

基于 ArcEngine 与 IDW 法的围岩亚级分级研究

周洪文,杜玉星,任高峰,王玉杰

(武汉理工大学资源与环境工程学院,武汉 430070)

摘要:为减少地铁隧道施工中经常出现的围岩坍塌、透水等地质灾害,分析施工段围岩地质情况,采用一种基于权重的岩体基本质量亚级分级方法对围岩进行分级,结合 C#与 ArcEngine 的二次开发,根据距离高次方反比法原理,利用已有地质钻孔数据,设计出对围岩进行等级估算和三维分级显示渲染功能的系统,并对该亚级分级方法的准确性进行验证。实验结果表明,基于权重的岩体基本质量亚级分级方法对隧道围岩分级更精确,具有较好的实用性。设计的系统对围岩等级估算的反算误差为 8.82%,与实际围岩开挖后测得的信息对比误差为 13%,三维分级渲染结果与实际情况较为接近,该方法可以为地铁隧道施工提供参考。

关键词:地铁隧道;围岩亚级分级;C#技术;ArcEngine 二次开发;距离权重反比插值;三维可视化

中文引用格式:周洪文,杜玉星,任高峰,等.基于 ArcEngine 与 IDW 法的围岩亚级分级研究[J].计算机工程,2016,42(1):316-321.

英文引用格式:Zhou Hongwen, Du Yuxing, Ren Gaofeng, et al. Research on Surrounding Rock Sub Grade Based on ArcEngine and IDW Method[J]. Computer Engineering, 2016, 42(1): 316-321.

Research on Surrounding Rock Sub Grade Based on ArcEngine and IDW Method

ZHOU Hongwen, DU Yuxing, REN Gaofeng, WANG Yujie

(School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

【Abstract】 In order to reduce the surrounding rock collapse, flooding and other geological disasters that often happen in subway tunnel construction and to get a clearer understanding about the geological conditions of the surrounding rock in the construction area, this paper adopts a basic quality sub grade of rock mass method based on the weight to classify the surrounding rock, combining C# with the secondary development of ArcEngine to design a system according to the principle of Inverse Distance Weighted (IDW) to estimate the grade and realize the 3D hierarchical display and rendering of the surrounding rock based on the existing drilling data. At the same time, this system can be used to verify the accuracy of the sub grade method. Experimental results indicate that the basic quality sub grade of surrounding rock method based on the weight is more precisely in the classification of tunnel surrounding rock and has better practicability. The inverse error of system estimation in the classification of the surrounding rock is 8.82%, compared with the excavation revealed information, the difference is 13%, the 3D hierarchical display and rendering of the surrounding rock is closer to the actual situation, which can provide a reference for the subway tunnel construction.

【Key words】 subway tunnel; surrounding rock sub grade; C# technology; ArcEngine secondary development; Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation; 3D visualization

DOI:10.3969/j.issn.1000-3428.2016.01.056

1 概述

由于对隧道围岩情况的了解不够详细,施工过程中经常会出现塌方、透水等事故,轻者造成工期延误、设备损坏等经济损失,重者造成人员伤亡等重大事故^[1]。如果能提前了解隧道的围岩情况并采取有

效措施就可以减少或避免类似事故的发生。围岩的基本质量分级是决定地铁隧道设计和施工最关键的因素之一,是评价隧道围岩稳定性的重要参数,也是隧道支护方案设计和确定施工工艺的主要依据^[2-4]。因而对围岩进行分级可以有效减少隧道施工中发生事故的概率。现行铁路隧道围岩分级方法中某些围

基金项目:国家自然科学基金资助项目“露天矿精细化开采时空原理研究”(51104112);武汉市科学技术局基金资助项目“基于 Google earth 的地下工程地质预报信息管理系统研究”(2013030409020108)。

作者简介:周洪文(1963-),男,副教授、硕士,主研方向为系统建模仿真;杜玉星,硕士研究生;任高峰,副教授;王玉杰,教授。

收稿日期:2014-10-31 **修回日期:**2015-01-04 **E-mail:**296660668@qq.com

岩级别跨度较大,不能满足实际施工的需要^[5],且分级结果只能以 Excel 表格或者二维图像的方式进行表达,使人很难直观地了解围岩分级后的三维真实情况。鉴于此,本文探讨一种基于权重的围岩亚级分级方法,采用 Google SketchUp 和 ArcGIS 软件建造隧道围岩和地质钻孔三维模型,导入到利用基于 ArcEngine 和距离权重反比 (Inverse Distance Weighted, IDW) 法开发出的系统来验证该亚级分级方法的准确性,同时根据已有地质钻孔数据估算出该段围岩等级分布,并进行围岩的三维显示及分级渲染。

2 关键技术

2.1 基于权重的岩体基本质量亚级分级

岩体基本质量分级是根据岩体基本质量指标 (BQ) 来确定的^[6]。岩体基本质量指标可根据岩石坚硬程度的定量指标,即岩石单轴饱和抗压强度 R_c 的兆帕值和岩体完整程度 K_v 按式(1)计算得出^[7]:

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v \quad (1)$$

岩体基本质量分级表如表 1 所示。

表 1 岩体基本质量分级

岩体基本质量级别	岩体基本质量指标 (BQ)
I	> 550
II	451 ~ 550
III	351 ~ 450
IV	251 ~ 350
V	≤ 250

岩体基本质量指标 (BQ) 是根据岩石坚硬程度和岩体完整程度进行计算的,根据地铁隧道围岩具体情况以及施工特点,岩体基本质量亚级分级将在岩体基本质量分级的基础上利用岩石坚硬程度、岩体完整程度以及地下水、主要软弱结构面产状和初始应力状态 5 个因素共同决定^[8]。根据各个因素对围岩质量的贡献并结合具体地下工程给每个因素设定一个权重,利用各因素的基本值和其权重计算出围岩亚级等级^[9-10]。计算过程中,将岩石坚硬程度和岩体完整程度合并成一个因素,即岩体基本质量指标 (BQ),给与较高权重 0.4,其他 3 个因素都给与 0.2 的权重。因素权重指标如表 2 所示。

表 2 岩体基本质量亚级分级因素权重分配

因素名	权重
岩体基本质量指标	0.4
地下水	0.2
主要软弱结构面产状	0.2
初始应力状态	0.2

为消除变量之间在数量级和量纲上的差异,采用 0-1 标准化对岩体基本质量指标、地下水、主要软弱结构面产状与初始应力状态的基本值进行预处理,即最有利的为 1,最不利的为 0。其中,岩体基本

质量指标标准化可通过式(2)实现。

$$A = \frac{BQ - BQ_{\min}}{BQ_{\max} - BQ_{\min}} \quad (2)$$

其中, A 为要素标准化后的值; BQ 为岩体基本质量指标; BQ_{\min} 为对应级别岩体基本质量指标的最小值; BQ_{\max} 为该级岩体基本质量指标的最大值。即将岩体基本质量指标减去该级岩体基本质量指标的最小值再除以该级的区间范围,就可以得到该岩体基本质量指标的标准化值。其他 3 个因素也可以通过类似方法进行标准化,将所有变量标准化后按照式(3)计算该岩体的亚级分级级别。

$$D = \sum_{i=1}^n A_i \times q_i \quad (3)$$

其中, A_i 为对应要素标准化后的值; q_i 为对应要素的权重,由于本研究中只有 4 个要素,因此 $n = 4$; D 即为得出的质量分级标准,当 D 大于或等于 0.5 时,则该岩体级别为岩体基本质量分级中较高级,用 X_1 表示,否则为较低级,用 X_2 表示, X 代表围岩基本质量级别。

为了便于对围岩亚级等级进行更加准确的估算,将所有亚级级别按照式(4)进行 100 分制标准化。

$$T = B_i + \frac{D_i}{0.5} \times 10 \quad (4)$$

其中, T 为 100 分制标准化后的结果; B_i 为 100 分制标准化每一级的最小分界值, B_i 可用式(5)表示。

$$B_i = 100 - 20i \quad (5)$$

可以证明,将岩体基本质量亚级级别按照 100 分制标准化后不仅保留了之前的亚级分级的详细信息,还可以得到更加精确的围岩亚级分级估算结果。例如:没有进行 100 分制标准化之前, $D_1 = 0.1$ 与 $D_1 = 0.4$ 同属于 I_2 级别,估算过程中没有区别;若进行标准化, $D_1 = 0.1$ 的标准化结果为 82, $D_1 = 0.4$ 的标准化结果为 88,这样不仅没有改变之前的亚级级别,而且可以更加准确地对未知围岩亚级级别进行估算。得出最终的岩体基本质量亚级分级如表 3 所示。其中,各级指标最小值为百分制标准化后的数据。

表 3 岩体基本质量亚级分级

岩体基本质量级别	岩体基本质量指标 (BQ)	岩体基本质量亚级级别	亚级分级指标 D	各级指标最小值
I	> 550	I_1	$D_I \geq 0.5$	90
		I_2	$D_I < 0.5$	80
II	550 ~ 451	II_1	$D_{II} \geq 0.5$	70
		II_2	$D_{II} < 0.5$	60
III	450 ~ 351	III_1	$D_{III} \geq 0.5$	50
		III_2	$D_{III} < 0.5$	40
IV	350 ~ 251	IV_1	$D_{IV} \geq 0.5$	30
		IV_2	$D_{IV} < 0.5$	20
V	≤ 250	V_1	$D_V \geq 0.5$	10
		V_2	$D_V < 0.5$	0

2.2 距离高次方反比法

IDW 法是一种权重平均插值法^[11]。待估属性点 Y 的估计值 $P(Y)$ 可通过已知测点 $P(X_i)$ 的线性和求得,用式(6)表示为:

$$P(Y) = \sum_{i=1}^n P(X_i) \times q_i \quad (6)$$

其中, n 为与待估属性点 Y 指定距离范围之内的已知属性点的个数; q_i 为根据距离多次方反比法求得的已知点的权重,用式(7)表示为:

$$q_i = \frac{\left(\frac{1}{d_i^k}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^k}\right)} \quad (7)$$

其中, d_i 为待估属性点 Y 与已知测点之间的距离。可以知道, k 值越大,则离待估属性点 Y 越近的已知点所占的权重越大,所有权重之和为 1。

通过以上分析可知,该方法是一种估测值全部来源于已知点信息的一种较精确的空间预测方法^[12]。经过理论分析与实验研究得知,对围岩等级估算采用较高的幂次(大于或等于 139)可以得到较理想的结果。

2.3 IDW 法计算步骤

IDW 法计算步骤如下:

(1) 假三维变真三维

由于 ArcScene 并不支持真三维,因此必须给所有要素都加上一个高程字段 *newheight* 来解决 *IArea block = mFeature[i].Shape as IArea* 中的 *block* 没有高程属性的问题^[12]。加上 *newheight* 字段之后就可以通过要素的 x, y 坐标加上 *newheight* 属性来得到要素的三维坐标。

(2) 获取距离数组

由于计算中会多次用到未知属性点到已知测点间的距离,因此可以先将距离数组求出并保存在内存中,以提高后期计算速度。距离数组在计算机中的计算公式如式(8)所示。

$$\text{arrayDis}[i, j] = \text{Math.Sqrt} \left(\text{Math.Pow}(x_j - x_i, 2) + \text{Math.Pow}(y_j - y_i, 2) + \text{Math.Pow}(z_j - z_i, 2) \right) \quad (8)$$

其中, x_i, y_i, z_i 为未知属性点三维坐标; x_j, y_j, z_j 为已知测点三维坐标; *arrayDis* 为所得的距离数组矩阵。

(3) 估算岩体质量等级

由于每个未知等级属性点在给定距离范围内的已知测点数目不可能完全相同,因此必须采用泛型集合 *Dictionary <int, string> dicDis* 来储存动态非固定长度的未知属性点到已知测点间的距离数据,相对于一个大型多维数组而言,这样不仅可以节约大

量内存空间,还可以极大提高计算速度^[13]。根据距离高次方反比法原理利用求得的泛型集合 *dicDis* 计算每个未知等级属性点指定范围内的所有已知测点的权重,并通过已知测点信息来计算未知等级属性点的岩体质量等级。

2.4 交叉验证误差法

交叉验证误差法^[14-15]是通过已经估算出的未知属性点再次利用 IDW 法来反算已知测点并进行误差计算,从而得出估算精度的一种方法。交叉验证误差公式如下:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{Q_k} \times (Q_k - P_k) \times 100\% \quad (9)$$

其中, P_k 为已知测点的属性值; Q_k 为反算的已知测点的属性值; n 为已知测点的个数; T 为估算精度。

3 模型构建

结合 ArcGIS 与 Google SketchUp 建立围岩三维立体模型,具体建模步骤如图 1 所示。

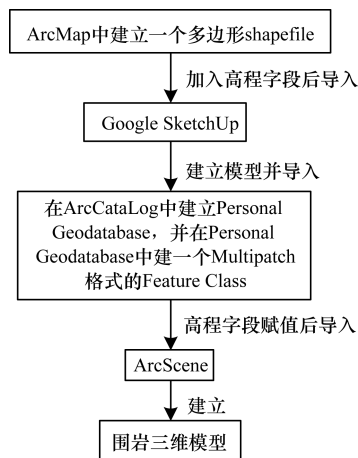


图 1 围岩三维模型建模过程

建立好的围岩三维立体模型如图 2 所示。

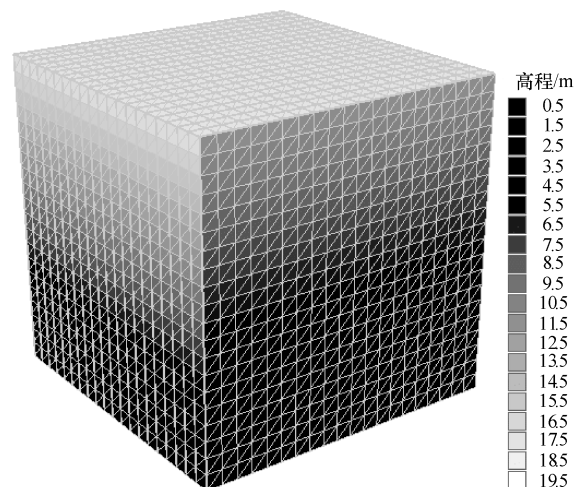


图 2 围岩三维模型

4 系统开发与设计

根据距离高次方反比法原理,围岩分级估算系统的开发与设计可按图 3 的过程进行。

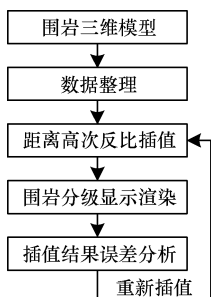


图 3 系统的开发与设计过程

该开发与设计的详细说明如下:

(1) 数据整理

提取已有地质钻孔的岩石坚硬程度、岩体完整程度以及地下水、主要软弱结构面产状和初始应力状态 5 个因素的数据,并按照基于权重的岩体基本质量亚级分级方法进行分级。

(2) 距离高次方反比法插值

采用距离高次方反比法利用建立好的地质钻孔模型对整个围岩区域进行插值,考虑到岩层分层特性,可以对水平方向适当加大权重。

(3) 插值结果三维显示渲染

对插值的结果进行三维显示以及渐变色分级渲染,达到更加直观地了解围岩质量等级分布情况的效果。

(4) 误差分析

采用交叉验证误差法,与 Surpac 估算的结果进行对比法以及与实际围岩开挖后揭示信息进行比较的方法,计算系统估算误差系统主界面等级估算与渲染窗体,如图 4 所示。

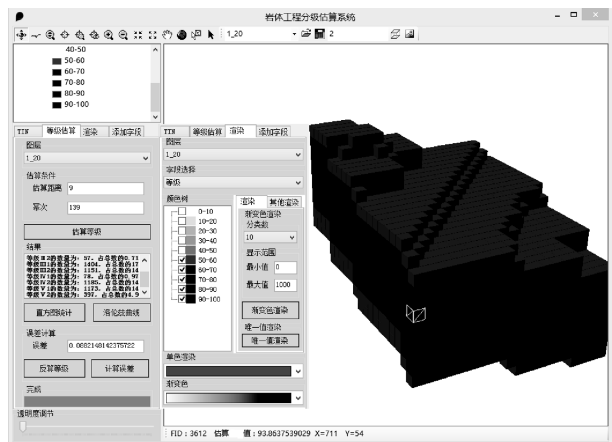


图 4 岩体工程分级估算系统主界面

5 实例分析

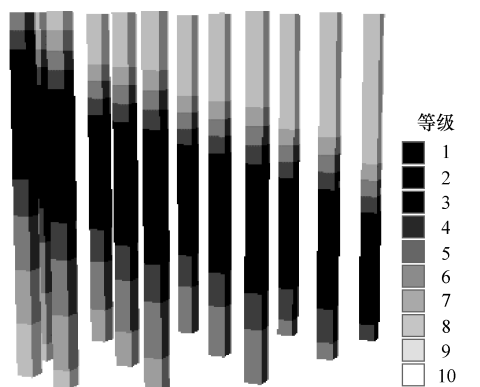
5.1 系统实现的软硬件环境

本文系统在微软 Windows 8 操作系统上利用 Microsoft Visual Studio 2010 作为系统开发环境,采用 C#结合 ArcEngine 的二次开发对系统进行设计,以 SQL Server 2008 对系统数据进行管理,隧道围岩和地质钻孔三维模型采用 Google SketchUp 和 ArcGIS 软件进行构建。

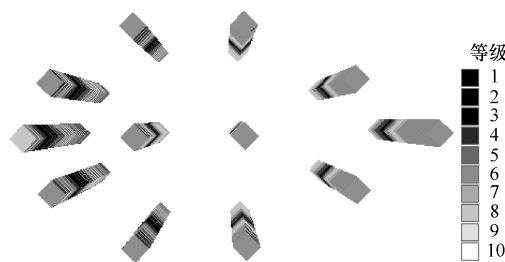
本文系统能够在 CPU 主频为 2.0 GHz 或以上,内存为 2 GB 或以上,硬盘为 80 GB 或以上的硬件环境下进行实现并能流畅的运行。

5.2 实验数据准备

本文原始数据来源于武汉市科学技术局“基于 Google Earth 的地下工程地质预报信息管理系统研究”项目,原始数据以 Access 数据库的格式进行保存。系统实验区为武汉地铁二号线 X 区域,并选取了 12 个地质钻孔数据作为系统的实验数据,根据基于权重的岩体基本质量亚级分级方法对其进行分级后,整理数据建立三维模型,分级渲染后的地质钻孔三维模型如图 5 所示。



(a)地质钻孔模型侧视图

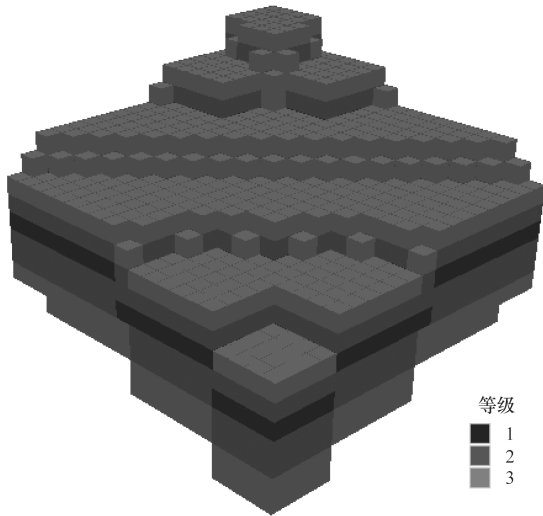


(b)地质钻孔模型俯视图

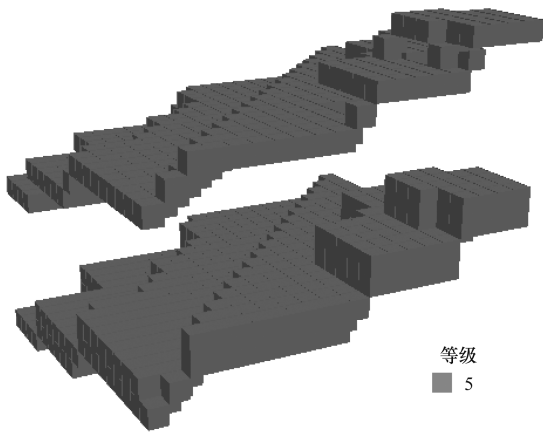
图 5 地质钻孔模型

5.3 等级估算与误差分析

将钻孔模型导入本文系统对该区域隧道围岩进行等级估算和分级渲染,并对结果进行误差分析。估算结果分级渲染的局部三维效果如图 6 所示。



(a)估算结果等级为1-3的局部三维效果图



(b)估算结果等级为5的局部三维效果图

图6 估算结果分级渲染的局部三维效果图

5.3.1 交叉验证方法估算误差

在保证施工区域每个未知等级属性点至少要通过4个地质钻孔数据进行估算的前提下,采用不同估算条件对围岩质量等级进行多次估算,综合考虑地质钻孔分布、估算误差与估算结果的三维分级渲染显示效果,找出最佳插值距离和最佳插值幂次。

由于要满足施工区域每个未知等级属性点至少要通过4个地质钻孔数据进行估算,根据钻孔在围岩中的分布情况可知估算距离至少为9m。采用插值距离为9m对围岩进行多次不同幂次插值,插值估算误差如图7所示。

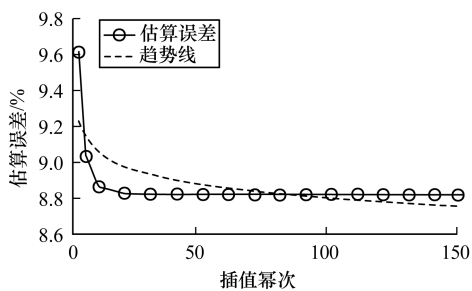


图7 插值距离为9m的各插值幂次估算误差

由图7可知,当估算幂次大于20时估算误差基本保持不变,但此时估算结果的三维分级渲染显示效果并不理想,继续增大插值幂次,当幂次为139时,可以得到最理想的三维分级渲染显示效果且与实际情况较为接近,当幂次继续上升时,估算结果基本上保持不变。由此可知,插值幂次为139时可以得到较好的插值效果。

当插值幂次为139时,采用5m~40m的插值距离对围岩进行插值,插值估算误差如图8所示。

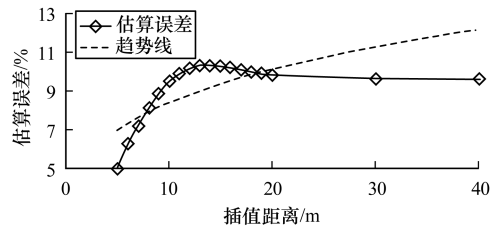


图8 插值幂次为139的各插值距离估算误差

由图8可知,当插值幂次为139时,估算误差随着插值距离的增大先增大后减小并趋于平稳,当插值距离小于9m时,虽然估算误差较小,但是无法满足施工区域每个未知等级属性点至少要通过4个地质钻孔数据进行估算的条件,而当插值距离大于9m时,虽然估算结果的三维分级渲染显示效果都很理想,但是误差会比较大,且计算耗时会比较长。综合考虑误差与估算结果两方面因素,可以判断9m是一个较合适的插值距离。由以上分析可知,在最佳插值距离(9m)与最佳插值幂次(139)的插值条件下,交叉验证方法得到的误差为8.82%,且在各种估算条件下,估算误差都可以保证在11%以下。

5.3.2 与其他软件估算结果对比

将地质钻孔数据导入到Surpac并采用普通kriging法进行插值估算,将估算结果以ArcSence能够接收的数据格式导入到本文系统与系统估算结果进行比较。系统等级估算结果的三维分级渲染图与Surpac估算的结果利用系统进行三维分级的渲染图对比如图9、图10所示。

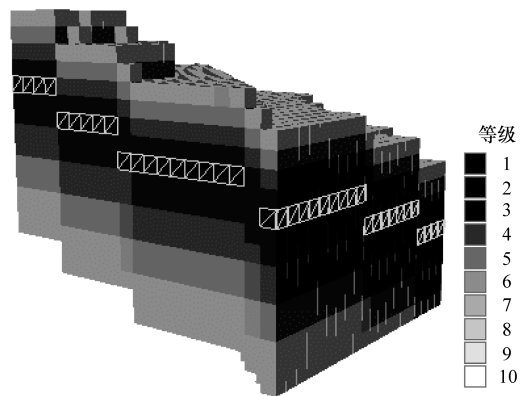


图9 本文系统等级估算结果的三维分级渲染图

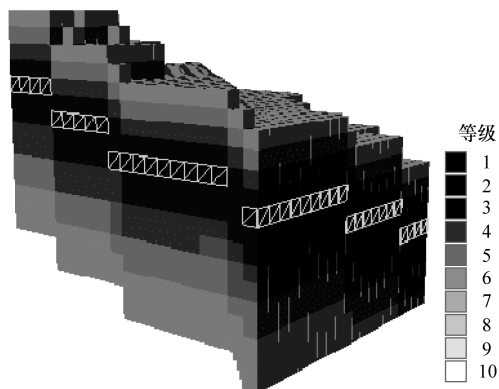


图 10 Surpac 等级估算结果的三维分级渲染图

由图 9、图 10 可知,系统估算结果与 Surpac 插值结果除了少数块体不一致外,大体上非常接近,IV₁, IV₂, V₁, V₂ 级围岩的估算结果近似程度达 95.5%,总

体相似度为 86.7%。利用 Surpac 插值估算的反算误差为 15.60%,比系统 8.82% 的估算误差大。

5.3.3 与开挖后揭示信息的对比

将开挖后的围岩取样按照基于权重的岩体基本质量亚级分级方法进行分级,将分级结果与系统估算结果进行对比,如表 4 所示。从表 4 可以看出,岩体基本质量实际级别与估算级别完全一致,且岩体基本质量亚级实际级别与估算级别也具有较高的一致性。对 100 个采样点进行采样并计算岩体级别后可得到岩体基本质量实际级别与估算级别的一致性高达 95% (未进行亚级分级时为 89%),基本质量亚级实际级别与估算级别的一致性高达 87%,一方面说明了基于权重的岩体基本质量亚级分级方法具有较高的准确性,同时也反映出系统具有较高的可靠性。

表 4 估算结果与开挖后揭示信息对比

编号	岩体基本质量指标 (BQ)	岩体基本质量指标 (BQ) 0-1 标准化值	地下水 0-1 标准化值	主要软弱结构面产状 0-1 标准化值	初始应力状态 0-1 标准化值	岩体基本质量亚级分级指标 D	岩体基本质量亚级实际级别	估算亚级级别百分制 标准化/%	岩体基本质量亚级估算级别
a	532.5	0.825	0.700	0.720	0.603	0.735	II ₁	75.3	II ₁
b	564.6	0.144	0.850	0.830	0.700	0.534	I ₁	89.6	I ₂
c	440.0	0.900	0.650	0.532	0.563	0.709	III ₁	55.6	III ₁
d	398.4	0.484	0.675	0.420	0.322	0.477	III ₂	47.5	III ₂
e	317.6	0.676	0.545	0.320	0.235	0.490	IV ₂	30.1	IV ₁

6 结束语

本文对现行铁路隧道围岩分级方法围岩级别跨度较大,且在对围岩级别进行计算时无法计算钻孔,附近没有钻孔控制岩体的岩体级别,难以实现钻孔区域围岩三维分级可视化的问题进行了分析。在上述分析基础上,提出一种基于权重的岩体基本质量亚级分级方法,结合 C# 与 ArcEngine 开发的系统对该方法的准确性进行了验证,并利用该方法计算的结果对隧道围岩进行分析。实验结果表明,基于权重的岩体基本质量亚级分级方法可以准确地对围岩进行分级,且系统能够实现对没有钻孔控制岩体的岩体级别进行较准确的估算,同时也能够实现对钻孔区域围岩的三维分级可视化。下一步将对该亚级分级方法中的分级因素与权重进行具体分析,以应用到更广泛的工程建设范围中。

参考文献

[1] 夏元友,卢清,刘祯. 基于 GIS 的三峡库区滑坡稳定性评价系统[J]. 计算机工程,2009,35(21):242-243,246.
 [2] 牛富生,马亢,郭永建. 铁路隧道围岩分级细化研究及应用[J]. 土木建筑与环境工程,2013,35(6):81-86.
 [3] 任洋. 高地应力公路隧道施工阶段围岩分级方法研究及应用[D]. 成都:成都理工大学,2009.
 [4] 闫明. 基于系统聚类分析的公路隧道围岩分级方法

研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
 [5] 王明年,刘大刚,刘彪,等. 公路隧道岩质围岩亚级分级方法研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(10):1590-1594.
 [6] 王小江. 工程岩体基本质量指标和分级档次的研究[D]. 沈阳:东北大学,2011.
 [7] 申艳军,徐光黎. 国标岩体分级标准 BQ 的图解法表示[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(S2):3659-3665.
 [8] 臧秀平,阮含婷,李萍,等. 岩体分级考虑因素的现状与趋势分析[J]. 岩土力学,2007,28(10):2245-2248.
 [9] Hoseinie S H, Ataei M, Osamloo M. A New Classification System for Evaluating Rock Penetrability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2009,46(8):1329-1340.
 [10] Tsiambaos G, Saroglou H. Excavatability Assessment of Rock Masses Using the Geological Strength Index (GSI) [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2010,64(1):13-27.
 [11] 李章林,张夏林. 距离平方反比法矿产资源储量计算模块设计与实现[J]. 地质与勘探,2007,43(6):92-97.
 [12] 周洪文,杜玉星,任高峰,等. 基于 ArcEngine 与 IDW 法的矿石储量分析研究[J]. 武汉理工大学学报,2014,36(2):115-119.
 [13] 张昊,王魁生,方明. 基于泛型技术的导航树生成策略[J]. 计算机工程,2009,35(9):55-56,59.
 [14] 姚雯,陈小前,罗文彩,等. 基于部分交叉验证的多准则序贯近似建模方法[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(7):1462-1467.
 [15] 徐晨,曹辉,赵晓. 基于 SVM 的说话人识别参数选择方法[J]. 计算机工程,2012,38(21):175-177.

编辑 顾逸斐