

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



强降雨作用下昔格达边坡渗流特性及稳定性分析

杨世豪^{1,3}, 苏立君^{1,2,3}, 张崇磊^{1,2}, 李丞^{1,3}, 胡兵立^{1,3}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室; 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;
2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 昔格达地层分布于中国西南, 其工程性质极差。为分析上覆第四纪残坡积物的昔格达组粉砂土边坡在强降雨作用下的渗流特性及稳定性, 结合石棉县莫家岗滑坡, 用数值模拟方法研究坡体渗流规律; 用 Morgenstern-Price 方法计算各时刻坡体稳定性系数, 并分析其变化规律。结果表明: 雨水在坡体中逐层入渗, 雨停后渗流过程将继续发展, 由于存在土层分界面, 坡体渗流特性不同于均质坡体; 降雨过程中, 孔隙水压力发生增长的范围在界面附近加速拓展, 雨停后, 土层分界面附近第四纪残坡积物仍处于近饱和状态; 降雨入渗导致坡体边坡稳定性系数下降, 且稳定性系数变化对降雨的响应存在滞后性。

关键词: 昔格达组; 层状边坡; 降雨入渗; 边坡稳定

中图分类号: P642.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2020)04-0019-09

Analysis of seepage characteristics and stability of Xigeda Formation slope under heavy rainfall

Yang Shihao^{1,3}, Su Lijun^{1,2,3}, Zhang Chonglei^{1,2}, Li Cheng^{1,3}, Hu Bingli^{1,3}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process; Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, P. R. China; 2. Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P. R. China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

Abstract: Xigeda Formation is distributed in southwest of China, and its engineering properties are very poor. In order to analyze seepage characteristics and stability of silty sand slope of Xigeda Formation overlying Quaternary residual slope sediments under heavy rainfall conditions, seepage law of slope is studied by numerical simulation based on Mojiagang landslide in Shimian County; Morgenstern-Price method is used to calculate safety factor of landslide and to analyze their variation laws. The results show that: rainwater infiltrates into slope layer by layer, and seepage process will continue after rainfall. As the existence of soil layer interface, seepage characteristics are different from homogeneous slope; during the rainfall process, the range of pore water pressure growth accelerates near the interface, and the Quaternary residual slope sediments near the interface is still in a near-saturated state after the rainfall; rainfall

收稿日期: 2019-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(41761144077)

作者简介: 杨世豪(1995-), 主要从事地质灾害启动机理研究, E-mail: 347295340@qq.com。

苏立君(通信作者), 男, 研究员, 博士生导师, E-mail: sulijun1976@163.com。

Received: 2019-11-27

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41761144077)

Author brief: Yang Shihao (1995-), main research interest: slope reliability, E-mail: 347295340@qq.com.

Su Lijun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: sulijun1976@163.com.

infiltration leads to reduction of safety factor of the slope, and stability has a lag in response to rainfall.

Keywords: Xigeda Formation; layered soil slope; rainfall infiltration; slope stability

昔格达地层为广泛分布于中国西南地区的半成岩河湖相沉积地层,形成于晚更新世与上第三系之间,主要由粉砂土和黏土组成^[1-2]。随着工程活动在昔格达地层分布区广泛开展,其工程性质引起学者关注。周平等^[3]、王志杰等^[4]研究发现,昔格达地层岩土体水稳性差,极易崩解。杜翔宇等^[5]研究昔格达地层岩土体的微观结构特性,并对其强度指标与含水率关系进行阐述。因力学性质特殊,昔格达地层分布区滑坡频发,相关学者对其进行了研究。黄绍槟等^[6]将昔格达滑坡归为覆盖层滑坡、昔格达基底滑坡和昔格达组层面滑坡 3 类。丁文富等^[7]提出,昔格达地层与上覆松散堆积层的接触界面、与下伏地层的界面以及层间软弱沉积结构面是该地层中主要的不良结构面。综上,昔格达地层边坡多为层状结构且滑面多位于不同土层接触面上。

降雨是常见滑坡诱发因素^[8],对昔格达地层岩土体遇水软化的特殊土体而言,这种作用尤为显著。降雨对边坡稳定性的主要影响在于土体孔隙水压力增加造成抗剪强度降低^[9]。此外,雨水入渗将在边坡表层岩土体形成暂态饱和区,使该区域土体自重增加,下滑力增大,边坡稳定性降低^[10]。White 等^[11]的研究采用降雨条件下土体体积含水率、孔隙水压力的变化规律来表征边坡的渗流特性。鉴于降雨入渗会对边坡稳定性造成严重影响,相关研究建立了边坡渗流特性与稳定性的关系^[12]。张建等^[13]对降雨触发浅层坡体失稳的迟滞现象及其与土质参数的关联性进行研究。层状边坡渗流规律较均质边坡更复杂。韩同春等^[14]认为,湿润锋至接触面时,引起接触面孔隙水压力上升是滑坡主要诱因。马吉倩等^[15]通过数值模拟方法,得到降雨条件及坡积土层厚度对含水率、孔隙水压力沿高程分布的影响规律。石振明等^[16]通过改进 Green-Ampt 模型,提出考虑降雨入渗的多层非饱和土边坡稳定性分析方法。上述研究阐述了层状边坡降雨渗流特征与稳定性变化规律。

昔格达地层边坡多为层状边坡,但目前针对降雨入渗作用下昔格达地层边坡内部渗流场分布规律研究较少。以四川省雅安市石棉县莫家岗滑坡为例,利用有限元方法模拟经历降雨边坡内渗流过程,并以 Morgenstern-Price 方法计算边坡各时刻稳定

性系数。通过研究坡内渗流特点及边坡在降雨作用下稳定性系数的变化规律,为昔格达地层滑坡治理提供参考。

1 计算理论

降雨入渗实质为坡内土体含水率上升,由非饱和和状态向饱和状态发展的过程。入渗过程中,含水率随深度分布可分为 4 部分,即:浅层饱和带、含水率变化较大的过渡带、含水率均匀分布的传导带和湿润度随深度减小的湿润区,湿润区前缘为湿润锋^[17]。

坡体中,水的运动基本方程为根据达西定律及质量守恒定律推导得到的 RICHARDS 方程^[18]。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial z} \right] = C(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial t}$$

式中: x 为水平方向; z 为竖直方向; h_m 为基质吸力水头; $k(h_m)$ 为非饱和土渗透系数函数; $C(h_m)$ 为比水容量及水土特征曲线斜率; t 为时间。其中,非饱和土渗透系数 $k(h_m)$ 有别于饱和土,达西定律中, $k(h_m)$ 等于常数渗透系数,为与体积含水率相关的函数,反映非饱和土中的水力关系对渗流的影响。

Morgenstern-Price 法可对任意形状滑动面进行求解,同时,满足竖向力、水平力及力矩的平衡,是一种常用极限平衡求解方法。基本计算原理为,假定两相邻土条的法向条间力和切向条间力之间存在一对水平方向坐标的函数关系,根据整个滑动土体边界条件进行迭代,求出问题的解^[7]。作为典型的复杂条分法,其计算过程比一般条分法复杂,但计算结果更为准确,因而,适用于利用数值模拟软件进行求解。

2 计算模型及工况设计

2.1 工程概况

莫家岗滑坡位于石棉县美罗乡狮子村 4 组,后缘地理坐标: N29°17'07.9", E102°26'52.8", 主滑方向为 184°,剖面呈上陡下缓形态,主滑方向坡高 80 m,总体坡度 16°,为中型浅层土质滑坡。坡体为典型层状结构,上部为第四系全新统残坡积物(Q4el+dl),黄褐色粉质粘土,局部夹碎块石,厚度 1.0~4.0 m;下部为第三系中统昔格达组粉砂土,强度较差;基岩为第三系中统昔格达组粉砂岩。

2.2 计算参数及边界条件

由试验测得,滑坡中第四纪残坡积物及昔格达组粉砂土相关参数见表 1。残坡积物水土特征曲线由软件内置样本函数拟合;昔格达粉砂土水土特征

曲线由粒径级配曲线拟合。两类土渗透系数函数根据相应土壤水分特征曲线,由 V-G 模型拟合^[19],昔格达组粉砂土粒径级配曲线如图 1 所示,两类土水土特征曲线及渗透系数函数曲线如图 2 所示。

表 1 物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters

土质类型	饱和渗透系数/($m \cdot h^{-1}$)	饱和含水率/($m^3 \cdot m^{-3}$)	残余含水率/($m^3 \cdot m^{-3}$)	重度/($kN \cdot m^{-3}$)	粘聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
昔格达组粉砂土	0.001 09	0.205	0.014	20 000	22	32
第四纪残坡积物	0.003 60	0.370	0.047	19 000	20	20

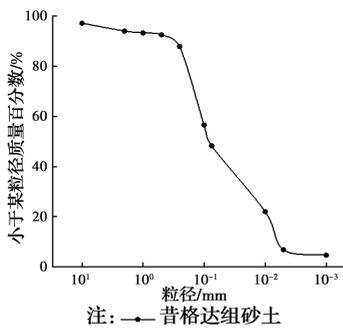


图 1 昔格达组砂土粒径级配

Fig. 1 Particle size distribution of Xigeda Formation soil

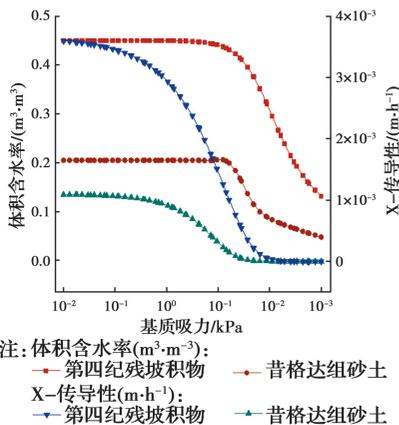


图 2 两种土水土特征曲线及渗透系数曲线

Fig. 2 SWCC & permeability coefficient curve

采用 Geo-studio 中的 seep/w 模块计算边坡渗流规律,geostudio 是适用于岩土工程数值模拟的计算软件,seep/w 为软件内专门用于非饱和土渗流计算的分析模块。seep/w 可进行稳态以及瞬态渗流计算分析,可以获得土体内部孔隙水压力、体积含水率等指标的空间及时间变化规律。此外,seep/w 模块的计算结果可与其他模块进行耦合计算,如与 SLPOE/W 耦合,获得考虑边坡内部基质吸力空间以及时间分布条件下边坡的稳定性系数。

莫家岗滑坡平面图利用无人机航拍图像获得,如图 3 所示,剖面图如图 4 所示,其中,剖面图参考文献[20]。坡体地下水位以上网格尺寸为 1 m,以下网格尺寸为 5 m。坡顶、坡中及坡脚设置 A、B、C 三处观测面。稳态分析中,模型上表面为自由边界,两侧及底部为不透水边界。瞬态分析包括降雨和不降雨两段,其中,降雨期间,坡体表面设为单位流量边界,流量等于降雨量,雨停后为自由边界。

结合石棉县当地情况及中国气象局关于降雨强度的划分标准,设定模拟共历时 7 d,前 4 天为降雨过程,降雨强度分别设为工况 1 大暴雨(0.006 m/h)和工况 2 大雨(0.001 6 m/h)两种,后 3 天无降雨作用。

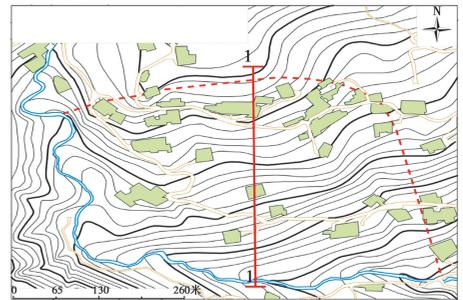


图 3 莫家岗滑坡平面图

Fig. 3 Plane map of Mojiagang landslide

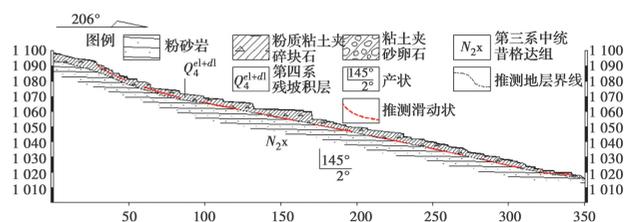


图 4 莫家岗滑坡剖面图(单位:m)

Fig. 4 Profile of Mojiagang landslide (unit: m)

3 计算结果分析

3.1 降雨作用下边坡含水率变化情况

3.1.1 坡顶监测面 图5、图6为两种工况下模拟过程监测面A的含水率分布。在大暴雨工况下, $t=48$ h, 坡体出现饱和区, 随降雨持续, 饱和区扩大; $t=96$ h, 最大入渗深度约3 m, 饱和区深度达2 m; 雨停后, 饱和区消散, 雨水继续入渗。 $t=168$ h, 入渗深度达3.5 m。A处渗流仅发生在覆盖层中, 为均质土体中渗流。降雨时, 含水率沿深度分布曲线含饱和区、过渡区、传导区、湿润区及湿润锋, 与张建等^[13]的结论一致。雨停后, 高程87.5 m以上同深度含水率, 随时间延长而减少; 高程87.5 m以下同深度含水率, 随时间延长而增大, 湿润锋深度增加。在大雨工况条件下, 降雨入渗总深度明显减小, $t=96$ h时, 降雨入渗深度仅为2 m, 但与大暴雨工况下的渗流场特征相对比, 可以看出, 在降雨结束后, 大雨工况条件下, 雨水的入渗深度及同深度处的含水率都在继续增长。

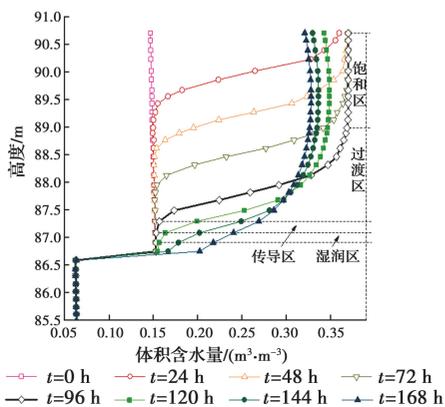


图5 大暴雨工况下坡顶监测面A体积含水率分布图

Fig. 5 The water content distribution with elevation on section A in situation 1

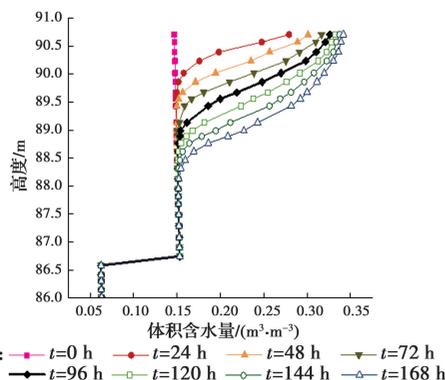


图6 大雨工况下坡顶监测面A体积含水率分布图

Fig. 6 The water content distribution with elevation on section A in situation 2

3.1.2 坡中监测面含水率 图7、图8为两种工况下模拟过程监测面B的含水率分布。在大暴雨工况下, $0 < t < 48$ h时, 渗流发生在覆盖层; $t=48$ h时, 含水率分布曲线包含饱和区、过渡区、传导区及湿润区; $t=96$ h, 覆盖层完全饱和, 雨水渗至昔格达地层内1.5 m, 覆盖层土体完全饱和, 土层分界面附近含水率突变, 昔格达地层内含水率分布曲线含饱和区、过渡区、传导区及湿润区, 可知, 降雨过程中, 雨水逐层渗透。雨停后, 覆盖层深部含水率大于浅部, 可见, 雨停后边坡浅部水分继续下渗, 导致含水量降低, 但土层分界面的隔水作用导致覆盖层深部土体水分减少量较浅部小; $t=168$ h时, 近土层分界面坡残积物含水率大于0.35, 处于近饱和状态。在大雨工况下, 雨水入渗的总深度明显减少, 当 $t=96$ h时, 降雨结束时, 雨水尚未渗透至地层分界面; 降雨结束后的72 h内, 雨水渗透至土层分界面处, 上下层土体在水土力学性质上的显著差异, 使得土层分界面具有显著的隔水性, 因此, 雨水入渗深度并未增加, 但同深度处土体的体积含水率却在不断升高。

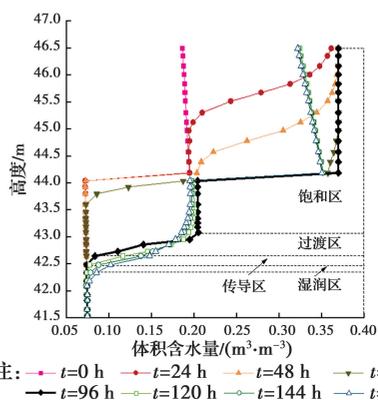


图7 大暴雨工况下坡中监测面B体积含水率分布图

Fig. 7 The water content distribution with elevation on section B in situation 1

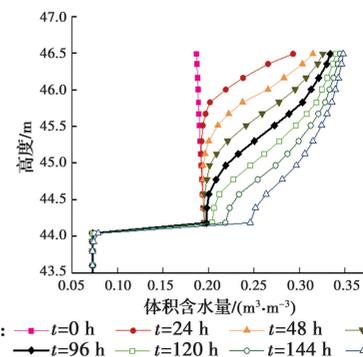


图8 大雨工况下坡中监测面B体积含水率分布图

Fig. 8 The water content distribution with elevation on section B in situation 2

3.1.3 坡脚监测面含水率 图 9、图 10 为两种工况下模拟过程监测面 C 的含水率分布。坡脚覆盖层厚度 1.04 m, $t=48$ h 时,覆盖层已饱和,且雨水渗入昔格达地层中; $t=96$ h 时,雨水最终入渗至粉砂土层内约 3 m。因入渗深度范围内两种土体渗透性质不同,含水率分布曲线分层明显。降雨过程中,覆盖层迅速饱和,因而,从 $t=48$ h 开始,该层土体处于饱和状态;雨停后,层面附近,残坡积物含水率约 0.35,昔格达组粉砂土含水率约 0.17,表明,雨停后层面附近土体含水率较高。在大雨工况下,由于坡脚覆盖层厚度较薄,降雨期间,雨水已经渗透至昔格达地层内部,但由于入渗量较小,未形成明确分区。与大暴雨工况下的渗流场特征进行对比可发现,在降雨结束后,水分在坡体内的最大入渗深度仍在不断增加,且同深度处的土体含水率不断增加。

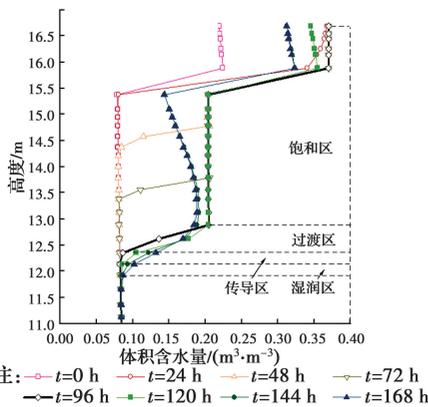


图 9 大暴雨工况小坡脚监测面 C 体积含水率分布图

Fig. 9 The water content distribution with elevation on section C in situation 1

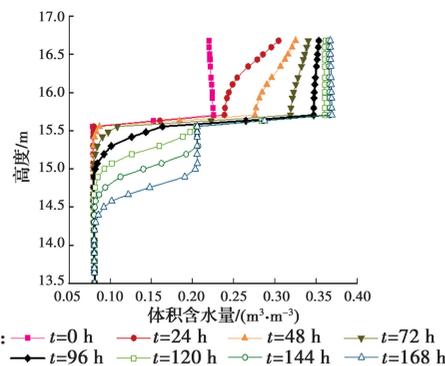


图 10 大雨工况下坡脚监测面 C 体积含水率分布图

Fig. 10 The water content distribution with elevation on section C in situation 2

3.2 降雨作用下边坡孔隙水压力变化情况

3.2.1 坡顶监测面孔隙水压力变化情况 图 11、图 12 为两种工况下模拟过程中监测面 A 孔隙水压力

力分布情况。两种工况下,A 处渗流均发生在覆盖层中,为均质土体中渗流。在大暴雨工况下,雨水入渗深度范围内,孔隙水压力持续增长,土体发生孔隙水压力增长范围匀速拓展;由图 11、图 12 可知,对于均质土体,雨停后,孔隙水压力随高程分布曲线可分为两个段,高程 87.5 m 以上土体中孔隙水压力消散;87.5 m 以下土体中湿润锋深度增加,同深度孔隙水压力增加。在大雨工况下,水分渗透深度更小,因此,全过程仅发生在上层覆盖物中。可以看出,模拟全过程土体中,孔隙水压力始终在逐渐增大,但未达到正值。

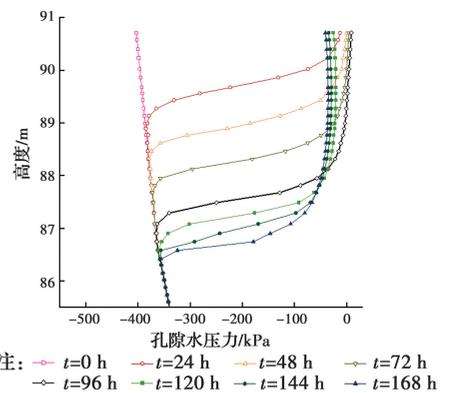


图 11 大暴雨工况小坡顶监测面 A 孔隙水压力分布图

Fig. 11 The pore water pressure distribution with elevation on section A in situation 1

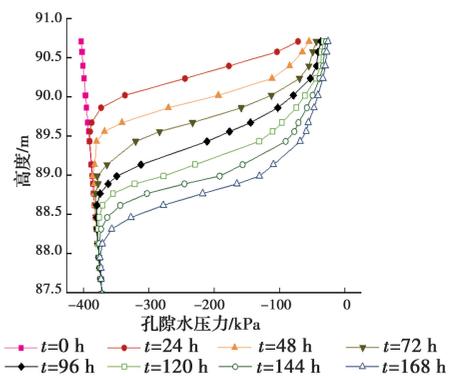


图 12 大雨工况下坡顶监测面 A 孔隙水压力分布图

Fig. 12 The pore water pressure distribution with elevation on section A in situation 2

3.2.2 坡中监测面孔隙水压力变化情况 图 13、图 14 为两种工况下模拟过程中监测面 B 孔隙水压力分布。在大暴雨工况下, $0 < t < 72$ h 时,雨水渗流仅引起覆盖层中孔隙水压力变化;随降雨继续,同深度孔隙水压力匀速增长; $t=96$ h 时,雨水渗至昔格达地层,地层面下 1 m 内土体饱和,孔隙水压力增至正值;因昔格达组粉砂土饱和含水率小于上层残坡

积物,使土体中发生孔隙水压力增长的范围在层面附近加速拓展。在大雨工况下,因降雨未到达昔格达地层中,孔隙水压力随高程的分布曲线无明显突变,在模拟过程,始终逐渐增大,但最终增长为正值。

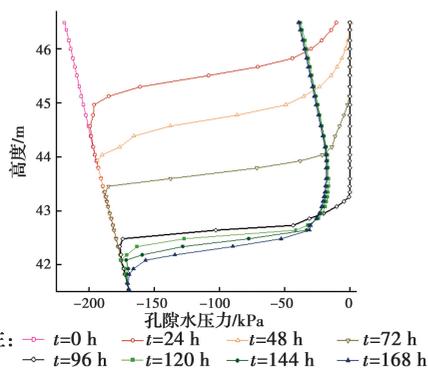


图 13 大暴雨工况下坡中监测面 B 孔隙水压力分布图

Fig. 13 The pore water pressure distribution with elevation on

section B in situation 1

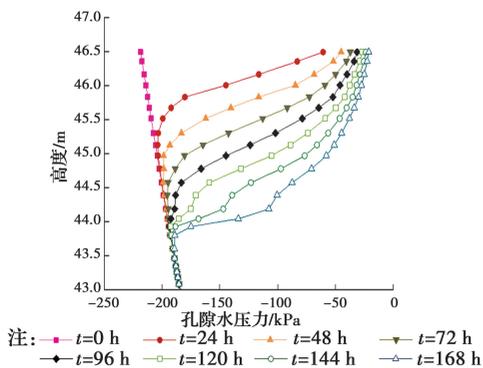


图 14 大雨工况下坡中监测面 B 孔隙水压力分布图

Fig. 14 The pore water pressure distribution with elevation on

section B in situation 2

3.2.3 坡脚监测面孔隙水压力变化情况 图 15、图 16 为两种工况下模拟过程中监测面 C 孔隙水压力分布。在大暴雨工况下,因覆盖层厚度仅 1.04 m, $t=48$ h 时,昔格达组粉砂土中出现饱和区,孔隙水压力增长至正值,层面附近孔隙水压力增长范围加速拓展;由图 15、图 16 可知,因两种土质渗流特性差异,雨停后,坡内孔隙水压力随高程分布曲线存在分区,分区特征与坡中监测面 B 类似,覆盖层中,近坡体表面孔隙水压力减少明显;昔格达粉砂土地层中, $t=96$ h 时,昔格达粉砂土中含水率曲线饱和区与过渡区交点为同时刻坡内孔隙水压力最大部位,该深度以下同深度孔隙水压力随时间增长而增长,湿润锋深度加大。在大雨工况下,孔隙水压力随降雨过程的发展而不断增长,但在 $t=96$ h 时,土体内部最大孔隙水压力仍未达到正值,降雨结束后,

由于土体中水分继续入渗,孔隙水压力逐渐增长为正值。

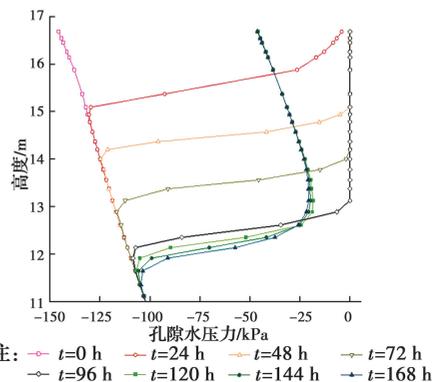


图 15 大暴雨工况下坡脚监测面 C 孔隙水压力分布图

Fig. 15 The pore water pressure distribution with elevation on

section C in situation 1

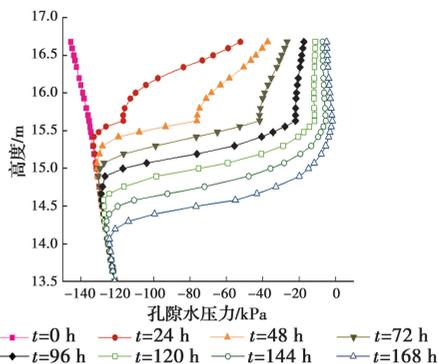


图 16 大雨工况下坡脚监测面 C 孔隙水压力分布图

Fig. 16 The pore water pressure distribution with elevation on

section C in situation 2

3.3 昔格达地层层状结构边坡渗流特征讨论

参考对层状结构边坡渗流特性的相关研究成果,并结合《工程地质手册》等资料,对普通岩土体相关参数的总结可以发现,与普通层状结构土质边坡相比,昔格达地层边坡中,上层松散堆积物覆盖层的渗透系数及饱和含水率的参数与下层昔格达地层岩土体的渗透系数及饱和含水率值之间的差距更大。这种层状结构边坡中,上下层土体之间在渗透系数以及饱和含水率等参数相差悬殊的特点,使得昔格达地层层状结构边坡在经历降雨过程时,在土层界面处土体含水率以及孔隙水压力的突变较普通层状结构土质边坡更为剧烈,突变量值更大。

昔格达地层层状结构边坡所具有的相较于普通层状结构土质边坡更为剧烈的土层界面处,土体含水率以及孔隙水压力的突变表明,该类边坡更易在土层界面附近形成高含水率区域,且该区域内

含水率更高,持续时间更久,消散更缓慢,这一特点对边坡稳定性造成较大影响。首先,由于接触面附近持续处于高含水率状态,降雨结束后,边坡内部仍会持续发生雨水渗流过程,使得边坡安全系数持续下降,其滞后性较普通层状结构土质边坡更为明显。其次,由于地层接触面附近的覆盖层土体含水率较高,且不能较快消散,相较于普通层状结构土质边坡,昔格达地层层状结构边坡土体内部水分更易发生沿土层接触面的流动,对边坡内部土颗粒产生较大渗流力,甚至对土体颗粒产生侵蚀。

3.4 边坡稳定性系数变化情况

图 17 为两种工况条件下边坡稳定性系数随降雨入渗的变化曲线。由图 17 可知,两种工况下,边坡安全系数的变化规律基本一致,降雨期间,稳定性系数持续下降,下降速率先增大后减小,反映出雨水入渗至坡体不同部位时,稳定性系数变化规律不同; $24\text{ h} < t < 48\text{ h}$ 时,雨水渗至土层分界面,由于土层附近土体发生孔隙水压力增长范围的扩张速率加快,使得边坡稳定性系数加快降低; $t > 40\text{ h}$ 时,水分渗入昔格达组粉砂土后,由于渗透深度持续增加导致边坡稳定性系数减小,但由于粉砂土渗透系数小于上层第四纪残坡积物,雨水下渗速率减慢,导致稳定性系数下降速率减慢。降雨结束后,由于坡体中水分并不能快速排出而是继续下渗,导致稳定性系数在雨停后继续下降; $t = 120\text{ h}$ 时,稳定性系数降至最小; $t = 144\text{ h}$ 为降雨结束后 48 h,土体中部分水分排出,稳定性系数上升,后基本保持稳定,表明,边坡安全系数的变化趋势与降雨过程并不同步,反映出降雨对层状边坡稳定性影响的滞后性。但由于大雨工况下坡体雨水入渗深度整体较小,因此,大雨工况下边坡的安全系数高于大暴雨工况下边坡的安全系数。

3.5 边坡破坏机理分析

根据相关研究结论,莫家岗滑坡为受历时长的强降雨诱发的昔格达地层牵引式滑坡,滑面位于基覆界面部位,其变形过程与降雨过程密切相关。研究区滑坡最早发生于 2008 年汛期,降雨导致斜坡后缘岩土体发生强烈变形;2012 年雨季斜坡后缘再次产生张拉裂缝;受暴雨影响,2013 年 7 月斜坡发生进一步强烈变形,形成局部错台,斜坡中下部变形十分明显,附近乡村公路受路基出现不均匀沉降;2014 年 7 月,研究区突降暴雨,致使斜坡局部强烈变形;

2014 年 8 月,研究区持续强降雨,斜坡体多处发生变形,斜坡后缘产生张拉裂缝^[20]。

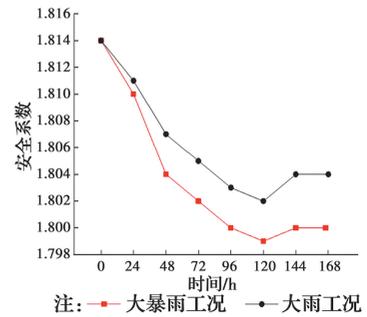


图 17 安全系数变化规律

Fig. 17 Safety factor versus time

结合渗流场数值模拟结果,可以将莫家岗滑坡破坏类型概述为两种,即局部浅层滑塌以及深层牵引型滑坡。莫家岗滑坡为典型的层状边坡,雨水在边坡中逐层渗入,降雨入渗,首先对边坡上层第四纪残坡积物覆盖层产生影响,造成覆盖层土体处于饱和状态,加之表层土体受人类活动改造剧烈,易引起局部浅层滑塌。结合渗流场模拟结果以及边坡结构特点,可以对边坡深层牵引型滑坡的破坏机理做出解释:边坡中下部第四纪残坡积物覆盖层厚度较薄,降雨可渗流至下层昔格达组地层中,且由于两种土体的水土性质差异悬殊,造成界面处长期处于高含水率状态,由于昔格达地层土体力学性质差,在长期受雨水作用下,易造成坡体下部岩土体发生滑面位于土层交界面的变形破坏,因而,边坡强烈变形多发生于坡体中下部。坡体上部覆盖层土体厚度较大,雨水不易渗入下层昔格达地层中,因此,上部坡体能保持较好完整性,但由于下部坡体力学性质不断减弱,上部坡体抗力减少,整体受牵引下滑,后缘产生张拉裂缝。

4 结论

1) 昔格达地层边坡多为层状结构,该工程为上覆第四纪坡残积物的昔格达组粉砂土边坡;降雨过程中,雨水在坡体中逐层入渗;雨停之后,入渗过程仍将持续,但残坡积物与昔格达组粉砂土中含水率及孔隙水压力分布特征有明显差异。

2) 土层交界面处含水率、孔隙水压力变化明显;界面上部土体长期处于高含水率状态,使昔格达地

层靠近界面处土体长期受水分软化作用,易形成软弱夹层,诱发滑面位于界面的滑坡;土体中孔隙水压力发生增长的影响范围在界面附近会加速拓展,使边坡抗滑力减弱,导致稳定性系数加速降低。

3)降雨入渗导致边坡稳定性降低,当雨水入渗至坡体不同部位时,稳定性系数表现出不同的变化规律;降雨结束后,稳定性系数不会立即回升,表明边坡对降雨入渗的响应存在滞后性。

参考文献:

- [1] 刘惠军, 聂德新. 昔格达地层研究综述[J]. 地球科学进展, 2004, 19(Sup1): 80-82.
LIU H J, NIE D X. The Overview of the Xigeda strata study [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19 (Sup1): 80-82. (in Chinese)
- [2] 罗运利, 刘东生. 昔格达组沉积环境演化与旋回地层学研究[J]. 第四纪研究, 1998, 18(4): 373.
LUO Y L, LIU D S. Cyclo-stratigraphy of the Xigeda formation and the paleo-environmental implications [J]. Quaternary Sciences, 1998, 18(4): 373. (in Chinese)
- [3] 周平, 王志杰, 徐海岩, 等. 考虑含水率的昔格达地层隧道围岩稳定及亚级分级研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 97-110.
ZHOU P, WANG Z J, XU H Y, et al. Stability and sub-classification study on the tunnel surrounding rock of Xigeda strata considering the influence of moisture content [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50 (12): 97-110. (in Chinese)
- [4] 王志杰, 杨跃. 含水率对昔格达地层大断面隧道初期支护安全性影响研究[J]. 铁道标准设计, 2017(11): 100-105.
WANG Z J, YANG Y. Research on effect of moisture content on initial support safety of large cross-section tunnel in Xigeda formation strata [J]. Railway Standard Design, 2017(11): 100-105. (in Chinese)
- [5] 杜宇翔, 盛谦, 王帅, 等. 昔格达组半成岩微观结构与力学性质研究[J/OL]. 岩土力学. <https://doi.org/10.16285/J.rsm.2019.0717>.
DU Y X, SHENG Q, WANG S, et al. Study on microstructure and mechanical properties of Semi-diagenetic rock of Xigeda formation [J]. Rock and Soil Mechanics. <https://doi.org/10.16285/J.rsm.2019.0717>. (in Chinese)
- [6] 黄绍祺, 吉随旺, 朱学雷, 等. 西攀路昔格达地层滑坡分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(Sup1): 41-44.
HUANG S B, JI S W, ZHU X L, et al. Analysis on Xigeda landslide in Xipan expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(Sup1): 41-44. (in Chinese)
- [7] 丁文富, 张广泽, 宋章. 成昆铁路昔格达地层工程地质特性及对策研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(4): 1-5.
DING W F, ZHANG G Z, SONG Z. Research on the engineering geological characteristics and engineering countermeasures of Xigeda strata of Chengdu-Kunming railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(4): 1-5. (in Chinese)
- [8] NG C, SHI Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage [J]. Computers and Geotechnics, 1998, 22(1): 1-28.
- [9] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [10] KIM J, JEONG S, PARK S, et al. Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils [J]. Engineering Geology, 2004, 75 (3/4): 251-262.
- [11] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry [J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 619-631.
- [12] ZHAN T L T, NG C W W. Analytical analysis of rainfall infiltration mechanism in unsaturated soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(4): 273-284.
- [13] 张建, 李江腾, 林杭, 等. 降雨触发浅层坡体失稳的迟滞现象及其与土质参数的关联性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(1): 150-157.
ZHANG J, LI J T, LIN H, et al. Delay phenomenon of shallow slope failure triggered by rainfall and its correlation with soil parameters [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49 (1): 150-157. (in Chinese)
- [14] 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): 39-45.
- HAN T C, HUANG F M. Rainfall infiltration process and stability analysis of two-layered slope [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2012, 46(1): 39-45. (in Chinese)
- [15] 马吉倩, 付宏渊, 王桂尧, 等. 降雨条件下成层土质边坡的渗流特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 464-471.
- MA J Q, FU H Y, WANG G Y, et al. Seepage characteristics of layered soil slope under rainfall conditions [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(2): 464-471. (in Chinese)
- [16] 石振明, 沈丹祎, 彭铭, 等. 考虑多层非饱和土降雨入渗的边坡稳定性分析[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 977-985.
- SHI Z M, SHEN D Y, PENG M, et al. Slope stability analysis by considering rainfall infiltration in multi-layered unsaturated soils [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(8): 977-985. (in Chinese)
- [17] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- LEI Z D, YANG S X, XIE S C. Soil Water Dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [18] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums [J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.
- [19] 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.
- [20] 覃亮, 杨学之, 王海波. 石棉县某昔格达地层滑坡防治对策探讨[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2017, 36(1): 102-105.
- QIN L, YANG X Z, WANG H B. Discussion on prevention countermeasures of Xigeda strata landslide in Shimian County [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2017, 36(1): 102-105. (in Chinese)

(编辑 邓云)