

室内模型実験による斜面崩壊土砂の 堆積形状と到達域に関する研究

土田 章仁^{1*}・下條 洋介²・西村 強^{3**}・河野 勝宣³

¹アサヒコンサルタント株式会社 地質調査部 (〒680-0911 鳥取市千代水四丁目28)
(鳥取大学大学院工学研究科博士後期社会人課程)

²鳥取大学工学部 土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南四丁目101)

³鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南四丁目101)

*E-mail: tsuchida@asahic.co.jp **E-mail: tnishi@cv.tottori-u.ac.jp

本研究では、崩壊土砂・岩屑の到達域の予測モデルを考える上で大切な崩壊物の堆積形状について、砂試料を用いた室内模型実験を実施して観察を行った。実験では、傾斜した板上を流下する砂が下部平面に到達したときに形成する堆積物の形状に注目した。そして、砂の堆積形状、到達域と斜面勾配などとの関係について整理した。その結果、流下体積と同体積の立方体の一辺長を基準とする長さとして選び、堆積域などの平面的広がりを整理すれば、実験結果がよく整理できた。また、斜面を流下する砂を質点の運動として計算した。その結果、先行する流下物が形成した斜面上を後続の流下物が通過すると仮定したモデルでは、砂の体積が大きいほどその到達距離が大きくなるという実験結果に対応した計算結果が得られた。

Key Words : landslide, cohesionless granular flow, laboratory experiment, mass point motion

1. 緒言

我が国は、国土の約70%が山地や丘陵地であり、山間部の住宅地では、その背後に急傾斜地が迫っていることが多い。また、産業の発展とともに山間部にも多くの主要道路が整備されてきた。このような道路は、山間部を縫うように建設されており、多数のり面を有している。さらに、我が国には、脆弱な地盤が広く分布しており、かつ、地盤災害の誘因となる降雨や地震が多い。このため、道路の近傍の地山や住宅背後の急傾斜地などでは、斜面崩壊、土石流、落石および岩盤崩壊などの土砂災害が多数発生している。近年では、中越地震(2004)、岩手宮城内陸地震(2008)、紀伊半島豪雨などによる大規模崩壊(2011、深層崩壊)および広島での集中豪雨による土石流災害(2014)など、約10年間でも地震や降雨による土砂災害が多発している。このような土砂災害時に斜面を流下する土砂や岩屑から人命、財産等を守るためには、斜面崩壊の発生箇所や発生時刻の予測と共に、崩壊土砂や岩屑の到達域の予測技術の確立が必要と考えられる。

このような土砂災害に関する予測技術の内、斜面崩壊の発生場所や発生時刻については、土壌雨量指数などを用いた大雨警報・注意報などのように既に実用化されているものもある。また、近年では、土砂災害発生場所の

予測精度の向上を目指して、レーザープロファイラなどによる詳細な数値地形地図や各種の計測機器・通信技術などを活用する研究も進められている¹⁾。しかしながら、崩壊の発生場所やその時刻の予測精度は、未だ十分とは言いがたい。これに加えて、落石や降雨・地震に伴う突発的な斜面崩壊では、崩壊が発生してからの保全対象物までの土砂や岩屑などの到達時間が非常に短い。したがって、このような状況下で防災施設計画(ハード対策)、警戒区域や避難経路の設定(ソフト対策)を行うためには、斜面崩壊の発生時刻の予測だけではなく、崩壊が発生した場合の土砂や岩屑の到達域の予測モデルを用いて、被害範囲の予測や対策施設の設計を行うことが必要となる。そして、この予測モデルの開発を行うためには、土砂や岩屑の移動速度、到達距離など、その運動メカニズムを明らかにするとともに、土砂や岩屑の堆積形状や到達域の傾向を把握しておくことが大切である。

このようなことから、本研究では、土砂や岩屑の堆積形状、到達域と斜面勾配などとの関係について、砂試料を用いた室内模型実験を実施して観察を行った。実験では、傾斜した板上を流下する砂が下部平面に到達したときに形成する堆積物の形状に注目した。そして、実験結果に基づいて、斜面勾配、砂の流下量および流下長さが砂の堆積形状、到達域に与える影響について考察した。

また、1つの試みとして、斜面を流下する砂を質点の運動としてモデル化し、その計算値と実験結果の比較を行い、斜面の傾斜角度と堆積した砂の流下方向の長さとの関係について考察した。

2. 室内模型実験

実験には、粒径2mm以下で気乾燥状態の砂試料（鳥取砂丘砂、 $\rho_s=2.652\text{g/cm}^3$ 、 $w=0.23\%$ 、安息角 30° ）を使用した。図-1に室内実験で用いた模型を示す。斜面を流下した砂の堆積形状、到達域は、砂を流下させる斜面の勾配、流下する量および流下長さによって変化すると考えられる。このことから、斜面の傾斜角度 β が35、40、45、50、55°の5通り、砂の流下質量 m が100、300、500、700、900gの5通り（流下させる砂の量を体積で制御することが難しいため質量を用いた）、砂の流下長さ（流下させる砂の斜面上の初期位置） L が10、20、30cmの3通りの計75通りの条件で室内実験を実施した。なお、斜面などの表面の粗度も砂の堆積形状、到達域に影響を与えることが考えられるが、今回の実験では一定としている。

実験では、まず実験に用いる砂試料の質量を測り、図-1のように斜面の所定の位置に設置した試料箱に測った砂を入れ、砂表面が斜面に平行になるようヘラ棒で均す。そして、試料箱を開放して砂を流下させる。試料箱から流下させた砂試料が完全に堆積し、砂粒の動きが停止した後、図-2に示すように、砂の流下方向の長さ（最大到達距離 D ）とそれに直交する方向の長さ（堆積砂の最大幅 W ）を測定した。なお、流下前の試料箱内の砂の平均密度 ρ_{mean} は 1.489g/cm^3 、相対密度は32.7%であった。

3. 室内模型実験結果および考察

(1) 斜面の傾斜角度と堆積状況との関係

室内模型実験結果の1例として、 $m=900\text{g}$ 、 $L=30\text{cm}$ における斜面傾斜角度毎の堆積状況を図-3に示す。

図-4は全75通りの実験結果を砂の流下長さ L ごとに分類して整理した斜面傾斜角度 β と最大到達距離 D との関

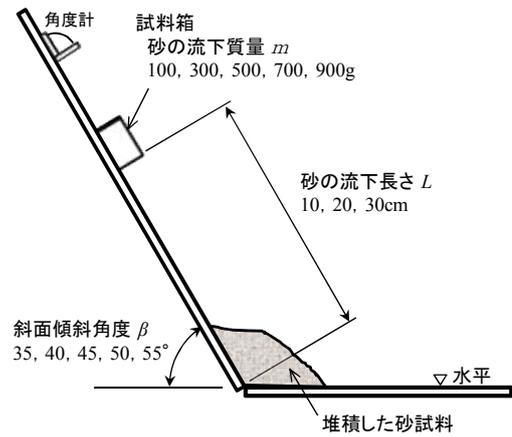


図-1 実験装置の概略図

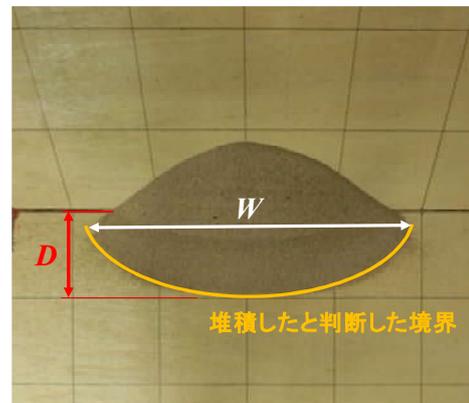


図-2 最大到達距離 D と堆積砂の最大幅 W

係を示したものである。また、同様に、図-5は斜面傾斜角度 β と堆積砂の最大幅 W との関係を示したものである。図-4および図-5の各図には、同一の L における m が100、300、500、700、900gでの β と D （または W ）との関係が示されている。

図-4 A, B, Cに示すように、最大到達距離 D は、何れの m においても、 β の増大とともに、増加する傾向が観察された。また、同じ L の場合、 m が大きいくほど、 D が大きくなっていることが判る。なお、 D は、 L の違いによる顕著な変化は観察されなかった。

一方、堆積砂の最大幅 W は、図-5 A, B, Cに示すように、 β の増大に伴う顕著な変化は観察されなかった。また、 D と同様に、同じ L の場合、 m が大きいくほど、 W は

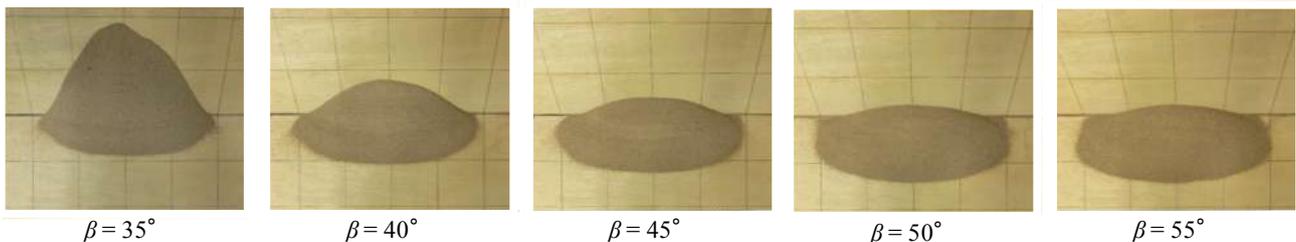


図-3 斜面傾斜角度毎の堆積状況 ($m=900\text{g}$ 、 $L=30\text{cm}$)

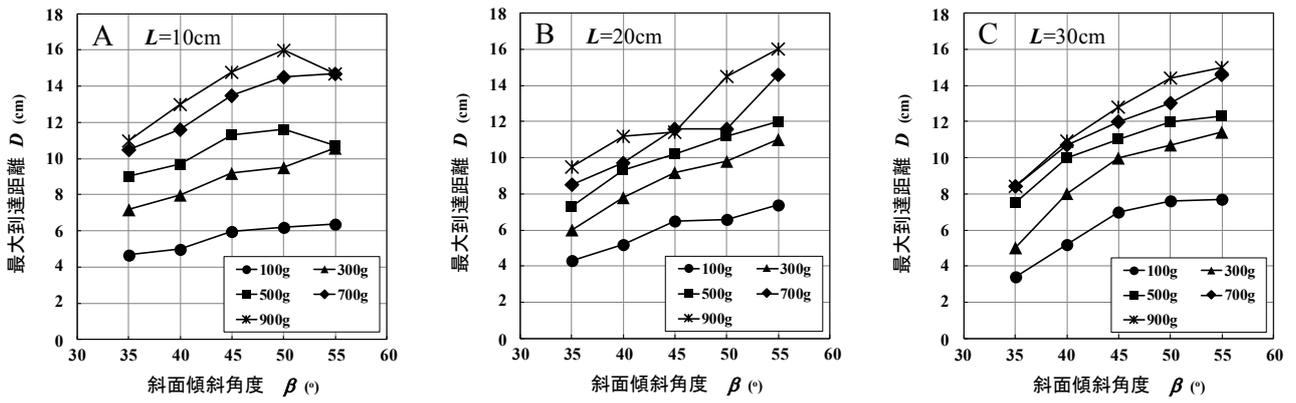


図4 斜面傾斜角度 β と最大到達距離 D との関係

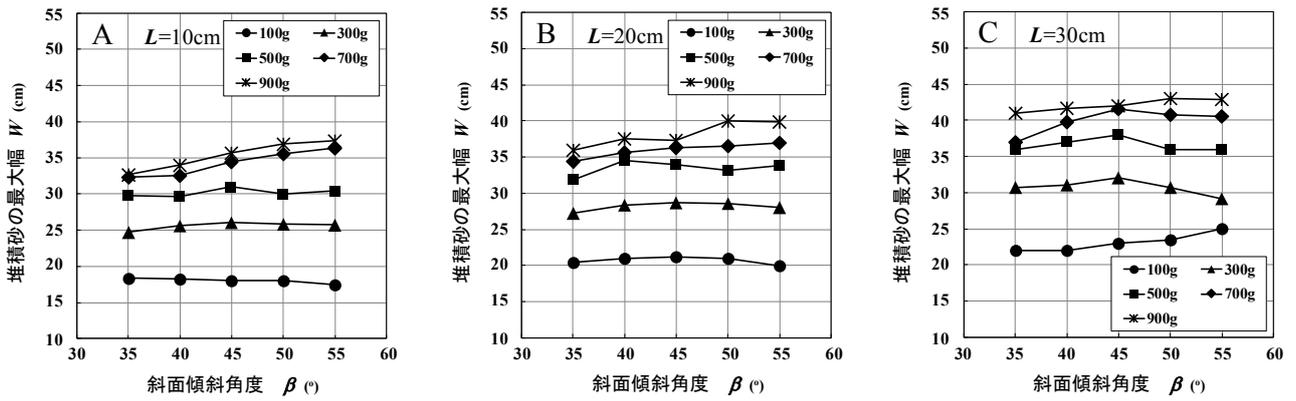


図5 斜面傾斜角度 β と堆積砂の最大幅 W との関係

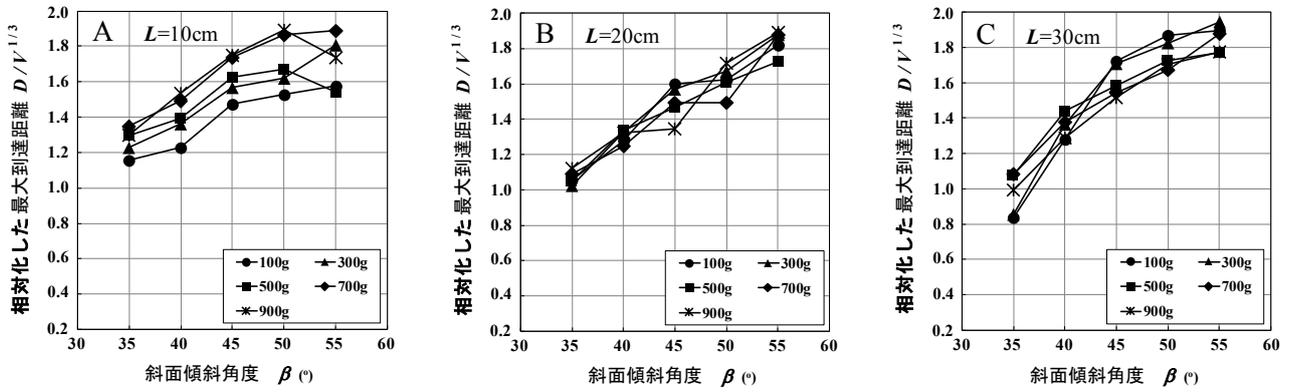


図6 斜面傾斜角度 β と相対化した最大到達距離 $D/V^{1/3}$ との関係

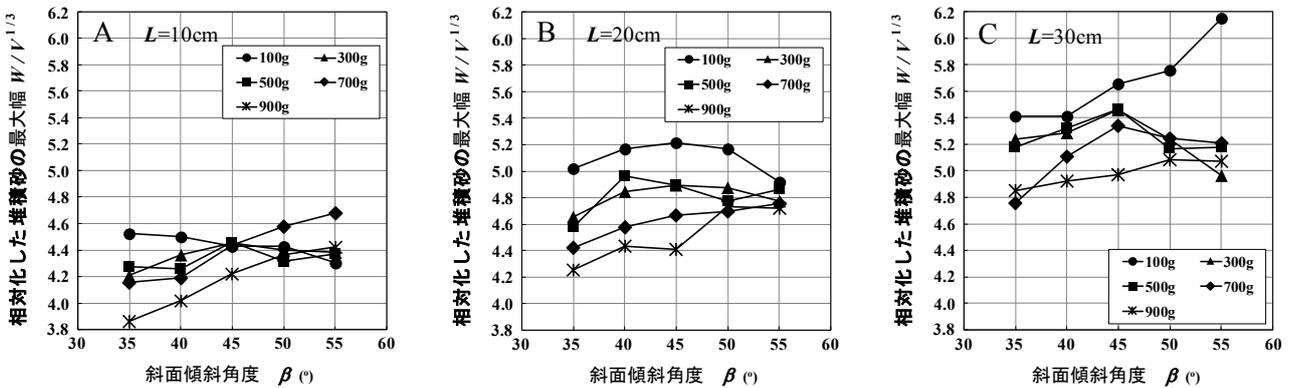


図7 斜面傾斜角度 β と相対化した堆積砂の最大幅 $W/V^{1/3}$ との関係

大きくなった。そして、 W は、 L の増大とともに、若干増加する傾向が見られた。

(2) 到達域の定量的表現

今回の実験における最大到達距離 D は、斜面傾斜角度 β だけでなく、流下させた砂の体積の影響も受けている。また、堆積砂の最大幅 W も流下させた砂の体積の影響も受けている。これらのことから、流下させた砂試料の体積と同体積を有する立方体の一辺長を用いて、 D および W を相対化させた値で実験結果の整理を試みた。具体的には、試料箱内の砂の体積 V を $V = m / \rho_{max}$ で求め、これの三乗根($V^{1/3}$)で D および W を除した値($D/V^{1/3}$, $W/V^{1/3}$)で整理を行った。

図-6は、全75通りの実験結果を砂の流下長さ L ごとに分類して整理した β と相対化した最大到達距離 $D/V^{1/3}$ との関係を示したものである。同様に、図-7は β と相対化した堆積砂の最大幅 $W/V^{1/3}$ との関係を示したものである。図-6および図-7の各図には、同一の L における各 m での β と $D/V^{1/3}$ (または $W/V^{1/3}$)との関係が示されている。

前出の図-4の β と D との関係では、 $m = 900g$ の場合の D が $m = 100g$ の D の1.8~2.6倍程度となり両者の差が大きかったが、図-6のように $D/V^{1/3}$ を用いて整理すると、これが0.8~1.2倍程度となった。 β と $W/V^{1/3}$ との関係についても同様の傾向であった(図-5, 図-7)。

このように、 D や W を $V^{1/3}$ で相対化した、砂の体積の大きさに依存しない無次元量($D/V^{1/3}$ または $W/V^{1/3}$)を用いて実験結果の整理を行ったほうが、砂の質量 m (あるいは体積 V)を用いた整理に比べると、 β の増大に伴う最大到達距離や堆積砂の最大幅との関係を把握し易い結果となった。

4. 最大到達距離 D の質点モデルによる検討

前章の記述をまとめると、斜面傾斜角度 β が大きくなれば最大到達距離 D は大きくなり、それを $D/V^{1/3}$ を用いて整理すると β の影響がよく表現できること、一方、堆積砂の最大幅 W への β の大小の影響が明確ではないことである。後者は、堆積物の形状、例えば堆積物の高さにも注意を払いながら考察する必要があるかも知れない。ここでは、流下する砂の運動を、粗い斜面上を滑動する質点の運動としてモデル化し、その計算値と実験結果の比較を行い、 β と D との関係について考察する。

図-8(a)に流下質量 m の質点(質量 m)が、斜面上を滑動して下部水平面に至るモデルを示した。ここに、 μ は砂-斜面間の摩擦係数である。質点のB点における速度の水平成分を、水平面への入射速度として滑動距離

D_x を求めると次の式(1)となる。

$$D_x = \frac{h}{\mu \cdot \sin \beta} \cdot (\sin \beta - \mu \cdot \cos \beta) \cdot \cos^2 \beta \quad (1)$$

この式を用いて計算した D_x と D との比較を、 $L = 30cm$ を例にとり、図-9(a)に示した。 D_x は図中の○印で示しており、一斜面と水平面から成るモデル(モデル1)である。計算では、摩擦係数を $\mu = 0.55$ として斜面ならびに水平面とも同一としている(摩擦係数は0.3-0.6の間で試算した)。また、計算に用いた滑動開始時点での質点の高さ(図-8(a)の h)は一定であり、室内模型実験時の最大値である $L = 30cm$, $\beta = 55^\circ$ での値とした。重力加速度は $g = 980cm/sec^2$ である。図-9(a)のモデル1での D_x と D と比較より、 β の変化に対する D の変化について、計算結果は実験で得られた傾向を示しておらず、 $\beta > 45^\circ$ では D_x が減少する傾向を示している。これは、これはB点における速度の水平成分が $v_x = v \cdot \cos \beta$ であり、 β の値が 45° を超えると落下高さが一定であっても余弦の値が減少するため、当然の結果と言える。また、このモデル1では、 D_x の計算時に、流下する砂試料の体積が考慮されていない。

そこで、図-8(b)に示すような、斜面-水平面接続部に $\beta' < \beta$ なる斜面PQを仮定したモデル(モデル2とする)を用いた計算例を追加した。この β' なる傾斜の面は、流下していく砂の先頭部が下部水平面に到達したとき、水平面との衝突により運動エネルギーを失って静止状態に至る(一次堆積域)として仮定した面である。追加した計算例は、その堆積域の表面を後続の砂が滑動すると仮定したものであり、図-8(b)中の一次堆積域の面積 S の大小によって体積の影響を考慮しようとする試みである。質点のQ点における速度の水平成分を、このモデルでの水平面への入射速度として、滑動距離 D_x (B点からの距離として整理する)を求めると次式となる。

$$D_x = \frac{v_x^2}{2\mu g} + h_1 \cdot \left(\frac{1}{\tan \beta'} - \frac{1}{\tan \beta} \right) \quad (2)$$

計算に用いた滑動開始時点での質点の高さ h (一定値)、 β , g および μ は、モデル1と同じ値である。斜面PQの傾斜角度 β' は、砂の安息角程度と考えて $\beta' = 30^\circ$ とした。まず、2つの斜面の接合点Pの鉛直高さ h_1 を5cm, 10cmとした計算例を図-9(a)に示す(図中の△, ◇印)。この結果より、実験結果と同様に、斜面傾斜角度 β が大きくなれば D_x も大きくなる傾向を示していることがわかる。なお、高さ h_1 および β' を一定のまま β を変化させると、 β が大きくなるにつれて一次堆積域の面積 S も大きくなるため注意が必要である。つまり、一次堆積域内体積が流下全体積を上回る場合が生じる。そこで、一次堆積域の面積 S を一定とした計算例を図-9(b)に示した。

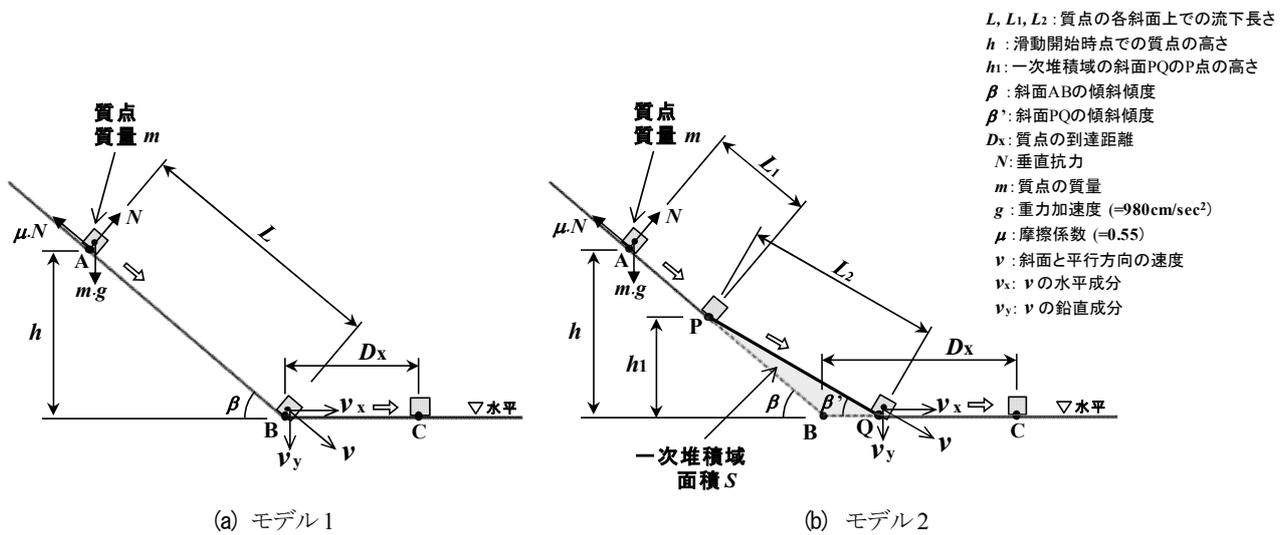


図-8 砂の最大到達距離の計算モデル

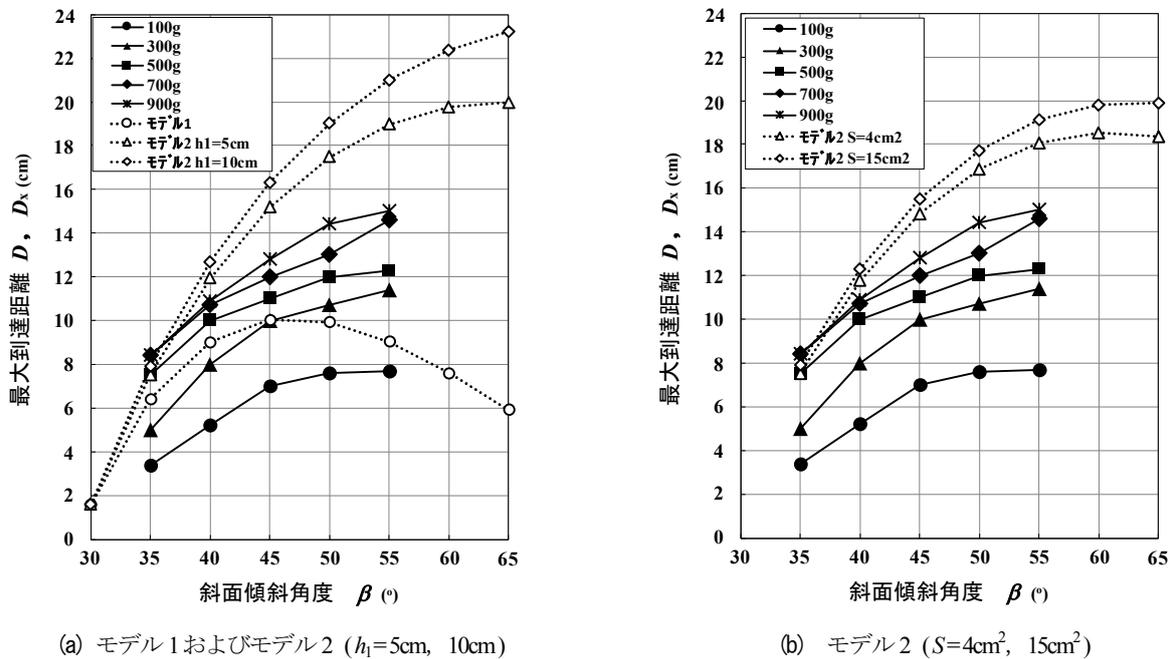


図-9 質点モデルと室内実験の最大到達距離の比較

ちなみに、 $S = 4\text{cm}^2$ では、 $h_1=2.6\text{cm}$ ($\beta=60^\circ$)程度、 $S=15\text{cm}^2$ では、 $h_1=5.1\text{cm}$ ($\beta=60^\circ$)程度などとなっている。斜面傾斜角度 β が大きくなれば D_x も大きくなるという実験結果に対応した傾向を示しており、高角度 $\beta > 50^\circ$ では D_x の増大が図-9(a)の結果に比べて小さくなる傾向がみられる。

なお、以上のモデル計算は、堆積域が幅 W 、高さ H を伴うものとして実験では求められているのに対して、 D のみに注目したものとなっており、かつ、実験上は確認できていない一次堆積域という領域を仮定している。今後は、到達域の推定を実施する際の一次堆積域を考慮することの効果などについて、個別要素解析などを用いて検討を実施する予定である。

5. 結言

本研究では、崩壊土砂・岩屑の到達域の予測モデルを考える上で大切な崩壊物の堆積形状について、砂試料を用いた室内模型実験を実施して観察を行った。そして、実験結果に基づいて、斜面勾配、砂の流下量および流下長さが砂の堆積形状、到達域に与える影響について考察した。また、1つの試みとして、斜面を流下する砂を質点の運動としてモデル化し、その計算値と実験結果の比較を行い、 β と D との関係について考察した。その結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 室内模型実験の結果、最大到達距離 D は、何れの m においても、 β の増大とともに、増加する傾向が

観察された。また、同じ L の場合、 m が大きいほど、 D が大きくなった。なお、 D は、 L の違いによる顕著な変化は観察されなかった。

- (2) 堆積砂の最大幅 W は、 β の増大に伴う顕著な変化は観察されなかった。また、 D と同様に、同じ L の場合、 m が大きいほど、 W は大きくなった。そして、 W は、 L の増大とともに、若干増加する傾向が見られた。
- (3) 流下させた砂試料の体積 V と同体積を有する立方体の一辺長 ($V^{1/3}$) を用いて D および W を相対化させた値 ($D/V^{1/3}$, $W/V^{1/3}$) で実験結果の整理を行った。その結果、砂の体積の大きさに依存しない無次元量 ($D/V^{1/3}$ または $W/V^{1/3}$) を用いて実験結果の整理を行ったほうが、砂の質量 m (あるいは体積 V) を用いた整理に比べると、 β の増大に伴う最大到達距離や堆積砂の最大幅との関係を把握し易い結果となった。
- (4) 流下する砂の運動を、粗い斜面上を滑動する質点の運動としてモデル化した計算を行い、 β と D との関係について考察した。その結果、先行する流下物が形成した斜面上を後続の流下物が通過すると仮定したモデルでは、砂の体積が大きいほどその到達距離が大きくなるという実験結果に対応した計算結果が得られた。

本研究では、傾斜した板上に砂試料を流下させた室内模型実験から、流下した砂が下部平面に到達したときに形成する堆積物の形状が斜面勾配、砂の流下量および流下長さの影響を受けることを示した。特に、砂の流下量は、最大到達距離と堆積砂の最大幅の両者に影響を及ぼしていた。また、斜面を流下する砂を質点の運動とした計算においては、一次堆積域という領域を仮定して砂の体積の影響を考慮することで、実験結果に対応した計算結果が得られた。これらは、斜面から発生した崩壊土砂・岩屑などの堆積形状や到達域が、崩壊物の体積とその堆積の過程によって変化することを示唆しているものと考えられる。今後は異なる条件下での実験結果や実際の斜面崩壊データでの傾向を整理・検討するとともに、個別要素解析などを用いた検討を実施する予定である。

参考文献

- 1) 土砂災害予測に関する研究集会—現状の課題と新技術—, 防災科学技術研究所資料, 第405号, 2016.

A SMALL SCALE EXPERIMENT ON ACCUMULATION AND HORIZONTAL PROPAGATION OF COHESIONLESS GRANULAR AVALANCHE

Akito TSUCHIDA, Yosuke SHIMOJYO, Tsuyoshi NISHIMURA,
and Masanori KOHNO

Investigation on the propagation mechanisms involved in a gravity-driven movement of a mass of rock and identification of parameters influencing velocity and deposit characteristics will work for reduction of disaster caused by landslide. The basic phenomenon studied in this paper is an unconstrained flow of dry sand down an inclined board at small scale, followed at the toe by a horizontal plane on which the mass spreads. Influence of the falling height and the volume of the falling material on the runout characteristics, the length, width and height of the runout deposit on the horizontal plane, are summarized. In order to better identify these characteristics, a mass point sliding down on inclined board is introduced.