

文章编号:1008-1542(2021)04-0415-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 降雨作用下路堤边坡水毁机理及影响因素分析

孙吉书<sup>1</sup>, 邱博超<sup>1</sup>, 肖 田<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300392)

**摘要:**为明确降雨对路堤边坡内部渗流场以及稳定性的影响,对路堤边坡水毁机理及其主要影响因素进行了研究。在特定土质、压实度以及冲刷入渗时间等控制条件下,通过边坡模型试验探究降雨对边坡坡面冲刷破坏过程的特征,运用 GeoStudio 程序进行数值模拟分析,找出降雨作用下路堤边坡内部渗流场和稳定性的变化规律。结果表明:降雨过程中雨水冲刷造成边坡坡面结构破坏,而边坡内部受到雨水渗流作用导致稳定性降低,降雨作用从外到内对边坡造成影响;随着 2 种土质边坡压实度从 85% 提升至 95%,砂性土边坡的冲刷量减少了 46.18%,边坡安全系数提升了 13.74%,黏性土边坡冲刷量降低了 33.70%,安全系数提升了 10.21%;随着降雨时间的增加,黏性土边坡后期冲刷深度趋于稳定,但砂性土边坡冲刷深度有增大的趋势;相同控制条件下,降雨前后黏性土边坡安全系数变化量小于砂性土边坡。因此,同等控制条件下,黏性土边坡的抗水毁性能以及整体稳定性均强于砂性土边坡,研究结果有助于更全面地了解降雨过程中路堤边坡的水毁机理及主要因素的影响规律,提高道路支撑的稳定性。

**关键词:**路基工程;冲刷破坏;模型试验;数值模拟;稳定性

中图分类号:U416.1<sup>+</sup>4

文献标识码:A

doi:10.7535/hbkd.2021yx04012

## Analysis on water damage mechanism and influencing factors of embankment slope under rainfall

SUN Jishu<sup>1</sup>, QIU Bochao<sup>1</sup>, XIAO Tian<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design &amp; Research Institute, Tianjin 300392, China)

**Abstract:** In order to clarify the influence of rainfall on the seepage field and stability of embankment slope, the mechanism of embankment slope water failure and its main influencing factors were studied. Under the specific control conditions of soil quality, compaction degree and erosion infiltration time, this study explored the erosion damage of subgrade slope under rainfall through slope model test, and then combined with GeoStudio program to find out the seepage field and stability change law

收稿日期:2021-04-27;修回日期:2021-05-31;责任编辑:张士莹

基金项目:国家自然科学基金(41872255);天津市交通运输科技发展计划(2018-06)

第一作者简介:孙吉书(1976—),男,河北广宗人,副教授,博士,主要从事道路工程方面的教学与科研工作。

通讯作者:邱博超。E-mail:571162644@qq.com

孙吉书,邱博超,肖田.降雨作用下路堤边坡水毁机理及影响因素分析[J].河北科技大学学报,2021,42(4):415-423.

SUN Jishu, QIU Bochao, XIAO Tian. Analysis on water damage mechanism and influencing factors of embankment slope under rainfall[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2021, 42(4): 415-423.

of subgrade slope during rainfall. The results show that in the process of rainfall, the slope surface is scoured by rain water and the external structure is damaged, while the internal stability of the slope is reduced by the seepage action of rain water. The two effects from the outside to the inside simultaneously lead to the overall damage of the slope. With the increase of compaction degree of two kinds of soil slopes from 85% to 95%, the erosion amount of sandy soil slopes decreased by 46.18%, and the slope safety factor increased by 13.74%, while the erosion amount of cohesive soil slopes decreased by 33.70%, and the safety factor increased by 10.21%. With the increase of rainfall time, the scouring depth of cohesive soil slope tends to be stable in the later stage, while the scouring depth of sandy soil slope tends to increase; Under the same control conditions, the change of safety factor of cohesive soil slope before and after rainfall is smaller than that of sandy soil slope. Under the same control conditions, the water damage resistance and overall stability of the clay soil slope are stronger than that of the sandy soil slope. The research results are helpful for more comprehensive understanding of the water-damage mechanism of the embankment slope and the influence laws of the main factors in the process of rainfall, and improve the stability of the road support.

**Keywords:** subgrade engineering; erosion failure; model test; numerical simulation; stability

路堤边坡作为公路与铁路的主要结构支撑部分,在自然环境中的各项性能表现会对道路的实际使用造成极大影响。由于边坡常年暴露于室外环境下,受到自然环境和人类活动产生的影响,因而极易发生各种变形、失稳甚至破坏,其中降雨的冲刷和入渗对路基边坡造成的破坏尤为明显。

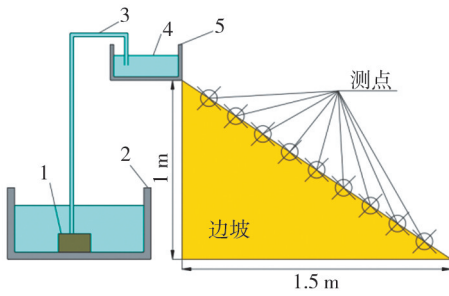
迄今为止,国内外专家学者从不同角度就降雨对路堤边坡破坏问题进行了研究,主要集中在利用理论分析<sup>[1-3]</sup>、数值模拟<sup>[4-9]</sup>和模型试验<sup>[10-12]</sup>等方式探究降雨对边坡的影响形式和作用机制。然而在实际工程中,路堤边坡与自然边坡的作用以及形成过程有所不同,为了使道路支撑更为稳定,对路堤边坡一般采用分层压实方法降低渗透系数,提高稳定性。此外,路堤顶面还会铺设一层有一定厚度和散水坡度的路面层,降雨过程中路面层具有一定的散水坡度,可使雨水汇集形成股流并以一定速度流至坡面<sup>[13-15]</sup>。可见,路堤边坡受到的降雨影响主要是水流的冲刷以及雨水入渗的综合作用。当前针对路堤边坡冲刷以及入渗综合作用引起失稳破坏的研究并不多。吴谦等<sup>[16]</sup>、冯兴波等<sup>[17]</sup>运用颗粒流程序 PFC<sup>3D</sup>对边坡降雨冲刷过程进行模拟,得到冲刷破坏过程中边坡不同部位土体孔隙率、水流流速、颗粒平均运动速度的分布及变化过程。邱胜光<sup>[18]</sup>为研究降雨入渗对非饱和土体边坡稳定性的影响,基于饱和-非饱和渗流理论,分析了降雨入渗条件下边坡内部渗流场变化及其对边坡稳定性的影响<sup>[19]</sup>。程树斌等<sup>[20]</sup>通过建立非饱和种植土-碎石绿化带雨水入渗的有限元模型,对比了有限元分析结果与理论计算结果,得出均匀降雨条件下雨水的入渗特征并验证了模型的正确性。综合国内外诸多专家学者的研究成果可知,降雨对路堤边坡的危害主要表现在2个方面:一是边坡坡面汇聚的水流以一定速度对路堤边坡直接冲刷,导致边坡表面结构失稳;二是水流入渗坡体内部,使土壤粘聚力下降、下滑力增加,坡体内部孔隙水压力发生变化,导致边坡内部稳定性降低。

运用模型试验方法以及实际工程案例分析方法能够直观展现降雨对路堤边坡的破坏机理,但较难观测边坡内部的渗流变化;运用有限元以及理论计算方法只能从理想状态分析路堤边坡渗流场及稳定性的变化情况,较难反映边坡坡面冲刷破坏的机理。为此,笔者结合模型冲刷试验和数值模拟分析,研究在特定土质、压实度以及冲刷入渗时间等控制条件下边坡由外到内的冲刷入渗过程,更全面地探究降雨过程中路堤边坡的水毁机理以及造成路基边坡水毁的主要因素和影响规律。

## 1 边坡冲刷破坏的物理模型试验

### 1.1 试验模型设计

在进行室内模拟试验时,首先要从多方面明确室内模拟与原型之间的相似关系。为了使模拟试验结果更贴近实际工程,应尽量采取大比例尺模型。本试验模型选取的参数如下:长度比尺  $\gamma_l = 10$ ,试验模型坡高  $L = 1$  m,坡比为 1:1.5。坡面由上至下等距离设置 9 个测量点,分别测量各时段的冲刷深度。模拟边坡冲刷模型如图 1 所示,边坡物理试验模型如图 2 所示。采用分层夯实法填筑边坡,压实过程中应保持每次压实力度基本相同,根据需要的压实度调整夯击的力度和次数,满足整个坡面压实度基本一致,并通过控制夯击时长使边坡土体的压实度达到设计值。



1—水泵; 2—蓄水池; 3—水管; 4—水; 5—挡水槽。

图 1 模拟边坡冲刷模型

Fig.1 Simulation of slope erosion model



图 2 边坡物理试验模型

Fig.2 Slope physical test model

### 1.2 试验材料

为了探究不同土质边坡的冲刷水毁机制,选取黏性土和砂性土 2 种典型的土质作为试验土样,各土样的物理力学参数指标如表 1 所示。设置降雨强度  $R$  为  $5.83 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,通过控制水箱内水流的输入量,使坡面水流冲刷速度达到  $0.015 \text{ m/s}$ 。

表 1 土样的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil

土 样	设计压实度/%	饱和含水率/%	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力/ $\text{kPa}$	摩擦角/( $^\circ$ )	液限/%	塑限/%
砂性土	85,90,95	21	20.2	19.3	28.6	28.8	20.2
黏性土	85,90,95	36	18.9	32.1	29.5	31.4	19.2

## 2 边坡冲刷破坏过程特征及结果

### 2.1 边坡冲刷破坏过程

按照水流冲刷试验装置进行坡面冲刷试验,在保持压实度相同的情况下,利用相同流速的水流分别冲刷 2 种不同土质的边坡模型,2 种不同土质边坡冲刷过程见图 3 和图 4。

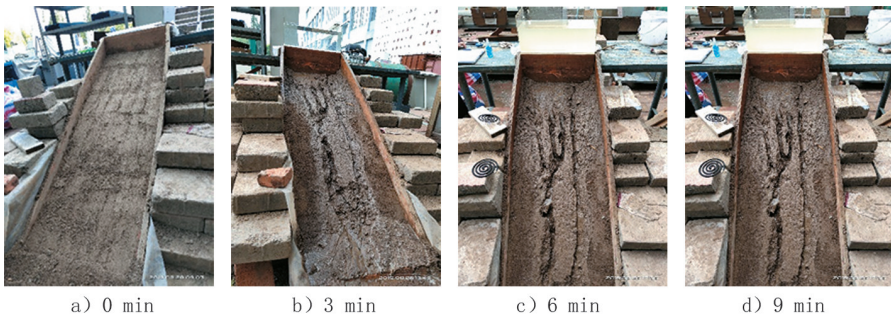


图 3 黏性土边坡不同时间坡面冲刷状态

Fig.3 Erosion state of cohesive soil slope at different time

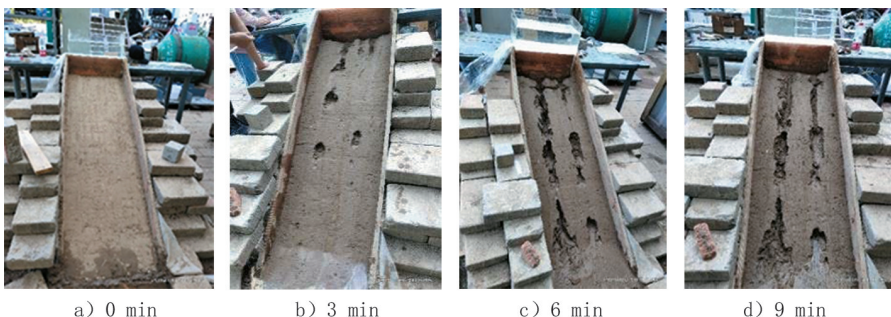


图 4 砂性土边坡不同时间坡面冲刷状态

Fig.4 Erosion state of sandy soil slope at different time

由图3、图4可以看出,水流对边坡的破坏是一个持续发展的过程。试验开始时水漫过水箱边缘,形成厚度相同的水帘以一定速度冲刷至坡顶,水流顺着坡面流下。当冲刷时间为3 min时,2种边坡表层浮动的土颗粒被水流带走,黏性土边坡模型表面出现少许细长的冲沟,而砂性土边坡出现分布不均匀的冲坑。6 min时边坡的浸蚀破坏已经非常明显,由于坡面不平,水流汇入冲沟和冲坑,使其流量和冲刷强度逐渐增大,导致冲沟以及冲坑的尺寸逐渐增大。当冲刷时间达到9 min时,冲刷现象更加严重,模型底部出现大量土体流失,由于先前形成的冲沟地势底,导致水流大量汇集于冲沟。两者相互促进,使原来的冲沟尺寸越来越大。对比2个模型的冲刷过程可以看出,砂性土的黏结强度相对于黏性土要低,随着时间的增加,黏性土边坡坡面的冲刷深度继续增大,边坡的冲沟加深,坡脚有坍塌现象出现;砂性土边坡坡面冲坑尺寸变大,导致冲坑的上部结构失稳产生局部滑塌。由于水流的作用,不同土质的边坡坡面破坏形式不同。从冲刷相同时间的破坏程度来看,砂性土边坡的破坏程度要高于黏性土边坡。

## 2.2 模型试验结果分析

图5为2种土质模型各测点的冲刷深度对比图。从图5可以看出,坡脚(85%压实度)冲刷深度最大,其次是坡中(90%压实度),坡顶(95%压实度)冲刷深度最小。由图5 a)和图5 b)可以看出,在相同测点处,压实度越大,边坡冲刷深度越小。当压实度为85%时,黏性土边坡与砂性土边坡各测点的冲刷深度平均值分别为29.188 mm和37.467 mm;当压实度由85%提升至90%时,黏性土边坡与砂性土边坡各测点的冲刷深度平均值分别为24.325 mm和29.426 mm,黏性土边坡冲刷深度在压实度为85%的基础上降低了16.67%,而砂性土边坡则降低了21.46%;当压实度提升至95%时,路基边坡的冲刷深度最小,黏性土边坡冲刷深度在压实度为85%的基础上降低了33.70%,而砂性土边坡则降低了46.18%。对比冲刷深度的降低量可以看出,提高压实度能够有效减少砂性土边坡的冲刷深度,且对砂性土边坡的抗冲刷性能提升要高于黏性土边坡。

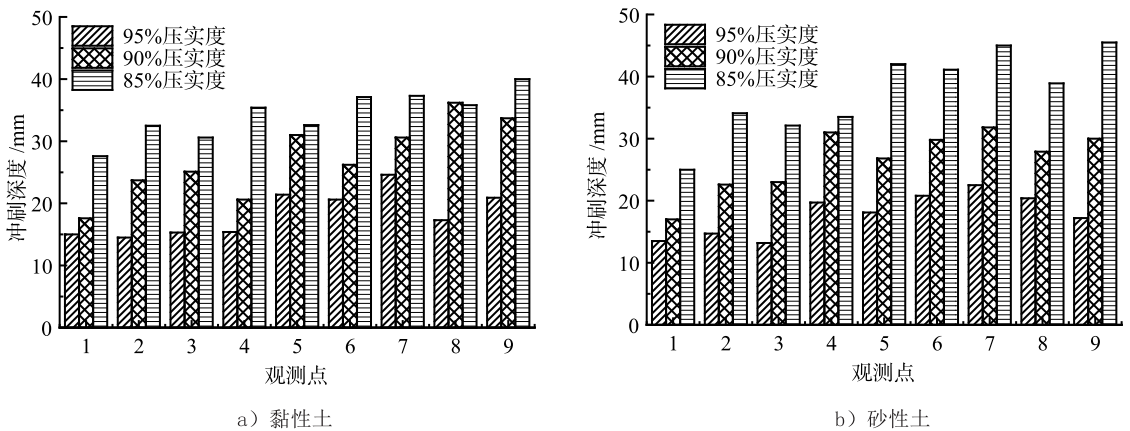


图5 模型各测点冲刷深度对比图

Fig.5 Comparison of scouring depth of each measuring point in the model

图6为2种土质边坡模型冲刷深度随时间的变化曲线。将整个冲刷过程分为3个阶段,0~3 min属于快冲阶段,此时边坡浮土与松散颗粒被冲离坡面,黏性土和砂性土边坡的冲刷深度差值稳定在2 mm以内;3~6 min为持续阶段,坡体表面浮土冲离边坡,由于下方土质密实,汇流水对坡面冲刷的难度增加,所以边坡冲刷深度的增长速度减缓;6~9 min为累进性冲刷阶段,此阶段2种土质边坡的冲刷深度差值由原来的2 mm左右增加到8 mm以上,黏性土的冲刷深度逐渐趋于稳定,而砂性土边坡的冲刷深度有增大的趋势。对比图6 a)、图6 b)和图6 c)可以看出,当压实度为85%时,砂性土边坡和黏性土边坡的冲刷深度差值为15.8 mm;当边坡压实度从85%提升至90%时,砂性土边坡和黏性土边坡的冲刷深度差值降低了10.2%;当压实度提升至95%时,砂性土边坡和黏性土边坡的冲刷深度差值相比较于边坡压实度为85%时降低了21.3%。从2种土质边坡的冲刷差值可以看出,短时间的降雨冲刷,压实度对2种土质边坡的冲刷深度变化影响较小;随着冲刷的进行,提升压实度对砂性土边坡的影响要大于对黏性土边坡的影响。

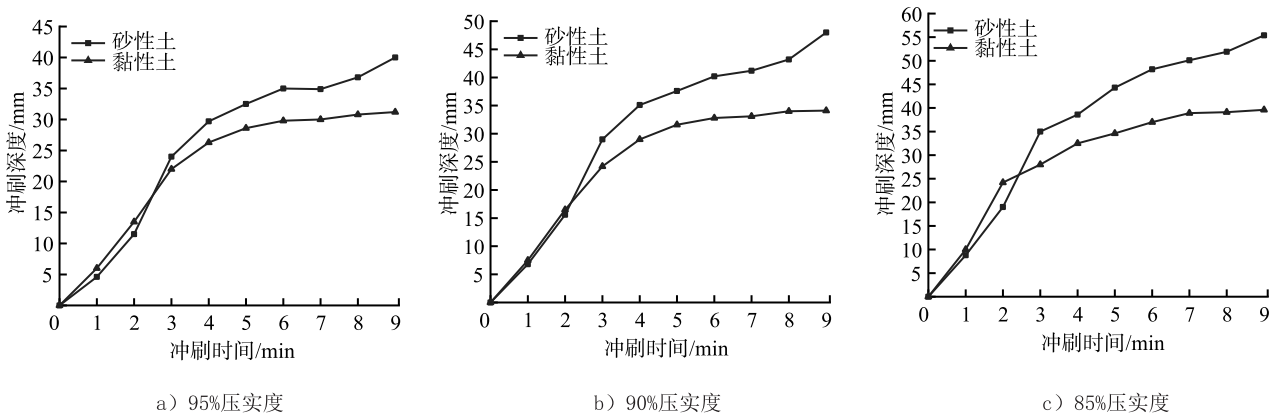


图 6 边坡模型冲刷深度随时间的变化曲线图

Fig.6 Variation curve of the erosion depth of the slope model with time

### 3 模拟边坡降雨入渗过程及分析结果

降雨过程中路堤边坡不仅受到雨水的冲刷作用,还受到雨水的渗流作用。室内模型试验更直观地展现了降雨冲刷作用对边坡坡面的影响,而降雨对边坡内部的影响无法观测。由于降雨过程中坡面水流渗透入边坡内部,导致土体的粘聚力下降,单位重度增大,因而引起边坡稳定性不断降低,严重时发生滑坡。为探究降雨对路堤边坡的内部渗流场以及稳定性的影响,运用 GeoStudio(SLOPE/W 和 SEEP/W 耦合)程序进行相关数值模拟分析。首先,通过 SEEP /W 计算模块获取降雨过程中路堤边坡各时段的渗流场信息;然后,将其代入 SLOPE/W 模块中进行降雨入渗过程中各时段边坡稳定性分析;最后,根据各测点孔隙水压力变化情况以及边坡安全系数随时间的变化趋势进行分析。

#### 3.1 数值分析模型

结合物理模型试验以及实际工程中的各项参数指标设置模型参数,各项参数如表 2 所示。在模型各部位设置 8 个测点,用于测量各测点孔隙水压力的变化情况。此仿真模型以 0.3 m 的网格进行划分,计算单元 761,节点数量 821。建模结果如图 7 所示。

表 2 稳定性计算参数

Tab.2 Stability calculation parameters

土 样	压实度/%	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)	饱和含水量/%	渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )
砂性土	95	21.3	21.0	32.8	19.3	2.97×10 <sup>-8</sup>
	90	20.2	19.3	28.6	21.0	3.53×10 <sup>-8</sup>
	85	19.2	17.4	23.5	24.7	3.81×10 <sup>-8</sup>
黏性土	95	19.9	33.8	33.7	34.3	4.83×10 <sup>-8</sup>
	90	18.9	31.5	31.0	36.0	5.08×10 <sup>-8</sup>
	85	17.9	27.3	26.6	39.5	5.47×10 <sup>-8</sup>

模型共有 3 个初始边界条件:①模型左右两侧以及底部边界为连续不透水边界;②坡脚、坡顶以及右侧坡面为自由入渗边界,其中降雨入渗单位流量为 5.83×10<sup>-7</sup> m/s;③初始地下水水位线 H<sub>左</sub>=6 m, H<sub>右</sub>=3 m。

#### 3.2 入渗过程

以压实度为 90%、坡比为 1:1.5 的黏性土质边坡和砂性土质边坡为例,分别进行边坡水流入渗分析,分析过程如图 8 和图 9 所示。

由分析结果可以看出,模拟时间为 0 min 时,边坡整体孔隙水压力分布呈层状,其孔隙水压力由上到下递增。当边

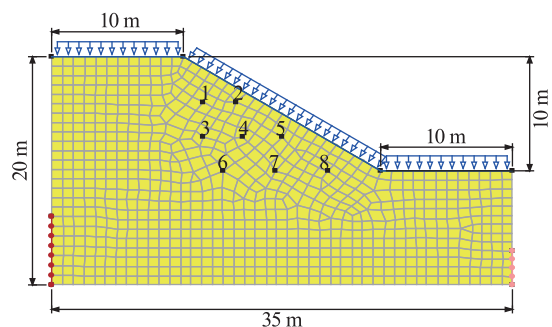


图 7 模型建立

Fig.7 Model setup

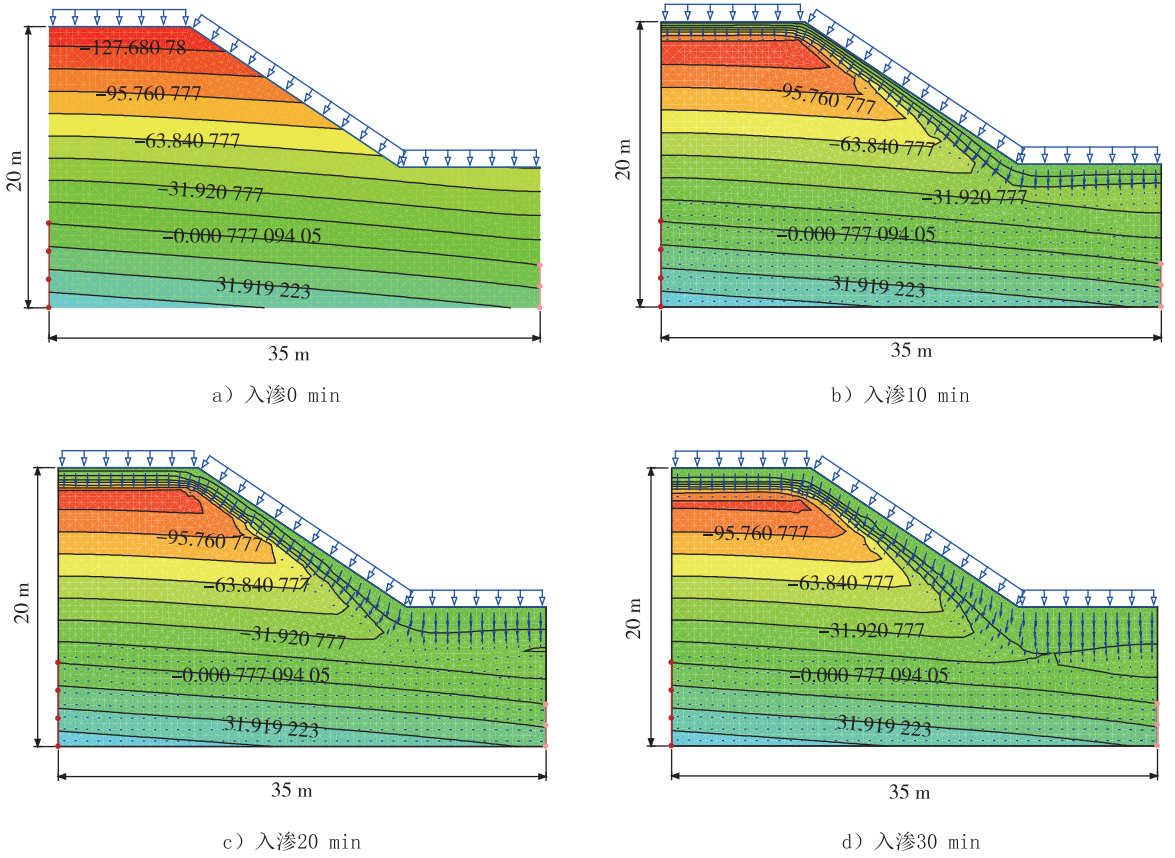


图8 压实度为90%的黏性土边坡各时段孔隙水压等线图

Fig.8 Contour map of pore water pressure in different periods of cohesive soil slope

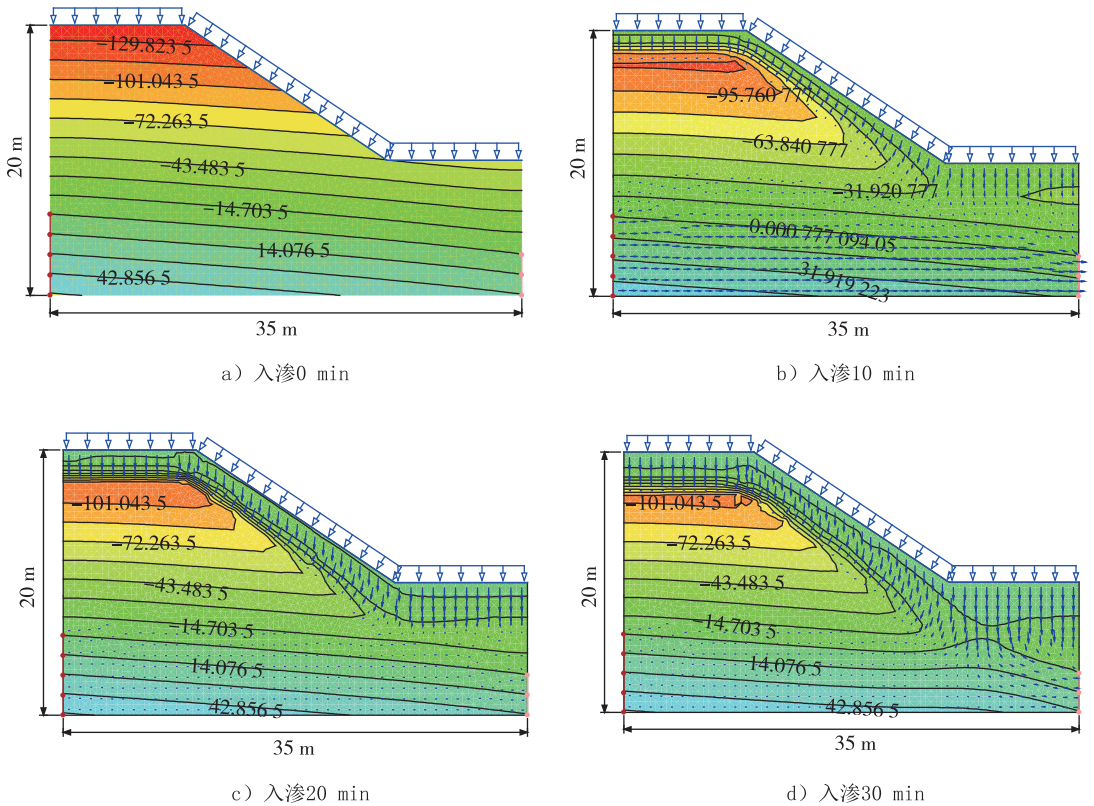


图9 压实度为90%的砂性土边坡各时段孔隙水压等线图

Fig.9 Pore water pressure contour map of sandy soil slope in different periods

坡被水流冲刷至 10 min 时,坡顶平台以及坡面表层土首先达到饱和状态,由于水的渗流导致边坡孔隙水压力曲线由层状变成环形分布。对比 2 种土质边坡的孔隙水压力图可以看出,黏性土入渗速度较慢,同样的时间里砂性土边坡表面更厚的土层达到饱和状态,并且慢慢向土体内部延伸,而黏性土仅仅只是表层少许土达到饱和状态,随着水流的持续,水流扫过的边坡表层土壤逐渐达到饱和。水流冲刷 30 min 后,砂性土模型中水流已入渗到边坡内部,而黏性土模型刚刚入渗到中部。通过对比 2 种土质边坡的入渗情况可以看出,相比于砂性土,同等条件下黏性土的抗入渗能力更强,土体内部的稳定性不容易受水流影响。

### 3.3 模拟结果

#### 3.3.1 孔隙水压力变化

图 10 为 90% 压实度的路堤边坡各监测点孔隙水压力随时间的变化曲线。

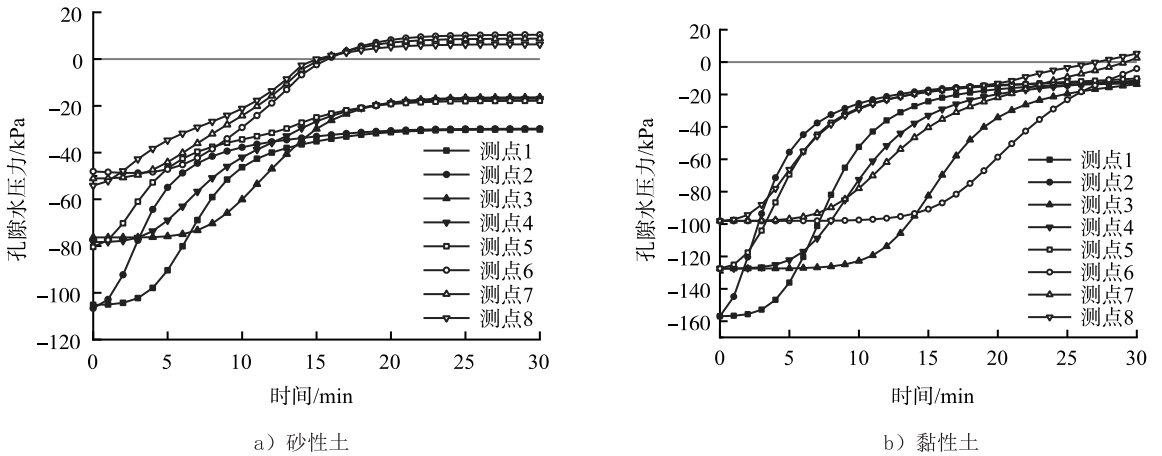


图 10 各监测点孔隙水压力随时间的变化曲线

Fig.10 Variation curve of pore water pressure with time at each monitoring point

以压实度为 90% 的 2 种土质边坡入渗分析结果为例。由图 10 可知,无论是黏性土还是砂性土,随着雨水的入渗,最先响应的是测点 2、测点 5、测点 8,雨水入渗开始此处的孔隙水压力逐渐增大,随后孔隙水压力变为 0,说明在雨水入渗一段时间后此处的土体基本达到饱和状态。其次是测点 1、测点 4、测点 7 号,测点孔隙水压力发生变化,经过较长一段时间孔隙水压力才达到平稳状态,但是变化曲线相对于前者要平缓很多。最后响应的是测点 3、测点 6,由于该点处于边坡较深处,因而孔隙水压力变化相对较缓慢。对比图 10 a)和图 10 b)可以看出,黏性土边坡模型各测点的孔隙水压力变化速率小于砂性土边坡模型,并且冲刷 30 min 后黏性土边坡的各测点才刚刚趋于稳定,而砂性土经过 25 min 后各测点孔隙水压力基本达到稳定。

#### 3.3.2 边坡安全系数变化

仿真过程中通过极限平衡法计算边坡安全系数。该方法通过计算滑块上的土体抗滑力与滑动力的比值来定义滑块本身的安全系数,安全系数越大,边坡越稳定。根据《公路路堤设计规范》(JTG D 30—2015)中边坡稳定性安全系数的规范标准可知,对于一般工况而言,正常运行条件下的安全系数为 1.35。

图 11 为 2 种土质在不同压实度下的边坡稳定性分析,由于砂性土与黏性土的各项参数不同,导致其初始边坡安全系数不同。砂性土边坡模型的安全系数在 2.0 以下,黏性土边坡模型则高于 2.0。从图 11 可以看出,初始入渗阶段,砂性土的响应速度明显比黏性土要快,随着时间的推移,稳定系数的衰减速度逐渐变小,最后逐渐趋于稳定,并且砂性土的安全系数衰减速度要远大于黏性土,当入渗时间达到 25 min 时砂性土各压实度下的安全系数已趋于稳定且冲刷后安全系数衰减了 29.1%,而黏性土则在 30 min 时才有稳定的趋势,安全系数衰减了 30.75%。砂性土边坡稳定性变化曲线相对平滑,黏性土边坡则有微小的起伏。由图 10 a)与图 10 b)可以看出,入渗过程中,压实度为 95% 时 2 种土质的安全系数均高于 1.35;当压实度从 85% 升高到 90% 时,黏性土边坡安全系数各时段整体提高了 6.01%,而砂性土边坡则提高了 7.31%;当压实度升高到 95% 时,黏性土边坡和砂性土的安全系数分别提升了 10.21% 和 13.74%。经历了 30 min 的入渗,黏性土边坡的安全系数变化量要小于砂性土边坡,且提升压实度对提高黏性土边坡稳定性的效果要小于砂性土边坡。

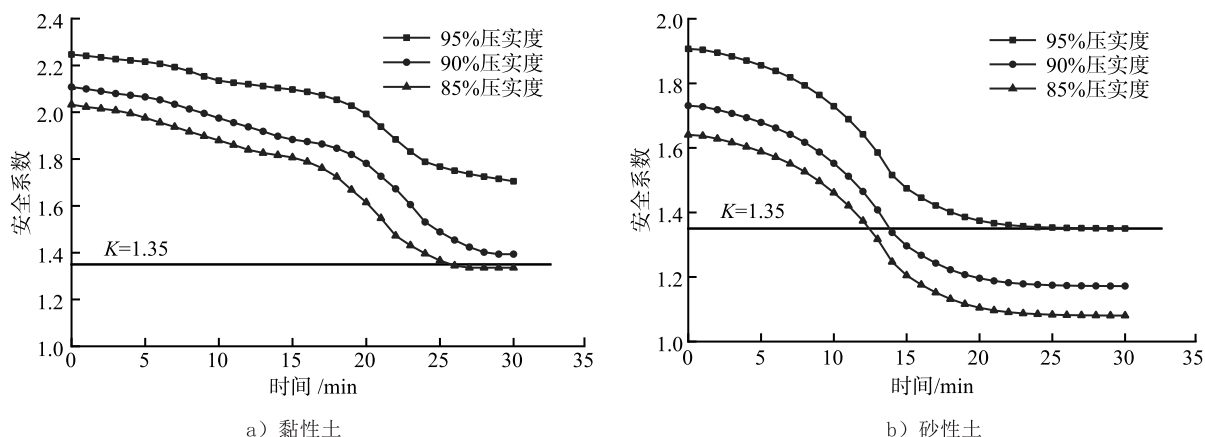


图 11 各压实度安全系数变化曲线图

Fig.11 Variation curve of stability coefficient of each compaction degree

## 4 结 语

在不考虑边坡防护的条件下,通过建立尺寸较大的物理模型,更真实地模拟了降雨对路堤边坡的冲刷作用,结合 SEEP/W 和 SLOPE/W 模块的耦合分析,探讨了降雨过程中雨水入渗现象以及对边坡内部结构的影响,得出以下结论。

1)降雨过程中,坡面易产生冲沟和冲坑,冲坑与冲沟都有汇聚水流的作用,从而促使原有冲坑以及冲沟内的水流加大,导致边坡表面受到的破坏愈来愈严重。由于水流入渗作用,边坡内部土体之间的粘聚力降低且孔隙水压力上升,导致路堤边坡稳定性降低。在冲刷与入渗的共同作用下,导致边坡从内到外的整体稳定性遭受破坏。

2)随着边坡压实度从 85% 提升至 95%,黏性土边坡安全系数各时段整体提高了 10.21%,边坡各测点平均冲刷量降低了 33.70%,而砂性土边坡安全系数提高了 13.74%,其平均冲刷量降低了 46.18%。冲刷时间相同时,提升压实度可以有效提升边坡的抗冲刷性能以及边坡稳定性,压实度的改变对砂性土边坡的影响要高于黏性土边坡。

3)冲刷模型试验中,随着时间的增加,黏性土边坡的冲刷量变化率先增大、后减小,最后趋于稳定;而砂性土前期冲刷量变化率与黏性土相近,冲刷后期其冲刷量变化率呈增长趋势。数值模拟过程中,当控制条件相同时,随着时间的增长,黏性土边坡安全系数变化量要小于砂性土边坡安全系数的变化量。

4)对比 2 种土质边坡表面冲刷以及内部稳定性的变化情况可知,在相同控制条件下,黏性土边坡表面的抗冲刷能力及边坡整体稳定性都要强于砂性土边坡。无论是改变边坡压实度还是控制冲刷入渗时间,黏性土边坡表面结构稳定性和内部结构稳定性的变化响应速度都比较缓慢,而砂性土边坡则响应迅速,其变化量大于黏性土边坡。

降雨对边坡的作用过程是一个从外到内的过程。本文结合模型试验和数值模拟,较为全面地探究了边坡外部结构破坏以及内部结构失稳的机理,通过改变控制条件明确了影响路堤边坡水毁的主要因素和影响规律。但是,本研究尚未考虑不同降雨强度对边坡的影响,并且在进行数值模拟分析时未能将边坡坡面冲刷破坏考虑进去。在后续研究中,将通过 PFC<sup>3D</sup> 颗粒流模拟软件分析降雨对边坡的影响,该软件能同时考虑坡面冲刷作用和边坡内部渗流作用,更大程度地还原降雨对边坡的作用过程。

## 参考文献/References:

- [1] 秦金桥,王大群.降雨对公路边坡渗流场与稳定性影响研究[J].路基工程,2020(5):120-125.  
QIN Jinqiao,WANG Daqun.Research on seepage field and stability of highway slope under rainfall conditions[J].Subgrade Engineering, 2020(5):120-125.
- [2] 王俊卿,王延寿,朱博良.降雨作用下不同坡度的黄土边坡稳定性分析[J].地下水,2020,42(6):134-135.  
WANG Junqing,WANG Yanshou,ZHU Boliang.Stability analysis of loess slope with different gradients under the action of rainfall[J].Ground Water,2020,42(6):134-135.



- [3] 年庚乾,陈忠辉,张凌凡,等.边坡降雨入渗问题中两种边界条件的处理及应用[J].岩土力学,2020,41(12):4105-4115.  
NIAN Gengqian, CHEN Zhonghui, ZHANG Lingfan, et al. Treatment of two boundary conditions for rainfall infiltration in slope and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 4105-4115.
- [4] 邱祥,蒋煌斌,欧健,等.降雨条件下边坡暂态饱和和区形成条件与演化特征数值分析[J].水利学报,2020,51(12):1525-1535.  
QIU Xiang, JIANG Huangbin, OU Jian, et al. Numerical analysis of formation conditions and evolution characteristics of transient saturation zone of a slope under rainfall conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(12): 1525-1535.
- [5] 韩同春,苏钰钦,张宇.双层结构边坡降雨入渗与坡面径流耦合分析[J].工程科学与技术,2020,52(6):145-152.  
HAN Tongchun, SU Yuqin, ZHANG Yu. Coupling analysis of rainfall infiltration and slope runoff in two-layered slope[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(6): 145-152.
- [6] 付兴涛,王奇花,王锦志.降雨条件下晋西黄绵土坡面室内外径流侵蚀试验差异分析[J].农业工程学报,2021,37(1):116-124.  
FU Xingtao, WANG Qihua, WANG Jinzhi. Laboratory and field erosion differences under rainfall on Loessal slope in Western Shanxi, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 116-124.
- [7] 陈忠源,戴自航.降雨条件下建筑边坡稳定性的云模型评价方法[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(2):50-56.  
CHEN Zhongyuan, DAI Zihang. Cloud model evaluation method for building slope stability under rainfall[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 50-56.
- [8] 蒋水华,刘贤,黄发明,等.考虑多参数空间变异性的降雨入渗边坡失稳机理及可靠度分析[J].岩土工程学报,2020,42(5):900-907.  
JIANG Shuihua, LIU Xian, HUANG Faming, et al. Failure mechanism and reliability analysis of soil slopes under rainfall infiltration considering spatial variability of multiple soil parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 900-907.
- [9] 何育聪,郑浩杰,韩剑桥.间歇性与连续性降雨对黄土坡面细沟侵蚀影响的比较[J].水土保持学报,2020,34(6):8-13.  
HE Yucong, ZHENG Haojie, HAN Jianqiao. Comparative study on the influence of intermittent and continuous rainfall on rill erosion of loess slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 8-13.
- [10] 李龙起,赵瑞志,王滔,等.降雨作用下的土质边坡变形破坏颗粒流仿真模拟[J].科学技术与工程,2020,20(21):8496-8502.  
LI Longqi, ZHAO Ruizhi, WANG Tao, et al. Simulation study on soil slope deformation destroys particle flow under the rainfall[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(21): 8496-8502.
- [11] 沈水进,孙红月,尚岳全,等.降雨作用下路堤边坡的冲刷-渗透耦合分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(12):2456-2462.  
SHEN Shuijin, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Scouring-penetration coupling analysis of embankment slope under rainfall action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2456-2462.
- [12] 汪益敏.路基边坡坡面冲刷特性与加固材料性能研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(4):708-708.  
WANG Yimin. Study on rainwash properties and effect of reinforcement material for highway subgrade slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 708-708.
- [13] 陆运磊.公路路面汇水对路基边坡冲刷破坏研究[D].昆明:昆明理工大学,2018.  
LU Yunlei. Damage of Subgrade Slope Erosion of Highway Pavement Drainage[D]. Kunming: Kunming University of Science, 2018.
- [14] 杜婷婷,李志清,王晓明,等.黄土边坡降雨冲刷模型试验研究[J].工程地质学报,2018,26(3):732-740.  
DU Tingting, LI Zhiqing, WANG Xiaoming, et al. Model experiment study on erosion of loess slope due to rainfall[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 732-740.
- [15] 王建洪,田明,邹云丽,等.云南地区降雨诱发堆积体边坡失稳的力学机理研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(4):204-208.  
WANG Jianhong, TIAN Ming, ZOU Yunli, et al. Mechanical mechanism of the rainfall-inducing deposit slope failure in Yunnan region[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(4): 204-208.
- [16] 吴谦,王常明,李同录,等.黄土边坡降雨冲刷试验及颗粒流模拟[J].长安大学学报(自然科学版),2017,37(6):1-8.  
WU Qian, WANG Changming, LI Tonglu, et al. Test on rainfall erosion of loess slope and its simulation by PFC3D[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(6): 1-8.
- [17] 冯兴波,宋丹青,徐永福.路基边坡冲刷特性的颗粒流模拟[J].地下空间与工程学报,2018,14(2):558-564.  
FENG Xingbo, SONG Danqing, XU Yongfu. Simulation research on characteristics of Embankment slope under rainfall scour[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(2): 558-564.
- [18] 邱胜光.降雨入渗对非饱和土体边坡稳定性影响及治理对策[J].金属矿山,2019(11):62-67.  
QIU Shengguang. Influence of rainfall infiltration to the stability of unsaturated soil slope and its countermeasures[J]. Metal Mine, 2019(11): 62-67.
- [19] 刘卫涛,曹文贵,张运强.考虑土体非饱和特性的斜坡降雨入渗模型及边坡稳定性分析[J].长江科学院院报,2021,38(4):102-109.  
LIU Weitao, CAO Wengui, ZHANG Yunqiang. Rainfall infiltration model and slope stability analysis in consideration of unsaturated soil characteristics[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(4): 102-109.
- [20] 程树斌,张春会,关彤军,等.种植土-碎石绿化带雨水入渗的数值分析[J].河北科技大学学报,2019,40(1):79-85.  
CHENG Shubin, ZHANG Chunhui, GUAN Tongjun, et al. Numerical modeling to rainfall infiltration into planting-soil-crushed-stone green belt[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(1): 79-85.