

【建設工学研究所論文報告集第 58 号〔報告〕2016 年 11 月】

兵庫県下酸性火山岩類分布地域における表層崩壊機構と崩壊予測モデル化

Mechanism of Surface Failure and its Prediction Model in Acidic Volcanic Rock Area in Hyogo Prefecture, Japan

沖村 孝
Takashi Okimura

中川 渉
Wataru Nakagawa

北田 憲嗣
Noritsugu Kitada

伊藤 正美
Masami Ito

嵯峨 根 朋子
Tomoko Sagane

1. はじめに

沖村等は表層土を対象として、地形を 10m 格子間隔で数値モデル化した後、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ている¹⁾。近年、技術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ている。

このような状況下、兵庫県のご協力により平成 19 年以降、各地でモデルを実用化する機会に恵まれてきた。これまでの経緯は、モデル構築において実用化に際して新たに出現した問題と対応として報告してきている^{2) 3) 4) 5) 6) 7)}。一方箇所別のモデル化に対し、地形・地質的な観点から同時代の類似岩種において微妙に異なったモデル条件を採用するに至っており、その代表事例として中生代白亜紀の酸性火山岩類がある。

兵庫県内における中生代白亜紀の酸性火山岩類は、県内に広く分布し、模式地によりその名称が異なる。神戸市北部から三田市、篠山市にかけて広く分布する有馬層群、兵庫県西部の姫路市から相生市にかけて分布する相生層群、兵庫県北部の香住、豊岡市にかけて広く分布する矢田川層群等である。これらの酸性火山岩類はいずれも中生代白亜紀の火山岩類と考えられており、デイサイト・流紋岩類等から構成されている。

これまでもモデル作成にあたり地層の崩壊特性を取りまとめ、過去の降雨に対しての災害履歴等を整理してきている。さらに経緯の中で同一地層の中でも、異なった緩衝帯を設けるなどのモデル化が認められてきている。

今後同時代の地層を取りまとめるに当たり、現状のモデルデータを地形・地質の観点から整理しておくことは重要である。またこれまで取り扱ってきた酸性火山岩類の他にも、兵庫県中央部に広がる生野層群、琵琶湖の東部の湖東流紋岩類、大阪南部の泉南流紋岩類、中国地方の高田流紋岩類、中部地方に広がる濃飛流紋岩類等同時代の酸性火山岩類に適応可能な地形地質が拡大される。

本論文では、我々が進めてきたリアルタイムハザードマップシステムモデル化にあたり、これら酸性火山岩類の各地域における地形・地質学的特性と表層崩壊の特徴を取りまとめる。

さらにリアルタイムハザードマップシステムのモデル作成にあたり、各地域での表土層厚せん断強度を検討する。そしてモデル解析において、見逃しが生じた場所での考察を行い、崩壊地形からの特徴として遷急線からの緩衝領域の設定のプロセスについて整理する。

2. 酸性火山岩類の地形・地質学的特徴

近畿地方の白亜紀火山岩類の分布は、吉田他(1987)にまとめられている(図-2.1)。それらのうち流紋岩及びデイサイトは西より相生層群、生野層群、矢田川層群、有馬層群、泉南層群、湖東流紋岩類に分類される。

これまで建設工学研究所で実施してきたリアルタイムハザードマップシステムでは上記流紋岩類及びデイサイト類のうち、上郡地域周辺の相生層群、豊岡市周辺の矢田川層群、丹波・篠山・三田・神戸・西宮市北部の有馬層群を対象としてきている。以下にこれら流紋岩及びデイサイト類の特徴について文献整理するとともに、地形的な特長について整理する。

地形の整理に当たっては、10m格子間隔での数値データを参照とした。また地質分布に関しては、既往文献⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾を参照として取りまとめた。

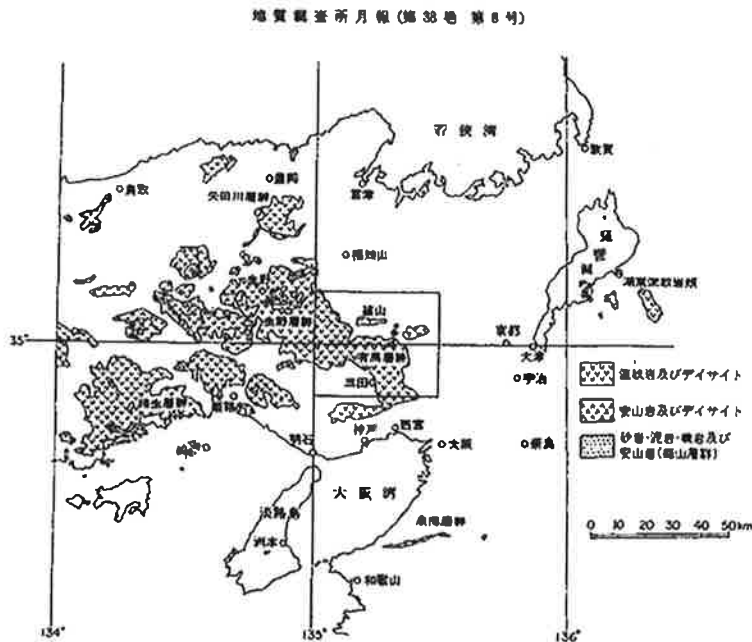


図-2.1 近畿地方の白亜紀火山岩類の分布⁸⁾

2.1 地形学的特徴

各地域の地形学的特徴を示すため、データプロファイラーより得られた1mメッシュのデータより10m格子間隔で数値モデル化した上郡町域、豊岡市域、神戸市域、西宮市域、三田市域、篠山市域、丹波市域の各情報を整理し、表層傾斜角の頻度分布を示した(図-2.2)。各データは、酸性火山岩類が分布する山地のみのデータを抽出し、平地部等のデータは除いている。

上郡町域は相生層群、豊岡市域は、矢田川層群、神戸市域、西宮市域、三田市域、篠山市域、丹波市域は有馬層群分布地域に相当する。

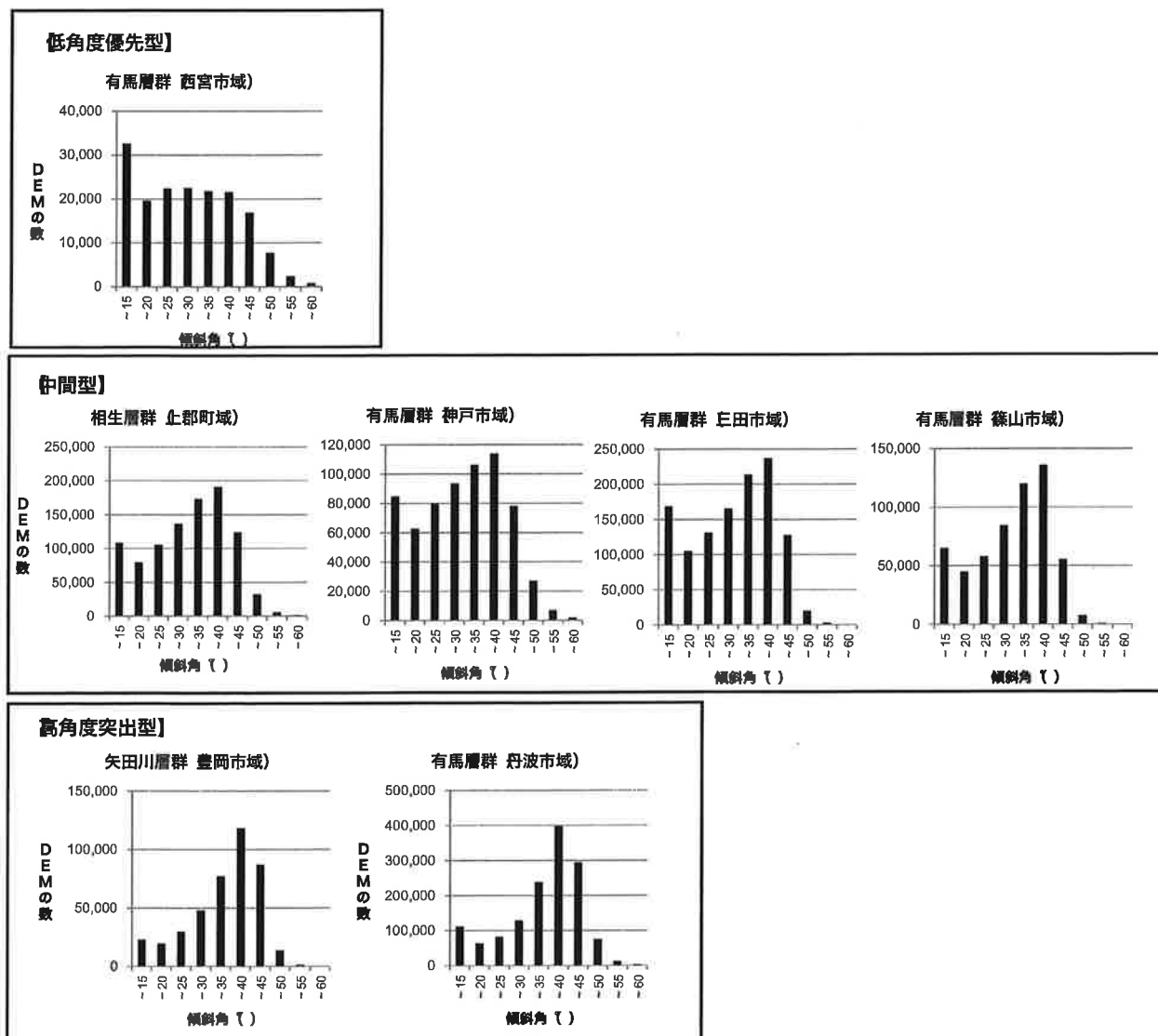


図-2. 2 各地域の山地全体表層傾斜角ヒストグラム

各市町域において共通した特徴として15°以下と40°の2つのピークを有するバイモーダル分布を示すことが明らかである。これは、台地状地形の両翼斜面と台地面の中に形成された緩やかな小起伏面が組み合わさっていることを示している(図-2. 2)。また各市町域で比較すると、西宮市域を除くほかの市町域は、ピークが35°~40°に集中している特徴があるのに対し、西宮地域は、高角度のピークが認めにくく、15°以下にピークが認められる特徴がある(低角度優先型)。この15°以下ピーク、35°~40°のバイモーダル分布形状の観点からみると、豊岡地域、丹波地域のグループ(高角度突出型)と西宮地域の特徴(低角度優先型)は大きく異なり、その中間として上郡地域、神戸市域、篠山地域、三田市域(中間型)があると考えられる。

次に各市町域の崩壊地の表層傾斜角の頻度分布を図-2. 3に示した。

上郡町域、神戸市域、西宮市域(H26年)においては35°~45°の斜面傾斜角をピークとした20°~60°までの幅広い傾斜角を有する正規分布を示している(正規分布型)。一方豊岡市域、三田市域、篠山市域は、40°~45°をピークとした分布角度が限られた崩壊地(卓越角度型)であることが特徴である。前者の地域は、台地状地形の両翼の斜面崩壊が卓越しているが、台地内部の小起伏面においても崩壊が発生していることを示している。

また西宮地域(S42年)においては、唯一バイモーダルな分布を示しており、40°~45°の高角度斜面での崩壊のほか、30°~35°低角度斜面でも崩壊が多くなる傾向がある。

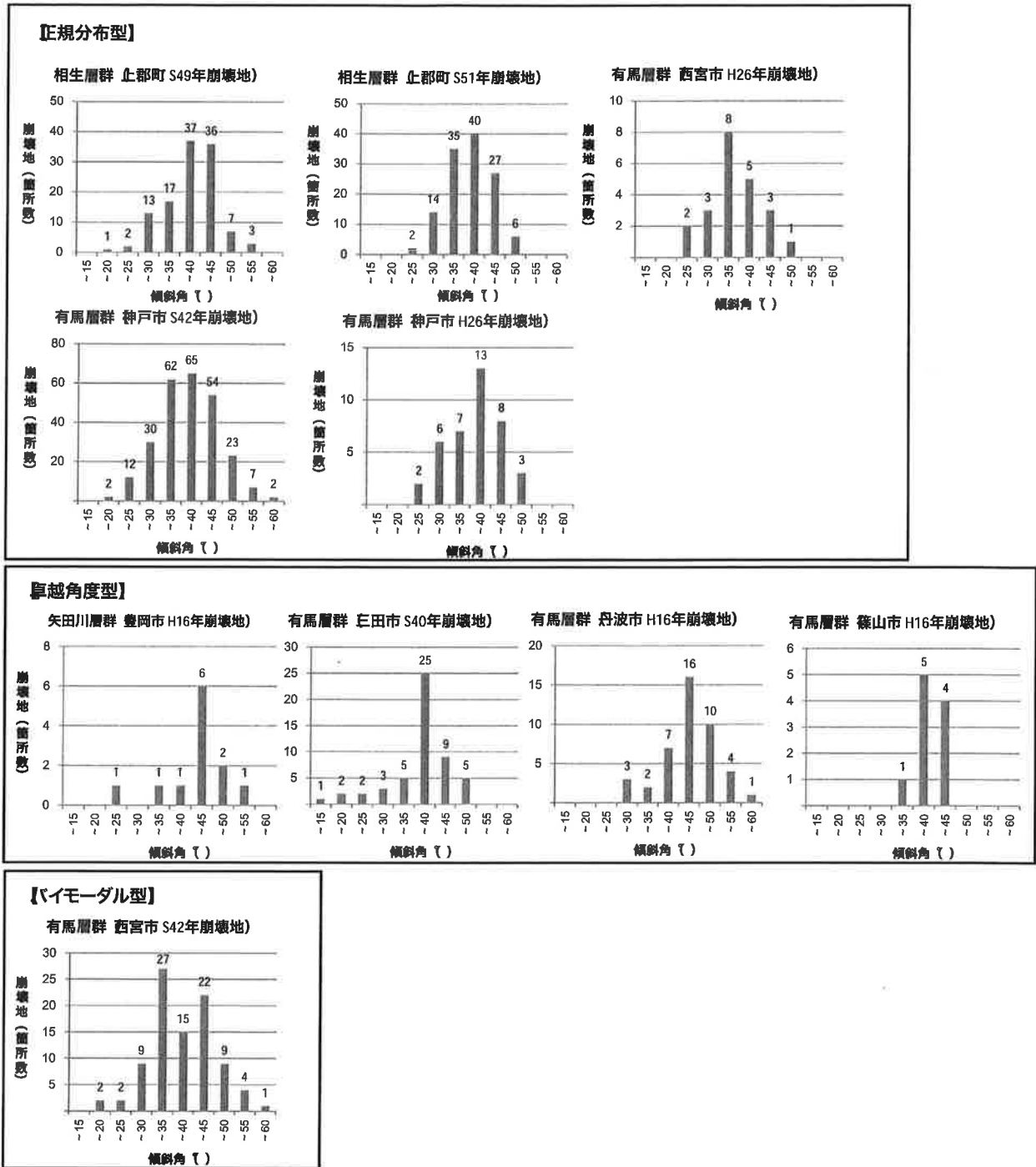


図-2.3 各地域の崩壊地の傾斜角ヒストグラム

2.2 地質学的特徴

2.2.1 相生層群

相生層群は下位より上郡下部累層、上郡上部累層、鶴亀下部累層、鶴亀上部累層、赤穂累層に区別されている⁹⁾。上郡町域の下部累層は下位より行頭部層、大南池部層から構成される。各地層の特性については、表-2.1に示した。

行頭部層は、泥岩の大小岩片が一般に混入されるとともに、流紋岩質の類質火山角礫、亜鉛礫を混入する。本質レンズによる溶結構造も認められる。

大南池部層は、流紋岩質の強溶結ガラス質凝灰岩であり基質は、ユータキサイト構造を示す。

上郡上部類層は、石堂部層、岩木部層、細念部層から構成される。石堂部層は、流紋岩質溶結多結晶凝灰岩である。灰白色～暗灰色の多結晶凝灰岩であり、顕微鏡下では、斑状結晶は石英、アルカリ長石、斜長石が認められる。岩木部層は、含石堂部層礫凝灰岩層と堆積岩相からなる。細念部層は、流紋岩質の多結晶凝灰岩である。この凝灰岩は、上郡地域において岩相が一定している。

鶴亀下部累層は、皆坂部層、下畑部層から構成される。皆坂部層は、輝石、斜長石の目立つ安山岩であり、時にアルカリ長石や石英の捕獲結晶が散在する。下畑部層は、流離の明瞭な流紋岩及び火砕岩相からなる。顕微鏡下に真珠構造や球顆組織が認められる。

鶴亀上部類層は、加賀美部層、滝谷部層から構成される。加賀美部層は頁岩、砂岩、層灰岩及び火山砂、礫岩互層である。滝谷部層はデレン岩質溶結多結晶凝灰岩で上郡地域の台地状地形の平坦山頂部に広く分布する。風化するとマサ状になって赤土状の深層風化を形成し、崩壊や地滑りに発達する。

赤穂累層は八塔寺部層からなり流理構造の明瞭な流紋岩質溶岩が主体である。

表-2. 1 相生層群の層序⁹⁾

層群名称	累層名称	部層名称	岩質の特徴
相生層群	赤穂累層	八塔寺部層	流紋岩質溶岩
	鶴亀上部累層	滝谷部層	デレン岩質溶結多結晶凝灰岩
		加賀美部層	頁岩・砂岩・層灰岩、火山砂・礫岩
	鶴亀下部累層	下畑部層	流紋岩・火砕岩
		皆坂部層	安山岩質火山岩層
	上郡上部累層	細念部層	流紋岩質溶結多結晶凝灰岩
		岩木部層	含異質礫凝灰岩・堆積岩
		石堂部層	流紋岩質溶結多結晶凝灰岩
	上郡下部累層	大南池部層	強溶結ガラス質凝灰岩
		行頭部層	含異質礫デイサイト

2. 2. 2 矢田川層群

矢田川層群は、兵庫県北部矢田川流域を模式地として弘原海・松本によって命名された¹³⁾。層序の下位から上位へ、角閃石安山岩・流紋岩類（リソイダイト質およびネバダイト質）および成層した凝灰岩層に区分されている（表-2. 2）。本地域の矢田川層群は、黒雲母流紋岩溶結凝灰岩を主体とし、少量の流紋岩溶岩を伴う。石室岩片として安山岩-デイサイト質溶岩が含まれている。

表-2. 2 矢田川層群の層序

層群名称	累層名称	部層名称	岩質の特徴
矢田川層群	凝灰岩層		縞状構造。風化して緑色化。小さなガラス破片含有。
	ネバダイト質火山岩層		溶結した火砕岩。融触した石英・斜長石・黒雲母斑晶。ユタキサイト構造
	リソダイト質火山岩層		緻密で脆い。ガラス破片主体火砕岩的構造。石英・斜長石斑晶
	安山岩質火山岩層		角閃石斑晶が認められる。

2. 2. 3 有馬層群

西南日本内帯に広く広がる後期白亜紀珪長質火山岩類のうち兵庫県南東部のものについては有馬層群¹⁴⁾と呼ばれてきている。ここでは神戸市地域、西宮市地域、三田市地域、篠山市地域、丹波市地域の各地域に分布しているものを有馬層群として取り扱っている。三田地域における有馬層群の層序を表-2. 3、京南西部から兵庫県中央部に至る有馬層群の対比を表-2. 4示した。

有馬層群の層序は、対象範囲の東部地域では下位より武田尾溶結凝灰岩、僧川碎屑岩層、中位の玉瀬溶結凝灰岩、玄能池碎屑岩層（衝原砂質凝灰岩層）、上位の境野溶結凝灰岩（母子溶結凝灰岩、丹生山凝灰角礫岩層）、佐曾利凝灰角礫岩から構成される¹²⁾。また対象範囲西部地域では下位より鴨川層、阿草溶結凝灰岩、平木溶結凝灰岩から構成さ

れる¹⁰⁾。僧川碎屑岩層は、主として流紋岩質溶結ガラス質凝灰岩から構成されるが、一部凝灰岩質砂岩-礫岩を挟む。

玄能池碎屑岩層は、粗粒凝灰質砂岩から構成される。明るい灰緑色を示し、砂質の火山物質の量が多い。境野溶結凝灰岩は流紋岩溶結ガラス質結晶凝灰岩から構成される。帯緑灰色～暗赤褐色を呈している。佐曾利凝灰角礫岩は、著しく多量の異質岩片を含む点が特徴的な流紋岩質凝灰角礫岩-火山礫凝灰岩である。基質の性質と岩片の種類からタイプIとタイプIIに区別されている。タイプIは流紋岩溶結火山礫凝灰岩でありユータキサイト構造が認められ、頁岩、チャートの異質礫を混入する。タイプIIは、基質が非溶結であり、大部分が凝灰質である。混入岩塊は、流紋岩溶岩、流紋岩溶結ガラス質凝灰岩、流紋岩ガラス質結晶凝灰岩、凝灰質泥岩-砂岩等が多い。鴨川層は流紋岩質溶結凝灰岩、流紋岩質非溶結凝灰岩、軽石凝灰岩及び成層凝灰岩からなる。阿草層は流紋岩溶結凝灰岩、火山礫凝灰岩、溶岩及び堆積岩からなる。平木溶結凝灰岩は火砕流堆積物としての流紋岩溶結ガラス質結晶凝灰岩から構成される。

表-2. 3 有馬層群の層序

累層名称	部層名称	岩質の特徴
平木溶結凝灰岩	上部層	黒雲母流紋岩溶結ガラス質結晶-結晶ガラス質凝灰岩
	堆積岩類	流紋質砂岩及び泥岩
	下部層	黒雲母流紋岩溶結ガラス質結晶-結晶ガラス質凝灰岩
阿草層		黒雲母流紋岩溶岩
		黒雲母流紋岩溶結ガラス質結晶-
		黒雲母流紋岩溶結火山礫凝灰岩
		礫岩及び砂岩
鴨川層		流紋岩溶岩
		流紋岩溶結ガラス質凝灰岩
		流紋岩凝灰岩及び成層凝灰岩 非溶結)
		凝灰質礫岩 砂岩及び泥岩

表-2. 4 有馬層群の層序対比¹⁰⁾

地域	福知山図幅地域	園部図幅地域	三田図幅地域 (西部)	篠山図幅地域 (西部)	叡陽地域 (南東)	三田図幅地域 (東部)	広根図幅地域	神戸図幅地域
文献	栗本・牧本(1990)	井本ほか(1991)	尾崎・松浦(1988)	本研究 (1993)		尾崎・松浦(1988)	吉田・河田(1987)	藤田・笠間(1983)
有馬層群	エニット 4 エニット 5 エニット 3 エニット 2 エニット 1	佐曾利凝灰角礫岩	平木溶結凝灰岩 (上部) 平木溶結凝灰岩 (下部)	平木溶結凝灰岩 (上部) 平木溶結凝灰岩 (下部)	母子溶結凝灰岩	境野溶結凝灰岩	境野溶結凝灰岩 (ステージIII)	丹生山凝灰角礫岩層
		琉璃溪層 (中部)	鴨川層	鴨川層	阿草層	玉瀬溶結凝灰岩	玉瀬溶結凝灰岩 (ステージII)	玉瀬結晶質凝灰岩層
		玄能池碎屑岩層	玄能池層	僧川碎屑岩層	僧川層	武田尾溶結凝灰岩 (ステージI)		

3. 各地層の表層崩壊と特徴

これまでに上郡地域、豊岡地域、三田市地域・篠山地域における中生代白亜紀の火山岩類分布地域における豪雨災害での表層崩壊の特徴は取りまとめられている⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

崩壊パターンは斜面崩壊の高さと位置によりa～dの4つに区別される(図-3, 1参照)。

a タイプは、斜面上方の遷急線付近での崩壊である。遷急線を含み、尾根側へ巻き込む形(後退型)での崩壊となるケースである。概ね多角形上となり、滑落崖は数mに及ぶ。崩壊後の流動距離が大きく、崩壊土砂量が増大する。

b タイプは斜面中で崩壊するケースである。落石崩壊のイメージであり、基質部の細粒部分が流れだし、大きな礫部分が崩れ落ちている。このタイプには風化層が厚く、土砂状に流出するものも含まれる。

c タイプは高原台地の小起伏面に発達する斜面崩壊である。緩やかな傾斜面での崩壊となるが、高低差がないため小規模な崩壊となることが多い。

d タイプは斜面裾部での崩壊である。崖錐部、強風化部が流水で洗い流される崩壊で、下部の浸食によるケースと間隙水圧の上昇により崩壊するケースが考えられる。

これらの崩壊パターンを地層別、地域別に整理し、表-3, 1に示した。

また、各層群毎の概要を表-3, 2に示した。

中生代白亜紀の火山岩類は、比較的風化に強く、露岩部や風化層が薄い場合が多い。このため、全体に斜面中の薄層や落石のパターンの崩壊bタイプが共通して認められる。一方、高原面や断層・変質部等では風化層が厚くなる。従って、上郡高原面や西宮の小起伏面では風化が厚く、急崖部遷急線付近の崩壊aタイプや緩傾斜面内の崩壊cタイプが認められる。

以下に各地層について崩壊特性を述べる。

3. 1 相生層群

相生層群の崩壊は、図-3, 1のaタイプが最も卓越するが、bタイプ、cタイプも認められ、顕著な特徴としてcタイプの崩壊が認められることである。図-3, 2に相生層群における崩壊地の分布状況、図-3, 3に相生層群における層序ごとの崩壊分布を示した。また、表-3, 2に相生層群の崩壊特性を示す。

a タイプの崩壊は、上郡地帯に広がる高原台地の斜面の遷急線付近からの崩壊で、岩木層、細念部層、皆坂層を中心とした分布地域で発生している。比較的硫化距離が長く、裾の付近まで広がるものも認められた。

c タイプは滝谷部層、大南池、下畑部層の広がる高原台地の小起伏面で発生するもので、高低差が少ない箇所での発生となっている。dタイプは相生層群そのものよりも2次堆積した崖錐堆積物等から発生したものである。

崩壊は、地層構造からも同部層の中で同水準の地層で発生している傾向があり、凝灰岩ならびに火砕岩等脆性状にある風化しやすい地層に集中しており、塊状である溶岩等には少ない傾向がある。

崩壊タイプaやcは、相生層群の中で局所的にみられる。モデル構築にあたって、相生層群全域にモデル標準値を設定した後に、対象エリアを設定し、局所的にモデルを調整することとした。dタイプは本システムの対象外であるため、モデルには反映しない。

3. 2 矢田川層群

矢田川層群の崩壊は、bタイプが卓越している。尾根付近に平坦面をつくらぬ地形の斜面において、礫を主体とした土砂が崩壊するものであり、裾部まで広がるものは少ない。表-3, 3に矢田川層群の崩壊特性を示す。

bタイプは矢田川層群全域で確認されているため、モデル構築では、矢田川層群全域においてモデル標準値で調整することとする。

3. 3 有馬層群

有馬層群の崩壊は、地域により若干の違いが認められる。

三田市地域、篠山市地域、丹波市地域は、bタイプ、cタイプの崩壊が認められるが、bタイプのものが卓越している。

一方、神戸市地域、西宮市地域は a, b, c, d すべてのタイプの崩壊が認められる。表-3. 4 に有馬層群の崩壊特性を示す。

一例として、西宮市域における有馬層群の地質図と崩壊分布位置を図-3. 4 に、有馬層群の層序別に示した崩壊地数を図-3. 5 に示す。

この地域には、有馬層群のうち下位に相当する武田尾火山岩類、玉瀬結晶質凝灰岩のみしか分布していない。しかしながら崩壊は、鴨川層相当である玉瀬結晶質凝灰岩に集中していることが明らかである。

三田市地域、篠山市地域、丹波市地域では、bタイプが有馬層群層群全域で確認されているため、モデル構築にあたって、有馬層群層群全域においてモデル標準値で調整することとする。西宮市域および神戸市域では、崩壊タイプ a や c が有馬層群の中で局所的にみられる。モデル構築にあたって、有馬群全域にモデル標準値を設定した後に、対象エリアを設定し、局所的にモデルを調整することとした。

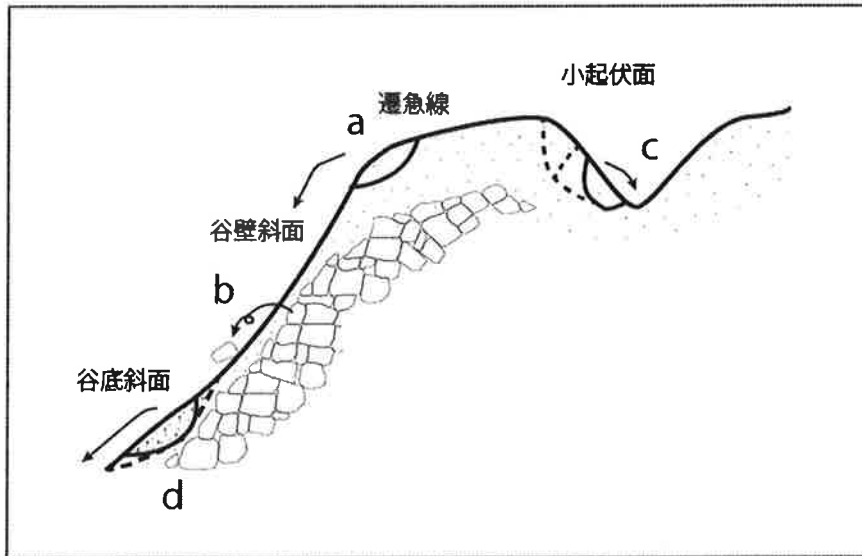


図-3. 1 崩壊位置によるタイプ名称

表-3. 1 地層別（地域別）崩壊タイプ

層群名称	地域	崩壊タイプ
相生層群	上郡	a, b, c, d
有馬層群	三田・篠山・丹波	b
	西宮・神戸	a, b, c, d
矢田川層群	豊岡	b

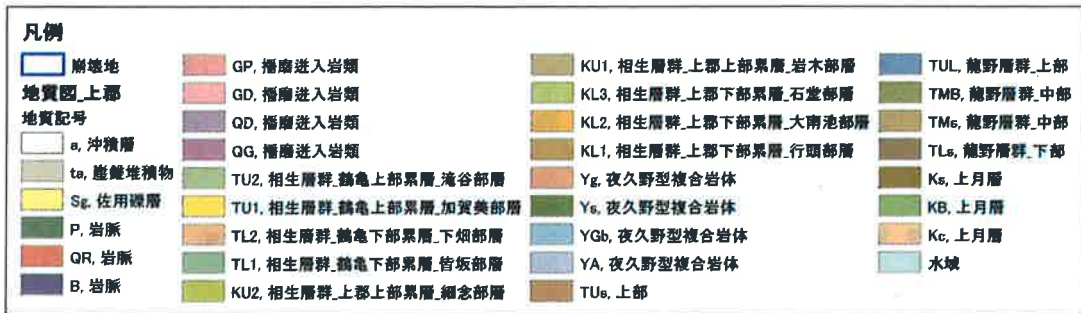
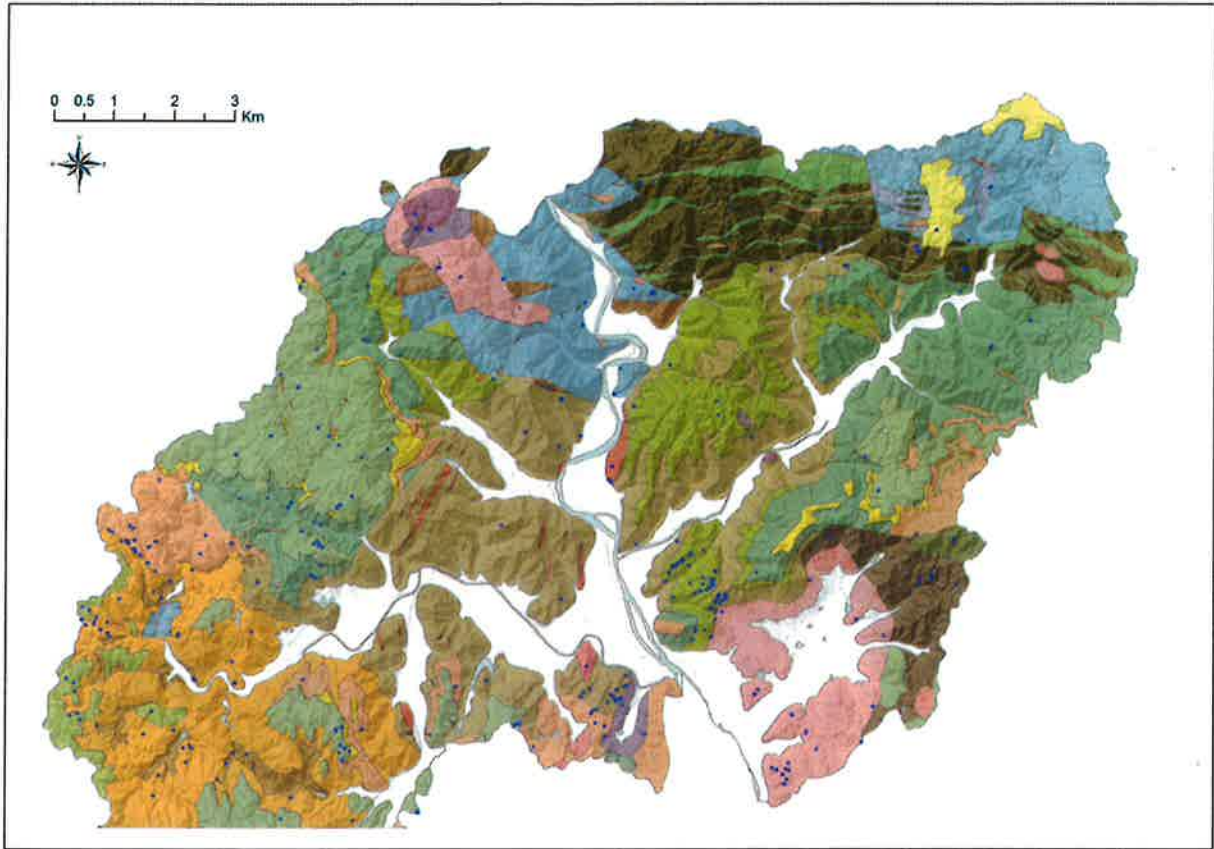


図-3.2 相生層群(上郡町域)における崩壊地分布状況⁹⁾

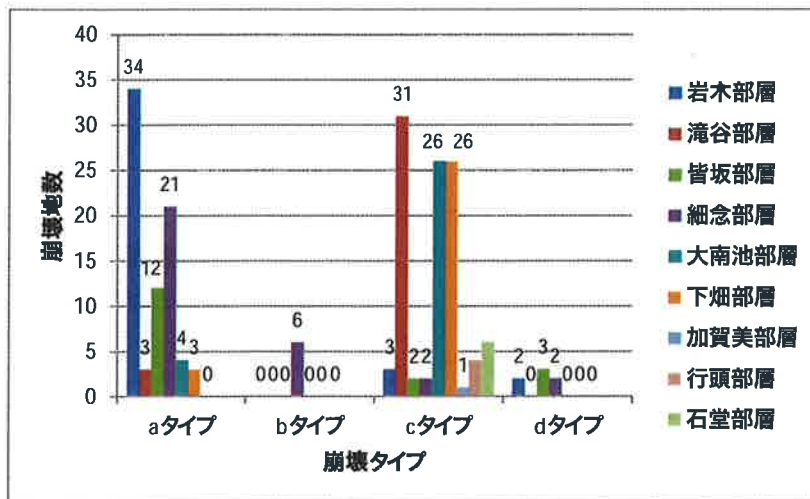


図-3.3 相生層群(上郡町域)における層序ごとの崩壊地数

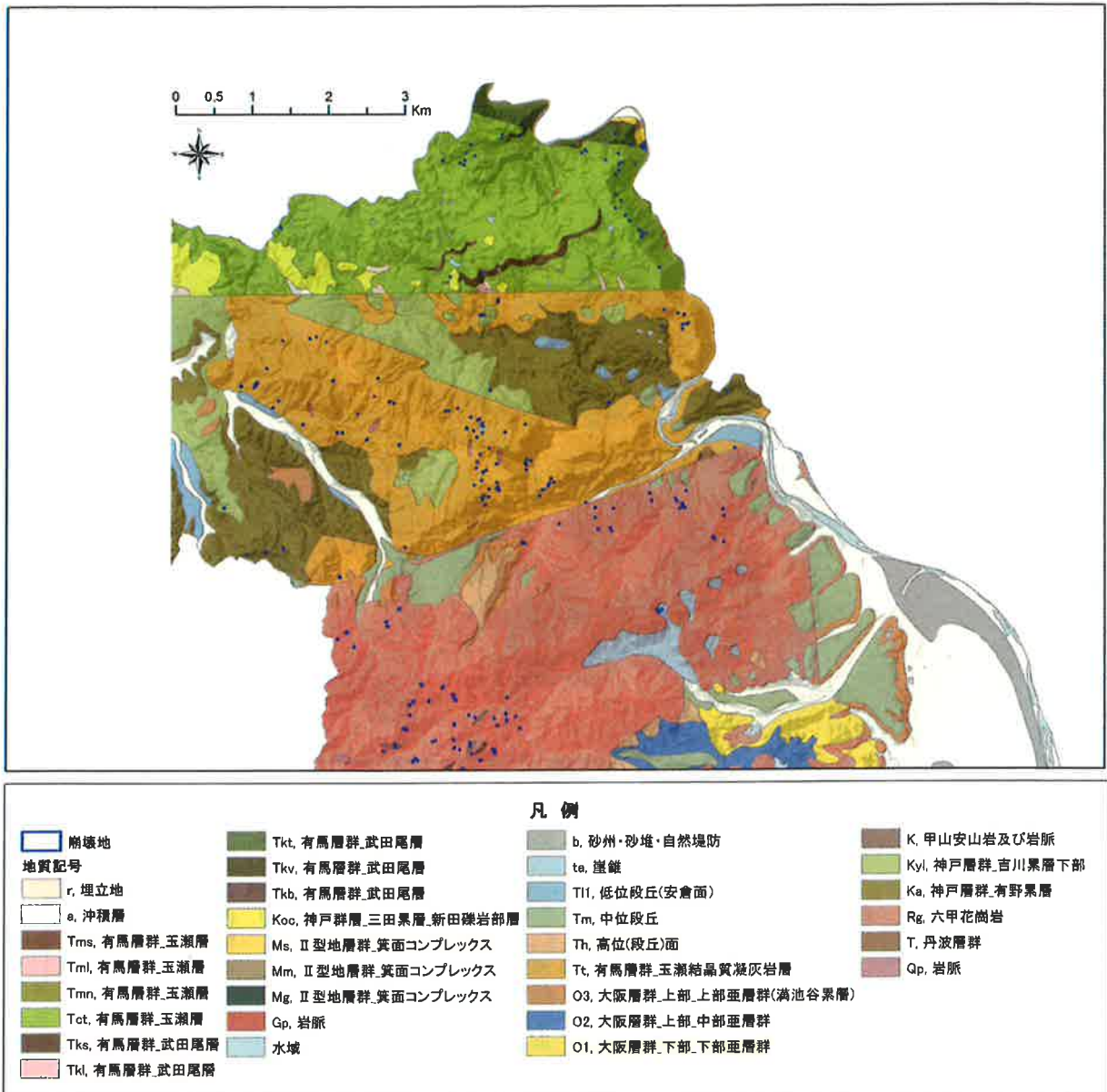


図-3. 4 有馬層群(西宮市域一部)における崩壊地分布状況^{15), 16)}

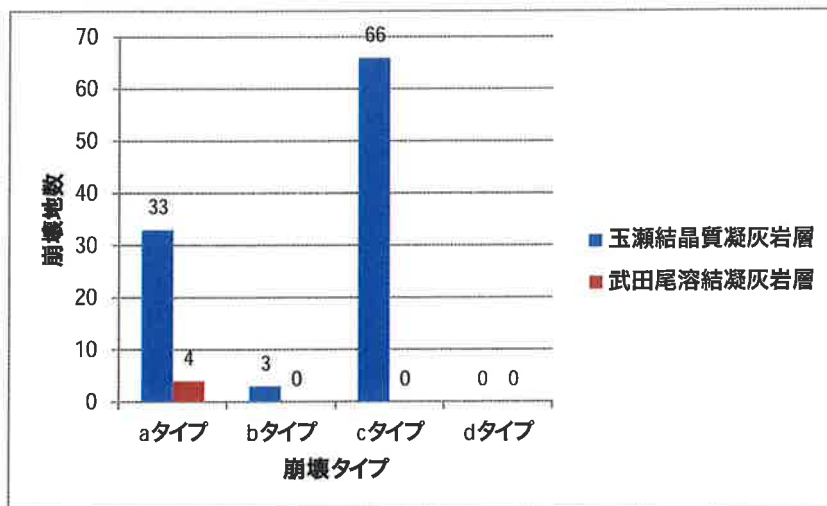


図-3. 5 有馬層群(西宮市域一部)における層序ごとの崩壊地数

表-3. 2 相生層群の崩壊特性

		相生層群 上郡町域																																																				
模式断面図		a)	b)	c) 上郡高原面	d)																																																	
地形		山地から丘陵地。 上郡高原面を除くと、山頂は急峻、山麓緩斜面となる。 上郡高原面は山頂小起伏面となり緩斜面が多くなる。																																																				
地質		白亜紀後期の火山岩類：相生層群。主に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、風化により開口割れ目となりやすい。																																																				
崩壊特性	平面位置	a)狭小に伸びる頂部斜面直下の上部谷壁斜面に崩壊が多発する。崩壊地周辺は、概ね植林地であるが、幼木が分布し植生に乏しい。 b)古い崩壊地等あり草本主体。 c)小起伏面内、上部谷壁斜面																																																				
	断面位置	a)斜面形態は概ね谷型凹状を呈する。崩壊地の勾配は40～50°の急傾斜面である。 b)斜面傾斜は40～60°と急傾斜面となる。 c)遷急線近傍の小起伏面30°																																																				
		<p>相生層群(上郡)_aタイプ 相生層群(上郡)_bタイプ 相生層群(上郡)_cタイプ 相生層群(上郡)_dタイプ</p> <table border="1"> <caption>崩壊地数 vs 傾斜角 (推定値)</caption> <thead> <tr> <th>傾斜角 (度)</th> <th>aタイプ</th> <th>bタイプ</th> <th>cタイプ</th> <th>dタイプ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>15</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>20</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>25</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>30</td><td>9</td><td>1</td><td>18</td><td>0</td></tr> <tr><td>35</td><td>9</td><td>1</td><td>41</td><td>0</td></tr> <tr><td>40</td><td>30</td><td>1</td><td>41</td><td>0</td></tr> <tr><td>45</td><td>22</td><td>4</td><td>31</td><td>0</td></tr> <tr><td>50</td><td>5</td><td>0</td><td>4</td><td>0</td></tr> <tr><td>55</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>				傾斜角 (度)	aタイプ	bタイプ	cタイプ	dタイプ	15	0	0	0	0	20	0	0	0	0	25	1	0	1	0	30	9	1	18	0	35	9	1	41	0	40	30	1	41	0	45	22	4	31	0	50	5	0	4	0	55	2	0	0
傾斜角 (度)	aタイプ	bタイプ	cタイプ	dタイプ																																																		
15	0	0	0	0																																																		
20	0	0	0	0																																																		
25	1	0	1	0																																																		
30	9	1	18	0																																																		
35	9	1	41	0																																																		
40	30	1	41	0																																																		
45	22	4	31	0																																																		
50	5	0	4	0																																																		
55	2	0	0	0																																																		
形態・機構		a)崩壊地の規模は幅5～20m、長さ10～30m、深さ0.5～1mが多い。流出土砂は、土石流となり、下流域まで斜面を削りながら流下したため、崩壊規模を大きくした。 b)露岩や転石等分布する箇所であり、薄い風化土砂部や落石の崩壊となる。 c)高原面は、土砂部が厚く浸透した雨水により飽和し崩壊となる。																																																				
備考		崩壊が集中している箇所では、空中写真判読結果より、皆伐後或いは新植後間もない林地であることが分かっている。植生が未発達で、根系による表土の緊縛抵抗が低下したため、崩壊が集中的に発生したと考えられる。																																																				
モデルへの設定		崩壊タイプaやcは、対象地質の中で局所的にみられる。全域にモデル標準値を設定した後、対象エリアを設定し、局所的にモデルを調整する。 dタイプは本システムの対象外であるため、モデルには反映しない。																																																				

表-3.3 矢田川層群の崩壊特性


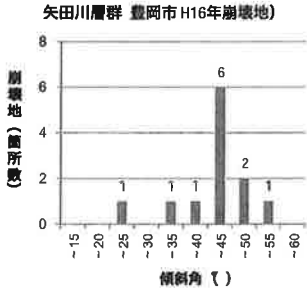
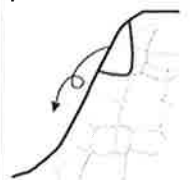
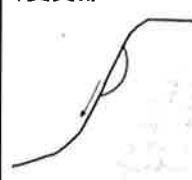
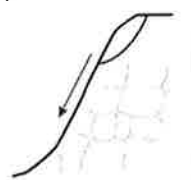
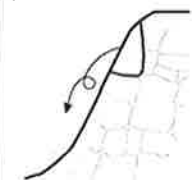
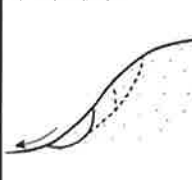
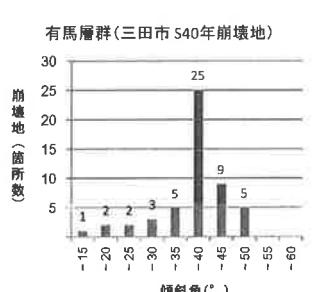
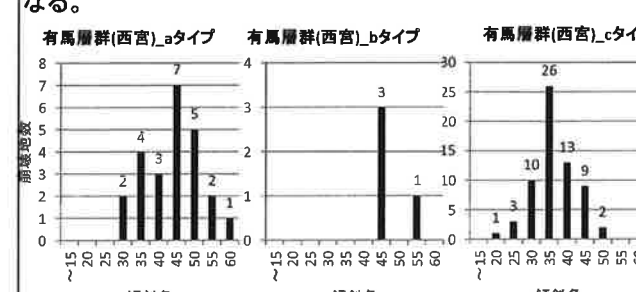
		矢田川層群 豊岡市																						
模式断面図	b)																							
地形		豊岡市南部の出石町、但東町の出石川上流部山地。南側で中国山地に連なる。全体に急峻な山容を呈し、樹枝状の溪流が発達する。																						
地質		白亜紀後期の火山岩類：矢田川層群。流紋岩質溶結凝灰岩。比較的風化に強く、風化層は薄い。溶岩では噴出時の、堆積岩では堆積時の空洞が多く、風化により開口割れ目となりやすい。																						
崩壊特性	平面位置	・狭小に伸びる頂部斜面直下の上部谷壁斜面に崩壊が多発する。 ・崩壊地周辺は、概ね植林地である。																						
	断面位置	斜面形態は概ね谷型凹状である。 ・崩壊地の勾配は40～45度程度の急傾斜面で、山腹の中部～上部で発生する傾向 <div style="text-align: center;"> <p>矢田川層群 豊岡市 H16年崩壊地</p>  <table border="1"> <caption>崩壊地 (箇所数)</caption> <thead> <tr> <th>傾斜角 (°)</th> <th>崩壊地 (箇所数)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>15</td><td>0</td></tr> <tr><td>20</td><td>0</td></tr> <tr><td>25</td><td>1</td></tr> <tr><td>30</td><td>0</td></tr> <tr><td>35</td><td>1</td></tr> <tr><td>40</td><td>1</td></tr> <tr><td>45</td><td>6</td></tr> <tr><td>50</td><td>2</td></tr> <tr><td>55</td><td>1</td></tr> <tr><td>60</td><td>0</td></tr> </tbody> </table> </div>	傾斜角 (°)	崩壊地 (箇所数)	15	0	20	0	25	1	30	0	35	1	40	1	45	6	50	2	55	1	60	0
	傾斜角 (°)	崩壊地 (箇所数)																						
15	0																							
20	0																							
25	1																							
30	0																							
35	1																							
40	1																							
45	6																							
50	2																							
55	1																							
60	0																							
形態・機構	・崩壊地の規模は幅10～30m深さ0.5～1mが多い。・一般的に集水斜面上で、雨水によって飽和した表土が崩壊している。 ・崩壊後土石流となり、下流域まで表土の削剥と崩土の堆積による荒廃地となっている。																							
備考	風倒木被害により、雨水を浸透させやすい状態で、表土層が飽和して崩壊した。 土石流は、多くの倒木が流され斜面を削剥しながら流下したことが崩壊規模を大きくした。																							
モデルへの設定	対象地質全域の特性であるため、対象地質全域でモデル標準値で調整する。																							

表-3.4 有馬層群の崩壊特性

		有馬層群				
		三田、丹波、篠山市域		西宮&神戸		
模式断面図		b) 	b)変質部 	a) 	b) 	c)小起伏面 
地形		山地。標高は300~500mで頂部斜面に露岩を伴う事が多い。樹枝状の渓流が発達する。比高差が大きく谷密度が小さい。		山地から丘陵地。武庫川沿いは、急斜面となる。小起伏面は、比較的低い比高差となっている。		
地質		白亜紀後期の火山岩類：有馬層群。主に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、風化により開口割れ目となりやすい。		白亜紀後期の火山岩類：有馬層群。主に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、風化により開口割れ目となりやすい。		
崩壊特性	平面位置	b)斜面上方~中腹に分布。変質部は、断層、変質部等の影響で土砂状となった箇所の一部に分布。		a)武庫川沿い急崖斜面上方にて発生。 b)斜面上方~中腹に分布。 c)小起伏面上に分布		
	断面位置	b)斜面傾斜30~40°程度とやや急斜面となる。変質部は、斜面傾斜25~30°程度の斜面となる。 		a)尾根頂部に近い位置で発生。斜面傾斜30~60°と全体に急斜面である。 b)斜面傾斜45~55°とやや急斜面となる。 c)遷急線近傍で生じ、斜面傾斜20~50°とやや緩斜面となる。 		
	形態・機構	b)斜面は露岩浅く、谷部には岩屑(最大径2m)主体の土石が堆積し、落石・岩盤崩壊由来の崩壊となる。変質部では、土砂部の崩壊となる。		a)風化層が厚く、浸透した雨水により飽和し崩壊 b)斜面は露岩浅く、谷部には岩屑(最大径2m)主体の土石が堆積し、落石・岩盤崩壊由来の崩壊となる。 c)小起伏面は、土砂部が厚く浸透した雨水により飽和し崩壊となる。		
備考		b)土砂層は薄く、割れ目沿いの崩落。変質部は、土砂層が相対的に厚く、降雨浸透、飽和により、崩壊が生じた。		c)土砂層が相対的に厚いところに、降雨が浸透して飽和したため、表層崩壊が生じた。		
モデルへの設定		対象地質全域の特性であるため、対象地質全域でモデル標準値で調整する。		崩壊タイプaやcは、対象地質の中で局所的にみられる。全域にモデル標準値を設定した後に、対象エリアを設定し、局所的にモデルを調整する。		

4. 崩壊予測のモデル化

4. 1 層厚

表土層厚は、対象市町域における既往のボーリングデータおよび試験結果、兵庫県のおける他市町域における同種地質での調査データおよび現地調査結果を参考にして、層厚-斜面勾配の関係式(層厚式)を推定した。推定した層厚式を図-4. 1に示す。相生層群、矢田川層群、有馬層群ともに、本システムのプロトタイプである六甲山系に分布している花崗岩と比べ、全体的に層厚が薄い傾向があった。そのため、花崗岩の層厚式よりも薄く設定した。特に、相生層群、矢田川層群では層厚が薄い。有馬層群では、風化残積土が厚い箇所も確認され、相生層群や矢田川層群より層厚の厚い式となっている。

現地調査結果より崩壊タイプによる層厚の違いは確認されなかったため、局所的な層厚の設定は行わないこととした。

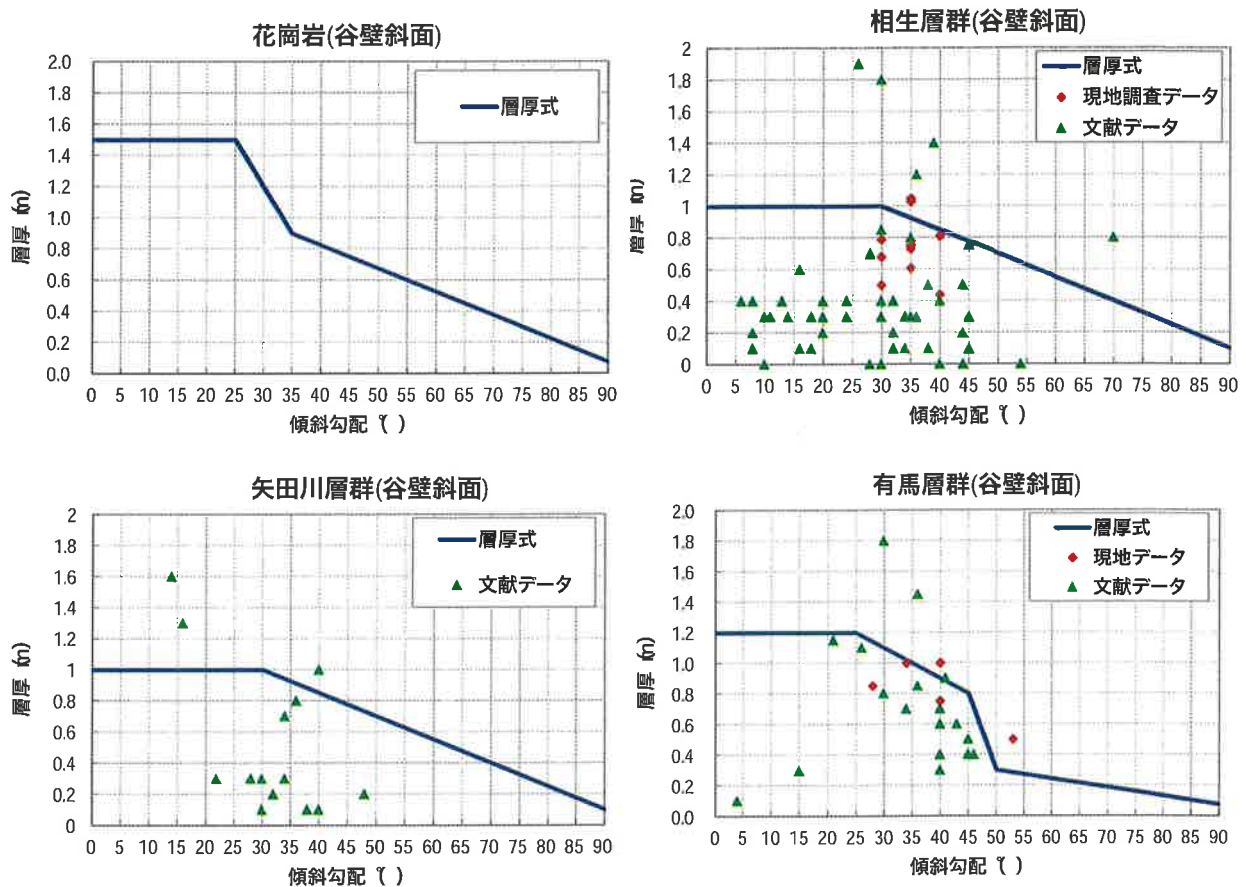


図-4. 1 地質区分毎の層厚式

4. 2 せん断強度定数

4. 2. 1 モデル標準値の設定

せん断強度定数(土の有効粘着力、有効内部摩擦角)については、兵庫県による検討成果やボーリングデータ、各種土質試験結果などを取りまとめた。これにより、地質区分ごとに標準的な物性値(モデル標準値)を整理した。

文献資料は主に内部摩擦角が示されているため、最初に文献にもとづく内部摩擦角の整理を行った。

相生層群の表土(風化残積土)に対して粒度試験した結果、細粒分・砂分・礫分を同程度に含んだ砂質土～礫質土状(細粒分質礫質砂～細粒分質砂質礫)をなしていた。表-4. 1に土質区分と内部摩擦角との関係を示す。表より相生層群の表土の内部摩擦角は30～35°の範囲内と考えられる。矢田川層群や有馬層群における表層崩壊地についても現地踏査を行った結果、細粒分・砂分・礫分を同程度に含んだ砂質土～礫質土状(細粒分質礫質砂～細粒分質砂質

礫)をなしており、同様に内部摩擦角は、30~35°の範囲内と考えられた。本システムのプロトタイプである六甲山系に分布している花崗岩($\phi=31^\circ$)よりも粗粒分が多いことから、内部摩擦角は32°程度と推定される。

表-4. 1 土質区分と内部摩擦角との関係¹⁷⁾

土質区分	
土質区分	内部摩擦角(ϕ)(°)
粘性土	25
砂質土	30
礫質土	35

注) 粘性土とは(シルト+粘土)分を50%以上含む土。
 砂質土とは(シルト+粘土)分が50%以下であり、残りの成分で砂分の方が礫分より多い土。
 礫質土とは(シルト+粘土)分が50%以下であり、残りの成分で礫分の方が砂分より多い土。

前述の検討に加えて、内部摩擦角度 $\phi=32^\circ$ で粘着力cとの組合せを試算し、再現計算による崩壊判定メッシュの傾斜角と、実際の崩壊が発生した斜面の傾斜角との整合性を確認して、最も適切な物性値の組合せを検討したところ、 $\phi=32^\circ$ 、 $c=5$ の組み合わせが整合性が最も高かったため、これを採用することとした。

4. 2. 2 局所的な設定

次に前述の崩壊タイプa,cにみられる局所的な不安定地形の設定方法について、検討を行った。対象地では、遷急線周辺に崩壊地が集中しており、不安定な地形が崩壊ポテンシャルを上げていると考察される。現地調査結果より、遷急線周辺の層厚は周辺の斜面と同じことが確認されている。また、遷急線は斜面上部に位置するため、豪雨時においても斜面下部ほどには地下水位が上昇しない。西宮市や神戸市に分布している有馬層群では、起伏量が小さく集水面積が小さいため、地下水位が上昇しにくい。図-4. 2に西宮市域の有馬層群分布域の昭和42年災害時の地下水位の解析結果を示す。最大地下水位を層厚で除し、地下水位の上昇割合をみると、崩壊地周辺では最大地下水位が土層の半分にも満たない。このように地下水位が低い状態では、物性値を変更せずに層厚を1m増厚したとしても、安全率は1未満とならない(図-4. 3)。

以上から、せん断強度定数(c, ϕ)の設定によって、斜面の不安定性を設定することとした。

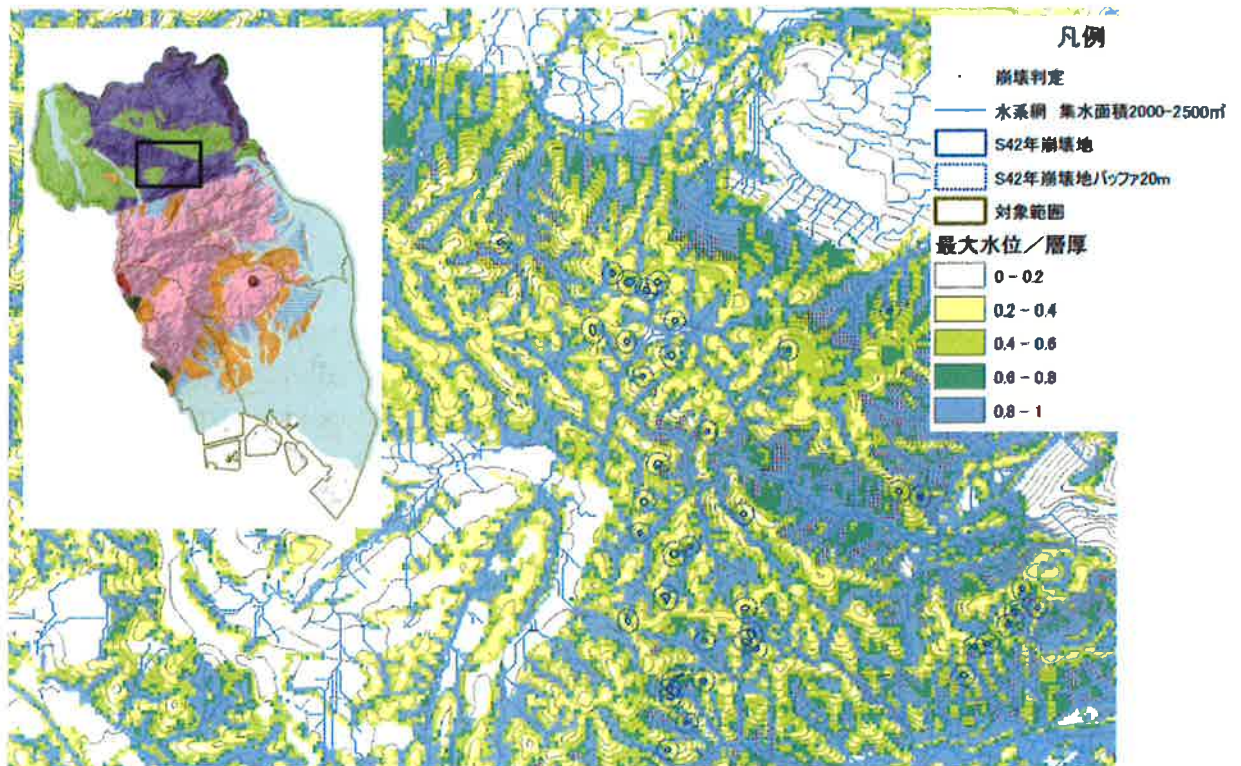


図-4. 2 有馬層群の緩斜面における崩壊地(見逃し)位置(昭和42年 case008 結果)

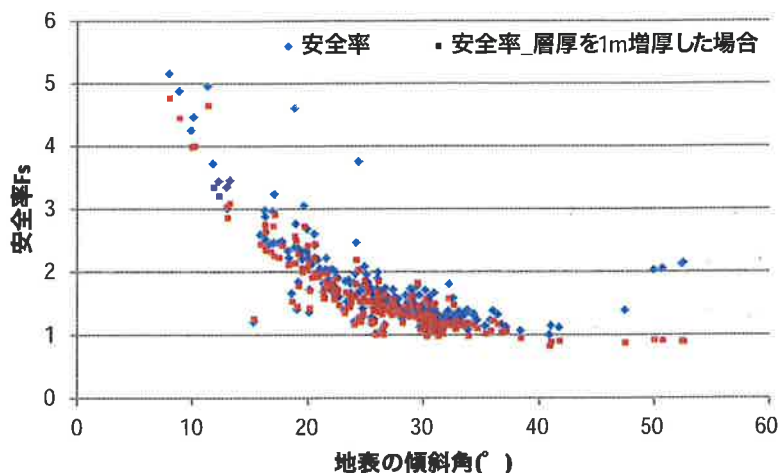


図-4. 3 有馬層群の見逃し箇所 の逆算結果 (昭和 42 年 case008 結果)



図-4. 4 相生層群 (上郡町域) における
遷急線周辺で発生している崩壊地

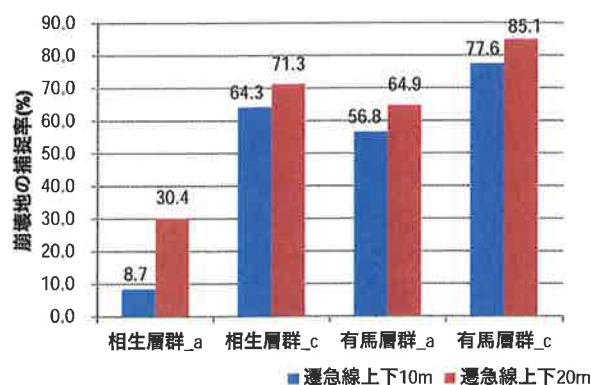


図-4. 5 遷急線にバッファを設定した際の
崩壊地の捕捉率

せん断強度定数の設定の対象エリアは、地形図判読を実施し、崩壊地と遷急線の位置関係や崩壊が発生している斜面の比高差から検討した。

地形図を判読したところ、遷急線の上下 20m で水平幅 40m の範囲が崩壊しやすい地形となっており、崩壊地が集中していることが明らかになった (図-4. 4)。図-4. 5 に、遷急線の上下 10m および上下 20m の範囲における崩壊地の割合を示す。どのタイプにおいても、遷急線上下 20m の範囲を設定した方が、崩壊地が多く含まれている。以上から、遷急線の上下 20m 幅を基本として、せん断強度定数を低減させることとした。

崩壊タイプ a および c タイプが確認されている相生層群 (上郡町域) および有馬層群 (西宮市域) にて、崩壊が発生している斜面の比高差を、地形図より判読した結果を図-4. 6 に示す。a タイプの比高差は 72.9m、100.4m と大きく、c タイプの比高差は 39.6m、22.6m と小さくなっている。これは、a タイプでは小起伏面の縁部分の起伏量の大きな斜面で崩壊が発生しているのに対し、c タイプは小起伏面の内部の起伏量の小さな斜面で崩壊が発生しているためと考えられる。特に、西宮市域や神戸市域にみられる有馬層群の小起伏面内で発生している c タイプの崩壊は、現地確認の結果、頭部背後は平坦地 (痩せ尾根) で、下方も比較的低い比高差で谷底低地となっており、急斜面が 20~30m 程度の細い帯状に分布している (図-4. 7)。このことから、西宮市域や神戸市域にみられる有馬層群の小起伏面内で発生している崩壊は、遷急線上下 10m 幅にて設定することとした。

対象エリアに設定するせん断強度定数は、尾根付近の遷急線 (崩壊前線) 付近は風化が進行し、現地状況から相対的に粘着力 c が低下していると考えられたため、粘着力 c を対象としてモデル標準値より低減させることとした。

再現計算の結果から対象エリアについてモデル標準値より c を 1KN/m^2 低減させることによって、過去の崩壊値の捕捉率が向上したことから、 c を 1KN/m^2 低減させることとした。

また西宮市域や神戸市域にみられる有馬層群の小起伏面内で発生している c タイプの崩壊は、現地調査の結果より他の崩壊と比べ傾斜が緩く、後退性の侵食によって崩壊が拡大していることが明らかになった。そのため、侵食によってさらに粘着力 c が低下していると考えられたため、遷急線バッファ内の計算メッシュの粘着力 c の設定値を標準値より 2 KN/m² 下げる設定をした。また φ については、再現計算や逆算結果から捕捉率や空振り率が最も良好となった φ=35° とした。

以上のモデルの改良を行ったことによって、過去の崩壊地の捕捉率が向上した(図-4. 8)。検討した物性値一覧を表-4. 2に示す。

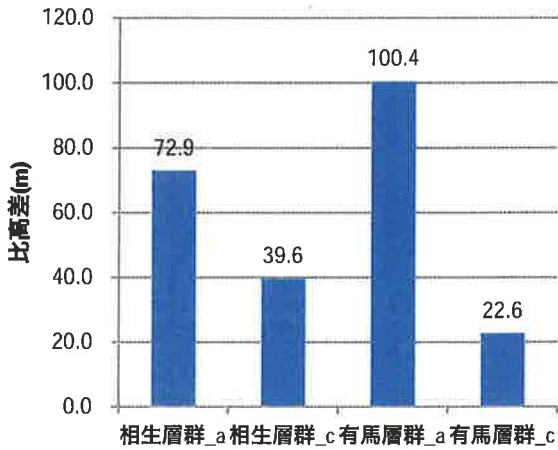


図-4. 6 崩壊タイプ毎の斜面の比高差

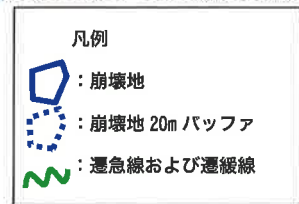
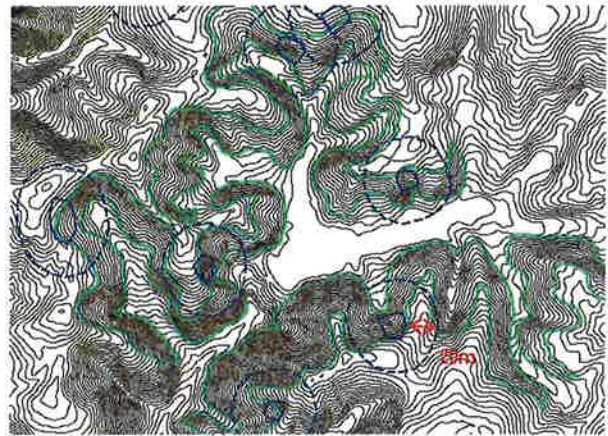
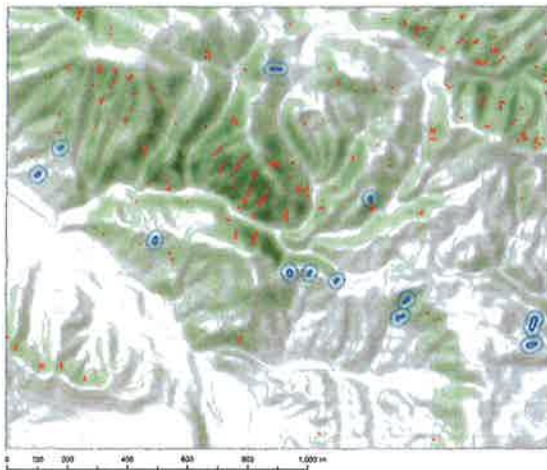
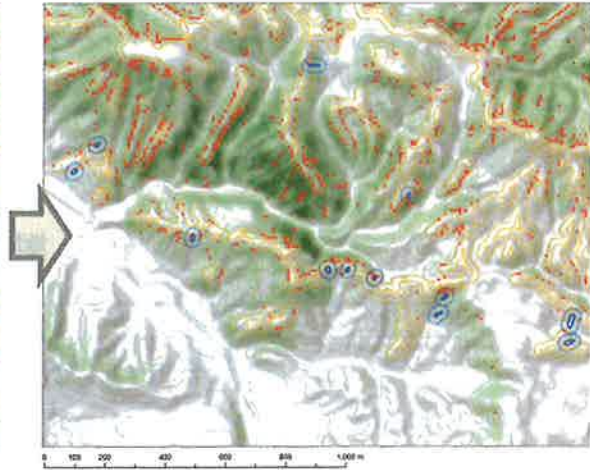


図-4. 7 有馬層群(西宮市域)における小起伏面内の遷急線周辺で発生している崩壊地



層厚・粘着力変更前(case013)



層厚・粘着力変更後(case016)

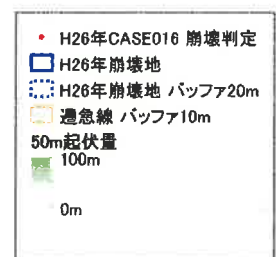


図-4. 8 有馬層群における遷急線バッファの設定による崩壊地の捕捉状況

表-4.2 物性値一覧

地質	矢田川層群	相生層群		有馬層群								
	市域	豊岡市域	上郡町域		三田市域	神戸市域		西宮市域			丹波市域	篠山市域
地質図による分類	矢田川層群	夢前系層 又坂系層		佐曾利凝灰角礫岩 玄能池砕屑岩類 塊野溶結凝灰岩	金剛童子流紋岩溶岩 塊野溶結凝灰岩 玄能池砕屑岩類 玉瀬溶結凝灰岩 僧川砕屑岩類 武田尾溶結凝灰岩		玉瀬溶結凝灰岩 僧川砕屑岩類 武田尾溶結凝灰岩			塊野溶結凝灰岩 玉瀬溶結凝灰岩		佐曾利凝灰角礫岩 塊野溶結凝灰岩 玉瀬溶結凝灰岩
地形による区分	全域	右記以外	遷急線	全域	右記以外	小起伏面	右記以外	遷急線	小起伏面	全域	全域	
1	土の単位体積重量 [kN/m ³]	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
2	土の飽和単位体積重量 [kN/m ³]	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	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 ²]	5.0	5.0	4.0	5.0	5.0	3.0	5.0	4.0	3.0	5.0	5.0
4	土の有効内部摩擦角 [deg]	32	32	32	32	32	35	32	32	35	32	32
5	有効空隙率[1]	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
6	透水係数[cm/s]	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056
7	層厚式	①相生層群・ 矢田川層群	①相生層群・矢田川 層群									②有馬層群

4.3 モデル化にあたっての留意点

兵庫県下中生代白亜紀の酸性火山岩類分布地域に沖村他¹⁾の崩壊モデルを適用するにあたって、空間的分布の異なる同時代の酸性岩類の相生層群、矢田川層群、有馬層群を地形・地質特性から整理した。その結果、地盤モデル作成にあたり、地域により地形・地質特性が大きく関わってきていることが明らかとなった。

酸性火山岩類分布地域では、10m間格子モデルにおいて5°毎の地形勾配の頻度分布図より3つのタイプにおおまかに分類できる。最も特徴的なのは、全ての市町域で、15°以下と35°~40°の斜面勾配の2ピークを有するバイモーダル型を示していることである。そのなかでも高角度の顕著なピークが認められず、15°以下の斜面が卓越するものもある(低角度優先型)。次に40°~45°を1ピークとする高角度突出型である。これらを地域ごとの特性として表-4.3に整理した。

表-4.3 地域別地形特性

地域	地形傾斜分布	崩壊傾斜分布	崩壊タイプ	地層名称
上郡	中間型	正規分布型	a b c d	相生層群
神戸	中間型	正規分布型	a b c d	有馬層群
三田	中間型	卓越角度型	b	有馬層群
篠山	中間型	卓越角度型	b	有馬層群
丹波	高角度突出型	卓越角度型	b	有馬層群
西宮	低角度優先型	バイモーダル型	a b c d	有馬層群
豊岡	高角度突出型	卓越角度型	b	矢田川層群

次に各地域の崩壊特性をとりまとめた結果、丘陵地の崩壊位置により4つのタイプ(a, b, c, d)に分けることができる(図-3.1)

このなかで、崩壊地の傾斜角分布がバイモーダル型ならびに正規分布型である地域は、崩壊タイプa, b, c, dのすべての崩壊タイプが分布していることが明らかであり、卓越角度型はbタイプの崩壊が優勢である。

全体的な分布としてa, cタイプの崩壊が多いが、凝灰岩等砕屑岩系の風化しやすい地層に崩壊が集中している傾向がある。

モデル化に際して十分に留意するケースとしてはパイモーダル型と正規分布型の地域である。特に崩壊斜面角度が卓越するタイプではなく崩壊角度幅が広く正規分布するタイプについては、見逃しが多くなる傾向がある。すなわち斜面の角度に対して、地下水の上昇や、層厚では説明できない地形が発生する。この場合のモデル作成としては、現状せん断強度定数で調整し、せん断強度定数のうち粘着力を低減し、安全率を下げる処理をしている。しかしながら斜面の角度が緩くなるのに対して崩壊が発生する原因は、内部摩擦角の低減を考慮すべきであるのに対して、粘着力のみの低減の意図が明確でない。その点は今後の研究課題とする。

また西宮市域の S42 年災害と H26 年災害の崩壊地のように、同じ市域でも災害によって崩壊地の傾斜角の頻度分布が異なる。これはそれぞれの降雨イベントの波形が異なることが一因と考えられ、今後降雨パターンによる崩壊特性の違いについても合わせて検討していく。

一方これらの火山岩類を地形地質的な分類により、パターン化してきたことは、同時代の火山岩類である生野層群、湖東流紋岩類などにも反映することができる。さらに 2010 年の 7.16 庄原ゲリラ豪雨、2013 年の島根・山口豪雨災害等の対象となった中国地域の高田流紋岩類、阿武層群などに反映できるものと考えられる。

5. おわりに

今後沖村他¹⁾が勧めるリアルタイムハザードマップシステムの地盤モデル作成にあたり、今回分析したような地形・地質学的手法がさらに他の地層、例えば第三紀堆積岩類等のケスタ地形等の特徴的な地形を有する地層群等に展開できるようになることが期待できる。その上でのモデル化手法の、マニュアル化を進めていけたらと考える。

本報告を執筆するにあたり、神戸工業高等専門学校鳥居教授、国際航業株式会社原口様、株式会社ダイヤコンサルタント鏡原様には貴重なご意見をいただき深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 沖村孝・市川龍平：数値地形モデルと潜在崩土層厚による雨水の飽和横流れ浸透流解析、土木学会論文集、1985
- 2) 沖村孝・鳥居宣之・南部光弘・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
- 3) 沖村孝・鳥居宣之・南部光弘・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
- 4) 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
- 5) 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、91-115、2013
- 6) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則、笠原拓造、山内政也、嵯峨根月子、伊藤正美：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、2014
- 7) 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(6)、建設工学研究所論文報告集、57、91-115、2015
- 8) 吉田久昭・河田清雄：兵庫県東部、篠山・三田間における有馬層群の概要、地質調査所月報、38、8、427-441、1987
- 9) 猪木幸男・弘原海清：上郡地域の地質、地域地質研究報告(5万分の1図幅)、地質調査所、1-81、1980
- 10) 栗本史雄・松浦浩久・吉川敏之：篠山地域の地質、地域地質研究報告(5万分の1図幅)、地質調査所、1-93、1992
- 11) 藤田和夫・笠間太郎：神戸地域の地質、地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)、地質調査所、1-115、1983
- 12) 尾崎正紀・松浦浩久：三田地域の地質、地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)、地質調査所、1-93、1988
- 13) 弘原海清、松本隆：北但地域の新生界層序-近畿西北部の新生界研究(その1)、地質学雑誌、64、625-637、1958
- 14) 笠間太郎：西宮市史、西宮市、1、193-197、1959
- 15) 松浦浩久・栗本史雄・寒川 旭・豊 遙秋：広根地域の地質、地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)、地質調

査所、1995

- 16) 藤田和夫・笠間太郎：大阪西北部地域の地質、地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)、地質調査所、1982
17) 兵庫県砂防課：土砂災害防止法基礎調査マニュアル(案)、2005

著 者

- 沖村 孝 所員，理学博士，地盤工学
中川 涉 客員研究員，応用地質株式会社，博士(工学)，地盤工学
北田 憲嗣 応用地質株式会社，技術士(応用理学部門)，地質学
嵯峨根 朋子 応用地質株式会社，技術士(建設部門)，地方計画学
伊藤 正美 応用地質株式会社，技術士(建設部門)，森林水文学