

# 林达滑坡内部1#次级滑体稳定性研究

杨大学\*, 童柳华

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南  
Email: \*yt970529@qq.com

收稿日期: 2021年6月5日; 录用日期: 2021年7月8日; 发布日期: 2021年7月16日

## 摘要

林达滑坡的稳定性问题对其上游林达电站、下游乐安电站、乐安乡及尼古寺的安全至关重要。本文利用GeoStudio软件根据滑坡体地质模型, 构建典型剖面的渗流分析模型, 采用有限元GeoStudio渗流分析模块SEEP模拟渗流。运用SLOPE模块对林达滑坡进行稳定性刚体极限平衡分析。分析研究表名: 天然工况下, 林达滑坡主滑体内1#次级滑体处于稳定状态; 暴雨工况下, 主滑体内1#次级滑体处于基本稳定-稳定状态。本文的研究为今后林达滑坡的稳定性安全设计和评价提供了一定的参考依据。

## 关键词

滑坡稳定, GeoStudio, 极限平衡法, 降雨

# Study on Stability of 1# Secondary Sliding Body in the Interior of Linda Landslide

Daxue Yang\*, Liuhua Tong

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui  
Email: \*yt970529@qq.com

Received: Jun. 5<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jul. 8<sup>th</sup>, 2021; published: Jul. 16<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The stability of the Linda landslide is of great importance to the safety of the upstream Linda power station, the downstream Le'an power station, Le'an township and Nigu temple. In this paper, GeoStudio software is used to build the seepage analysis model of typical section according to the geological model of landslide body, and the finite element GeoStudio seepage analysis module

\*通讯作者。

SEEP is used to simulate seepage. The SLOPE module is used to analyze the rigid limit equilibrium of the Linda landslide stability. Table name of analysis and research: under natural working condition, No. 1 secondary sliding body in main sliding body of Linda landslide is in stable state; under the rainstorm condition, the #1 secondary sliding body in the main sliding body is in the basic stable-stable state. The research in this paper has provided a certain reference basis for the stability and safety design and evaluation of Linda landslide in the future.

## Keywords

Slope Stability, GeoStudio, Limit Equilibrium Method, Rainfall

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

中国的滑坡灾害十分频繁,我国土地总面积的65%以上是山地地形,到目前为止大约将近20%~25%的山地地形存在滑坡的威胁。近15年来,发生了许多摧毁性很严重的大型崩滑事件[1][2][3][4][5]。历年来发生的许多大型滑坡所造成的损害是难以估量的,如:因为受到地震能量的影响,在08年汶川地震过后出现了大量的滑坡案例。2010年的重庆武隆“6·5”特大滑坡灾害,以及发生在西藏昌都的较大规模山体滑坡。可见我国的滑坡灾害遍布全国各地而且破坏性比较大,已经严重影响到人们的生存与生活的方方面面,因此,对滑坡的综合治理来说关于滑坡的灾害提前预报显得更加重要。为此,本文针对我国滑坡的现状,对林达滑坡是否可能发生崩滑进行了系统的分析研究,来提高预测的准确性与可靠性,减少滑坡灾害所造成的各种损失,来保障人民的人生安全与财产安全以及我国地形地貌的完整性。

## 2. 研究现状与内容

初始阶段,对于滑坡治理的早就开始于上世纪二十年代欧洲的瑞典,并且由瑞典的学者彼得森首先提出后来被命名为瑞典条分法的研究方法。但在接下来的20年左右的时间里,世界各地对山体滑坡的研究都是基于瑞典条分法的研究,显得十分的局限与片面。由于瑞典条分法成立的基础是将研究对象视为刚体,并且在刚体的极限平衡的条件下成立。其相对比较出名的代表的研究方法还有瑞典条分[6]、简化毕肖普[7]、传递系数法[8]、简布法[9]、斯宾塞法[10]、Morgenstern-Price法[11]等。

初始发展阶段(20世纪50年代),滑坡体内部的相对结构面与构成滑坡体的土体与岩石的开始成为新的研究对象,随着理论研究的深入,出现了极限平衡理论和弹塑性理论,同时在边坡问题的具体实际上,对于极限平衡法的应用开始变得越来越成熟,不仅如此随着时间的发现也对此方法在不同问题的应用做了合适的完善[12][13][14][15]。因为影响滑坡的因素具有不确定性与随机性,从而对于滑坡的相对的评价方法也变得各不相同,存在不同角度与方式的方法,其中比较具有代表性的方法有神经网络法、模糊数学法和灰色理论法等等一系列相关的方法[16][17]。

深入发展阶段(20世纪60年代),这个阶段的改变就是利用极限平衡法为基础,去研究分析滑坡体内部关于结构面之间的稳定性分析。同时利用全新的计算机分析方法来计算滑坡体的安全稳定性系数,并且由此来确定滑坡体的相对稳定性。此外,John也提出了图解法。

具体研究内容包括以下四点: 1) 工程地质环境条件的研究; 2) 林达滑坡基本特征研究: 滑坡边界条件、物质组成、滑坡工程地质分区、变形分带特征、变形破坏现象、影响因素、成因与机理等, 进一步抽象出滑坡相关基本概念的地质力学相关模型, 并且依据相关的数据来对滑坡坡段的局部以及整体的稳定性进行判定。3) 接着通过一系列的物理实验来得出边坡体的相关物理力学参数, 并联系实际的工程类比更进一步的来探究确定话滑坡带相关岩土体物理参数取值; 4) 此次研究选取林达滑坡体内部 1#次级滑坡的典型坡面, 并且选用传统的极限平衡法来调查不同情况下的稳定性分析。

### 3. 研究区概况

雅砻江上游乐安梯级水电站库区位于四川省甘孜藏族自治州境内, 隶属于甘孜藏族自治州新龙县行政区。在县城及其周围的乐安乡、角多、大盖乡、次措等地人口分布密集。库区内交通较为便利, 整个库区沿江有省道 S217 通过, 大部分河段有通县乡道路, 部分河段沿江有国道及省道相通(图 1)。

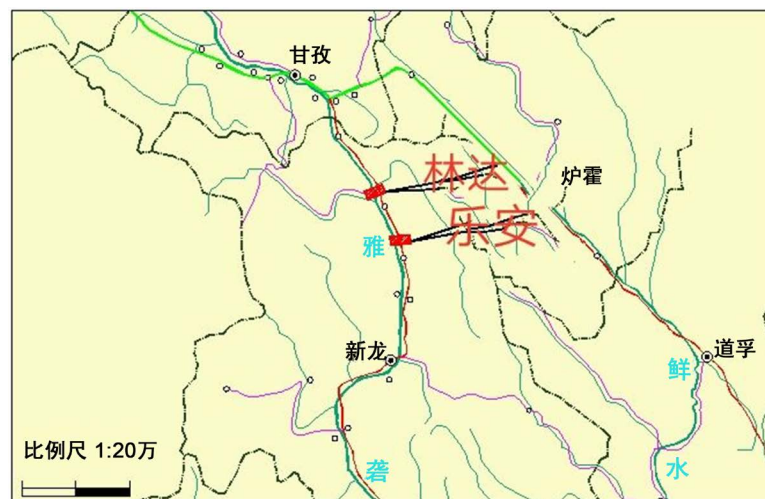


Figure 1. A sketch map of traffic location and administrative divisions  
图 1. 交通位置及行政区划简图

乐安水库河段地处于青藏高原东南部, 毗邻川西南高区, 其地势为呈现为北向南倾斜, 地貌区属于川西高原。地貌基本形态是具夷平面的大起伏高山, 山势海拔高程多在 3000 m 之上。河谷两岸为高达数百米至千米以上的陡峻岸坡, 库区属典型的高山峡谷型地貌(如图 2)。河谷呈现为“V”型峡谷, 谷坡坡度一般都超过 40°。

### 4. 滑坡基本特征及岩体力学参数

林达滑坡在乐安水电站库区右岸, 距离下坝址上游大概 5.5~6.7 km。雅砻江流向近 SN 向, 滑坡所在的江水水位约为 3142 m, 江面宽度约为 54 m, 滑坡堆积体总面积约为  $6 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。勘探结果表明, 滑坡体分布总体呈前缘薄, 中后部厚的形态, 前缘平均厚度约为 15 m, 中后部相对较厚, 平均厚度约为 75 m, 估计总体积为  $3390 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡堆积体后缘高程约为 3770 m, 前缘直抵河床, 高程约为 3141 m, 相对高差约为 630 m(如图 3、图 4)。

滑坡在平面上呈锥形, 两侧以冲沟为界, 后缘发育有明显的下错台坎, 此外还出露有约 10 m 高的基岩陡壁, 前缘直抵河床。堆积体整体坡度较陡, 且前缘比坡体后部要陡。根据地表调查及地质勘探成果, 林达滑坡目前内部有四处局部次级滑体, 从下游至上游, 依次为: 1#次级滑体、2#次级滑体和 3#次级滑体, 主滑动物体位于滑坡体的中后部。



Figure 2. Typical alpine and valley landforms in the reservoir area  
图 2. 库区典型高山峡谷型地貌

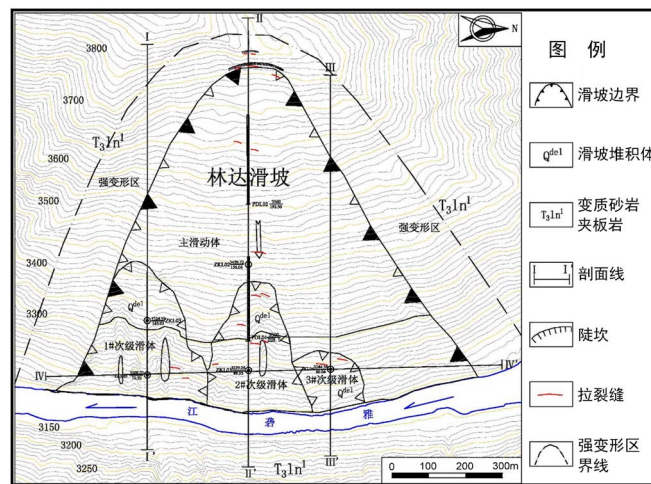


Figure 3. Linda landslide engineering geological plan  
图 3. 林达滑坡工程地质平面图

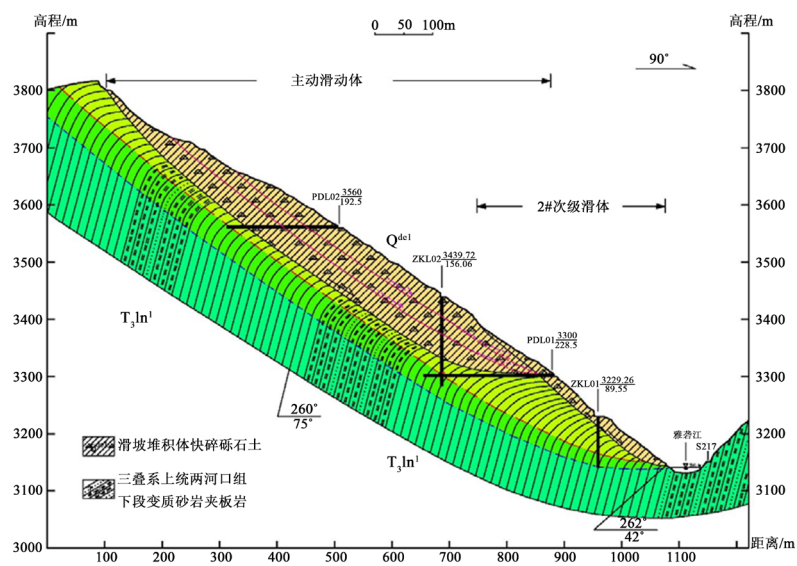


Figure 4. Section II-II of Linda landslide  
图 4. 林达滑坡 II-II 剖面图

滑坡渗流模拟、变形破坏及稳定性分析中, 选择合理的岩土物理力学参数非常重要。目前确定滑带土抗剪强度参数(C、 $\Phi$ )有工程类比、实验法和反演分析三种。此案例根据物理力学性质试验成果, 结合工程类比, 深入研究滑坡体各分带岩土体的参数取值。计算参数主要为滑体重度、滑带土的抗剪强度等, 结合类比分析确定其值。分析计算参数取值汇总, 见表 1。

**Table 1.** Seepage analysis of Linda landslide and summary table of numerical model parameter values  
**表 1.** 林达滑坡渗流分析、数值模型参数取值汇总表

部位	参数	天然重度 (KN/m <sup>3</sup> )	内聚力 (KPa)	内摩擦 角(°)	弹性模量 (Mpa)	泊松比	饱和体积含 水率	饱和渗透系数 (m/d)
主滑体	主滑体 1#次 级滑体	21	60	32.5	1000	0.31	0.38	2.5
	主滑体	23	120	36	4000	0.30	0.38	2.5
	主滑面	23	70	34	2500	0.30	0.38	2.5
滑床	强变形区	26	200	38	8000	0.28	0.17	0.25
	弱变形区	26.5	300	42	15000	0.27	0.13	0.15
	正常岩体	27	380	44	20000	0.26	0.08	0.05

## 5. 基于 GeoStudio 的软件模拟

### 5.1. 渗流场数值模拟的理论原理

SEEP/W 模块以达西定律为基本原理, 法国水利学家达西(H. Darcy)于 1856 年研究水通过均匀砂柱孔隙的渗流实验, 提出了线性渗透定律, 就是著名的达西定律[18]。其可用公式表述为:

$$Q = K_s \frac{\Delta H}{\Delta L}$$

$Q$  是单位体积流量,  $\Delta H$  为水头差,  $\Delta H/\Delta L$  为水力梯度,  $K_s$  为饱和渗透系数。

采用有限元 GeoStudio 渗流分析模块 SEEP 来计算林达滑坡在库水位波动以及降雨作用下, 其变形发展过程及其稳定性。采用饱和 - 非饱和渗流理论计算林达滑坡地下水渗流场的动态变化过程。二维饱和 - 非饱和渗流微分方程可由 Darcy 定律和质量守恒定律联合推导得出, 当采用水头  $h$  作为控制方程的因变量时, 渗流微分方程可以写成如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + Q = m_w r_w \frac{\partial h}{\partial t}$$

$K_x$ ,  $K_y$  分别为水平和垂直方向的饱和渗透系数;  $h$  为总水头;  $Q$  为施加的边界流量;  $m_w$  为比水容积;  $r_w$  为水的重度。

### 5.2. 滑坡稳定性计算的理论原理

SLOPE/W 模块以极限平衡法为原理, 主要针对岩土体边坡稳定性、边坡开挖、地震荷载等问题进行分析。除此之外 SLOPE/W 还可以用来对边坡添加锚索、织物、土钉、抗滑桩用以提高边坡的稳定性。极限平衡理论方法在前文已经详细介绍这里不再赘述。

### 5.3. 地质模型的建立

根据以上研究结果, 明确了主滑坡对整个滑坡起着控制作用。因此选取滑坡体的主滑剖面“II-II”建立数值计算模型(图 5)。该滑坡地质模型可分为 7 层, 主滑坡体、正常岩体、弱变形区、强变形区、滑坡

体内部 1#次级滑体、滑坡体内部 2#次级滑体和 2#次级滑体。由于该软件内置边界默认为不透水边界, 并且林达滑坡的左、右两侧边界可以按照不透水边界来进行渗流计算, 故将其 II-II 坡面设为基本滑动面。依据区域水文地质资料及勘探成果, 设定滑坡后缘水位高程为 3300 m, 为定水头边界。对林达滑坡的稳定性计算按照正常水位和暴雨两种工况进行计算:

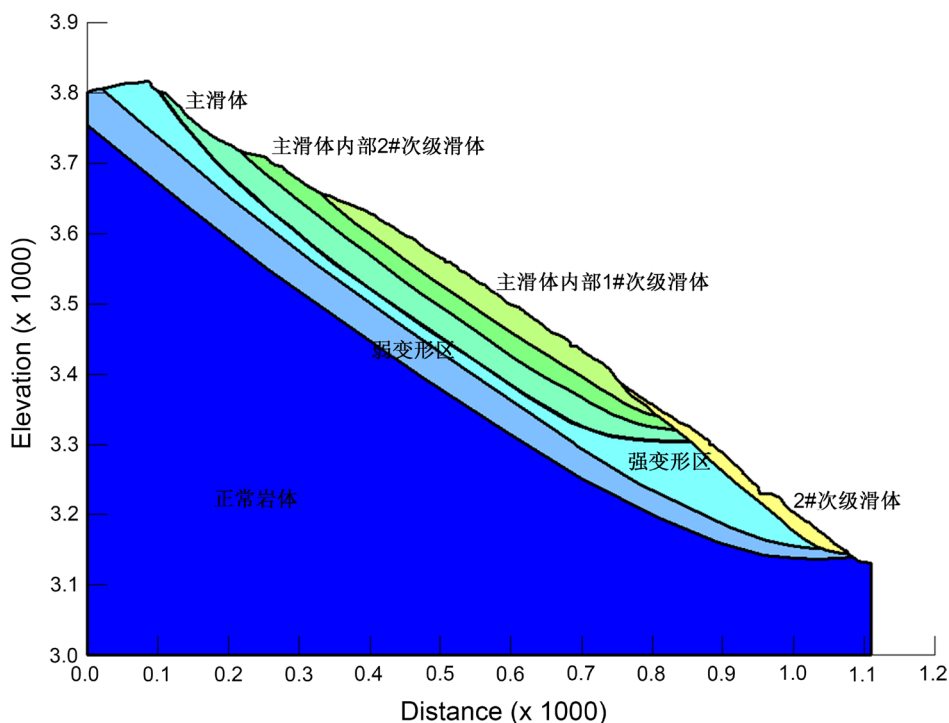


Figure 5. Sectional view of the section seepage model  
图 5. 剖面渗流模型剖面图

在进行渗流场计算时, 左、右两侧边界设为不透水边界, 坡面按照水位变化设为动水头边界。依据区域水文地质资料及勘探成果, 设定滑坡后缘水位高程为 3290 m, 为定水头边界, 不随库水位涨落而发生改变。通过上述模型, 采用 SEEP 渗流分析模块, 以 1 d 为时步间隔, 计算获取林达滑坡在库水位升降过程中的动态地下水渗流场。考虑到主滑体内部次级滑体分两种情况, 但由于主滑体不受蓄水水位的影响, 故选取情况 1 的模型进行分析。

#### 5.4. 模拟工况的选取

为研究林达滑坡在水库调度过程中的地下水动态渗流过程, 以勘察期库水位 3141 m 为初始水位, 从研究的目的出发, 分别考虑以下 2 种工况条件进行分析计算:

工况一: 天然状态滑体自重

工况二: 天然状态滑体自重 + 暴雨

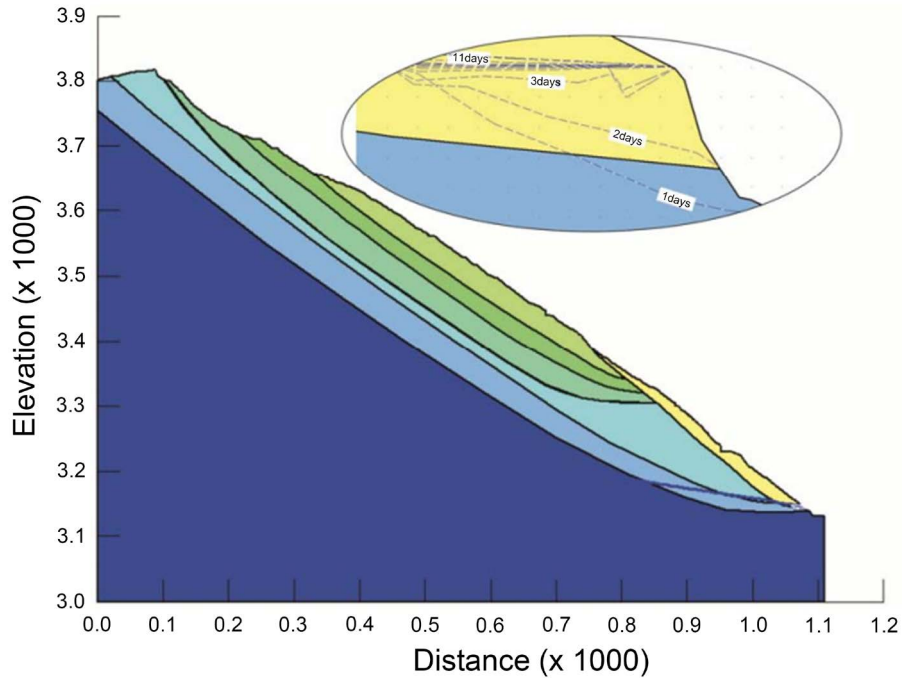
其中暴雨按 50 mm/d 的降雨强度考虑。

#### 5.5. 计算结果及稳定性评价

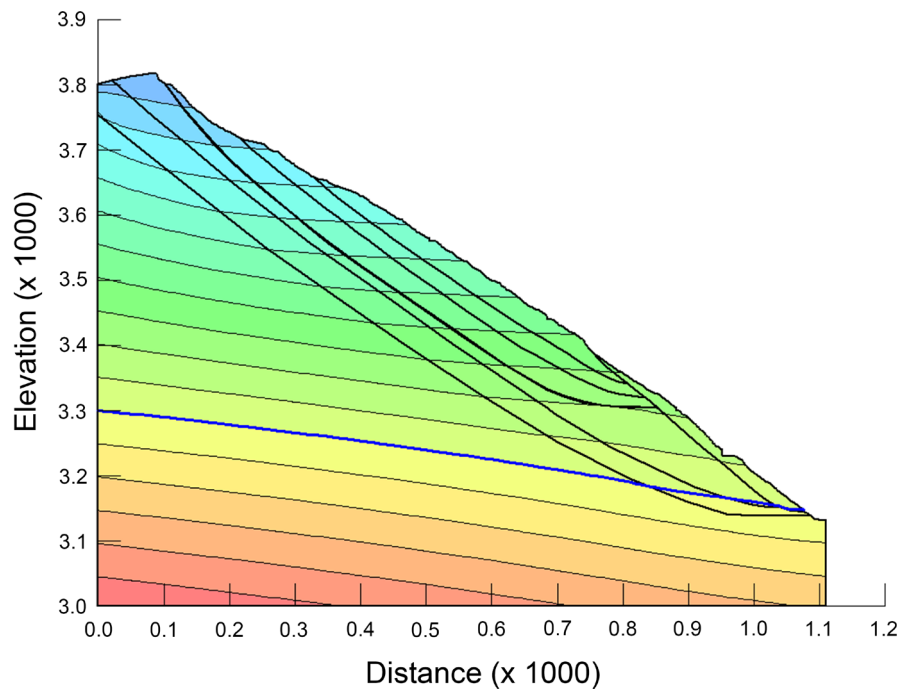
##### 渗流场结果与分析

根据图 6~9, 在降雨作用下, 林达滑坡的地下水渗流场有较为明显的变化, 且变化主要集中在滑体表

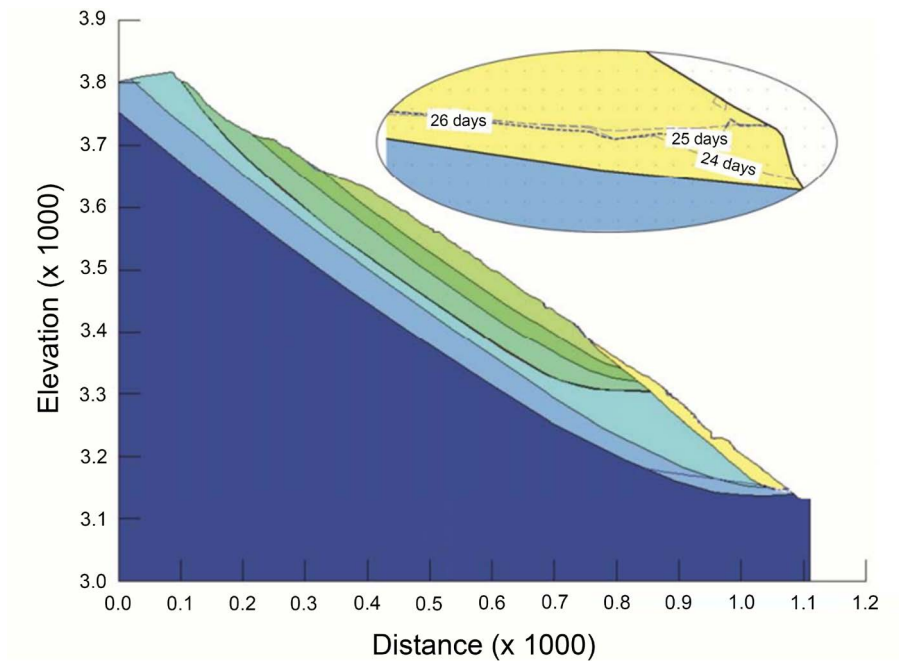
层。当库水位从 3145 升至 3148 并伴随 50 mm/d 的强度降雨时, 前缘次级滑体浸润线以内凹型并有一定程度的抬升, 抬升速度大于无降雨条件。由此可见, 降雨对林达滑坡的地下水渗流场有一定的影响, 且主要集中在改为前缘次级滑体的前缘。在较大的动水、静水压力作用下, 对前缘次级滑体的稳定性有一定影响。



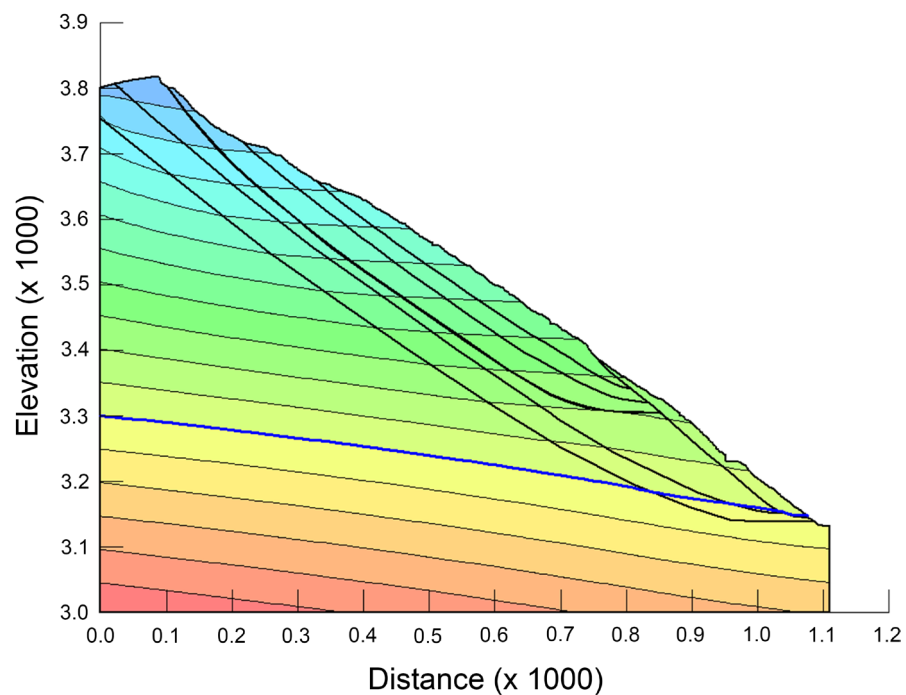
**Figure 6.** Transient change of groundwater level in working condition I of section II-II  
**图 6.** II-II 剖面工况一地下水水位瞬态变化图



**Figure 7.** Contour map of pore water pressure in working condition I of section II-II  
**图 7.** II-II 剖面工况一空隙水压力等值线图



**Figure 8.** Transient change of groundwater level in section II-II condition 2  
**图 8.** II-II 剖面工况二地下水位瞬态变化图



**Figure 9.** Contour map of pore water pressure under section II-II condition 2  
**图 9.** II-II 剖面工况二空隙水压力等值线图

### 5.6. 滑坡稳定性分析

目前最常用的 Bishop 法和 Janbu 法, 均只考虑了条间法向力, 而忽略了条间切向力, 且 Janbu 法仅能满足水平向的法向力平衡, 而不能满足力矩平衡[19]; 而 Morgenstern-Price 法(简称 M-P 法)不仅考虑了



条间正应力, 还考虑了条间剪应力, 且同时满足力平衡与力矩平衡[20]。本文将分别论述它们的计算结果并加以比较。

### 5.6.1. 计算原理及公式

根据勘察资料和前人研究的结论, 综合确定林达滑坡的滑动面为折线型, 所以选择传递系数法[21]对滑坡稳定性进行计算, 稳定性系数  $K$  计算公式如下:

$$K = \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \left[ R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right] + R_n \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \left[ T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right] + T_n \right\}$$

其中:  $R_n = [W_n ((1 - r_u) \cos \alpha_n) - R_{Dn}] \tan \psi_n + C_n L_n$

$$T_n = W_n (\sin \alpha_n + A \cos \alpha_n) - T_{Dn}$$

式中:

$\psi_j$  是第  $i$  块段的剩余下滑力传递至第  $i + 1$  块段时的传递系数( $j = i$ ), 即

$$\psi_j = \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \tan \psi_{i+1}$$

$r_u$ ——孔隙压力比, 可表示为:

$$r_u \approx \frac{\text{滑坡水下面积}}{\text{滑坡总面积} * 2}$$

### 5.6.2. 计算剖面的选取

为了对滑坡稳定性进一步分析求证, 综合分析该滑坡自有特点, 采用传递系数法对林达滑坡进行稳定性计算, 选取滑坡变形区内包含 1#次级滑体和主滑动体的 II-II (详见图 3, 滑坡工程地质平面图), 建立其计算模型(如图 10)采用局部搜索法和指定滑面法, 计算 1#次级滑体的稳定性。

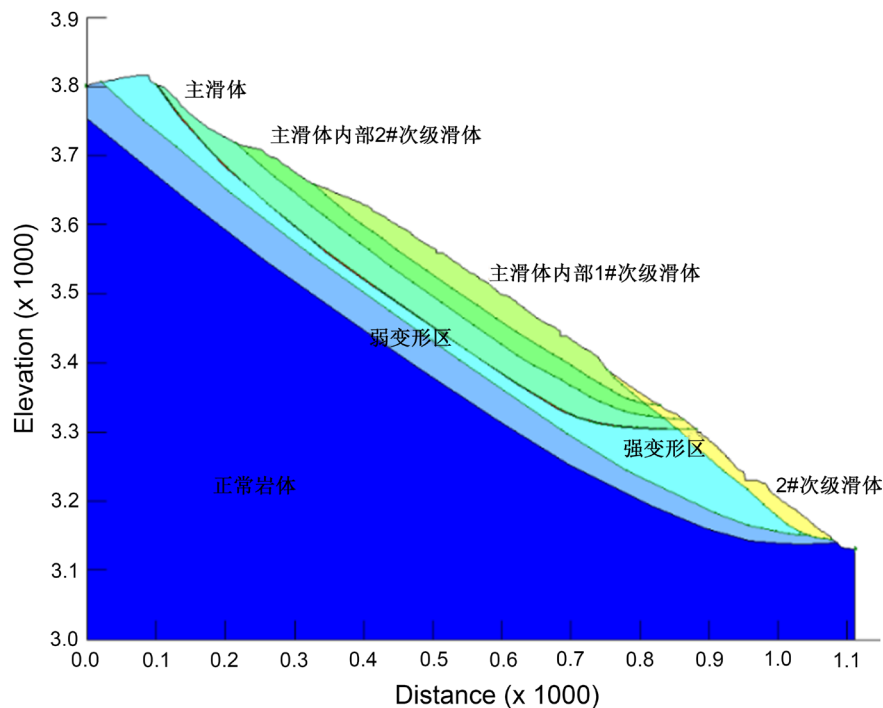


Figure 10. II-II section calculation model

图 10. II-II 剖面计算模型

### 5.6.3. 计算工况的类别

考虑到滑坡体在实际土层中含有碎石、受到地下水、大气降水下渗等因素的影响故采用以下二种工况进行计算, 并以暴雨状态下的稳定性计算结果为稳定性评价的首要考虑结果(如表 2)。

**Table 2.** Summary of working conditions for landslide stability calculation  
**表 2.** 滑坡稳定性计算工况汇总表

工况编号	计算工况
工况一	天然工况
工况二	暴雨工况

### 5.6.4. 计算参数及计算条件

综合考虑野外钻探、地质分析及室内岩土测试结果, 结合经验确定。根据滑面形态、含水性差异、滑面物质组成及滑面粗糙程度, 取值略有差异。该滑坡计算参数具体取值如下表 3。

**Table 3.** Landslide parameter table  
**表 3.** 滑坡参数表

项目	重度 $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )		粘聚力 C (kPa)		内摩擦角 $\Phi$ (°)	
	天然状态	暴雨状态	天然状态	暴雨状态	天然状态	暴雨状态
主滑体 1#次级滑体	21	21.8	60	56	32.5	32.1
滑带土	23	23.8	70	66	34	31
滑床	27	27.8	380	376	44	42.1

### 5.6.5. 滑坡稳定性计算及综合评价

采用传递系数法对滑坡稳定性进行分析, 利用上述确定的岩土体参数, 选取了林达滑坡 II-II 剖面作为计算剖面, 分别计算各剖面在天然工况、暴雨情况下的稳定系数, 判断滑体所处的状态。本文根据《水电水利工程边坡工程地质勘察技术规程》(DL/T5337-2006)滑坡稳定状态划分标准, 对滑坡各典型剖面的稳定性状况进行评价(如表 4)。

**Table 4.** Landslide stability evaluation standard  
**表 4.** 滑坡稳定性评价标准

滑坡稳定性系数	$F_s < 1.00$	$1.00 < F_s < 1.05$	$1.05 < F_s < 1.15$	$F_s > 1.15$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

如图 11, 其他天然工况方法下的稳定性分析以此类推, 这里不一一放图, 具体结果见后表。

由表 5 可知, 内部 1#次级滑体在 II-II 剖面上稳定性系数均大于 1.15, 所以天然工况下内部 1#次级滑体处于稳定状态。

如图 12, 其他暴雨工况方法下的稳定性分析以此类推, 这里不一一放图, 具体结果见后表。

由表 6 可知, 内部 1#次级滑体在 II-II 剖面上的稳定性系数分别为 1.05、1.06、1.06、1.07, 处于基本稳定 - 稳定状态。

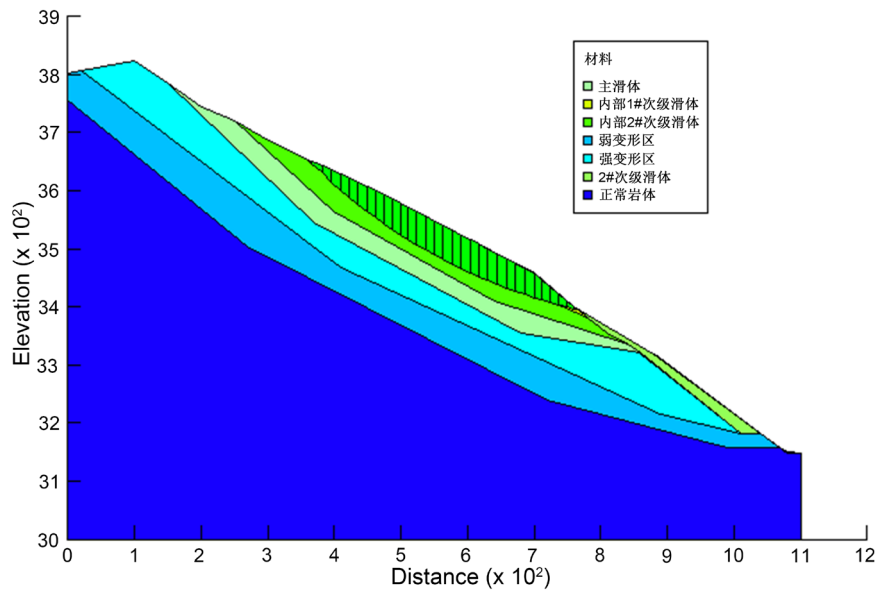


Figure 11. Morgenstern-Price method for stability analysis under natural conditions  
 图 11. 天然工况下稳定性分析 Morgenstern-Price 方法

Table 5. Natural working condition 1# secondary sliding body stability calculation results

表 5. 天然工况 1#次级滑体稳定性计算结果

	计算方法	II-II 剖面
主滑动体 1#次级滑体	Morgenstern	1.23
	Janbu	1.22
	Bishop	1.18
	Ordinary	1.20

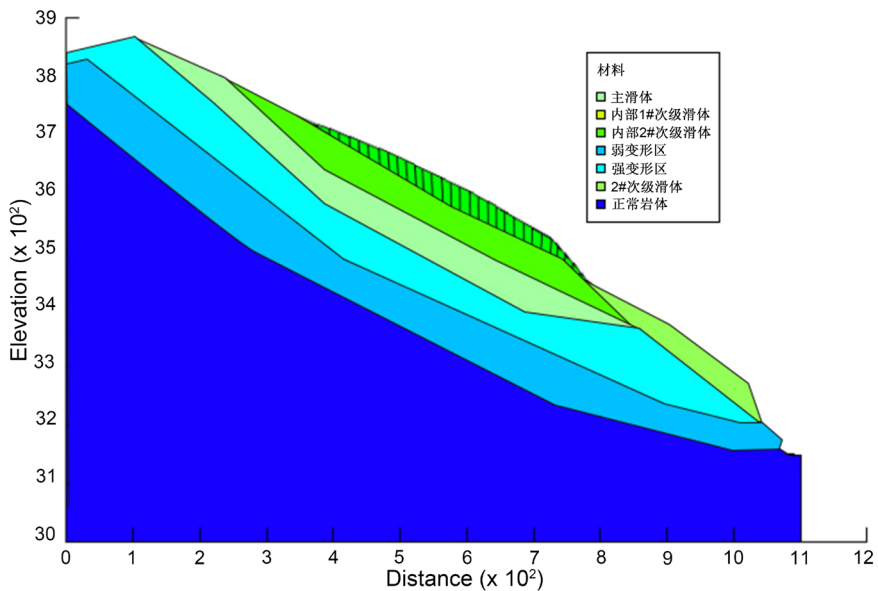


Figure 12. Morgenstern-Price method of stability analysis under heavy rain conditions  
 图 12. 暴雨工况下稳定性分析 Morgenstern-Price 方法

**Table 6.** The calculation results of the stability of the secondary sliding body in the rainstorm condition 1#  
**表 6.** 暴雨工况 1#次级滑体稳定性计算结果

	计算方法	II-II 剖面
主滑动体 1#次级滑体	Morgenstern	1.05
	Janbu	1.06
	Bishop	1.06
	Ordinary	1.07

## 6. 结论与建议

### 6.1. 结论

本论文通过对林达滑坡的背景资料分析,分析了林达滑坡的形成机制,并对滑坡稳定性进行了评价,在建立模型的基础上又深入研究了滑坡渗流场稳定性变化的过程。本文取得如下结论:

1) 根据野外地质勘探及调查综合分析,导致林达滑坡可能滑动的原因是水文因素、地质因素共同影响的。水文因素方面:林达滑坡水位线最高达到 3154 m,降雨是滑坡滑动的主要水文因素也是重要诱发因素。此外,滑坡区地下水位埋深较浅也可能诱发滑坡发生。地质因素方面:乐安水电站水库区所处大地构造位置属特提斯-喜马拉雅造山系东缘的松潘-甘孜造山带核心部位,该地区地层受构造活动作用完整性较差,地形复杂。

2) 滑坡稳定性系数跟降雨强度有很大关系,滑坡发生蠕动失稳的主要原因是,入渗的雨水导致地下水位线上升,滑动的抗剪强度大大降低。在年均降雨强度下,滑坡中水场变化不大,在遇到强暴雨情况下,水势场有明显的变化。

3) 林达滑坡主滑体 1#次级滑体在暴雨状况下处于基本稳定-稳定状态。在遇到极端暴雨天气或者持续暴雨情况下,滑坡有发生滑动的可能,滑坡急需治理;在天然状况下处于稳定状态,不用担心其滑坡隐患。

### 6.2. 建议

1) 本文在确定滑带土的抗剪强度参数时选择的是工程类比法,主观性很强。所以建议根据滑坡的宏观变形状况先假设滑坡的滑动面范围以及稳定性系数,反算滑带土抗剪强度参数,然后与工程类比所得的相比较再综合确定其取值。

2) 乐安水电站水库区气候湿润,雨水充沛且暴雨不在少数。因此为了减少自然因素对滑坡的影响,可以采取一些相应保护措施如:设置截排水沟、排水盲沟,防止地表水、地下水流入滑体内。

3) GeoStudio 软件只能计算二维模型,不能很好的刻画渗流场、应力场以及应力突变在空间上的变化情况,具有局限性,宜选用三维模拟如 Flac3d 分析会更具有客观性。

## 参考文献

- [1] 陈鹏飞. 和静县二十二团废弃石灰石矿崩塌发育特征及形成机制研究[J]. 地下水, 2020, 42(2): 146-147+162.
- [2] 郭炳跃, 咸玉建, 梁聪, 吴峰俊, 徐燕燕. 无锡市鼋头渚景区岩质边坡崩塌形成机制及防治对策研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2020, 31(1): 63-69.
- [3] 王毅, 陈又麟, 余业. 九寨沟景区“8·8”震后崩塌灾害发育特征及影响因素[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(3): 1250-1255.
- [4] 杨迪惠, 杨啡. 九寨沟景区某崩塌点稳定性分析及治理方案[J]. 四川地质学报, 2019, 39(4): 608-611+638.

- [5] 刘昭, 赵初晔. 公路山体崩塌灾害处置技术研究[J]. 灾害学, 2019, 34(z1): 134-137.
- [6] Maimunah, Yeni, M. and Kumala, D. (2019) The Influence of Water Level Fluctuation Reservoir Stability of the Earth Dam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **506**, Article ID: 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/506/1/012032>
- [7] Ji, J., Zhang, W., Zhang, F., Gao, Y. and Lv, Q. (2020) Reliability Analysis on Permanent Displacement of Earth Slopes Using the Simplified Bishop Method. *Computers and Geotechnics*, **117**, Article ID: 103286.
- [8] 王震. 基于传递系数法的岸坡稳定性分析——以某电站库区涉水边坡为例[J]. 水科学与工程学报, 2020(1): 86-88.
- [9] Sun, W.W., Wang, Y.B., Zhang, F., Feng, L.Z. and Zhou, Y. (2012) Janbu Method Application in Jianshan Iron Mine. *Advanced Materials Research*, **524-527**, 608-612. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.524-527.608>
- [10] 孟凡宪. 土坡稳定分析 Spencer 方法的一种有效应力形式[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2015.
- [11] Sun, G., Cheng, S., Jiang, W. and Zheng, H. (2016) A Global Procedure for Stability Analysis of Slopes Based on the Morgenstern-Price Assumption and Its Applications. *Computers and Geotechnics*, **80**, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.06.014>
- [12] 殷坤龙, 韩再生, 李志中. 国际滑坡研究的新进展[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(5): 1-4.
- [13] 刘立平, 姜德义, 郑硕才, 雷进生, 林登发. 边坡稳定性分析方法的最新进展[J]. 重庆大学学报, 2000, 23(3): 115-118.
- [14] 夏元友, 李梅. 边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1087-1091.
- [15] Al-Karni, A.A. and Al-Shamrani, M.A. (2010) Study of the Effect of Soil Anisotropy Slope Stability Using Method of Slices. *Computers and Geotechnics*, **26**, 83-103. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(99\)00046-4](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(99)00046-4)
- [16] 尚岳全, 黄润秋. 工程地质研究中的数值分析方法[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1991: 26-28.
- [17] Cai, F. and Ugai, K. (2007) Numerical Analysis of the Stability of a Slope Reinforced with Piles. *Soils and Foundations*, **40**, 73-84. <https://doi.org/10.3208/sandf.40.73>
- [18] Boussealsal, M. and Zaouche, E. (2021) The Evolution Dam Problem for a Compressible Fluid with Nonlinear Darcy's Law and Dirichlet Boundary Condition. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, **44**, 66-90. <https://doi.org/10.1002/mma.6708>
- [19] 赵成. Janbu 法收敛性的讨论及通用极限平衡法的实现[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2008.
- [20] 吴柳东, 苏爱军, 霍欣, 齐振宇. 不同极限平衡法确定边坡安全系数的比较与分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12): 151-154.
- [21] 陆荣林, 魏来, 罗刚, 吴京涛, 成昊坤. 滑坡稳定性评价中传递系数法的适用范围研究[J]. 路基工程, 2016(4): 17-22.