

滇西北高原山区不同降雨条件下斜坡深部响应的试验研究

陈贺^{1,2,3}, 鲁志强^{1,2,3}, 李果^{1,2,3}, 陈争玉^{1,2,3}

(1. 云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041; 2. 云南省交通投资建设集团有限公司, 云南 昆明 650103; 3. 云南省数字交通重点实验室(筹), 云南 昆明 650000)

摘要:为了探讨滇西北高原山区不同降雨条件下斜坡深部响应特征和机制,通过布设远程实时监测装置,开展斜坡原型现场试验,分析不同形式、降雨量等自然降雨条件对深部位移和地下水位变化的影响,提出滑坡监测预警建议。结果表明:汛期集中强降雨、坡度陡、岩石破碎等高原山区特征能够诱发斜坡更深部地下水位发生较小幅度的频繁波动,进而造成坡体深部形成两层变形剪切带;浅层位移随累计降雨量增加而增大,连续性降雨诱发浅层位移所需的累计降雨量比间歇性降雨小;地下水位长时间持续波动是深层位移间歇性急剧增大的主要诱因;应从预警角度出发选取监测指标,更多地关注用于滑坡预警的降雨量、地下水位、位移先后顺序。

关键词:高原山区;自然降雨;深部响应;现场试验

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

0 前言

复杂地形地貌特征是滑坡发育的根本原因,降雨是诱发滑坡的主要自然因素^[1]。位于青藏高原与云贵高原交界处的云南省西北地区高山深谷相间排列,具有丰富多样的立体气候和复杂多变的地形地貌条件,降雨引发的滑坡灾害多发、频发、规模大,对当地居民居住环境和基础设施安全造成极大的威胁。监测预警是主动防控滑坡灾害的主要手段之一。研究表明:降雨、地下水位、变形的有机结合综合预警可提高滑坡预警的精度和准确性^[2]。因此,有必要在滇西北高原山区开展降雨条件下斜坡地下水和变形的响应特征研究,对于高原山区乃至中国滑坡灾害的预测预报和防治具有重要的理论和实践指导意义。

针对具有非连续、大变形等失稳破坏特征的地质体^[3],试验研究是探索降雨条件下斜坡地下响应规律的有效途径之一。史振宁等^[4]探讨了降雨条件下地下0.5 m范围土体含水率分布状态;杨宗岱等^[5]利

用多参数长时间监测序列数据,探究了降雨条件下震后浅层堆积体斜坡的变形响应机制;林鸿州等^[6]通过模型试验揭示了降雨入渗对边坡稳定性的作用机制;江强强等^[7]通过库岸滑坡物理模型试验认为短时降雨对坡体变形的影响较小;Xia等^[8]分析了降雨对三峡库区斜坡位移的影响,得出降雨是浅层变形的主要诱发因素;刘广宁等^[9]完成了3组降雨诱发浅层滑坡全过程物理模型试验,探讨了华南强烈风化岩地区滑坡的响应规律与成灾降雨特征;李龙起等^[10-13]分析了不同降雨和软弱夹层倾角条件下顺层岩质边坡模型的变形响应规律,并明确指出要重视斜坡深部位移的监测;Wu等^[14]通过3组不同降雨强度和坡度条件下滑坡模型试验,分析了降雨入渗作用下黄土滑坡的破坏特征;李爱国等^[15]、龙万学等^[16]完成了土质滑坡的现场试验,探讨了降雨诱发浅层滑坡的成灾特征和机理;Marco等^[17]通过黏土滑坡现场试验得出,基质吸力变化是触发深度1.4 m滑坡体变形的的主要因素;Askarinejad等^[18]通过人工降雨条件下砂土滑坡(剪切带最深1.455 m)现场试验得出,位移是滑坡失稳破坏的显著前兆信息;郑恒等^[19]通过现场

收稿日期:2021-12-02

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2022YFC3002601);兴滇英才支持计划项目;云南交投科技创新计划项目(编号:YCIC-YF-2022-17)

作者简介:陈贺,男,博士,高级工程师.E-mail:chenhe_2009@163.com

监测表明泥岩滑坡以浅部多层滑动为主,地下 1 m 处位移速率与降雨量具有相关性;Vallet 等^[20-21]构建了斜坡地下水补给计算方法,探讨了周期性变化位移与地下水位之间的关系;Wei 等^[22]建立了斜坡深层滑动降雨量阈值估算方法;Zhi 等^[23]通过现场监测阐述了滑坡深层位移速率与地下水位之间的关系。

上述研究对于揭示和认识不同降雨条件下斜坡地下水位、变形响应规律和失稳破坏机理具有重要意义。然而,模型试验采用的物理概化模型难以完全模拟坡体实际结构,尤其是复杂结构的岩质边坡,得到的相关研究成果仅可用于监测预警实践参考^[4];试验过程中多采用人工降雨模拟诱发滑坡的主要因素,实际上即使利用再精细化和先进化的人工降雨装置也难以模拟自然降雨特征^[13];另外,大多数研究成果均是基于土质斜坡浅表层滑动(一般深度 2~5 m)得到的,有关岩质斜坡深部响应规律和机制还有待研究。本文通过布设远程实时监测装置,开展滇西北高原山区自然降雨条件下的斜坡原型现场试验,分析不同降雨条件下斜坡深部位移和地下水位的响应规律和变化机制,提出滑坡监测预警相关建议。

1 滇西北高原山区地质环境特点

滇西北地处青藏高原东南部,横断山脉的北段,受欧亚板块和印度板块的剧烈碰撞和挤压作用,新地质构造运动较为活跃,燕山运动末期基本定型,喜山运动又强烈上升隆起,承袭断裂活动、差异抬升、河流下切等区域地质演变影响,形成北部梅里雪山、东南部哈巴雪山和玉龙雪山,地面高程为 1 800~3 500 m,沟谷深切、河谷狭窄,总体上呈现出西北高、东南低的构造剥蚀高中山和构造侵蚀高山地形地貌。特殊的构造地貌形态造就了“四山夹三水”的“三江并流”的特殊地貌水文景观。金沙江、澜沧江、怒江流域两侧山谷坡度陡,是斜坡地质灾害的主要发育区^[24]。

滇西北位于北纬 26°14′~29°20′、东经 98°05′~101°16′,属于低纬度高原山区。受东亚季风、南亚季风、青藏高原季风环流的影响,气候垂直变化极为明显,属于温带和寒温带季风气候,具有季节变化不明显、年温差小、日温差大、干湿季明显等特点。降雨主要集中在 5—10 月,以阵性降雨为主、雨滴较大,大雨、

暴雨频发,多年平均降雨量 800 mm,日最大降雨量达 100 mm,达到或超过斜坡活动对水分的要求^[25]。

2 现场试验方案

笔者在滇西北各州、市地区开展了斜坡相关指标的监测实践,并积累了位移、降雨量、地下水位等关键预警指标的监测数据。综合考虑滇西北地区的气候条件、地形地貌、地层岩性和斜坡变形机制,选取一处代表性斜坡监测数据,重点探讨不同自然降雨条件下地下水位和深部变形特征以及变化机制。需要说明的是,文中所述深部位移是斜坡监测中的一种惯用语,指地下不同深度处的位移。

2.1 试验场地描述

试验场地位于云南省西北部,属于滑坡灾害较为发育的青藏高原与云贵高原和四川盆地之间坡降带范围,发育多条活动断裂,地震峰值加速度达 0.3g,是云南省崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害强烈发育区。

试验斜坡位于最高海拔为 5 396 m 的哈巴雪山脚下,属于构造剥蚀峡谷高中山地貌区,海拔高程 2 300~2 700 m,谷坡陡峭,地势相对高差大,上、下侧平均坡度分别为 35°、45°。斜坡所在区域属于温带和寒温带季风气候,气候垂直变化极为明显,俗有“一山分四季”的立体气候之称。深部位移钻孔位于斜坡中下部某高速公路隧道进口和桥梁的衔接区域,具体见图 1、2。



图 1 钻孔位置

受滇西北地质构造和强烈的风化剥蚀作用,钻孔深度范围内上覆第四系残坡积层(Q_4^{el+dl})含碎石粉质黏土,黄褐色、灰褐色,硬塑状,角砾成分为板岩,深度 0~10.5 m;下伏强风化板岩,灰褐色,泥质胶结,变余结构,岩体较为破碎,板状构造,节理裂隙发育,多呈碎石状。深度 42~46 m 内的板岩更加破碎,含水量较大,结合差,呈现碎裂状结构(图 3)。

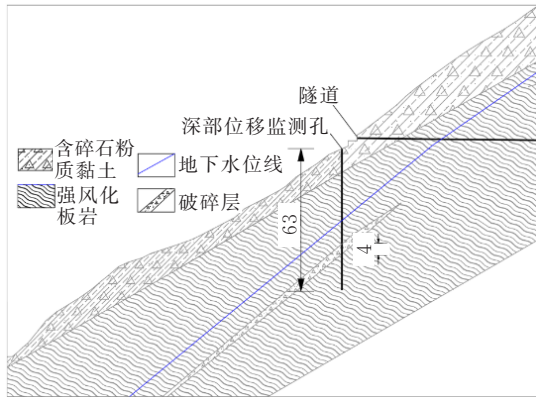


图2 工程地质剖面(单位:m)



图3 深度42~46 m位置处的岩芯

2.2 监测系统

试验采用的监测系统由地下监测装置和地面监测装置组成,地下监测装置主要包括基于MEMS深部岩土体变形监测仪器(MEMS深岩仪)、渗压计,地面监测装置主要包含翻斗式雨量计、数据采集发送装置等,如图4所示。

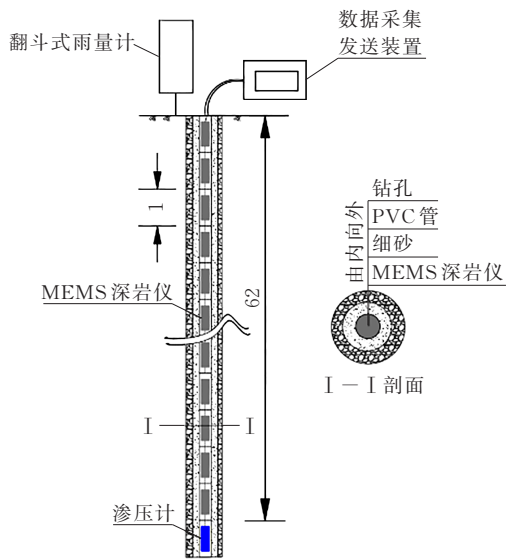


图4 试验采用的监测系统(单位:m)

MEMS深岩仪是自主研发并经过大量现场监测验证的一款深部位移监测装置,可监测3个相互垂直方向的位移,监测深度间隔为1 m,具有精度高、频率

高、可测量大变形等优势,相关监测原理和方法可参考文献[26];翻斗式雨量计的型号为JD-05型,承雨口直径为20 cm,分辨率为0.2 mm;地下水位监测采用的CX-212型渗压计具有抗干扰能力强、漂移小、性能可靠等优势,量程为1 MPa。

野外监测过程中,采用光伏板供电系统向所有监测装置供电。该光伏板系统能在仅有光照条件下发电,保障监测装置在连续阴雨条件下的用电量,适用于高原山区的长期监测;采用自主集成的数据采集发送装置,将深部位移、地下水位、降雨量等数据远程实时发送至室内;数据采集频率一般为1 h/次,可根据监测需求进行调整。

2.3 监测装置安装过程

为避免岩土体挤压造成地下监测装置破坏,渗压计和MEMS深岩仪均埋设于PVC管内。具体埋设步骤为:①在直径75 mm的PVC管端头处交叉开孔,并将透水土工布包裹的渗压计放入其中,然后采用透水土工布包裹PVC管的外侧;②采用单动双管钻具进行钻孔,钻孔深度为63 m,钻孔直径约为110 mm,向钻孔内拼接安装PVC管;③向PVC管内放入MEMS深岩仪,同时通过向上提拉的方式保证其垂直度;④向PVC管与MEMS深岩仪之间的空隙内填入细河砂或机制砂,期间不断向空隙内倒入适量的清水,使PVC管与MEMS深岩仪紧密接触,保障位移监测精度(图5)。

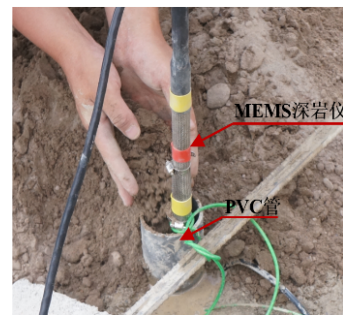


图5 MEMS深岩仪的安装过程

地面监测装置的正确安装对于长期远程监测非常重要。首先,按照相关要求在设备箱内部固定后端监测装置,主要包括便携式锂电池、数据采集发送装置、渗压计和太阳能板控制器等,并正确连接线路,如图6(a)所示。然后,将设备箱、光伏板、雨量计等安装在立柱上,其中光伏板的安装方向要保证其不被构筑物遮挡光照[图6(b)]。

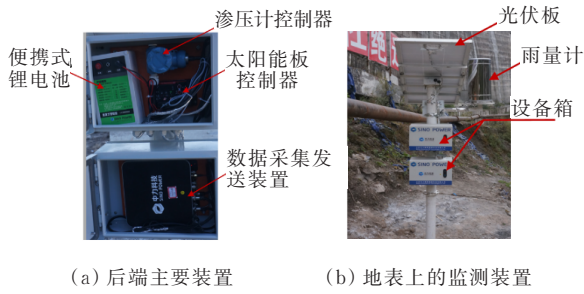


图 6 监测装置的安装

3 试验结果分析

2018 年完成监测装置的安装、调试后,连续远程、实时自动化监测两年,积累了大量深部位移、降雨量、地下水位数据。期间隧道掘进量为 400~620 m,综合分析认为施工对监测结果的影响很小,尤其在汛期,隧道施工近乎停止,但此时深部位移发展较快。由于篇幅限制,重点利用 2019 年的监测结果分析不同降雨条件下地下水位和深部变形的响应规律和特点。

3.1 自然降雨条件

图 7 为 2018 年 11 月至 2019 年 12 月间的日降雨强度。

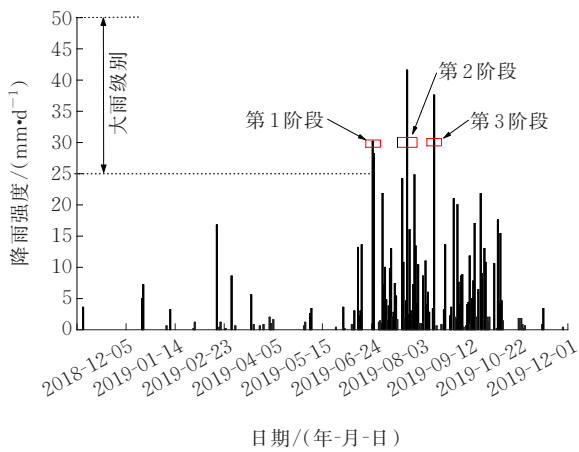


图 7 2018 年 11 月至 2019 年 12 月间日降雨强度

由图 7 可知:全年降雨量主要集中在 6—9 月,6 月 24 日至 26 日(第 1 阶段)、7 月 19 日至 8 月 2 日(第 2 阶段)、8 月 13 日至 14 日(第 3 阶段)的大雨期间深部位移发展较快,因此主要分析这 3 个阶段的自然降雨对地下水位和深部位移的影响。

由于前期降雨对斜坡地下水位和变形影响较大,按照降雨间隙最大限值 15 h 原则确定 3 阶段的降

雨周期,不同降雨条件参数如表 1 所示。

表 1 不同降雨条件参数

阶段	降雨形式	最大降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	累计降雨量/mm	累计持续时间/h
1	连续双峰形	8.8	58.4	39
2	间歇多峰形	14.2	165.6	320
3	连续单峰形	13.8	41.0	14

由图 7、表 1 可以看出:第 2 阶段为多峰形、间歇性降雨,最大降雨强度和累计降雨量最大,累计持续时间最长;第 1、3 阶段分别为双峰、中峰形连续性降雨,第 3 阶段最大降雨强度较大,但累计降雨量较小,累计持续时间较短。

3.2 降雨与地下水位

3 阶段强降雨期间的小时降雨强度、地下水位高度与时间之间的关系如图 8 所示,其中地下水位高度为地下水位与钻孔孔底之间的距离。

由图 8 可知:第 1 阶段降雨期间地下水位高度保持基本不变,第 2、3 阶段降雨诱发地下水位频繁波动;该斜坡地下水位深度为 32.8~33.8 m,深于其他现场试验斜坡的地下水位^[22-23, 27],但第 2、3 阶段的降雨仍能诱发地下水位发生变化;第 2、3 阶段地下水位变化幅度均小于 40 cm,相比其他斜坡浅层地下水变化量值较小^[22-23, 27];由图 8(b)、(c)可以看出:地下水位高度增大相对于最大降雨强度具有滞后性,滞后时间与前期降雨量密切相关。

地下水补给受地表形态、当期降雨量、前期降雨量、植被、光照等多种因素影响^[20]。对于该试验斜坡,地表形态、前期降雨量、当期降雨量为地下水位高度的关键控制因素。前期降雨量较大会造成岩土体含水量增大,甚至饱和,再次发生降雨时湿润锋能够迅速向下发展并直接补给地下水位。因此,前期降雨量为 0(图 8)的第 1 阶段连续降雨只能增加斜坡岩土体含水量和湿润锋深度,不足以抬升地下水位;汛期集中降雨导致前期降雨量足够大,湿润锋接近地下水位高度,第 2 阶段降雨就能够诱发地下水位高度发生频繁变化。然而,滇西北高原山区陡坡地形和更加破碎的风化岩石构建了良好的地下水排泄条件,强降雨作用下地下水会很快排泄,因此地下水位高度差值较小。

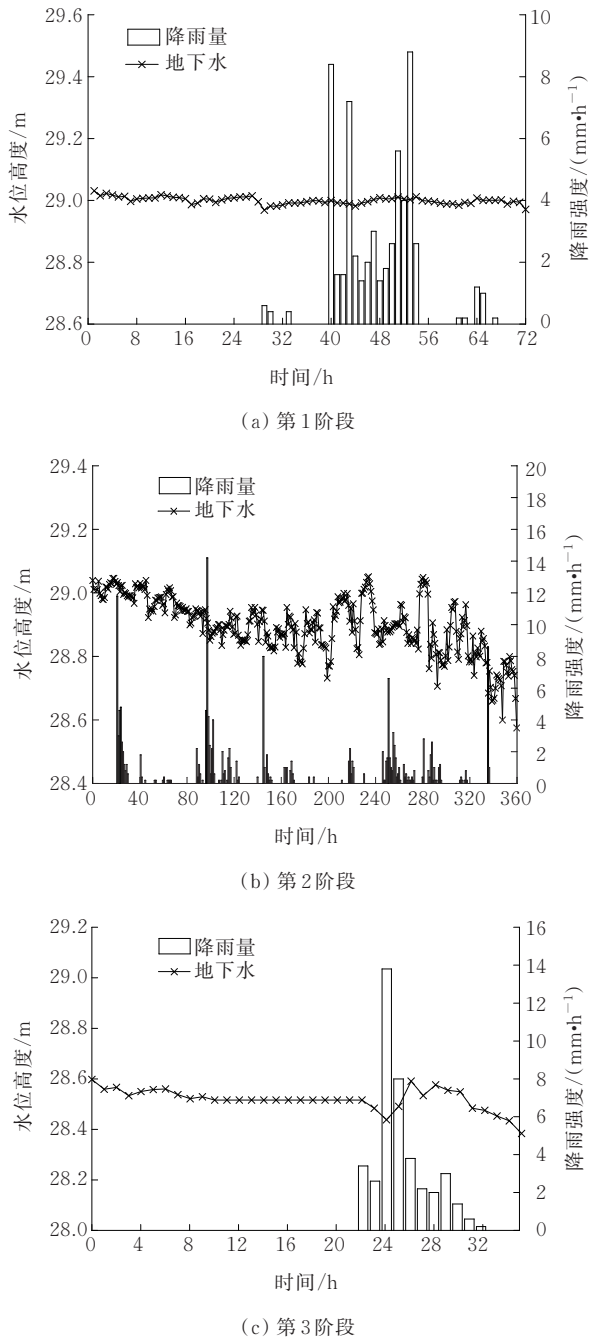


图8 降雨强度和地下水位高度与时间之间的关系

3.3 不同时刻深部位移

图9为2019年汛期不同时刻深部位移随深度的变化曲线,其中顺坡向是指顺着坡面向下的方向,逆时针旋转 90° 为垂直顺坡向。此汛期期间,隧道掘进量接近620 m,施工基本停止,因此隧道施工对深部位移监测的影响很小,可以忽略不计。

由图9可知:坡体内部存在两个显著的剪切带,分别位于深度9~10.5 m(浅层)和40~46 m(深层);浅层剪切带位于岩土分界面,深层剪切带位于破碎层范围内,图2所示的顺坡向破碎层构成了顺坡向深

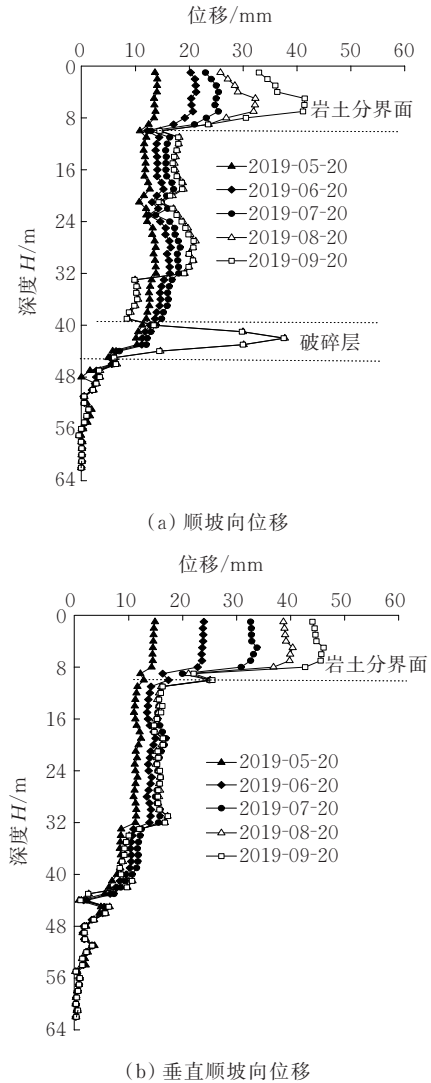


图9 不同时刻的位移与深度之间的关系曲线

层位移发展的物质基础,从坡体结构角度表明深部位移监测结果的可靠性;随着时间的增加,浅层和10.5~40 m处岩土体位移逐渐增加,破碎层位移呈现出间歇性增大;由于岩土体较破碎,因此深度10.5~40 m的位移随着深度增加表现出突变特点。

2019年7月,在钻孔附近发现挡土墙倾斜、地表裂缝、混凝土开裂等多处宏观变形迹象,距离钻孔约160 m处发现隧道内部环向裂缝,具体如图10所示。



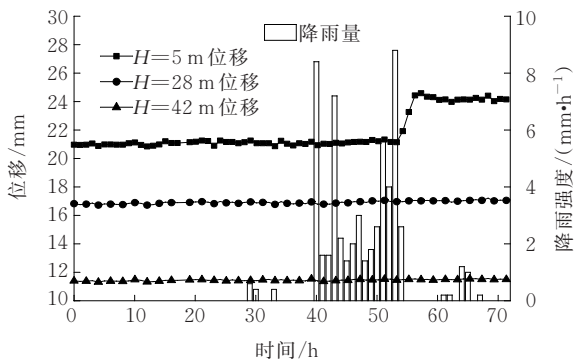
图10 宏观变形痕迹

靠近钻孔的地表裂缝宽度为 2~6 cm,由此可以进一步说明深部位移监测结果的可靠性。

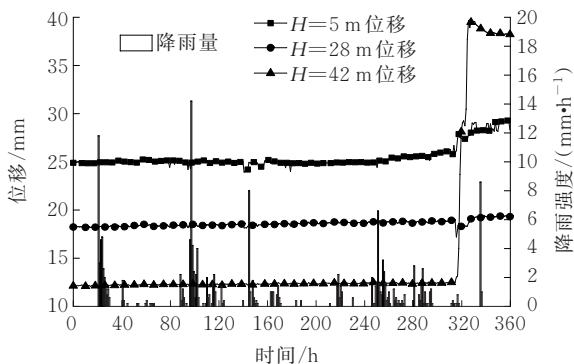
3.4 降雨与不同深度位移

选取深度 H 为 5 m、28 m、42 m 处的顺坡向位移数据来分析不同降雨条件下深部变形的特点,其中深度 5 m 和 28 m 均位于地下水位以上,深度 42 m 位于地下水位以下。3 个不同深度处初始位移主要是 2019 年 5 月之前降雨诱发的。

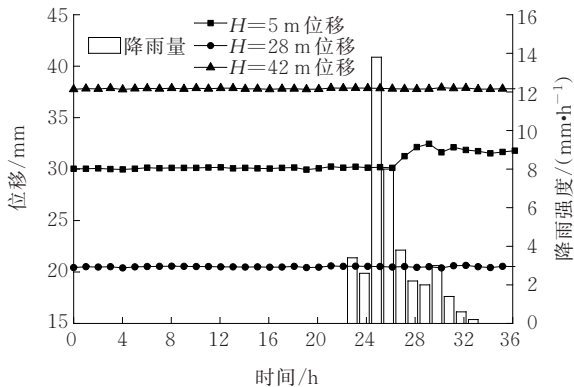
图 11 为 3 阶段降雨期间不同深度处位移随时间的变化曲线。



(a) 第 1 阶段



(b) 第 2 阶段



(c) 第 3 阶段

图 11 降雨强度和不同深度处位移与时间之间的关系

由图 11 可知:3 阶段降雨期间深度 5 m 处位移均增大,但仅有第 2 阶段降雨期间深度 42 m 处位移增加;不同深度处位移增大相对于最大降雨强度均具有滞后性,其中图 11(a)所示的浅层位移滞后时间较长,但是数值较大;图 11(b)所示的深层位移增加滞后时间最长,反映出雨水从坡面入渗至坡体内部需要一定的时间,与其他现场试验结果相一致^[11,22-23]。

图 12 为 3 阶段降雨诱发的浅层位移增量与累计降雨量之间的关系。

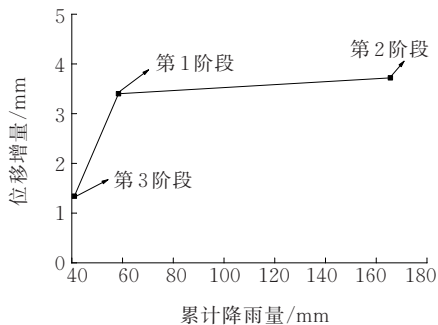


图 12 浅层位移增量与累计降雨量之间的关系

由图 12 可以看出:浅层位移增量随累计降雨量增加而增大;结合表 1 可知,第 3 阶段至第 1 阶段累计连续性降雨量由 41 mm 增至 58.4 mm,位移增量从 1.34 mm 增至 3.4 mm;而第 1 阶段至第 2 阶段累计降雨量由 58.4 mm 增为 165.6 mm,位移增量仅从 3.4 mm 增为 3.72 mm。结果表明,连续性降雨更易诱发斜坡浅层位移,连续性降雨诱发浅层位移所需的累计降雨量比间歇性降雨小。

降雨作用下斜坡非饱和土位移的增加本质上是由于基质吸力消散导致其强度降低造成的^[28-29]。累计降雨量导致土体含水量增大,基质吸力消散,土体强度也随之减小,当土体的抗剪强度不足以抵消下滑力时,土体在剪应力作用下发生变形,斜坡产生位移;因此连续性累计降雨量越大,土体强度减小幅度就会变大,位移增量也就较大;另外间歇性累计降雨量虽最大,但期间的连续性降雨持续时间较少。

降雨条件下地下水补给引起的孔隙水压力变化是斜坡深层变形的主要触发因素^[22,30]。如图 2、3 所示,钻孔深度 42~46 m 范围存在一破碎层,为深层变形奠定了物质基础;深层位移陡增之前,浅层岩土体沿着岩土分界面已滑动,造成地表出现大量宏观裂缝,构成了第 2 阶段降雨的下渗通道;长时间间歇性降雨造成地下水位高度发生频繁波动,孔隙水压力

和渗透力也随之反复变化,弱化了岩体强度^[21],320 h时深层位移陡增[图 11(b)]。连续性降雨虽然引起地下水位高度发生变化,但是深层位移却保持不变(图 11)。表明强降雨和累计降雨量引发的长时间地下水位持续性波动是深层位移急剧增大的主要诱因,与 Vallet 等^[21]对滑坡变形的水力分析结果吻合。

4 讨论

随着科学技术的突飞猛进,各种不同类型的斜坡监测指标均可实现,如降雨量、地表位移、裂缝宽度、深部位移、地下水位、地声、构造物应力等。为了保证基础设施的建设和运营安全,相关企业和部门根据工程重要性和破坏后果规定了监测指标和监测要求,对一些重要斜坡实施了监测,但并不是监测点和监测手段越多就越有效。根据本文的研究,从预警角度出发,降雨是诱发滑坡的主要驱动力,可用来预判滑坡的发展趋势,应该对其进行监测,特别是突发性很强的降雨型滑坡;位移是滑坡动态变化最直观反映和失稳破坏前最显著的外在表现,不仅需要在地表位移进行监测,而且建议对深部位移进行远程监测,尤其事先判断出地表与深部位移可能不一致的斜坡;地下水位监测需求应根据前期的勘察结果确定,对于地下水位较浅或者潜在深层滑动面位于地下水位以下的滑坡,应该对其进行监测。

滑坡预警预报是滑坡监测的主要目的,但由于降雨型滑坡一般具有较强的突发性,仅仅依靠位移数据进行预警可能会漏报或者提前时间短而不具有防灾的实际意义^[2],因此近年来耦合多元指标体系开展降雨滑坡预警正在逐步受到重视^[5]。采用多指标体系进行预警预报时,首先要根据前期监测结果判断滑动面或潜在滑动面位置与地下水位的关系;当滑动面位于地下水位以下时,因为滑坡体的变形滞后于降雨量和地下水位的变化,因此要根据降雨量、地下水位、位移的顺序进行分析预警;当滑动面位于地下水位以上时,首先要采用降雨量进行预警,而后再观察位移的变化,具体如图 13 所示。

5 结论

降雨型滑坡是滇西北高原山区最频发、最严重

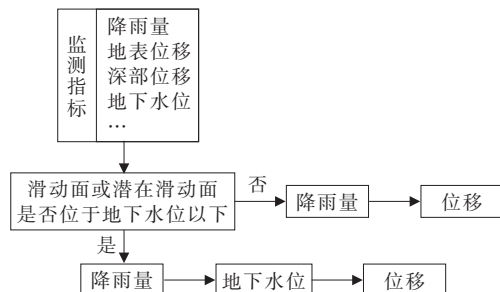


图 13 滑坡监测预警流程

的地质灾害,探究降雨条件下斜坡深部响应规律和机制对于提高滑坡监测预警精度和准确度具有重要意义。为此,通过布置远程实时监测装置开展不同自然降雨条件下斜坡原型现场试验,分析不同降雨条件下深部位移和地下水位的响应规律和变化机制,提出滑坡监测预警相关建议,得到以下结论:

(1) 汛期集中强降雨、坡度陡、岩石破碎等滇西北高原山区特征能够诱发斜坡更深部地下水位发生较小幅度的频繁波动,进而造成坡体深部形成两层变形剪切带。

(2) 斜坡浅层变形是基质吸力消散造成的,位移随着累计降雨量增加而增大,连续性降雨诱发浅层位移所需的累计降雨量比间歇性降雨小。

(3) 斜坡深层位移呈现出间歇性增加,强降雨和累计降雨量引发的地下水位长时间持续性波动是深层位移急剧增大的主要诱因。

(4) 地下水位和位移相对于最大降雨强度均具有滞后性,建议应从预警的角度出发选取滇西北高原山区斜坡监测指标,并按降雨量、地下水位、位移的先后顺序进行预警。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.
- [2] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360-374.
- [3] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野: 宏微观土力学[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 195-254.
- [4] 史振宁, 戚双星, 付宏渊, 等. 降雨入渗条件下土质边坡含水率分布与浅层稳定性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 980-988, 1085.
- [5] 杨宗佑, 王礼勇, 石莉莉, 等. 降雨滑坡多指标监测预警方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 272-285.
- [6] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 降雨特性对土质边坡失稳

- 的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):198-204.
- [7] 江强强,焦玉勇,宋亮,等.降雨和库水位联合作用下库岸滑坡模型试验研究[J].岩土力学,2019,40(11):4361-4370.
- [8] XIA M, REN G M, MA X L. Deformation and mechanism of landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall, Three Gorges, China[J]. Natural Hazards, 2013, 68(2):467-482.
- [9] 刘广宁,李聪,卢波,等.降雨诱发全-强风化岩边坡浅层失稳模型试验研究[J].长江科学院院报,2020,37(7):88-95.
- [10] 李龙起,罗书学,王运超,等.不同降雨条件下顺层边坡力学响应模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(4):755-762.
- [11] 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.
- [12] 李龙起,巨能攀.光栅测试技术在顺层边坡降雨模型试验中的应用研究[J].岩土力学,2016,37(7):2119-2127.
- [13] 李龙起.高速铁路土质边坡降雨力学响应及安全性评价研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [14] WU L Z, ZHOU Y, SUN P, et al. Laboratory characterization of rainfall-induced loess slope failure[J]. Catena, 2017, 150:1-8.
- [15] 李爱国,岳中琦,谭国焕,等.土体含水率和吸力量测及其对边坡稳定性的影响[J].岩土工程学报,2003,25(3):278-282.
- [16] 龙万学,吴俊,傅鹤林.降雨型滑坡现场模拟试验研究[J].贵州工业大学学报(自然科学版),2008,37(3):20-23,28.
- [17] MARCO B, ROBERTO V, FIORENZO S, et al. Monitoring soil-water and displacement conditions leading to landslide occurrence in partially saturated clays [J]. Geomorphology, 2012, 173-174:161-173.
- [18] ASKARINEJAD A, AKCA D, SPRINGMAN S M. Precursors of instability in a natural slope due to rainfall: a full-scale experiment[J]. Landslides, 2018, 15(9):1745-1759.
- [19] 郑恒,潘雪瑛,沙桢晖,等.基于深部位移及气象监测的泥岩滑坡特征及成因分析:以岑溪大业公田滑坡为例[J].桂林理工大学学报,2019,39(2):389-395.
- [20] VALLET A, BERTRAND C, FABBRI O, et al. An efficient workflow to accurately compute groundwater recharge for the study of rainfall-triggered deep-seated landslides, application to the Séchiliennne unstable slope (western Alps)[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(1):427-449.
- [21] VALLET A, CHAILIER J B, FABBRI O, et al. Functioning and precipitation-displacement modelling of rainfall-induced deep-seated landslides subjected to creep deformation[J]. Landslides, 2016, 13(4):653-670.
- [22] WEI Z L, LU Q, SUN H Y, et al. Estimating the rainfall threshold of a deep-seated landslide by integrating models for predicting the groundwater level and stability analysis of the slope[J]. Engineering Geology, 2019, 253:14-26.
- [23] ZHI M M, SHANG Y Q, ZHAO Y, et al. Investigation and monitoring on a rainfall-induced deep-seated landslide [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(3):1-13.
- [24] 管新邦.云南省滑坡地质灾害危险性评价研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2018.
- [25] 赵平伟,郭萍,李成武,等.云南不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(12):2135-2141.
- [26] 李果,房锐,刘晓宇,等.多节点超长深部位移监测装置和监测方法:中国,CN201610306005.6[P].2018.10.30.
- [27] 黄博寅,李德河,林宏明.降雨量与地下水位变形对南部山区边坡稳定性影响之研究[J].中华防灾学刊,2017,9(2):133-146.
- [28] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007, 98(3-4):239-267.
- [29] LU N, GODT J W. 斜坡水文与稳定[M]. 简文星,王菁莪,候龙,译.北京:高等教育出版社,2014.
- [30] PROKEŠOVÁ R, MEDVED'OVÁ A, TÁBOŘÍK P, et al. Towards hydrological triggering mechanisms of large deep-seated landslides[J]. Landslides, 2013, 10(3):239-254.