

学位論文題名

発生域と堆積域での土砂動態を考慮した土石流危険溪流の
再評価に関する研究

学位論文内容の要旨

土砂災害を軽減防止するために、土砂災害の発生域における「発生場所とタイミング」および堆積域における「氾濫範囲」を把握することが実務上重要となる。発生域に関しては、降雨による表層崩壊および土石流の発生モデルがすでに開発されており、気象庁と県が土砂災害警戒情報として発表している。一方、深層崩壊や地すべり等による大規模土砂災害は、しばしば無降雨時にも発生するため、先行降雨や地下水の関与を明らかにしなければ予測は不可能で、その発生危険個所についても未だ適確な判断基準が得られていない。また、堆積域に関しては、運動モデルに基づいて土石流を数値シミュレーションする手法は開発されているが、その多くが石礫型土石流を対象としている。しかし、石礫型土石流よりも高濃度で下流にまで拡散するような細粒土砂を含む土石流（混相流）の流速、体積、氾濫範囲を予測する技術は開発されていない。このように土砂災害の発生場所、タイミング、氾濫範囲について、既存のモデルで予測することには一定の限界があり、現実の災害事例からさかのぼってプロセスを再現し、土砂災害を予測できるような土石流危険溪流の評価手法の開発が望まれる。

本研究では、予測不可能な広範囲に土石流が氾濫・堆積した事例として、平成 21 年山口県防府市の剣川で発生した土石流災害を取り上げた。ここでは、細粒土砂を含む土石流（混相流）濃度について分析を行うとともに、多量の細粒土砂を含む土石流の氾濫範囲の把握に必要な土石流濃度の算出方法を新たに提案した。また、降雨に応答しないタイミングで大規模崩壊とそれに続く土石流を発生した事例として、平成 22 年に鹿児島県南大隅町の船石川で発生した土石流災害を取り上げた。本災害は、土石流発生時に無降雨であったことから地下水の関与が予想される地下水型土石流とみなすことができ、地下集水型地形を含む渓流水の比流量による発生タイミング判別方法を提案した。

山口県防府市で土石流の発生した剣川は、流域面積 1.84km²、流路延長は 2.8km である。地質は花崗岩地帯で、山腹の表層には細粒分(粒径 0.075mm 未満)が 30%程含まれるマサ土が分布している。平成 21 年 7 月 21 日に観測史上最大の 256mm/日の降雨を記録し、谷出口にある民家や国道 262 号にまで到達して死者 2 名を出す土石流災害が発生した。この土石流は石礫型土石流に比べて、4 倍程度の高濃度を示す細粒土砂を含む土石流であることがわかった。そこで、この土石流を構成する細粒土砂を用いて、細粒土砂を含む混相流型の土石流の濃度変化プロセスを実験的に調べた。その結果、細粒土砂を含む土石流の濃度は水路勾配により異なるが、従来の実験で得られた石礫型土石流の濃度よりも高い値を示し、細粒土砂を含む土石流の石礫型土石流に対する濃度比は、水路勾配 4 度で 1.33 倍、水路勾配 8 度で 1.85 倍になることが分かった。

さらに、約 0.1mm 以下の細粒（以降、境界粒径と呼ぶ）土砂を比重の重い流体として取り扱えば、実験で得られた土石流濃度をこれまでの石礫型土石流濃度式（高橋式）で表現できることが分かった。た

だし、実際に剣川で発生した土石流は石礫型土石流の約 4 倍の濃度であったことから、乱れの大きな実際の土石流では、実験における境界粒径 0.1mm 程度よりさらに大きな境界粒径をもつ可能性がある。最後に、土石流濃度が 4 倍になるように境界粒径を設定した数値シミュレーションを行った結果、石礫型土石流の濃度式では再現できなかった剣川の土砂氾濫範囲を再現できることが分かった。今後は、本実験より大規模の境界粒径の計測実験を行い、流れのスケールが異なっても一定の境界粒径を示すように、沈降速度と摩擦速度による無次元量での検討を行う必要がある。

鹿児島県南大隅町で土石流を発生した船石川は、阿多カルデラのカルデラ壁に陥入した溪流で、流域面積 0.23km²の小流域である。船石川（正式地名：船石川 2）では、平成 22 年 7 月 4 日夜に 7 波の土石流が発生し、100,000m³を超える土砂が下流へ流出した。しかし、その時までの 1 ヶ月間に 1000mm を超す降雨が観測されており、7 波のうち第 4 波以外の 6 波の土石流は、発生タイミングは無降雨時であった。このため、これらの土石流への地下水の関与が推察された。船石川流域の崩壊斜面の断面地質図と周辺地域の等高線図をもとに解析した結果、地表面の流域面積の約 3 倍近い 0.67km²の地下集水型地形が抽出された。地下集水型地形を広域にわたり詳細に調査することは困難であるため、地下水貯留量を反映すると言われる流域の比流量を指標として地下集水型地形を判別した。これにより、船石川と同様の地質構造を持つ溪流のうち、これまで土砂災害を発生した 13 溪流を選び、比流量に基づく土石流発生の危険度評価を行った。

その結果、各溪流の比流量は 0.01~0.21m³/s/km² で有意な差があり、また船石川 2 の比流量は 0.12 m³/s/km² であったことから、比流量 0.1m³/s/km² を超える 5 溪流（花倉第 4 谷、中浜谷、平野川、辺田川、冷川）を抽出し、これらの溪流において無降雨時の土石流災害の発生記録を調査した。中浜谷、平野川、辺田川、冷川の 4 溪流は土石流の発生要因を特定できなかったが、花倉第 4 谷では、降雨強度 28mm/hr、連続雨量 350mm と、土石流発生限界を超える降雨時には土石流は発生せず、その 1 週間後に土石流が発生したことが分かった。このことから花倉第 4 谷では、先行降雨や地下水の関与する無降雨時の土石流が発生したと判定された。また、これらは現在の土石流警戒避難基準では予測が困難であり、花倉第 4 谷については半減期を 800 時間とする実効雨量を、平成 21 年と 19 年に 2 回の土石流が発生した船石川 2 では、半減期を 1100 時間とする実効雨量をそれぞれ用いる必要があると考えられた。さらに、比流量を調査した 13 溪流について、一般に用いられる流域面積や溪流の平均勾配等で危険度評価を行った場合と、本論で採用した比流量を考慮した危険度評価を行った場合とで比較した。その結果、比流量を指標とした危険度評価では、比流量の大きな溪流は、先行降雨量が多い場合に警戒が必要とされる現在の土砂災害警戒避難基準雨量によって危険溪流を抽出するよりも具体的であると考えられた。

これまで土砂災害対策において予測手法が確立されていなかった、発生域における「発生場所とタイミング」および堆積域における「氾濫範囲」を把握することを目的として、山口県防府市剣川の細粒土砂を含む土石流と鹿児島県南大隅町船石川の無降雨型土石流とを分析した。その結果、発生域においても堆積域においても、土石流の発生・流下・堆積時における濃度変化、比流量の変化など、これまでの予測技術で見落とされていたいくつかの重要なファクターが抽出された。そのために、境界粒径の設定の仕方や実効雨量の半減期を考慮することにより、これまでより高い確率で土石流の発生場所、タイミング、氾濫範囲が予測できることが明らかになった。今後の土砂災害対策においても、本研究で抽出されたファクターを観測項目として取り入れ、発生域と堆積域の土砂動態をシミュレーションすることが望まれる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 丸 谷 知 己
副 査 教 授 井 上 京
副 査 准教授 笠 井 美 青

学位論文題名

発生域と堆積域での土砂動態を考慮した土石流危険溪流の 再評価に関する研究

土砂災害を軽減防止するために、土石流の「発生場所とタイミング」および「氾濫範囲」を把握することが実務上重要となる。発生域においては、降雨による表層崩壊および土石流の発生モデルはすでに開発されているが、無降雨時にも発生する土石流は、その発生場所やタイミングについて未だ適確な判断基準がない。また、堆積域においては、石礫型土石流を対象とした数値シミュレーション手法は開発されているが、高濃度で流出する細粒土砂を含む土石流（混相流）の流速、体積、氾濫範囲を予測する技術は開発されていない。このように土石流の発生場所、タイミング、氾濫範囲について、既存のモデルで予測するには一定の限界があり、現実の災害事例からプロセスを再現し、土石流を予測できるような評価手法の開発が望まれる。本研究では、細粒土砂を含む土石流（混相流）の氾濫プロセスを解明するために、平成 21 年山口県防府市の剣川で発生した土石流災害を、また無降雨の地下水型土石流の発生場所と発生タイミングを解明するために、平成 22 年に鹿児島県南大隅町の船石川で発生した土石流災害を取り上げた。

山口県防府市の剣川流域は、流域面積 1.84km^2 、流路延長は 2.8km で、地質は花崗岩地帯で、山腹表層には細粒分(粒径 0.075mm 未満)を 30%程含むマサ土が分布している。平成 21 年 7 月 21 日に観測史上最大の 256mm の日降雨により、谷出口まで到達して死者 2 名を出す土石流災害が発生した。この土石流は石礫型土石流に比べて、4 倍程度の高濃度を示す細粒土砂を含む土石流であることがわかった。そこで、現地の細粒土砂を用いて、混相流型の土石流の濃度変化を実験的に調べた。その結果、細粒土砂を含む土石流濃度は、石礫型土石流の濃度よりも高い値を示し、これらの濃度比は、水路勾配 4 度で 1.33 倍、水路勾配 8 度で 1.85 倍になることが分かった。さらに、約 0.1mm 以下の細粒（以降、境界粒径と呼ぶ）土砂を比重の重い流体として取り扱えば、これまでの石礫型土石流濃度式（高橋式）でもその濃度変化を計算できることが分かった。また、土石流濃度が 4 倍になるように「境界粒径」を設定した数値シミュレーションにより、石礫型土石流の濃度式では再現できなかった現地の土砂氾濫範囲を再現できることが分かった。

鹿児島県南大隅町の船石川流域は、阿多カルデラのカルデラ壁に陥入した溪流で、流域面積 0.23km^2 の小流域である。平成 22 年 7 月 4 日夜に 7 波の土石流が発生し、 $100,000\text{m}^3$ を超える土砂が下流へ流出

した。しかし、この土石流7波のうち6波は、1000mmの先行降雨の後の無降雨時に発生していたことより、土石流発生への地下水の関与が推察された。そこで、発生源斜面の断面地質と等高線を解析した結果、地表面での流域面積の約3倍の地下集水型地形が抽出された。地下集水型地形の広域調査は困難であるが、その地下水貯留量を反映する溪流の比流量を指標として判別できる。これに基づいて、現地と類似した地質構造の13溪流を選び、比流量の水文調査を行った結果、船石川の比流量 $0.12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ を超える5溪流が抽出された。さらに、これらについて過去の土石流発生時の降雨量を解析したところ、特に、花倉第4谷では、土石流発生限界を超える降雨時（降雨強度 $28\text{mm}/\text{hr}$ 、連続雨量 350mm ）で土石流が発生せず、その1週間後に土石流が発生したことが分かった。このことから花倉第4谷が、船石川と同様に、これまで見落とされていた地下水型の土石流危険溪流であることが判明した。これらの溪流では、現在の警戒避難基準では土石流の発生予測が困難であり、比流量を考慮した実効雨量として、花倉第4谷では半減期を800時間、船石川では半減期を1100時間とする雨量を用いる必要のあることがわかった。このように、土石流の発生場所と発生タイミングについては、従来の警戒避難基準の実効降雨の半減期を拡張することにより、危険溪流の抽出が可能になると考えられた。

これまで予測手法が確立されていなかった、発生域における地下水型土石流の「発生場所とタイミング」、および堆積域における混相流型土石流の「氾濫範囲」を解析することにより、従来の予測技術で見落とされていた重要なファクターが抽出された。そのために、境界粒径の設定方法や実効雨量の半減期を考慮することにより、これまでより高い確率で土石流の発生場所、タイミング、氾濫範囲が予測できることが明らかになった。このように、本研究は土石流発生予測技術に大きな改良をもたらす知見を実証的に導いたもので、今後我が国の土石流災害の警戒避難に大きな貢献をなすものと思われる。

よって、審査員一同は、中野泰雄が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。