

滑坡稳定性判别的非计算方法

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: 用计算来确定滑坡的稳定性, 由于参数选取存不确定因素, 就必然导致了其计算结果的不确定性。而滑坡稳定性判别的非计算方法, 是通过对滑坡发育程度、形成条件的综合分析来确定滑坡的稳定程度的方法。文中通过归纳分析滑坡的形成条件, 然后从滑坡地貌条件、动力作用、堆积物特征、诱发因素等方面详细阐述了滑坡稳定性判别的方法, 最后, 例举了川藏公路 102 滑坡实例对该方法进行了验证。实践证明该方法是滑坡稳定性中非常实用和有效的方法。

关键词: 滑坡; 稳定性判别; 非计算方法

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A

滑坡的稳定性判别是滑坡调查和发展趋势分析中的一项重要内容。在滑坡稳定性判别中, 以往研究较多且备受推崇的是各类计算方法^[1~4], 通过计算得出某个滑坡的稳定系数, 以此来确定滑坡的稳定程度。但在滑坡的稳定性计算中, 通常存在着一些问题, 一是稳定性计算参数的选取存在较多的不确定因素, 如力学参数, 滑面特征, 滑坡规模等。二是滑坡的稳定性计算过程都是以某一条块的坡体为计算单元, 以此来推算整个滑坡的稳定性。这一单元能否代表滑坡的其他部分是不确定的。三是对滑坡的发育程度的认识不一致。这些不确定因素的存在, 就必然造成稳定性计算结果的不确定性。滑坡稳定性判别的非计算方法, 是通过对滑坡发育程度、形成条件的综合分析, 来确定滑坡的稳定程度。因此, 通过对滑坡的综合分析, 判断滑坡的稳定状态。

1 滑坡稳定性判别的基础

1.1 滑坡形成的基本条件

滑坡发生的基本条件是由构成斜坡的岩性、软弱结构面、有效临空面组成, 这些条件决定了滑坡发生的必然性。大量资料表明, 滑坡分布具有明显的区域性, 而这种区域性与某些地层或岩性的区域分布几乎完全一致。滑坡严格的局限于某些地层或岩性中。因此, 这种与滑坡形成密切相关的地层被称

为易滑岩组。常见的易滑岩组有粘土、黄土、半成岩、泥岩、砂页岩、含煤地层、千枚岩等。斜坡岩体在形成的地质时期或以后的演变过程中, 坡体内要形成各种结构面, 它将岩体被分割成不同形态, 大小的块体。当这些结构面的组合形态不利于坡体的稳定时, 就构成了控制坡体发生的滑面^[5]。有利于形成滑面的结构面有: 斜坡中顺坡向的岩层层间; 覆盖层与岩层的界面; 顺坡向缓倾角裂面; 斜坡上纵向裂面。滑坡发生滑动的临空条件是坡体在滑动过程中前方有足够的临空面, 它有利于滑坡向前运动。坡体具有有效临空面的基本条件是: ①临空面与滑面的倾向一致或基本一致; ②临空面的坡度要大于滑动面的坡度, 滑面前缘位于临空面内。

1.2 诱发条件

诱发条件在滑坡发生过程中主要起着增加下滑力或减小抗滑力的作用, 滑坡发育过程中常见的诱发因素有:

1. 水体作用 从作用类型上可分为渗透应力作用、物理化学作用和水体径流作用等, 而常说的降雨诱发因素, 实际上是通过这些方式发生作用。

2. 外动力作用 诱发滑坡发生的外动力主要有地震、人类工程活动等。地震对滑坡的诱发是地震引起坡体中质点运动而产生的作用力, 使斜坡中已有的裂缝扩大, 整体性降低, 或者使处于临界状态的滑坡失稳。人类工程活动对斜坡的破坏是通过开

收稿日期: 2001-01-10; 改回日期: 2001-06-19。

基金项目: 中国科学院特别支持领域“山地灾害—泥石流、滑坡基础研究”资助项目。

作者简介: 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。

挖、堆压、爆破等作业, 改变了坡体的稳定条件或使原有的地表径流发生变化, 诱发滑坡发生。

诱发作用对坡体的影响是一种综合效应^[6], 它可直接对滑坡发生起作用, 也可间接发生作用。例如, 坡脚处的下切或开挖不仅削弱了坡体的抗滑段, 而且增大了地下水的水利坡度, 加大了渗透应力。同时地下水作用还增加坡体的物理、化学风化, 促进了坡体的变形和滑坡发生。

2 滑坡稳定性判别方法

2.1 滑坡稳定性判别的原则

2.1.1 滑坡发生前后形成条件对比

判别滑坡是否稳定的一个重要原则是对滑坡发生前后的形成和诱发条件进行对比。一般说来, 滑坡发生前后的条件各不相同, 体现了坡体下滑和抗滑这对矛盾的转化, 所以, 在对滑坡进行宏观稳定性判别时, 必须了解分析滑坡发生前后形成条件和诱发条件的变化。在比较分析中, 对处于变形过程中的滑坡, 应注意分析不同发育阶段形成条件的变化。对已发生的滑坡, 应注意发生前后形成条件的变化。当滑坡形成的某一种条件不存在, 而重新形成这种条件的可能性不大或需要经历漫长的时间时, 即可准确的判别滑坡的稳定状态。

2.1.2 条件分析与实例分析相结合

形成条件分析是判别滑坡稳定性的基本方法, 它能确定斜坡发生滑坡的可能性和滑坡的稳定状

态。大量滑坡调查表明, 当斜坡具备有滑坡形成条件时, 并未立即发生滑坡, 坡体仍处于相对稳定状态, 滑坡发生受到某中特定条件的控制。因此, 在确定滑坡稳定性状态时, 应把条件分析和已发生的滑坡实例进行对比分析。

2.1.3 综合分析 with 主控因素分析相结合

综合分析是指以形成条件分析到变形迹象分析之间的有机结合, 同一滑坡上的变形迹象都存在内在的联系, 可以有一种合理的解释。如果出现矛盾则必须找出原因, 使之合理和完善。在强调综合分析的同时, 对导致滑坡发生的主控因素应特别重视, 一些在滑坡发生过程中的特殊现象需仔细分析, 以增加综合分析的准确性。

2.2 滑坡稳定性判别方法

2.2.1 地貌条件分析

滑坡发生后, 一个最显著的变化是地貌形态的改变。表现在斜坡坡度降低, 滑坡四周坡面裂缝增加, 滑坡体上形成较多的台坎, 滑坡前缘临空面坡度发生变化等。这些地貌形态的变化所反映的滑坡稳定状态各不相同^[7](表1)。

2.2.2 动力作用分析

常用于分析滑坡稳定性的动力作用方式有: 滑坡体势能的变化, 滑坡体应力状态的变化, 滑面物理力学性质的变化所引起阻力做功的变化, 坡体应力卸荷引起岩体碎裂成块(碎)石, 能量快速释放(表2)。

表1 滑坡发生后地貌形态变化对坡体稳定性的影响
Table 1 The Influence of The Physiognomy on Slope Stability After Landslide

地貌变化	地貌现象	利于滑坡稳定的地貌现象	不利于滑坡稳定的地貌现象
坡度变化	滑坡发生使斜坡坡度发生变化	坡度变缓	坡度变陡, 特别是斜坡下部或滑坡体前缘变陡
有效临空面变化	滑坡下滑后, 由于地形条件的变化, 可能使斜坡的有效临空条件发生变化(主要指斜坡下部或滑坡前缘)	滑坡体前缘滑入沟底, 滑坡继续滑动的空间变小; 滑动受岩体的阻挡, 坡体已不具备克服阻力向前滑动的能量	已发生的滑动的坡体仅为滑坡的一部分, 前缘滑动后, 临空面变陡, 临空面更加开阔
	斜坡下部有突出的基岩出露, 滑坡在滑动一定距离后有效临空面变窄, 形成束口	滑坡下滑后两侧突出岩体阻挡坡体下滑, 使滑动空间变小	临空面变陡, 临空面更加开阔
滑坡后缘裂缝	滑坡发生后在后缘和两侧会形成裂缝, 不同的裂缝对地表水排导作用不同	滑坡后缘及两侧的裂缝发育成冲沟, 斜坡上部的地表水被排出滑坡体	在滑坡后缘形成的主裂缝未与两侧的裂缝相通, 导致大量地表水渗入坡体, 促使滑坡失稳

表 2 滑坡发生后动力特征与坡体稳定性
Table 2 Slope Dynamical Feature and Stability After Landslide

动力类型	动力作用特征	利于滑坡稳定的动力现象	不利于滑坡稳定的动力现象
势能变化	滑坡体高度降低后, 其势能降低, 一般说来对滑坡的稳定性都有所增加	滑坡体已基本滑入沟底, 或坡体的相对高差已降低, 动能已大部分释放	滑动后坡体仍保持相对较大的高差, 其势能基本未释放
滑坡应力状态变化	由复合型滑面控制的滑坡, 当两侧岩体滑动方向指向轴线或背离轴线时, 应力分布将发生变化	滑坡两侧的坡体在滑动过程中向轴线方向挤压时, 滑坡前部岩体被挤压加密、加厚, 形成应力支撑拱,	坡体滑动后成放射状滑动, 应力得以充分释放
滑面力学性质变化	坡体滑动后, 原滑面的物理力学性质发生变化, 直接影响滑面摩擦力的大小	滑坡体覆盖在由碎石块石构成的坡面上; 或覆盖在松散堆积层构成的坡面上	滑坡体覆盖在顺坡向岩层或顺坡向结构面的坡面上, 使滑坡体很容易沿这些结构面发生滑动
卸荷释能	滑坡在滑动过程中解体, 应变能释放	滑坡在滑动过程中解体成碎块, 松散的堆积在斜坡上, 坡体中聚集的应变能已释放	滑动后相对完整, 应变能未被释放, 前缘可能形成崩塌或滑坡

2.2.2 滑坡堆积物特征分析

滑坡发生后形成的堆积物在体结构上将发生较大的变化, 其变化主要表现在滑坡体的碎(块)石在运动过程中出现一定程度的分选、原滑面的性质发生变化、坡体的孔隙率变化^[4], 结构明显改变必然对坡体的稳定性产生较大的影响(表 3)。

2.2.3 诱发因素分析

诱发滑坡发生的因素有水体作用、地震诱发作用、人类工程活动等, 对滑坡的诱发作用各不相同(表 4)。

表 3 滑坡堆积体结构变化与坡体稳定性
Table 3 The Change of Landslide Accumulation Structure and Slope Stability

结构类型	滑坡体或堆积物结构	利于滑坡稳定的堆积物特征	不利于滑坡稳定的堆积物特征
坡体结构变化	坡体在滑动过程中解体(形成碎(块)石), 并在运动过程中发生分选, 形成不同的结构	在堆积物剖面上 颗粒上部细, 下部粗, 不利于新的滑面形成, 形成较稳定的坡体结构 在坡面上 斜坡下部颗粒粗, 上部细, 不利于新滑面形成	在堆积物剖面上 颗粒上部粗, 下部细, 易于形成新的滑面, 形成不稳定的坡体结构 斜坡下部颗粒细, 上部粗, 易于形成新的滑面
滑面变化	坡体滑动后, 滑体堆积在坡面或岩层面上, 原滑面的性质发生变化, 重新滑动必须克服更大的阻力或形成新的滑面	当滑体堆积在松散的含碎石的坡面或堆积在反坡向岩层构成的坡面上时, 原滑面的阻力增大或不易形成新的滑面, 有利于坡体的稳定	当滑体堆积在顺坡向岩层构成的坡面或细颗粒物质覆盖的坡面时, 原滑面的摩擦力减小或有利于形成新的滑面, 坡体的稳定性降低
坡体孔隙变化	坡体滑动后原坡体或堆积物结构发生变化, 引起的坡体地下水渗流状态变化	滑动后坡体或堆积物形成上部细下部粗的结构, 有利于坡体排水, 含水率减少稳定性增加	滑动后坡体或堆积物形成上部粗下部细的结构, 不利于坡体排水, 含水率增加稳定性降低

表 4 不同诱发因素对坡体稳定性的影响

Table 4 The Influence of Various Factors on Slope Stability

类型	诱发因素作用方式与特征	对坡体稳定性的影响
水体作用	地表水渗入坡体的条件	当地表条件有利于地表水渗入坡体(如滑坡后缘裂缝、冲沟), 滑坡的稳定性降低
	水流对坡脚的淘蚀	水流淘蚀坡脚后, 使抗滑段被削弱, 降低了滑坡的稳定性
	地下水渗透应力包括静水压力和动水压力, 当坡体中地下水位升高时, 渗透应力增加	地下水水位越高, 作用于滑面(空隙)的静水压力越大, 滑面处地下水头差越大, 所承受的动水压力越大 滑坡前部变陡, 地下水水力梯度增大, 渗透应力增加
地震诱发作用	地震波引起坡体质点加速震动而产生的作用力对坡体的破坏起着促进作用	对处于临界平衡状态的滑坡体在地震的作用下可能发生突然失稳
工程活动	改变了滑坡体状态和受力条件	在滑坡前缘开挖、后部加载, 改变坡面的径流状态, 都可能导致滑坡失稳

3 滑坡实例分析

以川藏公路 102 滑坡为例^[5], 用上述方法对其稳定性进行分析。

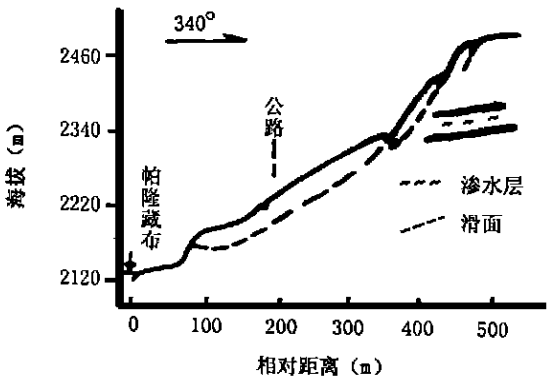
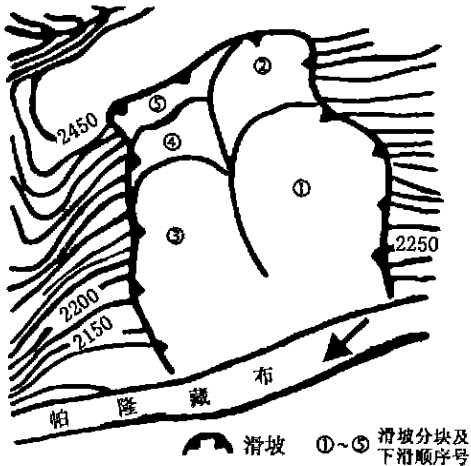


图 1 102 滑坡平面(上图)、剖面(下图)示意
Fig. 1 The Plan and Section of #102 landslide

滑坡位于川藏公路 102 道班附近, 为一大型堆积层滑坡, 方量为 $5.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。102 滑坡在 60 年代就有明显的活动迹象, 后缘经常出现崩塌和滚石, 为此, 公路部门曾修建防泥走廊。1987 年滑坡变形加剧, 前缘发生坍塌, 路基每年下沉 0.5 m ~ 1.0 m。1991—06 滑坡发生大规模快速滑动(图 1), 影响公路 550 m, 滑坡前缘直冲帕隆藏布彼岸, 堵河回水 3 km。102 滑坡发生后, 后壁地下渗流水常年不断, 加之雨季地表水作用, 坡面已形成 5 条冲沟, 并伴有小规模的发生^[1]。

3.1 滑坡发生后形成条件的改变与坡体稳定性状态

102 滑坡在发生整体大规模滑动后, 一个最显著的变化是地貌形态的改变。滑坡体前部块体在经过 100 m ~ 150 m 的滑动后, 后部的块体紧随着下滑 50 m ~ 60 m, 大量的坡体物质堆积在坡脚, 使斜坡下部变宽、变大, 在地貌上形成向前突出的正地形, 在斜坡的后部由于坡体下滑, 使原先凹陷的负地形进一步加大, 在地貌上形成一个洼地。所以地貌上的变化使得斜坡的平均坡度降低为 37 °左右。滑坡体下部的有效临空条件向有利于稳定的方向转变, 后缘块体则由于下部块体的滑动而使临空条件向有利于滑动的方向转变。

另一方面, 坡体大规模滑动使使滑坡体发生剧烈扰动, 斜坡面上形成下部堆积物厚, 上部堆积物薄的状态。在滑坡体堆积过程中, 坡体发生解体并产生一定的分选, 较大的块石、碎石大部滚落在坡脚或斜坡下部, 而较细碎屑却堆积在斜坡上部, 形成下部可颗粒粗、上部颗粒细的坡体结构, 在坡体的孔隙上就表现为上部孔隙率小, 下部孔隙率大。这种结构

实际上是一种有利于排水的结构, 滑坡体中的地下水通过下部孔隙被排出坡体, 滑坡体上部孔隙率小, 地表水不易渗入坡体, 这样就使坡体中的含水量逐渐降低, 碎石周围的粘粒逐渐固结, 岩土体的强度增高。

3.2 动力作用方式改变与坡体稳定性状态

滑坡发生后, 滑坡体前部向前滑动了 100 m ~ 150 m, 后部下滑了 60 m。滑坡大部分物质堆积在河床、坡脚和斜坡的下部, 原来聚集在坡体内的应变能基本被释放。根据滑坡发生的一般规律, 滑坡发生要经历一个从变形、能量聚集到能量释放形成滑坡的过程。在这一过程中能量聚集是一个较为缓慢的过程, 滑坡体的能量释放后, 再次发生大规模滑动的可能性不大。就滑坡体的势能而言, 原滑坡体的几何重心位于海拔 2340m, 滑坡发生后几何重心下降为海拔 2220 m, 相对高差低了 100 多 m, 势能减少, 滑坡再次发生整体滑动的可能性已大大降低。

3.3 地下水渗流状态的改变与滑坡的稳定性状态

滑坡发生后地下水的渗流状态发生了很大的变化。由滑坡勘察得知, 斜坡表面以下 35 m ~ 54 m 之间存在一个潜水层, 地下水的渗流方向从斜坡顶部向帕隆藏布流动。滑坡发生后, 坡体中原有的渗水层被错断, 在滑坡后缘陡壁上出露了 6 处泉水, 这些泉水大都汇集于坡面冲沟后被排出坡体。滑坡下部没有出水点。这表明滑坡体中的渗水层在后缘处被错断, 地下水渗流水基本没有进入坡体, 而是从坡面排走。这有利于坡体碎石土的固结, 使滑坡的稳定性增加。

通过以上分析认为, 102 滑坡整体处于稳定状态, 滑坡堆积体的破坏主要表现为后壁陡岩处小规

模崩塌和坡面冲沟两侧的坍塌, 整体不会再次发生大规模滑动。后来的事实证明了这一结论正确, 虽然在雨季 102 滑坡的坡面改造十分强烈, 滑坡体上的几条冲沟两侧坍塌严重, 但整体未发生大规模滑动。这证明了滑坡稳定性判别非计算方法在实践中是可行的, 特别是在滑坡调查和发展趋势分析中非常实用, 通过详细的野外调查和综合分析, 能快速判定滑坡的稳定性, 也是在对滑坡进行详细勘探和力学参数测试以前, 分析判断滑坡稳定性的有效方法。

参考文献:

- [1] 罗文强, 黄润秋, 张倬元, 等. 几种边坡可靠性数学模型的对比[J]. 山地学报, 2000, 18(1): 42~46.
- [2] 吴承梅, 洪伟. 滑坡预报的 BP-GA 混合算法[J]. 山地学报, 2000, 18(4): 360~364.
- [3] 靳晓光, 李晓红, 王兰生, 等. 滑坡深部位移曲线特征及稳定性判别[J]. 山地学报, 2000, 18(5): 440~444.
- [4] 蒋良文, 王士天, 刘汉超, 等. 岷江上游汶川—较场段滑坡稳定性的神经网络评判及其堵江可能性浅析[J]. 山地学报, 2000, 18(6): 547~553.
- [5] 孔纪名, 金龙山地区滑坡优势面分析[J]. 山地研究, 1991, 9(4): 218~224.
- [6] 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.
- [7] 林立相, 徐汉斌. 边坡稳定性分析的可靠度方法. 山地学报, 1999, 17(3): 235~239.
- [8] 任光明, 聂德新等. 强度再生效应在大型滑坡稳定性评价中的运用. 山地学报, 2000, 18(增刊): 60~64.
- [9] 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通科学研究所著. 川藏公路典型山地灾害研究[M]. 成都科技出版社, 1999. 172~181.
- [10] 张小刚, 王成华等. 川藏公路“102”滑坡群的基本特征. 山地研究, 1998, 16(2): 151~155.

The Non-computation Method to Differentiate the Stability of Slope

KONG Ji-ming

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

Abstract: It is one major task to differentiate the stability of slope of forecasting and controlling landslide, and the exactness degree of differentiating the stability of slope will decide the success or failure of forecasting and controlling landslide. Usually we work out the stability coefficient of one landslide through some mathematical method to forecast the stability of slope. But we find some question in the process of calculating the stability of slope, for example we can't select the value of some parameter. One block of slope is used as calculating cell to work out the slope coefficient to differentiate the stability of slope, but we don't make certain whether this block can represent the whole slope and so on. These uncertain factors lead to acquire uncertain result consequentially. The non-computation method of the differentiation of the stability of slope is one systemic method, which refers to the development of landslide and formative condition to analyze landslide synthetically. The paper expatiates detailed the non-computation method to differentiate the stability of slope from the formative condition landform condition, dynamic function, accumulation feature and derivational factors and so on. At last the paper validated this calculating method through 102 landslides in Road chuanzeng. Through synthetically analytical method to differentiate the stability of slope is one kind of applied method.

Key words: landslide; the differentiation of the stability of slope; non-computation method

短讯: “国际山区发展学术会议”

为响应联合国关于 2002 年为国际山地年的倡议, 由中国科学院发起组织, 并由中科院·水利部成都山地灾害与环境研究所和中国地理学会共同承办的“国际山区发展学术会议”将于 2002 年 10 月在四川成都举行。本次会议的主题为山地生态环境与山区可持续发展。交流语言为英语。有关具体事宜详见会议正式通知。我们热诚欢迎有关单位及个人参与。

联系人: 张宁 郭梅菊, 中科院成都山地所综合信息室, 成都 610041

电 话: (028)5228819 传 真: (028)5222258

E-mail: Zhangning@imde.ac.cn