

ハイブリッド型ペナルティ法による斜面上の支持力解析

法政大学 学生会員 鈴木 康大
法政大学 学生会員 石田 圭司
法政大学 正会員 竹内 則雄
法政大学 正会員 草深 守人

1. はじめに

自然斜面や人工斜面上に構造物を施工する場合，安定解析の一つとして支持力の検討を行う必要がある．しかし，既往の解析手法は不連続性の概念を取り入れておらず，すべり等の表現が困難であった．また，RBSMではすべり等の不連続性の概念を表現できるが，変位に対する信頼性に問題がある．このような背景から，竹内ら[1]は，Lagrange の未定乗数に RBSM のばねの考え方を導入し，ばね定数としてペナルティを用いたハイブリッド型ペナルティ法を開発している．

そこで，本論文では，ハイブリッド型ペナルティ法により模型実験の解析を行い，ハイブリッド型ペナルティ法が斜面の支持力問題に対して有効な解析手法となり得ることを検討する．

2. ハイブリッド型ペナルティ法の定式化

本解析では，隣接する 2 つの部分領域 $\Omega^{(a)}$ と $\Omega^{(b)}$ の共通の境界辺 $\Gamma_{<ab>}$ において，変位の連続性を Lagrange の未定乗数 λ を用いて表し，仮想仕事式に導入したハイブリッド型仮想仕事式を用いて定式化を行った．

$$\sum_{e=1}^M \left(\int_{\Omega^{(e)}} [L\delta u]^t \sigma - \int_{\Omega^{(e)}} \delta u^t f \right) d\Omega - \sum_{s=1}^N \left(\delta \int_{\Gamma_{<s>}} \lambda^t (\dot{u}^{(a)} - \dot{u}^{(b)}) \right) d\Gamma - \int_{\Gamma_\sigma} \delta u^t T d\Gamma = 0 \quad (1)$$

ここで， L は微分作用素， u は変位， σ は応力， f は物体力， T は表面力を表している． $\Omega^{(e)}$ は部分領域であり， M はその個数， Γ_σ は表面力が与えられる境界， N は隣接する 2 つの要素境界辺の数である．

また，変位場として線形変位場を要素毎に独立に設定し，部分領域 $\Omega^{(e)}$ について次のように表す．

$$u^{(e)} = N_d^{(e)} d^{(e)} + N_\varepsilon^{(e)} \varepsilon^{(e)} \quad (2)$$

ここで，上付きの (e) は部分領域 $\Omega^{(e)}$ に関するものであることを意味する．また， $d^{(e)}$ は要素内の任意点における変位， $\varepsilon^{(e)}$ は要素内で一定な値を持つひずみを表している．

未定乗数 λ は物理的に表面力を意味するので，部分領域 $\Omega^{(a)}$ と $\Omega^{(b)}$ における境界上 $\Gamma_{<ab>}$ の表面力を

$$\lambda_{<ab>} = k \cdot \delta_{<ab>} \quad (3)$$

と表す．ここで，式(1)には，要素内応力が考慮されているため，ばね定数を用いる必要はない．そこで，要素境界面上の相対変位 $\delta_{<ab>}$ と表面力の関係式(3)において， k をペナルティとして取り扱い，近似的に要素境界面上で変位の連続性を導入する．

3. 解析条件

解析対象は，文献[2]の大型土槽内で帯状荷重を載荷した模型斜面の支持力のうち，法勾配 1:1.5 のものである．図 1 に斜面の寸法形状，表 1 に解析に用いた定数を示す．ただし，物体力は無視した．図 2 に本解析で用いた要素分割図を示す．この要素分割では，様々なすべりを想定して，三角形を基本に分割した．特に，

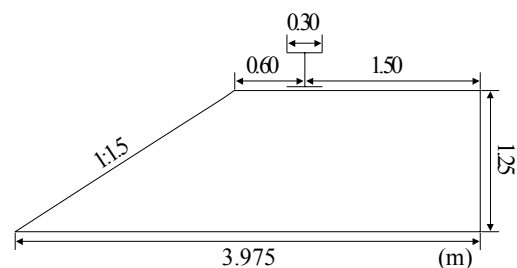


図 1 形状寸法

キーワード：ハイブリッド型ペナルティ法，支持力，層すべり

〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

載荷板下部は、剛体的な挙動を示す主動域となり、くさび状のすべりが発生することが予想されるため、そのようなすべりが表現できるような分割を行った。要素数 577、節点数 293 であり、ペナルティを設定する要素境界辺の数は 804 である。境界条件は供試体底面の水平・垂直方向を固定し、斜面右側の側面は水平方向のみ変位を拘束した。

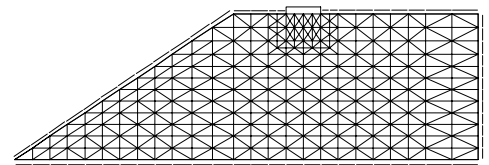


図2 要素分割図

表1 材料定数

弾性定数 E	ポアソン比 ν	粘着力 C	内部摩擦角 ϕ
6.0MN/m ²	0.35	17.5kN/m ²	25 °

4. 解析結果

図3は崩壊時における破壊パターンを比較したものである。実験では土槽底面より約85cmの位置に層すべり破壊が生じている。また、くさびの角度は約65°となった。HPMによる解析結果はくさびの角度は約57°、すべり線が土槽底面より約90cmの位置に生じており、実験と比較すると若干くさびが鈍く、すべり線の位置が高いものの、層すべりによく対応した破壊パターンを示している。

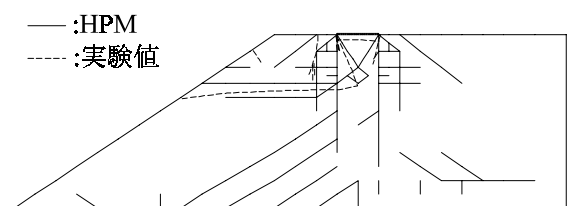


図3 破壊パターン

次に、図4は荷重沈下曲線を示したものである。実験により得られた崩壊荷重は311kN/m²である。HPMの解析による崩壊荷重は293.8 kN/m²で、実験値との誤差が5.5%と近い値となっている。また、RBSMの解析結果では361.1 kN/m²となっており、崩壊荷重に関しては、HPMの方が高い精度を得ることができた。次に、沈下量をみると、実験では荷重が180kN/m²以降になると沈下量が大きくなっている。一方、解析では沈下量が荷重に対して直線的に変化している。このため250kN/m²付近までは良好な値となっているが、崩壊荷重に近づくと実験値と差が生じている。しかし、全体的には良好な結果となっている。

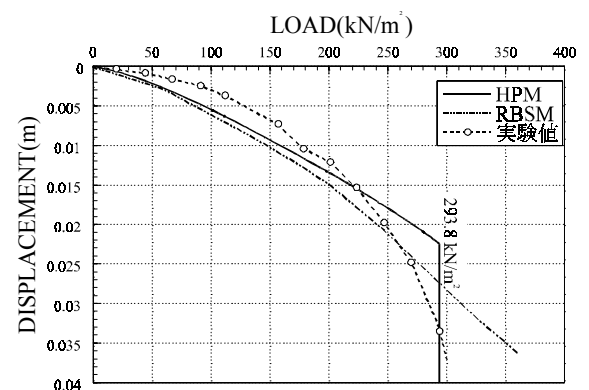


図4 荷重沈下曲線

5. まとめ

本論文では、ハイブリッド型ペナルティ法が斜面上の支持力問題に対してより有効な解析手法となり得ることを示すため、模型斜面の支持力実験の解析を行った。その結果、概ね実験結果を表現できる結果が得られた。本解析で対象とした斜面上の支持力実験では層すべりが発生しているが、従来の連続体を基礎とする解析手法では、層すべりの表現が困難であるのに対し、本手法による解析では、若干ずれがあるものの、この層すべり現象が表現されており、この種の進行型破壊現象を扱うことが可能であるものと考えられる。また、崩壊荷重は、精度の高い値を得ることができ、荷重沈下曲線も概ね良好な対応を示した。

以上のように、本手法は従来、困難であるとされていた、層すべりなどの不連続現象を定性的レベルではあるが再現できることを示すことができた。今後、さらに詳細な検討を加えることで、斜面上の支持力問題に対する実用的な解析法になるものと考えられる。

参考文献

- 1) 竹内則雄, 草深守人, 武田洋, 佐藤一雄: ペナルティを用いたハイブリッド型モデルによる離散化極限解析, 構造工学論文集, Vol.46A, 2000
- 2) 後藤哲雄, 香川和夫: 帯荷重による斜面の応力・変形とその解析, 第9回土質工学研究発表会, pp.629-632, 1974