

改変地形データを用いた 地盤の脆弱性把握のための開発

中埜 貴元¹・小荒井 衛¹

¹国土地理院 地理地殻活動研究センター 地理情報解析研究室 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)。

地震時に大規模盛土造成地で発生が懸念される地盤災害(主に盛土の滑動崩落)に対して、減災対策を効率的に行うために、主に人工改変地形データを用いて簡易に地盤の脆弱性を評価できる手法を検討し、3つの評価手法を用いた半自動的な評価システムを試作した。過去の地震による被害実績データを用いて本システムの正答率を検証した結果、簡易力学モデルの正答率が他手法に比べて高いことがわかった。

キーワード 地盤脆弱性評価システム, 盛土造成地, 改変地形データ, 変動予測調査, ガイドライン, 点数法, 簡易力学モデル

1. はじめに

大規模盛土造成地のような人工改変地では、地震時に地盤災害が多発するため、減災対策を行う必要がある。これまでに1978年宮城県沖地震、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震等の際に、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渡る滑動的変動が発生し、大きな被害をもたらした。そのような背景から、平成18年に「宅地造成等規制法」が改正され、地方公共団体が大規模盛土造成地の変動予測調査を行っ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。国土交通省では、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」と略す)をとりまとめ、公表している¹⁾。

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^2 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に分けられる。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、多数の盛土の変動危険度(脆弱性)を系統立った手法で簡易に評価し、より危険度の高い盛土から調査を実施するといった、調査対象の絞り込みが必要となる。盛土の脆弱性評価手法についてはガイドラインにもいくつかの参考手法が示されているが、腹付け盛土の評価が不可能であること、地下水の評価が小さ過ぎること、既存資料や現地ボーリングデータが利用されていないことなどの問題点が指摘されている。

そこで本研究では、人工改変地形データを用いて簡易に地盤の脆弱性を評価するために、ガイドラインに示されている「点数方式」の他に、同方式では脆弱性が評価できない腹付け盛土についても評価可能で、現地データ(地下水位、盛土材質、施工方法等)もオプションとして組み込むことができる地盤脆弱性評価システムを試作し、そのシステムを検証した。

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. 地盤脆弱性評価手法の検討

地盤脆弱性評価手法の検討にあたり、先行して第一次スクリーニングを実施している自治体担当者や、その分野の学識経験者へ聞き取り調査を行い、現状での問題点や要望等を調査した。その結果、調査対象の絞り込みにおける現地調査の必要性や、ガイドラインに示されてい

る「点数方式」における問題点（腹付け盛土が評価不可能、地下水の過小評価、既存資料・現地ボーリングデータの未利用等）等が明らかとなった。そこで、これらの問題点を考慮しながらも、主として地形データを用いた系統的な評価が行える手法を検討し、以下の3つの手法を採用した。

(1) ガイドラインの点数方式

ガイドラインに示されている点数方式（以下、「点数法1」と呼ぶ）では、盛土厚、盛土幅、盛土幅/盛土厚比、原地盤勾配、地下水の有無に配点を与えて、それらの合計点を過去の災害事例を基に導かれた回帰式に代入して変動確率を求める（表-1）。配点は、兵庫県南部地震時の被害実績と盛土形状を用いたニューラルネットワークによる予測手法²⁾による寄与率の比率を評価の重みとして与えて導かれている。盛土厚の評価比率が47%と大きく、地下水の評価比率は2%と小さい。なお、この手法では腹付け盛土は評価できない。

表-1 ガイドラインの点数方式の配点表

盛土厚さ(m)		盛土幅(m)		盛土幅/盛土厚さ		原地盤の勾配(度)		地下水	
区分	点数	区分	点数	区分	点数	区分	点数	区分	点数
3以下	21	20以下	0	5以下	1	5以下	5	あり	1
3~6	12	20~50	3	5~10	2	5~10	4	なし	0
6~12	6	50~120	5	10~15	5	10~15	2		
12より大きい	0	120より大きい	10	15より大きい	8	15より大きい	0		

(変動確率) = $-0.000006x^3 + 0.0009x^2 - 0.0061x + 0.0104$

(xは合計点を示す)

表-2 数量化解析手法のカテゴリスコア・カテゴリスコアが正に大きいほど安全側。Nはサンプル数。

要因	カテゴリ	N	カテゴリスコア	レンジ
横断形状 (幅/厚さ比)	0~4未満	46	0.6	1.808
	4~8未満	62	0.4	
	8~10未満	21	0.2	
	10~12未満	19	0.0	
	12~50未満	80	-0.2	
	50以上	11	-0.4	
滑动基準 (底面傾斜/厚さ比)	0~0.3未満	8	0.2	0.606
	0.3~2未満	160	0.0	
	2~4.5未満	45	-0.2	
	4.5以上	26	-0.4	
形成年代	1974年以前	206	0.1	0.193
	1975年以前	33	-0.1	
谷の長軸方向	北北東-南南西	57	0.1	0.114
	東北東-西南西	30	0.0	
	東南東-西北西	55	-0.1	
	北北西-南南東	97	-0.2	
地下水の豊富さ	少ない	45	0.1	0.464
	豊富	194	0.0	

(変動確率) = $0.0673s^3 - 0.0097s^2 - 0.4961s + 0.5045$

(sはスコア合計点を示す)

(2) 地下水を重視した数量化解析点数法

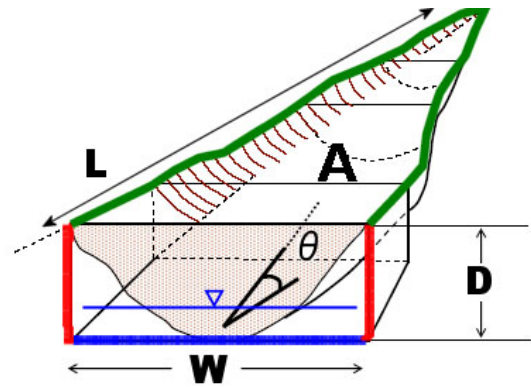
点数法1に比べて、地下水のウェイトを高くした点数法として、数量化解析手法³⁾（以下、「点数法2」と呼ぶ）を採用した。この手法では、兵庫県南部地震時の被害実績と盛土形状を基に、数量化 類による解析で得られたカテゴリスコア（表-2）を用い、幅/厚さ比、底面傾斜/厚さ比、形成年代、谷の長軸方向、地下水の豊富さで評価する。谷の長軸方向については、地震波との関係で決まるため、今回のような予測の場合には最も不利な値に固定した。地下水の評価比率は15%と点数法1に比べて大きい。この手法でも腹付け盛土の評価はできない。

(3) 簡易力学モデル

側方抵抗を考慮したモデル⁴⁾により、盛土幅、盛土厚、盛土長、地山傾斜角、地下水の有無のみで力学的な評価が可能な「簡易力学モデル」を採用した。このモデルでは、谷側部の抵抗力と底面の過剰間隙水圧を考慮し、谷埋め盛土の形状を図-1のように矩形で単純化して評価する。原理的には腹付け盛土も評価可能となる。地下水については、地山勾配の関数として地下水位を入力してあり、実測値の入力も可能である。ただし、このモデルは通常の力学モデルとは異なり、地盤強度定数は兵庫県南部地震時の事例を用いた試行計算による最適フィッティング値を固定値として用いる。形成年代、盛土材質、施工方法等の定性的な情報については、バイアスとして評価時に設定するように設計した。評価結果は安全率として求まるが、上記2手法と比較できるように、変動確率にも変換できるようにした。

3. 地盤脆弱性評価システムの試作

前章で示した3つの手法を組み込んだ地盤脆弱性評価



A：盛土面積，L：盛土長，D：盛土深，W：盛土幅
：地山傾斜角，：地下水位

図-1 簡易力学モデルにおける盛土形状の単純化

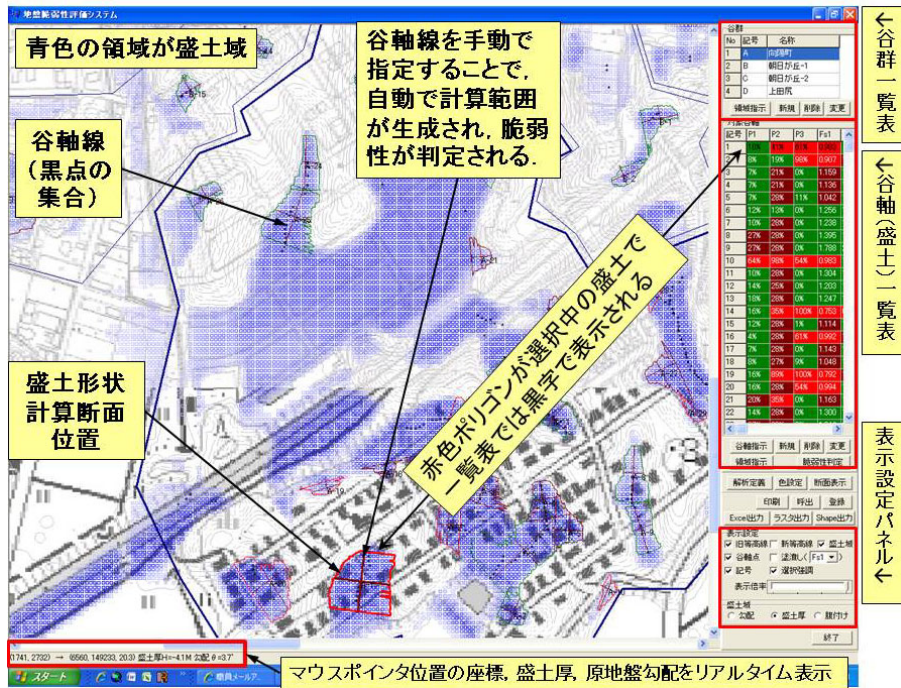


図-2 試作した地盤脆弱性評価システムの画面

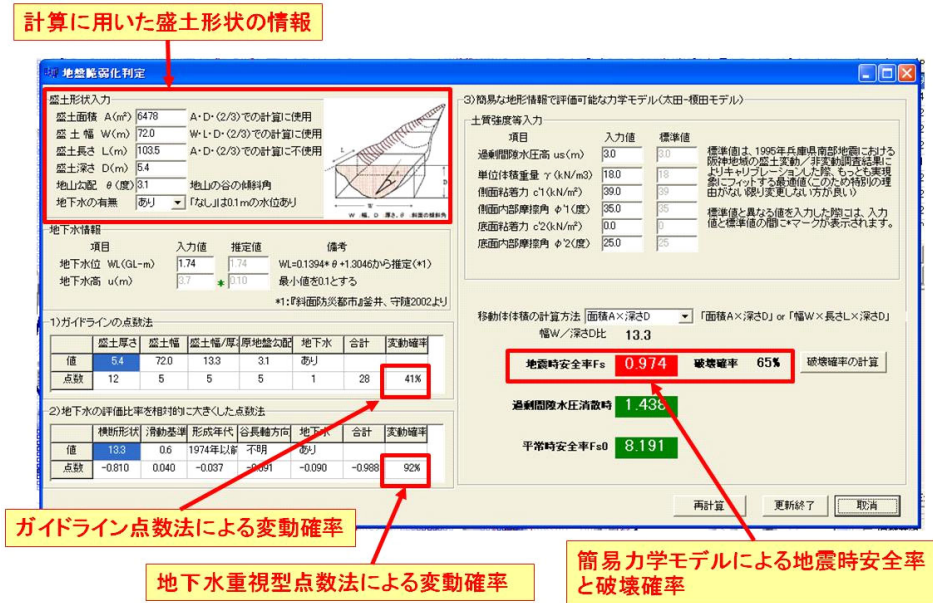


図-3 盛土個別の地盤脆弱性判定画面

システムを試作した。地盤脆弱性評価システムの画面を図-2に示す。新旧地形データや背景地図を読み込むと、自動的に盛土領域と盛土の谷軸線が表示される。盛土は複合的に存在し、自動で区分することは難しいため、谷軸線や旧地形の等高線などを参考に盛土の谷軸を手動で指定することで、自動的に計測範囲(盛土個別の範囲)が生成されるようになっている。同時に、脆弱性評価に必要な地形量が抽出され、3つの手法による地盤脆弱性評価結果がそれぞれ一覧表に表示される。盛土個別の範囲はユーザーの判断により、手動で描画することもでき

る。一覧表から盛土を選択すると、各盛土のより詳細な評価結果も表示される(図-3)。谷軸を指定する前に、盛土の管理を容易にするため、地区ごとや集水域ごとなど、ユーザーが手動で谷群(盛土グループ)を設定することもできる。また、表示設定パネルにより、表示縮尺や表示色の変更も可能である。現在の第一次スクリーニングでは、新旧地形データからGIS等を用いて盛土領域を表示し、個別の盛土範囲を技術者の判断により手動で抽出している。さらに第二次スクリーニングの計画のための脆弱性評価は、抽出された盛土から必要な地形量を

1つ1つ計測して実施していることが多い。一方、本システムでは基本的に盛土の谷軸線を手動で指定するだけで、地形量の抽出から脆弱性評価までを一括で行うことができ、作業効率が大幅に向上すると考えられる。

4. 試作版「地盤脆弱性評価システム」の検証

柏崎市の朝日が丘及びその周辺地区における造成宅地の改変地形データ⁵⁾と、新潟県中越沖地震時の地盤変状分布を用いて、試作した地盤脆弱性評価システムの検証を行った。当該地区の旧地形は昭和36年撮影の1/20,000空中写真、新地形は平成14年撮影の1/20,000空中写真を使用して作成した。盛土切土分布と地盤変状を重ね合わせたものを図-4に示す⁶⁾。この図を見ると、地盤変状は盛土部分と盛土・切土境界部分で発生していることがわかる。

検証では、正誤判定基準を変動確率 = 50%及び安全率 $F_s = 1.0$ (または変動確率 = 30%及び安全率 $F_s = 1.2$) として正答率を求めた。すなわち、変動確率50%以上 (安全率1.0未滿) で実際に変動した盛土、及び変動確率50%未滿 (安全率1.0以上) で非変動だった盛土を「正答」、それ以外は「誤答」とした場合と、基準を和らげて変動確率30%以上 (安全率1.2未滿) で実際に変動した盛土、及び変動確率70%未滿 (安全率0.9以上) で非変動だった盛土を「正答」、それ以外は「誤答」とした場合で評価した。2つの点数法においては腹付け盛土の評価はできないため、腹付け盛土と判断された盛土は正答率の計算から除外した。また、本評価システムは、盛土の全体または大部分が元々の地盤をすべり面として変動する滑動崩落現象を対象としているため、現地調査等で滑動的変動が確実な盛土のみを変動盛土とした。以上により求めた3手法の正答率を表-3、表-4に示す。表中の「変動」は、実際に変動した盛土を、「非変動」は変動しなかった盛土を対象とした正答率を示しており、「合計」はそれらを合算したものである。地盤の脆弱性を評価す

る場合、実際に変動するであろう盛土を見落とさないことが重要であり、「変動」盛土の正答率に注目する必要がある。変動・非変動盛土を合わせた合計の正答率はいずれの手法も70%以上であったが、変動盛土に限って見ると、点数法1では20%前後と非常に低く、点数法2では正誤判定基準の違いによって約40%または70%と評価が分かれた。一方、簡易力学モデルの正答率は、約70%~85%と他手法に比べて相対的に高い値となった(表-3)。また、腹付け盛土については、サンプル数が少ないため一概には判断できないが、簡易力学モデルにおいては正誤判定基準によらず正答率100%という高い値を示した(表-4)。

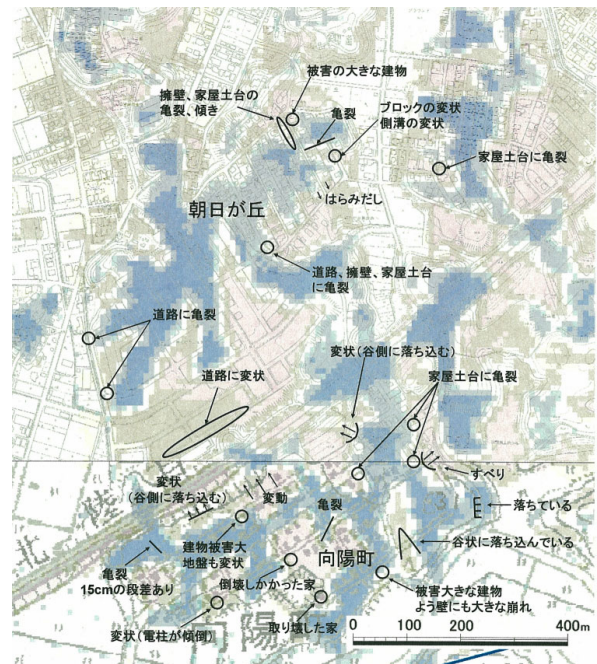


図-4 柏崎市朝日が丘・向陽町地区の盛土切土分布と中越沖地震による地盤変状の分布。寒色系領域が切土、暖色系領域が盛土。

表-3 滑動崩落現象が発生した谷埋め盛土と非変動谷埋め盛土の評価結果。簡易力学モデルのP3は、安全率 F_s を変動確率に変換した場合の正答率を示している。

		変動確率50%, $F_s=1.00$ 基準				変動基準: 変動確率30%, $F_s=1.20$ 非変動基準: 変動確率70%, $F_s=0.90$			
		点数法1	点数法2	簡易力学モデル		点数法1	点数法2	簡易力学モデル	
		P1	P2	P3	F_s	P1	P2	P3	F_s
変動	総数	13	13	13	13	13	13	13	13
	正答数	2	5	9	9	3	9	10	11
	正答率	15%	38%	69%	69%	23%	69%	77%	85%
非変動	総数	35	35	35	35	35	35	35	35
	正答数	32	33	32	32	35	33	30	34
	正答率	91%	94%	91%	91%	100%	94%	86%	97%
合計	総数	48	48	48	48	48	48	48	48
	正答数	34	38	41	41	38	42	40	45
	正答率	71%	79%	85%	85%	79%	88%	83%	94%

表-4 腹付け盛土の評価結果．簡易力学モデルのP3は，安全率Fsを変動確率に変換した場合の正答率を示している．点数法1と点数法2は腹付け盛土を評価できないため参考値．

		変動確率50%，Fs=1.00基準				変動基準：変動確率30%，Fs=1.20 非変動基準：変動確率70%，Fs=0.90			
		点数法1	点数法2	簡易力学モデル		点数法1	点数法2	簡易力学モデル	
		P1	P2	P3	Fs	P1	P2	P3	Fs
変動	総数	(9)	(9)	9	9	(9)	(9)	9	9
	正答数	(3)	(8)	9	9	(5)	(9)	9	9
	正答率	(33%)	(89%)	100%	100%	(56%)	(100%)	100%	100%
非変動	総数	(1)	(1)	1	1	(1)	(1)	1	1
	正答数	(1)	(0)	1	1	(1)	(0)	1	1
	正答率	(100%)	(0%)	100%	100%	(100%)	(0%)	100%	100%
合計	総数	(10)	(10)	10	10	(10)	(10)	10	10
	正答数	(4)	(8)	10	10	(6)	(9)	10	10
	正答率	(40%)	(80%)	100%	100%	(60%)	(90%)	100%	100%

5. 外的要因による問題点

評価手法以外の外的要因による問題点について考察する．

(1) 盛土の抽出精度から見た問題点

図-5は柏崎市のある地区において，新旧地形の差分量の閾値を2m（上図）及び3m（下図）にして表示した盛土分布であるが，上図では水田の半分程度の面積が盛土として表示されているのに対し，下図は谷埋め盛土や道路部の盛土などが概ね適切に抽出されている．この地域の水田が2mも盛土されているとは考えにくく，盛土の抽出精度は標高差2～3m程度と考えられる．ここで，点数法1では盛土厚に関する配点が高く，厚さ3m以下の盛土の点数は21と非常に高いが，厚さ3m以下の盛土を正確に抽出することは難しく，点数法1の設定は技術的に難しいものがあると言える．

(2) 腹付け盛土の選定基準に関する問題点

ガイドラインの腹付け盛土の基準（高さ5m以上，地山傾斜角20°以上）は，縦断形状のみから定められている．しかし，現場あるいは図上で腹付け盛土と判定する際には，長さに比べて幅が広いというような平面的な形状で判断することが多い．谷埋め盛土と腹付け盛土の形状の違いは，幅に対して長さが短いことや，幅に対して厚さが薄いことで特徴づけられる．柏崎市朝日が丘及びその周辺地区において，現地踏査により谷埋め盛土と腹付け盛土を総合的に判断・区分し，幅/長さ比と幅/厚さ比をプロットしたグラフを図-6に示す．谷埋め盛土は幅/長さ比0.3～2，幅/厚さ比4～15に多く分布するのに対し，腹付け盛土は幅/長さ比2，幅/厚さ比10に多く分布していることが判明した．今後，これらに着目し，より合理的な腹付け盛土の定義について再検討する必要がある．

また，表-5に示すように，現地で実際に腹付け盛土の

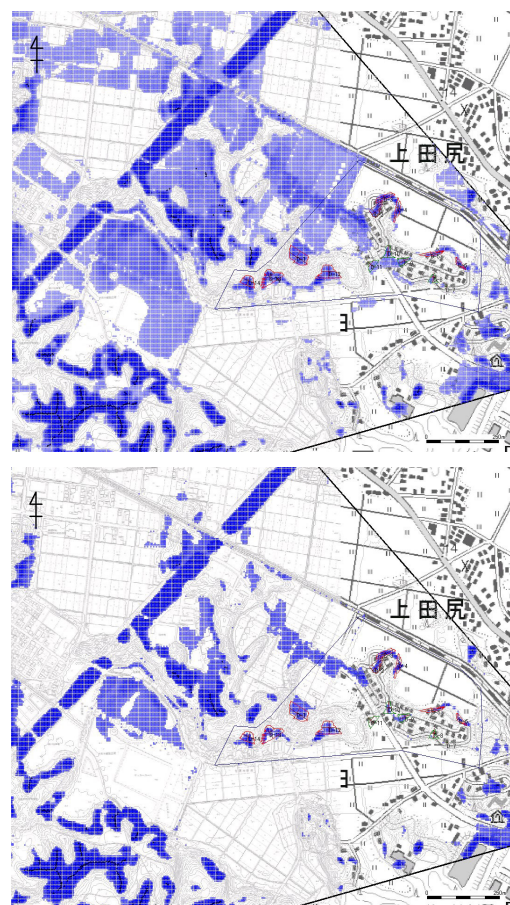


図-5 異なる閾値による盛土分布図(上：閾値2m，下：閾値3m).青色部分が盛土領域．

高さを計測した結果(A)と，改変地形データを用いて地盤脆弱性評価システムで自動計測された盛土厚(B)との間には相違がある．これは現地計測が腹付け盛土末端部の擁壁の高さを計測しているのに対し，システムでは盛土中心部の厚さを計測していることから，全体として後者の盛土厚の方が小さくなる傾向があることも一因と考えられる．現に，改変地形データにおける盛土内の最大盛土厚(C)は，システムで計測した盛土厚

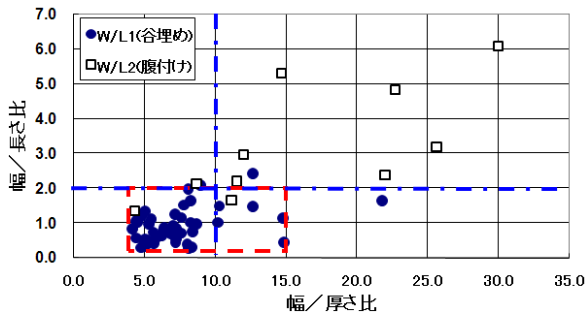


図-6 柏崎市朝日が丘及びその周辺地区の盛土の「幅/厚さ比」と「幅/長さ比」の関係

(B) より一様に大きく、現地計測高 (A) との差も小さい。なお、この差は改変地形データ作成時の写真測量の誤差の範囲内といえる。以上から、システムで自動計測される値のみによって、ガイドラインの基準に従って自動で腹付け盛土を抽出することは、必ずしも適当ではない。

6. まとめと課題

大規模盛土造成地の変動予測調査において、第二次スクリーニングを効率的に実施するためのツールとして、新旧地形データから盛土を抽出し、その脆弱性評価を半自動的に行うことができる「地盤脆弱性評価システム」を試作した。試作した評価システムは、ユーザが盛土の谷軸線を手動で指定するだけで、地形量の抽出から脆弱性評価までを一括で行うことができ、従来に比べて作業効率が大幅に向上すると考えられる。しかし、柏崎市での検証では、採用した3つ評価手法において正答率にばらつきが見られ、実用化するためには課題が残されている。今後、過去の被災地域（仙台、阪神、長岡、柏崎等）において、試作したシステムの評価結果と被害実績とを比較し、全体として正答率が向上するようにシステムを改良する。特に、実際に変動した盛土の正答率を向上させることが重要で、旧地形の詳細な形状が変動確率に与える影響や地域性（地質等）も考慮して改良を進める予定である。

表-5 柏崎市朝日が丘及びその周辺地区の腹付け盛土の現地計測高とシステム計測結果

盛土番号	現地計測高(A)	システム計測盛土厚(B)	システム計測最大盛土厚(C)	(B) - (A)	(C) - (A)
D-3	6.1m	4.7m	5.3m	- 1.4m	- 0.8m
D-4	4.8m	3.3m	5.8m	- 1.5m	+ 1.0m
D-5	4.5~6.5m	2.8m	4.5m	- 1.7~ - 3.7m	0~ - 2.0m
D-7	5.0m	1.5m	3.2m	- 3.5m	- 1.8m

謝辞：本研究を進めるにあたり、専門家会合を設置し、京都大学防災研究所の釜井俊孝教授、(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、川崎市まちづくり局の瀧川道夫氏、長岡造形大学の澤田雅浩准教授には、様々なご指導を賜りました。また、神戸大学の沖村孝名誉教授、東京電機大学の安田進教授にも貴重なご意見を賜りました。検証に用いたデータは国土地理院地理調査部から提供して頂きました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省：大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの解説，100pp.，2008.
- 2) 釜井俊孝・守随治雄・笠原亮一・小林慶之：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，40(5)，pp.22-39，2003.
- 3) 釜井俊孝・守随治雄：斜面防災都市 都市における斜面災害の予測と対策，200pp.，理工図書，2002.
- 4) 太田英将・榎田充哉：谷埋め盛土の地震時滑动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.27-35，2006.
- 5) 国土地理院地理調査部：地盤脆弱性把握のための盛土・埋土地形データ作成に関する検討業務報告書，181pp，2008.
- 6) 小荒井衛：2.2 地震後の地形変化，2007年新潟県中越沖地震災害調査報告書，(社)地盤工学会，2009.