

## 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(6)

### Some Problems and Measures appeared during the Construction of the Real-time Hazard System for Slope Disasters at a Heavy Rainfall (6)

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

2015 年 7 月 4 日 3 時にマーシャル諸島で発生した台風 11 号は沖縄県の南にあった熱帯低気圧を吸収し、7 月 16 日 23 時頃に高知県室戸市付近に上陸し、比較的ゆっくりとした速度で近畿・中国地方を北上した。この台風により西日本や東日本を中心に多くの雨量をもたらした。7 月 17 日には和歌山県新宮市熊野川町や田辺市本宮町で熊野川やその支流が氾濫した。また、7 月 24 日 17 時までの消防庁の集計では、死者 2 名、重軽傷 59 名、家屋の全半壊 7 棟、一部破損 79 棟、床上・床下浸水 398 棟の被害となり、高知県から茨城県の 2 府 14 県において 1,087,284 人に避難勧告、43,384 人に避難指示が出された<sup>1)</sup>。

台風の中心が日本海に抜けた 17 日夕方以降は、活発な台風外側の雲が関西地域にかかり続けたことで京阪神地域が記録的な大雨となった。中でも、兵庫県神戸市の神戸海洋気象台（現：神戸地方気象台）で 24 時間雨量が観測史上最大の 270.5mm を観測するなど、多くの地点で観測史上最大または 7 月最大の雨量を観測した<sup>2)</sup>。兵庫県ではこの大雨により死者 1 名、重軽傷 14 名、家屋の全半壊 3 棟、一部破損 6 棟、床上・床下浸水 27 棟の被害を生じ、10 市町 81,964 世帯 183,979 人に避難勧告、9 世帯 21 人に避難指示が出された<sup>3)</sup>。このとき、神戸市は初めて市内全ての土砂災害警戒区域に対して避難勧告を発令したが、警戒区域の具体的な場所を示さなかったため「うちが区域に入っているのか」といった問い合わせが殺到し、警戒区域や避難勧告等の周知方法に課題が残った<sup>4)</sup>。

このように、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警戒情報として使われている。しかし、近年のような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指標や基準だけでは、十分な対応に結び付かない可能性がある。すなわち、過去に崩壊記録のない斜面に崩壊が発生したり、総降雨量によらず大きな降雨強度の出現時刻に崩壊が発生したりする可能性がある。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。また、空間や時系列に関して、よりきめ細かな予測情報を提供することが、警戒や避難情報の適切な発令に資するものと考えられる。

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>5)</sup>。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、この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>6)7)</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、すでにこれまでの報告<sup>8)9)10)</sup>で詳しく紹介した。また、異なる地質を有する豊岡市や上郡町における

本システムの適用に際して生じた課題とその対応については前報<sup>11)12)</sup>で紹介した。本報告は、表六甲山系や豊岡市、上郡町と類似の地形・地質を有する三田市への適用に関して、地質区分ごとの表土層の設定などについてこれまでと異なる知見が得られたのでこれを報告するものである。

## 2. 2010年報告<sup>8)</sup>における内容

2010年報告では<sup>8)</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、次のとおりである。

- 1) 地形のスモージング化
- 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2010年報告<sup>8)</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>9)</sup>における内容

2011年報告<sup>9)</sup>においては、2010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2011年報告<sup>9)</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>10)</sup>における内容

2012年報告<sup>10)</sup>においては、その後の運用中に出現した課題について検討した。その内容は以下のとおりである。

- 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2012年報告<sup>10)</sup>で詳しく説明しているため、ここでは省略する。

## 5. 2013年報告<sup>11)</sup>における内容

2013年報告<sup>11)</sup>においては、豊岡市を対象としてこれまで適用していない地質条件である北但層群や矢田川層群、

照来層群、超塩基性岩などに適用した際に判明した課題と対策について述べた。その内容は以下のとおりである。

- 1) 難透水層の影響による崩壊への対応
- 2) 人家裏切土斜面の崩壊特性の把握と対応

これらについては2013年報告<sup>11)</sup>で詳しく説明しているため、ここでは省略する。

## 6. 2014年報告<sup>12)</sup>における内容

2014年報告<sup>12)</sup>においては、上郡町を対象としてこれまでに適用していない地質条件である相生層群や超丹波帯などに適用した際に判明した課題と対策について述べた。その内容は以下のとおりである。

- 1) 頂部小起伏面の周縁部に多発する崩壊への対応
- 2) 頂部小起伏面の自動抽出手法

## 7. 三田市への適用時に判明した課題と対策

### 7. 1 検討対象エリアの概要

#### 7. 1. 1 地形・地質

検討対象の三田市は、市域の北部と東部の標高が相対的に高く、500m～700mの山地地形を成し、その大部分が流紋岩質凝灰岩・凝灰角礫岩を主体とする火山岩類が分布している。この地層は中世代白亜紀のもので、有馬層群と呼ばれ上郡地域の相生層群に対比される。一方、南西部は概ね300m以内の丘陵台地を呈し、神戸層群や大阪層群が分布する。武庫川が北西から南東にかけて市域を貫流して多くの支流を伴い、武庫川本川沿いの周辺は盆地地形を呈している。

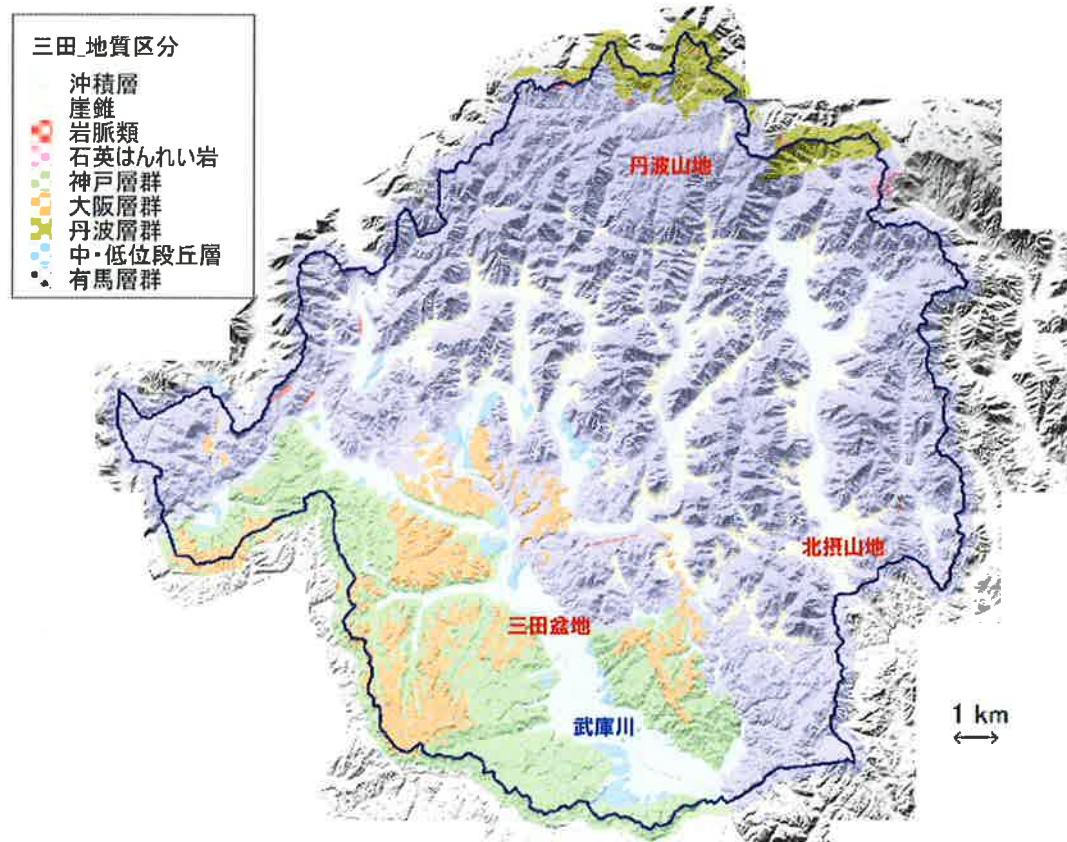


図 7.1.1 三田市の地形・地質

## 7. 1. 2 過去の豪雨災害

三田市における過去の主要な豪雨災害について、既存資料を基に整理した結果を表 7.1.1 および表 7.1.2 に示した。

戦後の災害記録によると、比較的広域に被害を及ぼした豪雨災害は、S36・S40・H16 年に発生した梅雨および台風災害があげられる。

S36 年災害は、災害救助法が適用され浸水被害が広範囲に及んだものであった。今回入手できた最も古い空中写真が S38 (1963) 年撮影であり、S36 年の崩壊地と思われるものが確認できるものの、崩壊前の空中写真が無かったため特定することができなかった。

S40 年災害では台風 23 号、台風 24 号、秋雨前線豪雨の連続により気象庁三田観測所で累加雨量 606mm を記録する大雨となった (図 7.1.4)。この災害前後の空中写真判読により丹波山地や北摂山地の有馬層群における崩壊地が多く確認され、市内全体で 68 箇所であった (図 7.1.2、図 7.1.3)。また、同様に災害前後の空中写真のある H16 年災害では降雨量が S40 年災害よりも少なかったことで崩壊箇所が 25 箇所と少なく散在する状況が確認された (図 7.1.2、図 7.1.3、図 7.1.4)。

表 7.1.1 三田市の過去の豪雨災害 (1)

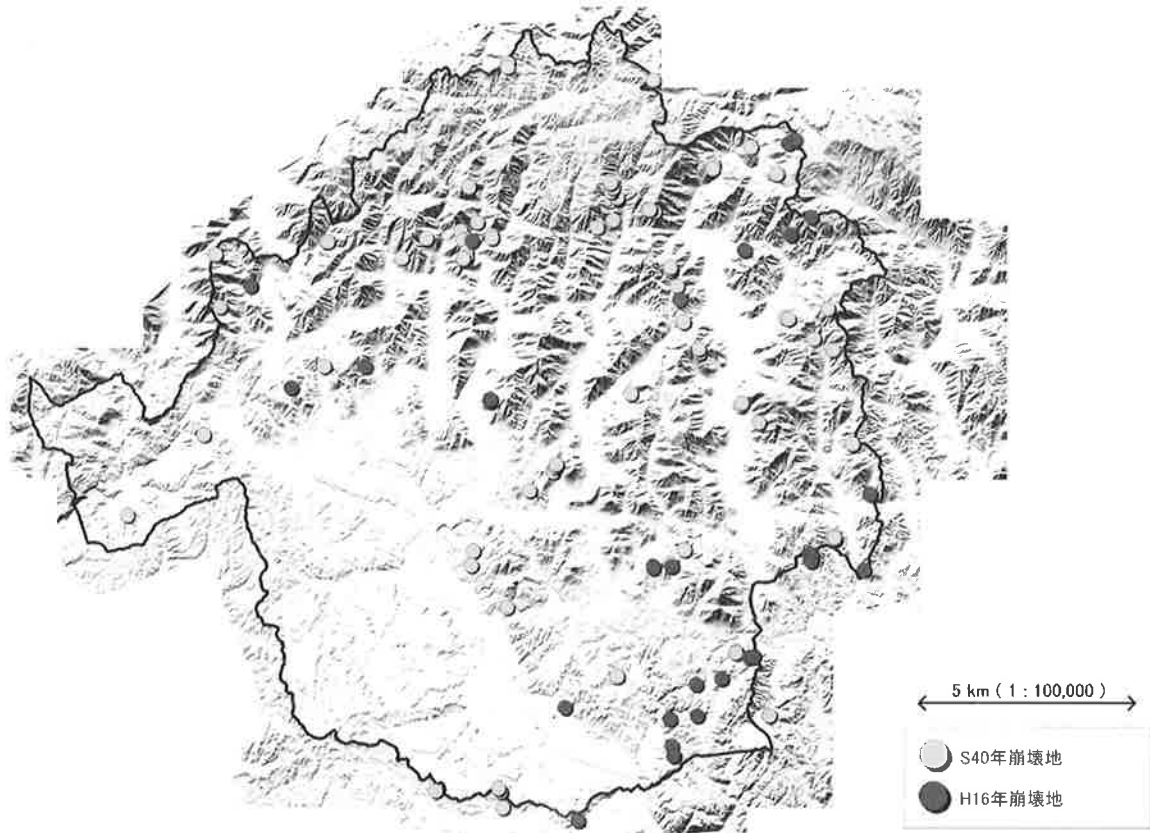
発生年月日	災害の名称	災害の状況	降雨の概況
昭和 35 (1960) 年 8月29日 ~9月1日	台風 16 号	●住宅被害：倒壊 1 戸/床下浸水 100 戸 ●その他被害：橋梁流出 7 ヶ所/道路損壊 4 ヶ所 /堤防決壊 1 ヶ所/山崩れ 3 ヶ所	・連続雨量：249mm ・日最大雨量：227mm ・時間雨量：42.5mm
昭和 36 (1961) 年 6月24日 ~6月28日	梅雨前線豪雨	<災害救助法適用> 床下浸水：150 戸 ため池損壊：2 ヶ所	・連続雨量：314mm ・日最大雨量：116mm ・時間雨量：48mm
昭和 37 (1962) 年 6月7日 ~6月10日	梅雨前線	●住宅被害：床上浸水 110 戸/床下浸水 372 戸 ●その他被害：橋梁流出 1 ヶ所/道路損壊 2 ヶ所 /堤防決壊 2 ヶ所	・連続雨量：203mm ・日最大雨量：164mm ・時間雨量：28mm
昭和 39 (1964) 年 9月24日 ~25日	台風 20 号	●住宅被害：浸水 34 戸 ●その他被害： 建築関係：8,174 千円 農業土木関係：30,988 千円 公共施設関係：2,835 千円	・日最大雨量：123mm
昭和 40 (1965) 年 9月8日 ~9月18日	台風 23 号 台風 24 号 秋雨前線豪雨	●人的被害：重傷 1 名、軽傷 4 名 ●住宅被害：全壊 33 戸/半壊 102 戸/床上浸水 287 戸/床下浸水 1,086 戸 ●その他被害： 建築関係：146 件(39,150 千円) 農業土木関係：317 件(50,700 千円) 教育施設：21 件(26,399 千円) その他施設：221 件(5,721 千円)	9/8~9/10 (台風 23 号) ・連続雨量：149mm ・日最大雨量：67mm ・時間雨量：60.5mm 9/13~9/18 (台風 24 号及び秋雨前線) ・連続雨量：424mm ・日最大雨量：151mm ・時間雨量：21.5mm
昭和 47 (1972) 年 6月7日 ~6月8日	台風くずれの 低気圧 による大雨	●住宅被害：床上浸水 1 戸/床下浸水 418 戸 ●その他被害： 建築関係：193 件(101,410 千円) 農業土木関係：893 件(373,700 千円) 教育施設：8 件(701 千円) 市有施設：4 件(700 千円)	・連続雨量：114mm ・日最大雨量：114mm ・時間雨量：61mm
昭和 51 (1976) 年 9月8日 ~9月13日	台風 17 号 秋雨前線	●住宅被害：床下浸水 51 戸 ●その他被害： 道路及び橋梁被害：15 ヶ所(9,381 千円) 河川損壊：42 ヶ所(52,150 千円) ため池損壊：10 ヶ所(20,200 千円) 農業用水損壊：26 ヶ所(15,950 千円) 田畑冠水等：433ha(95,055 千円) その他農業用施設被害： 頭首工 6 ヶ所/橋梁 1 ヶ所(12,650 千円)	・連続雨量：248.5mm ・日最大雨量：82mm ・時間雨量：24mm

三田市地域防災計画 風水害等対策計画資料編 より

表 7.1.2 三田市の過去の豪雨災害（2）

発生年月日	災害の名称	災害の状況	降雨の概況
昭和 58 (1983) 年 9月 24 ～9月 30日	台風 10号 秋雨前線	●住宅被害： 床上浸水 89 戸/床下浸水 506 戸 ●その他被害： 道路被害：39 ケ所/橋梁被害 2 ケ所 (77,093 千円) 河川損壊：114 ケ所(297,877 千円) 農地損壊：174 ケ所(102,300 千円) ため池損壊：21 ケ所(36,000 千円) 農業用水損壊：51 ケ所(34,700 千円) その他農業用施設：30 ケ所(30,700 千円) 砂防：18 件(29,286 千円)	・連続雨量：220mm ・日最大雨量：186mm ・時間雨量：28mm
平成 2 (1990) 年 9月 17日 ～9月 20日	秋雨前線 台風 19号	●その他被害： 道路被害：4 件(7,670 千円) 河川被害：16 件(115,200 千円) 農地被害：6 ケ所(8,079 千円) ため池損壊：7 ケ所(27,272 千円) その他農業用施設：6 ケ所(7,831 千円)	・連続雨量：237mm ・日最大雨量：159mm ・時間雨量：8.5mm
平成 8 (1996) 年 8月 28日	秋雨前線	●住宅被害：床上浸水 5 戸/床下浸水 37 戸 ●その他被害： 道路被害：13 件(70,609 千円) 河川被害：32 件(209,282 千円) 農地被害：38 ケ所(34,183 千円) その他農業用施設：180 ケ所(90,000 千円)	・連続雨量：309mm ・日最大雨量：251mm ・時間雨量：40mm
平成 16 (2004) 年 9月 29日	台風 21号	●住宅被害：床下浸水 3 戸/一部損壊 5 件 ●その他被害： 道路冠水：2 ケ所 土砂災害：2 ケ所(大川瀬うぐいすの里) 農地被害：10 ケ所(18,000 千円) 農業用施設：6 ケ所(34,000 千円)	・連続雨量：118mm ・日最大雨量：113mm ・時間雨量：39mm
平成 16 (2004) 年 10月 20日	台風 23号	●人的被害：軽傷 3 名 ●住宅被害：床上浸水 1 戸/床下浸水 25 戸/ 一部損壊 96 件 ●その他被害： 道路通行止：21 件 道路冠水：13 件 山腹崩壊：9 ケ所 農地農業施設等 167 ケ所(256,000 千円) 山腹崩壊等：11 ケ所(40,000 千円) 河川：50 ケ所(115,000 千円) 道路：40 ケ所(101,000 千円)	・連続雨量：253mm ・日最大雨量：188mm ・時間雨量：39.5mm ・武庫川水位(下田中)：629mm (17:50)
平成 18 (2006) 年 7月 15日 ～7月 19日	梅雨前線	●その他被害： 道路法面崩壊 1 ケ所 斜面崩壊：1 ケ所 農地法面崩壊：1 ケ所 土砂崩れ：1 ケ所	・連続雨量：161mm (7月 15日～7月 19日) ・最大時間雨量：16mm (7月 19日 4:00～5:00)
平成 22 (2010) 年 5月 23日 ～5月 24日	比較的まと まった雨	●住宅被害：床下浸水 2 戸 ●その他被害： 道路通行止：2 ケ所 道路冠水：2 件 神戸電鉄：箕谷-山の街間土砂崩れ運休	・連続雨量：92.5mm (5月 24日) ・時間雨量：10mm (5月 24日 7時～8時)
平成 23 (2011) 年 9月 2日 ～9月 4日	台風 12号	●その他被害： 道路通行止：2 ケ所 道路冠水：2 ケ所	・連続雨量：244.0mm (9月 4日) ・時間雨量：24.5mm (9月 3日 22時～23時)
平成 23 (2011) 年 9月 20日 ～9月 21日	台風 15号	●その他被害： 道路通行止：3 ケ所 水路への土砂流出：1 ケ所	・連続雨量：229mm (9月 20日) ・時間雨量：19mm (9月 20日 5時～6時)

三田市地域防災計画 風水害等対策計画資料編 より



判読に使用した空中写真

- ・空中写真（1963,1967,1980年撮影）（国土地理院）
- ・空中写真（1969年撮影）（兵庫県）
- ・空中写真（2005,2011年撮影）（三田市）

図 7.1.2 昭和40年台風23・24号及び平成16年台風23号で発生した崩壊地  
 (100m<sup>2</sup>以下の小規模な崩壊地を除く)

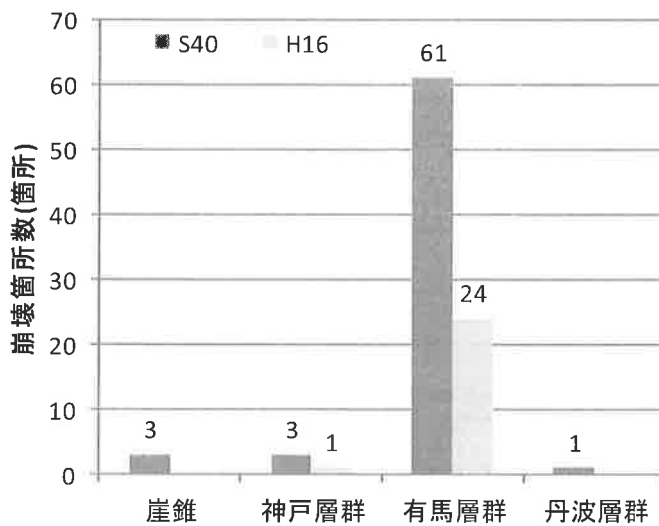
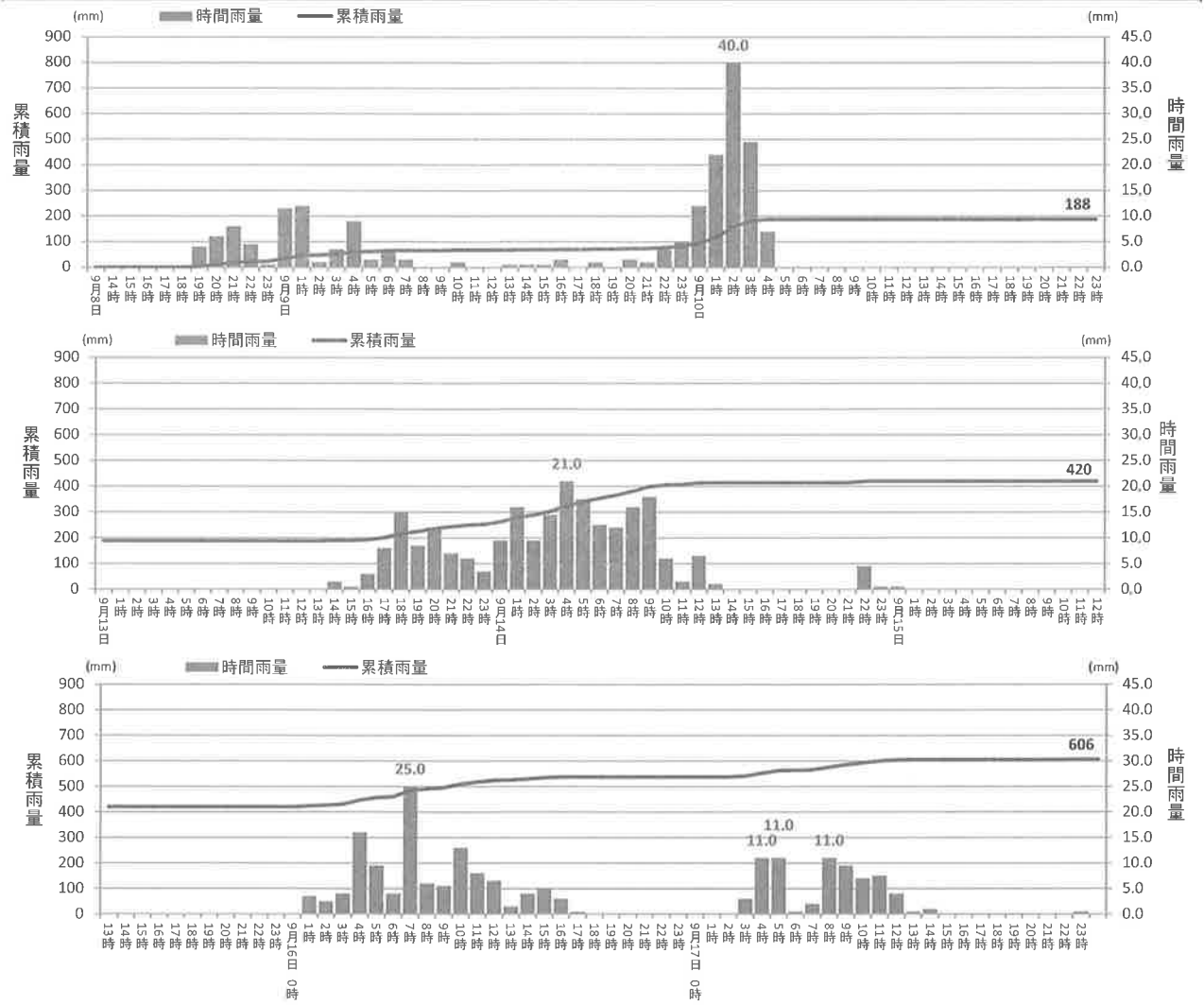


図 7.1.3 地質別の崩壊発生箇所数（昭和40年台風23・24号及び平成16年台風23号）  
 (100m<sup>2</sup>以下の小規模な崩壊地を除く)

昭和 40 年



平成 16 年

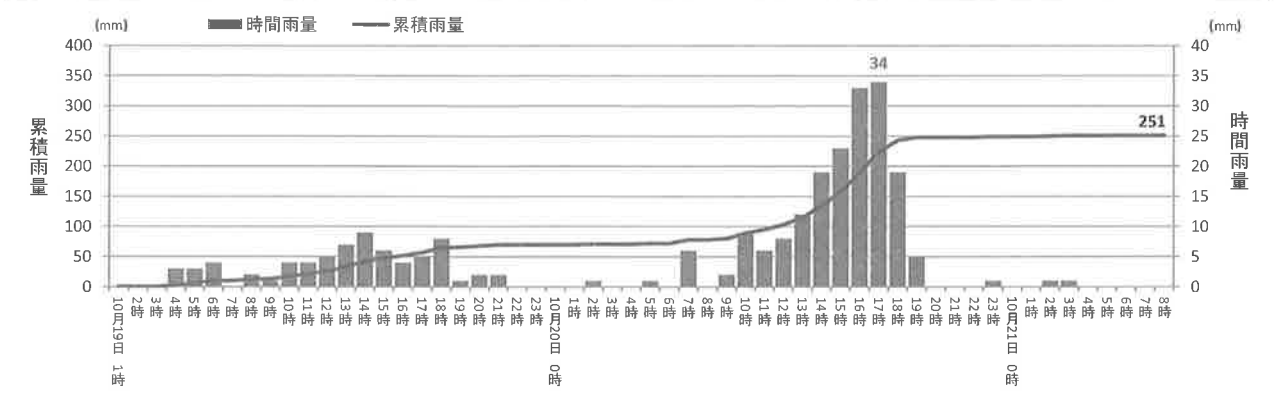


図 7.1.4 昭和 40 年台風 23・24 号及び平成 16 年台風 23 号の降雨状況 (気象庁三田観測所)

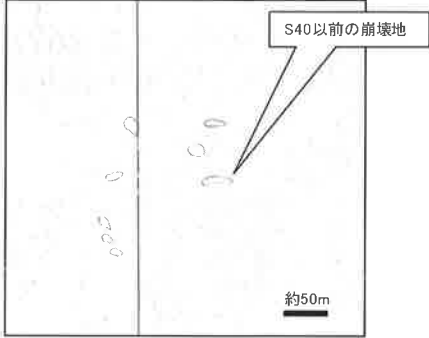
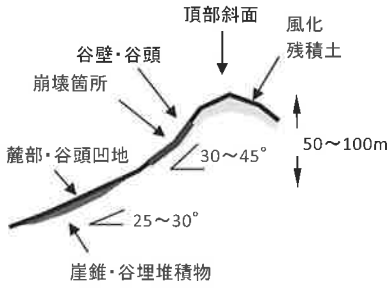
7. 2 代表的な地質における崩壊特性

当該地域の代表的な地質ごとに過去の崩壊地を対象に現地踏査などを実施し崩壊特性についてとりまとめた。

7. 2. 1 有馬層群における崩壊特性

有馬層群における地形地質の概要と崩壊特性について表 7. 2. 1 に示す。

表 7. 2. 1 有馬層群における崩壊の特性


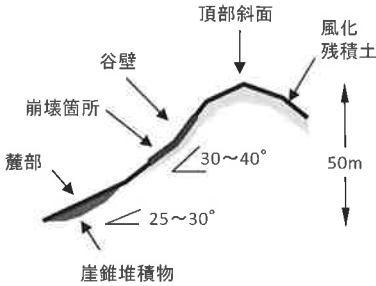
<p>表層崩壊の分布</p>	 <p>標高300~500mの山地 谷壁ないし谷頭に崩壊多い。</p>
<p>模式断面図</p>	
<p>地形</p>	<p>三田市南西部を除く全域に広がる山地。標高は300~500mで、頂部斜面に露岩を伴うことが多い。樹枝状の溪流が発達する。比高差が大きく、谷密度が小さい。</p>
<p>地質</p>	<p>白亜紀後期の火山岩類で、主岩相は流紋岩質溶結凝灰岩。比較的風化に強く、風化層は薄い。初生ないし構造的な高角度節理が発達し、風化するにつれ開口割れ目となりやすい。</p>
<p>斜面崩壊</p>	<p>発生頻度 S40(1965)9月災害 やや多い。北部の裸地で崩壊が密集。H16(2004)10月災害 殆ど無い。</p> <p>平面位置 ・上部谷壁の凹斜面(0次谷)ないし谷頭斜面で崩壊が多発している。・崩壊地周辺は概ね植林地であるが、裸地・伐採地内では崩壊が密集する。</p> <p>断面位置 谷壁斜面ないし谷頭斜面に位置し、崩壊地の勾配は30~45°程度の急傾斜面である。斜面形態は直線状~凹状を呈する。</p> <p>崩壊形態 <u>全体に、ガリ状に崩壊するような、小規模な崩壊が多い。</u>崩壊地の規模は幅10~20m、長さ20~40m、深さ0.5~1mが多い。流出土砂が土石流となり、下流域まで斜面を削りながら流下したところもみられ崩壊規模を大きくしている。</p>
<p>崩壊メカニズム</p>	<p><u>崩壊はやや多く、全体に均質に分布する。</u> <u>崩壊地は集水地形(0次谷)をなし、豪雨時には地下水が集中しやすい。</u>裸地・伐採地内に崩壊地の密集がみられるが、全体的には植生の影響は低い。そこに多量の降雨が表土層に浸透して飽和し、表層崩壊に至ったと考えられる。</p>



7. 2. 2 丹波層群における崩壊特性

丹波層群における地形地質の概要と崩壊特性について表 7.2.2 に示す。

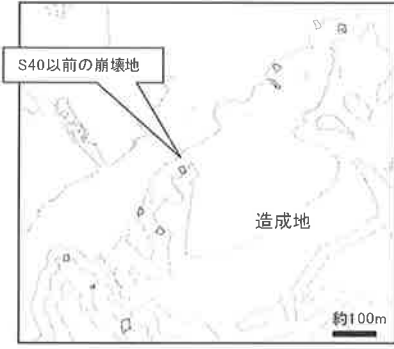
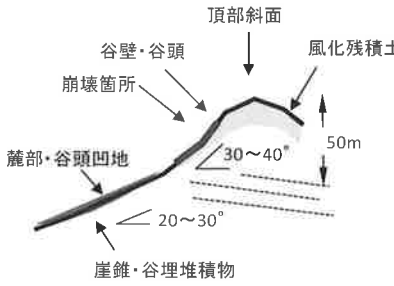
表 7.2.2 丹波層群における崩壊の特性

<p>表層崩壊の分布</p>	 <p>北端部の標高500~600mの山地崩壊地はほとんどない。</p>
<p>模式断面図</p>	
<p>地形</p>	<p>三田市北端部の山地。標高は500~600mで、山稜は有馬層群分布域よりも緩やか。樹枝状の溪流が発達する。比高差が大きく、谷密度が小さい。</p>
<p>地質</p>	<p>古生代の堆積岩類で、主岩相はチャート、砂岩および粘板岩。比較的風化に強く、風化層は薄い。</p>
<p>斜面崩壊</p>	<p>発生頻度 S40(1965)9月災害 殆ど無い。 H16(2004)10月災害 殆ど無い。</p> <p>平面位置 ・分布の狭さ故に発生数は極めて少ないが、上部谷壁の凹斜面(0次谷)で崩壊が認めらる。 ・崩壊地周辺の植生は概ね自然林で、針広混交林である。</p> <p>断面位置 上部谷壁の凹斜面(0次谷)に位置し、崩壊地の勾配は30~40°程度の急傾斜面である。縦断形態は直線状~凹状を呈する。</p> <p>崩壊形態 崩壊地の規模は幅15~25m、長さ20~30m、深さ1~2m程度。</p>
<p>崩壊メカニズム</p>	<p>超丹波帯地層群の分布域は狭く、風化層は薄い。上部谷壁の凹斜面(0次谷)において表層崩壊が認められる。多量の降雨が0次谷の表土層に浸透して飽和し、有効応力が低下したことにより表層崩壊が発生したことが考えられる。</p>

7. 2. 3 神戸層群における崩壊特性

神戸層群における地形地質の概要と崩壊特性について表 7. 2. 3 に示す。

表 7. 2. 3 神戸層群における崩壊の特性

<p>表層崩壊の分布</p>	 <p>南～西部の標高200～250mの丘陵地を形成する。 谷壁ないし谷頭斜面に崩壊多い。</p>
<p>模式断面図</p>	
<p>地形</p>	<p>三田市の南～西部の丘陵地。標高は200～250mで、樹枝状の溪流が発達する。 急斜面と緩斜面が繰り返す地形がみられる。また、河川浸食による段丘崖が発達する。</p>
<p>地質</p>	<p>新第三紀中新世の堆積岩類で、主岩相は礫岩、砂岩および泥岩。 比較的風化に弱く、風化層はやや厚い。</p>
<p>斜面崩壊</p>	<p>発生頻度 S40(1965)9月災害 少ない。 H16(2004)10月災害 殆ど無い。</p> <p>平面位置 ・谷壁ないし谷頭の凹斜面(0次谷)で崩壊が発生している。 ・崩壊地周辺の植生は概ね自然林で、針広混交林である。 ・人工改変により地形改変が進む。</p> <p>断面位置 谷壁斜面ないし谷頭斜面に位置し、崩壊地の勾配は30～40°程度の急傾斜面である。斜面形態は直線状～凹状を呈する。</p> <p>崩壊形態 崩壊地の規模は幅10～20m、長さ10～20m程度、深さ0.5～1.5m程度。</p>
<p>崩壊メカニズム</p>	<p>全体には崩壊発生数は少ない。 崩壊は、明瞭な集水地形で発生しておらず、流域面積の小さい急傾斜斜面の谷壁の凹斜面で崩壊が発生している。 比較的風化に弱い地層のため、地表部には表層崩壊予備物質が多く分布する。加えて段丘崖の発達したところでは、斜面勾配は急峻になり不安定化しやすいだけでなく、そこに形成された凹地斜面には、風化土が厚いため、豪雨時の浸透水の重みで表層崩壊に至ったと考えられる。</p>

7. 3 地質ごとの崩壊特性を踏まえたモデル構築上の課題と対策

7. 3. 1 テスト計算による課題の把握

(1) 有馬層群・丹波層群における層厚式の設定

有馬層群は三田市の大部分を占め、これに対して丹波層群は三田市北部の篠山市との境界付近の狭い範囲に分布する。有馬層群は火山岩類、丹波層群は古生代の堆積岩類と岩種の違いはあるものの、表 7.2.1 および表 7.2.2 の通りいずれも風化層が薄く崩壊地の傾斜のレンジが類似することから同一の層厚式として検討するものとした。また、これまで他の市町で検討した類似地質の層厚分布 (図 7.3.1) に三田市内のボーリングデータをプロットしたところ大きく傾向が異なる状況は確認されなかったため、相生層群 (上郡町) などで適用した図 7.3.2 の層厚式をもとにテスト計算を行うこととした。

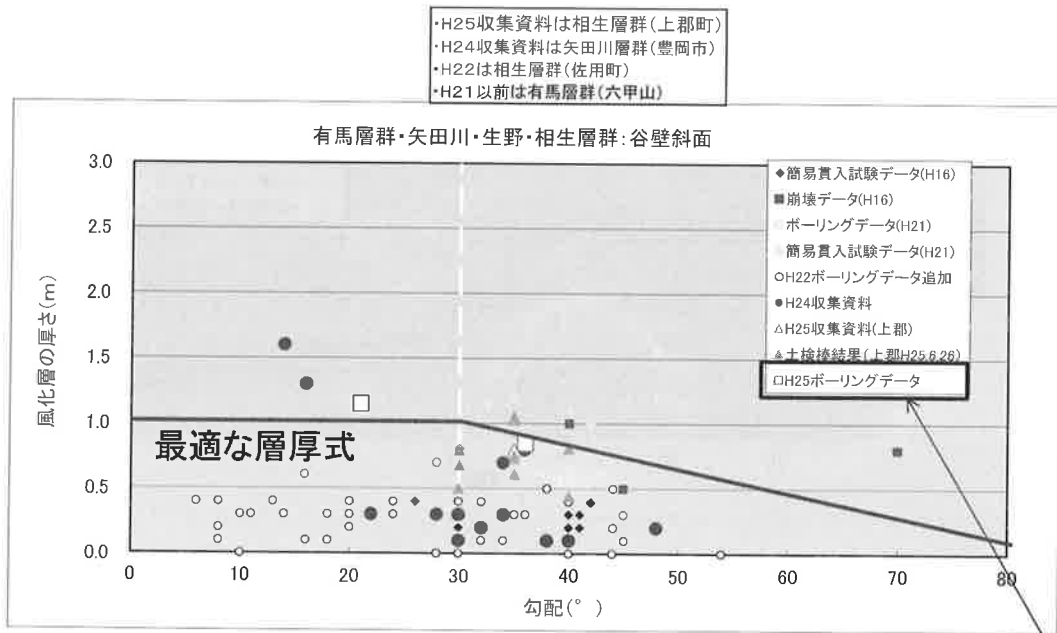


図 7.3.1 有馬層群・丹波層群と類似地質の層厚分布 (谷壁斜面)

三田市範囲データ

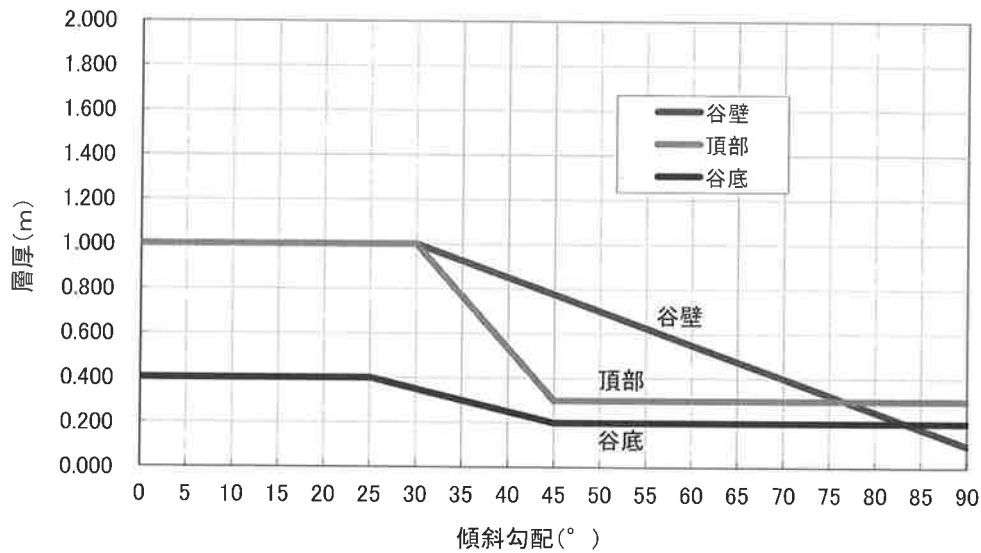


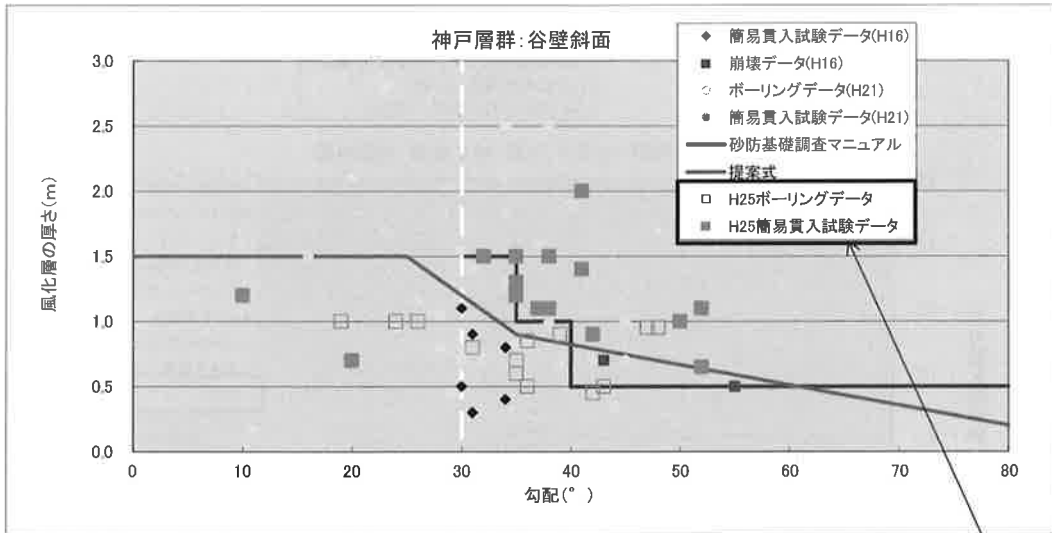
図 7.3.2 有馬層群・丹波層群におけるテスト計算用層厚式

(2) 神戸層群・その他における層厚式の設定

神戸層群は表六甲山系において取り扱った地質である。

これまで他の市町で検討した類似地質の層厚分布 (図 7.3.3) に三田市内のボーリングデータなどをプロットしたところ大きく傾向が異なる状況は確認されなかったため、表六甲山系における検討事例と同様に花崗岩地域の層厚式 (図 7.3.4) を準用してテスト用を実施することとした。

また、大阪層群や沖積層、ごく一部に分布する花崗岩 (石英はんれい岩) についても表六甲山系と同様に花崗岩地域の層厚式 (図 7.3.4) を準用することとした。



三田市範囲データ

図 7.3.3 神戸層群と類似地質の層厚分布 (谷壁斜面)

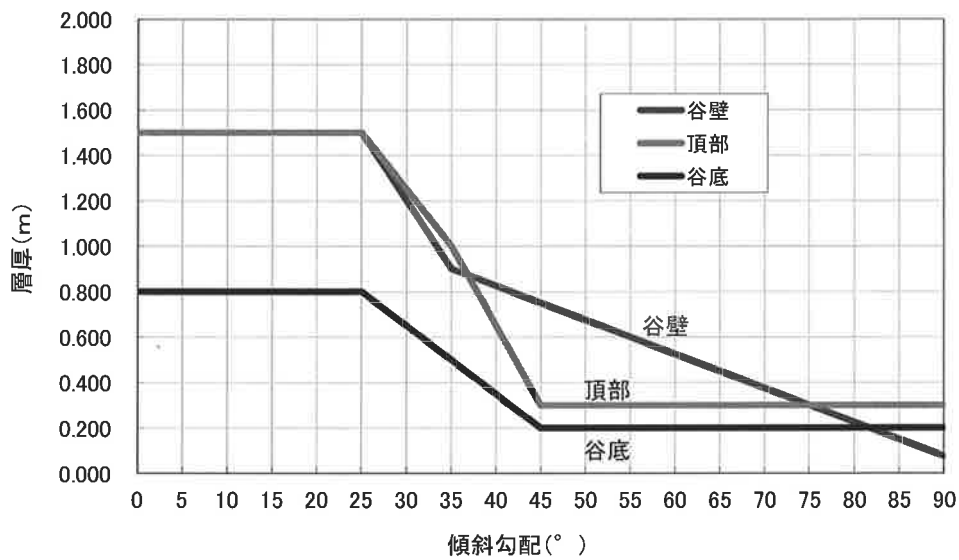


図 7.3.4 神戸層群・その他におけるテスト計算用層厚式

### (3) 土質パラメータの設定

先行する他の市町の事例や既往の調査成果を参考に表 7.3.1 のとおり設定した。なお、表 7.3.1 の「地質図による分類」の欄が図 7.1.1 の地質図の凡例に対応する。

表 7.3.1 テスト計算における土質パラメータの設定

項 目			有馬層群	花崗岩	神戸・大阪層群	沖積層ほか
地質図による分類			有馬層群 丹波層群 岩脈類	石英はんれい岩	神戸層群 大阪層群	沖積層 崖錐 中・低位段丘層
1	土の単位体積重量	[kN/m <sup>3</sup> ]	15.0	17.0	15.0	15.0
2	土の飽和単位体積重量	[kN/m <sup>3</sup> ]	18.0	19.0	18.0	18.0
3	土の有効粘着力	[kN/m <sup>2</sup> ]	5.0	5.0	5.0	5.0
4	土の有効内部摩擦角	[deg]	32	31	30	31
5	根系の粘着力[kN/m <sup>2</sup> ]	[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	0.35	0.35	0.35
8	透水係数	[cm/s]	0.056	0.056	0.056	0.056
9	層厚式パターン	—	①有馬層群	②神戸層群・大阪層群・沖積層	②神戸層群・大阪層群・沖積層	②神戸層群・大阪層群・沖積層

### (4) 昭和 40 年災害を対象としたテスト計算結果と課題の抽出

以上までで述べた地質ごとの層厚式や土質パラメータを用いて昭和 40 年災害の崩壊地（図 7.1.2）を対象とした再現計算を行った。

再現計算では、災害当時に雨量観測所が少ないことや広範囲に大雨をもたらした災害であったことを踏まえ、入力降雨として気象庁三田観測所における観測データ（図 7.1.4 参照）を全域に均等に与えることとした。再現計算結果は、適中率等の評価指標を求めて表 7.3.2 にとりまとめた。また、再現計算結果の平面分布の一例を図 7.3.5 に示した。

表 7.3.2 の評価指標のうち崩壊地の捕捉率に着目すると三田市の大部分を占める有馬層群で約 50%と先行する他の地域に比べて低い状況が確認された。どのような場所で見逃しているのか実際の崩壊地と再現計算による崩壊判定箇所（安全率 1 未満）の平面分布（図 7.3.5）および傾斜別頻度分布図（図 7.3.7）により確認した。その結果、図 7.3.7 のとおり有馬層群における崩壊判定の頻度のピークが 40°～45°であるのに対して実際の崩壊のピークが 30°～40°と異なっていることが確認された。すなわち、類似する地質と同一の層厚式を準用せず有馬層群固有の層厚式の設定が必要と考えられた。また、図 7.3.7 の丹波層群においても同様の傾向にあり有馬層群を含めて層厚式の見直しを行うものとした。一方、神戸層群では崩壊判定の頻度のピークが実際の崩壊のピークよりも緩い傾斜角となっていることが確認されたが、崩壊事例数が少ないなかで傾斜 50°程度にピークがあることが妥当なものか疑問が生じたため層厚式の見直しは行わず物性値の見直しなどによって改良を進めることとした。

また、崩壊地を見逃している場の特徴については前述した傾斜のほか裸地、草地、とくしゃ地の分布との関連している箇所が確認されたため植生を考慮した土質パラメータの調整が必要と考えられた（図 7.3.6）。

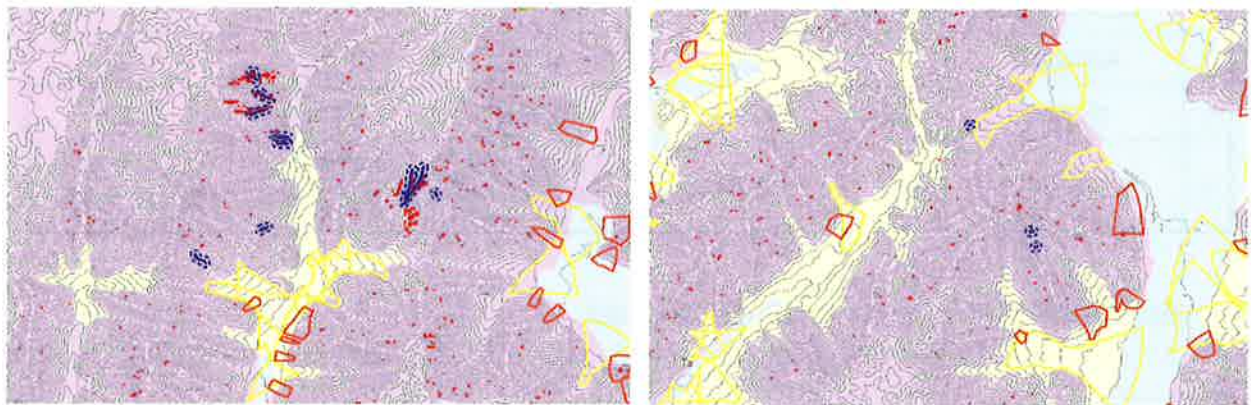
さらに、既存の土質調査資料などより土の単位体積重量や土の飽和単位体積重量を定めたが、これらと有効空隙率との関係が土粒子の密度を考慮した場合に妥当な値となっているかの確認がなされていないため、その確認方法を整理しておく必要が考えられた。

表 7.3.2 昭和40年災害の再現計算による評価指標

年	地質区分	A	B	C	D	適中率	捕捉率	空振率	見逃率	警戒区域の捕捉数
S40 (case002)	山地全域	559	545	3,033	1,501,377	99.8%	50.6%	0.2%	49.4%	0/1
	地質1 崖錐	3	30	10	90,161	100.0%	9.1%	0.0%	90.9%	
	地質2 神戸層群	0	23	103	142,780	99.9%	0.0%	0.1%	100.0%	
	地質3 有馬層群	584	492	2,760	1,169,539	99.7%	54.3%	0.2%	45.7%	
	地質4 丹波層群	12	0	144	142,797	99.9%	100.0%	0.1%	0.0%	

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



(崩壊捕捉事例)

(崩壊見逃し事例)

図 7.3.5 昭和40年災害の再現計算結果の一例

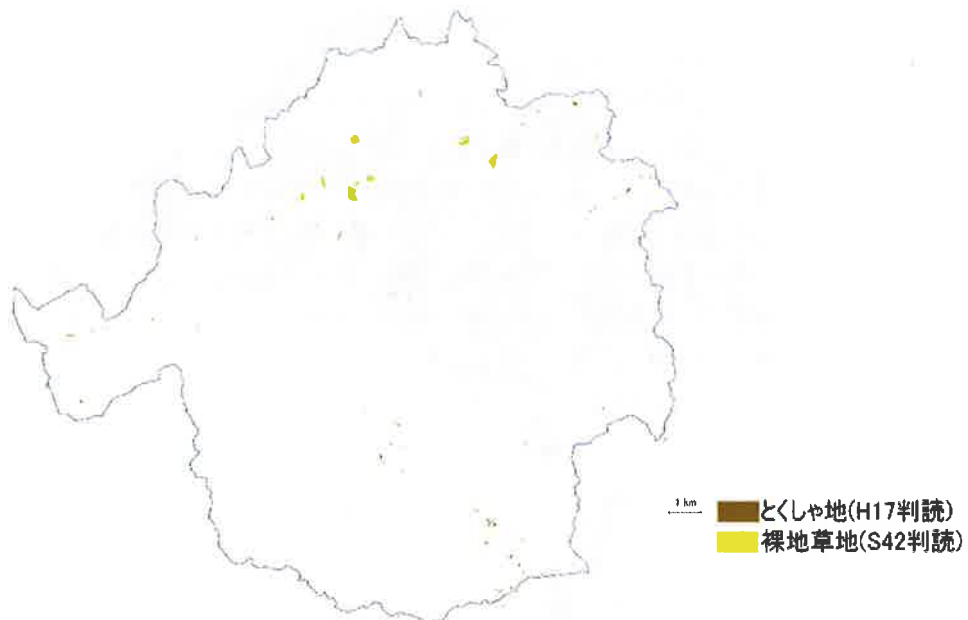


図 7.3.6 裸地、草地、とくしゃ地の分布

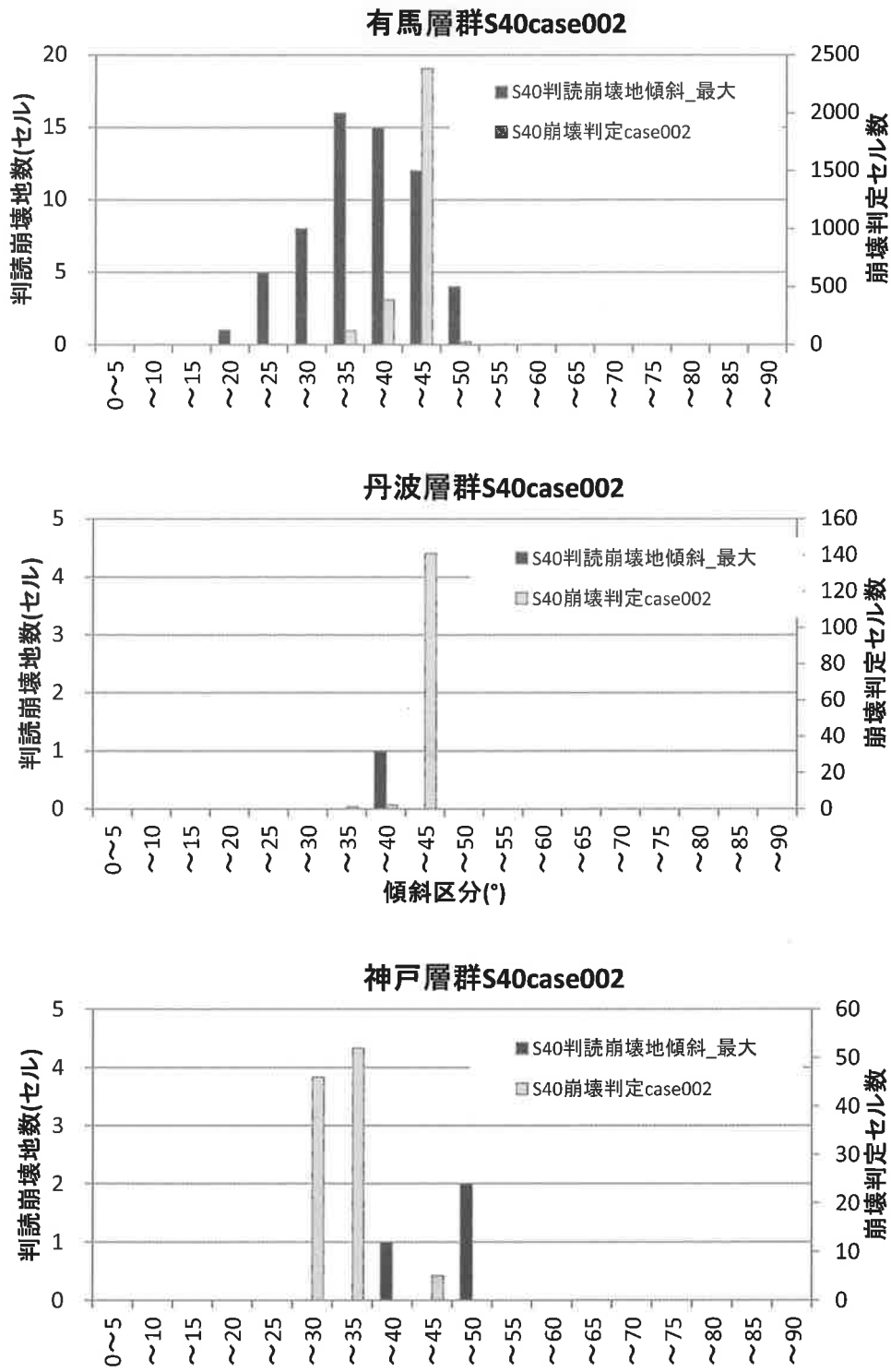


図 7.3.7 S40年再現計算による崩壊判定セルの傾斜角分布

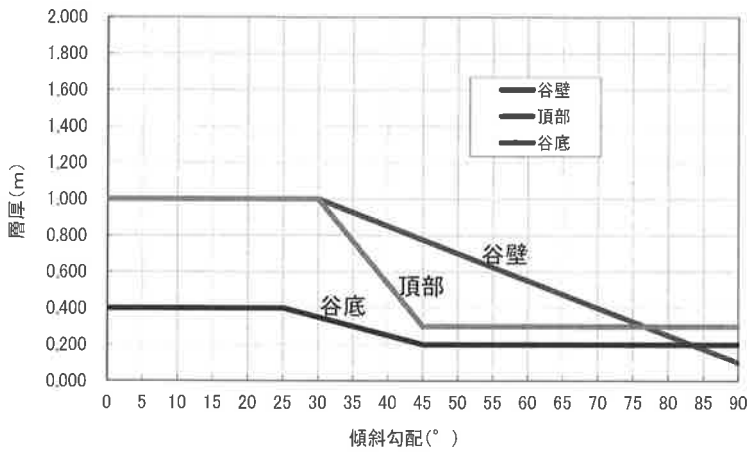
7. 3. 2 テスト計算により把握された課題への対策

前項で把握された課題を列記すると以下のとおりである。ここでは、それぞれの課題についての対策について述べる。

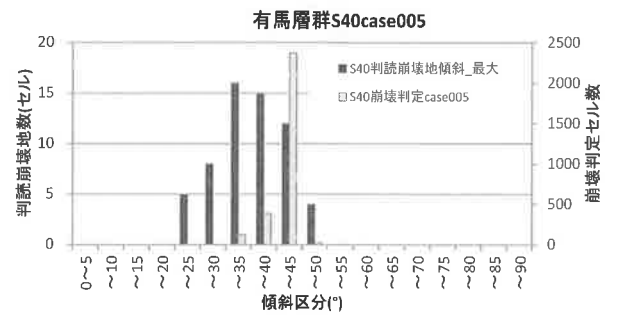
- ① 有馬層群（丹波層群を含む）固有の層厚式の設定
- ② 裸地、草地、とくしゃ地における粘着力の調整
- ③ 礫密度を考慮した土質パラメータ間の整合性の確認

(1) 有馬層群（丹波層群を含む）固有の層厚式の設定

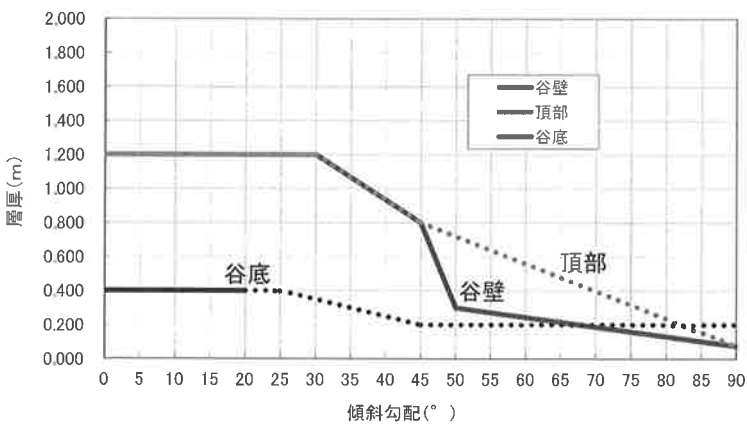
有馬層群（丹波層群）を含む層厚式は、S40年の再現計算による崩壊判定の傾斜別頻度分布が実際の崩壊地の傾斜別頻度分布に整合するように層厚式の調整を行うものとした。具体的には谷壁において傾斜 30° ~ 45° で崩壊判定を出やすくするために層厚を厚くなるように、また傾斜 45° より急な領域で実際の崩壊の発生限界である傾斜 50° を境に崩壊判定が少なくなるよう層厚を薄くなるように調整した（図 7.3.8）。



a. 層厚式（見直し前）

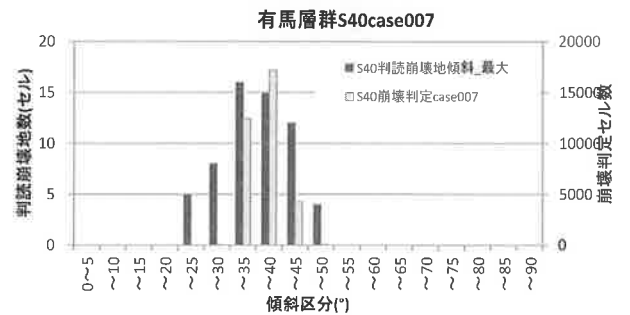


b. 崩壊判定の傾斜別頻度分布（見直し前）



c. 層厚式（見直し後）

※点線は微地形区分のしきい値外の値



d. 崩壊判定の傾斜別頻度分布（見直し後）

図 7.3.8 有馬層群（丹波層群を含む）における層厚式の再設定



## (2) 裸地、草地、とくしゃ地における粘着力の調整

裸地、草地およびとくしゃ地については樹木根系が発達していないことを考慮し、粘着力  $c$  (樹木根系による効果を含む) を標準値より 1 低減するものとした。

## (3) 礫密度を考慮した土質パラメータ間の整合性の確認

土の単位体積重量や土の飽和単位体積重量、有効空隙率との関係の妥当性の確認方法を土の状態を表す基本的な関係式より整理した。

まず、以下に示す一般値の各項目について既存調査資料を参考に定める。次に、式(1)～式(5)により、土の単位堆積重量や土の飽和単位体積重量を求めて、設定値の妥当性を確認する。

### ■一般値

含水比	%	$w$	
有効空隙率		$ne$	
空隙率		$n$	
空隙比		$e$	$= n/(100-n)$
重力加速度	$m/s^2$	$g$	
土粒子の密度	$g/cm^3$	$\rho_s$	
水の密度	$g/cm^3$	$\rho_w$	

$$\blacksquare \text{土の単位体積重量} \quad kN/m^3 \quad \gamma_t = \rho_t * g \quad (1)$$

$$\text{土の湿潤密度} \quad g/cm \quad \rho_t = \rho_d(1+w/100) \quad (2)$$

$$\text{土の乾燥密度} \quad \rho_d = \rho_s / (1+e) \quad (3)$$

$$\blacksquare \text{土の飽和単位体積重量} \quad kN/m^3 \quad \gamma_{sat} = \rho_{sat} * g \quad (4)$$

$$\text{土の飽和密度} \quad g/cm^3 \quad \rho_{sat} = (\rho_s + \rho_w * e) / (1+e) \quad (5)$$

この確認方法に沿って、表 7.3.1 に示した有馬層群の土の単位体積重量および土の飽和単位体積重量について検算した結果を以下に示す。この検算結果より土の単位体積重量および土の飽和単位体積重量についてそれぞれ 1.0 程度引き上げる必要性が見られた。これと同様の検討により表 7.3.5 のように土質パラメータを見直すこととした。

### ■一般値

含水比	%	$w$	$= 6$ (表 7.3.3、まさ土の最小値程度)
有効空隙率		$ne$	$= 0.35$ (図 7.3.9、砂の最大値程度)
空隙率		$n$	$= 0.415$ (図 7.3.9、砂の最大値程度)
空隙比		$e$	$= 0.71$ ( $= n/(1-n)$ )
重力加速度	$m/s^2$	$g$	$= 9.81$ (一般値)
土粒子の密度	$g/cm^3$	$\rho_s$	$= 2.6$ (表 7.3.4、砂質土の最小値)
水の密度	$g/cm^3$	$\rho_w$	$= 1$ (一般値)

$$\blacksquare \text{土の単位体積重量} \quad kN/m^3 \quad \gamma_t = \rho_t * g = 15.8 > 15.0 \text{ (表 7.3.1 有馬層群)}$$

$$\text{土の湿潤密度} \quad g/cm \quad \rho_t = \rho_d(1+w/100) = 1.61$$

$$\text{土の乾燥密度} \quad \rho_d = \rho_s / (1+e) = 1.52$$

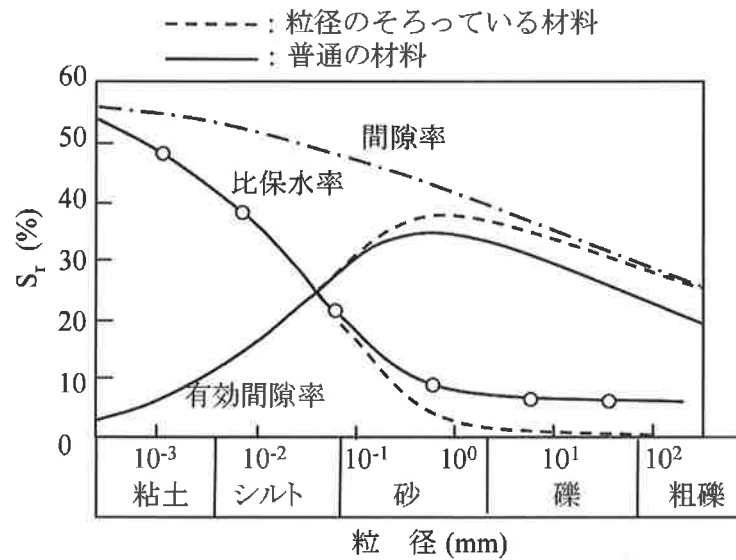
$$\blacksquare \text{土の飽和単位体積重量} \quad kN/m^3 \quad \gamma_{sat} = \rho_{sat} * g = 19.0 > 18.0 \text{ (表 7.3.1 有馬層群)}$$

$$\text{土の飽和密度} \quad g/cm^3 \quad \rho_{sat} = (\rho_s + \rho_w * e) / (1+e) = 1.94$$

表 7.3.3 含水比の測定例<sup>13)</sup>

土質名	地域	含水比(%)
沖積粘土	東京	50~80
洪積粘土	東京	30~60
関東ローム	関東	80~150
まさ土	中国	6~30
しらす	南九州	15~33
黒ぼく	九州	30~270
泥炭	石狩	110~1300

〔土質試験の方法と解説-第一回改訂版-〕P66より抜粋

図 7.3.9 粒径と間隙率、有効間隙率の関係<sup>14)</sup>表 7.3.4 代表的な土粒子の密度<sup>15)</sup>

鉱物名	密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	鉱物名	密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
石英	2.6 ~ 2.7	豊浦砂	2.64
長石	2.5 ~ 2.8	沖積砂質土	2.6 ~ 2.8
雲母	2.7 ~ 3.2	沖積粘性土	2.50 ~ 2.75
角閃石	2.9 ~ 3.5	洪積砂質土	2.6 ~ 2.8
輝石	2.8 ~ 3.7	洪積粘性土	2.50 ~ 2.75
磁鉄鉱	5.1 ~ 5.2	泥炭(ピート)	1.4 ~ 2.3
クロライト	2.6 ~ 3.0	関東ローム	2.7 ~ 3.0
イライト	2.6 ~ 2.7	まさ土	2.6 ~ 2.8
カオリナイト	2.5 ~ 2.7	しらす	1.8 ~ 2.4
モンモリロナイト	2.0 ~ 2.4	黒ぼく	2.3 ~ 2.6

表 7.3.5 土質パラメータの見直し

RHM版分類			有馬層群	花崗岩	神戸・大阪層群	沖積層ほか
地質図による分類			有馬層群 丹波層群 岩脈類	石英はんれい岩	神戸層群 大阪層群	沖積層 崖錐 中・低位段丘層
1	土の単位体積重量	[kN/m <sup>3</sup> ]	16.0	17.0	16.0	16.0
2	土の飽和単位体積重量	[kN/m <sup>3</sup> ]	19.0	19.0	19.0	19.0
3	土の有効粘着力 (樹木根系による効果も含む)	[kN/m <sup>2</sup> ]	5.0	5.0	5.0	5.0
4	土の有効内部摩擦角	[deg]	32	31	30	31
5	根系の粘着力[kN/m <sup>2</sup> ]	[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	0.35	0.35	0.35
8	透水係数	[cm/s]	0.056	0.056	0.056	0.056

注：有馬層群、神戸層群・大阪層群、沖積層ほかの単位体積重量および飽和単位体積重量で、それぞれ 15→16kN/m<sup>3</sup>、18→19kN/m<sup>3</sup>に変更した。

#### (4) 課題対応後の昭和40年災害を対象とした再現計算

前項までで述べた課題に対応した昭和40年災害の再現計算結果を表7.3.6に示した。テスト計算段階で約50%であった捕捉率が80%を超えるレベルに改善され、先行する他の地域と同等の精度が確保されたことが確認できた(表7.3.6)。しかしながら、神戸層群については捕捉率を改善することができず今後の課題となった。

表 7.3.6 課題対応後の昭和40年災害の再現計算による評価指標

年	地質区分	A	B	C	D	合計	適中率	捕捉率	空振率	見逃率
S40 (case023)	山地全域	800	171	14,297	1,490,286	1,505,554	99.0%	82.4%	1.0%	17.6%
	地質1 崖錐	3	0	2	90,199	90,204	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%
	地質2 神戸層群	0	9	187	142,710	142,906	99.9%	0.0%	0.1%	100.0%
	地質3 有馬層群	785	162	13,626	1,158,803	1,173,376	98.8%	82.9%	1.2%	17.1%
	地質4 丹波層群	12	0	450	34,919	35,381	98.7%	100.0%	1.3%	0.0%

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

## 8. 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三田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) 総務省消防庁：平成 27 年台風第 11 号に係る被害状況等について（第 12 報）、2015 年 7 月 24 日。
- 2) 気象庁：過去の気象データ検索（<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>）
- 3) 兵庫県企画県民部災害対策局災害対策課：台風第 11 号による被害等、平成 27 年 7 月 21 日
- 4) 神戸新聞 NEXT：土砂災害警戒区域どこ？神戸市に問い合わせ殺到、平成 27 年 7 月 18 日
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Takashi OKIMURA, Nobuyuki TORII, Masatoshi MATSUMOTO, Mitsuhiro NANBU and Katsunori 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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（4）、建設工学研究所論文報告集、55、91-116、2013.
- 12) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則 ほかに：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（5）、建設工学研究所論文報告集、56、45-66、2014.
- 13) 地盤工学会：土質試験の方法と解説、第一回改訂版、2004.
- 14) Davis, S.N. and De Wiest, R.J.M. : Hydrogeology, John Wiley & Sons, 1966.
- 15) 石田ら：地盤材料の試験・調査入門、インデックス出版、2011.

## 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