

# 宅地盛土における地震時滑動崩落に対する安全性評価支援システムの構築

## Development of support system to evaluate stability of the artificial fills for housings during earthquake

中埜貴元<sup>a)\*</sup>, 小荒井 衛<sup>a)</sup>, 星野 実<sup>a)</sup>, 釜井俊孝<sup>b)</sup>, 太田英将<sup>c)</sup>

Takayuki NAKANO, Mamoru KOARAI, Minoru HOSHINO, Toshitaka KAMAI and Hidemasa OHTA

### Abstract

It is necessary to evaluate the relative risk of seismic sliding collapse to estimate damage effectively on the extensive land reclamation fills, and it is desirable to be evaluated from only common geographical information in all fills through the primary screening in accordance with the guideline for movement estimation investigation in extensive residential fill sites published by Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Therefore, the authors conducted development and verification of the support system to be able to measure fill shape and evaluate relative stability for seismic sliding collapse.

**Key words:** seismic sliding collapse, extensive land reclamation fill, statistical side friction model, statistical three dimensional stability analysis model, evaluation support system

### 和文要旨

地震時に発生が懸念される大規模盛土造成地における滑動的変動被害について、その被害予測を効率的に実施するためには、国土交通省の「大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドライン」の第一次スクリーニングですべての盛土に共通して得られる地形情報のみを利用して、盛土の相対的な滑動崩落危険度を評価する必要がある。そこで、盛土地形の計測と地震時滑動崩落に対する相対的な安全性の評価支援が可能なシステムを構築し、その有効性を検証した。

キーワード：地震時滑動崩落、大規模盛土造成地、統計的側部抵抗モデル、統計的三次元安定解析モデル、評価支援システム

## 1. はじめに

地震時における地盤災害は、宅地造成地や河川沿いの低地などの人工改変地で生じることが多い。特に、大規模盛土造成地における谷埋め盛土や腹付け盛土は、地震時に滑動崩落を起こし、盛土上や盛土下流域の宅地やライフラインに大きな被害を与える。これまでも1978年宮城県沖地震や1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震等の発生時に、大規模に谷を埋めた造成宅地において、盛土と地山との境界面をすべり面とした盛土全体にわたる滑動的変動が発生し、大きな被害をもたらした。

これら地震時における宅地盛土の被害を軽減するためには、その位置と規模を定量的に把握し、それぞれの危険度を評価して対策を講じる必要がある。2006年に「宅地造成等規制法」が改正され、地方公共団体が予め大規模盛土造成地の変動予測調査を実施して宅地ハザードマップを作成し、都道府県知事等が造成宅地防災区域の指定もしくは宅地造成工事規制区域における勧告を行い、宅地所有者等が滑動崩落防止工事を実施することが明記された(渋谷, 2007)。国土交通省は、造成宅地防災区域の指定等を行うにあたって必要となる大規模盛土造成地の変動予測の調査手法について、「大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドライン」(以下、「ガイドライン」という。)をとりまとめ、その解説とともに公表している(国土交通省, 2008)。

このガイドラインでは、宅地造成等規制法施行令で定義されている大規模盛土造成地(盛土面積が3000m<sup>2</sup>以上の「谷埋め盛土」、盛土する前の地盤面の傾斜が20°以上でかつ盛土の高さが5m以上の「腹付け盛土」)を変動予測調査の対象としている。変動予測調査は、造成前後の地形図、空中写真等の基礎資料から盛土造成地の位置と規模を把握する第一次スクリーニングと、それを基に詳細な現地調査や安定計算を実施する第二次スクリーニングとで構成されている。限られた予算の中で効率的に第二次スクリーニングを行うためには、第一次スクリーニングで把握した多数の盛土について、簡易かつ系統立った手法による相対的な滑動崩落危険度や現地踏査等に基づく調査対象の優先順位づけが必要となる。盛土の相対的な滑動崩落危険度を、主に盛土の幾何形状を用いて簡易に評価する手法については幾つか提案されている(例えば、釜井・守随, 2002; 釜井ほか, 2003; 太田・榎田, 2006; 国土交通省, 2008; 橋本・三輪, 2008等)が、多くの手法で腹付け盛土の評価が不可能であることや検証地域が限定的であることなどの問題点が指摘されていた。

そこで筆者らは、基本的に盛土の幾何形状(盛土地形データ)のみを用いて簡易に盛土の相対的な滑動崩落危険度を評価する手法として、従来の「側方抵抗モデル」(太田・榎田, 2006; 国土交通省, 2008)および中村ほか(1985)のHovland法(土研式Hovland法)の考え方をベースに、新たに「統計的側部抵抗モデル」および「統計的三次元安定解析モデル」を構築し、ガイドラインに掲載されている「点数方式」と併せて、盛土の滑動崩落が発生する相対的な危険度の系統的評価が半自動で行えるシステム(盛土形状計測・相対的滑動崩落発生可能性評価

\* 連絡著者 / corresponding author

a) 国土地理院  
Geospatial Information Authority of Japan  
〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番

b) 京都大学  
Kyoto University

c) 太田ジオリサーチ  
OHTA GEO-research Inc.

支援システム)を作成した。本稿では、このシステムで採用している評価手法の詳細とシステムの概要について述べる。

なお、この研究は、国土交通省総合技術開発プロジェクト「高度な画像処理による減災を目指した国土の監視技術の開発」の一環として実施したものである。

## 2. システムの基本設計概念

盛土形状計測・相対的滑動崩落発生可能性評価支援システム(以下、「本評価支援システム」と称す。)の基本的なコンセプトを述べる。

第一次スクリーニングで抽出した多数の盛土について、詳細調査の優先度を系統的に判断するためには、すべての盛土を同一条件で評価する必要がある。滑動崩落の危険度を把握するためには、力学的な安定計算を行うことが望ましいが、宅地盛土全体において安定計算に必要な土質パラメータを得ることは非常に困難である。一方、盛土の厚さや幅等の盛土地形データは、第一次スクリーニングによってすべての盛土で得ることができる。そこで、本評価支援システムでは、盛土地形データのみで盛土の相対的な滑動崩落の発生可能性を評価できる手法を用いることとした。すなわち、本評価支援システムは第一次スクリーニング後の相対評価が目的であり、絶対的な危険度評価を行うものではない。

盛土の地形データのみで評価が可能な代表的な手法としては、ガイドラインに掲載されている「点数方式」(国土交通省, 2008)と、側方抵抗を考慮した安定解析手法である側方抵抗モデルにおいて未知の土質パラメータを、兵庫県南部地震による阪神地区での被災事例に合うように帰納的に逆算して求めて、盛土の地形形状のみで評価を可能とした簡易的な側方抵抗モデル(太田・榎田, 2006)が挙げられる。

ガイドラインの「点数方式」は、盛土の厚さや幅、盛土幅/厚さ比、原地盤勾配、地下水の有無の情報で評価が可能であるが、盛土地形データの抽出精度に対して配点区分が不整合であることや地下水の評価比率が小さいこと、腹付け盛土が評価できない等の問題点が指摘されていた(小荒井ほか, 2009; 国土交通省, 2010)。しかし、本手法の配点は釜井ほか(2003)のニューラルネットワーク手法の結果から導かれたものであり、改良が困難であることから、現行のまま評価支援システムに組み込むこととした。

一方、太田・榎田(2006)による簡易的な側方抵抗モデルは、盛土の崩落が盛土幅/厚さ比と強い相関を持つという釜井・守随(2002)の考え方に基づいて、力学的なバランスを考慮して盛土形状を単純化し、汎用性を高めたモデルであり、原理的には腹付け盛土にも適用できる。ただし、計算パラメータの設定に用いられている検証事例が、兵庫県南部地震に伴う阪神地区での事例に限られていたため、本研究では他地域の事例も加えてより

汎用性の高いモデルとして、新たに「統計的側部抵抗モデル」を構築することにした。なお、このモデルは、未知の地盤強度パラメータを過去の実例(盛土の地形情報と変動・非変動実績)から統計的かつ帰納的に求めているため、その呼称は「側方抵抗モデルの原理を用いた盛土の地形情報による統計的回帰モデル」というのが適切であるが、ここでは略して「統計的側部抵抗モデル」と呼ぶ。

さらに、近年、写真測量技術を用いることにより、より精度の高い盛土地形データが得られるようになったことから、盛土形状を単純化せずに評価する手法として、地すべり土塊の安定性評価等に使用されている土研式Hovland法(中村ほか, 1985)をベースに、統計的かつ帰納的に未知パラメータを設定して、地形情報だけで評価可能な「統計的三次元安定解析モデル」も構築することにした。

本評価支援システムは、専門的な知識のない者でも操作しやすいよう、マウス等のポインティングデバイスで操作可能なグラフィカルユーザーインターフェース(GUI)によるシステムとした。

## 3. 各モデルの概要

本評価支援システムで採用した、盛土の滑動崩落の発生可能性評価手法のうち、本研究で構築した「統計的側部抵抗モデル」および「統計的三次元安定解析モデル」について概説する。なお、ガイドラインに掲載されている「点数方式」の詳細については、国土交通省(2008)を参照されたい。

### 3.1 統計的側部抵抗モデルの考え方

先述のように、統計的側部抵抗モデルは、側方抵抗モデルの考え方をベースにしている。地下水流動のある盛土は、底面付近が地下水流の影響を受け非常に緩んだ状態になっている。この現象は、簡易貫入試験などで盛土調査をする際、地山との境界直上に非常に緩い層が存在することで確認されている(釜井, 2006)。盛土直後にはこのような緩みは存在しないので、時間の経過とともに発生する現象と考えられる。地震の強震動等の外力を受けると、その緩み構造が破壊され、盛土・家屋等の上載荷重が緩み帯に作用する。ここには飽和地下水が存在するが、急激な水圧増加に対して排水が間に合わず、過剰間隙水圧を発生させることになる。このような原理により、盛土底面の抵抗力が著しく失われると考えられたのが側方抵抗モデルである。地中洗掘を受けて緩み帯を形成し、そこに飽和地下水が存在すれば、盛土材自体が液状化を発生させない材料(例えば粘性土)であっても滑動崩落の条件を満たすことになる。側方抵抗モデルでは、谷側部の抵抗力が安定性に大きく関与していると解釈し、同時に底面には過剰間隙水圧が作用して著しい強度低下が起きていると考える(図-1(a))。その際、実際に発生した現象で検証する必要があることから、兵庫

県南部地震時に得られた盛土形状および滑動崩落に関するデータセット (以下, 「阪神地区データセット」という。) にある項目 (盛土厚さ, 盛土幅, 盛土長さ, 盛土面積, 地山傾斜角) のみで評価できるように盛土形状が単純化されている (図-1 (b)). 本来は地盤調査を行い, 三次元的な計算を行うことが土質力学的には理想的であるが, このモデルでは, (1) 一次スクリーニング等の盛土情報抽出作業から詳細な盛土形状を読み取ることは困難な場合もあり, 得られるデータの精度と同等の情報で評価できること, (2) これまでに抽出されている主

なデータ項目のみで評価ができること, の 2 点を重視している。ここでは, 矩形の土塊の底面には静水圧と過剰間隙水圧が作用し, 側部には別の摩擦抵抗が生じると考えて計算する。側部摩擦は, 実際には谷側壁への鉛直応力に対応した摩擦力が作用するが, 矩形モデルで単純化しているため土圧的な力を便宜的に仮定し, 上載荷重が大きくなると抵抗力も大きくなるように工夫されている。なお, 図-1 では谷埋め盛土の事例を示しているが, 腹付け盛土も長さ (奥行き) の短い盛土と考えて, 同様の考え方を適用している。これは, ガイドライン等では谷埋め盛土と腹付け盛土を明確に区分しているが, 実際には両者の幾何形状は漸次的に変化し, 明確な区分が難しいためである。従って, 次章以降で示すモデル構築においても, 谷埋め盛土と腹付け盛土は区分していない。ただし, 運用上, 両者を区分する必要が生じることも考慮し, ガイドラインで定義される腹付け盛土や現地調査で腹付け盛土と判断される盛土については, 腹付け的な盛土として判別できるようにしている。抵抗力と滑動力の比は, 力学モデルの場合には「安全率」となるが, 本モデルの場合には「安全性評価指数 (Is)」と呼び, 「安全率」のように「1.0」を基準に変動・非変動を評価するのではなく, 基本的に指数の大小で相対的な安全性を判断するものとした。

基本となる計算式を以下に示す。

$I_s = R/T$  … 安全性評価指数

$T = W_i \cdot \sin \theta + W_r \cdot k_h \cdot \cos \theta$  … 滑動力 (kN)

$R = R_s + R_b - W_i \cdot k_h \cdot \sin \theta \cdot \tan \phi'_2$  … 抵抗力 (kN)

$R_s = c'_1 \cdot A_s + P \cdot \tan \phi'_1$  … 側部抵抗力

$R_b = c'_2 \cdot A_b + (W_i - U_s - U_o) \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi'_2$  … 底面抵抗力 (kN)

ここで,

$W_i = \gamma_i \cdot V_i$  … 重量 (kN)

$\gamma_i$ : 土塊の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>) = 18kN/m<sup>3</sup>

$V_i$ : 移動体の体積 (m<sup>3</sup>)

=  $A \cdot D \cdot (2/3)$  または  $W \cdot L \cdot D \cdot (2/3)$

$A$ : 調査結果による平面図上の盛土面積 (m<sup>2</sup>)

$D$ : 盛土の厚さ (m)

$L$ : 盛土全体の水平長さ (または単位長さ) (m)

$W$ : 盛土の幅 (m)

$k_h$ : 水平震度 (最大0.25とする) = 0.25

$\theta$ : 地山傾斜角 (底面傾斜角)

$c'_1, c'_2$ : 側面および底面の粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)

$\phi'_1, \phi'_2$ : 側面および底面の内部摩擦角 (度)

$A_s = 2 \cdot D \cdot L$  … 側面積 (m<sup>2</sup>)

$P = 2 \cdot 1/2 \cdot K \cdot \gamma_r \cdot D^2 \cdot L$  … 側部土圧 (kN)

$K$ : 側方土圧係数 = 0.5

$A_b = A_r / \cos \theta$  … 底面積 (m<sup>2</sup>)

$A_r = V_i / D$  … 換算平面積 (m<sup>2</sup>)

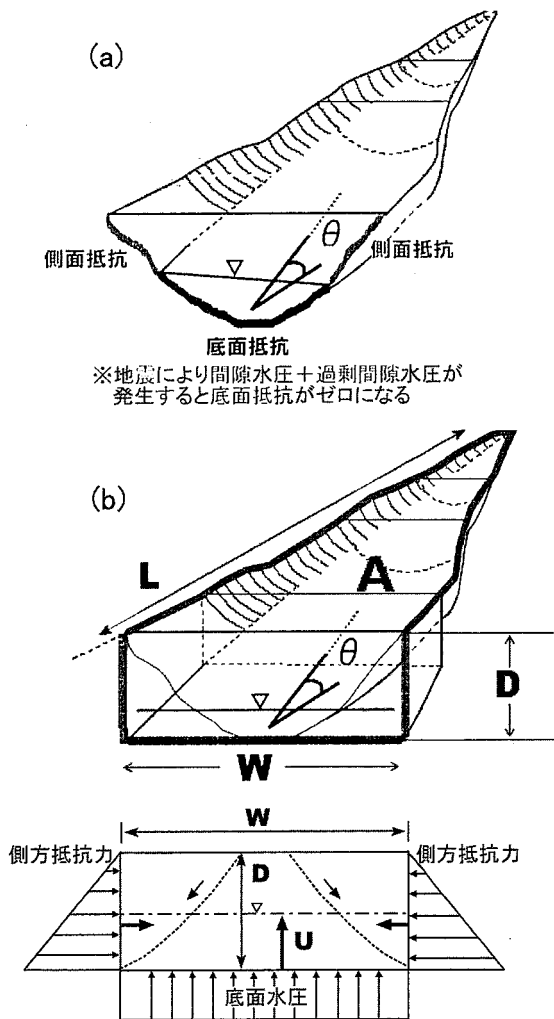


図-1 側方抵抗モデルの模式図。(a)実際の盛土形状におけるイメージ (太田・榎田 (2006) より引用), (b)側方抵抗モデルにおける盛土の形状模式図 (国土交通省 (2008) より引用, 加筆)。L: 盛土長さ, W: 盛土幅, D: 盛土厚さ, A: 盛土面積,  $\theta$ : 地山傾斜角, U: 過剰間隙水圧高。

Fig. 1 Schematic diagram of fill shape with side friction model. (a) Image on actual fill shape (Ohta and Enokida, 2006), (b) Schematic diagram of fill shape with side friction model (touch up the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2008). L: length of fill, W: width of fill, D: depth of fill, A: area of fill,  $\theta$ : angle of inclination of old ground, U: height of excess pore water pressure

$U_b = \gamma_w \cdot u \cdot A_i$  …底面水圧 (kN)  
 $\gamma_w$ : 水の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>) = 9.8kN/m<sup>3</sup>  
 $u$ : 水位高さ (m) =  $D - WL$   
 $WL = 0.1394\theta + 1.3046$  (釜井・守随, 2002)  
 (※地下水無しの評価の場合,  $u = 0.1m$  とする)

$U_s = \gamma_w \cdot A_i \cdot u_s$  …過剰間隙水圧 (kN)  
 $u_s$ : 過剰間隙水圧の水位高さ (m)  
 ※ $W_i - U_b - U_s < 0$  のとき,  $W_i - U_b - U_s = 0$  とする。  
 →  $c'_2 = 0$  (kN/m<sup>2</sup>) なので底面抵抗力 = 0 となる  
 ※側面に作用する水圧は実際の谷が矩形ではないので無視する。

太田・榎田 (2006) の簡易的な側方抵抗モデルでは, 上記計算式中の下線部の数値は固定的な値として考え, その他の未知パラメータ (二重下線部) は阪神地区データセットを元に, それらを最もよく説明できる値を逆解析 (キャリブレーション) して帰納的に求めている。ここで求められたパラメータは, 「地盤強度的パラメータ」と呼ぶべきものであり, 地盤自体の土質強度定数 (土質パラメータ) とは区別して考えることが必要である。この解析の中で平常時地下水位は, 釜井・守随 (2002) による阪神における現地調査のデータから求められた地山傾斜角の関数を用いて算出しているが, 実際の計測値が得られている場合は, その値を入力することもできる。

本研究では, 以上のような阪神地区データセットを基に構築された太田・榎田 (2006) の簡易的な側方抵抗モデルに, 1978年宮城県沖地震, 2004年新潟県中越地震, 2007年新潟県中越沖地震における滑動的な変動が発生した盛土地形データセットも適用して未知パラメータを求め, より汎用性の高いモデルとして「統計的側部抵抗モデル」を構築した。ここでの「滑動的な変動が発生した盛土」とは, 滑動崩落のように盛土が地山との境界面をすべり面として崩落した事例に加えて, 滑動崩落には至らなかったが, 盛土全体が一体となって変動したことによって発生したと考えられる盛土・切土境界部等での亀裂や地表変状が見られた盛土も含んでいる。

### 3.2 統計的三次元安定解析モデルの考え方

統計的三次元安定解析モデルのベースとなっている安定計算法は, 建設省 (現独立行政法人) 土木研究所が作成した中村ほか (1985) のHovland法 (土研式Hovland法) である。この手法は, 地すべり対策事業などにおいて広く用いられており, 三角柱要素を用いて底面の最大ベクトル方向に滑動力が生じるとし, ベクトルを合成して総滑動力と滑動方向を算出する手法である (図-2)。抵抗力はスカラーで合算する。地震力は仮に, 静的な地震荷重 $k_h = 0.25$ を作用させている。なお, この $k_h$ の値は二次元解析により求められる値であるため, 三次元解析の場合には, 適宜設定する必要があるが, 統計的手法において検証できない未知数を増やすことはデメリットが多いこと, また, 相対的な安全性評価が主目的であるた

め, 二次元解析と同じ値を用いることとした。

本モデルでも, 前述の「統計的側部抵抗モデル」と同様, 計算における未知パラメータは過去の被災事例に合うように統計的に求めており, 「統計的側部抵抗モデル」における矩形の盛土をより詳細な形状にして計算するモデルと言い換えることができる。

## 4. モデルの構築と検証

### 4.1 モデル構築に用いたデータセット

「統計的側方抵抗モデル」および「統計的三次元安定解析モデル」の構築に用いた地形データ (DEM) の諸元を表-1に示す。従来の阪神地区データセットにおける盛土地形データ作成に用いられている旧地形データは, 位置精度の低い明治期や昭和初期の旧版地形図から作成されていたため, 本研究では旧地形データを1960年代撮影の空中写真および1940年代後半に撮影された米軍空中写真を用いた空中写真測量により新たに作成し, 兵庫県南部地震発生以前の1994年の空中写真から空中写真測量

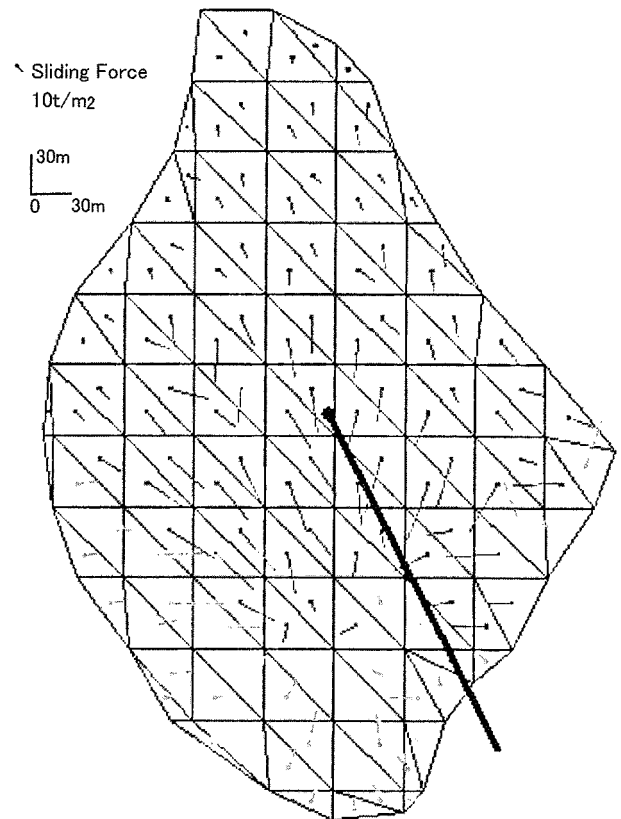


図-2 土研式Hovland法における滑動方向, 滑動力のベクトル表示例。中村ほか (1985) における地すべりブロックの形状に基づく計算結果で, 実線は下向き, 灰色破線は上向きのベクトルを示す。

Fig. 2 Example of sliding direction and sliding force on Hovland method improved by Public Works Research Institute. These vectors show calculation result on landslide block shape in Nakamura et al. (1985). Solid line: downward vector, Gray broken line: upward vector.

により作成した新地形データと差分を取ることで、より位置精度の高い盛土地形データを作成した。

新地形データは、地震の直前の資料に基づき作成することが望ましいが、仙台緑ヶ丘地区は当該データが得られなかったため、近年のデータを使用した。仙台緑ヶ丘地区を除いて、新旧DEMとも写真測量ブレイクライン取得法により作成したDEMである。写真測量ブレイクライン取得法は、写真測量で等高線を取得する際に、道路や堤防の法肩や擁壁の角等の急激な傾斜変換線(ブレイクライン)を補完的に取得し、実際の地形を詳細に再現する手法である。そのため、他の手法に比べて高い精度で盛土地形データが作成できる(星野ほか, 2009)。これら新旧DEMを評価支援システムで読み込んで差分を取り、盛土・切土分布図を作成し、盛土形状計測機能で盛土中心線(旧地形の谷軸)を指定して評価に必要な各盛土の地形データ(盛土厚さ, 盛土幅, 盛土長さ, 盛土面積, 地山傾斜角)を抽出した(盛土形状計測機能の詳細については5章を参照)。盛土厚さと盛土幅は、基本的にガイドラインに従って盛土中央部(盛土縦断線(盛土中心線)と最大幅地点の盛土横断線の交点)で計測しているが、地山傾斜角については、ガイドラインの規定(谷頭と谷尻を結んだ線と水平面が成す角)では適切に盛土形状を表現できない可能性があることから、ここでは盛土中心線を4等分して、そのうち中央部の前後1/4の距離地点の谷底標高を抽出し、その間の傾斜角を地山傾斜角としている。なお、腹付け的な盛土については、旧地形が谷形状でない場合もあるため、その場合は盛土の中央付近で仮定の盛土中心線を指定した後、盛土幅の

計測位置(通常は盛土が最も厚いと想定される盛土末端部)を指定して、盛土中心線と盛土幅計測横断線の交点で盛土厚さを計測している。抽出した盛土数は仙台地区(緑ヶ丘地区)で33, 阪神地区で195, 長岡地区(高町地区)で32, 柏崎地区(朝日が丘・向陽町地区)で58となった。なお、本検証地区で盛土厚が15mを超えるものは、その横断形状がV字状に近く、過剰間隙水圧が発生する底面の面積比率が小さくなるため、想定する滑動メカニズムが発生しにくいと考えられること、地山傾斜角が $0^\circ$ の盛土(平坦地盛土)はモデルに適用できないことから、それらに該当する盛土は除外した。

また、仙台地区(緑ヶ丘地区), 阪神地区, 長岡地区(高町地区), 柏崎地区(朝日が丘・向陽町地区)の4地区について、それぞれ1978年宮城県沖地震, 1995年兵庫県南部地震, 2004年新潟県中越地震, 2007年新潟県中越沖地震に伴い発生した盛土の滑動的変動箇所を、過去の被害報告(東北大学理学部地質学古生物学教室, 1979; 佐武編, 1979; 釜井ほか, 1996; 釜井, 2005; 沖村ほか, 2006; 地盤工学会編, 2009等)および自らの現地調査結果に基づき選定し、盛土地形データと合わせてデータセットを構築した。

#### 4.2 統計的側部抵抗モデルの構築

「統計的側部抵抗モデル」の計算で用いられるパラメータのうち、容易に変更できない項目を除くと、可動パラメータは、①過剰間隙水圧高、②側面粘着力、③側面内部摩擦角、④底面内部摩擦角の4項目となり、これらがキャリブレーションで求める地盤強度的パラメータとなる。これらのうち、内部摩擦角については土質パラメータとして採用しうる常識的な範囲が $\phi = 20 \sim 40^\circ$ 程度であるため、それらの制約条件を考慮して安全性評価指数に対する感度分析を行い、パラメータの寄与度を調べた(図-3)。その結果、安全性評価指数への感度が高い順に並べると、①底面内部摩擦角 $\phi_2$ 、②側面粘着力 $c_1$ 、③過剰間隙水圧 $\Delta h$ 、④側面内部摩擦角 $\phi_1$ となった。ここ

表-1 モデルの改良に用いた地形情報の諸元  
Table 1 Elements of geographical information for improvement of models

地区名	仙台(緑ヶ丘)	阪神	長岡	柏崎	
旧地形データ	原資料	1955~1965年(昭和30年代)の縮尺1/3,000都市計画図(一部, 1956(昭和31)年の米軍空中写真より図化)	1961(昭和36)年空中写真(縮尺1/15,000), 1949(昭和24)年米軍空中写真(縮尺約1/20,000)	1967(昭和42)年空中写真(縮尺1/25,000)	1961(昭和36)年空中写真(縮尺1/20,000)
	作成手法	マップデジタルにより等高線データ化	写真測量ブレイクライン取得法	写真測量ブレイクライン取得法	写真測量ブレイクライン取得法
	縮尺	1/3,000	1/2,500	1/5,000	1/5,000
新地形データ	原資料	2000年DMデータ	1992(平成4)年及び1994(平成6)年空中写真(縮尺1/12,500, 1/15,000, 1/25,000)	1996(平成8)年空中写真(縮尺1/10,000)	2005(平成17)年空中写真(縮尺1/20,000)
	作成手法	DM(Digital Mapping)による作成	写真測量ブレイクライン取得法	写真測量ブレイクライン取得法	写真測量ブレイクライン取得法
	縮尺	1/2,500	1/5,000	1/2,500	1/5,000
抽出盛土数(うち, 変動盛土数)	33(10)	195(22)	32(22)	58(21)	

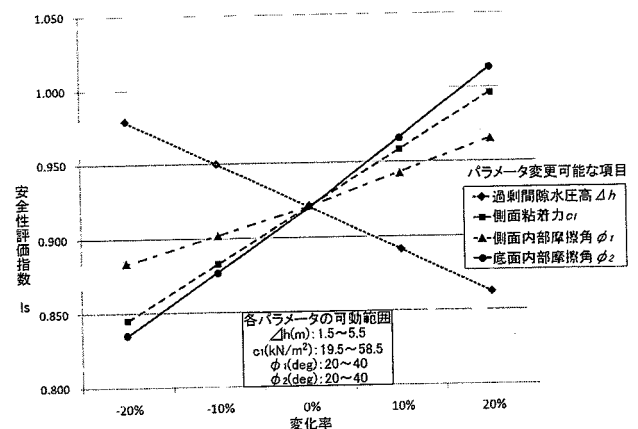


図-3 可動パラメータの感度分析結果  
Fig. 3 Result of sensitivity analysis of modifiable parameters

で、過剰間隙水圧発生時の底面の摩擦抵抗としては、内部摩擦角によるものと過剰間隙水圧によるものが考えられるが、これらのうち過剰間隙水圧の影響の比率が非常に大きく、内部摩擦角の違いを分析的に導き出すことが現実的に困難なため、キャリブレーションの順序は①側面粘着力 $c_1$ 、②過剰間隙水圧 $\Delta h$ 、③底面内部摩擦角 $\phi_b$ 、④側面内部摩擦角 $\phi_s$ とした。これらのうち、①および②を順に図-3中に示した可動範囲内を0.1刻みで変化させ、最適値を選定し、③で安全性評価指数1.0を境に変動・非変動が最も正答率よく分離できるよう、1°刻みで調整した。④については変化量・変化可能幅が小さいため、太田・榎田(2006)で採用されている値のままとした。

まず、地区ごとに可能な限り滑動的変動盛土の正答率が高くなるようにキャリブレーションを実施した(表-2)。ここでの「正答率」とは、(1)地震時に実際に滑動的に変動した盛土(以下、「変動盛土」という。)の場合、安全性評価指数(Is)が1.0未満なら正答、1.0以上なら誤答とした場合の全盛土に対する正答盛土の割合(%), (2)地震時に滑動的に変動しなかった盛土(以下、「非変動盛土」という。)の場合、安全性評価指数(Is)が1.0以上なら正答、1.0未満なら誤答とした場合の全盛土に対する正答盛土の割合(%), を示している。また、キャリブレーションでは、従来の考え方において、幅/

厚さ比が安全性評価指数と強い相関をもつことから、幅/厚さ比-安全性評価指数グラフ(図-4)において、変動盛土プロットの対数線形式の相関係数が最も高い場合を最適パラメータとした。

それぞれの地盤強度的パラメータの傾向を見ると、仙台地区のみ値が大きく異なっている。この要因としては、(1)防災時期が古く、盛土の滑動的変動箇所を過去の文献のみから推測するしかないため、滑動的な変動盛土の特定が不正確であり、変動盛土とした盛土の中に施工不良等による盛土内崩壊や圧密沈下等が含まれている可能性があること、(2)他地域に比べて対象地区の震度が小さい割に崩壊しにくい形状(末端閉塞型)の盛土が崩壊していること、他地域に比べて盛土が厚いこと、他地域の地震は内陸直下型地震であるのに対し仙台のみ海溝型地震であることから、想定と異なる崩壊メカニズムで崩壊した盛土が多い可能性があること、が考えられる。従って、不確定要素の大きい仙台地区を除いた3地区のみでキャリブレーションを実施した。

阪神・長岡・柏崎の3地区のデータセットを用いたキャリブレーションの結果を表-3に示す。ここでは、3パターンのパラメータとその正答率を示している。本システムでは、変動する可能性のある盛土を見落とさないこと、すなわち変動盛土の正答率が高いことが求められるが、どのパターンも3地区全体の変動盛土の正答率は80%を超えている。ただし、パラメータ②と③における柏崎地区の変動盛土正答率は80%を下回っている。非変動盛土の正答率は各パターンで40%弱からほぼ100%と異なっている。

### 4.3 統計的三次元安定解析モデルの構築

「統計的三次元安定解析モデル」においては、ベースとなっている土研式Hovland法の性質上、適用可能な盛土の形状が末端開放型や腹付け型のような単純なものに限られるため、まず、盛土形状が比較的単純な柏崎地区でキャリブレーションを実施した後、阪神地区と長岡地区で検証することとした。ここで、複雑な形状の盛土における実際の滑動崩落では、盛土内の最も剪断破壊しやすい位置を側面として滑動が生じると考えられるため、末端閉塞型を含む複雑な形状の場合には、盛土幅を谷の出口の幅や最小幅の箇所に合わせて修正してから検討する必要がある。そこで、少なくとも滑動変動の可能性が高い盛土を見落とさないという観点に立ち、盛土幅を調整した変動盛土のみを用いてキャリブレーションを行うこととした。

各地区の過剰間隙水圧高は先述の統計的側部抵抗モデルと同値を用いることを考えると、滑動する可能性が高い盛土を見落とさないためには、過剰間隙水圧高が最大である柏崎地区のパラメータを用いることが望ましいと判断した。なお、本モデルは統計的側部抵抗モデルとは異なり、盛土の縦断形状が実際の形状となるため、形状が腹付け的な盛土については、過剰間隙水圧が作用する

表-2 各地区の最適パラメータ  
Table 2 Optimum parameters in each area

地区名→	仙台(緑ヶ丘)	阪神	長岡	柏崎
側面粘着力 $c_1$ (kN/m <sup>2</sup> )	45	30	25	30
過剰間隙水圧高 $\Delta h$ (m)	5.0	4.0	4.0	5.5
底面内部摩擦角 $\phi_b$ (°)	5	36	34	44
盛土厚さの中央値(m)	8.5	4.2	4.2	4.8
滑動変状盛土正答率	80%	100%	100%	100%
備考	$c_1$ と $\Delta h$ が大きく、 $\phi_b$ が著しく小さい特徴がある。その傾向は、仙台地区の特性である可能性がある。	滑動変動と非変動盛土が安全性評価指数 $I_s=1.0$ を境に分離させることができる。	阪神地区と非常に似通った結果が得られた。非変動盛土の正答率は低い(30%)。	阪神地区と比較して、 $\Delta h$ および $\phi_b$ が大きく変っている。盛土厚が阪神に比べてやや厚い。

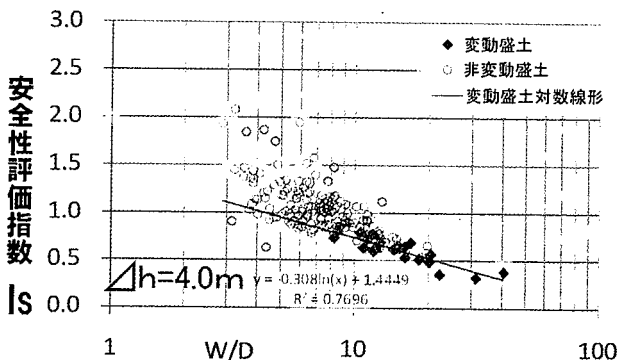


図-4 安全性評価指数と幅/厚さ比グラフにおける変動・非変動盛土分布

Fig. 4 Plot of collapse and stable fills on safety index-width/thickness ratio graph

表-3 統計的側部抵抗モデルの最適パラメータと正答率  
Table 3 Optimum parameters and validities of statistical side friction model

パラメータ①: 変動盛土の正答率が100%となる設定				パラメータ②: 変動・非変動盛土の正答率の合計が最大となる設定				パラメータ③: 変動盛土の正答率が90%以上で非変動盛土の正答率が最大となる設定				
過剰間隙水圧高(m)		4.5		過剰間隙水圧高(m)		3.0		過剰間隙水圧高(m)		4.4		
水の単位重量(kN/m <sup>3</sup> )		9.8		水の単位重量(kN/m <sup>3</sup> )		9.8		水の単位重量(kN/m <sup>3</sup> )		9.8		
単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )		18.0		単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )		18.0		単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )		18.0		
側面粘着力(kN/m <sup>2</sup> )		25.0		側面粘着力(kN/m <sup>2</sup> )		39.0		側面粘着力(kN/m <sup>2</sup> )		39.0		
側面内部摩擦角(°)		35.0		側面内部摩擦角(°)		35.0		側面内部摩擦角(°)		35.0		
底面粘着力(kN/m <sup>2</sup> )		0.0		底面粘着力(kN/m <sup>2</sup> )		0.0		底面粘着力(kN/m <sup>2</sup> )		0.0		
底面内部摩擦角(°)		36.0		底面内部摩擦角(°)		25.0		底面内部摩擦角(°)		33.0		
側方土圧係数		0.5		側方土圧係数		0.5		側方土圧係数		0.5		
水平震度kh		0.25		水平震度kh		0.25		水平震度kh		0.25		
正答率	阪神地区	変動盛土	100%	阪神地区	変動盛土	95%	阪神地区	変動盛土	100%	阪神地区	変動盛土	100%
		非変動盛土	42%		非変動盛土	98%		非変動盛土	78%			
	長岡地区	変動盛土	100%	長岡地区	変動盛土	86%	長岡地区	変動盛土	95%	長岡地区	変動盛土	95%
		非変動盛土	20%		非変動盛土	100%		非変動盛土	50%			
	柏崎地区	変動盛土	100%	柏崎地区	変動盛土	71%	柏崎地区	変動盛土	76%	柏崎地区	変動盛土	76%
		非変動盛土	35%		非変動盛土	100%		非変動盛土	92%			
	3地区	変動盛土	100%	3地区	変動盛土	85%	3地区	変動盛土	91%	3地区	変動盛土	91%
		非変動盛土	38%		非変動盛土	98%		非変動盛土	79%			

すべりの他に、過剰間隙水圧が作用しない慣性すべりについても検討した。その際、腹付け的な盛土は側部拘束効果が小さく、慣性力により引張り場であり、側面部の粘着力 $c_1$ が作用しないことが考えられるため、 $c_1 = 0$  kN/m<sup>2</sup>の条件でキャリブレーションを行った。

柏崎地区の変動盛土を説明できる最適パラメータを表-4に示す。なお、その正答率は100%である。このパラメータを用いて阪神および長岡地区で盛土幅を調整した変動盛土を対象に検証した結果、その正答率は両地区とも100%となった。

### 5. GUIによる評価支援システムの構築

ガイドラインに掲載されている「点数方式」と本研究で構築した「統計的側部抵抗モデル」および「統計的三次元安定解析モデル」を組み込んだGUI(グラフィカルユーザーインターフェース)による評価支援システムを構築した。このシステムは、Microsoft Windows2000, XP, Vistaおよび7上で作動するように設計されており、プログラミング言語はVisual Basic(一部Visual C++)を用いている。

このシステムでは、まず造成前および造成後のDEMデータと、必要に応じて対象範囲の地形図データを読み込む必要がある。DEMデータのデータ形式はASCIIグリッド形式(.grd)となっており、グリッドサイズは2.5m, 5m, 10mに対応している。データを読み込むと、自動的に地形図上に盛土・切土分布が表示される(図-5)。

安全性評価を行うためには、まず個別盛土の範囲を指定する必要がある。本システムでは、自動で表示される旧地形の谷線を基に、盛土の中心軸(旧地形の谷軸)の

表-4 統計的三次元安定解析モデルの最適パラメータ  
Table 4 Optimum parameters of statistical three dimensional stability analysis model

	全盛土	腹付けの盛土 (慣性すべり 想定) 考慮しない ( $\angle h=0$ )
過剰間隙水圧高 $\angle h$	5.5m	
水の単位重量 $\gamma_w$	9.8 kN/m <sup>3</sup>	
単位体積重量 $\gamma$	18 kN/m <sup>3</sup>	
側面粘着力 $c_1$	50 kN/m <sup>2</sup>	0 kN/m <sup>2</sup>
側面内部摩擦角 $\phi_1$	35°	25°
底面粘着力 $c_2$	0 kN/m <sup>2</sup>	0 kN/m <sup>2</sup>
底面内部摩擦角 $\phi_2$	35°	25°
水平震度 $k_h$	0.25	

谷頭端(谷軸起点)と谷尻端(谷軸終点)をマウスでクリックするだけで、盛土の範囲が自動的に抽出され、盛土地形データも計算される。盛土形状がイメージ通り取得されているかどうかは、三次元形状表示機能で確認することができる。抽出された盛土形状に問題がある場合は、谷幅を強制的に指定することも可能である。

各盛土の安全性評価結果は、盛土の谷軸を指定した段階で自動的に表示される(図-5の右側の一覧表)。ここでは、通常の安全性評価指数(Is1)と、慣性力のみによる変動の場合、すなわち過剰間隙水圧が発生しない場合の安全性評価指数(Is2)が計算される。各盛土の詳細な情報(計算に用いたパラメータ等)も別ダイアログで表示することができる(図-6)。

本システムでは、盛土・切土分布の表示や評価計算を行うにあたって設定が必要な定義事項を任意に設定する

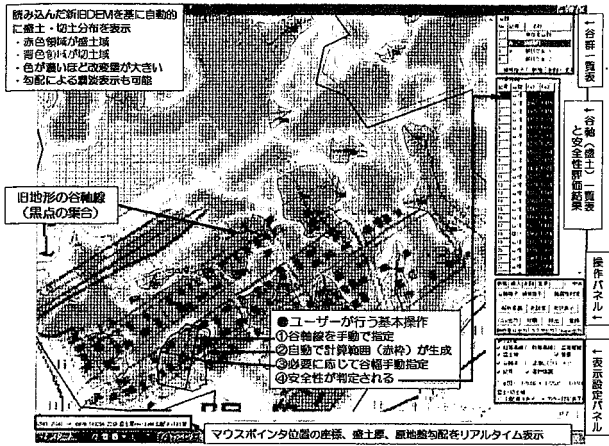


図 5 盛土形状計測・相対的滑動崩落発生可能性評価支援システムの操作画面

Fig.5 Operation scene of "Fill shape measuring and relative potential of sliding collapse scoring support system"

ことができる。DEMデータの精度に応じた盛土地形データの高さ方向の許容範囲や旧地形の谷底面からどの高さまでを谷底と判定するかを決めるパラメータ, 評価に使用する地盤強度的パラメータを指定可能である。

### 6. モデルの考察と適用条件

本評価支援システムで採用した評価手法のうち, 本研究で構築した2つのモデルについて考察し, 適用条件を示す。

まず, 「統計的側部抵抗モデル」における各地区の最適パラメータを表-2で示したが, 阪神・長岡・柏崎の3地区は多少の違いはあるものの, 近い値となっている。このことは, 盛土の地震時滑動崩落現象を説明する場合, 盛土自体の材質は地域によって異なっても, 強度条件は類似している可能性を示している。また, 阪神および長岡地区の過剰間隙水圧比は約0.52, 柏崎地区は約0.62となり, 過剰間隙水圧比が0.5~0.6程度で滑動崩落現象が発生している可能性を示唆している。

一方, 表-3に示した3パターンのパラメータは, 正答率の設定条件によって異なるものである。これらのうち, 変動する可能性のある盛土を見落とさないことを重視する場合は表-3左側の設定値①となるが, この設定値では非変動盛土の正答率が相対的に低くなり, 危険な順に並べた際に上位にランクされる盛土の中に, 実際には変動しない可能性が高い盛土が含まれることになる。つまり, 調査の対象となる盛土数が少ない場合や, 予算的にほとんどの盛土に対して詳細な調査を実施できる場合に向けた設定値と言える。ただし, 非変動盛土はあくまで過去の地震で変動しなかった盛土であり, 条件が揃えば変動していた可能性もあることから, 盛土の形状的に変動する可能性の高い盛土を漏れなく抽出したい場合には, この設定値が最も有効である。表-3中央の設定

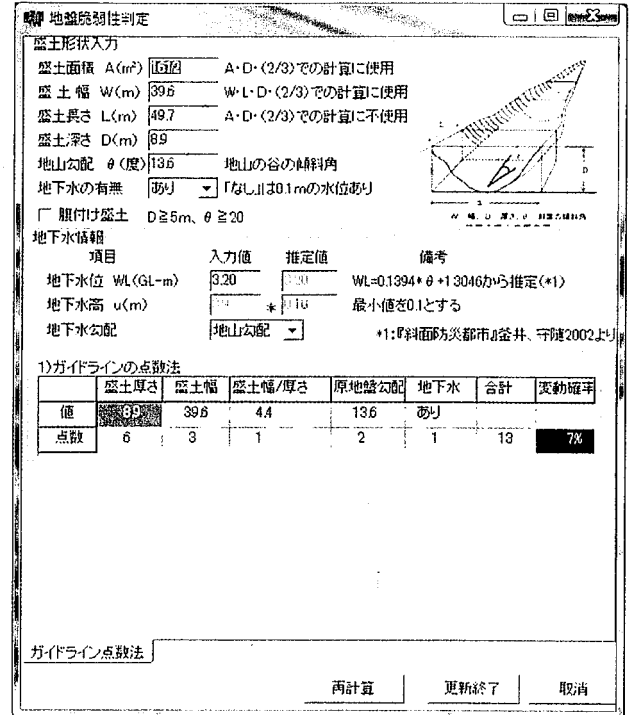


図 6 盛土個別の詳細な評価結果ダイアログ  
Fig.6 Dialog of detail scoring result on each fill

値②は, 変動盛土と非変動盛土両方の正答率が高く, バランスの取れた設定値であり, 詳細調査の対象となる盛土を効率的に抽出できる。ただし, 変動盛土の正答率が90%未満であり, 滑動変動を生じる可能性の高い盛土を見落とす可能性を少々含んでいる。そのため, 事前の現地踏査や情報収集を十分に実施して, 盛土の現況を把握している場合に向いていると言える。表-3右側の設定値③は, 変動盛土の正答率が90%を超えており, 非変動盛土の正答率も80%弱であるため, 設定値②の場合よりも変動盛土の抽出効率を重視する場合に適している。以上の設定値は, 過去に実際に発生した事象を説明できるように逆算的に求めたものであり, 地震時に盛土内でこのような地盤強度パラメータが実際に成立しているかどうかは不明であるが, パラメータの値は理論的にあり得る範囲内にあること, および過剰間隙水圧高が大きい設定値であるほど, または側面粘着力が小さい設定値であるほど変動盛土の正答率が高い(すなわち, より多くの盛土を変動する可能性がある)と判断する)傾向にあり, 最初に仮定している「過剰間隙水圧が発生する領域が滑動力として働き, 不飽和域の盛土側面が抵抗力として働く」というモデルと調和的であることから, これらを他地域へ適用することは十分に可能だと考えられる。なお, これらの設定値は, システム上でユーザーが自由に変更可能であり, これら3つのパターンから自らに適した設定値を選択してもらうことを想定している。

「統計的三次元安定解析モデル」では, 変動盛土の正答率が100%となるパラメータを設定した。この設定値



が示すものは基本的に「統計的側部抵抗モデル」と同様であるが、複雑な形状の盛土については盛土幅を調整して単純な形状としているため、実際に滑動変動が発生した盛土形状を正確に反映できていない可能性がある。また、今回用いている地形情報 (DEM) の精度が高い一方で、盛土の谷軸指定位置や地盤強度的パラメータ、地下水位、過剰間隙水圧高の作用位置等の情報精度は相対的に低いと、谷軸の指定位置の変化に評価結果が敏感に反応してしまう傾向がある。また、(1) 盛土の側面形状が垂直壁となり、かつ地下水位が高い場合、不飽和領域で作用する側面粘着力が働かないことになり、実際と異なる結果になる場合がある、(2) 土研式Hovland法では、すべり土塊を剛体としてみなすため、盛土自体が変形することは想定されないが、実際には末端閉塞型谷埋め盛土の場合には剪断面が形成されて滑動する場合がある、等の理由により、半自動的に盛土形状を設定することは現時点では困難であり、解決すべき課題は多い。また、表-4のパラメータは「統計的側部抵抗モデル」と比較的近い値であるが、過剰間隙水圧高がやや大きめであることから、個別の盛土に対して評価を行う場合には、その点を考慮して過剰間隙水圧を設定しなおす必要が生じる可能性がある。このため、「統計的三次元安定解析モデル」の適用範囲は限定的となる。

先述したように、モデルのキャリブレーションに用いた入力事例は限定的であり、適用範囲には限界がある。2つのモデルに共通した適用条件としては、(1) 対象となる被害はガイドラインの前提である盛土の滑動的変動のみであり、不等沈下、単なる亀裂、盛土内すべり等は対象外、(2) 盛土厚15mを超えるような盛土では想定する滑動メカニズムが発生しにくいと考えられることから、それ以内の盛土厚であること、(3) 地山傾斜角が $0^\circ$ 、すなわち平坦地盛土だと、滑動力の方向が決定できなくなることから、地山傾斜角が $0^\circ$ を超える盛土であること、(4) 入力事例から、発災要因となる地震は直下型地震で、震度は6弱~6強であること、が挙げられる。また、「統計的三次元安定解析モデル」については、(1) モデルで許容できない盛土自体の変形が想定される末端閉塞型や複雑な形状の盛土でないこと、(2) 適切なモデル計算が行える地下水位が比較的低い (地山傾斜角が大きい) 盛土であること、も条件となる。

以上のように、各モデルパラメータには適用条件があるが、表-2~4で示したパラメータに共通する解釈は、(1) 盛土底部で飽和している地下水には、急激な強震動が作用した際に過剰間隙水圧 (過剰間隙水圧比0.5~0.7程度) が発生し、底面の剪断抵抗が著しく小さくなる現象が発生している可能性があること、(2) 盛土の不飽和部に形成される剪断面 (側方抵抗発生面) には摩擦力が存在すること、(3) 底面の剪断抵抗力が著しく小さいことから、僅かな傾斜でも盛土土塊は滑動しようとするが、側方抵抗力の比率が大きい場合、滑り面の平均強度が大

きくなるため滑動崩落は起きず、逆に側方抵抗力の比率が小さい場合には滑動崩落が発生する、ということである。また、これらの条件は入力事例の範囲を示しているものであり、この条件に当てはまらないからと言って、必ずしも正しい評価が行えないという訳ではない。

## 7. まとめ

宅地耐震化推進事業の一環で実施される大規模盛土造成地の変動予測調査の第一次スクリーニングで得られた盛土地形データのみで、その後の詳細調査 (第二次スクリーニング) を効率的に実施するための盛土の優先順位付けへの活用を目的に、系統的に盛土の地震時滑動崩落の発生可能性を評価できる手法を確立し、その手法を組み込んだ評価支援システムを構築した。

評価手法のうち、「統計的側部抵抗モデル」については、阪神、長岡、柏崎地区の盛土の滑動的変動事例を高い正答率で説明できることが示された。入力事例は3地区に限られており、適用範囲が限られているが、異なる地区の多数の盛土を対象にしているにも関わらず、90%を超えるような高い正答率が得られていることを考慮すると、汎用性の高い評価手法と言えらる。今後、事例が増えて検証、改良を行うことができれば、より汎用性の高い手法を確立できると考える。また、本システムの盛土形状計測機能を用いるだけでも、従来手間のかかっていた盛土地形データの抽出が谷軸指定だけで容易に行うことができ、作業の効率化にもつながり、宅地耐震化推進事業の促進が期待される。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたっては、国土交通省総合技術開発プロジェクトの委員として、千葉大学の山崎文雄教授をはじめとする各委員の先生方、および専門家会合委員の(財)ベターリビングの二木幹夫氏、東北学院大学の宮城豊彦教授、長岡造形大学の澤田雅浩准教授からご指導を賜った。また、(財)建設工学研究所の沖村孝神戸大学名誉教授、東京電機大学の安田進教授、中央大学の石原研而教授、太田秀樹教授、神戸大学の飯塚敦教授、(株)アドバンテクノロジーの濱崎英作氏には、貴重なご意見と資料を賜った。ここに記して、心から感謝する。

## 参考文献

- 橋本隆雄・三輪賢志 (2008) : 宅地耐震化促進事業に伴う腹付け型大規模盛土造成地の変動予測評価手法の提案, 土木学会第63回学術講演会講演概要集, Vol. 63, pp. 331-332.
- 星野実・吉武勝宏・木村幸一 (2009) : 盛土地形データ作成手法の検討, 国土地理院時報, Vol. 119, pp. 93-100.
- 地盤工学会編 (2009) : 2007年新潟県中越沖地震災害調査報告書, (社)地盤工学会2007年新潟県中越沖地震災害調査委員会, pp. 490.
- 釜井俊孝 (2005) : 2004年新潟県中越地震による都市域の斜面災害, 応用地質, Vol. 46, No. 3, pp. 138-144.
- 釜井俊孝 (2006) : 地震による大規模宅地盛土土すべりの変動メカニズム, 平成15年度~17年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B))

- 研究成果報告書, pp. 120.
- 釜井俊孝・守隨治雄 (2002): 斜面防災都市一都市における斜面災害の予測と対策, 理工図書, pp. 200.
- 釜井俊孝・守隨治雄・笠原亮一・小林慶之 (2003): 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, Vol. 40, No. 5, pp. 22-39.
- 釜井俊孝・鈴木清文・磯部一洋 (1996): 平成 7 年兵庫県南部地震による都市域の斜面変動, 地質調査所月報, Vol. 47, No. 2/3, pp. 175-200.
- 小荒井衛・中埜貴元・星野実・吉武勝宏・太田英将 (2009): 写真測量技術を使った大規模造成宅地の地盤脆弱性評価, 日本写真測量学会平成 21 年度年次学術講演会発表論文集, pp. 189-192.
- 国土交通省 (2008): 大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの解説, pp. 100.
- 国土交通省 (2010): 高度な画像処理による減災を目指した国土の監視技術の開発総合報告書, 国土地理院技術資料, C・1-No. 400, pp. 243.
- 中村浩之・中島茂・吉松弘行 (1985): Hovland法による地すべり 3 次元安定解析手法, 土木研究所資料, No. 2265.
- 沖村孝・鳥居宜之・田中裕美・大藪剛士 (2006): 高町団地を対象とした地震時宅地盛土被災原因に関する考察, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, Vol. 10, pp. 17-28.
- 太田英将・榎田充哉 (2006): 谷埋め盛土の地震時滑動崩落の安定計算手法, 第 3 回地盤工学会関東支部研究発表会講演集, pp. 27-35.
- 佐武正雄編 (1979): 1978年宮城県沖地震による被害の総合的調査研究, 昭和53年度文部省科学研究費自然災害特別研究 (I) 報告書, pp. 265.
- 渋谷和久 (2007): 宅地造成等規制法の改正 - 宅地造成地の耐震化対策 -, 地学雑誌, Vol. 116, No. 3-4, pp. 511-515.
- 東北大学理学部地質学古生物学教室 (1979): 1978年宮城県沖地震に伴う地盤現象と災害について, 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, Vol. 80, pp. 1-96.  
(原稿受付2011年6月3日, 原稿受理2012年1月16日)