

II - 8

粒子濃度を考慮した土石流の堆積距離の現地適用性

八戸工業高等専門学校 学生員 横岡 雅之

1. 目的

土石流とは土砂災害における崖崩れ、地すべり、土石流のうちの1つであり、山腹、川底の石や土砂が長雨や集中豪雨などによって一気に下流へ押し流される現象である。その流れの速さは規模によって異なるが、時速20～40kmという速度で一瞬のうちに人家や畑などを壊滅させる現象であり、土砂災害の中でも被害が大きい。

土石流の堆積範囲には、流量や河床勾配などの多くの要素が関係してくるが、微細な粒子では粒子同士の作用が堆積範囲に影響を与えている。これまでは、構成する粒子が比較的に大きく、粒子間隙を満たす流体が空気の場合のように、その影響が無視できると考えられているために粒子濃度が堆積距離に与える影響を評価したものは少ない。

本研究では、微細な粒子で構成される土石流に対して粒子濃度が堆積範囲にどのような影響を与えているかを評価するために粒子濃度を变化させ、地形条件である河床勾配と粒子濃度を組み合わせ、模型実験と数値計算によって評価を行った。また、その結果から現地への適用を検討した。

2. 実験装置

実験装置を図-1に示す。長さ180cm、幅10cmの上流側直線水路の下流側に長さ140cm、幅60cmベニヤ板の中央に接続されている。棒ら¹⁾の測定方法を参考に、下流側河床を固定、上流側河床を可変勾配とし、上流側勾配を变化させて湿潤状態の砂を上流側河床より60cmの間に敷き、水路の上流から水を600cm³給水して土砂を流下させ下流側に土砂を堆積させ勾配が変わる地点からの土砂の堆積距離、堆積高さ、堆積幅を測定した。平面域での勾配 $\theta_a=3^\circ$ とし上流側河床勾配を $\theta_a=11^\circ, 13^\circ, 15^\circ, 17^\circ$ と变化させ、粒子濃度を变化させるために初期の粒子濃度 $C_0=40, 37, 33, 29\%$ と变化させて実験を行った。上流側水路の側面壁に貼り付けたアクリル板にデジタルカメラを設置し、水深を測定し計算式で用いる検証材料とした。上流側直線水路・下流側平面水路はベニヤ板とし、実験で用いる砂の平均粒径は0.6mmとした。

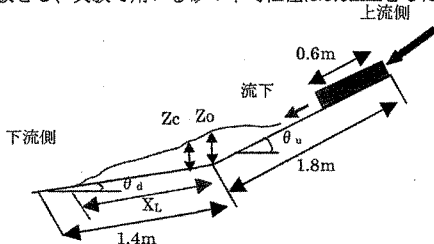


図-1 実験装置

3. 数値計算による堆積範囲の再現

3.1 計算式と計算諸元

土石流を連続体として数値計算を行い、二段になっている上流側河床勾配と粒子濃度を变化させて、堆積距離、堆積高さ、堆積幅を算定した^{2), 3)}。

・堆積距離

$$U_n = 1.3 \left\{ \frac{\sin \theta_a}{0.042 \sin \alpha} \left(c + (1-c) \frac{\rho}{\sigma} \right) \right\}^{0.2} \left\{ \left(\frac{c_*}{c} \right) - 1 \right\}^{0.4} \left(\frac{g Q^4}{d^2 A^3} \right)^{0.5} \quad \text{式(1)}$$

$$V = U_n \cos(\theta_a - \theta_d) \left\{ 1 + \frac{[(\sigma - \rho) C \kappa + \rho] \cos \theta_a}{2[(\sigma - \rho) C + \rho]} \frac{g h}{U_n^2} \right\} \quad \text{式(2)}$$

$$G = \frac{(\sigma - \rho) g c \cos \theta_a \tan \alpha}{(\sigma - \rho) c + \rho} - g \sin \theta_a \quad \text{式(3)} \quad X_L = \frac{V^2}{G} \quad \text{式(4)}$$

・堆積高さ

勾配急変部での最大堆積高さ Z_o を求める時に式(5)を用いた。

$$Z_o = X_L \times \tan(\gamma - \theta_d) \quad \text{式(5)}$$

出口からの距離 X での堆積高さ Z_c に関しては次式を用いた。 X が $0 \sim 0.2X_L$ 間では式(6)を、 X が $0.2X_L \sim X_L$ 間では式(7)を用いた。

$$\frac{Z_c}{Z_o} = \exp \left\{ -6.4 \left(\frac{X}{X_L} \right) \right\} \quad \text{式(6)} \quad \frac{Z_c}{Z_o} = \exp \left\{ -3.2 \left(\frac{X}{X_L} \right)^2 \right\} \quad \text{式(7)}$$

・堆積幅

最大堆積幅を式(8)によって求めた。土石流の幅の形状を勾配急変部から最大堆積幅まで直線状に変化すると仮定して式(9)を、最大堆積幅から最大堆積距離までの堆積範囲を楕円形と考え式(10)を用いた。

$$B_m = \frac{S}{0.6 X_L Z_o} \quad \text{式(8)} \quad B = B_m \left(0.4 \frac{X}{X_o} + 0.6 \right) \quad \text{式(9)}$$

$$\left(\frac{B}{\frac{B_m}{2}} \right)^2 + \frac{(X - X_o)^2}{(X_L - X_o)^2} = 1 \quad \text{式(10)}$$

ここで、 c :粒子濃度、 Z_o :勾配急変部の堆積高さ、 Z_c :任意点の堆積高さ、 B :堆積幅、 B_m :最大堆積幅、 X_L :堆積距離、 X :出口からの距離、 κ :主働土圧係数、 γ :堆積表面勾配、 S :谷出口からの流出土砂体積を示す。

土粒子密度 $\sigma = 2.58 \text{ g/cm}^3$ 、粒子の最密濃度 $C_* = 0.65$ 、水の密度 $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 、重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 35^\circ$ 、衝突条件によって決まる角度 $\alpha = 31^\circ$ 、流路幅 $A = 10 \text{ cm}$ 、それ以外の諸元は、流量 Q 、水深 h 、粒子濃度 C は実験で得られたデータを用いた。

3.2 粒子濃度と堆積範囲の影響

a) 粒子濃度と堆積距離

粒子濃度に対する堆積距離と式(4)からの堆積距離を図-2に示す。粒子濃度が高いと堆積距離が短くなっている。実験値では、勾配 11° で粒子濃度が一番高い27%で堆積距離は113cm、23%では堆積距離は128cmとなり4%の差で15cm長くなる。河床勾配 17° で粒子濃度が一番高い $C=40\%$ で123cm、 $C=29\%$ で138cmとなり、粒子濃度が11%の差で堆積距離は15cm長くなる。堆積距離は勾配 17° と勾配 11° で堆積距離の変化は同じだが、勾配 11° では粒子濃度が低い状態で堆積距離が変化している。勾配 11° では上流側河床に砂が残り、粒子濃度が低くなる。そのために粒子同士の衝突が小さくなり流速が速くなるために粒子濃度差が小さくても堆積距離の変化が大きくなったと考えられる。計算では粒子

濃度が流速に与える影響が一番大きく、実験や計算で粒子濃度が堆積距離に与える影響は大きいことがわかった。実験値と計算値の相対誤差は最大で8%、最小で1%となり、堆積距離は式(4)で評価できる。

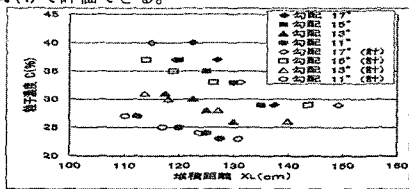


図-2 粒子濃度に対する堆積距離の比較

b) 粒子濃度と堆積高さ

実験から得られた粒子濃度に対する堆積高さとして式(6)と式(7)から得られた堆積高さとの比較を図-3に示す。粒子濃度が高いほど勾配急変部(X=0cm)での高さが高くなっている。粒子濃度が高いと粒子同士の作用によって流速が遅くなり勾配急変部付近(0cm~30cm)で堆積しやすいと考えられる。勾配急変部での堆積高さでの相対誤差は、粒子濃度が高い順から3、3、0、4%と小さく、再現できるといえる。また勾配急変部以外での各粒子濃度における平均の相対誤差は粒子濃度が高い順から7、10、12、15%となりC=40%とC=37%といった高濃度では再現されているが、C=33%、C=29%では相対誤差が大きくなっていく。計算では急変勾配部での高さによって任意の点の堆積高さを求めているが、実験値では堆積距離30~90cmでの堆積距離中央部で粒子が堆積しやすい傾向になっている。これは、勾配急変部で堆積しやすくダムのような状態になり、粒子が堆積した上を越流するために堆積距離中央部に堆積しやすいと考えられる。

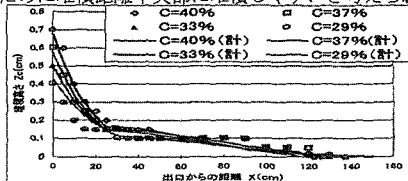


図-3 粒子濃度に対する堆積高さの比較(勾配17°)

c) 粒子濃度と堆積幅

実験から得られた粒子濃度に対する堆積幅として式(9)と式(10)から得られた堆積幅との比較を図-4に示す。最大堆積幅になる堆積距離と最大堆積距離との比は粒子濃度が高い順に0.65、0.64、0.61、0.58となり、粒子濃度が高いほど最大堆積幅となる堆積距離の比が大きいく傾向になっている。このことから、粒子濃度が低いほど最大堆積幅となる堆積距離から最大堆積距離まで細長い形状となる。実験値と計算値では堆積距離が異なるために再現できていないが、最大堆積幅では相対誤差が平均で9%となり、9%以内の再現性がある。計算でのC=37%の堆積距離、堆積高さ、堆積幅は120cm、0.68cm、26.8cm、C=29%では145cm、

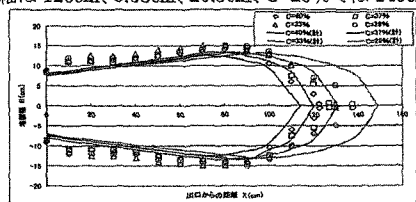


図-4 粒子濃度に対する堆積幅の比較(勾配17°)

0.43cm、26.2cm になっている。実験では粒子濃度が低く、堆積距離が長いと堆積幅が広がる傾向にある。計算では最大堆積幅を仮定した直方体に対する流出土砂体積を式(8)で考えており、実験値から堆積距離に0.6の係数をかけることによって最大堆積幅を算出できていることが判った。

4. 現地への適用

八戸市の土砂災害マップに記載されている二十数箇所の土石流危険渓流の河床勾配17°~9°の地形において計算を適用した。土石流は15°以上の河床勾配と流域面積が0.05km²以上あり有効降雨強度が150mm/hr以上の降雨であれば発生するとされている²⁾。また、最も土石流が発生しやすい流域面積は0.1km²記されていることから⁵⁾、流域面積を0.1km²、有効降雨強度を150mm/hrとして式(11)の合理式²⁾から流量、式(12)より流出土砂量²⁾を算出した。式(4)~式(10)から土石流の堆積範囲を算出した結果を図-5に示す。

$$Q = \frac{1}{3.6} r_e A_{15} \quad \text{式(11)}$$

$$V_d = 1.46 \times 10^4 A_{15}^{0.583} \quad \text{式(12)}$$

r_e : 有効降雨強度(mm/hr)、 A_{15} : 河床勾配が15°以上の流域面積(km²)、 V_d : 流出土砂量(m³)

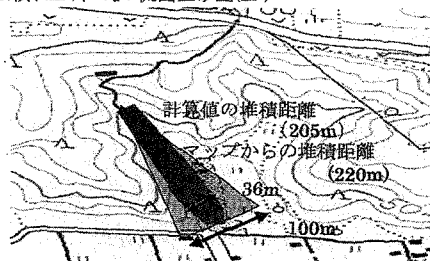


図-5 対象地点での堆積距離

その結果、堆積距離は相対誤差6%となり、最小の有効降雨強度と最も土石流が発生しやすい流域面積、現地の勾配に応じた粒子濃度から堆積距離を算出できることが判った。堆積幅は、マップと計算値で大きく異なっている。土石流の堆積範囲は扇状に仮定されていると考えられている。計算では粒子濃度を実際の土石流の粒子濃度よりも低く、

粒径が均一な粒子で考えているために粒子が直線に進みやすく、横に拡がり難い特性と考えられる。

5. まとめ

今回の研究結果から粒子濃度と河床勾配の堆積範囲の関係は、粒子濃度と河床勾配が高い、または大きいほど堆積高さは高く、堆積幅は小さくなる。しかし、粒子濃度が高いほど堆積距離は短くなった。現地での適用性は堆積幅の適用は難しいが、堆積距離はマップと計算値の相対誤差が6%となり適用性は高いことが判った。

参考文献

- 1) 椿東一郎・橋本晴行: 土石流の勾配急変による堆積機構, 第28回水理講演会論文集, pp.711-716, 1984.
- 2) 高橋保・吉田等: 土石流の停止・堆積に関する研究(1)勾配急変による堆積, 京大防災研究所年報, 第22号B-2, pp.315-328, 1979.
- 3) 高橋保: 土石流の機構と対策, p.432, 2004.
- 4) 土砂災害危険箇所マップ: 青森県八戸県土整備事務所.
- 5) 芦田和男: 扇状地の土砂災害, p.276, 1985.
- 6) 河上房義: 土質力学第7版, p.224, 2001.