

黄土滑坡体立体排水系统的三向渗流数值模拟

张爱军^{1,2}, 康顺祥², 李鹏²

(1. 西安理工大学 水利水电工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 设置由排水隧洞及水平、垂直和倾斜方向的排水孔组成的立体排水系统, 是降低黄土滑坡体地下水位线, 提高滑坡体稳定性的有效方法, 但其效果的计算分析是一难点。三向渗流数值模拟是解决这一个难点问题的有效方法。对渭河关中段西部一典型黄土滑坡体立体排水系统的三向渗流数值模拟表明, 由于滑坡体内部土层结构的复杂性, 室内试验得到的渗透系数不能很好地反映地层综合渗透性, 需要根据实测地下水水位进行反分析; 排水孔的间距与位置对降水效果有极大的影响。

关键词: 三向渗流; 滑坡; 立体排水系统; 数值分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2004)06-0006-04

中图分类号: P642.22

3D Seepage Numerical Analysis of Three-dimensional Drainage System in Loess Landsliding Body

ZHANG Aijun^{1,2}, KANG Shunxiang¹, LI Peng²

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048,

Shaanxi Province, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering,

Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: Setting three-dimensional drainage system which is composed drainage culvert and horizontal, vertical and acclivitous drainage bore in loess landsliding body, is an effectual method for dropping the underground water level and improving the stability of slope, but its effect estimation is a problem. The 3D seepage numerical analyze is an effectual method to solve the difficulty. The three-dimensional drainage system in a typical loess landsliding body at Guanzhong section of Weihe River is simulated with 3D seepage numerical analyze method. The results show that because of complexity of stratum in landsliding body, the infiltrative coefficients obtained with indoor testing do not accord with naturalness, the anti-analyze is needed according to the determined underground water level on the spot; the space and position between drainage bore hugely influence the effect of dropping the underground water level.

Keywords: 3D seepage; landsliding; three-dimensional drainage system; numerical analyze

渭河关中段西部渭河北岸存在大量的黄土滑坡, 多群集出现。该段从渭河宝鸡峡出口开始到常兴有 90 km 多, 分布有大大小小的黄土滑坡 170 余处。单个滑坡体宽度 100~1800 m, 长度 200~800 m, 滑动体的体积从 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 到 $5.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 不等。该区渭南岸 1—4 级河流阶地发育完全, 基本无滑坡, 北岸 1—3 级阶地缺失, 4 级阶地前缘高出现代河床 120~210 m, 产生了一系列的滑坡。这些滑坡主要有 3 种类型, 主要发生在 2 个地质年代 Q_3, Q_4 中。在上更新世初期 Q_3^1 , 也就是渭河二级阶地侵蚀期, 在已经缺失 3 级阶地的 4 级阶地前缘, 产生了较多的滑坡, 称为古滑坡; 其后上部覆盖下更新世黄土 Q_3^2 , 成为埋藏式滑坡。在全更新世初期 Q_4 , 相当于一级阶

地侵蚀期, 4 级阶地前缘高度进一步加大, 又产生一系列滑坡, 称为老滑坡; 现代人类的活动又进一步破坏了 4 级阶地的稳定, 而产生了新滑坡。这些黄土滑坡体给当地人民的生产和生活带来了极大的危害。

降低滑坡体内部地下水位是治理滑坡, 保证滑坡体稳定的一个重要手段。在滑坡体内部打设排水隧洞和排水孔(水平向、垂直向和倾斜向), 形成立体排水系统是降低滑坡体内部地下水位的的有效方式, 已经被应用于工程实践中, 取得了较好的效果^[1], 但是由于排水洞和排水孔尺寸较小, 且布设的密度较大, 方向各异, 其排水和降低地下水水位的作用效果如何计算, 一直是渗流分析的难点问题^[2]。以往一般利用非完整井的计算方法, 或通过平面渗流方法进行分

收稿日期: 2004-08-05

作者简介: 张爱军(1964—), 男(汉族), 山西阳高县人, 工学硕士, 在读博士研究生, 从事水利工程岩土力学问题科学研究工作。电话(029) 87085629, E-mail: zaj@nw.suaf.edu.cn。

析,由于方法与实际相差较大而不能取得较为合理的结果。三向渗流电模拟试验也是常用的一种方法,但是由于试验周期长,费用高,而且无法进行反分析而适用范围有限。本文利用三向渗流有限元法对渭河关中段西部北岸一典型黄土滑坡体进行了计算分析,用反分析方法解决了黄土滑坡体地层分布复杂,地层渗透系数不易准确得到的问题,解决了排水隧洞和排水孔模拟、渗流上下边界处理等一系列难点问题,对黄土滑坡体设置立体排水系统的降水效果进行了数值模拟,为评价立体排水系统降水效果提供了理论依据。

1 滑坡体地层分布

从地层上看,渭河关中段北岸黄土地层分布从上到一般为:Q₄ 新近堆积黄土, Q₃ 黄土, 古土壤, Q₂ 黄土或黄土状土, 古河床砂卵石, 第三系(N) 红色砂

砾岩, 第三系(N) 红色砂质泥岩。根据阶地的不同,在黄土内部存在一层或几层古河床砂卵石。在黄土层中有的地方有地下潜水存在,有的没有,但在砂卵石中均存在地下水,特别是在黄土与第三系红土之间的砂卵石层中存在较多的地下水。在宝鸡附近由于坡高较大,红土层受力最大,且在红土层中有水平裂隙和具有承压水的薄砂层透镜体存在,因此滑坡面均穿过了红土层,表现为深掏的坡基滑坡;其它地方由于坡高较小一般是沿红土与黄土之间的接触面滑动。本次计算滑坡的典型地质剖面如图1所示。滑坡体的平面图如图2,3所示。

该滑坡体地质条件比较复杂,地层涉及到上第三系(N)和第四系(Q),岩性主要为上第三系碎屑岩类,包括:砂质泥岩、砂砾岩;第四系砂卵石、黄土状土、黄土、人工杂填土等。

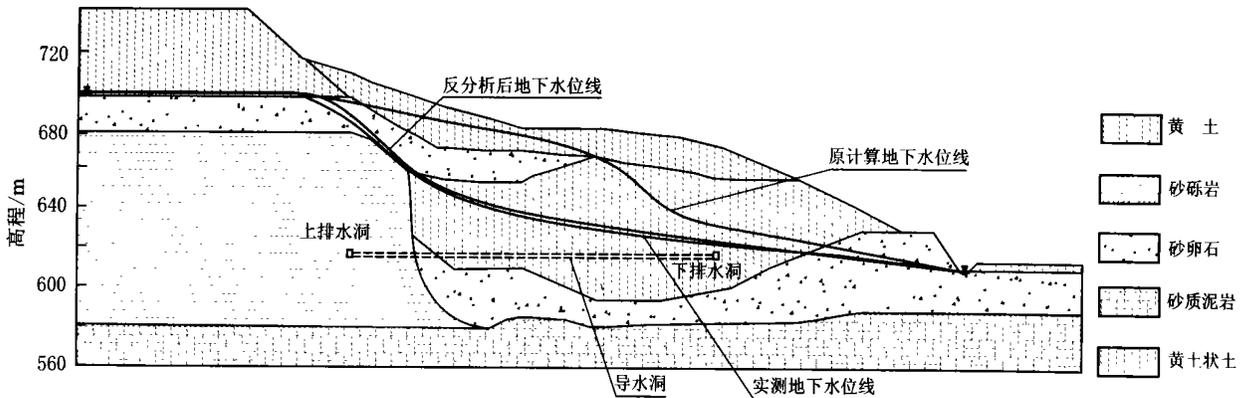


图1 滑坡体典型断面地层与实测最高地下水位线

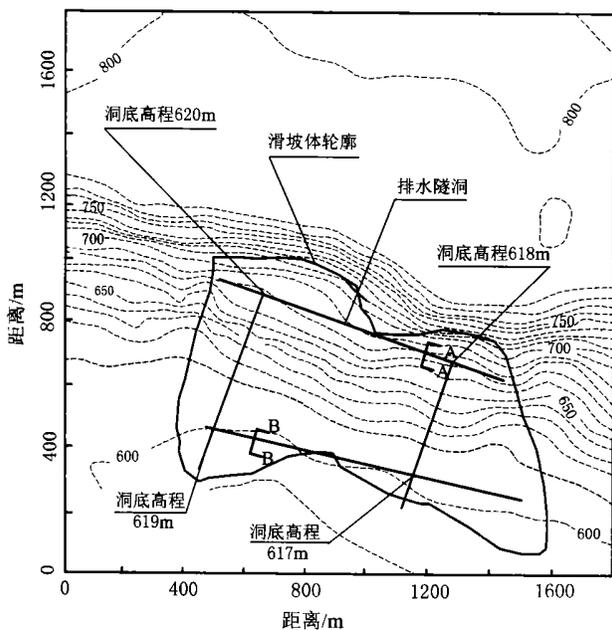


图2 滑坡体平面图

经过地质勘察表明,滑坡体内部的地下水位常年较高,其水位随着降雨等因素的变化而变化,监测得到的最高地下水位如图1所示。

2 立体排水系统

立体排水系统一般有2种形式,一种是由垂直方向的大口井和从井内部向四周打设的水平或倾斜的辐射状排水孔构成,称为辐射井排水系统;另一种是水平排水隧洞和从洞内部设置的水平、垂直和倾斜的排水孔构成。这2种类型的排水系统可以适用于不同的工程情况。本工程由于滑坡体高度较大,而采用第2种类型。在滑坡体内设置上下两道横向排水洞,并在排水洞周围布设排水孔,排水孔孔径1m或0.5m,沿排水洞布设,间距为8m。排水洞之间用支洞相连,并设置排水口将洞内渗水排出滑坡体外。地下水通过排水孔汇入排水洞内部,并通过排水洞排出滑坡体外。这样就形成了一套立体的排水系统,保证滑坡体内部地下水及时排除,从而降低地下水位,稳定坡体(图2)。

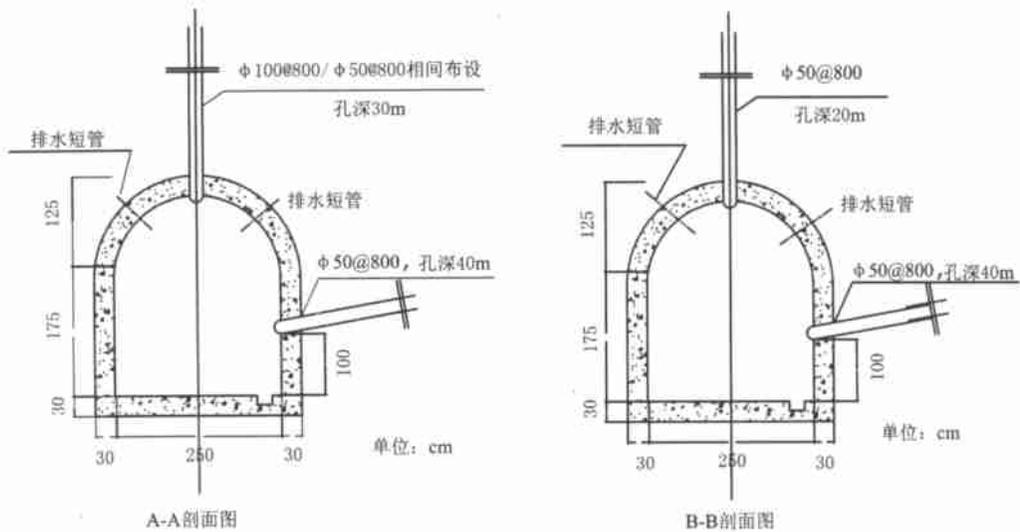


图3 主体排水系统设计图

3 计算参数的确定

根据工程实际用多孔介质连续渗流理论,将坝区的渗流场简化为一个非均质的、服从达西定律的多孔介质三向渗流问题^[2-4]进行数值计算,计算用自主开发的三维渗流计算软件 UnderFlow_3d 进行,该软件已经过大量的算例检验和多个实际工程的考验,保证了计算的正确性。地质勘测和室内试验表明,滑坡体内部各地层的渗透系数如表 1 所示。

表 1 试验得到的各地层渗透系数值

编号	地层名称	渗透系数 / ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	黄土状土	7.71
2	黄土	29.80
3	砂卵石	231.00
4	砂砾岩	46.30
5	砂质泥岩	1.32
6	排水孔	10000.00

用以上材料的渗透系数,结合图 1 所示的地层分布,用三向渗流计算程序计算了滑坡体在不设排水系统时的地下水位分布。计算范围包括滑坡体的全部和一部分非滑坡体。为了很好地模拟滑坡体的上游水位条件,将计算范围向滑坡体的上缘后延了 20 m,下缘取到滑坡体南端的渭惠渠道处。由于砂质泥岩的渗透系数较其它土层小最少 7 倍,因此选取砂质泥岩顶面以下 20 m 处为不透水边界。计算上游水位取滑坡体上缘的实测地下水位高度 706.0 m,下游水位取滑坡体下缘的渭惠渠渠道的渠内水位 610 m。总剖分节点 4401 个,单元 6968 个,单元剖分图见图 4 所示。

计算得到的滑坡体地下水位见图 1,可以看出计

算与实测地下水位相差较大,两者相差最大达到 27 m。分析认为其原因主要是室内试验得到的渗透系数结果不符合实际所致。

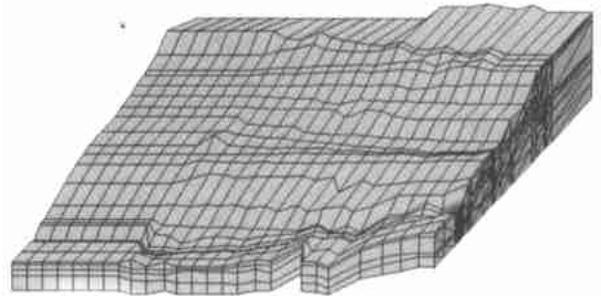


图4 整体单元剖分图

根据其它工程的经验^[5],砂卵石、黄土状土和黄土的渗透系数按表 1 所列的数据是合适的,现场其它试验的结果也证实了这一点,但是砂砾岩的渗透系数值较其它试验得到的值有所出入,其数值偏大。因此反分析主要通过变更砂砾岩的渗透系数进行。

砂砾岩和上游的砂卵石决定着上游来水量的大小,其渗透系数越大,上游来水量越大,滑坡体内部的地下水位就越高,因此反分析时应该减少砂砾岩的渗透系数。因此,在反分析中只将砂砾岩的渗透系数作为可变量,将计算得到的地下水位线与实测水位线最大相差值最小为目标函数进行计算,反分析计算得到的地下水位线见图 1,其值与实测水位线较为接近。相应的砂砾岩的渗透系数为 $5.79 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

4 立体排水系统的降水效果分析

本次计算中排水隧洞和排水孔的模拟是关键。排水隧洞由钢筋混凝土衬砌,本身透水性较差,但是在洞四周设有排水孔,使之成为一个透水的洞体。排水孔

分为长和短 2 种类型, 长孔孔径 1 m 或 0.5 m, 长度最长达到 30 m, 需要单独考虑。短孔长度较小, 只有 3 m, 孔径也只有 0.5 m, 但是其分布较为密集, 因此将其作为排水洞的一部分考虑, 即认为排水洞本身是透水的, 而不考虑短排水孔的排水效果。

排水孔的模拟方法有: (1) 以沟代井法; (2) 以特殊的单元类型模拟; (3) 实体单元模拟; (4) 以节点水位模拟等几种方法。本次计算由于排水孔孔径较大, 并有几个不同的方向, 且有两排排水孔并未穿透整个土层, 以排水沟代替排水孔是不合适的; 排水孔具有径向集水和竖向集水 2 个方向的集水功能, 并且以径向集水为主, 而杆单元不能很好地模拟径向集水的效果, 因此也不能以杆单元模拟之。鉴于以上的分析, 考虑到本次排水孔的孔径较大的特点, 本次计算中用实体单元模拟排水孔, 计算中用等面积的正方形实体柱代替圆形的排水孔, 柱体内部土体的渗透系数按照 0.1 cm/s 计算。并在柱体周围 5~10 m 内加密网格, 尽量消除由于网格过密引起的计算误差。

排水洞内部宽度为 2.5 m, 高 2.7 m, 地下渗水绝对不会充满其中, 因此, 实际上洞内部处于无压状态, 洞内水位也基本上等于洞底高程。因此, 在计算中将排水洞作为一个已知水头节点考虑, 其节点水头就等于洞底高程。并在洞外四周 10 m 范围内加密网格, 以消除计算误差。计算中考虑到排水洞、排水孔的密度较密, 在典型剖面附近截取了一段宽 96 m 的典型段对

排水孔的排水效果进行局部三维渗流计算, 可以较为精确地反映排水孔的降水效果。局部单元剖分见图 5。总剖分了断面 26 个, 节点 5 330 个, 单元 8 750 个。

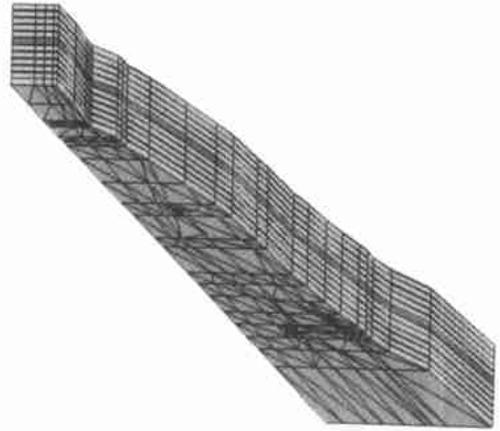


图 5 局部单元剖分图

计算得到的排水孔间距为 8 m 情况下滑坡体的地下水位分布见图 6 所示。从图中可以看出, 设置排水洞和排水孔可以有效地降低滑坡体内部的地下水位。其中间距为 8 m 时, 滑坡体后缘平均降低 12.5 m, 滑坡体前缘排水洞上部地下水位降低 6.6 m, 设置排水洞和排水孔对砂砾岩内部地下水位降低的幅度最大, 其中在砂砾岩内部的排水洞顶部地下水位降低的幅度达到 31.7 m。可以看出其效果是明显的。

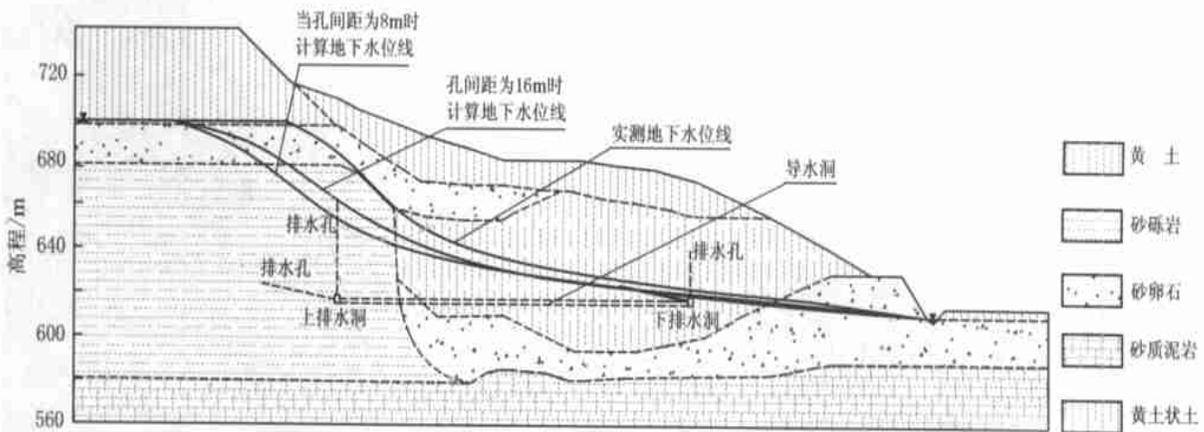


图 6 滑坡体的计算地下水位分布图(高程单位: m)

当排水孔间距为 16 m 时, 滑坡体的地下水位分布曲线见图 5。从图中可以看出, 此时地下水位明显增高, 其最大增高 6 m, 增高的位置均在滑坡体内部, 对滑坡体的安全不利, 因此增加排水孔的间距对于降低排水孔的地下水位不利。应该根据滑坡体安全分析确定合理的孔距。

5 结 论

(1) 在滑坡体内部设置立体排水系统可以有效地降低滑坡体内部的地下水位, 是保证滑坡体稳定性的有效措施。

(下转第 71 页)

施工边道、恢复被毁公路、水渠、开垦农田等时, 严禁乱挖乱填。

4.6 修建应急减灾工程, 提高防灾和抗灾能力

对目前已处于蠕滑期和临界状态的滑坡, 应及时堵填裂缝、同时将周边和坡面汇水引出滑坡体以外, 防止水体渗入坡体; 对滑坡体上的水田, 应减少灌水量, 防止水体下渗; 对过陡的边坡和危岩、危树适当削坡和清除^[4]。对危及村镇的泥石流和山洪, 应修建铅丝石笼导流堤和干砌挡墙等临时性拦排工程, 防止泥石流洪水外溢泛滥。同时, 清除河道和沟道狭谷段、涵洞、桥梁淤积物和阻碍行洪的建筑物, 疏浚河道、沟道。

5 防灾减灾措施

5.1 开展山地灾害详查和活动性评估

7.19 灾害发生后, 腾冲县又新增了数以千计的灾害点, 灾害的数量、分布区域和活动状况发生了变化。因此, 应尽快开展新一轮的地质灾害详查工作, 查清灾害的活动规律、危害程度及未来发展趋势, 为今后灾害区划、危险度评价、监测和防治提供依据。

5.2 山地灾害的危险性分析和分区

危险性分区是对灾害的区域性预测, 可为地方城乡建设、公路、水利、农田规划和灾害防治提供指导性意见^[6]。在区域地质灾害详查的基础上, 根据灾害的影响因素(分布密度、高差、坡度、岩性、构造、地震、暴雨、森林植被等)和危险区的严重程度进行分级、分区对未来开展灾民安置、危险区居民搬迁和防灾减灾极为重要。

5.3 系统开展山地灾害治理工作

对于严重威胁到城镇、厂矿、重要水利电力设施和较大的居民点的灾害点, 应尽快开展灾害防治项目

的规划建设、可行性研究和立项工作, 分期分批按照轻重缓急, 实施工程治理。此外, 加强灾害区森林植被的恢复和保护, 搞好水土保持, 对减少滑坡泥石流山洪灾害的发生、减轻灾害程度, 也具有十分重要的作用^[6]。

5.4 建立山地灾害预测预报和预警系统

由于地质灾害点多面广, 且多处于偏远的山区, 目前的气象、水文站点和灾害监测站点无法满足测报的需求。因此, 应尽快建立地质灾害监测和预报系统, 如利用遥测雨量计和气象雷达, 对雨量进行实时监测, 利用 GPS 监测滑坡位移变形等。

5.5 加强部门协作, 搭建灾害防御平台

滑坡泥石流山洪灾害的监测、预报和防治是一个复杂的系统工程, 既涉及到国土资源部门, 亦涉及到行政管理、水保、水利、水文、气象、地震和救灾等多个部门。因此, 应由主管领导协调各个部门, 共同搭建山地灾害防御平台, 达到资源共享, 信息互通, 提高山地灾害的整体防御能力。

[参 考 文 献]

- [1] 伍皓, 曾庆红, 回良玉. 在云南灾区勉励干部群众战胜灾害[N]. 人民日报. 20040720, 第 1 版.
- [2] 赵鼎汉, 等主编. 云南地图册[M]. 北京: 中国地图出版社, 2004. 129—136.
- [3] 云南省地质工程第二勘察院. 腾冲县地质灾害防治规划(2001—2010)[R]. 2001. 1—22.
- [4] 张信宝, 刘江. 云南大盈江流域泥石流[M]. 成都: 成都地图出版社, 1989. 1—13, 110—118.
- [5] 谢洪、陈杰, 马东涛. 2002 年 6 月陕西佛坪山洪灾害成因及特征[J]. 灾害学, 2002, 17(4): 42—47.
- [6] 云南省计委国土整治农业区划办公室, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 云南滑坡泥石流灾害防治[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2002. 1—16, 113—117.
- (上接第 9 页)
- (2) 三向渗流有限元分析是分析立体排水系统降水作用的有效手段。渗流计算得到的地下水位分布以及滑坡体内部的渗流场分布是进行滑坡体稳定计算的主要依据。
- [参 考 文 献]
- [1] 崔政权, 李宁. 边坡工程——理论与实践最新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. 12.
- [2] 毛昶熙, 段详宝, 李祖贻. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
- [3] 张爱军, 邢义川, 骆亚生, 等. 韩城发电厂三向渗流分析[J]. 西北水资源与水工程, 1995, 6(3): 58—62.
- [4] 张爱军, 骆亚生. 高心墙土石坝三向渗流问题研究[J]. 人民长江, 2004, 35(5): 13—15.
- [5] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.