

断层特征对单厂房围岩稳定性影响的数值分析

杜甜甜^{1,2,3}, 王雅^{1,2,3}, 蒋红^{1,2,3}, 郭鸿^{1,2,3}, 罗滔^{4,5}, 崔岚⁶

(1. 陕西理工大学 土木工程与建筑学院, 陕西 汉中 723001;

2. 陕西理工大学 人居环境科研学社, 陕西 汉中 723001;

3. 陕西理工大学 秦巴山地岩土环境与灾害防治研究中心, 陕西 汉中 723001;

4. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

5. 西京学院 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安 710123;

6. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为了深入研究断层特征对单厂房围岩稳定性的影响, 通过数值模拟方法分析不同断层倾角、倾向和厚度对单厂房位移、应力和塑性区特征的影响。研究发现, 断层破碎带倾角的增加会减少厂房拱顶和右边墙的水平位移, 会增加底板隆起, 倾角变化导致最大和最小主应力先增大后减小, 塑性区面积变化不大但分布范围有所优化; 断层破碎带倾向的增加使围岩的水平和竖向位移先增大后减小, 主应力变化趋势相似, 塑性区面积分布范围逐渐扩展但深度变化不大; 断层破碎带厚度的增加会显著增大厂房拱顶和右边墙的水平位移, 竖向位移突变, 主应力和塑性区面积增大。

关键词: 断层特征; 单厂房; 围岩稳定性; 数值模拟

中图分类号: TV731⁺.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)05-0072-10

Numerical Analysis of the Influence of Fault Characteristics on the Stability of the Surrounding Rock of a Single Cavern

DU Tiantian^{1,2,3}, WANG Ya^{1,2,3}, JIANG Hong^{1,2,3}, GUO Hong^{1,2,3}, LUO Tao^{4,5}, CUI Lan⁶

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;

2. Student Research Society of Human Settlements, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;

3. Research Center of Geotechnical Environment and Geological Hazards Control in Qinling-Daba Mountains, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;

4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

5. Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710123, China;

6. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: To further investigate the impact of fault characteristics on cavern stability, numerical simulations were conducted to assess the effects of varying fault dip angles, inclinations, and thicknesses on cavern displacement, stress, and plastic zone features. It is found that the increase of the dip angle of the fault fracture zone will reduce the horizontal displacement of the vault and the right wall of the plant, but will increase the uplift of the floor plate, and the change of dip angle will lead to the increase of the maximum and minimum principal stresses first and then decrease. The area of the plastic zone did not change much, but the distribution range was optimized. The horizontal and vertical displacement of the surrounding rock increases first and then decreases with the increase of the tendency of the fault fracture zone, the change trend of the principal stress is similar, and the area distribution range of the plastic zone

收稿日期: 2024-05-31

修稿日期: 2024-06-29

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2023-YBSF-324); 陕西省教育厅服务地方专项计划项目(23JC019); 陕西理工大学科研能力提升专项项目(SLGNI202415); 陕西理工大学自然科学创新基金项目(SLGNI202456)

作者简介: 杜甜甜(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为岩土与地下工程。E-mail: dutiantian@snut.edu.cn

通讯作者: 蒋红(1986—), 女, 博士, 副教授, 主要从事颗粒物质力学、岩土工程理论及数值模拟研究工作。E-mail: jianghong@snut.edu.cn

gradually expands but the depth changes little. The increase of the thickness of the fault fracture zone will significantly increase the horizontal displacement of the vault and the right wall of the plant, and the vertical displacement will change abruptly, and the area of the principal stress and plastic zone will increase.

Keywords: fault characteristics; single cavern; stability of surrounding rock; numerical simulation

在厂房的开挖过程中,当厂房穿越断层区域时,断层的不同特征(如倾角、倾向及厚度)对地下工程的稳定性产生不同程度的影响。较大的倾角可能导致岩体破裂与滑动,从而增加施工难度与风险;倾向直接影响厂房的稳定性及支护结构的设计;厚度较大可能引起岩体更加破碎和松散,导致厂房围岩的稳定性降低。这些参数的变化直接影响地下工程的设计、施工及运营。因此,研究不同形态断层对地下工程的影响具有重要的理论和实际意义。

针对地质结构复杂的地层,学者们采用了理论分析^[1-4]、模型试验^[5-8]和数值模拟^[9-11]等多种研究方法,开展了卓有成效的研究。刘国钊等^[12]基于弹性力学理论,考虑断裂带的活动性和错动特征,发现断裂带错动会导致隧道产生显著的纵向变形和应力集中;陈世杰等^[13]通过数值模拟深入分析陡倾角断层对地下洞室在地震作用下破坏特性的影响,研究结果表明,陡倾角断层的存在显著改变了地下洞室的应力分布和破坏机制;Zheng等^[14]采用实验和数值模拟,分析了断层穿越隧道的分段衬砌结构失效机制,发现断层对隧道衬砌的稳定性有显著影响;韩瑀萱等^[15]通过数值模拟分析了隧道穿越不同形态断层破碎带时的围岩稳定性,研究结果显示,断层倾角和断层带厚度对倾斜断层的隧道围岩稳定性影响最大。

本文旨在通过有限差分数值模拟方法,考虑断层倾角、倾向和厚度等多个参数影响,对厂房围岩的位移、应力和塑性区特征进行系统分析,旨在揭示不同断层特征下厂房围岩的稳定性规律,为地下工程设计和施工提供更为全面的理论支持和技术指导。

1 数值模拟

1.1 有限差分法

有限差分法的基本原理是对岩土体结构进行离散化处理,将连续的三维介质转化为由四面体或六面体单元组成的网格系统。在网格系统中,利用高斯积分和线性插值技术将每个单元的重力(G)、内部应力和外部载荷转化为不平衡力(F),这些力随后在相邻节点间平均分配。基于牛顿第二定律 $F = ma$ (其中 a 为网格节点的加速度),为每个网格节

点建立控制性方程再基于微分算法对加速度 a 进行离散化,以单位时间内网格节点的速度变化率来表示,从而将连续的动力学问题转化为一系列代数方程。FLAC^{3D}通过迭代求解这些方程,更新节点的速度和位置,直至达到平衡状态,实现对岩土体动态行为的模拟。

1.2 建立模型

以中东某抽水蓄能电站为工程背景,工程区域内地层由老到新分别为:下玄武岩、Umm-Sabune 地层、Bira 组、上玄武岩和 Lissan 地层的新近沉积物。玄武岩地层中大多数为Ⅲ类围岩,局部存在Ⅱ类围岩;断层带或粘土夹层中,大多属于Ⅴ类围岩。在项目范围内的断层“Fur-7”穿越厂房,主要由受强烈挤压到破碎的软弱岩体组成,泥质或粉质黏土充填。根据圣维南原理,断层错动的影响范围有限,厂房开挖仅对距离开挖中心3倍至5倍厂房宽度内的围岩产生相互作用。因此,围岩模型尺寸选择285 m(长)×220 m(宽)×245 m(高);厂房模型尺寸85 m(长)×20 m(宽)×45 m(高)。整体模型如图1所示。

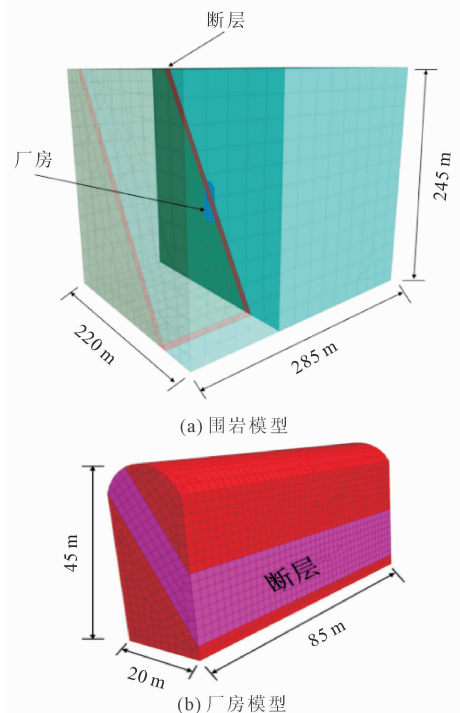


图1 整体模型

围岩模型设置为理想的均质模型,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则。岩体物理及力学参数根据工程的勘察成果按照表 1 选取。

表 1 岩体物理力学参数

计算参数	重度 /(kN·m ⁻³)	变形模 量/GPa	泊松 比	黏聚力 /MPa	内摩擦 角/(°)	抗拉强 度/MPa
围岩	26	5.50	0.26	0.85	39	0.07
断层	19	0.35	0.29	0.22	14	0.00

1.3 参数设计

采用单一控制变量法,围岩断层倾角范围为 30°~90°,倾向范围为 0°~60°,厚度范围为 5 m~25 m。断层倾角、倾向及厚度具体参数取值如表 2 所示。

表 2 断层参数表

工况	断层倾角/(°)	断层倾向/(°)	断层厚度/m
1	30	0	10
	45	0	10
	60	0	10
	75	0	10
	90	0	10
2	60	0	10
	60	15	10
	60	30	10
	60	45	10
	60	60	10
3	0	60	5
	0	60	10
	0	60	15
	0	60	20
	0	60	25

2 计算结果及分析

2.1 断层倾角的影响

为了研究不同倾角的断层对厂房围岩变形的影响规律,设置了断层破碎带倾角以 15°为间隔,从 30°递增到 90°。不同断层破碎带倾角下围岩的位移、应力和塑性区特征如图 2—图 6 所示。

2.1.1 围岩的位移特征

由不同断层倾角下围岩水平位移云图 2 可知,当断层倾角为 30°、45°、60°、75°和 90°时,围岩的最大水平位移均发生在拱顶和右边墙,这些区域正是断层破碎带的影响所在。厂房拱顶的最大水平位移分别为 93.34 mm、78.70 mm、55.36 mm、39.20 mm、25.17 mm;右边墙的最大水平位移分别为 204.70 mm、200.87 mm、190.31 mm、11.35 mm、9.54 mm。随着断层破碎带倾角的增大,厂房拱顶和右边墙的最大水平位移值逐渐减小。这表明较大的倾角能够有效减少断层破碎带对厂房围岩的水平位移影响。

由不同断层倾角下围岩竖向位移云图 3 可知,围岩的最大竖向位移均发生在断层破碎带处。厂房拱顶的最大沉降值分别为 86.35 mm、82.04 mm、78.24 mm、76.69 mm、94.59 mm;厂房底板的最大隆起值分别为 19.13 mm、21.33 mm、23.30 mm、132.37 mm、140.15 mm。由此可见,在倾角 30°到 75°时,断层破碎带的应力释放导致拱顶沉降值逐渐减小;而在 90°时,应力分布不均匀导致拱顶沉降值达到最大。底板隆起值则随着倾角的增加而增加,尤其在 75°和 90°时显著增大。这可能是因为围岩的应力分布发生了变化,导致厂房底板承受的垂直应力增加,进而导致隆起。

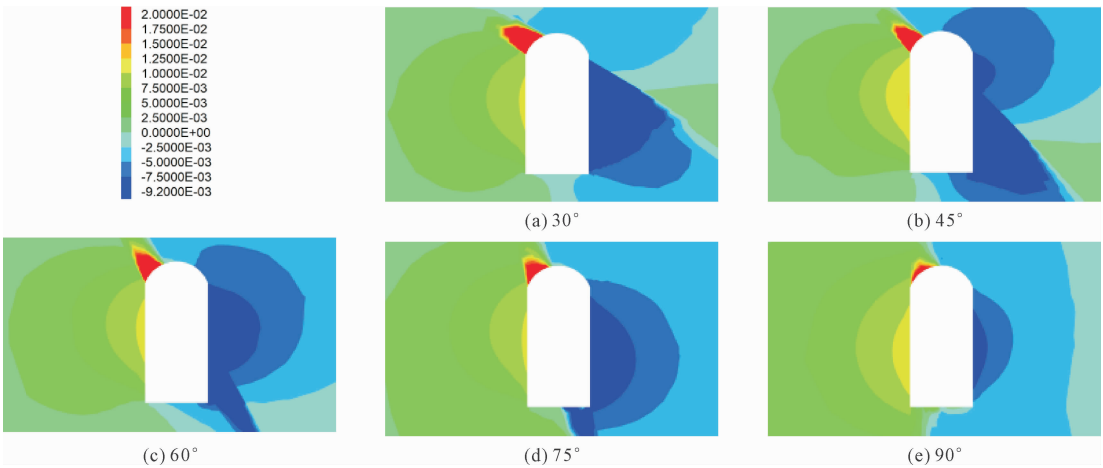


图 2 不同断层倾角下围岩水平位移云图

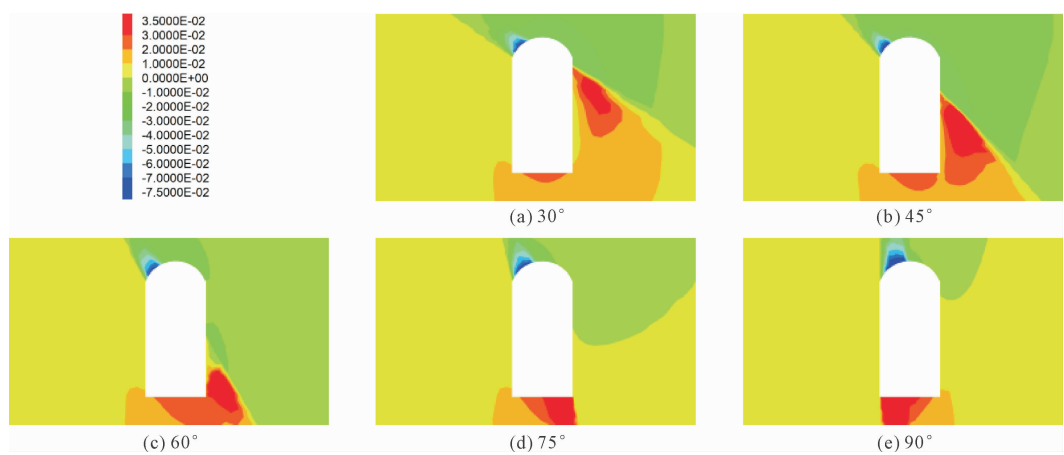


图 3 不同断层倾角下围岩竖向位移云图

2.1.2 围岩的应力特征

由不同断层倾角下围岩最大主应力云图 4 可知,倾角从 30°增大到 75°时,最大主应力逐渐增大,可能是因为较小的断层破碎带倾角增加了围岩的剪切应力;当倾角从 75°增大到 90°时,最大主应力逐渐减小,这可能是由于较大的倾角使断层破碎带的应力释放更充分导致的结果。这表明,最大主应力

随着断层倾角的增大呈现出先增大后减小的变化趋势。

由不同断层倾角下围岩最小主应力云图 5 可知,随着断层倾角的不断增大,最小主应力呈现出先增大后减小的趋势,并逐渐集中在断层破碎带区域。这一变化趋势表明,随着倾角的增大,应力分布从均匀逐渐变为集中。

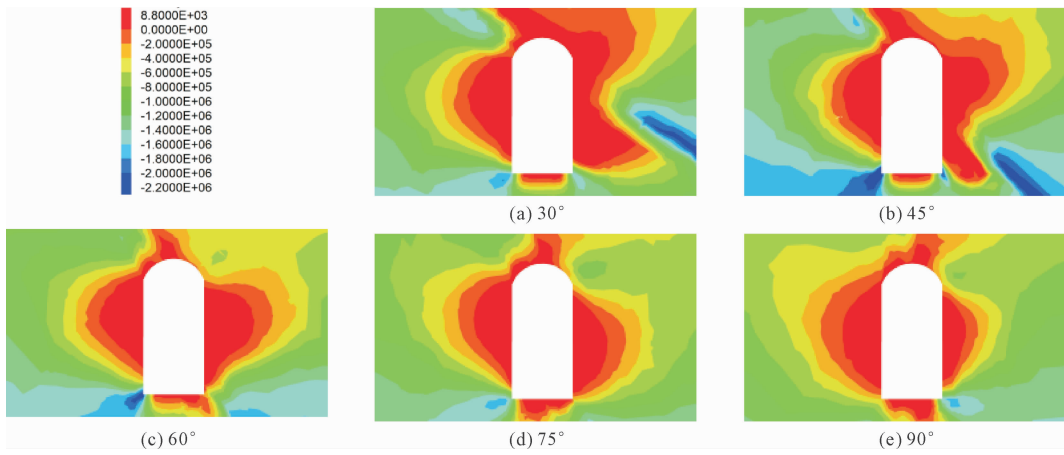


图 4 不同断层倾角下围岩最大主应力云图

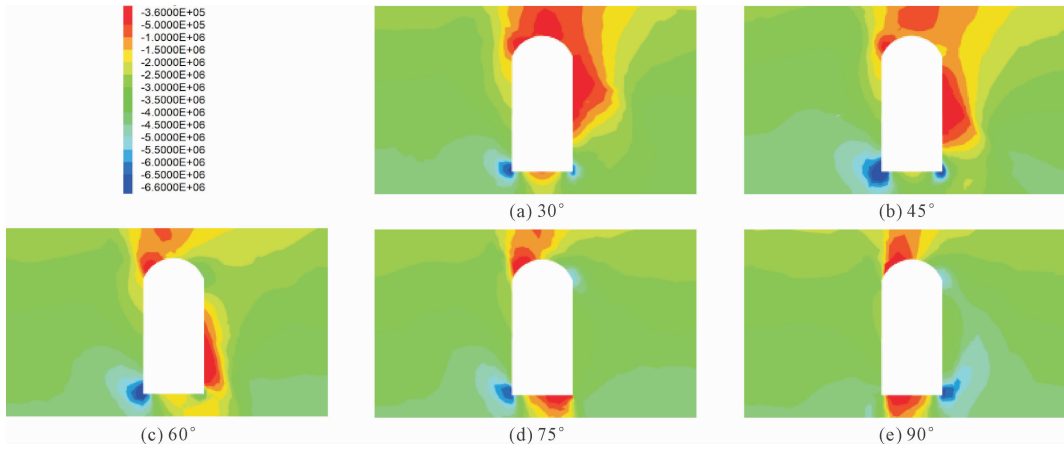


图 5 不同断层倾角下围岩最小主应力云图

2.1.3 围岩的塑性区特征

由不同断层倾角下围岩塑性区云图 6 可知,当断层的倾角增大时,断层两边的岩石变形区域(塑性区)的大小并没有明显变化。但是,断层本身的

变形区域却在逐渐变小,这种变化是从厂房靠近断层的地方开始,逐渐向断层内部的厂房区域发展,其影响的深度也随之减少。

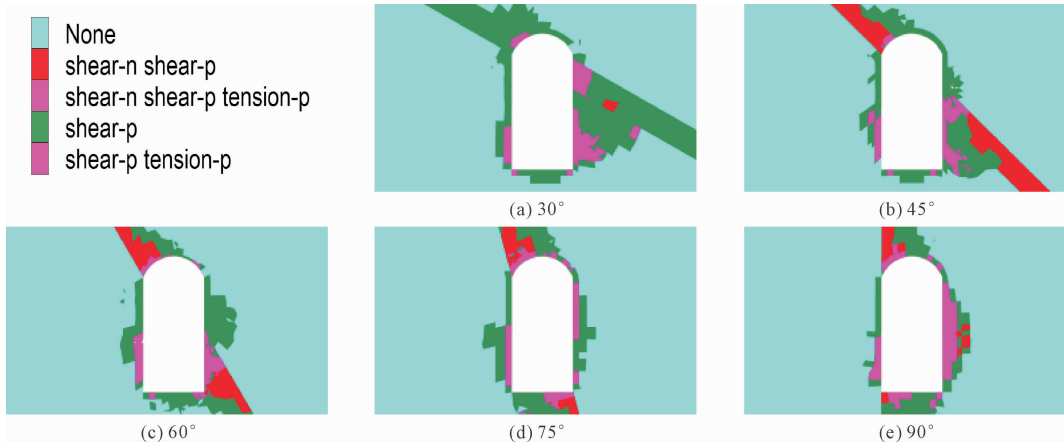


图 6 不同断层倾角下围岩塑性区云图

综上所述,随着断层破碎带倾角的增大,厂房拱顶和右边墙的最大水平位移减小,拱顶沉降值先减小后增大,而底板隆起值则显著增加,最大和最小主应力呈现先增大后减小的变化趋势,断层两侧围岩段的塑性区面积变化不大,但塑性区分布范围有所优化。

2.2 断层倾向的影响

为了分析不同倾向的断层对厂房围岩变形的影响规律,设置了断层破碎带倾向以 15°为间隔,从 0°递增至 60°。不同断层破碎带倾向下围岩位移、应力和塑性区特征如图 7—图 11 所示。

2.2.1 围岩的位移特征

由不同断层倾向下围岩水平位移云图 7 可知,围岩最大水平位移均发生在左右边墙处。厂房左边墙最大位移值分别为 10.31 mm、11.0 mm、9.34 mm、8.95 mm、8.45 mm;右边墙最大位移值分别为

190.48 mm、206.67 mm、60.67 mm、20.06 mm、11.71 mm。随着断层倾向的增加,左右边墙的水平位移呈现先增大后减小的趋势。这表明在低倾向角度下(0°和 15°),断层破碎带对厂房围岩的支撑作用较弱,导致右边墙的水平位移显著增加。当倾向角度增大到 30°时,右边墙的位移大幅减少,表明此时断层破碎带对围岩的影响有所减弱。进一步增大倾向角度到 60°时,左右边墙的位移均逐渐减小,显示出断层破碎带的影响趋于平衡。

由不同断层倾向下围岩竖向位移云图 8 可知,围岩最大竖向位移均发生在断层破碎带处。厂房拱顶最大沉降值分别为 75.16 mm、78.48 mm、43.67 mm、13.71 mm、12.20 mm;厂房底板最大隆起值分别为 21.90 mm、22.41 mm、18.89 mm、17.79 mm、17.31 mm。随着断层倾向的增加,厂房拱顶最大沉降和底板最大隆起值先增大后减小。



图 7 不同断层倾向下围岩水平位移云图

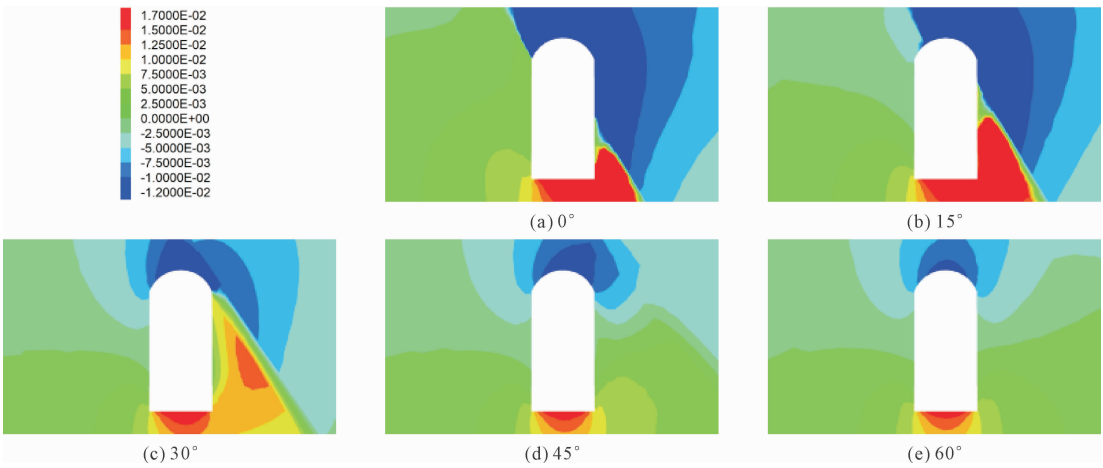


图 8 不同断层倾向下围岩竖向位移云图

2.2.2 围岩的应力特征

由不同断层倾向下围岩最大主应力云图 9 可知,最大主应力随着断层倾向的增大而减小。在断层倾向较小时,断层面承受较大的垂直应力分量,而当倾向增大时,断层带可能会经历应力释放,导致最大主应力减小。

由不同断层倾向下围岩最小主应力云图 10 可知,随着断层倾向的不断增加,最小主应力呈现先增大后减小的趋势。当断层倾向从 0°增加到 30°时,围岩中的最小主应力逐渐增大,应力集中效应最强;当断层倾向继续增加到 60°时,最小主应力开始减

小,应力得以缓解。

2.2.3 围岩的塑性区特征

由不同断层倾向下围岩塑性区云图 11 可知,当断层的倾向增大时,围岩塑性区并没有出现明显的扩大。但是,断层内部的塑性区却变得更宽,这种变化是从断层中心的厂房区域开始,向外扩展到断层的区域。

综上所述,随着断层破碎带倾向的增大,厂房围岩的水平位移和竖向位移先增大后减小,最大主应力和最小主应力也呈现相似的变化趋势,而塑性区面积的分布范围逐渐扩展但深度变化不大。

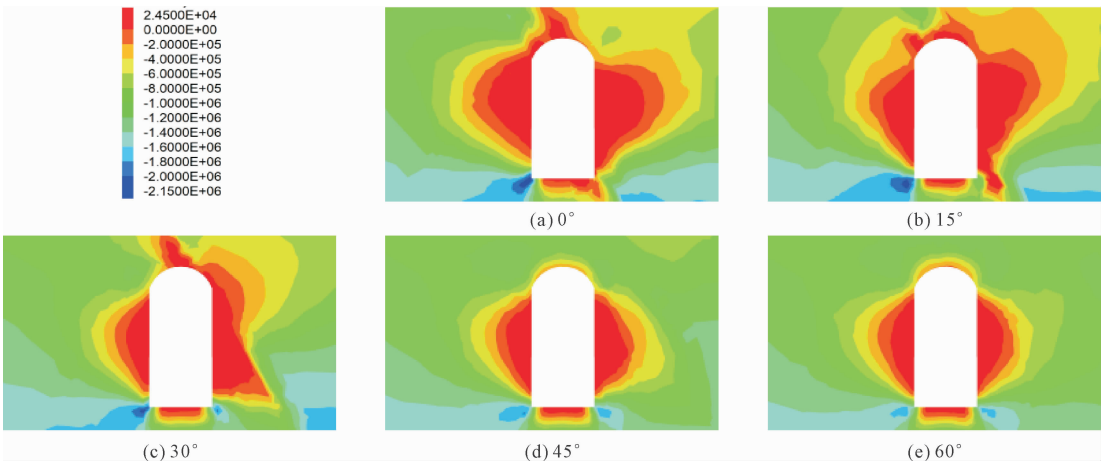


图 9 不同断层倾向下围岩最大主应力云图

2.3 断层厚度的影响

为了探究不同厚度的断层对厂房围岩变形的影响规律,设置了断层破碎带厚度以 5 m 为间隔,从 5 m 递增至 25 m 穿过厂房的左拱肩和右拱腰区域。不同断层破碎带厚度下围岩位移、应力和塑性区特征如图 12—图 16 所示。

2.3.1 围岩的位移特征

由不同断层厚度下围岩水平位移云图 12 可知,围岩的整体变形分布规律保持一致。拱顶的最大水平位移分别为 32.67 mm、55.29 mm、67.37 mm、74.62 mm、101.09 mm;右边墙的最大水平位移分别为 84.09 mm、191.57 mm、306.72 mm、418.31 mm、

467.20 mm。随着断层厚度的增加,拱顶和右边墙的水平位移均增大,对围岩稳定性产生更显著的影响。尤其是厂房右边墙在断层核心区

的水平位移出现突变,并随着断层厚度的增加而达到峰值。

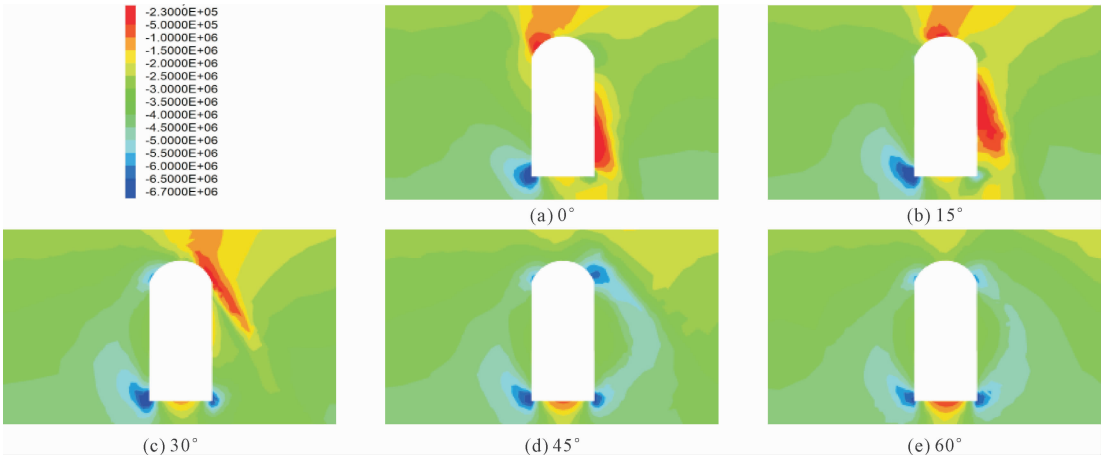


图 10 不同断层倾向下围岩最小主应力云图

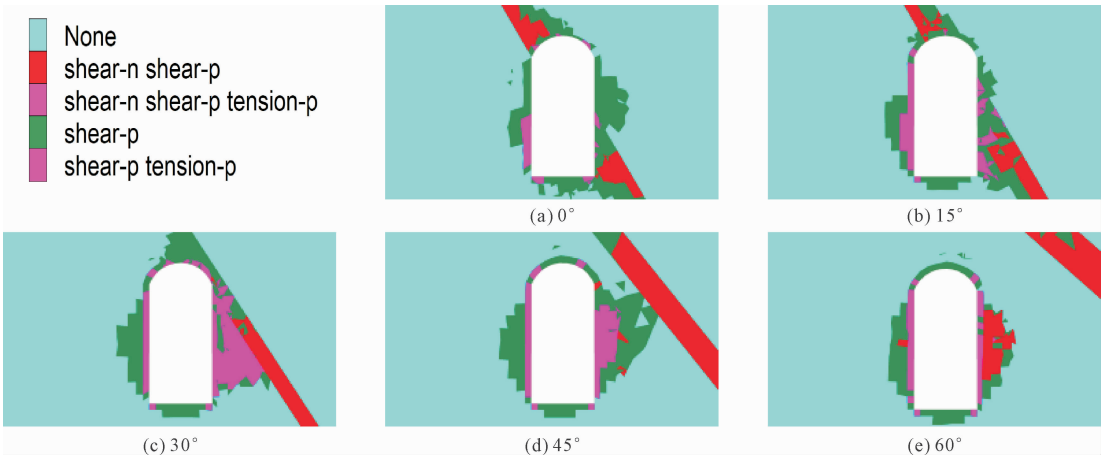


图 11 不同断层倾向下围岩塑性区云图

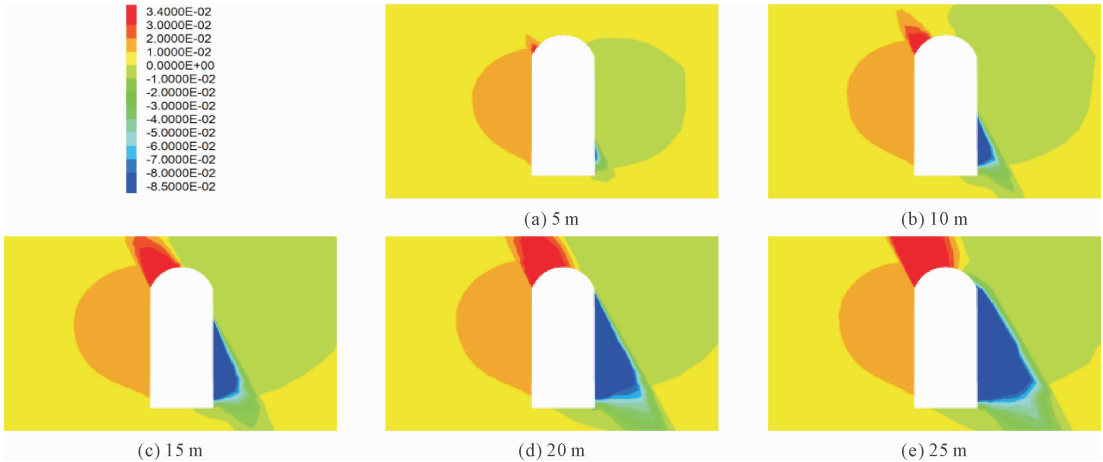


图 12 不同断层厚度下围岩水平位移云图

由不同断层厚度下围岩竖向位移云图 13 可知,拱顶最大沉降值分别为 46.10 mm、78.24 mm、

118.42 mm、163.37 mm、190.54 mm;底板最大隆起值分别为 20.62 mm、23.40 mm、24.79 mm、28.04

mm、28.27 mm。位移特征表明,当断层厚度不断增加,水平位移和竖向位移会出现突变。这种突变是由于断层的存在打破了原有的岩土体连续性,导致应力重新分布,从而在断层直接影响区域产生较大

的位移。尽管厂房底板最大隆起值没有显著变化,但断层影响范围却在扩展。这表明,围岩的位移随着断层厚度的增加而增大,越接近断层核心区域,围岩的变形量越大,对厂房稳定性的潜在风险也越高。

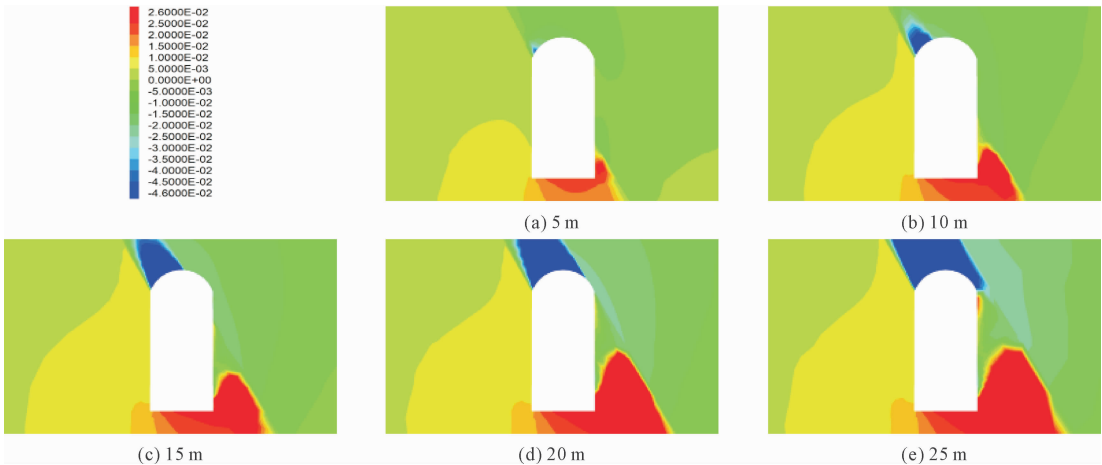


图 13 不同断层厚度下围岩竖向位移云图

2.3.2 围岩的应力特征

由不同断层厚度下围岩最大主应力云图 14 可知,随着断层厚度的增加,最大主应力逐渐增大。断层厚度的增加意味着断层破碎带的宽度增大,这使得围岩在断层区域的应力集中效应更为显著。较厚的断层破碎带限制了围岩的变形空间,导致应力难以有效释放和分散,从而使得围岩中的最大主应力逐渐增大。

由不同断层厚度下围岩最小主应力云图 15 可知,随着断层厚度的增加,最小主应力逐渐增大。最小主应力的增大主要受限于变形空间的减小和应力释放能力的下降。厚度增加后的断层破碎带会形成一个高应力集中区域,围岩的弹性变形空间被压缩,无法充分缓解和分散应力,从而导致最小主应力逐

渐增大。

2.3.3 围岩的塑性区特征

由不同断层厚度下围岩塑性区云图 16 可知,随着断层厚度的增加,断层两侧的普通岩石区域的变形区域大小没有显著变化,但断层内部的变形区域却在深度方向上有所扩展。

综上所述,随着断层破碎带厚度的增加,厂房拱顶和右边墙的水平位移显著增大,拱顶的竖向位移突变,最大和最小主应力均逐渐增大,而塑性区的扩展范围明显增加。

3 结 论

本文通过单一控制变量法,系统分析了断层破碎带的不同特征(倾角、倾向和厚度)对围岩稳定性

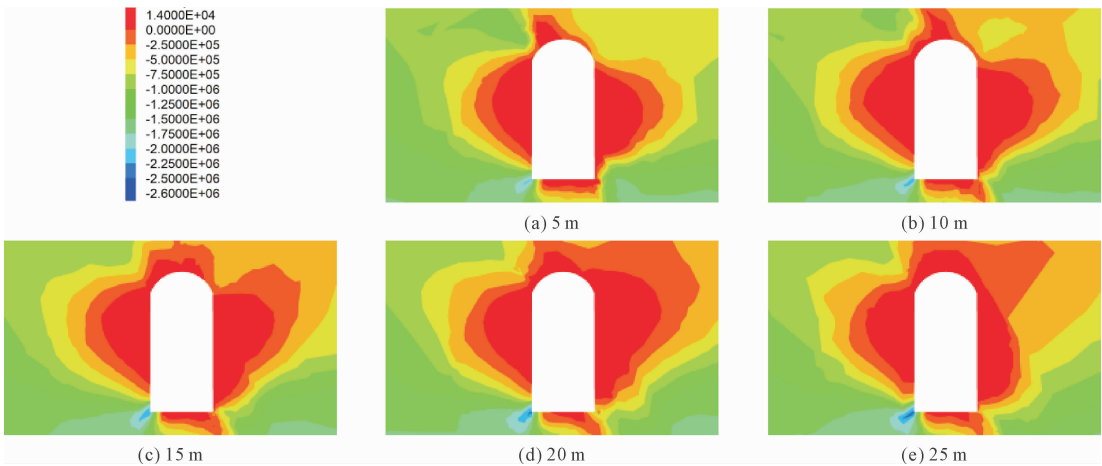


图 14 不同断层厚度下围岩最大主应力云图

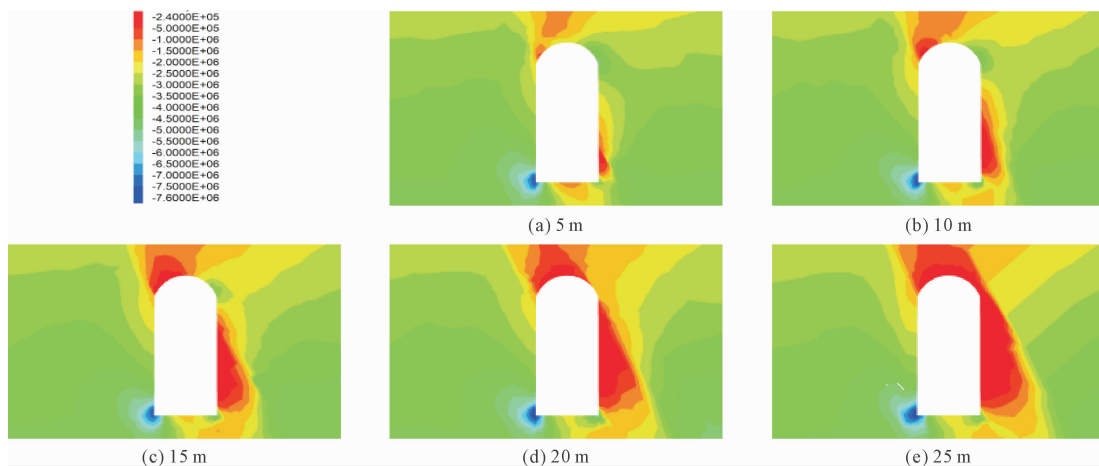


图 15 不同断层厚度下围岩最小主应力云图

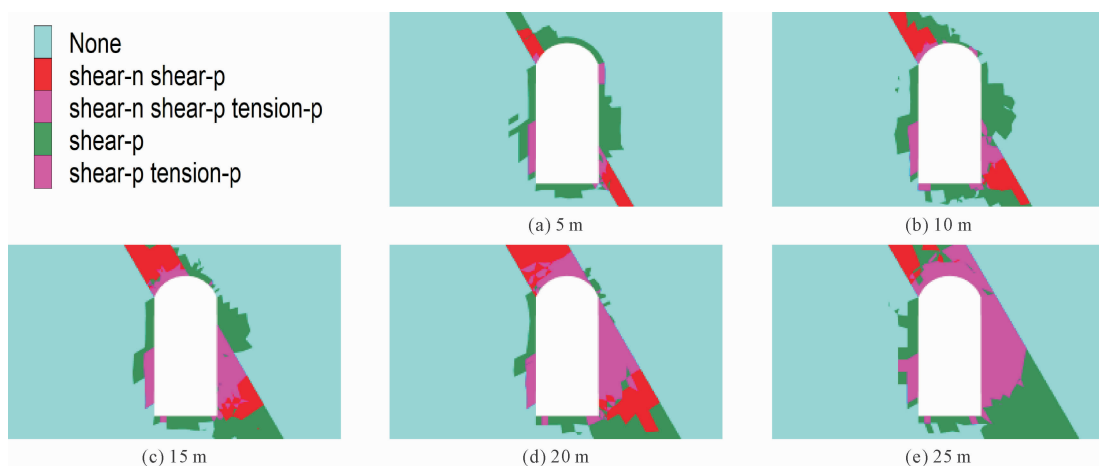


图 16 不同断层厚度下围岩塑性区云图

的影响,得出以下结论:

(1) 随着断层破碎带倾角的增大,厂房拱顶和右边墙的最大水平位移减小,拱顶沉降值先减小后增大,而底板隆起值显著增加;最大和最小主应力先增大后减小;同时,塑性区的分布范围虽未显著扩大,但其内部变形区域随着倾角的增加而逐渐减小。

(2) 随着断层破碎带倾向的增加,厂房围岩的水平位移和竖向位移先增大后减小;最大和最小主应力变化趋势与之相似;塑性区的分布范围逐渐扩展但深度变化不大。

(3) 随着断层破碎带厚度的增加,厂房边墙的水平位移和拱顶的竖向位移显著增大;最大和最小主应力均逐渐增大;塑性区的扩展范围明显增加。

(4) 不同断层破碎带特征对围岩稳定性影响的显著性依次为断层的厚度、倾角和倾向。在进行地下工程的设计和施工时,应尽可能避免厂房穿越厚度较大的断层区域,以减少围岩发生较大变形的风险。

参考文献:

- [1] 张伯虎,邓建辉,周志辉,等.大岗山水电站厂房断层控制区域微震监测分析[J].岩土力学,2012,33(S2):213-218.
- [2] 苏都都,范勇,吴进高,等.穿越断层破碎带深埋洞室爆破开挖围岩破坏机理研究进展[J].三峡大学学报(自然科学版),2024,46(4):25-34.
- [3] Abdellah W R, Butt S D, Abdullah A I, et al. Investigating the influence of geometric factors on tunnel stability: A study on arched roofs [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2023,42(1):207-234.
- [4] 常铭宇,申玉生,张熙,等.考虑围岩-衬砌切向接触效应的穿越断层隧道结构纵向响应解析解[J].岩石力学与工程学报,2024,43(8):2013-2026.
- [5] 黎盼,杨晓华,刘禹阳,等.穿越断层带隧道结构动态力学特性试验研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(2):153-162.
- [6] 王志岗,陶连金,石城,等.逆断层错动作用下双仓管廊结构力学特性和抗断设计研究[J].土木工程学

-

质砂力学特性研究[J]. 高校地质学报, 2021, 27(6): 679-686.

袁童, 雷学文, 艾东, 等. 椰壳纤维-MICP 复合改良膨胀土强度特性[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(3): 105-111.

土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.