

論文

液状化による流動変位予測のための地盤の硬軟分布評価に関する研究

吉田 雅穂*・宮島 昌克**・北浦 勝**

Evaluation of Spatial Hardness of Soil Layers to Estimate Liquefied Ground Flow

Masaho YOSHIDA*, Masakatsu MIYAJIMA** and Masaru KITAURA**

Abstract

Horizontal ground displacements caused by liquefied ground flow were observed at reclaimed lands during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake. Many displacements were not due to the influence of the inclination of ground surface and movement of quay wall. The present paper aims to find the causes of the displacements mentioned above and to investigate how to estimate their directions and magnitudes. A method is proposed here to evaluate the spatial distribution of SPT *N*-value. Although this method is usually used to investigate a trend surface on altitude, it was applied to evaluation of the spatial hardness of soil layers. The gradient and azimuth of trend surface on SPT *N*-value were found using data of reclaimed lands in Kobe area. The boundary of geological stratum that was decided by the distribution of SPT *N*-value was easily estimated using the proposed method. Furthermore, it was clarified that the direction of horizontal displacement of ground surface was influenced by the inclination of boundary between soft and hard soil layers. It will be expected that this method is useful to estimate the liquefied ground at the level reclaimed land.

キーワード：地震，液状化，地盤流動，*N* 値，硬軟分布評価，1995年兵庫県南部地震

Key words : earthquake, liquefaction, liquefied ground flow, SPT *N*-value, evaluation of hardness of soil layers, the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake

* 福井工業高等専門学校環境都市工学科
Dept. of Civil Engineering,
Fukui National College of Technology

** 金沢大学工学部土木建設工学科
Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Kanazawa University

本報告に対する討論は平成13年9月末日まで受け付ける。

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、臨海部に位置する埋立地盤において、液状化に起因する地盤沈下や地盤流動による過大な地表変位が観測されている。そのうち水平変位を引き起こす地盤流動の発生メカニズムとしては、地表面勾配を有する地盤において標高の高い所から低い所に向かって地盤が流動する傾斜地盤タイプと、臨海埋立地や河川の護岸のように一方に開放面をもつ地盤において、護岸が開放面方向に移動することによりその背後地盤が流動する護岸移動タイプの2つが考えられている¹⁾。地盤工学会の研究委員会による報告²⁾によれば、前者の傾斜地盤で生じる流動のメカニズムとして、①慣性力、②滑り面、③重力効果、④液体化、⑤噴砂に伴う物質移動、⑥水膜の反力の計6つの要因が示されており、現在ではそのうち③と④が主たる要因であると判断されている。

ところで、兵庫県南部地震における深江浜、魚崎浜、御影・住吉浜の3つの埋立地盤（Fig. 1参照）における流動事例を調査した結果、護岸背後から数百メートルも離れ、しかも地表面勾配のない水平な地盤で1メートル以上の水平変位が発生していた事例や、地表面の傾斜方向とは異なる方向に水平変位が発生していた事例を明らかにしている³⁾。また、同地盤における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³⁾。

多くの地表変位は、当該地区の微地形など局所的な地盤の影響を受け、それにより変位の量や方向性が決定づけられるものと考えられる。しかし、前述のような2つの地盤流動タイプとは若干異なる地盤条件の比較的広い領域において、地表変位がある一方向への方向性を有していたということは、この地震特有の地震動や地盤の特性が大いに関与していたものと推測できる。またこのことは、既に検討がなされている護岸背後の地盤や傾斜地盤における局所的な地盤流動に加えて、埋立地全体の地盤構造やそこに作用する地震動による影響といった、マクロな視点での地盤流動に対する検

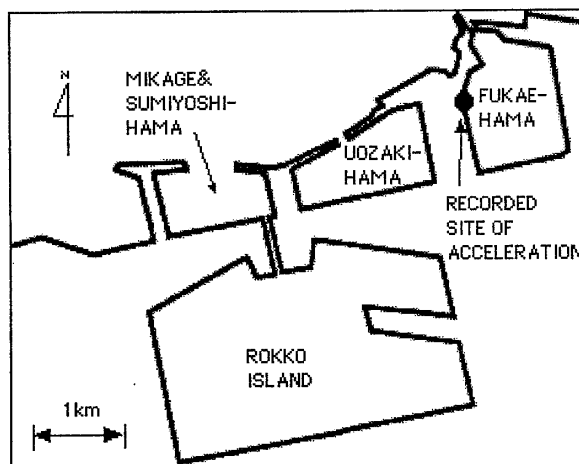


Fig. 1 Map of reclaimed lands investigated in this paper.

討も必要であることを示唆するものと考えている。

著者らは、このような場合の地表変位の誘因として、地層境界面の傾斜方向と、地震動による慣性力の卓越方向に着目しており、模型振動実験においてその可能性を示している⁴⁾。前述の報告²⁾によれば、液状化層上面が水平で下面が傾斜している場合には、上記の①や③のメカニズムが想定されていたが、①の慣性力による残留変形は地盤が非線形挙動を呈する場合には支配的な要因であるが、流動の直接的要因ではないということで必要条件からは外されている。また、基盤が傾斜した地盤では重力によるアンバランスな初期せん断力が作用しており、液状化が発生するとその応力が解放される方向、すなわち基盤の傾斜方向に変位する可能性があるが、模型実験や数値解析より流動と呼ばれるような大きな変位は発生せず、現在では流動の発生する地盤条件とは考えられていない。したがって、ここで着目した2つの誘因は現在では流動メカニズムとしては特に考慮されないものとなっている。

このような背景の下、本研究では改めて上述の2つの誘因のうち特に地層境界面の傾斜に着目し、それが液状化地盤の地表水平変位に与える影響について、1995年兵庫県南部地震の事例分析により検討を行った。また、この地層境界面の傾斜を明らかにするため、数少ない地盤データを用いて対象地区の地盤の層構造を評価する手法を提案し、

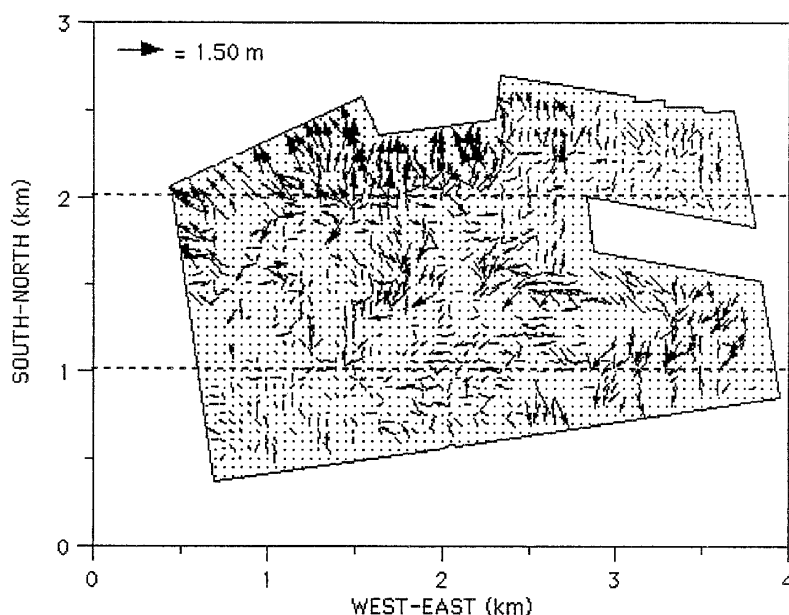


Fig. 2 Distribution of horizontal ground displacements in inland area of Rokko-island⁵⁾.

それを本事例に適用してその有効性を検討した。

2. 兵庫県南部地震における事例分析

前述のように、深江浜、魚崎浜、御影・住吉浜の3つの埋立地盤で発生した地表水平変位の分析結果より、岸壁から100 mの範囲内における護岸部では一様に護岸直交方向に地表変位が発生していたが、それ以外の内陸部においては3地区ともに南方向への変位が卓越する傾向が明らかとなっている³⁾。本章では、Fig. 1に示すこの3地区の南方に位置する埋立人工島の六甲アイランドについて、3地区と同様に地表水平変位の発生傾向について検討を行う。

2.1 地表水平変位の特徴

対象地区はFig. 2に示す六甲アイランドを含む東西4 km×南北3 kmの領域であり、解析では同地区を東西50 m×南北50 mのメッシュに分割して検討を行った。本研究で扱う水平変位は、護岸移動による影響をできるだけ除去した、主に埋立地盤内陸部における変位を検討対象としているため、対象地区の全変位データを護岸から最大で100 m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

に分離して利用している。なお、変位ベクトルは濱田ら⁵⁾による地震前後の航空写真測量による判読結果を50 mのメッシュデータに変換したものをを用いており、Fig. 2はそのうち内陸部の変位ベクトルのみを示したものである。最大水平変位は護岸部で約5.5 m、内陸部で約1.6 mであり、内陸部でも比較的大きな変位が発生していた。

Fig. 3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。Fig. 3(a)の護岸部では、0度(360度)付近と180度付近、すなわちほぼ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する護岸距離が全護岸の約68%と長く、その護岸にあるケーソン岸壁のほとんどが海側に傾斜したためと考えられる。ちなみに、南北方向に面した護岸の法線直交方法を調べてみると、およそ330度~10度と170度~190度の範囲にあり、Fig. 3(a)のピークとはほぼ一致していた。一方、Fig. 3(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、Fig. 3(b)の内陸部のデータに関して、変位の発生場所をFig. 2に示す同地区の南北方向座標軸を用いて、0~1 km(南区)、1~2 km(中区)、2~3 km(北区)の3区域に分類し変位の発生傾向を整理した。

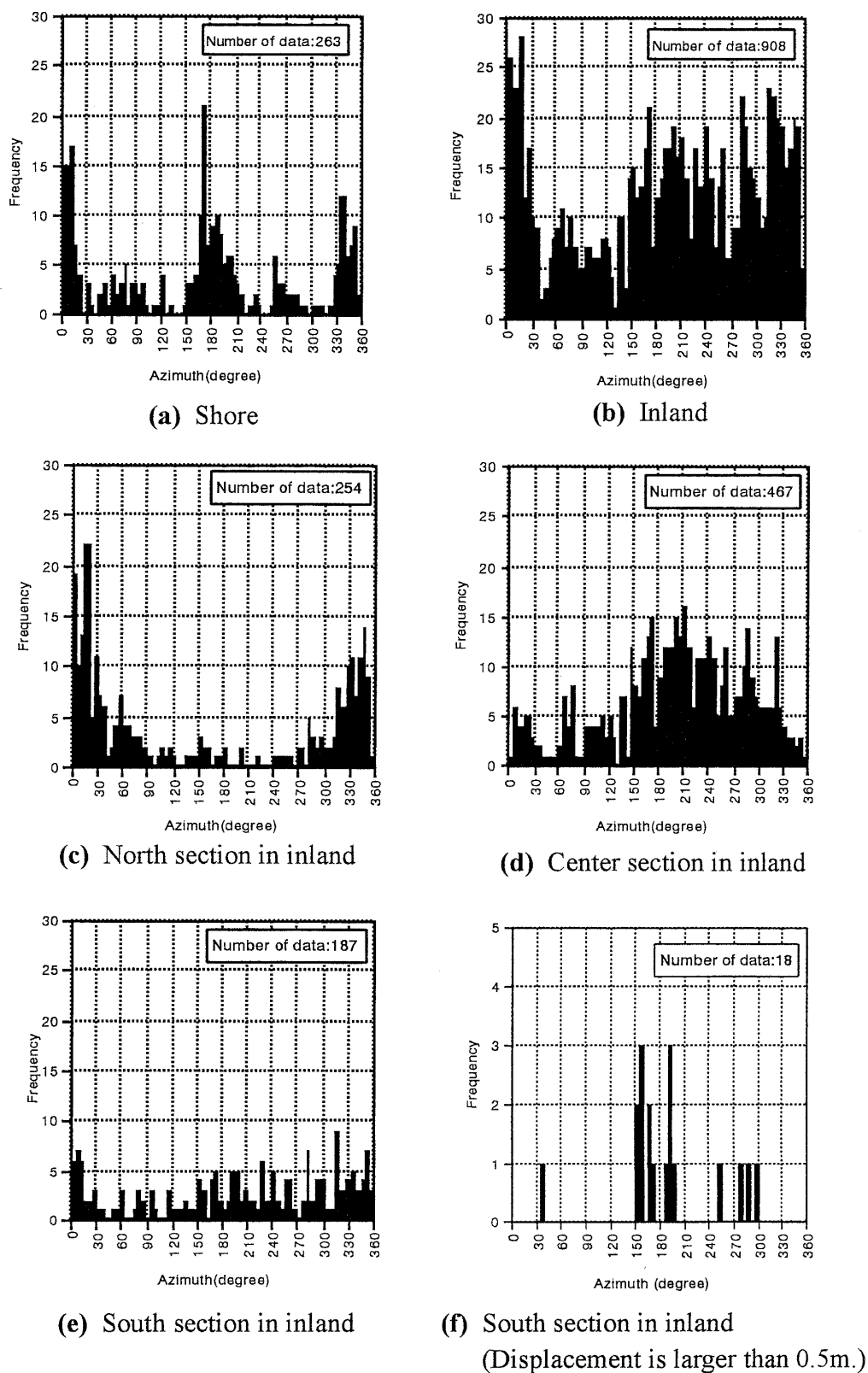


Fig. 3 Histograms azimuth of horizontal ground displacement.

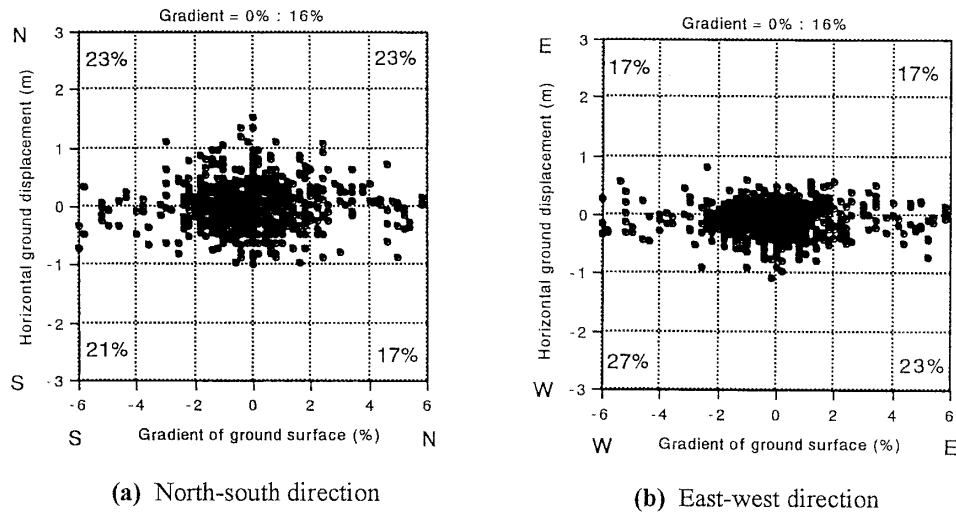


Fig. 4 Relationship between gradient of ground surface and horizontal ground displacement.

まず, Fig. 3 (c) の北区については北方向 (0 または 360 度) 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あり, 護岸から 100 m 以上離れた所でも護岸移動の影響を強く受けていた可能性を示唆している。この液状化の程度の違いは, 六甲アイランド中区および南区の埋立土の土砂源と北区の土砂源の違いによるものであり, 前者が神戸層群 (一部大阪層群) であるのに対し, 後者は風化花崗岩であり, 風化花崗岩からなるマサ土の液状化抵抗が低かったことによるものと考えられている⁶⁾。

つぎに, 中区については, Fig. 3 (d) に示すように南及び南西方向 (180~270 度) 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, Fig. 3 (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, 別途大きき別に整理した結果, Fig. 3 (f) に示す 0.5 m 以上の大きい変位は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, 他の 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。

2.2 要因分析

ここでは, 特に前述の六甲アイランド中区における南方向への水平変位について, そ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 50 m の 2 地点との標高差を南北および東西方向でそれぞれ求めて地表面勾配に変換し, また同検討地点での変位を南北および東西方向の水平変位に分解し, 両者の関係を調べた。したがって, 変位の発生していない地点は検討対象外となっている。変位方向は北と東方向を正とし, 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。Fig. 4 (a) は南北方向の結果であり, 同図には各象限に存在するデータの割合も記してある。なお, 勾配が 0% のデータは各象限の割合に含めず別途枠外に示しており, 勾配が 6% を越えるものについては全データの 10% 以下とデータ数が少なかったため非表示とした。同図より, 点は各象限にほぼ均等に分布しており, 両者の間に有意

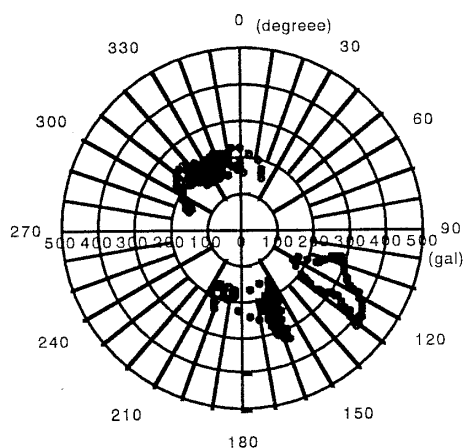


Fig. 5 Distribution of direction of peak acceleration greater than or equal to 150gal.

な関係は見られない。これは Fig. 4 (b) の東西方向についても同様の結果であり、したがって、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変位が多数発生していたと考えられる。

つぎに、地震動の卓越方向による影響について、深江浜と魚崎浜の間に架かる東神戸大橋付近の地盤上で観測された加速度記録を用いて検討を行った。Fig. 5 は、加速度記録の東西および南北成分を用いて加速度のピーク値の方位分布を求め、そのうち 150 gal 以上の点をプロットしたものである。小さな加速度レベルでは特徴は見られなかったが、同図に示す大きな加速度レベルでは、南方向または南東方向への加速度が卓越していたことが分かる。地表の水平変位が地震動の慣性力による残留変位に起因するならば、この地動加速度の卓越方向も変位の方向性に影響を与えた要因の一つと推測できる。

Fig. 6 は対象地区付近の地盤図⁷⁾より、六甲アイランド下部地盤の旧海底面（埋立土層底面）とその下にある沖積粘土層底面の東西及び南北方向の平均的な勾配を求めて示したものであり、北及び東方向に下る勾配を正としている。同図より、両地層底面ともに南方向及び東方向に傾斜していることが分かる。その大きさを比較すると、埋立土層底面は約 0.2%，沖積粘土層底面は約 0.5%と小さいが、いずれも南方向に卓越する傾向が確認でき、この点においても地表水平変位の方向性

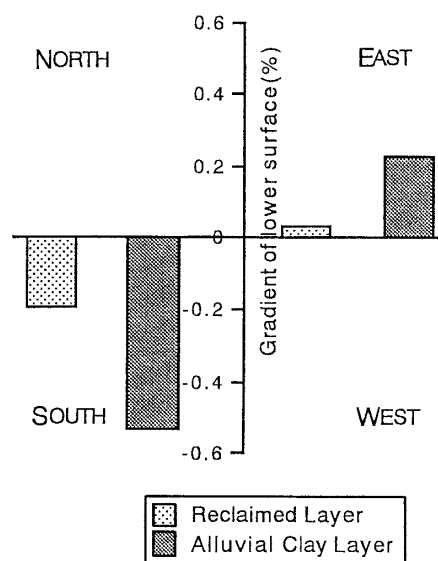


Fig. 6 Gradient of lower surfaces of reclaimed layer and alluvial clay layer.

との対応が示された。

以上のように、兵庫県南部地震における事例分析より、傾斜地盤や護岸背後地盤で発生した地表変位と比較するとその値は小さいが、地表面が水平な地盤においても地表水平変位が発生することを明らかにした。また、その要因として地震動の慣性力や地層境界面の傾斜が影響している可能性も示した。

3. 地盤の硬軟分布評価手法

現在の傾斜地盤に対する地盤流動による地表水平変位の予測では、いずれも地表面の勾配がパラメータとなっているため、地表面が平坦な地盤においては地盤流動の影響を考慮しないで設計を行うのが現状である。したがって、前述の結果より今後何らかの検討を行う必要性が生じるものと思われる。本研究で着目した2つの流動メカニズムのうち、地震動の卓越方向を事前に予測することは現段階では非常に困難であると思われる。一方、地層境界面の傾斜についてはボーリング柱状図のような地盤データが存在すれば事前の予測は可能と考えられるが、予測対象地区において地盤データが密に存在するとは限らない。

そこで本章では、数少ない地盤データを用いて対象地区の地盤の層構造を推定する手法を提案し、

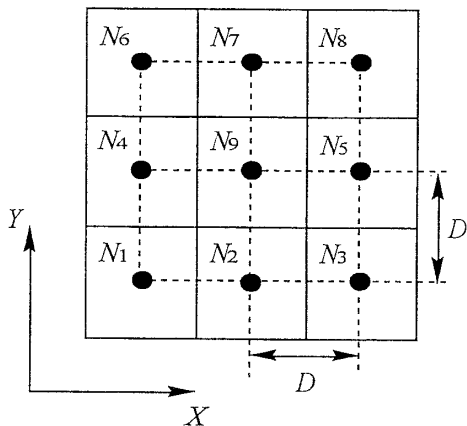


Fig. 7 Coordinate for calculation of trend surface.

その有効性について検討する。ここでは、地盤流動に影響を及ぼす地盤物性値の一つとして標準貫入試験より得られる N 値を取り上げ、その空間的な分布傾向（本研究ではこれを硬軟分布と称する。）を知ることにより地盤の層構造を明らかにすることを試みた。著者らは既に、バリオグラムを用いた硬軟分布評価手法を提案しその有効性を確認しているが^{8),9)}、本研究は新たに標高の傾向面を求める方法¹⁰⁾を硬軟分布評価手法に適用するものである。

3.1 解析手法

標高データを平面座標に対して一定間隔で格子状に定義したものを数値地形モデルと呼んでいるが、これを利用することにより地形を数量的に扱うことが可能である。この標高を用いて算出される地形特性値の一つである傾向面は、地表面の勾配やその傾斜方向を量的に表現できるものである。本研究では、この標高を N 値に置き換えてその傾向面を求め、それを地盤の硬軟分布の方向性評価に適用した。これにより、平面的に分布する N 値の変化量やその方向性を量的または視覚的に扱うことが可能となる。

任意の深さにおける N 値の傾向面は、与えられたデータに対して誤差の平方和が最小となるような曲面、もしくは平面として算出され、具体的には Fig. 7 に示す 3×3 メッシュ内中心の N 値、すなわち 9 格子点の N 値より面が求まる。ここで

は、最も単純な次式に示す 1 次傾向面を用いた。

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

ここに、 x と y は東西および南北方向の座標値であり、 z は N 値である。この式に各格子点に存在する実際の N 値とその座標値を代入した時の、誤差の平方和が最小となるような係数 a, b, c, d を求めて式 (1) に与えれば、 N 値の 1 次傾向面の式となる。

(1) 傾向面の勾配

N 値の傾向面の勾配の求め方は、1 次傾向面と水平面 ($z = 0$) との交わる角度より求めればよい。勾配を S (1/m) とすると以下のようなものである。

$$S = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{6D} \quad (2)$$

ここに、 $\Delta x = N_1 + N_4 + N_6 - N_3 - N_5 - N_8$

$$\Delta y = N_1 + N_2 + N_3 - N_6 - N_7 - N_8$$

であり、西から東方向または南から北方向に N 値が小さくなる場合を正と定義している。また、 D はデータの格子間隔 (m) である。本研究ではこの勾配 S が、水平面における N 値の 1 m 当りの変化量を表す値となる。なお、この値に格子間隔 D を乗ずると、隣り合う格子のデータ間の N 値の変化量が求まるものである。

(2) 傾向面の傾斜方向

同様に N 値の傾向面の傾斜方向 θ (度) は以下の通りである。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right) \quad (3)$$

本研究では、この角度を北方向を 0 度、東方向を 90 度、南方向を 180 度、西方向を 270 度とする方位角で表すことにした。

3.2 モデル地盤による硬軟分布のパターン化

モデル地盤は Fig. 8 に示すように 1,000 m 四方の大きさであり、 N 値のデータが 200 m ($D = 200$ m) の格子状に均等に 36 個存在する地盤を仮定した。 N 値が任意方向に徐々に変化していく

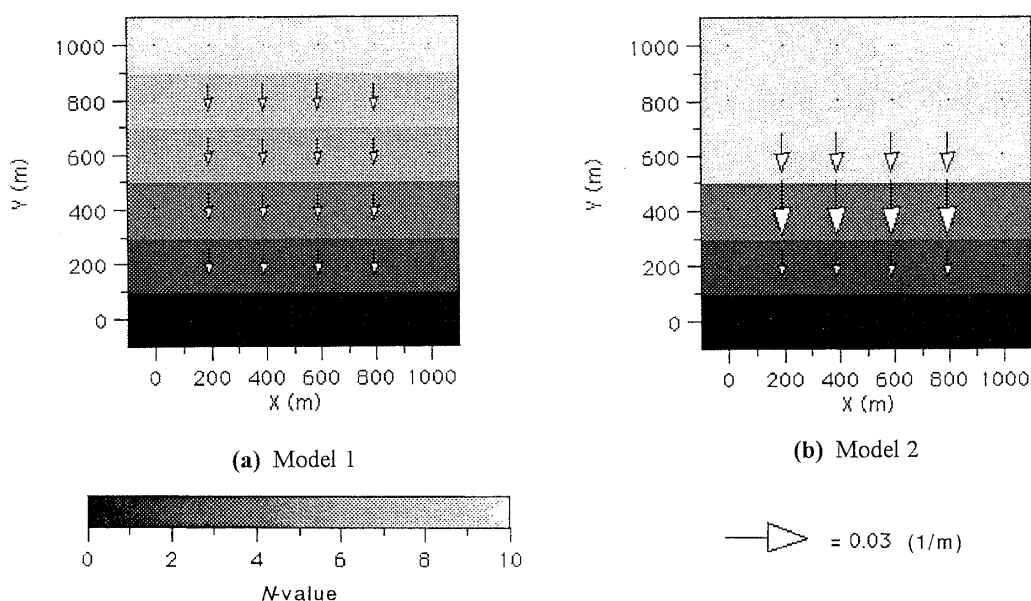


Fig. 8 Distribution of N -value and vectors of trend surface for model grounds.

地盤や局所的に N 値が変化する地盤など、様々な分布パターンのモデル地盤を上記手法で解析することによって、 6×6 個のデータから外周の 20 地点を除いた 4×4 個の地点で、 N 値の傾向面の向きと、変化量のデータを取得することができる。ここでは、この傾向面の特性をベクトル成分で表し（本研究ではこれを傾向面ベクトルと称する）、傾向面の向きはベクトルの方向で、変化量はベクトルの大きさで示すこととした。

一例として、北から南方向に硬い地盤から軟らかい地盤へと推移するモデル 1 の結果を Fig. 8 (a) に示す。同図には N 値の分布とその傾向面ベクトルを重ね合わせており、 N 値の変化に応じて北から南へと向かう同じ大きさ ($S = 0.01$) のベクトルが確認できる。なお、この N 値を標高に置き換えれば、北から南へ傾斜した地盤と判断できる。一方、Fig. 8 (b) はモデル 1 と比較して北側に N 値の大きな領域が広く分布する場合であり、地盤中央部で N 値が急に变化する様子が確認できる。また、モデル 1 が上層にモデル 2 がその下層に存在していた場合には、 N 値の大きさで区別した地層境界面が北から南に傾斜していることをこの結果より判読することができる。したがって、このような解析を対象地区の任意の深さの層で実

施することにより、硬軟分布より判断した地層境界面の勾配や方向を 3 次元的に評価することが可能であることが明らかとなった。

4. 評価手法の実地盤への適用

本章では、前章で提案した地盤の硬軟分布評価手法を用いて、兵庫県南部地震において地盤流動の発生した埋立地盤の地盤構造を明らかにすることを試みる。すなわち、解析で明らかとなった地盤の硬軟分布や地層境界面と、そこで発生した地表水平変位との関係について検討を行う。

4.1 対象地区

対象地区は六甲アイランド北部の深江浜、魚崎浜、御影・住吉浜の 3 つの埋立地盤であり、解析では同地区を 200 m メッシュに分割して検討を行った。3 地区ともに地表面勾配は 1% 未満であり、事前の検討により地表面の傾斜と地表水平変位との相関は低いと判断されたため³⁾、ここでは地盤内の N 値の分布特性のみに着目し地表水平変位との関係について検討した。本章で用いた地表変位データは、濱田ら⁵⁾による地震前後の航空写真測量による判読結果を 50 m のメッシュデータに変換したもの³⁾であり、解析で扱う 200 m メッ

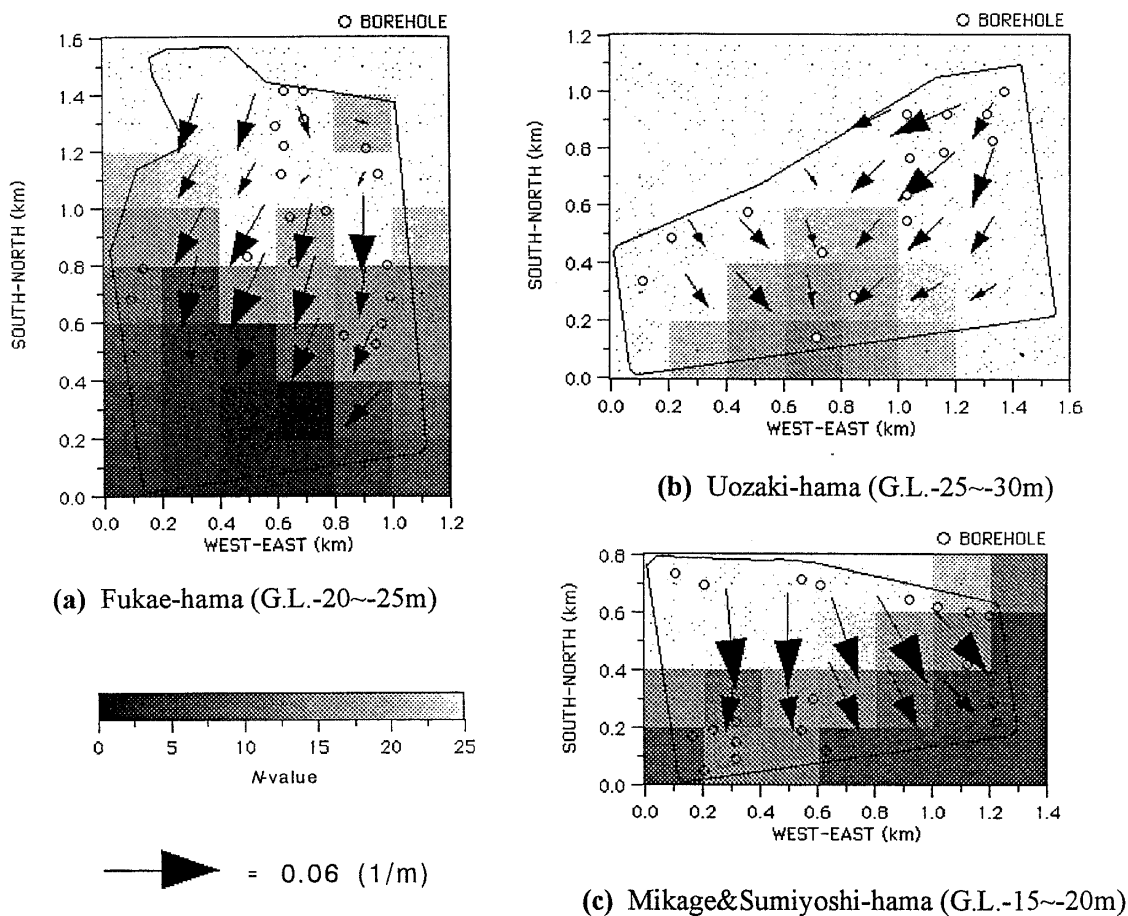


Fig. 9 Distribution of N -value and vectors of trend surface for three reclaimed lands.

シュの場合には同メッシュ内にある最大の変位ベクトルをその代表値として利用した。また、ここでも護岸移動による影響をできるだけ除去するため、護岸から 100 m の範囲内のデータを削除したものをを用いている。

4.2 硬軟分布と変位の関係

解析結果の一例を Fig. 9 に示す。同図は、各地区の N 値の分布を濃淡で表し、それより求めた N 値の傾向面ベクトルを重ねて示したものである。 N 値のデータは、同地区に存在するそれぞれ 31 本、15 本、22 本のボーリングデータ¹¹⁾ を利用しており、その分布状況は同図の○印で示す通りである。深さ方向には地表から深度 30 m までのデータを用いており、同地盤を 5 m 間隔の 6 層に分割し、各層の平均 N 値を求めて利用した。したがって、分割された地盤ブロック 1 つの大きさは、

200 m 四方で厚さ 5 m である。なお、メッシュ内にボーリングデータがない場合には Kriging 法¹²⁾ で補間したデータを用いている。解析の都合上、同図には埋立地の外側にも外挿された N 値の分布が表示されているが、以降の検討結果には特に影響のないものである。

各地区の層ごとに N 値の傾向面ベクトルを求めたが、同図は各地区で最も大きな傾向面ベクトルの得られた層の結果を示したものであり、深江浜は第 5 層目 (G.L.-20 m ~ -25 m)、魚崎浜は第 6 層目 (G.L.-25 m ~ -30 m)、御影・住吉浜は第 4 層目 (G.L.-15 m ~ -20 m) となっている。いずれの地区も、地区南部に N 値の小さい軟弱地盤が存在しており、 N 値の傾向面ベクトルもそれに応じてそのほとんどが南向きを示していることが分かる。

つぎに、Fig. 10 は Fig. 9 に示した各層の N 値の傾向面ベクトルと、各地区で発生した地表水平

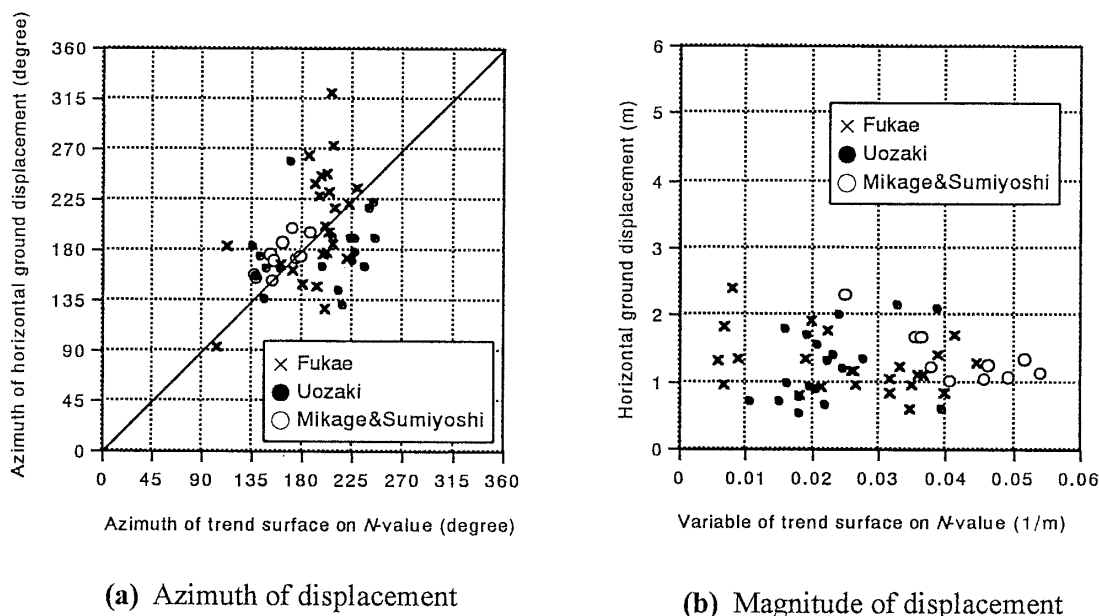


Fig.10 Relationship between trend surface on N -value and horizontal ground displacement.

変位ベクトルとの関係を示したものであり、両ベクトルについて方向と大きさに分離して比較検討している。Fig.10(a)の方位角については、地表変位ベクトルの方位角の±45度の範囲内に N 値の傾向面ベクトルの方位角が存在する割合は、深江浜で63%、魚崎浜で58%、御影・住吉浜で100%となっており、比較的高い相関を示していると言える。したがって、この N 値の傾向面の方向性が地表水平変位の方向性に影響を与えていたとするならば、各地区のG.L.-20m付近に存在する地盤構造がその原因と考えられる。一方、Fig.10(b)の変位量については、各地区ともに両者の間に明瞭な関係は見られず、 N 値の傾向面ベクトルと地表水平変位ベクトルとの関係においては、方向性についてのみ相関があることが明らかとなった。

Fig. 9に示した1層の結果からは地層境界面の傾斜を判読することはできないが、Fig. 8の考察の所で述べたように複数の層の N 値の傾向面ベクトルを観察することで、このことが可能となる。検討の結果、G.L.-20m付近の地盤は上層にある N 値10以下の軟弱地盤と、その下層の N 値30以上の硬い地盤で構成され、これら N 値の硬軟分布で形成される地層境界面が、Fig. 6の結果と同様に北から南に向かって下る傾斜を有することが

本手法により推測できた。なお、ボーリングデータ¹¹⁾によれば上層の軟弱地盤は埋立土層の下にある沖積粘土層であり、下層の硬い地盤は洪積砂質土層であった。なお、著者等が提案している液状化領域の空間分布推定手法により、同地区の液状化層を推定した結果、その底面についても同様に北から南に下る傾斜を有することを確認している³⁾。

以上より、 N 値の傾向面ベクトルを求めることにより地表水平変位の方向性を予測できることの可能性を示したが、変位の大きさについては事前の検討³⁾により液状化層厚との間に相関があることを明らかにしている。今後は、この両者の関係について検討する必要があると言える。

5. 流動変位予測に関する検討

液状化地盤の流動変位予測を検討する際には、その流動を引き起こす要因、すなわち駆動力となるものを明らかにする必要がある。傾斜地盤では地表面の勾配が、護岸背後地盤では護岸の移動がその駆動力と考えられるが、地表面が水平な場合には地盤内部の状況もしくは地震動がその駆動力となり得ると考えられる。既往の研究によれば、地表面が水平で基盤に傾斜のある地盤を対象とし

た地盤流動メカニズムとして、層厚の違いによる不等沈下により地表面に傾きが生じ、液体となった地盤が上流から下流へ移動するメカニズム¹³⁾や、基盤や堆積層の傾斜による初期せん断応力が液状化により解放されて変位が発生するというメカニズム^{14), 15)}が指摘されている。

まず、前者のメカニズムについて検討する。前章で対象とした3地区の内陸部での残留鉛直変位量⁵⁾の分布によれば、深江浜では北部の方が南部より若干沈下量が大きい傾向にあるが、他の2地区では明瞭な特徴は確認できない。しかも、変位の時間的推移が不明であるため、前者の様な現象が発生したかどうかは不明である。つぎに、後者のメカニズムについて検討する。これまでの検討により、対象とした4地区はいずれも、埋立土層底面、沖積粘土層底面ともに南方向に傾斜しており、その勾配で比較すると沖積粘土層底面の方が大きく、同地盤の南側にそれぞれの土層が厚く堆積していることが明らかとなっている。よって、埋立土層と沖積粘土層ともに地層底面の傾斜による初期せん断力が作用していた可能性は否定できない。以上より、同地盤には平面的な地盤条件、ここではせん断応力の不均衡が生じており、液状化による応力解放と南東方向に卓越した300 galを越える強い地震動による慣性力により大きなせん断挙動が生じ、地盤全体として南方向に変位する傾向があったのではないかと推測される。また、地区南部には軟弱な沖積粘土層やその上部の液状化した埋立土層が厚く堆積しており、このことが南方向への変形を促進したのではないかと考えられる。

N 値の傾向面ベクトルが大きいという事はその地点で硬軟分布が大きく変化していることを意味し、すなわちその地点で地盤条件の不均衡が生じていることを示すものである。前述の流動メカニズムについては未だ不明の点が多いが、このような地盤全体の不均衡を量的、また視覚的に取り扱うことができれば、今後これを利用した流動量や流動方向の予測に活用できるのではないかと考えられる。

6. おわりに

本研究では、地表面が水平な場合は地盤内部の地盤条件や地震動が、液状化に伴う地盤流動の量および方向に大きく関与しているものと考え、兵庫県南部地震をケーススタディとして両者の関係について統計分析と数値解析により検討した。以下に、本研究で得られた成果を記す。

ボーリングデータより得られる N 値の空間的な分布特性を明らかにする手法として、標高の傾向面を求める手法を適用し、 N 値の傾向面の向きとその変化量の2要素を求める手法を提案した。それら2つの要素が、地盤流動による地表水平変位の向きと大きさに与える影響を検討した結果、本研究で対象とした水平埋立地盤においては、地盤内に存在する地層境界面の傾斜によって形成される平面的な硬軟分布の不均衡とそこに作用した強い地震動が、大規模埋立地盤で発生した地表水平変位の方向性に影響を与えた可能性を示した。

地盤はその堆積過程において、材料特性やその応力状態に方向性を有する場合が多いと考えられる。地盤流動の主たる要因は地表面の傾斜や護岸移動と考えられるが、本研究の結果より、今後は地盤環境をマクロな視点でとらえた、液状化による地盤流動の方向性予測も必要になるのではないかと思われる。

謝 辞

本研究で利用した加速度記録は、(財)震災予防協会の強震動アレー観測記録データベースで公開されているものであります。同財団と観測機関である阪神高速道路公団に深謝いたします。また、本研究を遂行するにあたり、福井工業高等専門学校元学生 中屋有加里さん(豊橋技術科学大学)、小畑啓介君(ナチュラルコンサルタント(株))の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 濱田政則・若松加寿江：液状化による地盤の水平変位の研究，土木学会論文集，No.596/Ⅲ-43，pp.189-208，1998.
- 2) 地盤工学会：液状化に伴う流動のメカニズム，地

- 震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集, pp.53-70, 1998.
- 3) 吉田雅穂・宮島昌克・北浦 勝：液状化領域の空間分布推定法の提案とほぼ水平な地盤における流動予測への適用, 土木学会論文集, No.638/Ⅲ-49, pp.155-166, 1999.
- 4) 吉田雅穂・伊井和也・宇野元喜・武澤永純・宮島昌克・北浦 勝：傾斜基盤と地動加速度が液状化地盤の流動現象に与える影響に関する基礎的実験, 第35回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2261-2262, 2000.
- 5) 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.
- 6) 神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査(ポートアイランド, 六甲アイランド)報告書, pp.11-21, p.65, 1995.
- 7) 岩見義男：神戸のまちと地盤, 神戸新聞出版センター, pp.149-162, 1987.
- 8) Yoshida, M., Miyajima, M. and Kitaura, M.: A Simplified Procedure to Estimate Liquefaction-Induced Large Ground Displacement using Spatial Liquefaction Potential, Proc. of 7th International Conference on Structural Safety and Reliability, Vol.3, pp.1659-1664, 1997.
- 9) 吉田雅穂・宮島昌克・北浦 勝・辻 慎一郎：液状化地盤の流動方向予測のための地盤の硬軟分布推定, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, 第3部(A), pp.284-285, 1998.
- 10) 沖村 孝・吉永秀一郎・鳥井良一：地形特性値と地形区分, 表土層厚の関係—仙台入菅谷地区を例として—, 土地造成工学研究施設報告, 第9号, pp.19-39, 1991.
- 11) 神戸市開発局：神戸の地盤, pp.70-174, 1980.
- 12) Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M.: An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, 1989.
- 13) 東畑郁生・山田和彦：地盤の液状化による永久変位量の簡易予測式, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp.632-633, 1989.
- 14) 安田 進・中島良二・規矩大義：液状化による地盤の永久変位の模型実験と解析, 地盤と土構造物の地震時挙動に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.189-196, 1989.
- 15) 内田 泰・安田 進・永瀬英生・古田祐一郎：永久変位に及ぼす種々の条件に関する振動台実験, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp.646-647, 1990.
- (投稿受理：平成12年4月21日
訂正稿受理：平成12年10月5日)