

文章编号: 1674—8247(2025)02—0046—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2025.02.007

四川盆地某车站路基上拱原因分析及变形趋势预测

郑 维 陈明浩 陈兴海

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:四川盆地红层区高速铁路路基上拱变形已成为高速铁路建设面临的难题。以四川盆地某客运专线铁路车站上拱路基为研究对象,在既有研究成果的基础上,通过地质调绘、地质钻探、地应力测试、室内试验等方法,分析车站路基上拱的原因,并对典型变形段上拱变形趋势进行预测。结果表明,(1)车站路基持续上拱的内因为红层泥岩在低应力作用下的蠕变性,外因为场地内存在的水平构造应力;(2)预测车站典型变形段(K 53 + 073 ~ K 53 + 293)持续变形至 2041 年趋于稳定,最终上拱变形量为 41 mm,目前已累计上拱 24.8 mm,剩余变形量约为 16 mm。研究成果可为车站路基上拱病害整治工程设计提供依据。

关键词:四川盆地;无砟轨道;路基上拱;变形趋势预测

中图分类号:U216.41;U213.1 文献标志码:A

Cause Analysis and Deformation Trend Prediction of Subgrade Upward of a Railway Station in Sichuan Basin

ZHENG Wei CHEN Minghao CHEN Xinghai

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

Abstract: The upward deformation of subgrade of high-speed railway in red layer area of Sichuan Basin has emerged as a challenge in high-speed railway construction. Taking the subgrade upward of a passenger dedicated railway station in Sichuan Basin as the research object, based on the existing research results, the causes of subgrade upward of the station were analyzed by means of geological mapping, geological drilling, in-situ stress test and indoor test. On this basis, the upward trend of typical deformation section was predicted. The results show that: (1) The internal cause of the continuous upwarding of the station subgrade is the creep of red mudstone under low stress, while the external cause is the horizontal tectonic stress in the site. (2) It is predicted that the typical deformation section (K 53 + 073 ~ K 53 + 293) of the station will be stable until 2041, with a final upward deformation of 41 mm, the cumulative upward now is 24.8 mm, and the remaining deformation is about 16 mm. The research findings can provide a basis for the design of the upward disease treatment project of the station.

Key words: Sichuan Basin; ballastless track; subgrade upward; deformation trend prediction

近年来,随着人们对出行舒适性和快捷性要求的提高,采用无砟轨道的高速铁路越来越多。因无砟轨

道对变形的敏感性极强,近年来无砟轨道上拱问题得到学者们的广泛关注,如兰新高速铁路^[1]、成渝客运

收稿日期:2024-06-12

作者简介:郑维(1989-),男,工程师。

基金项目:中国国家铁路集团有限公司重大课题(K2019G045)

引文格式:郑维,陈明浩,陈兴海.四川盆地某车站路基上拱原因分析及变形趋势预测[J].高速铁路技术,2025,16(2):46-50.

ZHENG Wei, CHEN Minghao, CHEN Xinghai. Cause Analysis and Deformation Trend Prediction of Subgrade Upward of a Railway Station in Sichuan Basin[J]. High Speed Railway Technology, 2025, 16(2):46-50.

专线内江北站^[2]、郑西高速铁路^[3]、云贵高速铁路^[4]、京沈高速铁路^[5]、成贵客运专线宜宾西站^[6]等。尤其是红层地区,因红层泥岩具有特殊的工程性质,其上拱变形已成为高速铁路建设面临的难题之一^[7]。

众多学者针对红层区路基上拱问题进行了研究。刘毅等^[8]通过离心模型试验得出基底水平应力与竖向应力的关系是导致深路堑基底上拱的关键因素;王冲等^[9]、王剑^[10]通过现场调查与室内试验得出膨胀性泥岩和地下水是病害发生的原因;钟志彬等^[7]通过蠕变试验得出泥岩的蠕变特性是路基中长期上拱变形的主要原因,而泥岩的膨胀性是短期变形的主要原因;吴沛沛^[11]通过分析考虑流变与不考虑流变情况下基底应力及竖向变形的差异,认为泥岩的流变特性是路基出现长时间上拱变形的重要原因。

本文结合既有研究成果,通过地质调绘、地应力测试、室内试验等方法,分析了四川盆地某车站路基上拱的原因,在此基础上对典型变形段上拱变形趋势进行预测,为上拱病害整治工程设计提供依据,也可类似问题的分析解决提供参考。

1 上拱段变形情况

研究车站为2台4线的中间站,2015年12月开通运营。根据工务段监测数据分析,自通车运营至今,车站K 52+882~K 52+990和K 53+073~K 53+293段存在时断时续的上拱变形,其中K 52+882~K 52+990段最大上拱量18.7 mm,K 53+073~K 53+293段最大上拱量24.8 mm,上行线(右线)累计最大上拱变形值为24.3 mm,位于K 53+242处,下行线(左线)累计最大上拱变形值为24.8 mm,位于K 53+

239处,上、下行线累计上拱变形最大处平均上拱速率为0.32 mm/月。通过分析累计上拱变形量与时间的关系,发现上拱速率与降雨无显著相关性,如2018年2月—6月的上拱变形量与2018年7月—10月的上拱变形量大致相当。

2 上拱段地质特征

车站区属丘陵地貌,丘槽相间,地形波状起伏,地面高程405~450 m,相对高差45 m,自然横坡15°~40°,局部较陡。

车站路基基底以下以川中红层泥岩为主,局部夹少量砂岩。泥岩主要为紫红色,局部为灰绿色,泥质胶结,岩质软,具遇水软化崩解、失水收缩开裂的特性;砂岩多为灰绿色,中粗粒结构,泥质胶结,中厚层状,岩质较软。

车站位于扬子准地台之川中台拗,受龙门山推覆构造及喜山后期东西向水平挤压影响,区域存在一定的水平应力作用,主要构造应力场方向为北西向。

两上拱段均为深挖路堑,其中K 52+882~K 52+990段路堑线路中心最大挖深约23.2 m,K 53+073~K 53+293段路堑线路中心最大挖深约29.9 m。

3 补充勘察成果

3.1 地质调绘

通过上拱病害发生后的地质调查发现,上拱段发育两处褶皱构造,即张家湾背斜和张家湾向斜,张家湾背斜与线路交于K 52+980,交角85°,张家湾向斜与线路交于K 53+242,交角75°,车站路基上拱段与褶皱构造关系如图1所示。

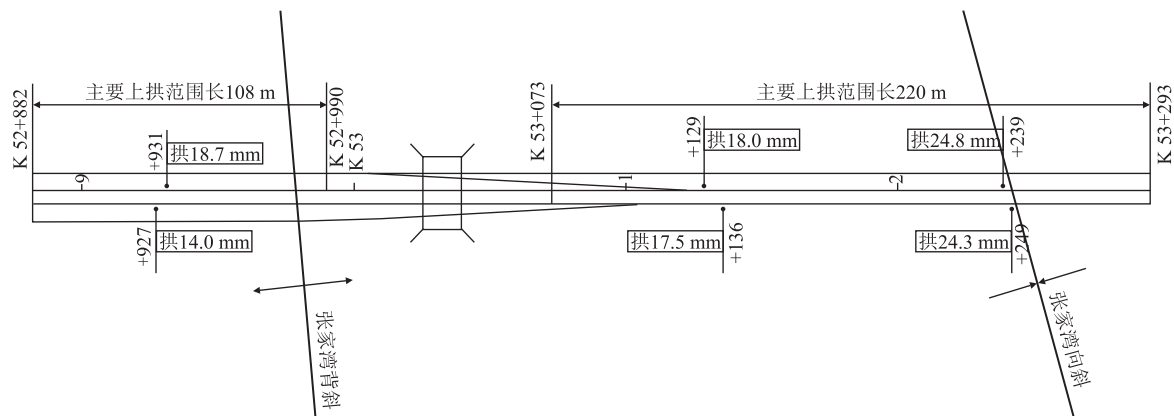


图1 车站路基上拱段与褶皱构造关系图

通过对比构造发育情况和监测数据发现,上拱区段均位于褶皱构造影响范围内,其中上拱最大处(上行线K 53+242、下行线K 53+239)位于张家湾向斜核部,其余上拱区段均位于张家湾向斜与张家湾背斜

之间或两侧一定范围内。

由此可见,路基上拱与褶皱构造存在一定关系,局部构造应力集中使水平应力增大,大于垂向应力,在水平应力的作用下使路基发生上拱。

3.2 地质钻探

在路基典型变形段布置3个钻孔,钻孔位置如

图2所示。钻孔发现路基基底以下以泥岩为主,局部夹少量砂岩,钻孔终未见地下水。

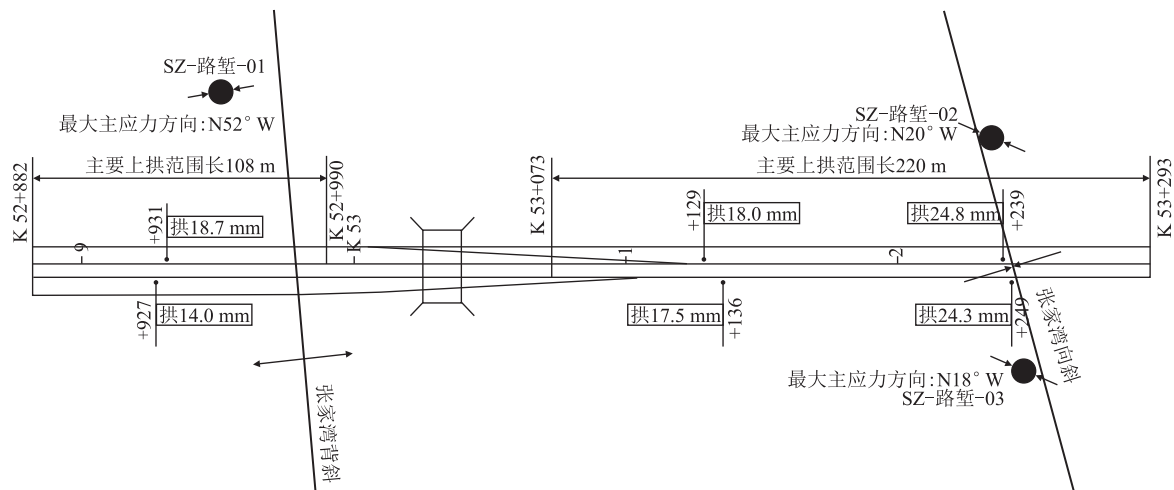


图2 地应力测试钻孔布置图

3.3 地应力测试

为分析上拱段岩体地应力状态,在车站典型变形段路基两侧钻孔内进行了不同深度地应力测试。通过水压致裂法测试,获得了路基底层岩体的水平最大主应力 σ_H 、最小主应力 σ_h 和最大主应力方向。

实测SZ-路堑-01孔最大水平主应力方向为N52°W, SZ-路堑-02孔最大水平主应力方向为N20°W, SZ-路堑-03孔最大水平主应力方向为N18°W,最大水平主应力优势方向为NNW-NWW向。

主应力大小随深度的分布如图3~图5所示。SZ-路堑-01孔测试深度范围内最大水平主应力值为0.65~4.63 MPa,最小水平主应力值为0.51~2.80 MPa;SZ-路堑-02孔测试深度范围内最大水平主应力值为0.76~3.34 MPa,最小水平主应力值为0.67~2.42 MPa;SZ-路堑-03孔测试深度范围内最大水平

主应力值为0.97~2.42 MPa,最小水平主应力值为0.91~1.64 MPa。

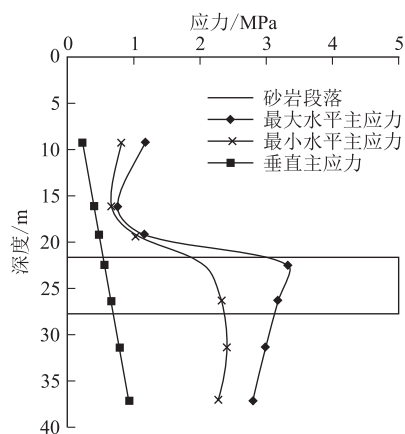


图4 SZ-路堑-02孔地应力分布图

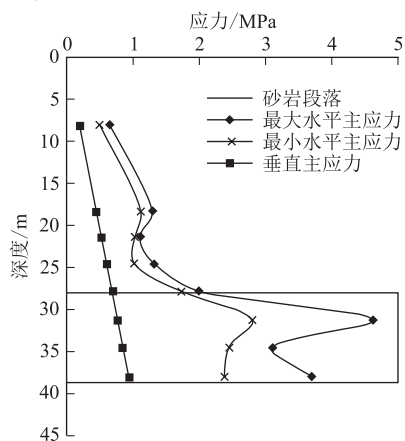


图3 SZ-路堑-01孔地应力分布图

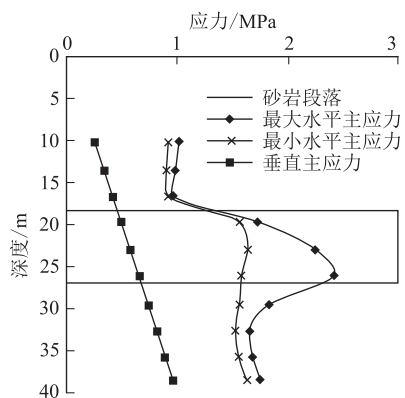


图5 SZ-路堑-03孔地应力分布图

由地应力测试结果可知,上拱区段主应力值大致随测试深度的增加而增加,主应力之间的大小关系为

$\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ (σ_H 为最大水平主应力, σ_h 为最小水平主应力, σ_v 为垂直主应力), 且在砂岩层中, 水平应力明显呈现出应力集中现象。

由此可见, 受构造影响, 场地内存在以水平应力为主的构造应力场。

3.4 室内试验

3.4.1 泥岩膨胀性实验

根据 TB 10038 - 2022《铁路工程特殊岩土勘察规程》^[12], 将饱和吸水率 $\omega_{sa} \geq 10\%$ 、自由膨胀率 $F_s \geq 30\%$ (膨胀率 $V_H \geq 3\%$)、膨胀力 $P_p \geq 100$ kPa, 这 3 个指标中 2 个符合则可认为属于膨胀岩。

根据上述标准, 建设勘察阶段共取 16 组样品进行膨胀性试验, 自由膨胀率平均值为 23.93%, 膨胀力平均值为 79.39 kPa, 饱和吸水率 ω_{sa} 平均值为 6.91%, 有 4 组样品为膨胀岩。补充勘察阶段共取 27 组样品进行了膨胀性试验, 自由膨胀率平均值为 27.11%, 膨胀力平均值为 29.7 kPa, 饱和吸水率平均值为 21.44%, 有 13 组为膨胀岩。

与建设勘察阶段相比, 泥岩膨胀性试验指标有所增大, 但从指标均值来看, 仅饱和吸水率达到膨胀岩标准。故对车站上拱段泥岩判断为具有一定膨胀性, 局部为弱膨胀岩。试验结果如表 1 所示。

表1 泥岩膨胀性试验结果表

勘察阶段	饱和吸水率		膨胀力		自由膨胀率		膨胀岩/组
	组	指标/%	组	指标/kPa	组	指标/%	
建设勘察阶段	16	0.8 ~ 28.5	16	10.0 ~ 244.8	14	2 ~ 44	4
补充勘察阶段	27	9.8 ~ 38.9	27	4.5 ~ 81.9	27	12 ~ 42	13

3.4.2 矿物 X 射线衍射实验

补充勘察阶段取 3 组泥岩进行全岩矿物 X 射线衍射实验, 得出黏土矿物含量为 48.2% ~ 67.1% (如表 2 所示), 同时补充勘察阶段对 10 组泥岩进行了蒙

脱石含量测定, 10 组样品中均含蒙脱石, 含量 9.62% ~ 16.33%。根据补充勘察阶段试验成果及红层泥岩研究成果^[13]可知, 红层泥岩黏土矿物以伊利石为主, 含有一定的蒙脱石。

表2 全岩矿物 X 射线衍射法检测结果表

编号	成分含量/(Wt%)						
Q2217747	石英	斜长石	方解石	白云石	赤铁矿	黏土矿物	合计
	16.8	5.2	7.4	1.5	2.0	67.1	100
Q2217748	石英	斜长石	方解石	白云石	赤铁矿	黏土矿物	合计
	23.4	7.0	16.0	3.5	1.9	48.2	100
Q2217749	石英	斜长石	方解石	白云石	赤铁矿	黏土矿物	合计
	17.9	5.9	12.4	3.1	1.0	59.7	100

3.4.3 典型泥岩薄片鉴定

车站典型泥岩样品在显微镜下的微观结构图显示, 该样品泥质成分含量约 67% ~ 72%, 呈显微隐晶质黏土矿物集合体, 其间夹杂显微鳞片状、纤状黏土矿物雏晶, 几乎不具有光性特征, 空隙较发育, 具有吸水膨胀的结构基础。

岩薄片鉴定结果, 泥岩中黏土矿物以伊利石为主, 空隙发育, 具有膨胀的物质基础和结构基础, 存在缓慢、微弱膨胀变形的风险。但泥岩的膨胀离不开水的作用, 而补充勘察阶段泥岩层内未发现地下水发育, 且通过对比上拱变形速率与降雨量的关系发现二者无明显相关性, 故认为泥岩的膨胀性不是车站路基上拱的主要内因。在此基础上, 结合已有研究成果, 认为泥岩的蠕变性是车站路基上拱的主要内因, 即恒定应力状态下的蠕变变形是路基上拱的内因。

4 路基上拱原因分析

4.1 内因——红层泥岩的蠕变性

红层泥岩具有两大特性, 即膨胀性和蠕变性。

根据建设勘察阶段和补充勘察阶段泥岩膨胀性试验结果分析, 车站区泥岩自由膨胀率和膨胀力指标较低, 饱和吸水率指标相对较高, 局部达弱膨胀岩判定标准, 结合地形地貌特征, 认为泥岩有一定膨胀性, 但不具有典型的膨胀岩特征。根据矿物成分分析和典型泥

4.2 外因——低水平应力

补充勘察阶段地质调绘和地应力测试结果表明, 路基上拱段存在以水平应力为最大主应力的构造应力场, 路基开挖卸荷, 竖向自重应力降低, 基底泥岩有向临空面变形的趋势, 加之泥岩在应力作用下具有长期蠕变的特性, 故在低水平应力作用下发生长期的蠕变

变形。

综上所述,车站路基持续上拱的内因为红层泥岩在低应力作用下的显著蠕变性;外因为场地内存在水平构造应力。深路堑开挖卸载导致水平应力与垂直应力差增大,加之地下水和水汽的共同作用,基底红层软岩发生以低应力条件下的长期蠕变为主的上拱变形。

5 上拱变形趋势预测

选取车站 K 53 + 073 ~ K 53 + 293 段典型断面进行上拱预测分析,本段路堑线路中心最大开挖深度 29.9 m,该部分典型断面如图 6 所示。

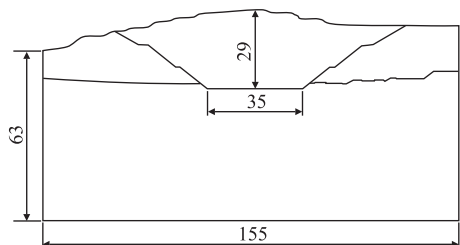


图6 车站代表性横断面图(m)

以基床中心点作为监测点,记录开挖完成到模型再次稳定时的垂向位移增量,得到观测点随运算时步变化曲线,如图 7 所示。

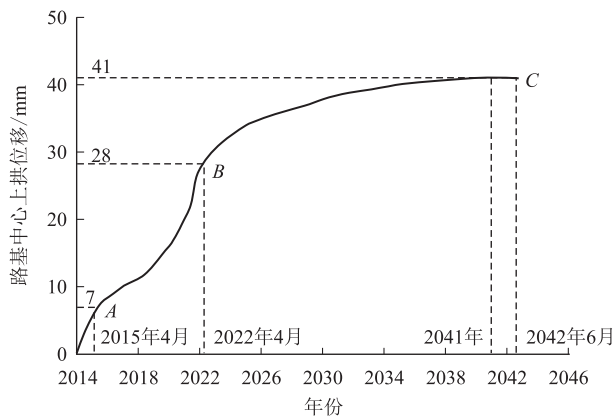


图7 典型断面路基上拱量和时间步长的关系图

数值模拟虽然无法直接提供上拱过程的真实时间信息,但是借助现场实际观测数据仍可较合理地进行时间预测分析(每 72 步约代表 1 a)。预测车站(K 53 + 073 ~ K 53 + 293)累计上拱变形量 41 mm,其中 2014 年 2 月—2015 年 4 月(开挖到路基面标高至无砟轨道施工前)预测上拱变形 7 mm,2015 年 5 月—2022 年 4 月预测上拱变形 21 mm,2022 年 4 月—2042 年 6 月预测后期上拱变形 13 mm。根据 2014—2022 年实测轨面最大高程偏差为 24.8 mm,与预测结果较吻合,剩余变形量约为 16 mm。

6 结论

本文结合既有研究成果,通过地质调绘、地应力测试、室内试验等方法,研究某车站上拱原因,并分析上拱变形趋势。得到主要结论如下:

(1)车站上拱段发育两处褶皱构造,场地内存在以水平应力为主的构造应力场。

(2)车站区泥岩矿物成分以黏土矿物为主,黏土矿物主要为伊利石,空隙较发育,具有吸水膨胀的结构基础。

(3)车站路基持续上拱的原因分为内因和外因两个方面,内因为红层泥岩在低应力作用下的显著蠕变性;外因为场地内存在水平构造应力。深路堑开挖卸载导致水平应力与垂直应力差增大,加之地下水和水汽的作用,基底红层软岩出现低应力下长期蠕变为主的上拱变形。

(4)预测车站典型变形段(K 53 + 073 ~ K 53 + 293)持续变形至 2041 年趋于稳定,最终上拱变形量约为 41 mm,目前累计上拱量 24.8 mm,剩余变形量约为 16 mm。

参考文献:

- [1] 丁小刚,马丽娜,张戎令,等.高速铁路弱膨胀泥岩地基轨道上拱量计算预测[J].兰州大学学报(自然科学版),2021,57(6): 753-759.
DING Xiaogang, MA Lina, ZHANG Rongling, et al. Expansion Potential of Mudstones with a Low Clay Mineral Content on a High-speed Ballastless Railway[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2021, 57(6): 753-759.
- [2] 杨吉新,马旭超,刘前瑞.关于成渝高铁路基上拱问题的探讨[J].铁道建筑,2016,56(8): 112-115.
YANG Jixin, MA Xuchao, LIU Qianrui. Exploring on Subgrade Swelling of Chengdu-Chongqing High Speed Railway [J]. Railway Engineering, 2016, 56(8): 112-115.
- [3] 张国胜,刘更新,贾华强.郑西高铁 K921 段无砟轨道上拱整治方案研究[J].中国铁路,2013(7): 52-54.
ZHANG Guosheng, LIU Gengxin, JIA Huaqiang. Study on Treatment Scheme of Upper Arch of Ballastless Track in K921 Section of Zhengzhou-Xi'an High-speed Railway [J]. Chinese Railways, 2013(7): 52-54.
- [4] 陈伟志.低矮路堤荷载下膨胀土地基胀缩变形特性研究[D].成都:西南交通大学,2015.
CHEN Weizhi. Study on Deformation Characteristics of Expansive Soil Foundation under Low Embankment Load[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [5] DUAN Junyi, YANG Guolin, HU Min, et al. Heave Performance of a Ballastless Track Subgrade of Double Line High-speed Railway Filled with Micro-expansive Andesite under Water Immersion [J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119087.

(下转第 56 页)

- 1990.
- WU Jishan. Observation and Study on Debris Flow in Jiangjiagou, Yunnan Province[M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [10] 谭炳炎,段爱英. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(2): 43-52.
- TAN Bingyan, DUAN Aiying. Study on Prediction for Rainstorm Debris Flow along Mountain District Railways[J]. Journal of Natural Disasters, 1995, 4(2): 43-52.
- [11] 刘传正. 区域滑坡泥石流灾害预警理论与方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(3): 1-6.
- LIU Chuansheng. Study on the Early Warning Methods of Landslide-debris Flows[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(3): 1-6.
- [12] 崔鹏,刘世建,谭万沛. 中国泥石流监测预报研究现状与展望[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(2): 10-15.
- CUI Peng, LIU Shijian, TAN Wanpei. Progress of Debris Flow Forecast in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(2): 10-15.
- [13] 关君蔚,王礼先,孙立达,等. 泥石流预报的研究[J]. 北京林学院学报, 1984, 6(2): 1-16.
- GUAN Junwei, WANG Lixian, SUN Lida, et al. A Study on the Forecast of Debris Flow[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1984, 6(2): 1-16.
- [14] TB 10027-2022 铁路工程不良地质勘察规程[S].
- TB 10027-2022 Specification for Unfavorable Geological Condition Investigation of Railway Engineering[S].
- [15] 莫容飞,黄艺丹,孙先锋,等. 基于高原隆升裂点理论的中尼铁路泥石流特征及减灾选线要点[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(12): 60-68.
- MO Rongfei, HUANG Yidan, SUN Xianfeng, et al. Characteristics of Debris Flow and Key Points of Disaster Reduction and Route Selection of China-Nepal Railway Based on Plateau Uplift Knickpoint Theory[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(12): 60-68.
- [16] 朱颖,魏永幸. 复杂艰险山区铁路地质灾害风险与减灾选线策略[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(S2): 1-4.
- ZHU Ying, WEI Yongxing. Railway Geological Disaster Risk and Route Selection Strategy for Disaster Reduction in Complex and Dangerous Mountainous Areas[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(S2): 1-4.
- [17] 铁道部基本建设总局. 路基工程[M]. 北京: 人民铁道出版社, 1965.
- General Administration of Basic Construction of the Ministry of Railways. Subgrade Engineering[M]. Beijing: People's Railway Publishing House, 1965.
- [18] 吴红刚,陈小云,李慈航,等. 长达坂沟泥石流桩板墙治理工程模型试验[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(22): 16-21.
- WU Honggang, CHEN Xiaoyun, LI Cihang, et al. Management Engineering of Changdaban Ditch Debris Flow Model Test[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(22): 16-21.
- [19] 许强,李骅锦,何雨森,等. 文家沟泥石流治理工程效果的定量分析评价[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1046-1056.
- XU Qiang, LI Huajin, HE Yusen, et al. Quantitative Evaluation of Engineering Treatments for Prevention of Debris Flow at Wenjia Gully[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 1046-1056.

(上接第50页)

- [6] 龙清亮. 川南城际铁路自宜线泥岩膨胀特性研究和防治对策[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(3): 102-106.
- LONG Qingliang. A Study on Swelling Characteristics of Mudstone along Zigong-Yibin Line of South Sichuan Intercity Railway and Countermeasures[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3): 102-106.
- [7] 钟志彬,李安洪,邓荣贵,等. 高速铁路红层软岩路基时效上拱变形机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 327-340.
- ZHONG Zhibin, LI Anhong, DENG Ronggui, et al. Study on Time-dependent Upheaval Deformation Mechanisms of Red-bed Soft Rock Subgrade of High-speed Railways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 327-340.
- [8] 刘毅,程谦恭,陈梦发,等. 某红层深挖路堑基底上拱离心模型试验研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 70-74.
- LIU Yi, CHENG Qiangong, CHEN Mengfa, et al. An Experimental Study on Centrifugal Model of Upheaving of Deep Cutting Base in the Red Bed[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 70-74.
- [9] 王冲,王起才,张戎令,等. 无砟轨道高速铁路路基上拱病害成因分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(12): 252-256.
- WANG Chong, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Analysis of Arch Disease of Ballastless Track High-speed Railway[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(12): 252-256.
- [10] 王剑. 兰新高速铁路路基上拱原因分析及整治措施[J]. 路基工程, 2015(1): 205-209.
- WANG Jian. Cause Analysis on Subgrade Arching of Lanzhou-Xinjiang High-speed Railway and the Control Measures[J]. Subgrade Engineering, 2015(1): 205-209.
- [11] 吴沛沛. 基于流变的高速铁路深挖路堑长期上拱变形数值分析[J]. 路基工程, 2019(1): 135-139.
- WU Peipei. Numerical Analysis on the Long-term Upheaval Deformation of High-speed Railway Deep Cutting Based on Rheology[J]. Subgrade Engineering, 2019(1): 135-139.
- [12] TB 10038-2022 铁路工程特殊岩土勘察规程[S].
- TB 10038-2022 Code for Special Soil and Rock Investigation of Railway Engineering[S].
- [13] 王建奇,王秉勇,韩侃. 高速铁路路基上拱变形问题综述及对策[J]. 路基工程, 2024(1): 1-6.
- WANG Jianqi, WANG Bingyong, HAN Kan. Overview and Countermeasures of Up-arching Deformation Problem for High-speed Railroad Roadbed[J]. Subgrade Engineering, 2024(1): 1-6.