

比抵抗を用いた液状化地盤のモニタリング手法と 大型土槽への適用方法

神宮司元治¹・国松 直¹・泉 博允²

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)

Abstract: To interpret liquefaction phenomenon in more detail, we use the resistivity monitoring technique. By using the technique, we can estimate the homogeneity of the produced soil ground in a chamber and also observe the sedimentation process in liquefaction phenomenon. However, various technical examinations are required to apply the technique to an experiment using a large-sized liquefaction experiment system. We describe the various resistivity monitoring technique for liquefied soil ground in the liquefaction experiment system and discuss about the technical applicability for the experiment in this report.

1. はじめに

液状化現象に伴う地盤および構造物の破壊現象を解明するためには、液状化時の地盤の特性を理解することが重要である。比抵抗を用いた液状化試料のモニタリングは、液状化に伴う砂層の相対密度の変化を観測することができるため、液状化に伴う砂層の再堆積過程を直接観測することが可能である¹⁾。また、水中落下等の試料作成方法により作成した砂試料の均一性を評価することも可能である²⁾。一方で、液状化層の収縮面上昇速度³⁾は、砂層の透水係数や相対密度に依存し、液状化の継続時間を推定する上で重要なパラメータになるものと考えられ、大型土槽での実験において、検討する必要があると考えられる。しかしながら、比抵抗を用いた液状化モニタリング技術を大型土槽に適用するためには、電極の配置方法等の計測手法に改良が必要である。本報告では、比抵抗による液状化地盤

のモニタリングの手法について述べ、次に、大型土槽への適用方法について言及する。

2. 比抵抗による液状化地盤のモニタリング手法

比抵抗による液状化地盤のモニタリングは、液状化現象に伴う砂層の収縮を相対密度の変化として、比抵抗を用いることにより計測する。間隙水の比抵抗が既知である場合、飽和砂層と比抵抗の間には、Archieの式⁴⁾で表せる関係が成り立ち、飽和砂層の相対密度と比抵抗との関係を事前に調べておくことにより、計測した飽和砂層の比抵抗値から間隙率を算出することが可能である。砂層の比抵抗は、土槽もしくは、砂層内に配置した電極から計測され、空間的な分布として計測することが可能である。

比抵抗による液状化地盤のモニタリング手法には、電極の配置方法や計測方法によって

異なるが、以下の3つの手法に大きく分類される。

- 1) 土槽全体を大きな容器とみなし、土槽全体に電流を流して土槽の1次元深度方向の平均的な比抵抗を計測する方法。
- 2) 屋外電気検層と同様な方法で、土槽内の砂層に検層ケーブルを設置して、検層ケーブル周囲の比抵抗を計測する方法。
- 3) 土槽の側面あるいは、土槽内部に複数の検層ケーブルを配置して比抵抗トモグラフィーを行う方法。

ここで、1)の手法の模式図を図1に示す。本手法は、図1に示すように土槽を断面積の変わらない容器と見なし、土槽の上下から一定の平行電流を流し、容器の側面に配置した点あるいは線状の電位電極にて電位を計測し、流した電流値と計測した電極間の電位差から比抵抗を計測する方法である。本手法では、垂直一次元方向の平均的な比抵抗分布をリアルタイムに計測することが可能である。本手法では、計測にあたって電流電極を切り替える必要がないため、高速のサンプリングが可能である。また、土槽全体に電流を流すことが必要であるため、大型土槽などでは、十分な電流密度を得るために、大電流を流す必要がある。

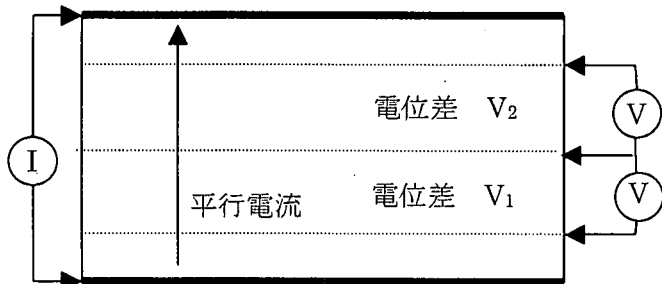


図1 土槽全体に平行電流を流す方法

2)の手法は、比抵抗電気検層と同様に、検層ケーブルを液状化砂層に埋設し、検層ケーブルを用いて砂層比抵抗の計測を行う方法

である。図2に検層ケーブルを用いた比抵抗モニタリング手法についての模式図を示す。検層ケーブルを用いた方法では、ケーブル内の電極4極を用いて、電位電極2極を挟む上下2極の電流電極から電流を流し、電位電極の電位差を計測することで、流した電流値と電位電極間の電位差から電位電極の間の比抵抗を計測する。この4極の電極セットを切り替えることにより、電極間隔程度のケーブル近傍の比抵抗を計測することが可能である。検層ケーブルを用いた方法は、電流・電位電極を切り替える必要があるため、1)の方法に比べて、測定時間がやや長くなる。

また、検層ケーブルを用いた方法では、ケーブル近傍の比抵抗を計測するため、通電に必要な電流値は小さく、また、土槽の形状や大きさなどの依存性はない。

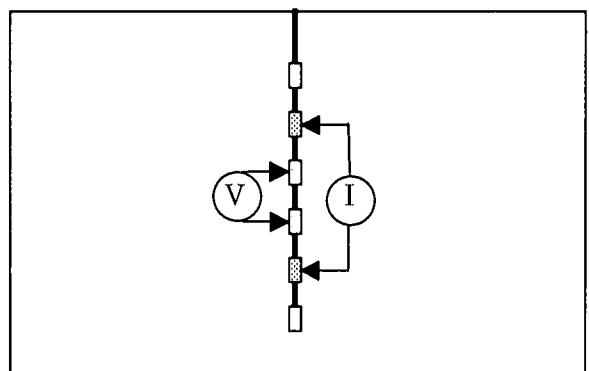


図2 検層ケーブルを用いる方法

3)の方法は、土槽側面などに電極を多数配置して行う比抵抗トモグラフィーの方法である。比抵抗トモグラフィーでは、多数の電極セットの計測を行い、取得したデータのインバージョンを行うことにより、土槽内の比抵抗分布を2次元あるいは3次元で取得する事が可能である。

表1にこれら三つの手法の利点・欠点を示す。表1に示したように、これらの方法は、様々な特徴があり、用途に合わせた計測を行う必要がある。

表1 比抵抗計測手法の比較

手法	利点	欠点
1) 土槽全体に平行電流を流す方法	電流電極の切り替えが不要であり、高速な計測が可能で、リアルタイムでの計測が可能である。	1次元深度方向の計測に限定される。土槽全体に電流を流す必要があるため、大電流が必要である。
2) 検層ケーブルを用いる方法	電流・電位電極の切り替えが必要であるが、リアルタイムでの計測が可能である。土槽に電極を配置する必要がないので、計測にかかる制限が少ない。	検層ケーブル周囲の比抵抗を計測するため、局所的な影響を受けやすい。液状化における検層ケーブルの影響も考慮する必要がある。
3) 比抵抗トモグラフィによる方法	土槽内比抵抗の3次元分布が計測できる。	データ量が膨大になるのでリアルタイム計測は難しい。比抵抗分布を求めるため、インバージョンを行う必要があり、データ解析が煩雑である。

3. 大型土槽への適用方法

比抵抗計測法の大型土槽への適用については、土槽の種類や電極のレイアウトなど、様々な条件に基づいて適切な計測を行う必要がある。2. で挙げた計測法のうち、リアルタイム計測が可能なのは、1) 土槽全体に平行電流を流す方法および2) 検層ケーブルを用いる方法である。1) 土槽全体に平行電流を流す方法では、土槽全体を大きな容器と見なし、土槽全体に平行電流を流すことにより計測を行う。今、土槽の断面積を S 、液状化砂層の比抵抗を ρ 、土槽の電極間隔を l 、電極間の電位差を V とした場合、土槽に流す電流値を I は、(1) 式のように示される。

$$I = \frac{VS}{\rho l} \quad (1)$$

ここで、断面積 100m^2 の大型土槽とし、砂層の比抵抗を $80\Omega \cdot \text{m}$ 、電極間隔を 20cm 、十分な S/N 比が得られる電極間の電位差を 300mV とすることとすれば、土槽に流す電流値は、 1.9A となる。

しかしながら、土槽全体に電流を流す手法は、図1に示したように、土槽の上下に銅網などの電極を配置することにより、平行電流を流すが、土槽底面の下部はともかく、土槽上部では、他の計測用ケーブルなどの障害物があるため、銅網電極等の平行電流源の設置が困難である。これらの問題を解決するため、図3に示すような線状電流源を用いた計測法について小型土槽を用いて実験を行った。その結果、線状電極源の極めて近傍では、計測は困難であるが、線状電極から電位電極が離れるにつれて、電流源の影響が急速に小さくなり、実用上問題ないことを確認した。

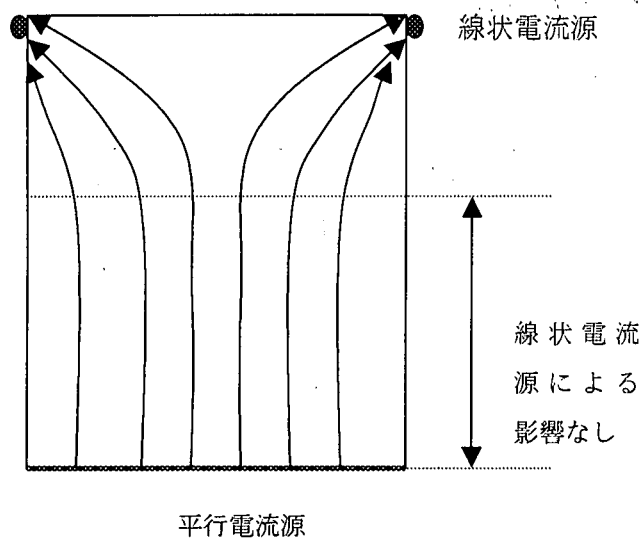


図3 線状電流電極を用いた計測

また、2) 検層ケーブルを用いた方法では、土槽全体に電流を流すのではなく、検層ケーブルを用いて、局所的に電流を流す。そのため、1) の方法と比較して、大電流を流す必要がなく、また、土槽全体にわたって電極を配置する必要がないので、計測時の制限が少ないという特徴を持つ。例えば、ウエンナー配置の4極法を想定した場合、液状化砂層の比抵抗を ρ 、検層ケーブルの電極間隔を l 、電極間の電位差を V とした場合、流れる電流値 I は、(2)式のように示される。

$$I = 4\pi l \frac{V}{\rho} \quad (2)$$

砂層の比抵抗を $80 \Omega \cdot \text{m}$ 、電極間隔を 20cm とし、十分なS/N比を得が得られる電極間の電位差を 300mV とすることとすれば、土槽に流す電流値は、 8mA となる。

このように、検層ケーブルを用いる方法では、検層ケーブル周囲の比抵抗の計測に限定されるが、土槽に流す電流値は上記の試算のように非常に小さく、他の測定装置に与える影響などをほとんど考慮する必要がない。検層ケーブルの設置についても、制約が少ないため、大型土槽での実験には向いていると考えられる。

4. まとめ

本報告では、比抵抗を用いて、大型土槽内での液状化地盤の現象をモニタリングするための、計測手法の種類およびそれらの大型土槽への適用方法について論じた。

現在、小型土槽を用いて、これらの手法の大型土槽での適用を考慮した土槽実験を行っている。

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) 神宮司元治, 国松 直, 泉博允, 望月智也: 均一土槽実験試料の作成方法及び比抵抗を用いたその評価方法, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム, pp.71-74, 2000.
- 3) 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, 投稿中.
- 4) 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, 第20巻, 第1号, pp.100-108, 1983.