

降雨型堆积层滑坡特征及稳定性分析

陈善雄^{1,2}, 许锡昌¹, 徐海滨¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2.华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430072)

摘要: 堆积层滑坡是滑坡的一种基本类型, 其物质组成、结构等有别于其它类型滑坡。堆积层滑坡失稳绝大多数是由降雨或地下水位的变化而引起的, 在降雨诱发堆积层滑坡稳定性分析中, 必须考虑渗透力的作用。系统分析了堆积型滑坡发育环境及特征, 推导了基于总应力法和有效应力法的可考虑渗透力的传递系数法, 采用有效应力法计算滑坡稳定系数时, 既要考虑地下水浮力作用, 又要考虑地下水流动时的渗透力作用; 采用总应力法计算滑坡稳定系数时, 仅需考虑地下水流动时的渗透力作用。对一个工程实例进行了深入剖析, 验证了考虑渗透力的传递系数法的可靠性。

关键词: 降雨; 堆积层滑坡; 稳定性分析; 传递系数法

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Features and stability analysis of rainfall-induced colluvial landslides

CHEN Shan-xiong^{1,2}, XU Xi-chang¹, XU Hai-bin¹

(1. Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. College of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The colluvial landslide is a kind of basic type of landslides; and its matter component and structure are different from other type landslides. The slope instability of colluvial landslide mostly is induced by rainfall or change of groundwater level; and groundwater plays a fateful role in the slope instability, therefore, the seepage action should be considered in the landslide stability analysis. The growth environment and characteristic of a colluvial landslide is analyzed systematically. Based on total stress method and effective stress method, a transfer coefficient method with considering seepage forces for landslide stability analysis is established. Adopting effective stress method to calculate the landslide stability factor, both the buoyancy force of groundwater to soil and seepage force should be considered; and adopting effective stress method to calculate the landslide stability factor, only seepage force should be considered. At last, an example is thoroughly analyzed; and the result shows that the transfer coefficient method with considering seepage forces for landslide stability analysis is reliable.

Key words: rainfall; colluvial landslide; rainfall-induced colluvial landslide; stability analysis; transfer coefficient method

1 引言

滑坡是一种严重的岩土体失稳现象, 是发生频率最高、危害最大的灾种之一, 对人类的生命财产带来重大威胁。堆积层滑坡是滑坡的一种基本类型, 是指第四系地层中除黄土、粘土以及其它软土层以外的松散堆积层(包括人工堆积物)的滑坡, 而且重点是指河谷两岸缓坡地带的坡积、洪积成因的堆积层滑坡, 它具有与很多其他类型滑坡不同的特点, 在我国滑坡类型中占有很大的比例。堆积层边坡的失稳绝大多数是由降雨或地下水位的变化而引起的, 如, 根据调查统计, 甘肃省陇南武都地区 95 %

的滑坡发生于雨季, 贵州六盘水地区 94 % 的滑坡发生于雨季^[1]。这是目前滑坡灾害预测与防治领域亟待研究与解决的难点与关键问题。

降雨原因引起的滑坡称为降雨型滑坡。降雨对滑坡的触发作用主要体现在, 在降雨过程中, 地表水进入岩土体增加了坡体的自重, 增大了孔隙水压力, 加大了边坡的下滑力, 使处于极限平衡状态的坡体产生滑动; 降雨由地表进入地下, 转变成为地下水, 浸泡软化滑动面, 降低了坡体的抗剪强度, 降低了边坡的抗滑力; 坡体反复的干湿交替变化导致岩土体开裂, 产生大量的节理裂隙, 使得雨水更易于渗入岩土体。

收稿日期: 2005-02-27

作者简介: 陈善雄, 男, 1965年生, 博士生, 副研究员, 主要从事非饱和土土力学和地基处理的理论与工程应用研究工作。E-mail: sxchen@whrsm.ac.cn

堆积层滑坡的物质组成、结构等有别于其它类型滑坡。在其失稳过程中，有自己独特的变形特征。因此，应该有与其相适应的稳定性评价方法。目前，滑坡及边坡工程的稳定性评价方法有极限平衡法、极限分析法、有限单元法。其中被广泛采用并认可的仍然为极限平衡法。下面结合工程实例，对降雨型堆积层滑坡稳定性分析的极限平衡分析方法进行讨论。

2 堆积型滑坡发育环境及特征^[2,3]

(1) 物质组成特征 堆积层边坡坡体由第四系松散或相对松散的岩土体，如残积物、崩坡堆积物、洪积物等构成，其结构松散，透水性较强。

(2) 地质特征 地貌上多为汇水的裙形坳地，各土层水文性质差异性较大。同一时期的堆积物在很小的范围内可以看到不同岩相的变化。在垂直剖面上，岩相的多变性导致水文地质条件(渗水性、富水性等)不一，坡体组成物质结构疏松，易渗水，坡堆积层下为不透水顶板，降雨时，在相对隔水层上的松散堆积层内易积水。岩相向上的多变性导致边坡岩土体在不同地段的抗剪强度不同，从而不同地段的稳定性也不同，使之形成局部滑移段和局部阻滑体，这将使边坡形成挤压隆起区和拉伸张裂区，边坡的失稳破坏方式转化为不均一的破坏方式。

(3) 发生特征 多为暴雨及大量降雨激发，可一次激发剧滑或多次反复缓慢蠕移。大强度暴雨及历时长、雨量大的降雨易使坡堆积层受激发而初始失稳，破坏触动坡堆积体表面植被和地层为主要对象，出现冲沟、切沟、地表裂缝等状况，甚至一次激发产生剧滑及次生泥石流。强降雨常激发坡体剧滑，长历时降雨则以触动坡体蠕滑为主。降雨自地表入渗，坡堆积层含水量不断增加，岩土组合体内摩擦角迅速减小。另外，张裂缝的导通，使得滑床面上膨胀土强度指标与含水量呈强烈的负相关性，更易受软化，一旦外部条件适宜，斜坡就滑动。因此，雨量作用于坡堆积体内部，使其整体力学性质变异是改变其稳定性的一个重要方面。降水入渗增加了浮托推力，降雨沿坡堆积体表面的裂缝入渗时，在滑面上汇流贯通，形成一层水垫，降低了滑面的摩擦阻力，随降雨的补给，产生一种动态浮托力。同时，雨量不断充填裂缝及软弱结构面，产生一种顺坡向的动态扩张力，使张裂缝张大，逐步加剧斜坡堆积体的变形和位移。随着降雨的连续补给，坡面水在较短时间内难以从坡体上排除，尤其是雨量大，强度高时，坡体表面很快形成一定厚度水层，

内部也是一样。根据力学分析看，增加了斜向自重推力，顺坡向的雨水冲击力也使得处于临界状态的坡堆积体产生激剧的滑动。

(4) 位移特点 不连续变形，时序规律性差，位移滞后于降雨，常成多级滑动，整体性差。在外力作用下，在变形滑移过程中，坡体不仅产生整体滑移，而且还产生较大的塑性变形和流变变形。

(5) 滑动面特征 滑动面在硬塑土中常有镜面擦痕；堆积层滑坡的滑移面可以是堆积层下的基岩面，也可以是坡体内任一连通的破裂面。大多数均质厚层边坡的滑移面受坡体内应力控制，滑移面的形状各异，经常是地下水的富集带以基岩面为滑移面的堆积层滑坡，受基岩面形状的控制，每一次剧烈滑移后，堆积体表面(坡面)形状与基岩面(滑移面)形状相似，形成所谓的正地形，此时堆积体处于稳定和超稳定状态。再次失稳后，堆积体又使其改造成与基岩面形状相反的负地形。滑坡剪出口是滑移面与滑移临空面的交接出口。堆积层滑坡剪出口主要是由应力条件控制，是坡体的剪切破裂面，具有一定的隐蔽性，通常需进行力学分析及现场的仔细观察才能确定。由于堆积层坡体为松散堆积体，其抗剪强度很小，所以有张应力出现的部位很容易形成张裂隙，在边坡后壁附近经常出现张裂隙。

3 稳定性分析方法

3.1 滑坡稳定分析计算方法

滑坡稳定定量分析的方法主要有极限平衡法和有限元法，各有千秋，应充分了解他们的特点、适用条件和局限性，以便根据工程的具体特性选用合适的计算方法。

Duncan^[4]在边坡稳定分析 25 年回顾中提出，由于计算机的应用、计算方法的相应发展，稳定分析的极限平衡法的精度已很高，同时符合整体力及力矩平衡的各种通用条分法，其计算所得的安全系数的变化幅度在 12% 以内，可以认为这些方法的计算所得的安全系数误差在 ±6% 以内。6% 计算误差的精确度在实用上已足够。因此，可以肯定的滑坡稳定分析算法就是满足整体力及力矩平衡的通用条分法^[5]，如 Spencer 法或 Morgenstern-Price，对于圆弧滑面还有简化 Bishop 法。

剩余推力法作为边坡稳定性计算分析方法，已经成为工程界普遍采用的方法，并纳入了边坡计算的规范要求。该方法在计算边坡推力和稳定性时，假定该滑面取单位宽度，不计两侧摩擦力和滑体自身挤压力；滑面按折线计算，整体呈孤型滑动。该

方法为解决工程问题曾发挥巨大作用,但它毕竟是一种简化分析方法,有很大的局限性^[5]。

随着计算机和有限元分析方法的产生和发展,应用严格的应力-应变分析方法分析建筑结构的变形和稳定性已变为可能。因此,有限元法也被广泛应用于边坡稳定分析。采用这一方法,可以不必对一部分内力和滑裂面形状作出假定,使分析研究成果的理论基础更为严密。应用有限元法分析边坡,不但能对其稳定性作出定量评价,而且在分析中还能考虑到构成边坡物质的不连续性和非均质性,因此,具有一定的优越性。从近30年的实际应用情况来看,有限元方法也存在自身的局限,主要是在确定边坡的初始应力状态,把握边坡临近破坏时的弹塑性本构关系以及保证非线性数值分析的稳定性等方面遇到的困难。另外,还有计算成果和工程实践中采用的传统的安全系数判据接轨的问题。

总之,从工程实用的角度,极限平衡法概念简单,直观,易于工程技术人员掌握,可作为稳定分析的首选方法,并应优先考虑选用同时符合整体力及力矩平衡的各种通用条分法。剩余推力法作为规范推荐的边坡稳定性计算分析方法,已为工程界普遍采用,但有相当的局限性,在使用时,应对其局限性有充分的认识。对某一具体问题,宜结合多种方法进行对比分析,以保证工程安全。

3.2 考虑渗透力的传递系数法

在降雨过程中,地表水进入岩土体除增加坡体自重外,易在坡体内部形成瞬态地下水位,内部形成渗流场,渗流将对土颗粒产生拖拽力,即所谓渗透力。渗透力的计算是评价降雨渗流作用下坡体稳定的关键因素,因此其计算的正确与否直接影响评价结果。目前许多单位的技术人员,在概念上有些混淆,往往在考虑了周边静水压力的同时,又把渗透力作为单独的力考虑进去,导致水压力的重复计算^[6]。下面将对考虑渗透力的剩余推力法进行简要讨论。

从坡体中取出一个土条*i*,计算简图见图1。图中 W_{i1} 为土条中浸润线以上土体的重力; W_{i2} 为土条中浸润线以下土体的饱和重力; U_i 为土条底面静水压力的合力; D_i 为渗透压力, $D_i = \gamma_w h_{iw} L_i \cos \alpha_i \cdot \sin \beta_i$,其方向与水流方向一致,与水平方向的夹角为 β_i ; N_i 为土条底面土颗粒之间的接触压力(有效压力); P_i 为土条*i-1*对土条*i*的推力,其方向指向土条*i*,与水平方向的夹角为 α_i , α_i 为土条底面与水平方向的夹角; β_i 为土条中浸润线与水平向的夹角; h_{iw} 为浸润线相对土条底面的高度; L_i 为土条底

面宽度; γ_w 为水的重度。

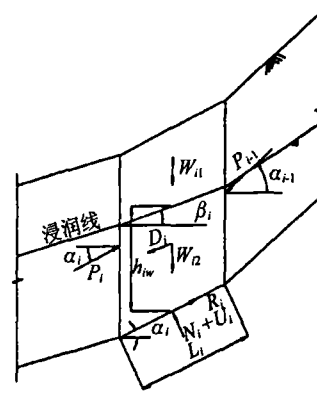


图1 计算简图

Fig.1 Computation sketch

采用传递系数法计算滑坡稳定性时,滑坡稳定系数 F_s 可按式(1)计算:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right) + T_n} \quad (1)$$

$$\psi_i = \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i-1}) \tan \varphi_i \quad (2)$$

式中 ψ_i 为土条*i*的剩余下滑力传递至土条*i+1*的传递系数; T_i 为作用在土条*i*滑动面上滑动分力; R_i 为作用在土条*i*的抗滑力; φ_i 为土条*i*的内摩擦角。

若采用总应力法:

$$T_i = (W_{i1} + W_{i2}) \sin \alpha_i + D_i \cos(\alpha_i - \beta_i) \quad (3)$$

$$R_i = [(W_{i1} + W_{i2}) \cos \alpha_i - D_i \sin(\alpha_i - \beta_i)] \tan \varphi_i + c_i L_i \quad (4)$$

式中 c_i 为土条*i*的凝聚力,采用UU剪切试验指标。

若采用有效应力法:

$$T_i = (W_{i1} + W_{i2} - \gamma_w h_{iw} L_i) \sin \alpha_i + D_i \cos(\alpha_i - \beta_i) \quad (5)$$

$$R_i = [(W_{i1} + W_{i2} - \gamma_w h_{iw} L_i) \cos \alpha_i - D_i \sin(\alpha_i - \beta_i)] \cdot \tan \varphi'_i + c'_i L_i \quad (6)$$

式中 φ'_i 为土条*i*的有效内摩擦角; c'_i 为土条*i*的有效凝聚力。

从以上计算式,可以看出渗透力增加了滑动力部分,但采用总应力法和有效应力法时,滑动力的计算是有所区别的,采用有效应力法,既要考虑地下水浮力作用,又要考虑地下水流动时的渗透力作用;采用总应力法,仅需考虑地下水流动时的渗透

力作用。

3.3 滑移面确定

大多数堆积层斜坡与下伏基岩接触面是斜坡堆积体的第一不连续面。由于地下水及其他因素的长期作用,此面与堆积体间的力学强度指标通常较低,再加上地下水所产生的孔隙水压力和渗透力的共同作用,对厚度不大的堆积层边坡,此面常常是斜坡失稳的滑移面。因此,以该面为斜坡稳定性分析基础常常是行之有效的。

但较大型堆积层斜坡的失稳,常产生多级滑移或解体现象,有的斜坡还产生双层平行滑移和多层滑移。产生上述现象的原因,除物质构成的差异及下滑动力解体外,主要是坡体的内部应力场变化而产生双层滑移面或多层滑移面,从而产生双层滑移或多层滑移。对大型堆积层斜坡的稳定性分析,应考虑双层滑移面或多层滑移面^[7]。

4 实例分析

4.1 工程概况与地质条件

2004年7月2日,一场暴雨后,某县职教中心后山南坡土体滑坡,坡面出现了大量破裂裂隙,后缘最大裂缝宽为20 cm,长12 m,垂直位移为40 cm,各裂缝断断续续呈扇形分布;前缘临空面出现几条垂直裂缝,下部5层住宅楼后挡土墙已经破裂,局部已经向外错动3~4 cm,由于挤压作用,挡土墙与住宅楼之间水泥地面鼓胀隆起近20 cm。详见图2。场地属剥蚀残丘地貌,山顶海拔183.5 m,坡脚海拔77 m,最大相对高差106.5 m,总体坡度15°~35°。地处北亚热带气候区,年平均降雨量1285 mm。降雨具有集中、强度大的特点,每年4~9月为雨季,其降雨量占全年的75%,7月初为每年的梅雨季节,多阵雨和暴雨,最大降雨量可达50 mm/h。

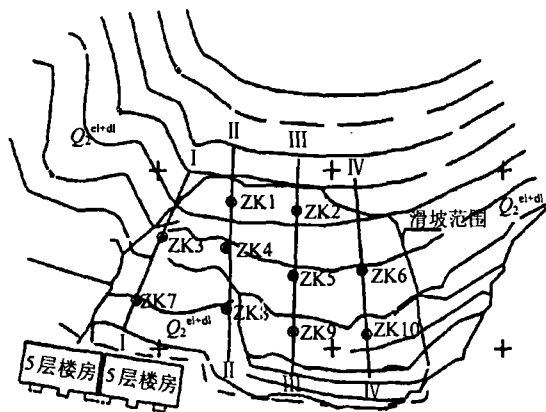


图2 滑坡示意图

Fig.2 Sketch map of landslide

滑动区范围内基本全为第四系残坡积松散土层覆盖,土层厚度5.5~20.5 m,下伏志留系上统茅山组石英细砂岩、粉砂岩与石炭系中统黄龙组灰岩。第四系残坡积松散土层,从上到下分为粉质粘土、砾质粘土和砂砾粘土等3层;志留系上统茅山组为中厚~厚层石英细砂岩、粉砂岩,砂质结构,层状构造。上部为强风化,破碎程度较高;下部为中风化,岩石较完整,呈灰褐色,结构致密坚硬。石炭系中统黄龙为灰白色至深灰色灰岩,微风化,粉晶结构,块状厚层状构造,岩石较完整,局部节理裂隙发育,主要为方解石充填。滑坡各土层的物理力学指标见表1。

表1 土层物理力学性质指标表
Table 1 Physico-mechanical properties of soils

土层名称	密实状态	含水量 / %	重度 / kN·m ⁻³	孔隙比	内摩擦角 / (°)	粘聚力 / kPa
粉质粘土	松散,可塑	20.5	19.1	0.726	27.2	32.1
砂砾质粘土	密实,硬塑	21.5	19.2	0.719	27.0	22.4
含砾粘土	软塑	36.6	17.8	1.077	18.4	18.8
滑动面					12	15

滑坡内地下水均为潜水,埋藏较浅,多在4.5~13.9 m。滑坡周边无地表水系,滑坡内地下水主要由后缘基岩裂隙水及降水补给。本滑坡区地表全由第四系松散层覆盖,由粉质粘土、砂砾质粘土和少量碎石土组成,滑体内土体结构松散,裂隙发育,破碎程度较高,透水性很强,孔隙水主要受大气降水补给,一部分渗入地下基岩,一部分顺坡向渗流。

4.2 滑坡形态特征与滑坡失稳破坏类型

滑坡所在山体地形较陡,滑坡体后缘上部坡度35°,滑体前缘坡度15°~20°,由于人工开挖建筑场地,在滑坡体前缘形成了多级人工开挖陡坎,坎高1~4 m。总体地形为高临空面及坡上部斜坡地形。

滑坡体东西长约120 m,南北宽55 m,分布面积6600 m²,厚5.5~15.3 m,平均约9.8 m,沿山坡呈扇形分布,全部为第四系残坡积土体,估计方量约70000 m³。滑体最后缘海拔121 m,土体较薄(约5.5 m),下伏志留系石英细砂岩;滑体最前缘海拔90.8 m,土体较厚(11~20.2 m),下伏石炭系灰岩。滑坡区山体表面坡度24°~46°,总体呈楔形向南倾伏。

根据钻探结果,滑体后缘土体较薄,下伏基岩为细砂岩,滑体前缘土体较厚,下伏基岩为灰岩,基岩坡面较陡,坡度呈24°~46°。因此滑体主要

在自重力作用下沿基岩接触面滑移。由于滑体为土体,滑动面强度主要受土体的凝聚力和摩擦力控制。所以,假定滑坡失稳破坏模式为:滑体后缘受张拉应力作用,在滑体内形成张拉裂隙面,滑体中部沿基岩接触面滑移,滑体前缘在土体内形成挤压剪切滑动面。

4.3 斜坡稳定性分析

斜坡稳定性分析采用极限平衡法,采用传递系数法分别计算各断面的稳定系数。计算时按一般气候条件(工况1:滑体内土体处于非饱和状态)和暴雨条件(工况2:滑体内形成暂态地下水,浸润线以下土体全部饱和)进行考虑。

根据钻探资料和实地调查,发现滑移面上部位于粉质粘土中,中部沿基岩接触面,底部穿过临空面后出露。

以II-II剖面为例分析边坡稳定性,计算时,滑体坡面地形线及滑带均简化成折线。各工况计算剖面见图3、图4,计算成果见表2。

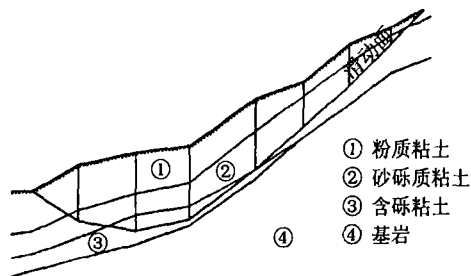


图3 滑坡稳定性计算剖面(工况1)

Fig.3 Section for calculating of stability of landslide under condition 1

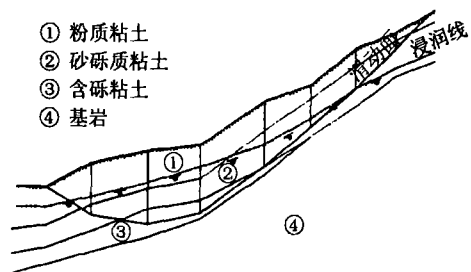


图4 滑坡稳定性计算剖面(工况2)

Fig.4 Section for calculating of stability of landslide under condition 2

从表2可以看出,在自然状态下,边坡处于基本稳定状态。降雨发生后,雨水进入岩土体,增加了坡体的自重,并在坡体内部形成瞬态地下水位,产生渗透力。在渗透力的作用下边坡稳定性大幅下降,形成滑坡,计算结果反映了实际情况。为对比分析考虑与不考虑渗透力作用对边坡稳定系数的影

响,分析了工况3,发现工况1与工况3计算结果接近,明显与实际不符。因此,在降雨诱发堆积层滑坡稳定性分析中,必须考虑渗透力的作用。

表2 各工况下的稳定系数计算结果表
Table 2 Calculating results on stability under three conditions

工况	计算条件	F_s
工况1	滑体内土体处于非饱和状态	1.16
工况2	滑体内形成暂态地下水,浸润线以下土体全部饱和,考虑渗透力作用	0.97
工况3	滑体内形成暂态地下水,浸润线以下土体全部饱和,不考虑渗透力作用	1.15

5 结论

堆积层滑坡是滑坡的一种基本类型,堆积层滑坡的物质组成、结构等有别于其它类型滑坡。其失稳绝大多数是由降雨或地下水位的变化而引起的,在降雨诱发堆积层滑坡稳定性分析中,必须考虑渗透力的作用。

从工程实用的角度,极限平衡法概念简单直观,易于工程技术人员掌握,可作为稳定分析的首选方法,并应优先考虑选用同时符合整体力及力矩平衡的各种通用条分法。本文给出的考虑渗透力的传递系数法,充分考虑了降雨对滑坡的触发作用,可用于降雨诱发滑坡的稳定性分析。

参考文献

- [1] 张先发,李明华,张小刚. 长江上游暴雨与滑坡崩塌关系[J]. 地理, 1995, 8(3): 102-106.
- [2] 王发读. 浅层堆积物滑坡特征及其与降雨的关系初探[J]. 水文地质工程地质, 1995, (1): 20-23.
- [3] 贺可强,雷建和,陈喜山. 堆积层滑坡的基本特征与防治原则[J]. 黄金, 1998, 19(11): 28-31.
- [4] Duncan J M. State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(7): 577-596.
- [5] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析的原理和方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [6] 郑颖人,时卫民,孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3 203-3 210.
- [7] 贺可强. 大型堆积层滑坡的多层滑移规律分析[J]. 金属矿山, 1998, (1): 15-18.