

地震による雪崩発生リスク評価に関する研究 —地震応答解析に基づく雪崩発生条件の検討—

Study on risk assessment for avalanche caused by strong ground motion - Examination for conditions of avalanche using seismic response analysis -

千葉隆弘, 佐藤雄輝 (北海道科学大学)

原田裕介, 大宮哲, 伊東靖彦 ((国研) 土木研究所 寒地土木研究所)

松下拓樹 ((国研) 土木研究所 雪崩・地すべり研究センター)

Takahiro Chiba, Yuki Sato, Yusuke Harada, Satoshi Omiya, Yasuhiko Ito and Hiroki Matsushita

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震の翌日である 2011 年 3 月 12 日に、長野県北部の地震が発生した。最大震度は、長野県栄村で 6 強であり、揺れによる建物の被害に加えて、揺れをトリガとした雪崩により鉄道や道路の交通機関に対しても被害がもたらされた¹⁾。このような地震の揺れをトリガとした雪崩は、2013 年 2 月 25 日に栃木県北部で発生し、奥鬼怒温泉郷の宿泊施設で一時孤立状態となった^{2), 3)}。

通常時の雪崩は、積雪の重力による慣性力が積雪層内に形成された弱層のせん断強度、あるいは、積雪と斜面との界面に生じる摩擦抵抗力を上回ることによって発生する。一方、地震時においては、重力による慣性力に加えて揺れによる慣性力が同時に作用することから、通常時に比べて雪崩が発生し易くなるとともに、雪崩の規模も大きくなると予想できる。従って、雪崩のリスク管理を行う場合は、冬期に発生する大地震を想定しておく必要があり、地震動の規模と雪崩発生状況との関係を明らかにすることが重要となる。

このような背景から本研究では、質点系せん断型モデルを用いた地震応答解析に基づいて地震動の規模と積雪層内に作用するせん断応力との関係を検討した。

2. 解析モデルの検討

本研究では、図 1 に示すように、積雪を上層、中間層、および下層の 3 層から成る質点系せん断型の振動モデルに置き換えて地震応答解析をすることとした。この振動モデルは、並列のばねとダッシュポットで構成された弾性モデルであり、斜面積雪を模擬した既往の振動実験⁴⁾で得られた結果に基づいて剛性と減衰係数を設定した。

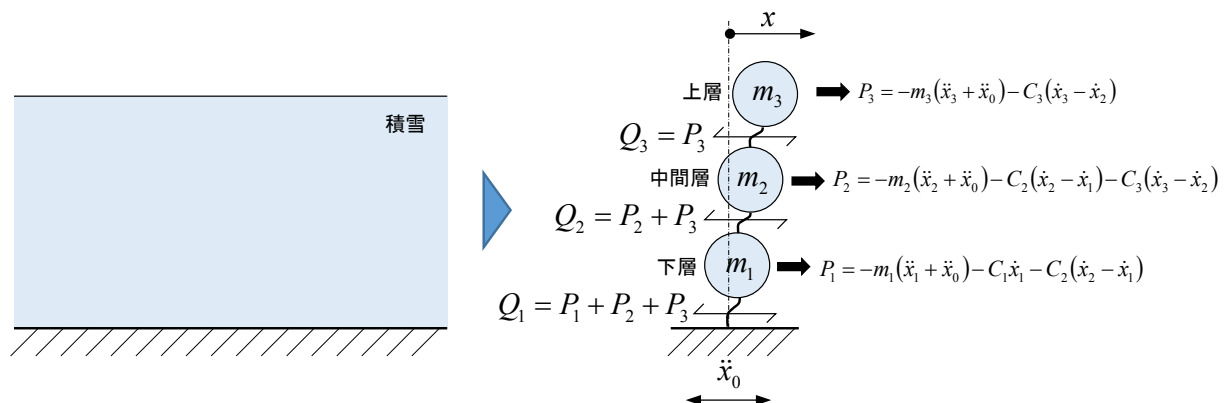


図 1 本研究で用いた質点系せん断型振動モデル

表 1 質点系せん断型モデルに設定した各質点の剛性

想定深さ (m)	想定密度 (kg/m ³)	全体重量 (kN/m ²)	質点の質量 (kg/m ²)	質点の剛性 (kN/m/m ²)	1次固有振動数 (Hz)	1次固有モード
0.6	350	2.06	m_1 : 7.14	K_1 : 1700	10.1	m_1 : 1.02
			m_2 : 7.14	K_2 : 1400		m_2 : 2.06
			m_3 : 7.14	K_3 : 950		m_3 : 2.95

既往の振動実験は、斜面積雪の応答性状を把握することを目的としており、振動台に取り付けた模擬斜面の勾配を 30° とし、屋外から切り出された深さ 0.4~0.8m の自然積雪を模擬斜面に設置して 1~10Hz のスイープ加振を行っている。斜面積雪の応答は加速度計を用いて測定しており、様々な深さおよび雪質で十数回の振動実験を行っている。ここで、振動実験で得られた斜面積雪の固有振動数をみると、いずれの斜面積雪においても 10Hz となっており、応答加速度の鉛直分布は、上層ほど加速度が大きくなる比例関係を示した。本研究では、このような振動実験の結果を再現するため、表 1 に示すように積雪各層の剛性を設定した。表中の積雪深さおよび密度は実験で対象とした斜面積雪の平均値であり、各層の質量は全体を 3 等分した。このような質量分布で固有振動数が 10Hz および固有 1 次モードが比例関係となるように各層の剛性を設定した。

次に、減衰係数は、既往の振動実験で得られた加速度応答倍率の鉛直分布と適合する減衰定数を用いて設定した。図 2 に、振動実験で得られた加速度応答倍率の鉛直分布と減衰定数ごとに行った地震応答解析で得られた加速度応答倍率の鉛直分布とを比較した結果を示す。なお、地震応答解析で用いた地震動は 1~10Hz のスイープ加振とし、積雪各層の剛性は、表 1 に示す値とした。図のように、減衰定数 80% における加速度応答倍率の鉛直分布が振動実験と概ね対応した。このことから本研究では、斜面積雪の減衰定数を 80% として減衰係数を求め、観測波を用いた地震応答解析を行うこととした。

3. 解析結果

3. 1 地震動の違いが積雪の応答性状に及ぼす影響

本研究では、振動特性の異なる 2 つの観測波を用いて積雪の応答性状を検討した。図 3 に、地震応答解析に用いた観測波を示す。図のように、揺れをトリガとした雪崩が発生した栃木県

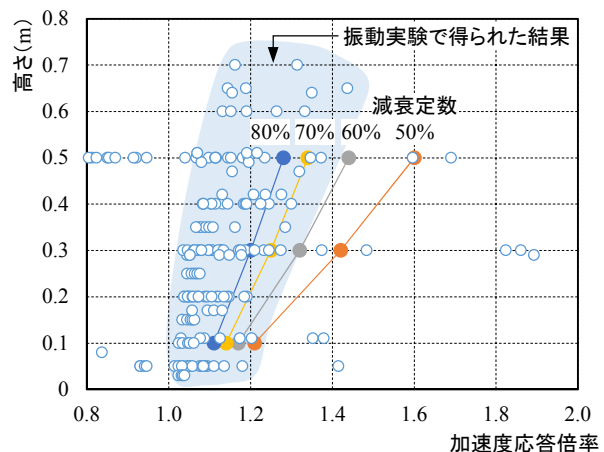


図 2 加速度応答倍率の鉛直分布

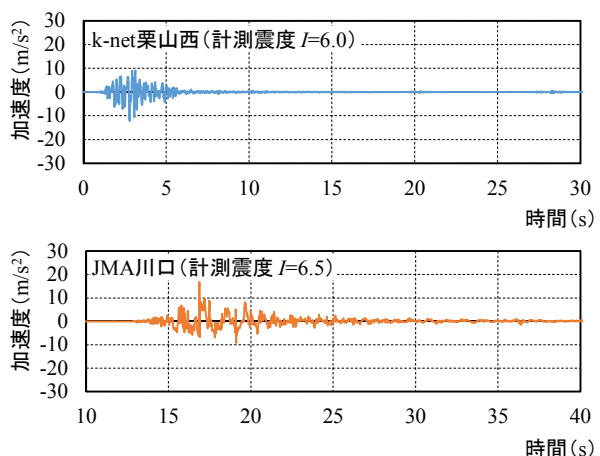


図 3 解析で用いた観測波

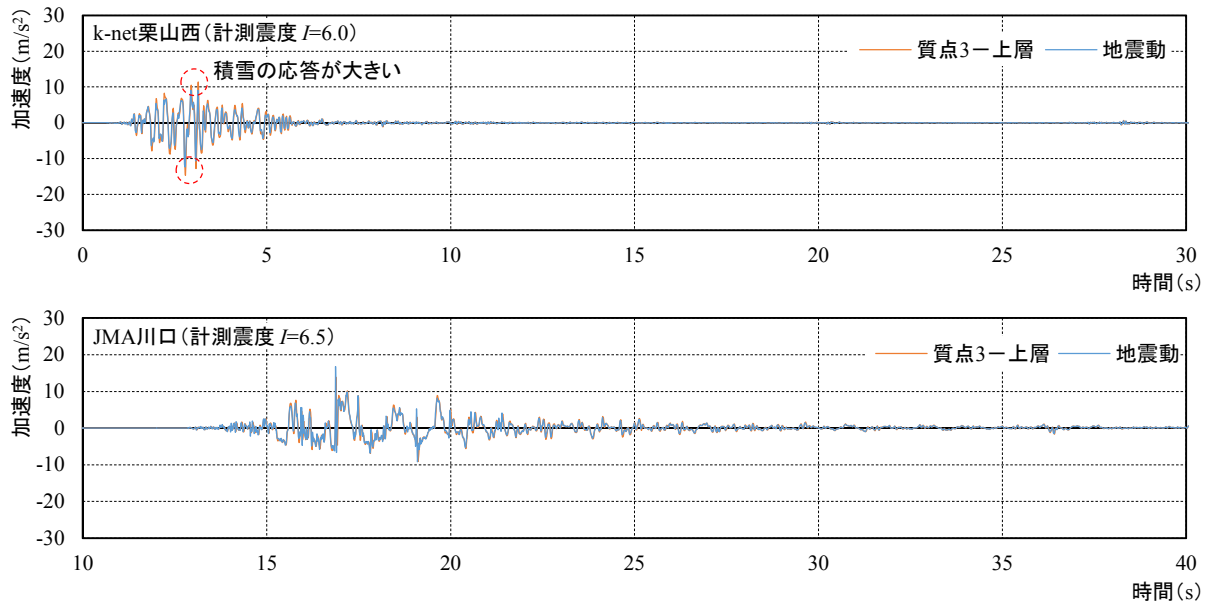


図 4 地震応答解析で得られた加速度時刻歴

北部の地震において栗山西地点で観測された地震動（以下、「k-net 栗山西」という。）と、新潟県中越地震において川口地点で観測された地震動（以下、「JMA 川口」という。）を用いた。計測震度はそれぞれ 6.0（震度 6 強）と 6.5（震度 7）であり、JMA 川口の方が強い揺れとなっている。一方、卓越周波数については、k-net 栗山西が 3～10Hz、JMA 川口が 0.5～1.0Hz となっており、k-net 栗山西が高周波数帯に、JMA 川口が低周波数帯に卓越周波数を有している。

これら 2 つの地震動を用いて積雪を対象とした地震応答解析で得られた加速度時刻歴を図 4 に示す。なお、積雪各層の剛性および減衰係数は第 2 章で検討した値を用い、上層、中間層、および下層のうち、最も応答する上層の加速度時刻歴を示した。図のように、計測震度は JMA 川口の方が大きいものの、k-net 栗山西の場合における積雪の応答が大きくなる。このように、高周波数帯で卓越する地震動ほど積雪が応答し易くなる。

3. 2 斜面積雪における地震動の規模とせん断応力との関係

以上に示すように、積雪の地震応答は、地震動における卓越周波数帯の影響を受け、高周波数帯に卓越周波数を有する地震動ほど積雪が応答し易くなる。以下では、実物大の斜面積雪を想定するとともに地震動の規模を変化させた場合の地震応答解析を行い、地震動の規模と積雪各層のせん断応力との関係を検討した。斜面勾配は 30° と 50° の 2 種類とし、斜面積雪の深さは 2.0m とした。密度については全層平均で 350kg/m³ を想定し、各質点の質量は全体を 3 等分した。なお、解析される質点の慣性力がせん断応力となるように、質量は単位面積当たりの値で設定した。各質点の剛性は、固有振動数が 10Hz 程度になるとともに、固有 1 次モードが比例関係を示すように設定し、減衰係数は、減衰定数 80% として設定した。また、地震時における積雪各層の最大せん断応力 $\tau_{i-\max}$ は、各積雪層における単位面積当たりの質量を m_i 、重力加速度を g 、地震時における積雪層の最大応答加速度を a_i 、斜面勾配を θ として、以下の 3.1) 式に基づいて算定した。なお、式中の Σ は、 i 層より上側を合計するという行為を表す。

$$\tau_{i-\max} = \sum m_i \cdot g \cdot \sin \theta + \sum (m_i \cdot a_i) \cdot \cos \theta \dots\dots\dots 3.1)$$

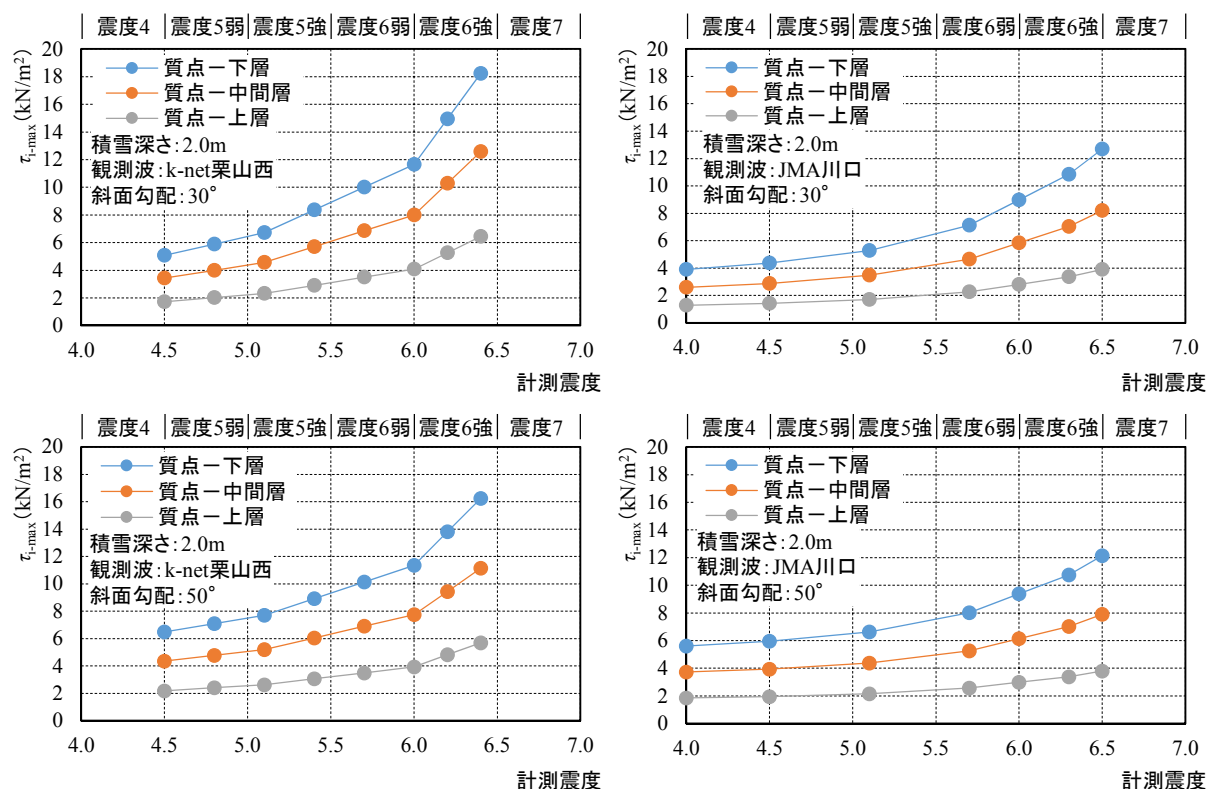


図5 計測震度と各質点の最大せん断応力 τ_{i-max} との関係

解析に使用した地震動は、k-net 栗山西と JMA 川口の2種類の観測波を用い、観測波の振幅を拡大・縮小することによって計測震度が4~6.5の範囲となる8つの地震動を2つの観測波ごとに作成した。すなわち、それぞれの観測波が保有する卓越周波数帯を変えずに規模のみを変化させた複数の地震動を用いて地震応答解析を行った。ここで、計測震度と積雪各層の τ_{i-max} との関係を図5に示す。図のように、斜面勾配が τ_{i-max} に及ぼす影響は、いずれの観測波においても小さい傾向を示し、下層ほど τ_{i-max} が大きくなる関係を示す。観測波の違いで比較すると、k-net 栗山西のように高周波数帯に卓越周波数を有する地震動ほど τ_{i-max} が大きくなる。また、 τ_{i-max} が増加し始める地震動の規模は、およそ「震度5強」であり、その増加傾向はk-net 栗山西で顕著となっている。以上の結果をみると、地震の揺れをトリガとした雪崩は、高周波数帯に卓越周波数を有する地震動ほど発生し易く、その規模は震度5強以上であることわかる。

4. まとめ

本研究では、地震の揺れをトリガとした雪崩の発生条件を明らかにすることを目的に、斜面積雪を質点系せん断型振動モデルに置き換え、地震応答解析を行った。その結果、地震の揺れをトリガとした雪崩は、高周波数帯に卓越周波数を有する地震動ほど発生し易く、その規模は、斜面積雪が2.0m、全層平均密度が350kg/m³の場合、震度5強以上となることが分かった。今後は、粘弾性体の運動方程式を考慮し、雪質等が斜面積雪の地震応答に及ぼす影響を検討する。

【参考文献】

- 1) 消防庁災害対策本部：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)について(第149報)，入手先<<http://www.fdma.go.jp/bn/higaihou/pdf/jishin/149.pdf>>，参照2015.6.17
- 2) 消防庁災害対策本部：栃木県北部を震源とする地震(最終報)，入手先<<http://www.fdma.go.jp/bn/2013/>>，参照2015.6.17
- 3) 上石勲，安達聖，阿部修，小杉健二，伊東靖彦，池田慎二，松下拓樹：2013年2月25日に発生した栃木県北部地震によって誘発された雪崩，雪氷研究大会(2013・北見)講演予稿集，No. A3-3，2013.9
- 4) 松下拓樹，原田裕介，笠村繁幸，松澤勝，中村浩：地震動に対する斜面積雪の応答性状に関する実験，雪氷研究大会(2013・北見)講演予稿集，No. P2-4，2013.9