

## 山区高速公路弃渣场边坡渗流及稳定性分析

陈武

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410008)

**摘要:** 依据岩土饱和-非饱和渗流理论, 考虑代表性降雨入渗的影响, 运用有限元分析软件, 对高速公路弃渣场边坡的典型断面进行渗流及稳定性数值模拟计算与分析。结果表明, 在短时暴雨入渗作用下, 渣体渗透性小于降雨强度, 降雨期间渣场坡面形成暂态饱和区; 在连续降雨入渗作用下, 渣体渗透性大于降雨强度, 降雨期间渣场坡面无暂态饱和区; 在短时暴雨和连续降雨入渗作用下, 渣体上部的孔隙水压力增大, 短时暴雨入渗引起孔隙水压力变化的深度范围比连续降雨入渗时小, 降雨入渗影响深度不大于 3 m; 随着降雨的持续, 入渗影响深度增加, 渣场边坡的稳定性系数逐渐降低。

**关键词:** 公路; 边坡; 山区高速公路; 弃渣场; 渗流分析; 稳定性

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2018)04-0071-04

在山区公路建设中, 受山区气候、地质地貌类型及生态环境条件的限制, 桥隧比例高, 不可避免地产生大量弃渣。弃渣场是一种人工形成的边坡, 其稳定性比自然边坡差, 在降雨尤其是暴雨、特大暴雨的诱发下容易形成滑坡、泥石流、古滑坡复活等次生灾害及生态环境破坏。目前, 对降雨入渗下普通边坡的稳定性有较深入的研究, 如李焕强等通过降雨条件下不同坡角边坡物理模型试验, 得到了降雨入渗作用下边坡性状的变化规律; 谭文辉等采用有限元方法研究了正常水位和降雨入渗情况下边坡渗流场、孔隙水压力、应力场和位移场的变化特点, 并采用修正的 Mohr-Coulomb 准则和二维通用条分法对边坡的稳定性进行了分析; 张国超等分析了间歇性降雨条件下滑坡的稳定性变化。但针对不同降雨入渗或地下水变化条件下弃渣场边坡稳定性的研究尚少。该文结合现场调查, 运用数值模拟的方法进行山区高速公路弃渣场边坡渗流与稳定性分析。

## 1 渗流分析原理与方法

主要针对某隧道开挖形成的弃渣堆积体及下伏覆盖层与覆盖层下的风化基岩进行渗流分析, 采用连续介质模型与等效连续介质模型进行描述。

根据饱和-非饱和渗流理论, 可将浸润面上下的非饱和区与饱和区作为一个统一的区域进行渗流计算。在这个统一的计算系统中, 非饱和区中孔隙水压力为负值, 饱和区中孔隙水压力为正值, 浸润面上孔隙水压力为零。连续介质中的饱和-非饱和水

流运动可用下列 Richards 方程表述:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t}$$

式中:  $k_x$ 、 $k_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的渗透系数;  $H$  为总水头, 即压力水头  $h$  与高程  $y$  之和;  $m_w$  为土水特征曲线的斜率;  $\gamma_w$  为水的容重;  $t$  为时间。

为便于计算和分析, 利用常用水土特征曲线 Fredlund & Xing 模型, 将基质吸力与含水量关系表达为:

$$\theta_w = C_\psi \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\psi/a)^b]\}^c}$$

式中:  $\theta_w$  为非饱和土体的含水量;  $C_\psi$  为修正函数;  $\theta_s$  为饱和体积含水量;  $\psi$  为基质吸力;  $a$  为与进气值有关的参数;  $b$  为与土水特征曲线斜率有关的参数;  $c$  为与残余含水率有关的试验参数。

在进行饱和-非饱和渗流数值求解时, 将渗流场划分为有限个单元的单元组合体, 采用时间向后差分格式依次进行迭代计算。迭代方程为:

$$(\Delta t [K] + [M]) \{H_1\} = \Delta t \{Q_1\} + [M] \{H_0\}$$

式中:  $\Delta t$  为时间增量;  $K$  为单元渗透系数矩阵;  $M$  为单元含水矩阵;  $H_1$ 、 $Q_1$  分别为时间增量末的水头和节点流量;  $H_0$  为时间增量初始的水头。

降雨入渗与地表土体接受入渗补给的能力有关。降雨强度小于土体接受降雨入渗补给能力时, 入渗流量等于降雨强度, 降雨全部入渗地层; 降雨强度超过土体接受降雨入渗补给能力时, 将形成地表径流。考虑到渣场边坡地形特点, 入渗边界点达到

饱和状态时,认为地表不积水,为无压入渗状态。

## 2 数值计算模型

### 2.1 工程概况及计算断面

该弃渣场为隧道弃渣,在自然休止角下堆填而成,堆填过程中在渣场坡脚修筑了浆砌片石挡墙,弃渣完成后进行了削坡修整。根据地质勘探资料,隧址区属于构造剥蚀低山~丘陵地貌,植被较发育,出露的基岩主要为强风化片岩,节理裂隙较发育。

选取弃渣场现状边坡的典型剖面(见图1)进行渗流计算分析。计算模型范围:右边界取弃渣场底下的冲沟,左边界取弃渣场后缘堆填边界处,上边界取地表,底边界取至高程180 m。计算模型共有基岩中风化层、强风化层、第四系覆盖层、弃渣层及浆砌片石挡墙五类渗透介质。

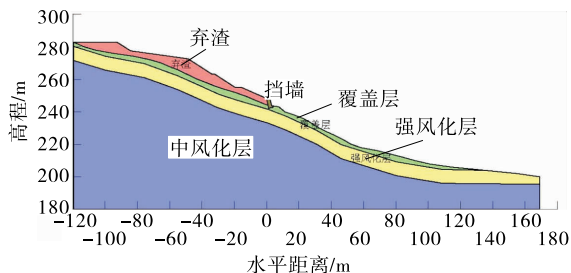


图1 弃渣场边坡渗流计算剖面图

### 2.2 计算参数

弃渣场的渣体主要为隧道弃渣,结构较松散,颗粒粒径相差较大,饱和渗透系数为  $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ;浆砌片石挡墙排水效果较差,挡墙饱和渗透系数为  $5.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ;覆盖层主要为残坡积含砾粉质黏土、崩坡积碎石土夹粉质黏土,饱和渗透系数为  $5.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。根据工程经验,强风化片岩、中风化片岩的饱和渗透系数分别为  $5.0 \times 10^{-4}$ 、 $5.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。渣体、覆盖层、风化片岩的非饱和和渗流参数根据数据资料类比选取,各分区材料的饱和、非饱和参数分别见表1、图2及图3。

表1 渣场边坡渗透性分区及取值

| 渗透性分区 | 渗透分区材料 | 渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|-------|--------|------------------------------------------|
| K1    | 弃渣体    | $1.0 \times 10^{-3}$                     |
| K2    | 浆砌挡墙   | $5.0 \times 10^{-5}$                     |
| K3    | 覆盖层    | $5.0 \times 10^{-5}$                     |
| K4    | 强风化片岩  | $5.0 \times 10^{-4}$                     |
| K5    | 中风化片岩  | $5.0 \times 10^{-5}$                     |

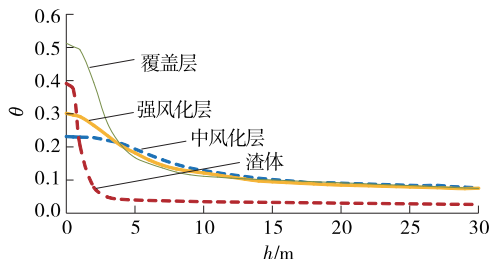


图2 水土特征曲线

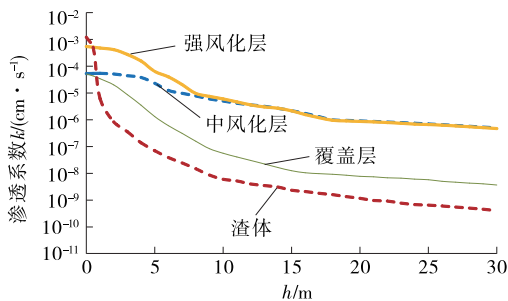


图3 渗透系数曲线

### 2.3 计算条件

根据现场调查与地质勘探资料,地下水位取高程200 m。为考虑侧向补给,按给定水头边界考虑。计算剖面位于渣场中部,经过试算,边坡后缘地下水位为280 m,渣场未出现地下水溢出,与现场调查情况一致,计算的地下水浸润线接近弃渣与天然地表的分界线。

降雨尤其是暴雨是滑坡活动重要的触发因素和动力来源。根据当地气候资料,选取两种有代表性的降雨条件进行计算:一种为短时暴雨,降雨总量为350 mm,持续时间为6 h,强度为58.3 mm/h,停雨后计算18 h,总时长为24 h;另一种为连续降雨,降雨总量为150 mm,持续时间为7 d,强度为21.4 mm/d,停雨后计算3 d,总时长为10 d。

### 2.4 计算工况

采用饱和-非饱和渗流有限元计算模型对弃渣场边坡渗流场进行计算分析,对计算断面考虑3种工况:工况1考虑边坡渗流场主要受弃渣场后缘和冲沟的地下水作用,不考虑降雨的影响,同时为后续降雨条件下渗流计算分析提供初始渗流场;工况2在工况1的基础上分析短时暴雨对渗流场的影响;工况3在工况1的基础上分析连续降雨对渗流场的影响(见表2)。工况1不考虑降雨影响,按稳定流进行计算;工况2与工况3分别考虑短时暴雨与连续降雨,均按非稳定流进行计算。

表 2 渗流计算工况

| 工况编号 | 水位条件                  | 降雨条件                            |
|------|-----------------------|---------------------------------|
| 工况 1 |                       | 不考虑降雨影响                         |
| 工况 2 | 上游 280 m;<br>下游 200 m | 短时暴雨,降雨强度 58.3<br>mm/h,持续时间 6 h |
| 工况 3 |                       | 连续降雨,降雨强度 21.4<br>mm/d,持续时间 7 d |

3 数值模拟计算结果及分析

3.1 边坡渗流场分布

工况 1 下渗流场总水头及孔隙水压力等值线见图 4。由图 4 可知:坡体内地下水流动主要从山体向冲沟底部排泄。工况 1 仅考虑山体地下水对边坡的侧向补给,弃渣堆积体在地下水位之上,地下水在自然坡面高程 232.5 m 左右溢出,与现场调查情况基本吻合。

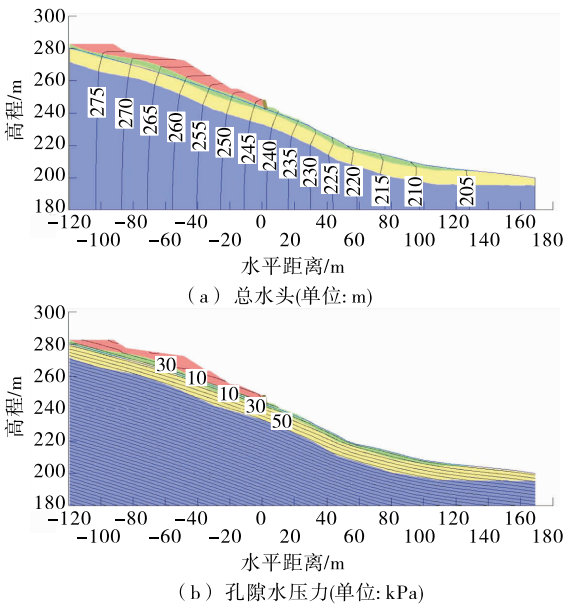


图 4 工况 1 下渗流场总水头及孔隙水压力等值线图

工况 2 中降雨强度为  $1.62 \times 10^{-3}$  cm/s,渣体饱和和渗透系数略小于降雨强度,覆盖层饱和和渗透系数小于降雨强度,由于渣体和覆盖层的入渗能力小于降雨强度,降雨入渗过程中边坡表层会形成暂态饱和区。工况 2 下降雨第 6 h 的渗流场总水头及孔隙水压力等值线见图 5。由图 5 可知:降雨入渗使渣体上部基质吸力减小,入渗水流由垂直坡面流向边坡内部,在降雨入渗过程中坡面达到饱和状态。地下水位埋深较小的边坡位置逐渐饱和,地下水溢出点在降雨第 6 h 抬升至高程 242.4 m。

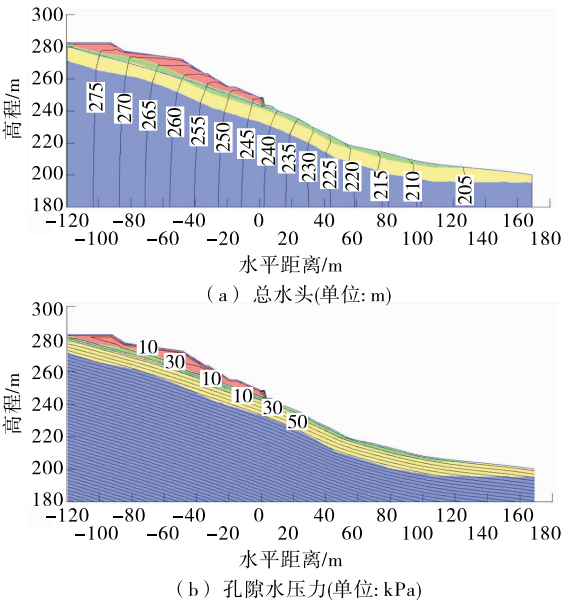


图 5 工况 2 下降雨第 6 h 的渗流场总水头及孔隙水压力等值线图

工况 3 中降雨强度为  $2.48 \times 10^{-5}$  cm/s,渣体饱和和渗透系数大于降雨强度,覆盖层饱和和渗透系数略大于降雨强度,由于渣体与覆盖层的入渗能力大于降雨强度,降雨能完全入渗坡体。工况 3 下降雨第 7 d 的渗流场总水头及孔隙水压力等值线见图 6。由图 6 可知:降雨入渗使边坡地下水运动趋势与工况 2 基本一致,地下水溢出点在降雨第 7 d 抬升至高程 241.8 m。

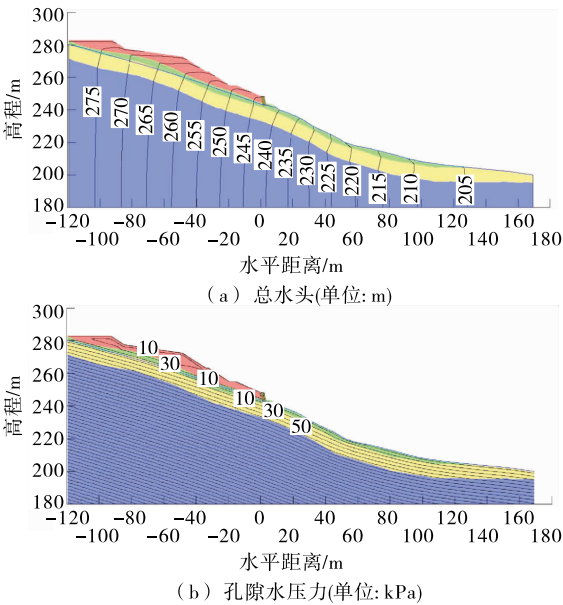


图 6 工况 3 下降雨第 7 d 的渗流场总水头及孔隙水压力等值线图

### 3.2 坡体孔隙水压力变化

选取图7所示弃渣场二级边坡平台位置不同深度的节点,分析不同深度处孔隙水压力分布。其中:节点N1位于坡面,节点N2~N8距离坡面深度分别为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0 m。工况2与工况3下各节点孔隙水压力分布见图8、图9。

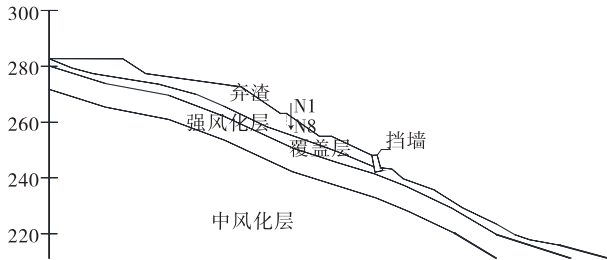


图7 二级边坡平台节点位置示意图(单位:m)

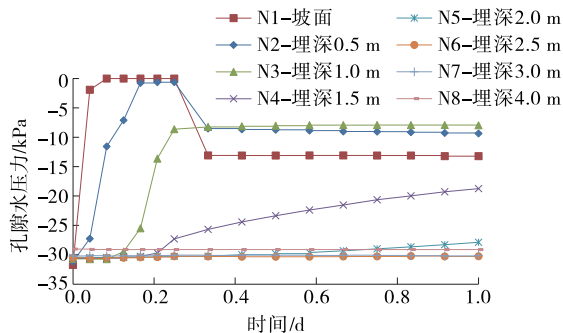


图8 工况2下边坡平台不同埋深节点的孔隙水压力分布

由图8可知:在工况2降雨期间,坡面节点N1和距离坡面0.5 m的节点N2达到饱和状态,距离坡面1.5 m以内的节点N1~N4在降雨期间的孔隙水压力均已增大,距离坡面2.0 m的节点N5在降雨结束后孔隙水压力缓慢增加,而距离坡面大于2.0

m的节点N6~N8在计算时段1 d内孔隙水压力没有明显变化。表明降雨入渗使渣体表层孔隙水压力显著增加,随着降雨时间的延长入渗逐渐向边坡内部扩展;降雨入渗的影响范围有限,强降雨6 h(0.25 d)结束时最大入渗影响深度约1.5 m。

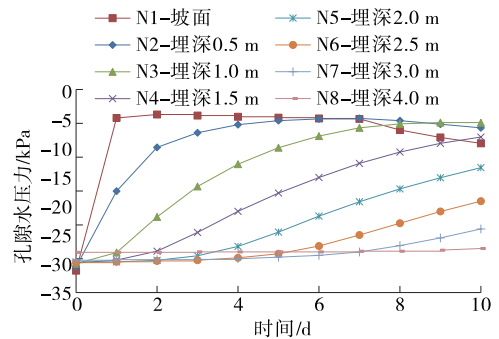


图9 工况3下边坡平台不同埋深节点的孔隙水压力分布

由图9可知:在工况3降雨期间,距离坡面2.5 m以内的节点N1~N6的孔隙水压力均已增大,距离坡面2.5 m以下节点N7和N8在降雨结束后孔隙水压力缓慢增加,但均未达到饱和状态。表明渣体表层孔隙水压力显著增加,连续降雨入渗引起孔隙水压力变化的深度范围比短期暴雨入渗时大,连续降雨7 d结束时最大入渗影响深度约2.5 m。

## 4 边坡稳定性模拟分析

采用极限平衡法中的简化Bishop法计算弃渣场边坡的稳定性。选取不同降雨工况下弃渣场边坡典型断面,对其进行局部和整体搜索,找到可能发生的滑动面,其稳定性计算结果见表3。

由表3可知:降雨对边坡稳定性的影响显著,正

表3 不同工况下边坡稳定性计算结果

| 工况情况          | 稳定性系数 | 计算工况     | 规范允许值           |
|---------------|-------|----------|-----------------|
| 不考虑地下水和降雨     | 1.313 | 正常工况     | 1.20~1.30,取1.20 |
| 考虑地下水,不考虑降雨   | 1.212 | 正常工况     | 1.20~1.30,取1.20 |
| 考虑地下水和6 h强降雨  | 1.134 | 非正常工况 I  | 1.10~1.20,取1.10 |
| 考虑地下水和7 d连续降雨 | 1.057 | 非正常工况 II | 1.10~1.20,取1.10 |

常工况下边坡稳定性满足规范要求。当地下水位在强降雨影响下逐步升高时,坡体内产生渗透压力,弃渣抗剪强度降低,造成边坡稳定性系数显著下降。

## 5 结论

(1) 仅考虑山体地下水侧向补给,不考虑降雨

影响时,弃渣堆积体在地下水位之上,地下水在冲沟的自然坡面溢出。

(2) 在短时暴雨入渗作用下,渣体渗透性小于降雨强度,降雨期间渣场坡面形成暂态饱和区;在连续降雨入渗作用下,渣体渗透性大于降雨强度,降雨

(下转第141页)



沉降接近复原位置为止。顶升注浆是一个缓慢的过程,施工时需实时监测箱涵底板的顶升变化和注浆压力的变化。

#### 4 注浆顶升效果评价

该工程主要对箱涵底板下地基进行注浆加固,注浆过程中和注浆后对箱涵沉降较大的1、2号箱涵进行沉降观测,结果见图3。由图3可知:注浆对箱涵起到了一定顶升作用,顶升高度约13 mm,且施工完成后箱涵底部沉降趋于稳定。注浆加固处理加大了地基承载力,可控制箱涵基础的进一步沉降。

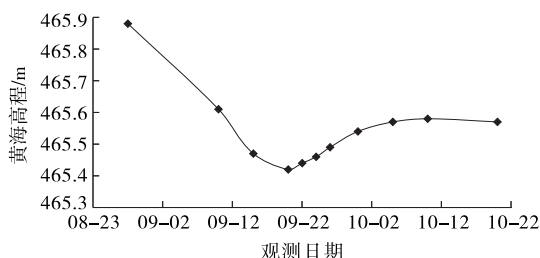


图3 注浆顶升过程中箱涵底板沉降观测结果

#### 5 结语

(1) 对箱涵注浆时,加固注浆压力取0.6~1.4 MPa,顶升注浆压力取1.2~1.6 MPa。通过顶升注浆,汝郴高速公路K639+675-745段左幅1、2号

箱涵底板抬升高度约13 mm,且沉降趋于稳定。

(2) 要达到注浆加固预期顶升效果,注浆参数控制非常重要,施工中应严格按设计要求控制注浆参数,满足设计注浆压力和注浆量要求。

(3) 注浆加固对箱涵板底地基土体具有一定的改良和加固作用,可改善土体结构,提高箱涵底部土体的抗压能力及密实度,阻止箱涵底板继续沉降。

#### 参考文献:

- [1] TB 10002.1-2005,铁路桥涵设计基本规范[S].
- [2] 河海大学,江苏宁沪高速公路股份有限公司.交通土建软土地基工程手册[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 张礼斌.回采巷道软弱破碎围岩锚注加固支护技术实践[J].煤炭开采,2006,11(2).
- [4] 杨植春,程卫军,阳先全.注浆工艺在加固涵洞中的应用[J].交通标准化,2008(7).
- [5] JGJ/T211-2010,建筑工程水泥-水玻璃双液注浆技术规范[S].
- [6] 张晓华,叶中兵,周扬更新.客运专线路基基底岩溶注浆施工技术[J].铁道标准设计,2008(4).
- [7] JTJ D30-2015,公路路基设计规范[S].
- [8] 王跃文.浙赣线岩溶地区路基注浆加固技术[J].铁道建筑,2008(6).

收稿日期:2017-11-07

\*\*\*\*\*

(上接第74页)

期间渣场坡面无暂态饱和区;考虑降雨入渗的影响,地下水的溢出点有所升高。

(3) 在短时暴雨和连续降雨入渗作用下,渣体上部的孔隙水压力增大,短时暴雨入渗引起孔隙水压力变化的深度范围比连续降雨入渗时小,降雨入渗影响深度不大于3 m。

(4) 随着降雨的持续,入渗影响深度增加,渣场边坡稳定性逐渐降低。

#### 参考文献:

- [1] 唐红梅,陈洪凯,关明芳.边坡渗流研究现状及趋势分析[J].重庆交通学院学报,2006,25(1).
- [2] 彭立,黄伟伟,徐希武,等.山区高速公路弃土场选址分类方法及其稳定性分析[J].铁道科学与工程学报,2011,8(6).
- [3] 吴志斌,王陈琦,曾江波,等.不同降雨强度下渣土受纳场边坡地下水渗流和稳定性的数值模拟分析[J].安全与环境工程,2017,24(4).

- [4] 李焕强,孙红月,孙新民,等.降雨入渗对边坡性状影响的模型实验研究[J].岩土工程学报,2009,31(4).
- [5] 谭文辉,璩世杰,高丹青,等.降雨入渗对边坡稳定性的影响分析[J].武汉理工大学学报,2010,32(15).
- [6] 张国超,范付松,赵鑫.间歇性降雨对滑坡稳定性的影响[J].安全与环境工程,2011,18(4).
- [7] 周大华,罗红明,邹从义,等.十白高速公路泰山沟隧道进口边坡稳定性及其破坏概率分析[J].安全与环境工程,2013,20(5).
- [8] 曾铃,史振宁,付宏渊,等.降雨入渗对边坡暂态饱和区分布特征的影响[J].中国公路学报,2017,30(1).
- [9] H Rahardjo, X W Li, D G Toll, et al. The effect of antecedent rainfall on slope stability[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2001, 19(3).
- [10] 于玉贞,林鸿州,李荣建,等.非稳定渗流条件下非饱和土边坡稳定分析[J].岩土力学,2008,29(11).
- [11] GB 50330-2013,建筑边坡工程技术规范[S].
- [12] JTJ D30-2015,公路路基设计规范[S].

收稿日期:2018-01-21