

東日本大震災による宅地盛土被害と 安全性評価との関連

中埜 貴元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) .

東日本大震災で仙台市およびその周辺で変動した宅地盛土のうち、仙台市緑ヶ丘地区を対象に、「大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドライン」にある点数方式と国土地理院が開発した盛土の安全性評価手法を適用し、実際の被害と評価結果との関係を分析した。その結果、従来のガイドラインの点数方式に比べて、上記2つのモデルは実際に変動した盛土を相対的に危険であると判定できた。これにより、海溝型地震による盛土変動についても、これらのモデルである程度適切に事前評価できる可能性が示された。

キーワード 東日本大震災, 宅地盛土被害, 盛土地形データ, 評価支援システム, 点数方式, 統計的側部抵抗モデル, 仙台市緑ヶ丘地区

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）では、津波による被害の他にも広範囲にわたって地盤変状が生じた。特に、従来から地震時の変動が懸念されている大規模盛土造成地のような宅地盛土では、家屋の倒壊や道路の変状、亀裂等、多数の被害が生じた。中でも、仙台市およびその周辺では被害が顕著で、1978年宮城県沖地震の際に変動した宅地盛土が、再度変動する現象が見られた。

このような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による被害を軽減するため、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すること、および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の解説」（以下、「ガイドライン」という。）をとりまとめ、公表している¹⁾。

ガイドラインでは、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を実施することとな

っている。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、多数の盛土の相対的な変動危険度（安全性）を第一次スクリーニングで全盛土に対して均一に得られた情報（盛土地形データ）のみで簡易に評価できることが理想的である。このような手法については、これまでにいくつかの手法が提案されており、ガイドラインにも掲載されているが、統計的な検証事例が内陸地震に偏っており、揺れの性質が異なると考えられる海溝型地震での検証例が少ないことが課題となっている。

そこで本稿では、国土地理院がこれまでに構築・提案している、主に盛土地形データを用いて過去の事例（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）における盛土の変動を高い正答率で判定できる盛土の安全性評価支援システム²⁾を用いて、今回の東日本大震災でいくつかの盛土が変動した仙台市緑ヶ丘地区の盛土の安全性評価を行い、その結果と実際の被害とを比較することで、各評価手法の有効性を検討した結果を報告する。

2. 盛土の安全性評価手法

国土地理院では、変更前後の地形データ（DEM）を用いて、宅地盛土が地震時に滑動崩落する可能性を相対的に判定・支援するシステムとして、「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、「評価支援システム」という。）を開発した。盛土

の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ため、評価支援システムでは、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盛土の厚さや幅等の幾何形状（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た。すなわち、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ことに注意が必要である。

評価支援システムでは、ガイドラインに掲載されている点数方式（以下、「ガイドライン点数方式」という。）と、過去の事例（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）において盛土の変動を高い正答率で判定できる「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」の3手法を採用し、ユーザが手法を選択できる仕組みとなっている。以下、筆者らが構築した上記2つのモデルについて概説する。なお、ガイドライン点数方式の詳細については、ガイドラインを参照されたい。

(1) 統計的側部抵抗モデル

「統計的側部抵抗モデル」は、側方抵抗を考慮したモデル³⁾をベースに構築し、盛土幅、盛土厚、盛土長、地山傾斜角、地下水の有無で相対評価が可能なモデルである。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⁴⁾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、未知の地盤強度パラメータは過去の3つの地震の事例を最もよく説明できるよう試行計算された最適フィッティング値を固定値として用いる。なお、各パラメータは評価基準に応じて変更可能であり、現状では表-1に示す3つのパラメータを提案している²⁾。表-1左の設定値は、変動

する可能性のある盛土をできる限り見落とさないことを重視する場合に適しているが、非変動盛土の正答率（過去の事例で変動しなかった盛土を安全と評価する割合）が低くなり、相対的に危険と判断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。すなわち、調査対象となる盛土数が少ない場合や、すべての盛土に対して第二次スクリーニングを実施できる場合に適した設定値と言える。ただし、非変動盛土はあくまで過去の地震でたまたま変動しなかっただけの可能性があり、条件が揃えば変動する可能性を有しており、盛土形状的に変動する可能性が高い盛土を遺漏なく抽出したい場合はこの設定値が最も適している。表-1中央の設定値は、変動盛土と非変動盛土両方の正答率が共に高く、バランスが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9割を切っているため、滑動的変動を生じる可能性が比較的高い盛土を見落とす可能性を含んでいる。そのため、事前の現地踏査や情報収集が十分に実施でき、盛土の現況が把握できる場合に適している。表-1右の設定値は、変動盛土の正答率が9割を超えており、非変動盛土の正答率も8割弱であるため、表-1中央の場合よりも変

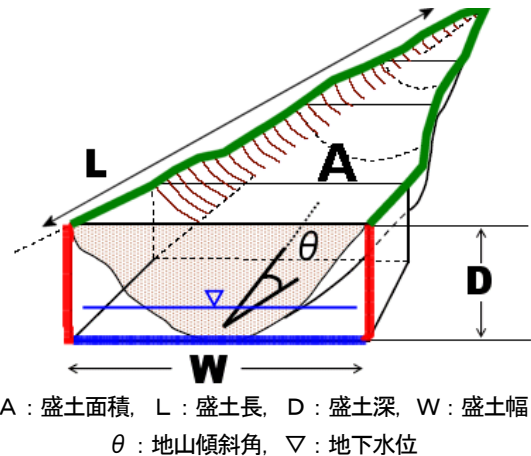


図-1 統計的側部抵抗モデルにおける盛土形状の単純化

表-1 統計的側部抵抗モデルにおける3つの最適パラメータと正答率

変動盛土の正答率が100%となる設定			変動・非変動盛土の正答率の合計が最大となる設定			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 ³)	9.8		水の単位重量(kN/m ³)	9.8		水の単位重量(kN/m ³)	9.8	
単位体積重量(kN/m ³)	18.0		単位体積重量(kN/m ³)	18.0		単位体積重量(kN/m ³)	18.0	
側面粘着力(kN/m ²)	25.0		側面粘着力(kN/m ²)	39.0		側面粘着力(kN/m ²)	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 ²)	0.0		底面粘着力(kN/m ²)	0.0		底面粘着力(kN/m ²)	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	変動盛土	100%	正答率	変動盛土	85%	正答率	変動盛土	91%
	非変動盛土	38%		非変動盛土	98%		非変動盛土	79%

動盛土の抽出効率を重視する場合に適している。なお、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。

(2) 統計的三次元安定解析モデル

統計的三次元安定解析モデルは、建設省（現独立行政法人）土木研究所が作成したHovland法（土研式Hovland法）⁹⁾をベースとしている。この手法は、地すべり対策事業などにおいて広く使われており、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考え、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し、地震力は仮に静的な地震荷重 $kh=0.25$ を作用させている。なお、この kh 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く、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、先述の「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。

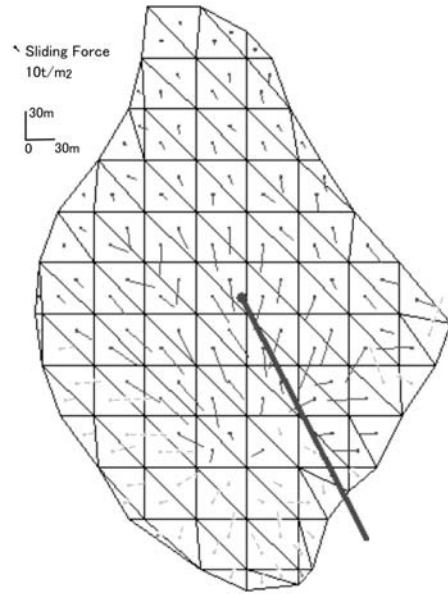


図-2 土研式 Hovland 法における滑動方向、滑動力のベクトル表示例。地すべりブロックの形状に基づく計算結果を示しており、実線は下向き、灰色破線は上向きのベクトルを示す。

3. 仙台市緑ヶ丘地区での宅地盛土被害と盛土分布

東日本大震災により、仙台市およびその周辺の宅地盛土では、多くの変状被害が発生した。そのうち、仙台市緑ヶ丘地区は1978年宮城県沖地震時にも変状被害が発生しており、緑ヶ丘1～4丁目では谷埋め盛土が滑動的に変

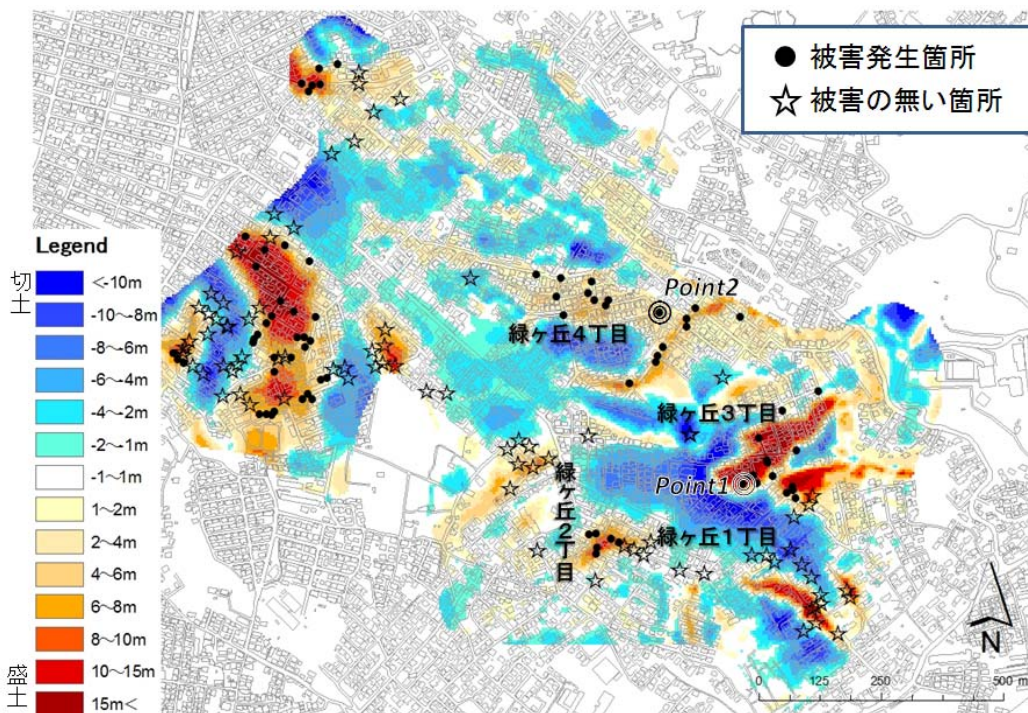


図-3 仙台市緑ヶ丘地区およびその周辺の盛土・切土分布と現地で確認した被害分布。背景には基盤地図情報を使用。



図-4 図-3中 Point1 (緑ヶ丘3丁目)における被害状況

動した⁶⁾。

図-3に仙台市緑ヶ丘地区およびその周辺の盛土・切土分布と現地を確認した被害箇所を示す。図を見ると、被害が発生した箇所は盛土部分に多く分布していることが明らかである。なお、ここでの被害は、地表に変状が現れているものをほぼ網羅的にプロットしているが、図中のすべての地域を調査している訳ではない。

図-3中のPoint1, 2における現場の状況をそれぞれ図-4, 5に示す。Point1は緑ヶ丘3丁目に位置し、盛土頂部で多数の亀裂が発生し(図-4上)、側溝等に圧縮変形が見られる(図-4下)。Point2は緑ヶ丘4丁目に位置し、ブロック塀の倒れ込みや路面の圧縮変形(図-5上)、地すべり性変形による路面の圧壊(図-5下)が発生している。

4. 評価支援システムによる盛土の安全性評価

図-3で示した盛土地形データを評価支援システムに適用し、同地区の盛土の相対的な滑動崩落の発生可能性を評価した。ここで、評価支援システムで評価可能な現象は盛土の滑動的な変動であるが、図-3で示した盛土の範囲で、今回の地震で滑動的な変動をした比較的大きな盛土は、図-6に示す緑ヶ丘3丁目の2盛土と緑ヶ丘



図-5 図-3中 Point2 (緑ヶ丘4丁目)における被害状況

4丁目の1盛土のみである⁷⁾。中でも、緑ヶ丘4丁目の盛土は谷壁に貼り付けられたタイプの腹付け盛土に近い薄い盛土で、緑ヶ丘3丁目に比べて変動量が大きかった。

上記3つの滑動的変動盛土における各手法による評価結果を表-2に示す。ガイドライン点数方式の評価結果は変動確率(%)で示され、数値が大きいほど滑動的変動の可能性が高いことを示している。ここでは仮に変動確率50%以上は変動の可能性大、30%以上を可能性中、それ未満を可能性小と考えることとする。一方、統計的側

表-2 仙台市緑ヶ丘地区の滑動的変動盛土の安全性評価結果。

盛土名→ ↓評価手法	緑ヶ丘 3丁目 ①	緑ヶ丘 3丁目 ②	緑ヶ丘 4丁目	判断基準
ガイドライン点数方式(変動確率P)	2%	4%	68%	P≥50%:可能性大 30%≤P<50%:可能性中 P<30%:可能性小
統計的側部抵抗モデルA(安全性評価指数Is)	0.97	1.27	0.36	Is≤1.0:可能性大 1.0<Is≤1.2:可能性中 Is>1.2:可能性小
統計的側部抵抗モデルB(安全性評価指数Is)	0.88	1.19	0.61	
統計的側部抵抗モデルC(安全性評価指数Is)	0.98	1.30	0.41	
統計的三次元安定解析モデル(安全性評価指数Is)	0.72	0.38	1.02	

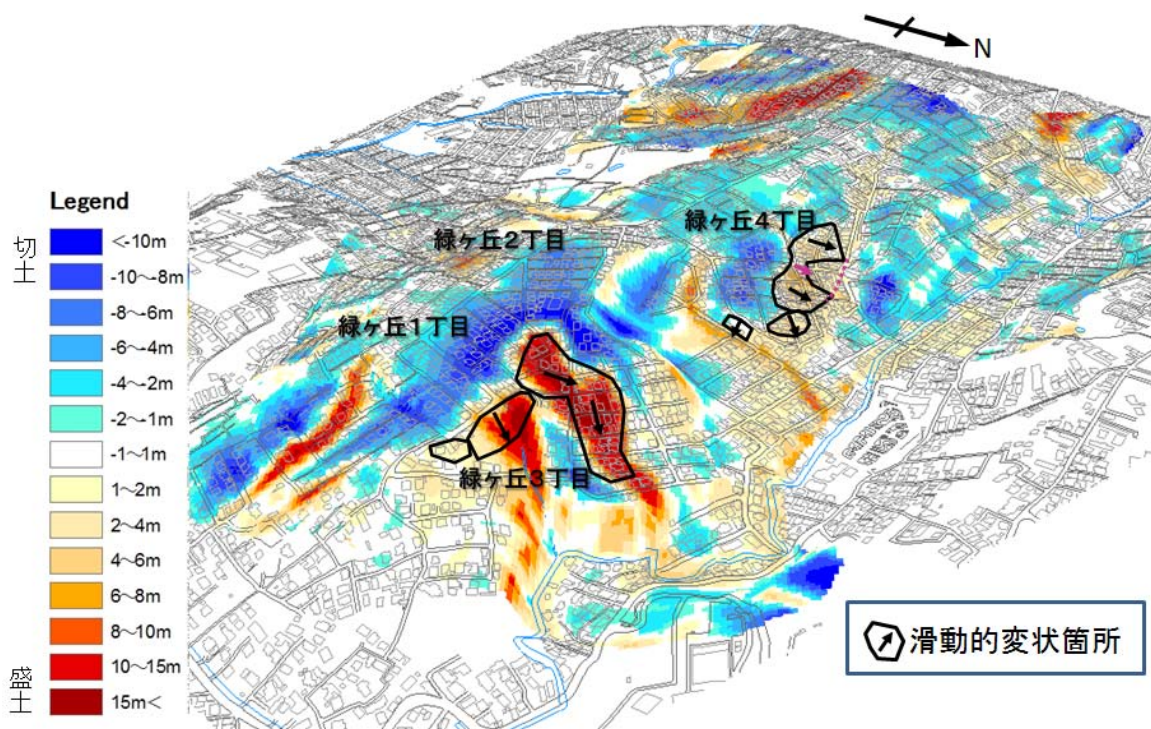


図-6 仙台市緑ヶ丘地区およびその周辺における滑動的変動盛土の位置。北東方向上空から見た鳥瞰図で表現。鉛直方向は2倍に拡大。背景には基盤地図情報を使用。

部抵抗モデルおよび統計的三次元安定解析モデルの評価結果は安全性評価指数 (I_s) で示され、数値が小さいほど滑動的変動の可能性が高いことを示している。ここでは、 $I_s \leq 1.0$ を変動の可能性大、 $1.0 < I_s \leq 1.2$ を可能性中、 $I_s \geq 1.2$ を可能性小と考えることとする。なお、表-2では統計的側部抵抗モデルを3種類示しているが、Aが表-1左の設定値、Bが表-1中央の設定値、Cが表-1右の設定値による評価結果である。

この結果を見ると、ガイドライン点数方式では、緑ヶ丘4丁目の変動の可能性が大きいと判定できているが、緑ヶ丘3丁目の2盛土については変動確率が5%以下で全く評価できていない。統計的側部抵抗モデルでは、どの設定値の場合も緑ヶ丘4丁目の盛土については I_s が小さく、変動の可能性が大きいと判定できており、緑ヶ丘3丁目①の盛土についても変動可能性を中程度と評価できている。しかし、緑ヶ丘3丁目②の盛土については、設定値Bを除いてうまく評価できていない。統計的三次元安定解析モデルについては、変動した3つの盛土ともに変動の可能性大か中の範囲に評価できているが、変動の大きかった緑ヶ丘4丁目①が相対順位が最も低く、実情とは合致していない。

5. 評価結果の考察

今回の評価に用いた3つの手法は、いずれも基本的に過去の直下型地震の事例を説明できるように構築されたものであり、海溝型地震による検証が殆ど成されていない。

かったが、海溝型地震である今回の東北地方太平洋沖地震に伴う事例に対して検証を行った。その結果、表-2で示したように、ガイドライン点数方式では滑動的に変動した盛土を的確に評価できたのは、3盛土中1盛土のみであった。筆者らが構築した統計的側部抵抗モデルでは3盛土中2盛土については的確に評価できたが、緑ヶ丘3丁目②の盛土については変動の可能性が低いと評価されてしまった。これは、この盛土の幅/厚さ比がモデルパラメータの構築に使用した過去の変動盛土に比べて小さいため、パラメータに検討の余地があることを示している。ただ、ガイドライン点数方式と比べると、特に設定値Bにおいては、このモデルが海溝型地震による盛土の変動についてもある程度適切に評価できる可能性を示している。統計的三次元安定解析モデルについては、基本的にはすべての盛土を変動の可能性が大または中と評価できているが、変動量の大きかった緑ヶ丘4丁目の盛土の安全性評価指数が最も大きくなっており、実際の変動の度合いとは合致していないことから、さらなるモデルパラメータの検討が必要である。

6. まとめと課題

大規模盛土造成地の変動予測調査の第二次スクリーニングを効率的に行うために必要な盛土の相対的な滑動崩落の発生可能性を、盛土地形データのみで評価できることを目的に開発した評価支援システムを用いて、今回の

東日本大震災に伴って変動した仙台市緑ヶ丘地区の宅地盛土を対象に評価を行い、その正当性を検証した。その結果、評価支援システムに導入している3つの手法（ガイドライン点数方式、統計的側部抵抗モデル、統計的三次元安定解析モデル）のうち、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は、ガイドライン点数方式に比べて滑動的変動盛土の相対的な危険度を高く評価することができ、過去の直下型地震の事例に基づいて構築しているパラメータがある程度海溝型地震による変動にも適用できる可能性を示すことができた。ただし、検証事例数が少ないうえ、統計的な2モデルについても、海溝型地震による変動をより高精度に説明できるモデルパラメータの検討が必要であり、今後広域的な事例での検証が必要である。今回の震災では、各研究機関、学会等が広範囲にわたって宅地盛土の変動被害を調査しているため、それら地域の盛土地形データを作成することができれば、より多くの事例で検証ができるとともに、海溝型地震による盛土変動をより高精度に説明できるモデルパラメータの構築も可能となる。一方で、現段階でも比較的高い正答率が得られていることから、盛土の変動予測調査が進んでいない地方公共団体において利用が進めば、宅地耐震化事業の促進につながると考えられる。また、東日本大震災の被災地における新たな造成宅地の計画段階において、造成後の地形を仮想的に作成できれば、事前に盛土の安全性を評価することがで

き、対策工の効率的な計画立案や予め安全性に配慮した宅地造成に貢献できると考える。

謝辞：図-3等の切土・盛土分布図の作成に用いた新旧地形データは、東北学院大学の宮城豊彦教授よりご提供頂いた。また、仙台市緑ヶ丘地区での現地被害調査結果および現地写真については、国土地理院の佐藤浩電子国土調整官にご提供頂いた。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) 国土交通省：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」総合報告書，pp.117-143，2010.
- 3) 太田英将・榎田充哉：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.27-35，2006.
- 4) 釜井俊孝・守随治雄：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.200，2002.
- 5) 中村浩之・中島茂・吉松弘行：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.2265，1985.
- 6) 東北大学理学部地質学古生物学教室：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.1-96，1979.
- 7) 京都大学防災研究所：仙台市における宅地谷埋め盛土の地すべり，5pp，2011.