

土石流モデルによる鋼製砂防堰堤モデルへの動的応答シミュレーション

砂防鋼構造物研究会 ○井上隆太 石川信隆
防衛大学校 別府万寿博 京都大学大学院 水山高久

1. 緒言

土石流段波が発生すると、先頭部が盛り上がり、非常に大きな衝撃的荷重を示す可能性がある。著者らは、土石流段波を受ける砂防堰堤の挙動を解明するため、土石流段波モデルを用いた荷重計測および鋼板の変形挙動を調べてきた¹⁾。また、粒子法を用いて、石礫型土石流モデルの荷重評価を行ってきた²⁾。本研究は、2次元粒子法シミュレーションにより、土石流モデルが鋼製堰堤モデルに作用した場合の動的応答を計算し、土石流モデル実験との再現性を検証するものである。

2. 実験の概要

図-1 に示す急勾配水路（幅 100mm、勾配 18 度）において、礫と砂を 7 : 3 で混入した土石流モデルを上流から 4m 流下させて、分力計により荷重～時間曲線を測定した。ここで、礫は 16-19mm 径、砂は 2mm 径以下を使用した。また別途、鋼板を設置して同じ土石流モデルを作用させて、鋼板の変位およびひずみ応答を計測した。鋼板は、厚さ 2.0mm、幅 100mm、高さ 300mm、ヤング率 $E=200\text{kN/mm}^2$ であり、鋼板の下から 5cm、10cm、15cm にひずみゲージを貼付してひずみ応答を測定した。また、鋼板の下から 29.5cm の位置でレーザー式変位計により変位応答を計測した。

写真-1 に、実験で得られた段波性状の一例を示す。このように、礫と砂の割合によっては、写真に示すような段波が形成されることがわかる。図-2 は、荷重計測実験で得られた荷重～時間関係を示す。これより、土石流段波モデルが分力計に到達すると、荷重は急激に増大して約 60N の最大荷重を示す、その後一定の荷重を示すことがわかる。鋼板の変形を計測した実験結果については、シミュレーション解析の考察において説明する。

3. 鋼板の変形シミュレーション

3.1 解析方法および解析モデル

本研究では、粒子法として MPS 法を用いた。本解析では、流体力を受ける鋼薄板の挙動を差分法で解析した。連成解析の詳細は、文献³⁾を参照していただきたい。まず、鋼薄板を壁粒子としてモデル化して通常の流動解析を行う。次に、壁粒子に発生する圧力を、鋼薄板に作用する外力として変形解析を行う。このとき、鋼薄板の離散点と壁粒子を一致させて振動解析を行う。流体力によって生じた鋼薄板の変形を、次の時間ステップにおける壁粒子として同様の解析を行う。解析の概要を図-3 に示す。鋼板ははりとして取扱い、図-4 に示す動的な力の釣り合いから誘導される振動方程式を離散化して解いた。

解析モデルを図-5,6 に示す。本解析では、礫を直径 10mm の剛体要素 5 個を集合体としてモデル化し、土砂は 1 個の流体要素に粘性を与えることでモデル化した。動粘性係数は $0.05\text{mm}^2/\text{msec}$ とした。

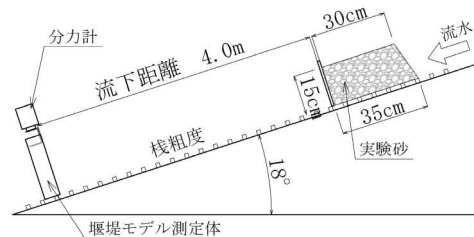


図-1 実験の概要

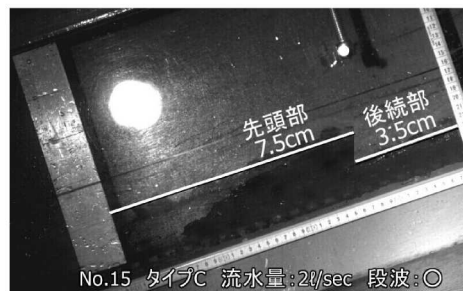


写真-1 先頭部の流動状況
(白い丸は撮影のための電光)

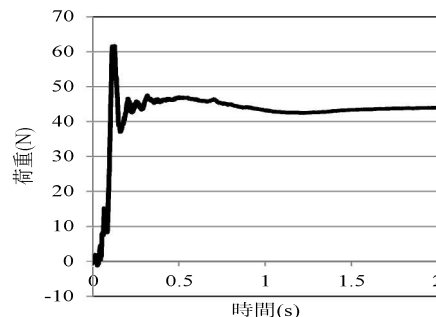


図-2 荷重計測実験結果

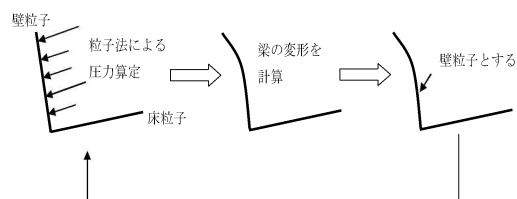


図-3 連成解析の概要

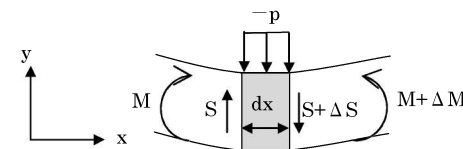


図-4 はりのたわみ振動

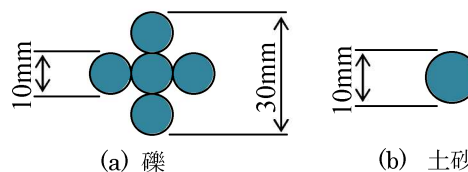


図-5 土石流モデル

また、礫と土砂要素の密度はそれぞれ $2.60\text{g/cm}^3, 1.20\text{g/cm}^3$ とした。

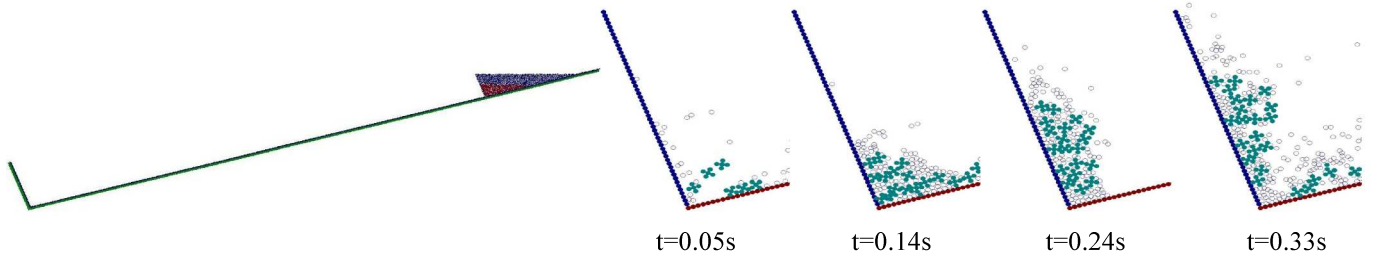


図-6 解析モデル

図-7 鋼薄板の変形過程（薄板のみ変形を10倍にして表示）

3.2 解析結果および考察

図-7 に土石流モデルが鋼板に衝突する前後の流動過程および鋼板の変形状況を示す。なお、図中では鋼板の変形を10倍に示している。これより、土石流モデルは、鋼板に到達すると上方へ伝播している。また鋼板は、土石流の衝突を受けて変形を開始していることもわかる。図-8 に、解析の鋼板の圧力から算定した荷重～時間関係を、実験で得られた荷重と比較して示す。実験では土石流モデルは分力計や鋼板に衝突すると同時に流動がほぼ停止するが、解析では衝突後も流動する傾向を示すため、また鋼板が後方へ変形するため、荷重は実験値に比べて大きく振動していることがわかる。しかし、荷重の平均値としては実験をよく再現できている。図-9 に、解析で得られた変位～時間関係を実験値と比較して示す。実験では、土石流モデルが鋼板に衝突するとともに変位が上昇し、最大で約11mmの変形であった。解析結果は、荷重の乱れによって変位応答も振動しているが、最大変位や変位の増減の傾向は実験値とある程度一致していることがわかる。図-10 は、ひずみ～時間関係の比較を示している。図から、解析ではひずみが大きく振動するため、最大ひずみは実験の約2倍となったが、平均的な傾向としては実験を再現していると言える。

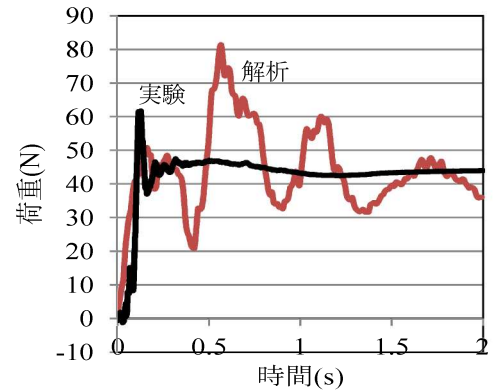


図-8 荷重～時間関係

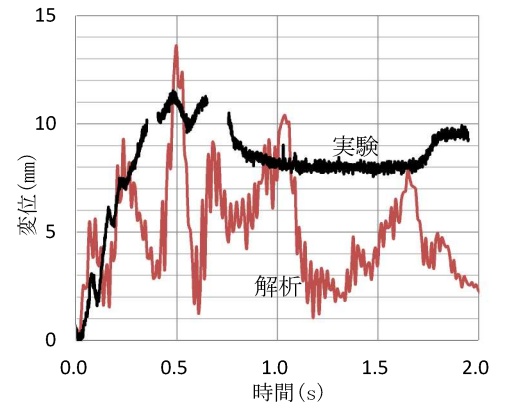


図-9 変位～時間関係

(実験時のデータ欠損は越流水によるもの)

4. 結言

本研究は、粒子法を用いて、土石流段波モデルの作用を受ける鋼板の変形をシミュレーション解析したものである。提案した手法を用いて、変位およびひずみの動的応答をある程度再現できることがわかった。

参考文献

- 1) 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, 平成 21 年 5 月
- 2) 井上隆太, 石川信隆, 別府万寿博, 長谷川祐治, 水山高久: 砂防えん堤モデルへの土石流段波モデルによる動的応答実験, 平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 182-183, 平成 22 年 5 月
- 3) 別府万寿博, 井上隆太, 石川信隆, 長谷川祐治, 水山高久: 粒子法による流体力を受ける鋼薄板構造物の変形シミュレーション解析, 平成 23 年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 258-259, 平成 23 年 5 月.

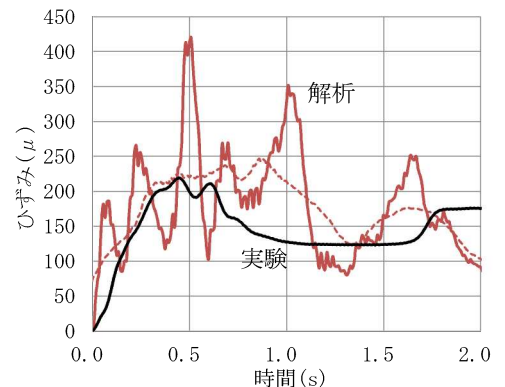


図-10 ひずみ～時間関係
(解析の破線は、移動平均を示す)