



# 不同降水作用下渗流岩质公路边坡安全稳定性研究

李雅婧<sup>1</sup>, 冯文林<sup>2</sup>

(1. 焦作工贸职业学院 建筑工程学院, 河南 沁阳 454550;  
2. 哈尔滨工业大学(深圳) 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 降雨产生的渗流会降低公路边坡的稳定性, 进而引发各种边坡灾害, 影响公路的安全运营。因此, 如何有效保障降水条件下公路边坡的稳定性显得尤为重要。本文以云茂高速公路风化岩质雨水渗流边坡为例, 采用数值模拟手段对不同水力梯度下的加固边坡稳定性进行研究, 揭示边坡变形及安全性的变化规律。研究结果表明: 1) 边坡的水平 and 垂直位移均随水力梯度的增加而增加, 不同位置的位移变化受水力梯度的影响程度差异显著; 2) 水力梯度对滑面水平滑移特性影响显著; 3) 安全系数随水力梯度的增加呈指数函数减小, 当水力梯度增大时, 边坡稳定性急剧下降, 滑坡灾害的风险随之大幅增加。本文成果可为渗流边坡支护设计和稳定性预测供借鉴与参考。

**关键词:** 渗流岩质边坡; 水力梯度; 稳定性演化; 安全系数; 变形发展; 数值分析

中图分类号: TU973<sup>+</sup>. 23

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)03-0018-07

doi: 10.13402/j.gcejs.2025.03.031

## Research on security and stability of seepage rock highway slope under different precipitation

LI Yajing<sup>1</sup>, FENG Wenlin<sup>2</sup>

(1. Faculty of Architectural Engineering, Jiaozuo College of Industry and Trade Qinyang 454550, Henan, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, Guangdong, China)

**Abstract:** The seepage caused by rainfall can reduce the stability of highway slopes, and then cause various slope disasters and affect the safe operation of highways. Therefore, it is particularly important to effectively ensure the stability of highway slope under precipitation conditions. The weathered rocky rainwater seepage slope of Yunmao expressway is taken as an example, numerical simulation methods are used to study the stability of the reinforced slope under different hydraulic gradients, and the change law of slope deformation and safety is revealed. The results show that: 1) The horizontal and vertical displacement of the slope increase with the increase of hydraulic gradient, and the displacement change of different positions is significantly affected by the hydraulic gradient; 2) The hydraulic gradient has a significant effect on the horizontal slip characteristics of the sliding surface; 3) The safety factor decreases exponentially with the increase of hydraulic gradient, and when the hydraulic gradient increases, the stability of the slope decreases sharply, and the risk of landslide disaster increases significantly. The results can be used as a reference for the design and stability prediction of seepage slope support.

**Key words:** seepage rock slope; hydraulic gradient; stability evolution; safety factor; deformation development; numerical analysis

收稿日期: 2024-05-30

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51304068)

作者简介: 李雅婧(1995—), 女, 助教, 从事工程稳定性方面的研究。

随着公路基础工程建设的发展,我国高速公路的建设规模与日俱增,总里程现已超过 14 万  $\text{km}^{[1-2]}$ 。完善的公路设施建设是带动经济发展的基础,但山区高速公路无法避免需要修筑大量边坡,边坡的稳定与否直接影响公路的长期安全运营 $^{[3-5]}$ 。近年来,由于公路边坡失稳引发的灾害频发,如云南水昭高速、广东梅大高速等路段的滑坡事故,造成了安全事故和经济损失。因此,研究公路边坡稳定性对于保障其长期运营安全具有重要意义。

岩质公路边坡的稳定性受多种因素影响,其中,降雨是一个非常重要的因素。雨水冲刷和渗流作用使边坡内部结构弱化,岩体力学特性降低,从而显著影响其稳定性 $^{[6-8]}$ 。近年来,因水作用导致的边坡失稳问题日益增多,降水对边坡稳定性的影响受到了越来越多的关注。许多学者就此开展了相关研究,如:王安礼等 $^{[9]}$ 基于贵州公路岩质边坡,研究了锚索支护条件下边坡在不同稳定状态下的安全系数变化,并揭示了失稳演化过程中的能量释放规律;魏斌斌等 $^{[10]}$ 采用数值模拟方法,研究了某山区高速公路顺层边坡的稳定性,分析了地下水或降雨对边坡下滑力的影响,并构建了结构内部应力分布特征;GAO 等 $^{[11]}$ 针对某一高速边坡开展了研究,通过现场应力和应变监测,提出了边坡岩土结构稳态渗流分析的叠加计算方法;KIM 等 $^{[12]}$ 研究了浅层滑坡的渗流机制,通过人工降雨对  $30^\circ$  沙坡进行水槽试验,利用数值模拟手段分析渗流作用下边坡的稳定性,并考虑渗流方向和渗流力对安全系数的影响,探讨了地形变化对渗流机理的影响。

鉴于此,本文以云茂高速公路边坡为研究对象,采用数值模拟强度折减法,研究水力梯度变

化对边坡稳定性的影响,揭示边坡水平与垂直位移随水力梯度的变化规律,提出安全系数的预测模型,以期降水渗流公路边坡不稳定状态加固策略的选择提供科学的指导,也为边坡稳定性预测提出理论基础。

## 1 公路边坡岩体特征

云茂高速公路某风化岩质雨水渗流边坡位于云茂高速段(图 1) $^{[13]}$ 。2019 年 7 月,受第七号台风“韦帕”影响,该区域连降暴雨,导致边坡坡顶出现较大规模的裂缝群。为确保边坡稳定和居民安全,2019 年 8 月—2019 年 12 月期间对该边坡进行了加固。该边坡由风化花岗岩构成,其力学参数:黏聚力约为 0.5 MPa,摩擦角约为  $42^\circ$ ,泊松比约为 0.26,弹性模量约为 6.5 GPa,容重约为  $19 \text{ kN/m}^3$ 。根据监测数据和变形情况,滑面内聚力为 8 kPa,内摩擦角取  $9.5^\circ$ 。边坡属于四级边坡,加固措施采用预应力锚索,具体参数:一级边坡锚索长度为 20 m,二级、三级边坡锚索长度为 34 m,四级边坡锚索长度为 40 m,各级边坡锚索的锚固长度为 10 m,预应力为 400 kN,锚索间距约为 3 m,锚索与坡面夹角为  $90^\circ$ 。边坡加固示意如图 2 所示。雨期时,雨水透过较厚的残积层及全风化层下渗,使滑面成为边坡的主要含水带。由于该公路边坡属于高边坡,即使经过加固,仍存在排水不畅的问题,特别是在暴雨作用下,渗流作用显著。为研究降水对边坡稳定性的影响,开展不同降水强度下的高边坡稳定性数值试验,揭示其稳定性演化特征。

边坡滑面作为滞水面,其水力梯度会随着不同降雨量发生显著变化。杨天森等 $^{[14]}$ 根据实际结



(a) 边坡整体特征; (b) 边坡岩质特点

图 1 高速公路边坡形态

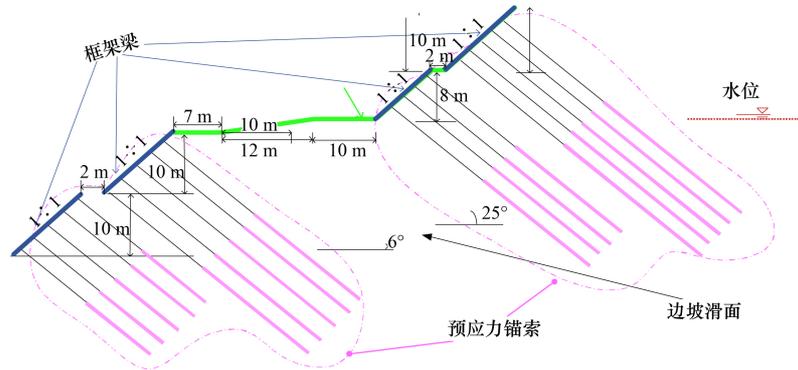


图 2 高速公路边坡结构示意图

果，得出了边坡水力梯度与降雨量之间的关系。表 1 为不同降雨量与水力梯度范围的应关系。根据表 1 分别设计 5 组水力梯度  $H_g$  范围，分别为 0.2(中雨)、0.4(大雨)、0.5(暴雨)、0.6(大暴雨)、0.7(特大暴雨)。这 5 组水力梯度分别对应不同的降雨量，因此可以通过研究滑面水力梯度的变化来分析其对边坡稳定性的影响。

表 1 降水量等级与水力梯度的关系

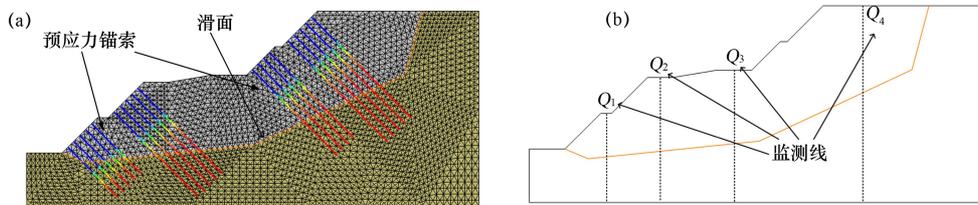
24 h 降雨量/mm	等级	水力梯度
10 ~ 25	中雨	0.12 ~ 0.30
25 ~ 50	大雨	0.22 ~ 0.48
50 ~ 100	暴雨	0.48 ~ 0.55
100 ~ 250	大暴雨	0.55 ~ 0.60
>250	特大暴雨	0.60 ~ 0.70

## 2 数值模型设计

采用有限元数值分析方法 UDEC 建立相应的

数值模型，以研究不同影响因素下加固边坡的稳定性。由于主滑面是滑面中破坏最为严重的部分，在后续监测中其滑动变形也最大，本文数值分析基于边坡主滑面进行稳定性评估。数值模型尺寸如图 3 所示，其中  $Q_1 \sim Q_4$  为监测点。模型材料力学设置参数如表 2 所示。边坡岩体力学参数与实际边坡勘探结果一致，滑面形态也与真实边坡主滑面相符。锚索的抗拉强度为 1 860 MPa，弹性模量为 195 GPa。

边坡加固后，降水会导致滑面的水力梯度发生变化，从而显著影响边坡的稳定性。此外，地质构造因素会使预应力锚索的锚固力和锚固长度发生变化，导致边坡不同位置可能出现锚固失效。基于上述影响边坡稳定性的因素，采用离散元数值分析方法对边坡在水力梯度、锚固力、锚固长度以及锚固失效位置因素变化条件下的稳定性进行评估。



(a) 边坡数值离散元模型；(b) 边坡监测位置布设

图 3 数值模型与监测线设置

表 2 数值模型岩体和滑面力学参数取值

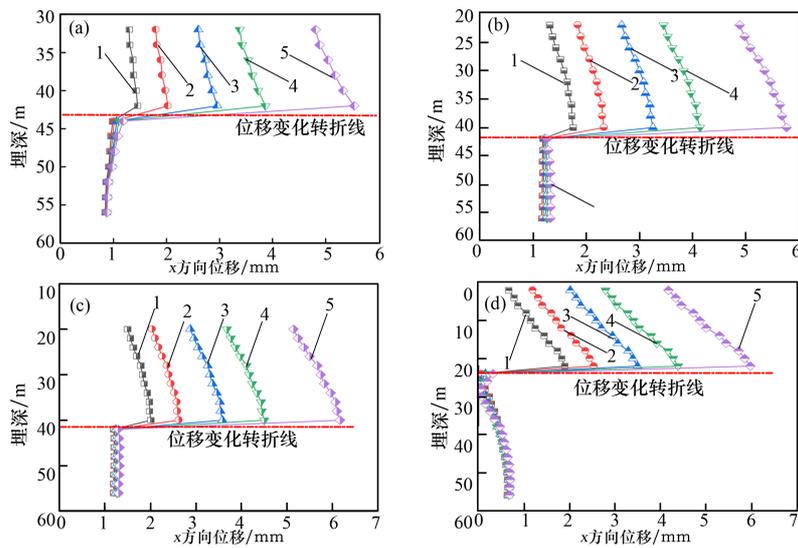
项目	容重/( $kN \cdot m^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/( $^{\circ}$ )
风化花岗岩	19	6 500	0.26	500	42.0
滑动面	—	—	—	8	9.5

### 3 水力梯度对边坡稳定性影响

#### 3.1 不同方向位移变化

各监测点在不同水力梯度下达到不平衡力比时的位移如图 4、5 所示。由图 4、5 可知: 不同水力梯度下, 各个监测点的位移变化趋势相似, 但具体数值会受水力梯度的影响。 $x$ 、 $y$  方向的位移均随水力梯度的增加而增大。各级边坡  $x$  方向上的位移波动变化受水力梯度影响大, 并且随水力梯度的增加, 差异逐渐增大。水力梯度的增加直接影响滑面

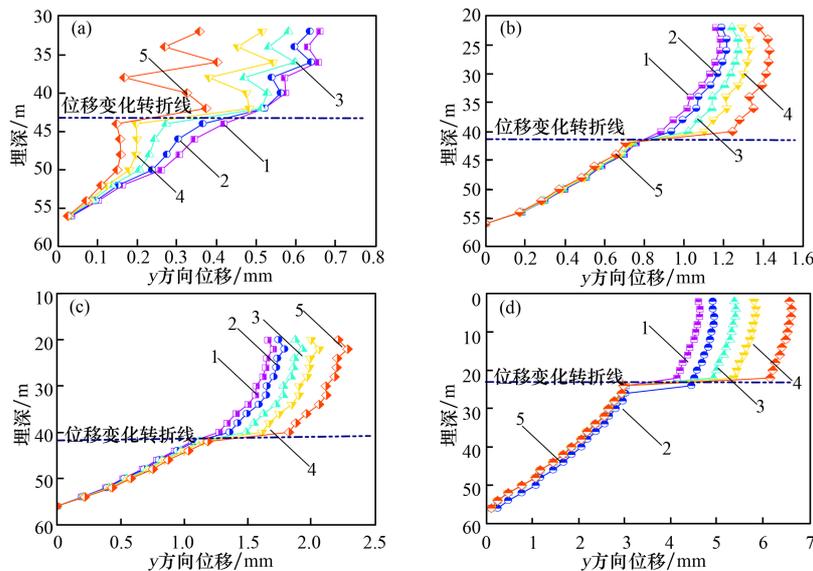
的滑动性, 因此水平方向上的变形差异较大。坡脚处  $y$  方向的位移在水力梯度较小时随深度波动性大, 但随着水力梯度的增加, 波动性明显降低, 不同水力梯度间的位移差也减小。除坡顶外, 其他各级边坡的  $y$  方向位移均非常小, 且小于水平位移。 $y$  方向的最大位移差出现在坡顶。 $x$ 、 $y$  向的位移都会出现断崖式转折的变化, 其中  $Q_4$  的位移转折发生在埋深 20~24 m 处, 而  $Q_1 \sim Q_3$  的位移转折则发生在 40~42 m 处。整体上, 水力梯度对滑面水平滑移特性影响显著, 而对边坡下沉的影响较小。



监测点: (a)  $Q_1$ ; (b)  $Q_2$ ; (c)  $Q_3$ ; (d)  $Q_4$

水力梯度: 1—0.2; 2—0.3; 3—0.5; 4—0.6; 5—0.7。

图 4 不同水力梯度下各个监测点  $x$  向位移随埋深的变化



监测点: (a)  $Q_1$ ; (b)  $Q_2$ ; (c)  $Q_3$ ; (d)  $Q_4$

水力梯度: 1—0.2; 2—0.3; 3—0.5; 4—0.6; 5—0.7。

图 5 不同水力梯度下各个监测点  $y$  向位移随埋深的变化

### 3.2 位移差分布特征

以监测点  $Q_4$  坡面为基准零点，分别计算不同埋深下各监测点在其他水力梯度下的  $x$ 、 $y$  向位移与水力梯度 0.2 时的位移差，具体如图 6、7 所示。由图 6、7 可知：随着水力梯度的增加，各监测点  $x$  方向上的位移差随埋深变化的差异较小。 $y$  方向上的位移差差异较大。监测点  $Q_1$  的  $y$  向位移差最大出现在埋深 20~24 m 处，监测点  $Q_2 \sim Q_4$  的  $y$  向位

移差最大出现在埋深 40~42 m 处。监测点  $Q_3$  的  $y$  向位移差最大，监测点  $Q_2 \sim Q_4$  的  $y$  向位移差随着水力梯度的增加而增大，而监测点  $Q_1$  的  $y$  向位移差则随着水力梯度的增加而减小。监测点  $Q_1$ 、 $Q_2$  的位移差最大区域出现在 38~42 m 处，而监测点  $Q_3$ 、 $Q_4$  的位移差最大区域出现在 20~24 m 处。

### 3.3 位移矢量分布特征

图8为不同水力梯度下的位移分布云图。由

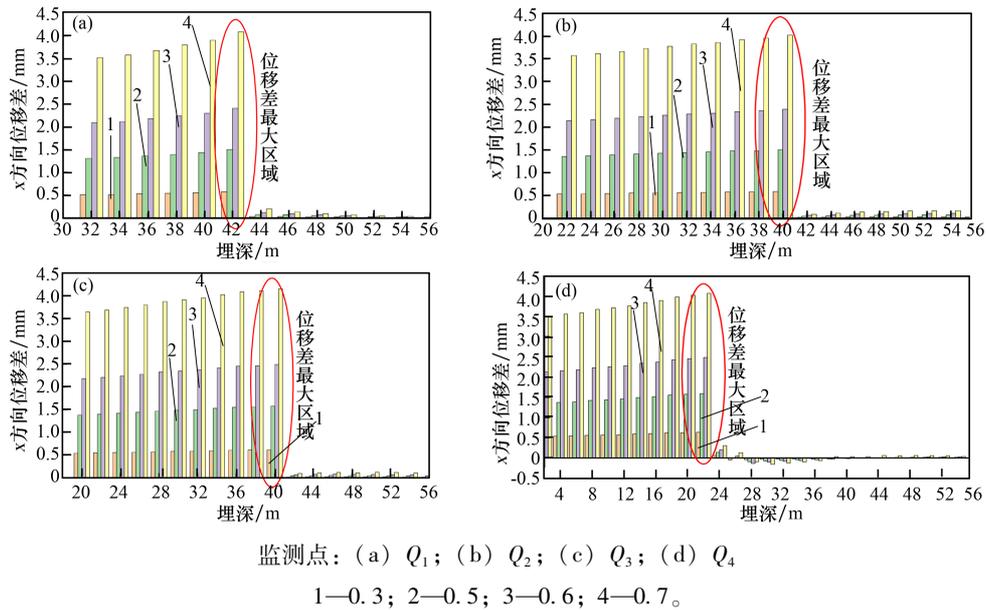


图 6 不同监测点各水力梯度  $x$  向位移差的分布

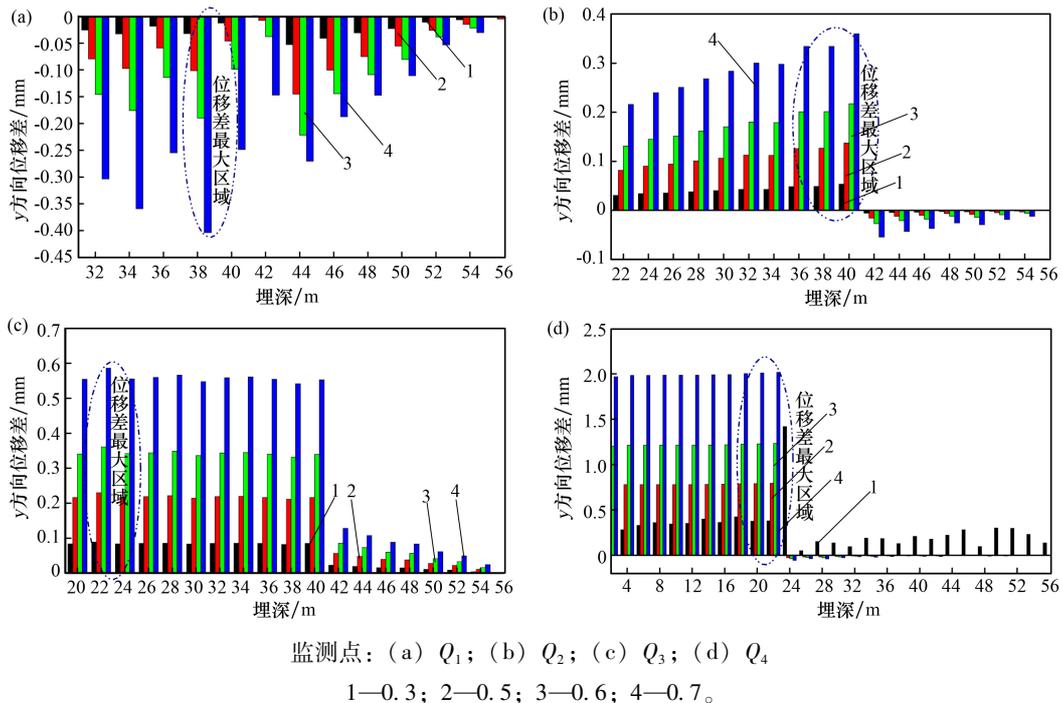
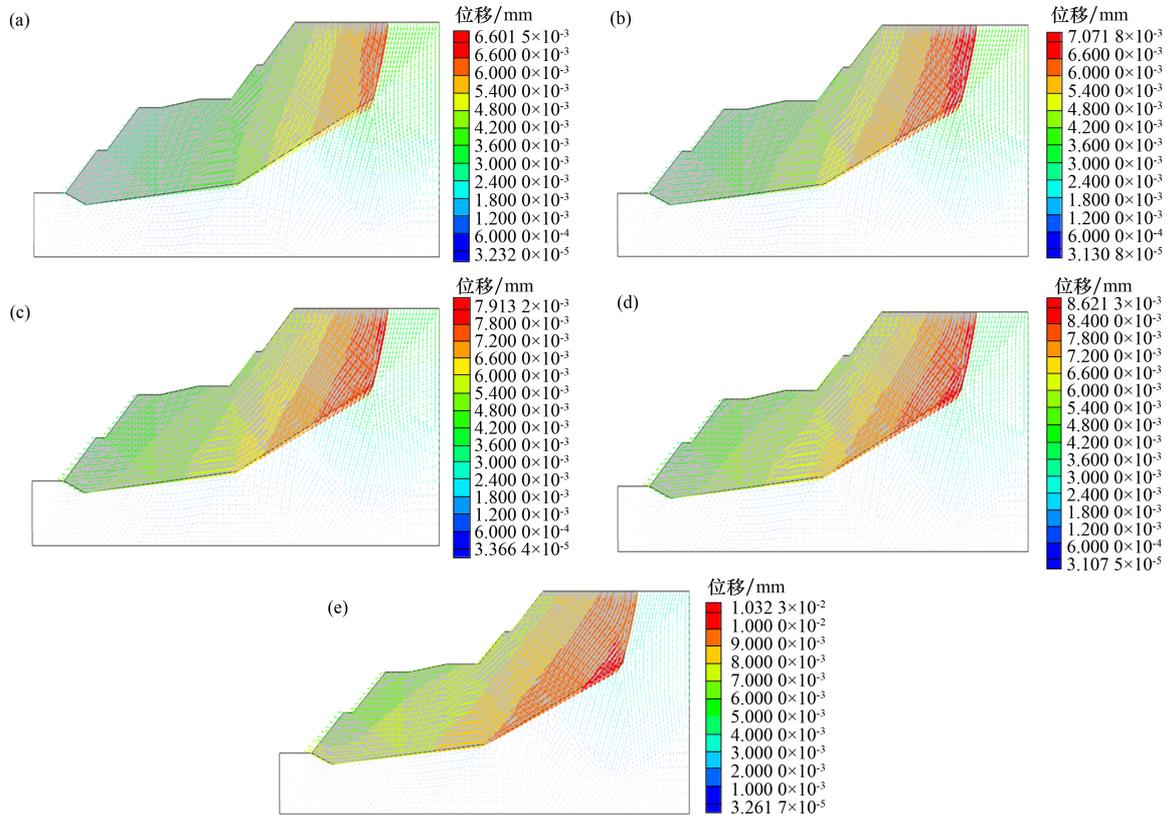


图 7 不同监测点各水力梯度  $y$  向位移差的分布



水力梯度: (a) 0.2; (b) 0.3; (c) 0.5; (d) 0.6; (e) 0.7

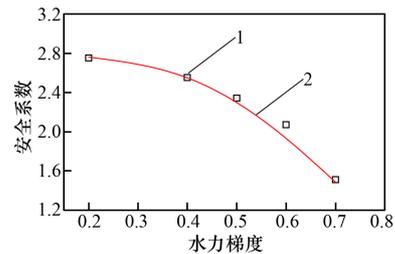
图 8 不同水力梯度下位移矢量分布

图 8 可知: 位移分布形式受水力梯度影响显著。整体上, 滑动体的位移矢量方向沿着滑面方向, 位移从坡顶至坡脚逐渐扩展。滑动体位移矢量较大区域集中在坡顶滑面位置, 而位移矢量较小的区域位于滑动体的二级坡面位置。越接近滑面, 滑动体的位移越大; 随着水力梯度的增加, 滑面处的位移也相应增大。当水力梯度较小时, 边坡稳定性较好, 变形较小, 位移呈现竖向条带状分布。随着水力梯度的增加, 边坡位移和滑移均显著增大, 位移开始偏移, 最大位移区逐渐移动至滑面下部。同时, 位移较大区域的范围也随着水力梯度的增加而扩大。

### 3.4 安全系数的变化规律

采用强度折减法, 对不同水力梯度  $H_g$  下的边坡进行稳定性分析, 得到其安全系数 ( $S_{FOS}$ ), 结果如图 9 所示。

由图 9 可知: 随着水力梯度的增加, 边坡的安全系数逐渐减小, 且减小速度逐渐增加快。水力梯度增加时, 滑动面的摩擦系数减小, 滑梯与坡体之间的黏结作用减弱, 导致边坡更容易产生



1—试验值; 2—理论值。

图 9 不同水力梯度下安全系数的变化规律

滑动。同时, 滑面上的水渗流作用随着水力梯度的增加而增强, 进一步加剧了滑面的滑动趋势。因此, 随着水力梯度的增加, 安全系数的降低速度也会增大。安全系数与水力梯度之间呈指数函数关系, 相关系数为 0.983 5。试验值与理论值的对比如图 9 所示, 具体函数形式如下。

$$S_{FOS} = 2.7809 \exp(-2.2009 H_g^{3.5195}) \quad (1)$$

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

(1) 随着水力梯度的增加, 不同监测点的  $x$ 、 $y$  向位移逐渐增大, 但在特定埋深时会出现位移突

减的现象。各监测点发生突减现象的埋深不同,越接近坡顶的监测点,突减发生的埋深越浅。

(2) 不同监测点在水力梯度变化下的  $x$ 、 $y$  向位移差表现出不同的变化规律。总体上,各监测点的  $x$  向位移差较为接近,而  $y$  向位移差差距较大。三级坡面  $y$  向位移差相对较大; $x$  向位移差较大区与位移发生转折的埋深基本一致; $y$  向接近坡脚位置的最大位移差出现在较大的埋深处,而接近坡顶位置的最大位移差出现在较小的埋深处。

(3) 滑动块体的位移矢量方向沿着滑动面变化,位移大小呈现条带状分布特征。随着水力梯度的增加,条带状分布变窄,位移值增大,且位移较大的区域主要出现在接近坡顶的滑面上,离滑面越近,位移值越大。

(4) 随着水力梯度的增加,边坡的安全系数逐渐减小,衰减速率也逐渐加快,边坡更容易发生滑坡灾害。水力梯度增加时,滑面的力学特性弱化,导致安全系数下降。安全系数与水力梯度的关系符合指数衰减函数的变化规律。

## 4.2 建议

为防止后期因大降水而引发重大滑破灾害,建议采取加固策略如下。

(1) 对于第一级边坡,采用锚杆格构梁方式进行补强。通过锚杆将滑坡推力传递到稳定层,增强边坡的整体性;格构梁传力结构进一步提升加固效果,减弱降水渗流引起的滑动病害。

(2) 对于第二级边坡,通过预应力锚索框架进行支护补强。预应力锚索结构能有效抑制滑坡移动,改变当前的不稳定应力状态;框架结构可防止雨水直接冲刷边坡。

(3) 对于第三、四级边坡,采用人字型骨架防护或生态网植草措施。由于这些区域地势陡峭并有裂缝产生,相关措施可以防止水土流失,减少降水冲刷,从而提高边坡在降水渗流条件下的稳定性。

## 参考文献:

[1] 张超,魏松涛,刘彬,等. 山区高速公路灰岩质高陡边坡失稳与加固措施分析[J]. 公路,2023,68(7): 264 - 269.

- [2] 张旭,周绍武,李元松,等. 公路泥质砂岩边坡预警判据与参数敏感性分析[J]. 长江科学院院报,2019,36(3):90 - 97.
- [3] 宋益明,薛世恩,张菊锋. 考虑反倾破坏面的高陡公路岩质边坡倾覆分析[J]. 工程建设,2023,55(8): 35 - 41.
- [4] 周游,黄静美,谢红强. 西南地区某高速公路边坡危岩体稳定可靠性评价[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(增刊2):1022 - 1029.
- [5] HE F, TAN S C, LIU H J. Mechanism of rainfall induced landslides in Yunnan province using multi-scale spatiotemporal analysis and remote sensing interpretation [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2022(90): 104502.
- [6] 杨军海,罗聪,于海明. 渐进演化力学机制在某高速公路边坡失稳分析中的应用研究[J]. 中外公路,2018,38(5):23 - 26.
- [7] 宋洋,马旭琪,牛凯,等. 降雨强度对含软弱夹层边坡失稳破坏临界长度影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(5):538 - 547.
- [8] 周永利,王建明. 降雨诱发舍后缘裂缝岩质边坡失稳机制研究[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(4): 103 - 108.
- [9] 王安礼,邬忠虎,娄义黎,等. 公路岩质边坡稳定性的数值模拟分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(22): 9577 - 9582.
- [10] 魏斌斌,李滔. 山区高速公路顺层岩质边坡稳定性分析[J]. 交通世界,2021(7):64 - 65.
- [11] GAO X, CHENG B, TIAN W, et al. Simulation parameter selection and steady seepage analysis of binary structure slope[J]. *Water*, 2020,12(10):2747.
- [12] KIM M S, ONDA Y, UCHIDA T, et al. Effect of seepage on shallow landslides in consideration of changes in topography: Case study including an experimental sandy slope with artificial rainfall[J]. *Catena*, 2018(161):50 - 62.
- [13] WANG Z C, NIU S J. Engineering analysis and numerical study on stability evaluation of seepage slope reinforcement stability of Yunmao expressway[J]. *Frontiers materials*, 2023(10):1 - 18.
- [14] 杨天森,马飞跃,郭霞,等. 暴雨作用下杂填土边坡滑动机理数值模拟研究[J]. 河北工业大学学报,2022,51(3):94 - 100.