

斜面上を滑動する崩壊土塊の到達距離の推定について

鳥取大学大学院 学 〇下條 洋介
アサヒコンサルタント(株) 学 土田 章仁
鳥取大学大学院 フェロー 西村 強
鳥取大学大学院 正 河野 勝宣

1. 緒言

斜面崩壊をはじめとした土砂災害による被害を軽減するためには、発生箇所、発生時刻に加えて崩壊土砂の到達域を予測できることが望ましい。既往の研究¹⁾では、2015年に発生した広島豪雨災害において、3度の崩壊が連続して発生し、先発の崩壊によって発生した法尻部の地形変化のため、後発の崩壊による土砂は運動方向を大きく変えた可能性が指摘されている¹⁾。このような指摘から、崩壊土砂量が同じであっても、崩壊形態により到達域、堆積形状が大きく異なることを想定しなければならない。そこで流下する土砂内の土塊同士の衝突や乗り越えといった運動形態が、土砂全体の運動と到達に及ぼす影響に関する簡易モデルの提案を行う。

既報の室内模型実験(図-1)では、流下試料の体積 V 、試料の初期配置時の水平面からの高さ h (以下、初期高さ h とする)、斜面傾度 β の増加に対し、到達距離 D_E が大きくなる傾向が観察されている²⁾。本報告ではまず、試料の流下運動を、一つの質点の一樣勾配斜面上の滑動としてモデル化し、到達距離 D_M の計算を行った。次に、試料箱下部の土塊が水平部に到達し、減速したところへ試料箱上部の土塊が衝突して運動エネルギーを付加するモデル、さらには、崩壊部下部の土塊が水平部に到達し、形成した静止域の上を崩壊部上部の土塊が乗り越えるモデルを仮定し、到達距離を推定する式を提案する。

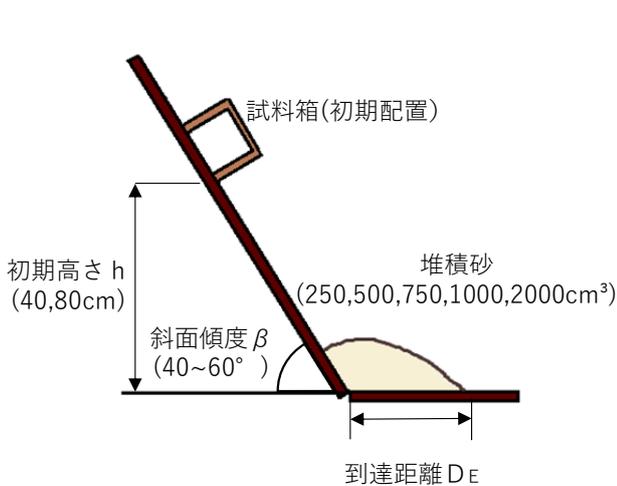


図-1 室内模型実験¹⁾

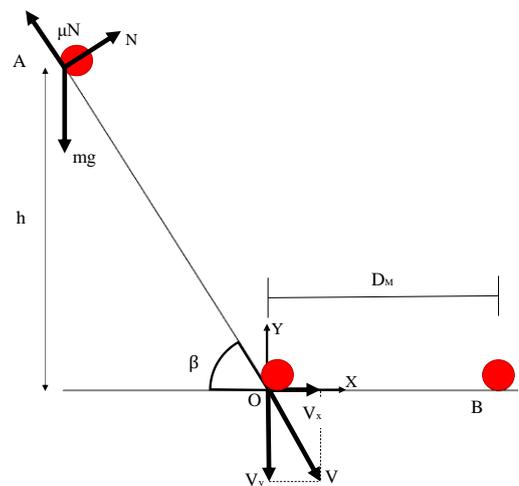


図-2 質点モデル

2. 質点の滑動による流下運動のモデル化

図-1の試料箱にある試料を図-2のA点にある質点としてモデル化する。O点において質点の斜面方向速度 V を鉛直方向と水平方向に分解すると、水平方向速度 V_x は式(1)で表される。

$$V_x = \sqrt{2gh(1 - \mu \cot \beta)} \cdot \cos \beta \quad (1)$$

O点での鉛直方向速度 $V_y=0$ とし、静止までを質点の滑動として計算すると到達距離 D_M は

$$D_M = \frac{h}{\mu \sin \beta} (\sin \beta - \mu \cos \beta) \cos^2 \beta \quad (2)$$

キーワード 斜面崩壊, 到達距離, 滑動, 衝突, 乗り越え運動

連絡先 〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101 鳥取大学大学院工学研究科 TEL 0857-31-5285

で表される。式(2)において到達距離 D_M は初期高さ h , 質点と斜面及び水平面との摩擦係数 μ , 斜面傾度 β に依存している。

模型実験と質点モデルの到達距離を比較した例を、図-3 に示す ($h=80\text{cm}$, $V=1,000\text{cm}^3$)。室内模型実験で求められた到達距離 D_E は、斜面傾度 β の増加に伴い大きくなる傾向を示している。この図では、 $V=1,000\text{cm}^3$ の例を示したが、 $250\sim 2,000\text{cm}^3$ で実施した数例についても、同様の傾向を観察している。

質点による解析について、同図には $\mu=0.4, 0.5, 0.6$ の3例を示しているが、その値に関わらず、斜面傾度 45° 前後で到達距離 D_M が最大となる傾向を示している。このことから、斜面を流下する粒状体の到達距離 D_E が、斜面傾度の増加に伴い大きくなる傾向は、一質点の斜面上の滑動では説明しきれないと言える。

室内模型実験では、水平部に先着して減速した砂試料を、これに後着した試料が（図-1における水平部の）右方向に押し出す様子、あるいは乗り越えていく様子が観察されている。そこで、これらの運動形態を、試料箱内に静置した試料を上部・下部に2分割し、2つの質点の衝突を含む運動とするモデル化、水平部に先着した砂試料が静止域を形成したとして斜面形状が初期（図-2）とは変更されたとするモデル化により表現を試みる。

3. 土塊の衝突を考慮したモデル

試料箱下部の土塊を S_1 , 試料箱上部の土塊を S_2 とし、水平部で減速した S_1 に、 S_2 が衝突するモデルを衝突モデルとする（図-4）。

図-4 に示す質点 S_1 と S_2 が同時に斜面上の滑動を開始して水平部に至るとする。それぞれが O 点に到達するまでの時間差 Δt は式(3)で表される。

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2(h_2 - h_1)}{g(\sin\beta - \mu\cos\beta)\sin\beta}} \quad (3)$$

O 点を原点とし、 S_2 が O 点に到達した時を $t=0$ とする。 O 点における速度成分に関する仮定は質点モデルと同様とし、 S_1 の O 点での水平方向速度を V_{x1} とすると、 $t=0$ における S_1 の速度 V_{x1}' 及び O 点からの距離 X_1 は、

$$X_1 = -\frac{\mu g \Delta t^2}{2} + V_{x1} \Delta t \quad (4)$$

$$V_{x1}' = -\mu g \Delta t + V_{x1} \quad (5)$$

で表される。

O 点における S_2 の水平方向速度を V_{x2} とする。衝突までの時間を t_c , 衝突位置を X_c とすると

$$\begin{cases} X_c = -\frac{\mu g t_c^2}{2} + V_{x1}' t_c + X_1 \\ X_c = -\frac{\mu g t_c^2}{2} + V_{x2} t_c \end{cases} \quad (6)$$

の2式で表される。これを解いて、

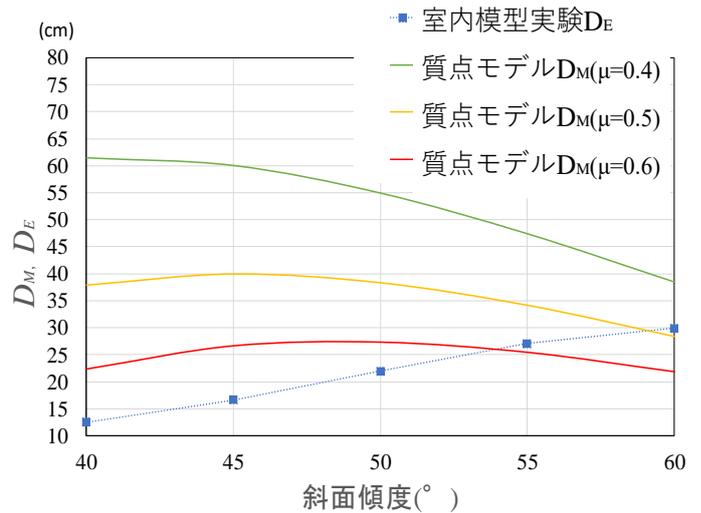


図-3 D_M, D_E の比較

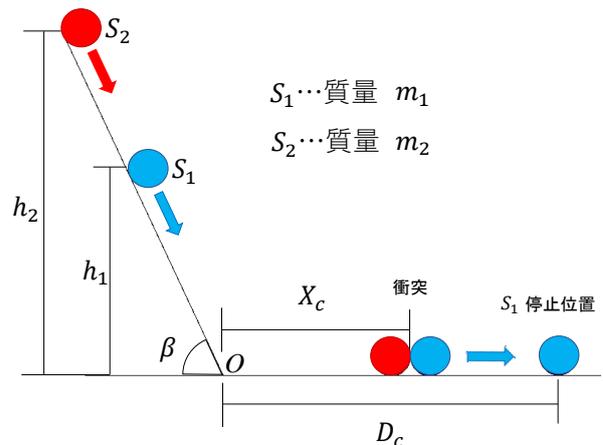


図-4 衝突モデル

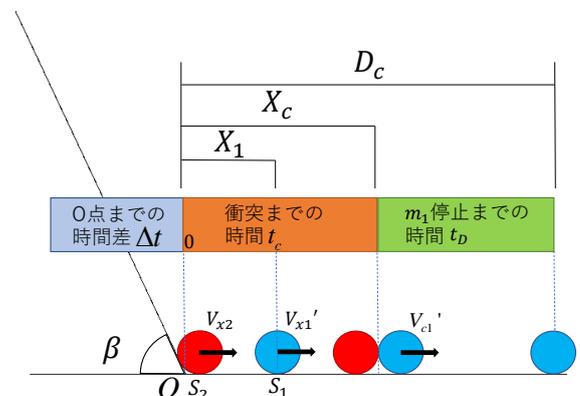


図-5 質点の衝突

$$t_c = \frac{X_1}{V_{x2} - V_{x1}'} \quad (7)$$

衝突直前の S_1 及び S_2 の速度 V_{c1} , V_{c2} は,

$$V_{c1} = -\mu g t_c + V_{x1}' \quad (8)$$

$$V_{c2} = -\mu g t_c + V_{x2} \quad (9)$$

で表される. 反発係数を e とし, 衝突直後の S_1 及び S_2 の速度を V_{c1}' , V_{c2}' とすると,

$$V_{c1}' - V_{c2}' = e(V_{c2} - V_{c1}) \quad (10)$$

運動量保存則より

$$m_1 V_{c1}' + m_2 V_{c2}' = m_1 V_{c1} + m_2 V_{c2} \quad (11)$$

到達距離 D_c は, S_1 の停止位置とする. (10), (11) 式を解いて V_{c1}' を求めると,

$$V_{c1}' = \frac{1}{m_1 + m_2} \{ (m_1 V_{c1} + m_2 V_{c2}) - e m_2 (V_{c1} - V_{c2}) \} \quad (12)$$

S_1 が静止するまでの時間を t_D ($t_D = \frac{V_{c1}'}{\mu g}$) とすると到達距離 D_c は

$$D_c = \frac{-\mu g t_D^2}{2} + V_{x2} t_D + X_c \quad (13)$$

で与えられる. 式(12)に関して, S_1 , S_2 の質量を m_1 , m_2 と置いて計算している. この式の値は, m_1/m_2 の値によって決定する.

衝突モデルにおいて, 衝突する質点の質量が等しい場合と, $m_2/m_1=2$ の場合で反発係数を変化させ, 到達距離 D_c の計算を行った.

D_E , D_M , D_C を比較したものを, 図-6 に示す. 摩擦係数は $\mu=0.5$, D_C に関して $h_1=80\text{cm}$, $h_2=100\text{cm}$ とする計算例を示している.

衝突モデルにおいて, 反発係数 e が大きいほど, あるいは m_2/m_1 が増加するほど D_C が大きくなった. しかし, グラフの形はいずれの場合も斜面傾度 45° 付近を最大とする曲線であり, D_M と同様の傾向を示している.

これらのことは, 試料箱上部が試料箱下部に衝突することによって到達距離が大きくなる可能性を示している. しかしながら, D_E の斜面傾度の増加に伴う変化の傾向を説明することはできなかった.

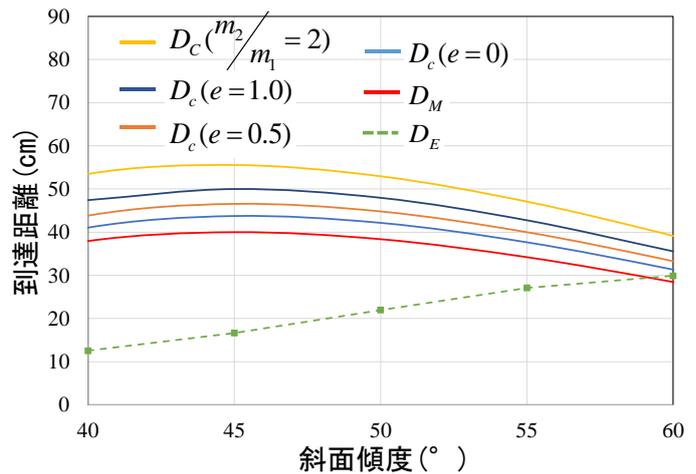


図-6 D_C , D_M , D_E の比較

4. 土塊の乗り越えを考慮したモデル

図-7 の, 土塊の乗り越えを考慮したものを乗り越えモデルとする. 試料箱下部が水平部に到達し, 静止することで形成した領域を一次堆積域とする. 一次堆積域の斜面傾度 β' は, 室内模型実験で使用した試料の安息角である 30° とした.

運動方程式は, 質点モデルと同様である. P 点での AP 方向速度を V_1 とし, PQ 方向速度はこれに $\cos(\beta - \beta')$ を乗じた V_1' によって与えられる.

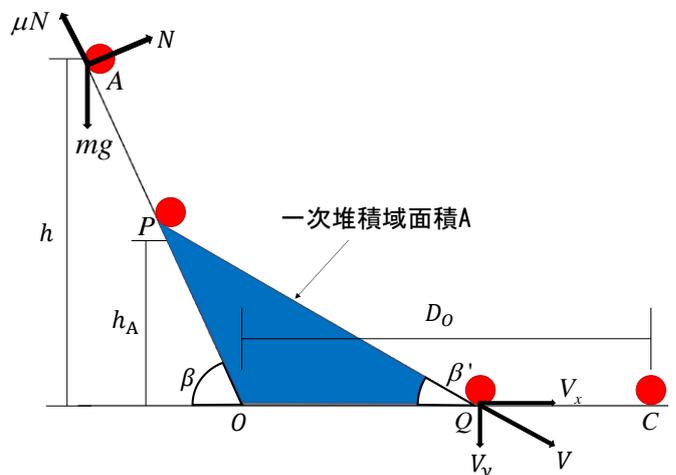


図-7 乗り越えモデル

$$V_1' = \left\{ \sqrt{2g \frac{h-h_A}{\sin \beta} (\sin \beta - \mu \cos \beta)} \right\} \cos(\beta - \beta') \quad (14)$$

PQ間の運動は、 V_1' を初期速度として与えた運動方程式を解いて、Q点での水平方向速度 V_x を求める。

$$V_x = \left\{ \sqrt{V_1'^2 + \frac{2gh_A}{\sin \beta'} (\sin \beta + \mu \cos \beta)} \right\} \cos \beta' \quad (15)$$

よって、QC間は D_M と同様に計算すると、

$$QC = \frac{V_x^2}{2\mu g} \quad (16)$$

で計算される。到達距離 D_o は、これにOQの長さを加えた式で与えられる。

$$D_o = \frac{V_x^2}{2\mu g} + h_A \left(\frac{1}{\tan \beta'} - \tan \beta \right) \quad (17)$$

また、一次堆積域の面積Aが到達距離に及ぼす影響を観察するため、図-8のように β' は 30° に固定し、面積 $A=10\text{cm}^2$ の場合と、 $A=40\text{cm}^2$ の場合で D_o を計算している。図-9に D_E 、 D_M 、 D_o を比較したものを示す。

D_o は、斜面傾度の増加に伴い大きくなる傾向を示した。また、一次堆積域の面積Aが拡大すると、 D_o は大きくなった。

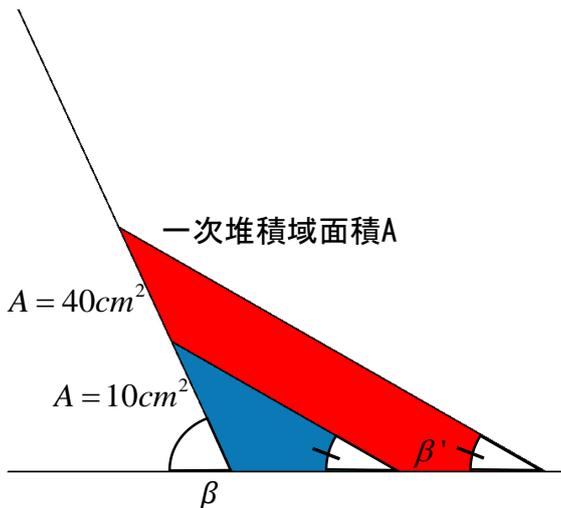


図-8 一次堆積域の面積

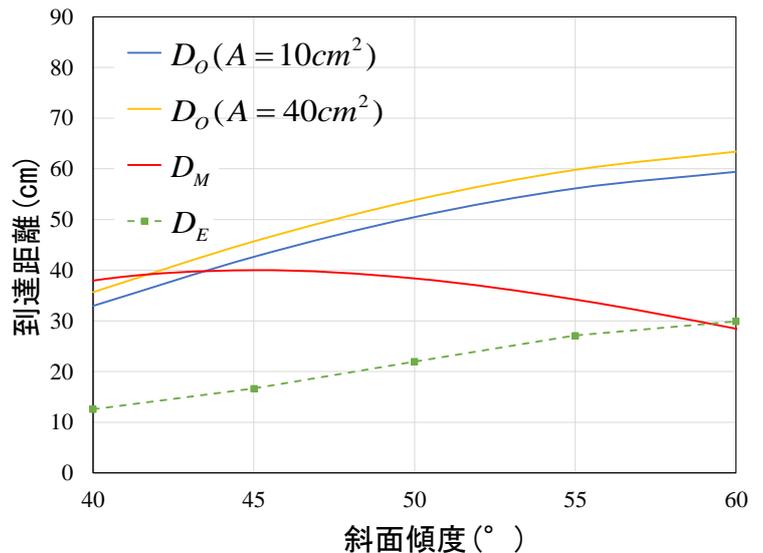


図-9 D_o, D_M, D_E の比較

参考文献

- 1) 土田 孝, 森脇 武夫, 熊本 直樹, 一井 康二, 加納 誠二, 中井 真司: 2014年広島豪雨災害において土石流が発生した溪流の状況と被害に関する調査, 地盤工学ジャーナル Vol.11, No.1, pp.33-52, 2016.
- 2) 土田 章仁, 下條 洋介, 西村 強, 河野 勝宣: 室内模型実験による斜面崩壊土砂の堆積形状及び到達域に関する研究, 第45回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp43-148, 2018.