

## 液状化時の砂の挙動観測

杉井 俊夫, 山田 公夫

### Monitoring the Behavior of Sand during Liquefaction

Toshio Sugii and Kimio Yamada

Numerous researchers and engineers have performed cyclic undrained triaxial tests, shaking table tests using a ground surface model, and full-scale experiments using controlled blasting techniques to elucidate the mechanism of liquefaction and its influence on circumambient foundation. The previous experiments measured acceleration, displacement of ground surface and excess pore water pressure. Currently, a resistivity tomography technique is used to observe foundation behavior during liquefaction. The current paper examines the applicability of the dielectric constant of a soil by using a simple soil moisture sensor to observe porosity during liquefaction, and explains the behavior of sand during liquefaction. These sensors derive the volumetric water content from the dielectric constant of the measured soil. If soil is saturated, the volumetric water content is equal to porosity. The results refine the difference in the behavior of the sand at the depth of the liquefaction layer from the results observed during liquefaction.

Keywords : Liquefaction, Porosity, Laboratory test, Behavior of sand

#### 1. まえがき

液状化メカニズムや周辺地盤への影響を把握するために、多くの研究者や技術者らによって室内における非繰り返しせん断試験や液状化モデル地盤による振動実験、発破による

大規模現場液状化試験などが行われてきた。その中で加速度とともに地盤表面及び地中変位や間隙水圧（過剰間隙水圧）が主として計測されてきたが、発破による大規模現場液状化試験では液状化中のリアルタイムな地盤挙

動を観測・可視化のために比抵抗法によるトモグラフィーが行われるようになってきた<sup>1)</sup>。本報告は、不飽和土分野で利用されることが多くなった安価で簡易的な土中の比誘電率計測を原理とした土壌水分計を用いて液状化時のモデル地盤における局所的な間隙率変化の計測を試み、モデル地盤を用いた液状化発生時の砂層の挙動について報告している。

2. 実験方法

2.1 誘電式水分計測センサーと密度計測

近年、誘電率式土壌水分センサーがいくつか市販化され、操作性も容易で安価であることなどから、不飽和土分野では水分センサーの利用が多くなった。通常、水分センサーは、式(1)に示す土中の体積含水率 $\theta$ を計測する。

$$\theta = \frac{V_w}{V} \tag{1}$$

ここに、 $V$ :土体積、 $V_w$ :土中水体積である。

本研究では、飽和地盤中の体積含水率から乾燥密度(間隙率)を算定し、密度の常時計測を試みることにした。飽和時( $S_r=100\%$ )の体積含水率 $\theta$ と間隙率 $n$ の関係は式(2)となることから、土のかさ密度である乾燥密度 $\rho_d$ を式(5)として求めることができる。

$$\theta = \frac{V_w}{V} = \frac{V_w}{V_v} \frac{V_v}{V} = S_r \cdot n = n \tag{2}$$

ここに、 $V_v$ :土中間隙の体積、 $S_r$ :飽和度( $V_w/V_v$ )、 $n$ :間隙率( $V_v/V$ )である。

$$\rho_d = \rho_s \left( 1 - \frac{\theta}{S_r} \right) \tag{3}$$

ここに、 $\rho_s$ :土粒子の密度である。

本研究では、液状化時の砂層中の体積含水率、すなわち間隙率を計測することで、砂層の乾

燥密度の変化を砂の挙動として評価することとした。

著者らは、センサー本体、ロガー本体も安価で汎用性が高いことから図1に示すADR(Amplitude Domain Reflectometry)法に基づく土壌水分センサー(Theta Probe)を用いた<sup>2)</sup>。プローブ内部に発振器と測定電子回路が内蔵されており、センサー部は4本の平行なステンレス製のロッドからなっている。このセンサー部のロッドは真中の1本が信号ロッドでその周りの3本は信号ロッドの周囲に電気的な遮断を形成するシールドロッドとなっている。物質の比誘電率は、物質によって異なり、水の比誘電率80.2(20℃)、鉱物3~5と水と土粒子の比誘電率の差を利用している。本センサーの出力電圧 $V$ と対応する比誘電率 $\epsilon$ は式(4)の関係があり、また Whally ら<sup>3)</sup>によれば、比誘電率と体積含水率の関係は式(5)の関係があり、 $a_0, a_1$ は計測物質のパラメータである。 $a_0, a_1$ のパラメータは測定土質によって校正係数として求めることが望ましいとされている。

$$\sqrt{\epsilon} = 1.07 + 6.4V - 6.4V^2 + 4.7V^3 \tag{4}$$

$$\theta = \left( \sqrt{\epsilon} - a_0 \right) / a_1 \tag{5}$$

図2は豊浦砂に対する水分センサーからの出力電圧と体積含水率の校正曲線である。乾燥密度は式(3)によって計算されるが、

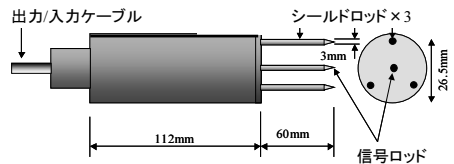


図1 土壌水分センサー (ADR)

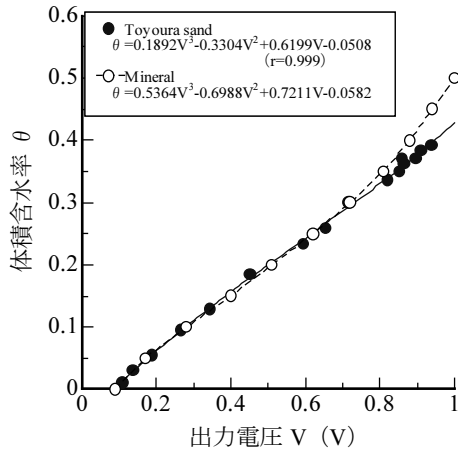


図2 水分センサーの校正曲線 (V~θ)

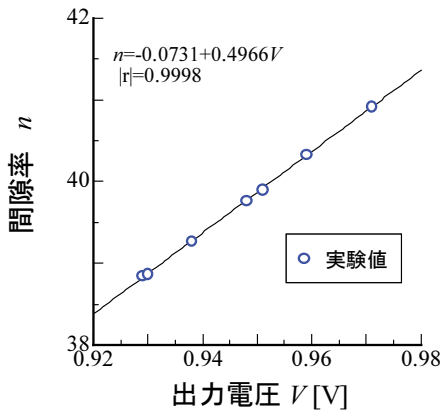


図3 センサー出力と観測間隙率の検証

Malicki ら<sup>4)</sup>(1996)は不飽和土での乾燥密度の依存性を示すことを示しており、著者らは、飽和した豊浦砂に対する出力電圧と実測の間隙率の関係を予め調べることにした。求められた両者の関係を図3に示す。これより、飽和砂における間隙率は一意的に決めることができることがわかる。

これまで、比抵抗法による広範囲の密度分

布を把握する方法は用いられてきたが、局所的な密度を把握するのにこの誘電率式水分計は適していると考えられる。

## 2.2 実験試料および試験ケースの概要

今回使用したのは、粒径 0.425~0.075mm の豊浦砂 (Gs=2.645) を使用した (図4)。

試験は、加振時の乾燥密度が計測できるかを検証するためと、液状化時の砂の挙動を把握するための2ケースを実施した。ケース1では ADR センサーのみによる乾燥密度 (間隙率) が計測 (図5) を、ケース2では2つの ADR センサーの他、間隙水圧計、加速度計の3種類、5個のセンサーを固定して設置している (図6)。いずれのセンサーも、液状化開始とともに浮き上がらないように図5.6

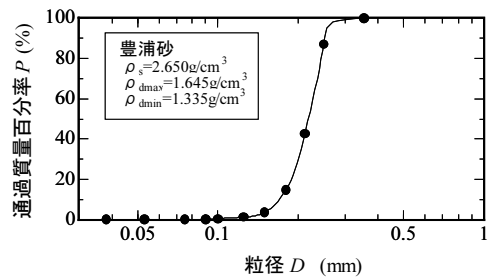


図4 豊浦砂の粒度分布

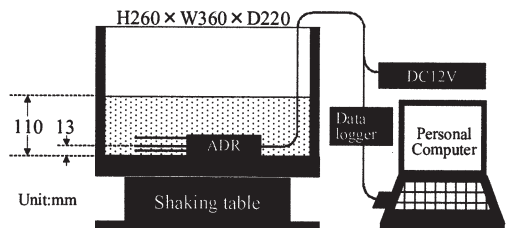


図5 試験装置 ケース1

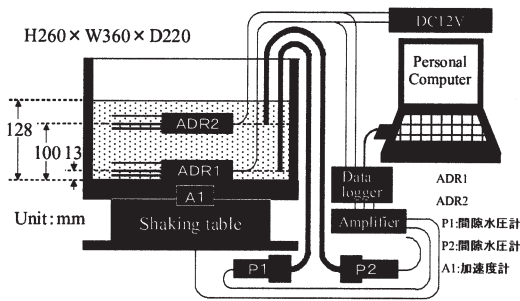


図6 試験装置 ケース2

に示すように H260×W360× D220mm の水槽の壁面に固定した後、水槽に水を張り飽和した豊浦砂を用いて飽和地盤を 11cm 及び 13cm に作成した。砂の地表面と水面が同じになるように下端から水を排水させ、飽和地盤とする。計測開始後、加振を行い、地表面に水位が溜まり、地表面の高さが一定になるまで加振し計測を終了した、ケース2では計測

された間隙水圧から得られた静水圧を差し引き得られる過剰間隙水圧  $u_e$  と初期有効拘束圧 (有効土被り圧)  $\sigma'$  で除した過剰間隙水圧比 ( $u_e/\sigma'$ ) で整理を行っている。過剰間隙水圧比は、1 を越えると土粒子の有効応力がゼロとなり、液状化が発生していることがわかる指標である。

### 3. 試験結果

#### 3.1 ケース1の観測結果

図7にケース1で観測された乾燥密度の変化を示しており、加振時における乾燥密度の挙動が計測されていることがわかる。

測定開始時 1.60g/cm<sup>3</sup> あった乾燥密度が測定開始後7秒から9秒(点A→点B)にかけて 1.58g/cm<sup>3</sup> まで減少し、その後、35秒前後(点C)までの間に 1.66g/cm<sup>3</sup> まで増加している。下層部での計測であるために上部より締まっていることから密な砂のせん断特性の特

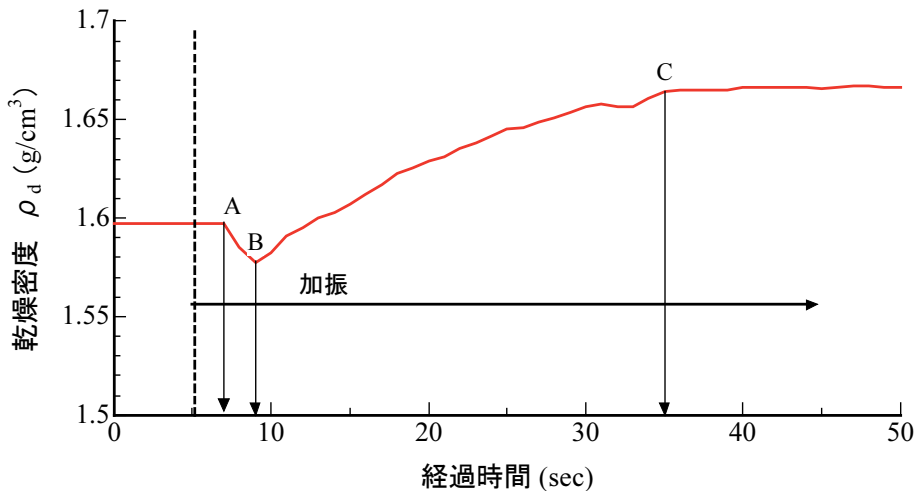


図7 液状化による乾燥密度の変化

徴でもある負のダイレイタンス効果（せん断時に膨張）が現れているものと考察される。

測定開始後9秒（点B）から乾燥密度は増加しており、液状化により水中に浮かんだ状態になった土粒子が、徐々に再堆積していくことを表している。今回の試験では地表面変位を計測はしていなかったため、計測された乾燥密度の変化から層全体の沈下ひずみを算出してみることにした。初期の乾燥密度  $1.60\text{g/cm}^3$  から最終の乾燥密度  $1.66\text{g/cm}^3$  を用いて供試体全体の試料厚を算出すると、約106mm となり、4%程の沈下ひずみが発生し

ていることが推察され、一般的にいわれる液状化による沈下ひずみ 5%にほぼ等しいことがわかり、液状化時の乾燥密度計測の信頼性を裏付けることができた。

### 3.2 ケース2の観測結果

ケース1の結果から液状化時の乾燥密度計測の可能性が得られたため、次に加速度、間隙水圧、深さによる乾燥密度の変化を把握するために、先の図6に示したセンサーを配置して実験を行った。

下端から13mmの土壌水分計（ADR1）、100mmの土壌水分計（ADR2）で測定された乾

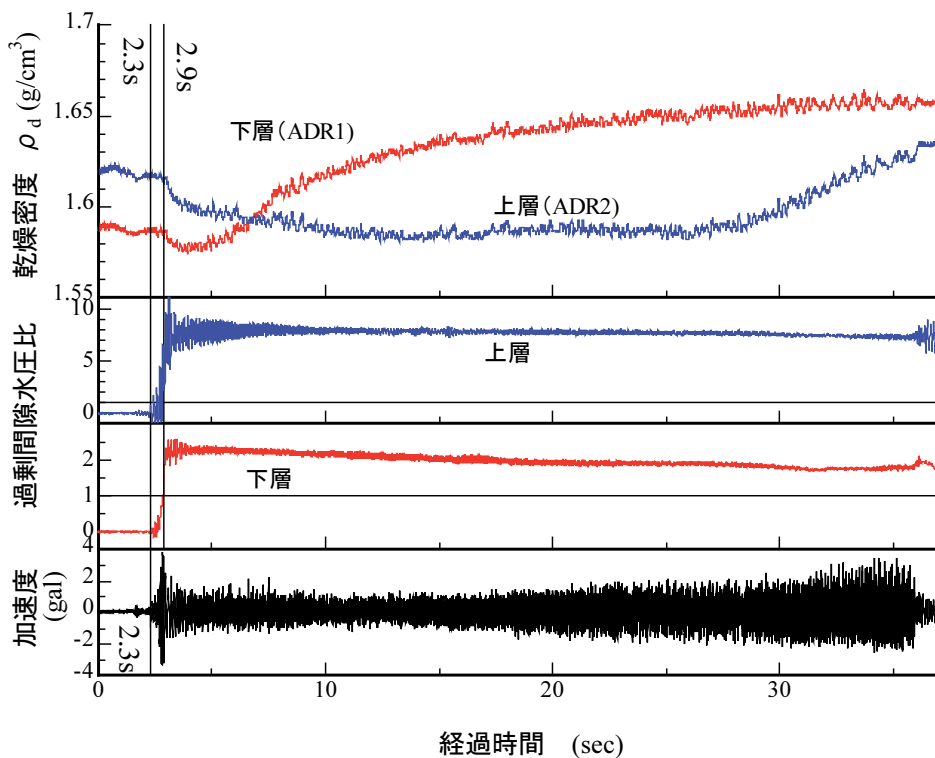


図8 試験ケース2 液状化時の乾燥密度，過剰間隙水圧比，加速度の変化

乾燥密度、同じ下端から 13mm の間隙水圧計 (P1)、100mm の間隙水圧計 (P2) で測定された間隙水圧から求めた過剰間隙水圧比、加速度計で測定された加速度を図 8 に示す。加速度より測定開始後 2.3 秒で揺れ始め、その後、2.9 秒で過剰間隙水圧比が 1 を超えたことから、ここで液状化が発生したことが分かる。乾燥密度の観測結果から、液状化の発生した 2.9 秒後から急激に乾燥密度が減少し、水分計下(P1)は 4.0 秒後から、水分計上(P2)は 26 秒後から徐々に増加していることがわかり、加振初期においてはケース 1 と同様に下層は密な砂のせん断特性、上層は緩い砂のせん断特性に似たダイレイタンスの挙動を示しており、実験の再現性を得ている。

過剰間隙水圧比の図から、水圧計上 (P2) による過剰間隙水圧比の値が非常に揺れが激しい。これは、センサーの位置が水面から 3cm 弱の非常に浅いところにあるため、水面の振動による波まで測定してしまうためだと推測する。また、水圧計下 (P1) による過剰間隙水圧比に比べ 3 倍ほど大きな値をとったのは、

水圧計下 (P1) に比べ浅いところにあり、そのため土かぶりが少なくなり、初期拘束応力が小さかったためと推測される。しかし、水圧計上による過剰間隙水圧比も測定開始 2.3 秒から、水圧計下による過剰間隙水圧比が 1 を超える 2.9 秒の間に 1 を超え、ほぼ同時に液状化が生じることが分かる。液状化発生後の乾燥密度について見てみると、下層部ではすぐに乾燥密度は上昇し始め 25 秒程度までで収束するに比べ、上層部ではゆっくりと乾燥密度は減少し約  $1.58\text{g/cm}^3$  の乾燥密度を維持し、下層部の乾燥密度が収束するとようやく乾燥密度が増加することが明らかになった。さらに、上層部と同じ密度に漸近していくことも分かる。このことから、加振が続く場合、液状化後の液状化した土粒子の堆積速度が液状化時間に関係し、液状化層厚が薄いほど、液状化時間が短くなることが推察できる。図 9 は計測された 2 点の間隙水圧から計算した動水勾配と計測された乾燥密度を用いて砂層の厚さの計算結果を示す。上層部は乾燥密度が増加するために層厚が膨張する形となって

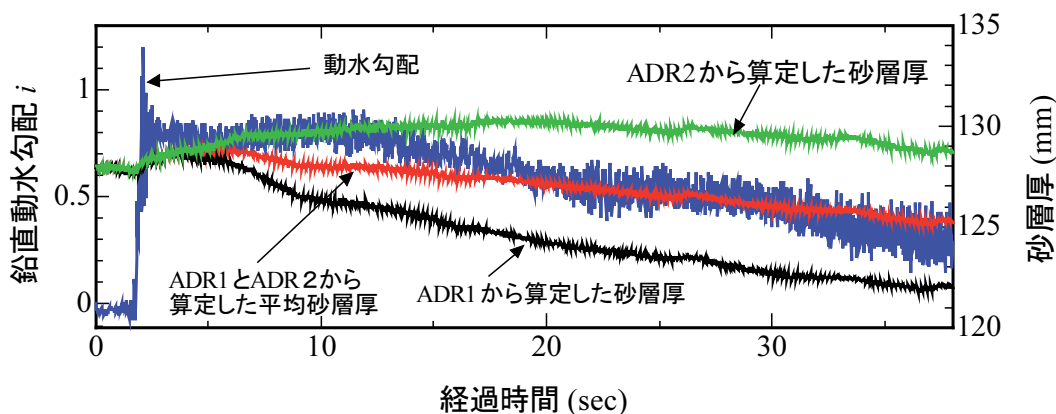


図 9 液状化時の観測された動水勾配と砂層厚の変化

いるが、下層部の乾燥密度からの計算では6mmの沈下があり、平均では3mm強の沈下が計算されている。また、計測から約2秒後に動水勾配が最大を示し、その後10秒過ぎまで動水勾配が一定を保ち、上層部の乾燥密度が最小になるころに動水勾配が減少することが観察でき、乾燥密度を把握することで液状化時の砂の挙動をよく説明できることが分かった。

#### 4. あとがき

安価で簡便な土壌水分計を用いて液状化試験時の乾燥密度（間隙率）の計測の可能性について検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- 1)飽和土において土壌水分計を用いて間隙率の計測が可能であり、液状化中においても正しく計測できることを明らかになった。
- 2)下層の過剰間隙水圧が減少するに伴い、密度が緩やかに高くなることが確認できた。
- 3)液状化層の下層部は、一旦密度が低下するもののすぐに上昇し始め一定値に落ち着くが、上層部の密度は低下し続け、下層の密度が一定になると密度が急上昇していることから、加振が続いても液状化層が薄いほど液状化が終了することが早いことが裏付

けられた。

- 4)上層部、下層部とも同じ密度に収束していくといった液状化後の再堆積の様子が明らかとなった。

本研究は、平成20年度総合工学研究所第6部門の援助を受けた。ここに、記して謝意を表す。

#### 【参考文献】

- 1)菅野高弘, 小濱英司, 三藤正, 塩崎禎郎 : 発破を用いた港湾・臨海部都市機能の耐震性向上に関する十勝港における実物大実験, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.901-906, 2002.
- 2)Gaskin,G.J. and Miller, J.D : Measurement of Soil Water Content Using a simplified Impedance Measuring Technique, J.Agric. Engng Res., Vol.63, pp.153-160, 1996.
- 3)Whally, W. R. : Considerations on the use of time-domain reflectometry for measuring soil water content, Soil Sci., Vol. 44, pp.1-9, 1993.
- 4)Malicki,M.A., Plagge, R. and Roth, C. H. : Improving the Calibration of Dielectric TDR Soil Moisture Determination Taking into Account the Solid Soil, European J. Soil Sc., Vol.47, pp.357-366, 1996.