化可能地域としていることが窺われる。

ここでは、地震による液状化のメカニズムを微視的に捉え、超音波の空洞現象を利用して土粒子にエネルギーを作用させ、地震時の液状化と同様の現象を再現して判定する方法を提案している。

2. 液状化現象のメカニズム

液状化現象を微視的に捉えると図-1に示す概念図の通りであり、上載荷重を間隙水のみで支えることになる。このため、間隙水圧が大きくなり地盤の弱い部分から水圧が消散しようとしてルーズとなった砂を伴って地上に噴出すことになる。このような一連の現象を液状化現象と言う。



(a) 飽和した自然砂地盤 (b) 振動により浮遊した砂粒子 (c) 重力によって砂粒子が沈降

図-1 液状化現象のメカニズムの概念図

地震動によってルーズな飽和した自然砂地盤 (a) の質量の小さい土粒子は地震によって振動することによって土粒子間の接点が離され間隙水中を浮遊した状態となる (b)。土粒子は浮遊状態を保てないので、重力によって土粒子は沈降することになる (c)。飽和した砂層より上部の地盤の重量を砂地盤の間隙水が支えることになり、上載荷重と同等の過剰間隙水圧となり、地上に砂やシルトを伴って噴出すことになる。この現象により、不等沈下や地下構造物の浮き上がりなどを引き起こす。

3. 現在の液状化判定

液状化の判定は実際の地震を想定した繰り返しせん断試験を行って判定するのが最良であるが、高価な装置を必要とするばかりではなく、試験の熟練者を必要としコストが高くなるのでほとんど行われず、次の二つの方法で判定されているのが現状である。

一つは、過去の液状化を起こした土の粒度分布から液状化しやすい粒度分布曲線を提示し、液状化が起こると想定される土の粒度分布曲線を試験で求め、液状化しやすい粒度分布曲線と比較して判定する方法であ

キーワード : 液状化 , 試験法 , 超音波照射 , 液状化係数

連絡先 : 〒460-0014 名古屋市中区富士見町 10-24 Tel 052-253-8923

る。この方法は、きわめて液状化しやすい粒度分布の範囲と液状化しやすい粒度分布の範囲が示されているが、相対密度が小さい場合には提示された範囲ばかりではなく、シルト層などの細粒な土粒子の場合でも液状化することが分ってきている。すなわち、2種類の粒度分布範囲が示されているが、示された粒度分布を外れるような細粒分を含んだ土層も鳥取地震で液状化した例（鳥取県境港の埋立地）もあり、粒度分布曲線だけの判定ではいけないことが裏付けられた。

二つ目の方法は標準貫入試験で求められるN値から液状化強度比と繰り返しせん断応力比を求め、液状化抵抗率を算出して判定する方法である。N値から求めた応力比から液状化抵抗率を算出する方法が最近では多く用いられているが、判定結果の精度はN値を基に算出する間接的な方法であり、信頼するに足る方法とは言い難く、簡易判定法と位置づけられている。

二つの判定法の他に振動三軸圧縮試験機を使用して地震と同様な外力を作用させる繰り返し三軸圧縮試験の方法もあるが、この方法でも液状化現象を起こさせる試験ではなく、液状化に対するせん断強度を求め、液状化への抵抗率を検証するのみである。

4. 超音波照射による提案方法

超音波を照射することで高密度砂杭を造成することを大内ら¹⁾は基礎的研究を行っており、超音波照射が土粒子を振動させ液状化を起こして高密度の砂杭としている。大内らは液状化とは表現していないが、まさに液状化現象を利用して高密度にしている。すなわち、飽和した土に超音波を照射すると細砂(0.075～0.25mm)、シルト(0.005～0.075mm)など細粒部分の土粒子は超音波の密度波や空洞現象（キャビテーション）によって振動し始める。粗砂(0.85～2mm)や礫(2mm以上)は土粒子の質量が大きいため超音波の密度波エネルギーやキャビテーションによるエネルギー程度ではほとんど動かないが、中砂(0.25～0.85mm)は照射する超音波の出力によって動いたり動かなかったりする。

飽和した土の土粒子が振動すると土粒子間の接触が断ち切れ個々の土粒子が水中で浮かんた状態となり土粒子自身の質量によって沈降することになる。図－1に示す状態が超音波照射によって発生し、地震による液状化現象と全く同じ現象を起こすことができる。

ここでは、このメカニズムを利用して超音波による液状化現象を発生させ、液状化判定の試験を行えるような方法を提案した。すなわち、特殊な試験とはなるが、静的三軸圧縮試験機を用いて静的三軸圧縮試験と同様の方法で供試体をセットして超音波を照射したときの結果で判定する方法であり、以下に、試験装置、供試体の作製、試験方法、計測結果による判定について記述する。

（1）試験装置

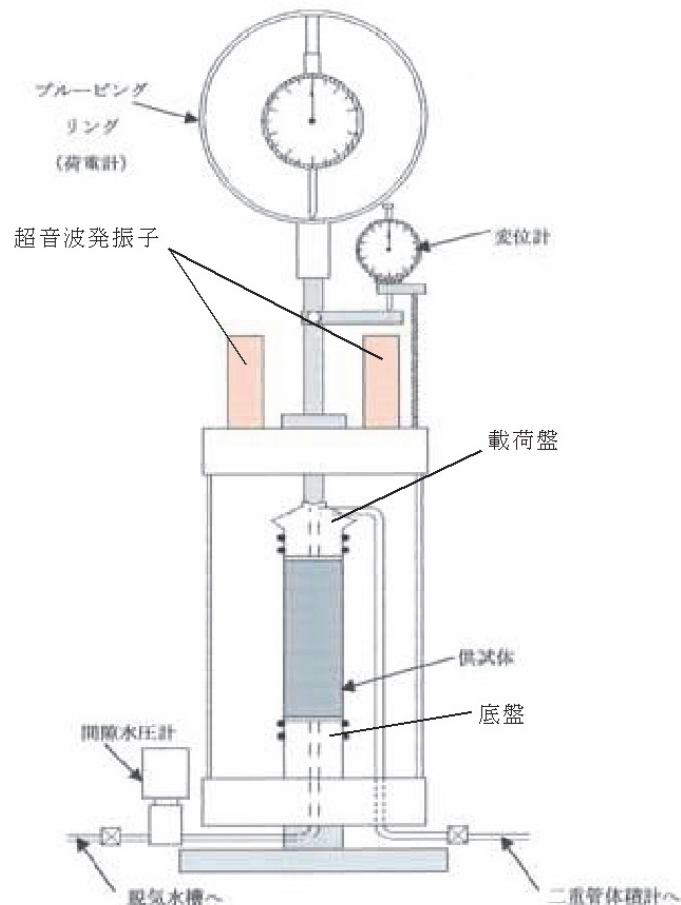
判定試験に用いる装置は供試体を飽和させることができ、さらに超音波照射のできる必要がある。しかし、一般的に広く利用されている静的三軸圧縮試験の三軸セルに超音波発信装置を取り付けるのみで、新たな装置は必要としない。図－2に示すように、超音波発振子を三軸セルの上部に2個取り付けるかあるいは荷重載荷盤ないし底盤に内蔵させることで判定試験装置として利用できる。

① 三軸セル

三軸セルは前述したとおり、一般的に使用されている普通三軸圧縮試験の三軸セルをそのまま用いればよく、このセルに超音波発振子を取り付ける。ただし、供試体を飽和させるための背圧が掛けられ、間隙水圧、体積変化量が測定できる必要がある。また、液状化する範囲は地表面から20mまでの深さで発生することを考え、三軸室の側圧は400kNm²まで載荷できるものであればよい。

② 圧縮装置

普通三軸圧縮試験機に付属する載荷装置がそのまま使用できる。ただし、変形のコントロールができることが大切であるが、普通の三軸圧縮試験機であればこの機能は標準的に装備されている。



図－２ 超音波発振子を取り付けた三軸セル

③ 超音波発振子および発信装置

超音波の周波数は空洞現象（キャビテーション）の発生しやすい15～40 kHz のものを使用する。超音波の出力は発振子を三軸セルに取り付けた状態で1～4 W/cm² の範囲でコントロールできる装置が望ましく、さらに、周波数もコントロールできることが望ましい。

超音波の周波数と出力は対象とする土質の細粒分含有量と地震力の大きさと相関するので、周波数と出力を変えることによって広範な土質に対応できることになる。

（２） 判定試験

① 供試体の作製

ここでは不攪乱試料を対象にしているが、ボーリング調査などで採取される不攪乱試料ばかりではなく、攪乱試料も同様に試験できる。試料の作成は、不攪乱の場合は所定の直径にトリマーを使って成形を行い、攪乱の場合は所定の相対密度に供試体を均一に締め固めて作製する。

液状化の起こりやすい砂質土では不攪乱試料の採取が困難な場合が多いので、この場合には、現地密度をできる限り正確に測定し、測定した密度となるように攪乱試料と同様の方法で供試体を作製する。

② 側圧の決定

側圧はボーリングあるいは試掘孔などの試料採取深さ（ d_h ）と単位体積重量（ γ_t ）、静止土圧係数（ K_0 ）により式 4-1 によって決める。

$$\sigma_3 = K_0 * \gamma_t * d_h \quad \text{式 4-1}$$

静止土圧係数は細粒土の混入割合によって異なってくるが、 $K_0 = 0.3 \sim 0.4$ の範囲で決め、現地の応力状

態を再現できるようにする。

③ 供試体の飽和

作製した供試体を三軸セルにセットしたならば、決定した側圧をかけ、供試体下部から側圧と同じ圧力でバックプレッシャーをかけ供試体の空気を追い出す。一般的に行われている供試体の飽和と同様に体積変化測定パイプから気泡が出なくなるまで行う。

④ 軸応力の載荷

供試体の飽和が終了してから軸応力を載荷する。軸応力は試料採取深さ（ d_h ）と単位体積重量（ γ_t ）から式 4-2 から求め、この荷重を載荷する。

$$\sigma_1 = \gamma_t * d_h \quad \text{式 4-2}$$

この段階で、供試体は（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ） i の現地と同じ状態を保ち破壊することはない。

⑤ 超音波の照射

供試体に軸応力を載荷したならば超音波の照射を行う。周波数と出力は細粒分含有量（ F_c ）と想定地震の大きさによって選択する。細粒分含有量が多い場合は高い周波数（40 kHz）とし、大きい地震を想定する場合は出力を大きくする。

超音波照射時間は5分（300sec）程度を目安とするが、超音波を照射し始めると供試体の軸差応力（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ） i は低下し始め、細粒分含有量が少ないと軸差応力は0近くまで低下する。照射終了時までには軸差応力は一定値を示すようになるのでこの時の一定値（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ） f を読みとる。

超音波を照射している間は体積変化の起こらないようにセットしておき、間隙水圧（ U_e ）と軸差応力の変化を計測する。超音波照射が終わってから体積変化測定用のコックを開き、照射による体積変化を読みとる。

（3）液状化の判定

液状化の判定は超音波照射による軸差応力と間隙水圧によって行う。 $F_c=0$ でも相対密度が80%を超えている、あるいは土粒子が0.84mm以上である場合には液状化現象は起こさない。

このようなことを考え合わせて、低下した軸差応力（（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ） f ）と高くなった間隙水圧（ U_e ）の比を液状化係数（ L_f ）と定義し、この係数値によって判定することができる。

$$L_f = U_e / (\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad \text{式 4-3}$$

ここで

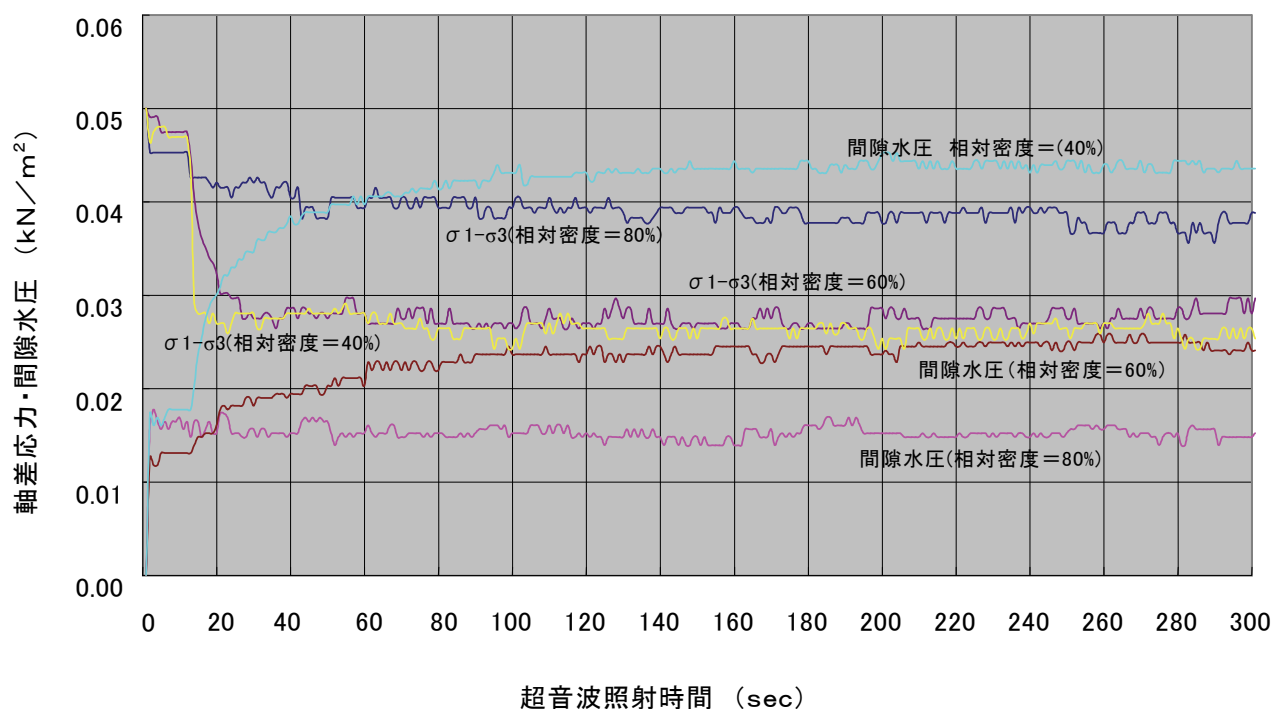
L_f	: 液状化係数
U_e	: 超音波照射によって発生した間隙水圧 kNm^2
$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$	: 超音波照射によって低下した軸差応力 kNm^2

液状化係数が $L_f = 1$ を超えると液状化している状態であるが、液状化に対する安全性と試験誤差などを含め $L_f = 0.85$ 以上は液状化すると判定する。

5. 液状判定試験の実験例

提案した液状化判定試験法にもとづいて、2mm以下の砂に細粒分を加え、細粒分含有率と相対密度を変化させて図-1に示した三軸セルで幾つか実験を行った。細粒分含有量が $F_c=20\%$ になると相対密度が40%でも液状化の可能性は小さいことが分かった。また、 $F_c=10\%$ になると相対密度によって液状化することが分かってきた。また、相対密度が80%になると細粒分含有率が0でも液状化はしないことも判明した。すなわち、細粒分含有率が10%程度であると相対密度の変化が液状化の発生に大きく影響することが分かってきた。さらに、液状化対策は相対密度を80%以上にすることで対応できることも裏付けられた。

図-3は $F_c=10\%$ に粒度調整した土の相対密度を変化させたときの軸差応力と間隙水圧の経時変化を



図－３ 液状化判定試験での軸差応力と間隙水圧測定値

示したものである。相対密度が 40, 60, 80 % の場合が示されているが、液状化判定係数は $L_f = 3, 1.1, 0.5$ となっており相対密度が 60% でも液状化すると判定される。

実験では超音波照射時間を 300sec としているが、軸差応力の低下はほぼ 60sec 以内に一定値に達しており、間隙水圧は 100sec 程度で一定値に到達していることが分かる。

6. 液状化判定試験の今後の課題

提案した試験法は全く新しい液状化の判定試験方法であるため、現実の地盤の判定例は全くない状態であるが、実際に発生する液状化現象と同じメカニズムで実施する判定試験法であり、現実に応じた判定試験法と言える。

一方、南海トラフを震源域とする大規模地震が想定されているので各地域で被災を最小限にするために液状化する可能性のある場所を特定しようと試みられているが、標準貫入試験の N 値から液状化低効率を算定して行われているため、不確実性が大きくならざるを得ない。

ここで提案した試験法によって多くの土層の液状化を判定すれば、不確実な液状化抵抗率を算定しなくとも正確なハザードマップの作成が可能になってくる。しかし、提案した試験法は室内で粒度調整した供試体で実験的に確かめられたのみであるので、液状化の可能性のある土層で採取した供試体での判定を行う必要がある。さらに、東日本の地震、鳥取での地震などで液状化が確かめられている土層などを判定してこの試験法の判定と比較検討することも大切である。

提案した試験法では、側圧の決定、液状化の判定などこれで妥当なのかを検証することが必要であり、液状化対策への新たな指針を策定することも大切となってくる。

参考文献

- (1) 大内光徳, 村上俊秀, 兵動正幸, 吉本憲正: 超音波による高密度砂杭造成に関する基礎的研究, 土木学会論文集 C, Vol. 6 5, No. 4, 929-942