

文章编号: 1674—8247(2020)06—0063—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.06.012

兰渝铁路梅岭关隧道底鼓段病害成因分析

王崇艮¹ 王茂靖¹ 赵文² 吉安娜² 刘亚雄²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘要:兰渝铁路梅岭关隧道 DK 610 + 550 ~ DK 610 + 902 段施工过程中发生拱顶初期支护纵向开裂、拱顶下沉及喷混凝土掉块等病害,运营阶段轨道异常超高,发生隧底底鼓病害,虽通过隧底补强措施抑制了隧道底鼓现象,但隧道其它段落仍存在类似病害。本文结合隧道所处的区域地质环境,对比病害整治前后的地质勘察成果,通过蠕变试验、数值分析及理论分析深入研究了隧道底鼓病害机理。梅岭关隧道处于高应力水平层状软质岩层中,构造应力长期对围岩产生挤压作用,施工引起围岩松弛、地下水环境发生改变,使围岩强度降低,软质岩发生蠕变,当隧道结构不能抵抗这种变化时便产生隧底底鼓病害。研究指出隧底仰拱结构强度及曲率是高地应力红层缓倾岩层地段隧道底鼓变形设计的重要参数,研究成果可为类似隧道病害整治及新建隧道设计提供参考。

关键词:隧道;底鼓;病害;机理;挤压性围岩;成因分析

中图分类号:U457.2

文献标志码:A

Cause Analysis of Diseases in the Floor Heave Section of Meilingguan Tunnel in Lanzhou-Chongqing Railway

WANG Chonggen¹ WANG Maojing¹ ZHAO Wen² JI Anna² LIU Yaxiong²

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

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: During the construction of DK 610 + 550 ~ DK 610 + 902 section of Meilingguan Tunnel in Lanzhou-Chongqing Railway, some diseases occurred, such as longitudinal cracking of initial arch crown support, arch crown settlement, and shotcrete spalling. During the operation stage, the track was abnormally high, and the tunnel floor heave occurred. The tunnel floor heave is restrained by the reinforcement measures at the tunnel floor, but similar diseases still exist in other sections of the tunnel. In this paper, combined with the regional geological environment in which the tunnel is located, the mechanism of the tunnel floor heave disease is deeply studied through creep test, numerical analysis and theoretical analysis. Meilingguan tunnel is located in the layered soft rock stratum with high stress level, and the structural stress has squeezed the surrounding rock for a long time. The construction causes the surrounding rock to relax and the groundwater environment to change, which reduces the strength of the surrounding rock and causes the soft rock to creep. When the tunnel structure cannot resist this change, the tunnel floor heave disease will occur. It is pointed out that the strength and curvature of the inverted arch structure at the tunnel bottom are important parameters for the deformation design of tunnel floor heave in the red-bed gently inclined rock section with high ground stress. The research results can provide reference for similar tunnel disease treatment and new project design.

收稿日期:2020-11-10

作者简介:王崇艮(1974-),男,高级工程师。

引文格式:王崇艮,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.

Key words: tunnel; floor heave; disease; mechanism; compressive surrounding rock; cause analysis

兰渝铁路梅岭关隧道 2009 年开工建设,2015 年建成通车。2016 年 3 月,铁路工务部门对隧道轨道精调时,发现 DK 610 + 612 ~ DK 610 + 712 段轨道异常超高,发生了隧底底鼓病害,且隧底底鼓持续发展。设计单位于 2018 年对底鼓段进行了地质补勘,并采取了隧道补强措施。结合隧道所处的区域地质环境和地应力测试结果,对比施工图阶段与补勘阶段的岩石试验强度成果,采用挤压型因子判断公式(Jethwa et al. 1984)对比计算^[1],分析了隧道底鼓病害产生的主要原因。

1 隧道病害概况

1.1 工程概况

兰渝铁路梅岭关隧道(施工里程 DK 607 + 329 ~ DK 615 + 600)位于四川盆地北东部的广元市元坝区石井铺乡,轴线走向 N10°W,全长 8 215 m,最大埋深约 410 m(位于 DK 609 + 003 附近)。隧道为双线无砟隧道,设计速度 200 km/h,纵坡为 5‰、3‰的人字坡,满足开行双层集装箱要求,仰拱矢跨比约为 1:10.7。

1.2 病害概况

隧道施工开挖过程中,DK 610 + 550 ~ DK 610 + 993 段出现拱顶初期支护纵向开裂、拱顶下沉及喷混凝土掉块现象,具体情况如表 1 所示。

表 1 隧道施工中部分段落初支变形开裂情况表

| 段落 | 开裂情况 |
|-----------------------------|---|
| DK 610 + 550 ~ DK 610 + 595 | 2012 年 9 月 10 日 - 23 日,拱顶初期支护出现纵向贯通裂缝,裂缝宽度 2 ~ 3 cm,且局部出现喷混凝土掉块及钢架变形现象。9 月 29 日,DK 610 + 533 ~ DK 610 + 549 线路左侧拱腰位置出现不均匀裂缝,最大累计下沉量 67.8 mm,未侵入二衬净空尺寸 |
| DK 610 + 754 ~ DK 610 + 840 | 2012 年 5 月 17 日 - 7 月 4 日,拱顶初期支护出现纵向贯通裂缝,裂缝宽度 2 ~ 3 cm,且局部出现喷混凝土掉块现象,最大累计下沉量 73 mm,未侵入二衬净空尺寸 |
| DK 610 + 865 ~ DK 610 + 902 | 2011 年 8 月 10 日 - 8 月 14 日,拱顶初期支护出现纵向贯通裂缝,裂缝宽 2 ~ 10 cm,走向与隧道中线呈 10° ~ 25°夹角,且局部出现喷混凝土掉块及钢架扭曲变形现象,出现 1 ~ 14.7 cm 的初支变形侵限 |

施工阶段对边墙、拱顶加强了初支措施,但仰拱仍采用素混凝土填筑。

开通运营前,工务部门发现动车通过 DK 610 + 612 ~ DK 610 + 712 上行线时存在晃车现象,线路测量后轨道异常超高,该段限速 80 km/h 运行。同时设置

观测点对轨道进行监控测量。左线轨道板测量结果如图 1 所示。从图 1 可以看出,从 2017 年 6 月 - 2020 年 3 月,DK 610 + 637 断面左侧轨道累计变形 22.5 mm。

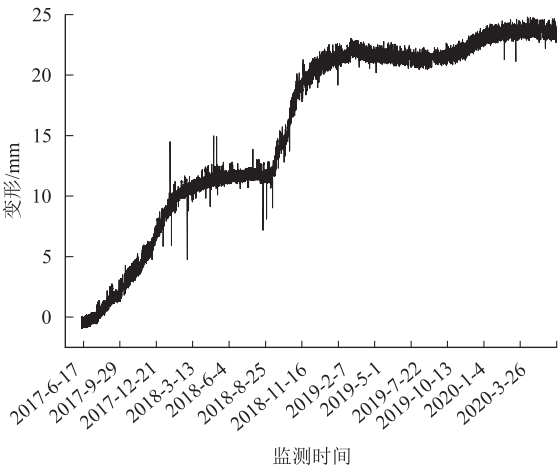


图 1 历次测量结果图

现场调查发现,左线(上行线)DK 610 + 589.5 ~ DK 610 + 652 段靠边墙侧轨道板与仰拱填充面存在离缝,离缝宽度约 1 ~ 26 mm,最重点位于 DK 610 + 632 处,宽 26 mm,深 27 cm。此位置裂缝在 2016 年 4 月线路开通前就存在,当时裂缝宽 6 mm,深 18 cm。DK 610 + 637 处存在一条环向贯通裂纹,贯通了侧沟和中心沟。

对于该段病害,2019 年 3 月完成了仰拱地基钻孔灌注桩(长 10 m、桩径 300 mm)锚固、中心沟埋管后回填、施作泄水孔引排地下水的综合整治措施。至 2020 年 4 月,该段底鼓病害整治后,上行线高程隆起约 2 mm,平面位移 1.3 mm。

2 隧道区域工程地质条件

2.1 地形地貌

隧道位于构造侵蚀中低山区,单面山迭岭地貌,地面高程 500 ~ 1 000 m,相对高差 300 ~ 400 m,自然坡度 35° ~ 50°,地形起伏大。进口段纵向河谷深切,沟壁地形陡峻,地面坡度 30° ~ 50°。进口位于下王家坝河沟陡崖下,基岩裸露,地势陡峻。洞身穿越多条顺岩层走向切割的单面山山梁,构造坡平缓,地面横坡 10° ~ 20°,多村落及耕地,侵蚀坡陡峻,地面横坡达 30° ~ 50°,局部为陡崖,地表多为柏树林及灌木荆藤。地面标高 560 ~ 990 m,相对高差约 430 m。出口位于大沟河与尹家河交汇下游约 50 m 处,地势较陡。

2.2 地层岩性

隧道区覆盖层主要为第四系全新统冲洪积层(Q_4^{al+pl})、坡洪积层(Q_4^{dl+pl})、坡残积层(Q_4^{dl+el})及崩坡积层(Q_4^{dl+col}),下伏基岩为白垩系下统剑门关组(K_{1j})及侏罗系上统莲花口组(J_3l)泥岩、泥质砂岩。地层单斜,走向与线路近垂直。其中底鼓病害段主要为剑门关组(K_{1j})泥岩、泥质砂岩。

2.3 地质构造与地震动参数

隧址区位于龙门山印支褶皱带东部、四川中拗陷燕山褶皱带中之川北凹陷东部,侏罗系、白垩系地层广泛分布,形成缓而开阔的背、向斜或孤立的鼻状弯曲穹隆构造,以水平岩层及宽缓褶曲构造为主,主要构造线走向均以东西向为主,褶皱多为宽缓褶皱。隧道北为潼梓关鼻状构造,其南为舒展开阔的向场向斜,隧道洞身为单斜构造,倾角 $3^{\circ}\sim 15^{\circ}$,NEE-SWW向展布,无断层构造,地质构造简单。岩体中主要发育两组构造节理,一组走向NW,一组走向NE,倾角陡倾。

根据2008年12月中国地震局地壳应力研究所《兰渝铁路重点工程场地安全性评价和沿线地震动参数区划》,测区地震动峰值加速度 0.10 g ,地震动反应谱特征周期为 0.40 s 。

2.4 水文地质条件

隧址区地下水主要存在两种类型,即第四系松散堆积层孔隙水和基岩裂隙水。第四系孔隙水赋存于坡残积、坡崩积层中,因区内土层厚度不大,降水多沿坡面汇集于冲沟排泄,补给水量有限,含水量甚微,主要分布于出口表层覆盖土中。隧道洞身主要为基岩裂隙水,赋存于基岩裂隙中,其中泥岩属相对隔水层,裂隙水较贫乏,多发育于浅层风化裂隙中。砂岩构造裂隙较发育,地下水相对较丰富,主要接受地表水及壤中水下渗补给。本段隧道洞身为泥岩、泥质砂岩,局部夹砂岩,地下水一般沿砂岩、泥岩接触面渗流,地下水相对泥岩较发育,钻孔勘探取样揭示赋存于砂岩中的地下水存在承压性,无侵蚀性。计算隧道平常涌水量为 $2\,900\text{ m}^3/\text{d}$,雨季最大涌水量为 $8\,600\text{ m}^3/\text{d}$ 。

3 隧道地应力测试及岩石工程特性

3.1 地应力测试

梅岭关隧道最大埋深约 410 m ,对隧道洞身埋深最大处的DZ-MLG-1钻孔进行地应力测试,根据《兰渝线铁路地应力测量分析报告》,该孔深度在 $394.50\sim 395.30$ 范围内,实测应力结果为 $S_H=15.23\text{ MPa}$, $S_h=$

9.87 MPa , $S_v=10.26\text{ MPa}$,不存在发生岩爆的可能。最大水平主应力方向为 $N25^{\circ}W\sim N33^{\circ}W$,与隧道轴线方向(隧道轴线 $N10^{\circ}W$)夹角较小,最大水平主应力方向有利于围岩的稳定性。

最大主应力随深度的线性回归方程为:

$$S_H = -5.77 + 0.053D \tag{1}$$

最小主应力随深度的线性回归方程为:

$$S_h = -3.59 + 0.035D \tag{2}$$

式中: D ——钻孔深度。

最大主应力线性回归方程相关系数取 0.97 ,最小主应力线性回归方程相关系数取 0.984 。隧道底鼓段埋深 $260\sim 280\text{ m}$,根据上述回归方程,最大主应力为 $8.01\sim 9.10\text{ MPa}$,最小主应力为 $5.51\sim 6.21\text{ MPa}$,最大主应力与洞轴线夹角为 20° 。

3.2 岩石强度试验

勘察阶段,通过深孔钻探在隧道洞身取岩样 47 组,主要试验结果如表2所示。

表2 勘察阶段隧道围岩岩石强度表

| 统计项 | 天然密度 /(g/cm^3) | 天然含水率 /% | 天然抗压强度 /MPa | 饱和抗压强度 /MPa |
|-----|-------------------------------------|-------------|----------------|----------------|
| 样本数 | 47 | 46 | 46 | 39 |
| 最大值 | 2.67 | 3.20 | 74.30 | 58.4 |
| 最小值 | 2.41 | 0.29 | 3.08 | 1.79 |
| 平均值 | 2.60 | 0.96 | 35.65 | 25.07 |
| 标准值 | - | - | 30.76 | 20.69 |

补勘中采取岩石样本 20 组,并对 11 组岩样进行了岩石强度试验,结果如表3所示。

表3 补勘阶段隧道围岩岩石强度表

| 统计项 | 天然密度 /(g/cm^3) | 天然含水率 /% | 天然抗压强度 /MPa |
|-----|-------------------------------------|-------------|----------------|
| 样本数 | 11 | 14 | 11 |
| 最小值 | 2.56 | 0.95 | 4.3 |
| 最大值 | 2.69 | 4.34 | 19.1 |
| 平均值 | 2.61 | 2.43 | 8.4 |

由表2、表3的岩石天然抗压强度及天然含水量可知,隧道开通后,隧底岩石天然含水率大幅增加,岩石单轴天然抗压强度大幅降低。岩石天然含水率与抗压强度关系如图2所示。

3.3 岩石膨胀特性

选取 14 组岩样进行了膨胀岩试验,试验结果仅 1 组岩样自由膨胀率为 31% ,饱和吸水率为 16.72% ,达到膨胀岩指标,其余均达不到膨胀岩指标,其中最大膨胀力仅为 48.9 kPa 。因此,可判定红层泥岩不属于膨胀岩^[2],不会引起隧道底鼓。

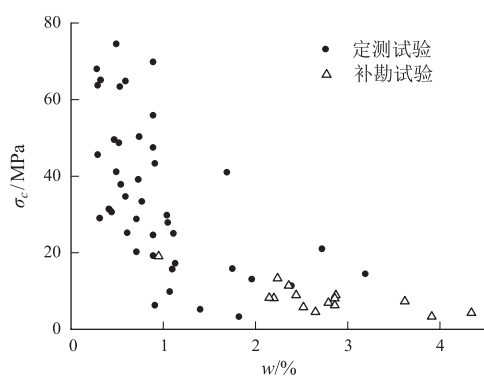


图2 抗压强度与含水率的关系图

3.4 衬砌混凝土强度

选取6组仰拱混凝土试样进行岩芯强度试验,测得混凝土强度最大值为38.3 MPa,最小值为28.9 MPa,平均值为32.68 MPa;选取11组仰拱填充层混凝土试样进行强度试验,测得混凝土强度最大值为34 MPa,最小值为26 MPa,平均值为28.58 MPa。从隧道仰拱和填充层混凝土强度来看,施工已达到设计强度要求。

4 病害成因分析

根据隧道底鼓病害段的地质勘察结果,隧底围岩为四川红层泥岩和泥质砂岩。岩样膨胀性指标显示,底部围岩不属于膨胀岩类,岩石膨胀力极小。因此,隧底围岩变形不是岩石膨胀性引起的,也与混凝土强度无关,而是在残余构造应力作用下,岩石强度变化引起围岩挤压变形缓慢发生的^[3-5]。

4.1 红层泥岩蠕变特性

在病害段取2组红层泥岩试样做压缩流变试验(如图3所示),岩石单轴抗压强度平均值约为8.4 MPa。将岩石制成直径50 mm,高度50 mm的试样,制样时尽量确保试件的含水率接近天然状态。试验进行580~760 h后,结果如图4所示。

从图4可以看出,红层泥岩长期强度约为3.0~3.6 MPa,约为峰值强度的35.6%~42.8%,岩石破坏时的轴向应变约12.2%~16.3%。这说明红层泥岩在长期较大压应力的作用下,将产生较大的蠕变变形并趋于破坏。

4.2 高应力环境下水平层状结构岩体破坏模式

采用离散单元法对水平层状岩结构岩体破坏模式进行分析。为简化计算,模型尺寸为高150 m,宽120 m,隧道尺寸由兰渝铁路单线单洞洞型简化而成。模型上、左、右边界均采用应力边界,施加的应力与实



图3 红层泥岩蠕变试验图

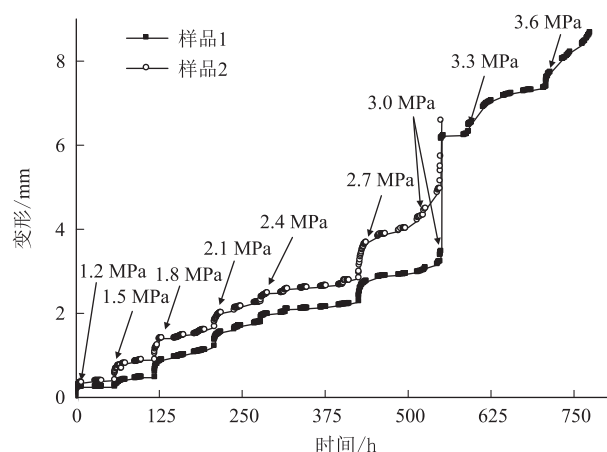


图4 红层泥岩压缩蠕变特征图

测应力对应,底边界固定。计算隧道开挖前初始应力后,再进行隧道开挖分析。水平层状结构隧道岩体破坏模式如图5所示。对于水平层状结构岩体,在隧道开挖扰动应力作用下,拱顶岩体产生折断塌陷,仰拱岩体也产生回弹变形,同时产生部分岩体的折断,但不如拱顶严重。水平层状结构岩体变形以拱顶和拱底的竖向变形为主。

4.3 底鼓机理分析

(1) 底鼓段最大水平构造应力

病害段最大水平主应力为8.01~9.01 MPa,最小水平主应力为5.51~6.21 MPa,垂直应力最大水平应力与隧道洞轴线交角20°,因此,垂直洞轴线的最大地应力为:

$$\sigma_{\max} = S_H \sin^2 \phi + S_h \cos^2 \phi \quad (3)$$

计算结果显示,隧道洞轴线最大构造主应力为5.81~6.53 MPa,垂直应力为6.76~7.28 MPa;水平垂直应力比 $\sigma_H/\sigma_v = 1.12 \sim 1.16$ 。

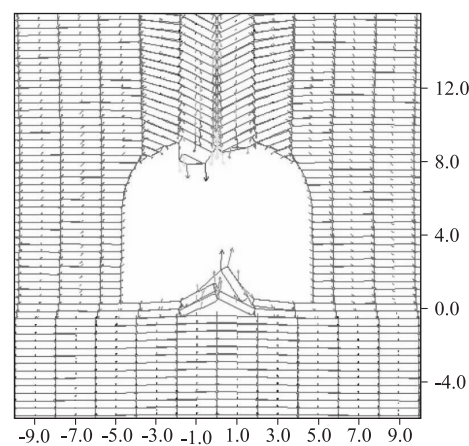


图5 水平层状结构岩体破坏模式图

(2)地应力等级判断

根据岩样试验资料,隧底大部分为红层泥岩,勘察阶段47组岩石天然抗压强度标准值取30.76 MPa,强度应力比 R_c/σ_{\max} 约为5.29~4.71,岩石强度应力比 $4 < R_c/\sigma_{\max} < 7$ 。根据GB/T 50218-2014《工程岩体分级标准》,判定^[6]隧底围岩存在轻微变形。但随着隧道开通运营,地下水迁徙运移,隧底围岩含水量增高,岩石天然抗压强度降低,补勘的11组岩样岩石天然抗压强度平均值仅8.4MPa,此时,岩石强度应力比 R_c/σ_{\max} 为1.28~1.45,隧底围岩处于高初始地应力状态,隧底围岩底鼓隆起变形特征明显。

(3)围岩挤压性判识

红层泥岩地区隧道产生变形的原因在于隧道周边一定范围内的围岩产生了较大塑性变形。采用挤压性判断因子 N_c 判断其挤压等级^[7]:

$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{P_0} \tag{4}$$

其中, $\sigma_{cm} = (0.003\,4m_i^{0.8})\delta_{ci}[1.029 + 0.025e^{(-0.1m_i)}]^{GSI}$

式中: σ_{cm} ——岩体单轴抗压强度;

P_0 ——最大初始地应力;

δ_{ci} ——岩块强度;

m_i ——Hoek-Brown 常数;

GSI ——地质强度指数。

围岩挤压性分级如表4、表5所示。

表4 围岩挤压性分级表(据 Jethwa et al,1984)

| N_c | 高度挤压型 | 中等挤压型 | 轻度挤压型 | 无挤压性型 |
|-------|-------|---------|---------|-------|
| 挤压性等级 | <0.4 | 0.4~0.8 | 0.8~2.0 | >2.0 |

表5 围岩挤压性分级表(据 Hoek,2000)

| 等级 | I 不明显 | II 轻度 | III 严重 | IV 非常严重 | V 极严重 |
|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|
| N_c | >0.37 | 0.22~0.37 | 0.16~0.22 | 0.11~0.16 | <0.11 |

定测阶段钻探及井中测试显示,本段围岩完整性较好,岩体强度较高,综合判示为Ⅲ级围岩。取岩块强度 $\sigma_{ci} = 30.7\text{ MPa}$, $P_0 = 9.0\text{ MPa}$, $m_i = 8$, $GSI = 75$,则 $N_c = 1.17$,属轻度挤压围岩,其变形潜势为Ⅰ级,变形量接近0。根据补勘取样试验结果,病害段取岩块强度 $\sigma_{ci} = 8.4\text{ MPa}$, $P_0 = 9.0\text{ MPa}$, $m_i = 8$, $GSI = 60$,计算得 $N_c = 0.18$,属高度挤压围岩,其变形潜势为Ⅲ级,变形严重。

隧道大部分段落,岩体较为完整,围岩为弱-微风化,地下水不发育,岩体强度较高。勘察阶段判示为轻度挤压围岩,变形潜势为Ⅰ级,实际揭示情况亦未发生变形。底鼓病害段围岩节理裂隙较发育,岩体完整性较差,围岩多为弱风化,因地下水浸润,相较勘察阶段,岩石天然含水率明显增加,天然抗压强度明显降低。判示为高度挤压围岩,变形潜势为Ⅲ级,变形严重,隧底实际情况与判示一致。

(4)综合分析

隧道地处单斜构造,隧道与岩层走向近正交,底鼓段岩层倾角10°左右,近于水平产出。隧址区水平地应力大于垂直应力,显示存在较大水平向构造应力。病害段围岩整体较破碎,加之围岩抗压强度低,且泥岩与砂岩接触带存在一定基岩裂隙水,地下水作用使得隧底围岩进一步软化,表现出强度逐渐降低的时效性。隧底围岩处于高初始地应力区,在构造水平地应力作用下,低强度的泥岩存在缓慢蠕变,加之隧底仰拱矢跨比较大,且为素混凝土结构,其强度不足以抵抗围岩蠕变形变,进而发生向临空面弯曲的底鼓变形。最终隧底围岩底鼓变形引发其上无砟轨道变形,且具有放大作用。

5 结论

本文通过对兰渝铁路梅岭关隧道底鼓段病害成因的分析,得出以下主要结论:

(1)隧道底鼓病害是因为隧道本身处于高应力近水平层状软质岩层中,构造应力长期对围岩产生挤压作用。施工引起围岩松弛,地下水环境发生改变,在残余构造应力作用下,围岩强度降低,软质岩发生蠕变。较大矢跨比的隧底素混凝土仰拱结构不足以抵抗岩石形变,从而产生底鼓病害。

(2)隧道勘察设计应高度重视残余构造地应力、现今构造应力及自重应力背景值、岩石强度及其影响因素,特别是软质围岩在恒定应力作用下的流变特性、

时效特性及持续变形特性。研究隧道初始地应力背景下的岩石强度应力比十分必要。

(3) 由于岩体及构造的不均一性和差异性, 围岩变形存在局部、耦合现象, 目前的地质勘察手段难以精准定位围岩挤压变形区段。因此, 普遍采用较强的隧底仰拱结构(足够强的曲率仰拱)抵抗局部围岩形变的设计思想是适宜的、正确的。同时, 勘察阶段应增加洞身地应力、岩块强度等测试工作, 施工过程中应加强地质素描工作, 并根据揭示围岩情况及时调整衬砌措施。

参考文献:

[1] 张倬元,王士天,王兰生,等. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1994 .
ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng, et al. Principles of Geological Engineering [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 王子江,王科,王崇艮,等. 兰渝铁路玄真观隧道变形破坏原因分析及处理对策探讨[J]. 高速铁路技术, 2014, 5(6): 26-31.
WANG Zijiang, WANG Ke, WANG Chonggen, et al. Treatment and Countermeasures for Tunnel Deformation and Failure Mechanism in Subhorizontal Red Bed under Local High Geostress[J]. High Speed Railway Technology, 2014, 5(6): 26-31.

[5] 王建宇,胡元芳,刘志强. 高地应力软弱围岩隧道挤压型变形和可让性支护原理[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(3): 9-17.
WANG Jianyu, HU yuanfang, LIU Zhiqiang. Tunneling in Squeezing Ground with Yielding Supports[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(3): 9-17.

[6] GB/T 50218-2014. 工程岩体分级标准[S].
GB/T 50218-2014 Standard for Engineering Classification of Rock Mass [S].

[7] HOEK E. Strength of Jointed Rock Masses [J]. Géotechnique, 1983, 33(3): 187-223.

(上接第44页)

[4] 王军平,单连琨,丁军君,等. 个性化钢轨廓形打磨方法分析[J]. 铁道建筑, 2015, 55(11): 131-133.
WANG Junping, SHAN Liankun, DING Junjun, et al. Analysis of Personalized Rail Profile Grinding Method[J]. Railway Engineering, 2015, 55(11): 131-133.

[5] 刘永乾. 高速铁路动车组车体抖动问题分析与整治[J]. 中国铁路, 2020(3): 88-96.
LIU Yongqian. Analysis and Countermeasures of High Speed Railway EMU Car Body Vibration[J]. Chinese Railways, 2020(3): 88-96.

[6] 牛学勤. 波磨钢轨合理打磨周期决策研究[J]. 铁道标准设计, 1997, 40(12): 13-16.

NIU Xueqin. Study on Decision-making of Reasonable Grinding Cycle of Rail Corrugation[J]. Railway Standard Design, 1997, 40(12): 13-16.

[7] 杨永飞. 钢轨打磨技术在地铁线路维护工作中的应用[J]. 技术与市场, 2016, 23(6): 79-80.
YANG Yongfei. Application of Rail Grinding Technology in Metro Line Maintenance [J]. Technology and Market, 2016, 23(6): 79-80.

[8] 铁总运[2014]357号,高速铁路钢轨廓形打磨管理办法[S].
Tie Zong Yun [2014] No. 357, Management Measures for Rail Profile Grinding of High-speed Railway[S].