

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103099

基于岩爆危险性评价的川藏铁路某深埋硬岩隧道 线路方案比选研究

陈仕阔¹, 李涵睿¹, 周 航^{1,2}, 陈兴强³, 刘 彤¹

(1. 西南交通大学地质工程系, 四川 成都 611756; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 川藏铁路穿越区域地形起伏大, 区域地质构造作用强烈, 隧道建设中面临的高地应力问题异常复杂, 特别是深埋硬岩隧道中的岩爆灾害问题, 成为制约选线、设计乃至施工建设的难题。由于隧道工程地质条件复杂, 如果岩爆评价指标针对性不强, 往往会造成评价结果与实际偏差较大。通过综合分析影响岩爆的关键因素, 选取岩石单轴抗压强度与洞壁最大主应力比、洞壁最大切向应力与岩石单轴抗压强度比、岩石强度脆性系数、岩石弹性能指数及岩体完整性系数建立了岩爆评价指标体系。根据熵权法确定各指标权重, 基于理想点的基本理论及计算规则, 构建了一种岩爆危险性评价模型。通过计算各里程段与理想点的距离, 对新建川藏铁路某隧道的 3 种线路方案进行岩爆风险评估的综合比选。研究结果表明 B 线路总岩爆段落占比 24.9%, 其中不可控岩爆段落占比 13.4%, 比另外两条比选方案低 4% 左右, 综合对比 B 线路为最优方案。该方法可为深埋硬岩隧道地质综合选线提供必要的科学依据和技术支撑。

关键词: 岩爆危险性评价; 川藏铁路; 深埋硬岩隧道; 理想点法; 线路比选

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0081-10

Route selection of deep-lying and hard rock tunnel in the Sichuan-Tibet Railway based on rock burst risk assessment

CHEN Shikuo¹, LI Hanrui¹, ZHOU Hang^{1,2}, CHEN Xingqiang³, LIU Tong¹

(1. Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: The large terrain undulations and strong regional geological structures are the typical characteristics along the Sichuan-Tibet Railway. The high ground stress problem in tunnel construction is extremely complex, especially the rockburst problem in deep-lying and hard rock tunnels, which restricts route selection schemes and becomes a major difficult problem of construction. Because of the complex geological conditions of the tunnel engineering, the evaluation results often deviate from the actual situation if the rockburst evaluation index is not pertinent. The key factors of rockburst is considering comprehensively, and five factors are selected as the evaluation indexes, including the ratio of the uniaxial compressive strength of rock to the maximum main stress of the surrounding cave wall, the ratio of the maximum tangential stress of the surrounding cave wall to the uniaxial compressive strength of rock, the ratio of compressive to the tensile strength of rock, the elastic strain energy index, and the intactness index of rock mass. The entropy weight method is used to determine the weight of each

收稿日期: 2021-03-30; 修订日期: 2021-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672295); 四川省科技计划项目(2019YFG0047)

第一作者: 陈仕阔(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质工程和岩土工程等相关方面的科研与教学工作。E-mail: shikuochen@swjtu.edu.cn

通讯作者: 周航(1995-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事铁路隧道重大地质灾害危险性评价与防控研究。E-mail: zhouhangswjtu@163.com

index, and a rock burst risk assessment model is constructed based on the basic theory and calculation rules of the ideal point method. By calculating the distance between each mileage section and the ideal point, a comprehensive comparison of rock burst risk assessment is carried out on three route plans of a tunnel on the Sichuan-Tibet Railway. The results show that the total rock burst sections of route B is 24.9%, and the uncontrollable rock burst sections account for 13.4%. The route B is about 4% lower than the other two alternative schemes. The route B is determined as the optimal plan according to the impact of rock burst disasters. This method can provide a new scientific basis and technical support for the comprehensive geological selection of deep-lying and hard rock tunnels.

Keywords: rock burst risk assessment; Sichuan-Tibet Railway; deep-lying and hard rock tunnel; ideal point method; route selection

新建川藏铁路沿线区域动力学环境极其活跃,构造应力场复杂多变,深埋硬岩隧道的典型地质病害突出,成为影响选线、设计、施工的关键问题。岩爆灾害因其突发性、不确定性和破坏力强,至今仍是困扰地下工程勘察设计和安全施工的一个世界性难题^[1-3]。因此,进行深埋隧道岩爆危险性评价研究,对川藏铁路的选线设计、施工建设和支护结构设计都具有非常重要的工程实际价值。

目前,现行的铁路选线方法主要有工程选线、环保选线、地形选线、地质选线、减灾选线等^[4],对线路的评价仍以定性分析为主。综合多种影响因素进行考虑,对线路进行定量的客观评价,特别是把控重大风险,突破关键控制难题,依然是艰险复杂山区铁路选线的重要研究方向。罗圆等^[5]建立了一种基于大地震风险的川藏铁路线路方案评价模型,通过规避地震风险区进行选线。张永双等^[6]以成兰铁路隧道穿越活动断裂为例,提出了活动断裂带工程地质选线思路 and 对策。杨宗伟等^[7]通过研究滑坡灾害的孕灾环境、诱发条件和灾害特征,提出了一种山区铁路规划选线方法。钟卫等^[8]根据崩塌落石对铁路工程及运营的影响研究,指出了针对崩塌危险区域的铁路选线方法。林奎^[9]综合考虑优选指标体系与模糊层次评判模型,建立了一种适用于冰川泥石流地区铁路选线的评价模型。李雯^[10]系统地研究了适用于岩溶区域的铁路选线方法。李国和等^[11]根据实测资料详细总结了采空区铁路勘察选线设计的基本流程,并给出了采空区铁路选线安全距离计算方法、相关参数标准及选线途径。大量研究表明,线路区域内的典型地质病害是影响线路优选的主要因素之一,针对性的选线研究是非常必要的^[12]。随着川藏铁路等复杂山区铁路工程的规划建设,深埋硬岩隧道数量越来越多,且整体埋深较深,构造活动强烈,地质条件异常复杂,岩爆

等典型地质灾害问题也越发突出,在减灾选线设计中进行针对性的研究也越发重要。

众多学者对岩爆的影响因素、判据开展了一系列研究探讨。影响因素方面,徐林生等^[13]对多个地下工程资料进行整理研究,发现高地应力条件是岩爆产生的能量来源,岩体结构及其性能、地质构造、水文地质条件等决定了产生岩爆的能量积蓄和释放能力、岩爆方式等。何川等^[14]通过对苍岭隧道的岩爆特征与影响因素的相关性分析,认为岩性与应力条件对岩爆的发生起着控制作用。判据方面,张镜剑等^[15]将陶振宇判据和谷明成判据结合起来,提出修改后的谷-陶判据。还有一些学者致力于岩爆预测方面,邱道宏等^[16]基于超前地质探测和地应力反演数据对江边水电站掌子面前方范围内的岩爆强度进行精细预测。邢军等^[17]基于地应力和室内岩石力学试验结果,结合水文地质条件,综合分析该隧道发生岩爆的危险性等级。徐俊帅等^[18]研究发现广义 Hoek-Brown 计算的岩体强度可以综合考虑岩石类型和强度、施工情况、岩体结构特征,提出用岩体强度代替岩石强度进行岩爆预测。这些研究成果都充分认识到了地应力场环境及岩体力学性质对岩爆评价结果的影响,但是受限于隧道工程地质条件的复杂性,目前普遍存在评价指标体系不完善及指标相关性不明确等问题。因此,构建完善的岩爆评价指标体系,确定指标的客观权重,采用多指标的综合预测方法是解决该问题的有效途径之一。

岩爆综合预测是通过构建合适的数学模型或经验评价体系,对地下工程的潜在岩爆风险进行综合预测^[19-20]。笔者基于熵权-理想点法和地应力场反演分析构建了一种岩爆预测模型,并在川藏铁路拉林段桑珠岭隧道岩爆预测中得到较好的验证^[21]。在此基础上,本文立足于我国西部复杂艰险山区铁路工程隧道

建设,将前述岩爆预测模型应用于新建川藏铁路某深埋长大硬岩隧道,从岩爆问题着手进行线路方案比选研究,以期类似工程地质条件下的深埋长大硬岩隧道选线研究提供解决方案。

1 岩爆危险性评价模型

1.1 岩爆评价指标体系

通过对以往发生岩爆的深埋隧道典型案例资料进行收集和整理,总结发现岩爆的发生主要与地应力状态、围岩性质以及岩体本身力学性质有关^[22]。Zhou等^[21]通过归纳总结岩爆案例的破坏特征及发生规律,基于熵权法的属性约简研究分析了岩爆的关键影响因素,从11项指标中选取岩石单轴抗压强度与洞壁最大主应力比($\sigma_c/\sigma_{\max}$)、洞壁最大切向应力与岩石单轴抗压强度比(σ_θ/σ_c)、岩石强度脆性系数(σ_c/σ_t)、岩石弹性能指数(W_{et})及岩体完整性系数(K_v)作为岩爆评价指标,并结合熵权-理想点法和地应力场反演构建了岩爆危险性综合评价模型。因此,本文选取上述5项指标构建岩爆评价指标体系,这些评价指标综合反映了具有岩爆倾向的围岩性质、岩石力学性能和高地应力环境,保证了所选评价指标对于岩爆综合评价的有效性以及体系的完备性^[13, 15, 21-22]。为便于后续岩爆评价指标的归一化处理及权重计算,本文对强度应力比法的原始比值范围进行统一处理。在保证安全合理基础上,将强度应力比法中的极强岩爆归入强烈岩爆中,即当 $\sigma_c/\sigma_{\max} < 2$ 时,属于强烈岩爆。岩爆与各评价指标的关系如表1所示^[15, 20-22]。

表1 岩爆与各评价指标的关系

Table 1 Relationship between rock burst and various evaluation indexes

评价指标	无	轻微	中等	强烈
$\sigma_c/\sigma_{\max}$	≥ 7	[4, 7)	[2, 4)	< 2
σ_θ/σ_c	< 0.20	[0.20, 0.30)	[0.30, 0.55)	≥ 0.55
σ_c/σ_t	≥ 40.0	[26.7, 40.0)	[14.5, 26.7)	< 14.5
K_v	< 0.55	[0.55, 0.65)	[0.65, 0.75)	≥ 0.75
W_{et}	< 2.0	[2.0, 3.5)	[3.5, 5.0)	≥ 5.0

1.2 熵权法计算指标权重

熵权法的基本思路是根据评价指标的熵值计算各指标的权重系数,能够克服专家打分法、平均法等主观性强的缺陷,得到的指标权重更加合理可靠^[22]。本文利用其对岩爆评价指标进行客观赋权,其评价指标分为“效益型”和“成本型”两种,经量纲归一化处理,计算可得岩爆评价指标的权重系数。

1.3 理想点法确定岩爆风险等级

理想点法是多属性决策中常用的一种解决多因素问题的方法,能集中反映总体情况并进行综合评价,其核心是计算评价对象到理想点的距离大小并将其作为判断归属的依据。距离越小,说明评价对象与理想解越接近。本文采用闵可夫斯基距离函数^[21]计算评价对象与理想点的距离D:

$$D = \left\{ \sum_{i=1}^n w \left[\frac{f_i(x) - f_i^*(+)}{|f_i^{u_i} - f_i^{l_i}|} \right]^H \right\}^{1/H} \quad (1)$$

其中, $f_i(x)$ 、 $f_i^*(+)$ 、 $f_i^{u_i}$ 和 $f_i^{l_i}$ 依次为第*i*个指标的评价值、理想值、上限值和下限值。

H 为闵可夫斯基距离,当 H 取1,2和 ∞ 时分别代表曼哈顿距离、欧氏距离和切比雪夫距离。根据Zhou等^[21]对川藏铁路桑珠岭隧道岩爆评价研究,选择 $H=2$ (欧氏距离)在岩爆危险性评价中的精度达到94.1%。在后续隧道线路比选研究中,选择 $H=2$ 进行岩爆危险性评价。

2 工程概况及线路比选方案

2.1 大高差的地貌特征

川藏铁路某隧道地处藏东南三江流域高山峡谷地区,工程区地貌形态主要受青藏高原地貌隆升的影响,山脉总体走向为东西向,山势雄伟,群峰高耸,地面高程为3 720~4 900 m,是典型的“V”形高山峡谷地貌。

2.2 复杂活跃的地质构造特征

川藏铁路地处印度洋板块与亚欧板块挤压碰撞形成的造山带,属于强烈挤压区^[23]。在构造分区图上(图1),研究区主体位于华南板块(Ⅲ)及滇藏板块(Ⅳ)内^[24]。川藏铁路所经过的川西及藏东南地区处于印度板块北移的压应力场之中,构造活动带表现出多期性,这些构造运动更多地表现在一系列强烈活动的断裂构造带上,区域地质构造异常复杂^[25-26],加之隧道埋深大、围岩强度高,使得高地应力条件下的硬岩岩爆灾害问题尤为突出,对铁路选线设计,尤其是地质选线工作提出了严峻的挑战。

2.3 主要的地质灾害风险

川藏铁路某隧道最大埋深超过1 320 m,岩性多为花岗闪长岩和二长花岗岩等硬岩,块状构造,岩质坚硬^[27],隧道典型地质剖面(B线路)如图2所示。结合工程区的地质构造特征及实测地应力数据,该区域的构造应力处于较高水平。经过初步调查,影响该隧道工程选线的主要地质灾害为岩爆,其余类型的地质灾

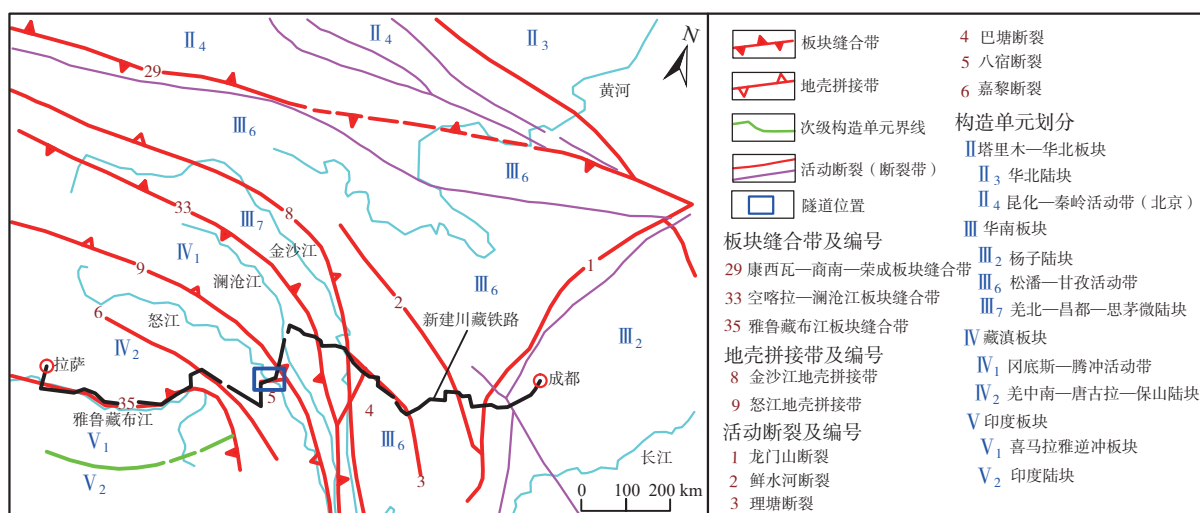
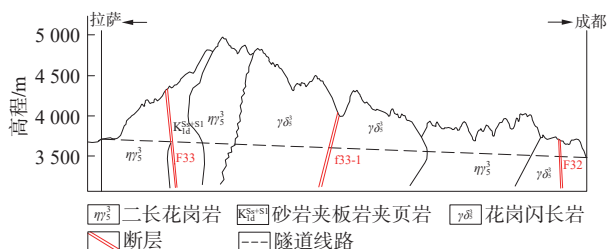
图 1 新建川藏铁路沿线构造纲要^[24]Fig. 1 Geotectonic outline of the new Sichuan-Tibet Railway^[24]

Fig. 2 Typical geological section of a tunnel on the new Sichuan-Tibet Railway

害对本隧道影响相对较小, 本文暂不考虑, 仅探讨基于岩爆危险性综合评价结果的隧道关键控制段比选方案。

2.4 线路比选方案

本文以新建川藏铁路某隧道作为研究对象, 基于对潜在的岩爆危害进行定量评估, 开展 3 条线路方案的比选研究(图 3)。线路均位于怒江高山峡谷向伯舒拉岭山区的过渡区域^[27]。

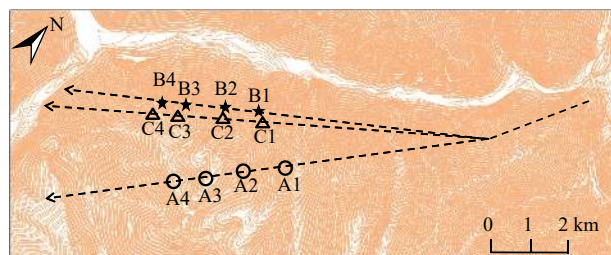


Fig. 3 Route scheme

根据图 4 可知, 3 条线路的埋深超过 1 000 m 的段落较少, 其中 A 线路平均埋深超过 1 000 m 路段占比

最大, 达到 5.8%; B 线路占比最小, 为 5.2%。隧道围岩的结构和力学性质决定了岩爆发生时能量积聚和释放的能力大小, 岩爆多发生在 I、II、III 级围岩中。根据图 5, C 线路 II 级和 III 级围岩占比最多, 为 81.3%, A 线路较 C 路线稍少, 为 74.4%; B 线路 II 级和 III 级围岩占比最少, 为 56.4%。

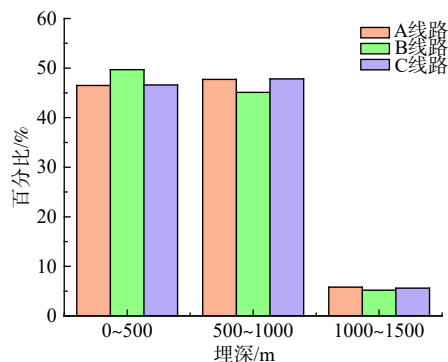


Fig. 4 Distribution of buried depth

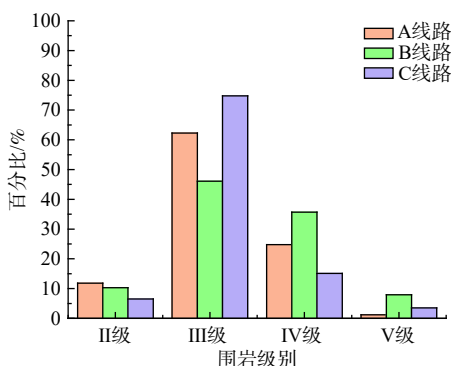


Fig. 5 Percentage of surrounding rock grades

3 基于岩爆危险性评价的减灾选线评价

道岩石力学基本参数如表 2 所示。

3.1 工程区岩石力学试验

川藏铁路某隧道的岩性以二长花岗岩和花岗闪长岩等硬岩为主,按照国际岩石力学学会 (ISRM) 的规定,将岩样加工成标准岩石试件。先通过 RSM-SY6 声波仪测量岩石试件的横波和纵波速度,计算得到岩石试件的动弹性模量和动泊松比。随后,在 RMT-150C 型电液伺服控制刚性压力机上对二长花岗岩和花岗闪长岩等岩石试件分别开展单轴压缩变形试验和巴西圆盘劈裂试验,测试得到两种岩石试件的单轴抗压强度、单轴抗拉强度、静弹性模量和静泊松比。图 6 为岩石全过程应力-应变曲线,川藏铁路某隧

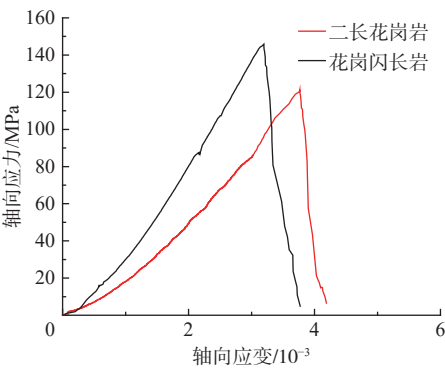


图 6 岩石全过程应力-应变曲线
Fig. 6 The complete stress-strain curve

表 2 岩石物理力学参数一览表
Table 2 Physical and mechanical parameters of rocks

岩性	单轴抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa	静弹性 模量 E/GPa	静泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	横波波速 $v_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	纵波波速 $v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	动弹性模量 E_d/GPa	动泊松比 ν_d
二长花岗岩	118.2	5.83	30.12	0.21	2.69	3 054.62	5 233.84	61.32	0.24
	123.7	6.33	32.36	0.22	2.66	2 643.39	5 694.83	54.72	0.25
	103.4	5.34	28.79	0.21	2.76	3 018.19	5 450.18	64.19	0.28
花岗闪长岩	145.6	6.92	36.16	0.23	2.65	3 123.32	4 998.11	60.98	0.18
	151.4	7.57	35.78	0.25	2.68	3 131.55	5 163.69	63.48	0.21
	137.5	7.31	35.62	0.21	2.75	2 643.39	5 694.83	52.27	0.36

3.2 岩爆倾向性评价

岩爆倾向性评价主要考虑岩石的强度和变形,以及岩性方面进行岩爆危险性评价研究。结合前人对岩石的岩爆倾向性指标分析研究^[1, 16, 22],选择最大储存弹性应变能指标和岩石强度脆性系数对该工程区可能发生岩爆的硬质岩(主要为二长花岗岩和花岗闪长岩)的岩爆倾向性进行定量评价。在岩爆倾向性评价中,岩石力学参数均取其平均值。

岩石硬脆程度可以用强度脆性系数 B 来表示:

$$B=\sigma_c/\sigma_t \tag{2}$$

式中: σ_c ——岩石饱和单轴抗压强度/MPa;

σ_t ——岩石单轴抗拉强度/MPa。

最大储存弹性应变能指标可用下式计算:

$$E_s=\sigma_c^2/2E \tag{3}$$

式中: E_s ——最大储存弹性应变能指标/($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$);

E ——岩石弹性模量/GPa。

根据式(2)和(3),结合表 2,计算可得二长花岗岩和花岗闪长岩的强度脆性系数分别为 19.74, 19.92, 最大储存弹性应变能分别为 0.22, 0.31 MJ/m^3 ,并绘制二长花岗岩和花岗闪长岩的岩爆倾向性评价标准及结

果分析图,如图 7 所示。由于二者的强度脆性系数和最大储存弹性应变能均处于同一水平区间且相差不大,可认为两种岩性对岩爆的影响程度无较大的差异。故该隧道两种岩性的岩爆倾向性均在轻微-中等岩爆之间。

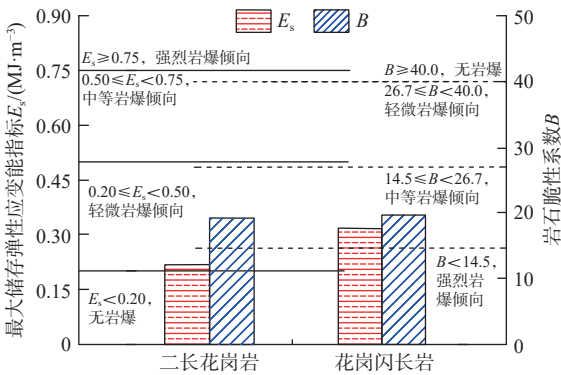


图 7 岩爆倾向性评价标准及结果分析图
Fig. 7 Test results and evaluation criteria of rock burst proneness

3.3 地应力测试及初始地应力场反演分析

川藏铁路某隧道采用水压致裂法进行了原位地应力测试,CD-1[#]钻孔实测地应力数据如表 3 所示。由

实测地应力资料可知, 钻孔实测最大埋深 622 m, 最大水平主应力 S_H 范围为 6.25 ~ 17.55 MPa, 最小水平主应力 S_h 范围为 4.66 ~ 16.20 MPa, 垂向主应力 S_v 范围为 5.32 ~ 13.35 MPa。三向主应力的大小关系在浅部满足: $S_H > S_h > S_v$, 反映了在地壳浅层有着较强的水平构造应力作用的特点; 埋深超过 400 m 的部分表现为: $S_H > S_v > S_h$, 说明随着埋深的增大, 自重应力影响逐渐增大, 但最大水平主应力依然占据主导地位。

表 3 实测钻孔地应力数据
Table 3 Measured borehole stress data

钻孔编号	埋深/m	主应力值/MPa			最大主应力方向
		S_H	S_h	S_v	
CD-1 [#]	178 ~ 622	6.25 ~ 17.55	5.32 ~ 13.35	4.66 ~ 16.20	N42°— 52°E

根据工程地质资料, 结合 DEM 数字高程数据, 选取 20 000 m×10 000 m 的区域作为计算对象, 保证 3 条比选线路均处于模型中央。通过拟合三维地形曲面并建立三维模型并剖分地层后, 导入 COMSOL Multiphysics 中生成计算模型。本次计算采用边界荷载调整法^[22], 结合现有实测地应力资料对隧址区初始地应力场进行反演分析, 该隧道最大水平主应力云图如图 8 所示。

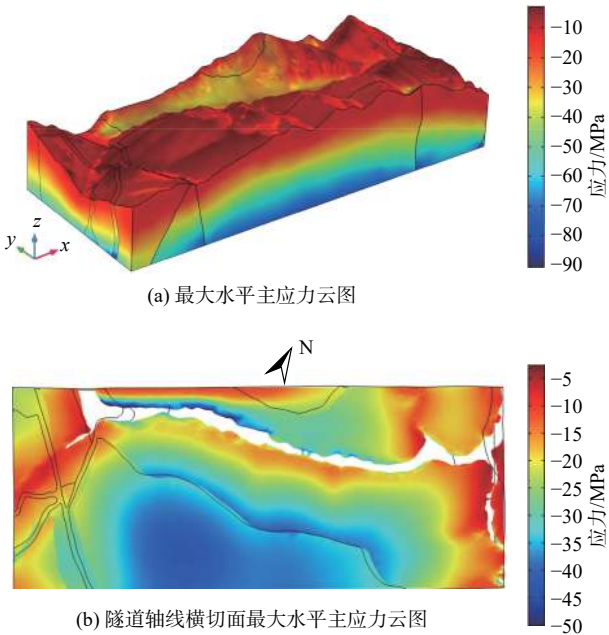


图 8 工程区最大水平主应力云图
Fig. 8 Maximum horizontal principal stress of the engineering area

根据地应力实测资料以及初始地应力场反演结果可知, 该隧道沿线 73% 的区域都处于高到极高地应力状态, 具备岩爆发生的高地应力条件。从图 8(b)可

知, 隧道轴线上最大水平主应力的量值普遍较高, 有 90.41% 的区段应力值大于 20 MPa, 反映了该区域较强的水平构造应力作用特征。受篇幅限制, 表 4 仅列出该隧道 3 条线路 12 个里程段的应力资料 (每段里程 100 m)。

表 4 线路部分里程的应力资料
Table 4 Stress data of route partial mileage

线路方案	里程编号	S_H /MPa	S_h /MPa	S_v /MPa
A	A1	39.6	16.8	19.6
	A2	42.9	19.3	22.9
	A3	50.3	26.1	33.2
	A4	51.2	22.3	29.3
B	B1	33.7	14.3	23.7
	B2	35.6	12.1	20.6
	B3	47.9	23.1	31.9
	B4	43.5	19.7	26.5
C	C1	35.2	12.5	21.6
	C2	36.1	16.3	24.6
	C3	48.6	23.6	32.8
	C4	45.1	20.6	28.4

新建川藏铁路某隧道拟采取全断面掘进法开挖, 即开挖断面为圆形, 洞壁最大切向力 σ_θ 计算方式见文献 [21]。根据上文所述, 确定该隧道各里程段的岩石饱和单轴抗压强度 (σ_c)、最大主应力 (σ_{max}), 并计算洞壁最大切向力 (σ_θ), 该隧道 3 条比选线路部分里程的岩爆分析资料如表 5 所示。在本文岩爆危险性综合评价中, 岩石饱和单轴抗压强度取其平均值。

表 5 线路部分里程的岩爆分析资料
Table 5 Rock burst analysis data of route partial mileage

线路方案	里程编号	σ_c /MPa	σ_{max} /MPa	σ_θ /MPa
A	A1	103.4 : 118.2 114.1	39.6	47.4
	A2	42.9	59.5	
	A3	137.5 : 151.4 144.8	50.3	86.2
	A4	51.2	77.4	
B	B1	103.4 : 118.2 114.1	33.7	45.2
	B2	35.6	42.8	
	B3	137.5 : 151.4 144.8	47.9	75.7
	B4	43.5	68.1	
C	C1	103.4 : 118.2 114.1	35.2	49.6
	C2	36.1	65.2	
	C3	137.5 : 151.4 144.8	48.6	85.5
	C4	45.1	78.1	

注: 单轴抗压强度中, 横线上为最小值; 最大值, 横线下为平均值。

根据图 9 实测钻孔地应力值与模拟值对比可知, 实测值与模拟值整体结果较吻合, 最大水平主应力、

最小水平主应力和垂向主应力基本上均随埋深的增大而逐渐增大,且三向主应力的平均误差分别为 9.9%、11.3% 和 2.0%。根据初始地应力场反演分析求得钻孔各测点最大水平主应力的平均方位为 N48°E,与实测方位 N42°—52°E 相吻合,与现今构造运动的应力场方向也基本相符。因此,初始地应力场反演分析的结果能够反映该隧道所在区域实际地应力情况,可以作为岩爆危险性综合评价的参考依据。

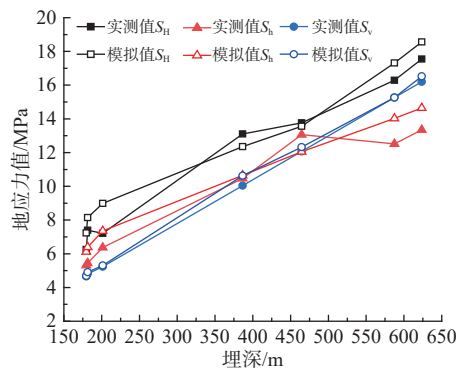


图 9 实测钻孔地应力值与模拟值对比
Fig. 9 Comparison of the measured borehole value and simulated value

3.4 确定评价指标值

川藏铁路某隧道各个里程段的岩石弹性能指数 W_{et} 由室内试验和工程类比法综合确定。根据国标《工程岩体分级标准》(GB 50218—1994)^[28] 中的岩体 BQ 值以及隧道围岩基本质量级别、岩块饱和单轴抗压强度、地下水、软弱结构面产状、天然应力等地质勘察资料,反推隧道各里程段的岩体完整性系数 K_v 。最后,结合表 3 和表 4,得到隧道各评价指标的具体数值,如表 6 所示。

表 6 各评价指标值
Table 6 Each evaluation index values

线路方案	里程编号	σ_c/σ_{max}	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}	K_v
A	A1	2.91	0.41	19.74	0.62	3.60
	A2	2.69	0.52	19.74	0.62	3.60
	A3	2.88	0.60	18.35	0.81	4.30
	A4	2.83	0.53	19.92	0.71	4.00
B	B1	3.42	0.39	19.74	0.62	3.60
	B2	3.23	0.37	19.74	0.62	3.60
	B3	3.02	0.52	19.92	0.62	4.00
	B4	3.33	0.47	18.35	0.81	4.30
C	C1	3.27	0.43	19.74	0.62	3.60
	C2	3.19	0.57	19.74	0.62	3.60
	C3	2.98	0.59	18.35	0.81	4.30
	C4	3.21	0.54	19.92	0.71	4.00

3.5 计算指标权重

根据熵权法的基本理论及计算规则,利用其对岩爆评价指标进行客观赋权,输入该工程区各评价指标的数值,经量纲归一化处理后,计算可得各评价指标的权重系数。由表 7 可知, σ_θ/σ_c 对某隧道岩爆的影响较大,其次是 W_{et} ,而 σ_c/σ_{max} 、 K_v 和 σ_c/σ_t 对岩爆的影响相对较小。其中,岩爆各评价指标权重的大小与某隧道工程的样本组成和数量有关,样本越多,代表性越强,计算结果越可靠。

表 7 各评价指标权重系数
Table 7 Entropy weight of each evaluation index

评价指标	σ_c/σ_{max}	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}	K_v
熵值 e_j	0.992	0.837	0.997	0.931	0.985
偏差度 $1-e_j$	0.008	0.163	0.003	0.069	0.015
权重系数 w	0.032	0.631	0.013	0.267	0.056

3.6 岩爆危险性评价

根据笔者在前期工作中提出的熵权-理想点法和地应力场反演方法^[21],构建的深埋硬岩隧道岩爆危险性评价模型来综合评估理想点距离与岩爆等级的关系,川藏铁路某隧道 3 条线路的岩爆危险性评价结果示例如表 8 所示。根据所选 12 个里程段的岩爆危险性评价结果可知,B 线路的岩爆危害影响相对较小。

3.7 线路综合比选及推荐方案

根据现场实测资料、室内岩石力学试验、初始地应力场反演结果以及工程类比法等,将 3 条比选方案各个里程段的岩爆评价指标值代入岩爆危险性评价模型中,得到评价结果如图 10 所示。结果表明,A 线路总岩爆段落占比 32.5%,B 线路总岩爆段落占比 24.9%,C 线路总岩爆段落占比 26.7%,从总岩爆段落占比来看,A 线路岩爆发生的可能性最大,B 线路岩爆发生的可能性最小。中等和强烈岩爆的防控是设计及施工中的棘手问题,有较强的不可控性,应进行重点研究。A 线路中不可控岩爆(中等岩爆和强烈岩爆)段落占比为 17.4%,B 线路中不可控岩爆段落占比 13.4%,C 线路中不可控岩爆段落占比 17.5%。A 线路和 C 线路中不可控岩爆段落占比相当,分别比 B 线路高 4.0% 和 4.1%。综合对比可知,B 线路可初步作为优选方案。此外,还应加强地质勘察深度、进行更多的实测地应力钻孔测试以及室内岩石力学试验,结合更加精细化表征的地应力反演模型,并借鉴类似工程经验,综合确定岩爆危险性评价所依据的指标及其权重,使评价结果更加准确和可靠。

表 8 岩爆危险性评价结果示例

Table 8 Examples of rock burst risk assessment results

线路方案	里程编号	岩性	埋深/m	围岩级别	H=2(欧氏距离)				岩爆判别结果
					无	轻微	中等	强烈	
A	A1	二长花岗岩	783 ~ 809	Ⅲ级	2.701	1.312	0.428	0.480	中等
	A2	二长花岗岩	792 ~ 813	Ⅲ级	3.478	2.131	0.516	0.386	强烈
	A3	花岗闪长岩	1 195 ~ 1 215	Ⅱ级	4.164	2.969	0.786	0.252	强烈
	A4	花岗闪长岩	893 ~ 912	Ⅲ级	3.657	2.346	0.354	0.217	强烈
B	B1	二长花岗岩	780 ~ 801	Ⅲ级	2.553	1.155	0.440	0.540	中等
	B2	二长花岗岩	806 ~ 815	Ⅲ级	2.405	0.995	0.459	0.551	中等
	B3	花岗闪长岩	1 176 ~ 1 192	Ⅲ级	3.544	2.188	0.519	0.404	强烈
	B4	花岗闪长岩	973 ~ 995	Ⅱ级	3.237	2.083	0.588	0.335	强烈
C	C1	二长花岗岩	753 ~ 767	Ⅲ级	2.835	1.456	0.427	0.487	中等
	C2	二长花岗岩	780 ~ 796	Ⅲ级	3.883	2.554	0.628	0.420	强烈
	C3	花岗闪长岩	1 183 ~ 1 191	Ⅱ级	4.125	2.932	0.775	0.261	强烈
	C4	花岗闪长岩	936 ~ 965	Ⅲ级	3.693	2.385	0.371	0.268	强烈

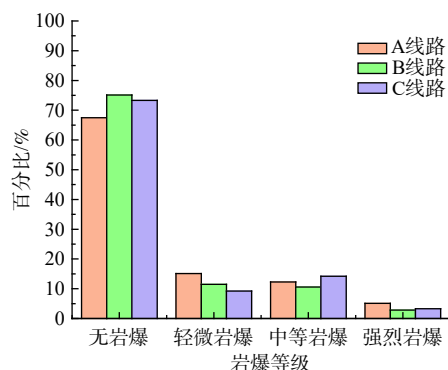


图 10 岩爆危险性评价结果

Fig. 10 Rock burst risk assessment results

4 结论

(1) 根据实测地应力以及初始地应力场反演分析结果可知, 川藏铁路某隧道沿线多段具备发生岩爆的高地应力条件。对该工程区可能发生岩爆的二长花岗岩和花岗闪长岩进行岩爆倾向性评价可知, 两种岩性的岩爆倾向性均在轻微—中等岩爆之间。

(2) 基于熵权-理想点法和地应力场反演的岩爆危险性综合评价模型, 对川藏铁路某隧道 3 条线路的岩爆灾害进行定量评价可知: A 线路的岩爆灾害影响程度最高, B 线路的岩爆灾害影响程度最低, 并且 B 线路中不可控岩爆(中等岩爆和强烈岩爆)段落占比最小, 岩爆灾害影响最小, 为最优线路方案。

(3) 本文通过定量分析岩爆灾害的影响程度来指导新建川藏铁路深埋硬岩隧道选线, 规避岩爆潜在风险的影响, 为最终的铁路选线决策提供技术支撑。由于铁路选线是一个复杂的工程地质问题, 还需进一步结合其它影响因素综合研究确定。

参考文献 (References) :

- [1] 严健, 何川, 汪波, 等. 雅鲁藏布江缝合带深埋长大隧道群岩爆孕育及特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 769 - 781. [YAN Jian, HE Chuan, WANG Bo, et al. Inoculation and characters of rockbursts in extra-long and deep-lying tunnels located on Yarlung Zangbo suture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 769 - 781. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 何怡帆, 李天斌, 曹海洋. 隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型及工程应用[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 102 - 111. [HE Yifan, LI Tianbin, CAO Haiyang. Attribute recognition model of fatalness assessment of rockburst in tunnel construction and its application[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 102 - 111. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘国锋, 李志强, 王晓明, 等. 深埋隧道岩爆规模现场快速估算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1): 57 - 64. [LIU Guofeng, LI Zhiqiang, WANG Xiaoming, et al. Field rapid estimation method for the scale of rockburst in deep tunnels[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(1): 57 - 64. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 吴光, 肖道坦, 蒋良文, 等. 复杂山区高等级铁路选线工程地质的若干问题[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(4): 527 - 532. [WU Guang, XIAO Daotan, JIANG Liangwen, et al. Problems about engineering geology of high-grade railway route selection in complicated mountainous areas[J]. Journal of Southwest Jiaotong

- University, 2010, 45(4): 527 – 532. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 罗圆,朱颖,张小强,等.基于大地震风险的川藏铁路线路方案评价模型[J].铁道工程学报,2018,35(4): 34 – 38. [LUO Yuan, ZHU Ying, ZHANG Xiaoqiang, et al. Evaluation model of Sichuan-Tibet Railway scheme based on large earthquake risk[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(4): 34 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张永双,任三绍,郭长宝,等.活动断裂带工程地质研究[J].地质学报,2019,93(4): 763 – 775. [ZHANG Yongshuang, REN Sanshao, GUO Changbao, et al. Research on engineering geology related with active fault zone[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(4): 763 – 775. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 杨宗信,丁朋朋,王栋,等.川藏铁路(康定至林芝段)沿线滑坡风险分析[J].铁道学报,2018,40(9): 97 – 103. [YANG Zongji, DING Pengpeng, WANG Dong, et al. Landslide risk analysis on Sichuan-Tibet Railway (Kangding to Nyingchi section)[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9): 97 – 103. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 钟卫,李秀珍,崔云,等.崩塌滑坡灾害对川藏铁路康定—昌都段选线的影响[J].铁道标准设计,2018,62(1): 34 – 38. [ZHONG Wei, LI Xiuzhen, CUI Yun, et al. The influence of landslide and collapse hazards on railway alignment in Kangding-Changdu section of Sichuan-Tibet Railway[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(1): 34 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 林奎.冰川泥石流地区铁路线路方案综合优选研究[D].成都:西南交通大学,2016. [LIN Kui. Research on comprehensive optimization in route scheme of railway in the glacial debris flow area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李雯.岩溶地区铁路选线风险评估研究[D].成都:西南交通大学,2014. [LI Wen. The risk assessment research on railway location in karst region[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李国和,李桂芳.采空区铁路工程地质选线研究[J].铁道工程学报,2012,29(10): 15 – 20. [LI Guohe, LI Guifang. Geological route selection of railway in mining district[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(10): 15 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 黄润秋,王贤能.深埋隧道工程主要灾害地质问题分析[J].水文地质工程地质,1998,25(4): 3 – 5. [HUANG Runqiu, WANG Xianneng. Analysis of the main geological hazards in deep lying tunnels[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1998,25(4): 3 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 徐林生.地下工程岩爆发生条件研究[J].重庆交通大学学报,2005,24(3): 31 – 34. [XU Linseng. Research of rockburst formation condition in underground engineering[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(3): 31 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 何川,汪波,吴德兴.苍岭隧道岩爆特征与影响因素的相关性及防治措施研究[J].水文地质工程地质,2007,34(2): 25 – 28. [HE Chuan, WANG Bo, WU Dexing. Research of relativity between rockburst character and influence factor and prevention measure in Cangling tunnel[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(2): 25 – 28. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张镜剑,傅冰骏.岩爆及其判据和防治[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10): 2034 – 2042. [ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2034 – 2042. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 邱道宏,李术才,张乐文,等.基于隧洞超前地质探测和地应力场反演的岩爆预测研究[J].岩土力学,2015,36(7): 2034 – 2040. [QIU Daohong, LI Shucui, ZHANG Lewen, et al. Rockburst prediction based on tunnel geological exploration and ground stress field inverse analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 2034 – 2040. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 邢军,王建斌,蒋蕾,等.圭嘎拉高速公路隧道地应力特征及岩爆预测[J].水文地质工程地质,2019,46(2): 170 – 178. [XING Jun, WANG Jianbin, JIANG Lei, et al. In-situ stress characteristics and rock burst prediction of the Guigala Expressway tunnel[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 170 – 178. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 徐俊帅,徐金明,涂齐亮.基于地应力和岩体强度的岩爆预判[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(5): 52 – 58. [XU Junshuai, XU Jinming, TU Qiliang. Prediction of rock based on field geostress and rock mass strength[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 52 – 58. (in Chinese with English abstract)]

- [19] ZHOU J, LI X B, MITRI H S. Evaluation method of rockburst: State-of-the-art literature review[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81: 632 – 659.
- [20] 王元汉, 李卧东, 李启光, 等. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(5): 493 – 501. [WANG Yuanhan, LI Wodong, LI Qiguang, et al. Method of fuzzy comprehensive evaluations for rockburst prediction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(5): 493 – 501. (in Chinese with English abstract)]
- [21] ZHOU H, CHEN S K, LI H R, et al. Rockburst prediction for hard rock and deep-lying long tunnels based on the entropy weight ideal point method and geostress field inversion: a case study of Sangzhuling Tunnel[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(5): 3885 – 3902.
- [22] 周航, 陈仕阔, 张广泽, 等. 基于功效系数法和地应力场反演的深埋长大隧道岩爆预测研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1386 – 1396. [ZHOU Hang, CHEN Shikuo, ZHANG Guangze, et al. Efficiency coefficient method and ground stress field inversion for rockburst prediction in deep and long tunnel[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1386 – 1396. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 卞爽, 于志泉, 龚俊峰, 等. 青藏高原近南北向裂谷的时空分布特征及动力学机制[J]. *地质力学学报*, 2021, 27(2): 178 – 194. [BIAN Shuang, YU Zhiquan, GONG Junfeng, et al. Spatiotemporal distribution and geodynamic mechanism of the nearly NS-trending rifts in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 2021, 27(2): 178 – 194. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 宋章, 张广泽, 蒋良文, 等. 川藏铁路工程地质特征及地质选线原则[J]. *铁道建筑*, 2017, 57(2): 142 – 145. [SONG Zhang, ZHANG Guangze, JIANG Liangwen, et al. Engineering geological features and geological route selection principle of Sichuan-Tibet Railway[J]. *Railway Engineering*, 2017, 57(2): 142 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 郭长宝, 吴瑞安, 蒋良文, 等. 川藏铁路雅安—林芝段典型地质灾害与工程地质问题[J]. *现代地质*, 2021, 35(1): 1 – 17. [GUO Changbao, WU Rui'an, JIANG Liangwen, et al. Typical geohazards and engineering geological problems along the Ya'an-Linzi section of the Sichuan-Tibet Railway, China[J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 1 – 17. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 陈兴强. 基于地应力侧压系数的青藏高原东南缘区域性岩爆预测研究[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(7): 44 – 49. [CHEN Xingqiang. Prediction of regional rock burst in southeastern Qinghai-Tibet plateau based on in-situ stress lateral pressure coefficient[J]. *Railway Standard Design*, 2020, 64(7): 44 – 49. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 霍欣. 某铁路怒江至伯舒拉岭段主要工程地质问题及地质选线[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(11): 7 – 13. [HUO Xin. Major engineering geological problems and geological route selection of Nujiang-Bershulla section of a railway[J]. *Railway Standard Design*, 2020, 64(11): 7 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. [Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)]

编辑: 汪美华