

(70) 岩塊モデルによる岩盤斜面の非定常不圧浸透流解析

榑熊谷組 原子力開発室 正員 坂口 雄彦

埼玉大学 工 学 部 正員 佐藤 邦明

榑熊谷組 原子力開発室 正員 伊藤 洋 正員 森 清就

1. はじめに

大規模岩盤斜面の掘削に際して、斜面崩壊・地すべり等の予知・安定解析を行う場合、地下水挙動の影響は無視できないものであり、その予測解析に関して数多くの研究がなされている。しかしながら、亀裂系岩盤地山特有の地山の變形と地下水運動の相互依存性を加味した検討は十分になされているとは言えない。

本論では、こういった観点から、佐藤らが既に亀裂の動的変化を考慮した地下水解析を行うために提案した岩塊モデル¹⁾を応用・発展させることにより、非定常不圧地下水-応力連成解析を可能にし、掘削後の岩盤斜面を対象に非定常不圧地下水解析を行い、その基礎的性質を吟味した。いくつかの興味ある知見を得たのでここに報告する。

2. 基礎式

本論で用いるモデルは岩塊モデルであり、図-1 (後述) 中に示すように弾性立方体の岩塊と亀裂内介在物を有し、応力変動によって亀裂幅は動的に変化する。これより、非定常不圧地下水流れの基礎式、有効応力変化を考慮した透水係数式および空隙率式を導くと結果的に次のようになる¹⁾。

$$\partial \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) / \partial x + \partial \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) / \partial y + \partial \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) / \partial z = S_r \frac{\partial h}{\partial t},$$

$$S_r = \frac{\partial n}{\partial h} : \text{基礎式} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} k_i &= k_{oi} \cdot \frac{\{1 + 1/a_i \cdot e_c \cdot (\Delta P_f / E_r - \Delta P_{ti} / E_r)\}^3}{1 + S'_{oi} / S_{oi} \{ \beta_i \Delta P_f / E_r - (1 + \beta_i) \Delta P_{ti} / E_r + M_r \Delta P_{tj} / E_r + M_r \Delta P_{tk} / E_r \}} \\ k_{oi} &= \frac{2}{3} \cdot \frac{g}{\nu} \cdot \frac{d_{oi}^3}{S_{oi}}, \quad \beta_i = \frac{1}{a_i \cdot e_c} \cdot \frac{2 d_{oi}^3}{S'_{oi}}, \quad e_c = E_c / E_r \\ k_x &= k_1 + k_2, \quad k_y = k_1 + k_3, \quad k_z = k_2 + k_3, \quad i, j, k = 1, 2, 3 \quad (i \neq j \neq k) \end{aligned} \right\} \text{透水係数} \quad (2)$$

$$n = \sum_{i=1}^3 \frac{2 d_{oi}}{S_{oi}} \cdot \frac{1 + 1/a_i \cdot e_c \cdot (\Delta P_f / E_r - \Delta P_{ti} / E_r)}{1 + S'_{oi} / S_{oi} \{ \beta_i \Delta P_f / E_r - (1 + \beta_i) \Delta P_{ti} / E_r + M_r \Delta P_{tj} / E_r + M_r \Delta P_{tk} / E_r \}} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 k_x, k_y, k_z : x, y, z 方向岩盤地山透水係数、 h : ピエゾ水頭、 S_r : 貯留係数、 n : 空隙率、 i, j, k : 割れ目の方向成分、 a_i : 介在物の断面積が割れ目の面積に占める割合 ($a_i < 1$)、 P_f : 任意の亀裂における間隙水圧、 P_{ti} : 全応力、 E_r : 岩塊の弾性係数、 M_r : 岩塊のポアソン比、 g : 動力加速度、 ν : 水の動粘性係数、 $2 d_i$: 亀裂の幅、 S_i : 亀裂の分布間隔、 S'_i : 岩塊の辺長、 E_c : 介在物の弾性係数、 Δ : 微小変化量であり添字 0 は基準状態の値であることを示している。

3. 岩盤斜面浸透流解析への適用

2. で示した基礎式を用いて岩盤斜面における浸透解析を行い、その代表的結果について検討を行なうこととする。

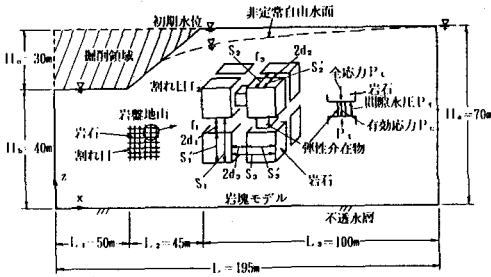


図-1 解析モデル

(1) 解析モデルと条件

図-1に解析モデルを示す。モデルは、不透水性基盤上に無数の亀裂系を有する岩塊集合からなる長さ $L = 195\text{m}$ 、厚さ $H_a = 70\text{m}$ の矩形透水性岩盤地山であって、深さ $H_s = 30\text{m}$ 、底面幅 $L_1 = 50\text{m}$ にわたる領域(図中斜線部)が瞬時に掘削されたものとする。従って、掘削後に掘削領域周辺地盤は応力の開放により新しい応力状態になる。斜面勾配は $1:1.5$ であり、掘削段階およびその後の全応力の変化は考慮しない。斜面掘削前の初期水位は地山表面に一致し、掘削後は掘削底面を自由表面($H_b = 40\text{m}$)とする。また、モデルの要素形状は四角形とし、要素数、節点数は各々273,306である。

表-1に解析条件および諸定数を示している。解析ケースは、介在物に係る定数 $aE_c = 2.0, 4.0\text{MN/m}^2$ の2つを考えるが、比較のため不変形地山(等方均質地山)、つまり透水係数、空隙率が変化しないとした場合についても行い、各々Run 1, 2(変形地山)、Run 3(不変形地山)とする。

表-1 解析条件

地質	ケース	aE_c (MN/m ²)	基準状態の値				諸条件
			透水係数 k_{xx}, k_{zz} (m/s)	空隙率 n (%)	弾性係数 E_c (MN/m ²)	圧縮係数 ν	
変形地山	Run 1	2.0	—	—	—	—	$H_1: 30\text{m}, H_2: 70\text{m}$ $E_c: 11.76\text{ GN/m}^2$ $M: 0.3$ $\nu: 25.5\text{ kN/m}^2$ $\gamma: 5.8\text{ kN/m}^3$ $K: 1.0$
	Run 2	4.0	—	—	—	—	$\nu: 1.0 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ $L_1: 50\text{m}, L_2: 45\text{m}$ $L_3: 100\text{m}, L: 195\text{m}$
不変形地山	Run 3	—	—	—	—	—	—

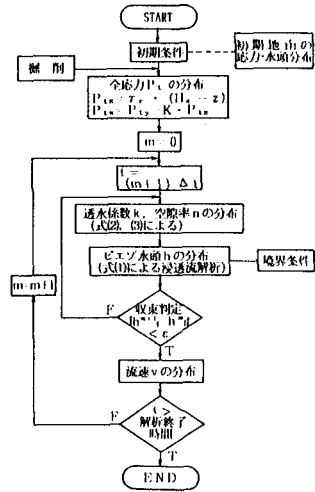


図-2 解析フロー

(2) 解析方法と手順

解析は、基礎式(1)~(3)を用いた非定常不圧浸透流に線型弾性掘削解析による全応力を考慮して有限要素法により計算することになる。

図-2はその解析のフローを示したものである。手順は、まず初期地山における初期水頭および初期透水係数、空隙率を設定し、つづいて斜面掘削後の全応力分布を算出する。つぎに式(2), (3)により新たに透水係数、空隙率分布を計算し、必要な境界条件下で式(1)による不圧浸透流解析を行いピエゾ水頭分布を算定する。このピエゾ水頭分布を透水係数・空隙率分布が同時に収束するまで反復計算することにより、ある時間ステップにおけるピエゾ水頭・流速分布が得られる。この手順を微小時間ステップごとに繰り返すことによりピエゾ水頭、流速分布の経時的変化を求めることができる。

(3) 解析結果と考察

表-1に示した解析条件に従って解析を実施し、岩盤斜面掘削後の斜面付近の地山透水性の変化について吟味する。

まず、図-3は斜面掘削後の地山の x, z 方向成分全応力の分布を示したものである。図中実線の長さは圧縮応力の大きさを表しているが、斜面および掘削底面下において

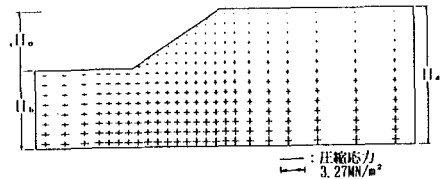


図-3 掘削後の全応力 P_{1x}, P_{1z} の分布

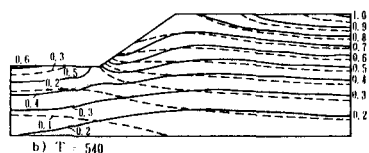
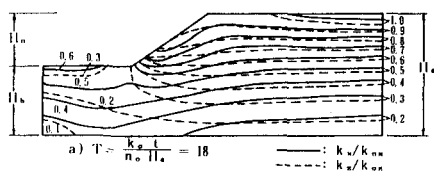


図-4 Run1における無次元透水係数 k_x / k_{ox} 、 k_z / k_{oz} の分布の変化

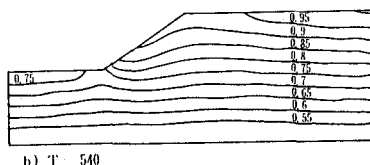
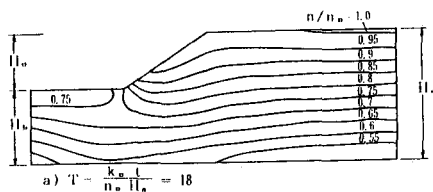
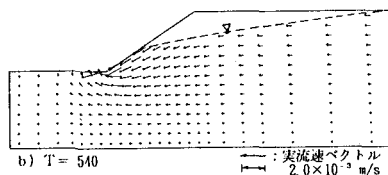
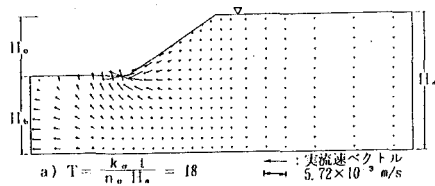


図-5 Run1における無次元空隙率 n / n_0 の分布の変化

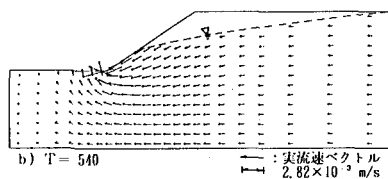
応力開放による z 方向応力の减小および x 方向のその増大が認められる。

つぎに、このような応力場を有する地山の透水係数・空隙率の分布の変化に注目する。図-4は、Run1における無次元時間 $T = k_0 t / n_0 H_a = 18$ および $T = 540$ での無次元透水係数 k_x / k_{ox} (図中実線)、 k_z / k_{oz} (破線) の分布を示したものである。透水係数は、全体的には深さ方向に小さくなる傾向をもつが、斜面付近上部では特に x 方向のそれが大きくなり、のり尻では逆に若干小さくなるといったことが判読できる。一方、掘削底面下では掘削に伴う応力開放により同深度のそれに対し k_z は小さく k_x は大きくなっている。また、経時的には水位低下に伴って有効応力は増大することになるから k_x 、 k_z 共減少することになる。図-5には透水係数分布と対応した無次元空隙率 n / n_0 の分布を示している。当然ながら透水係数分布と同様の傾向を呈しているが、変化率は透水係数のそれほど大きくはない。

つぎに、こういった k 、 n の分布を有する岩盤斜面地山において地下水流れがどのような挙動を示すかに着目する。図-6は、図-4、5と同様Run1における $T = 18$ 、540と比較のためRun3の $T = 540$ での実流速ベクトルの分布を示したものである。図より、(1)Run1のa) $T = 18$ の時点では



(1) Run 1 の場合



(2) Run 3 の場合

図-6 実流速ベクトルの変化

流速は斜面ののり尻近傍および掘削底面下で卓越するが、表面流出はのり尻近傍に集中していることがわかる。b) $T = 540$ では、流速は掘削底面下では小さくなり、斜面上流側で大きくなる。全体的には浅層中心の流れ場となり、表面流出はのり尻部が経時的にも一層支配的となる。 $T = 540$ におけるRun1と3を比較すると、地山変形を考慮したRun1では明らかに流れは斜面表層部が中心となっていることが認められる。

図-7はa) $T = 18$ 、b) $T = 540$ における無次元ピエゾ水頭 $(h - H_b) / H_0$ の分布および自由水面

の変化を(1)変形地山、(2)不変形地山各々の場合について示したものである。図中実線はRun1、一点鎖線はRun2、破線はRun3の場合のピエゾ水頭を、二点鎖線は自由水面である。これより、まずa) $T = 18$ の段階では自由水面の低下はほとんどなく掘削地山表面に一致しており、ピエゾ水頭伝播も掘削底面下程度までしか進行していない。ただ、変形地山の場合の水頭分布は不変形地山のそれに比べて深部において遅れる傾向にある。これは介在物に係る定数 $a E c$ が小さいRun1 (実線) においてより顕著である。変形地山においてこういった傾向をもつのは、基本的に深部方向に透水係数が小さくなることによる。一方、b) $T = 540$ と定常に近づくとき自由水面形状、水頭分布形状共に一致してくることになる。

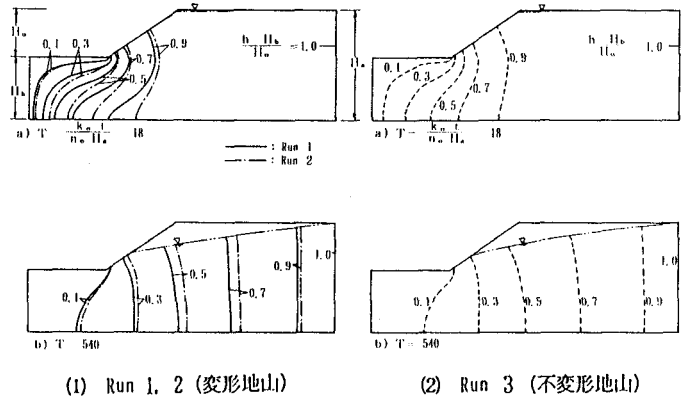


図-7 無次元ピエゾ水頭 $(h - H_b) / H_0$ の分布および自由水面の変化

図-8は、斜面および掘削底面における流出量の比率、経時変化を見るため、掘削底面からの流出量を Q_1 、斜面からのそれを Q_2 、全流量を Q_T とし、その無次元量を Q_1 / Q_T 、 Q_2 / Q_T ととして示したものである。ここでは実線はRun1、一点鎖線はRun2、破線はRun3の場合のそれを各々示している。3者に共通して常に $Q_1 > Q_2$ と掘削底面よりの流出量が多く、その差 $Q' = Q_1 - Q_2$ は初期段階で急激に小さくなってその後はほぼ一定値となっている。しかし、変形と不変形のそれらを比較してみると、明らかに変形を考慮したRun1、2の方がその差は小さくなっている。このことは、全流出量に占める斜面からの流出比率が大きく、しかも前述の流速ベクトル分布 (図-6) からみてものり尻に集中していることを示唆しているものと考え得る。

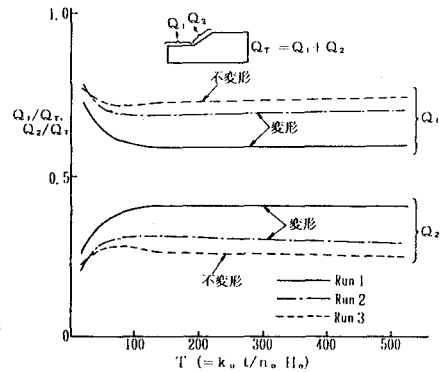


図-8 無次元流出量 Q_1 / Q_T 、 Q_2 / Q_T の経時変化

4. むすび

本研究は、亀裂系岩盤に斜面を設けたときの地下水挙動の基本的性質を検討するため、岩塊モデルを導入して非定常不圧応力-浸透連成解析を行ったものである。その結果、透水係数は斜面掘削後応力開放の影響により斜面上部は水平・鉛直方向共大きく、のり尻および掘削底面では水平方向は同様の傾向をもつが鉛直方向は逆に小さくなるということかわかった。また、変形地山ではピエゾ水頭伝播が深部で遅れ、表層部の透水係数増大とも相まって、経時的にも流速ベクトルは斜面部に集中し、流出量ものり尻付近で一層大きくなることが示唆された。一部の流速場の発達はいびき等の地盤破壊を誘発する可能性もあるわけ、岩盤斜面の安定性を考える上でも注意を要することになる。

参考文献

- 1) 佐藤邦明・伊藤 洋：岩塊モデルによる地下空洞の地下水解析，土木学会論文集，第369号/II-5，pp. 51~60，1986. 5.

(70) UNSTEADY FLOW ANALYSES AROUND ROCK SLOPE BY MEANS
OF ROCK BLOCK MODEL IN UNCONFINED GROUNDWATER

by T.Sakaguchi^{*}, K.Sato^{**}, Y.Ito^{*} and K.Mori^{*}

ABSTRACT

In dealing with dynamic and hydraulic problems of rock slopes, it is important to investigate the groundwater motion around rock slopes.

This paper analyzes the unsteady flow of rock slope by a deformable rock block model in unconfined groundwater. The model used in this study is composed of a number of elastic rock blocks and interstitial substances in fractures. The permeability and water pressure in all fractures are subjected to deformable behavior of rock mass. The characteristics of unsteady flow around rock slope clarified by examination of computed results.

The main conclusions by this study can be summarized as follows:

- (1) The application of rock block model to hydraulic problems was effectively confirmed by several analyses of groundwater in rock slope.
- (2) The distribution of permeability decreases with depth as a whole, and permeability in the neighbourhood of slope surface becomes larger with time than that of initial state after excavating.
- (3) The velocity vectors are large around slope, and the flow rate concentrates in the neighbourhood of slope toe.

* Dept., Nuclear Power Development, Kumagai Gumi Co., Ltd.

** Faculty of Engineering, Saitama University.