

# 水电站边坡开挖质量控制系统的开发与应用

赵春菊<sup>1,2</sup>, 冯诚诚<sup>1,2</sup>, 周宜红<sup>1,2</sup>, 胡超<sup>1</sup>

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;  
2. 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:** 为了提高水电站边坡开挖质量控制的精细化程度并实现信息化管理, 将基于三维激光扫描获取的海量高精度点云数据运用到边坡开挖质量控制中。根据边坡开挖质量控制理论, 在系统分析用户需求的基础上, 采用结构模块化设计方法和软件开发技术设计并开发了水电站边坡开挖质量控制系统。系统由数据录入、开挖面数据分析、开挖面剖面分析、事故查询和统计报表5个模块组成, 可实现边坡开挖全过程质量控制信息的实时、动态和交互式查询。某水电站边坡开挖质量控制现场管理应用结果表明, 系统运行结果真实可靠, 可为边坡开挖质量控制与现场管理提供信息支撑, 辅助工程技术人员及时采取相关质量控制措施。

**关键词:** 水电站; 边坡开挖; 质量控制; 三维激光扫描; 结构模块化设计方法; 系统开发

**中图分类号:** TV222.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2015)04-0075-05

**Development and application of a quality control system of slope excavation for hydropower stations//**ZHAO Chunju<sup>1,2</sup>, FENG Chengcheng<sup>1,2</sup>, ZHOU Yihong<sup>1,2</sup>, HU Chao<sup>1</sup> (1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In order to improve the refinement degree of the quality control of slope excavation for hydropower stations and realize the informatization management, large amount of high precise point cloud data obtained by three-dimensional(3D) laser scanning was applied into the quality control of slope excavation. Based on the quality control theory of slope excavation and the comprehensive analysis of users' demands, a quality control system of slope excavation for hydropower stations is designed and developed using the structure modular design method and software development technology. This system consists of five modules: data entering, data analysis of excavated surface, profile analysis of excavated surface, accident query, and statistical reports. The proposed system can provide real-time, dynamic, and interactive query of quality control information during the whole process of slope excavation. The results based on practical application show that this system can provide information for quality control and field management of slope excavation and assist engineers to take relevant quality control measures in time.

**Key words:** hydropower station; slope excavation; quality control; 3D laser scanning; structure modular design method; system development

边坡开挖作为水电工程项目的一道关键工序, 其质量与整个工程安全、进度和成本等密切相关。目前我国水电工程边坡开挖质量控制大多是通过开挖前、中、后的测量放样以及开挖后选取检测点进行检验来实现的<sup>[1-3]</sup>, 常受测量人员素质、测量仪器精度、测量数据处理及应用技术等因素的影响。开发基于质量检验方法、三维激光扫描技术和计算机信息技术的边坡开挖质量控制系统, 充分发挥三维激光扫描仪采样速度快、精度高、无接触测量的优势<sup>[4-6]</sup>, 提高开挖质量评价和管理的精度, 并通过质量检验方法实现设计和实际开挖形态的多方位比较

与分析, 对提高工程技术人员质量控制水平和边坡开挖质量具有重要意义。

## 1 系统分析

### 1.1 系统需求分析

水电工程质量管理体系虽然比较完善, 但在实际施工过程中, 控制点信息的采集、分析和处理基本都由人工手动完成<sup>[7]</sup>, 因此在边坡开挖质量控制方面仍存在很多问题。

**a. 资料管理难度较大。**由于施工现场缺乏完善的系统对施工进度文件、机械物资信息、质量评定

报表等资料进行统一管理,一方面使得资料的共享难以实现,另一方面增加了重要资料破损和遗失的可能性。

**b. 传统单点测量方式工作效率低、数据量不足、测量仪器精度有限。**采用单点测量无法批量获取控制点信息,受测点数量、仪器精度等限制,难以获得精准的开挖面信息。

**c. 数据处理技术效率较低。**即使采用高精度测量仪器获取海量点云数据,由于数据量大,对技术人员的数据处理速度和技能要求高,现有技术手段难以满足将点云数据用于开挖面实时质量控制的要求。

**d. 质量检验结果精度和可靠性不足。**质量检验结果通常采用人工记录,其可靠性得不到保障,质量检验所依据的数据信息量不足,导致质量检验结果精度不足。

针对水电站边坡开挖存在的质量控制问题,本文结合现代质量管理方法和计算机技术,采用一种高效实用、操作简单的质量控制工具,实现控制点信息的采集、分析、处理以及边坡开挖全过程质量控制信息的实时、动态和交互式查询,从而提高质量控制水平。

## 1.2 系统功能分析

为了实现开挖全过程质量信息的动态、交互式查询,同时依据实测数据进行设计开挖信息和实际开挖信息的多方位比较与分析,为工程技术人员提供高效便捷的施工管理与控制工具,本系统应具有以下功能:

**a. 快速录入和有效存储边坡开挖相关数据信息,**如施工质量信息、边坡形态扫描数据等。

**b. 基于点云数据绘制点云图和开挖剖面图,**直观展示各工程部位的开挖形态。

**c. 绘制开挖剖面对比图,**输出相关质量控制参数,如超欠挖量等。

**d. 快速查询工程事故信息,**为工程技术人员采取相应的质量控制措施提供信息支持。

**e. 输出开挖过程中的相关数据信息,**实现报表的更新和打印等功能。

## 2 系统组成与功能

根据系统的需求分析和功能分析,将系统分为数据录入、开挖面数据分析、开挖面剖面分析、事故查询和统计报表五大功能模块。

### 2.1 数据录入模块

边坡开挖信息主要包括工程基本资料、施工进度文件、机械物资信息、施工质量信息以及扫描数

据。针对不同的开挖信息设计不同的数据录入窗体,通过该模块,用户可以将数据分类存储到数据库中,为其他模块的开发提供基础数据,该模块与其他模块的关系如图 1 所示。

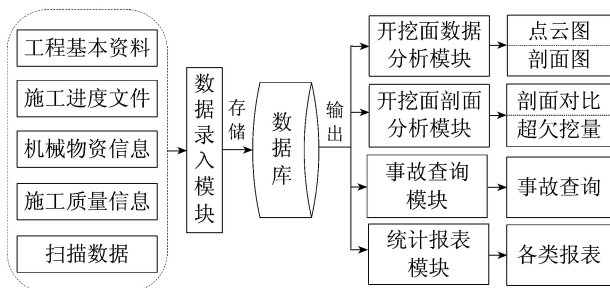


图 1 数据录入模块与其他模块关系

开挖面数据分析模块及开挖面剖面分析模块中用于绘制点云图、剖面图、剖面对比图以及超欠挖量计算的点云数据均为通过数据录入模块存储到数据库中的扫描数据;事故查询模块中的工程事故信息为通过数据录入模块存储到数据库中的施工质量信息;统计报表模块中的报表数据为通过数据录入模块存储到数据库中的施工进度文件、机械物资信息、施工质量信息等,即数据录入模块为数据输入端,其他模块为输出端。

### 2.2 开挖面数据分析模块

为了便于在不同地区的工程项目各参与方通过计算机观察到施工现场的开挖形态,利用三维激光扫描仪采集的海量高精度点云数据,结合 COM 组件技术、Matlab 与 C#混合编程技术以及二维插值原理,建立开挖面数据分析模块,分别通过点云图和剖面图展示开挖面和沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴 3 个方向剖分的开挖形态。该模块实现流程如图 2 所示。

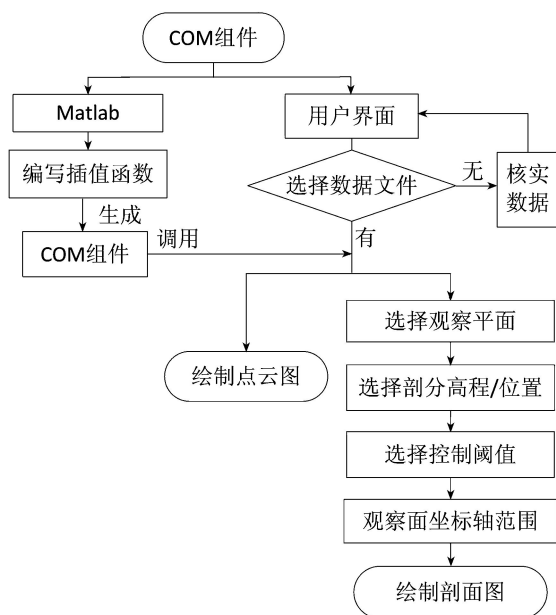


图 2 开挖面数据分析模块实现流程

三维激光扫描仪采集的点云数据包括各点的三维坐标、激光强度以及像素等信息。利用点云的三维坐标可以直接绘制点云图,但它不足以反映沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴 3 个方向的剖分形态,因此需要对点云数据进行网格化处理。首先采用二维插值原理对点云的三维坐标进行插值处理,再生成规则的三角网格,最后进行多方位的剖分。Matlab 具有内置的二维插值函数,可以有效避免 C#编写插值算法的复杂性。通过 COM 组件技术实现 Matlab 与 C#之间的混合编程,可提高绘制点云图和剖面图的效率。

### 2.3 开挖面剖面分析模块

边坡开挖质量一般通过质量控制指标(超欠挖、平整度、半孔率等)进行评价<sup>[8]</sup>,为了实现设计开挖形态与实际开挖形态的多方位对比分析,采用超欠挖指标进行评价,通过原始数据与实际数据、设计数据与实际数据和原始数据与设计数据三类剖面对比图的绘制,反映实际开挖形态与设计开挖形态的偏差,便于管理人员及时采取相应质量控制调整措施。该模块实现的流程如图 3 所示。

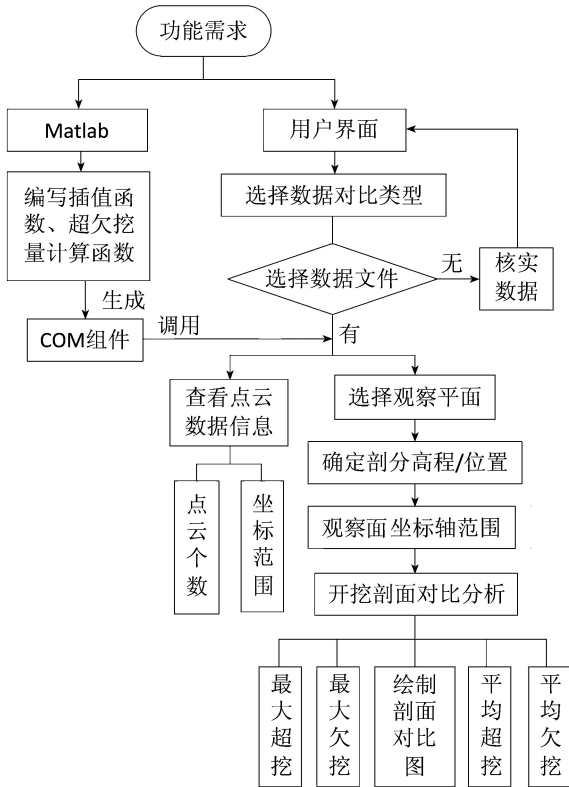


图 3 开挖面剖面分析模块实现流程

在开挖面数据分析模块的基础上,根据边坡开挖质量控制指标(超欠挖)的计算原理,通过 Matlab 编写超欠挖量计算函数,实现由点云数据计算超欠挖量的功能,并生成 C#可调用的 COM 组件,最后通过友好的用户界面为工程技术人员提供便捷的质量控制工具。

### 2.4 事故查询模块

边坡开挖工程事故主要包括爆破飞石事故、边坡失稳事故、塌方事故、施工人员跌倒碰伤事故、高处坠落砸伤事故和机械伤害事故等<sup>[9-10]</sup>。为了便于快速准确地获取工程事故信息,系统采用事故类型和施工单位两种检索途径,建立事故查询模块。该模块的具体实现流程如图 4 所示。

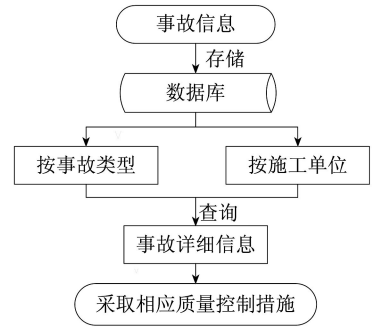


图 4 事故查询模块设计

事故查询模块可查询各工程事故的详细信息,便于工程技术人员或管理层进行下一阶段的质量控制,并对造成工程事故的有关单位追责及处罚。

### 2.5 统计报表模块

统计报表模块的功能是将用户所需的信息通过报表的形式输出。CrystalReports 是专门用于制作数据输出报表的工具,支持大多数流行的开发语言。本模块采用 CrystalReports 组件技术,对不同类别的报表进行设计,并通过 CrystalReportViewer 输出,在该模块中可以实现数据更新、打印等功能。与传统的人工记载、更改和保存各类开挖信息相比,可提高工作人员的效率以及信息的安全性。该模块具体实现流程如图 5 所示。

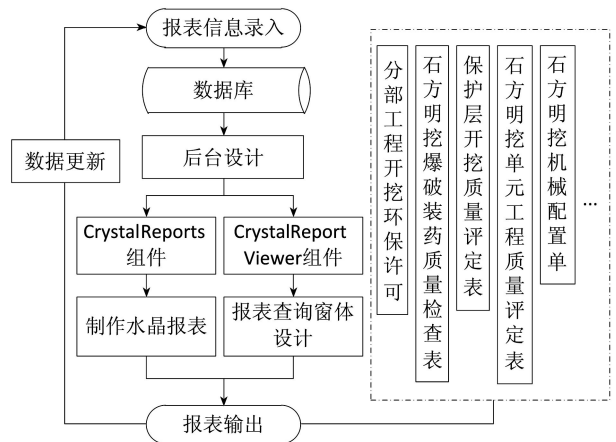


图 5 统计报表模块实现流程

## 3 系统开发与实现

### 3.1 系统结构设计

系统采用结构化生命周期法来处理开发过

程<sup>[11-14]</sup>,结合功能需求及结构模块化设计方法,系统包含以下几个模块层次:

a. 用户层。主要提供数据录入、开挖面数据分析、开挖面剖面分析、事故查询、统计报表五大功能模块。

b. 逻辑层。主要包括数据库的处理与存储方法。

c. 数据层。该层是数据库的核心部分,负责存储数据,主要包括用户信息、原始设计数据、激光扫描数据、信息报表和多媒体数据。

系统整体架构如图 6 所示,总体界面如图 7 所示。

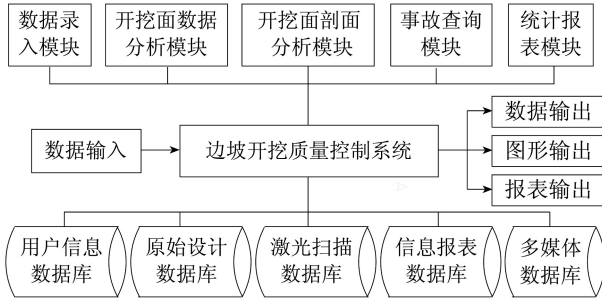


图 6 系统整体架构



图 7 系统总体界面

### 3.2 数据库设计

根据边坡开挖信息在系统中的用途,将数据库分为用户信息数据库、原始设计数据库、激光扫描数据库、信息报表数据库以及多媒体数据库五大类。

用户信息数据库主要存储用户基本信息、参建单位信息等,原始设计数据库主要存储原始形态(如地貌形态、地质形态)、设计方案(如施工组织方案、设计结构面貌),激光扫描数据库主要存储原始扫描数据和随施工进展新增的扫描数据,信息报表数据库主要存储施工过程中的相关报表,多媒体数据库主要存储施工现场照片、视频等。

### 3.3 开发环境

基于系统需求分析、功能分析、系统的体系结构设计,考虑系统的可扩展性和用户的友好性,采用

C/S 分布式系统架构,开发基于 Visual C#. NET 平台的边坡开挖质量控制系统,数据库采用 Microsoft SQL Server 2008 R2,数据软件采用 Matlab。

## 4 工程应用

某水电站枢纽工程由拦河坝、泄洪消能建筑物和地下引水发电系统等组成。拦河坝为混凝土双曲拱坝,坝顶高程 834.0 m,坝顶弧长 689 ~ 727 m,最大坝高约 290 m,坝身布置多层孔洞,同时坝段尺寸较大。该工程混凝土施工技术复杂,施工难度大,现场施工情况复杂,相互干扰多,施工控制任务繁重。

边坡开挖过程要严格按照施工设计规范进行施工和控制,实际开挖轮廓必须符合规范指定的开口线、坡比、水平尺寸、高程和控制点坐标的要求;施工过程中要防止欠挖,严格控制超挖,超挖控制标准为 0.2 m,欠挖控制标准为 0.1 m;开挖面应严格控制平整度,平整度允许偏差为 0.15 m,建基面起伏差要符合设计要求。

采集该水电站边坡开挖的原始、设计、实际点云数据以及其他相关施工信息,应用数据录入、点云图绘制、剖面图绘制、剖面对比图绘制、事故查询以及报表输出等子模块进行边坡开挖质量控制。其中,开挖面剖面分析模块是整个边坡开挖质量控制的核心部分,选取左岸坝肩边坡的设计数据及实际数据,得到如表 1 所示的点云信息。

表 1 点云数据详情

| 数据类型 | 点云数       | 坐标范围/m            |                     |            |
|------|-----------|-------------------|---------------------|------------|
|      |           | x                 | y                   | z          |
| 设计数据 | 83 629    | 588 650 ~ 589 450 | 3013 249 ~ 3014 381 | 745 ~ 1160 |
| 实际数据 | 1 206 191 | 588 650 ~ 589 450 | 3013 249 ~ 3014 381 | 745 ~ 1160 |

注:设计点云数据通过基于 CAD 二次开发的程序对设计资料中的地形线进行离散得到。

选择观察平面  $xOz$ ,根据用户需求自定义剖分位置  $y$  以及  $x$  轴和  $z$  轴范围,但需满足在设计数据及实际数据的交集范围内,根据工程设计资料由系统自动设定阈值、坡高比以及超欠挖控制标准,分析间距为二维插值步长,得到设计开挖剖面与实际开挖剖面的对比图及超欠挖情况如图 8 所示。

由图 8 可以直观地看到该工程部位的超欠挖形态及超欠挖量,通过对超欠挖控制标准及系统计算的超欠挖量进行对比分析,辅助工程技术人员及时采取相关质量控制措施。选择不同的观察平面,可以实现对该工程开挖部位的多方位比较与分析。将系统运行结果与施工现场实际开挖情况进行对比,表明系统运行结果真实可靠,可为施工现场边坡开

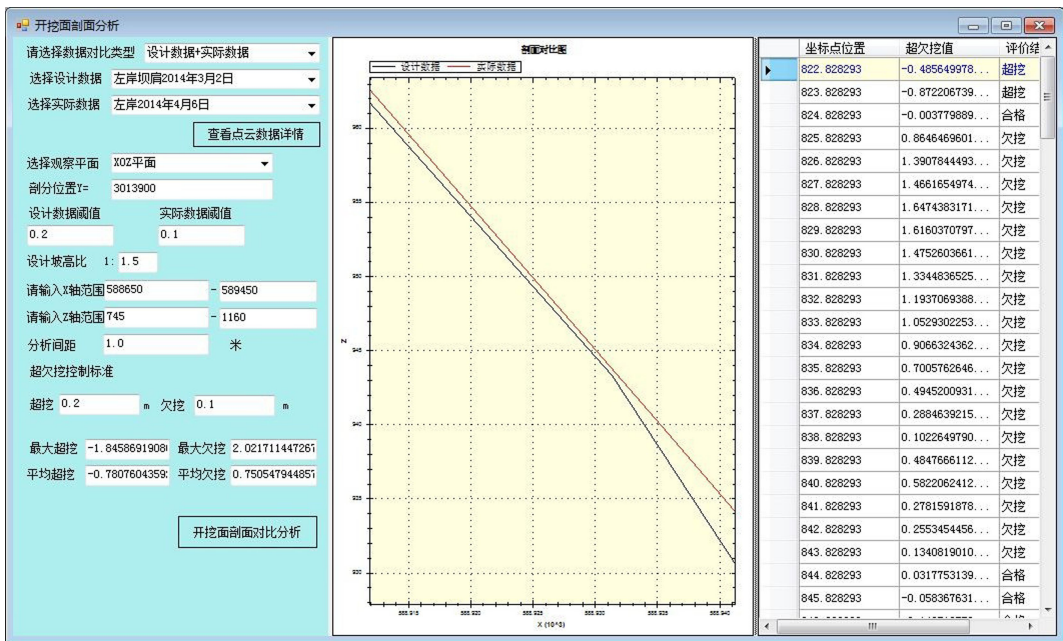


图 8 开挖面剖面对比分析

挖提供技术支持。

## 5 结 语

本文将高精度的海量点云数据应用到边坡开挖质量控制中,为加强质量控制的科学化、精细化提供新思路,保证了质量控制参数(如超欠挖量)计算的科学化和精细化。结合 COM 组件技术、Matlab 与 C#混合编程技术、二维插值原理、边坡开挖质量控制方法、CrystalReports 组件技术等方法和技术手段,采用结构模块化设计方法开发了边坡开挖质量控制系统,通过点云图绘制、剖面图绘制、剖面对比图绘制、超欠挖量计算、工程事故查询以及统计报表等功能,实现了对边坡开挖全过程质量控制信息的实时、动态和交互式查询,为边坡开挖信息化管理提供了重要的技术手段与工具。

## 参考文献:

[ 1 ] 王柱年. 丹达河水电站工程高陡边坡开挖施工与质量控制 [ J ]. 广西水利水电, 2012 ( 6 ): 45-49. ( WANG Zhunian. High and steep slope excavation and quality control of Dandahe hydropower station [ J ]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2012 ( 6 ): 45-49. ( in Chinese ) )

[ 2 ] 叶曹华, 陈周云, 杨军华, 等. 大奔流沟料场高边坡支护型式和施工质量控制 [ J ]. 人民长江, 2013, 44 ( 14 ): 57-59. ( YE Caohua, CHEN Zhouyun, YANG Junhua, et al. Supporting type of high slope at Dabenliugou quarry and construction quality control [ J ]. Yangtze River, 2013, 44 ( 14 ): 57-59. ( in Chinese ) )

[ 3 ] 吴基昌, 李桂林, 刘峰. 大岗山水电站拱坝拱肩槽开挖

质量管理 [ J ]. 人民长江, 2012, 43 ( 22 ): 16-17. ( WU Jichang, LI Guilin, LIU Feng. Quality management for excavation of dam abutment groove of Dagangshan Hydropower Station [ J ]. Yangtze River, 2012, 43 ( 22 ): 16-17. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 戴升山, 李田凤. 地面三维激光扫描技术的发展与应用前景 [ J ]. 现代测绘, 2009 ( 4 ): 11-12. ( DAI Shengshan, LI Tianfeng. The development and application prospect of ground three-dimensional laser scan technology [ J ]. Modern Surveying and Mapping, 2009 ( 4 ): 11-12. ( in Chinese ) )

[ 5 ] 王方建, 习晓环, 万怡平, 等. 大型建筑物数字化及三维建模关键技术分析 [ J ]. 遥感技术与应用, 2014 ( 1 ): 144-150. ( WANG Fangjian, XI Xiaohuan, WAN Yiping, et al. Analysis on digitization and 3D-reconstruction of large building based on terrestrial laser scanning data [ J ]. Remote Sensing Technology and Application, 2014 ( 1 ): 144-150. ( in Chinese ) )

[ 6 ] GRANT D, BETHEL J, CRAWFORD M. Point-to-plane registration of terrestrial laser scans [ J ]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 72: 16-26.

[ 7 ] 张炜. 基于模糊综合评价法的中小水利水电工程施工质量评价 [ J ]. 水电能源科学, 2014 ( 1 ): 157-160. ( ZHANG Wei. Construction quality evaluation of medium and small water conservancy and hydropower project based on the fuzzy comprehensive evaluation method [ J ]. Water Resource and Power, 2014 ( 1 ): 157-160. ( in Chinese ) )

[ 8 ] WANG Hao, LI Li, JIAO Yuyong, et al. A relationship-based and object-oriented software for monitoring management during geotechnical excavation [ J ]. Advances in Engineering Software, 2014, 71: 34-45.

(下转第 94 页)

- (5);39-41. (in Chinese))
- [6] 王建秀,胡力绳,叶冲,等.复杂应力路径下大理岩三轴渗透试验研究[J].岩土力学,2010,31(8):2389-2394. (WANG Jianxiu, HU Lisheng, YE Chong, et al. Triaxial permeability test of marble under complex stress path[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2389-2394. (in Chinese))
- [7] 郭鸿,骆亚生,郭靖.考虑应力场作用的饱和黄土渗透特性研究[J].水土保持通报,2010,30(1):131-133. (GUO Hong, LUO Yasheng, GUO Jing. Infiltration characteristics of saturated loess by considering the role of stress field[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(1): 131-133. (in Chinese))
- [8] 俞缙,李宏,陈旭,等.渗透压-应力耦合作用下砂岩渗透率与变形关联性三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(6):1203-1213. (YU Jin, LI Hong, CHEN Xu, et al. Triaxial experimental study of associated permeability-deformation of sandstone under hydro-mechanical coupling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1203-1213. (in Chinese))
- [9] 朱俊高,龚选,周建方,等.不同剪切速率下掺砾料大三轴试验[J].河海大学学报:自然科学版,2014,42(1):29-34. (ZHU Jungao, GONG Xuan, ZHOU Jianfang, et al. Large-scale triaxial tests on behavior of gravelly soil at different shearing rates [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(1): 29-34. (in Chinese))
- [10] 陈志波,朱俊高.宽级配砾质土三轴试验研究[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(6):704-710. (CHEN Zhibo, ZHU Jungao. Triaxial tests on widely graded gravelly soil [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(6): 704-710. (in Chinese))
- [11] 邹玉华,陈群.砾石土心墙料-反滤料联合抗渗研究进展[J].水利水电科技进展,2009,29(5):89-94. (ZOU Yuhua, CHEN Qun. Progress in research on anti-permeability properties of gravelly soil core material and filter material[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(5): 89-94. (in Chinese))
- [12] 雷红军,孙逊,卞锋,等.土的三轴多向渗透试验装置的研制[J].实验技术与管理,2009,26(6):55-57. (LEI Hongjun, SUN Xun, BIAN Feng, et al. Development of triaxial seepage test equipment for soil [J]. Experimental Technology and Management, 2009, 26(6): 55-57. (in Chinese))
- [13] 柯瀚,王文芳,魏长春,等.填埋体饱和渗透系数影响因素室内研究[J].浙江大学学报:工学版,2013,47(7):1164-1170. (KE Han, WANG Wenfang, WEI Changchun, et al. Experimental study on saturated hydraulic conductivity of MSW under different conditions [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2013, 47(7): 1164-1170. (in Chinese))

(收稿日期:2014-05-04 编辑:熊水斌)

(上接第79页)

- [9] 周创兵.水电工程高陡边坡全生命周期安全控制研究综述[J].岩石力学与工程学报,2013,32(6):1081-1093. (ZHOU Chuangbing. A prospect of researches on life-cycle safety control on high-steep rock slopes in hydropower engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1081-1093. (in Chinese))
- [10] 李喆,谭德宝,张穗,等.水利工程项目管理系统的设计与开发[J].长江科学院院报,2014(1):66-71. (LI Zhe, TAN Debao, ZHANG Sui, et al. Design and development of management information system for water project construction [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014 (1): 66-71. (in Chinese))
- [11] 马开远,万飏,高仕春,等.统一平台下大坝安全评价系统设计及开发[J].水利水电技术,2014(2):126-128. (MA Kaiyuan, WAN Biao, GAO Shichun, et al. Design and development of unified platform based dam safety evaluation system [J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2014 (2): 126-128. (in Chinese))
- [12] 陈桂洪.水利水电工程施工质量评价方法[J].黑龙江水利科技,2012(10):220-222. (CHEN Guihong. Construction quality evaluation method of water resources and hydropower engineering [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2012 (10): 220-222. (in Chinese))
- [13] 雷用,刘长林.边坡工程质量事故:设计原因分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(增刊1):576-579. (LEI Yong, LIU Changlin. Design reasons about quality accident of slope engineering [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2011, 30 (Sup1): 576-579. (in Chinese))
- [14] LU Wenbo, HU Yingguo, YANG Jianhua, et al. Spatial distribution of excavation induced damage zone of high rock slope [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 64: 181-191. (收稿日期:2014-04-10 编辑:熊水斌)

