

ここで、 c は粘着力、 γ は土層の単位体積重量、 h は土層厚、 I は斜面勾配、 γ_w は水の単位体積重量、 u は間隙水圧、 ϕ は土の内部摩擦角とした。

ここで、ダルシー則より、土層内の水深が地表面に達しない範囲では以下のように表すことができる。

$$Q(t) = K_s \frac{u(t)}{\gamma_w} \tan I \quad (2)$$

ここで、 $Q(t)$ は単位幅あたりの時刻 t のある地点の流量、 K_s は飽和透水係数、 γ_w は水の単位体積重量である。

また、水に関する質量保存則から、 $Q(t)$ は式3で表すことができる。

$$Q(t) = r(t)A + \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

ここで、 $r(t)$ は時刻 t の降雨強度、 A はある地点の集水面積、 v はある地点の貯留水量である。ここで、水文過程は定常状態 ($dv/dt=0$) を仮定し、式1~3を用いて、安定解析式での安全率が1となる降雨強度 (r_c) について、式4が得られる。

$$r_c = \frac{K_s \sin I \{c + \gamma_t h \cos I (\cos I \tan \phi - \sin I)\}}{A \{ \gamma_w \cos I \tan \phi + (\gamma_s - \gamma_t) (\sin I - \cos I \tan \phi) \}} \quad (4)$$

γ_s 、 γ_t はそれぞれ、飽和状態、不飽和状態の土層の単位体積重量で、 $\gamma = \{ \gamma_s h_s + (h - h_s) \gamma_u \} / h$ 、 h_s は地下水深とした。式4から、 r_c は、任意の地点で、測定可能な土層の単位体積重量、土層厚、斜面勾配、土の粘着力、土の内部摩擦角、飽和透水係数、集水面積から求まる。そこで本研究では、式4により求まる r_c が小さい地点ほど小規模な降雨で表層崩壊が発生することを意味し、 r_c が小さい地点ほど危険度が高いと考えた。

2.3 検討対象流域とモデルの適用

2.3.1 検討対象流域

本検討は、広島市街地から西方約11kmに位置する荒谷川流域の支渓で行った(図-2)。流域面積は1.4ha、流域の斜面勾配は12~54°で平均36°である(写真-1)。

1999年6月には、総雨量417mm、最大時間雨量63mmの豪雨により、荒谷川で土石流が発生し、多くの被害が発生している。本検討の対象流域内においても、斜面崩壊が4つ発生した(図-3①~④)。

2.3.2 パラメータの設定

土層厚の設定は検討対象流域で簡易貫入試験を



図-2 荒谷流域の位置

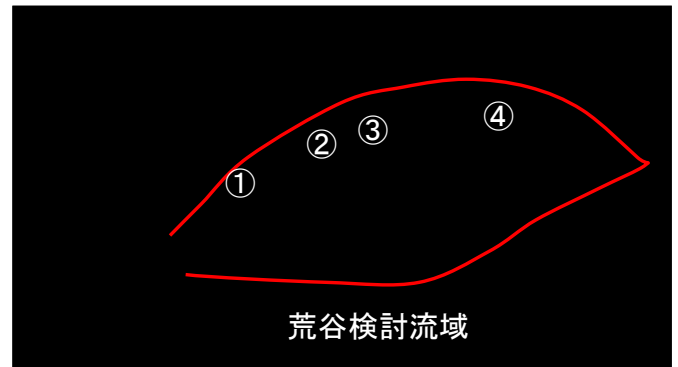


写真-1 荒谷流域

概ね10~15m間隔で、計173点行った。崩壊地内及びその周辺の貫入試験結果から、 $N_d=20$ 程度が崩壊面と考えられたため、検討に用いる土層厚は各試験地点の $N_d=20$ の深度とした。なお、崩壊地内の土層厚は簡易測量を行い、崩壊前の土層厚を推定した。

飽和状態、不飽和状態の土層の単位体積重量は、流域内で5試料を採取し、室内土質試験を行い、パラメータの設定を行った。

豪雨時の斜面の等価飽和透水係数は、パイプ流など選択的な流れの影響を受け、小さい土壌サンプル(例えば、100cc)で求めた透水係数より大きい可能性が高い⁶⁾。そこで、本研究では、豪雨時の現象の再現のため、検討対象流域内で継続して行っている水文観測から得られた間隙水圧と流量をもとにダルシー則にしたがうと仮定した手法⁶⁾に従い、斜面の等価飽和透水係数を算出し、用いた。

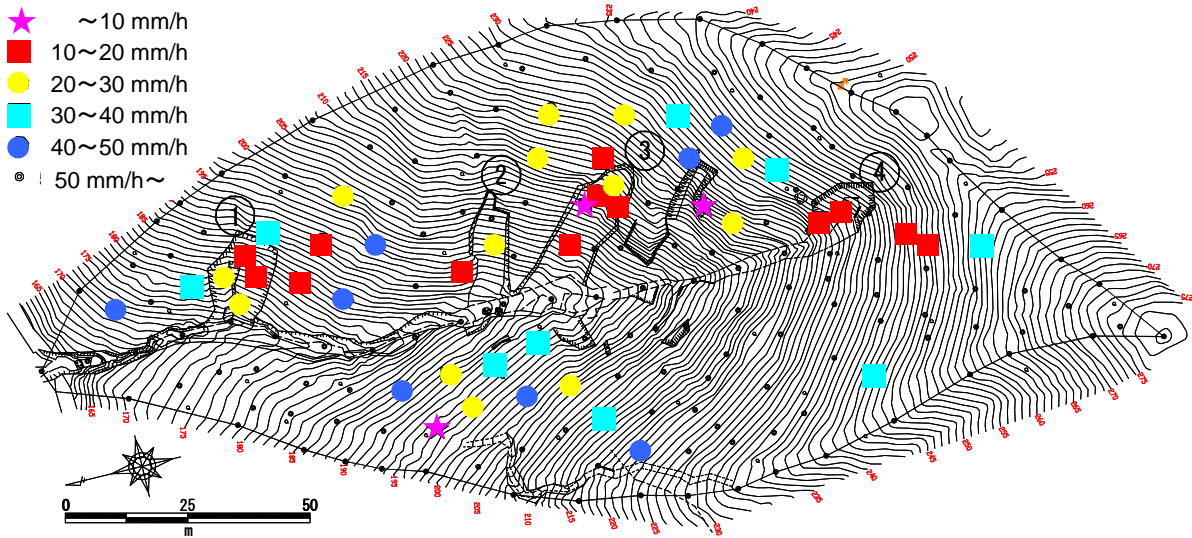


図-3 崩壊危険降雨強度の算出結果

また、斜面の見かけの粘着力・内部摩擦角は根系の影響や礫等の影響を受け、小さい土壌サンプルで用いた値と乖離している可能性がある。また、実際の斜面崩壊発生時において、土壌が完全な排水状態になるかどうか不明である。さらに、土のせん断強度は含水率の影響を受け、斜面崩壊は土層内の最も弱い部位において発生すると考えられる。そこで、本研究では、地形及び土層厚から粘着力を逆推定した。ここでは、少なくとも、不飽和時には、安全率が1以下になることはないと考え、流域内で例外的に斜面勾配が急（54°）でかつ土層厚が大きい（390cm）1点を除いた地点で、土層が不飽和状態で安全率が1を切らない範囲の最小の粘着力（7.5kN/m²）を算出し、計算に用いた。

集水面積ならびに斜面勾配については、貫入試験実施箇所ごとに、地形測量結果ならびに簡易貫入試験結果をもとに算出した基岩面の5mメッシュの地形データを用いて算出した。集水面積、斜面勾配の算出は、D-Infinity Flow Direction法を用いた。なお、D-Infinity Flow Direction法は全方向を0.01°刻みで算出し、最急勾配の方向を求めることで、上流側のメッシュから下流側2メッシュに対して流下する流量の重み付けを行い、流下させる手法である。

2.4 検討結果

前節で示した方法で設定したパラメータを用いて r_c を算出した結果を図-3に示した。 r_c の値が小さい箇所と実際に崩壊した箇所は、崩壊地②を除き、概ね一致する結果となった（図-3）。

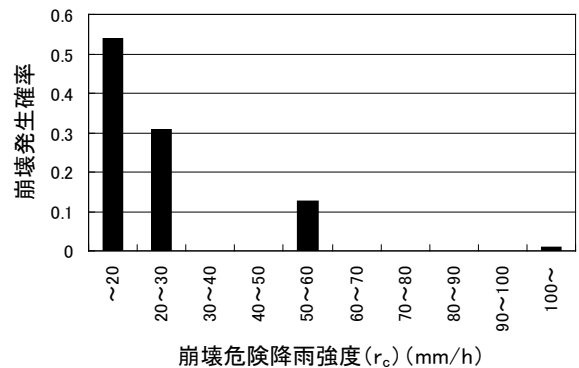


図-4 崩壊危険降雨強度と崩壊確率の関係

図-4には r_c ごとの崩壊確率（ある r_c の全地点数に対する崩壊地内の地点数の割合）を示した。崩壊確率は r_c が20mm/h以下の地点では6割弱、20~30mm/hの地点では3割強であるのに対し、 r_c が30~100mm/hでは、崩壊地内に属する地点は1つのみで崩壊確率は約3%、100mm/h以上で1%以下であった。すなわち、 r_c が小さいほど、斜面崩壊する可能性が高く、 r_c が斜面崩壊発生の相対的な危険度を良く表しているといえる。

また、1999年の豪雨時の最大1、3、6時間平均の降雨強度は、それぞれ、63、44、28mm/hであり、崩壊地内の r_c が10~40mm/hであった結果と概ね整合している。以上より、表層土層厚の空間分布情報、レーザープロファイラに基づき計測した地形データ、水文観測結果により設定したパラメータを簡易な物理モデルに入力することにより、表層崩壊箇所を比較的精度良く予測できることが分かった。

3. 溪流単位の危険度評価手法

3.1 検討方針

前項までに検討した物理モデルは、降雨条件、地形情報、土層厚、土質強度（内部摩擦角、粘着力）、土の水理特性（水分特性曲線、透水係数）を入力条件として、斜面の安全率を出力するものである。入力条件のうち、降雨条件、地形情報は比較的容易に手に入るものの、土層厚、土質強度、土の水理特性は広域で面的に情報を得ることは現時点では多大な労力を必要とし、困難である場合が多い。一方、実測結果に基づき、当該地域・溪流の土層厚、土質強度、土の水理特性を確率的にでも評価できれば、ある程度地下の情報を取り入れた崩壊発生確率を推定することができる。仮に、斜面ごとの崩壊発生確率が算出された場合、崩壊発生確率の高い斜面が多い溪流を土石流発生危険度の高い溪流と評価すれば、溪流単位の土石流発生危険度が求まることになる。

そこで、本項では、土層厚、土質強度、土の水理特性から、斜面崩壊確率を算出し、斜面崩壊確率に基づき、流域単位の土石流発生危険度を評価する手法についてその有効性を検討する。

3.2 検討方法

安全率の算出にあたっては、前節同様、土層内の間隙水圧は定常状態に達した状態を仮定し、式1、2を変形し、式5で算出した。

$$Fs = \frac{c + (\gamma h \cos^2 I - \gamma_w \frac{Ar}{K_s \tan I}) \tan \phi}{\gamma h \cos I \cdot \sin I} \quad (5)$$

これにより、地下の情報に関するパラメータは、①土層厚、②粘着力、③土の内部摩擦角、④飽和透水係数の4つとなる。また、定常状態を仮定したことにより、飽和—不飽和の浸透流解析が不要となるため、多ケースのシミュレーションが比較的短時間で可能となる。

さらに、本研究では、メッシュごとに、ある降雨条件下において、土層厚、土質強度、土の水理特性を確率的に与え、当該降雨条件下において、安全率が1以下となる確率を、「崩壊確率」として算出した。地下の情報を確率的に与えるにあたっては、以下の式を用いた。

$$C = C_m + C_a \times rd \quad (6)$$

ここで、Cはあるパラメータとし、C_mはパラメー

タCの平均値、C_aはパラメータCの標準偏差、rdはモンテカルロシミュレーションで発生する正規乱数である。正規乱数の発生には、Box-Mullerの方法⁸⁾を用いた。シミュレーション回数は10000回とした。

3.3 手法の適用

3.3.1 検討対象地域

検討対象は、愛媛県新居浜市多喜浜地区の面積3.22km²の地域である（図-5）。同地区は新居浜市の背後に広がる標高300m未満の丘陵性の山地であり、和泉層群の砂岩、泥岩からなる。同地域は2004年の台風15号と21号により、表層崩壊や土石流が多発した。検討対象地域内では108個の表層崩壊が発生した。

3.3.2 パラメータの設定

土層厚は図-5中の流域13の崩壊地周辺で25点土研式簡易貫入試験を実施し、平均値、標準偏差を求めた。また、粘着力、土の内部摩擦角については、貫入抵抗値と粒度分布より、粘着力および土の内部摩擦角が推定できる若月ら（2007）⁹⁾が提案した式により、貫入試験結果と粒度分布の測定結果より平均値及び標準偏差を算出した。さらに、飽和透水係数については、ここでは、六甲山地において大型サンプルを用い、測定したHedorayanto（1999）¹⁰⁾のデータを参考に平均値及び標準偏差を設定した。なお、算出の結果、いずれのパラメータとも正規分布よりも、対数正規分布に近い分布形を示したため、正規乱数の発生にあたっては、対数値を用いた。

地形量の算出にはレーザープロファイラによる地形データを用いて、10mメッシュで勾配、集水面積を算出した。算出には、D-Infinity Flow Direction法を用いた。

3.4 検討結果

3.4.1 溪流ごとの危険度算出

対象地域を図-5に示すように0.04～0.46km²の19の溪流に分割した。その上で、溪流ごとの危険度を表す指標として、「崩壊危険面積（α）」および「崩壊危険面積率（α/A）」を式7、8でそれぞれ算出した。

$$\alpha = \sum_{i=1}^n ap_i \quad (7)$$

$$\alpha / A = \sum_{i=1}^n ap_i / A \quad (8)$$

ここで、 a は各メッシュの面積（=100m²）、 p はメッシュ i の崩壊確率（10000回の計算で安全率1以下になる確率）、 n は溪流内のメッシュ数、 A は各溪流の面積である。

降雨強度を50mm/hにした場合の溪流ごとの崩壊危険面積の算出結果と実際に2004年の台風で発生した崩壊地数の関係を図-6に示した。図に示したように、溪流単位で見た場合、算出された崩壊危険面積と実際の崩壊地数とは正の相関が極めて高く（ $r^2=0.77$ ）、崩壊危険面積は溪流単位の表層崩壊発生危険度をよく表しているといえる。

また、図-7には、崩壊危険面積率と1km²あたりの2004年に発生した崩壊地数（以下、崩壊地密度）の関係を示した。崩壊危険面積率が大きいにもかかわらず、崩壊地密度が小さい溪流はあるものの、崩壊地密度が高かった溪流は、崩壊危険面積率も大きく、斜面崩壊が多発する溪流は概ね抽出できていた。

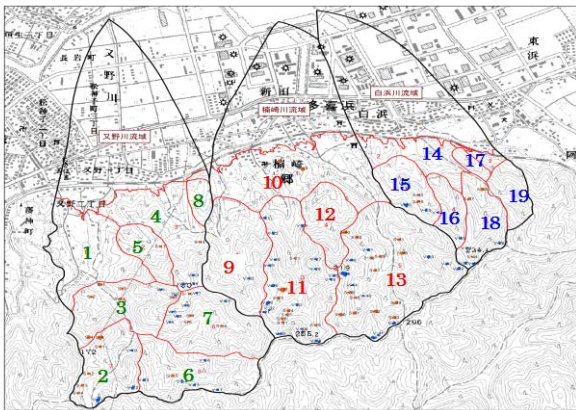


図-5 検討対象地域（愛媛県新居浜地区）



写真-2 新居浜地区で発生した表層崩壊の様子

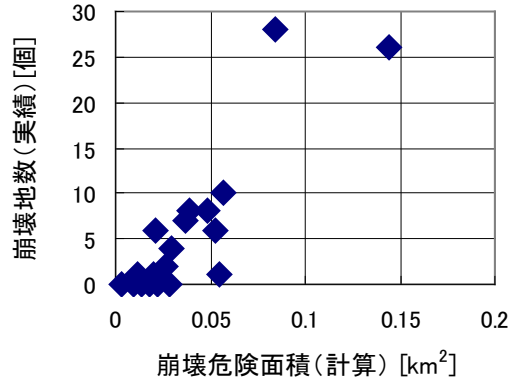


図-6 溪流単位の崩壊危険面積と崩壊地数の関係

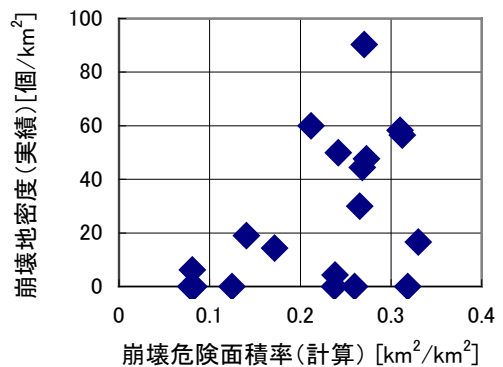


図-7 溪流単位の崩壊危険面積率と崩壊地密度

以上のように、簡易な物理モデルと実測に基づき推定した土層厚・土質強度の確率分布を用い、溪流単位で表層崩壊の発生危険度の評価を試みたところ、概ね良い再現性が見られた。また、今回対象とした3.22km²をパソコン（Intel CoreTM2 CPU 2.40GHz）を用いて計算するに要した時間は、勾配・集水面積の算出に約2時間、その後の崩壊確率の算出は15分程度であった。

4. 表層崩壊に起因する土石流危険度評価手法

以上の検討結果から、表層崩壊に起因する土石流の危険度評価に関する調査・検討のフローを図-8に示した。表層崩壊に起因する土石流に関する危険度評価は、まず、概略の危険度評価を行い、その上で、危険度が高いと判定された溪流について、詳細な危険度評価を行う。詳細評価においては、概略評価において危険度が高いとされた溪流の中で特に危険度の高い溪流の抽出、溪流内で発生源として危険度の高い斜面、支溪の抽出を行う。

概略の危険度評価を行うにあたっては、3章で示した「溪流単位の危険度評価手法」を用いる。

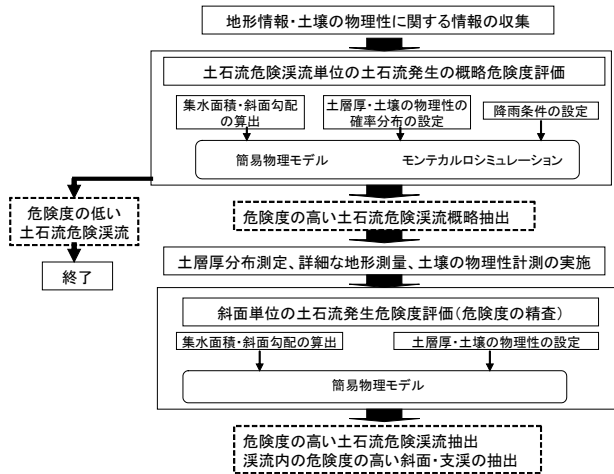


図-8 土石流危険渓流の危険度調査・評価フロー

具体的には、数値地形情報を用い、土質定数、土層厚、透水係数は実測値を基に確率的に与え、単純化した浸透流理論と斜面安定解析に基づく手法により、溪流単位の危険度を評価する。

一方、詳細な危険度評価にあたっては、2章で示した「斜面単位の危険度評価手法」を用いる。具体的な調査は、土層厚の空間分布の測定、詳細な地形測量、水文観測を行う。その上で、簡易な物理モデルにより、危険度を精査する。

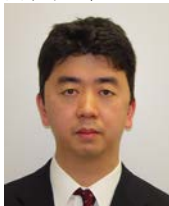
5. まとめ

本研究では、既存の物理モデルのコンセプトを活用し、詳細な現地調査を行うことにより、表層崩壊発生場所および発生する可能性が高い溪流を精度良く抽出できることを示した。その結果を基に、本研究では、表層崩壊に起因する土石流の危険度評価に関する調査・検討のフローを提案した。現在、地質・地形条件の異なる地域を対象にここで示した手法の汎用性の確認を行っているところである。

参考文献

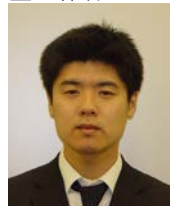
- 1) 内田太郎：近年における山地の土砂移動現象にかかわる斜面水文プロセス研究の進歩、砂防学会誌、Vol.57、No.2、pp. 58-64、2004
- 2) 例えば、平松晋也・水山高久・石川芳治：雨水の浸透流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究、砂防学会誌、Vol.43、No.1、pp.5-15、1990
- 3) 沖村 孝・市川龍平・藤井郁也：表土層内浸透水の集水モデルを用いた花崗岩表層崩壊発生位置の予知のための手法、砂防学会誌、Vol.37、No.5、pp. 4-13、1985
- 4) Montgomery, D. R., and W. E. Dietrich : A physically-based model for the topographic control on shallow landsliding, Water Resources Research, Vol. 30, 1153-1171, 1994.
- 5) Pack, R. T., D. G. Tarboton and C. N. Goodwin : "The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping," Paper Submitted to 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada 1998
- 6) Uchida, T., Y. Asano, N. Ohte and T. Mizuyama : Analysis of flowpath dynamics at a steep unchanneled hollow in the Tanakami Mountains of Japan, Hydrological Processes, Vol. 17, 417-430, 2003
- 7) Tarboton, D. G. : A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, Water Resources Research, Vol. 33, 309-319, 1997.
- 8) 三根 久：モンテカルロ法・シミュレーション（現代応用数学講座4）、40-48、コロナ、1994
- 9) 若月 強・佐々木良宜・田中幸哉・松倉公憲：簡易貫入試験値と粒度組成を用いたマサ土の単位体積重量とせん断強度定数及び透水係数の推定、砂防学会誌Vol.59、No.6、38-46、2007
- 10) Hendrayanto, Analysis on Spatial Variability in Hydraulic Properties of Forest Soils, Ph.D. Thesis, Kyoto Univ., 1999

内田太郎*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム主任研究員
Taro UCHIDA

盛 伸行**



東京建設コンサルタント(株) (前独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム交流研究員)
Nobuyuki MORI

田村圭司***



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム上席研究員
Keiji TAMURA