

1. はじめに

1993年7月末から9月初めにかけて鹿児島県では度々集中豪雨に見舞われ、甚大な被害を受けた。なかでも、8月6日夕刻から始まった鹿児島市を中心とする局地的豪雨は特に激しく、市内各所で河川氾濫、斜面崩壊、土石流によって被害を受けたほか、市街地から北へ向かう鹿児島（錦江）湾沿いの地区でも崩壊・土石流が頻発したため、海岸に平行に走るJR日豊線、国道10号線が寸断され、交通は1時、完全にマヒした。夕方のラッシュ時ということもあって、大災害の発生も懸念されたが、幸いにも適切な避難誘導と救助により、トラックや乗用車の乗客、JRの通勤、通学客など約1800人が、海路より助けだされた。本地区は2万数千年前に形成された始良カルデラ壁の一部で、崩壊・土石流の常襲地帯と言われており、その対策は重要な課題となっている。

本稿では、この始良カルデラ壁に発生した鹿児島市吉野町花倉地区及び竜ヶ水地区の斜面崩壊について運動解析を試み、流下時の崩壊土砂の速度、到達時間などについて若干の考察を行ったのでその概要を以下に報告する。

2. 計算で用いた崩壊事例

本計算では今回の豪雨による(1)花倉地区及び(2)竜ヶ水谷第2溪流の崩壊、ならびに1977年6月に発生した(3)竜ヶ水谷第3溪流の崩壊¹⁾を対象とした。

<花倉地区の崩壊> 標高78mあたりから長さ20m、幅10m、深さ3~7mにわたって崩れ、土砂が直下にある花倉病院の一部を直撃したため、入院患者15名が死亡した。崩壊土砂の先端は海岸沿いの国道まで達した(図1参照)。

<竜ヶ水谷第2溪流の崩壊> JR竜ヶ水駅の北側を流れる溪流で、最上部の崩壊源は標高274mにみられるが、その崩壊土砂は途中で停止しているため、今回の計算では標高170m~130m付近を崩壊源とした。崩壊した土砂はJR竜ヶ水駅の北側を通過し、土砂の先端は海岸まで達している。

<竜ヶ水谷第3溪流の崩壊>本地区は上記の第2溪流の南側に隣接する沢で、1977年6月の豪雨により標高280m~240m付近で崩壊が発生。流下土砂により住家13棟が全壊、9名の死者がでた。崩壊した土砂はJR日豊線の線路上で停止した。

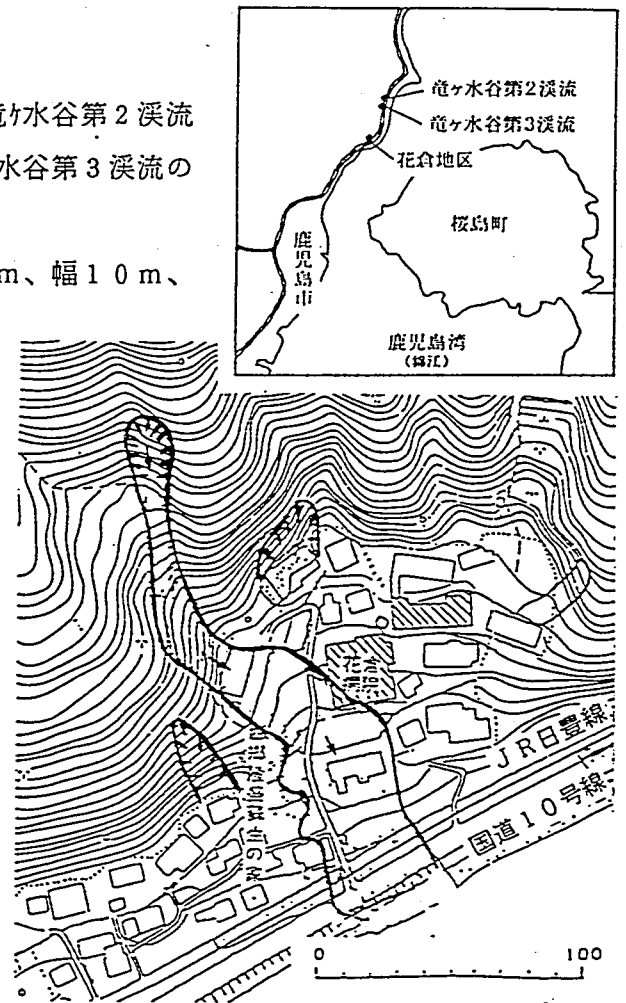


図1 崩壊地の位置(上)と花倉地区の崩壊

3. 計算の手順と運動方程式

今回の運動計算にあたっては崩壊土砂がひと塊となって流下したものと仮定して、土砂の運動を質点運動で取り扱った。計算手順としては、まず流下経路の縦断形状を2500分の1の地形図（竜ヶ水谷第3溪流については春山・下川¹⁾の図を用いた）から読み取り、斜面形状の近似式を求め、その経路上を滑り落ちるものとした。ついで、空中写真や地形図から崩壊源を決定し、その中心点を質点運動の点とした。計算は摩擦係数及び抵抗係数を種々の数値に変えて計算を行い、崩壊発生地点及び停止地点で速度が零になる条件に一致する数値を決定し、速度-時間曲線、速度-距離曲線の関係を求めた。計算に使用した運動方程式は以下の通りである。

図2に示すように崩壊土砂の流下経路の縦断形状を $z = f(x)$ とする。 x は水平距離、 z は高さである。エネルギー保存則より次式が成立する²⁾。

$$\frac{d}{dt} (U+T) + RV = 0 \quad (1)$$

ただし、 T 、 U はそれぞれ運動、位置エネルギー、 R は抵抗、 V は速度である。質量 m 、重力加速度 g 、水平方向の速度成分 u の記号を用いると、 T 、 U 、 V は

$$T = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} m u^2 (1 + f'(x)^2) \quad (2)$$

$$U = m g z = m g f(x) \quad (3), \quad V = u \sqrt{1 + f'(x)^2} \quad (4)$$

で表される。上式から、

$$m \dot{u} (1 + f'^2) + m u^2 f' f'' + R \sqrt{1 + f'^2} = 0 \quad (5)$$

また、運動方程式の x 成分のみを考えると

$$m \dot{u} = \frac{-f' N - R}{\sqrt{1 + f'^2}} \quad (6), \quad N = \frac{m(g + u^2 f'')}{\sqrt{1 + f'^2}} \quad (7)$$

ここで、 N は崩壊土砂に働く垂直抗力を示す。

抵抗 R については物体に作用する抵抗として次の二つのモデルを考えた。

- (i) 摩擦抵抗のみの運動モデル、 (ii) 摩擦抵抗と速度の2乗に比例する抵抗の運動モデル

$$R = \mu N$$

$$R = \mu N + \delta m V^2$$

表1 計算結果

動摩擦係数は(i)摩擦抵抗のみの運動モデルによる

| | 災害発生 年月日 | 最大速度 (m/sec) | 流下時間 (sec) | 動摩擦係数 | 崩壊源の平均勾配 ($\tan \phi$) | H/L |
|-------|-------------|-----------------|---------------|-------|-----------------------------|------|
| 花倉地区 | '93.8.6 | 14.3 | 22.4 | 0.322 | 0.60 ($\tan 31^\circ$) | 0.32 |
| 竜ヶ水第2 | '93.8.6 | 26.3 | 21.8 | 0.410 | 0.89 ($\tan 42^\circ$) | 0.46 |
| 竜ヶ水第3 | '77.6.24 | 29.8 | 25.4 | 0.455 | 1.00 ($\tan 45^\circ$) | 0.49 |

H : 全流下高、 L : 全水平流下距離

4. 計算結果の検討

図3、4は花倉地区について抵抗が(i)の摩擦抵抗のみの場合及び(ii)の摩擦抵抗と速度の2乗に比例する抵抗の場合における計算結果を示す。(i)のケースでは速度分布はドーム型を呈しているが、(ii)のケースでは初期の段階で速度は上昇するもの徐々に減衰する形を示す。

(i)のケースでは崩壊が発生してから停止するまでの流下時間は22.4秒、最大流下速度は約14.3 m/s (時速51.5 km)であった。図中、丸印は花倉病院の位置を示している。病院を直撃するのは崩壊発生後13.3秒後で、その時の速度は13.0 m/s (時速46.8 km)である。

また、(ii)のケースでは流下時間は26.3秒、最大流下速度は13.1 m/s (47.2 km/s)であった。(ii)の

計算では未知数が2つあるため幾通りもの組合せが考えられる。計算の単純さから考えれば(i)の摩擦抵抗のみのモデルで十分である。竜ヶ水谷第2、第3溪流の崩壊についても(i)のモデルを用いて同様に計算を行った。その結果を表1に示す。おおむね、崩壊が発生してから停止するまで約20秒強である。計算で得られた動摩擦係数の範囲は0.322~0.455であった。

つぎに崩壊土砂の到達距離について考えてみる。図5は国内外の崩壊事例33例についてそれぞれ崩壊源の平均勾配(\tan)と全流下水平距離Lに対する全流下高Hの比(H/L)との関係を表したものである。図は地質や誘因に関わらず、崩壊源の平均勾配が小さいほど H/L は小さくなる、つまり到達距離は大きくなることを示している。この関係から、崩壊が予想される斜面の勾配からおよその到達距離の概略を予測することが可能である³⁾。図5のデータは崩壊土砂がひと塊として流下したものに限っている。従って、前述の運動計算において、抵抗が(i)摩擦抵抗のみの場合($R = \mu N$)に相当する。崩壊源の平均勾配とは崩壊源の滑落崖の位置と脚部末端の位置を結んだ直線が水平線となす角度の正接である。この H/L は崩壊土砂の質点運動の取扱いでは結果として運動中の摩擦係数

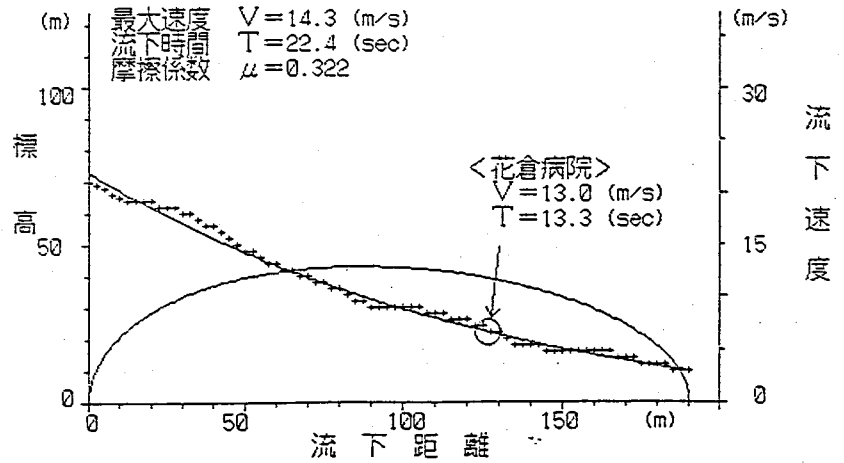


図3 花倉地区の流下距離と移動速度 ($R = \mu N$)

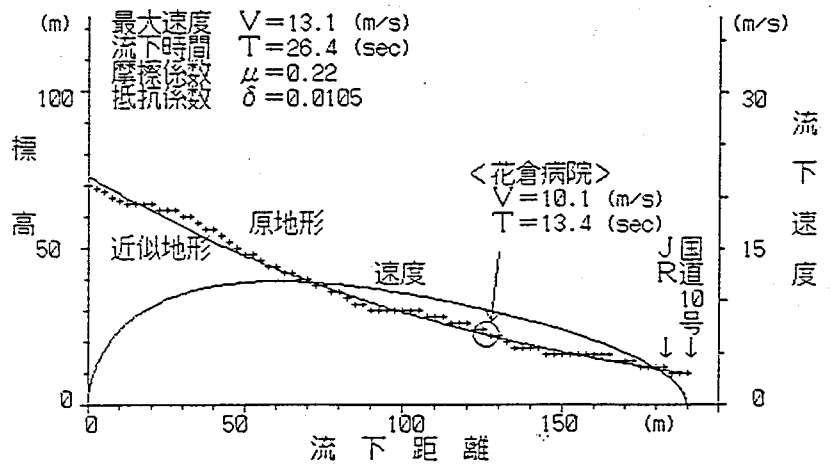


図4 花倉地区の流下距離と移動速度 ($R = \mu N + \delta m V^2$) (+印は原地形を表す)

μ に等しくなるということで、等価摩擦係数⁴⁾とも呼ばれている。図5中の実線は回帰直線を表している(相関係数は0.938)。この直線より下に位置すれば流動性が高くなることを意味している。図の破線はここで取り扱った崩壊の下限値を示している。

現地調査、地形図の読み取りから今回の花倉地区及び竜ヶ水谷第2溪流、第3溪流について崩壊源の平均勾配とH/Lの数値を求め(表1参照)、図5にプロットした。花倉地区の崩壊では図5のほぼ実線上近くに位置し、平均的な崩壊土砂の運動を示していることになる。

運動計算による動摩擦係数の値は0.322であった。また、等価摩擦係数H/Lの値は0.32であるから、両者はほぼ一致している。従って、花倉地区の崩壊は土石流化した運動ではなく、最大流下速度約50 km/hを示すひと塊の崩壊土砂の運動として考えることができる。一方、竜ヶ水谷第2溪流及び第3溪流の崩壊は図5では破線上近くに位置しており、どちらも流動性が高いことを示している。つまり、崩壊源の平均勾配が急に関わらず、平均値よりも到達距離は長い。この現象については両溪流とも比較的、流下経路が滑らかな曲線形を呈しており、滑り易い地形条件であったことが影響しているとも考えられる。また、流下時に溪流の水を巻き込んで流動化し、到達距離がのびたのかも知れない。ただ、花倉地区の崩壊とは異なり、計算で得られた動摩擦係数の値はいずれもH/Lと一致せず、H/Lより小さい値となっている。この不一致の原因については現時点では明らかではない。上記の問題と併せて今後、検討したい。

5. おわりに

崩壊土砂の運動については固体(剛体)として扱うか、流体として扱うべきかは重要な問題であるがその見きわめは難しい。このような現状ではとりあえず、共通性のある単純なモデルを用いて、各災害について流下速度や流下時間、動摩擦係数の数値を比較検討してみるのも一方法であろう。また、他の運動方程式による比較検討も現象や式の妥当性を論じる上で必要である。

<参考文献>

- 1) 春山元寿・下川悦郎(1978): 鹿児島市吉野町竜ヶ水地区の山地崩壊・土石流災害について。新砂防, 107, 33-38.
- 2) 矢崎 忍・森脇 寛(1985): 昭和59年長野県西部地震による御岳山大岩屑流の運動について。昭和60年度砂防学会研究発表会概要集, 222-223.
- 3) 森脇 寛(1987): 崩土の到達距離予測。地すべり, Vol. 24, No. 2, 10-16.
- 4) H s u (1975): Catastrophic debris streams generated by rockfalls. Geological Society of America, Bulletin, 86, 129-140.

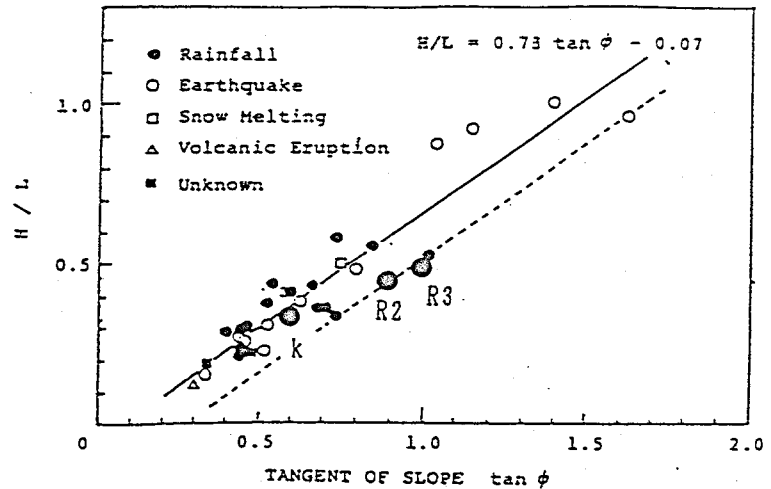


図5 到達距離比(H/L)と崩壊源の平均勾配(tan φ)
k: 花倉、R2: 竜ヶ水谷第2、R3: 竜ヶ水谷第3