

広域での地震時の斜面崩壊危険度の事例研究

山本明夫*・稲垣賢亮*・岡本由貴*・若井明彦**

A Case Study of Risk Assessment for the Earthquake-induced Slope Failures Using Micro-Zoning Technique

Akio YAMAMOTO*, Yoshiaki INAGAKI*, Yuki OKAMOTO* and Akihiko WAKAI**

Abstract

The seismic micro-zoning technique has been used frequently to estimate earthquake damages and to develop earthquake disaster reduction plans. This paper focuses on earthquake-induced slope failures and reviews risk assessment methods by earthquake-induced slope failures metrics table. A new method of risk assessment for earthquake-induced slope failures is introduced. This method consists of 3D-FEM response analysis. Two methods are used to calculate seismic motion of the active fault associated with the 2000 Tottori-Ken-Seibu Earthquake. Seismic motion calculations are carried out with the usual seismic micro-zoning technique and compared to the proposed 3D-FEM response analysis by BESSRA (Bird's-Eye-viewed Slope analysis for Seismic Risk Assessment). Our proposed method integrates slope analysis by BESSRA with the instrumental seismic intensity from seismic micro-zoning technique. This allows for 1D micro-zoning seismic motion calculations to take into account 3D topographic effects. The new instrumental seismic intensity with integrated 3D topographic effect is then adapted to the earthquake-induced slope failures metrics table, and risk assessment of earthquake-induced slope failures is improved with the proposed methodology.

Keywords: risk assessment, earthquake-induced slope failures, seismic micro-zoning technique, 3D-FEM analysis, 3D topographic effect of seismic motions.

要 旨

本論文は、近年、各地方自治体で実施されている地震被害想定調査の中で、地震時の斜面崩壊危険度の予測手法に焦点を当て、新しい手法を導入してその手法の改善を図ったものである。地震被害想定調査の中で用いられる地震時の斜面崩壊危険度予測手法は、広域での評価を行わなければならないことから、地震被害想定調査で算出した一次元地震応答解析による計測震度を用いて、過去の地震時の斜面崩壊事例を基にした評価点方式による相対評価手法が永く用いられてきている。この斜面危険度予測手法について、より詳細なアプローチとして、斜面の三次元有限要素法による地震応答解析に基づく方法(BESSRA(2013)³⁾: Bird's-Eye-viewed Slope analysis for Seismic Risk Assessment)を導入した。この三次元解析手法を用いて、2000年鳥取県西部地震の地震断層を震源とした地表の地震動を算出し、その計測震度を基に、三次元地形効果を評価し、地震被害想定調査による計測震度を修正した。また、その結果を用いて評価点方式による斜面崩壊危険度相対評価を実施し、三次元地形効果を取り入れた斜面崩壊危険度評価結果を得た。ここで開発した手法は、直接、三次元有限要素法による地表計測震度を用いるより簡便に適用できるものであり、このような地震動の三次元地形効果を加味した解析が今後望まれる。

キーワード：危険度評価，地震による斜面崩壊，サイスミック・マイクロゾーニング，三次元 FEM 解析，地震動の三次元地形効果

*応用地質（株）社会システム事業部 **群馬大学大学院理工学府

* OYO Corporation Social System Business Division, ** Department of Civil and Environmental Engineering Gunma University.

1. まえがき

日本は平野が少なく山がちな地形から急傾斜地が多く、急傾斜地直下にも多くの住宅が存在している。近年の2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震においても多くの急傾斜地の崩壊が発生しており、建物被害および人的被害が発生している。また、都市部においては、台地・丘陵地を人工的に改変して大規模な造成地を作ることもあり、地震による斜面被害の問題は、地震被害全体の中でも、その解析手法と対策において課題の多いものとなっている。

これらの地震災害に関し、国および地方自治体では想定地震を設定して、対象地域の地震動予測、液状化予測、急傾斜地崩壊の予測、津波浸水予測、建物被害予測、火災延焼被害予測など各種の被害予測を実施し被害量を事前に把握する地震被害想定調査(サイスミック・マイクロゾーニング調査)を実施した後、地震防災対策を更新するようになっている。

地震時の急傾斜地・斜面問題に関して、山本ほか(2013)¹⁾は、現在までサイスミック・マイクロゾーニング調査で行われてきた急傾斜地崩壊危険度の予測について、その手法をレビューするとともに、新しく開発した急傾斜地崩壊の予測手法を紹介し、実際の地震による斜面被害を用いて、手法の検証を行っている。

本論文では、この新しい手法について、今回の解析地域に適用するとともに、同地域で行ったサイスミック・マイクロゾーニング調査の急傾斜地崩壊危険度の予測と比較した。さらに、2000年鳥取県西部地震での実際の斜面崩壊地点と比較し、これらを基に斜面崩壊危険度予測の新しい評価手法を検討・解析したものである。

2. 設定した手法

2.1 サイスミック・マイクロゾーニング調査による斜面崩壊危険度予測手法

図1にサイスミック・マイクロゾーニング調査による斜面崩壊危険度予測についてのフローチャートを示した。その手法の要約は以下の通りである。

- (1) 検討地域(主に都道府県全域)を、約250m×約250mの区域(250mメッシュ)に細分し、解析を開始する。
- (2) 想定地震を設定し、その巨視的および微視的パラメータから統計的グリーン関数法を用いて、メッシュの工学的基盤における地震動を算出する。
- (3) 250mメッシュごとに一次元のS波速度層モデルを基本とした地盤解析モデルを作成する。
- (4) この地盤解析モデルおよび(2)の工学的基盤での地震動を入力として、一次元地震応答解析により地

表の地震動を計算し、この計算波形から最大加速度(PGA)、最大速度(PGV)、計測震度、震度階などを得る。

- (5) これら計測震度などの地震動指標を用いて様々な被害予測を行うが、斜面崩壊危険度の予測は計測震度と斜面カルテの相対危険度ランクを用いて、表1²⁾のように判定される。
- (6) ここで、地震動による相対危険度ランクA, B, Cは「危険性が高い」、「危険性がある」、「危険性が低い」というような、定性的、相対的なものとなっている。

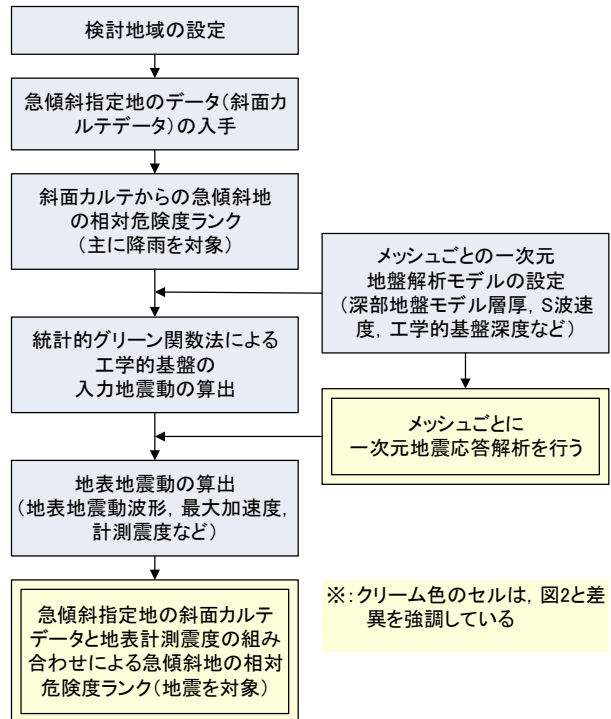


図1 サイスミック・マイクロゾーニング調査による斜面崩壊危険度予測のフローチャート

表1 地震時斜面崩壊危険度判定ランク²⁾

計測震度	斜面カルテの危険度ランク ^{※1)}		
	c	b	a
6.0以上	A ^{※2)}	A	A
5.5以上～6.0未満	B	A	A
5.0以上～5.5未満	C	B ^{※2)}	A
4.5以上～5.0未満	C	C	B
4.5未満	C	C	C ^{※2)}

※1: 斜面カルテの危険度ランクは、c→b→aの順により危険側になる。

※2: 地震動による危険度ランクは以下のものとしている。

ランクA: 危険性が高い

ランクB: 危険性がある

ランクC: 危険性が低い

○対策工が既成の場合は、ランクCとする。

2.2 三次元広域地震応答解析システムによる斜面崩壊危険度予測手法

今回の三次元解析は、新しく開発された広域地震応答解析システム (BESSRA(2013)³⁾: Bird's-Eye-viewed Slope analysis for Seismic Risk Assessment) により行った。このシステムは、若井ほか(2008)⁴⁾の解析プログラムをコアに、入出力を GUI(Graphical User Interface)化して整備したものである。この解析システムの詳細については、山本ほか(2013)¹⁾において解説している。

図 2 に三次元広域地震応答解析システムによる斜面崩壊危険度予測のフローチャートを示した。その手法の要約は以下の通りである。

- (1) 検討地域の地表の三次元地形形状を、国土地理院 50m メッシュ標高データなどから作成する。
- (2) 検討地域の地盤の三次元解析メッシュモデルを KiK-net 地点などのリファレンス地点の地盤解析モデルを参照して作成する。今回は、三次元地表面から工学的基盤面までの厚さに占める各層の比率が、リファレンス地点のサイスミック・マイクロゾーニング調査による一次元地盤解析モデルの層厚の比率に等しいものとして、三次元地盤解析メッシュモデルを作成する。
- (3) 図 1 に示すサイスミック・マイクロゾーニング調査で算出した工学的基盤での入力地震動を用いて、三次元地盤解析メッシュモデル底面での入力地震動を作成する。
- (4) BESSRA(2013)³⁾により三次元地震応答計算を行い、三次元メッシュの地表の地震動を算出する。
- (5) 算出した地表最大加速度、最大せん断応力などから、斜面崩壊危険度を検討する。この具体的な検討事例は、山本ほか(2013)¹⁾の 3.3 節を参照されたい。

上記は、BESSRA(2013)³⁾単独で斜面崩壊危険度を検討する場合であり、今回は、サイスミック・マイクロゾーニング手法と関係づけた新しい手法を提案している。

3. 斜面崩壊危険度の新しい予測手法の開発

3.1 サイスミック・マイクロゾーニング調査による解析事例

ここで示すサイスミック・マイクロゾーニング調査による解析事例は、鳥取県(2015)⁵⁾によるものであり、対象とした想定地震は、2000 年鳥取県西部地震の地震断層によるものである。解析は、約 250m のメッシュサイズ行っており、震源から工学的基盤まで統計的グリーン関数法、工学的基盤から地表までは、メッシュごとに地盤解析モデルを作成し、一次元地震応答解析により実施している。地震動は全県で算出しているが、今回は図 3 の解析範囲図の部分を取り出して検討に用いた。

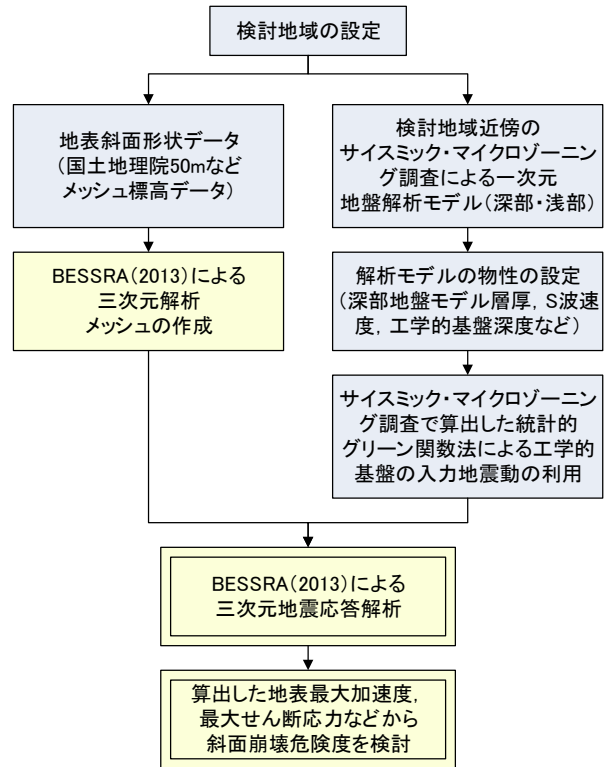
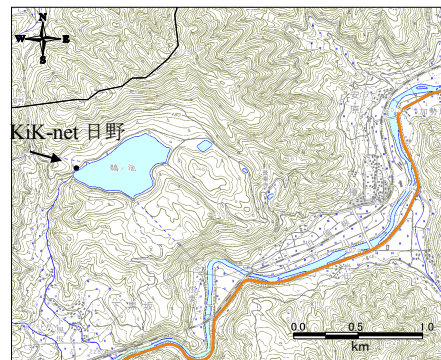


図 2 三次元地震応答解析(BESSRA(2013)³⁾による斜面崩壊危険度予測のフローチャート



【位置図】



【解析範囲図】

(※背景に国土地理院の電子地形図 25000 を使用)

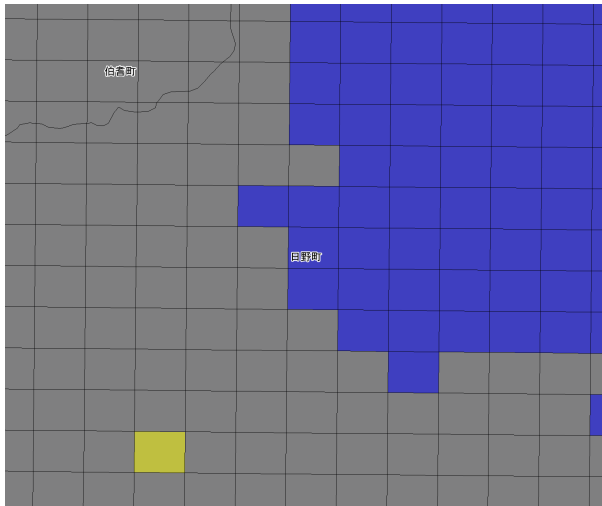
図 3 解析範囲位置図

つまり、本論文では、一次元地震応答解析は、図 3

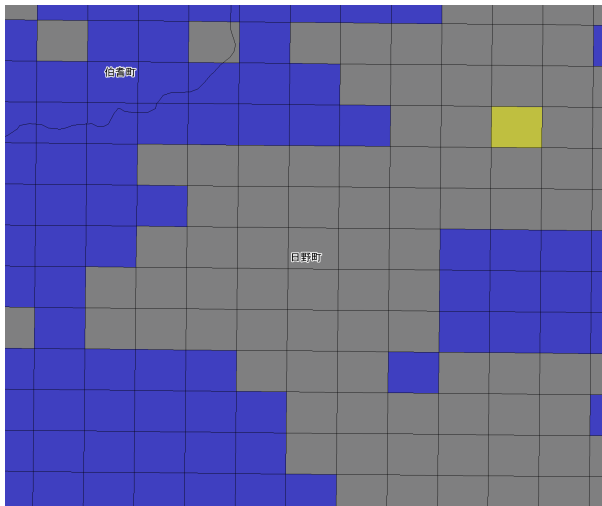
の解析範囲図域で、250m メッシュごとに行っている。

図 3 には解析対象とした鳥取県西部地震の地震断層位置も示しているが、これは地震調査研究本部(2002)⁶⁾によるものである。サイスミック・マイクロゾーニング調査による解析では、地震調査研究本部(2002)⁶⁾で設定された断層位置などの巨視的パラメータを基に、さらに観測強震動記録に合致するように微視的パラメータを設定して、地表地震動を算出している⁵⁾。

図 4～図 5 に、今回の解析範囲の地表最大加速度 (PGA; EW 方向, NS 方向) および計測震度をそれぞれ示した。なお、計測震度は、地表で算出した加速度波形から気象庁の定義により計算している。表 1 による斜面崩壊危険度判定に用いる地震動は、図 5 の計測震度である。



【PGA_EW 方向】



【PGA_NS 方向】

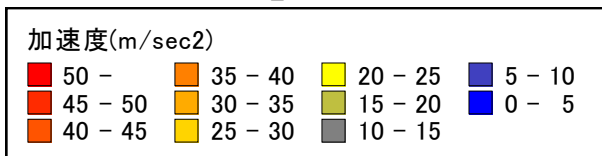


図 4 サイスミック・マイクロゾーニング調査による地表最大加速度分布 250m メッシュ図

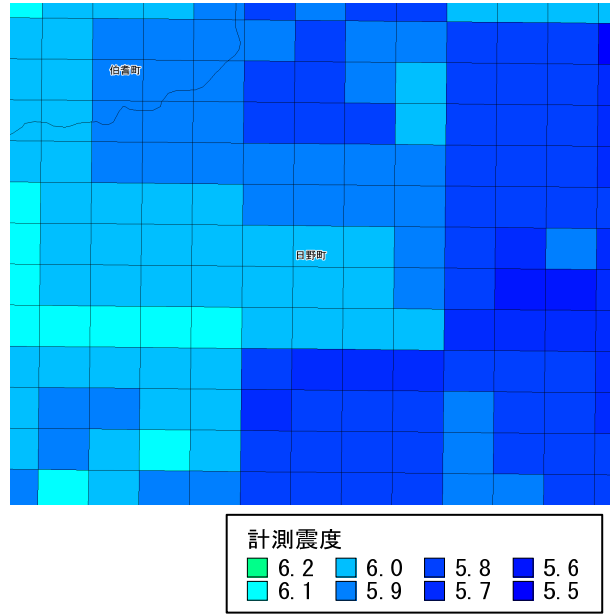
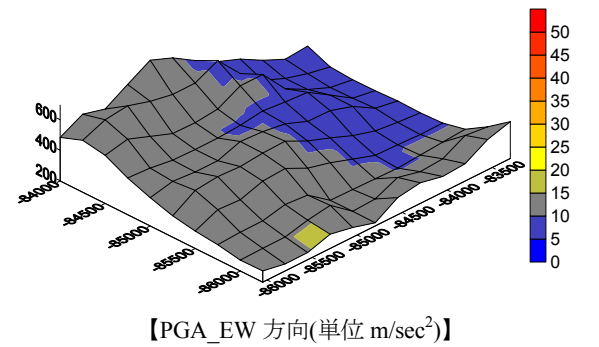
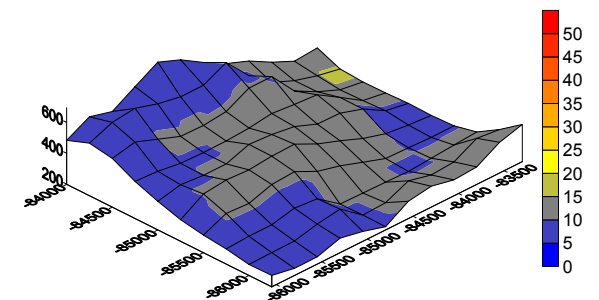


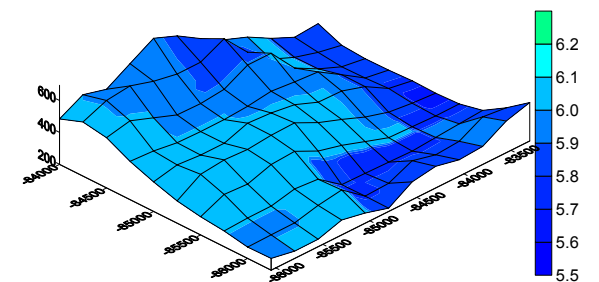
図 5 サイスミック・マイクロゾーニング調査による計測震度分布 250m メッシュ図



【PGA_EW 方向(単位 m/sec²)】



【PGA_NS 方向(単位 m/sec²)】



【計測震度】

図 6 サイスミック・マイクロゾーニング調査による地表最大加速度および計測震度三次元メッシュ図

BESSRA(2013)³⁾の結果と比較するために、250m メッシュのデータで三次元メッシュ図を作成すると図 6 のようになる。図中の xy 方向の座標は平面直角座標 (V 系) による位置(m), z 方向は標高(m)を表す。

図 5 の計測震度分布を用いて、斜面カルテのデータを基に、図 1 に示すフローに従って急傾斜地崩壊の相対的危険度ランクを算出した⁷⁾。図 7 にその結果を示すが、急傾斜地ごとに設定した計測震度は、図 5 の計測震度のメッシュを重ね合わせ、形状データ (ポリゴンデータ) に含まれる最大の計測震度値を用いた。図 7 の斜面崩壊危険度ランクは表 1 の下部に示したものである。

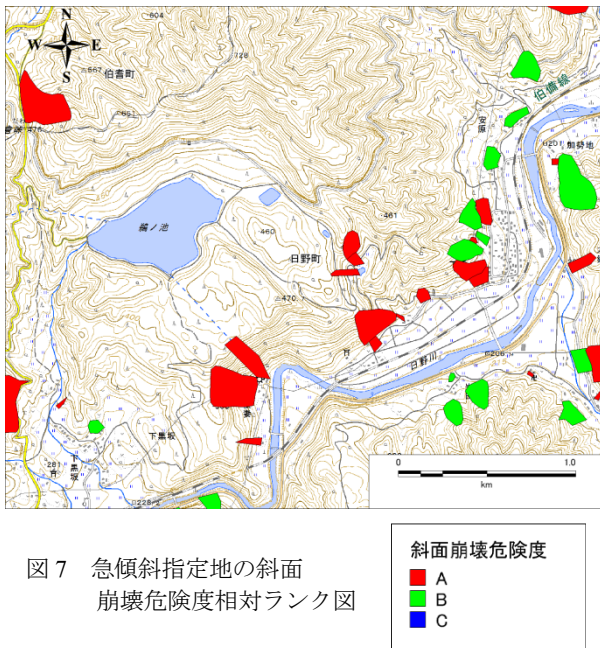


図 7 急傾斜指定地の斜面崩壊危険度相対ランク図

3.2 三次元広域地震応答解析システムによる解析事例

今回の BESSRA(2013)³⁾による解析は、図 3 の解析範囲図に示す範囲で行っている。xy 方向のメッシュサイズは 50m で、サイスミック・マイクロゾーニング調査で解析した KiK-net 日野地点の工学的基盤の地震動を調整して入力地震動としている。図 8 に解析対象地域の三次元地形図を示した。図 3 拡大位置図の南西端から見た図面となっている。

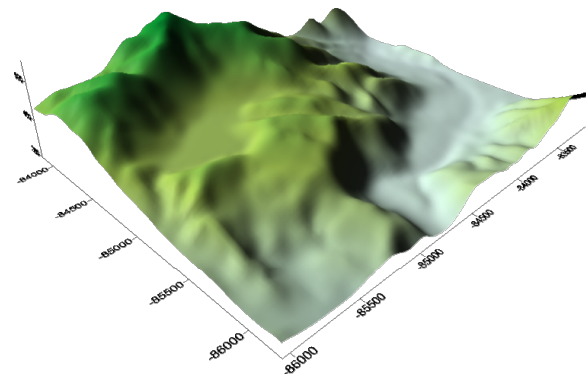
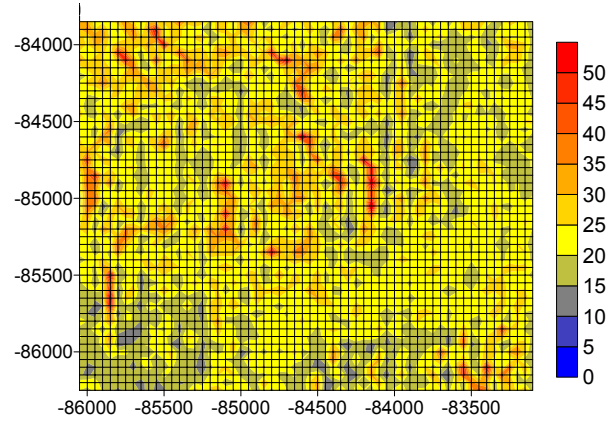
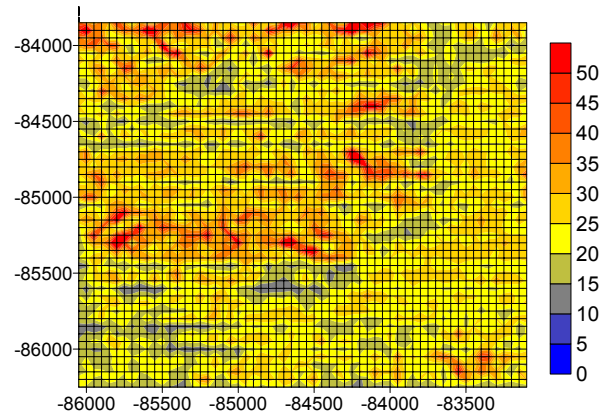


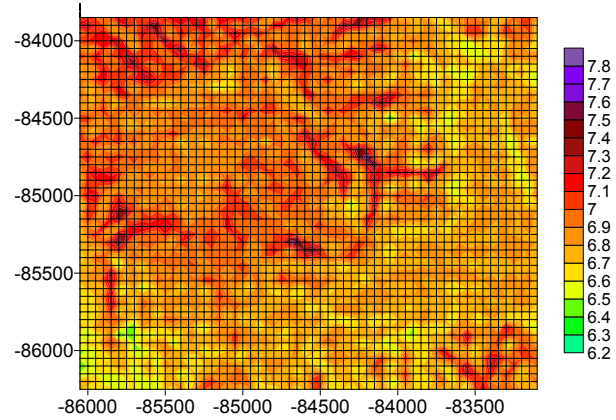
図 8 解析範囲の三次元地形図



【PGA_EW 方向(単位 m/sec²)】



【PGA_NS 方向(単位 m/sec²)】



【計測震度】

図 9 BESSRA(2013)³⁾による解析結果 50m メッシュ単位の地表最大加速度分布図および計測震度分布図

図 9 に三次元広域地震応答解析システム (BESSRA(2013)³⁾) による解析結果をサイスミック・マイクロゾーニング調査結果と比較できるように二次元平面図で示した。この図 9 は、地表最大加速度分布(PGA; EW 方向, NS 方向) と計測震度分布を示している。計測震度は、地表の 3 成分の加速度波形から気象庁の仕様で計算している。

図 4, 図 5 に示すサイスミック・マイクロゾーニング調査による地表最大加速度および計測震度と比較して

三次元解析による値が大きくなっている原因は、次のように考えられる。

- (1) 地盤解析モデルについて、三次元地表面から工学的基盤面までの厚さに占める各層の比率が、リファレンス地点のサイスミック・マイクロゾーニング調査による一次元地盤解析モデルの層厚の比率に等しいものとしていること。
- (2) サイスミック・マイクロゾーニング調査で用いて

いる一次元地震応答解析では、三次元的な尾根部などの形状効果はいっさい考慮されず、三次元解析では、尾根部の地震波の集中による増幅効果(三次元地形効果)が入っていること。

図10にBESSRA(2013)³⁾による解析結果の三次元地表最大加速度分布図および計測震度分布図を示した。上記の尾根部の地表最大加速度、計測震度が増幅している様子がよく分かる。

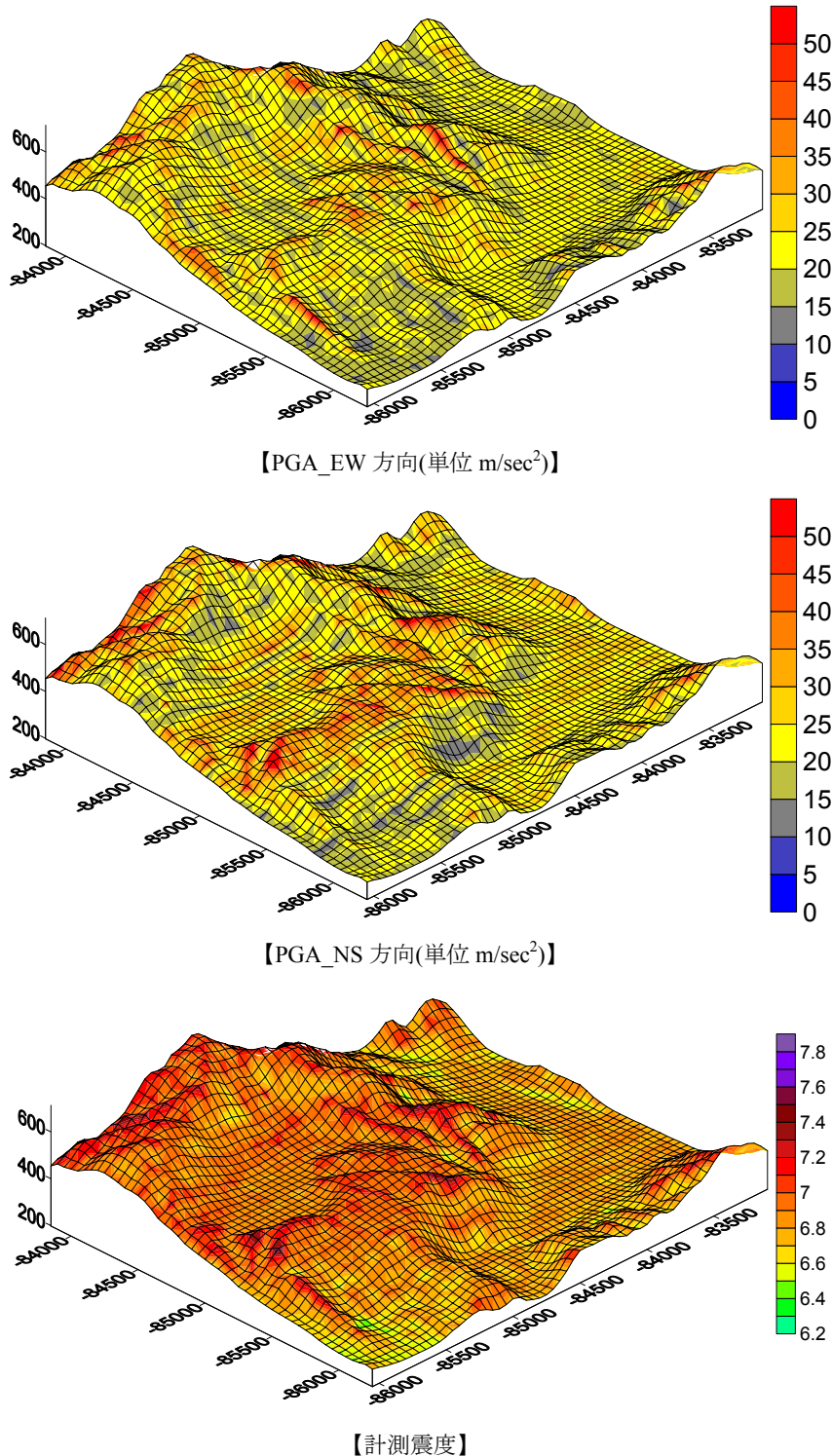


図10 BESSRA(2013)³⁾による解析結果 (50m メッシュ単位の地表最大加速度分布および計測震度分布三次元図)

3.3 実被害との比較

本論文で対象としている鳥取県西部地震の地震断層は、2000年鳥取県西部地震を想定したものであり、この地震では実際に斜面崩壊被害が発生している。この斜面崩壊被害発生地点については、地盤工学会平成12年鳥取県西部地震災害調査委員会による災害調査報告書⁸⁾に記述されている。

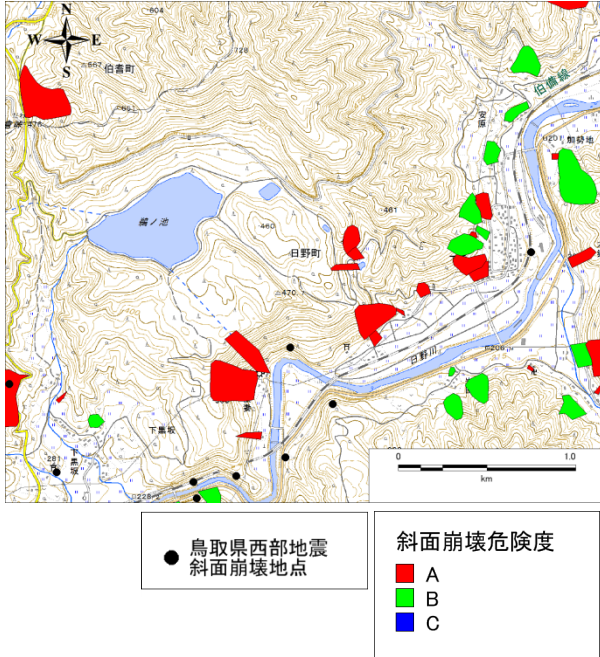


図 11 2000年鳥取県西部地震の斜面崩壊地点分布図およびサイスミック・マイクロゾーニングの手法による斜面崩壊危険度相対ランク図の重ね合わせ

図 11 に上記文献から実際の斜面崩壊地点を、サイスミック・マイクロゾーニング手法による斜面崩壊危険度相対ランク図に重ねた図を示した。これによると、斜面カルテによる急傾斜指定地の範囲は、実際の斜面崩壊地点に近い場所にあり、評価した相対的な危険度も実際の斜面崩壊地点に比較して、それほどおかしくないものになっている。また、カルテによる急傾斜指定地は、やや広い面積を指定していることが分かる。

3.4 斜面崩壊危険度の新しい予測手法

三次元広域地震応答解析システムによる斜面地震応答の三次元地形効果を取り入れる目的で、以下のような斜面崩壊危険度予測手法の修正を行った。

- (1) 図 12 に示す三次元広域地震応答解析システム (BESSRA(2013)³⁾) による 50m メッシュ単位の基準メッシュに対する計測震度増分と標高の関係より、三次元地形効果を考慮した計測震度補正量 (ΔI) を導入して、地表震度の補正を行い、斜面崩壊危険度を再計算した。

- (2) (1)式は、三次元地形効果による平地部の基準メッシュに対する 50m メッシュ計測震度増分 ($\Delta I = I_{jma50} - I_{jma50 \text{ 平地部}}$) と標高 ($ALT(m)$) の関係を示している。

$$\Delta I = 7.425 \times 10^{-4} ALT - 1.593 \times 10^{-1} \quad (1)$$

- (3) ここで、平地部の基準メッシュについては、三次元広域地震応答解析システムによる解析範囲の 50m メッシュ標高の度数分布を取ったとき、下位 10% 標高になるメッシュ (標高=214.55m) とした (図 13)。

- (4) この計測震度補正量 (ΔI) を用いて、サイスミック・マイクロゾーニング調査からの 250m メッシュの計測震度 (I_{jma250}) を、50m メッシュの計測震度 (I_{jma50}) に補正した。

$$I_{jma50}' = I_{jma250} + \Delta I \quad (2)$$

補正した計測震度分布を図 14 に示した。図 14 に斜面カルテの形状データ (ポリゴンデータ) を重ね合わせ、ポリゴンデータに含まれる最大の計測震度値を用いて

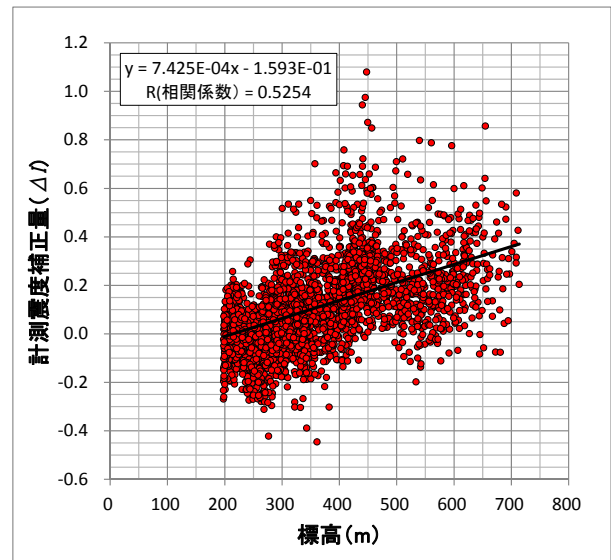


図 12 平地部の基準メッシュに対する 50m メッシュ計測震度補正量と標高との関係

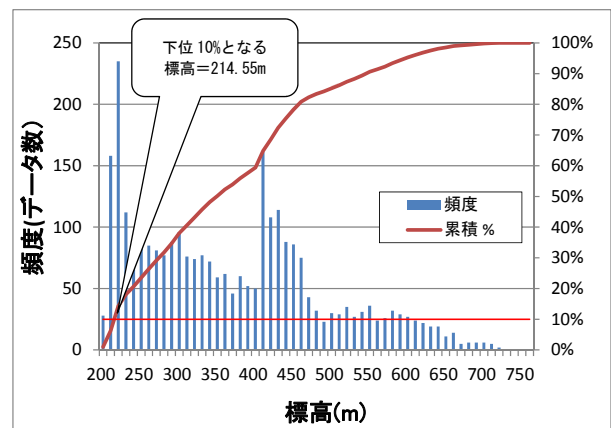


図 13 50m メッシュ標高の頻度分布

表1の判定ランクにより、斜面崩壊危険度ランクを再計算した。図15に三次元地形効果を補正した斜面崩壊危険度相対ランク図を示した。

図11のサイスミック・マイクロゾーニングの手法による計測震度を用いた斜面崩壊危険度相対ランクより、3つの急傾斜地崩壊指定地で斜面崩壊危険度相対ランクが高くなっているのが分かる。

また、実被害箇所との比較では、図15に示すように河川沿いの斜面で、より斜面崩壊危険度ランクが高くなっており、実被害と正確に地点は一致しないが、よりよい評価の傾向になっている。

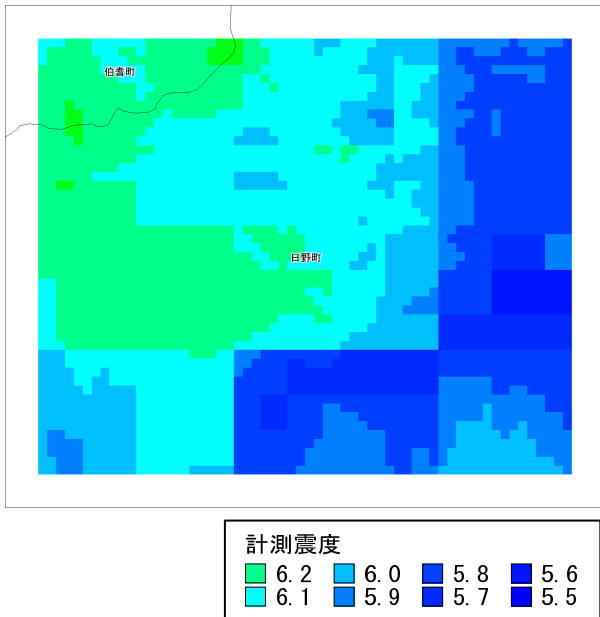


図14 三次元地形効果を補正した計測震度分布(I_{jma50})

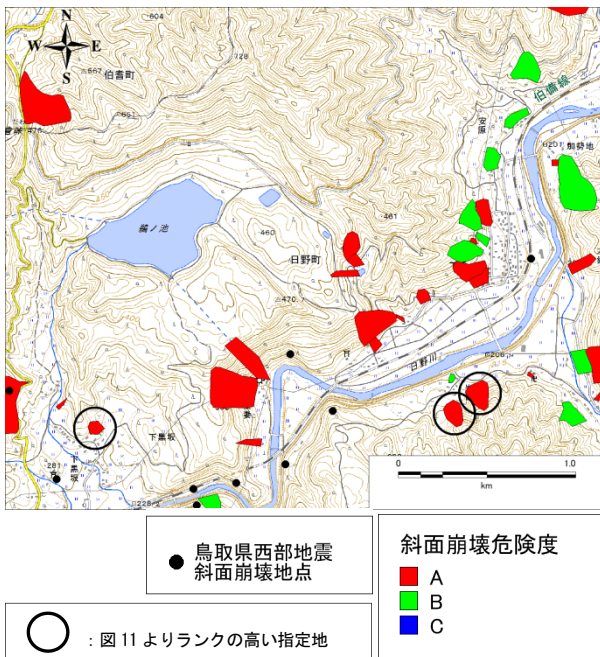


図15 三次元地形効果を補正した斜面崩壊危険度相対ランク図

また、ここでは BESSRA(2013)³⁾による計測震度は、サイスミック・マイクロゾーニング手法で用いている一次元地震応答解析による計測震度を補正する(1)式を求めするために使用している。つまり、3.2節(1)で述べているように、図9および図10下部の BESSRA(2013)³⁾による計測震度分布は、三次元地盤モデルを簡略化しているためそのまま用いることができない。このようなことから、三次元地形効果を示す増幅倍率だけを取り出すために、計測震度補正量(ΔI)と標高の関係を導入している。

さらに、異なる地域で(1)式を作成すると、異なる関係が表れる可能性があるが、本手法を用いた検討結果の蓄積を今後待ちたい。

なおこの手法は、図12に示すように、計測震度補正量(ΔI)と標高(m)との関係を採用しているが、計測震度補正量(ΔI)と50mメッシュ標高を用いた最大斜面傾斜度(deg)の関係も検討した。しかしながら、50mメッシュ標高データでは、最大斜面傾斜度がラウンドされてしまうため、うまく関係が構築できなかった。

4. 考察

本論文では、斜面崩壊危険度の新しい予測手法を検討することを目指しているが、見方を変えると、地形の三次元不整形性が地震動に与える影響について、どのようにその効果を評価するかということになると考えられる。

山地形のような、水平成層でない三次元不整形地盤では、地震動の増幅特性が地形の影響を受けることが一般的に知られている⁹⁾。この地震動の三次元地形効果の検討については、1995年兵庫県南部地震以降、三次元地震応答解析が利用されてきている。山地の地震動応答について研究した論文には、栗田ら(2005)¹⁰⁾、浅野ら(2006)¹¹⁾がある。これらの研究論文は、三次元地形効果などによる地震動波形または、フーリエスペクトルの変化など、貴重な観測結果、解析結果を与えているが、これら解析を、今回のような約3km×3kmの広い範囲で計算を行うことは、現状の計算機の能力でも難しいと考えられる。

次に、サイスミック・マイクロゾーニングによる地震動算出は、広域の地震動算出に広く利用されており、簡便な一次元地震応答解析を用いて、広域を約250mメッシュの矩形に区切ることにより、広域で詳細な地震動分布が得られるとしている。

しかしながら、図16に示すように、サイスミック・マイクロゾーニングの手法で山地部は、工学的基盤を浅くした一次元地震応答解析になっているだけである。また、原理的にも三次元地形効果は、一次元地震応答解析では取り扱うことができない。

このようなことから、本論文では、三次元地形効果を

考慮できる三次元広域地震応答解析システム(BESSRA(2013)³⁾)により、同地域で、地震動を算出し、その計算結果の計測震度を用いて、サイスミック・マイクロゾーニングの手法による計測震度を修正し、現行の斜面カルテを用いた斜面崩壊危険度予測手法に取り入れた。つまり、簡便に地震動の三次元地形効果を取り入れる手法を提案した。

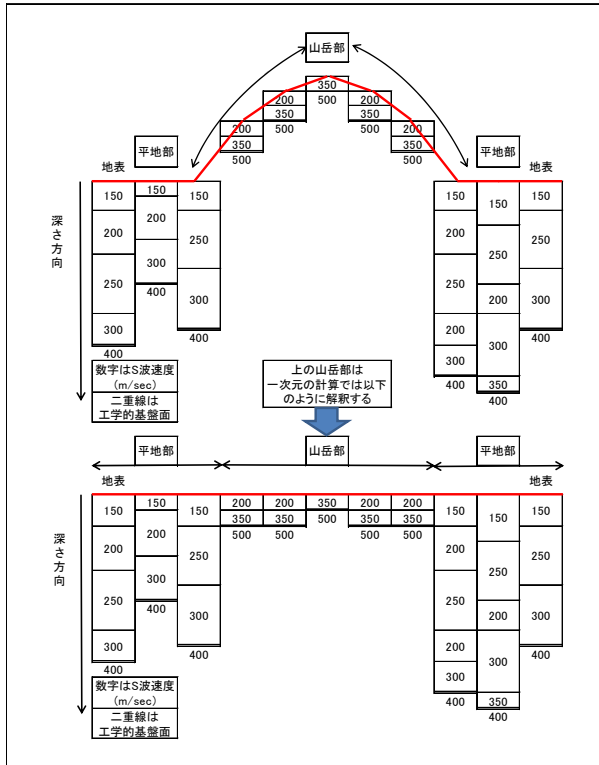


図 16 山地部を一次元地盤解析モデルで近似表現した場合の近似誤差模式図

5. 結論

本論文では、以下のような結論を得た。

- (1) 同一地域および同一の想定地震で、サイスミック・マイクロゾーニングの手法による一次元地震応答解析を用いた地震動予測と、三次元広域地震応答解析システム(BESSRA(2013)³⁾)による地震動予測を行い、両者の地表計測震度から、三次元地形効果による差異を確認した。
- (2) 斜面カルテを用いた地震時の斜面崩壊危険度相対ランク評価は、サイスミック・マイクロゾーニング調査で算出された計測震度を用いて広く実施されている。本論文でもその例を示し、さらに、2000年鳥取県西部地震での急傾斜地の実被害箇所と比較し、斜面指定地のカルテデータによる斜面崩壊危険度と実被害箇所がそれほど違いなく対応して

いることを確認した。

- (3) 地震動の三次元地形効果を、斜面カルテを用いた地震時の斜面崩壊危険度相対ランク評価に取り入れるため、三次元広域地震応答解析システムによる50mメッシュの計測震度を用いて、地震動の三次元地形効果に対応する計測震度補正量(ΔI (式1))を提案した。
- (4) この計測震度補正量(ΔI)を用いて、サイスミック・マイクロゾーニングによる震度を補正し、再度、斜面カルテを用いた地震時の斜面崩壊危険度相対ランク評価を行った。この結果、3つの斜面指定地で斜面崩壊危険度相対ランク評価が高くなった。つまり、サイスミック・マイクロゾーニングの手法単独で評価するより、BESSRA(2013)³⁾による震度補正で、三次元地形効果を考慮した方が精度が向上したと考察できる。
- (5) 三次元広域地震応答解析システムにより算出した三次元地形効果を考慮した地表計測震度を、斜面カルテを用いた斜面崩壊危険度相対ランク評価に取り入れる手法を考察した。

6. あとがき

本論文では、地震動の三次元地形効果を、斜面カルテを用いた斜面崩壊危険度相対ランク評価手法に取り入れたものである。ここで用いている三次元広域地震応答解析システムによる地震動予測計算では、以下の入力条件を簡略化して用いている。

- (1) 三次元の地盤解析モデルは、三次元地表面から工学的基盤面までの厚さに占める各層の比率が、リファレンス地点のサイスミック・マイクロゾーニング調査による一次元地盤解析モデルの層厚の比率に等しいものとしている。
- (2) 三次元広域地震応答解析システム(BESSRA(2013)³⁾)による地震動予測に用いる地盤の動的物性は、サイスミック・マイクロゾーニング調査による平均的な動的物性から、BESSRA(2013)³⁾で用いられている Wakai & Ugai(2004)¹²⁾による繰返し載荷構成モデル(UW)モデルのパラメータを求めたものである。その手法については、山本ほか(2013)¹⁾を参照されたい。

以上の簡略化および平均化については、山地部における動的解析を行う際の共通した課題であり、これについてデータを詳細にすることで克服することは非常に難しく、本論文で述べたような簡略化した手法を取り入れることが必要ではないかと考えている。また、このような解析事例と、比較できる実被害の蓄積が少なく、今後は実被害による検証事例の蓄積が望まれる。

謝辞：本解析で使用した KiK-net(基盤強震観測網) 地点の地盤データは、独立行政法人 防災科学研究所により整備されたものであり、その利用に関し感謝します。また、鳥取県危機管理局には、解析データなどの公表について多大な便宜を図っていただいた。ここに謝意を表します。

the seismic analysis of slopes and its applications. Soils and Foundations, vol. 44, No.4, 2004, p.83-97.

参 考 文 献

- 1) 山本明夫, 岡本由貴, 眞鍋俊平, 飛田健二, 若井明彦. 広域での地震時の斜面崩壊危険度の評価方法について. 応用地質技術年報, No.33, 2013, p.1-16.
- 2) 千葉県. 平成 19 年度千葉県地震被害想定調査報告書 平成 20 年 3 月. 2008, p.6-1.
- 3) BESSRA. Bird's-Eye-viewed Slope analysis for Seismic Risk Assessment, BESSRA 研究会. 2013, <http://geotech.ce.gunma-u.ac.jp/bessra/> [閲覧日 2014 年 1 月 1 日].
- 4) 若井明彦, 田中頼博, 安部真郎, 吉松弘行, 山邊康晴, 渡邊泰介. 中山間地の地震時斜面崩壊リスクを評価するための有限要素法に基づく広域被害予測システム. *J. of the Jpn. Landslide Soc.*, vol. 45, No.3, 2008, p.207-218.
- 5) 鳥取県地震防災調査研究委員会. 第 2 回被害想定部会資料 1 地震動予測結果 (修正案). 平成 27 年 6 月 30 日開催. 2015, p.1-55.
- 6) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 強震動部会. 鳥取県西部地震の観測記録を利用した強震動評価手法検証 (平成 14 年 10 月 31 日公表). 2002, p.1-15.
http://jishin.go.jp/main/chousa/02oct_tottori/index.htm, (参照 2015-11-17).
- 7) 鳥取県地震防災調査研究委員会. 第 2 回委員会資料 1 地震動・液状化・急傾斜地崩壊危険度予測結果. 平成 27 年 9 月 29 日開催. 2015, p.1-68.
- 8) 社団法人 地盤工学会 平成 12 年鳥取県西部地震災害調査委員会. 平成 12 年鳥取県西部地震災害調査報告報告書. 第 4 章斜面被害 . 4.4 崩壊発生地点とその特徴. 2001, p.57-77.
- 9) 土木学会 編. 動的解析と耐震設計 第 2 巻 動的解析の方法, 技報堂出版, 1989, p.206-223.
- 10) 栗田哲史, 安中正, 高橋聡, 嶋田昌義, 末広俊夫. 山地形による地震動の増幅特性. 日本地震工学論文集. 第 5 巻, 第 3 号, 2005, p.1-11.
- 11) 浅野志保, 落合博貴, 黒川潮, 岡田康彦. 山地における地震動の地形効果と斜面への影響. *J. of the Jpn. Landslide Soc.*, vol.42, No.6, 2006, p.457-466.
- 12) Wakai, A. and K. Ugai. A simple constitutive model for