

文章编号: 1674—8247(2022)05—0079—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.05.016

鲁南某高速铁路岩溶塌陷风险评估及防治对策

陈兴海¹ 王 朋¹ 于翠翠²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 山东省地质测绘院, 济南 250014)

摘 要: 本文以鲁南某高速铁路某段线路岩溶塌陷为研究对象, 通过收集区域地质资料、现场水文地质调查和理论分析计算等方法相结合, 研究分析岩溶的发育形态和发育规律, 从岩溶发育程度、覆盖层特征、地下水动力条件及历史条件 4 个方面, 对铁路沿线两侧威胁较大的潜在岩溶塌陷区进行风险评估, 并提出相应的工程防治对策。本文研究成果对鲁南岩溶地区铁路勘察设计和施工具有重要参考价值。

关键词: 高速铁路; 岩溶塌陷; 风险评估; 防治对策

中图分类号: U238 **文献标识码:** A

Risk Assessment and Countermeasures for Karst Collapse of a High-speed Railway in Southern Shandong

CHEN Xinghai¹ WANG Peng¹ YU Cuicui²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Shandong GEO-Surveying & Mapping Institute, Jinan 250014, China)

79

Abstract: In this paper, the karst collapse of a section of a high-speed railway in southern Shandong is researched, and the development form and development law of karst are studied and analyzed from four aspects: karst development degree, overburden characteristics, groundwater dynamic conditions, and historical conditions by combining regional geological data collection, onsite hydrogeological investigation, and theoretical analysis and calculation. The potential karst subsidence areas on both sides of the railway are risk-assessed and the corresponding engineering prevention and control countermeasures are put forward. The research results of this paper have significant reference value for railway survey, design, and construction in karst areas of southern Shandong.

Key words: high-speed railway; karst collapse; risk assessment; prevention and control measures

近年来,岩溶塌陷作为我国发育较普遍的不良地质现象,已严重影响到铁路建设和运营安全^[1],如武广高速铁路花都特大桥、贵广高速铁路甘棠江特大桥、郑万铁路汉江特大桥等在施工过程中均发生过岩溶塌陷^[2]。因此,如何在铁路勘察设计阶段就查清岩溶的发育特征及发育规律,并对岩溶塌陷风险进行评估显得尤为重要。

本文以鲁南某高速铁路某段线路岩溶塌陷为研究对象,通过研究工程区的地形地貌、岩土特征、构造特征及水文地质条件,分析岩溶分布特征和发育规律以及岩溶塌陷的发育特征和成因机理,最终对岩溶塌陷的风险程度进行评价,并提出相应的防治措施。研究成果可为类似工程地质条件下的铁路岩溶区勘察设计和施工提供科学依据

收稿日期:2022-04-18

作者简介:陈兴海(1976-),男,高级工程师。

引文格式:陈兴海,王朋,于翠翠. 鲁南某高速铁路岩溶塌陷风险评估及防治对策[J]. 高速铁路技术,2022,13(5):79-85.

CHEN Xinghai, WANG Peng, YU Cuicui. Risk Assessment and Countermeasures for Karst Collapse of a High-speed Railway in Southern Shandong[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5):79-85.

和技术支持。

1 工程地质特征

1.1 地形地貌

某岩溶塌陷段位于泰莱盆地,地处泰山山脉与徂徕山脉之间的山前倾斜平原地带,属剥蚀堆积平原地貌,为大汶河、牟汶河、柴汶河等河流冲积、冲湖积而成。地形平坦开阔,地面略有起伏,地面坡度 0~10°,地面高程 70~160 m。

1.2 气象水文

工程区属于北暖温带季风区半湿润过渡性气候,受大气环流及泰山山脉影响明显,四季分明,雨量集中,降水时空变化大,多年平均降水量为 831.7 mm (1961~2019 年),降水量随月份差异明显,6~10 月份降雨量占全年的 73.4%,11 月~次年 3 月仅占全年降水量的 10.2%。

工程区属黄河水系,地表河流水系发育,区域以南的大汶河为地表主要河流,呈北东至南西流向经东平湖后注入黄河,大汶河河床宽度 100~700 m 不等,坡度呈北缓南陡,主要由牟汶河及瀛汶河两大干流汇集而成,另发育有庞河、柴汶河等支流。

1.3 地层岩性

鲁南某高速铁路某岩溶塌陷段里程范围为 DK 0+000~DK 7+290,全长 7.29 km。地表均被第四系土层覆盖,总厚度 2~28 m,覆盖层厚度由北向南逐渐变薄,从上至下连续分布软塑~硬塑粉质黏土,中细砂及粗砂,局部夹透镜状粗圆砾土,下伏基岩主要为奥陶系下统、寒武系上中统灰岩及寒武系下统页岩、泥灰岩。其中灰岩岩溶发育,占评估段总长的 80.45%,泥灰岩岩溶弱发育,占评估段总长的 9.53%,页岩夹泥灰岩岩溶不发育,占评估段总长的 10.02%。

1.4 地质构造

工程区大地构造上处于华北板块的鲁西隆起区之鲁中隆起区,属泰莱凹陷分区。断裂构造发育,以

NW~NNW 向断裂为主,如红庙羊娄断裂、岱道庵断裂、庞河断裂及洪沟断裂为近似平行的 4 条断层组成的断裂束,多被第四系覆盖,仅在南北两端有出露。断裂构造以 NEE 向断裂次之,如徂徕山断裂、万家庄断裂及宅子断裂等。评估段与规划铁路线位直接相交的断裂共 7 条。

2 岩溶发育特征

2.1 岩溶发育形态

从岩溶发育形态看,工程区内裸露型岩溶区地下水接受大气降水补给后以垂向运动为主,近代岩溶发育较弱,仅发育少量的溶隙、溶沟或溶槽。覆盖型岩溶区分布于工程区大部分,岩溶形态有溶洞、网络状溶洞、蜂窝状溶孔及溶蚀裂隙等。

2.1.1 溶洞

工程区内属覆盖型岩溶,钻孔揭示溶洞多以串珠状为主,局部呈多层水平状,溶洞直径 0.1~12.6 m,统计显示 89% 的溶洞高度小于 2 m,仅约 3.5% 的溶洞高度大于 4 m,多为半充填~全充填,部分为无充填,填充物为褐黄、黄褐色软塑~硬塑状黏土夹灰岩质碎石、角砾。钻孔揭示段内溶洞发育情况如表 1 所示,典型充填溶洞如图 1 所示。



图 1 钻孔揭示典型充填溶洞图

表 1 钻孔揭示溶洞统计表

里程	钻孔数/个	遇洞钻孔/个	钻孔总进尺/m	遇洞钻孔进尺/m	钻孔遇洞率/%	钻孔线岩溶率/%
DK 0+000~DK 5+380	275	134	11 682.86	568.15	48.73	4.86
DK 5+380~DK 6+580	138	32	4 880.21	51.7	23.19	1.06
DK 6+580~DK 7+290	51	1	1 829.24	1	1.96	0.05

2.1.2 溶孔

钻孔揭示溶孔发育普遍,常形成于溶蚀破碎带中,形状以椭圆形为主,少量呈长条形槽状、蜂窝状、网状及串珠状,溶孔直径 1~25 mm,最大可达

50 mm,溶孔发育段岩芯破碎,岩体完整性差,由于地下水流淘空作用而多无充填物,仅少量半充填褐黄色钙质沉积物。呈蜂窝状及串球状的溶孔贯通性好且富水性强,往往成为孔隙水流的流动通道。钻孔揭示

段内典型溶孔如图2所示。



图2 钻孔揭示典型溶孔图

2.1.3 溶隙

钻孔揭示多为层间溶隙,宽度1~4 mm,仅少量>4 mm。溶隙孔壁多呈黄色,局部浸染红褐色铁质氧化薄膜,张开型溶隙多充填褐黄色软塑-硬塑状黏土,导水及赋水性均较好,闭合型溶隙局部充填黄色钙质物,胶结程度较好,封闭度较高,但导水能力相对较差。钻孔揭示段内典型溶隙如图3所示。

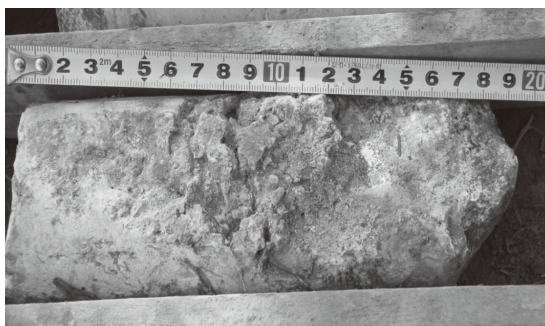


图3 钻孔揭示典型溶隙图

2.2 岩溶发育规律

2.2.1 岩溶发育的平面规律

钻孔揭示工程区岩溶洞隙多发育在覆盖层厚度5~20 m的岱道庵断裂、圣元官庄断裂、红庙羊娄断裂等断裂及其破碎带附近,其展布方向多呈NWW向,基本与断裂方向一致。如岱道庵断裂附近400 m范围内完成的29个钻孔,有23孔揭露溶洞,溶洞数共45个,揭露溶洞总高度为48.7 m,溶洞最大高度达5.9 m。

2.2.2 岩溶发育的垂向规律

搜集钻孔揭露,随着深度增加岩溶发育呈现由强变弱的趋势,尤以地表以下10~40 m范围内的岩溶最发育。发育形态从浅到深,由以溶孔、溶洞为主逐

渐转变为以溶孔、溶隙为主。浅部岩溶发育的主要原因是表层岩石长期遭受风化剥蚀作用,裂隙发育,有利于地表水或第四系孔隙水的淋滤溶蚀,使岩溶自上而下发展。

3 岩溶塌陷风险性评估

3.1 岩溶塌陷影响因素分析

3.1.1 岩溶发育程度

下伏可溶岩石岩溶发育是岩溶塌陷形成的必要条件,而岩溶发育程度受可溶岩的岩石可溶性、构造特征及新构造运动、地形地貌及气候等因素综合决定,本区以岩石可溶性和构造特征最具控制性作用。

(1) 岩石可溶性

从工程区可溶岩地层岩性看,钻孔显示岩溶最易发育为质纯厚层均匀分布的鲕状灰岩,其次为泥晶灰岩和豹斑灰岩,再次为白云质灰岩和白云岩,泥灰岩及泥质灰岩发育最弱。

(2) 构造特征

工程区岩溶发育多位于下第三系泥岩与奥陶系灰岩接触带以南,奥陶系与寒武系地层接触带,岱道庵、圣元官庄及庞河等断裂破碎带及其附近位置。岩溶发育程度受断裂构造带控制明显,断裂带往往因岩体破碎而成为地下水循环交替的良好通道,加之岩溶水排泄基准面对岩溶洞隙的发育程度起控制作用,故随着深度增加岩溶发育明显减弱,而浅部发育的溶洞、溶孔及溶隙便成为塌陷物质的储集空间和运移通道。

3.1.2 覆盖层

(1) 土层类型

工程区主要分布为细粒的粉质黏土及细砂、中砂及粗砂为主的砂类土,相同条件下,黏土含量越高,越不利于塌陷的产生,即细粒土发生塌陷相对较难,砂类土则相对容易。

(2) 土层结构

土层结构一般分为一元结构(A或B型)、二元结构(AB或BA型)和多元结构(MA)等3种类型。一元结构多为坡积残积成因的黏土,厚度一般较薄。二元结构和多元结构多由黏土层、砂卵石层交互组成,厚度一般较大。相同动力条件下二元结构和多元结构产生塌陷要比一元结构容易。工程区所处的旧县-羊娄塌陷区多以二元结构的土层为主,其分布特征如表2所示。

(3) 土层厚度

工程区覆盖层总厚度2~28 m,厚度由北向南逐

渐变薄。统计分析显示,工程区约 4%的塌陷点覆盖层厚度小于 5 m,约 26%的塌陷点覆盖层厚度 5 ~ 10 m,约 68%的塌陷点覆盖层厚度 10 ~ 25 m,仅 2%的塌陷点覆盖层厚度大于 25 m。上述数据表明塌陷形成的

临界条件与土层厚度并无明显的关系,但却对塌陷规模及塌陷的时间点有较大影响。土层厚度越小,塌陷规模较小,土层厚度越大,孕育塌陷的时间周期越长,但形成的塌陷规模则显著变大。

表 2 岩溶塌陷区覆盖层特征统计表

塌陷区		地层	岩性	土层结构	土层厚度/m
旧县—羊娄塌陷区	旧县水源地	临沂组	粘性土、中粗砂	AB	2 ~ 10
	羊娄地区	临沂组为主,少量黑土湖组	粘性土、中粗砂、粗圆砾土	AB、MA	10 ~ 28

3.1.3 地下水动力条件

地下水是引发岩溶塌陷最直接的动力条件。首先岩溶空腔中负压的产生多是由于地下水位的波动引起,其压力大小与地下水位波动幅度、流动速度及上部覆盖层性质有关,空腔中的负压会加快上部地下水的渗流速度,并补给下部岩溶含水层,上部孔隙水及下部岩溶水联系显著加强,提高了在空腔开口附近土层的水力坡度,当水力坡度大于土体临界水力坡度时,土体发生渗透变形破坏。另外,人工开采地下水也是影响地下水变幅及其与基岩面关系的关键因素,工程区地下水位受旧县水源地开采影响明显,通过对比分析区内地下水位历史数据,1988 – 2005 年为旧县水源地人工开采高峰期,平均开采量达 4.2 ~ 4.8 万 m³/d,地下水位持续在基岩面上下波动,致使岩溶塌陷从盛发期经历至持续发展期到最后的高发期。

3.1.4 大气降水

大气降水到达地表后,部分形成地表径流,部分蒸发,部分通过岩层和土层的孔隙或裂隙渗入地下补给地下水。若大气降雨长期入渗,渗流强度及潜蚀作用相应增大,快速加重土壤湿度及重力,同时水流使土体摩擦力变低导致土层失衡。另外极端降雨易导致地表水位快速上升,地表水流同步加速岩溶水的地下流动,表水入渗使地下水位快速升降,由此产生的一系列压力效应诱发塌陷的产生。工程区内已发生的岩溶塌陷 80%均出现在汛期,尤其是在大型暴雨之后。

3.2 岩溶塌陷风险性评估指标

本文拟选取岩溶发育程度、地下水动力条件、覆盖层特征和历史条件 4 项一级因子,再对各一级因子进行细化、筛选,最终选取基岩岩性(K1)、地质构造(K2),土层结构(Q1)、土层厚度(Q2),地下水年变幅(W1)、地下水位与基岩面的关系(W2)、地下水开采模数(W3)及与已知塌陷点距离(D1)等 8 项二级指标因子作为本次评价工作的参评因子。岩溶塌陷风险性评估层次结构模型如图 4 所示。

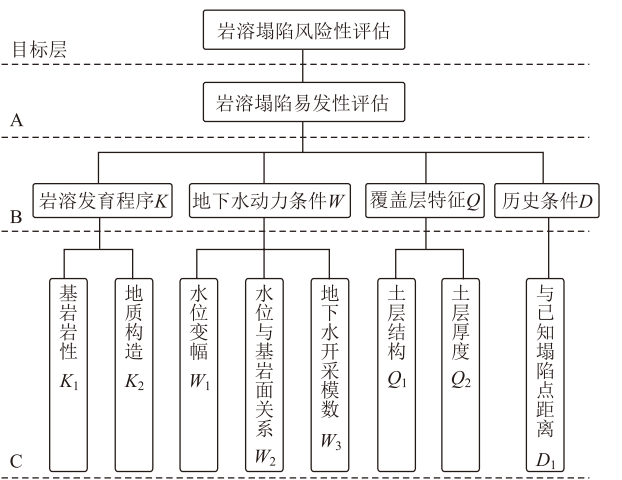


图 4 岩溶塌陷风险性评估层次结构模型图

3.3 计算评价指标权重

在本文构建的岩溶塌陷风险性评估模型中,通过对影响岩溶塌陷风险性评估的关键影响因子进行层次划分,确定相应的目标层、准则层和子准则层,如图 4 所示。采用 Saaty 提出的 9 级标度法^[3],根据岩溶塌陷发育的时间和空间规律,将各层次中的评价因素分析对比,得到判断矩阵,计算确定评价指标的权重系数,并对判断矩阵进行一致性检验。

一致性指标 CI 公式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$
 (1)

式中: λ_{max}——判断矩阵的最大特征根;
n——判断矩阵的阶数。

当判断矩阵的随机一致性比例 CR 小于 0.1 时,认为层次分析法确定岩溶风险性评估指标的主观权重系数是合理的。否则需调整判断矩阵的评价因子,重新计算,直至满足一致性标准^[4-5]。随机一致性比例 CR 公式为:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$
 (2)

式中: RI——判断矩阵的平均随机一致性指标, RI 取

值根据查表确定^[6-7]。通过计算,各指标权重取值如表 3 所示。

表 3 岩溶塌陷风险评价指标权重表

目标层	A 层	B 层	C 层	A 层相对目标层权重	B 层相对 A 层权重	C 层相对 A 层权重
岩溶塌陷风险性评价	易发性评价	岩溶发育程度	基岩岩性	1	0.35	0.21
			地质构造			0.14
		地下水动力条件	水位变幅		0.35	0.07
			水位与基岩面关系			0.105
			开采模数			0.175
		覆盖层特征	土层结构	1	0.2	0.12
			土层厚度			0.08
		历史条件	距已知塌陷点距离		0.1	0.1

3.4 岩溶塌陷风险性评估分区

基于李海良等^[8]、陈学军和罗元华^[9]对岩溶塌陷风险性评估的研究成果,运用 GIS 技术,通过室内遥感解译、INSAR 变形监测、LiDAR 微地貌识别等手段,在地面调查、钻探及物探等野外工作基础上,通

过数值模拟分析不同来源数据并进行综合处理,将岩溶塌陷的影响因素的 8 项二级指标因子进行量化打分,最大值取 7,最小值取 1,分别表示岩溶塌陷的高易发程度和低易发程度,各二级因子评价指标取值如表 4 所示。

表 4 岩溶塌陷影响因素二级指标因子取值表

二级指标因子名称		分数赋值		
		7 分	4 分	1 分
基岩岩性 K_1		鲕状灰岩、泥晶灰岩、豹斑灰岩	白云质灰岩、白云岩	泥灰岩、泥质灰岩
地质构造 K_2	与大型断裂带距离/m	< 100	100 ~ 300	> 300
	与小型断裂带距离/m	< 50	50 ~ 100	> 100
土层结构 Q_1		二元结构	多元结构	一元结构
土层厚度 Q_2 /m		10 ~ 25	5 ~ 15	> 25 或 < 5
地下水年变幅 W_1 /m		> 5	2 ~ 5	< 2
地下水位与基岩面的关系 W_2	地下水位距基岩面距离/m	< 5	5 ~ 10	> 10
地下水开采模数 W_3 ($10^4\text{m}^3/\text{a}\cdot\text{km}^2$)		> 30	10 ~ 30	< 10
与已知塌陷点距离 D_1 /m		< 100	100 ~ 300	> 300

建立层次分析模型,对研究区岩溶塌陷易发程度进行评价分区,计算得到风险性指数 F 值,并根据风险性指数 F 值的大小确定岩溶塌陷风险性等级,划分标准如表 5 所示。

鲁南某高速铁路某岩溶塌陷段里程范围为 DK 0 + 000 ~ DK 7 + 290,根据岩溶塌陷风险性综合评估得分,将评价区划分为岩溶塌陷高风险区、中等

风险区和低风险区,岩溶塌陷风险性预测评价结果如表 6 所示。

表 5 岩溶塌陷风险性分级标准表

序号	综合分值 F	风险性等级
1	$F \geq 5.2$	高风险性
2	$3.5 \leq F < 5.2$	中等风险性
3	$F < 3.5$	低风险性

表 6 岩溶塌陷风险性预测评价结果表

里程	长度/km	地质条件	覆盖层特征	风险性指数 F 值	岩溶塌陷等级	分布范围
DK 0 + 000 ~ DK 1 + 200	3.44	多位于断裂带及附近,基岩以奥陶纪马家沟群灰岩及寒武纪三山子组及炒米店组,岩溶发育	结构多为 AB 型,其次为 MA 型	6.7	高风险区	主要分布于评估区中部,沿岱道庵断裂两侧分布,旧县村—圣元官庄—东苑庄带以及东、西羊娄村
DK 1 + 450 ~ DK 2 + 340				6.3		
DK 2 + 890 ~ DK 4 + 240				5.9		
DK 1 + 200 ~ DK 1 + 450	1.88	基岩包括奥陶纪马家沟群及寒武纪朱砂洞组、张夏组、炒米店组、三山子组,岩溶较发育	结构多为 AB 型,其次为 A 型及 MA 型	5.0	中等风险区	主要分布于评估区中北部,易发性高区外围地区
DK 2 + 340 ~ DK 2 + 890				4.8		
DK 4 + 240 ~ DK 5 + 320				4.4		
DK 5 + 320 ~ DK 7 + 290	1.97	多位于断层影响带外围,覆盖区基岩包括多为寒武纪崮山组、张夏组及馒头组,岩溶发育较弱	结构为 A 型、B 型	2.8	低风险区	除上述以外的地区,主要分布在评估区东部及南部

岩溶塌陷风险性等级划分长度及占比如图5所示。从图5可以看出,岩溶塌陷段全长7.29 km,高风险区长度约3.44 km,占段落总长的47.2%;中等风险区线路长度约1.88 km,占段落总长的25.8%;低风险区线路长度约1.97 km,占段落总长的27.0%。

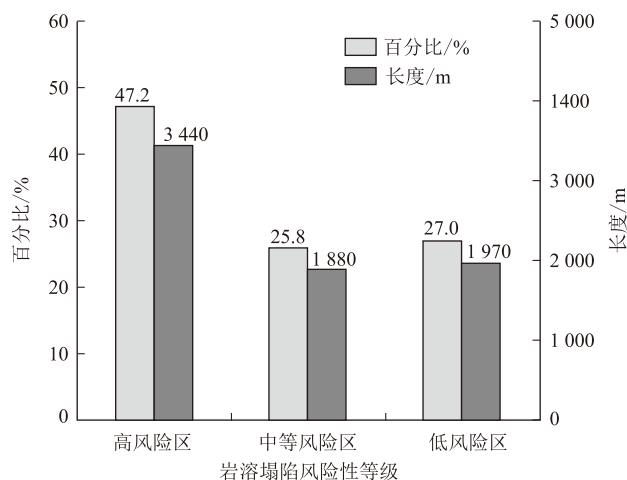


图5 评估段岩溶塌陷风险等级长度及占比图

4 岩溶塌陷防治对策

根据工程区内岩溶塌陷的特征、地质环境条件,本着经济合理、高效实用的原则,提出以下具体治理措施:

(1)工程区多位于岩溶塌陷高-中等风险区,因路基结构抵抗沉降变形的能力弱,建议线路采用桩基结构的桥梁通过。

(2)桥梁桩基布置应尽量避免已有土洞、塌陷坑及溶洞发育段,无法避免时应采取清除填堵、跨越、灌浆充填、深基础等相应的治理工程措施。

(3)设计应适当加大桥梁桩径,并植入完整基岩内一定深度,岩溶塌陷高风险区应对桥梁桩基进行抗倾覆能力检算。

(4)岩溶地下水不合理开采,引发地下水位剧烈变化是诱发研究区岩溶塌陷的主要原因。应开展线路附近水源地及分散自备井等岩溶地下水安全开采的防控研究,制定地下水临界水位,提出岩溶地下水限采或禁采措施,为线路工程的建设、安全运营提供地质依据。

(5)建立“高速铁路运营期间监测预警系统”,对岩溶塌陷、地下水位动态、路基沉降变形等进行监测并及时预警。

5 结论

本文以鲁南某高速铁路某段线路岩溶塌陷为研

究对象,研究分析工程区岩溶的发育形态及发育规律,基于GIS技术,采用风险性指数法对工程区段的岩溶塌陷风险性进行了评估,并提出了岩溶塌陷防治对策,得出主要结论如下:

(1)此段线路岩溶塌陷的形成和分布主要受地层岩性、地质构造、覆盖层结构及厚度、地下水、大气降水、距已知塌陷点距离等因素的影响和控制,在综合分析影响岩溶塌陷的岩溶发育程度、覆盖层特征、地下水动力条件和历史条件等基础上,构建了完善的岩溶塌陷风险性评估层次结构模型,具有较高的可靠性和准确性,对鲁南岩溶地区铁路勘察设计和施工具有重要参考价值。

(2)工程区溶岩段全长7.29 km,高风险区长度约3.44 km,占段落总长的47.2%;中等风险区线路长度约1.88 km,占段落总长的25.8%;低风险区线路长度约1.97 km,占段落总长的27.0%。

(3)此段线路多位于中等和高风险岩溶塌陷区,因路基结构抵抗沉降变形的能力弱,建议采用桩基结构的桥梁通过。规划线路工程桥梁桩基应尽量避免已有土洞、塌陷坑及溶洞发育段,无法避免时应采取清除填堵、跨越、灌浆充填、深基础等相应的治理工程措施。

参考文献:

- [1] 易勇进,宋章,张广泽,等.高速铁路岩溶勘察技术研究现状及展望[J].高速铁路技术,2020,11(1):23-26.
YI Yongjin, SONG Zhang, ZHANG Guangze, et al. Research Status and Prospect of Karst Reconnaissance Technology for High-Speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 23-26.
- [2] 曾德建,王茂靖,杜宇本.汉江特大桥覆盖型岩溶地质特征及处理措施研究[J].高速铁路技术,2020,11(5):63-67.
ZENG Dejian, WANG Maojing, DU Yuben. Research on Geological Characteristics of the Covered Karst and Treatment Measures for Hanjiang Super-Major Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5): 63-67.
- [3] SAATY T L. Applications of Analytical Hierarchies[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1979, 21(1): 1-20.
- [4] 周航,陈仕阔,刘彤,等.挤压性围岩大变形危险性评价的组合赋权-理想点模型[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(10):3647-3658.
ZHOU Hang, CHEN Shikuo, LIU Tong, et al. Combination Weight and Ideal Point Method Model for Risk Evaluation on Squeezing Large Deformation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(10): 3647-3658.
- [5] 沈祥明,刘波拉,汪继锋.基于层次分析法的铁路岩溶隧道突水

- 风险评价[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(12): 56–63.
- SHEN Xiangming, LIU Pola, WANG Jifeng. Evaluation of Water-Inrush Risks of Karst Tunnel with Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(12): 56–63.
- [6] 周航. 山岭隧道岩爆、大变形危险性评价的理想点模型及工程应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- ZHOU Hang. Ideal Point Method Model for Risk Evaluation on Rockburst and Large Deformation of Mountain Tunnels and Its Application[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [7] 陈仕阔, 周航, 廖昕, 等. 川藏铁路高地应力隧道减灾选线[J]. 地球科学, 2022, 47(3): 803–817.
- CHEN Shikuo, ZHOU Hang, LIAO Xin, et al. Line Selection for Disaster Reduction of High Geostress Tunnel on the Sichuan-Tibet Railway[J]. Earth Science, 2022, 47(3): 803–817.
- [8] 李海良, 江思义, 潘兴鱼. 基于GIS与AHP法的岩溶塌陷危险性评价[J]. 资源信息与工程, 2021, 36(3): 118–121.
- LI Hailiang, JIANG Siyi, PAN Xingyu. Evaluation of Karst Collapse Risks Based on GIS and AHP[J]. Resource Information and Engineering, 2021, 36(3): 118–121.
- [9] 陈学军, 罗元华. GIS支持下的岩溶塌陷危险性评价[J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(4): 15–18.
- CHEN Xuejun, LUO Yuanhua. Karst Collapse Risk Assessment with Support[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2001, 28(4): 15–18.

(上接第72页)

其装卸能力的提升需要多次仿真实验才能得出理论数值, 本文探讨所用数据是借用码头自动化提升经验数据, 后续可结合实际工程进行仿真实验。

参考文献:

- [1] 李光磊. 铁路集装箱中心站装卸设备配置研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- LI Guanglei. Studies on Configuration of Handling Equipment in Railway Container Terminal[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [2] 巴树森, 曹正贵, 雷庆秋, 等. 浅谈铁路集装箱结点站装卸设备的选型[J]. 铁道货运, 2003, 21(1): 26–27.
- BA Shusen, CAO Zhenggui, LEI Qingqiu, et al. Discussion on the Selection of Loading and Unloading Equipment of Railway Container Junction Station[J]. Railway Freight Transport, 2003, 21(1): 26–27.
- [3] Q/CR 9133–2016 铁路物流中心设计规范[S].
- Q/CR 9133–2016 Code for Design of Railway Logistics Center[S].
- [4] 熊玲燕, 杨勇, 王晓磊. 青岛港前湾港区迪拜环球码头自动化装卸工艺设计[J]. 港工技术, 2018, 55(S1): 10–13.
- XIONG Lingyan, YANG Yong, WANG Xiaolei. Design of Automated Handling Process of Dubai Universal Terminal at Qianwan Harbor of Qingdao Port[J]. Port Engineering Technology, 2018, 55(S1): 10–13.
- [5] 刘广红, 程泽坤, 林浩. 自动化集装箱码头总体布置[J]. 水运工程, 2013(10): 73–78.
- LIU Guanghong, CHENG Zekun, LIN Hao. General Layout of Automated Container Terminal[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(10): 73–78.
- [6] 毕强, 王建, 胡建平. 巴西至秘鲁两洋铁路换装站研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(3): 60–64.
- BI Qiang, WANG Jian, HU Jianping. Study on Transshipment Station of Brazil-Peru Bi-Ocean Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(3): 60–64.
- [7] 包起帆. 集装箱自动化无人堆场[J]. 上海海事大学学报, 2007, 28(2): 58–61.
- BAO Qifan. Automated and Unmanned Container Yard[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2007, 28(2): 58–61.
- [8] GB 50091–2006 铁路车站及枢纽设计规范[S].
- GB 50091–2006 Code for Design of Railway Station and Terminal[S].