

9 崩土の運動に関する模型実験

建設省土木研究所 ○工藤 賢二
 寺本 和子
 吉松 弘行
 建設省傾斜地保全課 仲野 公章
 (株)神戸製鋼所 中西 宏

1. まえがき

急傾斜地における斜面崩壊対策において、被災程度の予測や対策を合理的なものにするためには、斜面崩壊の発生機構を明らかにするだけでなく、崩壊土砂の運動機構を明らかにすることが必要となる。しかし、崩土の運動機構については研究事例も少なく機構解明が進んでいない。そこで、崩土流下の模型実験、崩土材料の物性試験の結果を用いて主に流速、擁壁に作用する衝撃力についてシミュレーションを行った。シミュレーションは、運動材料を多数のボールの集合体とみなす剛体要素モデルである。

2. 実験の概要

実験の概要を図-1に示す。斜面は角度 40° であり、斜面下端に設置してある擁壁に崩土が衝突する際の衝撃力、斜面流下中の速度、層厚、底面抵抗、および密度を測定した。崩土材料は、砂、シルト、ロームでそれぞれ含水比を2種類変え計6タイプとした。なお、角度 50° でロームの含水比2種類についても実験を行った。

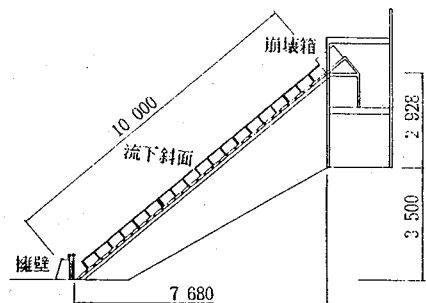


図-1 実験装置概念図

3. 実験結果

崩土の擁壁に対する衝撃力の時間分布を図-2に示す。図より、崩土材料による衝撃力の違いが見られる。また含水比の違いにより、高含水比の方が衝撃力は小さくなる。

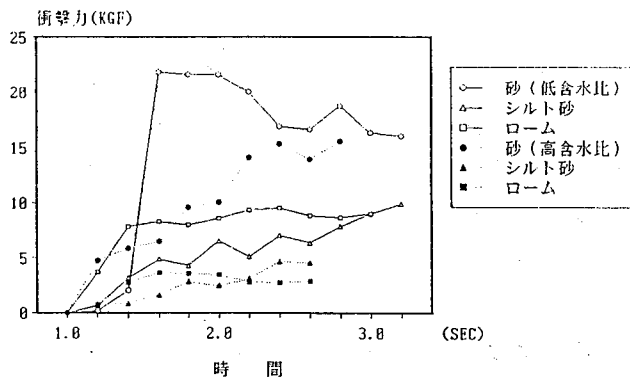


図-2 衝撃力分布図

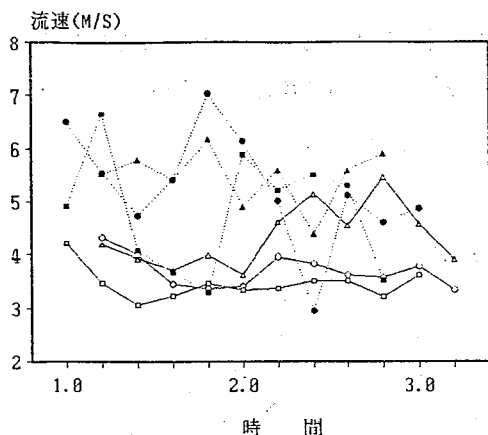


図-3 速度分布図

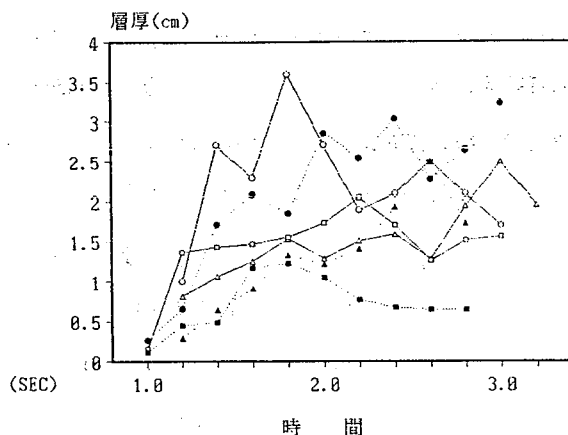
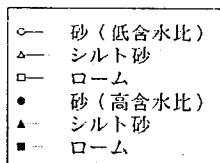


図-4 流下中層厚分布図



流下速度の時間分布を図-3に示す。これより速度に関しては、データのばらつきがあり一概には言えないが、崩土材料による違いがあまり見られない。また、高含水比の方が速度が大きく、40°の場合、低含水比の方は、斜面中間部で計測している速度と比べるとだいたい一定であるが、高含水比の方は加速している。

層厚の時間分布を図-4に示す。あまり違いがみられないが、全体的には高含水比の方が層厚が大きい。しかし、水を含んだ粒子がくっついて一部だけ層厚が高くなっている事も考えられ、層厚は側面から計測しているので3次元的にそういった傾向がみられる理由ではない。

4. シミュレーション

今回行ったシミュレーションは、Cundall による離散ボールモデルであり、粒状体を不連続体である剛体要素の集合にモデル化し、要素間の力を適当なバネ、ダッシュボットおよびスライダーで表現して、個々の要素の運動方程式を逐次積分により求め、不連続体の動力学挙動を数値解析により求めるものである。

図-5にボールモデルを示す。本シミュレーションの基本的な仮定は、

- (1) ボールの質量はその重心に集中する。
- (2) ボールの変位はその重心点の移動変位 (X および Y 方向の移動) で代表させる。
- (3) ボールは粘弾性体とし、接触している相互のボールの重心を結ぶ方向およびそれに直角方向にフォークタイプのバネ、ダッシュボットの配置を考える。
- (4) 他のボールまたは斜面に接触しているボールの滑りは Mohr-Coulomb の条件に従う。
- (5) 接触している2つのボールの離散は、接触点で所定の粘着力以上の力が作用する場合に起こる。

いま、ボール i とボール j の距離が両者の半径の和よりも小さいとすると、両者は接触していると判断される。ボール中心 i よりボール中心 j に向かう方向を正とする局所座標 X、Y を考え、ボール i および j の X 方向の時刻 t での速度を $\dot{X}_i$ 、 $\dot{X}_j$ とすると i j 方向に作用する力は

$$F_{ij}^t = f_{ij}^t + \eta (\dot{X}_i^t - \dot{X}_j^t) \quad (1)$$

ただし、 $f_{ij}^t = k (\dot{X}_i^t - \dot{X}_j^t) \Delta t + f_{ij}^{t-\Delta t}$

Δt : 時間刻み幅

$f_{ij}^{t-\Delta t}$: 時刻 $(t-\Delta t)$ での接触力

k : バネ定数

η : 粘性係数

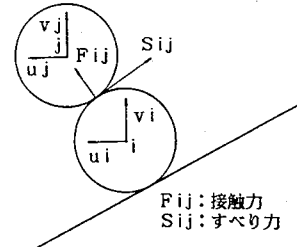


図-5 ボールモデル

局所座標系の Y 方向のボール i および j の速度をそれぞれ $\dot{Y}_i$ 、 $\dot{Y}_j$ とすると、ボール i j の接触面でのずり抵抗力は式 (1) と同形で

$$S_{ij}^t = s_{ij}^t + \eta_s (\dot{Y}_j^t - \dot{Y}_i^t) \quad (2)$$

ただし、 $s_{ij}^t = k_s (\dot{Y}_j^t - \dot{Y}_i^t) \Delta t + s_{ij}^{t-\Delta t}$

k_s : ずり変形に対するバネ定数

η_s : ずり変形に対する粘性係数

今回は、仮定 (5) のボールの離散に関する判定基準を 2 タイプ (低粘度、混合型) 検討した (表-1)。

表-1 ボールの離散に関する判定

これらより、ボール i の運動方程式は、

$$m_i \ddot{u}_i = m_i g_x + \sum F_{ij}^x$$

$$m_i \ddot{v}_i = m_i g_y + \sum F_{ij}^y$$

u_i, v_i : 全体座標系でのボール i の速度

g_x, g_y : 重力加速度の X, Y 成分

となる。

各ボールについて同様の運動方程式をたて、それらを時間に関し数値積分して各ボールの運動を求めた。

タイプ	接触力	すべり力
混合型	粘着力を越えるバネ力で分離 分離するまで粘性力が作用 $f_{ij}^t < -c$ の時 $f_{ij}^t = -c$	s_{ij}^t がクーロン則の抵抗力を 越えるとき s_{ij}^t にその抵抗 則を適用 $ s_{ij}^t > c + \mu f_{ij}^t$ のとき $S_{ij}^t = s_{ij}^t = c + \mu f_{ij}^t$
低粘度	粘着力を越える引張力で分離 $F_{ij}^t < -c$ の時 $F_{ij}^t = -c$	S_{ij}^t がクーロン則の抵抗力を 越えるとき S_{ij}^t にその抵抗 則を適用 $ S_{ij}^t > c + \mu F_{ij}^t$ のとき $S_{ij}^t = c + \mu F_{ij}^t$

5. 計算結果

本シミュレーションでは、試料の摩擦係数として3軸圧縮試験の結果を用い、2次元の計算を行った。

その計算結果ではボールの速度および擁壁に作用する衝撃力は実験による計測値よりも大きめに求まった。その理由の一つに実験のさいの側壁の影響が考えられる。(実験では流路の幅は 30 cmである。) 若干摩擦係数を大きくして 0.73 とした場合の流路下端位置でのボール平均速度を図-6に示す。この場合、ボール平均速度は実験値よりまだ大きい部分もあり、摩擦係数の値をもう少し大きくとる必要がある。ボールの流下状態を図-7に示す。

6. 考察

今回、実験は同じ材料で含水比を変えて行った。含水比の違いによって擁壁に対する衝撃力、流下速度、および層厚に違いが見られる。ここでは、データのばらつきが大きく考察は避けるが、今後、違った面からのアプローチを踏まえて考察していくつもりである。

シミュレーションでは、速度および擁壁に対する衝撃力について結果の比較を行った。シミュレーション結果と実験計測値の差に影響している要因の一つに層厚が考えられる。実験では、層厚がMaxで 6cm程度であった。今回のシミュレーションでは、ボール直径を 3cmとしており、今後層厚に着目して計算する場合には、ボール直径を小さくして、また、ボール個数を多くして計算する必要があると思われる。

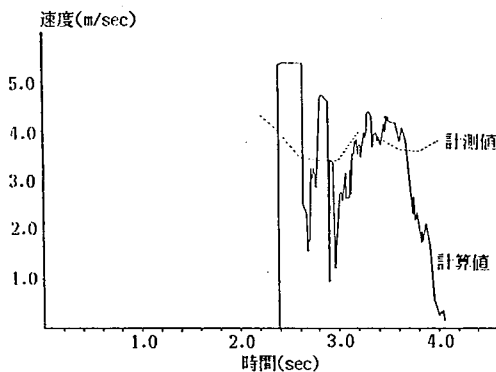


図-6 計算結果速度分布図

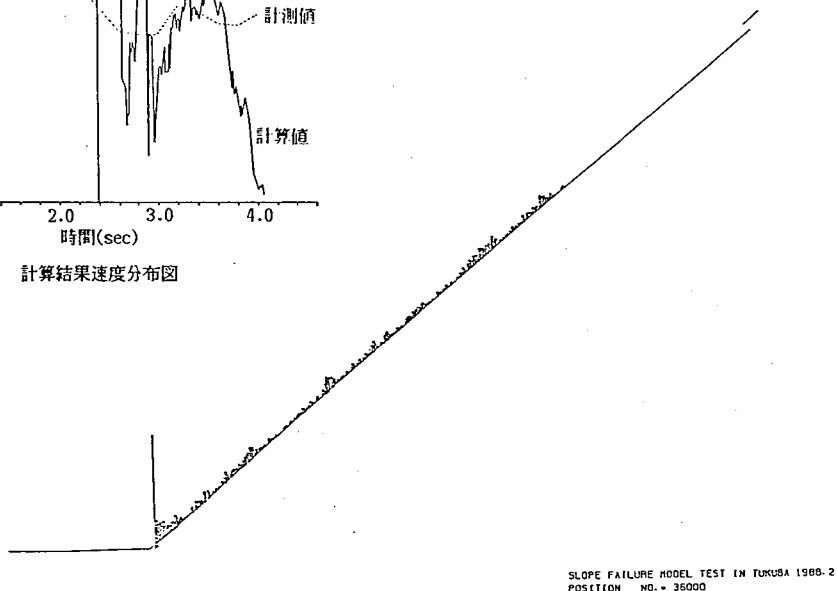


図-7 ボール流下状態