

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.03.005; CSTR:32311.14.rswc.2025.03.005.

李斯萱, 张晓明, 赵艺, 等. 直剪剪切方式对崩岗土体边坡稳定性的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3):180-187.

Li Sixuan, Zhang Xiaoming, Zhao Yi, et al. Impact of direct shear methods on the stability of Benggang slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3):180-187.

直剪剪切方式对崩岗土体边坡稳定性的影响

李斯萱¹, 张晓明¹, 赵艺¹, 郭晓亮²

(1. 华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 武汉林水工程咨询有限公司, 武汉 430070)

摘要: [目的] 探究不同直剪方式对崩岗土体抗剪性能及边坡稳定性的差异化影响, 旨在为边坡治理提供科学依据。[方法] 采用不同直剪试验测量抗剪强度参数, 并利用 FLAC3D 软件模拟各剪切条件下边坡稳定性变化, 以综合分析不同直剪方式的力学效应。[结果] (1) 慢剪条件下剪应力响应最大: 红土层在荷载 400 kPa 下慢剪试验中剪应力激增至 197.9 kPa, 表明其在慢速剪切下具有高强度增长潜力。(2) 剪切强度与剪切方式的敏感性: 红土层相比过渡层对剪切方式更为敏感, 荷载为 400 kPa 慢剪下的抗剪强度达到 194.547 kPa, 高于过渡层的 182.37 kPa。固结快剪对土体内部力学属性(如内摩擦角和黏聚力)的改变最为明显。(3) 边坡稳定性分析: 慢剪不仅安全系数低(FS=3.18), 且伴随较大剪应变增量及广泛变形区域, 明确其为最不稳定剪切模式。崩岗边坡 X 轴应力均朝向坡面, 最大约为 22 kPa, 所有剪切方式下位移均初增后减, 但固结快剪位移量及方向有别于其他试验, 显示位移量较大, 方向朝向坡外。Y 轴应力随深度增加递减, 慢剪下剪应力变幅尤为突出。[结论] 在不同的直接剪切方式作用下, 抗剪强度的绝对差异虽不显著, 但内摩擦角与黏聚力相差较大。经数值模拟分析可知, 慢剪条件对崩岗边坡的稳定性构成了最大的挑战。

关键词: 直剪方式; FLAC3D; 稳定性; 边坡; 崩岗

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)03-0180-08

Impact of direct shear methods on the stability of Benggang slope

Li Sixuan¹, Zhang Xiaoming¹, Zhao Yi¹, Guo Xiaoliang²

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan, 430070, China; 2. Wuhan Linshui Engineering Consulting Co., Ltd., Wuhan, 430070, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the differential impact of various direct shear methods on the shear resistance performance of Benggang soil and slope stability, aiming to provide scientific evidence for slope management. [Methods] Different direct shear tests were used to measure shear strength parameters, and FLAC3D software was employed to simulate slope stability changes under various shear conditions for a comprehensive analysis of the mechanical effects of each direct shear method. [Results] (1) Maximum shear stress response under slow shear conditions: in the slow shear test, the shear stress in the red soil layer surged to 197.9 kPa under a 400 kPa load, indicating its high potential for strength increase under slow shear conditions. (2) Sensitivity of shear strength to shear methods: the red soil layer is more sensitive to shear methods compared to the transition layer. Under the slow shear test with a 400 kPa load, the shear strength reached 194.547 kPa, higher than the transition layer's 182.37 kPa. Consolidated quick shear significantly affected the internal mechanical properties of the soil, such as internal friction angle and cohesion. (3) Slope stability analysis: slow shear not only resulted in a low safety factor (FS=3.18), but also led to large shear strain increments and extensive deformation areas, making this shear method the least stable shear method. The X-axis stress on the Benggang slope was directed towards the slope face, peaking at approximately 22 kPa. Displacement under all shear methods initially increased and then

收稿日期: 2024-07-01

修回日期: 2024-08-06

接受日期: 2024-08-25

资助项目: 国家自然科学基金(41771307; 41201271); 生产建设项目中水文数据筛选新技术(20212614C03)

第一作者: 李斯萱(1998—), 女, 江西上饶人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀机理。E-mail: 2311836861@qq.com

通信作者: 张晓明(1980—), 男, 辽宁锦州人, 博士, 副教授, 从事崩岗及土壤侵蚀研究。E-mail: zxm_huanong@mail.hzau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

decreased. However, the magnitude and direction of displacements in the consolidated quick shear test differed from those in other tests, showing a large displacement towards the outside of the slope. The Y-axis stress decreased with increasing depth, and the shear stress variation was particularly significant under slow shear conditions. [Conclusion] Under different direct shear methods, although the absolute difference in shear strength is not significant, the internal friction angle and cohesion differed considerably. Numerical simulation indicates that the slow shear condition poses the greatest challenge to the stability of Benggang slopes.

Keywords: direct shear method; FLAC3D; stability; slope; Benggang

崩岗是指在重力与水力的综合作用下,山坡土体或岩体风化壳发生分离、崩塌和堆积的侵蚀现象。这种现象严重威胁国土安全、粮食安全、生态安全以及公共安全。因此,对崩岗边坡稳定性的研究成为学术界的热点,其中土体的抗剪强度是评价崩岗稳定性的重要指标^[1-2],如评价土体的工程特性、土体边坡稳定性等^[3]。一些学者研究了土壤性质,包括质地^[4]、粒径级配、含水率、植物根系、黏土矿物等^[5-7],以及这些因素对抗剪强度的影响,并总结了各因素对土壤抗剪强度影响的一般规律。林金石等及徐忠等^[8]通过直剪(快剪)和三轴(UU)两种不同的剪切试验,发现三轴剪切试验得到的抗剪强度与直剪试验相当,但其黏聚力总体大于或等于直剪试验,而内摩擦角小于直剪试验的测值,这表明剪切方式对测得的抗剪强度指标有影响,不同剪切方式下的指标存在差异。宋路等^[9]通过原位十字剪切试验和直剪试验测定根—土复合体的抗剪强度,发现原位十字剪切试验测得的抗剪强度更大。郭鹏斐等^[10]通过不同直剪试验(快剪、慢剪、固结快剪)分析轻量土的抗剪强度指标,发现不同直剪方式下轻量土的剪应力—剪应变位移曲线及抗剪强度相近,但内摩擦角和黏聚力不同。程平^[11]通过研究不同剪切速率对固结快剪试验测值的影响,发现剪切速率会影响固结快剪试验测得的抗剪强度。综上,直接剪切试验是测定土体抗剪强度的重要方法。不同直剪方式(不同固结及排水情况)测定的抗剪强度指标有所差别,且直剪试验有快速、便捷和适应性强的特点,能降低抗剪强度测定的成本和时间^[12]。因此,研究不同直剪方式下的抗剪强度指标,为土体抗剪强度指标的精确测定提供了新的思路,进而为准确评价边坡稳定性提供了科学依据。

边坡稳定性数值模拟研究是地质工程和岩土工程领域的一个关键研究方向,其重要性和意义在于它能够为边坡的设计、施工和监测提供科学依据。边坡安全系数及破坏面的主要研究方法包括强度折减法、有限差分法、离散元法等,其中FLAC3D自带的强度折减法以其直观且应用面广的特点被众多学者承认并广

泛应用^[13]。相较于其他软件(如Geostudio),FLAC3D的强度折减法对于黏聚力和内摩擦角等土体力学参数的变化更为敏感能更精细地揭示参数对边坡稳定性的影响^[14]。FLAC3D的强度折减法相较于其他方法,无须假定滑动面的形状和位置,避免人工假定造成的误差^[15],且强度折减法与极限平衡法计算出的安全系数一致。综上所述,本研究选用FLAC3D软件对崩岗边坡进行三维数值模拟,利用强度折减法计算不同直剪方式对安全系数、最大剪切应变增量云图以及土体在不同深度下的位移—应力具体影响。这些模拟结果为科学评价崩岗边坡稳定性提供重要依据,有助于更准确地理解崩岗现象并采取相应的防治措施。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究的区域位于湖北省咸宁市通城县内的五里镇。五里镇地处通城县西南部,位于湖南、湖北和江西三省交汇之处,地形特征呈现“川”字形分布,东西两侧多山地,中部地区则为丘陵地带,而北部则为平坝地形,属于典型的北亚热带季风气候区。该地区的光照条件适宜,四季分明,雨热同期,年平均气温为16.7℃,年平均降水量达1215.8 mm。通城县的土壤母质主要以花岗岩(783.9%)和泥质岩类(10.6%)为主。

1.2 样品采集与抗剪强度测定

试验土层主要依据崩壁剖面土壤颜色、土层深度及颗粒组成对土层进行划分(表1)。由于崩岗区表土层较薄,极易被降雨冲刷殆尽。而黏粒含量较高的红土层和过渡层是崩壁及崩积堆的主要组成部分,因此红土层和过渡层的抗剪强度指标是崩岗发育的重要影响因素。研究以红土层和过渡层在不同直剪方式下的抗剪强度指标及边坡稳定性的差异为研究对象,用3种不同直接剪切方式模拟3种不同的固结、排水条件下的土层抗剪强度。在数值模拟时,表土层和砂土层采用的快剪试验测得的强度指标作为模拟参数。

样品首先经过分层处理,去除土壤中的较大杂

质,例如植物残体等。随后,将土样置于自然条件下风干。风干完成后,使用木棒将土块碾碎,并通过2 mm筛网进行筛选,以去除2 mm以上的石英颗粒。接着,将筛选后的土样在120℃的烘箱中烘干备用。干密度参照取样地红土层和过渡层的数据,设定为1.37 g/cm³;含水率根据取样时红土层和过渡层的实际含水率差1.5%,分别设定为质量分数24%及22.5%。试验采用高20 mm、直径61.8 mm的环刀制样。根据

表1 各土层物理特性

Table 1 Physical properties of each soil layer

物理特性	表土层	红土层	过渡层	砂土层
土层深度/m	0.05—0.17	0.17—0.49	0.49—2.10	2.10—3.10
干密度/(g·cm ⁻³)	1.38	1.35	1.39	1.41
黏粒含量(<0.002 mm)/%	36.64	39.32	43.59	15.97
粉粒含量(0.002~0.05 mm)/%	26.10	27.75	26.12	30.45
砂粒含量(2~0.05 mm)/%	37.26	32.93	30.29	53.58

根据GB/T50123-2019《土工试验方法标准》中关于直接剪切试验的试样制备规定中的建议,设置了100 kPa, 200 kPa, 300 kPa和400 kPa共4个级别的荷载,分别测定了试样的抗剪强度,并据此计算出其内聚力和内摩擦角。试验根据固结程度和剪切时的排水条件,对试样进行了3种不同的剪切试验,以模拟3种常见的边坡荷载情况:

(1) 快剪试验:将一定含水率的土样直接制成试样,并在1.2 mm/min的剪切速率下进行剪切。

(2) 固结快剪试验:将一定含水率的土样制成试样,并进行固结试验,在1.2 mm/min的剪切速率下进行剪切。

(3) 慢剪试验:将一定含水率的土样制成试样,并进行固结试验,在0.2 mm/min的较慢剪切速率下进行剪切。

1.3 崩岗边坡稳定分析

FLAC3D软件内置的强度折减模块(即solve fos命令)充分考虑了土体内部应变对应力状态的影响,这使得其在评估边坡稳定性时无需预先假设滑移面的具体形状,从而提高了分析的灵活性和准确性。假设边坡为理想塑性体,并遵循Mohr-Coulomb屈服准则。在模型构建时,除了坡面及坡顶外,对模型的四周及底部均施加了相应的约束条件,确保模型仅受重力作用。为评估不同剪切方式对边坡稳定性的影响,我们采用了FLAC3D 6.00自带的强度折减模块(solve fos命令)来计算边坡的安全系数。利用最大剪应变增量云图来分析边坡内部的位移变化情况,从而预测可能出现的滑移面位置。通过对不同深度下土体的位移—应力特征进行分析,进一步探讨不同剪切方式

环刀体积(60 cm³)、设定的干密度以及含水率,计算出所需干土和水的重量。将水均匀喷洒在干土上并充分拌匀,后将拌好的土样放入密封袋中静置24 h,以确保水分均匀分布,随后进行分层制样。环刀的高度为20 mm,因此将每份土样分为两等份湿土。首先将一份湿土倒入环刀中,用击实工具将其压实至10 mm厚,然后在上端用钢针抛毛处理,接着将另一份湿土同样击实在环刀内,制成一个完整的试样。

下土体内部的应力分布及变形规律。

1.4 数据计算与分析

用剪切试验得到的抗剪强度,根据库仑定律计算内摩擦角与黏聚力:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中: τ_f 为土的抗剪强度(kPa); σ 作用在剪切面上的法向应力(围压)(kPa); φ 为土的内摩擦角(°); c 为土的黏聚力(kPa)。

用Origin 2017作图;Rhinoceros及FLAC3D 6.00软件做崩岗边坡稳定分析。

2 结果与分析

2.1 不同剪切方式下应力—应变关系

根据图1所示的数据分析,红土层及其过渡层在慢剪试验条件下表现出最大的剪应力—剪切位移变化特性。在400 kPa的荷载下进行慢剪试验时,红土层的剪应力随着剪切位移的增加,呈现出明显的上升态势,其增长速率较高,剪应力最大值达197.9 kPa。相比之下,进行固结快剪试验时,剪应力随剪切位移的变化则相对平缓,其最大值为130.7 kPa。过渡层在两种剪切试验中的表现,慢剪试验中剪应力随剪切位移的变化同样展现出较大的幅度,表明其力学行为在慢剪条件下更为敏感。而在快剪试验中,特别是在200 kPa的荷载下,过渡层的剪应力在试验初期增长较为缓慢,表现出与慢剪试验不同的力学响应模式。综上所述,红土层和过渡层在慢剪试验条件下展现出的剪应力—剪切位移变化特性最为明显,特别在红土层中剪应力增长速率在慢剪试验最大。

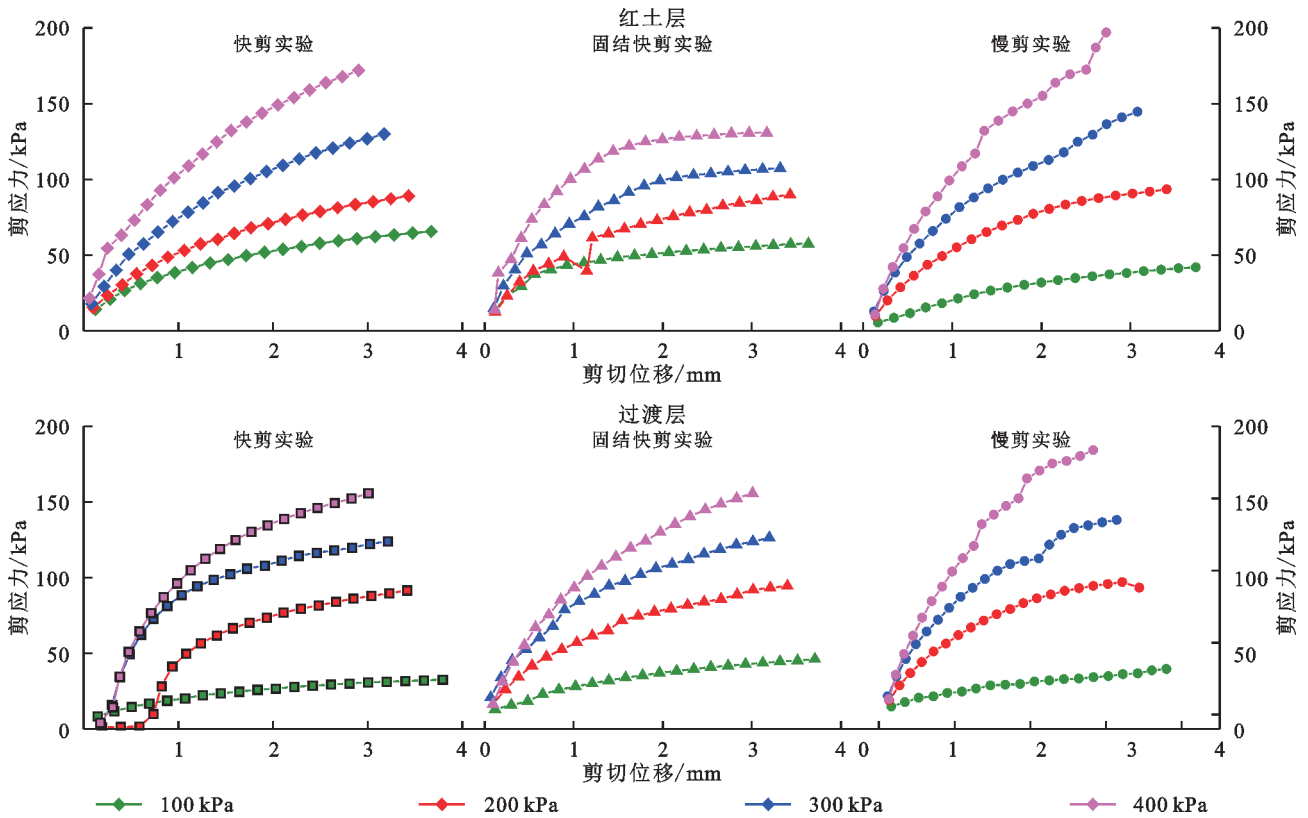


图1 剪应力与剪切位移的关系

Fig. 1 Relationship between shear stress and shear displacement

2.2 不同剪切方式下抗剪强度指标差异

从图2的总体趋势来看,慢剪试验所测得的抗剪强度呈现出相对高值。具体而言,在红土层及过渡层中,当荷载为400 kPa时,通过慢剪试验测得的红土层和过渡层抗剪强度分别高达194.547 kPa和182.37 kPa。相比之下,红土层在快剪试验条件下测得的抗剪强度较低,为3种剪切方式中的最小值。而在过渡层中,快剪

试验与固结快剪试验所测得的抗剪强度则表现出高度的相似性。当荷载为200 kPa时,红土层和过渡层在3种直剪方式下测得的抗剪强度表现出较接近的数值,特别是在过渡层中,3种直剪方式下的抗剪强度数值差在8 kPa以内。这一现象表明,相较于过渡层,红土层的抗剪强度更易受到不同剪切方式的影响,显示出较为敏感的力学响应特性。

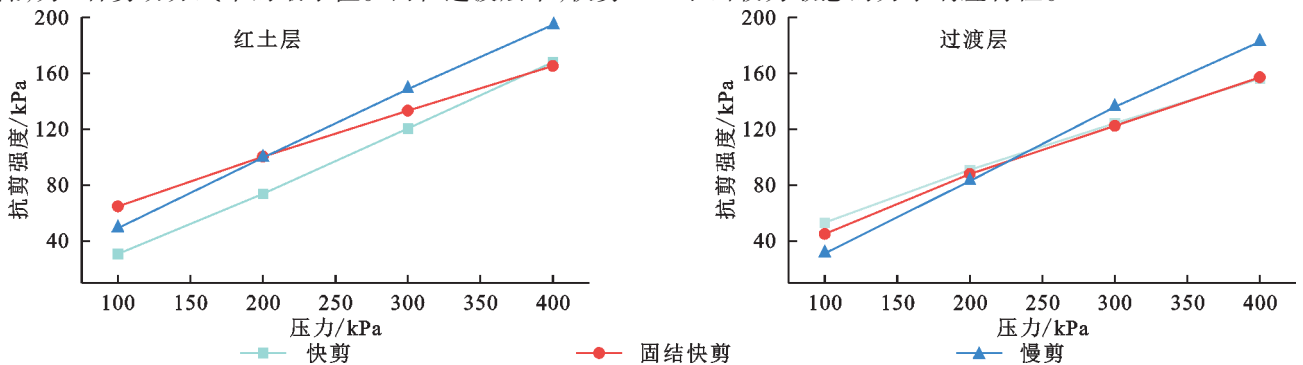


图2 不同剪切方式下抗剪强度

Fig. 2 Shear strength under different shear methods

从图3中可明显看到,在慢剪试验条件下,两个土层的内摩擦角均达到最大值,红土层及过渡层分别为22.92°和22.02°。与此同时,固结快剪试验测得的内摩擦角小于其他两种剪切方式,在红土层中,固结快剪条件下测得的内摩擦角为16.35°,这一数值低于快剪试验中的21.88°和慢剪试验中的22.92°。且红土层的内摩擦角始终高于过渡层,表明红土层在力

学性质上具有更高的摩擦性。对于黏聚力而言,红土层在固结快剪试验中的值为27.92 kPa,这一数值大于过渡层在相同条件下的黏聚力。通过对比3种试验中的黏聚力数据,可以发现固结快剪对土层的黏聚力产生了最大的影响。通过对红土层及过渡层在不同剪切条件下的试验数据分析,可得出结论:不同剪切方式对土层的力学性质有影响。

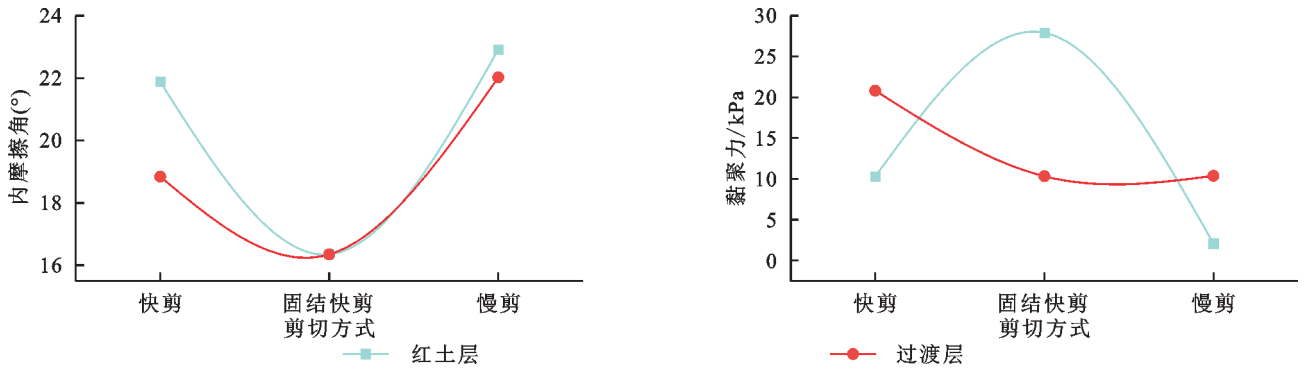


图 3 不同剪切方式下内摩擦角及黏聚力

Fig. 3 Internal friction angle and cohesion under different shear methods

2.3 基于 FLAC3D 的边坡安全性数值模拟研究

数值模拟以试验获取的不同直剪方式下的力学参数为依据,借助 FLAC3D 6.00 和犀牛软件对崩岗边坡进行模型构建与数值模拟分析。图 4 为犀牛软件创建的边坡剖面示意图,表 2 列出了通过直剪试验及其他试验所得的不同土层的力学参数。

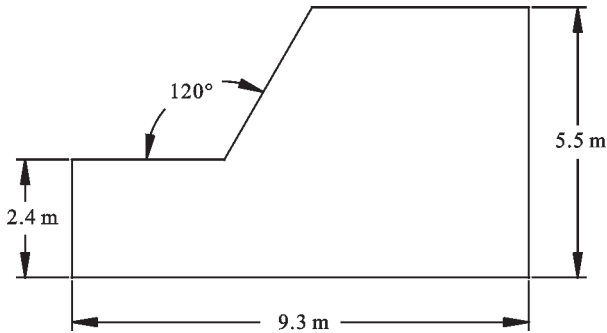


图 4 边坡模型剖面示意图

Fig. 4 Cross-sectional schematic diagram of the slope model

表 2 边坡各土层力学参数

Table 2 Mechanical parameters of each soil layer of the slope

剪切方式	土层	杨氏模量/ Pa	抗剪 强度/Pa	黏聚 力/Pa	内摩 擦角/(°)
快剪	表土层	5204626	70210	19960	18.58
	红土层	5591168	73710	10290	21.88
	过渡层	8473837	90860	20820	18.84
固结快剪	砂土层	3408881	88980	29540	23.93
	红土层	5591168	100340	27920	16.35
慢剪	过渡层	8473837	87860	10330	20.31
	红土层	5591168	99540	2040	22.92
	过渡层	8473837	82870	10370	22.02

基于表 3 数值模拟得到的安全系数,3 种不同剪切条件下的边坡安全系数均显著超越 3.0,明确边坡在慢剪、快剪以及固结快剪这 3 种试验条件下均处于稳定状态。进一步比较发现,在快剪试验条件下,边坡的安全系数达到了最高的 4.05,这显示了在快速剪切作用下,边坡的稳定性表现尤为优异。而在慢剪试验条件下,虽然安全系数也保持在稳定的 3.18 水

平,但相较于快剪试验,其数值为三者中最低。分析最大剪切应变增量云图,边坡坡顶位置为剪切应变增量最为集中的区域,这表明了在此区域内土壤颗粒间的位移和形变最大。如图 5 所示的快剪、图 6 所示的固结快剪以及图 7 所示的慢剪,对比 3 种剪切方式下的模拟结果,边坡在这 3 种条件下可能发生的滑移形状较为相似。然而,通过慢剪试验的数值模拟结果能够发现,慢剪试验下最大剪切应变增量数值不仅最高,应变发生的范围也最为广泛,体现了在较慢的剪切速率下,边坡内部应力分布和位移累积的复杂性。综上,慢剪试验对应的崩岗现场固结后逐步缓慢承受荷载,如长时间缓慢降雨条件下的剪切过程的情况下,崩岗是最不稳定的。

表 3 模拟分析不同剪切方式下的土层安全系数

Table 3 Simulated safety factors of soil layers under different shear methods

剪切方式	快剪	固结快剪	慢剪
安全系数(FS)	4.05	3.52	3.18

从图 8 可看出,对于崩岗边坡 X 轴内部应力的方向性特征,3 种剪切方式下均呈现出一致的朝向坡面趋势。具体而言,应力最大值近似达到 22 kPa,这一数值在 3 种直剪方法中保持一致。进一步分析应力随深度的变化趋势,发现均遵循着土层深度增加则应力减小的普遍规律,但在土层深度达到 2.75 m 时,应力均出现了小幅度的上升现象。其中快剪试验和固结快剪试验的应力曲线具有两个小幅度上升的区间,而慢剪试验的应力曲线只有一个小幅上升区间。考察位移与土层深度的关系时,3 种剪切方式下的位移均呈现出先增大后减小的趋势,这揭示了崩岗边坡内部位移变化的共性。然而,固结快剪试验的位移方向与其他两种方式不同,其位移是朝向坡面内部的,并且位移值大于快剪和慢剪试验。具体而言,在土层深度为 2.29 m 时,固结快剪试验的位移达到最大值 36.58 mm。相比之下,快剪和慢剪试验的位移方向均朝向坡外,并在土层深度达到 2.75 m 时取得最大值,该值为 10 mm。

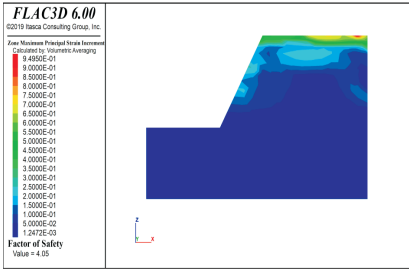


图 5 模拟快剪试验的最大剪应变增量云图

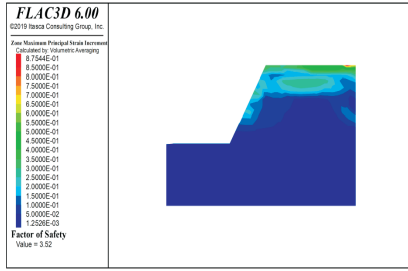


图 6 模拟固结快剪试验的最大剪应变增量云图

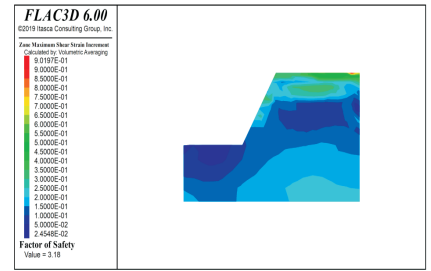


图 7 模拟慢剪试验的最大剪应变增量云图

Fig. 5 Nephogram of the maximum shear strain increment of the simulated fast shear test

Fig. 6 Nephogram of the maximum shear strain increment of the simulated consolidated quick shear test

Fig. 7 Nephogram of the maximum shear strain increment of simulated slow shear test

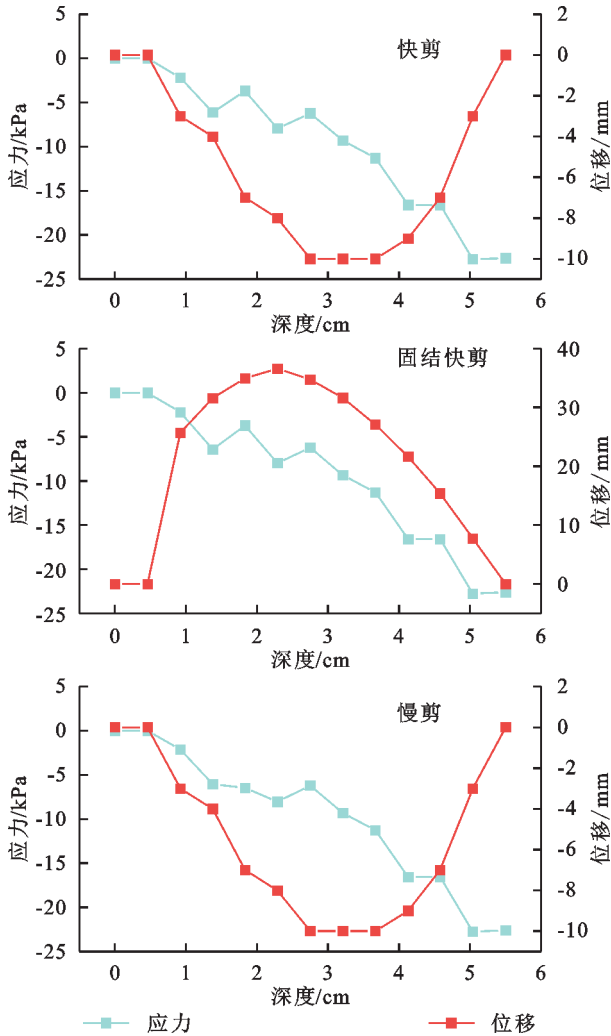


图 8 X轴方向不同深度土层应力—应变关系曲线
Fig. 8 X-axis stress-strain curves of soil layers at different depth

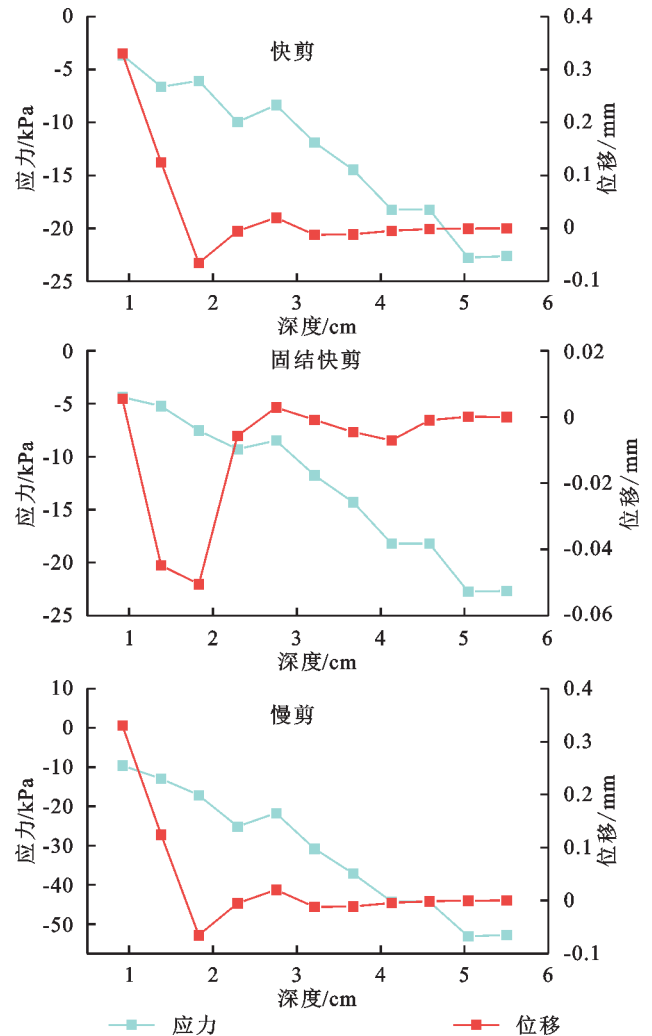


图 9 Y轴方向不同深度土层应力—应变关系曲线
Fig. 9 Y-axis stress-strain curves of soil layers at different depth

从图 9 的数据分析可见,崩岗边坡在 Y 轴方向上的应力响应在 3 种不同的剪切模式下均呈现出一种共性趋势,即随着土层深度的递增应力值逐渐减小。其中,在慢剪试验条件下,剪应力的变化幅度最大,特别是在土层深度达到 5 m 时,剪应力达到了最大值 52.7 kPa,这一数值明显超过了快剪和固结快剪试验中的相应值。

具体而言,在相同的 5 m 土层深度下,快剪和固结快剪试验的最大应力值仅为 22.6 kPa,表明慢剪试验中的应力水平几乎是其他两种剪切方式的两倍。在考察位移与土层深度的关系时,发现 3 种剪切方式下的位移表现存在差异。在快剪和慢剪试验中,随着土层深度的增加,位移呈现了一种先减后增的变化趋势。具体而言,当土层深度增加时,位移首先沿着 Y 轴正方向逐渐

减小,随后在某一特定深度(约为1.83 m)处达到最小值,几乎接近零,之后则沿着Y轴负方向逐渐增大。然而,在固结快剪试验中,随着土层深度的增加,位移的变化幅度相对较小,且始终沿着Y轴正方向增大,直至土层深度达到1.83 m时,位移增加至0.05 mm。

3 讨论

不同直剪剪切方式对崩岗边坡抗剪强度特性及整体稳定性的影响。在本研究的特定采样区域中,慢剪试验测得的抗剪强度最大,这与方济升等^[16]提出的抗剪强度随剪切速率增大而减小的观点一致。慢剪试验中,剪应力—剪切位移变化曲线的起点最低、斜率最大,表明土样的黏聚力值最小,内摩擦角值最大,这与肖杰等^[17]提出的膨胀土在慢剪试验下的剪应力—剪切位移变化规律相符。主要原因是土体在固结压缩后,土壤颗粒间的接触、摩擦及咬合作用增强,使抗破坏能力增加,因此在慢剪试验及高荷载(400 kPa)条件下,抗剪强度较大。

在FLAC3D数值模拟中,慢剪试验条件下边坡的安全系数最小为3.18,且最危险滑动面的位置较深范围更广。这表明在慢剪试验对应的崩岗现场,如固结后逐步缓慢承受荷载,长时间缓慢降雨条件下的剪切过程,崩岗是最不稳定的。这与林鸿州和荆鹏等^[18-19]提出的在降雨量相同时,低强度长历时的降雨更易导致边坡发生深层次大规模滑坡的观点一致。主要原因在于低强度长历时的降雨,使土壤能更充分吸收更多雨量,水分入渗更深,导致土体自重增加,激发较大孔隙压力,从而降低边坡的稳定性。本研究慢剪试验中抗剪强度和内摩擦角均最大,黏聚力最小,数值模拟的安全系数最小,最危险滑动面的范围较其他直剪方式更广,由此可见,黏聚力的大小对边坡稳定性影响较大^[20]。

4 结论

(1) 剪应力—剪切位移变化特性,在慢剪试验条件下,红土层和过渡层展现出了明显的剪应力—剪切位移变化特性。特别是在红土层中,剪应力增长速率在慢剪试验中达到最大值。在荷载400 kPa下,红土层的剪应力最大值达到了197.9 kPa。

(2) 抗剪强度在不同直剪试验下的表现不同,慢剪试验测得的抗剪强度最大,黏聚力值最小,内摩擦角值最大。同时,固结快剪试验条件对土层的内摩擦角及黏聚力产生了较大影响。相比于过渡层,红土层的抗剪强度更易受到不同剪切方式的影响,显

示出较为敏感的力学响应特性。

(3) 在3种直剪试验中,慢剪试验的安全系数(FS=3.18)最低,最大剪切应变增量数值最高,应变发生的范围最为广泛。对于崩岗边坡,3种剪切方式下水平方向的应力均呈现出一致的朝向坡面的趋势,位移均呈现出先增大后减小的趋势。然而,固结快剪试验的位移方向与其他两种方式不同,且位移值大于快剪和慢剪试验。对于崩岗边坡,Y轴应力随着土层深度的增加逐渐减小,在慢剪试验条件下,剪应力的变化幅度最大。

参考文献(References):

- [1] Zhao P R, Liu S Y, Wu K. Study on macro and micro shear strength of continuously graded and gap-graded sand[J]. *Particuology*, 2024, 86:101-116.
- [2] 陈嘉林. 崩岗土体胶结物质与其抗剪强度的关系研究[D]. 福州:福建农林大学,2018.
Chen J L. Research on Correlation between Shear Strength and Cementing Material of Collapsing Gully [D]. Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.
- [3] Yao C Q, Chen P, Ma T T, et al. Physicochemical effect on shear strength characteristics of clayey soils based on ring-shear experiment[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2020, 57(12):1820-1831.
- [4] 阮伏水. 福建崩岗沟侵蚀机理探讨[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,1996,12(S1):24-31.
Ruan F S. Discussion on erosion mechanism of collapse gully in Fujian[J]. *Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition*, 1996, 12(S1):24-31.
- [5] 贺伟明,石胜伟,蔡强,等. 考虑膨胀作用对抗剪强度影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2):3524-3533.
He W M, Shi S W, Cai Q, et al. Stability analysis of expansive soil slope considering the influence of swelling on shear strength[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(S2):3524-3533.
- [6] Gong W P, Quan C, Li X X, et al. Statistical analysis on the relationship between shear strength and water saturation of cohesive soils[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(8):1-37.
- [7] 林金石,庄雅婷,黄炎和,等. 不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24):106-110.
Lin J S, Zhuang Y T, Huang Y H, et al. Shear strengths of collapsing hill in red soil as affected by soil moisture under different experimental methods[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(24):106-110.

- [8] 徐忠. 直剪试验和三轴剪切试验对比分析[C]//徐忠, 2012年2月建筑科技与管理学术交流论文集. 北京: 建筑科技与管理学术交流会; 2012.
Xu Z. Direct shear test and triaxial shear test comparison analysis[C]//Xu Z, Proceedings of Academic Exchange on Architecture Technology and Management in February 2012. Beijing: Academic Exchange on Architecture Technology and Management; 2012.
- [9] 宋路, 朱海丽, 李国荣, 等. 两种方法测定根-土复合体抗剪强度试验对比研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 282-287.
Song L, Zhu H L, Li G R, et al. Comparative research for two experimental methods to determine soil-root composite shear strength[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(4): 282-287.
- [10] 郭鹏斐, 侯天顺, 刘茜, 等. 直剪试验方法对轻量土抗剪强度的影响规律研究[J]. 水利水电技术, 2023, 54(4): 161-170.
Guo P F, Hou T S, Liu Q, et al. Study on the influence of direct shear test methods on shear strength of lightweight soil[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(4): 161-170.
- [11] 程平. 剪切速率对直剪固结快剪试验指标的影响浅析[J]. 城市道桥与防洪, 2019(10): 164-166.
Cheng P. Brief analysis on influence of shearing rate on direct shear consolidation fast shear test index[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2019(10): 164-166.
- [12] Nam S, Gutierrez M, Diplas P, et al. Determination of the shear strength of unsaturated soils using the multi-stage direct shear test[J]. Engineering Geology, 2011, 122(3/4): 272-280.
- [13] 宋坤. 强度折减法在露天矿边坡稳定性分析中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
Song K. Application of strength reduction in the open pit slope stability analysis[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [14] Zeng J, Xiao S. Optimization algorithm of the strength reduction method for the stability analysis of slopes based on FLAC3D[J]. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 22(9): 3831-3843.
- [15] Basahel H, Mitri H. Probabilistic assessment of rock slopes stability using the response surface approach: a case study[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(3): 357-370.
- [16] 方济升, 刘杰, 张耀辉, 等. 土工格室与沙漠沙界面特性大型直剪试验[J]. 公路交通科技, 2024, 41(6): 65-73.
Fang J S, Liu J, Zhang Y H, et al. Large-scale direct shear test on interface characteristics between geocell and desert sand[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(6): 65-73.
- [17] 肖杰, 杨和平, 李哈峰, 等. 低应力条件下不同密度的南宁膨胀土抗剪强度试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6): 15-21, 37.
Xiao J, Yang H P, Li H F, et al. Shear strength test of Nanning expansive soil with various dry densities and low stresses[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 15-37.
- [18] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 198-204.
Lin H Z, Yu Y Z, Li G X, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 198-204.
- [19] 荆鹏, 张雅琪, 宋心彤, 等. 强降雨及高温天气对风积沙路基水力特性的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024(5): 1-12.
Jing P, Zhang Y Q, Song X T, et al. Analysis of the effects of heavy rainfall and high temperature on hydraulic behavior of aeolian sand subgrade[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024(5): 1-12.
- [20] 郭艳坤, 刘成才, 郭乐工. 干湿循环作用下公路边坡稳定性离散元分析[J]. 公路工程, 2018, 43(1): 226-228, 290.
Guo Y K, Liu C C, Guo L G. Discrete element analysis of highway slope stability subjected to wetting-drying cycles[J]. Highway Engineering, 2018, 43(1): 226-290.