

降雨作用下山体边坡稳定性及加固方法研究

——以邯郸磁县山体滑坡为例

王为广

河北省地质矿产勘查开发局第一地质大队 河北 邯郸 056000

摘要: 降雨是引发边坡失稳破坏的常见因素。为深入探究降雨对边坡稳定性的影响机理,我们以邯郸磁县山体滑坡为例,运用Geostudio软件对长期降雨入渗条件下的边坡稳定性进行了模拟分析。研究揭示,当降雨强度不变时,随着降雨历时的延长,降雨入渗速率增大,土体中基质吸力降低,土体剪切强度不断弱化,土体位移场逐渐增大。与此同时,降雨对岩土体的加载和软化作用也越来越明显,从而导致了边坡的稳定性不断下降。为应对这一问题,我们采用了新型锚杆支护结构进行加固。该结构不仅能有效排导降雨形成的坡体水流,还能显著增强坡体的稳定性,确保了边坡的安全稳固。

关键字: 长期降雨; 边坡稳定; 边坡加固; 滑坡

引言: 降水是引发山体滑坡的关键因素,这一领域已引起全球各国学者的广泛关注,并展开了大量深入研究,取得了丰硕的研究成果。在现代土力学的发展历程中, Terzaghi^[1]首次提出了孔隙水压力这一重要概念,为理解砂土抗剪强度的变化提供了新视角。他指出,孔隙水压力对砂土的稳定性有着至关重要的影响。降雨之所以会引发泥石流,其背后的原理与孔隙水压力的变化密切相关。当雨水渗透到土壤中时,土壤的含水量显著增加,这导致孔隙水压力随之增大,而基质吸力则相应减小。这些变化直接改变了土壤的物理性能,使得土层的抗剪强度逐渐减弱。因此,降雨通过改变土壤的含水量、孔隙水压力和基质吸力,进而影响了土壤的物理性能和抗剪强度,最终触发了山体滑坡的发生。这一机制不仅解释了降雨引起泥石流的原因,也为我们理解和预防山体滑坡提供了重要依据。朱建东^[2]等人在这方面进行了重要的室内实验,他们构建了黄土和泥岩山体滑坡模型。通过模拟不同降水条件下的土壤渗透和力学行为,实验揭示了非饱和土壤中水分渗透对山体滑坡稳定性的具体影响。这些实验结果为理解降水诱发山体滑坡的机制提供了有力支持。徐晗^[3]等人则采用了有限元方法,结合对斜坡泥沙流动与压力变化的研究,进一步深入探讨了降水对山体滑坡的影响。他们的研究不仅考虑了土壤的水分渗透,还分析了斜坡在降水条件下的应力分布和变形情况,为预测和防范山体滑坡提供了更为准确的手段。

作者简介: 王为广 性别: 男, 1981.07 民族: 汉族, 籍贯: 河北省邯郸市, 学历: 大学本科 职称: 高级工程师 研究方向: 水文地质与工程地质

1 长期持续性降雨对边坡稳定性的影响

1.1 边坡工程地质条件

此处的边坡坐落于邯郸市磁县的地域内,其地理特征呈现出西高东低的特点,其中大部分区域属于太行山的东侧边缘,同时也有部分地区由山前的沉积物形成的平坦土地构成,大约占到整个县城总面积的85%。



图1 边坡现场图

1.2 降雨入渗基本理论

设定条件下若为降水,则时间的延长会导致水分深入土壤更深,因此对边坡含水量的变化有诸多影响因素,例如雨水量大小、雨水种类、雨水持续时间和土壤吸收雨水的的能力等。当降水缓慢进入斜坡后,土壤的状态将会逐步转变,由未饱和和转至饱和状态。以下为其计算公式:

$$i(t) = q(0, t) = -k(h) \frac{\partial(h+z)}{\partial z} = -k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) I_{z=0}$$

式中: $i(t)$ —— t 时刻的入渗率, %;

$q(0, t)$ —— 在 t 时刻,每平方米的水流量是 cm^3/s 。

k —— 土体的渗透系数, m/s ;

h —— 当土体不饱和时，取值为基质势大小；当土体饱和时，取值为压力水头值。

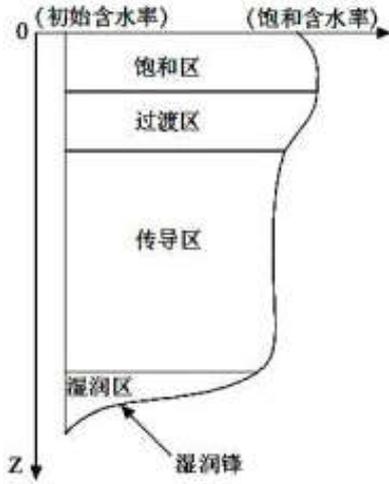


图2 土体入渗率曲线

按照降水强度的不同以及土壤透水性的差异，可以将其归纳为两种类型的降水影响模式：降雨型和积水型。如果降水强度未超过土壤的透水性能，则被视为降雨型；而在此类型下，可以进一步细分成两个子阶段，分别为非压力浸润期(初期)和压力浸润期(后期)。

雨水的渗透不仅随着时间的推移对其斜面产生了效应，而且其潜在的风险也因因地制宜有所不同。当降水发生时，根据土壤中的水分含量可将其分为四种区域：饱和区、过渡区、传导区、湿润区，如图3显示的那样。

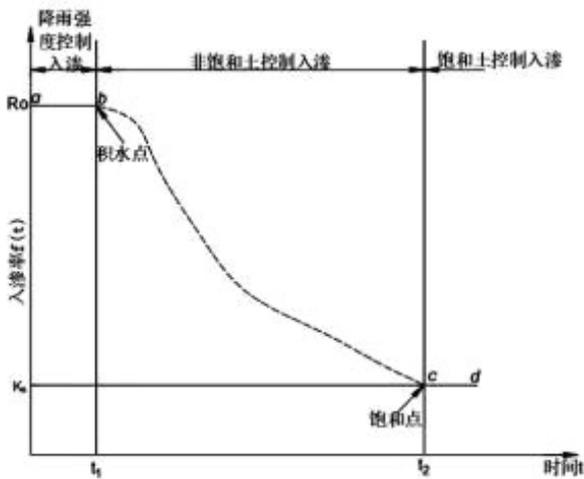


图3 降雨入渗典型含水率剖面图

2 长期降雨工况对边坡稳定性的模拟分析

2.1 模型建立

初始阶段，使用AutoCAD来描绘斜坡的形状并对其每一部分进行了分区处理，然后将其保存成DXF格式的数据并将之引入到GeoStudio软件里。为此，需要设置好

地下水的深度，并在模型中添加限制条件和滑动的入口与出口的位置。

在自然环境中，我们核心采用了极限值平衡法来评估坡体的稳定性，这一方法能够为我们提供关键的稳定性分析依据。为了确保评估的准确性，我们精心选择了符合自然环境条件的岩土参数作为计算基础。表1详细列出了各个计算模块所采用的参数设置，这些设置全面考虑了自然环境下的各种因素，以确保模拟和计算出的边坡稳定性结果能够真实反映实际情况。通过这样的方式，我们对自然环境下边坡的稳定性进行了深入而细致的模拟与分析。

表1 各层土体的物理力学参数

编号	材料	重度 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	粘聚力 $C(\text{kPa})$	内摩擦角 $\Phi(^{\circ})$	渗透系数 $k(\text{m/s})$	饱和体积 含水率 (%)
1	砂岩	21.2	18	28.8	$6\text{e-}6$	28
2	人工填土	17	10	15	$8\text{e-}5$	40
3	砂质黏土	18	24	20	$5\text{e-}5$	33

在自然条件下，以自然条件下的天然物质参数为模型参数，通过随机选择4种不同的极限平衡法，利用SLOPE/W软件，对不同类型的边坡进行稳定性分析，并编制出相应的稳定性系数表2，具体包括以下几个方面。

表2 边坡稳定系数表

计算方法	M-P 法	Bishop 法	Janbu 法	Corps of engineers#2	平均值
安全系数	1.21	1.22	1.15	1.24	1.2

依据《滑坡防治工程勘察规范》(GBT32864-2016)的评判准则对边坡的安全性进行了评估，结果显示于表3中。若边坡的安全指数低于1，即被认定为不稳定的状况；如果其介于1和1.05之间，则属于欠稳固的情况；而处于1.05到Fst之间的值，则是相对稳定的条件；最后，只要超过了Fst这个界限，就可认为是安全的。

为了确保边坡的稳固性和准确度，采用了多种方式来评估其稳定程度，并以这些方式得出的安全系数均值作为原始状态下边坡的安全指数。根据这个标准，可以确定此边的安全级别是二级，这表明它基本保持了稳定的状态，并且满足了设计的最低要求。

2.2 降雨工况下模拟分析

参考相关的研究报告，选择使用未饱和土壤来设定初始边界条件，并依据本地降水量及起始水位参数。将SLOPE/W模块和SEEP/W模块相结合以进行分析和计算，并在底部设置了地下水的水平面边界。在斜坡的上下左右三处设定了观测点的位置，这些位置被绘制成图形(见图4)，以便于观察在不同的雨量条件下斜坡的稳定情况。

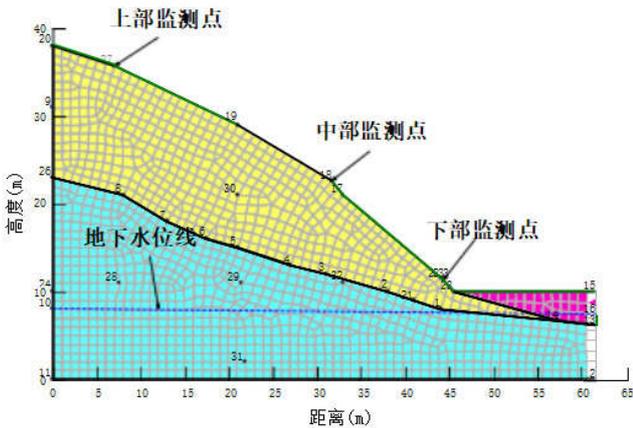
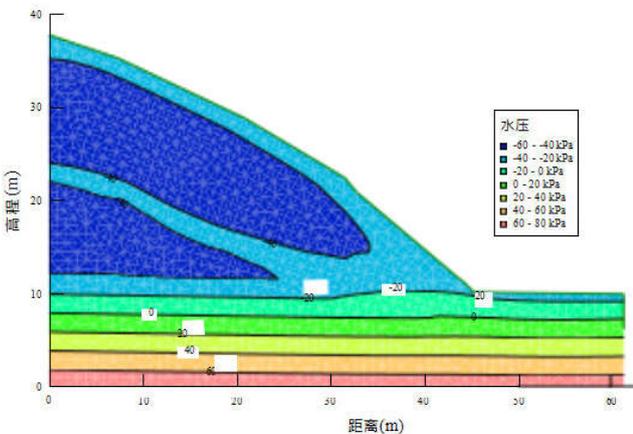
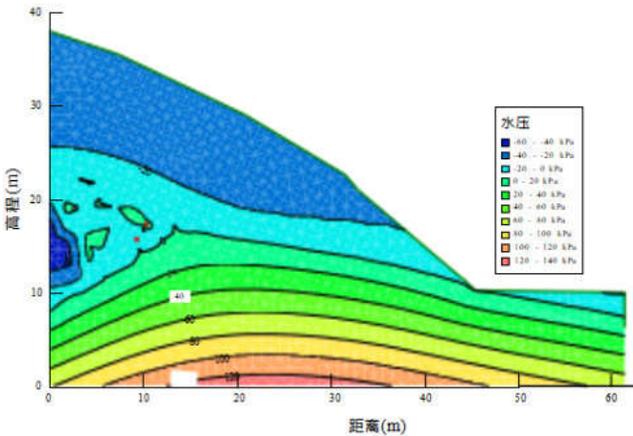


图4 边坡监测点位置



(a) 1d



(b) 10d

图5 130 mm/d 降雨强度下边坡孔隙水压力变化图

当降水连续的时间增长时,会使土壤中的水分含量上升,同时也会引起孔隙水的压强产生相应的变动。在本章中,主要探讨了以130mm/d的雨强作为参考值的等强型降雨在十天内对于斜坡孔隙水压强的变迁的影响,并展示了斜坡初始日与末日的孔隙水压强状况,如图5所示。

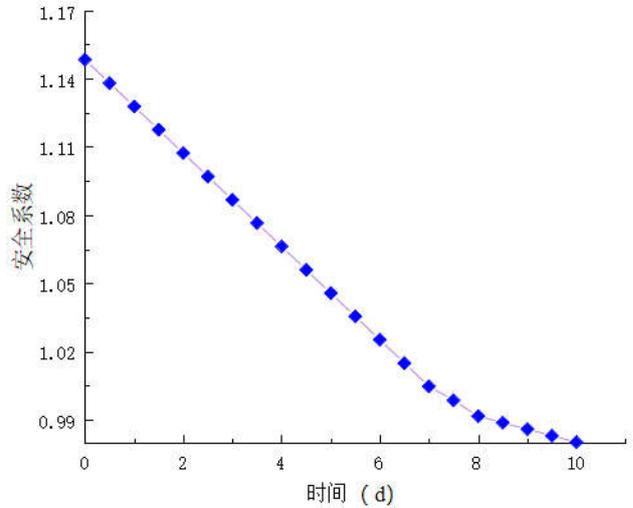


图6 130 mm/d降雨10天内的安全系数变化图

如图6展示了通过边坡模型模拟得出的安全系数如何受到降雨时间的影响,其中,当连续降雨达到130mm/d并保持长时间(超过10天),其对安全系数的负面影响会逐渐增强。

3 边坡稳定与加固

由于受到诸如暴雨、震灾之类的外部因素与地形条件的共同影响,频繁出现各类自然地理灾难事件中尤其以山体滑动和人造土方塌陷最为突出^[5]。然而当国家的基建项目不断深化并取得显著成果时,却不得不面对一系列由建筑工地挖掘引发的地貌问题挑战:例如人工斜坡易于产生下滑现象;不仅会造成财产上的巨额亏损还会威胁到人们的安全。

3.1 边坡加固措施方案

在沙石地基较低位置的土壤表面安置防护栏及排水分道,同时在其上覆盖绿色植物以保持生态平衡。接着,在沙砾粘土之上放置一层金属网格,并用锚索将其牢固地附着到沙砾粘土中。

3.2 锚杆间距对边坡稳定性的影响

对于锚杆间的距离如何对其所支撑的地形稳健度产生效应的研究是极其关键且必要的部分^[6]。然而,现阶段大多数地形的保护措施都依赖于个人或团队的专业知识来决定合适的锚杆间隔长度。

3.3 锚固角度对边坡稳定性影响

依据建筑边坡工程技术规范的规定,锚杆的最优倾角应落在15°到35°区间内。为了探究这个最优的角度选择,计划采用每隔3米垂直排列的方式来全面覆盖整个山体,并保持其余变量恒定。

结论

在长期持续性降雨的作用下,边坡的安全系数逐渐

降低。特别是在第10天，安全系数降至最低点。在降雨初期，安全系数下降幅度较大，而后期则趋于稳定。同时，边坡靠近坡顶的临空面位置产生了较大的水平位移，最大位移量达到了10.1毫米。此外，降雨对坡顶处的最大总应力也有显著影响，但总应力并未随降雨强度的增大而明显增大。

为了有效加固边坡，我们提出了一种新型锚杆加固结构。首先，依据有关原理，合理地设计了相应的锚固参数。在此基础上，对锚索的锚固距离、锚固角度等进行了分析。结果表明，不同的锚索布置方式对坡体的稳定有很大的作用，但锚索的倾角对锚索的作用不大。

为了保证边坡的稳定，将锚索垂直距离设为3 m。另外，锚杆的锚固角选取灵活，可从10~35度任意选取，且都符合设计要求。考虑到锚碇的锚固力及防排水作用，最后确定锚碇倾角35度。

参考文献

[1]Terzaghi K. Mechanism of landslides application

of geology to engineering practice[J].Geological Society of America, Berkley Volume:1950,83-123.

[2]Collins B D, Znidarcic D. Stability analyses of rainfall induced landslides[J].Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering,2004, 130(4):362-372.

[3]朱建东,鄢好,李绍红,吴礼舟.黄土-泥岩接触面滑坡的两种雨型模型试验[J].工程地质学报,2019,27(03):623-631.

[4]徐晗,朱以文,蔡元奇,等.降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J].岩土力学,2005(12):1957-1962. DOI:10.16285/j.rsm.2005.12.020.

[5]刘礼领,殷坤龙.2008.暴雨型滑坡降水入渗机理分析[J].岩土力学,29(4):1061-1066

[6]刘艳辉,刘丽楠.基于诱发机理的降雨型滑坡预警研究——以花岗岩风化壳二元结构斜坡为例[J].工程地质学报,2016,24(04):542-549.