

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.07.019

毛羽山特长公路软岩隧道初始地应力反演分析

陶文斌^{1,2}, 张志峰¹, 王飞¹, 朱方华^{1,3}, 吴华¹, 侯俊领⁴

(1. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 池州学院 地理与规划学院, 安徽 池州 247000; 4. 攀枝花学院 钒钛学院, 四川 攀枝花 617000)

摘要:针对毛羽山公路隧道工程区地质构造的复杂性,为探明毛羽山公路隧道轴线方向的初始地应力场状态,文章基于现场水压致裂法获得隧道初始地应力实测数据,利用 ANSYS 软件建立毛羽山隧道工程区三维计算模型,计算得到水压致裂法各测点位置的地应力量值,运用多元回归方法对毛羽山公路隧道全长范围内轴线方向上的初始应力分布规律开展反演分析。实测地应力数据表明毛羽山隧道工程区构造应力在地应力分布中占主导地位,最大水平主应力以西北—东南向挤压为主。基于数值模拟展开的多元线性回归分析,获得的初始地应力回归计算值与实测值较为接近,误差基本控制在 20% 以内,验证了反演回归计算结果的合理性。通过毛羽山地应力反演回归计算表明,毛羽山隧道工程区作用应力从大到小依次为最大水平主应力 σ_H 、垂直应力 σ_v 、最小水平主应力 σ_h ,且最大水平主应力与最小水平主应力的量值差距较大,隧道平面内存在较大的剪应力,易导致围岩产生过大变形或破坏。该研究成果对毛羽山公路隧道支护结构的设计、围岩稳定性的评判及施工加固方案的选择具有重要的指导意义和应用价值。

关键词:软岩隧道;初始地应力;水压致裂法;多元回归分析

中图分类号:U451.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)07-0983-07

Inverse analysis of initial ground stress field in Maoyushan extra-long soft rock highway tunnel

TAO Wenbin^{1,2}, ZHANG Zhifeng¹, WANG Fei¹, ZHU Fanghua^{1,3}, WU Hua¹, HOU Junling⁴

(1. Anhui Transport Consulting and Design Institute Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. School of Geography and Planning, Chizhou University, Chizhou 247000, China; 4. School of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China)

Abstract: In view of the complex geological structure in the Maoyushan highway tunnel project area, it is necessary to ascertain the initial ground stress field state along the axis direction of the Maoyushan highway tunnel. In this paper, the *in situ* hydraulic fracturing method is adopted to obtain the measured data of initial ground stress in the tunnel project area, and then the ANSYS software is used to establish the three-dimensional calculation model of the Maoyushan tunnel project area, the ground stress values at each measuring point of the hydraulic fracturing method are calculated, and finally the multiple regression method is used to carry out the inverse analysis of the initial stress distribution law in the axial direction within the full length of the Maoyushan highway tunnel. The measured ground stress data show that the tectonic stress in the Maoyushan tunnel project area is dominant in the distribution of ground stress, and the maximum horizontal principal stress is dominated by northwest-southeast compression. The multiple linear regression analysis is carried out by numerical simulation.

收稿日期:2023-03-16; **修回日期:**2023-03-31

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2208085ME118);深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室开放基金资助项目(SKLMRDPC21KF13)

作者简介:陶文斌(1991—),男,安徽淮南人,博士,安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司工程师;

朱方华(1992—),男,安徽安庆人,博士,安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司工程师,通信作者, E-mail: zhufanghua2016@mail.hfut.edu.cn.

The initial ground stress regression calculation value obtained is relatively close to the measured value, and the error is basically controlled within 20%, which verifies the rationality of the inverse regression calculation result. The inverse regression calculation shows that the stresses acting over the Maoyushan tunnel project area in descending order are: the maximum horizontal principal stress σ_H , vertical stress σ_v , and minimum horizontal principal stress σ_h , and the magnitude difference between the maximum horizontal principal stress and the minimum horizontal principal stress is large. There is a large shear stress in the tunnel plane, which is likely to cause excessive deformation or damage to the surrounding rock. The research results have important guiding significance and application value for the design of supporting structure, evaluation of surrounding rock stability and selection of construction reinforcement scheme of Maoyushan highway tunnel.

Key words: soft rock tunnel; initial ground stress; hydraulic fracturing method; multiple regression analysis

近年来,随着我国交通基础设施建设的蓬勃发展,铁路、公路建设逐渐向西部地质复杂地区延伸,由于西部高原及其边缘地区受青藏板块、扬子板块、华北板块和塔里木板块的挤压作用,广泛存在高地应力、软弱围岩等特殊不良地质条件,大量工程实践表明,高地应力场软岩隧道在施工过程中经常遇到衬砌裂损、拱架扭曲、断面缩小、掌子面坍塌等围岩大变形问题,严重影响隧道施工的安全和进度,增加了施工成本^[1],给隧道工程的设计和施工带来了新挑战。

近年来,国内相关学者针对高地应力条件下开挖的地下工程做了大量研究和试验工作,取得了较为丰富的研究成果^[2-9]。文献[10]利用地应力椭圆回归分析的声发射 Kaiser 效应地应力测量方法对长山岩盐矿区的地应力进行实测工作,并联合多元非线性拟合方法,获取工程区深部岩盐矿初始地应力场的大小和方向;文献[11]根据宜兴铜官山抽水蓄能电站地下厂房区的地应力实测资料,运用位移函数法理论和 ANSYS 有限元分析软件,获取整个区域的初始地应力场。

基于地应力实测资料,文献[12]运用地层剥蚀原理和径向基函数神经网络相结合的地应力反演方法获得拉林铁路桑日至加查段地应力场,结果表明各测点处地应力计算值与实测值高度吻合,证明该方法计算地应力场的合理可靠。基于双江口水电站地下厂房区实测地应力资料,文献[13]采用多元回归法对厂区三维初始地应力进行多元回归反演,获得厂区初始地应力函数与应力分布变化规律;文献[14]以现场水压致裂法测得的初始地应力资料为研究基础,获得各测点位置的地应力大小,并结合多元回归分析探明了蓝家岩隧道轴线方向上的初始地应力场分布规律。

借助地应力测量结果,文献[15]采用正交数值分析和遗传规划算法,建立工程地质体的地应力场反演优化模型,有效反演了金川矿区工程地质体的地应力场。综上所述,学者们一般是以工程区实测地应力资料为基础^[16],通过分析单点的地应力数据描述整个工程区的初始地应力场。

毛羽山公路隧道的工程地质条件特点鲜明,其地应力场处于高地应力,且岩石强度弱、结构面发育。周边已完成施工的兰渝毛羽山铁路隧道中,围岩在施工开挖过程中表现出了自身独特的变形破坏特征,变形量大、变形持续时间长。本次毛羽山公路隧道是研究高应力软岩条件下隧道掘进围岩稳定问题的一个不可多得的工程样本。

因此,本文基于毛羽山公路软岩隧道现场水压致裂法测得的初始地应力数据,综合运用多元回归方法与数值模拟技术等研究手段,对隧道全长范围内轴线方向上的初始应力分布规律开展反演分析。研究成果对毛羽山公路隧道支护结构的设计、围岩稳定性的评判及施工加固方案的选择具有重要的指导意义和应用价值。

1 毛羽山工程区地质背景

毛羽山公路隧道是西和至宕昌高速公路控制性工程,根据地质资料,毛羽山公路隧道位于甘肃省陇南市宕昌县境内,隧道洞身穿越毛羽山,连通临江乡与南阳镇。隧址区断层分布如图 1 所示。隧道工程区位于临潭—宕昌断裂的东段,发育多条北西—南东向逆断层。隧道工程区主要发育 2 条主断裂,5 条伴生断裂。其中:第 1 组主断裂为毛羽沟—寺顶山断裂(F5)及其伴生断裂 F5-1,为倾向北东的逆冲断层;第 2 组为 F6 及其伴生断裂 F6-1、F6-2、F6-3、F6-4,为倾向南西的逆冲

断裂组。2 组断裂使隧道中部形成断陷盆地,沉积了厚层的古近系地层。

隧道工程区的大地构造属于青藏歹字形构造体系,受构造作用影响,地质构造复杂。根据现场调查成果,隧道工程区范围内受区域地质构造作用影响,发育有断层、褶皱、岩层角度不整合接触带及节理密集带,地质构造发育。毛羽山隧道设

计为左、右行分离式的双洞特长隧道,右线长度为 6 412 m,最大埋深 628 m;左线长度为 6 456 m,最大埋深 632 m。毛羽山隧道纵面采用单向下坡方案,纵坡坡度-2.0%,埋深大于 300 m 的段落有 4 km,占全长 67%。该隧道穿越页岩、板岩、千枚岩等软岩地层,隧道围岩不仅强度较低,还受地质构造作用造成的高地应力影响。

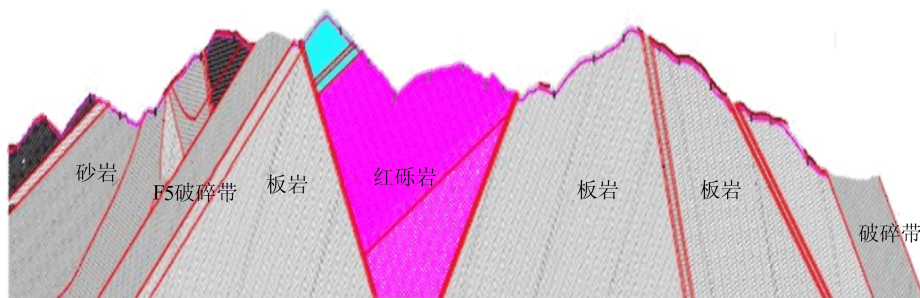


图 1 隧址区断层分布

2 毛羽山公路隧道初始地应力场测试

为探明毛羽山隧址区初始地应力分布特征,本文采用 HF-2032 型水压致裂法地应力测试系统,在隧道沿线分别布设 ZK-MYSSD-2 和 ZK-MYSSD-3 这 2 个钻孔开展地应力测试工作。根据钻孔岩芯资料和地质条件,对钻孔 ZK-MYSSD-2 和 ZK-MYSSD-3 分别逐段逐次开展 6 段地应力测量工作。具体钻孔 ZK-MYSSD-2 测段位置依次为:197.0~197.5 m、206.0~206.5 m、224.0~224.5 m、242.0~242.5 m、288.5~289.0 m、303.5~304.0 m;钻孔 ZK-MYSSD-3 测段位置依次为:241.7~242.2 m、313.5~314.0 m、361.2~361.7 m、390.2~390.7 m、421.7~422.2 m、450.2~450.7 m。两钻孔水压致裂法测试 6 个测段的应力结果如图 2 所示。

由图 2 可知,最大水平主应力 σ_H 、垂直应力 σ_v 、最小水平主应力 σ_h 等应力数值随测孔深度增加基本呈增大的趋势。从图 2a 可以看出,ZK-MYSSD-2 钻孔地应力从大到小依次为 σ_H 、 σ_h 、 σ_v ,其最大水平主应力与垂直应力呈线性分布, σ_H 随测孔深度增大由 7.67 MPa 线性增加至 9.36 MPa; σ_h 测点数据在类似条带状的平行线内变化,数值分布在 5.87~8.08 MPa 范围内,最大水平主应力与垂直应力的平均比值为 1.32,最小水平主应力与垂直应力的平均比值 1.16。从图 2b 可以看出,ZK-MYSSD-3 钻孔应力结果变化趋势与 ZK-MYSSD-2 钻孔应力结果整体相似,但地应力从大到小为 σ_H 、

σ_v 、 σ_h ,ZK-MYSSD-3 的 σ_H 为 8.82~13.30 MPa, σ_h 为 6.42~10.70 MPa,最大水平主应力与垂直应力的平均比值为 1.20,最小水平主应力与垂直应力的平均比值 0.94。

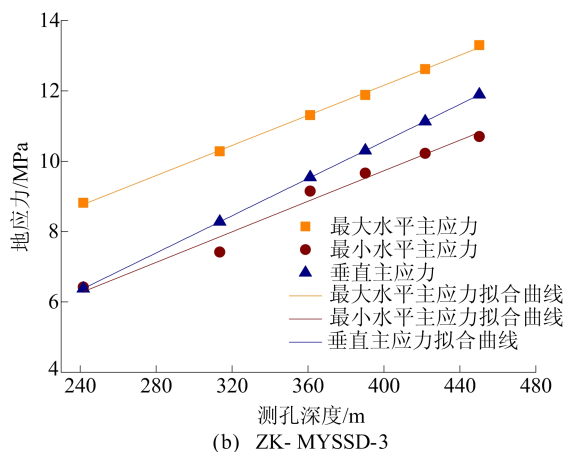
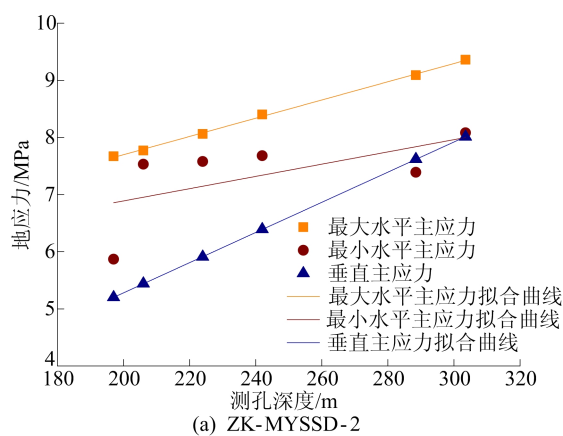


图 2 水压致裂法地应力实测结果

ZK-MYSSD-2 和 ZK-MYSSD-3 钻孔实测的最大水平主应力方向分别为 N82°E 和 N79°E, 以西北—东南向挤压为主, 与现今构造运动的应力场方向相一致。ZK-MYSSD-3 钻孔与 ZK-MYSSD-2 钻孔得到的地应力结果趋势不同, 反映了较强的现今水平构造应力作用特点, 测点受地形构造影响较大, 与地应力整体分布规律并不矛盾。

3 隧道初始地应力场反演回归分析

3.1 三维数值模型建立

依据勘察实际现场, 利用有限元软件 ANSYS 建立毛羽山公路隧道三维数值模型。模型计算范围的确定主要考虑^[13]: ① 略微增大工程影响区的计算范围, 以减小边界效应的影响; ② 宜以山脊线与河谷线作为边界, 并假设垂直于边界线的方向上不会产生位移。

基于隧址区的地形地貌、地质条件、线路走向以及水压致裂法实测点分布情况, 本文确定了毛羽山隧道数值模型计算区域: 沿 x 轴和 y 轴的计算范围为 7 000 m \times 100 m, 沿 z 轴从隧道轴线设计高程以下 100 m 并延伸至地表面。其中: x 轴与隧道轴线平行; y 轴与隧道轴线垂直, z 轴竖直向上。该计算区域囊括了毛羽山公路隧道的开挖全长和对隧道影响较大的断层构造。在本次数值模拟计算中, 选取 ANSYS 三维实体单元 Solid45 模拟地层。将垂直隧道轴线的地层作为地层分界面, 采用六面体网格划分, 其三维数值模型如图 3 所示。根据地勘资料及相关规范要求标准, 毛羽山隧道岩体物理力学性质参数见表 1 所列。

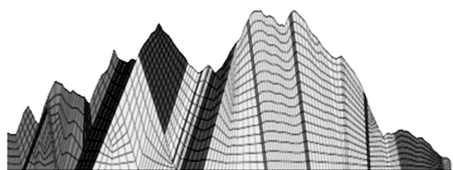


图 3 毛羽山隧址区三维数值模型

表 1 岩体物理力学性质参数

序号	围岩类别	弹性模量/ GPa	密度/ (kg/m ³)	泊松比
1	D2/2Xh/1 砂岩	4.0	2.72	0.32
2	D2/2Xh/1 板岩	3.5	2.71	0.33
3	F5 破碎带	0.8	2.25	0.45
4	Tb 板岩	3.5	2.71	0.34
5	E 青灰色砾岩	4.1	2.45	0.32
6	E 红褐色砂泥岩互层	1.0	2.35	0.40
7	E 红褐色砾岩	4.1	2.45	0.32
8	F6-2 破碎带	0.8	2.25	0.45
9	F6-1 破碎带	0.8	2.25	0.45
10	F6 破碎带	0.8	2.25	0.45

3.2 初始地应力场影响因素和边界条件

根据现场水压致裂法测试结果, 并结合地质力学分析可知, 初始地应力场主要由自重应力场和构造应力场组成, 模拟岩层自重和构造力作用的基本因素^[14,17]通常分为自重应力状态、东西向水平均匀挤压构造运动、南北向水平均匀挤压构造运动、水平面内的均匀剪切变形构造运动、东西向垂直平面内的竖向均匀剪切变形构造运动、南北向垂直平面内的竖向均匀剪切变形构造运动。由于毛羽山工程区水压致裂法实测地应力成果中没有垂直平面内的剪切应力, 进而可确定影响毛羽山隧道初始地应力场形成的主要因素, 包括自重应力状态、沿 x 轴方向的挤压构造运动、沿 y 轴方向的挤压构造运动和水平面内的剪切构造运动 4 种基本因素, 如图 4 所示, 以此作为模拟岩层自重和构造力作用的基本因素。

在数值计算过程中, 分别施加边界条件: ① 自重应力状态是根据围岩的实测密度, 在模型侧面和底面施加位移约束, 在模型中施加自重应力场(图 4a); ② 沿 x 轴方向的挤压构造运动是在垂直于 x 轴侧面施加应力边界条件, 其余侧面和底面施加位移约束(图 4b); ③ 沿 y 轴方向的挤压构造运动是在垂直于 y 轴施加应力边界条件, 其余侧面和底面施加位移约束(图 4c); ④ 水平面内的剪切构造运动是在模型侧面施加位移边界, 模型底面施加位移约束(图 4d)。

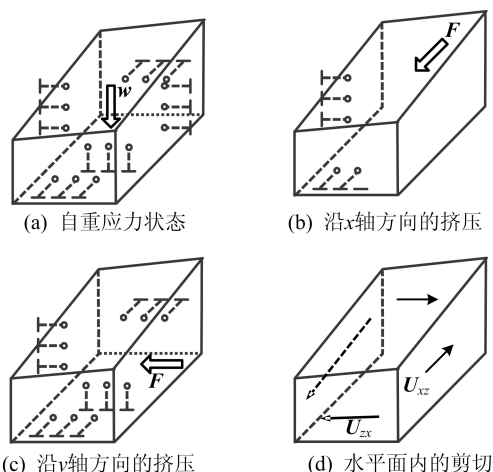


图 4 模拟岩层自重和构造力作用的因素及边界条件

通过对工程区自重应力状态、沿 x 轴方向的挤压构造运动状态、沿 y 轴方向的挤压构造运动状态和水平面内的剪切构造运动状态进行运算, 得到应力云图如图 5 所示。

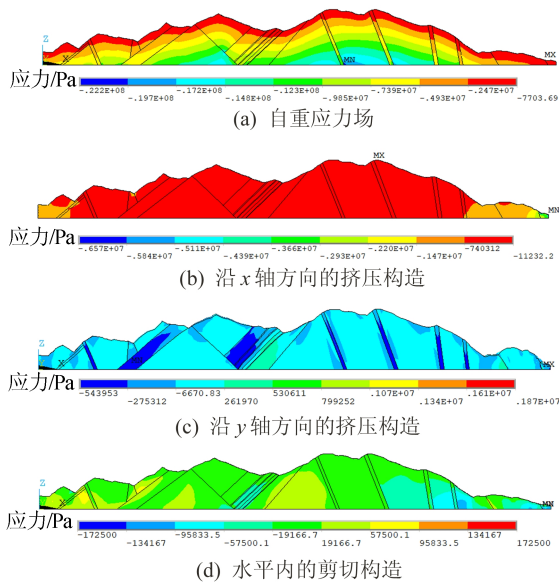


图 5 初试地应力场应力分量云图

3.3 初始地应力场反演回归分析原理

基于多元线性回归分析方法,将初始地应力的回归计算值 $\hat{\sigma}_k$ 定义为因变量,数值模拟计算值 σ_k^i 定义为自变量,依据最小二乘法原理令残差平方和取最小值,以求得多元回归方程中各待定因素系数的最优解,方程式为:

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

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk} \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^2 \sigma_{jk} \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^n \sigma_{jk} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: k 为观测点序号; m 为观测点个数; σ_{jk} 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; $\hat{\sigma}_k$ 和 σ_k^i 分别为相应应力分量的

回归计算值和数值计算值的单列矩阵; n 为工况数; σ_{jk}^i 为 n 工况下第 k 观测点 j 应力分量计算值。

通过求解式(2),可以得到 n 个待定回归系数 $L = [L_1 \ L_2 \ \dots \ L_n]^T$,然后即可根据式(1)获得计算区域内任意一点的回归初始地应力。

3.4 初始地应力场反演回归结果分析

基于水压致裂法测试结果,综合运用数值模拟技术和多元线性回归分析方法,得到了与影响毛羽山公路隧道初始地应力场的 4 种基本因素相对应的回归系数 $L_1=0.776, L_2=-11.638, L_3=1.367, L_4=-48.5915$,并且得到一个自由项 $e=-0.5221$ 。由此,得到毛羽山隧道初始地应力场的回归方程为:

$$\hat{\sigma} = 0.776\sigma_z - 11.638\sigma_{g1} + 1.367\sigma_{g2} - 48.5915\sigma_{g3} - 0.5221 \quad (3)$$

其中: $\hat{\sigma}$ 为初始地应力场的回归计算值; σ_z 为岩体自重引起的应力场回归计算值; σ_{g1} 为沿 x 轴方向的水平均匀挤压构造运动引起的应力场回归计算值; σ_{g2} 为沿 z 轴方向的水平均匀挤压构造运动引起的应力场回归计算值; σ_{g3} 为水平面内的均匀剪切变形构造运动引起的应力场回归计算值。根据式(3),可获得各钻孔测点处地应力的回归计算值,并将其转化成主应力值。ZK-MYSSD-2 和 ZK-MYSSD-3 钻孔 100、200、300 m 的测点位置如图 6 所示。

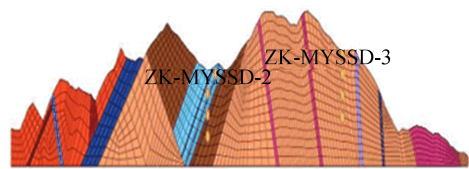


图 6 毛羽山工程区地应力对照点

相应测点位置的地应力实测值与反演回归计算值的结果对比见表 2 所列。

表 2 地应力反演与实测值对比

钻孔	垂直主应力			第三主应力			第一主应力		
	实测值/MPa	模拟值/MPa	误差/%	实测值/MPa	模拟值/MPa	误差/%	实测值/MPa	模拟值/MPa	误差/%
ZK-MYSSD-2	2.64	3.217 9	21.89	5.76	4.924 7	-14.50	6.02	6.484 9	7.72
	5.28	6.340 2	20.08	6.76	5.942 2	-12.10	7.52	9.315 0	23.87
	7.92	8.260 1	4.29	7.76	7.416 6	-4.42	9.02	10.341 4	14.65
ZK-MYSSD-3	2.71	3.149 2	19.29	3.14	2.707 4	-13.78	5.70	6.695 0	17.46
	5.42	5.121 9	-2.99	5.24	4.357 1	-16.85	7.80	9.551 8	22.46
	8.13	7.033 9	-11.19	7.34	5.973 9	-18.61	9.90	10.875 0	9.85

从表 2 可以看出,初始地应力的回归计算值

与实测值的结果较为接近,误差基本控制在 20%

以内,且两者的变化趋势与总体规律相同,由此说明通过三维反演回归得到的毛羽山公路隧道工程区的应力场是合理、可信的^[14]。

4 毛羽山公路隧道轴线地应力分布特征

将毛羽山公路隧道轴线处地应力的回归计算值代入式(3),可得到毛羽山公路隧道轴线处的初始地应力场,进一步可求得相应主应力值 σ_H 、 σ_h 、 σ_v 。毛羽山公路隧道沿线地应力分布如图 7 所示。

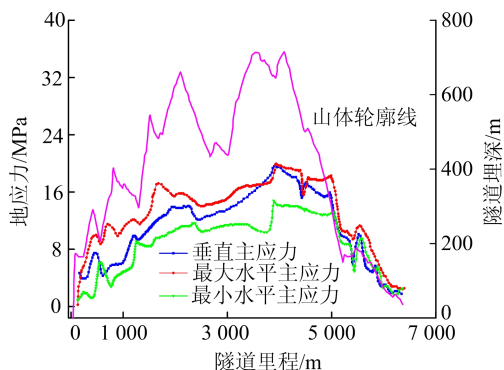


图 7 毛羽山公路隧道沿线地应力分布

从图 7 可以看出,随着埋深的增加,隧道轴线处的最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力均呈现出抛物线形变化趋势;最大水平主应力 σ_H 随埋深变化增加较快,而埋深变化对最小水平主应力 σ_h 的影响相对较小,垂直主应力值 σ_v 约等于或略大于单位面积上覆岩层的重量。毛羽山隧道轴线处主应力的量值从大到小依次为 σ_H 、 σ_v 、 σ_h ,但其规律与 ZK-MYSSD-2 钻孔结果不同。ZK-MYSSD-2 钻孔结果是单点测试结果,也反映出改点地形构造影响较大,导致该处最小水平主应力高于垂直应力,该点只是特殊地质状况下的畸变结果。

同时由地应力场分析可知,毛羽山公路隧道工程区的初始应力场是以水平构造应力为主导的。其最大水平主应力与最小水平主应力的差距较大,根据摩尔-库伦强度理论,两主应力的差值就是剪应力,说明在隧道平面内存在较大的剪应力,而围岩的破坏通常是由于剪切破坏导致的,必须引起足够的重视。此外,毛羽山公路隧道轴线处的主应力在 F5 断层及影响带有明显的扰动,这是由于受断层挤压剪切影响,该区域地应力表现为应力变化剧烈。

初始地应力场是影响隧道围岩稳定状态的最主要因素之一,在进行高地应力地区的隧道纵轴线选择时,一般以地应力因素为主,这与在中低应

力地区主要考虑岩体结构条件有所不同。但对于超大埋深特长公路隧道而言,无法单纯依靠现场测试的手段获得隧道轴线方向上的初始地应力场分布规律,最常用的方法是在工程区有限的实测地应力数据的基础上,结合数学理论和数值计算,通过反演回归得到工程区的初始地应力场。由于毛羽山公路隧道正在设计阶段,现场获得的地应力数据偏少,在今后工作中应加强隧道轴线上地应力的实测工作,以修正反演回归结果。毛羽山公路隧道纵轴线走向应满足工程总体布置的要求和有利于隧道围岩稳定,一般应兼顾岩体优势结构面和地应力。若岩体破碎或结构面发育,可在采取预注浆固结、预打穿过岩体保护层的超前锚杆等措施后,再进行控制掘进。

5 结 论

1) 毛羽山工程区受构造作用影响,褶皱断裂发育,地质构造十分复杂。工程区范围内区域地质构造作用影响,发育有断层、褶皱、岩层角度不整合接触带及节理密集带,地质构造发育。

2) 通过地应力测试发现,毛羽山工程区构造应力在地应力分布中占主导地位,其地应力数值随深度增加基本呈增大的趋势,最大水平主应力场以西北—东南向挤压为主,最大水平主应力 σ_H 大于最小水平主应力 σ_h 和垂直主应力 σ_v ,但测点受地形构造影响较大,最小水平主应力分布与垂直应力分布存在差别,与地应力整体分布规律并不矛盾。

3) 根据地应力实测展开地应力反演分析,主应力量值从大到小依次为 σ_H 、 σ_v 、 σ_h ,隧道轴线位置最大水平主应力量值大部分在 16~20 MPa,最大水平主应力与最小水平主应力的量值差距较大,隧道平面内存在较大的剪应力,而围岩的破坏通常是由剪切破坏导致的,必须引起足够的重视。

4) 探明工程区初始地应力场的分布规律可为隧道的设计与施工提供有力支撑。由于毛羽山公路隧道正在设计阶段,在今后工作中应加强隧道轴线方向上地应力的实测工作,以修正地应力反演回归结果,优化掘进支护方案。

[参 考 文 献]

- [1] 钱海洋. 仰拱开挖对软岩隧道围岩的稳定性影响[D]. 成都:西南石油大学,2016.

[参 考 文 献]

- [1] 戴晓虎. 污泥处理处置的瓶颈与技术分析[C]//第八届全国市政污泥处理与处置高级研讨会. 北京:[出版者不详], 2017:1-12.
- [2] 曹业始,郑兴灿,刘智晓,等. 中国城市污水处理的瓶颈、缘由及可能的解决方案[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(11):1292-1302.
- [3] 范茏,徐农,施汉昌,等. 计算流体力学在污水处理中的应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:100-120.
- [4] 许晓毅,葛丹丹,于兰,等. 基于回归正交设计的沉砂池细砂分离特性分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(11):63-69.
- [5] 邵超,叶勇,汪家权,等. 新型旋流沉砂池砂粒去除效果的数值模拟[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(5):373-379.
- [6] 周士雄. 基于 Fluent 对旋流沉砂池的数值模拟[J]. 水科学与工程技术, 2018(5):60-63.
- [7] 王旭博,王延涛. 新型导流板旋流沉砂池数值模拟及水处理效能研究[J]. 工业水处理, 2020, 40(5):106-111.
- [8] 许畅,罗凡,周锐,等. 平流沉淀池导流挡板优化设计[J]. 给水排水, 2021, 47(增刊 1):18-22.
- [9] 汪光焘. 城市供水行业 2000 年技术进步发展规划[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1993:20-32.
- [10] 黄延林,李玉仙,何文杰. 斜管沉淀池结构参数优化的理论分析[J]. 给水排水, 2007, 33(4):20-26.
- [11] ANSYS Inc. ANSYS Fluent user's guide[EB/OL]. [2023-03-10]. <http://www.ansys.com>.
- [12] PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. New York: McGraw Hill, 1980:146-151.
- [13] 肖柏青,张法星,戎贵文. 气泡尺寸对曝气池内气液两相流数值模拟的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11):2006-2010.
- [14] 陈虹,李婷,林春敬,等. U 型斜管在给水厂沉淀池改造中的应用及探讨[J]. 城镇供水, 2020(2):27-32.
- [15] 智凯敏. 斜板沉降器的分析研究[J]. 石油化工设计, 2017, 34(1):17-19.
- [16] 王喜良,黄云平,周兴龙,等. 斜板沉降固液分离理论及设备进展[J]. 金属矿山, 1999(2):21-24.
- [17] 龙干,颜振邦,赵华,等. 旋流沉砂池在上海白龙港污水处理厂的应用[J]. 中国市政工程, 2001(增刊 1):26-31.
- [18] 何强,王琦,胡澄,等. 山地城市污水特细砂除砂系统目标粒径确定[J]. 环境工程学报, 2014, 8(7):2653-2657.
- [19] HUNTER G, BARBADILLO C, BLACKD P, et al. The testing of grit systems: understanding fact and fiction [C]//Annual Conference Technical Program. Raleigh: NC AWWA-WEA, 2007:124-126.
- [20] 石艳玲,濮晨熹. 曝气沉砂池的运行效果评估[J]. 给水排水, 2015, 41(增刊 1):134-138.
- [21] 王水兵,高俊贤,王燕,等. 某污水处理厂旋流沉砂池结构改造及运行效果分析[J]. 环境工程, 2020, 38(7):116-121.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 988 页)

- [2] 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.
- [3] 康红普,徐刚,王彪谋,等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40a 及展望[J]. 煤矿开采, 2019, 1(2):1-33.
- [4] QIU D H, LI S C, ZHANG L W, et al. Rockburst prediction based on tunnel geological exploration and ground stress field inverse analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7):2034-2040.
- [5] 周子寒,何川,蒙伟,等. 花岗质侵入岩地层隧址区的初始地应力场反演分析[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(2):322-330.
- [6] 陶文斌,陶杰,侯俊领,等. 深埋巷道地应力特征及优化支护设计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(4):28-37.
- [7] 王金安,李飞. 复杂地应力场反演优化算法及研究新进展[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2):189-205.
- [8] 孙礼健,朱元清. 初始地应力场分析方法的研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2008, 29(3):14-21.
- [9] 裴书锋,赵金帅,于怀昌,等. 考虑洞室岩体应力型破坏特征的局部地应力反演方法及应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(12):4093-4104.
- [10] 唐建新,王宏图,李晓红,等. 深部岩盐矿地应力的确定及特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23):3954-3958.
- [11] 张志峰. 位移函数法回归初始地应力与围岩稳定分析[D]. 南京:河海大学, 2004.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 杨志强,高谦,翟淑花,等. 复杂工程地质体地应力场智能反演[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(4):154-160.
- [16] HAIMSON B C, CORNET F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7):1011-1020.

(责任编辑 吴 亮)