

引用格式：张世殊，胡新丽，章广成，等，2024. 西部高山峡谷区重大滑坡生成规律及灾变演化机理研究进展 [J]. 地质力学学报，30 (5)：795–810. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2024031

Citation: ZHANG S S, HU X L, ZHANG G C, et al., 2024. Formation and catastrophic evolution of giant landslides in the alpine canyon area of western China [J]. Journal of Geomechanics, 30 (5)：795–810. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2024031

西部高山峡谷区重大滑坡生成规律及灾变演化机理研究进展

张世殊¹，胡新丽²，章广成²，李亚博²，刘欣宇²，徐庆尧²，冉从彦¹，赵小平¹
ZHANG Shishu¹，HU Xinli²，ZHANG Guangcheng²，LI Yabo²，LIU Xinyu²，XU Qingyao²，RAN Congyan¹，ZHAO Xiaoping¹

1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，四川 成都 610072；
2. 中国地质大学（武汉）工程学院，湖北 武汉 430074
1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, Sichuan, China;
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China

Formation and catastrophic evolution of giant landslides in the alpine canyon area of western China

Abstract: [Objective] Most hydroelectric projects in western China are located in alpine canyons. The intricate geological engineering conditions in this area have contributed to the widespread distribution of landslide disasters across the reservoir banks of hydroelectric projects. [Methods] Based on the engineering geological characteristics of western alpine canyons, correlations between topography, geological structure, landslide material, slope structure, hydrogeological conditions, and the formation and progression of landslides were analyzed. We also delineated the types and features of landslide development in the western region, as well as the mechanisms governing the evolution of typical landslide disasters. [Results] Results indicate that the landslides were characterized by slopes ranging from 30° to 50°, elevations exceeding 1000 m, and volumes surpassing one million cubic meters. Triassic, Ordovician, and Silurian strata were identified as the principal slippery strata in this area. Rainfall and reservoir impoundment significantly influenced landslide stability, leading to erosion, datum uplift, and range expansion. Water level fluctuations resulted in diminished rock and soil properties along the leading edge of advancing landslides. [Conclusion] The most frequent landslides in the western alpine region included accumulated landslides dominated by traction, thrust, and composite mechanisms and rock landslides dominated by bedding, buckling, anti-dip, and seating mechanisms. [Significance] This study elucidates landslide disaster mechanisms under varying evolutionary and mechanical failure processes, providing significant guidance for the identification, monitoring, early warning, and prevention of landslide disasters in the western region.

Keywords: the alpine canyon area of western China; reservoir landslide; formation law; landslide types; evolution mechanism; failure mechanism

摘要：中国西部水电工程大多位于高山峡谷内，复杂的工程地质条件导致峡谷库岸滑坡灾害分布广泛。基于西部高山峡谷水电工程区的工程地质特征，系统分析了地形、地质构造、滑体物质、坡体结构和水文地质条件与滑坡的生成发育关系，并总结了典型滑坡的类型、特征及其灾变演化的力学机制。研究表明：西部高山峡谷滑坡以坡度 30°~50°、高程超过 1000 m、体积超过 100×10⁴ m³ 的滑坡为主；三叠系、奥陶系和志留系为典型的易滑地层；降雨和水库蓄水导致侵蚀基准面抬升、侵蚀范围扩大，库区水位的反复升降导致涉水滑坡体前缘岩土体性质降低。西部高山峡谷区滑坡类型主要分为以牵引式滑坡、推移式滑坡和复合式滑坡为主的堆积层滑坡以及以顺层岩质滑坡、溃屈型岩质滑坡、反倾岩质滑坡

基金项目：国家自然科学基金项目（U22A20601）

This research is financially supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. U22A20601).

第一作者：张世殊（1970—），男，博士，正高级工程师，岩土工程专业，主要从事工程勘察与地灾研究。Email: 1992070@chidi.com.cn

收稿日期：2024-04-02；修回日期：2024-06-14；录用日期：2024-06-20；网络出版日期：2024-09-26；责任编辑：范二平

和座落式滑坡为主的岩质滑坡,不同类型的滑坡其演化过程不同,滑坡灾变机理也有所差异。研究成果将对西部高山峡谷区的滑坡识别、监测、预警以及防治具有一定的指导意义。

关键词: 西部高山峡谷区; 库岸滑坡; 成生规律; 滑坡类型; 演化机理; 破坏力学机制

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2024) 05-0795-16

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2024031

0 引言

随着中国对可再生清洁能源的大量需求和“双碳战略”的共同推动,水能资源丰富的西部高山峡谷地区近几年和未来依然会有大量的水利、水电工程建设。然而,由于该地区工程地质条件极其复杂,容易孕育大量的地震、滑坡、泥石流等灾害,严重制约着水利、水电工程的安全建设与健康运营,并威胁着人民生命、财产安全(唐辉明等, 2009)。

西部高山峡谷地区处于中国地势的第一阶梯和第二阶梯,区内河流多发源于青藏高原,如长江及其支流(雅砻江、大渡河、岷江)以及雅鲁藏布江、澜沧江和怒江等,河谷深切,形成了高山峡谷的地貌特征。同时,黄润秋(2007)认为高山峡谷地区存在大量活动性断裂带,为强震活动提供了特殊的地质动力条件。该地区地层岩性复杂,岩石强度差异大,松散沉积物广泛分布,为孕育滑坡、泥石流等地质灾害提供了物质条件。

滑坡的孕育与形成受地质环境控制,不同的地质作用导致的滑坡类型不同。张世殊等(2018)结合大量西部高山峡谷水电工程实例,发现高山峡谷水电工程区库岸广泛分布的滑坡隐患与青藏高原持续隆升的影响有关。库岸边坡的稳定性与水电站的运行以及库区群众的生命财产安全息息相关,历史上曾发生过多次数水库滑坡灾害,严重威胁水电站主体建筑物安全以及群众生命、财产安全。例如,1963年意大利 Vajont 水库滑坡引发 220 m 高的涌浪,导致 2000 多人死亡(Belloni and Stefani, 1987); 2003 年千将坪滑坡造成堵江并造成 24 人死亡,1100 多人无家可归(殷跃平和彭轩明, 2007)。

研究滑坡灾变演化机理有助于分析滑坡发展趋势及其工程防治应用。西部高山峡谷地区的滑坡灾变演化受地质历史演化影响,包括堆载卸荷、雨水(冰雪)侵蚀、风化、地震和构造运动等荷载作用(王思敬, 1966)。然而,西部高山峡谷地区特殊的地质环境以及复杂的内、外荷载作用,基于少量

发生在西部高山峡谷水电工程区的滑坡成生规律和灾变演化机理研究仍不充分,无法满足当前以及未来在西部高山峡谷地区特殊的地质环境和复杂的内、外荷载作用下的水利、水电工程建设需求。因此,系统总结西部高山峡谷地区的滑坡成生规律及其灾变演化机理,有助于滑坡识别、监测及其工程防治,为保障高山峡谷地区水利、水电工程安全以及工程上、下游群众生命、财产安全提供科学依据。

1 西部复杂山区工程地质特征

1.1 地形地貌

中国西部地区高山、深谷与高原盆地相间排列,地势上西高东低,具有明显的高海拔、深切河谷、高原地形的地貌特征。其中川西高山峡谷区以深切河谷地貌为主,河谷狭窄,局部为峡谷,其高程分布如图 1 所示。区内最高海拔超过 7000 m,由西向东主要分布有沙鲁里山、大雪山、邛崃山、岷山以及横断山等山脉,平均海拔为 4000~5000 m。

1.2 地层岩性

西部地区地层岩性错综复杂,各个区块内地层

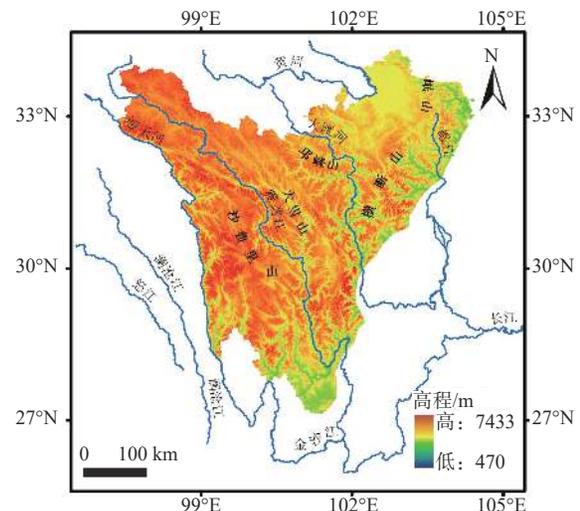


图 1 川西高程分布图

Fig. 1 Elevation distribution of the western Sichuan, China

发育及组合差异明显,层序复杂多变,变质作用强烈,各种片岩较发育。区内松散堆积层主要沿谷坡及河谷分布,残积、崩坡积、冰川、冰水堆积主要分布于山顶平台及缓坡地带,冲/洪积广泛分布于沟口、河床及两岸阶地,湖积主要分布在局部低洼盆地。区内岩体岩性依据建造特征可划分为岩浆岩、沉积碎屑岩、沉积碳酸盐岩和变质岩4种类型。表层松散土体沉积物分布面积广、厚度大、成因类型多,按照土的粒度组成及特殊工程地质性质,主要划分为卵砾类土、砂土类、黏性土及特殊土等。

1.3 地质构造及地震

西部地区褶皱、断裂构造发育,存在大量活动断裂,主要受华北地台、扬子地台、塔里木地台、天山-兴蒙褶皱系、秦祁昆褶皱系和滇藏褶皱系6个构造单元的影响。区域内部持续受到近南北方向较高的挤压应力作用,总体以水平挤压应力为主,地应力随着深度增加而相应增长(Wang et al., 2020),属于高地应力与高地震烈度区域,强震灾害频发,易诱发滑坡等灾害(Huang, 2009)。川西高山

峡谷区主要由龙门山断裂带和鲜水河-小江断裂带构成,主压应力方向为北西-南东向和近东西向,这些构造带对活动断裂发育、地震活动有重要影响。

西部地区强震多发生在刚性地块和褶皱带交接边界,多为构造地震,受活动断裂的控制。震源机制解表明西部地区主压应力轴的倾角总体上不超过30°,反映地壳表层现以水平运动为主(徐纪人等, 2008)。地壳巨大的不平衡重力作用为其垂直运动提供动力,西部地区垂直运动较为强烈,其速率等值线密集,藏南雅鲁藏布江沿岸区域垂直形变最大,地形大面积上升,而在滇西南地区以北和金沙江以东地区则以下降为主(陈智梁等, 1999)。

1.4 水文地质条件

西部地区山势巍峨,海拔变化较大,地表径流丰富,河谷发育,水流湍急,多发源于青藏高原。西部地区地下水类型如表1所示,主要分为松散沉积物孔隙水、基岩裂隙水、碳酸盐岩裂隙溶洞水和冻土冻结水4种类型;地下水补给主要为地表径流、降雨和冰雪融水,排泄以蒸发和泄流方式为主。

表1 中国西部地区地下水的主要类型

Table 1 Main classification of groundwater in the western region

类别	分布区域	补给方式	排泄方式
松散沉积物孔隙水	成都平原、断陷盆地、黄土高原	冰雪消融水、降水	河流外泄、蒸发排泄
基岩裂隙水	天山南麓、鄂尔多斯高原、黔北山地等高山丘陵区	降雨入渗、冰雪消融	泉水、蒸发、向山区河流的泻流
碳酸盐岩裂隙溶洞水	西南地区	降水、地表径流	泉水、泻流
冻土冻结水	阿尔泰山区及青藏高原地区	—	—

西部地区不同位置的地下水化学特征差异显著,其中,南部地区地下水矿化度较低,水化学类型为重碳酸盐型;而北部干旱地区地下水矿化度较高,呈现出从重碳酸盐型淡水带向硫酸盐型咸水带逐渐递变的规律(胡汝骥等, 2002)。程国栋和金会军(2013)认为基岩山地地区没有外来水源,并且局部有盐沼,山区向平原的地下水表现为重碳酸盐型—硫酸盐型—氯化物型逐渐过渡的水化学类型。高原的多年冻土区多为重碳酸盐型,矿化度较小。

1.5 人类工程活动

近年来人类的工程活动规模和强度不断扩大,对自然环境的影响日益严重。水电工程建设对山体破坏加剧,使得斜坡内的天然应力状态发生变化,水库蓄水后改变了原有边坡的水文地质条件,降低了边坡的稳定性,增加了引发滑坡地质灾害的

可能性。

2 滑坡成生规律

2.1 滑坡空间分布特征

选取中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司作为主设计单位的9个水电工程枢纽区及其库区发育的77个滑坡,对西部高山峡谷区复杂工程地质条件下的滑坡发育规律进行研究。77个典型滑坡发育分布位置见图2,分别从流域、高程、体积、岸别和类型对滑坡分布特征进行研究。

2.1.1 发育流域

77个滑坡涉及岷江、雅砻江、金沙江和大渡河4条河流,滑坡所在流域统计见表2。河流地质环境的差异导致滑坡发育数量的差异,分布于岷江、雅

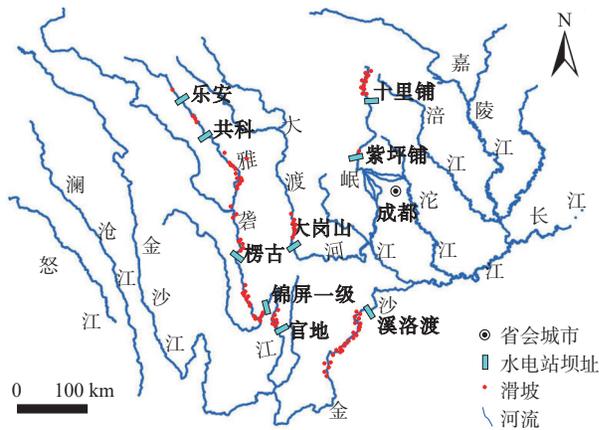


图2 库区77个典型滑坡发育分布图

Fig. 2 Distribution of 77 typical landslide developments in the reservoir area

砷江、金沙江和大渡河的滑坡数量分别为20、36、13和8,分别约占滑坡总数的26%、47%、17%和10%。

表2 滑坡发育流域统计

Table 2 Basin statistics of landslide development

流域	岷江	雅砷江	金沙江	大渡河
滑坡数量	20	36	13	8
占比/%	26	47	17	10

2.1.2 滑坡高程

按照滑坡发育的高程对77个滑坡进行分类(表3),其中74个滑坡可准确统计出前后缘高程。综合分析,西部水电工程滑坡多发育在1000m以上高程,约占滑坡总数的81%。

表3 滑坡发育高程统计

Table 3 Elevation statistics of landslide development

高程/m	500~1000	1000~2000	>2000
滑坡数量	14	38	22
占比/%	19	51	30

2.1.3 滑坡体积

根据《水电水利工程边坡设计规范》(DL/T 5353—2006)(中国电力企业联合会,2007)对滑坡体积分类统计,可准确估算体积的75个滑坡体积分类统计情况见表4所示。综合分析,西部水电工程发育的滑坡以大型、特大型和巨型滑坡为主,约占滑坡总数的87%,这与西部水电工程复杂的地质环境有关。

表4 滑坡发育体积分类统计

Table 4 Volume statistics of landslide development

体积/ $\times 10^4 \text{m}^3$	小型 (<10)	中型 ($10\sim 100$)	大型 ($100\sim 1000$)	特大型 ($1000\sim 10000$)	巨型 (>10000)
滑坡数量	1	9	23	34	8
占比/%	1	12	31	45	11

2.1.4 滑坡发育岸别

按照不同流域对77个滑坡发育岸别进行统计(表5)。综合分析,仅砷江流域滑坡发育具有明显的河流岸别选择性特点,该流域滑坡多发生在右岸;其余流域左、右两岸发育的滑坡数量大致相同。

表5 滑坡发育岸别统计

Table 5 Bank statistics of landslide development

流域	岷江	雅砷江	金沙江	大渡河
左岸滑坡数量	11	9	6	5
右岸滑坡数量	9	27	7	3

2.1.5 滑坡类型

按照堆积层滑坡和岩质滑坡对77个滑坡进行分类,变形体视为岩质滑坡,其中基岩滑坡发育43个,堆积层滑坡发育34个。综合分析,西部水电工程所处的高山峡谷区,河谷深切且狭窄,岩体风化卸荷强烈,受卸荷裂隙等结构面控制的岩体发展演化到一定阶段易形成岩质滑坡。

2.2 滑坡发育影响因素分析

2.2.1 地形地貌

绝大多数滑坡形成及发育的根本原因之一是其所处位置地形地貌特征复杂。坡度、坡高和坡形是影响滑坡的主要地形地貌因素,其中坡度和坡高直接影响滑坡发生可能性,坡度越大、坡高越高,坡体稳定性相对越差。西部水电工程发育的77个滑坡,其中65个滑坡可准确统计出坡度。统计结果表明(表6),西部水电工程地区滑坡最易发生在 $30^\circ\sim 50^\circ$ 坡度,占总数的85%。同时,74个滑坡可准确统计出坡高,统计结果表明(表7),西部水电工程地区滑坡最易发生在坡高200~800m,占总数的75%。此外,坡形对滑坡发育也有一定影响,凸形坡稳定性最差,凹形坡稳定性较好。

表6 滑坡发育坡度统计

Table 6 Slope gradient statistics of landslide development

坡度/ $^\circ$	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60
滑坡数量	1	7	41	14	2
占比/%	1	11	63	22	3

表7 滑坡发育坡高统计

Table 7 Slope height statistics of landslide development

坡高/m	0~200	200~400	400~600	600~800	800~1000	1000~1200
滑坡数量	11	27	15	14	2	5
占比/%	15	36	20	19	3	7

2.2.2 地层岩性

滑坡易发生在层状破碎岩体、松散堆积体地带,其下部岩层中一般含有容易形成滑动带的矿物成分和风化物质,这类地层岩组被称为易滑岩组。通过统计西部水电工程69个滑坡的发育地层表明

(表8),三叠系、奥陶系和志留系中发育的滑坡占总数的88%,上述3组地层是西部水电工程区的易滑地层;其中三叠系岩性为砂岩、变质砂岩夹页岩、板岩及煤层,奥陶系、志留系岩性为砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩、千枚岩、砂质页岩夹泥灰岩、泥质灰岩。

表8 滑坡发育地层统计

Table 8 Stratigraphic unit statistics of landslide development

地层	元古界	寒武系	奥陶系、志留系	泥盆系	二叠系	三叠系
滑坡数量	2	2	27	3	1	34
占比/%	3	3	39	4	2	49

2.2.3 地质构造

一般来说滑坡常发生在地质构造复杂及构造应力强烈的地带,这些区域为滑坡提供了易滑构造。Peng et al.(2016)调查了刘家堡滑坡附近发育的6条正断层的地质特征,证明断层对刘家堡滑坡的启动有一定控制作用。自始新世末—渐新世初与欧亚板块相撞以来,青藏高原地区构造运动方向性的转化生成了一系列深大断裂,使西部水电工程区域褶皱、断层、节理极其发育(唐永仪,1992)。西部水电工程区受地质构造显著影响的滑坡有26个,约占滑坡总数的34%,其中10个滑坡受褶皱影响,16个滑坡受断层影响。例如,雅砻江锦屏一级水电站的三滩右岸变形体I、II、III都受到三滩同倾向斜褶皱的影响;雅砻江楞古水电站的周家滑坡和八通滑坡都受到前波断层的影响。

逆向结构岸坡发育滑坡优势不明显;西部高山峡谷区陡倾岩层的逆向结构岸坡风化卸荷强烈,易发生倾倒变形,最终演化为岩质滑坡。

2.2.4 坡体结构

有关坡体结构的研究是在滑坡岩土体结构的基础上发展起来的。坡体结构是坡体内岩土体的分布和排列顺序、位置、产状及其与临空面之间的关系,其构成滑坡的地质基础,主要控制着滑动面(带)的位置和形状(王恭先,2005)。西部水电工程区岸坡结构类型按岩层倾向与岸坡的关系可划分为顺向坡、逆向坡和斜向坡。针对该区域滑坡所发育的坡体结构类型,统计出其中50个滑坡的坡体结构,分析其不同岸坡结构类型的滑坡发育特征(表9)。结果表明,西部水电工程地区顺向结构岸坡相较于于

表9 滑坡发育岸坡结构统计

Table 9 Bank slope structure statistics of landslide development

岸坡结构	顺向坡	逆向坡	斜向坡
滑坡数量	27	22	1
占比/%	54	44	2

2.2.5 降雨

降雨是滑坡重要的诱发因素之一,许多滑坡灾害与降雨存在密切关系。降雨时大部分雨水渗入坡体内部,增加坡体自重,增大其下滑力;同时降雨会破坏破体结构,使土体内部孔隙水压力增加,有效应力降低,从而使岩土体的抗剪强度减小,导致坡体变形、甚至破坏。卢书强等(2014)分析了三峡库区树坪滑坡累计位移和降雨量关系,发现滑坡变形较大的时期恰好处于每年的降雨集中时期。一般情况下,降雨是诱发滑坡最主要、也是最活跃的因素。但西部水电工程区的降雨较少,降雨不是该地区滑坡的主要诱发因素。

2.2.6 库水

库水对库岸边坡的影响主要体现在库水对库岸坡体的改造作用、库水对库岸坡体岩土性质的作用以及库水对库岸坡体内地下水系统的作用,当库水位下降时,会对库岸边坡产生诸多不利影

响。例如,三峡库区水位下降速度越大,区内滑坡稳定性极小值越小,出现极小值的时间也更早(唐辉明和章广成, 2005)。经过统计,西部水电工程区 77 个滑坡中有 75 个受库水影响, 1 处受降雨影响(色古变形体), 1 处受工程开挖影响(解放沟左岸变形体)。

2.2.7 地震

地震滑坡即地震诱发的边坡滑动,其发育和分布特征不仅受地震震级、烈度、震源深度和震中距等地震参数的影响,还与斜坡所处区域的地形地貌、地层岩性等地质环境有关(张铎等, 2013)。中国西南地区地处地中海-喜马拉雅地震带,地壳活动频繁,历史上曾发生过多次地震滑坡灾害问题。尤其是 2008 年汶川地震引发的滑坡、崩塌、泥石流约 15000 处,新发现滑坡灾害隐患点 1701 处(殷跃平, 2008)。西部水电工程区紫坪铺水库坝前存在一大型古滑坡堆积体,在汶川地震的作用下坡体前缘陡缓变坡处出现小规模坍塌和局部不同程度的裂缝,前缘部分在基覆界面附近出现约 30 mm 的错动变形,但其在震时保持了整体稳定。

2.3 滑坡类型与基本特性

合理的滑坡分类对于认识和防治滑坡是必要的,不同学者从不同的观点出发,曾对滑坡做过各种各样的分类(Varnes, 1978; 刘广润等, 2002)。根据近些年来的工程实践经验,对西部水电工程区重大滑坡进行分类,按照其物质组成可分为堆积层滑坡和基岩滑坡 2 大类。

为了对各类滑坡进行深入分析,总结各类滑坡的发育规律、演化特征,笔者按照不同分类标准对西部水电工程区堆积层滑坡和基岩滑坡进行细分。其中,堆积层滑坡按照启动机制分为牵引式滑坡、推移式滑坡和复合式滑坡 3 类;基岩滑坡按照变形破坏机制的不同又可以分为顺层岩质滑坡、溃屈式滑坡、反倾岩质滑坡和座落式滑坡 4 类。

2.3.1 堆积层滑坡

(1) 牵引式滑坡

牵引式滑坡是坡体下部首先达到极限平衡状态并产生很大位移,此时下部坡体先失稳,导致上部坡体失去下部坡体的抗力进而滑动。牵引式滑坡一般为前部陡、中后部稍缓的坡面形态,坡脚抗滑段较短,前缘坡体应力集中。这类滑坡往往发生在堆积层、风化带及岩土体的软弱夹层所组成的斜

坡地带,滑体多为松散堆积物构成。牵引式滑坡前部岩体节理裂隙较为发育,易风化且易被地表水冲蚀,从而形成临空面。

(2) 推移式滑坡

推移式滑坡是坡体中一上部在外荷载增加或强度降低时首先达到极限状态,并增加对下部坡体的推力,导致坡体整体下滑。推移式滑坡一般为后部陡、中前部稍缓式的坡面形态,后缘应力集中。推移式滑坡常发生在具有层状破碎岩体、松散堆积体的地带。同时自然形成的推移式滑坡后部多存在陡峭岩体,其节理裂隙发育,完整性差,岩体风化程度越高,越易发生崩塌落石,并对滑坡后缘产生加载效应。

(3) 复合式滑坡

复合式滑坡同时具有牵引式滑坡和推移式滑坡的特点,变形始于前缘和后缘坡体,一般表现为前后部陡、中部稍缓的坡面形态。这类滑坡的后缘通常存在节理裂隙发育的陡峭岩体,前缘岩体松散破碎,极易受到库水位和降雨的影响。

2.3.2 基岩滑坡

(1) 顺层岩质滑坡

顺层岩质滑坡是沿着层面或追踪层面发生滑动运动的岩质滑坡。这类滑坡主要发育于层面为中倾-陡倾的中厚层-厚层状灰岩、砂岩斜坡中。顺层岩质滑坡尤其是大型顺层岩质滑坡其滑带往往由软弱夹层构成,软弱夹层的性状决定着滑坡体的整体性状。这类滑坡发育具有区域性群发特征,常表现为蠕变与渐进破坏特性。

(2) 溃屈式滑坡

溃屈破坏是由王兰生和张倬元(1979)提出的“斜坡岩土体破坏形成演化力学机制模式”的一种,是层状结构特有的破坏形式,通常为岩体上部沿层面滑动,下部发生弯曲和鼓胀。溃屈是结构失稳的表现,需满足岩层倾角等于或略大于斜坡倾角的条件。溃屈的临界坡长与岩层单层厚度、弹性模量等有密切关系,单层厚度越大,弹性模量越高,岩层发生溃屈的临界坡长越大,形成的溃屈规模也越大。

(3) 反倾岩质滑坡

反向层状岩体斜坡是指边坡内的优势结构面与边坡具有相反的倾向,边坡的走向与岩层的走向一致的层状岩质斜坡。层状岩体的绝对优势结构面(层面、片理面)大多属于物质的分界面,平行于

优势结构面的岩体其组成基本相同,垂直于优势结构面的岩土组成软硬交替。所以,反倾岩质斜坡的稳定性主要受控于反倾结构面的发育程度、岩层倾角与坡角的关系、岩层的厚度以及软弱结构面的强度。

(4) 座落式滑坡

座落式滑坡多发生在反倾或近水平状地层中,其垂直运动距离大于水平运动距离。这类滑坡多具有陡峭的后壁,发育有多组优势结构面,坡脚处岩层较缓,一般发育有软弱夹层。岩性表现为上硬下软,下层软岩在上层破碎硬岩长期自重应力的作用下易发生流塑变形,导致上部岩层整体滑移。

3 典型类别滑坡的灾变演化力学机制

3.1 牵引式滑坡

3.1.1 演化过程

开挖路堑坡脚、河流冲刷是引起牵引式滑坡发生的主要作用因素,坡脚应力和滑带剪应力增加,导致前缘局部先变形,形成牵引区。同时,受降雨及库水位升降综合作用,坡面产生裂缝,产生的牵引变形裂缝为地表水下渗提供了通道,并且雨水可通过裂缝下渗到斜坡的更深部,斜坡体变形逐步向后、向上发展,最后发展为多级滑动块体,形成多级后缘断裂面,即形成被牵引区(Kennedy et al., 2021)。滑坡中通常存在2个滑动面(Xu et al., 2014),分别是控制滑动的底部滑动面和不稳定滑动体与后坡之间的后缘断裂面。底部滑动面通常平行于滑动方向的弱夹层或土壤-岩石界面。后缘断裂面是水入渗引起底部滑动面抗剪强度的不断降低,边坡内部滑动体形成且不稳定,形成受前缘渐变牵引变形控制-后部逐步变形失稳的变形破坏模式。

3.1.2 破坏力学机制

牵引式滑坡受力情况如图3所示,图中*i*-1、*i*和*i*+1分别表示边坡存在的滑体条块,其中*A*、*B*分别为第*i*-1个滑体右侧、左侧与底滑面的交点,*C*为第*i*-1个滑体左侧在表面的出露点;*B*₁为第*i*个滑体左侧与底滑面的交点,*C*₁为*i*个滑体左侧在表面的出露点;*W*_{*i*}是第*i*个滑体条块的重量;*N*_{*i*}是作用在第*i*个滑体条块滑动面上的正压力;*T*_{*i*}是作用在第*i*个滑体条块滑动面上的剪切力;*E*_{*i*-1}和*E*_{*i*}分别是作用在第*i*-1和第*i*滑体条块左侧和右侧的正压力;

*X*_{*i*-1}和*X*_{*i*}分别是作用在第*i*-1和第*i*滑体条块左、右侧的剪切力;*l*_{*i*}为第*i*个滑体条块滑动面长度;*l*'_{*i*}为第*i*个滑体条块的后缘断裂面长度;*α*_{*i*}为第*i*个滑体条块的底部滑动面的倾角;*θ*_{*i*-1}和*θ*_{*i*}分别是第*i*-1和第*i*滑体条块的后缘断裂面的倾角。

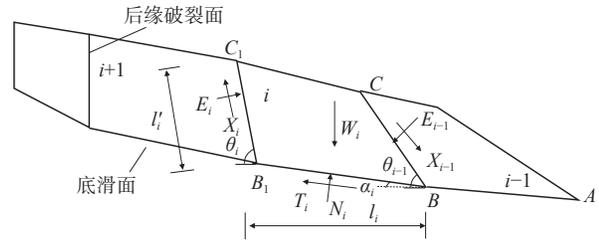


图3 牵引式滑坡受力分析模型(变量含义见文中)

Fig. 3 Mechanical model of buckling failure for rock slopes

牵引式滑坡力学计算模型根据质量极限平衡条件和莫尔库仑强度破坏准则,可建立任意第*i*滑体条块的平衡方程。设滑块*i*具有稳定性系数*F*_{*i*},则底滑面*BB*₁满足极限平衡条件(Lian et al., 2020):

$$T_i = \frac{c_{zi}l_i + N_i \tan \varphi_{zi}}{F_i} \quad (1)$$

底滑面*BB*₁失稳滑动后,后缘破裂面*B*₁*C*₁形成,*B*₁*C*₁为拉剪破坏面(因拉破坏产生的裂缝深度较小,此处忽略不计),则有:

$$X_i = c_{mi}l'_i + E_i \tan(\varphi_{mi}) \quad (2)$$

式(1)(2)中,*c*_{*zi*}为第*i*级滑块单元底滑面的黏聚力;*φ*_{*zi*}为第*i*级滑块单元底滑面的内摩擦角;*c*_{*mi*}为第*i*级滑块单元后缘破裂面的黏聚力;*φ*_{*mi*}为第*i*级滑块单元后缘破裂面的内摩擦角;其他变量含义同图3。

3.2 推移式滑坡

3.2.1 演化过程

许强等(2004)根据滑坡宏观变形破坏迹象,将推移式滑坡分为缓慢蠕动、匀速蠕滑、加速蠕滑和急剧变形阶段。由滑坡形成条件可知,推移式滑坡后缘危岩体崩塌、人类活动及地表水下渗是引起推移式滑坡发生的主要因素。坡体后缘形成张拉裂缝后(图4),地表水沿裂缝入渗,动静水压力增大,当下滑力超过抗滑力时,后部首先失稳始滑、并推动前部滑动,期间在坡表产生鼓张裂缝,在空间上分为后端剪切段、中间过渡段和前缘蠕滑段。

3.2.2 破坏力学机制

许强和黄润秋(2008)总结出推移式滑坡对应

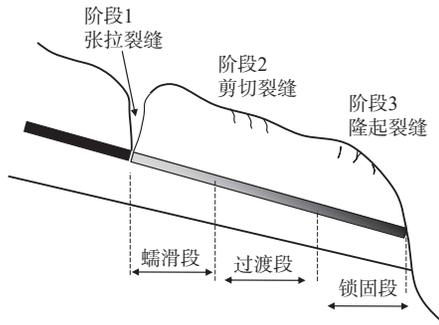


图 4 推移式滑坡演化过程示意图

Fig. 4 Evolutionary process diagram of thrust-type landslide

阶段的滑坡宏观变形特征,指出缓慢蠕动—加速蠕滑阶段的地表宏观裂缝产生过程为后缘拉裂缝形成、中段侧翼剪切裂缝产生、前缘隆胀裂缝形成,当上述整套裂缝都已出现,并形成基本圈闭的地表裂缝形态时,表明坡体滑动面已基本贯通,坡体整体失稳破坏的条件已经具备,滑坡即将发生。学者通过建立推移式滑坡滑面的物理力学控制方程,研究其破坏控制标准(Lu, 2015):

$$\tau = G\gamma(1 + \gamma^m/S)^\rho \quad (3)$$

式中: τ 、 γ 分别为剪应力和剪应变, G 为初始剪

切模量; S 、 m 、 ρ 分别为不同法向应力下的常系数; ρ 为一量纲参数,且 $-1 < \rho \leq 0$ 和 $1 + m\rho \neq 0$ 。

临界应变满足如下关系式:

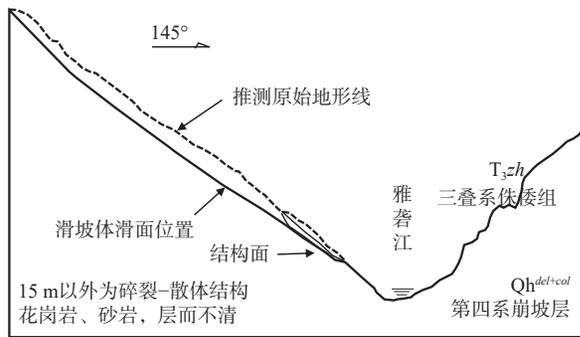
$$S + (1 + m\rho)\gamma_{peak}^m = 0 \quad (4)$$

式中: γ_{peak} 为峰值应力对应的应变;其他变量含义同公式(3)。

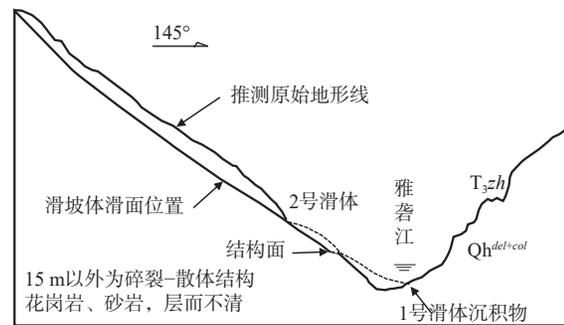
3.3 复合式滑坡

3.3.1 演化过程

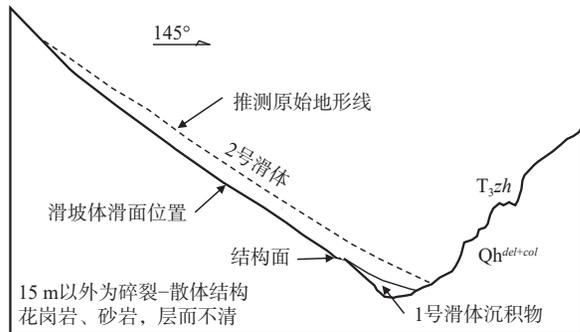
复合式滑坡同时具有牵引式和推移式滑坡的特点,其变形始于前缘和后缘坡体。易志坚(2010)结合楞库库岸唐古栋滑坡,将其演化过程分为3个阶段:①卸荷回弹—滑移—压致拉裂变形阶段(图 5a),雅砻江河谷间歇性下切导致谷坡应力调整,形成陡倾坡外的卸荷裂隙,受卸荷影响,坡体沿缓倾坡外节理产生滑移变形,变形由滑移—压致拉裂导致,自下而上发展,使斜坡前缘产生变形,并进一步扩展陡倾卸荷裂隙;②阶梯状蠕滑、滑面贯通阶段(图 5b、5c),由于坡体中发育2组缓倾坡外节理、1组陡倾坡外节理,以及挤压错动带和顺层侵入的伟晶岩脉,这些结构面与早期形成的裂缝相互



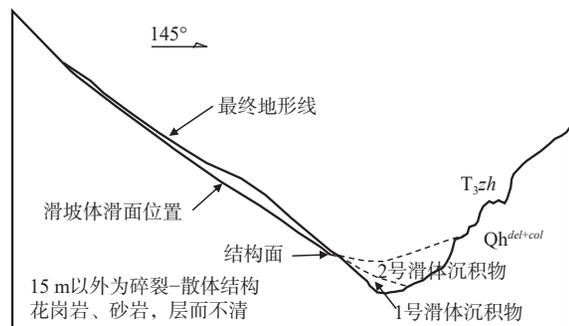
(a) 卸荷回弹—滑移—压致拉裂变形阶段



(b) 阶梯状蠕滑、滑面贯通阶段(前缘失稳)



(c) 阶梯状蠕滑、滑面贯通阶段(后缘整体滑动)



(d) 滑坡分级滑动—堵江阶段

图 5 复合式滑坡演化示意图(易志坚, 2010)

Fig. 5 Diagram of evolution of complex landslide(Yi, 2010)

- (a) Unloading bounce-slip-compression strain fracture deformation stage; (b) Step creep, sliding surface through stage (leading edge instability);
- (c) steep creep, sliding surface through stage (integral trailing edge slide); (d) Landslide classification sliding-river blocking stage

作用, 形成阶梯状滑面, 特别是在高程平洞中揭露的陡倾挤压错动带进一步促进了坡体的蠕滑变形; 同时频发的地震更促进了结构面的贯通, 加速滑面发展, 前缘临空导致坡体后缘逐步变形; ③滑坡分级滑动一堵江阶段(图 5d), 当斜坡岩土体的下滑力超过抗滑力时, 堆积体首先开始滑动、形成滑坡后壁, 为上部坡体的形变提供空间, 接着上部滑体剪断下部锁固段岩体, 导致整体高速远程滑坡向雅砻江对岸冲击, 形成堰塞坝。

3.3.2 破坏力学机制

复合式滑坡的破坏力学特性包含 2 个临界状态, 前缘启动区按照牵引式滑坡的方式确定演化状

态, 后缘启动区按推移式滑坡的方式确定演化状态。复合式滑坡受力如图 6a 所示, 杜毅等(2023)以此提出了滑坡演化阶段的荷载传递划分判据:

$$\begin{aligned} T(x) &= -E_{i-1}h_{i-1}\frac{\Delta\delta}{d_x} = -E_{i-1}h_{i-1}\delta'(x), \\ N(x) &= E_{i+1}h_{i+1}\frac{\Delta\delta}{d_x} = E_{i+1}h_{i+1}\delta'(x) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $T(x)$ 为滑坡后缘扰动荷载, 方向与自重下滑分力平行; $N(x)$ 为滑体内部等效牵引扰动荷载, 其大小等于抗滑力减去浮托力; $\Delta\delta$ 为受扰动荷载的滑体条块变形; E_{i-1} 、 E_{i+1} 为首尾 2 条块的弹性模量; h_{i-1} 、 h_{i+1} 为首尾 2 条块的高度; $\delta(x)$ 为滑体沿滑动方向与滑带的错动位移; d_x 为条块长。

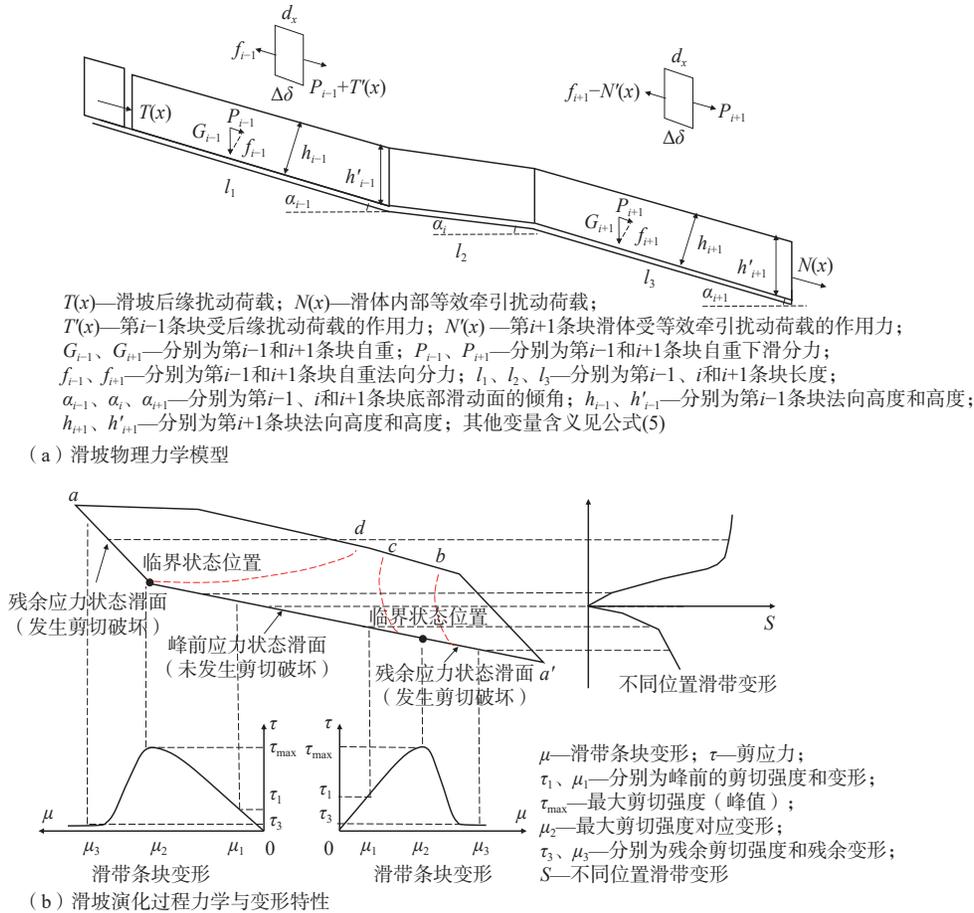


图 6 复合式滑坡地质力学模型

Fig. 6 Geomechanical model for complex landslide

(a) Physical and mechanical model of sliding slope; (b) Mechanics and deformation characteristics of landslide evolution

结合静力平衡原理建立受力平衡微分方程为:

$$\delta''(x) = \frac{P_i - \tau(x)}{E_i h_i} \quad (6)$$

式中: P_i 为第 i 条块的自重下滑分力; $\tau(x)$ 为滑

带抗滑力; E_i 为第 i 条块的弹性模量; h_i 为第 i 条块的高度。

根据滑带的软化过程特性, 复合式滑坡的演化过程如图 6b 所示。首先, 斜坡两端受荷载作用, 滑

带土进入蠕滑状态;随后,残余荷载使滑带应力升高,荷载被完全抵消。当荷载增大,局部滑带软化进入剪切状态,牵引式破坏区逐级下错拉裂,推移式破坏区鼓胀隆起。荷载持续增大时,滑带剪切变形向滑坡中部推进,锁固段软化,后部鼓胀,前部拉裂。最终,锁固段滑带剪切变形至整体贯通。

3.4 顺层岩质滑坡

3.4.1 演化过程

大多数顺层岩质滑坡滑动主要发生在中后部,滑坡沿软弱层面发生剪切变形,其前缘通常出现切层或者倾斜缓慢的阻滑段。Tang et al.(2015)基于鸡尾山滑坡滑带力学参数的软化特性,将顺层岩质滑坡在空间上分为蠕滑段、过渡段和锁固段(图7)。

3.4.2 破坏力学机制

顺层岩质滑坡演化过程是力与变形逐渐协调平衡的过程,其变形是渐进发展的,同样岩土材料的强度损伤也是渐进变化的(张龙飞等,2019)。Rosso et al.(2006)研究认为破裂面经历不同风化、扰动和应力的不同部分导致力学性能的空间不均匀性,地表水从张拉裂缝深入边坡内部,导致破裂带

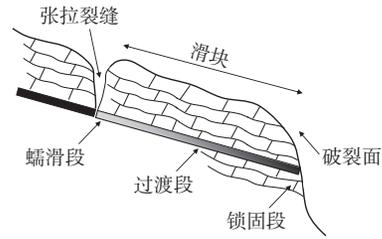


图7 顺层岩质滑坡演化概念模型 (Tang et al., 2015)

Fig. 7 Conceptual model of the evolution of consequent bedding rockslides (Tang et al., 2015)

后部强度衰减、下部强度依然很强,在滑坡前部形成锁固段;随着滑坡的变形演化,减弱区逐渐向滑坡前缘扩大,锁固段长度减小至完全破坏。在对顺层岩质滑坡演化力学机制进行分析时,通常采用无限斜坡模型,如图8所示。选取斜坡 x 位置处微小单元体,根据静力平衡条件可得:

$$\frac{dP(x)}{dx} = \tau(x) - f_s \quad (7)$$

式中, $P(x)$ 为 x 位置处传递的荷载; $\tau(x)$ 为 x 位置处滑带的剪应力; d_x 为单元体的长度; f_s 为滑体下滑力。

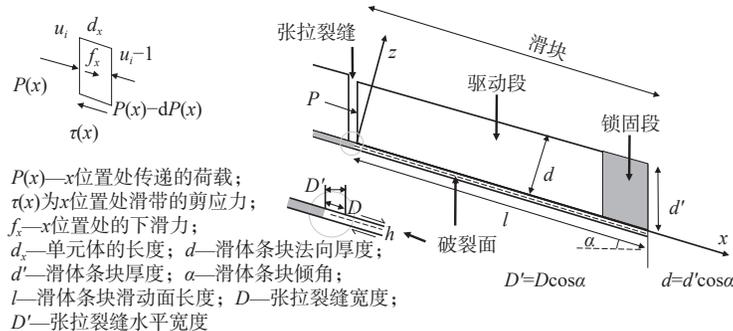


图8 顺层岩质滑坡渐进锁固力学模型

Fig. 8 Progressive locking mechanical model of consequent bedding rockslides

邹宗兴等(2012)提出渐进锁固力学模型表达式来反映顺层岩质滑坡的演化及锁固段状态:

$$\tau'(x, u) = k(x)\tau(u) = \left[\frac{A}{1 + e^{-c'(x-b)}} + H \right] G_s \frac{u}{h} \exp \left(- \left(\frac{u}{u_0} \right)^m \right) \quad (8)$$

式中, G_s 为剪切初始模量; h 为蠕滑带的厚度; u 为滑体沿滑动方向与滑带的错动位移, u_0 为初始位移; $\tau(u)$ 为滑带剪应力, m 为均匀性指标或称脆性指数,表示滑带的软化特性; $k(x)$ 为S型软化系数状态曲线方程, x 为滑带空间位置; A 为S型曲线的弱化幅值, H 为弱化极限值,且 $A+H=1$; b 为S型曲线阶段表征值; c' 为S型曲线形态系数(Tang et al., 2015)。

3.5 溃屈型岩质滑坡

3.5.1 演化过程

王兰生和张倬元(1979)将溃屈破坏分为3个演化过程(图9):①轻微弯曲隆起阶段,斜坡坡脚处岩层轻微隆起,形成层面小规模错动;②强烈弯曲一隆起阶段,岩层弯曲程度增大,在隆起段出现X型裂隙及层间空腔;③切出面贯通破坏阶段,弯曲段发生折断,上部岩层沿层面滑出。在强烈弯曲一隆起之后,整体失稳之前,存在一个中间演化阶段,即滑移—碎裂—散体化阶段。这一阶段通常发生在中缓倾角顺向坡上,由于滑面强度的丧失,斜坡下部弯曲段在岩层折断和坍塌之后,岩块可能发生位错、

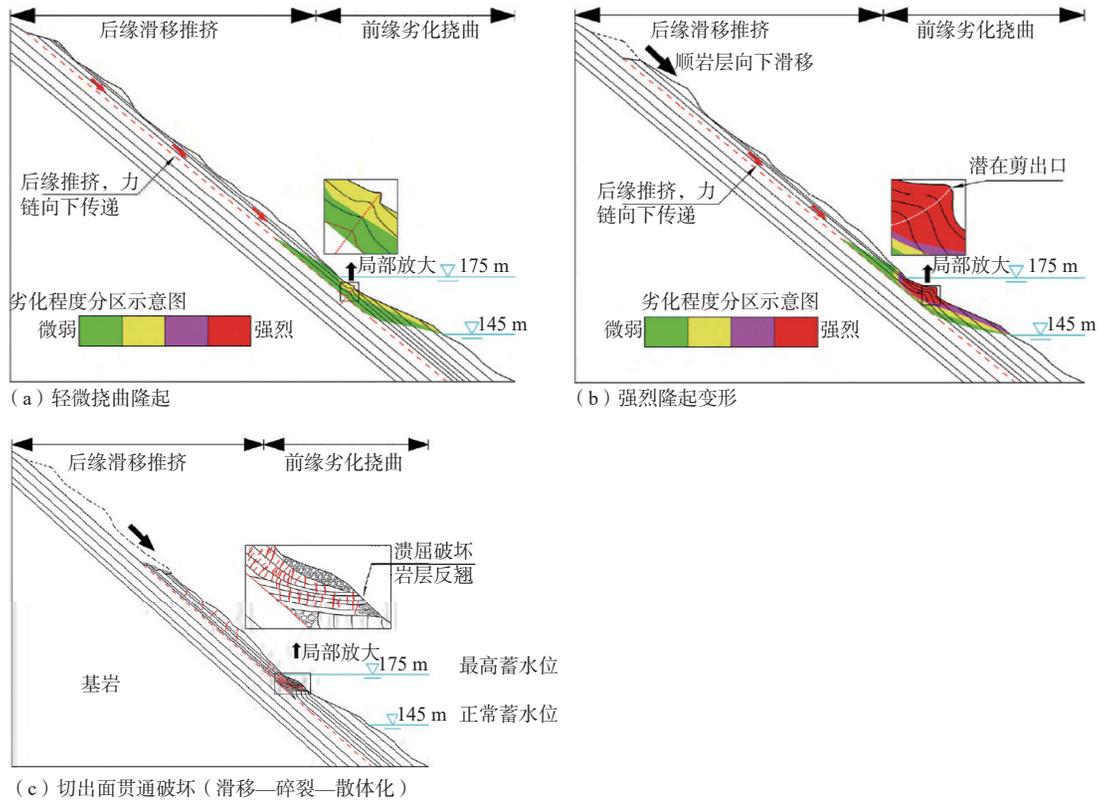


图 9 典型溃屈型滑坡演化示意图 (闫国强等, 2022)

Fig. 9 Evolution diagram of typical buckling landslides (Yan et al., 2022)

(a) Slight flexural uplift; (b) Strong uplift deformation; (c) Cutting through failure (slipping-fragmentation-dispersing)

混合、压碎和密实等变化, 最终导致散体化的现象。

对溃屈型或滑移-弯型滑坡形成机制的研究均认为在顺层岩质边坡临近坡脚的斜坡临空部位。在这些区域, 岩层可能会出现弯曲隆起、破碎, 并形成平面滑面。自然状态下, 斜坡可能处于基本稳定状态或者极限平衡状态, 一旦成为工程斜坡, 其稳定性会受到影响, 导致失稳滑动。这种失稳滑动的力学模式通常涉及到坡脚附近顺层岩层承受纵向压应力, 并在一定条件下发生弯曲变形。

3.5.2 破坏力学机制

在溃屈变形过程中, 岩层仅沿地表移动并垂直

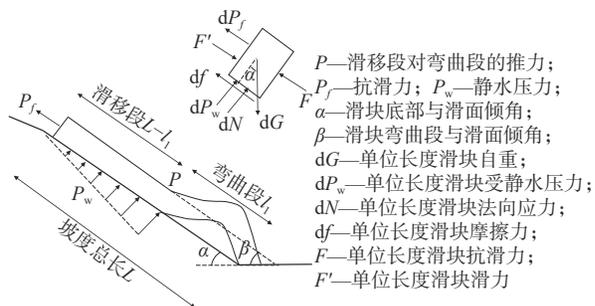


图 10 岩质边坡溃屈破坏力学模型

Fig. 10 Mechanical model of buckling failure for rock slopes

变形。整体坡度的长度 L 可以由 2 段组成: 下部弯曲段和上部滑移段, 如图 10 所示。

若岩层单一宽度, L 为坡度总长, 下部弯曲段长为 l_1 , 上部滑移段长为 $L-l_1$, 岩层容重为 γ , 厚度为 d , 层数为 n , 岩层倾角为 θ , 滑动面内聚力和内摩擦角为 c 和 φ , γ_w 为水容重, φ_w 为饱和状态下滑动面内摩擦角。则滑移段对弯曲段的推力 P 为 (孙广忠, 1988):

$$P=(L-l_1) \left[n\gamma d \sin \theta-n\gamma d \cos \theta \tan \varphi-c-\frac{1}{2}\left(\gamma_w \sin \theta \tan \varphi_w\right) \right] \quad (9)$$

其中, 根据岩体破坏的总深度和单层厚度 (层间节理间距) 可以得到层数 n 。弹性板梁弯曲段挠曲线微分方程可表征为:

$$y=a_1\left(1-\cos \frac{2\pi x}{l}\right)+a_2\left(1-\cos \frac{4\pi x}{l}\right) \quad (10)$$

式中: y 为弯曲高度; a_1 、 a_2 为系数; x 为弯曲段位置; l 为弯曲段长度。

3.6 反倾岩质滑坡

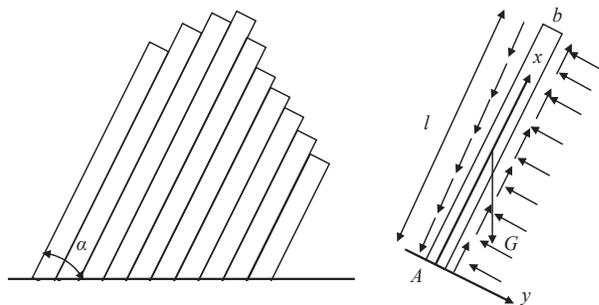
3.6.1 演化过程

反倾岩质滑坡演化模式可分为块状倾倒、块

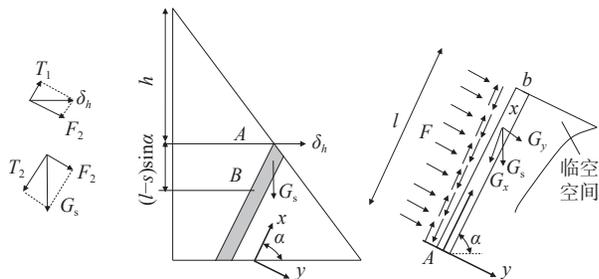
状-弯曲倾倒、弯曲倾倒。王飞等(2018)对雅砻江流域边坡进行了详细的地质调查,将反倾岩质边坡变形破坏过程的演变分为4个阶段:①卸载阶段,随河流下切作用,坡顶临空面岩体沿层面张裂并向坡外倾倒变形;②变形阶段,坡顶临空面岩层向后缘逐层错动并产生倾倒破坏,层间剪切错动导致深层岩体塑性弯曲变形,张拉裂隙进一步向坡体内部扩展;③裂缝发展阶段,坡体中部一坡脚临空面岩层拉裂形成浅层和深层破裂面,临空面破碎岩体沿浅层破裂面产生滑移破坏,坡脚锁固段岩体受上部岩体压力产生剪切裂缝;④滑坡破坏。

3.6.2 破坏力学机制

反倾岩质边坡弯曲变形破坏的变形和破坏特征是弯曲和剪切的综合作用。殷坤龙等(2014)基于悬臂梁模型,揭示了反倾岩石边坡的破坏机制并提出各破坏阶段的力学模型和应力判据(图11)。在



(a) 叠合悬臂梁弯曲-滑移变形力学模型



T_1 、 T_2 —分别为上部岩层对反倾岩层顶部A和任意位置的轴向剪切力;
 F_1 、 F_2 —分别为上部岩层对反倾岩层顶部A和任意位置的法向作用力;
 h —反倾岩层顶部A到坡顶距离; B —反倾岩层任意位置(x 处);
 y —反倾岩层法向; F —上部岩层施加法向作用力; b —岩层厚度;
 l —反倾岩层长度; α —反倾岩层倾角; G_s —反倾岩层自重;
 G_x —反倾岩层倾角自重顺向分力; G_y —反倾岩层倾角自重法向分力;
 s —任意位置(x 处)到定点A的反倾岩层长度; δ_h —上部岩层对反倾岩层顶部A的作用力

(b) 独立悬臂梁弯曲变形模型

图11 反倾岩质边坡倾覆破坏力学模型(殷坤龙等, 2014)

Fig. 11 Mechanical model of counter-tilt rock slopes(Yin et al., 2014)

(a) Mechanical model of flexural slip deformation of superposed cantilever beam; (b) Bending deformation model of independent cantilever beam

自重和梁叠合面正应力作用下产生的倾覆力矩 M_T 大于梁叠合面剪应力产生的抵抗力矩 M_R , 即:

$$M_R \leq M_T \quad (11)$$

$$M_T = G \frac{l}{2} \cos \alpha + \int_0^l (\sigma'_n - \sigma_n) x dx \quad (12)$$

$$M_R = \frac{b}{2} \int_0^l (\tau_n - \tau'_n) dx \quad (13)$$

式(11)–(13)中: σ_n 和 σ'_n 分别为梁叠合面受到上、下梁板的正应力; τ_n 和 τ'_n 分别为梁叠合面受到上、下梁板的剪应力; x 为岩体位置; α 为岩层倾角; b 为单层叠合梁宽; l 为单层叠合梁长; G 为单层梁板的重力, $G = \gamma lb$, γ 为岩体容重。

中部岩体拉裂破坏阶段的破坏判据为:

$$\sigma_T = [\sigma_T] \quad (14)$$

$$\sigma_T = \frac{M_T - M_R}{W} + \frac{\int_0^l (\tau'_n - \tau_n) dx}{b} \quad (15)$$

式中: σ_T 为梁板内拉应力, $[\sigma_T]$ 为材料抗拉强度, W 为单层梁板截面惯性矩; 其他变量含义同上。

3.7 座落式滑坡

3.7.1 演化过程

座落式滑坡的滑动面呈现上陡下缓的特征,上硬下软的岩性组合、岩层倾角大和岩层界面的差异性风化卸荷作用是座落体滑坡的主要诱因。雷清雄(2017)将座落式滑坡演化过程分为4个阶段(图12):

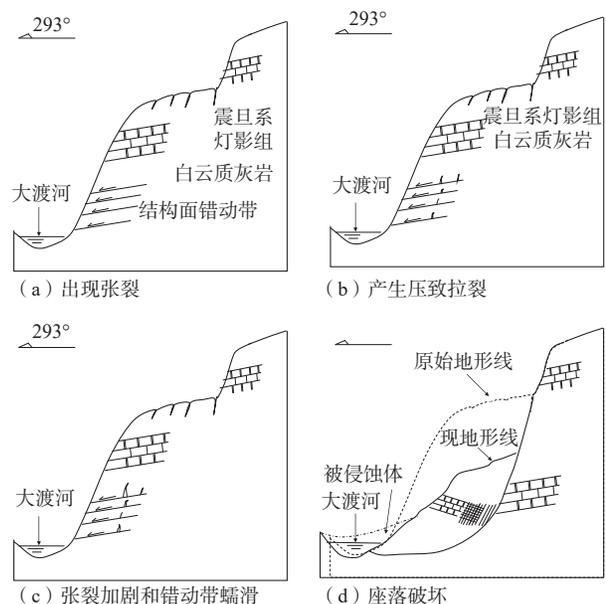


图12 座落式滑坡演化示意图(据雷清雄, 2017)

Fig. 12 Evolution diagram of sliding-falling body landslide(Lei, 2017)

①构造能量储备和“储能体”形成阶段,岩体经过历次构造应力作用但又未遭到强烈破碎,具备了储存残余应变能的条件;②应力变化产生压致拉裂,河谷下切卸荷作用促使斜坡前缘形成临空面,岩体卸荷拉裂强烈,并沿陡倾坡内的结构面产生拉张变形或张裂;③张裂加剧和错动带蠕滑,斜坡应力逐渐稳定,坡体内的水平应力使得岩体受重力控制沿着层面或层间错动带产生蠕滑时效变形;④座落破坏,岸坡岩体中的卸荷拉裂带不断扩展,逐渐形成连续的椅状拉裂蠕变带,卸荷拉裂岩体沿该带发生整体转动座落。

3.7.2 破坏力学机制

座落式滑坡具有顺层滑坡与切层滑坡的特点。由于地质、地形和降雨因素的综合作用,滑坡临空面和河道快速切口导致斜坡岩体应力松弛。在库岸边坡演化过程中,出现了大量松弛裂缝,不仅破坏了岩体的完整性,而且为降雨向边坡内渗透提供了通道。在水和重力的长期作用下,倾角斜坡可能逐渐向下倾斜,导致泥岩夹层逐渐形成基底剪切带。当剪应力达到其抗剪强度时,破裂面将完全穿透边坡。

4 问题与展望

随着中国对可再生清洁能源的大量需求和“双碳战略”的推动下,西部地区近几年和未来依然会有大量水电站相继完工和运行。工程扰动下西部地区的地质灾害问题日益凸显,由于西部地区地质灾害孕灾背景极为复杂,不同地区的地质和降雨条件差异极大,加之不同类型滑坡的成灾机理不同,针对不同类型滑坡稳定性评价方法的准确性有待提高,不同类型滑坡监测预警技术与设备研发仍存在一些卡脖子问题。

(1)广域范围内滑坡隐患快速识别研究

西部高山峡谷地区范围辽阔,地质、地形、水文、气候等多种因素影响下滑坡孕育过程不一致,无法用单一方法识别滑坡隐患。因此,需要综合利用卫星光学与遥感、无人机快速识别、地面高精度探测设备(如激光雷达 LiDAR、探地雷达 GPR 等)以及传统勘探及检测手段相结合的方式,建立滑坡隐患“空-天-地-体”一体化网络,识别高山峡谷及库区内的滑坡隐患。

(2)滑坡智能监测与分析

针对西部地区典型类别的滑坡,设计差异化的监测方案。考虑到不同类型滑坡的形态特征、运动规律以及影响因素的不同,制定针对性强的监测方案,提高监测效率和准确性。通过引入人工智能、大数据等技术,建立智能化的滑坡监测系统。通过对大量监测数据的分析和处理,实现对滑坡变形趋势的智能预测和预警,提高监测系统的自动化水平和预警效果。

(3)滑坡多因素多尺度稳定性评价方法研究

针对西部地区的滑坡发育影响因素及滑坡演变力学机制,综合考虑地质、地形、水文、气候等多种因素对不同类型滑坡稳定性的影响。建立包含多个参数的评价模型,通过综合分析各种因素的相互作用,全面评估滑坡的稳定性。发展多尺度的滑坡稳定性评价方法,从微观至宏观,充分考虑地质结构和水文条件对滑坡稳定性的影响。通过多尺度分析,提高评价结果的可靠性和精确度。

5 结论

(1)中国西部水电工程多分布于高山峡谷之中,这些地区地质构造错综复杂,呈现高海拔、深切河谷和高原地貌的明显特征。受地质背景和构造活动的影响,地壳活动强烈,地震活动频繁,水平挤压显著,岩性复杂多变,导致滑坡灾害分布广泛,多发频发。

(2)以西部水电工程大量滑坡为例,系统梳理其成因与地形地貌、地层岩性、地质构造、坡体结构、降雨、库水及地震等因素的关系:多数滑坡发育在 1000 m 以上高程,以大型、特大型和巨型滑坡为主;基岩滑坡数量多于堆积层滑坡;仅雅砻江和大渡河流域滑坡发育对河流岸别具有选择性;滑坡最易成生的坡度为 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$,坡高为 200~800 m;易滑地层为三叠系、奥陶系和志留系地层;岸坡结构对滑坡发育无明显影响;部分滑坡会受到区域地质构造以及降雨和库水的影响。

(3)从物质组成、滑动机制、变形破坏模式等方面对西部地区水电工程滑坡类型进行了分析。滑坡按物质组成可分为堆积层滑坡和基岩滑坡 2 大类。堆积层滑坡按启动机制又分为牵引式滑坡、推移式滑坡和复合式滑坡。基岩(岩质)滑坡按变形

机制则可分为以顺层岩质滑坡、溃屈式滑坡、反倾岩质滑坡和座落式滑坡。针对不同演化过程和破坏力学机制下的滑坡灾变机理进行了阐述。

References

- BELLONI L G, STEFANI R, 1987. The Vajont slide: instrumentation: past experience and the modern approach[J]. *Engineering Geology*, 24(1-4): 445-474.
- CHEN Z L, ZHANG X Y, SHEN F, et al., 1999. GPS monitoring of the crustal motion in southwestern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(19): 1804-1807. (in Chinese with English abstract)
- CHENG G D, JIN H J, 2013. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and it changes[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- China electricity council, 2007. Design specification for slope of hydropower and water conservancy project: DL/T 5353-2006[S]. Beijing: China Electric Power Press: 6-72. (in Chinese)
- DU Y, YAN E C, CAI J S, et al., 2023. Mechanical discrimination of stability state of progressive failure of broken-line complex landslides[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 45(6): 1151-1161. (in Chinese with English abstract)
- HU R J, FAN Z L, WANG Y J, et al., 2002. Groundwater resources and their characteristics in arid lands of northwestern China[J]. *Journal of Natural Resources*, 17(3): 321-326. (in Chinese with English abstract)
- HUANG R Q, 2007. large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 433-454. (in Chinese with English abstract)
- HUANG R Q, 2009. Some catastrophic landslides since the twentieth century in the southwest of China[J]. *Landslides*, 6(1): 69-81.
- KENNEDY R, TAKE W A, SIEMENS G, 2021. Geotechnical centrifuge modelling of retrogressive sensitive clay landslides[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(10): 1452-1465.
- LEI Q X, 2017. Analysis of formation mechanism and environmental effects of collapses and landslides at Hanyuan-Tongjiezi in the Dadu River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- LIAN B Q, PENG J B, ZHAN H B, et al., 2020. Formation mechanism analysis of irrigation-induced retrogressive loess landslides[J]. *CATENA*, 195: 104441.
- LIU G R, YAN E C, LIAN C, 2002. Discussion on classification of landslides[J]. *Journal of Engineering Geology*, 10(4): 339-342. (in Chinese with English abstract)
- LIU S Q, YI Q L, YI W, et al., 2014. Analysis of deformation and failure mechanism of Shuping landslide in Three Gorges reservoir area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 35(4): 1123-1130, 1202. (in Chinese with English abstract)
- abstract)
- LU Y F, 2015. Deformation and failure mechanism of slope in three dimensions[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(2): 109-119.
- PENG J B, LENG Y Q, ZHU X H, et al., 2016. Development of a loess-mudstone landslide in a fault fracture zone[J]. *Environmental Earth Sciences*, 75(8): 658.
- ROSSO R, RULLI M C, VANNUCCHI G, 2006. A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding[J]. *Water Resources Research*, 42(6): W06410.
- SUN G Z, 1988. Rock mass structure mechanics[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- TANG H M, ZHANG G C, 2005. A study on slope stability during reservoir water level falling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 26(S2): 11-15. (in Chinese with English abstract)
- TANG H M, LI D W, HU X L, 2009. Faulting characteristics of Wenchuan earthquake and evaluation theory of regional crustal stability for engineering[J]. *Journal of Engineering Geology*, 17(2): 145-152. (in Chinese with English abstract)
- TANG H M, ZOU Z X, XIONG C R, et al., 2015. An evolution model of large consequent bedding rockslides, with particular reference to the Jiweishan rockslide in Southwest China[J]. *Engineering Geology*, 186: 17-27.
- TANG Y Y, 1992. The effect of neotectonic movement on formations of landslide and debris flow in Southern Gansu[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 28(4): 152-160. (in Chinese with English abstract)
- VARNES D J, 1978. Slope movement types and processes[R]. Washington: Transportation Research Board Special Report.
- WANG F, TANG H M, ZHANG G C, et al., 2018. Development characteristics and evolution mechanism of the deep-seated toppling in the upstream of the Yalong River, China[J]. *Mountain Research*, 36(3): 411-421. (in Chinese with English abstract)
- WANG K W, DENG C J, ZHANG F, 2012. Formation process of Tanggudong landslide and Yuri accumulation body in Yalong river valley in southwest China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 20(6): 955-970. (in Chinese with English abstract)
- WANG G X, 2005. Key technique in landslide control and its handling measures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(21): 3818-3827. (in Chinese with English abstract)
- WANG L S, ZHANG Z Y, 1979. Basic geomechanic model of slope deformation[C]//Proceedings of the First Engineering Geology Congress. Suzhou. (in Chinese)
- WANG Q Z, LI Z Q, YIN Y, et al., 2020. Distribution characteristics of typical geological relics in the Western Sichuan Plateau[J]. *Open Geosciences*, 12(1): 307-323.

- WANG S J, 1966. An engineering geological study on the mechanical behaviour of a rock mass[J]. Chinese Journal of Geology, 7(1): 64-78. (in Chinese with English abstract)
- XU J R, ZHAO Z X, ISHIKAWA Y, 2008. Regional characteristics of crustal stress field and tectonic motions in and around Chinese mainland[J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(3): 770-781. (in Chinese with English abstract)
- XU L, DAI F C, CHEN J, et al., 2014. Analysis of a progressive slope failure in the Xiangjiaba reservoir area, Southwest China[J]. Landslides, 11(1): 55-66.
- XU Q, HUANG R Q, LI X Z, 2004. Research progress in time forecast and prediction of landslides[J]. Advance in Earth Sciences, 19(3): 478-483. (in Chinese with English abstract)
- XU Q, HUANG R Q, 2008. Kinetics characteristics of large landslides triggered by May 12th Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 16(6): 721-729. (in Chinese with English abstract)
- YAN G Q, YIN Y P, HUANG B L, et al., 2022. Deterioration-buckling failure mechanism of consequent bedding limestone bank slope in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 43(9): 2568-2580. (in Chinese with English abstract)
- YI Z J, 2010. Research on formation mechanism and stability of Tanggudong giant landslide of Lenggu hydropower station[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- YIN K L, ZHOU C M, CHAI B, 2014. Reservoir area failure mechanism and criterion of counter-tilt rock slopes at Wuxia gorge section in three gorges[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 33(8): 1635-1643. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, PENG X M, 2007. Failure mechanism on Qianjiangping landslide in the three gorges reservoir region[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 34(3): 51-54. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, 2008. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 16(4): 433-444. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG D, WU Z H, LI J C, et al., 2013. An overview on earthquake-induced landslide research[J]. Journal of Geomechanics, 19(3): 225-241. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L F, WU Y P, MIAO F S, et al., 2019. Mechanical model and stability analysis of progressive failure for thrust-type gently inclined shallow landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 40(12): 4767-4776. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG S S, HU X L, ZHANG G C, et al., 2018. Catastrophic evolution and control technology of major landslides in western hydropower project[M]. Beijing: China Water & Power Press. (in Chinese)
- ZOU Z X, TANG H M, XIONG C R, et al., 2012. Geomechanical model of progressive failure for large consequent bedding rockslide and its stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(11): 2222-2231. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 中国电力企业联合会, 2007. 水电水利工程边坡设计规范: DL/T 5353—2006[S]. 北京: 中国电力出版社: 6-72.
- 陈智梁, 张选阳, 沈凤, 等, 1999. 中国西南地区地壳运动的 GPS 监测[J]. 科学通报, 44(8): 851-854.
- 程国栋, 金会军, 2013. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化[J]. 水文地质工程地质, 40(1): 1-11.
- 杜毅, 晏鄂川, 蔡静森, 等, 2023. 折线型复合式滑坡渐进破坏稳定性状态的力学判别[J]. 岩土工程学报, 45(6): 1151-1161.
- 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等, 2002. 中国西北干旱区的地下水资源及其特征[J]. 自然资源学报, 17(3): 321-326.
- 黄润秋, 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 26(3): 433-454.
- 雷清雄, 2017. 大渡河汉源—铜街子段崩、滑灾害成因机制及环境效应研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 刘广润, 晏鄂川, 练操, 2002. 论滑坡分类[J]. 工程地质学报, 10(4): 339-342.
- 卢书强, 易庆林, 易武, 等, 2014. 三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J]. 岩土力学, 35(4): 1123-1130, 1202.
- 孙广忠, 1988. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社.
- 唐辉明, 章广成, 2005. 库水位下降条件下斜坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 26(S2): 11-15.
- 唐辉明, 李德威, 胡新丽, 2009. 龙山门断裂带活动特征与工程区域地壳稳定性评价理论[J]. 工程地质学报, 17(2): 145-152.
- 唐永仪, 1992. 新构造运动在陇南滑坡泥石流形成中的作用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 28(4): 152-160.
- 王飞, 唐辉明, 章广成, 等, 2018. 雅砻江上游深层倾体发育特征及形成演化机制[J]. 山地学报, 36(3): 411-421.
- 王恭先, 2005. 滑坡防治中的关键技术及其处理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 24(21): 3818-3827.
- 王兰生, 张倬元, 1979. 斜坡岩体变形破坏的基本模式[C]//第一届工程地质大会论文. 苏州.
- 王孔伟, 邓成进, 张帆, 2012. 中国西南雅砻江流域唐古栋滑坡及雨日堆积体形成机理分析. 工程地质学报, 20(06): 955-970.
- 王思敬, 1966. 以工程地质观点探讨岩体的力学属性[J]. 地质科学, 7(1): 64-78.
- 徐纪人, 赵志新, 石川有三, 2008. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究[J]. 地球物理学报, 51(3): 770-781.
- 许强, 黄润秋, 李秀珍, 2004. 滑坡时间预测预报研究进展[J]. 地球科学进展, 19(3): 478-483.
- 许强, 黄润秋, 2008. 5.12 汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报, 16(6): 721-729.
- 闫国强, 殷跃平, 黄波林, 等, 2022. 三峡库区顺层灰岩岸坡劣化-溃

- 屈灾变机制研究[J]. 岩土力学, 43(9): 2568-2580.
- 易志坚, 2010. 楞古水电站唐古栋巨型滑坡成因机制及稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 殷坤龙, 周春梅, 柴波, 2014. 三峡库区巫峡段反倾岩石边坡的破坏机制及判据[J]. 岩石力学与工程学报, 33(8): 1635-1643.
- 殷跃平, 彭轩明, 2007. 三峡库区千将坪滑坡失稳探讨[J]. 水文地质工程地质, 34(3): 51-54.
- 殷跃平, 2008. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 16(4): 433-444.
- 张铎, 吴中海, 李家存, 等, 2013. 国内外地震滑坡研究综述[J]. 地质力学学报, 19(3): 225-241.
- 张龙飞, 吴益平, 苗发盛, 等, 2019. 推移式缓倾浅层滑坡渐进破坏力学模型与稳定性分析[J]. 岩土力学, 40(12): 4767-4776.
- 张世殊, 胡新丽, 章广成, 等, 2018. 西部水电工程重大滑坡灾变演化及控制技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社.
- 邹宗兴, 唐辉明, 熊承仁, 等, 2012. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 31(11): 2222-2231.

获奖者简历:

张世殊, 正高级工程师, 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司党委副书记、总经理, 国际岩石力学与岩石工程学会(ISRM)中国国家小组副主席, 四川省岩石力学与工程学会理事长。2023年荣获第十八次李四光地质科学奖野外奖。从事水电工程勘察设计和技术管理工作30余年, 为我国水电开发建设事业做出重要贡献: 牵头国家某重大工程勘察设计与技术管理工作, 策划并实施该巨型工程重大科学问题与关键技术的科技攻关, 系统构建超2000 m级深部工程定向钻探与随钻探测技术、超深厚河床覆盖层原位取样测试技术; 研发高能环境深埋越岭隧TBM高效安全施工与超前地质预报技术, 显著促进工程勘测技术水平的重大提升; 提出工程岩体力学参数综合取值方法, 开创性地利用Ⅲ2类岩体作为300 m级特高拱坝坝基, 突破高坝基岩体利用下限, 为特高拱坝建基面的科学选定做出贡献; 解决滑坡失稳堰塞、高陡危岩体、泥石流、隐蔽型变形体等地质灾害防控难题, 为水电工程安全建设与运行提供支撑。获国家发明专利授权50余项; 出版技术专著13部, 编纂专业辞典2部; 发表论文100余篇; 起草行业、团体技术标准16项。先后获国务院政府特殊津贴专家、电建集团首席技术专家、四川省工程勘察设计大师, 入选成都市重大人才计划“蓉城英才计划”。获国家科技进步二等奖1项、省部级科技进步特等奖等25项科技奖。

