不織布で安定化された粘性土盛土の安定解析法

防衛大学校土木工学教室 宮田喜壽 木暮敬二

概要

関東ロームに代表される高含水比粘性土を用いた盛土を安定化するために、不織布がしばしば水平排水材として用いられる。その設計法を合理化するためには、排水層の配置条件によって変化すると考えられる粘性土盛土の安定性を合理的に評価できる解析法を確立する必要がある。本論文においては、排水層が配置された粘性土盛土の極限解析法を検討し、排水層の配置条件が盛土の安定性に及ぼす影響を計算で調べる。

Stability Analysis of stabilized clayey soil embankment using non-woven geotextile

National Defense Academy Yoshihisa Miyata and Keiji Kogure

Abstract

Non-woven geotextile is often used as horizontal drainage for stabilizing embankment with high water content cohesive soil. In order to rationalize the design method, it is needed to establish stability analysis method, which is able to consider the effect of layout condition of horizontal drainage. In this paper, limit analysis method for stabilized clayey soil embankment using non-woven geotextile are proposed, the effect of layout condition of horizontal drainage is examined by conducting numerical analysis.

不織布で安定化された粘性土盛土の安定解析法

防衛大学校土木工学教室 宮田喜壽 木暮敬二

1. はじめに

関東ロームに代表される高含水比粘性土を用いた盛土を安定化するために、不織布がしばしば水平排水材として用いられる（以後、水平排水工法）。水平排水工法に関する設計法を合理化するためには、排水層の配置条件によって変化すると考えられる粘性土盛土の安定性を合理的に評価できる解析法を確立する必要がある。

粘性土盛土内各位置における施工過程の有効応力経路は、各場所毎に異なる。極限時に発揮されるせん断強さは過去の応力履歴に影響されるから、盛土を均質な強度を有する構造物とみなすには無理がある。排水層が配置された盛土の安定性を評価するためには、間隙水の出入りに伴い地盤の安定性が変化する部分吸排水効果を妥当に評価できる解析手法を確立しなければならない。

本研究は、排水層が配置された粘性土盛土の極限解析法を検討し、排水層の配置条件が盛土の安定性に及ぼす影響を計算で調べる。不織布には補強効果も有することが報告されているが、本論文においては、その排水効果による盛土の安定化効果を議論の対象とする。

2. 解析手法

(1) 解析における前提条件

本研究は、自然含水比 w_n が最適含水比 w_{opt} を大きく上回っている高含水比粘性土を対象としている。飽和度管理で締固められた粘性土の力学挙動は飽和状態の粘土に近い¹⁾。また、山内らは、代表的な高含水比粘性土のひとつである関東ロームの基本的なせん断挙動が限界状態理論によって説明できることを確認している²⁾。以上のことから、盛土材を完全飽和と仮定し、締固めた高含水比粘性土の構成関係をカムクレイモデル³⁾で表現する。本研究は、以上の前提条件のもとで、連成極限解析法^{4)~7)}を排水層が配置された粘性土盛土の安定問題に適用する。すなわち、盛土内有効応力分布を弾塑性有限要素法による変形解析で推定した後、盛土の極限状態を剛塑性有限要素法によって評価する。以下に、2つの有限要素法の要点を述べる。

(2) 弾塑性有限要素法による変形解析

連成極限解析法においては、安定性を評価する段階での有効応力分布を知る必要がある。盛土内の応力場は盛り立てに伴い形成される。したがって、盛土内部の有効応力分布を推定するためには、施工過程を初期値境界値問題に置き換えて計算する必要がある。盛土の施工段階を再現する解析では、盛土材が転圧されながら盛り立てられる過程で、新たに盛り立てられる盛土材の自重が分布荷重として下層に伝達される様子を再現する必要がある。本研究は、土-水連成効果を考慮して、盛土の施工過程を解析するために、松井の研究⁸⁾を参考に、盛土をいくつかの水平層に分け、層の積み重ねによ

って盛土が形成されるとする方法を採用した。
すなわち、図－１に示すように、 i 層に有効応力と間隙水圧に関する所定の初期条件を仮定し、次に盛り立てられる $i+1$ 層の自重を表面力に換算した初期値境界値問題を $i+1$ 層が形成されるのに必要な時間増分で解く。この計算ステップを繰り返し、最上層の計算では荷重なしの放置時間を仮定することで、所定の速度で盛土される様子を再現した。

図－１ 盛立て解析の説明図

上述のような計算においては、初期条件を合理的に算定する必要がある。本研究において、初期有効応力は、式(1)に示すようなカムクレイモデルから誘導される正規圧密粘土の非排水強度式を用い、土被りゼロの位置における締固め粘性土の一軸圧縮強度とその他の土質定数より圧密応力 p' を逆算し、 K_0 値を仮定して評価した。

$$c_u = \frac{M}{2} \cdot \exp\left\{-\left(1 - \frac{\kappa}{\lambda}\right)\right\} \cdot p' \quad (1)$$

ここで、 M は限界状態パラメータ、 λ は圧縮指数、 κ は膨潤指数である。

初期間隙水圧は、飽和条件の仮定より層圧の $1/2$ に相当する大きさを仮定した。なお、一連の解析において、土－水連成効果は、Christian の方法を発展させた赤井・田村の方法⁹⁾にしたがい評価する。

(3) 剛塑性有限要素法による極限解析

弾塑性有限要素法による変形解析より計算される、施工直後における平均主応力 p_0' を、式(2)より破壊時の平均主応力 p_f' に換算した後、式(3)よりミーゼス半径 σ_0 を各要素に割り付けて、非排水条件を仮定した極限解析を行う。

$$p_f' = p_0' \cdot \exp(-\Lambda), \quad \Lambda = 1 - \frac{\kappa}{\lambda} \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{(M \cdot p_f')}{\bar{\dot{e}}} \quad (3)$$

ここで、 λ は圧縮指数、 κ は膨潤指数、 Λ は不可逆定数、 M は限界状態時の応力比、 $\bar{\dot{e}}$ は相当ひずみ速度を表し、式(4)で計算されるスカラーである。

$$\bar{\dot{e}} = \sqrt{\dot{\mathbf{u}}_p^T \mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{B} \dot{\mathbf{u}}_p} \quad (4)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

極限解析は、釣り合い式と非排水条件式（体積一定条件式），そして仕事一定条件式を連立させて解く¹⁰⁾．解くべき連立方程式を以下に示す．

$$\begin{bmatrix} \int_v \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dv & \mathbf{L}^T & \mathbf{F} \\ \mathbf{L} & 0 & 0 \\ \mathbf{F}^T & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_p \\ \lambda \\ -\mu \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここで， $\mathbf{B}$ は $\dot{\mathbf{u}}_p$ で表される塑性変位速度ベクトルを塑性ひずみ速度ベクトルに変換するマトリックス， $\mathbf{L}$ はその $\dot{\mathbf{u}}_p$ を塑性体積ひずみ速度ベクトルに換算するマトリックス， λ は平均主応力（全応力）ベクトル， μ は荷重係数， $\mathbf{D}$ マトリックスは式(7)に示すとおりである．

$$\mathbf{D} = \sigma_0 \cdot \mathbf{Q} = \sigma_0 \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

極限荷重として盛土材の自重を想定するから，荷重条件として，解析対象の全域に単位物体力に相当する節点力を与えた．式(6)に示した非線形の連立方程式を解くにあたって，体積ひずみに関する計算では低減積分を行い，直接代入法と線形近似法（修正 Newton-Raphason 法）を組み合わせるアルゴリズムを用いる¹¹⁾．

(4) 排水効果の評価法

一連の解析において，水平排水層による排水効果は，盛土の施工過程を再現する変形解析のみで評価する．極限解析では，その効果を特別に評価せず，解析対象領域全体に非排水条件を課す．本研究においては，粘性土と排水層からなる排水層配置領域に平均的な透水係数を考慮することによって排水効果を評価する．平均的な透水係数の算定にはいくつか考えられるが，一層の排水層が受け持つ領域の対称性を仮定して，図－2に示す粘性土層と排水層からなる2層モデルの平均的な透水係数を算定する方法が最も単純な方法といえよう．ここで，この2層モデルにおける2方向の平均的な透水係数 k_v ， k_h は次式で表される．

$$k_v = \frac{h_d + a_d}{\frac{h_d}{k_s} + \frac{a_d}{k_d}} \quad (8)$$

$$k_h = \frac{k_s \cdot h_d + k_d \cdot a_d}{h_d + a_d} \quad (9)$$

図－２ 盛土層と排水層の２層モデル

表－１ 解析パラメータ

M	λ	κ	c_0	e_0	K_0	$k_s(\text{m/day})$	$\gamma_t(\text{tf/m}^3)$
1.20	0.434	0.043	0.5	2.50	0.5	1.0e-4	1.200

図－３ のり面勾配 1 : 2 の盛土の有限要素モデル

さらに上式において，水平排水工法における一般的な排水層の配置条件で成り立つと考えられる， $h_d \gg a_d$ と， $k_d \gg k_s$ を仮定すれば， k_v ， k_h は次式で表される．

$$k_v \approx k_s \quad (10)$$

$$k_h \approx k_s + \frac{\theta_d}{h_d} \quad (11)$$

ここで， θ_d は排水層の通水性能を表す．

(5) 解析条件

排水層の配置条件が盛土の安定性に及ぼす影響を，盛り立て高さ $H_e=28\text{m}$ ，のり面の勾配 1:2.0 の時について調べた．配置する排水層の長さ L_d と間隔 h_d は全層で一定とし， L_d と k_h を変化させて計算した．解析対象モデルの例を図－３に示す．本研究が対象にしている高含水比粘性土のうち，関東ロームの力学的性質については数多くの報告がある¹²⁾．本論文の一連の解析で用いる火山灰質粘性土の材料定数は，それらを参考にして，表－１に示すように仮定した．

3. 解析結果

図-4 F_γ と L_d , k_h の関係

図-5 F_γ と k_h , L_d の関係

極限解析で求めた極限荷重 μ と変形解析で考慮した盛土材の単位体積重量 γ_t の比で算定した安全率 F_γ と L_d の関係を図-4に示す。また、同じ結果を F_γ と k_h の関係にまとめ直して図-5に示す。 k_h が $1.0 \times 10^{-1}(\text{m/day})$ より大きく、 L_d が H_e よりも長くなると、排水層による盛土の安定性の増加が顕著になることが分かる。また、同じ排水層の長さで比較した場合、 k_h が $1.0 \times 10^0(\text{m/day})$ より大きくなると、 k_h による盛土の安定性の増加は小さくなることが分かる。 L_d によって荷重係数が変化しない $k_h=10^{-3}(\text{m/day})$ の時と、 L_d に伴い荷重係数が大きくなる $k_h=10^{-1}(\text{m/day})$ の時について、 L_d が極限時の塑性変位速度分布に及ぼす影響を調べた。塑性変位速度が卓越する領域を曲線で近似して、図-6に示す。 $k_h=10^{-3}(\text{m/day})$ のとき、塑性変位速度が卓越する領域は L_d の長さによって変化しないが、 $k_h=10^{-1}(\text{m/day})$ のとき、 L_d が長くなると、その領域が広くなる。

4. まとめ

本論文では、排水層が配置された粘性土盛土の安定解析法を検討した。まず、粘性土と排水層からなる排水層配置領域における平均的な透水係数 k_h を、盛土材の透水係数、不織布の通水性能、その配置間隔から評価した後、弾塑性圧密解析と水-土骨格連成剛塑性極限解析を2段階で行う安定解析法を示した。そして、 k_h と排水層の長さを変化させた解析結果を示し、上述の解析法は、排水層の配置条件によって変化する盛土の安定性を合理的に評価できることを明らかにした。排水層が配置され

図－6 排水層の配置条件によって変化する盛土の極限状態

た粘性土盛土の安定解析法を，連成極限解析法に基づき確立した。

著者は別途，この解析法をもとに排水層の最適配置の問題を最適問題に置き換えて，検討を行っている¹³⁾¹⁴⁾。今後，本論文に示した解析法を含め，その実用性について検討を続けたい。

参考文献

- 1) 例えば，土木学会編：新体系土木工学 17，土の力学(Ⅲ)－特殊土，締固め，土と水－(吉国 洋，宇野尚雄，柳沢栄司・共著)，第 2 章 火山灰質粘性土，pp.3-33，技報堂出版，1984。
- 2) 山内裕元：粘性土盛土の不織布による補強法，東京大学学位論文，1993。
- 3) Scofield, A. N. and Wroth, C. P. : Critical state soil mechanics, London, 1968.
- 4) Asaoka, A. and Ohtsuka, S. : The analysis of failure of a normally consolidated clay foundation under embankment loading, Soils and Foundations, Vol.26, No.2, pp.47-89, 1986.
- 5) Asaoka, A. and Ohtsuka, S. : Bearing Capacity analysis of a normally consolidated clay foundation, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.58-70, 1987.
- 6) 浅岡 顕：支持力と有効応力，土と基礎，36-6，pp.43-49，1988。
- 7) Asaoka, A., Ohtsuka, S. Matsuo, M. : Coupling analysis of limiting equilibrium state for normally consolidated and lightly overconsolidated soils, Soils and Foundations, Vol.30, No.3, pp.109-123, 1990.
- 8) 松井家孝：フィルダムの変形と内部応力，土と基礎，20-12，pp.47-54，1972。
- 9) 赤井浩一，田村 武：弾塑性構成則による多次元圧密の数値解析，土木学会論文報告集，No.269，pp.95-104，1978。

- 10) Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi, T. : Limit analysis of soil structure by rigid plastic finite element method, Soils and Foundations, Vol.24, No.1, pp.34-42, 1984.
- 11) (社)日本塑性加工学会編：非線型有限要素法－線形弾性解析から塑性加工解析まで－，コロナ社，1994.
- 12) 関東ロームの土工－その土質と設計・施工－，高速道路調査会，1973.
- 13) 宮田喜壽，木暮敬二：水平排水層を配置した高含水比粘性土盛土の安定解析と設計，第 33 回地盤工学研究発表会発表講演集，2 分冊の 2，pp.2353-2354，地盤工学会，1998.
- 14) 宮田喜壽，木暮敬二：粘性土盛土の安定性確保のために必要な水平排水層の配置条件の評価，第 53 回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-A244，pp.484-485，土木学会，1998.