

山梨大(現山梨県) 学生員 ○清水 一正

山梨大・工学部 正 員 箭内 寛治

山梨大・工学部 正 員 村上 幸利

1. はじめに

今日、交通網の発達に伴い地形・地質的条件の悪い山岳地帯に道路が建設されることが多くなり、落石による被害も多発している。したがって、落石に関する防災対策は非常に重要な問題となっている。しかし、落石現象には雨水による浸食、凍結融解、植生、地震動、風化などの因子や、地形・地質の条件が複雑に絡み合うので、この発生機構を解明するには困難が伴う。実際に行われている対策としては、防護網や落石警報装置等の設置があるが、有効な対策工を考えていく上においては落石発生に対する危険度を判定する方法の確立が不可欠である。本報告では、転石に外力を与えて人為的に落石を発生させ、そのデータを逆解析して強度定数を求め、この値をもとに落石の危険度を判定する方法を提案する。

2. 落石の二次元的安定解析

本研究は、静止状態の転石を人為的に落下させることにより落石発生の危険度を探ろうとするものである。したがって、落石発生時の力学的条件を理論的に求めておく必要がある。そこで二次元的安定解析を行う。なお落石形態は滑動および転倒の二通りが考えられるが、逆解析が可能なのは滑動のみである。まず、外力が加わらない場合に臨界状態の関係から落石がおこる臨界傾斜角 β 。

を求めると¹⁾(図-1)、

$$\beta_0 = \delta + \sin^{-1} (2rc \cdot \sin\theta \cdot \cos\delta / W) \quad (1)$$

ただし、 r : 転石半径 θ : 転石根入れ角 W : 転石単位長当りの重量 δ : 土と転石とのせん断抵抗角 c : 土と転石との粘着力。

次に、水平方向に外力が加わった時に落石発生の臨界状態となる

外力 f は次の通りである。

$$90^\circ - \theta \geq \beta \text{ の場合 } f = W \cdot \tan\delta + 2rc \cdot \sin\theta \cdot \cos\beta \quad (2)$$

$$90^\circ - \theta \leq \beta \text{ の場合 } f = W \cdot \tan\delta + 2rc(1 - \cos\theta \cdot \sin\beta) \quad (3)$$

3. 実験

(1) 実験方法 まず、逆解析の可能性を調べる基礎実験を行う。すなわち、斜面傾斜を自由に設定できる傾斜装置を用いて、斜面上の転石を落石させるに必要な外力 f を求めた。さらに、 f の理論値を得るに必要な強度定数を求めるために一面せん断試験を行った。なお、斜面の土床に、山梨県高根町から採取した八ヶ岳ローム($w_L = 54.0\%$, $I_p = 7.7\%$, $w_u = 33.0\%$)を用いた。

次に、実際の落石現場を想定したモデル実験を行う。実験装置は基礎実験と同様のものを使用し、土床には山梨県数島町から採取した黒富士火砕流を用いた。試料調整は行わず、含水比は自然含水比(20.5%)とした。さらに、求める安全率の妥当性を検討するために、落石が発生するまで転石の下部を削り取り臨界根入れ角を求めた。

(2) 実験結果および考察 基礎実験において臨界状態となる外力の理論値と実験値を比較した代表例が図-2である。実験値は理論値よりも10~30%程度小さな値となっている。この理由としては、転石下部で

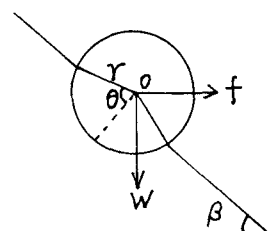


図-1 転石の二次元モデル

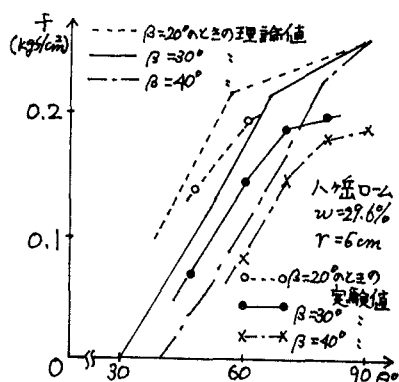


図-2 臨界外力の理論値と実験値の比較

の局部破壊等の理論ではカバーできない影響が考えられる。そこで、理論値と実験値の比を平均したものを補正係数 α ($=1.26$) として考える。その α と滑動部分の実験値を用いて $c \sim \tan \delta$ 関係線を描くと図-3のようである。なお、 $c \sim \tan \delta$ 関係線を与える式は②、③式を変形し、次の通りとなる。

$$90^\circ - \theta \geq \beta; \tan \delta = (\alpha \cdot f - 2rc \cdot \sin \theta \cdot \cos \beta) / W \quad ④$$

$$90^\circ - \theta \leq \beta; \tan \delta = \{\alpha \cdot f - 2rc(1 - \cos \theta \cdot \sin \beta)\} / W \quad ⑤$$

これらの直線の交点の座標を平均したものを (c , $\tan \delta$) の逆解析値とする。なお、逆解析値と一面せん断試験値とを比較したものを表-1に示しておく。

同様に、モデル実験で用いる黒富士火砕流の逆解析値を求めると、 $c = 0.0108 \text{ kg f/cm}^2$, $\tan \delta = 0.433$ ようになる。傾斜角一定の状態では理論的に算出される臨界根入れ角 (図-4) と実際の根入れ角との比を安全率と考える。この安全率と転石根入れ角、転石半径の関係を描いたものが図-5である。これから斜面傾斜角が大きくなると、大きい転石ほど落石の危険が高くなるといえる。これは大きい転石ほどその自重の増加が、接地面積の増加より大きくなるためである。なお、図-4の $\theta \sim r$ 関係線を与える式は①式を変形したもので次のようになる。

$$r = 2c \cdot \sin \theta / \pi r_s (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \delta) \quad ⑥$$

ただし、 r_s は転石の単位体積重量である。さらに、ここで求めた安全率の妥当性を検討するために行った実験結果が表-2であるが、予想される臨界根入れ角よりも大きい値で落下している。このことについては今後の改善が必要であると思われる。

表-2 臨界根入れ角の理論値と実験値の比較

傾斜角 半径	3 cm		4.5 cm		6 cm	
	理論値	実験値	理論値	実験値	理論値	実験値
30°	30°	32.2°	30°	31.9°	30°	35.9°
40°	40°	47.9°	40°	50.1°	49.5°	54.8°
50°	50°	63.5°	62.1°	68.1°	—	77.2°

4. まとめ

転石に外力を加え、その実験値から逆解析を行って強度定数を求め、さらに転石ごとの安全率を算出する手法は可能といえる。しかし、実際の落石現場には、互いに大きさ・根入れ角の異なる転石が数多く存在している。このような場合は、斜面傾斜角に応じた $\theta \sim r$ 関係線を描き、この図上に個々の転石の状態をプロットすることにより斜面の総合的な安全率を検討すればよい。さらに、この安全率を点数化し、従来の採点表とともに用いて危険度判定を行えば、より効果的になると思える。今回は二次元的解析可能な円柱を実験用転石として用いたが、今後は、実際の現場に数多く存在する球について検討していくことが課題となる。

【参考文献】 1) 村上・箭内：転石型落石の発生機構に関する基礎的研究，土質工学会論文報告集，第27巻1号，p151-p162 (1987)

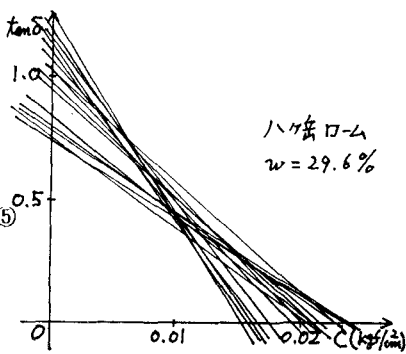


図-3 $c \sim \tan \delta$ 関係線

表-1 逆解析値と一面せん断試験値の比較

手法 含水比	逆解析		一面せん断試験値	
	c (kgf/cm²)	$\tan \delta$	c (kgf/cm²)	$\tan \delta$
29.6%	0.0122	0.305	0.013	0.340
39.7%	0.0186	0.228	0.018	0.249

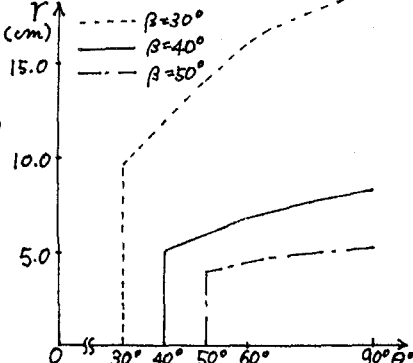


図-4 臨界状態の $\theta \sim r$ 関係線

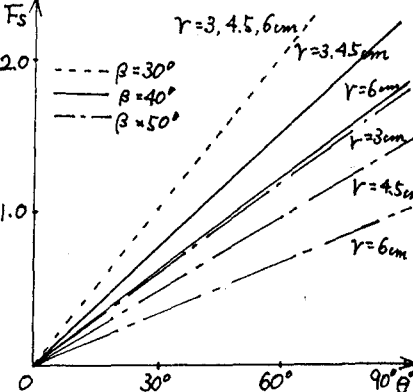


図-5 $\theta \sim F_s$ 関係線