2024 年 第 24 卷 第 20 期
2024, 24(20):08640-08

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2304833
引用格式:陈志敏, 张赓旺, 李宁. 隧道穿越岩堆体围岩剪切特性及分级[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(20): 8640-8647.
Chen Zhimin, Zhang Gengwang, Li Ning. Shear characteristics and classification of surrounding rock of tunnel through rock pile[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(20): 8640-8647.

隧道穿越岩堆体围岩剪切特性及分级

陈志敏[1], 张赓旺[1,2*], 李宁[3]
(1. 兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730070; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056;
3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

摘 要 为解决隧道穿越岩堆体围岩分级不准确的问题,通过相似材料直剪试验分析岩堆体的直剪特性,将含水率和填充土含量两个因素带入熵权可拓物元法,并结合地质指标进行分级研究。结果表明岩堆体的抗剪强度随着含水率、填充土含量的增大,先增大后减小,最终趋于平稳,过高或过低的含水率和填充土都会“弱化”岩堆体的抗剪强度。根据岩堆体的特点,选取岩石单轴饱和抗压强度、节理裂隙密度、岩体完整性系数、含水率和填充土含量作为分级指标,结合熵权可拓物元法,将所选指标和熵权可拓物元法结合并在工程实例进行验证,分级结果比原方法准确性更好,证明研究提出的围岩分级方法是合理可行的。研究结果能够为岩堆体隧道的围岩分级提供指导,为施工设计和支护方式提供依据。

关键词 隧道工程; 围岩分级; 熵权可拓物元; 直剪试验; 围岩稳定性; 岩堆
中图法分类号 TU452; **文献标志码** A

Shear Characteristics and Classification of Surrounding Rock of Tunnel through Rock Pile

CHEN Zhi-min[1], ZHANG Geng-wang[1,2*], LI Ning[3]
(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, China;
3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

[**Abstract**] In order to solve the problem of inaccurate classification of surrounding rock of tunnel through rock pile, direct shear test of similar materials was used to analyze the direct shear characteristics of rock pile, and two factors of water content and soil content were used to the entropy weight extension matter element method, and the classification was studied in combination with geological indexes. The results show that with the increase of water content and soil content, the shear strength of rock pile first increases and then decreases, and finally becomes stable. Too high or too low water content and soil will "weaken" the shear strength of rock pile. According to the characteristics of rock pile, the rock uniaxial saturated compressive strength, joint crack density, rock integrity coefficient, water content and soil content were selected as classification indexes. Combined with the entropy weight extension matter element method, the selected indexes were combined with the entropy weight extension matter element method, and the classification results were verified in engineering examples. The accuracy of the classification results is better than that of the original method, which proves that the surrounding rock classification method proposed is reasonable and feasible. The research results can provide guidance for the grading of rock pile tunnel, and provide basis for construction design and support method.

[**Keywords**] tunnel engineering; classification of surrounding rock mass; extension matter-element theory; direct shear test; stability of surrounding rock; rock pile

在隧道建设过程中,围岩分级是工法选择和支护设计前提工作,准确的围岩分级方法能够直观的判断围岩稳定性和结构状态。随着西部大开发的进一步,在建设过程中隧道经常会穿越松散岩堆体,为保证隧道安全顺利的施工,建立一种快速有效的围岩分级方法是目前亟待研究解决的难题。

中国常用的岩体基本质量指标(rock mass basic quality,BQ)法,对大多数围岩具有较好的适用性,但对于松散的岩堆体分级结果较差。有学者根据大量的隧道案例,总结分析质量指标(quality sys-

收稿日期: 2023-06-29 **修订日期**: 2024-04-17
基金项目: 国家自然科学基金(12262018);甘肃省建设科技攻关基金(JK2018-33)
第一作者: 陈志敏(1979—),男,汉族,河北邢台人,博士,教授。研究方向:岩土工程及隧道工程。E-mail:czm@mail.lzjtu.cn。
* **通信作者**: 张赓旺(1997—),男,汉族,陕西宝鸡人,硕士研究生。研究方向:隧道工程及岩土工程。E-mail:1500210440@qq.com。

tem, Q)分级方法和 RDI (rock mass drillability index)分级体系[1-2]。张波[3]运用熵权-可拓物元理论及熵权-云模型的数学解析方法对围岩分级,并通过现场案例验证了其准确性。Salimi 等[4]在 TBM (tunnel boring machine)中使用基于回归树和人工智能算法,对岩体进行分类研究。吴圣智等[5]以定性鉴别、BQ、岩芯状态和围岩弹性纵波速度为基础的岩质围岩基本分级细化方法。杨悦等[6]对实测数据进行无量纲化处理并转化为 Vague 集,最后建立基于 Vague 集的可拓安全评估模型。随着计算机技术和各种数理统计方法的不断发展,将数学方法与围岩分级结合成为研究热点,将模糊推理、灰色聚类法、层次分析法以及最大间隔分级应用于围岩分级中[7-10]。文献[11-12]在围岩分级中适用可拓理论进行了研究。王睿等[13]研究了一种在施工阶段快速得到 BQ 的分级法,并进行了验证。文献[14-16]基于支持向量机对岩体进行了分级研究。

上述研究对围岩分级有一定的推动意义,但由于岩堆体物质组成不均匀,孔隙度大,结构松散等特性,更使得常用的围岩分级方法不适用于岩堆体隧道。因此,在前人研究的基础上,通过相似理论进行岩堆体的直剪试验,分析其剪切特性。在此基础上选取 5 个分级指标,运用熵权-可拓物元模型对岩堆体隧道进行围岩分级,并利用现场数据验证,对围岩稳定性做出评价,研究成果可为岩堆体隧道的围岩分级提供指导。

1　岩堆体剪切特性分析

围岩分级过程指标选取以及指标范围的确定至关重要,在课题组对岩堆体的研究过程中,发现含水率和填充土含量对岩堆体的抗剪强度以及其他物理特性影响较大,因此选这两个因素作为分级指标,岩堆体的破坏基本上为失稳倒塌破坏,因此岩堆体的抗剪强度是岩堆体围岩稳定性的控制性指标,所以通过直剪试验,主要研究岩堆体填充土含量和含水率对其剪切强度的影响[17-18]。

1.1　试验设计

通过查阅资料发现,西南地区岩堆体架空结构明显,构造较为简单,大部分岩堆体的岩块含量占 70% 以上,主要岩性为泥质页岩、白云岩、砂岩、灰岩、石英砂岩、花岗岩等,填充土占比约为 30%,大多为黏性土。因此,将岩堆体简化成岩块、土、水 3 种基本材料。

岩堆体是在漫长的地质历史过程中,由于地震、板块挤压、物理风化等作用下,导致原本的基岩崩解破碎,翻滚塌落在坡脚形成堆积体,石英砂的形成过程和物理特性与岩堆体岩块具有高度的相似性,且岩块中具有石英砂成分,在矿物成分方面也与岩堆体具有相似性。再者,石英砂的主要成分为二氧化硅,是一种廉价易得的材料,且坚硬耐磨。从这两点出发,使用石英砂来模拟岩堆块体进行实验研究,根据文献[19-20],结合相似理论,石英砂作为基本岩块单元组成颗粒体系,实验过程中,在此基础上通过不断增加填充土含量和含水量,对松散岩堆体的力学行为进行模拟实验。根据研究目的选用几何相似比和容重相似比作为基础相似比,具体为:几何相似比 $C_L=200$、容重相似比 $C_\gamma=1$、泊松比 $C_\mu=1$、摩擦角相似比 $C_\varphi=1$、应变相似比 $C_\varepsilon=1$、应力相似比 $C_\sigma=200$、黏聚力相似比 $C_c=200$、弹性模量相似比 $C_E=200$。

通过前期的地勘报告,得到岩堆体基本性质,如表 1 所示。在此基础上通过不同含量的填充土和含水率来进行直剪试验,实验方案如表 2 所示。

表 1　岩堆体物理力学参数

Table 1　Physical parameters of rock pile

容重/(kN·m^{-3})	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
18.5 ~ 21.6	38 ~ 41	51 ~ 71.2

表 2　直剪实验方案

Table 2　Scheme of direct shear experimental

填充土含量/%	含水率/%	垂直压力/kPa
0 6 25 50	2、4、6、8、12、27	100、200、300、400

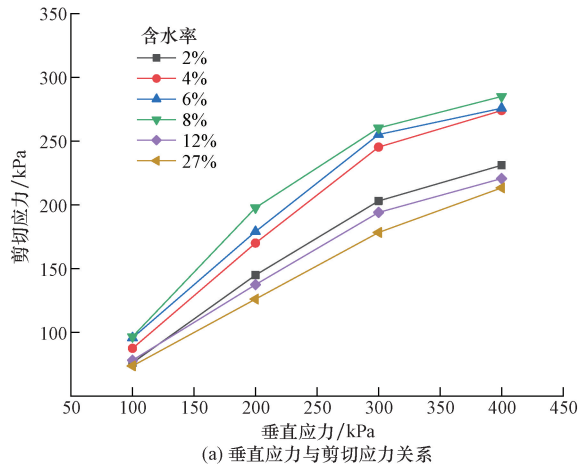
1.2　岩堆体剪切特性分析

1.2.1　含水率对抗剪强度的影响

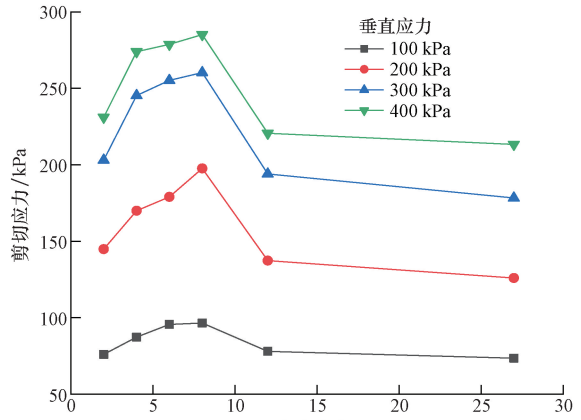
由图 1 可知,随着含水率的增加,岩堆体的剪切强度总体上先增大后减小,具体可分为如下 3 个阶段。

(1)第一阶段。含水率在 2% ~8%,这一阶段剪切强度随着含水率的增加而不断增加,直到达到峰值强度,这是因为在含水率较小时,随着含水率变大,水分子增加了岩堆体内填充土颗粒的吸附胶结作用。

(2)第二阶段。含水率在 8% ~12%,这一阶段随着含水率的增加,剪切强度急剧下降,这是因为随着含水率的不断增加,水对剪切强度产生了弱化作用,主要因素有:一是含水率到达一定程度后,填充土颗粒周围吸附的水膜达到最大值,减小了颗粒间的摩擦作用,使抗剪强度降低;二是水分子吸附在岩堆体的岩块颗粒表面,降低了岩堆单元之间的



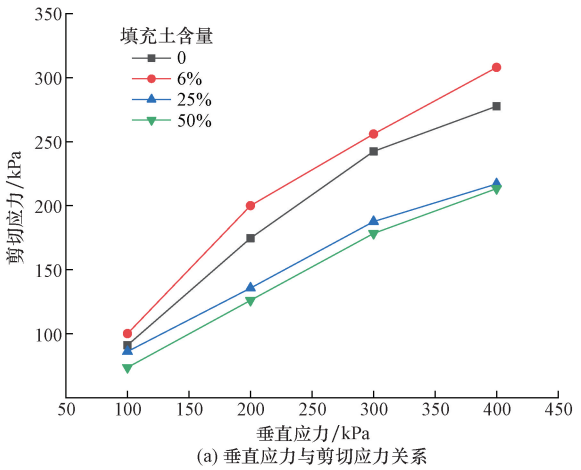
(a) 垂直应力与剪切应力关系



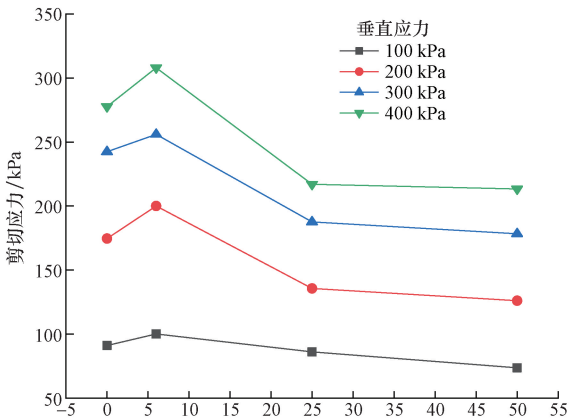
(b) 含水率与剪切应力关系

图 1 含水率与剪切强度关系

Fig. 1 Relationship between water content and shear strength



(a) 垂直应力与剪切应力关系



(b) 填充土含量与剪切应力关系

图 2 填充土含量与剪切强度关系

Fig. 2 Relationship between soil content and shear strength

咬合摩擦阻力;三是过量的水存在于岩堆体缝隙之中,水会对周围岩堆体产生挤压作用,促使岩堆体颗粒发生移动,从而降低抗剪强度。

(3)第三阶段。含水率大于 12%,这一阶段剪切强度随着含水率的增加变化幅度不大,曲线基本持平,这一阶段水对岩堆体的弱化影响达到最大,即使含水量发生变化,剪切强度也基本不发生变化,剪切应力曲线相对平稳。

1.2.2 填充土含量对抗剪强度的影响

由图 2 可知,岩堆体的剪切强度随填充土含量的不断增加先增大后减小,在填充土含量为 6% 时,达到峰值,剪切强度达到最大,岩堆体的剪切强度与垂直应力呈线性关系,相关系数为 0.980 39。同一填充土含量,垂直应力越大,剪切强度越大,但是剪切强度关于垂直应力的敏感度逐渐降低,剪切强度增量逐渐减小。剪切强度可分为 3 个阶段:在填充土含量为 0 ~ 6% 阶段,剪切强度缓慢增加,增加幅度较小;在填充土含量为 6% ~ 25% 阶段,填充土含量增加,剪切强度快速下降,一直减小到无填充土含量的剪切强度之下;在填充土含量为 25% ~ 50% 阶段,剪切强度逐渐减小,下降曲线极为缓慢,强度变化较小,这是因为刚开始填充土含量较少,抵抗剪切强度的来源主要来自粗颗粒之间的咬合作用,随着填充土含量的增加,结果不断变得密实,孔隙率减小,形成良好的级配,颗粒间的咬合和摩擦作用,共同抵抗剪切作用,这种效果随着填充土含量的增加一直到最大值,当填充土含量超过 6% 时,过多的填充土起到润滑作用,反而降低了岩堆体的剪切强度[21],这种作用随着填充土含量的增加,逐渐减弱。

2 熵权-可拓物元基本理论

熵权-可拓物元理论能够综合考虑各指标之间的关联性,能完全满足整个系统,并能把不相容的因素转化为相容关系,所以在可拓理论基础上结合熵权法,运用于围岩等级划分中,可以得到更为客观、准确的围岩评价等级[22],其基本计算流程如图 3所示。

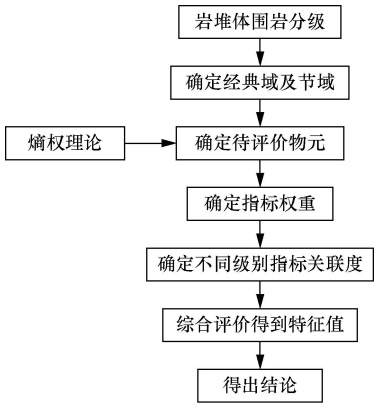


图 3　分级流程

Fig. 3　Classification process

2.1　可拓物元法

物元可拓理论是一种将可拓数学和物元理论相结合的数学分类方法,主要涉及两个方面:一是专门研究物元的变化及其可拓性变化的物元数学理论;二是研究建立在系统可拓物元集合理论基础上的物元数学理论和工具。物元可拓系统可以较为合理地描述各种事物内部结构、各个元素之间的联系和他们之间的联系变化。总的来说,可拓集合能够描述事物的可变性和相容性。

这个方法中,描述事物的基本因子简称为物元,由 3 个基本元素构成,其中,N 为要评价事物的对象,C 为事物的特征值,V 为特征值 C 的取值,则总体函数可表示为[9]

$$\boldsymbol{R}=(N,C,V)=\begin{bmatrix} N & C_1 & (a_1,b_1) \\ & C_2 & (a_2,b_2) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_n,b_n) \end{bmatrix} \tag{1}$$

式(1)中:C_n 为某个影响因素的特征值;a_n、b_n 为影响因素特征值的取值区间。

经典域是对某种因素进行评价时,各单因素的取值变化范围,设隧道围岩分为 m 个等级,评价指标有 n 个,隧道围岩质量等级的经典域 $\boldsymbol{R}_m$ 为

$$\boldsymbol{R}_m=\begin{bmatrix} N_m & C_1 & (a_{m1},b_{m1}) \\ & C_2 & (a_{m2},b_{m2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{mn},b_{mn}) \end{bmatrix} \tag{2}$$

式(2)中:a_{mn}、b_{mn} 分别为不同围岩等级下各分级指标的值域区间的上限值和下限值。

节域是指标取值的规定范围,可表示为

$$\boldsymbol{R}_p=\begin{bmatrix} N_p & C_1 & (a_{p1},b_{p1}) \\ & C_2 & (a_{p2},b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{pn},b_{pn}) \end{bmatrix} \tag{3}$$

式(3)中:a_{pn}、b_{pn} 分别为不同围岩等级下各分级指标的取值范围。

待评价的样本物元可描述为

$$\boldsymbol{R}_m=\begin{bmatrix} N_m & C_1 & x_{m1} \\ & C_2 & x_{m2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式(4)中:x_{mn} 为不同围岩等级下各分级指标的取值。

当所选取事物的物元在其元素所限定的范围内时,这时物元的所取得的量值称为关联函数。通过此函数,能定量的描述某一元素在隶属于某一性质的程度和变化,关联函数的计算公式为[9]

$$K_{ij}(x_{ij})=\begin{cases} \dfrac{-\rho(x_{ij},X_{oij})}{|X_{oij}|}, & x_{ij}\in X_{oij} \\ \dfrac{\rho(x_{ij},X_{oij})}{\rho(x_{ij},X_{pj})-\rho(x_{ij},X_{oij})}, & x_{ij}\notin X_{oij} \end{cases} \tag{5}$$

式(5)中:

$$\begin{cases} \rho(x_{ij},X_{oij})=\left|x_{ij}-\dfrac{1}{2}(a_{oij}+b_{oij})\right|-\dfrac{1}{2}(b_{oij}-a_{oij}) \\ \rho(x_{ij},X_{pj})=\left|x_{ij}-\dfrac{1}{2}(a_{pj}+b_{pj})\right|-\dfrac{1}{2}(b_{pj}-a_{pj}) \\ X_{oij}=b_{oij}-a_{oij} \end{cases} \tag{6}$$

式(6)中:$p(x_{ij},X_{oij})$、$p(x_{ij},X_{pj})$ 为计算关联度;x_{ij} 为影响因素的取值;a_{oij}、b_{oij} 为影响因素的最小值和最大值;a_{pj}、b_{pj} 分别为影响因素的取值范围最小值和最大值。

则待评价围岩关于围岩等级的关联度为

$$K_i(p)=\sum_{j=1}^{n}W_{ij}K_{ij}(x_{ij}) \tag{7}$$

式(7)中:W_{ij} 为权重,通过熵权法进行计算。

2.2　熵权理论

熵权法是一种客观的对需要所评价的指标赋予权重的方法,根据各指标的变异程度(以变异系数来表示)来保证对所评价指标权重不会受到人为主观判别的影响,利用熵权法计算权重步骤如下。

步骤 1　对数据进行无量纲处理(线性极差法)。

当指标越大越有利,则有

$$x_{ij}=\frac{r_{ij}-\min(r_{ij})}{\max(r_{ij})-\min(r_{ij})} \tag{8}$$

当指标越小越有利,则有

$$x_{ij}=\frac{\max(r_{ij})-r_{ij}}{\max(r_{ij})-\min(r_{ij})} \tag{9}$$

式(9)中:x_{ij} 为数据处理后的无量纲数值;r_{ij} 为选取影响因素的取值。

步骤 2 熵值 H_j 计算。

假设隧道围岩有 s 个数据样本,则有

$$H_j = -\frac{1}{\ln s}\sum_{i=1}^{s}\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{s}x_{ij}}\ln\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{s}x_{ij}} \tag{10}$$

式(10)中:H_j 为影响因素的计算熵值。

步骤 3 根据熵值计算第 j 个围岩样本数据的熵权 θ_j,计算公式为

$$\theta_j = \frac{1-H_j}{n-\sum_{j=1}^{n}H_j} \tag{11}$$

$$\sum_{j=1}^{n}\theta_j = 1 \tag{12}$$

式中:n 为评价指标的数量。

3 基于熵权-可拓物元分级法的围岩分级应用

项目依托的隧道在修建过程中,设计阶段的围岩分级与现场实际施工存在较大误差,施工过程中,通过掌子面的附近围岩的掉块、拱部无支护条件下的块体塌落情况,以及围岩的变形收敛以及洞顶下沉情况,发现前期分级情况与实际稳定性不符,存在多次围岩级别变更的情况,为研究围岩分级存在的问题,选取 10 个断面进行分级研究。

3.1 分级指标选取

评价指标的选取是岩堆体隧道稳定性评价的重要部分,也是进行围岩分级的基础,关系到评价结果的准确度,只有科学合理全面的指标体系才能更好地进行围岩稳定性评价。

通过影响隧道穿越岩堆体围岩稳定性影响因素的深入分析以及岩堆体的物理工程特性,结合学者的询问建议以及《铁路隧道设计规范》(TB10003—2016)。由于岩堆体的形成经过崩解、翻滚塌落堆积而成,因此选取岩体单轴饱和抗压强度、节理裂隙密度、岩体完整性系数这 3 个指标可以反应岩堆体的岩块强度和破碎程度,而含水率以及填充土含量主要根据岩堆体松散、孔隙率大、易失稳破坏的工程特性以及课题组在研究过程中发现这两个指标对岩堆体的稳定性影响较大,因此选为围岩分级指标以及含水率和填充土含量,共 5 个因素对岩堆体围岩进行分级研究,在减少围岩分级过程中的工作量同时,又能准确的描述岩堆体的特点,得到准确的围岩分级结果。如图 4 所示,通过这 5 个因素相结合,更能反映岩堆体的堆积特点以及物理特性。

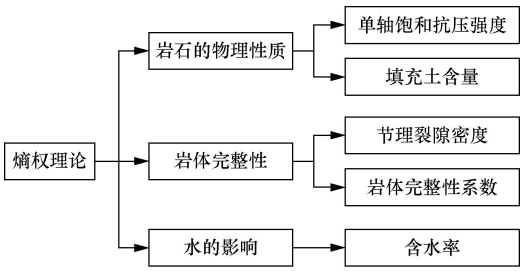


图 4 围岩分级指标体系

Fig. 4 Surrounding rock classification index system

3.2 确定围岩分级经典域、节域

根据岩堆体的地质特性,参照《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)、《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)和相关围岩稳定性评价的研究[23-24],以及工程实践,将岩堆体围岩等级分为Ⅰ~Ⅴ级,其中,Ⅰ级围岩稳定性最好,Ⅴ级最差。不同等级指标取值区间如表 3 所示。

由于围岩的分级指标单位不同,数量级也不同,指标之间互不兼容,没有可比性,为了使各因素进行综合分析,因此,需要进行无量纲化处理。计算公式如式(8)、式(9)所示,对表 3 进行无量纲化处理,得到如表 4 所示。

根据表 4 的数据,可以得到围岩分级质量的经典域和节域,以 $\boldsymbol{R}_1$ 为例其余矩阵与其原理一致。

表 3 隧道围岩分级

Table 3 Tunnel surrounding rock classification

等级	U1	U2	U3	U4	U5
Ⅰ	150~120	0~0.5	1.00~0.75	6.0~8.5	7~4
Ⅱ	120~90	0.5~3.0	0.55~0.75	9.0~8.5	7~11
Ⅲ	90~60	3.0~8.0	0.55~0.35	9.0~10.0	11~15
Ⅳ	60~30	8.0~15.0	0.35~0.15	10.0~11.0	15~20
Ⅴ	30~10	15.0~25.0	0.15~0	11.0~30.0	20~50

注:U1 为单轴饱和抗压强度;U2 为填充土含量;U3 为节理裂隙密度;U4 为岩体完整性系数;U5 为含水率,U1~U5 无量纲。

表 4 隧道围岩分级(无量纲化)

Table 4 Tunnel surrounding rock classification (dimensionless)

等级	U1	U2	U3	U4	U5
Ⅰ	0.79~1.00	1.00~0.96	1.00~0.75	1.00~0.90	0.92~1.00
Ⅱ	0.57~0.79	0.96~0.88	0.55~0.75	0.90~0.87	0.92~0.83
Ⅲ	0.36~0.57	0.88~0.68	0.55~0.35	0.87~0.83	0.83~0.74
Ⅳ	0.14~0.36	0.68~0.40	0.35~0.15	0.83~0.79	0.74~0.64
Ⅴ	0~0.14	0.40~0	0.15~0	0.79~0	0.64~0

注:U1、U2、U3、U4、U5 为各围岩指标,无量纲。

经典域为

$$\boldsymbol{R}_1 = \begin{bmatrix} N_1 & C_1 & (0.79,1) \\ & C_2 & (0.96,1) \\ & C_3 & (0.75,1) \\ & C_4 & (0.90,1) \\ & C_5 & (0.92,1) \end{bmatrix} \tag{13}$$

节域是各评价指标无量纲化处理后的取值范围,由表3可得节域为

$$\boldsymbol{R}_p = \begin{bmatrix} N_1 & C_1 & (0,1) \\ & C_2 & (0,1) \\ & C_3 & (0,1) \\ & C_4 & (0,1) \\ & C_5 & (0,1) \end{bmatrix} \tag{14}$$

3.3　待评价围岩物元矩阵确定

由于每段围岩计算过程一致,因此选取其中一段DK1036+777~DK1038+010进行计算说明,评价指标现场实测数据如表5所示。对分级指标实测值进行无量纲化处理,如表6所示。

表5　分级指标实测值

Table 5　Measured value of grading index

岩段	U1	U2	U3	U4	U5
DK103 6+777~DK103 8+010	56.3	10.0	0.35	10.6	15.5

注:U1、U2、U3、U4、U5为各围岩指标,无量纲。

表6　指标实测值

Table 6　Measured value of grading index

岩段	U1	U2	U3	U4	U5
DK103 6+777~DK103 8+010	0.331	0.600	0.710	0.825	0.734

注:U1、U2、U3、U4、U5为各围岩指标,无量纲。

由表6得到断面的围岩物元矩阵为

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{DK1036+777\sim DK1038+010}} = \begin{bmatrix} N & C_1(0.331) \\ & C_2(0.600) \\ & C_3(0.710) \\ & C_4(0.825) \\ & C_5(0.734) \end{bmatrix} \tag{15}$$

3.4　分级指标关联系数计算

各围岩指标(U1、U2、U3、U4、U5)关于围岩等级(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ)的关联系数代入式(5)、式(6),计算结果如表7所示。

3.5　各指标权重计算

根据熵权法对各指标的权重进行计算,将无量纲化后的数据代入式(10)、式(11),得到表8。

由表8可知,各指标关于围岩质量的稳定性的权重在隧道中,节理裂隙密度和岩体完整性对围岩影响最大,分别为43.2%和35.9%,其他3个影响因素相差不大,所占权重分别为7.8%,9.4%和3.7%。

表7　分级指标关于围岩等级的关联系数

Table 7　The correlation coefficient of classification index about surrounding rock grade

等级	U1	U2	U3	U4	U5
Ⅰ	-0.581	-0.474	-0.533	-0.300	-0.411
Ⅱ	-0.420	-0.412	-0.364	-0.205	-0.265
Ⅲ	-0.081	-0.167	0	-0.125	-0.199
Ⅳ	0.133	0.286	0	0.029	0.064
Ⅴ	-0.366	-0.333	-0.364	-0.167	-0.261

注:U1、U2、U3、U4、U5为各围岩指标,无量纲。

表8　各指标权重

Table 8　Index weight

岩段	U1	U2	U3	U4	U5
DK103 6+777~DK103 8+010	0.078	0.432	0.359	0.094	0.037

注:U1、U2、U3、U4、U5为各围岩指标,无量纲。

4　围岩级别确定

将所计算关联系数(表7)和指标对应的权重(表8)代入式(7),得到隧道围岩的综合关联度,如表9所示。

根据式(16)可以判断出断面处关联度最大为0.091,所以围岩等级为Ⅴ级,与实际施工过程中现场围岩等级一致。

$$K(p) = \max K_i \tag{16}$$

式(16)中:i=Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ;$K_{(}p)$为关联度的最大值。

最终得到结果如表10所示。可以看出,所选的10个断面的围岩中,有9个结果与现场围岩级别相同。DK1041+595~DK1041+665断面熵权可拓分级结果为Ⅳ级,实际围岩级别为Ⅴ级,通过关联度的大小可以得出,虽然结果为Ⅳ级,但数值上非常接近Ⅴ级。其他结果皆与实际围岩分级相同,准确率高达90%,相比于BQ、Q法,两者具较好的一致性,分级效果较好。

从表10结果对比可知,所建立的熵权可拓物元分级法对岩堆体隧道的围岩分级适用性较好,准确率较高,即使隧道部分断面分级结果不一致,但是不存在"跳级"现象,分级结果与实际断面有差异的原因可能是指标数据获取通常带有勘察人员的主观判断,或者实验过程中存在一定的误差,导致分级结果与实际不一致的现象。

表9　围岩质量分级结果

Table 9　Results of surrounding rock quality classification

岩段	$K_{\mathrm{Ⅰ}}$	$K_{\mathrm{Ⅱ}}$	$K_{\mathrm{Ⅲ}}$	$K_{\mathrm{Ⅳ}}$	$K_{\mathrm{Ⅴ}}$
DK103 6+777~DK103 8+010	-0.645	-0.561	-0.376	-0.217	0.091

注:$K_{\mathrm{Ⅰ}}$、$K_{\mathrm{Ⅱ}}$、$K_{\mathrm{Ⅲ}}$、$K_{\mathrm{Ⅳ}}$、$K_{\mathrm{Ⅴ}}$为所对应围岩级别的关联度。

表 10 分级结果对比

Table 10 Comparison of grading results

断面	BQ 分级法	Q 法	现场实际围岩级别	可拓物元计算结果
DK1036 +777 ~ DK1038 +010	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ
DK1038 +010 ~ DK1038 +390	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
DK1038 +390 ~ DK1038 +955	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
DK1038 +955 ~ DK1039 +475	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ
DK1039 +475 ~ DK1040 +075	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
DK1040 +075 ~ DK1040 +275	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
DK1040 +275 ~ DK1040 +475	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ
DK1040 +475 ~ DK1040 +575	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ
DK1040 +575 ~ DK1041 +595	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ
DK1041 +595 ~ DK1041 +665	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ

5 结论

通过室内直剪试验,分析了岩堆体的剪切特性,并选用含水率和填充土含量作为围岩分级指标之一,基于熵权可拓物元法对岩堆体围岩分级进行研究,得到以下结论。

(1) 随着含水率的增加,岩堆体的抗剪强度呈现出先增大后减小的剪切特性,在 8% 可取到极大值,含水率过大或过小都会弱化岩堆体的抗剪强度。

(2)填充土含量增加,岩堆体的剪切强度先增大后较小,填充土含量不断增加,曲线接近平稳,在 6% 可取到极大值。填充土含量过大,对抗剪强度影响的敏感性逐渐减小。

(3)不同含水率及填充土含量的样本剪切强度随竖向应力的增加不断增加,总体上含水率为 8% 以及填充土含量为 6% 的样本在不同竖向压力下均大于其他试样。

(4) 选取石英砂以及填充土作为模拟岩堆体的基本材料,能够很好地对岩堆体的工程力学特性进行模拟。岩石单轴饱和抗压强度、节理裂隙密度、岩体完整性系数、含水率和填充土含量 5 个指标能够准确地描述岩堆体的物理特性,适合作为岩堆体围岩分级的指标。

(5) 熵权可拓物元法从定性定量的角度对岩堆体围岩分级,准确率高达 90%,即使部分断面与实际结果不一致,但是未出现围岩级别跳级现象,证明该方法是科学有效的,能够满足工程实践的需要。

参 考 文 献

[1] 刘灯凯, 饶军应, 陈凯, 等. 基于岩体质量 Q 系统的隧道围岩分级[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(13): 254-259.
Liu Dengkai, Rao Junying, Chen Kai, et al. Tunnel surrounding rock classification base on rock mass Q-system[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(13): 254-259.

[2] Hoseinie S H, Aghababaei H, Pourrahimian Y. Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDI)[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45(1): 1-10.

[3] 张波. 基于熵权法的隧道施工围岩分级方法[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(4): 122-127.
Zhang Bo. Surrounding rock classification method of tunnel construction based on entropy weight method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(4): 122-127.

[4] Salimi A, Rostam I J, Moormann C. Application of rock mass classification systems for performance estimation of rock TBMs using regression tree and artificial intelligence algorithms[J]. Tunneling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2019, 92: 103-109.

[5] 吴圣智, 王明年, 刘大刚. 基于模糊概率理论岩质围岩基本分级细化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(1): 45-51.
Wu Shengzhi, Wang Minnian, Liu Dagang. Rocky surrounding subclassification based on fuzzy mathematics and probability method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15 (1): 45-51.

[6] 杨悦, 肖修鸿, 朱捷, 等. 隧道围岩 Vague 集可拓安全评估模型[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 25-29.
Yang Yue, Xiao Xiuhong, Zhu Jie, et al. Extension safety assessment model of Vague sets in tunnel surrounding rock[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1): 25-29.

[7] 徐博, 汪佳欣, 钱屹, 等. 基于模糊推理的智能围岩分级方法研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(8): 24-29.
Xu Bo, Wang Jiaxin, Qian Yi, et al. Intelligent surrounding rock classification based on duzzy inference[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(8): 24-29.

[8] 裴启涛, 丁秀丽. 岩体质量等级倾向性预测灰评估优化模型及应用[J]. 水电能源科学, 2016, 34(9): 148-152.
Pei Qitao, Ding Xiuli. Optimal grey evaluation model for prediction of rock mass quality classification proneness and its application[J] Water Resources and Power, 2016, 34(9): 148-152.

[9] 田卫明. 层次可拓法在层状围岩隧道风险评估中的应用[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(9): 68-71, 40.
Tian Weiming. Application of AHP-extenics model in risk assessment of layered surrounding rock tunnel[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45(9): 68-71, 40.

[10] 张琦, 朱合华, 黄贤斌, 等. 基于 Mamdani 模糊推理的山岭隧道围岩 RMR14 分级[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2116-2124.
Zhang Qi, Zhu Hehua, Huang Xianbin, et al. RMR14 classification of surrounding rock in mountain tunnels based on Mamdani

fuzzy inference[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 39(11): 2116-2124.

[11] 何乐平, 罗舒月, 胡启军, 等. 基于理想点-可拓云模型的隧道围岩稳定性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 126-134.
He Leping, Luo Shuyue, Hu Qijun, et al. Stability evaluation of tunnel surrounding rock based on ideal point-extension cloud model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 126-134.

[12] 周宗青, 李术才, 李利平, 等. 岩体质量等级分类预测方法及其工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(4): 1049-1056.
Zhou Zongqing, Li Shucai, Li Liping, et al. Classification method of rock mass quality and its engineering application[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(4): 1049-1056.

[13] 王睿, 夏道洪, 邓祥辉, 等. 施工阶段隧道围岩快速分级法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(5): 2053-2060.
Wang Rui, Xia Daohong, Deng Xianghui, et al. Rapid classification method of tunnel surrounding rock in construction stage[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(5): 2053-2060.

[14] 易文豪, 王明年, 童建军, 等. 基于支持向量机的大断面岩质隧道掌子面围岩非均一性判识方法[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(5): 112-122.
Yi Wenhao, Wang Mingnian, Tong Jianjun, et al. Inhonogeneity identification method for surrounding rock of large-section rock tunnel face based on support vector machine[J]. China Railway Science, 2021, 42(5): 112-122.

[15] 张钧博, 何川, 严健, 等. 基于交叉验证的 XGBoost 算法在岩爆烈度分级预测中的适用性探讨[J]. 隧道建设, 2020, 40(S1): 247-253.
Zhang Junbo, He Chuan, Yan Jian, et al. Discussion on the applicability of XGBoost algorithm based on cross validation in predication of rockburst intensity classification[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(S1): 247-253.

[16] 郑帅, 姜谙男, 张峰瑞, 等. 基于机器学习与可靠度算法的围岩动态分级方法及其工程应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 308-318.
Zheng Shuai, Jiang Annan, Zhang Fengrui, et al. Dynamic classification method of surrounding rock and its engineering application based on machine learning and reliability algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 308-318.

[17] 宋继宏, 胡明鉴, 付克俭, 等. 宜巴高速岩堆不同密实度大型直剪强度特性[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 687-692.
Song Jihong, Hu Minjian, Fu Kejian, et al. Strebgth behavior of rock debris heaps with different densities in Yiba Expressway[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 687-692.

[18] 宋勇军, 孙银伟, 李晨婧, 等. 基于离散元法模拟的冻融砂岩细观破裂演化特征研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3602-3616.
Sun Yongjun, Sun Yinwei, Li Chenjing, et al. Study on meso-fracture evolution characteristics of sandstone after freeze-thaw cycles based on discrete element method simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3602-3616.

[19] 关振长, 龚振峰, 陈仁春, 等. 基于正交设计的岩质相似材料配比试验研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(9): 92-98, 111.
Guan Zhenchang, Gong Zhenfeng, Chen Renchun, et al. Experimental study on mix proportion of rock similar material based on orthogonal design[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(9): 92-98, 111.

[20] 刘昌国, 谢全敏, 曾勇, 等. 宜巴高速公路三里花岩堆形成机理与破坏模式研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(2): 102-107.
Liu Changguo, Xie Quanmin, Zeng Yong, et al. Study on formation mechanism and failure mode of Sanlihua Talus slope at Yiba highway[J], Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(2): 102-107.

[21] 胡世丽, 蒋冰. 级配和含水量对赣南红土抗剪强度特性影响的试验研究[J]. 江西理工大学学报, 2021, 42(1): 1-6.
Hu Shili, Jiang Bing. Experimental study of the influence of water content and particle size distribution on shear strength of red soil in south Jiangxi[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2021, 42(1): 1-6.

[22] 陈思华. 隧道蚀变围岩分级及土石混合体细观特性研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
Chen Sihua. Study on tunnel alteration surrounding rock classification and mesoscopic characteristic of soil rock mixture[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.

[23] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京:中国铁道出版社, 2017.
National Railway Administration of People's Republic of China. Code for design on tunnel of railway: TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

[24] 中华人民共和国水利部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.