

降雨入渗对某变电站施工期间边坡稳定性的数值模拟研究

Numerical simulation of rainfall infiltration on slope stability of a substation during construction

付培森¹ 李云飞² 黄宇² 黄钊鑫³

Fu Pei-sen¹ Li Yun-fei² Yu Huang² Huang Chuan-xin³

1.武汉建材地质工程勘察院有限公司 中国·湖北 武汉 430000

2.十堰市华脉建筑勘察设计有限公司 中国·湖北 十堰 442000

3.重庆陆威土木工程设计有限公司 中国·重庆 400060

1. Wuhan Building Materials Geological Engineering Investigation Institute Co., Ltd, Hubei Wuhan, 430000, China

2. Shiyan Huamai Architectural Survey and Design Co., Ltd, Hubei Shiyan, 442000, China

3. Chongqing Luwei Civil Engineering Design Co., Ltd, Chongqing, 400060, China

摘要:众所周知,降雨渗流是引发边坡失稳的主要因素。为了研究土岩混合边坡在降雨入渗条件下的稳定性,论文以某变电站土岩混合边坡为研究对象,采用 Midas GTS 数值分析软件,建立相应的数值分析模型,描述了土岩混合边坡在降雨入渗条件下的渗流场演变规律,揭示了渗流作用下土岩混合边坡的稳定性随降雨时间和降雨强度的变化规律。

Abstract: It is well known that rainfall seepage is the main factor causing slope instability. In order to study the soil-rock mixture slope stability under the condition of rainfall infiltration, the numerical analysis model is established by Midas GTS based on a soil-rock mixture slope. describes the soil rock mixture under the condition of rainfall infiltration of slope seepage field evolution, reveals the seepage effect affecting the stability of the slope rock mixed with rainfall intensity and rainfall time change rule.

关键词: 渗流;稳定性;边坡;数值模拟;安全系数;施工期间

Keywords: Seepage; Stability; Slope; Numerical simulation; Safety factor; During construction

DOI: 10.36012/etr.v2i5.1978

1 引言

近年来,随着中国国民经济的发展,大量的基础工程建设向中西部地区开展,如高速公路,水利水电等。因此,工程大开挖形成的高陡边坡数见不鲜,降雨所导致的边坡失稳越来越频繁,造成了大量的财产损失和安全事故,引起了越来越多专家的重视。但往往忽略了边坡施工期间经历梅雨季节时,降雨对施工期间边坡稳定性的影响,研究施工期间雨水对边坡稳定性的影响,从而分析施工期间应该采取的防排水措施对边坡支护施工具有重要的实际意义。

目前世界各国学者针对降雨入渗对边坡的稳定性已经进行了相关研究。

赵吉坤等^[1]对三种不同坡度的边坡人工降雨模拟实验,研究降雨条件下坡度、粘聚强度与体积含水率的函数关系;

徐全等人^[2]将饱和-非饱和渗流理论和强度折减法相结合,对降雨条件下的非饱和边坡进行流固耦合和土水耦合分析,研究结果表明饱和和渗透系数对降雨边坡稳定性影响显著;

刘金龙等人^[3]采用数值模拟的方法,研究边坡降雨入渗条件下的饱和-非饱和一维渗流过程对边坡稳定性影响,结果发现边坡非饱和区土体的基质吸力随着降雨的不断入渗逐渐减小,是引起非饱和土质边坡稳定性下降的主要影响因素,同时还发现在模拟过程中不同基质吸力对边坡的稳定性影响程度不同;

翁新海等人^[4]针对不同降雨强度边坡稳定性进行数值模拟分析,结果表明当降雨强度较大时,边坡安全系数迅速降低,在降雨停止时安全系数最小,雨停后安全系数逐渐恢复

【作者简介】付培森(1991~),男,汉,湖北十堰人,注册土木工程师(岩土),从事岩土工程研究。

自然状态;

刘丽等人^[9]对强降雨入渗工况下不同压实度强风化软岩路堤边坡的渗透规律与安全性进行分析,结果表明降雨入渗会造成边坡土体软化,进而降低土体抗剪强度;

李焕强等人^[10]通过试验研究降雨入渗对边坡性状的影响。在降雨条件下,降雨强度与持续时间以及边坡的土层分布都会对边坡的稳定性产生不同程度的影响;

王述红等人^[11]基于有限元软件 ABQUES 研究了降雨条件下边坡渗流场和应力场耦合后的安全系数,揭示了降雨影响边坡稳定性的机理。

本文以某变电站边坡为例,由于施工期间边坡防排水未完善,导致大暴雨来临时雨水大量从坡顶下渗,造成滑坡。以此案例为基础,探讨不同降雨量及不同降雨持续时间下边坡的稳定性。研究不同降雨条件下边坡的渗流及稳定性的变化,为类似的边坡在施工期间的防水及施工期间的稳定性评价提供参考意见。

2 工程概况

某变电站边坡位于中国湖北省房县某乡镇,因修建变电站场地而开挖边坡,边坡支护方式采用坡率法与坡面片石护坡(如图 1)。其中北侧和西侧为岩土组合边坡,主要为挖方边坡,边坡的主要土层为填土、粉质黏土、碎石以及基岩,边坡最大高度为 10m;南侧为岩土组合边坡,全段为挖方边坡,边坡的主要成分为填土、粉质黏土、碎石以及基岩,边坡最大高度为 3m;东侧为土质边坡,全段为回填边坡,边坡的主要成分为填土,边坡最大高度为 2m。西侧坡面按坡率开挖到位后,由于疫情影响,坡面浆砌片石防护工程搁置,梅雨季节到来以后,水体从坡顶进入,导致西侧边坡发生局部滑坡。本文选取西侧的 AB 段边坡的 1-1 截面为研究对象,采用数值模拟的方法探究降雨入渗对该侧边坡稳定性的影响。

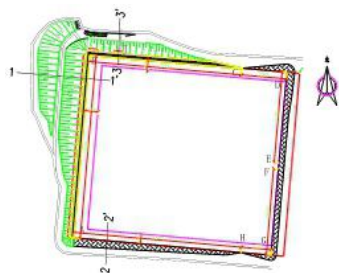


图 1 变电站场区平面图

3 数值模拟分析

3.1 模型建立

根据现场调研资料可知,1-1 断面的边坡高度为 14.3m,分两级开挖,第一级边坡(6.5m 高)和第二级边坡(6.3m 高)的坡率均为 1:1,且第一级与第二级边坡中间连接段设置一道宽约 2.0m 的马道,边坡后缘设置环形截水沟,坡底设有高为 1.5m 的挡土墙,坡面采用浆砌石护坡,如图 2 所示。为分析降雨入渗条件下该边坡的稳定性,将剖面段建立二维分析模型,如图 3 所示。模型边界设定为:边坡左右侧及底部设置固定边界,表面及坡顶设定为降雨



图 2 边坡示意图

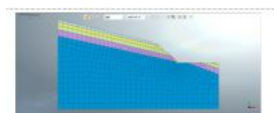


图 3 边坡数值模型图

3.2 强度折减法基本原理

强度折减原理就是把土体的抗剪强度值和除以一个折减系数 F 。把折减以后的土体强度值代入有限元中计算,并不断变换折减系数,得出满足收敛条件的折减系数。即为所求的安全系数。

Zien-kiewicz 把抗剪强度折减系数定义为:在外荷载保持不变的情况下,边坡内土体所发挥的最大抗剪强度与外荷载在边坡内所产生的实际剪应力之比。外荷载所产生的实际剪应力应与抵御外荷载所发挥的最低抗剪强度,即按照实际强度指标折减后所确定的、实际中得以发挥的抗剪强度相等。当假这种抗剪强度折减系数定义为边坡的整体稳定安全系数,由此所确定的安全系数,可以认为是强度储备的安全系数。

3.3 材料参数

根据地质勘察,土体共分为五层,依次为填土、粉质黏土、碎石、强风化泥质粉砂岩以及中风化泥质粉砂岩,各土层岩土体参数见表 1。土-水特征曲线是体积含水率与基质吸力的关系曲线,可通过实验得出,但实际操作复杂,因此一般通过经验公式得出。常用的经验公式有 Brooks-Corey 模型^[10]、Gardner 模型^[8,9]、Van Genuchten 模型^[12]和 Gardner-Russo 模型^[11]。这里采用的是 Van Genuchten 模型。土壤持水曲线

Van Genuchten 模型的具体表达形式为:

$$\theta = \theta_{\gamma} + \frac{\theta_s - \theta_{\gamma}}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (3-1)$$

式中:

θ - 土壤体积含水量($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$);

h - 压力水头(-cm);

θ_{γ} - 土壤的剩余和饱(cm^3)

θ_s - 土壤的体积含水量(cm^3);

(cm^3)和 n (-)是经验拟合参数(或曲线性状参数), $m=1-$

$$\frac{1}{n}。$$

表 1 各岩土层力学参数表

层号	名称	弹性模 (MPa)	重度 (kN/m ³)	内摩擦 (°)	粘聚力 (kPa)	泊松比	渗透系数 k (m·s ⁻¹)
1	素填土	2.0	17.0	10	5	0.21	0.001
2	粉质黏土	10.0	19.0	20	20	0.26	0.0006
3	碎石土	24.0	21.0	25	0	0.24	0.02
4	强风化泥	35.0	25.0	20	35	0.28	0.0001
5	质粉砂岩						
6	中风化泥质粉砂岩	50.0	25.0	30	65	0.3	0.00001

3.4 模拟方案

通过渗流 - 应力耦合分析即先不考虑降雨条件,对边坡在固定地下水位的静水位作用和自重作用下进行稳态流固耦合分析。分析所得初始应力场、初始孔压、初始饱和度以及初始孔隙比作为之后降雨入渗瞬态流固耦合分析的初始条件。再考虑降雨入渗条件,对边坡在降雨入渗、静水位和自重作用下进行瞬态流固耦合分析。

在考虑正常工况下和降雨工况下,分别建模分析该边坡的稳定性。但是该工程未给出具体降雨数据,因此,根据中国气象局官网湖北房县区域降雨强度等级划分标准,选取 4 种降雨工况,分别是中雨 20mm/d、大雨 40mm/d、暴雨 90mm/d 和大暴雨 200mm/d,降雨持续时间均为 30h。初始渗流场及 4 种降雨工况在相同降雨历时条件下的边坡内部渗流场变化。通过以边坡初始(无降雨时)渗流场为参照,对边坡内部渗流场变化情况进行分析。

3.5 结果分析

3.5.1 渗流分析

(1) 渗流随降雨强度的关系

图 4、图 5、图 6 以及图 7 分别为中雨强度、大雨强度、暴雨强度以及大暴雨强度时坡体内部的渗流场。观察四幅渗流场图可知,随着降雨强度的增加(即从中雨强度到大暴雨强度),土体达到饱和的深度逐渐增加且均在边坡坡脚处首先形成局部饱和区,之后坡面浅层土体处逐渐形成贯通的饱和区。除此之外,还可以看到,边坡的马道处入渗大于其余坡面,这是因为垂直入渗大于水平的原因。

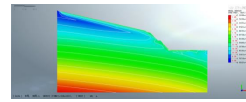
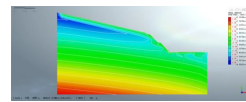


图 4 中雨强度时坡体内部渗流场图



5 大雨强度时坡体内部

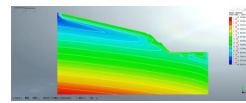


图 6 暴雨强度时坡体内部渗流场

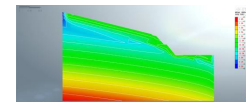


图 7 大暴雨强度时坡体内部渗流场

(2) 渗流随降雨时长的关系

为研究同等降雨强度条件下降雨时间对该边坡稳定性的影响,此处仅对大暴雨情况下历时 30h 作分析,分别计算降雨过程中不同时刻的边坡土体内渗流场。降雨不同时刻边坡土体的渗流场如图 8 至图 13 所示。

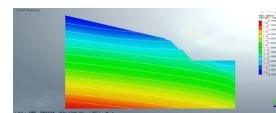


图 8 边坡初始(无降雨)时渗流场

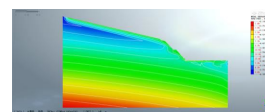


图 9 大暴雨 6h 后坡体内部渗流场

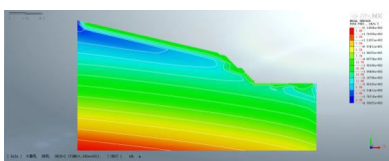


图 10 大暴雨 12h 后坡体内部渗流场

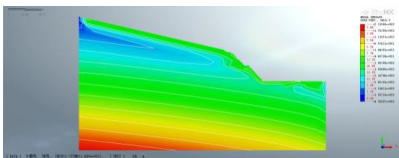


图 11 大暴雨 18h 后坡体内部渗流场

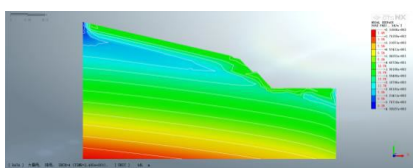


图 12 大暴雨 24h 后坡体内部渗流场

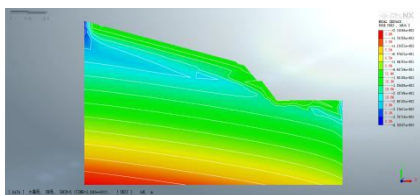


图 13 大暴雨 30h 后坡体内部渗流场

有限元模拟计算结果显示,降雨入渗使边坡坡脚处较早的处于饱和状态,随着降雨历时的增加边坡浸润线逐渐抬升,饱和区域自下而上逐步发展;随着边坡上部土体含水率的增加,孔隙水负压区的减小,边坡土体的基质吸力逐渐降低。在降雨初期,雨水入渗增加了边坡土体的自重,边坡位移以沉降为主,而坡脚首先入塑性状态;降雨时间延长后随着边坡土体的基质吸力减小,土体抗滑力降低而滑动力增加,边坡土体的水平位移逐渐向坡面方向发展,

3.5.2 稳定性分析

表 2 边坡稳定性状态划分表

边坡稳定性系数	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < F_{st}$	$F_s \geq F_{st}$
边坡稳定性状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

该工程边坡等级为二级,通过查阅 GB50330-2013《建筑边坡工程技术规范》可知,二级边坡的在一般工况下的稳定安全系数为 1.30。边坡稳定性状态与边坡稳定性系数之间的联系见表 2。

(1) 不同降雨强度下的边坡稳定性分析

图 14 为降雨强度与边坡安全系数的关系曲线。从图中可知随着降雨强度的增大,边坡的安全系数逐渐变小,但减小的程度逐渐变缓。在降雨强度为 0mm/d 的情况下(即正常工况),该边坡的安全系数为 1.81;在中雨条件、大雨条件、暴雨条件以及大暴雨条件下的安全系数分别为 1.62、1.45、1.21 以及 0.92。根据《建筑边坡工程技术规范》要求,该边坡的安全系数需要大于 1.30 才是处于稳定状态,因此,该边坡在暴雨以及大暴雨的情况下需要做好应对措施,防止边坡发生滑坡。

(2) 不同降雨时长下的边坡稳定性分析

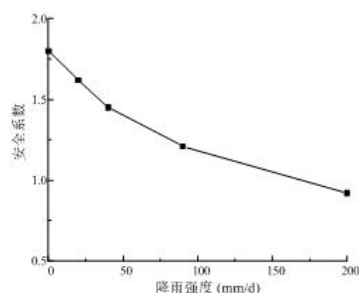


图 14 降雨强度与边坡安全系数的关系

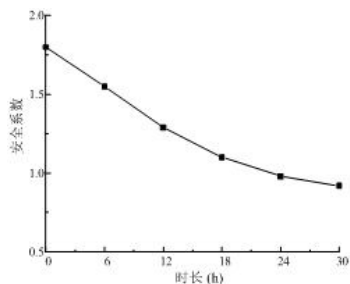


图 15 降雨时长与边坡安全系数的关系

根据不同降雨强度下的边坡稳定性的分析结果可知,在大暴雨或者暴雨情况下,该边坡处于欠稳定状态。因此,此处仅分析大暴雨条件下该边坡的安全系数随着降雨时长的变化关系。图 15 为边坡安全系数与降雨持续时长的关系曲线。从图中可知,在降雨作用下,随着降雨时长的增大,边坡安全系数逐渐降低。降雨 6h、12h、18 h、24 h 以及 30h 小时后,边坡的安全系数分别为 1.55、1.29、1.10、0.98、0.92。根据《建筑边坡工程技术规范》要求,该边坡的安全系数需要大于 1.30 才是处于稳定状态,因此,在大暴雨降雨 12 小时以内,该边坡处于基本稳定状态。

4 结论

降雨入渗是诱发边坡失稳的主要原因之一。

(下转第 196 页)

方片石,保证工程施工原材料的正常供需。

针对石料场石粉不足现象,安排从中国进1台专门轧石粉的机械,以确保基层料的石粉供应,以及防护工程机制砂的所需。项目部加强两个采石场的管理力度,专人负责石料场的施工生产,每日对生产量进行跟踪、检查以及质量监督等,确保生产进度计划完成。

8 保证措施

针对C段的特殊天时地理环境,在上述正常的施工安排情况下,项目部还需做下述措施安排,以确保工程顺利完成。增加一个采石场,确保石料的供应,已经于8月下旬开始出料。为确保基层施工的质量,将基层碎石拌和站迁移到C段的中段K107左侧,以保证基层的施工质量和进度。从中国进一套轧石粉机,以确保石粉和石屑的产量。视施工情况,考虑路面基层安排二个作业组施工,确保施工进度。从中国调

(上接第193页)

基于非饱和土体的强度和渗流理论,建立降雨入渗条件下边坡稳定性分析的有限元数值模型,模拟降雨入渗条件下某电站边坡的稳定性,得出了以下结论:

(1)随着降雨强度从20mm/d增大至200mm/d(即中雨到大暴雨),土体达到饱和的深度逐渐增加且均在边坡坡脚处首先形成局部饱和区,之后坡面浅层土体处逐渐形成贯通的饱和区;随着降雨时长的增大,边坡浸润线逐渐抬升,饱和区域自下而上逐步发展,孔隙水负压区减小,边坡土体的基质吸力逐渐降低。

(2)随着降雨强度的增大,边坡的安全系数逐渐变小,但减小的程度逐渐变缓;随着降雨时长的增大,边坡安全系数逐渐降低。该边坡在暴雨和大暴雨情况需要做好防范措施,防止滑坡的发生。

(3)岩土工程设计时,往往考虑的都是边坡的初始和最终条件。但在施工期间,由于种种原因,导致防排水措施无法做到边坡竣工后的效果,这也是为什么边坡都是在支护施工过程中发生滑坡。针对于上述分析,应高度重视施工期间边坡的防护,水是人类宝贵的资源,也是边坡支护工程的第一大敌,只有做好足够的防排水措施,才能保证边坡支护施工期间的边坡安全。

参考文献

[1] 刘金龙, 栾茂田, 王吉利, 等. 降雨条件下土体饱和-非饱和和渗流及稳定性分析[J]. 岩土力学, 2006(S1):103-107.

防护工程的施工队伍,以保证防护工程的施工质量和进度。

9 结束语

由于路桥工程进度计划实施过程中目标明确,而资源有限,不确定因素多。主客观条件不断变化,计划也随着改变。因此,在项目施工过程中必须不断掌握计划的实施状况,并将实际情况与计划进行对比分析,必要时采取有效措施,使项目进度按预定的目标进行,确保进度目标的实现。道路桥梁工程进度控制是道桥工程项目管理目标控制的重要内容。上述计划为第三旱季的总体计划,柬埔寨项目经理部将根据准备情况和现场实际的其他情况编制阶段性施工计划,做到以计划为龙头,实现主动控制,及时消除影响工程进度的关键因素,为保证工程计划的完成而努力。

参考文献

[1] 罗娜, 工程进度监理. 北京: 人民交通出版社, 2009.

[2] 刘丽. 干线公路强降雨对边坡稳定性的影响与防护设计[J]. 公路工程, 2018(4):253-257,262.

[3] 李焕强, 孙红月, 孙新民, 等. 降雨入渗对边坡性状影响的模型实验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 031(4):589-594.

[4] 王述红, 何坚, 杨天娇. 考虑降雨入渗的边坡稳定性数值分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(8):1196-1200.

[5] 翁新海, 王家鹏. 降雨入渗对非饱和边坡稳定性影响分析研究[J]. 科技通报, 2018.

[6] 徐全 谭晓慧 辛志宇 汪贤恩 谢妍. 降雨入渗条件下非饱和土质边坡的稳定性分析[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2015(38):991.

[7] 赵吉坤, 陈佳虹. 降雨条件下土体坡度及含水率对边坡稳定性影响的试验研究[J]. 山东大学学报:工学版, 2013, 43(2):76-83.

[8] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of soil water I Redistribution .Water Resource Research , 1970a , 6:851~861

[9] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of soil water II Simultaneous redistribution and evaporation .Water Resource Research , 1970b , 6 :1148~1153

[10] Milly P C D. Estimation of the Brooks-Corey parameters from water retention data .Water Resource Research , 1987, 23:1085~1089

[11] Russo D .Determining soil hydraulic properties by parameter :On the selection of model for the hydraulic properties .Water Resource Research, 1988 , 24:453~459

[12] Van Genuchten M Th . A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils .Soil Sci .Soc .Am .J ., 1980 , 44 :892~ 898.