

ペナルティ密度関数を用いた HPM によるジオテキスタイル補強土の離散化極限解析

法政大学	学生会員	○北川 和樹
三菱化学産資	正会員	間 昭徳
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

本研究では、ハイブリッド型ペナルティ法(HPM)を用いてジオテキスタイル補強土をモデル化するための新しい手法を提案し、補強材の補強効果を解析的立場より検証を行う。まず HPM の定式化を示し、次に検証に用いた実験の概要について述べる。そして、HPM の補強土のモデル化の方法について述べ、最後に数値解析結果を模型実験結果及びFEM 解と比較し、本手法による有用性を確認する。

2. ハイブリッド型仮想仕事の原理

図1に示す領域は閉境界 $\Gamma^{(e)}$ で囲まれたM個の部分領域 $\Omega^{(e)}$ から構成されている。いま、隣接する2つの部分領域 $\Omega^{(a)}$ と $\Omega^{(b)}$ の共通の境界を $\Gamma_{<ab>}$ とすると、ハイブリッド型の仮想仕事式は、境界において付帯条件をLagrangeの未定乗数 λ を用いて表すと式(1)のようになる。ここで、 $u_{<ab>}^{(a)}$ ならびに $u_{<ab>}^{(b)}$ は各部分領域における境界 $\Gamma_{<ab>}$ 上の変位を表している。

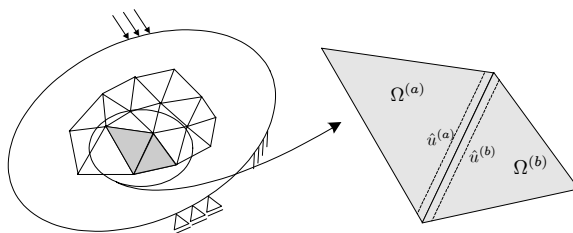


図-1 部分領域 $\Omega^{(e)}$ とその境界 $\Gamma^{(e)}$

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

本手法では、部分領域 $\Omega^{(e)}$ 内のある1点における剛体変位、剛体回転 $d^{(e)}$ に加え、直接、部分領域内で一定なひずみ $\epsilon^{(e)}$ を用いて式(2)のような線形変位場を仮定する。ここで、上付きの(e)は部分領域を意味する。

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

一方、Lagrangeの未定乗数は、物理的には表面力を意味している。いま、境界 $\Gamma_{<ab>}$ 上の表面力 $\lambda_{<ab>}$ と相対変位の関係を式(3)のように表す。ここで、 $\delta_{<ab>}$ は部分領域境界面 $\Gamma_{<ab>}$ 上の相対変位を表しており、 k はばね定数に対応する係数行列である。ハイブリッド型の仮想仕事式では、近似的に部分領域境界面上で変位の連続性を確保するため、極めて堅いばねを設ける必要があり、本手法では、ばね定数をペナルティ関数と考える。

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

離散化方程式は、式(1)に対して、式(2)で示す線形変位場の関係を代入することによって得られ、整理すると式(4)のようにまとめることができる。このように、最終的に連立1次方程式に帰着し、左辺の係数行列 K は各部分領域の剛性と部分領域境界面に関する付帯条件の関係を組み合わせることによって得られる。

$$\delta U^t \left(\sum_{e=1}^M K^{(e)} + \sum_{s=1}^N K_{<s>} \right) U - \delta U^t \left(\sum_{e=1}^M P^{(e)} \right) = 0 \quad (4)$$

↓

$$KU = P$$

3. 模型実験による補強度壁の载荷実験

・実験方法

本研究では、HPMでのモデル化にあたり解析結果の整合性を検討するために模型载荷実験を行った。実験は豊浦標準砂を自由落下で詰め、盛土の高さ60mmごとにランマーを用いて締固めを行い模型地盤(写真1参照)を作成した。模型地盤のスケールとしては、天端700mm、幅250mm、高さ450mm、斜面の勾配は3分勾配としている。補強土における補強材の敷設方法は、全面配置で地盤の底面から100mm(100mm, 200mm, 300mm, 400mm)の高さごとに、幅250mmのジオグリッドを4段敷設する。実験対象としては無補強地盤とジオグリッドを敷設した補強土である。計測は、法肩

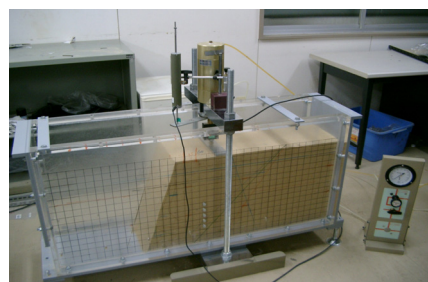


写真1. 実験装置の全景

ハイブリッド型ペナルティ法, ジオテキスタイル補強土, ペナルティ密度関数

〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

から 150mm の位置に載荷板の前面がくるように載荷装置を設置し、載荷板に沈下量を測定するための変位計を設置する。

4. HPM における補強土のモデル化

HPM では、近似的に部分領域境界面上で変位の連続性を確保するため、極めて堅いばねを設ける必要があり、式(3)におけるばね定数をペナルティと考え、 $k=p$ としている。砂地盤や載荷板の要素境界にはこの考え方をを用いてモデル化を行った。要素境界面でのペナルティの考え方の簡略図を図 2-(a) に示す。

次に、本研究における、砂地盤と補強材(ジオグリッド)との要素境界面の取り扱いについて述べる。図 2-(b)において砂地盤要素を①、②としジオグリッドを③とし、ジオグリッドの厚さは極めて薄いものとする。HPM では、図に示すようにジオグリッド上側と下側の両方にペナルティを考慮する必要があるため、上述のようにジオグリッドを極めて薄い部材と考えるなら、短い幅の間に 2 つのペナルティが入り、ペナルティの集中が起こってしまう。このペナルティの集中を避けるために、新たにペナルティ密度関数 β を導入し、式(5)のような別のペナルティ P' を用いることとした。

$$(\text{ペナルティ密度関数}) \quad \beta = \frac{1}{h_1 + h_2} \quad (5)$$

$$k_n = k_t = \frac{P}{h_1 + h_2} = \beta \cdot P = P' \quad (6)$$

ここで h_1, h_2 は、それぞれの要素の重心から要素境界面に下ろした垂線の長さを表している。

上述の点を踏まえ模型実験装置を対象にモデル化を行った。境界条件は、底部を鉛直・水平方向に固定し、右端は鉛直方向を自由、水平方向を固定した。破壊条件として Mohr-Coulomb の降伏条件を用い、2次元平面ひずみ状態と仮定し弾塑性解析を行う。

5. 本研究の考察

載荷実験は無補強地盤、ジオグリッド敷設長 150mm, 200mm, 250mm の 4 ケースについて行った。その結果、無補強地盤における破壊は、全般せん断破壊を起こし崩壊に至ることが分かった。矩形配置した補強土では、すべての敷設長において載荷初期は弾性的な挙動を示し、さらに荷重を増加させ地盤が塑性域に達すると、無補強地盤では急激に沈下が進行したのに対し、補強土では地盤の硬化を示した。また、ジオグリッド長が 150mm, 200mm と比較して、250mm の場合は硬化率が大きくなった。これは、ジオグリッドがすべりを制御するため、補強効果が著しく上昇したためと考察される。

図 3 は、ジオグリッド敷設長 250mm での、HPM、模型実験、FEM の荷重沈下曲線である。HPM は、FEM および実験値と初期剛性が一致し、塑性化後の地盤の硬化を示す曲線の傾きもほぼ一致した。また、崩壊荷重は 3 ケースとともに誤差範囲に収まり、HPM および FEM とともに模型実験結果と非常に近似した解析結果となった。

図 4 は無補強地盤の崩壊時 28.5kN/m² のときの無補強地盤およびジオグリッド 250mm のすべり線図である。また、図中の灰色の部分は要素が降伏していることを表している。無補強地盤では、すべり線が載荷板直下から法尻方向に入り崩壊したのに対して、敷設長 250mm の補強土では、ジオグリッドがすべり線を遮ることにより地盤の崩壊を抑制しているのが伺えた。

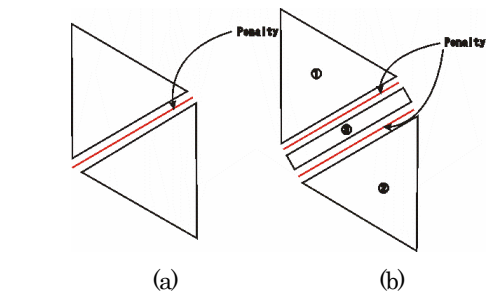


図 2 ペナルティの取り扱い

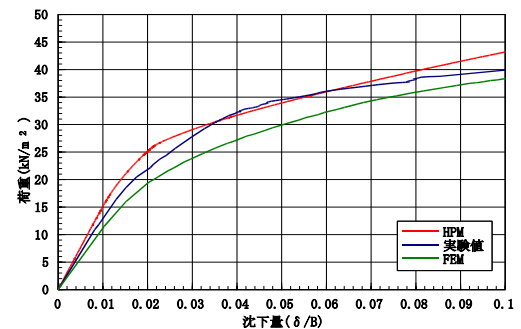
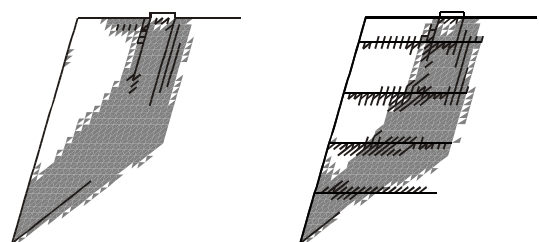


図 3 荷重沈下曲線



(a) 無補強地盤 (b) 補強土 250mm

図 4 すべり線図 (28.5kN/m²)

6. 結論

本研究では、HPM による補強土のモデル化を行いその精度を確認するため、先に行った模型実験及び FEM での解析結果と比較検討を行った。その結果、荷重沈下挙動についてほぼ 3 ケースともに近似した結果となり、またそれぞれの敷設長における斜面の崩壊挙動を確認することができ、HPM の補強土に対しての有用性を確認することができた。

参考文献：

- 1) 竹内則雄, 大木裕久, 上林厚志, 草深守人：ハイブリッド型変位モデルにペナルティ法を適用した離散化モデルによる材料非線形解析, 日本計算工学会論文集, Vol3, pp.53-62, 2001.