

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

CONSTRUCTION OF REAL-TIME TYPE HAZARD SYSTEM OF SLOPE FAILURE DISASTERS CAUSED BY HEAVY RAINFALLS

沖村 孝¹・鳥居 宣之²・尾崎 幸忠³・南部 光広⁴・原口 勝則⁵

Takashi OKIMURA, Nobuyuki TORII, Yukitada OSAKI,

Mitsuhiro NAMBU and Katsunori HARAGUCHI

¹財団法人建設工学研究所 (〒657-0011 神戸市灘区鶴甲 1-3-10)

E-mail: okimura@kensetsuk.or.jp

²神戸大学大学院 (〒657-0013 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: torii@kobe-u.ac.jp

³兵庫県西宮土木事務所 (〒662-8503 西宮市櫛塚町 2-28)

E-mail: yukitada_osaki@pref.hyogo.jp

⁴応用地質株式会社 (〒532-0021 大阪市淀川区田川北 2-4-66)

E-mail: nanbu-mitsuhiro@oyonet.oyo.co.jp

⁵国際航業株式会社 (〒183-0057 東京都府中市晴見町 2-24-1)

E-mail: katsunori_haragudhi@kkc.co.jp

Key Words: heavy rainfall, slope failure, real-time type hazard system, prediction information, evacuation

1. はじめに

近年、集中豪雨が従来にも増して激しくなっており、これに呼応するように各地で土砂災害が発生し、人的・物的被害が生じている。兵庫県下では、平成21年の台風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、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、危険な状況をいち早く察知し、住民を適切に避難させることが必要不可欠となっている。現在、兵庫県では六甲山系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)を構築して、平成22年度より試験運用している^{1,2)}。本報告では、今回構築したこのシステムの概要について述べるとともに、六甲山系流域で発生した昭和42年災害の検証計算を行うことで本システムの妥当性を評価したこ

とを述べる。

2. 対象地域およびシステムの概要

六甲山系は、兵庫県全体の1割の面積に6割の人口が居住する人口密集地の背後に位置し、急傾斜地崩壊危険箇所の数も県全体の3割となっている。この地域の自治体からは、人口密集地での土砂災害に対する警戒避難を行う場合、現在運用されている「土砂災害情報提供システム」や「土砂災害警戒情報」だけでなく、よりきめ細かい地域を対象として、降雨情報に対応したリアルタイム型の危険度情報が強く求められている。このような背景から、兵庫県では、「六甲山系土砂災害危険度予測システム検討会」を設立し、リアルタイム型のハザードマップシステムの構築を目指して検討を行ってきた。本システムでは、「土砂災害情報提供システム」および「土砂災害警戒情報」を補足する情報として、地形ならびに地盤物性

を考慮し、気象台からの降雨情報やデジタルマップを用いた視覚的に理解しやすい土砂災害の危険度情報の発信を目指している。対象とした地域を図-1に示す。六甲山系中央付近より南側、東側エリアを対象としており、関係する市としては神戸市、芦屋市、西宮市、宝塚市の4市である。このシステムでは、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の予測手法を用いており、数値地形モデル上のセルごとに地形、地盤、降雨等のデータを入力することで、降雨に伴って刻々と変化する斜面崩壊の危険度（安全率）を定量的に評価している（図-3参照）。すなわち、降雨によって表土層内に形成される地下水位を浸透解析によって求めるとともに、それらの地下水位を用いて無限長斜面の安定解析をセル毎に行って安全率を求めるものである。

3. 入力物性値の設定

本システムで必要となる入力物性値について述べる。

3.1 数値地形モデル（DEM）

DEMのセルのサイズは、対象地域における既往の崩壊地の大きさを考慮して決定した。具体的には、国土交通

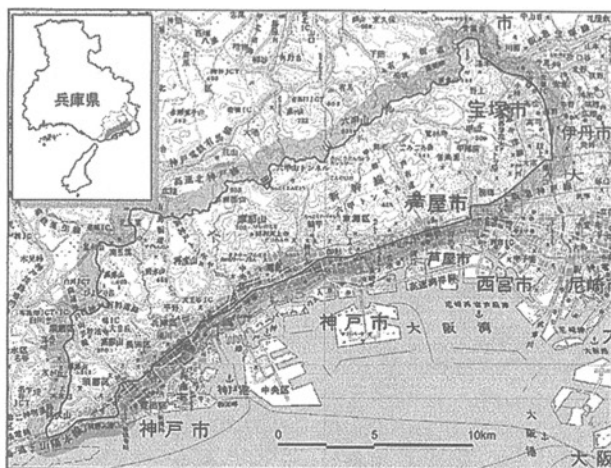


図-1 対象地域

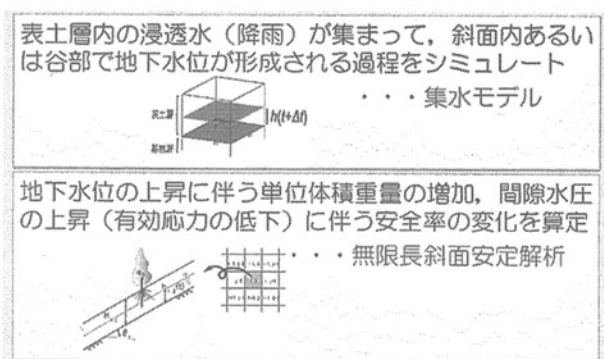


図-2 解析モデル

省六甲砂防事務所より提供いただいた航空機レーザ測量成果をもとに、10mのDEMを作成して用いることとした。

3.2 表土層深データ

表土層深は、地下水位ならびに無限長斜面安定解析の算定結果を大きく左右する重要な条件である。対象地域内の表土層深分布を知るためには、簡易貫入試験などで調査する手法があるが、六甲山全域への適用を考えた場合、多大な労力と費用を要する手法の採用は現実的な方法とはいえない。よって、表土層深の形成過程と関連深い地形分類ごとに、限られた現地データから表土層深分布を推定する方法を適用することとした。具体的には、既存資料や現地調査に基づき、地質、地形分類（頂部斜面、谷壁斜面、谷底斜面）ごとに傾斜と表土層深の関係

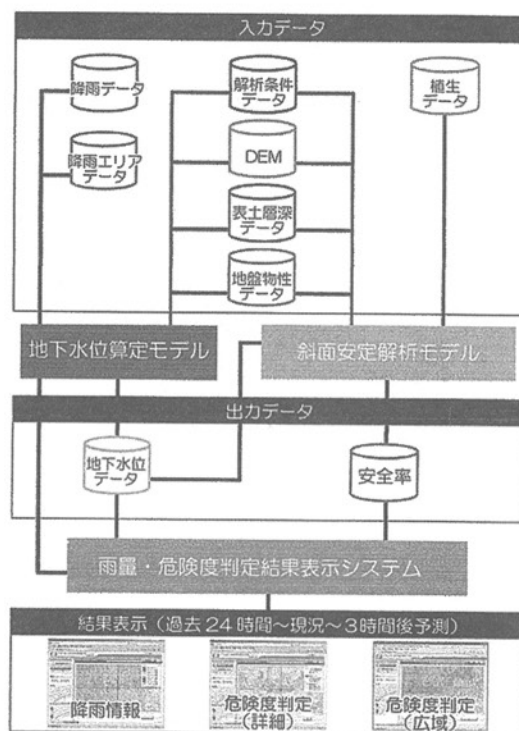


図-3 六甲山系土砂災害危険度予測システム

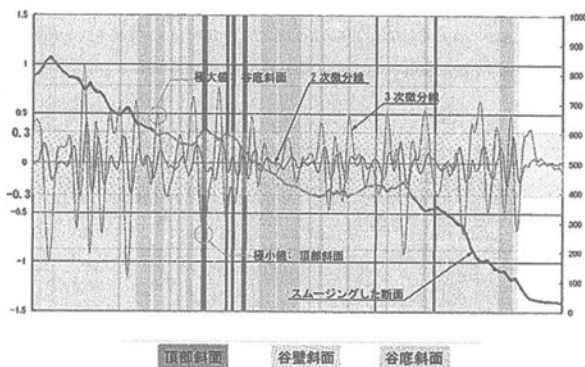


図-4 谷底斜面、頂部斜面抽出の概念

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した。また、地形分類の手法については、DEMを用いた自動処理による地形分類手法を用いた。すなわち、**図-4**に示すように、南北、東西方向の断面を高速フーリエ変換してスムージングした地形情報を二次微分、三次微分することにより、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斜面、それ以外を谷壁斜面とした。すなわち、**図-4**において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る場合がわかり、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斜面になることが概ね判別できる。このことより、**図-5**に示すフローにしたがって頂部斜面、谷底斜面を抽出し、それ以外を谷壁斜面とした。なお、**図-4**では谷頭斜面、谷頭凹地も分類しているが、有意な差が認められなかったために、谷壁斜面に分類した。

3.3 地盤物性データ

土の単位体積重量、せん断強度パラメータ、透水係数などの地盤の物性値について、対象地域内の地質区分毎に既往の研究成果や兵庫県で作成している土砂災害防止法基礎調査マニュアル等を参考に設定した。六甲花崗岩は風化するとマサ状となり、未固結の大阪層群、沖積層と同様、砂質土化するので同じ値とした。神戸層群においても砂質土化するところが多いので同値とした。一方、布引花崗岩、丹波帯は細粒化するところが多いので、 ϕ をこれよりも小さく、有馬層群では、粘着成分が高いのでCを大きくした。また同表には単位体積重量、浸透係数も示した。透水係数は一律に0.056cm/sとした。

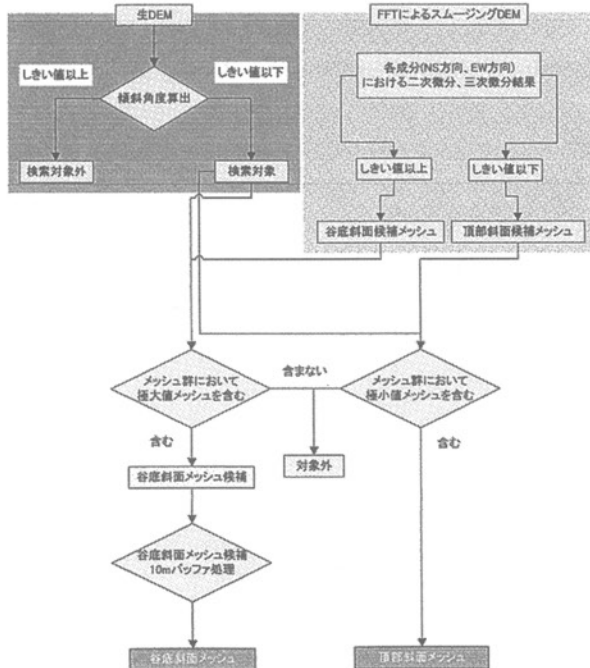


図-5 DEMを用いた自動地形分類の流れ

3.4 植生データ

植生が斜面の安定性に及ぼす影響としては、降雨の分散、根茎の引抜き抵抗⁴⁾や上載荷重の増加などの要因が挙げられる。しかしながら植生は、経年的に変化するものであり、本システムを運用していく上でのメンテナンス等を考慮した場合、その影響を定量的に評価するのは難しいと考え、現段階では植生の効果について考慮しないものとした。

3.5 降雨データ

降雨データとしては、気象台より提供される「10分間降水量解析値」と「10分間降水量予測値」を組み合わせ、国土数値情報3次格子(1kmメッシュに相当)ごとの降雨データを用いることとした。

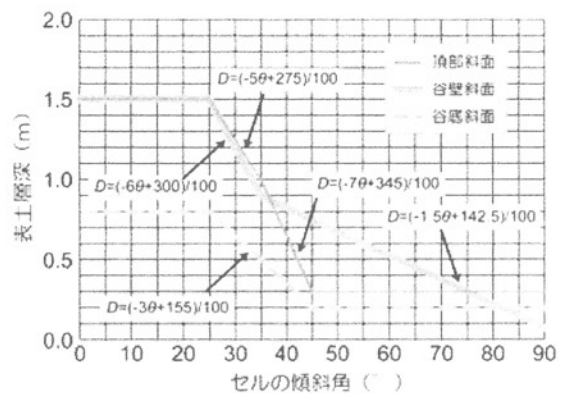


図-6 地形分類ごとの表土層深と傾斜角の関係

表-1 地質区分と地形分類ごとの地盤物性データ

地質区分	地形分類	層厚推定式	物性値	単位体積重量	透水係数
六甲花崗岩	頂部斜面 谷壁斜面 谷底斜面	図-6に示す 各地形分類の 層厚推定式	$C=5.0 \text{ kN/m}^2$ $\phi=31^\circ$	17 kN/m ³	0.056 cm/s
丹波帯			$C=5.0 \text{ kN/m}^2$ $\phi=28^\circ$	18 kN/m ³	0.056 cm/s
神戸層群			$C=5.0 \text{ kN/m}^2$ $\phi=31^\circ$	15 kN/m ³	0.056 cm/s
有馬層群			$C=7.2 \text{ kN/m}^2$ $\phi=31^\circ$	15 kN/m ³	0.056 cm/s
布引花崗岩			$C=5.0 \text{ kN/m}^2$ $\phi=28^\circ$	17 kN/m ³	0.056 cm/s
大阪層群他			谷壁斜面	図-6の層厚推定式(谷壁斜面の推定式)	$C=5.0 \text{ kN/m}^2$ $\phi=31^\circ$
沖積層地	谷壁斜面	図-6の層厚推定式(谷壁斜面の推定式)	$C=5.0 \text{ kN/m}^2$ $\phi=31^\circ$	15 kN/m ³	0.056 cm/s
各地質共通	人工改変地	図-6の層厚推定式(谷底斜面の推定式)	$C=5.0 \text{ kN/m}^2$ $\phi=31^\circ$	15 kN/m ³	0.056 cm/s
	水面	図-6の層厚推定式(谷底斜面の推定式)	$C=5.0 \text{ kN/m}^2$ $\phi=31^\circ$	15 kN/m ³	0.056 cm/s

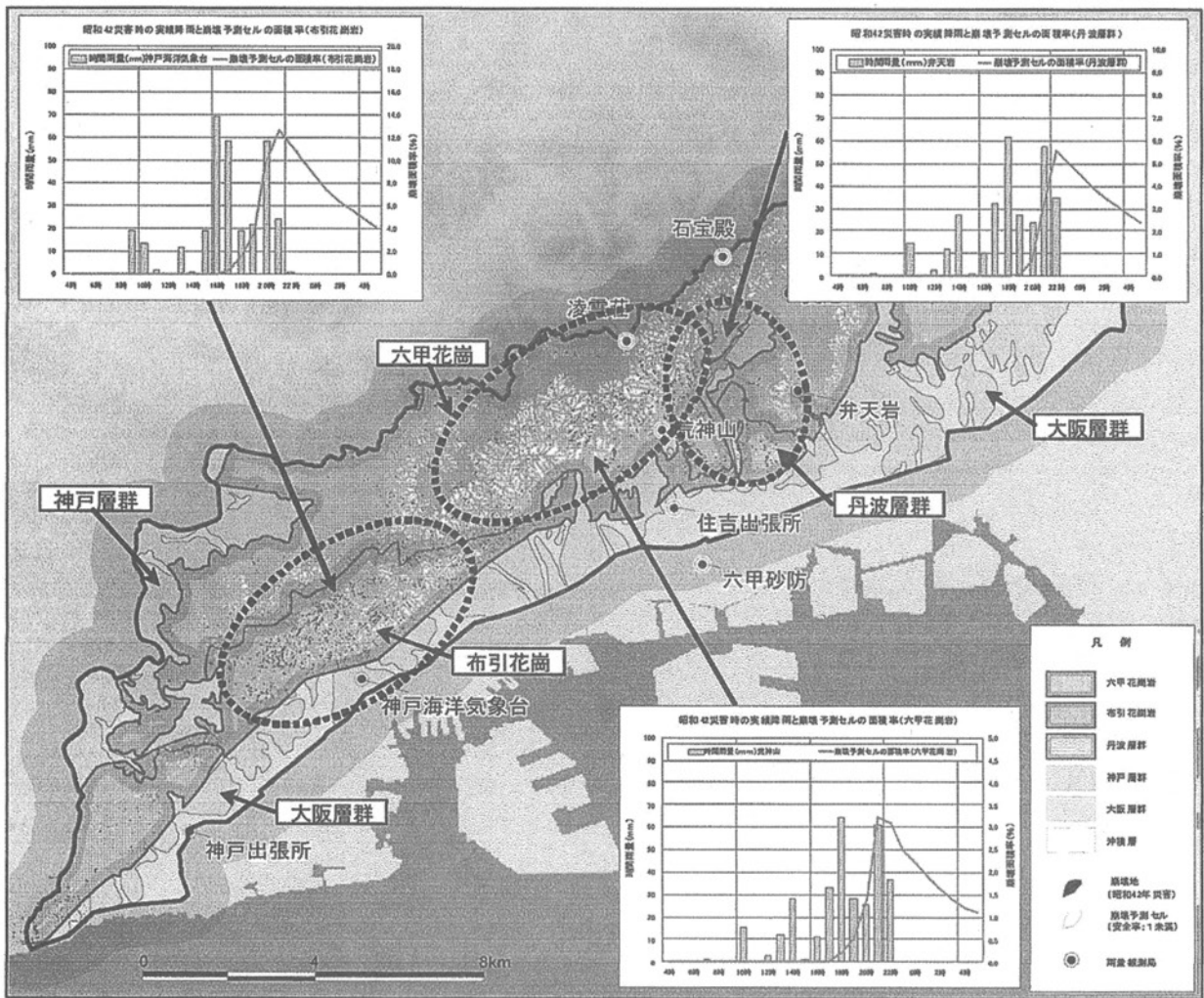


図-7 崩壊発生予測結果と実際の崩壊地の関係

4. 昭和42年災害の再現解析

六甲山系で発生した昭和42年災害の検証計算を行うことで本システムの妥当性を評価する。

4.1 入力データ

図-6に、地形分類ごとの表土層深と傾斜角の関係を、表-1に地盤物性データを示す。なお、対象地域内の人工改変地については、谷底斜面に用いた物性を用いた。また、昭和42年災害の降雨データは、対象地域周辺の雨量観測所の時間雨量を国土数値情報3次格子ごとの時間雨量に補完したものを用いた。

4.2 検証結果

図-7に、崩壊発生予測結果と実際の崩壊地の関係を、図-8に崩壊予測セル数の推移を示す。なお、図中の崩壊予測セルは、解析対象期間(7/9 4:00~7/10 5:00)中に安全率が1.0を下回ったものを崩壊予測セルとして表示している。図-7においては楕円中に存在するセルの変化を

示しており、西より布引花崗岩、六甲花崗岩、丹波層群が主として分布する領域である。同図では、各地域の時間降雨量と安全率が1を下回っている崩壊面積率の推移を示しているが、20:00~22:00にかけて崩壊が多発している。このことは、昭和42年災害における崩壊多発時刻の記録と合致しており、時刻の再現ができています。また、全体適中率(全セル数に対する崩壊予測と非崩壊予測が合致したセル数の割合)と空振り率(崩壊非発生セルに対する崩壊予測セル数の割合)を求めると、適中率は94.9%、空振り率は4.3%と良好な結果が得られた。

5. 崩壊予測システム構成

本システムは、兵庫県のフェニックス防災システムから分岐するWeb型システムとして構成され、気象台から配信される1kmメッシュ(3次メッシュ)ごとのレーダ解析雨量や予測雨量をもとに、図-8に示すリアルタイム演算処理を行う。

6. システムの機能

6.1 詳細危険度表示機能

1/10,000～1/25,000の地図を背景として、10mメッシュや土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊および土石流）ごとに、警戒（赤）と警戒準備（黄）の2種の判定表示を行うこととした。なお、危険度表示は、実況、1時間後予測、2時間後予測、3時間後予測ごとに表示し、30分毎の更新とした。

(1) 10mメッシュごとの判定表示

昭和42年災害の検証結果等に基づき、安全率が1を下回るとき警戒（赤）判定とした。また、過去の災害やモデル降雨による検討を踏まえ、警戒（赤）判定の概ね1時間前に警戒準備（黄）となるよう「 $1.0 \leq \text{安全率} < 1.05$ 」の基準を設定した（表-2）。

(2) 土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）の判定表示

図-9（上）のとおり、土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）内に10mメッシュの警戒（赤）判定が1メッシュ以上生じた場合に警戒（赤）判定とした。同様に、警戒準備（黄）の判定も警戒準備（黄）判定が1メッシュ以上生じた場合とした。

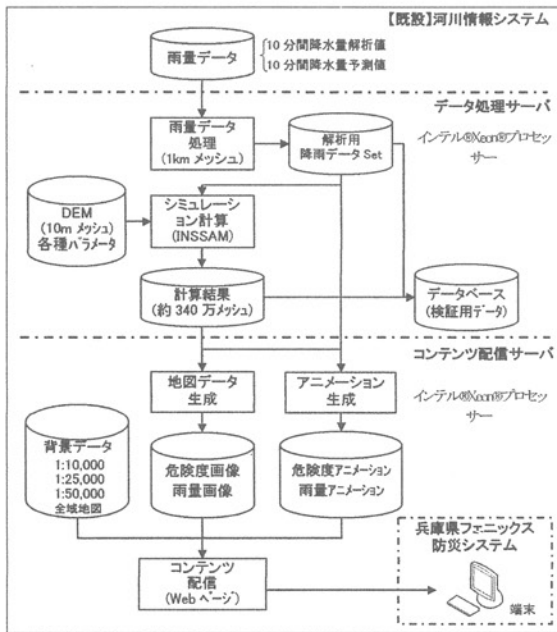


図-8 システム構成およびデータ処理フロー

表-2 表示基準

表示区分	表示色	表示基準
警戒	赤	安全率 < 1
警戒準備	黄	$1 \leq \text{安全率} < 1.05$
その他	無色	$1.05 \leq \text{安全率}$

(3) 土砂災害警戒区域（土石流）の判定表示

当該モデルでは主として表層崩壊を対象としている。昭和42年に六甲山系で発生した崩壊も表層崩壊が大半であり、それによって土石流が発生している。この時の土石流災害については、図-10に示すように昭和42年災害時における土石流発生溪流と非発生溪流について、流域面積と崩壊面積率の関係を整理した。同図では、土石流実績（著しい侵食）、土石流実績（土砂氾濫）、非発生の3種類に分けてプロットしている。この図を基に土石流発生溪流と非発生溪流の境界を著しい侵食事例の下限付近を通る線として設定した。今後の予測にあたっては、この基準線を用いて溪流ごとに危険度を判定することとした。すなわち、10mメッシュごとに崩壊危険度を判定した後に、溪流ごとに警戒（赤）と警戒準備（黄）の面

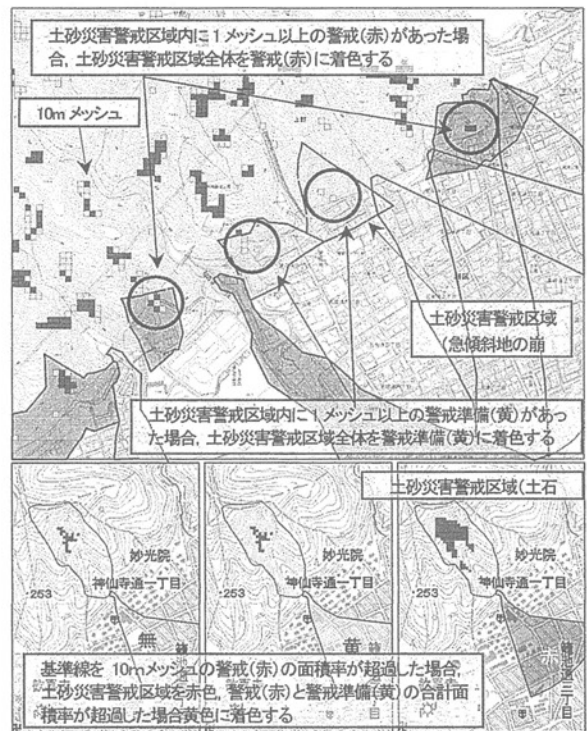


図-9 10mメッシュ・土砂災害警戒区域の判定方法

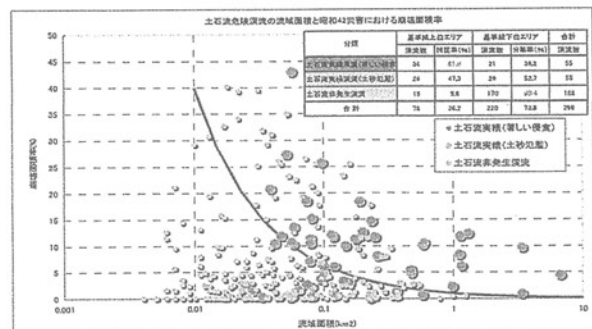


図-10 昭和42年災害における土石流発生状況と崩壊面積率、流域面積の関係

積を集計し、警戒（赤）の面積率が図-10の基準線を超過した場合、土砂災害警戒区域を赤色、警戒（赤）と警戒準備（黄）の合計面積率が基準線を超過した場合、黄色に着色することとした（図-9（下））。図-11には、これらの結果に基づく、危険度判定結果の提供画面を示した。なお、地質が異なり、深層崩壊が発生するところでは、図-11の基準線などが異なってくる。

6.2 広域危険度表示機能

雨量データと同様の1kmメッシュごとに、格子内の10mメッシュの最小安全率に応じて表-2と同様の表示を行うものとした。

6.3 その他の機能

その他の機能として、1kmメッシュごとの雨量分布表示機能やアニメーション表示機能、過去データ表示機能、画面印刷機能、表示画面の状態記録用のURL表示機能などを設けた。

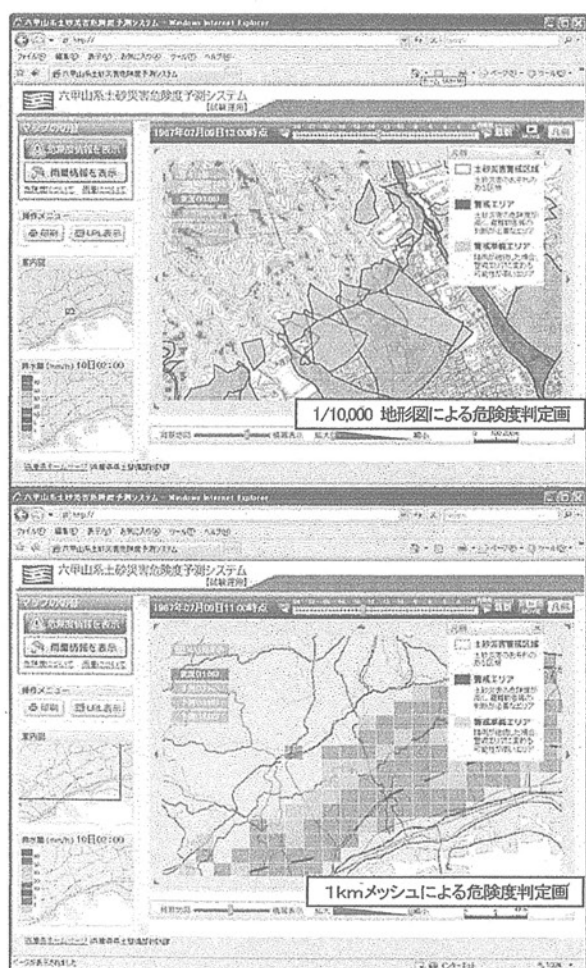


図-11 危険度判定結果の提供画面

7. システムの性能

7.1 解析速度

- ・雨量データ処理（データ変換処理） 5秒程度
- ・地下水位・安全率計算 90～120秒程度
- ・土砂災害警戒区域ごとの判定処理 10秒程度
- ・合計 105秒～135秒程度

7.2 画像生成速度

生成する画像は、全域、1/50,000、1/25,000、1/10,000の4種の背景地図と、実況、1時間後予測、2時間後予測、3時間後予測の判定結果や雨量分布との合成画像である。合成画像は解析計算と並行して順次作成され、解析計算終了後、1分程度で完備され閲覧可能となる。

8. おわりに

本報告では、現在、兵庫県が構築をした六甲山系土砂災害危険度予測システムの概要を述べ、昭和42年災害の検証計算を行うことで本システムの妥当性を評価した。パラメータの設定にあたっては、各種地質調査結果を入力し、それらを基に設定していったが、その中で勾配と潜在崩土層厚（表土層厚）との関係については実例値と予測値との整合を図るために各種計算を行い、その中で最適なものを抽出した。今後、他地域での解析結果が増えることによって、精度が向上し、より広範な地域に適用していけるパラメータ表が得られると思われる。

謝辞

本システムは、国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所はじめ関係機関の多大なご支援があって構築できたものである。ここに関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 沖村孝, 他: 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, 平成22年度砂防学会研究発表会概要集, 2010.
- 2) 沖村孝, 他: 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機能紹介, 平成22年度砂防学会研究発表会概要集, 2010.
- 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, 土木学会論文集, No.358/III-3, pp.69-75, 1985.
- 4) 阿部和時: 樹木根系が持つ崩壊防止機能の評価方法に関する研究, 森林総合研究所研究報告, No.373, pp.105-181, 1997. (2010. 5. 14 受付)