

文章编号: 1674—8247(2024)06—0098—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.06.016

西部山区某深埋长大隧道地应力特征及 大变形危险性分析

刘 伟¹ 常兴旺² 周 航² 张宇琦¹ 尹小康² 宋 章²

(1. 西南交通大学, 成都 611756; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:某隧道位于青藏高原东南缘,区域地质构造作用强烈,加之深切河谷地形地貌的影响,隧道建设中面临的高地应力问题异常复杂。通过在工程区布设 8 个钻孔,采用水压致裂法获取了 62 段地应力数据与 25 段定向印模测试数据,结合区域地质资料、室内试验和初始地应力场反演分析等,研究分析隧道工程区地应力特征。研究结果表明:(1)现场地应力测试结果显示,工程区整体上以水平构造应力为主,最大水平主应力优势方向为 NE~NEE 向,与区域地应力背景值基本吻合;(2)初始地应力场反演分析结果表明,隧道轴线最大水平主应力 S_H 为 7.7~26.28 MPa,最小水平主应力 S_h 为 4.1~18.6 MPa,垂向主应力 S_v 为 5.2~29.3 MPa,工程区应力场类型主要为走滑型断层($S_H > S_v > S_h$),局部区段为正断层($S_v > S_H > S_h$),隧道沿线 93.84% 的区域处于高到极高地应力状态,具备发生大变形的高地应力条件;(3)基于铁路隧道大变形双指标分级标准,隧道全长 20 247 m,发生软岩大变形段落总长 7 230 m,占比 35.71%;其中轻微大变形 5 960 m,占比 29.4%;中到大变形 1 010 m,占比 4.99%;强烈大变形 260 m,占比 1.28%。本文研究内容和结论可为类似地质条件下的西部山区长大深埋隧道前期勘察设计提供科学依据和技术支持。

关键词:深埋长大隧道;西部山区;水压致裂法;地应力特征;大变形

中图分类号:U458

文献标志码:A

Analysis of In-situ Stress Characteristics and Large Deformation Risk for a Deep and Long Tunnel in the Western Mountainous Area

LIU Wei¹ CHANG Xingwang² ZHOU Hang² ZHANG Yuqi¹ YIN Xiaokang² SONG Zhang²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

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

Abstract: A tunnel located in the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau faces exceptionally complex high in-situ stress issues during its construction due to intense regional geological tectonic activity combined with the influence of deep-cut valley landforms. By deploying eight boreholes in the engineering area and employing the hydraulic fracturing method, 62 segments of in-situ stress data and 25 segments of oriented impression test data were obtained. These data, along with regional geological information, laboratory tests, and back-analysis of the initial in-situ stress field, were used to investigate and analyze the characteristics of in-situ stress in the tunnel engineering area. The research results indicate: (1) Field in-situ stress tests reveal that the engineering area is dominated by horizontal tectonic stress overall, with the preferred orientation of the maximum horizontal principal stress being NE~NEE, which is basically consistent

收稿日期:2024-09-09

作者简介:刘伟(1981-),男,高级工程师。

基金项目:中国中铁股份有限公司科技研究开发计划(No. 2021-重点-02);中铁二院工程集团有限责任公司科技研究开发计划课题(KDNQ214100)

引文格式:刘伟,常兴旺,周航,等.西部山区某深埋长大隧道地应力特征及大变形危险性分析[J].高速铁路技术,2024,15(6):98-103.

LIU Wei, CHANG Xingwang, ZHOU Hang, et al. Analysis of In-situ Stress Characteristics and Large Deformation Risk for a Deep and Long Tunnel in the Western Mountainous Area[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(6):98-103.

with the regional in-situ stress background values. (2) Back-analysis of the initial in-situ stress field shows that the maximum horizontal principal stress S_H along the tunnel axis ranges from 7.7 MPa to 26.28 MPa, the minimum horizontal principal stress S_h from 4.1 MPa to 18.6 MPa, and the vertical principal stress S_v from 5.2 MPa to 29.3 MPa. The stress field type in the engineering area is mainly strike-slip faults ($S_H > S_v > S_h$), with some local sections featuring normal faults ($S_v > S_H > S_h$). 93.84% of the area along the tunnel is under high to extremely high in-situ stress conditions, possessing the conditions for high in-situ stress that can lead to large deformations. (3) Based on the double-index classification standard for large deformations in railway tunnels, the total length of the tunnel is 20 247 m, with a total length of 7 230 m experiencing soft rock large deformations, accounting for 35.71%. Among them, 5 960 m are subject to mild large deformations, accounting for 29.4%; 1 010 m are moderate large deformations, accounting for 4.99%; and 260 m are severe large deformations, accounting for 1.28%. The research conclusions can provide scientific basis and technical support for the preliminary survey and design of deep and long tunnels in western mountainous areas under similar geological conditions.

Key words: deep-lying long tunnels; western mountainous areas; hydraulic fracturing method; in-situ stress characteristics; large deformation

1 研究背景

随着我国铁路建设重心逐步西移,西部山区涌现出一大批百年世纪工程,深埋长大越岭和傍山铁路隧道群不断地规划建设^[1-3]。这些交通廊道均穿越横断山三江(金沙江、澜沧江、怒江)并流向高山峡谷区,沿线地形地貌复杂多变,山高谷深,地形高差显著,地势起伏大,区域构造作用异常强烈,地质条件极其复杂,导致三江并流区沿线隧道常常呈现出“埋深大、洞线长、跨度大”的特征,高地应力现象显著^[4-6]。准确获得工程区地应力场特征,开展大变形危险性分析是复杂山区深埋长大软岩隧道工程勘察设计和施工建设的必要前提。

本文基于西部山区某深埋长大隧道实测钻孔地应力数据,开展隧址区初始地应力场反演分析,研究分析工程区测点及周边区域的地应力分布特征及规律,通过开展隧道全线大变形危险性评价分析,为类似地质条件下的复杂山区长大深埋隧道前期勘察设计提供科

学依据和技术支持。

2 隧道工程地质特征

西部山区某隧道处于青藏高原东南缘,隧道纵断面如图1所示^[7],隧道进口里程K 18+340,出口里程K 38+587,全长20 247 m,最大埋深约1 113 m。工程区岩性主要为页岩、砂岩、泥岩、白云岩、灰岩等。测区处于青藏高原腹地,属构造剥蚀高山地貌。隧道主要穿越妥坝断裂带构造体系和部分小型构造,区域构造作用强烈,隧道建设中面临的高地应力问题异常复杂,且隧址区多为页岩、泥岩、砂岩等软质岩,使得隧道建设及运营过程中发生高地应力大变形的风险极高。

3 工程区岩石力学试验及地应力特征分析

3.1 工程区岩石力学试验及参数

选取西部山区某隧道钻孔岩芯,制成标准圆柱体试件和圆盘试件,开展单轴压缩变形试验、巴西圆盘劈

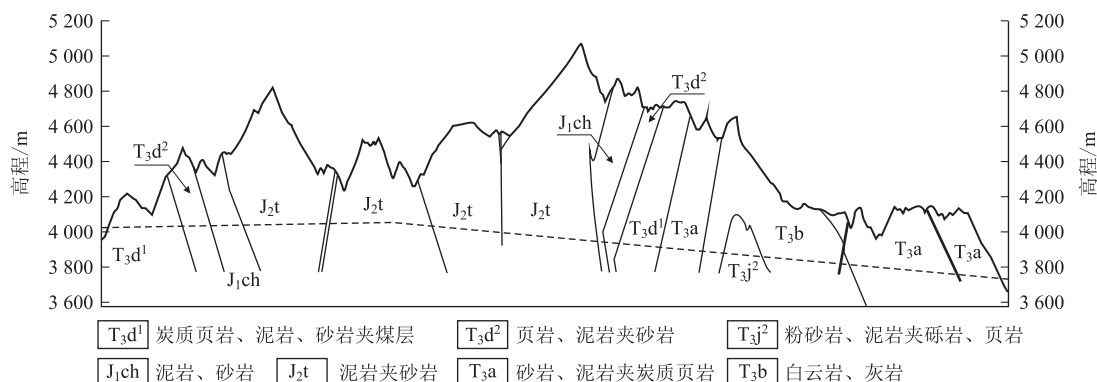


图1 西部山区某隧道纵断面图

裂试验,隧址区岩石力学基本参数如表1所示。

3.2 钻孔地应力测试

本文采用水压致裂法在西部山区某隧道开展8个钻孔地应力测试,共有62段地应力测试与25段定向印模测试,最大测试深度超1100m,钻孔地应力测试成果如表2所示。隧道工程区地应力场最大优势方向为N71.6°W~N61.8°E,与中国现代构造应力场图反映的区域构造应力场方向基本一致,如图2所示。

表1 隧道工程区岩石力学基本参数表

岩石试件	天然密度 ρ / (g/cm ³)	岩石单轴抗压强度 σ_c /MPa	岩石弹性模量 E /GPa	泊松比 ν
泥岩	2.68	13.6	4.5	0.33
	2.76	18.7	7.8	0.29
	2.72	15.5	6.1	0.31
平均值	2.72	15.9	6.1	0.31
灰岩	2.71	23.2	8.2	0.25
	2.65	17.9	7.5	0.30
	2.74	32.6	9.2	0.23
平均值	2.70	24.6	8.3	0.26

表2 隧道钻孔地应力测试成果表

钻孔编号	埋深/m	主应力值/MPa			S_H 方位
		S_H	S_h	S_v	
ST-01	58~128	2.68~5.57	2.71~4.04	1.55~3.09	N40°~47°E
ST-02	278~374	7.54~10.65	5.90~7.96	7.38~9.92	N44.1°~61.8°E
ST-03	579~760	11.15~14.37	8.16~10.89	15.36~20.16	N1.9°~55.9°E
ST-04	728~1120	16.24~26.58	12.14~19.43	19.30~29.68	N11.4°W~N25.7°E
ST-05	347~955	12.02~25.02	7.19~16.59	9.21~25.31	N19.2°~40.6°E
ST-06	375~718	10.36~24.18	8.06~17.38	9.95~19.03	N23.2°~71.6°W
ST-07	288~456	9.66~16.75	7.00~11.58	7.64~12.10	N45.3°~61.5°E
ST-08	381~769	15.54~25.71	8.92~14.17	10.11~20.39	N34.8°~41.0°W

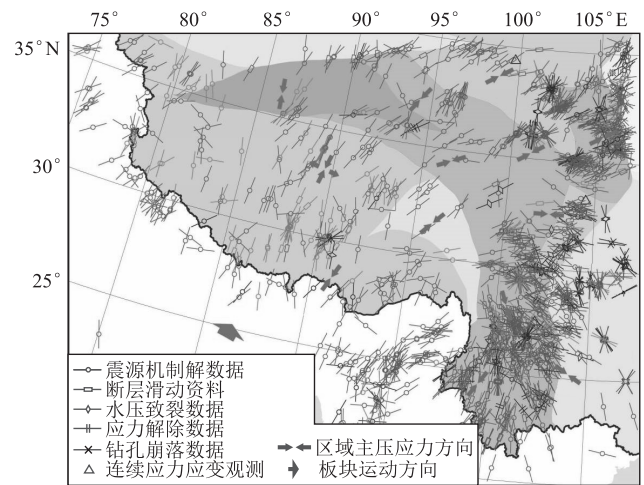


图2 基于中国现代构造应力场的隧址区应力状态图

$S_H > S_v > S_h$, 应力结构表现为走滑型。

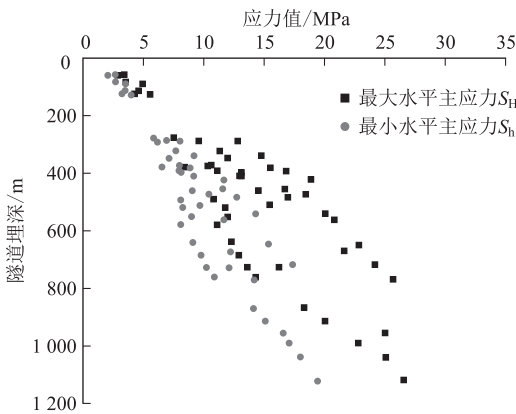


图3 最大水平主应力和最小水平主应力与埋深的关系图

3.3 主应力值

隧址区最大水平主应力、最小水平主应力与埋深的关系如图3所示。最大水平主应力、最小水平主应力与埋深没有明显线性关系,但整体而言,工程区的主应力均随隧道埋深的增大而呈现出逐渐增大趋势。ST-06号钻孔的最大测深1120m,最大水平主应力 S_H 和垂直主应力 S_v 分别达到26.58MPa和29.68MPa,其应力变化梯度分别为2.64MPa/(100m)和2.39MPa/(100m)。隧道工程区三向主应力之间关系表现出分段性特征,当埋深在600m以内,三向主应力关系主要为 $S_H > S_h > S_v$,应力结构表现为逆断型;当埋深超过600m时,部分区段的三向主应力关系为

3.4 最大水平主应力方位

西部山区某隧道的最大水平主应力方位角与隧道埋深关系如图4所示。最大水平主应力方位角为N11.4°W~N61.8°E,该隧道的最大水平主应力优势方向为NW~NE向,与震源机制解反映的构造应力基本相符。

3.5 侧压力系数

Brown and Hoek^[8]根据实测钻孔地应力数据,采用侧压力系数研究分析了应力分布规律。侧压力系数 λ 表达为:

$$\lambda = (S_H + S_h)/2S_v \tag{1}$$

式中: λ ——侧压力系数;
 S_H ——最大水平主应力(MPa);

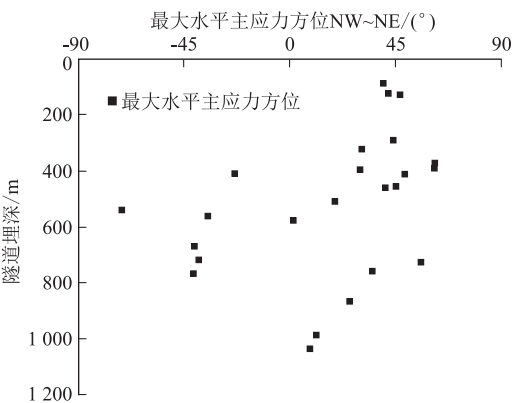


图4 最大水平主应力方位角与埋深的关系图

S_h ——最小水平主应力(MPa);
 S_v ——垂直主应力(MPa)。

根据隧道实测钻孔地应力数据,隧道不同埋深下的侧压力系数如图5所示,工程区的侧压力系数为0.62~2.00,平均值为1.03。工程区侧压力系数 λ 与埋藏深度 Z 的关系为:

$$\lambda = 0.81 + \frac{63.9}{Z}$$

(2)

式中: λ ——侧压力系数;
 Z ——埋藏深度(m)。

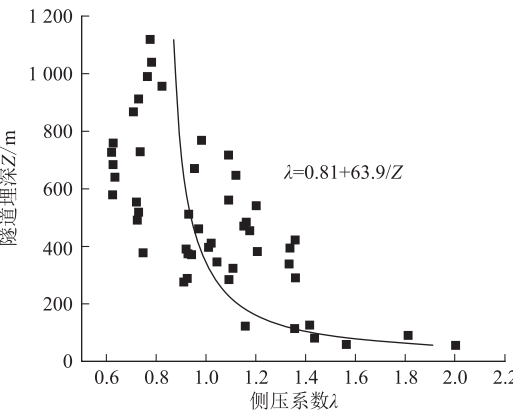


图5 隧道工程区侧压力系数与埋深的关系图

由图5可知,当隧道埋深小于200 m时,侧压力系数处于1~2,主要因为地应力测试点的埋深较小,受斜坡应力场和高山峡谷地形地貌叠加影响,导致水平应力值大于自重应力值,侧压力系数值增大。但当隧道埋深超过800 m,侧压力系数均小于1,分析认为这些测试点埋深较大,水平构造作用有限,自重应力占据主导地位。因此,西部山区某隧道是由水平构造作用和自重应力作用共同占据主导地位。

4 初始地应力场反演分析

4.1 建立数值模型

根据西部山区某深埋长大工程地质资料,通过

Sufer、Rhino 和 COMSOL Multiphysics 等软件构建三维数值计算模型,隧道岩石物理力学参数如表3所示。

表3 隧址区岩体物理力学参数取值表

岩性	时代	密度 $\rho/(kg/m^3)$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
泥质粉砂岩、岩屑砂岩	T ₃ a	2 720	8	0.31
岩屑砂岩、砾岩	T ₃ j	2 650	8	0.28
角砾状灰岩、灰岩	T ₃ b	2 700	8	0.26
岩屑砂岩	T ₃ d	2 650	6	0.30
紫色岩屑砂岩、粉砂质泥岩夹灰岩	J ₂ d	2 650	8	0.30
紫红色厚层泥岩、粉砂岩、岩屑砂岩、中砾岩	J ₁ w	2 680	5	0.27

4.2 计算结果分析

本次三维数值仿真计算采用边界荷载调整法^[9],结合实测地应力数据开展工程区初始地应力场反演分析,隧道最大水平主应力云图如图6所示。

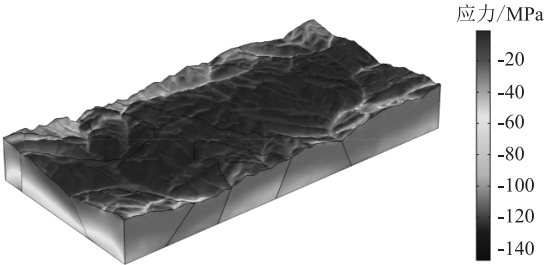


图6 西部山区某隧道工程区最大水平主应力云图

以隧道进口(K 18+340)为起点,每隔500 m选取三向主应力值,提取相应的隧道埋深值,隧道轴线三向主应力及埋深分布如图7所示。隧道轴线最大水平主应力 S_H 为7.7~26.28 MPa,量值呈现出随埋深增加而逐渐增大的趋势。最小水平主应力 S_h 为4.1~18.6 MPa,主要受地形、断裂构造和河谷下切卸荷作用的影响,在断裂构造部位的应力值下降1~3 MPa,深埋段最小主应力值达到12.2~18.63 MPa。垂直主应力 S_v 为5.2~29.3 MPa,应力值随着隧道埋深的增加

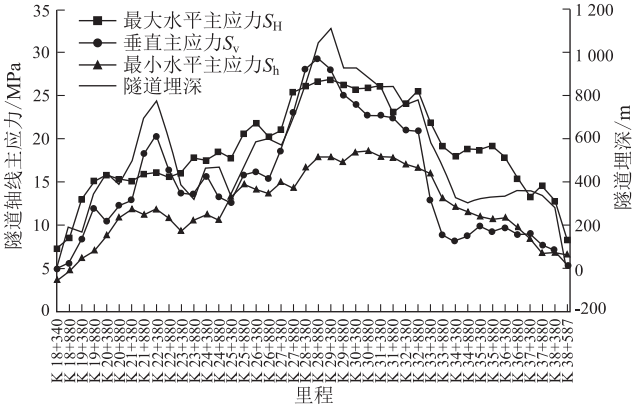


图7 隧道轴线三向主应力及埋深分布图

而升高,河床部位浅表部中间主应力值较低,在断层发育部位,中间主应力略有降低。

西部山区某隧道总长 20 247 m,根据 TB 10027 – 2022《铁路工程不良地质勘察规程》中的初始地应力状态评估基准(如表 4 所示)^[10],即采用最大初始地应力值 S_{\max} 和岩石强度应力比 σ_c/S_{\max} 双指标法^[11] 评估隧道岩线的地应力状态,可知隧道沿线 93.84% 的区域处于高到极高地应力状态,导致隧道施工及运营过程中易发生高地应力大变形灾害。

表 4 高地应力软质岩初始地应力状态划分基准表		
初始地应力状态划分	S_{\max}/MPa	σ_c/S_{\max}
极高地应力	$S_{\max} \geq 10$	$\sigma_c/S_{\max} \leq 2$
高地应力		$2 < \sigma_c/S_{\max} \leq 4$
中等地应力	$S_{\max} < 10$	$4 < \sigma_c/S_{\max} \leq 7$
低地应力		$\sigma_c/S_{\max} > 7$

注: S_{\max} 为岩体最大初始地应力(MPa); σ_c 为岩石单轴抗压强度(MPa);地应力状态划分一般应同时满足两项指标

4.3 地应力误差分析

ST-04-2 号钻孔实测地应力值与模拟值对比如图 8 所示,最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力的平均误差分别为 5.4%、6.6% 和 1.8%,表明三维数值仿真计算分析结果的量级和数值上与实测地应力数据基本相符。

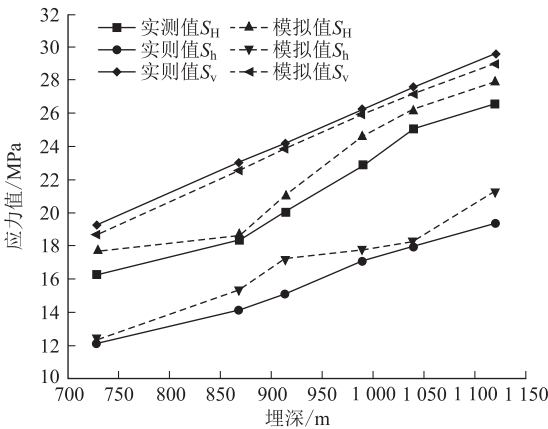


图 8 钻孔实测地应力值与模拟值对比图

5 隧道大变形危险性分析及验证

5.1 隧道大变形危险性分析

根据 TB 10027 – 2022《铁路工程不良地质勘察规程》中的高地应力大变形分级判据及标准(如表 5 所示),即采用 S_{\max} 和 σ_c/S_{\max} 双指标法评价分析隧道沿线的大变形危险性等级,隧道沿线各里程段 S_{\max} 和 σ_b/S_{\max} 值如图 9 所示。

根据大变形危险性综合评价结果,隧道发生软岩大变形段共 7 230 m,占比 35.71%;其中轻微大变形

表 5 高地应力大变形分级判据及标准表

大变形分级	S_{\max}/MPa	σ_b/S_{\max}
轻微(Ⅰ)	$S_{\max} \geq 10$	$0.25 < \sigma_b/S_{\max} \leq 0.50$
中等(Ⅱ)		$0.15 < \sigma_b/S_{\max} \leq 0.25$
强烈(Ⅲ)		$0.05 < \sigma_b/S_{\max} \leq 0.15$
极强(Ⅳ)		$\sigma_b/S_{\max} \leq 0.05$

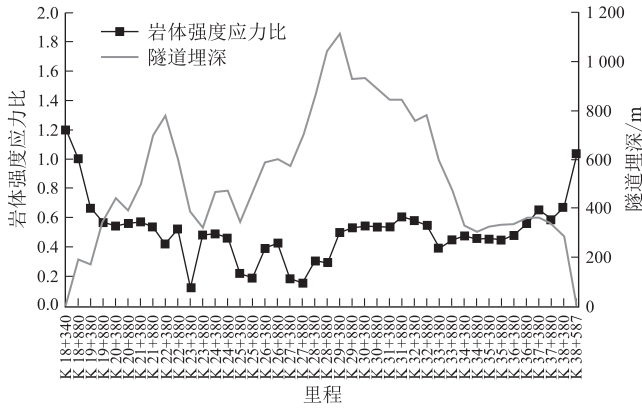


图 9 隧道沿线各里程段 S_{\max} 和 σ_b/S_{\max} 值图

5 960 m,占比 29.4%;中等大变形 1 010 m,占比 4.99%;强烈大变形 260 m,占比 1.28%。综合分析隧道围岩级别以及大变形危险性评价结果,隧道工程区Ⅳ级、Ⅴ级围岩多数埋深段以轻微和中等大变形为主,局部深埋段落及断层破碎带附近可能发生强烈大变形。

5.2 隧道施工期大变形验证分析

隧道 K 21 + 380 ~ K 21 + 400 段为砂岩、泥岩,Ⅳ级围岩,隧道埋深约 503 ~ 516 m,预设计为Ⅰ级大变形段。以隧道 K 21 + 380 ~ K 21 + 400 段为试验段,其中 K 21 + 380 ~ K 21 + 390 段确认Ⅰ级大变形,该段拱墙采用 I20 型钢架加强支护,间距 1.0 m/榀;K 21 + 390 ~ K 21 + 400 段取消Ⅰ级大变形,该段拱墙采用 I12 型钢架加强支护,间距 1.2 m/榀。

当隧道施工完成后,K 21 + 380 ~ K 21 + 390 段掌子面最大变形量为 49 mm,变形监测数据均处于正常范围;而试验段 K 21 + 390 ~ K 21 + 400 段左侧出现多处裂缝,隧道底板鼓起最大变形量为 165 mm,现场初支断面扫描左侧拱腰变形最大值为 110 mm,达到Ⅰ级大变形判别标准。在隧道 K 21 + 390 测得地应力数据为 17.6 MPa,与勘察阶段三维数值仿真计算的 18.3 MPa 基本一致。通过上述对比试验验证分析,本文隧道大变形危险性评价分析结果符合现场实际情况。

6 结论

本文基于水压致裂法的实测地应力数据和初始应

力特征展开研究,结合岩石力学试验和区域地质资料对隧道轴线各里程段的大变形危险性进行分析。得到主要结论如下:

(1)西部山区某隧道三向主应力之间表现出分段性特征,当埋深在600 m以内,三向主应力关系主要为 $S_H > S_h > S_v$,应力结构表现为逆断型;当埋深超过600 m时,部分区段的三向主应力关系为 $S_H > S_v > S_h$,应力结构表现为走滑型。

(2)初始地应力场反演分析结果表明,隧道轴线最大水平主应力 S_H 为7.7~26.28 MPa,垂直主应力 S_v 为5.2~29.3 MPa,隧道沿线93.84%的区域处于高到极高地应力状态,具备发生大变形的高地应力条件。

(3)基于铁路隧道双指标的大变形分级标准评价法,隧道全长20 247 m,发生软岩大变形段落总长7 230 m,占比35.71%;其中轻微大变形5 960 m,占比29.4%;中等大变形1 010 m,占比4.99%;强烈大变形260 m,占比1.28%。

参考文献:

- [1] 马有良. 复杂地应力环境下隧道底鼓处治技术研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(3): 68-72, 80.
MA Youliang. Study on Treatment Techniques for Tunnel Floor Heave in Complex Crustal Stress Environments[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(3): 68-72, 80.
- [2] 周航, 谢荣强, 宋章, 等. 高地应力蚀变花岗岩隧道大变形特征及成因分析[J]. 铁道技术标准(中英文), 2024(1): 29-35.
ZHOU Hang, XIE Rongqiang, SONG Zhang, et al. Large Deformation Characteristics and Genetic Analysis of High Geostress Altered Granite Tunnel[J]. Railway Technical Standard (Chinese & English), 2024(1): 29-35.
- [3] 索朗, 徐正宣, 宋章, 等. 西南山区某深埋长大隧道水文地质特征及突涌水危险性分析[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(3): 97-101.
SUO Lang, XU Zhengxuan, SONG Zhang, et al. Analysis of Hydrogeological Characteristics and Water Burst Risk of a Deep and Long Tunnel in Southwest Mountainous Area[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3): 97-101.
- [4] 马栋, 孙毅, 王武现, 等. 高地应力软岩隧道大变形控制关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(10): 1634-1643.
MA Dong, SUN Yi, WANG Wuxian, et al. Key Technologies for Controlling Large Deformation of Soft Rock Tunnels with High Geostress[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(10): 1634-1643.
- [5] 徐正宣, 孟文, 郭长宝, 等. 川西折多山某深埋隧道地应力测量及其应用研究[J]. 现代地质, 2021, 35(1): 114-125.
XU Zhengxuan, MENG Wen, GUO Changbao, et al. In-situ Stress Measurement and Its Application of a Deep-buried Tunnel in Zheduo Mountain, West Sichuan[J]. Geoscience, 2021, 35(1): 114-125.
- [6] 周航, 张广泽, 赵晓彦, 等. 深部极高地应力花岗岩隧道岩爆破坏特征及成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(3): 1098-1111.
ZHOU Hang, ZHANG Guangze, ZHAO Xiaoyan, et al. Rockburst Failure Characteristics and Formation Mechanism of Deep Granite Tunnel with Extremely High Geo-stress[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(3): 1098-1111.
- [7] 邹远华, 王朋, 周航, 等. 藏东南某隧道水文地质特征及突涌水危险性评价[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2): 37-42.
ZOU Yuanhua, WANG Peng, ZHOU Hang, et al. Hydrogeological Characteristics of a Tunnel in Southeastern Tibet and Risk Assessment of Water Burst[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 37-42.
- [8] BROWN E T, HOEK E. Trends in Relationships between Measured In-situ Stresses and Depth [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, 15(4): 211-215.
- [9] 周航, 张广泽, 赵晓彦, 等. 西南山区某隧道地应力特征及岩爆危险性评价[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(12): 48-54.
ZHOU Hang, ZHANG Guangze, ZHAO Xiaoyan, et al. In-situ Stress Characteristics and Rockburst Risk Evaluation of a Tunnel in the Southwest Mountains[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(12): 48-54.
- [10] 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].
- [11] 张广泽, 贾哲强, 冯君, 等. 铁路隧道双指标高地应力界定及岩爆大变形分级标准[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(8): 53-58, 65.
ZHANG Guangze, JIA Zheqiang, FENG Jun, et al. Definition for Dual-index High Geostress and Classification Standard for Rock Burst and Large Deformation in Railway Tunnels[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(8): 53-58, 65.