

引用本文:杨连祥,翁效林,胡继波,等.强降雨条件下高陡填方雪道路基稳定性分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(3):170-179.  
YANG Lianxiang, WENG Xiaolin, HU Jibo, et al. Stability analysis of high and steep fill snowway roadbed under heavy rainfall condition[J].  
Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(3): 170-179.

DOI:10.19815/j.jace.2021.11031

## 强降雨条件下高陡填方雪道路基稳定性分析

杨连祥<sup>1,2</sup>, 翁效林<sup>1,2</sup>, 胡继波<sup>1,2</sup>, 雷尚民<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为研究降雨入渗对路基稳定的影响规律,以涞源县冬奥会高陡滑雪赛道跳台路基为工程背景,考虑雪道路基填料的级配和降雨强度等因素,建立有限元模型,分析强降雨条件下高陡填方路基的稳定性,并通过离心试验结果验证数值模拟结果的合理性。结果表明:降雨入渗会导致路基位移增大,最大位移量为22.401 cm,孔压由负变正且相对孔压最大值为85 kPa;随着路基填料级配趋于良好,路基顶面的位移和相对孔压逐渐减小;随着降雨时间的增加,路基顶面的位移和相对孔压不断减小,位移由22.401 cm减少至12.35 cm,相对孔压由85 kPa减少至37 kPa,路基安全系数下降至1.2;在降雨强度和时长相同的条件下,填土级配对路基稳定性的影响较大;降雨强度存在临界值,一旦超过该临界值( $150 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),路基位移迅速增大,孔压急速变化,路基失稳时间缩短且破坏程度加剧;降雨入渗引起的路基滑动破坏往往是浅层滑动,可通过加强路基坡面的防护和排水,减小降雨对路基浅层土体的影响,提高路基的稳定性。

**关键词:**强降雨;路基填料;最优级配;高陡路基;失稳

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)03-0170-10

### Stability analysis of high and steep fill snowway roadbed under heavy rainfall condition

YANG Lianxiang<sup>1,2</sup>, WENG Xiaolin<sup>1,2</sup>, HU Jibo<sup>1,2</sup>, LEI Shangmin<sup>1,2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the influence of rainfall infiltration on the stability of roadbed, the finite element model was established based on the engineering background of the high and steep ski jumping platform roadbed of Laiyuan County Winter Olympic Games, considering the factors such as gradation of snow roadbed filler and rainfall intensity. The stability of high and steep fill roadbed under heavy rainfall conditions was analyzed, and the rationality of numerical simulation results was verified by centrifugal test results. The results show that rainfall infiltration will lead to the increase of roadbed displacement, the maximum displacement is 22.401 cm, the pore pressure changes from negative to positive and the maximum relative pore pressure is 85 kPa. As

收稿日期:2021-11-23

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2019JM-216)

作者简介:杨连祥(1997-),男,工学硕士研究生,E-mail:1368729168@qq.com.

通信作者:翁效林(1980-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:49768532@qq.com.

the gradation of roadbed fill tends to be good, the displacement and relative pore pressure of the top surface of the roadbed gradually decrease. With the increase of rainfall time, the displacement and relative pore pressure of the top surface of the roadbed decrease continuously. The displacement decreases from 22.401 cm to 12.35 cm, the relative pore pressure decreases from 85 kPa to 37 kPa, and the safety factor of the roadbed decreases to 1.2. Under the same rainfall intensity and duration, the fill gradation has a great influence on the stability of roadbed. There is a critical value of rainfall intensity. Once the rainfall intensity exceeds the critical value ( $150 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ), the roadbed displacement increases rapidly, the pore pressure changes rapidly, the roadbed instability time is shortened, and the damage degree is aggravated. The sliding failure of roadbed caused by rainfall infiltration is often shallow sliding. By strengthening the protection and drainage of roadbed slope, the influence of rainfall on shallow soil of roadbed can be reduced and the stability of roadbed can be improved.

**Key words:** heavy rainfall; roadbed filling; optimal gradation; high and steep roadbed; instability

## 0 引言

在2022年冬季奥运会高低跳台滑雪道的建设中出现大量的高陡路基,路基稳定问题得到较多的关注<sup>[1]</sup>。应国际雪联要求,基于原有强风化白云岩陡坡开挖土方和击实回填碎石土,形成坡角接近 $45^\circ$ 的高填方滑雪赛道。赛道路基对差异性沉降敏感,加之全球极端天气频发,为了滑雪道路基的长期稳定,需考虑极端降雨入渗对高陡填方路基稳定性的影响。

Priono等<sup>[2]</sup>研究表明,降雨入渗影响非饱和土路基稳定性的过程是复杂的,其稳定性受到气候、地质、路基形态及土质特性等诸多因素的综合影响;Kristo等<sup>[3]</sup>对降雨强度、土质特性参数、路基几何特性参数等因素在降雨过程中对路基稳定性的影响进行研究;唐军<sup>[4]</sup>提出路基稳定性临界深度的计算公式;Lagerwerff等<sup>[5]</sup>提出了渗流场与极限平衡法相结合的方法,尤其是综合考虑空气压力变化耦合的渗流分析方法;Cai等<sup>[6]</sup>运用有限元方法分析降雨条件下路基内孔压的变化情况及该条件下的路基稳定性,研究发现路基稳定性随降雨入渗而降低,降雨强度、降雨持续时间及土体强度都会影响路基安全系数;Pham等<sup>[7]</sup>通过 Galerkin 有限元法研究不同降雨及不同土体类型下的非饱和渗流,基于刚体弹簧模型对路基稳定性进行深入的研究和数值分析;Fredlund等<sup>[8]</sup>经过多次试验及论证,基于运动波理论和 Green-Ampt 入渗模型提出坡面降雨入渗的动力模型;卢宁等<sup>[9]</sup>通过强度折减有限元法,研究三维路基稳定性在不同边界条件和几何形状下的变化。此外,随着 ABAQUS、ANSYS 等数值模拟软件的

普及,工程相关问题也可以通过数值分析来研究。Li等<sup>[10]</sup>开发出了一种高效的边坡系统可靠性计算机仿真方法,对边坡的稳定性情况进行了定量分析;Cho等<sup>[11]</sup>利用修正的 Mohr-Coulomb 破坏准则和所提出的考虑降雨入渗的非饱和边坡安全系数计算程序,研究了降雨作用下不同形状斜坡的入渗和滑动过程;陈卫卫等<sup>[12]</sup>利用有限元模拟软件基于饱和-非饱和渗流理论对不同降雨条件下路基稳定性进行研究;王立中<sup>[13]</sup>利用数值模拟方法对降雨入渗诱发滑坡进行分析,认为基质吸力减小是路基失稳的重要原因。

目前,有关跳台雪道路基的稳定性研究尚不系统,本文将利用 ABAQUS 和 Geo-Studio 两种数值模拟软件进行分析,利用饱和-非饱和渗流理论和流-固耦合理论,考虑降雨边界条件、渗透系数与基质吸力之间的关系,从二维和三维的角度出发对离心模型试验的结果进行对比分析,多角度多维度地研究强降雨环境下路基稳定性以及路基孔隙水压力等物理参数的变化,并总结其填料的渗流规律,为分析其稳定性奠定了基础。

## 1 工程背景

国家跳台滑雪中心是中国建设的首个跳台滑雪场地,也是全球首个全钢筋混凝土框架结构滑雪中心,首个在顶部出发区设置大型建筑物的跳台滑雪场地。本工程为国家跳台滑雪中心跳台 HS140 和跳台 HS106 的滑雪道路基工程,地处保定市涞源县白石山镇附近,大跳台长度 352 m,高度 136 m,标准跳台长度 317 m,高度 114 m。HS140 赛道路基坡角接近  $45^\circ$ ,属于高陡型路基,且在半山腰高度约

80 m 处,属于填方区域,易产生裂缝,诱发滑坡和不均匀沉降,因而需要加固处理,采用预应力锚杆加格构梁的加固方式。根据当地的气象资料可知,每年的 6~9 月为雨季,因此需考虑降雨入渗透发路基破坏的可能性。经前期勘察,路基以中风化白云岩为基岩,强风化白云岩和碎石填土为上层土。建筑物安全等级为二级,地基基础设计等级为乙级,抗震设防类别为丙级,对差异沉降敏感程度为敏感,最大面荷载为 300 kPa,拟建区域如图 1 所示。

## 2 降雨入渗影响因素

### 2.1 渗流方式

根据质量守恒定理及广义达西定理得到各向异性多孔介质中饱和-非饱和渗流的控制方程<sup>[14]</sup>:

$$[c(h) + \beta S_s] \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} [k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h)] \quad (1)$$

式中: $\beta$ 为区分饱和与非饱和区的引入变量,饱和时, $\beta=1$ ,非饱和时, $\beta=0$ ;  $c(h)$ 为非饱和区的等效体积分水率; $S_s$ 为弹性饱和度; $h$ 为总水头; $t$ 为时间;

$k_{ij}^s$ 为饱和渗透系数张量; $k_r$ 为相对渗透系数; $k_{i3}$ 为竖向渗透系数; $x_i, x_j$ 为坐标值。

当坡面未出现径流时,可将入渗边界看作流量边界来处理:

$$[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h)] \mathbf{n}_i \Big|_{\Gamma} = p \quad (2)$$

式中: $\mathbf{n}_i$ 为渗流边界面的外法线方向向量; $\Gamma$ 为渗透边界; $p$ 为渗流面上的降雨强度,以流入坡体为主。

此外,因雨水全部入渗降雨边界上的各点压力水头  $h$  需满足  $h \leq 0$ 。

但是,当坡面出现径流时,不可继续将降雨的边界当作流量边界,可将其看作水头边界处理。降雨强度大于土体入渗能力,雨水未能全部渗入,则边界的流量应满足

$$[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h)] \mathbf{n}_i \Big|_{\Gamma} < p \quad (3)$$

总而言之,降雨渗流边界为不定边界,在每一个计算步长开始时无法精确确定,因而需利用迭代算法对其进行求解。

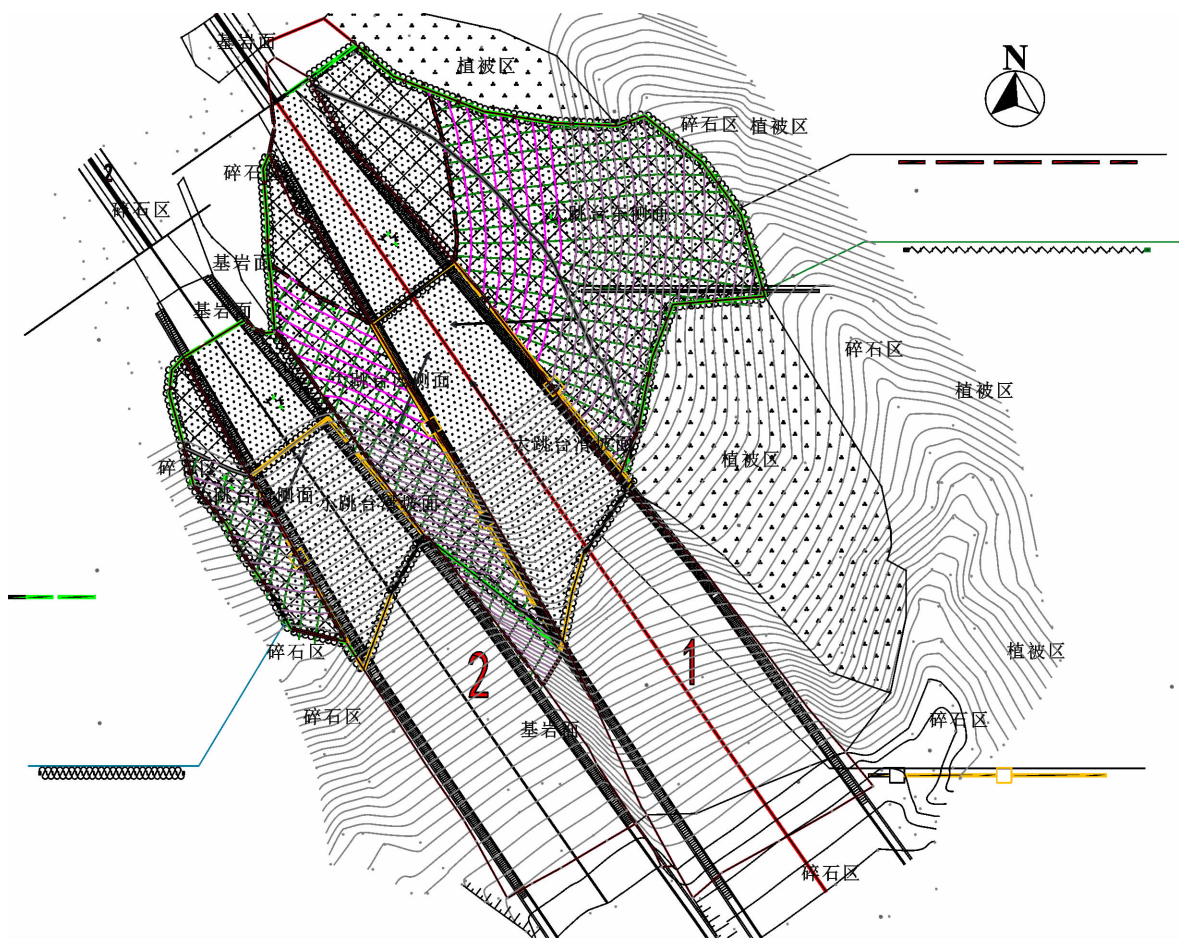


图 1 工程布置

Fig. 1 Engineering layout

## 2.2 填土级配

土体颗粒的矿物成分及颗粒间的可溶性盐对水土特征曲线的影响主要反映在对水分的亲和程度上,若组成土体的矿物亲水性较强,其所表现的吸力也较大,则其水土特征曲线的残余含水率较大,曲线斜率也会变得较为平缓。

另外,土体级配也可影响水土作用的面积及收缩膜的形状,收缩膜的形状可以决定吸力的大小。土体孔隙较小,进气值就越强,水土特征曲线越平缓。

水土特征曲线在非饱和土力学分析中发挥很大作用,大量试验证明非饱和土的水土特征曲线与土的性质有一定的关系。在研究非饱和土的水分运动情况时,很多参数都能通过水土特征曲线求得。

考虑到回填土体对于路基稳定性分析的影响,现特设4组级配的回填土路基,对极端降雨下的路基稳定进行分析。各填土的级配曲线和水土特征曲线如图2、3所示。

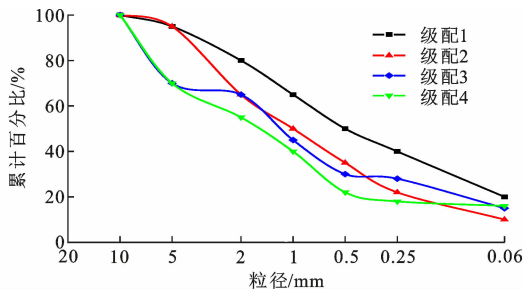


图2 级配曲线

Fig. 2 Grading curve

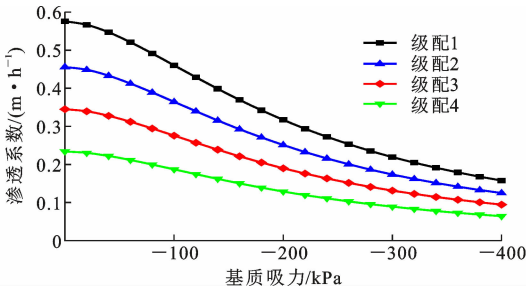


图3 水土特征曲线

Fig. 3 Soil and water characteristics curve

## 2.3 分析方法

有限元强度折减法是极限平衡原理、有限元计算原理和强度折减理论相结合的一种方法<sup>[15]</sup>。通过一系列材料特定参数的折减,利用不断地增大折减系数进行数值计算,进而确定路基的应力场、位移场,并对特征点的水平位移等值与折减系数的关系和塑性区的出现发展进行分析。

极限平衡法<sup>[16]</sup>是基于摩尔-库仑强度准则的提出的,即只考虑静力平衡条件和土体的摩尔-库仑破坏准则,通过分析土体破坏瞬间的平衡求解路基稳定性。

基于上述两种分析方法,可采用 ABAQUS 和 Geo-Studio 两种有限元分析软件进行对比分析,更客观地研究强降雨诱发填土路基的稳定性破坏规律。

## 3 模型建立

基于有限元分析软件 ABAQUS 及 Geo-Studio,对极端降雨条件下的路基稳定性进行分析,从内部孔隙水压力的变化和坡面的位移分析其强度的变化,通过 Geo-Studio 得出其二维路基的安全系数并搜索出危险滑动面。

### 3.1 模型参数

通过 ABAQUS 建立三维模型,如图4所示。模型长 80 m,宽 30 m,高 60 m,材料分为基岩和填料,对模型施加重力荷载和降雨荷载,固定单元的位移,进而完成流固耦合的计算。

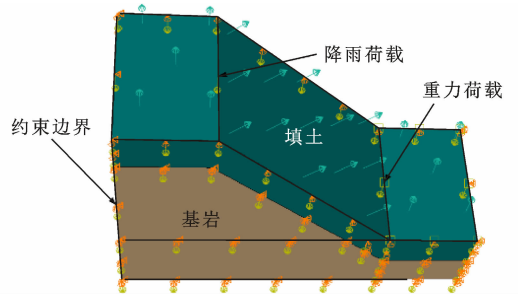


图4 三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model

路基填料采用修正摩尔-库仑模型。本研究考虑降雨作用下路基的孔压与位移,对路基工程简化处理,渗流采用饱和-非饱和的正交渗流控制方程。级配1~4组成粒组中含量最高的粒组依次是:粗粒组、中粒组、细粒组、黏土。结合工程地质勘察材料及室内试验测定的土体参数如表1所示。

表1 土体参数

Table 1 Parameters of soil

级配	$E/\text{kPa}$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$k_{ws}/(\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$
1	23 450	30.10	45.0	0.576
2	19 340	42.47	37.7	0.498
3	18 734	47.39	35.2	0.349
4	10 342	50.69	30.8	0.207

注:  $E$  为弹性模量;  $c$  为黏聚力;  $\varphi$  为内摩擦角;  $k_{ws}$  为渗透系数。

### 3.2 边界条件和降雨强度

渗流计算因雨水入渗的复杂性,Mein 和 Larson 用降雨量  $q$ 、土壤容许入渗量  $f_p$  及饱和渗透系数  $k_{ws}$  三个参数分析雨水入渗的情况。

(1) 当  $q < k_{ws}$  时,不发生地表径流,雨水全部入渗。

(2) 当  $f_p > q > k_{ws}$  时,降雨全部入渗,  $f_p$  随降雨时间的持续而降低,但入渗率降低。

(3) 当  $q > f_p$  时,因降雨量超过容许入渗量,路基产生地表径流,路基土体的入渗率降低。

降雨时长为 120 h,根据表 2 合理选取降雨强度,降雨强度取 200、150、100  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在 3 种降雨强度下,对比分析降雨强度诱发路基稳定性破坏的过程。

表 2 降雨强度等级

Table 2 Rainfall intensity grade

降雨类型	降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$
小雨	$<10$
中雨	$10 \sim 25$
大雨	$25 \sim 50$
暴雨	$50 \sim 100$
大暴雨	$100 \sim 250$
特大暴雨	$>250$

## 4 模拟结果分析

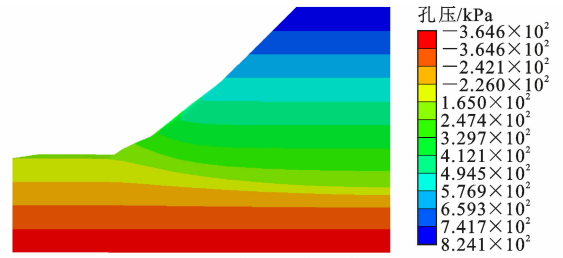
### 4.1 填土级配的影响

#### 4.1.1 路基孔压

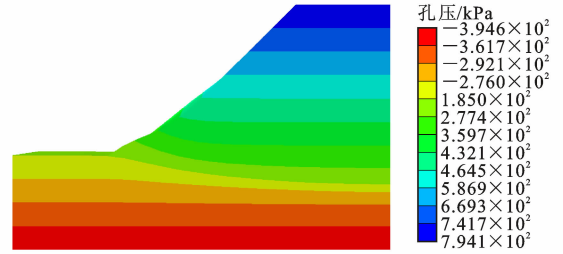
通过地勘资料及相关规范,取极端降雨强度为 200  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,分析不同级配填土路基受极端降雨的影响情况。

图 5 为不同级配填料路基降雨 120 h 后的孔压等值图,图 6 为不同级配填料路基的孔压变化幅度(相对孔压)。从图 5 可以看出,级配 1 的孔隙水压力  $P$  最大值为 824.1 kPa,较初始孔隙水压力  $P_0$  增加 40 kPa,而级配 4 的孔隙水压力增加了 85 kPa。这是因为级配 1 粗颗粒较多,击实效果显著,土体较密实,渗透系数较小,雨水入渗深度变浅,影响范围缩小,孔压的变化幅度也降低。级配 1~4 粗粒组占比减小,细粒组占比增加。在这个变化过程中,土颗粒间咬合效果由好变差,在降雨条件下有效应力减小,孔隙水压力增加,在极端降雨环境下孔压变化幅度由小变大。

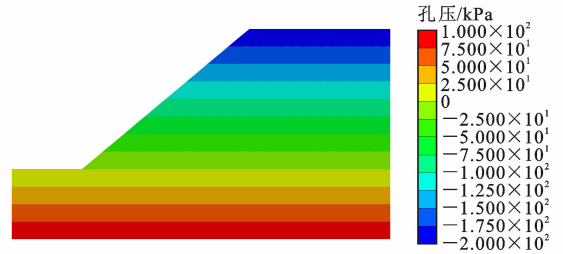
由图 5(b)、(c)可以看出,随着降雨时间的增长,孔隙水压力呈现上升的趋势。在持续降雨条件



(a) 级配1(降雨后)



(b) 级配4(降雨后)



(c) 级配4(降雨前)

图 5 孔压等值图

Fig. 5 Pore pressure contour map

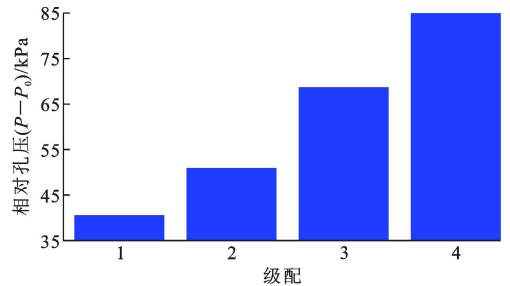


图 6 孔压变化幅度 1

Fig. 6 Variation amplitude of pore pressure 1

下,雨水由坡面向内部渗流,级配 4 路基土体中的孔隙水压力由负值逐渐转为正值,整体呈现增长趋势。

结合图 5、6 可以看出,级配 1~4 路基土体受降雨的影响程度由弱到强,表现为孔压变化幅度由小变大,对路基填料内部孔隙水压力的影响增强。孔隙水压力的增加则会导致基质吸力的减小,在一定程度上削弱土体有效抗剪强度<sup>[17]</sup>。因此,级配对路基稳定性的影响不可忽略,级配越良好越能提升路基的稳定性。罗仁美<sup>[18]</sup>指出细颗粒含量的增加会增加路基土体的孔压变化幅度,降低其抗剪强度,从而影响路基稳定性。

### 4.1.2 路基位移

图 7~9 分别为不同级配填料路基的降雨位移、最大位移和安全系数。从图 7、8 可以看出,在降雨强度一定的条件下,随着细颗粒的增加,级配 1~4 坡面沉降的位置由坡顶向坡底延伸,沉降的区域逐渐变窄,位移量由 12.35 cm 增大到 22.401 cm,破坏面向更深处发展。这是由于降雨入渗导致细颗粒迁移,随着降雨时间的增加,坡体中的细颗粒迁移量逐渐增大。同时,因为细颗粒的迁移,导致坡体的渗透速率随侵蚀过程的增加而逐步增大。

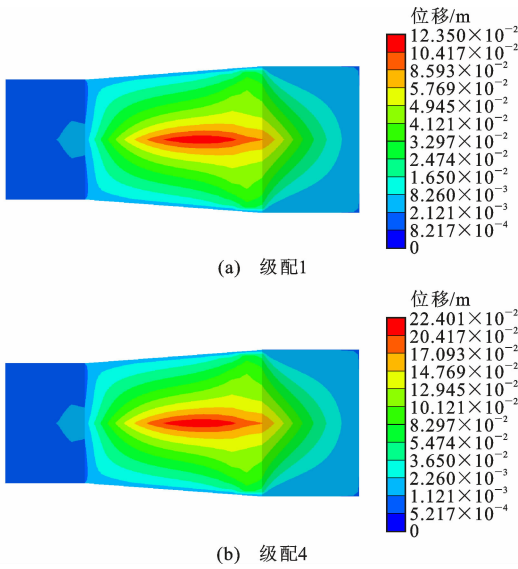


图 7 降雨位移

Fig. 7 Rainfall displacement

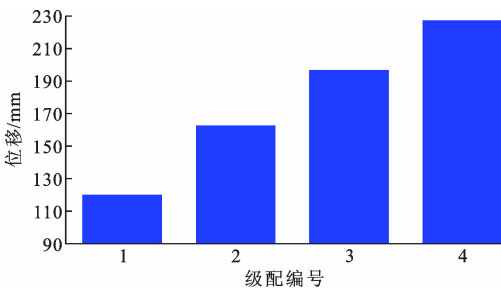


图 8 最大位移

Fig. 8 Maximum displacement

从图 9 可以看出,安全系数随降雨时间的增加而逐渐减小。考虑到降雨持续将导致路基表层一定深度下形成相对不透水层,在不透水层上部的暂态饱和区内岩土体在饱和前期抗剪强度迅速降低,浸润区内非饱和抗剪强度逐步丧失,表层土体重度增大,超孔隙水压力不断增大,导致路基安全系数迅速降低。同时,该层上部土体生成的超孔隙水压力也将显著降低坡体的安全系数,进而诱发路基的失稳。

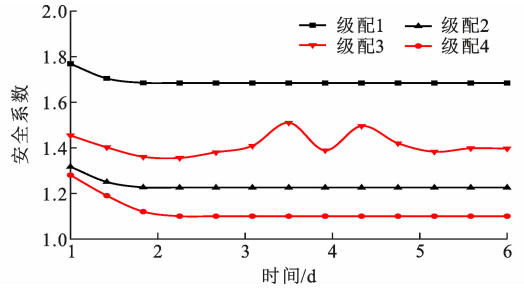


图 9 安全系数 1

Fig. 9 Safety factor 1

随着细颗粒的增加和降雨的持续,各级配填土有效抗剪强度逐渐减小,路基的位移量逐渐增大,同时滑动面逐步加深。张硕等<sup>[19]</sup>开展的黏土填方路基降雨入渗试验也得出了相同的结论。

### 4.2 降雨强度的影响

#### 4.2.1 路基孔压分布

针对不同降雨强度下的路基稳定分析,选取 3 种降雨强度工况(100、150、200 mm · d<sup>-1</sup>),以级配 1 的填土为研究对象,分析降雨强度对路基稳定性的影响。

图 10、11 分别为 200 mm · d<sup>-1</sup>降雨强度后的孔压以及不同降雨强度下的孔压变化幅度。可以看出,降雨强度为 200 mm · d<sup>-1</sup>后的相对孔压为 37 kPa,大于 100 mm · d<sup>-1</sup>后的 18 kPa。在相同时间内,降雨强度增强会导致降雨量变多、入渗量增加,引起路基基层的渗透压力上升,进而扩大填料受降雨入渗的范围,导致孔隙水压力变化由小变大。最优级配填料的路基在降雨前后孔隙水压力变化的增大导致基质吸力的损失加重,有效抗剪强度削弱,这将诱发路基失稳和不均匀沉降变形。魏红卫等<sup>[20]</sup>研究降雨强度影响路基破坏概率时也印证了此现象。

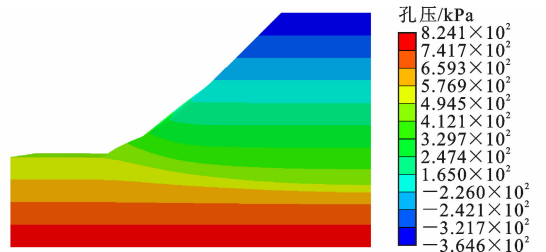


图 10 200 mm · d<sup>-1</sup>降雨强度后的孔压

Fig. 10 Pore pressure after 200 mm · d<sup>-1</sup> rainfall intensity

#### 4.2.2 路基位移分布

在不同降雨强度下路基的位移分布如图 12、13 所示。由图 13 可知,降雨强度由 100 mm · d<sup>-1</sup>增加至 200 mm · d<sup>-1</sup>,路基的位移增大到 12.35 cm。随

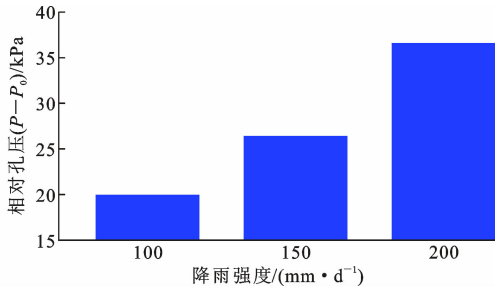


图 11 孔压变化幅度 2

Fig. 11 Variation amplitude of pore pressure 2

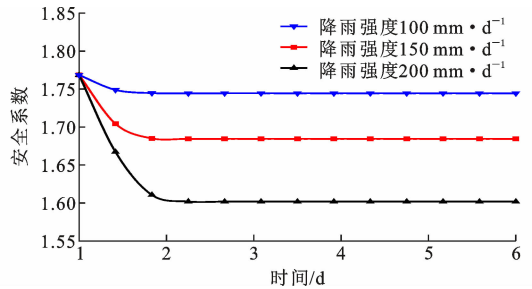


图 14 安全系数 2

Fig. 14 Safety factor 2

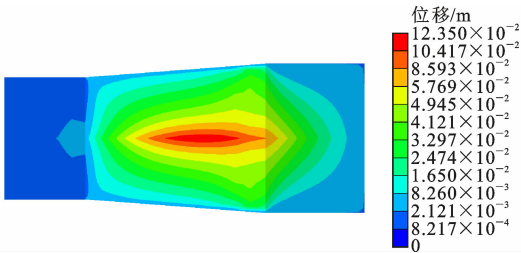
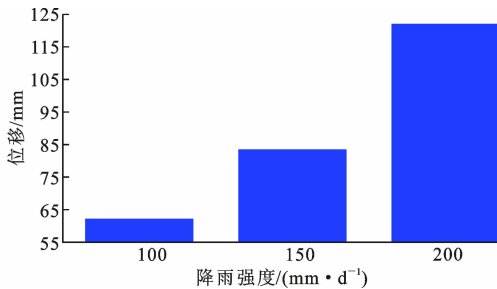
图 12 200 mm·d<sup>-1</sup>降雨强度后的位移Fig. 12 Deformation after 200 mm·d<sup>-1</sup> rainfall intensity

图 13 降雨后的位移

Fig. 13 Displacement after rainfall

着降雨时间的增长,安全系数逐渐减小,而且降雨强度增强加大了安全系数的下降速度和下降幅度,这意味着单位时间内坡体表面所受的雨水量增加,路基表层饱和的时间被缩短<sup>[21]</sup>。由水土特征曲线可知,路基的基质吸力下降速率加快将引发有效抗剪强度减小程度变大,这也会导致滑动体自重变大的速率增大。邱祥等<sup>[22]</sup>研究不同因素对路基稳定性的影响时,提出降雨强度与坡面安全系数的关系是正相关的。

图 14 为不同降雨强度下路基的安全系数。从图 14 可以看出,当降雨强度为 150 mm·d<sup>-1</sup>时,路基的安全系数较高,处于稳定状态,但当降雨强度增加到 200 mm·d<sup>-1</sup>时,路基的安全系数快速减小。这表明,当降雨强度增加到某一值<sup>[23]</sup>时,路基的破坏时间将快速缩短,路基位移也将陡然增加。

### 4.3 加固效果

结合工程实况,采用锚杆加固的方式增加路基

的稳定性,图 15 为加固后的二维滑动图。通过图 15 的对比发现:级配 1 填料危险滑动面的位置较浅,破坏面从坡脚逐渐向坡顶延伸,滑动体的体积较小;级配 4 填料(黏土)的危险滑动面位置更深,破坏面在锚杆进入土体最深处发生逐渐向坡顶和坡角发展,滑动坡体较大。由此得出,级配对于填土体强度的影响方式和范围不同,级配越好的填土所含粒组的种类越多,导致土体渗透系数越小。在极端降雨条件下,级配良好的土体可以延长达到饱和的时间,缩小受影响的范围和减少强度损失,若在坡顶处采取合适的排水措施,路基稳定性破坏的概率将大大减小。

## 5 试验验证

为验证数值模拟的结果,通过离心模型试验得到相应数据,离心模型如图 16 所示。在坡顶、坡底、坡面 3 处设有孔压传感器等传感元件,测量其孔隙水压力变化与坡面位移情况。本文以坡顶位置的孔压和位移的变化为研究对象,对比数值模拟与试验得到的不同降雨条件下路基的孔压与位移变化情况。

### 5.1 级配影响

图 17 为不同级配下数值模拟结果与试验结果的对比。从图 17 可以看出,各级配填土的数值模拟结果与试验结果变化趋势一致,均为随着降雨时间的增加土体的相对孔压由小变大,路基位移量也在增加,而且随着级配的变化,细颗粒含量越高的填土,其位移量和相对孔压越大。

此外,通过图 17 还可以看出:数值模拟结果与试验结果并不同步,相同时间点的相对孔压与路基位移存在差值,最大差值分别为 15 kPa、72.5 mm;同时,相对孔压与路基位移的变化时间点不同,这表明试验结果具有滞后性。出现这种情况的原因可能是模拟过程中降雨边界条件由渗流边界转变成压力

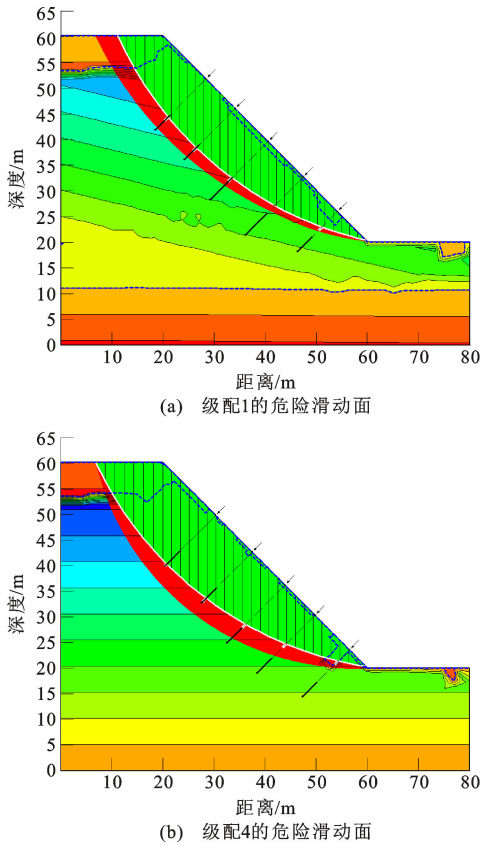


图 15 二维滑动图

Fig. 15 2D slide diagram

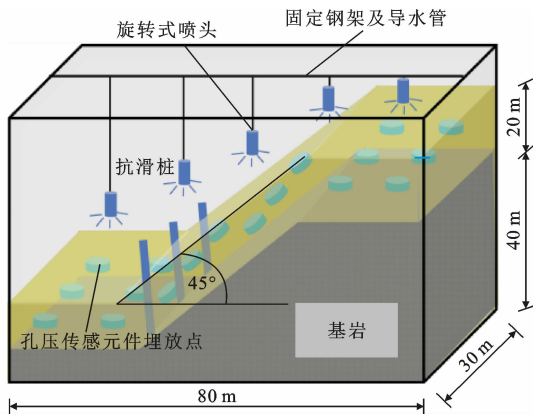


图 16 模型箱示意图

Fig. 16 Schematic diagram of model box

水头边界时,渗流控制方程的选取不合理,另外模拟无法体现土体的各向异性和渗流路径的变化,这才导致两者结果有所出入。

图 18 为级配 1 试验破坏结果与模拟破坏结果的对比。可以看出,模拟破坏结果接近试验破坏结果,二者的破坏形式接近,验证了数值模拟的有效性。

### 5.2 降雨强度影响

以级配 1 填土为试验对象,研究不同降雨强度对路基稳定性分析的影响,对比分析数值模拟结果

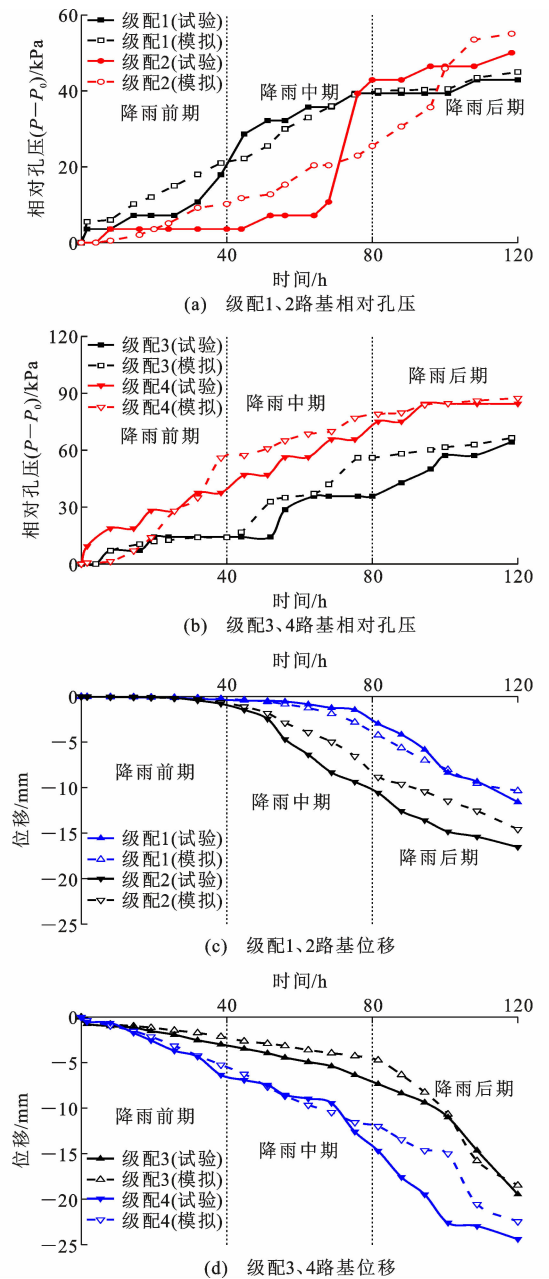


图 17 试验结果与模拟结果的对比

Fig. 17 Comparison between experimental and simulation results

与试验结果(图 19)。在相同时间段内,数值模拟曲线与试验结果曲线接近,表现为相同时间点的相对孔压和路基位移最大差值分别为 5 kPa、2 cm,较为接近。

当降雨强度为  $150 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  时,路基的相对孔压为 25 kPa 且坡面位移为 82 mm,土体较为稳定,但当降雨强度增加到  $200 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  时,路基的相对孔压与坡面位移都快速增大。这表明,随着降雨强度增加,相对孔压与坡面位移逐渐增大,当降雨强度增加到某一值时,路基的破坏时间会大大缩短。

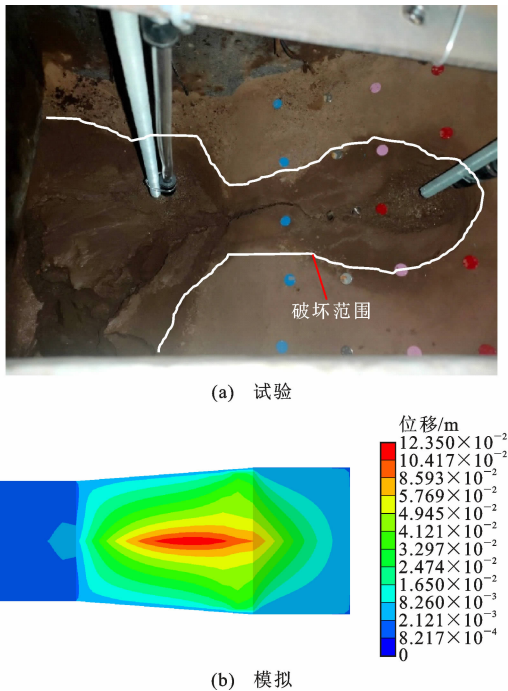


图 18 级配 1 试验破坏结果与模拟破坏结果的对比  
Fig. 18 Comparison between experimental failure and simulation failure results of grade 1

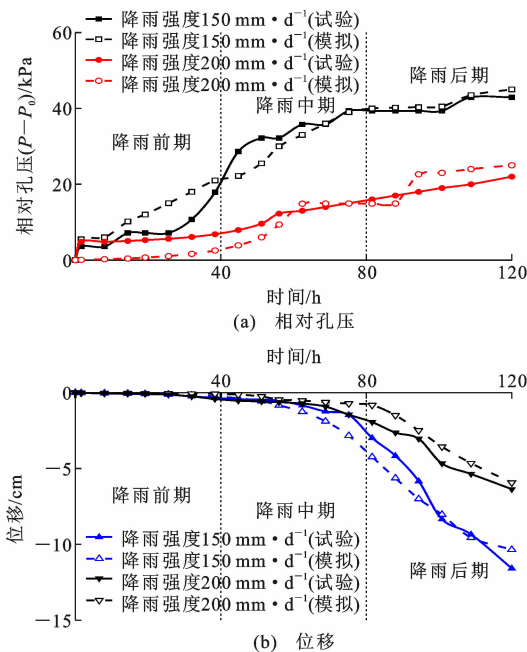


图 19 级配 1 试验结果与模拟结果的对比  
Fig. 19 Comparison between experimental and simulation results of grade 1

## 6 结语

(1)随着路基填料级配趋于良好,路基顶面的位移和相对孔压逐渐减小,滑动面由深及浅。在降雨强度和时长相同,填料级配越好越有利于路基的

稳定。随着降雨时间的增加,路基顶面的位移和相对孔压不断减小,位移由 22.401 cm 减少至 12.35 cm,相对孔压由 85 kPa 减少至 37 kPa,路基安全系数下降至 1.2。

(2)降雨强度存在临界值,一旦超过该临界值 ( $150 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),路基位移迅速增大,孔压急速变化,路基失稳时间缩短且破坏程度加剧。因此,在设计和施工过程中,需注意降雨强度对路基的影响,以保障路基的稳定性和安全性。

(3)降雨入渗诱发路基滑动破坏往往是浅层滑动。在雨季(6~9月),降雨入渗可能导致路基顶面位移增大,导致路基浅层发生滑动。因此,在路基设计和施工中,应加强对路基坡面的防护和排水,降低降雨对路基浅层土体的影响,提高路基稳定性。

(4)对于高陡类型填土路基,应根据现场情况调整填土级配,选择最优级配,提高填土的降雨强度临界值,增强路基应对极端天气的能力。

## 参考文献:

### References:

- [1] 杨锐,张大伟,郝家旺.高山滑雪中心大坡度雪地路基稳定性数值模拟研究[J].施工技术,2020,49(10):44-46.  
YANG Rui, ZHANG Dawei, HAO Jiawang. Numerical simulation study on stability of large-slope snow subgrade of alpine skiing center [J]. Construction Technology, 2020, 49(10): 44-46.
- [2] PRIONO, RAHARDJO H, CHATTERJEA K, et al. Effect of hydraulic anisotropy on soil-water characteristic curve [J]. Soils and Foundations, 2016, 56(2): 228-239.
- [3] KRISTO C, RAHARDJO H, SATYANAGA A. Effect of variations in rainfall intensity on slope stability in Singapore [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2017, 5(4): 258-264.
- [4] 唐军.高填方边坡在强降雨条件下稳定性分析:以攀枝花机场为例[D].成都:成都理工大学,2014.  
TANG Jun. In high fill slope stability analysis under the condition of heavy rainfall by Panzhihua airport as an example [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [5] LAGERWERFF J V, OGATA G, EAGLE H E. Control of osmotic pressure of culture solutions with polyethylene glycol [J]. Science, 1961, 133(3463): 1486-1487.
- [6] CAI F, UGAI K. Numerical analysis of rainfall effects on slope stability [J]. International Journal of Geome-

- chanics, 2004, 4(2): 69-78.
- [7] PHAM H Q, FREDLUND D G, LEE BARBOUR S. A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(6): 1548-1568.
- [8] FREDLUND D G, XING A Q, HUANG S Y. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 533-546.
- [9] 卢宁, LIKOS W J. 非饱和土力学[M]. 韦昌富, 侯龙, 简文星, 译. 北京: 高等教育出版社, 2012. LU Ning, LIKOS W J. Unsaturated soil mechanics [M]. Translated by WEI Changfu, HOU Long, JIAN Wenxing. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [10] LI D Q, YANG Z Y, CAO Z J, et al. System reliability analysis of slope stability using generalized subset simulation [J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 46: 650-664.
- [11] CHO S E, LEE S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(3): 185-208.
- [12] 陈卫卫, 常乃坤, 宁山超. 降雨入渗下的非饱和土质边坡渗流场及稳定分析[C]//《建筑科技与管理》组委会. 2015年7月建筑科技与管理学术交流会议论文集. 北京:《建筑科技与管理》组委会, 2015: 49-51. CHEN Weiwei, CHANG Naikun, NING Shanchao. Infiltration in unsaturated soil slope under seepage field and stability analysis[C]// Organizing Committee of *Building Technology and Management*. Proceedings of July 2015 Building Technology and Management Symposium. Beijing: Organizing Committee of *Building Technology and Management*, 2015: 49-51.
- [13] 王立中. 降雨入渗条件下边坡稳定性分析[J]. 铁道勘察, 2014, 40(1): 42-43. WANG Lizhong. Stability analysis of slope under rainfall infiltration[J]. Railway Investigation and Surveying, 2014, 40(1): 42-43.
- [14] 李宁, 许建聪. 基于 ABAQUS 的三维边坡降雨入渗模块的开发及其应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 667-674. LI Ning, XU Jiancong. Development and application of three-dimensional rainfall infiltration module based on ABAQUS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 667-674.
- [15] 李宁, 许建聪. 基于场变量的边坡稳定分析有限元强度折减法[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 314-318. LI Ning, XU Jiancong. Strength reduction FEM for slope stability analysis based on field variable[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 314-318.
- [16] 秦鹏飞. 极限平衡和数值方法在边坡工程中的应用[J]. 金属矿山, 2020(6): 204-209. QIN Pengfei. Application of limit equilibrium and numerical method in slope engineering[J]. Metal Mine, 2020(6): 204-209.
- [17] KIM J, KIM Y, JEONG S, et al. Rainfall-induced landslides by deficit field matric suction in unsaturated soil slopes [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(23): 808.
- [18] 罗仁美. 印子峪排土场安息角与岩石块度分布规律研究[J]. 矿冶工程, 1995, 15(4): 16-19. LUO Renmei. Repose angles and rock size distributions of Yinziyu waste dump[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1995, 15(4): 16-19.
- [19] 张硕, 裴向军, 黄润秋, 等. 黄土填方边坡降雨入渗特征及变形破坏模式的模型试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 32-41, 50. ZHANG Shuo, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Model test on seepage characteristics and deformation failure modes of loess fill slope under rainfall [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(9): 32-41, 50.
- [20] 魏红卫, 赵凡. 饱和渗透系数变异性对边坡破坏概率的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 95-102. WEI Hongwei, ZHAO Fan. Influence of saturated permeability coefficient variation on failure probability of slope [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(8): 95-102.
- [21] JEONG S, KIM Y, PARK H, et al. Effects of rainfall infiltration and hysteresis on the settlement of shallow foundations in unsaturated soil [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(13): 494.
- [22] 邱祥, 蒋煌斌, 欧健, 等. “暂态”饱和-非饱和边坡稳定性分析方法研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 63-75. QIU Xiang, JIANG Huangbin, OU Jian, et al. Stability analysis method of “transient” saturated-unsaturated slope [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 63-75.
- [23] 王志强, 马晓亮. 持续降雨环境下高速公路边坡稳定性影响的数值模拟分析[J]. 公路工程, 2018, 43(5): 310-315. WANG Zhiqiang, MA Xiaoliang. Numerical simulation analysis on the stability of highway slope under continuous rainfall environment [J]. Highway Engineering, 2018, 43(5): 310-315.