# 平成26年度シンポジウム予稿集

# 「東北の地震と地すべり、その知見と教訓」

-2008 岩手・宮城内陸地震と 2011 東北地方太平洋沖地震を振り返って-

平成26年4月23日

会場:仙台市戦災復興記念館

公益社団法人日本地すべり学会東北支部

公益社団法人日本地すべり学会東北支部

# 平成26年度シンポジウム

# 「東北の地震と地すべり、その知見と教訓」

## -2008 岩手・宮城内陸地震と 2011 東北地方太平洋沖地震を振り返って-

【シンポジウム趣旨】

東北地方ではここ数年で巨大地震に何度も見舞われ、直接的な被害もさることながら地 すべりや崩壊など多数発生し,これまで多くの犠牲者を出すとともに生活基盤を根底から 覆す甚大な被害を蒙った。とくに本年は2008 岩手・宮城内陸地震から6年,2011 東北地方 太平洋沖地震から3年を経て,これまで地すべり学会ならびに他学会に所属する多くの研 究者,技術者がこれらの調査・研究に参加し,新たな研究手法が試みられるとともに、多 くの知見や教訓がそろってきた。

本シンポジウムではこれらの地震地すべりの研究成果を総括するとともに,今後の地す べり学会の地震時の斜面災害に対する取り組み方,社会貢献などについて議論する。

# 【キーワード】

地震地すべり,調査解析手法,危険度評価,対策工,社会貢献

# 【開催概要】

開催日:4月23日(水) 場所:仙台市戦災復興記念館 スケジュール: 13:30-14:40 支部総会

- 14:40-17:30 シンポジウム(講演 25 分×6、総合討論 20 分)\*
- 18:00-20:00 意見交換会

(ホテルグランテラス仙台国分町(旧ホテルリッチフィールド仙台))

# 【講演】

## 目 次

2.【講演 2】・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2-4

# FEM 地震応答解析と地すべり発生メカニズムについて

# 若井明彦教授(群馬大学)

概要:盛土からなる斜面等とはやや異なり,自然斜面が地震動によって地すべり性の 変状を生ずる現象を予測する場合,地形および地質的条件に応じた発災機構を考慮す ることが重要である。今回は,既往の地震地すべりを動的弾塑性 FEM により再現した 事例をもとに,斜面内の土が示す地震時の力学特性と巨視的な変形現象との関係につ いておさらいしたい。

【講演3】・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5-8
 2011 東北地方太平洋沖地震での福島県内火山灰地域で発生した地すべりから得た知見

梅村順講師(日本大学)

概要:福島県内では,3.11 東北地方太平洋沖地震の際,中通り地方南部で比較的規模 の大きな地すべりが生じたほか,4.11 いわき市西部を震源とする関連地震では,3.11 とはタイプの異なる地すべりが生じたことは周知の通りである。今回の報告ではこれ ら地すべりの誘因に着目し,斜面に与える地震動特性について,検討中の事項を含め て紹介する。また,豪雨誘因と地震誘因それぞれでの地すべり発生場の相違点につい ても,若干触れる。

# 佐藤真吾氏(株式会社復建技術コンサルタント)

概要:本発表では,地すべりと盛土の滑動(すべり)の違い,および,造成宅地の地 震被害要因分析結果について,仙台市の宅地被害の事例に基づいて説明する。研究で わかったことは,盛土の表層部が滑動する被害(ひな壇すべり)は緩い盛土状態と地 表面の勾配が大きく影響していること,盛土厚さが薄く原地盤勾配が小さいほど滑動 崩落被害が多いというこれまでの知見は今回殆ど確認されなかったことなどである。 また,まだわからないこととして,ひな壇すべりにおける実際のすべり面,盛土材料 の劣化の影響等がある。

より震度 5 強(1978 年宮城県沖地震時の推定震度)以上,かつ特定の層準に集中して 繰り返し発生してきたことが推察される。地震時の斜面変動発生に結びつきやすい地 質・地質構造には地域毎の特性があり、これを把握することが防災面で重要と考える。

# 濱崎英作氏(株式会社三協技術/(株)アドバンテクノロジー)

概要:新しい手法として,①これまでの地震地すべり・崩壊事例からバッファ移動分 析と統計解析による要因抽出を行い②地すべり・崩壊発生非発生条件分離に最も適合 するアイテム選定・重み付けに,AHP法および正規分布確率密度関数をもちいた過誤確 率による手法を提案した。そこから崩壊と地すべりでは要因を異にしていることがわ かった。特に地すべりでは、「地上開度」「谷次数」などが要因として効いている。そ の他、今回解った崩壊・地すべりの発生に関わっている地形・地質要因についての知 見を述べるとともに、これに基づくリスク評価マップ作成など社会実装について述べ る。

# 【総合討論】

司会:林一成氏(奥山ボーリング株式会社)

# 岩手宮城内陸地震と東日本大震災を振り返って

(公社)日本地すべり学会東北支部平成26年度シンポジウム「東北の地震と地すべり、その知見と教訓」 宮城豊彦(東北学院大) 2014年4月23日(仙台市戦災復興記念館)

キーワード:地すべり災害、地すべり地形分布図、地震起動型、雨雪起動型、自律系としての地すべり破壊、 3次元評価時代の地すべりリスク、同サスセプティビィリティ、順応的管理、自然現象

#### 1. はじめに

この数十年というスケールで振り返れば、地すべり現 象についての基礎的な認識(地すべり観)が大きく変化 してきたと思える。特に2004年中越地震以後、地すべり 現象の理解が大きく進展していると考えられる。言い換 えれば、「地すべりの科学化が今まさに展開している」と も思えるのではないか。

いささか極端な物言いになるが、日本では従来、地す べりに起因すると思われる土砂災害が各地で発生するこ とを契機に、その対応策を構築するために、一連の調査・ 対策・研究が実施されてきた。例えば、「地すべりが発生 した」という事実をもって安全率が1を下回ったと設定 し、スベリ面を確認する。これを基礎資料として目標安 全率を1.2に設定し、一連の調査・評価・対策を施される。 「この仕方」は、極めて目標合理性がある。しかし地す べりの学問的(科学的・技術的理解とは括りきれない) な理解(例えば、何故、何処に、どのように、どのよう な地すべり現象が発生するか)が深化することは乏しか ったのではないか。 今から 20 年前までは地すべり災害の 発災地の分布データはあるが、地すべりによって生成さ れた場所の理解は、日本の一部にしか存在していなかっ た。「日本における地すべり災害の発生は、その殆どが既 往の地すべり地で発生する再活動型である。」との大方の 共通認識があったにもかかわらず、である。であれば、 当然ながら地すべりによって生成された土地の実態把握 である地すべり地形の分布状況のデータベース化が1982 年以後防災科学技術研究所によって推進されたのは、至 極当然である。

#### 2. 被害地震の発生

防災科研の地すべり地形データベースが整備されつつ ある中、2004年の新潟県中越地震、2008年岩手宮城内 陸地震、2011年東日本大震災など、東日本を領域とする 一連の被害地震に際して、地震起源の地すべり性斜面災 害が、それぞれ数千か所規模で頻発した。

このうち、前2者は内陸直下型の逆断層地震で、地す べり多発地帯に発生したもので、次に挙げるような特徴 がある。1)斜面破壊の大半は、震源断層の上盤側に集 中的に発生している。2)既存の地すべり地形は高密度 で分布し、地すべり災害も多発していたが、従来から言 われていたような「大方が既存の地すべり地形の再活動 である」とは言い切れない側面が見られた。3)崩壊型 の破壊について、ゴルジュの傾斜変換線など谷壁部の地 形効果が指摘された。極めて緩傾斜のスベリ面を持つ大 規模地すべりが散発した。5)地すべりには、地震起源 と雨雪期限の地すべりがありそうであるということなど が見えてきた。6)斜面変動で生じた不安定土砂量は億 立米の規模に達し、このようなイベントが流域全体の地 形発達に大きく貢献することが想起された。

東日本大震災時の斜面災害では、内陸直下型地震とは 異なる斜面災害の特徴がみられた。この M.9 クラスのプ レート境界型地震においては、1)東日本の広い範囲で、 局地的な集中性を持って斜面災害が発生した。2) 震度 6 弱規模の振動に3分以上も曝されたにもかかわらず、 「大方の地すべり地形が随所で再活動した」という事実 は見えてこない。3) 1978 年宮城県沖地震時に生じた人 工地盤の破壊は今回も繰り返された。4) 松島湾などで 集中した斜面崩壊は、特定の地質構造と海食崖という特 定の地形が寄与していたと見られる。余震であっても M.7 規模のものが繰り返され、その一つは正断層型の内陸直 下型地震であった。この地震時には、震源断層の近傍で 表層崩壊や地すべりが集中的に発生した。

#### 3. 新しい地すべり研究の展開可能性

地すべり災害と地すべり地形の分布実態の双方が共に 把握できるのが現在であろう。

地すべり地形分布の全体像がほほ判り、雨雪起源と地 震起源とがありそうで、3次元での地すべりメカニズムの 解析が可能になった。トリガーとしての二つの力を設定 することは、十分に理解できる。と同時に、地すべりは、 初生的な破壊の後に自律的な破壊過程をたどると考えら れ、それぞれの破壊過程で関係する破壊変形要因も変化 する性質を持っている。この変化過程を再整理してみる ことが必要ではないか。緩勾配の巨大地すべりは、強震 動を加味しない限り殆ど動かない。ただし、一旦破壊さ れれば話は別である。

ここに来て、分布を説明する議論が可能になっている。 個々の地すべり地形のリスク評価も大事だが、そもそも、 どのような場所が地すべりし易い潜在性(Susceptibility) を有しているのかという評価も可能となった。

#### 4. これからの社会貢献の在り方

地すべりという自然現象の全体的なイメージが見えて きた。従来は発災に反応した対策に終始せざるを得なか った。これからは、目前の災害現象の背後にある自然現 象としての地すべりを視野に入れて対応策を考察できる のではないか。抑止と抑制という対応策に加えて、順応 的管理という考えが提案されつつある。地すべり潜在性 に予め留意した土地利用の在り方を提案する時期にある。

# FEM 地震応答解析と地すべり発生メカニズムについて

Mechanisms of earthquake-induced landslides and their seismic response analysis based on FEM

若井明彦\*(群馬大学)

Akihiko WAKAI (Gunma University)

キーワード:力学機構,ひずみ軟化,有限要素法

Keywords: Mechanism, Strain-softening, Finite element method

## 1. はじめに

盛土からなる斜面等とはやや異なり,自然斜面 が地震動によって地すべり性の変状を生ずる現象 を予測する場合,地形および地質的条件に応じた 発災機構を考慮することが重要である。今回は, 既往の地震地すべりを動的弾塑性FEMにより再現 した事例をもとに,斜面内の土が示す地震時の力 学特性と巨視的な変形現象との関係についておさ らいしたい。

## 2. 土塊の滑落を伴う地震地すべりの再現

東北地方太平洋沖地震においては、地震動によ る繰返し載荷に対して鋭敏な軟弱粘土層が地震中 に急激な強度低下を生じ、上部土塊の自重を支え きれずに滑落をもたらす―というメカニズムのも とで、流動性の高い地すべりが多数発生した。

このような事象の発生機構を考える場合に重要

なのは、斜面全体のすべり機構形成に対する力学 的な余裕度と、そのすべり機構をもたらす原因と しての斜面内各要素の地震時の力学特性である。

すでに、多くの報告において紹介された現場の ため、詳細は割愛するが、例えば、福島県白河市 葉ノ木平地区で発生した地すべりを、動的弾塑性 FEMによって再現した結果が図-1である。解析に おいては、滑落の一因と考えられる"風化軽石を 含む鋭敏粘土層の繰返し載荷による軟化"を構成 モデル(UW 軟化モデル)において考慮した。

現場から採取した鋭敏粘土層の不撹乱試料を用 いた種々の拘束圧下の繰返し一面せん断試験(等 体積条件)の結果とそれらを上記の構成モデルに よって再現したものが図-2 である。載荷初期には 一定のせん断抵抗が発揮されるものの,繰返し載 荷とともに急激に見かけの強度を失う様子が窺え る。この際,構成モデルにおいても「どの程度の



(b) 最大せん断ひずみ (J<sub>2</sub>比例成分)

図-1 白河市葉ノ木平地すべりの地震後の残留変形性状 (FEM による再現結果).

-2-



(b) 再現結果(UW 軟化モデルによる)

図-2 鋭敏粘土層の不撹乱試料を用いた繰返し一面せん断試験(等体積条件;種々の拘束圧)の結果と それらの応力-変位履歴曲線のUW軟化モデルによる再現.

載荷によってどの程度の軟化が進行するのか」といった観点からの実験結果への近似が望まれる。

比較的均質なゆるい飽和した砂層に対して液状 化の危険度を予測する場合,繰返し載荷の振幅を 変えた一連の非排水載荷試験において,載荷の何 回目で過剰間隙水圧が極端に上昇したことに伴う せん断ひずみの急増(液状化)を生じたか,その 回数を載荷振幅の関数として図に整理する―とい ったいわゆる「液状化強度曲線」という概念があ るが,強度低下の発生するメカニズムには差違こ そあれ,繰返し載荷の入力レベルと見かけの軟化 度との関係に着目するという意味では,これらは 類似した着眼点と考えてよい。

# 3. すべり機構と全体安定に着目した評価

前章で紹介した FEM 結果において, 地震中のい くつかの時刻における"すべり面上のせん断抵抗 (せん断応力)  $\tau$  と見かけの非排水せん断強度  $\tau_{\rm f}$  の分布"を示したのが図-3 である。地震中に斜面 内各位置の強度が徐々に低下し、やがてせん断抵 抗が発揮されにくくなっていく様子が窺える。

これらの力学的平衡を直接的に表すために、「すべり面上のせん断強度の総和」を「上部土塊の自重による滑動力」で除した指標 Fdに着目する。

$$F_d = \frac{\sum R_f}{\sum T_s}$$

ここに $\sum R_f$ はすべり面上の最大せん断抵抗力 (強度)の総和, $\sum T_s$ は自重に起因する滑動力 (注・地震動による慣性力は含めない)である。 図-4がFEMで得られたこの指標の時刻歴である

が、地震中にこの値が1.0以下に急減して土塊の滑落と長距離移動が開始したことがわかる。



図-3 地震中のすべり面上各位置で発揮されているせん断抵抗 τ と見かけのせん断強度 τ<sub>f</sub>の分布 (FEM 結果).



図-4 土塊の滑落に対する安定性を評価するための指標 F<sub>d</sub>の時間的変化(FEM 結果).

# 4. まとめ

局所的な要素の力学特性とそれらの集合体とし ての全体系の安定性の議論は不可分である。これ らを連成した理論的検討が望まれる。

## 参考文献

- 若井明彦・鵜飼恵三・尾上篤生・樋口邦弘・黒田 清一郎(2007):層理面のひずみ軟化挙動に起因 する流れ盤斜面の地震時崩壊の有限要素シミュ レーション,日本地すべり学会誌, Vol.44, No.3, pp.1-11.
- Wakai, A., Ugai, K., Onoue, A., Kuroda, S. and Higuchi, K. (2010) : Numerical modeling of an earthquake-induced land-slide considering the strain-softening characteristics at the bedding plane, Soils and Foundations, Vol.50, No.4, pp.515-527.

# 2011 東北地方太平洋沖地震での福島県内火山灰地域で発生した

# 地すべりから得た知見

Findings about the landslides occurred in the volcanic ash soil range of Fukushima Prefecture under the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

梅村 順(日本大)\*

Jun UMEMURA(Nihon Univ.)

キーワード:東北地方太平洋沖地震,誘因,地震動

-5-

Keywords: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Induced causes, Seismic vibrations

#### 1. はじめに

2011 年(平成 23 年)東北地方太平洋沖地震の際, 福島県内では,震源に近い浜通り地方と,中通り地 方の阿武隈低地中部から栃木県に至る南北に延びる 地域で計測震度 6 強に見舞われた.これら計測震度 の大きい地域に対応して,白河市葉ノ木平地すべり をはじめ,多くの崩壊が発生した.

また,2011年(平成23年)4月11日には,いわき 市西部を震源とする M7.0の内陸地震が発生し,い わき市が再び計測震度6強に見舞われた.この地震 でいわき市では,新たに多くの自然斜面の崩壊,変 動を生じた.著者が確認した,本震で生じた福島県 内の幅10mを超える規模の大きな崩壊は,原発事故 で立ち入りが制限され確認ができない地域を除いて, 100箇所を超えた.

本文では、今回の震災での起象事項について、特 に、代表的な斜面災害である白河市周辺で発生した 火山灰質粘性土分布域での地すべりの特徴を述べる. 次いで、得られた知見を防災対策、特に事前対策に 生かすために取り組んでいる課題について紹介する.

#### 2. はじめに

白河火砕流堆積物層を覆う那須火山起原の火山灰 質粘性土分布域で,白河市葉ノ木平地すべりが含む 幅約 10m 以上の規模をもつ地すべりが,10 箇所で 発生した.これらは,今回の地震での特徴的な斜面 災害であった.

これら地すべりを生じた斜面の地質は,数層の火 山灰質粘性土を主体とし,斜面にほぼ沿い堆積した 流れ盤であった.写真-1に,葉ノ木平地すべり地 で滑落崖に現れたすべり面を生じた層準付近の近接 写真を示す.火山灰質粘性土,火山砂,スコリア(火 山礫),軽石の堆積物層中に,少なくとも2枚の埋没 土壌が認められた.滑落崖で見られる最下位の埋没 土壌は,崩壊地すべり面に連続してみられ,また,

この埋没土壌中には風化した軽石堆積物の簿層が狭 在し、すべり面に点在していた.このことから、こ の簿層付近にすべり面が発達したと見られた.また、 この埋没土壌には固結して岩盤状になった部分を含 むスコリア層が上載する.この岩盤状の層は、上下 層に較べて密度が大きく、硬い特徴を有し、地震時 には、このスコリア層の質量が大きな地震力を生じ るとともに、変形に強いために、その上下位層のひ ずみ量を相対的な増加が示唆された.

地形的特徴では,頂部滑落崖の背後に,退行性の クラックは認められなかった.また,図-1~4に示



写真-1 葉ノ木平地すべりでの地質状況



図-1 葉ノ木平地すべり平面図 (白河市役所都市計画図に加筆)



10m メッシュ数値地 図を基図に作成)

すように、これら の地すべりはいず

れも、移送域でその方向を変化させたり、すべり面 の深さが大きく変化したりする点であった. このこ とは、1 つの移動体での運動とは考えにくく、屈曲 部付近やすべり面深さの変化部を頂部に、別の移動 体ですべりが発生したと考えられる.

写真-2,3は、福島県県南建設事務所による葉ノ 木平地すべり発生直後の状況である.写真-2から, 直後には比較的大きなブロックの土塊で堆積した状 況が窺え、それら土塊の上に立つことができたとの 証言があった.また,写真-3 は堆積土砂の状況で あるが、土塊は植生を乗せたまま、大きく擾乱せず に到達したことが窺える.崩壊直後に救助に当たっ た建設会社の社員からは、土塊が大きく地山の状 態を保存しており、重機での掘削が困難であった との証言があった. さらに、堆積した土塊の下部 には, 擾乱されていないスコリア層を確認できた. 一方、頂部滑落崖付近では地下水の湧出は殆ど確 認できず、屈曲部やすべり面深さが変化する付近 では湧水が認められた.以上のことがらと,移動 体の主体が相対的に不透水である火山灰質粘性土 からなることを合わせると、すべり面付近には水 みち状に地下水が存在し、特に下部では、その影 響を受けたと考えられた.これら葉ノ木平地すべ りでの特徴は、他の地すべり地でも確認できた.

以上のことから,地すべりのメカニズムを模式的 にまとめたのが、図-5である.先ず、頭部が強い 地震動に伴って,山頂部や地形凸部で,軽石堆積 簿層が脆性的に破壊して,いわゆる進行型の崩壊 を生じたと考えられる. そして, 山頂部付近で生 じた崩壊土砂は,遷急線を跨ぐように堆積した. その後、時間を置かずに、土砂の停止に伴う反力 や急激な上載による間隙水圧の上昇、また、地震 ュ数値地図を基図に作成)



写真-2 葉ノ木平地すべり発生直後の状況 (福島県県南建設事務所提供・2011.3.15 撮影)



写真-3 葉ノ木平地すべり発生直後堆積土砂状況 (福島県県南建設事務所提供・2011.3.15 撮影)



図-5 火山灰質粘性土分布地域で生じた地すべり機 構模式図



写真-4 西郷村太陽の国からまつ荘裏崩壊地 (国際航業(株)撮影)

の揺れに伴う斜面内の間隙水圧の上昇などが重なっ て、谷頭部の凸部を巻き込んで二次的に崩壊した. そして、この二次的な崩壊で、結果として、滑動距 離が長くなったと考えられた.

#### 3. 1998年豪雨災害との比較

2011 年(平成 23 年)東北地方太平洋沖地震での白河市周辺地すべり発生域は,1998 年北関東・南東北 豪雨災害時での地すべり性崩壊発生域とほぼ重なる. それ故,地震,および,豪雨の誘因の違いによる地 すべりの相違点は,興味あるところである.

写真-4, および、5には、豪雨災害時での西郷村 太陽の国からまつ荘裏崩壊地の状況と、すべり面付 近の地質模式図を示した.すべり面は地質模式図中, スコリア層直下の軽石層内に生じた.この特徴的な スコリア層は、太平洋沖地震時の葉ノ木平他の地す べり地でも認められたので、これを鍵に対比すると、 埋没土壌中に狭在した軽石堆積物層と写真-5に示 す軽石層とは同じ層準であり、地震時、豪雨時とも 同じ層準にすべり面が生じたと判断できた.

豪雨時の発生メカニズムを模式的にまとめ、地震時と対比させたのが、図-6 である.地震時に崩壊地下部で生じたと考えられる二次的なすべりと、豪雨時のすべりの発生箇所はほぼ同じと判断でき、地震時でははじめに、それよりも上位で崩壊が開始したので、結果として土量が増え、それが被害を拡大させた原因の一つであると考えられる.

## 4. 地すべりと地震動との関係

この地域で発生した地すべりについて,その滑動 方向の特徴を検討した.いくつかの地すべりは,前 述したように,途中で滑動の方向を変えたので,そ れらについては,方向変化点の上流側,下流側それ ぞれの方向を取った.







図-7には、こ の地域で発生し た地すべりにつ いて, 方向変化点 上の頂部滑落崖 から求めた移動 体の初期滑動方 向と,方向変化点 下の下流側地す べりの滑動方向 を合わせて示し たものである.初 期滑動方向はほ ぼ全ての地すべ りで、北、もしく は,南に向いてい た. 一方, 下流側 地すべりの滑動 方向には,明瞭な 関係は認められ なかった.

-7-



# 図-8 KiK-NET 西郷観測点 地中地震計質点軌跡

これら初期滑動方向と地震動の震動方向との対応 を確認するために、この地域にある KiK-net 西郷で の地震計記録から質点軌跡を描き、比較した.図-8



(頃斜方向最大加速度ベクトル量 法線方向最大加速度ベクトル量 傾斜方向 Arias Intensity 量
 図-9 本震(上段),および,4.11 関連地震(下段)でのいわき市地震動因子評価図

に、示すように、地震動の変位は南北方向に優勢で 初期滑動方向とほぼ一致する関係にあり、初期滑動 方向が地震動の影響を強く受けていることが解った. ここで、地震計が設置されている地盤と、地すべり を生じた箇所の地盤のサイト効果の差違を考慮し、 基盤内に設置されている地中地震計(KiK-net 西郷 観測点では、G.L.-200mの白河溶結凝灰岩層内)の データを用いた.

5. 斜面に与える地震動の影響について

平成16年(2004年)新潟県中越地震以降に頻発 する内陸型地震では多くの地すべりが発生し,従来 行われなかった地震時解析の必要性が指摘され,(公 社)日本地すべり学会でも積極的な取り組みが進め られている.その中で,内陸型地震では海溝型地震 に較べて地震動の上下動成分が卓越する点,周波数 特性が短周期である点などが,地すべりの安定性に 影響を与えると指摘されている.しかし,海溝型地 震であった東北地方太平洋沖地震では多くの地すべ りが発生しており,内陸型,海溝型では充分な説明 が困難であると考えられる.

そこで,著者は,誘因に着目する立場から,斜面 での地すべり発生に寄与する地震動の性質の,より 的確な評価が必要と考えた.地震動を構成する因子 は一般に,最大加速度,周波数特性,位相特性,お よび,震動継続時間といわれ,また,前述した卓越 方向も含まれるであろう.

著者は現在,これら因子のうち,これまで取り上 げられることが少ない震動継続時間と周波数特性, 位相特性に着目して,それらと地すべり発生斜面と の関係を調べているので,途中経過を紹介する.

図-9 は検討の一例として, 震動継続時間の評価 指標に Arias Intensity (Arias, A., 1970)を用い, い わき市での地表面傾斜方向テンソル量の大きさを図 化したものである. 比較のため,最大加速度につい て,地形傾斜方向,および,法線方向それぞれのベ クトル量も示した. なお,使用した地震記録は,地 質区分域毎の KiK-NET 観測点で,サイト効果を除 去するために地中地震計のものを利用した.

これらの図から、従来しばしば利用される計測震 度に較べれば斜面に及ぼす地震動の影響を細かく評 価でき、また、最大加速度に較べて Arias Intensity の方が、内陸型と海溝型との震動性状の差を表現で きそうであることが分かった.そして、このような マップで表現できることから、広域での危険度評価 への利用が期待できそうである.

一方,周波数特性,および,位相特性について, これらはサイトに強く依存するので,地すべり地で 常時微動測定を実施し,そのデータからの評価を進 めているところである.

【謝辞】本検討は、国土交通省国土技術政策総合研 究所河川開発技術課題の一環として実施し、同受託 研究グループ諸氏には、有意義な議論を戴いた.こ こに期して感謝の意を表する.

参考文献 Arias, A.(1970) : A Measure of Earthquake Intensity, Seismic Design for Nuclear Power Plants (Hansen, R. J. ed.), The M.I.T. Press, pp.438-483.

# 2011年東北地方太平洋沖地震での造成宅地の滑動被害から得られた知見

# 佐藤 真吾/(株)復建技術コンサルタント

#### 1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震では,仙台市の丘陵地造 成地において,宅地・建物,道路,ライフライン(地中 埋設物)等の甚大な被害が発生した。

また,同地震による造成宅地被害は,発災から2ヶ月 程度の期間中に9県56市町村において3,592件が確認 された(国土交通省調べ,2011年8月28日現在)。

ここに,造成宅地被害とは,被災宅地危険度判定にお ける「危険(赤)」判定と,「要注意(黄)」判定の宅地を 示す。被害宅地数は,仙台市(2,104箇所)が突出して おり,次いで,福島市(349箇所),一関市(115箇所), いわき市(95箇所)の順となっている。また,仙台市の 宅地被害は,その後の調査で5,728箇所(仙台市調べ, 2013年7月31日現在)に増加している。

本発表は、東北地方太平洋沖地震における仙台市の造 成宅地被害から得られた知見について報告するものであ る。

#### 2. 大規模盛土造成地の滑動被害

図-1 に,東北地方太平洋沖地震による被災宅地地域と 計測震度<sup>1)</sup> および表層地質<sup>1)</sup>の関係を示した。同図 b) は被災宅地地域を示したものであり,宅地被害が確認さ れた市町村を赤で色付けするとともに,造成宅地滑動崩 落緊急対策事業の適用地区を緑の丸印で示した。

ここに,造成宅地滑動崩落緊急対策事業適用地区とは, 谷埋め型大規模盛土造成地または腹付け型大規模盛土造 成地の滑動被害が発生し,再度災害防止等の観点から, 大規模地震に対する滑動崩落防止の目的で強化復旧対策 を施した地区である。

宅地被害が多く(30箇所以上)確認された市町村は, 概ね計測震度6弱~6強の地域に集中している。また, 造成宅地滑動崩落緊急対策事業の適用地区における被害 形態は,全体すべり,ひな壇すべり,のり面すべり,擁 壁被害等が大勢を占める。このほか,茨城県の鹿嶋市と 東海村では液状化による滑動被害が発生した。



図-1 被災宅地地域と計測震度および表層地質の関係

# 3. 大規模盛土造成地の滑動の特徴

自然地形の地すべりと大規模盛土造成地の滑動(すべ り)の大きな違いとしては,前者では明瞭なすべり面が 存在するのに対して,後者では明瞭なすべり面が存在し ない場合が多いことが挙げられる。東北地方太平洋沖地 震被害が発生するまで,大規模盛土造成地の滑動は,盛 土と地山の境界をすべり面とする地すべり的被害を想定 していた。しかしながら,同地震による仙台市の造成宅 地被害では,いわゆる「ひな壇すべり」と呼ばれるよう な,盛土内にすべり面をもつ被害(図-2参照)もしくは, 盛土表面が変状する被害(変形被害)が多く発生した。



図-2 造成盛土のひな壇すべりの例

また,自然地形の地すべりでは,滑りやすい地層を境 にその上位の地盤がそっくり動き出すが,盛土造成地の 場合には,弱線部が面状には存在せず,盛土の状態や外 力によって盛土の変状が大きく変化する特徴がある。

#### 4. 造成盛土宅地の被害形態と被害要因

仙台市内の造成宅地における切土・盛土・切盛境界に おける被害形態は、図-3 に示すとおり、(1)滑動崩落・ 変形被害、(2)沈下(不同沈下)被害、(3)擁壁被害の大 きく3つに分類される。また、(1)滑動崩落・変形被害 は、地山と盛土の境界をすべり面とする「全体すべり」 と、ひな壇部の特に緩い盛土部分が滑動変状する「ひな 壇すべり」に分類される。(2)沈下(不同沈下)被害は、 緩い盛土が地震動により揺すり込み沈下する場合と、液 状化による体積変化で生じる沈下に分類される。



図-3 造成宅地の被害形態

一方,造成宅地の被害要因は,図-4 に示すとおり, a)谷埋め型盛土の滑動に起因するもの,b)腹付け型盛土 の滑動に起因するもの,c)切盛境界に起因するもの, d)のり面の安定性不足に起因するもの,e)擁壁の安定性 不足に起因するもの,f)緩い盛土状態(揺すり込み)に 起因するもの,g)地盤の液状化に起因するもの,の7つ に分類される。



#### 5. 造成盛土宅地の被害メカニズム

丘陵地の造成盛土宅地の被害メカニズムについては, 図-5 に示すとおりである。素因としては,今回,甚大な 被害が発生した大規模盛土造成地では,地震動に弱い地 盤であったこと,および,擁壁が古い基準で造られたも のであり,擁壁の構造や支持力・安定性に問題があった ことなどが考えられる。ここに,地震動に弱い地盤とは, 次の4つの要因が挙げられる。

- ①盛土は脆弱(砂質土は非常に緩く、粘性土では非常に軟らかい状態)である。
- ②盛土材料が新第三紀の砂岩,泥岩,凝灰岩等の堆積 岩から構成されている場所では、スレーキングによ り軟化(土砂化)しやすい。
- ③盛土が飽和した緩い砂質土から構成されている場合 に,液状化が発生しやすい。
- ④地下水位が高い(地表面から浅い)。

誘因としては,強い地震動(震度6強~6弱)が作用 したこと,大きな揺れ(震度3以上)が3~4分継続し て長い時間作用したこと等が挙げられる。また,飽和砂 質土層では大きな地震動が長く作用したことで液状化が 発生した。なお,このほか誘因には降雨や融雪等も挙げ られるが,今回の地震ではこれらは発生していない。

上記,素因と誘因により,造成盛土宅地では,滑動崩 落または滑動変形被害や,宅盤の不同沈下被害(段差や 開ロクラック等)が発生した。また,擁壁の破壊や変状 (傾斜,移動等)が発生し,宅盤の変状(不同沈下等) を助長した。

一方, 地震被害は盛土造成地全体で一様に発生した訳

ではない。宅地および建物被害は、同じ一団の盛土造成 地(特に谷埋め盛土造成地)でも被害が集中している地 域と無被害に近い地域が確認された(図-6)。



図-5 丘陵地の造成盛土宅地の被害メカニズム

この要因の1つとしては,造成盛土前の旧地形形状と 盛土厚さ等に起因する地震動の増幅特性の違いが考えら れる。図-7は高分解能三次元モデルに地震波を入力した 際に,同じ谷埋め盛土でも地震波が大きく増幅するエリ アが出現することを示したシミュレーション結果である。

被災宅地の被害形態(図-3)で示した大きく3つの分 類,すなわち,(1)滑動崩落・変形被害,(2)不同沈下 被害,(3)擁壁被害,のメカニズムについては,それぞ れ(1)盛土の滑動(すべり),(2)盛土の体積圧縮,(3) 構造由来(耐震性不足)として整理される。なお,盛土 の滑動崩落・変形被害の区別については,図-8に示すと おり,盛土が変形から破壊に至る過程の区別であり,す べり面の状態で区別される。



図-6 谷埋め盛土造成地の宅地被害例



図-7 谷埋め盛土造成地の強震動シミュレーション例



図-8 滑動崩落と滑動変形の区別<sup>2)</sup>

#### 6. これまでの知見との比較

#### (1) 盛土厚と被害の関係

国の大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの 解説<sup>8)</sup>では、1995年兵庫県南部地震や1978年宮城県沖 地震による被害から得られた知見として、盛土厚さが薄 いほど滑動崩落の危険性が高く、特に盛土厚が3m以下 では最も危険度が高いとされている(表-1参照)。

東北地方太平洋沖地震における仙台市の造成地被害と 盛土厚の関係を図-9に示した。

表-1 と図-9 を比較すると,表-1 の配点では盛土厚が 3m以下では盛土厚 6~12mの約 3.5 倍で,盛土厚 12m より大きい場合は 0 点となっているが,今回の地震被害 場合は盛土厚が 3m以下では盛土厚 6~12mの約 1.3 倍, 盛土厚 12mより大きい場合は 0.6 倍と 0 ではない。

表-1 大規模盛土造成地の変動確率評価の配点<sup>3)</sup>

•									
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		



図-9 盛土厚と宅地被害箇所数の関係

#### (2) 切土 盛土 切盛境界と被害の関係

造成宅地における宅地,建物,ライフライン(地中埋 設物)等の被害は切盛境界で発生し,盛土上の被害は比 較的少ないと考えている専門家も多い。

図-10に、宅地、木造建物、上水道(漏水)、下水道(マ ンホールおよび管渠)の各被害と切土・盛土・切盛境界 の被害割合をそれぞれ示した。ここに、切盛境界の被害 については、切盛図の精度が概ね±2.0mであることか ら、切盛厚さが±2.0mの範囲内にある被害を切盛境界 の被害としている。図-10より、いずれの被害も盛土上 の被害が50%を超えており、次いで切盛境界の被害が全 体の 20~30%程度で発生していることがわかる。



図-10 切土・盛土・切盛境界と各種構造物被害の関係

#### (3) 現地盤勾配と被害の関係

これまで、現地盤勾配と被害との関係はあまり着目さ れていなかったが, 仙台市の被害(造成宅地滑動崩落緊 急対策事業適用地区)では、現地盤勾配が6度以上の地 区で大部分の被害が発生していることが判明した(図 -11 参照)。



図-11 現地盤勾配と宅地被害の関係

#### 7. 造成盛土宅地の滑動対策

造成盛土宅地の滑動対策は,基本的に地すべり対策と 同じである。しかしながら、盛土が極めて不均質かつ軟 弱であるため、抑止対策だけでは宅地・建物の再度災害 を防げない問題がある。これは、例えば抑止杭工で頭部 の許容変位を 10cm 許したとすると、その 10cm の変位で 宅盤が不同沈下し、住宅に甚大な被害を与えることにな る。また、擁壁が健全であっても宅盤が不同沈下して住 宅に甚大な被害を与えた例も確認されている。これは, 宅盤が緩い締固め状態にあるため、地震動による揺すり 込み沈下した例である。さらに,砂質系盛土で地下水位 が高い場合には,液状化により不同沈下が発生した例も 確認されている。これらは、宅盤の品質の問題である。

このため、造成宅地の場合は、盛土の滑動対策や擁壁 補強のみならず、宅盤補強まで確実に実施しないと再度 災害を防ぐことができない特徴がある(図-12参照)。



図-12 造成宅地の再度災害防止対策<sup>4)</sup>

#### 8. まとめ

『地すべり』という言葉は、最近では造成盛土宅地の 滑動に対しても用いられている。しかしながら,造成盛 土宅地には明瞭なすべり面が存在しない場合が多く、滑 動被害発生の有無は盛土の品質に大きく左右される。ま た、造成宅地では、宅盤のわずかな変位で住宅に大きな 損傷を与える。このため、造成宅地の再度災害防止のた めの対策工としては、抑止工に加えて盛土(宅盤)の改 良が必要となる。

#### 【参考文献】

- 東日本大震災に関する東北支部学術合同調査委員会, 1) 成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震災害調査報告 書, 1.4.6 宮城県および仙台市内での地震動, pp.53~ 2013年6月 57.
- 地盤工学会東北支部,造成宅地災害対応マニュアル,滑 2)動崩落(変形・すべり・崩壊)形態のイメージ図, p. 79, 平成 25 年 3 月 29 日.
- 大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの解説, 3)(加速工業のなど) 国土交通者, p. 53, 平成 24 年 4 月. わが家の宅地安全マニュアル (滑動崩落編), 滑動崩落防
- 4)止工事の概要,国土交通省,2010年2月に加筆.

2011 東北地方太平洋沖地震での松島湾・石巻周辺での斜面変動に関する知見

東北工業大学 千葉 則行

# 1. 斜面変動箇所の分布

宮城県内では最大震度7を栗原市で観測したほか,沿 岸部の各地で6強から6弱の揺れに見舞われ,未曽有の 甚大な被害となった。被害の主なものは津波によるもの であったが,南三陸町から牡鹿半島にかけての地域,さ らには松島湾内の島嶼およびその沿岸部で多くの斜面災 害が発生した。また仙台市内の丘陵部では谷埋め盛土の 宅地が地震の影響で崩れ,家屋が被災するケースが多く 見られた。

県内は、地形的・地質的に区分すると、奥羽山脈地帯、 北上山地南部隆起帯、阿武隈山地北部隆起帯、仙北丘陵 地帯、仙北低地帯、仙南低地帯の6地域に大別される。 図-1によれば、県内の斜面変動は、低地帯を除く丘陵〜 山地部にかけて広く分布する<sup>1)</sup>。しかし、詳細にみると 偏在的な分布傾向を示しており、震源に近い沿岸部で中 古生層からなる北上山地南部隆起帯、あるいは中新世〜 鮮新世の厚い堆積岩で構成される仙北丘陵地帯東部にお いて崩壊が多発している。特に、震源に近い松島湾周辺 および牡鹿半島から南三陸町にかけての地域に集中的に 見られる。松島湾周辺では海進時に海岸浸食を受けて形 成された急斜面(海食崖)が発達していて、そこで集中 的に崩壊している点が特徴として挙げられる。

一方,県南の沿岸部に位置し,先第三系砂岩・粘板岩 (時代未詳)と花崗岩類で構成される阿武隈山地北部隆 起帯では対象的に極めて少ないものとなっている。



図-1 宮城県内の斜面変動分布(Google map に加筆)

#### 2. 斜面変動の形態

地震よって発生した斜面変動のデータ<sup>1)</sup>は、宮城県土 木部防災砂防課および同農林水産部森林整備課から、土 砂災害危険個所の地震後点検結果(実施時期:3月11日 本震、4月7日余震の両方による斜面変動が含まれる) を入手し、この中から、砂防・治山施設の被害の詳細が 不明な箇所を除き、発生した斜面変動現象を「地すべり」、

「崩壊」、「変状」(ここでいう「変状」とは、斜面やそこ にある構造物の亀裂や段差、はらみ出しなどが発見され たが、斜面変動範囲を推定し難いもの)、「土石流」およ び「土石流危険渓流での崩壊」に分けて整理した。この 他、林野庁東北森林管理局宮城北部森林管理署・(株)パ スコが2011年7月に実施した栗駒山周辺域の空中から の斜面変動発生状況調査結果も入手されている。

以上の情報収集とは別に、斜面崩壊が多数発生した松 島湾周辺および南三陸町〜牡鹿半島地域を対象として、3 月 11 日本震後における被災状況を空撮してこれをネッ ト上に掲載した Google Earth,そして宮城県土木部の県 管理道路の斜面災害情報をもとに、現地調査を実施して 斜面崩壊箇所の実態把握を行った。

#### 3. 松島湾周辺地域の斜面変動

松島湾は仙台市の北東約 20km に位置している。この 周辺では、松島町から東松島市の鳴瀬川河口周辺にかけ て広がる丘陵地や湾内の島嶼部の丘陵地で数多くの崩壊 が発生した。

#### (1) 斜面変動の発生状況

崩壊が集中した地域は約10km四方の範囲である。今回の地震(本震,最大余震4/7のいずれで発生したかは 不特定)で発生したとみられる箇所は、2011年4月6日 撮影のGoogle Earthの画面でも確認することができ、76 箇所であった(図-2,3)。

塩釜市内の寒風沢島・野ノ島・宮戸島や松島町手樽・ 大塚地区,東松島市野蒜や小野地区では、急斜面(ほと んどが海食崖に相当)下に古くからの集落が立地し、ま た新たな住宅地となっている箇所もあり、今回の地震に より崩壊土砂が人家に流入したり、農地を埋没させたり する被害が多くみられる<sup>2)</sup>。また崩壊地だけでなくその 周辺斜面には崩壊に至らないまでも亀裂やはらみ出しが 生じている斜面もみられる。



図-2 松島湾周辺の地質と斜面変動分布



図-3 松島湾周辺の岩盤崩壊(Google Earth より)

# (2) 斜面変動と地質との関係

松島湾周辺の地形・地質は、浸食されやすい新第三紀 中新世の堆積岩(凝灰岩に富み、軟質岩)が分布してお り、多数の節理・層理・断層を伴っている<sup>3)</sup>。このため 風化剥離、海食によって急崖を作り易く、島嶼部さらに は沿岸近くの内陸部でも海進時に形成された海食崖がみ られる。また松島湾周辺の発達する丘陵地は概ね 100m 以内の標高でしかなく開析が進んでいる。

松島湾には下位より新第三紀中新世前期の松島層,大 塚層が主に分布するが,今回の地震では両層の特定の部 層に崩壊が集中する傾向が認められた(表-1)。

松島層は安山岩角礫および石英片を含む塊状の軽石凝 灰岩からなり、岩相上、下部から下部軽石凝灰岩部層、 中部軽石凝灰岩部層、凝灰角礫岩部層、シルト岩部層、 上部軽石凝灰岩部層の5部層に細分され、主に室戸島、 松島湾沿岸部に広く分布している。この地層では上部軽 石凝灰岩部層に多くの岩盤崩壊が発生した。この部層は 層理の乏しい軽石凝灰岩を主体とし、凝灰質砂岩あるい はシルト岩を伴い,軽石は粒径1~2cm程度である。全般に塊状で割れ目の少ない岩体をなしているところでは加工しやすさから石材として利用されている。今回の地震では1m~数mの間隔で発達する開口した節理,亀裂の発達した部分で岩盤崩壊が発生したところが多かった

(写真-1)。また本部層から成る海食崖を掘り込み小規模 な倉庫にして利用していたところでも、節理等の分離面 から崩壊する例がみられた。本部層の崩壊は、直径数 m 規模の崩落を特徴としている。

一方、大塚層は下部よりシルト岩部層,砂岩シルト岩 部層,珪藻質シルト岩部層、シルト岩砂岩部層の4層で 構成される。本層はシルト岩を主体とし、凝灰質砂岩・ 軽石凝灰岩などを狭有している。主に浦戸諸島,松島内 陸部に広く分布しており、このうちシルト岩部層に岩盤 崩壊が集中して発生した。このシルト岩部層は塊状のシ ルト岩を主体とし、一部に細粒砂岩の薄層を挟む互層(シ ルト岩勝ち)の岩体もみられる。全般に暗灰色を呈して 硬いものの、本部層からなる海食崖の露頭では割れ目が 著しく発達している(**写真-2**)。この部層での崩壊は、細 かく砕片化した崩積土(岩片状)から直径数m規模の崩 壊岩塊が生じており、これらは基盤の割れ目間隔に規制 されている。

表-1 地層別の斜面変動の件数

時代		州屆夕		<u> </u>	品体准数
μ-j					朋友什奴
				禍 な ン ル ト 石	
				凝火質砂岩及び軽石凝火岩	
		ŧ		凝灰質細粒砂岩(凝灰岩層を挟む)	
			三ッ谷層	斜層理のある中一粗粒砂岩	
		田岡		礫岩	
	-	眉野		斜層理のある中一粗粒砂岩	
	꾸 배	矸		細粒砂岩(凝灰岩薄層を挟む)	
	朔		根古層	軽石質砂岩(一部斜層理を示す)	2
中新世.				軽石凝灰岩	
		松	大塚層	シルト岩砂岩互層	
				縞状珪藻質シルト岩	
				凝灰質砂岩及び軽石小片を含む砂質シルト岩	4
				シルト岩(砂岩薄層を挟む)	27
		島		凝灰質砂岩・軽石凝灰岩及びシルト岩	2
		湾層群		デイサイト質火山角礫岩	
	***		松島層	軽石凝灰岩及びシルト岩偽礫を含む凝灰質砂岩	14
	时日			シルト岩細粒砂岩互層	1
	79]			凝灰角礫岩・火山角礫岩及び軽石凝灰岩	3
				シルト岩偽礫を含む軽石凝灰岩	1
				安山岩角礫を含む軽石凝灰岩	



写真-1 松島層・上部軽石凝灰岩部層の岩盤崩落

-14-



**写真-2** 大塚層・シルト部層の岩盤崩壊

以上,松島湾周辺で崩壊が多く発生した二つの部層の 各特徴について述べたが,大塚層・シルト岩部層の崩壊 箇所を地形的にみると,いずれも海岸線の海食崖や昔の 内陸部の海進時から出来上がった旧海食崖に位置してい ることが共通している。特に海食崖からなる比高約10m 以上の急崖で,傾斜遷急線を挟んだ領域を発生域とした ものが多くみられた<sup>4</sup>。

#### (3) 宮城県沖地震時の斜面変動分布との比較

東北大学理学部地質学古生物学教室<sup>5</sup>よれば、1978年 宮城県沖地震の際に松島湾周辺で発生した自然斜面の崩 壊箇所は全部で17箇所確認されている(図-4)。崩壊の 分布傾向をみると、松島町中心部や松島湾付近の島嶼部 の急崖箇所に集中し、地質的にも今回の地震によるもの と類似した傾向であり、規模の大きな地震の度に被災が 繰り返されていることが分かる。



図-4 1978年宮城県沖地震による斜面変動分布

# 4. 牡鹿半島周辺地域の斜面変動

今回の地震による斜面変動は、石巻市より女川町にか けての牡鹿半島付近と南三陸町内で崩壊発生が集中した。 斜面変動箇所は、国土交通省、宮城県、石巻市の行政機 関の調査結果と現地調査で確認した箇所をあわせて 55 箇所であった(図-5)。



図-5 牡鹿半島における地質と斜面変動分布

# (1) 斜面変動の発生状況

斜面変動の被害形態は道路沿いの斜面の崩壊・落石で あり、この他に路盤の亀裂、盛土路肩の崩壊・亀裂に伴 う小規模の沈下などである。松島湾周辺と同様に、牡鹿 半島周辺地域でも1978 年宮城県沖地震の際に崩壊・地 すべりが発生したことが報告されている<sup>3)</sup>。今回の地震 においてもほぼ同様な分布特性、崩壊形態のものが認め られた。

# (2) 斜面変動と地質との関係

牡鹿半島が位置する北上山地を構成する緻密堅硬な 中・古生界は、風化・浸食に抵抗力があるため、急峻な 斜面の発達が随所に認められる。地山斜面での斜面変動 は、三畳系およびジュラ系の砂質頁岩および砂岩互層の 分布域に集中し、節理面あるいは層理面に沿った岩盤崩 壊がほとんどである。また女川町牡鹿半島基部では層理 面に沿った地すべり様の斜面変動もみられた。

対象地域で発生した全体で55の斜面崩壊箇所を地質 調査所の5万分の1地質図「石巻地域」,および「金華 山地域」図幅<sup>6,7</sup>と対比して,地質別の崩壊件数を確認 した。その結果、崩壊は中生代の地層で発生しており, 主に頁岩と砂岩で構成されている地層での崩壊であった。 これらの斜面変動の規模をみると、幅は40m以下で、 水平距離6m~15m、高さ11~30mのものが多く、また 崩壊深2m以下のものがほとんどであった。

崩壊の地質的発生素因としては、層理や開口した節理 の面が高角になって発達し、これが原因で崩壊した構造 を持つものと、明瞭な層理や節理の面が緩い傾斜ですべ

-135-

り面となった流れ盤の構造を持つものとに二分される。 さらにわずかであるが、風化岩のところでも崩壊がみら れた(写真-3)。



写真-3 風化岩の崩壊

## 5. まとめ

県内の斜面変動箇所は,偏在的な分布傾向を示しており,震源に近い仙北丘陵地帯東部沿岸部,北上山地南部 隆起帯で密集する傾向を示した。

中新世〜鮮新世の厚い堆積岩で構成される松島湾周辺 では海食崖で集中的に崩壊している点が特徴として挙げ られる。同地域はシルトや凝灰岩質の岩相で構成され, スレーキング等の現象は少ないものの,層理・節理・断 層を伴っており,これらが要因で岩盤での崩壊が集中し たと考えられる。崩壊の規模は幅・高さともに10~15m のものが多かった。

また牡鹿半島から南三陸町かけての地域では、三畳系 およびジュラ系の頁岩と砂岩で構成されている硬軟互層 分布域に崩壊が発生していることが分かった。これらは 層理面あるいは節理面に沿った崩壊がほとんどであった。

上記の崩壊地では、隣接した斜面上に段差、開口した 亀裂が幾つも認められ、斜面の構成岩盤の緩みゾーンの 存在が随所で確認された。これらは、今後の地震・豪雨 での崩壊の危険性が高いと思われ、監視が必要と考えら れる。

# 参考文献

- 日本地すべり学会:平成23年度河川砂防技術開発研究課題 「地震による斜面変動の実態と特徴の類型化」報告書, p.227,2012
- T. Miyagi, D. Higaki, H. Yagi, S. Doshida, N. Chiba, J. Umemura, and G Satoh : Reconnaissance report on landslide disasters in northeast Japan following the M9 Tohoku earthquake, Springer, Landslides, 8-3, pp.339-342, 2011
- 石井武政他:松島地域の地質,地域地質研究報告書(5万分の1図幅),地質調査所, p.121, 1982

- 4) 千葉則行:東北地方太平洋沖地震による宮城県松島・東松 島地域の崩壊の特徴、シンポジウム「東日本大震災で発生 した斜面変動」資料、日本地すべり学会、2012
- 5) 東北大学地質古生物学教室:1978 年宮城県沖地震に伴う地 盤現象と災害について、地質学古生物学教室研究邦文報告, 第80号, p.98, 1979
- 6) 滝沢文教,神戸信和,久保和也,秦光男,寒川旭,片田正人:石巻地域の地質,地質調査所,pp1-48,1984
- 7) 滝沢文教,一色直記,片田正人:金華山地域の地質,地質 調査所,pp.1-51,1974

# 地すべり発生の分布と地形地質から得た地すべり要因に関する知見

# - 主として 2004 年中越地震ならびに 2008 年岩手宮城地震から -

New knowledge about seismic induced landslide factor from distribution on topography and geology

檜垣大助, 濱崎英作\*, 林一成, 綱木亮介

Daisuke HIGAKI, Eisaku HAMASAK, Kazunari HAYASHI, Ryosuke TSUNAKI

キーワード:地震地すべり,バッファ移動分析,正規分布確率密度関数,リスク評価

Keywords: Earthquake landslide, Buffer movement analysis, Distribution probability function, Risk assessment

# 1. はじめに

今回,新しい試みとして,①これまでの地震地 すべり・崩壊事例からバッファ移動分析と統計解 析による要因抽出を行い②地すべり・崩壊発生非 発生条件分離に最も適合するアイテム選定・重み 付けにAHP法および正規分布確率密度関数を用い た過誤確率による手法を提案した。その結果,崩 壊と地すべりでは要因を異にしていることがわか った。今回,判明した崩壊・地すべりの発生に関 わっている地形・地質要因についての知見を述べ るとともに,これに基づく危険度評価マップ作成 など社会実装について述べる。

### 2. 分析方法

分析に当たって 2008 年岩手・宮城内陸地震での 事例を使用した。地すべり(大規模崩壊を含む) と崩壊(表層崩壊)分布については八木(2008)の判 読図を採用した。また,これらの分析には災害発 生前 10mDEM を使い GIS を用いてシームレス地質 図(産総研),地すべり地形分布図(防災科研)などを データベース化して用いた。

図−1 バッファ移動検索概念図

まず,統計処理を行うに当たって地すべり,崩 壊のそれぞれに図-1 に示すような,バッファ領域 (検索半径 R を持つ円領域)を設定し,中心点を移 動距離 L 毎にスキップさせつつ,円領域に含まれ る地形量や地質との関連を集積し分析した。

ここでは崩壊と地すべりのバッファ R とスキッ プ距離 L を,それぞれの現象にあわせ R=100m, L=50m と R=250m, L=150m とした。

また,バッファ内で地すべりもしくは崩壊現象 があるものを"発生"とし,抽出した因子毎の条件設 定とバッファ内の 10mメッシュ数から発生率(=発 生メッシュ数/全メッシュ数)を求めた。それをも とに,図-2 に示すような積層棒グラフで条件設定 範囲と発生率の関係を示し,その傾向から因果関 係が認められるものピックアップしていった。



# 図-2 積層棒グラフ事例(崩壊・地上開度)

ここで条件設定とは、条件内の範囲を区切るこ とで、たとえば図-2 の「地上開度」の場合、角度 を 5 度刻みに設定して発生率毎に評価することで ある。危険度はバッファ内を AHP 点数として評価 するもので下記とした。

# AHP 点数 = $\Sigma W \cdot X$

この式のXは各要因の最大値でありWはその条 件範囲で定まったウェイトである。AHP 点数はそ れらの総和であり0から100で設定されている。 ピックアップされた要因ごとの類似重複を避ける ためAHP法や単独要因での正規分布確率密度関数 過誤確率分析から5アイテムに絞った。

正規分布確率密度関数による過誤確率分析とは, 崩壊や地すべりの発生・非発生条件の独立・分離 を明確に評価するために用いたもので,モデルの 合理性を過誤確率(p)の合計値の最小化を目的関数 として評価したものである。



図-3 正規分布確率密度関数と過誤確率分析(p)

なお、最適モデルの絞込みにはモンテカルロ法 を用いた。

# 3. 結果

抽出された要因(X)とウェイト評価した結果を 地すべり・崩壊それぞれについて,その適合性を 表-1,2にまとめた。表中の初期モデルとは AHP 法でまずウェイト(W)を作成し,その結果での過誤 確率(p)を表している。他方最終適合モデルはモン テカルロ法によって最適化されたW値であり,同 様に過誤確率(p)を示しており,わずかだが過誤す る確率が低下している。

x · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	表1	地すべり正規分布確率密度関数と過誤確率分析(p)
---	----	--------------------------

きょうこう	卡语	海中	AHP最大ウェイト値		
地りへり安凶	1日1示	进止	初期モデル	最終適合モデル	
地質	地質(岩相)	Ø	27	20	
地形	起伏量	0	20	20	
地形	地上開度	0	20	20	
地下水	谷次数	0	20	20	
地質	地すべり土塊	Δ	13	20	
	<b>過</b> 調和	在率(n)	0.6961	0.6960	

表-2 崩壊正規分布確率密度関数と過誤確率分析(p)

品体再日	te ta	海中	AHP最大ウェイト値		
朋城女凶	1日1示	选足	初期モデル	最終適合モデル	
地形	平均勾配	Ø	25	25	
地下水	谷次数	$\Delta$	10	20	
地質	地質(岩相)	$\triangle$	10	10	
地形	凸凹10m	O	25	20	
地形	地上開度	O	30	25	
	過誤研	寉率(p)	0.6136	0.6110	

図-4,5には、地すべり・崩壊それぞれの実際の発生、非発生のヒストグラム分布とその平均値μ, 偏差値σに基づく正規密度関数モデルおよび過誤 確率分布を示す。





図−5 崩壊・最終最適正規分布モデル

なお, この AHP に基づく評価マップは図-6, 図-7 のようになる。



図-6 地すべりに対する AHP 評価マップ



図-7 崩壊に対する AHP 評価マップ

# 4. 考察

今回の2008年岩手宮城内陸地震の地すべり発生 からの分析では「谷次数」「地質」「地すべり地形 =地すべり土塊面積」「起伏量」「地上開度」の5 アイテムが選定され、それぞれ最大ウェイトは 20%毎の等分のモデルが良好な結果を示した。他 方,崩壊については「平均勾配」「地上開度」「谷 次数」「凸凹度 10m」「地質」が選定されたが、過 誤確率(P)でみるとそれぞれ25%,25%,20%,20%, 10%の最大ウェイトがもっとも適合するモデルと なった。このことから従来から多くの地すべり専 門家が述べてきたように地震発生には崩壊では地 形要素のウェイトが高い。一方、地すべり発生で は地質要因も少なからずあり,やはりもともと地 すべり地形が多く脆弱なところで多発し、かつ第 三紀堆積岩類や火砕流堆積物分布範囲において多 くが発生に関与していることがわかった。

# 5. 社会実装

今回の分析でバッファ以内の要因を集積し得点 化することでバッファ内での地すべりもしくは崩 壊の発生確率を論理的に表現することが出来るこ とが解った(図6,7のAHP評価マップ)。これは すなわち地すべり・崩壊の発生しやすさ (Susceptibility Map) そのものである。社会実装の ためには、危険度判定のための閾値を設定し、か つ保全対象エリアを掛け合わせるなどのステップ アップが必要で、次なる2次3次調査へと進む仕 組みの構築が今後の課題である。

# 5. まとめ

今回,新しい試みとして,2008 岩手宮城地震で の地すべり・崩壊事例からバッファ移動分析と統 計解析による要因抽出を行った。また要因の分析 とAHPのウェイト評価に積層棒グラフによる分析 と正規分布確率密度関数をもちいた過誤確率によ る手法を提案した。地すべり・崩壊それぞれにつ いてはAHP式加点モデルによる Susceptibility Map を作った結果,崩壊,地すべりを再現して良好な 結果が得られた。結果として崩壊と地すべりでは 要因を異にしていることがわかった。すなわち崩 壊は地形の要因が大きく,他方地すべりは地質要 因も効いている。なお,社会実装のためには保全 対象を加味し閾値を設定した危険度評価モデルの 構築が必要である。

# 参考文献

- Saaty, Thomas L.(1980) : The Analytic Hierarchy Process, New York, McGraw-Hill Book Company, 265p
- 濱崎英作、戸来竹佐、宮城豊彦(2003): AHP を用 いた空中写真判読結果からの地すべり危険度評 価手法、第42回日本地すべり学会研究発表会 講演集,pp227-230,日本地すべり学会誌,Vol.44, No.3, pp.1-11.
- Miyagi.T., Prasad.G.B., Tanaud.C., Potichan.P., Hamasaki.E,(2004) :Landslide Risk Evaluation and Mapping- Manual of Aerial Photo Interpretation for Landslide Topography and Risk Management -,Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, No. 66 ; September,pp75-137.
- 八木浩司,山崎孝成,宮城豊彦(2008): 岩手・宮 城県内陸地震で発生した東栗駒山東斜面の崩壊 と土石流,地すべり, Vol45, No.2, pp63-64.