

基于可拓学理论的黄土隧道围岩分级方法研究^{*}

薛晓辉^{1,2}, 张军², 姚广²

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术
交通行业重点实验室, 太原 030006)

摘 要:为解决现有黄土隧道围岩分级方法理论依据不足的问题,在总结分析黄土隧道围岩力学性能、构造特性评价指标的基础上,利用可拓学理论建立关联函数,解决各评价指标之间的融合问题,对黄土隧道围岩分级做一些探索性的工作,以为黄土隧道的设计与施工提供理论依据。研究表明:基于可拓学理论的黄土隧道围岩分级方法综合考虑了黄土的强度性质、变形性质、各向异性、构造特性,使得其分级结果更加客观、准确;利用可拓围岩分级方法求得的掌子面围岩的关联度不仅可判定掌子面围岩级别,而且其数值大小可定量反映掌子面围岩质量好坏程度;可拓围岩分级结果与现场围岩级别分类的结果基本一致,存在的分级误差基本属于“亚级”之间的差异,未出现“跳级”现象;且该结果与规范中围岩分类结果相比,其准确度更高。

关键词: 黄土隧道; 围岩分级; 可拓学理论

中图分类号: U452

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)03-0651-07

Study on Loess Tunnel Surrounding Rock Classification Method Based on Extension Theory

Xue Xiaohui^{1,2}, Zhang Jun², Yao Guang²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, P.R. China; 2. Shanxi Transportation Research Institute, Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region of Ministry of Transport, Taiyuan 030006, P.R. China)

Abstract: In order to solve the shortage of theoretical basis on the loess tunnel surrounding rock classification method, on the basis of analyzing the existing loess tunnel rock mechanical properties and structural features, the paper uses extension theory to establish correlation function, and solve the integration problem of evaluation indexes. The paper makes some discovery working for loess tunnel surrounding rock classification, and it provides foundation for loess tunnel design and construction. The results show that the loess tunnel surrounding rock classification method considers the loess intensive property, deformation properties, anisotropy and structural property. According to the correlation degree, we can judge the tunnel surrounding rock level and define the rock quality degree. The rock classification results are in accordance with the field test results. The existence errors belong to the paraisopolar level, and there is no grade-skipping. As opposed to the code method, the result accuracy is higher.

Keywords: loess tunnel; surrounding rock classification; extension theory

^{*} 收稿日期: 2016-11-28(修改稿)

作者简介: 薛晓辉(1986-), 男, 山西芮城人, 博士生, 工程师, 主要从事隧道与地下工程方面的科研工作。

E-mail: 582991719@qq.com

基金项目: 山西省交通运输厅科研项目(2013-1-3, 2015-1-18); 交通运输部应用基础研究项目(2014319771190)

0 引言

随着我国基础设施建设力度的不断增大、中西部开发战略的深入实施以及国家公路网和铁路网的逐步完善,穿越黄土地区的隧道越来越多。目前,我国山西、陕西、甘肃、河南等地区已修建大量的黄土隧道,其中不乏一些大跨度、大断面、小净距、地质条件复杂的典型黄土隧道。如郑西客运专线中的秦东隧道,其开挖断面达 170 m^2 ,是目前湿陷性黄土地区开挖断面最大的黄土隧道;同样,在郑西客运专线上的张茅隧道,其全长达 $8\,483\text{ m}$,且穿越富水黄土地层,围岩极为软弱,地质条件非常复杂,是目前世界上施工难度最大的黄土隧道^[1]。目前,学者们针对黄土隧道开展了大量科研工作,并取得了数量可观的科研成果。陈建勋等^[2]针对国道主干线 GZ35 青岛至银川高速公路陕西境内吴堡至子洲沿线上 7 座单洞两车道分离式黄土隧道围岩变形进行现场监测,并系统研究了两车道黄土公路隧道变形规律。张新善等^[3]依托西安地铁一号线区间隧道,利用数值模拟手段研究了黄土隧道开挖对周围土体变形的影响,得出黄土隧道开挖过程中前期支护条件、后期加固措施等因素对隧道内部地表、拱顶、侧墙以及地上建筑物沉降的影响程度和塑性区、位移的分布规律。张爱军等^[4]依托郑西客专张茅隧道,系统分析其地质条件,确定了具有针对性的隧道开挖步序,对开挖后初期支护的拱顶下沉和两壁收敛等特征变形量进行现场长期测试,总结出三台阶七步开挖条件下黄土隧道初期支护的极限变形量指标特征。扈世民^[5]以兰渝高铁黄土隧道为工程背景,采用室内试验、三维数值模拟等措施,基于黄土工程特性研究隧道围岩空间位移的变形特征,针对隧道围岩空间位移场进行分析;将空间位移场分为径向与纵向两部分,所得结论与已有理论进行对比;在空间位移分析的基础上对先期位移进行预测。上述成果为黄土隧道工程技术发展打下了坚实的基础。然而,黄土隧道围岩的一些基础性问题尚需不断探索与解决。现有黄土隧道围岩分级是参照岩质隧道围岩分级方法的,且无法提供黄土围岩的主要计算物理力学参数的建议值,这种情况引起学者们思考现有黄土隧道围岩分级方法是否合理?黄土隧道围岩分级应采用什么评价指标及方法?

要解决这些问题,首先要清楚黄土隧道围岩力学性质、构造特征的关键影响因素;其次必须选取适当的评价方法对这些因素进行综合考虑。梁庆国等^[6]分析了黄土作为特殊性土和黄土隧道围岩时具有的几个特殊性质:水敏感性、小应变破坏特性、各向异性和黄土节理对其稳定性的影响。刘祖典等^[7]鉴于目前各种地基基础规范和工程地质勘探报告对黄土地层的分类命名比较混乱,现行规范虽然反映了各种工程的特殊性,但未能反映黄土的本质,对现有分类命名作了分类比较,以土的本质为基础,反映黄土的特性,提供几种黄土分类命名供参考。王永焱等^[8]对黄土-古土壤系列的岩性地层、气候地层、磁性地层及年代地层作了全面介绍,并提出了黄土地层划分方案;在大量分析研究和实验室测试的基础上,对黄土结构特征和物理力学性质及其二者之间的相互关系进行了研究。本文在总结分析黄土隧道围岩力学性能、构造特性评价指标的基础上,利用可拓学理论建立关联函数,解决各评价指标之间的融合问题,对黄土隧道围岩分级做一些探索性的工作,以期对黄土隧道的设计与施工提供理论依据。

1 黄土隧道围岩分级现状

国内外最早以黄土隧道或地下洞室稳定性分析为目的的黄土围岩分级,见于 20 世纪 70 年代后期铁道部门所编著的《铁路工程设计技术手册·隧道》(1978 年版),其黄土围岩分级方法中较为合理和准确地反映了影响黄土力学性能的两个关键指标,即含水量和干密度,但尚未考虑不同初始含水量状态及其变化情况对黄土力学参数的影响,难以全面反映不同类型黄土围岩的力学性质;同时,其提出的含水量、粘聚力和内摩擦角的数值范围存在交叉,即级别较低的黄土围岩也可能具有级别较高的黄土围岩的若干参数,反之亦然。

我国现行的《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)仅将黄土按照地质年代粗略地分为Ⅳ级(老黄土 Q1、Q2)和Ⅴ级(新黄土 Q3、Q4),且在其给出的“各级围岩的物理力学指标”表中,建议选用的物理力学指标却标注“本表数值不包括黄土地层”。现行的《铁路隧道设计规范》(TB10003—2005/J449—2005)中的黄土隧道围岩分级方法也基本类似。

2 黄土隧道围岩评价指标

2.1 黄土的强度性质评价指标

现有大量文献资料表明^[7-10],黄土的内摩擦角、粘聚力、抗压强度和抗拉强度均随着土体含水量的增加而减小。本文选取内摩擦角作为强度性质参数的代表值,测定其在不同干密度情况下随含水量变化的情况,具体结果如图 1、图 2 所示。

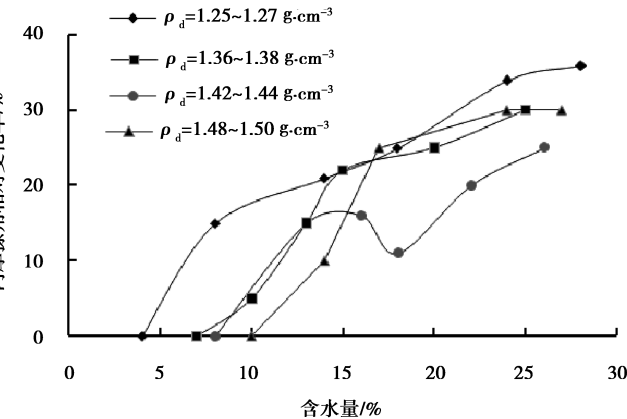


图 1 含水量变化引起的内摩擦角相对变化率

Fig. 1 Internal friction angle relative changing rate caused by the change of water content

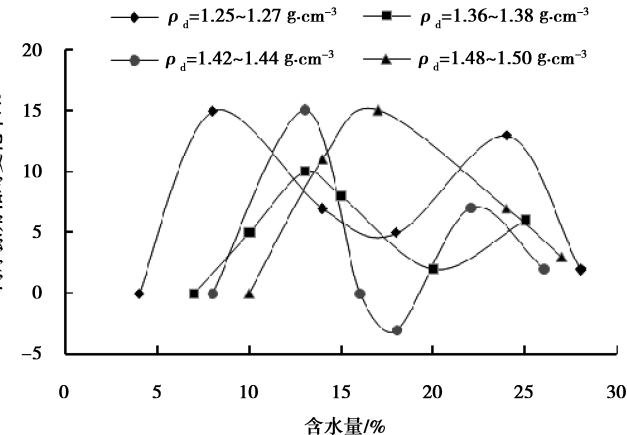


图 2 含水量变化引起的内摩擦角降低率

Fig. 2 The internal friction angle reduction amplitude caused by the change of water content

图中的相对变化率为 $(\varphi_{wmin} - \varphi_w) / \varphi_{wmin}$, 其中 φ_{wmin} 为最低含水量时的内摩擦角, φ_w 为某含水量时的内摩擦角;降低率为相邻两个含水量对应的内摩擦角的相对比率,即 $(\varphi_{w0} - \varphi_{w1}) / \varphi_{w0}$, 其中 φ_{w0} 为某一含水量时的内摩擦角, φ_{w1} 为含水量从 w_0 增加到 w_1 时的内摩擦角。由图 1 可知,相对于低含水量时的值,内摩擦角随含水量的增加而不断降低,最大降低幅度达 30% 左右。由图 2 可知,内摩擦角降低率在含水量为 12% 和 22% 时出现峰值,表明

在此含水量情况下,内摩擦角随含水量变化的幅度较大。可见,黄土强度随含水量的增加而降低,而具体降幅取决于初始含水量 w_0 和干密度 ρ_d 。

2.2 黄土的变形性质评价指标

在单轴压缩、三轴压缩、直接剪切、现场载荷试验等大多数情况下,黄土存在一临界含水量 w_l , 当土体现有含水量 $w < w_l$ 时,土体变形属脆性破坏;而当土体现有含水量 $w \geq w_l$ 时,土体变形属塑性破坏。如延安的 Q_2 黄土,其临界含水量 $w_l = 10\%$,天然含水量约为 10.43%,该地区黄土基本呈现塑性破坏状态;西安地区的 Q_2 黄土,其临界含水量 $w_l = 12\%$,而该地区大部分土体含水量达到了 15% 左右,可以判定该地区黄土呈现塑性破坏状态。

可见,黄土含水量与其临界含水量的差值 Δw 对破坏应变有显著影响,其不仅决定了黄土的极限强度,同时也决定了黄土破坏应变的类型和大小。

2.3 黄土力学性质的各向异性评价指标

在黄土力学性质试验中,根据试样的取样方向可将其分为垂直向试样和水平向试样,其加载方向各不相同。现有文献资料表明^[7-10],当黄土试样分别采用垂直向试样和水平向试样时,试验所得结果中黄土变形模量、无侧限抗压强度等力学性能参数差异较大,垂直向的参数值大于水平向的,最大倍数在 2.0~2.5 之间。可见,黄土受力方向与其沉积方向之间的夹角 θ 是衡量黄土力学性质的各向异性的重要评价指标。

2.4 黄土的构造特征评价指标

黄土的宏观结构是控制黄土隧道围岩破坏机制及稳定性的关键因素,其宏观结构主要体现在节理、地裂缝、喀斯特等方面,而此三者也可统称为黄土节理。在黄土节理中,垂直节理最为发育,其通常上下贯通于黄土的各个分层,为地表水下渗、地下水上升提供通道,同时引起黄土地下陷穴、盲沟、井、土柱等构造的形成,严重威胁黄土围岩的稳定性。对于 Q_1 午城黄土、 Q_2 离石黄土,节理面一般较为清晰、平整,其节理密度较稀,间距均大于 0.8 m,上下延伸切穿黄土分层的厚度为 3 m 左右;而对于 Q_3 马兰黄土,节理呈断口状,分布较密集,间距大多小于 0.5 m,上下延伸距离小于 1 m。因此,可选取地质年代 G 作为黄土的构造特性评价指标。

3 可拓学理论简述

可拓学理论是用形式化模型研究事物拓展的可能性和开拓创新的规律与方法,用于解决不相互

融合的问题。可拓学理论是以物元理论、可拓数学、层次分析法为其基本理论,并引入物元概念、关联函数作为其基本逻辑细胞^[11]。

在物元概念中,给定事物名称 P ,将 P 关于特征 C 的量值定义为 V ,则有序三元组 $R=(\text{事物},\text{特征},\text{量值})=(P,C,V)$ 即可作为描述事物的基本物元。利用物元概念,可将事物看成一个复杂的、相互联系的物元网。一个物元的变换会导致相关物元的变换,并传导到整体物元中去^[12]。

利用关联函数的概念,可定量描述事物具有某种特性的程度及其变化。对于同一事物的同一类参数,也可根据关联函数值的大小而分出不同的层次。为将常用的定性描述转变为定量描述,首先将关联函数概念中距离的概念拓展为距的概念。因此,规定实轴上点 x_0 与区间 $X_0=(a,b)$ 之距为:

$$\rho(x_0,X_0)=\left|x_0-\frac{a+b}{2}\right|-\frac{1}{2}(b-a)\quad (1)$$

在距的概念上,可建立初等关联函数,其基本公式为:

$$k(x)=\frac{\rho(x,X_0)}{\rho(x,X)-\rho(x,X_0)}\quad (2)$$

4 基于可拓学理论的围岩分级法应用

吉县—河津高速公路乔原隧道为左右分离式隧道,两洞中轴线最大间距为 32 m,设计速度为 80 km/h,左右洞长度分别为 1 572 m、1 626 m,洞体最大埋深为 114.98 m。隧址区位于黄土塬区,塬面平整,四周冲沟发育,沟深坡陡,沟间多有残塬分布,微地貌表现为黄土冲沟、黄土斜坡及黄土梁等。在该隧道进口、出口、洞身等关键部位选取 4 个典型掌子面围岩作为围岩分级研究对象,并利用可拓围岩分级方法对其围岩情况进行分级评价。

4.1 围岩分级指标的确定

根据上述黄土隧道围岩评价指标的分析情况,本文选取初始含水量 w_0 、干密度 ρ_d 、含水量与其临界含水量的差值 Δw 、黄土受力方向与其沉积方向之间的夹角 θ 、地质年代 G 作为黄土隧道围岩分级指标,可从黄土的强度性质、变形性质、各向异性、构造特性等方面进行全面评价,使得围岩分级结果更加客观、准确。围岩分级指标实测值的基本情况如表 1 所示。

表 1 乔原隧道围岩分级指标实测值
Table 1 Measured value of rock mass classification index in Qiaoyuan tunnel

掌子面	w_0 /%	ρ_d /(g·cm ⁻³)	Δw /%	θ /(°)	G
K1	17.6	1.27	7.6	35	Q4
K2	19.2	1.49	7.2	10	Q2
K3	15.3	1.38	3.3	10	Q2
K4	21.5	1.36	9.5	28	Q3

4.2 构造物元

4.2.1 围岩等级参数的选取

根据现有规范、文献中关于黄土隧道围岩分级的基本方法,同时结合本项目中各指标的实测值,将黄土隧道围岩分为 3 个等级,具体指标参数情况如表 2 所示。

表 2 黄土隧道围岩等级分类
Table 2 Surrounding rock classification of loess tunnel

围岩 级别	w_0 /%	ρ_d /(g·cm ⁻³)	Δw /%	θ /(°)	G
IV	5~15	1.3~1.5	-10~0	0~45	Q1~Q2
V	15~20	1.2~1.3	0~5	45~75	Q2~Q3
VI	20~25	1.0~1.2	5~10	75~90	Q3~Q4

4.2.2 指标参数的无量纲化处理

在多指标综合评价体系中涉及的变量较多,且各指标所代表的物理涵义不同,其异量纲性将极大影响综合评价结果的精度,因此必须对指标参数进行标准化、规格化,即无量纲化处理。本项目采用阈值法对围岩分级指标进行无量纲化处理,其基本算法公式如下:

当参数越大对整体评价越有利时,

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}-x_j^{\min}}{x_j^{\max}-x_j^{\min}},z_{ij}=\frac{r_{ij}-x_j^{\min}}{x_j^{\max}-x_j^{\min}}$$

当参数越小对整体评价越有利时,

$$y_{ij}=\frac{x_j^{\max}-x_{ij}}{x_j^{\max}-x_j^{\min}},z_{ij}=\frac{x_j^{\max}-r_{ij}}{x_j^{\max}-x_j^{\min}}$$

式中: x_{ij} 为第 i 级别第 j 因素的评价标准值; $x_{j\max}$ 为第 j 因素的最大评价标准值; $x_{j\min}$ 为第 j 因素的最小评价标准值; y_{ij} 为无量纲化处理后第 i 级别第 j 因素的评价标准值; r_{ij} 为第 i 个掌子面的第 j 因素的

评价标准值; z_{ij} 为无量纲化处理第*i*个掌子面的第*j*因素的评价标准值。表1、表2的无量纲化处理结果如表3、表4所示。

表3 乔原隧道围岩分级指标实测值的无量纲化处理结果
Table 3 Dimensionless results of the measured value of rock mass classification index in Qiaoyuan tunnel

掌子面	w_0	ρ_d	Δw	θ	G
K1	0.37	0.54	0.12	0.61	0
K2	0.29	0.98	0.14	0.89	0.67
K3	0.49	0.76	0.34	0.89	0.67
K4	0.18	0.72	0.03	0.69	0.33

表4 黄土隧道围岩等级分类的无量纲化处理结果
Table 4 Dimensionless results of surrounding rock classification of loess tunnel

围岩级别	w_0	ρ_d	Δw	θ	G
IV	0.50~1	0.60~1	0.50~1	0.50~1	0.67~1
V	0.25~0.50	0.40~0.60	0.25~0.50	0.17~0.50	0.33~0.67
VI	0~0.25	0~0.4	0~0.25	0~0.17	0~0.33

4.2.3 物元经典域矩阵与节域矩阵

根据表4中关于黄土隧道围岩等级分类参数的情况,可得到IV~VI级黄土隧道围岩指标对应的取值范围,即为物元经典域。

黄土隧道围岩IV级:

$$R_{01} = \begin{bmatrix} N_{01}c_1 < 0.50, 1 > \\ c_2 < 0.60, 1 > \\ c_3 < 0.50, 1 > \\ c_4 < 0.50, 1 > \\ c_5 < 0.67, 1 > \end{bmatrix}$$

黄土隧道围岩V级:

$$R_{02} = \begin{bmatrix} N_{02}c_1 < 0.25, 0.50 > \\ c_2 < 0.40, 0.60 > \\ c_3 < 0.25, 0.50 > \\ c_4 < 0.17, 0.50 > \\ c_5 < 0.33, 0.67 > \end{bmatrix}$$

黄土隧道围岩VI级:

$$R_{03} = \begin{bmatrix} N_{03}c_1 < 0, 0.25 > \\ c_2 < 0, 0.40 > \\ c_3 < 0, 0.25 > \\ c_4 < 0, 0.17 > \\ c_5 < 0, 0.33 > \end{bmatrix}$$

节域物元根据掌子面围岩评价指标的取值范围而定,即为表3中各参数的取值范围。

$$R_p = \begin{bmatrix} Pc_1 < 0.00, 1.00 > \\ c_2 < 0.00, 1.00 > \\ c_3 < 0.00, 1.00 > \\ c_4 < 0.00, 1.00 > \\ c_5 < 0.00, 1.00 > \end{bmatrix}$$

4.2.4 待评物元矩阵

掌子面 K1

$$R_{10} = \begin{bmatrix} N_{10}c_1 0.37 \\ c_2 0.54 \\ c_3 0.12 \\ c_4 0.61 \\ c_5 0 \end{bmatrix}$$

掌子面 K2

$$R_{20} = \begin{bmatrix} N_{20}c_1 0.29 \\ c_2 0.98 \\ c_3 0.14 \\ c_4 0.89 \\ c_5 0.67 \end{bmatrix}$$

掌子面 K3

$$R_{30} = \begin{bmatrix} N_{30}c_1 0.49 \\ c_2 0.76 \\ c_3 0.34 \\ c_4 0.89 \\ c_5 0.67 \end{bmatrix}$$

掌子面 K4

$$R_{40} = \begin{bmatrix} N_{40}c_1 0.18 \\ c_2 0.72 \\ c_3 0.03 \\ c_4 0.69 \\ c_5 0.33 \end{bmatrix}$$

4.3 关联度的计算

对于第*i*个掌子面围岩的第*j*个评价指标关于围岩级别*t*的关联度为:

$$k_{ij}(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{-\rho(x_{ij}, V_{ij})}{|V_{ij}|} x_{ij} \in V_{ij} \\ \frac{\rho(x_{ij}, V_{ij})}{\rho(x_{ij}, V_{pi}) - \rho(x_{ij}, V_{ij})} x_{ij} \notin V_{ij} \end{cases}$$

式中: $|V_{ij}| = |b_{ij} - a_{ij}|$; $\rho(x_{ij}, V_{ij}) = \left| x_{ij} - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \frac{b_{ij} - a_{ij}}{2}$; $\rho(x_{ij}, V_{pi}) = \left| x_{ij} - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2}$; V_{ij} 为节域; a_{ij} 为节域下限值; b_{ij} 为节域上限值。

以掌子面围岩 K1 为例,利用公式可得掌子面围岩 K1 的各评价指标与各国岩级别的关联度,具体情况如表5所示。

表 5 掌子面围岩 K1 评价指标与各等级的关联度

Table 5 Correlation degree between K1 evaluation index and surrounding rock level

掌子面	围岩等级	$K_{ij}(x_{ij})$				
		x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}
K1	IV	-0.26	-0.12	-0.76	0.22	-1
	V	0.48	0.3	-0.52	-0.22	-1
	VI	-0.24	-0.23	0.48	-0.53	0

掌子面围岩 K1 关于围岩级别 t 的关联度可根据下式进行计算：

$$k_{ij}(N_i) = \sum W_{ij}k_{ij}(x_{ij})$$

式中： W_{ij} 为掌子面围岩各个评价指标 C_i 的权重系数,其公式为：

$$W_{ij} = \frac{x_{ij}/b_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}/b_{ij}}$$

将掌子面围岩 K1 相关参数代入上述公式中,可得掌子面围岩 K1 与各围岩级别的关联度分别为-0.072、0.087、-0.292;同理可得掌子面围岩 K2~K4 与各围岩级别的关联度,具体情况如表 6 所示。

表 6 掌子面围岩 K1~K4 与各围岩级别的关联度

Table 6 Correlation degree between tunnel face K1~K4 and the surrounding rock level

围岩等级	$k_{ij}(N_i)$			
	k_1	k_2	k_3	k_4
IV	-0.072	0.025	0.121	0.285
V	0.087	-0.552	-0.272	-0.285
VI	-0.292	-0.685	-0.526	0.388

4.4 围岩级别的确定

在求得掌子面围岩 K_i 关于围岩级别 t 的关联度 $K_{ij}(N_i)$ 后,当 $K_{ij}(N_i) = \max \{ K_{iu}(N_i), t = 1, 2, \dots, s \}$ 时,即可判定掌子面围岩 K_i 的围岩级别为 t_i 类,而且 $K_{ij}(N_i)$ 的数值大小可定量反映掌子面 K_i 的围岩质量好坏程度。根据表 6 所得的围岩级别关联度的计算结果,掌子面 K_1 的围岩级别为 V 级, K_2 的围岩级别为 IV 级, K_3 的围岩级别为 IV 级, K_4 的围岩级别为 VI 级。

目前,最常用的围岩分级方法为根据规范进行分类;同时,在施工过程中,通过掌子面围岩的不断揭露,可通过现场观察准确判断围岩级别。因此,

可利用这两种围岩分类结果与可拓学围岩分级的结果进行对比分析,其具体情况如表 7 所示。

表 7 评价结果比较

Table 7 Comparison of evaluation results

掌子面	评价方法		
	可拓围岩分类级别	规范法围岩分类级别	现场围岩分类级别
K1	V	V	IV3
K2	IV	IV	IV3
K3	IV	IV	IV2
K4	VI	V	VI

从表 7 可知,可拓围岩分级结果与现场围岩级别分类的结果基本一致,存在的分级误差基本属于“亚级”之间的差异,未出现“跳级”现象;该结果与规范法围岩分类结果相比,其准确度更高,从而更加客观、全面、科学地反映了围岩的工程性质。

5 结论

(1)基于可拓学理论的黄土隧道围岩分级方法,可将多个评价指标进行综合考虑,解决了各评价指标不相融合的问题;选取初始含水量 w_0 、干密度 ρ_d 、含水量与其临界含水量的差值 Δw 、黄土受力方向与其沉积方向之间的夹角 θ 、地质年代 G 作为黄土隧道围岩分级指标,综合考虑了黄土的强度性质、变形性质、各向异性、构造特性等方面,使得黄土隧道围岩分级结果更加客观、准确。

(2)利用可拓围岩分级方法求得的掌子面围岩关于围岩级别 t 的关联度 $k_{ij}(N_i)$ 不仅可判定掌子面围岩 k_i 的围岩级别为 t_i 类,而且 $k_{ij}(N_i)$ 的数值大小可定量反映掌子面的围岩质量好坏程度。

(3)利用可拓围岩分级方法对乔原隧道进行围岩分级,其结果与现场围岩级别分类的结果基本一致,存在的分级误差基本属于“亚级”之间的差异,未出现“跳级”现象;且该结果与规范法围岩分类结果相比,其准确度更高,因此可拓围岩分级法应用于黄土隧道围岩分级中具有较好的适用性和准确性。

(4)在本文提出的可拓围岩分级法的基础上,应进一步细化黄土隧道围岩分级修正指标,建立黄土隧道围岩亚级分级指标体系,提高黄土隧道围岩分级的准确性。

参考文献(References)

- [1] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. 郑西客专大断面黄土隧道施工方法与监控技术研究总报告[R]. 西安: 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2009. (China Railway First Survey & Design Institute Group Co. Ltd. Research report of construction method and monitoring technique of large section loess tunnel in Zhengzhou-Xi'an passenger railway[R]. Xi'an: China Railway First Survey & Design Institute Group Co., Ltd. (in Chinese))
- [2] 陈建勋, 姜久纯, 罗彦斌, 等. 黄土隧道洞口段支护结构的力学特性分析[J]. 中国公路学报, 2008, 21(5): 75-80. (Chen Jianxun, Jiang Jiuchun, Luo Yanbin. Mechanics characteristic analysis of support structure of loess tunnel entrance[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 75-80. (in Chinese))
- [3] 张新善, 廖红建, 张立. 黄土地下隧道开挖对周围土体变形的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增1): 4333-4338. (Zhang Xinshan, Liao Hongjian, Zhang Li. Analysis on influence of tunnel excavation on deformation of surrounding soil in loess strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.1): 4333-4338. (in Chinese))
- [4] 张爱军, 白名洲, 许兆义, 等. 郑西客运专线铁路张茅隧道近饱和黄土体初期支护应力变形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增2): 3714-3720. (Zhang Aijun, Bai Mingzhou, Xu Zhaoyi. Study of stress and deformation characteristics of Zhangmao nearly saturated loess tunnel initial support of Zhengzhou-Xi'an passenger railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Supp.2): 3714-3720. (in Chinese))
- [5] 扈世民. 基于黄土工程特性的隧道围岩空间位移分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 117-122. (Hu Shimin. Analysis on spatial displacement of surrounding rock based on engineering properties of loess [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(9): 117-122. (in Chinese))
- [6] 梁庆国, 李洁, 李德武, 等. 黄土隧道围岩分级研究的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增1): 170-176. (Liang Qingguo, Li Jie, Li Dewu. Some problems on surrounding rock classification of loess tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Supp.1): 170-176. (in Chinese))
- [7] 刘祖典, 郭增玉. 黄土的工程地质特征及分类命名的建议[J]. 陕西建筑与建材, 2004(3): 26-29. (Liu Zudian, Guo Zengyu. Suggestions to the engineering geological characteristics & classification and nomenclature of loess [J]. Shanxi Architecture and Building Materials, 2004(3): 26-29. (in Chinese))
- [8] 王永焱, 林在贵. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990. (Wang Yongyan, Lin Zaigui. Structural characteristics, physical and mechanical properties of loess in China [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese))
- [9] 中国科学院土木建筑研究所土力学研究室. 黄土基本性质的研究[M]. 北京: 科学出版社, 1961. (Research Office of Institute of Civil Construction, Chinese Academy of Sciences. Study on fundamental properties of loess [M]. Beijing: Science Publishing House, Beijing, 1961. (in Chinese))
- [10] 米海珍, 李如梦, 牛军贤. 兰州原状黄土剪切强度特性的试验研究[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(4): 109-111. (Mi Haizhen, Li Rumeng, Niu Junxian. Experimental investigation of shear strength characteristics of intact loess in Lanzhou [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2006, 32(4): 109-111. (in Chinese))
- [11] 贾超, 肖树芳, 刘宁. 可拓学理论在洞室岩体质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 751-756. (Jia Chao, Xiao Shufang, Liu Ning. Application of extenics theory to evaluation of tunnel rock quality [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 751-756. (in Chinese))
- [12] 康志强, 冯夏庭, 周辉. 基于层次分析法的可拓学理论在地下洞室岩体质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3687-3693. (Kang Zhiqiang, Feng Xiating, Zhou Hui. Application of extenics theory to evaluation of underground cavern rock quality based on stratification analysis method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3687-3693. (in Chinese))