

# 精密写真測量を用いた振動台実験における 液状化による地盤流動の評価

中原博隆<sup>1</sup>・三輪滋<sup>2</sup>・筒井雅行<sup>1</sup>・阿保寿郎<sup>2</sup>・近久博志<sup>3</sup>・濱田政則<sup>4</sup>

<sup>1</sup>工修 飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

<sup>2</sup>飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

<sup>3</sup>工博 飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

<sup>4</sup>工博 早稲田大学 理工学部土木工学科 (〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1)

In order to measure liquefaction-induced ground displacement easily, a precise photogrammetric system was applied to liquefaction experiment by using a large-scale shaking table. Comparing the ground displacement and settlement measured by the precise photogrammetry with those obtained by video cameras fixed upon the shaking table and plumb, it was found that displacement can be measured by the precise photogrammetry in sufficient precision. Also, it was found that applicability to real ground which is wider than experiment are shown.

**Key Words** : precise photogrammetry, self calibration method, liquefaction, lateral soil movement  
digital camera, digital image

## 1. はじめに

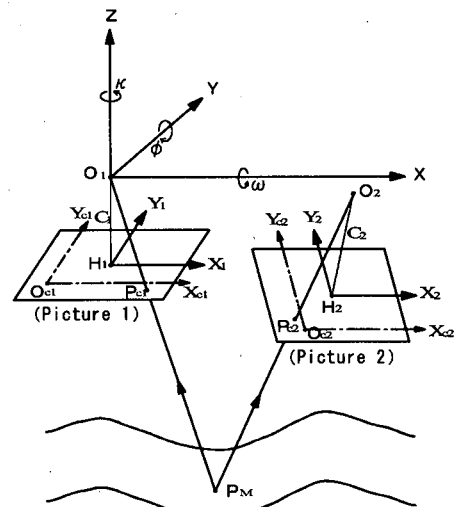
従来、液状化した地盤の流動変形に関しては、航空写真測量(例えば文献1) 2) ) や原位置での亀裂などの踏査(例えば文献3))によりその変位量を評価されてきた。しかし、航空写真測量は高価であり、また原位置での踏査では、広範囲の変位量を把握するには課題が多い。筆者らは、これまでに市販されているマニュアルフォーカス機能付きのデジタルカメラを用いて、対象物に対して撮影位置を変えて複数枚のデジタル写真を撮影し、写真上の標点の視差の違いから、標点の3次元座標をパソコンにより算出する精密写真測量システムを開発してきた<sup>4)</sup>。本システムは、現地では任意の位置からデジタルカメラで撮影するだけであり、一般の測量に比べて現地での測量作業を大幅に少なくし、危険箇所へ立ち入らなくても測量可能であるため安全性も確保できる。また、本システムは、デジタルカメラ、パソコンおよび開発したソフトを用いるため極めて安価で手軽な技術である。

本文では、本システムを用いて安価に液状化に伴う地盤の流動量を評価することを目的に、大型土槽を用いた振動台実験による液状化実験に適用する。まず、本手法の概説および本実験での適用方法を述べ、さらに、同実験で別途実施された固定式ビデオカメラによる地盤流動

量の測定結果<sup>5)</sup>や地盤高さの測定結果と比較し、本手法の適用性について検討する。

## 2. Self Calibration 法による重複画像標定問題の解析<sup>6),7)</sup>

投影原理により3次元の被写体空間を2次元の写真空間に写像することを考える。



図—1 重複写真の共線条件

図—1は被写体 (P<sub>M</sub>) に対して撮影した2枚の写真画像においてカメラ (O<sub>i</sub>) と取得画像 (P<sub>ci</sub>) の位置関係を示したものである。

この図から分かるように被写体上の点 P<sub>M</sub> は、その写真画像上の点 P<sub>ci</sub> とカメラの投影中心 O<sub>i</sub> は、ひとつの直線上に存在しなければならない。この条件のことを被写体空間の点と2つの画像上の点の共線条件と呼ぶ。

座標が (X<sub>j</sub>, Y<sub>j</sub>, Z<sub>j</sub>) であるような点 j の写真 i における写真座標 (x<sub>ij</sub>, y<sub>ij</sub>) は、共線条件式(1), (2)で表される。

$$x_{ij} - \Delta x_{ij} = -c_i \frac{a_{11i}(X_j - X_{0i}) + a_{12i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{13i}(Z_j - Z_{0i})}{a_{31i}(X_j - X_{0i}) + a_{32i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{33i}(Z_j - Z_{0i})} \quad (1)$$

$$y_{ij} - \Delta y_{ij} = -c_i \frac{a_{21i}(X_j - X_{0i}) + a_{22i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{23i}(Z_j - Z_{0i})}{a_{31i}(X_j - X_{0i}) + a_{32i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{33i}(Z_j - Z_{0i})} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11i} & a_{12i} & a_{13i} \\ a_{21i} & a_{22i} & a_{23i} \\ a_{31i} & a_{32i} & a_{33i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\kappa_i & -\sin\kappa_i & 0 \\ \sin\kappa_i & \cos\kappa_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega_i & -\sin\omega_i \\ 0 & \sin\omega_i & \cos\omega_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi_i & 0 & \sin\phi_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi_i & 0 & \cos\phi_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、c<sub>i</sub>は写真iの焦点距離であり写真iは6個の外部標定要素 (X<sub>0i</sub>, Y<sub>0i</sub>, Z<sub>0i</sub>:カメラ投影中心の座標, ω<sub>i</sub>, φ<sub>i</sub>, κ<sub>i</sub>:カメラの傾き) を有する。また正しい写真座標 (x<sub>ij</sub>, y<sub>ij</sub>) は測定された写真座標を (x<sub>cij</sub>, y<sub>cij</sub>) とすると式(4)~式(8)のように表される。

$$x_{ij} = x_{cij} - x_{hi} - \Delta x_{ij} \quad (4)$$

$$y_{ij} = y_{cij} - y_{hi} - \Delta y_{ij} \quad (5)$$

$$\Delta x_{ij} = x_{ij}(k_1 r_{ij}^2 + k_2 r_{ij}^4 + k_3 r_{ij}^6) + p_{1i}(r_{ij}^2 + 2x_{ij}^2) + 2p_{2i}x_{ij}y_{ij} \quad (6)$$

$$\Delta y_{ij} = y_{ij}(k_1 r_{ij}^2 + k_2 r_{ij}^4 + k_3 r_{ij}^6) + 2p_{1i}x_{ij}y_{ij} + p_{2i}(r_{ij}^2 + 2y_{ij}^2) \quad (7)$$

$$r_{ij}^2 = x_{ij}^2 + y_{ij}^2 \quad (8)$$

ここで、x<sub>hi</sub>, y<sub>hi</sub>は主点位置のずれ、k<sub>1i</sub>, k<sub>2i</sub>, k<sub>3i</sub>, p<sub>1i</sub>, p<sub>2i</sub>はカメラレンズのひずみ曲収差の係数である。

Self Calibration 法では、1台のカメラのみを用いて焦点距離を変えずに撮影を行うため、それぞれの写真がすべて共通した内部標定要素をもつものとみなすことができる。すなわち、この方法では、外部標定要素 (X<sub>0i</sub>, Y<sub>0i</sub>, Z<sub>0i</sub>, ω<sub>i</sub>, φ<sub>i</sub>, κ<sub>i</sub>) が写真ごとに異なるのに対して、他の8個の内部標定要素 (c<sub>i</sub>, x<sub>hi</sub>, y<sub>hi</sub>, k<sub>1i</sub>, k<sub>2i</sub>, k<sub>3i</sub>, p<sub>1i</sub>, p<sub>2i</sub>) はすべての写真で同一であるとして解析を行う。

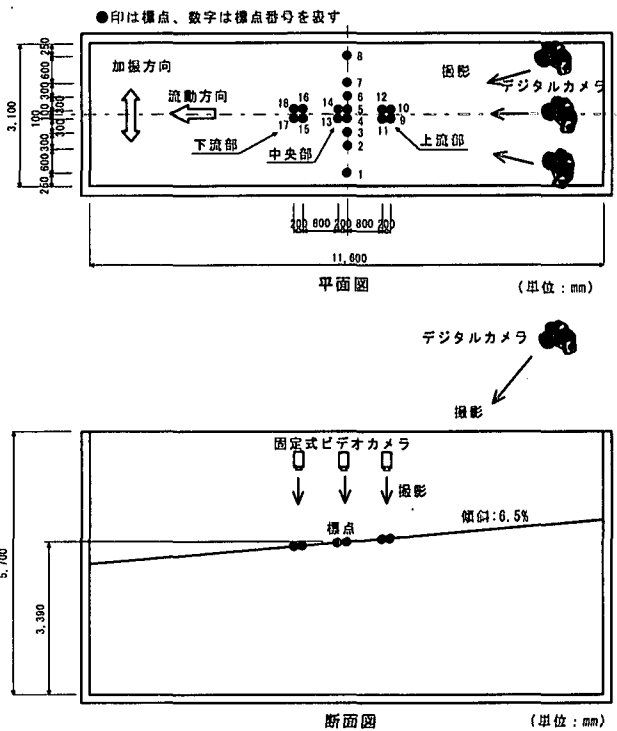
式(1)~式(8)で表される共線条件式は、未知数について非線形である。したがって、解析では、未知数を近似値と微小補正量とに分けて非線形方程式を線形化

し、繰り返し計算によって解を求める。

### 3. 振動台による液状化に伴う地盤流動実験

#### (1) 実験の概要

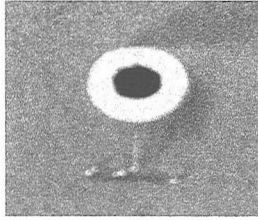
実験は、大型振動台上に図—2に示すように長さ11.6m、幅3.1m、高さ5.7mの大型せん断土槽をせん断が生じないように固定して設置し、液状化する傾斜砂地盤を作成し、正弦波で加振することで地盤の流動を発生させるものである。地盤条件を表—1に示す。地盤は相対密度が45.8%で、土槽中央の地盤厚さが3.39m、地盤の平均傾斜が6.5%をもつ。精密写真測量では、固定式ビデオカメラによる地盤流動量評価<sup>5)</sup>のために地表面の所定の位置に設置された、直径約3cmの黒色の標点を用い流動量を測定する。写真—1に使用した標点を示す。また、図—2に標点の設置位置図をあわせて示す。地盤に使用した砂は、霞ヶ浦砂である。



図—2 実験の概要図

表—1 地盤条件

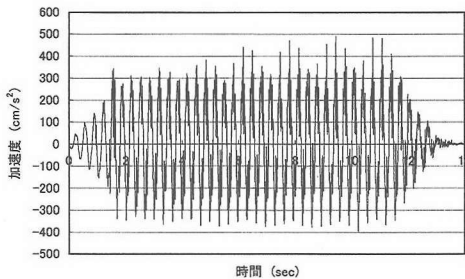
土槽中央の地盤厚さ(m)	傾斜(%)	相対密度(%)
3.39	6.5	45.8



写真—1 写真測量に用いた標点

## (2) 入力波

地盤を液状化させ流動を発生させるために用いた入力波は、流動方向と直交する方向の正弦波（3Hz）で、加速度の目標最大振幅は  $300\text{cm/s}^2$  である。立ち上がりの5波の後、 $300\text{cm/s}^2$  に達してから10秒間とし、その後収束の5波とする。図—3に実験時の土槽中央部の底面で計測された入力波形を示す。入力加速度最大値は  $492\text{cm/s}^2$  である。



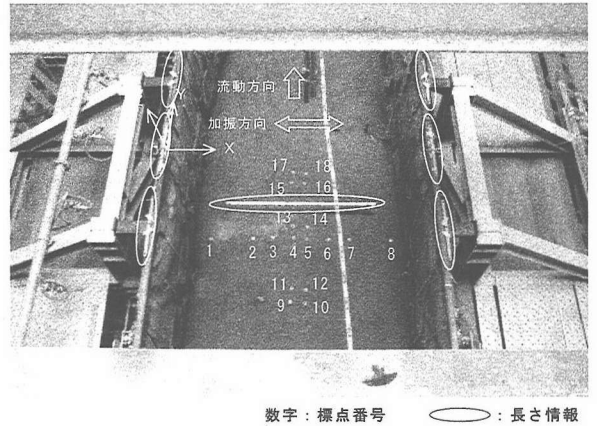
図—3 入力波形

## 4. 精密写真測量による地盤流動量の測定

### (1) 概要

図—2に示すように大型土槽の上方約10mの3方向から写真撮影を行う。使用したカメラは約270万画素のデジタルカメラ（ミノルタ RD3000）であり、撮影距離は約10m、焦点距離は22mmで撮影を行う。精密写真測量においては、撮影した画像を解析する上でカメラレンズの歪みを補正し、実空間と同スケールにするために長さ情報（2点間の長さが既知である基準尺）を設置し、写真撮影を行う。今回用いた長さ情報は、長さが約35cmと約2mのアルミ製板の両端に直径2cmの黒色シールを貼り付け、写真—2に示すように土槽の枠上端に6箇所と中央に1箇所設置する。加振後は土槽内の水を排水し、実験から約1時間経過した後に流動後の地盤を撮影する。

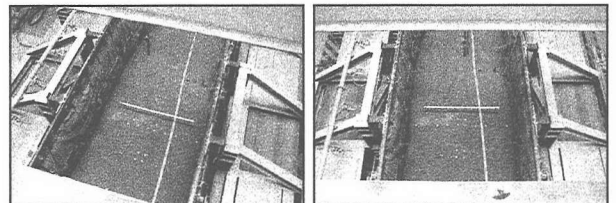
加振前において標点は地表面にあるが、加振後は液状化現象により標点は地盤内へ埋もれるため、加振後の写真撮影時においては埋もれた標点を掘り出し、おおよそ埋もれていた位置の地表面に標点をおいて写真撮影を行う。そのため、人手による掘り出しによる位置の誤差が含まれる可能性がある。



写真—2 精密写真測量の概要

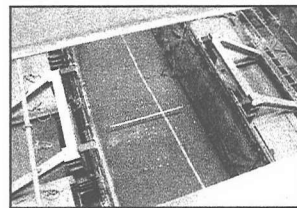
### (2) 解析に用いた画像

写真—3と写真—4に加振前後に大型土槽の上方から撮影した3枚の画像を示す。加振前後の撮影においてはほぼ同様の箇所から撮影を行う。



(a) 上流右側から撮影

(b) 上流中央から撮影



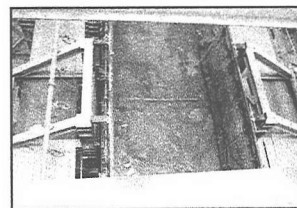
(c) 上流左側から撮影

写真—3 加振前の撮影画像



(a) 上流右側から撮影

(b) 上流中央から撮影



(c) 上流左側から撮影

写真—4 加振後の撮影画像

### (3) 解析方法

加振前後に撮影した各 3 枚の画像をもとに Self Calibration 法を用いて解析を行う。このとき、解析時の標点の写真座標の読み取り誤差は、測量精度に影響を与える。このため標点の写真座標を精度良く読み取るために、標点の明度による重み付き重心の値を写真座標として取得する<sup>4)</sup>。

### (4) 解析結果

表—2 に精密写真測量で得られた標点の流動量を示す。また、表—3 に上流部、中央部および下流部の平均流動量と平均沈下量を示す。流動量は上流部で平均 338mm、中央部で平均 287mm、下流部で平均 123mm であり、徐々に流動量は減少している。また、沈下量は上流部で平均 130mm、中央部で平均 58mm、下流部で平均 4mm である。

表—2 精密写真測量による各標点の流動量

標点番号	流動量(mm)		
	x	y	z
1	282.8	285.2	-60.3
2	-47.5	266.0	-78.7
3	-35.5	265.3	-47.6
4	-86.9	272.4	-62.9
5	-78.6	277.7	-61.0
6	-85.2	258.1	-36.0
7	-81.3	268.2	-32.6
8	-433.2	294.0	-33.1
9	-10.3	339.6	-137.2
10	-79.5	377.0	-141.9
11	-56.1	312.6	-122.8
12	-97.7	321.8	-117.7
13	-47.8	299.1	-49.9
14	-73.3	298.4	-56.2
15	-51.1	115.3	0.8
16	-77.3	145.6	-10.8
17	-82.4	97.5	14.5
18	-104.6	135.6	12.0

表—3 精密写真測量による上流部、中央部および下流部の平均流動量と平均沈下量

箇所	標点番号	平均流動量(mm)	平均沈下量(mm)
上流部	9	338	130
	10		
	11		
	12		
中央部	4	287	58
	5		
	13		
	14		
下流部	15	123	-4
	16		
	17		
	18		

### (5) 解析上の精度

表—4 に今回の解析における不動点である長さ情報の標点の加振前後における解析誤差を示す。平均誤差は X 方向 1.5mm、Y 方向 0.8mm、Z 方向 2.9mm であり、標準偏差は、X 方向 1.7mm、Y 方向 1.0mm、Z 方向 3.8mm と

なり、X、Y 方向に比べて Z 方向がやや精度が低下している。

測量精度は、デジタルカメラの性能や標点の写真座標の読み取り誤差などにより異なる。今回の実験に使用したデジタルカメラの CCD 素子の大きさは 11.8 $\mu$ m であり、標点の写真座標の読み取り精度を 1 画素とするとおおよその測量精度は、撮影距離が 10m、カメラの焦点距離が 22mm であるため、11.8 $\mu$ m $\times$ 撮影スケール(撮影距離/カメラの焦点距離)より 5.4mm となる。このことより、標点の写真座標の読み取り精度は X、Y 方向においては 1 画素の 1/4~1/7 程度、Z 方向においては 1/2 程度である。

以上のように、地盤の流動を対象とした場合でも、標点を比較的精度よく測量することが可能であることが分かった。

表—4 精密写真測量による不動点の解析誤差

	平均誤差(mm)	標準偏差(mm)
X方向 (加振方向)	1.5	1.7
Y方向 (流動方向)	0.8	1.0
Z方向 (鉛直方向)	2.9	3.8

## 5. 固定式ビデオカメラによる地盤流動量との比較

### (1) 概要

精密写真測量の結果を評価するため、同実験で別途実施された固定式ビデオカメラによる流動量測定結果<sup>5)</sup>と比較する。図—2 に示すように上流部、中央部および下流部において設置した標点の直上に 3 台のデジタルビデオカメラを固定し、加振直前から加振後まで撮影される。使用したビデオカメラは、上流部と下流部においては 30 コマ/秒で撮影できる画素数約 36 万画素のビデオカメラであり、中央部においては 200 コマ/秒で撮影できる画素数約 12 万画素の高速ビデオカメラである。

測定は、事前に標点間の長さを測定しておき、撮影した画像上に写っている標点間の画素数より画像尺度が算出され、標点が移動した画素数から流動量を算出する。撮影した画像において、上流部は 2.50mm/画素、下流部は 2.65mm、中央部は 1.56mm/画素である。

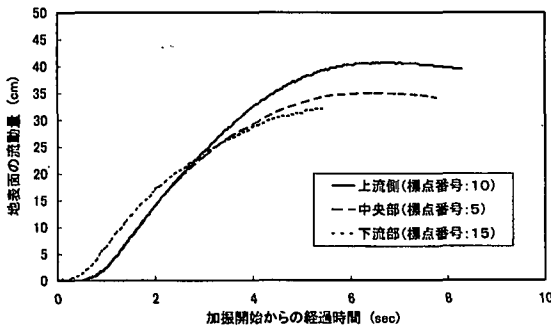
### (2) 測定結果

測定の結果、表—5 のように標点の流動量が得られた。流動量は、上流部で平均 370mm、中央部で平均 339mm、下流部で平均 305mm であり、下流に行くにしたがい徐々に流動量は減少している。加振開始からの流動量の時刻歴を図—4 に示す。加振開始後約 6 秒~8 秒程度で、液状化による噴水で標点は水没し測定ができなくなるが、

確認された流動量は、加振開始5秒付近ではピーク値に達しその後3秒程度はほとんど変化しないかやや戻る傾向を示すことから、ほぼ最終変形量に達しているものと判断した。この値を精密写真測量で求まる実験後約1時間が経過した後の残留移動量と比較することにする。

表一5 固定式ビデオカメラによる上流部、中央部および下流部の平均流動量

箇所	標点番号	流動量(mm)	平均流動量(mm)
上流部	9	390	370
	10	395	
	11	307	
	12	387	
中央部	4	339	339
	5	339	
	13	338	
	14	339	
下流部	15	320	305
	16	294	
	17	305	
	18	302	



図一4 固定式ビデオカメラによる流動量の時刻歴

### (3) 流動量の測定結果の比較

表一6に地表面の流動量について、精密写真測量結果と固定式デジタルカメラによる測定結果を比較して示す。流動量が下流になるにつれて流動量は減少していく傾向は同じである。上流部、中央部の平均流動量は、固定式ビデオカメラによる測定結果に比べて精密写真測量結果の方が32mm~52mm小さい値となっている。加振後は液状化により標点が地盤内へ埋もれるため、加振後の写真撮影時に埋もれた標点を掘り出し、おおよそ埋もれていた位置の地表面に標点を置いた影響を考慮すれば、よい一致を示していると考えられる。特に上流部では、それぞれの標点の相対的な移動量の関係も一致している。下流部において、固定式ビデオカメラの結果が305mmに対し、精密写真測量の結果が123mmとおおよそ180mm小さく、半分以下の値となっている。前述した解析上の誤差が1mm程度であることを考えると違いが大きい。図一4に見られるように標点が加振中に最大変位を示しやや戻る傾向があることから、標点が加振後半に押し戻された可能性や下流部については掘り出しの際に斜め方向から作業したことから、位置のずれが大きくなった可能性などがあり、さらに他の計測結果と比較検証するな

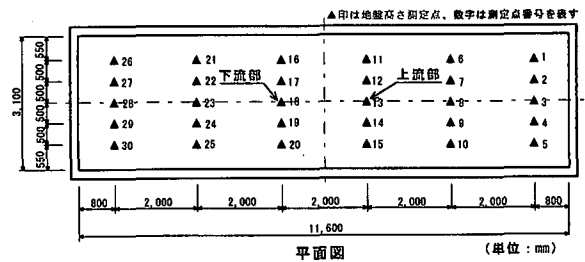
ど今後の課題としたい。

表一6 平均流動量の比較

箇所	平均流動量(mm)	
	固定式ビデオカメラによる測定	精密写真測量結果
上流部	370	338
中央部	339	287
下流部	305	123

## 6. 測定された地盤高さとの比較

ここでは、精密写真測量で得られた地盤の沈下量を、別途実験前後に下げ振りを用いて測定された地盤高さから求まる沈下量と比較する。下げ振りによる地盤高さの測定は、図一5に示す所定の位置で大型土槽の上方の高さが既知の箇所から地表面まで巻き尺を垂らして地盤高さを読み取る。測定結果を表一7に示す。加振前の土槽中央部の平均地盤高さは3.39m程度であり平均傾斜は6.5%である。実験後における土槽中央部の平均地盤高さは3.35m程度であり平均沈下量は0.04mで平均傾斜は1.3%となり、加振により水平に近い状態となったことが分かる。また、測定位置の違いによる地盤の不陸がかなりあり、その差は精密写真測量が対象とする上流部断面で最大6cm程度、下流部断面で2cm程度である。



図一5 下げ振りによる地盤高さの測定位置

表一7 下げ振りによる地盤高さの測定結果

箇所	測定点番号	加振前の地盤高さ(m)		加振後の地盤高さ(m)		地盤沈下量(m)	平均地盤沈下量(m)
		測定値	平均値	測定値	平均値		
上流部	1	3.79	3.78	3.40	3.41	0.39	0.37
	2	3.79		3.40		0.39	
	3	3.78		3.40		0.38	
	4	3.79		3.42		0.37	
	5	3.77		3.45		0.32	
	6	3.68		3.38		0.30	
	7	3.70		3.39		0.31	
	8	3.70		3.38		0.32	
	9	3.67		3.36		0.31	
	10	3.66		3.38		0.30	
中央部	11	3.45	3.44	3.38	3.35	0.07	0.08
	12	3.46		3.36		0.10	
	13	3.44		3.32		0.12	
	14	3.43		3.34		0.09	
	15	3.40		3.36		0.04	
	16	3.34		3.35		-0.01	
	17	3.34		3.35		-0.01	
	18	3.34		3.34		0.00	
	19	3.33		3.33		0.00	
	20	3.32		3.33		-0.01	
下流部	21	3.20	3.21	3.34	3.32	-0.14	-0.11
	22	3.20		3.32		-0.10	
	23	3.22		3.32		-0.10	
	24	3.23		3.31		-0.08	
	25	3.21		3.32		-0.15	
	26	3.17		3.31		-0.10	
	27	3.17		3.32		-0.15	
	28	3.17		3.31		-0.14	
	29	3.17		3.32		-0.10	
	30	3.17		3.10		0.07	

表—8に精密写真測量結果ともっとも近い位置の下げ振りによる測定結果を比較して示す。下げ振りによる測定は、読み取りが cm 単位であり、地表面の不陸を考慮するとほぼ同様な結果が得られた。

表—8 平均沈下量の比較

箇所	下げ振りによる測定結果 (mm)	精密写真測量結果における平均沈下量 (mm)
上流部	120	130
下流部	0	-4

## 7. 結論と今後の課題

精密写真測量を大型振動台と大型土槽を用いた液状化に伴う地盤の流動実験に適用し、地盤の流動量の測定を行い、他の手法との比較を行った。その結果、以下のことが分かった。

(1)流動する地盤を対象とする場合でも、解析は比較的精度良く、今回の実験では、標点の写真座標の読み取り精度はX、Y方向においては1画素の1/4~1/7程度、Z方向においては1/2程度であった。

(2)加振後に標点が地盤内に埋もれてしまったため、標点を掘り出した誤差が混入したことから、数 cm の違いは生じたものの、水平の流動量は流動の上流部、中央部では精度よく評価することができた。しかしながら下流部では測定結果の差が大きく、標点を掘り出す際に斜め方向から作業したことによる位置のずれが大きくなった可能性などがあり今後の課題としたい。

(3)沈下量の測定においては、地表面の不陸を考慮するとほぼ同様な結果が得られ、比較的精度良く測定することができた。

以上のことから、実際の地震における構造物の変位挙動を測定しようとする場合においては、今回の実験のように標点が地盤内に埋もれないものを標点とすれば問題なく、しかも3次元的な地盤の流動量や構造物の変位挙動を解析することができる可能性が高いことが示された。

今回の実験では撮影距離が約10m、カメラの焦点距離が22mmで比較的近距离から撮影することができ、精度良く地盤の変位挙動を測定することができたが、測量対象が実際の地盤のように、より広範囲である場合は、カメラの焦点距離を22mmとすると遠距離から撮影を行わなければならない。この場合、例えば撮影距離を100mとすると測量範囲は約100m×75mとなり今回の実験結果の10倍程度精度が低下することが考えられる<sup>8)</sup>。しかしながら、実際の地震において構造物の変位挙動を測定する上においては実用的なオーダーであると考えられる。

今後は、より広範囲の測量における精密写真測量の精度を検証するとともに測量精度の向上に努めたい。

謝辞：本実験は科学技術振興調整費「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として実施されたものである。本実験は独立行政法人防災科学技術研究所の大型振動台実験施設により行われました。施設をご提供いただいた独立行政法人防災科学技術研究所佐藤正義統括主任研究員および関係者の方々に感謝の意を表します。また、引き続き行われた実験に快く参加させて頂いた独立行政法人港湾空港技術研究所構造振動研究室菅野高弘室長に感謝の意を表します。また、本精密写真測量システムは、京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻大西有三教授にご指導して頂きながら共同で開発したものであり、ここに改めて感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 濱田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利: 液状化による地盤の永久変位の測定と考察, 土木学会論文集, 第376号/III-6, pp. 211-220, 1986.
- 2) Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K: Liquefaction-induced ground displacement and its related damage to lifeline facilities, Special Issue of Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, pp. 81-97, 1996.
- 3) Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H: Soil characteristics and ground damage, Special Issue of Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, pp. 109-118, 1996.
- 4) 近久博志, 中原博隆, 筒井雅行, 大西有三, 岡本厚: 岩盤空洞の不連続面分布調査に対する精密写真測量の適用法, 第1回岩盤工学シンポジウム講演論文集, システム総合研究所, pp.45-46, 1996.
- 5) 栗田誠, 平尾淳, 藤原裕司, 高橋祐治: 大型土槽実験による液状化土の流動特性の研究, 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, 土木学会, 2002. (投稿中)
- 6) Okamoto, A: The model construction problem using the collinearity condition, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.50, No.6, pp. 705-711, 1984.
- 7) 岡本厚, 大西有三, 藤原弘一: 精密写真測量による不連続面計測について, 土木学会第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.286-290, 1996.
- 8) 近久博志, 中原博隆, 阿保寿郎: 市販されているデジタルカメラを用いた長大法面の挙動監視システム“TPhotoS”, 電力土木, No.294, pp.116-117, 2001.