

基于密度分区的填方路堤边坡渗流与稳定性研究<sup>\*</sup>雷鸣<sup>1</sup>, 兰天<sup>2</sup>, 徐一鸣<sup>1</sup>, 龙志东<sup>2</sup>

(1.广东广佛肇高速公路有限公司, 广东 佛山 528041; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 针对以往路堤渗流与稳定数值分析在同一模型中使用单一密度所存在的不足, 提出了一种考虑密度分区的分析方法, 基于现场试验测得的不同密度区域渗透系数、抗剪强度及土水特性参数, 分析了在降雨条件下密度差异对路堤边坡渗流场与稳定性演化规律的影响。结果表明密度分区模型对路堤边坡渗流场与稳定性数值计算结果的影响较显著, 采用分区模型进行仿真分析时, 边坡临空面两侧土体密度越低, 其孔隙水压力变化越快, 土体越容易达到饱和; 密度较低的浅层土体容易形成水流通通道, 使入渗雨水在坡脚处汇集, 造成水毁破坏; 内部区域密度相同时, 分区密度差别越大, 边坡安全系数越低。

**关键词:** 公路; 密度分区; 路堤边坡; 数值仿真; 渗流与稳定

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0114-04

初始干密度是用来评价填方路堤性能的重要指标。干密度不同时, 土体的渗透系数、抗剪强度参数、土水特征曲线等都会存在差异。由于施工工艺的限制, 填方路堤在分层碾压时会使土体沿水平方向朝临空面两侧延展, 导致边坡中部土体的密度高于两侧。但已有研究很少考虑这一现象对边坡渗流及稳定性的影响, 不利于对实际边坡工程的安全稳定性进行正确评价。特别是在中国南方花岗岩残积土广泛分布的地区, 边坡水毁灾害时有发生, 边坡的稳定性一直是工程技术人员及科研人员关注的焦点。为了揭示不同密度分区对路堤渗流与稳定性的影响, 该文以广佛肇(广州—佛山—肇庆)高速公路实际路堤工程为依托, 通过现场试验测得的物理力学参数将路基边坡按一定比例划分为内外两个独立的区域, 以前人研究的饱和—非饱和稳定分析方法为基础, 通过有限元软件 Geo-studio 模拟降雨过程中不同密度分区路堤边坡的瞬态渗流场, 在此基础上运用刚体极限平衡法进行边坡稳定性分析, 为路堤工程的安全稳定评价与防护治理提供参考。

## 1 密度分区土体渗流与稳定分析理论

### 1.1 分区土体渗流理论

在花岗岩残积土路堤边坡中, 水的基本渗流规律服从达西定律:

$$v = k_w i \quad (1)$$

式中:  $v$  为水的流速;  $k_w$  为渗透系数;  $i$  为水力梯度。

区别于一般库岸边坡中恒定不变的渗透系数, 密度分区路堤边坡土中的渗透系数  $k_w$  不仅是与孔隙水压力或含水量相关的函数, 还随着分区密度的不同而变化。若不考虑渗流所引起的土体体积变化, 同时假定土体满足各向同性的要求, 则非饱和土中的渗流场可由下式计算:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_w \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) = m_w \gamma_w \frac{\partial h_w}{\partial t} \quad (2)$$

式中:  $h_w$  为渗流过程中的水头;  $\gamma_w$  为水的重度;  $m_w$  为 SWCC 在对应孔隙水压力处的斜率。

式(2)左侧表示流经土单元竖直与水平方向的水量变化量。

### 1.2 抗剪强度理论

当边坡土体不同区域密度存在差异时, 随着含水量的增加, 基质吸力减小的幅度将不同, 从而导致边坡土体的抗剪强度存在区域性差异。同样, 当饱和度减小时, 基质吸力增加, 土体抗剪强度增大的幅度也会存在区别。填土路堤在雨水入渗作用下, 其内部土体的抗剪强度不仅随着含水量的改变而变化, 还会因密度不同而表现出区域性差异。在边坡稳定分析中, Fredlund 将莫尔—库仑抗剪强度公式进一步拓展, 使分析模型中可采用含有非饱和参数的强度公式计算花岗岩残积土路堤边坡的安全系数, 这同样适用于不同密度分区的边坡。计算公式如下:

<sup>\*</sup> 基金项目: 广东省交通运输厅科技计划项目(2013-00-002)

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (3)$$

式中: $\tau$ 为抗剪强度; $c'$ 为有效粘聚力; $\sigma_n$ 为法向应力; $u_a$ 为孔隙气压力; $\tan \varphi'$ 为有效内摩擦角; $u_w$ 为孔隙水压力; $\varphi^b$ 为吸力内摩擦角,表明基质吸力对抗剪强度的贡献。

非饱和土的抗剪强度包括三部分,即  $c'$  对应的粘聚力对抗剪强度的贡献  $\tau_c$ 、 $\sigma_n - u_a$  对应的摩擦力对强度的贡献  $\tau$  和  $u_a - u_w$  对应的吸力对强度的贡献  $\tau_s$ 。

## 2 密度分区对降雨作用下边坡渗流的影响

降雨入渗不仅会造成边坡土体强度弱化,还会显著降低土体内部的基质吸力,导致滑动面上的抗剪强度降低,引发边坡失稳破坏。采用 Geo-studio 软件对密度分区影响下的路堤边坡进行仿真计算。

### 2.1 计算条件与工况

以广佛肇高速公路填方路堤为例,其典型路段

断面见图 1(考虑对称性,取半幅路堤进行模拟计算),坡比为 1:1.5。为研究边坡的渗流场及稳定性,设定流量边界条件模拟降雨,其中降雨历时为 1 d(86 400 s),降雨强度为 100 mm/d( $1.157 \times 10^{-6}$  m/d)。路堤以花岗岩残积土作为填筑材料,其相关物理力学参数通过现场试验获得(见表 1)。

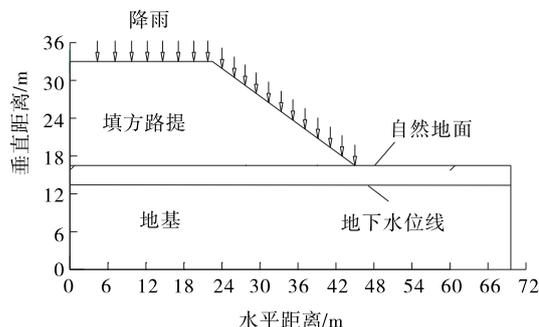


图 1 路堤边坡典型断面

表 1 路堤边坡模型计算参数

土样	编号	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	饱和渗透系数/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	粘聚力/ kPa	土水特征曲线
花岗岩	I	1.58	$1.90 \times 10^{-6}$	31.29	11.21	见文献[11]
残积土	II	1.45	$4.10 \times 10^{-6}$	30.91	6.32	
(填方土)	III	1.37	$5.60 \times 10^{-6}$	30.48	4.88	
	IV	1.28	$3.70 \times 10^{-5}$	30.21	1.99	
地基土	V	1.82	$2.70 \times 10^{-7}$	35.00	20.00	SEEP 程序拟合

区别于一般填方路堤边坡仅考虑单一密度条件下的渗流与稳定分析,这里根据试验数据,将边坡按密度分为内外两部分,并考虑不同密度区域强度参数与土水特性参数的差异。在保持路堤边坡内部土体密度不变的前提下,按两侧密度从大到小的顺序依次设 4 组不同分区方案进行模拟计算(见图 2)。

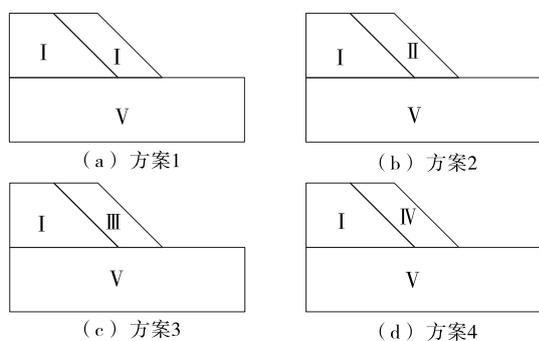


图 2 路堤边坡不同密度分区方案

### 2.2 计算结果与分析

图 3 为不同分区方案下降雨 1 d 时的路堤边坡含水量计算云图。对比不同密度分区路堤边坡含水量率分布(颜色从浅到深代表体积含水量从低到高),干密度较低的外侧土体是降雨入渗的主要通道,且干密度越低,降雨影响范围越广。无论是否考虑密度分区,入渗雨水都向坡脚处汇聚,干密度越低,汇集的水流越多。

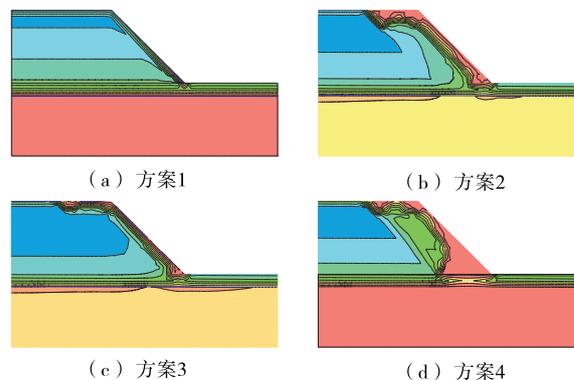


图 3 降雨 1 d 时路堤边坡不同密度分区的含水量云图

从图3来看,在一定降雨持续时间内,降雨入渗对路堤边坡内部渗流场的影响相对较弱,故只选取路堤边坡表层特征部位对渗流场相关参数进行分析。选取的特征点A、B、C位于地表以下0.5 m位置(见图4)。

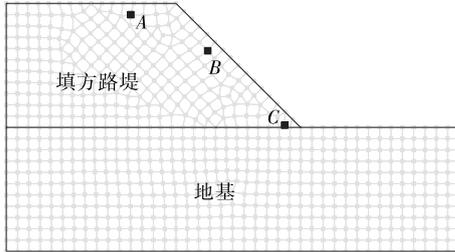


图4 模型剖面特征点位置

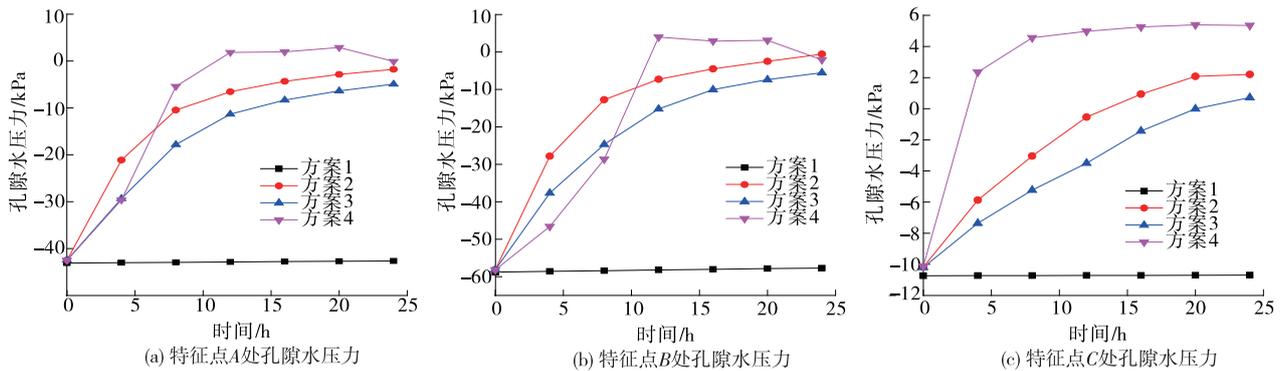


图5 降雨1 d时特征点位置的孔隙水压力

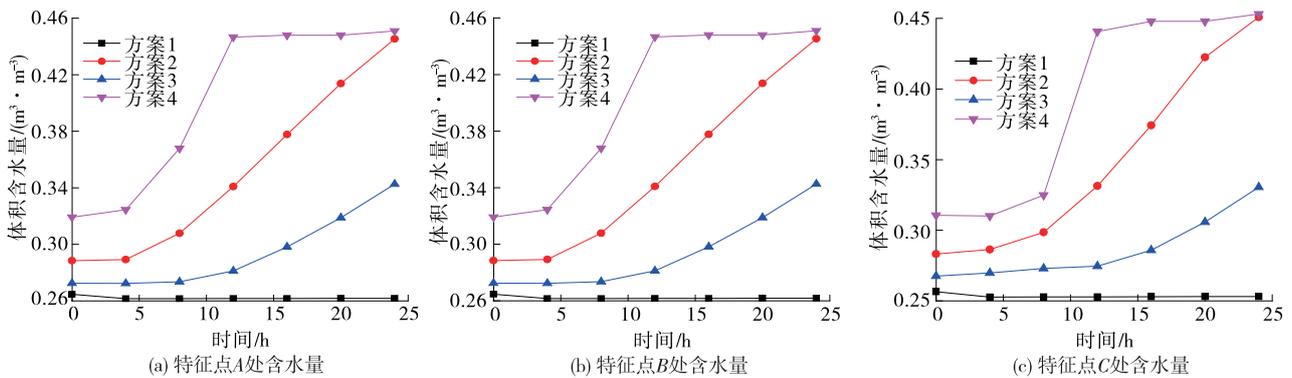


图6 降雨1 d时特征点位置的含水量

### 3 密度分区对降雨作用下边坡稳定的影响

以降雨条件下边坡饱和-非饱和渗流场的研究为基础,将渗流场的变化纳入边坡稳定分析中。采用极限平衡方法中的Mogenson-Price法分别计算不同分区密度下路堤的稳定安全系数和滑弧变化,得到密度分区对路堤边坡稳定性和滑弧变化特

不同分区方案下边坡特征点A、B、C处孔隙水压力随时间的变化见图5,体积含水量随降雨历时的变化见图6。

从图5、图6可见:密度分区对孔隙水压力与含水量的影响十分显著。不考虑密度分区时,各特征点在给定降雨条件下的孔隙水压力与含水量基本保持不变;而考虑密度分区时,临空面土体的密度越低,其孔隙水压力变化越快,基质吸力在降雨过程中快速消散,这对边坡稳定性不利。体积分水量的变化趋势与孔隙水压力相差不大,外侧土体的密度越小,含水量增加越快,边坡浅层土体迅速达到饱和,这可能造成土体强度弱化,引发水毁灾害。

征的影响(见图7、图8)。

由图7、图8可知:考虑压实效果造成的密度差异对边坡稳定分析的影响将导致计算得到的安全系数小于未考虑时的情形;当采用分区密度计算路堤边坡安全稳定性时,方案1~3的安全系数受降雨的影响不大,但方案4在降雨前期即发生失稳,密度分区边坡的安全稳定性与分区密度差关系密切;路堤两

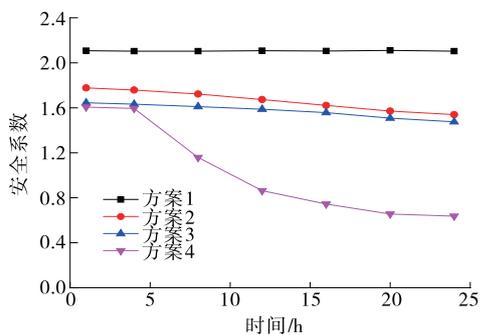


图 7 降雨条件下不同密度分区边坡的安全系数

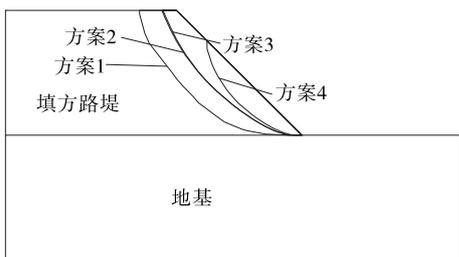


图 8 降雨 1 d 时不同密度分区边坡的滑移面范围

侧密度越低,与中间的密度差越大,对边坡的稳定性越不利;当两侧土体密度过低,如方案 4(两侧密度为  $1.28 \text{ g/cm}^3$ ),降雨过程中极易在边坡内部形成贯通的水流通道,使入渗雨水向坡脚处汇集,从而大幅降低边坡的稳定安全系数,导致水毁破坏;两侧密度与中部密度差异越大,造成滑动的滑弧范围越小,边坡更易因为浅层土体滑动而导致失稳。

### 4 结论

(1) 密度分区对花岗岩残积土填方路堤边坡稳定性的影响显著,当临空面两侧土体密度较低时,持续的降雨会使土体内部的基质吸力迅速消散,造成土体强度弱化,导致边坡安全系数降低。

(2) 考虑密度分区时,若坡面表层密度较低,容易使雨水在边坡浅层范围内形成贯通通道,导致水

流往坡脚处汇集,引起边坡发生水毁破坏。边坡治理中应重视边坡排水,并对坡脚进行特别处理。

(3) 未考虑密度分区路堤边坡的安全评价通常会高估稳定安全系数,延误采取防治处理措施的时机,最终导致不必要的水毁与滑坡灾害。

### 参考文献:

- [1] 胡梦玲,姚海林,刘杰,等.干密度对路基性能的影响研究[J].岩土力学,2012,33(增刊 2).
- [2] 申春妮,方祥位,王和文,等.吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J].岩土力学,2009,30(5).
- [3] 王铁行,卢靖,张建锋.考虑干密度影响的人工压实非饱和黄土渗透系数的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(11).
- [4] 伊盼盼,牛圣宽,韦昌富.干密度和初始含水率对非饱和和重塑粉土土水特征曲线的影响[J].水文地质工程地质,2012,39(1).
- [5] 胡小明,余学明.高填方黄土路堤的最优填筑密度分区研究[J].四川大学学报:工程科学版,2002,34(1).
- [6] 娄一青.降雨条件下边坡渗流及稳定有限元分析[J].水利学报,2007(增刊 1).
- [7] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. John Wiley and Sons INC, 1993.
- [8] 高涛,毛巨省,罗建峰,等.SLOPE/W 程序在土质边坡稳定性分析中的应用[J].西安科技大学学报,2006,26(2).
- [9] 詹良通,李鹤,陈云敏,等.东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J].岩土力学,2012,33(3).
- [10] Rahimi A, Rahardjo H, Leong E C. Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(5).

收稿日期:2016-09-27

\*\*\*\*\*

(上接第 109 页)

- [2] Drapper D, Tomlinson R, Williams P. Pollutant concentrations in road runoff, southeast queensland case study [J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1999, 126(4).
- [3] 赵剑强.路面径流污染特性及排污规律的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2000.
- [4] 陈伟伟,张会敏,张建斌,等.城区路面径流水质特征与初期径流量研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(5).

- [5] 韦小慧,秦志斌.长沙市路面径流污染特征研究[J].交通建设与管理:下半月,2014(11).
- [6] 王雪梅,胡金朝.公路路面径流污染特征及控制措施研究进展[J].绵阳师范学院学报,2013,32(5).
- [7] 聂发辉,李田,向速林,等.不同结构生态浅层渗滤系统净化路面径流的效果与机理[J].给水排水,2012,38(6).

收稿日期:2016-05-15