

京都大学防災研究所 正員 高橋 保
 京都大学防災研究所 正員 中川 一
 京都大学防災研究所 正員 里深 好文
 日本道路公団 正員 富田 貴敏

1.はじめに 中国の蔣家溝で発生している粘性土石流は緩い勾配を2～5分間隔で繰り返して流下する特徴を持っている。そこでこの流動性を明らかにするため、現地の粒度分布をもとに粘土と礫の混合物からなる粘性土石流を再現する実験を行った。実験の結果から緩勾配で一旦堆積した粘性土石流がどの様に後続の土石流に取り込まれて、再び高濃度で流動し伝播するのか、その流動、堆積・再流動化機構に関する検討を行った。そして、それをもとに一次元再現計算を行った。

2.粘性土石流の流動、堆積・侵食に関する水路実験

実験は全長7.5m、幅9cmの長方形断面水路を用いた。従来の研究では粘土と比較的様な礫との混合物からなる土石流材料を用いたが、高濃度の土石流を再現することができなかった。そこで本研究では、パールクレイと7種類の珪砂を用いて現地の広い粒度分布を再現し、土石流の材料とした。現地の粒度分布と再現した粒度分布を図-1に示す。まず、水路を勾配10度に固定し、土砂量約13000cm³を固定床上に上流端から流下させ、土砂濃度と粘性係数を求める実験を行った。流動状況と堆積厚から求めた降伏応力とを検討した結果から、流動中の材料をニュートン流体と仮定し、測定した流動深と表面流速から近似的に見かけの粘性係数を求めた。その結果を図-2に示す。この結果から土砂濃度0.57付近で粒子が分散して流動し、この濃度よりも高いと流動せずに堆積し、低いと粒子がすぐに沈降することが分かった。次に、蔣家溝の土石流を再現するために一旦固定床上に土砂量約25000cm³の土石流を流下させて(1本目)ある厚さの土砂を水路床上に堆積させ、その上に繰り返して土砂を流下させ(2～5本目)移動床上の流れを再現した。実験条件として土砂濃度を0.57とし、水路の勾配を変化させた。測定は側面から高速度ビデオカメラで流動状況を撮影し、上流端から3.0mと6.0mの位置に水位計を設置し、下流端で土砂の流出量を計測した。勾配ごとの堆積厚と後続流によって取り込まれ再流動化する厚さを計測した結果を図-3に示す。この結果から、勾配が11度以上では何回流下させても全層が再流動化し、堆積厚、取り込み厚は同じであった。勾配が9度以下では取り込み厚はほぼ一定であったが、堆積厚を全て取り込むことはできずに堆積厚は増加する一方であった。

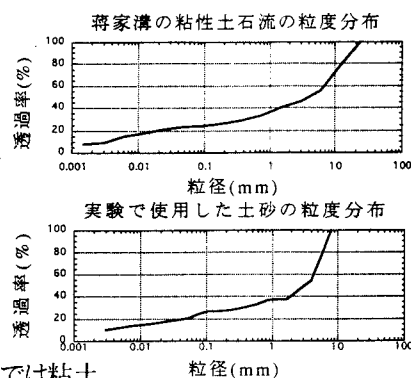


図-1 粒度分布

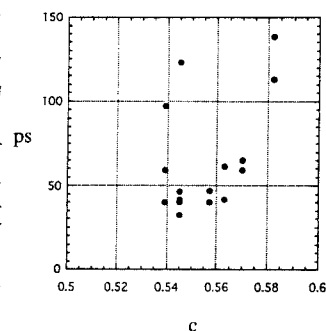


図-2 濃度-粘性係数

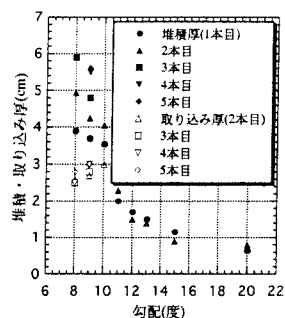


図-3 堆積・取り込み厚

3. 粘性土石流の流動、堆積・侵食に関する一次元再現計算

勾配11度の実験ケースをもとに水路実験の流動、堆積・再流動化の再現計算を行った。 $\Delta x=10\text{cm}$ 、 $\Delta t=0.0001\text{sec}$ 、上流端の供給土砂量は実験で供給した土砂のハイドログラフを与えた。流動中の土砂をニュートン流体と見なし、固定床上流れの抵抗則を用いて計算した。堆積・取り込み速度は実験結果をもとに流動深の関数とし、以下のように与えた。堆積を正とする。

$$\begin{aligned} & 5.0 && (h \geq 5.0\text{cm}) \\ & 0 && (2.5\text{cm} \leq h < 5.0\text{cm}) \\ & -0.1 + 0.04 * h && (h < 2.5\text{cm}) \end{aligned}$$

再現計算は固定床上と厚さ2.0cmの堆積物が氷路上に敷いてある移動床上流れについて行い、実験結果の水位、下流端の流出量と比較した。これを図-4に示す。この計算結果と実験結果を比較すると、固定床上の流れは水位変化、流出量ともにうまく再現できているが、移動床上ではフロント部の水位が実験結果よりもかなり大きくなってしまった。

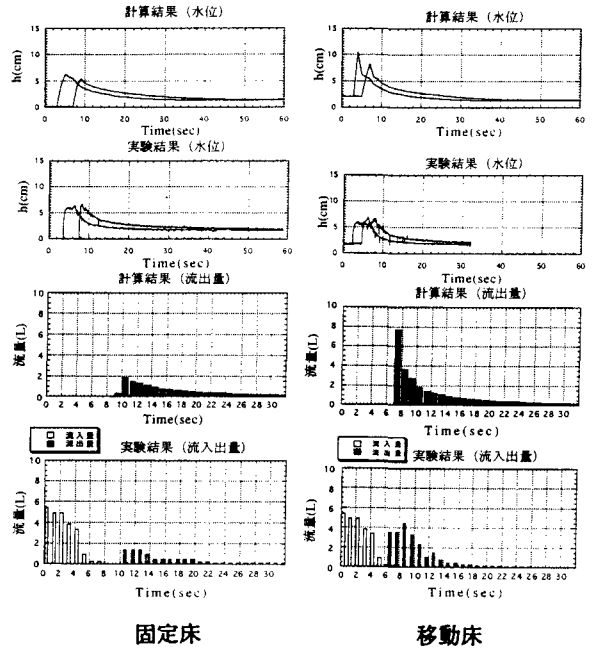


図-4 数値計算結果

4. 粘性土石流の流動、堆積・再流動化に関する考察 ニュートン流体的に流動していた土砂が堆積し、再流動化する機構について検討した。流動深、流速ともに大きいと平均的な速度勾配も大きく、上下で速度差を持った粒子は乗り越え、潜り込みの運動をするために分散した状態でニュートン流体的に流動する。この時のせん断抵抗力は流体の変形による応力 $\tau_f = \mu_t (du/dz)$ だけである。しかし、平均的な速度勾配が小さくなると、粒子が分散した状態で流動することができず次第に沈降してくる。粒子が沈降し、底面付近の粒子濃度が大きくなることで粒子の接触による応力 $\tau_s = p_s \tan \phi$ が作用し、流動できずに堆積を始める。この堆積の模式図を図-5に示す。 h_1 以上では濃度一定でそれ以下では濃度が増加し、 h_2 以下で堆積するとしている。実線が抵抗力、破線が掃流力である。底面から順次に堆積し、表面付近の速度勾配が小さくなると今まで作用しなかった降伏応力 τ_p が作用することで全層にわたって堆積し、この堆積厚を h_A とする。降伏応力と粒子の静的な接触によって堆積した土砂は新たな土砂の流下によって再流動化するが、掃流力よりもせん断抵抗力の大きな層は取り込まれずに堆積したままである。この取り込みの模式図を図-6に示す。新たな土砂が流下してきたときの堆積層のせん断抵抗力を実線で、掃流力を破線で表した。 h_p 以下では再流動化しない。

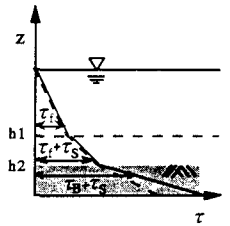


図-5 堆積模式図

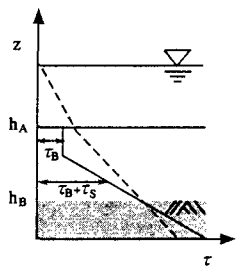


図-6 取り込み模式図

5. おわりに 広い粒度分布を持つ混合土砂を用いて高濃度の粘性土石流を流動させることが可能であることが分かった。その流動中の土砂はニュートン流体とみなせることが分かった。本研究の数値計算は実験データをそのまま与えて行ったものであり、一般性のある計算を行うためには流動、堆積・再流動化の機構に関する定量的な検討が必要である。