

外部降雨条件和内部瞬态承压水作用对堆积层滑坡的影响分析和数值模拟

汪磊, 尚岳全

(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: [目的] 分析瞬态承压水的发育特征, 为该类滑坡的预防和治理提供科学借鉴。[方法] 以浙江省丽水市松阳县范山头滑坡为例, 对其松散堆积体边坡内部的瞬态承压水的作用机理进行模拟和研究, 通过分析滑坡区域的地质背景条件、水文地质条件、变形破坏特征, 并与降雨数据进行对比, 采用 GeoStudio 数值模拟软件对不同的降雨条件和坡体初始水位进行模拟。[结果] 当滑坡体存在渗透性差异很大的不同岩土层时, 强降雨作用或者较高的初始水位会促进瞬态承压水的出现和发展, 降低边坡的稳定性。[结论] 外部降雨和瞬态承压水的产生和发展对堆积层滑坡的产生有重要的影响作用, 降低了坡体的稳定性, 促进了滑坡的出现。

关键词: 堆积层边坡; 瞬时承压水; 发育特征; 降雨强度; 初始水位; GeoStudio

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)05-0141-05

中图分类号: TU43

文献参数: 汪磊, 尚岳全. 外部降雨条件和内部瞬态承压水作用对堆积层滑坡的影响分析和数值模拟[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 141-145. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 05. 021; Wang Lei, Shang Yuequan. Analysis and numerical simulation on influence of external rainfall conditions and internal transient confined water on accumulation landslide [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 141-145.

Analysis and Numerical Simulation on Influence of External Rainfall Conditions and Internal Transient Confined Water on Accumulation Landslide

Wang Lei, Shang Yuequan

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: [Objective] The development characteristics of transient confined water were analyzed to provide scientific reference for the treatment and prevention of accumulation landslide. [Methods] Taking the Fanshantou landslide at Songyang County, Lishui City, Zhejiang Province as an example, the mechanism of transient confined water in the loose accumulation slope was simulated and studied. By analyzing the geological background conditions, hydrogeological conditions, the deformation and failure characteristics of the landslide area, and by comparing them with the rainfall data, the different rainfall conditions and the initial water level of the slope were simulated using the GeoStudio numerical simulation software. [Results] When there were different layers with different permeability in landslide mass, heavy rainfall or high initial water level would promote the emergence and development of transient confined water and reduce the stability of slope. [Conclusion] The generation and development of external rainfall and transient confined water have an important impact on the formation of accumulation landslide. It could reduce the stability of slope and promote the appearance of landslide.

Keywords: accumulation slope; transient confined water; developmental characteristics; rainfall intensity; initial water level; GeoStudio

山地边坡在中国南方存在广泛, 坡体安全性始终是一个重要的研究对象^[1]。堆积层滑坡是滑坡演化

的一个发展阶段, 可以持续几个月就失稳, 也可以长达数十年不进入剧滑破坏阶段^[2-3]。堆积体滑坡是所

有滑坡中分布最为广泛、规模大、发生频率高、突发性强、持续危害较大的一类滑坡种类,该类滑坡通常发生在第四系及近代松散堆积体中。堆积体边坡往往地质结构复杂,其滑体物质一般由次生堆积体,如崩积物、崩坡积物及冲积与崩坡积混合物堆积而成,成因各不相同,滑动面一般为堆积体与下覆基岩的接触面^[4-9]。地下水作为最主要的影响因素一直是稳定性研究中的重点内容^[10]。其中承压水因其水力学作用和诱发机理的特殊性,在矿山边坡和涉水边坡的研究中得到较多的关注^[11-12]。本文所提的瞬态承压水指的只在降雨条件下形成的承压水作用,承压水的形成是瞬时的,降雨停止后承压水作用消失。研究瞬态承压水,对于实施滑坡防治工程有着十分重要的应用价值^[13-14]。

目前,对于堆积层滑坡中降雨对地下水的影响研究,主要通过数值模拟、理论分析和实地监测等方法进行^[15-18],鲜有研究将由于降雨入渗而产生的瞬态承压水作为研究重点。关于承压水诱发滑坡的案例,在分析时多从传统滑坡的概念进行分析,没有深入的分析这些坡体在地质条件、地层结构上的共同点,没有从瞬态承压水的产生和作用机理角度对灾害做出深入的解释。本文以范山头滑坡为案例,通过对坡体的地质背景和水文条件进行分析,采用数值模拟的方法对边坡的渗流场进行研究,得到此类滑坡的诱发机理和瞬态承压水在坡体内部的产生和后期的发育特征。

1 滑坡概况

范山头滑坡位于浙江省丽水市松阳县玉岩镇沙丘村范山头村处,滑坡隐患区总方量约 $2.85 \times 10^6 \text{ m}^3$,前缘处于蠕滑变形状态的次级滑坡方量约 $1.50 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。场地地形呈现出北高南低、东高西低的整体特点,山间有沟谷发育。范山头整个边坡坡向 220° ,地势起伏较大,坡脚高程 440 m,后缘高程 535 m,最大相对高度超过 90 m。

该地区雨季时降雨充沛,对坡体的破坏力强,对坡体的稳定性影响较大,极易诱发地质灾害。加上坡体后缘水田较多,地下水资源较为丰富。强降雨导致坡面出现裂缝,坡体出现滑移,产生了间歇性的蠕动滑坡区。

该滑坡所处属浙西南以火山碎屑岩、变质岩为主的断块中山地貌区,滑坡区表面形态呈现上陡、中缓、下陡的趋势,滑坡体的物质可分为结构差异明显的上、中、下共 3 层,主要由粉质黏土、含黏土碎石及下覆较完整基岩组成。含角砾粉质黏土主要分布在坡

体前缘的浅层,渗透系数较低,角砾含量在 $5\% \sim 20\%$ 之间,粒径 $0.2 \sim 2.0 \text{ cm}$,饱和,可塑,切面粗糙,其余为粘性土,干强度中等—高,层厚 $1.4 \sim 9.4 \text{ m}$;中间层为含黏土碎石,要分布在前缘下层和整个后缘的基岩之上,渗透系数较大,颗粒级配分选性差,碎石含量在 $50\% \sim 80\%$ 之间,粒径 $2 \sim 15 \text{ cm}$ 不等,个别达到 18 cm 。滑坡体中零星分布碎石土。下层为下伏基岩,主要由不同风化程度的玻屑凝灰岩和泥质粉砂岩组成,厚度较大,物理力学性质较好。

该滑坡地下水补给来源丰富,活动频繁。滑坡后缘渗透系数相对较大,渗透系数为 $2.85 \times 10^{-6} \text{ m/s}$,富水性较好,水力梯度较大,滑坡前缘渗透性相对较低,渗透系数为 $5.61 \times 10^{-8} \text{ m/s}$,水力梯度较小,且滑坡表层的含角砾粉质黏土渗透系数小,为弱含水层,因此表层降雨很难入渗,后缘进入坡体内部的地下水在径流过程中对滑坡区前缘表层有“顶托”作用。地下水径流产生较大渗透力,加大了坡体下滑力,减少了抗滑力,大大降低坡体稳定性系数。

滑坡区地下水位较浅,一般在 $2 \sim 5 \text{ m}$ 左右,该滑坡出现险情之前两个月 80% 时间均在降雨,再加上滑坡后缘灌溉用水下渗、滑坡体上方生活用水无序排放等,使坡体吸收较多的水分,岩土体基本处于完全饱和状态。造成该坡体下滑力增加,并且润滑了滑动带,导致 c, φ 值急剧降低。综上所述,地下水的上升在本次滑坡的形成和发展过程中起着控制性作用。

2 滑坡变形破坏与降雨关系

2.1 滑坡变形破坏特征

滑坡的变形最早发现于 2010 年 7 月 4 日,现状滑坡区的前缘部分多处房体出现宽度高至 10 cm 的裂缝,范山头村最北侧区域出现一条最大的裂缝 L_1 , L_1 裂缝最宽处高达 15 cm ,为基本连通的弧形裂缝。到同年 8 月, L_1 弧形裂缝继续加大和扩展,最大宽度达到 25 cm 。

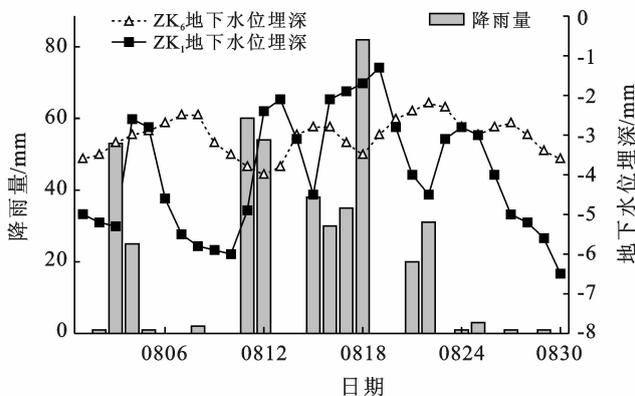
虽然采取了很多应急措施,比如水泥砂浆填充裂缝,但是收效甚微。在 2012 年 6 月经历强降雨之后,裂缝再次发展扩大。在此之后,每次经历强降雨天气之后,裂缝均扩展和加深,在 2013 年的 9 月,对整个坡体进行了地质勘察和测绘,发现整个裂缝的数量较最初有较大程度的增加,在裂缝 L_1 后缘出现新裂缝 L_6 ,变形破坏区范围持续扩大,2015 年 6 月对滑坡进行复查,滑坡体上分房屋倾斜明显,于 2016 年 6 月完成了全村搬迁。

2.2 降雨条件下地下水的积累过程

由于坡体前缘与后缘的渗透性不同,坡体地下水

的积累过程就是强降雨在坡体表面的不均匀入渗的过程。为了得知强降雨对地下水水位的影响,进行现场试验,结果如下。

图1所示为2018年8月的4场降雨对坡体后缘和前缘的地下水水位孔ZK₁和ZK₆的水位高程的影响,4场降雨分别是3,11,15,21日,钻孔ZK₁和ZK₆分别指代坡体的后缘和前缘部分的地下水变化情况。前缘ZK₆孔的水位响应时间为3d,在降雨开始之后的3d时间水位才达到最高位置,水位上升高程不大,在到达最高水位之后,高水位持续时间较长,水位下降比较缓慢,地下水位与降雨表现出高相关性;后缘ZK₁孔的水位响应时间为1d,水位上升高程很大,在到达最高水位之后,高水位下降迅速,持续时间较短,地下水位与降雨的相关性同样比较明显(8月21日由于现场抽水试验导致水位变化出现了滞后)。对比后缘与前缘地区的水位数据,可以发现两处的水位在降雨条件下均进行了不同程度的上涨,在到达最高水位之后,高水位维持时间较短,但是回落速度不同,后缘高水位回落较快,前缘高水位回落较慢,说明降雨对整个坡体的地下水水位高度影响较大。但是坡体后缘水位的响应时间比前缘要少2d,水位上升高度更明显,说明降雨对坡体后缘部分的水位上升影响更大。



注:ZK₆为前缘水位孔;ZK₁为后缘水位孔。下同。

图1 研究区坡体地下水水位与降雨量关系

由于坡体后缘渗透性大,强降雨发生时雨量首先通过后缘高渗透区渗入坡体内部,使得坡体后缘的地下水水位被快速抬升,而坡体前缘的地下水水位变化较为滞后,强降雨的不均匀入渗对地下水的积累过程起着关键的作用。

2.3 滑坡变形破坏与外部降雨关系

图2为滑坡区的年度降雨量,可以看出2002,2010,2012年降雨量较大,滑坡的变形破坏就开始于2010,2012年。从月降雨量分布(见图3)可以看出,

2002年虽然降雨量较大,但降雨分散,全年相对均衡,没有出现单月降雨量超过300mm的月份,而滑坡出现变形破坏的2010年和2012年的单月最大降雨量分别达到365mm和466mm,而且最大降雨量出现的月份均是6月,也就是滑坡灾害出现的前一个月,由历时降雨数据查知,2010,2012年6月份的90%时间均处于降雨天气下,坡体逐渐趋于饱和,地下水水位不断上升,导致滑坡发生变形破坏,产生较大规模的裂缝。由此可见,滑坡变形破坏与降雨关系密切。

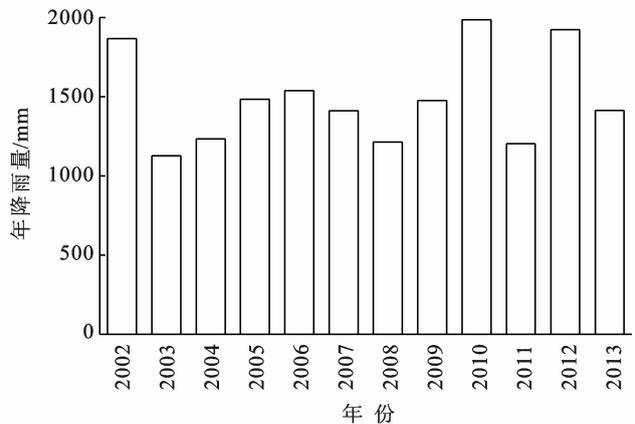


图2 2000—2014年研究区年度降雨量

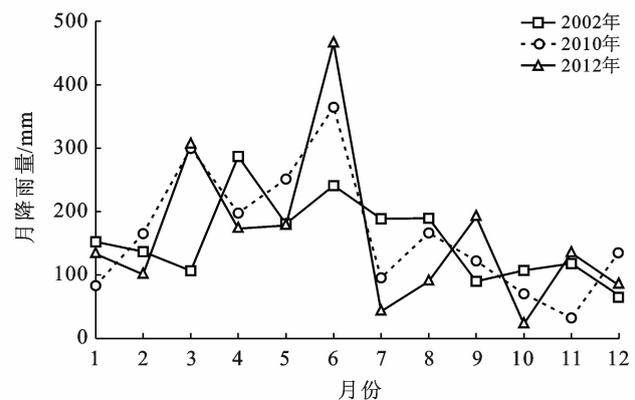


图3 2002,2010及2012年研究区的月降雨量分布

3 瞬态承压水对坡体的影响以及数值模拟

3.1 瞬态承压水的提出以及对坡体的影响

从地层剖面分布可以发现,表层粉质黏土只分布在坡体的中缘和前缘,后缘的表层是渗透性较好的碎石土层,渗透系数较低的含角砾粉质黏土在滑坡后部缺失,这为降雨入渗提供了很好的条件。因此当雨季发生连续降雨时,大量的地下水外来补给可以通过后缘的碎石土层进入坡体,并沿着坡体内部的碎石土层进行较为稳定的地下水渗流。由于坡体前缘是渗透

性较低的粉质黏土层,坡体前缘的入渗率低,大部分外来降雨均沿着坡体表流走,渗入坡体内部的外来降雨较少,坡体前缘的地下水位来源主要为坡体后缘入渗进而随着渗流通道而来的地下水。随着后缘地下水位砸坡体内部的不断渗流,前缘地下水也不断上升,由于地下水上升过程中会遇到渗透性低的粉质黏土层的下底面,此时就出现了上升的阻碍,就出现了瞬态承压水的作用,对坡体产生了很大的影响作用。

通过范山头滑坡变形破坏发展过程分析,揭示了降雨入渗是诱发滑坡灾害的主要外在因素。降雨入渗是瞬态承压水出现的必要条件,对于堆积层滑坡,只有产生了降雨,才会导致瞬态承压水的出现。降雨是外因,瞬态承压水是内部因素。研究降雨入渗产生瞬态承压水的形成过程,将可以更深入地理解范山头滑坡的成因机理。为此首先选择具有实测数据的 2018 年,开展坡体渗流场数值模拟分析,验证计算模型的合理性,进而研究降雨入渗形成瞬态承压水的条件。

3.2 计算模型及其验证分析

选取 ZK₁ 和 ZK₆ 所在的剖面,采用 GEO-STUDIO 软件,构建边坡渗流场分析计算模型,模型长度为 470 m,高度为 140 m,分析坡体渗流场特征。

在模拟过程中,由于基岩为泥质粉砂岩,渗透性很低,模拟时渗透系数设为 0,基岩被视为不透水层,

在含黏土碎石层和基岩之间的接触面处施加零流量参数可以实现。该模拟方案的基本思路是分别在整个滑坡区域的前缘和后缘设置固定水头高,水头高为坡体实际的监测数据,从而确定坡体内部的初始地下水位位置。在坡面处设置不同的降雨强度和降雨时间段,探究不同条件下坡体内部渗流场的变化规律。此外,该模拟方法根据地表岩土体的渗透性,模拟了入渗边坡的水量和地表渗流,忽略了地表渗流对边坡的影响,模拟了不同降雨强度和不同初始水位下坡体内地下水位的变化。

首先选择具有完整监测资料的 2018 年 8 月 1 日至 15 日的实测降雨量和实测地下水位,进行模型合理性验证,以钻孔的实测地下水位和模型计算地下水位作为验证依据。

图 4 为滑坡前后缘钻孔实测地下水位与数值计算地下水位对比图。以 2018 年 7 月 31 日实测水位作为模拟初始水位,同时作为模型的边界固定水头。将降雨条件设置为水量单位流量和时间的函数,并输入日实际降雨量数据,对 ZK₁,ZK₆ 钻孔水位进行了为期半个月的模拟,并与 2018 年 8 月实测水位进行了对比。可以对比发现建立的数值计算模型与实际的地下水位变化规律十分接近,能够较好地反映范山头滑坡地下水渗流特征,可以用于滑坡地下水渗流场的模拟研究。

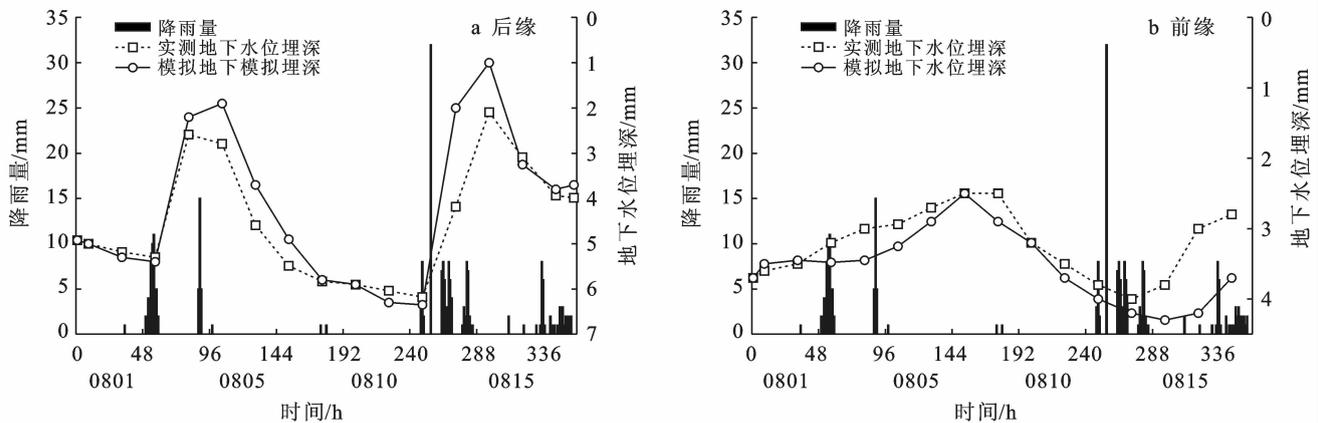


图 4 研究区滑坡钻孔实测地下水位与数值计算地下水位对比

3.3 降雨强度对瞬态承压水的影响

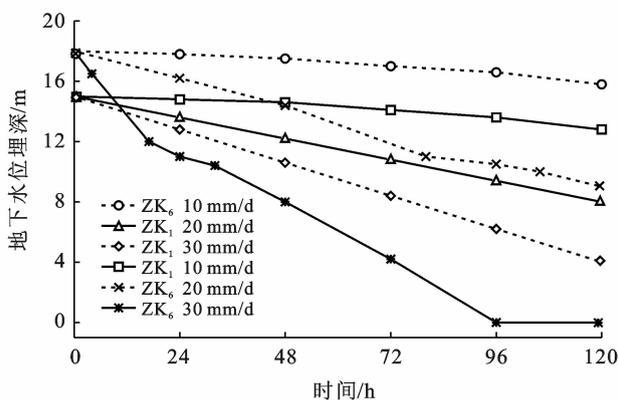
不同的降雨强度,有着不同的坡体地下水渗流场变化过程。该区域的月降雨量总体上可以划分为:100 mm 以下低降雨量、100 mm~250 mm 中等降雨量和 250 mm 以上的强降雨量。为了便于分析不同降雨强度下的坡体渗流场特征,选定降雨强度分别为 10,20 mm/d 和 30 mm/d,降雨持续时间为 5 d,采用滑坡实测的初始地下水位条件,进行不同降雨强度条

件下的渗流场变化规律研究。

通过对比分析 10,20 mm/d 和 30 mm/d 的降雨强度下,经过 5 d 时间后,坡体内部地下水位的位置对比,可以得知,在降雨前,坡体内的地下水位保持在粉质黏土层底面以下,此时坡体中不出现承压水,地下水表现为潜水形式。在降雨过程中,地下水位逐渐上升,但不同降雨强度条件下地下水位上升速度和幅度均不相同。

在降雨强度为 10 mm/d 条件下,坡体地下水位没有达到粉质黏土层的底面,始终没有形成承压水。这表明在非强降雨的自然条件下,地下水以潜水形式表现出来,不形成承压水;在降雨强度为 20 mm/d 条件下,地下水上升幅度有所增加,在降雨后 72 h,前缘 ZK6 附近的地下水位上升超过粉质黏土层的底面,形成局部承压水。随降雨过程的发展,承压区范围逐渐扩大;在降雨强度为 30 mm/d 条件下,最明显的特征表现为大面积的承压区及高的承压水压力水头,出现了地下水的渗出区。现场调查发现强降雨后,相应区域出现大量泉点。在降雨 24 h 后,前部 ZK6 处地下水位就上升到粉质黏土层的底面以上,形成局部承压水,在降雨 72 h 后就出现了地下水的地表渗出,这表明随着降雨强度的增加,承压水发展为前缘渗出的泉点是一个必然的过程。

图 5 为在不同降雨强度下,坡体不同位置的地下水位随时间的变化情况。从图中可以看出在不同强度的降雨条件下,均引起坡体地下水位上升。受地质结构的影响,后缘地下水位上升表现为匀速过程,不同降雨强度条件下的地下水位上升过程的表现形式基本相同。前缘的地下水位上升表现形式与降雨强度有关,在较低的降雨强度时,地下水位表现为匀速上升,再较高的降雨强度时,地下水位快速上升,在形成局部承压水后,会出现短暂的地下水位上升速度减缓的阶段。随后地下水位又会匀速上升,直到地下水位到达地表,也反映出瞬态承压水的形成过程。



注:图例中不同数值代表不同的降雨强度。

图 5 研究区不同降雨强度下地下水位随时间变化特征

3.4 初始水位对瞬态承压水的影响

初始地下水位条件体现了前期降雨积累。研究初始地下水位条件对形成瞬态承压水影响规律,可以揭示前期降雨积累对滑坡稳定性影响程度。以滑坡实测地下水位为基础,通过抬升 2 m 和降低 2 m 初始地下水位,模拟 3 种工况对瞬态承压水形成的影响。

选择降雨强度为 20 mm/d,降雨持续时间均为 5 d,进行三种工况对比分析。

通过对比分析 3 种初始地下水位工况条件下,降雨强度为 20 mm/d,降雨持续时间 5 d 后的地下水位情况。可以得知,对于这种特殊的渗透性差异的二元结构堆积体,降雨对坡体稳定性的影响与初始坡体地下水位的高低关系密切。当初始水位较低时,地下水位上升需要的时间较长,需要很长时间才能够进入上层渗透性较低的粉质黏土层,较难形成对坡体影响较大的瞬态承压水,一次降雨过程对坡体稳定性威胁较小;当初始水位较高时,由于降雨入渗的叠加作用,会导致地下水位快速上升,快速产生较大的瞬态承压水,对坡体产生极大的威胁。当初始地下水位位于两者之间时,对坡体的威胁也位于两者之间。综合 3 种初始水位高度的结果与分析,总体上表现为坡体内部的初始水位越高,降雨过程产生承压水压力越大,对坡体稳定性威胁越大。

4 结论

根本滑坡概况分析、滑坡变形与降雨关系分析,瞬时承压水的理论分析和数值模拟,所得结论如下:

(1) 松散堆积层边坡中往往分布相对隔水层,渗透性二元结构堆积体是其中的典型类型,降雨入渗在边坡的某些部位形成瞬态承压水,会导致边坡失稳。瞬态承压水的形成不仅取决于地层结构,还受降雨强度和降雨持续时间及初始地下水位条件等多方面因素的影响。

(2) 堆积层边坡的变形破坏与降雨量及其降雨过程关系密切;在连续强降雨条件下,滑坡体中会产生瞬态承压水,从而使坡体稳定性大幅下降,是产生范山头滑坡失稳的主要因素;降雨强度高,初始水位高,均会促进坡体内部形成瞬态承压水,导致滑坡灾害的发生。

(3) 通过数值模拟揭示了堆积体滑坡瞬态承压水和降雨之间的量化关系。瞬态承压水的出现需要特定的降雨条件,特定的地层结构,出现的时间较短、作用较强,加速地下水的流动速度,对堆积层边坡的失稳有很大的促进作用,在实际工程防治中应该注意瞬态承压水的疏散。

[参 考 文 献]

- [1] 唐海,唐川,陈明,等.强震区泥石流防治工程效果数值模拟分析[J].水土保持通报,2019,39(4):196-201.
- [2] 夏敏,任光明,马鑫磊,等.库水位涨落条件下滑坡地下水渗流场动态特征[J].西南交通大学学报,2014,49(3):399-405.

反映被评价水体状况明显变化;而用 SWQI 指数评价是,单项分指数分别为 0.95 和 1.05,差异很小。这也反映出单因子评价存在自身难以解决的问题。

3.4.2 评价方法统计基础的影响 SWQI 指数评价法是一种均权量化评价法,因而 SWQI 指数反应的是水质各项污染物质浓度水平的数学概化。现行地表水环境质量评价办法是一种极值评价法,只关注到污染最重的指标,忽略或者弱化了其他指标的影响^[7]。

3.4.3 地区差异带来的影响 SWQI 指数评价法定量分级的阈值是使用数理统计方法得到的,因此在数据区间的高值区和低值区都会存在扰动。而由于陕西省地理上差异,陕南、关中、陕北 3 个地理区域的地表水环境现状有明显不同的特点,对 SWQI 指数评价法的稳定性和适应性提出了很高的要求。

4 结论

(1) 从监测数据出发,用数理统计方法得到 SWQI 定性评价 I—VI 级阈值(≤ 3.5 , ≤ 5 , ≤ 6.5 , ≤ 8 , ≤ 10 , > 10),经过断面、河流、区域等 3 个层次的数据验证,在不同水期、不同地理区域上均显示了与现行地表水环境质量评价办法良好的一致性。

(2) 在 SWQI 分级评价的基础上,地表水环境质量指数 SWQI 可以实现地表水环境质量定性评价与定量评价的统一,简化地表水环境质量评价过程,普及公众对水质评价的认知度,实现如同空气质量指数 AQI 一般的功效。

[参 考 文 献]

- [1] 孔海燕,陈珂,赵颖,等.水环境质量评价及其数量分析方法研究[J].中国资源综合利用,2018,36(3):109-111.
- [2] 李名升,张建辉,梁念,等.常用水环境质量评价方法分析与比较[J].地理科学进展,2012,31(5):617-624.
- [3] 马立平.统计数据标准化—无量纲化方法:现代统计分析方法的学与用(三)[J].北京统计,2000(3):34-35.
- [4] 嵇晓燕,孙宗光,陈亚男.城市地表水环境质量排名方法研究[J].中国环境监测,2016,32(4):54-57.
- [5] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [6] 邓聚龙.灰色系统综述[J].世界科学,1983(7):1-5.
- [7] 廖岳华,樊娟,陈世雄,等.我国地表水环境质量评价存在的问题与建议[J].安全与环境工程,2010,17(3):55-58.
- (上接第 145 页)
- [3] 刘宝元,刘瑛娜,张科利,等.中国水土保持措施分类[J].水土保持学报,2013,27(2):80-84.
- [4] 汪丁建,唐辉明,李长冬,等.强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J].岩土力学,2016,37(2):439-445.
- [5] 尹晓萌,晏鄂川,杜毅,等.库水位下降条件下堆积层滑坡稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(3):8-15.
- [6] 刘礼领.库水位升降对堆积体滑坡稳定性影响的研究[J].西部探矿工程,2011,23(2):35-39.
- [7] 武秀文,贺可强,崔宪丽,等.不同库水位条件下堆积层滑坡渗流场和稳定系数的影响分析[J].卷宗,2012(10):144-145.
- [8] 武秀文.库水位变化加卸载动力效应及其对堆积层边坡稳定性影响规律研究[D].山东青岛:青岛理工大学,2012.
- [9] 刘晓红,贺可强,罗会来,等.库水位升降对典型堆积层滑坡的加卸载动力作用规律研究[J].工程建设,2014,46(5):18-23.
- [10] 蔡玲,胡成,陈植华,等.江汉平原东北部地区高铁锰地下水成因与分布规律[J].水文地质工程地质,2019,46(4):18-25.
- [11] Liu Xiaoli, Wang Sijing, Wang Enzhi. A study on the uplift mechanism of Tongjiezhi dam using a coupled hydro-mechanical model [J]. Engineering Geology, 2011,117(1/2):134-150.
- [12] Seo S N, Liu P L F. Edge waves generated by the landslide on a sloping beach [J]. Coastal Engineering, 2013,73:133-150.
- [13] 赵权利,孙红月,王智磊,等.承压水对平推式滑坡的作用分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):762-769.
- [14] 赵权利.缓倾滑坡中承压水作用机理研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [15] Doglioni A, Fiorillo F, Guadagno F M, et al. Evolutionary polynomial regression to alert rainfall-triggered landslide reactivation [J]. Landslides, 2012, 9(1):53-62.
- [16] Xu Qiang, Liu Hanxiang, Ran Jiabin, et al. Field monitoring of groundwater responses to heavy rainfalls and the early warning of the Kualiangzi landslide in Sichuan Basin, Southwestern China [J]. Landslides, 2016,13(6):1555-1570.
- [17] Ran Qihua, Qian Qun, Wang Guangqian, et al. Analytical solution for slope instability assessment considering impact of confined aquifer [J]. Journal of Central South University, 2015,22(4):1502-1509.
- [18] 孙红月,吕庆.堆积层滑坡成因机理与防治[M].北京:科学出版社,2012:1-5.