

スライス境界にバネを用いた斜面安定解析法と適用事例

愛知県豊田土木事務所 正会員 近藤 観 慈
三重大学生物資源学部 正会員 林 拙 郎

1. はじめに

筆者らは、既にスライス境界と底面にバネを用いたモデルによる斜面安定解析法¹⁾ (以下、SSMという) を提案している。この方法は、極限平衡法(分割法)の枠内で、斜面の安全率やスライス間内力(以下、内力という)を合理的に決定しようとするものである。ここでは、主に、内力の作用角 δ_i' の決定法と、斜面安定問題と支持力問題への適用例について報告する。

2. 解析モデルの概要

本解析モデルは、図-1に示すように鉛直分割されたスライスを剛体と仮定し、スライス境界(以下、境界という)に、垂直な線形弾性バネ(バネH)と、平行な弾完全塑性バネ(バネV)を置き、また、スライス底面(以下、底面という)に、垂直な線形弾性バネ(バネN)と、平行な剛完全塑性のスライダを設けたモデルである。そして、スライスの変位に次の仮定を設ける。すなわち、スライスの変位は底面と境界に平行な方向を基本とし、境界が塑性状態に達したときのスライスの変位方向にはダイレイタンシー角 ν_D を与え、底面も同様とする。また、 ν_D には土塊の内部摩擦角を与える。解析手順としては、まず、バネHとバネNの各々に内力の水平成分 Z_{Hi}' と底面反力の垂直成分 N_i' を与え、変位の仮定に基づいて得られる隣接スライスの相対鉛直変位量 v_i (図-2参照)からバネVに生ずる仮想せん断力 Z_{Di} を求める。この Z_{Di} と Z_{Hi}' から内力の仮想作用角 δ_{Di} を算出する。次に、 δ_{Di} を、力学的な静定化係数 k を含む次の式(1) $[\tan\{(\pi/2 - \delta_i')/2\} = k \cdot \tan\{(\pi/2 - \delta_{Di})/2\}]$ の仮定式に与え、力のつり合い($\mathbf{F}=0$)とモーメントのつり合い($\mathbf{M}=0$)が満足されるように k を決定して、安全率 F_s 、 δ_i' 、内力の大きさ等を算出する。なお、添え字の i はスライス番号を示し、上方から下方に向かって1～ n まで順次付番する。

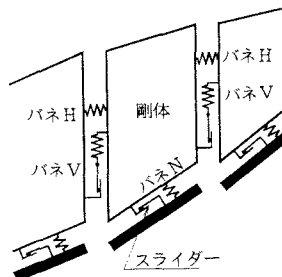


図-1 解析モデル

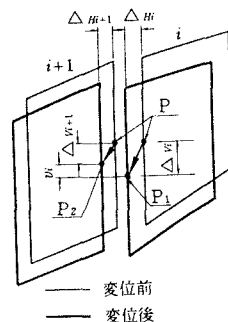


図-2 スライスの変位

3. δ_i' の決定法

スライス変位に対するひずみは、スライスの形状を基準とする。すなわち、バネH、バネVには境界を挟んだ隣接スライスの中点間の水平長($d_i + d_{i+1}$)、バネNには、スライスの重心における鉛直長さのすべり面に垂直方向の長さ(D_i)を用いる。各バネの変位はフックの法則にしたがうものとし、軸方向とせん断方向のバネ定数をそれぞれ e_g とする。なお、以下の式中の H_i は境界の鉛直高さ、 l_i は底面の長さ、 ϕ_{mi}' は底面に動員される内部摩擦角、 ϕ_{si}' は境界の内部摩擦角、 α_i は底面傾斜角、である。

境界が塑性時のこの境界における ν_D の影響によって生ずる水平変位 u_{DH} は、 v_i と ϕ_{si}' を用いて次の式(2) $[u_{DH} = -v_i \tan \phi_{si}']$ で表現される。したがって、隣接スライスの相対水平変位量 u_{Hi} は u_{DH} とバネHの軸変位量 u_{si} ($=Z_{Hi}' \cdot m_{si}/e$)の和として式(3) $[u_{Hi} = u_{si} + \xi_i u_{DH}]$ で与えられる。ここに、 $m_{si} = (d_i + d_{i+1})/H_i$ 、 ξ_i : 塑性時に1、非塑性時に0、である。次に、スライスの水平変位量 Δ_{Hi} は、末端スライスを固定して各スライスの u_{Hi} を当該スライスまで順次累積した式(4) $[\Delta_{Hi} = \sum u_{Hi}, (j=i \sim n-1)]$ で与えられる。一方、解析には極限平衡状態を想定するので、 Δ_{Hi} の変位によって底面では ν_D の影響を受け、スライスに式(5) $[\Delta_{Di} = \Delta_{Hi} \cdot \tan(\alpha_i - \phi_{mi}')]$ の鉛直変位 Δ_{Di} が生ずる。したがって、スライスの鉛直変位量 Δ_{vi} は、 Δ_{Di} とバネNの軸変位量 u_{Ni} $[=(N_i' + N_{\phi}) \cdot m_{Ni}/(2e)]$ の鉛直成分との和として式(6) $[\Delta_{vi} = u_{Ni} \cdot \sec \alpha_i + \Delta_{Di}]$ で求められる。

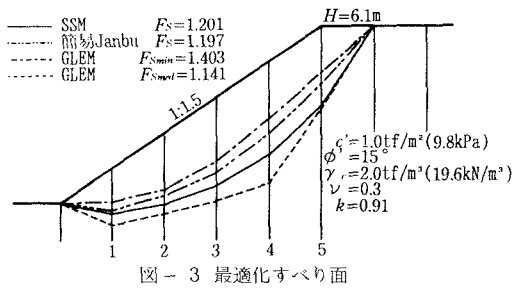


図-3 最適化すべり面

ここに、 N_{Qi} ：スライスの上面に作用する荷重の底面に垂直方向の成分、 $m_{hi}=D_i/l_i$ である。結局、 v_i は隣接スライスの Δv_i の差として式(7) [$v_i = \Delta v_i - \Delta v_{i+1}$] で与えられる。式(2)～式(7)の関係を用いて整理すると、 v_i は式(8) [$v_i = v_{Ti} / e$] で与えられる。ここに、 $v_{Ti} = (C_{Hi} + C_{Ni}) / A_i$ 、式中の C_{Hi} , C_{Ni} , A_i は以下のとおりである。
 $C_{Hi} = B_i \cdot \sum_{j=i-1}^{n-1} (m_{hj} \cdot Z_{Hj}' - \xi_j \cdot v_{Tj} \cdot \tan \phi_{sj}') + m_{hi} \cdot Z_{Hi}' \cdot \tan(\alpha_i - \phi_{mi}')$
 $C_{Ni} = \{m_{hi} \cdot (N_i' + N_{Qi}) \cdot \sec \alpha_i - m_{i-1} \cdot (N_{i+1}' + N_{Qi+1}) \cdot \sec \alpha_{i+1}\} / 2$, $B_i = \tan(\alpha_i - \phi_{mi}') - \tan(\alpha_{i+1} - \phi_{mi+1}')$
 v_i が求まれば、 Z_{Dvi} としてバネVの応力ひずみ関係から式(9) [$Z_{Dvi} = g \cdot v_i / m_{hi}$] が得られ、 δ_{Di} が [$\tan \delta_{Di} = Z_{Dvi} / Z_{Hi}'$] の関係を用いて式(10) [$\tan \delta_{Di} = (g/e) \cdot (C_{Hi} + C_{Ni}) / (m_{hi} \cdot A_i \cdot Z_{Hi}')$] で与えられる。そして、式(1)に δ_{Di} を代入すると δ_i' が求まる。また、塑性時の境界に対する δ_i' には、境界のせん断抵抗力 T_{Si} を用いた式(11) [$\tan \delta_i' = (T_{Si} / Z_{Hi}') \cdot (Z_{Vi} / |Z_{Vi}'|)$] の値を用いる。

4. 解析例

斜面安定問題と支持力問題の解析例を示す。解析に用いるバネ定数には、平面ひずみの一軸状態を想定する。こうすると、 δ_i' は、弾性係数に依存せず、ポアソン比 ν を含む因子によって決まる。ここでは、 ν に0.3を用いる。また、すべり面の最適化法に荒井らの方法²⁾を用いる。

斜面安定解析の断面として、榎ら³⁾が用いた斜

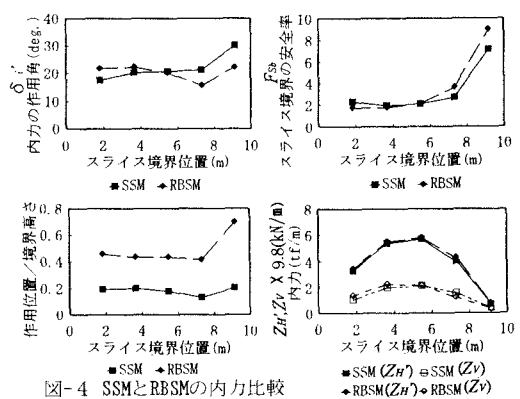


図-4 SSMとRBSMの内力比較

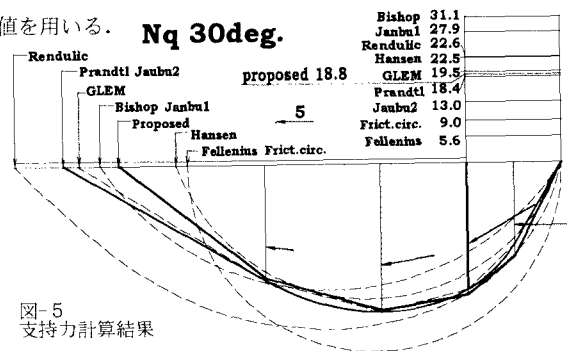


図-5 支持力計算結果

面に対して、SSMによって安全率が最小となるすべり面¹⁾ (図-3) を求め、そして、SSMと剛体ばねモデル(RBSM)の解析結果を比較する。なお、RBSMの安全率の算出には文献4)の方法を用いる。解析結果を図-4に示す。RBSMの安全率は1.203でSSMの値1.201 ($k=0.99$) によく一致している。同図では、両者の δ_i' が比較的一致していて、スライス方向の変化傾向が類似している。境界の安全率(F_{sb})に関しては、二つの解析結果が精度よく一致している。内力の作用位置については、RBSMがSSMより高い位置にあるが、変化傾向は類似している。さらに、 Z_{Hi}' と Z_{Vi} も、よく一致している。次に、支持力解析例として、一様な上載荷重(1.0)の作用する自重のない均質な地盤($\phi' = 30^\circ, c' = 0$)に対して、単位作用幅(1.0)の支持力(N_q)を計算する。解析結果(支持力値、すべり面形状、内力の大きさと作用方向、位置)を図-5に示す。図には、SSMの結果とともに、Hansen(1966)が示した他の解析法によるものと榎らのGLEMの結果⁵⁾を示した。塑性理論に基づくPrandtlの支持力の正解値(18.4)とSSMの値(18.8)が精度よく一致し、また、すべり面形状もよく一致している。なお、単位幅の作用荷重直下のスライス境界の内力の作用角 δ_i' として水平方向を与えて解析した。他のスライスの δ_i' は本モデルで求めた。

参考文献 1)近藤親慈, 林拙郎, 1995: スライス境界にバネを用いた斜面安定解析, 土木学会第50回年次学術講演会, 第3部(A), pp. 808~809 2)Arai,K., Tagyo,K.1985: Determination of noncircular slip surface giving the minimum factor of safety in slope stability analysis, S & F, Vol.25, No.1, pp.43 ~ 51 3)Enoki,M., Yagi,N., Yatabe,R.1990: Generalized slice method for slope stability analysis, S & F, Vol.30, No.2, pp.1 ~ 18 4)近藤親慈 1994: 弾塑性 RBSM による地すべり斜面の全体安全率, 第29回土質工学研究発表会, pp.1823 ~ 1824 5)Enoki,M., Yagi,N., Yatabe,R.1991: Generalized limit equilibrium method and its relation to slip line method, S & F, Vol.31, No.2, pp.1 ~ 13