

『長距離』移動する地すべり土塊のシミュレーション——その②

(一財)砂防・地すべり技術センター 斜面保全部

1. はじめに

前回、その①では、地すべり土塊の移動を表現するシミュレーションモデルを構築し、降雨・融雪に伴い発生し「長距離」移動した地すべり事例の再現計算やパラメータの感度分析を示しました。

今回は、この構築したシミュレーションを「活用」する観点から述べたいと思います。

2. 数値シミュレーションの活用にあたって考慮すべき事項

数値シミュレーションの活用にあたっては、以下の4点について、総合的に勘案し、活用方針を検討することが重要と考えています。4点とは、①対象とする現象、②数値シミュレーションの目的、③パラメータ設定の基本的考え方、④数値シミュレーションモデルの特性、となります。

①対象とする現象は、ここでは降雨等を誘因とする地すべりで、その中でも「長距離」移動する現象です。なお、「長距離」の定義を前回に引き続き再度示します(図-1)。

②数値シミュレーションの目的は、後述しますが、一般には、学術的に自然現象の精緻な再現を目指す場合や、ハザードマップ、緊急的な概略被害範囲の想定等、さまざまです。

③パラメータ設定の基本的考え方は、大きく、「試験値」を入力するか、「一般値等何らかの想定値」を入力するかに分かれます。

④数値シミュレーションの特性は、何が表現できるモデルであるか、また、各パラメータの影響はどのようなものであるか、といったこととなります。

以下、それぞれの点について、今回の数値シミュレーションの活用の観点から詳述します。

①対象とする現象

上述のとおり、対象とする現象は降雨等に伴い発生し「長距離」移動する地すべりです(地震の事例は含みません)。ここでは、もう少し突っ込んで、こういった現象がどのような特性を持つか述べたいと思います。

平成12年に交付されました「土砂災害防止法」では、地すべりにおける「土砂災害警戒区域(イエローゾーン)」の設定根拠として、「 $L2 > L1$ となる事例は全体の1%」という集計が示されています(「土砂災害防止法例の解説」、平成15年発行より)。前回その①に示しましたが、当センターにおいても、平成12年以降の事例を含め、日本における「長距離」移動した地すべり事例を整理した結果、二十数事例と多くは確認できませんでした。なお、地すべり土塊の一部が土石流化し、谷沿いに流下する現象は想定していません。

これら集計結果から、「長距離」移動する地すべりは稀な現象である、と言えると思います。しかしながら、発生した場合の被害は甚大となる現象です。

一方、これら現象が発生するメカニズムについては、過剰間隙水圧の発生による液状化^{★1}、粒子や岩屑の衝突効果^{★2}など様々な説が提案されています。しかしながら、依然不明な部分が多く、数値シミュレーションの実施に必要となる「理論のモデル化」も十分とは言えません。ただし、上述した「長距離」移動した地すべり事例

図-1 「長距離」の定義： $L2 > L1$ 、もしくは $L2 > 250m$

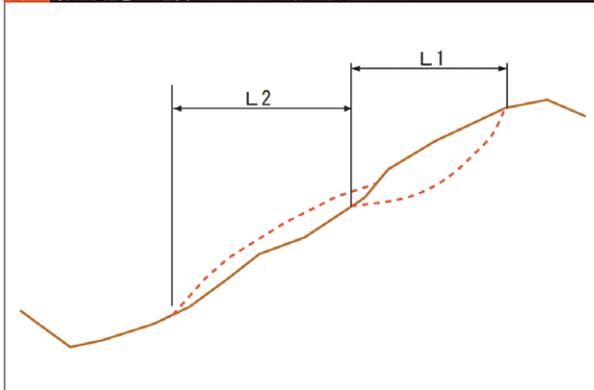




写真-1 毘沙門地すべりにおける堆積末端の流動化状況
(http://www.nan9.co.jp/)

について、当時の写真よりその堆積状況を再度確認したところ、多くの事例において、堆積域末端部で土塊が流動化している状況が確認されました。写真-1に毘沙門地すべりの事例を示します。

②数値シミュレーションの目的

「長距離」移動した地すべりのメカニズムは不明な点が多く、理論を構築し、検証を実施するというアプローチが大変難しい分野だと言えます。学術的な分野で今後期待することとしたいと思います。

ここでは、現象の不明さ、複雑さ、理論化の状況、発生頻度の少なさ等を勘案し、現実的なアウトプットとして「到達範囲の緊急的・概略的予測」と設定します。

③パラメータ設定の基本的考え方

上記目的に沿ったシミュレーションの実施においては、時間的な制約から、原位置でサンプリングし、パラメータ入力値を決定するための試験を実施することが期待できません。よって、「一般値等何らかの想定値」を入力値とすることが現実的と考えます。

また、検討結果は「人命にかかわる緊急的な対応」への活用を想定すること、「稀な」現象であるため頻繁な検討は想定されないことを考慮すると、人命第一の観点から「到達範囲が過小評価とならないこと」が重要となると考えられます。

④数値シミュレーションモデルの特性

本検討で適用したシミュレーションモデルは、張・吉松(2004)モデル^{*3}を基本としたものです(その①参照)。

表-1 入力パラメータ一覧と一般値

| パラメータ | λ | μ | ϕ_{int} | ϕ_{bed} | ξ |
|-------------|-----------|-------------------------------|--------------|--------------|------------|
| | 間隙水圧係数 | 間隙流体の粘性係数 | 内部摩擦角 | 底面摩擦角 | フェルミ乱流係数 |
| 一般値と考えられる範囲 | 0~0.7程度 | 10^{-6} (m ² /s) | 0~70程度 (°) | 0~70程度 (°) | 1~10000程度? |
| 関連する抵抗則 | 1)、2)、4) | 3)、5) | 1)、2) | 1)、4) | 6) |

本モデルにおいては、土塊の運動を規制する抵抗則として、以下の各項を含みます。

- 1) 圧力項、2) 土塊内部のせん断力項、3) 間隙流体の粘性項、4) 底面せん断力項、5) 間隙流体のせん断力項、6) フェルミ抵抗項

以下に、運動量保存則(x方向)を示します。

$$\rho \left[\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{v}_x M)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}_y M)}{\partial y} \right] = \rho g_x h - \left[(1-\lambda) \rho g_z h k_{act/pass} - \lambda \rho g_z h \right] \frac{\partial h}{\partial x} - \text{sgn}\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y}\right) h k_{act/pass} \frac{\partial}{\partial y} \rho g_z h (1-\lambda) \sin \phi_{int} + v_f \mu h \left(\frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial y^2} \right) - \text{sgn}(\bar{v}_x) \rho g_z h (1-\lambda) \tan \phi_{bed} - 3 v_f \mu \frac{\bar{v}_x}{h} - g_z M \sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2} / \xi$$

ここに、 g_x, g_y, g_z : X, Y, Z方向の重力加速度、 $M = \bar{v}_x h, N = \bar{v}_y h$: 流量フラックス、 ξ : フェルミー乱流係数、 ρ : 混合流体の密度、 λ : 間隙水圧係数、 $\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z$: X, Y, Z方向の速度、 h : 流動深、 ϕ_{int} : 内部摩擦角、 ϕ_{bed} : 底面摩擦角、 v_f : 水の存在率、 μ : 間隙流体の粘性係数、 $k_{act/pass}$: 主働/受働土圧係数(ϕ_{int} と ϕ_{bed} の関数)

右辺第1項は駆動力であり、第2項以降が1)~6)の各抵抗則となります。

これら抵抗則各項のうち、2)および4)は地すべり土塊としての滑動、変形に伴う抵抗を示します。

また、3)、5)および6)は流体として挙動する場合の抵抗を示します。なお、1)は土塊、流体いずれの挙動にも対応します。本モデルは、概略ながら「①対象とする現象」で示した堆積末端部での流動化現象にも対応しうるモデルであると言えます。

ここで、数値シミュレーション実施にあたって入力が必要となるパラメータを一般値と考えられる範囲とともに表-1に整理します。

図-2 間隙水圧係数λの分析事例（誤差とは実際の土砂到達地点と計算結果の差を示す）

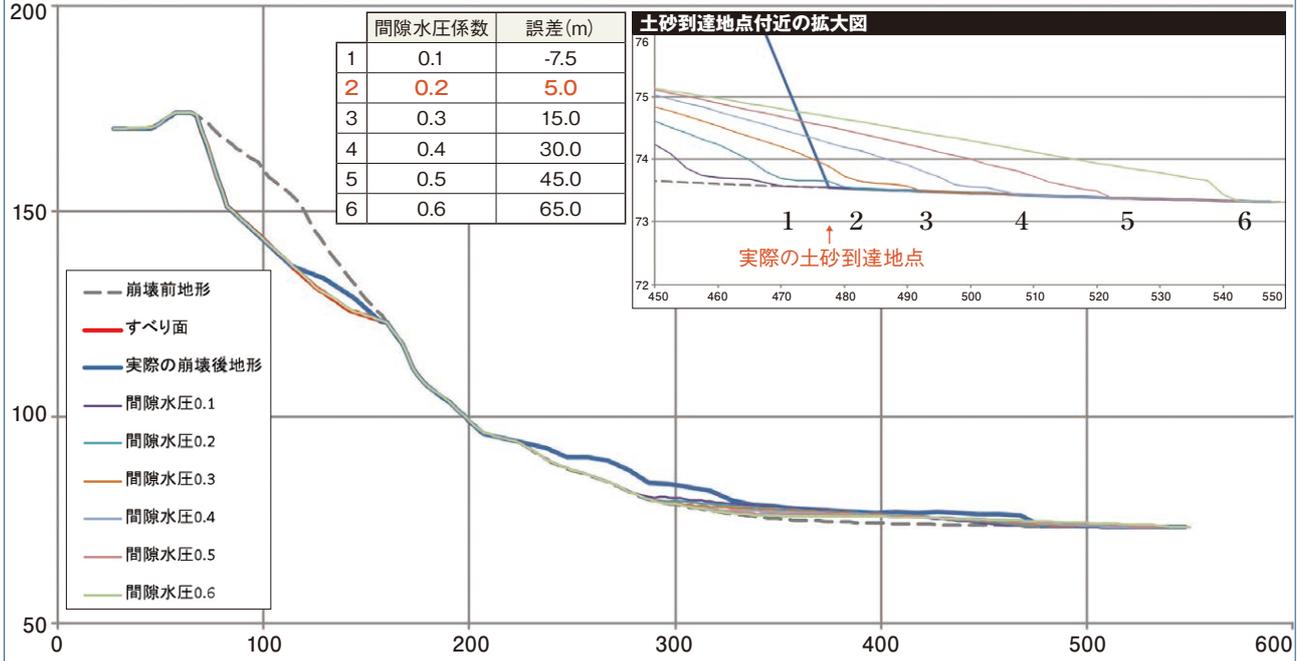


表-2 入力パラメータの感度分析結果

| パラメータ | λ | ϕ_{int} | ϕ_{bed} | ξ |
|------------|-----------|--------------|--------------|----------|
| | 間隙水圧係数 | 内部摩擦角 | 底面摩擦角 | フェルミ乱流係数 |
| 適用値 | 0.2→0.3 | 20→30° | 20→30° | 100→1000 |
| 計算結果に及ぼす影響 | 10m | 2.5m | 80m | 77.5m |

これら入力パラメータのうち、 μ は $10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$ と小さく、 μ を含む3)項、及び5)項は計算結果にほとんど影響を及ぼさないことがわかります。

また、 ξ の一般値はよく分かっておりませんので、既往文献から適用実績を十分カバーする範囲を記しました。

これらパラメータ(μ 以外)を一般値の範囲で一定の割合で変化させた時に、それらが計算結果に及ぼす影響(到達範囲算定値と実績値との差)を表-2に整理しました。なお、 ξ は適用範囲が広く、分母に逆数として掛かるため、他のパラメータと同等の割合での比較が難しいことから、1オーダーの違いによる比較としました。なお、感度分析計算を行った地形は、前回その①で示した「赤松地すべり」を適用しました。また、例として感度分析事例として間隙水圧係数 λ の土砂到達距離の算定結果を図-2に示しました。

表-2より、 ϕ_{bed} と ξ の設定が計算結果に大きな影響を及ぼすことがわかります。

抵抗則との関連より、 ϕ_{bed} は、地すべり土塊としての

滑動・変形に伴う抵抗を表現するための最重要パラメータ、 ξ は、流体として挙動する場合の最重要パラメータと言えます。

3. 数値シミュレーションの活用のためのパラメータ設定方針検討例

上述の①～④を踏まえ、本数値シミュレーションの活用のためのパラメータ設定方針を検討したいと思います。④より、 ϕ_{bed} と ξ の設定が重要であることを把握しましたが、 ξ に関しては適用範囲が広くパラメータの設定基準を決定することが難しいという課題があります。

そこで、本稿では、「最も簡便な設定」という観点から、 ϕ_{bed} 以外のパラメータを一般値とし、「長距離」移動する地すべりに対し、最大となる到達範囲を緊急的・概略的に予測するために適切な ϕ_{bed} を検討したいと思います。

今回の検討においては、「長距離」移動した地すべり事例として、末端が解放されており、発生域の斜面勾配、および堆積域の斜面勾配がほぼ同様の赤松と毘沙門の地すべり事例について再現計算により最適な ϕ_{bed} を検討します。 ϕ_{bed} 以外のパラメータは、一般値として、 $\lambda=0.2$ 、 $\phi_{int}=25^\circ$ 、 $\xi=1000$ としました。

図-3、図-4に赤松、毘沙門地すべりにおける最適な ϕ_{bed} 検討結果を示します。赤松地すべりでは、 $\phi_{bed}=5^\circ$ 、毘沙門地すべりでは $\phi_{bed}=15^\circ$ が最も再現性の高い(最適な)値となりました。なお、 ϕ_{bed} は値が大きくなるほど斜

図-3 赤松地すべりにおける最適 ϕ_{bed} 検討結果

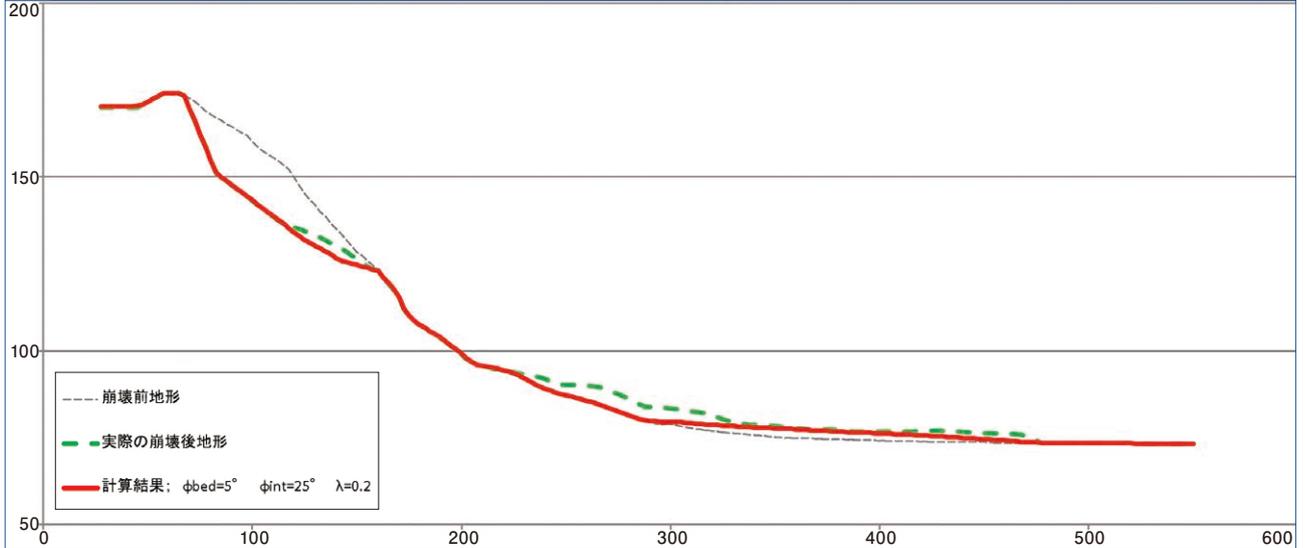
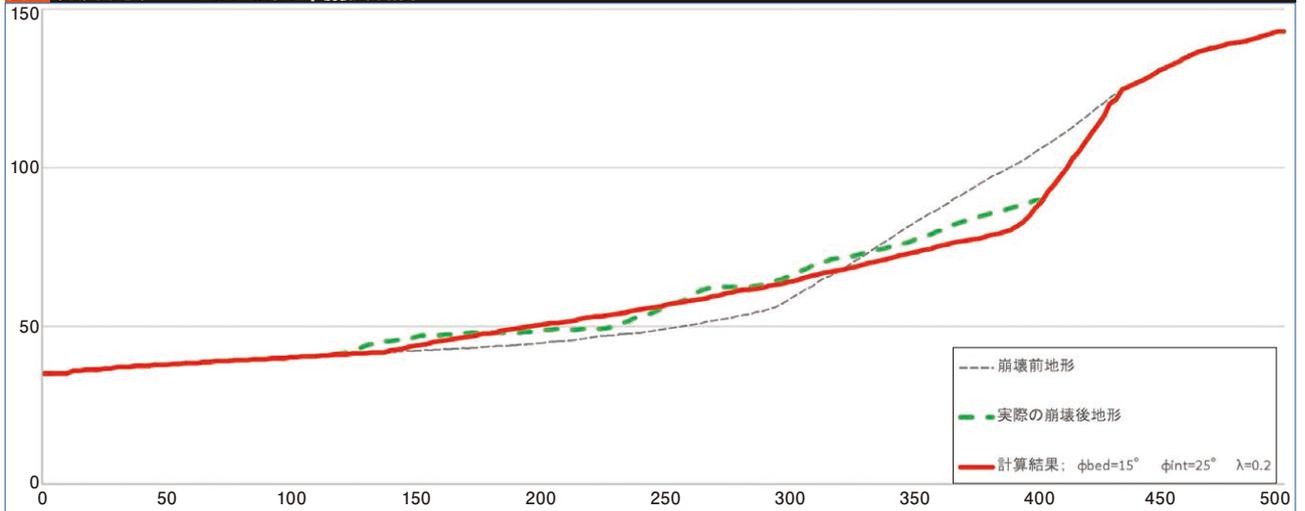


図-4 昆沙門地すべりにおける最適 ϕ_{bed} 検討結果



面上方で停止する(移動距離が短くなる)傾向となります。

ここで、前回その①で示した小泊の事例(最適 $\phi_{bed}=25^\circ$)も合わせて考察すると、赤松地すべりでの最適値 $\phi_{bed}=5^\circ$ を採用することにより、「長距離」移動する地すべりに対し安全側の評価となることが分かりました。

4. 課題

今回、シミュレーションの活用の観点から、様々な条件を考慮したうえでのパラメータの設定方針の一つの考え方を示しました。最後に、課題について以下に挙げます。

- 分析事例が少ないため、十分に安全側の検討結果となっていない可能性がある。
- 変位が認められた場合の緊急時に、移動土塊が長距

離移動するか否かの判断をどのように下すか、さらに滑落範囲をどのように入力条件とするか。

- 谷沿いを流下する土石流など、今回のシミュレーションモデルで考慮していない現象についてのフォローアップ。実際の活用の際には、上記のような観点からもさらに検討が必要と考えます。

参考文献

- ★1 Iverson, R. M., Reid, M. E., Iverson, N. R., LaHusen, R. G., Logan, M., Mann, J. E., and Brien, D. L. (2000): Acute sensitivity of landslide rates to initial soil porosity, *Science*, 290, 513-516.
- ★2 Hsü, K. J. (1975): Catastrophic debris streams, sturzstroms generated by rockfalls, *Geological Society of America Bulletin*, 86, 129-140.
- ★3 張 馳・吉松 弘行・岩堀 康希・阿部 真郎: 数値解析による崩壊土塊の到達範囲予測, *日本地すべり学会誌*, 第41巻, 第1号, pp.9-17, 2004