

地震と土砂生産機構に関する研究

安田勇次*

1 はじめに

近年、阪神・淡路大震災や芸予地震にみられるように、地震による斜面崩壊が多く発生し、多くの被害を与えている。また中央防災会議で指摘されている東南海・南海地震が発生した場合にも、多くの斜面崩壊が発生し被害を与えることが危惧される。当センターの自主研究課題である「地震と土砂生産機構に関する研究」は、地震時に発生する表層崩壊を予測することができれば、事前に対策等を講じることによりその被害を最小限にとどめることが可能となると考え、地震時に発生する表層崩壊を過去の事例をもとに予測することが可能であるかについて検討を行ってきた。地震と表層崩壊との関係については、これまでに多くの研究がなされている。それらの研究成果の一例を挙げると以下のとおりである。

- ①地震時の斜面崩壊と凸型や平行型の地形形状に関する研究（大村、1975；尾張・駒村、1965；芥川ほか、1980；山口・川邊、1982；川邊、1987；Keefe, 1993；Ochiai et al., 1995；Saito et al., 1995；Japanese Geomorphological Union, 1996；Nishida et al., 1997，；西田ほか、1996）。
- ②凸型地形における地震波の増幅に関する研究（Nishida et al., 1997；Ochiai, 1997）。
- ③地震波の増幅現象は、これまでの経験によれば、平地の沖積地盤で丘陵地の硬質地盤に比べ増幅されやすいこと（Ohsaki, 1983；Ando, 1993）、標高が高くなるほど増幅され地震加速度は大きくなるとされる（Kawabe et al., 1997）。
- ④地震による山腹崩壊の統計的特徴は、標高・比高：斜面の上方に位置するものが多い、勾配：35°～55°の急斜面での崩壊が多い、斜面形状：遷急点付近での崩壊が多い、平衡型斜面や尾根型斜面で崩壊が多い、凹凸が激しいほど崩壊出現率が高い

などである（奥藪誠之ら、1995）。

- ⑤実在する山体モデルを対象に地震時の斜面変動を再現する動的シミュレーションが試みられ（Ochiai, 1997；Wang, 1998）、その結果はモデル底面から入力した地震波が尾根筋に沿って大きな加速度が応答している。増幅された加速度により尾根部に発生した亀裂は、その後も残留変位として山体中に残存するため、余震や降雨により新規崩壊を発生させることは否定できない（Hirmatsu et al., 1995）。

これら地震と表層崩壊に関する研究は、地形形状による表層崩壊の発生しやすさや地震波の増幅効果に注目した研究が行われてきた。しかし、地震動や地盤性状の影響、崩壊の可能な規模や山体崩壊ポテンシャル等から土砂生産機構と災害防止の観点に立った総括的研究がされた事例は少ない。

そこで本研究では、地震に起因し発生する表層崩壊について、地形指標から予測する手法の開発を目的とし、初年度には3次元動的振動解析によりモデル斜面における地形要素と地震波の増幅の関係について検討をおこなった。次年度は地形形状による地震時の斜面形状の変化に及ぼす影響の検討とそれら地形形状要素に着目し、阪神・淡路大震災時に表層崩壊を発生させた実斜面を用いた解析を実施した。最終年度である平成15年度には、残留ひずみと地形指標（勾配、方向、平均曲率）の関係を整理し、地震時の表層崩壊の発生危険度を示す一般化手法の検討を試みている。本稿では、本自主研究の主な研究成果について紹介する。

2 モデル斜面における地形形状の影響

既往研究成果では、地震時に発生する表層崩壊は地形形状の影響を強く受けるとされている。そこで地震動が斜面崩壊に及ぼす地形形状の影響を把握するために、典型的な微地形（凸、平坦、凹型地形）

*（財）砂防・地すべり技術センター砂防技術研究所
上席研究員

を有する仮定の斜面地形を作成し、地震動による斜面微地形形状の相違による斜面の変形状況の傾向を残留変位に着目した解析をおこなった。

2.1 解析モデル

解析に適用する地形モデルは、幅140m、長さ200m、全層厚8mの水平から32°の傾斜を有する平坦部に、尾根部の地形をイメージした凸型楕円体（長(a)・中(b)・短(c)軸の半径をそれぞれa=70m、b=35m、c=10m）とする地形モデル（図1、表1

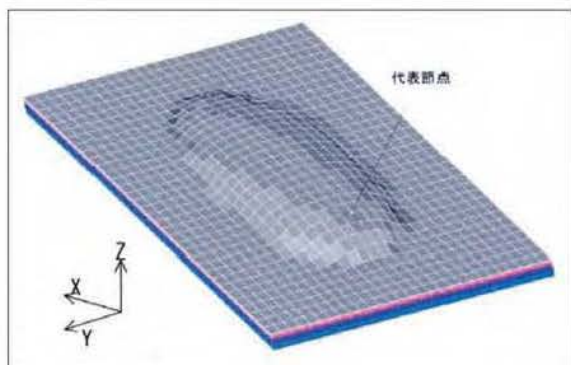


図1 地形モデル

表1 地形モデルの概念

| 地形形状 | ① (凸型) | ② (フラット面) | ③ (凹型) |
|------|--------|-----------|--------|
| | | | |

表2 動的強度特性値

| 項目 | 記号 | 単位 | 鉛直方向の層毎 (cm) | | | | | | | |
|---------|----------|-------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | 0~25 | 25~50 | 50~100 | 100~150 | 150~200 | 200~300 | 300~550 | 550~800 |
| せん断弾性係数 | G | N/m ² | 6.71E+06 | 1.15E+07 | 1.61E+07 | 2.08E+07 | 2.54E+07 | 3.20E+07 | 4.39E+07 | 1.98E+08 |
| 体積弾性係数 | K | N/m ² | 4.46E+07 | 4.46E+07 | 8.92E+07 | 1.78E+08 | 2.04E+08 | 2.04E+08 | 4.09E+08 | 8.18E+08 |
| 単位体積質量 | ρ | kg/m ³ | 1600 | 1600 | 1600 | 1600 | 1700 | 1900 | 2100 | 2200 |
| せん断強度 | τ_f | N/m ² | 5.96E+04 | 6.09E+04 | 6.29E+04 | 6.63E+04 | 7.53E+04 | 8.39E+04 | 9.96E+04 | 1.38E+05 |

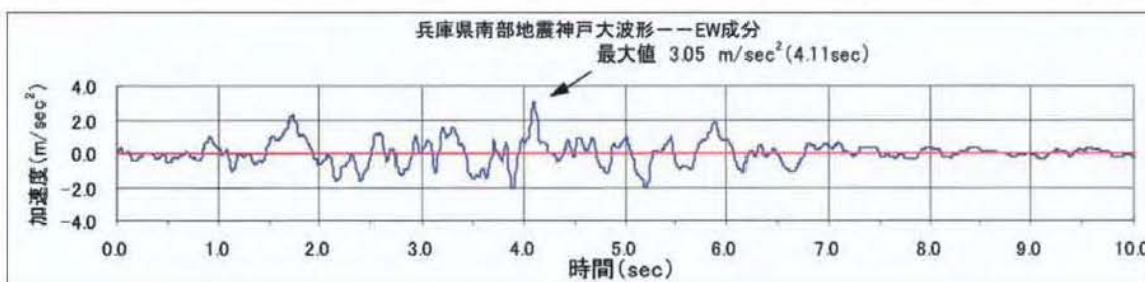


図2 入力地震動波形

参照)である。また比較ケースとして上記の斜面傾斜角 θ を20°にしたケース及び、楕円体の短(c)軸半径をc=5mとしたケースを設定した。入力地震波の卓越周期などを考慮し地形モデルのX、Y方向の分割の大きさは500cm×500cm、深度Z方向の分割は25cm~250cm程度の8層構造とした。

入力地震波は、図2に示す兵庫県南部地震時に神戸大学で計測された地震波形をもとに、その地震波形のEW成分($Acc_{max}=3.0m/s^2$ 程度)を、斜面長さ方向(X)の水平方向に与えた。地盤の動的強度特性は表2のとおりである。また、境界条件としては底面を周期境界、側方を周期境界とローラー境界としている。

2.2 解析結果

残留変位は、凸型の方がフラット面及び凹型より大きく、凸型・フラット面・凹型のいずれの場合でも曲率の大きい程、残留変位も大きい。また、地震波形の入力方向に影響されるが、対象斜面に水平方向に地震波形を入力した場合には、斜面中心より左右方向で残留変位が大きくなる傾向がある。さらに、

層厚を一定とした場合、残留変位は地形の凸程度が大きくなると、残留変位も大きくなる。一例として図3に、傾斜角32°の各地形の地表面におけるX方向の応答加速度及び変位分布を示す。加速度応答及び変位応答は表面形状の凹凸に応じて分布し、特に斜面肩部、凹面のような急変部ではいずれの値も大きく変化している。

2.3 回帰分析

地震時の斜面変形と地形形状の関係を把握するため、地形特徴係数として①平均曲率、②局所傾斜角、③局所傾斜方向（斜面長さ方向（X）を0°とする）を設定し、地表面の残留変位（ベクトル値）との重相関関係をみた。局所傾斜方向を10°毎に分割し、全体傾斜面角32°の凸面ケースを対象とした。

モデル形状および局所傾斜方向との単相関結果の対称性により、データ数251個のうち、120~180度範囲内の112個を対象に検討を行った結果を表3に示した。この解析結果より「平均曲率と局所傾斜角による影響度は、概ね斜面縦断方向より斜面横断方向の方が大きいこと、局所傾斜方向による影響度は、斜面縦断方向の斜面下方より約45°となる斜面方向で最も大きい」ことが読み取れる。

3 実斜面地形を用いた動的振動解析

3.1 地形モデルの概要

検討対象地域は、1995年兵庫県南部地震による新規崩壊の箇所を有する神戸市住吉川五助地区を対象とした。対象地域の層厚および土質・岩質などは、既往の調査結果（ボーリング柱状図、標準・簡易貫入試験、比抵抗、P S 検層など）をもとに、対象地域の代表的な断面における土質・岩質分布を把握して、表層の平均的な層厚を設定した（図4）。図4において、四角で囲まれた領域が解析範囲、丸印で示した個所が崩壊地である。入力地震動は、神戸大学で観測された速度波形の3成分を用いた。

3.2 解析結果

図5に阪神・淡路大震災時に表層崩壊を生じた個所における加震後の残留変位の分布図を示した。

図5から岩盤部と土砂部の境界付近より浅い領域において、残留変位が大きくなり、斜面上部の凸型部分に斜面下方方向の大きな残留変位を生じていることがわかる。このことから、表層土層において地震波が増幅され、特に凸型の地形形状を有する斜面においては、ひずみが大きくなることが示された（図5(a)）。一方、図5(b)に示した崩壊地周辺の

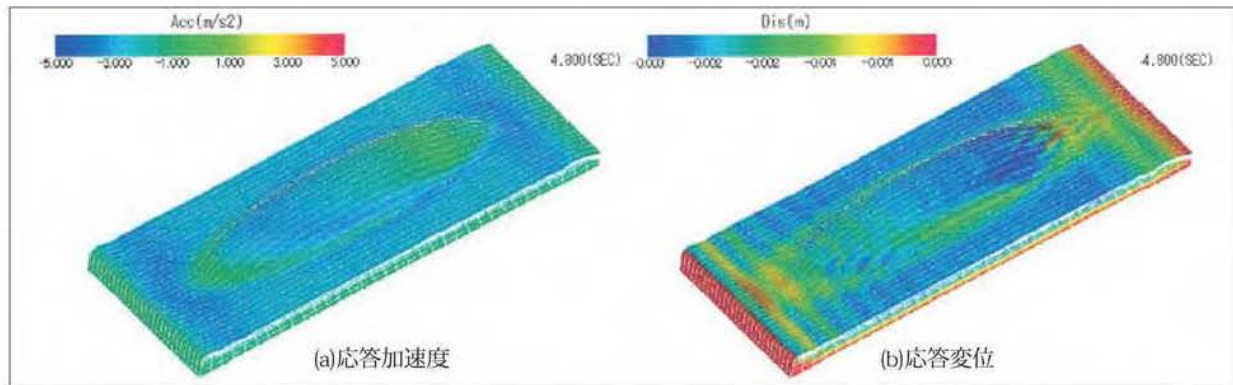


図3 加速度・変位の応答分布（X方向、上：凸面、中：フラット面、下：凹面）

表3 重回帰解析結果—偏回帰係数一覧

| 偏回帰係数 | | 局所傾斜方向10度毎 | | | | | | 平均値 |
|--------|------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 相関項目 | 係数記号 | 120-130 | 130-140 | 140-150 | 150-160 | 160-170 | 170-180 | |
| 平均曲率×1 | c | 0.1316 | 0.5514 | 0.0094 | -0.3483 | -0.2028 | 0.0655 | 0.0345 |
| 傾斜角×2 | a | 0.4046 | 0.7510 | -0.5400 | -0.7723 | -0.0332 | -0.2874 | -0.0796 |
| 傾斜方向×3 | d | -6.6722 | -0.8361 | 0.8326 | -1.6497 | -6.8491 | -3.7400 | -3.1524 |
| 定数10 | k | 14.6436 | 2.6050 | -0.0166 | 5.0176 | 15.6043 | 9.6409 | 7.9158 |
| データ個数 | N | 10 | 9 | 15 | 20 | 26 | 32 | 19 |

斜面では、図5(a)に見られるほどの残留変位は生じていない。このことから、モデル斜面で行った解析と同様に、局所的な凸型斜面の形状が、地震時に表層崩壊を生じやすい傾向にあることが示された。

4 崩壊発生危険度評価手法

4.1 崩壊発生危険度指標

これまで筆者らは、地震時に生じる斜面の挙動について、斜面形状の違いに着目し3次元動的振動解析を用い、その影響を評価してきた。その結果、地震波の卓越する斜面方向や局所的な地表面の形状に応じて異なった斜面上のひずみレベル(残留変位)を応答していることを確認した。この残留変位と地形指標(斜面傾斜方向・斜面傾斜角・平均曲率)と

の関係を見出し、地震時に崩壊が発生するであろう範囲を抽出する危険度評価手法の検討を行った。しかし、図6(a)に示した通り残留変位を用いた場合、個々のメッシュの方向が単位斜面全体の傾斜方向と一致していないと、実際に地震時に崩壊を生じた斜面との対応が良くないことがわかった。そこで、方向成分を持たない「残留ひずみ」を用いることとした。有限要素法弾塑性応答解析で残留ひずみが大きな値を示した範囲と、実際に崩壊が生じた斜面との対応が良くなった(図6(b))。

4.2 地形指標と表層崩壊発生危険度指標の関係

この残留ひずみと地形指標との関係を整理したものを図7に示した。図7より平均曲率が大きくなると斜面勾配に依存することなく、残留ひずみが大きくなる傾向が認められる。また斜面傾斜角が30°以上の斜面では、平均曲率に依存することなく、残留ひずみが大きくなることが示された。平均曲率が大きな斜面は尾根部や上部斜面である。このことは、地震時に発生した表層崩壊が尾根部や上部斜面に多くみられるという考察を裏付けるものである。

4.3 表層崩壊発生危険度算出式

地形指標と残留ひずみ(表層崩壊発生危険度指標)の関係について、単回帰分析や重回帰分析により検討を行った。その結果、式(1)に示す関係が最も相関が高く有意であった。

$$y = c \cdot x_1 + a \cdot x_2 + k \quad \dots (1)$$

ここで、y: 解析によって得られる残留ひずみの



図4 解析範囲位置図

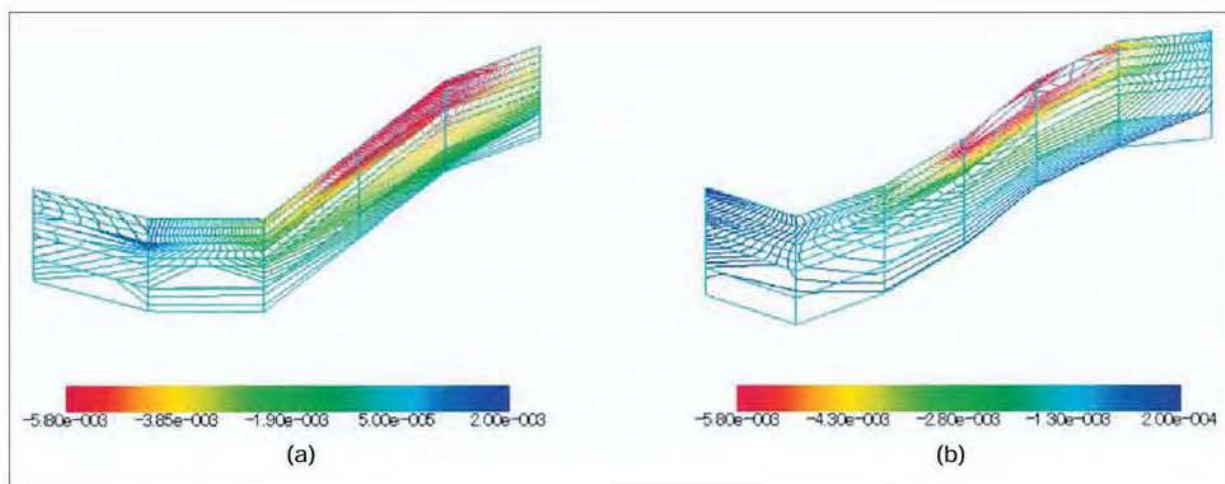


図5 崩壊地における残留変位分布図

予測値、 x_1 :任意メッシュの平均曲率、 x_2 :任意メッシュの斜面傾斜角、 c,a :係数 ($c=1.59E-2, a=-2.08E-6$), k :定数項 ($k=2.09E-4$) である。

表層崩壊発生危険度算出式では、累加・累乗近似式の検討や平均曲率・斜面傾斜角を算出するメッシュサイズ等について検討を行い、最も相関が認められた $20 \times 20m$ のメッシュサイズを用いた。また他地域で簡易に表層崩壊発生危険度が検討できることを前提としているため、今回解析で用いたFEMメッシュとグリッドメッシュとの違いについても検討を行ったが、メッシュサイズが小さければ影響ないこ

とを確認している。

5 六甲山系への適用と考察

兵庫県南部地震で発生した表層斜面崩壊をもとに、地形指標を用い簡易に地震時に発生する表層崩壊を予測する手法の検討を行ってきた。前項までにその算出式に至る過程を説明したが、ここでは他地域への適用について検討を行った。本検討は六甲山系地区で荒地山、都賀川流域および山田川流域の3地域とし、それぞれ $5 \times 5km$ の範囲を設定した。図

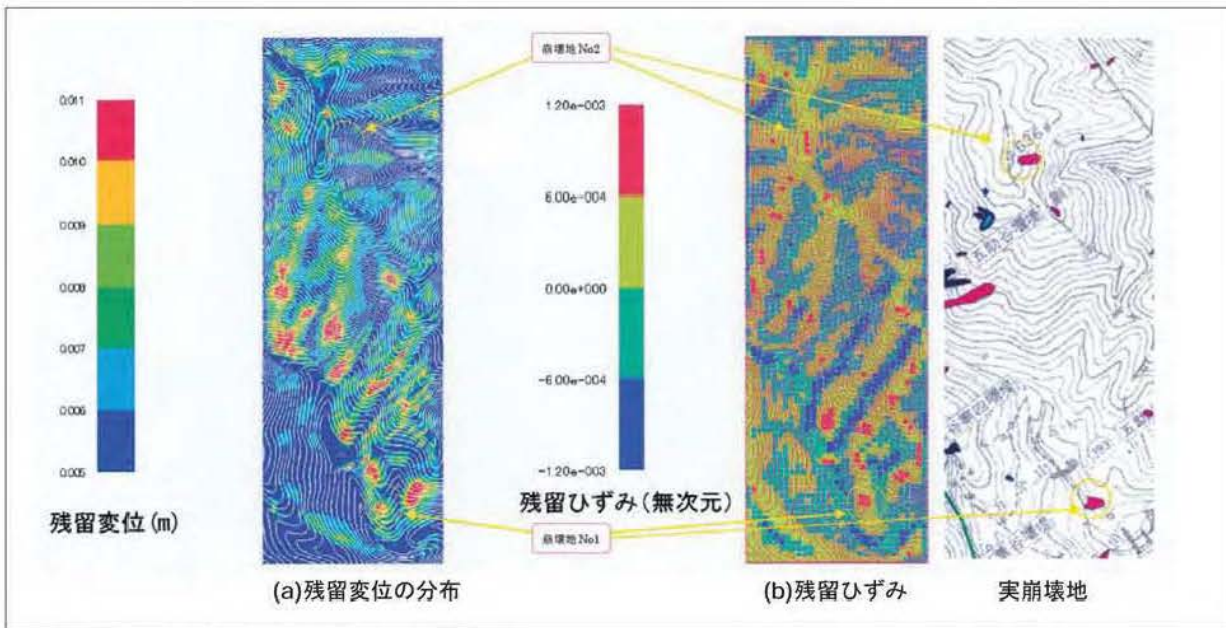


図6 兵庫県南部地震時に発生した表層崩壊と解析結果

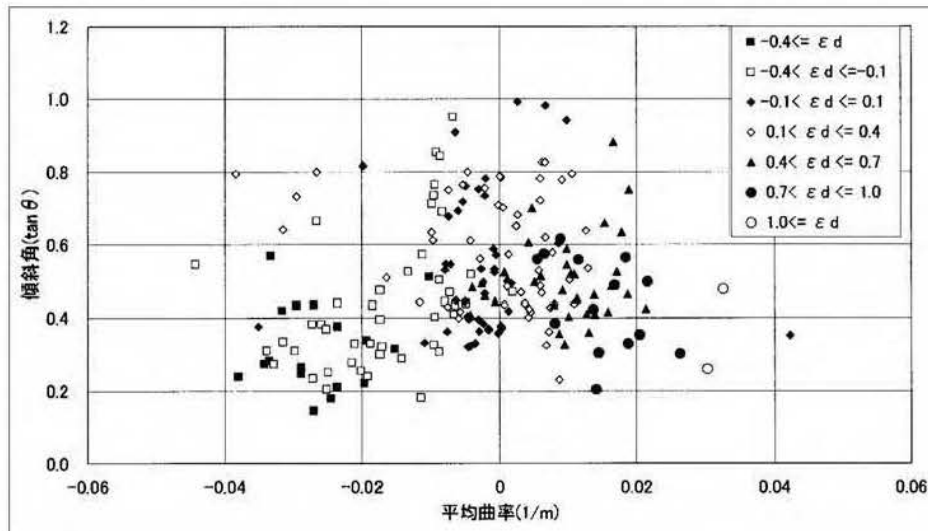


図7 平均曲率・傾斜角と残留ひずみの関係

8に検討範囲位置図と解析結果の一例を示す。

六甲山系に適用した結果、地形指標から地震時に表層崩壊が発生する危険性のある個所は、荒地山地区で2.11%、都賀川流域地区で3.25%、山田川流域地区で3.02%であった。平成7年の阪神・淡路大震災時に実際に崩壊した面積率は、それぞれ0.31、0.46、0.40%であったことから、かなり多めに危険と判別されていることになる。また、実際に崩壊が発生した個所をどの程度予測できたかについては山田川流域を例に挙げると、実崩壊箇所数408箇所に対し、計算により予測された箇所数79箇所であり、

的中率にすると19%である。

この結果から判断すると本手法により抽出された表層崩壊発生危険箇所は、実際に発生した崩壊に比べかなり多めに算出される。また実際に崩壊が発生した地点の2割しか的中していないこととなる。

しかし、図9に示した解析により得られた崩壊発生箇所と実崩壊地が分布する位置関係を調べたものとみると、解析により抽出された地点の近傍50m以内の範囲に実崩壊地が90%分布している。このことは本手法は、概ね地震時に発生するであろう表層崩壊の地点を予測しようということである。



図8 六甲山系での解析事例

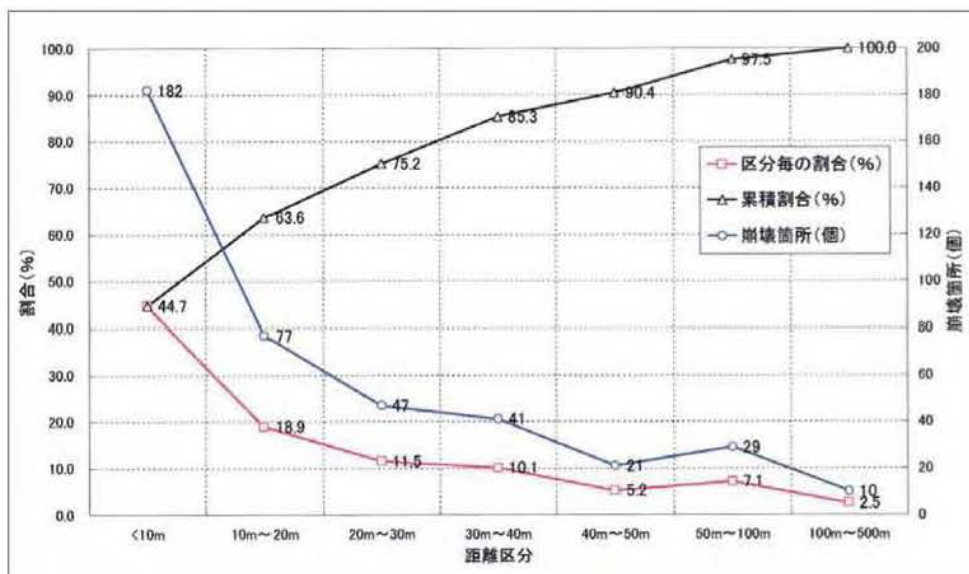


図9 解析結果と実崩壊地の分布位置の関係

6 おわりに

本研究では、地震時に発生する表層崩壊が既往研究などで地形要素と関係が示されていたものを、モデル斜面を作成し3次元動的振動解析により、表層崩壊が発生しやすい斜面を平均曲率と斜面傾斜角を用いて表現できることを示した。さらにそれら地形要素と解析により得られた残留ひずみから、地震時に発生する表層崩壊の個所を予測する関係式を導いた。この表層崩壊発生危険度算出式により地震時に発生する表層崩壊を予測することが可能となったと考えている。しかし本研究では、兵庫県南部地震の地震波形による六甲山周辺地域での検討にとどまっている。このことは、検討対象となる地域の地質が花崗岩であることが前提条件となる。

よって今後は、他の地震波形での応答や地質条件が異なる地域での本手法の適用性について議論することが必要であると考えます。

最後に本研究は、(社)砂防学会と(財)砂防・地すべり技術センターとの共同研究によって行われたものであり、本論文は砂防学会研究発表会に発表した内容を取りまとめたものであることを明記するとともに、本研究を進めるにあたりご尽力頂いた関係者の方々にこの場を借りて、謝意を表します。

【引用文献】

松村ら (2002)、地震による斜面崩壊に関する地形効果の解析的研究、平成14年度砂防学会研究発表会概要集、(社)砂防学会、p.206-207

安田ら (2003)、動的振動解析による地震時の表層崩壊の発生機構について、平成15年度砂防学会研究発表会概要集、(社)砂防学会、p.190-191