

兵庫県南部地震における 地表水平変位の方向性に関する検討

吉田雅穂¹・宮島昌克²・北浦 勝³

¹正会員 福井工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

²正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20)

³フェロー 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20)

本研究は、地表面がほぼ水平な地盤において発生する、液状化地盤の流動メカニズムを明らかにするものである。1995年兵庫県南部地震の際に六甲アイランドで生じた地表の水平変位の方向性について、その分布特性や発生要因を検討した結果、地表面傾斜や護岸移動の影響をあまり受けていない地盤において、南方向の水平変位が卓越していたことを明らかにし、この方向と当該地盤の土層境界面の傾斜方向とが一致していることを示した。また、地表面が水平で基盤に傾斜を有する地盤をモデル化した液状化実験を実施した結果から、基盤傾斜の方向に地表水平変位が発生したことを示した。

Key Words : earthquake, liquefaction, lateral flow of ground, ground displacement, plane ground
1995 Hyogoken-Nambu earthquake, Rokko island, case study, experiment

1. はじめに

液状化した地盤が水平方向に数メートルも移動する流動現象は、従来より地表面の傾斜や護岸の移動が要因となって発生するとされてきた。しかし、過去の流動現象を詳しく調べてみると、これらの条件を満足しないような地盤においても、数メートルのオーダーで流動が発生しているケースも確認されている。例えば、1995年兵庫県南部地震について、神戸市東灘区の臨海部に位置する深江浜、魚崎浜、御影・住吉浜の3つの埋立地盤における流動事例を調査した結果、地表面勾配が1%以下のほぼ水平な所や、護岸背後から数百メートルも離れた所でも、数メートルもの水平変位が発生していたことが明らかとなっている¹⁾。また、それらの水平変位の方向性を調査した結果、護岸部ではそのほとんどが海側に変位しているのに対し、その背後の内陸部では南方向への変位が卓越していたことを明らかにしている²⁾。

本研究は、このような地表面の傾斜や護岸の移動を主な要因としない、ほぼ水平な地盤における流動のメカニズムを明らかにするもので、事例分析と模型実験により検討を行った。まず事例分析では、上記3地区の南方海上に位置する六甲アイランドを対象として、地表の水平変位の分布特性やその発生要因を明らかにし、また、変位の量と方向に関与する要因として、地表面勾配と土層境界面勾配を取り上げ、その

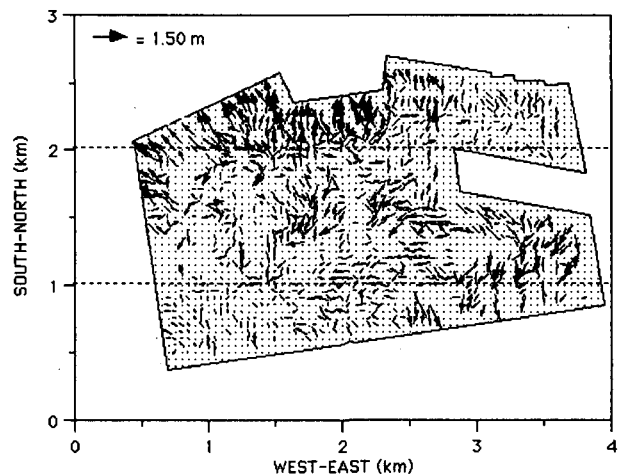


図-1 対象地区

影響の有無について検討を行った。また模型実験では、地表面は水平であるが基盤に大きな傾斜を有する地盤をモデル化して振動実験を行い、液状化に伴う地表水平変位の発生メカニズムについて考察を行った。

2. 事例分析

(1)水平変位の分布特性

対象地区は図-1に示す六甲アイランドを含む東西4km×南北3kmの領域であり、解析では同地区を東西50m×南北50mのメッシュに分割して検討を行っ

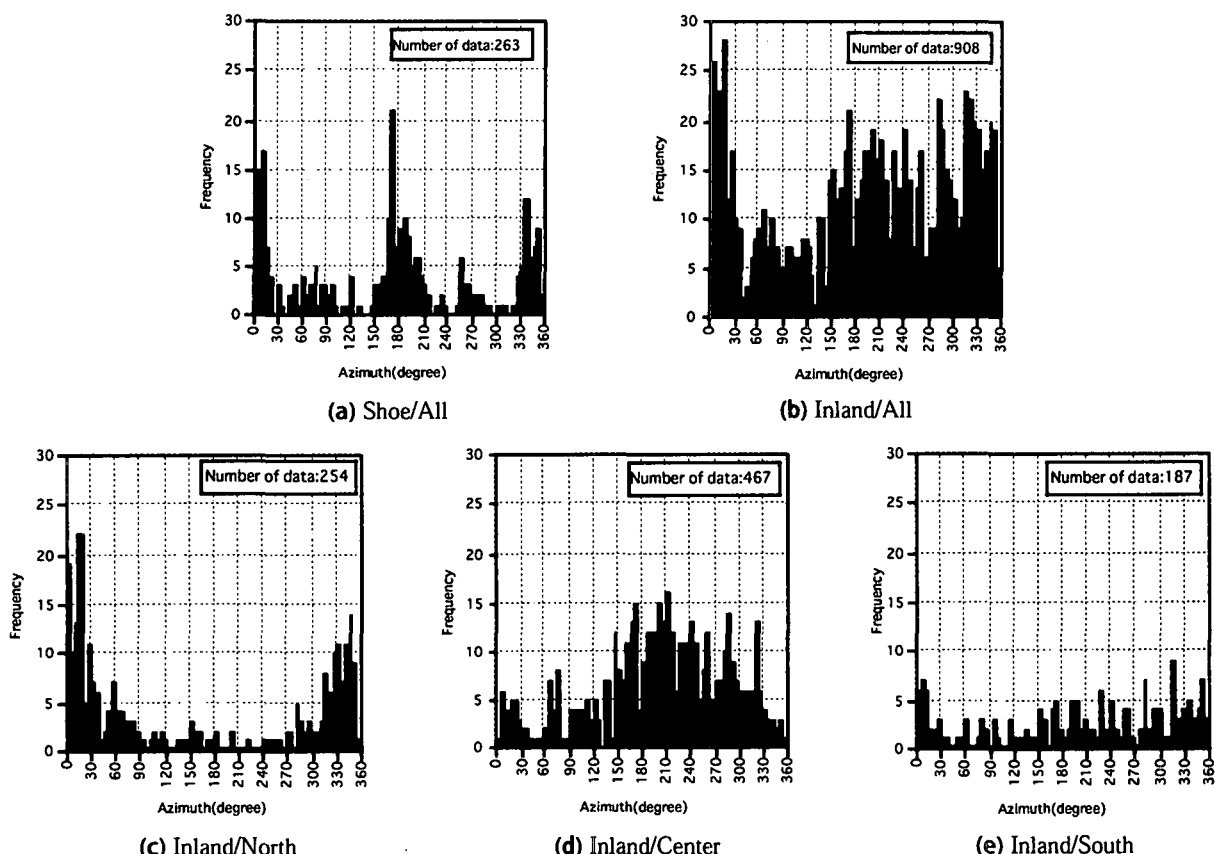


図-2 水平変位の方位角

た。本研究で扱う水平変位は、主に護岸移動による影響の少ない埋立地盤内陸部における変位を対象としているため、対象地区の全変位データのうち護岸から最大で100mの範囲内で発生した護岸部（Shore）での変位と、それ以外の内陸部（Inland）での変位とに分けて利用している。なお、変位ベクトルは地震前後の航空写真測量による判読結果²⁾をメッシュデータ化したものを用いており、図-1にはその内陸部のみの変位ベクトルが示されている。最大水平変位は護岸部で約5.5m、内陸部で約1.6mであり、内陸部でも比較的大きな変位が発生していた。

図-2は水平変位ベクトルの方位角をヒストグラム表示したものである。図(a)の護岸部では0度(360度)と180度方向、すなわち南北方向にピークが見られる。これは、六甲アイランドは南北方向に面した護岸距離が長いことによる影響と考えられる。しかし、図(b)の内陸部では、90度前後の変位が少ないという点以外には特徴的な傾向が見い出せない。そこで、図(b)の内陸部のデータに関して、変位の発生場所を同地区の南北方向座標軸を用いて、0～1km（南区）、1～2km（中区）、2～3km（北区）の3区域に分類し変位の発生傾向を整理した。

まず、図(c)の北区については北方向への流動データが圧倒的に多く、この方向は北区で発生した護岸部の海側への移動方向とも一致する。現地調査結果

によれば、この北区は六甲アイランドの中でも特に液状化による噴砂が顕著であった所でもあり、護岸から100m以上離れた所でも護岸移動の影響を強く受けていたことを示している。つぎに、中区については、図(d)に示すように南および南西方向の変位が卓越していることが分かる。これは、前述の深江浜、魚崎浜、および御影・住吉浜と同様の傾向を示しており、非常に興味深い結果である。最後に、図(e)の南区については、他の区域と比較してデータ数が少ないため明瞭な傾向は確認できなかったが、別途大きさに別に整理した結果、0.5m以上の大きい変位は同区域の護岸移動の方向でもある南方向に多く分布する傾向が見られた。以上より、液状化の程度が激しかった北区では、護岸移動の影響が内陸部の変位方向にまで影響したが、護岸移動の影響を受けていない中区に関しては、前述の3つの埋立地盤と同様に南方向への変位が卓越していたことが明らかとなった。

(2)水平変位の要因分析

ここでは、六甲アイランドの水平変位について、特に中区において顕著であった南方向への変位の発生要因を検討する。

まず、地表面勾配による影響を検討するため、検討地点と前後50mの2地点との標高差を東西および南北方向でそれぞれ求めて地表面勾配に変換し、また

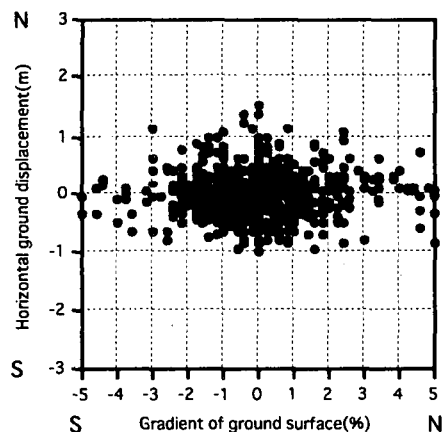


図-3 地表面勾配と水平変位量との関係

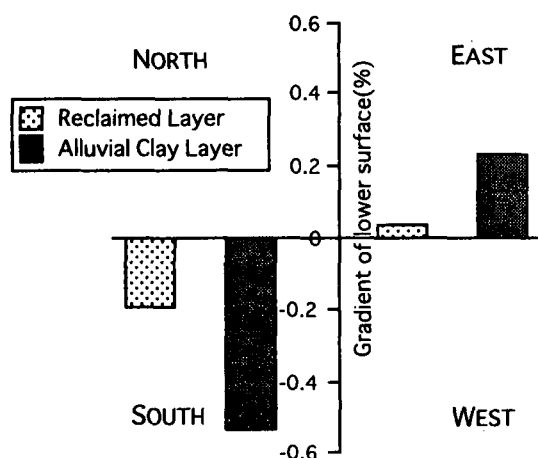


図-4 埋立土層と沖積粘土層の底面勾配

同検討地点での変位を東西および南北方向の水平変位に分解し、両者の関係を調べた。変位方向は東と北方向を正とし、勾配は同方向に下る場合を正としており、傾斜方向と変位方向が一致した場合、すなわち標高の高い所から低い所に地盤が移動した場合には、同図は原点を通る右上がりの関係を示すものである。図-3は南北方向の結果であるが、両者の間に有意な関係は見られず、変位の方向性については、地表面勾配の影響を受けていない地点が多数存在していたと考えられる。これは東西方向についても同様の結果であった。

図-4は対象地区付近の地盤図³⁾より、六甲アイランド下部地盤の旧海底面(埋立土層底面)と、その下に堆積している沖積粘土層底面の東西および南北方向の平均勾配を求めて示したものであり、北および東方向に下る勾配を正としている。同図より、両土層底面ともに南方向および東方向に傾斜していることが分かるが、その大きさを比較してみると、いずれも南方向への勾配の方が大きいことが確認できる。しかし、その勾配は1%以下と小さいため、変位の方向性との関係については不明の点が多いが、その要因として検討すべき因子の一つと考えられる。

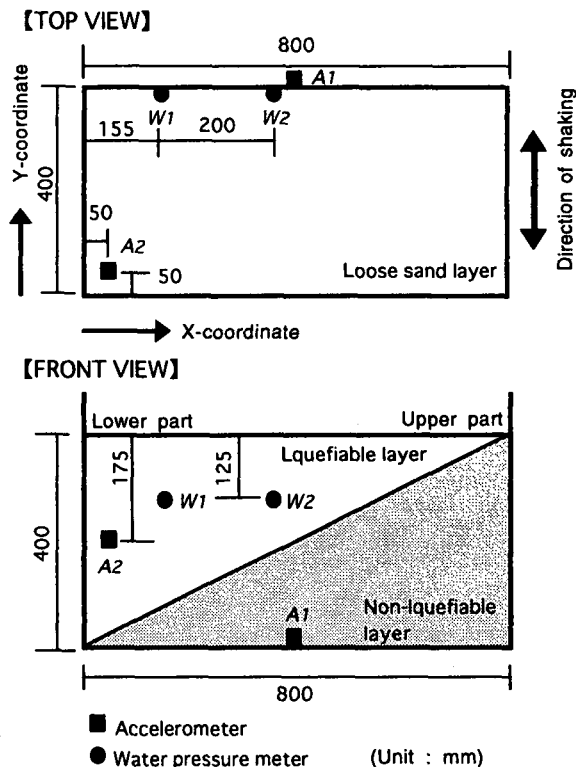


図-5 模型地盤

2. 模型実験

(1) 実験概要

模型地盤の概要を図-5に示す。アクリル製の土槽(長さ800mm×幅400mm×高さ500mm)内下部に傾斜角約27度の非液状化基盤層を設け、その上部に7号珪砂($\rho_s=2.63\text{g/cm}^3$, $D_{50}=0.16\text{mm}$)を水中落下させて地表面が水平な模型地盤(D_f 約30%)を作成した。なお、本文では同図に示すように地盤の長手方向をX軸、短手方向をY軸、また傾斜基盤の右側を上流側、左側を下流側と称している。加振装置は起振機を取り付けた板バネ式振動台であり、その上部に固定した土槽をY軸方向に加振した。最大加速度約20gal、振動数約3Hzの振動を起振機により40秒間継続入力するとともに、加振開始5秒後には振動台を打撃することにより大きな加速度を与えて液状化を発生させている。計測項目は入力加速度、地盤応答加速度、過剰間隙水圧、そして水平および鉛直方向の残留変位である。

(2) 実験結果および考察

図-6は入力加速度と地盤内に発生した過剰間隙水圧の時刻歴波形の一例を示したものである。加振開始約5秒後の打撃加振により約130galの加速度が入力されており、それによって地盤内では過剰間隙水圧が一気に初期有効上載圧まで上昇し、その後約8秒間その状態が継続している様子が分かる。

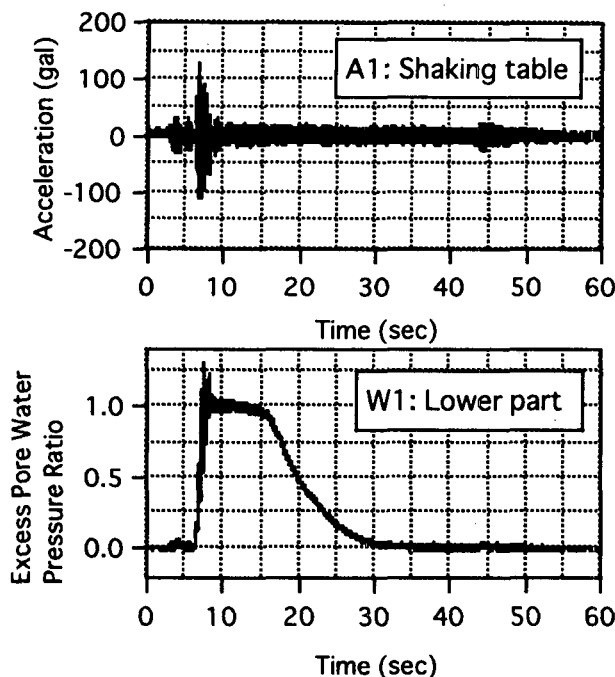


図-6 入力加速度と過剰間隙水圧比の時刻歴波形

図-7は地表面における水平方向の残留変位ベクトルを示したものであり、図中に示す計35地点に設置した地表マーカーの移動量より求めた。大きな水平変位が生じた所は地盤中央部付近であり、その変位方向はX軸方向の左側へ、すなわち基盤の傾斜方向に変位している様子が確認できる。しかし、上流および下流端の土層壁面に近い所ではいずれも変位量が小さい。また、Y軸方向に関しては両土層壁面から中央に向かう方向に変位している様子が確認できる。

実験の目視結果によれば、加振5秒後の打撃によって地盤が一気に液体状となり、土槽内で地表面が大きく波打つ現象が約2秒間継続し、同図に見られる大きな残留変位の約半分がこの時点で発生していた。また、その後も地盤は加振終了時まで小さく動揺しており、地盤厚の小さい上流側の地盤から下流側に向かって徐々に固化していくと同時に変位も収束していく様子が確認できた。

この流動現象のメカニズムを考察すると、加振方向であるY軸方向において地盤中央に向かって生じた変位は、液体状になった地盤が土槽壁面に波打ち、その反射によって生じた動的な残留変位と考えられる。また、X軸方向中央部における大きな変位は、明らかに基盤の傾斜の影響によるものと考えられる。このメカニズムについては以下のような考察を行っている。それは、傾斜基盤上に地盤が堆積した場合に生じる初期せん断力による影響であり、液状化によってこの応力が解放され、その解放方向すなわち傾斜基盤方向に流動が発生するというものである。また、本実験の場合、液状化の発生時期は地盤全体で

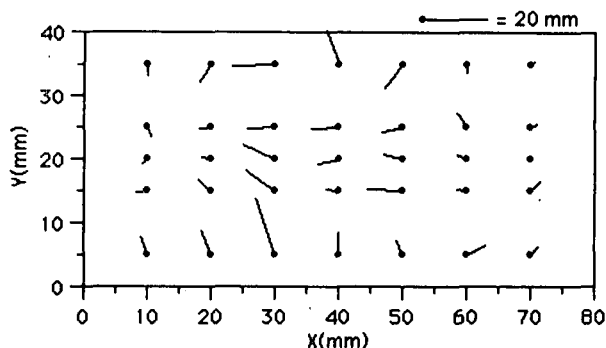


図-7 地表面の水平変位

ほぼ同じタイミングであったが、その終了時期は水平方向に地盤厚が異なるため、同地盤の上流側から下流側に徐々に地盤の再堆積が生じていた。その際にも、その進行方向に何らかの水平応力が作用していたことも推測できる。ただし、最下流側の地盤については、同様に傾斜方向に流動する力は作用していたが、下流端にある剛な土層壁の影響によって、上流側からの流動が抑制されたものと考えられる。

4. おわりに

本研究の結果より、地表面が水平な地盤では、液状化層下面勾配が地盤流動の方向性に影響を与えている可能性を示した。これは液状化地盤の流動メカニズムとして従来から指摘されていたことではあるが、大きな流動は生じないという観点から近年になってその要因から除外されていたものである。模型実験レベルでは小さな変位であったが、兵庫県南部地震の事例では1m前後の変位が発生している個所も確認されており、ほぼ水平な地盤における流動現象の要因の一つとして、今後検討すべき問題ではないかと思われる。

謝辞：本研究を実施するに当たり福井高専専攻科の武澤永純君の協力を得た。また、本研究は文部省科学研究費（奨励研究(A)）の補助によって行われたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 吉田雅穂, 宮島昌克, 北浦 勝: 1995年兵庫県南部地震における液状化地盤の流動方向に関する検討, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.2, pp. 1359-1364, 1998.
- 2) 濱田政則, 磯山龍二, 若松加寿江: 1995年兵庫県南部地震 液状化、地盤変位及び地盤条件, 地震予知総合研究振興会, 1995.
- 3) 岩見義男: 神戸のまちと地盤, pp.149-162, 1987.