

滑体的运动变形及观测要点

李沛 陈自生 刘正荣

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所)

提 要 滑体运动变形特征是建立滑坡观测系统的主要依据。前者受控于滑面类型。1. 直线型滑面上的滑体作整体运动,运动具等效效应;内部变形微弱,观测重点在地表位移;2. 折线型滑面上的滑体亦作整体运动,变形较强,观测重点在深部位移和变形;3. 凹弧型滑面上的滑体作整体旋转运动,变形较弱,观测重点在后缘和前缘;4. 凸弧型滑面上的滑体作破碎旋转运动,变形较明显,观测重点在地表(尤其是剪出口处);5. 复合型滑面上的滑体作分级分块运动,变形强烈,宜作综合观测。

关键词 滑体 滑面 运动 变形 观测要点

滑体虽具有块体的某些特性,但毕竟不是一个简单的刚性块体,而是一个复杂的刚柔结合体;它由各向异性的岩土体组成,具有独特的结构构造和水文地质工程地质特性。滑面即滑体沿之运动变形的面(“轨道”)。运动指滑体与滑床(滑面之下的未动岩土体)之间相对位置的改变。变形是滑体在重力作用下所发生的形态或体积的变化,如挤压、拉裂、错动和屈曲等。

据滑面与滑体主轴剖面之交线的形态,可将滑面分为:1. 直线型;2. 折线型;3. 圆弧形(其又可分:凹弧型和凸弧型);4. 复合型,共四类。

滑面类型不同,滑体运动变形特征就不同,滑体观测要点亦各有差异。这就是说,滑体运动变形特征为建立滑坡观测系统的主要依据。

一、各类滑面上的滑体运动变形特征

(一)直线型滑面上的滑体运动变形特征

直线型滑面就是:经过滑动而倾向 \approx 斜坡坡向的平直岩层层面或断层面。直线型滑面上的滑体一般为顺层滑体。

众所周知,当滑面与滑体之间的摩擦力 $=0$ 时,滑体沿斜面作无侧限自由向下滑动的加速度不变(以下简称块体斜面运动原理)。若前缘抗滑阻力很小,以至为0,且滑面摩擦力又不变者,则直线型滑面上的滑体运动变形特征如下:1. 滑面平直(斜率不变),下滑力为恒量,滑体受力均匀,作整体运动;2. 除瞬时速度随时间推移而变化外,同一时刻内滑体各部位的运动速度、运动方向与位移量分别大体一致,这就是滑体运动的等效效应;3.

注:文中的滑体、滑面即分别指滑坡体、滑动面。

本文收稿日期:1991-07-25。

滑体运动速度随时间推移而加快(遵循能量守恒定律); 4. 滑体的重心高度和运动距离在不断变化, 而滑体内部结构和地表地貌形态在滑动初期和中期变化不明显; 5. 滑体由下而上作牵引式发展。

在工程实践中, 滑体是坚硬岩石沿软弱岩层面滑动者, 常常把其看成是块体, 将滑面各段实际并不相等的摩擦力取成综合摩擦力, 且用块体斜面运动原理来分析滑体受力状态, 计算下滑力和最大滑速

我国许多顺层岩质滑坡^[1-3]的运动特征就服从于块体斜面运动原理。这些顺层岩质滑坡的速度快慢和运动距离的长短均取决于滑体启动时下滑力与抗滑力的比值。下滑力 \approx 抗滑力者, 滑体作匀速运动; 下滑力 $>$ 抗滑力者, 滑体作匀加速运动, 直至前缘脱离滑床而向前冲盖。整个滑体随摩擦阻力的增大而减速, 以至停止运动。

多层直线型滑面上的滑体的表层速度 $>$ 底层(滑面处)速度(图 1)。下伏平整基岩层面上所发育的覆盖层滑坡, 在滑面未贯通前, 表层位移量 $>$ 底层位移量。

(二) 折线型滑面上的滑体运动变形特征

折线型滑面是直线型滑面经分段转折后的滑面, 其一般可由断层面、岩层面和节理面组成(图 2)。

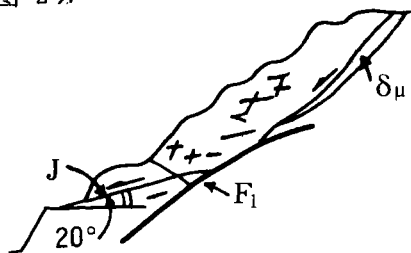


图 2 大冶铁矿狮子山北帮 1# 滑坡剖面
(引自参考文献[4], 作过修改)

Fig. 2 1# landslide section on north wall at Daye

Open Iron Mine of Hubei Province

J. 节理面; F. 断层面; δ_μ . 岩脉

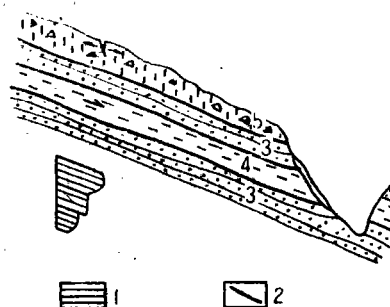


图 1 多层直线型滑面上的滑体运动变形特征

Fig. 1 The motion deformation features of the sliding body with multi-slip surfaces

1. 位移量; 2. 滑面; 3. 砂岩; 4. 页岩; 5. 残坡积覆盖层

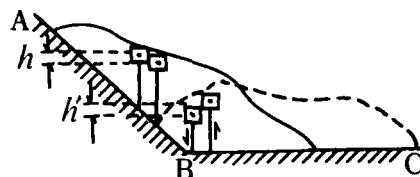


图 3 折线型滑面上的滑体变形模式

Fig. 3 The deformation patterns of the sliding body with a mansard slip surface

方块示单元体; AB, BC 分别为两个滑面段; h, h' 分别为两个单元体的不同高度差(错动距离)

折线型滑面上的滑体运动变形特征有以下几点: 1. 各段斜率不同的滑面上的滑体水平位移分量随滑面斜率的增大而减少, 垂直位移量则反之; 2. 各段滑体的运动方向、运动速度不同(即矢量不同); 若滑体由覆盖层或破碎岩体组成, 滑体内部会产生错动(图 3);

3. 滑体由后段向前段作推动式整体运动,内部以压应力和剪应力为主,因而呈现压缩变形和剪切变形为主。

滑体从一个滑面段滑至另一个滑面段者,内部结构会发生改变,如拉裂、错动、屈曲等变形,以适应新的斜率;地表地貌形态亦随之改变,在转折点B处改变得最为明显(见图3)。由此左右两个单元体从第一个滑面段至第二个滑面段后,两者的高度差由原来的 h (呈顺向)变为 h' (呈反向),即两者的相对位置由原来的右在下、左在上变成左向下、右向上,呈现出相对错动。这就是某些滑坡后缘凹槽(滑坡湖)的形成机制。

折线型滑面的前缘(剪出口)若是反倾的,则仍可用图3表达之。

为考察折线型滑面上滑体的运动状态,设滑体 W 从 L_a 段滑至 L_b 段,滑面倾角由 60° 变成 30° 。若滑体 W 属刚性体者,则其必须向左旋转 30° (以适应新的斜率),此情况下,在滑面转折点A处垂线附近出现张裂缝(图4-a);若滑体 W 属非刚性体,节理裂隙又大量发育者,则转折点A处垂线上就呈现右向上、左向下的错动和向左旋转,转折点C处垂线上会呈现右向下、左向上的错动和向右旋转(图4-b)。

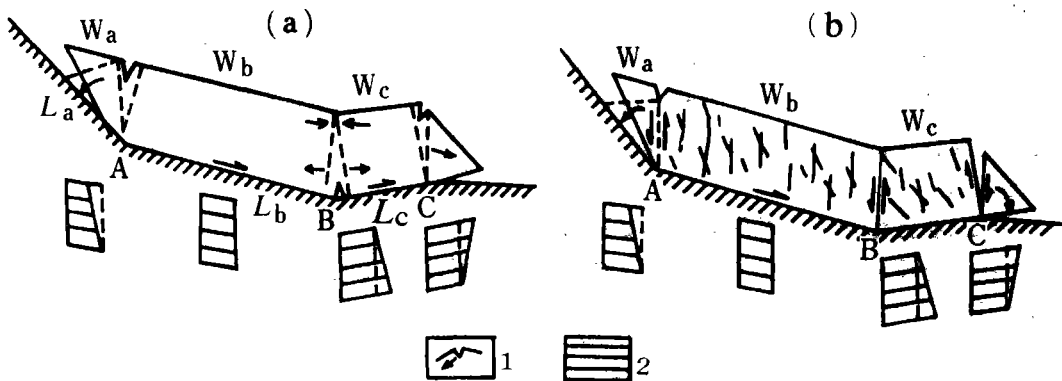


图4 折线型滑面上的滑体运动变形特征

Fig. 4 The motion deformation features of the sliding body with a mansard slip surface

a. 刚性体; b. 非刚性体。1. 变形; 2. 位移量

再则,设滑体 W 由 L_b 段滑至 L_c 段。若滑体 W 属刚性体者,则其就产生简支梁式的弯折破坏,此时转折点B处形成张应力区(扩容区),产生下宽上窄的张裂缝(见图4-a);如果 W 属非刚性体,节理裂隙又发育者,则转折点B处垂线上就呈现右向上、左向下的错动(见图4-b)。

(三) 圆弧型滑面上的滑体运动变形特征

1. 滑体作圆弧运动的位移分解

圆弧型滑面上的滑体呈现有旋转运动。目前由于滑坡观测技术的限制,还难以直接观测滑体的旋转量。因此现将圆弧型滑面置于直角坐标系内,以分析滑体在旋转过程中各个单元体所产生的垂直位移分量与水平位移分量的关系。

图5所示,左下角属凹弧型滑面,右上角属凸弧型滑面,两者所在的坐标系分别为 K_1

和 K_2 。

凹弧型滑面上的单元体,从顶点 M 滑至底点 N ;单元体在滑面上半部以垂直位移为主,在滑面下半部却以水平位移为主。凸弧型滑面上的单元体,则从顶点 M' 滑至底点 N' ;位移关系就同前者相反。由图 5 可见,两类滑面的垂直位移分量和水平位移分量大小的转换点各自分别为相应象限圆弧的平分点,该点上垂直位移分量与水平位移分量两者的绝对值分别对应相等。

2. 凹弧型滑面上的滑体运动变形特征

凹弧型滑面大多出现在均质土层中或向斜构造的岩层层面上。

凹弧型滑面上的滑体运动变形特征如下:1)滑面曲率半径保持不变,滑体以旋转运动为主,且保持完整,地表主要为倾斜变形;2)滑体各点的角位移相等;3)曲率半径上滑体运动速度由地表向深部递增;4)在惯性力的作用下,滑体前段和后段经滑移一定路程后,局部脱离滑床而悬空(图 6),滑体开始解体。

3. 凸弧型滑面上的滑体运动变形特征

凸弧型滑面一般由第四系覆盖层沿凸弧型基岩层面(如背斜面)发育而成,难以形成一个独立完整的滑面,大多数作为复合型滑面的一部分。

凸弧型滑面上的滑体运动变形特征有:1)滑体亦以旋转运动为主,但不完整,地表又以倾斜变形为特色;2)滑面所对应的圆心角 $< 90^\circ$;3)曲率半径方向上滑体运动速度由地表向深部递减;4)滑体滑至飞离滑床高度 $h \leq 2R/3$ (式中 R 为曲率半径)处,在惯性力的作用下,滑体可能会飞离滑床而呈现冲盖、超覆(图 7)。

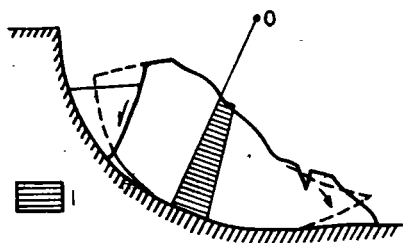


图 6 凹弧型滑面上的滑体运动变形特征

Fig. 6 The motion deformation features of the sliding body with a concave slip surface

1. 位移量

即

$$mgh + (mV^2/2) = mgR,$$

$$V^2 = 2g(R - h), \quad (1)$$

式中 V 为滑体任一点的运动速度; h 为滑体飞离滑床高度; R 为曲率半径; g 为重力加速度; m 为滑体质量。

在滑体飞离滑床处,滑体向心力 = 滑体重力在曲率半径方向上的分力 F_1 , 于是

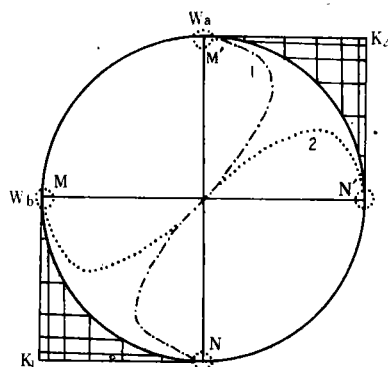


图 5 圆弧型滑面上的滑体位移分解

Fig. 5 The displacement resolution of the sliding body with a circular slip surface

1. 水平位移与垂直位移的绝对差值

($|L-h|$) 曲线;

2. 垂直位移与水平位移的绝对差值

($|h-L|$) 曲线

$$mV^2/R = F_1 = mg \cos \alpha = mgh/R,$$

即

$$V^2 = gh, \quad (2)$$

式中 V 为滑体飞离滑床处运动速度[同式(1)中的 V]; α 为两条曲率半径间夹角。

将式(1)代入式(2),得

$$2g(R-h) = gh,$$

即

$$h = 2R/3. \quad (3)$$

凸弧型滑面上在 $h = 2R/3$ 处,滑体水平动能最大,但由于岩土体内聚力影响,圆弧上的剪出口实际位置 $h < 2R/3$ 。

(四)复合型滑面上的滑体运动变形特征

复合型滑面由直线型滑面、折线型滑面和圆弧型滑面三者组合而成。这类滑面上的滑体虽主要仍作整体运动,但还有斜面运动和圆弧运动,又尤易呈现运动分级分块而各具运动变形特征,运动方向和运动速度又不一,滑体的内部应力和内部变形也各不相同,分别可能呈现拉裂、错动与屈曲等变形,甚至改变原有地下水网络,形成新的地下水网络。此外滑体的地表地貌形态变化亦显著(图8)。

尤其应当注意的是:复合型滑面上的滑体中段所发生的冲盖超覆现象。由于惯性力

作用,在滑面斜率由缓变陡或圆弧型滑面切线角 $\geq 45^\circ$ 处,后方滑体可能会向缓斜率滑面的延伸方向脱离滑床,而冲盖超覆在前方滑体上。这是复合型滑面的一种特有的滑坡现象。

(五)滑体滑动形式的转化

一般说来,无论哪类滑面之上,若滑体的下滑力 \leq 抗滑力,则滑体可能处于蠕变蠕滑状态;若下滑力 $>$ 抗滑力,在直线型滑面上的滑体作匀加速滑动,并可能发生

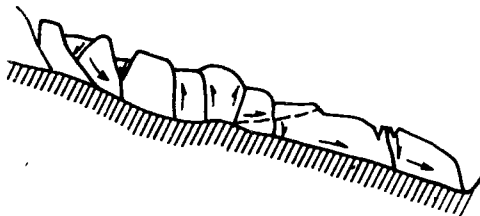


图8 复合型滑面上的滑体运动变形特征

Fig. 8 The motion deformation features of the sliding body with composite slip surface

运动形式的转化。

1. 在直线型滑面上或在只有一个转折点、且抗滑段长度比主滑段长度短得多、临空条件又佳的折线型滑面上,主滑体的剩余下滑力就集中作用于抗滑段(锁固段)。按格里菲斯的应力集中效应和岩土体的累进破坏原理(尤其在强烈地震、大暴雨的影响下),岩土体就加剧破坏,剪断了锁固段内的全部岩土体(好似滑体前缘拔掉了铆钉),由此滑体才作匀加速运动,大多还转化成快速向前冲跳、翻滚的崩塌、碎石流运动。

2. 滑面虽不是直线型或不是只有一个转折点的折线型,但剪出口却很高,临空条件又佳者,滑体一旦滑离滑床亦会在前方斜坡坡面上呈现崩塌或碎石流运动。两者具有极大

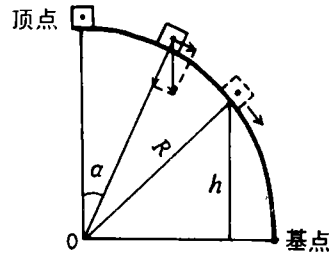


图7 凸弧形滑面上的滑体运动变形特征

Fig. 7 The motion deformation features of the sliding body with a convex slip surface
方块表示单元体

的破坏力。因此在设计观测方案和拟定防灾措施时,必须考虑到滑体运动形式的转化。

二、滑体观测要点

建立滑坡观测系统的主要依据是滑体运动变形特征。后者取决于滑面类型。因此应在野外地质地貌调查和勘探基础上,确定滑体范围,弄清滑面类型后,才作观测。

(一)直线型滑面上的滑体观测

单层直线型滑面上的滑体作整体运动,速度基本一致,内部变形不明显。对于这样的滑体观测应以地表位移为重点,且在滑体的后段和前段的观测点应布置得密些。观测的项目、方法与仪器等应视滑面斜率、滑体性质、物质成分、构造、水文地质条件和施测条件而定。对多层直线型滑面上的滑体则应增加深部变形观测。

(二)折线型滑面上的滑体观测

折线型滑面上的滑体亦作整体运动,内部变形较明显。滑体观测的范围、重点、项目方法及仪器视滑坡发育阶段不同和前述(一)中所列条件而定。有关例子见附表左。

附表 某些滑体观测要点举例

Table Observed focal points of some landslide bodies

滑 坡	大冶铁矿狮子山北帮 1 [#] 滑坡 ^[4]	阿 平 山 滑 坡 ^[5]
滑面类型	折 线 型	凸 弧 型
滑 体 运 动 变 形	1. 滑面由斜率不同的节理面 J、断层 F ₁ 和岩脉 γ_1 组成(见图 2); 2. 滑体运动方向多变; 3. 既有整体运动, 又有内部变形(剪切错动、拉裂); 4. 前段以水平位移为主, 后段以垂直位移为主	1. 滑面由凸弧面与斜面组成; 2. 滑体的后段和中段作旋转运动, 前段作斜面运动, 各段的运动速度和运动方向不同; 3. 既有整体运动, 又有内部变形(剪切错动、拉裂); 4. 前段以水平位移为主, 后段以垂直位移为主
观 测 的 项 目 及 方 法	1. 用前方交会法观测前段的水平位移量; 2. 用钻孔倾斜仪观测前段的水平位移量, 确定滑面位置、层数, 兼测地下水水位; 3. 用水准测量法观测后段的垂直位移量; 4. 用地声仪观测 J、F ₁ 滑面转折点处岩石破裂的地声; 5. 用位移计观测后缘裂缝的开闭量	1. 用视准线法观测前段的水平位移量; 2. 用钻孔倾斜仪观测前段的水平位移量和确定滑面位置、层数, 兼测地下水水位; 3. 用水准测量法观测中段、后段的垂直位移量; 4. 在砂岩与红粘土的接触面处, 用应力计观测界面应力和用位移计观测剪切位移量; 5. 用地声仪观测凸弧面与斜面转折点处岩石破裂的地声; 6. 用位移计观测后缘裂缝的开闭量

所列举的这个滑坡^[4]具有两个转折点的折线型滑面,其斜率变化较大,在剖面上的运动矢量发生了三次转折,在平面上亦有明显变化,这些在建立观测网时应予以重视。在原有的观测方案中,露天矿边帮岩体不稳定,难以选定视准线基点,故选用前方交会法是正确的。现根据滑坡剖面特征,应增加几种测量方法(见附表左),以便揭示整体运动和深部变形,为治理工程设计提供科学依据。

(三)凹弧型滑面上的滑体观测

凹弧型滑面上滑体作整体旋转运动。滑体运动速度由地表向深部递增,滑面出露于滑体的后缘张裂缝和前缘剪出口,两处的速度和位移量最大。因此滑体观测重点需放在地表的后缘和前缘。后缘用水准测量法观测垂直位移量,前缘用视准线法观测水平位移量。

(四)凸弧型滑面上的滑体观测

凸弧型滑面上的滑体实属罕见。它主要作破碎旋转运动。现据有关文献^[5]仅举一例(见附表右)。该滑坡原未作滑体观测。滑坡发育于背斜顶部。岩层破碎,层间错动发育,红粘土易滑,这些为凸弧型滑面的发育提供了有利条件。滑面剪出口高度大体符合 $h=2R/3$ 。滑体运动速度由地表向深部递减,故滑体观测重点应放在地表(尤其是滑面剪出口处)。

(五)复合型滑面上的滑体观测

其运动变形比较复杂。滑体主要作整体运动,但还有因斜面运动和圆弧运动而引起的分级分块运动,深部变形强烈,滑体中段可能会有冲盖超覆现象。对此宜取地表与地下、多项目、多方法的滑体综合观测。

上述种种滑体观测要点应视财力、物力、实施条件、滑坡险情和滑坡危害程度而加以调整。对处于剧动阶段的滑体,因人员难以进入现场,宜作立体摄影测量和用电子仪器进行遥测,以满足实时观测和实时报警之需要,避免或减少生命财产的损失。

参 考 文 献

- [1] 金德镰、王耕夫,1988,柘溪水库塘岩光滑坡,中国典型滑坡,科学出版社,第301—307页。
- [2] 胡余道,1988,铁西滑坡发生发展规律与整治工程实践,中国典型滑坡,科学出版社,第329—335页。
- [3] 王济群,1988,攀钢石灰石矿H₂滑坡,中国典型滑坡,科学出版社,第128—132页。
- [4] 张弭等,1988,大冶铁矿狮子山北帮西口I号滑坡体滑坡实例分析,中国典型滑坡,科学出版社,第172—178页。
- [5] Q. 扎留巴、V. 门次尔(交通部科学研究院西北研究所译),1974,滑坡及其防治,中国建筑工业出版社,第90页。

MOTION DEFORMATION OF LANDSLIDE BODY AND ITS OBSERVED FOCAL POINTS

Li Pei Chen Zisheng Liu Zhengrong

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

Abstract

The motion deformation character of landslide body is one of main bases to set up the landslide observational system and it varies with different types of sliding plane.

1. The rectilinear sliding plane; it is of a integral landslide body. The motion velocities and displaced volume are equal in each part. The landslide motion is of equivalency and its internal deformation is not obvious in the initial term as well as the middle term. The focal point of observation should be laid on the end section of landslide body.

2. The mansard sliding plane; the motion deformation of this landslide body is complex, and the gradient of the sliding plane is different in each section. In the motion courses, crack, fault and buckling would arise in the landslide body. The focal point of observation should be laid on the end and front sections.

3. The concave sliding plane; the motion of this landslide body is mainly rotation ones and it keeps as integral mass. The motion velocities of sliding plane are faster than ground surface. The sliding planes arise at the tension crack of end edge and shear fracture of front edge. Thus the two positions are the main observed focal points.

4. The convex sliding plane; the motion of this landslide body is also mainly rotational. The displaced volume of the broken ground surface almost is more than sliding plane. The relative height of the sliding plane is equal at $2/3$ of the curve radius. The landslide bodies are easy to break away from sliding bed and arise a punching and overlapping phenomenon. This place should be observed focal point.

5. The composite sliding plane; the motion deformation of landslide body is very complex, and make a integral motion. The internal deformation is strong so as to cause crack, fault, buckling and even to form new groundwater net. Therefore, it should carry out a integrated observation.

Key words landslide body, sliding plane, motion, deformation, observed focal point