

PIV 解析による埋設管周辺地盤の液状化時挙動の観察

愛媛大学大学院理工学研究科 正会員 ○小野耕平 正会員 岡村未対

1. はじめに

内水圧による不平衡力が作用している圧力管路の屈曲部は、液状化に伴う埋戻し地盤の強度低下により大きく変位し、継手の破損に繋がることが指摘されている<sup>1)</sup>。埋設管の変位に対抗する液状化時の水平抵抗力を評価するためには、液状化した地盤と埋設管路の相互作用を把握することが必要である。本研究では、遠心力場において加振実験を行い、液状化時の水平抵抗力を計測するとともに、PIV による画像解析を実施した。

2. 実験概要

2.1 実験模型

実験模型の概略図を Fig. 1 に示す。420×120×230 mm の剛土槽内に豊浦砂を空中落下させ、相対密度 50%（乾燥密度 1.49 g/cm<sup>3</sup>）の地盤を作製した。模型管には、直径 30 mm のアルミニウム製丸棒を使用した。模型管の中央部に直径 20 mm のアルミニウム製ロッドを直角に取り付け、その先端を電動アクチュエータに接続した。管とロッドの連結部には荷重計を固定し、水平変位に伴って管に加わる抵抗力を計測した。

埋戻しを完了した後、真空槽内で 20cSt のメトロズ水溶液により飽和させた。作製した模型を遠心载荷装置に搭載し、遠心加速度を 20G まで上昇させた。加振実験に先立ち、一定速度（5.0 mm/s）の水平载荷のみを行う単調载荷実験（Case-A）を実施し、基本的な水平変位特性を確認した。その後、水平载荷と加振を同時に行う実験（Case-B）を行い、液状化発生時に埋設管が水平変位する状況を再現した。入力波形の一例を Fig. 2 に示す。加振方向は水平载荷と同様に管軸直角方向であり、最大加速度は原型スケールで約 1.23 m/s<sup>2</sup>、卓越振動数は約 0.9Hz である。

2.2 PIV 解析概要

PIV とは連続画像の濃度情報を利用して流れのベクトル解析を行うものであり、標点を設けることなく撮影画像全体の動きを追跡できる。加振時及び水平载荷時の地盤の動きを、土槽の亚克力面から高速度カメラで撮影し、流体計測ソフトウェア Flow-vec<sup>2)</sup> を用いて解析を行った。Table 1 に、取得画像及び PIV の設定パラメータを示す。濃度パターンの基準サイズ及び追跡する範囲は試行錯誤により決定した。1 画素あたりの解像度は約 0.16 mm であり、0.1 s 間隔（管の変位量で 0.5 mm 間隔）の連続画像に対して解析を実施した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 3 に、水平変位量と水平抵抗力及び受働側管側部の過剰間隙水圧比（以下、水圧比）の関係を重ねた。変位量は口径で、抵抗力は有効重量、口径、管長、土被り厚でそれぞれ正規化した。図中の矢印は画像解析位置を示す。Case-A では、载荷開始直後から水平抵抗力は概ね線形に増加し、口径の 0.15 倍程度の変位でピークを迎えた後、定常となっている。管側部の水圧比は、抵抗力のピークまで減少を続けており、地盤のせん断

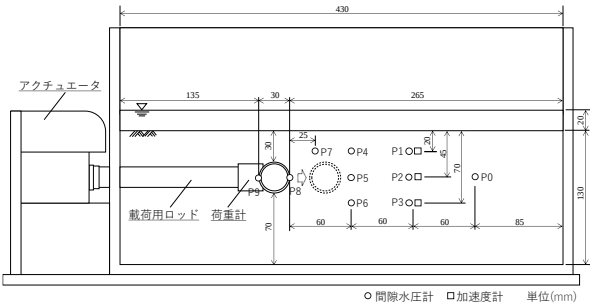


Fig. 1 実験模型

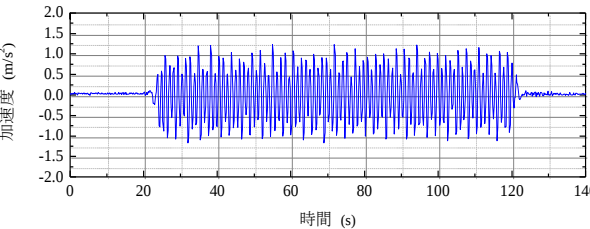


Fig. 2 入力波形

| Table 1 画像解析パラメータ |           |     |
|-------------------|-----------|-----|
| サンプリング周波数         | 10        | Hz  |
| 解像度               | 2448×2048 | pix |
| 格子間隔              | 10        | pix |
| 基準サイズ             | 81×81     | pix |
| 追跡範囲              | 21×21     | pix |

変形が非排水に近い状態で生じたことを示している。一方、Case-B では、管側部の水圧比が 1.0 に達しており、管周辺地盤が液状化することで地盤反力が得られていない。抵抗力は加振終了直前に回復を始め、同時に間隙水圧の消散が確認される。回復後は単調に増加し、その後ピークに達している。変位－抵抗力曲線の傾きを表す地盤反力係数は、原型スケールで Case-A, B それぞれ 1584, 1361 kN/m<sup>3</sup> と近い値を示しており、ひとたび液状化に至った地盤でも加振後には同等程度の抵抗力を発揮するといえる。

Fig. 4 に、速度ベクトルの分布図を示す。0.1 s 間隔の連続画像間に移動した地盤の速度を捉えたものであり、初期からの累積値ではない。Case-A において、ピーク前①では管周辺にのみ分布している载荷速度 (5.0 mm/s) と等しい領域が、ピーク時②には地表面にまで達しており、滑り面が形成されていく過程が確認できる。一方、Case-B では、加振中の①に

において、地表付近の地盤が液状化し、管を迂回する左向きの流れが確認できる。管は周囲 7~14 mm 程度の地盤を楕円状に纏いながら移動している。②においても同様の動きが観察されるものの、このとき地盤全体は右向きに移動している。このように、左右に大きく移動する液体状の地盤の流れの中で管が水平変位する様子が確認できる。③は抵抗力が回復に転じた際の動きであり、地表付近の挙動は①と同様であるものの、受働側地盤の移動範囲が明確に拡大しており、液状化による変形と水平载荷によるせん断変形が混在している様子が捉えられている。ピーク時④の挙動は、Case-A に類似したものである。ベクトル分布から概算したピーク時の滑り面の角度は両ケースともに約 40° であり、ランキンの受働土圧状態で想定される角度 (約 28°) より大きいものの、両ケースの地盤反力係数が同等であった結果を裏付けるものである。

#### 4. おわりに

遠心力場において模型管の水平载荷実験を実施し、PIV により地盤の動きを可視化した。液状化時、及び抵抗力回復過程の地盤の移動特性を定性的に捉えることができた。今後、液状化地盤の変形をより正確に捉えるために高速度・高解像度の撮影環境を整えること、各ひずみ量を算出し定量的な評価を行うことが必要である。

#### 参考文献

- 1) Mohri et al., 2014, Damage to agricultural facilities, *Soils and Foundations*, 54(4), 588-607.
- 2) 加賀ら, 1994, 気流分布の画像計測のためのパターン追跡アルゴリズム, 可視化情報学会誌, 14(53), 108-115.

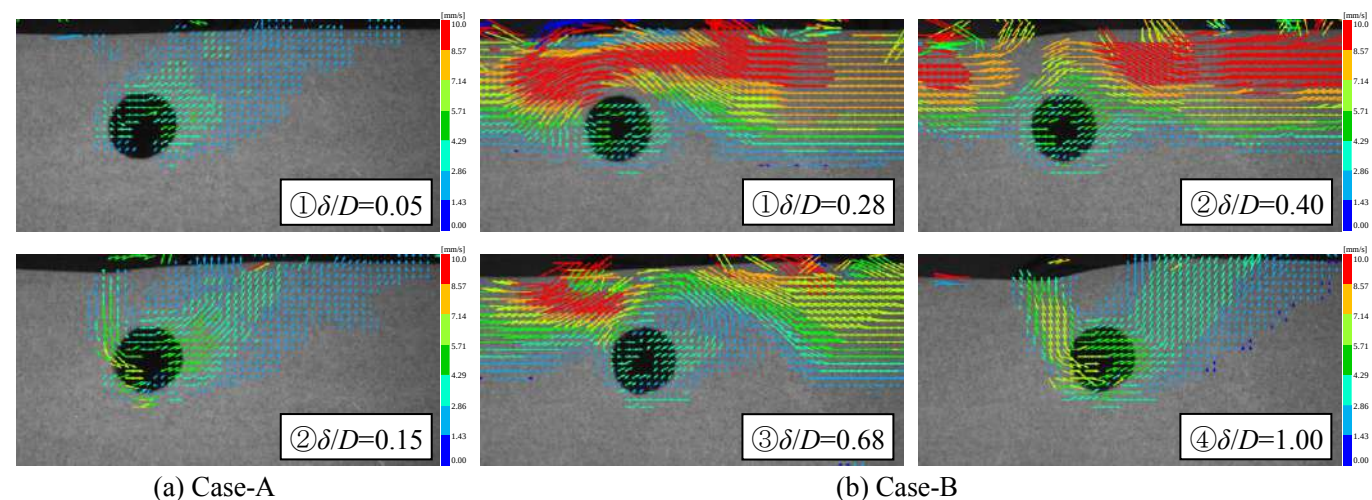


Fig. 4 速度ベクトル分布図

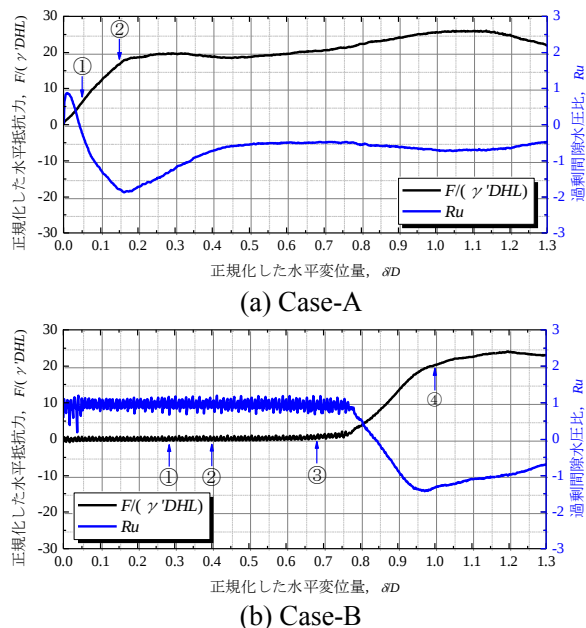


Fig. 3 水平抵抗力と過剰間隙水圧比の変化