

# 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

防衛大学校 ○別府万寿博 砂防鋼構造物研究会 井上隆太 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. 緒言

土石流を受ける砂防えん堤の設計に当っては、土石流荷重や土石流荷重を受ける構造物の変形を評価する手法が必要であるが、これらの要素技術は未だ十分に確立されているとはいえない現状にある。著者らは、これまでに粒子法を用いて土石流モデルの流動シミュレーションや荷重評価について検討を行ってきた<sup>1)</sup>。その結果、粒子法によりある程度の精度で土石流モデルの挙動を評価できることを明らかにしている。本研究は、清水の流体力を受ける鋼薄板を対象として、流体と構造の変形シミュレーションを行ったものである。

## 2. 実験の概要

図-1に示すように勾配18度の急勾配水路(幅10cm)に、清水を用いた土石流モデルを4m流下させた。下流側に高さ30cm、板厚2mmの薄肉鋼板を設置し、流体力を作用させた。清水は、止め板で天然ダム形状に貯留させ、先頭部の水深が15cmになった時点で止め板をはずして流下させる方法(天然ダム決壊型)を採用した。図-2に、実験で得られたひずみ～時間関係(下端から5cm, 10cm)を示す。これより、衝突時に生じたと考えられるひずみが最大で35μ生じ、その後後続の流水によってひずみが漸増していることがわかる。

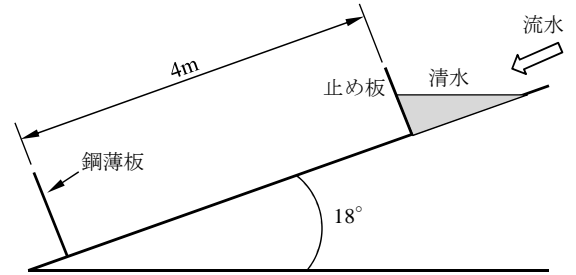


図-1 実験の概要

## 3. 粒子法連成解析による変形シミュレーション

### 3.1 粒子法連成解析の概要

本研究では、粒子法としてMPS法を用いた。MPS法では、微分演算子に対応する粒子間相互作用モデルを用いて、連続の式とナビエーストックス方程式を解く。本解析では、流体力を受ける鋼薄板の挙動を次節で示す差分法で解析した。連成解析の方法については、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。

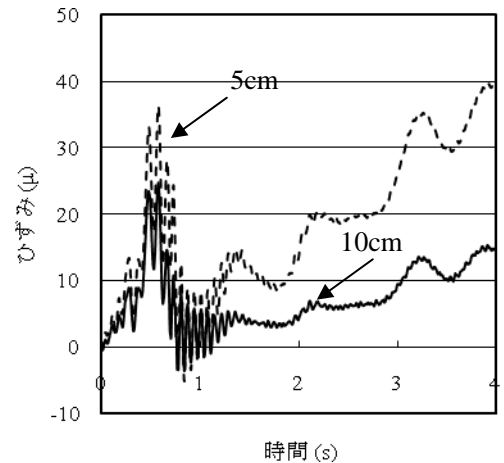


図-2 ひずみ～時間関係

### 3.2 はりの振動解析基本式

はりの振動方程式は、図-4を参照にして、力の釣合いから次のように導かれる。

$$m \left( \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right)_i = - \frac{M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1}}{\Delta x^2} + p \quad (1)$$

ここに、 $m$ は単位長さあたりの質量、 $y$ は粒子 $i$ の変位、 $M_i$ は曲げモーメント、 $\Delta x$ は微小区間の長さ、 $p$ ははりに作用する圧力を示す。また、曲げモーメントと曲率 $\phi$ および変位の関係は次式で与えられる。

$$M_i = EI\phi = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = EI \frac{y_{i+1} - 2y_i + 2y_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (2)$$

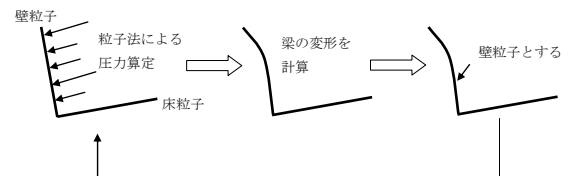


図-3 連成解析の概要

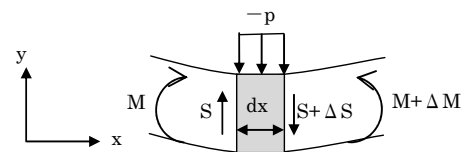


図-4 はりのたわみ振動

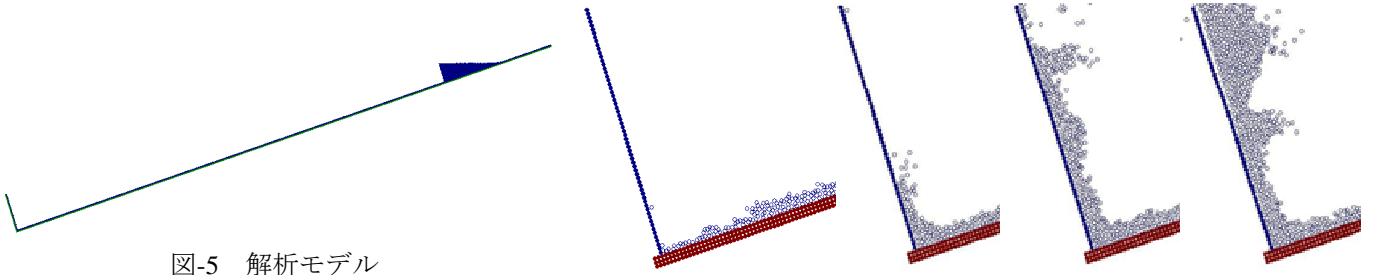


図-5 解析モデル

t=1.77s t=1.82s t=1.97s t=2.15s  
図-6 鋼薄板の変形過程（薄板のみ変形を10倍）

式(1)の左辺に示す慣性項を中心差分法を用いて離散化すると、最終的に次式が得られる。

$$y_{i,j+1} = 2y_{i,j} - y_{i,j-1} - \frac{1}{m} \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} (M_{i+1,j} - 2M_{i,j} + M_{i-1,j} + \Delta x^2 p) \quad (3)$$

なお、添え字の表記は、例えば  $y_{i,j+1}$  は、時間ステップ  $(j+1)$  における離散点  $i$  の変位を示す。

### 3.3 解析結果および考察

図-5に解析モデルを示す。水粒子および床・壁粒子の直径は5mmとした。図-6に土石流モデルが鋼薄板に衝突する前後の流動過程および薄板の変形状況を示す。なお、図中では鋼薄板の変形を10倍にして表示している。これより、清水は鋼薄板に到達すると上方へ伝播している。鋼薄板は、清水が鋼薄板の上端まで载荷した後に大きく変形していることがわかる。図-7に、壁の変形に伴って鋼薄板に作用した荷重～時間関係を、別に行った荷重計測実験で得られた荷重と比較して示す。これより、清水が鋼薄板に到達すると荷重は少しずつ上昇して10Nの荷重が生じ、約0.6sにおいて13Nの最大荷重を示すことがわかる。

図-8に、鋼薄板下端から29cm位置の変位～時間関係を実験と比較して示す。図中で変位がスケールを振り切っている箇所があるが、これは清水が鋼薄板に到達した後の水しぶきによって計測ができなかったためである。図より、解析値は実験に比べてやや遅れて応答を開始するが、最大変位は約0.6sにおいて1.2mmとなることがわかる。図-9に、鋼薄板下端から5cmの位置に生じたひずみ～時間関係を実験値と比較して示す。これより、解析では実験における高次の振動は発生せず、実験値より大きい最大ひずみ50 $\mu$ を示している。解析は実験と異なり後続流をモデル化していないため、時刻2s以降での差異が広がっているが、粒子法連成解析によって鋼薄板の挙動をある程度再現できることがわかる。

### 4. 結言

本研究は、粒子法連成解析を用いて、清水による流体力を受ける鋼薄板の変形シミュレーションを行ったものである。MPS法による流体解析を鋼薄板を片持ちはりで差分化した手法と組み合わせることにより、流体力を受ける鋼薄板の変形挙動を再現することができた。

**謝辞：**本研究の一部は、科研費(21560512)の助成を受けて行われたものである。

### 参考文献

- 1) 別府万寿博, 石川信隆, 園田佳巨, 長谷川祐治, 水山高久: 剛体・流体粒子による土石流モデルのシミュレーション解析, 平成21年度砂防学会研究発表会概要集, pp.96-97, 平成21年5月。

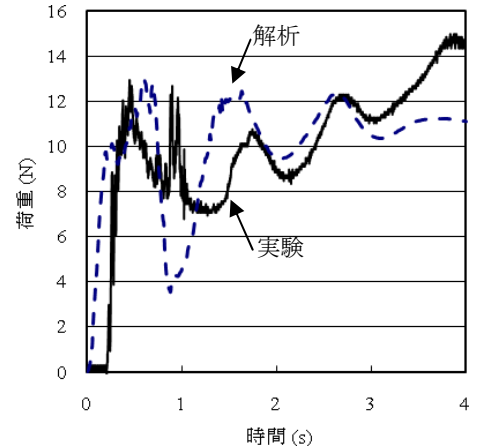


図-7 荷重～時間関係

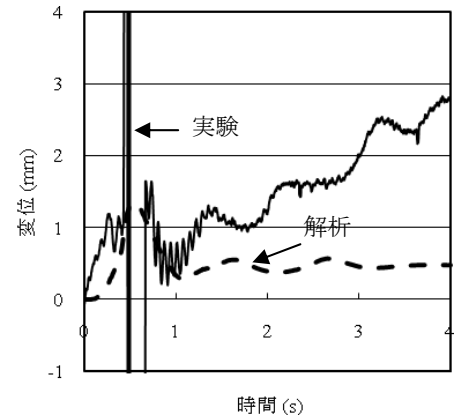


図-8 変位～時間関係

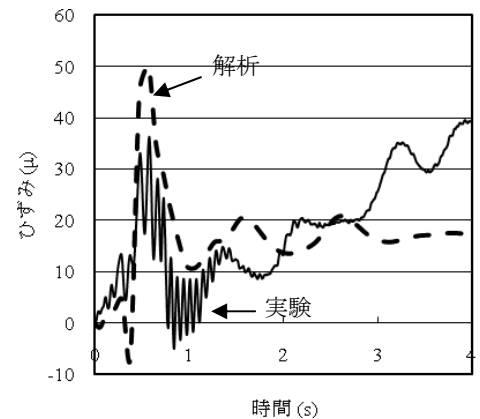


図-9 ひずみ～時間関係の比較(5cm)