地震による雪崩の発生評価技術について

Technologies for risk assessment of earthquake-induced avalanches

高橋渉,原田裕介((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) 松澤勝((国研) 土木研究所 寒地土木研究所) Wataru Takahashi, Yusuke Harada, Hiroki Matsushita, Masaru Matsuzawa

1. はじめに

積雪期に発生した地震が起因となる雪崩の発生が報告されており,発生のリスクを 評価する手法が求められている.過去には,地震動による外力を考慮した斜面積雪の安 定度の評価がなされているが,これらは地震動による地表面の加速度を,そのままの大 きさで斜面積雪に作用させており¹⁾²⁾,積雪の応答特性を考慮していない.本研究では, 振動実験により,任意の地震動における斜面積雪の応答を調べ,積雪の応答特性を考慮 した地震による雪崩発生の評価手法を検討した.なお,本研究では横揺れの地震動によ るせん断破壊によって発生する雪崩を対象とする.

2. 実験概要

振動実験は寒地土木研究所石狩吹雪 実験場(N43°12′55″, E141°23′23″) で,2014および2015年の1~3月に194 回行った.屋外から自然積雪状態の雪 を整形したもの(以下,試料という.)を 建屋内に設置した振動台(2m×2m; SPTDU-20K085L-50T)上にL型鋼材に より強固に固定した勾配 30°の合板製 斜面模型上(幅 50 cm×長さ 55 cm)に, 積雪層構造が斜面にほぼ平行になるよ



図1 振動実験の様子

うに設置した.図1に示す水平振動方向に,振動台の加速度を一定として,振動数を1~ 10Hz に変化するスイープ加振を3分間加えた.振動台に入力する加速度は0.1~ 0.9G(1G=9.81m/s²)とした.試料内には加速度計(18×18×24 mm³,40g:ASW-5A)を設置 し,試料および振動台の加速度を0.04秒間隔で測定した.

3. 実験結果

3.1 試料の応答特性

試料内の任意の高さにおける加速度と振動台との加速度との比を応答倍率と定義する.振動数と応答倍率の関係は、いずれの実験回のいずれの加速度計においても、10Hzの際に応答倍率が最大となった.また、入力加速度が大きい場合、試料の重量が大きい場合、加速度計が上層にある場合に、応答倍率が大きくなった.振動数と応答倍率との関係の一例を図2に示す.

3.2 雪質の違いにおける応答倍率

本実験においては,試料の雪質を,しまり 雪(乾雪),ざらめ雪(乾雪),ざらめ雪(湿 雪)の3つに分類した(しまり雪(湿雪) は例が少ないため除外).また,加速度計の 高さを約10 cm 刻みで区分し, 各雪質, 各高 さにおいて,応答倍率との相関が高かった 入力加速度 a (G)と試料の質量 m (kg)をそ れぞれ説明変数とし、応答倍率の最大値 SR を目的変数とする重回帰分析により求めた 結果を表1に示す.これは、しまり雪よりも ざらめ雪, 乾雪よりも湿雪の場合で応答倍 率が大きくなる結果となった。また,各雪質 における 30~39cm の位置において, 10Hz における応答倍率を100%としたときの,任 意の振動数 f(Hz)における比率を回帰分析 により求めた結果を表2に示す.

4. 地震動による雪崩の発生評価手法

4.1 雪崩発生評価モデルの検討

ここでは, 弱層から雪崩が発生する表層雪崩を対象とする. 本研究では松澤ら³⁾が示した地震動を考慮した積雪安定度*SI*_E'を求める式に、表1、表2で得られた結果をもとに、任意の高さにおける水平震度*a*'を用いた式を雪崩発生評価式とする(式(1)(2))(図4).

$$SI_{E}' = \frac{CL + \sigma_{n}L(\cos\psi - a'\sin\psi)\tan\varphi + \Sigma_{t}D}{\sigma_{n}L(\sin\psi + a'\cos\psi)}$$

$$a' = a\{(SR_{10Hz} - 1)IR + 1\}$$
(2)

ここで, C は積雪粒子の凝集力(N/m²), L は 弱層から上部の積雪層の長さ(m), σ_n は単位



表1 応答倍率の最大値 *SR* と入力加速

度 a および質量 m の重回帰式

雪質	加速度計高さ	平均高さ	Ν	重回帰式	R^2
ι	$10\sim 20$ cm	15.7cm	140	SR=0.116a+0.003m+0.944	0.452
ま 乾	30~39cm	30.3cm	97	SR=0.190a+0.005m+0.919	0.449
り 雪	40~49cm	40.7cm	91	SR=0.257a+0.007m+0.868	0.487
雪	$50\sim 60$ cm	54.4cm	77	SR=0.399a+0.007m+0.844	0.407
ざ	$10\sim 20$ cm	15.0cm	51	SR=0.261a+0.005m+0.808	0.513
ら乾	30~39cm	30.0cm	44	SR=0.513a+0.008m+0.676	0.778
め 雪	$40\sim49$ cm	40.8cm	49	SR=0.546a+0.009m+0.639	0.523
雪	$50\sim 60$ cm	50.4cm	39	SR=0.677a+0.011m+0.524	0.539
ざ	$10\sim 20 \mathrm{cm}$	15.0cm	55	SR=0.357a+0.006m+0.761	0.582
ら 湿 雪 雪	30~39cm	30.0cm	48	SR=0.577a+0.009m+0.630	0.554
	$40\sim49$ cm	40.0cm	48	SR=0.725a+0.011m+0.543	0.607
	50~60cm	50.0cm	41	SR=1.043a+0.012m+0.442	0.629

表2 応答倍率の比率 IR と,

振動数 f との関係

(10Hzの応答倍率を1とする)

雪質	N	関係式	R^2
しまり雪(乾雪)	102	$IR = 4.1 \times 10^{-3} \times f^{2.41}$	0.989
ざらめ雪(乾雪)	44	$IR = 4.5 \times 10^{-3} \times f^{2.34}$	0.992
ざらめ雪(湿雪)	48	$IR = 4.1 \times 10^{-3} \times f^{2.37}$	0.994



図4 斜面積雪に作用する力
 (a)斜面積雪の荷重 σ_nと強度 Σ_s, Σ_t
 (b)地震動による外力 a'

面積あたりの弱層上の積雪荷重(N/m²)で,弱層上の積雪層の厚さ D(m)と密度 $\rho(kg/m^3)$ および重力加速度 $g(m/s^2)$ から求まる($\sigma_n = g\rho D$). ψ は斜面勾配(°), Σ_t は雪の引張強度 (N/m²)である. φ は雪粒子の内部摩擦角で,新雪,こしまり雪,こしもざらめ雪の場合に おいては $tan \varphi = 0.21$ とし, それ以外の雪質では考慮しない⁴⁾.

水平震度 a'は表1で得た式が振動実験よりも大きい積雪深でも成り立つと仮定し,任

意の高さにおける振動数が 10Hz としたときの応答倍率 SR10Hz を求める。次に、表 2 で得た式を用い、任意の振動数fにおける応答倍率の比 IR を求める。これらを式(2)に 代入し、水平震度 a'が求まる.

雪崩の発生時における積雪安定度は,実際の斜面は積雪の側面等の繋がりがあるた め1とはならない.実際の雪崩事例からの臨界値の検討⁵⁾を参考に,本稿においては雪 崩発生の目安となる積雪安定度を1.5以下の場合とした.

4.2 雪崩発生評価モデルの検証

2011年3月の長野県北部地震, 2013年2月の栃木県北部地震で発生した雪崩事例を 対象にして,4.1節で示した雪崩発生評価モデルの検証を行う.表3に示す諸条件を式 (1),式(2)に与え、地震発生時の斜面の積雪安定度を求める.なお,引張強度 Σt(N/m²)の 調査は現地で行われなかったため、Watanabe⁷⁾が積雪の密度 $\rho(kg/m^3)$ から引張強度を求 めた式(3a),式(3b)を用いた.

$$\Sigma_t = 7.78 \times 10^{-3} \rho^{2.60}$$
(ざらめ雪) (3a)

$$\Sigma_t = 3.40 \times 10^{-4} \rho^{3.24}$$
(しまり雪) (3b)

図 5a は、4.1 節の方法で計算した地震発生時の積雪安定度 SIE'と、地震発生前(a=0) の積雪安定度 SI を比較したものである.4 事例中3 事例で地震発生前に1.5 以上だった 積雪安定度が,地震時には 1.5 以下に積雪安定度が低下した.すなわち地震によって雪 崩が発生した現象をよく再現していると考えられる.図 5b は式(1)で水平震度 a'を用い た場合(本研究の評価方法)と,地表面における水平震度 a をそのまま用いた場合(既 往研究の評価方法)の比較である. 振動数が 4.3Hz であった栃木県北部地震において は、両評価方法の違いはあまり見られなかった一方、振動数が11.2Hzを観測した長野県

北部地震において積雪安定度の 低下が著しくなった.既往の評価 手法でも積雪安定度は1.5以下を 示す結果でがあったが,短周期の 地震動において,本研究で示した 手法を用いた方がより厳密に評 価が可能と考える.

5. 雪崩発生評価手法の一般化に ついて

4章では雪崩発生評価モデルを

а 4.0 4.0 SI^E 2011 長野県北部 ●2011 長野県北部 S' 2013 栃木県北部 a'を用いたの積雪安定度 を用いた地震時の積雪安定度 3.0 3.0 2.0 2.0 1.0 1.0 0.0 0.0 0.0 1.0 2.0 3.0 4.(0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 地震前の積雪安定度 SI (a=0) aを用いた積雪安定度 SIE

h

図5 斜面積雪積雪の安定度計算結果 (a) 式(1) において地震発生前後の比較 (b) 式(1) において式(2) を考慮した場合の比較

地震		強震度観			雪崩すべり面の積雪			雪崩すべり面より上部の積雪			積雪	雪崩すべり面より下部の積雪			積雪観測場所				
	発生年月日と	規模	水平	振動数	測所と	雪崩	斜面	長さ	雪質	せん断	荷重	厚さ	深さ	密度	主体となる	深さ	密度	主体となる	(備考)
787.001	震源地		震度		雪崩発生	種類	勾配			強度					雪質			雪質	
-\$#199			а	f	箇所の														
			※1	※1	距離		ψ	L		С	$\sigma_{\rm n}$	D	Н	ρ		H'	ρ'		
		(M)		(Hz)	(km)		(°)	(m)		(N/m^2)	(N/m ²)	(m)	(m)	(kg/m ³)		(m)	(kg/m ³)		
2011長野県北部①	2011/3/12	67	0.72	11.2	15	湿雪 表層	35	10 ^{38/2}	ざらめ雪	1580	1178	0.61	0.75	197 ^{⊛2}	ざらめ雪	1.62	197 ^{∰3}	ざらめ雪(湿雪)	新潟県十日町市孟地
2011長野県北部②	長野県北部	0.7	0.72	11.2	6	湿雪 表層	25	10 ^{38/2}	ざらめ雪	780	1813	0.56	0.62	330 ^{⊗2}	ざらめ雪	2.04	330 ^{∰3}	ざらめ雪(湿雪)	新潟県十日町市野中
2013栃木県北部①	2013/2/25	62	1.25	4.2	4	乾雪 表層	42	9.5	こしも ざらめ雪	1510	744	0.41	0.55	185	しまり雪	0.99	316	ざらめ雪(乾雪)	栃木県日光市奥鬼怒
2013栃木県北部②	栃木県北部	0.5	1.25	4.5	4	乾雪 表層	42	9.5	こしも ざらめ雪	2890	1626	0.74	1.00	224	しまり雪	0.66	224	ざらめ雪(乾雪)	栃木県日光市奥鬼怒
※1 水平震度aは最大値、振動数/は水平震度最大値での値を示す ※2 文献 ¹⁰ の図からの読み取り値。 ※3 データがないため、上部の積雪の密度を代用した ¹⁰ 。																			

表3 地震によって発生した雪崩事例の条件値

※1 水平震度aは最大値、振動数fは水平震度最大値での値を示す ※2 文献¹⁾の図からの読み取り値。 示し,実際に発生した雪崩を対象に積雪安定度を求め,この評価モデルが適切に実現 象を再現すること確認した.ここでは,任意の条件下で発生する地震動に対して,積雪 安定度の値を求める手法を検討する.

式(1)において、 雪の引張強度 $\Sigma_t(N/m^2)$ は式(3a)(3b)より、 凝集力 $C(N/m^2)$ は Watanabe⁷⁾が積雪の密度 $\rho(kg/m^3)$ からせん断強度 $\Sigma_s(N/m^2)$ を求める式(4a)(4b)(4c)を示している.

$\Sigma_s = 3.56 \times 10^{-5} \rho^{3.36}$ (ざらめ雪・しもざらめ雪)	(4a)
$\Sigma_s = 3.73 \times 10^{-4} \rho^{3.08}$ (しまり雪)	(4b)
$\Sigma_s = 6.18 \times 10^{-4} \rho^{2.70}$ (ぬれ雪)	(4c)

積雪の密度 $\rho(kg/m^3)$ は文献 ⁸⁾に雪質に応じた積雪の密度の記載がある(表 4).弱層上の 積雪層の厚さ D(m)は文献 ⁵⁾を参考に $0.6m \sim 0.7m$ と仮定することができる.斜面勾配 ψ (°),弱層から上部の積雪層の長さ L(m)は,対象とする斜面の形状から求まる.

式(2)における *SR*_{10Hz}, *IR* については表1,表2より求めることができる.入力地震動である水平震度 *a* ならびに振動数 *f* の設定は,過剰な値を想定することは避け,短周期型の地震で雪崩発生履歴のある長野県北部地震の水平震度,振動数を想定するのが現時点では望ましいと考える.

表4 積雪の分類と密度値⁸⁾

雪質	しまり雪	ざらめ雪	こしもざらめ雪	しもざらめ雪	
密度(kg/m3)	200 ~ 500	300~500	200~400	250 ~ 400	

参考文献

1) 上石勲,本吉弘岐,石坂雅昭,佐藤威,2012:2011 年 3 月 12 日に発生した長野県北部地震 による雪崩発生状況と地震の影響,雪氷,74-2,pp-159-169.

2) 松下拓樹,松澤勝,中村浩,2014:地震時の雪崩発生条件に関する検討-2013年2月の栃 木県北部地震の事例-,第57回(平成25年度)北海道開発技術研究発表会

3) 松澤勝,加治屋安彦,伊東靖彦,2002:地震発生時の斜面積雪の安全率評価に関する一 考察,北海道の雪氷,26,pp95-98.

4) A.Zeidler and B.Jamieson,2006: Refinements of empirical models to forecast the shear strength of persistent weak snow layers:Part A:Layers of faceted crystals:*Cold Regions Science and Technology*,**44**,PP194-205.

5) Perla, R:Slab avalanche measurements,1977: Canadian Geotechnical Journal,14, 206-213.

6) 松下拓樹,中村浩,松澤勝,2014:地震による雪崩発生条件に関する検討,寒地土木研究 所月報,733,pp39-44.

7) Watanabe,Z:The influence of snow quality on the breaking strength, 1977: *Sci.Rep.Fukushima Univ.*,**27**,27-35.

8) 公益社団法人日本雪氷学会編,2014:新版 雪氷辞典,pp246.