

# 快速实现三维可视化土石方量精确计算的方法与应用

左健扬<sup>1,2</sup>, 倪万魁<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 宁夏回族自治区 国土资源调查监测院, 宁夏 银川 750002)

**摘要:** [目的] 对快速实现三维可视化土石方量精确计算的方法与应用进行分析, 为工程设计、决策安排提供有效参考依据。[方法] 利用 Petrel 软件建立的数字高程模型, 能够实现三维精准可视化土石方量的快速计算。[结果] 通过模型精度评价认为, 该方法不仅满足工程需要, 模拟精度还要高于常用的 Surfer 软件。[结论] 结合工程实例分析, 采用该方法的土石方量精确计算不仅能够直观地展示工程预期成效, 估算结果还更为保守可靠。

**关键词:** 土石方量; 快速计算; 可视化; 精准化

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2016)06-0136-03

**中图分类号:** P282

**文献参数:** 左健扬, 倪万魁. 快速实现三维可视化土石方量精确计算的方法与应用[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 136-138. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.023

## Fast Implementation of 3D Visualization Modeling Method for Accurate Calculation of Earth-rock Work

ZUO Jianyang<sup>1,2</sup>, NI Wankui<sup>1</sup>

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710054, China; 2. Ningxia Institute of Land and Resource Investigation and Monitoring, Yinchuan, Ningxia 750002, China)

**Abstract:** [Objective] The method and application of fast accurate calculation of earth-rock work volume were demonstrated to provide effective reference for the engineering design and decision-making arrangements. [Methods] The digital elevation model established by Petrel software was used to realize the 3D precision of earthwork volume. [Results] Through the evaluation of model accuracy, this method not only met the needs of the project, but also was higher than Surfer software. [Conclusion] Combined with the engineering example, the estimation results performed more conservative and reliable. This accurate earthwork calculation can directly demonstrate the expected project results.

**Keywords:** earth-rock work; fast calculation; visualization; precision

土石方量计算在土木工程、水利水电和固体矿产采剥等诸多工程领域均有涉及, 也是工程决策者所关心的问题, 其计算成果不仅服务于工程实施的概预算, 还会对工程总体设计、施工安排及进度有重要的影响。目前, 土石方量计算的方法主要有等高线法、断面法、方格网法和数字高程模型方法 (DEM)。前 3 种方法多采用手工计算, 不仅效率较低且计算量很大, 计算过程的准确性也难以得到有效保证。而 DEM 法提供对地形的精确数字描绘, 结合计算机强大的运算能力, 可以将传统的土石方计算方法与三维模型有效结合, 使其成为快速、准确、可视化的工程量计算的有效途径。随着计算机应用技术的不断发展,

基于 DEM 的三维可视化土石方量计算的快速精确化研究也在不断发展。目前土石方量可视化计算和精度分析多在不规则三角网和 Surfer 软件下进行, 王京卫等<sup>[1]</sup>利用 Surfer 软件实现了施工场地的土石方量可视化计算, 并对计算精度进行了分析整理; 张勇等<sup>[2]</sup>通过 Surfer 下进行 Kriging 插值处理并在 AutoCAD 下实现 3 维实体建模可视化设计以及精度分析; 陈丽华等<sup>[3]</sup>结合 DEM 技术利用二次曲面插值实现渣场三维显示及容积计算; 孟永东等<sup>[4]</sup>利用分形布朗运动的插值算法实现 TIN 三角网模型下的方量计算和三维可视化分析; 还有利用其他方法或模拟软件进行土石方量的可视化计算, 如李洪涛等<sup>[5]</sup>利用

收稿日期: 2016-05-11

修回日期: 2016-05-27

资助项目: 陕西省科技统筹创新工程计划课题“沟谷高填方填筑技术及控制标准研究”(2012KTDZ03-04)

第一作者: 左健扬(1988—), 男(汉族), 宁夏回族自治区盐池县人, 博士研究生, 研究方向为岩土体边坡工程地质。E-mail: zuo\_jy@163.com。

ArcGIS 实现填挖土石方量的可视化与土石方量调配最优化分析;冯晓刚等<sup>[6]</sup>探讨了三维激光扫描技术在土石方量精确计算中的应用。本研究利用 Petrel 三维地质建模软件,通过理论函数模型的建立与计算精度的分析验证,证明其具有很高的计算精度,完全能够满足工程应用。并结合工程实例,来对可视化模拟和方法实现进行探讨和研究。

## 1 土石方量计算的三维可视化方法

三维可视化方法不仅可以对事物进行直观的模拟描述,还可以帮助我们分析和研究模型问题。三维模型计算土石方量的实质就是利用空间离散数据点分别对施工前后的地表形态进行插值模拟,并通过三维空间上的曲面叠合,构建三维网格化数据实体模型。经过每个单元网格体积的累加计算得到模型体积,也就是地形变化空间差值模型体的体积。利用基于 Windows 系统的三维可视化建模软件 Petrel 对土石方量可视化及精度分析进行研究。

土石方量可视化模拟计算主要分为 3 个步骤:(1) 获取空间离散数据点以及工作区范围。根据实际工程的精度需要,获取相应的地形线拐点信息。可以通过矢量化地形图、纸质图件或野外实时测量,参数主要为平面直角坐标  $X, Y$  和高程  $Z$ 。土石方量底面的确定可以根据实际需要(可以是水平面、斜面或者起伏变化的曲面)进行相应的确定。Petrel 软件具有强大的数据处理能力,在对大量冗繁的数据点进行预处理时,不需要人为的精简数据,不仅极大的减少了人工筛余的工作量,也有效的保证了数据信息的完整性和真实性。(2) 空间插值构建结构面。将预处理离散数据点文件通过对应项参数设置导入软件,空间数据点会自动在三维空间中生成并显示。通过在二维平面和三维空间视图下对数据点进行遗漏检查,并对数字化输入时的无效点直接修正(主要是删除非地形飞点数据或异常点查错更改)。选用合理的插值计算方法构建施工前后的网格曲面,网格划分越细,所表达的地形或地质现象精度相对越高,但软件模拟的运算处理速度也相对越慢。(3) 建立三维实体模型。利用工作区范围拐点坐标作为模型边界,设定合理的三维网格密度,通过施工前后地形曲面的约束建立三维实体模型(bulk volume),通过快速计算读取土石方量的体积。当对基岩面深度进行了有效控制(可通过钻孔、探槽等工程揭露获取),通过分层模拟,还可以实现土方量和石方量的分别计算。

## 2 软件计算的精度分析

### 2.1 采样点密度的影响

计算精度是网格化模型模拟评价的重要指标,也是数字地形建模、数字地形分析和各种地学过程模拟最为关心的问题。对于不同插值方法及网格精度下的方量计算精度问题,王宝成,陈竹安等<sup>[7-8]</sup>对计算方法的精度分析做了一定的评价研究。为了便于对 Petrel 软件土石方量体积网格和计算精度进行定量分析,本研究参照文献<sup>[8]</sup>,利用函数理论模型的建立,来对网格化模型计算精度进行分析研究。

首先,在区域:  $D(0 \leq x \leq 100, 0 \leq y \leq 100, z > 0)$  上构建函数模型:

$$Z = \sqrt{\frac{1}{100}x^3 - y^2}$$

通过对理论函数模型做二重积分,获得模型的体积  $V$ ,即

$$V = \iint_D \sqrt{1/100x^3 - y^2} dx dy = 196\ 349.5 \text{ m}^3$$

式中  $(x, y, z)$  空间向量的数值可以利用 Excel 进行计算得到。接下来分别从数据采样间隔和网格插值密度 2 个方面对模型精度进行分析。

(1) 在区域  $D$  内分别以 5, 10, 20 m 共 3 种采样间隔采集离散数据点作为曲面构建网格化的源数据,并以  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的网格密度利用克里金(kriging)插值方法对源数据进行曲面插值。

(2) 在区域  $D$  内以 5 m 采样间隔采集数据点作为源数据,以  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}, 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}, 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  这 3 种网格密度下利用克里金插值方法进行曲面及实体模型网度模拟

(3) 通过底界面  $Z=0$  的设定,建立三维空间理论实体模型。借助软件 Processes 进程下的 Utilities 模块中 Volum calculation 功能,可以快速计算得到三维实体模型体积量,理论函数模型体积方量计算误差分析,详见表 1。

由表 1 可以看出,通过合理的插值计算方法和网格密度控制的选择,基于 Petrel 下的网格化模型体积计算精度不仅远高于国家施工组织设计规范相对误差为 3% 的计算精度要求<sup>[9]</sup>,而且还要优于 Surfer 软件中经理论验证精度最好的改进谢别德法<sup>[8]</sup>,因此,该软件可以良好地应用于工程施工中土石方量计算,且估算结果相对更为保守可靠,有利于预算决策。

表 1 理论函数模型体积方量计算误差分析

软件	计算方法	采样间隔/m	网格密度/m	计算体积/ $10^5 \text{ m}^3$	理论体积/ $\text{m}^3$	绝对误差/m	相对误差/%
Petrel	克里金	5	$1 \times 1$	1.97	1.96	354.5	0.18
			$2 \times 2$	1.97	1.96	596.5	0.30
			$5 \times 5$	1.98	1.96	1 722.5	0.88
		10	$1 \times 1$	1.97	1.96	704.5	0.36
		20	$1 \times 1$	1.98	1.96	2 000.5	1.02
Surfer	克里金	10	$1 \times 1$	1.85	1.96	-10 885.4	-5.54
		20	$1 \times 1$	1.89	1.96	-7 266.2	-3.70
	改进谢别德法	10	$1 \times 1$	1.94	1.96	-2 765.1	-1.41
		20	$1 \times 1$	1.91	1.96	-3 072.7	-1.56

## 2.2 DEM 精度评价方法

对于实际数据条件下的高程模拟,本文采用任意点法<sup>[10]</sup>对等高线插值方法生成的 DEM 进行质量分析。利用 1:50 000 标准图幅地形图以及图幅上原始标注的 19 个高程控制点。将这些点处的内插高程与实际高程进行数据比较,通过平均误差(MAE)、均方差(RMSE)、拟合优越度( $R^2$ )作为评价指标(表 2)。

表 2 等高线内插算法的误差分析

算法	平均值/m	最大值/m	最小值/m	均方差/m	$R^2$
等高	4.214	10.016	-5.006	4.873	0.993

参照国家测绘局制定的《基础地理信息数字产品 1:10 000,1:50 000 生产技术规程》<sup>[11]</sup>中 DEM 精度评定标准,插值算法符合精度要求,山地地貌下格网点高程中误差小于 11 m(表 3)。证明了该软件下的 DEM 精确性。

表 3 1:50 000 DEM 生产中高程精度要求

地形类别	基本等高距/m	坡度/(°)	高差/m	格网点高程中误差/m
平地	1.0	<2	<80	4
丘陵地	2.5	2~6	80~300	7
山地	5.0	6~25	300~600	11
高山地	10.0	>25	>600	19

## 3 工程应用

某拟建泵站工程场地占地面积约 4 482  $\text{m}^2$ ,场地内地形变化相对较大,海拔高度 1 057~1 078 m,相对高差 21 m。场地倚山而建,需要实施挖山削坡和低洼填方工作,后进行边坡加固。设计施工形成约 1 063 m 标高的地坪,同时需要对削坡和填方方量进行分别计算。

通过含有平面直角坐标和高程信息的工作区原始地形测绘资料和场地边界范围的获取,在制图软件下进行地形线信息完整性核对检查,在确认没有地形等信息数据丢失的情况下,导入 Petrel 软件以形成空间离散点数据。在三维空间的显示下将非地形信息的无效点文件删除(软件将没有高程信息的点数据自动赋值为 0)。

利用等高线插值公式形成数字高程模型。并对 1 063 m 水平作为控制对原始地形进行赋值实现工程场地模拟。以工区范围做为边界,选择合理的插值网格密度(采用 1 m $\times$ 1 m)建立三维网格,并将原始地形及工后地形作为控制建立三维实体模型。提供模型体积计算,泵站场地施工所进行的削坡方量为 7 290  $\text{m}^3$ ,填方方量为 10 102  $\text{m}^3$ 。结合三维可视化模型,还可以根据实际需要或考虑工程预算的基础上对设计方案进行调整,通过工程预期成果的模拟再现,更好地服务于工程决策。

## 4 结论

相对于传统的二维地质数据表达方式,三维地质模型能够清晰准确地表达各种地质现象,通过快速直观地再现地质单元的空间展布及其相互关系,提供了较为便利的工程决策<sup>[12]</sup>。

本研究通过基于 DEM 下的 Petrel 三维可视化模型的建立,经过 DEM 精度分析验证,证明其网格化模型具有很高的计算精度,精度完全可以满足工程施工中的土石方量计算需要。三维可视化模型不仅可以直观的展示挖填方工程成果,还可以根据工区实际情况等因素重新调整设计方案,合理规划施工进度安排,在提高工作效率的同时还有效降低了工程预算,同时估算结果方量相对更为保守可靠,可以更好地为工程建设的顺利开展而服务。

(下转第 145 页)

# 三峡库区动水压力型土质滑坡排水管布置优化 ——以卧沙溪滑坡为例

张振华<sup>1,2</sup>, 王亮<sup>1</sup>, 刘武<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** [目的] 为降低动水压力型滑坡体内的动水压力, 提高其稳定性, 采取布设水平排水管的措施对该类型滑坡进行治理, 并对排水管的布设方案进行优化, 为同类滑坡的加固设计以及获得高效合理的排水管布设方案提供参考。[方法] 利用土体级配曲线, 采用间接方法近似确定滑体土土—水特征曲线, 并尝试通过 Fredlund & Xing 函数模型预测获得滑体土非饱和渗透函数曲线。采用均匀设计方法、有限元、神经网络和遗传算法相结合的综合集成方法开展排水管布设方案优化研究。[结果] 获得了卧沙溪滑坡最优的排水管布设方案为: 管长  $L$  为 26.6 m, 间距  $D$  为 6.88 m, 倾斜角  $\theta$  为  $7.3^\circ$ 。[结论] 采用该排水方案加固后的滑坡安全系数为 1.101, 大于设计安全系数 1.10, 满足滑坡加固安全与经济的要求。

**关键词:** 动水压力型滑坡; 渗透性; 排水管

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)06-0139-07

中图分类号: TV697.3

**文献参数:** 张振华, 王亮, 刘武, 等. 三峡库区动水压力型土质滑坡排水管布置优化[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 139-145. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.1205.001

## Layout Optimization of Horizontal Drainage Pipes for Typical Hydrodynamic Pressure Landslide in Three Gorges Reservoir Area —A Case Study at Woshaxi Landslide

ZHANG Zhenhua<sup>1,2</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, LIU Wu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui, 230009, China;

2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** [Objective] In order to reduce the hydrodynamic pressure of such pressure induced landslide and improve the slope stability, horizontal drain pipes were built in a potential landslide slope using a optimized layout scheme to provide references for reinforcement design for similar landslides. [Methods] Grain size distribution curve of sliding mass was obtained by size distribution testing firstly. Based on which, the soil-water characteristic curve of sliding mass was determined approximately and indirectly, and permeability function of sliding mass was predicted by Fredlund & Xing function model. Uniform design method, finite element method, neural network and genetic algorithm were taken to carry out the optimization of the layout scheme of horizontal drain pipes. [Results] The optimized scheme for Washaxi landslide had a pipe length of 26.6 m, a spacing distance of 6.88 m and a dip angle of  $7.3^\circ$ . [Conclusion] If the optimized scheme is adopted to reinforce the landslide, the factor of safety is 1.101, which is greater than design factor of safety 1.10. The scheme could satisfy the requirements both in safety and economy.

**Keywords:** hydrodynamic pressure landslide; permeability; horizontal drainage pipes

已有的研究<sup>[1-3]</sup>表明,三峡水库水位骤降对动水压力型滑坡的稳定性不利。比如,三峡库区的树坪滑

坡、白水河滑坡和卧沙溪滑坡等,都是在库水位下降的工况下发生了较大的变形<sup>[4,5,12]</sup>。由于动水压力型

收稿日期: 2016-06-19

修回日期: 2016-06-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“水库运行期消落带红层砂岩强度劣化的物理化学机制研究”(51579063), “水库岸坡消落带红层砂岩软化崩解机理及强度演化规律研究”(51579063); 中央高校基本科研专项(JZ2015HGBZ0480)

第一作者: 张振华(1977—), 男(汉族), 福建省政和县人, 博士, 教授, 主要从事水库岸坡稳定性分析评价与加固研究。E-mail: zenithzhang@sina.com。

通讯作者: 王亮(1990—), 男(汉族), 河南省泌阳县人, 硕士研究生, 研究方向为水工结构。E-mail: wangl0154@163.com。

滑坡的岩土体渗透性比较差,在库水位下降的过程中地下水不能及时排出,坡体内地下水位的下降速度小于水库水位的下降速度,导致坡体内水力梯度增大而引起动水压力明显增大,滑坡受到由坡内指向坡外的动水压力作用<sup>[5]</sup>,致使其稳定性降低,甚至引起滑坡的变形破坏和滑动。目前已有部分学者对三峡水库水位下降条件下的滑坡稳定性进行分析。例如,王锦国等<sup>[6]</sup>通过对三峡库区猴子石滑坡地下水动力场进行分析,发现库水位从 175 m 下降至 145 m 时所受动水压力为正常蓄水位时的 13 倍,对滑坡的稳定性极为不利;向玲<sup>[7]</sup>、卢书强等<sup>[4]</sup>研究表明,随着库水位下降,由于滑坡岩土体的渗透性较差,滑坡受到从内到外的渗透动水压力作用,使得滑坡的稳定性降低。从已有的文献来看,学者们虽然研究了库水位下降条件下动水压力对土质堆积体岸坡稳定性的影响,但没有提出有效的加固方案来降低该工况条件下坡体内的动水压力(即地下水位)。目前,常见的水库岸坡降低地下水位的措施主要有排水洞、集水井抽水、虹吸排水、水平排水和渗沟等<sup>[8]</sup>。由于水平排水管具有施工简单、工期短、维护方便和经济等优点,也是经过工程检验较为有效的排水措施之一<sup>[8-11]</sup>,因此水平排水管在滑坡的治理工程中得到了广泛应用。水平排水管的排水降压效果主要取决于排水管的布设方案,而在实际工程中,水平排水管的布设方案通常是按照规范,或者是根据经验、井流公式等进行简单设计,为了保证排水的效果而盲目的增加排水管数量,造成工程上不必要的浪费<sup>[8]</sup>。为了经济有效地降低库水位下降条件下动水压力型滑坡的地下水位,科学合理地确定水平排水管的布设方案是非常必要的。鉴于此,本研究以三峡库区典型动水压力型滑坡——卧沙溪滑坡为例,采用均匀设计方法、有限元、神经网络和遗传算法相结合的综合集成方法,对水平排水管布设方案进行优化研究。

## 1 卧沙溪滑坡概况

卧沙溪滑坡位于长江支流青干河的右岸,属于秭归县沙溪镇梅坪村。滑坡距青干河下游左岸的千将坪大型滑坡约 1.5 km,距河口约 6 km,距三峡坝址约 50 km<sup>[12]</sup>。滑坡平面上总体呈“圈椅”状,近南北向。滑坡体纵长(南北方向)约 250 m,横向平均宽度约 200 m,厚度约 15 m,体积约  $7.50 \times 10^5 \text{ m}^3$ <sup>[12]</sup>。滑坡后缘位于高程约 225 m 的村级公路上,前缘剪出口高程约 105 m,坡度为  $15^\circ \sim 30^\circ$ <sup>[13]</sup>。该滑坡为土质滑坡,滑体物质主要由第四系全新统崩积碎块石土、残坡积土组成,成分为黏性土夹砂岩、泥岩块碎

石,具有弱透水性<sup>[13]</sup>。滑带为上覆滑体与下伏基岩的接触面,由紫红色黏土夹少量碎石组成,碎石成分复杂,主要为黄褐色泥质粉砂岩,稍密—密实,具有弱—微弱透水性;滑带形态总体上陡下缓,厚度约为  $0.3 \sim 0.8 \text{ m}$ <sup>[13]</sup>。滑床基岩为侏罗系中—下统灰绿色厚—巨厚层状长石石英砂岩、粉细砂岩夹少量紫红色粉砂质黏土岩、泥岩,呈厚层状,泥质胶结,具有弱透水性<sup>[13]</sup>。岩层总体产状  $100^\circ \angle 25^\circ$ ,走向与岸坡总体走向大角度相交,属斜向结构岸坡<sup>[13]</sup>。根据参考文献<sup>[12-13]</sup>给出的滑坡 GPS 位移监测点(wsx1—3)记录的位移随库水位变化关系曲线(图 1),可知滑坡在每年库水位下降期(4—6 月)的位移变化较同一库水位变化周期内的其他时段明显得多,属于典型的动水压力型滑坡。

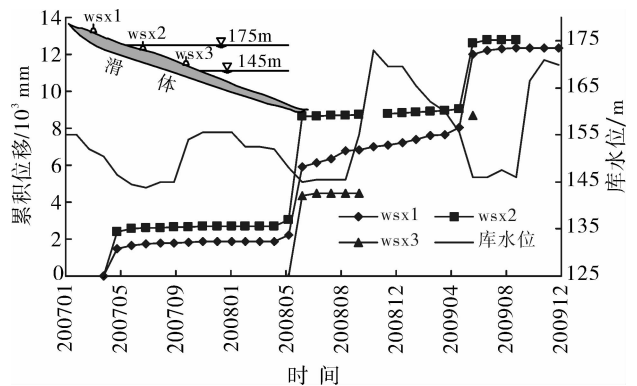


图 1 滑坡累计位移—库水位—时间关系

## 2 排水管布设方案设计

大量的研究<sup>[14-17]</sup>表明,影响排水效果的主要因素有管径,管长,排距,倾角,管间距等。假设对 5 个影响排水效果的因素都取 5 个水平,若考虑全部因素的水平相互组合,则排水管布设方案达到  $5^5 = 3125$  种,就此进行优化研究会因为工作量太大而难以实现,必须从中选择部分具有代表性的组合方案进行试验,即对布设方案进行科学合理的设计。均匀设计方法是王元和方开泰于 1978 年提出的试验设计技术,其数学原理是数论中的一致分布理论,只考虑试验点在试验范围内的均匀分布,即“均匀分散”性,忽略“整齐可比”性,使试验点均衡地分布在试验范围内,而且有充分的代表性<sup>[18]</sup>。若按 3 因素 6 水平的排列组合进行方案设计,共计  $6^3 = 216$  种布设方案;而依据均匀设计原理,若采用均匀设计表  $U_{24}(6^3)$ ,则具有代表性的排水布设方案仅需要 24 种方案。由此可见,采用均匀设计方法可以大大地减少排水管布设方案的数量,既具有代表性,又能合理反映所有可

能出现的试验组合特征。采用均匀设计方法设计排水管布设方案,首先应确定影响排水效果的因素及其水平,然后选取合适的均匀设计表设计排水管布设方案。

**2.1 排水管布设所考虑的因素及其水平**

根据参考文献[15-16]的研究,在管径  $R$  的通常取值范围内,管径的大小对边坡排水效果有一定影响,但是影响不明显,试图通过增大排水管管径来

达到更好的排水效果,不仅达不到预期的效果,反而会使施工难度和费用的增大。

故本文不把排水管径  $R$  作为排水管优化的参数,仅考虑影响排水效果的管长  $L$ 、倾角  $\theta$  和排距  $D$  这 3 个因素。根据文献[19],确定 3 个影响因素的取值范围:管长  $L$  取 5~30 m,排距  $D$  取 2~7 m,倾角  $\theta$  取  $5^\circ\sim 10^\circ$ 。对每个影响因素分为 6 个水平,具体计算结果详见表 1。

表 1 排水管布设方案影响因素水平

水平	影响因素			水平	影响因素		
	管长 $L/m$	排距 $D/m$	倾角 $\theta/(^\circ)$		管长 $L/m$	排距 $D/m$	倾角 $\theta/(^\circ)$
1	5	2	5	4	20	5	8
2	10	3	6	5	25	6	9
3	15	4	7	6	30	7	10

**2.2 按均匀设计表确定试验方案**

根据表 1,选择出合适的均匀设计表  $U_{24}(6^3)$  和  $U_6(6^3)$ (共 30 种代表性排水管布设方案,表 2—3)。

其中表 2 的样本用于下文关于水平排水影响因素与排水效果之间的神经网络模型的训练,表 3 中的样本用于该神经网络模型训练过程中的预测检验。

表 2 排水管布设方案均匀设计 [ $U_{24}(6^3)$ ]

方案	影响因素			方案	影响因素		
	管长 $L/m$	排距 $D/m$	倾角 $\theta/(^\circ)$		管长 $L/m$	排距 $D/m$	倾角 $\theta/(^\circ)$
1	5	7	9	13	5	4	10
2	10	7	8	14	10	4	8
3	15	7	6	15	15	4	7
4	20	7	5	16	20	4	5
5	25	6	9	17	25	3	10
6	30	6	8	18	30	3	9
7	5	6	6	19	5	3	7
8	10	6	5	20	10	3	6
9	15	5	10	21	15	2	10
10	20	5	8	22	20	2	9
11	25	5	7	23	25	2	7
12	30	5	5	24	30	2	6

表 3 排水管布设方案均匀设计 [ $U_6(6^3)$ ]

方案	影响因素			方案	影响因素		
	管长 $L/m$	排距 $D/m$	倾角 $\theta/(^\circ)$		管长 $L/m$	排距 $D/m$	倾角 $\theta/(^\circ)$
1	5	3	7	4	20	2	9
2	10	5	10	5	25	4	5
3	15	7	6	6	30	6	8

**3 不同排水管布设方案的排水效果**

**3.1 有限元计算网格模型**

根据参考文献[12-13]提供的卧沙溪滑坡地质资料,建立该滑坡主滑剖面 A-A' 的有限元计算网格模型。采用四边形单元进行剖面的网格划分,共划分单元 3 872 个、节点 3 845 个。

**3.2 计算参数**

3.2.1 岩土体常规物理力学参数 根据卧沙溪滑坡岩土体的物理力学参数建议取值等资料,通过工程类比和参数反演分析,综合确定有限元数值计算参数值(表 4)。使用“空气单元法”来模拟排水管,即将排水管的渗透系数设置成远大于周边渗流介质的渗透系数(可将二者的比值设置成等于 500<sup>[8]</sup>)来模拟排水管的排水性能。

表 4 滑坡岩土体常规物理力学参数

部位	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\Phi/(\text{°})$	饱和渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	变形模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$
滑体	20.8	43	25	$3.47 \times 10^{-4}$	30	0.30
滑带	16.2	22	18	$1.20 \times 10^{-4}$	12	0.35
滑床	23.0	2 500	40	$7.82 \times 10^{-5}$	25 000	0.20
排水管	19.0	40	25	$1.73 \times 10^{-1}$	30	0.30

### 3.2.2 滑体土土—水特征曲线和渗透函数曲线

经现场调查显示滑带土和滑床岩体长期处于饱和状态,其渗透特性可以用饱和渗透系数来表征,具体参数值详见表 4 库水位下降过程中,滑坡土体从饱和状态逐渐向非饱和状态过渡,故需采用非饱和和非稳定渗流分析方法对该滑坡渗流场进行分析。根据非饱和和非稳定渗流理论,非饱和渗流分析需要确定土体的土—水特征曲线(SWCC)、非饱和渗透系数等相关参数<sup>[20]</sup>。

土—水特征曲线描述了非饱和土基质吸力与含水量的关系。通过试验方法直接测定堆积体滑坡土体的土—水特征曲线是比较困难的,因此很多学者通过间接方法推测土—水特征曲线,如经验公式方法、物理经验模型、分型几何法等<sup>[21]</sup>。孔郁斐等<sup>[22]</sup>利用均匀土柱模型的毛细管理论推导出特定粒径颗粒堆积物中毛细水上升高度,据此构造出由土体级配曲线近似确定土—水特征曲线的物理经验模型,给出了土—水特征曲线的预测公式(1)–(3),并证明该模型是可行的,由于该方法合理易行,故采用该方法预测土—水特征曲线。

$$S = P(d) \quad (1)$$

$$d = 6\sigma R_{ou} / [(1+e)\gamma_w h] \quad (2)$$

$$\ln R_{ou} = a \ln(h) + b \quad (3)$$

式中: $S$ ——饱和度; $P(d)$ ——级配函数; $d$ ——粒径; $\sigma$ ——水的表面张力系数; $\gamma_w$ ——水的重度; $e$ ——孔隙比; $R_{ou}$ ——修正系数; $h$ ——吸力水头; $a, b$ ——拟合参数,利用非饱和土数据库 UNSODA 中 406 中土样的测量数据对参数  $a, b$  进行分析,分析

结果显示  $a, b$  与级配和孔隙比无关,可能受土的矿物组成影响较大<sup>[22]</sup>。

确定颗粒堆积体土—水特征曲线的主要步骤包括:首先,确定拟合参数  $a, b$  的取值(本文采取文献<sup>[22]</sup>统计的平均值  $a = 0.4397, b = 4.4950$ ),其次,根据公式(3)计算不同  $h$  值所对应的修正系数  $R_{ou}$ ;然后,将  $a, b, R_{ou}$  和不同的  $h$  值代入公式(2)得到相应的  $d$  值,再由公式(1)计算对应的饱和度  $S$ ;最后,通过饱和度  $S$  计算体积含水量,就可以得到吸力水头—体积含水量曲线,即 SWCC 曲线。

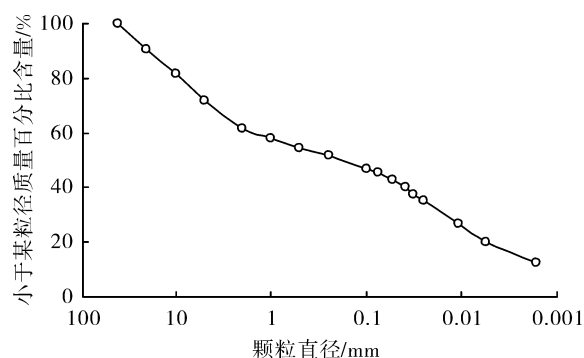


图 2 滑体土颗粒大小分布曲线

通过卧沙溪滑坡滑体土的颗粒分析试验获得其级配曲线(图 2)。

根据上述步骤确定的滑体土土—水特征曲线(图 3)和试验所得饱和渗透系数,尝试通过 Fredlund & Xing 函数模型<sup>[23]</sup>预测获得滑体土的渗透函数曲线(图 3)。

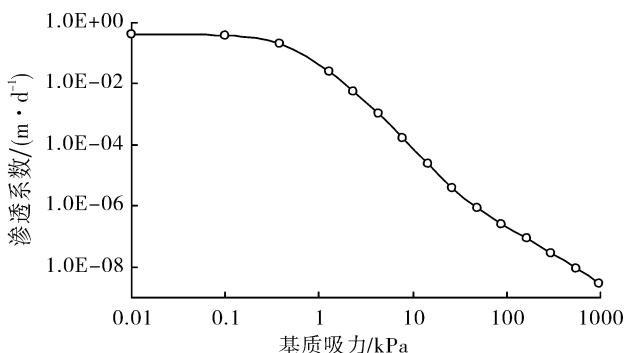
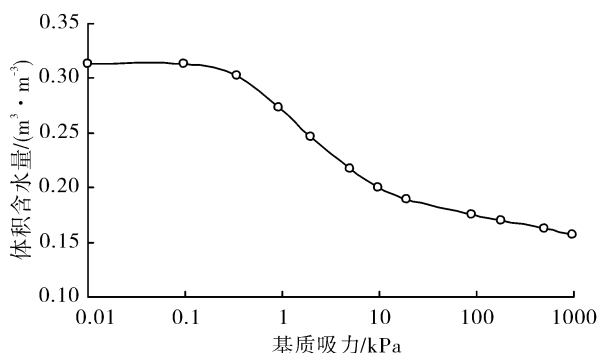


图 3 滑体的土—水特征曲线和渗透函数曲线

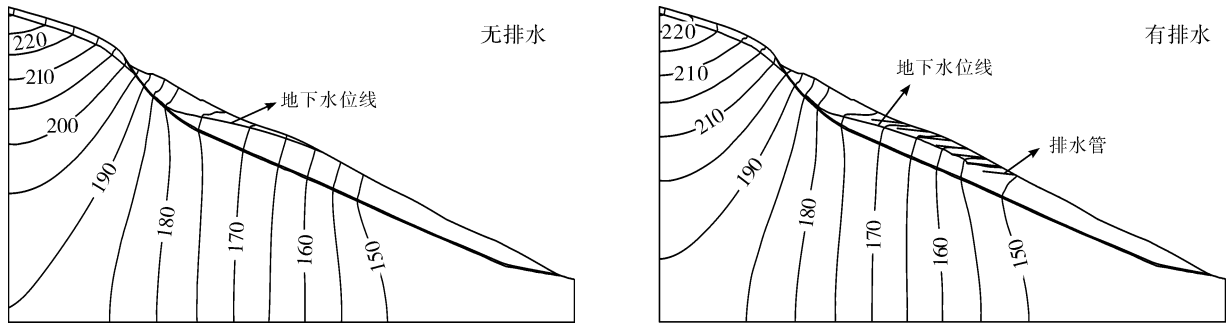
### 3.3 计算工况

由于动水压力型滑坡在库水位下降期对滑坡的稳定性最为不利,结合三峡水库的调度方案,水库水位下降是从坝前正常蓄水位 175 m 降至防洪限制水位 145 m,下降速度一般采用 1.2 m/d<sup>[24]</sup>。因此,确定计算工况为:库水位以 1.2 m/d 的下降速度从 175 m 下降至 145 m。

### 3.4 渗流场模拟和安全系数计算

3.4.1 渗流场模拟 根据表 2—3 中的共 30 个排水管布置方案,采用 Geo-Studio 岩土工程数值分析软件中的 SEEP/W 模块,对滑坡进行瞬态渗流分析,得到地下水位线分布、孔隙水压力分布等数据。图 4

分别为水位从 175 m 降至 145 m 时无排水和有排水的滑坡渗流场分布,一般排水管的排水效果可用排水管的出水量来衡量。由于排水管较多,且不同时刻排水管的出水量变化较大,故通过排水管出水量衡量排水效果不太合适。排水管的出水量,可以通过渗流场数值计算结果中有排水措施条件下坡体地下水位线相对无排水措施的地下水位线下降的区域面积来表征。因此,本文通过对有无排水措施条件下的地下水位线的对比分析,计算获得库位从 175 m 降至 145 m 时设置与未设置排水管条件下地下水位线之间的区域面积  $S$ (以下简称面积  $S$ ),见表 6—7;并将面积  $S$ (图 5)作为衡量排水效果的指标。



注:图中的数值为总水头(m)。

图 4 库水位从 175 m 下降至 145 m 时滑坡渗流场分布

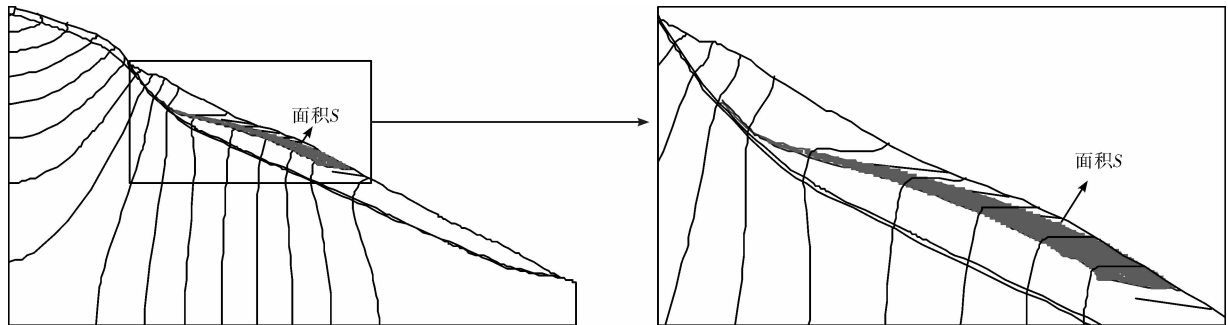


图 5 库水位从 175 m 降至 145 m 时方案 16(有排水)与无排水方案地下水位线之间的面积

3.4.2 安全系数计算 根据有、无排水措施条件下的滑坡渗流场模拟结果,通过 Geo-Studio 软件的 SLOPE/W 模块,采用 Morgenstern-Price 方法计算出 1 个无排水措施的滑坡安全系数(表 5)和 30 个有排水措施方案对应的滑坡安全系数(表 6—7)。

表 5 库水位从 175 m 下降至 145 m 无排水措施情况下的滑坡安全系数

水位高程/m	175	157	145
安全系数	1.294	1.118	1.035

## 4 排水管布置方案优化

运用人工神经网络(ANN)建立排水管布置参数(管长  $L$ 、倾角  $\theta$  和排距  $D$ ,详见表 1)与面积  $S$  及安全系数  $F_s$  之间的非线性映射关系。通过对结果的初步分析,发现排水效果越好(即面积  $S$  越大)时,滑坡的安全系数越大,意味着滑坡越稳定。当滑坡的安全系数达到规范<sup>[24]</sup>要求的设计安全系数 1.10 时,再增大排水效果就会提升工程造价。故出于排水方案的经济性考虑,方案优化以面积  $S$  最小为目标函数,以滑坡安全系数  $F_s$  大于 1.10 为约束条件,再利用遗传算



法(GA)在参数取值范围内搜索出最优的布设参数。基于神经网络与遗传算法的排水管方案优化数学模型可归纳为:

$$\begin{cases} \min f = S(\text{ANN}) \\ s. t. F(\text{ANN}) \geq F_s \end{cases}$$

对于约束的处理,采用简单的罚函数法。即在计算目标函数前,首先计算滑坡安全系数(表 6-7)并判断其稳定性,对安全系数  $F_s$  小于 1.10 的方案,在其面积  $S$  基础上加上 1 000<sup>[25]</sup>。

布设参数与面积  $S$  及稳定性  $F_s$  之间映射关系模

型为:

$$\left. \begin{aligned} & \text{ANN}(n_1, h_1, \dots, h_p, m): R^n \rightarrow R^m \\ & S = \text{ANN}_1(3, 5, 1)(X) \\ & F = \text{ANN}_2(3, 5, 1)(X) \\ & (X) = (L, \theta, D) \end{aligned} \right\}$$

式中: $F$ ——滑坡排水加固后的安全系数; $S$ ——地下水位线之间区域面积; $L, \theta, D$ ——排水管布设参数; $\text{ANN}$ ——BP 神经网络; $n, m$ ——代表网络输入层和输出层的维数; $h$ ——隐含层节点数; $p$ ——隐含层数; $F_s$ ——规范规定的设计安全系数,取 1.10。

表 6 24 种排水管布设方案的渗流和稳定性分析

方案	面积 $S/\text{m}^2$	安全系数 $F_s$	方案	面积 $S/\text{m}^2$	安全系数 $F_s$
1	15.80	1.037	13	40.21	1.040
2	77.08	1.052	14	109.58	1.048
3	174.45	1.072	15	203.83	1.070
4	256.61	1.086	16	294.60	1.085
5	278.23	1.084	17	286.23	1.089
6	341.83	1.092	18	424.54	1.103
7	31.95	1.038	19	53.90	1.042
8	79.74	1.045	20	177.90	1.067
9	155.57	1.058	21	215.11	1.073
10	262.16	1.079	22	318.06	1.089
11	341.64	1.094	23	427.80	1.105
12	427.05	1.109	24	525.20	1.119

表 7 6 种排水管布设方案的渗流和稳定性分析结果

方案	面积 $S/\text{m}^2$	安全系数 $F_s$	方案	面积 $S/\text{m}^2$	安全系数 $F_s$
1	53.90	1.042	4	318.06	1.089
2	103.83	1.051	5	367.72	1.100
3	174.46	1.072	6	341.83	1.092

经过遗传操作,进化到第 68 代,最终搜索出的最优方案为:排水管管长  $L$  为 26.6 m,排距  $D$  为 6.88 m,倾斜角  $\theta$  为 7.3°。

### 5 优化效果评价

按照上述搜索出的最优排水管布设方案,计算获得采用该排水方案加固后的滑坡安全系数为 1.101,比未加固时的安全系数 1.035(表 5)提升了 6.4%,使得滑坡从欠稳定状态提升至稳定状态,大于规范规定的设计安全系数 1.10,满足安全要求。

### 6 结论

(1) 通过颗分试验获得滑体土的级配曲线,基于滑体土的级配曲线,采用间接方法,近似确定了滑体土的土-水特征曲线;根据土体的土-水特征曲线和

饱和渗透系数,尝试通过 Fredlund & Xing 函数模型预测获得了滑体土的非饱和和渗透函数曲线。

(2) 获得了卧沙溪滑坡最优的排水管布设方案为:管长  $L$  为 26.6 m,间距  $D$  为 6.88 m,倾斜角  $\theta$  为 7.3°;采用该排水方案加固后的滑坡安全系数为 1.101,大于设计安全系数 1.10,满足滑坡加固安全与经济的要求。

#### [参 考 文 献]

[1] 肖诗荣,胡志宇,卢树盛,等.三峡库区水库复活型滑坡分类[J].长江科学院院报,2013,30(11):39-44.  
 [2] 易武,孟召平,易庆林.三峡库区滑坡预测理论与方法[M].北京:科学出版社,2011:61-64.  
 [3] 秦洪斌.三峡库区库水与降雨诱发滑坡机理及复活判据研究[D].湖北宜昌:三峡大学,2011.  
 [4] 卢书强,易庆林,易武,等.库水下降作用下滑坡动态变形机理分析:以三峡库区白水河滑坡为例[J].工程地质学报,2014,22(5):869-875.  
 [5] 卢书强,易庆林,易武,等.三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J].岩土力学,2014,35(4):1123-1130.  
 [6] 王锦国,周云,黄勇.三峡库区猴子石滑坡地下水动力分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S1):

- 2757-2762.
- [7] 向玲,王世梅,王力. 动水压力型滑坡对库水位升降作用的响应:以三峡库区树坪滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2014,22(5):876-882.
- [8] 唐晓松,郑颖人,刘亮,等. 水平排水孔在岸坡治理工程中的应用[J]. 重庆大学学报,2010,33(4):80-87.
- [9] 章普标,唐晓武. 超长距离水平排水滤管在高速公路边坡滑坡处治中的应用[J]. 公路,2006(1):80-85.
- [10] 林建东,董夫钱. 水平降排水技术在滑坡治理中的应用[J]. 探矿工程,2006(4):38-40.
- [11] 刘吉福,刘启党,杨春林. 深层排水管在边坡加固中的应用[J]. 工程勘察,2002(4):28-31.
- [12] 卢书强,易庆林,易武,等. 三峡库区卧沙溪滑坡变形失稳机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2013,24(2):21-25.
- [13] 陈德乾,肖诗荣,明成涛,等. 三峡库区卧沙溪滑坡变形影响因素分析[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2014,36(3):66-70.
- [14] 许桂生. 基于正交试验和复合单元法的排水孔优化设计[J]. 岩土力学,2007,28(7):1435-1438.
- [15] 邹隼. 富水高陡路堑边坡深层排水技术研究[D]. 湖南长沙. 长沙理工大学,2008.
- [16] 庞志伟. 边坡水平排水孔布设模式研究[D]. 云南昆明:昆明理工大学,2003.
- [17] 陈洪凯,唐红梅. 三峡工程永久船闸排水洞中排水孔优化布设模式研究[J]. 重庆交通学院学报,1998,17(1):3-8.
- [18] 梅松华,盛谦,冯夏庭. 均匀设计在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(16):2694-2697.
- [19] 王恭先,徐峻岭,刘光代,等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2004.
- [20] 魏进兵,邓建辉,谭国焕,等. 泄滩滑坡碎块石土饱和与非饱和水力学参数的现场试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(2):327-330.
- [21] 赵丽晓. 土水特征曲线的预测模型研究[D]. 江苏南京:河海大学,2007.
- [22] 孔郁斐,宋二祥. 由土体级配近似确定土-水特征曲线的一种方法[J]. 岩土力学,2015,36(9):2487-2493.
- [23] Fredlund D G, Xing Anqing, Huang Shangyan. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994,31(4):533-546.
- [24] 三峡库区地质灾害防治工作指挥部. 三峡库区地质灾害防治工程设计技术要求[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社,2014.
- [25] 尹顺德,冯夏庭,张友良,等. 滑坡加固方案优化的并行进化神经网络方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(16):2698-2702.

(上接第138页)

#### [参 考 文 献]

- [1] 王京卫,丁宁,赵同龙. 场地平整中土石方量计算的三维可视化方法[J]. 测绘工程,2006,15(6):15-19.
- [2] 张勇,何江达,谢红强. 基于3维实体模型的复杂工程场地土石方量的精确计算及可视化研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2012(S2):117-121.
- [3] 陈立华,申明亮,梅亚东. 基于DEM的土石方工程量计算研究[J]. 中国农村水利水电,2007(9):100-102.
- [4] 孟永东,徐卫亚,田斌,等. 基于分形插值的岩石边坡工程挖填方量估算[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S2):3999-4005.
- [5] 李洪涛,陈建峰,何宏,等. 基于ARCGIS的土石方量计算和调配路径最优化研究[J]. 矿山测量,2011(5):38-39.
- [6] 冯晓刚,刘明星,撒利伟,等. 三维激光扫描在土石方量精计算中的应用[J]. 地理空间信息,2015(4):49-51.
- [7] 王宝成,赵锋. 填挖方量计算的精度评定[J]. 测绘通报,2002(11):40-41.
- [8] 陈竹安,罗亦泳,张立亭. 基于Surfer的土地整理土石方量计算及精度分析[J]. 工程勘察,2010,38(5):53-56.
- [9] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 湖北武汉:武汉理工大学出版社,2003.
- [10] 谭衢霖,徐潇,王浩宇,等. 不同地貌类型区DEM空间内插算法精度评价[J]. 应用基础与工程科学学报,2014,22(1):139-149.
- [11] 国家测绘局. 基础地理信息数字产品1:10000,1:50000生产技术规程[S]. 北京:测绘出版社,2007.
- [12] 曾钱帮,刘大安,张菊明,等. 地质工程复杂地质体三维建模与可视化研究[J]. 工程地质计算机应用,2005(3):29-33.