Stability Analysis of Basalt Slopes in High-Altitude Cold Regions Using ANSYS Finite Element Method

Zhao Pengtao[1], Zhang Yunhui[1*]

Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China
**Corresponding author. zhangyunhui@swjtu.edu.cn*

ABSTRACT

To investigate the impact of freeze-thaw cycles on the stability of basalt slopes in high-altitude mountainous regions, the strength reduction method was combined with Ansys software. Leveraging Ansys' robust modeling capabilities, a plane failure slope finite element model was established. Numerical simulations were conducted on basalt slopes subjected to varying freeze-thaw cycles. Slope instability and failure were comprehensively assessed based on finite element calculation divergence, the formation of a continuous plastic zone from the slope base to the crest, and abrupt displacement changes at characteristic locations. The slope stability coefficient was analyzed and determined. Results indicate that the stability coefficient of slopes decreases significantly with increasing freeze-thaw cycles. Furthermore, slopes subjected to freeze-thaw cycles exhibit greater maximum displacement during failure compared to unfrozen slopes. These findings provide valuable reference for analyzing factors influencing slope stability.

Keywords: *High-altitude slopes; Freeze-thaw cycles; Strength reduction method; Stability coefficient; ANSYS*

高寒山区玄武岩边坡稳定性 Ansys 有限元分析

赵鹏涛[1]，张云辉[1*]

[1] *西南交通大学地球科学与工程学院，四川 成都，611756*

摘要

为研究冻融循环对高寒山区玄武岩边坡稳定性的影响，将强度折减法与 Ansys 软件相结合，借助 Ansys 强大的建模功能，建立平面破坏性边坡有限元模型，对不同冻融次数下的玄武岩边坡进行了数值模拟，并以有限元计算不收敛、塑性区形成坡底到坡顶的贯通和特征部位位移发生突变综合判断边坡失稳破坏，分析得出边坡的稳定性系数。结果表明：经过不同冻融次数的边坡稳定性系数有明显的减小，并且边坡发生失稳破坏时经过冻融循环作用的边坡比未冻融边坡的最大位移量大，可为分析边坡稳定性影响因素提供参考。

关键字：高寒边坡，冻融循环，强度折减法，稳定性系数，ANSYS

1.引言

我国高度重视高寒地区资源的开发和基础工程的建设,冻融灾害引发的岩体滑坡等灾害频发，严重威胁着高寒地区建设项目的安全和稳定。因此，研究高寒地区冻融条件下边坡的稳定性问题，对于高寒地区岩土工程灾害的防治具有重要意义。

国内外学者对于在冻融循环作用下的岩体

© The Author(s) 2025
S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_30

度折减有限元法是现在运用最广泛、最准确的边坡稳定性评价方法。本文利用强度折减法，基于 Ansys 有限元数值模拟分析，对于在不同冻融循环次数作用下的玄武岩边坡安全系数进行比较，得出冻融破坏对边坡稳定性的影响，为边坡稳定性影响因素的探求提供参考。

2. 有限元分析

（1）未冻融岩石水平位移与塑性应变云图

图 1 分别表示折减系数 F=1.40，F=1.88 和 F=2.36 时边坡模型的 X 方向位移云图与等效塑性应变云图。由图可见。开始边坡最大位移出现在坡顶，当折减系数 F=1.40 时，最大位移为 36.000mm，当折减系数 F=1.88 时，最大位移为 38.083mm，当折减系数 F=2.36 时，最大位移为 132.872mm。由此可知，随着强度折减系数 F 的逐渐增大，边坡水平方向的位移不断增大，边坡逐渐出现一条由坡脚通向坡顶的圆弧型剪切带，边坡底部的塑性区从无到有，从小变大再减小。当 F=2.36 时位移发生突变，塑性区出现从坡脚贯通到坡顶的滑弧，此时有限元计算刚好不收敛，边坡发生破坏并开始失稳。

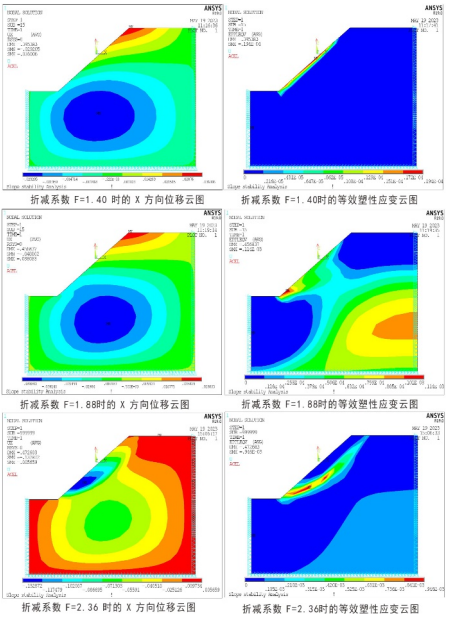

图 1 未冻融岩石部分折减系数 X 方向位移与等效塑性应变云图

（2）冻融 10 次后岩石水平位移与塑性应变云图

图 2 分别表示折减系数 F=1.38，F=1.86 和 F=2.20 时边坡模型的 X 方向位移云图与等效塑性应变云图。由图 2 可见，当折减系数 F=1.38 时，最大位移为 37.091mm，当折减系数 F=1.86 时，最大位移为 36.087mm，当折减系数 F=2.20 时，最大位移为 145.795mm。由此可知，随着强度折减系数 F 的逐渐增大，边坡水平方向的位移呈现先减小后增大的趋势，冻融 10 次的岩体与未冻融土的塑性应变发展过程大体相同。当 F=2.20 时位移发生突变，塑性区出现从坡脚贯通到坡顶的滑弧，此时有限元计算刚好不收敛，边坡发生破坏并开始失稳

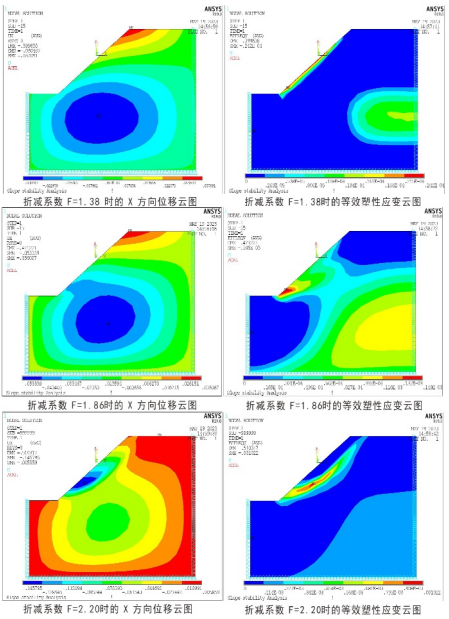

图 2 冻融 10 次后岩石部分折减系数 X 方向位移与等效塑性应变云图

（3）冻融 20 次后岩石水平位移与塑性应变云图

图 3 分别表示折减系数 F=1.36，F=1.84 和 F=2.10 时边坡模型的 X 方向位移云图与等效塑性应变云图。由图 3 可见，当折减系数 F=1.36 时，最大位移为 38.604mm，当折减系数 F=1.84 时，最大位移为 32.983mm，当折减系数 F=2.10

时，最大位移为 159.620mm。由此可知，冻融 20 次的岩体与冻融 10 次岩体的位移变化趋势大体相同，冻融 20 次的土体与未冻融土的塑性应变发展过程大体相同。当 F=2.20 时位移发生突变，塑性区出现从坡脚贯通到坡顶的滑弧，此时有限元计算刚好不收敛，边坡发生破坏并开始失稳。

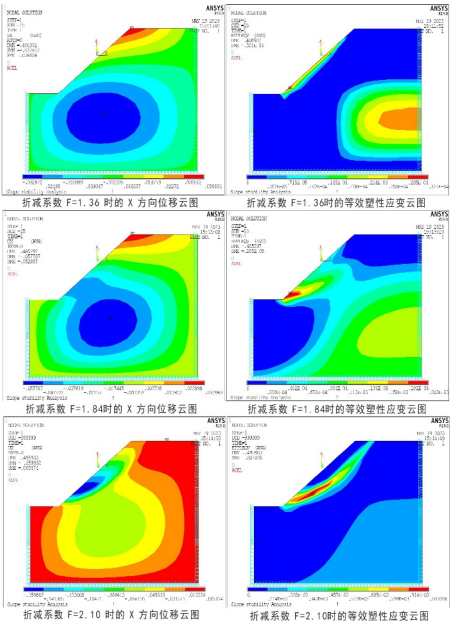

图 3 冻融 20 次后岩石部分折减系数 X 方向位移与等效塑性应变云图

（4）冻融 30 次后岩石水平位移与塑性应变云图

图 4 分别表示折减系数 F=1.28，F=1.62 和 F=1.96时边坡模型的X方向位移云图与等效塑性应变云图。由图 4 可见，当折减系数 F=1.28 时，最大位移为 38.427mm，当折减系数 F=1.62 时，最大位移为 37.004mm，当折减系数 F=1.96 时，最大位移为 151.076mm。由此可知，冻融 30 次的岩体与冻融 10 次岩体的位移变化趋势大体相同，冻融 30 次的土体与未冻融土的塑性应变发展过程大体相同。当 F=1.96 时位移发生突变，塑性区出现从坡脚贯通到坡顶的滑弧，此时有限元计算刚好不收敛，边坡发生破坏并开始失稳。

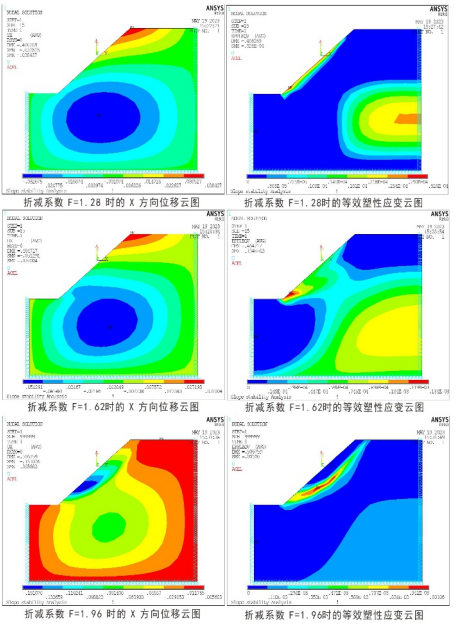

图 4 冻融 30 次后岩石部分折减系数 X 方向位移与等效塑性应变云图

3.结论

本文主要以玄武岩质高寒边仰坡为研究对象，通过变化冻融循环次数为影响因素，得出不同冻融循环次数岩体的初始黏聚力 c 和内摩擦角φ的值。然后使用 Ansys 软件对不同冻融循环次数下的玄武岩边坡进行数值模拟，通过数值模拟结果分析冻融破坏对边坡稳定性的影响。本文得到以下结论：

（1）玄武岩冻融后的力学性质变化：玄武岩在经过不同冻融次数后其黏聚力 c 和内摩擦角φ都呈现不断减小的趋势，在经过 10 次冻融、20 次冻融和 30 次冻融后黏聚力 c 分别减小 3.82%、5.29%、7.37%，内摩擦角φ分别减小 4.54%、4.27%、4.18%。随着冻融循环次数的增加，黏聚力减小量不断增大，而内摩擦角减小量则趋于稳定。这表明，冻融循环作用对岩体的黏聚力和内摩擦角影响程度不同。

（2）利用 ANSYS 软件对不同冻融次数下的玄武岩边坡进行强度折减法安全系数计算。通过数值模拟结果可以得出：未冻融边坡的安

全系数为 2.34，冻融 10 次的边坡安全系数为 2.18，冻融 20 次的边坡安全系数为 2.08，冻融 30 次的边坡安全系数为 1.94。由此可知，在不同的冻融循环次数作用下，边坡的安全系数明显降低，这表明边坡的稳定性在降低。在自重应力作用下，边坡的最大位移主要发生在边坡中部边缘；未冻融边坡在失稳时的最大位移量也明显小于经过冻融的边坡；边坡在发生失稳破坏时，塑性区都会出现从坡脚贯通到坡顶的滑弧。

（3）从有限元计算结果来看，经过多次冻融循环作用的边坡最大变形量明显大于未冻融边坡，同时边坡的安全系数也会显著减小。结合这两方面可以判断，冻融循环作用对边坡稳定性的影响较大，这主要是由于冻融作用会减少岩体的抗剪强度，从而影响边坡的稳定性和安全系数。所以，在高寒地区受到冻融作用的边坡应采取一定的措施进行支护，并不断进行监测，以确保边坡的稳定。

参考文献：

[1] 宋勇军,杨慧敏,谭皓等.冻融环境下不同饱和度砂岩损伤演化特征研究[J].岩石力学与工程报,2021,40(08):1513-1524.[SONG Yongjun, YANG Huimin,TAN Hao et al. Characterization of damage evolution insandstone with different saturatio nunder freeze-thaw environment [J].Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(08):1513-1524.]

[2] 贺晶晶,师俊平.冻融后不同含水状态砂岩的剪切破坏特性[J].岩石力学与工程学报, 2018,37(06): 1350-1358.[HE Jingjing, SHI Junping. Shear damage characteristics of sandstones with different water content after freeze-thaw [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2018,37(06):1350-1358.]

[3] 宋勇军,车永新,陈佳星等.冻融作用下不同饱和度红砂岩损伤力学特性[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(12):3493-3502. [SONG Yongjun, CHE Yongxin,CHEN Jiaxing et al. Mechanical properties of damage in red sandstone with different saturation under freeze-thaw action [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2020, 51(12): 3493-3502.]

[4] 贺晶晶,师俊平.冻融循环作用下砂岩三点弯曲断裂性能试验及其破坏形态研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(12):2917-2925.[HE Jingjing, SHI Junping.Experiment on threepoint bending fracture performance of sandstone under freeze-thaw cycles and its damage morphology [J].Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2917-2925.]

[5] 刘慧,杨更社,申艳军等.冻融–受荷协同作用下砂岩细观损伤演化CT可视化定量表征[J].岩石力学与工程学报,2023(5):1136-1149.[LIU Hui,YANG Changshe,SHEN Yanjun et al.CT visualization and quantitative characterization of sand-stone finescale damage evolution under synergistic freeze-thaw loading [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023(5): 1136-1149.]

[6] CHEN Yifan,LIN Hang,LIANG Linyuan.Freeze-thaw failure characteristics and strength loss of non-penetrating fractured rock mass with different fracture densities [J].Theor-etical and Applied Fracture Mechanics,2023, 124:103792

[7] YU Jun, ZHANG Qiang, JIA Chaojun et al. Experimental and DEM simulations of the mechanical properties of rock under freeze-thaw cycles [J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 211:103866.

[8] LIU Hui, HAN Senlei, YANG Gengshe et al. Experimental study on mesostructural damage evolution of sandstone subjected to freeze-thaw cycling under uniaxial compression [J].Cold and Arid Regions,2022,14(5):317-328.

[9] LI Pengfei,LIU Hongbo,ZHANG Yu et al.Based on the Strength Reduction Slope Stability Finite Element Analysis of Engineering Examples[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 170-173:885-888.

[10] JIANG Qinghui,QI Zufang, Wei Wei et al. Stability assessment of a high rock slope by strength reduction finite element method[J]. Bulletin of Engineering Geology And The Environment,2015,74(4):1153-1162.

[11] 高冯,李小军,迟明杰.基于有限元强度折减法的单双面边坡稳定性分析[J].工程地质学报,2020,28(3):650-657 . [GAO Feng, LI Xiao jun,CHI Mingjie.Stability analysis of single and double sided slope based on finite element strength reduction method[J]. Journalof Engineering Geology,2020,28(3): 650-657.]

[12] 荣光旭,彭艳,田凯.基于 Python 的 ABAQUS 有限元强度折减法程序在边坡稳定性分析中的应用[J].中北大学学报(自然科学版),2021,42(04):332-339.[Rong Guangxu,Peng Yan,Tian Kai.Applica-
tion of Python based ABAQUS finite element strength subtraction program in slope stabil-ity analysis [J].Journal of North Central University (Natural Science Edition)]

[13] LIU Fuming.Stability Analysis of Geotec-hnical Slope Based on Strength Reduction Method [J]. Geotechnical And Geological Engineering, 2020, 38(4):3653-3665.

[14] 宋彦琦,郑俊杰,李向上等.冻融循环作用对土质边坡稳定性的影响[J].科学技术与工程,2020,20(19):7885-7890. [SONG Yanqi,ZHENG Jun jie,LI Shangcheng et al. Effects of freeze-thaw cycling on the stability of soil slopes[J].Science,Technology and Engineering, 2020, 20(19): 7885-7890.]

[15] 贾帅,李树芳,王猛等.基于遍布节理模型的边坡冻融循环研究[J].金属矿山,2023(4):192-198. [JIA Shuai,LI Shufang,WANG Meng et al. Study of freeze-thaw cycles in slopes based on a spread out nodal model[J].Metal Mining, 2023(4): 192198]

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.