

白鹿塬西南废弃黄土窑洞边坡破坏机理研究

刘祥¹, 苏生瑞^{1*}, 肖云飞²

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710000; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 以白鹿塬西南长安区四坡村废弃黄土窑洞边坡为研究对象, 借助迈达斯(MADIS GTS NX)有限元软件模拟不同窑洞状态下窑洞边坡的应力应变特征, 进而揭示废弃黄土窑洞边坡变形破坏机理并提出相应的防治措施。分析总结不同状态窑洞边坡的MADIS数值模拟结果显示, 随着窑洞废弃, 土体含水量的增加导致土体力学性质降低, 局部临空面土体发生失稳掉落, 加之降雨影响, 土体力学性质进一步降低, 窑洞拱形结构遭到破坏, 从而引起窑洞所在边坡发生崩塌等整体失稳破坏。

关键词: 废弃黄土窑洞; 窑洞状态; 数值模拟; 破坏机理

中图分类号: TU431

文献标识码: A

Study on Failure Mechanism of Abandoned Loess Cave Slopes in Southwest of Bailu Plateau

LIU Xiang¹, SU Shengrui^{1*}, XIAO Yunfei²

(1. College of Geology Engineering and Surveying, Chang'an University, Shanxi, Xi'an 710000, China;

2. North China Municipal Engineering Design And Research Institute Co., Ltd, Tianjin 300074, China)

Abstract: The abandoned loess cave slope of Sipo Village, Chang'an District in southwest of Bailu Plateau was taken as the research object in this paper. And the characteristics of stress and strain of the cave slopes under different cave states were simulated with the help of MADIS GTS NX finite element software, thus further revealing the deformation and failure mechanism of the abandoned loess cave slope and put forward corresponding prevention measures. The analysis and summary of the MADIS numerical simulation results of the cave slopes in different states shows: as the cave is abandoned, the increase of the soil moisture content leads to the decrease of the mechanical properties of the soil and the loss of the local free surface soil. Furthermore, with the effect of rainfall, the mechanical properties of the soil are further reduced, and the arch structure of the cave is destroyed, which causes the collapse of the slope where the cave is located and other overall failure.

Key words: abandoned loess cave; cave state; numerical simulation; failure mechanism

黄土在全球广泛分布, 而中国是世界上黄土分布范围最大的国家之一, 分布面积约为 64 万 km²^[1]。陕西省是典型的黄土分布区, 具有罕见的黄土分布范围、覆盖厚度及分布的连续性^[2]。黄土是一种特殊的第四纪沉积物, 具有直立性等特点, 且黄土地区沟壑纵横, 塬、梁、峁广泛发育^[3], 加之在降雨较少时黄土具有的力学性质稳定且强度较高等一系列特征^[4-5], 从而孕育了中国北方极

具特色的民居形式——黄土窑洞。随着社会经济的不断发展, 越来越多的人选择离开祖祖辈辈生活的黄土窑洞。然而当窑洞废弃后, 缺少日常维护, 且人们常常在废弃窑洞前修建新房, 窑洞前的房屋阻隔光线、降低空气流通等因素导致窑洞内潮湿, 土体含水量增大, 黄土稳定性降低, 窑洞危险性增高。此外, 由于无人维护, 窑洞所在边坡植物根劈作用强烈, 裂缝发育, 导致坡体稳定性降

收稿日期: 2020-06-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41672285); 甘肃省地下水工程及地热能重点实验室开放基金资助项目(211826190519)

作者简介: 刘祥(1993-), 男, 陕西商洛人, 硕士研究生, 主要从事边坡破坏机理等方面的研究。

* 通讯作者: 苏生瑞(1963-), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害防治方面的教学与科研工作。

低,严重威胁人民群众的生命财产安全及道路交通等公共基础设施安全。因此对废弃黄土窑洞边坡进行稳定性和防治对策的研究具有重大意义。国内学者一直以来重点对黄土窑洞变形破坏和稳定性进行研究,并在黄土窑洞稳定性影响因素、稳定性分析方法和破坏模式等方面取得了卓著的成果。如赵龙^[6]采用 ANSYS 有限元软件对不同降雨入渗深度下和不同覆土厚度的黄土窑洞进行了静力分析,探究降雨入渗对黄土窑洞结构性能的影响;张帅^[7-8]运用有限元的强度折减法分析了窑洞形态参数的敏感性对黄土窑洞稳定系数的影响,并探寻了黄土窑洞稳定性的评价方法等。

本文以西安市长安区四坡村崩塌隐患为研究对象,运用 MADIS 软件建立研究区窑洞模型并进行数值模拟计算,分析窑洞在不同状态下的应力应变和位移场特征,剖析废弃黄土窑洞边坡稳定的影响因素和破坏机理,不仅对废弃黄土窑洞地区地质灾害的防治提供理论支撑,同时也对废弃黄土窑洞灾害的机理研究具有重要的参考意义。

1 有限元模型建立

1.1 几何模型

通过对研究区实地勘察、实地测量地形图及对废弃黄土窑洞尺寸的调查和统计,同时结合黄土边坡陡峻情况和本文的研究目的,以研究区实测剖面为基础建立三维几何模型(图1),采用窑洞尺寸为窑拱宽度 3 m,立壁高 2 m,窑拱高 1.5 m,窑腿宽度 2 m,进深 7 m,上覆土层厚 7 m 的双孔窑洞为研究对象,模型计算范围沿洞径各个方向均不小于 3~4 倍洞径。

1.2 地质模型

通过野外现场勘察,废弃黄土窑洞所在边坡主要由 Q_2^{eol} 黄土和古土壤组成,因此在数值模拟中只考虑 2 类岩土材料:① Q_2^{eol} 黄土、②古土壤。根据实地勘察确定的土层厚度、土层空间分布和窑洞尺寸建立研究区三维地质模型(图1),土层共三层:上层为厚 6.0 m 的 Q_2^{eol} 黄土层;中层古土壤层厚 1.0 m;下层为 Q_2^{eol} 黄土层。

1.3 数学力学模型

通过对地质模型中地层赋予相应的物理力学参数来建立数学力学模型。研究不同窑洞状态下含水量对黄土窑洞边坡稳定的影响,窑洞状态共分四种:正常居住(干燥)、窑洞废弃(稍湿)、依窑

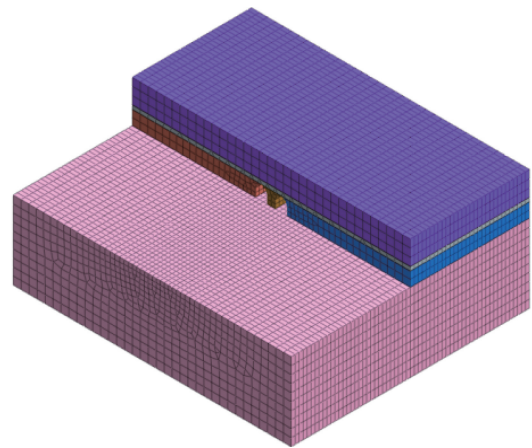


图1 研究区三维计算模型网格划分图

Fig. 1 Grid layout of 3D computation model in study area

建房(潮湿)和饱和工况,网格划分图如图1所示。

依据研究区土样的固结快剪试验结果和《工程地质手册(第五版)》综合确定本次模拟中材料的物理力学参数(表1)。土体材料设置为各向同性材料,并采用摩尔-库伦本构模型。

2 数值模拟结果分析

采用 MIDAS 中的施工阶段分析,通过赋予岩土材料不同的含水量来模拟不同窑洞状态的实际情况。设置边坡未开挖窑洞的初始应力状态为 0,计算开挖后窑洞的应力、位移和应变,并运用强度折减法(SRM法)计算窑洞开挖后边坡的稳定性。

2.1 稳定性分析

通过 MIDAS 有限元软件内置强度折减法对不同状态下黄土窑洞的稳定性进行模拟分析,得出各状态下窑洞边坡稳定性系数。

分析结果可以发现,正常居住的黄土窑洞稳定性较高,虽然人工斩坡和坡脚挖窑的人类活动降低了边坡的稳定性,但边坡仍处于稳定状态,稳定性系数可达 $K=1.25$;当窑洞废弃时,窑洞所在边坡稳定系数明显下降,此时系数 $K=1.05$;而随着依窑建房,窑内采光不足、通风较差、黄土吸潮等情况愈发严重,窑洞土体含水量升高,窑洞边坡稳定性进一步降低至 $K=1.02$;连续降雨时窑洞周围土体的含水量持续升高,边坡的稳定性则不断降低,最终稳定性系数降至 $K=0.97$,导致边坡失稳。

2.2 位移分析

在计算完成后,对结果云图和数据进行数值分析,在 MADIS GTS NX 的后处理单元中提取模型

表 1 模拟区地层物理力学参数取值表

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of formation in simulation area

窑洞状态	地层	含水量	重度	粘聚力	内摩擦角	压缩模量	泊松比
	名称	$\omega/\%$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	E/MPa	μ
正常居住	Q ₂ ^{col} 黄土	3.1	13.6	45.6	29.7	39.2	0.25
	古土壤	2.6	15.4	52.3	37.0	45.0	0.25
废弃窑洞	Q ₂ ^{col} 黄土	11.3	14.7	27.5	27.3	32.5	0.26
	古土壤	9.5	16.4	32.0	34.5	34.6	0.25
依窑建房	Q ₂ ^{col} 黄土	15.0	15.2	23.4	25.2	27.0	0.27
	古土壤	13.9	17.1	26.7	32.2	29.4	0.26
饱和工况	Q ₂ ^{col} 黄土	20.5	15.9	19	24	18.1	0.28
	古土壤	18.0	17.7	22.5	31.1	21.3	0.27

在 X、Y 和 Z 方向的位移云图并进行分析,发现不同黄土状态的窑洞模型的竖向(Z 轴方向)位移和横向(X 轴方向)位移的改变最为明显,并且 Z 向和 X 向的位移变化对窑洞的稳定性最具决定性意义,所以在对窑洞的位移分析中,分别对竖向(Z 轴方向)和横向(X 轴方向)位移进行分析研究。图中位移以坐标轴正向为正。

由图 2 和图 3 的计算结果可以看出,窑洞拱顶和窑底中间处的竖直方向(Z 向)位移值较大,窑洞两侧立壁中间处的水平方向(X 向)位移值较大。由于模型几何对称,研究时控制点选取窑腿中心一侧窑洞的窑口底部中点(a 点)、拱顶中点(b 点)和窑腿中部(c 点)为研究对象(图 4)。

经计算得出控制点的位移结果如表 2 所示。

从表 2 中可以得出,不同窑洞状态同一位置处

的位移都随着土体含水量的增加而增加。根据位移值正负的规定,a 点发生了向上的位移,即窑洞底部隆起;b 点发生了向下的位移,即窑洞拱顶发生下沉,c 点发生了向右的位移,即窑洞侧壁土体向内部位移。

综合以上可以得出:(1)在含水量的增加导致窑洞状态变化的过程中,各控制点的位移值逐渐增大,且水平和竖直方向位移范围也在逐渐扩大,体现出随着窑洞逐渐废弃,窑洞所在边坡的稳定性逐渐降低。同时,从云图中发现 Z 和 X 方向最大位移值和位移范围均向窑洞内部移动,反映出随着窑洞废弃,含水量的增加,窑洞所在坡体的破坏形式由坡体表层局部破坏向坡体整体失稳变化,发生整体崩塌和滑坡的可能性增大。(2)最大竖向(Z 向)位移产生在黄土窑洞的拱顶中点附

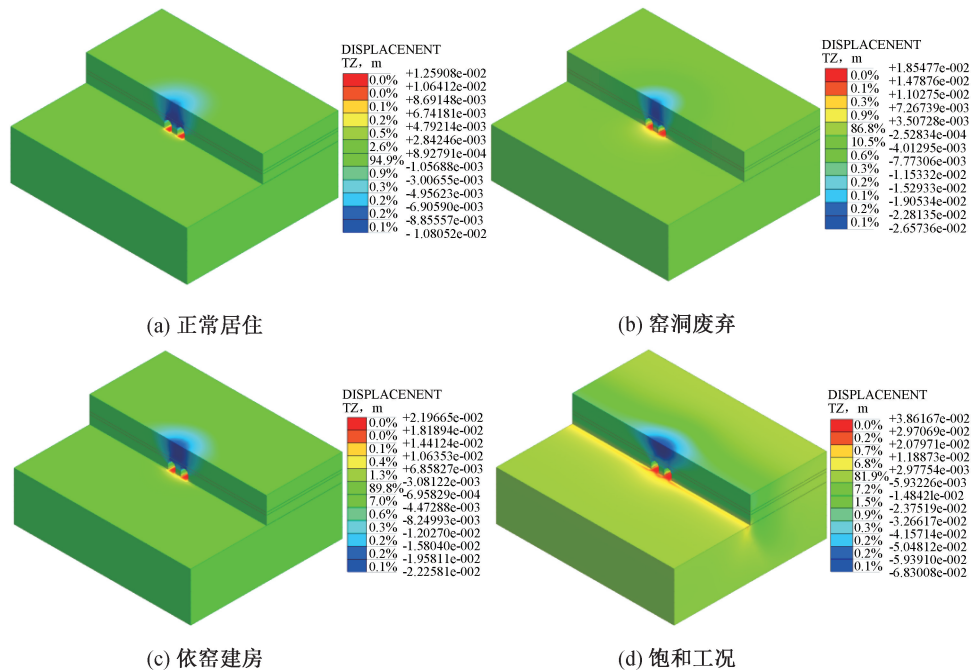


图 2 不同窑洞状态 Z 向位移云图

Fig. 2 Z-direction's displacement nephogram in different cave states

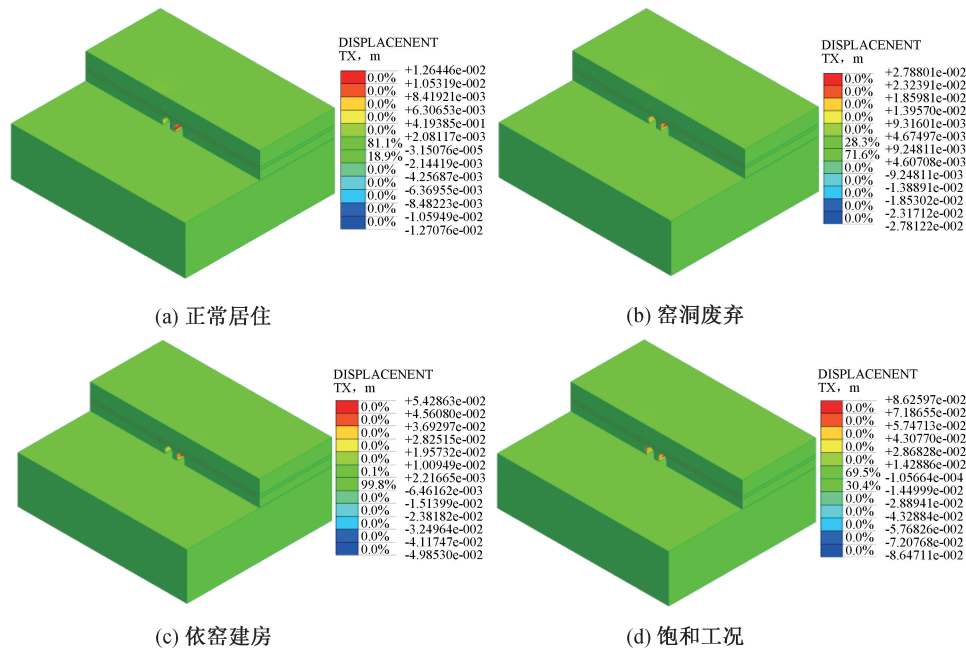


图3 不同窑洞状态 X 向位移云图

Fig. 3 X-direction's displacement nephogram in different cave states

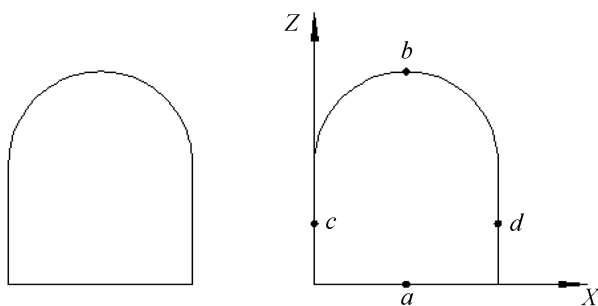


图4 双孔窑洞位移控制点的位置

Fig. 4 Position of displacement control points in double-hole cave

表2 各状态下黄土窑洞控制点位移

Tab. 2 Displacement of control points in loess cave under various states

窑洞状态	a 点	b 点	c 点	d 点
	(Z 向, cm)	(Z 向, cm)	(X 向, cm)	(X 向, cm)
正常居住	1.26	-1.08	1.26	-0.76
窑洞废弃	1.85	-2.66	2.78	-1.60
依窑建房	2.20	-2.34	5.43	-2.32
饱和工况	3.86	-6.83	8.63	-4.84

近,约为 6.83 cm。这主要是由于窑洞上部土体在重力作用下的沉降,容易发生局部或整体的坍塌破坏;窑洞底部产生竖直向上的位移,最大值约为 3.86 cm,表现为窑洞底部土体隆起,这是因为窑洞开挖导致底部土体因卸荷作用发生向上挤出。(3)最大水平(X 向)位移产生在两窑洞相邻的立

壁中部,约为 8.63 cm。这是由于窑洞开挖破坏了土体原有的平衡状态,窑洞两侧土体在水平压力的作用下向洞内发生变形,且水平位移仅集中在窑腿表面。

2.3 应力分析

分析应力云图(图 5、图 6)可以发现,由于洞室开挖导致应力重分布,窑洞周围土体较同一深度的土体应力更大。窑洞因土拱作用主要承担竖直和水平向的应力,其中窑腿承担竖向应力较大,而窑洞两侧立壁因周围土体朝向洞内松胀变形,其水平应力较大,且在转角处容易产生应力集中、裂缝等变形破坏,进而造成窑洞失稳;窑顶和窑底表现为较低的竖向应力,但水平应力较高,容易引起窑洞拱顶裂缝发育,从而产生掉块等现象,而窑底则表现为局部隆起。

多个窑洞的存在使得窑洞中间土体应力值较大,且两窑拱中间土体的水平应力更为突出,更容易发育竖向裂缝,从而降低窑洞所在边坡的整体稳定性。

2.4 塑性应变分析

塑性应变图(图 7)能反应出潜在破坏位置,为治理不稳定边坡提供依据。对黄土窑洞在含水量增大过程中可能出现的破坏位置,即对塑性应变区的分布情况进行研究。在塑性应变图中,认为最大等效塑性应变值为 0 的区域没有进入塑性区,大于 0 时,则认为该区域进入塑性区,且数值越大

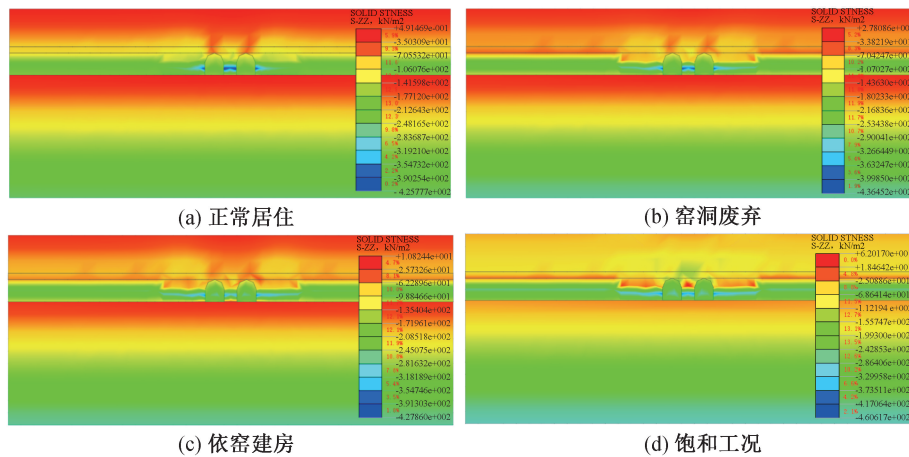


图 5 不同窑洞状态竖向应力云图

Fig. 5 Vertical stress nephogram in different cave states

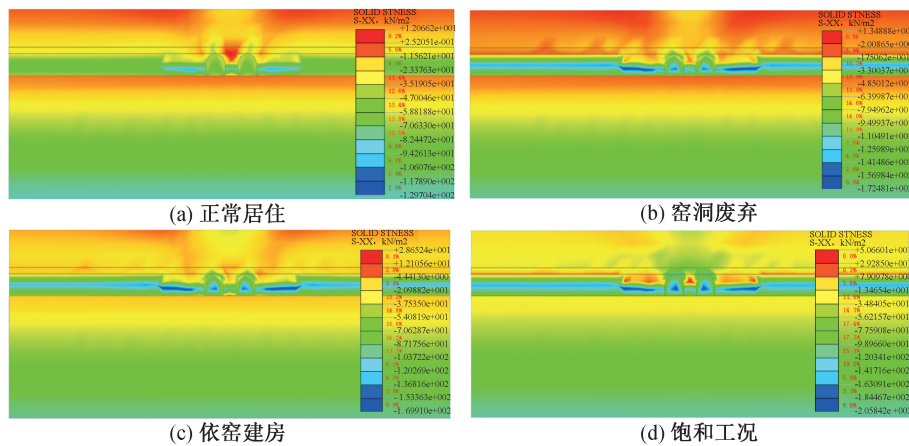


图 6 不同窑洞状态水平应力云图

Fig. 6 Horizontal stress nephogram in different cave states

越不安全。通过对不同黄土状态下的塑性应变云图进行观察和对比发现,塑性区最先出现在两窑洞相邻的直臂中点附近,且两窑洞间区域土体的等效塑性应变值显著大于其他区域土体。

对比模拟结果可以发现,随着窑洞状态的变化即坡体含水量的不断增加,塑性应变区的范围及数值不断增大,坡体稳定性逐渐降低,且塑性应变区有向坡顶和坡体内部扩展的趋势,黄土窑洞边坡发生整体失稳的可能性增大。

3 废弃黄土窑洞边坡破坏机理分析

窑洞处于正常居住状态时,黄土性质受含水量影响较小,窑洞依靠自身结构产生的抗力,承受所在边坡的土压力,窑洞拱顶和侧壁等关键部位位移较小,产生的变形以弹性变形和闭合原有裂隙为主;窑洞废弃后,洞内土体吸潮明显,一方面土体容重增加,另一方面由于黄土具有水敏性,窑

洞土体本身的力学性质降低,窑洞立壁的水平应力和位移逐渐增大,拱顶和窑洞底部的竖向位移也逐渐增大,窑洞所在边坡黄土的原状结构开始破坏,窑洞出现较明显变形,容易发生局部破坏;依窑建房后,前排房屋遮光、挡风作用明显,窑洞更加潮湿,窑洞所在边坡土体自重进一步增加,黄土力学性质进一步降低,应力和位移值继续增大,且应力、位移范围及最大值向窑洞内部移动,窑洞所在边坡稳定性进一步降低,局部破坏范围增大且有发生整体破坏的可能;在降雨的持续作用下,废弃黄土窑洞各主要部位变形进一步发展,黄土粘聚力大幅降低,窑洞拱形结构遭到破坏,窑洞整体处于失稳状态,极易发生崩塌和滑坡等整体失稳破坏。

4 四坡村崩塌隐患治理

4.1 研究区概况

研究区地貌属黄土台塬原边斜坡地带,如图 8

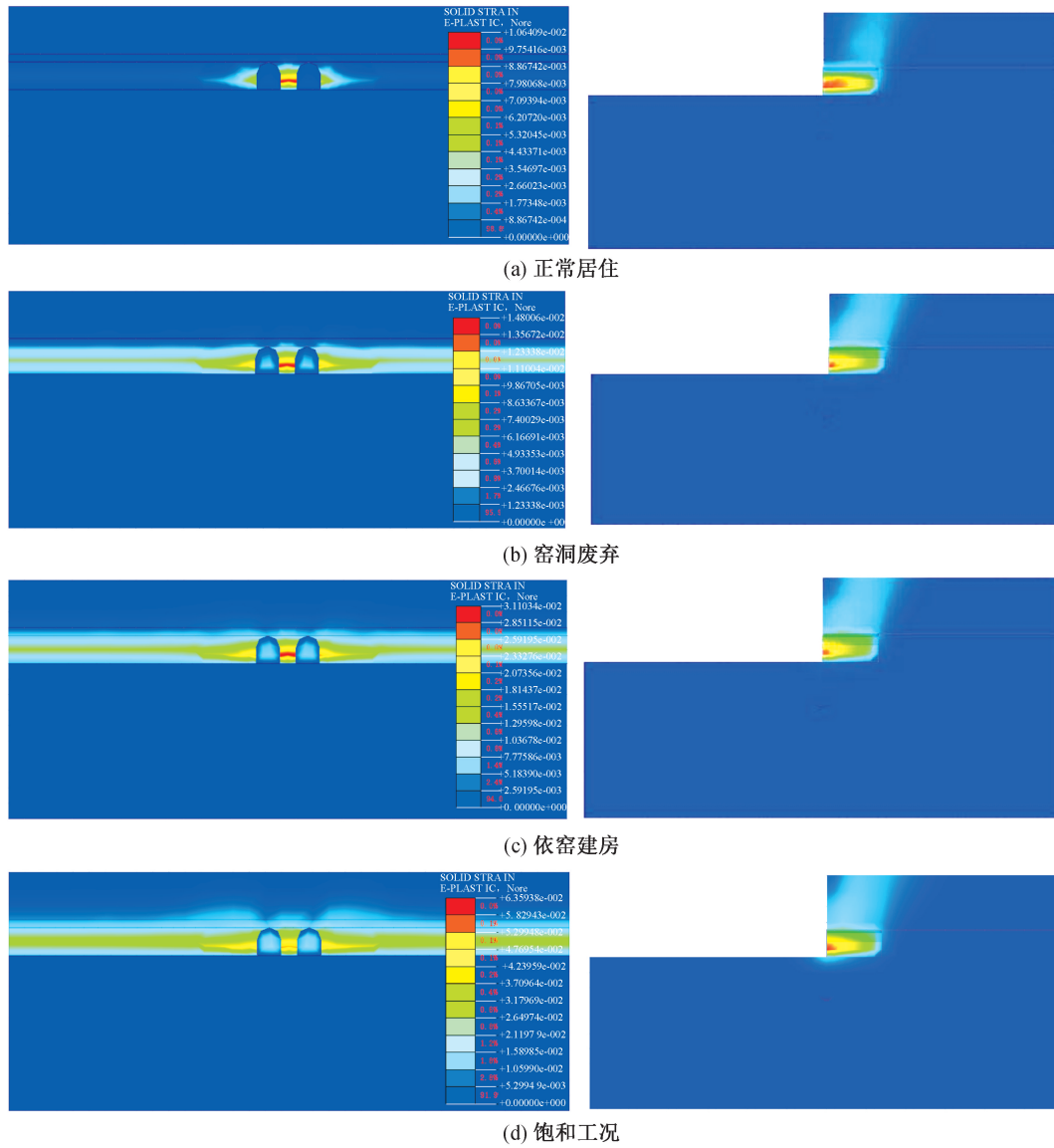


图7 不同窑洞状态塑性应变云图

Fig.7 Plastic strain nephogram in different cave states



图8 研究区航拍图

Fig.8 Aerial photos of the study area

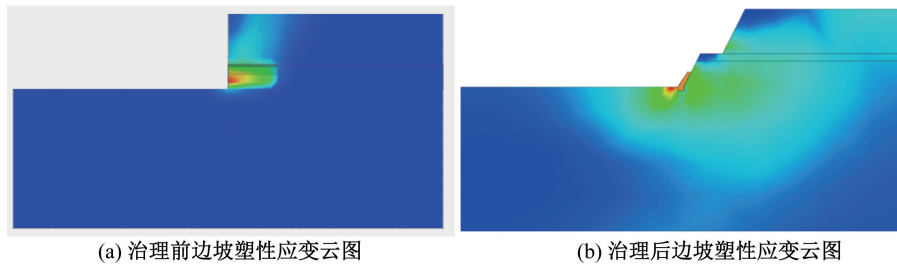


图9 不同窑洞状态塑性应变云图

Fig. 9 Plastic strain nephogram of different cave states

所示,废弃黄土窑洞所在斜坡临空面的坡面形态为阶梯形,陡立,坡度在 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$,局部呈近直立状甚至反倾。地层岩性为第四系中更新统风积黄土和古土壤。据实地调查统计研究区共有废弃黄土窑洞17孔,窑洞类型为靠崖式窑洞,尺寸总体情况为:窑洞宽 $2.5\sim 3.5\text{ m}$,窑洞高 $3.0\sim 3.5\text{ m}$ (窑洞直壁高 1.5 m ,拱高 $1.5\sim 2.0\text{ m}$),窑洞进深 $6.0\sim 8.0\text{ m}$,窑腿宽度 $2.0\sim 3.0\text{ m}$,覆土厚度 $5.0\sim 8.0\text{ m}$ 。

4.2 治理措施

根据废弃窑洞边坡数值模拟研究的结果,应对窑洞窑脸、拱顶、两窑洞拱圈间、直臂、直臂与拱圈交接以及窑脚等薄弱部位采取重点治理措施。综合边坡崩塌隐患的成因、规模、性质及破坏特征与现场实际施工条件限制,得出治理的总体思路是采用“削坡+窑洞封堵+排水+坡脚护面墙”的工程措施。治理工程应遵循“安全可靠,经济合理,环保美观”的原则。

“削坡+窑洞封堵+排水+坡脚护面墙”治理方案具体参数为:对图1中的尺寸按照二级边坡、斜坡坡率为 $1:0.5$ 、斜坡间平台宽 3.0 m ,窑洞封堵和坡脚设置顶宽 0.5 m 、底宽 0.8 m 、基础埋深 0.5 m 、墙高 2.0 m 的护面墙。

4.3 治理数值模拟

对上述治理方案运用MIDAS数值模拟软件分析,地层参数是窑洞状态为饱和工况时的物理力学参数(表1),护面墙弹性模量取 $2.70\times 10^7\text{ Pa}$,泊松比取 0.25 ,容重取 20 kN/m^3 。

采用SRM强度折减法计算治理后饱和工况状态下边坡的稳定性,并对治理前后饱和工况状态下边坡的塑性云图(图9)进行对比分析。

治理后饱和工况状态下边坡的安全系数为 $F_s=4.3$,边坡处于安全状态,边坡稳定性较治理前(安全系数 $F_s=0.97$)有了很大提高。边坡在治理前有明显的塑性区,而治理后边坡的塑性区和最大

等效应变有着明显的减小,边坡稳定性和安全性得到很大提高。

5 结论

1)随着窑洞状态的改变(含水量的改变)边坡稳定性逐渐降低。废弃黄土窑洞边坡稳定性较正常居住窑洞明显降低。

2)随着窑洞状态的改变,窑洞含水量也发生相应的变化,而土体含水量的增加导致土体力学性质的降低,局部临空面土体发生失稳掉落,随着降雨等因素的作用,土体力学性质进一步降低,窑洞拱形结构遭到破坏,从而引起窑洞所在边坡发生崩塌和滑坡等整体失稳破坏。

3)从坡体防治、坡面防治和防排水工程三个方面,给出相应的废弃黄土窑洞边坡的防治措施。针对四坡村废弃黄土窑洞边坡提出“削坡+窑洞封堵+排水+坡脚护面墙”的工程治理方案,经数值模拟对比分析得出,该防治措施效果显著。

参考文献:

- [1]刘典祖.黄土力学与工程[M].西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [2]彭建兵,林鸿州,王启耀,等.黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J].工程地质学报,2014,22(4):684-691.
- [3]宋焱勋.陇东地区黄土工程地质分区和变形特性研究[J].土工基础,2004(1):50-54.
- [4]乔平定,李增钧.黄土地区工程地质[M].北京:水利电力出版社,1990.
- [5]王永焱,林在贵.中国黄土的结构特征及物理力学性质[M].北京:科学出版社,1990.
- [6]赵龙.降雨入渗对生土窑居结构性能的影响研究[D].郑州:郑州大学,2017.
- [7]王念秦,张帅.基于正交设计的窑洞稳定性敏感性分析[J].科学技术与工程,2017,17(28):119-124.
- [8]王念秦,张帅.基于盲数理论的黄土窑洞稳定性定量评价[J].地下空间与工程学报,2017,13(S2):822-827.

(责任编辑 王利君)