

# 基于降雨响应的黄土-基岩型滑坡失稳机制分析\* ——以宝鸡市麟游县岭南滑坡为例

辛 鹏 吴树仁 石菊松 王 涛 杨为民

(国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室 中国地质科学院地质力学研究所 北京 100081)

**摘 要** 为探索黄土-基岩型滑坡的降雨响应机制,以麟游县岭南滑坡为例,利用滑坡宏观变形破坏数据、岩土体测试与模拟计算相结合的方法,讨论了暴雨、连阴雨下岭南滑坡的地下水水位响应特征,相应应力路径下土体应力应变特征,对黄土-基岩型滑坡的破坏机制进行了研究。初步揭示:(1)滑坡体为粉质黄土状黏土,滑床为砂砾岩,渗透系数小,具有隔水性质。(2)黄土泥流与块体滑动是岭南斜坡的主要运动失稳方式。暴雨天气时黄土泥流频发,块体滑动的出现与连阴雨有关。(3)与降雨 103mm 的暴雨天气相比,连续降雨 235.5mm,斜坡地下水水位明显升高。(4)滑坡体粉质黄土状土具有剪胀特征。在暴雨背景下,表层土体孔隙水压力易消散,诱发低速运动的黄土泥流;在连阴雨背景下,地下水水位以下的滑动面剪切破坏过程中,剪胀孔隙被地下水迅速补充,诱发的剧烈块体滑动,具有高危险性。

**关键词** 降雨 滑坡 失稳 机制

**中图分类号**:P642.22 **文献标识码**:A

## FAILURE MECHANISM ANALYSIS OF LOESS-ROCK LANDSLIDE UNDER RAINFALL - A CASE STUDY—TAKE THE LINGNAN LANDSLIDE IN LINYOU COUNTY OF BAOJI CITY FOR EXAMPLE

XIN Peng WU Shuren SHI Jusong WANG Tao Yang Weimin

(Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources; Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081)

**Abstract** In order to explore rainfall response mechanism of loess-bedrock landslide, the paper has discussed ground water level response characteristics of Lingnan landslide under rainstorm and successive rain and soil stress-strain characteristics under corresponding stress path. It takes the Lingnan landslide in Linyou county as an example. It combines macroscopic deformation and failure data of landslide, geotechnical test and analog computation. Moreover, the failure mechanism of the loess-bedrock landslide has been studied in the paper. The paper shows the preliminary results as follows. Firstly, the landslide mass is silty loessial clay. The landslide bed is glutenite. The mass and bed are featured by lower osmotic coefficient and high imperviousness. Secondly, the muddy loess flow and block slide are the main models of motion instability of Lingnan landslide. Upon rainstorm, the muddy loess flow breaks out frequently. In this sense, the block slide is in connection with successive cloudy-rainy weather.

\* 收稿日期: 2011-07-30; 收到修改稿日期: 2012-01-10.

**基金项目**: 国家自然科学基金(40802085, 41102165), 科技部十二五科技支撑项目(2012BAK10B02)和中国地质科学院地质力学所基本科研业务项目(DZLXJK201111).

**第一作者简介**: 辛鹏, 从事区域工程地质与地质灾害调查研究. Email: xximpp@126.com

Thirdly, the ground water level of the slope has increased drastically in 235.5 mm successive rain compared with 103 mm rainstorm. Fourthly, the silty loess of landslide mass is characterized with dilatancy. In case of a rainstorm, surface soil pore water pressure easily diffuses, subsequently, induces low-speed muddy loess flows. Under successive cloudy-rainy weather, dilating pores are timely replenished by ground water during shear breakdown of slide planes below ground water level. Drastic block slide arising from this cause can make great hazards.

**Key words** Rainfall, Landslide, Failure, Mechanism

## 1 引言

黄土高原一直是我国滑坡、崩塌、地裂缝等地质灾害频发高发地区之一,特别是新世纪以来,黄土崩塌滑坡重大灾害越来越严重。例如,2008年宝鸡市扶风县发生黄土滑坡,导致4人死亡;2009年山西吕梁地区发生黄土滑坡,导致23人死亡;2010年3月10日,陕西榆林市子洲县双峪镇发生黄土滑坡,导致27人死亡。上述黄土滑坡的发生除了受到黄土性质和结构影响之外,还与黄土的湿陷性、水解性远比其他岩土体明显有关,因此,降雨极易诱发黄土滑坡。宝鸡市是黄土地区降雨量相对较多的区域,既是暴雨和连阴雨集中的地区之一,也是黄土梁峁区降雨滑坡灾害高发区之一。例如,2005年宝鸡市陇县强降雨集中诱发滑坡26处,2003年8月麟游县全县强降雨诱发11处滑坡。降雨滑坡成为宝鸡地区地质灾害重点研究对象。因此,选择宝鸡市麟游县典型黄土-基岩滑坡为研究对象,研究黄土滑坡的降雨响应及其破坏机制具有重要意义。

近年来,许多学者从不同方面对降雨诱发黄土滑坡的破坏机制进行了研究<sup>[1,2]</sup>。朱丽娟利用数值模拟确定了非饱和黄土的土-水特征曲线和渗透系数-基质吸力关系曲线,研究了降雨对非饱和黄土边坡含水量的影响<sup>[3]</sup>。张少宏在讨论降雨与黄土滑坡稳定性中,通过计算分析了不同入渗深度对黄土边坡稳定性的影响,得出对任一特定边坡均有一个临界入渗深度值<sup>[2]</sup>。这些研究多集中于降雨过程中黄土含水量、渗透性、入渗深度的模拟计算上,对于黄土-基岩接触型滑坡的监测、勘察以及变形破坏的力学实验数据分析研究较少。因此,本文试图依托近年来在宝鸡地区进行地质灾害的所获得的资料,结合典型黄土滑坡监测、勘察和测试数据及其模拟计算分析,以宝鸡市麟游县岭南黄土滑坡为例,探讨黄土-基岩型斜坡在不同降雨汇流、渗透作用下,滑坡的变形、失稳演化过程及其破坏机理。

## 2 岭南滑坡基本特征

岭南滑坡位于陕西省宝鸡市麟游县招贤镇永丰移民新村。自2002年招贤镇36户居民230多人搬迁到此地后,后续年份雨季中断续发生滑动,长期以来被列为陕西省重大滑坡监测防护对象;2008年9月23日再次发生滑动,掩埋村民房屋。

### 2.1 岭南滑坡地质环境概况

宝鸡市麟游县位于关中平原最西端,黄土高原西南边缘,南部为岐山山脉,西部为六盘山及其支脉陇山,北部为黄土高原及北山山地。最高海拔1664m,最低海拔740m,以低中山丘陵、黄土梁峁、黄土残塬地貌为主。区域构造背景相对简单,无大规模的褶皱、断裂,构造作用轻微,岩层产状平缓,岩层倾角一般 $1^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ,局部小构造处岩层倾角可达 $22^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。

麟游县系黄土高原与基岩山区的过渡带,区内地貌形态为白垩系古风化地形所控制,黄土、第三系红色黏土土覆盖于基岩之上。局部黄土残塬区黄土覆盖厚度较大,达到20~100m左右,而多数黄土梁、中部页岭与基岩山区都为浅层黄土覆盖。第四纪黄土以离石黄土( $Q_2$ )与马兰黄土( $Q_3$ )为主,覆盖全区;黄土厚度在山顶与山脚差异大,厚度在10~20m之间,易于发生黄土-基岩接触面型滑坡。

### 2.2 岭南滑坡基本特征

岭南滑坡在地理位置上位于县境地质灾害最为发育的分水岭区,地貌上系中高山黄土梁区,海拔1200~1400m之间。滑坡平面上表现为后缘尖棱的三角形(图1),东西向最大纵长280m,中部宽近100m,前缘宽度在270m左右,平均厚度8m左右,体积近 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。新老滑坡体呈等轴状发育,主滑方向为 $98^{\circ}$ ,平均坡度 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。

岭南滑坡体存在完整的3级弧形滑动边界,边界陡坎高度从外向内逐次降低(图1,从D到C到

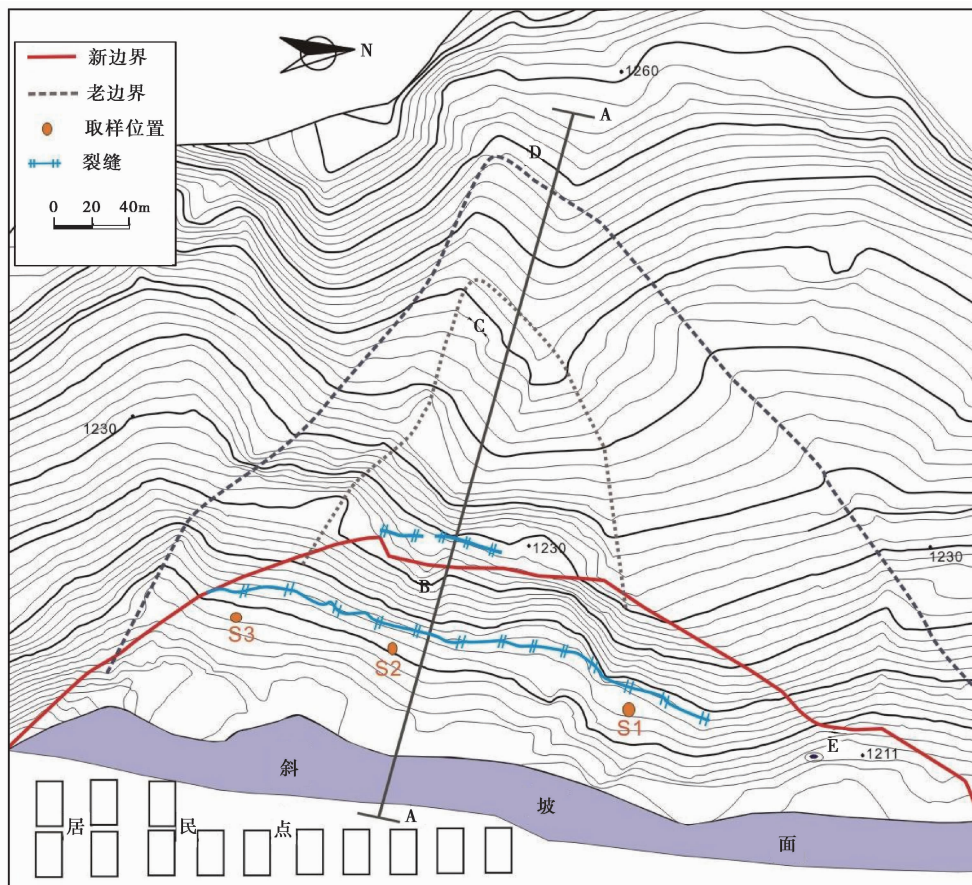


图1 滑坡分布平面图

Fig. 1 Distribution of Lingnan landslide

B),表明滑坡存在多次块体滑动。最外层边界为老滑坡的活动边界(D边界),其北侧边界走向NE40°,表现为1~4m的滑坡陡坎,南侧边界走向SE35°,表现为1~3m的滑坡陡坎。内部的边界(边界B)为最新活动边界,保留完整,勘测时下挫陡坎仍可以清晰见到。2008年9月降雨后滑坡体上出现新的不连续陡坎F,裂缝呈南北走向。

经勘测斜坡物质由2部分组成,上层为黄土状土、黄土和黏土,下层为白垩系砂岩、砾岩。区域白垩系岩层顶面存在厚约0.3m厚古风化壳,未风化基岩呈近水平状,产状 $358^{\circ}\angle 8^{\circ}$ ,相对强度大,且具有一定的隔水性。黄土状土的厚度在5~15m之间,坡脚与斜坡中部黄土状土较厚。据推测受土体与岩体力学性质的影响,滑动面可能沿着土体与岩体的接触面,滑坡的滑床则为基岩。

滑坡所在黄土梁区黄土厚度成浅层状,在连阴雨作用下,上部黄土体沿下伏白垩系砂砾岩接触面向下滑动。岭南滑坡的主滑动面与斜坡外部地形近平行(图2)。滑坡后缘滑动面部分陡峭,中部相对

平缓向坡脚延伸,在斜坡前缘陡峭。从斜坡后缘至前缘,发育3级下挫陡坎,是多次级滑动的次级滑面,次级滑面与主滑动面(带)贯通(图2),反映滑坡不同期次的活动。

### 2.3 降雨诱发滑坡变形特征

块体滑动、崩滑及黄土泥石流被认为是黄土滑坡3种运动形式<sup>[1]</sup>。自2002年起相关部门开始对岭南滑坡进行监测,根据当地国土局的历史记录与变形破坏监测资料显示<sup>[4]</sup>,岭南滑坡运动表现出块体滑动与泥石流复合变形的形式(图3、图4)。

岭南滑坡块体滑动变形剧烈,运动量大,在滑体后缘出现一系列拉张裂隙。2003年、2006年及2008年滑坡体均出现过大规模块体滑动。2003年8月29日,麟游地区日降雨量达到67.1mm,斜坡第一次发生下挫,下挫高度0.5m,滑动过程中,坡脚部分房屋地基整体抬升损坏,后缘活动的裂缝延伸至后缘(图1,C处)。2008年6月至11月出现连阴雨,8月23日与10月1日再次出现明显变形,其中

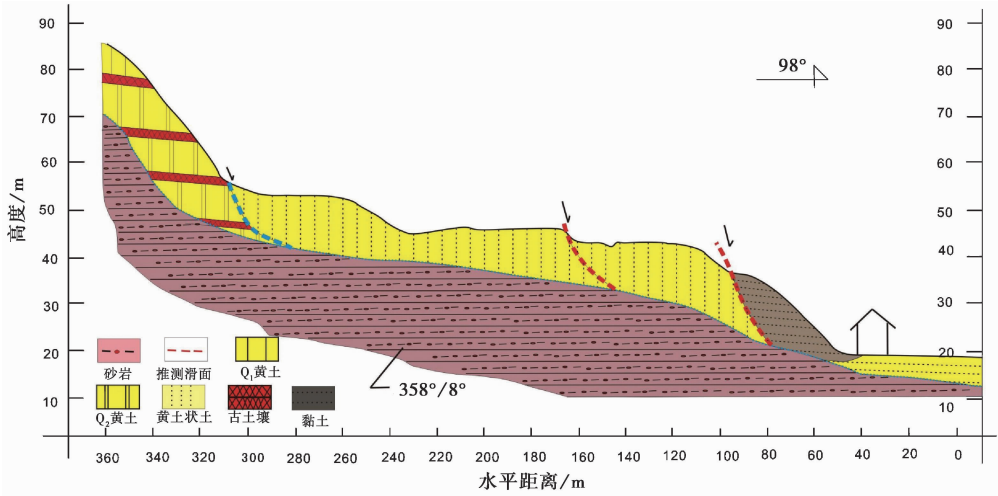


图2 岭南滑坡 A-A 剖面图

Fig. 2 Profile A-A of Lingnan landslide



图3 块体滑动陡坎(镜像北)

Fig. 3 Block slide scarp(lens to N)



图4 暴雨诱发黄土泥流(镜像西)

Fig. 4 Rainstorm-induced muddy loess flow(lens to W)

50cm, 下滑的高度在 40cm 左右 (图 3)。不断扩张的裂缝与滑坡边界(B 边界)近似平行, 显示出滑坡向下块体滑动的迹象 (图 3)。截止到 2009 年, 滑坡的后缘拉裂、下滑已到达 1.8m。根据麟游县国土局监测资料分析, 可看到块体滑动的出现多在连阴雨天气(梅雨期后期), 雨季前期发生较少<sup>[4, 5]</sup>。

黄土泥流是岭南滑坡的主要变形形式, 土体近饱和后, 在触发因素作用下, 土体结构失效向坡下流动。2003 年、2006 年、2007 年及 2008 年均有大规模泥流爆发 (图 5), 其中 2003 年泥流的体积在 200m<sup>3</sup> 左右, 2008 年泥流的体积达到 450m<sup>3</sup>; 降雨量偏小的 2004 年、2005 年, 泥流规模小, 平均流动体积仅在 100m<sup>3</sup> 左右。统计分析发现, 岭南滑坡的泥流活动有逐年增强的趋势, 2008 年为治理该滑坡, 进行了更为详细的跟踪研究, 发现 6 月、7 月、8 月爆发的黄土泥流体积逐月增大 (图 6), 规模均在

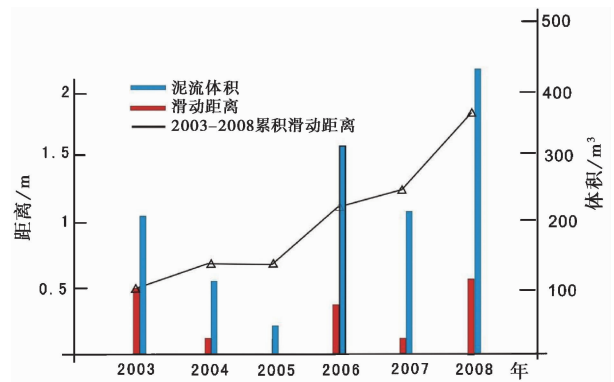


图5 黄土泥流体积年变化特征

Fig. 5 Annual volume variation characteristics of muddy loess flow

10月1日变形最大。在滑坡前缘平台出现2条拉张裂缝(图2), 较长的拉张裂缝长约180m, 宽20~

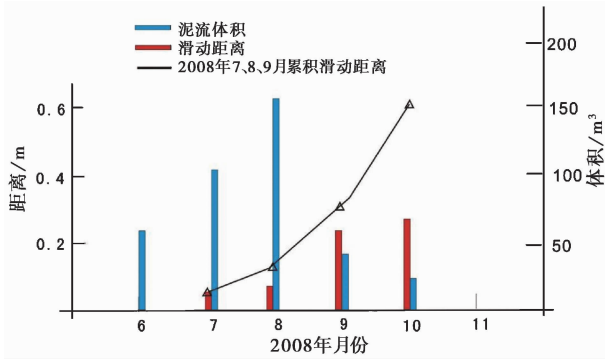


图6 黄土泥流体积月变化特征

Fig. 6 Monthly volume variation characteristics of muddy loess flow

60m<sup>3</sup>以上,而后的8月、9月后缘变形破坏加剧,其中8月份暴雨等强降雨过程频次增大,是黄土泥流频发的主要原因。除此之外,在2008年9月16日岭南滑坡出现了块体滑动、黄土泥流伴生现象。

岭南滑坡的变形破坏特征资料说明暴雨易导致斜坡前缘坡面松散体以流态化形式溜滑,长时间连阴雨易导致整个滑体沿基岩界面缓慢滑动。黄土泥流、斜坡的块体滑动与降雨过程相关联,但产出部位不尽相同。黄土泥流集中在斜坡坡脚爆发,沿着滑坡平面不同坡脚部位自左向右断续发育。斜坡的块体滑动迹象上,表现为后缘拉张裂缝、坡体中部发育次级拉张陡坎。块体缓慢蠕滑以陡坎式张裂缝形式向后缘扩展。总之,黄土-基岩型滑坡的变形破坏与降雨量、降雨形式以及雨水入渗过程等相关联。论文通过多方面的土力学试验与数值分析,阐明降

雨诱发该类黄土-基岩斜坡失稳的机理。

### 3 岭南地区降雨特征

麟游县属干旱地区,降雨过程具有季节分明的特征。该地区出现的最大年降雨量为987mm,每年自4月份,降雨量开始增加,10月份开始减少,7、8、9这3个月相对多雨(图7),其中6~10月降水量占全年降水量的81.1%~97.0%。2008年7月6号出现暴雨,降雨量达55mm,9月10日出现当年最高日降雨量达67.1mm,而9月1日至15日之间的连阴雨,持续半月之久,其累积降雨量达到203mm。在暴雨、连阴雨作用下,斜坡发生了复杂的物理学过程,降雨雨量大小主导了土体渗透、地下水水位变化、土体变形。

### 4 降雨诱发岭南滑坡的失稳机制

降雨过程中,黄土斜坡经历了雨水渗透、裂隙导水、强度弱化、非饱和到饱和和转换、地下水水位上升、土体强度降低等一系列物理学过程,这些因素中地下水水位与土体强度性质是两大主要响应因素。GEO-SLOPE提供了降雨渗流的计算模型,利用麟游县降雨监测资料可完成不同降雨类型下地下水水位响应特征分析。在地下水响应特征基础上,确定滑坡土体应力路径,结合土体变形特征分析岭南滑坡的块体滑动、黄土泥流形成机制。

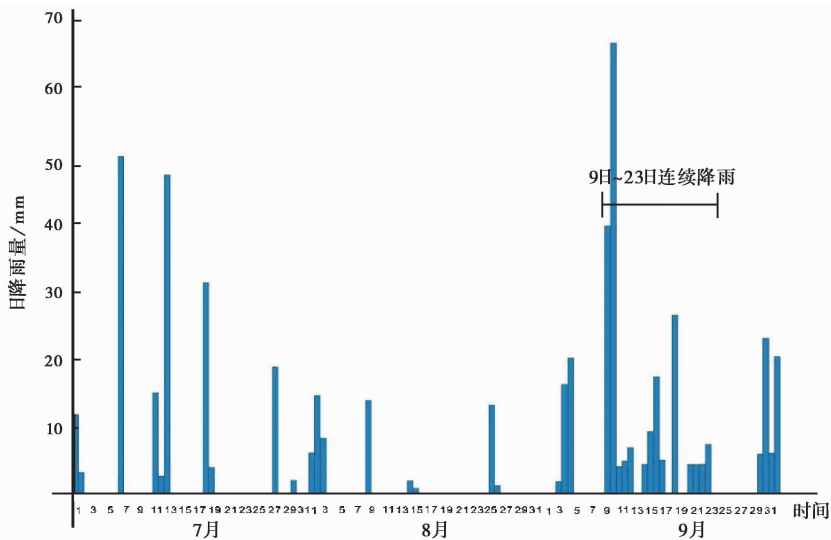


图7 2008年7、8、9月日降雨量

Fig. 7 Daily rainfall distribution of July, August and September 2008

#### 4.1 地下水位响应特征

降雨带来孔隙水压力与地下水位的变化,暴雨、连阴雨有着不同的地下水力学响应机制。利用麟游县 1979 年以来的年、月、日降雨资料,选取 2 种代表性的极端天气:(1)2007 年 8 月 9 日出现的最大日降雨量 103mm;(2)1981 年 8 月 14 日至 8 月 23 日间的 longest 连阴雨(考虑雨量因素),11d 降雨 235.5mm,分别代表暴雨与连阴雨 2 种条件。运用 GEO-SLOPE 渗流分析确定地下水位特征,其中地质模型概化为两层,其中上层黄土的非饱和渗透系数与饱和体积含水量是试验测得,作为基岩的砂岩其渗透系数采用工程地质类比法,根据经验参数确定,土水特征曲线是根据 Fredlund & Xing 法获取。降雨模拟时在斜坡坡面以降雨强度为标准施加流量边界条件,且同时施加潜在渗透面边界。

数值计算结构显示,最大日降雨量 103mm,降雨导致地下水位线发生变化,地下水位高度变化微小,主要集中在一级陡坎与二级陡坎之间、坡度较大的地区。11d 连续降雨 235.5mm 地下水位不断上升,在坡脚与二级陡坎之间,坡体完全呈现饱和状态(图 8),在斜坡的坡脚有地下水溢流现象。对比发现受到汇流作用的影响,在斜坡一级陡坎下部位地下水位变化剧烈,尤其是坡脚部位。斜坡陡坎以上部位,235.5mm 降雨带来的地下水水位上涨不高。

上述斜坡模型仅考虑土体渗透率、饱和性问题,实际黄土斜坡的雨水入渗机制较数值模型复杂,黄土内发育的垂直节理裂隙、风化裂隙、卸荷裂隙等裂隙系统使得雨水入渗深度增大。滑坡前期活动存在

的滑动面以及拉张裂缝、贯穿性裂缝 B、C、D 也成为此斜坡地下水快速流动的通道(图 1,图 2)。在此类裂隙发育的斜坡体中,暴雨(强降雨)即可带来岭南滑坡体地下水位的显著变化。

#### 4.2 土体结构与应力应变响应特征

为了解斜坡土体结构与物质成分组成,对岭南滑坡前缘隆起的部位开展 4.5m 的探槽开挖,取 3 组试样,利用 X 衍射试验进行黏土矿物组成综合测定。结果显示斜坡黄土状土的黏土矿物以伊利石、蒙脱石、混层矿物占黏土矿物的相对含量的 49%~69%,其混层比约为 45% 左右,属中等混合比矿物,伊利石、蒙脱石、混层矿物占天然干土重的 12.1%~36.6%(绝对含量),伊利石占 4.3%~15%,高岭石占 0.5%~2.6%。土体属于粉质黄土,黏粒(<0.005mm)含量大都在 32%~42% 左右,胶粒(<0.002mm)含量平均在 26%~32% 左右。同时根据膨胀势判断标准(图 8),滑坡土体表现为中等膨胀性。整个土体具有物理化学活性和亲水性,饱和土体渗透压力作用下具有土体结构失效的趋势。

为了解土体的应力应变性质、孔隙水压力特征影响滑坡体的破坏、运动机制,依据降雨应力路径具制定,采用固结不排水剪切试验,本次试验土样采用岭南滑坡坡体中 1m、2m、3m 深度处土体,试验土样采用标准的试样尺寸。由北京市勘测设计研究院三轴测试系统完成,试验结果显示(图 10,图 11):

(1)不同围压下,孔隙水压力均有峰值状态出现,在弹性阶段,孔隙水压力剧烈增加,特别是峰值应变出现区;塑性阶段,孔隙水压力下降,低围压下( $\sigma_3 \leq 100\text{kPa}$ ),压力增大过程中,固结不排水的土

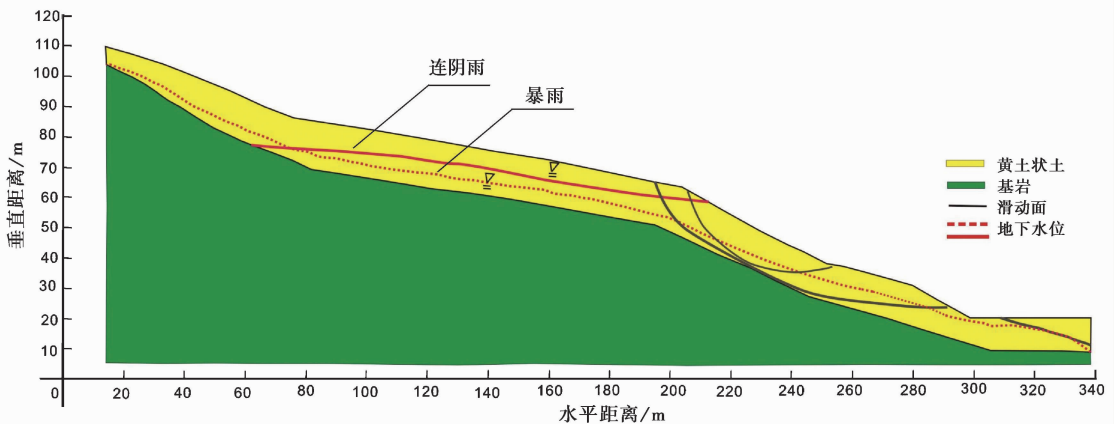


图 8 地下水位的分布图

Fig. 8 The distribution of groundwater

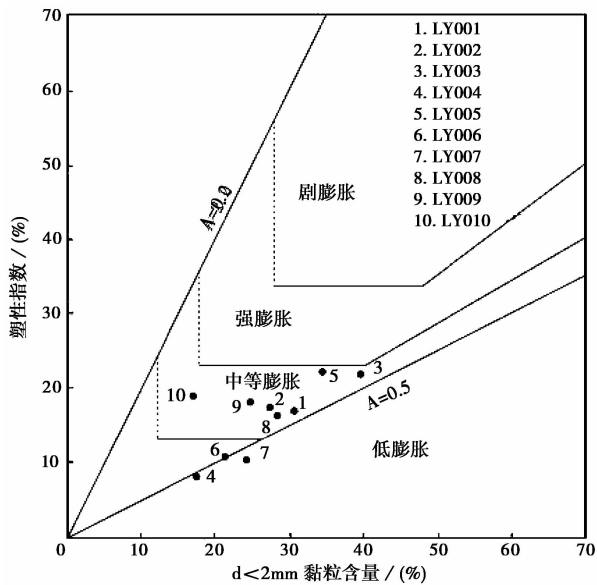


图9 膨胀性判断图

Fig. 9 Judge picture of swelling trend

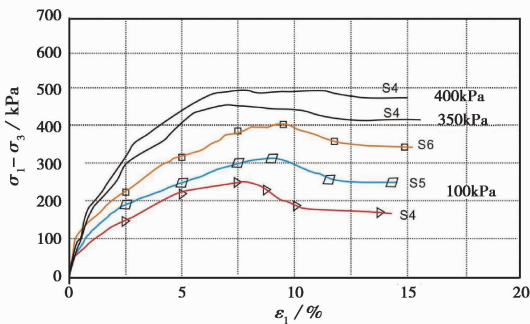


图10 主应力差与轴向应变关系

Fig. 10 Relation between main stress difference and axial strain

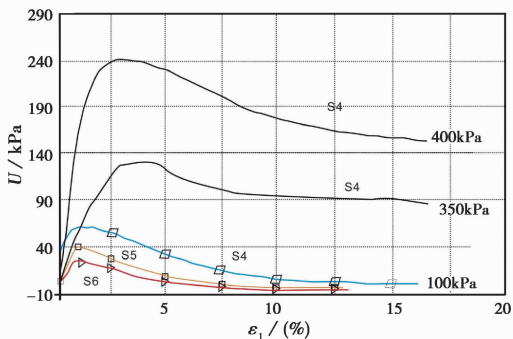


图11 孔隙水压力与轴向应变关系

Fig. 11 Relationship between pore water pressure and axial strain

样体积增大,致使孔隙水压力出现负值。高围压下孔隙水压力变化均为正值。

(2) 在高围压下( $\sigma_3 \geq 300\text{kPa}$ ),土样的应力-应

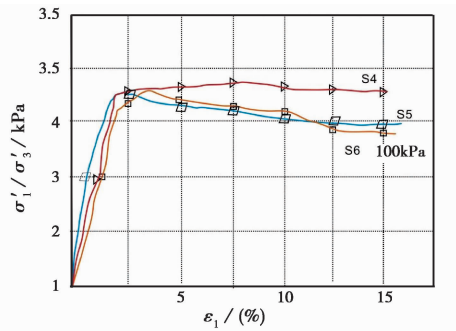


图12 有效主应力比与轴向应变关系

Fig. 12 Relationship between ratio of effective main stress and axial strain

变曲线表现应变硬化型,具有剪胀性质。在中、低围压下( $\sigma_3 \leq 200\text{kPa}$ ),弹性极限、屈服强度与峰值应变均随着围压的增大而增大。

(3) 土体剪胀性质改变了土体的孔隙特征,影响变形速率、孔隙水压力变化,但影响范围有限,土体最终强度与结构完全丧失。

#### 4.3 试验结果分析及滑坡失稳机制

地下水水位与岩土体的性质影响了斜坡变形特征。Hunger 按照运动速度特征将滑坡的运动方式分为坠落、倾覆、滑动、扩散与流动,这种分类同时考虑了滑坡运动时的物质性状(脆性或塑性)<sup>[6~11, 12]</sup>,对流动与滑动的运动进行了区分。经验表明对土质滑坡而言,滑动、流动、泥石流是3种主要的运动形式,典型的滑动包括沿滑坡体底面剪切滑动和滑坡体内部变形,在完整的或是有裂缝的黏土中,它是破裂的结果。土质滑坡的流动跨越的速度区间较大,可以慢速或高速。流动类滑坡破裂以后具有扩散性。

土体的变形破坏模式与其应力路径有着必然联系。岭南滑坡的变形破坏特征资料表明斜坡坡脚松散体易以黄土泥石流的形式缓慢下滑,整个滑体沿基岩界面缓慢蠕滑、块体滑动间或发生,块体缓慢蠕滑以陡坎式张裂缝形式向后缘扩展。黄土泥石流、沿基岩块体滑动都与降雨量、降雨形式等过程相关联。目前,对降雨作用导致的土体应力路径的定量分析较多,涉及到土体非饱和与饱和的转换。目前普遍认为暴雨入渗条件下,表层土体先饱和,经历了非饱和至饱和过程,表层土体经受偏应力 $q$ 不变、平均有效应力 $p$ 逐渐减小过程。当因连阴雨作用,斜坡底部因地下水汇聚,水位出现上涨时,斜坡自表层至滑动面土体所受应力过程较复杂,但可确定地下水水位以下的土体的应力状态,孔隙水压力随水位升高

增大。地下水水位的出现是黄土-基岩型斜坡破坏机制转变的关键。

土体强度特征与滑坡变形破坏的关系研究较多<sup>[4,5,11,12]</sup>,土体应力应变实验表明土体具有强度软化特征,同时表现出剪胀特征。斜坡坡脚的黄土泥流多在暴雨天气出现,暴雨入渗条件下,斜坡表层土体所受偏应力 $q$ 不变,平均有效应力 $p$ 逐渐减小的过程,总应力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 增大,土体内孔隙水压力逐渐增加。当变形破坏发生后,对于剪胀型土,孔隙比增加,孔隙水压力减小。暴雨过程中,表层土体孔隙水压力的降低能够由雨水渗透补给,补给的速度较孔隙水压力降低的速度慢。但仍可维持表层土体的缓慢剪切变形。变形的持续与雨水入渗的速率及入渗量相联系,缓慢的变形难以形成统一滑动面,最终表层近饱和土体在重力作用下,以缓慢流动形式堆积于坡脚。

块体滑动不同于黄土泥流,来自斜坡底部土体的变形破坏。当降雨为连阴雨时,地下水位以上土体所受应力路径与暴雨入渗相同。随着地下水位的上升,在地下水水位以下,土体的孔隙水压力随水位升高增大。连阴雨过程中,当土体剪切破坏发生在地下水水位以下产生时,土体剪胀,土体的孔隙增大,得到上部地下水的补充。与地表不同的是,因位于地下水水位以下,地下水充足。剪胀孔隙的补给迅速,土体破坏易产生的高孔隙水压力。在高孔隙水压力作用下,土体产生剧烈剪切破坏,形成统一结构面。宏观上斜坡体变形上则表现为整体破坏,滑动速度较快。

通过上述实验和原有研究成果表明:岭南滑坡的危险性可能在于连阴雨带来的深层滑动,深层滑动速度大,会形成统一的滑动面,可以出现大变形,但受到高程势能的控制,不会形成高速滑坡。岭南滑坡岩土体的剪胀型变性破坏方式也决定了暴雨条件下滑坡的滑动为浅层泥流,速度慢,滑面浅,受到季节降雨的作用,这种破坏频率高。

## 5 结 论

岭南滑坡前期变形形成的拉裂缝成为导水的通道,促进了地下水的快速运输。滑坡的启动、运动、堆积特征与降雨过程相联系:连阴雨过程中,出现深层块体滑动,后缘已形成高达0.8m的陡坎;强降雨过程,斜坡坡脚出现表层泥流。岭南滑坡对降雨的响应具有黄土-基岩滑坡的基本特征,经上述分析,

可见其变形失稳机制如下:

(1)岭南滑坡体为粉质黄土状土,滑床基岩为砂砾岩,两者水理性质差异大。砂砾岩的渗透系数小,具有隔水性质。黄土状土的物理化学活性和亲水性强,湿陷敏感性较强。

(2)前缘以黄土泥流形式溜滑、整体沿基岩界面块体滑动是岭南斜坡的主要失稳运动方式。暴雨等强降雨天气是黄土泥流频发,块体滑动的出现多在连阴雨天气。

(3)地下水水位与岩土体的性质影响了斜坡变形特征。在暴雨背景下,表层土体经历非饱和至饱和过程,岭南剪胀型滑坡体孔隙水压力易消散,致使低速运动的黄土泥流。

(4)连阴雨过程中,当土体剪切破坏发生在地下水水位以下产生时,土体剪胀,土体的孔隙增大,得到上部地下水的补充。与地表不同的是,因位于地下水水位以下,地下水充足。剪胀孔隙的补给迅速,土体破坏易产生的高孔隙水压力。在高孔隙水压力作用下,土体产生剧烈剪切破坏,形成统一结构面。宏观上斜坡体变形上则表现为整体破坏,滑动速度较快。具有高危险性。

为此,岭南滑坡体支护需要消除或减轻降雨对坡体的危害。建议在治理过程中做好坡面排水、导水设施,可以在斜坡体上布设环形截水沟,或布置垂直孔群及水平孔群,增设渗水洞,排出疏干填土中水分。提高其强度指标,以增强滑坡的稳定性。

## 参 考 文 献

- [1] 李同录,龙建辉,李新生.黄土滑坡发育类型及其空间方法[J].工程地质学报,2007,4(13):500~505.  
Li Tonglu, Long Jianhui, Li Xinsheng. Types of loess landslides and methods for their movement forecast. Journal of Engineering Geology, 2007, 4(13): 500~505.
- [2] 张少宏,康顺祥,李永红.降雨对黄土边坡稳定性的影响[J].水土保持通报,2005,25(50):42~45.  
Zhang Shaohong, Kang Shunxiang, Li Yonghong. Influence of rainfall on loess slope stability. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(50): 42~45.
- [3] 朱丽娟,王铁行.降雨对非饱和和黄土边坡含水量变化规律分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(1):95~99.  
Zhu Lijuan, Wang Tiexing. Influence of rainfall on moisture content in unsaturated loess slope. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 95~99.
- [4] 陕西省宝鸡市麟游县国土局.麟游县岭南重大滑坡监测资料[R].麟游:2009.  
Bureau of Land and Resources of Linyou County, Baoji City, Shan-



- nxi Province. Landslide Monitoring Data of Lingnan Landslide in Linyou County. Linyou: 2009.
- [5] 西安勘察设计研究院. 麟游县岭南滑坡工程技术报告[R]. 西安: 2008.  
Xi'an Investigation and Design Research Institute. Engineering Technical Report of Lingnan Landslide. Xi'an: 2008.
- [6] Sassa K, Fukoka H, Wang GH, Ishikawa N. Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics. *Landslide*, 2004, **1**: 7 ~ 19.
- [7] Hungr O. A model for the run-out analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, **32**: 610 ~ 523.
- [8] Hungr O. Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2001, **7**: 221 ~ 238.
- [9] 戴福初, 李焯芬. 从土的应力应变特性探讨滑坡发生机理[J]. *岩土工程学报*, 2000, **22**(1): 127 ~ 130.  
Dai Fuchu, Li Zhuofen. Analysis of landslide initiative mechanism based on stress-strain behavior of soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(1): 127 ~ 130.
- [10] 吴树仁, 金逸民, 石菊松, 等. 滑坡预警判据初步研究——以三峡库区为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2004, **34**(4): 596 ~ 600.  
Wu Shuren, Jin Yimin, Shi Jusong, et al. A primary study on landslide warning criterion: an example from the reservoir region of the Three Gorges. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2004, **34**(4): 596 ~ 600.
- [11] 赵信文, 金维群, 彭柯, 等. 清江中游隔河岩库区偏山滑坡形成机制及稳定性分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, **39**(5): 874 ~ 881.  
Zhao Xinwen, Jin Weiqun, Peng Ke, et al. Formation mechanism and stability analysis of the Pianshan landslide in Geheyan reservoir area of the middle reaches of the Qingjiang river. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, **39**(5): 874 ~ 881.
- [12] 周自强, 李保健, 王志荣. 兰州文昌阁黄土-基岩滑坡临滑预报[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2007, **1**(4): 450 ~ 454.  
Zhou Ziqiang, Li Baojian, Wang Zhirong. Critical sliding forecast for loess-rock landslide at Wenchangge, Lanzhou. *Journal of Lanzhou University (Nature Science)*, 2007, **1**(4): 450 ~ 454.