

DOI: 10.11779/CJGE202007011

开挖致使古滑坡复活变形机理研究

黄晓虎^{1,2}, 易武^{1,2}, 龚超³, 黄海峰^{1,2}, 余庆⁴

(1. 三峡大学防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002;
3. 宁夏回族自治区电力设计院有限公司, 宁夏 银川 750000; 4. 云南省煤田地质局, 云南 昆明 650034)

摘要:以三峡库区兴山县大礼溪村古滑坡为例,通过地质勘察、近1a的现场宏观巡查、人工GPS位移监测数据、自动GPS监测数据等,在剖析该滑坡存在的古滑坡特征的基础上,分析了滑坡复活过程中地表裂缝发育的时空规律以及变形特征,并结合Geo-Studio模拟确定了开挖和降雨两种作用对古滑坡复活变形的影响及主次关系。研究表明:①大礼溪滑坡为地质历史时期形成的含软层中—陡倾顺层岩质古滑坡;②滑坡复活变形与开挖作用密切相关,前期集中于临近最早开挖区域的前缘Q3附近,并沿着开挖方向逐渐在前缘Q4、Q5出现,最终在前缘Q5附近演化出次级滑坡,与此同时,纵向上变形逐渐向中后部推进,表现出渐进后退的发育特征;③开挖作用是滑坡变形复活的主要因素和诱发因素,降雨为激发因素,两者共同作用促使变形持续发展。

关键词:古滑坡;变形复活;开挖;变形特征

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)07-1276-10

作者简介:黄晓虎(1987—),男,博士,讲师,主要从事地质灾害预测与防治方面的教学与研究工作。E-mail: 88569096@qq.com。

Reactivation and deformation mechanism of ancient landslides by excavation

HUANG Xiao-hu^{1,2}, YI Wu^{1,2}, GONG Chao³, HUANG Hai-feng^{1,2}, YU Qing⁴

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Hubei Province, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. National Field Observation and Research Station of Landslides in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Ningxia Electric Power Design Institute Co., Ltd., Yinchuan 750000, China; 4. Yunnan Coalfield Geology Bureau, Kunming 650034, China)

Abstract: The Dalixi ancient landslide in Xingshan County in the Three Gorges Reservoir area is taken as an example. Based on the analysis of its characteristics, the deformation characteristics and temporal-spatial laws of surface cracks of the ancient landslide in the process of landslide revival are analyzed by use of geological survey, site inspection for nearly one year, artificial GPS displacement monitoring data and automatic monitoring data. Based on the Geo-Studio simulation, the influences of excavation and rainfall on the revival deformation of the ancient landslide and the primary and secondary relationships are determined. The results show that: (1) The Dalixi landslide is a middle-steep consequent ancient rock landslide with soft layer in geological history period. (2) The deformation of Dalixi landslide is closely related to excavation. In the early stage, it concentrates near the leading edge Q3 of the first excavation area, and gradually appears along the excavation direction at the leading edge Q4 and Q5, and finally evolves into the secondary landslides near the leading edge Q5. At the same time, the vertical deformation gradually advances to the middle and rear, showing the characteristics of progressive retrogression. (3) The excavation is the inducing factor for the revival of landslide deformation, and the rainfall is the stimulating factor. Both of them work together to promote the sustainable development of landslide deformation

Key words: ancient landslide; deformation reactivation; excavation; deformation feature

0 引 言

随着“西部大开发”战略及“一带一路”倡议的实施,西部县域经济逐渐升温。人类活动空间范围的逐渐扩展,与土地资源匮乏的矛盾日益突出。部分地区采取开挖自然斜坡坡脚进行造地来解决这一矛盾,

对地质环境的扰动程度不断加大,同时,极端气候的

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41807294);湖北省自然科学基金项目(2018CFB400);湖北省教育厅科学技术研究计划指导性项目(B2018014)

收稿日期:2019-07-17

*通信作者(E-mail: yiwu@ctgu.edu.cn)

频繁出现, 滑坡灾害, 尤其是古滑坡的复活问题日益突出, 对基础设施以及人民生命财产, 特别是对山区水库、水电站以及交通干线和城镇安全等造成巨大威胁。

古滑坡的复活通常是人类活动、降雨及地震等多因素综合作用的复杂过程^[1]。Burda 等^[2]以波希米亚 (Bohemia) 北部艾森伯格 (Eisenberg) 地区盆地边缘古滑坡为研究对象, 分析了气候变化和冰雪融化对其复活的影响。Ronchetti 等^[3]对意大利 (Italy) 北部亚平宁地区的瓦勒利亚滑坡 (Valoria landslide) 自 2005 年—2006 年的复活变形进行了研究。Deng 等^[4]对大渡河流域大型古滑坡的时空特征, 以及古滑坡形成机制和演化过程进行了分析, 并指出河流侵蚀与古滑坡、复杂滑坡和多级滑坡之间的形成联系。吴瑞安等^[5]总结了青藏高原东缘古滑坡复活的特征, 并以上窑沟古滑坡为例, 剖析了古滑坡的复活机理, 并对其危险性进行了预测评价。许多学者^[6-10]对库区古滑坡的复活机制进行了分析, 并研究了古滑坡复活的各类因素。

实际上, 部分古滑坡的复活, 人类工程活动往往是一个关键的主导因素, 例如, 四川省丹巴县甲居古滑坡因季节性强降雨和坡脚开挖发生渐进后退式破坏, 并逐年加强, 严重威胁滑坡上的藏寨村落及前缘公路安全^[11]。云南省金沙江支流冲江河的螺蛳湾巨型古滑坡, 因国道 G214 施工开挖坡脚和强降雨而出现局部复活, 严重威胁国道和螺丝湾水电站的安全^[12]。位于三峡库区兴山县大礼溪村的大礼溪生态工业园区是兴山县“一区多园”工业战略的重要布局地点。自 2015 年 10 月起开始实施基础设施工程建设, 对大礼溪村所处的自然斜坡坡脚进行开挖, 同时改迁原大礼溪河道并进行大规模填方, 在此过程中, 区域前缘先后出现蒋家淌滑坡、团堡滑坡、黄家岭滑坡等小型滑坡, 目前均已挖除。2017 年, 滑坡出现大规模的古滑坡复活变形及次级滑坡, 给当地人民及工业园造成了巨大的损失。开挖自然斜坡, 不可避免地会改变坡体的应力状态, 进而引起变形^[13-16]。对于古滑坡来说, 由于滑带等软弱结构面的存在, 开挖作用对其扰动理应更加明显, 加之强降雨可能存在的增幅作用, 导致其变形机理也就更加复杂。

本文以三峡库区兴山县大礼溪村古滑坡为例, 结合地质勘察、近 1 a 的现场宏观巡查、人工 GPS 位移监测数据、自动 GPS 监测数据等, 在剖析该滑坡存在的古滑坡特征的基础上, 分析了滑坡复活过程中地表裂缝发育的时空规律以及变形特征, 并确定了开挖与降雨两种作用在古滑坡复活变形中的主次关系。对有

效防范古滑坡复活引起整体破坏, 保障基础设施和居民生命财产安全具有重要参考价值。

1 滑坡案例

1.1 滑坡基本特征

大礼溪滑坡位于湖北省兴山县昭君镇大礼村, 平面形态呈宽“M”形, 后缘以斜坡出露的岩土分界为边界, 左侧以乱泥湖湾与土地湾东侧山脊为界, 右侧边界沿村委会东北侧山脊并向下顺沟谷直抵工业园区场坪。主滑方向 225°, 纵长约 800 m, 均宽 600 m, 分布面积约 $41.86 \times 10^4 \text{ m}^2$, 平均厚度 35 m, 总体积约 $1465 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属特大型滑坡。滑坡所处斜坡整体特征为上陡下缓, 标高 179~685 m, 相对高差 506 m。区域内发育四条较大的季节性冲沟, 冲沟走向与斜坡倾向一致。坡体上存在三级阶梯状平台, 分别位于高程 325, 366, 480 m 处, 平台上分布蒋家淌、乱泥湖湾、村委会和土地湾 4 个较大的居民点。

因兴山县生态工业园大礼溪片基础设施工程的实施, 2015 年开始对原大礼溪河道进行改造, 并在斜坡前缘坡脚开挖形成建设用地, 于 2017 年在滑坡前缘场坪区形成高程分别为 234, 256 m 的两级平台。并在形成 3 个高约 50 m, 坡度 30° 的人工边坡 Q3、Q4、Q5, 详见滑坡工程地质平面图(图 1), 剖面见图 2(a)。针对逐渐加剧的地表变形, 2017 年 5 月底在滑坡 Q4 区域中前部, 增加了 3 个补充勘探孔, 位置见图 1, 揭示了滑坡的物质结构。

滑体主要分为两部分: 表层为含砾粉质黏土或碎块石夹土, 灰—黄褐色, 可塑, 砾石含量 10%~30% 不等, 厚度一般 0.5~10 m 不等; 下部为紫红色粉砂质泥岩夹灰白色长石砂岩, 厚度一般 15~40 m, 中—厚层, 粉砂质泥岩力学性质差, 抗风化能力较弱, 在干湿交替作用下, 极易风化土状。长石砂岩的力学性质与抗风化能力较强。

滑带为紫红色粉砂质泥岩与长石砂岩组成的“强—弱”互层结构之间的层间软弱带, 见图 2(e)。从区域上看, 层间软弱带有多层, 滑坡前缘开挖区域有所揭露, 见图 2(b)。

1.2 古滑坡特征识别

如何在尽可能早的阶段识别出古滑坡, 是一个难点。针对此问题, 许强等^[17]从微地貌、地层岩性、变形迹象等体现的古滑坡特征出发, 构建了一套完整的递进式判断体系。本文依据其方法, 判断如下:

(1) 微地貌特征

剖面图 2(a) 显示, 大礼溪滑坡整体表现为上陡下缓的典型“椅状”地貌, 前缘坡高近 60 m, 坡角约

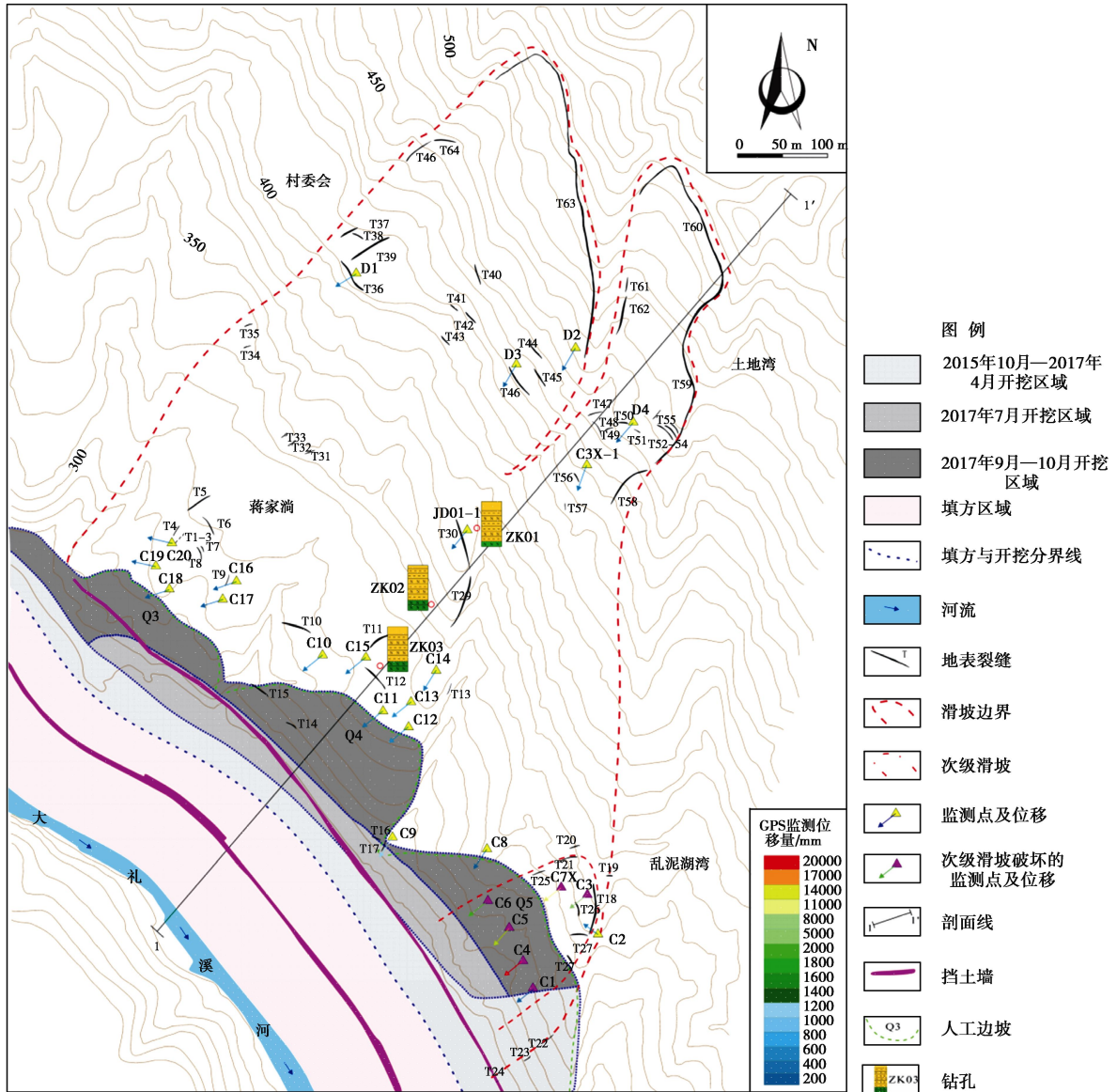
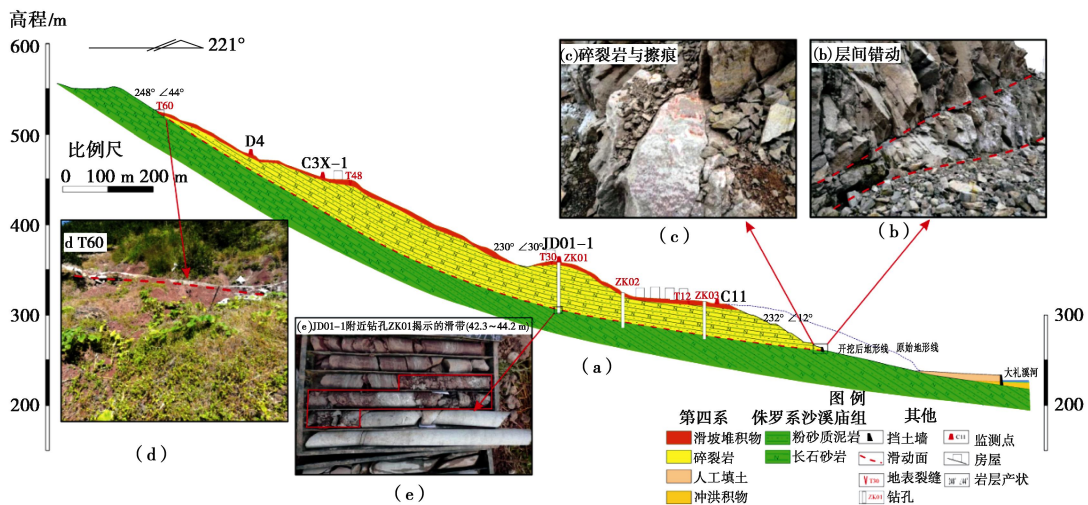


图1 大礼溪滑坡工程地质平面图

Fig. 1 Topography of Dalixi landslide



注：(a) 大礼溪主滑剖面I-I'；(b) 前缘碎裂岩及层间软弱带；(c) 碎裂岩与擦痕；(d) 后缘T60裂缝；(e) JD01-1附近钻孔ZK01揭露的滑带(42.3~44.2 m)

图2 大礼溪滑坡剖面图(I-I') (位置见图1)

Fig. 2 Geological cross section (I-I') of Dalixi landslide (see location in Fig. 1)

表1 大礼溪滑坡地表裂缝统计表

Table 1 Statistical data of cracks of Dalixi landslide

编号	走向/(°)	性质	位置	出现时间
T1~T9	155~235	前缘 Q3 附近拉张裂缝, 长约 3~30 m, 宽约 1~5 cm, 无明显上下错动, 可见约深度 5~10 cm	前缘 Q3	2017 年 2 月
T10~T17	130~240	前缘 Q4 附近拉张裂缝, 长约 5~40 m, 宽约 3~30 cm, 局部有错动约 5~20 cm, 可见约深度 5~15 cm	前缘 Q4	2017 年 3 月, 4 月
T18~T28	130~160	前缘 Q5 附近拉张、剪切裂缝, 断续延伸 5~50 m, 宽约 10~35 cm, 局部有错动约 200 cm, 可见约深度 10~30 cm	前缘 Q5	2017 年 5 月次级滑坡发生时产生
T29~T30	160~190	拉张裂缝, 长约 50~60 m, 宽约 3~10 cm, 可见约深度 10 cm	滑体中部	2017 年 7 月
T31~T35	170~260	拉张裂缝, 长约 4~8 m, 宽约 1~3 cm, 可见约深度 5~10 cm	滑体中部	2017 年 7 月
T36, T40~T57	145~170	滑体拉张裂缝, 长约 5~40 m, 宽约 1~10 cm, 局部有明显错动约 150 cm, 可见约深度 15~30 cm	滑体中后部	2017 年 10 月
T37~T39, T58~T65	155~230	后缘拉张、剪切裂缝, 长约 5~10 m, 宽约 5~15 cm, 局部有上下错动约 5~10 cm, 可见约深度 20 cm	后缘及两侧边界裂缝	2017 年 10 月

25°, 临空条件良好。同时在高程 325, 366, 480 m 存在三级阶梯状平台。

(2) 地层岩性

主滑剖面上的岩层产状从后缘、中部至前缘分别为 248° ∠44°, 230° ∠30°, 232° ∠12°, 呈现明显的“陡—缓”变化, 且岩层倾向与滑坡主滑方向近似一致, 为顺向坡。与此同时, 前缘开挖出露的岩体显示, 节理裂隙非常发育, 岩体破碎, 为典型的碎裂岩体, 且岩体中可见明显的层间破碎带, 见图 2(b)。

(3) 历史变形迹象

现场地质调查发现, 滑坡前缘左侧岩层间有明显擦痕, 该擦痕面光滑, 擦痕清晰可见, 见图 2(c), 其侧伏向约为 230°, 侧伏角约为 90°, 擦痕产状表明岩体在地质历史时期产生过顺层滑动。

从微地貌、地层岩性、历史变形迹象等一系列特征出发, 可判断大礼溪滑坡为地质历史时期的含软层中—陡倾顺层岩质古滑坡。

2 滑坡变形特征

2.1 裂缝发育的时空分布规律

根据 1 次/月 (汛期 2 次/月) 的宏观地质巡查显示, 自首期巡查 (2017 年 2 月 14 日) 在前缘 Q3 区域地表裂缝 T1~T9 之后, 裂缝持续发育, 且呈现与开挖方向相向伴随的特征, 在纵向上呈现明显的渐进后退的发育特征。2017 年 4 月发现 T10~T17 裂缝; 5 月, 前缘左侧发生次级滑坡, 并出现 T18~T28 裂缝; 6 月—9 月受强降雨及持续开挖影响, 变形向滑坡

中部、后部发展; 10 月受持续降雨及持续开挖影响, 在滑坡后缘部位出现多处地表裂缝及错动台坎, 并形成后缘边界裂缝形成。典型裂缝照片见图 3, 性质见表 1。具体裂缝发育过程如下:

(1) 滑坡前缘裂缝发育

前缘左侧坡脚 (Q3、Q4) 在开挖作用下, 阻滑区域减小, 所提供的阻滑力减小, 斜坡稳定性逐渐降低。与此同时, 开挖形成的人工边坡进入应力调整阶段, 边坡顶部出现因应力释放而产生的拉张裂缝, 变形的发展与开挖强度明显相关。前缘 (Q3、Q4) 出现的裂缝 T1~T9 以及 T10~T17 为此阶段产生。裂缝造成前缘 Q3 (蒋家淌) 居民房屋开裂, 见图 3 (a)。

(2) 次级滑坡及相应变形

4 月下旬至 5 月初, 开挖开始集中于前缘右侧 Q5 (乱泥湖湾) 附近, 由于开挖方式为自坡脚向坡顶开挖, 且无支护工程, 导致滑坡右侧局部稳定性急剧降低, 于 5 月 13 日发生次级滑坡, 造成 C1、C3、C4、C5、C6、C7X 监测墩破坏 (见图 1)。并形成 T18~T28 裂缝, 典型裂缝特征见图 4。因次级滑坡的产生, 开挖工作暂时停止。

(3) 滑坡中部裂缝产生

7 月, 随着前缘坡脚开挖的恢复, 滑坡整体稳定性继续降低, 处于坡体中的多处层间软弱带被逐渐揭露, 层间软弱带受到的扰动显著加强, 同时由于 7 月份的强降雨作用, 滑坡再一次出现明显变形, 形成裂缝 T29~T35 (7 月、8 月)。裂缝 T30 造成中部房屋场坪开裂, 见图 3 (b)。

(4) 滑坡后缘裂缝及边界裂缝形成

进入 9 月下旬, 开挖工作临近结束, 此时整体稳定性逐渐降至最低, 并受 9 月—10 月持续强降雨影响, 于 10 月在滑坡接近后缘部位先后出现多条拉张裂缝和边界裂缝。其中 T36, T40~T57 主要为坡体中后段拉张裂缝; T37~T39, T58~T65 为滑坡边界裂缝, 其中 T59、T63 等裂缝的形成导致多处房屋受损和局部垮塌, 见图 3 (c), (d)。地表裂缝延伸至后缘, 形

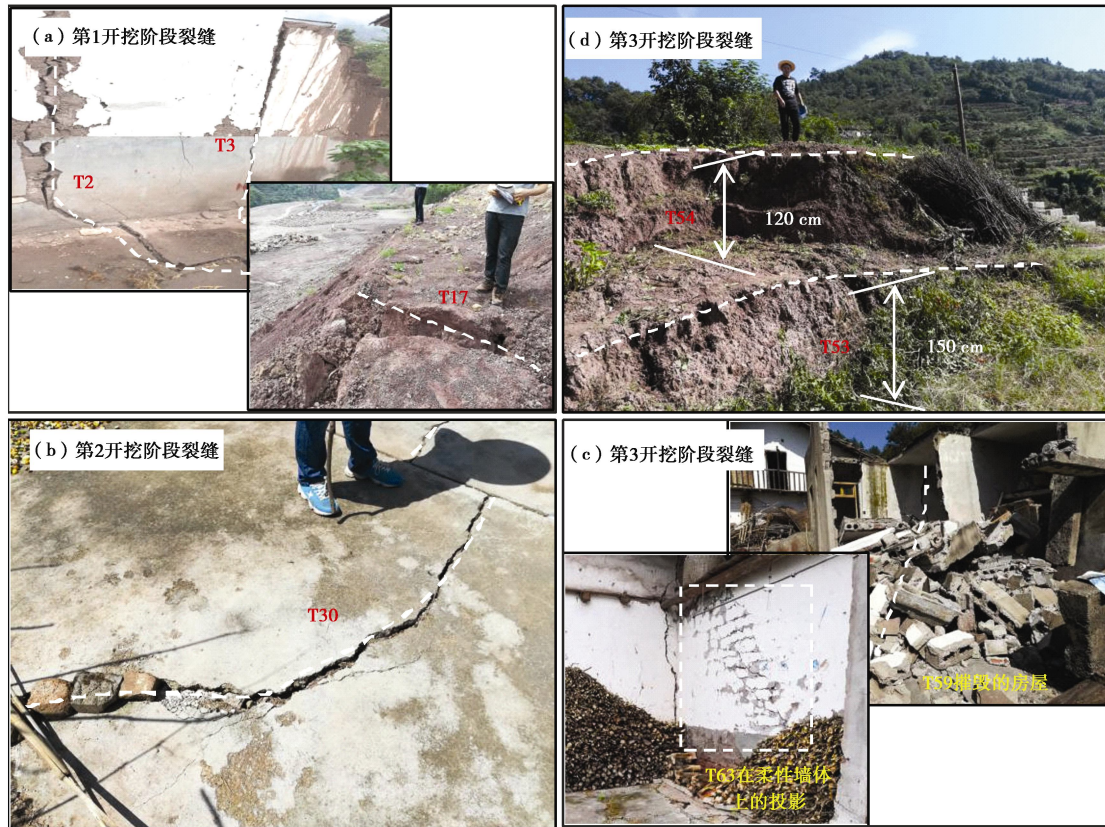


图3 各开挖阶段的典型裂缝

Fig. 3 Typical cracks of various excavation stages

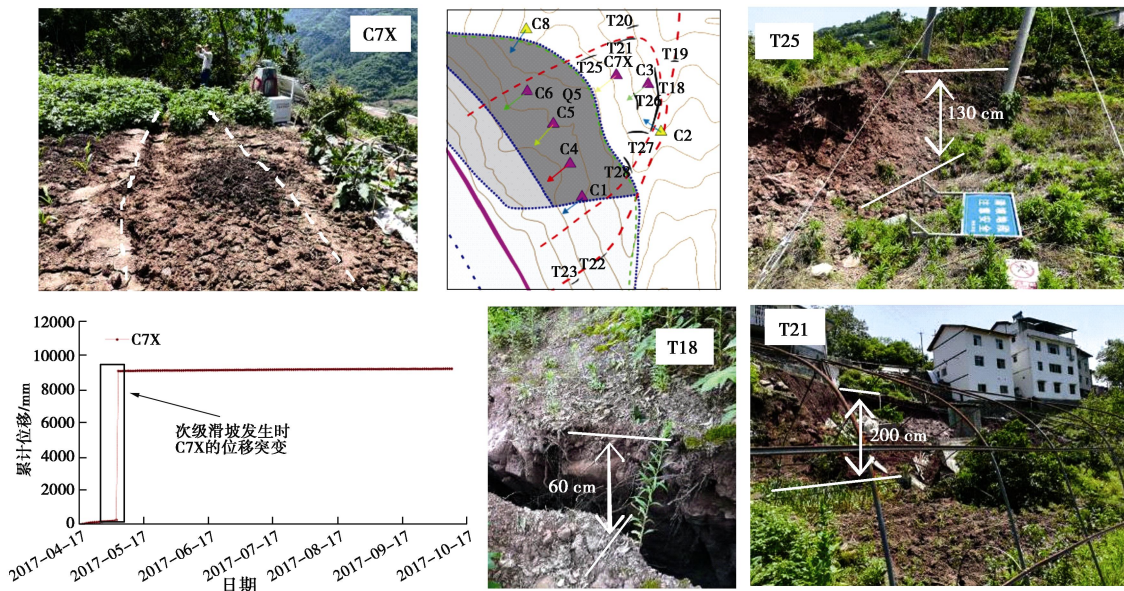


图4 2017年5月13日次级滑坡变形特征

Fig. 4 Deformation characteristics of secondary landslide on May 13, 2017

成“M”型边界裂缝。

大礼溪滑坡变形, 前期集中于临近最早开挖区域的前缘 Q3 附近, 并沿着开挖方向逐渐在前缘 Q4、Q5 出现, 最终在前缘 Q5 附近演化出次级滑坡, 与此同时, 纵向上变形逐渐向中后部推进, 表现出渐进后退

的发育特征。

2.2 监测网络

鉴于大礼溪滑坡地表裂缝发育在纵向上呈现的渐进后退发育特征, 逐步布设了遍布整个坡面的监测网络。2017年2月, 首先在滑坡前缘建立 20 个人工监

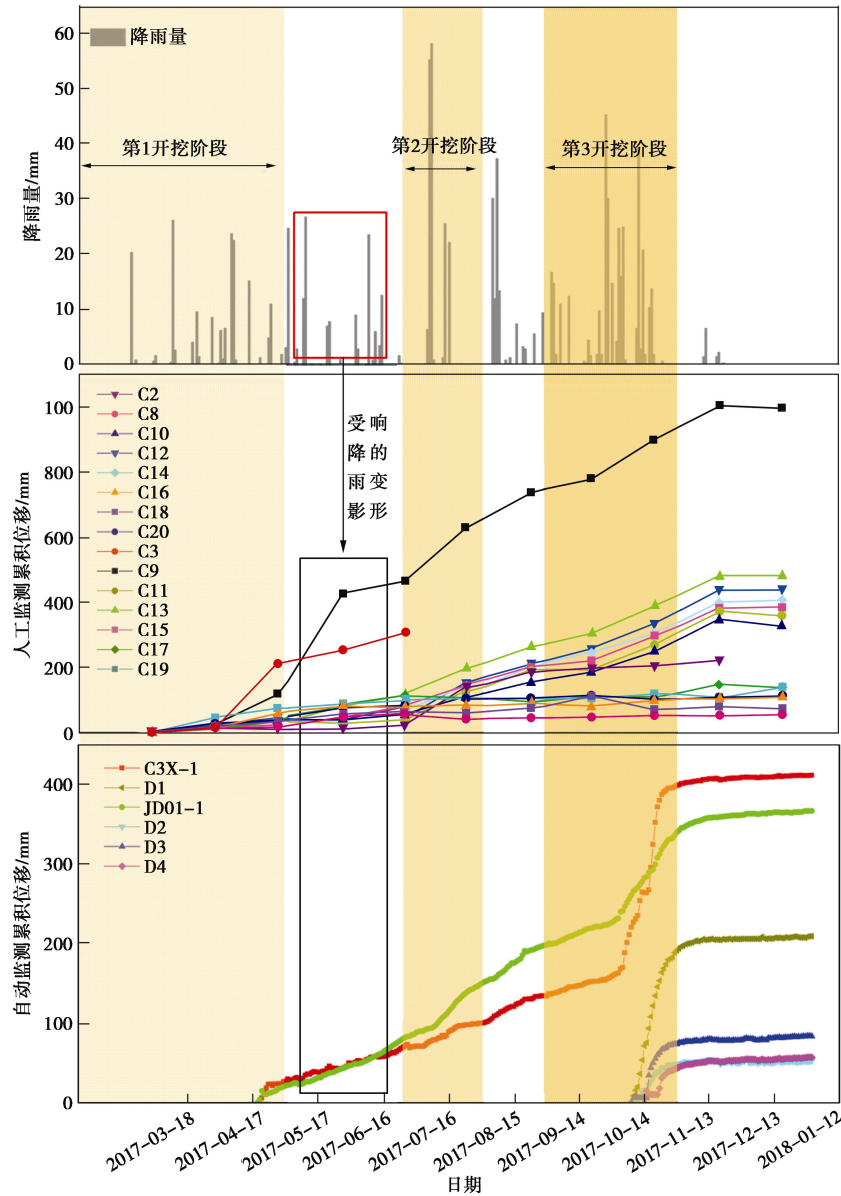


图 5 人工 GPS 监测点、自动 GPS 监测点累计位移与时间关系曲线

Fig. 5 Curves of accumulated displacement and monthly displacement rate at artificial GPS monitoring points

测点 (C1~C20)。随着变形的后移, 4 月布设 3 个自动监测点 (C7X、C3X-1、JD01-1), 10 月布设 4 个自动监测点 (D1~D4)。监测点布置见图 1。并经过室内分析获取累计位移与降雨、开挖的关系图, 见图 5。

由于 2017 年 5 月 13 日次级滑坡破坏了 C1、C3、C4、C5、C6、C7X 监测墩, 数据时长过短, 数据分析时未统计入内。

2.3 变形分析

图 1 所示, 人工监测点与自动监测有着近似的位移方向 (约 220°), 除受局部地形控制的部分监测点外, 如 Q3 区域的 C16~C20, 方向偏向右侧沟谷 (约 250°)。从地表裂缝发育的过程可知, 大礼溪滑坡的变形呈现一种与开挖密切相关, 并逐步后移的特征。

(1) 第 1 开挖阶段 (2017 年 2 月—4 月)

a) 此阶段是自 2015 年 10 月开始开挖的收尾阶段, 开挖范围见图 1 所示。挖除的主要为第四纪覆盖物以下的较完整的碎裂岩体。开挖方式为爆破开挖, 并由 Q3 向 Q5 逐步推进。同时, 4 月中旬该区域遭受突发暴雨, 月累积降雨量达 82.8 mm, 主要集中在 4 月 8 日—10 日, 单日最大降雨量 25 mm。

在两者作用下, 前缘 Q5 (C1~C8) 的月位移速率达到 8.12~198.83 mm/月; Q4 (C10~C15) 的月位移速率达到 8.9~94.91 mm/月; Q3 (C16~C20) 的月位移速率达到 8.07~46.78 mm/月, 详见图 5。鉴于地表裂缝大量发育, 开挖作业暂时停止, 并调整开挖方案, 取消爆破施工。

b) 5 月 13 日, 前缘 Q5 发生次级滑坡, 详见 2.1 节所阐述。6 月份, 大礼溪滑坡的变形明显趋缓, 前

缘 Q5 (C2、C8) 的月位移速率为 5.83~10.65 mm/月; Q4 (C9~C15) 的月位移速率达到 18.02~36.16 mm/月; Q3 (C16~C20) 的月位移速率为 6.96~18.91 mm/月。这期间的变形主要受降雨作用影响 (见图 5 所示红色矩形所圈部分)。

同时, 监测显示滑坡中部也存在明显变形, 自动监测点的 JD01-1、C3X-1 的月位移速率分别达到 40.1, 24.8 mm/月, 详见图 5。

(2) 第 2 开挖阶段 (2017 年 7 月)

a) 开挖范围如图 1 所示。挖除的主要为碎裂岩上覆的第四纪堆积体及局部的碎裂岩体, 集中在 Q3、Q4 下方。同时, 7 月上旬该区域遭受突发暴雨, 月累积降雨量达 173.6 mm, 主要集中在 7 月 8—9 日, 单日最大降雨量 58.6 mm。在两者作用下, 前缘 Q5 的 C2 月位移速率达到 115.93 mm/月; Q4 (C9~C15) 的月位移速率达到 52.84~166.05 mm/月; 此次开挖, Q3 区域涉及的较小, C16~C20 的月位移速率达到 1.37~23.79 mm/月。自动监测点 JD01-1、C3X-1 的月位移速率分别达到 61.8, 29.1 mm/月。

b) 8 月份, 开挖再次停止, 但在降雨作用及坡体应力调整的影响, 变形持续发展。前缘 Q5 的 C2 月位移速率达到 44.99 mm/月; Q4 (C9~C15) 的月位移速率达到 43.68~105.82 mm/月。自动监测点的 JD01-1、C3X-1 月位移速率分别达到 50.3, 34.3 mm/月。

(3) 第 3 开挖阶段 (2017 年 9 月—10 月)

a) 开挖范围如图 1 所示。挖除的是 Q3、Q4 区域的第四纪堆积体和下部的局部碎裂岩体, 此阶段是开挖量最大。同时, 9 月底至 10 月初区域遭遇长时间的持续降雨, 月累积分别达 108.8, 93.4 mm, 主要集中在 9 月 26 日—10 月 5 日, 单日最大降雨量 45.6 mm。

在两者作用下, Q4 (C9~C15) 的月位移速率达到 18.89~118.45 mm/月; Q3 (C16~C20) 的月位移速率达到 9.08~33.07 mm/月。滑坡中部的自动监测点 JD01-1、C3X-1 于 9 月、10 月的月位移速率分别 28~116.4, 25.1~243.1 mm/月。滑坡后部的自动监测点 D1~D4 的月位移速率达到 75.4~194.1 mm/月。

b) 11 月之后, 整体开挖工作结束, 同时降雨量大幅减少, 除 C9 监测点依然存在 103.35 mm/月的变形外, 基本无明显新增变形。C9 由于临近开挖线及附近沟谷, 易受其他工程活动的扰动。

综合对比第 1 至第 3 开挖阶段的变形监测数据可知, 开挖和降雨是大礼溪滑坡变形的主要因素。同时, 爆破施工、坡脚向坡顶开挖以及支护不及时对变形有一定的放大效应。

3 古滑坡复活变形机制

3.1 古滑坡成因

由区域出露地层可知, 大礼溪滑坡所在区域为典型的含软层中—陡倾顺层结构斜坡, 在地貌条件、坡体结构、岩性及其组合等因素作用下, 于地质历史时期形成大型古滑坡, 形成模式为“滑移—弯曲”式。

图 6 (a)~(d) 揭示了古滑坡的形成过程。在大礼溪滑坡复活之前, 滑坡处于切出面贯通, 滑坡形成之一阶段之后, 并在外营力地质作用改造下逐渐形成新的应力平衡, 形成如今的地形地貌特征。处于基本稳定—稳定状态。目前大礼溪滑坡存在的变形, 是在开挖之后, 坡体在应力调整的过程中, 引起的复活变形, 并受降雨的影响。

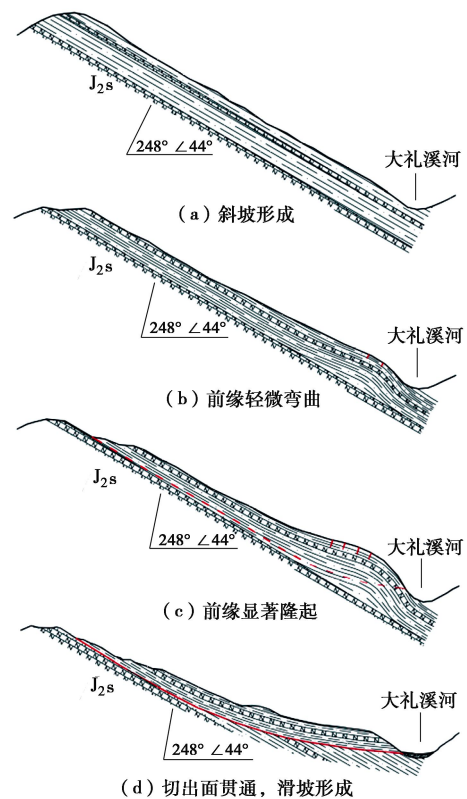


图 6 大礼溪古滑坡形成过程示意图

Fig. 6 Formation process of Dalixi ancient landslide

3.2 古滑坡变形复活机制分析

为了进一步厘清开挖与降雨对大礼溪滑坡复活变形的影响, 明确开挖与降雨的主次关系, 采用 Geo-Studio 软件, 对开挖作用及降雨作用下大礼溪滑坡位移、稳定状态特征进行数值模拟分析。

(1) 模拟模型

选择 1—1' 剖面建立滑坡的数值模拟计算模型, 模型长 1037 m, 高 406 m, 见图 7。模型物理参数见表

2 (参数根据补充勘察室内试验获取)。模拟实际开挖 (第 1 开挖阶段—第 3 开挖阶段) 至结束过程中, 滑坡变形、稳定性的演变特征。

模拟工况共选取开挖+实际降雨、实际降雨、开挖 3 种, 并与实际监测情况做对比分析。

(2) 模拟结果

图 8 提取的是开挖+实际降雨工况下, 滑坡前缘不同深度的变形特征, 可见位移均呈条带状分布, 越接近坡表其位移量越大。根据对应的开挖阶段来看, 第 3 开挖阶段的位移变化量明显大于第 2 开挖阶段和第 1 开挖阶段, 这与图 5 显示的实际监测结果基本一致。

表 2 大礼溪滑坡物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of Dalixi landslide

材料	重度 ($kN \cdot m^{-3}$)	黏聚力 c/kPa		内摩擦角 $\phi/(^\circ)$		泊松比
		模拟	室内 试验	模拟	室内 试验	
滑体	24.5	31.5	33.0	21.0	21.0	0.30
滑带	22.0	23.0	23.6	16.6	17.0	0.35
滑床	25.0	—	—	—	—	—

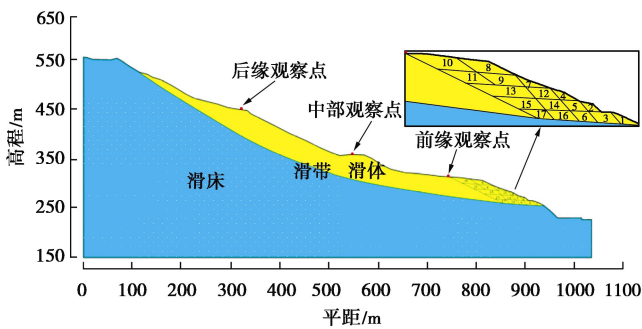


图 7 大礼溪滑坡数值模拟模型

Fig. 7 Numerical model for Dalixi landslide

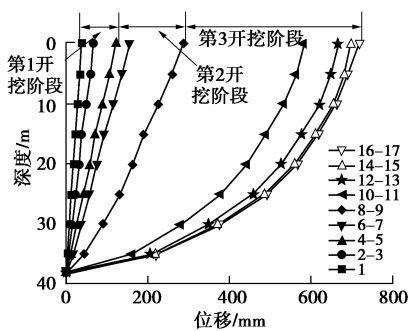


图 8 开挖+实际降雨工况下滑坡前缘深度位移特征

Fig. 8 Displacements of deep part at leading edge under excavation and rainfall

图 9 显示的是模型上选取的前缘、中部、后缘在开挖+实际降雨工况下的位移变化规律。累计位移分别为 751, 525, 200 mm。在开挖和降雨作用下滑坡

变形变为前缘>中部>后缘。值得注意的是, 在第 1 开挖阶段, 滑坡中部变形似乎大于前部, 这是由于中部变形额外受地形控制 (见图 2), 这也与第 1 开挖阶段中部监测位移略大于前部相对应 (详见 2.3 小节)。

同时, 图 9 显示, 在持续的开挖和降雨作用下, 滑坡的稳定系数持续降低, 由未开挖时的 1.20 降至开挖完成后的 1.08。从滑坡前缘、滑坡中部和滑坡后缘的变形量来看, 变形从前缘、中部至后缘依次减小, 变形具有从前缘向后部渐进后退发育的特征与监测信息与地表裂缝的发育特征基本吻合。

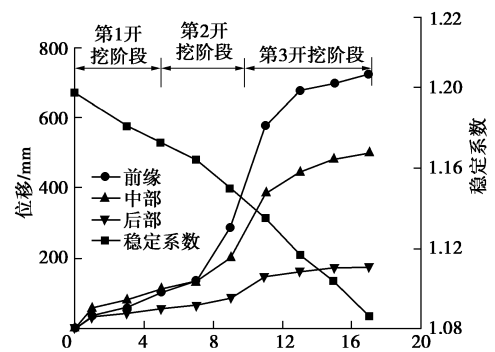


图 9 开挖+实际降雨工况下各观察点累积位移及稳定性系数

Fig. 9 Accumulated displacement and stability coefficients at

图 10 显示, 开挖+实际降雨工况下滑坡的前缘、中部、后缘的累计位移 (751, 525, 200 mm) 与 1—1'剖面附近的 C9、JD01-1、D3 监测点累积位移 (996.78, 368.9, 84.9 mm), 具有近似的变形规律。

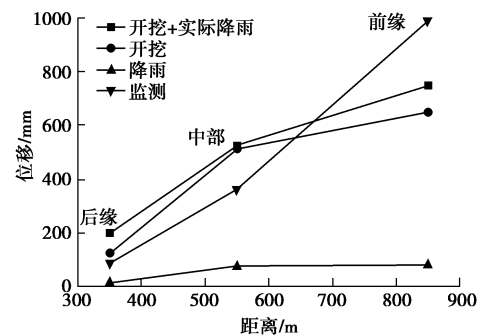


图 10 不同工况下模拟变形对比图

Fig. 10 Displacements of numerical simulation under different conditions

对比开挖+实际降雨、开挖以及实际降雨 3 种工况, 发现开挖+实际降雨工况下滑坡的前缘、中部、后缘的累积位移均大于开挖以及实际降雨工况, 但是开挖+实际降雨工况下的前缘、后缘累计位移比开挖工况下大 100 mm 左右, 而中部则相对较小, 约大 30 mm, 这说明中部的变形在地形的控制下, 对开挖的敏感度要远高于降雨。而在没有开挖, 仅有降雨的情况下, 滑坡的前缘、中部、后缘的累积位移仅为 15,

75, 80 mm。这说明开挖在大礼溪滑坡的变形发育中起主导作用,且早期的变形(Q3区域的地表裂缝T1~T9)也为开挖引起,而降雨对滑坡变形主要起激发强化的增幅作用。

结合以上分析可知,大礼溪滑坡原处于基本稳定—稳定状态,在开挖的作用下,稳定性逐渐降低,坡体在应力调整的过程中,变形持续发展,地表裂缝发育,并受降雨影响。因此,开挖作用是大礼溪滑坡变形复活的主要因素和诱发因素,降雨为激发因素,两者共同作用促使变形持续发展。

4 结 论

(1)三峡库区兴山县范围内的含软层中—陡倾顺层岩质地区,存在较多“滑移—弯曲”式古滑坡,大礼溪滑坡尤为典型。

(2)大礼溪滑坡的地表裂缝发育与开挖过程密切相关,前期集中于临近最早开挖区域的前缘Q3附近,并沿着开挖方向逐渐在前缘Q4、Q5出现,最终在前缘Q5附近演化出次级滑坡,与此同时,纵向上变形逐渐向中后部推进,表现出渐进后退的发育特征。

(3)开挖作用是滑坡变形复活的主要因素和诱发因素,降雨为激发因素,两者共同作用促使变形持续发展。同时,爆破施工、坡脚向坡顶开挖以及支护不及时对变形有一定的放大效应。

参考文献:

- [1] CRUDEN D M, VARNES D J. Landslide types and processes, special report, transportation research board[J]. National Academy of Sciences, 1996, **247**: 36 - 75.
- [2] BURDA J, HARTVICH F, VALENTA J, et al. Climate-induced landslide reactivation at the edge of the Most Basin (Czech Republic): progress towards better landslide prediction[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013, **13**: 361 - 374.
- [3] RONCHETTI F, BORGATTI L, CERVI F, et al. The Valoria landslide reactivation in 2005 - 2006 (Northern Apennines, Italy)[J]. Landslides, 2007, **4**(2): 189 - 195.
- [4] DENG H, WU L Z, HUANG R Q, et al. Formation of the Siwanli ancient landslide in the Dadu River, China[J]. Landslides, 2017, **14**(1): 385 - 394.
- [5] 吴瑞安, 张永双, 郭长宝, 等. 川西松潘上窑沟古滑坡复活特征及危险性预测研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(9): 1659 - 1667. (WU Rui-an, ZHANG Yong-shuang, GUO Chang-bao. Reactivation characteristics and hazard prediction of Shangyaogou ancient landslide in Songpan County of Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(9): 1659 - 1667. (in Chinese))
- [6] 郭健, 许模, 赵勇, 等. 黑水河库区某古滑坡形成及复活机制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, **40**(6): 721 - 728. (GUO Jian, XU Mo, ZHAO Yong, et al. Formation and reactivation mechanism of an ancient landslide in Heishui reservoir of Minjiang River, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2013, **40**(6): 721 - 728. (in Chinese))
- [7] 李明辉, 李浩然, 王东辉. 大渡河上游亚喀则滑坡复活变形机理及发展趋势分析[J]. 水土保持研究, 2014, **21**(1): 305 - 309. (LI Ming-hui, LI Hao-ran, WANG Dong-hui. The revival mechanism and development tendency of Yakaze landslide in the upper reaches of Dadu River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, **21**(1): 305 - 309. (in Chinese))
- [8] 付博, 严明, 李波, 等. 岷江某水电站库区#1滑坡复活机制分析[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(1): 11 - 16. (FU Bo, YAN Ming, LI Bo, et al. Analysis of revivification mechanism for a landslide on a hydropower station reservoir in Minjiang[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(1): 11 - 16. (in Chinese))
- [9] WANG J J, LIANG Y, ZHANG H P, et al. A loess landslide induced by excavation and rainfall[J]. Landslides, 2014, **11**(1): 141 - 152.
- [10] GU D M, HUANG D, YANG W D, et al. Understanding the triggering mechanism and possible kinematic evolution of a reactivated landslide in the Three Gorges Reservoir[J]. Landslides, 2017, **14**(6): 2073 - 2087.
- [11] 李明辉, 郑万模, 石胜伟, 等. 丹巴县甲居滑坡复活机制及其稳定性分析[J]. 山地学报, 2008, **26**(5): 577 - 582. (LI Ming-hui, ZHENG Wan-mo, SHI Sheng-wei, et al. The revival mechanism and stability analysis to Jiayu landslide of Danba county in Sichuan province[J]. Journal of Mountain Science, 2008, **26**(5): 577 - 582. (in Chinese))
- [12] 张永双, 郭长宝, 周能娟. 金沙江支流冲江河巨型滑坡及其局部复活机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(3): 445 - 453. (ZHANG Yong-shuang, GUO Chang-bao, ZHOU Neng-juan. Characteristics of Chongjianghe landslide at a branch of Jinsha River and its local reactivation mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(3): 445 - 453. (in Chinese))

- [13] 哈秋龄. 三峡工程永久船闸陡高边坡各向异性卸荷岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 26(5): 605 - 610. (HA Qiu-ling. Study on the anisotropic unloading rock mass mechanics for the steep-high rock slope of the three gorges project permanent shiplock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 26(5): 605 - 610. (in Chinese))
- [14] 盛 谦. 深挖岩质边坡开挖扰动区与工程岩体力学性状研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002. (SHENG Qian. Excavation Disturbed Zone of Deep Cutting Rock Slopes and Mechanics Behaviour of Engineering Rock Mass[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese))
- [15] 黄润秋, 林 峰, 陈德基, 等. 岩质高边坡卸荷带形成及其工程性状研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 228 - 229. (HUANG Run-qiu, LIN Feng, CHEN De-ji, et al. Formation mechanism of unloading fracture zone of high slopes and its engineering behaviors[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3): 228 - 229. (in Chinese))
- [16] 李 明, 张 嘎, 李焯芬, 等. 开挖对边坡变形影响的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 667 - 672. (LI Ming, ZHANG Ga, LEE C F, et al. Centrifugal model tests on excavation-induced deformation of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 667 - 672. (in Chinese))
- [17] 许 强, 汤明高, 黄润秋. 大型滑坡监测预警与应急处置[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (XU Qiang, TANG Ming-gao, HUANG Run-qiu. Monitoring, Warning and Emergency Treatment of Large Landslide[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))

岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学) 2020年度开放课题申请指南

重点实验室自2007年2月由教育部正式批准在同济大学立项建设以来,按照教育部重点实验室的开放要求,自2008年起面向国内外公开征集开放基金项目,连续十年批准了60余项国内外访问学者的申请,取得了持续对外开放、合作与交流的良好效果。经研究,本年度继续设立专项开放研究基金,资助国内外学者和科技工作者来实验室开展科研工作。

资助范围: 本年度开放课题主要资助的研究方向如下: ①软土力学理论与变形稳定控制; ②宏微观土力学理论与环境土工灾变; ③岩土体多场耦合理论与灾害控制; ④软弱岩土体地质灾害与防治加固; ⑤地下工程安全理论与风险控制; ⑥城市地下空间与岩体地下工程。

申请资格: 同济大学校外从事与岩土与地下工程有关的国内外高级、中级科技人员、青年科技工作者均可申请本实验室的开放基金。

资助金额: 申请者必须本着实事求是的原则申请资助金额,开放基金的资助强度一般每项不超过3万元,总计拟资助6至8项。

项目执行期限: 每个项目实施期限为两年,即2020年10月1日至2022年9月30日。

考核标准: 每个开放基金资助课题应在国际学术期刊发表1篇被SCI检索的论文(有正式的检索号),且同济大学合作者需列为论文的共同作者,作者单位之一必须标注为本重点实验

室,并注明课题批准号。

项目的实施与管理: 批准的开放课题资助经费实行一次核定,两批拨款。项目批准后,即拨付课题资助经费的50%至课题负责人所在单位;其余50%待课题结题验收后即拨付。项目负责人应当按照项目计划书组织开展研究工作,做好资助项目实施情况的原始记录,填写项目中期报告。自项目资助期满之日起60日内,项目负责人应当撰写结题报告、编制项目资助经费决算;取得研究成果的,应当同时提交研究成果报告。

如因客观原因不能按期完成研究计划,项目负责人应当于项目资助期限届满90日前提出延期申请,申请延长的期限不得超过1年。

申报程序: ①开放基金申请人应认真阅读有关申请说明,申报课题必须符合本实验室的研究方向,属于2020年资助研究内容的范畴,并具有本重点实验室固定研究人员合作。同济大学有关研究人员的介绍,可查阅: <http://geotec.tongji.edu.cn/keylab/yjry>。②本年度开放课题申请截止时间为2020年7月31日(以邮戳日期为准)。申请书须以纸质一式2份寄给:上海市杨浦区四平路1239号同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室(邮政编码200092);刘琦老师收(电话:021-65985200,13917983456, E-mail: liuqi472@tongji.edu.cn),除纸质申请材料,申请人须提供申请书及附件的电子文件(PDF格式),并注意纸质申请书与电子版申请书的内容应严格一致。

(岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学) 供稿)