

滑坡发育的阶段性特征与观测

孔纪名

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘 要:从滑坡发育阶段性特征分析入手, 根据滑坡不同发育阶段的特点, 将滑坡的发育过程划分为蠕滑、滑动、剧滑三个阶段, 并详细分析了滑坡不同发育阶段的特点, 针对实现滑坡有效观测的目的, 提出滑坡分阶段观测的内容和方法。

关键词:滑坡; 阶段性; 观测

中图分类号: P642. 22

文献标识码: A

滑坡的发生要经历蠕滑、滑动、剧滑等三个阶段, 三个阶段的变形特征各不相同, 表现出滑坡的地表位移、速率、裂缝分布、各种伴生现象各不相同, 因此, 根据滑坡发育不同阶段特点, 采用有针对性的观测方法是实现滑坡观测的关键, 也是能否有效观测滑坡的关键。滑坡发育具阶段性特点已被大多数人滑坡工作者所认同, 铁道科学院西北分院的徐峻龄研究员^[1]从滑坡预报的需要出发, 将滑坡的发育阶段划分为蠕变三阶段, 并根据不同的蠕变阶段提出相应的滑坡预报方法。在滑坡观测中, 如何根据滑坡不同发育阶段的变形特点来实现滑坡观测却被忽视, 缺乏对滑坡不同发育阶段变形特点的准确认识, 观测结果难以达到预期目的等问题。因此, 准确的认识滑坡发育的阶段性, 并按滑坡不同发育阶段的特点进行有针对性的观测就显得非常重要。实现滑坡的有效观测是滑坡灾害预报^[2]中十分重要的一项工作, 是滑坡预报的前期工作, 对滑坡灾害预测预报有很好的意义。

1 滑坡发育的阶段性特征

滑坡发育过程具有明显的阶段性特征, 这种阶段性特征完全决定于岩(土)体的力学性质, 反映出

不同性质岩(土)体在重力作用下发生变形的过程。因此, 确定滑坡发育的阶段性, 可借助于对岩(土)体在受力条件下发生变形破坏过程分析来实现。一般说来滑坡变形可分为蠕滑、滑动、剧滑三个阶段^[3]。

1.1 岩(土)体变形的阶段性特征

一般说来处于自然条件下的岩石在长期的载荷作用下, 岩石应力、应变将随时间而发生变化, 当变形发展到一定的阶段, 岩石发生破坏。岩石的这一流变过程可通过实验得到证明(图 1)。当在岩石试件上施加一个恒定的载荷时, 岩石立即产生一瞬时弹性应变 ε (OA) 段。这一变形时间极短, 可以认为在 $t=0$ 完成, 其应变为 $\varepsilon = \sigma/E$ 。若载荷保持恒定, 此时岩石的变形随时间缓慢地增加。根据蠕变的特点, 其过程可分为三个阶段。

第一蠕变阶段(AB 段)也称蠕滑阶段。在这个阶段内, 蠕变曲线呈向下弯曲的形状, 表现出应变率 $\dot{\varepsilon}$ 随时间迅速递减。当达到 B 点, 应变率则处于本阶段的最小值。若在这一阶段之中(曲线上某一点 E)进行卸载, 应变 ε 则沿曲线 EFG 下降, 表现出弹性变形, 最后应变为零。

第二蠕变阶段(BC 段)也称稳滑阶段。蠕变曲线近似一倾斜的直线, 即蠕变应变率 $\dot{\varepsilon}$ 保持常量, 一直持续到 C 点。若在这一阶段中进行卸载, 则应

收稿日期(Received date): 2004- 08- 01; 改回日期(Accepted): 2004- 10- 15。

基金项目(Foundation item): 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KJCX2- SW- L1- 6) —“山体滑坡灾害防治中的关键力学问题研究项目”资助[The knowledge innovation important direction project of Chinese Academy of Sciences(KJCX2- SW- L1- 6) — Research on mechanics problem in landslide calamity prevention]

作者简介(Biography): 孔纪名(1956-), 男(汉族), 四川重庆人, 研究员, 主要从事斜坡变形破坏规律研究[Kong Jiming(1956-), man, Professor, Work on research of slide destroy regularity]

变沿曲线 HIJ 逐渐恢复, 最后保留一定的永久变形 ϵ_p 。

第三蠕变阶段(CD 段) 也称加速滑动阶段。应变率由 C 点开始迅速增加, 达到 D 点, 岩石即发生破坏。这一变形阶段的时间较短。

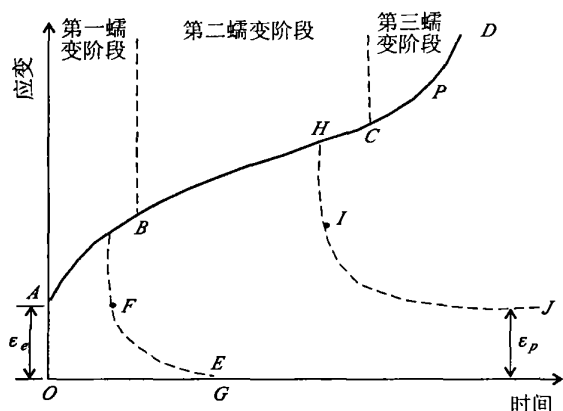


图 1 岩石蠕变曲线

Fig. 1 Rock creep curve

1.2 岩体的结构与环境对岩石流变影响

由于岩体中存在大量的节理、裂隙等不连续结构面, 大大降低了岩体的完整性和岩石强度。因此, 结构面对岩体强度及其破坏的影响十分明显。实验表明: 当受力(剪力)方向与岩体中潜在的结构面垂直时, 抗剪强度接近岩石的实验强度。当受力(剪力)方向与岩体中的结构面斜交时, 抗剪强度取决于不连续面结构面的胶结程度与胶结物强度, 由于胶结物强度一般低于完整岩石的强度, 因此, 包含结构面的岩体强度较完整岩体低, 变形同样具分阶段的特点。

结构面的形态也决定了岩体的力学性质。当结构面是呈平直状时, 受力作用后沿结构面产生位移, 其应力—应变曲线为连续光滑曲线。当结构面呈粗糙不平的锯齿状时, 结构面的咬合较大, 摩擦阻力也大, 抗剪程度较大。在受力过程中, 剪应力首先在结构面端点或结构面凸点受力一侧集中。当剪应力达到结构面端点或凸点的最大强度值(C_{max})时, 首先发生破裂, 位移随之增大, 剪应力逐渐减小, 达到一定程度后 C 值保持一定值, 即残余强度。随着位移的发展, 应力又在下一个结构面端点或凸点集中, 并逐渐发展下去, 应力—应变曲线表现锯齿状振荡, 最后使得岩体破坏, 变形趋势线仍具有岩石分阶段变形的特征。

岩体所处的环境条件(如岩石的含水量)是影响岩体力学性质又一因素。研究表明, 岩体结构面在富水后, 其强度比干燥时大大降低。如结构面中夹有粘土, 富水后结构面抗剪强度可降低 3~5 倍, 其变形趋势线仍具有岩石分阶段变形的特征。

1.3 滑坡变形过程的阶段性特征

由不同岩石构成的坡体在重力作用下发生变形破坏, 其变形的过程必然具有岩石的变形特征。一般而言, 滑坡的变形过程也可划分为三个阶段(图 2):

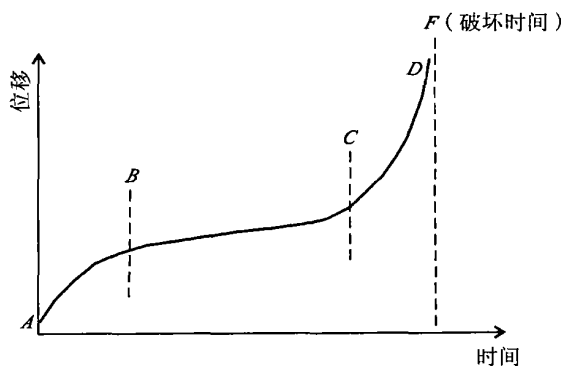


图 2 滑坡变形阶段性曲线

Fig. 2 Landslide to warp stage curve

1. 蠕滑阶段 滑坡发育的第一阶段, 即斜坡上的岩体在重力作用下, 应力首先在坡体中结构面(层面、节理、裂缝等)的两端和凸点处集中, 并发生蠕滑变形。随着结构面上剪应力增大达到 C_{max} 时, 在结构面的端点发生微破裂, 并逐渐向下一个结构面端点或凸点发展。坡体表现出缓慢的蠕滑变形。蠕滑阶段的变形特征有:

①地表裂缝 在坡体的后部出现横向拉张裂缝, 部分巨型滑坡后界裂缝可因滑坡体的巨大应变积累能力被拉开数十米。

②滑坡带(面) 在垂直固段蠕变形成剪切变形带(面), 并切断应力最先集中的垂直固段。剪切带内的抗剪强度由峰值强度逐渐降低。可见到剪切活动后的擦痕、破裂理现象。

③滑体变形 在滑坡体的后部和滑带(面)上可见不连续分布的裂缝, 变形几乎全部都集中在剪切带上, 地表宏观现象不明显。

2. 滑动阶段 滑坡发育的第二阶段。随着剪应力将滑面上的各锁固段(点)逐个剪断, 坡体的变形越来越大, 表现出变形缓慢增加, 此时潜在滑面的强度为滑动面的残余强度, 时间应变曲线为光滑的

曲线或跳跃式的位移。滑动阶段的变形特征有:

①宏观地貌形态 显露出滑坡总体轮廓,在纵向上可见解体现象。同时,滑坡周界的裂缝已基本连通,后缘可见拉张裂缝,部分可见前缘鼓胀裂缝。

②滑动面 剪切滑带已逐渐形成,滑带可见擦痕、镜面、擦痕等滑动现象。

③发育历时过程 这一阶段发育的时间较长,触发因素对加速滑动发育过程起主导作用。

④伴生现象 在滑坡发生过程中,常会出现地下水异常、动物异常、声发射、地物、地貌改变,滑坡后壁或前缘出现小崩塌。

⑤滑坡体的运动状态 滑坡呈匀速位移或缓慢增大,并有逐渐增大的趋势。

3. 加速阶段 加速阶段是滑坡发育特征最为明显、变形速率最快、最具可能发生破坏的阶段。当滑动面已基本贯通,滑动面上的残余强度接近滑坡体的下滑力时,岩体处于快速位移状态,位移历时曲线迅速向上扬起。这一趋势继续发展,最终将导致滑坡发生。滑坡加速变形阶段的特征有:

①地表裂缝 滑坡体上各种类型的裂缝都可能出现,但变化很快。后缘和侧缘裂缝两边出现滑坎,后壁上常有小崩塌发生。中段很多的拉张裂缝。前段出现扇形裂缝。

②滑动面 滑动面已完全贯通,形成完整的滑面。

③滑坡的运动状态 滑坡体在重力作用发生滑动,表现为一次或断断续续的多次完成滑动过程。

④触发因素的作用 触发因素继续起作用,特别是断断续续发生滑动的滑坡,其触发因素的作用十分明显。

⑤伴生现象 地下水异常、动物异常、声发射等现象继续出现,后壁或前缘的小崩塌明显增多。

⑥发育历时 较短或很短。

2 滑坡的变形观测的主要内容

2.1 地表变形观测

①滑坡体表面变形观测是通过在滑坡体表面设立观测点,查明滑坡水平、垂直位移的速率及方向,坡体倾斜速率及方向。同时对坡面的变形裂缝进行观测,裂缝观测的目的是查明滑坡的发育状态;位移速率;性质(张性、剪性、压性、产状);裂缝的长度、宽度、延伸方向;有无充填物、充填物含水性;裂缝两壁

的相对位移。

②地物变形观测主要是查明建筑物在滑坡体上的变形;开裂裂缝形状及特征;水平位移、垂直位移的速率及方向,发生变形的时间。

2.2 深部变形观测

深部变形观测应包括:对坡体内软弱结构面或滑面的位置、埋深、组数的观测;各滑动面(带)之间的连通性、滑带土的物理性质、滑动面(带)上下相对位移速率及方向的观测。

2.3 其他因素观测

诱发因素观测是对影响滑坡发生的降水、地下水位变化、人为活动等进行观测。

地下水观测 观测地下水出水点的数量、位置,地下水来源(补给),滑坡体中地下水渗流状态,查明出水点的类型、流量。观测地下水物化性质,水温、浑浊度、硬度、pH 值等。

人为活动观测 观测主要有包括爆破及地震作业观测;人工工程开挖工程堆填的观测。

3 滑坡不同发育阶段的观测技术方法

3.1 滑坡蠕滑阶段的观测

滑坡蠕滑阶段观测是为掌握滑坡变形的基本情况,确定滑坡变形的范围,位移速率等变形的基本参数,掌握滑坡整体变形的规律。由于滑坡变形小,位移缓慢,因此,此阶段观测主要是对滑坡变形进行宏观控制观测,采用精度高、量程较大的仪器。

常用的宏观控制观测方法有精密大地测量、GPS 空间定位系统观测等。该方法是在滑坡周围建立控制点,滑坡内建立位移点,共同组成滑坡观测控制网。技术方法主要采用视准线法、交汇法。在完成控制网的建设后,即进行首次观测,建立起滑坡观测的基本数据。

滑坡蠕滑阶段地表可能出现不规则的裂缝,因此,可以采用人工的或机械的方法对裂缝进行观测,掌握裂缝的发展与变化。有助于结合滑坡控制观测确定坡体的变形。

3.2 滑坡滑动阶段的观测

滑坡滑动阶段的变形十分明显,并且变形缓慢、历时长。这一变形阶段对观测仪器总体要求是精度高,运行可靠。目前所有的观测仪器和人工观测方法都能对该阶段滑坡的变形进行观测。对滑动阶段的观测应掌握以下几点:

①地表裂缝观测 滑动阶段的特点是变形速率缓慢,滑体上出现较多的裂缝。对裂缝进行观测,要求观测仪器具有较高的观测精度,有利于较准确掌握滑坡的位移。

②滑面变形特征观测 滑动阶段滑面已初步形成,滑面上的变形明显。当用地貌、地质宏观分析方法不能对滑动面进行准确判定时,可利用钻孔倾斜仪进行滑面深度、变动速率的观测。

③滑坡诱发因素观测 主要是对滑坡发生影响最为敏感的降雨进行观测,分析降雨于滑坡变形速率相关性,确定滑坡的变形规律。在滑动阶段,如出现地下水动态变化、滑坡前缘出现坍塌或掉块。应及时对伴生现象的进行观测。

滑坡滑动阶段观测的周期根据变形速率的大小决定。当滑坡变形快,观测间隔应小,变形慢间隔可加大。

3.3 滑坡剧滑阶段的观测

滑坡剧滑阶段表现出的破坏已十分明显,变形加剧,几乎所有的地面设施都可能遭到破坏。在滑坡变形前期安装的仪器此时已基本失去作用,就是未遭到破坏的仪器也因量程小而不能适应快速变化的滑坡观测要求。所以在滑坡的剧滑阶段,最有效的方法为大地精密测量。如交汇法、视准线法。有条件的地方可以在滑坡体上埋设遥测仪器,以增加对滑坡变形的局部控制观测,全面掌握滑坡变形。

4 观测实例分析

以重庆开县盛山变形斜坡(滑坡)观测为例。

1. 盛山变形斜坡(滑坡)的发育特征与变形趋势

盛山位于开县城区北西侧,是开县城郊绿地和公园,山顶最高点海拔 627 m,与城区相对高差 457 m。盛山公园、刘伯承纪念馆都座落在盛山斜坡地带。

盛山一带斜坡地层为侏罗系紫红色砂岩夹泥岩,斜坡表层有一层坡积物,厚度不等,岩性为砂土夹碎石。

盛山变形斜坡由刘伯承纪念馆东侧变形体和盛山公园八仙台变形体组成。

刘伯承纪念馆东侧变形体位于盛山下部纪念馆东侧,长 200 m,宽 260 m,发育有两组裂缝,分布在纪念馆前东侧公路两侧。虽然坡体目前未出现明显

的变形,但遇大的降雨,坡体有变形增加的可能。

盛山公园八仙台变形体位于盛山上部,长 100 m,宽 250 m。变形体后部共发育有五组裂缝。发育于变形体中部和南侧的冲沟使八仙台变形体破碎成三块。据调查,八仙台坡体在 1989-07 大暴雨时曾发生过滑动,并使得冲沟进一步扩大。由于冲沟在雨季汇集了大量的地表水,增加了对坡体的淘蚀,使较多的地表水渗入坡体,影响变形体的稳定性。因此,在大的降雨条件下,坡体的变形会进一步的加剧^[4],影响到盛山公园八仙台一带的安全。

2. 盛山变形体观测网(点)布置

由于盛山斜坡变形体处于极缓慢的蠕变阶段,变形特征主要表现为在变形体的局部位置出现裂缝,整个变形体的范围和边界都不十分清楚。因此,变形体观测应分阶段进行。

①第一阶段的观测 第一阶段观测以裂缝观测为主,技术手段采用简易地表裂缝观测、地表地质巡视,在刘伯承纪念馆东侧变形坡体和盛山公园八仙台变形体上共设立 13 条裂缝观测剖面。降雨观测可利用县气象局资料,盛山变形体观测不建雨量观测点。

②第二阶段的观测 视坡体变形情况和滑坡规模建立观测网,增加 GPS 观测和精密大地测量观测,滑坡深部变形观测等内容,组成完整的变形观测网。

GPS 观测和精密大地测量监测是通过在变形体四周和体内建立控制点和位移点来组成监测网。控制点:建在变形体四周稳定岩体上,共建立 5 个控制点。位移点:在变形体上建位移观测点 10~12 个,各位移点组成两条纵向观测剖面和两条横向观测剖面。纵向观测剖面的方向于变形体的轴线方向平行,横向观测剖面分别位于变形体中部和前缘变形明显部位。

GPS 观测和精密大地测量监测共用同一控制点和位移点。

钻孔测斜仪监测。钻孔深视监测应视变形体的发展而定,布置在变形体的中前部,控制变形体的深度,滑动面的形态。

参考文献(References)

- [1] Xu Junling. Landslide time forecast stage is divided and parameter select[J]. Roadbed Project, 1999, 1: 1~3. [徐峻岭. 滑坡时间预报阶段划分及其参数之选取[J]. 路基工程, 1999, 1: 1~3.]
- [2] Chen Yongbo, Wang Chenhua. Differentiating and Forecasting

- Landslide[J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, **18**(6): 559~562. [陈永波, 王成华. 滑坡发生的危险边坡判别及预测预报分析. 山地学报, 2000, **18**(6): 559~562.]
- [3] Qiao Jianping. Theory and Practice for Hazard Reduction of Landslide[M]. Scientific Press, 1997. [乔建平. 滑坡减灾理论与实践[M]. 科学出版社, 1997.]
- [4] Kong Jiming. The non-computation method to differentiate the stability of slope[J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, **19**(5): 446~451. [孔纪名. 滑坡稳定性判别的非计算方法[J]. 山地学报, 2001, **19**(5): 446~451.]

The Stage Feature of Landslide Growth and Observation

KONG Jiming

(*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China*)

Abstract: This paper analysis landslide growth stage feature. Basis landslide growth stage of different characteristic. Landslide of growth course is divided for 3 slippery stages that worm, glide and acutely glide. And have analyzed in detail to landslide of characteristic of different growth stage. Basis observation of landslide survey efficiently purpose. Make to landslide the method and content that divides into stage observation. And with the example of Shengshan landslide in Kaixian of Chongqing. Analyze to landslide of the stage feature of growth and observation method.

Key words: landslide; stage; observation

欢迎订阅《干旱区地理》

《干旱区地理》主要刊载干旱区地理学及其分支学科、边缘学科和交叉学科的新理论、新技术和新方法。具体包括: 自然地理、区域地理、干旱区生态与及其生态系统建设、土壤学与植被恢复、水文、水资源、干旱区自然资源与环境研究的发展、环境变化与保护、全球变化、气候、气象、灾害与防治、干旱区与大气圈、水圈、生物圈、岩石圈和人类活动之间的相互作用, 特别是干旱区资源环境研究重大科学问题; 还刊载干旱区研究成果、研究报道、学术活动、消息和书刊评价等。同时还免费刊登有关国际地理学合作研究信息、国际会议通知、中国国家自然科学基金资助的地理学项目、英文版新书介绍、地理专业招聘招生启事等内容。

主要读者对象: 地理工作者、高等院校师生、中学教师, 以及农、林、牧、水利、气象、地质、工交、贸易、城建、旅游、规划等部门的科技工作者和决策者和国内外科技工作者。欢迎集体和个人订阅《干旱区地理》。

《干旱区地理》国内外公开发行, 刊号: ISSN 1000-6060; CN65-1103/X

期刊为国际标准 16 开本, 双月刊, 每期定价: 10 元, 每年 60 元。欢迎新老读者及时到当地邮局订阅。全国各地邮局均可订阅, 邮发代号: 58-45, 国外发行代号: Q4557。若漏订者还可直接汇款至编辑部补订。汇款时务必写清汇款单位或个人的详细地址及邮政编码。款到开正式发票。

汇款请寄: 中国科学院新疆生态与地理研究所《干旱区地理》编辑部 徐曼、周政一 收

乌鲁木齐市北京南路 40 号附 3 号

邮编: 830011

电话: 0991-7885364

传真: 0991-7885320

电子信箱: Aridlg@ms.xjb.ac.cn

网址: www.eig.ac.cn