

粒子法による砂礫を含む土石流モデルの段波形成に関する一考察

砂防鋼構造物研究会 ○井上 隆太 防衛大学校 別府万寿博 砂防鋼構造物研究会 石川 信隆
(財)建設技術研究所 長谷川祐治 京都大学大学院 水山 高久

1. はじめに

土石流段波¹⁾が構造物に作用すると、衝撃的荷重が発生し、構造物に大きな損傷を与えることが分かってきた²⁾。本研究は、粒子法の一つである修正 MPS 法³⁾を用いて、砂礫を材料とした土石流モデルの段波形成について考察するものである。これまでに粒径分布の異なる土石流モデルについて実験を行い、礫 7 : 砂 3 の割合のとき、明瞭な段波が形成されることが分かった^{4),5)}。本研究は、これらの段波形成の要因について調べるため、2種類の粒径を含有する土石流モデルによる流下状況および荷重評価を行ったものである。その際、解析で新たに注入流水の影響を考慮するとともに流体の粘性の影響についても調べた。

2. 実験および解析手法の概要

2.1 実験の概要

実験は、図-1に示すように急勾配水路実験で行った。石礫型土石流モデルに対して、止め板で天然ダム形状に堆積させ、流水の越流と共に止め板をはずして流下させる方法(天然ダム決壊型)を採用して、水路幅 10cm、水路勾配 18°の条件で流動実験を行った。荷重は天然ダムから 5m 下流に設置した分力計を用いて計測した。実験では粒度分布を変化させた 6種類の土石流モデルを作成したが、本解析では礫と土砂(2mm以下)の質量比をそれぞれ 7 : 3 と 3 : 7 とした土石流モデルを対象とした。

2.2 解析の概要

本解析手法については土石流モデルのシミュレーション解析³⁾とほぼ同じである。本研究では、図-2に示すように砂は直径 4mm の単一の剛体粒子とし、礫は 5 個の剛体粒子を集合体(直径 12mm)として作成した。これら 2種類の粒子の割合を 7 : 3 または 3 : 7 に変化させた。剛体の密度は 2.6g/cm³とし、体積がほぼ実験の礫砂と等しくなるように剛体の個数を設定した。図-3(a)に大径剛体と小径剛体を 7 : 3 の割合で清水内にランダムに配置した状況を示す。流体粒子は、密度を 1.2g/cm³とし、剛体が完全に浸水するようにやや多めに設定した。全体図は図-3(b)のように 6.5m の床と 50cm の壁を作成したうえで土石流モデルを設置した。剛体同士が接触していると判定された場合には、粒子間に法線および接線方向バネを設定して、反発力や摩擦力を考慮した³⁾。剛体と床および剛体間の法線・接線方向バネ定数は $1.0 \times 10^3 \text{N/mm}$ とし、法線方向および接線の減衰定数はそれぞれ 0.4、0.1 とした。剛体と床との摩擦係数は 1.0、剛体間の摩擦係数は 0.1 である。土砂による粘性の影響を考慮するために、流体粒子の動粘性係数を $0.1 \text{ mm}^2/\text{ms}$ に設定した。

2.3 注入流水のモデル化(流入条件)

過去の解析⁵⁾では、実験で上流側から流される注入流水の影響を無視していたため、モデル実験をうまく再現できなかった。本解析では図-4に示すように注入流水を境界条件として導入した。すなわち、斜面の最上部に流入条件をモデル化する粒子(流入粒子と呼ぶ)を設置し、この流入粒子を移動速度 v で斜面方向に移動させる。流入粒子が粒子の直径分の距離を移動したら、下流側に新しい流体粒子を発生させると同時に、流入粒子を元の位置に戻す。これを繰り返すことで次々と流体粒子を流入させることができる。注入流水を継続して発生させると粒子数が増加し計算時間が増大するため、本解析では注入流水の水深を 2cm、流速 1.4m/s に設定し、1秒間流入した。

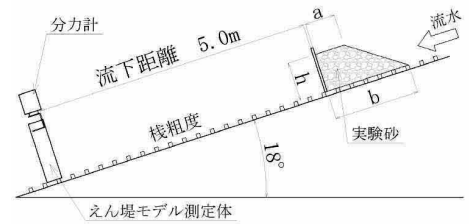
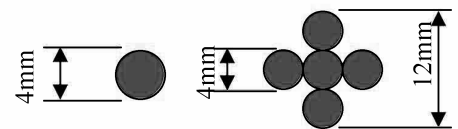
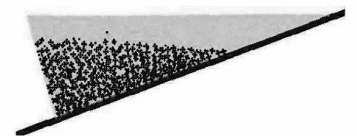


図-1 実験概要図

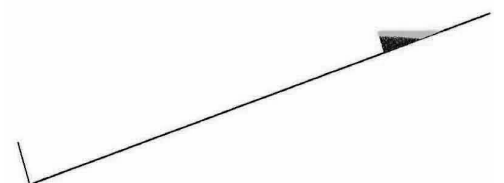


(a) 小径剛体(砂) (b) 大径剛体(礫)

図-2 礫をモデル化した剛体粒子群の構成



(a) 初期の剛体粒子の堆積状況



(b) 全体図

図-3 解析モデル

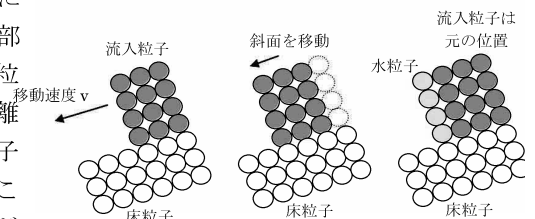
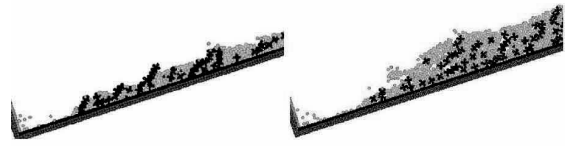


図-4 注入流水の模式図

3. 解析結果および考察

3.1 注入流水の影響

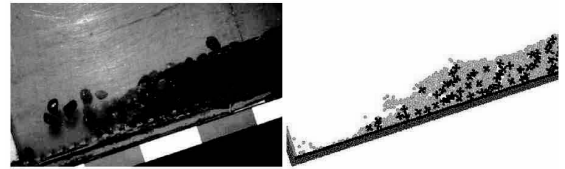
図-5は、礫7:砂3の場合において、注入流水の影響を(a)考慮しない場合と(b)考慮する場合のフロント部の状況を比較して示したものである。図-5(a)の場合は、フロント部の盛り上がりはであるが、流動深がやや低いことがわかる。一方、図-5(b)の場合は、(a)と比べて先頭部に流動深が大きく段波を形成していることが認められる。つまり、注入流水を考慮することは、フロント部の段波形成に影響を及ぼすものと考えられる。



(a)考慮しない場合 (b)考慮する場合
図-5 注入流水の影響(礫7:砂3の場合)

3.2 モデル実験との比較

図-6は、礫7:砂3の場合のモデル実験におけるフロント部の段波形成と注入流水を考慮した解析結果とを比較したものである。これより、解析結果は、実験結果をかなり良くシミュレートしていることが分かる。また、図-7は解析による荷重～時間関係を実験と比較したものである。これより、解析における荷重-時間曲線の最大荷重(約62N)はやや大きく出ているものの、実験値(約58N)とほぼ一致している。また最大荷重以降の実験値と解析値がずれている原因は以下のとおりである。実験では最大荷重以降は一定(約32N)となっているが、これは土石流モデルが衝突後に堆積しているためである。一方、解析では流水粒子が衝突後に壁の上方へ上昇しており、堆積に至っていないためであり、今後検討する必要がある。



(a) 実験結果 (b) 解析結果
図-6 フロント部の実験と解析の比較
(礫7:砂3の場合)

3.3 粒径分布による影響

図-8は、礫3:砂7の場合のフロント部の状況を示している。図-5(b)に示した礫7:砂3の場合と比較すると、礫3:砂7の場合はフロント部がくさび状になっている。これは、フロント部の礫個数が少なく流動深も小さいためである。この理由は、大径の礫が少ないため、礫が床面と接する回数や礫同士の衝突が少なくなり、段波を形成する引き金となる機会が礫7:砂3に比べて少ないことが考えられる。また、土砂を粘性流体でモデル化しているため、今後は土砂の構成則を考慮する必要があると考えられる。

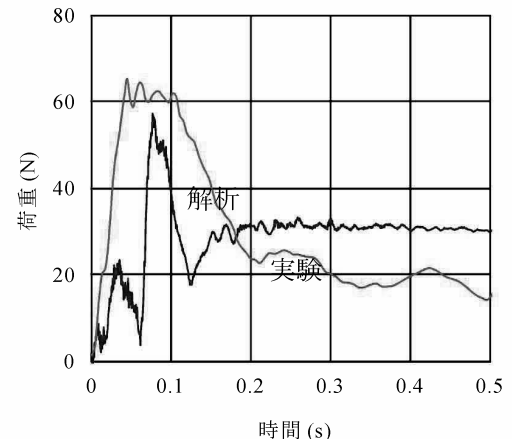


図-7 荷重～時間関係の比較

4. 結論

本研究は、粒径分布や注入流水の影響を考慮した土石流モデルのシミュレーションを行い、段波の形成に与える影響について考察したものである。解析の結果、段波が形成されるような計算結果が得られたが、さらに礫と壁との衝突時のパラメータの設定や土砂の構成則の導入などを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 高橋 保: 土石流の機構と対策、近未来社、2004. 9.
- 2) 石川信隆, 井上隆太, 別府万寿博, 長谷川祐治, 水山高久: 土石流モデルによる鋼製およびモルタル供試体のひずみ応答実験、土木学会第10回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, p. 85-90, 2010年12月
- 3) 別府万寿博, 井上隆太, 石川信隆, 長谷川祐治, 水山高久: 修正MPS法による土石流段波モデルのシミュレーション解析、砂防学会誌, Vol. 63, No. 6, pp. 32-42, 2011年3月
- 4) 井上隆太, 石川信隆, 別府万寿博, 長谷川祐治, 水山高久: 粒径分布を変化させた石礫型土石流モデルの荷重測定実験、平成21年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 82-83, 2009. 5.
- 5) 井上隆太, 石川信隆, 別府万寿博, 長谷川祐治, 水山高久: 粒子法による砂礫を用いた土石流モデルの荷重解析、平成23年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 376-377, 平成23年5月

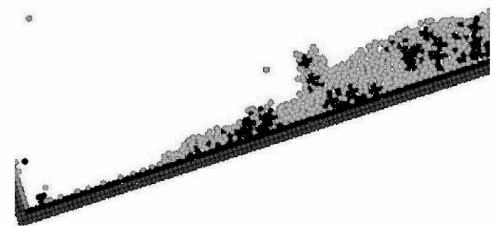


図-8 礫3:砂7の場合のフロント部の状況