地震加速度波の卓越周期と地盤のS波速度構造が 地すべり斜面の歪発生に及ぼす影響

Effects of predominant period of seismic wave and S-wave propagation on the strain depth-profile in a landslide

柴崎宣之^{a) b) *}, 石井靖雄^{a)}, 三輪賢志^{c)}

Nobuyuki SHIBASAKI, Yasuo ISHII and Kenji MIWA

Abstract

To clarify landslide triggering mechanism of earthquakes, we investigate the effect of maximum acceleration, predominant period of earthquake acceleration wave and material property of ground. One-dimensional earthquake response analysis was performed in Yanagihara landslide of Niigata prefecture which showed relatively small strain increasing in pipe strain gages at the time of earthquakes. As a result of analysis using multiple earthquake acceleration waves with different maximum acceleration, the predominant period of earthquake acceleration wave and the own natural period of ground effect to strain increasing of the slope of landslide. S-wave velocity structure also effect to strain increasing. Analysis result shows good agreement with depth which showed maximum strain increasing by pipe strain gage measurement. Therefore, one-dimensional earthquake response analysis using investigation result of the S-wave velocity profile could be used for initial evaluation of strain increasing by earthquake in landslide.

Key words : Landslide, Earthquake, Earthquake response analysis, Fourier amplitude spectrum, Own natural period.

和文要旨

地震加速度波の最大加速度や卓越周期、地盤の物性などが地すべりの発生に及ぼす影響を検討するため、地震発生時に比較的小さな変動が認められた新潟県柳原地すべりを対象に、一次元地震動応答解析を実施した。最大加速度・卓越周期の異なる複数の地震加速度波形を用いて解析を実施した結果、地震加速度波の卓越周期と地盤の固有周期が地すべり斜面での歪の発生に影響を及ぼすことが明らかとなった。また、調査斜面では、地盤のS波速度構造も地震発生時の歪発生に影響を与えることも明らかとなった。さらに、パイプ歪計の歪増加量が最も大きな値を示した深度と解析による最大せん断歪発生深度は、調和する結果を示した。これらより、地盤のS波速度構造等の調査結果にもとづく一次元地震動応答解析は、地震発生時の地すべり斜面における歪発生深度の事前評価に活用できる可能性が示された。

キーワード : 地すべり, 地震, 一次元地震動応答解析, フーリエ振幅スペクトル, 固有周期

1. はじめに

平成16年新潟県中越地震や平成20年岩手・宮城内陸地震では、多数の地すべり・崩壊が発生し家屋や社会資本に大きな被害を及ぼした(社団法人日本地すべり学会, 2012)。地震発生に伴う地すべり斜面の不安定化に影響を及ぼす要因としては、地盤の固有周期のほか、最大加速度や最大速度、卓越周期、主要動の継続時間などが考えられる(川邊, 2005; 社団法人日本地すべり学会, 2012)。川邊・山口(1983)は入射地震波の卓越周期と表層の固有周期が一致すると地盤は大きく揺れて、表層はより危険な状態になると指摘している。このような中、地すべり斜面での地震動観測結果より地すべり土塊の固有周期を調査した事例(柴崎・石井, 2016a)も報告されてきている。しかしながら、地震による地すべり変動を捉えて検討した事例は見られない。

近年、地震発生時に比較的小さな変動が認められた地すべりについて報告がなされてきている。地震発生前後

に変動が認められた深度は、降雨等の誘因により変動が発生したすべり面の深度と調和的であった事例や、そうでなかった事例が報告されている(菅ほか, 2002; Fujisawa et al., 2006; 岡本ほか, 2006; 岡本ほか, 2008; 高橋ほか, 2012)。今後、地震時に比較的小さな変動が認められた地すべりの計測結果を手がかりとして、地震加速度波の最大加速度や卓越周期、地盤の物性などが地すべりの発生に及ぼす影響を検討していくことが重要と考えられる。その際の検討においては、最大加速度や卓越周期が異なる地震加速度波の影響も考慮可能で、地盤構造や動的特性等の違いも考慮できる地震動応答解析(吉田, 2010)の活用が有効と考えられる。

新潟県上越市に位置する柳原地すべりでは、パイプ歪計の観測により降雨時に歪の増加が認められていた深度で地震時にも歪の増加が認められた(柴崎ほか, 2014)。そこで、2011年3月12日に発生した長野県北部地震を対象とし、現地でのPS検層結果に基づいて地盤のS波伝搬速度を設定し、一次元地震動応答解析を実施した。その結果、一次元地震動応答解析は地震発生時の変動発生深度の推定に役立てられる可能性が示された(柴崎・石井, 2016b; 柴崎・石井, 2017)。

柳原地すべりでは、長野県北部地震に加えて、2004年

* 連絡著者 / corresponding author

a) 国立研究開発法人土木研究所 土砂管理グループ
Public Works Research Institute Erosion and Sediment Control Research Group
〒305-8516 つくば市南原1番地6
1-6, MINAMIHARA, TSUKUBA-CITY, IBARAKI-PREFECTURE, JAPAN

b) 現所属 日本工営株式会社
Now in NIPPON KOEI CO., LTD.

c) 復興庁
Reconstruction Agency

10月23日の新潟県中越地震(以下, 中越地震という), 2007年7月16日の新潟県中越沖地震(以下, 中越沖地震という)においても, 同一深度で歪の増加が観測されていた。そこで, 本論文では, 最大加速度や周期特性が異なるこれらの地震加速度波形を用いて一次元地震動応答解析を実施し, 地震加速度波の卓越周期と地盤の固有周期, 地盤のS波速度構造が最大せん断歪の発生に及ぼす影響を検討した結果を報告する。

一次元地震動応答解析には長野県北部地震を対象とした解析で用いた解析モデル(柴崎・石井, 2016b; 柴崎・石井, 2017)を用いた。これら既往報告における解析モデルの説明は概要の記述にとどまる。そこで, 本論文では, パイプ歪計観測結果, 地盤調査結果と解析モデルについても詳細に記述した後, 一次元地震動応答解析結果を記述する。

2. 調査対象地すべりの概要

調査対象とした地すべりは, 新潟県上越市安塚区に位置する柳原地すべり防止区域aブロックである。aブロックは1992年より調査が行われている。地すべりの規模は, 幅約70m, 長さ約450m, 斜面勾配10~20°, 層厚4~7mである。図-1に示すとおり斜面下部から中腹部のa1ブロックとその上部のa1-1, a2, a3, a5, a6, a7, a8ブロックに区分されている。aブロックは新第三紀中新世の黒色泥岩の分布域に位置しており, 渡・小橋(1987)の地すべり分類の粘質土地すべりに相当する。すべり面形状は, 図-2に示すとおり層状すべり面(渡・小橋, 1987)をなす。

対策工については, 1993年に床固工・水路工が設置され, 1999年より横ボーリング工, 明暗渠工等の地下水排除工が設置されている。地すべりの滑動は, a1ブロックでは1992年の調査開始から明暗渠工を設置する2004年まで活発に認められた。その滑動量は斜面下部のBV4-3で最大約150cm/年を記録している。その一方で, BV4-3では2004年の中越地震発生時に地震による揺れの影響を受けずに地震前からの滑動が続いた記録(Fujisawa et al., 2006)がある。斜面中腹部の観測孔BV17-2では, 観測を行っていた2007年の中越沖地震発生時に突発的に歪増加が観測されている。斜面上部のa5ブロックの観測孔BV11-2では, a1ブロックBV4-3でみられた最大約150cm/年に及ぶ顕著な滑動は認められていないが, 降雨時や中越地震, 中越沖地震, 長野県北部地震発生時に突発的に歪増加が観測されている。

このように, aブロックでは地下水排除工により地すべりの安定化が図られてきたものの, 大きな揺れを伴う地震発生時には斜面上部において突発的に歪変動が観測されている。

図-1 柳原地すべりaブロック平面図
Fig. 1 Topographic map of Yanagihara landslide.

図-2 柳原地すべり断面図
Fig. 2 Section of Yanagihara landslide.

3. 調査方法

3.1 地震発生時の歪変動と地盤特性

地震発生時の歪発生深度は, a5ブロックに設置されていたパイプ歪計BV11-2における地震発生前後の歪増加量を調査して評価を行った。調査対象地震は, BV11-2において地震発生前後にパイプ歪計と地下水位計の観測が実施されていた中越地震, 中越沖地震, 長野県北部地震とした。表-1に調査対象地すべりから約6km離れた防災科学技術研究所強震観測網(K-NET安塚)の最大地震加速度および約4km離れた上越市安塚区安塚(気象庁発表)の震度を示した。K-NET安塚では, 中越地震の38分後に発生した余震のほうで, 中越地震を上回る最大加速度を記録していた(表-1)。そこで, 中越地震は本震(以下, 中越本震という)と余震(以下, 中越余震という)に分けて解析を行うこととした。

歪増加量を算出した期間は, 長野県北部地震が2011年3月10~14日, 中越本震および中越余震, 中越沖地震は, それぞれ2004年10月22~26日, 2007年7月14~18日とした。なお, 中越本震および中越余震については, 中越本震と中越余震の間に観測が実施されていなかった。そのため, 中越本震と中越余震のそれぞれの歪増加量を算出することは出来なかった。また, 歪増加量は, 地震発生時と降雨時の歪発生深度を比較するため, 降雨によって

表-1 観測期間中の調査対象地震の概要
Table 1 Object earthquakes in monitoring period.

地震	発生日時	最大 加速度 ^{注1)} (gal)	震度 ^{注2)}	K-NET 安塚 と震央との 距離(km)
中越本震	2004/10/23 17:56	274.6	5 強	約 42
中越余震	2004/10/23 18:34	522.4	6 弱	約 47
中越沖地震	2007/7/16 10:13	229.8	5 強	約 50
長野県 北部地震	2011/3/12 3:59	334.2	5 弱	約 21

注 1) K-NET 安塚における 3 成分の合成加速度

注 2) 気象庁が発表した上越市安塚区安塚の震度

歪の増加が顕著に認められた2006年7月19日～23日についても調査を行った。

さらに、歪増加が認められた深度の地盤特性を調査・考察することを目的として、BV11-2から約1m離れた地点に調査ボーリング(BV柳-1)を行ったほか、ボーリング孔を活用してPS検層を行った。PS検層は、地盤工学会基準(JGS1122-2012)によるダウンホール式(受振点間隔1m)により実施した。

3.2 一次元地震動応答解析

3.2.1 解析方法

一次元地震動応答解析は「富士通エフ・アイ・ピー株式会社製, LIQUER Ver. 15.1E(以下, LIQUERという)」を使用した。LIQUERはSHAKE(Schnabel et al., 1972)と同じ重複反射理論による等価線形化手法を用いた解析プログラムである。SHAKEの理論式は以下の通りである。

第 m 層の位置 x における時間 t の水平変位を

$$U_m = U_m(x, t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

とし、(1)式の変位が円振動数 ω の調和振動をした時の調和振動の解は、(2)式で表わされる。

$$U_m(x, t) = E_m e^{i(km x + \omega t)} + F_m e^{-i(km x - \omega t)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$k_m^2 = \frac{\rho_m \omega^2}{G_m + i \omega \eta_m} = \frac{\rho_m \omega^2}{G_m^*} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 E_m ；入射波、 F_m ；反射波、 k_m ；複素波数、 ρ_m ；第 m 層の密度、 G_m ；第 m 層のせん断弾性係数、 G_m^* ；第 m 層の複素せん断弾性係数、 η_m ；第 m 層の粘性係数である。

図-3(A)は一次元地震動応答解析の概念について、荒川ほか(1982)が作成した図に、第 m 層の深度 X_m の水平変位 U_m を加筆したものである。ここに、 H_m ；第 m 層の地盤の厚さである。

第 m 層の深度 x に発生するせん断歪 γ_m は、(2)式を x で偏微分することにより、(4)式のとおり求められる。

$$\gamma_m = \frac{\partial U_m}{\partial x} = ik_m (E_m e^{i(km x + \omega t)} - F_m e^{-i(km x - \omega t)}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

図-3 一次元地震動応答解析の概念(荒川ほか(1982)に加筆)

Fig. 3 The conceptual diagram of earthquake response analysis (based on Arakawa et al., 1982).

なお、複素せん断弾性係数 G_m^* は、(5)式とした(Lysmer et al., 1975; Desai and Christian, 1977)。

$$G_m^* = G_m (1 - 2h^2 + 2ih\sqrt{1 - h^2}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 h ；減衰定数である。

3.2.2 入力地震加速度波形

柳原地すべりにおいて地すべり移動方向に設定した測線は、上部のa5ブロックは南南東方向であるが、a1ブロック中部、下部になると、南方向に転じていく。そこで、本解析では、地震加速度波形を平面上において平均的な地すべりの移動方向に変換し(北から東回り210度の方向を正值(+))とした、図-1)入力することとした。

入力した地震加速度波形は以下の手順で作成した。

- ①K-NET安塚で観測された中越本震、中越余震、中越沖地震、長野県北部地震発生時のそれぞれの地表地震加速度波形を、平面上において地すべりの移動方向(北から東回り210度の方向)に変換した。変換の計算式は、地震加速度波形の南北方向において北が正、東西方向において東が正のとき、(6)式(Huang et al., 2001)で表される。

$$a_d = -a_N \sin \phi + a_E \cos \phi \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 a_d ；地すべり測線方向の水平加速度、 a_N ；南北方向の加速度、 a_E ；東西方向の加速度、 ϕ ；北を基準とした地すべり測線方向に対する走向である。

- ②K-NET安塚の地表面波形を、S波速度450m/sの岩盤の上端にあたる深度9mを工学的基盤面とし、図-3(B)のモデルにより引き戻し計算を実施

- ③深度9mの入射波成分($2E_n$)を取り出し、後述する柳原地すべりの解析モデルにおける工学的基盤面の入力加速度波形とし一方向で入力

入力した地震加速度波形は、図-4に示すとおりである。

入力時間は主要動を含む40.95秒(データ間隔0.01秒)とした。柳原地すべりにおける工学的基盤面は、後述す

図-4 入力地震加速度波形
Fig. 4 Input earthquake acceleration wave.

る地盤調査により安定した地盤が分布していると考えられる十分な深さ20mとした。

4. 調査結果

4.1 地震発生時の歪変動と地盤特性

(1) 歪変動

図-5に柳原地区BV11-2の歪観測結果を示した。BV11-2の降雨時の最大歪は深度4mにおいて認められた。その増加量は 866μ であった。一方、地震発生時の最大歪は、中越地震(余震を含む)、中越沖地震、長野県北部地震ともに深度4mで認められ、その増加量はそれぞれ 324μ , 847μ , 2530μ であった。BV11-2にお

ける地震発生前後の孔内水位に変化は認められなかった。BV11-2以外の孔では、地震発生前後や調査対象とした降雨期間に歪観測が実施されていなかった。このため、図-5に示した深度4mの歪増加が面的な広がりをもっていたのかは不明である。地震後に明瞭な地表変状が発生したという報告はなかったことから、BV11-2の歪増加は降雨に伴う地下水位上昇や地震によって生じた局所的な変動と推定される。

(2) 地盤調査

BV柳-1でのPS検層により得られたS波走時曲線およびS波速度は、図-6に示すとおりである。地盤は、S波走時曲線の傾きから、深度2mまでの第1層、深度4mまでの第2層、深度7mまでの第3層、深度7m以深の第4層に区分される。

また、ボーリングコア観察の結果、薄層のすべり面粘土層は認められなかったが、深度4.05m以浅は軟質で粘土状を呈し、それ以深のコアは風化しているもののハンマーで割れる程度の硬さを呈していた。また、深度4.02mから深度4.04m付近の灰黄色の礫は扁平に潰れていた(写真-1の矢印で示す部分)。一方、深度4.08~4.10m付近の礫はその形状は原形を保っているとみられた(写

図-5 柳原地区BV11-2の歪観測結果(深度12mは小動物被害による断線により欠測)

Fig. 5 Observed result of pipe strain gauges at BV11-2.

図-6 BV柳-1のS波走時曲線およびS波速度
Fig. 6 Travel time curve of S wave and velocity of S wave at BV Y-1

写真－1 BV柳－1 深度4.00～4.13mのボーリングコア (柴崎・石井, 2017)

Photo 1 Boring core of 4.00–4.13m depth at BV Y-1 (Shibasaki and Ishii, 2017).

真－1の四角の枠内の部分)。

以上の結果より、降雨時のすべり面は深度4.05m付近と推定した。すべり面深度付近はS波速度構造が150m/sから270m/sに変化する地盤の境界に対応している。

4.2 一次元地震動応答解析結果

4.2.1 解析を行った地盤モデル

解析モデルは、PS検層結果に基づき、表－2に示すとおり設定した。泥岩の湿潤重量、飽和重量は、それぞれの深度で採取したボーリングコアの室内土質試験結果

表－2 解析地盤モデル
Table 2 Material property of analysis model.

深度 GL-m (m)	S波速度 (m/s)	湿潤重量 (kN/m ³)	飽和重量 (kN/m ³)	動的変形特性曲線 G/G ₀ , h ^{注1)}
0.00 ～ 1.87	130	18.0	18.0	すべり面上位
1.87 ～ 4.05	150	19.2	19.7	
4.05 ～ 7.05	270	20.9	21.0	すべり面下位
7.05 ～ 20.00	390	21.4	21.6	

注1) G₀:せん断歪発生前の初期せん断弾性係数, G:せん断歪が発生した時のせん断弾性係数

図－7 BV柳－1における動的変形特性曲線

Fig. 7 Dynamic deformation characteristics at BV Y-1.

より設定した。深度0.00～1.87mの崩積土については、既往文献(社団法人日本河川協会, 1997)を参考に設定した。

動的変形特性曲線は、地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸動的変形特性試験(JGS0542-2009)結果より、図－7に示すとおり設定した。試験を行ったコアの採取深度はすべり面の上位と下位とし、試験前に行った透過X線写真で含礫が無いと推定された深度(すべり面より上位は深度3.00～3.15m, 下位は深度7.35～7.50m)とした。せん断歪発生前の初期せん断弾性係数(G_0)は、(7)式(吉田, 2010)を用いて設定した。また、既往文献(吉田, 2010)を参考に、最大歪と有効歪の比を0.65とした。

$$G_0 = \rho_m \times V_s^2 \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 ρ_m ; 第 m 層の密度, V_s ; 第 m 層のS波速度である。

収束判定基準は各層のせん断弾性係数と減衰定数の前回との差が5%未満の場合とした。

BV11-2の地下水位は2日間隔の計測値が保管され、調査対象地震発生当日の計測値は得られていた。そこで、解析にはBV11-2で地震発生日当日に観測された孔内水位を使用した(表－3)。なお、解析は、地下水位より上位地盤の密度は湿潤重量を用い、地下水位より下位地盤の密度は飽和重量を用いて行った。

4.2.3 解析結果

図－8に、解析により得られた最大せん断歪を示した。最大せん断歪は、せん断応力が地すべり方向に作用した時の各深度の最大値をプロットした。ただし、中越余震では、最大加速度が他の地震のそれに比べて2.4倍から3.4倍と非常に大きかったことから、試験値(図－7)を超えるせん断歪が発生した。Ishihara (1982)によると、等価線形化手法の適用範囲は、せん断歪が $10^{-5} \sim 10^{-2}$ (0.001～1%)と述べられている。その一方、地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸動的変形特性試験結果から設定した動的変形特性曲線(図－7)を超えるせん断歪に対しては、Hardin-Dmievich (1972)などの数式モデルにより外挿する手法がある。しかし、外挿は極力さけるべきである(吉田, 2010)という報告もある。そこで、本解析では、解析に使用する動的変形特性

表－3 BV11-2の地震発生当日の孔内水位
Table 3 Observed groundwater level on the day of the earthquake at BV11-2.

地震名	中越本震, 中越余震	中越沖地震	長野県 北部地震
孔内水位 観測日時	2004年 10月23日 23時 (地震後)	2007年 7月16日 8時 (地震前)	2011年 3月12日 9時 (地震後)
孔内水位 深度 GL-m (m)	1.95	2.48	2.95

図-8 一次元地震動応答解析による最大せん断歪

Fig.8 Maximum shear strain by earthquake response analysis.

は試験値の範囲で行い、中越余震については解析の対象外とした。

最大せん断歪は、中越本震、中越沖地震、長野県北部地震のいずれの地震においても、S波速度が270m/sから150m/sへ変化する深度4.05mの上面の要素で発生した。この結果はBV11-2の深度4mにおいて中越地震（余震を含む）、中越沖地震、長野県北部地震発生時にパイプ歪計で歪が増加したこと（図-5）と調和する。解析結果は、降雨時に歪変動が認められた観測孔（BV11-2）のすべり面深度付近が、地震時に歪が生じやすい地盤特性を有していることを裏付けるものと考えられる。

表-4に、パイプ歪計における地震前後の歪増加量、一次元地震動応答解析により得られた最大せん断歪および一次元地震動応答解析で入力した地震加速度波の最大加速度およびその卓越周期の範囲を示した。入力した加速度波形の周期特性は、図-9のフーリエ振幅スペクトル（Parzenウィンドウ、バンド幅0.1Hzで平滑化）に示す通りである。また、図-9にはスペクトルのピークが卓越している周期の範囲を記載した。一次元地震動応答解析における長野県北部地震の入力加速度は中越沖地震

表-4 パイプ歪計の歪増加量と一次元地震動応答解析における最大せん断歪および入力した地震加速度波

Table 4 Observed result of pipe strain gauges and maximum shear strain and input earthquake acceleration wave on earthquake response analysis.

項目	中越本震	中越余震	中越沖地震	長野県北部地震
歪計 歪増加量 (μ strain)	324		847	2530
解析値 最大せん断歪 (%)	0.042	— ^{注)}	0.043	0.062
入力 最大加速度 (gal)	118.03	402.31	147.95	168.37
卓越周期 の範囲	0.27～ 0.43 秒 付近	0.27～ 0.47 秒 付近	0.47～ 1.24 秒 付近	0.15～ 0.22 秒 付近

注) 動的変形特性は試験値の範囲で行った結果、解析対象外とした。

図-9 一次元地震動応答解析へ入力した地震加速度波形のフーリエ振幅スペクトル（Parzenウィンドウ、バンド幅0.1Hz）

Fig.9 Fourier amplitude spectrum of input earthquake acceleration wave on earthquake response analysis. (Parzen window, bandwidth : 0.1Hz).

の約1.1倍の値であったのに対し、最大せん断歪は約1.4倍の値を示した。いずれの地震も最大歪は同じ深度で生じ、最大加速度と歪の大小関係は整合していた。一方、長野県北部地震発生前後のパイプ歪計の歪増加量は、中越沖地震の約3.0倍の値を示した。一次元地震動応答解析によるパイプ歪計の歪量の定量的な評価については、今後の課題である。

4.2.4 考察

(1) 地盤の固有周期と加速度波形の卓越周期

調査対象とした地震のうち中越余震の最大加速度が最も大きかったにもかかわらず、中越地震前から中越余震後にかけてのパイプ歪計の歪増加量は、他の地震よりも小さい値を示した。一方、地震加速度波の卓越周期は、各地震で異なっており（図-9）、卓越周期が歪増加量に影響を及ぼした可能性が考えられる。そこで、以下に地震加速度波の卓越周期と地盤の固有周期の関係を考察する。

大崎（1994）は、地盤の固有周期が基準深度と対象深度間の加速度フーリエ振幅スペクトルの比（スペクトル増幅率）の最大値（ピーク）の周期で表すことができると述べている。前述のとおり、解析により得られたせん断歪を定量的に評価することは難しいと考えられた。しかし、図-8に示したとおり、いずれの地震においても、最大せん断歪が深度4.05mに現れたことから、スペクトル増幅率による地盤の固有周期の評価は可能であると考えられる。そこで、PS検層の結果 $V_s=390\text{m/s}$ を示した7.05～20.00mの地盤は工学的基盤に相当すると考えて、その上端の深度7.05mを基準とし、地表、深度1.87m、4.05mの応答加速度のスペクトル増幅率を求めた。解析により最大値が現れた周期を表-5に示した。図-10には、代表例として長野県北部地震での周期とスペクトル増幅率の関係を示した。スペクトル増幅率は、解析結果が得られた3つの地震のいずれも0.16～0.17秒において最大値を示した（表-5）。したがって、柳原地すべり

図-10 一次元地震応答解析による長野県北部地震の応答加速度のスペクトル増幅率

Fig. 10 Spectral amplification factor of the North Nagano Prefecture Earthquake in 2011.

表-5 一次元地震応答解析による応答加速度の増幅率の最大値が現れた周期

Table 5 Maximum value of spectral amplification factor by earthquake response analysis.

比較深度	中越本震	中越沖地震	長野県北部地震
地表/7.05m	0.16 秒	0.16 秒	0.17 秒
1.87m/7.05m	0.17 秒	0.16 秒	0.17 秒
4.05m/7.05m	0.17 秒	0.17 秒	0.17 秒

の固有周期は0.16～0.17秒と推定される。

一方、図-9によると、長野県北部地震の加速度波の卓越周期は、表-5に示した一次元地震応答解析で推定された地盤の固有周期（0.16～0.17秒）を含む範囲にある。また、他の地震に比べて短い周期においてピークがいくつか認められ、周期0.16秒にもピークがみられる。このように、歪増加量が最大値を示した長野県北部地震では、地震加速度波の卓越周期が地盤の固有周期と一致していた。中越本震と中越沖地震の最大加速度の差は29.92galであったのに対し、長野県北部地震と中越沖地震の最大加速度の差は20.42galであった（表-4）。一方、地震動応答解析により得られた最大せん断歪の差は、中越本震と中越沖地震では0.001%であったのに対し、長野県北部地震と中越沖地震での差は0.019%と大きくなった。現地観測によるパイプ歪計の歪増加量も、長野県北部地震において最大値（2530 μ ）を示し、次いで中越沖地震（847 μ ）、中越地震（324 μ ）であり、解析値と大小関係は整合している。本調査対象地震の地震当日の地下水位の差は、最大で1.0mであり、最大せん断歪が大きい結果を示した長野県北部地震の地下水位が最も低いことから地下水位の影響は大きくないと推定される。したがって、今回の解析結果からみると、長野県北部地震では、地震加速度波の卓越周期が地盤の固有周期と一致したため、パイプ歪計の歪増加量が大きくなったと考えられる。

前述のとおり、地震動観測地点は調査対象地すべりから約6km離れている。パイプ歪計による歪増加量は中越沖地震の約3倍の値を示したことから、柳原地すべり

では、0.16～0.17秒のスペクトルがK-NET安塚より大きかったことも考えられる。

(2) S波速度構造が地震発生時に歪発生に及ぼす影響

一次元地震動応答解析で入力した加速度波形の卓越周期が中越本震（0.36秒）、中越沖地震（0.77秒）、長野県北部地震（0.20秒）で異なるにも関わらず、最大せん断歪発生深度が同じ深度の要素で認められた。このことは動的変形特性曲線をすべり面の上下で求めたことが影響した可能性もある。しかし、PS検層はS波速度がすべり面付近で変化する結果を示した。したがって、この結果は、S波速度の深度間の違いも地震発生時の歪発生に大きな影響を与えたことを示唆すると考えられる。

2014年長野県神城断層地震で発生した地すべりにおいて、PS検層で得られた地盤のS波速度を用いた一次元地震動応答解析による最大せん断歪と推定すべり面が一致したという児玉ほか（2017）の報告がある。また、弱層に強い応力を作用させる可能性のある硬軟境界の存在が地震発生時に火山灰丘陵地で崩壊性地すべり発生危険性を高める要因の一つとなるという報告（杉本, 2014）もある。本研究での卓越周期が異なる3つの加速度波形を用いた解析の結果、最大せん断歪の発生深度はいずれも同じ深度であった。S波速度構造の大きな違いは地盤に硬軟のコントラストがあることを示す。柳原地すべりは、前述のとおり、堅硬な泥岩層の上部が軟質化し地すべり土塊を形成している。硬軟の変化を生じさせているすべり面に地震発生時に強い応力が作用したため、すべり面深度での歪増加量が大きくなったと考えられる。

以上の結果より、S波速度構造等の調査結果にもとづく一次元地震動応答解析は、最大加速度・卓越周期の異なる地震動加速度波形にも用いることが可能で、想定される地震加速度波に対する地すべり斜面の歪変動発生深度の事前評価に活用できる可能性があると言える。

一方、柳原地すべりとは異なり、硬い地盤に挟まれた軟質地盤で歪変動が認められた事例もある（柴崎ほか, 2015）。地震発生時に歪変動が大きくなる特徴を有するすべり面には、いくつかのタイプがあることが考えられる。

5. まとめ

柳原地すべりを対象に、近傍の観測所で記録された最大加速度・卓越周波数の異なる複数の地震加速度波形を用いて一次元地震動応答解析を実施した結果、次のことが明らかとなった。

- ・長野県北部地震でパイプ歪計の歪増加量が中越沖地震よりも大きくなった原因は、地震加速度波の卓越周期が地盤の固有周期と一致し、歪の発生に影響を及ぼしたことが考えられる。
- ・地震動応答解析は卓越周期が異なる3つの加速度波形を用いて行ったが、最大せん断歪の発生深度は同じ深度であった。本事例では、地盤内のS波速度構造も地

震時の歪発生に大きな影響を与えたと考えられる。

- ・S波速度構造等の調査結果にもとづく地震動応答解析は、地盤の固有周期と入力地震加速度波の卓越周期を考慮することが可能であり、想定される地震加速度波に対する地すべり斜面の歪発生深度の事前評価に活用できる可能性がある。

今後、地震動応答解析を地すべり斜面での地震による歪発生深度の事前評価に活用していくためには、地震発生時における複数の観測孔での地盤の変位、地中変位計測に基づいた地震動応答解析の事例の蓄積が必要であると考えられる。また、本研究で行った等価線形化手法による一次元地震動応答解析は、大きなせん断歪みの解析に課題があり、せん断歪みの大きな領域における解析手法についても検討が必要である。さらに、解析対象斜面において定量的な評価を行っていくためには、解析対象となる地すべり斜面での地震動の観測も重要な課題と考えている。

謝 辞

地すべり観測データを提供頂いた新潟県、強震観測網のデータを利用して頂いた国立研究開発法人防災科学技術研究所およびフーリエ・スペクトル解析を行うためのソフトウェア「スペクトル解析」を使用させて頂いた立命館大学伊津野教授に感謝申し上げます。

引用文献

- 荒川直士, 常田賢一, 木全俊雄, 近藤益央, 高松重則 (1982): 地盤の地震時応答特性の数値解析法—SHAKE: DESRA—, 土木研究所資料, 第1778号, p. 5.
- Desai C. S., Christian J. T. (1977): Numerical Methods in Geotechnical Engineering, pp. 692–700.
- Fujisawa K., Ishii Y., Kamihara N. (2006): Monitored Behavior of Landslide at the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, INTERPRAEVENT International Symposium in Niigata, Japan, pp. 25–34.
- Huang C. C., Lee Y. H., Liu H. P., Keefer D. K. and Jibson R.W. (2001): Influence of Surface-Normal Ground Acceleration on the Initiation of the Jih-Feng-Erh-shan Landslide during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 91, No. 5, pp. 953–958.
- Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972): Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, Proc. of American Society of civil engineers, Vol. 98, No. SM, pp. 667–692.
- Ishihara K. (1982): Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis, International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Zurich, pp. 237–259.
- 川邊洋 (2005): 斜面表層の振動特性と不安定化, 日本地すべり学会誌, Vol. 42, No. 2, pp. 112–114.

- 川邊洋, 山口伊佐夫 (1983): 地すべりに及ぼす地震動の影響, 新砂防, Vol. 36, No. 2, pp. 5–16.
- 菅秀哉, 村上治, 大川義明 (2002): 芸予地震による地すべりの地中変位—愛媛県内の事例—, 第41回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 313–316.
- 児玉浩, 高木将行, 石井靖雄, 藤平大 (2017): 一次元地震動応答解析を用いた歪発生深度の推定とS波伝搬速度の検討—市場1号地すべりを例として—, 第56回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 122.
- Lysmer J., Udaka T., Tsai C. F., Seed H. B. (1975): FLUSHU-A Computer Program For Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, Report No. EERC75-30, College of Engineering University of California, Berkeley, pp. 16–21.
- 社団法人日本地すべり学会 (2012): 地震地すべり, 地震地すべりプロジェクト特別委員会の総括編, 社団法人日本地すべり学会, 302p.
- 社団法人日本河川協会 (1997): 建設省河川砂防技術基準 (案) 同解説 計画編 改定新版, 山海堂, pp. 199.
- 大崎順彦 (1994): 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, pp. 189–193.
- 岡本隆, 松浦純生, 浅野志穂, 竹内美次 (2006): 活動中の地すべり地における中越地震発生時の移動および間隙水圧変動特性, 地すべり学会誌, Vol. 43, No. 1, pp. 20–26.
- 岡本隆, 松浦純生, 浅野志穂 (2008): 異なる地震動に対する地すべり変動の比較, 第47回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 67–70.
- Schnabel P. B., Lysmer J. and Seed H. B. (1972): SHAKE-A Computer Program For Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC72-12, College of Engineering University of California, Berkeley, pp. 3–8.
- 柴崎宣之, 石井靖雄, 阿部大志, 片岡正次郎 (2014): 地震動の加速度・卓越周期が地すべりに与える影響, 第53回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 17–18.
- 柴崎宣之, 石井靖雄, 三輪賢志 (2015): 既存地すべりにおける地震動による歪等変動発生深度とその地質的特徴, 第54回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 39–40.
- 柴崎宣之, 石井靖雄 (2016a): 複数深度での地震動観測結果に基づく地すべり土塊の固有周期, 地すべり学会誌, Vol. 53, No. 6, pp. 227–234.
- 柴崎宣之, 石井靖雄 (2016b): 地震による歪発生が認められた地すべりの一次元地震動応答解析と地盤の特徴, 第55回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 68.
- 柴崎宣之, 石井靖雄 (2017): 地震時の地すべり変動発生深度の評価に向けた検討, 土木施工, Vol. 58, No. 6, pp. 38–41.
- 杉本宏之 (2014): 地震によって火山灰被覆丘陵で発生する崩壊性地すべりの危険個所の抽出, 平成26年度 (公社) 日本地すべり学会シンポジウム講演集, pp. 18–21.
- 高橋明久, 阿部真郎, 檜垣大助 (2012): 計測データから見た地震時の地すべり変動, 第51回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 68–69.
- 渡正亮, 小橋澄治 (1987): 地すべり・斜面崩壊の予知と対策, 山海堂, pp. 37–46.
- 吉田望 (2010): 地盤の地震動応答解析, 鹿島出版会, pp. 47–57, pp. 80–83, 175–199.

(原稿受付2018年4月10日, 原稿受理2018年7月25日)