

三峡库区寨坝变形体的渗流变形有限元耦合分析

The coupled FEM analysis of deforming slope of Zhaiba, the Three Gorges

吴梦喜¹, 王建锋¹, 苏爱军²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 长江水利委员会综合勘测局, 湖北 武汉 430074)

摘要: 三峡库区寨坝明德小学变形体是山前坡积物、崩积物以及滑坡堆积物等的混杂体, 中部存在孤立的块碎石含水层, 地下水位较高。公路开挖引起了远场集中通道排水疏干和开挖面附近卸载, 导致了不均匀变形破坏产生。本文给出了这种开挖卸载与排水疏干共同作用下, 边坡饱和-非饱和渗流与变形耦合的有限元分析方法。研究表明, 集中通道排水造成了坡体大范围的孔隙水压力下降, 从而导致不均匀变形和地面开裂; 其中通道排水诱发的不均匀变形将随着排水通道的封堵和地下水位的回升而停止, 而纯粹的开挖卸载主要影响开挖面附近的土体变形。这一典型实例所揭示的机理模式, 可以解释工程施工区通常出现的因开挖和开挖引起的排水所诱发的远近变形破坏现象的实质。

关键词: 边坡; 变形; 有限元; 排水; 耦合

中图分类号: TV 223. 21

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)04-0445-04

作者简介: 吴梦喜(1967-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地基承载力与变形方面的数值模拟研究。

WU Meng-xi¹, WANG Jian-feng¹, SU Ai-jun²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China; 2. Bureau of Geotechnique, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: The deforming slope in Minde primary school, Zhaiba, Yunyang county, the Three Gorges, is consisted of cliff debris, colluvial and diluvial deposits. There is an isolated aquifer, which is consisted of block and rubble stones under the center of the land site, and the underground water level is just below the ground surface. Uneven deformation had been induced by groundwater discharge via some concentrative piping channels due to road excavation in 1998-2000 construction periods. A coupling finite element method (FEM) of saturated-unsaturated soil seepage and deformation calculation has been presented to model the deformation and the ground failure. It has shown that a large range of both descending of pore water pressures and uneven deformation were in fact caused by groundwater discharge. The excavation unloading may only cause deformation of soils near the excavation face.

Key words: slope; deformation; FEM; discharge; coupling

0 前言*

寨坝滑坡区位于三峡库区云阳新县城主城区云江大道与磨盘寨之间, 分布高程 275~490 m, 面积 0.65 km², 总体积 1210 × 10⁴ m³, 由若干危岩、滑坡组成, 是因近期区内道路开挖诱发地面变形破坏, 而暂时搁置开发的一块相对平坦的“平台式”斜坡。其平台上覆主体组成物质为山前坡积物、崩积物以及滑坡堆积物等混杂体, 北部后侧山体和下伏基岩为侏罗系中统上沙溪庙组(J_{3s})水平层状砂泥岩。

图1为寨坝滑坡区(明德小学变形体)开挖变形情况。在1998年及其随后的开发利用期间, 道路开挖导致多处松散堆积物的变形。明德小学变形体变形面积达 3.5 × 10⁴ m², 明德小学校舍和近区民宅拉裂变形而被迫迁移, 变形区前缘已建成的望江大道内侧边坡和路基鼓胀破坏。在变形体东侧, 新形成的变形体纵向影响宽度达 60~70 m, 两个月时间内的水平位移达 1~6 cm。

明德小学及其东侧近区的地面变形发展之快, 范围之广, 曾引起人们的恐慌和专家的争论。人们担心

的主要问题是这类变形是否就是所谓的滑坡现象, 这块土地能否利用。本文应用渗流与变形耦合计算的有限元法, 对明德小学变形体进行二维计算分析, 以期揭示这一“滑坡”变形体的变形机理, 并对该处土地的场地稳定性进行判别, 为开发利用提供依据。

1 非饱和-饱和土体流固耦合基本方程与有限元计算边界的处理

描述非饱和土的性状时, 应力张量采用净应力($\sigma - u_a$)和吸力($u_a - u_w$)^[1], 其中 u_a 为孔隙气压力, u_w 为孔隙水压力。非饱和土的变形, 由净应力和吸力的变化所控制, 其应力应变关系很复杂。实际应用中可以作非饱和土的变形仍由有效应力控制的近似假定, 将吸力折减为有效应力。那么, 非饱和土与饱和土可以采用一个统一的有效应力公式。采用弹性力学的习惯, 拉应力为正, 有效应力公式可表示为

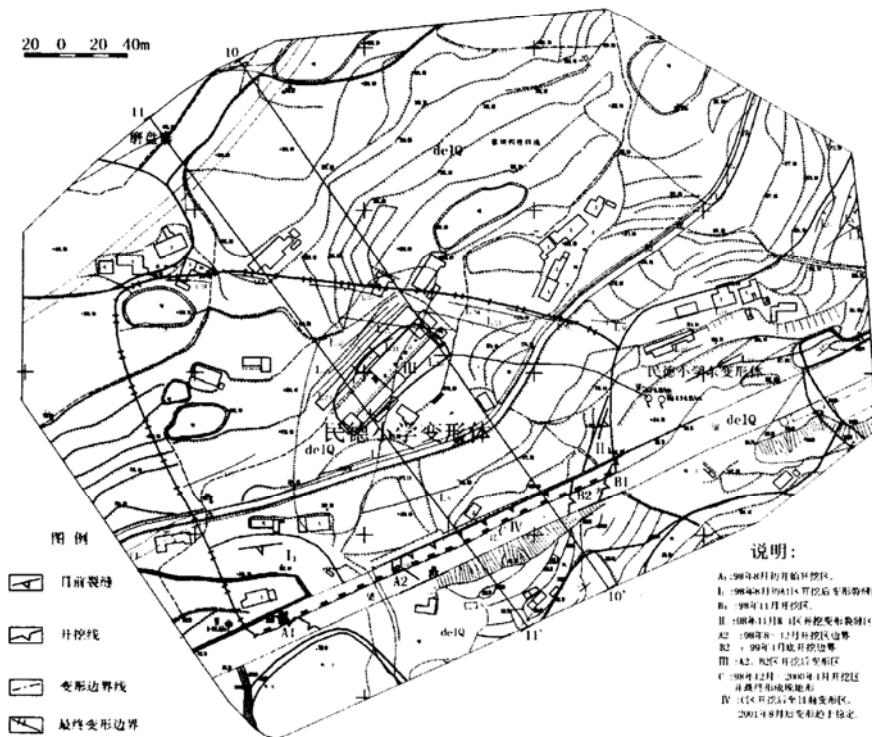


图1 寨坝滑坡区(民德小学变形体)开挖变形示意

Fig. 1 Excavation near Zhaiba landslide

$$\alpha'_y = (\alpha_y + u_a \delta_y) - a_w(u_a - u_w) \delta_y. \quad (1)$$

式中 α_y 为总应力张量; α'_y 为有效应力张量; δ_y 是克罗内克 delta; a_w 为吸力作用范围系数, 定义为孔隙水覆盖的土颗粒表面积与土颗粒的总表面积之比, 饱和时为 1, 土干时为 0^[1]。以下均假定土体固结过程中孔隙气压力瞬时消散($u_a \equiv 0$), 土颗粒不可压缩, 孔隙水非稳定渗流的微分方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (k_x(n, s) \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y(n, s) \frac{\partial H}{\partial y}) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} (k_z(n, s) \frac{\partial H}{\partial z}) = \frac{\partial(s \cdot n)}{\partial t}, \\ & H(x, y, z, t) = H_1(x, y, z, t), \text{ 在 } s_1 \text{ 上,} \\ & k_x \frac{\partial H}{\partial x} \cos(\bar{n}, x) + k_y \frac{\partial H}{\partial y} \cos(\bar{n}, y) + k_z \frac{\partial H}{\partial z} \cos(\bar{n}, z) \\ & = q, \text{ 在 } s_2 \text{ 上,} \\ & H(x, y, z, t) = z(x, y, z), \text{ 在 } s_3 \text{ 上,} \\ & H(x, y, z, t_0) = H_0(x, y, z, t_0). \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $H = u_w / (\rho_w g) + z$, H 为水头, u_w 为孔隙水压力; $k_x(n, s)$, $k_y(n, s)$, $k_z(n, s)$ 为沿坐标 x , y , z 的孔隙水渗透系数, 是孔隙比 n 和饱和度 s 的函数; s_1 为已知水头边界, s_2 为已知流量边界, s_3 为逸出段边界; q 为边界流量; $\cos(\bar{n}, x)$ 等为边界面外法线方向的方向余弦; t 为时间。

土体的饱和度, 是孔隙吸力的函数, 饱和度(s)与

吸力($u = u_a - u_w$)的关系, 称为土水特征关系。易知:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(s \cdot n)}{\partial t} &= s \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial s}{\partial t} = s \frac{\partial n}{\partial t} - n \cdot s' \frac{\partial u_w}{\partial t}, \\ (s' &= \frac{\partial s}{\partial u_w}, u_a = 0). \end{aligned} \quad (3)$$

根据最小势能原理, 可推导出式(1)的有限元方程。应用变分法, 并对时间取隐式差分, 可得式(2)的有限元方程, 用高斯消元法直接耦合求解可求得每一时步的结点位移和结点孔压。对于非饱和土渗流数值计算中可能出现的数值弥散现象的消除, 见文献[2]。

开挖面是重要的边界面, 该面上应满足应力为零的条件, 在模拟开挖过程中, 随着被开挖单元的撤除, 开挖面的应力应卸载至 0, 可将前一时步开挖面处的应力按分布荷载反向施加于该面上; 同时开挖面又是一渗流边界, 坡体内的水从开挖面排出。该面上逸出面结点的确定, 可根据计算中边界结点的流通量确定, 满足式(4)的点即为逸出点^[2]。其它的渗流逸出边界也根据下式判断:

$$-k_x \frac{\partial H}{\partial x} \cos(\bar{n}, x) - k_y \frac{\partial H}{\partial y} \cos(\bar{n}, y) - k_z \frac{\partial H}{\partial z} \cos(\bar{n}, z) \geq 0. \quad (4)$$

2 计算分析

图2为民德小学变形体的工程地质剖面, 该变形体主要由粉质黏土夹碎石、碎块石土、块石、大块石构

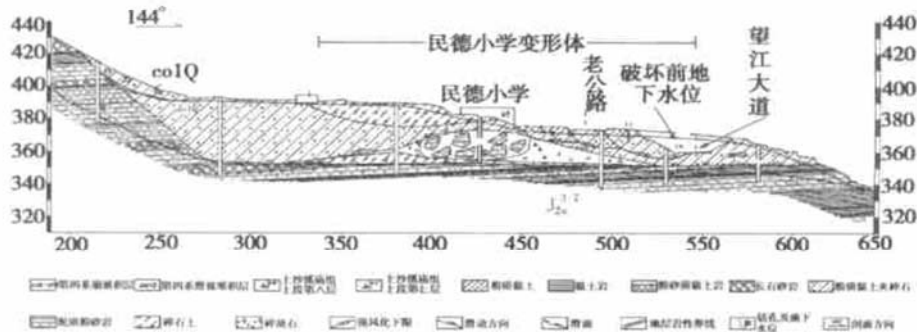


图 2 明德小学滑坡变形体工程地质纵剖面图

Fig. 2 The geological section of the deforming slope, Minde primary school, Yunyang county, the Three Gorges

成。黏土夹碎石透水性弱,是良好的隔水层,明德小学部位下伏块石和大块石,是主要的含水层。地下水位高,存在多处井泉出露,说明存在集中排水通道。

明德小学的滑坡变形情况:1998 年 11 月在其东部边坡前缘深挖公路挡墙基础时,揭露一较大地下水流,造成变形区内地下水大量流失,上部坡体开始变形,当时前缘路基下挖仅 5~ 6 m,在百余米后的原明德小学东部就发现 NW—SE 向拉裂变形,并伴随有不均匀沉降。1998 年 12 月至 2001 年 8 月间,望江大道全线施工,形成明德小学近 300 m 路段内高 12~ 16 m 的人工坡体,此期间的开挖引发了公路内侧边坡向外位移及路基鼓胀。后来随着前缘公路开挖和东部挡墙基础处地下水的进一步排放,变形体的变形自中部开始向前后不断扩展,同时,公路内侧边坡前缘产生顺坡向滑移,并由前及后逐步扩展,至 1999 年 4~ 5 月,路基降至 8~ 16 m 时,变形范围由原来的近万平米扩大到 3.5 万 m²,后缘地面变形裂缝波及最远处可达 220 余 m。其变形形式以不均匀变形为主,后期可见前缘部分土体有明显的座滑变形。

坡土体的物理力学参数变异性极大,要准确模拟实际边坡的变形场将很困难,数值模拟的目的主要是模拟坡体的渗流和变形发展过程,在此基础上分析边坡的变形和滑动机理。实际计算将土体分为 3 种,即粉质黏土、粉质黏土夹碎石、碎石块石土。土体的本构模型采用双曲线模型^[3],表 1 为计算采用的参数。图 3 为表层非饱和土的土水特征曲线和相对渗透系数与饱和度的关系^[4]。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

土类	c /kPa	φ /(°)	K	n	R_f	ν	渗透系数 /(m·s ⁻¹)
①	50	12.5	187	0.28	0.91	0.3	1×10^{-7}
②	25	18.0	180	0.40	0.96	0.3	3×10^{-7}
③	0	30.0	345	0.50	0.80	0.3	5×10^{-7}

注:①为粉黏土;②为黏土夹碎石;③为碎、块石土。

图 4 为计算模拟的初始孔压等值线图。变形体东

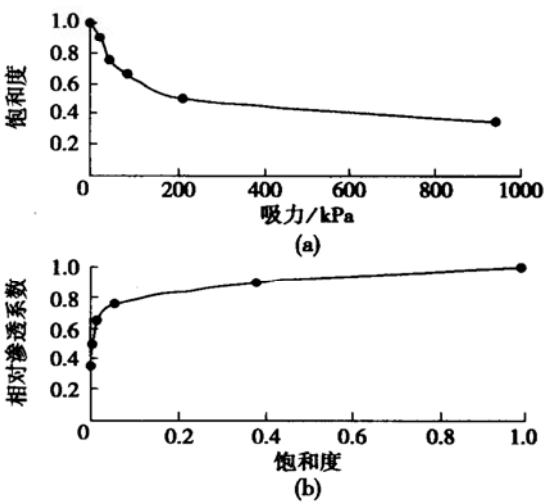


图 3 黏土非饱和特征曲线

Fig. 3 The characteristic curve of unsaturated clay

部开挖引起连接明德小学下伏的块碎石含水体的集中通道排水,用含水层下部的排水流量边界模拟。图 5 为变形体内下伏含水层中排水流量为 0.12 (m³/m·d) 时的孔压等值线图。可见坡体含水层附近 100 m 左右范围内孔隙水压力有较大的降低。鉴于集中排水通道的存在,排水的真实影响范围可能比计算结果还要大。除块碎石含水层的渗透系数较大,排水疏干较快外,其余部分渗透系数比较小,因而短期内零浸润线(零压线)降低不大,而内部孔压降低很大。

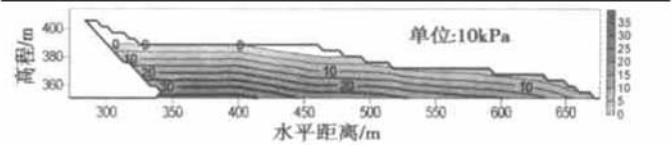


图 4 初始孔压等值线

Fig. 4 The original pore water pressure field of the deforming body

流场压力的变化,将引起坡体的变形,图 6~ 7 分别为集中通道排水后的坡体水平、垂直位移等值线。坡体位移指向明德小学下部的块碎石区域中心,波及前后范围超过 150 m。显然,大面积的不均匀变形是大范围地面开裂的原因。

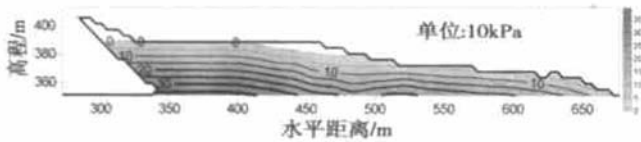


图 5 集中通道排水过程中孔压等值线

Fig. 5 The pore water pressure field of the deforming body during drainage

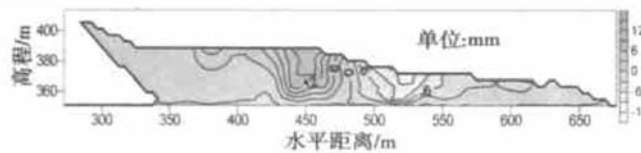


图 6 排水过程中水平位移等值线

Fig. 6 The horizontal displacement isoline during drainage

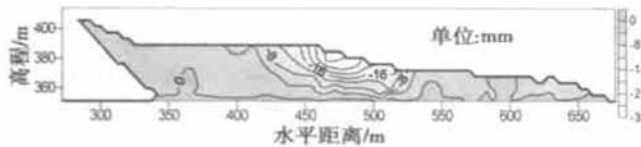


图 7 排水过程中垂直位移等值线

Fig. 7 The vertical displacement isoline during drainage

当然,集中通道排水引起的孔压场变化随着排水流量而变化,由于实际场地的水文地质条件复杂,因而计算结果主要是定性地说明排水对坡体流场和变形的影响。图 8 为开挖完成后的孔压等值线,开挖面附近的坡体孔压受开挖排水的影响较大,而远离开挖面的坡体孔压主要受集中通道排水的影响。图 9, 10 分别为开挖完成后坡体的水平和垂直位移等值线。开挖面附近的水平位移较大,指向开挖临空面,公路底部有较大的回弹变形。开挖卸载对坡体变形的影响局限于开挖面附近,而图中民德小学下伏水平位移中心与前缘开挖前没有明显的变化,变形的发展主要是进一步的排水所造成。根据经验,水平场地纯粹由开挖卸载引起的边坡变形范围一般不超过开挖深度的 3~6 倍^[5],这样看来该变形体大范围的变形应该是由排水减压引起。

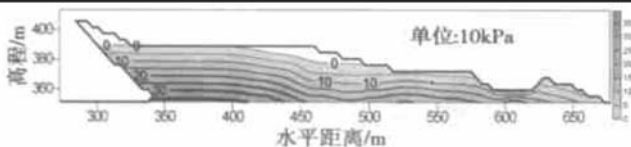


图 8 开挖完成后孔压等值线

Fig. 8 The pore water pressure after the excavation

民德小学变形体的变形,是坡脚开挖支挡的撤除与排水减压共同作用的结果。开挖引起坡体前缘的支撑力的撤除,坡体尤其是前缘土体的剪应力增加,随着开挖深度的增加,剪应力不断加大,达到土体抗剪强度而引起剪切滑移,并进一步拉动后部土体滑动,但其

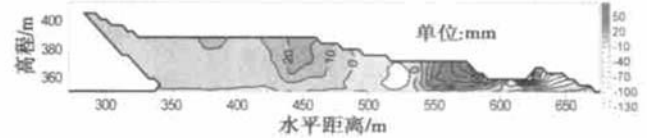


图 9 开挖完成后水平位移等值线

Fig. 9 The horizontal displacement isoline after the excavation

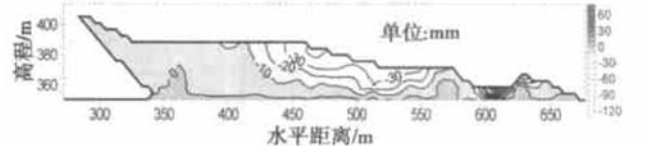


图 10 开挖完成后垂直位移等值线

Fig. 10 The vertical displacement isoline after the excavation

滑动范围是比较小的。排水减压引起的不均匀变形导致其上部地面拉裂。变形体东部开挖揭示出地下水流动后,坡体内的主要持水层民德小学下伏的块碎石层中的水体由集中通道逐步排除,首先是块石体中的大孔隙水体,然后逐步扩展到碎石中的较小的孔隙,坡体位移指向块碎石层的中心;随着疏干范围的扩大,其变形范围也前后扩展。排水通道封堵后坡体孔压会逐步回升,这与观测结果也一致。就整体而言,寨坝场地的变形是通道排水诱发的不均匀变形,而纯粹的开挖卸载主要影响开挖面附近的土体变形,因而其整体是稳定的,可以重新开发利用。

3 结 语

寨坝边坡变形的分析表明,采用场地工程地质分析,与边坡饱和-非饱和渗流与变形耦合数值分析相结合的方法,可以有效模拟边坡的整体变形场、孔隙水压力场变化,解释开挖以及开挖导致的排水诱发的地面变形和开裂现象,从而为边坡稳定性判别、公路开挖等工程设计提供依据。

参考文献:

- [1] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐,等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 126-146.
- [2] 吴梦喜, 高莲士. 饱和-非饱和土体非稳定渗流数值分析[J]. 水利学报, 1999, (12): 38-42.
- [3] Leong E C, Rahardjo H. A Review on soil-water characteristic curve equations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(12): 1106-1117.
- [4] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1996. 54-60.
- [5] 崔政权, 李 宁. 边坡工程——理论与实践最新发展[M]. 北京: 水利电力出版社, 1999. 99-100.