



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.022

胡超, 赵春菊, 周宜红, 等. 基于粗糙度的边坡开挖质量多维评价方法[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 151-156, 164. HU C, ZHAO C J, ZHOU Y H, et al. Multidimensional evaluation method for slope excavation quality based on roughness index[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 151-156, 164. (in Chinese)

基于粗糙度的边坡开挖质量多维评价方法

胡超^{1,2}, 赵春菊¹, 周宜红^{1,3}, 潘志国³

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443000; 2. 水电水利规划设计总院, 北京 100120;
3. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 边坡开挖与质量评价是水利工程建设中的关键环节, 如何高效、全面、直观地对开挖工程质量进行评价是工程建设各方关注的问题。针对水利工程边坡开挖过程中数据采集、处理效率低及指标不完整的问题, 结合规范中的质量评价指标, 利用设计基准数据及三维激光扫描获取的开挖面点云数据, 引入粗糙度的概念分别构建一维断面线比值、二维开挖面测点超欠挖值及方差、三维表面投影比等多维度的质量评价指标, 同时开发了边坡质量评价系统, 以对开挖边坡进行综合评价。最后, 通过对某工程实例分析表明, 上述多维度的指标能够全面直观地反映开挖质量情况, 通过评价系统能为边坡开挖现场质量评价与控制提供实时、全面的信息支撑。

关键词: 粗糙度; 边坡开挖; 质量评价; 三维激光扫描; 点云

中图分类号: P642 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)06-0151-06

Multidimensional evaluation method for slope excavation quality based on roughness index

HU Chao^{1,2}, ZHAO Chunju¹, ZHOU Yihong^{1,3}, PAN Zhiguo³

(1. College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443000, China;
2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, China)

Abstract: Slope excavation and quality evaluation is the key process in hydraulic engineering. How to evaluate the quality of the excavation work efficiently, comprehensively, and directly is the concern of engineering construction. This research was intended to tackle the problems of inefficient data acquisition and processing and incomplete indicators in the process of slope excavation. We adopted the quality evaluation indicators in technical specifications, utilized the reference design data and the excavated surface point cloud data obtained by 3D laser scanning, and introduced the roughness concept. With these, we established multidimensional quality evaluation indicators including the one dimensional section line ratio, the two dimensional variance of over under excavation value, and the three dimensional surface projection ratio. Meanwhile, we developed a quality evaluation system for slope excavation. A case study showed that the above mentioned multidimensional indicators could comprehensively and directly reflect the excavation quality and provide real time and comprehensive information support for the quality evaluation and control of slope excavation on site.

Key words: roughness; slope excavation; quality assessment; three dimensional laser scan; point cloud

边坡开挖是水电工程建设中的关键工序, 其质量直接影响到工程的建设目标及安全。边坡开挖工程必须符合工程设计标准, 严格控制开挖质量。规

范^[1-2]要求开挖后应及时对基础进行检查(自检)和处理, 开挖测量范围为开挖轮廓面和开挖断面, 开挖验收主要内容包括基础轮廓尺寸、控制点高程和超

收稿日期: 2017-03-22 修回日期: 2017-08-06 网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.0904.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51379109); 三峡大学青年科学基金(KJ2015A001)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51379109); Youth Science Foundation of China Three Gorges University(KJ2015A001)

作者简介: 胡超(1987-), 男, 湖北宜昌人, 讲师, 主要从事施工组织管理与系统仿真方面研究。E-mail: huchao@ctgu.edu.cn

欠挖情况。在质量检查过程中,当前主要使用全站仪或 RTK 等单点测量工具对开挖面控制点坐标逐点测量,对比实测数据与设计数据以判断超欠挖、不平整度等质量情况^[3,4]。然而,单点数据的采集精度易受外界环境因素的影响,且由于开挖面为不规则空间曲面,采集点数量有限,其代表性难以保障,因而无法准确、全面地反映开挖面的质量。大尺度三维激光扫描技术具有高精度、高密度、高速度及免接触等特点,能够极大地提高数据采集效率、数量与质量^[5,6],目前在地形测绘^[7,8]、工程监测^[9,10]、建筑业^[11,12]等方面得到广泛应用。利用三维激光扫描技术对边坡质量进行评价分析,笔者依据相关规范,建立了部分指标^[13,14],但评价体系依然不够完善。因此,能否有效利用三维激光扫描获取的海量点云数据,进行全面、准确的边坡开挖质量分析与控制,提高质量评价的直观性和准确性,关键在于建立适用于海量点云数据的评价指标和高效的评价方法。

本文以规范中的开挖质量评价要素为基础,将地表粗糙度的概念引入边坡开挖工程,利用三维激光扫描获取的开挖面点云数据与工程设计资料,分别构建一维断面线比值、二维开挖面测点超欠挖值方差、三维表面基准投影关系比等三项粗糙度质量评价指标,并对开挖边坡展开分析。利用基于以上三项评价指标建立的边坡开挖评价系统能快速、直观地对工程质量进行评价。

1 粗糙度评价指标的建立

粗糙度一般有两种理解^[15],一种从空气动力学的角度出发,也称空气动力学粗糙度;另一种是将地面凹凸不平的程度定义为粗糙度,也称为地表微地形,通过实际测量求得,为本文讨论的粗糙度。地表粗糙度是一个无量纲指标,通过测量某一面积内或某一截面上的若干点距参照基准面的高度,用各点的高度变化来反映地面的起伏程度^[16,17],该指标可对不同尺度量级的地表数据进行统一评价。由于边坡开挖面具有地形相似特征,将地表粗糙度的概念引入边坡开挖质量控制中能够扩展现有的质量评价指标体系^[18],更全面地对开挖质量进行分析和评价。本文依据现行规范中的评价指标并结合三维激光扫描获取的点云数据特点,分别建立了一维、二维和三维开挖面质量粗糙度评价指标。

1.1 一维粗糙度指标

一维粗糙度参考节理岩体粗糙度(JRC)的定义,为裂隙两面壁对参考坐标的相对高差,利用分形的方法对假设剖面 and 实际剖面的折线长比值进行计

算^[19]。据此,在开挖面质量评价中,对任意开挖断面,测量其长度,以设计断面线长度为基准,将两者的比值定义为一维粗糙度,即:

$$R_{1i} = \frac{L_{ai}}{L_{di}} \quad (1)$$

式中: L_{ai} 为第*i*条断面线的实际长度; L_{di} 为第*i*条断面线的基准长度。

由此, R_{1i} 的值越趋于1,说明所取断面开挖越光滑,开挖质量越好。然而,一维粗糙度只能反映特定开挖断面的与设计断面的相对比值,不反映断面中超欠挖情况。为解决这种情况,建立二维粗糙度指标。

1.2 二维粗糙度指标

在地形分析中,最常用也是最简单的参数是均方根高度,即观测样本集的标准差:

$$\sigma_z = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - \bar{z}]^2 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

式中: n 为观测样本点的数量; \bar{z} 为所有观测样本点的平均地面高度。

一般地,地表越粗糙,均方根高度越大。但是边坡工程多为倾斜面,无统一基准平面,且开挖形成的表面伴有较大的随机成分^[20],均方根高度描述的是各孤立位置的特征。因此,结合开挖工程的特征对式(2)进行改进,以开挖面上测点到设计基准面的距离的均方差作为二维粗糙度评价指标,表达为:

$$R_{2i} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta z_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$\Delta z_i = \frac{Ax_i + By_i + Cz_i + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (4)$$

式中: n 为开挖面上所有有效测量点的数量; Δz_i 是实测开挖面上第*i*个测量点到设计基准面垂直距离; A, B, C, D 为基准面的平面方程 $Ax + By + Cz + D = 0$ 的系数。

工程中, Δz_i 应有正有负,正表示测点在设计平面之上,为欠挖值,负则为超挖值。当测点数量足够多且分布均匀时,上式能整体对开挖面的质量指标进行评价。根据超欠挖控制标准及 Δz_i 的值分别建立超挖集 $\{C_j\}$ 、欠挖集 $\{Q_k\}$ 、合格集 $\{H_m\}$ (其中 $j+k+m=n$),依据 Δz_i 值分别存入相应的集合中,可计算开挖质量分布、合格率等指标。将 $\{C_j\}$ 、 $\{Q_k\}$ 、 $\{H_m\}$ 中值分别带入式(3)即得开挖面的超挖粗糙度 R_c 、欠挖粗糙度 R_q 及合格粗糙度 R_h 三个子指标,也可依据 R_{2i} 对开挖面整体进行评价。

通过指标 R_{2i} 的计算和分析,可以得到开挖平面的质量评价量化结果,其值越小(趋于零),即实际开挖面上的测点与基准面越靠近,开挖质量越好。当测点数

量过少甚至缺失时,可使用三维粗糙度指标进行评价。

1.3 三维粗糙度指标

三维粗糙度是由测点生成开挖面三角网格模型,分析实际开挖面网格模型的面积之和与基准面的面积比。其构造过程如下:首先通过三维激光扫描仪对开挖面进行扫描,得到开挖面表面的空间点云数据,利用数据筛分得到基准面控制点范围以内的点云;编写三角网格模型算法基于点云数据生成开挖面整体三角网格模型,并计算网格模型中各三角形面积之和,与基准面面积进行比较,见图1。

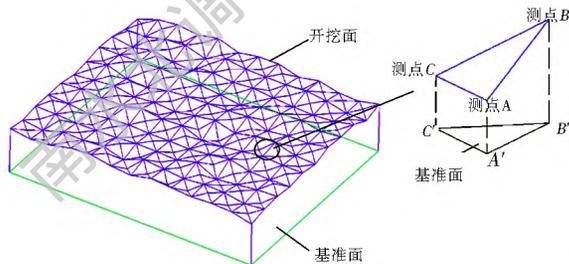


图1 三维粗糙度分析模型

Fig. 1 Model of 3D roughness analysis

图1中,上部为实际开挖面,下部为基准面,对开挖面三角网格模型中任一三角形 ABC ,其顶点坐标分别为 (x_a, y_a, z_a) 、 (x_b, y_b, z_b) 、 (x_c, y_c, z_c) ,依据公式 $S = \sqrt{l(l-a)(l-b)(l-c)}$ (l 为三角形周长; a, b, c 分别为三角形的三边周长)求得三角形面积为 S_{ABC} ,令 ABC 在设计开挖面上的投影为 $A'B'C'$,其面积为 $S_{A'B'C'}$,则三维粗糙度表示为:

$$R_r = \frac{S_{ABC}}{S_{A'B'C'}} \quad (5)$$

对于整个开挖面来说,其整体粗糙度可以表示为:

$$R_r = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n S'_i} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S_t} \quad (6)$$

式中: n 为三角网格模型中三角形的个数; S_i 为三角网模型中第 i 个三角形的面积; S_t 为设计开挖面面积。由上式分析可知, $R_r \in [1, \infty)$, R_r 越接近1,开挖面越光滑,开挖质量越好,反之质量越差。由定义可知,三维粗糙度指标能够覆盖整个开挖面,可弥补由于点缺失引起的指标不完整的情况。

2 基于粗糙度指标的开挖面数据分析与系统开发

在构建上述评价指标过程中,本文对基于点云数据的快速处理方法进行了研究,建立了基准面方程的快速拟合方法及三角网模型快速生成方法,同时开发了开挖面质量评价系统。

2.1 拟合基准面平面方程

在二维粗糙度计算中,建立准确的基准面平面方程是关键基础工作。边坡开挖中设计基准面一般为平面,基准面方程的一般表达式为:

$$Ax + By + Cz + D = 0, (C \neq 0)$$

$$\text{记: } a_0 = -\frac{A}{C}, a_1 = -\frac{B}{C}, a_2 = -\frac{D}{C}, \text{ 则平面方程}$$

变换为: $z = a_0x + a_1y + a_2$ 。

基准面平面方程可利用设计控制点 (x_i, y_i, z_i) , $i = 0, 1, \dots, n-1$ 拟合,应使 $S = \sum_{i=0}^{n-1} (a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)^2$ 最小,即:

$$\frac{\partial S}{\partial a_k} = 0, k = 0, 1, 2 \quad (7)$$

同时为满足工程需要,则应满足以下条件:

$$0 \leq S \leq \min(D_l^2, D_s^2) \quad (8)$$

式中: D_l, D_s 分别为最大欠挖和最大超挖控制标准值,通过对式(7)变换得到以下矩阵:

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum z_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

求解上述方程组得到 a_0, a_1, a_2 ,反向即可求得 A, B, C, D ,得到基准面方程。

2.2 构建基于逐点插入的开挖面点云三角网模型

三维粗糙度评价中,需要利用开挖面点云数据建立其三维模型并计算面积。利用激光扫描点云数据进行逆向建模是目前逆向工程领域研究的热点问题。通过点云数据逆向构建开挖面的三角网模型能够直观、准确地反映开挖面形态。三角网模型生成中运用最广泛的就是Delaunay算法,目前Delaunay算法主要为分割合并算法、逐点插入法,三角网生长算法等^[21-22]。结合边坡开挖面激光点云数据特点,本文采用逐点插入法构建开挖面网格模型,其基本步骤为:(1)读取开挖面扫描点坐标数据;(2)获取开挖面控制点范围内坐标数据并剔除范围外数据;(3)以X或Y坐标最小值为起点,搜寻获取点集外围边界;(4)依据边界及内部点生成三角网。逐点插入法示意图见图2。

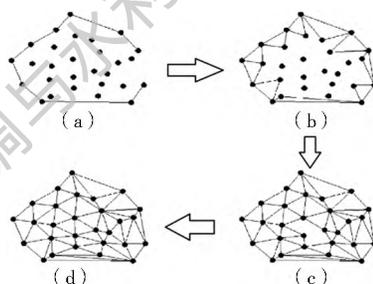


图2 逐点插入生成三角网示意图

Fig. 2 The diagram of generating triangular mesh point by point

2.3 建立边坡开挖质量评价系统

基于上述理论,开发完成了边坡质量评价系统。该系统可通过读取设计开挖基准数据、实际开挖面点云数据,分别从一维、二维、三维角度对开挖面质量进行评价,其中一维分析可生成任意位置、任意剖面断面对比图及粗糙度指标;二维分析可对控制点平面方

程快速拟合、自动剔除导入数据中控制点范围以外数据并得到开挖面测点超欠挖值方差,绘制超欠挖值分布图;三维分析可快速生成开挖面三角网模型,计算开挖表面基准投影关系比。该系统实现了数据的自动识别、处理与分析,可高效、实时地对开挖面质量进行评价。该系统二维分析界面见图 3。

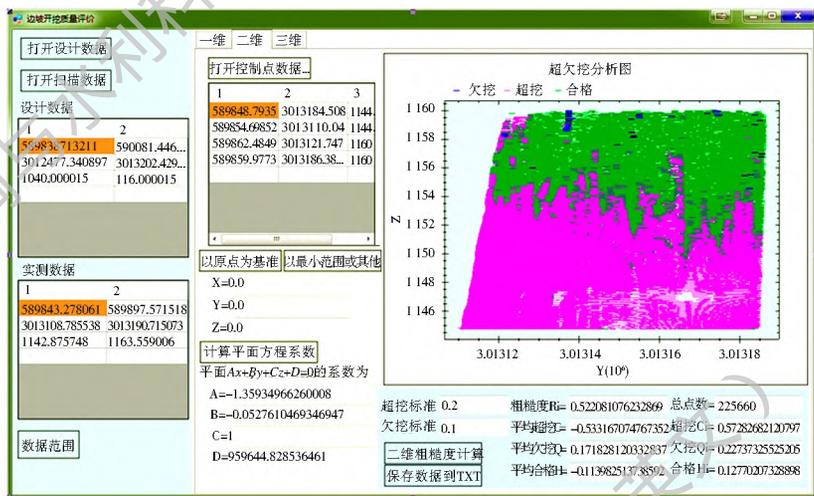


图 3 边坡开挖质量分析系统
Fig. 3 Slope excavation quality analysis system

3 工程应用研究

某水电工程位于西南地区,地质条件较差且坝址两岸岸坡呈不对称分布,左岸地形平顺、右岸陡峭,陡峭的地势为传统数据测量带来不便。为控制主体工程开挖质量,边坡开挖过程中采用 Leica HDS8800 三维激光扫描仪对开挖面进行实时数据采集。该扫描系统采用脉冲式激光扫描,水平视场 360°,垂直视场 80°,最大扫描距离 2 000 m,最大误差为 50 mm/2 000 m,扫描距离与精度能满足水电工程边坡开挖要求。在扫描过程中与全站仪后视配合,通过定位扫描仪坐标能直接将扫描对象的坐标转换为实际大地坐标,可减少后期数据配准及坐标转换工作量。为实现开挖过程的全记录,在工程施工过程中分别在开挖前、开挖后及处理完成后对开挖面进行扫描。

本文以右岸某开挖区某开挖面(见图 4)为例运用上述指标对质量进行分析。



图 4 开挖面示意图
Fig. 4 Excavation surface

3.1 开挖数据预处理

根据开挖面设计资料建立设计模型,通过点离散及插值的方法按高程等间距生成设计开挖面点云数据,见图 5。每条线间距为 1m,得到设计点约 8 万个。实际开挖面扫描后得到的点云数据见图 6,点数量约 50 万个。

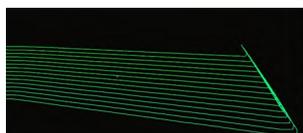


图 5 基准开挖面点云
Fig. 5 Reference excavation surface point cloud

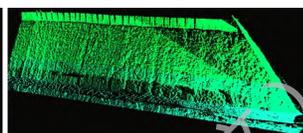


图 6 实际开挖面点云
Fig. 6 Actual excavation surface point cloud

3.2 一维粗糙度

从开挖面中任意选择 2 个连续断面进行分析,断面间距为 5 m,断面粗糙度结果见图 7,断面的分析结果见表 1。

表 1 一维粗糙度分析结果
Tab. 1 Analysis results of 1D roughness

| 桩号 | 项目 | | |
|---------|--------|--------|-------|
| | L_a | L_d | R_1 |
| K0+ 0.0 | 17.252 | 17.652 | 0.977 |
| K0+ 1.0 | 17.238 | 17.626 | 0.978 |
| K0+ 2.0 | 17.366 | 17.336 | 1.002 |
| K0+ 3.0 | 17.632 | 17.462 | 0.990 |

从图 7 中可知,开挖面在不同断面处断面形

状均不相同,各断面均存在一定程度的超挖,没有出现欠挖的情况,下部超挖量比上部大,计算得到一维粗糙度 R_1 在 1 附近,断面较光滑。可见一维

粗糙度指标可实现对是否存在超挖或欠挖的定性分析,不能得到定量分析结果,需要进一步补充评价指标。

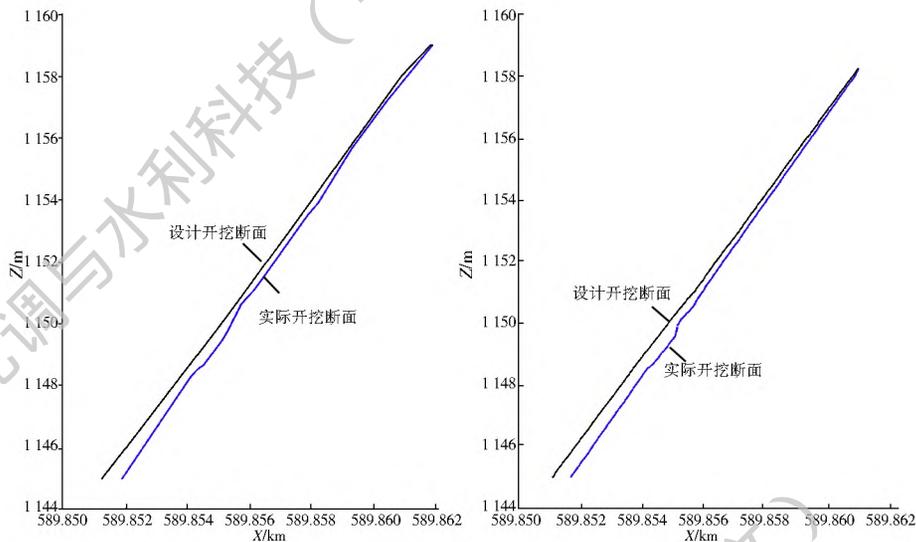


图 7 一维粗糙度断面分析
Fig. 7 One dimensional roughness section analysis

3.3 二维粗糙度

依据工程质量控制标准,本工程中边坡开挖最大允许超挖为 20 cm,最大允许欠挖为 10 cm。由设计资料可知,开挖面由 4 个控制点形成多边形坡面,其坐标见表 2。由 2.1 中的方法计算得到平面方程的系数分别为 $A = -1.35935880$, $B = -0.05276189$, $C = 1.0$, $D = 1018.85079581$,将控制点坐标 (x, y) 带入平面方程计算拟合平面与控制点 z 的误差,结果见表 2 中 Δz 列,误差均控制在 ± 0.001 m,拟合平面效果较好,能满足实际需要。

表 2 控制点坐标及误差分析

Tab. 1 Control point coordinates and error analysis m

| 序号 | 坐标 | | | |
|-------|----------|----------|-------|------------|
| | X | Y | Z | Δz |
| 11473 | 848.7935 | 184.5080 | 144.7 | 0.00089 |
| 11475 | 851.6852 | 110.0400 | 144.7 | -0.00089 |
| 11604 | 859.9773 | 186.3867 | 160.0 | -0.00102 |
| 11606 | 862.4847 | 121.7470 | 160.0 | 0.00102 |

根据拟合的平面方程,将开挖面的点数据点逐一带入式(4)中计算 Δz_i 并分别按其值计入 $\{C_j\}$ 、 $\{Q_k\}$ 、 $\{H_m\}$, 并进行统计分析,分析结果见图 8,其中粉色为超挖、红色为欠挖、绿色为合格。

由图 8 可知,上坡脚开挖面质量多为合格,边缘存在少量欠挖点,下坡脚部分全部超挖,而超挖情况较为严重,计算得到整体粗糙度 $R_2 = 0.522$,指标偏大,其中超挖粗糙度 0.573,欠挖粗糙度 0.227,合格点粗糙度 0.128,从粗糙度指标中可知,该开挖面超

挖情况较为严重。由图 8 可知,扫描获取的点数据分布不均匀,上部和左下角点密度较大,而右下角点较为稀疏,采用三维粗糙度进行进一步评价。

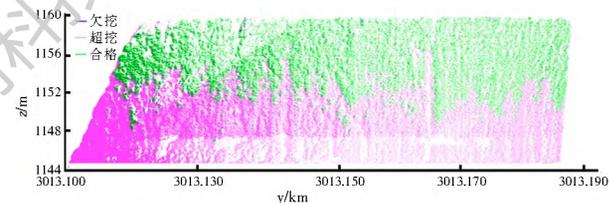


图 8 超欠挖分析结果
Fig. 8 Over/under excavation analysis results

3.4 三维粗糙度

三维粗糙度通过开挖面三角网的面积之和与原设计面积的比值来评判。依据设计控制点建立的开挖基准面模型,见图 9。根据扫描点云数据先剔除控制点以外的数据,然后运用 2.2 中方法生成开挖面三角网模型,见图 10。



图 9 基准面模型



图 10 三角网模型

Fig. 9 Reference surface model Fig. 10 Triangular mesh model

计算得到基准面面积 $S_t = 1321.752$ m²。点云数据处理后剩余点 210581 个,生成的三角网模型包含三角形 421070 个,计算得到面积和 $\sum_{i=1}^n S_i = 1456.553$ m²,三维粗糙度 $R_3 = 1.102$,说明此开挖面较基准面偏移较大,综合一维、二维粗糙度可知该

值偏大主要是由超挖引起,建议施工过程中应该注意控制开挖面轮廓,确保与设计方案的符合。

4 结论

三维激光扫描技术较传统的数据测量方式在范围、精度和效率方面有明显优势,且三维激光扫描能以非接触的方式对开挖面进行扫描,减少对施工的干扰和影响。现行规范中对边坡开挖质量检查主控项目和测点数量较少,难以完整地开挖面整体质量进行评价,且无法较好地反映出点云数据评价的优势和精度,本文建立的三项指标能分别从断面、超欠挖量及整体开挖面形态的角度对质量进行分析和评价,较传统的评价范围更全面,可在开挖过程中实时评价开挖面质量。开发的开挖面粗糙度评价系统能利用设计数据和实际开挖面扫描数据直接进行分析。通过对实际工程分析,三个指标可从不同维度对开挖质量进行评价,相比传统的方法更为直观和全面,在实际工程应用中能提高分析效率和精度,对工程有一定的指导意义。

参考文献(References):

- [1] DL/T 5389-2007. 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范. [S]. (DL/T 5389-2007. Construction technical specifications on rock foundation excavating engineering of hydraulic structure[S]. (in Chinese))
- [2] SL 631-2012. 水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准-土石方工程[S]. (SL 631-2012. Inspection and assessment standard for separated item project construction quality of water conservancy and hydroelectric engineering earth rock works [S]. (in Chinese))
- [3] 张志英, 何昆. 边坡监测方法研究[J]. 土工基础. 2006, 20(3): 82-84. ZHANG Z Y, HE K. A study on slope monitoring system and methods [J]. Soil Engineering and Foundation, 2006, 20(3): 82-84. (in Chinese)
- [4] 朱红兵, 孙志禹. 溪洛渡拱肩槽开挖质量控制与监测反馈[J]. 水利与建筑工程学报. 2010, 8(4): 29-32. ZHU H B, SUN Z Y. Quality control and monitoring for abutment groove excavation of Xiluodu Arch Dam[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(4): 29-32. (in Chinese)
- [5] 董秀军, 黄润秋. 三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用[J]. 岩石力学与工程学报. 2006, 25(S2): 3629-3635. (DONG X J, HUANG R Q. Application of 3D laser scanning technology to geologic survey of high and steep slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2006, 25(S2): 3629-3635. (in Chinese))
- [6] DU J, TENG H. 3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation[J]. Automation in Construction. 2007, 16(5): 657-663. http://dx. DOI: org/10.1016/j.autcon.2006.11.002.
- [7] 杨天俊. 三维激光扫描技术在拉西瓦水电站工程中的应用[J]. 西北水电. 2013, 1(1): 4-6. YANG T J. Application of 3D laser scanning technology in construction of Laxiwa Hydropower Project [J]. Northwest Water Power, 2013, 1(1): 4-6. (in Chinese)
- [8] 胡奎, 王丽英. 三维激光扫描技术在精细地形图绘制中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版). 2013, 32(7): 953-956. (HU K, WANG L Y. Application of three dimensional laser scanning technology in fine topographic map [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2013, 32(7): 953-956. (in Chinese))
- [9] 托雷, 康志忠, 谢远成, 等. 利用三维点云数据的地铁隧道断面连续截取方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版). 2013, 38(2): 171-175. (TUO L, KANG Z Z, XIE Y C, et al. Continuously vertical section abstraction for deformation monitoring of subway tunnel based on terrestrial point clouds[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2013, 38(2): 171-175. (in Chinese))
- [10] HAN S, CHO H, KIM S, et al. Automated and efficient method for extraction of tunnel cross sections using terrestrial laser scanned data[J]. Journal of Computing in Civil Engineering. 2013, 27(3): 274-281. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000211.
- [11] LEE J, SON H, KIM C, et al. Skeleton based 3D reconstruction of as built pipelines from laser scan data[J]. Automation in Construction. 2013, 35: 199-207. http://dx. DOI: org/10.1016/j.autcon.2013.05.009
- [12] Mart nez J, SORIA-MEDINA A, ARIAS P, et al. Automatic processing of Terrestrial Laser Scanning data of building facades[J]. Automation in Construction. 2012, 22: 298-305. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.09.005.
- [13] 胡超, 周宜红, 赵春菊, 等. 基于三维激光扫描数据的边坡开挖质量评价方法研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2014, 33(S2): 3979-3984. (HU C, ZHOU Y H, ZHAO C J, et al. Slope excavation quality evaluation based on three dimensional laser scan data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2014, 33(S2): 3979-3984. (in Chinese)). DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.074.
- [14] HU C, ZHOU Y, ZHAO C, et al. Slope excavation quality assessment and excavated volume calculation in hydraulic projects based on laser scanning technology [J]. Water Science and Engineering. 2015, 8(2): 164-173. http://dx. DOI: org/10.1016/j.wse.2015.03.001.
- [15] 吕悦来, 李广毅. 地表粗糙度与土壤风蚀[J]. 土壤学进展. 1992, 6(6): 38-42. (LV Y L, LI G Y. Surface roughness and soil erosion [J]. Progress in Soil Science. 1992, 6(6): 38-42. (in Chinese))
- [16] 江冲亚, 方红亮, 魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述[J]. 地球科学进展. 2012, 27(3): 292-303. (JIANG C Y, FANG H L, WEI S S. Review of land surface roughness parameterization study[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(3): 292-303. (in Chinese))
- [17] 李晓洁, 赵凯, 郑兴明. 基于激光三角法的地表粗糙度测试仪的研制[J]. 农业工程学报. 2012, 28(8): 116-121. (LI X J, ZHAO K, ZHENG X M. Development of surface roughness tester based on laser triangulation method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 116-121. (in Chinese))

(下转第164页)

- study on ground displacement and stress during and after the installation of deep circular diaphragm walls and soil excavation[J]. Computers & Geotechnics, 2008, 35(5): 791-807. DOI: 10.1016/j.compgeo.2007.11.001.
- [14] CHEN J J, LEI H, WANG J H. Numerical analysis of the installation effect of diaphragm walls in saturated soft clay[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(6): 981-991. DOI: 10.1007/s11440-013-0284-x.
- [15] CARRUBBA P, COLONNA P. A comparison of numerical methods for multistaged walls[J]. Computers & Geotechnics, 2000, 27(2): 117-140. DOI: 10.1016/S0266-352X(00)00007-0.
- [16] 郝峰. 高压旋喷桩复合土钉墙 Plaxis 有限元分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(9): 52-55. (HAO F. Plaxis finite element analysis on supporting structure with high pressure jet grouting pile and composite soil nailing wall[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling & Tunneling), 2009, 36(9): 52-55. (in Chinese))
- [17] 刘震国. 高压旋喷桩止水帷幕在深基坑支护中的应用[J]. 建筑机械化, 2012, 33(S1): 68-71. (LIU Z G. High pressure chemical churning pile water stop curtain applied in deep foundation pit[J]. Construction Mechanization, 2012, 33(S1): 68-71. (in Chinese))
- [18] 李龙舟. 基于 ABAQUS 软件的覆盖层中塑性混凝土防渗墙的应力变形分析[J]. 科技创新与应用, 2014(2): 1-3. (LI L Z. Deformation and stress analysis of plastic concrete cut off wall in overburden layer with ABAQUS software[J]. Technology Innovation and Application, 2014(2): 1-3. (in Chinese))
- [19] 朱守鹏. 接触算法在桩土结构相互作用中的应用[D]. 柳州: 广西工学院, 2012. (ZHU S P. Application of contact algorithm in the pile soil structure interaction[D]. Liuzhou: Guangxi University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [20] 何良德, 苏兴海, 徐笛清, 等. 基于修正剑桥渗流耦合模型的闸室有限元分析[J]. 中国港湾建设, 2013(3): 16-21. (HE L D, SU X H, XU D Q, et al. Finite element analysis of chamber walls of ship locks based on modified cam clay model coupling with biot theory[J]. China Harbour Engineering, 2013(3): 16-21. (in Chinese))
- [21] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004-1017. DOI: 10.1139/cgj35-6-1004.

(上接第 156 页)

- [18] 卞小林. 地表粗糙度的计算研究[J]. 通化师范学院学报, 2008, 29(8): 111-113. (BIAN X L. Surface roughness calculation study[J]. Journal of Tonghua Normal University, 2008, 29(8): 111-113. (in Chinese))
- [19] SEIDEL J P, HABERFIELD C M, 杨翠珠. 节理粗糙度研究的新进展[J]. 地质科学译丛, 1996(2): 70-78. (SEIDEL J P, HABERFIELD C M, YANG C Z. Towards an understanding of joint roughness[J]. Journal of Geoscience Translations, 1996, 13(2): 70-78. (in Chinese))
- [20] 张慧娟, 孙宇瑞, 林剑辉, 等. 不同粗糙度尺度下预测表层土壤孔隙率量化指数比较研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(1): 69-76. (ZHANG H J, SUN Y R, LIN J H, et al. Comparative study on predicting porosity by different roughness indices[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(1): 69-76. (in Chinese))
- [21] 胡金星, 潘懋, 马照亭, 等. 高效构建 Delaunay 三角网数字地形模型算法研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39(5): 736-741. (HU J X, PAN M, MA Z T, et al. Study on faster algorithm for constructing Delaunay triangulation's DTM[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2003, 39(5): 736-741. (in Chinese))
- [22] 黄培之. 基于等高线特性的三维表面重建方法的研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(8): 668-672. (HUANG P Z. 3D Terrain surface reconstruction with contour data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(8): 668-672. (in Chinese))