

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マップシステムの検討 —地形地質条件のモデル化—

窪田 安打*・野口 良彦**・岡本 由貴*・中川 渉*

Discussion of Real-time Type Hazard System to Predict Landslides Caused by Heavy Rainfalls —Modeling of Topographical and Geotechnical Information—

Yasu'uchi KUBOTA*, Yoshihiko NOGUCHI**, Yuki OKAMOTO* and Wataru NAKAGAWA*

Abstract

Due to recent increase in intensity of heavy rain, landslide disasters have been occurring in various regions in Japan, causing extensive property damage and human suffering. In order to diminish such damage, it is necessary to construct an appropriate hazard system which can evacuate residents properly from dangerous sites by means of spatial and time prediction of landslides. From April 2010, Hyogo Prefecture has started tentative operation of a real-time type hazard system developed by Hyogo Prefecture and Okimura et. al. for the Rokko mountain area. The hazard system utilizes a risk prediction method of surface soil failure using digital elevation model (DEM). This method estimates quantitatively the risk of slope failure by the seepage flow analysis and the infinite-length slope stability analysis using input data of topography, geotechnical information, and rainfalls. The validity of the hazard system has been proved by consistency of the predicted results and the actual landslide data caused by the heavy rainfall in July, 1967. This paper shows contents of the hazard system, particularly the modeling of topographic data and geotechnical information.

Keywords: heavy rainfalls, slope failure, topographic classification, real-time type hazard system, prediction information, evacuation

(要 旨)

近年、集中豪雨が従来にも増して激しくなっており、これにより各地で土砂災害が発生し、人的・物的被害が生じている。災害がどこで起こるのかという「場の予測」だけでなく、いつ起こるのかという「時の予測」も重要であり、これらを把握して危険な状態をいち早く察知し、住民を適切に避難させる仕組みを必要としている。この仕組みの導入を目指して、兵庫県、沖村他¹⁾は表六甲地域を対象としてリアルタイム型のハザードシステム（六甲山系土砂災害危険度予測システム）を構築し、兵庫県は平成22年度より試験運用を開始している。本システムは、数値地形モデル（DEM）を用いた表層崩壊危険度予測手法を採用している。この手法は数値地形モデルのセルごとに地形、地盤、降雨等のデータを入力条件として、浸透流解析と無限長斜面安定解析により、降雨に伴って刻々と変化する斜面崩壊の危険度（安全率）を定量的に評価するものである。本論文では、システムの内容について述べるとともに、表六甲地域の地形地質条件や災害特性をモデル化することで、地域特性をより反映した入力条件を整理したことを述べる。特に、安定解析結果に大きな影響を与える表土層深データの

* 応用地質(株)関西支社 ** 応用地質(株)データベース事業部

*** OYO Corporation

検討、地盤物性データを選定して、地形地質条件のモデル化を行なったことを示す。モデル検証の結果、表土層深の設定には、現地調査資料による設定だけでなく、再現計算による見直しが必要であった。このため、山地において現地状況をより適切で手軽に把握できる調査方法や、調査結果から適切な表土層深を地形・地質に応じて評価するための方法を確立することが、今後の課題である。

キーワード：豪雨、斜面崩壊、地形区分、リアルタイムハザードシステム、予測情報、避難

1. まえがき

近年、集中豪雨が従来にも増して激しくなっており、これにより各地で土砂災害が発生し、人的・物的被害が生じている。兵庫県では、平成 21 年の台風第 9 号に伴う集中豪雨により、兵庫県西、北部地域で土砂災害が発生している。このような土砂災害による被害軽減のためには、平成 13 年の「土砂災害防止法」の施行以降、災害がどこで起こるのかという「場の予測」だけでなく、いつ起こるのかの「時の予測」も重要であり、これらを把握して危険な状態をいち早く察知し、住民を適切に避難させる仕組みを必要としている。この仕組みの導入を目指して、兵庫県が財団法人建設工学研究所へ業務委託して、沖村他¹⁾は表六甲地域を対象としてリアルタイム型のハザードシステム(六甲山系土砂災害危険度予測システム)を構築した。これにより、兵庫県は平成 22 年度より試験運用を開始している¹⁾。本論文は、先ずこのシステムの概要について述べる。次に、表六甲地域の花崗岩分布域をモデル化するにあたり、表土層深の検討および表土の地盤物性データの選定に関する内容を示した上で、実解析により得られた結果と生じた課題を示す。

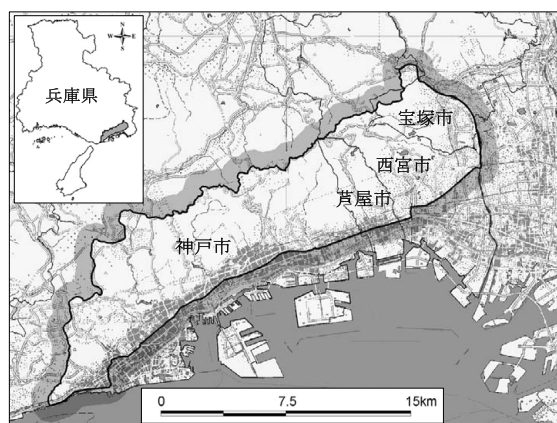


図-1 対象地域

Fig. 1 Objective area

2. 表六甲地域におけるシステムの概要と検討の流れ

2.1 自然斜面の表層崩壊の検討について

降雨による自然斜面の表層崩壊のメカニズムについ

て、飯田²⁾は、①地下水(間隙水圧)の上昇による有効応力の低下、②水みちの閉塞に伴う過剰間隙水圧の発生による有効応力の低下、③地下浸食と土層全体の沈下に伴う過剰間隙水圧の発生による有効応力の低下、④飽和度の増加(サクシジョンの低下)によるみかけの粘着力低下、⑤地下水位の上昇や飽和度の増加に伴う自重増加、を挙げている。このため、凹状の集水地形では雨水を集水して、地下水位が高まりやすく、表層崩壊が発生しやすい。加えて、斜面勾配がより急勾配である箇所や、表土層深がより厚い箇所は、相対的に滑動力が大きいいため、表層崩壊が発生しやすい。

このような一般的傾向はわかっているが、現在力学的解析法を用いた危険度予測システムが、実務レベルで運用されているものは殆どなく、未だ研究段階である。

2.2 表六甲地域における解析モデル

表六甲地域におけるシステムでは、図-2に示すように沖村・市川³⁾が提案している数値地形モデル(DEM)を用いた表層崩壊危険度予測手法を用いており、自然斜面の崩壊メカニズムは地下水の上昇による有効応力の低下を考えている。この手法は数値地形モデルのセルごとに地形、地盤、降雨等のデータを入力することにより、降雨に伴って刻々と変化する斜面崩壊の危険度(安全率)を定量的に評価するものである。すなわち、経時的に変化する降雨量を入力することで図-2に示す集水モデルによる浸透流解析を行い、無限長斜面安定解析(Infinite Slope Stability Analysis Method: INSSAM)を実施して各セルの危険度を求めるものである。水収支の連続の条件の式(2)は、各セルのX方向の水の増分、Y方向の水の増分、さらにセル内に降ってきた雨の増分を評価するもので、地表面から地下水面までの不飽和浸透を考えない条件でダルシー則の式(3)により解析する。次に、斜面安定解析モデルによって、地下水位の上昇に伴う単位体積重量の増加、間隙水圧の上昇(有効応力の低下)を求め、セルごとの安全率の変化を算定する。

安全率の算定は下記の式(1)によって行っている。

$$SF(t) = \frac{c_s + \{(\gamma_{sat} - \gamma_w)h(t) + \gamma_t(H - h(t))\} \cos^2 \beta \cdot \tan \phi}{\{\gamma_{sat} \cdot h(t) + \gamma_t(H - h(t))\} \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (1)$$

$SF(t)$: 時刻 t におけるセルの安全率
 C_s : 土の粘着力 (kN/m^2)
 ϕ : 土の内部摩擦角 ($^\circ$)
 $h(t)$: 時刻 t における地下水位 (m)
 γ_{sat} : 土の飽和単位体積重量 (KN/m^3)
 γ_i : 土の湿潤単位体積重量 (KN/m^3)
 γ_w : 水の単位体積重量 (KN/m^3)
 H : 表土層深 (m)
 β : 基岩斜面の傾斜 ($^\circ$)

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r \quad (2)$$

$$q_x = h \cdot k \cdot I_x \quad q_y = h \cdot k \cdot I_y \quad (3)$$

h : 表土層深の地下水位 (m) I : 動水勾配
 q : 単位時間あたりの単位幅流量 (m/hr)
 r : 地下水位上昇に直接寄与する有効降雨強度 (m/hr)
 k : 透水係数 (m/hr) λ : 有効間隙率
 ※添字 x, y はそれぞれの方向成分を表わす

上記のモデルでは入力データが比較的少なく、短時間で広域の安全率変化が求められるのが特徴である。また、植生データについては経年的に変化するものであり、この影響度を経時的に定量評価するのが難しいと考え、現段階では考慮しない。

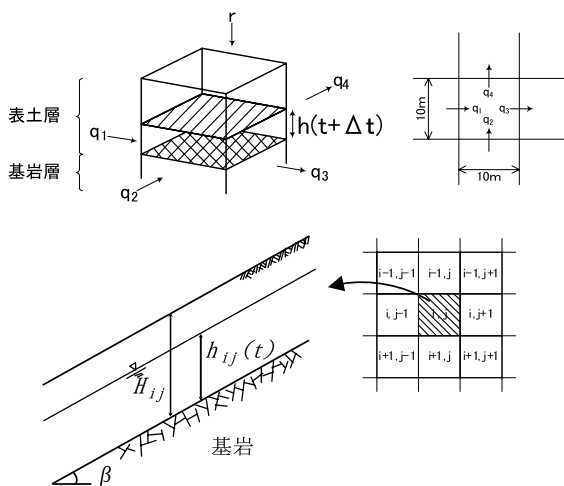


図-2 解析モデル⁴⁾
 Fig. 2 Analysis model

2.3 検討の流れ

モデル作成は、図-3に示すように、地形地質、既往災害・調査資料を利用して、入力データを検討する。

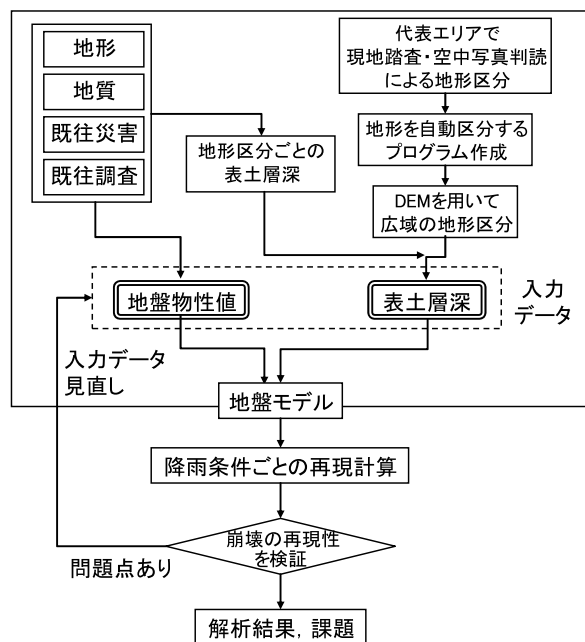


図-3 モデル作成の流れ
 Fig. 3 Flow of modeling

手順としては代表エリアで現地踏査・空中写真判読で地形区分する。この区分に整合するように、DEMデータから自動処理で地形区分をおこなうプログラムを作成する。このプログラムを利用して、広域の地形区分を行なう。表土層深データは、現地調査資料を利用して地形区分ごとに整理し、広域の地形区分に当てはめることで、広域の表土層深分布を整理する。また、地盤物性値は、地質条件や既往調査資料にもとづいて決定することで、地盤モデルを作成する。

3. 表六甲地域における地形地質条件

3.1 地形条件

システムに必要な地形区分は、表土層厚を推定するにあたって明瞭に区分できること、且つDEMを用いた自動抽出にも対応できることが求められる。沖村他⁴⁾は、六甲山系において顶部斜面、上部谷壁斜面などの地形区分を行い、数値地形モデルを用いて地形区分毎の表土層厚を推定し、崩壊発生位置の予測を試みている。この地形区分を参考にして、尾根部を顶部小起伏面、山腹の急峻な斜面を上部谷壁斜面あるいは下部谷壁斜面、谷沿いの緩斜面を谷底斜面と定義し区分した。

3.2 地質条件

表六甲地域の地質は、図-4に示すように、六甲山を中心に広く分布する、後期白亜紀の深成岩(山陽帯)である六甲花崗岩(主に中～粗粒の黒雲母花崗岩)、南西部の山裾付近では、後期白亜紀の深成岩(領家帯)である布引花崗閃緑岩(主に中粒の花崗閃緑岩)が分布する。また、神戸市西区を中心に、古第三紀の

堆積岩の神戸層群（主に礫岩砂岩泥岩）、第四紀更新世の堆積岩である大阪層群（主に礫岩砂岩泥岩）が分布する。この他に、六甲山南側斜面には、古生代の堆積岩である丹波層群（主に砂岩泥岩）が狭い範囲で分布する。これらの地質ごとに地形に差異が認められる。花崗岩類が分布する地域では、起伏量が大きく、神戸層群・大阪層群等の堆積岩が分布する地域では、起伏量が小さい。

表六甲地域には六甲花崗岩と布引花崗閃緑岩が広く分布しており、後者の分布域では昭和42年7月豪雨時の崩壊頻度が高く、地質性状と崩壊の関係に違いがあると考えられるため⁵⁾、六甲花崗岩とは別区分にして検討した。なお、地質の詳細な分布範囲は、表六甲地域の地質として最新成果である兵庫県土木地質図編纂委員会⁶⁾を利用した。

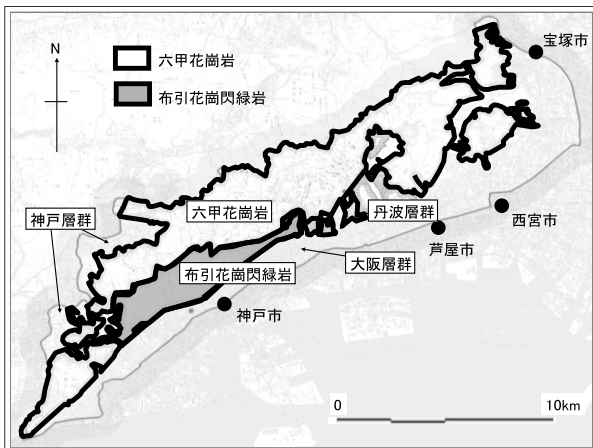


図-4 六甲山の地質分布図
Fig. 4 Geological map of Rokko mountain area

3.3 斜面災害の特徴

表六甲地域では、阪神大水害の昭和13年7月豪雨、

昭和36年6月豪雨、昭和42年7月豪雨によって、広範囲で甚大な被害が発生している。いずれも山地内で多数の斜面崩壊が発生し、各溪流で崩壊土砂の流下と土石流が発生した。

比較的新しい昭和42年7月豪雨の要因は、台風第7号から変わった弱い熱帯低気圧の影響で梅雨前線が刺激されたものである。降雨は7月9日～7月10日にかけて続き、神戸海洋気象台の観測値では、総雨量は371.7mmであった。降雨のピークは7月9日の17時頃と21時頃であり、最大時間雨量は9日17時の75.8mmであった（図-5）。また最近では、平成23年9月3日に発生した台風第12号、同年9月19日に発生した台風第15号により、表六甲地域において崩壊が数か所で発生した（図-6）。

昭和42年7月豪雨による、表六甲地域での斜面崩壊の特徴は、既往研究成果^{5).7).8)}によると、次の通りである。崩壊箇所は、表六甲地域の山腹斜面全域に発生しているが、崩壊箇所の特徴としては、布引花崗閃緑岩が分布する地域の崩壊が多く、六甲花崗岩の分布する範囲では傾斜変換点の上部からの崩壊が多くみられた。

また、地域的な崩壊地分布（崩壊密度）は、南西部で顕著にみられ、断層が卓越し急斜面の多い地域であることが一つの条件にあげられている。一方、東部の崩壊は、谷頭浸食の激しい河川源流部の急傾斜地に多くみられた。これらの崩壊規模は平均幅9m、長さ14m程度の表層崩壊であった。

4. 地盤モデルの作成

4.1 表土層深

表土層深の設定の流れは、以下の通りである。1) 表六甲地域の代表箇所を、現地踏査、空中写真判読による地形区分を行い、過去の崩壊地と地形区分の関係を整理する。2) 同範囲でDEMを用いた自動処理に

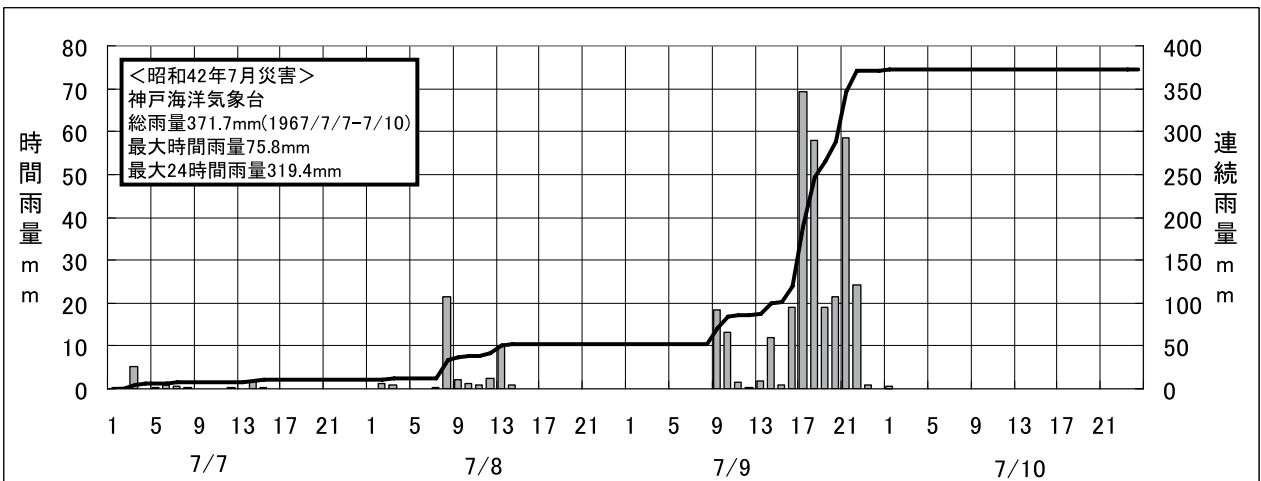


図-5 昭和42年7月豪雨のハイエトグラフ
Fig. 5 Hyetograph of the heavy rainfall in 1967 July

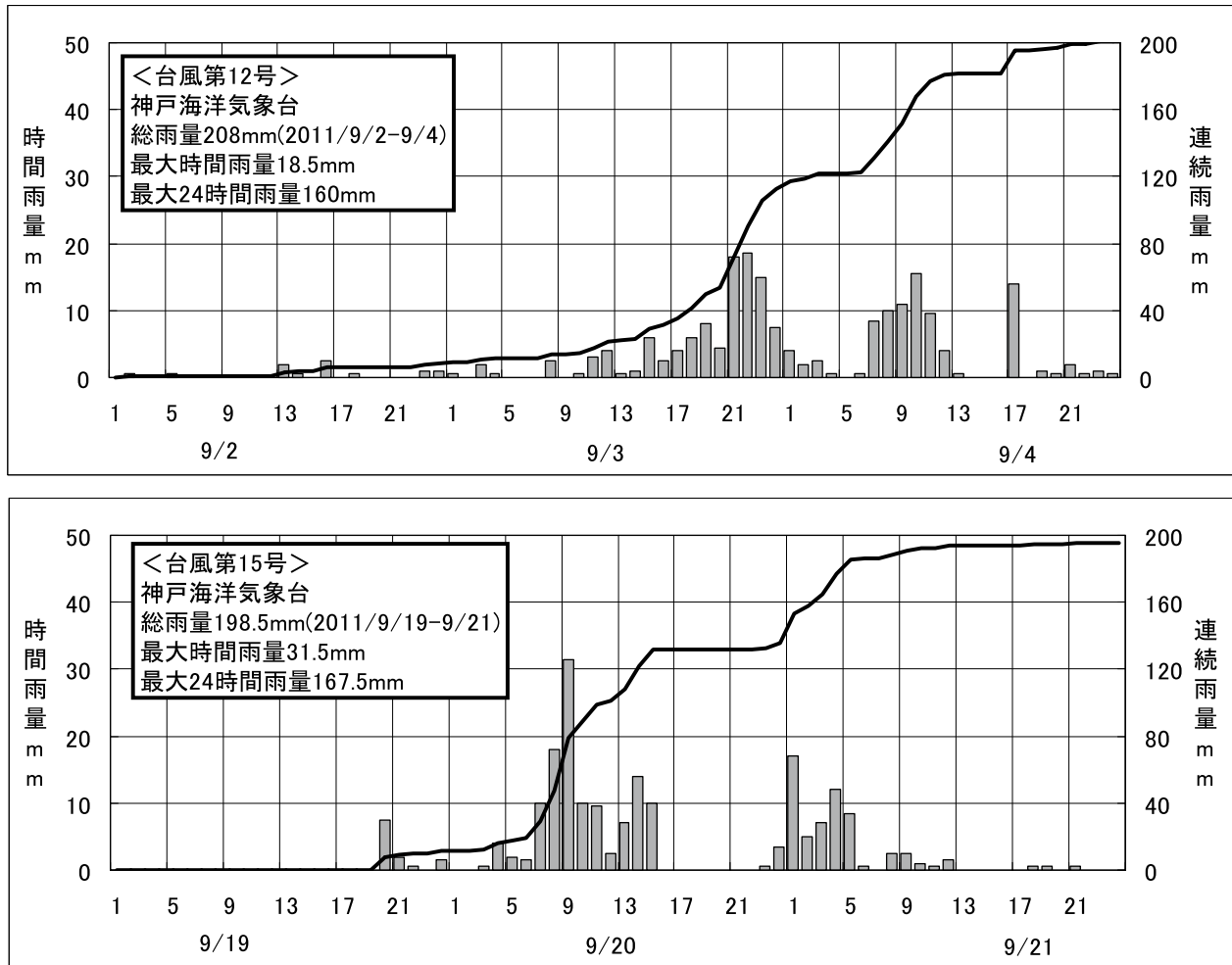


図-6 平成 23 年 9 月の台風第 12、第 15 号のハイエトグラフ
 Fig. 6 Hyetograph of the typhoon No. 12 and 15 in 2011 August

よる地形分類手法を作成し、表六甲全域の地形区分をおこなう。3) 既存資料や現地調査に基づき、地質、地形分類（頂部小起伏面、谷壁斜面、谷底斜面）ごとに斜面勾配と表土層深の関係式を作成し、この関係式を用いてセルごとの表土層深を設定する。

4.1.1 代表箇所の地形区分と既往崩壊の関係

斜面の地形区分は図-7に示すような遷急線・遷緩線による地形区分が、防災上で有効であると考えられている^{9)・10)}。日本の山地では一般に1～数段の遷急線が認められ、低位の遷急線ほど新しい時期に形成されたものである。遷急線より下側斜面の谷壁斜面は、浸食領域であり、降雨による表層崩壊の発生頻度が高いとされている¹⁰⁾。

表六甲地域の代表的な地形として、住吉川流域について、現地踏査、空中写真判読による地形区分を行なった。利用した空中写真は最も写真状況が良い昭和41年撮影（縮尺1:10,000）である。空中写真判読の際には、昭和42年災害の崩壊地を確認するために、災害直前の昭和41年撮影の空中写真と災害直後に撮影された昭和42年撮影の空中写真を比較した。その結

果を、図-8の住吉川流域の地形区分として示した。谷地形が深く、上部の遷急線が山頂近い位置に分布するため、谷壁斜面が広い面積を占める。

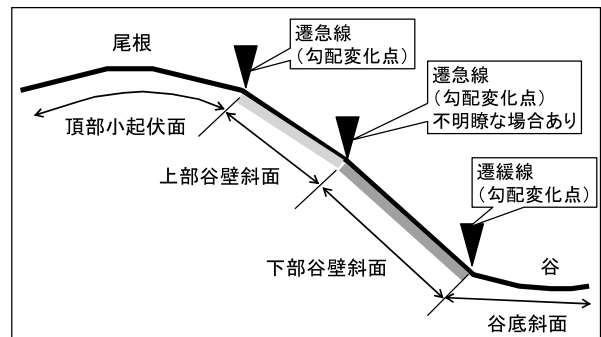


図-7 地形区分の概要図
 Fig. 7 Schematic diagram of topographic classification

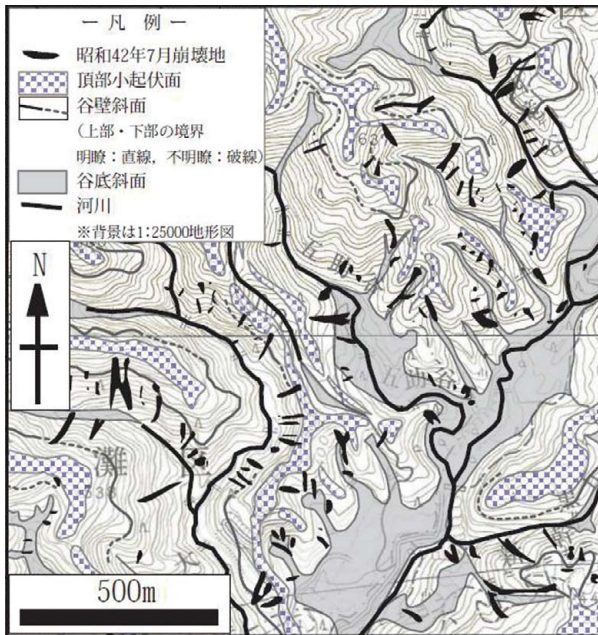


図-8 住吉川流域の地形区分と昭和42年7月豪雨の崩壊地分布
Fig. 8 Distribution of the slope failures caused by the heavy rainfall in 1967 July

頂部の小起伏面や谷底斜面は幅狭く、筋状に分布する。平野側に近い位置では、山頂と谷底の比高差が小さくなり、谷壁斜面が狭くなっている。

崩壊地と地形区分の関係は、上部・下部谷壁斜面の境界である遷急線付近から崩壊が発生し、谷底へ土砂が筋状に流下したものが多く、図-9に示すように、上部・下部谷壁斜面において斜面崩壊が集中することが確認された。この崩壊地の頻度分布は、上部谷壁斜面よりも下部谷壁斜面に集中する傾向である。しかし、両者を区分する遷急線は不明瞭な部分が多いため以降の作業では区分しないこととした。

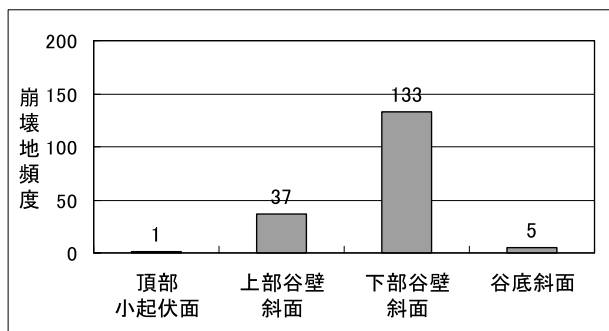


図-9 昭和42年7月豪雨による崩壊地と地形面の関係 (図-8の範囲内で計算)

Fig. 9 Relationship between the topography and the slope failures caused by the heavy rainfall in 1967 July (calculate in the range of Fig. 8)

4.1.2 地形区分の自動処理

地形分類の手法は、前述のような現地踏査あるいは空中写真判読による人為的手法のほかに、DEMを用いた自動処理がある。ここで用いた手法は、南北、東西方向の地形断面に対して高速フーリエ変換してスムージングした断面を二次微分、三次微分することで、極大値、極小値を求め、その値が一定のしきい値以上となるものを谷底斜面、また他のしきい値以下となるものを頂部小起伏面、それ以外を谷壁斜面とした。すなわち、二次微分値がゼロになる箇所かつ、三次微分値が極大値をとる箇所は谷底斜面であり、また、二次微分値がゼロかつ、三次微分値が極小値となる箇所は頂部小起伏面である。住吉川流域の地形区分と自動処理による地形区分を比較した結果、同じ地質が分布する他地域への適用が可能と判断し、表六甲全域の自動処理による地形区分を行なった。

4.1.3 地形区分ごとの斜面勾配と表土層深の関係

兵庫県内の地質区分別の表土層深と斜面勾配との関係は兵庫県¹¹⁾により示されている。しかしながら、傾斜角が30°以上に限定されており、地形区分に対応しておらず、今回の検討には適用できない。このため、簡易貫入試験について、本検討の実施データおよび、当該地域の既往データ¹²⁾を整理して、表土層深-斜面勾配の関係を取りまとめることにより、地形区分や地質区分に応じた表土層深を設定することとした。沖村他¹³⁾は、表六甲地域のマサ土層の表層崩壊について、簡易貫入試験のNd値が12以下の深度までの土層が表層崩壊の深度に概ね対応すると述べている。そこで図-10に、簡易貫入試験の打撃回数が12以下の深度を表土層深と見なし、試験箇所の斜面勾配の関係をプロットした。図-10は当該地域の花崗岩類分布域における地形区分毎の表土層深-斜面勾配であり、六甲花崗岩と布引花崗閃緑岩を一括したものである。なおNd値は、簡易貫入試験において10cm毎の貫入に必要な打撃回数である¹⁴⁾。図-10はばらつきが大きい、地形区分ごとに、斜面勾配と表土層深の関係として平均的な関係を折れ線で示し、これらの折れ線をまとめて図-11に示した。

以上の地形区分ごとの表土層深と斜面勾配の関係を自動処理により作成した表六甲全域の地形区分ごとに適用することで、全域の表土層深データを作成した。

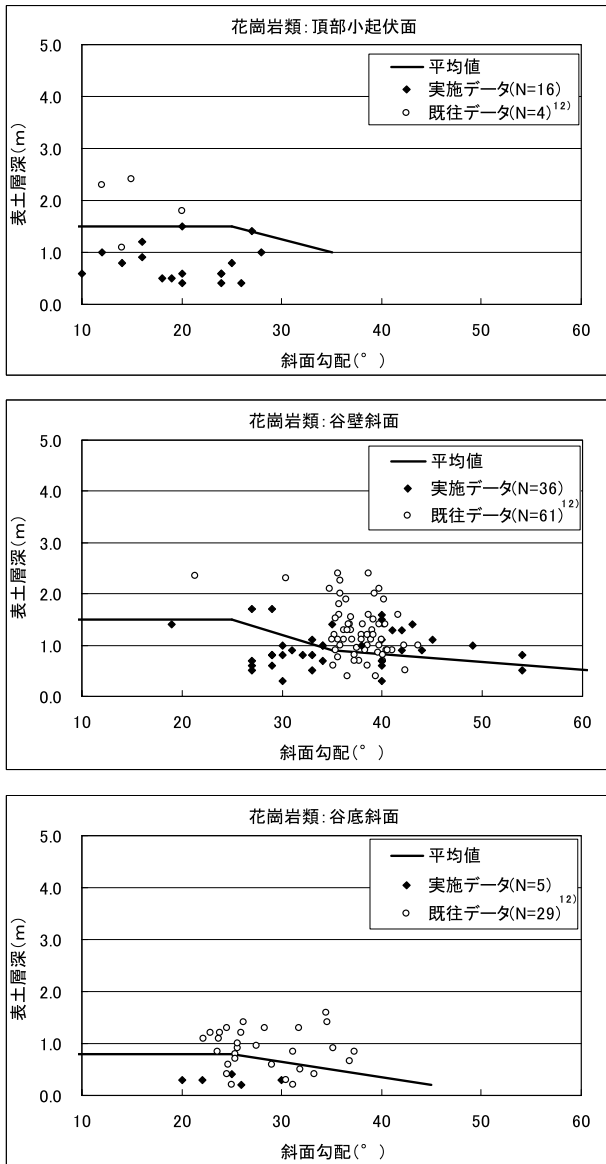


図-10 表土層深-斜面勾配の関係
Fig. 10 Relationship between surface layer depth and slope degree

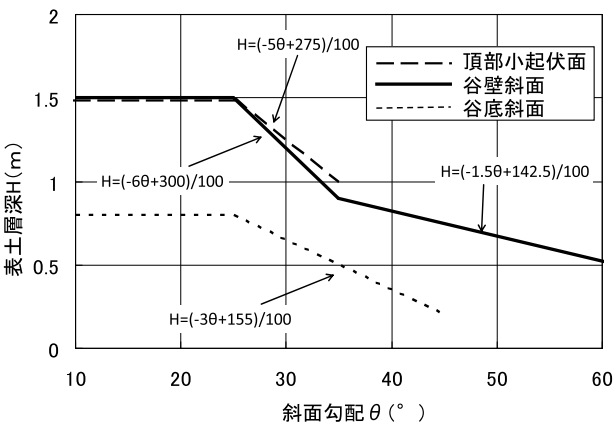


図-11 地形分類ごとの表土層深と斜面勾配の関係
Fig. 11 Relationship between surface layer depth and slope degree for each topography

4.2 地盤物性値

対象となる花崗岩類の表土層 (Nd 値 12 以下) の有効粘着力, 内部摩擦角等の地盤物性値は, 沖村他¹⁾, 兵庫県¹⁵⁾, 西田¹⁶⁾により求められている。また本検討では, 現場透水試験による表土層の透水係数を実測した。試験方法は GL-0.5 m 付近の表土層に対して, 簡易ピット式変水位法とした。

このうち, 沖村他¹⁾が六甲花崗岩の表土層を対象にした試験結果であるため, これを六甲花崗岩のモデルの地盤物性値として採用した。また, 布引花崗閃緑岩の表土層は, 基本的には六甲花崗岩に類似するが, 母岩の鉱物が六甲花崗岩に比べて小さいため, 表土層は比較的細粒な砂質土~粘性土となっている。このため, 内部摩擦角が相対的に小さいと考えられ, 昭和 42 年の崩壊地での逆算結果から得られた内部摩擦角を採用した。今回採用した地盤物性値の一覧を表-1に示す。

表-1 地盤物性値一覧
Table 1 Ground physical property list

項目		地質区分	
		六甲花崗岩	布引花崗閃緑岩
No.	物性値	砂質土	砂質土~粘性土
1	土の単位体積重量	[kN/m ³]	17.0
2	土の飽和単位体積重量	[kN/m ³]	19.0
3	土の有効粘着力	[kN/m ²]	5.0
4	土の有効内部摩擦角	[deg]	31.0
7	有効空隙率	[]	0.35
8	透水係数	[cm/s]	0.056

4.3 再現計算による検証

地形・地質区分に応じた表土層深と地盤物性値を初期設定した地盤モデルに, 実降雨やモデル降雨を適用して再現計算をおこなうことで, 地盤モデルの妥当性の検証と改良を行った^{17), 18)}。ここでは実降雨を適用した再現計算を示す。

検証の具体的な方法について, 実降雨は, 3.3章に示した昭和 42 年 7 月豪雨と平成 23 年 9 月の台風第 12 号, 第 15 号の降雨量を用いた。この降雨条件で斜面の安定解析を行った。この結果が, 実際の崩壊を再現できていない場合はその問題点を整理して, モデルの修正を行った。

検証の結果, 実降雨の再現計算により, 0 次谷では, 崩壊の空振り判定 (実際は崩壊していないが, 崩壊すると判定したセル) が多く発生していることが判った。主な原因は, 地盤物性値, 地下水位, または表土層深の設定の問題が挙げられる。このうち, 地盤物性値は周辺と大きな差異はない。また, 地下水位は, 0 次谷が集水地形であり高い地下水位であるため, 解析と実際に大きな差異は生じない。このため, 表土層深を実際よりも深く評価していることが原因であると考えた。このため, 0 次谷の表土層深について, 現地調

査で実施した簡易貫入試験にもとづいて、0次谷では周辺の谷壁斜面よりも表土層深が0.1m程度薄い(N=7箇所)結果を参考にして減厚することにより、再度の再現計算を行った。これにより、同地形における崩壊の空振り判定の多発を解消した。

一方、平成23年9月の台風第12号、第15号の再現計算において、昭和42年7月豪雨の崩壊跡地に空振り判定が発生していることが判った。この部分についても表土層深を実測するなどして修正して、同地形における崩壊の空振り判定を解消した。

これら0次谷および崩壊跡地の表土層深の見直しにより、昭和42年7月豪雨の再現計算による適中率(崩壊と予測して実際に崩壊したセル数+非崩壊と予測して実際に非崩壊のセル数/全セル数)は94.9%から96.3%へ向上し、空振り率(崩壊と予測して実際は非崩壊のセル数/実際に非崩壊のセル数)は4.3%から2.8%へと改善した。以上の再現計算による検証によって、地盤モデルを改良した。

5. 表層崩壊の危険度予測

昭和42年7月豪雨の再現計算を図-12に示す。昭和42年7月豪雨では、多数発生した斜面崩壊について69.9%の捕捉率(崩壊と予測して実際に崩壊したセル数/実際に崩壊したセル数)となっており、再現性の高いシステムであることを確認した。また、平成23年9月3日の台風第12号では、全地域で数箇所程度の斜面崩壊が発生した。危険度予測により崩壊を予測した箇所の一部を現地踏査した結果、3箇所での実際の崩壊を確認した。このことから、最近の降雨においても妥当な危険度予測ができることを確認した。

6. 課題

本論文では、今回検討したシステムの概要について述べるとともに、表六甲地域の花崗岩分布域を事例として、地盤モデルを作成するにあたり、表土層深の検討、および表土の地盤物性データの選定を示した。解析の結果、地盤モデルを構築する上で以下の課題が確認された。

1) 表土層深

表土層深は地形区分毎の代表区域での測定実測データをもとに広域を推定するため、詳細な地形に対して表土層深の評価ができていない。結果として、降雨に対する斜面崩壊の再現性が低下する主要因となっている。表土層深は0次谷や崩壊跡地でも変化するため、これらの地形も考慮した現地調査を行なって、表土層深を把握する必要がある。ただ、現地は山地内で調査が困難な場合が多く、従来のボーリング調査や簡易貫入試験だけでなく、その他の簡易で多数の試験を実施できる方法を選択するなどして、より現地状況を反映できる方法を確立する必要がある。

2) 表土層の地盤物性値

表土層の地盤物性値の設定について、現地試験の結果を反映できる方法を確立する必要がある。表土層は試験が難しいことから、地質ごとの既往の試験データが乏しい。このため、他地域の異なる地質で地盤モデルを検討する際は、試験方法の検討も含めて取り組んでいく必要がある。

モデルの入力条件の設定は、斜面の危険度評価結果に大きく影響する。このため、地域ごとの地形地質条件を的確に抽出して、モデル化することが、危険度予測の精度向上につながる。しかし、複雑な設定をすれば、システムの計算処理速度を低下させてリアルタイム性を損なったり、システムの導入に多大な経費と時間を要するなど、他地域への展開が難しくなる。このような点も考慮しながら、上記の課題を克服して、土砂災害に対する危険度予測、避難指示などに役立つ実用的なシステムとなるよう改良を加えていきたい。

7. 謝辞

本検討に際しては、兵庫県砂防課様、財団法人建設工学研究所理事の沖村孝神戸大学名誉教授、神戸市立工業高等専門学校の鳥居宣之准教授にご指導いただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 沖村 孝・鳥居宣之・尾崎幸忠・南部光広・原口勝則(2011):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, 砂防学会誌, **63**, 6, 4-12.
- 2) 飯田智之(2012):技術者に必要な斜面崩壊の知識, 鹿島出版会, 158-166.
- 3) 沖村 孝・市川龍平(1985):数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法, 土木学会論文集, No. 358/III-3, 69-75.
- 4) 沖村 孝・渡辺佳秀(1994):推定表土層厚を用いた崩壊発生位置の予測, 土地造成工学研究施設報告, 12, 43-65.
- 5) 黒田和男・岡 重文・桂島 茂(1970):昭和42年7月豪雨による神戸市背後の山くずれと表層地質, 防災科学技術総合研究報告, 24, 25-37.
- 6) 兵庫県土地質図編纂委員会(1996):兵庫の地質—兵庫県地質図解説書・土地地質編—.
- 7) T. Okimura(1983):Rapid Mass Movement and Groundwater Level Movement, Zeitschrift für Geomorphologie, Supple. 46, 35-54.
- 8) 高崎正義・小林基夫(1970):昭和42年7月豪雨による山地崩壊の地形的条件について, 防災科学技術総合研究報告, 24, 7-24.
- 9) 松井 健・武内和彦・田村俊和(1990):丘陵地の自然環境—その特性と保全, 古今書院, 202p.

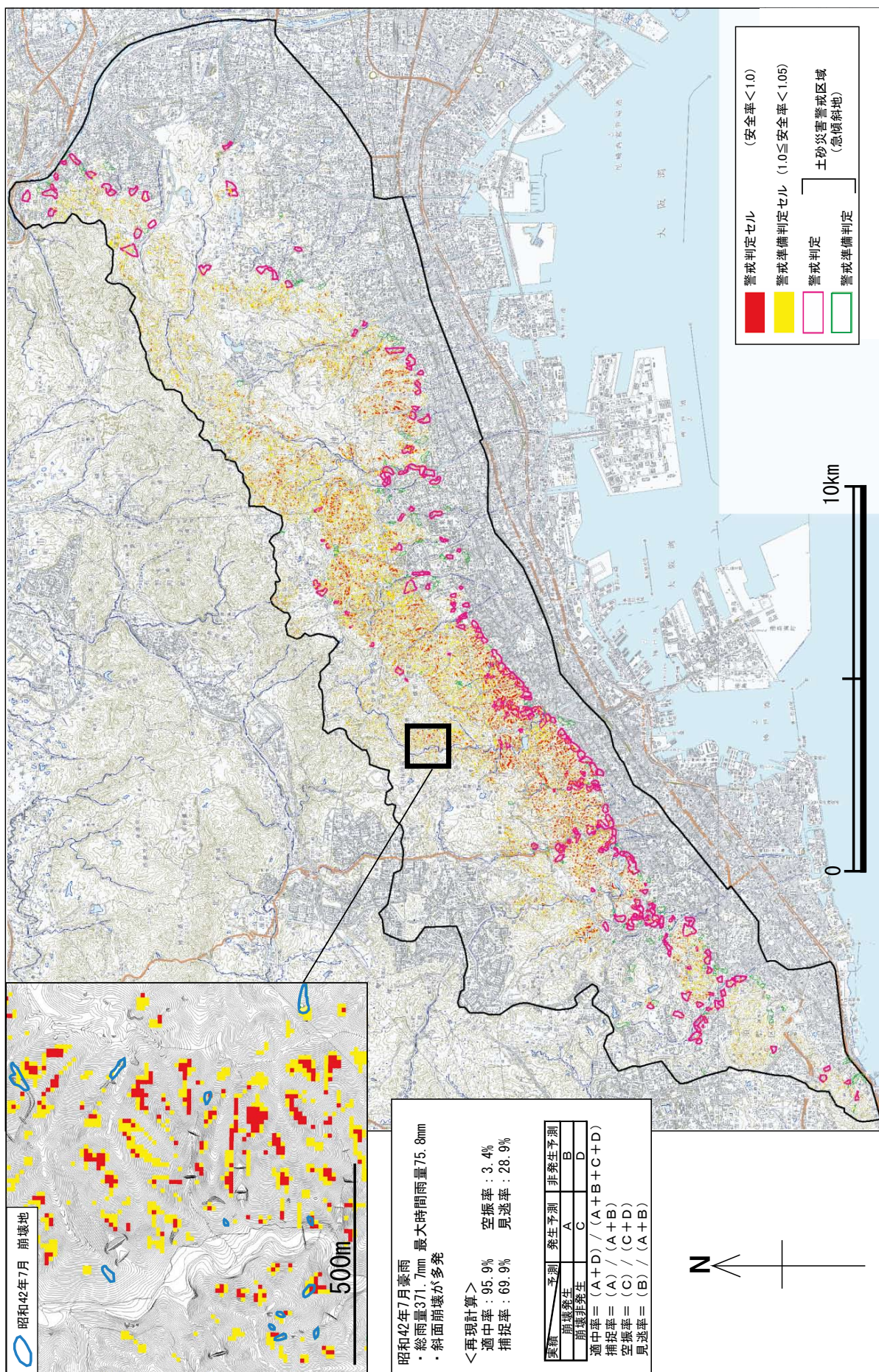


図-12 崩壊発生予測結果と実際の崩壊地の関係
 Fig. 12 Relationship of the prediction and actual data of slope failures by the heavy rainfall

- 10) 羽田野誠一(1986):山地の地形分類の考え方と可能性(要旨),東北地理,38,87-89.
- 11) 兵庫県(2005):土砂災害防止法基礎調査マニュアル(案)(その1),急傾-17-47.
- 12) 兵庫県(1997):六甲山系急傾斜地内地質調査業務,報告書.
- 13) 沖村 孝・田中 茂(1980):一試験地における風化花こう岩斜面の土構造と崩壊発生深さに関する研究,新砂防,116,7-16.
- 14) 社団法人地盤工学会(2004):地盤調査の方法と解説,274-279.
- 15) 兵庫県(2003):兵庫県基礎調査マニュアル等作成業務,報告書.
- 16) 西田一彦(1986):風化残積土の工学的性質,鹿島出版会,192p.
- 17) 沖村 孝・鳥居宣之・松本正利・南部光広・原口勝則・安武由貴(2011):豪雨時におけ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改良,平成23年度砂防学会研究発表会講演概要集,114-115.
- 18) 沖村 孝・鳥居宣之・松本正利・中川渉・原口勝則・安武由貴(2012):豪雨時におけ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改良(その2),平成24年度砂防学会研究発表会講演概要集,146-147.