

III-8

緩斜面模型実験の非定常浸透流・安定解析

長崎大学 正 伊勢田哲也 同 棚橋 由彦
同 学 川原 幸男 学 有吉 正敏

1. まえがき

緩斜面の崩壊原因として浸透水圧を荷重させるとして、模型実験を試みたが、その結果をふまえて安定解析を検討した。まず、非定常浸透流の飽和-不飽和有限要素解析を行ない、次いで各要素に流線方向に浸透力と鉛直方向に重力が作用したときの安定解析を行なった。すなわち、境界面摩擦係数および境界面すべりを考慮し、飽和度に依存するモール・クーロン型破壊規準による各要素の破壊安定性を検討した。

2. 解析方法

(1) 飽和-不飽和浸透流解析 (FEM-A)

飽和-不飽和浸透流解析は、赤井・大西・面垣の手法⁽¹⁾を用いた。支配方程式は次式に示すとおりである。

$$\text{div } K(\varphi) \cdot (\varphi + x_3) = (C(\varphi) + \alpha S_s) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) \quad (1)$$

ここに $\alpha = 0$: 不飽和領域, φ : 圧力水頭, x_3 : 位置水頭, $K(\varphi)$: 2次の透水係数テンソル
 $\alpha = 1$: 飽和領域, $C(\varphi) = \frac{\partial \theta}{\partial \varphi}$: 比水分容量, $S_s = \frac{\partial \theta}{\partial \varphi}$: 比貯留係数

(1)式は重み付き残差法を用いて有限要素による定式化が与えられ、時間上に関しては差分法による離散化を用いている。本解析に必要な主入力データは、飽和状態の透水係数 k_{ij}^s と貯留係数 S_s 、サクシュン $(-\varphi)$ -体積含水率 θ 関係、比透水係数 $K_r \left(\frac{k_{ij}^s}{k_{sat}} \right)$ と θ 関係、初期圧力水頭 φ_0 と初期体積含水率 θ_0 等である。出力結果としては、任意時間上における各節点の全水頭 $(\varphi + x_3)$ 、圧力水頭 φ 、体積含水率 θ 等が得られる。

(2) 浸透力と飽和度上昇による強度低下を考慮した安定解析

安定解析は伊勢田・棚橋らの壁面摩擦係数を考慮した有限要素解析手法⁽²⁾を基に改良を加えたものである。飽和度 S_r と強度定数 C, ϕ との関係は双曲型の次式を与える。

$$C(S_r) = \frac{1}{1 + (b + a S_r)}, \quad a = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{C_i} - \frac{1}{C_u} \right) \cdot (1 - S_{ri}), \quad b = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{C_i} - \frac{1}{C_u} \right) \quad (2)$$

ϕ に関して同様の式を用いるが、 $\phi_i = \phi_u$ とし、 $\phi(S_r) = \phi$ を用いた。ここに、サフィックス i は初期または自然状態を意味し、 u は $S_r = 1$ 飽和時を意味する。なお任意三角形要素 e の飽和度 $\{S_r\}^e$ は、FEM-Aの出力、各節点の体積含水率 $\theta_i, \theta_j, \theta_k$ から次式で計算される。

$$\{S_r\}^e = (\theta_i + \theta_j + \theta_k) / 3n \quad (3)$$

各要素における浸透力、およびそれと等価な節点力の計算式は図1を参照して以下のように誘導される。

三角形要素 e を含む面 π の方程式は、 $Ax + By + Cz = D$ (4)

$$A = H_i(y_k - y_j) + H_j(y_i - y_k) + H_k(y_j - y_i), \quad B = H_i(x_j - x_k) + H_j(x_k - x_i) + H_k(x_i - x_j)$$

$$C = x_i(y_j - y_k) + x_j(y_k - y_i) + x_k(y_i - y_j) = 2 \text{ dvol}, \quad D = H_i(x_j y_k - x_k y_j) + H_j(x_k y_i - x_i y_k) + H_k(x_i y_j - x_j y_i)$$

ここに $H_m = \frac{y_m}{y_k - y_j}$ ($m = i, j, k$): 各節点の全水頭, x_m, y_m ($m = i, j, k$): 各節点の x, y 座標。

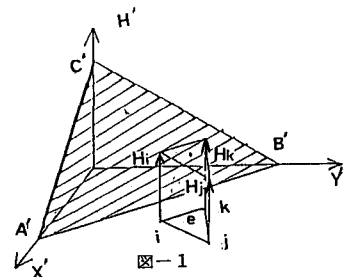
要素 e の x 方向の動水勾配 $\{i_x\}^e = \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right\}^e$ は、面 π と $y = 0$ 面との交線の x 方向の勾配であるから、交線 l の方程式 $Ax + Cz = D$ 。

$$\therefore \{i_x\}^e = \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right\}_{x=0} = \frac{A}{C} \quad (5)$$

$$\{i_y\}^e = -\frac{B}{C} \quad (6)$$

要素 e の浸透力は
 $\{P_x\}^e = \gamma_w \{i_x\}^e \text{ dvol}, \{P_y\}^e = \gamma_w \{i_y\}^e \text{ dvol} \quad (7)$
 従って浸透力と等価な節点力 f_m ($m = i, j, k$)は(4)~(7)式より(8)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} x \text{ 方向: } f_{xm} &= \{P_x\}^e / 3 = \gamma_w \{H_i(y_k - y_j) + H_j(y_i - y_k) + H_k(y_j - y_i)\} / 6 \\ y \text{ 方向: } f_{ym} &= \{P_y\}^e / 3 = \gamma_w \{H_i(x_k - x_j) + H_j(x_i - x_k) + H_k(x_j - x_i)\} / 6 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$



なおx軸と反時計まわりに θ 回転した xy 座標系の場合は、(4)~(8)式の全ての x, y, x_m, y_m にプライムを付すだけでよい。

3. 解析条件

模型実験に用いた斜面の分析モデルは図2に示すとおりであり、M-1はシルト質粘土、M-2は岩盤破砕帯である。入力した土性や、透水係数、自然および飽和時の強度定数等は、模型実験に関する報告の⁽¹⁾それを用いた。

4. 解析結果および考察

FEM-Aの解析結果の一例を図3~図5に示す。

図3は全水頭の、図4は自由水面の時間変化であり、図5は $t=3.5$ 分における流線網を描いた図である。図6~図8は、FEM-Bの解析結果である。図6は $t=3.5$ 分時の逐次破壊図で、図7は $t=2$ 分における各要素の安定状態を示したものである。図8は図6に示した要素Aの主応力図で、Pはそれぞれ浸透力、重力である。

5. あとがき

緩斜面崩壊模型実験について、有限要素法による浸透流および安定解析をおこなった。本解析手法により、ある程度緩斜面の崩壊状況を説明できるとの感銘を得たが、今後、 σ - τ 関係、 σ - τ 関係や、飽和度と強度定数の関係など実験的に実明すべき課題は多い。なお、本解析には文部省自然災害科学研究費の補助を受け、計算には本学情報処理センター・FACOM/M-180IIADを使用したことを附記する。末筆ながら、本論文作成にあたり御指導くださった本学古本勝弘助教授、武政剛弘助手に感謝の意を表します。

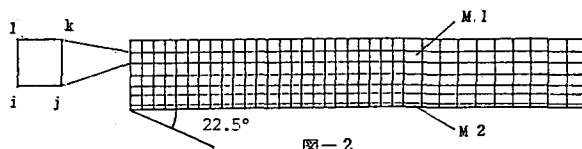


図-2

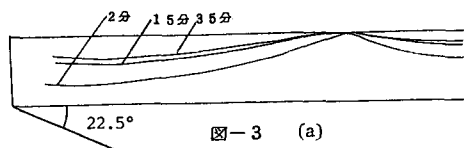


図-3 (a)

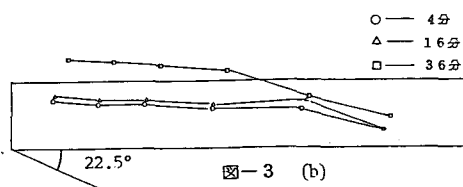


図-3 (b)

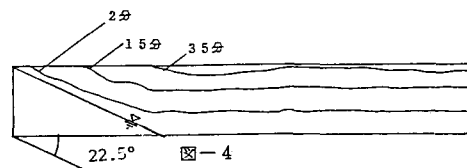


図-4

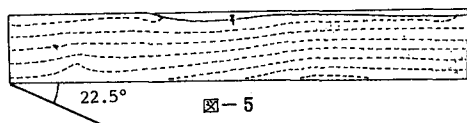


図-5

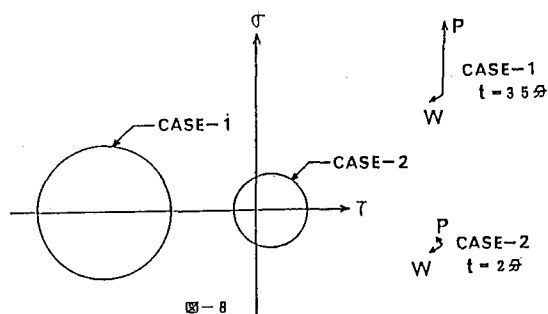


図-6

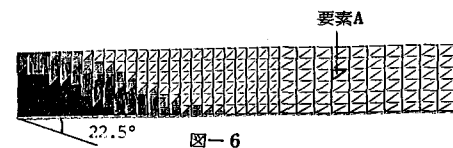


図-7

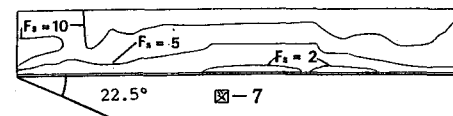


図-8

引用文献: (1) 赤井・大西・西垣; 土木学会論報第264号, PP87-96, 1977 (2) 伊勢田・棚橋; 第16回土質工学研究発表会報告概要, PP37-45, 1981, (3) 伊勢田他, 昭和58年度土木学会西部支部発表会第Ⅲ部門, 1984。