

# 盐锅峡库区黄土台缘滑坡研究

赵尚学 李鸿琰 马东涛

(中国科学院兰州冰川冻土研究所·兰州市·730000)

**摘 要** 该文通过对黑方台黄土台缘滑坡进行深入细致的野外调查和测量、地下水观测、灌溉试验、水样和土样的物理化学分析,初步摸清了台缘滑坡的基本要素,分布特征、规模及危害,并查明了滑坡成因机制。据统计,该区有大小滑坡 44 处,1986 年至今发生滑坡 20 多次,滑坡面积从 0.2~2.5m<sup>2</sup> 不等。仅 1989 年以来,滑坡造成的直接经济损失近 600 万元,平均每年近 120 万元。从野外观察和室内分析认为,该区台缘滑坡主要是由台面灌溉水下渗转为地下水,在台缘中下部以泉水形式溢出,或在砾石层底部和老滑坡底部出露,使砾石层底部泥岩被水浸泡软化成泥,当受压蠕动后便形成滑动带。有利的台缘地层和高陡的台缘地形也是引起滑坡的重要因素。

**关键词** 库区 黄土 台缘 滑坡

## Study on the Landslides at the Edge of Loess Terrace in Yanguoxia Reservoir Region

Zhao Shangxue Li Honglian Ma Dongtao

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

**Abstract** Through the field investigation and measurement, groundwater observation, irrigation testing and the physical and chemical analysis of water and soil samples. this paper has preliminarily discussed the sliding basic factors, distribution features, scale and harm of the landslides at the edge of terrace, the formation mechanism of landslide is established as well. According to statistics, there are 44 landslides in this region. From 1886 up to now, more than 20 Landslides have happened, the sliding areas of landslides varies from 0.2 to 2.5Km<sup>2</sup>, Since 1989, the direct economic loss caused by landslide reached nearly 6 000 000 yuan by the average of 1 200 000 yuan per year. By the field observation and indoor analysis, we think that the landslide in this region is generated by the groundwater from infiltration of irrigation water, the ground water exposes in spring flow at the down part of slope. or bottom of pebble layer and the bottom of old landslide. the mudstone at the bottom of pebble layer is softened to mud by water, while it is compressed and influenced, the sliding belt will be formed. The special stratum and high—steep slope landforms are all the essential factors for inducing of landslides.

**Key words** reservoir region loess Landslide at edge of terrace

# 1 概 况

盐锅峡黑方台位于甘肃省永靖县境内,盐锅峡水库北岸的黄河第四级阶地。是兰州附近的黄河阶地中迄今保存面积最大,台地较完整的阶地之一,其面积  $13.5\text{km}^2$ ,台缘高差约  $120\text{m}$ ,开垦耕地约  $1.5$  万亩。在长  $10\text{km}$  多的台缘,新老滑坡相连,构成大型台缘滑坡群,其发生频繁,危害严重。

自 1967 年移民 1 万余人到黑方台,垦台平田,1969 年提水灌溉以来,不仅使昔日干旱荒芜的台面黄土普遍下沉  $2\sim 3\text{m}$ ,而且使台缘滑坡活动加剧。据统计,1986~1993 年的 7 年内,共发生滑坡 20 多次,滑动土体  $1\ 000$  万  $\text{m}^3$ 。埋没村庄学校,毁坏农田、水渠和提水管道,中断交通时间长达  $5\sim 20$  天。目前直接威胁交通、村镇和工厂的滑坡有 40 多处。1992 年滑坡埋没电石厂,使一个小小的乡镇企业损失 17 万元,1991 年水管所滑坡毁坏上水管道,损失 10 万多元。台缘滑坡灾害,在西固区的达家台、兰州郊区和武山附近常有发生。如造成直接经济损失 200 多万元的天水锻压机床厂滑坡和威胁着 1 974 户居民的天水椒树湾滑坡均发生于阶地前缘。

## 1.1 滑坡区地貌

该区地形总轮廓为两湾夹一咀。从新庄至桥头的焦家河湾,曲率半径为  $800\text{m}$ ,是目前台缘地下水出露点最多、最高的地段,也是滑坡发育最频的地段,黄茨至三姓庄的黄茨咀,自台缘向黄河方向伸出  $2.2\text{km}$  的一大台咀。白垩系红层大面积裸露,形成直立红层陡坎,为地下水出露较少的地段。坡体红层相当破碎,是老滑坡最发育近期又接连复活的地段;从三姓庄至电站的盐锅集河湾,为一直线长  $3\text{km}$  多的大河湾,老滑坡发育近期又不断复活。

黑方台沟壑发育。有大小冲沟 30 多条,其中虎狼沟最长,并具有沟谷形态,深  $100\text{m}$  以上,沟底宽  $5\sim 10\text{m}$ 。沟内滑坡成群,活动频繁。其余沟道一般长为  $1\text{km}$  左右,深仅数米,狭窄、沟壁陡峭,沟床比降一般为  $30\%\sim 50\%$ 。这些沟不仅是台面径流的汇集区,同时也是地下水出露和排泄道,受地表和地下水的浸润和侵蚀、蚕蚀而削减台原地面。

台缘斜坡除桥头至黄茨段呈  $60\sim 70^\circ$  的直立状态外,河湾段由于冲沟水流侵蚀与堆积,特别受滑坡多次搬运、堆积,坡面呈上陡下缓的“坐椅式”,台边滑坡后壁坡度为  $50\sim 60^\circ$ ,坡麓地段的坡度  $10\sim 20^\circ$  左右。

## 1.2 滑坡区的地质

在区域地质构造上该区地处祁连山褶皱带与陇西旋转构造的交汇处。处于我国南北大地震带中。从台缘裸露地层看,第四级阶地形成前,曾发生长期掀斜运动,使白垩系红色砂岩高角度倾斜,局部褶皱构造也十分发育,第四级阶地形成期间或以后的构造运动使阶地均匀抬升,黄河的砾石层和后期的冲积黄土层均保持着水平层。由于各时段构造运动的形式不同,使红层与砾石层、黄土层呈高角度接触。一定程度地抵御了滑坡的整体性发育和限制着滑坡的规模。

## 1.3 滑坡区地层

自上而下由土壤层、新黄土、老黄土、砾石层和白垩系红色粘砂岩或砂粘土岩组成。土壤层仅数米,质地疏松。新黄土(马兰黄土)属砂质型黄土。虽距兰州仅  $100\text{km}$ ,但黄土厚度只有  $40\text{m}$  左右,为兰州附近黄土厚度的  $1/5$ 。质地疏松无胶结,垂直节理十分发育,孔隙尤其发育,湿陷系数  $0.10\sim 0.20$ ,天然含水量  $16\%\sim 18\%$ ,天然容重  $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ ,属强湿陷性土。近 20 年来因受农田灌水渗漏作用,地面普遍下陷  $2\sim 3\text{m}$ 。其中管状、跌穴、陷穴和网状喀斯特构造发育。老黄土属冲积粘砂土和砂粘土。厚  $10\sim 15\text{m}$ ,结构坚实,具浅红色,水平层理,含盐量高,粘粒含量高,有少量孔

隙,湿陷度小。砾石层厚4~5m,砾石磨圆度好,一般粒径5~20cm,无明显层次,结构疏松,是良好的蓄水区,顶部有20cm的粗砂层。红色泥岩和泥砂岩层,可见厚度60~80m,砂岩与泥岩常呈互层,即在较厚的砂岩层中夹一层厚度1~2m的泥质板岩,岩层层理清晰,产状多变,倾角20~30°。

#### 1.4 滑坡区水文

该区年平均降水量316mm,除暴雨时在台地边缘地带产生径流,沿台缘冲沟泄流外,在细雨情况下很少产生地表径流,几乎全部雨水渗入地下。包括农田灌溉水,年平均下渗的水量约为3500万m<sup>3</sup>。这些水分别从砾石层底部、上部泥质板岩顶面、下部泥质板岩顶面及山麓地带的老滑坡脚部出露。横向上依古黄河的凸岸少凹岸多。经过台缘6处出水点一年的观测,台缘年总出水量约40万m<sup>3</sup>。地下水在时间上的分布和年际变化不大,这是因为黄土层较厚,容水量较大,尽管网状结构导致地表水大量下渗,但这种结构如同土孔“蜂巢”,容纳很多水量,新老滑坡后缘裂缝虽然很发育,但位置不在天然集水区,也不在农田灌水范围之内,水不直接汇入裂缝,只有厚度孔隙大,层理完整的砾石层是良好的蓄水库,可调节水体迁移。使其底部的泥岩长期被水浸泡软化成泥,导致滑坡形成。

## 2 滑坡分布

本区在10km多的台缘地带,直接滑向公路村庄的大小滑坡40多处,新老迭置,彼此相连,构成大型台缘滑坡群。单个滑坡长度不等,大小不一。滑距最长的2.5km,最短的0.5km,面积从0.2~2km<sup>2</sup>不等。分布密度随地下水分布差异而不同,在河湾区其分布密集,而在山咀地带较稀少。

### 2.1 焦家滑坡密集区

在3km长的台缘有大小滑坡18处,滑坡最长2.5km,最短的0.5km,滑坡面积0.2~0.5km<sup>2</sup>,是近期滑坡最发育、密度最大的地段。不仅新老迭置,而且左右相嵌,大小相套。多高位黄土崩塌性滑坡,如焦家崖头滑坡,距黄河水面250m的台边滑脱,几分钟内前舌落入黄河,激起数米高的水浪,淹没对岸粮田,目前活动仍很频繁,威胁仍然存在。

### 2.2 黄茨湾滑坡群

该区朝向黄河的滑坡有9处,滑体最长2.5km,宽1.5km。老滑坡比较发育。坡脚由滑坡扰动土构成的土堆,小丘到处可见。近期有许多老滑坡复活。

### 2.3 盐锅集滑坡区

该区有较大滑坡9处,属大型老滑坡区。老滑坡体具有三个明显的阶梯状后壁,如水管站滑坡于1991年雨后再次滑坡,这是一处潜伏着很大灾害的滑坡,特别台缘裂缝,滑坡区地下水发育,预示着明显的活动性和灾害的降临。

## 3 滑坡成因机制

黑方台前缘10多km范围内,虽然原始地形,表部地层,地下水活动均相同,但经后期斜坡重力作用过程,使台缘各地段的表层状态各异。因而现代滑坡的形成机制也就不同。

### 3.1 崩塌性高速滑坡

这种滑坡在焦家湾区分布最多,并有典型代表。此类滑坡一般都具有不同于山地滑坡的特定条件。斜坡破裂面上部具有完整的厚层黄土层,厚度达40~50m。斜坡高陡,特别是后壁格外陡

峭。后部 40~60m 高度范围内的坡度 60~70°。尽管曾多次滑坡,但后部新的边壁依然陡峭。斜坡上部岩土层内部,具有一组或几组与临空面平行的构造面,在焦家滑坡区多以黄土喀斯特孔隙缝为裂面。反映在地表的为多条平行并列的弧形或直线状拉张裂缝;最长的达 150~200m,深度 15~20cm。具有足够的水源和地下储水层;黑方台的地层中,都有相当厚度的砂砾石层或风化破碎的储水层,它位于海拔 1 650m 左右的半坡上,厚 4~5m,外溢水量不断增加,具有粘粒含量高的岩体隔水层;黑方台均以厚 1~2m 的泥质板岩为隔水层,长期被水浸泡后便成为软弱垫层,具有厚度 10cm 以上的泥化层作为滑坡滑动带。

黑方台有两层滑动带。主滑带于砂砾石层下部的泥岩顶面,它是一层厚度不大的塑性带,极易变形,塑性带一般在压应力超过一定限度和塑性体的剪切应力系数超过 1.6 时发生变形。高压应力一是来自上部巨厚脆性土层的自重压力,充水湿化后这种土体的自重量增加 30%,每平方米上的下错力达 20~30kg;二是孔隙水压力增加,塑性带中的土体受压体积减小。塑性带在受高压变形率达 24% 时,向临空面方向的水平应力增大,而部分层被挤出并牵引上部脆性带崩塌下滑。滑动过程中常带动底部白垩系地层顶部 2~5m 参与滑坡。另一层滑带位于老黄土底部与砂砾石层顶部砂层的接触面附近。此带属饱水层,除大量盐被溶解流失,  $C \cdot \varphi$  值剧降外,还受地下水动水压力作用,使砂粒迁移变位,乃至流失。虽然滑带及附近土体的安全系数大于 1,但部分或局部滑带的抗剪强度远小于剪切力。某一局部应力的变化,将引起大范围应力突变,而使整个边坡滑塌。因受黄土垂直节理面的控制。每滑一次黄土层前缘陡崖平行后退,后壁始终保持 60~80° 的高倾斜坡。所以,同一地段可能发生 2~4 次滑坡或更多。

### 3.2 沿软弱构造带的低速滑坡

软弱构造带可能是风化破碎层与下伏基岩面的接触带,也许是褶皱、断裂等小构造界面。有时由斜穿岩层的岩脉,如第三系和白垩系岩层中的石膏脉构成。在黑方台的黄茨河湾,盐集河湾等老滑坡区以及张家台的吊咀老滑坡区所见。

砂砾层的积水不是像崩塌性滑坡区那样从半山坡的红粘岩顶面排出,而是沿老滑坡体底部的滑动面泄流,久而久之,便在破碎堆积与下伏基岩面之间形成浸润带,堆积层之下的基岩并非完整均一的斜面,有的产状与老滑坡面斜交,有的被挤压得破裂欲碎,当然也有垂向节理发育。因此,地下水伏流于不同层次,渗流至坡脚,在隔水性较强的粘性泥岩顶部溢出,成为台缘最低一层泉水出露带。在地下水较富集的层面附近沿某一较弱结构带形成新的滑动带,在水的长期浸泡和流动等物理化学作用下,滑面不断扩展勾通成形。在人工开挖取砂和坡麓水渠浸泡下发生蠕动,便在斜坡中上部老滑坡体的反坡平台附近和台缘顶面出现拉张裂缝,如黑台麦场滑坡。

沿老滑坡体下部的主滑动段向下蠕动时,对后部陡立的黄土层施以牵引,使顶面出现更多的平行、弧形、环状裂缝,沿裂缝的土体强度因牵引破裂和地表水汇集灌入而衰减。当主滑带全面形成后,主滑段与被牵引段共同合力推压下方抗滑段。当抗滑段应力小于剪切应力时,预滑、蠕动阶段完成,滑坡阶段随之到来。

## 4 滑坡危害

黑方台滑坡位处工农业开发程度高,人口密度较大的地区,一旦滑坡则成灾或带来慢性危害。

(下转第 58 页)

### 3.3 工程设计指标

该流域治沟工程采用20年一遇的标准进行设计,防御标准为10年一遇,根据当地特殊情况,冻融侵蚀严重,而且沟口直对村镇,所以不宜过高,主要工程项目指标见附表。

附表 主要工程项目指标

项 目	高(m)	顶宽(m)	长(m)
铅丝笼石坝	2.0	2.0	20~30
铅丝笼防洪墙	2.0	1.5	15~20
浆砌石谷坊	2.5	1.5	/

### 3.4 泥石流防治效益

经过5年的综合治理,孟宗沟流域的综合防护体系已初具规模,治坡和治沟措施的防治效益也逐渐得以发挥,治理后的草地水源涵养能力大为提高,地表径流得到了进一步的控制,全流域治理后土壤、草被总持水量比治理前增加了13万t,土壤持水量比治理前增加1.6%,草被持水量比治理前增加150%,治理后的工程防护措施在调节水源,防止沙石下泄,防止冰川移动,防止泥石流发生等方面也已开始发挥了作用,水保治沟工程完成后可蓄水50万m<sup>3</sup>,并可分层截断径流,调节汇流,减缓洪峰。

该流域经初步治理后,泥石流防护效益已见成效,1991年8月10日晚10h25min,孟宗沟连降混有冰雹的大暴雨30min,降雨量23.2mm,引起山洪爆发,洪水卷起沙石浆顺流而下,经各项工程措施的层层拦蓄,绝大部分沙石泥块被谷坊和铅丝笼石坝所拦蓄,流域沟口耕地及群众生产、生活用品无一受损。1991年后至今,流域内综合防治群体作用已得到发挥,从未发生一次泥石流,经治理后的沟口滩地也同时建起了苗圃,并在沟口、铅丝笼石坝之间的砂石滩和冲积扇上进行了客土造林,以彻底改变沟道的自然景观。

(上接第22页)

### 4.1 对公路交通的危害

兰州至盐锅峡公路自新庄到三姓庄5.2km长的线路,依山傍水,紧靠黑台坡脚通行。规模较大的滑坡无不埋没公路,导致断道阻车,尤以焦家河湾滑坡区为严重,曾4次阻断交通,埋没段最长为500m,阻车时间5~20天。黄河大桥北侧红山咀斜坡危在旦夕,如果两个滑坡相继发生,可能危及大桥。另外,停留在半山小冲沟中的滑坡松散物,在雨水浸泡下形成泥流,常年不断地下泄堆积在公路上,对来往车辆和行人造成很大威胁。

### 4.2 对学校工厂和人民生命财产危害

1992年焦家崖头滑坡毁坏埋压电石厂车间与住房,损失达17万元。1989年党川中学后部台缘滑坡,学校受到严重威胁,后经临时削坡,但危险仍存。盐化家属楼后方的方台边缘,山坡陡峭,台沿裂缝贯通呈弧,斜坡不稳,坡脚楼房平房相间,受威胁的居民达3000多人。

### 4.3 对农田水利工程的危害

虽然台地面积大,但人口密集,耕地十分宝贵。滑坡在同一地点多次滑动,每滑一次台缘向后退10~20m。同时台地边缘耕地大范围开裂,向台内的宽度60~250m,横向宽度100~300m,若取最小宽度100m计,则整个台缘有1500亩耕地被废弃。黑方台坡脚迥迁一条长10km多的渠,较大滑坡无不毁埋渠道。7年来先后被滑坡推移和埋没的多达5段,累积长2000多m。两个上水管道4次被滑坡毁坏。如1991年水管站滑坡毁坏上水管道,直接经济损失达10万多元。

总之,滑坡对工农业、水利设施、交通运输的危害是严重的。自1989年以来,滑坡造成直接经济损失达519万元,平均每年损失120万元。其中水利设施损失近60万元,由于塌陷搬家建房耗资460万元,滑坡毁坏上水工程造成减产达30万元,毁坏厂房、断道阻车经济损失44万元。