

ハイブリッド型ペナルティ法による軽量盛土工法の解析

法政大学 学員 大木 裕久

フリー工業(株)正員 富安 薫

法政大学 正員 竹内 則雄

九州エス・ピーシー(株)正員 矢立 仁志

1. はじめに

地すべり地帯に用いられる軽量盛土工法の盛土材としてエアモルタルがある。エアモルタルは軽量性、分離抵抗性、流動性に優れている特徴を備えており、こうした特徴が数々の施工現場で高い評価を受けている。本論文では、ハイブリッド型の仮想仕事の原理にペナルティ法を導入したハイブリッド型ペナルティ法を用いて、崩積土上の軽量盛土工法の解析を行い、その適応性について検討を行う。

2. 基礎方程式とハイブリッド法

弾性問題の基礎方程式は次式で与えられる。

$$L^T \delta + f = 0; \quad \delta = D^T u; \quad u = Lu \quad (1)$$

ここで、 u ; L ; δ はそれぞれ変位、ひずみ、応力ベクトルであり、 D ; f は構成行列、物体力を表す。いま、図1の領域 Ω は境界 $\Gamma^{(e)}$ で囲まれた M 個の部分領域 $\Omega^{(e)}$ から構成されているものとする。

ハイブリッド型の仮想仕事の原理では、境界において付帯条件を Lagrange の未定乗数 $\tilde{u}$ を用いて仮想仕事式に導入する。いま、隣接する2つの要素境界面数を N とするとハイブリッド型の仮想仕事式は式(2)のように表せる。なお Lagrange の未定乗数 $\tilde{u}$ は部分領域 $\Omega^{(a)}$; $\Omega^{(b)}$ の境界 Γ_{ab} 上の表面力を意味する。

$$\sum_{e=1}^M \int_{\Omega^{(e)}} [L^T \delta] \delta d\Omega - \sum_{e=1}^M \int_{\Omega^{(e)}} \delta u^T f d\Omega - \sum_{s=1}^N \int_{\Gamma_{ab}^{(s)}} \delta u^T T d\Gamma - \sum_{s=1}^N \int_{\Gamma_{ab}^{(s)}} \tilde{u}^T (\delta^{(a)} - \delta^{(b)}) d\Gamma = 0 \quad (2)$$

本手法では、部分領域 $\Omega^{(e)}$ 内の1点における剛体変位、剛体回転 $d^{(e)}$ に加え、部分領域内で一定なひずみ $\epsilon^{(e)}$ を自由度とし、要素毎に独立に設定する。仮定する変位場 $u^{(e)}$ を以下に示す。

$$u^{(e)} = N_d^{(e)} d^{(e)} + N_{\epsilon}^{(e)} \epsilon^{(e)} \quad (3)$$

このように、本論文で用いる変位場は、従来の FEM とは異なり、節点において変位を共有しない。すなわち節点は領域形状を認識するために用いるのであって、自由度を設けるための節点ではない。さらに、Lagrange の未定乗数は、物理的には表面力を意味しており、境界 Γ_{ab} 上の表面力 $\tilde{u}_{ab}$ と相対変位の関係を式(4)のように表す。

$$\tilde{u}_{ab} = k \Delta \epsilon_{ab} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta \epsilon_{ab}$ は部分領域境界面 Γ_{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。

また、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る。そこで本手法では、ばね定数をペナルティ関数と考え、以下のように仮定する。

$$k = p \quad (5)$$

3. 地形地質条件

本研究に用いた地形は、標高 315m ~ 330m 前後の急傾斜の山地形である。中腹斜面には馬蹄形に地すべり地形を呈する崩壊跡地が見られる。下部は河岸堆積物および崩積土で覆われ、18 ~ 15m 程度の厚層を示す。崩壊跡地

キーワード：ペナルティ法、ハイブリッドモデル、軽量盛土工法

〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

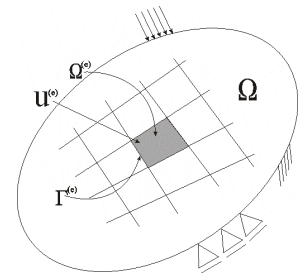


図1 部分領域 $\Omega^{(e)}$ と閉境界 $\Gamma^{(e)}$

には 2～5m 巨大な転石群が多数分布しているが、比較的古い崩壊地であり斜面崩壊・転石に分類される。崩積土は転石および礫混じり砂が堆積しているが狭在する転石の岩塊は比較的少ない。礫混じり砂は風化の進む石英安山岩の礫で 5～30mm 程度の粒子で、中には拳大～人頭大の礫も点在している。また、N 値は 6～50 以上で中位～非常に密な相対密度を示している。

4．数値解析結果

図 2 に本解析に用いた解析モデルの要素分割図とその載荷方法を示す。図中、載荷盤真下の網掛け部が本研究で比較の対象となるエアモルタルとコンクリートの盛土箇所であることを表す。境界条件は下部に対して水平、鉛直方向、右端に関して鉛直方向の拘束とする。表 1 は解析に用いた材料定数である。

図 3 はエアモルタルとコンクリート両モデルにおける、すべり線図を表したものである。コンクリートのすべり線は載荷盤部から発生した後、水平方向に進展するが、エアモルタルでは水平方向の進展は見られない。図 4 に変位モード図を示す。コンクリートでは、エアモルタルと比較しても大きく変形しているのが分かる。図 5 は変位ベクトル図を表わしたものである。このベクトル図より、特にコンクリート部の載荷盤近傍で応力が最も多く生じ、すべり線に沿ったベクトルの流れが見られるが、エアモルタルではそのようなすべり面は発生していないことも分かる。また、図中、右端下部においては、ほとんど発生していないことからベクトル図の正確性も確認することができる。

さらに、安全率に関しては、変位ベクトル図を参考にして決めた破壊線を基に計算を行ったところ、コンクリートが $F_s=0.99$ であったのに対して、エアモルタルでは $F_s=1.64$ であった。これらの結果から、コンクリートはすべりが生じる一方、エアモルタルは安全性が高いことが分かる。このことより、崩積土上において軽量盛土工法であるエアモルタルを用いた方が、安全性が向上するものと考えられる。

5．まとめ

ハイブリッド型ペナルティ法を用いて軽量盛土工法の安定解析を行った結果、すべり線図、変位モード図、変位ベクトル図、安全率等からコンクリートよりも軽量性、分離抵抗性、流動性などの特徴を有するエアモルタルを用いた方が、崩積土上の盛土に対して有効であるという結果が得られた。

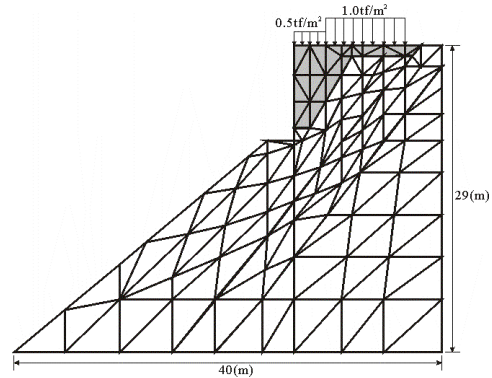


図 2 解析モデル図

表 1 解析に用いた材料定数

	エアモルタル	コンクリート
単位体積重量 γ (tf/m ³)	0.63	2.30
変形係数 E (t/m ²)	1.05E+06	
粘着力 C (t/m ²)	50.00	
内部摩擦角 ϕ (度)	0.010	
ポアソン比	0.169	

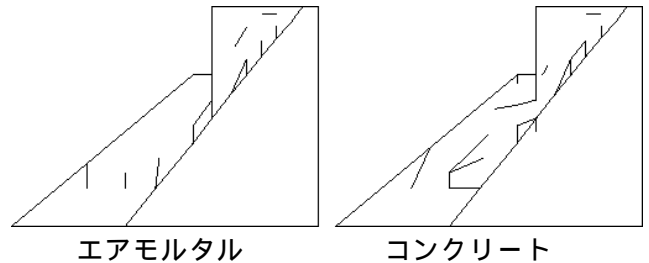


図 3 すべり線図

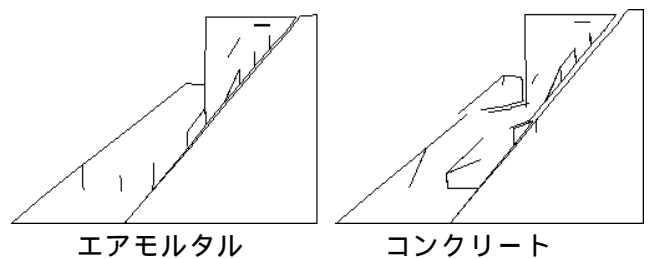


図 4 変位モード図

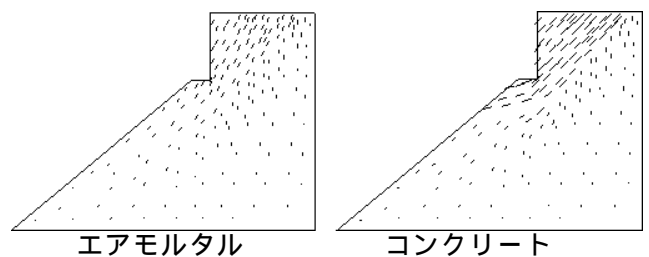


図 5 変位ベクトル図