

# 比抵抗を用いた大規模模型地盤の分布評価および 液状化状態における砂層収縮状態の計測

神宮司 元治<sup>1</sup>, 国松 直<sup>1</sup>, Selcuk Toprak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>Ph.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 measurement method of relative density of sand using resistivity is the technique to measure the distribution of relative density of sand and its changes during liquefaction state using relationship between resistivity and porosity of sand called Archie's law. In this paper, we introduce the technique developed for chamber test of relative density.

**Key Words:** resistivity, relative density, distribution, monitoring

## 1. はじめに

大型模型地盤の作製において、土槽内の相対密度分布の計測および砂層収縮状態の計測は、地盤作製手法の評価や液状化現象の解明を行う上で重要と考えられる。比抵抗を用いた砂層の相対密度計測法は、砂層の間隙率と比抵抗の間に成り立つ、Archieの式の関係を利用して、液状化砂層の相対密度の分布を、砂層を破壊することなく非破壊で計測する技術である<sup>1)</sup>。本報告では、平成14年の8月から10月にかけて(独)建築研究所で行われた大型土槽実験における実験結果について報告する。

## 2. 原理および計測システム

本実験は、チャンネル数29、サンプリング速度2秒(1スキャン)で、32極の電極のうち4極を連続的にスキヤニングすることが可能なリアルタイム比抵抗計測装置を使用した。本実験で使用した電極ケーブルの概念図を図1に示す。

本実験で使用した電極ケーブルの電極配置は、15cm間隔である。そのうちの4極の電極を1セットとして、外側2極を電流電極、内

側2極を電位電極として用い、この4極の電極セットを高速度で下部から上部に向けてスキヤニングすることにより、ケーブル周囲の深度方向の比抵抗分布を計測する。

このようにして得られた電流・電位の計測結果から比抵抗を算出し、ケーブル周囲の垂直方向の比抵抗分布を計測する。

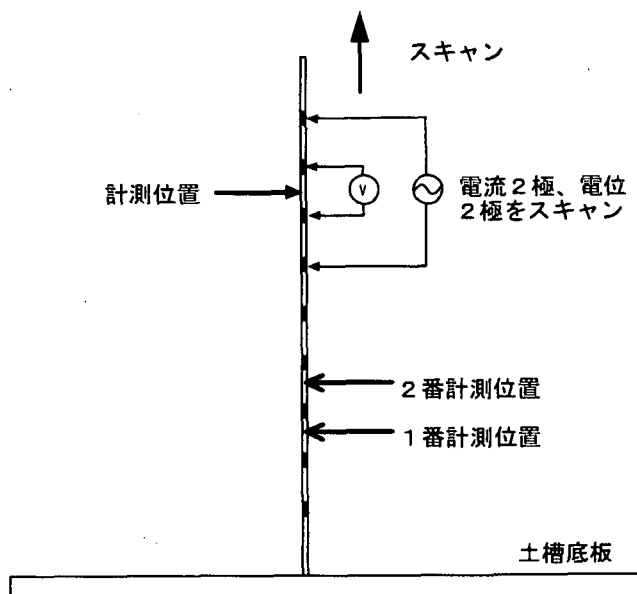


図1 電極ケーブル概念図

算出された比抵抗は、ほぼ電極間隔を直径とする球内の砂層の平均的な値である。

比抵抗値から相対密度への変換については、(1)式に示す Archie の式を利用することにより行う。

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

ここで、 $\phi_t$  は砂の比抵抗、 $\phi_w$  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。ここで、実験中に間隙水の比抵抗が求められれば、砂層の比抵抗から相対密度を算出することができる。

### 3. 大型土槽実験の概要

本実験は、水中落下法における砂層作製手法について行った実験で、長さ 6m、幅 3m、高さ 3m の金属製土槽の上部に、試作された砂撒き装置を設置し、効果確認のための砂層作製を行った。実験では、土槽上部に設置した砂撒き装置から砂を投入し、砂層作製を自動化することにより、砂層作製の高速化および作製砂層の相対密度の制御について検討した。今回の実験においては、砂層の作製手法の違いを検討するため 5 ケースの実験を行った。ケース 1 からケース 3 までは、乾燥砂を用い、ケース 4 およびケース 5 については、湿潤砂(再利用砂)を用いた。なお、実験ケース 1 は砂撒き機を使って砂層を作製した実験、ケース 2 は砂撒き機を使わずに砂層を作製した実験、ケース 3 は、砂層の下盤を起振機を用いて締め固めた実験である。実験に使用した砂は、日光珪砂 5 号である。その物理試験結果を表 1 に示す。比抵抗計測は、土槽内に、図 1 に示すような、電極ケーブルを配置して計測を行った。また、図 2 に電極ケーブルの設置位置を示す。なお、本実験では、比較検討のために、各種センサーを配置し、凍結サ

ンプリングによる各深度での相対密度の実測についても行った。

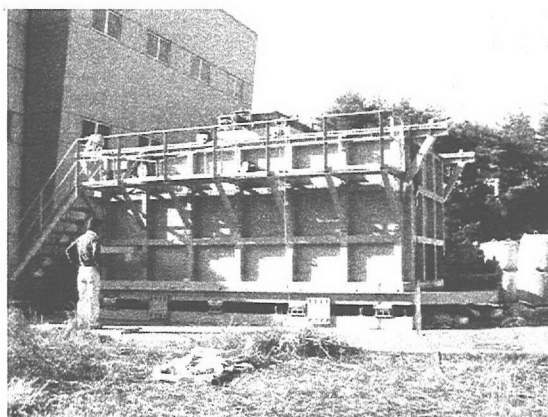


写真 1 大型土槽実験装置

表 1 実験砂の物理試験結果

土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.666
粗砂分 0.425~1mm (%)	48.7
細砂分 75 $\mu$ m~0.425mm (%)	49.6
シルト分 5~75 $\mu$ m (%)	1.7
均等係数 $U_c$	1.89
曲率係数 $U_c$	0.92
D50 mm	0.418
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.621
最小乾燥密度 $\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.342

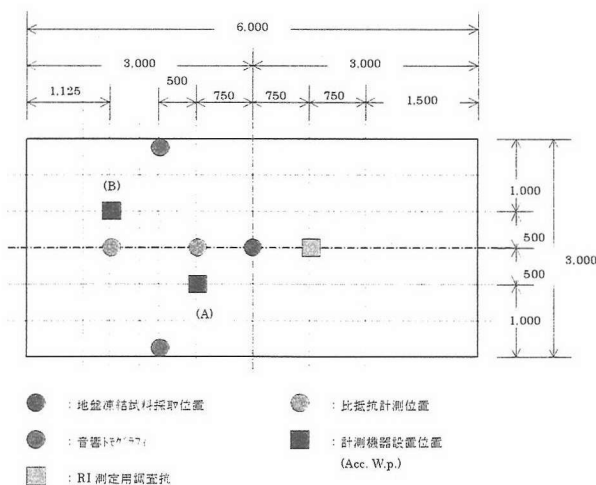


図 2 各種センサーおよび計測孔の配置図

#### 4. 砂層の比抵抗と相対密度への変換

図 3 に、今回の実験で計測されたケース 1 からケース 4 の深度ごとの比抵抗分布を示す。

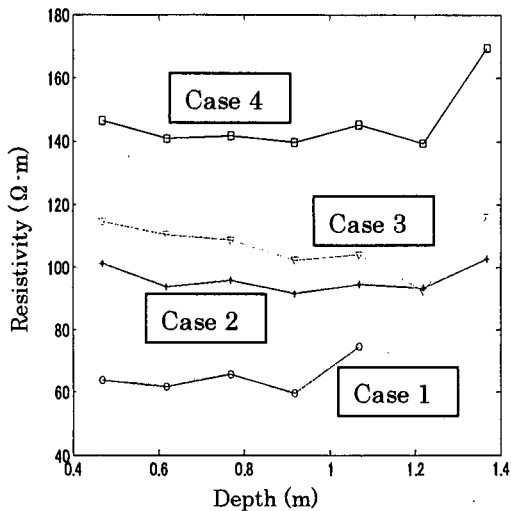


図 3 各実験ケースにおける比抵抗分布測定結果

各実験ケースで、比抵抗値の絶対値が大きく異なっているが、これは、間隙水の比抵抗が実験ケースにより大きく異なることに起因する。今回の実験では、実験に使用した水に消火栓の水を利用したが、消火栓に使われている地下タンクが長期間使用されていなかったために、タンク内の金属イオンが水に溶け出し、間隙水の比抵抗値を低下させたと考えられる。なお、本実験では、間隙水の比抵抗値を、深度毎にサンプリングすることによって計測したが、間隙水の比抵抗は、実験を重ねるごとに大きく増加している。また、いずれの実験ケースにおいても、浅部の比抵抗値が大きな値として現れているが、今回の実験では、水位面が表層より若干下がっていることから、その影響が表れていると考えられる。

これらの比抵抗計測の結果から、(1)式を用いて、間隙率の値に変換するが、そのためには、

(1)式中の実験定数  $a$  ,  $m$  を求める必要がある。図 4 は、室内実験において求めた日光珪砂の間隙率とフォーメーションファクタとの関係を示した図である。実験では、直径 5cm、高さ 30cm の小型容器を用い、水中落下で砂試料のサンプルを作製し、側面を打撃することによって間隙率を変え、砂層および間隙水の比抵抗からフォーメーションファクタを求めた。

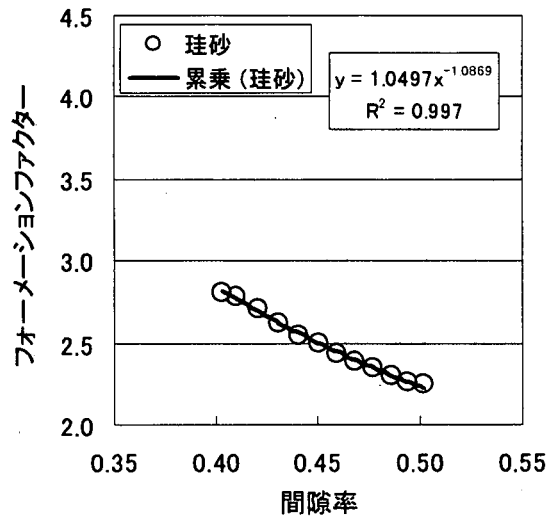


図 4 日光珪砂の間隙率とフォーメーションファクタとの関係

以上の関係から、(1)式への最小二乗近似を行った。定数  $a$  ,  $m$  の値は、1.05 および 1.09 と求められた。

これらの定数から相対密度への換算を行うが、ケース 4・5 のデータでは、求められる地盤の密度値が異常な値となり相対密度の換算ができなかった。その理由として、湿潤砂(再利用砂)では、用いた砂粒子の粒子破碎などの影響で、上記の定数  $a$  ,  $m$  の値が変わってしまったことが考えられる。今回の実験では、湿潤砂(再利用砂)のサンプリングを行っていないため、ケース 4・5 の相対密度への変換は行

っていない。ここで、図5に計測された比抵抗値から換算した各深度での密度分布を示す。また、図6には、地盤密度から、物理試験結果を用いて算出した相対密度分布を示す。

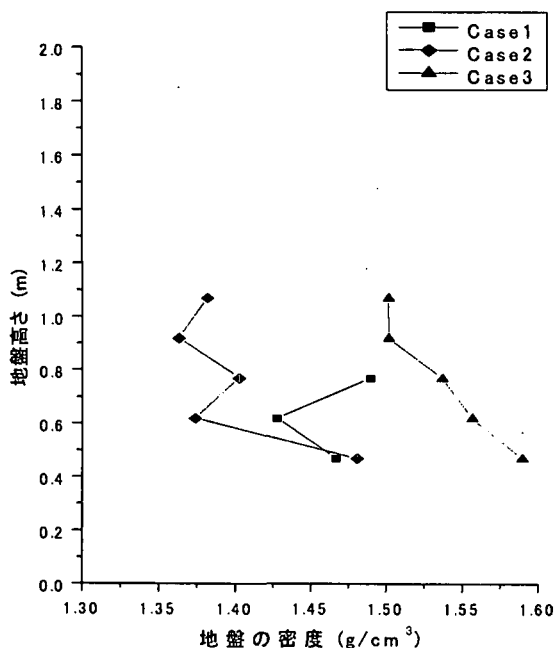


図5 比抵抗値から換算した地盤密度分布

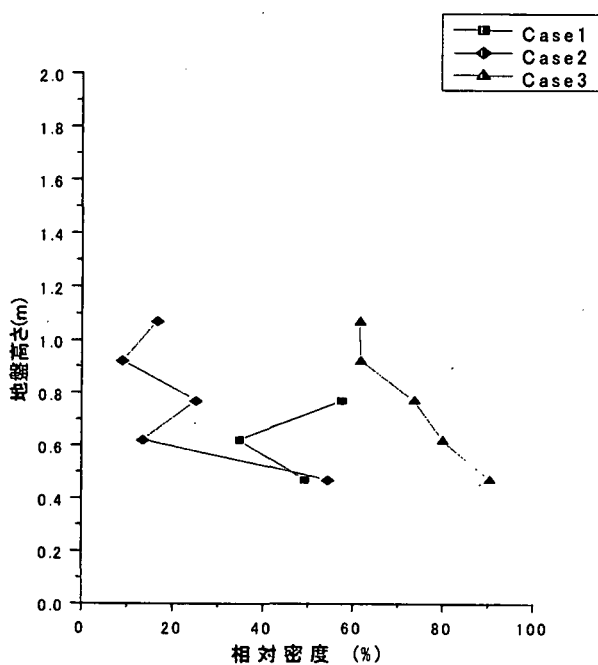


図6 比抵抗値から換算した相対密度分布

なお、今回の実験では比抵抗測定と同時に凍結サンプリングによる深度方向の相対密度の計測についても行ったが、その結果を図7および図8に示す。

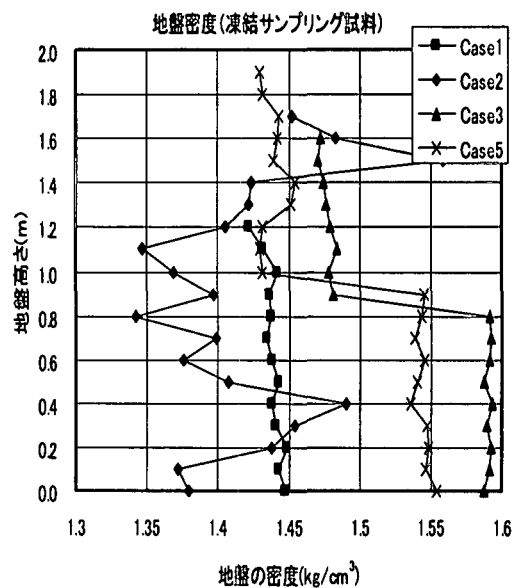


図7 凍結サンプリング試料による地盤密度分布

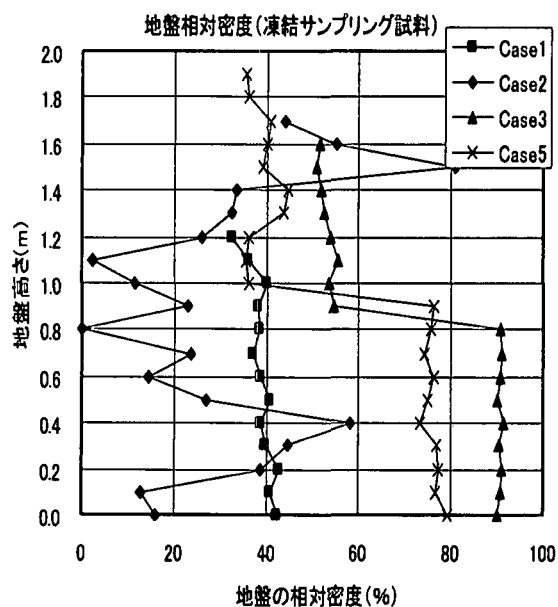


図8 凍結サンプリング試料による相対密度分布

凍結サンプリング試料による結果では、ケース1とケース2で相対密度のばらつきに大きな差がでており、ケース1の砂撒き機を使った結果では、相対密度のばらつきが極めて小さく、深度方向に均一な結果が得られている。これと比較して、比抵抗値から換算した相対密度分布は、ケース1とケース2で、ばらつきに大きな差はなく、ほぼ10%程度の範囲でばらついている。凍結サンプリングの結果と比較して比抵抗の計測結果が大きくばらついた原因として、今回の実験に使用した間隙水の比抵抗値が低いため、実験の初期のケースにおいて、計測された比抵抗値が小さく、電極間の電位差が小さくなることにより、S/N比が劣化したことが考えられる。

### 5. 液状化時の比抵抗変化

比抵抗計測では、砂層作製時の比抵抗相対密度分布の計測だけでなく、液状化時においても、その変化を計測することが可能である。図9は、室内実験で行った液状化時の比抵抗変化である<sup>2)</sup>。砂層の下部から比抵抗の増大、つまり密度の増大が起こり、上部に向かって進展していく様子を示している。

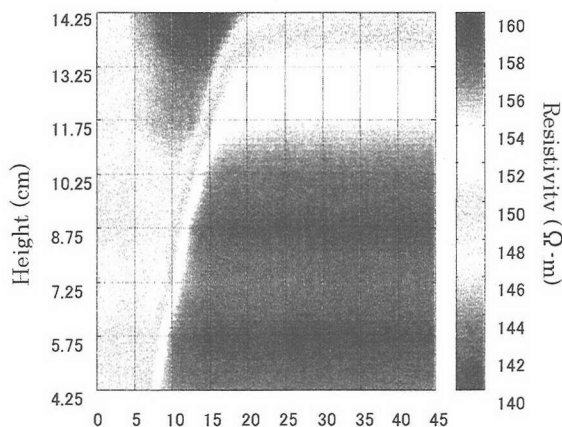


図9 室内実験における液状化時の比抵抗変化

また、図10は、図9における初期の比抵抗値を基準とした、比抵抗の時間変化である。さらに、図11に、今回の実験ケース4における液状化時の時間変化を示す。今回の実験においても、室内実験と同様に明瞭な砂層の収縮が観測された。

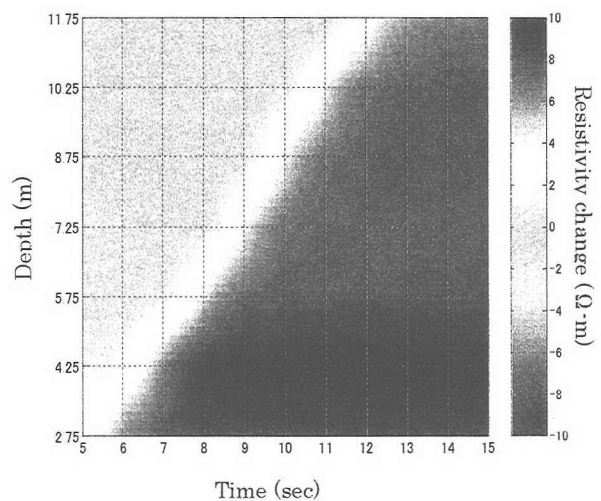


図10 室内実験における初期比抵抗を基準とした液状化時の時間変化

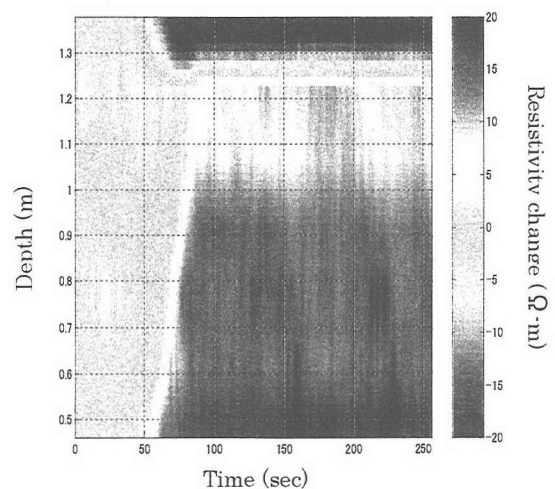


図11 本実験における初期比抵抗を基準とした液状化時の時間変化 (ケース4)

## 6. まとめ

(独) 建築研究所で行われた土槽作製方法を検討する実験において、作製された土槽の初期状態を評価するために、作製時の比抵抗分布および液状化時の比抵抗変化についての計測を行った。また、室内実験において相対密度への変換に必要な Archie の式の定数の取得を行った後、相対密度への変換を行った。また、比抵抗測定と同時にを行った凍結サンプリングの直接測定との比較を行った。その結果、比抵抗計測の結果は、相対密度の深度分布の値の傾向については、ほぼ等しいもののその他については10%程度のばらつきが生じていることがわかった。この原因としては、今回の実験に使用した間隙水の比抵抗値が低いため、計測された比抵抗値が著しく小さく、検出される電位差が小さくなり、S/N 比が低下したためと考えられる。

今後の精度向上のために、電極を含む計測システムや電流密度の改善などが上げられる。

また、本実験においても加振時の比抵抗変化について、検討を行った。その結果、ケース4において室内実験と同様な明瞭な砂層収縮面が観測されており、均一な砂層では、室内実験と同様に、砂層の収縮が土槽の下部から生じ、上部に向かって進展していくことが分かった。

## 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.