

降雨条件下拓宽路堤稳定性数值分析*

郑俊杰^{1,2†}, 鱼欢², 郭震山¹, 曹文昭²

(1. 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006;

2. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:基于非饱和渗流理论,在有限差分软件FLAC^{3D}渗流模块的基础上,采用内置FISH语言自编程序实现了降雨条件下拓宽路堤上饱和-非饱和渗流过程的模拟,进而分析了降雨入渗对拓宽路堤孔隙水压力和饱和度的影响,以及土工格栅加筋和填料渗透系数对降雨条件下拓宽路堤稳定性的影响.研究表明:降雨初期路堤土体基质吸力迅速降低,边坡最先达到饱和状态,形成暂态饱和区;考虑降雨入渗影响时,拓宽路堤安全系数明显减小,土工格栅加筋可有效减小降雨入渗对拓宽路堤稳定性的影响;新路堤填料渗透系数对降雨条件下拓宽路堤稳定性的影响较大,实际工程中应保证路堤填土的压实度并采取边坡防护措施以减小雨水入渗的影响.

关键词:拓宽路堤;数值模拟;降雨入渗;孔隙水压力;稳定性

中图分类号:U416

文献标志码:A

Numerical Analysis of the Stability of Widened Embankment under Rainfall Conditions

ZHENG Junjie^{1,2†}, YU Huan², GUO Zhenshan¹, CAO Wenzhao²

(1. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Taiyuan 030006, China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The simulation of saturated and unsaturated seepage under rainfall conditions was carried out by self-programming system using the built-in FISH language based on the seepage module of finite difference software FLAC^{3D} and the unsaturated seepage theory. The pore water pressure and degree of saturation of the widened embankment under rainfall conditions were analyzed. The effects of geogrid reinforcement and permeability coefficient on the stability of the widened embankment were also investigated. The results show that the soil matrix suction decreases rapidly and the slope reaches to saturated state and forms the transient saturated zone firstly. The safety factor of the widened embankment decreases obviously, considering the effect of rainfall infiltration. The geogrid reinforcement reduces the effect of rainfall infiltration on the stability of the widened embankment. Meanwhile, the permeability coefficient of the newly constructed embankment has large effect on the stability of the widened embankment under rainfall conditions. In practical engineering, the degree of compaction of the embankment fill should be guaranteed and the measures of slope protection should be taken to reduce the effect of the rainfall infiltration.

Key words: widened embankment; numerical simulation; rainfall infiltration; pore water pressure; stability

* 收稿日期:2016-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278216), National Natural Science Foundation of China(51278216); 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题(KLTLR-Y14-2), Open Fund of Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region(KLTLR-Y14-2)

作者简介:郑俊杰(1967—),男,湖北武汉人,华中科技大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: zhengjj@hust.edu.cn

为满足交通量持续增长的需求,拓宽既有公路因具有投资规模小、节约用地及交通管理和养护方便等优点,成为优先考虑的方法.降雨入渗是诱发路堤失稳的重要因素之一,统计资料表明,绝大多数路堤失稳都发生在降雨期或降雨后^[1].我国西部地区降雨季节分布很不均匀,春冬干旱,夏秋多雨,强降雨对路堤边坡稳定性影响很大.对于拓宽路堤,旧路堤在长期行车荷载和各种外界因素作用下,路堤土体已压实致密,而新路堤虽经压实,但新、旧路堤土体性质仍存在较大差异.降雨不仅改变了地下渗流场,也使路堤浸泡软化,抗剪强度降低,而新、旧路堤结合部的薄弱搭接进一步增大了降雨条件下拓宽路堤失效的风险.

针对降雨诱发路堤边坡失稳的问题,国内外学者已从理论分析、模型和现场试验及数值模拟等方面做了不少工作,但有关降雨对拓宽路堤影响的研究较少.苏永华等^[2]对加筋切填路基变形影响因素的敏感性进行了模拟试验,无论是限制路堤顶沉降还是限制路堤侧向位移,加土工格室效果比加土工格栅要好;邹维列^[3]通过人工降雨装置,研究了非饱和黄土对加载和降雨入渗的响应;言志信^[4]应用有限差分软件两相流模块建立了非饱和土边坡数值模型,并开展了考虑降雨入渗影响的渗流场及稳定性分析.Rahimi等^[5]对强降雨入渗条件下的水力学参数进行了敏感性分析,探究了土水特征曲线的拟合参数对边坡稳定性的影响;王协群等^[6]采用基于变模量的弹塑性强度折减法,研究了降雨条件下非饱和路堤的变形和稳定性;武彩萍^[7]采用人工降雨装置对黄土边坡进行室内模型试验,观察了强降雨条件下黄土滑坡的发生发展过程及坡面形态的变化情况;蒋中明等^[8]采用FLAC^{3D}软件的非饱和渗流计算功能,实现了边坡三维降雨入渗的模拟;刘小平等^[9]分析了降雨对非饱和土路基含水量的影响,结果表明,渗流深度受到降雨强度、降雨时间、土的吸水率、非饱和土的进气值及渗透系数等因素影响.张社荣^[10]为揭示强降雨入渗下边坡失稳破坏的内在规律,从孔压时空演化、位移时程和安全系数等角度探究了雨型和降雨强度等降雨特性对边坡失稳破坏的影响.

本文基于非饱和渗流理论,结合有限差分FLAC^{3D}软件渗流分析模块,采用FISH语言自编程序,实现拓宽路堤在降雨条件下的饱和-非饱和渗流过程的模拟,进而分析降雨入渗对拓宽路堤孔隙水压力和饱和度的影响,以及土工格栅加筋和填料渗

透系数对降雨条件下边坡稳定性的影响.

1 非饱和渗流在FLAC^{3D}中的实现

非饱和渗流不同于饱和渗流,非饱和渗流中土的渗透特性与饱和度密切相关,渗透系数是饱和度的函数,而饱和度随降雨入渗时间变化而变化,所以非饱和渗流过程是不断变化的.FLAC^{3D}在饱和-非饱和计算时,采用非饱和达西定律^[11],即

$$q_i = -K_{ij}k_r(s)[p - \rho x_j g], \quad (1)$$

$$k_r(s) = s^2(3 - 2s). \quad (2)$$

式中: K_{ij} 为饱和渗透系数张量; $k_r(s)$ 为相对渗透系数; s 为饱和度; p 为孔隙水压力; ρ 为流体密度; g 为重力加速度分量.

FLAC^{3D}的渗流计算能力很强,但计算过程中默认节点上的饱和度为1.0,缺少基质吸力与饱和度的函数关系.通过采用FLAC^{3D}内置FISH语言编写基质吸力与饱和度的函数关系并嵌入到渗流计算过程中,可实现降雨条件下基质吸力随饱和度的变化而变化.土水特征曲线采用Van Genuchten提出的土体体积含水率与负孔隙水压力的关系式^[12]:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (p/a)^{n'}]^{m'}}. \quad (3)$$

式中: θ 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; a, n', m' 为拟合参数,参数取值为 $a = 100, n' = 2, m' = 1$.根据体积含水率和饱和度的关系 $\theta = ns$,由式(3)可得出饱和度和孔隙水压力的函数关系:

$$s = s_r + \frac{1 - s_r}{[1 + (p/a)^{n'}]^{m'}}. \quad (4)$$

式中参数含义同上,其中 s_r 为残余饱和度.

数值计算中,降雨边界条件分为流量边界和压力边界2类.当降雨强度小于路堤土体的入渗能力时,计算入渗速率取为降雨强度,即流量边界条件;当降雨强度大于路堤土体的入渗能力时,入渗强度为土体的入渗能力,即压力边界条件.

2 工程概况和数值建模

2.1 工程概况

选取西部某高速公路典型拓宽路堤断面,旧路堤顶面宽26 m,高8 m,采用对称拓宽的方法,2边各拓宽8 m,路堤边坡坡度比保持1:1.5不变.根据规范^[13],路堤拓宽时,应在既有路堤坡面开挖宽

度不小于1 m台阶.该路堤拓宽工程开挖台阶尺寸为1.5 m×1.0 m(宽×高),随拓宽部分路堤的填筑,自下而上逐级开挖台阶.对于加筋工况,土工格栅自台阶处开始铺设,第一层格栅位于路堤底面处,自下而上共铺设3层,层间距3 m.根据现场地质勘察报告和土工实验结果,路堤填土计算参数见表1.

表1 路堤填土计算参数

Tab.1 Properties of embankment fill

土层	压缩模量/MPa	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(10 ⁻⁵ cm·s ⁻¹)	孔隙率
新路堤	22.4	19.2	0.3	50.0	20.5	4.0	0.32
旧路堤	20.4	19.2	0.3	38.4	17.6	3.0	0.29

2.2 数值建模及边界条件

采用有限差分软件FLAC^{3D}建立数值模型,根据结构对称性,选取半幅路基进行分析,路基横向计算宽度50 m,纵向计算宽度1.0 m.为方便对各时间点的孔隙水压力和饱和度进行观测,在路堤表面设置监测点1,2,3,4,地表及边坡以下1 m处设监测点A,B,C.土工格栅采用FLAC^{3D}内置土工格栅单元(geogrid)模拟,其余部分均采用实体单元,屈服准则采用Mohr-Coulomb准则.地下水位距地表14 m,模型尺寸与边界条件如图1所示.

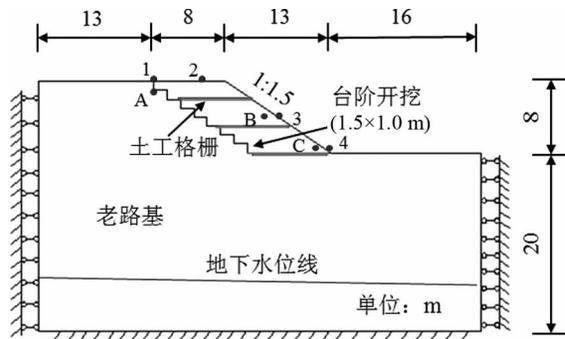


图1 模型尺寸与边界条件

Fig.1 Dimension and boundary conditions of the model

非饱和渗流计算还需定义模型的水力边界条件,取路面、边坡表面和地表为雨水入渗边界.降雨入渗是一个变化的过程,降雨初期地表入渗率大于降雨强度,属于无压入渗,随着入渗的进行,入渗率不断降低,当小于降雨强度时,开始形成地表径流.为模拟实际工况,FLAC^{3D}计算中,雨水入渗边界在降雨初期设为流量边界,并实时检测地表孔隙水压力,当孔隙水压力为正时,将雨水入渗边界转化为压力边界,即地表孔隙水压力设为0.在模型两侧,

地下水位以下采用定水头边界,地下水位以上采用零流量边界,模型底部按不透水边界处理.渗透系数采用Van Genuchten提出的方程进行计算,渗透系数随基质吸力的变化如图2所示,建模参数见表1,对于加筋工况,土工格栅参数见表2.

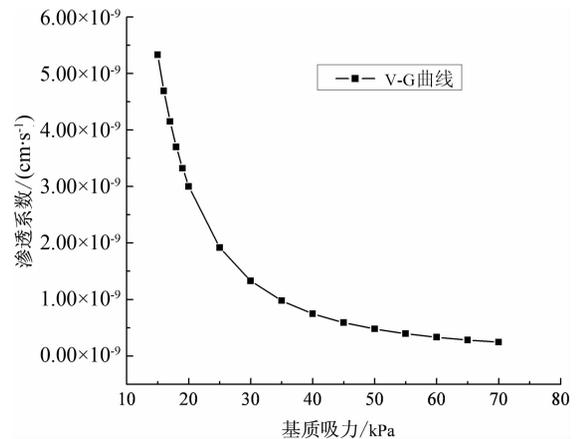


图2 渗透系数与负孔隙水压力关系曲线(V-G曲线)

Fig.2 Relation between the coefficient of permeability and the negative pore water pressure

表2 土工格栅计算参数

Tab.2 Properties of geogrid

弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	黏结摩擦角/(°)
86	30.72	12.96

考虑新旧路堤的实际建造过程,数值模拟分为以下几部分:①在旧路堤上施加等效静荷载至路堤顶面沉降稳定;②分层填筑路堤拓宽部分,每层填筑高度1 m,分不加筋和加筋2种工况;③进行降雨渗流模拟,西部地区降雨主要集中在夏季,且多为大暴雨,因此本文取降雨强度480 mm/d,连续降雨3 d;④采用强度折减法进行降雨入渗条件下路堤边坡稳定分析.

3 渗流计算结果分析

3.1 降雨入渗对孔隙水压力的影响

图3所示为降雨过程中孔隙水压力随时间变化等值线图.降雨前的负孔隙水压力分布均匀,基质吸力较大,降雨入渗使孔隙水压力发生较大变化,影响范围由表向里扩散;随降雨时间增加,地表基质吸力减小,降雨历时2 d时,地表附近孔隙水压力由负转正,但接近于零,此时地表入渗能力小于降雨强度,地表形成径流,地表附近深度形成暂态饱和区,同时路堤内部土体基质吸力也在减小,路堤顶部及边坡的入渗深度约为3.5 m.

图 4 所示为不同降雨时期的饱和度,其中降雨前路堤表面饱和度为 0.64.随降雨历时增加,饱和度迅速增加,边坡最先形成暂态饱和区.边坡坡脚处受坡脚平台降雨入渗和边坡路堤土体中孔隙水的补给影响,坡脚处饱和度上升速度也较快.图 3 中孔

隙水压力为 0 的等值线与图 4 中饱和度为 1 的等值线对应.由于地下水位很低,且降雨强度及降雨历时较小,使得暂态饱和区很难延伸到路堤较深处,地下水位上升不明显.

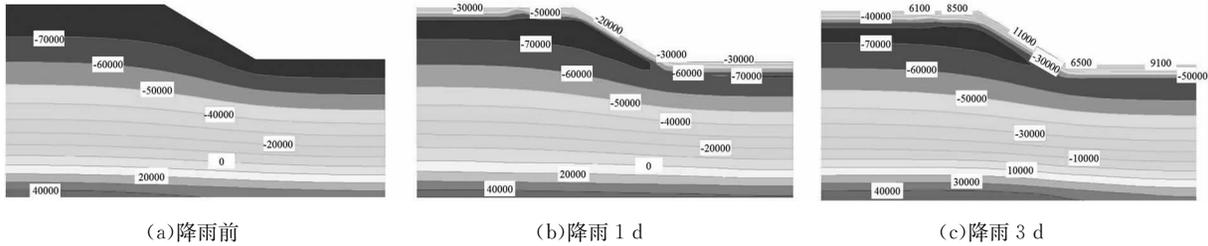


图 3 孔隙水压力分布图(单位:Pa)

Fig.3 Contours of distribution of pore water pressure(unit: Pa)

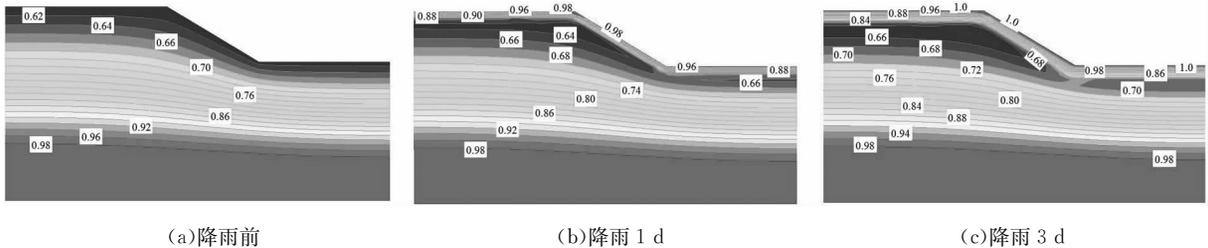


图 4 饱和度分布图

Fig.4 Contours of degree of saturation

图 5 和图 6 分别为降雨时拓宽路堤表面和内部监测点的孔隙水压力和饱和度随时间的变化.降雨初期,基质吸力迅速减小,监测点 3(拓宽路堤边坡)负孔隙水压力减小速率最快,路堤内部监测点 A,B 和 C 负孔隙水压力减小缓慢,因为雨水渗入路堤中需要时间.降雨 24 h 后,路堤表面达到饱和状态,孔隙水压力逐渐趋近于 0,相应的饱和度增大到 1.监测点 2,3,B 和 C(拓宽路堤)在降雨条件下孔隙水压力及饱和度的变化速率比旧路堤快,这是因为新路堤填料的孔隙率和渗透系数比旧路堤大,降雨入渗能力大于旧路堤.

3.2 降雨入渗对拓宽路堤稳定性的影响

降雨入渗中负孔隙水压力减小是诱发路堤产生滑坡的主要因素,特别是对于拓宽路堤,新旧路堤填土参数不同,对新路堤边坡的稳定性影响较大.基于上述分析,采用考虑基质吸力的强度折减法对降雨条件下的拓宽路堤稳定性进行分析.

3.2.1 格栅加筋的影响

表 3 为格栅加筋和无筋 2 种工况下拓宽路堤安全系数随降雨时间的变化.降雨前无筋拓宽路堤的安全系数为 2.565,降雨 72 h 后,安全系数降低到 2.377,降幅为 7.3%,表明降雨对拓宽路堤的稳定

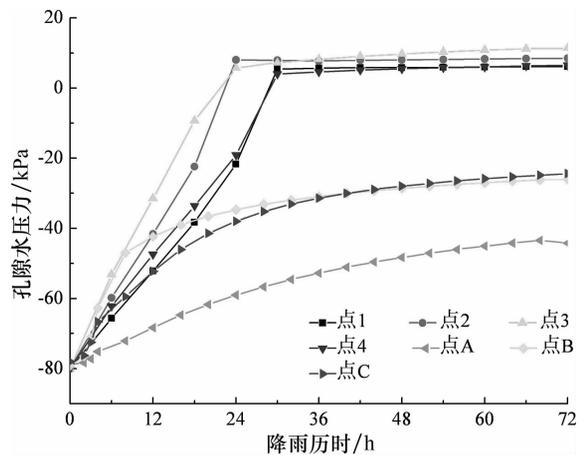


图 5 孔隙水压力随降雨历时变化规律

Fig.5 Variation of pore water pressure with rainfall duration

性影响较大.分析原因:降雨入渗引起路堤填土含水量增加,基质吸力降低并在土体接近饱和时消失,而基质吸力是非饱和土抗剪强度的重要组成部分,因此路堤填土抗剪强度降低,从而引起边坡失稳.

对于无筋拓宽路堤,降雨 24 h 后安全系数减小为 2.554,降幅为 2%;降雨 48 h 后安全系数进一步减小为 2.453,降幅为 2.3%;降雨 72 h 后安全系数

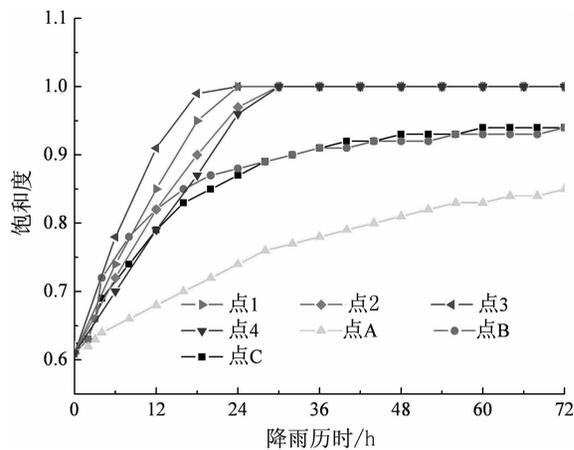


图6 饱和度随降雨历时变化规律

Fig.6 Variation of degree of saturation with rainfall duration

继续减小至 2.377, 降幅为 3.2%。与此类似, 对于加筋拓宽路堤, 对应于降雨 24 h, 48 h 和 72 h, 安全系数降幅分别为 1.7%, 1.8% 和 2.3%。上述分析表明, 在降雨过程中, 降雨历时相同时, 无筋工况的安全系数降幅随时间增加而快速增大, 而加筋工况下安全系数降幅增大速率较小, 表明在拓宽路堤中加筋可以有效提高降雨条件下的边坡稳定性。分析原因: 土工格栅具有较高的抗拉强度和较低的延伸率, 降雨过程中, 路堤填土和土工格栅之间产生相对滑动, 而土工格栅可以约束路堤填土的侧向变形, 从而提高新、旧路堤的稳定性。

表3 安全系数随降雨历时变化

Tab.3 Variation of safety factor with rainfall duration

降雨历时/h	0	6	24	48	72
无筋工况	2.565	2.554	2.511	2.453	2.377
加筋工况	2.771	2.759	2.723	2.673	2.611

图7所示为降雨72h时无筋与加筋2种工况

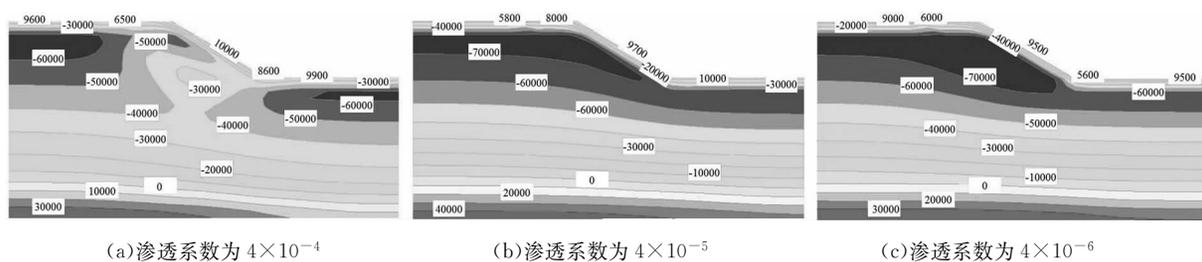


图8 渗透系数对孔隙水压力分布的影响(t = 48 h)

Fig.8 Effect of coefficients of permeability on the distribution of pore water pressure (t = 48 h)

图9所示为3种工况的安全系数随降雨历时的变化关系。渗透系数越大, 相同降雨历时下安全系数越小, 渗透系数为 4×10^{-4} cm/s 时稳定性最差, 但在降雨过程中安全系数减小速率较小, 说明入渗能

的拓宽路堤剪切应变云图。无筋工况安全系数比加筋工况安全系数小 9%, 显然无筋工况塑性贯通区比加筋工况大(潜在滑动面), 且贯通路堤顶及边坡坡脚。

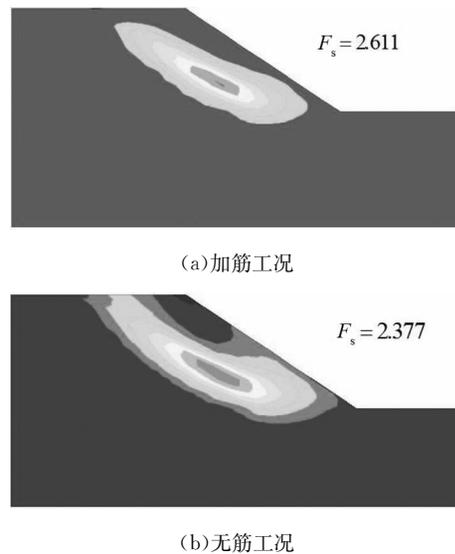


图7 降雨72h剪切应变云图

Fig.7 Contour of shear strain under rainfall of 72 hours

3.2.2 新路堤渗透系数的影响

实际工程中, 新路堤填料的选择至关重要, 填料选取不当, 可能会造成在降雨条件下边坡失稳。通过改变新路堤渗透系数, 研究降雨条件下新路堤渗透系数对拓宽路堤稳定性的影响。新路堤渗透系数分别为 4×10^{-4} cm/s, 4×10^{-5} cm/s 和 4×10^{-6} cm/s, 图8所示为降雨48h时3种渗透系数工况下孔隙水压力分布图。相同降雨历时下, 孔隙水压力的分布差别较大, 渗透系数越大, 雨水越容易进入路堤边坡内部, 使基质吸力减小, 并接近饱和状态, 形成暂态饱和区, 相应的安全系数也降低。

力相对较强的土体, 安全系数降低速度取决于降雨强度大小和持续时间。而渗透系数较小, 未降雨前稳定性较好, 因为同一类土压实度越高, 渗透系数越小, 越有利于路堤稳定性。因此, 路堤土体的渗透性

对边坡的稳定性至关重要.渗透系数是综合反映土体渗透能力的一个指标,影响土体渗透系数的因素很多,压实度是主要因素之一,因此,在实际工程中,新路堤应分层填筑,均匀压实,压实度应不小于90%.为了减少雨水对新路堤填土边坡的入渗,可采取种植植被等降低地表入渗能力的防护措施,从而提高拓宽路堤的稳定性.

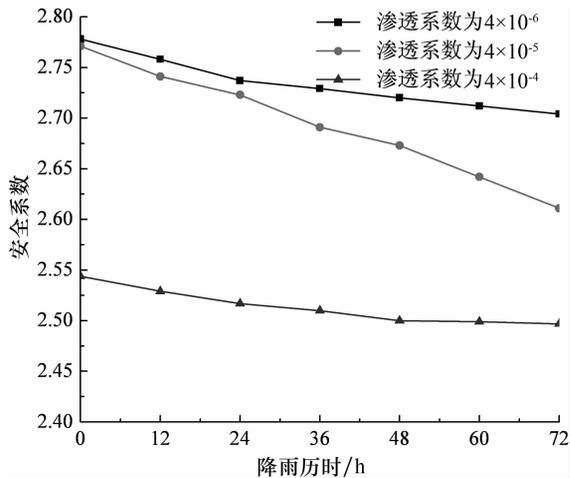


图9 不同渗透系数时安全系数随降雨历时的变化

Fig.9 Variation of safety factors with rainfall duration under different coefficients of permeability

4 结论

1)基于非饱和渗流理论,结合有限差分软件FLAC^{3D}渗流分析模块,采用内置FISH语言自编程序,可对降雨条件下拓宽路堤边坡的非饱和-饱和和渗流进行模拟.

2)降雨初期路堤填土基质吸力迅速减小,随降雨历时增加,地表附近形成暂态饱和区,孔隙水压力趋近于0.

3)考虑降雨入渗的影响时,基质吸力降低使拓宽路堤土体软化,抗剪强度大幅降低,安全系数明显减小.土工格栅加筋可以有效减小降雨入渗对拓宽路堤稳定性的影响.

4)路堤填土渗透系数对路堤边坡稳定性影响较大,实际工程中应保证新路堤填土的压实度并采取边坡防护措施以减小雨水入渗的影响.

参考文献

[1] 孙广忠. 中国典型滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 13-115.
SUN Guangzhong. Typical landslides in China[M]. Beijing: Science Press, 1998: 13-115. (In Chinese)

[2] 苏永华, 罗正东, 常伟涛. 基于模拟试验的加筋切填路基变形

影响因素敏感性分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2011, 38(3):12-15.

SU Yonghua, LUO Zhengdong, CHANG Weitao. Sensitivity analysis of the reinforced cut and fill subgrade distortion factors based on simulation test[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011, 38(3):12-15. (In Chinese)

[3] 邹维列. 非饱和路堤对加载和降雨入渗响应的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1512-1519.

ZOU Weilie. Model tests on responses of unsaturated road-embankments to loading and rainfall infiltration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1512-1519. (In Chinese)

[4] 言志信. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定性数值分析[J]. 铁道建筑, 2013(7): 83-85.

YAN Zhixin. Numerical analysis of rainfall infiltration on stability of unsaturated soil slope under seepage condition[J]. Railway Engineering, 2013(7): 83-85. (In Chinese)

[5] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E C. Effect of hydraulic properties of soil on rainfall-induced slope failure[J]. Engineering Geology, 2010, 114(3): 135-143.

[6] 王协群, 张有祥, 邹维列, 等. 降雨入渗条件下非饱和路堤变形与边坡的稳定数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3640-3644.

WANG Xiequn, ZHANG Youxiang, ZOU Weilie, et al. Numerical simulation for unsaturated road-embankment deformation and slope stability under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11):1640-3644. (In Chinese)

[7] 武彩萍. 人工降雨条件下黄土边坡的室内模型试验研究[D]. 西安: 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 2013: 29-54.

WU Caiping. Indoor model test research on loess slope under artificial rainfall conditions[D]. Xi'an: College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, 2013: 29-54. (In Chinese)

[8] 蒋中明, 熊小虎. 基于FLAC^{3D}平台的边坡非饱和和降雨入渗分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 854-861.

JIANG Zhongming, XIONG Xiaohu. Unsaturated seepage analysis of slope under rainfall condition based on FLAC^{3D}[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 854-861. (In Chinese)

[9] 刘小平, 赵明华. 降雨对非饱和土路基含水量的影响分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2008, 35(8): 9-13.

LIU Xiaoping, ZHAO Minghua. Analysis of the seepage of unsaturated roadbed with rainfall effect[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2008, 35(8): 9-13. (In Chinese)

[10] 张社荣. 强降雨特性对饱和-非饱和边坡失稳破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4102-4112.

ZHANG Sherong. Influence of heavy rainfall characteristics on saturated-unsaturated slope failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4102-4112. (In Chinese)

[11] Itasca Consulting Group, Inc. Online manual of FLAC^{3D} fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions[M]. Version 3.0. Minneapolis: Itasca Inc, 2003: 11-18.

[12] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.

[13] JTG D30-2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 54-55.

JTG D30-2015 Specifications for design of highway subgrades [S]. Beijing: China Communications Press, 2015: 54-55. (In Chinese)