

### 静宁县田堡调蓄水池滑坡成因及稳定性分析

韩朝君, 李国营, 吴伟江, 张立军, 韩海龙

### Causes and stability analysis of the landslide at Tianbao Reservoir in Jingning County, Gansu Province

HAN Zhaojun, LI Guoying, WU Weijiang, ZHANG Lijun, and HAN Hailong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202305036>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响——以湖南安化春风滑坡群为例

Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: taking Chunfeng Landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example

贺小黑, 彭鑫, 谭建民, 裴来政 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 96–103

##### 甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施

Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province

张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 张文纶, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7–14

##### 西藏藏中与昌都联网工程八宿县10L336–10L338段滑坡及塔基稳定性分析

\${suggestArticle.titleEn}

樊柱军, 刘晓娟, 程东幸 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(2): 55–60

##### 湖南通道播阳镇楼团滑坡发育特征及稳定性分析

Development characteristics and stability analysis on the Loutuan Landslide in Boyang Town, Tongdao County, Hunan Province

周小飞, 曹红娟 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 48–53

##### 地理探测器在判别滑坡稳定性影响因素中的应用

Application of geographic detector in identifying influencing factors of landslide stability: A case study of the Jiangda County, Tibet

支泽民, 陈琼, 张强, 周强, 刘峰贵, 赵富昌, 陈永萍 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 19–26

##### 汉江孤山航电枢纽工程区近坝滑坡稳定性分析及防治工程建议

\${suggestArticle.titleEn}

王启国 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(1): 41–51



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202305036

韩朝君, 李国营, 吴玮江, 等. 静宁县田堡调蓄水池滑坡成因及稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(6): 13-19.

HAN Zhaojun, LI Guoying, WU Weijiang, et al. Causes and stability analysis of the landslide at Tianbao Reservoir in Jingning County, Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 13-19.

## 静宁县田堡调蓄水池滑坡成因及稳定性分析

韩朝君<sup>1</sup>, 李国营<sup>1</sup>, 吴玮江<sup>2</sup>, 张立军<sup>1</sup>, 韩海龙<sup>1</sup>

(1. 甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院, 甘肃兰州 730020;

2. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 2020年9月18日, 甘肃省平凉市静宁县四河镇田堡村田堡调蓄水池左岸发生滑坡, 滑坡长180 m, 宽240 m, 体积 $48.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 主滑方向 $191^\circ$ , 为黄土-泥岩老滑坡的复活。滑坡破坏已开挖的边坡和公路路基, 严重威胁田堡调蓄水池的正常建设。通过现场勘查、岩土试验和计算等工作, 对田堡调蓄水池滑坡形成的地质条件、滑坡基本特征及滑坡成因进行了探讨, 并采用简化Janbu法对滑坡稳定性进行分析。研究发现, 滑坡形成条件主要为老滑坡地质基础、坡体前缘开挖、持续性强降雨三个方面, 即坡脚大规模开挖和强降水的共同作用下, 引发老滑坡的复活滑动。稳定性计算结果表明, 在坡脚开挖后坡体滑动前, 暴雨条件下坡体稳定系数小于0.98, 处于失稳滑动状态, 滑动后各工况稳定系数小于1.05, 处于不稳定一欠稳定状态。

**关键词:** 滑坡; 成因; 工程开挖; 降水; 稳定性

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)06-0013-07

## Causes and stability analysis of the landslide at Tianbao Reservoir in Jingning County, Gansu Province

HAN Zhaojun<sup>1</sup>, LI Guoying<sup>1</sup>, WU Weijiang<sup>2</sup>, ZHANG Lijun<sup>1</sup>, HAN Hailong<sup>1</sup>

(1. The Second Geological and Exploration Institute of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. Institute of Natural Geological Disasters, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** On September 18, 2020, a landslide occurred on the left bank of Tianbao Reservoir in Tianbao Village, Sihe Town, Jingning County, Pingliang City, Gansu Province. The landslide is 180 m long, 240 m wide,  $48.5 \times 10^4 \text{ m}^3$  in volume, and  $191^\circ$  in main sliding direction, which is the revival of the old loess-mudstone landslide. Landslide destroys the excavated slope and highway subgrade, which seriously threatens the normal construction of Tianbao Reservoir. Through field investigation, geotechnical test and calculation, the geological conditions, basic characteristics and causes of landslide formation in Tianbao Reservoir were discussed, and the stability of landslide was analyzed by simplified Janbu method. The study found that the formation conditions of the landslide are mainly three aspects: the geological foundation of the old landslide, the excavation of the front edge of the slope, and the continuous heavy rainfall. That is, the old landslide is caused by the large-scale excavation of the slope toe and the heavy rainfall. The stability calculation results show that after excavating the slope toe, the stability coefficient is less than 0.98 under the rainstorm condition, which is in the unstable sliding state. After sliding, the stability

收稿日期: 2023-05-26; 修订日期: 2023-10-18 投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 甘肃省科学院应用研究与开发项目(2022JK-04)

第一作者: 韩朝君(1997-), 男, 黑龙江大庆人, 工程师, 主要从事工程地质与地质灾害防治研究。E-mail: 1441255419@qq.com

通讯作者: 吴玮江(1963-), 男, 甘肃天水人, 研究员, 主要从事工程地质与地质灾害防治研究。E-mail: wwj0408@163.com

coefficient of each working condition is less than 1.05, which is in the unstable-unstable state.

**Keywords:** landslide; genesis; engineering excavation; precipitation; stability

## 0 引言

黄土是第四纪以来形成的一种多孔隙弱胶结构的特殊沉积物, 具有大孔隙、水敏性、力学性质差和节理裂隙发育的特点<sup>[1]</sup>。由于黄土的特殊性质, 黄土滑坡是我国发生数量最多、危害最严重的突发性地质灾害之一。

甘肃省是我国黄土滑坡地质灾害发生频繁的省份之一<sup>[2]</sup>, 黄土滑坡常造成群死群伤和重大财产损失并影响社会安全稳定。1983年3月7日, 甘肃省东乡县洒勒山高速滑坡, 造成220人死亡, 成为我国最严重的灾难性黄土滑坡之一。黄土滑坡研究一直是国内外的热点, EDWARD等<sup>[3]</sup>对中国西北部黄土滑坡进行了初步研究和部分模型构建; 彭建兵院士等<sup>[4-6]</sup>对黄土高原滑坡的空间分布发育特征、形成机制等进行了全面系统的研究, 同时总结了区域构造及典型人类工程活动对黄土滑坡的影响; 吴玮江等<sup>[7-8]</sup>、冉林等<sup>[9]</sup>通过对甘肃黄土滑坡研究, 总结了黄土地区滑坡的分布规律, 主要的四种类型及各类滑坡的活动特征; 张茂省等<sup>[10-11]</sup>对黄土滑坡诱发因素及其形成机理开展了相关研究, 得出降水和人类工程活动是最积极的诱发因素; 刘琨<sup>[12]</sup>、李同录等<sup>[13]</sup>、王民兰等<sup>[14]</sup>对降雨及地震引发滑坡进行了专门研究, 得出了降雨及地震情况下黄土滑坡的形成机制。

由于人类工程活动的强度和规模的不断增加, 由其引发的滑坡灾害也不断增多, 常造成严重的经济损失和人员伤亡, 增大工程投资, 拖延工期, 严重影响工程建设的顺利进行。本文以甘肃平凉地区静宁县田堡调蓄水池滑坡为研究对象, 在现场调查、勘探、无人机测量及滑坡滑动前勘查资料的基础上, 对滑坡成因及稳定性进行了系统研究, 以期对同类滑坡的研究提供参考。

## 1 工程地质环境概况

### 1.1 滑坡区位置及概况

研究区位于甘肃省平凉市静宁县四河镇席家河左岸斜坡地带, 为引洮供水二期工程覆盖地区(图1)。

区内工程建设主要为田堡  $30 \times 10^4 \text{ m}^3$  调蓄水池, 主要功能是解决引洮供水工程检修期间静宁县西部10个乡镇人民的生活用水问题。工程于2020年3月20日开工建设, 工程建设主要内容有坝基和北岸边坡开挖、临河侧填筑等, 2020年9月18日, 调蓄水池左岸发生滑坡, 滑坡破坏已开挖的边坡和公路路基, 严重威胁田

堡调蓄水池的正常建设。

### 1.2 地形地貌

静宁县地处陇西黄土高原东部, 属黄土低中山梁峁地貌区。滑坡区地貌主要是厚黄土覆盖于波状起伏的新近系红层上的黄土丘陵。由于强烈侵蚀、切割, 区内沟壑纵横、地形起伏。海拔在1600~2245 m, 相对高差一般为200~300 m, 平均坡度15°~30°。在沟底和部分谷坡可见新近系地层出露, 沟岸滑坡、崩塌较为发育。

### 1.3 地层岩性

本区地层结构较为简单, 基底地层主要是巨厚的新近系砖红色泥岩夹灰白色砂岩(N), 产状近于水平, 岩性软弱, 分布广泛, 在部分冲沟中下部有出露。黄土梁区广泛披覆马兰黄土( $\text{Qp}_3^{\text{eol}}$ ), 岩性为浅黄色粉土, 质地疏松, 具有湿陷性。一般厚度3~8 m, 最厚达15 m左右。河谷区发育上更新统、全新统冲积物( $\text{Qp}_3^{\text{apl}}$ 、 $\text{Qh}^{\text{apl}}$ ), 岩性以黄土状粉质黏土为主, 底部为砾石层。另外席家河北岸和冲沟内还发育全新统滑坡堆积物( $\text{Qh}^{\text{del}}$ ), 主要为扰动的马兰黄土和泥岩, 结构破碎, 成分混杂。

### 1.4 水文地质条件

静宁县属于温带干旱、半干旱气候区, 多年平均降

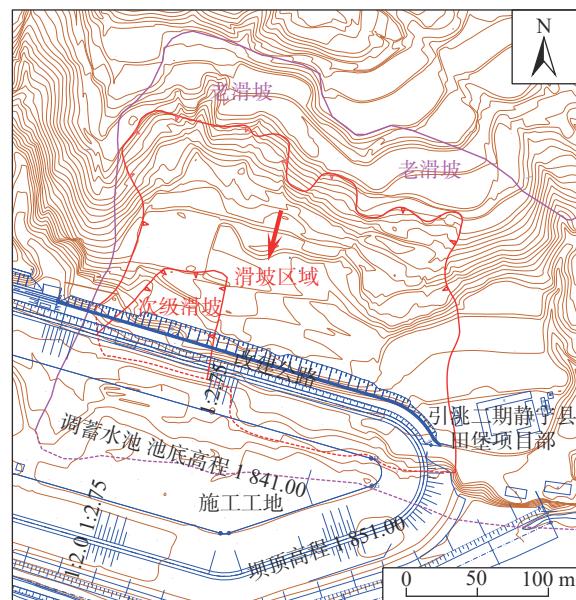


图1 研究区平面图

Fig. 1 Study area plan

水量 453.3 mm, 多年平均蒸发量 1 512 mm, 为降水量的 3.37 倍。由于降水稀少蒸发强烈, 再加上地形起伏, 地下水补给条件差, 斜坡区地下水总体贫乏, 只在汇水条件较好的地势低洼部位有少量黄土潜水分。

## 2 滑坡特征

### 2.1 形态特征

滑坡位于席家河北岸斜坡地带, 平面形态呈不规则四边形(图 2), 南北平均长 180 m, 东西宽 240 m, 面积  $4.32 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 滑体厚 3.0~18.0 m, 平均 11.2 m, 体积  $48.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 滑坡主滑方向 191°(图 3)。滑坡后缘高程 1 900~1 908 m, 东侧前缘高程 1 842 m, 西侧高程 1 850 m 左右, 前后缘高差约 58 m, 平均坡度 15.8°。



图 2 田堡调蓄水池滑坡照片

Fig. 2 Photo of the landslide at Tianbao Reservoir

受南北向分布的小冲沟等地形影响, 滑坡后壁形态很不规则。实际上, 该滑坡后壁是由 4~5 个相对独立的次级滑坡的后壁组合而成, 高度 3~6 m, 坡度 50°~60°, 其上擦痕较为清晰。

剖面上滑坡总体呈多级台阶状(图 4)。最上部为后壁滑落形成的高度 12 m 左右、坡度约 25°的堆积坡

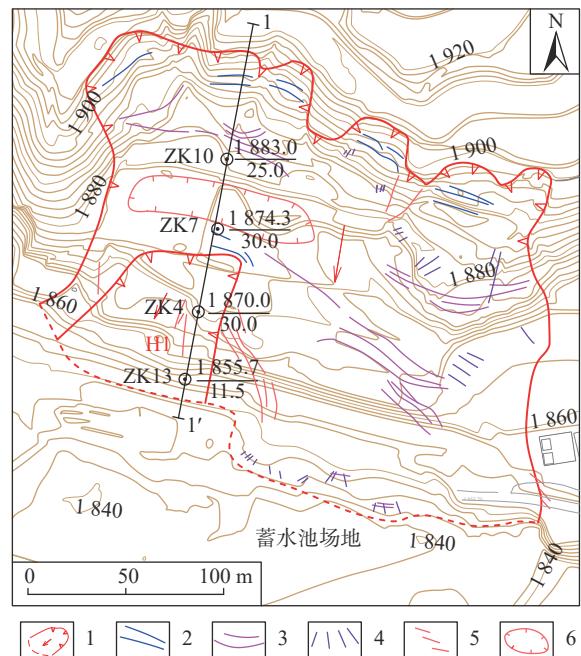


图 3 滑坡勘查平面图

Fig. 3 Plan view of the landslide investigation

- 1—滑坡周界 ; 2—拉张裂缝 ; 3—鼓胀裂缝 ; 4—扇状裂缝 ;
- 5—剪裂裂缝 ; 6—滑坡洼地

体, 其下部为宽 20~40 m 的平台, 东西两侧较宽, 中间窄, 分布高程 1 882~1 888 m。中部为宽大的滑坡主平台, 宽 40~75 m, 分布高程 1 866~1 878 m, 整体略为反坡, 中部发育长 100 m、宽 15~30 m、深约 3 m 的洼地。主平台前部为人工开挖形成的高 10~15 m、坡度 35°~45°的陡坡。滑坡前缘东侧为长约 100 m、宽 30~40 m、坡度 16°左右的滑舌, 已伸入拟建库区, 分布高程 1 842~1 854 m。

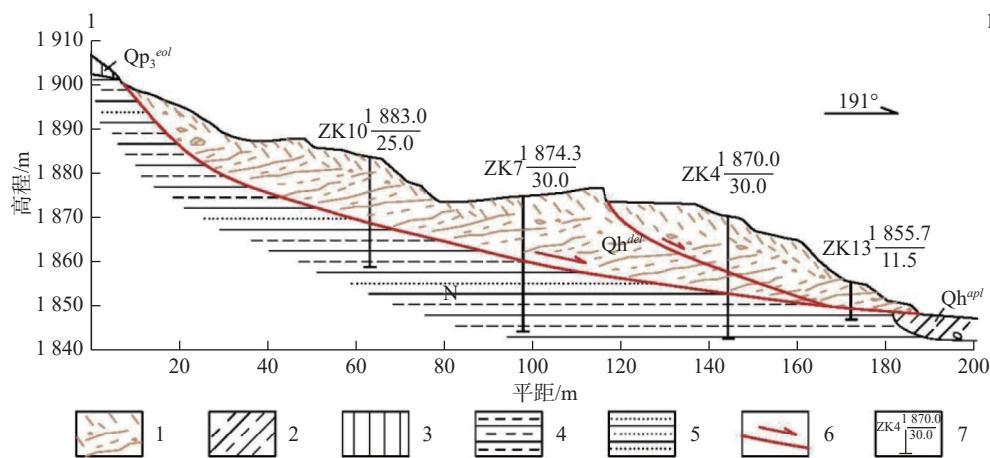


图 4 滑坡地质剖面图

Fig. 4 Geological cross-section of the landslide

- 1—滑坡堆积 ; 2—粉质黏土 ; 3—马兰黄土 ; 4—泥岩 ; 5—砂岩 ; 6—滑动面 ; 7—钻孔

滑坡西侧前部发育 H1 次级滑坡, 平面形态呈簸箕状, 南北长 75 m、东西宽 50~80 m, 体积约  $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 主滑方向 200°。H1 次级滑坡实际上是 2020 年 5 月中旬已滑动的部分, 9 月整体滑坡时为相对独立且滑动剧烈的块体, 地势相对低洼, 其后部范围有所扩大。

## 2.2 结构特征

蓄水池滑坡的滑体主要为原老滑坡体物质, 岩性为滑动后的红层和黄土, 结构相对完整, 层序扰动轻微, 滑体表部主要为黄土, 厚 3.0~6.7 m, 中部主平台一带厚度较大且连续分布; 以下滑体主要为红层(图 5)。滑坡后壁主要由红层组成。前缘滑体岩土成分与结构相对混杂, 夹有较多席家河冲洪积形成的青灰色粉质黏土。



图 5 钻孔揭示的下部红层

Fig. 5 Lower red layer revealed by borehole drilling

该滑坡是老滑坡的大规模复活滑动, 滑动面基本继承了老动滑面(图 6), 后部滑动面倾角 45°、中部 20°~11°、前部 6°左右, 滑带土主要是棕红色粉质黏土, 稍湿-湿, 可塑-软塑状, 局部可见滑动擦痕和光亮面, 滑床为新近系红层。后部滑体厚度 3~9 m, 中部 8~18 m, 前部厚度 3~12 m, 平均厚度 11.2 m, 属于中层中型滑坡。



图 6 滑坡后部滑面

Fig. 6 Rear sliding surface of the landslide

## 2.3 变形滑移特征

滑坡体上各种裂隙非常发育, 滑坡后部对应各次级滑坡后壁发育拉张裂隙、侧缘剪切裂隙和鼓胀裂隙。滑坡中部主平台区东侧前部发育鼓胀裂隙, 走向与滑动方向垂直, 规模较大, 裂隙前部滑体普遍鼓起 2 m 左右, 表现出前部滑体受后部滑体的强烈推挤而鼓起。滑坡东侧剪张裂隙发育, 道路、护坡被剪断; H1 次级滑坡东

侧边界一带剪张裂隙及后部拉张裂隙较为发育。滑坡东侧前缘剪出口向南突出, 伸入河谷区已开挖的场地内, 较西侧剪出口前移 30 m 左右, 滑坡剪出口一带连续鼓起 1 m 左右, 鼓胀裂隙和放射状裂隙普遍发育(图 7)。



图 7 滑坡东侧前缘鼓胀裂缝

Fig. 7 Front shear outlet and bulging cracks on the east side of landslide

通过现场调查和正射影像分析, 蓄水池滑坡的滑动具有一定差异性, 后缘部位的滑距较大, 一般水平滑距为 6~9 m, 下错 3~5 m; 前缘水平滑距多为 1~3 m, 东侧大部分拱起 1~2 m。H1 滑坡是前缘滑动相对剧烈的部位。

## 3 滑坡成因分析

静宁县田堡调蓄水池滑坡的成因包括内在的地质环境条件和外部引发因素两方面。老滑坡的存在是地质基础, 大规模的前缘开挖和大量而集中的降水共同引发了复活滑动。

### 3.1 老滑坡是本次滑坡的地质基础

静宁县是我省滑坡发育的县份之一, 据调查, 近东西向展布的席家河河谷北岸斜坡较陡, 坡度 20°~25°, 老滑坡较为发育。田堡调蓄水池北侧老滑坡发育, 其主要证据有斜坡区圈椅状滑坡地形明显、地形零乱(图 8), 前缘发育混杂的滑坡堆积体和滑动面, 并根据水库下游 200 m 席家河北岸 15 m 高的Ⅱ级阶地前缘堆积物中夹有混杂滑体(图 9), 可以确定老滑坡形成时代为早全新世。可见, 老滑坡三方面的特征要素齐全。老滑坡破

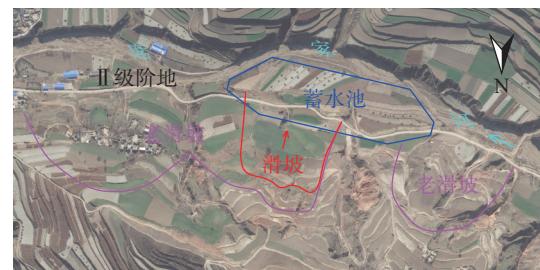


图 8 蓄水池北侧老滑坡影像图

Fig. 8 Aerial view of the old landslide on the north side of the reservoir

坏了斜坡地质结构和稳定性,其滑动面是后期进一步复活滑动的有利结构面。

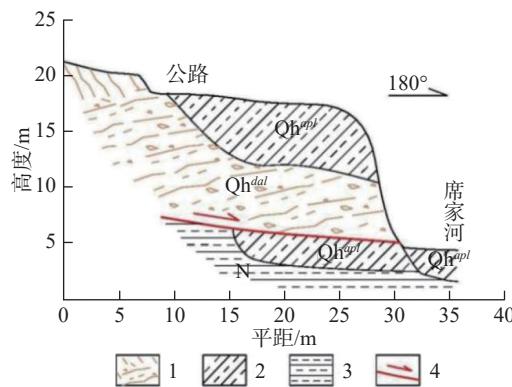


图 9 老滑坡前缘滑体与Ⅱ阶地关系图

Fig. 9 Relationship between the front sliding body of the old landslide and the second terrace

1—滑坡堆积; 2—粉质黏土; 3—泥岩; 4—滑动面

### 3.2 前缘工程开挖

由于席家河河谷狭窄,调蓄水池建设场地空间有

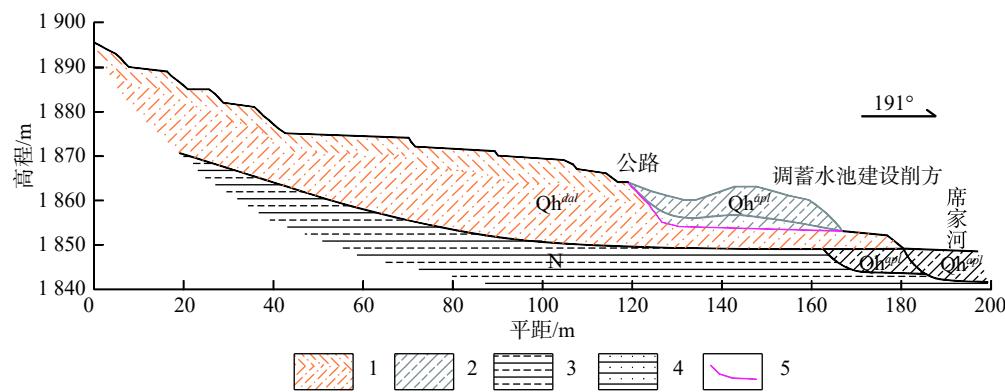


图 11 蓄水池工程开挖断面图

Fig. 11 Cross-sectional view of the excavation at reservoir project

1—滑坡堆积物; 2—粉质黏土; 3—泥岩; 4—砂岩; 5—原设调蓄水池计开挖线

### 3.3 降水的不利影响

根据气象资料,静宁县2018—2020年连续三年为丰水年,降水量分别达518.9 mm、578.9 mm和647 mm,为多年平均降水量的114.5%~142.7%。降水集中且多为暴雨形式,2018年7—9月降水量占全年的58.5%,每月的降水量均在100 mm以上。特别是2020年的降水更加集中在5、6、8三个月内,均在月平均降水量的一倍以上(图12)。6月份降水166.5 mm,其中6月25—26日降水达142.2 mm;8月份降水达188.8 mm。大量降水沿落水洞、裂隙下渗至坡体内,软化土体,导致调蓄水池工程施工过程中于9月18日老滑坡发生复活滑动。

### 3.4 滑坡破坏变形机制分析

由上述可知,蓄水池北侧老滑坡复活滑动的主要原

限,因此,工程建设主要对北侧老滑坡前部进行了大量开挖(图10)。开挖宽度50~60 m,平均深度8 m左右,即老滑坡前部每延米的平均开挖量约450 m<sup>3</sup>/m,总开挖量1.08×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>,占老滑坡总体积的15%左右(图11),大幅降低了老滑坡前部的抗滑能力和稳定性。就斜坡区坡脚开挖和坡顶加载相对而言,坡脚开挖更容易改变斜坡应力分布,降低斜坡稳定性和引发滑坡。因此,前部工程开挖是引发本次老滑坡复活滑动的主要原因。



图 10 蓄水池工程开挖老滑坡前缘

Fig. 10 Excavation of the front edge of the old landslide in the reservoir project

因是工程开挖降低滑体前部的抗滑力,很自然的认为该滑坡属于前部首先失稳滑动,再牵引后部滑动的牵引式

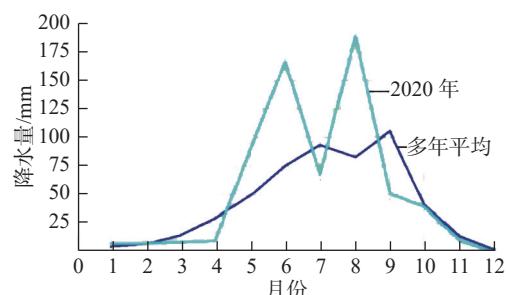


图 12 静宁县2020年与多年平均逐月降水量曲线图

Fig. 12 Curves of 2020 and multi-year average monthly precipitation in Jingning County

滑坡。但从滑坡后部的滑距明显较前部大、前缘拱起,且主平台区东侧前部鼓胀裂缝侧前部滑体普遍鼓起2m左右的实际情况,该滑坡表现出前部滑体受后部滑体的强烈推挤而鼓起的推移式滑动的性质和特点。

实际上,滑坡的滑动形式往往存在牵引式与推移式之间的相互转化。大规模工程开挖降低蓄水池北侧老滑坡前部的抗滑力,老滑坡前部产生蠕动变形,在后部滑体较薄和滑动面较陡的部位可能产生拉张裂缝和应力松弛,大量降水沿落水洞、裂缝渗入滑体,降低抗剪强度,由于后部滑动面较陡,后部滑体首先发生大规模滑动,又推挤前部滑体整体失稳。

## 4 滑坡稳定性分析

### 4.1 计算模型及计算方法

滑坡滑面形态属折线型,采用折线滑动法(简化Janbu 法)计算滑坡复活滑动后的稳定系数,计算软件为理正岩土工程计算分析软件。稳定性计算的工况条件分为3种:即:①一般条件(自重状态下);②降雨条件(滑体处于饱和状态下);③地震条件,本区地震动峰值加速度为0.20 g。选择滑动后滑坡中部主剖面进行稳

定性计算。

### 4.2 滑坡计算参数的选取

滑坡稳定性计算参数主要为滑体重度和滑动带(面)抗剪强度指标,采用土常规试验数据结合经验值反算取值,各参数取值见表1。

根据钻探资料,滑带黏土长期为饱和状态(软塑状态),地下水已浸没部分滑体,降雨工况下滑体重度采用饱和重度(极端状态下的全部饱和),抗剪强度指标与一般工况一致。

滑面抗剪强度参数的反算对滑坡稳定性分析具有直接的影响,根据调蓄水池前期勘查资料,选取坡脚开挖后滑坡滑动前的坡体断面,结合同类滑坡的勘查经验,给定稳定系数为1.02, c为10.4 kPa,计算 $\varphi$ 值,计算公式如下:

$$c = \frac{F \sum W_i \sin a_i - \tan \varphi \sum W_i \cos a_i}{L} \quad (1)$$

$$\varphi = \arctan \frac{F \sum W_i \sin a_i - cL}{\sum W_i \cos a_i} \quad (2)$$

经计算, $\varphi$ 值为11.25°。

表1 岩土力学参数取值表

Table 1 Value table of geotechnical mechanical parameters

| 滑体        | 物理参数                      |         |                    |                           |         |                    |                                |         |                    | 工况    |    |
|-----------|---------------------------|---------|--------------------|---------------------------|---------|--------------------|--------------------------------|---------|--------------------|-------|----|
|           | 实验值                       |         |                    | 经验反算值                     |         |                    | 稳定性计算取值                        |         |                    |       |    |
|           | $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$ | $c/kPa$ | $\varphi/(^\circ)$ | $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$ | $c/kPa$ | $\varphi/(^\circ)$ | $\gamma_{sr}/(kN\cdot m^{-3})$ | $c/kPa$ | $\varphi/(^\circ)$ |       |    |
| 滑坡<br>主剖面 | 滑体土                       | 19.62   | —                  | —                         | 20.0    | —                  | —                              | 20.0    | —                  | —     | 一般 |
|           | 滑带土                       | 20.49   | —                  | —                         | 21.0    | —                  | —                              | 21.0    | —                  | —     | 降水 |
|           | 滑带土                       | —       | 12.7               | 13.06                     | —       | 10.4               | 11.25                          | —       | 10.4               | 11.25 | 一般 |
|           |                           | —       | 12.7               | 13.06                     | —       | 10.4               | 11.25                          | —       | 10.4               | 11.25 | 降水 |

### 4.3 滑坡稳定系数计算结果

采用理正岩土工程计算分析软件,添加有关计算参数(表1),得出了滑坡复活滑动后,滑体在一般、降雨、地震3种不同工况条件下的稳定系数(表2)。

表2 稳定性计算结果一览表  
Table 2 Summary of stability calculation results

| 类型            | 计算工况 | 稳定系数  | 稳定状态 |
|---------------|------|-------|------|
| 现状滑体<br>(主剖面) | 一般   | 1.040 | 欠稳定  |
|               | 降雨   | 1.030 | 欠稳定  |
|               | 地震   | 0.998 | 不稳定  |

从计算结果可以看出,现状滑体在一般条件下处于欠稳定状态,在降雨条件下处于欠稳定状态,在地震条件下处于不稳定状态。

### 4.4 计算参数验算

根据滑坡的变形发育过程可知,坡体在开挖坡脚之后,经过强降雨发生滑动,故在降雨条件下,开挖坡脚后的坡体为失稳状态,选取坡脚开挖后滑坡滑动前的坡体断面,将本次计算参数代入理正岩土工程计算分析软件计算坡体的稳定系数,便可验算参数的准确性。

经过计算,坡体坡脚开挖后,滑动前,在暴雨工况下,稳定系数为0.975。符合失稳滑动的实际情况,计算参数选取合理,为后续防治工程设计提供了基础。

## 5 结论

(1)滑坡形成条件主要为老滑坡地质基础、坡体前缘开挖、持续性强降雨三个方面,即老滑坡在坡脚开挖后经过强降雨从而发生复活滑动。

(2) 使用折线滑动法计算了一般、暴雨、地震三种工况滑坡的安全系数。得出滑体在一般条件下处于欠稳定状态, 在暴雨条件下处于欠稳定状态, 在地震条件下处于不稳定状态。

(3) 田堡调蓄水池老滑坡复活滑动造成严重损失的经验教训说明, 山区工程场地选址和勘查要重视老滑坡等地质灾害的调查判别, 深入分析研究工程活动可能引起的复活滑动和对工程的危害, 以保证工程的顺利建设和安全运营。

### 参考文献(References):

- [1] 吴玮江, 宋丙辉, 刘迪, 等. 黄土塬区包气带水分运移特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 12–22. [ WU Weijiang, SONG Binghui, LIU Di, et al. Research on the characteristics of water transport in the aeration zone of loess tableland [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 12–22. (in Chinese with English abstract) ]
- [2] 郭富赟, 张龙生, 王信, 等. 甘肃黑方台罗家坡滑坡演化过程及运动机制分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 11–20. [ GUO Fuyun, ZHANG Longsheng, WANG Xin, et al. Analysis on evolution process and movement mechanism of the Luojiapo landslide in Heifangtai, Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 11–20. (in Chinese with English abstract) ]
- [3] DERBYSHIRE E, MENG Xingmin, DIJKSTRA A T A. Landslides in the thick loess terrain of North-west China [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.
- [4] 彭建兵, 吴迪, 段钊, 等. 典型人类工程活动诱发黄土滑坡灾害特征与致灾机理 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 971–980. [ PENG Jianbing, WU Di, DUAN Zhao, et al. Disaster characteristics and destructive mechanism of typical loess landslide cases triggered by human engineering activities [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 971–980. (in Chinese with English abstract) ]
- [5] 彭建兵, 王启耀, 门玉明. 黄土高原滑坡灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 2019. [ PENG Jianbing, WANG Qiyao, MEN Yuming. Landslide disaster in loess plateau [M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese) ]
- [6] 彭建兵, 王启耀, 庄建琦, 等. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制 [J]. 地质力学学报, 2020, 26(5): 714–730. [ PENG Jianbing, WANG Qiyao, ZHUANG Jianqi, et al. Dynamic mechanism of landslide disaster formation in loess plateau [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 714–730. (in Chinese with English abstract) ]
- [7] 吴玮江, 王念秦. 甘肃滑坡灾害 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006. [ WU Weijiang, WANG Nianqin. Landslide hazards in Gansu [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006. (in Chinese with English abstract) ]
- [8] 吴玮江, 王国亚, 刘兴荣, 等. 甘肃舟曲县牙豁口滑坡发育特征与成因分析 [J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 544–554. [ WU Weijiang, WANG Guoya, LIU Xingrong, et al. The development characteristics and causes of the Yahuokou landslide in Zhouqu County, Gansu Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 544–554. (in Chinese) ]
- [9] 冉林, 马鹏辉, 彭建兵, 等. 甘肃黑方台“10·5”黄土滑坡启动及运动特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 1–9. [ RAN Lin, MA Penghui, PENG Jianbing, et al. The initiation and motion characteristics of the “10·5” loess landslide in the Heifangtai platform, Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 1–9. (in Chinese with English abstract) ]
- [10] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究 [J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530–540. [ ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530–540. (in Chinese with English abstract) ]
- [11] 张茂省, 胡炜, 孙萍萍, 等. 黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望 [J]. 地球环境学报, 2016, 7(4): 323–334. [ ZHANG Maosheng, HU Wei, SUN Pingping, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides [J]. Journal of Earth Environment, 2016, 7(4): 323–334. (in Chinese with English abstract) ]
- [12] 刘琨. 降雨影响下黄土斜坡的地震失稳机制及其稳定性评价 [D]. 兰州: 兰州大学, 30–51. [ LIU Kun. Earthquake instability mechanism and stability evaluation of loess slope under the influence of rainfall [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 30–51. (in Chinese with English abstract) ]
- [13] 李同录, 李颖喆, 赵丹旗, 等. 对水致黄土斜坡破坏模式及稳定性分析原则的思考 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 25–32. [ LI Tonglu, LI Yingzhe, ZHAO Danqi, et al. Thoughts on modes of loess slope failure triggered by water infiltration and the principals for stability analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 25–32. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 王兰民, 蒲小武, 陈金昌. 黄土高原地震诱发滑坡分布特征与灾害风险 [J]. 城市与减灾, 2019(3): 33–40. [ WANG Lanmin, PU Xiaowu, CHEN Jinchang. Distribution characteristics and disaster risk of earthquake-induced landslides in loess plateau [J]. City and Disaster Reduction, 2019(3): 33–40. (in Chinese with English abstract) ]