

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222343

富水长大裂隙对地下洞室施工期围岩稳定影响研究

吕小龙^{1,2,3}, 景来红^{1,2}, 王玉杰³, 翟利军¹, 田万福¹

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003; 3. 中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 北京 100048)

摘要: 江门中微子地下实验室在施工支洞开挖时, 揭露三条富水长大裂隙, 局部探水孔中出现高压喷射涌水, 可能对洞室围岩稳定产生不利影响。为此, 采用离散元方法, 系统分析了开挖面不同水压力条件下 L1、L2、L3 对实验大厅围岩变形的影响。结果表明, 富水长大裂隙对工程的顶拱围岩整体稳定影响较小, 顶拱围岩在 L1 和 L2 处对开挖面排水条件变化不敏感, 随着开挖面水压升高, L3 拱肩部位变形陡增且趋势不收敛。L2 对下部水池变形基本无影响, L1、L3 附近浅部围岩出现卸荷。综合分析, 建议将 0.5 MPa 作为工程开挖面浅层围岩排水控制标准。

关键词: 高压地下水; 长大裂隙; 超大跨度; 围岩变形; 江门中微子实验站

中图分类号: TV731

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)09-0125-05

1 工程概况

江门中微子实验站位于广东省江门市, 是中国科学院高能物理研究所为解决中微子的质量顺序问题而建设的一座大型地下实验室。实验大厅为地下建筑核心, 最大埋深约 730 m, 高程范围为 -403.50 ~ -476.30 m, 整体采用“上部拱形+下部圆形水池”的组合形式, 其中上部起拱跨度 49 m, 长度 56.25 m, 起拱高度 27 m; 下部圆形水池内径 44.9 m, 高度 44.9 m。实验大厅通过斜井和竖井与地面连通。江门中微子地下室在施工支洞开挖时揭露高压地下水, 给工程安全带来极大困扰, 尤其高压水对顶拱和边墙围岩稳定的影响是建设方重点关注的问题。目前, 针对大型水电站地下厂房普遍存在的“大跨度、高边墙、高地应力、软弱结构面”等问题已开展系统研究, 并取得了丰硕成果^[1-3]。为此, 本文首先介绍了江门中微子实验站地质条件和开挖方案, 然后通过现场地质调查确定长大裂隙内高压水特征, 并制定计算方案, 最后结合数值模拟成果, 分析了高压地下水对顶拱和水池边墙围岩稳定的影响, 揭示了脉状高压水作用下地下洞室围岩变形机理, 确定了

工程开挖面浅层围岩排水控制标准, 并对局部大变形部位提出处理措施, 研究成果可为类似工程提供参考。

2 工程地质条件及开挖方案

2.1 工程地质条件

工程区大地构造单元上位于华南褶皱系(I)南部的粤北、粤东北—粤中拗陷带(II)粤中拗陷(III)的阳春—开平凹褶断束(IV), 为加里东褶皱带, 因受多次构造的影响, 地质构造较为复杂。实验大厅布置于直径约 2 km 的花岗岩侵入体内, 外围 200 m 为接触变质角岩, 再向外为古生代岩层, 包括碎屑岩、泥岩等, 岩性复杂, 性质变化较大。实验厅花岗岩质量良好, 采用水电分类、RMR 系统、Q 系统获得的岩体质量指标值分别为 $T=82$ 、 $Q=30$ 、 $RMR=73$, 在水电分类中属于典型的 II 类围岩。

在花岗岩区布置了 7 个测点, 采用水压致裂法测试地应力。在测试深度范围内, $\sigma_H=10.3\sim 15.8$ MPa, $\sigma_h=7.3\sim 11.5$ MPa, $\sigma_v=9.5\sim 16.0$ MPa。深部应力场呈 $\sigma_H>\sigma_h>\sigma_v$ 特征, 说明构造作用引起的水平应力占主导作用。根据压裂缝方

收稿日期: 2022-11-01, **修回日期:** 2022-11-30

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3202400); 河南省博士后经费资助项目(202002081); 黄河设计公司博士后研究开发项目(2020BSHZL03)

作者简介: 吕小龙(1989-), 男, 博士后, 研究方向为水利工程设计咨询, E-mail: lvxl@yrec.cn

向的印模结果,最大水主应力方向在 $N10^{\circ}W \sim N54^{\circ}W$ 之间。

2.2 开挖方案

实验大厅施工自上而下共分 4 层。I 层宽 30 m,高 11.2 m。II 层宽 49 m,高 6 m。III 层宽 49 m,高 6.2 m。IV 层宽 49 m,高 4 m。V~IX 层进行水池开挖。具体分层分块见图 1。

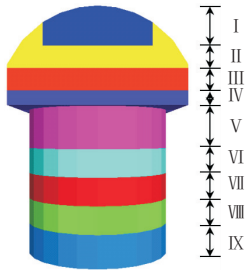


图 1 实验大厅分层开挖图

Fig. 1 Excavation schedule of experimental hall

3 高压地下水特征

高压地下水是江门地下实验室施工面临的最大的安全挑战之一,在详勘阶段,查明地下水补给主要来源于大气降水和侧向径流,实验大厅工区潜水地下水位高程 82.64 m,顶拱处水头近 500 m。鉴于实验大厅埋深大,为确定岩体在高水头压力下的透水性,在钻孔 ZK1(孔深 620 m)内进行高压压水试验,结果表明即使在 7 MPa 的水压力作用下,岩体的渗透性仍很弱,深部围岩抗渗透能力强,且在高压作用下未见扩张及冲蚀现象。

根据施工组织设计,首先斜井和竖井同步开挖,然后开挖[#]1、[#]2 施工支洞,通过施工支洞进入实验大厅施工。其中,[#]1 施工支洞与实验大厅轴线垂直,[#]2 施工支洞平行于实验大厅轴线。在斜、竖井开挖至花岗岩段时,洞壁从渗水、滴水现象发展为涌水。为保证项目建设进度,在随后掘进过程中采用探水注浆止水的施工方法。其中,斜井单孔最大出水量达 400 m³/h,竖井单孔最大出水量达 140 m³/h。

随后,在[#]1 施工支洞开挖期间,揭露了近 NEE 向的三条长大裂隙(图 2),分别通过实验大厅的北侧、中部和南侧,局部探水孔中出现高压喷射涌水。鉴于水压力较高,且排水廊道尚未形成,可能对洞室围岩稳定有不利影响。

4 高压地下水对围岩稳定的影响

长大裂隙内的水压力与赋存环境、施工开挖步、掌子面排水条件等密切相关。现场调查显示,

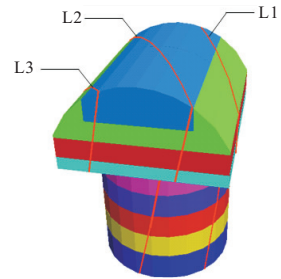


图 2 长大裂隙位置

Fig. 2 Location of large cracks

围岩地下水主要集中在这三条构造带内,形成三条脉状导水带,且导水带之间缺乏足够的水力联系,显著区别于岩体孔隙水和贯通良好裂隙网络内的地下水。

根据现实条件和工程需要,对导水带内的高压水做如下假设:① 高压地下水仅存在于三条长大裂隙内,且仅考虑静水压力作用,忽略动水压力、软化效应等影响;② 假定在初始状态下,距离开挖面 50 m 处的水压力为 5 MPa,开挖面处水压力为 0、0.5、1.0、1.5、2.0 MPa,即分别模拟敞排和不同程度排水不畅(喷矸影响、排水失效等)。

根据假设,首先构造初始地应力场和长大裂隙水压力场(图 3)。随着实验大厅开挖揭露地下水,长大裂隙内的水压力降低,地应力和水压力场将动态变化。为模拟开挖引起的排水泄压过程,将洞室开挖面上的水压力设置为指定值,进行耦合计算。图 3(b)为开挖完成后,在畅排条件下,长大裂隙内水压力分布情况。

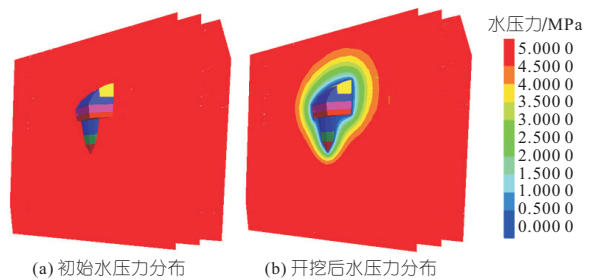


图 3 长大裂隙内水压力分布

Fig. 3 Distribution of water pressure in long cracks

4.1 岩体本构模型及参数

采用 3DEC 软件模拟开挖支护过程。本工程采用动态设计施工理念,在斜井、竖井和施工支洞开挖过程中,结合位移监测结果,反演确定了岩体和结构面参数。岩体采用 Hoek-Brown 模型,花岗岩单轴抗压强度 $UCS=100$ MPa,长大裂隙采用摩尔-库伦强度准则,围岩和长大裂隙力学参数见表 1。

4.2 顶拱围岩稳定分析

图 4 为开挖面不同水压力条件下实验大厅顶

表 1 围岩、长大裂隙力学参数

Tab. 1 The mechanical parameters of rock mass and long crack

参数	取值	参数	取值
GSI	70	G/GPa	12.9
m_i	33	$K_n / (\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$	20×10^3
m_b	11.3	$K_s / (\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$	10×10^3
s	0.0357	$\varphi / (^\circ)$	25
a	0.5014	c/MPa	0.1
K/GPa	19.5		

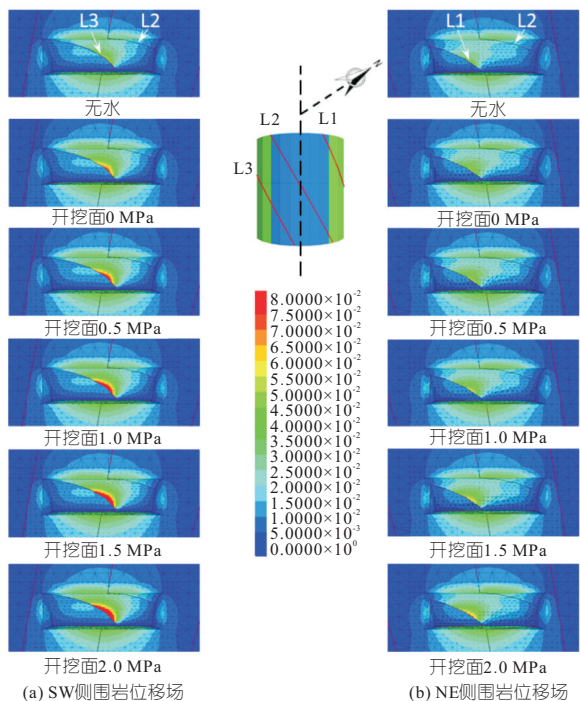


图 4 实验大厅顶拱位移(单位:mm)

Fig. 4 Displacement of top arch of experimental hall

拱位移。由图 4 可看出,长大裂隙 L1、L3 均造成顶拱位移场不连续,长大裂隙 L2 对顶拱位移场的影响较小。总体上,在开挖面不同水压力条件下,富水长大裂隙的影响范围十分有限,即使排水不畅造成开挖面处水压力达到 2.0 MPa,较大变形仅发生在长大裂隙 L3 局部,围岩未发生整体大变形,表明富水长大裂隙对顶拱围岩的整体稳定影响较小。相比较而言,当开挖面处水压较高时,L1、L2 对围岩变形的影响不明显,L3 在中部拱肩处将产生较大变形。该现象主要受长大裂隙产状和水压力控制,其中 L3 倾向开挖临空面方向,且高压水进一步降低结构面法向应力,共同诱发拱肩处围岩大变形。

为量化评估不同开挖面水压力对长大裂隙附近围岩变形的影响,沿长大裂隙布置典型监测点。图 5 为典型监测点在不同排水条件下的变形监测结果。由图 5 可看出,即使在开挖面畅排条件下,各监测点位移相对长大裂隙无水情况均有一定程度增长,表明长大裂隙内高压水对顶拱浅部围岩

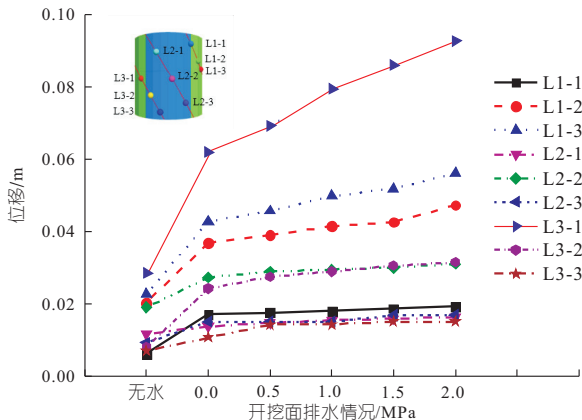


图 5 典型监测点位移与开挖面水压关系

Fig. 5 Relationship between displacement of typical monitoring points and water pressure of excavation face

变形有明显诱发作用。对 L1、L2,随开挖面水压力升高,典型监测点位移变化较平缓,表明 L1、L2 对开挖面排水条件变化不敏感。对 L3 上拱肩部位监测点 L3-1,随着开挖面水压升高,监测点变形陡增且趋势不收敛,因此工程中需采取排水措施,避免 L3 开挖面附近水压力雍高。基于计算结果,建议将 0.5 MPa 作为开挖面浅层围岩排水控制标准。

4.3 下部水池围岩稳定分析

图 6 为开挖面不同水压力条件下的水池位移。由图 6 可看出,无水和开挖面 0.5 MPa 条件下,L2 对水池位移场基本无影响,L3 在出露部位产生一定位移,L1 在水池中上部变形明显,下部基本不受影响。随着开挖面水压升高,长大裂隙影响范围逐渐扩大,当开挖面水压力达到 2.0

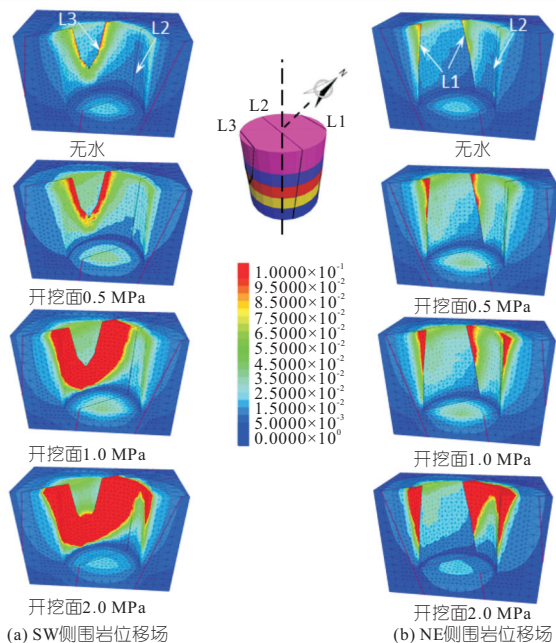


图 6 下部水池位移(单位:mm)

Fig. 6 Displacement of lower pool

MPa 时,三条长大裂隙造成的大变形区域将在水池顶部连通,影响水池边墙安全。因此,将 0.5 MPa 作为浅层围岩排水控制标准能够基本满足边墙稳定要求。

图 7 分别给出了开挖面水压 0.5、2.0 MPa 时,下部水池在不同高程的位移分布情况。由图 7 可看出,L2 对下部水池围岩变形基本无影响。

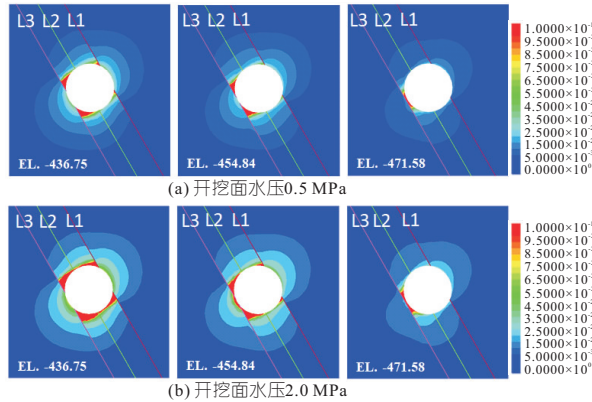


图 7 下部水池不同高程位移(单位:mm)

Fig. 7 Displacement of lower pool at different elevation

图 8 为-440.58 m 高程在长大裂隙附近典型监测点的应力路径。其中,高程-440.58 m 对应第 5 个开挖步,由图 8 可看出,随着实验大厅顶拱开挖(1~4 步),小主应力 σ_3 逐步减小,大主应力 σ_1 略有上升。由于水池断面为圆形,当开挖第 5 步时,径向卸荷导致 σ_3 快速降低,切向应力集中引起 σ_1 增大。根据压裂缝方向的印模结果,工程区最大水主应力在 $N10^\circ W \sim N54^\circ W$ 之间,计算结果显示,后续开挖将造成 L2 上监测点 P2-1 和 P2-2 产生持续应力集中。综上所述,第 5 步开挖后,切向应力与长大裂隙 L2 的走向大角度相交,且大主应力 σ_1 普遍大于 20 MPa,此时长大裂隙内高压地下水的作用被抑制,因此 L2 对下部水池围岩变形基本无影响。

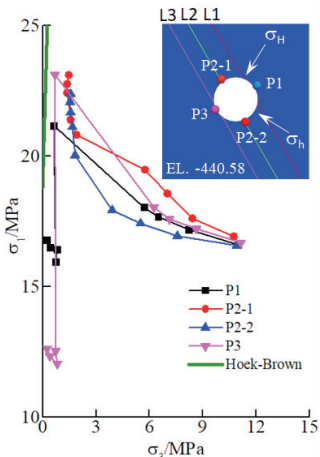


图 8 下部水池典型部位应力路径

Fig. 8 Stress path of typical part of lower pool

如图 7 所示,长大裂隙 L1、L3 表现为变形边界作用,在 L1、L3 内侧浅层围岩变形较大,外侧深部围岩变形基本不受影响。图 8 中监测点 P1、P3 均表明,在经历第 5 步的应力集中后,水池浅部围岩出现了明显卸荷,陡倾角长大裂隙在高水压作用下,结构面上法向应力降低明显,上盘岩体产生了沿长大裂隙滑移的趋势。由于 L3 倾向水池内部,临空条件更差,因此 L3 附近围岩大变形范围明显大于 L1。综上所述,当开挖面水压力控制在 0.5 MPa 时,水池中上部浅表层围岩有变形不连续现象,但大变形深度较浅,均在系统支护作用范围内。鉴于长大裂隙 L3 影响范围相对较大,建议在 L3 出露部位进行锚杆加密。

5 结论

- a. 在开挖面不同水压力条件下,富水长大裂隙对本工程顶拱的影响范围十分有限,较大变形仅发生在 L3 拱肩局部,围岩未发生整体大变形,表明富水长大裂隙对顶拱围岩整体稳定的影响较小。基于计算成果,建议将 0.5 MPa 作为本工程开挖面浅层围岩排水控制标准。
- b. 当开挖面水压力控制在 0.5 MPa 时,水池中上部浅表层围岩有变形不连续现象,但围岩大变形深度较浅,均在系统支护作用范围内。鉴于长大裂隙 L3 影响范围相对较大,建议在 L3 出露部位进行锚杆加密。
- c. 随着排水系统施工,工程区地下水的补给、排泄关系将发生改变,实验大厅的外水边界条件随之变化,未来需进一步分析长期运行期地下水变化规律及对工程安全的影响。

参考文献:

[1] 汤艳春,商好凡,陈建林,等.地质强度指标对白鹤滩水电站地下厂房围岩稳定性的影响研究[J].水电能源科学,2022,40(10):140-143.

[2] 吴钰,李东,罗登泽,等.猴子岩水电站地下洞室群围岩松弛损伤控制技术[J].水电能源科学,2021,39(8):142-145.

[3] 张恺,徐力群.高地下水位时地下厂房尾水洞渗控措施优选[J].水电能源科学,2018,36(8):105-108.

[4] 李邵军,谢振坤,肖亚勋,等.国际深部地下实验室岩体原位力学响应研究综述[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2491-2509.

[5] 李邵军,郑民总,邱士利,等.中国锦屏地下实验室开挖隧洞灾变特征与长期原位力学响应分析[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(8):842-852.

Study on Influence of Water-Rich Fault on the Stability of Surrounding Rock of Underground Cavern During Construction

LV Xiao-long^{1, 2, 3}, JING Lai-hong^{1, 2}, WANG Yu-jie³, ZHAI Li-jun¹, TIAN Wan-fu¹

(1. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources(Under Construction), Zhengzhou 450003, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: During the excavation of the construction adit, the Jiangmen Neutrino Underground Laboratory revealed three long and water rich cracks, and high-pressure jet water gushing appeared in local water exploration holes, which may have adverse effects on the stability of the surrounding rock of the tunnel. The influence of L1, L2, L3 on the deformation of surrounding rock of the experimental hall under different water pressures of the excavation face was systematically analyzed by using the discrete element method. The results show that the influence of water rich long cracks on the overall stability of the arch surrounding rock is small. The arch surrounding rock at L1 and L2 is not sensitive to the change of the drainage conditions of the excavation face. With the increase of the water pressure of the excavation face, the deformation of L3 arch shoulder increases sharply and the trend is not convergent. L2 has little effect on the deformation of the lower pool, and the shallow surrounding rock near L1 and L3 is obviously unloaded. Based on comprehensive analysis, 0.5 MPa is recommended as the control standard for shallow surrounding rock drainage at the excavation face of this project.

Key words: high pressure groundwater; large crack; super-large span; surrounding rock deformation; Jiangmen Neutrino Observatory

(上接第 119 页)

Study on Influence of FLUENT Rigid Vegetation Diameter on Water Flow Characteristics of Open Channel

MA Jian-xin, SHI Xi, XIE Xiao-gang, SONG Ming-cong

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the vegetation in beach and river bottom on the water flow characteristics at different time periods, under the condition of changing the vegetation diameter (6-10 mm) only, the numerical simulation was used to study the variation of vertical velocity distribution, contoured velocity, water level and intensity of turbulence along the way at different vegetation diameter. The results show that the vertical velocity distribution shows an "S" distribution in the vegetation zone and a "J" distribution outside the vegetation zone; In general, the larger the diameter is, the lower the overall velocity is, the more obvious the upstream congestion of the water level is, and the larger the water surface slope ratio is; The turbulence intensity is proportional to the vegetation diameter; The turbulence intensity of water flowing through the vegetation is greater than that of the vegetation channel when the vegetation diameter is the same.

Key words: rigid vegetation; vegetation diameter; numerical simulation; multi-phase flow; turbulent strength

(上接第 146 页)

[3] 刘新荣,涂义亮,钟祖良. 基于能量突变的强度折减法边坡失稳判据[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(6): 2065-2072.

[4] 涂义亮,刘新荣,钟祖良,等. 三类边坡失稳判据的

统一性[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 173-180, 190.

[5] 赵尚毅,郑颖人,张玉芳. 极限分析有限元法讲座——II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332-336.

Study of Slope Instability Criterion Based on Total Displacement Mode Mutation

XU Jing-qi, XU Li-qun, ZHANG Guo-chen

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The selection of instability criterion is particularly important when the finite element strength reduction method is used to analyze slope stability, but a consensus has not yet been reached. Based on ABAQUS finite element software, the method of total displacement mode combined with cusp catastrophe theory was proposed to judge the safety coefficient of slope. For a classical slope case, the safety coefficient was calculated by using calculation non-convergence, abrupt change of displacement of characteristic point, plastic zone penetration and abrupt change of total displacement mode as the instability criterion, and compared with Spencer method. The results show that the new criterion has a clear meaning, is less subject to human interference, has a wide range of application, and has certain advantages over the traditional three criteria.

Key words: slope stability; strength reduction method; instability criteria; total displacement mode; cusp catastrophe theory