

# 金龙山地区斜坡滑动优势面分析

孔 纪 名

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所)

**提 要** 据优势面分析原理和方法,对金龙山地区斜坡各种结构面所作的优势面分析结果显示:浅层强风化岩体中顺坡向剪切裂隙,是控制浅层顺层滑坡发生发展的滑动优势面;深层弱风化岩体中粘土岩风化软弱夹层、斜坡上段拉张裂隙与斜坡下段顺坡向剪切裂隙三者相组合,是控制深层顺层滑坡发生的滑动优势面。当地受滑动优势面控制的滑坡变形破坏模式有:浅层为蠕滑—拉裂,深层为滑移—弯曲。

**关键词** 金龙山 斜坡 滑动优势面 结构面

金龙山地区斜坡为一顺向坡。在重力作用下,斜坡岩体内发育有多种结构面,它们在斜坡变形破坏中起的作用各不相同。以往常用滑坡的形成条件分析来确定滑面;或假定几个结构面后,计算出各结构面稳定系数,取稳定系数最小的结构面作滑面。显然这样做可能不一定完全反映客观实情。现试图据优势面分析理论和方法<sup>[1]</sup>,用以分析斜坡中的各种结构面,进而确定斜坡滑动优势面。这种做法的客观程度,也有待实践检验。

## 一、金龙山地区斜坡的结构面

### (一) 原生结构面

这主要指一系列平行的顺坡向岩层界面,由斜坡坡面向坡内计有三个:上二叠统峨眉山组玄武岩( $P_{2B}$ )与下二叠统阳新组灰岩( $P_{1Y}$ )间岩层界面,阳新组灰岩与下二叠统梁山组粘土岩( $P_{1L}$ )间岩层界面,梁山组粘土岩与石炭系灰岩( $C$ )间岩层界面。后者为软弱夹层,连续性好,普遍含薄层状或透镜状泥质夹层,厚 0.2—0.5 米,其中尤以由沉积间断而成的粘土岩顶面泥质夹层最为突出。三个结构面产状皆为  $170^\circ-190^\circ \angle 28^\circ-35^\circ$ ,岩层倾向与斜坡坡向( $210^\circ$ )之夹角约  $30^\circ$ 。

### (二) 次生结构面

它主要由卸荷裂隙组成,发育在斜坡坡面以下 0—100 米处岩体强风化带和弱风化带内。由硐、硐<sub>2</sub>揭示:斜坡坡面以下 0—9 米为全风化带,其间岩性为沙质粘土夹碎石,裂隙不发育;斜坡坡面以下 9—275 米为强风化带和弱风化带,次生结构面主要分布在这一范围内,然而两者相比,弱风化带中的卸荷裂隙更为发育。次生结构面的单条长度都不大,几十厘米至几米不等,宽度较小,通常 1—10 厘米。次生结构面密集成带者,便成卸荷裂隙软弱破碎带,最长约 30 米,宽约 1 米。

本文收稿日期:1991-07-25.

当地斜坡的卸荷裂隙按产状可分为四组,第一组产状  $160^{\circ}-170^{\circ} \angle 30^{\circ}-40^{\circ}$ ,第二组产状  $200^{\circ}-230^{\circ} \angle 30^{\circ}-50^{\circ}$ ,两者的倾向与斜坡坡向近于一致,倾角大于斜坡坡度;第三组产状  $180^{\circ} \angle 10^{\circ}-20^{\circ}$ ,裂隙面上出现顺坡向擦痕,裂隙倾向与斜坡坡向基本一致,故这组裂隙在滑坡发育过程中易成滑动优势面,第四组产状  $305^{\circ}-355^{\circ} \angle 32^{\circ}-60^{\circ}$ ,其倾向与斜坡坡向相反(即逆坡向)。

### (三) 构造结构面

其主要为北西向、北东向共轭 X 节理。共轭 X 节理由产状  $300^{\circ}-310^{\circ} \angle 60^{\circ}-65^{\circ}$  和  $30^{\circ}-50^{\circ} \angle 65^{\circ}-70^{\circ}$  的两组节理构成。北东向节理作反时针压扭性运动,而北西向节理作顺时针压扭性运动。北东向节理较为发育,在部分地段它错断岩层而成小断层。该共轭节理呈区域性分布,较为发育,平面上延伸较远,这就对金龙山地区斜坡作纵向分割明显。

### (四) 层间劈理带

当地斜坡由一套单斜岩层构成。在构造活动中,随着岩层被褶皱而生成层间错动,使软弱夹层间的坚硬岩层形成层间劈理。它们具压扭性、沿层分布密集。由平硐揭示,层间劈理宽度从十几厘米至几十厘米,最宽达 1.5 米,受岩层层面控制,劈理倾向与斜坡坡向一致。层间劈理带在构造活动后期受重力作用,故层间劈理由压扭性转变为张扭性,并充填有少量泥质,岩石风化加强,形成软弱结构面。在金龙山地区斜坡岩体中,大多数层间劈理带力学强度很低,抗剪强度接近残余抗剪强度,最易发展成滑动优势面。

## 二、确定斜坡变形破坏优势面的优势指标

金龙山地区斜坡变形破坏优势面由下列优势指标确定。

### (一) 结构面优势指标

斜坡岩体的结构面优势指标是指在重力作用下,斜坡岩体中所形成的顺坡向剪切裂隙、拉张裂隙及富含泥质的岩层层面(粘土岩风化软弱夹层)。这些结构面倾向坡外,较平直,连通性好,抗剪强度低。

### (二) 结构面产状优势指标

结构面倾向坡外,即与斜坡坡向同,倾角小于斜坡坡度,而大于结构面内摩擦角,便易产生滑动。斜坡中顺坡向缓倾角结构面是具产状优势的结构面。

### (三) 结构面发育密度优势指标

结构面发育密度直接反映了斜坡岩体的结构、碎裂类型和力学性质。斜坡深层岩体中,顺坡向剪切裂隙、层理的发育密度大于其他几组裂隙的发育密度,由此而产生顺层滑动;斜坡浅层岩体中,各类裂隙的发育密度无多大差异,岩体呈现松散结构,产生的是圆弧滑动。

### (四) 相关因素指标

相关因素指结构面胶结程度、含水性、风化程度、充填物厚度等。当地斜坡中顺坡向层面上和裂隙内的含水性、风化程度都较高,稳定性较低。

### 三、金龙山地区斜坡地质力学优势面的确定

确定斜坡地质力学优势面主要是:据上述各项优势指标确定斜坡变形破坏的优势面,分析优势面组合特性而得出滑坡的地质力学模式和数学模式,确定金龙山地区斜坡滑动优势面。

#### (一)不同应力状态与岩石变形破坏

由岩石力学理论和实验可知,在不同应力条件下,岩石变形破坏有以下几种情况。

1. 侧应力  $\sigma_3$  或岩石塑性较高者,岩石首先从与主应力  $\sigma_1$  交角大致为  $45^\circ - (\varphi/2)$  ( $\varphi$  为岩石内摩擦角)的方位上产生细微裂隙;随着变形的发展,岩石在此方位上产生剪切破坏,并形成剪切面。

2. 侧应力  $\sigma_3$  较低或岩石脆性较高者,岩石首先从与主应力  $\sigma_1$  近于平行的方位上产生细微张裂隙;随着裂隙的发展,在此方位上产生贯通性的张裂隙,并形成压致拉裂面。

3. 岩石处于拉应力状态者,岩石破坏发生在与拉应力垂直的方位上。岩石中首先产生一些与拉应力方向垂直的不规则细微张裂隙,随后产生锯齿状张裂面,其方向与张应力方向垂直,称之为拉张裂隙面。

岩石受力状态不同,岩石的破坏就有差异,这是岩石裂隙起始扩展角所决定。由断裂力学应变能密度理论可知,岩石在单向受力状态下(此时可视其他两向应力均较小或趋于0),裂隙的起始扩展角  $\theta_0$  可由下式确定,即

$$2(1-2\nu)\sin(\theta_0-2\beta)-2\sin[2(\theta_0-\beta)]-\sin 2\theta_0=0,$$

式中  $\nu$  为岩石的莫桑比;  $\beta$  为裂隙的走向与主应力  $\sigma_1$  方向之间的夹角。由于应变能密度因子依赖于主应力  $\sigma_1$ ,故单向拉伸( $+\sigma_1$ )或单向压缩( $-\sigma_1$ )的破裂方向是完全不同的。在拉应力  $+\sigma_1$  作用下,单向拉伸使裂隙向垂直拉应力方向发展;在压应力  $-\sigma_1$  作用下,单向压缩使裂隙向平行压应力方向发展。

#### (二)斜坡应力场与变形结构面

对整个金龙山地区的构造变形分析结果显示,现代构造活动对斜坡影响甚微,对斜坡变形起主要作用的为重力。在斜坡发育过程中,斜坡的形态、岩体特征、地质力学条件都在不断变化着,这就决定了斜坡应力场的复杂性。由有限元法对斜坡应力场分析结果可知,在金龙山地区斜坡纵剖面上可将应力状态分为四个应力区(图1)。

应力区 I 其位于斜坡上段(海拔1460米以上),为拉张应力区。区内岩体在拉张应力作用下发生拉张变形,产生拉张结构面,生成金龙山地区滑坡后缘的拉张裂缝。

应力区 II 其位于当地斜坡海拔1150—1460米浅层岩体中,岩性为强-弱风化玄武岩,真厚度30—40米。区内主应力  $\sigma_1$  方向与斜坡坡向斜交,垂直于斜坡坡向的应力很小。本区的应力状态如下。

在强风化玄武岩岩体中,其具一定的塑性,沿最大剪切应力方向发生剪切破坏,生成两组共轭剪切裂隙:一组为顺坡向缓倾角裂隙,其倾角小于斜坡坡度,产状  $140^\circ-200^\circ \angle 20^\circ-30^\circ$ ;另一组为剪切裂隙,其倾向与斜坡坡向相反,产状  $35^\circ \angle 75^\circ$ 。因这两组裂隙

在斜坡浅层岩体中,故岩体的风化作用和卸荷作用使裂隙变陡变短。

在弱风化玄武岩岩体中,其具一定强度而呈脆性,在压应力作用下形成压致拉张裂隙。裂隙倾向倾角与斜坡坡向坡度一致。

**应力区Ⅲ** 其位于斜坡下段和坡脚浅层岩体中,斜坡中主应力 $\sigma_1$ 方向与斜坡坡向平行,垂直于斜坡坡面的应力很小,常出现垂直于斜坡坡面的拉张应力。因此本区斜坡中主要发育有一组缓倾角剪切裂隙,由硐揭示:这组剪切裂隙的产状 $170^\circ-180^\circ \angle 14^\circ-20^\circ$ ,并有可能向临空面处剪出,这使顺坡向岩层发生隆起或挠曲。

**应力区Ⅳ** 其位于斜坡深层岩体中,岩性为弱风化玄武岩和阳新灰岩。岩体主要受重力作用外,还受岩体侧向应力作用而处于三轴应力状态,主应力 $\sigma_1$ 略倾向临空面。在这样的应力状态下,岩体沿最大剪切应力方向发生破坏,发育有两组共轭剪切裂隙:一组顺坡向,裂隙受岩层层面控制而较发育,延伸较长,倾角 $35^\circ-45^\circ$ ;另一组逆坡向,裂隙不太发育,延伸受岩层层面的控制,倾角 $45^\circ-60^\circ$ 。

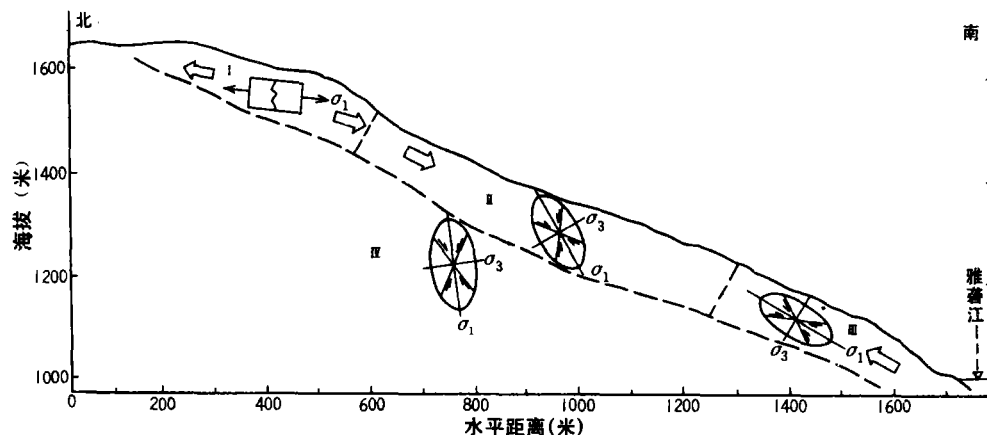


图1 金龙山地区斜坡应力状态分区示意图

Fig. 1 Sketch map of stress state division of slope in Jinlongshan region

### (三) 斜坡地质力学优势面

对金龙山地区斜坡稳定性影响甚大的几组结构面中,权重最大的结构面决定着斜坡的稳定性。裂隙的相互组合构成斜坡变形破坏的优势面。

在当地斜坡原生结构面中,粘土岩顶底面风化软弱夹层是最不稳定的。因为粘土岩风化软弱夹层分布稳定,隔水性能良好,地下水相对富集,抗剪强度很低,具备斜坡变形破坏优势面的各项优势指标。这是构成顺层岩质滑坡主体的地质力学优势面。

在斜坡上段拉张应力区(即应力区Ⅰ),岩体处于拉张应力状态,发育有一组拉张裂隙。随着裂隙位移量的积累,在斜坡上段坡面上产生明显的拉裂,金龙山地区滑坡后缘的拉张裂缝控制了滑坡后缘的形态和分布范围。

在斜坡中下两段剪应力集中区(即应力区Ⅱ,Ⅲ),岩体处在平行于斜坡坡向的单轴受

力状态下,发育有两组共轭剪切裂隙。从斜坡变形破坏优势面的优势指标来看,顺坡向缓倾角剪切裂隙明显优于逆坡向陡倾角剪切裂隙,前者是斜坡岩体中地质力学优势面。

这组顺坡向缓倾角剪切裂隙对金龙山地区斜坡变形破坏的控制表现为两种方式:1. 浅层强风化岩体中,在应力作用下,顺坡向剪切裂隙逐渐连通,生成浅层滑动优势面;2. 深层弱风化岩体中,斜坡下段顺坡向剪切裂隙常与斜坡上段拉张裂隙、软弱结构面三者相组合,生成深层滑动优势面。

在斜坡深层岩体(即应力区Ⅳ)中,岩体处于三轴应力状态下,发育有两组共轭剪切裂隙。其中顺坡向剪切裂隙在斜坡变形破坏过程中逐渐沿岩层层面发展,并与斜坡上下两段的顺坡向剪切裂隙连通,生成深层岩体中地质力学优势面;而逆坡向剪切裂隙不具备优势面条件,就不能成为地质力学优势面。

由上可见,斜坡上段拉张裂隙、顺坡向剪切裂隙和粘土岩风化而成的软弱结构面,分别是金龙山地区斜坡变形破坏的优势面。三者的彼此组合就构成浅层残坡积层滑坡、深层岩质滑坡的滑动优势面。

#### (四)斜坡滑动优势面随机分析

随机分析法是一种通过对随机变量的随机模拟和统计试验来求近似解的方法。在斜坡滑动优势面分析中,优势指标和参数值都难以确定,它们是具有随机性的随机变量,服从于一定的分析规律。一般说来,随机变量的分布类型服从于正态分布或对数正态分布。因而由随机变量组合所确定的滑坡稳定系数也是随机变量。用随机分析法进行斜坡稳定性随机分析,首先要建立相似性概率模型,然后对模型进行随机分析,再以所得结果求这些特征统计估计值,并将其作为所分析问题的数值近似解。

一般说来,滑坡稳定系数

$$K = G(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m),$$

式中  $x_i (i = 1, \dots, m)$  为优势面的优势指标,属具有正态分布的随机变量。 $K$  是通过  $G$  作用于  $x_i$  的函数,也属随机变量。

在金龙山地区斜坡稳定性随机分析中,设斜坡滑动优势面只存在于域  $\Omega$  内,斜坡滑动优势面的抗滑安全稳定系数为  $K$ 。为能在域  $\Omega$  内准确搜索出斜坡滑动优势面的位置和形状,通常可设法投掷一定数量的斜坡地质力学优势面,并计算出对应的斜坡地质力学优势面的抗滑稳定系数  $K_i$ 。设随机变量为  $\eta$ 。某一随机投掷的地质力学优势面  $K_i \leq K$  者,取  $\eta = 1$ ,表示地质力学优势面投掷成功,稳定性低;当  $K_i \geq K$  者,取  $\eta = 0$ ,表示地质力学优势面投掷失败,稳定性高。

若随机投掷的斜坡地质力学优势面数量足够,统计所得到的  $\eta$  值,在  $n$  次随机投掷试验中随机投掷地质力学优势面成功的总次数为  $m$ ,则由统计估计理论和中心极值定理可知,取  $K$  为斜坡滑动优势面的抗滑安全稳定系数时,所对应的斜坡地质力学优势面即为斜坡滑动优势面, $K$  值所确定的斜坡滑动优势面概率

$$P = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i.$$

当随机投掷的斜坡地质力学优势面数量  $n$  越多,斜坡滑动优势面概率  $P$  就越大,这便愈

能真实反映金龙山地区斜坡滑动优势面情况。

在当地斜坡滑动优势面中,可分两组进行滑动优势面随机分析。一组以浅层强风化岩体中顺坡向剪切裂隙作分析;另一组以深层弱风化岩体中软弱结构面与顺坡向剪切裂隙二者组合作分析。由计算分析结果表明,金龙山地区斜坡滑动优势面有两组(图2)。

第一组为由浅层强风化岩体中顺坡向剪切裂隙构成的滑动优势面,大致呈圆弧形,控制着浅层顺层滑坡的发生发展。

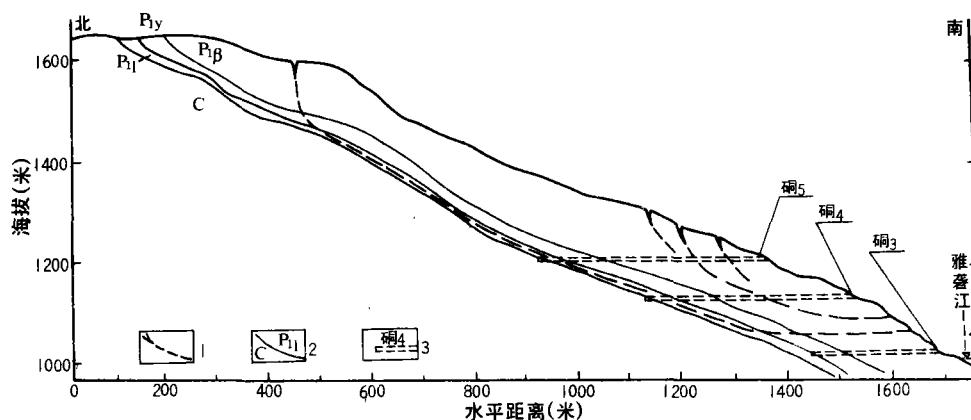


图2 金龙山地区斜坡滑动优势面

Fig. 2 Slide preferred planes of slope in Jinlongshan region.

1. 滑动优势面; 2. 地层界线; 3. 平洞及其编号

第二组为由深层弱风化岩体中斜坡上段拉张裂隙、粘土岩风化软弱夹层与斜坡下段顺坡向剪切裂隙三者构成的滑动优势面,呈折线形,控制着深层顺层滑坡的发生发展。

## 四、金龙山地区滑坡变形破坏模式

### (一) 第一组滑动优势面控制的浅层滑坡

由当地斜坡浅层顺坡向剪切裂隙的统计分析结果显示,裂隙分布在斜坡坡面以下30—60米的浅层强风化玄武岩岩体中,其中坡面以下50米处最为集中。由洞1、洞5揭示:在洞内140米(垂直深度50米)处为一主要的剪切裂隙带,其控制着强风化岩体中的滑坡发生发展。目前已经发生或正在发生的金龙山I区滑坡、I区油库古滑坡、III区9"楼滑坡,都受顺坡向剪切裂隙的控制。浅层滑坡变形破坏模式为蠕滑—拉裂,变形破坏过程可分为三个阶段。

1. 蠕滑阶段 坡体内剪切裂隙在重力作用下应力逐渐集中,形成塑性变形区;剪切裂隙逐渐扩大,在斜坡坡面上表现为蠕滑变形。

2. 滑动阶段 随着蠕滑变形的发展,顺坡向剪切裂隙逐渐连通扩大,生成滑动优势面,斜坡坡面开始出现拉张裂隙。

3. 加速变形阶段 滑动优势面在最大剪切应力作用下已完全连通,滑坡变形量加

大,最后导致滑坡的发生。

## (二)第二组滑动优势面控制的深层滑坡

该组滑动优势面主要控制着顺层岩质滑坡的发生发展。深层滑坡变形模式为滑移—弯曲。这就是说,斜坡岩体在重力作用下沿滑动优势面滑移过程中,斜坡下段岩体受阻而呈现顺坡向弯曲,弯曲变形量积累到一定程度(即超过岩体强度极限)后,岩体就在弯曲变形最大部位破裂,最后导致滑坡的发生。深层滑坡的变形破坏过程亦可分为三个阶段。

1. 轻微弯曲(挠曲)阶段 斜坡中上两段(主滑段)岩体在重力作用下沿滑动优势面发生蠕滑过程中,使斜坡下段(抗滑段)岩体呈现顺坡向弯曲,其变形机制与板状材料单轴压缩变形机制相仿。弯曲部位出现顺层拉裂面,坡面轻微隆起,结构面产状发生变化,并伴有局部压碎。由铜,揭示,目前当地深层滑坡变形破坏正处于本阶段。

2. 强烈弯曲隆起阶段 变形显著增强,弯曲部位剖面上呈现共轭X剪切裂隙,其中顺坡向剪切裂隙逐渐发展成滑动优势面,并伴有弯曲部位岩体的强烈变形,斜坡坡面隆起明显。斜坡上段坡面出现拉张裂隙。

3. 剪切面贯通破坏阶段 弯曲部位岩体发生破坏,滑动优势面完全连通,最后导致滑坡的发生。

## 参 考 文 献

- [1] 罗国煜等,1988,优势面分析理论与方法初步研究,第三届工程地质大会论文选集(下卷),成都科技大学出版社,第1212—1219页。

# AN ANALYSIS ON THE SLIDE PREFERRED PLANES OF THE SLOPE IN JINLONGSHAN REGION

Kong Jiming

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences

& Ministry of Water Conservancy)

## Abstract

In the Jinlongshan region the slope is bedding ones. There are varied structural planes formed by gravitating in the rock mass of the slope. The structural planes are shear rupture of bedding, tension rupture and weak intercalation of weather claystone etc. They would become slide preferred planes of that are bedding slopes, as well as flater, continutier and with lower strength.

According to the theory and method of preferred planes and analysis varied structural planes of the slope in the Jinlongshan region, the conclusion follows:

1. The slide preferred plane is composed of shear rupture of the bedding slope in the shallow-intense weathered rock mass. It will control formation of the shallow-bedding landslide.

2. The slide preferred plane in the deepweak weathered rock mass is composed of tension rupture in the upper slope, shear rupture in the lower slope and weak intercalation of weather claystone. It will control formation of the deep-bedding landslide.

Deformation fracture model of Jinlongshan landslide is creep slide—tension in the shallow rock mass and gliding—flexural in the deep rock mass.

**Key words** Jnlongshan, slope, slide preferred plane, structural plane