

振動輸送理論を応用した地震時斜面のすべり変位解析法の提案

立命館大学理工学部 学生員 ○岡村 嘉之
立命館大学 COE 推進機構 正会員 酒匂 一成
立命館大学理工学部 正会員 深川 良一

わが国における斜面崩壊の原因の約 30%以上が地震である。斜面の地震時崩壊については、弾塑性有限要素解析などを用いた残留変形解析を耐震設計に適用することが主流となってきた。しかし、有限要素法 (FEM) による残留変形解析では、崩壊時に明確なすべり面の発生を伴う剛塑性的なメカニズムの再現精度が低い。本研究は明確なすべり面の形成を伴う地震時崩壊について、機械工学で発展してきた振動輸送理論を応用することにより、斜面の地震時変位を求める方法を提案する。

1. 振動輸送理論¹⁾

振動している面上に物体を載せると、物体は相対すべりや跳躍運動を繰り返しながら一定の方向に輸送される。このような機械的振動を積極的に利用して、物体を移送する方法を一般的に「振動輸送」と呼ぶ。図 1 に示すように、質量 m の物体が角度 θ だけ傾いた平面上に置かれているとする。すべりの方向を X 方向 (斜面に沿って下降する方向を正とする)、物体の運動の各方向成分を x 、平面の運動を X で表す。いまこの平面に振幅 A 、円振動数 ω なる水平振動が作用するとすれば、振動面の運動は次の式で表される。

$$X = A \cos \theta \sin \omega t$$

物体と振動面との間に相対すべりが無い場合は、物体の輸送は行われ無いが、相対すべりがある場合の運動は次式で表される。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg \sin \theta \pm \mu P$$

ここで、 μ は物体と振動面の間に作用する摩擦力であり、 P は抗力である。したがって、物体の運動は次式で表される。

$$P = m(g \cos \theta - A \omega^2 \sin \theta \sin \omega t)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = g \sin \theta \pm \mu(g \cos \theta - A \omega^2 \sin \theta \sin \omega t)$$

平面 (すべり面) の運動は図 1 上で実線、物体の運動は点線のように表すことができる。

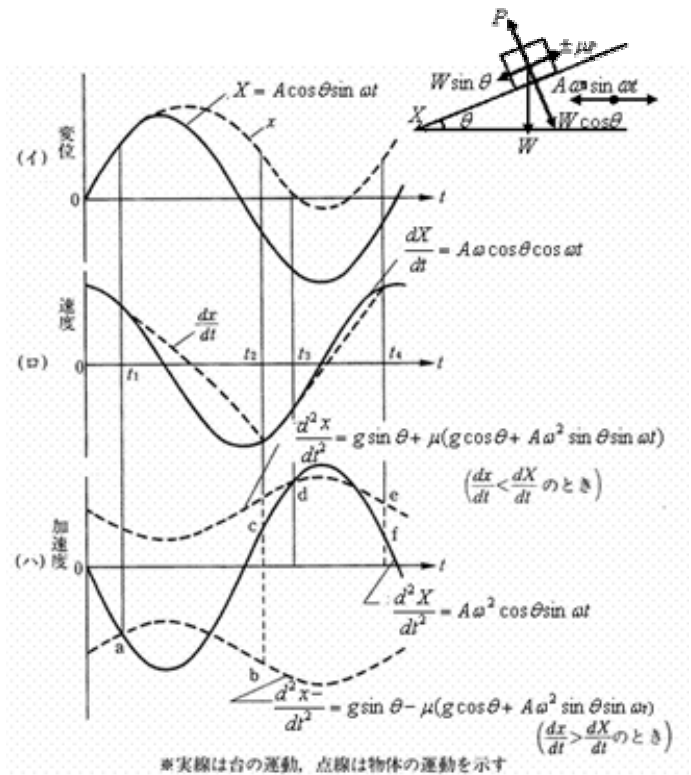


図 1. 振動輸送理論による物体と振動台の運動形
(横山らの図^{参考文献}) に加筆、修正)

2. 振動輸送理論の斜面変位解析への応用

二次元弾塑性 FEM による斜面の地震応答解析の結果から応力場の時刻暦を取り出し、あらかじめ特定されたすべり面が通る各要素におけるせん断応力 τ とせん断強さ τ_f の時刻暦を得る。

$$\sigma = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\tau = \tau_{xy} (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) - (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta$$

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

キーワード 地震、斜面、変位、振動輸送

連絡先 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目-1-1 立命館大学びわこ・くさつキャンパス TEL077-561-2617

すべり面が通るすべての要素についてこれらを計算し、すべり面全体でのせん断力 S およびせん断抵抗力 R を次式で計算する。

$$S = \sum_i^N \tau_i \times \Delta s_i, R = \sum_i^N \tau_{fi} \times \Delta s_i$$

ここに、 N はすべり面が通る要素の数、 Δs_i はすべり面が通る i 番目要素のすべり面長である。

これらを各タイムステップで計算し、すべり面より上の土塊の総質量で除す。これをすべり面の加速度波形(図1の実線)とすべり土塊の加速度波形(図1の点線)とし、二つの波形で囲まれた領域について時間による二階積分を行うことにより、すべり面に対する土塊の相対変位を求めることができる²⁾。

この解析方法のフローを図2に示す。

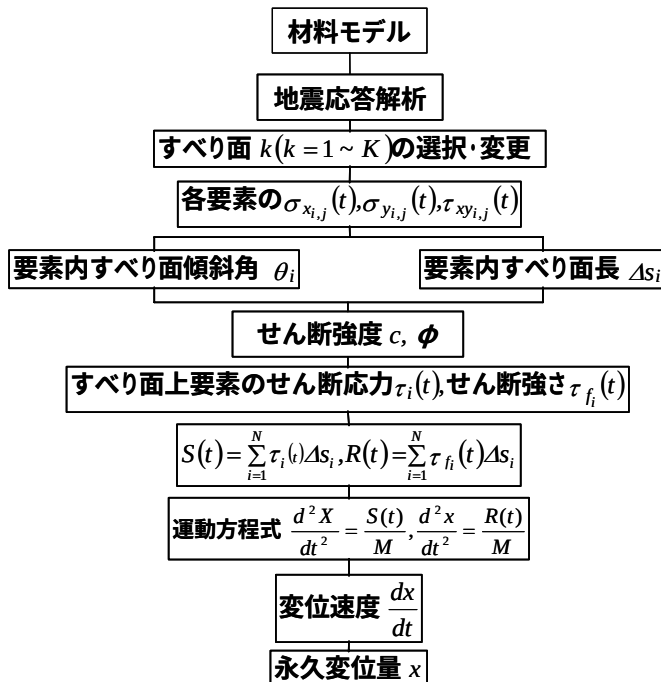


図2. 振動輸送理論による変位解析フロー

3. 解析の適用

振動輸送理論の応用により地震時斜面の変位を求める前段階として、地震応答解析の結果からすべり面全体でのせん断力 S およびせん断抵抗力 R を求めることにより、斜面のすべり安全率 F_s ($=R/S$) の算定を試みた。

地震応答解析は図3に示す解析メッシュを用いて実施した。解析に用いたモデルは Drucker-Prager 塑性モデルで、材料定数を表1に示す。なお、図3中の赤線は Fellenius 法による斜面安定計算の結果において安全率が最小となったすべり面を示している。

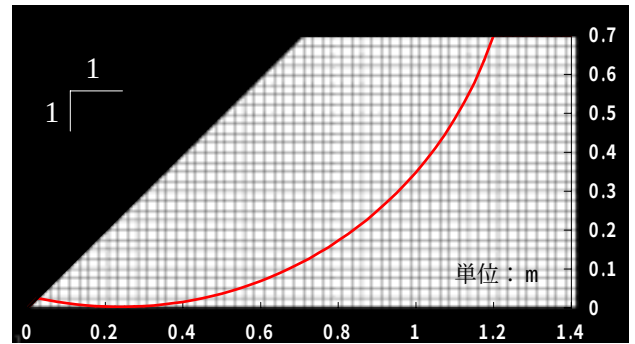


図3. 解析メッシュ

表1. 解析に用いた定数

$\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	$c(\text{kPa})$	$\phi(^{\circ})$	$E(\text{kPa})$	ν
15.0	10.0	25.0	3000	0.30

解析では図4のような波形を示す水平加速度を解析検討モデルの底面および側面(背面)に入射した。境界条件は側面境界を水平方向固定、底面境界を鉛直方向固定とした。解析手順は外力として自重のみを考慮した解析(自重解析)の後、地震応答解析を行った。図5に安全率の時刻暦を示す。

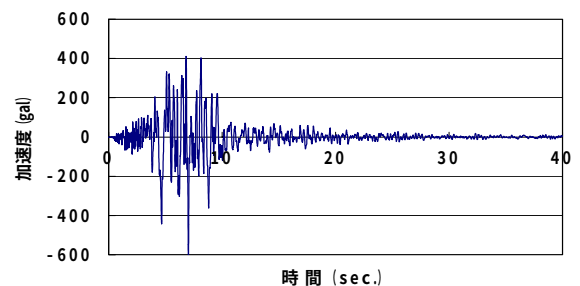


図4. 入力地震加速度波形

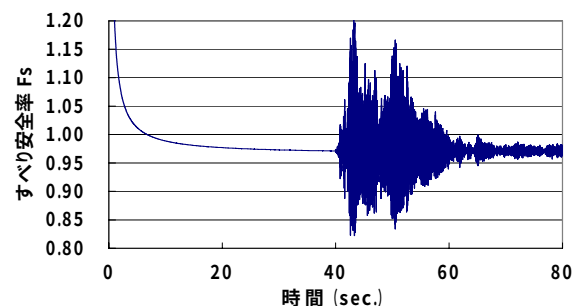


図5. 安全率時刻暦

<参考文献>

- 1) 横山恭男, 石川憲一, 岡部佐規一, 小泉邦夫: 振動応用技術, 工業調査会, pp.79-86, 1992.
- 2) V. B. Nguyen, J. -C. Jiang, T. Yamagami: Modified Newmark analysis of seismic permanent displacements of slopes, Journal of the Japan Landslide Society, Vol.41, No.5, pp. 12-17, 2005.