

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221007001

基于多元线性回归原理的高海拔深埋隧道地应力反演分析*

何军杰^{1,2}, 胡松³, 郭永刚¹, 陈亮^{1,4}

(1. 西藏农牧学院水利土木工程学院, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏土木水利电力工程技术研究中心, 西藏 林芝 860000; 3. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 4. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于青藏高原东南地区某特长深埋隧道工程, 建立了高精度的山体三维有限元模型。在横洞内钻取了岩芯试样, 通过室内试验获得了岩石物理力学参数。采用水压致裂法测得该工程区的现今构造应力, 测区现今主应力场以南西-北东向挤压为主。地应力数据转换角度后, 通过多元线性回归的原理, 得到构造应力的回归公式, 回归公式和回归系数满足显著性检验。计算得到隧道工程区域的构造应力场, 反演计算精度良好, 计算结果符合实际隧道工程区域的构造特征。隧道轴线上的主应力分布规律表明: 该隧道受到强烈的构造挤压作用, 岩体内赋存较大的水平应力, 最大水平主应力超过 62 MPa。为避让大断层而选择的隧道走向与最大水平主应力小角度相交, 这将有利于隧道围岩的稳定。隧道埋深较浅的里程地应力特征为 $S_H > S_V, S_h$, 埋深较大的里程地应力特征为 $S_H > S_V > S_h$ 。从应力角度初步统计出该特长深埋隧道的岩爆灾害等级, 该特长深埋隧道全线路发生岩爆灾害的概率较大。

关键词: 深埋隧道; 构造应力; 多元线性回归; 岩爆

中图分类号: U452.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0120-08

Analysis of Tectonic Stress in High Altitude Deep Buried Tunnel Based on Multiple Linear Regression Principle

HE Junjie^{1,2}, HU Song³, GUO Yonggang¹, CHEN Liang^{1,4}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China; 2. Research Center of Civil, Hydraulic and Power Engineering of Tibet, Linzhi 860000, China; 3. State Key Laboratory of Coal Combustion, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Geotechnical Engineering Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A high-precision three-dimensional finite element model of the mountain terrain was developed for an exceptionally long and deeply buried tunnel project in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau. Core samples extracted from lateral tunnels facilitated the acquisition of physical and mechanical parameters of rock through in-lab testing. The current tectonic stress within the project area was as-

* 收稿日期: 2022-10-07; 修回日期: 2023-02-21

基金项目: 西藏自治区自然科学基金项目(XZ202001ZR0025G)、煤燃烧国家重点实验室开放基金项目(FSKLCCA2013)资助

作者简介: 何军杰(1989—), 男, 讲师, 博士研究生。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: hejunjie@xza.edu.cn

通讯作者: 郭永刚(1966—), 男, 教授, 博导。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: guoyonggang@xza.edu.cn

sessed using the hydraulic fracturing method, revealing a prevailing compressive stress orientation from southwest to northeast. Tectonic stress data were reoriented and analyzed using multivariate linear regression, yielding a regression formula for tectonic stress that met the criteria of statistical significance. The calculated stress field in the tunnel zone exhibited high accuracy when compared to the actual structural features of the region. The principal stress distribution along the tunnel's axis suggests significant tectonic compression. There are high horizontal stresses within the rock mass, with the maximum value exceeding 62 MPa. This supports the strategy of tunnel crossing a major fault at a small angle, which enhances the stability of the surrounding rock mass. In shallow buried sections, the tectonic stress signature is characterized by $S_H > S_V, S_h$, while at greater depths, the sequence is $S_H > S_V > S_h$. A preliminary evaluation of the likelihood of rockburst hazards throughout this extensive deep tunnel suggests a considerable risk along its entire length.

Keywords: deep buried tunnel; tectonic stress; multiple linear regression; rock burst

0 引言

地应力广泛存在于岩体中,是在地质构造作用和地形地貌演化形成的,储存于岩体内的原始应力。20世纪初,地质学家 A.Heim 首次提出了地应力的概念^[1]。N. Hast^[2]基于大量的实测数据认为近地表的水平应力大于竖向应力。隧道工程埋深越大,地应力作用越强烈,高地应力是隧道发生岩爆、软岩大变形等工程地质灾害的根本因素^[3]。隧道建设中构造地应力以及开挖稳定后所形成的二次应力是影响洞室稳定性极其重要的因素^[4]。研究隧道工程区域的地应力分布特征对隧道选线设计、围岩稳定控制及隧道运营维护具有重要意义。

地应力可以通过勘察技术手段测量获得,目前隧道工程测量地应力的方法主要有:应力解除法^[5], Kaiser 效应法^[6],水压致裂法^[7]等。隧道工程有埋深大、线路长的特点,实测地应力工作耗时长、费用高昂,如要全线测得地应力数据并不现实。合理利用有限的实测地应力分析计算整个隧道工程区域的构造应力具有重要的现实意义。分析计算地应力的方法主要有:侧压力系数法、边界荷载调整法、有限元数学模型回归分析方法等^[8]。其中,郭怀志等提出的有限元数学模型回归分析构造应力的方法引入了数理统计中的多元线性回归分析原理,具有科学性、可靠性及解的唯一性等优点^[9]。

西藏东南部区处于新构造运动活跃状态,喜马拉雅地震断裂带地震活动剧烈频繁,区域内地质灾害频发且分布范围广,工程地质条件复杂,构造地应力量值处于较高水平。该区域已有桑珠岭隧

道^[10]、嘎隆拉隧道^[11]、巴玉隧道^[12]、多雄拉隧道^[13]等工程运用多元线性回归的方法反演出相应的构造应力,并取得较为理想的成果。对于该区域的特长深埋隧道工程来说,岩爆、大变形和片帮等围岩失稳问题在隧道开挖施工过程中时有发生,对现场人员和设备产生了威胁,影响施工进度^[10,12]。本研究隧道工程的最大埋深超过 1 900 m,1 200 m 深钻孔实测水平应力超过 40 MPa,工程特点极具代表性,分析研究该隧道地应力特征并预测岩爆等级,具有重要的工程实践价值。

1 工程概况

1.1 隧道概况

西藏东南地区某段隧道位于喜马拉雅山脉的东端,横跨雅鲁藏布江缝合带西北侧,该区域是青藏高原上隆升和剥蚀速率最快的地区。伴随着青藏高原的演化,雅鲁藏布江下游地区形成了一系列的大型区域性活动断裂带,主要包括:雅鲁藏布江断裂带、扎木—马尼翁断裂带,这些断裂带控制了雅鲁藏布等主要河流的走向。

本研究隧道长度为 12.95 km,隧道轨面高程超过 2 000 m,隧道最大埋深超过 1 900 m,隧道位于高山峡谷区域,隧道通过区地形陡峭、沟谷深切,与隧道洞身大角度相交的“V”型沟谷极为发育。隧道走向范围内断裂构造极其发育,有多条断层与线路正线大角度相交。隧道洞身涉及地层主要为中元古界片麻岩、喜山期花岗岩,断层带内主要为压碎岩及断层角砾。

1.2 有限元模型

隧道工程区域卫星影像如图1所示,为准确反映隧道区域内复杂的地形地貌特征,需建立高精度的隧道工程区域有限元模型。首先提取隧道区域等高距小于20 m的等高线数据,根据隧道线路主要走向裁剪出36 km×18 km的矩形区域。提取等高线中多段线的坐标点,再利用Surfer软件将坐标点均匀化并导出。利用自编的复杂曲面建模程序在Abaqus软件中运行脚本,生成有限元初始模型。共划分了1 713 293个六节点四面体网格单元,研究区段有限元模型的纵断面如图2所示。

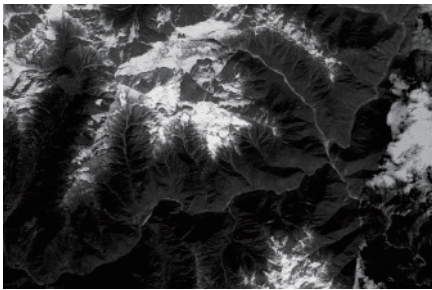


图1 隧道工程区域卫星影像

Fig.1 Satellite imagery of the tunneling area

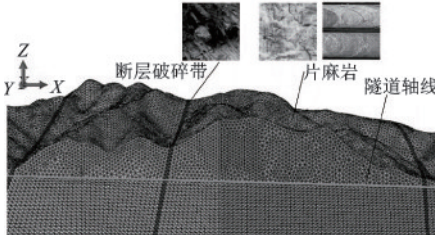


图2 有限元模型-线路纵断面示意

Fig.2 Finite element model of tunnel longitudinal section

1.3 水压致裂法实测地应力

采用水压致裂法测得该工程区的现今构造应力,测区现今主应力场以南西-北东向挤压为主。水压致裂法实测得到的水平主应力方向与计算模型的坐标系存在水平夹角,需要将实测地应力数据进行坐标变换^[14]。而计算坐标系和实测地应力的大地坐标系中的竖向坐标一致,只需转换两个坐标系的 x 、 y 轴。两个坐标系之间的方向余弦为:

$$\begin{cases} L = \cos \alpha \\ M = \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中, L 为实测坐标系中的应力与计算坐标系 x 轴正向的夹角; M 为实测坐标系中的应力与计算坐标系中 y 轴正向之间的夹角。

根据实测地应力数值及方位角,可由下式将地应力转换成计算坐标系下的应力分量。

$$\begin{cases} \sigma'_x = L^2 \sigma_y + M^2 \sigma_x + 2LM\tau_{xy} \\ \sigma'_y = M^2 \sigma_y + L^2 \sigma_x + 2LM\tau_{xy} \\ \sigma'_z = \sigma_z \\ \tau'_{xy} = (L\sigma_y + M\tau_{xy})^2 + (M\sigma_x + L\tau_{xy})^2 - \\ (L^2 \sigma_y + M^2 \sigma_x + 2LM\tau_{xy})^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z, \tau'_{xy}$ 为计算坐标系下的各应力分量, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}$ 为实测坐标系下的各应力分量。转化后的地应力数据如表1所示。

表1 转换后的地应力数值

Table 1 Converted tectonic stress values

埋深/m	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_z /MPa	τ_{xy} /MPa
700	18.25	14.41	17.97	0.85
850	27.39	21.81	22.56	1.24
900	30.05	22.83	24.26	1.61
1 050	36.46	26.87	28.32	2.13
1 150	40.39	28.05	30.37	2.75
1 200	42.14	31.46	32.17	2.38

1.4 岩石物理力学参数

本研究隧道工程正处于横洞施工阶段,研究人员在三个横洞内钻取了岩芯试样。测得岩石密度 ρ 、弹性模量 E 和泊松比 ν 和岩石饱和抗压强度 σ_c 。断层破碎带因取芯困难,无法获得完整岩芯,强度参数取为片麻岩1的1/4,泊松比取为0.3。岩石物理力学参数如表2所示。

表2 岩石物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the rock

岩性	ρ /(g·cm ⁻³)	E /GPa	ν	σ_c /MPa
花岗岩	2.64	42	0.21	89.5
片麻岩1	2.67	45	0.20	95.2
片麻岩2	2.63	39	0.22	90.5
断层破碎带	2.50	11	0.30	23.8

2 构造应力反演

2.1 构造应力多元线性回归分析原理

基于多元回归的数学方法^[10,15-16]反演隧道工程区域的地应力场是现今常用的方法。勘察初期在隧道线路上钻孔,依据水压致裂法测得岩体中的地

应力。利用数值计算的方法,建立与实测地应力数据对应的回归方程。利用线性叠加的原理,将构造地应力的回归计算值 $\hat{\sigma}_k$ 定义为因变量,将数值模拟计算得到的 σ_k^i 等定义为自变量,基于多元回归的数学方法,可以计算出待定回归系数 L_i ,就能计算出区域内任意一点 P 点的回归构造地应力。回归方程的形式为:

$$\hat{\sigma}_k = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_k^i \quad (3)$$

式中, k 为观测点的序号; $\hat{\sigma}_k$ 为第 k 观测点地应力的回归计算值; L_i 为相应于自变量的多元回归系数; σ_k^i 为相应应力分量计算值的单列矩阵; i 为工况数, $i=1,2,\dots,n$ 。

2.2 模拟计算边界条件

水压致裂法实测地应力数据为水平面的主应力、竖向应力。模拟计算时,在有限元模型上施加产生构造应力的主要边界因素:重力作用、沿模型边界面的 X 向挤压构造作用、沿模型边界面的 Y 向挤压构造作用以及 XY 平面内的剪切构造作用^[10],不同的边界施加原理如下:

(1)重力作用:按照实际重度进行模拟计算;

(2) X 向挤压构造作用:考虑到实测地应力的数值的量级,单位边界荷载定为10 MPa。在 X 方向界面上施加沿内法线方向的单位均布荷载进行模拟计算;

(3) Y 向挤压构造作用:同理,在 Y 方向界面上施加沿内法线方向的单位均布荷载10 MPa进行模拟计算;

(4) XY 平面内的剪切构造作用:隧道工程区域的有限元模型的长度和宽度的比例为2:1,施加的单位位移边界的比例相同。考虑到计算范围较广,位移边界应以m为单位。参考在两个 X 方向界面分别施加沿 Y 轴正、负方向1m的单位位移边界,在两个 Y 方向界面分别施加沿 X 轴正、负方向各0.5m的单位位移边界。

在不同的边界条件下分别计算得到应力测试点不同深度的应力分量 $\sigma_{\text{构}1}$ 、 $\sigma_{\text{构}2}$ 、 $\sigma_{\text{构}3}$ 、 $\sigma_{\text{构}4}$ 。

2.3 隧道工程区应力反演及结果分析

利用最小二乘法运算出四个自变量的权重系数 C_1 (重力工况应力)=1.808, C_2 (X 向挤压构造作用)=5.345, C_3 (Y 向挤压构造作用)=2.440, C_4 (平面剪切构造作用)=8.174,常数项 $C_0=$

20.504,详见公式(4)。但 C_4 的 P -value为0.055,超过0.05,不满足回归系数的显著性检验。除此之外,常数项为20.504,数值较大,且自重作用的回归系数超过了1.8,与实际的地质构造因素并不相符。

$$\sigma = 20.504 + 1.808\sigma_{\text{构}1} + 5.345\sigma_{\text{构}2} + 2.440\sigma_{\text{构}3} + 8.174\sigma_{\text{构}4} \quad (4)$$

考虑到实测平面剪应力数值最大为2.38 MPa,为其余实测构造应力的0.02%~7.62%,反映出平面剪应力在构造应力中所占比例很少。公式(4)计算得到测点的平面剪应力数值为2.42 MPa,与实测的相对误差为1.7%。剔除影响不显著的平面剪切构造作用因素,再次利用最小二乘法运算出三个自变量的权重系数 C_1 (重力工况应力)=1.261, C_2 (X 向挤压构造作用)=3.759, C_3 (Y 向挤压构造作用)=1.555,常数项 $C_0=4.641$ 。将回归系数代入公式(3),得到区域构造应力回归公式为:

$$\sigma = 4.641 + 1.261\sigma_{\text{构}1} + 3.759\sigma_{\text{构}2} + 1.555\sigma_{\text{构}3} \quad (5)$$

公式(5)计算得到测点的平面剪应力数值为3.08 MPa,与实测值相差仅为0.7 MPa,可以认为剔除平面剪切作用是合理的。

为验证回归结果的可靠性,利用统计学原理对回归结果进行检验。

(1) R 检验

求得复相关系数 $R=0.975$ 接近于1.0,表明回归效果良好。

(2) F 检验

在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时,在 F 分布表中查得在显著水平下的临界值,得到: $F=129.4 > F_{1-\alpha}(p, n-p-1)=F_{0.95}(3, 19)=3.13$,满足回归模型的显著性检验。

(3) P 检验

回归系数 C_1 、 C_2 、 C_3 的 P -value分别为1.14E-12、4E-13和1.57E-08,均远小于显著水平 $\alpha=0.05$,满足回归系数 C_1 、 C_2 、 C_3 的显著性检验。

(4) t 检验

查 t 分布分位数表得到显著水平 $\alpha=0.05$ 下的临界值, $t_{1-\alpha/2}(n-p)=F_{0.975}(20)=2.086$,回归系数 C_1 、 C_2 、 C_3 对应的 t 值分别为15.62、16.52和9.08,满足回归系数 C_1 、 C_2 、 C_3 的显著性检验。

回归公式(5)可得到实测地应力点的应力回归计算值,该值与各测点实测应力分量对比见表3。可以得出,实测应力和反演计算出的应力绝对误差较小,大部分应力相对误差小于10%,埋深较浅的

表3 地应力实测值及反演值

Table 3 Measured and inverted values of tectonic stress

埋深/m	σ_x /MPa			σ_y /MPa			σ_z /MPa			σ_{xy} /MPa		
	实测	反演	相对误差	实测	反演	相对误差	实测	反演	相对误差	实测	反演	相对误差
700	18.25	22.74	24.6%	14.41	18.40	27.7%	17.97	13.87	-22.8%	0.85	1.54	-44.63%
850	27.39	28.62	4.5%	21.81	21.79	-0.1%	22.56	20.59	-8.7%	1.24	2.23	-44.37%
900	30.05	30.64	2.0%	22.83	23.06	1.0%	24.26	23.08	-4.9%	1.61	2.43	-33.94%
1 050	36.46	35.66	-2.2%	26.87	26.21	-2.5%	28.32	29.04	2.5%	2.13	2.81	-24.03%
1 150	40.39	38.07	-5.7%	28.05	27.81	-0.9%	30.37	32.21	6.1%	2.75	2.95	-7.09%
1 200	42.14	40.18	-4.7%	31.46	29.23	-7.1%	32.17	34.91	8.5%	2.38	3.08	-22.73%

点的相对误差较大。原因是,埋深较浅的点可能会出现应力释放,引起理论计算应力数值误差较大。但实际工程中,本次计算精度能够满足实际工程的需求。

图3为钻孔各点实测地应力分量值与其反演计算值对比图,可以看出,各地应力点的应力的回归计算值与实测值吻合较好,地应力随深度总体变化趋势一致,表现出应力数值随着埋深的增加而增加。

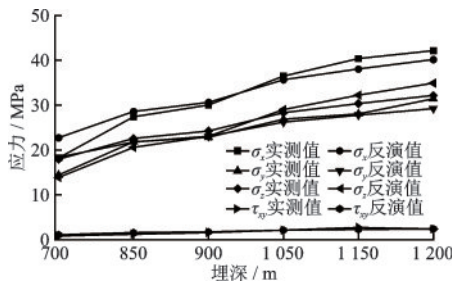


图3 地应力实测值和反演计算值对比情况

Fig.3 Distribution rule of the tectonic stress along depth

复相关系数 $R = 0.975$, 计算结果优于苍岭隧道的 $0.894^{[8]}$, 蓝家岩隧道的 $0.923^{[16]}$, 以及桑珠岭隧道的 $0.945^{[10]}$, 表明本次反演计算精度效果良好, 计算结果符合实际隧道工程区域的构造特征。

回归方程和回归系数通过显著性检验, 回归系数均为正值, 自变量之间不存在多重共线性, 回归计算得出的回归系数数值合理, 反演得到应力的影响因素与实测地应力的组成一致, 回归计算得到的隧道构造应力是合理的。

3 特长深埋隧道构造地应力分析

3.1 隧道区域构造应力特征

图4为隧道工程区域竖向、X向和Y向水平构

造应力分布图。从模型边界的应力云图可以看出, 竖向应力主要由岩体自重构成, 应力云图表现为成层性, 埋深越大, 应力数值增加, 规律性良好。

该区域的X向与Y向构造应力的比值大致为2/3, 水平向构造应力在山体浅埋处应力较小, 随着埋深的增加, 应力数值呈增大的趋势, 与表格4中转换后的实测应力值的变化规律一致。由于挤压作用, 山体浅表局部存在较小的拉应力, 表现出“拱效应”。

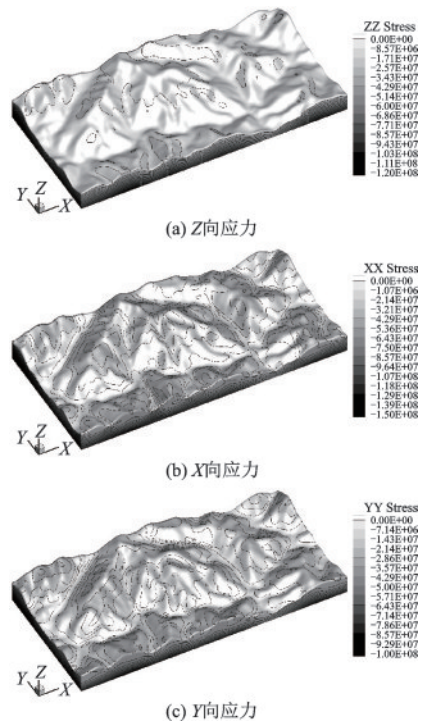


图4 区域构造应力分布

Fig.4 Regional tectonic stress distribution

3.2 隧道轴线构造应力特征

依据回归公式(5), 计算得到隧道轴线方向的

各地应力分量,并计算出水平最大主应力 S_H 、水平最小主应力 S_h 和垂直应力 S_V ,绘制出隧道轴线的主应力分布图,如图5所示。隧道轴线上最大水平主应力 S_H 在里程K4+625处取得最大值,数值约为62.5 MPa,在里程K8+500处 S_H 达到62.0 MPa;最小水平主应力 S_h 最大值出现在里程K6+750处,数值为43.7 MPa;最大竖向应力 S_V 位于K6+125,数值达到55.4 MPa。通过对比王成虎等^[17]预测的该铁路沿线关于片麻岩地层Ⅲ-Ⅳ级围岩中原地应力量值。本文计算得出的 S_H 、 S_V 的量值略高, S_h 超过该文献预测数值近1/3。本文更加详细的给出了该段隧道的地应力数值。

从应力分布曲线可以看出,主应力和竖向应力曲线大部分为连续光滑曲线,地应力变化规律与隧道埋深变化规律一致。隧道在里程K0+250、K8+500和K13+000处分别与断层f1、f2和f3呈大角度相交。在断层区域,由于断层岩性的强度较低,应力分布曲线有明显弯折或突变。浅埋段的构造应力变化幅度均较小。在深埋段,竖向应力和最小水平主应力突变幅度大,最大水平主应力变化幅度较小。

隧道在深埋大于800 m的区段地应力分布规律为 $S_H > S_V > S_h$,在此区间外的地应力分布规律为 $S_H > S_V$ 、 S_h 、 S_V 、 S_h 数值相差不大。最大竖向应力出现在最大埋深处,符合自重应力的分布特征。

隧道轴线的应力分布特征表现出:隧道埋深较浅路段地应力以较大的水平主应力为主,而在深埋段竖向主应力所占比重较大,原因是,地壳挤压构造运动在山体中产生较大的水平应力,但随着山体岩层厚度的增加,相对刚度增大,应力数值降低。隧道轴线方向的主应力分布与临近的桑珠岭隧道^[10]的计算结果一致。总体来看,隧道全段水平向构造作用较强,岩体中赋存有较大的水平构造应力,符合青藏高原东南区域构造应力分布特征。

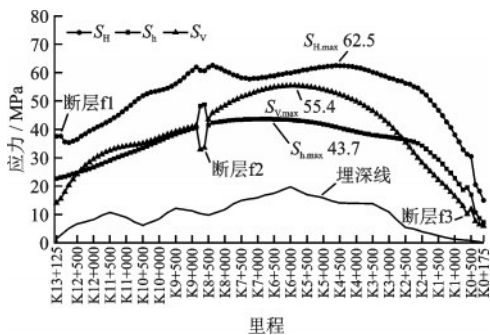


图5 隧道轴线的主应力分布
Fig.5 Principal stress distribution along tunnel axis

3.3 隧道轴线主应力方向特征

考虑到隧道走向应避让附近大断层,隧道轴线方向选定为 $N61^\circ E$,根据反演回归计算得出的地应力数值求解出最大主应力的方向,与隧道轴线方向的关系如图6所示。最大主应力方向的区间为 $N43^\circ E-N78^\circ E$,实际钻孔测得的主应力方向为 $N70^\circ E$,计算结果与实测地应力成果一致,表明利用钻孔实测应力资料反演获得的地应力是合理的,并且有较高的可信度。最大主应力方向符合喜马拉雅东构造区域最大水平主应力优势方向 $N40^\circ E-N60^\circ E$ ^[17]。

最大水平主应力方向与隧道轴线方向的角度差值绝大部分小于 $\pm 10^\circ$ 表明该隧道的在线路设计阶段的走向设计是合理的。在深埋路段,地应力由较高的水平构造力和上覆岩层自重应力叠加而成,最大水平主应力方向与线路走向方向差别较小,表明最大水平主应力与隧道轴线小角度相交,有利于隧道围岩的稳定。在浅埋段,最大主应力方向与线路夹角较大,然而地应力数值相对较低,对隧道围岩稳定性影响较弱。

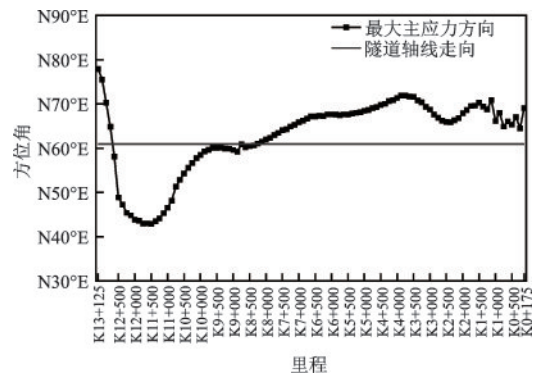


图6 最大水平主应力方向与隧道轴线方向对比情况
Fig.6 Angle between the maximum principal stresses direction and tunnel axis

3.4 岩爆预测分析

选取岩石单轴抗压强度与洞壁最大主应力比 R_c/σ_1 、洞壁最大切向应力与岩石单轴抗压强度比 σ_θ/R_c 作为岩爆评价指标,岩爆评价体系选取陶振宇判据、拉森判据和二郎山判据^[18],岩爆计算统计成果如表4所示。弱岩爆段里程占比7.1%。埋深介于150~840 m预测发生中等岩爆,里程占比35.7%,埋深超过800~1100 m预测发生强烈岩爆,里程占比57.1%。可以预见,该隧道发生中等-强烈

岩爆的风险较高。

该隧道穿越区域地形起伏大,区域地质构造作用强烈,岩爆灾害成为制约选线、设计和施工建设的难题。可以根据岩爆产生机制和岩爆烈度等级,提出针对性的防治措施,可以有效预防岩爆的发生或降低岩爆等级,减小对工程施工的影响。主要方法有:改善围岩的物理力学特性,改善围岩应力条件,加固围岩,改进施工工艺等。

表4 岩爆风险统计成果

Table 4 Rockburst risk statistics results

里程	R_c/σ_1	陶震宇判据	σ_0/R_c	拉森判据	二郎山判据	综合判定
K13+125	3.10	中等	0.48	中等	轻微	中等
K12+000	2.91	中等	0.46	中等	轻微	中等
K11+000	2.46	强烈	0.53	中等	中等	中等
K10+000	2.14	强烈	0.61	强烈	中等	强烈
K9+000	1.89	强烈	0.69	强烈	强烈	强烈
K8+000	1.90	强烈	0.70	强烈	强烈	强烈
K7+000	1.98	强烈	0.67	强烈	中等	强烈
K6+000	1.92	强烈	0.65	强烈	中等	强烈
K5+000	1.86	强烈	0.63	强烈	中等	强烈
K4+000	1.87	强烈	0.60	强烈	中等	强烈
K3+000	1.99	强烈	0.62	强烈	中等	强烈
K2+000	2.16	中等	0.65	强烈	中等	中等
K1+000	3.04	中等	0.46	中等	轻微	中等
K0+175	7.69	轻微	0.14	轻微	无	轻微

4 结论与讨论

(1)利用多元线性回归的原理反演计算出西藏西南地区某特长深埋隧道的构造应力,复相关系数达到0.975,回归方程和回归系数通过显著性检验。反演得到应力的构成因素与实测结果一致,体构造地应力的回归效果良好,回归计算得到的隧道构造应力是客观合理的。

(2)隧道轴线上最大水平主应力 S_H 超过62.5 MPa,最小水平主应力 S_h 最大值达到43.7 MPa;最大竖向应力 S_V 出现在最大埋深位置,数值达到55.4 MPa。隧道穿越断层的区域应力有明显变化。隧道埋深较浅里程地应力以较大的水平主应力为主而在深埋段竖向主应力所占比重较大。

(3)最大主应力方向的区间为 $N43^\circ E \sim N78^\circ E$,大部分里程的最大水平主应力与隧道轴线小角度

相交,有利于隧道围岩的稳定。

(4)计算统计出隧道线路弱岩爆段里程占比7.1%,中等岩爆段里程占比35.7%,强岩爆段里程占比57.1%。

本研究利用回归反演计算得到隧道工程区域的构造应力,结果表明该区域受强烈的构造挤压作用,岩体内赋存较大的水平应力是产生岩爆的重要因素。从应力方面初步统计出该特长深埋隧道的岩爆灾害等级,该特长深埋隧道全线路发生岩爆灾害的概率较大。因该隧道正处于横洞开挖阶段,埋深较浅,无法获得大埋深洞段的围岩岩爆现场数据,但研究成果可以为周边区域同类型隧道的设计、施工提供借鉴。

参考文献:

- [1] 葛修润,侯明勋.三维地应力BWSRM测量新方法及其测井机器人在重大工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,2011,30(11):2161-2180.
Ge X R, Hou M X. A new 3D in-situ rock stress measuring method: Borehole wall stress relief method (BWSRM) and development of geo stress measuring instrument based on BWSRM and its primary applications to engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (11): 2161-2180. (in Chinese)
- [2] Hast N. The state of stresses in the upper part of the earth's crust [J]. Engineering Geology, 1967, 2(1): 5-17.
- [3] Kuang Z H, Qiu S L, Li S J, et al. A new rock brittleness index based on the characteristics of complete stress-strain behaviors [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(3): 1109-1128.
- [4] 黄勇,孟祥连,胡卸文,等.雅安至林芝交通廊道重大工程地质问题与对策研究[J].工程地质学报,2021, 29(2): 307-325.
Huang Y, Meng X L, Hu X W, et al. Major engineering geological problems and countermeasures along traffic corridor from Ya'an to Nyingchi [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 307-325. (in Chinese)
- [5] 钟山,江权,冯夏庭,等.锦屏深部地下实验室初始地应力测量实践[J].岩土力学,2018,39(1):356-366.
Zhong S, Jiang Q, Feng X T, et al. A case of in-situ stress measurement in Chinese Jinping underground laboratory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 356-366. (in Chinese)
- [6] Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: principles and

- stress estimation techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40(2): 151-171.
- [7] 王璞,王成虎,杨汝华,等.基于应力多边形与震源机制解的深部岩体应力状态预测方法初探[J].岩土力学, 2019,40(11):4486-4496.
Wang P, Wang C H, Yang R H, et al. Preliminary investigation on the deep rock stresses prediction method based on stress polygon and focal mechanism solution [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4486-4496. (in Chinese)
- [8] 汪波,何川,吴德兴,等.苍岭特长公路隧道地应力场反演分析[J].岩土力学,2012,33(2):628-634.
Wang B, He C, Wu D X, et al. Inverse analysis of in-situ stress field of Cangling super-long highway tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 628-634. (in Chinese)
- [9] 郭怀志,马启超,薛玺成,等.岩体初始应力场的分析方法[J].岩土工程学报,1983(3):64-75.
Guo H Z, Ma Q C, Xue X C, et al. The analytical method of the initial stress field for rock masses [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(3): 64-75. (in Chinese)
- [10] 王庆武,巨能攀,黄健,等.桑珠岭特长隧道初始地应力场反演分析[J].科学技术与工程,2016,16(25): 137-143.
Wang Q W, Ju N P, Huang J, et al. Regression analysis of initial geostress field of Sangzhuling super-long tunnel [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(25): 137-143. (in Chinese)
- [11] 徐彦举.嘎隆拉隧道初始地应力场的研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.
Xu Y J. Research on initial geostress field of Gonggala Tunnel [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [12] 王庆武,巨能攀,杜玲丽,等.深埋长大隧道岩爆预测与工程防治研究[J].水文地质工程地质,2016,43(6): 88-94.
Wang Q W, Ju N P, Du L L, et al. Research on rockburst prediction and engineering measures of long and deep-lying tunnels [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 88-94. (in Chinese)
- [13] 冯伟.西藏多雄拉隧道地应力场特征与双护盾TBM掘进围岩稳定性研究[D].成都:西南交通大学,2018.
Feng W. Study on the in-situ stress characteristics and the stability of surrounding rock by double shield TBM excavation of the Duoxiong Tunnel in Tibet [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [14] 蒙伟,何川,张钧博,等.高地温高地应力下岩体初始地应力场反演分析[J].岩石力学与工程学报,2020,39(4):749-760.
Meng W, He C, Zhang J B, et al. Inverse analysis of the initial geostress field of rock masses under high geo-temperature and high geostress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 749-760. (in Chinese)
- [15] 张强勇,向文,于秀勇,等.双江口水电站地下厂房区初始地应力场反演分析[J].土木工程学报,2015,48(8): 86-95.
Zhang Q Y, Xiang W, Yu X Y, et al. Back analysis of initial geostress field for underground powerhouse zone of Shuangjiangkou hydropower station [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(8): 86-95. (in Chinese)
- [16] 代聪,何川,陈子全,等.超大埋深特长公路隧道初始地应力场反演分析[J].中国公路学报,2017,30(10): 100-108.
Dai C, He C, Chen Z Q, et al. Inverse analysis of initial ground stress field of deep embedded and extra long highway tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 100-108. (in Chinese)
- [17] 王成虎,高桂云,杨树新,等.基于中国西部构造应力分区的川藏铁路沿线地应力的状态分析与预估[J].岩石力学与工程学报,2019,38(11):2422-2433.
Wang C H, Gao G Y, Yang S X, et al. Analysis and prediction of stress fields of Sichuan-Tibet railway area based on contemporary tectonic stress field zoning in Western China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(11): 2422-2433. (in Chinese)
- [18] 吕庆,孙红月,尚岳全,等.深埋特长公路隧道岩爆预测综合研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16): 2982-2988.
Lyu Q, Sun H Y, Shang Y Q, et al. Comprehensive study on prediction of rockbursts in deep and over-length highway tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2982-2988. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)