

文章编号:1672-3961(2024)02-0126-10 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.036

围岩参数不确定性对地下水封洞库稳定性的影响

彭振华¹,王者超²,洪成华²,李康林²,李傲²

(1.中海油石化工程有限公司,山东 青岛 266000; 2.辽宁省深部工程与智能技术重点实验室,沈阳 110819)

摘要:为了分析库区围岩条件测量不确定性问题对围岩稳定性分析产生的影响,依托国内某地下水封洞库工程,采用 ANSYS/FLAC^{3D} 建立洞库的三维数值计算模型,开展洞库稳定性数值模拟。将围岩的位移分布、应力分布和塑性区分布作为稳定性的评价指标,分析围岩物理力学参数(包括弹性模量、泊松比、密度、内摩擦角、黏聚力和抗拉强度)、地应力方向对洞库围岩稳定性的影响。通过改变围岩物理力学参数的大小和应力场方向,开展考虑围岩物理力学参数和主应力方向不确定性的地下水封洞库围岩稳定性研究。数值模拟结果表明,当围岩的物理力学参数下降 10% 时,围岩的位移显著增加,地应力方向改变 10% 时,围岩位移变化均会增加,说明围岩物理力学参数的变化对稳定性的影响更大,验证主洞室的走向应与地应力方向平行。

关键词:地下水封洞库;稳定性;围岩物理力学参数;地应力方向;不确定性

中图分类号:TV554 **文献标志码:**A

引用格式:彭振华,王者超,洪成华,等. 围岩参数不确定性对地下水封洞库稳定性的影响[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(2): 126-135.

PENG Zhenhua, WANG Zhechao, HONG Chenghua, et al. Influence of parameter uncertainty on stability of underground water-sealed cavern[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(2): 126-135.

Influence of parameter uncertainty on stability of underground water-sealed cavern

PENG Zhenhua¹, WANG Zhechao², HONG Chenghua², LI Kanglin², LI Ao²

(1. CNOOC Petrochemical Engineering Co., Ltd., Qingdao 266000, Shandong, China; 2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Deep Engineering and Intelligent Technology, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: In order to analyze the impact of uncertainty in measuring the surrounding rock conditions in the reservoir area on the stability analysis of the surrounding rock, a three-dimensional numerical calculation model of caving was established using ANSYS/FLAC^{3D} based on a domestic underground water-sealed cavern project, and numerical simulation of the cave stability was carried out. The displacement distribution, stress distribution and plastic zone distribution of surrounding rock were taken as the evaluation indicators of stability, and the influence of physical and mechanical parameters of surrounding rock (including elastic modulus, Poisson's ratio, density, internal friction angle, cohesion and tensile strength) and in-situ stress direction on the stability of surrounding rock of cavern was analyzed. By changing the size of the physical and mechanical parameters of the surrounding rock and the direction of the stress field, the study on the stability of the surrounding rock of underground water sealed caverns was carried out considering the uncertainty of the physical and mechanical parameters of the surrounding rock and the direction of the main stress. The numerical simulation results showed that when the physical and mechanical parameters of the surrounding rock decreased by 10%, the displacement of the surrounding rock increased significantly. When the direction of the in-situ stress changed by 10%, the displacement of the surrounding rock would increase. It showed that the change of physical and mechanical parameters of surrounding rock had a greater impact on the stability, and it verified that the strike of the main cavern should be parallel to the direction of crustal stress.

Keywords: underground water-sealed storage cavern; stability; physical and mechanical parameter of surrounding rock; in-situ stress direction; uncertainty

收稿日期:2023-02-27

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(42177157);辽宁省应用基础研究计划资助项目(2022JH2/101300127)

第一作者简介:彭振华(1976—),男,河南驻马店人,高级工程师,硕士,主要研究方向为地下洞库技术。E-mail:401534684@qq.com

0 引言

近年来,随着国民经济的快速发展,我国对石油的需求量逐年上涨^[1-2]。世界格局动荡使我国的石油价格受到不小影响,加快我国石油储备战略的实施势在必行。地下水封油库是将石油储存在地下水位中,利用油水在岩体中不相容的原理,防止油气泄漏^[3-5]。与地上储油库相比,地下水封洞库具有大储量、高安全性、强应急能力、低造价、节约土地资源等优点^[6-8],是目前国际上石油等能源储存的主要方式之一,广泛运用于石油等能源物资的储存。

地下水封洞库安全施工和长久运行的关键问题之一是围岩稳定性,国内外学者对此进行了大量的研究。在理论研究方面:文献[9]以某个大型不衬砌地下水封油库项目为背景,运用弹塑性理论,在室内岩石三轴试验基础上,研究了花岗岩地层大型不衬砌地下水封油库围岩的完整性、变形性和稳定性;文献[10]通过时频组合分析方法解释测量能量释放波形,验证了开挖卸载导致微裂隙的形成,揭示了围岩能量释放模式及其与稳定性之间的关系;文献[11]在考虑地下环境中发生温度-水流-应力-化学(thermo-hydro-mechano-chemical, THMC)多场耦合作用的前提下,从岩石强度理论的基础上得出岩石多场耦合本构模型及岩石蠕变本构模型。利用现场试验评价稳定性也是重要的方法:文献[12]以国内某大型地下水封石油洞库建设项目为依托,利用监控量测的方法分析了地下水封石油洞库的稳定性;文献[13]在分析类矩形盾构隧道结构极限承载力中采用了数值模拟与整环足尺试验相互验证的方法,最终得出了类矩形盾构隧道的破坏模式。除此之外,如今运用最广泛的方法是利用数值模拟的方法分析地下洞室的稳定性:文献[14]利用FLAC^{3D}软件模拟了黄岛地下水封石油洞库工程的一个洞罐,模拟实际开挖工序,分析地下洞室围岩的变形情况和稳定性;文献[15]通过复杂的三维数值模型模拟地下水封洞库,进行稳定性分析评价,得到了水封条件下围岩稳定性评价的各项指标,优化了洞室的布置和开挖方案;文献[16]提出一种数值模拟结合微震监测的方法评价洞室稳定性,该方法还具备捕获围岩中微裂隙的功能。以上有关地下水封洞库稳定性的研究大多基于确定条件的分析,忽略了库区围岩条件的不确定性对稳定性评价的影响。现

场条件往往具有不确定性,仅进行确定条件分析往往导致研究结果与实际工程有所偏差,或者导致工程突发安全事故或安全余量过大、资源浪费等问题。

针对地下工程中围岩参数不确定性影响工程稳定这一问题,国内外学者也进行了大量研究。在隧道工程中,文献[17]利用一阶可靠性法(first order reliability method, FORM)计算承受静水应力场的圆形隧道的可靠性指数,认为围岩的弹性模量、内摩擦角、黏聚力具有不确定性,从而评价隧道的稳定性;文献[18]利用数值模拟结合响应面的方法分析东川隧道的稳定性,得到了考虑围岩参数不确定性条件下的隧道稳定性情况;文献[19]提出一种基于岩体分类和FORM的经验法解决岩体参数不确定性对隧道开挖稳定性的影响。在地下洞室研究中,文献[20]研究了不同岩体条件下,考虑围岩参数不确定性的地下洞室开挖稳定评价,并给出推荐的安全系数。在地下水封洞库方面,文献[21]使用Unwedge程序和Monte-Carlo法研究了结构面参数不确定性对洞室块体稳定性的影响,并给出支护系统的优化建议。综上所述,目前大量地下工程已开展了围岩参数不确定对工程的影响分析,有关参数不确定性对地下水封洞库围岩稳定性影响的研究较少,尤其是研究围岩的物理力学参数不确定性对洞库整体稳定性的影响更少,因此,研究围岩参数不确定性对地下水封洞库稳定性的影响对保证洞库长期安全运行具有重要意义。

本研究依托国内某地下水封洞库项目开展研究,该项目的库区自然环境和地质条件复杂,安全和环境控制标准高,工程的初期勘察数据表明库区的围岩条件存在不确定性。本研究利用工程初期勘察的数据及工程的设计方案,结合有限差分数值软件FLAC^{3D}对主洞室开挖的稳定性进行模拟,通过对比在一定范围内改变围岩物理力学参数和地应力的方向时主洞室围岩的稳定性情况,分析岩体物理力学参数和地应力倾角的不确定性对开挖稳定性的影响。结合模拟数据对工程提出相关指导性意见,为保证工程后续安全施工和稳定运行提供科学依据。

1 工程概况

1.1 工程背景

本研究依托的某地下水封洞库项目地下工程

由主洞室、施工巷道及水幕系统等组成。主洞室共设7个,按北偏东70°向平行布置,含2组洞罐。主洞室为直边墙圆拱洞,跨度20 m,高度30 m,洞室底板高程-60 m,顶板高程-30 m。

1.2 工程地质

通过勘察报告,库区的岩性主要为微风化二长花岗岩,岩体节理裂隙微发育,完整性较好,局部破碎,质地致密坚硬,为坚硬岩。场地内二长花岗岩微风化岩体节理裂隙发育较少,岩体较完整到完整,岩石强度高,岩体基本质量等级一般为Ⅱ、Ⅲ级,部分为Ⅰ级。

拟建洞库场地内脉岩较发育,地质调查及钻探显示主要有辉绿岩、闪长玢岩及石英岩等,各种脉岩分布在二长花岗岩岩体中,脉岩产出受岩体内构造、裂隙控制明显,均呈较规则脉状产出,其延展方向与构造基本一致。

根据勘察结果可知,对洞库工程建设影响较大的是分布在工程建设场地内的破碎带和节理密集带。对库区稳定性有影响的是节理密集带 J_6 和破碎带 P_1 、 P_2 及 P_3 。节理密集带 J_6 位于库区范围内,水平方向延伸420 m;破碎带 P_1 位于库区东面,距离施工巷道较近,水平方向延伸740 m;破碎带 P_2 位于库区范围内,水平方向延伸450 m;破碎带 P_3 位于库区西面,距离主洞室较近,水平方向延伸650 m。

2 库区围岩数值模拟及结果

2.1 本构模型构建

本研究的本构模型采用FLAC^{3D}软件中自带的莫尔-库仑模型,该模型常用于描述土体与岩石的剪切破坏。利用本模型描述地下水封洞库中主洞室的围岩应力-应变情况满足本研究的需求。为了准确描述该模型,需要输入体积模量、剪切模量、泊松比、摩擦角、黏聚力、抗拉强度及密度等7个基本量。该本构模型包含莫尔-库仑破坏准则及拉伸破坏准则。

莫尔-库仑模型采用的破坏准则为莫尔-库仑破坏准则和最大拉应力准则,3个主应力为 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ,且 $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3$ 。复合破坏准则如图1所示。

破坏包络线 AB 由莫尔-库仑破坏准则定义:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} = 0, \quad (1)$$

式中, c 为黏聚力, ϕ 为摩擦角。

破坏包络线 BC 由拉伸破坏准则定义:

$$f^t = \sigma_3 - \sigma^t, \quad (2)$$

式中 σ^t 为抗拉强度。

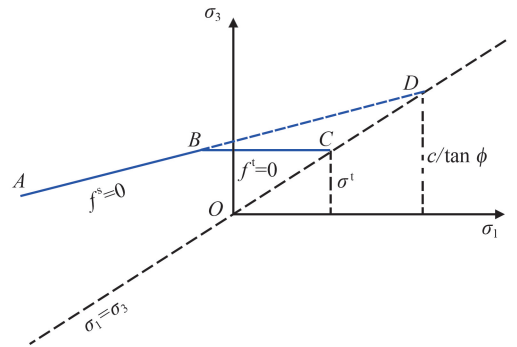


图1 复合破坏准则

Fig.1 Composite destruction guidelines

由图1可见,材料的抗拉强度不能超过 $f^t = 0$ 和 $\sigma^t = 0$ 交点对应的 σ_3 ,因此最大抗拉强度

$$\sigma_{\max}^t = \frac{c}{\tan \phi}. \quad (3)$$

2.2 数值模型建立

根据勘察得到地形图,采用Surfer生成库区地貌图,并导入ANSYS软件,将拟建洞库的主洞室、水幕巷道、竖井、施工巷道统一建入模型中,导入FLAC^{3D}软件生成的计算模型如图2所示,依据经验,洞室开挖后影响范围为洞径的3~5倍,确定模型长(沿 x 方向)1500 m,宽(沿 y 方向)780 m,下边界标高-200 m,上边界为地表高程,模型东南西北距离主洞室分别为430、350、150、100 m。根据现场物探的结果,地下工程布置全部位于微风化地层中,岩体类型为二长花岗岩。整个模型共有843040个节点,5057830个单元。由于破碎带 P_2 位于库区范围内且延伸较长,本次数值模拟主要分析破碎带 P_2 对拟建洞库稳定性的影响。

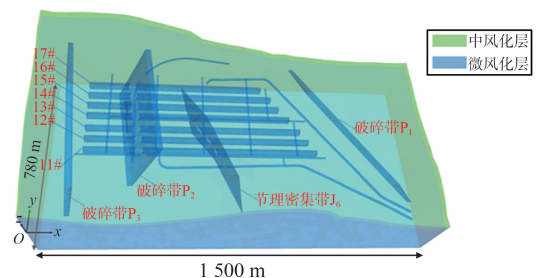


图2 数值计算模型

Fig.2 Numerical calculation model

2.3 计算参数设置

将文献[22]中拟定的岩体物理力学参数与运用Hoek-Brown准则校核得到的岩体物理力学参数进行综合分析比较,取其平均值,确定库区岩体的物理力学参数,如表1所示。

表 1 数值模拟中物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters in numerical simulation

岩体	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)	摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
中风化二长花岗岩	4.77	0.31	2 450	29.5	0.76	0.84
微风化二长花岗岩	34.50	0.20	2 620	38.7	1.57	1.10
破碎带 P ₁ 、P ₂ 、P ₃	1.30	0.35	2 300	24.0	0.35	0.40
节理密集带 J ₆	5.00	0.30	2 500	30.6	0.81	0.89

2.4 边界条件

边界条件设置图如图 3 所示。数值模拟中的边界条件设置如下:上边界为自由边界条件,不施加位移及应力边界条件;下边界固定 z 方向位移约束,不施加应力边界条件;左右前后边界设置为位移(零速度)边界条件,初始应力场中,垂直应力为自重应力(最小主应力),水平方向为最大和中间主应力。

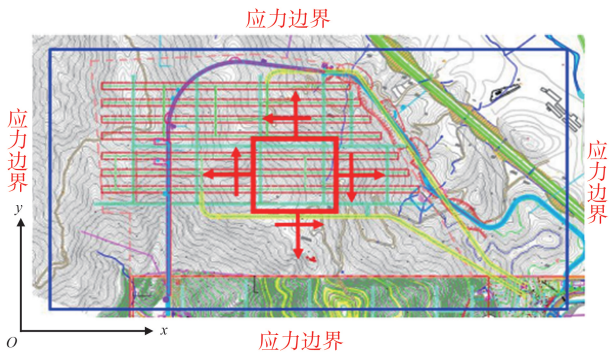


图 3 边界条件设置图

Fig.3 Boundary condition setting diagram

x 方向主应力

$$\sigma_x = 0.019 8H + 1.826, \quad (4)$$

式中 H 为地下埋深。

y 方向主应力

$$\sigma_y = 0.362H + 1.428. \quad (5)$$

z 方向主应力

$$\sigma_z = 0.026H. \quad (6)$$

剪切应力

$$\tau_{xy} = -0.003 7H + 0.087. \quad (7)$$

边界条件设置完成后,采用 FLAC^{3D} 模拟生成洞室岩体的初始应力分布状态。

2.5 监测断面与监测点

拟建库区共 7 条主洞室,自南向北分别为 11#、12#、13#、14#、15#、16#、17#,长度分别为 920、890、860、820、780、750、710 m。洞室跨度 20 m,高 30 m,间距 30 m(13#和 14#主洞室间距 40 m),洞室底板标高-60 m。为了获得主洞室不同位置处的应力应变,在每个洞室周围设置了 8 个监测点,如

图 4 所示。

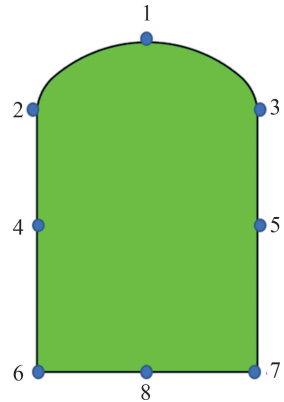


图 4 主洞室监测点布置示意图

Fig.4 Layout of monitoring points in main cavern

2.6 模拟结果

2.6.1 位移

为了分析主洞室开挖后破碎带 P₂ 处洞室围岩的位移分布,以图 2 中坐标 O 为原点,提取模型中 x=330 m(考虑破碎带 P₂)处围岩水平位移云图、竖直位移云图和监测点的位移信息,如图 5 和表 2 所示,其中监测点 2~7 记录水平位移,监测点 1、8 记录竖直位移;云图上正表示和坐标轴方向一致,负表示和坐标轴方向相反。

从图 5 和表 2 可以看出:由于破碎带 P₂ 在该截面处穿过 15#、16#主洞室,在该区域洞室围岩的最大水平位移达到 24.71 mm,各洞室围岩较大水平位移发生在洞室边墙中部,其中 15#洞室边墙中部与 16#洞室边墙中部水平位移相对较大,最大位移为 18.08~24.71 mm,围岩收敛现象明显,施工过程中应加强该区域位移监测;洞室拱顶均有沉降,沉降较大处发生在 15#~17#洞室,最大沉降达 17.15 mm,洞室底板均有隆起,最大沉降约为 18.59 mm,发生在 15#洞室底板,该区域洞室拱顶沉降和底板隆起现象应在施工过程中重点监测,加强支护措施。由于该截面只是选取 P₂ 破碎带穿过主洞室的代表性截面,故推测其余被 P₂ 破碎带穿过的主洞室部分同样在施工过程中应加强支护措施。

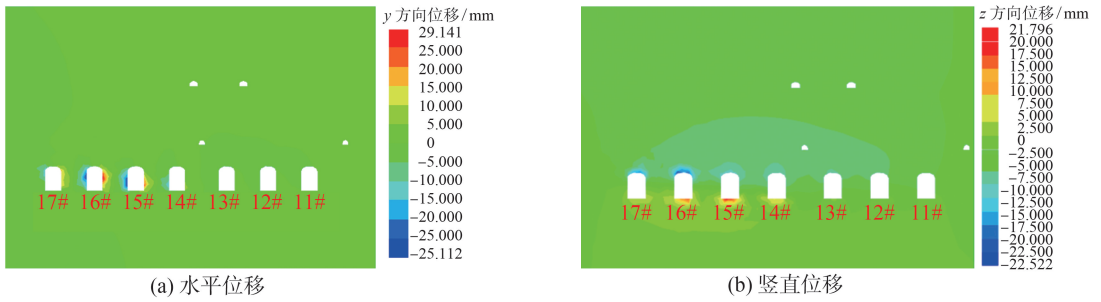


图5 $x=330\text{ m}$ 处洞室围岩位移云图

Fig.5 Displacement cloud diagram of cavern surrounding rock at $x=330\text{ m}$

表2 $x=330\text{ m}$ 处洞室围岩监测点位移

Table 2 Displacement of surrounding rock monitoring point of cavern at $x=330\text{ m}$

洞室编号	位移/mm							
	监测点 2	监测点 3	监测点 4	监测点 5	监测点 6	监测点 7	监测点 1	监测点 8
11#	1.66	1.43	2.08	2.79	0.35	1.84	4.53	1.85
12#	2.02	0.46	2.93	2.02	0.45	1.33	6.72	2.01
13#	2.11	0.87	4.84	2.55	0.98	1.03	7.92	2.79
14#	2.91	1.58	9.51	4.86	5.45	3.25	9.25	9.28
15#	14.55	4.34	24.71	18.41	7.53	7.43	10.72	18.59
16#	17.01	13.71	18.08	22.63	3.50	5.49	17.15	14.66
17#	11.32	16.65	6.28	14.54	12.62	14.03	16.10	7.04

2.6.2 应力

为了分析主洞室开挖后破碎带 P_2 处洞室围岩的应力分布,提取模型中 $x=330\text{ m}$ (考虑破碎带 P_2)

处围岩最大主应力云图、最小主应力云图以及监测点应力监测结果,如图6和表3所示。云图上压应力为负,拉应力为正。

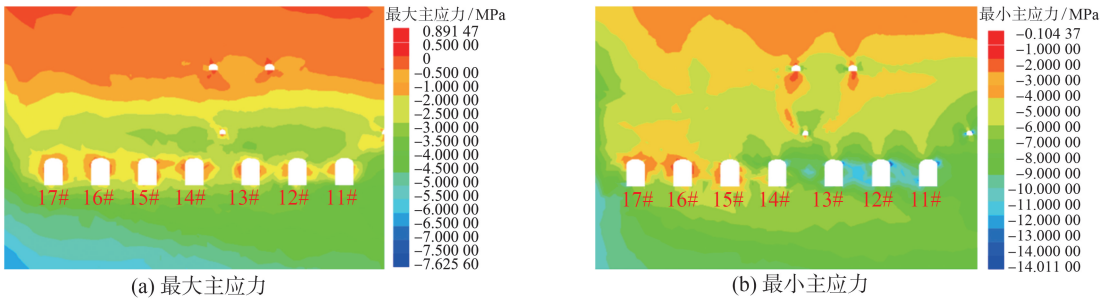


图6 $x=330\text{ m}$ 处洞室围岩主应力云图

Fig.6 Principal stress cloud diagram of cavern surrounding rock at $x=330\text{ m}$

表3 $x=330\text{ m}$ 处洞室围岩最大主应力

Table 3 The maximum principal stress of cavern surrounding rock at $x=330\text{ m}$

洞室编号	最大主应力/MPa							
	监测点 2	监测点 3	监测点 4	监测点 5	监测点 6	监测点 7	监测点 1	监测点 8
11#	7.28	8.89	12.62	9.89	8.43	10.86	8.29	8.47
12#	6.13	11.24	13.77	8.92	9.55	10.26	9.40	6.92
13#	5.69	9.48	12.17	7.55	8.62	9.07	9.72	7.81
14#	6.08	6.75	10.54	4.30	6.61	4.48	6.90	4.79
15#	4.17	2.28	4.43	1.88	2.94	4.18	3.72	3.22
16#	2.81	1.91	2.25	3.07	2.38	5.14	4.92	3.73
17#	2.67	2.55	2.15	5.73	2.56	9.26	5.15	5.83

由图6可以看出,破碎带 P_2 对研究区域围岩的应力分布产生扰动,破碎带影响区域内洞室拱部与边墙区域压应力较小,出现明显的压应力释放现象,例如15#~17#主洞室由于应力发生扰动,应力集

中现象消失,而应力释放现象则更加明显,应力释放区域的应力分别为1.88、1.91、2.15 MPa,施工时应考虑该区域围岩稳定性较差,加强支护工作,防止围岩发生破坏。11#~14#主洞室边墙上部出现局

部压应力集中区,根据表 3 可知,最大压应力分别为 12.62、13.77、12.17、10.54 MPa,小于二长花岗岩抗压强度,因此不会发生围岩的压裂破坏,但在现场施工过程中需要持续对该区域应力集中区进行应力监测,以保证正常施工安全。该区域无明显的拉应力区。

2.6.3 塑性区

为了分析主洞室开挖后破碎带 P_2 处洞室围岩的塑性区分布,研究破碎带 P_2 对洞室稳定性的影

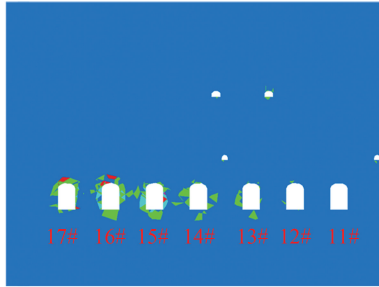


图 7 $x=330$ m 处主洞室塑性区分布云图

Fig.7 Distribution cloud diagram of plastic zone in main cavern at $x=330$ m

响,提取 $x=330$ m(考虑破碎带 P_2)处塑性区云图,如图 7 所示。11#主洞室围岩附近无明显塑性区分布,12#~17#主洞室均存在塑性区,由于破碎带 P_2 的影响,13#~17#均存在范围较大的塑性区,塑性区范围达到 10 m,塑性区类型主要为剪切破坏区和拉破坏区,要密切关注破碎带 P_2 穿过的主洞室区域,对该区域进行重点加固支护处理,防止围岩发生破坏。

应力状态

- 无应力状态
- 受剪状态-现在 受剪状态-过去
- 受剪状态-现在 受剪状态-过去 受拉状态-过去
- 受剪状态-过去
- 受剪状态-过去 受拉状态-过去

3 围岩参数不确定性分析

3.1 工况设置

地下水封洞库库区地质条件存在不确定性会影响洞库稳定性,本次考虑围岩物理力学参数和地应力方向的不确定,分析这些围岩参数不确定对洞库稳定性的影响。为此,设置了 5 个工况,其中工况 1 的参数设置与表 1 相同,反映了工程的实际情况,同时作为基准工况与其他对照组进行对比。由于微风化层二长花岗岩作为库区的主体部分,对洞室

开挖稳定性起到关键作用,因此工况 2 和工况 3 在工况 1 的基础上只将微风化层二长花岗岩围岩物理力学参数(包含弹性模量、泊松比、密度、内摩擦角、黏聚力和抗拉强度)分别上调 10%和下调 10%,具体参数设置见表 4、5,目的是分析围岩物理力学参数不确定性对主洞室稳定性模拟的影响。工况 4 和工况 5 的围岩物理力学参数与工况 1 一致,应力场方向在工况 1 的基础上分别向右和向左偏转 10° ,即最大主应力方向分别为北偏西 22° 和北偏西 42° ,目的是分析地应力方向不确定性对洞室稳定性的影响。

表 4 工况 2 数值模拟中物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters in numerical simulation under condition 2

岩体	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	摩擦角/($^\circ$)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
中风化二长花岗岩	4.77	0.31	2 450	29.5	0.76	0.84
微风化二长花岗岩	37.90	0.22	2 882	42.6	1.72	1.21
破碎带 P_1 、 P_2 、 P_3	1.30	0.35	2 300	24.0	0.35	0.40
节理密集带 J_6	5.00	0.30	2 500	30.6	0.81	0.89

表 5 工况 3 数值模拟中物理力学参数

Table 5 Physical and mechanical parameters in numerical simulation under condition 3

岩体	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	摩擦角/($^\circ$)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
中风化二长花岗岩	4.77	0.31	2 450	29.5	0.76	0.84
微风化二长花岗岩	31.00	0.18	2 358	34.8	1.41	0.99
破碎带 P_1 、 P_2 、 P_3	1.30	0.35	2 300	24.0	0.35	0.40
节理密集带 J_6	5.00	0.30	2 500	30.6	0.81	0.89

3.2 数值模拟结果

按照第 2 章的数值模拟方向开展不同参数条件

下的洞室稳定性分析,获得工况 2~5 的位移、应力和塑性区结果,如图 8~10 所示。

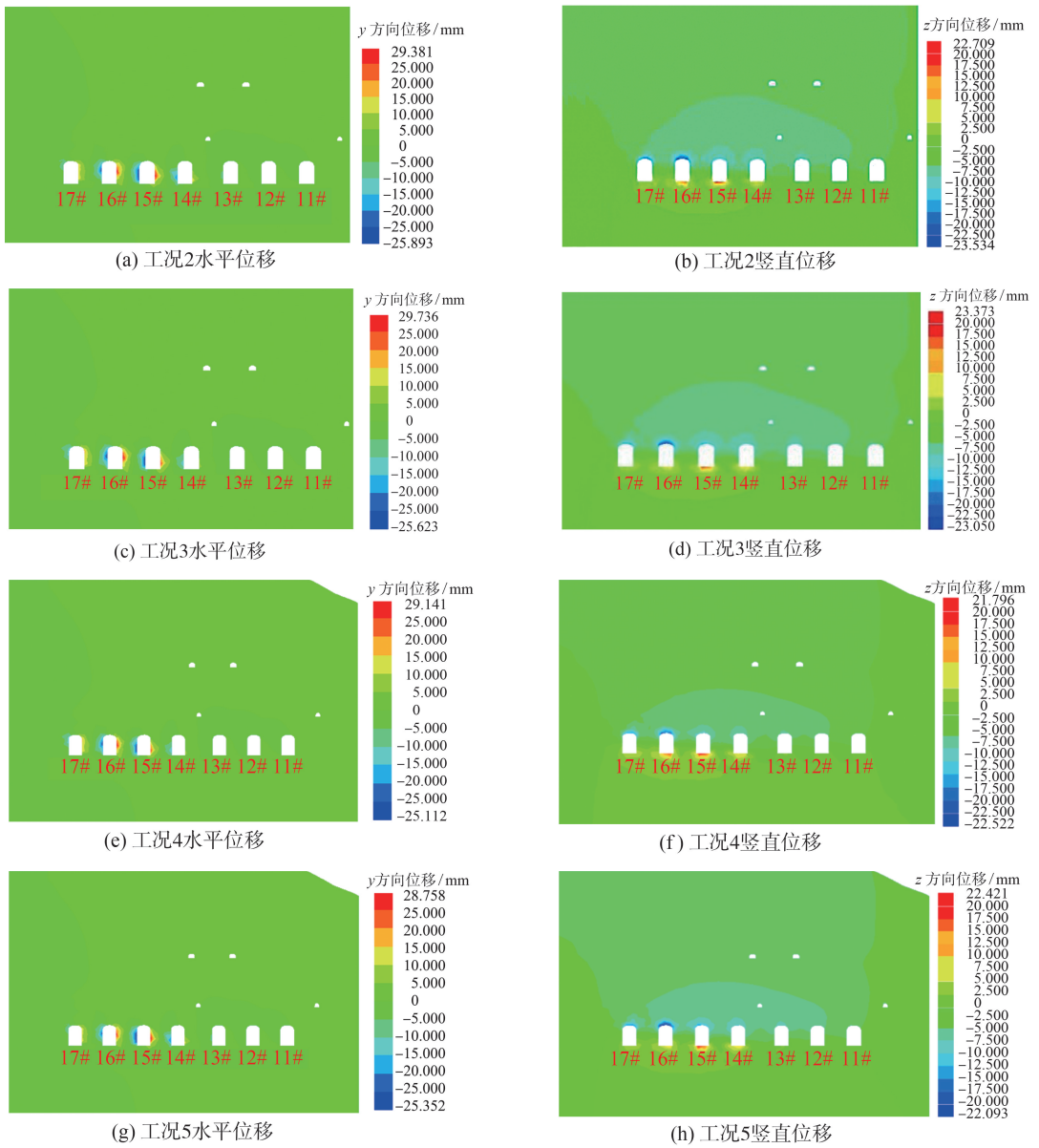
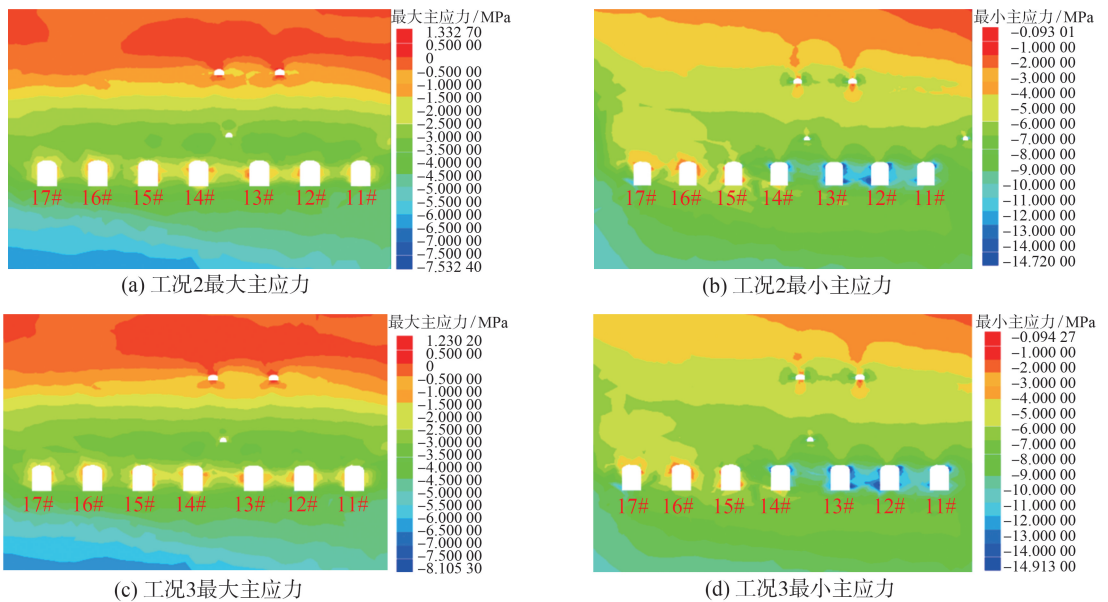


图 8 洞室围岩位移云图

Fig.8 Displacement cloud diagram of cavern surrounding rock



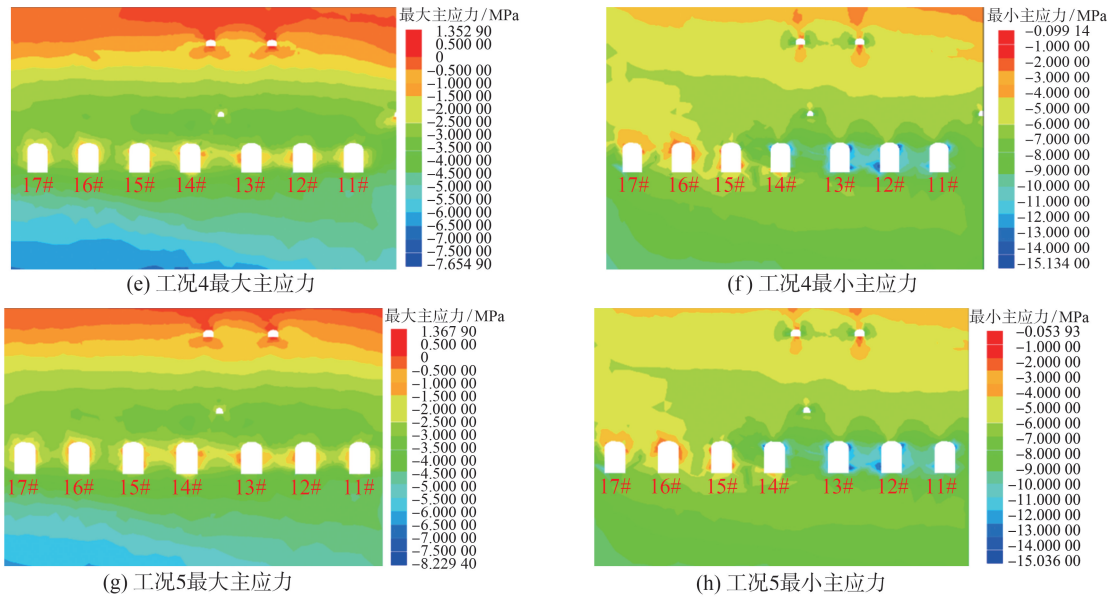


图 9 洞室围岩主应力云图

Fig.9 Principal stress cloud diagram of cavern surrounding rock

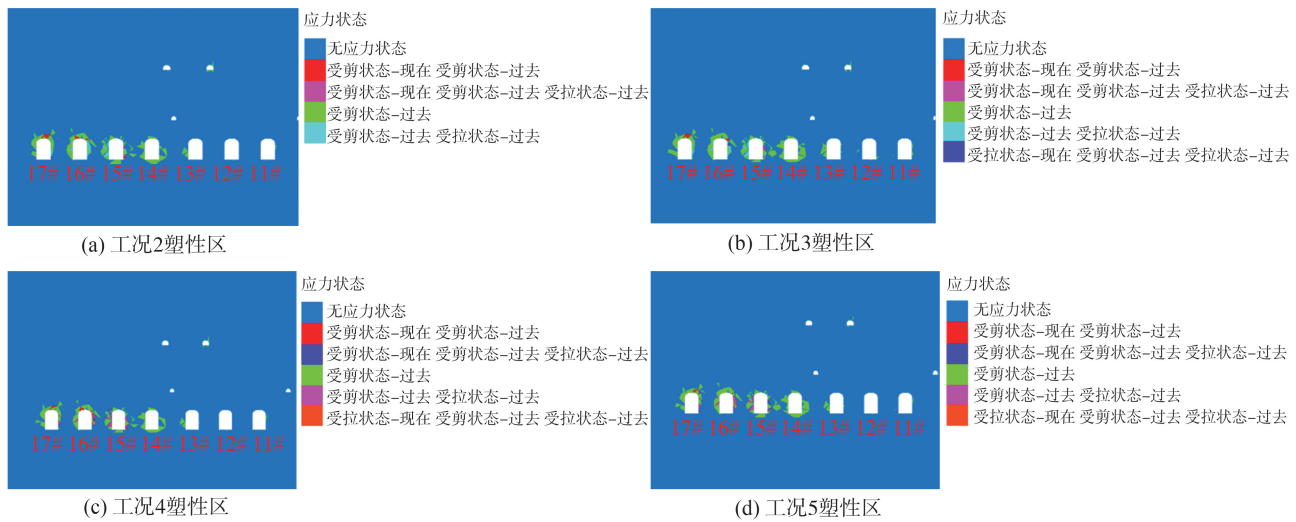


图 10 洞室围岩塑性区云图

Fig.10 Cloud diagram of plastic zone of surrounding rock of cavern

3.3 岩体物理力学参数不确定影响

在位移方面,对比图 5 和图 8(a)~(d)可知,各洞室围岩水平位移较大处均发生在洞室边墙中部,最大水平位移处均发生在由破碎带 P₂ 穿过的 15#、16#主洞室;洞室拱顶均有沉降,洞室拱顶沉降较大处发生在 16#、17#洞室。当岩体的物理力学参数上调 10%,在该区域洞室围岩最大水平位移达到 24.71 mm,边墙中部最大水平位移为 18.08~24.71 mm,相比工况 1 降低了 8.8%~13.9%;16#、17#洞室拱顶沉降分别为 15.26、14.89 mm,降低了 11%;14#~16#洞室底板隆起较为明显,最大隆起为 17.06 mm,降低了 8.2%。当岩体的物理力学参数下降 10%时,围岩最大水平位移增大到 28.78 mm,整体边墙最大位移为 21.43~28.78 mm,相比工况 1 增大了 16.5%~18.5%;16#、17#洞室拱顶沉降分别为

22.35、20.16 mm,增大了 30.3%;14#~16#洞室底板隆起较为明显,最大隆起为 23.06 mm,增大了 20%。

在应力方面,对比图 6 和图 9(a)~(d)可知,破碎带 P₂ 对研究区域围岩的应力分布均产生扰动,破碎带影响区域内洞室拱部与边墙区域压应力均较小,出现明显的压应力释放现象;各洞室最大压应力为 13.5~14.9 MPa,最大拉应力为 0.06~0.23 MPa,不会发生压裂或者拉破坏。当岩体的物理力学参数上调 10%,各洞室最大压应力为 13.5~14.5 MPa,相比工况 1 增大 5.3%~28.1%。当岩体的物理力学参数下降 10%时,各洞室最大压应力达 14.9 MPa,相比工况 1 增大 8.2%。

在塑性区方面,对比图 7 和图 10(a)~(b)可知,当岩体的物理力学参数上调 10%或下调 10%,由于破碎带 P₂ 的影响,13#~17#均存在范围较大的

塑性区,塑性区范围为4~10 m,塑性区类型主要为剪切破坏区和拉破坏区。对比工况1,整体的塑性区分布没有太大改变,集中分布在13#~17#主洞室,洞室周边最大塑性区尺寸没有改变,局部塑性区范围有所减小。

总之,岩体的物理力学参数上调10%,围岩位移降低8.8%~13.9%,最大压力增加10%;岩体的物理力学参数下调10%,围岩位移增加16.5%~30.3%,最大应力增加8.2%。围岩参数下调对围岩位移会产生较大的影响,即围岩物理力学参数不确定性会对围岩稳定性产生较大影响。

3.4 主洞室地应力方向不确定影响

在位移方面,对比图5和图8(e)~(h)可知,和工况1一样,各洞室围岩较大水平位移均发生在洞室边墙中部,最大水平位移处均发生在由破碎带 P_2 穿过的15#、16#主洞室;洞室拱顶均有沉降,洞室较大拱顶沉降发生在16#、17#洞室。当地应力方向向右偏转 10° ,在该区域洞室围岩最大水平位移为25.65 mm,边墙中部最大水平位移为20.23~25.65 mm,相比工况1增大了3.8%~11.9%;16#、17#洞室拱顶沉降分别为18.56、15.67 mm,增大了8.2%;最大隆起为20.12 mm,增大了8.2%。当地应力方向向左偏转 10° ,最大水平位移为25.78 mm,边墙最大位移为20.12~25.78 mm,相比工况1增大了4.3%~11.3%;16#、17#洞室拱顶沉降分别为20.08、18.67 mm,增大了17.1%;最大隆起为22.42 mm,增大了20.6%。

在应力方面,对比图6和图9(e)~(h)可知,和工况1一样,破碎带 P_2 对研究区域围岩的应力分布均产生扰动,破碎带影响区域内洞室拱部与边墙区域压应力均较小,出现明显的压应力释放现象;各洞室最大压应力为12.8~14.5 MPa,最大拉应力为0.07~0.11 MPa,不会发生压裂或者拉破坏。地应力方向偏转会增加各洞室的压力,增加幅度小于10%。

在塑性区方面,对比图7和图10(c)~(d)可知,相比工况1,整体的塑性区分布没有太大改变,集中分布在13#~17#主洞室,塑性区最大范围没有改变,局部塑性区范围有所减小。

地下水封洞库设计要求洞轴线与水平最大主应力方向宜平行或小角度相交,从本研究看,随着应力方向与轴向方向角度的增加,位移和最大应力都会增加。

4 结论

本研究基于某地下水封洞库工程建立相应的

模型,开展数值模拟。通过模拟结果评价了主洞室开挖过程中的稳定性,分析了参数不确定性对主洞室开挖稳定性评价的影响,主要结论如下。

(1) 主洞室开挖过程中,较大水平位移主要分布在洞室边墙中部,拱顶均有沉降,底板均有隆起。主洞室最大位移均发生在不良地质带与主洞室的交汇处,特别是被破碎带 P_2 影响的断面,位移显著增加,需重点监测并时刻根据开挖情况进行支护加固处理,必要时可先进行预注浆加固再开挖。

(2) 破碎带对主洞室开挖后围岩的应力分布有较大影响,破碎带影响区域内洞室拱部与边墙区域压应力较小,会出现明显的压应力释放现象,使应力集中现象消失,而无破碎带影响的洞室均存在应力集中区。

(3) 破碎带对主洞室开挖后塑性区的范围有较大影响,在被破碎带横穿的13#~17#主洞室围岩均存在范围较大的塑性区,塑性区范围达到10 m,而无破碎带影响的11#主洞室围岩附近无明显塑性区分布,12#主洞室围岩存在较小范围的塑性区。

(4) 在破碎带 P_2 与主洞室交汇断面处,当围岩的物理力学参数上调10%时,对围岩应力分布产生的影响较大,应力增加5.3%~28.1%;当围岩的物理力学参数下降10%时,围岩的位移显著增加,水平位移增加16.5%~18.5%,竖直位移增加30%。本研究中,在围岩物理力学参数上调或降低10%范围内对塑性区的分布影响较小。

(5) 在破碎带 P_2 与主洞室交汇断面处,当地应力场向左或向右偏转 10° 时,洞室位移、应力和塑性区范围相对典型工况均会增加,表明主洞室的走向应与水平应力方向保持平行或小角度相交,更利于增加主洞室的稳定性。

参考文献:

- [1] 张巧玲. 全国政协委员钱七虎:国家石油储备库应建于地下[N]. 科学时报, 2007-03-14(1).
- [2] 王梦恕, 杨会军. 地下水封岩洞油库设计、施工的基本原则[J]. 中国工程科学, 2008(4): 11-16.
WANG Mengshu, YANG Huijun. Basic principles of design and construction of underground water sealed cavern oil depot[J]. Engineering Science, 2008(4): 11-16.
- [3] 杨明举. 地下水封裸洞储气应力场、渗流场、储气场耦合模型的研究及其工程应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2001.
YANG Mingju. Study on coupling model of gas storage stress field, seepage field and gas storage field in groundwater sealing bare hole and its engineering application

- [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2001.
- [4] ÅBERG B. Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rock[C]//Proceedings of the First International Symposium on Storage in Excavated Rock Caverns. Stockholm, Sweden: Pergamon, 1977: 399-413.
- [5] GOODALL D C. Containment of gas in rock caverns[D]. Berkley, USA: University of California, 1986.
- [6] 李仲奎, 刘辉, 曾利, 等. 不衬砌地下洞室在能源储存中的作用与问题[J]. 地下空间与工程学报, 2005(3): 350-357.
LI Zhongkui, LIU Hui, ZENG Li, et al. The role and problem of unlined underground caverns in energy storage [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005(3): 350-357.
- [7] LINDBLOM U. The development of hydrocarbon storage in hard rock cavern[C]//Proceedings of the International Conference of Storage of Gases in Rock Caverns. Trondheim, Norway: [s.n.], 1989: 15-30.
- [8] 崔京浩. 地下工程与城市防灾[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [9] 王者超, 李术才, 薛翊国, 等. 大型地下水封石油洞库围岩完整性、变形和稳定性分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2011, 41(3): 112-117.
WANG Zhechao, LI Shucai, XUE Yiguo, et al. Analysis of integrity, deformation and stability of surrounding rock in large groundwater sealed oil caverns [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2011, 41(3): 112-117.
- [10] ZHUANG D Y, TANG C A, LIANG Z Z, et al. Effects of excavation unloading on the energy-release patterns and stability of underground water-sealed oil storage caverns[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 61: 122-133.
- [11] 颜丙乾, 任奋华, 蔡美峰, 等. THMC 多场耦合作用下岩石物理力学性能与本构模型研究综述[J]. 工程科学学报, 2020, 42(11): 1389-1399.
YAN Bingqian, REN Fenhua, CAI Meifeng, et al. Review of petrophysical and mechanical properties and constitutive model under multi-field coupling of THMC[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(11): 1389-1399.
- [12] 田昊, 李术才, 王者超, 等. 地下水封石油洞库施工期监控量测与稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1710-1720.
TIAN Hao, LI Shucai, WANG Zhechao, et al. Monitoring measurement and stability analysis during the construction period of groundwater sealed oil cavern [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1710-1720.
- [13] 柳献, 赵子蓬, 叶宇航, 等. 类矩形盾构隧道结构极限承载力分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 1283-1295.
LIU Xian, ZHAO Zipeng, YE Yuhang, et al. Analysis of ultimate bearing capacity of quasi-rectangular shield tunnel structure[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2020, 48(9): 1283-1295.
- [14] 陈祥. 黄岛地下水封石油洞库岩体质量评价及围岩稳定性分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2007.
CHEN Xiang. Quality evaluation and stability analysis of surrounding rock in Huangdao groundwater sealed oil cave[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007.
- [15] 时洪斌. 黄岛地下水封洞库水封条件和围岩稳定性分析与评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
SHI Hongbin. Analysis and evaluation of water sealing conditions and surrounding rock stability of Huangdao groundwater sealing reservoir[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [16] MA K, TANG C A, WANG L X, et al. Stability analysis of underground oil storage caverns by an integrated numerical and microseismic monitoring approach [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2016, 54: 81-91.
- [17] LI H Z, LOW B K. Reliability analysis of circular tunnel under hydrostatic stress field[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(1/2): 50-58.
- [18] 赵明. 隧道工程的可靠性分析方法与应用[D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.
ZHAO Ming. Reliability analysis method and application of tunnel engineering [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2015.
- [19] LU H, GUTIERREZ M, KIM E. Empirical approach for reliability evaluation of tunnel excavation stability using the Q rock mass classification system [J]. Underground Space, 2022, 7(5): 862-881.
- [20] ZHANG W G, GOH A T C. Reliability assessment on ultimate and serviceability limit states and determination of critical factor of safety for underground rock caverns [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 32: 221-230.
- [21] 卢卫莉. 地下水封洞库围岩结构面力学特性与块体稳定性[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
LU Weili. Mechanical characteristics and block stability of surrounding rock structure of groundwater sealing reservoir [D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.
- [22] 中华人民共和国水利部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.