

# 四川九龙县溪谷输变电工程 场地稳定性的岩体力学分析

曹广鹏, 李渝生, 鲍杰

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

**摘要:** 溪谷输变电工程场地具有较复杂的双层地质结构, 岩土体拉分变形明显。场地后缘及底部岩土体的主应力和剪应力集中明显, 堆积体内部岩体处于拉分松弛状态, 岩土体的潜在变形模式以蠕滑-拉裂为主。在水库蓄水与地震共同作用的极限工况下, 场地处于潜在不稳定状态。

**关键词:** 应力集中; 拉分松弛; 蠕滑-拉裂; 极限工况

**中图分类号:** P642; TU452 **文献标识码:** A

## 1 引言

四川省九龙县溪谷输变电工程区位于九龙复式向斜南西翼, 场地地貌单元为九龙河右岸——华丘古滑坡南东部边缘堆积台地。地形受滑坡堆积控制, 圈谷-凹陷、台地、鼓丘及前缘陡坡等滑坡地貌特征较为明显(图1)。场地地形较为开阔, 地面起伏不平, 前缘为九龙河岸陡坡。下游九龙溪谷电站水库蓄水及区域地震活动对场地的稳定性影响很大。

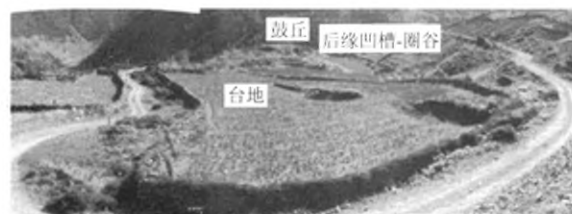


图1 场地地貌全景

Fig. 1 Panoramic geomorphology of the site

## 2 场地的地质结构及变形特征

### 2.1 场地的地质结构特征

场地为华丘巨型古滑坡体南东部边缘次级滑移堆积体, 具有双层地质结构(图2)。上部为土石堆积结构, 场地主体的中、后部主要由变质砂岩块石构

成, 总体处于稍密-松散状态, 可见架空结构现象。场地前部(东部前缘)主要为块碎石、角砾, 岩屑夹少量块石堆积, 处于稍密-中密状态; 下部由三叠系上统侏倭组( $T_3zh$ )变质砂岩、板岩及千枚岩构成的岩石基座。基岩顶面起伏较大, 中段高出现代河床约25 m, 南、北两段逐渐降低。



图2 场地的双层地质结构

Fig. 2 Double-layer geological structure of the site

### 2.2 场地岩土体的变形特征

场地内部的变形现象极为明显, 其发育形式各部位有所不同(图3)。

场地西部堆积体后缘, 典型的变形现象是由一系列凹槽及塌陷组成的圈谷拉分结构(图3)。其中有些新近形成的塌陷坑, 显示场地后缘近期处于持续缓慢的拉分变形状态。

场地中部典型的变形现象是槽状次级拉分结构(图3)。其形态经改造而不甚清晰, 变形时代相对较早。这是典型的块体滑移差异性的产物<sup>[1]</sup>。

场地东部堆积体前缘陡坡地段的局部崩塌现象

十分清楚。目前每年雨季,小型塌滑时有发生。

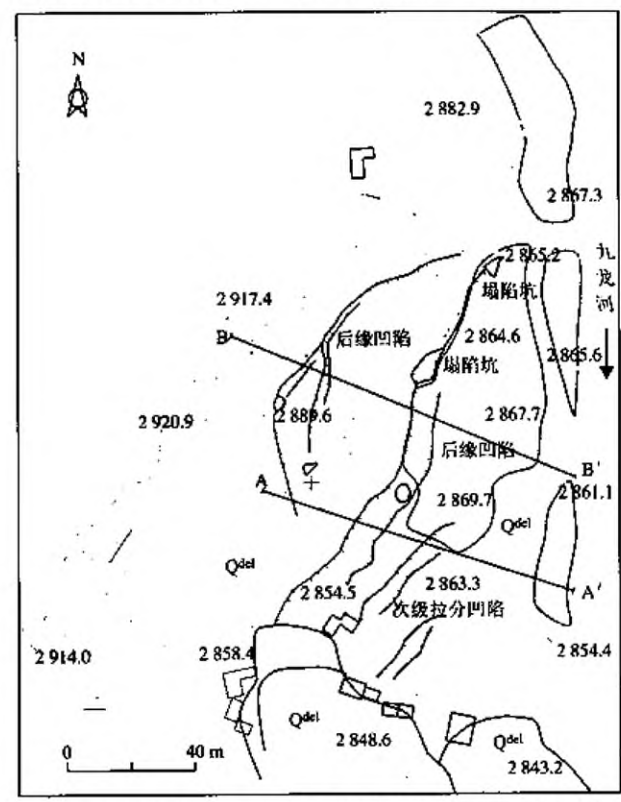


图 3 场地工程地质图(Q<sup>del</sup>:古滑坡堆积体;A-A'剖面线)  
Fig. 3 Engineering geology of the site(Q<sup>del</sup>:old landslide communication body;A-A'-section line)

### 3 场地岩土体应力-形变特征有限元数值分析

在充分考虑场地岩土体地质结构的基础上,按 A-A'主剖面(图 3)建立有限元数值计算模型<sup>[2]</sup>(图 4)。模型介质的物理力学参数按表 1 所列指标取值<sup>[3]</sup>,地震峰值加速度 0.15g。

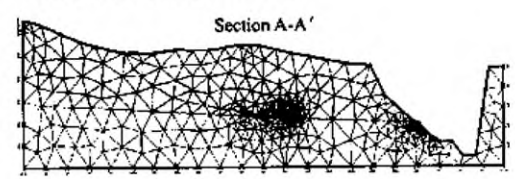


图 4 有限元数值计算模型  
Fig. 4 Finite element numerical calculation model

#### 3.1 场地岩土体的应力分布特征

##### (1) 主应力矢量

岩体主应力矢量总体上缓倾坡外。沿底部及场地后缘潜在在滑移控制面附近,最大主应力作用方向与结构面交角较小。这种应力分布状况反映出,主应力矢量明显受结构面倾角及潜在的滑移形式控制<sup>[1]</sup>。水库蓄水及地震作用等极端工况下,主应力矢量无明显变化(图 5)。

表 1 有限元数值计算模型介质参数

Table 1 Medium parameters of the finite element numerical calculation model

岩土类型	指标	容重 /g·cm <sup>-3</sup>	抗剪指标		E /MPa	$\mu$	法向刚度 /MPa·m <sup>-1</sup>	切向刚度 /MPa·m <sup>-1</sup>
			C/MPa	$\varphi/^{\circ}$				
碎石土		2.3	0.15	35	10	0.35	—	—
潜在滑移面		—	0.015	—	—	—	7 000	18 000

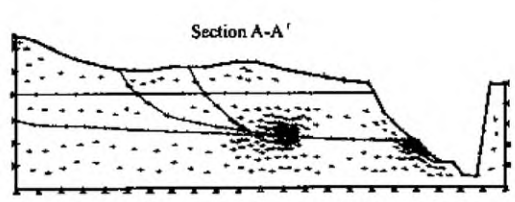


图 5 极限工况(地震+水库蓄水)主应力矢量分布特征  
Fig. 5 Distribution of principal stress vectors in the extreme conditions(seism & reservoir storage)

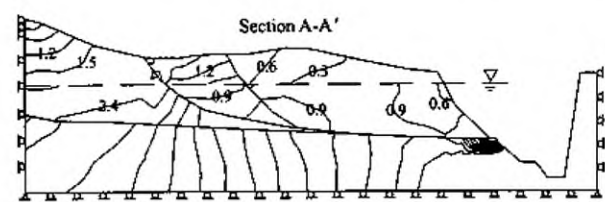


图 6 极限工况(地震+水库蓄水)最大主应力  $\sigma_1$  (MPa) 分布特征  
Fig. 6 Distribution of max principal stresses (MPa) in the extreme conditions (seism & reservoir storage)

##### (2) 主应力分布特征

最大主应力  $\sigma_1$  分布无明显的应力集中现象,最小主应力  $\sigma_3$  处于低值拉张应力状态。在地震力与水库蓄水同时作用的极端工况下,岩体最大主应力  $\sigma_1$  分布及量值无明显变化,场地前缘出现明显的拉张应力分布(图 6)。

##### (3) 最大剪应力 $\tau_{max}$ 分布特征

最大剪应力  $\tau_{max}$  (MPa) 总体上处于低值状态,场地后缘凹陷部位和前缘陡坡下部基岩顶面附近,出现明显的应力集中现象;在地震力与水库蓄水同时作用的极端工况下,沿底部潜在滑移面(基岩顶面)最大剪应力  $\tau_{max}$  明显增高(图 7)。

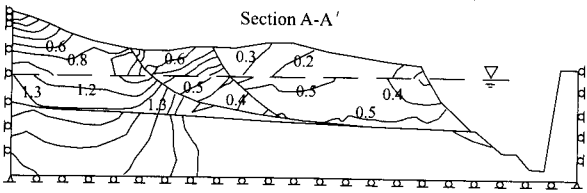


图7 极限工况(地震+水库蓄水)最大剪应力  $\tau_{max}$  (MPa)分布特征

Fig.7 Distribution of max shear stresses (MPa) in the extreme conditions (seism & reservoir storage)

3.2 场地岩土体的变性特征

场地后缘圈谷凹陷部位的垂向位移大于水平位移,前缘斜坡的水平位移大于垂向位移。场地岩土体的潜在变形模式以蠕滑-拉裂<sup>[5]</sup>为主。在地震力与水库蓄水同时作用的极端工况下,场地前缘的水平位移及后缘拉分凹陷部位的垂向位移变形将进一步加剧(图8)。

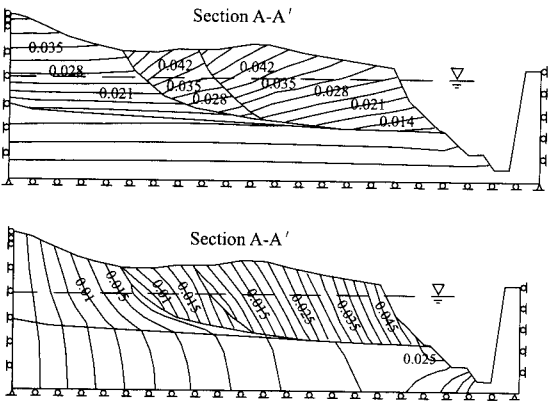


图8 极限工况(地震+水库蓄水)垂直(上)和水平(下)位移等值线

Fig.8 The vertical displacement isoline in the extreme conditions (seismic+reservoir storage)

4 场地稳定性极限平衡分析

根据场地岩体结构、变形破坏现象及岩体应力-应变作用模式机制等方面的实测调研及理论分析成果,建立 A-A' 剖面块体极限平衡计算模型(图9)。模型计算参数按表2取值<sup>[3]</sup>,地震加速度 0.15 g。

表2 极限平衡模型计算参数

Table 2 Calculation parameters of the limit equilibrium section

指标	重度 /kN·m <sup>-3</sup>	粘聚力 /kN·m <sup>-2</sup>	内摩擦角 /°
岩土类型			
堆积碎石土	23	0.15	35
潜在滑面	21	0.015	22

A-A'剖面计算成果分析:

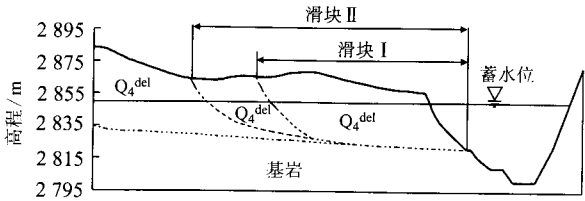


图9 极限平衡计算模型

Fig.9 The limit equilibrium calculation model

在天然状态、水库蓄水及地震力等3种工况条件下,场地中前部(块体I)及场地整体(块体II)均可保持其整体稳定性。但在水库蓄水同时叠加地震作用的极限工况下,处于潜在的不稳定状态(表3)。

表3 A-A'剖面极限平衡计算结果

Table 3 Limit equilibrium calculations of Section A-A'

A-A'剖面	计算方法	一般条分法	毕晓普法	简布法	M-P法
	工况条件				
滑块 I	天然工况	1.866	2.004	1.794	1.949
	水库蓄水	1.348	1.482	1.337	1.444
	地震	1.168	1.268	1.007	1.209
	蓄水+地震	0.833	0.927	0.790	0.885
滑块 II	天然工况	2.286	2.644	2.407	2.469
	水库蓄水	1.709	1.978	1.813	1.857
	地震	1.329	1.489	1.259	1.314
	蓄水+地震	0.984	1.105	0.938	0.979

5 结论

(1) 该场地具有双层地质结构,上部堆积体主要为块碎石、角砾、岩屑夹少量巨块石;下部为三叠系上统侏倭组变质砂岩、板岩及千枚岩构成的岩石基座。场地内部的变形现象极为明显,主要表现为后缘塌陷坑及拉分槽谷,中部槽状次级拉分,前缘陡坡局部崩塌。

(2) 场地岩土体主应力矢量整体缓倾坡外,场地北部主应力  $\sigma$  及场地整体剪应力  $\tau_{max}$  分布沿底部潜在滑移面出现较明显的应力集中现象,堆积体内部岩体则处于拉分松弛状态,水库蓄水将导致主应力分异现象进一步加剧。岩土体的潜在变形模式以蠕滑-拉裂形式为主,在水库蓄水与地震作用下变形将进一步加剧。

(3) 场地岩土体在天然状态、水库蓄水及地震力等3种工况条件下均可保持其整体稳定性,但在水库蓄水同时叠加地震作用的极限工况下,处于潜在的不稳定状态。

参考文献

[1] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1994.  
[2] 何满潮,黄润秋,等. 工程地质数值法[M]. 北京:科技出版社,



2006.

[3] 《工程地质手册》编辑委员会. 工程地质手册(第 4 版)[M]. 中国建筑出版社,2007.

[4] 詹军,于清扬. 有限元法在滑坡稳定性分析中的应用[J]. 煤田地质与勘探,2002,30(1):45-47.

[5] 晏鄂川,刘广润. 试论滑坡基本地质模型[J]. 工程地质学报,2004,12(1):21-24.

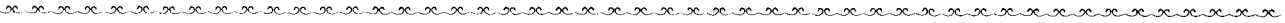
A ROCK-MECHANICAL STUDY ON  
THE STABILITY OF THE XIGU POWER TRANSMISSION STATION  
SITE IN JIULONG COUNTY, SICHUAN PROVINCE

Cao Guang-peng, Li Yu-sheng, Bao Jie  
(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of  
Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The station site has a complex double geological structure with evident pull-apart deformation. Its deformation model is a creep-fracture one, with an obvious concentration of principal and shear stress at the posterior edge of the site and the bottom of the rock-soil mass as well as the deposit body pull-apart and loose within it. The site will be unstable in the extreme conditions of reservoir storage and seism.

**Key words:** stress concentration; pull-apart and looseness; creep-fracture; extreme conditions

**作者简介:** 曹广鹏(1988—),男,安徽省砀山县人,2009 级硕士研究生,主要从事地质工程和岩土工程相关研究工作。



(上接第 45 页)

CHARACTERISTICS OF THE GROUND SUBSIDENCES  
IN BEIJING AND THEIR CAUSES

Bai Ling-yan, He Jing, Wang Ji-ming  
(Beijing Institute of Geological Survey, Beijing 100195, China)

**Abstract:** Ground subsidences have, increasingly, been threatening Beijing severely in recent years. Their environments and temporal-spatial distribution, as well as their causes, are discussed here. Furthermore, they are classified here into two types: mining and engineering. The former is mainly distributed in the Mentougou valley of West Mountain, with mining depth, ore-body dip-angle, rainfall and drainage as the main causes, while the latter is in the urban area, with pipeline leak-erosion, groundwater overexploitation, improper construction methods and artificial vibration as the main causes.

**Key words:** ground subsidence; distribution; cause; Beijing

**作者简介:** 白凌燕(1982—),女,工程师,硕士,主要从事城市地质、环境地质方面的工作。