

极高地应力软岩稳定性指标优先级及多因素耦合分级*

陈志敏¹, 唐帅尧¹, 李亚子², 龚 军³, 陈宇飞³, 李增印³

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中建八局轨道交通建设有限公司, 江苏 南京 210046;
3. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511458)

摘要: 极高地应力隧道工程设计施工除了考虑地质构造作用极其强烈以外, 强度应力比、地下水、膨胀应力、结构面产状等因素对围岩稳定性的影响也必须考虑, 同时隧道轴线与最大应力主方向夹角、隧道断面及面积、岩层厚度及倾角等因素也非常重要。以《工程岩体分级标准》为基础, 提出一种极高地应力复杂软岩隧道围岩稳定性因素优先级分析思路, 并采用熵权法形成多主因素耦合、次因素修正的围岩分级方法。现场实践表明分级结果与现场施工状态吻合较好, 进一步对另两座隧道使用本方法进行验证。结果表明, 现行规范中国岩分级因素和方法不适用极高地应力情况, 且和影响因素优先级加多因素耦合修正BQ值的围岩分级方法结果相差10%左右, 原因是对极高地应力软岩稳定性影响因素考虑不全面。这种围岩稳定性分级方法具有较好的适用性, 且耦合时使用熵权法原理使得结果更加偏向于定量计算, 减少了人为因素干扰, 结果更加客观真实。

关键词: 极高地应力; 复杂软岩; 熵权法; 多因素耦合; 围岩分级

中图分类号: U45; X936 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)01-0078-10

Stability Index Priority and Multi-Factor Coupling Classification Method for Extremely-High In-Situ Stress Soft Rock

CHEN Zhimin¹, TANG Shuaiyao¹, LI Yazhi², GONG Jun³, CHEN Yufei³, LI Zengyin³

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. China Construction Eighth Bureau Rail Transit Construction Co., Ltd., Nanjing 210046, China;
3. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou 511458, China)

Abstract: In the design and construction of tunnels with extremely high in-situ stress, it is essential to consider not only the geological structure and its strong effect, but also the influence of strength-stress ratio, groundwater, expansive stress, and the occurrence of structural planes on the stability of surrounding rock. At the same time, the angle between the tunnel axis and the three principal stress directions, the tunnel cross-section and area, and the thickness and dip angle of rock layer are also very important. Based on the "Engineering Rock Grading Standard", an approach for prioritizing factors for analyzing the stability of the surrounding rock in complex soft rock tunnels with extremely-high in-situ stress is proposed. The entropy weight method is then used to establish a multi-principal factor cou-

* 收稿日期: 2022-06-16; 修回日期: 2022-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(12262018)、中央引导地方科技发展资金项目(22ZY1QA005)资助

作者简介: 陈志敏(1979—), 男, 教授, 博士。主要从事岩土与隧道工程方面的教学与科研工作。E-mail: czm@mail.lzjtu.cn

通讯作者: 唐帅尧(1998—), 男, 硕士研究生。主要从事岩土与隧道方向研究。E-mail: 11200163@stu.lzjtu.edu.cn

pling and sub-factor correction method for grading the surrounding rock. The results show that the factors and methods of surrounding rock classification in the current code are not suitable for extremely high ground stress, and the results of surrounding rock classification method with priority of influencing factors and multi-factor coupling correction BQ value yields results that differ by about 10 %. This discrepancy is due to that the factors affecting the stability of soft rock with extremely high ground stress are not fully considered. This method of classifying the stability of the surrounding rock is highly applicable, and the use of the entropy method principle in the coupling process leads to more quantitative calculations, reducing the interference of human factors, and making the results more objective and realistic.

Keywords: extremely-high in-situ stresses; complex soft rock; entropy weighting method; multi-factor coupling; classification of surrounding rock

0 引言

近年来,随着我国西部隧道建设的越来越多,遇到的难题也随之变多,尤其高地应力软岩隧道的大变形现已经变成隧道行业研究的热门方向,这种隧道在施工过程中,需要对围岩进行分级从而保证施工安全、节约资金和后期运营维护方便等。对工程岩体进行分类与分级的目的是对各类岩体的承载力及稳定性做出评价,以指导建筑物的设计、施工及基础处理。围岩分级经过长时间的发展,研究人员陆续提出 RQD、RMR、Q 系统等适用于不同围岩条件的分级方法,加快了研究进程^[1-6]。在我国,围岩分级主要采用国 BQ 法进行分级,适用于大部分的围岩,但在一些特殊的地质围岩环境中,其准确性和适用性将会大大降低。但因其简单可靠,故许多专家学者都在此分级基础上针对不同工程岩体进行修正,利用修正后的 BQ 值再进行围岩质量分级^[7]。

在极高地应力复杂软岩隧道进行围岩稳定性分级时,需要对影响因素进行主次分类。陈卫忠等^[8]在研究岩体基本质量指标修正值 BQ 的挤压变形预测方法时优先考虑了隧道埋深、跨度、围岩强度应力比、地下水、岩体结构面等 5 个为主要影响因素进行分级。余跃新^[9]通过开展声波测试和室内岩石力学试验,分别对隧道群围岩的岩石力学性质和质量分级进行了研究。在层状岩体质量评价中,沙鹏等^[10]采用 Jaeger-Donath 与 Mogi-Coulomb 强度准则提出结构面产状修正系数以及初始地应力状态修正系数的计算公式,修正 BQ 分级方法并对木塞岭铁路隧道层状围岩进行了岩体质量评价,且结果

更为精确。张波^[11]总结各类围岩分级方法的基础上综合选取岩石单轴饱和抗压强度、岩石完整性系数、岩体体积节理数、地下水、岩石质量指标 RQD、围岩弹性纵波速度等 6 个参数作为隧道围岩分级评价指标,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。刘浩等^[7]在对巷道围岩稳定性分级时依然采用工程岩体分级标准中的三个分级指标,采用加权平均法对系数取值进行修正,效果良好。故在研究不同地质环境时对影响因素进行增加或减少再进行适当处理,此种方法可行^[12],在极高地应力软岩膨胀岩分级工程中也可采用类似的方法进行围岩等级修正。

由此可见,很多国内外学者在针对围岩分级方面已经做出了很多建设性的研究,给极高地应力软岩隧道围岩稳定性分级方面提供了理论及实践参考价值^[13-16]。但在这一研究方向上,还有些不足之处:一是所有研究并未形成一个被所有人接受和认可的方法,需要在不同的地质条件下进行不同的考虑;二是在前人的研究中,对于围岩稳定性的影响因素优先级判断主要通过工程师的经验进行判断,并未明确的进行规定;三是在已提出的围岩分级方法中并不完全适用极高地应力情况,只能提供参考借鉴。

因此,本文通过在前人研究的基础上,针对以往研究的不足,结合围岩特征和变形数据分析影响极高地应力复杂软弱围岩稳定性的影响因素,用灰色关联法确定影响因素的主次关系,再以 BQ 分级方法为基础使用熵权法对围岩进行修正。结合隧道实例进行验证,其成果可以为极高地应力复杂软岩类隧道围岩分级提供科学依据和施工指导。

1 高地应力软岩特征及影响因素分析

1.1 极高地应力基本概念及分类

地应力是指在人类活动影响前就存在于岩体中的应力。其成因可以分为板块挤压运动、地心引力、岩浆侵入、地温梯度、地表剥蚀等几种情况。根据引起因素的不同,可以分为构造应力、非构造应力和残余应力^[17]。一般情况下,(极)高地应力隧道均是以构造应力为主,表现为测点水平应力大于其垂直应力。

规范中规定,以强度应力比的大小判断围岩是否属于(极)高地应力。当数值小于4时,则属于极高地应力区;在4~7时,属于高地应力区。但在实际应用过程中,这种划分方法有时过于保守,根据具体情况可以适当进行调整。

1.2 极高地应力复杂软岩隧道围岩变形及机理

极高地应力复杂软岩隧道在开挖后,由于围岩自身软弱破碎且围岩的自稳能力弱,施工开挖后岩体不再是三轴应力稳定状态易受剪应力破坏,从而使围岩会发生大变形和位移,当支护结构上的支护力不足时会引起结构掉块、破裂等隧道病害。

一般在隧道围岩变形过程中主要分为三步:①围岩发生弹性变形时期;②围岩弹性变形与塑性变形共存时期;③变形的形式主要为蠕变并有一定的塑性变形,并且围岩处于断裂、挤出以及膨胀等多种变形形式共存的时期。

1.3 极高地应力复杂软岩稳定性影响因素

引起隧道围岩发生大变形的原因较多,且错综复杂,不易进行判断。通过前人^[18-19]的研究和总结,主要分为客观和主观因素。客观因素主要有:地下水、围岩结构面产状、岩层厚度和倾角、强度应力比、膨胀应力、隧道轴线与三大主应力方向夹角、隧道断面形式及面积、围岩的抗压强度等;主观因素主要包括:隧道施工时不规范、人为主观判断不准确等。

将这些影响因素作为修正BQ值的指标体系,但影响因素对围岩稳定性的影响程度不相同,它们之间没有确定的交互关系且各个影响因素的量纲并不相同,故在进行围岩稳定性分级时需要进行筛

选。利用时将之分为主要和次要因素,分别对围岩级别进行修正。

2 围岩稳定影响因素优先级

2.1 灰色关联法

采用灰色关联法^[20-21]和隧道稳定性影响机理相结合对围岩影响因素进行优先级分析。灰色关联方法主要是根据影响因素之间的发展趋势相似或者相异的程度来衡量因素间接近的程度,对样本的大小单位没有太大的要求。分析时也不需要典型的分布规律,用关联度来描述因素间关系的强弱、大小和顺序,可以确定围岩稳定性分级中的主导因素,并对围岩分级的影响因素进行筛选。其分析过程和筛选结果,是对围岩分类途径的有效扩展和补充。且极高地应力围岩稳定性的影响因素较多、量纲不统一、各个因素之间没有明显的函数关系,所以可以使用灰色关联法来描述极高地应力围岩各影响因素的重要程度。

灰色关联分析方法其主要步骤是:①确定影响因素中最重要的参考数列和其余影响因素的比较数列;②所有数列进行无量纲化处理,使其不受数据单位和大小的影响;③求出比较数列的关联系数;④求出各比较数列与参考数列之间的关联度。计算公式仍然采用灰色关联法的原公式,详细计算及过程参考文献[22]。当计算结果关联度越小时,其相对应的因素对围岩稳定性的影响程度越大。

2.2 影响因素优先级判断

2.2.1 确定各数列取值

根据MLS(M表示各影响因素引起的病害控制措施状态;L表示事故的发生频率;S表示产生的后果)安全评价法^[23]中综合考虑关联因素的方法,选取高地应力围岩影响因素的控制关联指标为:围岩稳定性破坏的可能、事故发生频率、灾难程度和控制措施。各指标的分数值通过统计高地应力隧道各种病害的4个指标分别按照MLS法打分确定数值,并以这4个指标组成的数列为参考数列。将各个影响因素也同样进行统计打分,作为比较数列。MLS安全评价法打分时,只需按照打分规则进行危害程度判断,不需要人为的赋值,可以最大程度的降低人为因素的影响。

2.2.2 计算关联度

对各个数列进行无量纲化,并计算出各影响因素对参考数列的关联系数,见表1。关联度排序见表2。

表1 各影响因素关联系数

Table 1 Values of correlation coefficients for each influencing factor

影响因素	破坏可能	发生频率	灾害程度	控制措施
地下水	0.712	0.632	0.546	0.640
结构面产状	0.670	0.604	0.755	0.692
岩层倾角	0.662	0.545	0.675	0.593
强度应力比	0.474	0.573	0.529	0.763
软弱夹层	0.786	0.869	0.796	0.725
膨胀应力	0.652	0.741	0.569	0.749
断面面积	0.925	0.889	0.756	0.869
轴线与主应力夹角	0.939	0.858	0.798	0.879

表2 各影响因素关联度排序

Table 2 List of correlation for each influencing factor

影响因素	关联度	排序
强度应力比	0.584 8	1
岩层倾角	0.623 9	2
地下水	0.632 6	3
膨胀应力	0.677 6	4
结构面产状	0.680 3	5
软弱夹层厚度	0.809 6	6
隧道断面面积	0.859 7	7
隧道轴线与最大水平主应力夹角	0.868 6	8

由表2可以得出高地应力软岩稳定性的影响因素排序为强度应力比、岩层倾角、地下水、膨胀应力、结构面产状、软弱夹层厚度、隧道断面面积、隧道轴线与最大主应力方向夹角。在实际应用中,若某一影响因素影响特别小或没有,可以直接去除此因素。

3 极高地应力复杂软岩耦合分级方法

3.1 围岩分级方法思路分析

以BQ围岩分级方法为基础,使用国标《工程岩体分级标准》^[24]中岩石坚硬程度及岩体完整程度组合确定岩体基本质量指标BQ值,由于各影响因素

对围岩稳定性的影响程度不同,将主要影响因素利用熵权法原理配合计算进行第一次修正,然后通过次要影响因素在第一次修正基础上进行二次修正,两次修正完成后的[BQ]值通过对比得到围岩稳定性分级的围岩级别。第二次修正主要是根据第一次修正结果减去次要因素的修正值即可,围岩分级基本流程如图1所示。后面用影响因素优先级加多因素耦合修正BQ值分级方法描述此方法。

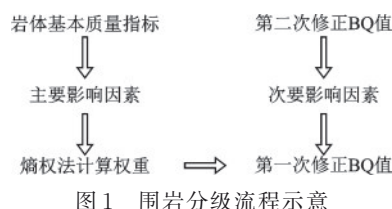


图1 围岩分级流程示意

Fig.1 Flow chart of surrounding rock classification

3.2 熵权法原理简介

熵权-可拓物元理论是将待评对象视为物元,通过物元分析来确定不同评价等级的评估标准,运用熵权法可以确定各评判指标的权重值。这其中最主要的是由:建立评价的物元、经典域、节域,参数的无量纲化和计算评价指标的权重等部分组成。对于某项评价指标,其熵越小,则表明系统越有序,该指标在系统评价过程中的作用也越大,权重也越大,所以,可使用熵权法减小人为主观因素对权重大小的影响,计算出各个指标的权重,为多指标综合评价提供依据。具体的构建计算过程参见论文基于熵权法的隧道施工围岩分级方法^[11],熵权法的流程如图2所示。运用熵权法来计算评价指标的权重系数,克服确定权重系数的主观性,避免人为主观干扰,提高结果可信度。



图2 熵权法计算流程示意

Fig.2 Flow chart of the entropy weight method

3.3 多因素耦合体系构建

文中以国标《工程岩体分级标准》^[24]的分级方法先根据公式(1)计算出BQ值,然后根据主要影响因素对围岩稳定性的不同,利用熵权法原理进行权

重分配计算,体现出不同影响因素对围岩稳定性不同程度的影响。按照所得权重根据公式(2)计算主要影响因素修正后的BQ值。

$$BQ=100+3R_c+250K_v \quad (1)$$

$$[BQ]=BQ-100(\sum a_i K_i) \quad (2)$$

式中, R_c 为岩体单轴饱和抗压强度; K_v 为岩体完整性系数; a_i 为主要影响因素权重系数; K_i 为主要影响因素取值。

3.4 影响因素数据取值分析

地下水和围岩结构面产状的取值按照《工程岩体分级标准》^[24]进行取值。其余影响因素分别按照下文介绍或者现场实测数据进行取值。

3.4.1 强度应力比

规范中的初始地应力状态和强度应力比之间含义有所重复,且强度应力比可以更好的描述围岩强度与地应力之间的关系,所以选择这个指标。强度应力比 M 通过式(3)进行计算:

$$M=R_c K_v / \sigma_{\max} \quad (3)$$

式中, M 为强度应力比; R_c 为岩体单轴饱和抗压强度; K_v 为围岩完整性系数; $\sigma_{\max}$ 为围岩最大主应力值。

由于强度应力比的值越小围岩稳定性越差,为和其他影响因素取值保持一致,故用如表3所示进行换算取值。

表3 围岩强度应力比换算取值

Table 3 Conversion values for the strength stress ratio of the surrounding rock

强度应力比	>0.80	$(0.60, 0.80]$	$(0.32, 0.60]$	$(0.18, 0.60]$	≤ 0.18
修正值	0.5	$(0.5 \sim 0.8)$	$[0.8 \sim 1)$	$[1 \sim 1.5)$	1.5

3.4.2 膨胀应力

围岩膨胀性指标取值,需要对围岩样本进行膨胀性试验。包括:①原岩进行取样通过XRD成分衍射分析试验,测出围岩中蒙脱石、伊利石等膨胀性粘土矿物的含量;②岩样含水量测试和干燥饱和吸水率;③岩样自由膨胀变形量。其数据取值按照表4进行。

3.4.3 其余影响因素数据

其余影响因素数据作为主要因素时直接使用勘测数据,作为次要因素时修正BQ值直接按照下面表中数据在第一次修正完成后的数据基础上进行相减。

表4 围岩膨胀性指标取值

Table 4 Values for the swellability index of the surrounding rock

围岩膨胀等级	蒙脱石含量/%	干燥饱和吸水率/%	自由膨胀变形量/%	数据值
弱膨胀性	<10	<20	<10	$0.1 \sim 0.2$
中膨胀性	$10 \sim 30$	$20 \sim 50$	$10 \sim 15$	$0.2 \sim 0.6$
强膨胀性	>30	>50	>15	$0.6 \sim 0.8$

无论围岩的强度高低,当围岩含有软弱夹层尤其是在掌子面上,都会使得围岩失稳。所以需要考虑到围岩软弱结构面的影响。岩体软弱夹层厚度的取值见表5。

表5 岩体软弱夹层厚度影响

Table 5 Effect of thickness of soft rock inclusions

岩层厚度/m	$h \leq 1$	$1 < h \leq 3$	$3 < h \leq 10$	$h > 10$
修正值	0	1	1.25	1.5

一般情况下,在隧道选线时隧道轴线与最大水平主应力方向夹角越小对围岩的稳定性影响越小,通过查阅资料^[25-26]和对比分析,按照 30° 和 60° 将夹角进行三分并分别进行修正。按照表6进行取值。

表6 隧道轴线与最大水平主应力夹角影响

Table 6 Influence of the angle between the tunnel axis and the maximum horizontal principal stress

夹角	$\leq 30^\circ$	$30^\circ \sim 60^\circ$	$\geq 60^\circ$
修正值	0.5	1	1.5

围岩中储存的应力释放随着隧道断面面积的增大而增大。对于公路隧道,其断面相对较大,所以需要考虑这一影响因素,隧道断面面积修正BQ值见表7。

表7 隧道断面面积影响

Table 7 Impact of the tunnel cross-sectional area

隧道断面面积/ m^2	<80	$80 \sim 100$	>100
修正值	0	1	1.5

两次修正完成后,根据最终的修正BQ值和表8对比确定围岩亚分级等级。当围岩等级达到Ⅳ级以上,则认定围岩稳定性较差,隧道开挖后会发生大变形,施工时需要进行着重加强支护结构。

表8 公路隧道围岩基本质量分级^[27]

Table 8 Classification of rock mass basic quality in highway tunnel engineering

级别	Ⅲ		Ⅳ			Ⅴ	
	Ⅲ ₁	Ⅲ ₂	Ⅳ ₁	Ⅳ ₂	Ⅳ ₃	V ₁	V ₂
修正	450~	400~	350~	315~	284~	250~	210~
BQ值	401	351	316	285	251	211	150

4 工程实例分析与验证

4.1 宁缠隧道工程概况

宁缠隧道位于青海省门源县境内,其项目施工平均海拔为3 600 m。左、右线全长分别为6 024 m、5 943 m,属于特长隧道,隧洞底最大埋深约544.00 m。隧道设计车速为80 km/h,隧道内断面净宽为10.25 m,净高5.0 m,设计仰拱净空断面面积达111.68 m²。有段掌子面开挖后揭露地层岩性为石炭系下统钙质粉砂岩与泥碳质粉砂岩互层,夹碳质泥岩和碳质页岩,为较软岩和软岩,局部夹极软岩(碳质泥岩),强风化、中风化炭质页岩(夹煤线)与粉砂岩互层。围岩整体呈层状构造,原岩结构、构造大部分被破坏,各组分主要依靠泥钙质物的胶结作用,其节理较为分明、裂隙极发育,强度较低,岩体大多破碎,钻取岩芯不易成型。且掌子面围岩较为潮湿,隧洞开挖时水从围岩的裂隙间流露、渗出,部分段落裂隙水较为发育,初期支护施做后衬砌结构呈现出不对称大变形,且表面仍有少量水渗出,呈滴淋状。掌子面突出变形,初支完成后围岩变形长达100 d还未完全稳定。隧道线路方向约为NW56°,地应力检测试验结果显示最大水平主应力优势方向为NW64°^[28]。

4.2 围岩稳定性分级

选取宁缠隧道ZK40+130~ZK43+164共10段高地应力段为研究对象,分别用编号1~10代替标段,用影响因素优先级加多因素耦合修正BQ值分级方法对围岩进行稳定性分级。

4.2.1 主次影响因素选择

将灰色关联法对高地应力围岩稳定性影响因素的排序和宁缠隧道的围岩特点进行综合考虑,其优先级结果与实际工程中考虑的影响因素基本

吻合。

将关联度值做成折线图(图3),如图3所示,在第5和第6个影响因素之间斜率最大,差异较为明显,可以以关联度值0.7为分界线,前五个为围岩分级的主要影响因素,后面三个为次要因素,为后续实际工程提供参考。根据宁缠隧道的现场调研实践分析:地下水、结构面产状、地应力等也是主要考虑因素。

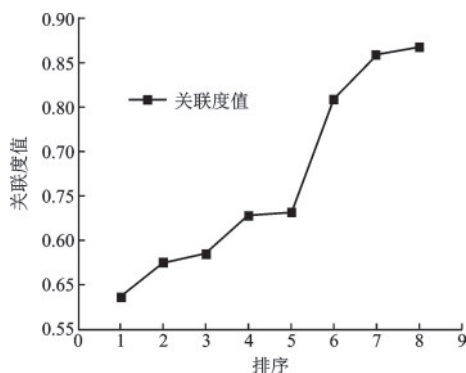


图3 关联度值折线

Fig.3 Line graph of correlation values

所以按照排序以强度应力比、岩层倾角、地下水、结构面产状和膨胀应力5个影响因素为主要修正指标,其余三个为次要修正指标。

4.2.2 主要影响因素修正

主要影响因素对隧道围岩稳定性分级修正采用熵权法原理在工程岩体分级标准上进行修正。

按照3.4节的影响因素取值,使用熵权法原理计算主要影响因素的各权重指标结果见表9。

表9 各影响因素权重系数

Table 9 Weight coefficient of each influencing factors

影响因素	地下水	岩层倾角	强度应力比	膨胀应力	结构面产状
权重(a)	0.13	0.24	0.34	0.17	0.12

将权重系数代入公式(2)进行计算,得到主要影响因素修正BQ值结果见表10。

4.2.3 次要影响因素修正

通过对隧道病害的监控量测得到精确的数据,对比次要因素的修正表选取修正值,用第一次修正得到的BQ值减去选取的次要因素的修正值得到最终结果,最后和表8对比判断围岩稳定性等级,结果见表10。

表10 围岩BQ值修正表

Table 10 Correction for BQ values of the surrounding rock

标段编号	主修正[BQ]值	次修正[BQ]值	围岩等级
1	282.2	279.1	IV ₃
2	289.5	286.4	IV ₂
3	316.7	313.6	IV ₂
4	292.58	289.48	IV ₂
5	288.3	285.2	IV ₂
6	259.36	256.26	IV ₃
7	209.29	206.66	V ₁
8	269.1	266	IV ₃
9	207.18	204.08	V ₂
10	36.16	33.06	V ₂

4.2.4 与隧道现场施工分级对比

隧道现场施工等级是通过公路隧道规范中提供的方法进行计算得出结果。将勘察设计等级、隧道施工等级和4.2.2节的结果统计后得到表11。由表11可知使用影响因素优先级加多因素耦合修正BQ值分级方法后,得到的最终修正BQ值与隧道勘察设计阶段相差较大,与施工阶段相比基本相差一个亚级。

表11 隧道围岩级别对比

Table 11 Comparison of grades of tunnel surrounding rock

标段编号	隧道施工	修正后围岩等级	勘察设计
1	IV ₂	IV ₃	III ₂
2	IV ₁	IV ₂	III ₁
3	III ₂	IV ₂	III ₂
4	IV ₁	IV ₂	III ₁
5	IV ₂	IV ₂	III ₂
6	IV ₃	IV ₃	III ₃
7	V ₁	V ₁	IV ₁
8	IV ₃	IV ₃	III ₃
9	V ₁	V ₂	IV ₁
10	V ₂	V ₂	IV ₂

通过分析发现在勘察设计阶段对于围岩级别的把控并不准确,整体基本相较于施工时的围岩等级相差较大,在施工时全部进行了补充勘察。在勘察设计阶段做出的分级结果普遍偏小的原因是勘察时由于勘察人员的主观判断和对围岩地应力和膨胀性考虑不全,致使围岩等级偏于稳定;隧道施工阶段修正BQ值与本文修正方法得出的数据结果

之间相差不大,且有些数据刚好处于表8分界线的两侧,使得有的标段刚好相差一个亚级。由于隧道本身属于极高地应力区,且围岩结构强度较低,在施工过程中仍然有衬砌变形掉块出现,故这种多因素耦合的修正BQ值的围岩分级方法有较好的参考价值。在宁缠隧道这种围岩条件下,可以使用影响因素优先级加多因素耦合修正BQ值分级方法。

由图4可以看出,修正前后BQ值的跨度只有第2和3标段相差较大,为10%左右,但由于在施工过程中在高地应力段常出现拱架变形、衬砌掉块等较严重病害,故修正前后之间的跨度是合理的;当不考虑膨胀应力对围岩稳定性的影响时,可以看出与现行规范修正BQ值相差在10以内,所以膨胀应力只是一个影响因素,在没有膨胀性的隧道围岩分级中也可以应用。

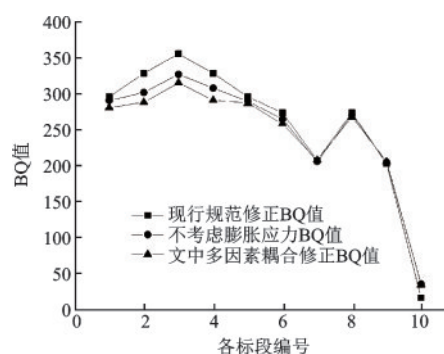


图4 修正前后BQ值对比

Fig.4 Comparison of BQ values before and after correction

4.3 大变形隧道案例验证

4.3.1 木寨岭隧道

木寨岭为超大断面隧道,以该隧道DK177+697~DK182+000为例。隧道围岩中等富水、岩体单轴饱和抗压强度为20.13~30.41 MPa、强度应力比为1.0~2.46,为高地应力板岩及炭质板岩,且围岩无膨胀性。经计算,以强度应力比、岩层倾角、地下水和结构面产状为主要影响因素,隧道断面面积和隧道轴线与主应力夹角为次要影响因素进行计算。按照影响因素优先级加多因素耦合修正BQ值分级方法进行计算得到最终修正BQ值为267,对比表8得到围岩等级为IV₃。

因现场设计并未进行围岩亚分级,但根据与实际开挖情况相对比,现场围岩分级为IV级,且又重新调整支护参数,故此结果与实际围岩情况相符^[10]。

4.3.2 鹧鸪山隧道

以鹧鸪山隧道高地应力软岩K0 + 361~374段为例^[29],隧道所穿岩层主要为千枚岩、板岩及变质砂岩,隧道最大主应力方向主要在N50°W~N70°W,最大水平主应力可以达到13~18 MPa。因为选取的是高地应力段,所以在式(3)中 $\sigma_{\max}$ 按照最大水平主应力取值。采用本文建立的极高高地应力复杂软岩隧道多因素耦合围岩分级方法进行分级计算,最终对比得到围岩等级为V₁,现场实际围岩级别为V,两者分级结果基本吻合,且前者采用亚分级的方式更加精确。

4.3.3 结果评价

木寨岭和鹧鸪山两座隧道最后修正的BQ值均偏小,原因是考虑到了原来设计时没有考虑到的因素,如(超)大断面隧道断面面积,围岩没有的影响因素则不进行考虑。所以在实际分级过程中应把所有可能影响围岩稳定性的因素考虑全面,尽量避免施工时继续调整支护结构参数,减少隧道灾害。

5 结 论

通过总结极高高地应力复杂软岩隧道稳定性影响因素,得到多个围岩评价指标,使用灰色关联法对评价指标进行优先级分类,然后按照熵权法原理进行多个评价指标耦合的方法修正BQ围岩分级方法,得到极高高地应力复杂软弱围岩的定量评价分级体系。得到如下结论:

(1)针对极高高地应力复杂软岩,现行公路隧道规范只考虑了地下水、结构面产状和初始地应力状态,未将影响高地应力软岩的影响因素考虑全面,计算出的围岩等级偏小。所以规范方法不适用于高地应力的情况,在此基础上,提出的影响因素优先级和多因素耦合修正BQ值分级方法全面考虑了影响围岩稳定性主次要因素,结果更符合实际。

(2)以关联度大小为主次因素划分标准,关联度小于0.7为主要影响因素,按照优先级顺序为:强度应力比、岩层倾角、地下水、结构面产状、膨胀性;大于0.7为次要影响因素,按照优先级顺序为:软弱夹层厚度、隧道轴线与主应力夹角、隧道断面面积等。在实际隧道围岩分级工程中,围岩情况会有改变,所以计算出的主次要因素可能也会有所不同。

(3)提出一种极高高地应力复杂软岩隧道多因素耦合围岩分级方法,主要步骤归纳为:①提出极高

地应力复杂软岩隧道围岩稳定性影响因素;②灰色关联法分析影响因素进行优先级分析,定出主、次因素;③主因素采用熵权法定权重,进行多因素耦合修正BQ值;④次因素在主修正基础上根据取值进行减法运算得到最终修正BQ值。

(4)运用影响因素优先级加多因素耦合修正BQ值分级方法,结合隧道实例,结果表明:修正BQ值结果相比于规范减小10%左右,修正围岩等级相比现场施工等级基本相差一个亚级,符合围岩实际稳定性情况,可以更加有效的控制围岩变形,防止隧道病害。

参考文献:

- [1] Karra R C, D Subodh N, B Ashwin J. Prediction of Bond's work index from field measurable rock properties [J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 157:134-144.
- [2] 陈钟. 欧洲典型隧道围岩分类方法简介及海外工程应用[J]. 中外公路, 2020, 40(增2):228-232.
Chen Z. A brief introduction to the classification method of typical tunnel surrounding rock in Europe and its overseas engineering application [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2020, 40 (Sup2): 228-232. (in Chinese)
- [3] Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(2):185-216.
- [4] 吴忠仕. 按Q值进行围岩分级的工程实践[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(4):44-47.
Wu Z S. Rock classification with Q value [J]. Modern Tunnelling Technology, 2001, 38(4): 44-47. (in Chinese)
- [5] 张恒, 张港, 孙建春, 等. Q值与围岩力学参数的相关性分析与工程应用[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5): 26-34.
Zhang H, Zhang G, Sun J C, et al. Correlation analysis of Q value and mechanical parameters of surrounding rocks and its engineering application [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(5):26-34. (in Chinese)
- [6] Gupta M C, Singh B K, Singh K N. Engineering geological rock mass classification of Punasa tunnel site, Khandwa District, Madhya Pradesh [J]. Journal of the Geological Society of India, 2011, 77(3): 269-272.
- [7] 刘浩, 邵海, 刘欣, 等. 基于加权平均法修正BQ法的巷道围岩稳定性分级应用研究[J]. 中国矿业, 2015, 24

- (4):91-95.
- Liu H, Shao H, Liu X, et al. Application study on roadway surrounding rock stability classification based on BQ method revised with weighted average method[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(4): 91-95. (in Chinese)
- [8] 陈卫忠, 田云, 王学海, 等. 基于修正[BQ]值的软岩隧道挤压变形预测[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3125-3134.
- Chen W Z, Tian Y, Wang X H, et al. Squeezing prediction of tunnel in soft rocks based on modified [BQ] [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3125-3134. (in Chinese)
- [9] 余跃新. 贵安腾讯数据中心隧道群围岩岩石力学性质及质量分级研究[J]. 土木工程, 2021, 10(2): 132-141.
- Yu Y X. Study on rock mechanical properties and quality classification of surrounding rock of tunnel group in Gui'an tencent data center [J]. Civil Engineering, 2021, 10(2): 132-141. (in Chinese)
- [10] 沙鹏, 赵逸文, 高书宇, 等. 隧道层状岩体质量评价的BQ分级改进[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 942-950.
- Sha P, Zhao Y W, Gao S Y, et al. Improvement of BQ classification for layered rock mass quality index in tunnel engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(5): 942-950. (in Chinese)
- [11] 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 B. 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. (in Chinese)
- [12] 刘志春, 朱永全, 李文江, 等. 挤压性围岩隧道大变形机理及分级标准研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 690-697.
- Liu Z C, Zhu Y Q, Li W J, et al. Mechanism and classification criterion for large deformation of squeezing ground tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 690-697. (in Chinese)
- [13] 孟陆波, 黄意霖, 李天斌, 等. 高地应力层状软岩隧道非对称挤压大变形分级修正方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 147-156.
- Meng L B, Huang Y L, Li T B, et al. Study on the classification method of the asymmetrical squeezing of layered soft rock tunnels with high geo-stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 147-156. (in Chinese)
- [14] 徐林生, 李永林, 程崇国. 公路隧道围岩变形破裂类型与等级的判定[J]. 重庆交通学院学报, 2002, 21(2): 16-20.
- Xu L S, Li Y L, Cheng C G. Judging of the deformation-cracking type and grade about surrounding rock of highway tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2002, 21(2): 16-20. (in Chinese)
- [15] 李国良, 刘志春, 朱永全. 兰渝铁路高地应力软岩隧道挤压大变形规律及分级标准研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1): 62-68.
- Li G L, Liu Z C, Zhu Y Q. On the large squeezing deformation law and classification criteria for the lanzhou-chongqing railway tunnels in soft and high geo-stress rocks [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(1): 62-68. (in Chinese)
- [16] 陈子全, 何川, 吴迪, 等. 高地应力层状软岩隧道大变形预测分级研究[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(6): 1237-1244.
- Chen Z Q, He C, Wu D, et al. Study of large deformation classification criterion for layered soft rock tunnels under high geostress [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(6): 1237-1244. (in Chinese)
- [17] 张景寿. 地应力的分类及研究方法小议[J]. 中国地质, 1984, 32(8): 20-21.
- Zhang J S. A short discussion of the classification of ground stress and research methods [J]. Geology in China, 1984, 32(8): 20-21. (in Chinese)
- [18] 陈洋宏, 万晓燕, 刘志强. 高地应力缓倾软硬互层岩体中隧道底鼓影响因素模拟分析[J]. 铁道建筑, 2020, 60(2): 65-69.
- Chen Y H, Wan X Y, Liu Z Q. Simulation analysis of influencing factors of tunnel floor heave in the gently inclined soft hard interbedded rock under high geostress [J]. Railway Engineering, 2020, 60(2): 65-69. (in Chinese)
- [19] 马永忠. 高地应力巷道底鼓影响因素及支护对策研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(6): 40-42, 45.
- Ma Y Z. Study on influencing factors and countermeasures of floor heave in high ground-stress roadway [J]. Coal Engineering, 2015, 47(6): 40-42, 45. (in Chinese)
- [20] 曹丽文, 魏永军, 李新民, 等. 围岩稳定性分级影响因素的灰色关联度分析[J]. 中国煤田地质, 2006, 18(5): 41-42, 55.
- Cao L W, Wei Y J, Li X M, et al. Gray relation grade analysis on influencing factors of surrounding rock stability classification [J]. Coal Geology of China, 2006, 18(5): 41-42, 55. (in Chinese)
- [21] 李晓斌, 何富连, 秦宾宾, 等. 极近距离煤层回采巷道围岩分类与支护研究[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(3):

- 325-333.
- Li X B, He F L, Qin B B, et al. Study on classification and support of surrounding rock of mining roadway in extremely close coal seams[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(3): 325-333. (in Chinese)
- [22] 黄冬梅, 谭云亮, 常西坤, 等. 深部巷道围岩稳定性影响因素的灰色关联分析[J]. 煤矿安全, 2016, 47(3): 202-204.
- Huang D M, Tan Y L, Chang X K, et al. Grey relation analysis of influenced factors for deep surrounding rock stability[J]. Coal Mine Safety, 2016, 47(3): 202-204. (in Chinese)
- [23] 刘云, 王保民. MLS评价法在安全评价中的应用[J]. 安防科技, 2011(9): 56-58.
- Liu Y, Wang B M. Application of MLS evaluation method in safety evaluation[J]. Security Technology, 2011(9): 56-58. (in Chinese)
- [24] 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [25] 张广泽, 邓建辉, 王栋, 等. 隧道围岩构造软岩大变形发生机理及分级方法[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 1-12.
- Zhang G Z, Deng J H, Wang D, et al. Mechanism and classification of tectonic-induced large deformation of soft rock tunnels[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(1): 1-12. (in Chinese)
- [26] 代聪, 何川, 夏舞阳, 等. 主应力方向对软岩隧道稳定性影响的试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(2): 303-311.
- Dai C, He C, Xia W Y, et al. Test on the stability of soft rock tunnel with high ground stress field influenced by direction of maximum horizontal principle stress[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(2): 303-311. (in Chinese)
- [27] 公路隧道设计细则 JTG/T D70—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [28] 国道569曼德拉至大通公路宁缠隧道地应力测试及力学试验研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2018.
- [29] 任洋, 李天斌, 张广洋, 等. 高地应力隧道围岩分级BQ-hg法的研究及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 449-450.
- Ren Y, Li T B, Zhang G Y, et al. Research and application of BQ-hg method for surrounding rock classification of tunnels with high geostress[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(3): 449-450. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)

(上接第77页)

- Dong Z G, Wu J M, Shi Z Q, et al. Regression analysis of initial geostress for an underground power plant region[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 5(9): 543-546. (in Chinese)
- [12] 谢红强, 肖明砾, 何江达, 等. 锦屏水电站坝区初始地应力场反演分析[J]. 长江科学院院报, 2008(5): 50-54.
- Xie H Q, Xiao M L, He J D, et al. Regression analysis of initial geostress for dam region of Jinping hydropower station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008(5): 50-54. (in Chinese)
- [13] 何江达, 谢红强, 王启智, 等. 官地水电站坝址区初始地应力场反演分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 166-171.
- He J D, Xie H Q, Wang Q Z, et al. Inversion analysis of initial geostress in dam site of Guandi Hydropower Project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 166-171. (in Chinese)
- [14] 张建国, 张强勇, 杨文东, 等. 大岗山水电站坝区初始地应力场反演分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3071-3078.
- Zhang J G, Zhang Q Y, Yang W D, et al. Regression analysis of initial geostress field in dam zone of Dagangshan hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3071-3078. (in Chinese)
- [15] 张强勇, 向文, 于秀勇, 等. 双江口水电站地下厂房区初始地应力场反演分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(8): 86-95.
- Zhang Q Y, Xiang W, Yu X Y, et al. Back analysis of initial geostress field for underground powerhouse zone of Shuangjiangkou hydropower station[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(8): 86-95. (in Chinese)
- [16] 张永兴. 岩石力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Zhang Y X. Rock mechanics[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [17] 曾冬霞. 西藏怒江松塔水电站坝区岩饼及片帮形成机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- Zeng D X. The study on core discing and spalling formation mechanism of Songta Hydropower Station in Nu River of Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [18] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 292-297.
- Huang R Q. Main characteristics of high rock slopes in southwest China and their dynamic evolution[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 292-297. (in Chinese)