

均一土槽実験試料の作製方法及び 比抵抗を用いたその評価方法

神宮司元治¹・国松 直¹・泉 博允²・望月智也³

¹正会員 工博 資源環境技術総合研究所 (〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-3)

²正会員 工博 大成建設株式会社 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

³正会員 工修 株式会社 篠塚研究所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 4-5-1)

It is reported that big damages to lifelines and underground structure are occurred by liquefaction or lateral flow. Some experiments or simulations have been doing to clarify the cause of these phenomena or take countermeasures against these disasters. Recently, a large-sized experiment has often conducted in order to make clear realistic effect of liquefaction or lateral flow. However, for the more large-sized experiment, it is very important to know the condition of sand samples before the experiment, such as relative density and degree of saturation because the numbers of experiments are limited. In this report, we proposed the method to measure the porosity of test samples by using resistivity. In addition, we studied about the method of making experiment samples variously.

Key Word: liquefaction, resistivity, sample, uniformity

1. はじめに

地震時の砂地盤の液状化現象や液状化に伴う側方流動が、ガス・水道などのライフラインや護岸・杭基礎などの土木構造物に大きな被害を与えることが、これまでの災害被害調査の結果から数多く報告されている¹⁾。これらの破壊現象の解明や対策を目的として、様々な数値解析や土槽実験などが行われてきた²⁾。特に、近年、土槽実験では、より実現象に近い液状化現象や側方流動に伴う破壊現象の影響解明を目的として、大型の実験が行われるようになってきた。しかしながら、大型土槽実験では、土槽内の試料の作製にかなりの労力が費やされ、実験回数が小型土槽に比べて限定されることから、一回あたりの実験精度保証のため、試料の作製手法や試料の初期状態の把握手法についても十分検討しておく必要がある。

本報では、比抵抗を用いた実験試料の均一性評価手法について検討を行い、その手法を用いて均一試料の作製手法について検討した結果について述べる。

2. 比抵抗による試料均一性評価

一般に大型土槽での試料作製の際、問題となるのは試料の飽和度と相対密度分布であるが、比抵抗を用いた均一試料の評価は相対密度の分布計測を行うものである。相対密度を求めるためには、間隙比あるいは間隙率が必要であるが、比抵抗値があまり大きくない間隙水で飽和されたクリーンサンドにおいては、一般に以下に示す Archie の式が成り立つことが良く知られている³⁾。

$$F = \phi_t / \phi_w = an^{-m} \quad (1)$$

ここで、Fはフォーメーションファクター、 ϕ_t は砂の比抵抗、 ϕ_w は間隙水の比抵抗であり、nは間隙率、a, mは実験により求められる定数である。図-1に示すように、クリーンサンド(M: 舞子浜砂、T: 高浜砂、T: K: 木津川砂、S: 豊浦砂)において、間隙水の比抵抗値と測定された比抵抗値からFを求め、間隙率を容易に求めることが可能である。

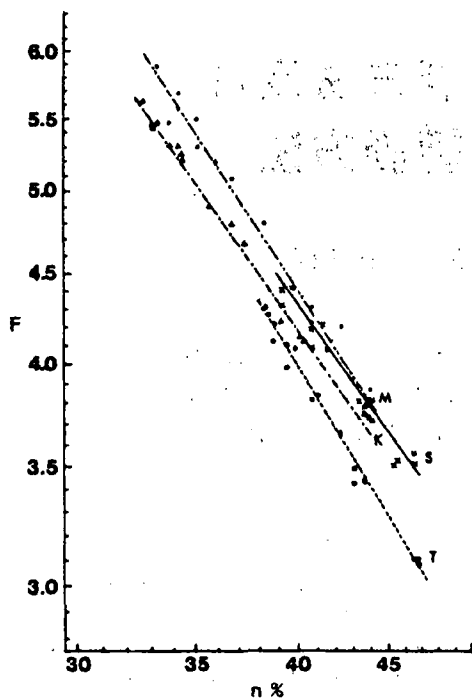


図-1 茂木他によるフォーメーションファクターと
間隙率との関係

なお、試料がクリーンサンドでなく、粘性土を含む場合には、粘性土の粒子の表面伝導効果により間隙率と比抵抗の関係が(1)式で表せないことが知られている⁴⁾。しかしながら、小型試験容器などを用い、実験に用いる間隙水の比抵抗値を用いて、図と計測された同様の比抵抗曲線を実験的に求めることにより、比抵抗値から砂層の間隙率を求めることは可能である。また、間隙率が求められれば、間隙比が算出でき、その砂層の最大間隙比及び最小間隙比を用いて、相対密度を求めることができる。

3. 小型実験容器を用いた試料均一性評価実験

作製試料の均一性を評価し、均一試料の作製手法を検討するために、図-2に示すようなアクリル製円筒型試験装置を作製した。試験装置の上部及び下部には、平行電流源として銅網が取り付けられており、電位電極として30本のピン電極が円筒容器の側面に2cm毎に配置されている。また、円筒容器下部には、分散板として多孔質プレートが設定されており、下部から水流を送り込むことによって、作製試料にボイリングを起こすことが可能である。

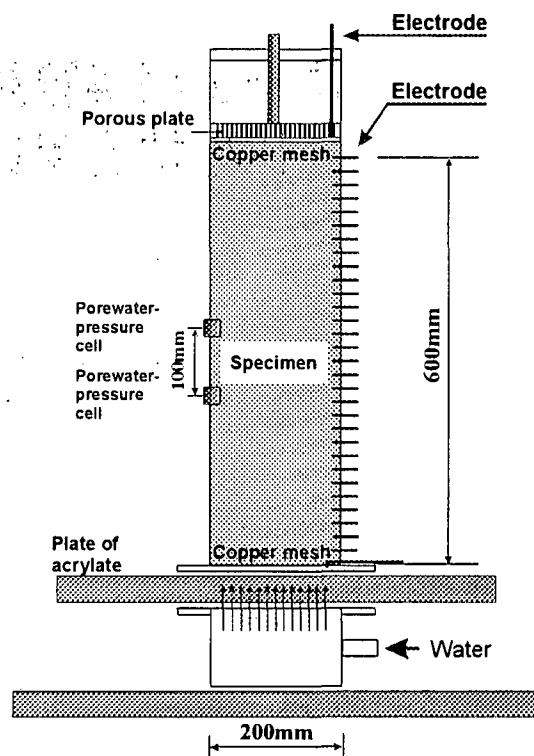


図-2 実験に使用した小型実験容器

実験に使用した比抵抗計測装置は、千葉電子研究所(有)およびネオサイエンス(有)に制作依頼した15チャンネル連続比抵抗計測器である。本計測器は、サンプリング速度250msで、15チャンネルの比抵抗値を連続的に計測することが可能である。また、本実験では、加振を加えた際の試料の状態変化を検討するために、サンエス製電磁式振動加振器SSV-725((株)鴻池組所有)を使用した。なお、比抵抗から換算した間隙率の計算において、(1)式の係数には茂木ほかによって求められた豊浦標準砂の値($a=1.2$, $m=1.4$)を用いた。また、間隙水の比抵抗値には $28.5 \Omega m$ を用いた。本手法により求められた間隙率について、容器中の砂層の重量及び体積から求めた間隙率と比較することにより整合性を確認した。さらに、相対密度の計算には、豊浦標準砂の標準的な最大間隙比0.9820及び最小間隙比0.6039を用いた。

試料作製実験では、加振・ボイリング・水中落下方法について検討を行った。図-3に、200gal、5Hz、4秒の加振を加えた際の、加振前及び加振後の深度方向の相対密度を示す。

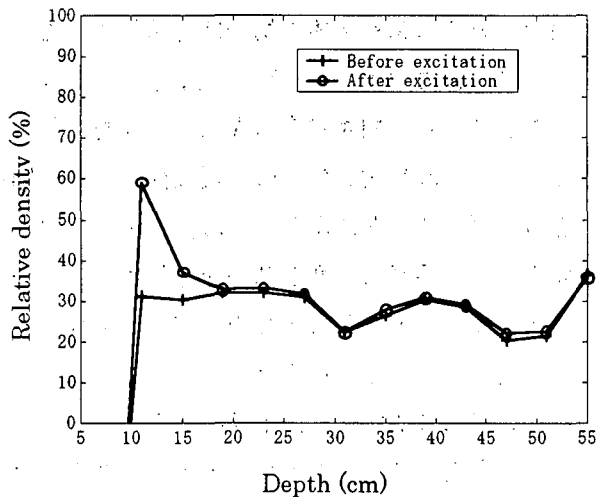


図-3 加振前後の相対密度分布

明らかに浅部の相対密度が変化しているが、20 cm以降の相対密度は変化していないことが分かる。このように、試料に弱震を加えた場合では、表層に近い部分の相対密度が大幅に変化するだけで、深部の相対密度は変化しない。また、加振力を変化させた場合には、加振力の増大に伴い相対密度の変化する深度が深くなっていく傾向が確認された。

以上、作製試料に加振を加えて相対密度を調整する方法では、表層に近い部分の相対密度が大きく変化し、試料は不均一となる。試料全体として見た場合では、砂層表面が沈降し相対密度は増加するが、深い部分の相対密度は依然として変化していないため、均一試料の作製手法としては適していない。

次に、ボイリング及び水中落下法により作製した試料の深度方向の相対密度分布を示す。図中のA～Dは以下の実験条件によって作製された試料である。A) 5 l/min のボイリング後、砂層を攪拌させ、沈降させた場合、B) 5 l/min のボイリング後、一度沈降させ、再度 2.5 l/min のボイリングを加え沈降させた場合、C) 5 l/min のボイリング後、一度沈降させ、再度 1.5 l/min のボイリングを加え沈降させた場合、D) 水中落下の場合。

図-4 から分かるように、この方法において作製した試料の深度方向の相対密度変化は少なく、全深度において相対密度が一定な均一試料ができていると判断される。また、再ボイリングの流量によって、

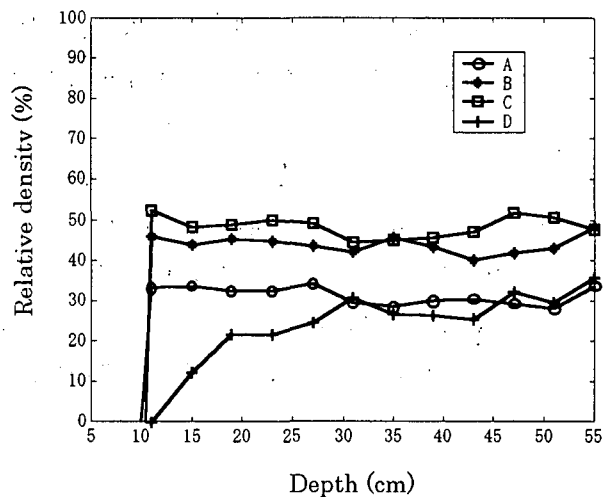


図-4 各種試料作製方法による
垂直方向の相対密度分布

砂層の平均相対密度を30%から50%の間で変化させることができる。

一方、水中落下法で作製した試料は、深部で相対密度が大きく、浅部になるにつれて相対密度が漸減していくという特徴を持つ。

このように、ボイリングを用いた方法は、均一試料を作製するのに適した方法であるといえる。

4. 大型土槽への適用

本実験の結果、比抵抗を用いることにより、作製試料の鉛直方向の相対密度分布を容易に計測できることが分かった。また、ボイリングによる試料作製方法を用いることにより、均一な試料を作製できることが分かった。しかしながら、この方法を大型土槽に適用するためには、いくつかの問題点が存在する。一つには、電流電極の設置方法の問題であり、もう一つはボイリング流量の問題である。今回の実験で用いた電流電極は、試料の上下間に平行電流を流すため、円筒容器の上下に銅網電極を設置している⁵⁾。このような銅網電極は、液状化に伴う基礎杭などへの影響を検討するような実際の土槽実験の際には設置が難しく、より実際の運用に適した電極が必要である。現在、土槽の内壁に導線などを巻いたリング状電極を用いた比抵抗計測法を開発し、中型の土槽（早稲田大学所有；2 m×1 m×0.6 m）で実験を行っているが、このようなリング状電極を

用いれば、電極を土槽壁面にのみ設置することになるので、他の実験設備に影響することなく、実験試料の評価が可能となる。また、せん断土槽にも適用可能である。

また、ボイリングの流量については、今回用いた底面積 0.07m^2 の円筒容器で使用した $5\text{l}/\text{min}$ の流量を例えば、底面積 250m^2 の大型土槽で適用する場合には、約 $18\text{m}^3/\text{min}$ という膨大な流量が必要であり、それ相応の水供給設備が必要となる。

5. まとめ

比抵抗を用いた作製試料評価法は、作製試料の垂直方向の相対密度を直接把握することができ、作製試料の均一性の評価に有効であることを示した。また、比抵抗を用いた方法は、液状化に伴う砂層の相対密度の変化を計測することも可能であり、さらに、比抵抗トモグラフィ等の技術を用いれば、砂層全体の相対密度の分布を計測することが将来的には可能であると考えられる。

また、試料の作製方法についても、ボイリングを用いた方法は試料全体の均一性を確保することができ、また、再ボイリング時の流量をコントロールすることにより、相対密度の異なる試料を作製できることから、液状化実験への支援技術として、期待できる。ボイリングによる手法は、人手をかけずに、効率よく、手軽に何度も試料を作製することができるというメリットがあるため、様々な実験パターンを迅速に行うことが可能となる。しかしながら、ボイリングに必要な流量は土槽の底面積に比例するため、大型土槽では、大容量のボイリング設備などの施設が必要となる。

また、試料の作製方法についても、ボイリングを用いた方法は試料全体の均一性を確保することができ、また、再ボイリング時の流量をコントロールすることにより、相対密度の異なる試料を作製できることから、液状化実験への支援技術として、期待できる。ボイリングによる手法は、人手をかけずに、効率よく、手軽に何度も試料を作製することができるというメリットがあるため、様々な実験パターンを迅速に行うことが可能となる。しかしながら、ボイリングに必要な流量は土槽の底面積に比例するため、大型土槽では、大容量のボイリング設備などの施設が必要となる。

参考文献

- 1) Hamada, M. and O'Rourke, T.D.(Eds): Case study of liquefaction and lifeline performance during past earthquake, Vol.1 Japanese case studies, Technical Report NCEER-92-002, 1992.
- 2) 吉田 望, 永瀬英夫, 三浦均也: 液状化に伴う地盤の流動と解析法(その1), 土と基礎, Vol.47, No.8, pp.47-52, 1999.
- 3) 茂木 透, 佐々宏一: 砂のせん断特性及び透水性と比抵抗, 水曜会誌, Vol.20, No.1, pp.100-108, 1983.
- 4) 茂木 透, 本郷克己, 佐々宏一: 細粒土の電気的特性, 物理探査, Vol.39, No.2, pp.17-27, 1986.
- 5) 神宮司元治, 国松 直: 比抵抗による液状化現象の計測とその評価, 物理探査, Vol.52, No.5, pp.439-445, 1999.