

土砂斜面上の落石の線運動に関するシミュレーション解析

松江工業高専 正会員 河原庄一郎
愛媛大学工学部 フェロー 室 達朗
愛媛大学大学院 学生会員 〇菊田 裕樹
愛媛大学工学部 濱谷 友和

1. まえがき 現在、現場落石実験、シミュレーション解析により落石の運動機構が解明されつつある。しかし、現場実験では実験条件を完全に揃えることができず、精度上限界がある。また、双方とも土砂斜面上の落石の沈下が考慮されていない。ここでは土砂斜面上の落石の沈下が落石速度に及ぼす影響を考慮した落石の線運動に関するシミュレーション解析を行い、斜面方向加速度を求めることを目的とした。

2. 解析仮定 落石は円柱、斜面は平坦均質である。落石の線運動(並進+回転)は、等加速度、等角加速度運動であり、落石の沈下量、スリップ率は線運動中に変化しないと仮定する。また、土砂斜面のリバウンド量、円柱の速度効果、寸法効果は考慮しない。

3. 解析方法 図1に線運動中の落石に作用する諸力を示す。また、図2に解析のフローチャートを示す。

まず、沈下量の初期値 z_{0i} を次式¹⁾より算出する。

$$z_{0i} = \left[\frac{3mg \cdot \cos\beta}{bk\sqrt{2r}(3-n)} \right]^{\frac{2}{2n+1}} \quad \begin{array}{l} b: \text{円柱の幅} \\ k, n: \text{地盤定数} \end{array}$$

スリップ率の初期値 i_{b1} を室内実験²⁾より得られた値を用いて設定する。一般に、制動時のスリップ率 i_b は次式で定義される。

$$i \equiv \frac{r\omega - v}{v} \leq 0 \quad \begin{array}{l} r: \text{円柱の半径}, \omega: \text{角速度} \\ v: \text{並進速度} \end{array}$$

垂直合力 P とせん断合力 T 、それぞれが斜面垂直方向となす角 φ_p, φ_t を次式を用いて計算する³⁾。

$$\sigma = kd^n = k(z - r + r \cdot \cos\theta)^n, \quad P = b \cdot r \int_0^{\theta_f} \sigma d\theta$$

$$\varphi_p = \frac{M_p}{P} = \frac{b \cdot r \int_0^{\theta_f} \sigma \cdot \theta d\theta}{P} \quad \sigma: \text{垂直応力}$$

$$\tau = (c_a + \sigma \cdot \tan\delta) \{1 - \exp(-a_j \cdot j_b)\}, \quad T = b \cdot r \int_0^{\theta_f} \tau d\theta$$

$$j_b = r \left\{ (\theta_f - \theta) - \frac{1}{1+i_b} (\sin\theta_f - \sin\theta) \right\} \quad \tau: \text{せん断応力}$$

$$\varphi_t = \frac{M_t}{T} = \frac{b \cdot r \int_0^{\theta_f} \tau \cdot \theta d\theta}{T} \quad \begin{array}{l} c_a, \delta, a_j: \text{実験定数} \\ j_b: \text{スリップ量} \end{array}$$

斜面垂直方向の力のつり合いを判定する x により $P, T, \varphi_p, \varphi_t$ の妥当性を判定する。

判定が No の場合、新たにスリップ率 $i_{b2} = i_{b1}(1+2x)$ を求め再び $P, T, \varphi_p, \varphi_t$ を計算する。

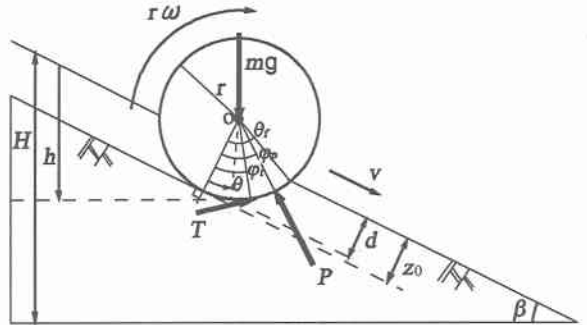


図1 運動中の落石に作用する諸力

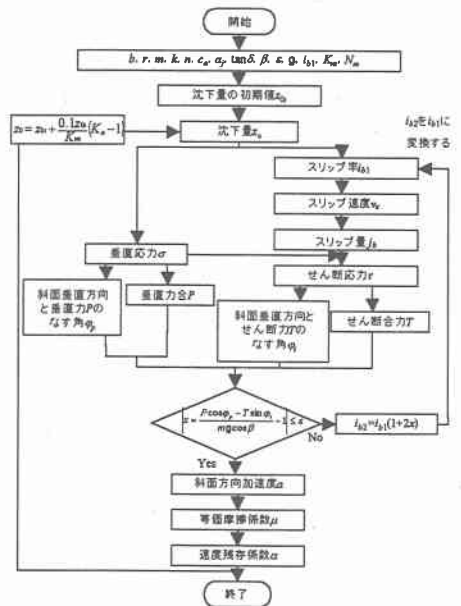


図2 落石の線運動シミュレーション解析のフローチャート

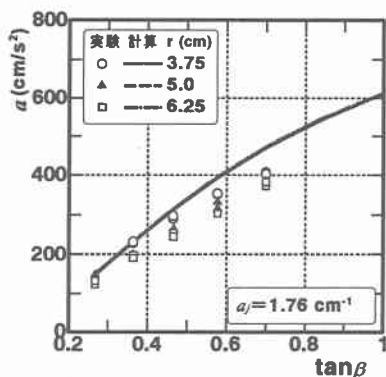


図3 斜面方向加速度 a と
斜面勾配 $\tan \theta$ の関係

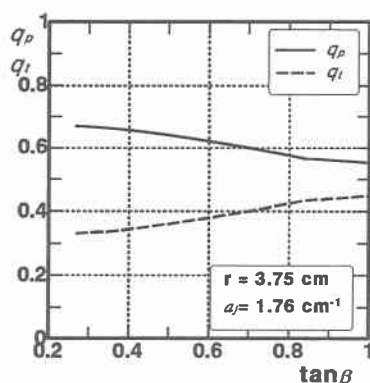
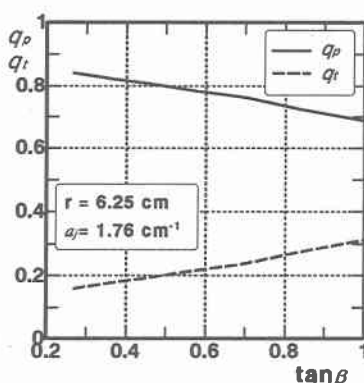


図4 q_p , q_t と斜面勾配 $\tan \theta$ の関係

判定が Yes の場合、斜面方向加速度 a を斜面方向の力のつり合い式より求める。

つぎに、沈下量の初期値 z_{0i} を +10% の範囲で 40 に分割し、沈下量 z_0 を変化させ与えた斜面勾配に対する沈下量とスリップ率の組み合わせを求める。

シミュレーション解析結果は、判定式を満たした複数組の z_0 , i_{b2} の結果のうち、垂直合力の斜面垂直方向成分 $P \cos \varphi_p$ が円柱落石荷重の斜面垂直方向成分 $mg \cos \beta$ よりも大きく、かつその差が最小のものを用いた。これは、この時最も斜面方向加速度 a が大きくなるので、安全側となるからである。

4. 解析条件 表1に解析条件の一覧を示す。判定値 ε は 0.001 とした。

5. 斜面方向加速度 図3に斜面方向加速度 a と斜面勾配 $\tan \beta$ の関係を示す。解析結果の斜面方向加速度 a は、実験結果よりも若干大きいものの、実験結果と同様に、斜面勾配 $\tan \beta$ が大きくなるにしたがって

増加し、半径 r に関わらず斜面勾配 $\tan \beta$ に対する増加率はほぼ一定となる。しかし、半径 r が大きくなると、斜面方向加速度 a はわずかに小さくなるものの、その減少率は実験結果と比べると非常に小さい。

6. 垂直合力とせん断合力の割合 抵抗力 ($=P \cdot \sin \varphi_p - T \cdot \cos \varphi_t$) に対する垂直合力 P の斜面方向成分の占める割合 q_p 、せん断合力 T の斜面方向成分の占める割合 q_t と斜面勾配 $\tan \beta$ の関係を図4に示す。 q_p は、斜面勾配 $\tan \beta$ が大きくなるにしたがって減少する。半径 r が大きくなると、 q_p は大きくなる。

q_t は、斜面勾配 $\tan \beta$ が大きくなるにしたがって増加する。また、半径 r が大きくなると、 q_t は小さくなる。

q_p の値は、最小で $q_p = 0.552$ ($\beta = 45^\circ$, $r = 3.75$ cm), 最大では $q_p = 0.841$ ($\beta = 15^\circ$, $r = 6.25$ cm) となり、垂直合力 P の斜面方向成分で表される締固め抵抗が、土砂斜面上の円柱に作用する抵抗力にかなり影響を及ぼしていることがわかる。

7. まとめ 垂直合力の斜面方向成分で表される締固め抵抗が、土砂斜面上の円柱の線運動にかなり影響を及ぼす。ここで提案したシミュレーション解析法の適応性は、定量的にはまだ不十分であるが、定性的にはある程度満足のいくものである。

参考文献 1) 杉山 昇 著：建設機械と土の諸問題, pp.120~122, 1982. 2) 河原莊一郎・室 達朗・菊田裕樹：土砂斜面上の落石の線運動定数, 土木学会四国支部第5回技術研究発表会講演概要集, pp.178-179, 1999.

3) 室 達朗 著：テラメカニクス, 技報堂出版, pp.56-59, 1993.

$$a = g \cdot \cos \beta - \frac{1}{m} (P \cdot \sin \varphi_p - T \cdot \cos \varphi_t)$$

表1 解析条件一覧

記号	入力値	単位
β	15~45 (5° 刻み)	(°)
r	3.75, 5.00, 6.25	(cm)
b	9	(cm)
m	1.022, 1.888, 2.995	(kg)
i_{b1}	-0.2	—
k	6.59	(N/cm ⁿ⁺²)
n	0.41	—
c_a	0	(kPa)
$\tan \delta$	0.42	—
a_f	1.76	(cm ⁻¹)

$$q_p = \frac{P \cdot \sin \varphi_p}{P \cdot \sin \varphi_p - T \cdot \cos \varphi_t}$$

$$q_t = \frac{-T \cdot \cos \varphi_t}{P \cdot \sin \varphi_p - T \cdot \cos \varphi_t}$$