

地震時における大規模宅地盛土斜面の不安定化予測

EARTHQUAKE RISK ASSESSMENTS OF LARGE RESIDENTIAL FILL-SLOPES IN URBAN AREAS

釜井俊孝*・守随治雄**・笠原亮一***・小林慶之***

Toshitaka KAMAI, Haruo SHUZUI, Ryouichi KASAHARA and Yoshiyuki KOBAYASHI

Recent destructive earthquakes in urban regions, such as the 1978 Miyagiken-oki earthquake, the 1993 Kushiro-oki earthquake and the 1995 Hyougoken-nanbu earthquake, have triggered landslides in many gentle slopes of residential areas around Sendai, Kushiro, Nishinomiya and Kobe. The earthquake-induced slope instability that has occurred is closely related to artificial landforms, especially valley fills (embankments). More than 60% of the unstable slopes in the Kobe-Nishinomiya urban region are in artificial valley fills. This instability was caused by strong ground movements during the 1995 Hyougoken-nanbu earthquake.

Investigation of past artificial landform changes and multi-variate analysis of case studies of past earthquake disasters show that differences in the shape of fills, such as depth, width, inclination angle of the base, and cross-sectional form, may be the key discriminating factors of slope instability. Triggering mechanisms (e.g. earthquakes) need to be considered in the analysis for accurate estimation; however, it is difficult to include earthquake parameters in linear multi-variate analysis (quantification theory II). Neural network analysis was applied to assess large fill slope instability in urban residential areas. The neural network model developed, including both causative factors (shape of fills, groundwater condition, age of construction) and triggering factors (distance from the fault, moment magnitude, direction to fault), was independently checked against another data set and sensitivity analysis was conducted. The neural network model appears to have advantages over multi-variate analysis. It should be possible to conduct landslide hazard mapping in urban residential areas by using the newly proposed neural network model.

Key Words : valley fills, landslide, urban region, neural network, hazard map

1. はじめに

高度経済成長期において、政策的に誘導された大都市への人口集中は、郊外に向かう宅地開発圧力となり、新たな斜面災害のリスクを増大させた。1978年宮城県沖地震、1993年釧路沖地震、1995年兵庫県南部地震など、都市に被害を与えた地震では、都市域に形成されていた多数の大規模な宅地盛土（多くは谷埋め盛土）が変動した。これらの現象は土塊の流動性が高い場合は「土砂流動」や「側方流動」と呼ばれている。しかし、変動した事例の多くは顕著な水平変位を伴う流動性の低い移動体の変動であり、運動の形態としてはむしろ地すべりに類似していた。したがって、こうした盛土の変動を、ここでは「地すべり」と呼ぶことにする。

既往の変動事例に関して地形・地質、および土質工学的検討が進められた結果、谷埋め盛土の地すべりは自然斜面の崩壊と異なり、発生する場と誘因（地震）があらかじめ限定され、土質がほぼ均一であるという特徴が明らか

になっている。そこで主として変動事例と非変動事例との対比をもとに、盛土底面の形状（造成以前の地形）や地下水、造成年代などの素因を要因とした多変量解析（数量化Ⅱ類）が試みられ、簡便な変動予測法が提案されている（Kamai et. al., 2000¹⁾、釜井ほか、2002²⁾）。

しかし、こうした多変量解析を用いた予測法においては誘因（地震）を評価することが難しく、震動に関する要因の取り扱いが曖昧なままであった。さらに地震ごとに得られる事例数に偏りがある場合にはその影響を強く受けるため、事例数が少ない地震のタイプに対しては予測精度が著しく低下し、事実上適用可能な地震が限定されていた。また、数量化法の場合、要因のカテゴリー区分（グループ分類）を行う必要があり、このことが解析を恣意的なものにする危険性を有している。すなわち、カテゴリー区分は事実上、試行錯誤的に行うことが一般的であるうえ、それをAICなどの情報量基準によって評価したとしても、誘因の条件を取り入れていない場合、他の地震にそのカテゴリー区分をそのまま適用することは難しい。

そこで本研究では、簡便性を保持しながら同時に上記の問題点を解決して高精度の予測手法を提案するため、非線形予

* 京都大学防災研究所 地盤災害研究部門

** 大阪支店 技術部

*** 首都圏事業部 国土保全部

測手法であるニューラルネットワーク（Back propagation法）を用いた谷埋め盛土の変動・非変動に関する不安定化予測を行った。ニューラルネットワークでは、地震に関する要因をシステムに含めることが可能であり、カテゴリー区分が原則として不要であるため、上記の問題点の多くは解決され、より高精度の変動予測モデルの構築を試みる事が可能である。なお、本論文は、日本地すべり学会誌第40巻第5号³⁾に発表したものである。

2. 谷埋め盛土の地すべり

地震時に住宅地の盛土地盤が変形・変動する事例は、十勝沖地震、宮城県沖地震、千葉県東方沖地震、釧路沖地震、北海道東方沖地震、兵庫県南部地震など過去の地震においてしばしば発生している（井口、1995⁴⁾）。このうち、1978年の宮城県沖地震、1993年の釧路沖地震、1995年の兵庫県南部地震においては、都市域に分布する谷埋め盛土について多数の変動事例が得られている（浅田、1982⁵⁾、千葉、1996⁶⁾、柳澤ほか、1993⁷⁾、Kamai et. al., 2000、釜井ほか、2002）。その多くはクラックや沈下などの地表変状の性質から、移動体（変動ユニット）中に頭部、側部、末端部を識別することが可能であり、全体が地すべりとして変動したと考えられる。実際にその一部は、宮城県沖地震の際の寿山団地や兵庫県南部地震による仁川の崩壊のように土塊の内部が液化化し、崩壊土砂が長距離を流動した。その他の大部分の事例では拘束条件や人工構造物、地下水位などの制約により、全般的な流動には発展しなかった。しかし、こうした非流動的な変動においても多くの住宅が損傷しており、このタイプの災害が地域社会に与えた影響は大きく、谷埋め盛土の地すべりは防災上重要な斜面災害のタイプであると考えられる。

本研究において谷埋め盛土の地すべり変動の有無は、原則として現地踏査による判定に従っている。すなわち、踏査の段階で視認される程度の地表変状の組み合わせを基に、変形が比較的顕著であり、同時に地すべり移動体（変動ユニット）が認定される場合を変動事例（地すべり）、それ以外を非変動事例と判定した。一部の事例のように過去の文献をもとに検討を行う場合は、踏査結果のわかる図面や写真をもとに判断した。したがって、切り盛り境界などの地表部にクラックが形成された場合でも、斜面方向に地すべり移動体（変動ユニット）が認定できず単なる盛土の沈下と判断される場合は、変動事例（地すべり）から除外した。

今回の地表踏査では、地域全体が網羅的に調査されている。したがって、地表踏査結果は、広域に分布する谷埋め盛土地すべりの現時点における最も信頼しうる情報源であると考えられる。しかし、地表踏査によって変動の有無を判定する場合、基準を数値などで明確にすることは困難で

ある。そのため、広域に多数分布する盛土を同じ精度で分類するためには、変動のランク区分はできるだけ単純なことが望ましい。そこで今回は、最も単純に、変動、非変動の二分割とした。踏査に熟練すれば、地域内に分布する多数の谷埋め盛土の中から、上記の“変動事例”を抜き出すことは難しくない。したがって、それらを除外した“非変動事例”も現実的には比較的容易に見つけることができる。こうした変動事例では、何らかの“被害”が顕著に発生していると考えられ、広域においてこれらを抽出することは、防災上の意義が大きいと考えられる。

3. ニューラルネットによる変動予測モデル

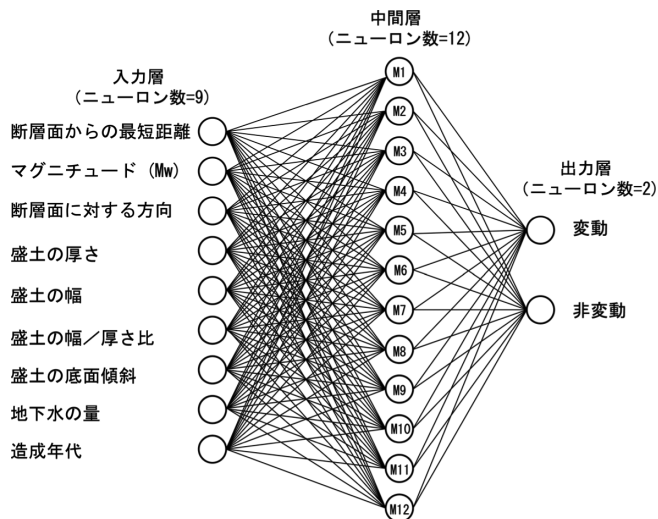
(1) ニューラルネットワークの概要

ニューラルネットワークは脳の中の神経細胞（ニューロン）とその繋がり＝ネットワークをモデル化した人工知能（AI）の一つである。ニューラルネットワークの特徴の一つは学習と自己組織化能力を持っている点である。すなわち、ニューラルネットワークは外部環境に合うように自分自身を変化させて適応することが可能である。ニューラルネットワークはニューロンの連結の仕方によって階層型ネットワークと相互結合型ネットワークに区分される。階層型ネットワークは層状に並べられたニューロン間を前の層から次の層へ方向にのみ信号が伝わり、入力信号に対して出力信号が一意的に定まる。本研究では相互結合型ネットワークを用いないので、階層型ネットワークをニューラルネットワークと呼ぶことにする。任意のパターンの識別には、最低3層（入力層、中間層、出力層）あれば可能であることが知られているため、本研究においても3層のニューラルネットワークを使用した。

ニューラルネットモデルの具体的解法として、ここではバックプロパゲーション法（Back Propagation：BP法）を採用した。BP法は矛盾を含むデータセットであっても誤差を最小とするネットワークモデルを構築することが可能である。BP法のネットワークは、入力層、中間層、出力層それぞれの層間ではニューロンは密接に結合しているが、同じ層内のニューロン間は結合していない（図-1）。図-2は、BP法の計算過程を示している（白木ほか、1998⁸⁾）。入力層に展開された学習パターンは中間層から出力層へ伝わり、出力層で出力値Oと教師値D（実際の結果）が比較される。そして出力値Oと教師値D間の誤差Eが最小となるように結合重みW,Vやしきい値Sを調整することによって学習が行われる。誤差Eは、出力値Oの関数であり、また出力値Oは中間層と出力層間の結合重みVの関数であるから、誤差Eを最小にするためには結合重みVによる誤差Eの偏微分に比例した量だけ、結合重みVを変化させれば良い。このときの比例係数を学習率 α と呼ぶ。入力層と中間層間の結合重みW

の更新も同様に行う。

このように誤差の減少のための信号が出力層から入力層へ伝えられることから、BP法は誤差逆伝播法とも呼ばれている。



図一 ニューラルネットワークによる予測モデルの構造

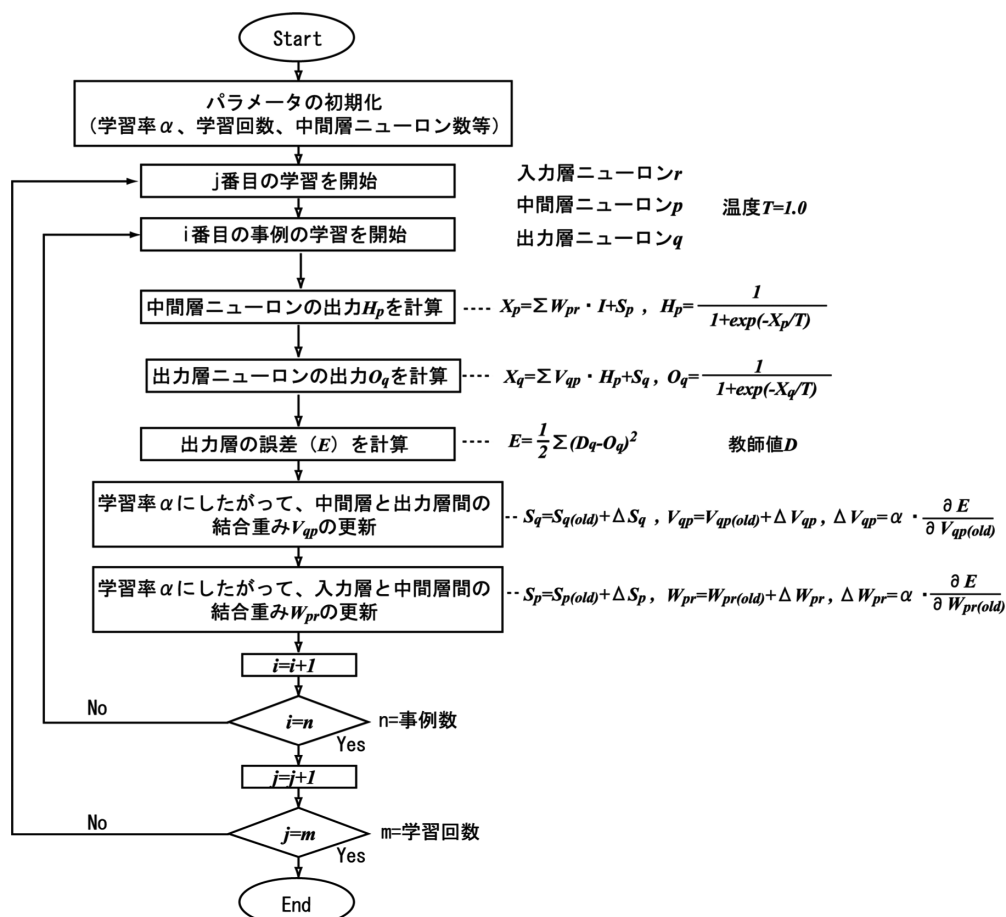
(2) 解析に用いる要因とデータセット

1) 要因

Kamai et. al. (2000) および釜井ほか (2002) は兵庫県南部地震、宮城県沖地震の事例をもとに、谷埋め盛土の変動に関する様々な素因について解析した。その結果、変動・非変動事例の判別において盛土の形状、地下水、形成年代に関する6要因に素因としての有意性が認められた。そこで本研究では、これらに誘因としての震動特性に関連する「断層面からの最短距離」、「モーメントマグニチュード」、「断層面に対する方向」の3要因を加え、以下の9個の要因でニューラルネットワークを構成することにした。

①断層面からの最短距離

谷埋め盛土の変動に影響を及ぼすと考えられる最大速度の距離減衰についてはいくつかの実験式が提案されている（例えば、Midorikawa,1994⁹⁾）。そうした式のパラメータは、主に距離とマグニチュードである。距離については震央距離、震源距離、断層からの距離、断層面からの最短距離と様々である。震央距離や震源距離はデータの作成が容易であるが、直下型地震のように被害域が震源断層に近い場合、点震源からの距離では被害の実態を正しく表現できない可能性がある。さらに今回は、使用するデータに直下型地震



図二 バックプロパゲーション法 (BP法) の解析フロー

の兵庫県南部地震の事例が多い。これらのことから、今回は距離減衰の影響を表現する要因として、断層面からの最短距離を使用する。この結果、兵庫県南部地震における事例の大半が、断層面から7km以内の震源域に含まれることになる。

また、断層から離れるにつれて、最大速度が減衰すると同時に、周波数特性（卓越周期など）も変化する。したがって、この要因は、距離による卓越周期などの周波数特性の変化についても陰に表現していると考えられる。

②モーメントマグニチュード

距離に関する要因として断層面からの最短距離を採用しているので、マグニチュードに関してもモーメントマグニチュード（ M_w ）を使用する。

③断層面に対する方向

断層面から盛土の長軸がどの方向であったかを計算し、要因として使用した。実際には断層の走向と長軸方向の内積（ $\cos$ （断層の走向と長軸方向がなす角）の絶対値）を用いた。兵庫県南部地震では、震源域において断層直交成分の地震動（速度、振幅）が卓越していた（地盤工学会、1996¹⁰⁾）。長軸すなわち斜面方向が断層に対してどの方向であったかは、盛土の揺れに影響を与えたと考えられる。

④盛土の厚さ

盛土の形状を記述する基本的パラメータの一つであり、盛土の質量に関連することから変動の有無に大きな影響を

及ぼす要因と考えられる。図-3は、兵庫県南部地震における谷埋め盛土の変動・非変動事例について、盛土の形状に関するパラメータのヒストグラムと変動率（変動事例数÷ヒストグラム横軸の各区区分での総数）を示している。谷埋め盛土の変動率は盛土が厚くなるにつれて低下し、盛土厚が薄いほど変動しやすい傾向が明瞭に認められた。

⑤盛土の幅

盛土の形状を記述する基本的なパラメータとして使用する。一般に幅が広ければ側方拘束の影響が弱まるため、変動が発生しやすいと考えられる。兵庫県南部地震ではこの傾向が明瞭に認められた（図-3）。

⑥盛土の幅/厚さ比

盛土の横断形状を記述する基本的無次元数である。谷埋め盛土の厚さ（＝谷の深さ）に対して幅の広い盛土と幅の狭い盛土とでは、被害の程度が異なるという経験的事実から導入した。三次元的なすべりを考えた場合、側面の抵抗を無視することができない。谷埋め盛土の底面には軟弱な地盤が残されていることが多いため、盛土側面の抵抗が変動の有無に大きな影響を及ぼす要因と考えられる。兵庫県南部地震ではこの傾向が明瞭であり、幅/厚さ比が20以下の領域では、谷埋め盛土の変動率は幅/厚さ比が大きくなるにつれて増加した（図-3）。一方、幅/厚さ比が25以上の領域では、非変動事例がほとんど見られなくなるため、変動率は80%以上ではほぼ一定となる。区分ごとのデータ数は少な

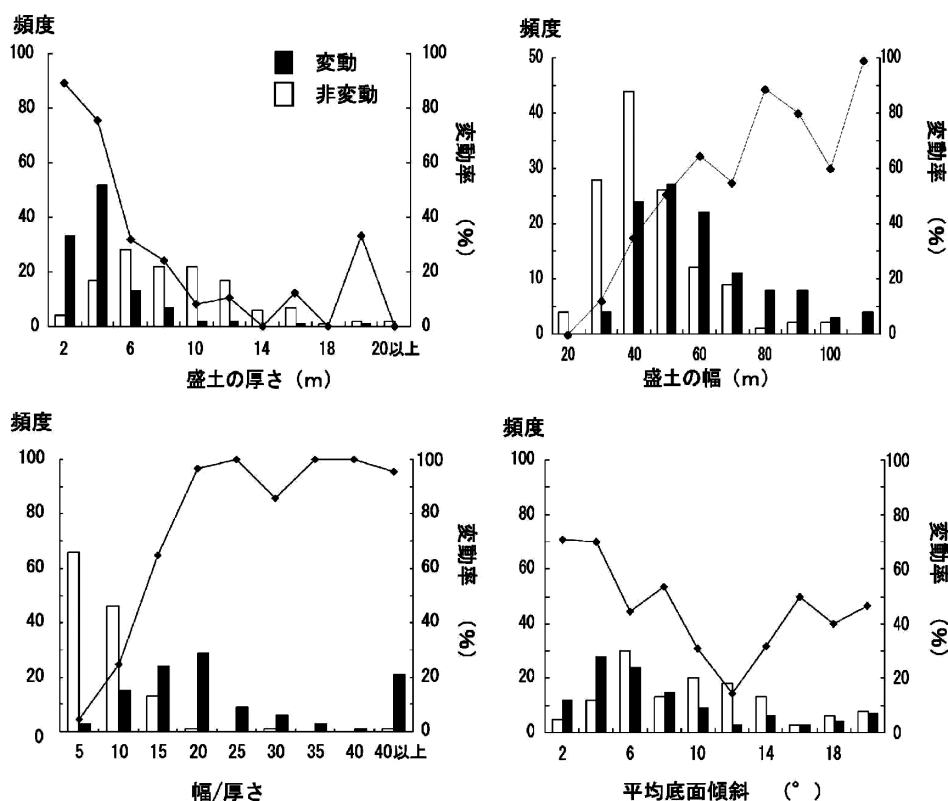


図-3 形状に関する各要因の頻度分布（兵庫県南部地震）

いが、変動事例と非変動事例の幅/厚さ比の分布は異なっており、最頻値が変動事例では20前後であるのに対し、非変動事例では5以下である。

幅/厚さ比は盛土底面の形状に強く関連し、幅/厚さ比が小さいほど谷（盛土底面）の横断形状はV字型に近く、幅/厚さ比が大きいほど谷の横断形状は皿形・お椀型に近くなる。このことと、谷埋め盛土の変動率は盛土が厚くなるにつれて低下し、変動した盛土の大部分が6m以下であったことから、変動事例の多くは底の浅いお椀型～皿形の横断形状をした盛土であったと考えられる。

⑦盛土の底面傾斜

盛土の形状を記述する基本的なパラメータとして使用する。傾斜は底面の部位によって異なるため、谷中央の最深部を通る縦断勾配を底面傾斜として定義した。一般に底面の傾斜が急であれば変動が発生しやすいと考えられるが、兵庫県南部地震の事例では、その傾向が認められなかった（図-3）。逆に、データのバラツキによる10～14度付近の急激な低下を除けば、全体に傾斜が増加するにつれて変動率は漸減している。これは、形状に関する要因（厚さ、幅、底面傾斜）が互いに独立でないため、他の支配的要因（変動の有無に強く影響を及ぼす要因）によるバイアスが発生しているためと考えられる。このことは、非線形予測手法の必要性を示唆するものと考えられる。

⑧地下水の量

谷埋め盛土の内部にはしばしば地下水が貯留されており、変動の有無に影響を与える要因と考えられる。しかし、地下水位の情報を定量的に把握できる地点は限られている。そこで、開発以前の土地利用状況（水田か畑かなど）や溜め池の有無、湧水の有無に関する情報をもとに、地下水の量が豊かか少ないかを推定して解析に使用した。解析においては、地下水に乏しい場合を0、豊富な場合を1として入力データとした。兵庫県南部地震の事例では、地下水位が低く盛土底面以下（入力値0）と判定された地点の変動率は、約9%（4/46箇所）であったのに対し、地下水位が高く盛土中に形成されていると判定された場合（入力値1）の変動率は、約54%（113/210箇所）であり、顕著な相違が見られた。

⑨造成年代

宅地造成に関する法令・規則の多くが、1965～1975年にかけて整備された。こうした、規制の状況は谷埋め盛土の品質に影響を及ぼしたと考えられる。そこで、造成年代を1975年以前と以後に区分し解析に使用した。解析においては、1974年以前の造成の場合を0、1975年以後の造成の場合を1として入力データとした。兵庫県南部地震の事例では、1974年以前に造成された盛土（入力値0）の変動率は、約47%（104/222箇所）であったのに対し、1975年以降に造成された盛土（入力値1）の変動率は、約35%（12/34箇所）

であった。阪神間の都市域では、1970年代までに開発が一段落しているため母集団の規模に違いがあるが、1974年以前に造成された盛土の変動率は、それ以後に造成された盛土よりもやや高いといえる。

上記のように地形に関する要因においては変動・非変動事例間に相違が認められ、しかもデータの収集が容易である。これに対し、盛土の換算N値（簡易貫入試験の結果を標準貫入試験に換算した値）は連続した頻度分布を示し、強度は全体に軟弱である（図-4上）。さらに、変動しなかった盛土でも表層部を除いて強度が極めて低い事例がしばしば認められた（図-4下）。すなわち、少なくとも現時点の調査結果では、谷埋め盛土のN値は、非変動事例も含めて母集団全体で値が低いため、変動と非変動を識別する上で有効な指標とは言えない。さらに広域に多数分布する全ての盛土において、N値の収集は現実には困難である。したがって、本研究ではN値を要因として使用しなかった。

2) データセット

上記の要因を全て含んだデータセットを以下の2種類用意した。

①過去の地震による変動・非変動事例

兵庫県南部地震による神戸市長田区～京都府向日市の事例（256、うち変動事例117）、宮城県沖地震による仙台都市域の事例（53、うち変動事例10）、釧路沖地震による釧路市

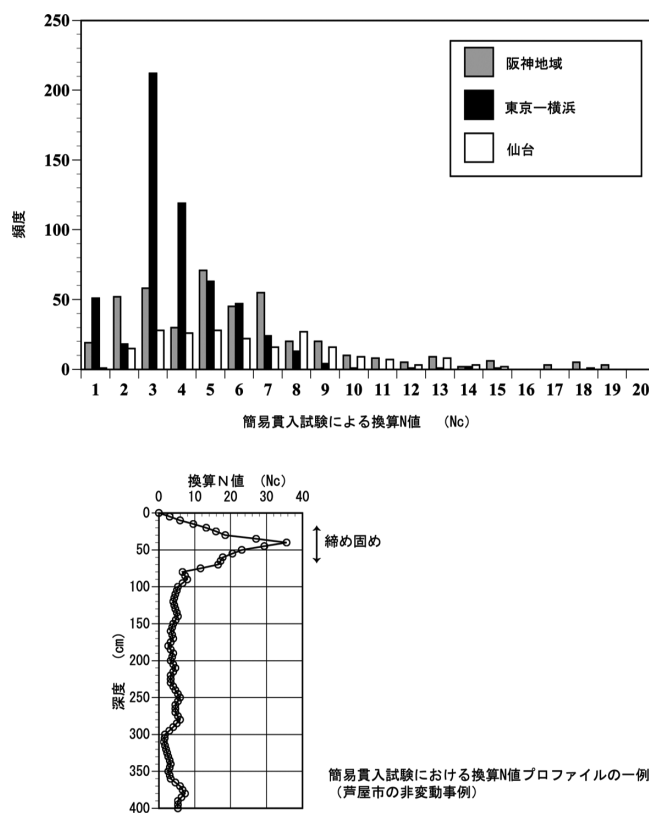
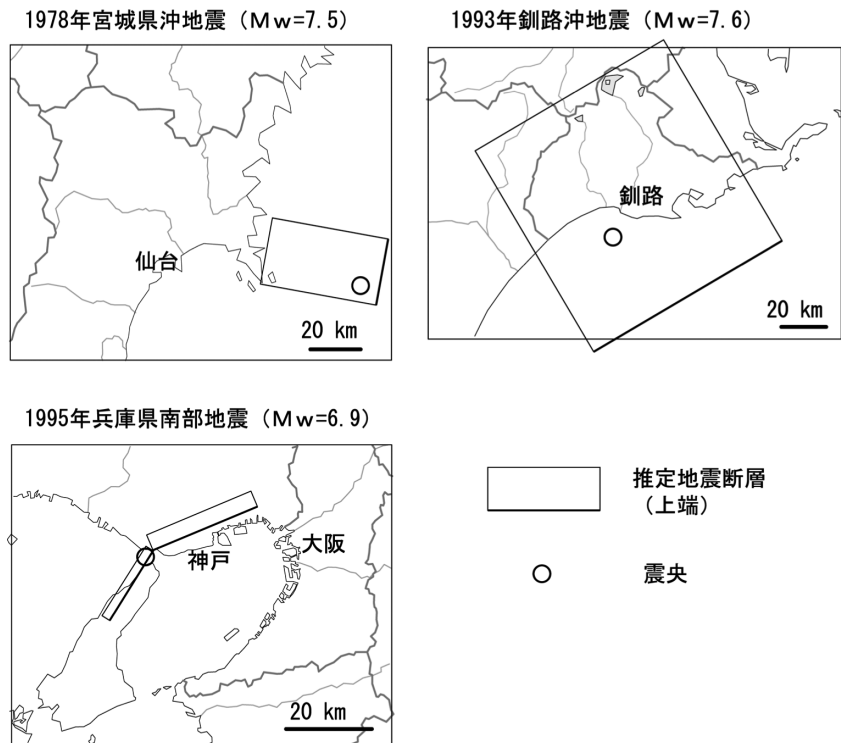


図-4 谷埋め盛土における換算N値（Nc）の分布



図ー5 学習に使用した地震の震央と推定断層およびモーメントマグニチュード

の事例（4、うち変動事例2）を収集した。図ー5に各地震の推定断層の位置、震央、モーメントマグニチュードを示す。

谷埋め盛土の形状に関するデータセットの作成方法は、釜井ほか（2002）と同様である。すなわち、各地域における1万分の1旧版地形図（開発以前の地形図）を収集し、数値化してDEM（数値地形モデル）を作成し、現在の地形図から作成したDEMとGIS上で重ね合わせ、差分を取って谷埋め盛土の概略の位置と形状を把握した。その際、地図のゆがみによる誤差や数値化の際の誤差などは手作業と現地調査によって補正した。この作業によって、地域内の幅約30m以上の大規模な谷埋め盛土を、ほぼ全数について把握することが可能である。データセットは、変動、非変動に関わらず原則として認定できた地域内の全ての谷埋め盛土について作成し、変動事例数に比べて非変動事例が少ない場合は、探索範囲を広げて変動事例と非変動事例の割合がほぼ同様となるようにデータの収集を行った。非変動事例の盛土において、盛土の縦断方向の長さに関しては周囲の変動事例から推定した。ただし、解析において縦断方向の長さに関連する要因を使用していないので、この推定における誤差の影響は大きくないと考えられる。

②首都圏南部地域の谷埋め盛土

首都圏南部の1/1万地形図、「自由が丘」「武蔵小杉」「鶴見」「新横浜」の範囲（東京都目黒区～横浜市港北区）に分布する谷埋め盛土（総数360箇所）を収集した。データセットの作成方法は、過去の地震による変動・非変動事例と同

様である。作成したデータセットによって、この地域の大規模な谷埋め盛土は、ほぼ網羅されている。

(3) ニューラルネットワークによる予測モデルの構成

モデルの性質を左右するパラメータとして、学習回数、中間層ニューロンの数と学習率がある。表ー1に使用したパラメータのセットを示す。全ての解析で学習回数は5,000回、中間層ニューロンの数は12、学習率は0.15とした。

学習回数は少なすぎると誤差が大きく、多すぎると過学習となってやはり誤差が拡大する（汎化能力の低下）。学習回数に対する誤差の変化を観察したところ、5,000回付近では平均二乗誤差（E）の変化が安定し約3%と最も小さいため、今回のモデルでは5,000回の学習を行うこととした。

中間ニューロン数が少なすぎる場合と同様に多すぎる場合でも学習が困難になる場合があるため、最適な中間層ニューロン数の決定はモデルの性能を左右する重要な要因である中間層ニューロン数が多くなると結合の総数は飛躍的に増加するが、データ数（今回は事例数）には限りがあ

表ー1 ニューラルネットワークによる解析条件

入力層ニューロンの数	9
中間層ニューロンの数	12
出力層ニューロンの数	2
学習率	0.15
学習回数	5000

るので中間層ニューロン数が少ない方がモデルとしての学習能力が高いと考えられる。しかし、中間層ニューロン数の決定法には明確な一般的手法がないため、通常は多めの数から検討を始め、徐々に中間ニューロン数を減らして最適な条件を見つける試行錯誤的方法が取られている（伊藤ほか、1997¹¹⁾）。そこで今回は、中間層ニューロンの数を15から9まで変化させ、5,000回学習時における平均二乗誤差（E）が増加し始める直前の中間層ニューロン数12をモデルの中間層ニューロン数として採用した。

ニューラルネットワークにおける結合重みの更新率を学習率と呼び、通常は0.05～0.2の範囲で定義する（伊藤、1999¹²⁾）。本研究では学習率を0.1,0.12,0.15,0.2と変化させ、5,000回学習時における平均二乗誤差（E）が最小であった学習率0.15を採用した。

出力層には変動・非変動のそれぞれに対応するニューロンを2個設定した。すなわち、変動と判定される場合は変動ニューロンの出力が1に、非変動ニューロンの出力が0になるように設定した。

（4）ニューラルネットワークの学習結果

過去の地震による変動・非変動事例を全て学習データとした解析（すなわちデータ数314）について、表-2に入力層ニューロンと中間層ニューロン間の結合重みと結合重みの二乗和、およびしきい値を示す。表-3は、中間層ニューロンと出力層ニューロン間の結合重みとしきい値である。入力層ニューロンと中間層ニューロン間の結合重みの二乗和は、入力要因の影響力を平均的に表す尺度である。表-2に示すように、寄与率（各要因の結合重み二乗和/結合重み二乗和の合計）は「盛土の厚さ」で最も大きく、「断層面に対する方向」、「盛土の幅」、「盛土の幅/厚さ比」、「断層面からの最短距離」、「盛土の底面傾斜」、「モーメントマグニチュード（M_w）」、「地下水の量」、「造成年代」の順に低下する。上位5位までの寄与率の合計は約80%であり、これらの誘因に関連する要因（断層面に対する方向、最短距離）

と盛土の規模と形状に関連する要因（厚さ、幅、幅/厚さ比）が支配的要因であると考えられる。

表-4は、本研究で行ったニューラルネットワークによる解析結果を全て示している。一部を非学習データ、残りを学習データとしてモデルの性能をチェックした解析（精度評価試験）の結果も含まれる。314地点の全事例について学習した結果、305事例で正解が得られ、正解率（適合率）は約97%であった。釜井ほか（2002）の多変量解析（数量化Ⅱ類）による予測モデルでは正解率の上限は約86%であり、約10%上昇した。二値判別問題としても高い正解率と言える。

地震事例別では、兵庫県南部地震で、約97%（256事例）、宮城県沖地震で約96%（54事例）、釧路沖地震で100%（4事例）となった。不正解となった事例は、全体で9事例と少ないが、実際には変動した事例を非変動事例と判定した場合が約67%と過半数を占めており、やや危険側に外れる傾向が認められる。

表-3 中間層-出力層間の結合重み
（M-1～12は中間層ニューロン）

M-3	-14.84	14.84
M-4	21.23	-21.22
M-5	9.51	-9.49
M-6	7.34	-7.41
M-7	13.94	-13.92
M-8	-3.55	4.69
M-9	-11.10	11.07
M-10	11.47	-11.48
M-11	-11.88	11.87
M-12	-16.89	16.90
しきい値	-6.69	5.77

表-2 入力層-中間層間の結合重み（M-1～12は中間層ニューロン）

	断層面からの最短距離	M _w	断層面に対する方向	盛土の厚さ	盛土の幅	盛土の幅/厚さ比	盛土の底面傾斜	地下水の量	造成年代	しきい値
M-1	-1.53	-2.07	0.40	-0.15	-0.38	-1.15	-0.68	2.08	-1.34	1.41
M-2	-2.84	-2.21	11.40	-6.36	-13.14	-2.93	1.36	2.81	0.61	6.85
M-3	8.38	-11.81	10.89	-29.19	-4.52	8.35	-15.60	-1.78	6.03	7.59
M-4	-20.32	-13.44	6.69	-31.00	30.35	18.55	-7.04	8.09	-8.28	-6.25
M-5	3.57	2.32	-23.46	-3.56	8.09	2.82	2.70	13.02	2.05	3.79
M-6	-3.82	-1.23	4.90	6.01	7.18	-5.68	3.48	7.47	-8.08	-3.90
M-7	-14.51	-7.72	17.10	-25.52	-8.85	8.84	6.31	2.79	-0.06	-12.09
M-8	-0.79	-1.23	2.08	0.78	1.20	0.51	-0.01	1.34	-0.41	2.14
M-9	-0.43	-0.31	22.30	6.39	5.40	6.24	-7.88	-1.98	2.31	-2.94
M-10	12.56	2.75	-11.39	-16.22	1.36	9.73	19.11	4.26	0.84	2.93
M-11	-11.93	16.15	10.94	6.21	-13.26	-1.18	20.14	0.71	1.00	-3.72
M-12	-16.27	-5.03	-9.05	28.25	-3.46	-24.97	-0.64	6.35	-9.78	1.45
結合係数の二乗和	1297.24	690.92	1993.43	3695.11	1530.00	1300.57	1187.93	378.64	279.46	
寄与率(%)	10.5	5.6	16.1	29.9	12.4	10.5	9.6	3.1	2.3	

表－4 解析による正解率（適合率）

正解率(適合率)(%) および (正解数/総数)		学習		予測(認識)
		全体	精度評価試験	精度評価試験
	全体	97.1 (305/314)	95.3 (204/214)	92.0 (92/100)
地震別	兵庫県南部地震	97.3 (249/256)	95.1 (174/183)	94.5 (69/73)
	宮城県沖地震	96.3 (52/54)	96.3 (26/27)	85.2 (23/27)
	釧路沖地震	100 (4/4)	100 (4/4)	－

4. 予測モデルの評価

(1) 要因の感度解析

ニューラルネット法はいわば非線形重回帰分析とも考えられるが、BP法による結合重みの探索結果は、線形解析の場合と異なり、式の形で書き下すことが困難である。この結果、入力と出力の関係がブラックボックスとなっていて、入力値の変化が出力にどのように影響を与えているかが直感的にわかりにくいという欠点を有している。そこで、各要因と出力値の関係を見るため、他の要因を固定しながらその要因を変化させる感度解析（シミュレーション）を行った。ただし、入力が連続値でない⑧地下水の量と⑨造成年代は感度解析の対象とはしなかった。

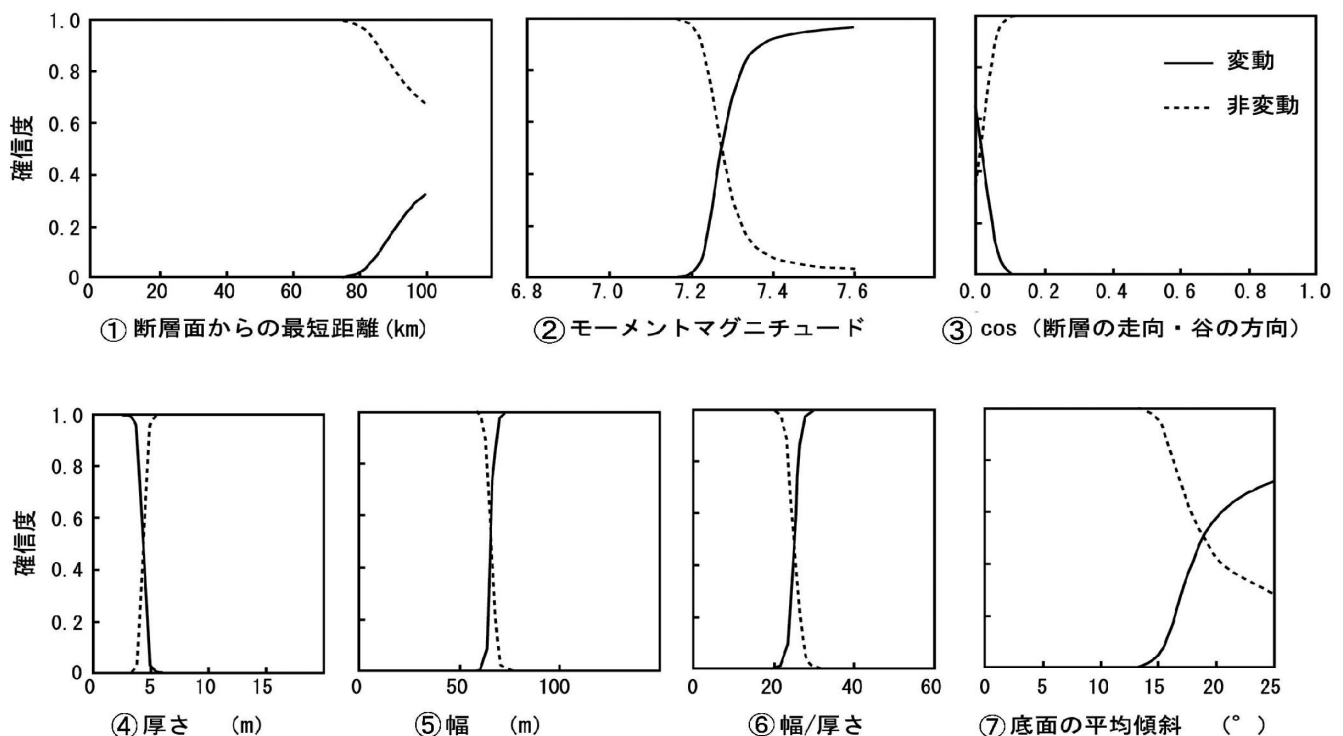
感度解析はデータセットの出力が変動、非変動とされるグループごとに行った。対象要因以外の要因は代表値（＝平均値）に固定し、対象要因の入力値を少しずつ変化させ、出力値の変化を調べた。この場合の出力値は、ある要因が単独で出力に及ぼす影響の大きさを測る尺度と考えられ、通常の解析の結果と区別するため、確信度と定義する。変

動、非変動と対立する出力に対する変化を調べているので、対象とした入力要因がモデルに対して大きな影響を与えている場合は、入力値の変化に応じて出力が大きく変化し、出力（確信度）の変化は一方が増加すれば一方が減少するというように相互に補完的な傾向となる。

ただし、こうした方法で行った感度解析は多次元空間に非線形的に存在する現象を二次元に投影して観察しているわけであり、要因相互の関係について調べているわけではない。したがって、現象の全体を把握しているわけではない点に注意が必要である。図－6は要因ごとの感度解析の結果である。X軸は各要因の入力値、Y軸は、出力値（確信度）である。以下に各要因について述べる。それぞれに合理的な解釈が可能であり、物理的に矛盾する要因は見られない。

①断層面からの最短距離

断層に近い領域では、距離は出力にほとんど影響を与えない。しかし70kmよりも遠い領域では、変動しやすさが増加する傾向にある。これらは、直下型地震としての兵庫県



図－6 感度解析の結果

南部地震、プレート型地震としての宮城県沖地震、釧路沖地震の事例の学習効果であると考えられる。地震としての事例数が少ないため個々の地震の特性が強調されている可能性があるが、上記の傾向は最大速度の距離減衰、および盛土の固有周期と震動の卓越周期の影響と見ることも可能である。

すなわち、兵庫県南部地震のような直下型地震では震源域の最大速度が大きく、全域ではほぼ飽和しているので変動は距離に関係なく多数発生する。一方、震源が遠いプレート型地震場合、最大速度の絶対値は減衰するものの、速度スペクトルで見ると長周期側に大きなパワーを持つ震動が発生することがある。1978年宮城県沖地震はその一例であった（宮城県、1980¹³⁾）。谷埋め盛土の固有周期は通常の地盤よりも長いのが普通であるから、こうした震動は、固有周期の長い谷埋め盛土では不安定化する要因となると考えられる。

②モーメントマグニチュード

7.2よりも大きくなると変動しやすさが急速に増加する。これは、宮城県沖地震、釧路沖地震の事例の学習効果であると考えられる。規模の大きいプレート型地震では震源が遠いにも関わらず谷埋め盛土で被害が出ることもある。②モーメントマグニチュードの傾向は①断層面からの最短距離とともに、こうしたプレート型地震の影響を表現することが可能である。

③断層面に対する方向

断層面に対して直交方向（内積=0）に長軸を持つ盛土が変動しやすい。直交方向から外れるにつれて変動しにくくなり、長軸が10度（0.18）以上斜交すると方向の影響は見られなくなる。

断層近傍では断層の走向と直交する方向の震動が卓越するので、谷埋め盛土の長軸が断層と直交する方向にある場合、強い震動が盛土全体を滑らす方向に作用すると考えられる。

④盛土の厚さ

厚さが薄くなるほど変動しやすく、5mを越えると変動しにくくなる。単位体積重量は盛土ごとに大きく変化しないと想定されるので、盛土の厚さは盛土全体の質量と底面に対する上載荷重の影響を表していると考えられる。上記の傾向は、盛土の質量が小さいものほど良く動くことを示している。

⑤盛土の幅

幅が広くなるほど変動しやすい。幅が60mよりも狭い場合は変動しにくい。幅の広い方が、側面の拘束の影響が小さくなり変動しやすくなると考えられる。

⑥盛土の幅/厚さ比

幅/厚さの比が大きいほど変動しやすい。盛土側面の抵抗

を考えると、幅に対して薄い盛土の方が、側面抵抗が小さいと考えられる。

⑦盛土の底面傾斜

底面傾斜が緩い領域では、傾斜は出力にほとんど影響を与えない。しかし15度よりもよりも急な領域では、変動しやすさが増加する。底面傾斜が急な方が底面のせん断応力が増加するので、合理的な結果と考えられる。底面傾斜のモデルに対する寄与率は約10%（全体の6位）とあまり高くない。しかし、兵庫県南部地震の事例では、傾斜が増加するにつれて変動率は緩やかに減少し、感度分析の結果とは矛盾する傾向が得られている。すでに述べたように、現実の事例において形状に関する要因（厚さ、幅、底面傾斜）は、互いに独立でない可能性が高い。したがって、こうした非線形性の強いデータの解析は、今回のニューラルネット解析のように全要因を用いた非線形解析によって行う必要がある。

(2) 精度評価試験

比較的事例数が多い兵庫県南部地震と宮城県沖地震の事例から100例を認識群（予測の対象）として引き抜き、残りを学習群として予測を行った。認識群のデータは学習に反映されないため、予測（認識）の結果を精度の指標とすることが可能である。

学習を行った214事例（314-100事例）についての適合率（正解率）は、全体で約95%であり、認識群の適合率（正解率）は全体で約92%であった。地震別では、兵庫県南部地震の事例についての適合率（正解率）は約95%、宮城県沖地震の事例では約85%であった。宮城県沖地震の事例において適合率（正解率）が低下した原因としては以下の3点が考えられる。

① そもそも学習データ数が少ない。

② 形状要因の影響が兵庫県南部地震の事例ほど明瞭でない。

③ 地震としての性質や基盤地質を反映した開析谷の形状（＝谷埋め盛土の形状）が、データ数の多い兵庫県南部地震の事例とは異なっている。

しかし、半数の27事例を学習データに含めた予測の結果、高い確率で残りの半数を正しく判定することができた。このことから、地震や地形の地域性によって正解率にやや片寄りが見られる可能性はあるが、今回作成した予測モデルによって、谷埋め盛土の危険度の関する簡易判定が可能であると考えられる。

5. 予測モデルの具体的適用と課題

(1) 都圏南部における谷埋め盛土の変動予測

首都圏南部（1/1万地形図、「自由が丘」「武蔵小杉」「鶴見」「新横浜」の範囲）に分布する大規模な谷埋め盛土（360事例）について、釜井ほか（2002）は多変量解析（数量化Ⅱ類）を使用した変動予測を行い、予測図を作成した。この地域に分布する谷埋め盛土は、ニューラルネットワークの学習に用いた兵庫県南部地震、1978年宮城県沖地震、釧路沖地震の事例と同様、鮮新～更新統からなる台地・丘陵地の開析谷上に造成されたものであり、地質、地形条件は学習事例と類似した特徴を有している。このことは、盛土の形状、地下水に関する要因が類似していることを示唆する。さらに、図-4に示したように、盛土の強度においても学習事例と大きな相違は認められず、造成の歴史的経過も阪神地域と良く似ている。すなわち、釜井ほか（2002）が検討対象とした首都圏南部に分布する谷埋め盛土は、多くの要因が今回の学習事例と総体として類似しており、今回作成したモデルの適用範囲であると考えられる。そこで、釜井ほか（2002）と同じ地点について、今回のニューラルネットワークによる予測モデルを適用し、変動・非変動の判定を行った。学習はデータセット全体（314事例）を使用し、対象地震を東京都（1997）の予測における神奈川県境

直下の地震（Mw7.2）とした（図-7）（損害保険料率算定会、1998¹⁴⁾）。

図-8は、変動・非変動の判定結果とその分布を示している。釜井ほか（2002）が行った数量化Ⅱ類は、変動群と非変動群が分かれるように要因の重み（カテゴリースコア）を設定し、地点ごとに要因の採点を行う手法である。点数の合計（サンプルスコア）の正負が、それぞれ非変動と変動に対応するように設定されているが、この点は、今回のニューラルネットワーク解析において、出力が0もしくは1

神奈川県境直下の地震（M=7.2）

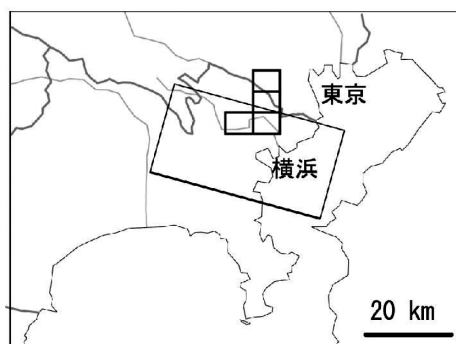


図-7 東京一横浜地域の谷埋め盛土の不安定化予測において想定した地震（東京一神奈川県境地震）

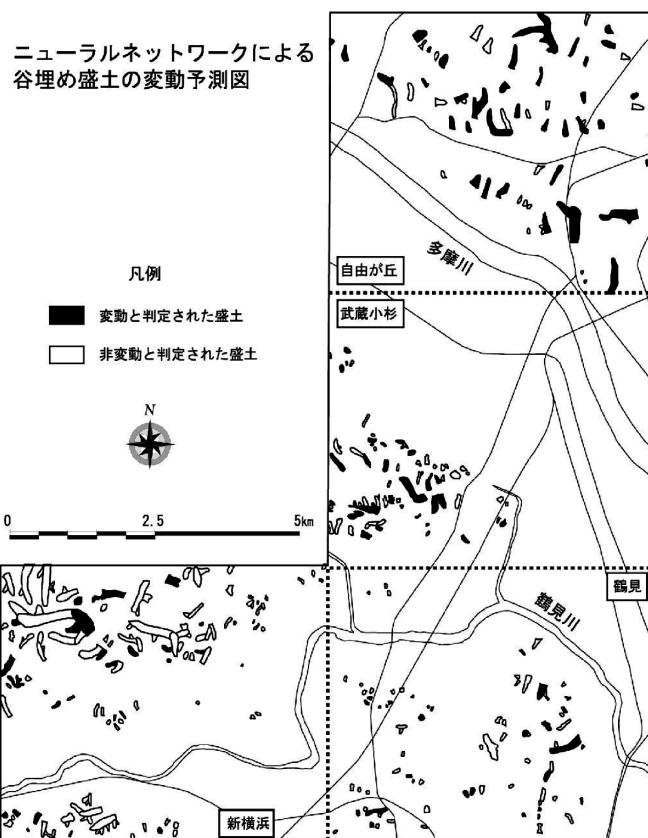
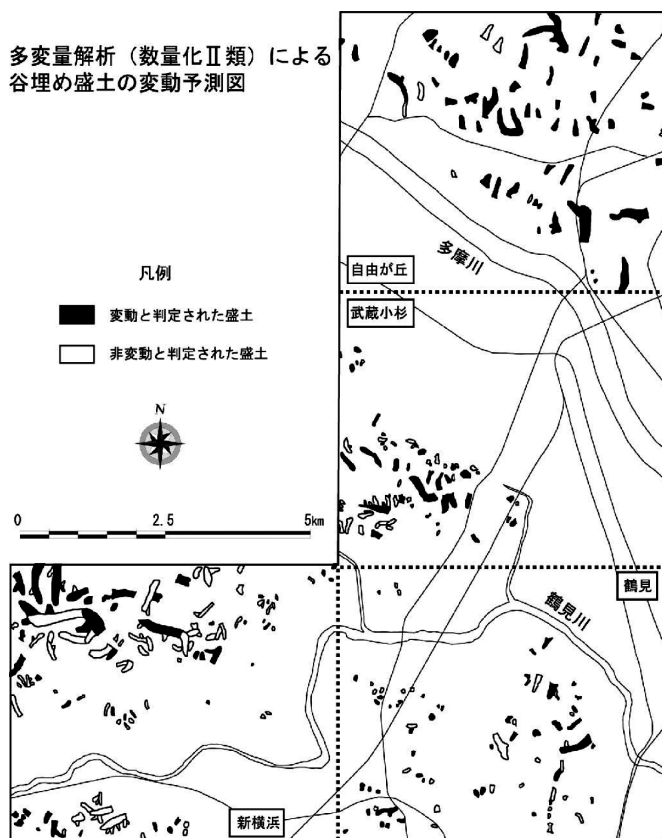


図-8 東京一横浜地域の谷埋め盛土に多変量解析(数量化Ⅱ類)とニューラルネットワークによる安定度評価手法を適用した結果

で得られることと同様である。数量化Ⅱ類では、サンプルスコアの区間ごとに実際に変動（もしくは非変動）した割合を計算し、確率を定義することが可能である。誤差が無い場合、正負それぞれの確率はそれぞれ50%であるが、釜井ほか（2002）の解析では、正負の分岐点における変動の確率が40%であった。そこで、図-8ではそれ以上の確率となった地点を変動として表した。

今回の解析では、教師値を0（非変動）と1（変動）で与えているが、ニューラルネットワークからの出力は、アルゴリズムの関係で連続値となる。事例全体の約95%（300/314事例）の出力は、0に近い値（0.1以下）か、1に近い値（0.9以上）であったが、残りの約5%の事例（14例）ではその範囲を超えて0.2から0.8までの出力が得られた。この場合には、出力層の二つのニューロン（変動、非変動）の出力を比較し、高い方の数値を結論として採用した。この処理は、結果的に出力値の0.5を境界値として変動・非変動を判断したことになる。

多変量解析（数量化Ⅱ類）による釜井ほか（2002）の予測と今回のニューラルネットワークによる予測は全体的には同様の傾向であり、多摩川以北に分布する武蔵野台地では変動と判定される地点が多く、多摩丘陵では少ない。首都圏南部では、一般に南西に向かうほど下位の地層が出現し、台地・丘陵地の起伏が増加する。これは、谷埋め盛土の容器である谷の形状が地形面によって変化することを意味している。すなわち、多摩川以北の武蔵野面（武蔵野台地）では底の浅い船底型の盛土が多く、多摩面（多摩丘陵）では横断形状が深い箱型の谷が多くなる。すでに述べたように、盛土の形状に関する要因は、変動・非変動を分ける支配的要因の一つであり、上記の判定結果の地域性は地形面によって盛土の形状が異なることを反映した結果であると考えられる（釜井ほか、2002）。しかし、ニューラルネットワークによる予測では釜井ほか（2002）の予測に比べ、変動と判断された地点が18%（40箇所）減少した。特に南部の多摩丘陵での減少が著しい。これは予測に誘因（地震動）に関する要因が取り入れられた結果、変動についてより精度高く判定されたためであると考えられる。

(2) 今後の課題

多変量解析（数量化Ⅱ類）による予測の問題点の多くは、非線形性の強い現象をデータの線形性を前提とする手法（多変量解析）でやや強引に解析することから発生した問題と考えられる。これに対し、非線形予測法であるニューラルネットワークによる予測では、上記のような問題は発生しにくい。正解率（精度）の向上（約10%の増加）、および感度解析結果の合理的な傾向は、このことを裏付けていると考えられる。

しかし、今回の結果については以下のような課題も残されている。

- ① 学習に用いた地震の数が依然として少ないので、データの収集を継続し、他地区への適用に際して精度の向上を図る必要がある。
- ② 予測の汎用性をより高めるためには、震動特性を予測モデルの学習要因に取り込むことが必要である。しかし、事例解析で様々な地震のパターンに応じたデータを収集するには限界がある。したがって、室内モデル実験やシミュレーション、現地観測を行い、予測モデルを補強する必要がある。
- ③ これまでの検討では地盤強度は変動・非変動に対するコントラストが弱いので、解析要因に用いていない。しかし、この傾向は簡易貫入試験の調査可能深度である5m以浅で認められたものであり、盛土の厚さを考えると調査深度が盛土の基底に達していない場合も多いと考えられる。盛土基盤まで調査が行われた一部の盛土では、下底部に極めて軟弱な部分（自沈）が存在することが判明しており、地盤強度に関しては簡便な評価法によって、さらに多くのデータを収集し、要因として取り入れる努力が必要であると考えられる。
- ④ 都市域の斜面には多くの防災施設などの人工構造物が存在する。これまでの解析ではこれらの影響は無視しているため、地点によっては判定を誤る可能性がある。今後の修正点として考慮する必要がある。
- ⑤ 変動する可能性が高いと判断された地点については、安定解析を含む詳細な解析が必要である。しかし、事例解析から明らかなように谷埋め盛土の変動は、縦断面の力学バランスに基づく単純な二次元解析からは判断できない現象である。今回の解析結果においても、盛土長軸（盛土以前の谷の延長方向）の断層面に対する方向が、変動の有無に影響を及ぼすことが判明した。したがって、今後の変動メカニズムの議論は少なくとも三次元問題として行う必要がある。

6. まとめ

今回、以下の諸点が結論として得られた。

- ① 宮城県沖地震、釧路沖地震、兵庫県南部地震における谷埋め盛土の変動・非変動事例314例について、新たに誘因（地震）に関する要因を取り入れニューラルネットワークを用いた変動予測を行い、全体の学習で約97%の正解率を持つモデルを構築することができた。
- ② モデルを評価するために行った感度解析では、各要因については合理的に説明できる入力値と出力値の関係が得られた。
- ③ 精度評価試験では、学習群（宮城県沖地震、釧路沖地

震、兵庫県南部地震：214例）で約95%、認識（識別）群（宮城県沖地震、兵庫県南部地震：100例）で約92%の高い正解率となり、今回のモデルは良好な判別モデルとして評価される。

現実にはあらゆる斜面について詳細な調査と解析を行うことは困難であるため、今回提案した簡易かつ合理的な不安定化予測手法は、ハザードマップの作成や対策の実施、および発生した地震に対するリアルタイム災害予測システムの構築において有用であると考えられる。

参考文献

- 1) KAMAI,T., KOBAYASHI,Y, JINBO, C. & SHUZUI, H. (2000) :Earthquake risk assessments of fill-slope instability in urban residential areas in Japan, Landslides (Proc. 8th Int. Symp. Landslide) , pp.801-806, Thomas Telford.
- 2) 釜井俊孝・守随治雄（2002）：斜面防災都市、理工図書、200p.
- 3) 釜井俊孝・守随治雄・笠原亮一・小林慶之（2004）：地震時における大規模宅地盛土斜面の不安定化予測、日本地すべり学会誌 第40巻 第5号（通巻第157号）、地すべり学会、pp.29-39
- 4) 井口 隆（1995）：谷埋盛土における地震時地すべりの事例と若干の考察、兵庫県南部地震などに伴う地すべり・斜面崩壊研究委員会報告書、地すべり学会、pp.101-117.
- 5) 浅田秋江（1982）：宅地造成地盤の地震時危険の予測法と防止工法に関する研究、土質工学会論文報告集、22-4、pp.191-202.
- 6) 千葉則行（1995）：1978年宮城県沖地震による地すべり・斜面崩壊について、兵庫県南部地震などに伴う地すべり・斜面崩壊研究委員会報告書、地すべり学会、pp.203-217.
- 7) 柳澤栄司・安田 進・吉田 望・若松加寿江（1993）：住宅地の被害、1993年釧路沖地震・能登半島沖地震災害調査報告書、土質工学会、pp.231-275.
- 8) 白木 渡・松保重之・宮下英明・伊藤則夫（1998）：自己組織化特徴マップ（SOM）による斜面崩壊予測システム、構造工学論文集、vol.44A、pp.453-459.
- 9) Midorikawa,S. (1993) :Preliminary analysis for attenuation of peak ground velocity on stiff site, Proc. Int. Workshop on strong motion data, vol.2, pp.39-48.
- 10) （社）地盤工学会（1996）：強震記録、阪神・淡路大震災調査報告書（解説編）、pp.108-122.
- 11) 伊藤則夫・白木 渡・安田 登（1997）：階層型ニューラルネットワークの構造最適化に関する研究、第5回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、pp.135-140.
- 12) 伊藤則夫（1999）：自己組織化ニューラルネットワークを用いた地盤特性値の空間分布推定手法に関する研究、金沢大学大学院自然研究科博士論文、pp.98-99.
- 13) 宮城県（1980）：'78宮城県沖地震災害の教訓－実態と課題－,406p.
- 14) 損害保険料率算定会（1998）：地震被害想定資料集、地震保険調査報告28.