

## 表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(4)

### Some Problems and Measures appeared during the Construction of the Real-time Hazard System for Slope Disasters at a Heavy Rainfall (4)

沖村 孝 鳥居 宣之 中川 渉 原口 勝則  
Takashi Okimura Nobuyuki Torii Wataru Nakagawa Katsunori Haraguchi

#### 1. はじめに

2013 年 7 月 28 日は、温暖湿潤な空気が日本の南側の太平洋高気圧の縁を沿うように西日本の日本海側に流れ込んできたことで、山口県と島根県の県境付近で次々と雨雲が発達し猛烈な大雨が生じた。

このとき、気象庁の福岡管区気象台は同日 9 時 40 分に最初の大雨と突風に関する気象情報を出した。10 時 11 分に第 2 号を発表し、11 時 19 分に記録的な大雨に関する気象情報を発表して最大級の警戒を呼びかけた。この記録的な大雨に関する気象情報は、2011 年の紀伊半島における豪雨災害を踏まえて制定されたもので、2012 年の平成 24 年 7 月九州北部豪雨と平成 24 年台風第 15 号に次いで 3 回目の発表となった。また、気象庁はこの豪雨の約 1 ヶ月後に運用を予定する特別警報に準じて、具体的な避難の呼びかけだけでなく外に出るのが危険な場合は家の中の安全なところにいるようにするなど、「ただちに命を守る行動を取ってください」という異例の対応もとられた。この豪雨は山口県で 1 時間あたり 100mm、山口県と島根県で 24 時間あたり 300mm を超す猛烈な大雨となった。28 日に降った降水量は、わずか半日で平年の 7 月 1 ヶ月分を超える降水量となった。

この豪雨による被害は、山口県と島根県をあわせ、確認されているだけで 2 人の死者と 2 人の行方不明者が発生している。<sup>1),2)</sup>

このように今年に限らず、近年では、観測史上最大の降雨量や降雨強度が報告されることが多い。従来、土砂災害の発生時刻に関する危険度指標は、過去の被災経験から総降雨量あるいは土壌雨量指数や降雨強度のパラメータが用いられ、これら過去に観測された値とその時の崩壊発生の有無から、崩壊発生の危険度が経験的に求められ、土砂災害警戒区域に対する土砂災害危険情報として使われている。しかし、上述したように過去に経験したことのない大きな降雨量に対しては、経験的に求められた空間情報である土砂災害警戒区域や時間情報である土砂災害危険情報等の危険度判別基準が、果たして効果的に活用できるか否かという疑問が生じる。すなわち、過去に崩壊記録のなかった斜面に崩壊が発生したり、総降雨量よりも大きな降雨強度の出現時刻に崩壊が発生する可能性がある。これを解消するためには経験的なデータから危険度を判断するのではなく、降雨を入力した力学的な斜面安定解析から安全率を求め、この安全率から危険度を判定することが必要になる。

筆者の一人は、かつて表土層崩壊を対象として地形を 10m 格子間隔で数値モデル化し、格子点（もしくはセルの中心点）に表土層厚を設定し、降雨を入力し、飽和横流れ浸透解析によりセルの地下水位を計算し、無限長斜面安定解析式を用いて、各セルで、時間ごとに安全率を計算する手法を提案した<sup>3)</sup>。しかし、当時は数値地形モデルを求める手法は縮尺 1/2,500 以上の大縮尺地形図から格子点の標高を直接読み取る手法で、かつ降雨量は測点が少なく近隣の観測所のデータを活用するしかなかった。このため詳細な解析を目的にしているにもかかわらず、入力データはそれを満足する精度ではなかった。しかし、近年、技術の開発により高精度の地形データや降雨データを入手できる状況になってきたこともあり、かつて提案したモデルを用いてリアルタイムでハザード情報を計算できるようになってきた。

このような環境条件下で、兵庫県のご協力を得て平成 19 年度より 3 ヶ年で「六甲山系土砂災害危険度予測システム」

プロジェクトでかつて提案したモデルを実用化する機会に恵まれた<sup>4),5)</sup>。このモデルの構築、実用化に際して新たに出現した問題点などは、すでに前報<sup>6)</sup>で詳しく紹介した。このプロトタイプモデルが、平成22年度兵庫県により試験運用に供された。この試験運用から新たに判明した課題や対応については前報まで<sup>7),8)</sup>で報告した。本報では、六甲山系で提案したモデルの地形・地質の異なる他の地域へ適用性について、豊岡市における試行的な検討時に確認された課題とその克服のための方法について中間的な報告を行うものである。

## 2. 2010年報告<sup>6)</sup>における内容

前々報<sup>6)</sup>では、モデルの概要説明を行った後、システム化に際して生じた課題について説明し、その対策手法の紹介を行った。その内容の主なものは、次のとおりであった。

- 1) 地形のスモーキング化
- 2) 地形分類と表土層厚
- 3) 人工改変地の扱い
- 4) 地盤条件の設定
- 5) 推定表土層厚の再検討
- 6) 植生条件の考察
- 7) 異なる地質条件への対応
- 8) 微地形条件（水面、沖積地等）への対応
- 9) 用いる雨量データの検討
- 10) 演算処理高速化の検討
- 11) アウトプットデータの表示方法の検討
- 12) 土砂災害警戒区域（急傾斜）への反映方法の検討
- 13) 土石流土砂災害警戒区域（土石流）への反映方法の検討

これらについては前々報<sup>6)</sup>で詳しく説明しているため、ここでは省略する。

## 3. 2011年報告<sup>7)</sup>における内容

前報<sup>7)</sup>においては、平成22年度の試験運用中に出現した様々な課題を、個別に検討した。それらは以下の諸課題で、これらに関する対策の概要を述べた。

- 1) 昭和42年崩壊地の表土層の推定
- 2) 谷壁斜面に存在する浅い谷（0次谷）の表土層厚の推定
- 3) 谷壁斜面と谷底斜面境界部での表土層厚の不連続対策
- 4) 小起伏斜面における表土層厚の推定
- 5) シミュレーション降雨による異常セル推定表土層厚の補正
- 6) 土砂災害警戒情報解除のためのタイミング情報対策

これらについては前報<sup>7)</sup>で詳しく説明しているため、ここでは省略する。

## 4. 2012年報告<sup>8)</sup>における内容

- 1) 0次谷および急傾斜地における層厚の調整
- 2) 表土層満水時の判定における不具合対策
- 3) シミュレーション降雨による局所的な不具合対策

これらについては前報<sup>8)</sup>で詳しく説明しているため、ここでは省略する。

5. 地形・地質が異なる地域への適用時に判明した課題と対策

5.1 検討対象エリアの概要

5.1.1 地形・地質

検討対象の豊岡市は、円山川が市の中央を北流し、その周囲に円山川低地（豊岡盆地）が広がる。円山川の西側は低山地～丘陵地が卓越する。南部は中国山地に連なる山地で、北部は沖積の発達した埋没山地となっている。

地質は、西部の北但層群、東部の山陰型花崗岩類が広く分布し、その他、矢田川層群や照来層群、超塩基性岩が一部に出現している。

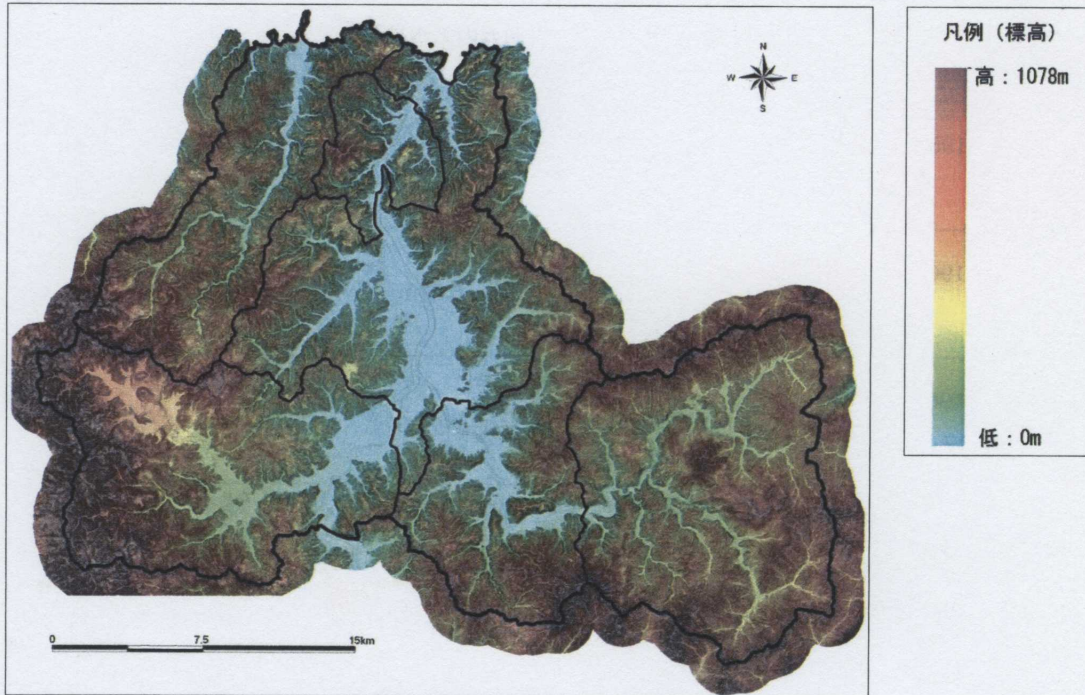


図 5.1.1 豊岡市の地形 (10mDEM による標高マップ)

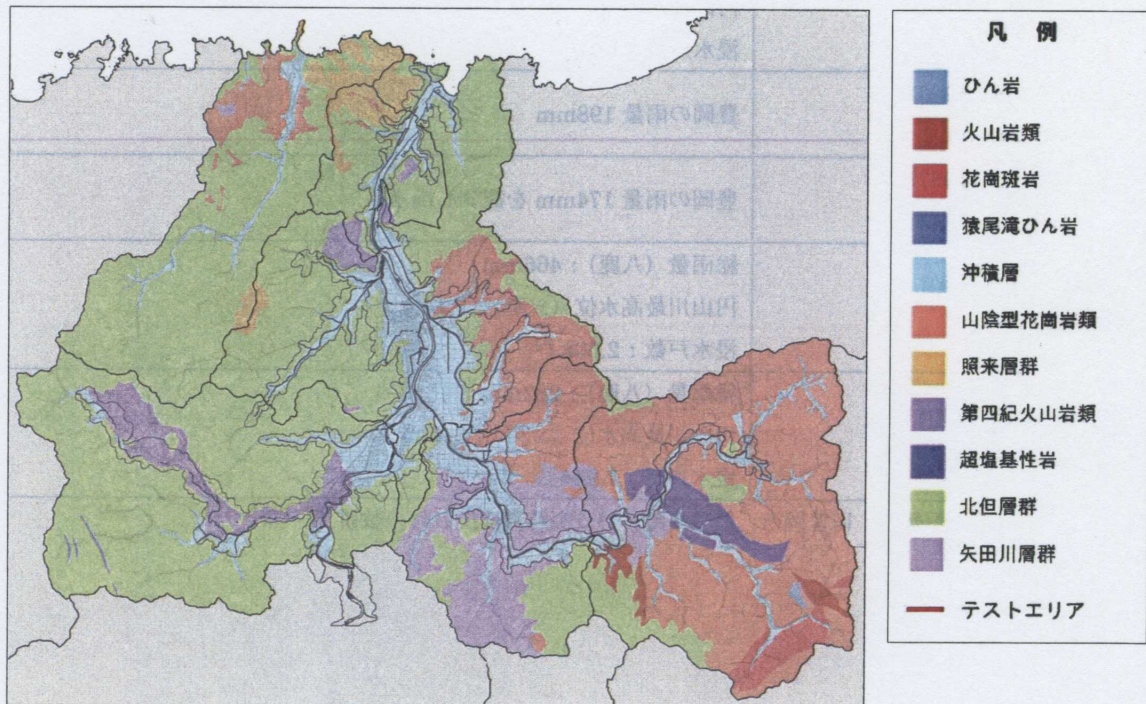


図 5.1.2 豊岡市の地質 (10 万分の 1 地質図)

### 5.1.2 過去の豪雨災害

豊岡市における過去の主要な豪雨災害について、既存資料をもとに整理した結果を表 5.1.1 に示した。

近年では、平成 16 年の水害が甚大であり、豊岡市によれば多数の浸水被害のほか死者 7 人（6 人は洪水、1 人は土砂災害）の人的被害が確認されている。

また、崩壊等の土砂災害の発生状況については、兵庫県砂防課による調査が詳しく、昭和 63 年～平成 23 年までの土砂災害の発生状況を図 5.1.3 に示した。

表 5.1.1 豊岡市の過去の洪水災害<sup>9)</sup>

発生年月日	災害状況
昭和 34 (1959)年 9月 26 日	豊岡で総雨量 278mm を記録し、被害 円山川最高水位 (立野) : 7.42m 浸水戸数 : 16,833 戸
昭和 36 (1961) 年 9月 16 日	総雨量 (八鹿) : 187mm 円山川最高水位 (立野) : 6.87m 浸水戸数 : 1,933 戸
昭和 40 (1965) 年 9月 10～17 日	総雨量 (八鹿) : 145mm 円山川最高水位 (立野) : 6.86m 浸水戸数 : 7,788 戸
昭和 47 (1972) 年 7月 3～15 日	総雨量 (豊岡) : 375mm 円山川最高水位 (立野) : 6.75m
昭和 51 (1976) 年 9月 10 日	八鹿で総雨量 542mm を記録し、但馬各地で被害 円山川最高水位 (立野) : 6.92m 浸水戸数 : 3,022 戸
昭和 54 (1979) 年 10月 19 日	総雨量 (八鹿) : 216mm 円山川最高水位 (立野) : 6.74m 浸水戸数 : 1,016 戸
昭和 58 (1983) 年 9月 24～30 日	豊岡の雨量 198mm
昭和 62 (1987)年 10月 13～18 日	豊岡の雨量 174mm を観測し出水
平成 2 (1990) 年 9月 20 日	総雨量 (八鹿) : 466mm 円山川最高水位 (立野) : 7.13m 浸水戸数 : 2,508 戸
平成 16 (2004) 年 10月 20 日 (水)	総雨量 (八鹿) : 282mm 円山川最高水位 (立野) : 8.29m 浸水戸数 : 7,944 戸

※浸水戸数は、旧豊岡市、旧城崎町、旧日高町、旧出石町の数値

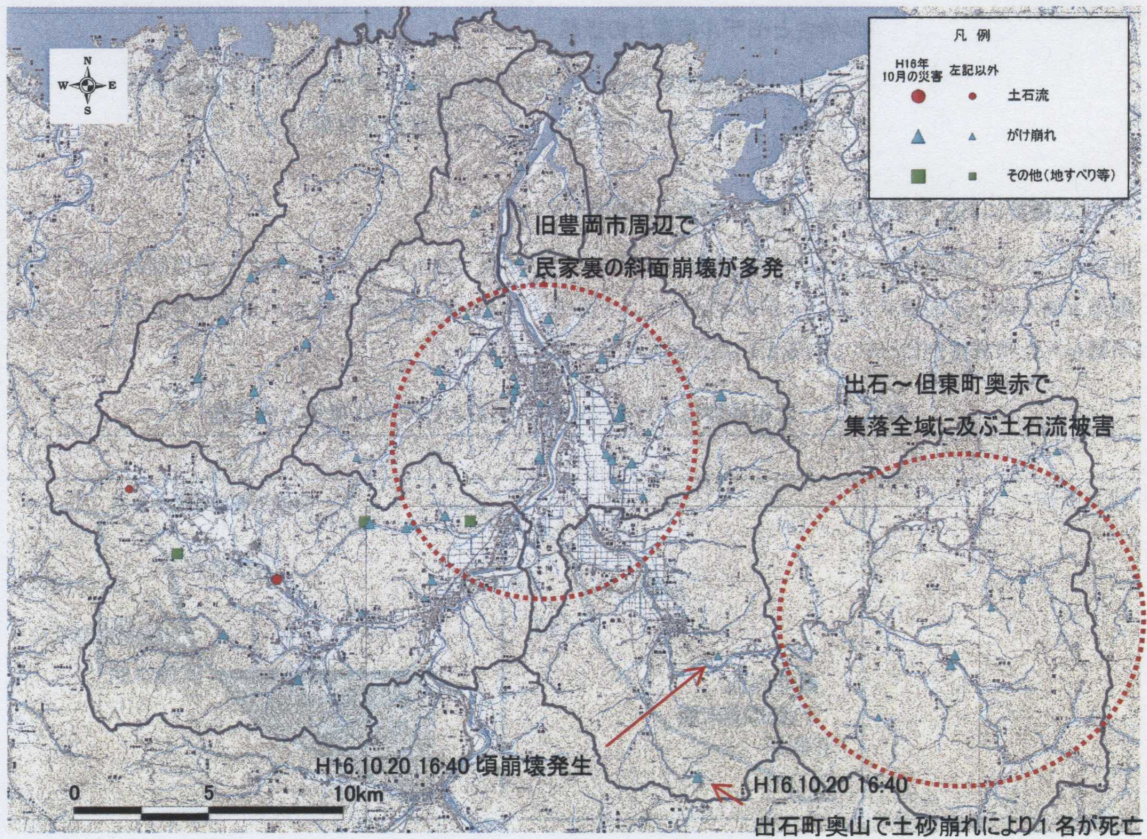


図 5.1.3 土砂災害発生位置図 (S63 年～H23 年)<sup>10)</sup>

5.1.3 テスト計算エリア

テスト計算のエリアは、豊岡市において広い範囲を占める北丹層群、矢田川層群、山陰型花崗岩類のうち、平成 16 年に崩壊等の実績があり災害実績との検証が可能なエリアとして、図 5.1.4 に示す 3 地域とした。

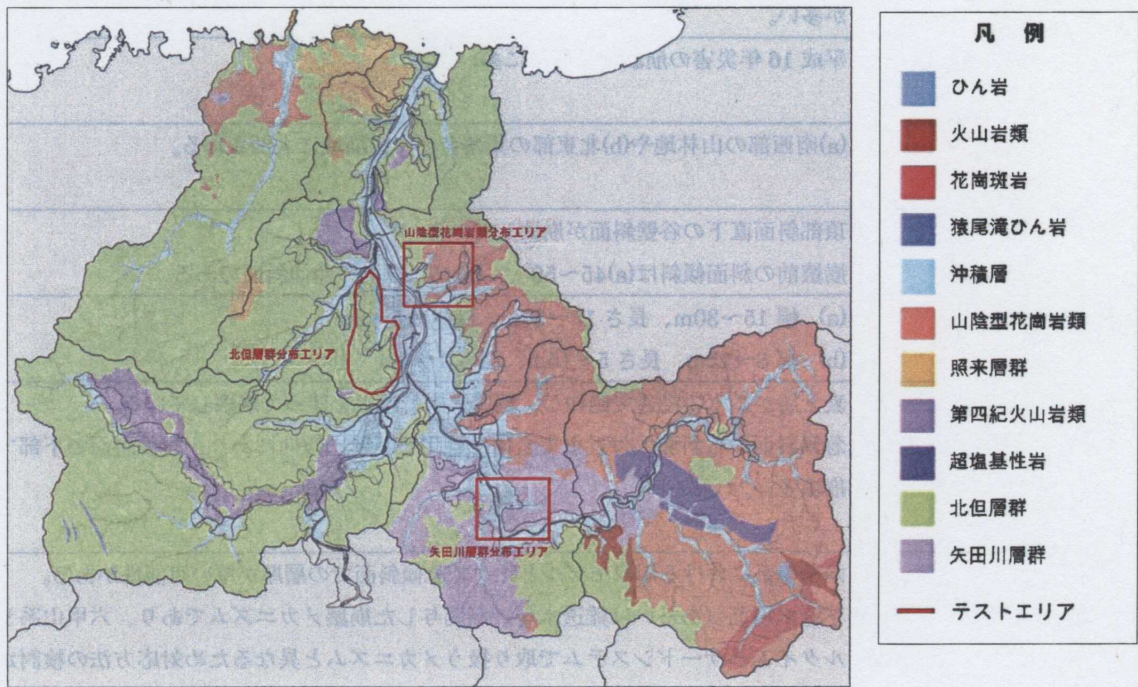


図 5.1.4 テストエリア

## 5.2 テストエリアにおける崩壊特性とモデル構築上の課題

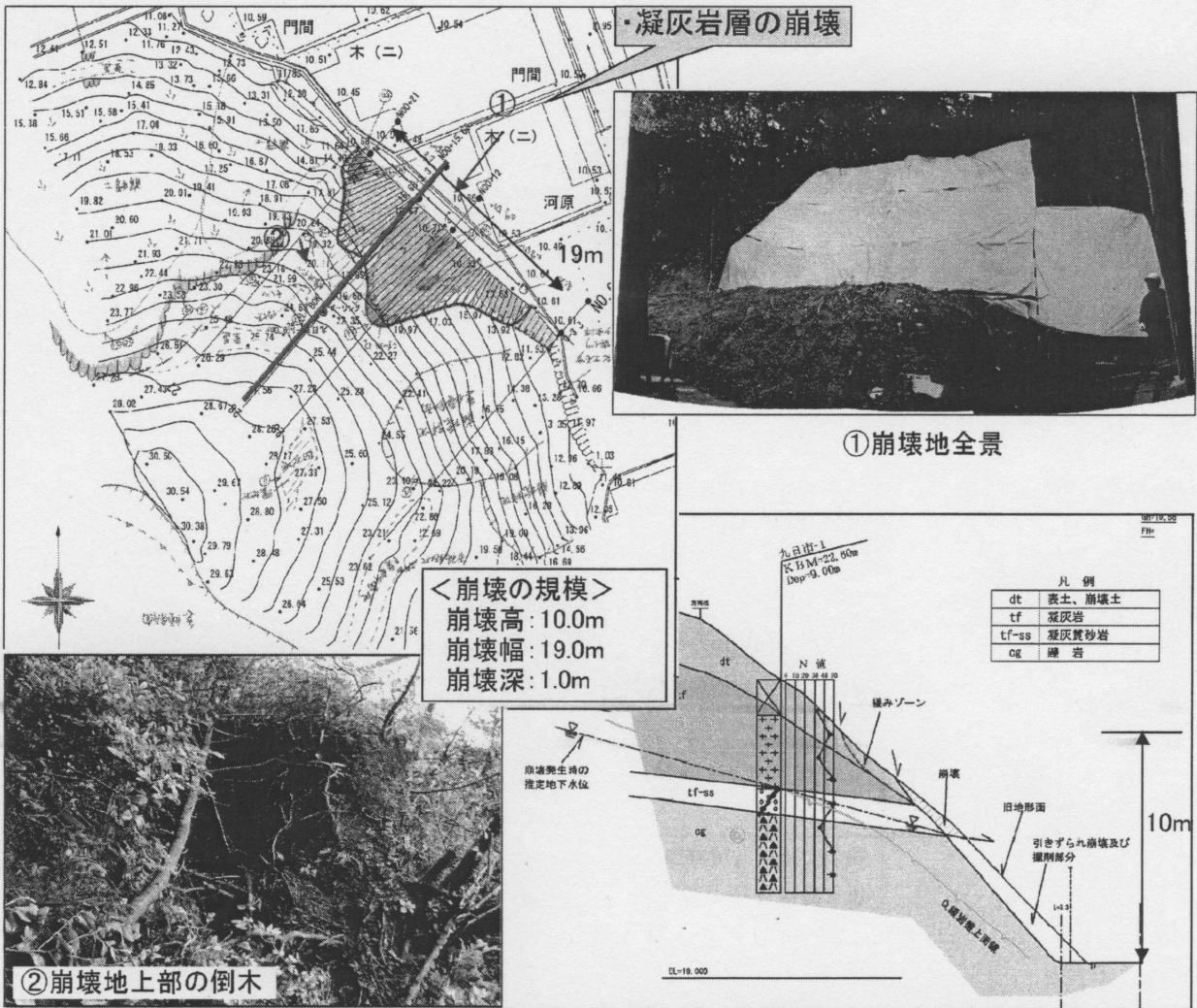
3つのテストエリアについて、過去の災害関連資料や空中写真判読、現地踏査などをもとに崩壊特性について整理し、六甲山系で構築したリアルタイムハザードシステムの適用にあたっての課題を整理した。

### 5.2.1 北但層群における崩壊特性とモデル構築上の課題

北但層群における崩壊特性およびモデル構築上の課題について表 5.2.1 にとりまとめた。北但層群では六甲山系と異なり難透水層が関わる崩壊メカニズムが確認されたことから、何らかの対応策の検討が必要と考えられた。なお、難透水層が関与した代表事例について図 5.2.1 に示した。

表 5.2.1 北但層群における崩壊の特性およびモデル構築上の課題

区分	特性	
模式断面		
地形	主として円山川低地（豊岡盆地）の左岸側の低山地～丘陵地。山頂部は緩やかで谷密度が高い。南部は中国山地に連なり、北部は沖積による埋没山地である。	
地質	北但層群は、以下の二種からなる。 新第三紀・堆積軟岩：北但層群・豊岡累層（泥岩・砂岩・礫岩・凝灰岩） 火山碎屑岩：北但層群・八鹿累層（玄武岩質安山岩溶岩・同火砕岩） 崩壊地は、泥岩や凝灰岩を中心に風化変質が著しく、水分を多量に保持した粘土分が多い。	
崩壊特性	発生数	平成 16 年災害の崩壊地が非常に多い
	平面	(a)南西部の山林地や(b)北東部の集落背面での崩壊に大別される。
	断面	頂部斜面直下の谷壁斜面が崩壊している。 崩壊前の斜面傾斜は(a)45～50°、(b)45°以上の急傾斜面である。
	規模	(a) 幅 15～30m、長さ 15～20m、深さ 0.5～2m (b) 幅 8～15m、長さ 5～15m、深さ 1～3m
崩壊メカニズム	表土層が雨水の浸透で飽和し、難透水層で湧水を伴って崩壊している。 急傾斜面から斜面尻付近まで全体に風化層が厚い傾向にあり、急傾斜面の下部での崩壊多い。	
モデル構築上の課題	六甲山系における層厚モデルと比べて急傾斜面での層厚が厚い可能性がある。 不透水層面（あるいは難透水層）が関与した崩壊メカニズムであり、六甲山系リアルタイムハザードシステムで取り扱うメカニズムと異なるため対応方法の検討が必要である。	



第三紀の北但層群が緩い層理面構造をもつため、民家裏の急斜面地で層状構造が露出する。この崩壊事例では、細粒で地下水の遮水層として働く凝灰岩層が基岩内の地下水を集めて、斜面中腹で湧水し崩壊に至っている。

図 5. 2. 1 難透水層が関与した崩壊事例（豊岡市九日市地区）

## 5.2.2 山陰型花崗岩類における崩壊特性とモデル構築上の課題

山陰型花崗岩類における崩壊の特性およびモデル構築上の課題について表 5.2.2 にとりまとめた。山陰型花崗岩類は六甲山系に類する花崗岩類であり崩壊状況からみてもモデル構築上の課題は確認されなかった。

表 5.2.2 山陰型花崗岩類における崩壊の特性およびモデル構築上の課題

区 分		特 性
模式断面		
地 形		<p>豊岡市の南東部及び北西部の山地。南東部は丹後山地に連なる。 出石川～円山川及び竹野川に面する埋没山地。 山頂は急峻で山麓は緩い。樹枝状～矩形状の溪流が発達する。</p>
地 質		<p>古第三紀前期の火成岩類：山陰型花崗岩類（花崗岩及び花崗閃緑岩） 花崗岩類の強風化帯（マサ状岩盤）とその残積土（マサ土）が表層に分布し主に砂状をなす。特に残積土は土粒子の結合力が弱い。</p>
崩 壊 特 性	発生数	平成 16 年災害の崩壊地が多い
	平 面	<p>狭小に延びる頂部斜面直下の上部谷壁斜面に崩壊が発生していることが多い。 集水地形（0～1次谷）であることが多い。 崩壊地周辺の植生は概ね自然林で広葉樹林（一部竹林）となっている。</p>
	断 面	<p>斜面形態は概ね谷型凹状である。 崩壊地の勾配は40～45°程度の急傾斜面で崩壊底面にはやや硬質な弱風化岩盤が露出している。</p>
	規 模	幅 20～40m、長さ 20～45m、深さ 0.5～2m（データ少ない）
崩壊メカニズム		表土層が雨水の浸透で飽和し自重の増大とせん断抵抗力の低下によって崩壊している。
モデル構築上の課題		六甲山系と同じ崩壊メカニズムであり特質する課題はない。



### 5.2.3 矢田川層群における崩壊特性とモデル構築上の課題

矢田川層群における崩壊の特性およびモデル構築上の課題について表 5.2.3 にとりまとめた。矢田川層群は基本的には六甲山系と同一の崩壊モデルで適用可能と考えられた。ただし、風倒木の影響を受けた地域については対応策の検討が必要と考えられた。

表 5.2.3 矢田川層群における崩壊の特性およびモデル構築上の課題

区分	特性	
模式断面		
地形	豊岡市南部（出石町・但東町）の出石川上流部山地。南側で中国山地に連なる。全体に急峻な山容を呈し、樹枝状の溪流が発達する。	
地質	白亜紀後期の火山砕屑岩類：矢田川層群、流紋岩質溶結凝灰岩 比較的風化に強く風化層は薄い。溶岩では噴出時に、凝灰岩では堆積時に生じた空隙が多く、風化してから開口亀裂となりやすい。	
崩壊特性	発生数	平成 16 年災害の崩壊は少ない
	平面	狭小に延びる頂部斜面直下の上部谷壁斜面に崩壊が発生していることが多い。崩壊地周辺の植生は概ね植林地でスギ材主体の針葉樹林となっている。手入れがされていない密な細木林であった場所が多く、平成 16 年台風による風倒木被害地およびその周辺地域に相当する。
	断面	斜面形態は概ね谷型凹状である。 崩壊地の勾配は 40~45° 程度で急傾斜面の中～上部で崩壊している。
	規模	幅 10~30m、深さ 0.5~1m
崩壊メカニズム	全般的には表土層が雨水の浸透で飽和し自重の増大とせん断抵抗力の低下によって崩壊している。 ただし、湧水跡や常時の地下水が見られず、風倒木被害によって根茎の粘着力の低下によって崩壊したケースも含まれる。	
モデル構築上の課題	全般的には六甲山系と同様のモデル評価可能である。（ただし、風倒木地域においては粘着力の低下を個別に考慮する必要がある。）	

### 5.2.4 その他の課題

テストエリアにおける崩壊特性を検討する中で、地質条件に拠らず人家裏の切土斜面の上部で崩壊を生じているケースが確認された。

図 5.2.2 に代表的な事例を示す。この事例では、尾根の先端斜面において崩壊が発生している。崩壊地の下部は急傾斜地の崩壊対策事業として擁壁工が設置されていたが、崩土は擁壁のポケット容量を超えて民家に達している。地盤は強風化した表土が分布し、古い土取りによる急崖・裸地であったことがわかる。

このような人家裏の切土斜面について、斜面位置の把握方法や土の物性値の与え方について検討が必要である。

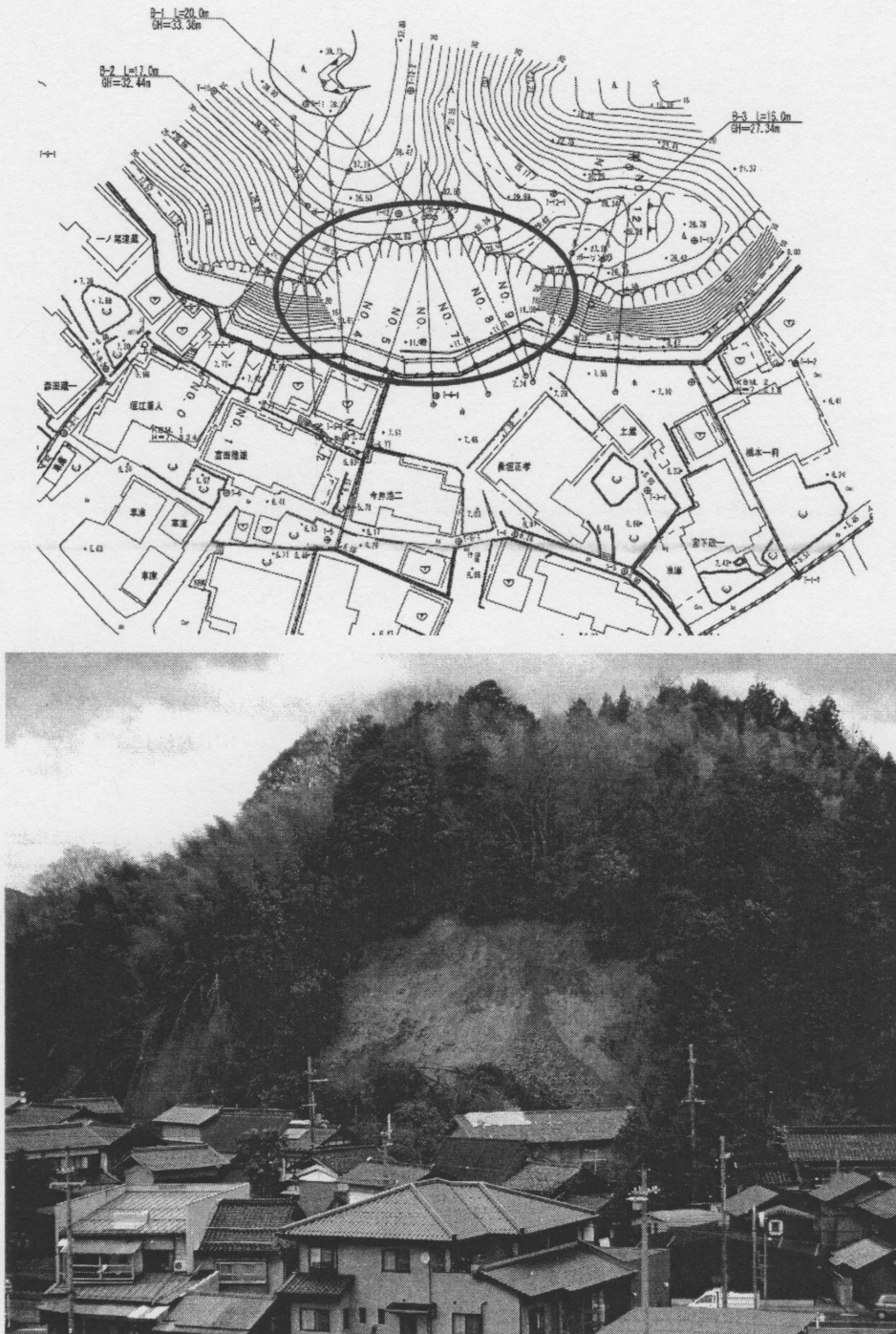


図 5.2.2 人家裏切土斜面における崩壊事例（豊岡市五荘福田地区）

### 5.3 テストエリアで確認された課題への対応

#### 5.3.1 難透水層の影響による崩壊への対応

##### (1) 崩壊メカニズムを踏まえたモデルの改良

難透水層の影響による崩壊は、図 5.3.1 のように模式化できる。崩壊に至るセルは難透水層に沿った側方流出（湧水）による影響を受けるセルであり、難透水層に関わるセル（図中の難透水層セル）に隣接する上部セルが周囲よりも高い地下水位となることで安定性を失い崩壊するものとする。

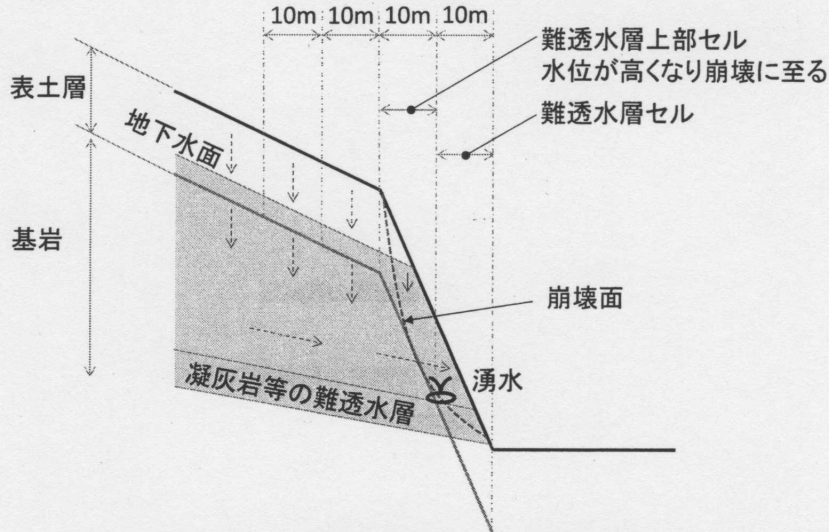


図 5.3.1 難透水層の影響による崩壊の模式図

このメカニズムを六甲山系で提案したモデルに反映するには、基岩中の浸透水の挙動を表現することが必要となる。しかしながら、基岩の浸透特性や基岩面の形状などを広範囲にわたって把握することが困難なため、図 5.3.2 のように難透水層セルへの側方浸透を規制し、隣接する上部の水位の上昇を促すことで周囲よりも安定性が低くなる状況を擬似的に表現することとした。

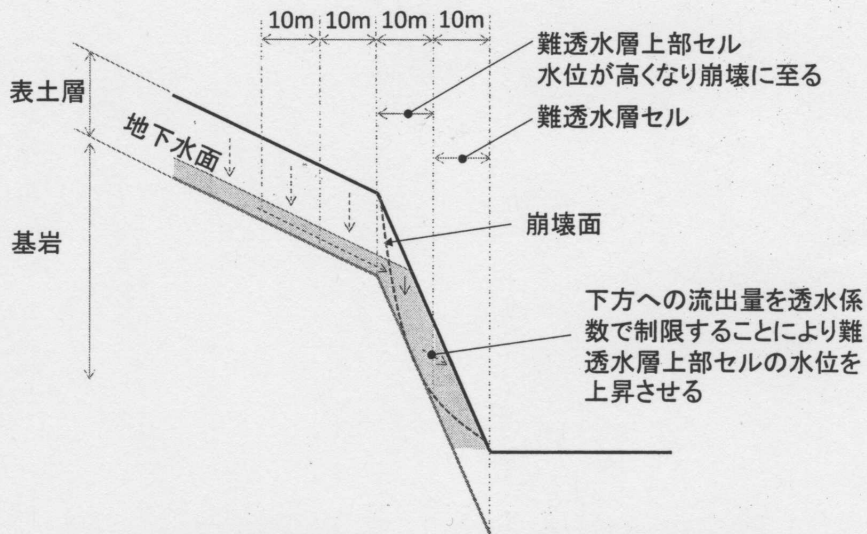


図 5.3.2 難透水層上部メッシュにおける水位上昇モデルの概念

なお、集水モデルによる地下水の計算プログラムの改良は、流出量の計算に用いる各方向の透水係数を  $\text{cop2}(k)$  (但し、 $k=1\sim 4$ ) と定義し、流出先と流出元の透水係数を比較して流出先の透水係数が流出元より小さい場合は流出先の透水係数を採用する (その方向へは流れにくくなる) ように変更するものとした。

例えば、図 5.3.3 のように流出元の透水係数を  $k_1$ 、流出先の透水係数を  $k_2, k_3$  とし、 $k_2 > k_1 > k_3$  の関係にあるとき、これまでのプログラムでは流量  $Q_2, Q_3$  の算定に流出元の透水係数  $k_1$  を使用していたが、改良プログラムにおいては流量  $Q_2$  の算定に流出元の透水係数  $k_1$  を使用し、流量  $Q_3$  の算定に流出元の透水係数  $k_3$  を使用することになる。

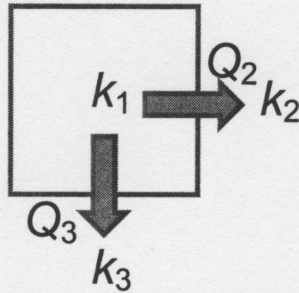


図 5.3.3 透水係数配置の模式図

(2) 難透水層の分布域の把握

崩壊の原因となる難透水層は、北但層群の各層序のうち豊岡累層の泥岩及び細粒凝灰岩からなる岩相である。

この岩相の分布状況について詳細に記述した広域地質図および原著論文には弘原海・松本(1958)<sup>11)</sup> があげられる。

これによれば、豊岡累層の主要構成層である「辻礫岩層」と「大岡礫岩砂岩互層」のうち、後者に凝灰岩・凝灰質泥岩の存在が記載されている。テストエリア周辺の地質構造は、基盤岩である山陰型花崗岩や矢田川層群の流紋岩による北東-南西系に長軸をもつ楕円形の盆状地に北但層群が堆積しているとされ、堆積初期の八鹿累層が南西部に厚く堆積したことによって、当該地の豊岡累層はその北側に非不整合で堆積しているため、北東～北方向に緩く傾斜した地質構造 (層理面構造) をもつとされている。図 5.3.4 の地質図上には、破線で示された「辻礫岩層」と「大岡礫岩砂岩互層」の境界面が描かれている。高さについて明示されたスケールは無いが、概ねほぼ水平～緩く北傾斜であることが分かる。

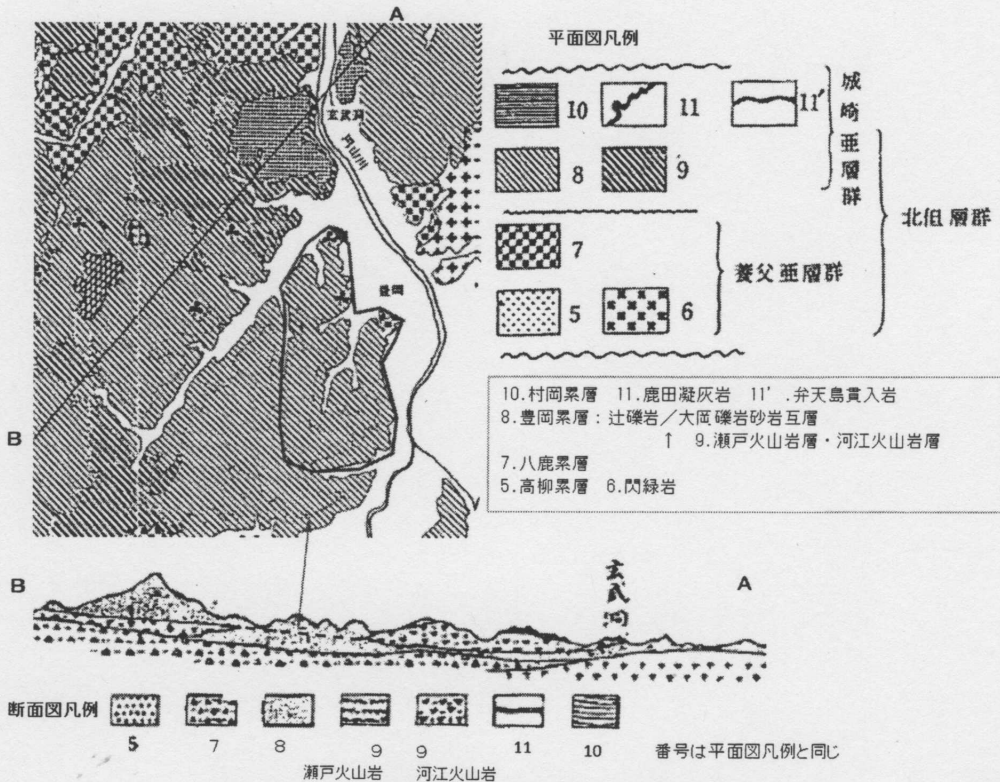


図 5.3.4 弘原海・松本(1958)<sup>11)</sup> による地質図

弘原海・松本(1958)<sup>1)</sup>や災害調査資料、現地踏査により凝灰岩の標高・位置データを地質図学的に展開することで、凝灰岩・凝灰岩質泥岩の分布を推定することが可能であり、テストエリア周辺で検討した分布図を図5.3.5に示した。

この凝灰岩・凝灰岩質泥岩の境界ラインの上部に位置する斜面において、前述した透水係数による側方浸透の規制を行うことで崩壊実績の再現が可能か次項以降で検討する。



図 5.3.5 難透水層分布図の作成に用いた現地調査との位置関係

### (3) 難透水層の透水係数

難透水層の透水係数は、脚注の文献を参照し、地表付近の風化や緩みを考慮した透水係数として、 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$ 程度が目安と考えられた。

一方、シミュレーションに適用する値としては、改良モデルが基岩中の水の移動を忠実に再現しようとするものではなく、難透水層上部のセルの水位を高めるため擬似的な処置であるため、実際の崩壊現象との整合性を確認する中で定める必要がある。

- 
- ① 藤邦明, 渡辺邦夫: 岩盤の透水性に与える種々の Crack 性状の影響, 埼玉大学工学部地盤水理年報, Vol.4, 1978  
 ② 尾方伸久他: 堆積岩の地質学的特性および透水係数, 見かけ比抵抗相互の関係とその水理地質構造モデル化への適用 (<特集>高レベル放射性廃棄物の地層処分), 応用地質 32., 6, 1992  
 ③ Suzuki, T., Tokunaga, E., Noda, H., and Arakawa, H.: Effects of rock strength and permeability on hill morphology: Transactions, Japanese Geomorphological Union 6, pp.101-130, 1985.

## (4) テスト計算による効果検証

以上までの検討結果に基づき、難透水層セルの透水係数を仮定し、改良モデルの効果の確認のための試算を行った。  
なお、試算における条件は表 5.3.1 のとおりであり、計算結果を図 5.3.6 に示した。

表 5.3.1 シミュレーション条件一覧

区分	細目	設定状況		
雨量データ	メッシュ雨量	気象庁レーダ解析雨量 5 kmメッシュ雨量		
地形モデル	10mDEM	国土地理院 10mDEM、国土交通省レーザ計測 5mDEM、兵庫県砂防基盤図のハイブリッド		
過去の崩壊地	崩壊地ポリゴン	空中写真判読による設定		
微地形区分	平地と山地境界設定	目視判読による設定		
	頂部斜面、谷壁斜面、谷底斜面の境界設定	ラプシアンによる自動区分		
	流域面積に応じた 0 次谷の設定	10mDEM による水系網で集水面積 2,000 m <sup>2</sup> (20 メッシュ)		
地質区分	引用地質図名・縮尺	兵庫県の地質		
	地質境界設定	10DEM コンター図との対応付け		
土地利用区分	① 人工改変地 ・宅地や各施設のための造成地 ・水田・田畑などの耕作地 ・対策工のある法面・切土斜面 ・対策工のない法面・切土斜面 ・道路および鉄道 ・堰堤などの人口構造物	目視判読による設定		
	② 水面			
層厚モデル	地質別の傾斜と層厚の関係式の設定	傾斜と層厚の関係式を設定 (図 5.3.8)		
	0 次谷の減厚処理	0.15m の減厚		
	崩壊跡地の減厚処理	未設定		
	再現計算の対象となる崩壊地の埋め戻し	未設定		
地盤物性値	地質区分	北丹層群		
	土の単位堆積重量(kN/m <sup>3</sup> )	15.0 <sup>1)</sup>		
	土の飽和単位堆積重量(kN/m <sup>3</sup> )	18.0 <sup>1)</sup>		
	土の有効粘着力(kN/m <sup>2</sup> )	6.0 <sup>2)</sup>		
	土の有効内部摩擦角(deg)	25.0 <sup>2)</sup>		
	根茎の粘着力(kN/m <sup>2</sup> )	-		
	植生の上載荷重(kN/m <sup>2</sup> )	-		
	有効空隙率	0.35 <sup>2)</sup>		
	透水係数(cm/sec)	0.056 <sup>3)</sup>	0.014 <sup>4)</sup>	
特殊地盤条件	難透水層の設定	文献、現地踏査等による設定		
	対策工のない法面・切土斜面における土の有効粘着力の低減	未設定		

1) 兵庫県基礎調査マニュアル等作成業務による土質試験結果

2) 文献等による設定

3) 六甲山系のモデルに準じた値

4) 難透水層セルの試算値 (0.056 の 1/4)

難透水層の透水性を低下させる改良を施した結果（図 5.3.6 の下図）をみると、崩壊地と安全率 1 以下の箇所との対応が改善されていることが確認された。

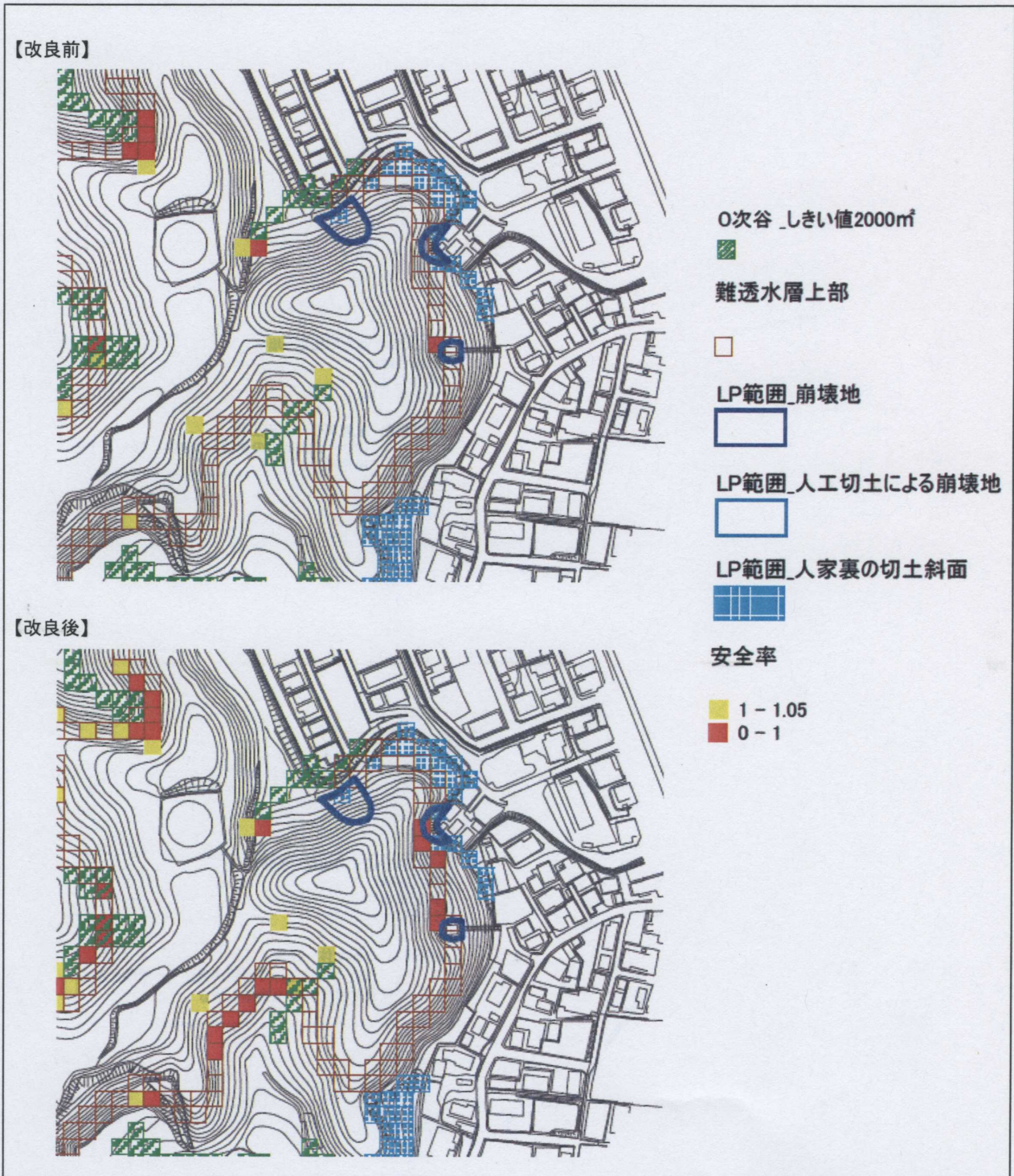


図 5.3.6 難透水層の影響による崩壊への対応

### 5.3.2 人家裏切土斜面の崩壊特性の把握と対応

人家裏の切土斜面の崩壊は、図 5.3.7 に示す二つのパターンが確認された。ひとつは、斜面の上部が崩壊するもので、もうひとつは斜面の中腹から下部が崩壊するものである。

いずれも宅地を広げる目的などで斜面の人為的な切り取りがなされ安定性が低下している。このため、これらの斜面への対応としては、該当箇所を空中写真判読や現地調査等により特定し、崩壊の源頭部となり得るセルの土の有効粘着力を低下させる方法が適当と考えられた。

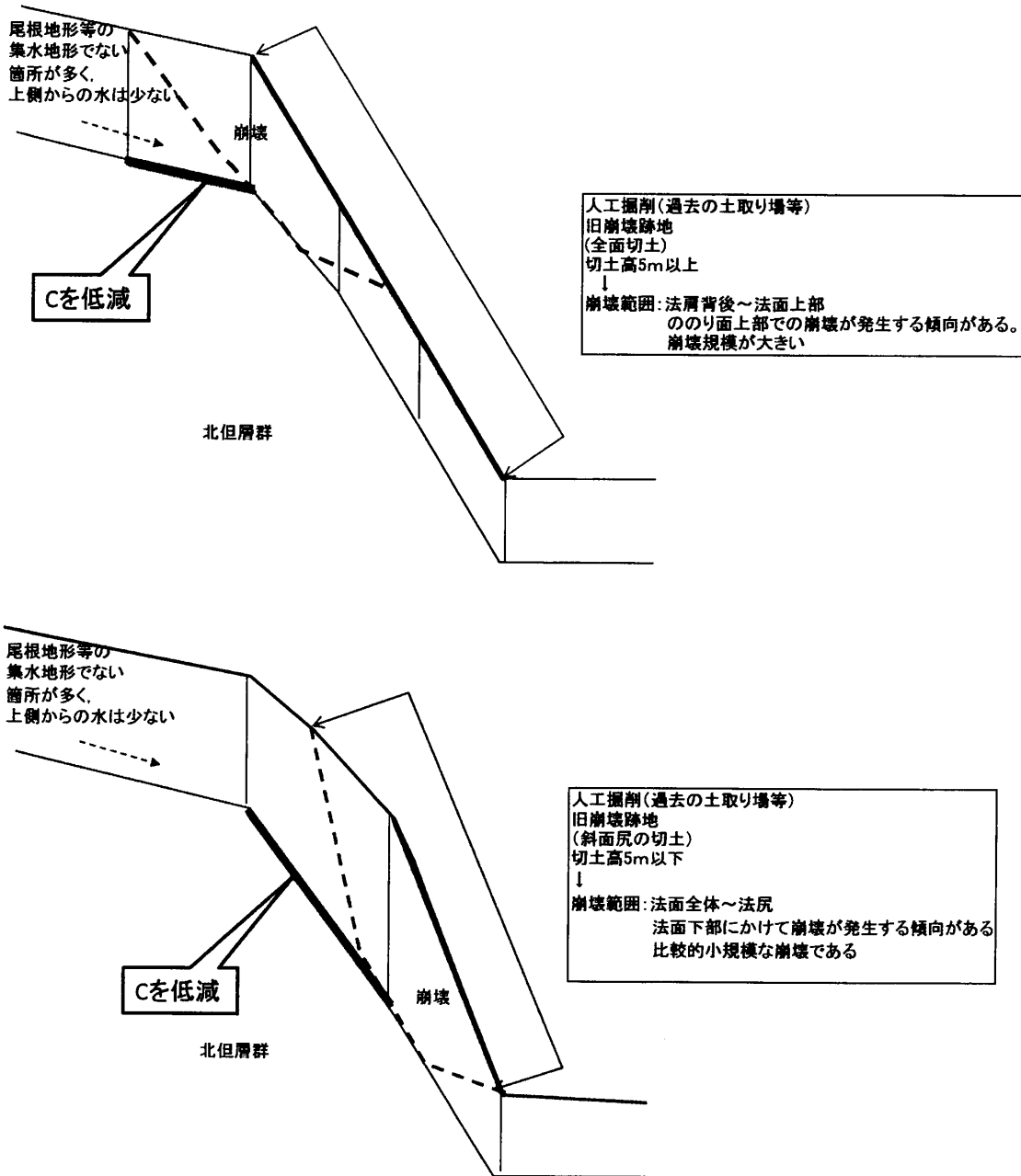


図 5.3.7 人家裏斜面の崩壊パターンとモデル改良方法

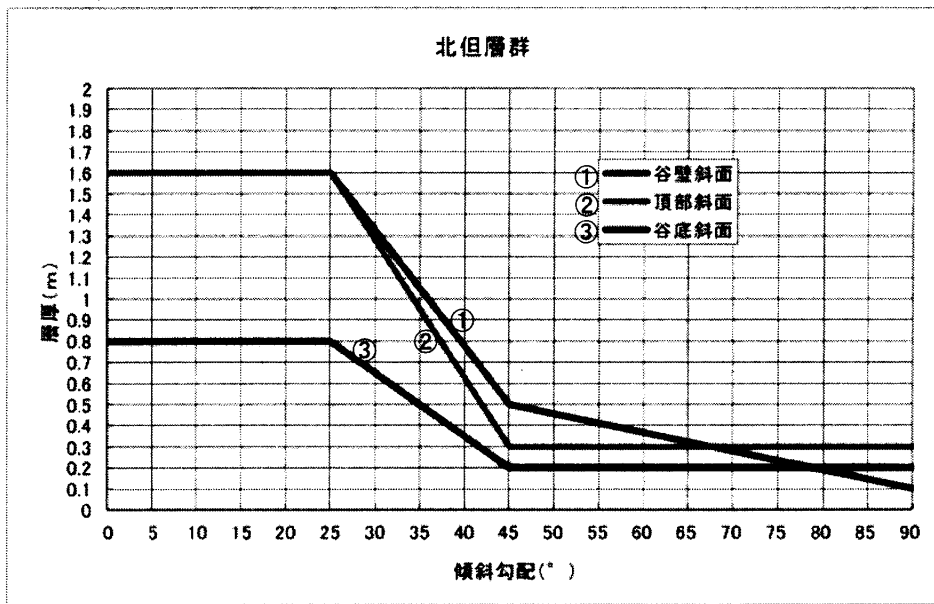


5.3.3 地質区分ごとの層厚や物性値の設定

(1) 層厚モデル

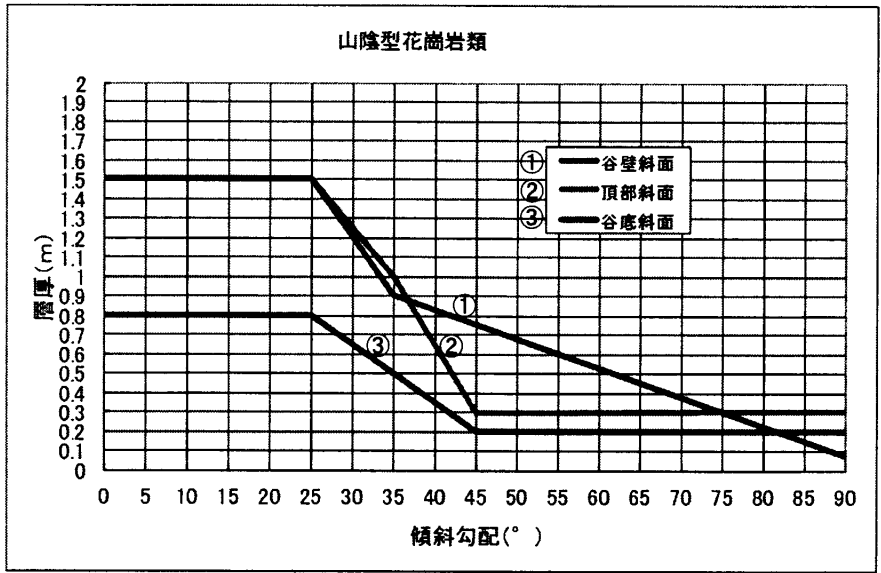
層厚モデルは、以下の資料を参照して、地質別に作成した。作成結果は図 5.3.8～5.3.10 のとおりである。

- ・兵庫県基礎調査マニュアル検討時のボーリングデータ
- ・兵庫県の急傾斜地調査データ
- ・六甲砂防事務所の調査データ地
- ・踏査による崩壊地データ



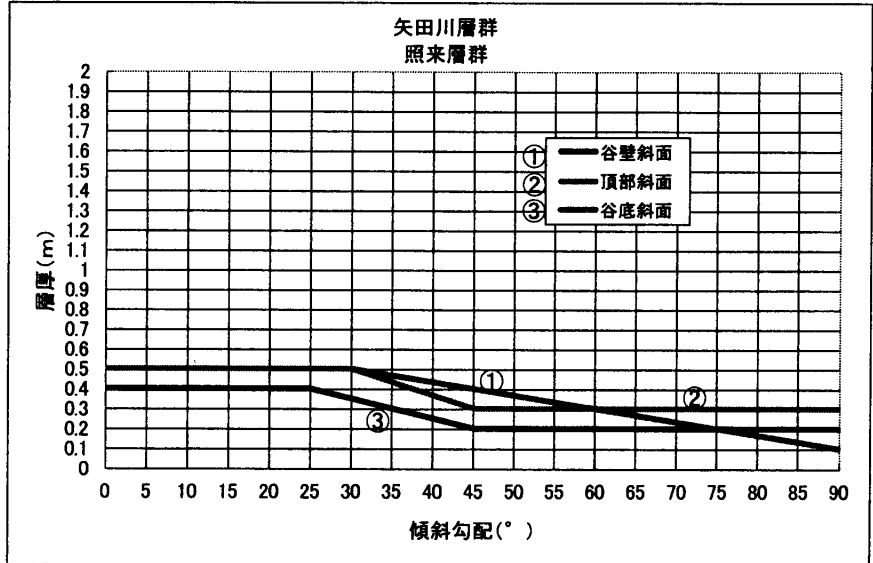
	谷壁斜面	頂部斜面	谷底斜面
	0-25° H=1.6m	0-25° H=1.6m	0-25° H=0.8m
北但層群 (崩壊域中 域・非崩壊中 域)	25-45° H=-0.055φ +2.975	25-45° H=-0.065φ - 2.625	25-45° H=-0.03φ +1.55
	45° - H=-0.00888 φ +0.9	45° - H=0.3m	45° - H=0.2m

図 5.3.8 北但層群における層厚モデル



	谷壁斜面	頂部斜面	谷底斜面
山陰型 花崗岩類	0-25° H=1.5m	0-25° H=1.3m	0-25° H=0.8m
	25-35° H=-0.06φ	25-35° H=-0.05φ	25-45° H=-0.03φ
	+3.00	+2.75	+1.55
	35° - H=-0.015φ	35-45° H=-0.07φ	45° - H=0.2m
	+1.425	+3.45	
		45° - H=0.3m	

図 5.3.9 山陰型花崗岩における層厚モデル



	谷壁斜面	頂部斜面	谷底斜面
矢田川層群 照来層群	0-30° H=0.5m	0-30° H=0.5m	0-25° H=0.4m
	30° - H=-0.00666φ	30-45° H=-0.0133φ	25-45° H=-0.01φ
	+0.6999	+0.899	+0.65
		45° - H=0.3m	45° - H=0.2m

図 5.3.10 矢田川層群における層厚モデル

## (2) 物性値

土の物性値については、既存資料等をもとに表 5.3.2.のとおりとした。

表 5.3.2 地質別物性値

			地質区分		
			北但層群	山陰型花崗岩類	矢田川層群
			凝灰岩・凝灰岩質泥岩	山陰型花崗岩類 花崗斑岩	矢田川層群・火山岩類 猿尾滝ひん岩・ひん岩
豊岡市域			H23豊岡地区検討により、文献および解析によって最も適当な表土の物性値を整理した。	粗粒の黒雲母花崗岩を主とすること、六甲花崗岩に形成時期が相対的に近いことから、地質は六甲花崗岩に類似するため、表土の物性が近いと判断される。	有馬層群と同種の流紋岩を主とする硬質な岩盤であり、形成時期も有馬層群と同時期である。よって有馬層群の表土の物性に近いと判断される。
六甲山系の地質との対応			—	六甲花崗岩	有馬層群 (矢田川・生野・相生層群含む)
土砂災害防止法基礎調査マニュアル(案)			第三紀中新世堆積岩	花崗岩類	古第三紀～白亜紀酸性火山岩類
No.	物性値	単位	砂質土～粘性土 (互層状)	砂質土	砂質土～礫質土
1	土の 単位体積重量	[kN/m <sup>3</sup> ]	15.0 <sup>※1</sup>	17.0 <sup>※3</sup>	15.0 <sup>※1</sup>
2	土の飽和 単位体積重量	[kN/m <sup>3</sup> ]	18.0 <sup>※2</sup>	19.0 <sup>※3</sup>	18.0 <sup>※2</sup>
3	土の有効粘着力	[kN/m <sup>2</sup> ]	6.0 文献値およびH23豊岡地区検討による 再現計算の最適値	5.0 <sup>※3</sup>	5.0 再現計算で最適値
4	土の 有効内部摩擦角	[deg]	25.0 <sup>※4</sup> 土砂災害基礎調査マニュアルの採用値	31.0 <sup>※3</sup>	32.0 <sup>※4</sup> (30.0-35.0で示されるが、粒度区分で他の砂質土～粘性土と同等程度と評価)再現計算の最適値
5	根系の粘着力	[kN/m <sup>2</sup> ]	—	—	—
6	植生の上載荷重	[kN/m <sup>2</sup> ]	—	—	—
7	有効空隙率	[1]	0.35 <sup>※5</sup>	0.35 <sup>※5</sup>	0.35 <sup>※5</sup>
8	透水係数	[cm/s]	0.056 (暫定値)	0.056 <sup>※6</sup>	0.056 <sup>※6</sup>

※1「兵庫県基礎調査マニュアル等作成業務」による土質試験結果

※2「兵庫県基礎調査マニュアル等作成業務」による土質試験結果による試験値から推定  $\rho_m = (\sigma - 1)c + 1$

※3六甲山系のモデルと同値

※4「土砂災害防止法基礎調査マニュアル(案)兵庫県砂防課 H17」で示されている土質区分に応じた内部摩擦角度を採用、当マニュアルで示されていないものや、現地の土質構成がやや異なるものは土質を考慮して採用

※5文献資料より推定

※6「兵庫県基礎調査マニュアル等作成業務」による土質試験結果の粒度推定、および前年度現地測定データより推定

## 6. 平成 16 年災害を対象とした再現計算

### 6.1 平成 16 年の災害降雨

平成 16 年の再現計算においては、平成 16 年 10 月 19 日から 10 月 21 日までの 3 日間の 1 時間降雨（気象庁のレーダ解析雨量）を用いた。

テストエリアごとの降雨状況は、図 6.1.1～図 6.1.3 のとおりであり、10 月 20 日 14 時～19 時までの時間帯に強い雨が集中し、最も降雨が多いエリアで 3 日間総雨量 344.4mm を観測している。

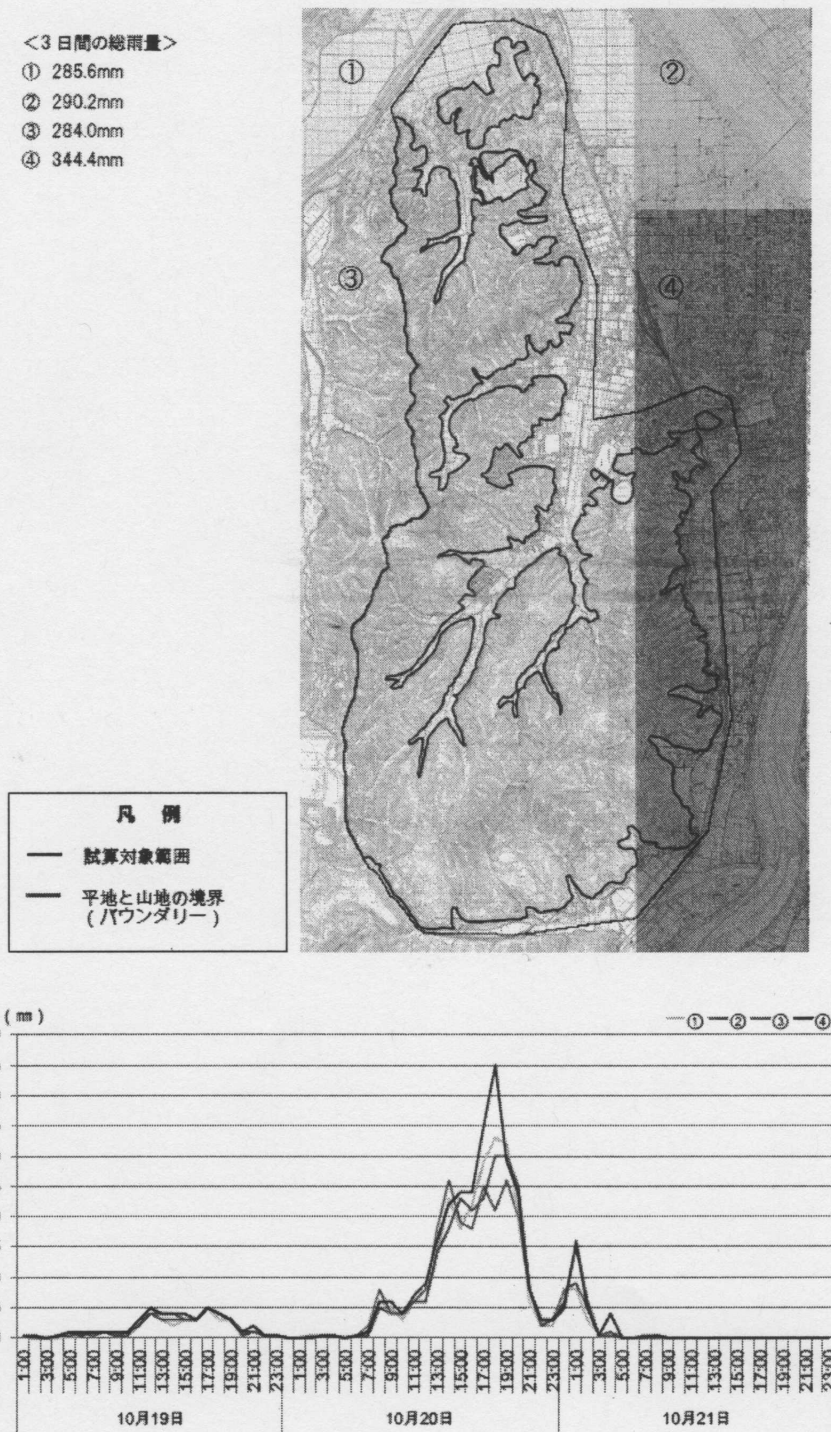


図 6.1.1 北但層群テストエリアにおける入力雨量（平成 16 年災害降雨）

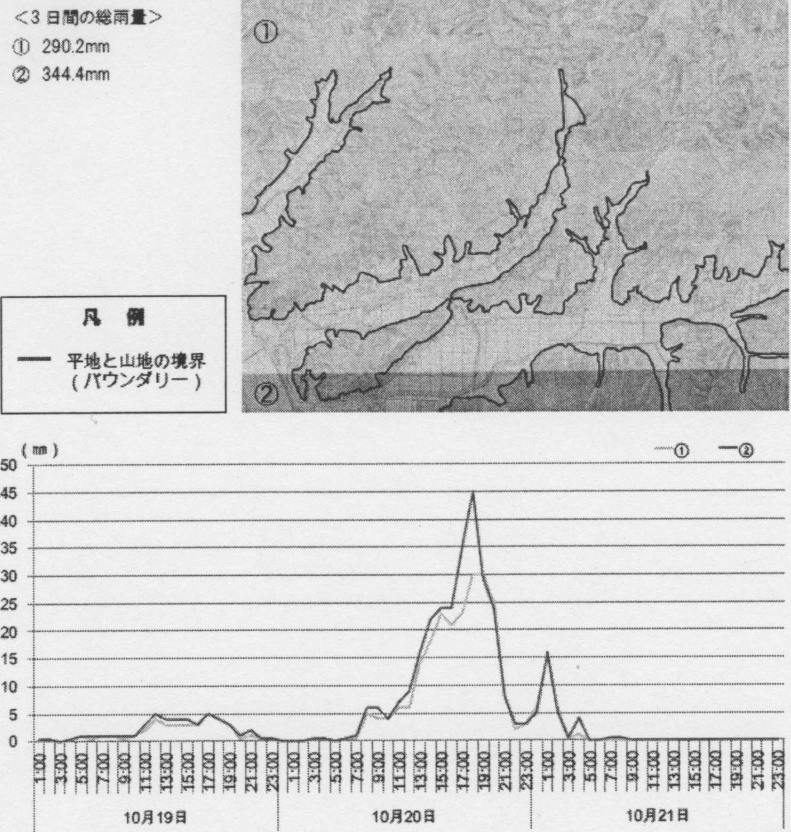


図 6.1.2 山陰型花崗岩類テストエリアにおける入力雨量 (平成 16 年災害降雨)

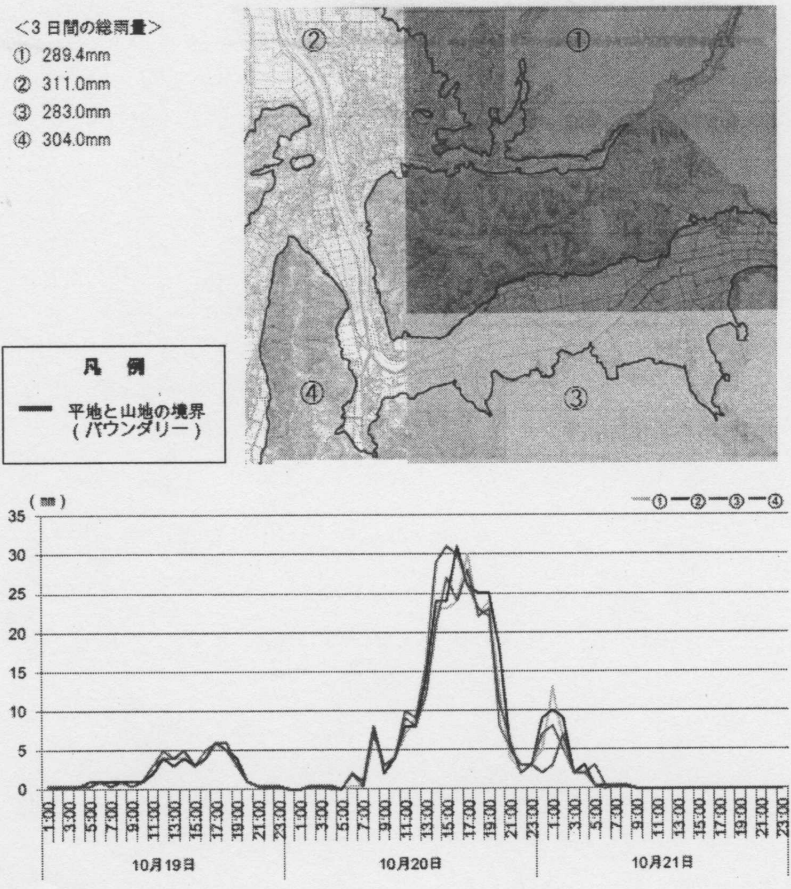


図 6.1.3 矢田川層群テストエリアにおける入力雨量 (平成 16 年災害降雨)

## 6.2 再現計算における条件

再現計算は、課題としてあげられた難透水層や人家裏の切土斜面への対応を考慮した表 5.3.1 のシミュレーション条件に基づき実施した。

表 6.2.1 シミュレーション条件一覧

区分	細目	設定状況		
雨量データ	メッシュ雨量	気象庁レーダ解析雨量 5 kmメッシュ雨量		
地形モデル	10mDEM	国土地理院 10mDEM、国土交通省レーザ計測 5mDEM、兵庫県砂防基盤図のハイブリッド		
過去の崩壊地	崩壊地ポリゴン	空中写真判読による設定		
微地形区分	平地と山地境界設定	10mDEMによる傾斜や起伏量による自動抽出		
	頂部斜面、谷壁斜面、谷底斜面の境界設定	ラプシアンによる自動区分		
	流域面積に応じた0次谷の設定	10mDEMによる水系網で集水面積 2,000 m <sup>2</sup> (20メッシュ)		
地質区分	引用地質図名・縮尺	兵庫県の地質		
	地質境界設定	10DEMコンター図との対応付け		
土地利用区分	① 人工改変地 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 宅地や各施設のための造成地</li> <li>・ 水田・田畑などの耕作地</li> <li>・ 対策工のある法面・切土斜面</li> <li>・ 対策工のない法面・切土斜面</li> <li>・ 道路および鉄道</li> <li>・ 堰堤などの人口構造物</li> </ul> ② 水面	目視判読による設定		
層厚モデル	地質別の傾斜と層厚の関係式の設定	北丹層群、矢田川層群、山陰型花崗岩類について傾斜と層厚の関係式を設定 (図 5.3.8~図 5.3.10)		
	0次谷の減厚処理	0.15mの減厚		
	崩壊跡地の減厚処理	未設定		
	再現計算の対象となる崩壊地の埋め戻し	未設定		
地盤物性値	地質区分	北丹層群	山陰型 花崗岩類	矢田川層群
	土の単位堆積重量(kN/m <sup>3</sup> )	15.0	17.0	15.0
	土の飽和単位堆積重量(kN/m <sup>3</sup> )	18.0	19.0	18.0
	土の有効粘着力(kN/m <sup>2</sup> )	6.0	5.0	5.0
	土の有効内部摩擦角(deg)	25.0	31.0	32.0
	根茎の粘着力(kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-
	植生の上載荷重(kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-
	有効空隙率	0.35	0.35	0.35
透水係数(cm/sec)	0.056	0.056	0.056	
特殊地盤条件	難透水層の設定	文献、現地踏査等による設定		
	対策工のない法面・切土斜面における土の有効粘着力の低減	標準値よりマイナス 1kN/m <sup>2</sup>		

### 6.3 再現計算結果

テストエリアにおける再現計算結果を図 6.3.1～図 6.3.3 に示した。また、適中率等の集計結果を表 6.3.1 に示した。

再現計算の対象となる平成 16 年災害時の崩壊地について崩壊前の地形に戻す処理を行っていない段階での試算であるため、適中率等の指標は参考となりたが、今回の試算により以下の事項が確認された。

- ① 難透水層セルの上部に安全率 1 を下回るセルが確認されるようになった。
- ② 北但層群に位置する人家裏切土斜面の崩壊地 3 箇所のうち 2 箇所で安全率 1 を下回るようになった。
- ③ 矢田川層群で安全率 1 を下回るセルが平成 16 年の崩壊地の数よりも多い状況が確認された。

当該地域では、豊岡市全域のレーザ計測が予定されており、新たな地形モデルの入手後に細部の調整を行う予定である。今後、難透水層の影響による崩壊では透水係数の調整を、人家裏切土斜面の崩壊では土の有効粘着力の調整を進めることで最適化できるものと考えられる。また、矢田川層群では地盤の物性値や土層モデルの全般について最適化のための検討が必要である。

表 6.3.1 テストエリアにおける適中率等（バッファなしでの計算結果）

	適中率	捕捉率	見逃率	空振率
北但層群	98.1%	18.0%	82.0%	1.1%
山陰型花崗岩類	98.7%	42.9%	57.1%	1.2%
矢田川層群	95.3%	26.3%	73.7%	4.6%

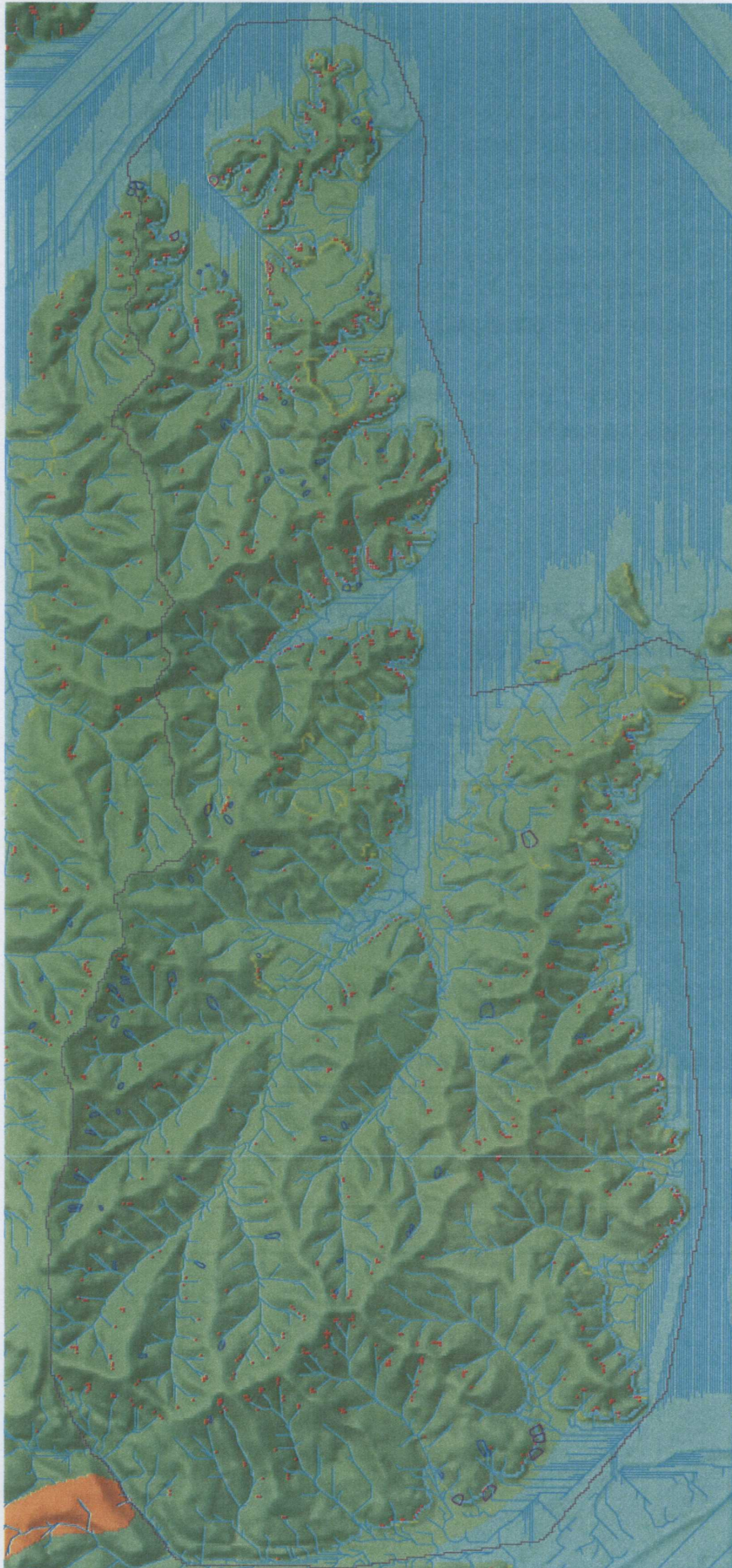
①適中率 :  $(A+D)/(A+B+C+D)$   
全範囲のうち、空中写真判読の判定に合致している割合

②捕捉率 :  $A/(A+B)$   
空中写真判読した崩壊地の範囲のうち、計算結果で崩壊判定が出ている割合

③空振率 :  $C/(C+D)$   
空中写真判読で崩壊地と判定していないのに、計算結果で崩壊判定が出ている割合

④見逃率 :  $A/(A+B)$   
空中写真判読した崩壊地の範囲のうち、計算結果で崩壊判定が出ていない割合

	予測	発生予想	非発生予想
実績			
崩壊発生		A	B
崩壊非発生		C	D



### 凡例

- テストエリア範囲
- 崩壊判定箇所 (最小安全率<1.0)

- 水系網 集水域2,000m<sup>2</sup>
- 人家裏切土斜面による崩壊地
- 地すべり性崩壊地
- 北但層群崩壊地
- 山陰型花崗岩類崩壊地
- 矢田川層群崩壊地
- 切土斜面上部判定セル
- 難透水層セル

### ハザードマップ地質区分 テストエリア

- 山陰型花崗岩類
- 矢田川層群・照来層群
- 北但層群 崩壊集中箇所外
- 北但層群 崩壊集中箇所

### テストエリア外

- 第四紀火山岩類
- 超塩基性岩
- 沖積層

図 6.3.1 北但層群テストエリアにおける再現計算結果



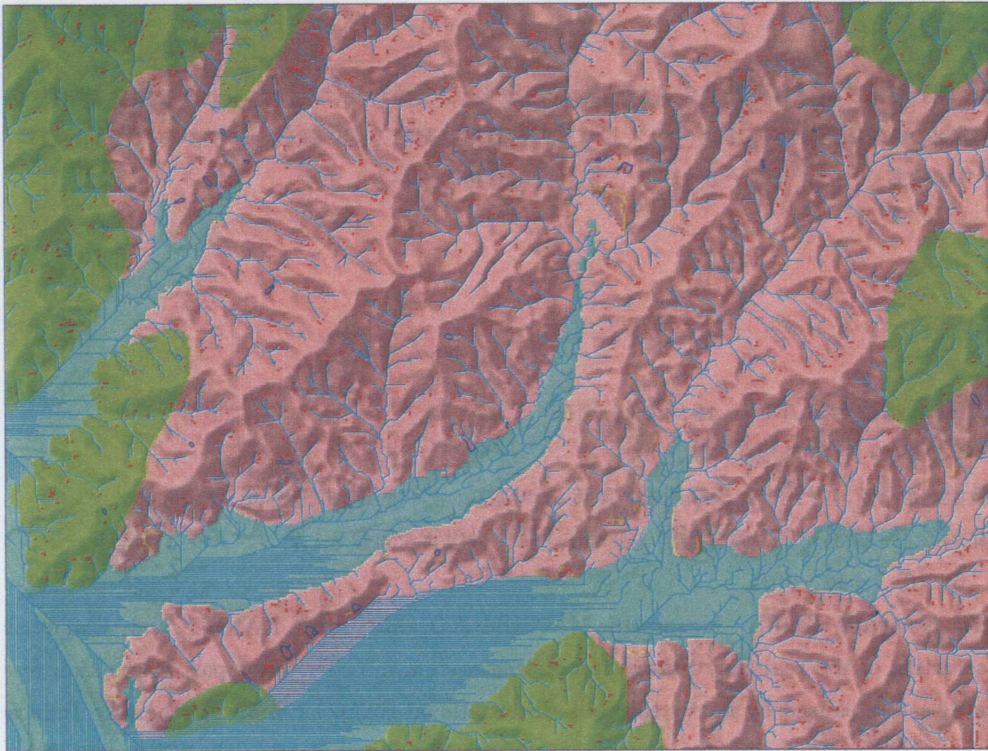


図 6.3.2 山陰型花崗岩類テストエリアにおける再現計算結果

**凡例**

- テストエリア範囲
- 崩壊判定箇所 (最小安全率<1.0)
- 水系網 集水域2,000㎡
- 人家裏切土斜面による崩壊地
- 地すべり性崩壊地
- 北但層群崩壊地
- 山陰型花崗岩類崩壊地
- 矢田川層群崩壊地
- 切土斜面上部判定セル
- 難透水層セル

**ハザードマップ地質区分  
テストエリア**

- 山陰型花崗岩類
- 矢田川層群・照来層群
- 北但層群 崩壊集中箇所外
- 北但層群 崩壊集中箇所

**テストエリア外**

- 第四紀火山岩類
- 超塩基性岩
- 沖積層

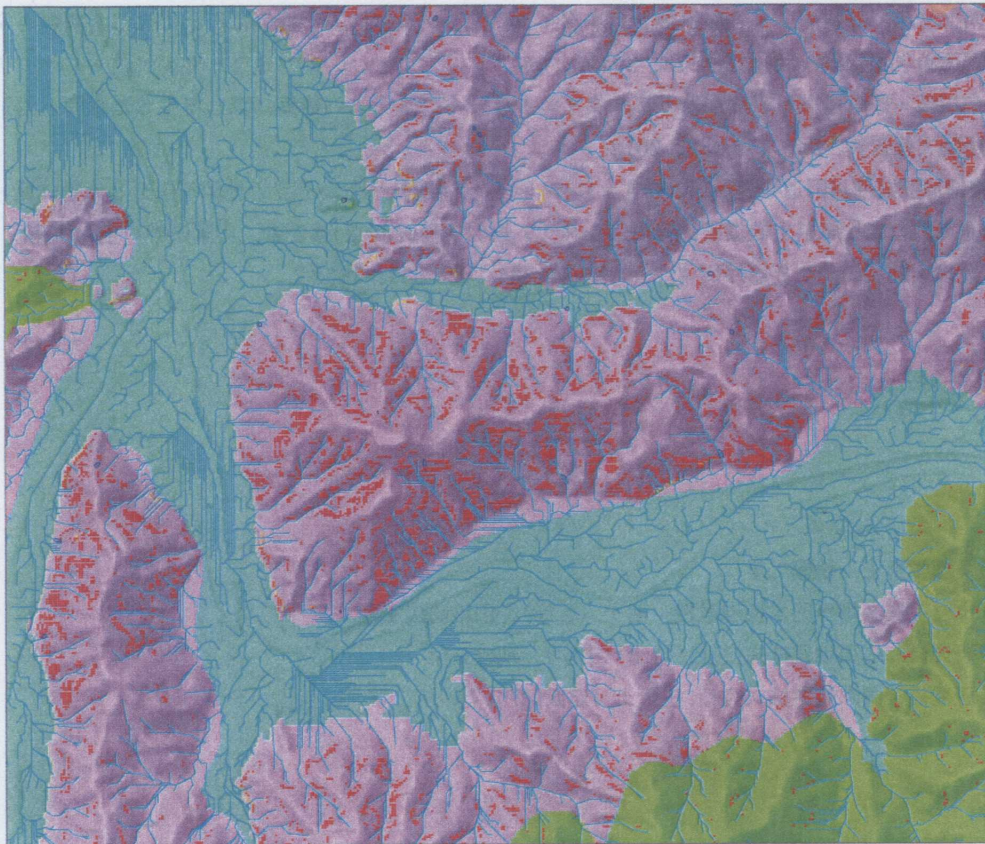


図 6.3.3 矢田川層群テストエリアにおける再現計算結果

## 7. おわりに

本プロジェクトの推進に関しては、兵庫県県土整備部砂防課の全面的なご支援を受けた。このような機会を与えていただいた関係各位に深く感謝の意を表します。また、テストエリアとした豊岡市の関係職員の皆様からは、災害資料の提供や活用上のアドバイスを数多くいただくことができた。あわせて感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 山口県緊急災害情報 (HP) 2013年8月6日 19時03分現在
- 2) 島根県報道資料 2013年7月29日 15時現在の状況
- 3) 沖村孝・市川龍平：数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法、土木学会論文報告集、1985.
- 4) 沖村孝・鳥居宣之・尾崎幸忠・南部光広・原口勝則：豪雨による土砂災害を対象としたリアルタイムハザードシステムの構築、新砂防、63 (6)、4-12、2011.
- 5) Takashi OKIMURA, Nobuyuki TORII, Masatoshi MATSUMOTO, Mitsuhiro NANBU and Katsutoshi HARAGUCHI: Construction of the real-time hazard forecasting system in order to support evacuation from surface slope failure disasters caused by heavy rainfalls, International Symposium on Earthquake Induced Landslides and Disaster Mitigation at the 3rd Anniversary of the Wenchuan Earthquake, Chengdu, China, 2011.
- 6) 沖村孝・鳥居宣之・南部光広・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策、建設工学研究所論文報告集、52、119-137、2010.
- 7) 沖村孝・鳥居宣之・南部光広・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策 (2)、建設工学研究所論文報告集、53、153-173、2011.
- 8) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策 (3)、建設工学研究所論文報告集、54、159-183、2012.
- 9) 国土交通省近畿地方整備局豊岡河川国道事務所 (2005) パンフレット、「明日へ生かそう！地図が伝える水害体験」
- 10) 平成 23 年度神戸市他県内全域兵庫県土砂災害情報提供システム検討業務(その2)報告書、兵庫県神戸土木事務所
- 11) 弘原海清・松本隆：北但馬地域の新生界層序(その1)、地質雑、64、625-637、1958

## 著 者

沖村 孝	所員 理学博士, 地盤工学
鳥居 宣之	神戸市立工業高等専門学校准教授、博士 (工学), 山地防災工学
中川 渉	客員研究員 応用地質株式会社, 博士 (工学), 地盤工学
原口 勝則	客員研究員 国際航業株式会社, 技術士 (建設部門), 砂防工学