

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

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 安全工学部(〒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) 技術研究所 土木研究部(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

³正会員 (株) 篠塚研究所(〒160-0023 東京都新宿区西新宿 4-5-1 幸伸ビル新宿 3F)

液状化現象を理解する上で、液状化現象における相対密度変化の観測は、砂層中の粒子構造の変化を把握するのに極めて有効な手法であると考えられる。比抵抗を用いた砂層相対密度の計測は、砂層の相対密度の変化を直接観測することができ、また多点に電極を配置することで、相対密度分布をイメージとして捉えることが可能である。そこで本研究では、垂直方向に多数の電極を配置した円筒土槽を用い、相対密度の可視化手法について検討を行った。その結果、液状化現象に伴い発生する、体積収縮が急激に起きる砂層収縮面の存在を確認した。

Key Words: liquefaction, visualization, relative density, resistivity

1. はじめに

液状化現象は、緩い砂層が地震動により繰り返しせん断力を受け、次第に粒子のかみ合わせがはずれ、粒子構造が破壊されていく過程で生じる現象であると考えられている¹⁾。また、砂層が上向き浸透流により液状化状態となる現象は、ボイリング現象として良く知られている。これらの液状化現象は、砂粒子間の結合の構造変化により引き起こされると考えられている。従って、砂層中の相対密度変化の観測は、このような粒子構造の変化を考察する上で極めて重要である。砂層中の相対密度の分布及びその変化の計測が可能となれば、液状化現象のメカニズムをより深く理解することが可能になると考えられる。

従来、液状化現象を観測する方法としては、主に間隙水圧の計測が行われてきた。一方、砂層の間隙率及び相対密度を直接観測することができ、多点で分布計測できる比抵抗を用いた手法²⁾は、液状化状態に伴う砂粒子の相対密度の時間変化を観測し、分析する上で有効な計測手法であると考えられる。また、本手法は、液状化現象に伴う相対密度の分布及び時間変化を計測し、描画することが可能であり、液状化現象の可視化手法として考えることができる。

本研究では、垂直方向に多数の電極配置した円筒容器を用いて、加振時における土槽垂直方向の砂試料の比抵抗計測実験を行った結果及び、その結果観測された砂層収縮面とその挙動に関して考察した結果について述べる。

2. 比抵抗計測値から相対密度への変換方法

本研究では、液状化現象に伴う砂層の間隙率の変化によって変化する比抵抗を、ある一定深度毎及び時間毎に計測することにより、その値を時間変化に伴う相対密度の分布へ変換する。以下にその変換方法を述べる。

間隙率と比抵抗値との間には、あまり比抵抗値が大きくないクリーンサンドにおいては、以下に示す Archie の式が成り立つことが知られている³⁾。

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

ここで、 ϕ_i は間隙水を含む砂の比抵抗、 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。

ϕ_i と ϕ_w の比は、フォーメーションファクタ (F) と呼ばれる値である。実験によって求められる定数 a 、 m については、茂木・佐々⁴⁾ によって詳細な実験が行われており、図-1 のような結果が得られている。

図-1 から分かるように、間隙水の比抵抗値が既知で実験中に変化しないと仮定でき、あらかじめフォーメーションファクタと間隙率との間の定数を求めておけば、飽和砂層の比抵抗値から砂層の間隙率 n を求めることが可能である。また、本研究では、動的な振動下においても式(1)が成り立つと仮定している。なお、クリーンサンド以外でシルトを含む砂層などでは、上記の Archie の関係式が

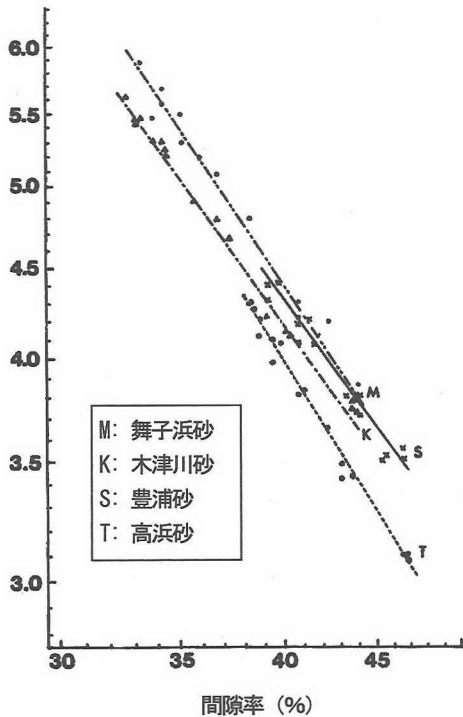


図-1 フォーメーションファクタと間隙率との関係⁴⁾

適合しないことが半明している⁵⁾。しかしながら、この場合でも、室内実験によって間隙率-比抵抗曲線を求め、比抵抗値を間隙率へ変換するための近似曲線を求めておけばよい。実現場から採取した砂試料を用いる場合には、実験により間隙率-比抵抗曲線を求める必要があるが、本研究では豊浦砂を用いたので、Archieの式が成立するものとし、茂木・佐々⁴⁾によって得られた定数を適用した。なお、今回の実験に使用した豊浦砂について、茂木ほかによる結果と整合することを確認している。

また、間隙率が求められれば、間隙比が算出でき、その砂試料の最大間隙比及び最小間隙比から、砂試料の相対密度を求めることができる。

以上の手順により、実験時に計測した比抵抗を相対密度へ変換した。

3. 多点電極配置円筒実験容器を用いた実験概要

上記に示したように、砂試料の比抵抗を計測することで砂試料の相対密度を計測することが可能である。そこで、図-2に示すような多点電極円筒実験容器を製作し、円筒容器側面に配置した多点の電極を用いて垂直方向の比抵抗変化について計測を行った。

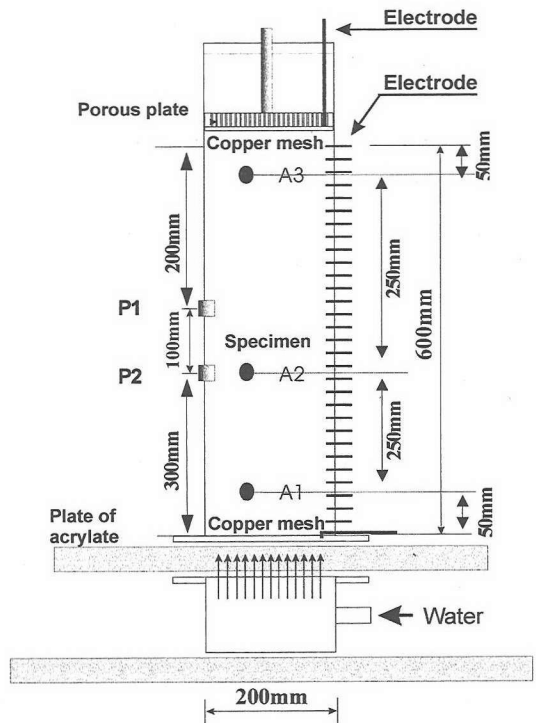


図-2 多点電極円筒実験容器

円筒容器側面には、30本の電位電極を2cm毎に配置し、電極間隔が4cmとなるように15本の電極を使用して計測を行った。そのため、比抵抗計測の深度方向の分解能は4cmである。また、円筒容器上面と下面には、銅網電極を設置し、電流電極として用いた。さらに、円筒容器中央部には、10cm間隔で2個の間隙水圧計(P1, P2)(共和電業製PGM-02KG)を深度20cmおよび30cmに配置した。比抵抗計測器には、電流極を固定し、電位極を高速で切り替えられる高速15チャンネル連続比抵抗計測器を使用した。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リアルタイムに計測することが可能であり、測定精度は約0.1%程度である。また、電流電極としては、上部と下部の銅網を使用し、両電極間に交流電流を流すことにより、垂直方向に設置された電極を使って砂試料の電極間の電位差を計測し、電極間隔と電位差および電流値から比抵抗を計測した。また、起振機には、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。本起振機は、水平1次元の起振機である。

さらに、本円筒容器下部には、分散板(パールコン)を設置し、作製試料の相対密度はボイリングにより調整した⁶⁾。

試料の垂直方向における相対密度の均一性は、垂直方向の比抵抗分布により評価した⁶⁾。なお、円筒容器の基部(A1)、中部(A2)および上部(A3)の容器外部には、加速度

表-1 実験条件

	加速度 (cm/s ²)	初期比抵抗 ($\Omega \cdot m$)	初期相対密度 (%)	周波数 (Hz)	加振時間 (s)
Case 1	200 300 400 600	99.3	31	5	4
Case 2	600	99.3 104.7 106.4	31 43 48	5	4
Case 3	400	101.0	34	5	90

計を取り付け、加振の際の各位置での加速度を計測した。

実験は、表-1に示すような条件で行った。なお、比抵抗から間隙率を算出する式として、式(1)を変形した式(2)を用い、定数には茂木・佐々⁴⁾によって求められた豊浦砂の値 ($a=1.2$, $m=1.4$) を用いた。

$$n = \left(\frac{a}{F}\right)^{1/m} = \left(\frac{1.2}{F}\right)^{1/1.4} \quad (2)$$

間隙水の比抵抗値 ϕ_w には市販の導電率計を用いて実測した値 28.5 $\Omega \cdot m$ を用い、実験中に間隙水の比抵抗値が変化しないと仮定した。また、垂直方向の比抵抗値が均一であることを確認した上で、容器中の砂層の重量及び体積から間隙率を求め、計測した間隙率との整合性を確認した。さらに、相対密度の計算には、豊浦砂の標準的な最大間隙比 0.9820 及び最小間隙比 0.6039 を適用した⁷⁾。

4. 実験結果

(1) Case 1 実験

Case 1 は、ボイリング後の沈降堆積を利用して作製した相対密度約 30 % のゆる詰め砂試料を 200~600 cm/s², 5 Hz, 4 s の正弦波で加振した実験である。本実験の結果における比抵抗変化を図-3 (a), 図-4 (a), 図-5 (a), 図-6 (a) に示す。図-3 (b), 図-4 (b), 図-5 (b), 図-6 (b) は比抵抗変化から算出した相対密度変化である。なお、縦軸の深度は最上部電極からの深さである。また、上部 10 cm の青色の部分は水である。本計測では、平行電流を流すため、上部に水が冠水している条件下で実験を行っている。なお、参考のために、P1, P2 の位置 (深度 20 cm 及び 30 cm) での間隙水圧及びその差圧 (P2-P1) を図-3 (c), 図-4 (c), 図-5 (c), 図-6 (c) に示す。また、記録開始後、約 5 秒後から加

振を開始している。図-7に加振波形の例を示すが、A1, A2, A3 のどの位置の加振加速度もほぼ同一の波形を示している。

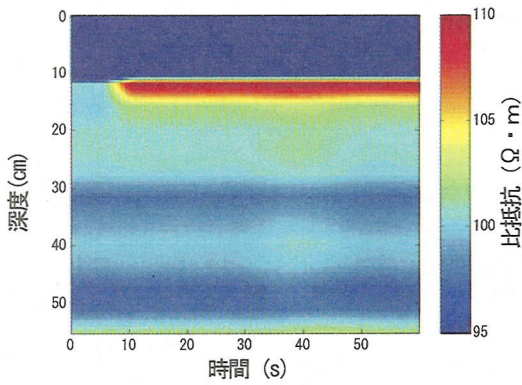
以上の結果から、次のことが分かる。すなわち、加振加速度により相対密度の変化が生じる深さが変化し、その傾向は加振加速度の増加に伴い、その深さも増加していく。また、加振直後、ある深さで生じた液状化状態は、下部から上部に向かって徐々に終了し、それに伴って相対密度変化が進行する。また、図-6 (c) から明らかのように、砂層収縮が間隙水圧計より深い位置から始まる場合には、間隙水圧計の値が初期有効応力 (深度 20 cm で 8 gf/cm², 深度 20 cm で 16 gf/cm²) に達しており、液状化状態になっていることが分かる。

この砂層収縮面上昇速度は、今回行った実験の条件および範囲では、図から明らかのように、ほぼ一定と見なすことができる。すなわち、液状化過程に伴う砂試料の収縮は、砂試料全体で一斉に生じるのではなく、ある一定深度から上部に向かって徐々に進展しく。本研究では、砂試料の収縮が生じている境界面を、砂層収縮面と呼ぶことにする。

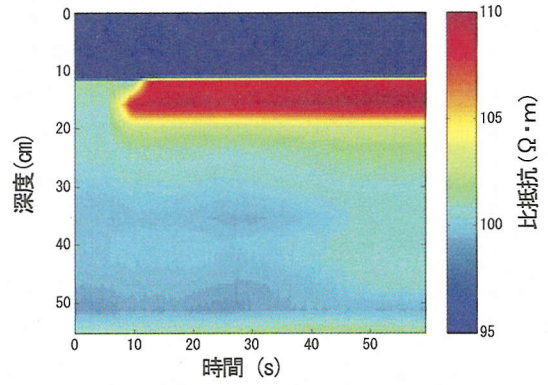
また、図-6 (c) から分かるように、P1, P2 の位置 (深度 20 cm 及び 30 cm) での間隙水圧の値は、砂層収縮面が通過した時点で低下している。

(2) Case 2 実験

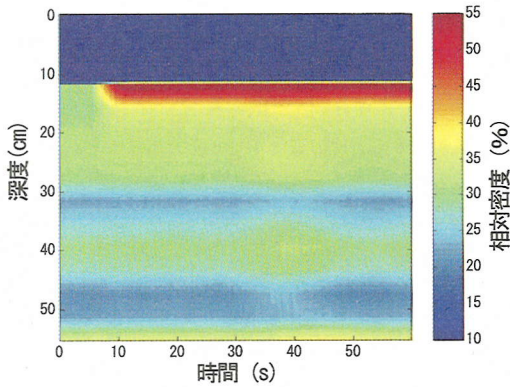
次に、600 cm/s², 5 Hz, 4 s の加振で、初期比抵抗値、すなわち初期相対密度を変化させた Case 2 の実験結果を図-8 (a), 図-8 (b), 図-8 (c) に示す。本実験で作製した相対密度の異なる砂試料は、ボイリング後の沈降堆積を利用し、その後再度ボイリング時の流量を調整する方法で作製した⁹⁾。また、試料の均一性は、相対密度の垂直分布によって評価した。



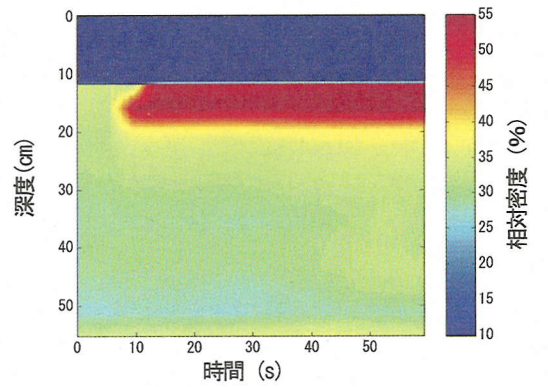
(a) 比抵抗変化



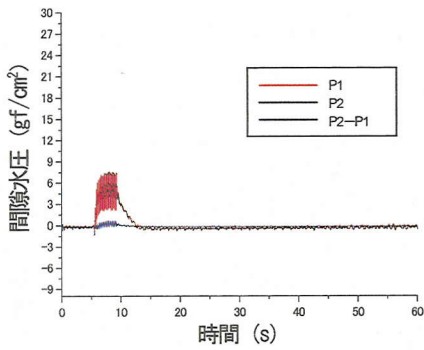
(a) 比抵抗変化



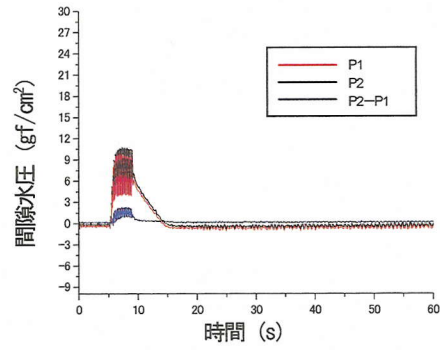
(b) 相対密度変化



(b) 相対密度変化



(c) 間隙水圧変化



(c) 間隙水圧変化

図-3 Case1: $200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, 5 Hz, 4 s での結果

図-4 Case1: $300 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, 5 Hz, 4 s での結果

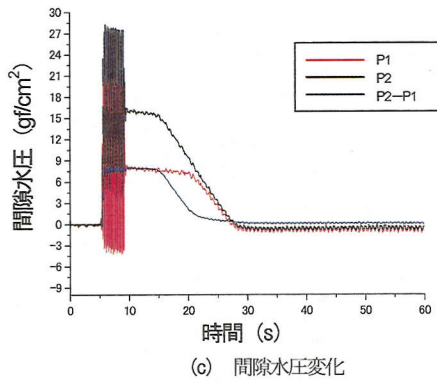
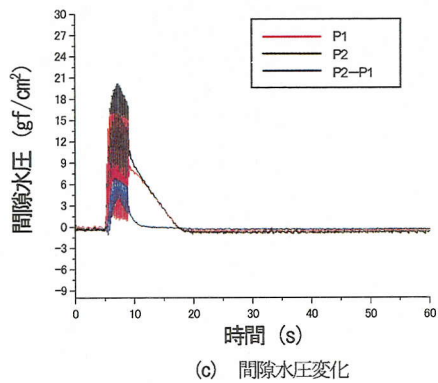
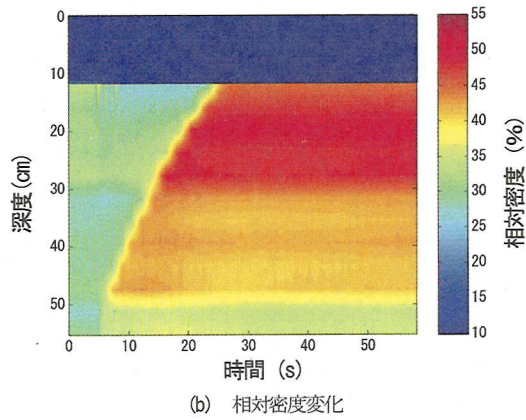
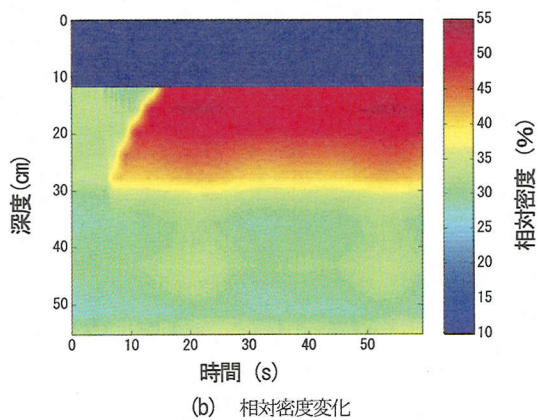
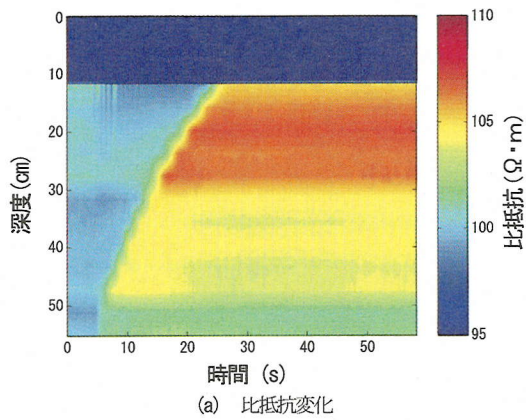
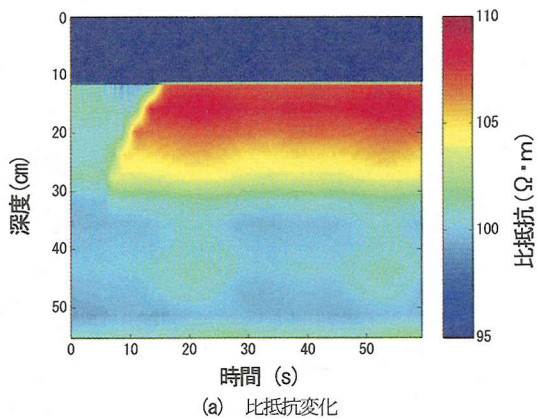
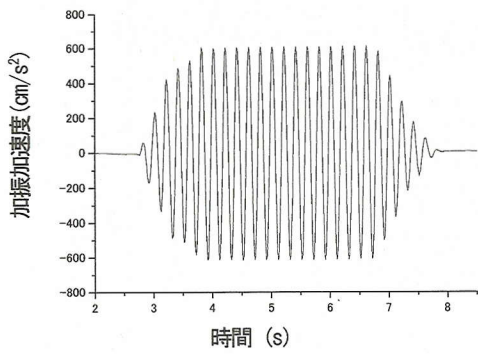
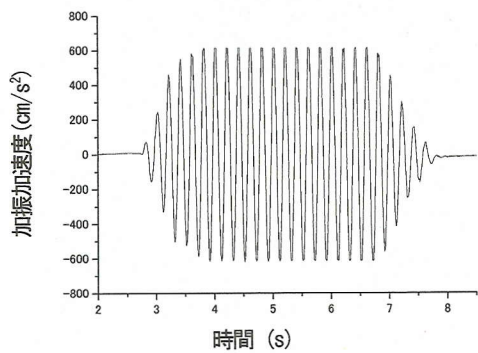


図-5 Case1: 400 cm/s², 5 Hz, 4 s での結果

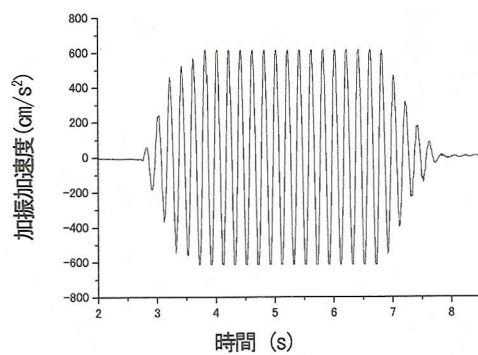
図-6 Case1: 600 cm/s², 5 Hz, 4 s での結果



(a) A1 位置の加速度波形

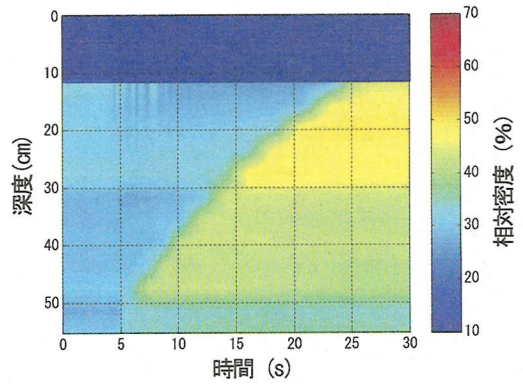


(b) A2 位置の加速度波形

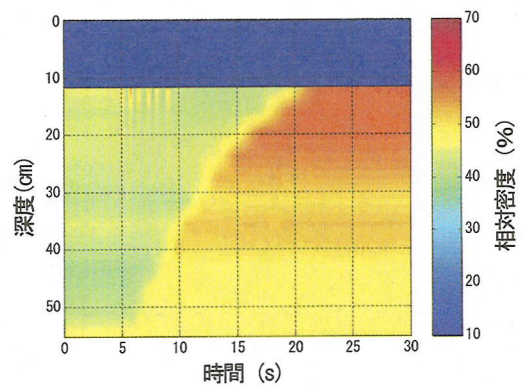


(c) A3 位置の加速度波形

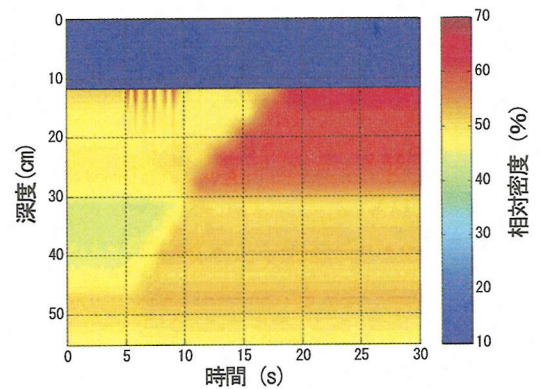
図-7 各位置での加振加速度波形



(a) 初期相対密度 31 % の例

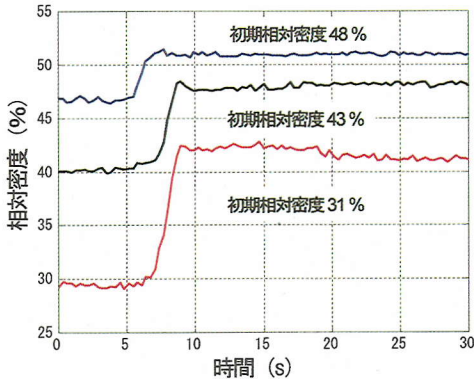


(b) 初期相対密度 43 % の例

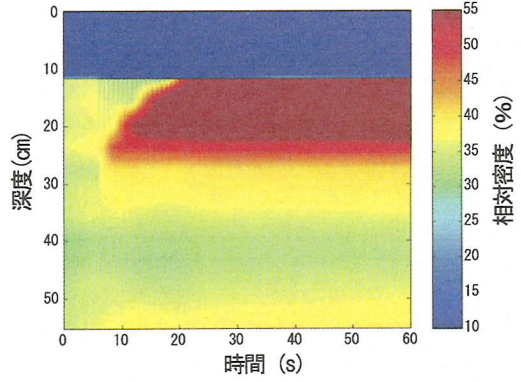


(c) 初期相対密度 48 % の例

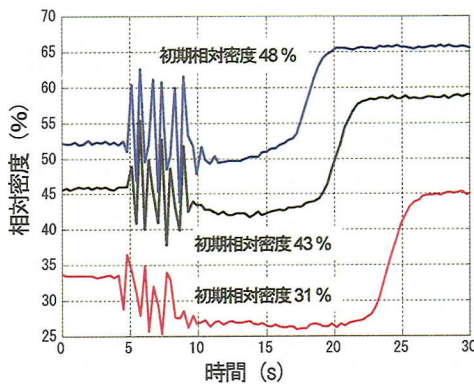
図-8 Case2: 初期相対密度の異なる結果の比較



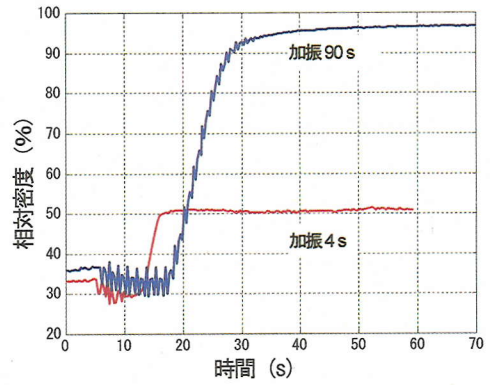
(a) 深度 40 cm での相対密度変化



(a) 相対密度変化



(b) 表層部での比抵抗変化



(b) 表層部の比抵抗変化 (Case1 との比較)

図一 9 各深度での相対密度変化

図一 10 Case3: 400 cm/s², 5 Hz, 90 s での結果

図一 8 から明らかなように、初期相対密度が異なる場合でも、砂層収縮面の発生する砂層収縮開始深度はあまり変わらないことが分かる。一方、液状化終了時間が相対密度によって変化し、密な状態ほど終了時間が短くなっていることが確認できる。

ここで、深度 40 cm の位置における初期相対密度の異なる試料の相対密度変化を図一 9 (a) に示す。明らかに、初期相対密度が高くなるにつれて、初期相対密度と終了時の相対密度の変化が小さくなっていることが分かる。

また、地表面からの深度 0~4 cm の表層部分の相対密度変化を図一 9 (b) に示す。

表層部分では、初期相対密度と液状化終了時の相対密度の変化は、深度 40 cm と比べて、初期相対密度による違いが小さい。表層部分では、液状化開始後、一度相対密度が低くなり、その後上昇しているが、これは表層が上向き浸透流によりボイリングを起こしているためと考えられる。これに起因して深部より表層部分での相対密度の変化が小さくなったものと考えられる。

(3) Case 3 実験

400 cm/s², 5 Hz で 90 秒間加振を加えた Case 3 の実験結果を図一 10 (a) に示す。

4 秒間の加振を加えた図一 5 と比べて、砂層収縮開始深度はほぼ同じであるが、初期相対密度と終了時の相対密度との変化幅が大きい。そこで、表層部分の相対密度変化を図一 10 (b) に示す。明らかに、90 秒の加振を加えた場合の相対密度変化が大きい。また、相対密度の絶対値そのものが 90 % を越えている。また、それに伴い液状化継続時間も長くなっている。

5. 考察

まず、本実験を通して全体的に共通する特徴は、砂層収縮面の存在である。ここで、砂層収縮面とは、固体層と液状化層の境界を意味し、この境界面において砂試料の収縮に伴う急激な相対密度の増加が生じる。実際には、この面において、砂粒子の配列構造の変化が生じる遷移領域があ

ると考えられるが、この遷移領域の大きさについてはよく分かっていない。

また、本実験結果から砂層収縮面が到達する前には、表層部を除き相対密度の変化は認められなかった。

液状化現象における間隙水圧の消散に関しては、吉見⁹⁾により、自重による一次元圧密問題として捉えられているが、上向き浸透流の過剰間隙水圧勾配が液状化状態継続中には限界動水勾配に達することが明らかになっている。そこで、本実験条件（砂の粒子比重 2.7、水の密度 1.0、砂層の厚さ 10 cm、間隙率 50 %）から計算される砂層 10 cm 間の限界動水勾配に対応する差圧は、 8.5 gf/cm^2 と計算され、この値は、図-6 (c) の二つの間隙水圧の差圧と等しい。すなわち、試料内に発生している上向き浸透流は限界動水勾配に達しており、このことから砂試料が液状化状態に達していると判断できる。また、間隙水圧計の値が低下する深度と、砂層収縮面が通過する深度が同じ時間で一致していることにより、液状化状態が砂層収縮面の通過とともに終了していることが理解できる。また、表層付近のボイリングを起こしていると考えられる領域を除いて、砂層収縮面以浅の深度の砂層比抵抗値が砂層収縮面の到達まで変化しないことは、砂層の収縮が液状化層全体で起きるのではなく、砂層収縮面のみで収縮が起こることを示している。このことは、砂層の収縮に伴う間隙水の排水が砂層収縮面でのみ発生し、砂層収縮面上部の液状化は、砂層収縮面から排水された上部への上向き浸透流によって引き起こされているものと考えられる。

この、砂層収縮面の存在は、一次元圧密問題に関連して、有効応力がかすかに増えたときに大きな体積収縮を起こすモデル（沈降現象モデル）⁹⁾ を支持するものであり、本相対密度可視化手法によってこの現象を確認できたものと理解できる。

6. 結論

液状化現象を理解するため、比抵抗を用いた液状化現象に伴う砂層の相対密度の時間変化を一次元（深度方向）で可視化する実験を行った。

その結果、相対密度が急激に変化する境界面、すなわち砂層収縮面の存在及び進展を確認した。この砂層収縮面は、従来から考えられてきた有効応力がかすかに増えたときに大きな体積収縮を起こすモデル（沈降現象モデル）を明確に示していると考えられる。今回の実験結果は、均一な砂層でのみ実験を行ったが、今後、粘土層を含む不均一な砂層の場合における砂層収縮面の挙動について、さらなる検討を行う必要がある。

また、砂層収縮面の進展速度は、液状化状態の継続時間に大きな影響を与えるが、本実験の結果より、砂層収縮

面の上部への進展速度は、初期相対密度や加振時間と密接な関係があることが分かった。この点に関しても、今後詳しい検討が必要である。

さらに、今回の円筒容器を使った実験においては、間隙水圧と砂層収縮面との関係について、間隙水圧の低下する深度と砂層収縮面が通過する深度が同じ時間で一致していることが分かった。すなわち、液状化現象において、間隙水圧が初期有効応力以上の間で液状化が継続していると考えられるならば、特定深度での液状化状態の終了とともに砂層収縮面が通過すると考えられる。また、砂層収縮面の通過まで、砂層収縮面以浅の比抵抗値には変化がないことから砂層の収縮は、砂層収縮面でのみ起こるものと考えられる。本現象は、砂層の収縮に伴う間隙水の排水が砂層収縮面でのみ発生し、砂層収縮面以浅に発生する液状化現象は、砂層収縮面で排水された表層への上向き浸透流によって引き起こされていると考えられる。間隙水圧計の観測により砂層収縮面以浅の砂層にかかる上向き浸透流の動水勾配が限界動水勾配に達している事実は、砂層収縮面以浅の液状化現象を裏付けているものと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、早稲田大学濱田政則教授に有益な助言を頂いた。また、(株) 鴻池組技術研究所の山田祐司氏には、振動台の使用に関して便宜を図って頂いた。比抵抗計測装置の製作にあたっては、(有) アスクシステムの水津 彰氏、(有) 千葉電子研究所の東 義則氏、(有) ネオサイエンスの城森 明氏から多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 安田 進：液状化の調査から対策工まで、鹿島出版会、pp.11-14, 1988.
- 2) 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.
- 3) 佐々宏一、芦田 譲、菅野 強：建設・防災技術者のための物理探査、森北出版株式会社、p.130, 1993.
- 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.
- 5) 茂木 透、本郷克彦、佐々宏一：細粒土の電気的特性、物理探査、第 39 巻、第 2 号、pp.17-27, 1986.
- 6) 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.
- 7) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説、地盤工学会、1990.
- 8) 吉見吉昭：砂地盤の液状化、技報堂出版株式会社、pp.91-94, 1980.
- 9) 地盤工学会編：地盤工学ハンドブック、地盤工学会、pp.207-208, 1999.

(2000. 6. 14 受付)

DEVELOPMENT OF VISUALIZATION TECHNIQUE OF RELATIVE DENSITY OF SAND DURING LIQUEFACTION USING RESISTIVITY AND CONSIDERATION OF THE RESULTS

Motoharu JINGUUI, Sunao KUNIMATSU, Hiromitsu IZUMI and Tomoya MOCHIZUKI

To understand the liquefaction phenomenon, we developed a new technique to visualize relative density of saturated sand by measuring resistivity. Measured resistivity can be transformed into relative density by using the unique relation between resistivity and porosity, and the image of the distribution of relative density caused by a change in time can be drawn from the measurement of multi-electrode in the depth direction. In this research, we measured resistivity during liquefaction in a cylindrical vessel with multi-electrode in the depth direction under some conditions and visualized the results. From the results, we confirmed the existence of the contraction plane of sand that is the boundary between solid zone and liquefaction zone, and indicated that the plane develops from the bottom part to the surface.