

個別要素法を用いた鋼製砂防堰堤における土石流捕捉に関する数値解析

神戸製鋼所機械研究所 ○勝田 貴志 織田 剛
 神戸製鋼所構造技術部 守山 浩史 葛西 俊一郎

1. はじめに

河川下流域の砂浜などの消失の問題や砂防構造物の建設コストの観点から鋼製砂防堰堤が注目を集めて久しい。関連した研究も数多く、実験のみならず数値解析も種々行われてきている。著者らはCundal¹⁾らの個別要素法をなだれの解析に適用した中西ら²⁾の研究を応用して2次元個別要素法を用いた鋼製堰堤の土石流捕捉に関する数値解析を実施した。個別要素法の問題点の一つがバネ定数・ダンパー定数・摩擦係数のパラメータと実現象との整合性である。ダンパー定数は反撥係数から求めることができる。バネ定数は接触におけるひずみに上限を設けることで値を選定することができる。しかし摩擦係数については計算結果に与える影響についてあまり明らかにされていない。本報告では特に摩擦係数に着目し鋼製堰堤の捕捉・減勢効果への影響について検証を行った。

2. 数値解析手法と解析モデル

数値解析手法は個別要素法であり、本報告では流下方向と鉛直方向を2軸とする2次元の数値解析を実施する。岩石間または岩石と河床、鋼管の接触についてはマスバネ・ダッシュポットで表現し、それら接触力、一様流を仮定した流体力と浮力、岩石間や河床、鋼管との摩擦力から式(1)、(2)に示す並進・回転に関する運動方程式を立て、時間に関してオイラー積分して岩石の軌跡を求める。

$$m_i \ddot{x}_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} + f_w + m_i g \quad (1)$$

$$I_i \ddot{\omega}_i = \sum_{j=1}^n r_i \cdot f_{ij}^s \quad (2)$$

摩擦力は $f_{ij}^s = \min(T_{ij}^s \cdot f_{ij}, \mu \cdot f_{ij}^n)$ として取り扱う。ここで、 m_i : 粒子質量、 I_i : 慣性モーメント、 r_i : 粒子半径、 \ddot{x}_i : 加速度ベクトル、 $\ddot{\omega}_i$: 角加速度、 f_{ij} : 接触力、 f_w : 流体力(浮力、抗力)、 g : 重力加速度、 f_{ij}^n 、 f_{ij}^s : 法線・接線方向の接触力、 T_{ij}^n 、 T_{ij}^s : 法線・接線方向の座標変換行列、 μ : 摩擦係数、 n : 粒子数。

鋼製砂防堰堤の解析モデルは図1に示すように斜度20°の斜面上に横梁材で構成される堰堤を配置し、上方10mの位置に1000個の粒子で構成される土石流が流下してきている状況を模した。計算条件及び粒子諸元について表1、2に示す。計算条件について深和ら²⁾の論文を参考に決定した。

表1 計算条件

岩石密度	2650[kg/m ³]	流体密度	1000[kg/m ³]
鋼管直径	0.6[m]	抗力係数	0.45
傾斜角度	20°	一様流速	2.0[m/s]

表2 粒子の諸元

粒径 [m]	粒子 個数	バネ定数		ダンパー定数	
		法線	接線	法線	接線
1.3	100	1.3×10 ⁸	1.0×10 ⁸	4.8×10 ⁵	4.3×10 ⁵
1.1	140	1.1×10 ⁸	0.9×10 ⁸	3.5×10 ⁵	3.1×10 ⁵
0.9	200	0.9×10 ⁸	0.7×10 ⁸	2.3×10 ⁵	2.1×10 ⁵
0.7	240	0.7×10 ⁸	0.6×10 ⁸	1.4×10 ⁵	1.3×10 ⁵
0.5	220	0.5×10 ⁸	0.4×10 ⁸	0.7×10 ⁵	0.6×10 ⁵
0.3	100	0.3×10 ⁸	0.2×10 ⁸	0.3×10 ⁵	0.2×10 ⁵

バネ定数およびダンパー定数の単位は[N/m]、[N·sec/m]

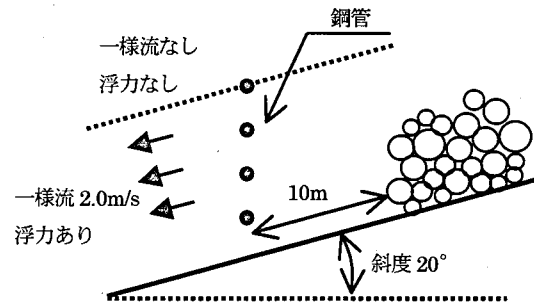


図1 鋼製砂防堰堤の解析モデル

鋼製砂防堰堤の性能を評価する指標として捕捉率と減勢率を採用した。それぞれ式3、4に示す。

$$P = \frac{(N_{all} - N_{over}) - N_{pass}}{(N_{all} - N_{over})} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{H_{pass}}{H_{no}} \quad (4)$$

ここで、 P : 捕捉率、 η : 減勢率、堰堤を透過した粒 N_{all} : 粒子の総数、 N_{pass} : 堰堤を透過した粒子の個数、 N_{over} : 堰堤の最上部を乗り越えた粒子の数(越流)、 H_{pass} : 堰堤を透過する土石流出量[m³/sec.]の最大値、 H_{no} : 堰堤が設置されていない場合の土石流出量[m³/sec.]の最大値である。

3. 解析結果と考察

最大岩石径 d_{max} に対する鋼管間隔 l の比 $l/d_{max} = 1.0, 1.5, 1.75, 2.0$ の4種についてそれぞれ確率的に岩石の初期配置を変えて8ケース計算を実施した。岩石と河床との摩擦係数 μ が0.04, 0.1, 0.4, の場合について計算を実施し、その影響について調べた。ただし、岩石間及び岩石・鋼管間の摩擦係数 μ は定数0.4である。捕捉率及び減勢率について図2に示す。また、 $l/d_{max} = 1.5$ の場合の代表的なハイドログラフの一例を図3、4、5に、土砂堆積過程を図7、8、9にそれぞれの摩擦係数ごとに示す。図6は表3に示す条件で実施した実験の最終堆積形状である。

図2の捕捉率，減勢率は $\mu=0.04$ と0.1の場合とは結果に大きな違いが見られず，図7，8の堆積過程も見た目で特定できるほどの差異はなかった。他方， $\mu=0.4$ の場合は $l/d_{max}=2.0$ の場合でさえ捕捉率が70%と高かった。図3~5に示す $l/d_{max}=1.5$ の場合のハイドログラフと図7~9の堆積過程を見ると， $\mu=0.04, 0.1$ の場合，堰堤に到達した土石流は堰堤の最上部高さまで達し，透過と閉鎖を繰り返しつつ捕捉を完了する。他方 $\mu=0.4$ の場合，堰堤に到達した土石流はほとんど透過せず，最上部高さまで達することなく捕捉を完了する。図6の実験結果の最終堆積形状と比較すると，堰堤最上部まで土石流が到達している点が $\mu=0.04, 0.1$ の場合と同様であるが， $\mu=0.4$ の場合とは大きく異なる。

以上から岩石・河床間の摩擦係数は土砂の堆積過程と最終堆積形状に大きく影響を与えることがわかった。このことから実際の土石流を数値解析で再現する際に選定することが難しかった河床・岩石間の摩擦係数を，現場の最終堆積形状から選定することが可能であると考えられる。

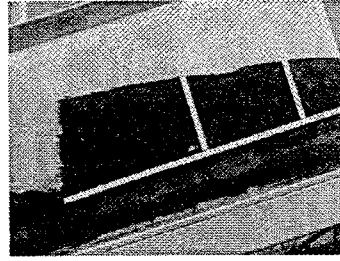


図6 実験における最終堆積形状

表3 実験条件

水路勾配	17°
土砂量	38.4[l]
流量	2.0[l/s]
平均粒径	3.65[mm]

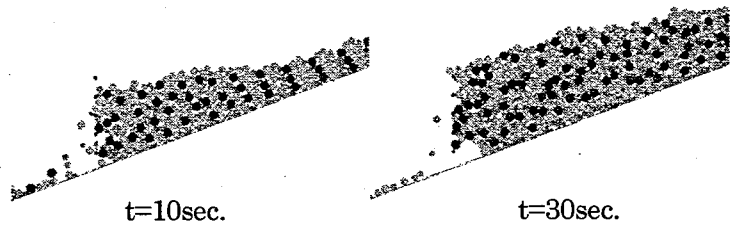


図7 $\mu=0.04$ の場合の堆積過程($l/d_{max}=1.5$)

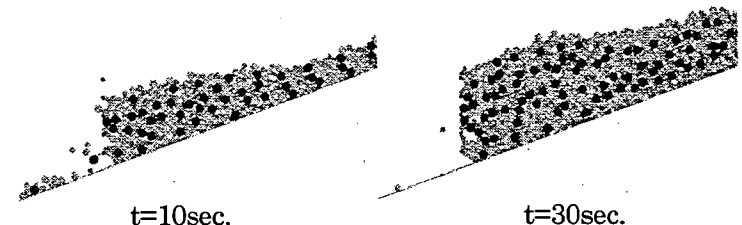


図8 $\mu=0.1$ の場合の堆積過程($l/d_{max}=1.5$)

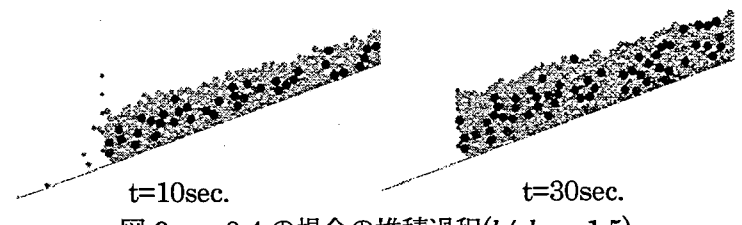


図9 $\mu=0.4$ の場合の堆積過程($l/d_{max}=1.5$)

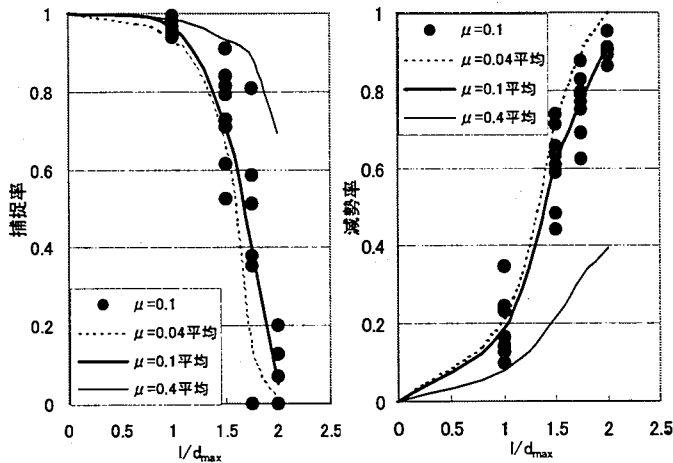


図2 壁の摩擦係数の違いによる影響の比較

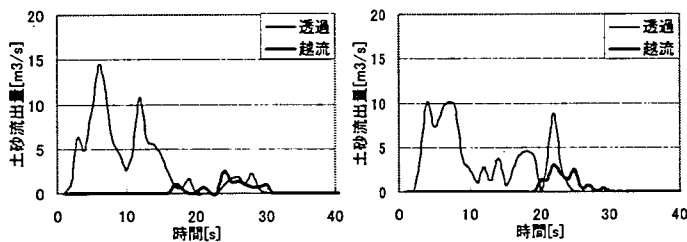


図3 $\mu=0.04$ の場合のハイドログラフ

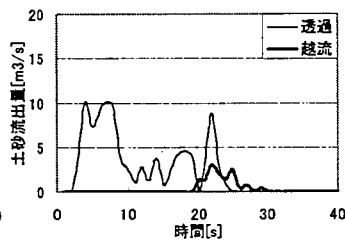


図4 $\mu=0.1$ の場合のハイドログラフ

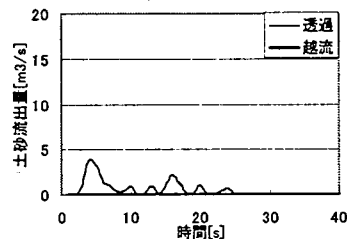


図5 $\mu=0.4$ の場合のハイドログラフ

4. まとめ

本報告では摩擦係数が結果に与える影響について検証を行い，次の結論を得た。

- (1) 計算結果の最終堆積形状やハイドログラフ，実験結果から岩石・河床間の摩擦係数は土砂の堆積過程と最終堆積形状に大きく影響を与えることがわかった。
- (2) 実際の土石流を数値解析で再現する際に選定することが難しかった河床・岩石間の摩擦係数を，現場の最終堆積形状から選定することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) Cundal, P. A. and Strack, O. D. : A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique* 29, No. 1, pp. 47-65, 1979
- 2) 中西 宏, 豊島 史郎: なたれの数値シミュレーション, 神戸製鋼技報 Vol 37, pp. 33-36, 1997.
- 3) 深和 岳人, 香月 智, 石川 信隆: オープン型鋼製砂防ダムのれき捕捉効果に関する個別要素法解析と確率的評価, 土木学会論文集 No.703, pp.165-176, 2002