

表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築における課題と対策

SOME PROBLEMS AND MEASURES APPEARED DURING THE CONSTRUCTION
OF THE REAL-TIME HAZARD SYSTEM WARNING SLOPE DISASTERS

沖村 孝¹・鳥居 宣之²・中川 渉³・原口 勝則⁴

笠原 拓造⁵・山内 政也³・嵯峨根 朋子³・伊藤 正美³

Takashi OKIMURA, Nobuyuki TORII, Wataru NAKAGAWA, and Katsunori HARAGUCHI

Takuzo KASAHARA, Masaya YAMAUCHI, Tomoko SAGANE, Masami ITO

¹一般財団法人建設工学研究所（〒657-0038 神戸市灘区深田町4-1-1 ウェルブ六甲道2番街653-3号室）

²神戸市立工業高等専門学校（〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3）

³応用地質株式会社（〒532-0021 大阪市淀川区田川北2-4-66）

⁴国際航業株式会社（〒183-0057 府中市晴見町2-24-1）

⁵国際航業株式会社（〒660-0805 尼崎市西長洲町1-1-15）

Key Words: urban flood, simulation model, resistance rule, inundation, underground space

1. はじめに

近年、観測史上最大といった降雨量や降雨強度が報告されることが多くなっている。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壤雨量指数や降雨強度が用いられている。すなわち、これら過去に観測された降雨記録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、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警戒情報など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。これを解消するためには経験的に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格子間隔で数値化し、格子点(もしくはセルの中心点)に表土層厚を与えたモデルに、降雨を入力し、表土内を地下水が流下するプロセスも評価した浸透解析によりセルの地下水位を計算したうえで、無限長斜面安定解析式を用いて、セルごとの安全率を時系列的に計算する手法を提案した¹⁾。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代用するしかなかった。すなわち、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、高精度の地形データや降雨データ入手できるようになったことから、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のもと、筆者らは兵庫県のご協力を得て平成19年度より3箇年で「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²⁾。さらにその後、六甲

山系以外の地形・地質などが異なる地域への展開を試みている。本報告では、このモデルの構築、実用化に際して出現したいくつかの課題とその対策について報告する。

2. システムの概要

本システムは、「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。このシステムでは、図-1に示すように沖村・市川¹⁾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、降雨など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-2 参照)。また、土石流危険渓流として指定された流域ごとに斜面の危険度が高いと判定されたセルの合計面積が一定の占有率以上となったとき、土石流発生の恐れがあるとする付加的機能も有している。

システムの構築に当たっては、対象エリアで過去に発生した災害時の雨量データ(以後“検証降雨”とする)を入力し、システムによる崩壊発生予測結果と実際の崩壊発生の状況を比較することで、入力モデルの妥当性の検討を行っている。検証の結果、モデルに対して地域特性などを考慮した調整が必要だと判断された場合、それを課題として対策を講じてきた。また、試験運用期間を設けて実際の降雨に対する応答と崩壊等の発生状況を踏まえた改良も継続的に実施している。

なお、本システムの構築に当たっては、基本的に、表-1に示す方法で入力モデルの構築・入力物性値の設定を行っている。

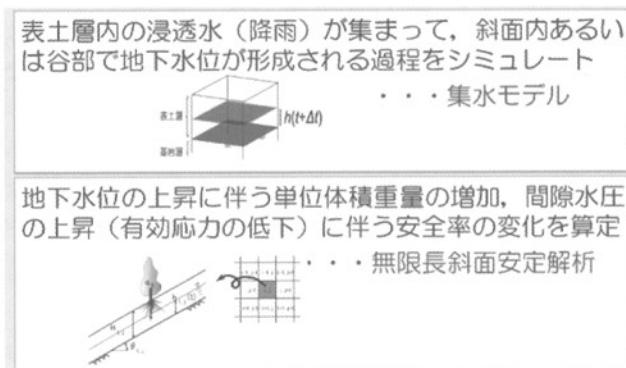


図-1 解析モデル²⁾

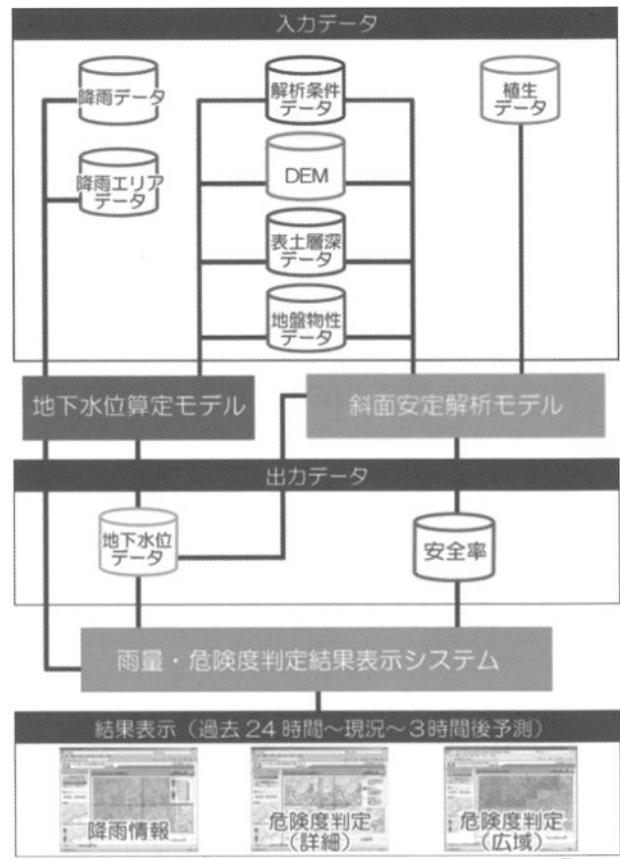


図-2 六甲山系土砂災害危険度予測システム²⁾

表-1 モデルの構築方法の概要

モデル	構築・設定方法の概要
数値地形	<ul style="list-style-type: none"> 航空レーザ測量成果をもとに 10mDEM を作成 対象地域における既往の崩壊地の大きさを考慮して格子間隔を 10m に設定
表土層厚	<ul style="list-style-type: none"> 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厚の関係式（モデル式）を作成 モデル式は、既往調査結果をもとに作成し部分的に現地調査にて確認 地形分類は、DEM データの微分により求められる傾斜およびその変化大きさから自動処理により分類
地盤物性	<ul style="list-style-type: none"> 土の単位体積重量、せん断強度定数、透水係数などの地盤の物性値について、地質区分ごとに既往の研究成果や兵庫県の土砂災害防止法基礎調査マニュアルなどを参考に設定
植生	<ul style="list-style-type: none"> 風倒木などにより植生による粘着力の低減が想定されるエリアについて、地盤の粘着力を低減
降雨	<ul style="list-style-type: none"> 気象台より提供されるレーダアメダス「10 分間降水量解析値」と「10 分間降水量予測値」を組合せて、国土数理情報 3 次メッシュ（1km メッシュに相当）ごとの降雨データを入力

崩壊危険度の予測結果は、特に表土層厚の影響を受ける。現実の表土層厚分布は大きなばらつきを示すも

のであるが、詳細な調査により層厚分布を決定することは現実的ではない。そこで、筆者らは、地形区分ごとおよび地質ごとにモデル式(傾斜と層厚の関係)を作成し表土層厚を設定している。また、地盤物性は、同じ地質内では均質としている。なお、崩壊メカニズムについては、比較的無理のないモデル化が可能な、降雨浸透による地下水位形成に伴う自重の増加と有効応力の減少としている。

また、このシステムの目的は、範囲をできるだけ限定して予測時間を含めた避難情報を提供することであるため、モデルの不確定要素も鑑み、主なアウトプットを土砂災害警戒区域ごとの判定結果としている。

3. これまでに生じた課題と対策

(1) これまでに生じた課題

2. で述べたようなモデル構築とその妥当性の検証の中で見いだされた課題のうち、本報告では表-2 に示す 6 つの課題について、その対策方法の概要を紹介する。

なお、本手法で用いている表土層厚や地盤物性の設定方法には不確定要素も多い。一方で、過去の崩壊事例は信頼できる事実であり、本研究では過去の崩壊を再現できるモデルを構築することで、モデルの不確定要素の影響を少なくし、予測結果の信頼性向上に努めている。

(2) 各課題に対する対策

a) 水系網沿いおよび急傾斜地に対する層厚の調整³⁾

空振りの発生している箇所において現地調査を実施した結果、当初作成されたモデルと比較して浸食場や露岩の影響で実際の表土層厚が浅いことが確認され、そのことが空振りの発生

につながっているものと考えた。そこで、検証降雨に対して安全率が 1 を切る表土層厚の上限値を斜面勾配ごとに逆算により求めた。同時に、水系網沿いの表土層厚に関して現地調査を実施した(図-3)。水系網沿いの表土層厚は、異常値を除くとモデル式に対して 15cm 程度薄い傾向が認められた。

逆算により求めた、水系網内で安全率が 1 を切る層厚の上限値と現地調査結果から、層厚を 15cm 減じることで浸食場の状況を反映できるものと考えた(六甲山系土砂災害危険度予測システムの事例³⁾)。

なお、露岩がみられるような急傾斜地での空振りについても、同様に現地調査による層厚確認と逆算による検討を実施し、モデル式の調整を行った。

表-2 モデルの構築上の課題

課題	主な内容
a) 表土層厚の設定	<ul style="list-style-type: none"> ○ 次谷や露岩がみられるような急傾斜地において、傾斜などから設定したモデルの表土層厚と現地状況が異なっており、比較的多くの箇所で空振りが発生。
b) 満水時の判定	<ul style="list-style-type: none"> 総雨量 400mm を超えるような状況にもかかわらず安全率が 1 を切るセルがない警戒区域(急傾斜地)が存在。 10mDEM で小規模な急傾斜地が再現できていない可能性などが課題。
c) 局所的な不具合	<ul style="list-style-type: none"> シミュレーション降雨(連続雨量 100mm と 200mm)を与えた結果、局所的な不具合が判明。 100mm で安全率が 1 を切るメッシュと 200mm で降雨終了後 24 時間以上安全率が 1 を切ったままのセルが存在。 客観的に発生を想定しにくい現象のため対策が必要。
d) 難透水層の関与	<ul style="list-style-type: none"> 同一の地質エリア全体に分布する難透水層の存在による、エリア特有の崩壊メカニズムが存在。 本システムの通常のモデルでは再現できないメカニズムであり、何らかの対策が必要。
e) 無対策の切土斜面	<ul style="list-style-type: none"> 宅地を広げるなどの目的で人家裏に存在する無対策の切土斜面では、実際に崩壊が発生。 本システムは基本的には自然斜面を対象に構築されているが、斜面崩壊が災害に直結する事象であり対策が必要。
f) 顶部小起伏面	<ul style="list-style-type: none"> ある地質が分布するエリアにおいて、地形的特徴と関連性の高い崩壊発生分布が確認されたが、本システムの通常のモデルでは再現が不十分。 地形的特徴と発生メカニズムを考慮したモデルの調整が必要。

b) 表土満水時の判定に対する不具合対策³⁾

当初の六甲地区モデルにおいて、すべてのメッシュを満水とした状態で安全率を計算したところ、926 箇所の警戒区域(急傾斜地)のうち、安全率が 1 を切らない箇所が 423 箇所にのぼることがわかった。再現計算では、実際に崩壊が起こっていないため適中との判断にはなっているものの、警戒区域においてハザード情報が出

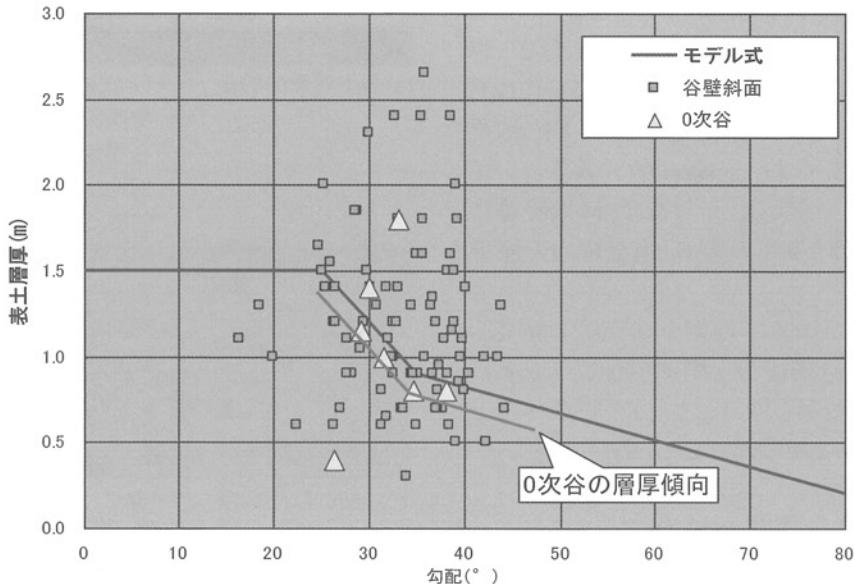


図-3 谷壁斜面における水系網沿いの勾配と表土層厚の関係

ないことは、早めの警戒避難を促すというシステムの役割として不安が残る。

この課題に対していくつかの検討を行った結果、他の地域への展開へ向けた汎用性なども考慮し、以下の方法により対象箇所を抽出したうえで、現地の地形地質条件を考慮しつつ層厚の調整を行うこととした。

① 客観的指標(地下水低下速度)による閾値の検討
満水で安全率が1を切らない警戒区域について、その区域内において集水性が高く、最も危険性が高いと考えられるメッシュを抽出する。具体的には、安全率が最も低いメッシュのうち、地形条件から集水して地下水が上昇しやすいメッシュを各区域内で最も危険なセルとして、1ないし複数抽出する。

抽出したメッシュについて、潜在的に斜面崩壊の危険性が高い箇所は、高い地下水が長時間維持される箇所であると考え、 $\Delta h/H$ (=地下水位/層厚)の時間変化を整理し、地形的な特徴を踏まえて崩壊の危険性を評価する。

危険性の評価については、地形や保全対象について対象メッシュを分類した上で、崩壊が起きやすい箇所について地下水位の時間変化をシミュレーションし、その傾向から「崩壊の危険性が低い=2時間後で $\Delta h/H=0.8$ 以下(もしくは3時間後、0.7以下)」とした。

② 閾値による崩壊の危険性が高いメッシュの抽出
①で検討した客観的指標を用いて崩壊の危険性の高いメッシュとそうでないメッシュを区分する。

③ 異常箇所の除外

地下水位の低下速度により崩壊の可能性が高いとされたメッシュの中には、以下にあてはまる箇所が存在する。

- ・対象メッシュが人工改変地に掛かっており、正確な計算ができない。
- ・上流側の表流水がまわらない。(上流側が広い道路などで明確に絶たれており、地下水低下は試算よりも早い)
- ・無関係な地形に位置する。(メッシュ位置が対象の斜面でない、区域設定のラインが他斜面に交わるなど)
これらの箇所については、不適切な評価となるため計算対象から除外する。

④ 選別された危険メッシュの層厚修正

崩壊の可能性が高いメッシュ数について、現地状況を詳細に反映させる。

これらの対応の結果、満水でもハザード情報が出ない状態となっていた警戒区域において、安全率が1未満となる箇所数が増加し、一定の改良の効果が確認された。

c) シミュレーション降雨による局所的な不具合への対策³⁾

崩壊の発生はないと考えられる連続雨量100mmと六甲地域で崩壊が出はじめると考えられる連続雨量200mmの2種類のシミュレーション降雨をモデルに与え安全率を確認した結果、当初の六甲モデルでは、100mmで安全率が1を切ってしまうセルが13セル確認された。また、200mmで安全率が1を切り、降雨終了後24時間以上経過しても1以上とならないセルが5セル確認された。

問題が確認されたセルについては、地形分類、地質、周辺の層厚との整合性について現地調査により確認した層厚にもとづき層厚を10cm薄くする処理を行った。その結果、すべてのセルにおいて問題が解決された。

d) 難透水層の影響による崩壊への対応⁴⁾

ある地質が分布するエリアについては、難透水層の上部で湧水を伴って崩壊が発生するというメカニズムが卓越していることが分かった。しかし、このメカニズムは本システムの通常のモデルでは再現することができないため、下記のような等価モデルを提案し適用している。

すなわち、この崩壊メカニズムは図-4 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考える。

このメカニズムをモデルに反映するため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 に示すように、難透水層セルへの上方セルからの浸透を、難透水層に設定した透水係数を用いて制限し、難透水層の上部に位置するセルの水位上昇を促すことで、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。

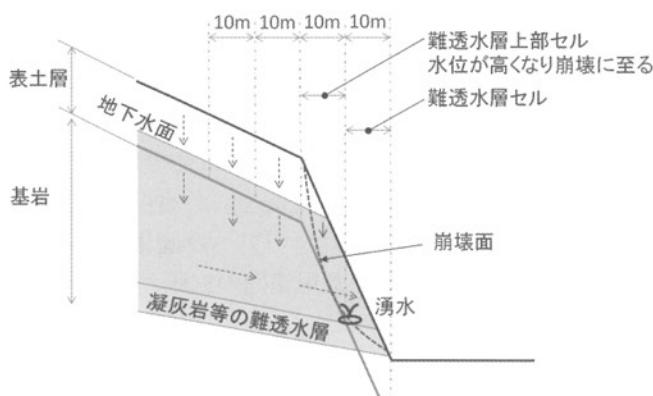


図-4 難透水層の崩壊による崩壊の模式図⁴⁾

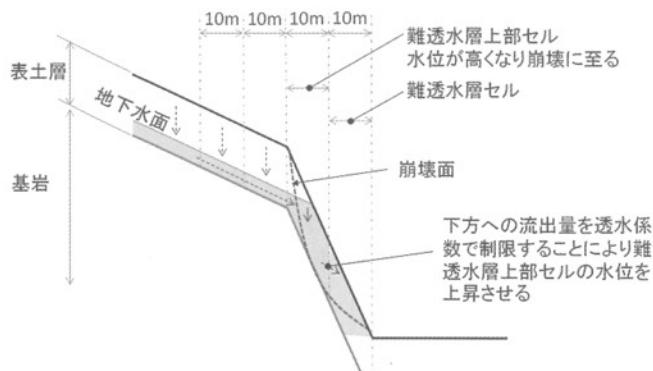


図-5 難透水層上部に位置するセルの水面上昇を促すモデルの概念図⁴⁾

なお、この改良にあたっては、各セルにおいて流出量の計算に用いる各方向(4 方向)の透水係数を設定し、流出先の透水係数が流出元の透水係数より小さい場合は、流出先の透水係数を採用するようにプログラムを改

良した。すなわち、流出先の透水係数が小さい場合、その方向へは水が流れにくくなるように計算される。

難透水層の分布については、地表地質踏査や既往調査データなどをもとに難透水層に相当する地層の分布状況を推定したうえで、その位置をセルに設定した。

また、難透水層の透水係数についても、既往資料を参照しつつ、実際の崩壊現象との整合性を確認しながら設定した。

e) 無対策の切土斜面の崩壊特性の把握と対応⁴⁾

人家裏などには、宅地面積を広げるために斜面を切り取っているものの、特に対策を施さないままの箇所が多く分布している。このような箇所では、写真-1 に示すような崩壊が実際に発生しており、人家裏であることから災害となる危険性が高いため、本システムでは、何らかの対応によって危険性を示す(安全率が 1 未満となるようになる)必要があると考えた。

現地調査や事例の検討により、人家裏の切土斜面の崩壊は、図-6 に示す 2 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、人為的な切取りにより安定性が低下している。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などにより特定し、崩壊の源頭部となり得るセルの土の有効粘着力 c を低下(地質ごとに設定した値から 1kN/m^2 低減)させることで地域特性を反映させたものとした。



写真-1 人家裏切土斜面における崩壊事例

f) 頂部小起伏面の不安定斜面の反映⁵⁾

ある地質が分布するエリアにおいては、山地に頂部小起伏面が分布するという地形的特徴を有してしており、遷急線の周辺に崩壊地が多く分布するという特徴があった。これは、遷急線周辺では、不安定な地形が影響して崩壊が発生しやすいことが考えられ、地形・地質上地域的な特性である。

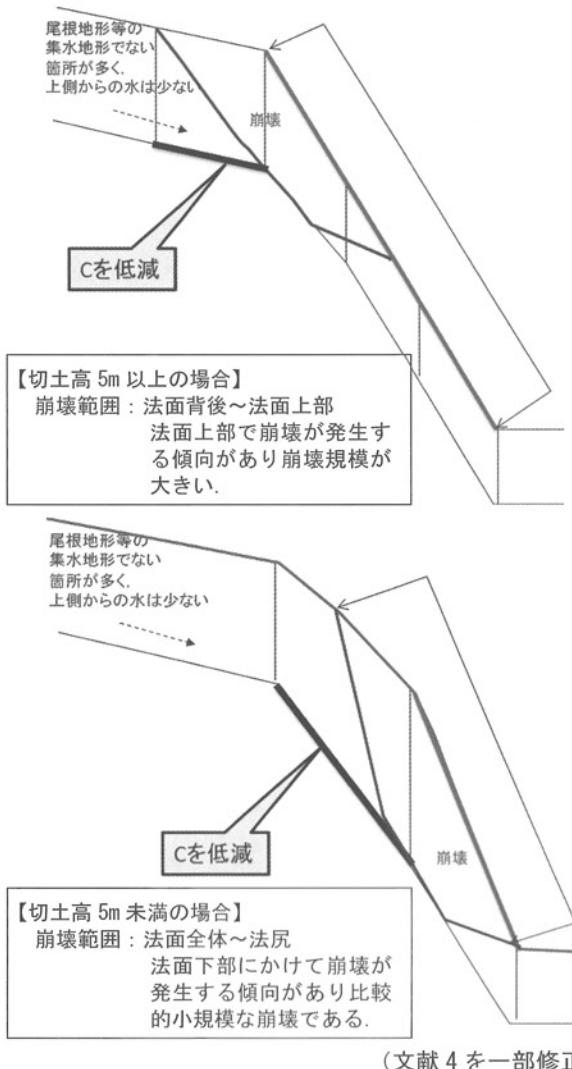


図-6 人家裏斜面の崩壊パターンとモデル改良方法⁴⁾

そこで現地調査および航空写真判読により、頂部小起伏面における遷急線の周辺、水平幅 40mの範囲が崩壊しやすい部分であり、過去の崩壊地が多く分布していることを把握した(図-7, 8)。また、調査結果ならびに逆算より、この範囲において有効粘着力 c を低減することで地域特性を反映するものとした。

なお、この対策を行うためには、遷急線の位置をモデル上に設定する必要があるが、DEM データを用いて数値解析的に抽出した。その結果、判読結果と比較しても整合性のある結果が得られることを確認した。

4. 終わりに

本報告では、筆者らが現在進めている表層崩壊のリアルタイムハザードシステムの構築における、入力モデルの精度向上のための取組みについて、その事例を紹介した。これらの課題(表-2 参照)は、開発当初「六甲山系土砂災害危険度予測システム」において、花崗岩分布エリアでの検討を行った後、異なる地形・地質および災害特性を持つ他のエリアへ適用を拡張する中で明ら

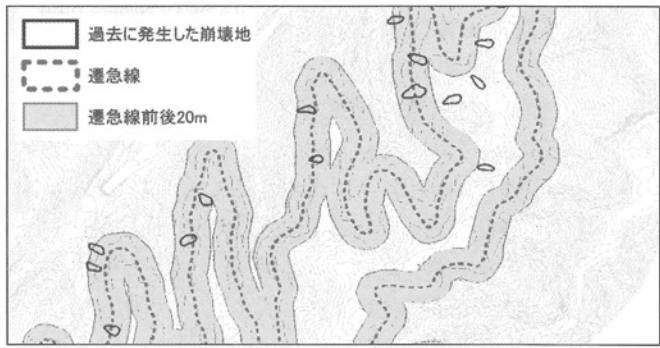


図-7 遷急線周辺における過去の崩壊地の分布状況⁵⁾

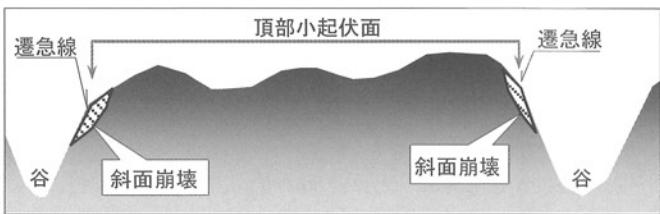


図-8 遷急線周辺における崩壊の概念図⁵⁾

かになったものであり、これらの課題抽出と対策の検討によりシステムの精度向上を図った。

対策の検討に当たっては、今後のさらなる適用エリアの拡張の際にも、汎用性も持つて適用できることを念頭に作業を進めてきた。また、これらの検討を行うことで、地域特性への対策に対するアプローチの方法についてもある程度の知見を得ることができた。

今後は、これまでの検討で得られた知見や地域特性への対処方法を有効に活用するとともに、さらに、適用事例のない地域特性を持ったエリアへの適用にも取り組むことで、このシステムの適用範囲の拡張と精度向上に努めていきたい。

参考文献

- 1) 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, 358号, 69-75, 1985.
- 2) 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.
- 3) 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(3), 建設工学研究所論文報告集, 54, 159-183, 2012.
- 4) 沖村孝・鳥居宣之・中川涉・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.
- 5) 沖村孝ほか: 土砂災害リアルタイムハザードシステムの活用に向けた取り組み~異なる地質地形条件での適用の検討(その2)~, 平成26年度砂防学会研究発表会概要集, 278-279, 2014.

(2014.7.18受付)