

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230229

抽水蓄能电站大型地下厂房区初始应力场反演

郑炜烽¹, 王乐华¹, 罗 笙², 韩晓玉², 张新辉², 董志宏²

(1. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 地应力场特征及分布规律对地下厂房围岩稳定及工程设计具有重要影响。根据某抽水蓄能电站地下厂房地表深钻孔及工程地质条件, 建立三维数值分析模型, 通过多元线性回归分析, 实现了初始地应力场的反演重构。研究表明, 深孔实测最大水平主应力为 6.7~17.6 MPa; 反演模型的量值大小和方向与实测值吻合较好, 地下厂房区水平应力为主导, 最大水平主应力为 16.2~17.4 MPa, 应力水平属于中应力水平; 厂房区域应力场最大主应力方位角主厂房轴线夹角小于 30°, 对于厂房围岩稳定有利。应力分布及方位角符合设计要求。研究成果可为类似工程提供参考。

关键词: 初始地应力场; 深孔地应力测试; 多元线性回归; 主厂房轴线

中图分类号: TV743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)11-0143-05

1 引言

地应力分布是影响地下厂房围岩稳定及工程设计的重要因素。初始地应力指在自然状态下岩体所赋存的应力, 对于隧洞及一些地下工程来说, 了解应力场的分布特征对于工程设计与施工至关重要^[1-2]。了解区域地应力场最直接的方法是实地测量, 但由于场地和成本问题, 大规模现场测量很困难^[3]。由于地质环境复杂且实测地应力场的局限性, 为保障围岩稳定性计算结果及工程设计与施工的顺利开展, 需参考地应力实测数据, 结合工程背景资料, 选择高效分析方法, 来反演和重建初始地应力场, 以获得更准确、适应性更强的地应力场。目前, 常用的应力场反演分析方法有多元线性回归法、神经网络法、遗传算法等^[4-9]。本文依托某抽水蓄能电站地下厂房区域的地质资料和深孔地应力实测成果, 建立三维数值分析模型, 选取目前使用较普遍、计算量小、精度较高的多元线性回归分析法, 研究了地下厂房区域的初始地应力场特征及分布规律, 以为工程实践提供参考。

2 地应力场反演方法

根据多元回归法原理, 将地应力回归计算值

作为因变量, 将有限元计算求得的自重应力场和构造应力场相应于实测点的应力计算值作为自变量, 则回归方程为:

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

式中, $\hat{\sigma}_k$ 为第 k 观测点的回归计算值; n 为工况数; 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; k 为观测点序号。

若有 m 个观测点, 则最小二乘法的残差平方和 $S_{残}$ 为:

$$S_{残} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^* - \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jk}^i)^2 \quad (2)$$

式中, σ_{jk}^* 为 k 观测点 j 应力分量的观测值; σ_{jk}^i 为 i 工况下 k 观测点 j 应力分量的有限元计算值。

根据最小二乘法原理, 使得 $S_{残}$ 为最小值的方程为:

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^1)^2 & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk}^2 & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk}^n \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^2 \sigma_{jk}^1 & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^2)^2 & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^2 \sigma_{jk}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^n \sigma_{jk}^1 & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^n)^2 & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^n)^2 \end{bmatrix} \cdot$$

收稿日期: 2023-02-21, 修回日期: 2023-03-25

基金项目: 云南省重大科技专项计划(202102AF080001, 202002AF080003); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2021462/YT, CKSF2023308/YT)

作者简介: 郑炜烽(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程, E-mail: 792844821@qq.com

通讯作者: 董志宏(1978-), 男, 博士、教授级高级工程师, 研究方向为岩体地应力测试与分析, E-mail: 14968857@qq.com

$$\begin{cases} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{cases} = \begin{cases} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^* \sigma_{jk}^1 \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^* \sigma_{jk}^2 \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^* \sigma_{jk}^n \end{cases} \quad (3)$$

通过求解得 n 个待定回归系数 $L = (L_1, L_2, \dots, L_n)^T$, 则计算域内任一点的回归初始应力 σ_{jp} 可由该点各工况有限元计算值迭加得到:

$$\sigma_{jp} = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jp}^i \quad (4)$$

式中, $j=1, 2, \dots, 6$ 对应初始应力六个分量^[10]。

根据深孔实测地应力, 将四种应力场的线性叠加作为计算域内的地应力场, 再将 4 种工况的应力场拟合成最后的计算地应力场。荷载及边界约束条件见图 1。

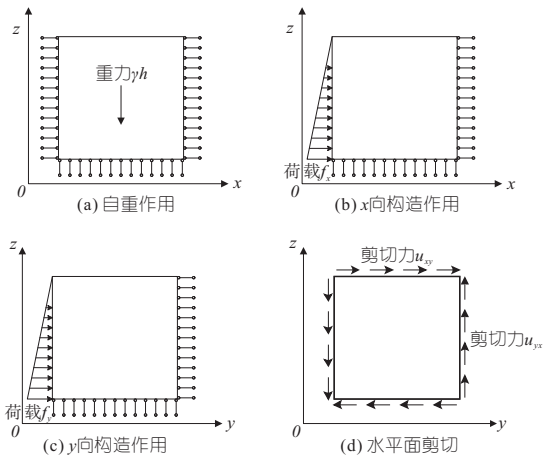


图 1 施加荷载及边界约束条件示意

Fig. 1 Illustration of applied loads and boundary constraints

3 实例应用

3.1 工程概况

某抽水蓄能电站位于某县城西南约 20 km 的一北东向山地区域, 最高处高程为 1 187.0 m, 最低处高程约 150.0 m。电站地下厂房采用中部式布置方式, 地下厂房采用引水钢管 70°斜进厂, 主副厂房洞、主变洞、尾闸洞三大洞室平行布置方式。主厂房洞室开挖尺寸为 165.0 m × 26.0 m (岩锚梁以上跨度为 27.6 m) × 56.2 m (长 × 宽 × 高), 机组安装高程为 161.0 m。主变洞开挖尺寸为 176.0 m × 20.9 m × 24.5 m (长 × 宽 × 高)。

3.2 深孔地应力实测分析

水压致裂法在满足工程测量要求的基础上, 以其测量效率成为应用最广泛的地应力测试方

法, 同时也是国际岩石力学学会推荐的岩体地应力主要测量方法^[10-11]。根据钻孔岩芯情况, 选择若干岩体完整的孔段进行水压致裂地应力测试, 成功获得 14 段测试数据, 在测试过程中由于岩性变化及岩芯的完整性等因素, 会对地应力测试数据产生不同水平影响。为保证地应力反演的精确性, 最大程度还原抽水蓄能大型地下厂房区的地应力场, 选取 6 段影响水平较小的数据进行反演。测试结果见图 2。

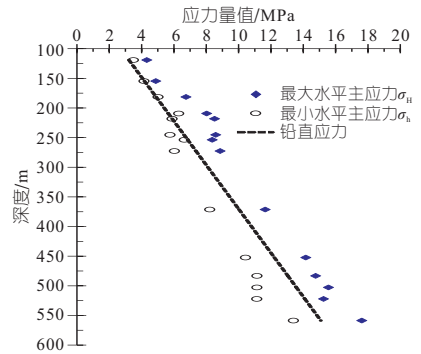


图 2 测点主应力量值与孔深变化关系

Fig. 2 The relationship between the principal force value of the measurement point and the change of hole depth

根据实测数据分析应力量值及其与孔深关系可知, 在孔深 181.4 ~ 558.6 m 范围内, 最大孔深达到 558.6 m。最大水平主应力为 6.7 ~ 17.6 MPa, 最小水平主应力为 5.0 ~ 13.4 MPa, 铅直应力为 4.9 ~ 15.1 MPa。分析最大水平主应力方向侧压系数可得: 测孔最大水平主应力方向的侧压系数范围为 1.1 ~ 1.4, 平均值为 1.12。说明测区地应力场以水平应力为主。

3.3 计算模型及边界条件

地下厂房三维模型采用前处理功能强的 Rhino 软件建模。模型坐标系原点高程为 0 m。主厂房轴线所对应模型 x 、 y 坐标分别为 689.9、1 643.3。计算域共划分为 592 181 个等参单元, 3 364 628 个节点, Flac3D 中模型及网格划分见图 3, 工程区共揭露 4 条断层, 多数宽约 5 m。为计算可行性和避免断层构造影响, 将计算模型的

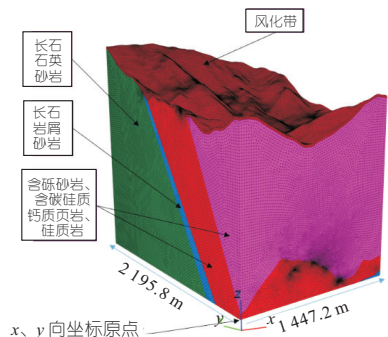


图 3 计算模型图

Fig. 3 Calculation model

基本岩层结构和主要断层进行必要优化。在计算域内模型垂直方向分为 2 层,自上而下依次为风化带及微新鲜岩体层。断层主要考虑 F3、F4、f17、f13 共计 4 条断层,如图 4。各地质体力学参数见表 1。

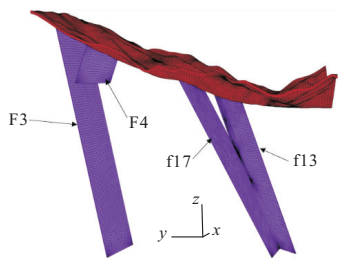


图 4 断层位置图

Fig. 4 Fault location map

表 1 岩体力学参数表

Tab. 1 Table of rock mass mechanics parameters

地层	变形模量/GPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
风化层	2	0.28	2.64
长石石英砂岩	15	0.18	2.74
长石岩屑砂岩	12	0.20	2.70
含砾砂岩、含碳硅质钙质页岩、硅质岩	10	0.21	2.68
断层	1.1	0.30	2.64

岩体地应力主要为岩体受到自重及构造挤压作用产生,因此本构模型采用弹性模型。地应力场形成的四种拟合荷载构造分别为自重力, x 、 y 方向的挤压构造力; xy 方向的剪切构造力,其计算模型工况与边界条件见表 2。表 2 中, $U_x=0$,为 x 向边界法向位移; $U_y=0$ 为 y 向边界法向位移; $U_{底}=0$ 为底部边界法向位移。

表 2 模型边界条件表

Tab. 2 Model boundary criteria

工况	边界条件
自重应力	$U_x=0, U_y=0, U_{底}=0$
x 向挤压应力	$U_x=0, U_y=0, U_{底}=0$; 在 x 向左侧边界节点施加构造挤压力
y 向挤压应力	$U_x=0, U_y=0, U_{底}=0$; 在 y 向左侧边界节点施加构造挤压力
xy 向挤压应力	$U_x=0, U_y=0, U_{底}=0$; 在 x 向左侧边界节点施加剪切应力

将实测地应力数据的主应力量值及方向转化为计算坐标下的六个应力分量 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} , 对各测点位置的计算应力值进行拟合分析,得到各工况回归系数。

4 结果与分析

4.1 多元线性回归系数求解

基于应力测试的地表钻孔 SSZK3(图 5)的水压致裂法地应力实测结果及反演结果,用最小二

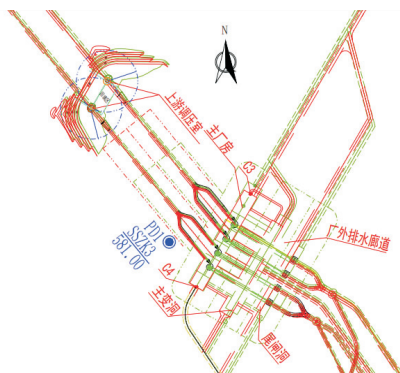


图 5 钻孔位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the drilling location

乘法多元回归分析求得计算模型的边界条件,得到自重应力的回归系数 $L_1=1.02$, x 方向构造应力回归系数 $L_2=1.6$, y 方向构造应力回归系数 $L_3=0.66$,水平面内剪切应力回归系数 $L_4=0.01$ 。

SSZK3 钻孔的最大测试深度为 558.6 m,接近某抽水蓄能电站地下洞室的最大设计埋深范围(约 550~650 m),SSZK3 孔 6 个测段的孔深—应力曲线走向呈现出正常线性关系,各压力参数明确。SSZK3 测点的实测值与回归值见图 6。最大水平主应力绝对差为 0.5~1.2 MPa;最小水平主应力绝对差为 0.4~2.6 MPa;最大水平主应力角度绝对差为 11.8°~15.7°。由于实测段相较于整个模型较密,导致地应力实测点有时可能会处于同一单元,因此通过去除单个异常,回归结果可以更好地反映初始原位应力场的分布,且与测量值的绝对误差较小。

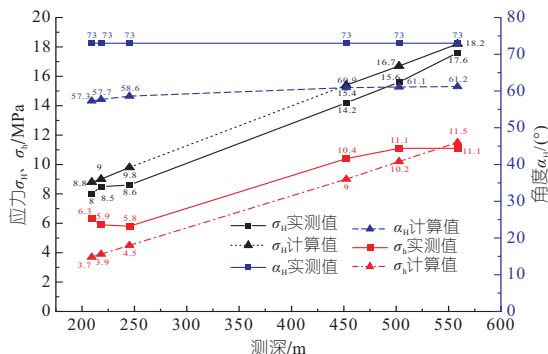


图 6 钻孔实测值与回归计算值对比

Fig. 6 Parameters of seepage property for sandstone

4.2 地应力场重构

通过多元线性回归分析得到模型的初始地应力场等值线云图见图 7。根据各主应力等值线图可看出,整个系统隧洞围岩应力总体上应力分布随地形起伏而变化,但在断层影响区域应力扰动明显。在各沟谷部位出现一定应力集中现象,其程度与沟谷下切深度相关,应力受断层影响突出,由于这些地质构造的物理力学性质指标较弱,应力量值及最大主应力方位有一定变化,伴随距离

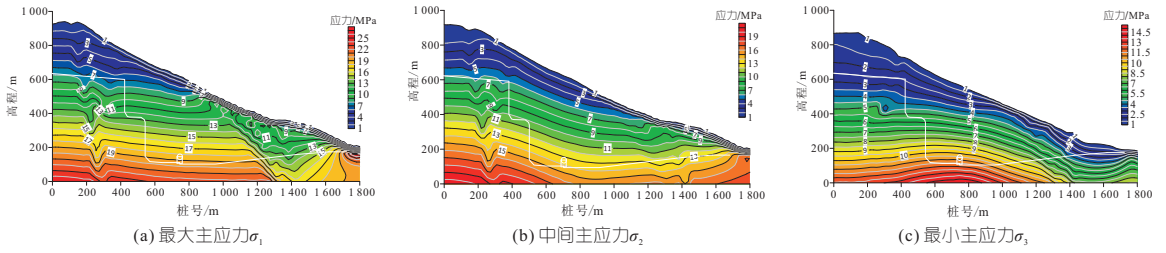


图 7 最大主应力 σ_1 、中间主应力 σ_2 、最小主应力 σ_3 等值线图

Fig. 7 Contour cloud of maximum, intermedia and minimum principal stresses

增加应力量值增大,到一定距离趋于稳定。

4.3 厂房区域地应力分析

通过地应力回归分析,获得了地下厂房区地应力场,可得隧洞沿线的初始地应力场分布。选取图 8 中隧洞点位的反演结果进行插值。根据插值结果,如表 3 所示厂房区域最大主应力为 17.9~18.2 MPa,平均值为 18.1 MPa,方位角为 N58°E~N60°E,近为 NEE 向;中间主应力为 12.2~13.2 MPa,平均值为 12.6 MPa,方位角为 N104°E~N142°E;最小主应力为 9.5~10.2 MPa,平均值为 10.0 MPa,方位角为 N186°E~N203°E。根据厂房区域的埋深,最大主应力量值及其方向在整个厂房区域均较为稳定,且测点的反演结果与实测值误差较小。重构应力场厂房区域的最大主应力方位角为 N58°E~N60°E,与主厂房轴线(N30°E)夹角较小,表明地下厂房的轴向选择较为合理。

域最大水平主应力回归数据分析(图 9)可以看出,整个厂房区域插值最大水平主应力变化范围为 16.2~17.4 MPa,离厂房较远部分位置最高可达 17.6 MPa,如图 9(b)主厂房自拱顶至底板 6 个插值点最大水平主应力随高程呈线性分布,变化范围为 16.2~17.4 MPa。应力水平属于中应力水平,应力方向对于厂房围岩稳定有利。由于厂房区域较大,且埋深不同,最大水平主应力曲线有轻微起伏。

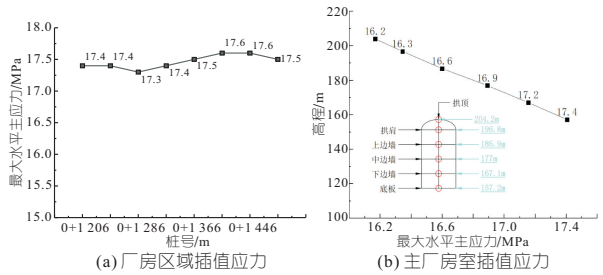


图 9 厂房区域最大水平主应力图

Fig. 9 Map of the maximum horizontal principal stress along the tunnel

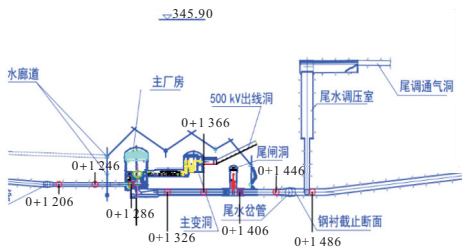


图 8 厂房区域插值点图

Fig. 8 Illustration of plant area interpolation

表 3 厂房区域部分插值点应力表

Tab.3 Stress table of interpolation points in the plant area part

桩号	高程 /m	最大主应力 σ_1			第二主应力 σ_2			最小主应力 σ_3		
		大小 /MPa	倾角 /($^{\circ}$)	方位角 /($^{\circ}$)	大小 /MPa	倾角 /($^{\circ}$)	方位角 /($^{\circ}$)	大小 /MPa	倾角 /($^{\circ}$)	方位角 /($^{\circ}$)
0+1 206	162.0	18.2	22	58	13.2	-59	104	10.3	20	-203
0+1 246	162.0	18.1	21	58	12.9	-57	112	10.3	24	-202
0+1 286	162.0	17.9	20	58	12.6	-53	120	10.2	30	-200
0+1 326	153.6	18.1	19	59	12.5	-48	126	10.2	36	-197
0+1 366	153.6	18.1	17	59	12.4	-43	132	10.1	42	-195
0+1 406	153.6	18.1	16	59	12.3	-38	136	9.9	48	-192
0+1 446	153.6	18.1	15	60	12.3	-33	140	9.7	53	-189
0+1 486	153.6	18.0	15	60	12.2	-29	142	9.4	57	-186

通过初始地应力场反演,测点最大水平主应力方位角为 N57.3°E~N61.2°E,平均在 N60°E 左右与实测 N73°E 较吻合,测点最大水平主应力与最小水平主应力的量值误差较小。结合厂房区

5 结论

a. 某抽水蓄能电站水压致裂法地应力测试表明水平构造应力作用较强。勘探实测试验表明最大主应力为 6.7~17.6 MPa,垂直孔测得最大水平主应力方向稳定在近 NEE 向。

b. 地应力场最大压应力与主厂房轴线夹角小于 30°,地下厂房轴向选择较为合理。地应力场分析成果可作为后续洞室开挖稳定性分析等工作的参考。

c. 厂房区域插值最大水平主应力变化范围为 16.2~17.4 MPa,最高可达 17.4 MPa,厂房自拱顶往下至底板最大水平主应力随高程呈线性分布,应力水平属于中应力水平,应力方向对于厂房围岩稳定有利。由于厂房区域较大,且埋深不同,最大水平主应力曲线有轻微起伏。

参考文献:

[1] 赵雨,白金朋. 基于 FLAC3D 的多元线性回归法地下厂房初始地应力场反演重构[J]. 水电能源科学, 2022,40(3):149-152,185.
 [2] 周宏伟,谢和平,左建平. 深部高地应力下岩石力学

- 行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91-99.
- [3] 王槐, 苏超, 吕超洋, 等. 蟠龙抽水蓄能电站地下厂房区初始地应力场反演[J]. 水力发电, 2019, 45(8): 42-46.
- [4] 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, 5(3): 64-75.
- [5] 张乐文, 张德永, 邱道宏. 径向基函数神经网络在地应力场反演中的应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 799-804.
- [6] 郭运华, 朱维申, 李新平, 等. 基于 FLAC^{3D} 改进的初始地应力场回归方法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 892-898.
- [7] 谢学斌, 罗海霞, 杨承祥, 等. 基于遗传单纯形算法与 RBF 网络的地应力场反演方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(1): 72-78.
- [8] 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.
- [9] 付成华, 汪卫明, 陈胜宏. 溪洛渡水电站坝区初始地应力场反演分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2305-2312.
- [10] 刘允芳, 尹健民, 刘元坤, 等. 地应力测量方法和工程应用[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2014.
- [11] 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(7/8): 1011-1020.

Inversion of Initial Stress Field in Large Underground Plant Area of Pumped Storage Power Station

ZHENG Wei-feng¹, WANG Le-hua¹, LUO Sheng², HAN Xiao-yu², ZHANG Xin-hui², DONG Zhi-hong²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of MWR, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The characteristics and distribution of in-situ stress field have an important influence on the stability and engineering design of the surrounding rock of underground power house. According to the deep surface drilling hole and engineering geological conditions of the underground power house of a pumped storage power station, a three-dimensional numerical analysis model was established, and the inversion reconstruction of the initial in-situ stress field was realized through multiple linear regression analysis. The results show that the maximum horizontal principal stress measured in deep holes is 6.7-17.6 MPa. The magnitude and direction of the inversion model are in good agreement with the measured value, and the horizontal stress in the underground workshop area is dominant, and the maximum horizontal principal stress is 16.2-17.4 MPa. The maximum principal stress azimuth of the stress field in the plant area is less than 30°, and the stress distribution and azimuth angle meet the design requirements. The research results provide a reference for similar large-scale underground projects.

Key words: initial in-situ stress field; deep hole in-situ stress test; multiple linear regression; main plant axis

(上接第 56 页)

Simulation of Flood Processes in Watersheds Considering Spatial Heterogeneity of Rainfall

LIU Wei¹, JIA Jing-jing², LIU Yang², CAO Sheng-le², WANG Hai-jun¹, WANG Kai³, WANG Jun²

(1. Hydrologic Center of Shandong Province, Jinan 250000, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Hydrology Bureau of Huaihe Water Conservancy Commission (Information Center), Bengbu 233001, China)

Abstract: Factors such as climate change have increased the spatial-temporal distribution heterogeneity of rainfall, it is thus important to study the response of hydrograph to the influence of the spatial heterogeneity of rainfall, which is of great importance to provide guidance to the hydrologic simulation of the flooding under conditions that the rainfall of the mainstream and tributary streams have different occurrence frequencies. The watershed above Linyi station of the Yihe River in Shandong Province was selected as an example. The watershed hydrological model was established using the Xinanjiang model. Hourly rainfall data from June to September from 1980 to 2020 were used for frequency analysis to obtain the design storms with different return periods in the Yihe river basin with a duration of 72 h. The flood process at Linyi station was analyzed by considering combined design scenarios of design storms with different return periods. Simulations were run using the established hydrologic model to obtain the response of flood process to the spatial heterogeneity of rainfall. The results show that the spatial distribution of rainfall has a significant impact on peak flows, with rainfall in areas close to the basin outlet being the determining factor for peak flood flows, and that smaller amounts of rainfall can produce larger peak flows in scenarios with high spatial heterogeneity of rainfall. The results can provide reference for the flood forecasting of downstream cross-sections under conditions that the mainstream and tributary floods have different occurrence frequencies due to spatial heterogeneity of rainfall.

Key words: spatial heterogeneity of rainfall; Yihe River Basin; Xinanjiang model; design storm