

DOI: 10.11779/CJGE2016S2041

2400 m 埋深地下实验室洞群布置模式优化研究

邱治强, 高明忠, 谢 晶, 张朝鹏, 汪文勇

(四川大学水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 四川 610065)

摘 要: 深部地下试验室是未来人类开采深部资源的基础, 中国锦屏地下实验室是全世界埋深最深的地下实验室, 锦屏地下试验室二期#8 实验洞的建设或许涉及极深岩石力学研究方向, 故拟在#8 实验洞内设计开挖多个实验洞群以开展原位力学测试及原理探索。然而, 实验洞群的布置模式直接影响地下实验室的长期稳定特性。针对高地应力赋存环境地下实验室洞室群开挖, 建立了 FLAC^{3D} 三维数值模型, 对比研究了同侧相邻洞室不同间距和异侧洞室不同布置工况下, 后续洞室开挖对已建洞室围岩稳定性的影响, 并用位移变化值作为地下洞室群布置工况评价指标, 判识开挖对已建洞室的影响程度。结果表明: 同侧相邻洞室间距 8 m, 异侧洞室对称布置为最优布置工况。研究成果可直接指导锦屏地下实验室二期#8 实验洞内实验洞群的布置设计, 为其他高地应力环境下洞室群布置提供参考。

关键词: 高地应力; FLAC^{3D}; 间距; 布置工况; 地下洞室群

中图分类号: TU456

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)S2 - 0250 - 05

作者简介: 邱治强 (1991 -), 男, 重庆垫江人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: 957719062@qq.com。

Optimization of layout pattern of underground laboratory cavern groups with buried depth of 2400 m

QIU Zhi-qiang, GAO Ming-zhong, XIE Jing, ZHANG Zhao-peng, WANG Wen-yong

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Deep underground laboratory is the foundation of deep mining resources in the future. Jinping underground laboratory in China is the deepest underground laboratory in the world. The construction of No. 8 experimental cavern may involve the research of deep rock mechanics, so multiple caverns will be designed and excavated to carry out in-situ mechanics tests and principle exploration. However, the stability of underground laboratory is directly influenced by the layout pattern of cavern groups. Therefore, aiming at the excavation of the underground experimental caverns under high geostress, a 3D numerical model is established by FLAC. The influences of excavation of the subsequent caverns on the stability of surrounding rock of excavated caverns are compared, which include different spacings at the same side and different layouts at opposite sides, then the value of displacement is introduced to identify the influences of excavation on the caverns which are built. The result shows that the layout with the spacing of 8 m at the same side and the symmetry at opposite sides is optimal. They may guide the layout of underground cavern groups in Jinping's No. 8 laboratory. Moreover, it can offer a reference for the layout of other similar underground projects.

Key words: high geostress; FLAC^{3D}; distance; layout; underground cavern group

0 引 言

浅部资源日趋枯竭, 深部开采成为必然趋势。深部近似三向等压静水应力状态, 致使岩体具有强流变的力学非线性、非可逆特征, 经典的胡克定律、宏观唯像弹塑性理论将难以适用或完全被颠覆。基于此, 凭借锦屏二期 2400 m 埋深高地应力原位环境以及低本底实验平台, 布置合适地下洞室群用以开展深部地质和岩体的开创性基础理论探索, 为世界重大工程的前沿基础研究提供特殊的、适宜的实验条件及有力的

理论支撑。然而, 在高初始地应力赋存条件下进行洞室群开挖, 岩体表现出非常规的力学行为^[1-2], 所以, 高地应力下大型地下工程的施工建设, 往往需要投入大量的人力、物力、财力。如果洞室群布置不合理, 不仅不能保证施工过程中的安全性和使用的长期稳定性, 而且将造成大量的物资浪费。因此对高地应力下

基金项目: 四川省科技厅应用基础计划项目 (2015JY0045); 国家重点研发项目 (2016YFC0600701)

收稿日期: 2016 - 05 - 19

洞室群布置进行探讨显得十分必要。

近年来, 国内外学者和工程界人士对高地应力环境地下洞室群稳定性进行了大量研究。如许多学者^[3-5]运用有限元、DDA 或二维和三维离散元方法对特定工程进行了稳定性分析; Lee 等^[6]结合实际工程对其设计、施工、分析计算和现场观测进行了较全面的研究; 付敬等^[7]针对高地应力埋深隧道软岩段围岩的时效特征进行了一系列探索; 王水林等^[8]采用脆塑性本构模型, 研究了断层对洞室稳定性的影响; 江权等^[9]针对拉西瓦水电站高地应力环境地下洞室群稳定性进行了数值模拟分析; 罗忆等^[10]针对高地应力条件下厂房开挖动态卸荷引起的变形机制进行了研究; 朱维申等^[11]对高地应力条件下大型地下洞室群分步开挖稳定性进行了分析。陈景涛等^[12]结合弹-脆-塑性本构模型对高地应力下地下洞室群开挖过程进行了数值模拟。

上述研究成果对探索高地应力地下洞室群围岩稳定性具有十分重要的工程价值和理论意义, 但这些成果均是对高地应力环境下单个洞室围岩稳定进行了研究, 缺乏后续洞室开挖对已建洞室围岩变形影响机制的探讨。本文运用 FLAC^{3D} 数值软件对同侧洞室不同间距、异侧洞室不同布置工况进行了数值模拟, 分析了不同间距及不同布置工况下, 后续洞室开挖所导致的已建洞室位移变形量。以期工程现场洞室群布置工况及间距选择提供参考。

1 数值模型的建立

1.1 工程概况

锦屏极深地下实验室是目前世界岩石覆盖最深的实验室, 利用其岩体赋存在高地应力环境中的特点, 可为极深岩体地质、岩土工程等相关理论研究提供极为真实的原位赋存实验条件。锦屏二期^{#8}地下实验洞最大主地应力高达 42 MPa, 该洞室为 (长×宽×高) 65 m×14 m×14 m 的马蹄形洞室, 拟在该洞室左右两侧共开挖 4 个尺寸为 (长×宽×高) 16 m×4 m×4 m 的长方体实验洞室, 以便开展相应岩石力学实验, 开挖洞室群布置如图 1 所示。

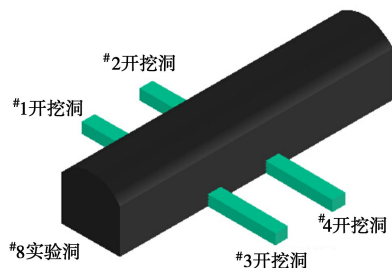


图 1 开挖体模型

Fig. 1 Model of excavation

1.2 计算模型

本次数值计算采用岩土工程计算软件 FLAC^{3D}, 包含开挖体模型 (图 1) 及地下洞室群的三维数值计算网格 (图 2), 单元总数达 54622。由于现场高地应力, 且岩体性质不均一, 洞室群开挖后难免会出现围岩卸压松弛、掉块、变形持续增加等现象, 因此在计算分析时必须采用非线性力学分析法, 本文采用目前常用的 Mohr-Coulomb 屈服准则进行计算模拟。锦屏二期地下洞室群位于大理岩岩体内, 参照文献[13], 其物理力学参数为弹性模 E 为 40 GPa, 泊松比 ν 为 0.25, 密度为 2700 kg/m³, 内摩擦角为 50°, 黏聚力为 10 MPa。

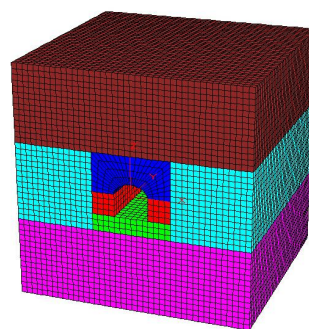


图 2 地下洞室群数值模型

Fig. 2 Numerical model for underground caverns

1.3 模型的边界条件

选取的三维数值模型各方向长度是开挖洞体的 5 倍, 故可将该模型视为半无限体。故可将模型底部、左右、前后等面施加固定约束, 顶部施加荷载为 $P=42$ MPa 的压应力, 取重力加速度为 9.8 m/s², 本次模拟忽略构造应力影响。

2 地下洞室群不同布置工况对比分析

如上图 1 所示, 模拟洞室开挖顺序为^{#1}→^{#2}→^{#3}→^{#4}, 拟先模拟同侧洞室开挖 (^{#1}, ^{#2}), 以^{#1}开挖洞位移变化值作为评价指标, 获取同侧相邻洞室最优布置间距, 基于此值确定^{#1}与^{#2}, ^{#3}与^{#4}开挖洞室布置距离。而后通过模拟地下洞室群 (^{#1}~^{#4}) 不同布置工况, 同样以^{#1}开挖洞位移变化值作为评价指标, 推断出异侧洞室最优布置工况。

2.1 同侧相邻洞室布置间距优化

根据现场实际情况, 模拟了同侧洞室不同间距下后续洞室开挖 (^{#2}) 对已建洞室 (^{#1}) 造成的围岩形变影响, 间距布置模拟方案如图 3 所示。拟在^{#1}开挖洞顶拱中部位置布置 9 个监测点 (监测点^{#1}~^{#9})、边墙中部位置布置 5 个监测点 (监测点^{#10}~^{#14}), 各监测点等间距布置。以监测同侧洞室不同间距时, ^{#2}开

挖洞开挖引起#1 开挖洞顶拱中部竖直方向及边墙中部水平方向位移变化值,各监测点布置情况如图 4 所示。

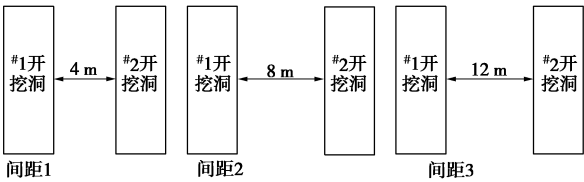


图 3 同侧洞室不同布置间距

Fig. 3 Different spacings for caverns at same side

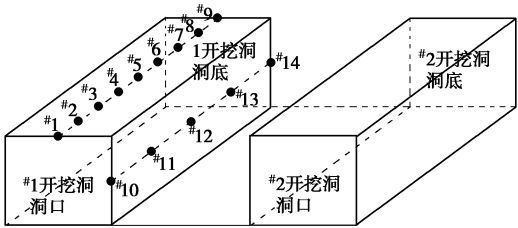


图 4 监测点布置图

Fig. 4 Layout of measuring points

(1)同侧洞室开挖对已建洞室顶拱竖直形变的影响分析

提取顶拱部分监测点数值计算结果,得到如图 5 所示同侧相邻洞室不同间距开挖下顶拱中部竖直方向形变曲线。从图 5 中可以看出,同侧不同布置间距时,后续洞室开挖导致已建洞室顶拱中部竖直方向位移变化值大致一样,均呈现先增后减趋势,且最大值均出现在距洞室口 4 m 处。具体的,当洞室间距为 4 m 时,#1 洞室顶拱中部竖直方向位移变化曲线位移图表最上方,且最大值为 0.912 mm,说明该间距值较小,不能满足洞室开挖要求。当间距为 8, 12 m 时,#1 洞室顶拱中部竖直方向位移变化曲线及其相近,位移变化最大值分别为 0.491, 0.427 mm,大约为 5 m 间距引起的最大位移变化值的 0.5 倍。对比上述 3 种方案可得出,相邻洞室间距 4, 8 m 相比,#1 洞室竖直方向位移变化值相差较大。但 8 m 间距与 12 m 间距相比,位移变化曲线十分靠近,表明 8 m 为一临界间距值,间距大于此值时开挖造成的位移变化量与 8 m 间距造成的位移变化量无明显差异,同时鉴于现场实验空间有限,故当以顶拱中部竖直方向位移值为优化指标时,选取 8 m 为同侧相邻洞室最优布置间距。

(2)同侧洞室开挖对已建洞室边墙水平形变的影响分析

图 6 为同侧相邻洞室不同间距,后续洞室开挖造成已建洞室边墙中部监测点水平位移变化值。从图中可看出,该组监测点在不同间距方案下,监测点位水

平移值距距#1 开挖洞洞口距离的增大而减小。当相邻洞室间距为 4 m 时,#1 开挖洞边墙中部位移值变形曲线位于整个图表上部,在洞室口处位移变形值最大,该值为 1.24 mm。而间距分别为 8, 12 m 时,#1 开挖洞室边墙中部水平位移变化值变化曲线无太大差异,两种方案引起的水平最大位移变化值分别为 0.395, 0.318 mm。故当以边墙中部水平方向位移为优化指标时,与上节讨论相似,同侧相邻洞室间距超过 8 m 时,开挖引起#1 洞室位移变形值与间距为 8 m 时极其相近,所以同侧相邻洞室间距取 8 m 时为最优间距。

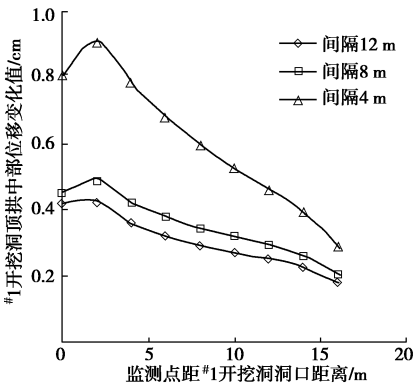


图 5 同侧洞室不同间距#1 开挖洞顶拱中部位移曲线

Fig. 5 Displacement curves in the middle of No.1 cavern's vault with different spacings at same side

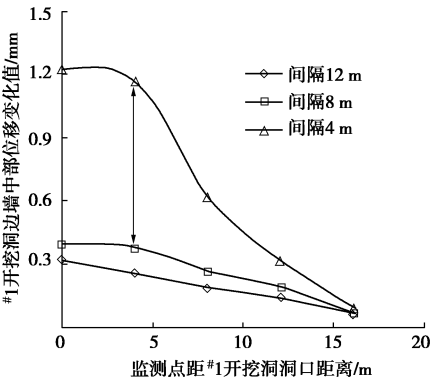


图 6 同侧洞室不同间距#1 开挖洞边墙中部位移曲线

Fig. 6 Displacement curves in the middle of No.1 cavern's side wall with different spacings

2.2 异侧洞室不同布置工况优化

通过建立如图 7 所示的异侧洞室布置图,其中工况一为两侧对称布置,工况二中#1 及#4 对称布置,工况三中#1 及#4 洞室错动 2 m 布置,同侧相邻洞室间距选择 8 m。计算得到了不同布置工况下后续洞室开挖(#2~#4)对已建洞室(#1)造成的围岩顶拱中部竖直位移变化值及边墙中部水平位移值,以此获取同侧相邻洞室间距为 8 m 时最优的异侧洞室布置工况。

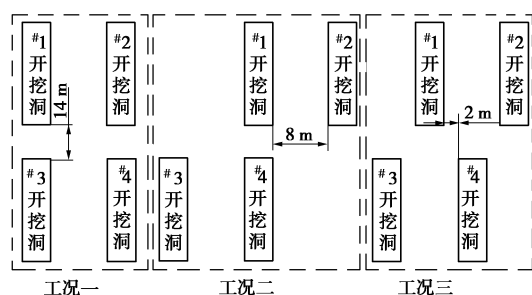


图 7 异侧洞室不同布置工况

Fig. 7 Different layouts for caverns at opposite sides

(1) 异侧洞室开挖对已建洞室顶拱竖直形变的影响分析

图 8 为异侧洞室不同布置工况情况下, 后续洞室开挖对#1 已建洞室顶拱中部竖直方向位移影响趋势图。从图中可看出, 3 种布置工况造成的位移形变影响有相同的规律性, 即随着监测点与洞室口距离的增加, 相对位移值呈先增加后减小态势, 且最大位移值出现在洞室口 2 m 处。其中布置工况一开挖造成#1 开挖洞的最大位移值 0.72 mm, 而工况二与工况三开挖造成的最大位移值分别为 0.91, 0.93 mm, 整体上布置工况一位移变化值位于工况二及工况三下部, 可得出 3 种布置工况中, 工况一造成 1#开挖洞顶拱中部位移变化值最小, 即当以洞室顶拱中部竖直方向变化值为判断异侧洞室布置工况优化指标时, 工况一为最优布置工况。

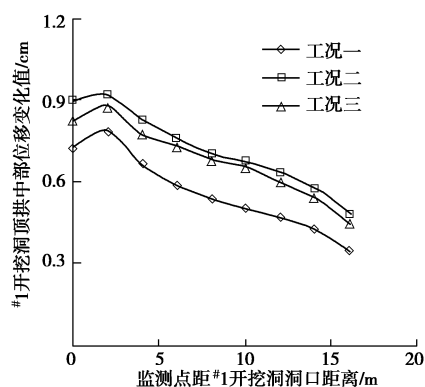


图 8 异侧洞室不同布置工况#1 开挖洞顶拱中部位移曲线

Fig. 8 Displacement curves in the middle of No.1 cavern's vault with different layouts at opposite sides

(2) 异侧洞室开挖已建洞室边墙水平形变的影响分析

根据数值模拟结果, 得到了如图 9 所示的 3 种布置工况下, 后续洞室开挖 (#2~#4) 对#1 洞室边墙中部监测点位移变化形变曲线。如图所示, 在洞室口附近, 不同布置工况造成的变形值有较大差异, 工况三所导致的变形值最大, 工况二其次, 在对比的 3 种布置方案中工况一开挖导致的变形值最小。而在靠近开

挖洞室底部时, 3 种开挖工况造成的变形值无较大差异。可得出以洞室边墙中部竖直方向变化值为判断异侧洞室布置工况优化指标时, 工况一依旧为最优布置工况。

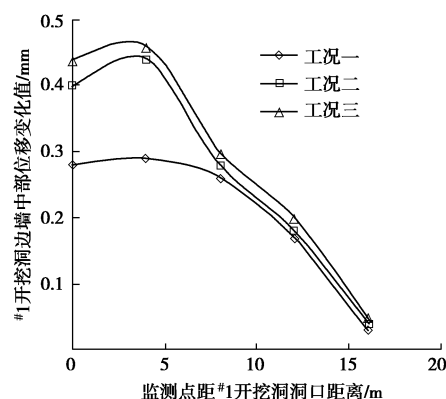


图 9 异侧洞室不同布置工况#1 开挖洞边墙中部位移曲线

Fig. 9 Displacement curves in the middle of No.1 cavern's side wall with different layouts at opposite sides

3 结 论

(1) 采用 Mohr-Coulomb 屈服准则, 对锦屏二期地下实验室地下洞室群布置间距及工况进行了 FLAC^{3D} 三维数值模拟, 得到了后续开挖洞室对已建洞室围岩变形影响规律。

(2) 相邻同侧洞室在 4, 8, 12 m 等三种不同间距下, 后续开挖洞室 (#2) 造成的已建洞室 (#1) 顶拱中部竖直方向位移变化量、边墙中部水平方向位移变化量变化趋势大致一致, 但 8 m 间距时既能保证围岩位移量相对较小, 又能节省洞室布置空间, 故选择 8 m 间距为最优布置间距。

(3) 综合对比工况一、工况二、工况三等三种不同布置工况, 后续开挖洞 (#2~#4) 造成的已建洞室 (#1) 顶拱中部及边墙中部围岩相对位移量呈相似变化趋势, 但整体上看工况一造成的相对位移量最小。

(4) 对比研究得出锦屏二期地下洞室开挖采取同侧相邻间距为 8 m, 异侧洞室对称布置为最优开挖布置工况。

参考文献:

- [1] 刘世煌, 吴 熹. 拉西瓦水电站高地应力地区大型地下厂房洞群围岩稳定性研究[J]. 水力发电, 1995(3): 17 - 21. (LIU Shi-huang, WU Xi. Surrounding rock stability study of huge hydropower station under high geostress filed[J]. Journal Hydroelectric Power, 1995(3): 17 - 21. (in Chinese))
- [2] 谢和平. 深部高应力下的资源开采与地下工程——机遇与挑战[C]// 香山科学会议第 175 次学术讨论会——深部高

- 应力下的资源开采与地下工程. 北京, 2001: 1 - 9. (XIE He-ping. Opportunity and Challenge of resource mining and underground engineering under deep high geostress[C]// Xiangshan Academic Conference Discussion No. 175—Basic Crucial Problem in Deep Underground Space Exploitation. Beijing, 2001: 1 - 9. (in Chinese))
- [3] CHRYSSANTHAKIS P, BARTON N. Dynamic loading of physical and numerical models of very large[C]// Proc of 8th Conference on Rock Mech. Tokyo, 1995: 1313 - 1316.)
- [4] DASGUPTA B, DHAM R, LORIG L J. Three dimensional discontinue analysis of the underground power house for Sardar Sarovar Project, India[C]// Proc. of 8th Int Conference on Rock Mech. Tokyo, 1995: 551 - 554.
- [5] DASGUPTA B, SHARMA M K V, VERMAN, et al. Design of underground caverns for Tehri Hydropower Project, India by numerical modeling[C]// Proc of 9th Int Conference on Rock Mech. Pairs, 1991: 357 - 358.
- [6] LEE Y N, SUH Y H, KIM D Y, et al. Three-dimensional behavior of large rock caverns[C]// Proc. of 8th Int. Conference on Rock Mechanics. Tokyo, 1995: 505 - 508.
- [7] 付敬, 董志宏, 丁秀丽, 等. 高地应力下深埋隧洞软岩段围岩时效特征研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 444 - 448. (FU Jing, DONG Zhi-hong, DING Xi-uli, et al. Study of aging characteristics of soft surrounding rock in deep tunnel with high ground stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 444 - 448. (in Chinese))
- [8] 王水林, 李春光, 史贵才, 等. 小湾水电站地下厂房洞室群弹脆塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(24): 4449 - 4454. (WANG Shui-lin, LI Chun-guang, SHI Gui-cai, et al. Analysis of underground powerhouses in Xiaowan Hydro-power station by elastic-brittle-plastic constitutive model[J]. Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(24): 4449 - 4454. (in Chinese))
- [9] 江权, 冯夏庭, 陈国庆, 等. 高地应力下拉西瓦水电站地下洞室群稳定性分析[J]. 水利发电学报, 2010, **29**(5): 132 - 140. (JIANG Quan, FENG Xia-ting, CHEN Guo-qing, et al. Stability analysis of large underground caverns in Laxiwa hydropower plant under high crustal stress[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, **29**(5): 132 - 140. (in Chinese))
- [10] 罗忆, 卢文波, 周创兵, 等. 高地应力条件下地下厂房开挖动态卸荷引起的变形突变机制研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(5): 1553 - 1560. (LUO Yi, LU Wen-bo, ZHOU Chuang-bing, et al. Mechanism study of abrupt deformation of underground powerhouse induced by excavation unloading under high in-situ stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(5): 1553 - 1560. (in Chinese))
- [11] 朱维申, 李勇, 张磊, 等. 高地应力条件下洞室群稳定性的地质力学模型实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(7): 1308 - 1314. (ZHU Wei-shen, LI Yong, ZHANG Lei, et al. Geomechanical model test on stability of cavern group under high crustal stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(7): 1308 - 1314. (in Chinese))
- [12] 陈景涛, 朱进明, 苏国韶. 高地应力下地下洞室群开挖过程的数值模拟[J]. 华中科技大学学报, 2009, **26**(4): 5 - 9. (CHEN Jing-tao, ZHU Jing-ming, SU Guo-shao. The numerical simulation of cavern group excavation under high crustal stress[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2009, **26**(4): 5 - 9. (in Chinese))
- [13] 江权, 冯夏庭, 陈建林. 锦屏二级水电站厂址区域三维地应力非线性反演[J]. 岩土力学, 2008, **29**(11): 3003 - 3010. (JIANG Quan, FENG Xia-ting, CHEN Jian-lin. Nonlinear inversion of 3D initial geostress field in Jinping II Hydropower Station region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(11): 3003 - 3010. (in Chinese))

(责任编辑 孙振远)