

文章编号:1672-3031(2021)06-0566-08

# 岩层产状对层状岩体地下厂房围岩松弛变形特征影响分析

王彦兵<sup>1</sup>, 张强<sup>2</sup>, 郭铭群<sup>1</sup>, 刘永奇<sup>3</sup>, 王玉杰<sup>2</sup>, 刘立鹏<sup>2</sup>(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048;  
3. 国家电网有限公司, 北京 100031)

**摘要:** 针对层状岩体地下厂房围岩变形稳定问题, 本文基于三维块体离散元软件(3DEC), 采用数值模拟, 研究岩层产状对层状岩体地下厂房围岩松弛变形特征的影响规律。研究表明, 当岩层倾角小于30°时, 厂房开挖后围岩最大变形发生在顶拱和底板部位, 当岩层倾角大于60°时, 最大变形发生在边墙部位; 在相同条件下, 随着岩层倾角的增加, 厂房开挖后围岩的最大变形量和松弛区的深度表现出了先增大后减小的趋势, 且当岩层倾角到达60°~70°时, 其达到了峰值; 随着厂房纵轴线与岩层走向的夹角的增大, 围岩的最大变形量和松弛区的深度表现为逐渐减小的趋势, 且当厂房纵轴线与岩层走向的夹角超过一定角度后, 其基本上无明显的减小趋势。对于陡倾角层状岩体, 地下厂房设计时, 建议洞室纵轴线与岩层走向的夹角不宜小于60°。

**关键词:** 地下厂房; 层状岩体; 岩层产状; 松弛变形特征; 三维块体离散元

**中图分类号:** TV554

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20210043

## 1 研究背景

层状岩体是地下工程建设中常见的一种岩体类型, 因内部发育有定向的成组层面, 其变形和强度特性具有明显的横观各向异性特征<sup>[1-2]</sup>。工程实践表明, 地下洞室开挖后, 受应力释放和调整的影响, 层状岩体普遍会出现松弛变形现象, 表现为岩层面的张开和滑移等变形破坏特征, 而且受岩层产状的影响, 层状岩体的松弛变形特性具有显著的非对称性<sup>[3-4]</sup>。因此, 研究层状岩体地下洞室围岩松弛变形特征对于指导工程设计具有重要的理论和工程实践价值。

针对层状岩体地下洞室围岩变形破坏问题, 国内外许多学者在此方面开展了相关的研究, 并取得了一定的成果。王永岩等<sup>[5]</sup>采用物理模型试验和数值模拟研究了不同倾角洞室围岩稳定性, 研究发现随着层状倾角的增大, 位移变化先增大后减小。王惠风等<sup>[6]</sup>采用PFC(Particle Flow Code)软件研究了层状岩体条件下巷道围岩的变形破坏规律, 并分析了岩层厚度变化对围岩变形破坏特征的影响。李赤谋等<sup>[7]</sup>采用3DEC(3 Dimension Distinct Element Code)研究了层面倾角对软岩隧道围岩变形的影响规律。沙鹏等<sup>[8]</sup>采用现场实时监测、数值模拟等手段, 研究了高地应力条件下层状地层隧道围岩挤压变形与支护受力特征。Xu G N等<sup>[9]</sup>基于连续-离散耦合分析方法, 从细观角度分析了隧道开挖后层状岩体的破坏机理。唐勇等<sup>[10]</sup>采用数值模拟分析了层理面的倾向与倾角对隧道破坏模式的影响, 在此基础上提出了围岩形变控制的锚杆非对称支护模式。张家宏等<sup>[11]</sup>对河北丰宁抽水蓄能电站地下厂房的围岩稳定进行了计算分析。张国新等<sup>[12]</sup>采用DDA(Discontinuous Deformation Analysis)模拟研究了水对层状岩体边坡倾倒变形的影响。

纵观现有研究成果, 目前针对层状岩体地下工程围岩变形破坏的研究主要集中隧道方面, 而对于大跨度、高边墙地下厂房的研究相对较少, 而且现有研究中多数仅考虑岩层倾角的影响, 而对岩层走向的影响研究较少<sup>[13-14]</sup>。本文基于三维离散元数值模拟, 分析岩层产状(包括倾角和走向)对层

收稿日期: 2021-02-19; 网络首发时间: 2021-08-27

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210827.1103.004.html>

基金项目: 国家电网科技项目(2000-201956442A0-0-00)

作者简介: 王彦兵(1987-), 博士, 高级工程师, 主要从事电力工程岩土相关研究。E-mail: wangyanbing2013@126.com

通讯作者: 张强(1986-), 博士, 高级工程师, 主要从事地下工程围岩稳定研究。E-mail: zhangq@iwhr.com

状岩体地下厂房围岩松弛变形特征的影响,在此基础上,针对层状岩体地下厂房洞轴线布置及支护措施的设计,提出了一些建议。研究成果对于指导地下厂房的设计具有重要的参考价值。

## 2 数值计算模型及计算条件

**2.1 数值计算模型** 针对层状岩体结构特征,文中选取抽水蓄能电站地下厂房典型断面形状,建立了层状岩体地下厂房概化模型,见图1。选取的地下厂房埋深为250 m,厂房断面尺寸为26 m(宽)×58 m(高),厂房分六层开挖,依次为CI至CVI;同时考虑边界效应和数值计算量的影响,模型尺寸为200 m(长)×200 m(宽)×50 m(厚),模型中层状岩体岩层厚度( $h$ )为4 m。

如图1所示,文中分析时为了便于描述岩层产状(倾向和倾角)的变化,采用厂房纵轴线与岩层走向的夹角来刻画岩层倾向的变化,在此基础上,分别建立了不同倾角及不同厂房纵轴线与岩层走向夹角的数值计算模型,见图2。其中,不同倾角分别取 $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $90^\circ$ ,图2(a)中给出了岩层倾角分别为 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $90^\circ$ 的模型;另外,在不同岩层倾角下,厂房纵轴线与岩层走向的夹角分别取 $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $80^\circ$ ,图2(b)中给出了厂房纵轴线与岩层走向的夹角分别为 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 和 $60^\circ$ 的模型。

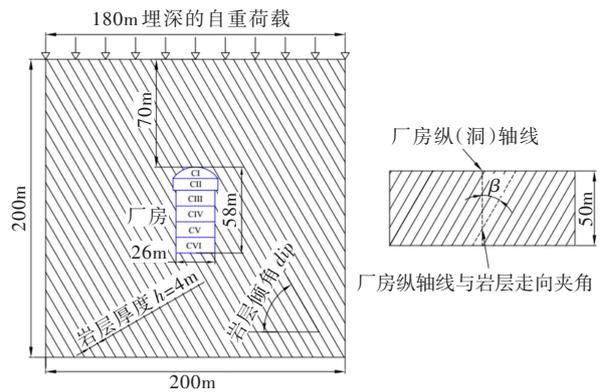


图1 层状岩体地下厂房概化模型

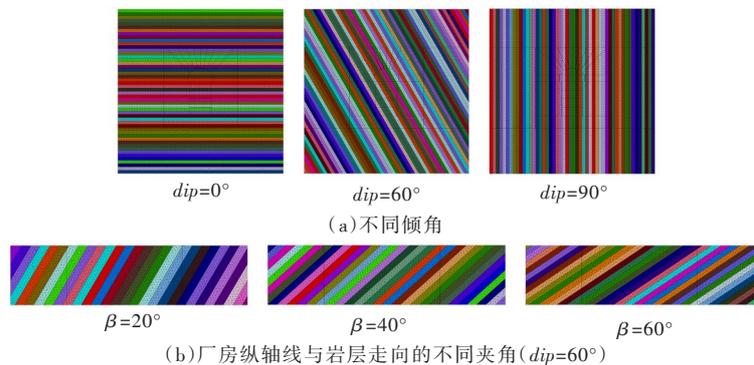


图2 数值计算模型

**2.2 计算本构模型及参数** 数值模拟中,岩层的力学特性采用摩尔-库伦弹塑性模型进行模拟,岩层间的接触力学行为采用库伦滑移模型进行模拟,文中数值计算参数取值情况见表1。

**2.3 数值计算条件** 对于抽水蓄能电站,通常情况下,地下厂房所处的地应力场多为自重应力场,因此文中数值模拟中考虑的初始地应力场为自重应力场,其水平方向的侧压力系数为0.5。在数值模拟时,通过在顶部施加180 m埋深的岩体自重荷载来模拟地下厂房250 m的埋深,同时模型四周边界条件设置为位移约束条件,即将边界节点速度设置为0。

## 3 岩层产状对厂房围岩松弛变形规律影响分析

**3.1 岩层倾角的影响** 为了考虑岩层倾角的影响,分析时选取了厂房轴线与岩层走向的夹角为 $0^\circ$ 情况下的不同岩层倾角下的数值计算结果,通过对比围岩的位移场分布及岩层面接触状态的破坏情况,分析岩层倾角变化对围岩松弛变形特征的影响规律。

图3给出了不同倾角下厂房开挖后围岩的位移场分布云图。总体上,从图3中可以看出,厂房开挖

表1 数值计算参数取值

类型	参数类型	取值	类型	参数类型	取值
岩层	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	2500.0	岩层面	法向刚度/(N/m)	8.0×10 <sup>9</sup>
	弹性模量/GPa	15.0		切向刚度/(N/m)	8.0×10 <sup>9</sup>
	泊松比	0.23		摩擦角/°	25.0
	摩擦角/°	45		法向黏聚力/MPa	0.5
	黏聚力/MPa	2.0		切向黏聚力/MPa	0.3

后，围岩位移场的分布与岩层倾角密切相关，在不同岩层倾角下，受岩层倾角的影响，位移场分布呈现出了显著的差异性；且当岩层倾角为0°和90°时，开挖后位移场的分布表现为左右对称的分布形式，而在其他倾角时，位移场分布表现为左右非对称的分布形式，且位移场的分布在层面位置也呈现出了明显的非连续性。进一步对比不同倾角下围岩最大变形的分布位置可以看出，在自重应力场下，当岩层倾角小于30°时，厂房开挖后围岩最大变形出现在顶拱和底板部位；当岩层倾角达到30°后，顺层面一侧边墙(即左侧边墙)的围岩开始逐渐呈现出了明显的顺层滑移变形，且进一步随着岩层倾角的增加，当岩层倾角到达60°时，此时围岩最大变形出现在了边墙部位。由此表明，在自重应力场条件下，当岩层倾角小于30°时，即缓倾角情况下，厂房开挖过程中应重点关注顶拱和底板部位围岩的变形稳定问题，而当岩层倾角大于60°时，即陡倾角情况下，需重点关注边墙部位围岩的变形稳定问题。

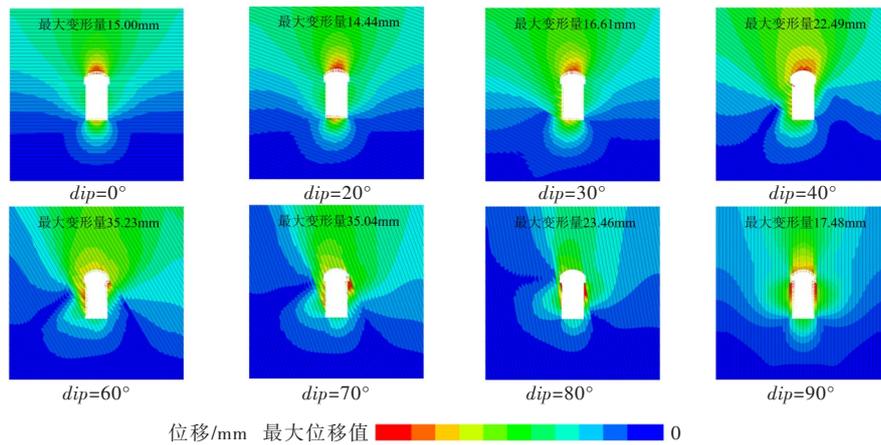


图3 不同岩层倾角下围岩位移分布云图

进一步对不同倾角下厂房开挖后围岩的最大变形量进行统计，分析岩层倾角变化对围岩最大变形量的影响规律。图4给出了围岩最大变形量随岩层倾角变化的关系曲线。从图4中可以看出，当岩层倾角小于30°时，随着岩层倾角的增加，围岩最大变形量基本无明显的变化；当岩层倾角达到30°后，随着倾角的增加，围岩最大变形量表现出了先增大后减小的趋势，且当岩层倾角达到60°~70°时，最大变形量达到了最大，增加量达到了2倍以上。由此可以看出，当岩层倾角小于30°时，岩层倾角的变化对开挖后围岩的最大变形量影响不大，当岩层倾角超过30°后，岩层倾角的变化对围岩的最大变形量则影响显著，变化幅度可达2倍以上。

对于赋存结构面的岩体，洞室开挖后岩体的变形特性主要受结构面的变形破坏控制。图5给出了不同岩层倾角下岩层面接触状态破坏情况的分布图。由图5中对比可以看出，在不同岩层倾角下，由于开挖后应力调整，厂房洞室周边围岩岩层面均出现了一定的张开和滑移的破坏情况，围岩表现出了松弛特性，且受岩层倾角变化的影响，围岩松弛区的分布也表现出了明显的差异性。进一步对比不同岩层倾角下围岩松弛区的深度和分布范围可以看出，当岩层倾角小于30°时，岩层倾角变化对开挖后松弛区的深度影响不大，且松弛区主要分布于顶拱和底板部位；当岩层倾角达到30°后，顺层面一侧边墙(即左侧边墙)部位围岩的松弛区出现了明显增大，而且随着岩层倾角的增加，开挖后厂房周边围岩松弛区的分布范围和深度也在不断扩大，当岩层倾角为60°~70°时，此时松弛区的深度和分布范围达到了最大，此后随着

岩层倾角的增加，围岩松弛区深度和分布范围开始出现逐渐减小的趋势，这一变化规律与图4中最大变形量随岩层倾角的变化规律是一致的，而这也正是导致不同倾角下厂房开挖后围岩变形特征表现出显著差异性的本质原因。

**3.2 岩层走向的影响** 为了考虑岩层走向的影响，分析时分别针对缓倾角和陡倾角情况两种情况，选取岩层倾角为30°和60°下的数值计算结果，通过对比围岩的位移场分布及岩层面接触状态的破坏情况，分析厂房纵轴线与岩层走向的夹角变化对围岩松弛区变形特征的影响规律。

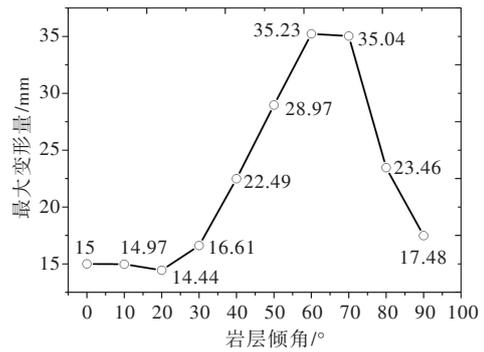


图4 最大变形量随岩层倾角变化的关系曲线

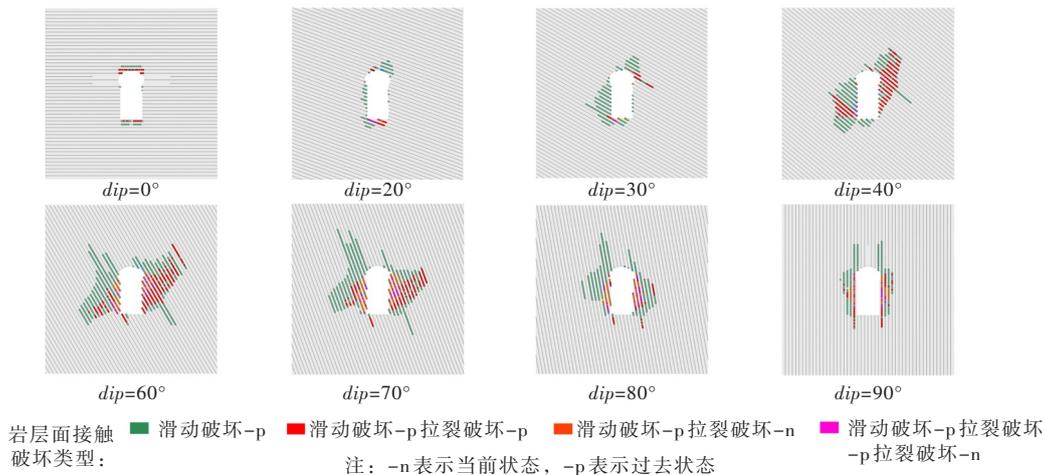


图5 不同岩层倾角下岩层面接触状态的破坏情况

图6所示为厂房纵轴线与岩层走向在不同夹角情况下的围岩位移场分布云图。总体上，从图6中可以看出，在同一岩层倾角下，随着厂房纵轴线与岩层走向的夹角的增大，厂房开挖后围岩的最大变形量是在逐渐的减小，而且对于缓倾角( $dip=30^\circ$ )和陡倾角( $dip=60^\circ$ )两种情况而言，随着厂房纵轴线与岩层走向的夹角的增大，厂房纵轴线与岩层走向的夹角的变化对围岩位移场分布的影响也不相同。其中，在缓倾角情况下，厂房纵轴线与岩层走向夹角的变化对围岩的位移场分布影响相对较小，见图6(a)；而在陡倾角情况下，厂房纵轴线与岩层走向夹角的变化对围岩的位移场分布影响相对较大，并且随着厂房纵轴线与岩层走向夹角的增大，围岩最大变形部位由边墙逐渐转移到拱顶和底板，见图6(b)。

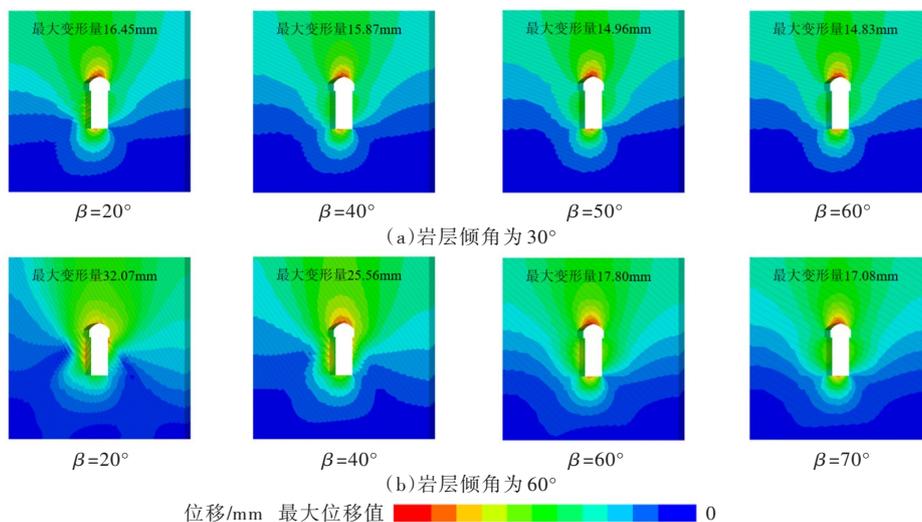


图6 厂房纵轴线与岩层走向在不同夹角下围岩位移场分布云图

进一步，为了分析厂房纵轴线与岩层走向夹角的变化对厂房开挖后围岩最大变形量的影响规律，图7中给出了围岩最大变形量随厂房纵轴线与岩层走向夹角的变化关系曲线。总体上，从图7中可以看出，在相同岩层倾角下，随着厂房纵轴线与岩层走向夹角的增加，围岩最大变形量表现出逐渐减小的趋势，并且当厂房纵轴线与岩层走向的夹角超过一定角度后，随着厂房纵轴线与岩层走向夹角的增加，围岩最大变形量的减小趋势出现了明显的减小，这表明当厂房纵轴线与岩层走向的夹角超过一定角度后，厂房纵轴线与岩层走向夹角的变化对围岩的变形基本上已无明显影响。具体而言，对于缓倾角( $dip=30^\circ$ )情况，厂房纵轴线与岩层走向夹角在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 变化时，围岩最大变形量的变化量达到了2倍以上，而当厂房纵轴线与岩层走向的夹角大于 $50^\circ$ 后，厂房纵轴线与岩层走向夹角的变化对围岩变形基本上已无明显影响；对于陡倾角( $dip=60^\circ$ )情况，厂房纵轴线与岩层走向夹角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 变化时，围岩最大变形量的变化量也达到了2倍以上，而当厂房纵轴线与岩层走向的夹角大于 $60^\circ$ 后，厂房纵轴线与岩层走向夹角的变化对围岩变形也基本上无明显影响。

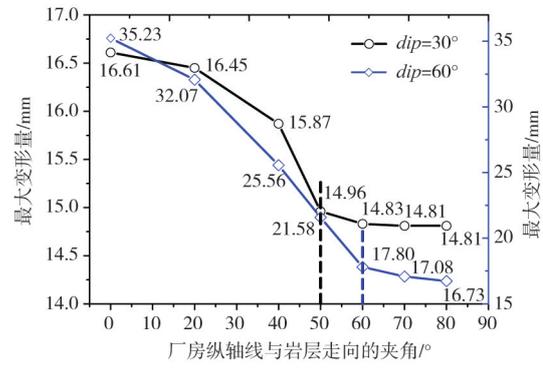


图7 最大变形量随厂房纵轴线与岩层走向的夹角的变化关系曲线

此外，图8中还给出了厂房纵轴线与岩层走向在不同夹角情况下岩层面接触状态的破坏情况。从图8中可以看出，在相同岩层倾角情况下，随着厂房纵轴线与岩层走向夹角的增加，围岩松弛区的分布范围和深度均在逐渐减小，且当厂房纵轴线与岩层走向的夹角超过一定角度后，随着厂房纵轴线与岩层走向夹角的继续

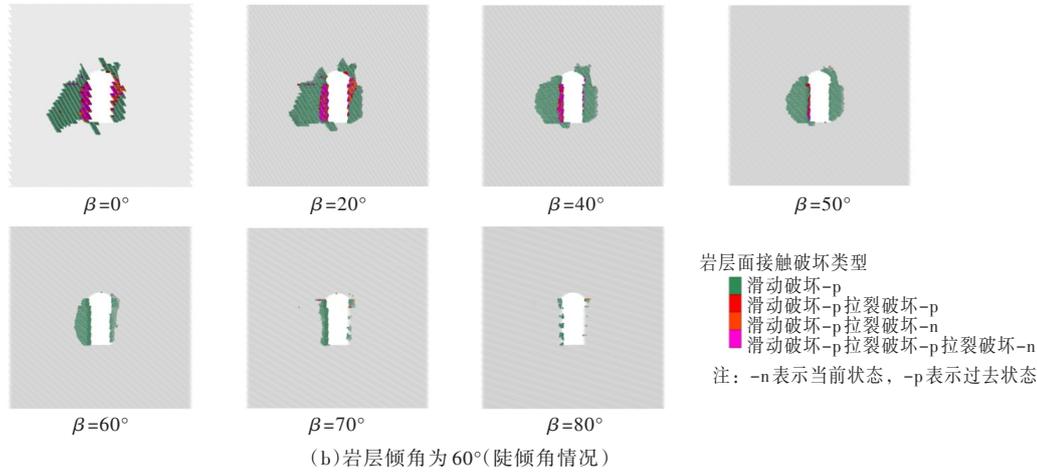
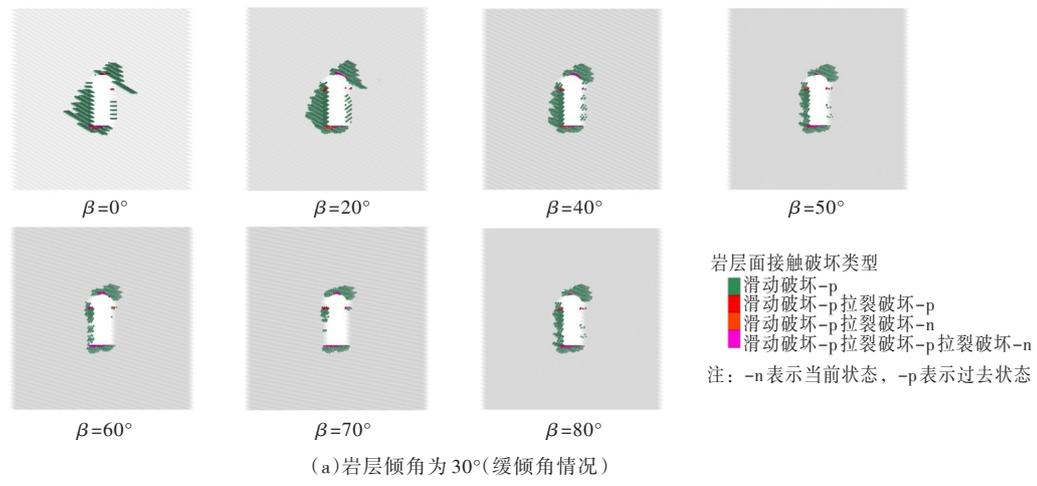


图8 厂房纵轴线与岩层走向在不同夹角下层面接触状态的破坏情况

增加,此时围岩松弛区的范围和深度基本上已无明显的减小。具体来说,对于缓倾角( $dip=30^\circ$ )情况,当岩层倾角大于 $50^\circ$ 后,随着厂房纵轴线与岩层走向夹角的增加,围岩松弛区的分布范围和深度基本上无明显的变化;而对于陡倾角( $dip=60^\circ$ )情况,当岩层倾角大于 $60^\circ$ 后,围岩松弛区的分布范围和深度基本上无明显的变化,这一变化规律与图7中最大变形量随厂房纵轴线与岩层走向的夹角的变化规律是一致的。

## 4 层状岩体地下厂房设计与支护建议

**4.1 关于层状岩体地下厂房纵轴线的的设计建议** 对于地下厂房主体洞室纵轴线方位的选择,水电站地下厂房设计规范(NB/T 35090—2016)<sup>[15]</sup>中规定:主体洞室纵轴线与岩体主要结构面走向的夹角不宜小于 $50^\circ$ 。文中针对缓倾角( $dip=30^\circ$ )和陡倾角( $dip=60^\circ$ )的情况,通过对比分析两种情况下厂房纵轴线与岩层走向夹角的变化对围岩松弛变形特征的影响规律发现,对于缓倾角层状岩体,当厂房纵轴线与岩层走向的夹角大于 $50^\circ$ 后,此时其夹角的变化对围岩变形及松弛区深度基本上无明显影响;而对于陡倾角层状岩体,当厂房纵轴线与岩层走向的夹角大于 $60^\circ$ 后,此时其夹角的变化对围岩变形及松弛区深度基本上无明显影响。因此,对于陡倾角层状岩体,在地下厂房设计时,建议洞室纵轴线与岩层走向的夹角不宜小于 $60^\circ$ 。

**4.2 关于层状岩体地下厂房支护措施设计建议** 对于地下厂房支护措施的设计,目前工程中主要采用对称支护措施。文中通过对不同岩层倾角下厂房开挖后围岩的松弛变形特征对比分析发现,在不同倾角下,受岩层倾角变化的影响,厂房开挖后围岩位移场分布呈现出了显著的差异性,除倾角为 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 情况外,位移场分布均呈现为左右非对称的分布形式,而且在不同倾角下,开挖后围岩松弛区的深度及分布范围也存在明显的不同。因此,针对层状岩体而言,在进行支护设计时,建议采用非对称支护措施,并根据开挖后围岩松弛区的分布范围和深度,确定合理的支护方案。

## 5 结论

针对层状岩体地下厂房围岩变形稳定问题,本文基于三维离散元数值模拟分析,研究了岩层产状对围岩松弛变形特征的影响规律,在此基础上,针对层状岩体地下厂房洞轴线布置及支护措施的设计,提出了一些建议。

(1)厂房开挖后围岩的位移场和松弛区的分布特征与岩层产状密切相关,且随着岩层倾角及厂房纵轴线与岩层走向的夹角的变化,呈现出了显著的差异性。总体来说,在相同条件下,随着岩层倾角的增加,厂房开挖后围岩的变形量及松弛区的深度表现出了先增大后减小的趋势,且当岩层倾角为 $60^\circ\sim 70^\circ$ 时,变形量及松弛区的深度达到最大值;而随着厂房纵轴线与岩层走向的夹角的增大,围岩的最大变形量和松弛区的深度均在逐渐减小。

(2)数值模拟研究结果表明,在自重应力场下,对于缓倾角层状岩体(岩层倾角小于 $30^\circ$ ),厂房开挖过程中,需重点关注顶拱和底板部位围岩变形稳定问题,对于陡倾角层状岩体(岩层倾角超过 $60^\circ$ ),需重点关注边墙部位围岩的变形稳定问题。

(3)根据数值模拟结果显示,在自重应力场下,对于陡倾角层状岩体地下厂房设计时,建议洞室纵轴线与岩层走向的夹角不宜小于 $60^\circ$ 。此外,由于开挖后围岩松弛变形特征具有明显的非对称特性,在支护设计时,建议采用非对称支护措施,并围岩松弛区的分布范围和深度,确定合理的支护方案。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 夏彬伟,陈果,康勇,等.层状岩体围岩变形破坏特征及稳定性评价[J].水文地质工程地质,2010,37(4):48-52.
- [ 2 ] 左双英,叶明亮,唐晓玲,等.层状岩体地下洞室破坏模式数值模型及验证[J].岩土力学,2013,34(S1):

- 458-465.
- [ 3 ] 谢国权, 孙文良. 锦屏一级水电站地下厂房围岩松弛变形机理分析与治理[J]. 水利水电技术, 2010, 41(2): 17-21.
- [ 4 ] DING X, NIU X, PEI Q, et al. Stability of large underground caverns excavated in layered rock masses with steep dip angles: a case study[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(7): 5101-5133.
- [ 5 ] 王永岩, 张余标, 冯学志, 等. 不同倾角洞室围岩稳定性模型试验及数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 281-287.
- [ 6 ] 王惠风, 宋立兵. 基于离散元的层状岩体巷道围岩变形破坏规律研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 56-62.
- [ 7 ] 李赤谋, 吴忠仕, 褚存, 等. 层状节理对软岩隧道的变形影响及对策研究[J]. 中外公路, 2020, 40(6): 219-222.
- [ 8 ] 沙鹏, 伍法权, 李响, 等. 高地应力条件下层状地层隧道围岩挤压变形与支护受力特征[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1407-1414.
- [ 9 ] XU G, HE C, CHEN Z, et al. Effects of the micro-structure and micro-parameters on the mechanical behaviour of transversely isotropic rock in Brazilian tests[J]. Acta Geotechnica, 2018, 13(4): 887-910.
- [ 10 ] 唐勇, 孙智慧. 层状软岩隧道开挖稳定性及锚杆非对称支护方式研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 56-64.
- [ 11 ] 张家宏, 李萌, 吕小彬. 某抽水蓄能电站地下厂房结构加固设计[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(4): 265-272.
- [ 12 ] 张国新, 雷峥琦, 程恒. 水对岩质边坡倾倒变形影响的 DDA 模拟[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(3): 161-170.
- [ 13 ] 李秀文, 朱赵辉, 王万顺, 等. 基于光纤光栅技术的围岩大应变连续监测研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(3): 197-203.
- [ 14 ] ZHAO J, ZHANF Y. Studies on rock failure of layered rock in underground mining-face control techniques[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2017, 3(4): 405-414.
- [ 15 ] 国家能源局. 水电站地下厂房设计规范: NB/T 35090-2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.

### Analysis of the influence of bedding attitude on the relaxation deformation characteristics of surrounding rock of underground powerhouse within layered rock mass

WANG yanbing<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>2</sup>, GUO Mingqun<sup>1</sup>, LIU Yongqi<sup>3</sup>, WANG Yujie<sup>2</sup>, LIU Lipeng<sup>2</sup>

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd, Beijing 102209, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

3. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

**Abstract:** In order to study the stability of underground powerhouse with layered rock mass, numerical simulation was carried out based on the three-dimensional Distinct Element Code(3DEC). The influence of bedding attitude on the relaxation deformation characteristics of surrounding rock of underground powerhouse with layered rock mass was studied and the results have shown that when the bedding dip angle is less than 30°, the maximum deformation of surrounding rock occurs at the arch crown and bottom plate. However, when the dip angle is greater than 60°, the maximum deformation occurs at the side wall. Under the same conditions, with the increase of dip angle, the maximum deformation of the surrounding rock and the depth of the relaxation deformation zone (RDZ) increase first and then decrease, and reach the peak when dip angle reaches 60° ~ 70°. With the increase of angle between the bedding strike and the longitudinal axis of the cavern, the maximum deformation and depth of RDZ decrease gradually. Moreover, such variation becomes stable when the angle is greater than a threshold angle. For the steeply inclined layered rock mass, when designing the underground powerhouse, it is suggested that the angle between the bedding strike and the longitudinal axis of the cavern should not be less than 60°.

**Keywords:** underground powerhouse; layered rock mass; bedding attitude; relaxation deformation characteristics; 3DEC

(责任编辑: 祁 伟)