

# 甘肃舟曲南桥村西滑坡地质特征及其治理

李永进

(甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所 兰州 730000)

**提 要** 详细描述舟曲南桥村西滑坡的物质组成、地质特征及其变形过程。并据变形迹象及勘探资料分析了组成滑坡的各块滑体受力特征及其之间的力学联系,通过稳定性计算,获得了滑体不同部位的稳定程度,为减灾治理提供了可靠的理论依据。同时,利用工程地质比拟法,结合室内实验资料,提出了隔水、排水、疏水及减载反压等治理方案。

**关键词** 滑坡 变形迹象 受力分析 减灾治理

## 1 滑 坡 概 况

舟曲县南桥村滑坡位于县林业局对面、江盘乡南桥村古滑坡形成的山凹内,近东西向白龙江大断裂与北西向次级断裂的交汇处,与锁尔头滑坡遥相呼应,形成对滑格局,为一断层及古滑坡破碎堆积体滑坡。滑体主要由钙质片岩、千枚岩碎片、灰岩碎块及断层泥等组成,表层为厚度不等的黄土类种植土。坡面较破碎,宏观坡度为  $25^{\circ}$ — $30^{\circ}$ ,局部较缓处已开成耕地。

南桥村滑坡统指该村南山北坡上古滑坡形成的圈椅状负地形直至江边这一范围。其纵轴长约 600m,舌部宽约 220m,中部宽 175m,上部宽约 60m,面积约  $9.42 \text{ 万 m}^2$ ,体积约  $77 \text{ 万 m}^3$ 。滑坡顶部海拔 1 572m,江堤海拔 1 316m,相对高差 256m,自然冲沟将滑体一分为二,形成了相对独立的東西两个滑坡(图 1)。

东部滑坡变形迹象已相当明显。上部已形成数米位移量,中部拉张裂缝密布,下部出现膨胀裂缝并在舌部形成明显的剪出口,处于滑前的能量聚集阶段。与其相比,西部滑坡面积约  $4.3 \text{ 万 m}^2$ ,约  $40 \text{ 万 m}^3$  的滑体已处于临界失稳状态,并直接威胁着滑舌前部的乡政府,加工厂,仓库及 156 户居民的生命及财产安全。如果堵江,将会危及县城的安全。因此研究及治理西部滑坡成为当务之急。限于篇幅,仅探讨西部滑坡。

## 2 滑坡的变形过程及空间分布特征

### 2.1 位移变形过程

据调查,该滑坡顶部开裂变形已有数年。1992 年 7 月变形速度明显加快,8 月中旬达到峰值。据县水保站观测资料,8 月 11—28 日,总位移量为 1.71m,日均 10cm,并在舌部(王宏英家后、王元有家)一带,形成明显的剪出口,造成墙壁坍塌。9 月份变形减缓。截至 12 月中旬,滑坡周界、滑动面和剪出口基本形成,后壁处形成多级坍塌陡坎。除周界附近

本文改回日期:1994-06-27.

形成密布的剪张、拉张羽裂外,在滑体表面形成了三个膨胀裂隙分布区,其裂隙宽度变化较大,一般为 0.05—0.60m,可见深度达 2m,并在相应部位,形成多级剪出口.最前部的剪出口位移量已达 10—20cm,且有缓慢滑移的迹象.到勘探研究时,平面及剖面上的各种滑坡要素均已具备.

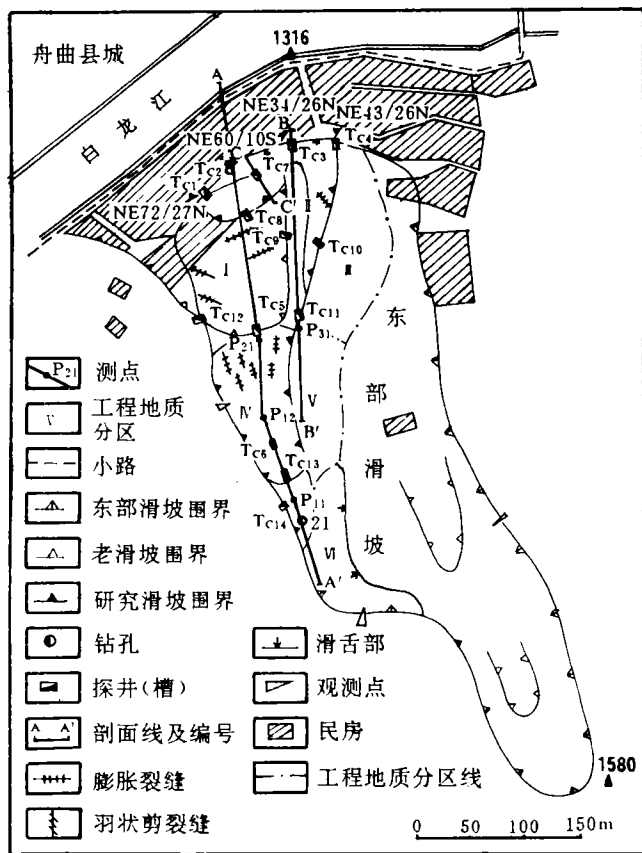


图 1 舟曲南桥村滑坡工程地质平面图

Fig. 1 The engineering geologic plan of Nanqiaocun Landslide in Zhouqu

## 2.2 滑坡的平面特征

该滑坡在平面上呈楔形体,顶部滑坡陡坎处宽约 30m,舌部宽约 210m,南北长约 400m.主滑方向受滑坡周界力学边界的约束,在不同高程有所变化,但总趋势为北北西向.根据该滑体表面的分布特征,多级剪出口的出露部位及坑探证实,该滑坡由多级受力性质不同的滑块组成.据此,可以将自然沟以西至滑坡西界范围内的坡体划为六个工程地质分区(见图 1).

**I 区** 位于滑坡的左下部,周界沿  $T_{C1}$ ,  $T_{C2}$ ,  $T_{C9}$ ,  $T_{C5}$ ,  $T_{C12}$  展布,为老滑坡形成的圈椅状负地貌.上部宽约 70m,下部宽约 140m,南北长约 160m,平面上呈梯形.变形特点是在舌部出现  $T_{C1}$ — $T_{C2}$  和  $T_{C1}$ — $T_{C7}$  两级剪出口.前者剪出口产状为  $NE60^{\circ}/10^{\circ}S$ ,呈反倾状,而后者为  $NE72^{\circ}/27^{\circ}N$ .在  $T_{C1}$ — $T_{C7}$  剪出口.以上的人工陡坡上,形成众多的纵向膨胀裂缝,

在  $T_{c8}$  处(新盖房屋地基上),存在明显排列有序的拉张裂缝,并趋于贯通,形成前部小坍塌的周界;在左侧  $T_{c12}$  处,边界走向  $NW17^\circ$ ,滑面产状  $NW\angle 51^\circ E$ ,擦痕指向  $NE66^\circ$ ,倾角  $36^\circ$ 。该处剪张羽裂发育,密度为 1.5 条/m,最大张开宽度约 30cm,可见深度达 1.5m,走向  $NW72^\circ$ 。在  $T_{c5}$  附近,滑坡后壁已被掩埋,平台地面上分布有 1—5cm 宽、走向为南北向的膨胀裂缝。在  $T_{c5}$ — $T_{c9}$  一线为老滑坡形成的右侧界陡坎。西侧比东侧低约 2—3m。在本次新滑动中,两侧均有滑移。但西侧位移量明显大于东侧,表现在原有的陡坎上,又形成了明显的剪切下错新壁,落差约 0.3—0.5m,侧壁平直垂立,擦痕清晰,两侧有羽状裂隙分布。中部变形与周界相比,相对微弱。即是局部有微量变形。但未破坏整块的力学连续性,故该区在新滑动中,表现得相对完整。

**I 区** 位于滑坡的右前部,东界沿  $T_{c5}$ ,  $T_{c10}$ ,  $T_{c11}$  展布,通过庙的东南角,在  $T_{c4}$  处剪出,滑面产状  $NE43^\circ\angle 26^\circ N$ 。西界与 I 区共有。与 I 区相比,该区为上宽约 20m,下宽约 50m 的相对正地形。本区特点是地表破碎,羽状剪张裂缝密布,并在  $T_{c3}$ — $T_{c11}$  一线,形成一贯通的剪张错裂面,将该块分为两块。东块相对完整,剪出口在  $T_{c3}$ ,  $T_{c4}$  处。而西块相对破碎,舌部有两级剪出口,分别在王忠于家屋后坡脚处和房屋地基下。后者与东块剪出口衔接,滑面产状为  $NE34^\circ\angle 25^\circ N$ 。

**II 区** 位于自然沟与 I 区之间。该区除左上角有少量挤压膨胀裂隙外,整体稳定性好,为新滑坡未波及区。

**IV 区** 位于  $T_{c5}$  以上,为上部主滑体。根据地表变形特点,该滑体可被分为两段:1.  $P_{11}$  测点以南为一楔形体,西侧界平直垂立,走向  $NW8^\circ$ — $10^\circ$ 。暴露于外的新鲜壁高约 60cm,面上擦痕清晰,指向  $NW8^\circ$ ,倾角变化较大,  $T_{c14}$  以西为  $36^\circ$  至  $P_{11}$  点西界处则减为  $12^\circ$ 。东侧界不完整,以塑性累积变形为主。后壁则由多级拉张陡坎及错台组成。  $P_{11}$ — $Z_1$  间,地表完整,无反翘或下倾现象。2.  $P_{11}$  测点以下到  $T_{c5}$ ,主滑方向为  $NW20^\circ$ 。其中  $P_{11}$ — $T_{c13}$  间形成了三级滑坡后壁,相对下错 0.7—1.2m,下错平台均反翘,按张裂缝宽约 10—50m,可见深度达 2m。  $T_{c6}$ — $T_{c13}$  间的斜坡上散布有纵向膨胀裂缝,并在  $T_{c6}$  附近有一次级剪出口。  $P_{12}$  附近地表完整。该段西侧为一自然小沟,有堆积覆盖现象。东侧界则为一平直垂立陡坎。  $P_{12}$ — $P_{21}$  间为一纵向膨胀裂缝分布区。特别在左前部。 ( $P_{21}$  以西)。滑坡前峰被阻于一小山包,因而滑体相当破碎,膨胀裂缝随处可见。

**V 区** 位于 IV 区的东侧。是古滑坡西侧山梁的残余延伸体,主要由片岩,千枚岩碎块组成。除表面分布有稀疏的挤压膨胀裂缝外(宽 2—3cm),整体稳定性较好。

**VI 区** 位于沟西古滑坡后壁前,为一浅层的坡积体滑坡。主滑方向北东,沟侧有膨胀丘及膨胀裂缝,剪出口位置不明。由于位移量较小,左侧界与 VI 区界线不清。

### 2.3 剖面特征

该滑坡在剖面上呈现多级滑动特征。根据地表变形、剪出口位置及探井资料,可以将滑体自下而上大致分为 8 块(图 2)。

**K<sub>1</sub> 块** 位于老滑坡的前部,是老滑坡复活时,在坡脚开挖形成具有较大临空状态的高陡斜坡上,产生的次级坍塌。剪出口位于  $T_{c1}$  处,后壁拉张裂缝位于新盖的房屋地基下。该块圈椅形拉张裂缝已经贯通。目前基本处于临界状态。

**K<sub>2</sub> 块** 为下部老滑坡的主滑体,由于承受上部滑坡的推挤而复活。该块地表虽有局部变形,但并未改变整块滑体的力学连续性及其受力性质,其稳定性受滑面附近聚水量的影响,波动于临界状态;滑带富水时,出现蠕动变形;贫水时,趋于稳定。

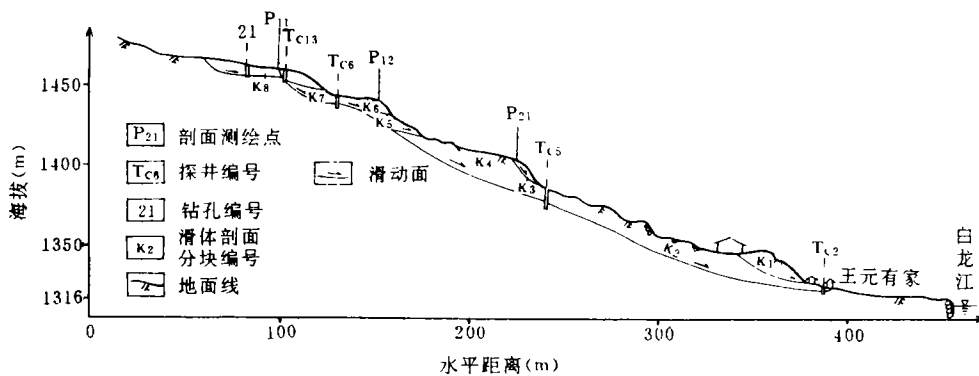


图 2 舟曲南桥村滑坡工程地质(A—A')主剖面图

Fig. 2 The major engineering geologic sections(A—A') of Nanqiaocun Landslide in Zhouqu

**K<sub>3</sub> 块** 位于 P<sub>21</sub>测点处,是中部滑坡在该处释放应力时,造成斜坡过陡而引起的坡肩坍塌。

**K<sub>4</sub> 块** 位于 T<sub>c5</sub>以上,是中部滑坡的主滑体。由于受力学边界条件的约束及滑坡应力释放影响,该块滑体相对破碎,稳定性类似于 K<sub>2</sub> 块。

**K<sub>5</sub>, K<sub>6</sub> 块** 位于 P<sub>21</sub>测点下。由于受原始地形及地质条件的影响,该处滑面产状变化较大,因而在斜坡上形成两级次级剪出口,使中部滑体的力学连续性遭到破坏,引起部分应力释放。

**K<sub>7</sub> 块** 位于 T<sub>c6</sub>—P<sub>11</sub>间的小山梁左侧翼上。受地质结构控制,滑面产状在 P<sub>11</sub>点处发生突变,形成一旋转形滑坡。由于滑面较陡且镜面发育,因而其滑动潜势较大,是整个滑坡的主力源之一。

**K<sub>8</sub> 块** 由前部的主动滑块及后部的多级牵引滑块组成。其共同特点是:滑面平直,镜面发育,滑阻力小、稳定性差,是引起多级滑动的重要启动力源。

### 3 滑坡的滑动机理与受力分析

如前所述,滑坡处于区域性大断裂带内,并具备古滑坡基础。坡体内存在着相对软弱层,阻塞了下渗水的通道,在剖面上形成季节性滞水层,并使相应部位土体饱和。这种高含水状态及其干湿循环为土体的物理化学作用创造了良好的地质环境。其结果,滑带泥化程度渐高,抗剪强度渐小。长期的降雨及近期增多的浇地水渗入加速了这一进程的发展,引起上下各段滑体的稳定性不断降低,接近于极限平衡状态。因此即使在较小力的作用下,也会引起相应各段滑体的链锁性复活。

滑坡的启动力源来自Ⅳ、Ⅵ区。Ⅵ区临空面向沟,潜在滑动方向为北东,施加于主滑坡的作用力较小。Ⅳ区滑体受力复杂,因而其主滑方向多变。变形最初出现于 P<sub>11</sub>测点以

上,众多拉张裂缝的存在,为地表水进入滑体创造了便利地通道,使其可以直接抵达潜在滑动面,并在面上形成泥化膜,致使强度急剧衰减,由蠕动挤压到整体失稳.该段滑坡主滑方向为 NW8°,其剩余下滑力传递给 P<sub>11</sub>测点以下滑坡,引起中部(P<sub>11</sub>—T<sub>cs</sub>段)滑坡复活.中部滑坡滑面产状为倾向 NE73°,倾角 28°.从力学原理出发,该块滑体理应向北东自然沟滑动,但由于受 V 区残留山嘴的抵挡,而滑向 NW6°—10°(据滑面上擦痕方向),宏观上造成该段主滑方向为 NW20°,即滑向 P<sub>21</sub>测点西侧界处的小山梁.当滑舌抵达小山梁时,受到该稳定山梁的支撑,逼使滑坡左前部应力释放,在坡面形成众多的膨胀裂缝.而滑舌中部正对 I 区老滑坡,虽然老滑坡体在稳定中部滑体中也起过一定的支撑作用,使中部滑坡在 T<sub>cs</sub>南斜坡上形成两级剪出口,并在坡面上形成了一系列膨胀裂缝,释放了部分应力,但由于老滑坡本身的稳定性欠佳,因而在抵抗上部推力的同时,也引起本身复活.被动位移的结果,又引起中部滑坡的前部主滑方向偏向北东,因而卸荷后的剩余下滑力主要作用于 I 区和 II 区. II 区相对 I 区为正地形.两区在同时承受北北东向推力时,前者表现为相对的刚性,承受的推力远大于后者,故造成无老滑坡基础的 II 区滑动.宏观上形成绕过 V 区支撑后,滑坡右侧界向北北东延伸.而 III 区因受 V 区保护,位于本次滑坡波及的死角,故能保持相对稳定.

综上所述,在所研究的六个工程地质分区内, I, II 区属被动失稳区, III 区为相对稳定区, IV 区属主动失稳区, V 区为稳定的支撑区, VI 区虽处于不稳定状态,但规模小,且滑动方向北东,对所研究滑坡影响较小.

## 4 灾害治理

为了有效地进行减灾治理,需首先对不同部位的滑体进行稳定性计算.

### 4.1 稳定性计算

考虑到南桥村滑坡滑面由多段组成,用“条分法”计算能较好地反映其实际的受力特征(图 3).图中:

$W$  为重力;  $K_w$  为地震引起水平力;  $E_r, E_L$  为条间相互作用力;  $X_r, X_L$  为条间摩擦力;  $u (=u_r - u_L)$  为静水压力;  $P$  为垂直滑面的正压力;  $S_m$  为平行滑面的剪切力;  $L$  为单元体滑面长;  $b$  为条块宽度;  $i$  为地面倾角;  $h$  为条块高度;  $\alpha$  为单元体滑面倾角.

据极限平衡原理,该单元体在垂直与水平向的静力平衡方程分别为

$$\begin{cases} W - S_m \sin \alpha - P \cos \alpha - (X_L - X_r) = 0, \\ P \sin \alpha - S_m \cos \alpha + K_w + (E_r - E_L) + (u_r - u_L) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

设  $S_m$  是滑面可提供的抗剪强度的  $1/F$ , 即

$$S_m = [C' L + (P - u) \tan \varphi] / F, \quad (2)$$

式中  $C'$  为有效粘着力;  $\varphi$  为有效内摩擦角. 将式(1,3)代入式(2)则有

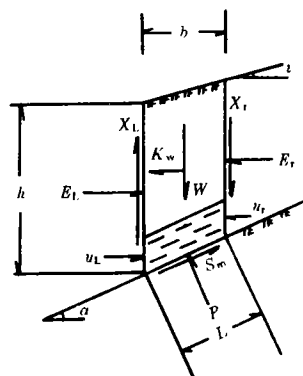


图 3 滑坡条块分析单元受力图

Fig. 3 Landslide strip analysis on element force-bearing pattern

$$\begin{aligned} & \{ [W - C' L \sin \alpha / F + u_L \operatorname{tg} \varphi \sin \alpha / F - (X_L - X_r)] / (\cos \alpha + \operatorname{tg} \varphi \sin \alpha / F) \} \sin \alpha - \\ & \{ [C' L + (P - u) \operatorname{tg} \varphi] / F \} \cos \alpha + K_w + (E_r - E_L) + (u_r - u_L) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

考虑:1. 该滑坡滑动期间无地震作用,故  $K_w=0$ ;

2.  $E_r, E_L$  为存在于单一条块间力,整体分析中合力为零,即  $(E_r - E_L) = 0$ ;

3. 滑动过程中,虽有地下水作用,但由于滑体透水性好,故可略去静水压力。

式(4)简化为

$$[(W - C' L \sin \alpha / F) / (\cos \alpha + \operatorname{tg} \varphi \sin \alpha / F)] \sin \alpha - [C' L + P \operatorname{tg} \varphi / F] \cos \alpha = 0. \quad (5)$$

若滑坡整体处于极限平衡状态,则式(5)变为

$$\sum \{ [(W - C' L \sin \alpha / F) / (\cos \alpha + \operatorname{tg} \varphi \sin \alpha / F)] \sin \alpha \} - \sum [C' L + P \operatorname{tg} \varphi / F] \cos \alpha = 0.$$

当  $F=1$  则下滑力等于抗剪强度,滑坡处于极限平衡状态;

$F>1$  下滑力小于抗剪强度,滑坡稳定;

$F<1$  下滑力大于抗剪强度,滑坡不稳定。

图4给出了A,B,C三剖面稳定性计算结果,各自滑体保持临界平衡的条件分别是:  
 $\varphi_A = 18.47 - 0.31C_A$ ,  $\varphi_B = 16.06 - 0.33C_B$ ,  $\varphi_C = 28.00 - 0.60C_C$ 。三式表明上述三剖面滑体在临界状态时滑带土的强度分别处于不同状态,因而无法通过联立方程求得具体的  $C, \varphi$  值。但根据各自滑面上的平直度,富水及泥化程度,镜面擦痕等特征,可依据工程地质比拟法,分别给出  $C$  值,则用相应平衡方程可得到对应  $\varphi$  值。如A剖面上取  $C_A = 2.50 \text{ t/m}^2$ , 则  $\varphi_A = 17.80^\circ$ ; B剖面上取  $C_B = 5.00 \text{ t/m}^2$ , 则  $\varphi_B = 14.81^\circ$ 。

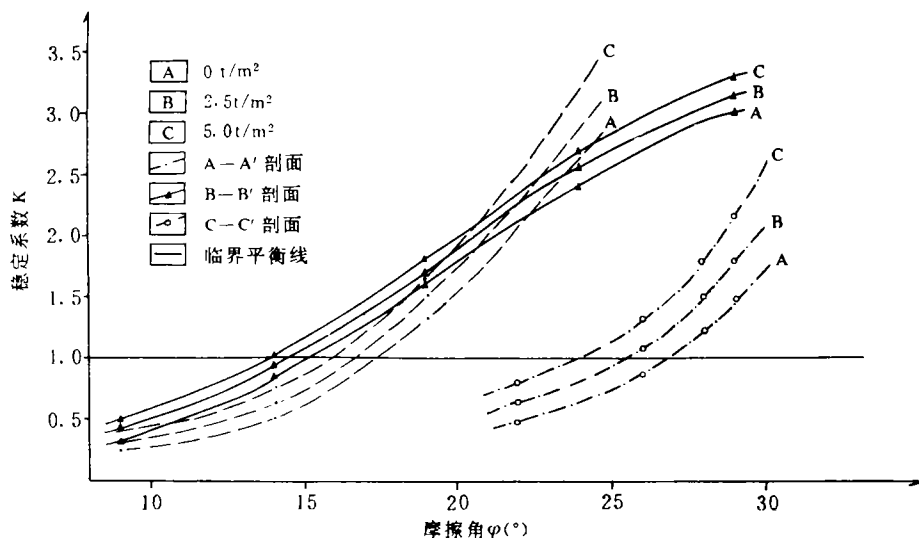


图4 舟曲南桥村滑坡不同剖面稳定性与强度参数相关图

Fig. 4 Relationship between varied sections and strength parameter of Nanqiaocun Landslide in Zhouqu

## 4.2 减灾治理

根据滑坡的受力分析可以看出,引起该滑坡失稳的因素固然很多,但最主要、最直接的诱发因素是水的作用。由于滑体主要由断层泥、古滑坡堆积体组成,其贯通的裂隙为降

雨和灌溉水的下渗提供了良好的通道,造成滑带富水软化,强度大幅度衰减而导致滑坡。因此防止地表水进入滑体是减轻灾害的最经济的有效方法。即除立即停止灌溉外,夯填滑体表面裂缝,在滑体上开挖导流渠,周界外修建截水沟,以达到疏干滑体的目的。另外,由于滑体复活引起滑带土风化程度加深,强度继续衰减,以及依然存在的巨大滑动潜势,因而必须采取有效的减载处理以改变目前滑体不利的空间形态。滑坡复活的主动动力来自Ⅳ区,故首先在A—A'剖面的P<sub>21</sub>点以上实施减载。考虑区域斜坡状态及该处斜坡的特点,采用1:1.5坡率及减荷平台相结合方案,共削去上部滑体53 441m<sup>3</sup>。削方后该剖面滑体的稳定性系数为1.42。

## 5 结 束 语

综上所述,舟曲南桥村滑坡之所以能复活、失稳,不仅因为它具备了形成滑坡不利的客观条件如区域性大断裂与古老滑坡基础和不利的地貌条件等,而且由于不良的地质营力及人为活动。降雨及农田灌溉使大量的水轻易地进入滑体,这不仅增加了滑体的重量,而且软化了滑带土,造成强度大幅度衰减。同时侧沟冲刷及坡脚切割,严重破坏了坡体稳定的力学条件,加速了滑坡复活的进程。

减灾治理是以经济和快速有效地稳定滑坡为原则。终止农田灌溉,修筑截水沟,导流渠以防止地表水进入滑体,同时有效改变滑体的空间形态如上部减载、下部反压,以达到保证滑坡保持长期稳定性的目的。

## THE GEOLOGIC CHARACTERISTICS OF NANQIAOCUN LANDSLIDE IN ZHOUQU, GANSU PROVINCE AND ITS CONTROL

Li Yongjin

(*Institute of Geologic Nature Disaster Control, Gansu Academy Lanzhou 730000*)

### Abstract

Nanqiaocun Landslide is located in Zhouqu County, Gansu Province. Its material composition, geologic characteristics and deformation process are detailed in this paper. According to the deformed indications and exploration data, the force-bearing characters of each mass of landslide and the mechanical relation among the masses are analysed. Based on the stability calculation, the stability degrees at different positions of slide body are acquired. Meanwhile, a series of control programs for water insulation, drainage and dredge, as well as reducing load and counter pressure.

**Key words** landslide, deformation, force-bearing analysis, disaster reduction and control