

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.15

山西白龙山隧道地应力场分布规律分析

刘国伟

(山西省交通环境保护中心站有限公司, 山西 太原 030006)

摘要: 根据静兴高速公路白龙山隧道实测地应力数据, 充分考虑地形地貌与构造应力的影响, 采取三维有限元数值模拟的方法反演整个工程区的初始地应力场分布规律, 结果表明: 反演计算结果与实测值吻合较好。通过分析隧道轴线方向上的初始地应力场特征, 发现区内存在较高地应力场区域。

关键词: 白龙山隧道; 初始地应力场; 有限元数值模拟

中图分类号: P452.1+1

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)03-0110-07

Analysis on in-situ geo-stress field of Bailong Mountain Tunnel

LIU Guowei

(Shanxi Transportation Environmental Protection Center Station Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: Based on the measured in-situ geo-stress data of Bailongshan Tunnel on Jingxing Highway in Shanxi Province, in situ geo-stress around the tunnel was regressed by 3D-FEM, considering the effects of landform and tectonic stress. The results show that the inversion results are in good agreement with the measured values. It is considered that a high in-situ stress field exists by analyzing the characteristics of initial in-situ stress field along the direction of tunnel axis.

Keywords: Bailong Mountain Tunnel; in-situ stress; FEM numerical simulation

0 引言

初始地应力场主要由自重应力场和构造应力场组成, 是影响深部工程稳定性的重要因素之一^[1-2], 目前常用的现场测试方法为水压致裂法和应力解除法^[3-4], 但由于现场测试费用昂贵, 测点数量有限且具有离散型, 对于一些大型工程而言, 很难对整个区域的应力场情况进行预测。为了更好的满足工程需要, 许多学者在实测地应力的基础上, 通过有效的计算方法进行区域地应力场反演, 并取得了丰硕成果^[1, 4-7]。比如, 李永松等^[3]采用钻孔孔壁切缝解除地应力测试方法数值模拟研究应力场分布规律; 易达等^[6]运用人工神经网络反演岩体初始应力场; 李守巨等^[5]研究了基于遗传算法的岩体初始应力场反演。邢军等^[8-12]针对高速公路深埋隧道特点, 在实测地应力资料基础

上, 采取多种分析方法获得隧道的初始地应力特征。

本文以白龙山大埋深特长公路隧道为例, 以实测地应力数据为基础, 结合多元回归方法与三维有限元数值模拟方法, 研究隧道区域初始地应力场分布规律。研究在一定程度上丰富和扩展了吕梁山脉初始应力场研究内容, 能够为隧道工程的设计和施工提供决策支持。

1 工程概况

1.1 地形地貌及地层

拟建白龙山特长隧道位于吕梁市岚县与兴县交界的吕梁山脉(图1), 隧址区地势总体表现为东低西高、中部高两侧低的地貌特征, 地貌单元属剥蚀构造变质岩中低山区。区内最高主峰海拔高程为 2 195 m, 洞体最大埋深 684.1 m, 隧道长度 10 374 m。隧道穿越的

收稿日期: 2019-07-13; 修订日期: 2019-09-10

基金项目: 山西省科技厅重点研发项目(201603D321118); 山西省交通厅建设科技项目(17-2-03)

作者简介: 刘国伟(1978-), 男, 山西壶关人, 本科, 高级工程师, 从事环境地质灾害研究。E-mail: 857041209@qq.com

地层为:第四系全新统松散堆积层,下元古界野鸡山群白龙山组斜长角闪岩、下元古界野鸡山群青杨树湾组变质砾岩、上太古界吕梁山群赤坚岭组斜长片麻岩、中

太古界界河口群奥家滩组石英片岩及侵入岩(辉长辉绿岩)。洞体围岩埋深最大部分主要为硬质角闪岩。

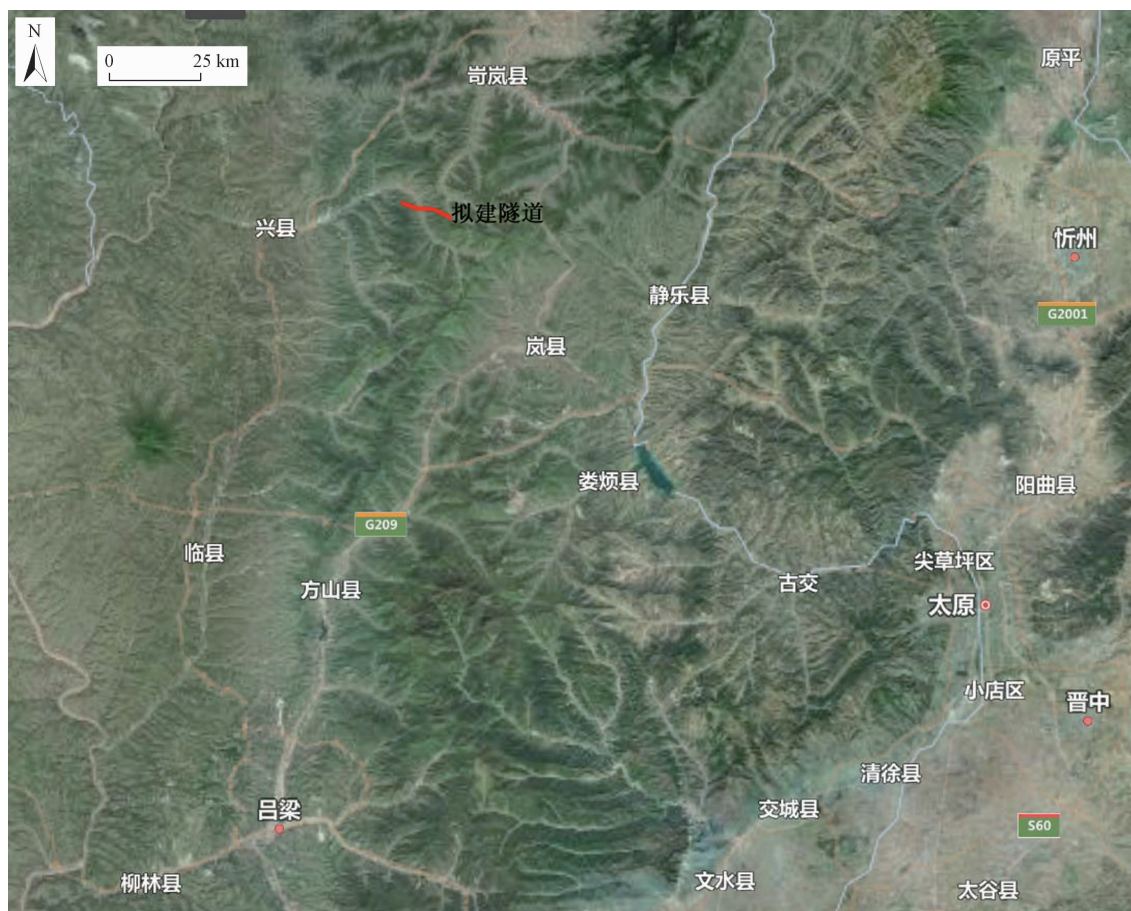


图1 拟建白龙山隧道位置

Fig. 1 Location of Bailongshan Tunnel

1.2 地质构造与应力场特征

拟建隧道位于离石大断裂西部,该区经历了复杂的地质构造作用,区内经历了阜平运动、五台运动、吕梁运动、燕山运动,形成了以阜平期北东向复式褶皱带和吕梁期北北东向复式褶皱带为主要的褶皱构造、北东向的逆断层和北西向张扭性断层的断裂构造以及韧性剪切带。区内构造形迹以褶皱构造和断裂构造为主,图2为隧址区构造纲要图。隧址处在走向NS方向的白龙山向斜,倾角 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。图3是根据节理裂隙特征绘制的隧址区岩石倾向玫瑰花图,从图中可以看出,岩石中X节理性产状为 $48^{\circ} \angle 51^{\circ}$ 、 $168^{\circ} \angle 73^{\circ}$,且上述两组节理产状形成期相同。通过节理系赤平投影结果可知,隧址区古应力场方位为: $\sigma_1, 108^{\circ} \angle 11^{\circ}$ 、 $\sigma_2, 252^{\circ} \angle 85^{\circ}$ 、 $\sigma_3, 6^{\circ} \angle 4^{\circ}$,该结果和燕山早-中期吕梁山地区应力场特征相吻合。研究区所处的吕梁山脉

具有典型的复合构造体系,主要原因是该区构造运动先经历了燕山构造运动作用,之后又经喜山期构造运动的改造,即本区构造应力场的演化先后分别经历了NWW~SEE向压应力场(燕山期)及NWW~SEE向拉应力场(喜山期)。

2 初始地应力场实测与分析

2.1 地应力实测结果

针对拟建白龙山隧道的SZK11钻孔,该孔选址上避开了断层及褶皱构造带,地层岩性主要为下元古界角闪岩,灰黑色,变晶结构,层块构造,矿物成分以斜长石,石英,黑云母为主,局部夹坚硬红色花岗岩及质软绿色绿泥石片岩,偶见石英石岩脉,质坚硬,钻进困难,锤击声脆,节理裂隙发育,钻进初200 m范围,岩芯破碎,强风化-中风化、深度超过200 m后岩心完整,呈长

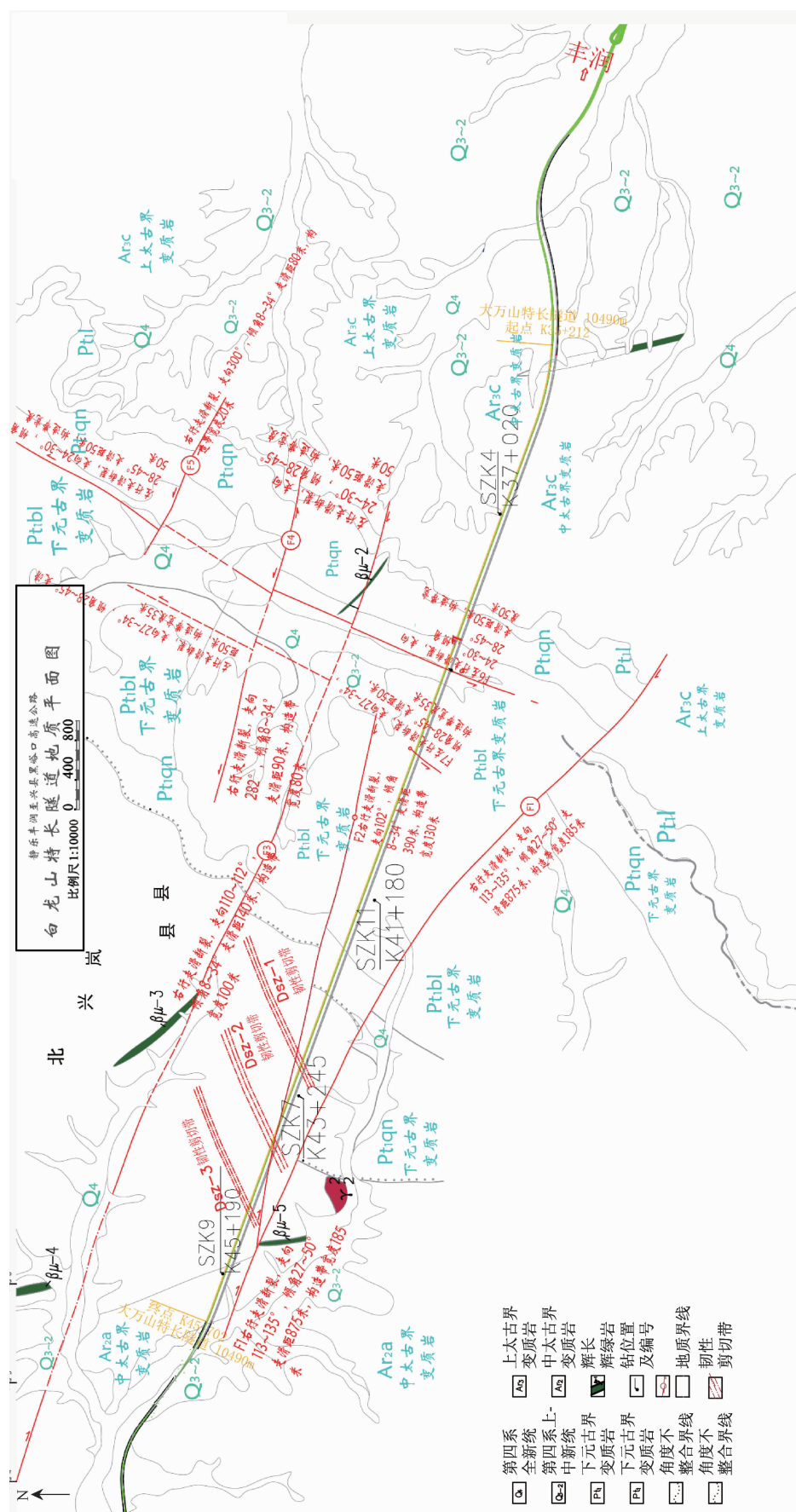


图2 吕梁山脉白龙山区构造纲要图

Fig.2 Structural outline map of Bailongshan Mountain area in Luliang Mountain range

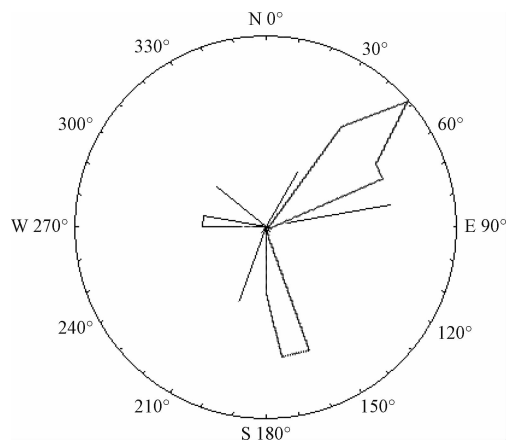


图 3 研究区倾向节理玫瑰花图

Fig. 3 Tendency rose diagram of joint in study area

柱状,一般节长 20 ~ 30 cm。选取完整岩体部位进行水压致裂地应力试验。现场测试共取得了 10 个测试段的地应力结果,测试数据如下表 1 所示。据在 SZK11 钻孔测试深度范围内印模器记录的裂纹破裂方向显示,白龙山隧道实测最大水平主应力值为 17.25 MPa,最大水平主应力方向为 NW58°左右。

2.2 地应力场的构成与分析

采用最小二乘法回归得到白龙山隧道 SZK11 钻孔地应力随埋深的变化关系如图 4 所示,图中显示,随着埋深的增加,最大水平主应力、最小主应力及垂直应力呈线性增大的相关性较好,说明隧道埋深越大,地应力越大。图 5 为各测试段侧压系数 λ (实测最大水平主应力与垂直向应力比值)随深度的关系曲线,图中

表 1 白龙山隧道 SZK11 钻孔地应力测试成果表

Table 1 In-suit geo-stress measured results in Borehole SZK11 of Bailongshan Tunnel

测点 编号	测点 深度/m	破裂 压力/MPa	重张压力/ MPa	关闭压力/ MPa	孔隙压力/ MPa	抗拉强度/ MPa	最大主应力/ MPa	最小主应力/ MPa	垂直应力/ MPa	最大主应 力方向
1	278	8.41	5.45	4.51	2.78	2.96	10.86	7.29	7.51	
2	320	8.82	6.17	5.34	3.20	2.65	13.05	8.54	8.64	
3	360	10.56	7.22	5.56	3.60	3.34	13.08	9.16	9.72	
4	420	10.22	7.14	5.95	4.20	3.08	14.91	10.15	11.34	
5	455	11.15	8.85	6.81	4.55	2.30	16.13	11.36	12.29	
6	464	11.97	10.57	7.40	4.64	1.40	16.27	12.04	12.53	NW 57°
7	482	12.28	11.11	7.56	4.82	1.17	16.39	12.38	13.01	
8	510	13.18	11.12	7.72	5.10	2.06	17.14	12.82	13.77	
9	522	13.21	10.77	7.60	5.22	2.44	17.25	12.82	14.09	NW 60°
10	534	13.07	10.95	7.58	5.34	2.12	17.13	12.92	14.42	NW 58°

注:自重应力按岩石的上覆重量计算,其岩石容重取为 27.0 kN/m³。

可以看出,白龙山隧道 SZK11 钻孔测试深度范围内,各测段侧压系数均 λ 均大于 1,表明工程场区存在一定程度的水平构造应力。同时,在浅部较大,随着埋深增加、侧压力系数 λ 逐渐减小,深部 (> 500 m) 侧压力系数均值仅为 1.22,最大水平主应力值略大于岩层的自重应力。因此,白龙山隧道所处的岩体应力场应属

于正常的应力场区,测试表明该区不存在明显偏高的构造应力场。

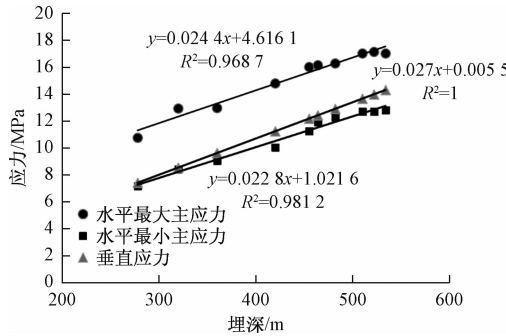


图 4 地应力随深度变化曲线

Fig. 4 In-situ geo-stress varies with depth

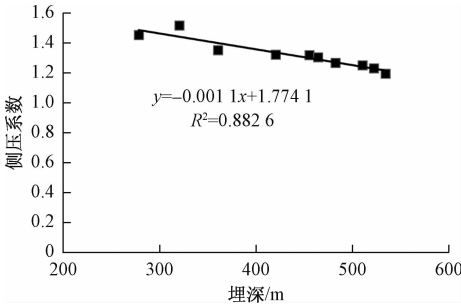


图 5 侧压系数随深度变化曲线

Fig. 5 Lateral pressure coefficient varies with depth

3 初始地应力场数值模拟与分析

3.1 三维计算模型

为削弱边界效应的影响,模型建立的计算范围适当扩大。根据研究区地形地貌特征和地质构造因素建

立计算模型,岩石力学参数应用室内岩石物理力学参数测试结果。为方便建立模型研究,将研究区工程地质类型简化为 5 个工程地质岩组并赋予其岩石物理力学参数表 2 所示。5 个工程地质岩组分别为石英片岩组(中太古界)、石英片麻岩组(上太古界)、变质砾岩组(下元古界)、角闪岩组(下元古界)及断层带岩组。计算模型如图 6 所示,将隧道轴线走向定为 x 轴,方向角度约 100° 。计算模型取隧道轴线静乐-黑峪口方向为 x 轴(约 100°),建立研究区三维计算模型如图 6 所示。计算模型边界施加应力大小和方向基于实测地应力资料数据,区域最大水平构造应力方向取 NW 58° 。将实测水平应力分解到研究区的 X 和 Y 两个水平对称方向,并根据 2.2 节中的深度(Z 轴)和构造应力的线性关系在 4 个边界上施加梯度水平应力。选用弹塑性本构关系,匹配摩尔-库仑准则进行计算。

表 2 模型岩石力学参数

Table 2 Rock mechanics parameters of model

岩层	杨氏模量 E/MPa	泊松 比 μ	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	内聚力 C/MPa	内摩擦角 $\Phi/(\circ)$
下元古界变质砾岩	11 000	0.23	2.8	24.4	42
下元古界角闪岩	30 000	0.16	3.05	33.1	50
上太古界石英片麻岩	25 000	0.19	2.7	26.7	45
中太古界石英片岩	22 000	0.21	2.6	25.9	43.8
断层	50	0.29	1.6	15	20

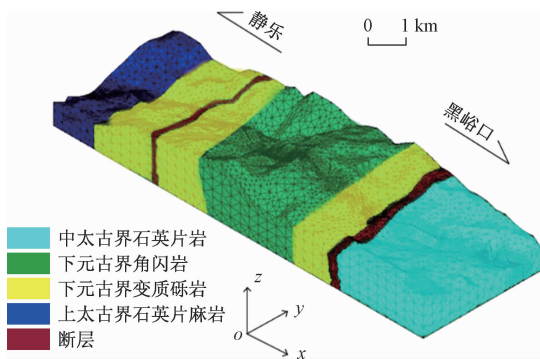


图 6 研究区三维有限元计算模型(网格图)

Fig. 6 The 3-D finite element model of study area

3.2 模拟结果分析

根据 Comsol multiphysics 有限元数值模拟软件模拟隧址区初始地应力场特征。图 7、图 8、图 9 为取隧道轴线方向的应力分布剖面切片图,根据色标可知,蓝色到红色代表应力大小逐渐增大。图 7~9 中显示地应力值随深度增加而增大,岩石的性质对地应力场特征具有重要的影响,地应力在硬岩层中的表现值应力大于较软的岩石。断层的存在对其临近岩层区应力具

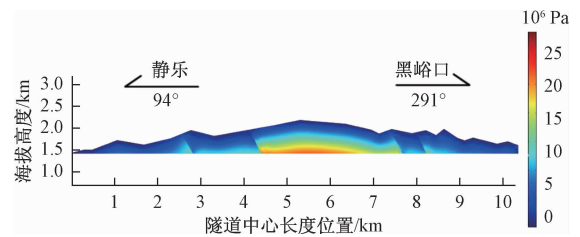


图 7 最大水平主应力分布云图

Fig. 7 Maximum horizontal principal stress distribution

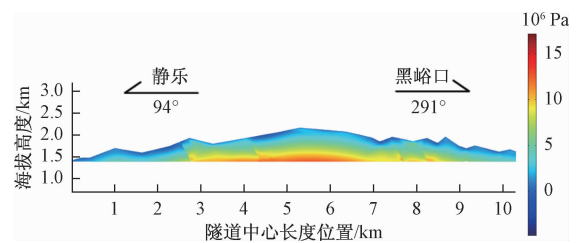


图 8 最小水平主应力分布云图

Fig. 8 Minimum horizontal principal stress distribution

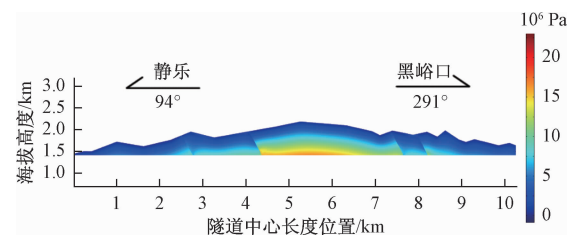


图 9 垂直应力分布云图

Fig. 9 Vertical stress distribution

有消散作用,断层内部岩石较破碎形成一个应力低值区,断层两侧完整岩层应力值相比于断层内部大,从而表现出断层对应应力场具有一定的阻隔作用。

剔除异常区域对地应力场的影响,提取正常区域模拟计算地应力值和实测地应力对比,如表 3 所示。总体上模拟计算值与实测值吻合度基本在 0.9 以上,模拟计算得到的初始地应力场分布规律与实测结果基本一致,因此数值模拟得到的隧址区初始应力场分布特征可靠。

拟建隧道位于下元古界角闪岩地层,岩层完整,偶有断层分布,但规模较小,因此断层对该区域影响较弱。由于隧道埋深最大达 685 m,该深度范围内隧道长度约 3 150 m,因此在该区域内隧址岩层处在相对高的应力状态。根据数值模拟结果可知, $\sigma_H = 22.88$ MPa,方向为 NWW-SEE; $\sigma_h = 15.8$ MPa,方向为 NNE-SSW; $\sigma_v = 22.84$ MPa。根据上述结果可知,隧道轴线方向与最大水平主应力方向呈一致状态,有利于开挖时隧洞的岩层的稳定。

表 3 模拟计算应力与实测应力对比
Table 3 Comparison of the simulated stresses and the measured stresses

序 号	深度/ m	σ_H /MPa			σ_V /MPa			σ_h /MPa		
		实测 值	计算 值	吻合 度	实测 值	计算 值	吻合 度	实测 值	计算 值	吻合 度
1	278	10.86	10.75	0.99	7.51	7.22	0.96	7.29	7.12	0.98
2	320	13.05	12.85	0.98	8.64	8.49	0.98	8.54	8.27	0.97
3	360	13.08	13.35	0.98	9.72	9.57	0.98	9.16	9.41	0.97
4	420	14.91	15.49	0.96	11.34	11.89	0.95	10.15	10.81	0.93
5	455	16.13	16.56	0.97	12.29	12.98	0.94	11.36	11.69	0.97
6	464	16.27	16.98	0.96	12.53	13.19	0.95	12.04	12.48	0.96
7	482	16.39	17.59	0.93	13.01	13.95	0.93	12.38	12.91	0.96
8	510	17.14	18.17	0.94	13.77	15.01	0.91	12.82	13.45	0.95
9	522	17.25	18.62	0.92	14.09	15.21	0.92	12.82	13.86	0.92
10	534	17.13	19.01	0.89	14.42	15.85	0.9	12.92	14.18	0.9

4 结论

(1) 白龙山隧道实测最大水平主应力值为 17.25 MPa,最大水平主应力方向为 NW 58°左右。采用最小二乘法回归计算分析得出最大水平主应力值略大于岩层的自重应力。

(2) 结合实测数据采用三维有限元数值模拟的方法反演研究区初始地应力场,反演结果较好地反映了地形、地貌及地质条件对初始地应力场的影响,且反演结果与实测结果吻合度较好。

(3) 反演分析结果表明,在隧道轴线以上,最大水平主应力均大于垂直应力,说明本区地应力场以构造应力为主导。拟建隧道洞体在该区最大埋深 685 m,最大水平主应力, $\sigma_H = 22.88$ MPa。

参考文献:

[1] 赵辰,肖明,陈俊涛. 复杂地质条件下初始地应力场反演分析方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 87 - 92. [ZHAO C, XIAO M, CHEN J T. Inversion analysis method for *in situ* stress field under complex geological conditions[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2017, 45(8): 87 - 92. (in Chinese)]

[2] 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.

[3] 王庆武,巨能攀,杜玲丽,等. 拉林铁路桑日至加查段三维地应力场反演分析[J]. 岩土力学,

2018, 39(4): 1450 - 1462. [WANG Q W, JU N P, DU L L, et al. Three dimensional inverse analysis of geostress field in the Sangri-Jiacha section of Lasa-Linzhi railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1450 - 1462. (in Chinese)]

[4] 李永松,彭潜,尹健民,等. 钻孔孔壁切缝解除地应力测试方法数值模拟研究及工程应用[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(3): 85 - 91. [LI Y S, PENG Q, YIN J M, et al. Method of geostress relieving and measuring by borehole slots: numerical analysis and engineering application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(3): 85 - 91. (in Chinese)]

[5] 李守巨,刘迎曦,王登刚. 基于遗传算法的岩体初始应力场反演[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 13 - 17. [LI S J, LIU Y X, WANG D G. Inversion procedure of initial stress fields in rock masses based on genetic algorithm[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1): 13 - 17. (in Chinese)]

[6] 易达,徐明毅,陈胜宏,等. 人工神经网络在岩体初始应力场反演中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 943 - 946. [YI D, XU M Y, CHEN S H, et al. Application of artificial neural network to back analysis of initial stress field of rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 943 - 946. (in Chinese)]

[7] 徐俊帅,徐金明,涂齐亮. 基于地应力和岩体强度的岩爆预判[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 52 - 58. [XU J S, XU J M, TU Q L. Prediction of rock burst based on field geostress and rock mass strength[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 52 - 58. (in Chinese)]

[8] 黄祥嘉,李相慧. 变质岩区深埋长大隧道初始地应力场反演研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 106 - 110. [HUANG X J, LI X H. Back analysis of *in situ* stress field of metamorphic rock in deep buried large tunnel[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(3): 106 - 110. (in Chinese)]

[9] 邢军,王建斌,蒋蕾,等. 圭嘎拉高速公路隧道地应力特征及岩爆预测[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 170 - 178. [XING J, WANG J B, JIANG L, et al. *In-situ* stress characteristics and rock burst prediction of the Guigala Expressway tunnel[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 170 - 178. (in Chinese)]

- [10] 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)]
- [11] 朱光仪, 郭小红, 陈卫忠, 等. 雪峰山公路隧道地应力场反演及工程应用[J]. 中南公路工程, 2006, 31(1): 71–75. [ZHU G Y, GUO X H, CHEN W Z, et al. Inversion of *in situ* stress and its application in Xuefengshan roadway tunnel[J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2006, 31(1): 71–75. (in Chinese)]
- [12] 徐正, 李天斌, 孟陆波, 等. 鹧鸪山隧道地应力反演模型与三维地应力[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(2): 243–250. [XU Z, LI T B, MENG L B, et al. Zhegu Mountain tunnel ground stress inversion model and three dimensional ground stress [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(2): 243–250. (in Chinese)]

封面照片说明

湖北省宜昌市秭归县泄滩乡卡门子湾滑坡

卡门子湾滑坡位于湖北省宜昌市秭归县泄滩乡陈家湾村,长江支流泄滩河左侧。地理坐标 E:110°36′50″, N:31°01′27″。滑坡前缘高程约 160 m,后缘高程约 290 m,地形坡度 35°~45°,坡向 315°。滑坡整体纵长约 192 m,横宽约 135 m,面积约 $2.7 \times 10^4 \text{ m}^2$,厚度 10~25 m,总体积约 $5.0 \times 10^5 \text{ m}^3$,主滑方向 350°。该滑坡体物质组成为侏罗系中统沙溪庙组紫红色砂岩、粉砂岩与粉砂质泥岩不等厚互层,滑带为粉砂质泥岩,岩层产状 30°~40°∠35°~40°,为典型的顺向岩质滑坡。2019 年 11 月 29 日该滑坡出现初始变形,12 月 5 日变形加剧,12 月 10 日 16 时 50 分左右,滑坡中下部出现整体滑移,部分滑体滑入泄滩河,造成 005 乡道 135 m、集镇供水管道及 380 伏高压线中断,6 ha 柑橘园损毁,13 个村 1.23 万人出行受阻,直接经济损失约 580 万元。由于滑坡变形发现及时、群测群防措施有效,临滑处置果断,成功避免了人员伤亡。

由于该滑坡位于三峡库区,且仍存在继续滑动的风险,中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心)联合湖北省地质环境总站等单位,于 2019 年 12 月下旬选择该滑坡作为普适型设备监测预警试验点,安装了一套滑坡监测预警仪 21 个测点,实时有效监测雨量、裂缝、倾角加速度、地表位移、含水率等 5 类测项。2020 年 4 月 17 日以来滑坡区出现降雨,大到暴雨,至 4 月 20 日中午累计雨量达 66 mm,设备及时捕捉到裂缝加大、倾角突变等明显的滑坡错动变形信息。4 月 20 日下午,根据实时监测反馈信息,中国地质环境监测院紧急与湖北省自然资源厅、湖北省地质环境总站、宜昌市自然资源局和秭归县自然资源局等单位召开“国家-省-市-县”四级联合会商视频会,综合研判滑坡的变形现状和发展趋势,确定预警等级为黄色。当地主管部门按照会商意见立即采取应急措施,有效保障了滑坡影响区人民群众生命财产和航道安全,初步显现了普适型设备的监测成效和预警作用。今后研究团队将致力提高普适型设备的集成度、可靠性和性价比,着力提升监测预警工作的网络化、数字化和智能化水平,努力打造地质灾害监测预警“新基建”,为解答“隐患什么时候发生”难题提供技术支撑。

自然资源部地质灾害技术指导中心 齐干 张鸣之 马娟 供稿
湖北省地质环境总站 湖北省地质局水文地质工程地质大队 供图