

基于位移变异系数的边坡模型收敛判别条件确定

夏雨璇

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年3月28日; 录用日期: 2025年4月19日; 发布日期: 2025年4月29日

摘要

结合强度折减法的边坡稳定性有限元分析中, 一般有三种指示边坡到达极限平衡状态: (1) 不平衡力的收敛; (2) 特征部位位移突变; (3) 边坡塑性区贯通。本文提出了一种基于位移变异系数的边坡模型收敛判别条件的确定准则, 用于边坡稳定性分析。基于该方法的创新点在于利用上伏滑体的全局位移统计信息, 而不是用几个特征点的局部位移来定义终止迭代计算过程。为了验证该方法的有效性, 先利用所提出的该手段计算一个简化的边坡然后与原有的收敛条件进行比较。并将该方法用于实际的边坡分析中与现场吻合较好。因此, 所提出的方法可以作为边坡模型收敛判别条件。

关键词

变异系数, 边坡数值模型, 收敛判别条件

Determination of Convergence Criteria for Slope Models Based on Displacement Coefficient of Variation

Yuxuan Xia

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Mar. 28th, 2025; accepted: Apr. 19th, 2025; published: Apr. 29th, 2025

Abstract

In the finite element analysis of slope stability combined with the strength reduction method, there are generally three indications that the slope reaches the limit equilibrium state: (1) the convergence of unbalanced forces; (2) the abrupt change of displacement at characteristic parts; (3) the penetration

of the plastic zone of the slope. This paper proposes a criterion for determining the convergence discrimination condition of the slope model based on the displacement variation coefficient in the analysis of slope stability. The innovation of this method lies in using the global displacement statistical information of the overlying sliding mass, rather than using the local displacements of several characteristic points to define the termination of the iterative calculation process. In order to verify the effectiveness of this method, the proposed method is first used to calculate a simplified slope and then compared with the original convergence conditions. And this method is applied to the analysis of actual slopes, and the results are in good agreement with the field situation. Therefore, the proposed method can be used as the convergence discrimination condition for the slope model.

Keywords

Coefficient of Variation, Numerical Model of Slope, Convergence Discrimination Condition

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在地质工程领域，边坡的稳定性分析是一个至关重要的研究方向，其关系到基础设施建设、矿山开采以及自然地质灾害防治等众多方面。随着计算机技术的飞速发展，数值模拟方法已成为研究边坡稳定性的有效手段，其中 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 软件因其强大的计算能力和对岩土材料力学行为的准确模拟，在边坡工程中得到了广泛应用[1]。

在运用 FLAC 软件进行边坡数值模拟时，收敛判别是确保模拟结果准确性和可靠性的关键环节。准确的收敛判别能够帮助我们确定模拟计算是否达到稳定状态，进而为边坡稳定性评价提供可靠依据[2]。然而，目前对于边坡 FLAC 数值模拟的收敛判别，尚未形成统一且完善的标准。不同的判别方法和参数设置可能会导致模拟结果的差异，从而影响对边坡稳定性的正确判断[3]。

一方面，传统的收敛判别指标，如不平衡力比率、位移收敛等，在一些复杂地质条件和工程工况下，可能无法准确反映边坡的真实稳定状态。例如，在存在软弱夹层或强烈非线性材料特性的边坡中，这些指标的变化规律可能变得复杂，难以准确判断收敛[4]。另一方面，随着对边坡工程安全要求的不断提高，如何建立更加科学、合理的收敛判别准则，以适应不同类型边坡的数值模拟需求，成为当前亟待解决的问题[5]。

一些学者通过结合现场监测数据与数值模拟结果，对收敛判别方法进行优化[6]。也有研究尝试引入新的判别指标，如能量耗散指标等，以提高收敛判别的准确性和可靠性[7]。然而，这些研究仍处于探索阶段，需要进一步深入研究和实践验证。

因此，深入研究边坡 FLAC 数值模拟的收敛判别方法，探索更加准确、可靠的收敛判别指标和准则，对于提高边坡稳定性分析的精度和可靠性具有重要的理论和实际意义。

2. 方法

2.1. 概述

FLAC3D 数值模拟技术在处理复杂边坡问题方面展现出独特优势，尤其适用于边坡稳定性分析。它能够深入剖析边坡在各种工况下的力学响应，为工程决策提供有力支持[3]。然而，在运用该技术分析堆积体边坡问题时，确定连续性边坡模型迭代过程的终止时机成为关键问题。目前，常用的终止迭代方案是在构建计算模型时预先设定一个最大迭代次数，计算过程会在达到该次数时自动终止。这种方法虽然操作简单，

但存在明显的局限性。当设定的迭代次数过少时, 计算结果可能因未充分收敛而不准确; 反之, 若迭代次数过多, 则会造成计算资源的浪费, 增加不必要的计算成本。为此, 本文基于位移统计原理, 提出一种全新的准则来解决这一问题。在迭代数值模型的过程中, 当每一个有限元的位移均值与标准差值(SD 值)的比值(即均值/SD 值)随着迭代次数的增加而趋于稳定时, 便将此时的状态作为终止迭代过程的最终依据。该准则充分考虑了模型整体位移的变化趋势, 相比传统方法, 能够更精准地捕捉模型的收敛状态。

2.2. 边坡迭代过程终止准则

本文在判别滑坡位移的基础上, 提出一种新的直观的终止迭代次数收敛的判据, 判据过程如下:

- (1) 根据地质条件, 建立数值模型, 确定滑移面位置。
- (2) 在进行迭代计算前, 确定好滑移面以上滑体的单元, 确定其 ID。
- (3) 在 FLAC3D 计算过程中, 按指定的时间间隔(例如 100 步, 200 步, 300 步)获取上伏滑体各个单元的位移, 并计算位移均值, SD 值和均值/SD 值。
- (4) 分析均值/SD 值的收敛行为。

本文提出, 当均值/SD 值收敛时, 模型计算过程终止。

3. 基于位移统计的连续模型的数值验证

3.1. 计算模型和参数

本文使用 Madis 建立了上伏滑体下伏基岩的边坡模型。软弱层夹角设为 30° (见图 1)。参数如表所示 (见表 1)。

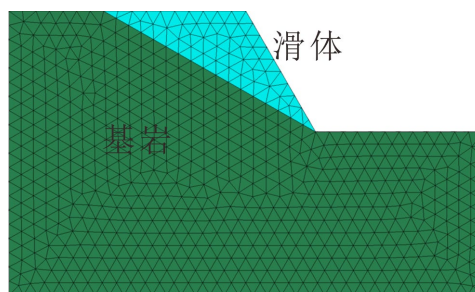


Figure 1. Calculation model of a slope with a 30° inclined weak interlayer

图 1. 倾角为 30° 的弱夹层边坡计算模型

Table 1. Relevant parameters of geotechnical materials

表 1. 岩土体相关参数

参数	单位重度(kN/m ³)	弹性模量(Mpa)	泊松比	粘聚力(kPa)	摩擦角($^\circ$)
滑体	20	42	0.3	42	17
基岩	25	100	0.3	42	17

3.2. 数值结果

对整个连续模型进行参数折减处理, 迭代次数与上伏位移均值/SD 值的关系图示(见图 2)。随着迭代次数的增加, 滑移面位移的均值/SD 值逐渐减小并最终收敛。在模型收敛后, 通过对数据的分析, 即可确定此时的迭代次数以及相应的变异系数(CV)。理想模型在 5000 步时收敛(见图 2), 其相应的 CV 为 1.13。FLAC 软件自身默认的收敛标准为 $1e-5$ (见图 3), 按照该标准, 模型计算的终止步数为 5437 步。

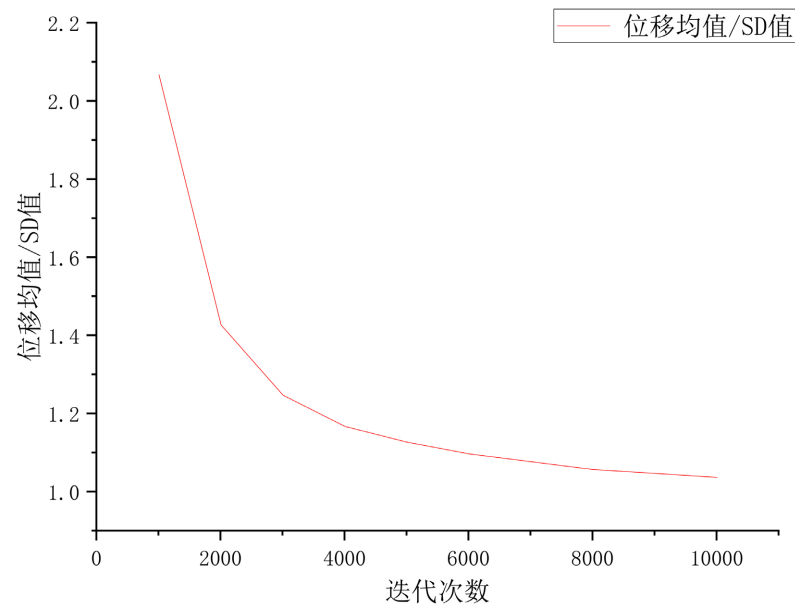


Figure 2. Statistical results of displacement mean/SD value and iteration times
图 2. 位移均值/SD 值与迭代次数统计结果

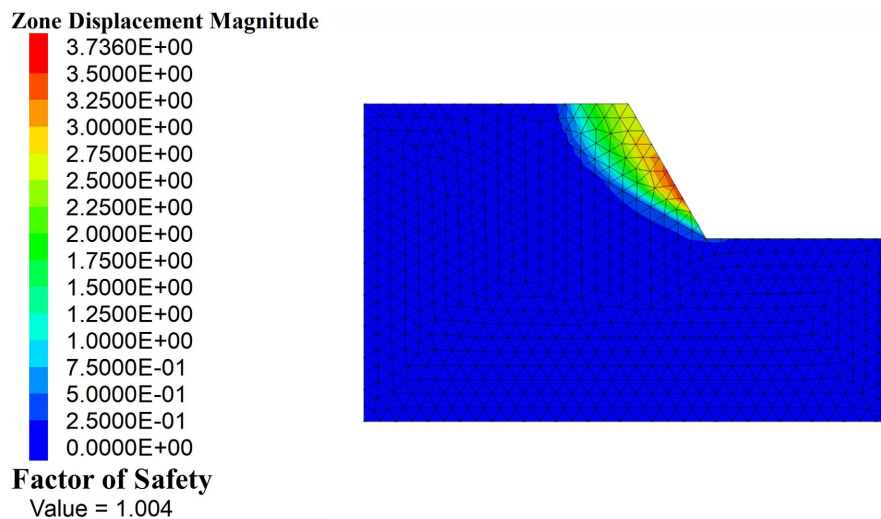


Figure 3. Strength reduction result of the slope with a 30°-inclined weak interlayer
图 3. 含倾角为 30°的弱夹层边坡强度折减结果图

4. 工程案例

4.1. 工程地质背景

该斜坡位于章村镇郎村村，丘陵地貌，地质构造不发育，自然地形坡度 25°~45°；覆盖层厚 2.0~5.4 m，主要为第四系坡积物(dIQ₄)，分布于山体表部。物质成分为碎石土，碎石含量约 60%，粒径约 2~15 cm，斜坡土体较为松散。下伏基岩为志留系唐家坞组灰绿色夹紫红色岩屑长石石英砂岩、细砂岩夹粉砂岩泥岩，夹少量紫红色砂岩，中风化为主。未见地下水出露。斜坡区植被发育，植被覆盖率较高，约 75% 以上，主要为灌木，茶树等，土地利用类型为林地和茶园。调查分析结果认为，该斜坡处于相对稳定阶段，根据野外勘察结果，该斜坡上部第四纪覆盖层厚度为 2.0~5.4 m，下部为中风化砂岩，岩层产状与坡

型呈反倾。该地区属于亚热带季风气候，雨量充沛，年平均降雨量约 1560 mm，降雨多集中在 4~9 月份。

4.2. 计算参数和模型

采用基于 FLAC3D 的强度折减法对滑坡在不同条件下的稳定状态进行评价，并基于位移变异系数确定边坡模型收敛判别条件。

强度折减法的核心思想是借助降低岩土体抗剪强度参数，来模拟研究区边坡失稳过程[8]。具体做法是，将边坡的粘聚力 c 和内摩擦角 φ 同时除以折减系数 F_s ，进而得到一组新的参数 c' 、 φ' [9]。之后，运用折减后的参数开展计算工作。持续迭代计算，直至边坡达到极限状态，此时对应的折减系数 F_s 就是边坡的稳定安全系数[8] [9]。强度折减法具体计算公式为：

$$c' = \frac{c}{F_s} \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan \frac{\tan \varphi}{F_s} \quad (2)$$

其收敛判别条件通过位移变异系数确定并与 FLAC 原有的收敛条件进行对比。

计算过程中，选取潜在主滑剖面作为稳定性计算的关键对象。在剖面选择上，充分考虑地形地貌特征，选取具有代表性的实测剖面线。同时，紧密结合野外调查，以及钻探、物探等手段揭示的剖面详细信息，从多个维度综合考量，科学合理地划定斜坡的工程地质分层，确保模型构建的准确性和计算结果的可靠性。计算采用 Mohr-Coulomb 模型(见图 4)，根据土工试验数据成果，结合斜坡现状稳定性分析，综合分析确定斜坡岩土体的主要参数见表 2，岩土体泊松比及弹性模量的选取参考《工程地质手册》中的相关经验值。

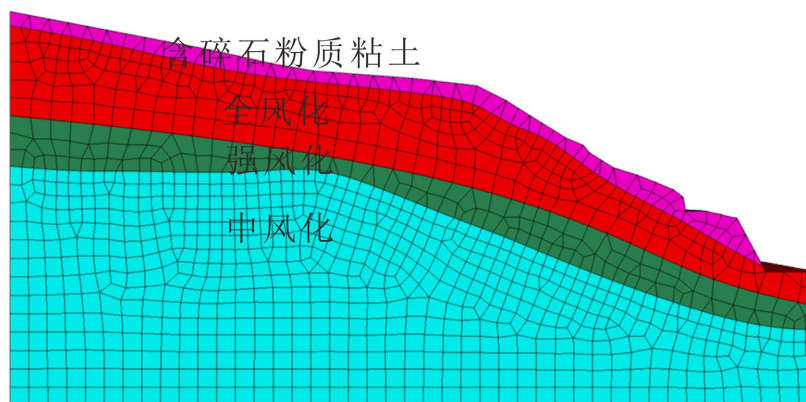


Figure 4. Calculation model of the landslide

图 4. 滑坡计算模型

Table 2. Relevant parameters of geotechnical materials

表 2. 岩土体相关参数

参数	单位重度(kN/m ³)	弹性模量(Mpa)	泊松比	粘聚力(kPa)	摩擦角(°)
含碎石粉质粘土	20.5	26	0.32	16	14
全风化砂岩	23	200	0.30	40	25
强风化砂岩	24.5	2000	0.28	100	30
半风化砂岩	25	2500	0.28	400	35

4.3. 计算结果

对整个连续模型进行参数折减处理，迭代次数与上伏位移均值/SD 值的关系如图(见图 5)。随着迭代次数的增加，滑坡面位移的均值/SD 值逐渐减小并最终收敛。收敛后，确定迭代次数和相应的 CV。理想模型在 3000 步时收敛，其相应的 CV 为 0.269 (见图 5)。FLAC 本身的收敛标准为 $1e-5$ ，其终止步数为 3005 (见图 6)。

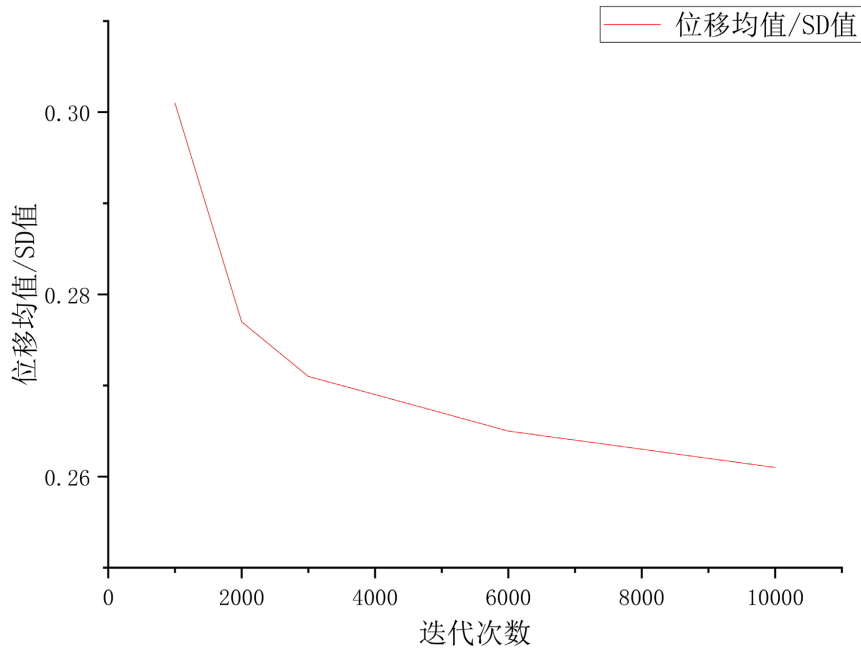


Figure 5. Statistical results of landslide displacement mean/SD value and iteration times
图 5. 滑坡位移均值/SD 值与迭代次数统计结果

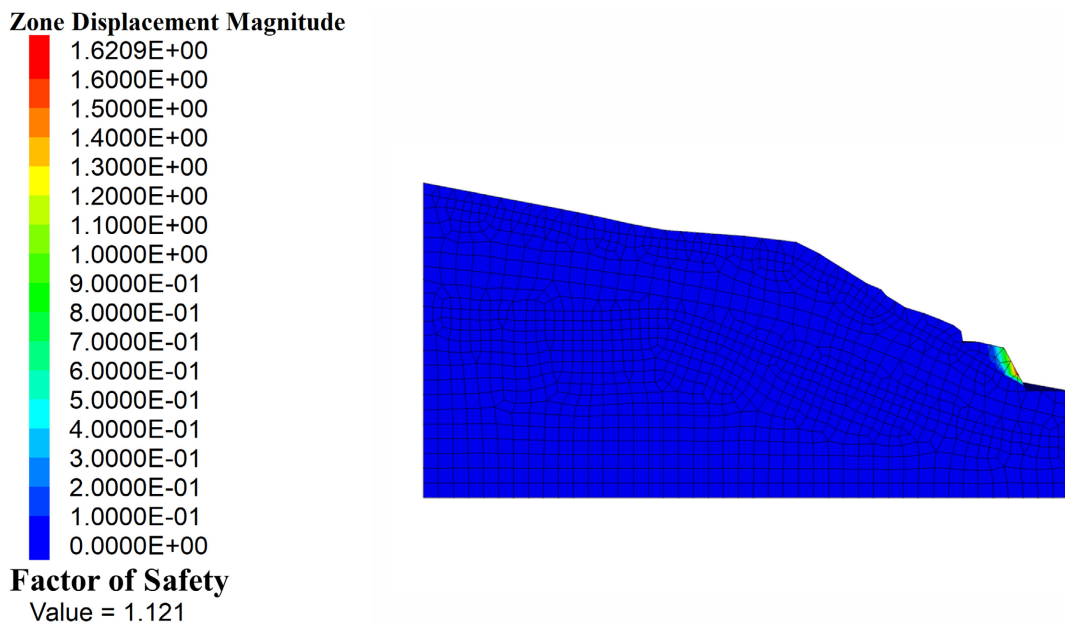


Figure 6. Landslide strength reduction result diagram
图 6. 滑坡强度折减结果图

根据《滑坡防治工程勘查规范(GB/T32864-2016)》，稳定性划分为四级：稳定性系数 $F_s > 1.15$ 为稳定， $1.15 \geq F_s > 1.05$ 基本稳定， $1.05 \geq F_s > 1.0$ 或 1.05 ± 0.005 为欠稳定， $F_s < 1.0$ 为不稳定。结合上述规范标准判断，该滑坡的稳定性系数显示其处于基本稳定状态。这一结论与现场实际观测到的滑坡状态高度吻合，进一步验证了计算方法的准确性以及稳定性评判结果的可靠性。

5. 参数分析

5.1. 正交试验设计

正交试验法需要根据参数数量选择正交表。本文选取含碎石粉质粘土弹性模量，泊松比，粘聚力，摩擦角 4 因素三水平建立正交表(见表 3)：

Table 3. Orthogonal experimental table
表 3. 正交试验表

编号	弹性模量(Mpa)	泊松比	粘聚力(kPa)	摩擦角(°)	位移均值/SD 值差值	安全系数
1	20	0.28	14	15	0.036	1.145
2	20	0.30	18	17	0.014	1.457
3	20	0.32	16	19	0.021	1.387
4	25	0.28	18	19	0.015	1.531
5	25	0.30	16	15	0.018	1.421
6	25	0.32	14	17	0.025	1.245
7	30	0.28	16	17	0.009	1.581
8	30	0.30	14	19	0.010	1.543
9	30	0.32	18	15	0.004	1.654

本文采用收敛时位移均值/SD 值与 1000 步时位移均值/SD 值差值(位移均值/SD 值差值)表征收敛效果显著程度。结果表明：在安全系数趋于 1 时收敛效果明显，而当安全系数远离 1 时，该方法所呈现的收敛效果则相对不明显。

5.2. 试验结果分析

从力学机制角度分析，安全系数反映了边坡抵抗破坏的能力。当安全系数增大，意味着边坡岩土体的强度相对较高，边坡整体稳定性增强。此时，在外部荷载及边界条件相对稳定的情况下，边坡的位移变化幅度会逐渐减小，各单元之间的位移差异也随之缩小。位移均值与标准差比值差值减小，正是这种位移变化趋缓、差异缩小的量化体现。标准差(SD)衡量的是数据的离散程度，在位移数据中，它反映了各单元位移相对于平均位移的离散情况。当边坡趋于稳定，各单元位移更趋于一致，标准差变小，进而使得位移均值与标准差比值差值减小。从理论层面看，根据岩土力学理论，边坡稳定性与位移变化密切相关，稳定的边坡位移应处于相对稳定的状态，变异系数较小。所以，当安全系数增大，边坡稳定性提高，位移变异系数变小，收敛效果也就变得不明显，这与实际工程中边坡稳定性变化规律相契合。

6. 结论

本文借助 FLAC3D 数值计算软件，针对章村镇郎村村某村民屋后斜坡构建了相应的数值模型。通过选取潜在主滑剖面开展强度折减计算，并基于位移变异系数对收敛条件判定展开深入探讨，最终得出如

下结论:

(1) 对滑坡潜在主滑剖面进行强度折减计算后,得到的安全系数为 1.14。经对比,该安全系数与实际滑坡状态高度相符,且通过分析发现,发生变形的部位位于切坡坡脚。这一结果为进一步评估该区域滑坡风险、制定针对性的防治措施提供了关键依据。

(2) 在理想模型中,当 FLAC 收敛标准设定为 $1e-5$ 时,其收敛步数为 5437;而基于位移变异系数的收敛判别条件下,收敛步数为 5000。在案例滑坡中,FLAC 收敛标准为 $1e-5$ 时,收敛步数为 3005;基于位移变异系数的收敛判别条件下,收敛步数为 3000。两种模型下的收敛情况均满足判别要求,这充分表明本文所提出的基于位移变异系数的方法,具备作为边坡模型收敛判别条件的可靠性与有效性,为今后边坡稳定性数值模拟分析提供了一种新的可靠途径。

(3) 安全系数与位移均值和标准差(SD)比值差值、收敛效果存在关联。安全系数越大,首尾差值越小,收敛效果越不明显。滑坡趋于稳定时,整体滑坡位移值趋稳,变异系数变小,此时所用方法更难显效。

参考文献

- [1] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 14-21.
- [2] 朱浮声, 杨庆, 李术才, 等. 岩土工程数值分析方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 肖维民, 李同录, 赵法锁, 等. 基于 FLAC 的黄土高边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 377-382.
- [4] 张鲁渝, 郑颖人, 时卫民, 等. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1639-1643.
- [5] 杨光华, 姚丽娜, 张玉成, 等. 强度折减法有限元中边坡失稳判据探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2192-2196.
- [6] 周辉, 冯夏庭, 卢景景, 等. 高地应力下硬岩隧洞大变形机制及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1309-1317.
- [7] 杨庆, 栾茂田, 李宏儒, 等. 基于 FLAC3D 的地基承载力强度折减有限元分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 144-148.
- [8] 王思源, 童小东. 基于动态强度折减-改进矢量和法的边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(7): 1384-1392.
- [9] 裴国平, 陈培帅. 基于参数化训练模型的边坡强度折减法研究[J]. 山西建筑, 2012, 38(21): 70-72.