類型化に基づく地震による斜面変動発生危険箇所評価手法の開発

報 告 書

(概要版)

	目 次
1	本受託研究の背景・目的
2	受託研究の内容1
3	研究実施体制
4	過去の地震による斜面変動発生事例の収集・整理
5	地形・地質要因の抽出
6	地盤解析9
7	· 誘因解析
8	要因評価手法の開発
9	危険箇所予測手法(地域スケール)マニュアル案骨子16
1	0 モデル地域の選定
1	1 結論と今後の課題

平成 25 年 2 月

公益社団法人 日本地すべり学会

1 本受託研究の背景・目的

最近 10 年間をとっても、わが国では 2004 年中越地震、2008 岩手・宮城内陸地震さらに 2011 年東北地方太平 洋沖地震とその誘発地震などで、中山間地や都市近郊の丘陵地において崩壊・地すべりなどの斜面変動による災 害が頻発し、甚大な牛命・財産被害を生じさせている。さらに、これらは、河道閉塞を生じさせ治水砂防上の大 きな脅威となるだけでなく、ライフラインをストップさせ、地震発生後の災害対応にも大きな支障を生じさせる。

東海・東南海・南海地震さらには活断層沿いの直下型地震での巨大災害が懸念される中で、災害予防・地震発 生後の迅速な対応による減災を図るために、地震による災害危険性の高い斜面を把握することは喫緊の課題であ る。ところが、これまで斜面変動による災害への対策や危険斜面の抽出は、豪雨・融雪に起因するものを主な対 象としてきた。

1995 年の兵庫県南部地震以降、地震予測及び過去の地震による土砂災害発生実態に関する研究が急速に進み、 想定される地震ケースに対する地震強さの予測や液状化などの地盤災害予測が進んできている。一方、(社)日本 地すべり学会では、地震による地すべり災害軽減を目的として平成21~23年度の3年間で地震地すべり特別研究 プロジェクト(以下、地震地すべりプロジェクト)を実施し、国内外の過去の地震による斜面災害の実態や発生 機構を把握してきた。

以上のような社会・行政・科学的背景から、今、地震防災対策推進のため、想定される地震による斜面変動発 生危険個所評価法を構築することが必要である。

そこで、本研究では、 国土交通省河川砂防技術開発研究課題「類型化に基づく地震による斜面変動発生危険箇 所評価手法の開発」として、国十交通省国十技術政策総合研究所より委託を受け、(公社)日本地すべり学会が以 下のような研究を行うものである。

研究目的

「さまざまな地形・地質・水文条件の地域に強震動を生じさせた東北地方太平洋沖地震での斜面変動発生事例と、 地震地すべりプロジェクトで収集された過去の地震による斜面変動事例を用いて、想定地震での影響地域で地震 動要因・地形/地質/土質等要因の組み合わせ評価により地震による斜面変動発生危険箇所を評価する方法の開発を 行う。|

2 受託研究の内容

2.1 河川砂防技術開発課題の全体計画

本研究では、国内外また歴史地震も含めて、これまでの地震地すべり発生事例を運動タイプ別に地形・地質・ 地震動 (震度・加速度・速度・周期や継続時間等)・隆水条件などの発生要因を統計的に解析し、それらの斜面変 動発生への寄与のしかたやその度合いについて評価する手法を開発する。また、その妥当性を物理的に検証する ため、斜面変動集中発生域で地震応答解析と斜面運動解析を用いて再現解析を行う。さらに、その評価手法適用 に必要な地形・地質データの取得手法・危険個所評価手法をマニュアル案としてまとめる。その際、モデルエリ アで危険個所評価マップを試作する。

以上を平成23-25年度の3年間で行う計画である。研究項目は、以下の通りである。

- ① 東北地方太平洋沖地震における斜面変動の類型化(平成23年度本課題受託研究で実施)
- 過去の地震を含めた斜面変動発生要因の評価

地形・地質要因、地盤解析による要因抽出、誘因解析(地震動、水文条件) (3) 要因評価手法の開発 危険度診断システムの構築、モデル地域での危険地域

・危険箇所マップ作成

④ 類型化に基づく地震による斜面変動危険個所評価マニュアル案の作成

平成24~25年度以降の研究計画概要は以下の通りである。

- a) 地形・地質要因の抽出: 地震地すべり研究プロジェクトの総括報告書に収録されている過去の地震と東北地 方太平洋沖地震及び誘発地震での斜面変動事例(以下、地震斜面変動事例)を、海溝型地震と内陸直下型地 震に分け、原文献にある斜面変動の発生場・運動タイプ・分布と地形・地質要因の関係を、GIS を用いて 統計解析し、発生要因を抽出する。その際、非発生斜面も含めて扱う。特に、集中発生と移動距離の大きい 地すべり発生が指摘される層状軟岩、埋没カルデラ・キャップロック・埋没谷・火山灰被覆丘陵等について は重点的に地形・堆積構造特性を明らかにする。
- b) 地盤解析による要因抽出: 地震斜面変動事例で, 地盤特性を考慮した応答解析結果と実際の斜面変動発生場 と地塊移動の関係から、斜面変動発生要因と長距離移動する地すべりの発生機構・運動過程を明らかにする。
- c) 誘因解析:各地震の特徴及び斜面変動発生筒所近傍での地震動および地震応答の各要素(加速度・速度・周 期・継続時間等)の特徴から、斜面変動発生や運動タイプに関係する地震動要因を GIS 解析などで抽出す る。次に、a)で重点的対象となるような斜面変動集中発生域で、地震応答解析とb)の運動モデルで変動事例 の再現解析を行うことで、運動タイプごとの斜面変動発生要因の妥当性を力学的に検証する。また、先行降 雨の多かった地震事例と少ない事例で流動化すべり発生数などを比較し、斜面変動発生に対する降雨・融雪 下での地震の影響も検討する。
- d) 要因評価手法の開発:想定される海溝型地震あるいは内陸直下型地震に対して、ある地域で斜面変動の起こ りやすい運動タイプ・発生危険度を評価する手法を開発する。抽出された評価要因を重みづけする診断シス テムとして、対象地域の地形・地質・地震動等の要因を与えることにより斜面変動発生危険性を評価する手 法を開発する。評価は、概略把握のための地域スケールのもの(1/20 万地勢図レベル)と、地区スケール のもの(1/25,000 地形図レベル)の2段階評価で考える。
- e) モデル地域での斜面変動危険地域マップ作成:東海・東南海・南海地震危険地域で、地質・地形帯の異なる 範囲を含む地域(静岡県などを想定)を抽出する。そのための現地調査を実施する。

2.2 受託研究内容

(1)研究名:平成24年度河川砂防技術開発研究課題 「類型化に基づく地震による斜面変動発生危険箇所評価手法の開発」 (2)研究委託料: ¥ 21,544,000-(3)業務期間:自 平成 24 年 8月 22 日 至 平成 25 年 2月 28 日 (5) 発注者: 国土交通省国土技術政策総合研究所 (6)受注者:(公社)日本地すべり学会 (7)研究の概要:国土交通省水管理・国土保全局では、地震により発生する深層崩壊、大規模地すべりによる 土砂災害を防止するため、その発生の予測手法・危険度評価等を行うための技術開発を必要としている。本 委託研究では、事例の要因解析や地盤解析等により、地震による大規模地すべり等の斜面変動の予測手法お よび地震により脆弱化した斜面変動の予測手法、そしてその危険度を評価する技術を開発するものである。

3 研究実施体制

3.1 研究組織

〒105-0004 東京都港区新橋 5-30-7 公益社団法人 日本地すべり学会 会長 檜垣大助 Tel/Fax 03-3432-1878, E-mail office@landslide-soc.org

研究メンバーは下記の通りである。

檜垣	大助	弘前大学 農学生命科学部 教授(研究代表者)
今泉	文寿	静岡大学 准教授(前筑波大学 助教)
井良泺	、 道也	岩手大学 農学部 教授
梅村	順	日本大学 工学部 専任講師
川邊	洋	新潟大学 農学部 教授
佐藤	岡山	帝京平成大学 現代ライフ学部 准教授
武士	俊也	土木研究所 土砂管理研究グループ 上席研究員
千葉	則行	東北工業大学 教授
綱木	亮介	(財)砂防地すべり技術センター 斜面保全部長
八木	浩司	山形大学教育学部教授
若井	明彦	群馬大学大学院 工学研究科 教授

3.2 主な活動

3.2.1 合同打合せ及び合同現地調査

業務の実施に当たり、実施方針や調査・研究の内容等の確認のために合同打合せを3回実施し、現象の共通認 識を得る目的で,原則,研究メンバー全員の合同現地調査を1回実施した。

種別 実施年月日 調査地·実施場所 主たる事項 事前調整会 $24/8/8 \sim 9$ 郡山市 既往事例のレビュー, AHP 解析に関す 議 るブレーンストーミング等 調整会議 24/8/29札幌市 研究内容及び分担の確認,研究方針に関 する討議等 三島市、伊豆市等 調整会議· 24/11/24報告書目次案の確認、執筆内容の確認・ 現地調査 ~ 25 調整, 地震による斜面変動の現地調査等 調整会議 25/1/26仙台市 執筆状況の確認、メンバー間の調整

表-3.2.1.1 合同現地調査及び調整会議の実施状況

3.2.2 意見聴取会

検討を進めるに当たって、特に地震による斜面変動の危険箇所の抽出手法については、学究的、行政的に高度 な判断が求められることから、丸井英明氏(新潟大学災害・復興科学研究所 所長)、吉松弘行氏(川崎地質(株))、 岡本敦氏(国総研砂防研究室 室長)を委員として意見聴取会を2回開催し,高所,大所からの助言を得ること とした。

【第一回意見聴取会】

日時:平成24年12月20日(月) 15:30~17:30 (社)斜面防災対策技術協会会議室

討議内容:

1.趣旨説明・・・研究代表者

2.資料説明及び意見聴取

2.1.地震時の斜面変動要因とその重み付け

- 2.2. 危険箇所の調査手法・抽出手法(第一次抽出)の妥当性
- 2.3.「地震地すべり危険箇所調査マニュアル案」(仮称)の構成案
- **3.**その他(次回日程等)

【第二回意見聴取会】

日 時 : 平成 25 年 2 月 4 日 (月) 16:00~18:00 (社)斜面防災対策技術協会会議室

討議内容 :

1.主催者挨拶・・・研究代表者 2.資料説明及び意見聴取 2.1.第一回意見聴取会の指摘事項と対応 2.2. 危険箇所の第二次抽出手法案 2.3.平成 25 年度に向けての予定 3.その他

4 過去の地震による斜面変動発生事例の収集・整理

4.1 既存資料の収集・整理

4.1.1 収集した資料

地震時斜面変動の発生に関わる地形・地質要因を抽出することを目的とした統計解析を行うために、斜面変動 を伴った地震事例について既存資料の収集・整理を実施した。収集する資料は、日本において科学的な記載がな されるようになった近代(明治時代)以降の研究論文等の文献資料とした。対象とした地震事例を表-4.1.1に示す。 各事例の地震諸元や発生時の気象条件、地すべり発生場の地形・地質条件について整理した。

表-4.1.1 文献調査の対象とした地震事例リスト

番号	地震事例	発生年月日
1	1964 年新潟地震	1964年6月16日
2	1968 年えびの地震	1968年2月21日
3	1968 年十勝沖地震	1968年5月16日
4	1970年日向灘地震	1970年7月26日
5	1974年伊豆半島沖地震	1974年5月9日
6	1975年大分県中部地震	1975年4月21日
7	1978年伊豆大島近海地震	1978年1月14日
8	1978年宮城県沖地震	1978年6月12日
9	1983年日本海中部地震	1983年5月26日
10	1984年長野県西部地震	1984年9月14日
11	1987年千葉県東方沖地震	1987年12月17日
12	1993 年釧路沖地震	1993年1月15日
13	1993年北海道南西沖地震	1993年7月12日
14	1994年北海道東方沖地震	1994年10月4日
15	1995年兵庫県南部地震	1995年1月17日
16	2001 年芸予地震	2001年3月24日
17	2003 年三陸南地震	2003年5月26日
18	2003年宮城県北部地震	2003年7月26日
19	2004 年新潟県中越地震	2004年10月23日
20	2007年能登半島地震	2007年3月25日
21	2007年新潟県中越沖地震	2007年7月16日
22	2008 年岩手・宮城内陸地震	2008年6月14日
23	2011年東北地方太平洋沖地震およびその関連地震	2011年3月11日

4.1.2 事例ごとの文献調査結果

表 4.1.1 に示した地震事例の文献調査結果を資料としてまとめた。この後の統計解析や AHP モデル構築を見据 えて、次のような項目について整理した。これらのうち、⑥については、可能な範囲で AHP の「重みづけ」に関 する考察を記載した。

①発生日

②最大震度,マグニチュード

③ 地震の特徴

④地震による斜面変動(地すべり・崩壊)分布を示した図の有無および斜面変動分布の特徴 ⑤地震による斜面変動に関する文献の有無(主に④が無い場合に記入) ⑥地震の特性(誘因)・素因と斜面変動の分布特性との関係

研究メンバーが各地震による資料分析を分担し、上記の資料から読み取れる地震時斜面変動要因についてブレ ーンストーミング会議を実施した。

4.2 文献調査からみた地震時斜面変動の発生要因

4.1 節に示した文献調査結果を表・4.2.1 にとりまとめた。ここでは例として一部を示す。

 地震名・主な被災県 	 ②発生年月日 マグニチュード 震度(地震発生場) 	③主な地震地すべり被災地	④文献調査から得られた要因
岩手・宮城内陸地震 (宮城県, 岩手県)	2008.6.14 M7.2 震度 6 強(内陸)	栗原市耕英地区 荒砥沢地すべり	火山の開析谷、キャップロッ 地すべり地では地すべりが再 地形的な要因が大きいのでは 開析された谷壁で浅層崩壊 る (地質的要因のほうが地震 上盤で発生.
東北地方太平洋沖地震 (東北〜北関東)	2011.3.11 M9.0 震度 7(海洋)	松島湾周辺 南三陸	中新世凝灰質シルト岩・軽石 新旧の海岸侵食受けた斜面で の発生は非常に少な 地形的に風化層の厚い場所で 注意の屋地告報(また三)
		福島県中通り〜栃木県北部・東 部	加盛の層状岩盤(相似岩) 埋没谷地形 スコリア・軽石層下の細粒火
長野県北部地震 (長野県,新潟県)	2011.3.12 M6.8 震度 6 強(内陸)	長野県栄村・新潟県津南町, 十 日町市	内陸直下型地震(M=6.7)で震源 新第三系泥岩・凝灰岩など主 融雪の進んでいない時期に発
福島県浜通りの地震 (福島県)	2011.4.11 M7.0 震度6弱(内陸)	いわき市	本震と 4.11 関連地震(M=7.0 変成岩では、岩盤クリープ斜

表-4.2.1 地震地すべり事例の文献調査結果一覧(一部)

分析結果を総括すると、小規模崩壊は傾斜など地形要因、大規模崩壊・地すべりは地質・地質構造などの要因 の影響が大きいと言えそうである(表-4.2.2)。

また、今回収取した資料のなかでは、高起伏山地や、変成岩など比較的硬質な地質から成る山地において、統 計解析やAHPで検証を行うのに十分なサンプル数が得られる事例がみられなかった。しかし、このような条件の 下で発生する地震時斜面変動の要因を分析することは、近い将来発生が懸念される南海トラフ沿いの巨大地震の 影響下にある地域などの危険度評価を実施するにあたり重要である。事例数としては少ないものの、個別の斜面 変動事例について過去の歴史地震の記録(井上, 2012)などを含めれば、これらの要因分析をさらに進められる可 能性がある。これは今後の課題である。

(AHP を考慮)
ク,逆断層の上盤,勾配の急な斜面,溶岩流の周縁部に多い
活動
(ただし崩壊と地すべりを分ける必要あり)
地すべりに関しては地質の影響大. 震源からの距離も影響するであろうが, 火山岩の縁辺部に集中す
の揺れよりも影響は大きい).地すべりのところが地すべり再活動が起こりやすいとはいえる.断層
凝灰岩分布域からなる丘陵
多い、遷急線付近とそのやや上で崩壊。縦断形が直線斜面で多く、尾根斜面も少しあり。谷型斜面で
い。傾斜 50 度以上。
は地すべり発生=低位海岸段丘崖、海岸段丘背後斜面など
山灰にすべり面(鋭敏な粘土で繰り返し軟化)
原断層から 10km 以内で地すべり・崩壊・土石流発生
体
生、同規模の中越地震に比べ斜面変動が少なかった。

)) で発生、後者では、内陸正断層の活動で断層から 10km 以内でほとんど発生(崩壊・地すべり) 面で崩壊・地すべり発生

表-4.2.2 文献調査から得られた地震時斜面変動の運動タイプごとの地形・地質要因

斜面変動の運動タイプ	地形要因	地質要因		
崩壊	地形勾配や凸型地形 斜面末端の被浸食性に関わ る要因	火山噴出物・風化花崗岩(マ サ)・第四紀の低固結砂な どの軟弱層に発生が多い		
地すべり 崩壊性地すべり	斜面末端の被浸食性に関わ る要因	(特に新第三系の)堆積 岩・旧地すべり堆積物の再 移動・流れ盤斜面・キャッ プロック構造を呈する斜面 などで発生が多い		

4.3 計測データから見た地震時の地すべり変動

4.3.1 はじめに

ここでは、計測データから見た地震時の地すべり変動という観点から、過去の研究結果と文献によるデータを 総括的にとりまとめた事例として、高橋ほか(2012)による報告を記載する。

4.3.2 地震時の観測データ収集・整理

(1) 東北地方の地すべり地におけるデータ収集

これまでの研究報告(阿部ほか,2006:森屋ほか,2009)をもとに、地すべり地6箇所とその後発生した地震 を加え、地すべり地に震度1から震度5強の地震が最大で11回作用した時のそれぞれにおける地表面変位(地 盤伸縮計・GPS など),地中変位(パイプ歪計・地中伸縮計など),地下水位変動の変動状況を一覧表にとりまと めた。対象とした地すべり地は、秋田県内と山形県内に存する地すべり防止区域である。地震は、2003年宮城県 沖の地震, 2008 年岩手・宮城内陸地震, 2011 年東北地方太平洋沖地震とその余震(2011 年 11 月 24 日まで), および 2004 年新潟県中越地震と 2007 年新潟県中越沖地震である。

(2) 文献からのデータ収集

2004 年新潟県中越地震の発生以降,平成 16 年から平成 23 年度までの日本地すべり学会誌,日本地すべり学会 研究発表会講演集、シンポジウム講演集等の報告事例より、地表面変位、地中変位、地下水位変動の変動状況を とりまとめた。

報告事例の多くは、新潟県中越地震や東北地方太平洋沖地震が1回作用した時の計測データであり、2回以上 の地震が作用した事例は2事例と少ない。なお、本稿で使用した震度は、気象庁震度データベースから検索した ものである。

4.3.3 結果と考察

地すべり地内の計測機器では、震度4以上での地震時に地表・地中・地下水位変動が捉えられる傾向にあり、 震度3以下では地表・地中・地下水位変動はみられない(図-4.3.3.1)。

地震による地すべり地の地表変動は、変位量が 0.1~1.0 mmと小さい場合でも、地すべりの移動方向に一致した 変位が発生する場合が多い。パイプ歪計や孔内傾斜計、多層移動量計の観測結果では、現在の確定すべり面、お よび旧期のすべり面深度付近で変位する事例が多くみられる。変位は一時的に発生する場合が多く、変位量の大 きさは震度によって異なっている。地すべり地の地下水位は、地震時に一時的に上昇または低下する現象が捉え られており、最大 7.5m の水位上昇や一旦上昇・低下した水位が地震前水位に戻らない場合も多くみられる。

すなわち、地震時における地すべりは、震度4程度の地震に対して計器上でのみ捉える事ができる程度の小さ な変動を見せている事が明らかになった。これらの事実は、阿部・高橋(1997)による震度5程度から小規模な 地すべりが、震度6程度以上で岩盤地すべりが発生し始めるとした報告に追加する形となる。逆に震度5以上で も変位が少ない地すべり地の場合には対策工の効果が含まれている可能性を示す。 問題点としては、粘性土地すべりや先第三系の破砕された回転性地すべりの事例が少ないことや、地震時の地

すべり地における地下水が様々な挙動を示していることなどがあげられる。



図-4.3.3.1 2003 年以降の主な地震における地区別の震度と地すべり活動状況

5 地形・地質要因の抽出

5.1 地震のタイプごとの地震による斜面変動発生場の類型化

斜面変動タイプと発生場の特徴から地震による斜面変動発生場の地形的な類型化をタイプごと(海溝型地震と 内陸直下型地震)に整理した。(表-5.1.1)

【海溝型地震にともなう斜面災害】

・高起伏山地の重力性山体崩壊が進行していた山体において崩壊あるいは崩壊性地すべりが発生する。

・丘陵や洪積台地内の風化火山灰埋積谷内で崩壊性地すべり、高速地すべりが発生している。

【内陸直下型地震に伴う斜面災害】

・傾斜 30 度以上となる急勾配の受け盤斜面において崩壊が多発する。

- ・末端部を浸食された地すべり移動体も流れ盤等の地質構造や旧すべり面の形状などの条件次第で大規模化し ながら再活動する。
- ・横ずれ断層の会合部付近では、押し込み側で発生する逆断層型の地盤隆起に前後して陥没型の大規模地すべ りが発生する場合がある。

嵀	大地形		t山	也			E	·陵			平野	
形ス	中地形	高起位	犬山地	中起伏	山地	火	砕流丘陵・	新第三系日	丘陵	洪積	台地	沖積平 野
ケ ー ル	小地形	クリープ 斜面	ゴルジュ	地すべり 地形	活断層 会名	膏末端・ 合部	ゴルジュ・ 海蝕崖	地すべり 地形	風化; 埋和	火山灰 漬谷	海蝕・ 段丘崖	
震海 溝	崩壊	+	+				0				0	
型	崩壊性地すべり	0	+	+			+	+	+	+		
地	地すべり								0	0		液
型内 地陸	崩壊	Ø	Ø	+			Ø				O	化化
震直	崩壊性地すべり	O	O	+			O	+			0	
下	地すべり	+	+	0	0	0	+	0	+			
	位置的条件	凸型斜面		末端侵食				末端侵食				
	◎:発生が著しい		〇:発生す	することが多	ड ा	+:稀に	発生					

表-5.1.1 地形要素と地震タイプとの対応における地すべり発生頻度

5.2 地震による斜面不安定化タイプ

平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震で,福島県内で発生した斜面変動と,それらに及ぼした地震動の影響 のしかたを考慮してみると図-5.2.1のように二つのタイプに類型化できる。

【進行型地すべり】

地震動の最大加速度に代表される、力に係る要素が斜面に作用したことで大きな変形を生じて潜在的なすべり 面で脆性破壊を起こし、進行破壊的にすべり面が発達して地すべり、斜面崩壊に至った、と考えられるタイプ。

【退行型地すべり】

地震動が長時間継続してせん断応力が繰返し作用して、大きな揺込み量や、間隙水圧の上昇を引き起こしたタ イプで、これは、地震動の累積エネルギーの大きさに係る要素が主として影響を及ぼすと考えられる。



図-5.2.1 地すべり・斜面崩壊に及ぼす地震動構成要素の概念

5.3 想定される要因-ブレーンストーミング結果と文献からみた要因-

地形や地質,地質構造についての要因に関する主たる項目は 4.2 節で述べたが,全体としてみると,小規模崩 壊は傾斜などの地形量が、大規模崩壊・地すべりは地質・地質構造の影響が大と判断される。

5.4 代表地震事例での崩壊・地すべり分布と GIS を用いた統計解析からの斜面変動発生と関連する要因の抽出 5.4.1 解析対象とする地震事例と斜面変動データ

統計解析を行う場合,目的変数となる地震地す -べりの発生個所が斜面スケールで特定できること や、統計処理に耐えうるある程度まとまった数の 地すべり・崩壊が発生している事例に対し、5.1 -節での類型化したタイプごとに要因の評価を行う ことが必要である。

4.1 節での検討から、上記の条件をできるだけ 網羅し、かつデータの取得性も考慮して、表 --5.4.1.1 に示す地震事例を選定した。

ス J. T. I. I 加町/州で177に地展事内								
地震事例	マグ゠チュード	分析対象地域の	解析対象とした斜					
地版中的	()=) = 1	地形・地質	面変動のタイプ					
2008 年岩手 · 宮城	M7.2	第四紀火山+堆積岩·山						
内陸地震	(直下型)	地	地すべり・朋感					
2004 年新潟県中	M6.8	第二至推辞出,后陈坤	ます。この正確					
越地震	(直下型)	- 第二ボ 堆 槓 石 ・ 止 陵 地	地すてり・朋塚					
1984 年長野県西	M6.8	答面约,500,0048	出唐					
部地震	(直下型)	弗四紀火田・田地	朋袋					
1978 年伊豆大島	M7.0(直下型;海底	未固結火山噴出物・丘陵	ます。この正確					
近海地震	の横ずれ断層)	地	地すてり・朋塚					
1974 年伊豆半島	M6.9	第三紀以前火山岩・第三	生たこのの正確					
沖地震	(直下型)	系堆積岩	地すてり・朋塚					
1968 年十勝沖地	M7.9	(八戸市郊外) 未固結火	出博					
震	(海溝型)	山噴出物・丘陵地	朋袋					

5.4.2 解析方法

5

地震時の斜面変動の発生状況を目的変数、それらの要因と考えられる地形・ 地質条件に関する値を説明変数とした統計解析を図-5.4.2.1 の検討フローに沿 って実施した。尚,解析に際し、10mメッシュを複数抱合するバッファ領域(検 索半径 R を有す円領域)をもとに解析した。

その理由として、10mメッシュだけでは対象となる地すべり(約100m以内)、 大崩壊、崩壊(幅 20~30m)とのスケールが一致しないこと、また"発生場"の 特性を明らかにするには、凸凹度や曲率や集水面積などの周辺地形量を含めた 広がりのある領域において意味をなす要因が多いからである。

地形・地質要因の指標とするために作成したデータの種類を表-5.4.2.2 に示 す。

	表-5.4.2.2	要因分枝	斤に用いた指標
分類	内容	単位	備考
	斜面の傾斜角度	0	
	地形の傾斜方向(12 方位)	-	1(北),2(北北東),3(東北 (西),11(西北西),12(北北
	集水面積	m ²	斜面の傾斜方向から累積
地形要因	谷次数	-	求める
	断面曲率	-	
	平面曲率	-	
	凸凹度	-	中心メッシュの周辺地形 絶対値で示したもの。
	地上開度	o	中心メッシュにおける地 示したもの
	地質分類(軟質~硬質)	-	20万分の1シームレス地 質)~7 (硬質)に再分類
心貝安囚	地すべり堆積物の分布	-	防災科研地すべり地形分
	斜面と地層の傾斜方向の差	0	小さいほど流れ盤がちな

素−5 4 1 1 統計解析を行った地震車例

北東),4(東)…10 北西) 責メッシュ数から



⑥に対する記伏を

也形的な開放度を

地質図凡例を1(軟 類したもの。 布図による 斜面

10m メッシュにとりまとめたデータを用いて、次のような分析を実施した。

図-5.4.2.13 に示したように検索半径 R におけるメッシュの地すべりないし崩壊の面積率を算出し、これを目的 変数とした。同様の範囲において、表-5.4.2.2 に示した各地形・地質要因について傾斜角度などの連続値は平均値 を、地質分類などの個別値は最頻値をとるなどの処理を行って目的変数とした。

次に検索範囲の中心をスキップ距離 L だけ移動させて、これを繰り返すことで解析範囲全体について上記のデ ータを作成し、<u>地すべり・崩壊の発生面積率と各要因の関係</u>を検討した。



検索半径 R とスキップ距離 L のとり方(図 -5.4.2.14)については、地すべりと崩壊で現象 のスケールが異なるためそれぞれ設定すること とした。地すべりはおおむね 10⁵m²以下、崩壊 は 10⁴m²以下のものが大半を占めるため、これ らを抱合する大きさの検索半径をとることとし た。

地すべりの解析には R=250m (面積約 1.96×10⁵m²),崩壊の解析には R=100m (面積 約 3.14×10⁴m²)をそれぞれ用いることとした。



半径 R とスキップ距離 L

5.4.3 解析結果

検索半径 R 内に入るバッファ領域内の全メッシュ数(メッシュ数×10m×10m=面積)に対する崩壊,地すべりの発 生メッシュ数の比を崩壊,地すべり発生面積率(%)として表し,各アイテムの度数に対して積層チャートや方位に 関与するものではレーダーチャートなどで表示して統計分析した。地震事例ごとに特徴を示す。

(1) 2008 年岩手・宮城内陸地震

崩壊面積率との関係では傾斜(図-5.4.3.2)・凸凹度・地上 開度といった地形要因の影響が強い。一方,地すべりでは(火 山地域以外での)地すべり堆積物,集水面積などの地質や地 下水関連の要因と一定の関係がみられた。地形要因では地上 開度と一定の関係がみられた。

(2) 2004 年新潟県中越地震

岩手・宮城内陸地震の場合と同様に,崩壊面積率との関係 では傾斜・凸凹度(起伏量)・地上開度といった地形要因の影 響が強い。一方,地すべりでは地質や地質構造(図-5.4.3.13) に関連する要因と一定の関係がみられた。地形要因では地上 開度と一定の関係がみられた。

(3) 1984 年長野県西部地震

崩壊面積率との関係では傾斜・凸凹度・地上開度といった 地形要因の影響が強い。また,旧地すべり地形の分布とほと んど一致しない点も含めて,類似した発生場での事例である 岩手・宮城内陸地震西部の解析結果と調和的である。

(4) 1978 年伊豆大島近海地震

伊豆半島南東部の被災エリアは斜面変動の特徴的から大き く4つのエリアに分けることができるが、その中で地すべり 性の斜面変動がおきた見高入谷エリアは、斜面方向,断面曲 率,地上開度,谷次数,集水面積,地すべりデブリ(図-5.4.3.22) と崩壊面積率との関係性がみられた。特に断面曲率,谷次数, 集水面積,地すべりデブリと崩壊面積率との関係は,他のエ リアと比較しても明瞭であった。

(5) 1974 年伊豆半島沖地震

崩壊面積率との関係が明確であった因子は、斜面方位、断面曲率であった。斜面方位(図-5.4.3.24)に注目した場合、南西方向で崩壊面積率が高い。断面曲率は、正の値が大きくなるほど(斜面の凸型形状が顕著なほど) 崩壊面積率が高い。



6



図-5.4.3.2 斜面の傾斜角度の分析結果の例

⁽²⁰⁰⁸ 年 岩手・宮城内陸地震)



図-5.4.3.13 斜面と地質の傾斜方向の差の分析結果の例 (2004 年 新潟県中越地震)



(1974年 伊豆半島沖地震)

(6) 1968 年十勝沖地震

緩斜面が広く分布しており、斜面傾斜が15°~25°の斜面域で崩壊は多発している。また、通常斜面崩壊が多発 しやすいとされている、傾斜 30°以上の斜面では、崩壊発生の割合は少ない。崩壊発生率からも、25°以上の斜面 からは発生率が横ばい、あるいは減少している。これは、崩壊予備物質とされている風化火山灰層が、25°~30° 以上の斜面に留まることが出来ずに流失していたためではないかと考えられる。

崩壊は浅い凹型斜面で発生割合が多い。特に水平曲率で顕著に見られる。(表-5.4.3.5) これは比較的傾斜の緩 い浅い谷斜面では、八戸浮石層(十和田八戸テフラ)が厚く堆積しやすい事、また、吉田・千木良(2012)が指 摘しているように、風化が進んで形成された粘土質軽石混じり火山灰が存在している可能性がある。また、先行 降雨による地下水滞留の影響を大きく受けている可能性が考えられる。

	n	平均值	最大値	最小值	標準偏差
全体	399557	-0.015	15.530	-12.770	0.870
発生	4263	0.212	11.410	-6.170	1.433
非発生	395294	-0.018	15.530	-12.770	0.861

表-5.4.3.5 崩壊発生・非発生別の水平曲率 10m メッシュ値の統計データ

また、八戸周辺地域で発生した崩壊は「板状崩壊」(上部谷壁斜面と下部谷壁斜面の境の遷急線付近から上部) 谷壁斜面が崩れるもの)と「丸のみ崩壊」(浅い谷型斜面で発生するもの)の2つに分類される。「丸のみ崩壊」 は風化の進んだ粘土質火山灰層の存在などで、地下水が集まりやすく先行降雨の多い条件で、地震動により土質 強度が低下した退行性すべり、「板状崩壊」は谷型斜面ではないやや凸状の斜面で地震力が効く進行性すべりであ る。従って、火山灰層の斜面変動は2つの異なる要因で発生したものの分布が混ざり合っているのではないかと 考えられる。

5.5 要因分析の結果

5.4節で実施した統計解析の結果と第4章で検討した文献調査から得られた地震時の斜面変動に関する地形・地 質要因について総括的にとりまとめたものを表-5.5.1および表-5.5.2に示す。伊豆大島近海地震は地すべりと崩壊 を区別せずに解析したが、ここでは崩壊の割合が大きかった梨本、白田、東伊豆海岸エリアでの傾向を表-5.5.1に、地 すべりの割合が大きかった見高入谷エリアでの傾向を表-5.5.2に示した。また伊豆半島沖地震では斜面変動の多くが崩 壊であったため、表-5.5.1 に傾向をまとめた。

統計解析においては、いずれの解析ケースでも既存の文献が指摘する要因と概ね整合する結果が得られた。す なわち、崩壊については文献において斜面勾配や地形の凸度(遷急線)などの地形形状に強く依存することが指摘さ れ、統計解析においても傾斜角や地上開度、凸凹度などの地形量指標と崩壊面積率との間に一定の関係がみられ た。地すべりについては文献において堆積岩地域での地質構造や旧地すべり堆積物の存在が素因として指摘され、 統計解析でもこれらの指標と地すべりとの間に一定の関係がみられた。また、地形要因として斜面末端部の被浸 食性の指標とした地上開度についても同様の傾向がみられた。これまで定性的に指摘されてきた地震に起因する 斜面変動の要因が、定量的に裏づけられたといえそうである。

以上より、表 5.5.1 および表 5.5.2 に示す地形・地質要因の指標としたデータを AHP の構成要素とすることで 地震時の地すべり・崩壊発生危険度評価を試みる。

表-5.5.1 要因解析結果のまとめ(崩壊の要因*1)

		地形	要因		地質要因			
解析ケース	傾斜角	地上開度	凸凹度	集水面積	地質の硬 軟分類	地形と地 層の傾斜 方向の差	旧地すべ り地形	
2008 年岩 手・宮城内陸 地震(北部)	0	0	0	×	×	-	×	
2008 年岩 手・宮城内陸 地震(西部)	0	0	0	×	×	_	-	
2004 年新潟 県中越地震	0	0	0	×	0	0	×	
1984 年長野 県西部地震	0	0	0	×	×	_	×	
1978 年伊豆 大島近海地震	Δ^{*2}	0	_	Δ^{*2}	Δ^{*2}	_	×	
1974 年伊豆 半島沖地震	×	×	-	0	0	-	×	
1968 年十勝 沖地震(八戸)	0	0	Δ^{*3}	×	0	-	-	
文献調査結果 のまとめ	地形勾配や に強く依存	緩急線などを	含め凸型地形	形など地形	火山性の軟 岩)、第四約 多い。	弱層、マサ 己低固結砂な	(風化花崗 ど軟弱層に	

表-5.5.2 要因解析結果のまとめ(地すべりの要因*1)

解析ケース		地形	要因		地質要因			
	傾斜角	地上開度	凸凹度	集水面積	地質の硬 軟分類	地形と地 層の傾斜 方向の差	旧地すべ り地形	
2008 年岩 手・宮城内陸 地震(北部)	0	Δ	Δ	Δ	0	_	0	
2008 年岩 手・宮城内陸 地震(西部)	×	Δ	×	Δ	Δ	_	_	
2004 年新潟 県中越地震	Δ	0	Δ	Δ	0	0	0	
1978 年伊豆 大島近海地震	×	×	-	0	×	-	0	
文献調査結果 のまとめ	末端の浸食(河川浸食)に絡む要因が強く関与している				堆積岩系が で旧地すべ	多く、特に新 りなどの再重	第三紀など カもある。	

を省略した。

*1 分析を行ったものの何れの解析ケースにおいても斜面変動と明瞭な関係がみられなかった要因については記載

^{*&}lt;sup>2</sup>関係のみられるエリアとみられないエリアがある。

^{*3}連続雨量で年間降水量の15%の先行降雨あり、浅い凹型にも多い。

5.6 現地調査などで明らかになった地震での発生要因と発生斜面変動特性

前節までに行った統計解析で考慮できなかった要因について、現地調査や追加の地形解析を行うことで、斜面 変動へ及ぼす影響について検討した。

検討対象としたのは1968年十勝沖地震,1978年伊豆大島近海地震,2011年東北地方太平洋沖地震である。

5.6.1 1968 年十勝沖地震





5.6.2 1978 年伊豆大島近海地震



図-5.6.2.4 崩壊発生機構と発生要因の模式図

5.6.3 2011 年東北地方太平洋沖地震

(1) 宮城県松島湾地域

松島湾周辺地域では 2011 年東北地方太平洋沖地震により 85 箇所において斜面変動が発生した。そのほとんど は崩壊で構成される。斜面変動の発生場の特徴として、①急傾斜地、とくに海食崖の遷急線を開析するように岩 **塊・**十砂が変動すること。②多くの発生場では共役な不連続面である層理・節理が見られることがあげられる。

GIS を用いた 50mメッシュでの地形要因と発生・非発生メッシュの関係から、最大傾斜 40°以上、起伏量 11~ 20m の地形条件で斜面変動が発生しやすいことが判明した。このような地形は、その多くが海食崖に相当する。 ただし、起伏量については 21~30 m、31~40 m での発生率も無視することはできない。したがって、傾斜 40° 以上、起伏量 11m 以上が地震による斜面変動発生の危険斜面(50m メッシュを対象)ということができる。

(2) 牡鹿半島周辺地域

石巻市街地周辺、牡鹿半島、一部女川町の斜面崩壊の実態を現地調査し、地質的特性と斜面崩壊の地質的発生 素因を大別しそれらの関係性を調べた。

崩壊した箇所は、主に牡鹿層群や稲井層群の集中しており、頁岩と砂岩で構成されているからなる硬軟瓦層分 布域に発生していることが分かった。また層理面あるいは節理面に沿って剥離した岩盤崩壊がほとんどであるこ とも明らかとなった。このように同じ方向性を持った明瞭な筋理が大きく関係して崩壊に至っているところもあ り、予測や危険度判定などの際に着目する点といえる。

(3) 福島県白河地域



図-5.6.3.15 崩壊発生機構と発生要因の模式図

5.6.4 火山灰被覆斜面における地すべり性崩壊の発生要因の比較

5.6.1~5.6.3の要素を表-5.6.4.1に整理した。

その結果、2011年東北地方太平洋沖地震の白河の事例と1978年伊豆大島近海地震の見高入谷の事例は、崩壊 発生の地形環境が上部谷壁斜面であること等共通点が多くあり、類似事例(上部谷壁斜面タイプ)ということが 出来る。一方で、1968年十勝沖地震は谷頭凹地で発生していることをはじめとして発生機構が異なり、異なるタ イプ(谷頭凹地タイプ)の現象といえる。これは、特に先行降雨の多寡の違いが大きいと考えられる。このこと は、地震によって発生する崩壊の発生メカニズム、流動距離等を考える際に、先行降雨の多寡を考慮する必要が あることを示している。

これらの発生危険度評価を行うためには、これらの斜面の要素について調査する必要がある。地形条件につい ては、LP 地形図判読, 空中写真判読によって地形分類図を作成するのが有効である。地質・十質条件については、 地上踏査、ボーリング調査等が考えられるが、既往の調査結果等を踏まえて効率的に実施する必要があると考え られる。

		1968年十勝沖地震 (八戸:丸のみ状崩壊)	1978年伊豆大島 近海地震(見高入谷)	2011年東北地方 太平洋沖地震(白河)	
	発生斜面	谷頭凹地	上部谷壁斜面	頂部斜面 上部谷壁斜面	
地形	地震動の増幅	-	尾根の末端斜面	尾根付近の遷急線	
	斜面不安定	-	脚部侵食 (下部谷壁斜面)	脚部侵食 (下部谷壁斜面)	
水文	地下水形成	多量の先行降雨、 谷頭凹地(集水地形)、 火山灰層(不透水層)	-	-	
	軟弱層の存在	_	古土壌(ローム)	風化テフラ 埋積谷	
地質	液状化(強度低下)	軽石質火山灰層? 砂質火山灰層?	?	?	
土質	硬軟境界への 応力集中	_	硬いテフラ層	硬いテフラ層 (Sr8、9)	
	連続したすべり面 の形成	-	斜面に厚く堆積したテ フラ(盤上のすべり)	斜面に厚く堆積した テフラ	

下部谷壁斜面の拡大によって脚部が侵食され て不安定化した頂部斜面から上部谷壁斜面が地 震により揺さぶられたことで、硬軟境界部に応 力が集中し、流れ盤による連続した弱層(風化 テフラ層)がすべり面となって地すべりが発生 したと考えられる。

頂部斜面から上部谷壁斜面には埋積谷があ り、そこに堆積していたテフラ層は風化が進行 して、弱層が形成されていたと考えられる。

表-5.6.4.1 崩壊発生要因の比較

6 地盤解析

6.1 地震による地すべり発生機構(数値シミュレーションによる再現解析)

6.1.1 被害の概要並びに地形的特徴

2011 年東北地方太平洋沖地震の本震(3月11日)時に白河市周辺で多数発生した移動距離の長い"流動性地すべり"の一つについて,動的弾塑性有限要素法に基づく数値シミュレーションを試みることで,地震動による繰返し載荷が斜面内の土のせん断強度を急速に低下させ,斜面を不安定化させるメカニズムについて考察する。

6.1.3 試料採取と室内力学試験およびモデル化

上述のすべり面付近の粘性土(砂分 21.0%,シルト分 40.8%,粘土分 38.2%;自然含水比 66.1%)をブロック 採取し,不攪乱試料による各種の室内力学試験を行った。その自然間隙比が高く(3.104~4.148),飽和密度が小 さい(1.369g/cm³)のは,軽石など空隙の多い成分を含むためである。

交番ではなく片振りの載荷条件とした。定圧試験ではせん断強度の低下量は限定的であった一方,非排水条件 下での載荷を想定した定体積試験の結果によると,発揮されるせん断応力すなわちせん断強度が載荷回数ととも に急激に低下する。斜面の浅い位置でのせん断,特に飽和度の低い領域でのせん断は前者に,深い位置での急速 せん断は自由な変形が強く抑制されるため相対的に後者により近い条件であることが考えられる。結果は,地震 動による繰返し載荷で著しく軟化する地層が,一定の深さ以深で生じやすいことを示唆しており,本現場の観察 事実と調和的である。

6.1.4 有限要素シミュレーション

発生機構を考察するため,動的弾塑性 FEM に基づく数値シミュレーションを 行った。本手法では新潟県中越地震の際 の,新第三系堆積岩の流れ盤斜面におい て発生した地すべりを再現解析してい る(若井他(2007), Wakai et al. (2010))。ここでは,その際に採用した 解析手法にならい,対象斜面の滑動方向 の二次元断面に関する有限要素モデル (図-6.1.4.1)を構築し,地震外力に対 する運動方程式を時間積分する時刻歴 応答解析を行った。

露頭観察等を参考に,砂礫層の上に粘 土質ロームを主成分とする未固結層を,

また、ローム層の中間部には前節で繰返し載荷時 の軟化挙動を把握した薄い凝灰質粘土層をモデル 化した。有限要素は 8 節点アイソパラメトリック 要素であり、見かけ上の分割格子の各辺中点にも 節点を有する高次変形に適した二次要素である。 斜面の上部には、後述の応答時刻歴を出力する節 点 A を指定した。







図-6.1.4.2 数値シミュレーションに用いた入力地震動

図・6.1.4.4(a)に地震後(地震動開始後 300 秒経過後) の斜面の変形性状を,図・6.1.4.4(b)に同じく最大せん断 ひずみ分布を示す。軟化する凝灰質粘土層を境にして, 上部土塊が大きく斜面下方に滑動している様子がよく わかる。これは地震動開始後 300 秒経過時点の変形図で あるが,図・6.1.4.3(b)からもわかるように,この後も土 塊の運動は継続するため,図・6.1.4.4 の各図は変形の最 終状態ではない。これらの状況は,観察された事実とほ ぼ一致する。

若井他(2007)にならい、下式で定義される安定性指標

F_dを考える。この値が 1.0 を下回る時, 斜面は地震によ

り滑動崩落(長距離移動)すると考えられる。

$$F_d = \frac{\sum R_f}{\sum T_s} \tag{6.1.4}$$

ここに、 ΣT_s : すべり土塊の自重に起因するすべり面上の滑動力、 ΣR_f : すべり面上で発揮されうる最大のせん断抵抗力である。 つの解析の場合、 ΣR_f はすべり面上の各要素のせん断強度の総 和と等しく、繰返し載荷とともに、徐々に低下する量である。 方、 ΣT_s は自重に基づいて求められる一定値である。震度法に基 づく安全率と異なり、地震中の慣性力等を ΣT_s 中には含めないこ とに注意されたい。このように、地震中にせん断抵抗が急減する ことで斜面の静的平衡状態が損なわれる状況を概念的に表したの が図-6.1.4.5 である。

図-6.1.4.6 では式(6.1.4)の指標の時刻歴を示した。初期に 1.0 を 大きく超えていた同指標の値は,地震とともに急速に低下し,地 震動開始後 110 秒前後の段階で 1.0 を割り込むことになった。こ の瞬間は,斜面内の軟化によって自重を支えきれなくなった瞬間 と一致しており,力学的には滑動崩落と長距離移動の発生するこ とが確定したことを意味する。

軽微な有限量の変状にとどまらずこのような長距離移動を伴う深刻 な事象が発生するか否かは,斜面の出口付近にある住宅等の安全性を 考える上で極めて重要であることはもとより,斜面が河川に接した場 合には河道閉塞の危険性を考慮することにもつながる。地震時の斜面 の安定性を考える場合,この指標値の減少幅を予測することは重要で ある。





図-6.1.4.6 安定性指標 Fd の時間変化

6.2 広域的な力学解析による危険斜面評価

6.2.1 有限要素法に基づく広域解析の位置づけ

本節では、動的弾塑性有限要素法に基づく力学解析を援用した広域的な危険斜面評価("鳥の眼"の検討)を試 みる。この評価手法は、地形・地質・水文・震度等の各基礎情報をもとにした簡易な一次スクリーニング手法に 比べて、さらに詳細な評価を行うことのできる高次の解析手法の一つと言える。入力地震動が実際の斜面地内で どのような増幅するか、またそれに伴う繰返し載荷と弾塑性変形が斜面にどのような加速度応答と残留変形およ びその引き金となる内部せん断応力を生ずるのか、といった観点をもとに、素因と誘因とがもたらす地すべり災 害の発生可能性を力学的に総合評価する解析手法であり、超広域を対象とした評価(全国あるいは全県下レベル など)と個別斜面の詳細検討との間を補間しうる現実的かつ柔軟な評価手法と位置づけられよう。

次項以降では、今回の解析対象とした 2011 年東北地方太平洋沖地震時の北関東地域の斜面災害の傾向を俯瞰し た後、それらを上記手法に基づいて分析した結果を紹介する。

6.2.2 北関東地域(本節の解析対象)の斜面災害の全体的特徴

斜面変動の分布を変動種別ごとに整理すると、それらは広域的 な地形区分と相関していることがわかる。岩盤崩壊・落石は八溝 山地や足尾・日光山地の周辺に多く、地すべりの類は段丘の発達 する郊外の丘陵地あるいは平野の縁辺部、表層崩壊・がけ崩れは 局所的な急岸地形の多い地域に目立つ。

以上の議論を,地質的な観点から改めて整理すると,特に目立 つのが栃木県中・東部ならびに同県北部に多発した地すべり群で ある。これらの多くは、尾根・段丘の頭部といった地震動の増幅 しやすい微地形に加えて、同地域に発達する厚い風成ローム層中 の粘土層(乳白色凝灰質粘土など)の繰返し軟化が地すべりの直 接的原因となったもので、集水地形もこれに手伝って、いずれも 高い流動性を有した崩壊土砂が長距離移動して斜面下部に甚大な 被害を与えている。

この地域の風成ローム層中への挟在が広く確認されているこの 種の凝灰質粘土は、軽石等がそれらを挟在する粘土質ロームとと もに層状に強風化したものであると考えられ、一般に液性限界と 図・6.2.2.3 ローム層厚の分布と斜面災害箇所との ほぼ等しいかそれを上回るほど高い自然含水比を有していること

から、地震動等による攪乱の際、容易に強度を消失して流動化する危険性が高い。これと関連して、図-6.2.2.3の ように、栃木県内のローム層の堆積厚さ分布(栃木県、2011)を図-6.2.2.2 に示した地すべりの発生地点と比較 すると、特に堆積の厚い栃木県の中・東部(那須烏山市や高根沢町の周辺)ならびに北部(白河市の南側に位置 する那須町など)における地すべり頻度との相関が高いことがわかる。

6.2.3 栃木県内の一部地域の広域的解析(三次元動的弾塑性FEM)の事例

本報告では、地震時斜面崩壊リスクを評価するための有限要素法に基づく広域被害予測システム(若井ほか、 2008)を用いて、東北地方太平洋沖震において流動性地すべりが多数発生した栃木県の一部地域を対象にした危 険度評価を試みる。対象地域の地形・地質に関する情報を GIS により集約するともに、近傍の Kik -net 観測記録 (防災科研)を工学的基盤に引き戻した地震動波形を用いて、地域全体の地震応答特性等を FEM により解析的に 調べた。



相関性(栃木県内)

6.2.4 解析結果と実際の地すべり箇所との比較

観測地震動波形と整合するような入力の条件測地震動波形と整合するような入力の条件下、得られた結果を以 下に示す。地震中の表面応答加速度 (水平合成分)の最大値の分布を図・6.2.4.1 に示す。図中の黒丸は実際に地 すべりが発生した地点であり、特にローム段丘付近に多い。解析結果では尾根や段丘付近で特に増幅が見られる。

一方,異なる地質の境界付 近で加速度の増幅が確認され るのは、固有周期の相違によ る位相差の影響と思われる。 同様に、地表付近(地表の有 限要素)の地震中の最大(八 面体) せん断応力の最大値の 平面分布を図-6.2.4.2 に示す。 実際の斜面災害地点(黒丸) と一定の相関性が見られる。

以上について精査するため, 図中の A の箇所についてのみ 拡大図を図-6.2.4.3 と図 -6.2.4.4 に示す。図中に地すべ り発生箇所を示した。地すべ り領域の上部に当たる部分で 特に加速度の増幅する傾向が ある一方,その斜面の下部(谷 側)ではせん断応力の蓄積が



図-6.2.4.1 解析結果(地表面の最大水平加速度分布)



図-6.2.4.2 解析結果(地表層の有限要素中の最大せん断応力分布) 図-6.2.4.9 解析結果の拡大図(最大せん断応力分布)

頭在化する傾向が見られる。他のいくつかの地すべり地点についても同様の傾向が見られた。このような地形・ 地質的条件を考慮した地すべり危険度の広域的評価手法は、中山間地が強震動を受けた場合の斜面災害リスクを 事前評価するために有効と考えられる。

6.2.5 広域解析による地震地すべり危険斜面の抽出(概念図)

崩壊する斜面 前項で拡大図として示した箇所の地すべり地点など、多くの地すべり 加速度の増幅 箇所を全体的に俯瞰すると次のようなことがわかる。このような地すべ せん断応力の増大 り状の崩壊の発生した斜面を挟むように隣接して、斜面上部では加速度 (塑性域の拡大) の大きな箇所が,斜面下部ではせん断応力の大きな箇所の存在する場合 が多い。以上のことは、図-6.2.5.1のように考えると理解しやすい。地 震時に斜面が崩壊する場合,その引き金となる大きな地震慣性力が斜面 に作用することが前提となる。加速度の増幅が顕著な斜面において、特 に慣性力が大きくなる、また、実際に斜面が崩壊するか否かは、作用し た慣性力により、斜面内にすべり機構の形成を促すようなせん断応力が 地震動 発生するかどうかで決まる。既往の斜面の動的弾塑性 FEM 解析で指摘さ 図-6.2.5.1 地震による斜面崩壊の機構に関する概念図 れているように、せん断応力ないし塑性領域の発生は、一般に斜面下部 から始まるので、今回のように地すべり状の崩壊の生じた斜面の下部で、特に大きなせん断応力の発生する解析 結果が得られたのだと考えられる。加速度分布およびせん断応力分布と実際の地すべり地点との相関性に関する 上記の傾向を利用することで、崩壊危険度のより高い斜面を広域中からある程度選別できる可能性がある。





図-6.2.4.8 解析結果の拡大図(最大水平加速度分布)





7. 誘因解析

7.1 東北地方太平洋沖地震による地震動の特徴-岩手・宮城内陸地震との比較を通して-

岩手・宮城内陸地震時に多数の崩壊・地すべりが発生した岩手・宮城県境付近、両地震時に同じ火砕流台地で 地すべりが発生した宮城県築館付近、東北地方太平洋沖地震時に地すべりが多発した福島県南部を対象に、各地 区における両地震による地震動の特徴とその崩壊・地すべり発生との関係、さらに直下型と海溝型の地震による 地震動の性質にどのような違いがあるのか、などについて検討する。

7.1.1 岩手宮城県境付近地震動、宮城県築館付近及び福島県南部の地震動

表7.1.1に最大加速度や卓越周期などの諸元を示す。

145 145	規測占名	the get	深度(m)	対象波形	古位	最大加速度	卓越周期	表層の増幅	100gal以上 の継続時間	最大速度	卓越周期	水平面内での	の 3成分合成値		債考
-15 -44	105/90/201	*0/JR	24.02 (111)	×) (\$4,42,10	77152	(gal)	(秒)	周期(秒)	(粉)	(kine)	(秒)	卓越振動方向	PGA(gal)	振動方向	1973
					NS	1036	0.05	0.18, (0.13)		37.5	(1.2), ~3.0				
			地中(260)	全体	EW	748	0.06	0.43, (0.13)	13	34.1	1.2~	- 1	1078	-	
	一関西	m			UD	681	~0.08	0,10, (0,21)		56.0	1.5~				
	(IWTH25)				NS	1143	0.10~	-		66.9	~1.3			U-D	
			地表	全体	EW	1433	~0.14	-	20	62.7	0.5~	(E-W)	4022	2 (積円体の長輪 がややNE-SW	
					UD	3866	0.06~			74.8	0.2			に傾く)	
					NS	67.2	0.10	0.36. (0.46)		4.7	1.70			(やや楕円体の	
				第1波(40~60秒)	EW	51.8	0.08	0.72, (0.11)	0	4.7	1.90	-	79	長輪がUS-DN 方向に傾く)	
			地中(263)		UD	49.4	0.08	0.06, (0.10)		4.1	0.85			77Pittine C	ボーリング柱状
					NS	64.3	~0.10~	0.52. (0.40)		6.6	1.80~		84	-	国は別国
				第2波(80~110秒)	EW	65.3	0.20	0.34. (0.79)	0	6.2	1.50~	(E-W)			
	一関西2	2			UD	57.7	0.14	0.053, (0.28)		6.7	~2.80~				
岩毛・宮城	(IWTH28)	-		第1波(40~60秒)	NS	266	0.13		(H)14	10.2	0.40		298	-	
県境付近					EW	272	0.10	-	(V) 8	15.3	~0.80	(E-W)			
			地表		UD	152	0.09			6.0	0.75~				
					NS	199	0.1. (0.4)		- 20	14.4	~0.50			4 –	
				第2波(80~110秒)	EW	289	0.12	-		16.6	0.80	-	304		
					UD	156	0.08			8.2	2.80				
		~		•	NS	740	0.17	(H)1 (V)1	(H)18	45.3	(0.17), ~4.0~		812	(NE-SW)	
		œ	地衣	全体	EW	678	0.18		(V)12	38.7	3.5	(NE-SW)			
					UD	224	0.10			14.7	2.0				
	签館				NS	1320	0.15			43.4	0.17				0~-1m:粘 作土
	(MYG004)			第1波(40~60秒)	EW	941	0.15	-	20	49.7	0.23	N-S	1521	N-S	-1 ~ -10m:
		2	地表		UD	634	0.09			12.3	0.09, (2.3)				名张
				AT A 24 (A A	NS	2700	0.23			111	0.23			N-S	
				第2波(90~110秒)	EW	1269	0.22	-	20	49.6	0.22	N-S	2933	(UD成分も比較 的大)	
<u> </u>					NC	1880	0.12	0.25 (0.22)		34.2	0.12		<u> </u>		
			# + (000)	main(110, 1105b)	NS	180	~	0.25, (0.23)	(H)13	10.0	0.5, (4.0)	(1) (2)			
			地中(200)	第3波(110~140秒)	EW	135	(0.10) 0.20	0.21. (0.17)	(V) 0	9.6	(0.5), 2.4	(N-S)	199	DNNW-USSE	
福島県南部	 (FKSH10)	2			NC	1062	(0.12), 0.2	0.094, (0.12)		12.8	(1.0), 1.4		<u> </u>		ホーリング柱状 図は別図
			经表	第2次(110~140秒)	EW	740	0.25	_	20	36.2	0.25	(NNE-SCM)	1335	()空直真上から NNEやSSWIに傾	
			地表	第53版(110~140秒)	LID	/08	0.20		30	31.2	0.20	(INE - 55W)		³ いた方向の突上 げ)	
					00	1016	0.13			Z4.5	0.13			.,,,	

) 岩手・宮城内陸地震(2008/06/14-08:4) ② 東北地方太平洋沖地震(2011/03/11-14:46)

表・711 地震動の特徴

7.1.2 直下型と海溝型の地震に起因する地震動の比較

(1) KiK-net (一関西および一関西2)における直下型と海溝型の相違

海溝型の加速度の卓越周期は、地中では直下型の2~3 倍であり(直下<0.08 秒<海溝)、地表ではほぼ同程度 になっている(表層の固有周期の影響か)。地中で異なるのは、直下型や海溝型による違いというより、震源距離 の長短の影響であろう。また、加速度と速度の大きさは、直下≫海溝となっているが、これは勿論震源距離の違 いによるものである。一方、卓越振動方向に特徴はない。強いて言えばどちらも E-W で、断層(海溝型の場合は 海溝軸)の走向(NNE-SSW)にほぼ直交している。地震動から見て、直下型地震と海溝型地震の違いは、単に震 源距離の違いに帰すことができるようである。

(2) K-NET(築館)の地表における直下型と海溝型の相違地表における加速度の卓越周期は、一関西と同様、直 下型と海溝型でほぼ等しい。これは表層の固有周期の影響と考えられ、地震の型は関係ない。卓越振動方向は、 直下型(NE-SW)も海溝型(N-S)も、断層(海溝型は海溝軸)の走向(NNE-SSW)にほぼ平行している。ここ でも、直下型と海溝型の違いを裏付けるデータはない。

7.2 地震動と大規模崩壊

7.2.1 近年のいくつかの大地震とそれによる大規模崩壊の事例 事例;5(1999 台湾・集集地震、2004 新潟県中越地震、2008 中国・四川地震、2008 岩手・宮城内陸地震、2011 東北地方太平洋沖地震)これらの諸元を表 7.2.1.1 に示す。

	林带女		断層面				助味る 断層線との		最寄の観測点における地震動〈水平動〉					崩壊規模 崩壊面	崩壊面	地 留 その他の				
NO.	地震名	M	タイプ	長さ (km)	走向	傾斜	用碳名	位置関係	観測点位置	PGA (gal)	fp (Hz)	PGV (kine)	fp (Hz)	振動卓越方位	継続時間 (s)	(m³)	方位	(f)斜 ([*])	电真	特徴
	台湾・集集		直下型			2015	草嶺	断層線南端 から上盤側 に約5km 投影断層面 内	CHY080 草嶺 (1km)	842 (NS)	1.2	96 (NS)	1.2	NE-SW	35	2.4 × 10°	sw	10 ~ 15	(新第三紀)堆積岩 砂岩頁岩五層	UD大 (716gal) 流れ盤•座屈 地すべり地影
ľ	(1999)	1.7	逆斷層型	80	NNE-55W	30 E	九份二	断層線中央 から上盤側 に約15km 投影断層面 内	TCU089 (6km)	348 (EW)	3.0	45 (EW)	-	(E-W)	35	3.5 × 10'	SE	20 ~ 25	(新第三紀)進積岩 夏岩	読れ盤 座屈
2	新潟県中越 (2004)	6.8	直下型 逆断層型	20 ~ 25	NNE-SSW	50° W	東竹沢	断層線中央 から上盤側 に約7km 投影断層面 内	NIG019 小千谷 (10km)	1308 (EW)	1.5	120 (EW)	-	_	20	>10	WNW	15 ~ 20	(新第三紀)堆積岩 シルト岩 砂質泥岩	UD大 (320gal) 流れ盤 地すべり地形
3	中国・四川 (2008)	8.0	直下型 逆断層型	300	NE-SW	50° NW	大光包	断層線中央 から上盤側 に約20km 投影断層面 内	MZQ 清平 (12km)	824 (EW)	1.1 (等価)	122 (EW)	1.1 (等価)	-	40	7.5 × 10 ⁸	ENE	35	(原生代)白雲岩 (古生代)石灰岩 砂岩・泥岩・頁岩	UD大 (623gal) (流れ盤) (地すべり地形)
4	岩手・宮城内陸 (2008)	7.2	直下型 逆断層型	40	NNE-SSW	40° W	荒砥沢	断層線から 上盤側に約 10km 投影断層面 内	IWTH025 一関西 (12km)	1433 (EW) 1036 (NS)	7.1- 20	67 (NS) 38 (NS)	0.77- 0.33-	(E-W) —	35 30	6.7 × 10 ⁷	SE	0~2	(新第三紀)火山岩 砂岩・シルト岩 軽石賃凝灰岩	UD大 (3866gal) 地すべり地形 湖成層
5	東北地方太平洋沖 (2011)	9.0	海満型 逆断層型	500	NNE-SSW	10° W	葉の木平	海溝軸から 上盤側に約 260km 投影断層面 外	FKSH10 西郷 (13km)	1062 (NS) 180 (NS)	4.0 3.3	36 (NS) 17 (NS)	4.0 2.0	(NNE-SSW) (N-S)	155 135	3.0 × 104	NE	10 ~ 20	(第四紀)火山岩 スコリア・軽石 火山灰質粘性土	地表部での UDの増幅大 (86→1016gal)

表-7.21.1 地震による大規模崩壊と誘因となった地震動の特徴

表からは、次のことが読み取れる。

○崩壊面傾斜が20°以下の緩傾斜地で発生する事例が多い。 ○元の斜面が流れ盤構造か、地すべり地形で多く発生する。 ○地表の UD 成分が極めて大きい(表層での増幅が大きい)斜面で発生する事例が多い。 ○堆積岩地帯では<3Hz、火山噴出物地帯では>3Hz の卓越周波数の地震動が効いているように見える。あるいは、崩 壊規模の方が効いているのかもしれない。概して規模の大きい崩壊には低周波数(長周期)の地震動が対応しており、 とくに、108 m³を超えるような大規模崩壊には、1Hz を少し超える程度の比較的長周期の地震動が対応している。

7.2.2 地震エネルギーと崩壊規模

(PGV)²×Tdと崩壊規模の関係を 図 7.2.3.2 に示す。東竹沢を除く5 か所の崩壊は、一本の曲線に載って いるように見える。この5か所の崩 壊を滑らかに結んだ曲線を、地震エ ネルギーに対する崩壊規模の上限 を示す包絡線と考えることができ る。地震エネルギーがどんなに大き くなっても(地震の規模自体に上限 があるが)、崩壊規模は頭打ちにな

表-7931	抽雪
34 1.2.0.1	20/15

			2	1							
No.	地震名	崩壊名	PGA (gal)	Tp (秒)	PGV (kine)	(PGV) ² (kine ²)	Tp (秒)	(PGV) ² × Tp	主要動 継続時間 Td (秒)	(PGV) ² × Td	崩壊規模 (m³)
1 台演 (1	台湾・集集	草嶺	842	0.83	96	9.2E+03	0.83	7.6E+03	8	7.4E+04	2.4E+08
	(1999)	九份二	348	0.33	45	2.0E+03	-	6.6E+02	20	4.0E+04	3.5E+07
2	新潟県中越 (2004)	東竹沢	1308	0.67	120	1.4E+04	-	9.4E+03	6	8.4E+04	1.0E+06
3	中国・四川 (2008)	大光包	824	0.93 (等価)	122	1.5E+04	0.93 (等価)	1.4E+04	16	2.4E+05	7.5E+08
4	岩手・宮城内陸 (2008)	荒砥沢	1433	~0.14	67	4.5E+03	~1.3	5.9E+03	10	4.5E+04	6.7E+07
5	東北地方太平洋沖 (2011)	葉の木平	1062	0.25	36	1.3E+03	0.25	3.4E+02	15	2.0E+04	3.0E+04

り、10°m³を超える崩壊は起こらないことを示している。崩壊を起こす斜面の広がりには地形的な制約があること も原因であろう。新潟県中越地震時の東竹沢では、地質・地形的条件が許せば、実際の100 倍を超える土量の地 すべりが発生する可能性があったことが、図-7.2.3.2 から読み取れる。 $(1/2) \rho$ (PGV)²×Td は、単位体積の斜

(動の諸元と地震エネルギーに関する計算過程)

面の土が、地震の主要動を受けている 間に得る弾性エネルギーである。この エネルギーにより斜面の土が移動す るかどうかは力学上の問題であるが、 受けるエネルギーが大きいほど、単位 体積の土の移動する確率が高いと考 えると、それだけ大きな体積の土がま とまって移動する確率が高くなる。

7.3 地震の規模と崩壊分布

崩壊の規模と頻度分布に関しては、 誘因の如何に関わらず、大規模な崩壊 ほど発生頻度が少なく、小規模なもの ほど多発するというのが、ほとんどの 災害地に見られる一般的傾向である。地震も 崩壊も同じ地殻物質の破壊現象と見なせば、 崩壊の発生頻度は崩壊規模の指標 Is(=log S)とともに指数関数的に減ると考える。

四川地震のリカレンス・カーブは。4.2≤ I s ≦ 5.8 の範囲を直線近似すると、log N (Is)=11.5-1.97 Is (r=0.994) が得ら れ最大規模の崩壊はS=10^{5.8}=6.3×10⁵ m² を示す。

7.4 海溝型地震・内陸直下型による発生場 の比較

7.4.1 対象地震



3.11 プレート境界型地震と 4.11 内陸直下型地震を誘因として斜面変動分布にどのような差異があったか傾向 をつかんだ。

7.4.2 斜面変動の特性と分布

空中写真判読によって作成したいわき市周辺の斜面変動分布図を震度分布、加速度分布および地質図に重ねた ものが図-7.4.2.1 である. 斜面変動は地すべりおよび崩壊に分類している。また、それぞれの斜面変動は3月 11 日に発生したものと4 月 11 日に発生したものに分けて示してある 2)。震度分布と最大加速度分布についても、 それぞれの地震によるものを表現している。3月11日の地震による地すべりと崩壊はそれぞれ17箇所と82箇 所、4月11日の地震による地すべりと崩壊はそれぞれ36箇所と675箇所となり、後者の地震でより多くの斜面 変動が生じたことがわかる。また、3月11日のそれは全体に散在しているのに対し、4月11日のものはある特 定の範囲に集中して分布しているようにみえる。具体的には、湯ノ岳断層を境に南東側と断層南東端部の北東側 また塩ノ平断層の西部には集中して斜面変動箇所が分布する。上記2 断層はともに正断層型であり、断層の上盤 側で震度・加速度ともに高くなること、それにあわせ斜面変動の発生数も増加することが把握できる。地すべり だけに注目すれば、古第三系のみならず中新世堆積岩での発生も多く、図-7.4.2.1 C-2 の青破線で囲った範囲に 集中する。一方で、変成岩類での地すべりは限定される.4月11日の地震による斜面変動分布は、断層の動きと 岩質に制約されている。







7.5 斜面に働く振動の 影響評価

7.5.1 評価手法

誘因の地震は、広い範 囲がほぼ同じ計測震度 となり、斜面毎の差とし て現れがたく、全般に危 険側ヘシフトさせる作 用がある。地震動の誘因 ファクタとしての定量 的表示方法について検 討した。

7.5.2 平成 23 年度東北 地方太平洋沖地震での福 島県内火山灰分布域で発 生した地すべりから得た 知見

地すべりや斜面崩壊に 及ぼす地震動の影響を整 理すると、一つは、地震 動の最大加速度に代表さ れる、力に係る要素が斜 面に作用したことで大き な変形を生じて潜在的な すべり面で脆性破壊を起 こし、進行破壊的にすべ り面が発達して地すべり、 斜面崩壊に至った、と考 えられるタイプ(進行型



図・7.4.2.1 3月11日および4月11日に発生した斜面変動分布と計測震度、最大加速度および地質との関係 A·1:3月11日の地震の計測震度と斜面変動分布,A·2:4月11日の地震の計測震度と斜面変動分布。B·1:3 月11日の地震の最大加速度と斜面変動分布。B-2:4月11日の地震の最大加速度と斜面変動分布。C-1:地 質と3月11日に発生した斜面変動分布。C-2:地質と4月11日に発生した斜面変動分布。

地すべり)である。もう一方は、地震動が長時間継続してせん断応力が繰返し作用して、大きな揺込み量や、間 隙水圧の上昇を引き起こしたタイプで、これは、地震動の累積エネルギーの大きさに係る要素が主として影響を 及ぼす(退行型地すべり)と考えられた。

7.5.3 誘因ファクタとしての地震動の定量的表示方法の検討

地震動の定量的表示方法に係 る検討は、東北地方太平洋沖地震 の際に福島県内で地すべりの発 生が集中した、白河市、および、 いわき市を対象に実施した。その 流れを、図-7.5.3.1 に示す。



図-7.5.3.1 地すべり危険度評価用地震誘因マップの作成手順

7.5.4 最大加速度ベクトルマップ・Arias Intensity マップの作成過程と作成例



3.000 - 5.999 6.000 - 8.999 9.000 - 11.999 12.000 - 14.999 15,000 - 17,999 18.000 - 20.999 21.000 - 23.999 24.000 - 26.999 27.000 - 29.999

図·7.5.4.10 白河市の傾斜角区分図

図・7.5.4.12 白河市の傾斜方向区分図

7.5.5 作成したマップに関する2、3の検討

図-7.5.5.1、図-7.5.5.2 に示した最大加速度ベクトルマッ プとの対応では、adip(傾斜方向) マップ、anor(斜面に垂 直な法線方向) マップとも、幾つかの発生箇所でそれらの値 が周囲に較べて高い傾向にあり、その寄与度が高いと判断され た。



図-7.5.5.1 本震での自河市の adip マップと地すべり発生箇所の対応



図·7.5.5.2 本書での白河市の anor マップと地すべり発生箇所の対応

7.5.6 まとめ

凡例

本震最大加速度

191.42 152.73

112.39

0

凡例

平地(-1)

北 (0-22.5)

北東 (22.5-67.5

東(67.5-112.5)

南東 (112.5-157.5

南(157.5-202.5)

南西 (202.5-247.5

西 (247.5-292.5)

重 (337.5-360)

北西 (292.5-337.5)

133.93

- a) 東北地方太平洋沖地震で得られた知見から、最大加速度ベク トルと Arias Intensity を用いた表示を試みたところ、GIS 上でうまく表示することができた。
- b) 東北地方太平洋沖地震での地すべり発生箇所と対応させた ところ、「進行型」と分類した地すべり発生箇所と最大加速度 ベクトルマップの対応が良かった。一方、「退行型」に寄与す ると考えた Arias Intensity マップとの対応は薄く、ほぼ予 想通りに評価され、

統計手法での解析では寄与度が高くなることが示唆された。

c) 最大加速度ベクトルマップ、Arias Intensity マップとも、 斜面傾斜角と方向の関数であるが、素因ファクタとしての斜 面傾斜角、および、方向と、誘因ファクタとしての最 大加速度ベクトル、Arias Intensity は、評価対象が異なるの

で、合理的に従属性はないと判断された。

d) いわゆる「海溝型」と「内陸型」の揺れの違いを、本検討手 法では表現できなかった。これは、振幅スペクトル比から震 央域の影響よりも、震源からの距離に依存しているためと考 えられ、対象とする地震動の周期帯を含めて、今後さらに検 討が必要である。

e)本検討の手法は、他地域への適用も可能である。

7.6 いくつかの地震での斜面変動の先行降雨条件及び融雪の影 響について

先行降雨有りとして評価された事例:中越地震、十勝沖地震。 先行降雨無しとして評価された事例: 岩手・宮城内陸地震、東日 本大震災。

図 7.6.5.8 から、1968 年十勝沖地震の崩壊地の H/L (等価摩擦 B7.7.3.1 A: 開査地の地形学図 B: 満状凹地 d2 C: 地点 w1の隆起番 D: 調線 abc 係数)と斜面勾配(h/1)の関係、崩壊高と崩土到達距離の関係に おいて分析した結果、崩壊した土砂は流動化した特徴を示していることがわかった。

7.7 内陸直下型地震による特殊な事例(川越え地すべり)

地形図に示した地すべり地形と文書記録に残された地形描写はよく対応しており、調査地では北伊豆地震の地 震動によりスランプタイプの地すべりが発生したと考えられる。すべり面は城川の河床下に位置することから、 対岸を隆起させる「川越え地すべり」となった。本研究により、地震時にも川越え地すべりが発生する履歴があ ることが明らかとなった。なお、当該地すべり地形の頭部には地すべり活動によって形成されたと思われる溝状 凹地 d-2 が存在しており、その形成期は北伊豆地震を遡る。これは、北伊豆地震以前にこの地すべり活動した時 期があり、北伊豆地震時にはその際に形成されたすべり面を活用して再活動した可能性も指摘できる。これを明 らかにするには、より詳細な地質調査等が必要となるが、調査地周辺において斜面上あるいは段丘状の地形面上 における凹地の存在が地震にともなう川越え地すべり発生の指標のひとつになることを提案しておく。

13



8. 評価要因手法の開発

8.1 AHP法(階層型分析法)を用いた評価

十分な経験値や根拠となるデータを用いて、図 8.1 の手順に 沿って分析し、整合性のある重みづけを行って AHP の合計点 を求める。地すべりと崩壊について AHP 階層構造作成と要因 の重み付けを行ったが、ここでは地すべりの場合について示す。

8.2 要因の抽出及び要因分析

8.2.1 要因抽出

文献、GIS による要因分析の結果、地すべりの場合、地形要 因(傾斜量、凸凹度、地上開度)、地質要因と相関があることが 分かった。地質要因の一例として、第三紀層は地形・地質と傾 斜方向に相関がみられた。

【地すべり】

地形要因:(◎)地上開度 地質要因:(○)地すべり土塊,(△)地質材料 地質構造要因: (o)地形と地層の傾斜方向差(=B) 地下水要因:(△)集水面積

8.2.2 要因の階層化

地すべり発生要因の階層化 階層レベル I として(i)素因,(ii) 誘因があり、(i)素因には階層レベル Ⅱとして地形,地質,地質構造,地 下水に分離される。階層レベルⅢと しては, それぞれ地形が地上開度, 地質が地すべりデブリ, 地質硬軟に 分けられる。地質構造は,斜面と堆 積構造の関係(β). 地下水は集水域に 分けられた。(ii) 誘因について

は基本的に地震によるがそれぞれ, 地震タイプ,震度階,加速度,速度, 継続時間, 地震周期, 震源からの距 離,震源断層との関係の8アイテム が抽出された。しかし、1 次抽出と しては震度階のみに注目することと した。



評価基準の抽出 及び 階層化

一対比較

ウェイトの 決 定

図 8.2 AHP による地震地すべり発生要因

8.2.3 一対比較によるウエイト評価

地すべり発生要因の階層レベルⅡ,Ⅲ一対比較 を行う。一対比較の基準は、下表で示し、地すべ り発生の階層レベルⅡは、地形=地質=地質構造 >地下水で階層レベルⅢの地質では、地すべりデ ブリ>地質硬軟が概ね妥当と判断された。以上を 整理して一対比較した結果は右記の通りである。 なお、誘因である地震動については、試験的に素 因に倍率をかけて感度解析をした。





8.3 AHP 分析結果 8.3.1 モデル評価地域の選定

【 地すべり 】

- 2004年中越地震(第三紀堆積岩多く層理面発達)
- ② 2008年岩手·宮城地震西部(第四紀火山岩優勢)
- ③ 2008年岩手・宮城地震北部(堆積岩優勢)
- ④ 1986年長野県西部地震(第四紀火山) このうち①の結果を表 8.1 に示す。

階層Ⅲについて、初期値、均一配点及び 各要素の初期値からのウエイトを±20%の 範囲で変動させ、AIC と重心距離が最適に なるような配点を調整値として求めた(表 8.2)。発生・非発生の分布では、重心距離が 離れ、また、AICの値は18.6と小さく、発 生・非発生の相関が良好なモデルとみられ る。また、AHP 得点が高いほど地すべりの 発生率が高くなる傾向が見られる。



表 8.1 異なった配点による解析結果の比較(中越地震:地すべり)

地すべりモデルについては集水面積が15から10に低下した分、地上開度に対し、30から33.4に増加した のがわかる。すなわち、地すべりにおいては地上開度の影響が大きいことが示された。

表 8.2 地すべり AHP モデルの総括表

	1	評	価基準アイ	テムとウエ	イト(合計	100)		AIC	X_dis
計算番号	モデル	地上開度	地すべり デブリ	地質硬軟	β	集水面積	地域		
	The second				1.000	1	2004中越地震	19.5	10.4
1	初期值	30	20	15	20	15	2008岩手宮城内陸地震·北部	43.1	8.2
						-	2008岩手宮城内陸地震·西部	48.7	11.4
					1	1.000	2004中越地震	18.6	11.2
2	配点20	20	20	20	20	20	2008岩手宮城内陸地震·北部	44.8	9.2
_			_			1.1.1.1	2008岩手宮城内陸地震·西部	50.2	11.7
11.11.11.11.1	and the second s		and the second second	1.1.1.1.1.1.1	and and		2004中越地震	20.0	11.2
1387	調整値	33.4	8.4 19.9	17.9	18.8	10.0	2008岩手宮城内陸地震·北部	37.1	10.6
							2008岩手宮城内陸地震·西部	48.4	12.5

AIC:赤池情報量規準 Xdis:発生,非発生重みつき分布重心の差 | :同一地域でもっても良い数値を示す箇所

8.4 共通性要因と地域性要因

8.4.1 AHP 得点構造からの判断

地すべり AHP モデルにおいては、地質要因、地質構造要因(例えばβ) にからむところについて地域性が高 いことがわかる。すなわち、下記に示す散布図(面積率とAHP 得点)においても堆積岩起源が卓越している 2008 年岩手・宮城地震北部、及び 2004 年中越地震においては AHP 得点が上がるにつれ、比較的明瞭な上昇を見せ ているが、他方、火山地域についてはやや AHP 得点の中央部に面積率の高いところが多い。



図 8.3 最適地すべり AHP モデルにおける AHP 得点と地すべり面積率での散布図

8.5 誘因に関する感度分析

2004年中越地震における AHP モデルの調整値に対し、図 8.4の AHP 倍率設定を使って感度分析を試みた。 地すべりの場合は、Xdis(重みつき発生・非発生重心距離)の値が Smin の増加に従い up down を繰り返しなが らも増加傾向を示し、AICもSmin=0.75を超えると階段状ながら低下する傾向を示す。ただし、最もAICが小 さく, Xdis が大きいのは Smin=1.0, すなわち地震動による倍率補正をしない場合となる。この要因として,地

形要因が大きい場合、地震動の強さが線形的に地形に作用するが、それ以外の素因はある限界点を超えるか超え ないかの "0" か "1" かで作用する因子の可能性を示す。この結果から、震度階による AHP 倍率設定は行わな い。



8.6 地図による AHP 解析結果の表現と今後の課題

第四系〜新第三系の堆積岩・火山岩からなる丘陵地〜中起伏山地では AHP 得点が高いほど地すべりの発生率 も高くなる傾向がみられ、特に堆積岩地域の事例である 2004 年新潟県中越地震や 2008 年岩手・宮城内陸地震 の北部の解析では良好な結果が得られた。図 8.6,中越地震の解析結果について試行的に AHP 得点を 10 点ごと に分割して塗色し地図化したものである。この図から、地すべりも 70 点以上で発生し、地すべり発生集中地域 は 80 点以上の地域に多く認められるのがわかる。今後、これらの地域については、配点構造の逆解析(モンテ カルロ法もしくは GA 法) や誘因に関する指標を適切に考慮する点などをさらに検討することで完成度を高める ことが出来ると考えられる。一方で、上記の AHP モデルでは丘陵地の未固結堆積物(火山灰被覆斜面)におけ る事例(1968年十勝沖地震)で良好な結果は得られなかった。このようなタイプの地震地すべりには 5.6 節な どで指摘されるように山地とは異なる要因・メカニズムが考えられ、このような地域性に起因する要因の導入に ついても課題が残されているといえる。これらの課題を解 決することで, 地域の地形・地質条件(想定される地震地 すべりの発生様式の類型化)を踏まえた最適な要因評価モ デルによる危険度評価が実施出来るようになると考えら れる。



図 8.5 地すべりの誘因倍率とモデル判定

9 危険箇所予測手法(地域スケール)マニュアル案骨子

9.1 地すべり及び急傾斜地崩壊の発生場予測

AHP を用いた要因の評価手法から、地震による斜面変動発生場予測のための「地震地すべり危険箇所調査マニ ュアル案」(仮称、以下「マニュアル案」と称する)の骨子案を提案することになる。

その前に主たる留意事項として、下記の2点が挙げられる。

①AHP 評価において各要因の得点を足し合わせた、いわゆる「得点」は、相対的なものである。したがって、 例えばある得点の幅で危険度を区分することを考えると、対象とする地域の条件によっては、非常に狭い得点幅 で危険度のランクを区分せざるを得ないような場合も予想される。もちろんその得点のランク区分を異なる対象 地域にそのまま当てはめることが適当かは、慎重に判断する必要がある。この点については解析事例を増やすな ど、さらに検討を要するものと考えられる。

次に、②AHPで大きな配点を与えられた要因と、既存の危険箇所抽出手法における評価要因との差違がどの程 度あるか、という点である。この点については、9.2において若干の比較検討を試みた。

9.2 地すべり及び急傾斜地崩壊危険箇所点検マニュアルのレビュー

AHP 解析に用いる要因の重み付けと、既存の地すべり危険箇所点検及び急傾斜地崩壊危険箇所点検に用いられている調査表中(それぞれ、砂防部局で用いられているものと道路部局で用いられているもの)での要因の重み付けを対比した。これらの点検表は誘因として豪雨のみを対象としている。

地すべりでは、「震度階」というカテゴリーを除けば、下記のようなことがいえる。

- (1) AHP 解析において重要視される要因は、河川との関係(地上開度)、地すべり地形、岩相、斜面と堆積構造、斜面の集水域である。
- (2) 一方、既存の点検表においては、相対的に地すべり兆候、地すべり履歴、地すべり地形、地質構造等が重視される傾向にある。
- (3) 両者の間の大きな違いは、①「地すべり履歴」を含めているか否か、②「河川との関係(地上開度)」及び「斜面の集水域」を重視するか否か、である。

①に関しては、誘因を降雨としている場合には履歴が大きな意味を有するのに対し、地震地すべりの場合には必ずしも履歴を有する斜面が危険である、ということにはならない、という実状を示しているものと考えられる。
 ②に関しては、今回の AHP 解析が DEM データを活用することを前提として実施されることから生じているものと考えられる。
 と考えられる。それらを除けば、今回の AHP で重視している要因は、既存の調査表の要因と調和的であるものといえる。

次に、急傾斜地崩壊に関しては、次のようなことがいえる。

(4) AHP 解析において重要視される要因は、勾配、河川との関係(地上開度)、である。

- (5) 一方、既存の点検表においては、相対的に表層の状況(表土及び浮き石・転石の状況、被覆状況)、地形(勾 配、高さ、オーバーハング等)に大きな配点が与えられている。
- (6) 両者の主たる差違は、①「地上開度」を含めているか否か、という点と、②「表層の状況」を加味しているか否か、という点である。

①に関しては、地すべりの場合と同様の理由から、今回のAHP解析において適用できる環境になったことが主たる原因と考えられる。また、②については、今回の提案が1/10~20万という地形図のスケールでのゾーニングを目標としていること(現地調査は想定していない)に起因する差違と解釈できる。

既存の危険箇所の判定表と対比した場合、地震を対象とした今回のAHP解析の要因では、特に急傾斜地崩壊の 場合に差違が生じる結果となった。大きな原因は、急傾斜地崩壊では、現象のスケールが小さいことから、DEM を用いた今回の手法と、現地調査を前提とした既存の判定法とは異なる要因に重み付けがなされる結果となった ものと思われる。それに対し、地すべりの場合には一般的にある程度の規模を有しているため、入手できる DEM データを用いることによって、AHP 解析でも現地調査を伴う既存の判定法とほぼ同程度のレベルの検討ができる ことから、従来の手法の要因と類似の要因が抽出されたことによると考えられる。

9.3 マニュアル案骨子案とその概説

「地震地すべり危険箇所調査マニュアル案」の現時点における構成案を表-9.3.1 に示す。地震時の地すべりと 斜面崩壊の発生要因にかなりの差違が認められることから、このマニュアル案においては、最終的に地すべり及

び斜面崩壊の二種の現象に対応 した判定法を作成することを目 標としている。また、表-9.3.1 の中で特に、「3.第二次抽出 (1/2.5~5万スケール)」の考え 方については流動的で、今後の 詳細な検討によって修正が加え られる可能性もある。

現在考えられる「骨子案」の 概要を述べたが、第二回意見聴 取会においては、特に「3.第 二次抽出(1/2.5~5 万スケー ル) について、現在の研究レベ ルの討議がなされ、現状での抽 出の困難性が指摘された。そし て、「既存の地震事例をできるだ け分析して、どういう場所にど ういう手法が有効か整理して示 すことが重要である。フローチ ャートのような形に整理するこ とが望ましい」(第二回意見聴取 会議事録)とのご意見もいただ いているため、上で示した計画 の見直しが必要となる可能性が 高い。

	表 - 9.3.1	「地震地す
	目次	:
1. 概説		
1.1 目的		
1.2 適用範囲	ŧ	
1.3 構成		
1.4 抽出フロ	L	
2. 第一次抽	出 (1/10~20)	万スケール)
2.1 対象地均	或の設定	
2.2 既存資料	斗の収集	
2.3 資料の鏨	整理	
① 想定震度		
2 周期		
③ 震源断層と	の関係	
④ 斜面基部の	>被侵食性	
⑤ 地すべり地	也形	
⑥ 起伏量(勾	5配)	
⑦ 岩相 · 岩質	賃 組み合わせ	
⑧ 風化状況		
⑨ 斜面方向。	と堆積構造	
⑩ 断層 • 褶的	Ħ	
⑪ 集水域		
⑫ 谷次数		
2.4 危険度の	り評価(併せて	AHP分析法の概説
2.5 危険地域	或のゾーニング	
3. 第二次抽	出 (1/2.5~5	万スケール)
3.1 対象範囲	国の設定	
3.2 資料の言	羊細整理	
 震源からの)距離	
② 地質の風化	ン状況・土層厚	 ・ 亀裂の発達状況
③ 地質構造 岩盤クリーブ	(受け盤・流れ [*] ・埋没谷等)	盤・キャップロ
 微地形(選 高等 	E急線・遷緩線	、段丘等)・勾
⑤ 斜面の水文	て状況	
3.3 現地調査	K.	
9 4 在陸台目	この 抽山	

^{3.5} 危険度の評価3.6 移動地塊の到達危険範囲の設定

「べり危険箇所調査マニュアル」(骨子)案

摘要 主として机上・GIS上での判断、土木事務所管轄範囲程度を対象 例えば、地震断層沿いの幅Okm、海溝型地震で震度5強以上の揺れ が予想されている地域かつ非高△m以上の斜面の分布域、等? 想定地震、地形、地質、地質構造等 以下の要素については、2.4のAHP分析の結果から取捨選択する。 5 確 以 ト 短周期<長周期 上盤側>下盤側 攻擊斜面>滑走斜面、集水面積 広>狭 凸>凹、傾斜 ブリットル>ダクタイル、火山岩類>凝灰質堆積岩>互層>泥岩 風化>未風化 流れ盤>受け盤 活断層(活構造)からの距離、断層密度 広→地下水位高、狭→地下水位低? 多>少 斜面崩壊及び地すべり、それぞれについて評価法を分けて記述する。詳細 ∰) の手順は報告書または巻末資料を参照するようにする。AHP分析の合計点 数から、メッシュごとに危険度を区分する。 現地調査、必要に応じて詳細調査、個々の斜面対象 例えば、第一次抽出で危険度Aとされたゾーン、等? 勾配・日 地震時に変状を生じると考えられる斜面の範囲を特定する。 上記「2.4」に同じ。

10 モデル地域の選定

本研究で開発される危険箇所評価手法を適用するためのモデル地域の選定を行った。モデル地域の選定は、1. 候補地の過去の地震や斜面変動の履歴についての文献調査、2.地質や地形条件など地域の特性についての情報 収集、3.現地調査の3つにより得られた情報を勘案しておこなった。

候補地として挙げられるのが静岡県である。静岡県は東海・東南海地震の危険地域にあたり,危険度の診断や 対策が望まれている地域である。また過去にも,数多くの地震がおき,それに伴い斜面変動が生じている。

静岡県内で過去に斜面変動が多く発生したエリアは、伊豆地域と中部地域の2つである。伊豆地域ではここ100 年の間に北伊豆地震、伊豆半島沖地震、伊豆大島近海地震で多数の斜面変動が発生した。北伊豆地震の大野旭山、 伊豆半島沖地震の中木、伊豆大島近海地震の見高入谷は代表的な斜面変動である。伊豆地域は、多くが第四紀火 山に由来する火山性の地層が広く分布している。また南部には湯ヶ島層群、白浜層群などの新第三系堆積岩のエ リアも一部みられる。すなわち、ある想定地震に対し8章で述べたいくつかの異なる地形・地質条件で構築され た AHP モデルを地域ごとに選択して評価を実施することができる地域である。伊豆半島沖地震、伊豆大島近海地 震については既に述べたように空中写真判読によって作成された崩壊分布図があるので、適用性・妥当性を検証 することが可能である。現地調査を行った結果、現在でも斜面変動の様子を確認できる場所あり、今後斜面変動 のメカニズムに関する詳細な検討を行うことも可能である。

一方,南海トラフ沿いの巨大地震では,西南日本外帯の先第三系堆積岩・変成岩での斜面災害が懸念されるが, その AHP 法による危険斜面抽出手法は今後の課題となっている。発生が特定された少数の箇所での岩盤クリープ 微地形や斜面形・開析度などの指標の調査による統計解析によらない AHP 評価手法の構築が適していると考えら れ,岩盤クリープ斜面の崩壊や,過去の地震での大規模崩壊が各所で把握されている静岡県中部地域(安倍川・ 大井川流域)の中・高起伏山地がその対象となる。地質は中生代~第四紀の堆積岩が主体である。宝永地震,安 政東海地震は大谷崩や白鳥山の崩壊などが有名であり,現在でもこれらについては崩壊地形をとどめている。外 帯にある四国山地南部は大井川・安倍川流域よりやや古い地質時代の堆積岩や変成岩からなるが,宝永南海,安 政南海地震さらに昭和南海地震で先第三系からなる大規模な崩壊発生やその前兆地形形成が進んだことが分かっ てきている。高知県越知町鎌井田崩壊(安政南海地震),加奈木崩れ(宝永南海地震),土佐町有間崩壊(安政南海 地震)などがその例である。そこで,これらの地域で,崩壊発生箇所とその周辺斜面を含む範囲を合わせてモデ ル地域とし,開発する AHP 手法の適用性を検証する。

11 結論

平成 23 年度の受託課題「地震による斜面変動の実態把握と特徴の類型化」に引き続き,「類型化に基づく地震 による斜面変動発生危険箇所評価手法の開発」について検討を行ってきた。その中で,歴史地震も含めて,これ までの地震地すべり発生事例について運動タイプ別に地形・地質・地震動(震度・加速度・速度・周期や継続時 間等)・降水条件などの発生要因を統計的に解析し,それらの斜面変動発生への寄与のしかたやその程度を評価す る手法を提案した。また,その妥当性を物理的に検証するため,斜面変動集中発生域で地震応答解析と斜面運動 解析を用いて再現解析を行った。さらに,その評価手法適用に必要な地形・地質データの取得手法・危険個所評 価手法をマニュアルとして取りまとめる前段として,骨子案を整理した。最後に,ここで提案された危険箇所評 価手法を実際に試行するためのモデル地域を選定した。