

広域での地震時の斜面崩壊危険度の評価方法について

山本 明夫*・岡本 由貴*・眞鍋 俊平*・飛田 健二**・若井 明彦***

Risk assessment for the earthquake-induced slope failures using micro-zoning technique

Akio Yamamoto*, Yuki Okamoto*, Shunpei Manabe*,
Kenji Tobita** and Akihiko Wakai***

Abstract

Many local governments in Japan have been implementing the local disaster management plan in preparation for the future earthquake damage. The seismic micro-zoning technique has been used frequently to estimate the damages by earthquakes and to develop earthquake disaster reduction plans. This paper focuses on the earthquake-induced slope failures and reviews the risk assessment methods in the seismic micro-zoning technique. The new methods of risk assessment for earthquake-induced slope failures are introduced. The methods consist of the 3-D FEM response analysis and the estimation of engineering bedrock input motion by empirical Green's function. These methods were properly validated by the slope damages and observed strong motions at the engineering bed rock in Feb. 25th, the 2013 Tochigi-ken-hokubu Earthquake. These methods contribute to the improvement in evaluation accuracy of the earthquake-induced slope failures for the earthquake disaster management plans.

Keywords: risk assessment, earthquake-induced slope failures, seismic micro-zoning technique, 3D-FEM analysis, empirical Green's function method.

(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、過去の地震時の斜面崩壊事例を基にした評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、簡便な評点方式が用いられてきたのに対し、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の導入を検討した。また、この地震応答解析に用いる工学的基盤入力波形の算出に、経験的グリーン関数法による工学的基盤入力波の予測手法を導入した。さらに、本手法による解析結果と2013年2月25日の栃木県北部を震源とする地震による斜面被害および観測波形とを比較・検討した。本手法により今後、広域の斜面崩壊危険度の評価の精度の向上が期待できる。

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、経験的グリーン関数法

* 応用地質(株)震災復興本部 ** 応用地質(株)社長室 *** 群馬大学大学院工学研究科

* OYO Corporation Earthquake Disaster Prevention Division, ** OYO Corporation President Office,

*** Department of Civil and Environmental Engineering Gunma University

1. まえがき

2011年に東北地方太平洋沖地震が発生し、津波被害などで尊い人命が多く失われた。この地震では、津波被害の他に、液状化被害や造成地の被害など地盤に起因する被害も多く発生している。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。

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（サイスマック・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きている。

このような中で、本論文では現在ま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により本手法の検証を行った。これらの解析・検討を基にして、広域での地震時の斜面崩壊危険度の評価方法について、今後採用すべき解析手法の方向性について述べる。

2. 現在までの斜面崩壊危険度予測手法

2.1 手法

サイスマック・マイクロゾーニングの手法を用いた地震被害想定調査の中で、急傾斜地崩壊危険度の予測は、降雨による急傾斜地崩壊の評価手法が基になっている。この手法は、元々国土交通省の道路斜面点検の手法として開発¹⁾されたものであり（表-1、表-2、表-3）、地震被害想定調査では、管理要素（表-2）を除いて利用されることが多い。

地震による急傾斜地崩壊危険度の予測手法は、この手法（表-1）を利用し、予測した地震動（地表震度など）でさらに重みを設定しての危険度ランクを設定するものである。つまり、この予測手法は、斜面崩壊を考える上での影響因子（斜面の構造と属性）とその寄与度を点数化したものであり、この影響因子と評点が斜面固有の不安定性を示すものであるため、危険をもたらす要因が雨の場合でも地震の場合でも適用できるとの基本的なスタンスを取り入れたものである。

この地震による急傾斜地崩壊の予測手法は、埼玉県地震被害想定策定調査（1982）²⁾で用いられて以来（表-4、表-5）、宮城県（1986）³⁾、鳥取県（2005）⁴⁾、内閣府（2005）⁵⁾、東京都（2012）⁶⁾など国、地方自治体の地震被害想定調査で多数回用いられており、現在

でもほとんどの調査でこの手法で予測している。

2.2 予測手法の評価

この手法の利点は、以下のとおりである。

- 基礎データとして急傾斜地崩壊危険箇所等の指定地を用いているため位置が特定できる。
- 急傾斜地崩壊危険箇所等として、斜面の高さ、傾斜、崖下の家の数などの基礎データが存在しそれを解析に利用できる。
- 危険度の評価が点数で簡便に推定できるため、その評価に地表地震動などの地震の条件をいれることにより地震による被害ランクを算出できる。

また、この手法の欠点としては以下の点あげられる。

- この手法では、地震時の相対的な危険度ランクを検討するだけであり、急傾斜地崩壊のメカニズムについては解析できない。
- 実際の斜面崩壊被害とどの程度の精度で整合しているか比較検証例が少ない。
- 手法的には急傾斜地崩壊危険箇所等の指定地以外にも適用できるが、実際は県などの単位で同じ精度の基礎データで評価するため、評価地点が指定地だけに限られる。

2.3 実被害との比較

既存手法では、実際の斜面崩壊被害との比較検証例が少ないため、実被害との比較を行う。まず、斜面崩壊予測は、第2.1節に述べた基本的な手法と同様であり、表-6に示すような手法である。本表で、a、b、cは降雨による斜面の評価結果であり、aが一番危険側である。一方、予測した震度階からⅥ強以上、Ⅴ強～Ⅵ弱、Ⅳ強～Ⅴ弱、Ⅳ弱以下の4つに区分し、地震による斜面崩壊危険度ランクをA、B、Cに設定している。ここで、A、B、Cの危険度ランクは以下に示すものである。

- 斜面崩壊危険度ランク A：落石・崩壊の危険性が高い
- 斜面崩壊危険度ランク B：落石・崩壊の危険性がある
- 斜面崩壊危険度ランク C：落石・崩壊の危険性が低い

1978年宮城県沖地震の震度予測結果を用いて、宮城県内の自然斜面の斜面崩壊危険度ランクを求めた結果を図-1に示した。宮城県（1980）⁷⁾によると自然斜面の崩壊箇所は98箇所であり、予測した斜面崩壊危険度ランク A は、166箇所であることから、斜面崩壊危険度ランクの的中率は約60%であり、全体に危険度を高めに評価する傾向にある。このようなことから、第2.1節で示したかなりラフな評価でも、倍半分の誤差以内に入っていると言えよう。

表-1 斜面要素による危険度の配点（日本道路協会（1988））

Table 1 Slope failure factors and risk weight allocations (Japan Road Association (1988))

番号	項目	小項目		備考
			点数	
1	斜面高 (Hm)	H < 10m	3	—
		10 ≤ H < 30	7	
		30 ≤ H < 50	8	
		50 ≤ H	10	
2	斜面勾配 (α)	α < 1:1.0	1	—
		1:1.0 ≤ α < 1:0.6	4	
		1:0.6 ≤ α	7	
3	オーバーハング	構造物のない斜面のオーバーハング	7	岩の斜面などで一見してオーバーハングとみられるもの。
		構造物のある斜面のオーバーハング	4	
		なし	0	
4	斜面の地質条件	斜面の表面に転石・浮石が多い	10	上位のものを用いる。例えば、土砂で表面に転石・浮石が多いものは10点とする。
		切土のり面に玉石が多い	7	
		風化変質・亀裂の発達した岩	6	
		礫混り土砂	5	
		風化変質した岩	4	
		亀裂の発達した岩	4	
		土砂	4	
5	表土の厚さ	0.5m以上	3	表土とは表面の腐植土・有機質土をさす。ただし表土下に非常にルーズな崩積土等があればそれも含める。
		0.5m未満	0	
6	湧水	有	2	常時みられる湧水をさす。
		無	0	
7	落石、崩壊頻度	年1回以上	5	道路交通又は道路構造物に損傷を与えない程度の軽微な落石・のり崩れ等をさす。
		年1回未満	3	
		なし	0	
8	道路の曲率半径 (Rm)	0 < R ≤ 25	4	稜線部の内カーブ山側(凸部)の法面斜面をプラスとする。沢部の外カーブ山側(凹部)はマイナスとする。R = ∞ もしくはマイナスは50 < Rに含むものとする。
		25 < R ≤ 50	2	
		50 < R	0	

表-2 斜面の管理要素の配点（日本道路協会（1988））

Table 2 Slope failure factors of maintenance and risk weight allocations (Japan Road Association (1988))

番号	項目	小項目		備考
			点数	
9	斜面の異常・変状	あり	a	斜面とは、自然斜面、無保護斜面(ネット工はいれる)、植生のあるのり面をさす。異常、変状はクラック、段差等崩壊に直接つながるものをいう。
		なし	c	
10	斜面安定工の異常・変状	あり	a	表面にモルタル吹付等何らかの人工構造物に覆われているもの。異常、変状はクラック、段差、はらみ出し等、崩壊に直接つながるもの。
		なし	c	
11	構造物や道路交通に支障を与えた落石・崩壊	あり	a	過去に落石、崩壊等により事故または道路構造物等に損傷を与えた経験があるもの。なお、当該箇所に十分な防護工が施されていれば対象外。
		なし	c	
12	斜面上の有害行為	顕著である	a	斜面高の範囲で盛土、水の放流、停滞、浸透等崩壊を助長させるような行為。
		若干みられる	b	
		なし	c	
13	斜面安定工による斜面の安定度	やや低い	a	—
		普通	b	
		高い	c	

表-3 斜面危険度の判定表（日本道路協会（1988））

Table 3 Slope failure criteria (Japan Road Association (1988))

要因要素7項目の合計		13点以下	14～23点	24点以上
管理要素 9~12	aが1つ以上	(A)	(A)	(A)
	bが1つ あとはc	(B)	(A)	(A)
	全部がc	(C)	(B)	(A)

表-4 斜面要素による危険度の配点 (埼玉県 (1982))

Table 4 Slope failure factors and risk weight allocations (Saitama Prefecture (1982))

番号	項目	小項目		備考
			点数	
1	斜面高 (Hm)	H<10	3	—
		10≤H<30	7	
		30≤H<50	8	
		50≤H	10	
2	斜面勾配 (α)	α<1:1.0	1	—
		1:1.0≤α<1:0.6	4	
		1:0.6≤α	7	
3	オーバーハング	構造物のない斜面のオーバーハング	7	岩の斜面などで一見してオーバーハングとみられるもの。
		構造物のある斜面のオーバーハング	4	
		なし	0	
4	斜面の地盤	斜面の表面に転石・浮石が多い	10	上位のものを用いる。例えば、土砂で表面に転石・浮石が多いものは10点とする。
		切土のり面に玉石が多い	7	
		風化変質・亀裂の発達した岩	6	
		礫混り土砂	5	
		風化変質した岩	4	
		亀裂の発達した岩	4	
		土砂	4	
		粘質土	1	
5	表土の厚さ	0.5m以上	3	表土とは表面の腐植土・有機質土をさす。ただし表土下に非常にルーズな崩積土があればそれも含める。
		0.5m未満	0	
6	湧水	有	2	常時みられる湧水をさす。
		無	0	
7	落石・崩壊頻度	年1回以上	5	道路交通又は道路構造物に損傷を与えない程度の軽微な落石・のり崩れ等をさす。
		年1回未満	3	
		なし	0	
合計			—	上記各項目の合計点

表-5 地震による斜面被害判定基準 (埼玉県 (1982))

Table 5 Criteria of slope failures by earthquakes (Saitama Prefecture (1982))

震度	基準要素点	13点以下	14~23点	24点以上
	6		B	A
5		C	B	A
4		C	C	A

A: 落石・崩壊の可能性が高い
 B: // 可能性あり
 C: // 可能性が低い

表-6 地震による斜面被害判定基準 (宮城県 (1986))

Table 6 Criteria of slope failures by earthquakes (Miyagi Prefecture (1986))

震度	要素点ランク	c	b	a
	基準要素点	13点以下	14~23点	24点以上
VI ⁺ ~		B	A	A
V ⁺ ~VI ⁻		C	B	A
IV ⁺ ~V ⁻		C	C	B
~IV ⁻		C	C	C

A: 落石・崩壊の危険性が高い
 B: // 危険性がある
 C: // 危険性が低い

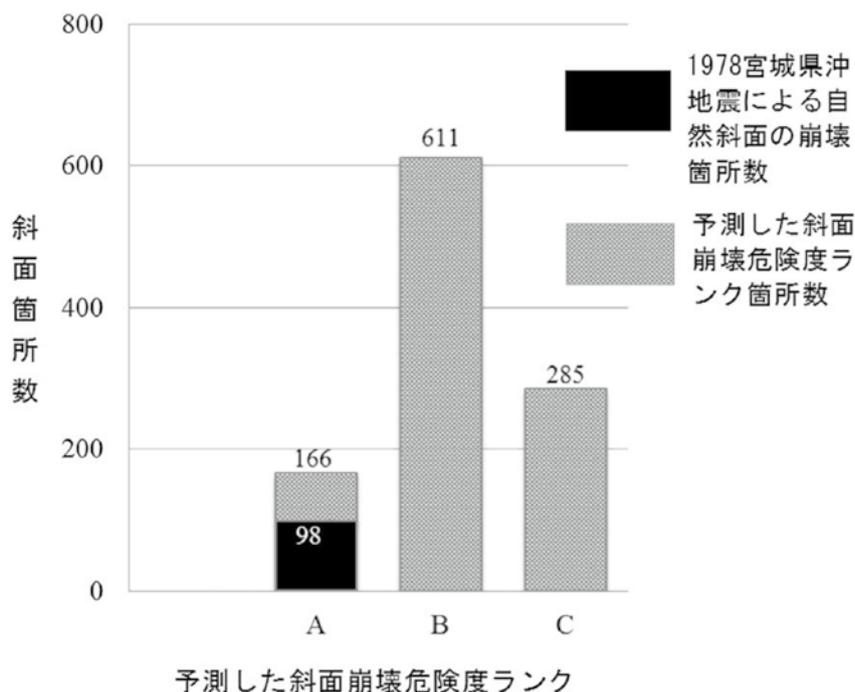


図-1 現行の手法による斜面崩壊危険度評価結果と実被害との比較 (宮城県 (1986))

Fig. 1 Comparison of the results of slope failure assessment by the existing method and the actual number of slope failures in the 1978 Miyagi-ken-oki Earthquake (Miyagi Prefecture (1986))

3. 新しい広域の斜面崩壊危険度予測手法

ここでは、三次元有限要素法による斜面崩壊危険度予測手法について述べ、この手法の入力値である経験的グリーン関数法による入力地震動の予測手法については、第4章の斜面危険度予測全体のフローの提案の中で記述する。

3.1 手法

地震による斜面崩壊の予測については、三次元の解析が、計算機の容量制限、複雑な地層の再現が難しいことなどの理由により、主に二次元のFEM解析により解析されてきた。しかしながら、県単位などの広域を対象とした地震による斜面崩壊の予測については、斜面の形状も考慮した三次元での解析手法が最も適切であると考えられるが、ほとんど実施されてこなかった。

若井ほか(2008)⁸⁾は、2004年新潟県中越地震の数多くの斜面崩壊事例から、山岳地帯が国土の大半を占める我が国において、山間地の地震時斜面被害リスクを広域的に評価することは、地域防災の観点から非常に重要で、斜面の危険度を厳密に評価するためには、山体をそのままモデル化した動的応答解析が望ましいと指摘し、新たな三次元解析手法を開発した。

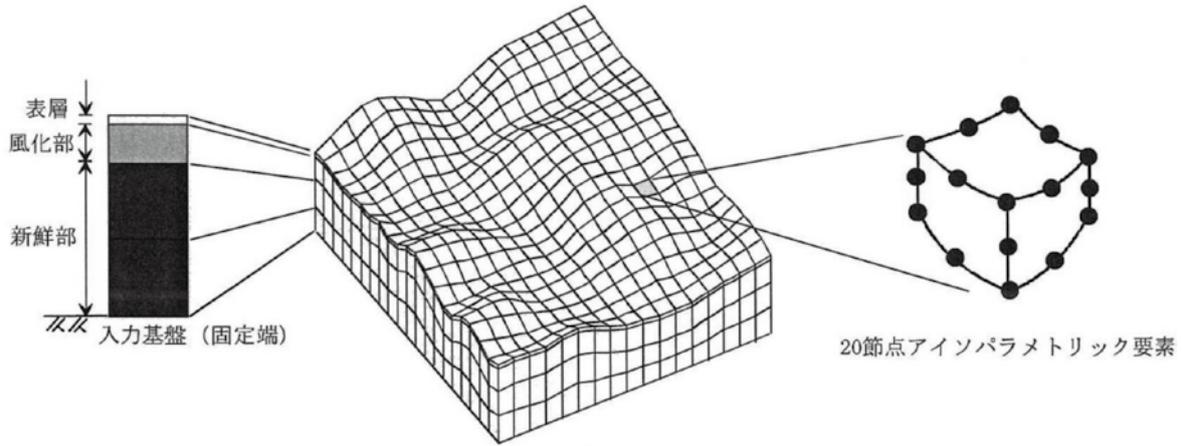
若井ほか(2008)は、三次元動的弾塑性有限要素法(FEM)に基づき山体斜面を一体的に解析しているが、1台のPCで計算できるように開発されている。

つまり、図-2に示すように、広域解析を効率的に実行するため、GISを介して地域全体の地形をある一定の大きさのサブストラクチャーに分割し、サブストラクチャーごとにFEM解析を行っている。サブストラクチャーごとに得られた結果を重ね合わせも考慮して、平面的につなぎ合わせることで広域全体の結果を得ている。各サブストラクチャーの領域端部における反射波などの影響を小さくするため、解析結果を採用する領域の平面外周を取り囲むようにダミー領域を付加して有限要素メッシュを構成している。

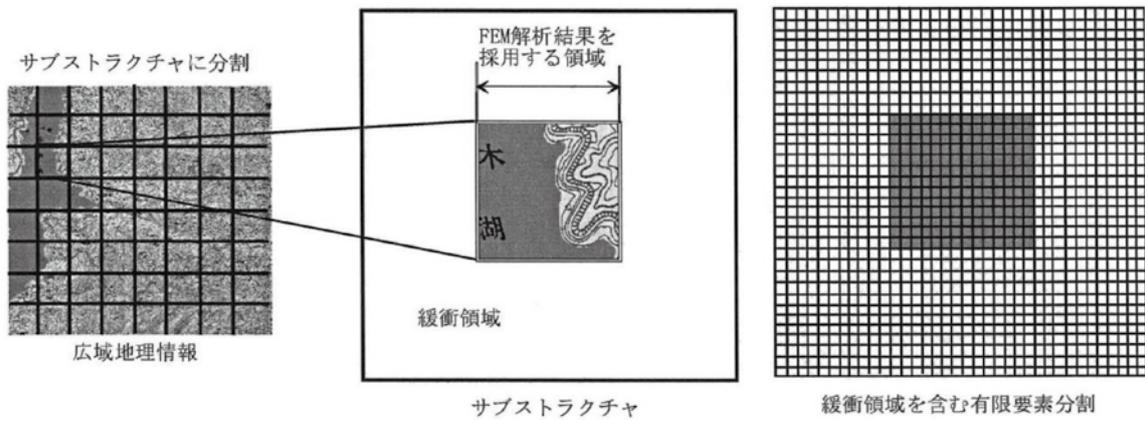
斜面の崩壊危険度判定は、広域で地表面の最大水平加速度、残留水平変位、最大せん断応力および局所安全率をもとに斜面の危険度を判断している。

3.2 若井ほか(2008)の応力ひずみの関係の構成則

時刻歴での地震応答解析では、どのようなせん断応力とせん断ひずみの関係を用いるかが非常に重要であり、従来、室内試験での動的変形特性曲線を考慮できるような繰返し载荷構成モデルとして、双曲線モデル(またはHardin-Drnevichモデル(H-Dモデル))、Ramberg-Osgoodモデル(R-Oモデル)が用いられてきた。ここで利用する、若井ほか(2008)の解析手法では、双曲線モデルをさらに改良したWakai & Ugai(2004)⁹⁾による繰返し载荷格子モデル(UW)モデルを用いている。(1)式にこのモデルのせん断応力(τ)とせん断ひずみ(γ)の関係を示した。



(a) 単純化された地盤構造 (若井ほか (2008))



(b) 計算機容量を節約するためのサブストラクチャー (若井ほか (2008))

図-2 解析に用いられる有限要素モデル (若井ほか (2008))

Fig. 2 Finite element model for the analysis (Wakai et al. (2008))

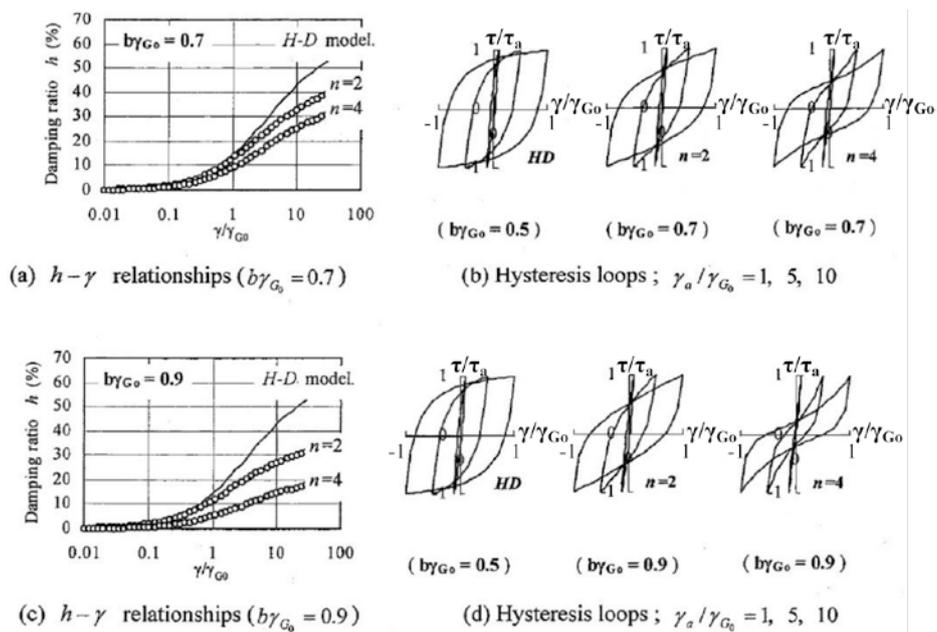


図-3 UWモデルの減衰比とせん断ひずみの関係およびヒステリシス・ループの設定事例 (Wakai & Ugai (2004))

Fig. 3 Examples of $h-\gamma$ relationships and hysteresis loops in the UW model and the H-D model

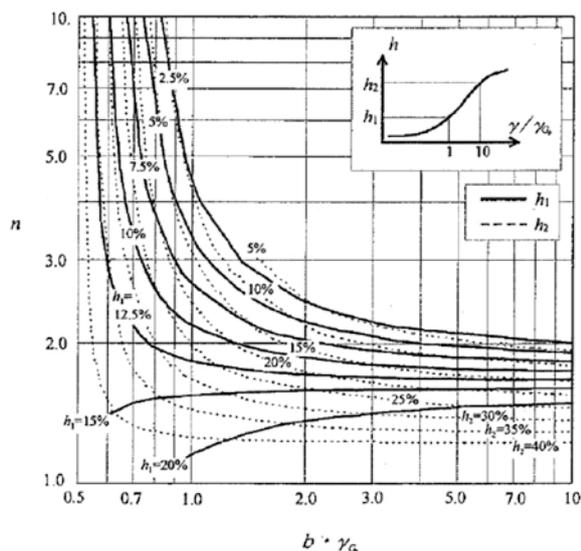


図-4 パラメータ n と $b \cdot \gamma_{G0}$ を決定するためのチャート
 Fig. 4 Chart to determine the parameters n and $b \cdot \gamma_{G0}$

$$\tau = \frac{a\gamma^n + G_0\gamma}{1 + b\gamma} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 G_0 は初期剛性率、 b 、 n は定数、 a は他の変数に依存する定数である。

このUWモデルでは、双曲線型の応力ひずみ関係を骨格曲線として採用し、さらに双曲線モデルで指摘されているせん断ひずみが大きい部分での過大な減衰比の問題を解決するため独自の履歴ループ曲線を採用している。図-3に双曲線モデル(図中のH-D model)とUWモデルの減衰比とせん断ひずみの関係の比較を示した。

UWモデルでは、二つのパラメータ(n 、 $b \cdot \gamma_{G0}$)を適切に与えることで、土の減衰比-せん断ひずみ関係($h-\gamma$ 関係)と合致した動的変形特性を表現できるようになっている。図-4にパラメータ n と $b \cdot \gamma_{G0}$ を決定するためのチャート図を示した。

3.3 実被害との比較

若井ほか(2008)は、2004年新潟県中越地震時の山古志村(当時)の斜面崩壊の事例解析を行い、解析結果と実被害がよい対応を示しているとしている。ここでは、より単純な被害事例を用いて、若井ほか(2008)の手法の評価を行う。

用いた事例は、2013年2月25日16:23に栃木県北部・奥鬼怒地域で発生したM6.2の地震被害である。本事例は、被害報告が若井(2013)¹⁰⁾により行われていること、単純な斜面被害事例であること、地表と工学的基盤の鉛直アレイ強震観測地点(KiK-net 栗山西)が被害地点から2 km程度にあること、理由から解析地点として選定した。

3.3.1 地震の諸元

気象庁による本地震の諸元および最大震度は表-7(地震・火山月報(2013)¹¹⁾)に示すとおりである。

表-7 栃木県北部を震源とする地震の諸元
 (気象庁:地震・火山月報(2013))より

Table 7 Earthquake data in Tochigi-ken-hokubu
 (The Seismological and Volcanological Bulletin of Japan (2013))

No.	項目	内容
1	発震日時	2013年2月25日(月) 16:23:53.5
2	震央位置	北緯 36.873° , 東経 139.412°
3	震源深さ	3km
4	マグニチュード(JMA)	6.3
5	最大震度(地点名)	震度5強(日光)

3.3.2 強震観測記録および観測点の地盤構造

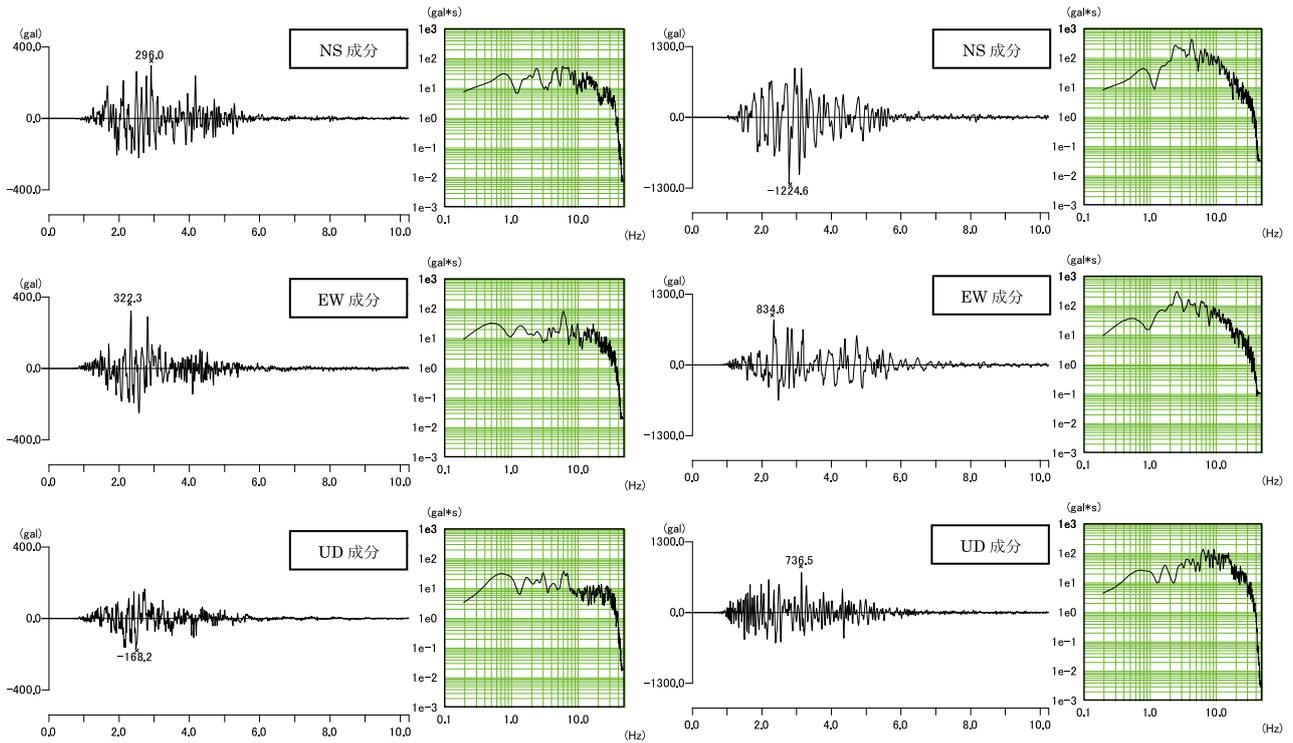
KiK-net 栗山西で観測された地表・工学的基盤の加速度記録、およびそれぞれのフーリエスペクトルを図-5に示した。観測された波形全体から見ると、非常に単純なパルス状の波形であり、継続時間は10秒程度の地震である。最大加速度は、地表で1224.6 gal (cm/sec^2) [NS成分]、工学的基盤で322.3 gal (cm/sec^2) [EW成分]である。

KiK-net 栗山西では、ボーリングおよびPS検層が行われている。表-8にその結果を示した。本地点では、花崗閃緑岩の基盤を新第三紀の流紋岩質溶岩と同質の火砕岩が覆う地質構成となっている。表層には、谷底を埋める砂礫が分布する。最表層のS波速度および(層厚)は、220 m/sec (4 m)、400 m/sec (18 m)、960 m/sec (10 m)、1250 m/sec (40 m)、以下1870 m/secとなっている。

表-8 KiK-net 栗山西の地盤構造 (PS検層結果)

Table 8 Groud layer configurations at the KiK-net Kuriyama-Nishi obtained by PS logging

No.	地質名	深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/sec)	S波速度(m/sec)
1	表土	4	4	550	220
2	砂礫	22	18	800	400
3	砂礫~ 火山角礫岩	32	10	1490	960
4	火山角礫岩 ~流紋岩	47	15	3600	1250
5	花崗閃緑岩	72	25	3600	1250
6	花崗閃緑岩	-	-	3600	1870



(a) 左側：工学的基盤波形

(b) 右側：地表波形

図-5 KiK-net 栗山西での栃木県北部を震源とする地震 (2013.02.25) の強震記録

Fig. 5 Strong motion records at the KiK-net Kuriyama-nishi in Tochigi-ken-hokubu Earthquake (2013.02.25)



図-6 2013年2月25日栃木県北部を震源とする地震による奥鬼怒地区の広域斜面・地盤被害状況 (若井 (2013))

Fig. 6 Wide area earthquake damage map with slope failures and ground damages in Tochigi-ken-hokubu Eq. on Feb. 25, 2013 (Wakai (2013))



図-7 2013年2月25日栃木県北部を震源とする地震による主な斜面・地盤変状の分布 (若井 (2013))

Fig. 7 Earthquake damage map at Meotobuchi-Onsen with slope failures and ground damages in Tochigi-ken-hokubu Eq. on Feb. 25, 2013. (Wakai (2013))

3.3.3 被害分布

被害分布については、若井 (2013) による広域被害分布地点位置図 (図-6) および現地踏査で観察された主な斜面・地盤変状の分布図 (図-7) に示した。広い範囲で見ると、女夫淵温泉付近および加仁湯付近に被害があり、特に図-7に示すように女夫淵温泉の対岸の尾根沿いに小規模な斜面崩壊および地盤変状が続いている。

3.3.4 被害事例による若井ほか (2008) の手法の評価

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)¹²: 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) の解析プログラムをコアに、入出力を GUI 化して整備したものである。

(1) 入力波形

入力波形は、表-7の地震の KiK-net 観測点 TCGH07 (栗山西) の地中観測記録 (深度 100 m, 設置標高 985 m) の水平成分 2 成分 (NS と EW) の記録とした。継続時間は 20 秒間とし、入射 + 反射 [E+F] 条件で入力した。

(2) 地盤構造の設定

解析に用いる地盤構造を、速度構造が明らかにされている KiK-net 地点の情報から設定した (表-8)。入力基盤面は標高 990 m, 地層の構造は 4 層構造とし、地表面から基盤面までの全体の厚さに占める各層の比率が KiK-net 地点の比率に等しいものとして、三次元地盤構造を設定した。

(3) 設定した地山の物性

設定した地山の物性は、KiK-net の PS 検層データによる S 波速度から、道路橋示方書 (2012)¹³ による S 波速度と N 値との関係式を用いて設定した。表-9

に設定した物性値を示した。

ここで、第 1 層および第 2 層の動的変形特性曲線は岩崎・龍岡・高木 (1977)¹⁴ の砂の標準曲線を用いた。UW モデルの履歴パラメータ $b \cdot \gamma_{G0}$ と n は、図-4 から、動的変形特性曲線の $h \sim \gamma$ 曲線にフィットするように設定した。図-8 に設定した減衰比曲線を示した。

レーリー減衰の係数 α と β は、第 1 層の初期ダンピングを $h=5\%$ 、第 2 層の初期ダンピングを $h=1.5\%$ として、強震動に大きく影響する周波数 0.5 Hz と 6 Hz で、それぞれ $h=5\%$ 、 $h=1.5\%$ の値になるように設定した。図-9 にレーリー減衰の設定値を示した。

表-9 BESSRA (2013) 解析のために設定した物性値

Table 9 Set parameters for BESSRA (2013) analysis

層 No	層相	厚さ(m)	単体(kN/m ³)	S波速度(Vs) (m/sec)	初期剛性率 $G0=\rho \cdot Vs^2$ (kN/m ²)	ポアソン比 (ν)	弾性率 E (kN/m ²)
1	表土	4.0	16.7	220	8.23E+04	0.45	2.39E+05
2	砂礫	18.0	19.6	400	3.20E+05	0.40	8.96E+05
3	砂礫~角礫岩	10.0	20.6	960	1.94E+06	0.30	5.03E+06
4	流紋岩	63.0	20.6	1250	3.28E+06	0.30	8.53E+06
-	基盤の標高	T.P.+990m					

層 No	層相	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 φ (degree)	レーリー減衰係数 α	レーリー減衰係数 β	履歴パラメータ $b \cdot \gamma_{G0}$	履歴パラメータ n
1	表土	240	20	2.900E-01	2.449E-03	1.14	1.97
2	砂礫	450	30	8.700E-02	7.346E-04	0.88	3.29
3	砂礫~角礫岩	980	40	8.700E-02	7.346E-04	2.60	1.52
4	流紋岩	980	40	8.700E-02	7.346E-04	2.60	1.52

(4) BESSRA (2013) による解析結果

図-10に、図-7の2013年2月25日栃木県北部を震源とする地震の被害地点を含めた BESSRA (2013) の解析エリアを示した。

図-11に2013年2月25日栃木県北部を中心とした地震の BESSRA (2013) の解析結果として、最大加速度分布を示した。図-7より被害の集中している地域を赤丸で示したが、図-11の最大加速度分布は、図-7の被害の集中している分布と整合している。

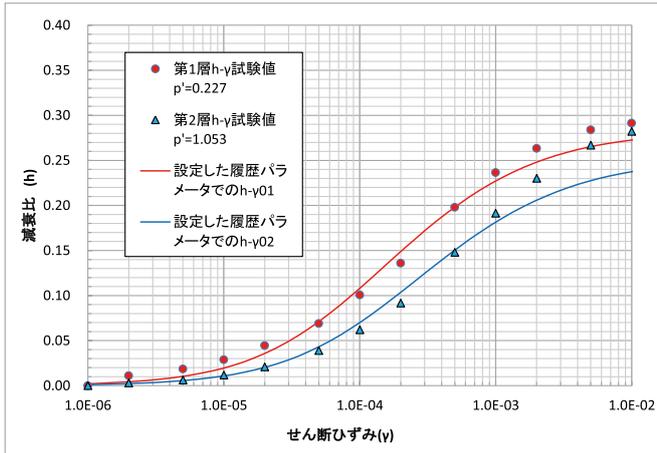


図-8 履歴パラメータの設定結果 ($h-\gamma$ 関係図)
 Fig. 8 Set parameters $b \cdot \gamma_{c0}$ and n ($h-\gamma$ relations)

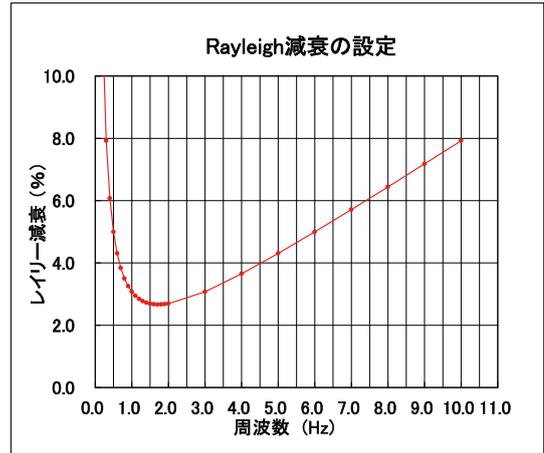


図-9 レーリー減衰の設定結果
 Fig. 9 Set Rayleigh damping parameters

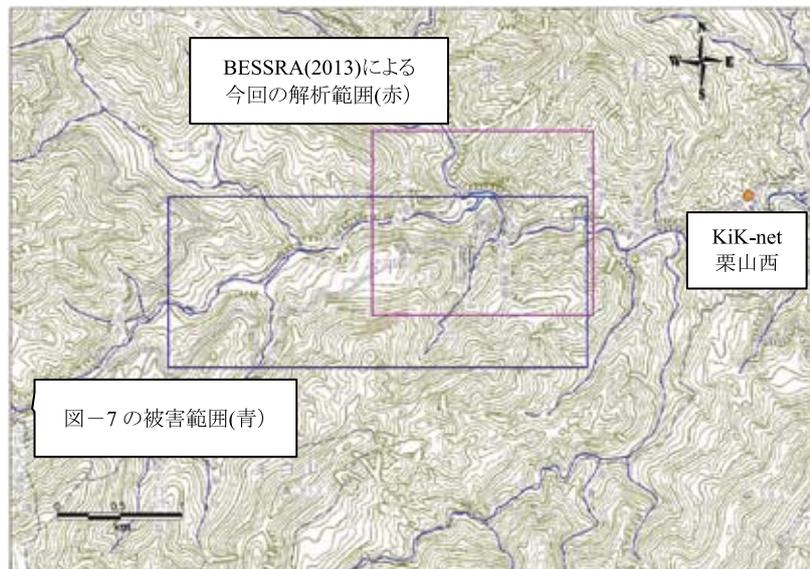


図-10 BESSRA (2013) による今回の解析範囲 (国土地理院: 数値地図 50000 に加筆)
 Fig. 10 Analysis area by BESSRA (2013) in this study (Corrected to Digital Map 50000 by GSI)

さらに図-12に最大せん断応力の分布を示した。最大せん断応力は、被害の集中している地域の谷部で小さくなっている部分があり、それより尾根の上部の最大せん断応力はより大きくなっており、他の地域とは最大せん断応力の差が大きいことが特徴的である。今回の三次元解析により、被害発生地点を含む尾根部では、他の地域より最大加速度が大きなこと、また、最大せん断応力が上部の尾根部で高いことが確かめられた。

現在行われている広い地域を対象とした地震動予測では、250 m 程度のメッシュ (格子状範囲) を用いて一次元の地震応答解析を実施しており、今回の解析ではこれらの結果とは明らかに異なる最大加速度分布が得られている。これは、少なくとも三次元の地形の凹凸を反映したものであり、斜面崩壊危険度予測では今回のような三次元を考慮した応答解析を行うべきであ

ることを示唆している。

本事例をさらに精査すると共に、被害事例と BESSRA (2013) の解析結果の比較を蓄積することにより、最大加速度分布と最大せん断応力分布を用いて、崩壊危険度のより高い斜面を広域から選別できると考えられる。

4. 広域での斜面崩壊危険度解析の今後の方向性

4.1 本解析から得られた課題と今後の方向性

広域での斜面崩壊危険度解析は、種々の制約から第2章で述べたような経験的な手法にとどまっているが、今後、地表の斜面形状を考慮した地震応答解析の採用が望まれる。その際、克服すべき課題としては以下のものが挙げられる。

- a) 斜面の形状を考慮した三次元解析を行う必要が

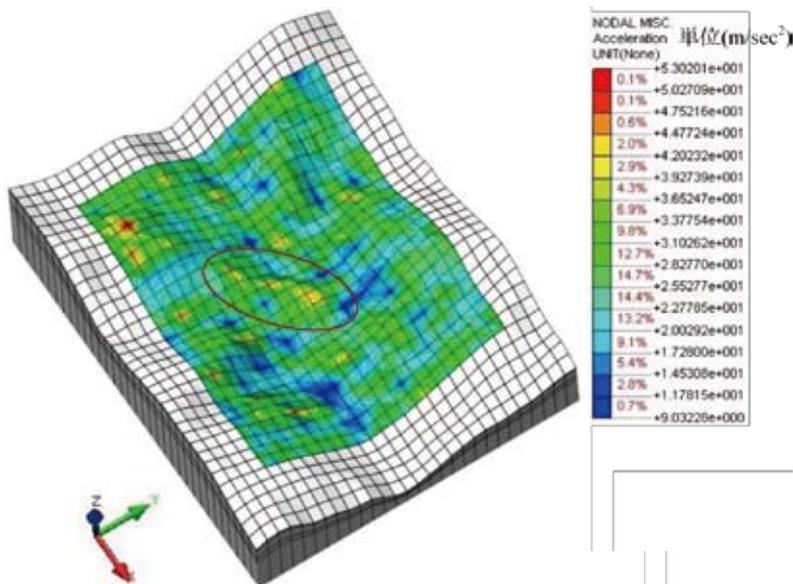


図-11 2013年2月25日栃木県北部を震源とする地震の BESSRA (2013) による女夫淵温泉付近を中心とした解析結果 (最大加速度分布: 単位 (m/sec²))

Fig. 11 Surface peak ground acceleration map at Meotobuchi-Onsen by BESSRA (2013) in Tochigi-ken-hokubu Eq. on Feb. 25, 2013

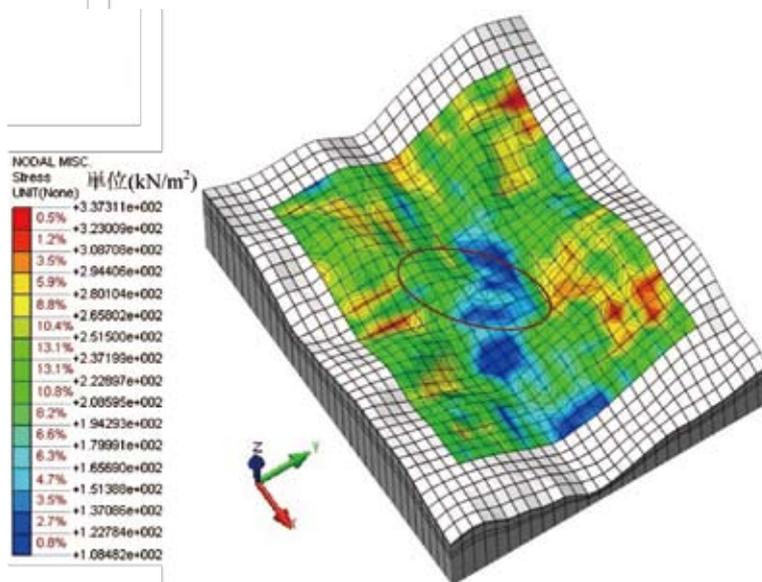


図-12 2013年2月25日栃木県北部を震源とする地震の BESSRA (2013) による女夫淵温泉付近を中心とした解析結果 (最大せん断応力分布: 単位 (kN/m²))

Fig. 12 Surface maximum shear stress map at Meotobuchi-Onsen by BESSRA (2013) in Tochigi-ken-hokubu Eq. on Feb. 25, 2013

ある。

- b) 斜面崩壊危険度検討のため、山間部で用いる工学的基盤の入力波形をどのように選択するか。
- c) 工学的基盤の深度をどのように決定するか。
- d) 山間部では、N 値などの地盤物性また、PS 検層および動的室内試験などの動的物性のデータが極端に少なく、工学的基盤から地表までの物性をどのように決定するか。
- e) 解析結果から得られた最大加速度・最大せん断応力等の指標から、斜面崩壊危険度をどのように評価するか。

このうち a) については、今回の解析のように BESSRA (2013) を利用することで解決可能である。

b) については、次項で述べるように経験的グリーン関数法により工学的基盤の入力波形を作成すること

が可能である。

c) については、文部科学省による全国 1 次地下構造モデル (暫定版) (2012)¹⁵⁾ を参照して工学的基盤の S 波速度を特定する方法が推奨される。また、全国約 700 箇所の主に関東に配置されている KiK-net (Kiban-Kyoshin Net: 基盤強震観測網)¹⁶⁾ は、地表と工学的基盤の鉛直アレイ強震観測網で、1 観測点ごとに柱状図および PS 検層結果が公開されているため、これを参照して工学的基盤の S 波速度の確認および深度を推定することが可能である。

d) については、最低限、上記 KiK-net の柱状図および PS 検層結果を反映して S 波層構造モデルを作成し、また、地盤物性・動的物性は県単位などの地震被害想定調査の平均的な値を当てはめて解析することが良いと考えられる。

e) については、まず、最大加速度値および最大せん断応力の大きな地域に着目して、今後、BESSRA (2013) による解析結果と実被害の対応を蓄積することが必要であろう。

これらの課題と今後の方向性をとりまとめて、図-13 にフロー図として示した。

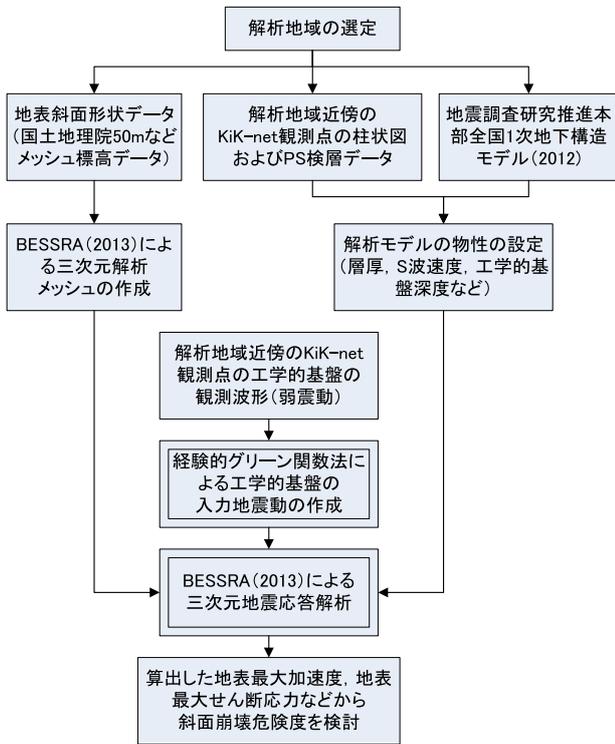


図-13 抽出した課題と今後の方向性フロー図

Fig. 13 Flow of extracted task and future direction

4.2 経験的グリーン関数法による工学的基盤の入力地震動の予測

広域地震応答解析システム (BESSRA (2013)) では、地表面の最大加速度、最大せん断応力等を算出するために、工学的基盤での入力地震動が必要である。第3.3節の実被害との検証の際は、KiK-netによる地中観測加速度波形を用いたが、斜面崩壊危険度を予測するためには、入力地震動波形も予測する必要がある。

4.2.1 経験的グリーン関数による手法

経験的グリーン関数法は、大地震の震源域に生じた小地震の実波形記録を用いて、大地震時の地震動を推定する方法である。この方法は、経験的關係と理論的關係を相補的に導入して、震源で予測の難しいパラメータおよび伝播経路、解析点近傍の地盤構造などの複雑な影響を直接見積ることなく大地震の地震動を推定できる。

ここでは、地震の相似則と経験的グリーン関数に基

づく地震波形の合成法 (Irikura (1983)¹⁷⁾ および Irikura (1986)¹⁸⁾ を基本式として用い、実際にはその波形合成式をさらに改良した入倉・香川・関口 (1997)¹⁹⁾ の合成式を用いている。合成式を (2) 式に示した。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{r}{r_{ij}} F(t-t_{ij}) * u(t) \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 $U(t)$ は大地震の震動、 $u(t)$ は要素地震の震動、 r は要素地震の震源距離、 r_{ij} は (i, j) 小断層の震源距離である。また、 $t_{ij} = (r_{ij} - r_0) / \beta + \xi_{ij} / V$ で、 r_0 は大地震の発震点からの距離、 ξ_{ij} は断層面上の発震点から (i, j) 要素断層までの距離、 β は伝播媒質の S 波速度、 V は破壊速度である。 $F(t)$ は (3) 式で与えられる。

$$F(t) = \delta(t) + \frac{1}{n'} \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \delta \left[t - (k-1) \frac{\tau}{(N-1)n'} \right] \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 N は要素地震の重ね合わせ数、 n' は重ね合わせによる人工的ノイズを防ぐための任意の整数、 τ は大地震の立ち上がり時間 (ライズタイム) である。

4.2.2 工学的基盤の入力地震動予測結果

2013年2月25日16:23に発生した栃木県北部の地震について、経験的グリーン関数法を用いた再現計算を行った。経験的グリーン関数には震源位置やメカニズムがほぼ等しい同日15:26発生地震による観測記録を用い、波形合成法には入倉・香川・関口 (1997) を用いた。震源諸元および設定した断層モデルを表-10および図-14に示す。解析対象とした観測点は、TCGH07(栗山西) およびFKSH07(檜枝岐) の2点とした。

観測記録および合成波の加速度時刻歴波形、速度時刻歴波形、疑似速度応答スペクトルを図-15～図-18にそれぞれ示す。

TCGH07(栗山西) では、NS成分については観測記録と整合しているが、EW成分については特に長周期側で過小評価となった。一方、FKSH07(檜枝岐) については、周期0.2-0.5秒程度において、合成波の速度応答がやや小さいが、観測記録を概ね再現できている。これは、FKSH07(檜枝岐) に比べ、TCGH07(栗山西) は震源に近いので、震源特性の影響が強く、震源位置や断層パラメータの精度を向上する必要がある。被害予測のための地震動予測という観点からは、水平2成分のうち大きい方を採用することにより、安全側をとることが考えられる。

また、各都道府県で行っている地震被害想定調査などで、各都道府県で設定された想定地震の工学的基盤の波形が公表されていればそれを利用してよいと考えられる。しかしながら、これらの想定地震の工学的基盤の波形は、大多数は統計的グリーン関数法²⁰⁾ で予測されたものであり、重ね合わせる小地震につい

表-10 経験的グリーン関数法解析に用いた地震諸元
Table 10 Earthquake parameters for the empirical Green's function analysis

発生時刻	気象庁 マグニ チュード (Mj)	震央緯度	震央経度	走向*	傾斜*	すべり角 *	モーメント*	モーメント マグニ チュード (Mw)*
2013/2/25 16:23	6.3	36.873°	139.412°	165°	80°	-15°	5.54E+17 Nm	5.8
2013/2/25 15:26	4.1	36.877°	139.407°	340°	89°	-7°	1.40E+15Nm	4.1

*印：F-netによるメカニズム解情報

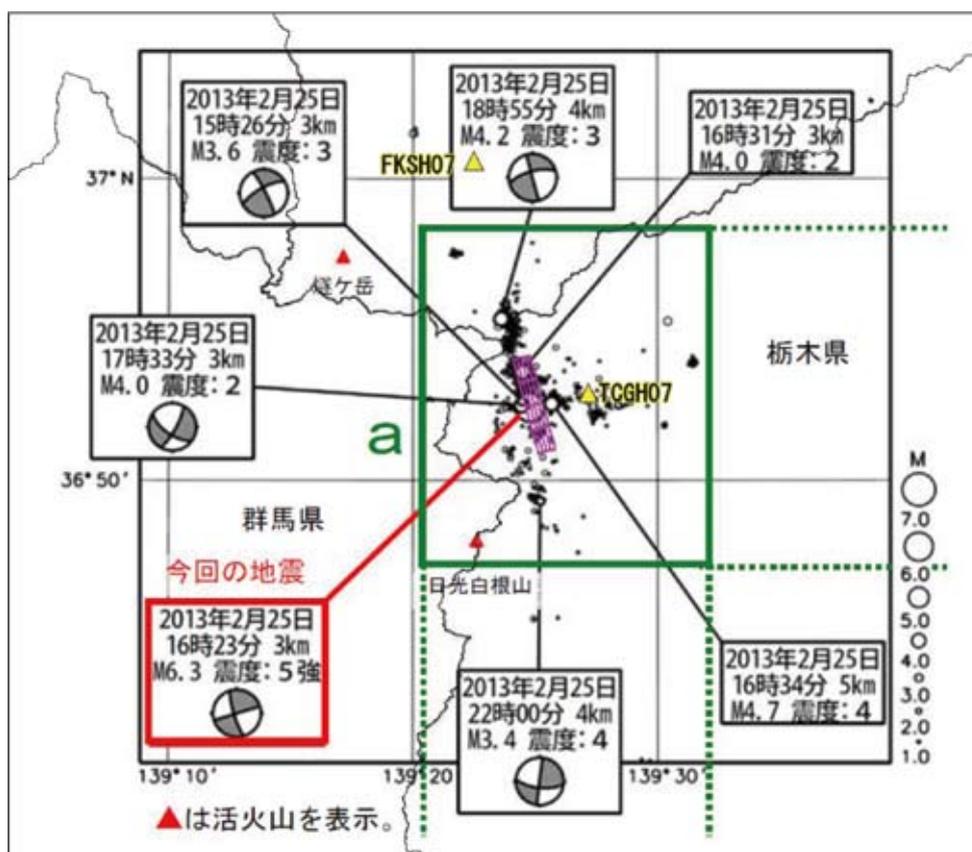


図-14 設定した断層モデルおよび観測点位置 (「平成 25 年 2 月地震・火山月報 (防災編)」(気象庁) に加筆)
Fig. 14 Set fault model and observation points (Revised from The Seismological and Volcanological Bulletin of Japan (2013))

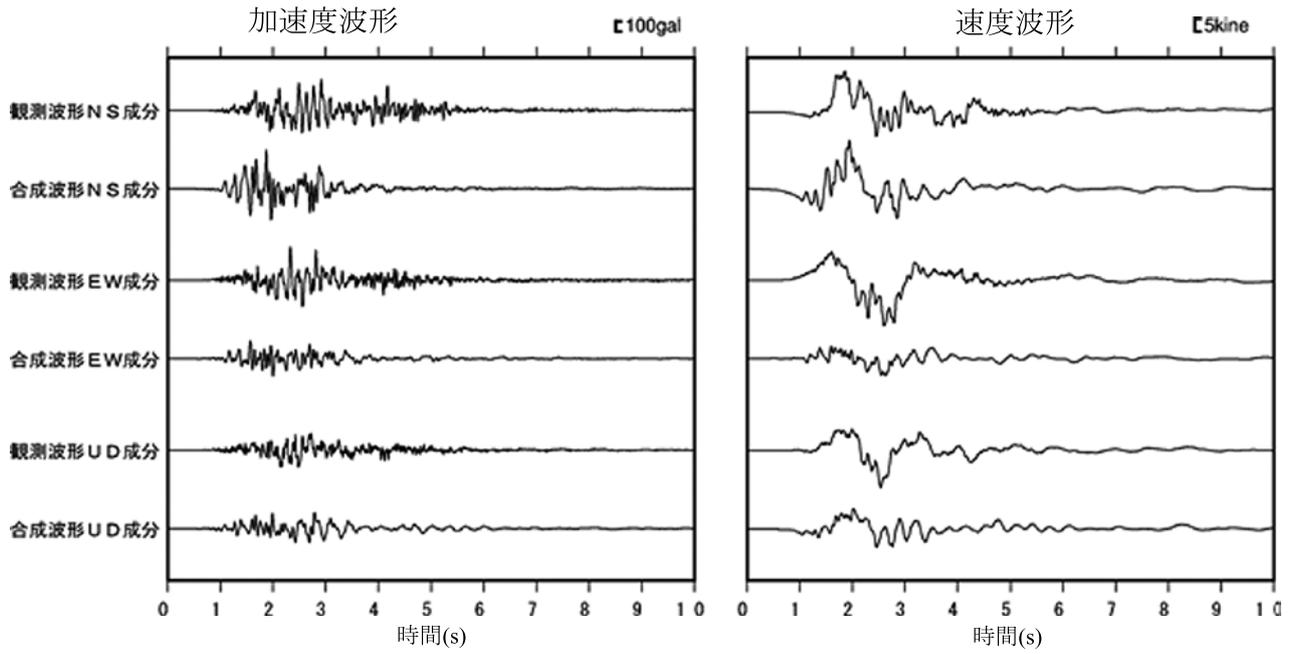


図-15 観測記録と合成波 (TCGH07 (栗山西))

Fig. 15 Observed motions and synthesized motions by EGF at TCGH07 (Kuriyama-nishi)

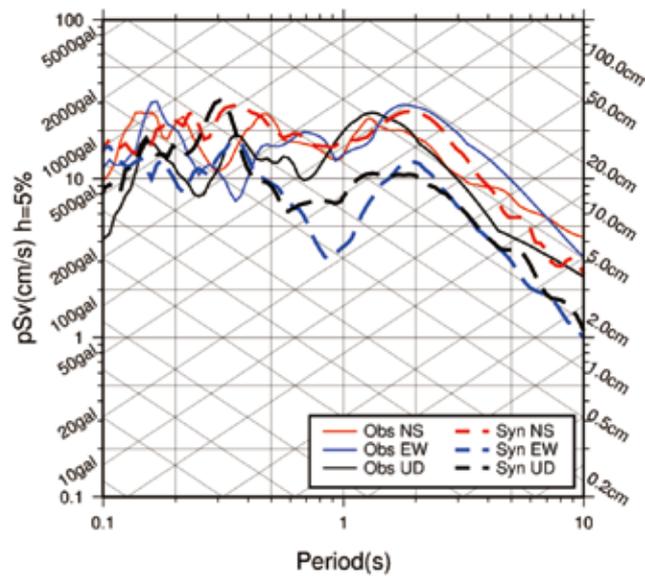


図-16 疑似速度応答スペクトルの比較 (TCGH07 (栗山西))

Fig. 16 Pseudo velocity response spectra from observed motions and predicted motions at TCGH07 (Kuriyama-nishi)

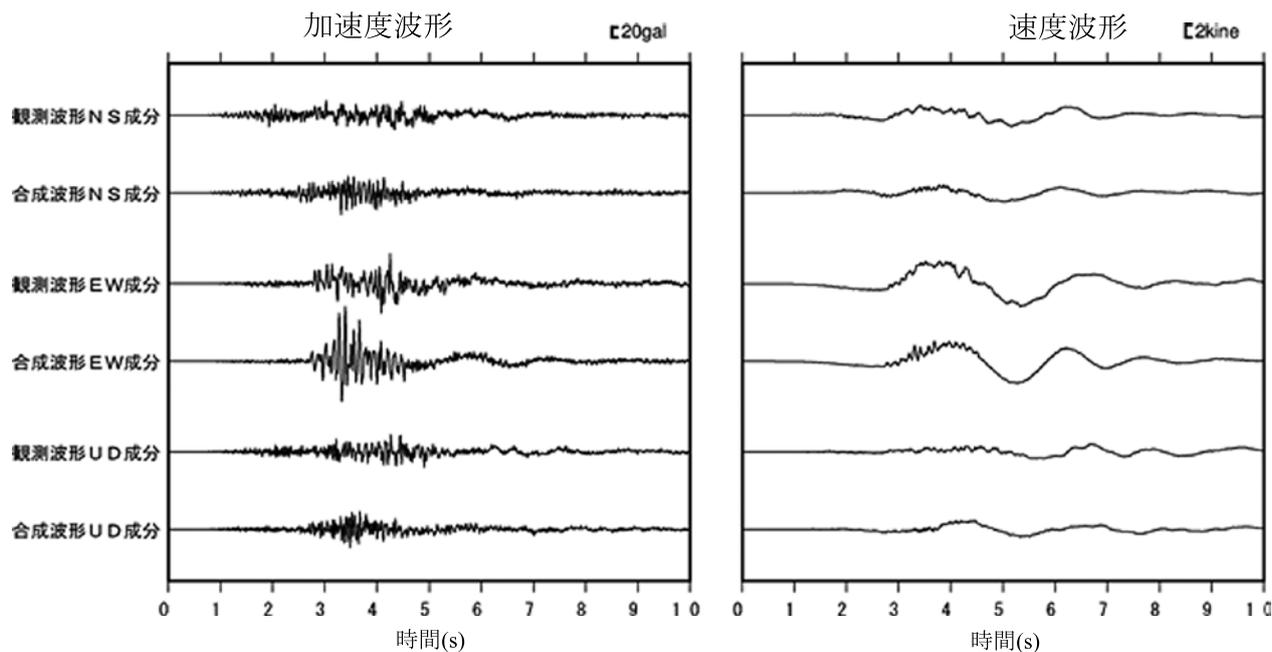


図-17 観測記録と合成波 (FKSH07 (檜枝岐))

Fig. 17 Observed motions and synthesized motions by EGF at FKSH07 (Hinoe-mata)

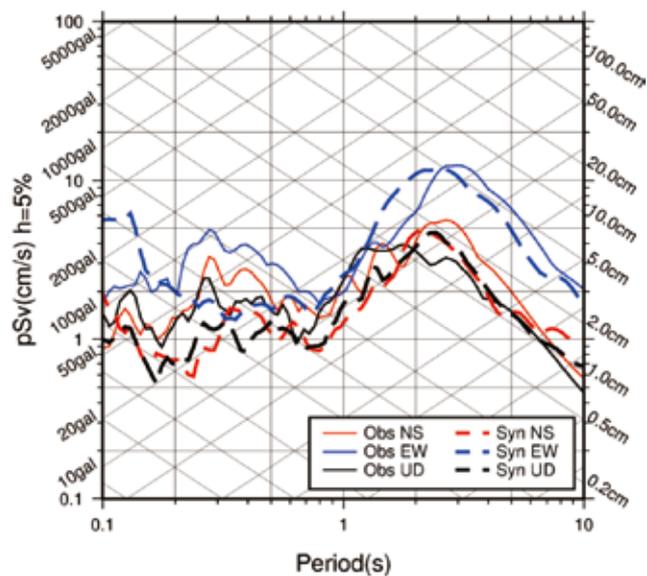


図-18 疑似速度応答スペクトルの比較 (FKSH07 (檜枝岐))

Fig. 18 Pseudo velocity response spectra from observed motions and synthesized motions at FSKH07 (Hinoe-mata)

て、それぞれの検討地域の地震動特性を反映している経験的グリーン関数法より、さらに一般化・平均化されたものであることに留意が必要である。

5. あとがき

本論文は、あくまでも広域の地震時の斜面崩壊危険度の評価方法について論述している。山間部の広域の解析では、地山のS波速度、動的変形特性試験結果などの動的物性値が、ほとんどないことが多く、これまでは過去の斜面被害からの類推で崩壊危険度が決められてきた。

今回は、山間部に主に設置されているKiK-netの柱状図およびS波速度データを用いて、山間部の三次元解析を行うことができるような手法を提示し、実被害とも比較している。

山間部斜面の形状を三次元的に考慮できる今回の解析のような手法が開発されたことを受け、今後は、解析事例を増やし、実被害との対応を多く行い、ソフト的な利用の幅を広げる努力が必要である。

6. 謝辞

本解析で利用したKiK-net(基盤強震観測網)による波形記録は、独立行政法人 防災科学技術研究所により観測・整備されたものである。その利用に関し感謝します。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会(1988):道路震災対策便覧(震前対策編)昭和63年2月,70-80.
- 2) 埼玉県(1982):埼玉県地震被害想定策定調査報告書 昭和57年3月,1-356.
- 3) 宮城県(1986):昭和60年度宮城県地震被害想定調査業務報告書 昭和61年3月,1-239.
- 4) 鳥取県(2005):鳥取県地震防災調査研究報告書 平成17年3月,1-1~14-12.
- 5) 内閣府(2005):首都直下地震に係わる被害想定手法について,内閣府(防災担当)作成資料, <<http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/pdf/shiryou3.pdf>> [閲覧日 2013年12月28日].
- 6) 東京都(2012):首都直下地震等による東京の被害想定(平成24年4月18日公表),1-1~3-94.
- 7) 宮城県(1980):'78'宮城県沖地震災害の教訓,1-407.
- 8) 若井明彦・田中頼博・安部真郎・吉松弘行・山邊康晴・渡邊泰介(2008):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.*, **45**, No. 3, 207-218.
- 9) Wakai, A. and K. Ugai(2004): A simple constitutive model for the seismic analysis of slopes and its applications, *Soils and Foundations*, **44**, No. 4, 83-97.
- 10) 若井明彦(2013):奥鬼怒地域の地震(2013.2.25)による斜面災害分布,第52回日本地すべり学会研究発表会講演集,27-28.
- 11) 気象庁(2013):地震・火山月報(カタログ編)2013年2月,気象庁編,一般財団法人気象業務支援センター,CD.
- 12) BESSRA(2013):Bird's-Eye-viewed Slope analysis for Seismic Risk Assessment, BESSRA 研究会, <http://geotech.ce.gunma-u.ac.jp/bessra/> [閲覧日 2014年1月1日].
- 13) 日本道路協会(2012):道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 平成24年3月,32-33.
- 14) 岩崎敏男・龍岡文夫・高木義和(1977):砂のせん断変形係数と減衰の歪依存性について,第12回土質工学発表講演集,417-420.
- 15) 文部科学省地震調査研究推進本部(2012):「長周期地震動予測地図」2012年試作版付録2.全国1次地下構造モデル(暫定版),平成24年1月13日地震調査研究推進本部 地震調査委員会, <http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/index.htm> [閲覧日 2014年1月1日].
- 16) 防災科学技術研究所(2014):強震観測網(K-NET, KiK-net)について, <<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>> [閲覧日 2014年1月1日].
- 17) Irikura, K. (1983): Semi-empirical estimation of strong ground motion during large earthquake, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst.*, **33**, 63-104.
- 18) Irikura, K. (1986): Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Symp.* 151-156.
- 19) 入倉孝次郎・香川敬生・関口春子(1997):経験的グリーン関数法を用いた強震動予測方法の改良,地震学会講演予稿集,1997年度秋季大会, B25.
- 20) 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長(1991):地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測,日本建築学会構造系論文報告集, **430**, 1-9.