

降雨入渗条件下框架锚杆支护边坡 稳定性与变形分析

叶帅华^{1,2}, 唐宁^{1,2}, 李京榜³

(1. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

3. 兰州工业学院 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 降雨引起的滑坡问题一直是工程界所面临的难题, 也是工程界研究的热点问题。国内外学者针对降雨引起的滑坡问题展开了多方面的研究, 框架预应力锚杆作为一种新型支挡结构, 对降雨引起的滑坡问题有很好的治理效果。因此本文在前人研究基础上, 针对降雨入渗引起的边坡基质吸力、位移、稳定性问题进行了研究。结合实际工程, 通过数值模拟软件 PLAXIS 3D 建立三维有限元模型, 首先对降雨入渗条件下框架锚杆支护边坡的基质吸力、位移和稳定性进行分析, 然后分别考虑降雨时间、降雨强度和地下水位对边坡加固前后基质吸力、边坡位移和稳定性的影响情况。结果表明: (1) 基质吸力在降雨前随坡高呈线性增加, 降雨后基质吸力迅速降低, 边坡最大位移值发生在边坡坡脚附近区域; (2) 边坡基质吸力随降雨时间增大而减小, 边坡表面基质吸力下降得更快; (3) 降雨强度越大, 基质吸力下降得越快, 边坡位移也随之增大, 边坡安全系数降低; (4) 地下水位越高, 边坡基质吸力下降得越快, 边坡位移增加越快, 边坡安全系数越小。

关键词: 降雨入渗; 地下水; 孔隙水压力; 框架锚杆; 基质吸力; 边坡稳定性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)01-0077-13

Stability and deformation analysis of slope supported by frame anchors under rainfall infiltration

YE Shuai-hua^{1,2}, TANG Ning^{1,2}, LI Jing-bang³

(1. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology,

Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. College of Civil Engineering, Lanzhou Institute of Technology,

Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Rainfall-induced landslides have persistently posed challenges in engineering, constituting a focal point for research endeavors in the discipline. The frame prestressing anchor, serving as an innovative support structure, demonstrates a beneficial influence on rainfall-induced landslides. Therefore, this work studies the matric suction, displacement and stability of slope caused by rainfall infiltration. Combined with the actual project, a three-dimensional finite element model was established by using the numerical simulation software PLAXIS 3D. Firstly, the matric suction, displacement and stability of the frame anchor supporting slope under the condition of rainfall infiltration were analyzed. Then, the effects of rainfall time, rainfall intensity and groundwater level on matric suction, slope displacement and stability before and after slope reinforcement were considered respectively. The findings indicate that: (1) matric suction exhibits a linear increase with slope height before rainfall, followed by a rapid decline after rainfall, with maximum slope displacement occurring proximal to the slope toe. (2) Matric suction of the slope diminishes with an increase in rainfall duration, and the matric suction of the slope surface experiences a swifter reduction. (3) Elevated rainfall intensity

收稿日期: 2022-08-20

基金项目: 国家自然科学基金 (52168050; 51768040; 51508256); 2023年甘肃省高校青年博士支持项目 (2023QB-052); 甘肃省高校青年博士基金 (2023QB-048)。

作者简介: 叶帅华 (1983—), 男, 河南巩义人, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事支挡结构、地基处理及岩土工程抗震方面的教学和研究工作。E-mail: yeshuaihua@163.com。

correlates with an accelerated decrease in matric suction, heightened slope displacement, and a diminished slope safety factor. (4) An elevated groundwater level is associated with a hastened reduction in slope matric suction, an expedited increase in slope displacement, and a diminished slope safety factor.

Key words: rainfall infiltration; groundwater; pore water pressure; frame anchor; matric suction; slope stability

0 引言

边坡稳定性分析主要是对边坡稳定性进行计算并评价边坡的现状和可能发展的趋势,从而为边坡防护工程提供一定的理论支持。目前,边坡稳定性的分析方法主要有工程地质分析法、极限平衡法以及有限元强度折减法^[1]。工程地质分析法主要依靠实际工程经验,辅以简单的分析计算对边坡稳定性进行初步评价,得出定性结论。极限平衡法^[2]是取极限状态下的任意土条为研究对象,分析其受力情况,建立极限平衡方程来求解未知量,最常用的方法有瑞典条分法、毕肖普条分法和杨布条分法。有限元强度折减法则是对土体参数(黏聚力和内摩擦角)进行折减,具体是将土体参数除以一系数得到新的参数值,通过试算的方式使其达到极限平衡状态。

目前,对于降雨入渗对边坡稳定性的影响研究已经取得了一定进展。ALONSO 等^[3]考虑了降雨时间、降雨强度对边坡稳定性的影响,结果表明:在一定范围内,降雨时间和降雨强度越大,对边坡稳定性系数的影响越大。SUN 等^[4]应用两相耦合理论对边坡应力场和渗流场进行耦合,建立了多相耦合方程,结果表明:降雨入渗过程中,由于孔隙气压力的存在,使得降雨渗透向土体内部迁移的速率变缓,在渗流分析中,必须考虑孔隙气压力影响。李兆平等^[5]通过编制计算机程序,求解了基质吸力变化对边坡稳定性系数影响的计算公式。周家文等^[6]考虑了基质吸力对滑移面抗剪强度的影响,采用二维有限元将渗流场和应力场进行耦合,将降雨入渗问题的边坡稳定性图形化,最终得到最危险滑移面所对应的最小安全系数。孔郁斐等^[7]运用极限平衡法,通过有限元软件对降雨条件下的边坡稳定性进行研究,分析表明:边坡安全系数最小值出现在停雨之后。李炎隆等^[8]基于工程实例,采用强度折减法,对降雨入渗条件下边坡的渗流场进行了计算,并对边坡在降雨入渗下的安全系数进行了求解。叶帅华等^[9]依托实际工程,利用 PLAXIS 3D 软件计算得到了多级黄土边坡下土体的有效应力、基质吸力、水平位移、竖直沉降以及边坡安全系数。刘畅等^[10]结合天津市某基坑实测数据,采用 PLAXIS 2D 有限元分析软件,分析了降雨对软

土基坑支护结构变形的影响机理。

还有一些学者对于降雨入渗条件下锚杆支护边坡稳定性进行了研究。李帅等^[11]基于极限平衡法,通过数值模拟和理论公式计算对比分析有无锚杆支护下的边坡稳定性,得出了锚杆的支护能力随着降雨强度的增加呈现递减趋势的结论。次仁拉姆^[12]基于强度折减法,对降雨入渗条件下边坡稳定性系数以及锚索轴力的变化情况进行了研究,结果表明:降雨总量一定时,降雨入渗范围随降雨强度增大而减小,坡体表面附近暂态饱和区域随降雨强度增加而增大,安全系数随降雨强度增大而减小,锚索轴力随降雨强度增大而增大。杨子莹等^[13]对强降雨下框架格构梁加固边坡进行了监测,结果表明锚杆加固后的边坡位移和稳定性相比较未加固的边坡都呈现减小的趋势。周勇等^[14]采用数值模拟分析了强降雨下框架预应力锚杆加固边坡稳定性的影响参数,结果表明:降雨持时、降雨强度、地下水位、土体渗透系数对降雨条件下锚杆加固边坡的抗拔承载力影响显著,而边坡安全系数存在明显的“滞后效应”。温学涛^[15]结合工程实例,把降雨入渗下边坡采用框架预应力锚杆支护作为一个整体研究,结果发现:边坡孔隙水压力随降雨持时和渗透系数的增大而增大,边坡安全系数随降雨持时和渗透系数的增大而减小,而支护结构内力、土体位移和土压力随降雨持时和渗透系数的增大而增大。李龙起等^[16]通过室内试验,探讨了不同工况下边坡的位移、结构内力变化规律,结果表明:相同降雨条件下,无支护边坡位移发展模式呈现渐近性、推动性的特点,有支护边坡呈现陡变性、牵引性的特点。周粲铭等^[17]采用 GeoStudio 软件建立了降雨入渗锚杆加固多级边坡的分析模型,结果表明:随着降雨强度和持续时间的增大,锚杆轴力及坡面位移均增大,边坡安全系数降低。董梅等^[18]采用考虑基质吸力影响的边坡安全系数计算方法,根据老虎岭遗址的实际降雨数据,开展不同降雨入渗条件下遗址剖面的稳定性数值模拟分析,为土遗址的科学保护提供一定的科学依据。

综上所述,针对降雨入渗引起的框架锚杆边坡基质吸力、位移、稳定性问题的研究较少,本文基

于强度折减法,依托实际的工程案例,建立降雨入渗条件下框架锚杆支护边坡的计算模型,模拟实际工程下降雨入渗对框架锚杆支护边坡变形和稳定性的影响。为了更好地为工程服务,分别研究了降雨时间、降雨强度和地下水位对边坡加固前后基质吸力、边坡位移和稳定性的影响情况。

1 工程概况

本文基于兰州市某边坡加固工程,边坡土体为黄土状粉土,坡高为 13 m,坡度为 60°,由地质勘察报告可知,该边坡地下水位于边坡坡脚以下 7 m 处。边坡加固方式采用框架锚杆支护,共布置 4 排锚杆,锚杆采用 32 mm 的 HRB335 级钢筋,锚杆设计参数如表 1 所示,框架梁、柱截面均为 300 mm×300 mm,挡土板厚度为 150 mm。土体及加固材料参数如表 2 所示,边坡剖面如图 1 所示。

表 1 锚杆设计参数

Table 1 Design parameters of anchor rod

锚杆编号	锚头所在高度/m	自由段长度/m	锚固段长度/m	锚固直径/mm
1	2.5	6	10	150
2	5.0	6	9	150
3	7.5	5	8	150
4	10.0	4	8	150

表 2 土体及加固材料参数

Table 2 Parameters of soil and reinforcement materials

项目名称	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/(kN/m ²)	重度/(kN/m ³)	泊松比
黄土	16	24	1.1×10 ⁴	17.8	0.33
框架梁、柱	—	—	3.0×10 ⁷	25.0	0.20
挡土板	—	—	3.0×10 ⁷	24.0	0.20
锚杆自由段	—	—	6.5×10 ⁵	—	—
锚杆锚固段	—	—	3.0×10 ⁷	24.0	0.20

单位:未注明均为mm

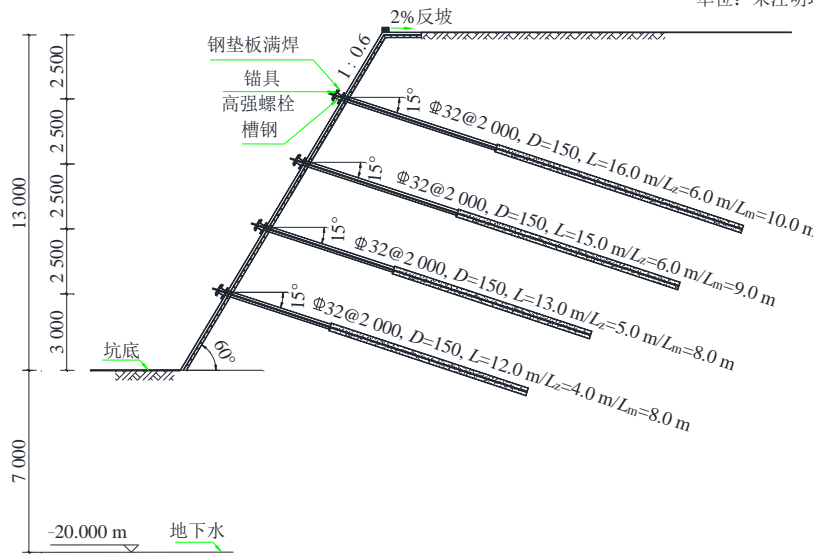


图 1 边坡剖面图

Fig. 1 Profile of slope

2 框架锚杆边坡加固分析

2.1 有限元模型的建立

在 PLAXIS 3D 软件中,土体采用摩尔-库伦本构模型。在定义水力条件时,地下水位于边坡坡脚较深的位置,所以可以通过工程勘察数据在钻孔中定义水力条件直接生成孔压。之后对加固材料进行定义,框架锚杆由锚杆、横梁、立柱以及挡土板构成,采用点对点锚杆模拟锚杆自由段,锚杆锚固段采用 Embedded 桩来模拟,锚杆自由段和锚固段采用铰连结,框架梁、柱以及挡土板分

别采用梁单元和板单元来模拟,并将表 2 的参数赋予结构。边坡在 X、Y、Z 三个方向的土体饱和渗透系数为 0.432 m/d。

本模型将边坡底部和左右两侧边界设置为关闭状态,边坡顶部和坡面设置为渗透状态,并以 500 mm/d 的降雨强度持续降雨 3 h 进行计算,由此建立降雨入渗条件下框架锚杆加固边坡的三维有限元模型,有限元模型的几何尺寸为 45 m×10 m×20 m,有限元模拟图和锚杆支护结构图分别如图 2 和图 3 所示,网格划分为 11 951 个单元和 21 584 个节点,如图 4 所示。

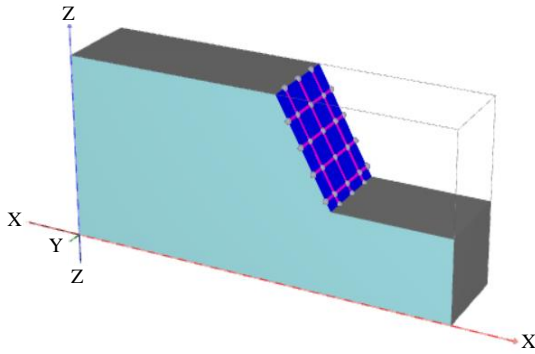


图2 有限元模拟图

Fig. 2 Finite element simulation

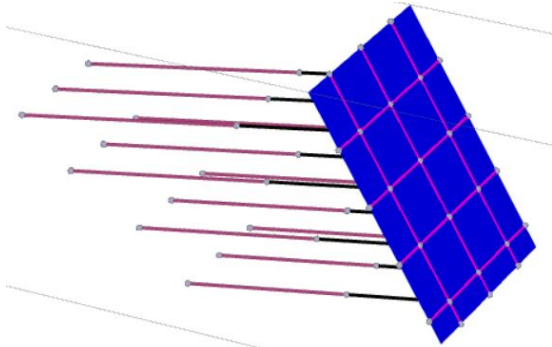


图3 锚杆支护结构图

Fig. 3 Support structure of anchor rod

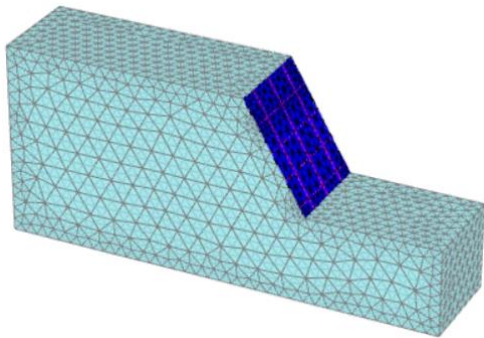


图4 网格划分图

Fig. 4 Grid partitioning

2.2 土-水特征曲线

土体的渗透系数在饱和土中为一常数，在非饱和土中是随基质吸力变化的函数，在本文计算中，渗透系数、饱和度和基质吸力的关系引用文献[9]的计算公式，函数表达式为：

$$k_w = \frac{k_{ws}}{1 + [a(u_a - u_w) / (\rho_w g)]^n} \quad (1)$$

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad (2)$$

式中： k_w 为渗透系数； k_{ws} 为饱和土体渗透系数； S 、 S_r 、 S_e 分别为饱和度、残余饱和度和有效饱和度； a 、 u_a 、 u_w 分别为土性常数、孔隙气压力和孔隙水压力；

$\rho_w g$ 表示势能； n 为拟合公式的经验系数，以反映土体孔径的分布特征。渗透系数曲线和土-水特征曲线分别如图5和图6所示。

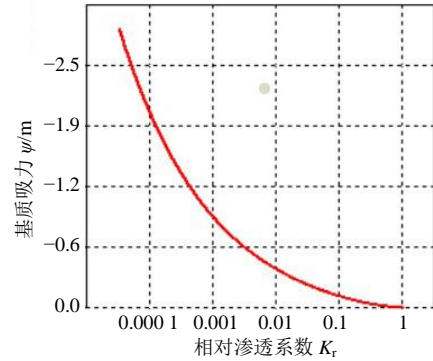


图5 渗透系数曲线

Fig. 5 Permeability coefficient curve

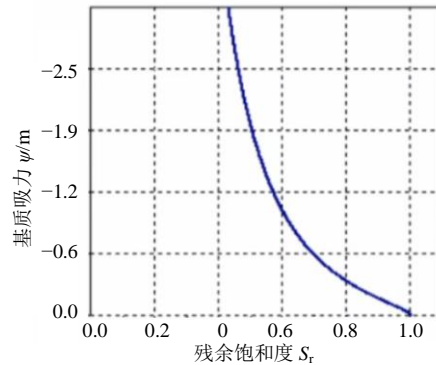


图6 土-水特征曲线

Fig. 6 Soil-water characteristic curve

2.3 边坡基质吸力分析

降雨入渗引起的边坡破坏往往发生在浅层土体中湿润峰处，且多为平行于边坡表面的破坏。但在分层假定模型中，由于雨水入渗，导致饱和区和基质吸力降低，土体黏聚力和内摩擦角降低，从而导致土颗粒之间的黏结力降低，土体抗剪强度也相应降低，所以边坡破坏面可能发生在饱和层和过渡层之间的交界面处。为了进行渗流分析，需设合适的降雨边界条件，边坡坡面和顶部设为渗流边界，当降雨强度小于土体渗透系数时，取流量边界，当降雨强度大于土体渗透系数时，取水头边界，边坡底部和左、右两侧设为不透水边界。由于降雨入渗影响边坡范围为边坡表层土体，故可以通过分析孔隙水压力变化来确定湿润峰位置，从而获得湿润峰垂直边坡坡面的迁移深度。PLAXIS 3D利用潜水位计算生成稳态孔压，在水位线处孔隙水压力值为0。降雨入渗对边坡基质吸力有很大的影响。

图7和图8分别为降雨前和降雨1h后边坡基质吸力变化云图，由图7~8可知，在降雨发生之前，边坡基质吸力随坡高呈线性增加，在降雨初

期,边坡表层土体基质吸力较高,这是由于降雨前边坡表层土体比较干燥,含水率较小,边坡处于非饱和状态。随着降雨不断入渗,湿润峰向坡体内部推进,边坡饱和区域扩大,非饱和区域缩小,随之边坡表层土体含水率不断增大,在坡体表面和内部形成了水力差,导致雨水下渗速率降低,边坡基质吸力也随之降低。而边坡表层土体基质吸力降速最快,基质吸力几乎降为 0,表明表层土体含水率已经趋于饱和。

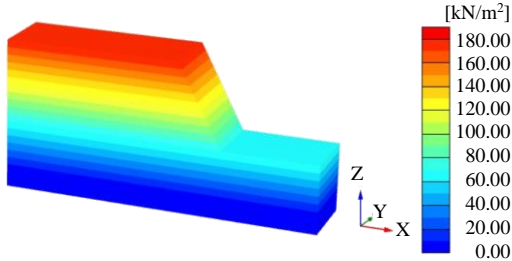


图 7 降雨前边坡基质吸力变化云图

Fig. 7 Slope matric suction variation nephogram before rainfall

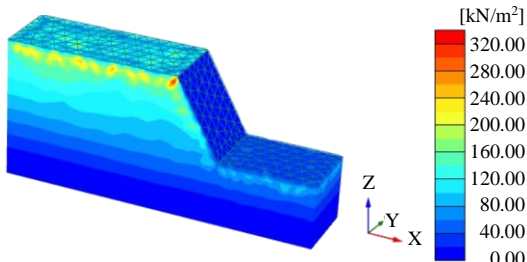


图 8 降雨 1 h 后边坡基质吸力变化云图

Fig. 8 Slope matric suction variation nephogram after 1 h of rainfall

2.4 边坡位移计算结果分析

图 9 与图 10 分别为降雨入渗条件下边坡在框架锚杆加固前后的总位移(由 x 和 y 两个方向的合成位移)云图,由图 9~10 可知,边坡最大位移发生在边坡坡底到坡面中部区域,最大位移值为 62.07 mm,采用框架锚杆支护之后最大位移值为 59.16 mm,降幅为 4.7%。这表明框架锚杆在限制边坡向临空面的位移上发挥了作用,对边坡稳定性有积极的影响。

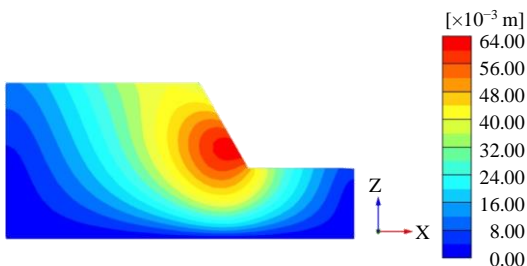


图 9 框架锚杆加固前边坡总位移云图

Fig. 9 Total displacement nephogram of slope before reinforcement by frame anchors

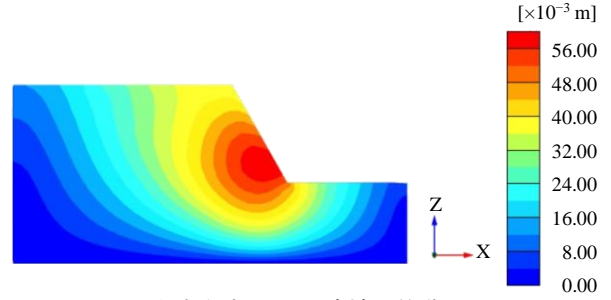


图 10 框架锚杆加固后边坡总位移云图

Fig. 10 Total displacement nephogram of slope after reinforcement by frame anchors

为进一步研究降雨入渗对边坡稳定性的影响,可以在边坡内部和表面设置监测点。由于边坡较高,为了更好地分析降雨入渗对边坡的影响,对监测点进行加密布置。监测点布置如图 11 所示。

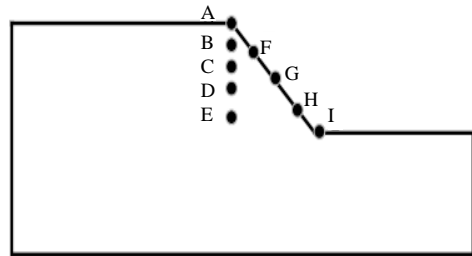


图 11 监测点布置图

Fig. 11 Layout of monitoring points

图 12 为框架锚杆加固前边坡监测点水平位移随降雨时间变化曲线,由图 12 可知,在降雨开始阶段,坡体内部处于稳定状态,随着供水时间增加,雨水不断渗入土体,坡体含水率增大,湿润峰向深层土体迁移,水平位移也随之增大。边坡水平位移最大值发生在边坡坡脚附近区域,从坡底到坡面依次呈现出递减的趋势,这是由于在自重应力和渗流力的共同作用下,坡底应力高于坡面,从而导致坡底位移大于坡面。

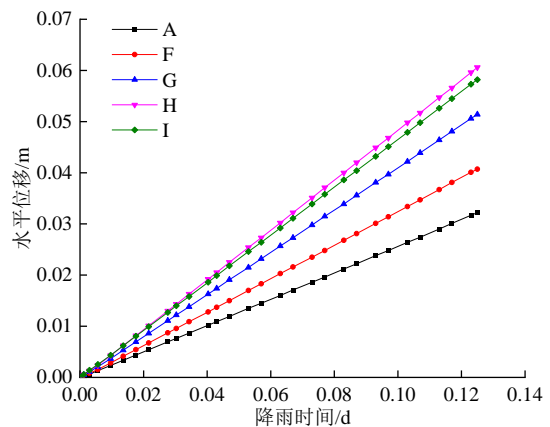


图 12 加固前边坡监测点水平位移随降雨时间变化曲线

Fig. 12 Horizontal displacement of slope monitoring points changes over rainfall time before reinforcement

图 13 为框架锚杆加固前边坡监测点竖直沉降随降雨时间变化曲线，由图 13 可知，边坡不同测点竖直沉降随时间增大而增大，测点竖直沉降大小依次为 A>B>C>D>E。由此可知，降雨入渗引起边坡最大沉降发生在边坡坡顶位置，这是由于坡顶位置最先受到雨水的浸润，导致孔隙水压力急剧增大，从而导致土体在坡顶的沉降较大。

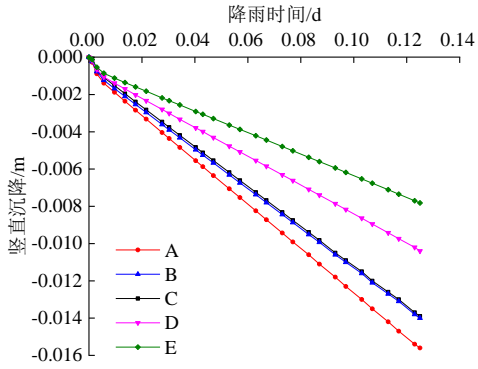


图 13 加固前边坡监测点竖直沉降随降雨时间变化曲线
Fig. 13 Vertical settlement of slope monitoring points changes over rainfall time before reinforcement

图 14 为框架锚杆加固后边坡监测点水平位移随降雨时间变化曲线，由图 14 可知，监测点 A 和 I 的水平位移值相比较框架锚杆支护之前的水平位移值都有所减小，A 点水平位移值减小 0.13 mm，I 点减小 8.77 mm，I 点的减小幅度较大，这说明框架锚杆对于发生水平位移较大的边坡区域有更好的限制作用。

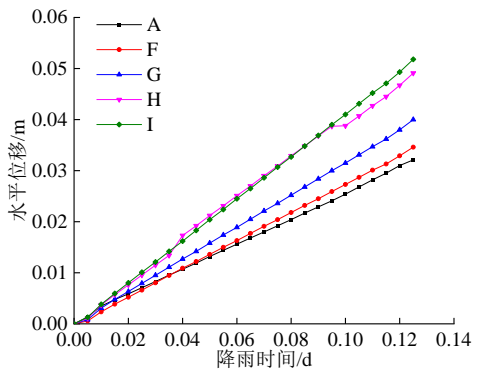


图 14 加固后边坡监测点水平位移随降雨时间变化曲线
Fig. 14 Horizontal displacement of slope monitoring points changes over rainfall time after reinforcement

图 15 为框架锚杆加固后边坡监测点竖直沉降随降雨时间变化曲线，由图 15 可知，A 点相比较锚杆加固之前的沉降值有所减小，E 点相比较锚杆加固之前的沉降值有所增大，A 点的沉降值减小 0.95 mm，E 点的沉降值增大 3.3 mm，其原因是因为 E 点位于边坡较深位置，E 点的沉降受地下水和孔隙水压力的影响较大，导致 E 点的沉降值有所增大。

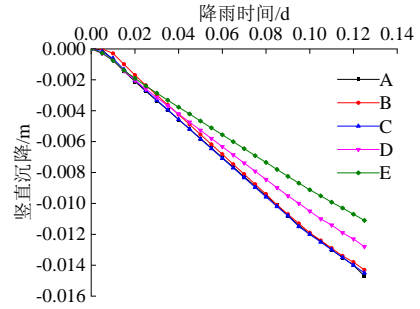


图 15 加固后边坡监测点竖直沉降随降雨时间变化曲线
Fig. 15 Vertical settlement of slope monitoring points changes over rainfall time after reinforcement

2.5 边坡稳定性分析

为了准确分析在降雨入渗条件下框架锚杆加固边坡的变形规律，PLAXIS 3D 软件安全分析中的偏应变增量云图能更加准确地反映边坡在降雨入渗条件下的滑移情况。图 16 和图 17 分别为边坡在降雨入渗条件下采用框架锚杆加固前后的偏应变增量云图，由图 16~17 可知，边坡滑移面为从坡顶贯穿到坡底的一条圆弧条带，在土体自重应力和渗流力的双重影响下，边坡土体经历了一个吸湿过程，土体颗粒之间的黏结效应降低，黏结因子降低，从而产生了塑性应变，边坡坡脚的偏应变增量云图颜色较深，这表明边坡坡脚的应变水平更高。相比较加固之前的偏应变增量云图，加固后边坡偏应变增量云图颜色更浅，条带更窄，影响范围更小，这说明框架锚杆对边坡的滑移起到加固的作用，控制了边坡向临空面的应变水平，使得边坡更加趋于稳定。

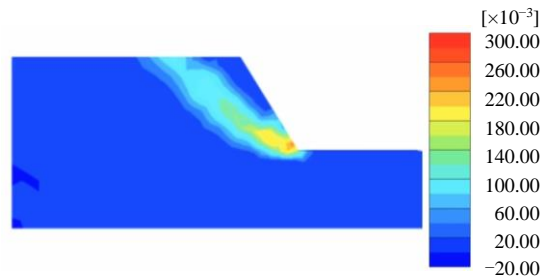


图 16 加固前边坡偏应变增量云图
Fig. 16 Slope deviatoric strain increment nephogram before reinforcement

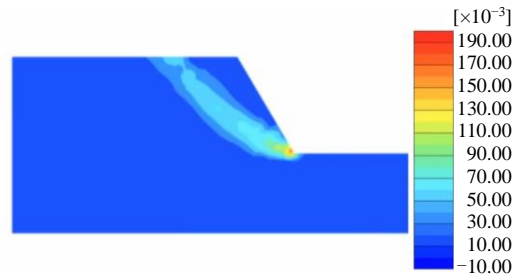


图 17 加固后边坡偏应变增量云图
Fig. 17 Slope deviatoric strain increment nephogram after reinforcement

采用数值分析软件 GeoStudio 进行建模,锚杆采用锚单元模拟,锚杆的自由段和锚固段分别采用结构杆和结构梁来模拟,采用 GeoStudio 中的边坡稳定性分析模块 SLOPE/W 来进行安全系数计算,表 3 给出了边坡在不同状态下的安全系数,由表 3 可知,边坡在未发生降雨之前安全系数为 1.582,降雨之后边坡安全系数降为 1.479,降幅为 6.51%,由此可知,随着降雨的持续和雨水的下渗,边坡安全系数在逐渐降低,此时边坡安全系数表明边坡已经处于临近失稳状态。采用框架锚杆加固后边坡的安全系数逐渐升高,最终升到 1.821,升幅为 15.11%,这表明框架锚杆能有效提高边坡的稳定性。

表 3 不同状态下边坡的安全系数

Table 3 Safety factor of slope under different conditions		
天然状态下	降雨条件下	边坡加固条件下
1.582	1.479	1.821

边坡位移和稳定性存在必然的联系,降雨入渗过程中,雨水不断渗入土体,导致土体的软化,土体抗剪强度参数发生改变,导致边坡位移不断增大,最终导致边坡发生失稳,当边坡发生失稳时,滑动体所产生的位移积累也将发生突变。

判断边坡失稳的依据之一是边坡土体位移是否发生突变,在 PLAXIS 3D 软件数值模拟中,评价安全系数最好的方式是通过绘制总乘子与监测点位移的关系曲线,虽然监测点的位移大小没有意义,但可以揭示破坏机理是否得到充分发展。图 18 为监测点 I 在降雨入渗条件下采用框架锚杆加固前后的位移-安全系数曲线,由图 18 可知,框架锚杆加固前,在降雨初期,边坡安全系数急剧增大,之后随着位移的不断积累,安全系数趋于一定值,故可以把降雨入渗条件下框架锚杆加固之前的边坡安全系数作为边坡发生失稳破坏的安全依据。而框架锚杆加固后的安全系数有很大的提高,可以把加固之后的边坡安全系数作为边坡失稳的储备依据。

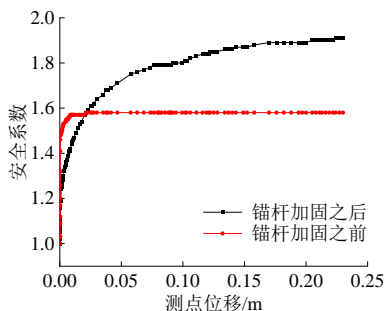


图 18 锚杆加固前后的位移-安全系数曲线图

Fig. 18 Displacement-safety factor curve before and after anchor reinforcement

3 降雨时间对边坡的影响

3.1 降雨时间对边坡基质吸力的影响

图 19~21 分别为降雨 1 h、2 h、3 h 边坡基质吸力变化云图,由图 19~21 可知,降雨 1 h、2 h、3 h 边坡最大基质吸力分别为 328.7 kPa、297.6 kPa、285.4 kPa,随着降雨时间的增大,边坡最大基质吸力减小,而边坡坡面基质吸力几乎减小为 0,这说明坡面土体已经趋于饱和,而降雨 3 h 时坡面饱和和区域范围更大,说明随着降雨时间的增大,雨水的不断入渗,坡面饱和和区域的范围在扩大,非饱和区域在不断减小。

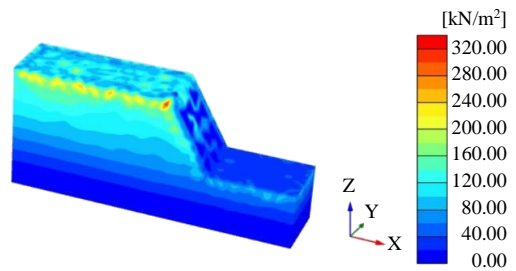


图 19 降雨 1 h 边坡基质吸力变化云图

Fig. 19 Matrix suction variation nephogram of slope after 1 h of rainfall

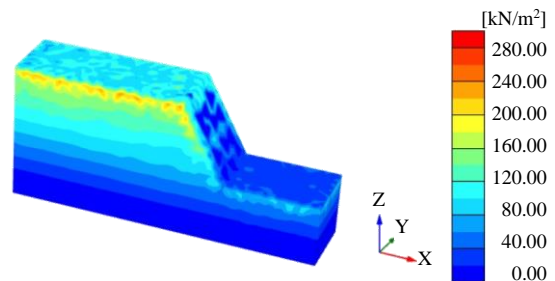


图 20 降雨 2 h 边坡基质吸力变化云图

Fig. 20 Matrix suction variation nephogram of slope after 2 h of rainfall

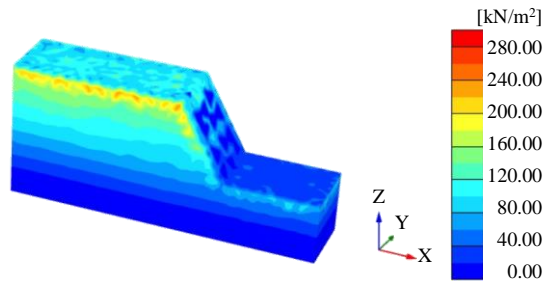


图 21 降雨 3 h 边坡基质吸力变化云图

Fig. 21 Matrix suction variation nephogram of slope after 3 h of rainfall

选取坡面监测点 I 和坡内监测点 E,分析两点基质吸力变化情况,图 22 为降雨 3 h 两监测点基质吸力随时间变化曲线,由图 22 可知,两点的基质吸力总体上在不同时段都随着时间的增大而减小,

在降雨初期,由于雨水的入渗,边坡土体含水率急剧增大,基质吸力迅速减小,坡内监测点 E 基质吸力由 102.88 kPa 降为 75 kPa,并在这一数值左右趋于稳定,坡面监测点 I 基质吸力由 105 kPa 降为 0,这是由于坡面土体率先受到雨水的浸润,在 0.02 d 时,基质吸力减小为 0,说明此时坡面土体已经趋于饱和。

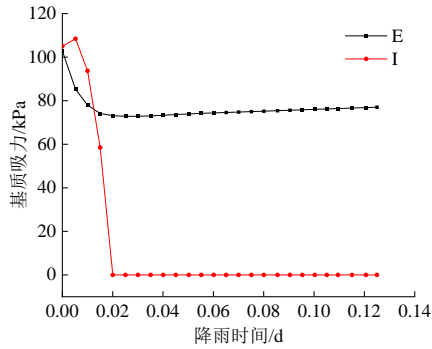


图 22 降雨 3 h 两监测点基质吸力随时间变化曲线
Fig. 22 Matrix suction changes over time at two measure points after 3 h of rainfall

3.2 降雨时间对边坡位移的影响

图 23 和图 24 分别为降雨入渗条件下框架锚杆加固前后监测点 E 和 I 位移随时间变化曲线,由图 23~24 可知,两点位移随时间的增大基本呈线性增加,采用框架锚杆加固边坡前, I 点最大位移值为 60.58 mm, E 点的最大位移值为 55.92 mm,这是因为 I 点处于边坡坡脚位置,在渗流力和土体自重应力的影响下,边坡坡脚处于薄弱位置,因而坡脚的整体位移要比坡内监测点位移值更大。采用框架锚杆加固边坡后, I 点最大位移值为 49.87 mm, E 点最大位移值为 52.94 mm,两测点位移值明显减小, I 点的最大位移值下降更大,这说明框架锚杆对控制薄弱点向临空面侧移更加有效,在采用支护结构加固边坡时,更应该对边坡坡脚区域加强设计力度。

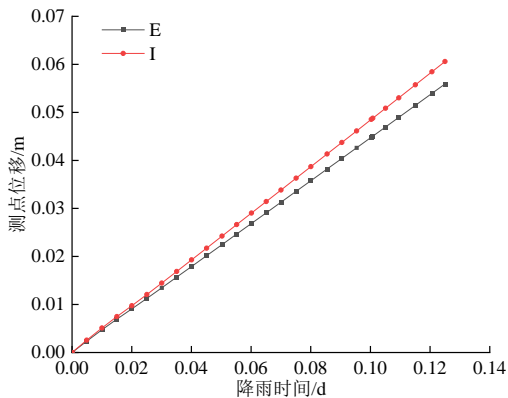


图 23 锚杆加固前不同测点位移随时间变化曲线
Fig. 23 Displacement changes over time at different measure points before anchor reinforcement

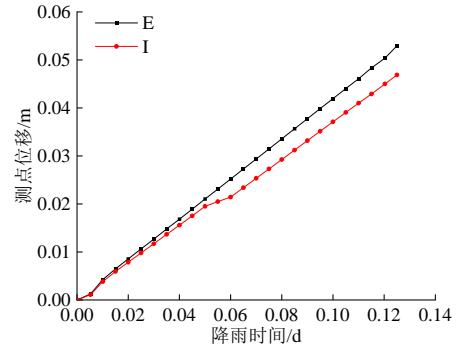


图 24 锚杆加固后不同测点位移随时间变化曲线
Fig. 24 Displacement changes over time at different measure points after anchor reinforcement

3.3 降雨时间对边坡稳定性的影响

图 25 为框架锚杆加固前后边坡安全系数随时间变化曲线,由图 25 可知,边坡安全系数随降雨时间的增大而不断减小,在采用框架锚杆加固边坡前,降雨时间为 1 h 时的边坡安全系数为 1.580,降雨时间为 3 h 时的边坡安全系数下降到 1.479,这说明在降雨强度和土体渗透系数相等的情况下,雨水全部渗入土体,随着时间的增大,安全系数也随之降低,但由于安全系数满足相应的规范,边坡并不会处于滑坡的危险状态。在采用框架锚杆加固边坡后,降雨时间为 1 h 时的边坡安全系数为 1.909,相比较加固之前安全系数上升 20.82%,降雨时间为 3 h 时的边坡安全系数为 1.821,相比较加固之前的安全系数上升 23.12%,这说明采用框架锚杆加固边坡后安全系数有很大提高,而降雨时间越长,锚杆的锚固效果越好。

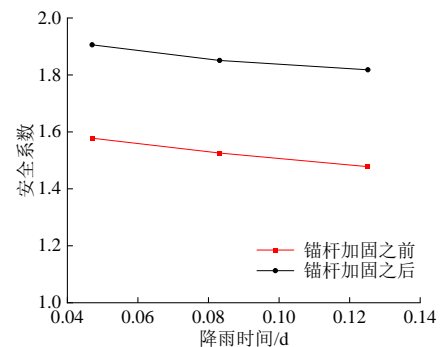


图 25 锚杆加固前后边坡安全系数随时间变化曲线
Fig. 25 Slope safety factor changes over time before and after anchor reinforcement

4 降雨强度对边坡的影响

4.1 降雨强度对基质吸力的影响

分别取 100 mm/d、300 mm/d 和 500 mm/d 这 3 种降雨强度分析其对边坡位移及稳定性的影响,图 26~28 分别为 3 种降雨强度下边坡基质吸力变化云

图,由图 26~28 可知,3 种降雨强度下基质吸力的最大值分别为 292.9 kPa、301.5 kPa、311.6 kPa,随着降雨强度的增加,基质吸力也在相应地增大,坡面和坡底基质吸力几乎为 0,表明坡面和坡底在 3 种降雨强度下已经趋于饱和,而 500 mm/d 降雨强度下边坡饱和区域范围更广,表明降雨强度越大,边坡表面土体饱和范围更大。

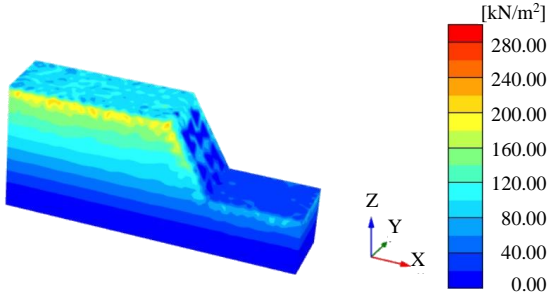


图 26 100 mm/d 降雨强度下边坡基质吸力变化云图
Fig. 26 Matric suction variation nephogram of slope under 100 mm/d rainfall intensity

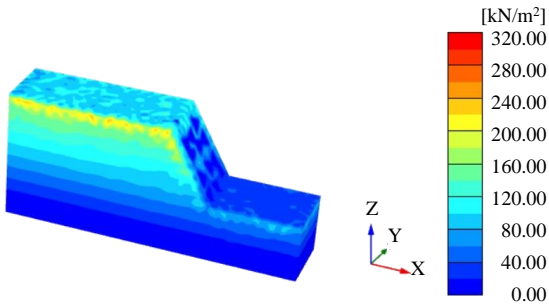


图 27 300 mm/d 降雨强度下边坡基质吸力变化云图
Fig. 27 Matric suction variation nephogram of slope under 300 mm/d rainfall intensity

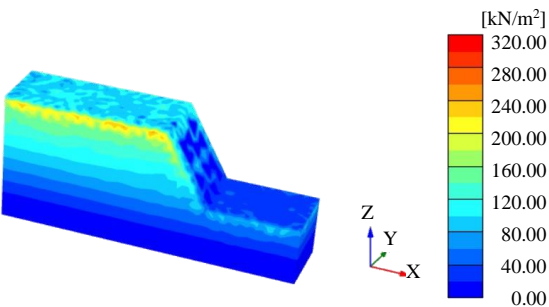


图 28 500 mm/d 降雨强度下边坡基质吸力变化云图
Fig. 28 Matric suction variation nephogram of slope under 500 mm/d rainfall intensity

图 29 和图 30 分别为监测点 E 和 I 在 3 种降雨强度下基质吸力随时间的变化曲线,由图 29~30 可知,无论是坡面监测点还是坡内监测点,基质吸力在 3 种降雨强度下短时间内都迅速降低,坡内监测点 E 在 3 种降雨强度下基质吸力分别在 0.024 d、0.042 d、0.068 d 时降为最低点,坡面监测点 I 在 3 种降雨强度下基质吸力分别在 0.026 d、0.030 d、0.055 d 时降为 0。这说明降雨强度越大,基质吸力

下降得越快,降为最低点所需的时间越小,而坡面监测点基质吸力下降的速度更快,这是由于坡面监测点率先受到雨水的浸润,含水率急剧增大,导致基质吸力下降得更快。

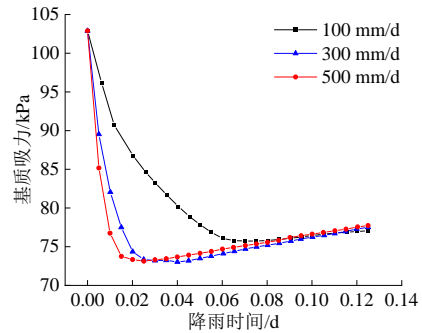


图 29 E 测点在不同降雨强度下基质吸力随时间变化曲线
Fig. 29 Matric suction changes over time under different rainfall intensities at point E

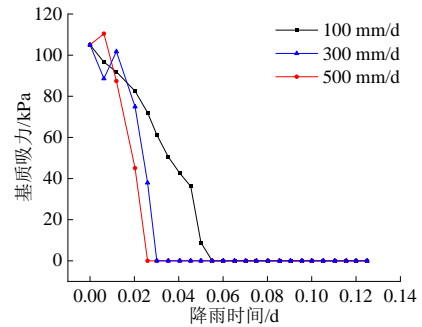


图 30 I 测点在不同降雨强度下基质吸力随时间变化曲线
Fig. 30 Matric suction changes over time under different rainfall intensities at point I

4.2 降雨强度对边坡位移的影响

图 31 和图 32 分别为框架锚杆加固前监测点 E 和 I 在 3 种降雨强度下的位移随时间变化曲线,由图 31~32 可知,同一降雨时刻,降雨强度越大,位移增大速度越快,最终积累的位移也越大,500 mm/d 降雨强度下,测点 E 位移为 60.66 mm,测点 I 位移为 55.98 mm,在长时间大量降雨的情况下,由于吸水导致土体饱和度增加,土体的单位重量和体积发生变化,这对于坡内土体的稳定性和位移也产生了较大的影响。

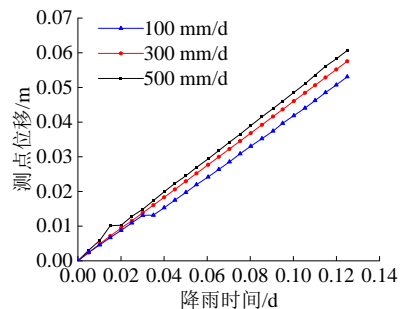


图 31 加固前 E 测点在不同降雨强度下位移随时间变化曲线
Fig. 31 Displacement changes over time under different rainfall intensities at point E before reinforcement

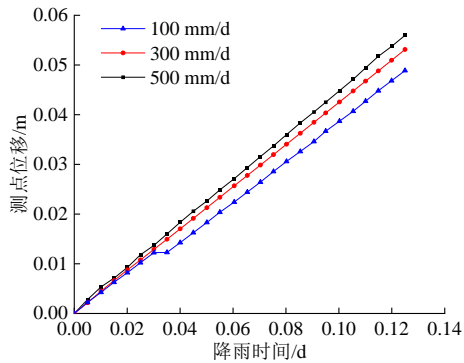


图 32 加固前 I 测点在不同降雨强度下位移随时间变化曲线
Fig. 32 Displacement changes over time under different rainfall intensities at point I before reinforcement

图 33 和图 34 分别为框架锚杆加固后监测点 E 和 I 在 3 种降雨强度下的位移随时间变化曲线,由图 33~34 可知,框架锚杆加固后边坡测点位移和未加固之前的变化趋势一致,同一时刻,降雨强度越大,边坡测点位移越大。相对于加固之前,不同降雨强度下边坡测点位移有所减小,500 mm/d 降雨强度下,测点 I 加固之前的位移为 55.98 mm,加固之后位移为 52.01 mm,测点 E 加固之前位移为 60.66 mm,加固之后位移为 50.55 mm,坡内测点 E 位移降幅更大,这是由于边坡加固强化了土体结构的连续性,降低坡体内部的滑动,也体现了框架锚杆的加固效果。

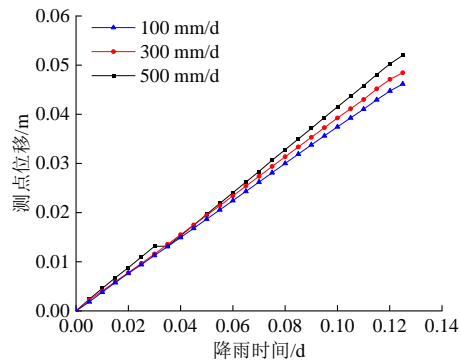


图 33 加固后 E 测点在不同降雨强度下位移随时间变化曲线
Fig. 33 Displacement changes over time under different rainfall intensities at point E after reinforcement

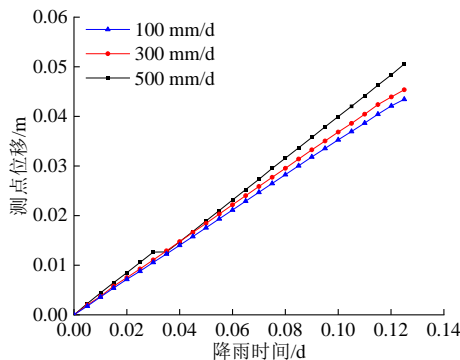


图 34 加固后 I 测点在不同降雨强度下位移随时间变化曲线
Fig. 34 Displacement changes over time under different rainfall intensities at point I after reinforcement

4.3 降雨强度对边坡稳定性的影响

降雨强度的差异对边坡稳定性的影响体现在安全系数的变化,图 35 为 3 种降雨强度下锚杆加固前后安全系数-降雨强度曲线,由图 35 可知,采用框架锚杆加固前,降雨强度由 100 mm/d 增加到 500 mm/d 时,边坡安全系数由 1.585 下降到 1.481,降幅为 6.56%,因此可以把降雨强度为 500 mm/d 的安全系数作为边坡稳定性的依据,而采用框架锚杆加固后边坡稳定性系数有所提高,在 500 mm/d 降雨强度下,安全系数增加至 1.835,表明框架锚杆加固后边坡稳定性提高。

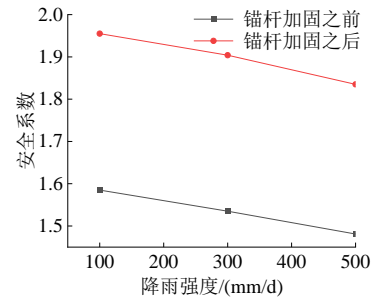


图 35 锚杆加固前后安全系数-降雨强度曲线
Fig. 35 Safety factor-rainfall intensity curve before and after anchor reinforcement

5 地下水位对边坡的影响

5.1 地下水位对边坡基质吸力的影响

分别将地下水位提升 2 m、下降 2 m,地下水水位分别位于边坡坡脚以下 5 m、7 m、9 m 的位置,分别记为工况一、二、三,对比 3 种工况下边坡基质吸力变化情况,从而分析降雨入渗条件下水位升降对边坡基质吸力和稳定性的影响。图 36~38 为 3 种工况下边坡基质吸力变化云图,由图 36~38 可知,3 种工况下边坡基质吸力最大值分别为 288.8 kPa、291.2 kPa、299.8 kPa,由于降雨入渗导致边坡水位上升,水位越高,边坡安全系数越低,边坡表层基质吸力下降越快,而边坡表层饱和区域也越大。

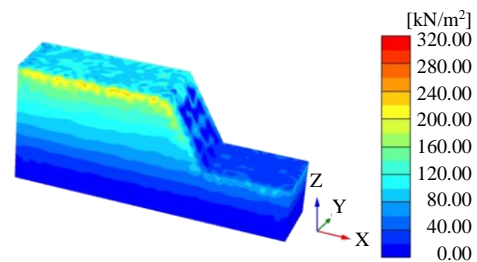


图 36 工况一边坡基质吸力变化云图
Fig. 36 Matric suction variation nephogram of slope under condition 1

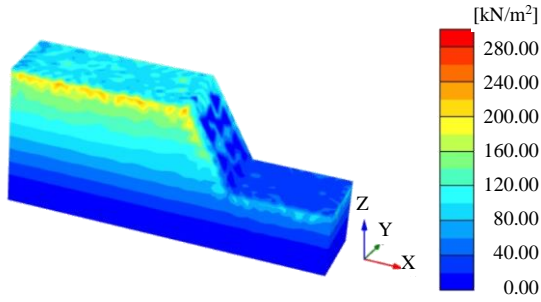


图 37 工况二边坡基质吸力变化云图

Fig. 37 Matrix suction variation nephogram of slope under condition 2

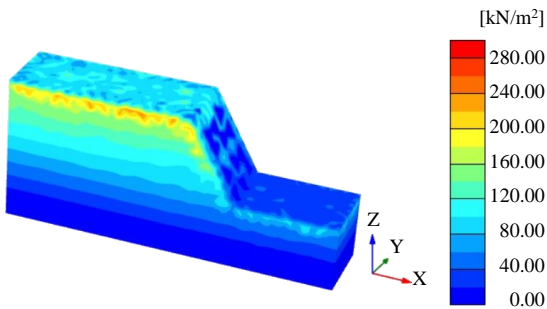


图 38 工况三边坡基质吸力变化云图

Fig. 38 Matrix suction variation nephogram of slope under condition 3

通过监测点观察基质吸力,进一步说明水位不同时边坡基质吸力的变化情况。图 39 和图 40 分别为监测点 E 和 I 在 3 种工况下基质吸力随时间变化曲线,由图 39 可知,坡内监测点 E 的基质吸力在 3 种工况下呈现的变化规律一致,都是基质吸力在短时间内急剧下降,下降至最低点时略微有所上升。由图 40 可知,坡面监测点 I 的基质吸力在 3 种工况下呈现的变化规律一致,都是短时间内急剧下降,最终降为 0。降雨入渗导致坡面含水率增大,边坡表面土体饱和,最终基质吸力降为 0,这也说明坡面监测点在 3 种地下水水位下的基质吸力符合整体边坡基质吸力的变化规律。

5.2 地下水水位对边坡位移的影响

在相同的降雨强度、渗透系数和持续时间下,考虑了不同地下水水位对边坡位移的影响。地下水水位的变化主要对坡面和坡底影响比较大,对坡顶的影响比较小。这是因为坡顶压力远比坡底和坡面小,因为负孔隙水压越大渗透系数越大,即坡底比坡顶渗透系数大,当降雨发生时,坡顶下部地下水不能因雨水入渗而受到补给,故其地下水水位变化不大。但对于坡底部分,不但渗透系数较大,且地下水水位埋深较浅,故很容易因降雨入渗而迅速补给地下水,从而使地下水水位溢出地表。此规律也正好验证了埋深较浅的地下水水位更容易增强坡底的水分入渗。图 41 和图 42 分别为监测点 E 和 I 在 3 种不同工况下位移随时间变化曲线,由图 41~42 可知,地下水水位埋深越浅,边坡位移越

大。而在同一地下水水位下,降雨入渗对坡面监测点 I 要比对坡内监测点 E 的影响更小,所产生的位移也要更小,这主要是因为自重应力和水分子运动的双重影响下,坡体内部产生了较大的沉降,在锚杆加固后,两测点的位移都下降,和 3.2 节降雨时间、4.2 节降雨强度对边坡位移的影响一致,这里不再赘述。

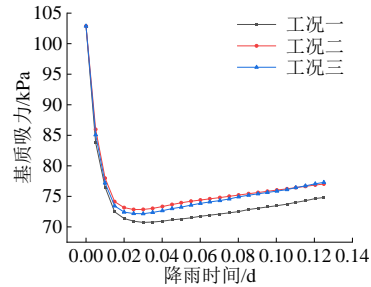


图 39 E 测点在不同工况下基质吸力随时间变化曲线
Fig. 39 Matrix suction changes over time under different conditions at point E

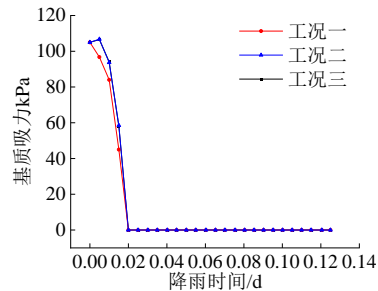


图 40 I 测点在不同工况下基质吸力随时间变化曲线
Fig. 40 Matrix suction changes over time under different conditions at point I

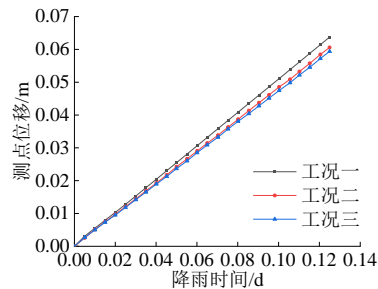


图 41 不同工况下 E 测点位移随时间变化曲线
Fig. 41 Displacement changes over time under different conditions at point E

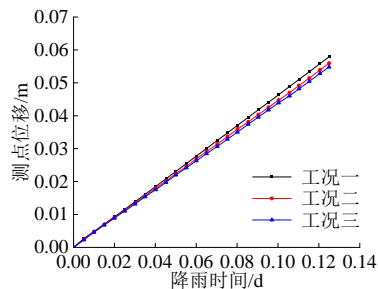


图 42 不同工况下 I 测点位移随时间变化曲线
Fig. 42 Displacement changes over time under different conditions at point I

5.3 地下水位对边坡稳定性的影响

图 43 为锚杆加固前后不同工况下的安全系数曲线,由图 43 可知,随着水位的增高,安全系数在降低,锚杆加固前,地下水位于边坡坡脚以下 5 m 时(工况一),边坡安全系数为 1.524,地下水位于边坡坡脚以下 9 m 时(工况三),边坡安全系数为 1.624,这也充分说明了水位埋深越浅对边坡稳定性的影响越大,锚杆加固后,地下水位于边坡坡脚以下 5 m 时(工况一),边坡安全系数为 1.852,地下水位于边坡坡脚以下 9 m 时(工况三),边坡安全系数为 1.942,增幅分别为 21.52%、19.58%。这说明框架锚杆对水位影响下边坡的稳定性起到积极的作用。

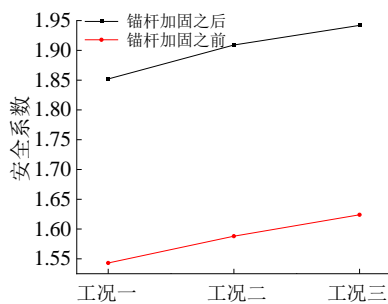


图 43 锚杆加固前后不同工况下的安全系数曲线

Fig. 43 Safety coefficient curves under different conditions before and after anchor reinforcement

6 结论

通过数值模拟软件 PLAXIS 3D 建立三维有限元模型并设置监测点,首先对降雨入渗条件下框架锚杆支护边坡的基质吸力、位移和稳定性进行分析,然后分别考虑降雨时间、降雨强度和地下水位对边坡加固前后基质吸力、边坡位移和稳定性的影响情况,得出几点主要结论:

(1) 基于强度折减法建立三维有限元模型,得到了边坡降雨前后的基质吸力、位移变化云图,结果表明:基质吸力在降雨前随坡高呈线性增加,降雨后基质吸力迅速降低,坡面基质吸力降为 0,边坡最大位移值发生在边坡坡脚附近区域。通过布置监测点的方式,得到监测点水平位移和竖直沉降最大值分别出现在边坡坡脚附近区域和坡顶区域,在采用框架锚杆加固后,水平位移值和竖直沉降值都有所减小,表明框架锚杆对限制边坡的变形有良好的作用。

(2) 通过设置不同的降雨时间,分析了不同降雨时间下边坡基质吸力、位移以及稳定性的情况,结果表明:边坡基质吸力随降雨时间增大而减

小,边坡表面基质吸力下降得更快。边坡加固前后位移都随降雨时间增大而增大,在采用框架锚杆加固后,监测点位移均有所减小,从而说明框架锚杆对限制边坡位移、提高边坡稳定性有很好的作用。

(3) 通过设置不同的降雨强度,分析不同降雨强度下边坡基质吸力、位移以及稳定性的情况,结果表明:降雨强度越大,基质吸力下降得越快,而随着降雨强度的增加,边坡位移也随之增大,边坡安全系数降低,边坡通过框架锚杆加固后,位移减小,稳定性有所提高。

(4) 通过设置不同的地下水位,分析不同地下水位下边坡基质吸力、位移及稳定性的情况,结果表明:地下水位越高,边坡基质吸力下降得越快,边坡位移增加越快,边坡安全系数越小,这说明高水位对边坡的影响更大。

参考文献

- [1] 黄润秋, 许强. 第三届全国岩土与工程学术大会论文集[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2009.
HUANG Run-qiu, XU Qiang. 3rd Conference of Geo-Engineering, China[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2009.
- [2] 卢坤林, 朱大勇, 甘文宁, 等. 一种边坡稳定性分析的三维极限平衡法及应用[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2276-2282.
LU Kun-lin, ZHU Da-yong, GAN Wen-ning, et al. 3D limit equilibrium method for slope stability analysis and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2276-2282.
- [3] ALONSO E, GENS A, LIORÉ T A, et al. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[C]//Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils. Paris, 1995.
- [4] SUN Y, NISHIGAKI M, KOHNO I. A study on stability analysis of shallow layer slope due to raining permeation[C]//Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils. Paris, 1995: 315-320.
- [5] 李兆平, 张弥. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 57-61.
LI Zhao-ping, ZHANG Mi. Effects of rain infiltration on transient safety of unsaturated soil slope[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 57-61.
- [6] 周家文, 徐卫亚, 邓俊晔, 等. 降雨入渗条件下边坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1066-1073.

- ZHOU Jia-wen, XU Wei-ya, DENG Jun-ye, et al. Stability analysis of slope under the condition of rainfall infiltration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1066-1073.
- [7] 孔郁斐, 宋二祥, 杨军, 等. 降雨入渗对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(6): 16-21.
- KONG Yu-fei, SONG Er-xiang, YANG Jun, et al. Rainfall's effect on the stability of unsaturated slopes[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(6): 16-21.
- [8] 李炎隆, 陈波, 马成成, 等. 基于 ABAQUS 的降雨入渗条件下基坑边坡稳定性分析[J]. 应用力学学报, 2017, 34(1): 155-161, 203, 204.
- LI Yan-long, CHEN Bo, MA Cheng-cheng, et al. Study on the stability of the foundation pit slope under rainfall infiltration conditions based on ABAQUS[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(1): 155-161, 203, 204.
- [9] 叶帅华, 时轶磊. 降雨入渗条件下多级黄土高边坡稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1648-1656.
- YE Shuai-hua, SHI Yi-lei. Stability analysis of multi-stage high slope with loess under rainfall infiltration[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1648-1656.
- [10] 刘畅, 季凡凡, 郑刚, 等. 降雨对软土基坑支护结构影响实测及机理研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 447-456.
- LIU Chang, JI Fan-fan, ZHENG Gang, et al. Measurement and mechanism of influences of rainfall on supporting structures of foundation pits in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 447-456.
- [11] 李帅, 林旺照. 降雨对系统锚杆加固边坡稳定性的影响[J]. 公路, 2020, 65(4): 47-51.
- LI Shuai, LIN Wang-zhao. Effect of rainfall on stability of slope reinforced by anchor bolt[J]. Highway, 2020, 65(4): 47-51.
- [12] 次仁拉姆. 不同降雨入渗条件下预应力锚索加固边坡稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2020, 40(4): 28-31, 37.
- CIREN La-mu. Stability analysis for slope reinforced by prestressed anchor cable with different rainfall infiltration[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(4): 28-31, 37.
- [13] 杨子莹, 于航. 膨胀土锚杆框架梁防护边坡强降雨试验研究[J]. 江西建材, 2019(7): 171, 173.
- YANG Zi-ying, YU Hang. Experimental study on protection slope with heavy rainfall by expansive soil anchor beam frame beam[J]. Jiangxi Building Materials, 2019(7): 171, 173.
- [14] 周勇, 王栋良, 王鑫. 强降雨条件下框架预应力锚杆柔性支护结构整体稳定性影响参数分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 233-244.
- ZHOU Yong, WANG Dong-liang, WANG Xin. Parametric analysis of influence on global stability of grillage flexible supporting structure with prestressed anchors under heavy rainfall[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(2): 233-244.
- [15] 温学涛. 降雨入渗框架预应力锚杆支护结构有限元分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2009.
- WEN Xue-tao. FEM analysis on grillage flexible supporting structure with prestressed anchors under raining[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009.
- [16] 李龙起, 罗书学, 魏文凯, 等. 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): 1772-1778.
- LI Long-qi, LUO Shu-xue, WEI Wen-kai, et al. Model tests of rainfall infiltration effect on bedding rock slope with weak interlayer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1772-1778.
- [17] 周黎铭, 董旭光, 李峥, 等. 降雨入渗对锚杆加固多级边坡稳定性影响分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12550-12556.
- ZHOU Can-ming, DONG Xu-guang, LI Zheng, et al. Stability influence analysis of multi-level slope reinforced with anchors by rainfall infiltration[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(28): 12550-12556.
- [18] 董梅, 郭青岭, 孔梦悦, 等. 考虑降雨入渗的良渚古城老虎岭遗址边坡稳定性分析[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 231-237.
- DONG Mei, GUO Qing-ling, KONG Meng-yue, et al. Slope stability analysis of Laohuling site in Archaeological Ruins of Liangzhu city considering real rainfall conditions[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(3): 231-237.