

ビデオ映像を用いた動画像計測による側方流動 地盤の流動・破壊状況の把握

○青木 久¹・山本裕司¹・森本 巖¹・須田嘉彦²・林 寛³

¹基礎地盤コンサルタンツ株式会社 (〒102-8220 東京都千代田区九段北 1-11-5)

²東京電力株式会社 (元社団法人電力土木技術協会) (〒170-0013 東京都豊島区東池袋 1-25-8)

³鹿島建設株式会社 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

Image measuring is able to obtain two dimensions information easily with non-contact. The purpose of this study is to grasp the destruction situation of the surrounding foundation of pile by liquefaction related ground lateral spreading using video images. Establishing many targets and color sand, to the surrounding foundation of pile at regular intervals, four video cameras were shot the ground surface where those were established.

The ground surface displacement of the two dimensions and three dimensions were calculated using these video images. Furthermore, the foundation flow quantity, destruction form of the foundation and distortion quantity of the foundation were calculated using the ground surface displacement quantity.

Key Words : image measuring, video images, liquefaction, lateral spreading, ground surface displacement

1. はじめに

兵庫県南部地震において、液状化に伴う地盤の側方流動による被害が発生した。これらの被害は埋立地や海岸線付近の施設における杭基礎に多くみられた。そこで、液状化に起因した側方流動に対する杭基礎設計法の提案に向け、実規模大の大型せん断土槽を用いた側方流動現象の再現実験を行った^{1) 2) 3) 4) 5)}。

本報告では、側方流動時における地盤地表面の流動・破壊状況を把握するため、ビデオ映像を用いて地表面変位の動画像計測を行い、この画像計測結果を用いて、側方流動時における杭周辺の地盤流動量および三次元的な地盤破壊形状を求め、さらに、地盤に生じたひずみ量の算出を試みた結果について述べる。

2. 大型振動台実験の概要

実験は、独立行政法人防災科学技術研究所の大型振動台 (15.0×14.5m) および大型せん断土槽 (長さ 12m×幅 3.5m×高さ 6m) を借用して行った。大型せん断土槽内にモデル地盤を作製し、大型振動台の上に固定した状況を写真-1に示す。

実験モデルは、図-1に示すように液状化層上部に非液状化層が載る二層地盤で、地盤中に高剛性杭および低剛性杭を各一本設置したものである。

実験方法は、地盤の側方流動現象を再現するため、加

振により地盤を液状化させた後、せん断土槽に外部から強制変位を与えて液状化層をせん断変形させた。なお、強制変位時に液状化状態を維持させるため、高周波微小加振を行いながら強制変位を行った。

3. 地表面のビデオ撮影

画像計測用のビデオカメラは、土槽上部の支持架構を利用して、対象範囲全域を直下撮影できるように4台設置した。使用したビデオカメラは市販のビデオカメラ (Sony DCR-VX1000) である。ビデオカメラの設置状況を写真-2に示す。なお、ビデオ撮影の対象範囲は、図-2に示す高剛性杭の周辺地盤である 4.5m×2.5m とし、撮影時間は、実験前後を含む約 10 分間とした。

また、地表面には計測対象を明確にするため、画像計測用ターゲットを設置した。このターゲットには、画像処理による自動認識を行うため、色 (赤、黄) と模様 (○、◎) が異なる 4 種類を用いた。これらのターゲットを、図-2に示すように高剛性杭周辺の地表面 3m×2m の範囲に 25cm 間隔で設置し、さらに、その範囲には格子状に色砂を敷設した。ターゲット数は全部で 116 個あり、これらを前述したビデオカメラを用いて同時撮影した。なお、この撮影時の地表面までの撮影距離は約 2.2m、解像度は約 4mm とし、撮影は撮影範囲の一部を重複させたステレオ撮影とした。

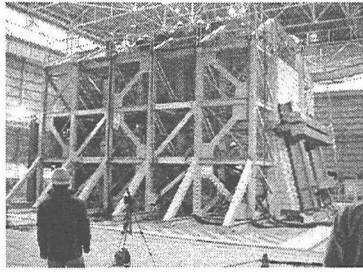


写真-1 大型振動台および
大型せん断土槽

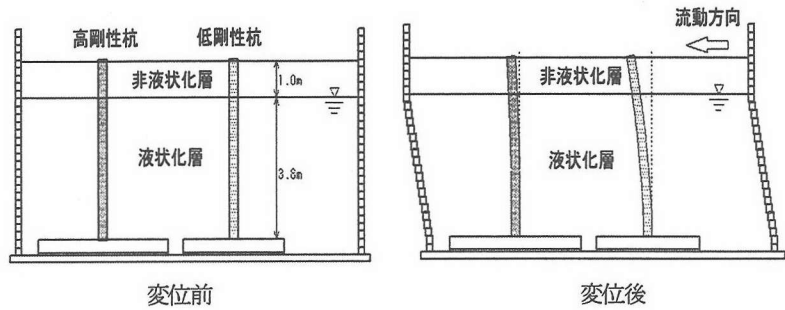


図-1 実験モデル

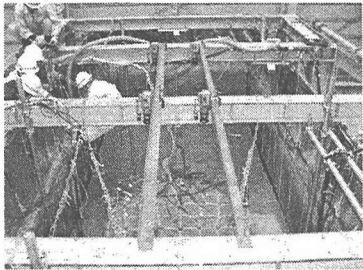


写真-2 ビデオカメラの設置状況

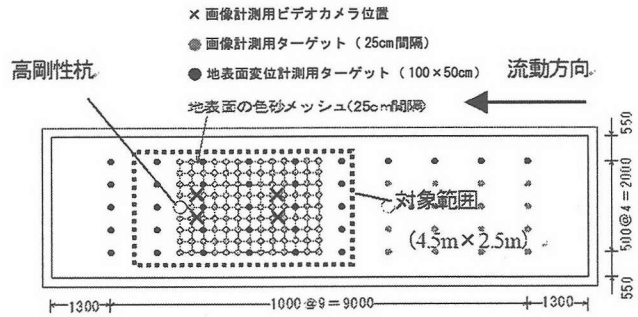
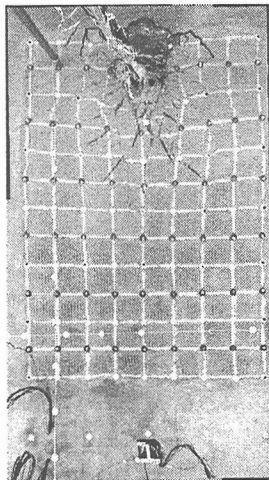


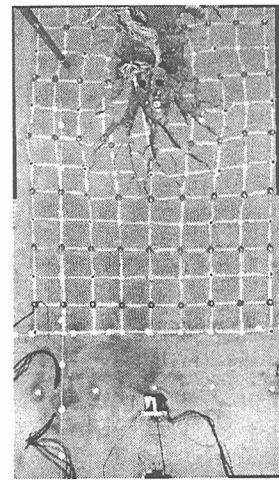
図-2 ビデオ撮影の対象範囲およびターゲットと色砂の設置位置



強制変位開始時



12秒後



強制変位終了時(22.5秒後)

図-3 補正処理を行った地表面画像

4. 使用データおよび補正処理

ビデオ映像は、液化化後の強制変位開始から強制変位終了までの25秒間の映像を使用した。なお、映像は画像処理を行うため、1秒毎の静止画像に変換し用いることとした。

作成した画像は、カメラ毎に26画像、合計で104画像である。これらの静止画像は、レンズの歪み補正、濃度変換、同時刻4枚の画像の繋ぎ合わせ⁶⁾を行った。

レンズの歪み補正は、最も影響が大きい放射方向の曲収差(レンズ中心からの放射的な歪み)について行い、濃度変換は、ターゲットの自動認識を容易にさせるため、線形変換法によりコントラストを強調させた。また、画

像の繋ぎ合わせは、接合する画像間の色合わせ、繋ぎ目の平滑化処理を施した。なお、高周波微小加振に伴う画像のぶれ補正は、初期時刻の画像を基準とした位置合わせによって行った。これらの一連の処理を全時刻の画像について行い、その後の解析に用いることとした。

上記補正処理を行った代表的な3時刻の画像を図-3に示す。これらの画像は、画像上部中心に杭頭が位置し、画像下部から上部に向かって地盤が流動している状況を表している。これらの画像から強制変位に伴う地盤の側方流動の進展により杭前面に亀裂が発生し、地盤が崩壊していく状況がわかる。

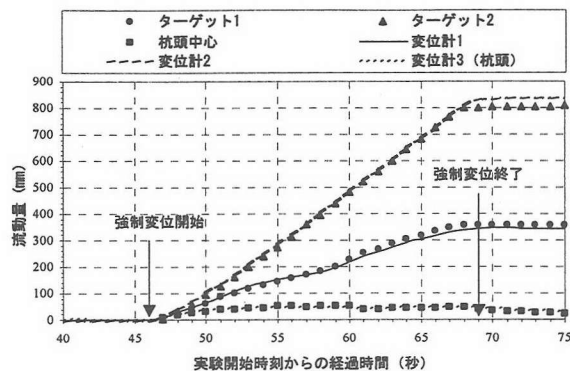


図-4 画像計測と変位計による地盤流動量の比較

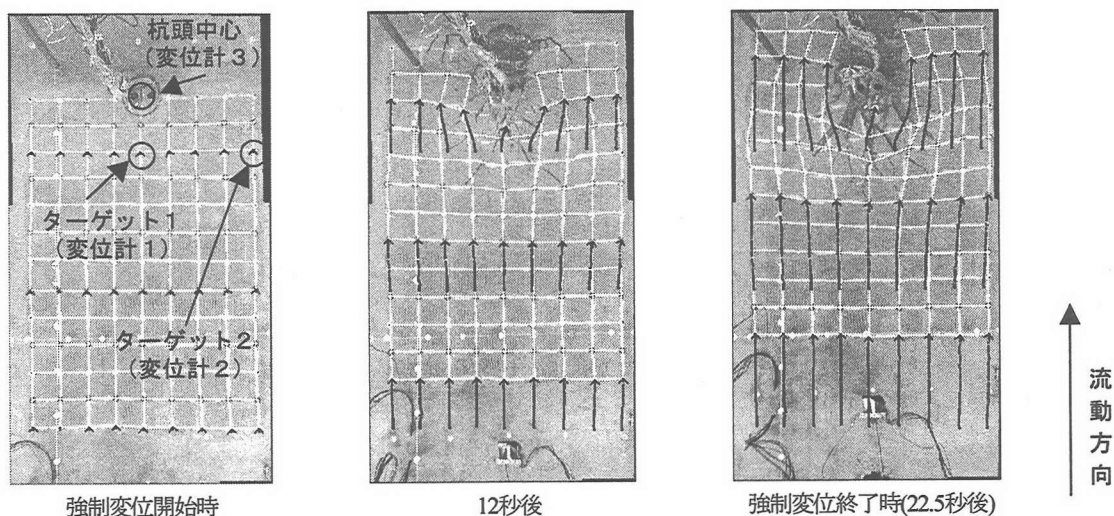


図-5 代表的なターゲットの流動軌跡

5. 地盤流動量の動画像計測

対象範囲における各ターゲット位置の変化より、1秒毎の地盤流動量を算出することとした。さらに、各ターゲットの変位軌跡および色砂模様の経時変化を求め、地盤の流動状況を把握することとした。

地盤流動量の算出方法は、動体追跡に応用されるテンプレートマッチング手法のひとつである面積相関法⁷⁾を用いて、各ターゲットの自動認識を行いその位置を求め、初期時刻の位置からの直線距離により求めた。

面積相関法とは、特定の対象物を表す領域(テンプレート)を対象画像の中で移動させ、各位置において画像の部分領域とテンプレートとの整合の度合い(相関係数)を測り、対象物の位置を求める手法である。従って、求められる位置は、相関係数が最大となる領域の中心位置となる。

各ターゲットのテンプレートは、初期時刻の画像におけるターゲットを表す領域(14×14画素)とした。なお、テンプレートの値は、認識精度を高めるため、地震被害建物を抽出する際に有効とされた判別指標⁸⁾を参考に、B値、色相の色情報、輪郭情報(エッジ強度)の3指標を用意した。これらの指標は、それぞれターゲットの領

域、色調、模様の認識に有効である。

3指標を用いた認識手法の判定条件は、最大相関係数が0.7以上の指標が2つ以上、かつ求められた位置の差が1画素以内とした。条件を満たす場合、求める位置は最大の相関係数が得られた位置となる。但し、条件が満たされない場合は、各指標で求めた相関係数の平均値を新たな指標として追加し、この4指標を用いて再評価を行った。なお、最終的に位置が求まらなかった場合は前時刻の位置とした。

このようにして、すべての画像について各ターゲットの流動量を算出した。設置したターゲット3地点についての画像計測と変位計による地盤流動量の計測結果の比較を図-4に示す。これより、画像計測と変位計による地盤流動量は、ほぼ同様な値となっていることがわかる。

また、代表的なターゲットの流動軌跡を図-5に示す。各ターゲットの流動軌跡より、杭周辺のターゲットは、上流から下流に向かって杭を回り込むような挙動を示していることがわかる。

以上の結果から、画像計測により複数地点の地盤流動量の計測が行え、地盤の流動状況を面的に把握できることが判明した。

表-1 高さ方向の地盤変位量（地盤高さ）の算出結果および三次元データの可視化画像

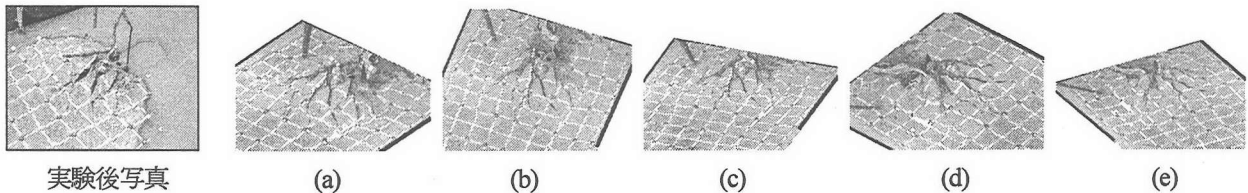
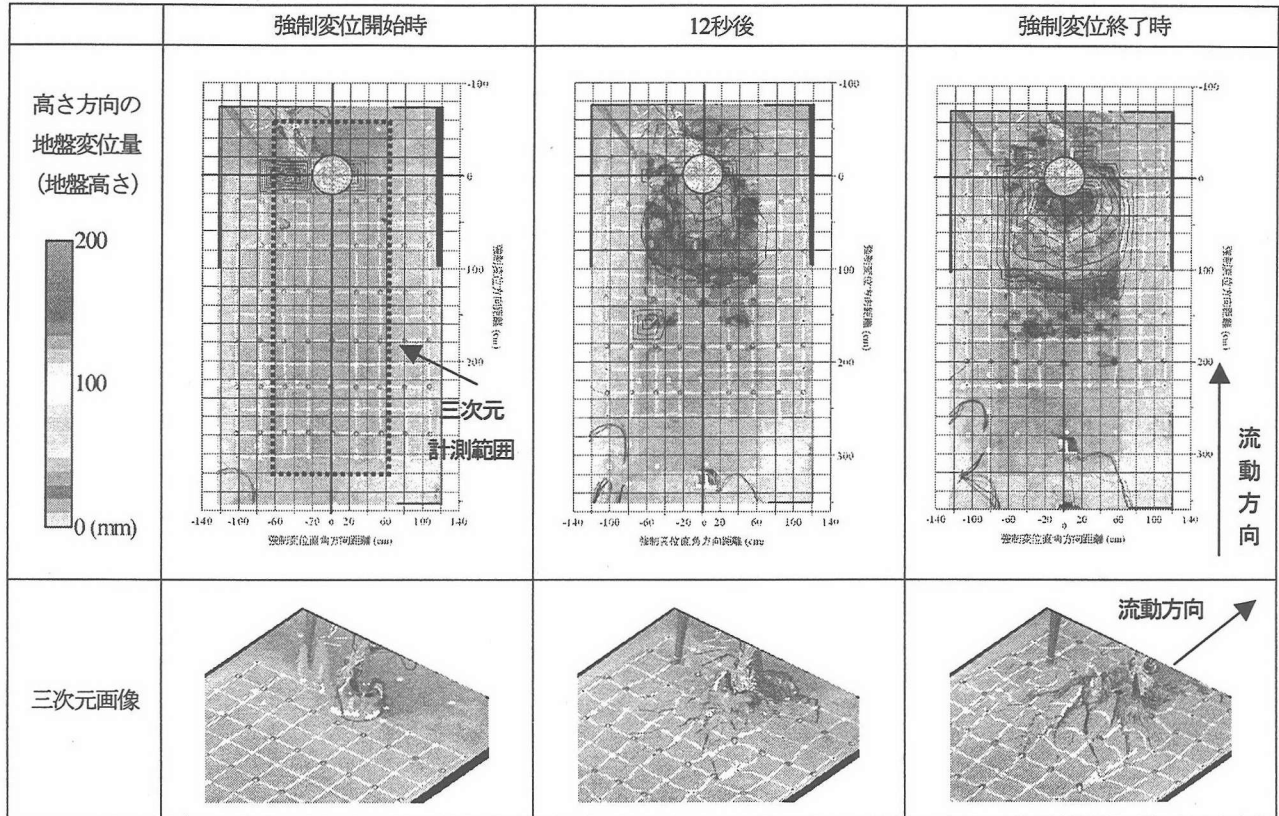


図-6 異なる視点からの強制変位終了時の三次元画像と実験後写真の比較

6. 地盤破壊形状の三次元計測

立体写真測量^{7), 9)}の手法を用いて、対象地盤の三次元計測を行い、1秒毎の高さ方向における地盤変位量の算出および算出した三次元データを可視化することで、地表面の立体的な破壊状況を把握することとした。

立体写真測量とは、同一の対象物を異なる場所から重複するように撮影した2枚1組のステレオ画像を用いることで、3次元座標を算出する技術である。具体的には、中心投影像である写真の平面座標を測定し、さらに、被写体、レンズ、フィルムを結ぶ光の幾何学的条件を利用して被写体の三次元座標を算出することになる。

本検討では、画像が重複する4m×1.2mの範囲を対象に三次元座標を算出することとした。カメラ位置を表すパラメータは、撮影距離2205mm、焦点距離35mm、カメラ間の距離（基線長）500mmである。

算出方法は、カメラ位置およびカメラ姿勢を表すエピソード幾何等のカメラパラメータを初期時刻の画像より算出し、次に、このパラメータを用いて、すべての時刻

の画像に対する三次元座標を算出した。高さ方向における変位量は、初期時刻の地表面高さを基準（変位量0地点）として求めた。従って、地盤高さは高さ方向の変位量を表すこととなる。

代表的な3時刻の地盤高さの算出結果とそれぞれの時刻で求めた三次元データの可視化画像（三次元画像）の一覧を表-1に示す。これらより、杭前面にはほぼ円形状の破壊が進行している状況がわかる。また、その大きさは、最大で直径約120cmとなっている。

異なる視点からの強制変位終了時の三次元画像と実験後写真の比較を図-6に示す。この結果、三次元画像と実験後写真の状況は、比較的良好に一致していることから、三次元画像は実験状況をよく再現しており、異なる角度からの破壊状況の把握にも有効であると考えられる。

以上の結果から、ステレオ画像を用いた画像計測により、地盤の崩壊過程を三次元で計測することが可能であり、さらに、立体的な地盤の破壊状況を異なる角度から把握するのにも有効であると判断される。

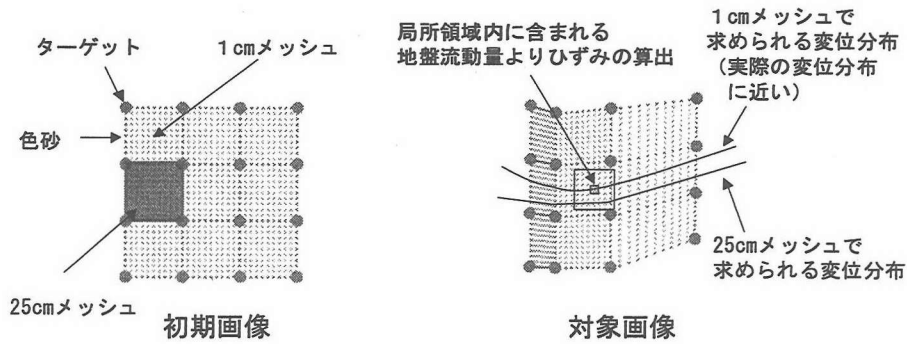


図-7 地盤ひずみ量の算出方法の概念図

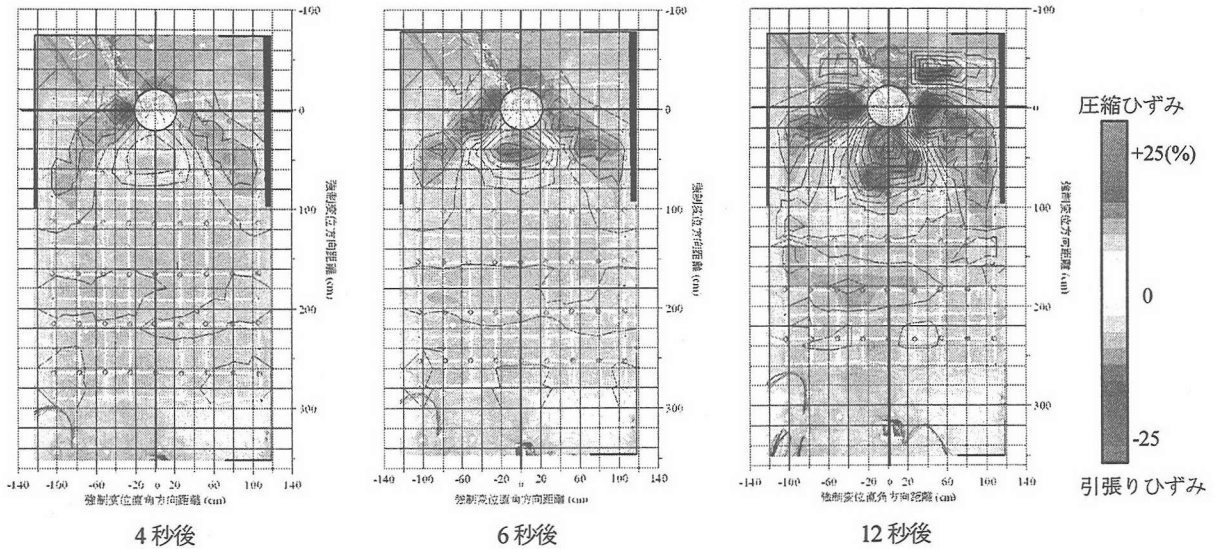


図-8 地盤に生じた水平面内のひずみ量の算出結果

7. 地盤ひずみ量の算出

浜田ら¹⁰⁾は、液状化による地盤の永久変位より、地盤の水平面内のひずみ量を算定している。

地盤の水平面内のひずみとは、地盤に荷重を加えた場合の元の長さに対する変形割合のことである。水平面内のひずみには、圧縮荷重による圧縮ひずみと引張荷重による引張りひずみがある。

本検討では、地盤流動量を用いて地盤に生じた水平面内のひずみ量を算出し、崩壊領域を定量的に把握することとした。

地盤ひずみ量の算出方法の概念図を図-7に示す。この算出方法において、滑らかな曲線のひずみ分布を求めるためには、詳細な地盤流動量のデータが必要となる。

しかし、本実験においては、地表面上に設置したターゲットと色砂で構成される25cmメッシュデータしか存在しないため、これら25cmメッシュを元データとして、内挿処理と平滑化フィルターを用いて擬似的な1cmメッシュの地盤流動量データを作成した。従って、各メッシュのひずみ量は、対象メッシュを中心とした局所領域より算出することになる。

また、局所領域内の地盤流動量の関数は、(1)式のよ

うに線形と仮定した。従って、求めるひずみ量は、局所領域内の平均的な値となる。なお、(1)式における6個の係数 $a\sim f$ は、周囲 13×13 メッシュの地盤流動量から最小2乗法を用いて求め、変位関数を微分することにより地盤の水平面内のひずみ量を算定することとした。

$$u = aX + bY + c, \quad v = dX + eY + f \quad (1)$$

但し、 X, Y は強制変位直角方向および強制変位方向にとった座標

u, v はそれぞれの方向の地盤流動量を表す

代表的な3時刻の地盤ひずみ量の算出結果を図-8に示す。これより、強制変位の開始とともに杭前面に圧縮ひずみが生じ、杭横側は、引張りひずみが生じていることがわかる。また、杭前面の圧縮ひずみ領域は、時間の経過とともに大きくなる傾向がみられる。なお、圧縮ひずみ量4%以上の範囲は、図-3の亀裂位置とほぼ一致しており、円形状になっていることがわかる。

以上より、地盤の崩壊領域が詳細かつ定量的に求められることおよびその経時変化を把握することが可能であることが判明した。

8. まとめ

ビデオ映像を用いた画像計測による大型振動台実験における側方流動地盤の流動・破壊状況の把握を行った結果をまとめて以下に示す。

- ① 4台のビデオ映像より1秒毎の静止画像を作成し、これら画像に、レンズの歪み補正、濃度変換、画像の繋ぎ合わせの補正処理を行った結果、これらの画像より、対象範囲全体の平面的な地表面状態を時系列的に把握できることが判明した。
- ② 地表面上にターゲットを設置し、各ターゲット位置の変化より、1秒毎の地盤流動量を算出し、さらに、各ターゲットの流動軌跡を求めた。なお、地盤流動量は、面積相関法を利用したターゲットの自動認識を行って算出した。その結果、複数地点の地盤流動量の計測が行え、地盤の流動状況を面的に把握できることが判明した。
- ③ 立体写真測量の手法を用いて、ステレオ撮影された対象地盤の三次元計測を行い、1秒毎の高さ方向における地盤変位量の算出および算出した三次元データの可視化を行った結果、ステレオ画像を用いた画像計測により、地盤の崩壊過程を三次元で計測することが可能であり、立体的な地盤の破壊状況を異なる角度から把握できることが判明した。
- ④ 地盤流動量を用いて、地盤に生じた水平面内のひずみ量を算出し、地盤の崩壊領域を求めた。なお、ひずみ量は、内挿処理と平滑化フィルターを用いた擬似的な1cmメッシュの地盤流動量データを作成することで、滑らかな曲線のひずみ分布を算出した。その結果、地盤の崩壊領域を詳細かつ定量的に求められることおよびその経時変化を把握できることが判明した。

以上より、地盤の流動・破壊状況を面的かつ立体的に計測できることおよび画像計測の有効性を示すことができたと考えられる。

最後に、本報告は、経済産業省より社団法人電力土

木技術協会が受託した「液状化対策実証調査」の成果の一部をとりまとめたものである。実験実施に際してご指導頂いた東京理科大学・石原研而教授、中央大学・國生剛治教授他の関係者、実験施設を借用させて頂いた独立行政法人防災科学技術研究所の関係者に紙面を借りて感謝を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 須田他：大型振動台実験による側方流動時の杭への作用力に関する検討(その1)－実験概要－，土木学会第57回年次学術講演会，Ⅲ-529，pp.1057 - 1058，2002。
- 2) 亀井他：大型振動台実験による側方流動時の杭への作用力に関する検討(その2)－実験結果－，土木学会第57回年次学術講演会，Ⅲ-530，pp.1059 - 1060，2002。
- 3) 山本他：大型振動台実験による側方流動時の杭への作用力に関する検討(その3)－杭への作用力と上限値－，土木学会第57回年次学術講演会，Ⅲ-531，pp.1061 - 1062，2002。
- 4) 森本他：大型振動台実験による側方流動時の杭への作用力に関する検討(その4)－地盤反力係数－，土木学会第57回年次学術講演会，Ⅲ-532，pp.1063 - 1064，2002。
- 5) 畔柳他：大型振動台実験による側方流動時の杭への作用力に関する検討(その5)－杭への作用力の定式化－，土木学会第57回年次学術講演会Ⅲ-533，pp.1065 - 1066，2002。
- 6) 高木幹雄，下田陽久：画像解析ハンドブック，東海大学出版会，1991。
- 7) 動体計測研究会：イメージセンシング デジタル画像－計測技術と応用－，(社)日本測量協会，1997。
- 8) 青木久，松岡昌志，山崎文雄：空撮画像を用いた地震による被害建物の抽出，写真測量とリモートセンシング，Vo.40，No.4，pp.27-36，2001。
- 9) (社)日本写真測量学会，解析写真測量委員会：解析写真測量改訂版，(社)日本写真測量学会，1997。
- 10) 浜田政則，安田進，磯山龍二，恵本克利：液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究，土木学会論文集，No.376/Ⅲ-6，pp.221-229，1986。