

不同降雨强度对土质高路堑边坡稳定性影响分析

郭名春

(江西赣州市交通工程质量监督站, 江西 赣州 341000)

摘要: 以兴赣(兴国—赣县)高速公路 K33+400—740 段土质高路堑边坡为工程背景, 运用 GeoStudio 软件对不同降雨强度下土质高路堑边坡的渗流特性进行分析, 研究路堑边坡安全系数及沉降变形变化规律。结果表明, 边坡内部土体的基质吸力与体积含水率均随降雨时间的增加逐渐增大, 降雨强度越大两者的上升速度越快; 降雨停止后, 路堑边坡内部土体的基质吸力先短暂保持不变, 随后慢慢减小; 降雨强度越大, 雨水入渗深度越大, 边坡产生的沉降变形也越大; 降雨停止后, 边坡内部的雨水一部分向外出渗, 另一部分在自重应力场作用下继续向边坡内部渗流, 致使边坡坡顶位移沉降继续增大, 但增大速率缓慢, 并最终趋于稳定; 降雨入渗条件下, 边坡安全系数随着降雨时间的增加逐渐减小, 降雨停止后, 边坡安全系数的回升速率较慢, 具有一定的滞后性。

关键词: 公路; 路堑边坡; 降雨入渗; 沉降变形; 安全系数

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)03-0091-04

降雨入渗是引起路堑边坡失稳破坏的主要因素。邱文基于饱和-非饱和渗流理论建立土质路堑边坡计算模型, 分析降雨过程中边坡内部基质吸力与体积含水率的变化规律, 并对相应条件下路堑边坡的稳定性进行分析; 李佳等通过室内土质路堑边坡降雨模型试验, 得出降雨强度对路堑边坡的变形有重要影响; 蒋鑫等分析不同降雨条件下土质路堑边坡的稳定性, 得出降雨初始阶段路堑边坡稳定性下降速度较慢、降雨超过一定时间后边坡安全系数迅速下降、降雨停止后安全系数迅速恢复。该文根据兴赣(兴国—赣县)高速公路 K33+400—740 土质高路堑边坡的实际情况, 分析不同降雨强度及降雨时间下边坡内部基质吸力与体积含水率的变化关系, 研究路堑边坡的稳定性变化规律。

1 降雨入渗基本理论

降雨条件下, 路堑边坡发生的渗流过程属于典型饱和-非饱和渗流, 由于土体自身的不均匀性, 其在渗流特性方面表现出各向异性, 具体表现为土体垂直方向渗透系数 k_y 小于水平渗透系数 k_x 。降雨条件下土质路堑边坡的渗流控制方程为:

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

式中: k_x 为 x 方向的渗透系数; H 为总水头; k_y 为 y 方向的渗透系数; Q 为边界降雨量; θ 为体积含水率; t 为时间。

降雨入渗对土质高路堑边坡稳定性的影响取决于土体自身渗透系数, 而土体渗透系数与其基质吸力及体积含水率有关。目前, 路堑边坡的渗透系数通过现场原位试验或采用经典的 Van Genuchten 模型拟合得到, 公式如下:

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \Psi)^n]^m}$$

$$k_w = k_s \frac{\{1 - (\alpha \Psi^{n-1}) [1 + (\alpha \Psi^n)^{-m}]\}^2}{1 + (\alpha \Psi^n)^{m/2}}$$

式中: θ_w 为体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率; Ψ 为基质吸力; α 、 m 、 n 为曲线拟合参数; k_w 为渗透系数; k_s 为饱和渗透系数; $n = 1/(1-m)$ 。

2 模型建立及计算方案确定

2.1 模型建立与参数确定

该高路堑边坡长约 120 m, 高 20 m, 分为两级。该处线路走向约 150°, 属丘陵地貌, 右侧发育冲沟, 地势左高右低, 地形起伏较大。主要为黏土, 饱和渗透系数为 6.8×10^{-6} m/s, 土体的主要参数见表 1, 土体基质吸力与体积含水率的关系见图 1。

表 1 土体的主要物理力学参数

项目	参数值	项目	参数值
岩性	黏土	有效内摩擦角/(°)	15
饱和重度/(kN·m ⁻³)	22	变形模量/MPa	20
干重度/(kN·m ⁻³)	19	泊松比 μ	0.35
有效粘聚力/kPa	20		

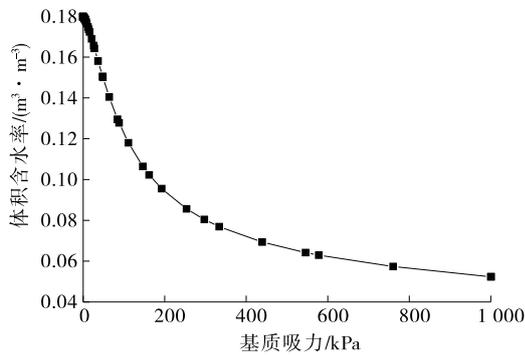


图1 高路堑边坡土体基质吸力与体积含水率的关系

该边坡分为两级,每级高 10 m,坡比均为 1 : 1,边坡平台为 2 m,利用 GeoStudio 软件建立计算模型,共划分为 4 445 个节点、4 288 个单元。模型两侧设为不透水边界,坡顶和坡面设为降雨边界。为监测边坡内部基质吸力与体积含水率,设定 1 个监测点 A 及监测截面 I - I (见图 2)。

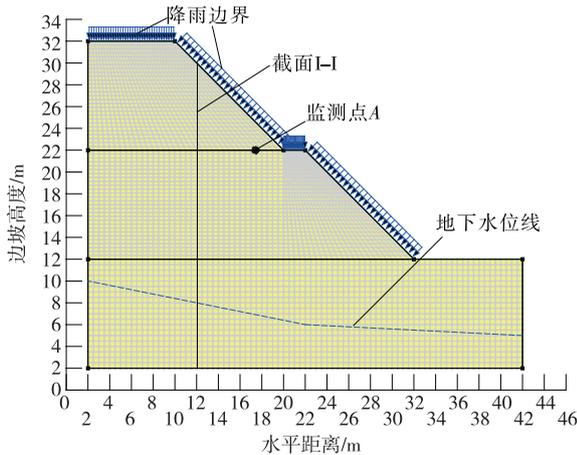


图2 高路堑边坡计算模型

2.2 计算方案

查阅当地气象资料,该高路堑边坡所在地区经常出现 3、15、30 mm/h 3 种强度的降雨,分别命名为小雨、中雨、大雨,降雨时间为 24 h,降雨过后持续对边坡监测 24 h。

3 高路堑边坡数值计算结果分析

3.1 基质吸力的变化规律

降雨入渗条件下,雨水在边坡表面的入渗会打破边坡原有渗流平衡,导致土体基质吸力丧失、边坡稳定性下降。为分析降雨入渗条件下该高路堑边坡基质吸力的变化规律,对特征监测点 A 进行监测,监测结果见图 3。

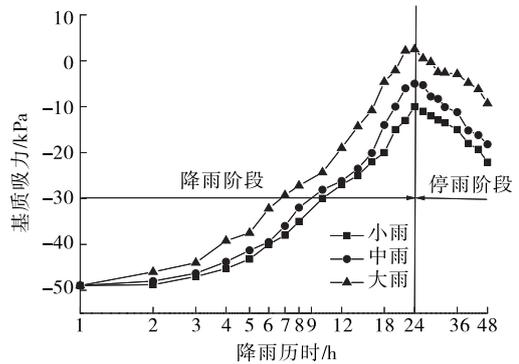


图3 高路堑边坡特征点基质吸力随降雨时间的变化

从图 3 可看出:当降雨等级分别为小雨、中雨和大雨时,边坡特征监测点基质吸力从 -51 kPa 分别增加到 -10、-5 和 3 kPa,增幅分别为 82%、90% 和 105%;降雨阶段,监测点的基质吸力随着降雨历时的增加逐渐增大,其中大雨的增加速率最大,中雨次之,小雨最小;降雨停止后,监测点的基质吸力在短暂维持后慢慢减小。

降雨入渗条件下,由于雨水通过边坡表面进入土体内部,雨水填充土的三相体系,致使边坡表面基质吸力慢慢增大;降雨停止后,入渗至边坡表面的雨水在重力场作用下继续向下入渗,监测点的基质吸力在降雨停止后得到短暂维持,但降雨停止一段时间后,雨水在边坡表面渗出,监测点的基质吸力慢慢减小。3 种降雨条件下,大雨的降雨强度最高,在边坡表面的入渗量最大,边坡基质吸力的增幅最大。

3.2 体积含水率的变化规律

体积含水率反映边坡土体饱和度,其值增加会造成边坡原有饱和区和非饱和区重分布,从而影响边坡的稳定性。为研究高路堑边坡在降雨入渗条件下的体积含水率分布规律,降雨历时 24 h 后监测特征截面 I - I 的体积含水率,监测结果见图 4。

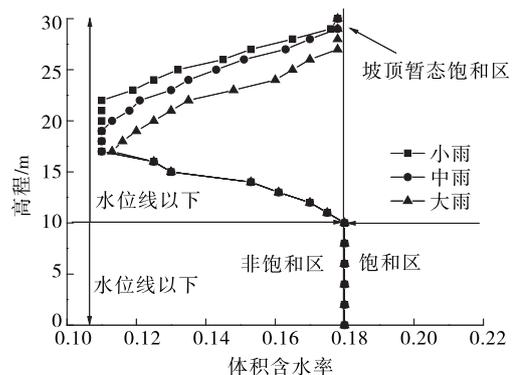


图4 高路堑边坡监测截面体积含水率随高程的变化

从图4可看出:1)降雨入渗条件下,坡顶位置土体的含水率达0.18,说明坡顶位置形成暂态饱和区。大雨条件下暂态饱和区深度达3.5 m,影响深度达13 m;中雨条件下暂态饱和区深度为2.3 m,影响深度达11 m;小雨条件下暂态饱和区深度为1.5 m,影响深度为7 m。2)高程10 m以下,体积含水率均达到饱和状态;高程为10~17 m时,体积含水率逐渐减小。

高程10 m以下为地下水区域,其体积含水率为饱和和体积含水率;降雨条件下,雨水先在边坡表面入渗,边坡表面体积含水率上升进而形成暂态饱和区;随着降雨时间的增加,雨水持续向边坡内部渗流,引起边坡内部土体的体积含水率上升,暂态饱和区逐渐向边坡内部扩展,影响深度不断增大。由于降雨强度越大雨水入渗量越大,大雨条件下暂态饱和区的深度最大,影响深度也最大。

3.3 坡顶位移沉降的变化规律

坡顶位移沉降是反映边坡变形的直观参数,其大小直接影响边坡变形程度。为分析3种降雨条件下高路堑边坡的变形规律,对坡顶位移沉降进行计算,结果见图5。

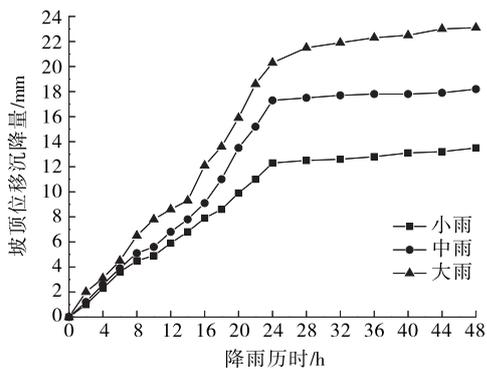


图5 高路堑边坡顶位移沉降随降雨时间的变化

从图5可看出:1)当降雨历时为24 h时,小雨、中雨和大雨条件下坡顶位移沉降量分别达到12.0、17.3、20.5 mm;降雨历时为24~48 h时,小雨条件下位移沉降量从12.0 mm增加到13.1 mm,中雨条件下位移沉降量从17.3 mm增加到18.8 mm,大雨条件下位移沉降量从20.5 mm增加到23.6 mm。2)降雨阶段,边坡坡顶位移沉降增加幅度较大;降雨阶段,边坡坡顶位移沉降增幅较缓,趋于稳定。

降雨条件下雨水在坡顶及边坡表面入渗,造成土体抗剪强度下降,在雨水不断渗流及重力场作用下坡顶逐渐产生位移沉降,并随着雨水的不断入渗

坡顶位移沉降量逐渐增加。由于大雨条件下雨水入渗量较大,雨水的影响深度较深,产生的位移沉降量最大。降雨停止后,雨水一部分沿着边坡表面向外出渗,另一部分因重力场的作用继续向边坡内部渗流,坡顶位移沉降量在降雨停止后仍会有缓慢增加,最终趋于稳定。

3.4 安全系数的变化规律

安全系数是边坡整体稳定性评价指标。对路堑边坡模型的安全系数进行数值计算,结果见图6。

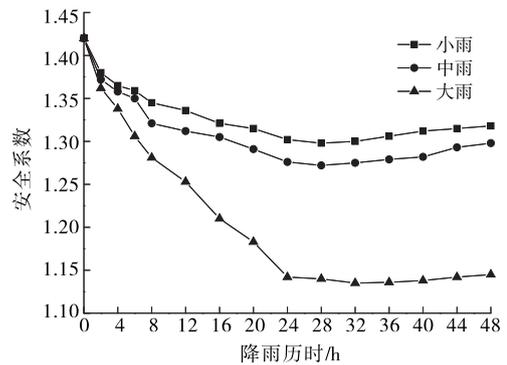


图6 高路堑边坡安全系数随降雨时间的变化

从图6可看出:1)降雨强度为小雨时,边坡安全系数从1.42降到1.32,降低7.0%;中雨时,边坡安全系数从1.42降到1.27,降低10.6%;大雨时,边坡安全系数从1.42降到1.32,降低19.7%。2)降雨停止后,边坡安全系数缓慢下降一段时间后回升,但回升速率较慢,具有一定的滞后性。

降雨强度越大,雨水在边坡表面的入渗量越大,在边坡表面形成暂态饱和区的深度及雨水的影响深度越大,造成边坡土体整体抗剪强度下降,边坡内部形成较大范围塑性区,大雨条件下边坡安全系数的变化幅度最大。降雨停止后,部分雨水由于重力场作用继续向边坡内渗流,导致边坡安全系数的回升具有一定的滞后性。

4 结论

(1)高路堑边坡内部土体的基质吸力随降雨时间的增加逐渐增大,降雨强度越大,土体体积含水率上升速度越快;降雨停止后,路堑边坡内部土体的基质吸力先短暂保持不变,随后慢慢减小。

(2)降雨开始后,路堑边坡表面的体积含水率上升,并在坡顶处形成暂态饱和区,降雨强度越大,暂态饱和区的范围越大,雨水入渗深度也越大,边坡产生的沉降变形也就越大;降雨停止后,边坡内部的

雨水一部分向外出渗,另一部分在自重应力场作用下继续向边坡内部渗流,致使边坡坡顶位移沉降继续增大,但增大速率缓慢,并最终趋于稳定。

(3) 降雨入渗条件下,边坡安全系数随着降雨时间的增加逐渐减小;降雨停止后,边坡安全系数的回升速率较慢,具有一定的滞后性。

参考文献:

[1] 王平豪,马华.土质高边坡稳定性计算分析方法[J].林业建设,2017,12(2).

[2] 罗根传,胡庆国,谭积青.基于极限平衡法与强度折减法的高边坡过程稳定性分析[J].矿冶工程,2016,14(2).

[3] 李强,沈毅,刘永兵,等.基于西部路域生态工程效果评价信息管理系统的开发[J].公路交通科技:应用技术版,2015(6).

[4] 杨波.边坡稳定性计算中圆弧滑动法与传递系数法的差异[J].黑龙江水利,2016,2(2).

[5] 邱文.基质吸力对非饱和土边坡稳定性影响分析[J].安徽建筑工业学院学报,2012,19(6).

[6] 李佳,高广运,黄雪峰.非饱和原状黄土边坡浸水试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,30(5).

[7] 蒋鑫,刘晋南,黄明星,等.抗滑桩加固斜坡软弱地基路

堤的数值模拟[J].岩土力学,2012,33(4).

[8] 宋焕宇.粗粒土斜坡高路堤变形性状与稳定性研究[D].武汉:华中科技大学,2007.

[9] 韩同春,黄福明.双层结构土质边坡降雨入渗过程及稳定性分析[J].浙江大学学报:工学版,2012,46(1).

[10] 李龙起,罗书学,魏文凯.降雨入渗对含软弱夹层顺层岩质边坡性状影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9).

[11] 汪丁建,童龙云,邱岳峰.降雨入渗条件下非饱和土朗肯土压力分析[J].岩土力学,2013,34(11).

[12] 向冲,费维水.陡斜坡路堤失稳破坏数值分析[J].重庆交通大学学报,2016,30(4).

[13] Van Genuchten M T H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5).

[14] Dieu Tien Bui, Biswajeet Pradhan, Owe Lofman, et al. Regional prediction of landslide hazard using probability analysis of intense rainfall in the Hoa Binh Province, Vietnam[J]. Natural Hazards, 2013, 66(2).

[15] 陈洪江,韩珠峰,周春梅,等.降雨条件下黄土路堑高边坡稳定性分析[J].公路,2017(2).

收稿日期:2018-02-09

(上接第 83 页)

力影响,但内部同一单元体同时受到拉、压应力作用,试件处于双向受力状态。不同受力模式下材料内部应力状态的不同导致弯拉、劈裂强度试验结果的差异。

4 结论

(1) 悬浮密实型水泥稳定碎石的抗拉性能优于骨架密实型和骨架空隙型,其具有更强的抗裂性能,更适用于层底拉应力较大的路面结构。

(2) 悬浮密实、骨架密实、骨架空隙结构中,弯拉强度、劈裂强度比值分别为 1.69、1.76、1.93,均值为 1.79。弯拉强度与劈裂强度之间具有较好的线性关系。使用弯拉强度作为结构设计参数将高估路面结构抗裂能力,劈裂强度更适合于表征实际路面结构的受力状态。

(3) 水泥稳定碎石的抗拉性能主要取决于混合料的粘结力及水泥石与集料交界面过渡区的强度,不同受力模式下材料内部应力状态的不同导致材料弯拉、劈裂性能的差异。

参考文献:

[1] 孙兆辉,王铁斌,许志鸿,等.水泥稳定碎石强度影响因素的试验研究[J].建筑材料学报,2006,9(3).

[2] JTG D50-2006,公路沥青路面设计规范[S].

[3] 沙庆林.重载交通长寿命半刚性路面设计与施工[M].北京:人民交通出版社,2011.

[4] 姚祖康.沥青路面结构设计[M].北京:人民交通出版社,2011.

[5] 沙爱民.半刚性基层的材料特性[J].中国公路学报,2008,21(1).

[6] JTG F40-2004,公路沥青路面施工技术规范[S].

[7] JTG E51-2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

[8] 李德文.水泥稳定碎石强度控制指标及标准研究[D].西安:长安大学,2010.

[9] 付志国.低剂量水泥稳定级配碎石基层材料收缩性能分析[J].公路与汽运,2018(1).

[10] 董玉凯.掺膨胀剂水泥稳定碎石抗裂性能研究[J].公路与汽运,2017(2).

收稿日期:2017-11-20