

## 熊本地震時の阿蘇外輪山崩壊地における地震動分布特性の検討

## Characteristics of seismic distribution of landslide slope triggered by Kumamoto earthquake in Aso-somma

浅野志徳\*1・黒川潮\*2・鈴木拓郎\*1

Shiho ASANO\*1, Ushio KUROKAWA\*2, Takuro SUZUKI\*1

\* 1 森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba, Ibaraki 305-8687

\* 2 森林総合研究所九州支所

Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Kumamoto 860-0862

**要旨：**熊本地震では阿蘇火山地域で多数の斜面崩壊が発生し大きな問題となった。火山地域における地震に伴う斜面崩壊の危険度予測に向けて、阿蘇火山の外輪山で発生した規模の大きな崩壊地付近の地震動分布と地形との関係について検討した。ここでは外輪山を対象として地形モデルを作成し有限要素法による応答加速度の分布特性を検討した。その結果外輪山の中でも稜線や稜線上の峰において斜面方向の応答加速度が大きくなる傾向があり、このような場所で規模の大きな崩壊が分布する傾向があることが明らかとなった。

**キーワード：**2016年熊本地震、応答地震加速度、有限要素解析、阿蘇火山

**Abstract:** Many landslides occurred in Aso volcano region in The 2016 Kumamoto Earthquake. In order to estimation of risk of landslide triggered by earthquake, we considered the relationship between topology and distribution of seismic acceleration around large-scale landslides triggered by earthquake in Aso somma. In this study, we constructed three-dimensional mountain model in Aso somma and conducted seismic response analysis by FEM. As a result, it was revealed that strong seismic acceleration tend to be distributed around mountain ridge and peak. And large-scale landslides tend to be occurred in strong seismic motion area.

**Key-word:** Kumamoto earthquake in 2016, response earthquake acceleration, FEM, Aso volcano

## I はじめに

2016年熊本地震では、活断層沿いの強い地震が繰り返し発生し、都市域から周辺地域に及ぶ広い範囲で大きな被害が発生した。この内、阿蘇地域では特にカルデラ西側地域の外輪山や中央火口丘などの山地で多数の斜面崩壊が発生し、家屋やライフラインなど社会基盤に甚大な被害を与えた。このような強い地震に伴う斜面災害の被害を軽減するためには、地震時の崩壊発生機構に基づく斜面の危険度の予測が必要である。

地震時の斜面崩壊発生については、以前は人工地盤を対象に斜面安定解析の検討や振動に伴う斜面の累積変動等により検討されてきた。また自然斜面に対しては、地質構造など発生場の条件についての検討が主に行われてきた。しかし誘因となる地震動については、崩壊時の地震観測が容易ではないことから、特に地形との関係については一部の例(3)の他にあまり検討は進んでいなかった。その後有限要素法など数値解析技術が進んだことに

より、地すべり発生の視点から地盤の変形を伴う地震動の分布と地形の関係について検討が進められ(4)、中越地震では泥岩分布地域の山体の地震動分布と崩壊発生場の関係について検討が行われた(1)。その後、地震動と地すべり変位の関係(5)や広域の地すべり危険度分布を地震動シミュレーションと関連付けて検討する方法(2)など、斜面崩壊危険度予測のための地震動分布の検討が進められている。しかしながら、各地域の地形や地質条件が異なることの影響もあり、山地における地震時崩壊発生機構の解明を進めるためにはまだ様々な地形条件下での検討が必要となっている。

阿蘇地域で発生した地震による崩壊はカルデラの外輪山や中央火口丘で特に多かったが、これらは火山地域に特有の地形であり、また形成年代も地質時代としては新しい。これらの火山地域に特徴的な地形と地震との関係は、今後の火山地域で発生する大規模地震時の崩壊危険度を考える上でも詳細な検討が必要となっている。

そこで本研究では、大きな被害が発生した熊本地震により阿蘇地域の崩壊地、特に外輪山で発生した大規模崩壊地の地震動の分布特性について、数値解析的手法により検討を行った。

## II 対象地と検討方法

**1. 対象地** 本研究の対象は阿蘇市狩尾地区の大規模崩壊地(N32° 57' 35" E131° 0' 30")の周辺斜面である。熊本地震による阿蘇地域の崩壊地は、主にカルデラの西側地域に集中しており、外輪山では狩尾地区周辺が崩壊集中地域の1つにあたる。カルデラ側から見て外輪山の外側はなだらかな斜面であり、内側のカルデラ内壁斜面は急勾配となっている。カルデラ底面と外輪山上部との比高差は400m以上あり、長大な急勾配の斜面となっている。崩壊地は内壁斜面の急斜面部で多く発生している。これらの崩壊地の中でも狩尾地区の大規模崩壊は周辺と比べて崩壊面積が大きく、その周辺にも規模の大きい崩壊が見られる。本報では崩壊幅が30m以上のものを規模が大きいとし、その位置を図-1に示した。

阿蘇火山では大規模な火砕流を伴う噴火が繰り返し発生しており、火山砕屑物が厚く堆積する。このうち対象地の外輪山部分では安山岩などの岩石、その上位に火砕流堆積物が積層する。またカルデラ内部では周囲の斜面からの崩積土や土石流堆積物が分布する。

**2. 解析手法** 本研究では対象地の三次元山体モデルを作成して、これに仮想的に地震動を与えてその振動の伝搬による地震加速度の分布を動的三次元有限要素弾性解析により求めた。三次元山体モデルは、狩尾地区の大規模崩壊付近を中心とした東西方向に南北方向にそれぞれ3kmの範囲の地形モデルを国土地理院の10mDEM

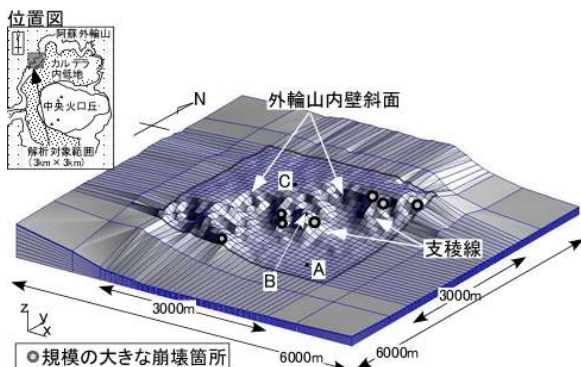


図-1. 作成した対象地の三次元解析モデル  
A,B,Cは図3の検討箇所, Dはモデル底面

Fig.1 Three-dimensional FEM model for analysis

A,B,C are reference points on Fig.3, D is basement of model

を用いて作成し、水平方向100m間隔でメッシュ分割した。モデルは表層と基盤の2層構造とした。モデル底面は標高360mとし、地表から層厚20mの2層の表層、以深を基盤層として底面まで8層に均等分割した。また有限要素解析における境界条件の影響を緩和するため、モデルの周囲に水平長さ1.5kmの範囲に要素を配置して緩衝帯とした。作成したモデルは節点数13475、要素数11560となった(図-1)。要素は8節点6面体アイソパラメトリック1次要素を適用した。メッシュサイズは複数の崩壊地を含む範囲と計算時間との兼ね合いで決定した。メッシュサイズは大きいためここでは、微地形の影響は考慮せず、大きなスケールでの地形との関係を検討した。

境界条件としてモデル側面は面の法線方向の変位を拘束し、底面は全方向変位を拘束した。初期条件として全要素に重力加速度を与えた後に、底面に水平二次元方向に地震加速度を与えた。

基盤の物性値は、現地のボーリング調査結果などが無かったため、防災科学技術研究所による近隣の地震観測点のうち、狩尾地区の大規模崩壊地から東方向に約20kmの外輪山上に位置するKMMH05(波野)のPS検層による20m以深のP波速度とS波速度の平均値から外輪山を構成する地盤の変形特性を決めた。また表層の物性値は現地で行った高精度表面波探査の結果と、KMMH05の表層のPS検層の結果を参考にして決めた。密度は平均的な礫混じりの火山砕屑物の密度( $\rho$ )を参考にして決めた。その結果基盤のヤング率を $2.57 \times 10^9(\text{N/m}^2)$ 、ポアソン比を0.42、密度を $2.1(\text{gf/cm}^3)$ とし、表層のヤング率を $3.34 \times 10^8(\text{N/m}^2)$ 、ポアソン比を0.32、密度を $2.1(\text{gf/cm}^3)$ とした。なお本研究では弾性領域での解析としたため、破壊強度は固い泥岩の強度を仮想的に与えて解析時に降伏しないようにした。

## III 結果と考察

**1. 解析精度の検討** 熊本地震時における図-1の地形モデルの範囲の地震加速度の観測値が無く解析方法の妥当性の検討ができないため、崩壊地から南東方向約2kmのカルデラ底面の地震観測点(KMMH04(阿蘇))の地表と深度100mの過去の観測データを用いて、再現解析を行い解析手法の妥当性について検討した。なおこの観測点は2012頃から観測データを公開しておらず、熊本地震においても地震観測の結果は公開されていない。

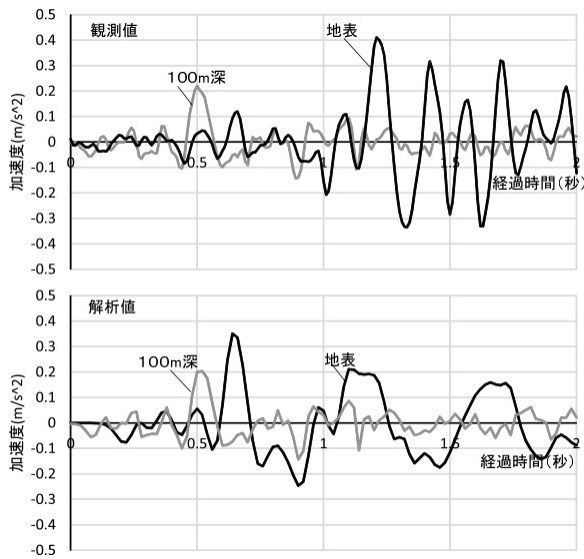


図-2. カルデラ内の観測点(KMMH04)を対象とした解析と観測値の比較

Fig.2 Comparison between FEM analysis and observation on KMMH04 site in Aso-caldera

MMH04 観測点はカルデラ底面の平坦地にあり地形の影響は考慮しなくてもよいと考えて、水平方向 1km×1km、厚さ 100m の直方体モデルを作成した。モデルの要素分割は水平方向には中心付近が密になる様にして、深さ方向は 10m 間隔で均等になるようにした。境界条件や初期条件は本解析と同じとし、物性値は KMMH04 観測点の PS 検層による P 波と S 波それぞれの全層の平均値を元に変形係数を決定し、質量密度は本解析と同じとした。その結果物性値のヤング率を  $4.02 \times 10^8 (\text{N/m}^2)$ 、ポアソン比を 0.49、密度を  $2.1 (\text{gf/cm}^3)$  とした。KMMH04 地点では 2012 年頃から観測を停止していたため、ここでは比較的大きな加速度を記録した 2011 年 10 月 5 日の地震とし、底面に与える地震加速度は KMMH04 の深さ 100m 地点の観測値の東西方向成分を用いた。地震の主要動である S 波が表れてから 2 秒間の地震動を用い、解析ステップは 100Hz、出力ステップは 50Hz とした。解析結果の東西方向成分のみの地表における観測値と解析値の比較を行った。

地表面における解析結果および観測値は図-2 のようになった。100m 深の地震動に対して地表付近の観測地震動は振幅が増大しており、解析結果も同様に増幅した。期間中の最大加速度が観測値で  $0.41 \text{m/s}^2$ 、解析値で  $0.35 \text{m/s}^2$  となり、最大値に関しては、本解析手法で概ね妥当と考えた。しかし、増幅のタイミング等の完全に振動を再現することはできていない。これについては解析が周囲を区切られたモデルを用いて底面からの振動のみ

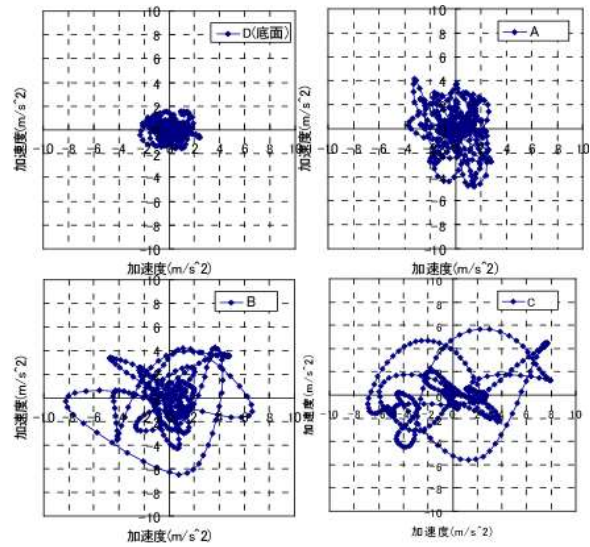


図-3. 各地点の応答加速度の水平方向成分の粒子軌跡図(地点名は図-1 を参照)

Fig.3 Particle motion of horizontal response acceleration on each site (Reference point are shown on Fig.1)

を検討しており、実際には反射などにより多方向から地震動が伝わっていること等の理由によると考えられる。ここでは崩壊に作用する地震動として主に最大値で検討することとし、その点では本解析で概ね検討できると考えた。今後より再現性の高い解析を行うため境界条件の設定方法や計算方法の改善を行う必要がある。

**2. 応答加速度の軌跡** 本解析では前述の対象地のモデルの底面に地震動を与えてその伝搬による応答加速度の分布を求める。底面に入力する地震加速度として、対象地の直接の観測データが無い場合、熊本地震の一連の地震観測データの中で最大であった地震観測点、地震加速度最も大きな地震動を用いることにした。記録された最大の地震加速度である 2016 年 4 月 16 日 1:24 に益城町の観測点(KMMH16)の深度 100m で測定された地震加速度の水平成分を用いた。この観測点は対象地から南西方向に約 25km 離れている。鉛直方向成分の解析への影響についてはまだ不明な点が多いため、ここでは考慮しなかった。本震の主要動が表れてから 4 秒間の地震動を用い、解析ステップは 100Hz とした。

ここではモデル底面に入力波、カルデラ底面(A)、斜面上部(B)、外輪山上部平坦面(C)の代表地点について、解析による応答加速度の水平成分の粒子軌跡図を図-3 に示した。これによると底面から地表に向かって応答加速度が増幅しており、特に斜面の上部で、加速度の振幅が更に大きくなった。斜面上で加速度の振幅が大きくなる方向は斜面の傾斜方向に近かった。外輪山の上部の平坦



面では全方向で加速度の振幅が大きくなった。応答加速度の増幅の度合いや大きくなりやすい方向などは、地形の影響が反映しているものと考えられる。

**3. 斜面方向の最大加速度の分布** 斜面崩壊発生に強く影響するのは、斜面の傾斜方向に発生する地震加速度である。そこで地震応答解析の結果から、各斜面の最大傾斜方向の水平成分を、解析モデル要素の地表面の法線方向の水平成分として求めて、この方向に生じる応答加速度の最大値の分布を図-4に示した。

斜面方向に発生する応答加速度の最大値の分布は、全としてカルデラ底面から外輪山にかけて、標高が高くなるほど大きくなる傾向を示した。崩壊が斜面で発生することを考えると、外輪山上部平坦面の応答加速度はここでは議論しない。外輪山内壁斜面について検討すると、外輪山内壁斜面の上端の稜線付近と、内壁斜面から突出した支稜線沿いの斜面で、大きな応答加速度が発生していた。応答加速度の大きさを比較すると、斜面下部のカルデラ底面や内壁斜面の横断形状が凹地形となっている谷斜面と比較して、支稜線沿い斜面の上部や内壁斜面の最上部では2倍から3倍程度の応答加速度が現れた。また支稜線沿いに現れた大きな応答加速度帯は斜面下部の緩斜面まで広がっており、斜面全体で大きな加速度が発生することを示した。崩壊発生場所を合わせて検討すると、規模の大きな崩壊は、斜面全体で大きな応答加速度が現れる支稜線沿いに分布する傾向にある。外輪山内壁斜面の応答加速度は上部で大きい斜面中腹では支稜線に比べるとやや小さい。崩壊も斜面上部付近に比較的規模の小さいものが多い傾向にあった。

熊本地震の外輪山の崩壊については、地形的に大きな地震加速度が現れやすい、内壁斜面上部や支稜線の斜面で多い傾向があると言える。特に規模の大きな崩壊は斜

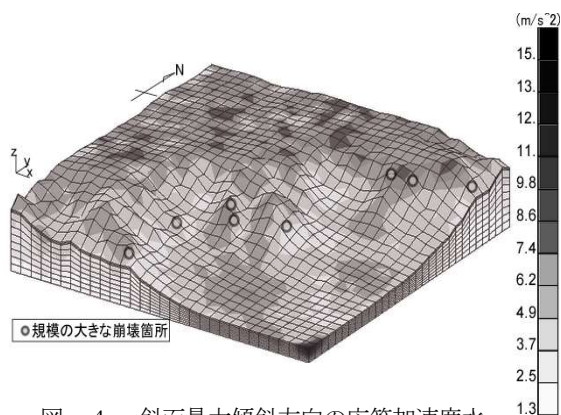


図-4. 斜面最大傾斜方向の応答加速度水平成分の最大値の分布

Fig.4 Distribution of maximum horizontal response acceleration on each slope direction

面全体で大きな地震加速度が現れやすい支稜線沿いに多くなり易いと考えられる。規模の大きな崩壊の中には地震動の大きな箇所と必ずしも一致しない箇所もあるが、実際の崩壊は地震加速度だけでなく、表層土や基盤の崩壊に対する強度が影響するためと考えられ、両者の条件が揃う場所でその危険度が高くなると考えられる。

#### IV まとめ

本研究により、大規模な火山に特有な外輪山において大規模な地震時の崩壊に影響する地震動の特徴について、解析的手法により検討した。その結果外輪山の内壁斜面の上部や、内壁斜面から突出する支稜線沿いで大きな地震加速度が現れやすい。特に規模の大きな崩壊は、斜面全体で加速度が大きくなる支稜線沿いに多くなりやすいことなどの特徴が明らかとなった。今後は更に他の箇所についても検討を進めて、火山地域における強い地震動による崩壊危険度に関する検討を進めたい。

**謝辞:** 本研究は森林総合研究所運営費交付金プロジェクト(201601)の一部として実施した。また、国土地理院の数値標高モデル、(国研)防災科学技術研究所の強震観測網データを利用した。崩壊地分布については、林野庁調査結果を利用した。関係各位に謝意を申し上げる。

#### 引用文献

- (1) 浅野志穂・落合博貴・黒川潮・岡田康彦 (2006) 山地における地震動の地形効果と斜面崩壊への影響. 日本地すべり学会誌 42(6) : 457-466
- (2) 林一成・若井明彦・田中頼博・阿部真郎 (2011) 地形・地質解析と有限要素解析の連携による地震時の地すべり危険度評価手法. 日本地すべり学会誌 48(1) : 1-11
- (3) 西村敬一・森井互 (1983) 地震動に及ぼす地形の影響の観測. 地震 36 : 383-392
- (4) 落合博貴・北原曜・三森利昭・阿部和時 (1995) 地震による山腹斜面崩壊と地震時応答解析. 兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究報告書 地すべり学会 119-132
- (5) 若井明彦・鶴飼恵三・尾上篤生・樋口邦弘・黒田誠一郎 (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 44(3) : 145-155
- (6) 吉中龍之進・長田昌彦・五月女敦・杉山弘泰・浜野久美 (2001) 三軸圧縮試験による火山角礫岩の強度及び変形特性. 土木学会論文集 673 : 85-100