

1. はじめに

斜面崩壊による災害防除のため崩土がどこまで到達するか研究された事例は数多くあり、大きく分類すると次の3種類に区分される。第1は崩土が有限の長さを有する物体の運動として質点的な取り扱いをしているものであり、この中には崩壊の発生標高と運動距離の関係より等価摩擦係数を議論するものも含まれる^{1)~5)}。第2は、災害資料を基に統計処理を行ない到達距離を議論しているものである⁶⁾。第3は降伏応力と速度に応じた散逸応力を考慮して崩土の運動を議論しているものである⁷⁾。本研究は崩土の到達距離推定の基礎式を得るべく第3の手法に焦点を当て、散逸応力モデルを通して乾燥砂を崩土材料として流動抵抗則の検討を行なった。

2. 崩土の抵抗機構

一定勾配斜面上を運動する崩土はある距離以上進むと一定速度に達し、この時点では重力成分による流下推進力と各種抵抗力が釣り合った状態になる。この等式を用いて¹³⁾乾燥砂の流速分布及び平均流速を求めると次のようになる。

$$U(h) = \frac{2}{3} \left\{ \frac{c \cdot g (\sin \theta - \mu_k \cos \theta)}{(\pi/12) \cdot \sin^2 \alpha \cdot (1 - e^2) \cdot (1/b) \cdot D^2} \right\}^{1/2} \cdot \{ H^{3/2} - (H - h)^{3/2} \} \quad (1)$$

$$U = \frac{2}{5} \left\{ \frac{c \cdot g (\sin \theta - \mu_k \cos \theta)}{(\pi/12) \cdot \sin^2 \alpha \cdot (1 - e^2) \cdot (1/b) \cdot D^2} \right\}^{1/2} \cdot H^{3/2} \quad \dots (2)$$

3. 実験及び結果

3. 1 模型実験及び観測状況

実験装置の概要は図-1の通りであり、上部には一定量の給砂が可能な様にホッパー装置が取り付けられている。崩土流下斜面は幅30cm、深さ30cm、長さ9.5mの一定勾配のものである。流下斜面底面には崩土材料と同じ流下材料を張り付けたロールのペーパーが実験材料に応じて取り付けることが可能である。崩土材料は運搬箱とクレーンを用いてホッパーに給砂出来るようになっている。崩土実験は斜面中央部から下流部で等速運動をなすようにホッパーバルブを調節し、斜面下端部より1mの箇所高速ビデオ(200コマ/秒)により、流下粒子の流下深及び速度分布等を観測・計測した。実験条件として、斜面勾配は31°、33.2°、35.7°、38.7°の4ケースであり、用いた崩土粒子の粒度分布は図-2に示す0.93mm、1.78mm、2.86mmである。

観察によると崩土は次のような挙動を示す。ホッパーを一定角度開口すると砂の流下が始まり明瞭な前線を形成して流下し、次第に一定の流下深を有するようになり、定常的な流れが斜面中央付近よ

り下方部に形成される。流れの表面は整然とした流れであって大きな波動現象は見られない。実験においては約13秒から20秒にかけて定常流れが出来ており、この時間内において砂粒子の変化をビデオ撮影より読み取り鉛直速度分布を求めた。全てのケースに共有して見られた現象は次の通りである。下層部に上に凸な速度分布と上層部に下に凸な速度分布を有する流れが見られ、その変化点は速度が約1 m/s付近に表れている。この上下層部の各粒子は層状に流れており、大きな波動は観察出来ないが、砂粒子は上下層の速度の違いにより回転しており、回転に伴って砂粒子は上下方向に多少波打ちながら流下している。

3. 2 流速分布の検討

まず解析に当り、(1)式に含まれる各係数値について測定検討する。摩擦係数に関しては、過去の研究^{6), 7)}によると μ_k/μ_s の比は粗度や材料の違いによる系統的な変化はなく、移動速度にも変化しないことが明らかになっており、

$\mu_k/\mu_s = 0.7 \sim 0.85$ の関係が報告されている⁷⁾。当解析においては動摩擦係数 μ_k 値は上述の関係を利用して求めることとした。すなわち、崩土の材料に対応した粗度板を作成し、その上に流下材料と同じ材料の粒子を一層程度敷き、砂層が層状をなして移動を始める時の斜面傾斜度を求め、静止摩擦係数値として算出した上で0.8の値を乗じて動摩擦係数値を求めた。

体積濃度に関しては、平野らの手法を用いて求めた。その結果が図-3, 4である。この図から斜面底面には体積濃度の大きな部分が存在し、表面に近づくにつれ線形関係で小さな値となっている。

以上の仮定のもとで(1)式について粒子流の流速分布形状について解析を実施してみた。しかしながら、(1)式により得られた粒子流の流速分布形状は下に凸の曲線形状となり、前述した粒子流観測結果より得られた下層部付近の上方凸形状の流速分布形状は得られなかった。この理由は(1)式の算出において体積濃度分布を一定値として処理しているためであると考えらえる。すなわち図-3, 4に観察されるように体積濃度分布は粒

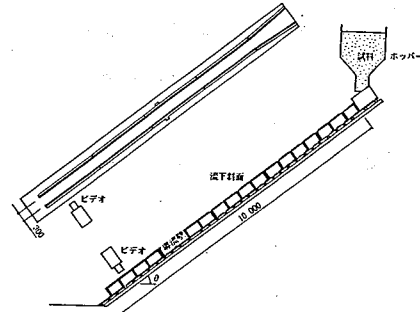


図-1 実験施設の概要

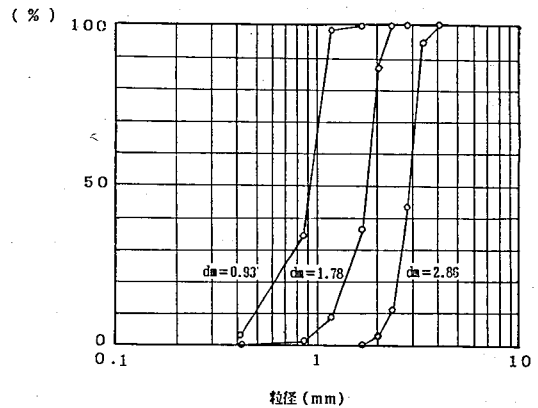


図-2 崩土材料粒径分布

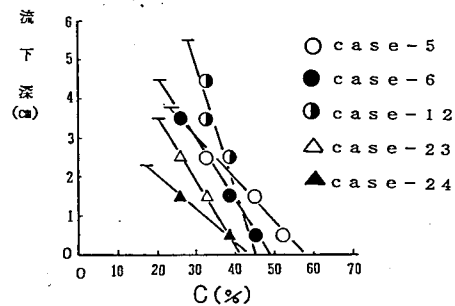


図-3 cの鉛直分布 ($d_{50} = 2.86 \text{ mm}$)

子流は上層部と下層部では明かな相違が見られ、一定値として処理することは困難である。すなわち、粒子間摩擦及び非弾性衝突によるエネルギー散逸式にはそれぞれ体積濃度を示す係数が含まれており、この影響を評価すべきであると考え。今回実施した乾燥砂粒子流に関する濃度分布は現在のところ提案されていないので図-3、-4に示される実験事実をもとに体積濃度の変化を次式より設定することとした。

$$c = -\beta h + c_0 \quad \dots(3)$$

ただし、C：体積濃度、h：粒子流の流下深、 c_0 ：底面における体積濃度、 β ：定数
すなわち、体積濃度分布が粒子流の深度に線形に変化すると仮定する。

以上の仮定に従うと粒子流の近似流速分布式として次式が求められる。

$$\frac{du}{dy} = \left\{ \frac{g \cdot (-\beta h + c_0) \cdot (H - y) \cdot (\sin\theta - \mu \cdot \cos\theta)}{(\pi/12) \cdot \sin^2\alpha \cdot (1 - e^2) \cdot (1/b) \cdot D^2} \right\}^{1/2} \quad \dots(4)$$

上式の解析においては、体積濃度による有効応力が流下深の関数であることより、これを台形公式より求めた後、流速分布の数値積分を実施した。解析結果を図-6に示すが実験結果と比較的良好一致しており、下層部の上方凸形状の流速分布が説明し得るものとなった。なお解析にあたって各係数は $\beta = 0.08$ 、 $c_0 = 0.4$ 、 $e = 0.8$ 、 $\alpha = 40^\circ$ 、 20° （ケース19のみ）である。特に反発係数eについては、実験より得られた図-5に示す結果及び文献^{10) - 12)}により0.8に設定した。

4. あとがき

非弾性衝突によるエネルギー散逸機構を考慮して崩土の抵抗則について検討を行った。今回議論した抵抗則は実験より得られた粒子流の流速分布形状を説明し得るものである。しかしながら、今回提案する抵抗則の適用において体積濃度の一義的決定が必要であり、これら問題点及び到達範囲に関して詳細なる検討が今後必要である。

参考文献

- 1) 吉中龍之進：46年千葉県集中豪雨による土砂災害、施工技術、5-11、pp73-79、1972
- 2) Scheidegger, A.E.: On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. Rock Mechanics 5, pp231-236. 1973
- 3) Hsu, K.J.: Catastrophic debris streams generated by rockfalls. Geological Society of America

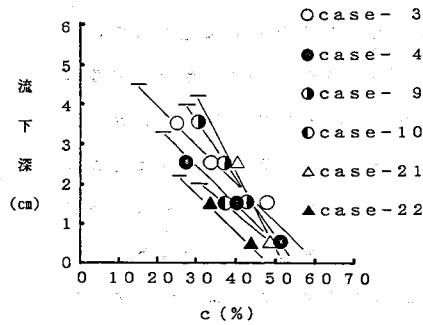


図-4 Cの鉛直分布 ($d_{50} = 1.78\text{mm}$)

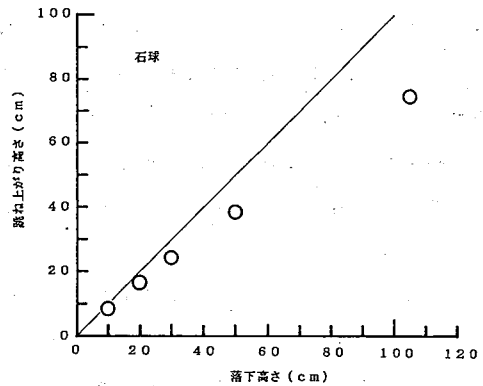


図-5 反発係数測定試験

ica Bulletin 86. pp129-140. 1975

- 4) 吉川秀夫、福岡捷二：山腹崩壊の到達長さについて、文部省特定研究災害科学、昭和46年台風第2号による千葉県下災害の実態調査報告書、pp17-23、1972
- 5) 海堀正博：山腹崩壊土砂の運動に関する研究、p99、1986
- 6) 森脇寛：崩土の到達距離予測、地すべり、24-2、pp10-15、1987
- 7) 芦田和男、江頭進治、神矢弘：斜面における土塊の滑動・停止機構に関する研究、京都大学防災研究所年報、27-B2、pp331-340、1984
- 8) 山野邦明、大同淳之、三輪浩、西本直史：Newton流体を含む粒子流の構成方程式のエネルギー的考察、土木学会第39回年報、pp367-368、1984
- 9) 平野宗夫、岩元賢：土石流先端部に関する実験的研究、新砂防、121、pp1-7、1981
- 10) 平澤賢二、佐武正雄、中川昌美：粒状流のクエット流のシミュレーション、土木学会第44回年次学術講演会、pp282-283、1989
- 11) 藤村尚、木山英郎、西村強、池添保雄：岩石のDEM定数決定のための落下反発試験、土木学会第41回年次学術講演会、pp369-370、1986
- 12) 江頭進治、芦田和男、矢島啓、高濱淳一郎：土石流の構成則に関する研究、京大防災研究所年報、32-B2、pp487-501、1989
- 13) 藤沢和範、吉松弘行、工藤賢二：崩土流下時の抵抗則について、平成元年度砂防学会研究発表会概要集、pp97-100

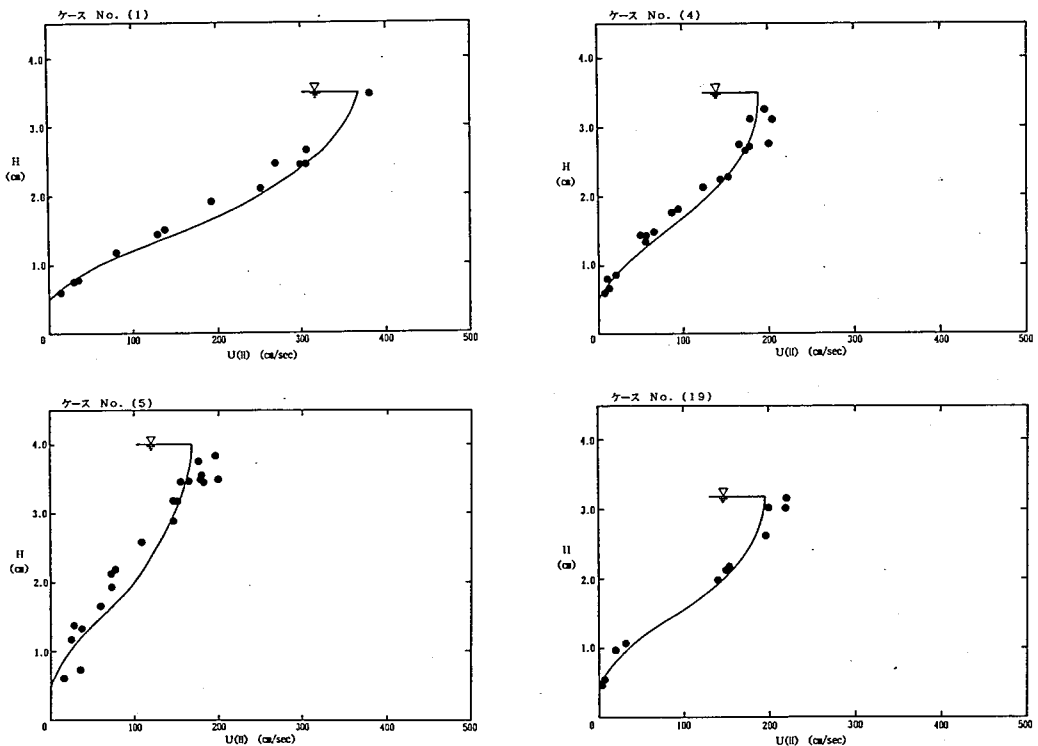


図 - 6 粒子流の鉛直流速分布の比較図