

文章编号: 1674—8247(2021)04—0029—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.04.006

西南地区某隧道底鼓病害原因分析

王茂靖 吴俊猛

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:西南山区某隧道 2009 年开通运营,2012 年 3 月发现隧底有 3 段存在不同程度的底鼓病害。经整治处理后,隧道底鼓变形得到一定抑制,但未能彻底消除,铁路不得不限速通行。针对这一问题,本文结合隧道所处的区域地质环境和地质补充勘察成果资料,深入分析了隧道底鼓病害产生的主要原因,提出了隧道设计应高度重视地应力、岩体强度及岩石产状之间关系的建议,并指出了隧底仰拱的结构强度及曲率是抵抗岩体变形的重要参数。

关键词:隧道;仰拱;底鼓病害;岩体强度;原因分析;结构强度;曲率

中图分类号:U457⁺.2 **文献标志码:**A

Cause Analysis for Floor Bulg of a Tunnel in Southwest China

WANG Maojing WU Junmeng

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

Abstract: It was found in March 2012 that there were floor bulgs in three sections of a tunnel in the southwest mountainous area that was put into service in 2009. After treatment, these floor bulgs was restrained to some extent, but not completely eliminated, and the railway had to be run at a limited speed. To solve this problem, combined with the regional geological environment where the tunnel is located and the results of supplementary geological survey, this paper makes an in-depth analysis on the main causes of floor bulgs, and suggests that great importance should be attached to the relationship among crustal stress, rock strength, and rock occurrence during tunnel design, and points out that the structural strength and curvature of the invert at the tunnel floor are important parameters to resist rock deformation.

Key words: tunnel; invert; floor bulg; rock strength; cause analysis; structural strength; curvature

1 工程及病害概况

西南山区某隧道全长 7 858 m,除出口段 17.81 m 位于的曲线(半径 8 000 m)外,其余均位于直线上。隧道范围内线路坡度为 +4‰(4 646 m)、-4‰(3 212 m)的人子坡,于 2009 年 6 月竣工并投入使用^[1]。

自 2012 年 3 月开始,工务部门发现隧道内

K 107 ~ K 110段线路时常出现不同程度的晃车现象,2012 年 9 月 18 日测量发现 K 107 + 950 ~ K 108 + 100(对应施工里程 DK 300 + 428 ~ DK 300 + 578)、K 108 + 600 ~ K 108 + 700(对应施工里程 DK 301 + 078 ~ DK 301 + 178)、K 109 + 250 ~ K 109 + 350(对应施工里程 DK 301 + 728 ~ DK 301 + 828)3 段线路轨面较 2012 年 2 月精调后均有变化,其中变化较明显的是 K 108 + 600 ~ K 108 + 630段,变化最大处轨面标高较

收稿日期:2020-03-30

作者简介:王茂靖(1964-),男,教授级高级工程师。

引文格式:王茂靖,吴俊猛.西南地区某隧道底鼓病害原因分析[J].高速铁路技术,2021,12(4):29-33.

WANG Maojing, WU Junmeng. Cause Analysis for Floor Bulg of a Tunnel in Southwest China[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4): 29-33.

精调后抬升了近 17 mm,线间沟出现纵向裂缝,缝宽 10 mm,整体道床表面有网状裂缝,最大缝宽达 3 mm。对变形速率快且累积变形量较大的 K 108 + 598 ~ K 108 + 642段隧底采用锚索 + 锚杆加固处理后,底鼓变形得到一定抑制,但各段底鼓变形至今仍在持续发展。贯通平导与正洞平行,位于正洞南侧 30 m,有 30 个横通道与正洞相连,平导内存在更为严重的底鼓变形且间断分布,无明显的分布规律。隧道正洞及平导边墙及拱顶未见明显变形迹象。

2 隧道地质条件

隧道区属低山地貌,穿越龙泉山脉,进口位于沱江峡谷西岸斜坡地带,出口位于龙泉山西缘山麓,隧道最大埋深 325 m。隧道穿越舒缓的龙泉山箱形复式背斜,无断裂构造。洞身位于侏罗系上统蓬莱镇组地层,岩性主要为泥岩、泥质砂岩夹粉砂岩、砂岩,局部夹脉状石膏,砂岩相变较大,穿插于泥岩之中,常常尖灭。基岩裂隙水微弱,对混凝土具硫酸盐中等腐蚀至强腐蚀性。岩层产状大多较平缓,未见断裂构造。

隧道穿越地层、构造相对简单,主要工程地质问题为进出口边坡砂泥岩易风化剥落,应加强防护。此外,隧道洞身下伏 3 000 m 为三叠系须家河组煤系地层,存在沿构造裂隙瓦斯溢出风险,隧道为高瓦斯隧道。

全隧除进口段 110 m、出口段 112 m 为Ⅳ、Ⅴ级围岩外,其余 7 636 m均为Ⅲ级围岩,占比 97%。

3 隧道岩体内残余构造应力

隧道底鼓病害发生后,为分析研究病害产生的原因,在平行导坑内进行了两个点的地应力测试^[2]。测试方法为较为成熟且可靠的应力解除法。

地应力 1 号测点位于平导洞与 13 号横通道交汇处的平导洞右边墙,测试深度为边墙内 4.0 m,地应力测试计算结果如表 1 所示。

表 1 隧道 1 号测点地应力测试结果表^[3]

测试部位	测点岩性	地应力参数	最大主应力 σ_1	中间主应力 σ_2	最小主应力 σ_3
		量值/MPa	16.7	11.7	9.3
		方向/(°)	326	201	62
		倾角/(°)	16	63	21

注:主应力方向是主应力的投影方向,以象限角表示;倾角“-”表示俯角,正角为仰角

地应力 2 号测点位于平导洞与 10 号横通道交汇处的平导洞右边墙,测试深度为边墙内约 6.5 m,地应力测试计算结果如表 2 所示。

表 2 隧道 2 号测点地应力测试结果表

测试部位	测点岩性	地应力参数	最大主应力 σ_1	中间主应力 σ_2	最小主应力 σ_3
		量值/MPa	14.3	6.8	4.8
		方向/(°)	341	72	165
		倾角/(°)	14	01	76

注:主应力方向是主应力的投影方向,以象限角表示;倾角“-”表示俯角,正角为仰角

从表 1、表 2 的测试结果可以看出:

(1)现场实测原岩地应力值较高,最大主应力值分别为 16.7 MPa 和 14.3 MPa。实测最大主应力从绝对值量值上反映了隧道区测量段具有较高的地应力。

(2)最大主应力 σ_1 方向分别为 326°和 341°,与平导轴线方向夹角约为 49°和 64°,基本呈大角度相交。

(3)最大主应力倾角为 16°和 14°,以近水平为主,但主应力与水平面一般都有一定夹角,主平面都是倾斜的。

地应力测试表明,龙泉山褶皱带历史时期遭受了较大的水平构造力作用,岩体中残余构造应力较大。

4 地质补勘主要成果

隧道发生底鼓病害后,设计单位先后进行了两次补勘^[4]。第一次补勘时间为 2013 年 5 月,在隧道内发生病害的 3 个段落及段落间共布置 8 个断面,每个断面布 3 孔,分别位于两线间中心沟和两侧线路与侧沟间回填部位,共计布孔 24 孔,钻探深度为 3 ~ 20 m。同时采用地质雷达对病害段隧底扫描,确定仰拱厚度。第二次补勘时间为 2018 年 1 - 5 月,共钻探 12 孔,补勘任务主要包括在正洞内 3 处底鼓病害段及 2 处用于对比分析的未变形段进行地质钻探、孔内物探及孔内监测元器件埋设等。为调查隧底围岩变形影响深度和地下水位变化情况,布置了 5 个围岩变形监测孔和 6 个地下水位监测孔,钻孔均布置在隧道中心处。两次补勘均钻取了大量岩样进行强度试验、蠕变试验及矿物成分分析。

(1)隧底岩性

钻孔揭示情况显示,补勘范围隧底岩性主要以泥质粉砂岩为主,局部地段为粉砂质泥岩,多数钻孔揭示岩芯较为完整,呈柱状、短柱状,岩层近于水平状。岩芯取出数日后一般未见风干开裂现象,岩芯中局部夹石膏脉,石膏脉单层厚 1 ~ 3 mm 不等。

(2)隧底地下水发育情况

多数钻孔初期孔内未见明显地下水,但在一段时间后,基岩裂隙水逐渐渗透并在钻孔内汇集。据观测,地下水位稳定后,水位普遍位于隧道道床顶面以下

0.1~1.0 m范围,地下水不具承压性。隧底地下水以基岩裂隙水形式存在,围岩透水性及富水性较弱^[5]。

(3) 岩石强度

第一次补勘共取38组岩样进行了强度试验,结果发现:隧底基岩以泥质粉砂岩为主,局部地段为粉砂质泥岩。岩样天然单轴抗压强度5.07~47.30 MPa,标准值为16.65 MPa;烘干单轴抗压强度13.6~59.6 MPa,标准值为29.75 MPa;饱和单轴抗压强度3.51~31.23 MPa,标准值为5.27 MPa;软化系数0.10~0.46。岩石饱和吸水率平均值为7.48%,自由膨胀率平均值为21.22%,膨胀力标准值为62.89 kPa,未达到膨胀岩的判定标准^[6]。

取两组岩样进行了单轴压缩蠕变试验,试样YDBZ-5-Y-9-1的长期强度为5.1 MPa,是常规压缩试验峰值强度(5.94 MPa)的85.86%;试样YDBZ-2-Y-3-1的长期强度为6.4 MPa,为常规压缩试验峰值强度(7.01 MPa)的91.29%。试验岩样具有中-低蠕变性。

第二次补勘共取67组岩样进行了物理力学试验,结果发现:

① 变形段落

岩样天然单轴抗压强度值6.40~55.10 MPa,标准值为15.40 MPa,饱和单轴抗压强度值5.34~14.50 MPa,标准值为5.76 MPa;岩石饱和吸水率1.57~4.95%,平均值为3.49%,自由膨胀率3~28%,平均值为16.38%,膨胀力11.2~87.9 kPa,标准值为33.18 kPa,未达到膨胀岩的判定标准。

② 未变形段落

岩样天然单轴抗压强度值2.22~34.1 MPa,标准值为11.79 MPa,饱和单轴抗压强度值6.16~12.35 MPa,标准值为4.37 MPa;自由膨胀率17~30%,平均值为26.29%,膨胀力12.7~76.6 kPa,标准值为17.59 kPa,未达到膨胀岩的判定标准。

(4) 岩石矿物成分分析

X射线粉晶衍射试验发现,变形段与未变形段处岩石的矿物成分组合基本相同,主要物质为石英、伊利石和绿泥石。每种矿物成分含量存在细微差异,变形段石英含量相对较高,未变形段伊利石(伊利石是形成其他粘土矿物的中间过渡性矿物)含量较高。

(5) 隧底软化层

钻探揭示基底以下有明显软化层的钻孔主要有以下几处:YDBZ-15(K 108+665右4.1 m)钻孔2.0~2.4 m段为厚约0.4 m的软化层,YDBZ-17(K 108+

975中心)钻孔2.05~2.12 m段为厚约7 cm的软化层,YDBZ-20(K 109+285中心)钻孔0.9~1.3 m段为厚约0.4 m的软化层,YDBZ-21(K 109+285右4.1 m)钻孔隧底(孔深1.3 m)处见木块,其余钻探揭示的仰拱底部基岩软化层较薄或不明显。由此可见,地下水对隧底基岩软化作用不明显。

(6) 仰拱混凝土强度及结构

病害段围岩级别为Ⅲ级和Ⅳ级,隧底仰拱为素混凝土。补勘共取隧底仰拱混凝土样36组,钻探未发现隧底仰拱混凝土与回填层混凝土有明显的分层界线。岩芯多呈柱状,总体上芯样表面较光滑,骨料分布较均匀,混凝土较密实,气孔分布较均匀。

隧底结构上部混凝土抗压强度值为17.6~34.5 MPa,平均值为25.21 MPa;下部混凝土抗压强度值为17.9~34.5 MPa,平均值为25.62 MPa。可见,隧道底部混凝土结构强度值总体上满足设计要求。

根据物探资料,K 109+250~K 109+350段左侧道床面以下混凝土厚1.70~2.14 m,右侧道床面以下混凝土厚1.30~1.70 m。钻探揭示左侧道床面以下混凝土厚1.70 m、1.99 m,右侧道床面以下混凝土厚1.30 m、1.50 m,中间仰拱及回填层混凝土厚0.90 m、1.30 m。根据钻探资料,该段混凝土厚度较薄,且仅YDBZ-19、YDBZ-20、YDBZ-22共3个钻孔混凝土底部见塑料防水板。

此外,钻孔揭示,隧底仰拱结构断面大部分形态较平直,部分断面甚至出现反向形态且混凝土厚度不足,隧底实际断面与设计拱形结构的形态差异明显。

(7) 孔内监测

第二次补勘共设置6个水位观测钻孔和5个隧底围岩变形监测钻孔,均通过在钻孔内埋设特制监测元器件进行数据采集分析。

① 地下水位监测

地下水位在孔口以下0.5~2.7 m范围内,与上次勘查结果基本一致。近两个多月的观察显示,水位累计变化量在2~10 mm之间,水位波动较小;水位高程变化不大,即便是在6~7月强降雨时节,钻孔中地下水位高程也基本没有变化。隧道地下水位累计变化时态曲线和高程累计变化时态曲线如图1、图2所示。

② 变形监测

在5个钻孔不同深度埋设多点位移计进行分层数据监测,5个点观测时长为80 d,孔内位移累计变形时态曲线如图3所示。

针对5个孔内不同深度的位移观测数据,分析

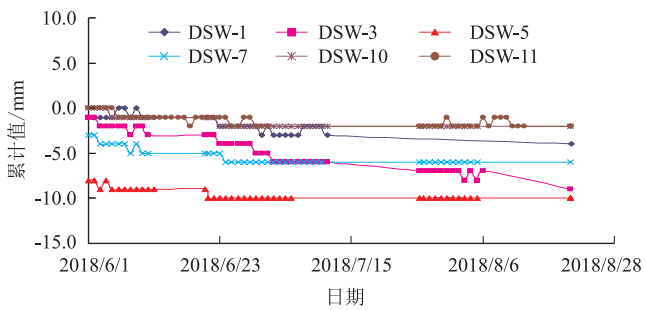


图1 隧道地下水位累计变化时态曲线图

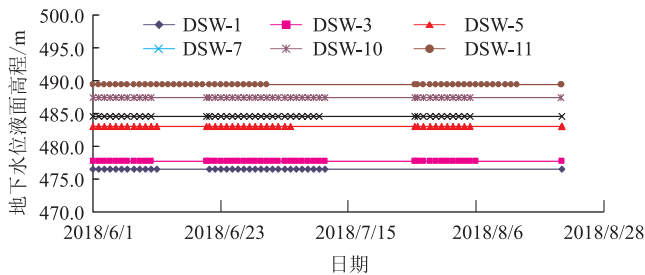


图2 隧道地下水位高程累计变化时态曲线图

如下:

DK 106 + 852 (YBZ-YD-04 孔) 围岩上拱变形主要集中在孔口以下 10 m 范围内,10 ~ 16 m 范围内岩层相对上拱量有一定变化,但增量相对较小。截至目前,孔口相对上拱变形量累计 0.85 mm。

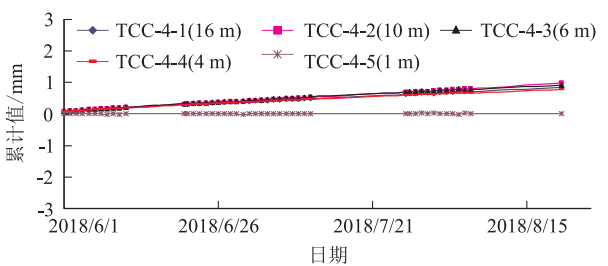
DK 107 + 652 (YBZ-YD-06 孔) 围岩上拱变形主要集中在孔口以下 12 m 范围内,截至目前,孔口相对上拱变形量累计 0.30 mm。

DK 108 + 016 (YBZ-YD-08 孔) 围岩上拱变形主要集中在孔口以下 10 m 范围内,10 ~ 36 m 范围内岩层相对上拱量有一定变化,但增量相对较小,已呈现一定的规律性。截至目前,孔口相对上拱变形量累计 0.74 mm。

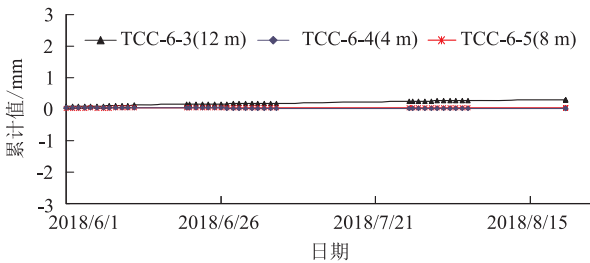
DK 108 + 645 (YBZ-YD-09 孔) 围岩上拱变形主要集中在孔口以下 10 m 范围内,截至目前,孔口相对上拱变形量累计 0.44 mm。

DK 109 + 266 (YBZ-YD-12 孔) 围岩上拱变形主要集中在孔口以下 14 m 范围内,14 ~ 26 m 范围内岩层相对上拱量有一定变化,但增量相对较小。截至目前,孔口相对上拱变形量累计 0.54 mm。

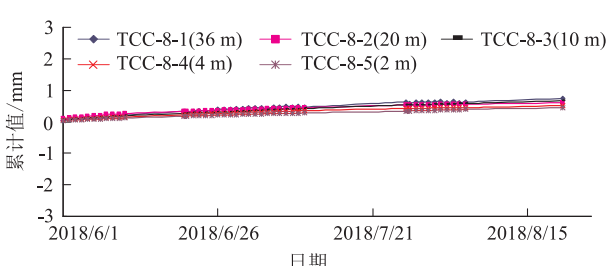
根据目前的监测数据,隧底围岩隆起变形量随时间推移而增长,变形处于持续发展,尚未见收敛趋势。由于目前监测周期较短,变形量值小,且部分段落监测数据波动相对较大,离散性大,数据未呈规律变化,因此,无法准确分析隧底围岩变形规律,需继续进



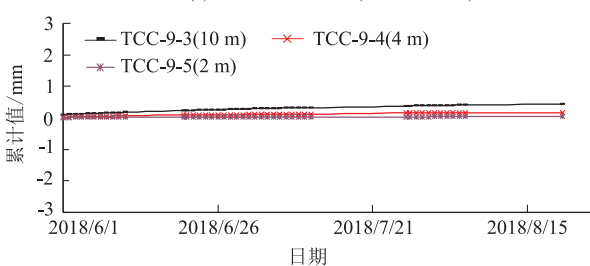
(a) YBZ-YD-04 钻孔(DK 106+852)



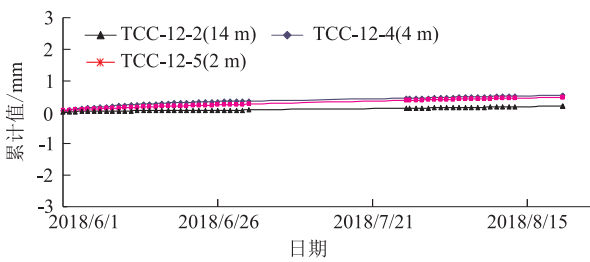
(b) YBZ-YD-06 钻孔(DK 107+652)



(c) YBZ-YD-08 钻孔(DK 100+016)



(d) YBZ-YD-09 钻孔(DK 108+645)



(e) YBZ-YD-12 钻孔(DK 109+266)

图3 钻孔孔内位移累计变形时态曲线图

行长期监测和数据采集。

5 隧底底鼓病害原因分析

隧底底鼓病害通常都是因隧底结构不足以抵抗隧道开挖后引起的围岩变形导致的。一般来说,主要原因有施工质量缺陷(仰拱厚度不足、曲率不够)、围岩具有膨胀性、二次应力调整引起围岩持续变形等。结

合本隧道底鼓病害补勘成果,病害原因分析如下:

5.1 岩石膨胀性

两次地质补勘成果资料显示,病害段岩性主要为泥质粉砂岩、泥岩,属于典型四川红层,岩石饱和吸水率平均值 7.48%,自由膨胀率平均值 21.22%,膨胀力标准值 62.89 kPa,不属于膨胀岩。根据笔者多年在四川地区从事勘察设计工作的经验,四川红层不属于膨胀岩,仅局部泥岩具有微弱的膨胀性。因此,分析认为本隧道底鼓病害不是由岩石膨胀引起的。

5.2 地应力引起围岩变形

自然界岩体天然存在地应力,经地应力测试,龙泉山背斜褶皱带岩体中残余构造应力普遍较大,最大水平主应力值 14~16 MPa,隧道洞身岩体处于中等地应力环境。隧道开挖引起地应力局部集中及释放,洞室周边应力一般会放大,产生最大压应力、最大拉应力集中现象,若围岩强度较低,则会立刻产生塑性变形,即通常说的软岩变形^[7]。

大量工程实践证明,地下工程围岩的变形破坏通常是累进性发展的,由于围岩内应力分布的不均匀性及岩体结构、强度的不均匀性和各向异性,那些地应力集中程度高,而岩体强度相对较低的部位往往是累进性变形破坏的突破口。在大范围围岩整体稳定性较好的情况下,这些应力—强度关系中的薄弱部位就会发生变形甚至破坏。尤其是软弱围岩,其在地应力作用下的变形具有蠕变特点,即软岩体内应变能释放相对硬质岩缓慢,存在滞后效应。

根据岩样试验资料,隧底泥质粉砂岩、砂质泥岩天然饱和单轴抗压强度可达 16.65 MPa,强度应力比 R_c/σ_{max} 约为 1~1.16,岩石强度应力比 R_c/σ_{max} 均小于 4。根据 GB/T 50218-2014《工程岩体分级标准》^[8],软质岩开挖后洞壁发生显著位移,隧道存在底鼓隆起变形特征。但本隧道开挖中,围岩强度相对较高,无地下水,整体稳定性较好,施工中并未发生较大的形变,初期支护实施后,围岩稳定,拱顶、边墙也未见明显位移。

但随着时间的推移,软质围岩受局部基岩裂隙水浸润软化,岩体强度进一步降低^[9],加之围岩倾向近于水平,在残余水平构造应力作用下,出现隧底水平层状岩层向临空面缓慢底鼓的蠕变变形,素混凝土仰拱结构不足以抵抗软岩变形,于是出现无砟道床板的底鼓隆起,底鼓病害呈现出分段、局部的特征。

5.3 隧底仰拱施工质量

根据补充地质钻探成果,隧底仰拱混凝土强度、厚

度大部分满足设计要求,但仰拱曲率却普遍与设计不吻合,结构断面大部分形态较平直,这导致隧底仰拱不能很好地承受地应力致使的软岩形变应力,因而出现底鼓病害。因此,隧底仰拱曲率平直也是本隧道底鼓病害产生的原因之一。

6 结语

本文结合隧道所处的区域地质环境、地质补充勘察成果资料,深入分析了隧道底鼓病害产生的主要原因,得出以下主要结论:

(1)隧底软质岩具有一定的蠕变特征,蠕变发生导致岩石强度下降,并在较高地应力作用下持续发生变形,而平直曲率的素混凝土仰拱结构不足以抵抗岩石的形变力。这是本隧道产生底鼓病害的原因所在^[10]。

(2)隧道设计应高度重视对区域地应力背景值、岩石强度及其影响因素的研究。本隧道穿越的龙泉山背斜构造是川东典型的北东向新华夏褶皱带,岩体中残余构造应力较大。而红层砂泥岩强度较低,且具有显著的蠕变效应,蠕变后强度持续下降,在地应力作用下持续变形。因此,研究岩石强度—应力比及软岩的蠕变效应非常必要,同时围岩级别划分应考虑地应力折减及围岩强度。

(3)隧道开挖后,应力集中及释放必然引起围岩形变,采用适宜的隧底仰拱结构能抵抗围岩的岩体形变。因此,仰拱强度、曲率是设计中必须重点研究的参数。

参考文献:

- [1] 中铁二院工程集团有限责任公司. 云顶隧道整治工程设计[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2013.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Design of Regulation Works for Yunding Tunnel [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2013.
- [2] 成都理工大学. 云顶隧道地应力测试分析报告[R]. 成都:成都理工大学,2014.
Chengdu University of Technology. Analysis Report of the Test of Crustal Stress of Yunding Tunnel [R]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [3] 王鹏程. 新老二郎山隧道岩爆发育特征及对比研究[D]. 成都:成都理工大学, 2018.
WANG Pengcheng. Study on the Rock Burst Development Characteristics of New and Old Erlang Mountain Tunnels and Their Comparison [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.

(下转第 64 页)

ZHAO Guotang. High-speed Railway Ballastless Track[M]. Beijing: China Railway Press, 2006.

[2] 宁星. 地面沉降下无砟轨道的力学特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

NING Xing. Research on the Mechanical Properties of Unballasted Track under Land Subsidence [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University. 2014.

[3] 张群. 路基不均匀沉降对双块式无砟轨道的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.

ZHANG Qun. Study of Doubleblock Ballastless Track causing by Subgrade Differential[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. 2007.

[4] 尤昌龙, 李殿龙. 铁路客运专线路基沉降特性及其对策[J]. 铁道科学与工程学报, 2005.

YOU Changlong, LI Dianlong. Settlement and Deformation of Passenger Dedicated Line and Its Countermeasure [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005.

[5] 高增增. 路基不均匀沉降对双块式无砟轨道结构受力影响分析[J]. 中国铁路, 2010(7): 74-76.

GAO Zengzeng. Analysis of the Influence of the Uneven Subgrade Settlement on the Structure of the Double-Block Ballastless Track[J]. China Railway, 2010(7): 74-76.

[6] 刘茹冰. 路基不均匀沉降对板式轨道动力学影响分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

LIU Rubing. Analysis of Differential Settlement of Subgrade Effecting on Slab Track Dynamics [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

[7] 韩义涛, 姚力. 基础沉降对土路基上板式轨道动力性能影响分析[J]. 铁道工程学报, 2007(10): 28-31.

HAN Yitao, YAO Li. Analysis of the Dynamic Performance for Slab Track Settlement on Embankment[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(10): 28-31.

[8] 刘学毅, 赵坪锐, 杨荣山, 等. 客运专线无砟轨道设计理论与设计方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.

LIU Xueyi, ZHAO Pingrui, YANG Rongshan, et al. Design Theory and Design Method of Ballastless Track of Passenger Dedicated Line [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010.

(上接第 33 页)

[4] 中铁二院工程集团有限责任公司. 云顶隧道补充工程地质勘察报告[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2013.

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Supplementary Engineering Geological Survey Report of Yunding Tunnel [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2013.

[5] 刘超, 袁伟, 路军富, 等. 某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 108-115.

LIU Chao, YUAN Wei, LU Junfu, et al. A Study of the Micro-Macro-Physical and Mechanical Properties of Silty Mudstone in the Bottom Drum Section of a Railway Tunnel [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 108-115.

[6] 范秋雁. 膨胀岩与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

FAN Qiuyan. Swelling Rock and Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2008.

[7] 张倬元, 王士庆, 王兰生. 工程地质分析原理(第2版)[M]. 北京: 地质出版社, 1994.

ZHANG Zhuoyuan, WANG Shiqing, WANG Lansheng. Principles of Engineering Geological Analysis (2nd Edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.

[8] GB/T 50218-2014 工程岩体分级标准[S].

GB/T 50218-2014 Classification Standard of Engineering Rock Mass [S].

[9] 蒋昱州, 王瑞红, 徐卫亚. 岩石力学特性的时间效应[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.

JIANG Yuzhou, WANG Ruihong, XU Weiya. Time Effect of Rock Mechanical Properties [M]. Beijing: China Water Power Press, 2016.

[10] 王崇良, 王茂靖, 赵文, 等. 兰渝铁路梅岭关隧道底鼓段病害成因分析[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 63-68.

WANG Chonggen, WANG Maojing, ZHAO Wen, et al. Cause Analysis of Diseases in the Floor Heave Section of Meilingguan Tunnel in Lanzhou-Chongqing Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 63-68.