

比抵抗を用いた相対密度分布の計測と大型土槽への適用

神宮司 元治¹, Selcuk Toprak², 国松 直¹

¹工博 独立行政法人 産業技術総合研究所 (〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-1)

²Ph.D Civil Engineering Department, Pamukkale University (20070 Kinikli, Denizli, Turkey)

The estimation of relative density distribution of sand in the large experiment chamber is very important for the check of the uniformity of the experiment sand made in chamber and the elucidation of liquefaction phenomenon. The monitoring method of relative density of sand using resistivity is the technique to measure the distribution of relative density of sand using relationship between resistivity and porosity of sand called Archie's law. In this paper, we conducted the technique developed for chamber test of relative density before and after excitation.

Key Words: resistivity, relative density, distribution, monitoring

1. はじめに

大型振動台をもちいた大型土槽実験は、実大スケールに近い液状化実験が可能であり、均一構造地盤から実地盤に近い層構造をもつ不均一な構造を持つ地盤まで、様々な模型地盤試料を使った実験が可能であると考えられる。しかしながら、これらの層構造を持つ模型地盤試料を作製するためには、模型地盤の制御された作製法とその密度分布の評価が必要である。比抵抗を用いた相対密度分布の計測¹⁾は、大型土槽実験における実験地盤試料の相対密度分布を評価することが可能になると期待される技術であるが、大型土槽へ適用した場合における測定上の不明点も多い。本報告では、建築研究所と合同で行った砂地盤作製実験における、比抵抗による相対密度評価の結果について述べ、比抵抗計測法の大型土槽実験への適用性について論じる。

2. 計測システムとその改良点

今年度の建築研究所での合同実験でも、昨年度と同様に高速比抵抗計測装置を使用した。本装置は、チャンネル数 29、サンプリング速度 1 秒 (1 スキャン) で、32 極の電極のうち 4 極を連続的にスキニングすることが可能であ

る。また、今年度の実験においても、昨年度と同様に土槽内に設置した電極ケーブルを使用した。電極ケーブルの概念図を図 1 に示す。

今年度の実験で使用した電極ケーブルの電極間隔は、昨年度と同じ 15cm 間隔と新たに製作した 10cm のケーブルを使用した。昨年度製作したケーブルは、電極の劣化のため測定不能であったため、今回の計測からは除外した。

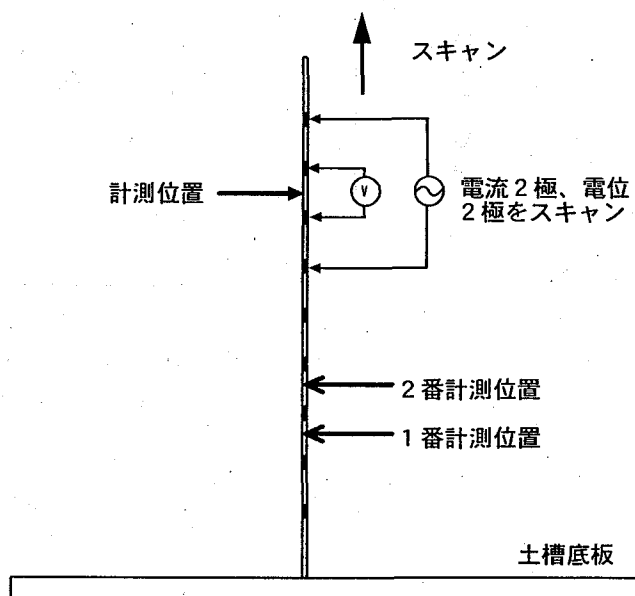


図 1 電極ケーブル概念図

3. 大型土槽実験の概要

今年度も、昨年度と同様に建築研究所の保有する大型金属土槽を使用した（写真 1）。本金属土槽は、長さ 6m、幅 3m、高さ 3m の金属製土槽の矩形土槽であり、土槽上部に、砂撒き装置が設置してあり、砂投入量をコントロールして水中落下で試料を作製することが可能である。今回の実験では、砂層の作製手法の違いを検討するため、砂の種類を変えた 2 ケースの実験を行った。砂の種類は、ケース 1 では珪砂 3 号、ケース 2 では珪砂 7 号である。なお、今回の実験では、ケース 1 では、昨年度使用した 15cm の電極のみを設置して計測を行ったが、電極の劣化に伴うと考えられるデータの異常が発生しており、今回の計測対象から除外した。なお、ケース 2 では、今年製作した新しい 10cm 間隔の電極を追加したが、この電極については問題なく、今回の解析は、この 10cm 間隔の電極で

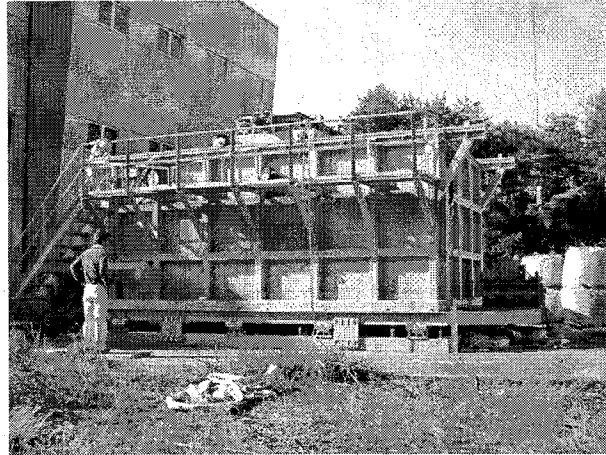


写真 1 実験に使用した大型実験土槽

計測したデータについて解析を行った。ここで、図 2 に本実験で使用した各種センサーと計測孔の位置関係を示す。

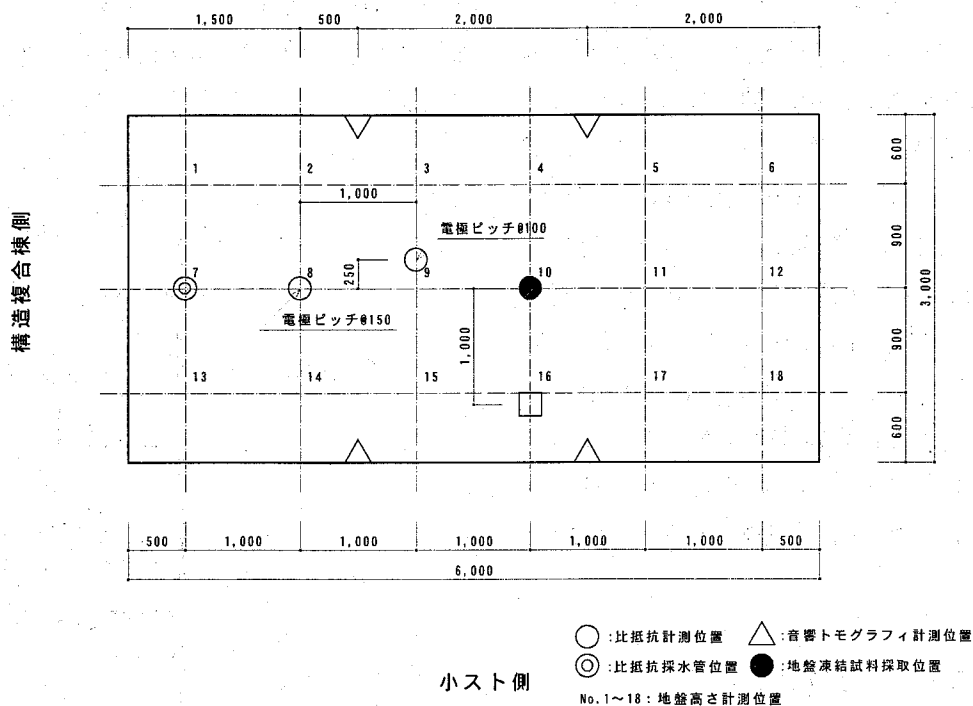


図 2 各種センサーおよび計測孔の配置図

地盤作成法は、水中振動ふるいを介した水中落下法を適用し、トンバックから砂撒き機に直接投入する方法で行った。実験ケースは、珪砂3号（ケース1）と珪砂7号（ケース2）の種類の違う2ケースであるが、前述したように、今回の実験では、昨年度使用した15cm間隔の電極ケーブルに計測異常（比抵抗計測値が安定しない）を起こしていたため、15cm間隔の電極ケーブルを用いた計測結果の解析は行っていない。また、今回の実験では、砂撒き機の投入速度を途中で変え、相対密度のコントロールを行う実験を行った。前回の実験では、投入速度の違いにより15%程度の相対密度の違い（投入速度が速いほうが、相対密度が大きい）という結果が出ており、今回の実験においても投入速度の違いによる差が出る可能性がある。

4. 合同実験の結果とその解釈

合同実験における作製砂層の相対密度分布を算出するため、実験に使用した砂のフォーシヨンファクタ F （砂の比抵抗／間隙水の比抵抗）と間隙率 n の関係をアーチーの関係式に当てはめ、その定数を室内実験によって求めた²⁾。その結果を以下に示す。

$$F = 1.38 n^{-1.11} \quad (1)$$

これらの関係式から砂層の相対密度分布を求める。なお、間隙水の比抵抗値は、砂層中の間隙水の比抵抗値が一定と仮定し、砂層全体の体積を重量から求めた平均相対密度と比抵抗の平均値から求めた平均相対密度が一致するように逆算して求めた $37.8 \ \Omega \cdot m$ を用いた。なお、サンプリングで得られた実測値の間隙水の比抵抗値は、 $42.0 \ \Omega \cdot m$ である。

以上のパラメータを用いて算出した地盤の

密度分布と相対密度分布を示す。

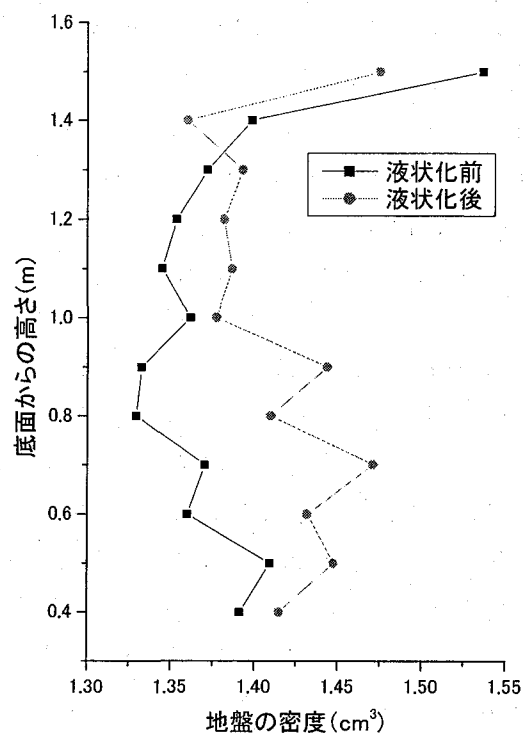


図3 地盤密度の垂直分布

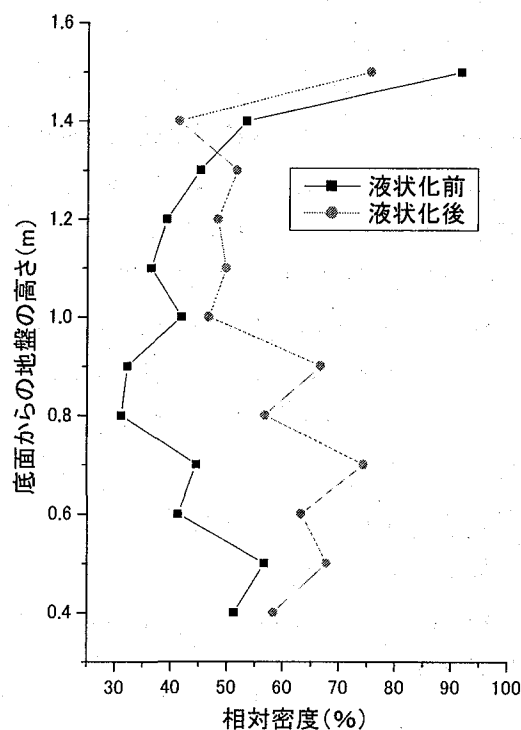


図4 相対密度垂直分布

図中の赤点は、土槽に備え付けた起震機を用いて、模型地盤を液状化させた液状化後の記録である。液状化前の模型地盤の密度および相対密度分布は、底面からの高さ 0.8m までが相対密度 40% から 50%、表層から 30cm 以浅を除く 0.8m 以上では 30% から 40% となっている。表層付近の砂層では、表面をならす際に水抜きを行ったため、地盤の密度および相対密度が大きくなったと考えられる。なお、今回の砂層作製において、砂の投入速度を途中で変えているが、その境界が 0.8m 付近で出ていると考えられる。ただし、相対密度で 10% 程度の違いとあまり大きな差ではないため、今後、凍結サンプリングの結果や小型土槽での投入速度を変えた実験を行うことにより、落下速度が本当に相対密度の分布に寄与するかどうか、確認していく必要があると考えられる。

図 3、図 4 における地盤の密度および相対密度の深度分布は、液状化前後で底面からの高さ 1.0m を境にして大きく異なっている。そこで、比抵抗、地盤密度、相対密度について、変化量を初期値で除した変化率に換算し、その結果を図 5 に示す。図中で黒■が比抵抗の変化率、赤●が相対密度変化率で青▲が地盤密度の変化率である。全ての変化率について、1m を境にその上部と下部で大きく変化率が異なり、模型地盤の上部で液状化に伴う地盤密度および相対密度の変化が小さい。この結果は、砂層の収縮率が模型地盤の上部で小さかったことを意味しているが、この原因を明らかにするため、図 6 に相対密度の時間変化を示す。

図 6 を見て明らかなように、底面からの高さ 1m を境にして、その上下で相対密度の変化の幅が異なっている。

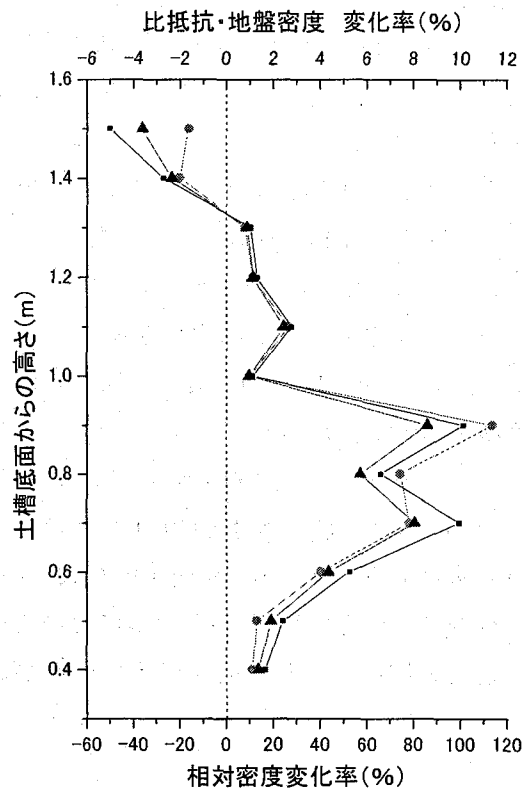


図 5 比抵抗・地盤密度・相対密度の変化率垂直分布

また、その時間変化は、比抵抗の変化が始まって、約 150 秒後に終了している。この時間は、液状化が始まってから終了するまでの時間とほぼ等しいと考えられる。すなわち、底面からの高さ 1m を境界として、その上下で変化の幅が異なる原因は、砂層の収縮が上部に達する前に、加振を終了させてことが原因と考えられる。これまでの実験では、加振後も砂層の収縮が持続する例もあったが、今回のケースでは、加振の終了と同時に砂層の収縮が終了していると考えられる。

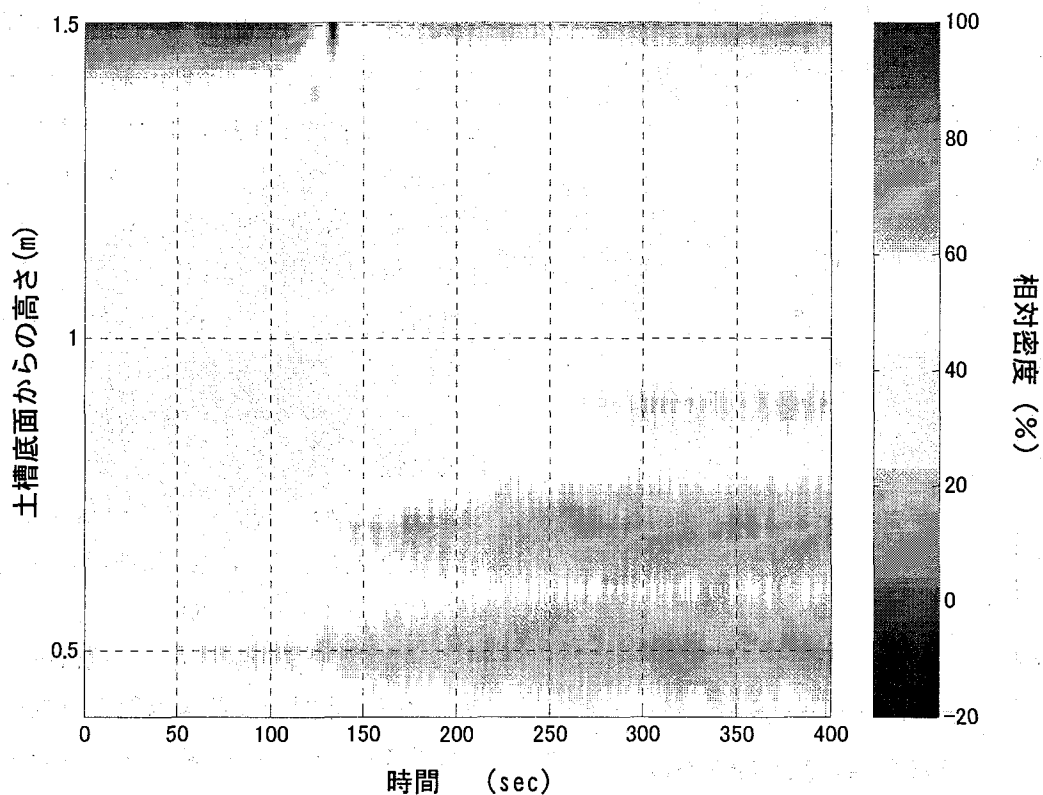


図 6 相対密度の時間変化

このように、比抵抗による相対密度の計測は、液状化前後の砂層の相対密度の変化だけでなく、その時間変化も把握することが可能である。今回の実験結果においては、模型地盤の上部で、相対密度の増加はあまり大きくなく、再加振による再液状化の可能性があると考えられる。

ところで、図 5 に示された比抵抗および地盤密度の変化率を詳しく見てみると、それらの分布がほぼ等しいことが分かる。比抵抗から地盤の密度への変換は、(1) 式に示される比抵抗と間隙率の変換式と砂粒子の密度を用いて換算しているが、比抵抗の変化率と地盤の密度の変化率がパラメータに依存せず同じ値をとるのであれば、比抵抗の変化率を地盤の密度の変化率とみなすことが可能である。

そこで、比抵抗から地盤密度への変換で、差異が発生すると考えられるアーチーの式のパラメータを考えてみる。変化率に影響を及ぼすと考えられるパラメータは、間隙率の累乗に関わる係数、つまり (1) 式の 1.11 で示されている係数であるが、これを 1.5 に変更してみる。なお、従来、様々な砂で実験し、比抵抗と間隙率の間の関係式についてこのパラメータを算出してきたが、ほぼ 1.0 から 1.5 の間に収まることが分かっている。ここで、図 7 に比抵抗から地盤密度への変換に使われるパラメータを変更した場合の比抵抗変化率分布と地盤密度変化率分布の関係を示す。

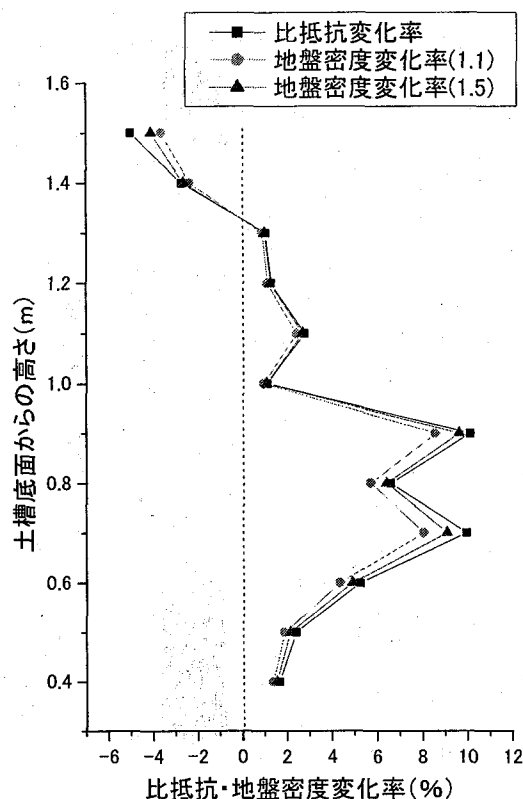


図7 変換パラメータを変えた場合における
比抵抗・地盤密度の変化率 垂直分布

図7を見て分かるように、パラメータを変更しても、比抵抗と地盤密度変化率には大きな差異がなく、比抵抗の変化率は、地盤密度の変化率とみなすことができる。これらの関係は、今後の室内大型実験や屋外実験において、比抵抗法を用いる上で有益と考えられる。

5. まとめ

大型模型地盤の相対密度分布の評価に比抵抗を用いて評価する方法について検討を行った。その結果、電極ケーブルを用いて地盤の密度および相対密度の深度分布を求める事が十分可能であることを示すことができた。比抵抗を用いた方法は、液状化前後の相対密度の変化だけでなく、液状化中の時間変化も計測するこ

とが可能であるため、初期相対密度分布の確認だけでなく、液状化状態の把握にも有効な測定方法でもあると考えられる。特に、今回の検討により、比抵抗と地盤密度の変化率が、比抵抗から間隙率への変換パラメータに依存せず、ほぼ同じ値を示すことが明らかになった。この特性は、今後の室内大型実験や屋外実験において、比抵抗法を用いる上で有益と考えられる。

参考文献

- 1) 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, 第52巻, 第5号, pp.439-445, 1999.
- 2) 神宮司, 国松, 泉, 望月: 比抵抗を用いた液状化時の相対密度遷移過程の可視化およびその考察, 土木学会論文集, No.680/III-55, pp.201-209, 2001.