

# 1999年トルコ・コジャエリ地震における 液状化地盤の流動 —サパンチャ湖周辺における流動の事例研究—

犬塚 真一<sup>1</sup>・石崎 安洋<sup>2</sup>・喜田 和政<sup>2</sup>・濱田 政則<sup>3</sup>

<sup>1</sup>早稲田大学 理工学研究科 (〒169-0072 東京都新宿区大久保3-4-1)

<sup>2</sup>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)

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

Kocaeli earthquake occurred with a magnitude of 7.8( $M_s$ ) on 17 August 1999 in Kocaeli Province of Turkey. Case studies of liquefaction-induced ground displacement around Sapanca Lake are conducted. In this case study, liquefaction-induced ground displacements are measured by aerial photo interpretations and ground conditions are investigated to predict liquefiable layer. The formula to predict displacements of sloped ground have already proposed based on the case study of liquefaction during past earthquakes. Therefore by comparison between case studies during Kocaeli earthquake and past earthquakes, reliability and precision of this formula is validated.

**Key Words:** Kocaeli earthquake, Sapanca lake, liquefaction, lateral spreading

## 1. はじめに

1999年8月17日、トルコ西部のマーマラ地方、コジャエリを震源として発生したトルコ・コジャエリ地震 ( $M_s=7.8$ ) によって、北アナトリア断層に沿ったイズミット湾の南岸西側カラミュセルから東側ギョルジュックにかけての海岸線一帯、さらに内陸部のサパンチャ湖畔において、水際線における地盤の流失、水没、流動といった地盤変状が生じていた。そこで、筆者らは、地盤変状を定量的に分析することを目的とし、サパンチャ湖畔とイズミット湾南岸において、大規模な航空写真測量を行い、地盤の地表面変位図を作成している。

今回、第一段階として、トルコ・コジャエリ地震で見られた地盤被害のうち、液状化被害が発生したサパンチャ湖南岸にあるサパンチャ・ホテル周辺における事例分析を実施した。筆者らは既に、既往地震による側方流動の事例分析、液状化土を非線形粘性流体とみなした場合の相似則および模型地盤の流動実験などに基づいた傾斜地盤の地表面変位の予測式<sup>1)</sup>を提案している。本研究における事例分析結果と既存の事例分析結果を比較することにより予測式の信頼性と精度を検討した。

## 2. サパンチャ・ホテル周辺の液状化と被害の概要<sup>2)3)</sup>

サパンチャ湖は、アダバザルの南西に位置する盆地であり、イズミット湾からおよそ20km離れた場所に位置している。液状化被害が顕著だった地域は、サパンチャ湖南岸に位置するサパンチャ・ホテル周辺である。サパンチャ湖およびサパンチャ・ホテルの位置を図-1に示す。

ホテル周辺では、湖岸のほとんどが浸水し(写真-1)、図-2に示すように海岸線が陸側へ移動した。地表には、湖岸にほぼ平行ないくつもの亀裂と噴砂の跡が見られ、液状化と流動が発生したことを示している。ホテル東側での亀裂の開口幅の合計は約2mである。

また、写真-2は地表面と建物の相対変位量(1999年9月現在)を表しており、最大水平ずれは約2mである。地震前には建物と密着していた地面の境界が建物の壁の位置に見え、上部構造に被害は見られない。

これらのことは、この地域全体で液状化の影響によって地表面が湖の方向に動いたことを示している。



図-1 サパンチャ湖の位置<sup>4)</sup>

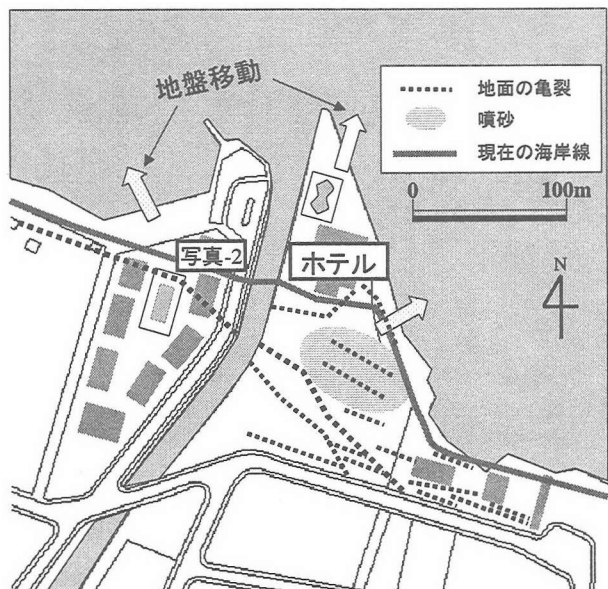


図-2 サパンチャ・ホテル周辺の被害概略図<sup>2)3)</sup>



写真-1 サパンチャ・ホテルの浸水状況

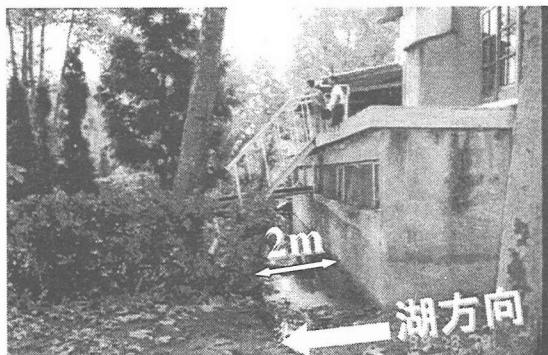


写真-2 サパンチャ・ホテル付近での地盤の流動<sup>5)</sup>

### 3. 航空写真による地盤変位量の測定

#### (1) 地盤変位量の測定について

液状化が及ぼした影響を定量化するために、表-1に示した地震前後の航空写真を用い、地表面の水平変位量、沈下量を測定した。航空写真測量は次の手順によって行われる。

- ・ 地震前後の航空写真に共通な目標物の中から基準点を選び出す。
- ・ その基準点の座標を既存の測量結果または地形図からの数値化により、決定する。
- ・ マンホールや樹木の足などを標的とした3次元座標を測量し、地震前後の各々の座標の差を地表面の水平変位量、沈下量とする。

なお、今回の写真測量における水平方向の精度は約50cm~60cmと見積もられている。

#### (2) 分析対象地域の選定とボーリング地点、地表面勾配について

図-3に地表面変位量を測定した地域とサパンチャホテルの位置を示す。このうち、地表面変位量、既存のボーリングデータをもとに、本研究における分析対象地域を東側から①~⑤の5つの湖岸沿いのエリアとした。

これらのエリアに含まれる既存のボーリングデータ17点に加え、航空写真測量による変位量が大きく、変位方向が一定である地点を14点選定し、新たにボーリング調査を行った。

また、地表面勾配を測定するために、大きな変位量が生じた場所や変位量データがまとまって存在する場所に16本の測線を設定し、航空写真測量から地表面の形状を調べた。その際、観測点には、道路脇のブロックや塀など局部的な突起物は極力除外した。

それぞれのエリアの拡大図を図-4~8に示し、地表面変位ベクトルと共に、ボーリング、測線の位置と番号をそれぞれ表示した。

表-1 測量に用いた航空写真

|     | 撮影縮尺     | 撮影年月日 |
|-----|----------|-------|
| 地震前 | 1/35,000 | 1994  |
| 地震後 | 1/16,000 | 1999  |

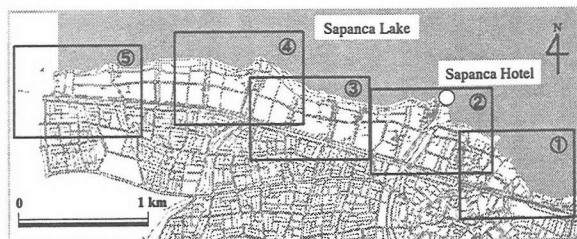


図-3 分析対象地域

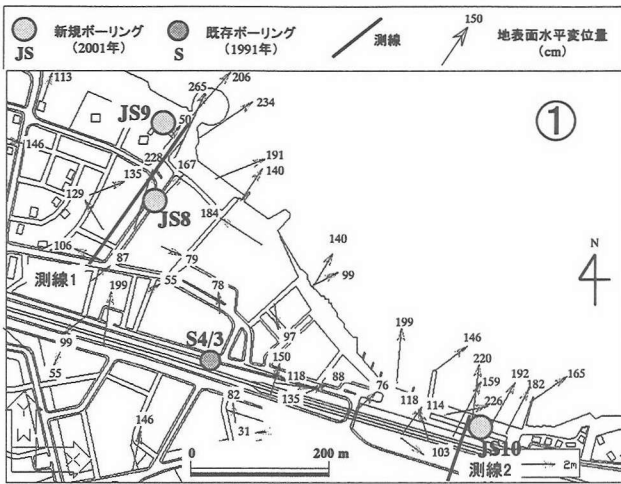


図-4 エリア①

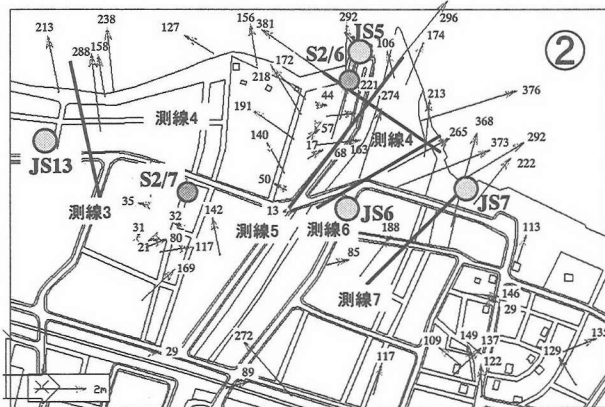


図-5 エリア②

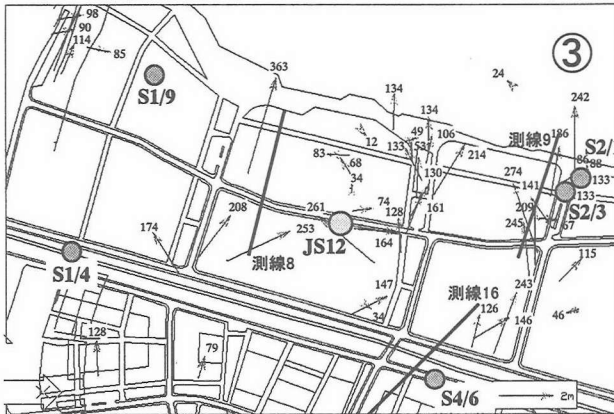


図-6 エリア③

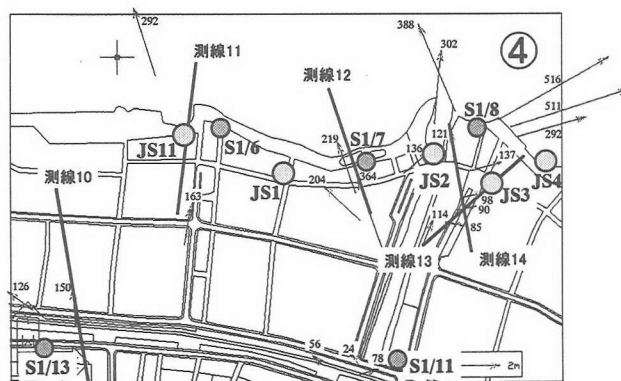


図-7 エリア④

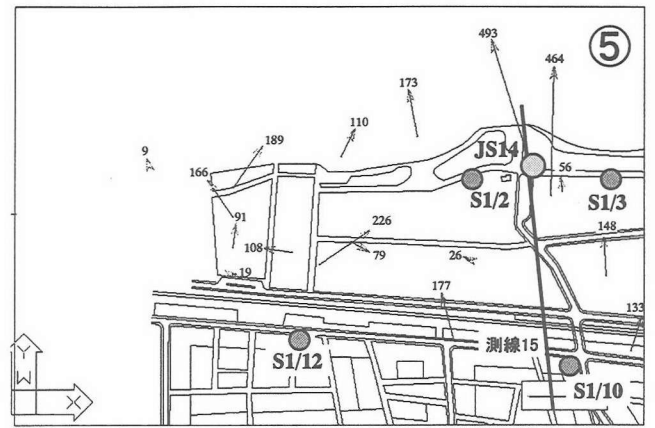


図-8 エリア⑤

#### 4. 土質条件と液状化の検討

##### (1) 分析対象地域の土質

図-4～図-8で示した31地点のボーリングデータにおいて、土質をそれぞれ①砂質土②レキ質土③粘性土④埋立・草地の4種類に分類し、地域別で作成した土質柱状図を図-9～図-13に示す。また、図中に各ボーリングにおける地下水位の位置とN値を示す。

図-9～図-13より、エリアが東から西に行くにつれ、砂質土が減り、粘性土が支配的になってくるのがわかる。また、どの地域においても、護岸から離れるにしたがって、レキ質土が支配的になっている。

##### (2) ボーリング地点における地表面水平変位量の推定方法

ボーリング地点より半径50m以内の測点における地盤変位量の平均値を求め、その値をそのボーリング地点における地表面水平変位量とした。ただし、ベクトル方向が全体の流動方向とそぐわないもの、変位量が極端に小さく明らかに側方流動によるとは考えにくい変位ベクトルは分析対象から除外した。

##### (3) 液状化層の推定

(2)により、全ボーリング地点のうち地表面変位量の推定が可能であった15地点のボーリングデータにおいて、道路橋示方書（V耐震設計編，1996）により、液状化に対する抵抗率  $F_L$  をそれぞれ計算し、各ボーリング地点における液状化層の様子を調べた。なお、地震の種類はタイプII地震動とした。また、本論文の対象地域では、地表面最大加速度の地震計による観測は行われていない。しかし、サパンチャ湖から最も近い場所（アダバザル）で計測された地表面最大加速度が407galであったことから、液状化判定用の水平震度を0.4とした。各ボーリング地点の液状化の判定結果を地表面変位量の大きいボーリング順に並べて図-14に示す。図-14に示すとおり、液状化層厚と変位量の関係には特に相関関係が見られていない。

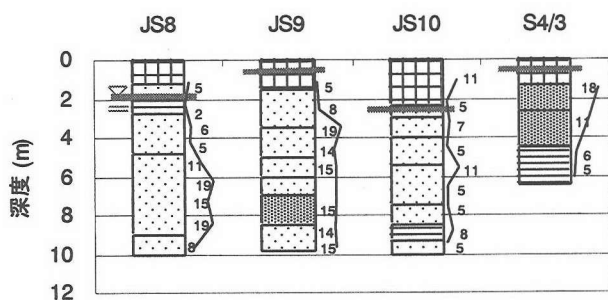
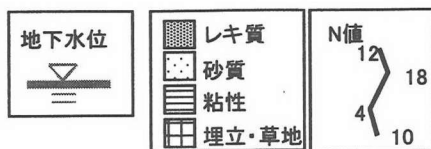


図-9 土質柱状図 (エリア①)

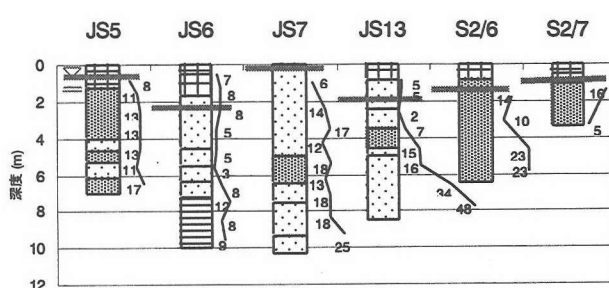


図-10 土質柱状図 (エリア②)

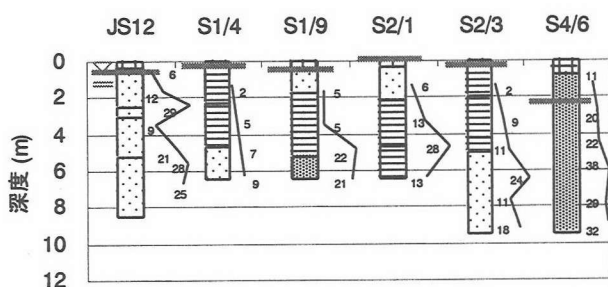


図-11 土質柱状図 (エリア③)

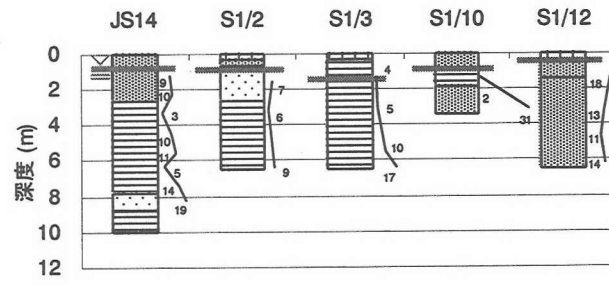


図-13 土質柱状図 (エリア⑤)

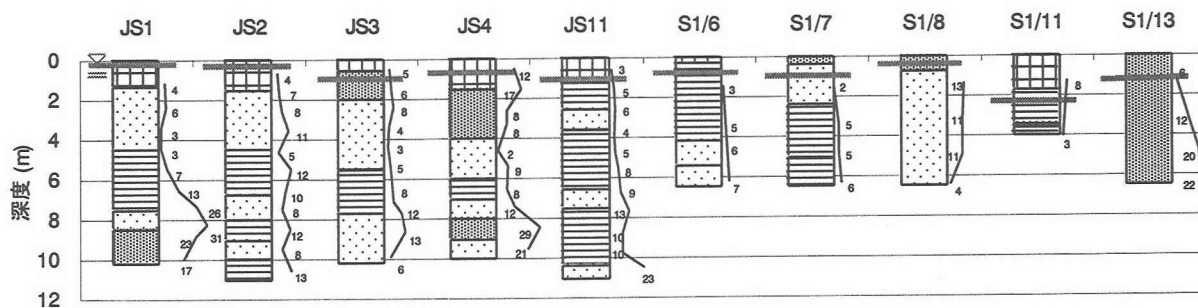


図-12 土質柱状図 (エリア④)

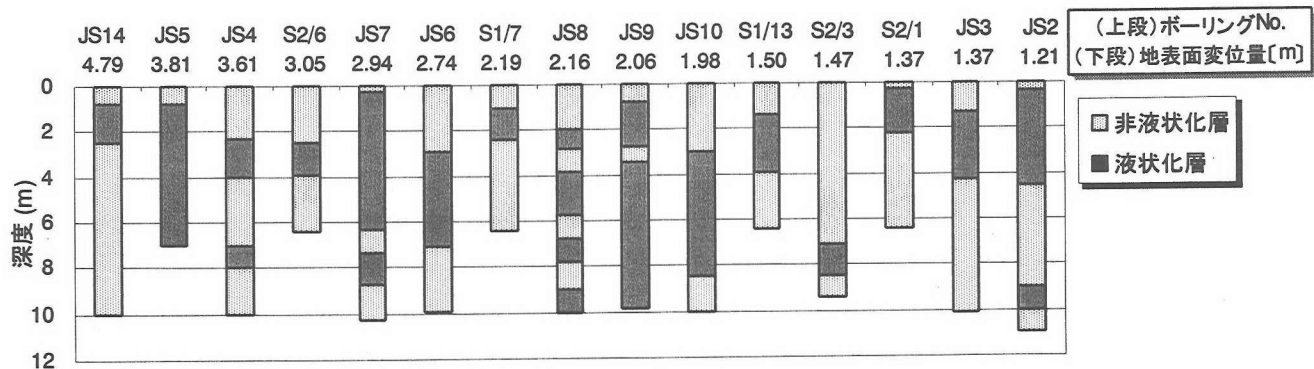


図-14 液状化柱状図

(4) 地表面勾配の算定

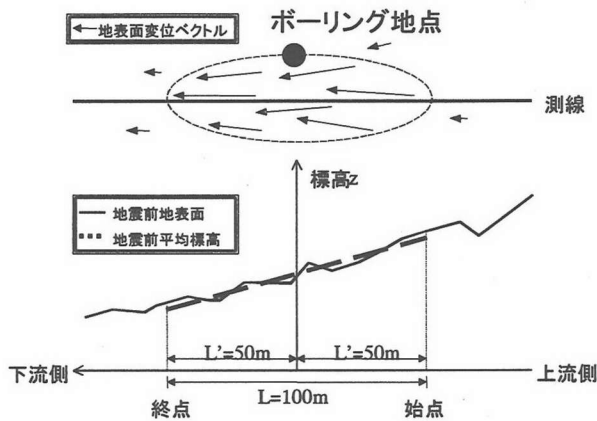


図-15 地表面形状の一例

地表面には多くの起伏や段差があり、地表面勾配を算定する場合、勾配を算定するための長さや位置により勾配が大きく変化する恐れがある。そこで、本論分では、以下の方法で地表面勾配を算定した。

原則として測線付近のボーリング地点より斜面の上流側、下流側それぞれへ 50m、計 100m をそのボーリング地点の領域長とした。次に領域長における観測点の標高を航空写真測量により測定し、図-15 のポンチ絵に示すように各観測点の標高から、最小二乗法により地表面形状を直線近似し、その傾きを地表面勾配とした。

この結果、地表面形状が複雑なもの、また、ボーリングを中心とした地表面勾配の正確な算定が不可能(湖内の勾配が測定不可能)な 4 地点のデータを除いた。

残ったボーリング 11 地点の液状化層厚、地表面勾配などのデータを表-2 にまとめて示す。

5. 既存データとの比較による考察

(1) 地表面変位量の推定式

既往の研究<sup>1)</sup>において、式(1)が傾斜地盤の地表面変位量の予測式として得られている。式(1)は 1964 年新潟地震、1983 年日本海中部地震および 1995 年兵庫県南部地震での液状化土の事例分析、液状化土を非線形粘性流体とみなした場合の相似則および模型地盤の流動実験などより求められたもので、図-16 のように液状化層が複数層に分かれた地盤を想定している。

$$Ds = 36 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\left( \sigma_{vi} H_i + \frac{1}{2} \gamma_i H_i^2 \right)}{\left( \sigma_{vi} + \frac{1}{2} \gamma_i H_i \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \bar{N}_i} \theta \quad (1)$$

ここに、  $Ds$  : 地表面の流動量 (m)

$\bar{N}_i$  : 有効鉛直応力によって補正された  $N$  値

その他: 図-16 参照

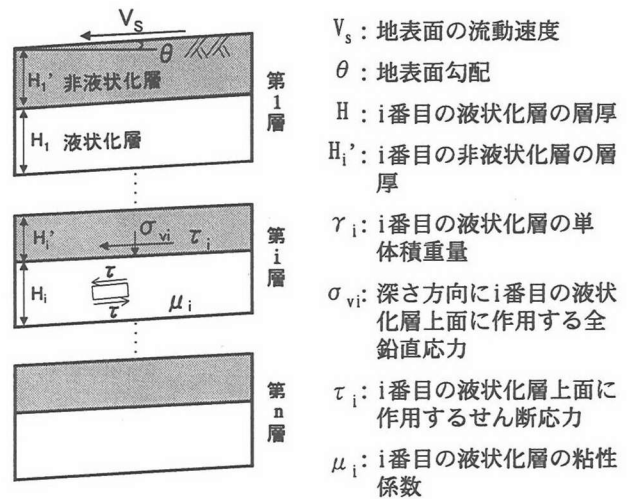


図-16 傾斜地盤の液状化層の流れ

既往地震における、本予測式による値と実測値との関係は図-17に示す通りである。

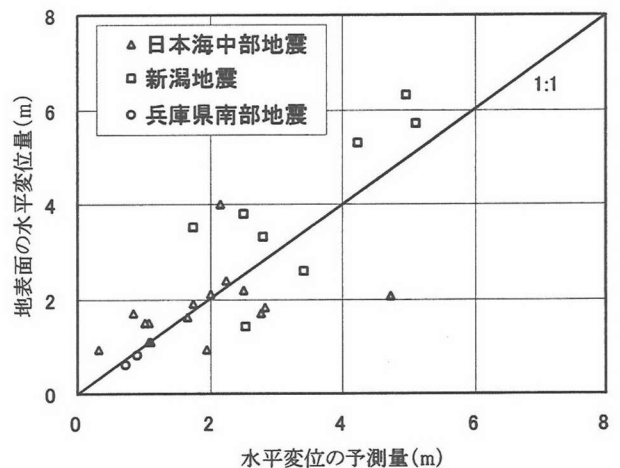


図-17 既往地震における予測値と実測値の関係<sup>1)</sup>

(2) トルコ・コジャエリ地震と日本における既往地震との比較

本論文で分析した 11 地点のボーリングデータにおいて、(1)の予測式を用い、予測値と実測値の関係を調べ、日本における既往地震と比較した。その結果を図-18 に示す。図中の数字はデータ番号を示し、各データ番号のボーリング資料を表-2 に示す。

図-18 に示すように、今回新たに加えたトルコ・コジャエリ地震におけるデータは、日本の既往地震におけるデータよりもばらつきが大きい、ある程度の整合性は得られている。

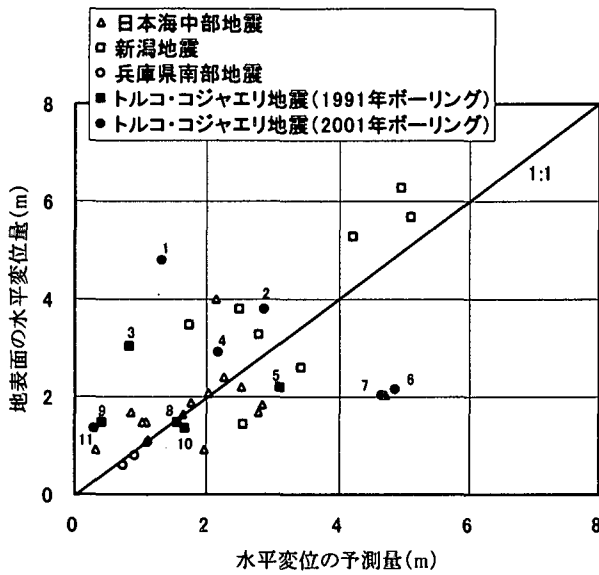


図-18 既往地震との比較

## 6. まとめ

1999年トルコ・コジャエリ地震において、航空写真測量を基にした地盤の地表面変位図作成による地盤変状の定量的分析の第一段階として、今回、サンチャ・ホテル周辺の液状化による地表面の流動量を分析した。航空写真による地表面変位量の実測値と、提案されている傾斜地盤における側方流動量予測式の関係について、既往地震における検証結果と比較検討した結果、トルコ・コジャエリ地震におけるデータは、日本の既往地震におけるデータよりもばらつきが大きいものの、ある程度の整合性が得ら

れた。

今後もイズミット湾南岸における断層や液状化などの被害について、航空写真測量を基にした定量的な事例分析を行っていく予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたって、Hacettepe University の R.Ulusay 教授、東海大学海洋学部の O.Aydan 教授に貴重ご指導をいただきました。また、航空写真測量を実施するにあたってはトルコ陸軍各位に多大なるご協力をいただきました。ここに感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

また、本研究は平成 11 年度科学技術振興調整費による総合研究の一環として行われたもので、関係者に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 濱田政則, 若松加寿江, 島村一訓, 田島幸治, 楡達郎: 液状化地盤の水平変位量の予測法に関する研究 「第 2 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論文集」, 2000
- 2) (社)地盤工学会: 1999 年トルコ・コジャエリ地震調査報告書, 2000
- 3) Jean-Pierre Bardet: the surface faulting and liquefaction-induced lateral spreads after the 1999 Kocaeli and Duzce earthquakes THE 1999 KOCAELI EARTHQUAKE, TURKEY, 2000
- 4) 1999 年トルコ・コジャエリ地震調査報告, 2000
- 5) EDM Technical Report No.6 August 2000: The 1999 Turkey Earthquake Report Vol.1, Report on Kocaeli, Turkey Earthquake of August 17, 1999

表-2 各種データのまとめ

| データ番号 | ボーリング |      | 測線 No. | エリア No. | 変位量 [m] | 地下水位 [m] | 液状化層厚合計 [m] | 地表面勾配 [%] | 水平変位予測量 [m] |
|-------|-------|------|--------|---------|---------|----------|-------------|-----------|-------------|
|       | No.   | 実施年  |        |         |         |          |             |           |             |
| 1     | JS14  | 2001 | 15     | ⑤       | 4.79    | 0.80     | 1.65        | 2.12      | 1.306       |
| 2     | JS5   | 2001 | 4      | ②       | 3.81    | 0.75     | 6.25        | 2.04      | 2.860       |
| 3     | S2/6  | 1991 | 4      | ②       | 3.05    | 1.50     | 1.50        | 2.04      | 0.830       |
| 4     | JS7   | 2001 | 7      | ②       | 2.94    | 0.30     | 7.43        | 1.44      | 2.167       |
| 5     | S1/7  | 1991 | 12     | ④       | 2.19    | 1.00     | 1.40        | 1.36      | 3.106       |
| 6     | JS8   | 2001 | 1      | ①       | 2.16    | 2.00     | 4.73        | 2.02      | 4.879       |
| 7     | JS9   | 2001 | 1      | ①       | 2.06    | 0.75     | 9.05        | 2.02      | 4.651       |
| 8     | S1/13 | 1991 | 10     | ④       | 1.50    | 1.40     | 2.58        | 1.69      | 1.547       |
| 9     | S2/3  | 1991 | 9      | ④       | 1.47    | 0.40     | 1.35        | 1.47      | 0.418       |
| 10    | S2/1  | 1991 | 9      | ④       | 1.37    | 0.00     | 1.90        | 1.47      | 1.681       |
| 11    | JS3   | 2001 | 13     | ④       | 1.37    | 1.02     | 2.98        | 0.20      | 0.302       |