

DDA 解析を用いた斜面崩壊時の崩土の到達距離の予測

九州大学工学部 学 ○森山 崇
九州大学大学院 正 陳 光斉

九州大学大学院 正 善 功企
九州大学大学院 正 笠間 清伸

1. はじめに

2001 年 4 月に土砂災害防止法¹⁾(以下「土砂法」と呼ぶ)が施行された。土砂法では、芦田ら²⁾の崩土の到達距離予測式から運動量保存則により衝突力を導出し、これを崩土の移動による力と規定している。本文では、この土砂法のモデルとして用いられている芦田らの式により崩土の到達距離の計算および感度分析を行い、「警戒区域」の指定基準の検討を行った。次にモデルをより実斜面に近づけるため、崩土の変形および地形の影響を考慮できる不連続変形法(DDA)³⁾によるシミュレーションを行い、土砂法のモデル式による計算結果と比較検討した。

2. 土砂法における崩壊土砂運動モデル

土砂法では、崩土の滑動を図-1 のようにモデル化し、移動過程における崩土の変形が無視できると仮定したとき、崩土の到達距離は次式で与えられる。

$$x = \frac{h_{sm}}{2a} \ln \left(1 - \frac{b_u}{b_d} \left(1 - e^{-2a \frac{H}{h_{sm} \sin \theta}} \right) \cos^2 (\theta_u - \theta_d) \right) \quad (1)$$

上式における変数は以下に示すとおりであり。

$$a = \frac{2}{(G-1)c_g + 1} f_b \quad b_u = \cos \theta_u \left\{ \tan \theta_u - \frac{(G-1)c_g}{(G-1)c_g + 1} \tan \phi \right\} \quad b_d = \cos \theta_d \left\{ \tan \theta_d - \frac{(G-1)c_g}{(G-1)c_g + 1} \tan \phi \right\}$$

x : 崖下から崩土の停止点までの距離、 h_{sm} : 崩土の移動高、 G : 崩土の比重、 c_g : 崩土の容積濃度、 θ_u : 斜面の傾斜度、 θ_d : 平坦部の傾斜度、 ϕ : 崩土の内部摩擦角、 f_b : 崩土の流体抵抗係数

崩土は θ_u が $b_u=0$ となる臨界角以上で滑り出し、斜面勾配が一定のときには、しだいに加速し、比較的短い運動の後、定常速度が達成される。崖下の傾斜角急変部において θ_u 斜面下流端の滑動速度の θ_d 方向の成分が保存されると仮定し、平坦部においてしだいに減速し停止する。

3. 到達距離予測式による感度分析

土質定数が崩土の到達距離に与える影響を調べるために、到達距離予測式による感度分析を行った。斜面形状は、 $H=22.2\text{m}$ 、 $\theta_u=34.4^\circ$ 、 $h_{sm}=0.75\text{m}$ とし、警戒区域を無次元パラメータ x/H で評価した。注目した土質定数は、容積濃度 c_g 、内部摩擦角 ϕ および流体抵抗係数 f_b で、崩壊可能な範囲を芦田らの研究⁴⁾をもとに、 $0.45 \leq c_g \leq 0.55$ 、 $15^\circ \leq \phi \leq 40^\circ$ 、 $0.015 \leq f_b \leq 0.06$ とした。感度分析の手法は、例えば、 x/H への c_g の影響を評価する場合、 c_g 以外のパラメータを固定し、 x/H をもとに、平均値 μ と分散 σ を求め、変動係数 σ/μ c_g 変動 を計算して評価した。まず、 c_g の変化による x/H の変動係数は、 σ/μ c_g 変動 $=0.014$ である。これにより c_g は x/H にはほとんど影響しないと考えられる。 ϕ と f_b の変化による x/H の変化を表したものが図-2 である。 ϕ および f_b の増加とともに、 x/H は減少する。このとき、 σ/μ ϕ 変動 $=0.399$ 、 σ/μ f_b 変動 $=0.419$ であることから、 ϕ と f_b は x/H への影響度が高い土質定数である。また、 ϕ の増加とともに、 f_b の変動幅は小さくなる。 ϕ および f_b の大きな範囲では、変動による影響が小さくなるといえる。以上より、 x/H は崩土の構成粒子およびその性状に大きく影響されることを考慮に入ると、土質の代表的なパラメータである ϕ および粘性を支配するパラメータである f_b は、 x/H への影響度が大きいパラメータであるといえる。

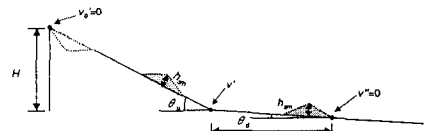


図-1 土砂法における崩土の滑動モデル

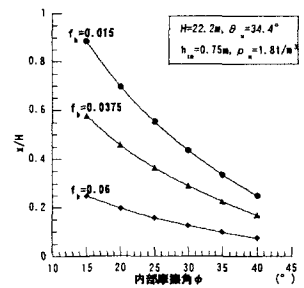


図-2 ϕ 、 f_b と x/H の関係

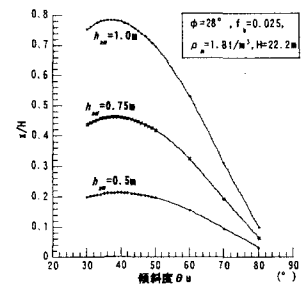


図-3 θ_u 、 h_{sm} と x/H の関係

次に、土質定数を一定として、斜面形状を表すパラメータである H 、 θ_u および h_{sm} の x/H への影響を調べた。 θ_u と x/H の関係を示したものが図-3 である。 x/H は $\theta_u=40^\circ$ 付近で最大となることがわかる。ここで注目すべき点は、崖下での崩土の θ_u 方向の速度は θ_u の増加に伴い増加する。しかしながら、式(1)で傾斜の急変部では速度の θ_u 方向成分のみ保存されると仮定しているため、 x/H は $\theta_u=40^\circ$ 付近で極値をとることになる。

H および h_{sm} と x/H の関係を示したものが図-4 である。 H の増加とともに x/H は減少する。到達距離 x 自体は H の増加とともに増加する。しかしながら、 x/H で評価すると x の増分よりも H の増分の影響が大きいため x/H は減少する。また、 H が一定以上大きくなると、 x/H は H に依存しなくなることがわかる。これは、 H が一定以上の大きになると、崩土が斜面途中で定常速度となり、崖下での崩土の速度も定常となるためである。また、 h_{sm} の増加に伴い、 x/H は増加することがわかる。

以上の考察をもとに、警戒区域の指定基準の検討を行う。広島県の設定例を参考に、一般の急傾斜地の崩土の移動高を $h_{sm}=0.75\text{m}$ (※最大崩壊深の 1/2) と仮定して、 x/H を最大にする条件を示したものが表-1 である。 x/H は最大でも 2 程度であり、一般の急傾斜地の崩壊において、崩壊可能なパラメータの範囲内で考える限り到達距離が斜面高さの 2 倍を越えることはないと考えられる。

4. 不連続変形法(DDA)の適用

土砂法のモデルでは、斜面を直線で近似し、崩土の滑動中の変形を無視している。しかしながら、実斜面は大小複数の斜面で構成されており、また崩土は滑動中に刻々と変形する。そこで、実斜面の複雑な地形の影響および崩土の変形を個々のブロックシステムにより考慮可能な不連続変形法(DDA)をモデル斜面へ適用してシミュレーションを行った。図-5 に解析モデルおよび解析条件を示す。崩壊形態は、地質の境界面を崩壊面と仮定した。DDA の解析結果と土砂法の予測式において崩土の粘性が最大時($f_b=0.06$)、最小時($f_b=0.015$)および平均時($f_b=0.0375$)の計算結果を比較したものが図-6 である。解析結果が予測式の計算範囲内に収まっており、 $f_b=0.0375$ (流体抵抗係数の平均値)の時の予測式とがほぼ一致した。DDA と土砂法による予測式との適合性が確認できる。また、予測式を実斜面へ適用する場合、そのパラメータの設定が問題となるが、DDA の解析結果から、今回用いたモデル斜面に対しては、不確実性を伴う流体抵抗係数は $f_b=0.0375$ 程度であると推定できる。

5. 結論

本文では土砂法の予測式による崩土の到達距離の感度分析および DDA 解析による到達距離の計算結果との比較を行い以下の結論を得た。1. x/H に影響するパラメータは土質定数では ϕ および f_b であり、 ϕ および f_b の増加により x/H は減少する。2. x/H を大きくする斜面形状は、 H が小さく、 $\theta_u=40^\circ$ 程度の斜面である。3. 崩壊の規模を $h_{sm}=0.75\text{m}$ 程度と仮定すると、 $H=5\text{m}$ 、約 $\theta_u=40^\circ$ の時、 x/H は最大でも 2.0 程度であり、一般の崩壊可能なパラメータの範囲を考える限り、「警戒区域」の指定基準は支持できる。4. DDA と土砂法の予測式の適合性が確認でき、DDA により崩土の変形の考慮および不確実性を伴うパラメータの推定が可能である。

《参考文献》 1) 土砂災害防止法令の解説,(社)全国治水砂防協会,2003 2) 江頭・中他: 斜面崩壊に伴う災害危険度の評価法に関する研究, 砂防学会誌, Vol.9, No.3, pp11-19, 1996 3) 陳光育: 不連続変形法及び土木工学への適用, 九州計算力学シンポジウム, pp46-55, 2003 4) 芦田・江頭他: 斜面における土塊の滑動・停止機構に関する研究, 京大防災研究所年報, 第 27 号 B-2, pp331-340, 1984

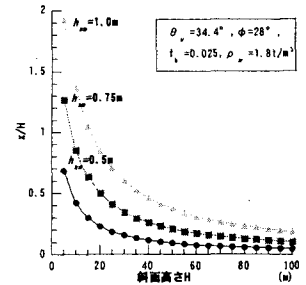


図-4 H , h_{sm} と x/H の関係

表-1 x/H を最大にするパラメータ

H (m)	θ_u ($^\circ$)	ϕ ($^\circ$)	f_b	h_{sm} (m)	x/H
5	40	15	0.015	0.75	1.97



図-5 DDA の解析モデル

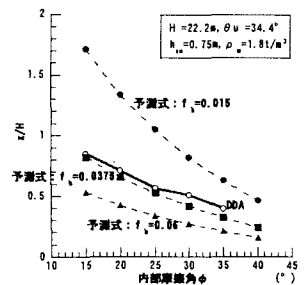


図-6 DDA と予測式の比較