

## 基于Midas-GTS的三峡库区金鸡岭滑坡成因机制与稳定性分析

谭银龙, 许万忠, 曹家菊, 罗丹, 王本栋, 谯立家, 周谊

## Mechanisms and stability analysis of the Jinjiling landslide in the Three Gorges Reservoir area based on Midas-GTS

TAN Yinlong, XU Wanzhong, CAO Jiaju, LUO Dan, WANG Bendong, QIAO Lijia, and ZHOU Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204054>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析

Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV

张欢, 巨能攀, 陆渊, 万勋, 蹇志权 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 171-179

#### 三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制

Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area

卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 李滨, 贺凯, 唐俊刚, 张天贵 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 73-81

#### 三峡库区浮托减重型滑坡对库水升降的响应规律

Response patterns of buoyancy weight loss landslides under reservoir water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir area

周剑, 邓茂林, 李卓骏, 张富灵 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 136-143

#### 基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究

Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength

魏占玺, 谢东武, 毋远召, 马文礼, 李元, 李万花 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 126-136

#### 基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength

钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 王智猛, 刘菟茹, 万旭升, 李康乐 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 100-107

#### 三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究

A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China

黄达, 匡希彬, 罗世林 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 127-135



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204054

谭银龙, 许万忠, 曹家菊, 等. 基于 Midas-GTS 的三峡库区金鸡岭滑坡成因机制与稳定性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 113-121.

TAN Yinlong, XU Wanzhong, CAO Jiaju, *et al.* Mechanisms and stability analysis of the Jinjiling landslide in the Three Gorges Reservoir area based on Midas-GTS[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 113-121.

## 基于 Midas-GTS 的三峡库区金鸡岭滑坡成因机制与稳定性分析

谭银龙<sup>1</sup>, 许万忠<sup>1</sup>, 曹家菊<sup>1</sup>, 罗丹<sup>2</sup>, 王本栋<sup>1</sup>, 谯立家<sup>1</sup>, 周谊<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093;

2. 重庆市地勘局 208 水文地质工程地质队, 重庆 400700)

**摘要:** 金鸡岭滑坡在暴雨后发生明显变形, 通过现场勘察、钻探、物探、深部位移监测以及水平位移监测得出初步结论。为进一步查明该滑坡成因机制, 通过解译现有勘察监测资料, 结合 Midas-GTS 软件分析不同工况下滑坡的渗流场、位移场、稳定性计算, 综合评价其成因机制。结果如下: (1) 物探解译得出金鸡岭滑坡为岩土混合、含水滑坡, 滑动面位于 T<sub>2</sub>b<sup>1</sup> 泥灰岩和 T<sub>2</sub>b<sup>2</sup> 泥岩分界线; (2) 深部位移监测揭示该滑坡为浅表层土体在发生滑移, 滑动面与物探解译得出的滑动面位置一致; (3) 水平位移监测表明浅表分布的后柳滑坡和潘家岭滑坡变形速率较快, 变形强烈; (4) 数值模拟结果显示金鸡岭滑坡在现状工况下处于基本稳定状态; 在排干地下水工况下处于基本稳定状态; 在暴雨工况下处于欠稳定状态, 可能产生整体滑移, 其上的潘家岭滑坡及后柳滑坡产生土体次级滑移。 (5) 金鸡岭滑坡的地形地貌、地质构造、地层岩性、为滑坡的形成和发展提供了物源和场地条件, 暴雨和人类工程活动作为诱发因素, 进一步加剧滑坡变形。该研究成果将为三峡库区类似滑坡的成因机制与稳定性分析提供理论依据, 对后期防治措施具有重要指导意义。

**关键词:** 金鸡岭滑坡; Midas GTS; 数值模拟; 成因机制; 稳定性分析

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0113-09

## Mechanisms and stability analysis of the Jinjiling landslide in the Three Gorges Reservoir area based on Midas-GTS

TAN Yinlong<sup>1</sup>, XU Wanzhong<sup>1</sup>, CAO Jiaju<sup>1</sup>, LUO Dan<sup>2</sup>, WANG Bendong<sup>1</sup>, QIAO Lijia<sup>1</sup>, ZHOU Yi<sup>1</sup>

(1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2. Chongqing Geological Exploration Bureau 208 Hydrogeology Engineering Geology Team, Chongqing 400700, China)

**Abstract:** The Jinjiling landslide was obviously deformed after the rainstorm, and preliminary conclusions were drawn through on-site investigation, drilling, geophysical prospecting, deep displacement monitoring and horizontal displacement monitoring. On this basis, in order to further find out the genesis mechanism of the landslide, this paper interprets the existing survey and monitoring data, combines the Midas-GTS software to analyze the seepage field, displacement field, and stability calculation of the landslide under different working

收稿日期: 2022-05-01; 修订日期: 2022-08-12

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(41562016)

第一作者: 谭银龙(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩土工程。E-mail: [1179606292@qq.com](mailto:1179606292@qq.com)

通讯作者: 许万忠(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程专业研究工作。E-mail: [582647881@qq.com](mailto:582647881@qq.com)

conditions, and comprehensively evaluates its genesis mechanism. The results indicate that (1) geophysical interpretation shows that the Jinjiling landslide is a rock-soil mixed, water-bearing landslide, and the sliding surface is located at the boundary between  $T_2b^1$  marlstone and  $T_2b^2$  mudstone. (2) Deep displacement monitoring data reveals that the landslide occurs in a superficial soil mass, and the position of the slip surface is consistent with the location of the slip surface obtained by geophysical exploration. (3) The horizontal displacement monitoring shows that the superficially distributed Houbang landslide and Panjialing landslide have fast deformation rates and stronger deformation. (4) The numerical simulation results show that the Jinjiling landslide is currently in a basically stable state; it is in a basically stable state when the groundwater is drained; it is in a less stable state under heavy rain conditions, which may cause overall slippage, and the Panjialing and Houbang landslides produce secondary soil slippage. (5) The topography, geological structure, stratigraphic lithology of the Jinjiling landslide provide provenance and site conditions for the formation and development of the landslide. Torrential rain and human engineering activities are the inducing factors, which further aggravate the deformation of the landslide. The research results will provide a theoretical basis for the analysis of the genetic mechanism and stability of similar landslides in the Three Gorges Reservoir area, and have important guiding significance for the later control measures.

**Keywords:** Jinjiling landslide; Midas-GTS; numerical simulation; causal mechanisms; stability analysis

随着三峡库区移民迁建工程的实施, 移民城市与集镇建设和路桥工程施工形成大量人工高边坡。据统计, 移民迁建区已形成的高陡边坡多达 3 000 余处, 受地质条件影响, 90% 的边坡安全性达不到规范要求, 对移民工程造成严重威胁<sup>[1]</sup>。在人类工程活动和强降雨的条件下, 产生了新滑坡, 如谭家湾滑坡<sup>[2]</sup>、武隆滑坡<sup>[3]</sup>, 同时也诱发了古滑坡的复活, 典型的有塔坪 H1 滑坡<sup>[4]</sup>、白水河滑坡<sup>[5]</sup>。

滑坡一直是工程界和地质灾害领域研究的热点和难点, 如金沙江色拉滑坡<sup>[6]</sup>、舟曲牙豁口滑坡<sup>[7]</sup>、金沙江沃达滑坡<sup>[8]</sup>等均受到广泛关注。以滑坡勘察监测为基础开展滑坡监测能有效减少滑坡灾害损失, 为滑坡灾害防治提供可靠的数据支撑。徐强等<sup>[9]</sup>根据变形—时间监测曲线从时间角度判断三峡库区秭归县白水河滑坡所处的演化阶段; Zhang 等<sup>[10]</sup>利用滑坡位移监测数据分析了三峡库区马家沟滑坡的运动趋势; 陶志刚等<sup>[11]</sup>整合牛顿力监测数据和降雨量监测数据, 对雅安宝兴县滑坡过程与力学演化进行分析; 张海燕等<sup>[12]</sup>分析三峡库区秭归谭家湾滑坡位移和降雨监测数据, 得到滑坡各位移监测点变形与降雨间的相关性; 周越等<sup>[13]</sup>利用地球物理方法查明张榆线崇礼隧道出口段滑坡的地质构造及滑面等特征, 建立了滑坡体地质模型。

数值模拟是研究滑坡的重要方法之一, 滑坡的成因机制、引发的次生灾害以及治理防治都可以通过数值模拟进行研究分析。许超等<sup>[14]</sup>使用有限元分析软

件 Midas-GTS 运用强度折减法对模型进行计算, 分析采动滑坡的形成过程; 黄刚等<sup>[15]</sup>采用 Midas-GTS 对四川通江县袁家山滑坡在暴雨工况下的稳定性进行了分析; Wang 等<sup>[16]</sup>利用 Midas-GTS 模拟某隧道洞口段边坡应力应变破坏对隧道的影响; 吕文斌等<sup>[17]</sup>利用 Midas-GTS 有限元数值模拟方法, 研究了西宁市张家湾滑坡的形成机理、发展过程和剪出口位置, 定量评价了该滑坡的稳定状态; 谭银龙等<sup>[18]</sup>利用 Midas-GTS 模拟降雨条件下大理海东新城开发某地段的边坡应力场和渗流场的变化, 采用数值方法计算出降雨入渗后的边坡稳定性系数。滑坡监测数据和数值模拟方法都是滑坡灾害防治研究中的重要手段, 仅用其中一种方法来评价滑坡的变形演化特征与稳定性变化规律, 往往会导致分析不够全面, 所以本文采用两者结合、相互验证的方法, 全面地评价滑坡的成因机制、发展趋势, 并提出较为准确的防治措施。这也将是当前一段时间滑坡灾害防治研究的热点问题。

金鸡岭滑坡位于重庆市巫山县新区江东组团龙水村金鸡岭, 为新生突发地质灾害点, 浅表还分布后柳滑坡、潘家岭滑坡。本文以该滑坡为例, 在现有丰富的现场勘察资料以及真实可靠的监测数据的基础上, 利用高性能有限元软件 Midas-GTS, 进行有限元建模和数值模拟, 通过比较实测数据和数值模拟结果, 综合分析金鸡岭滑坡的成因机制, 为判定治理措施提供科学可靠的依据, 同时为类似滑坡的分析研究提供参考。

### 1 地质背景和滑坡发育特征

#### 1.1 滑坡区地质背景

研究区位于重庆市巫山县新区江东组团龙水村, 属构造剥蚀低山地貌。滑坡区整体呈阶状地形, 其坡度在 25°~30°之间。研究区位于巫山向斜核部, 浅表岩层内部受次级皱褶控制。据区域地质资料和现场勘探揭示, 滑坡区出露地层主要为第四系全新统崩坡堆积层(Qh<sup>col+dl</sup>), 基岩为中三叠统巴东组(T<sub>2</sub>b)泥岩、泥灰岩, 岩层产状变化较大。

研究区降雨丰沛, 多年平均降雨量 1 049 mm, 最大日降雨量约 300 mm(2014-08-31), 降雨主要分布在 5—9 月。通过现场调查, 滑坡区后部存在 5 条冲沟(1#—5#), 冲沟终年有水, 且 2#—5#冲沟最终在龙洞沟汇流, 目前龙洞沟下部已被回填。人类工程活动包括公路边坡、房屋边坡以及人工堆填方。公路边坡位于滑坡区前缘, 房屋边坡主要位于黑梁子小区及中医院。滑坡区内堆填工程集中于拟建龙江中学及龙江小学区域, 主要是回填工程及碎石堆积场。

#### 1.2 滑坡发生情况

2018 年“6·18 暴雨”后金鸡岭滑坡发生初始明显变形, 2018 年 7 月 22 日, 出现明显加剧。2018 年 7 月

22 日, 对金鸡岭滑坡进行了现场勘察<sup>[19]</sup>, 根据滑坡变形和地貌特征, 判断该滑坡包括深层整体滑动和次级滑移。金鸡岭滑坡整体属于深层滑动, 其上浅表分布的潘家岭滑坡及后柳滑坡属于次级滑移, 此外还包括黑梁子安置房 8#楼边坡变形区、12#楼边坡变形区、龙水路 2 标段外侧变形区, 详见图 1。根据钻探结果, 得到 1-1' 典型剖面, 如图 2 所示。



图 1 金鸡岭滑坡区全貌图

Fig. 1 Full view of the Jinjiling landslide area

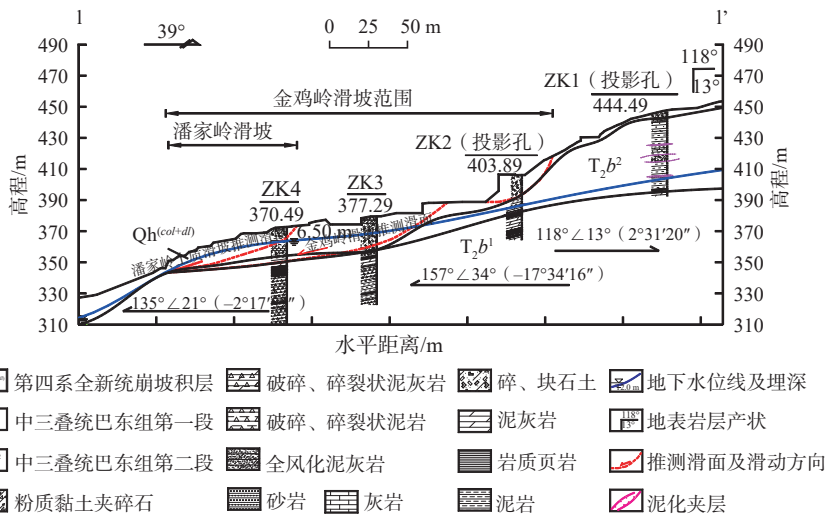


图 2 金鸡岭滑坡 1-1' 剖面工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological section of the 1-1' section of the Jinjiling landslide

### 2 物探解译与变形监测

滑坡区布置了钻孔、物探、探槽、深部位移及水平位移专业监测手段, 具体布置见图 3。

#### 2.1 物探

物探采用高密度电阻率法层析成像, 滑坡区共布

置等高密度物探剖面 5 条(WT1—WT5), 层析成像剖面 1 条(WT6), 以 WT5 剖面为例对物探结果(图 4)进行说明。WT5 剖面电性分层特征明显, 浅部为低阻层, 电阻率约 5~30 Ω·m, 推断为含水土层或强风化层, 其厚度约 2~20 m, 电阻率变化较大; 该剖面存在 1 个较明显的低阻异常体, 推断为破碎含水岩体。结

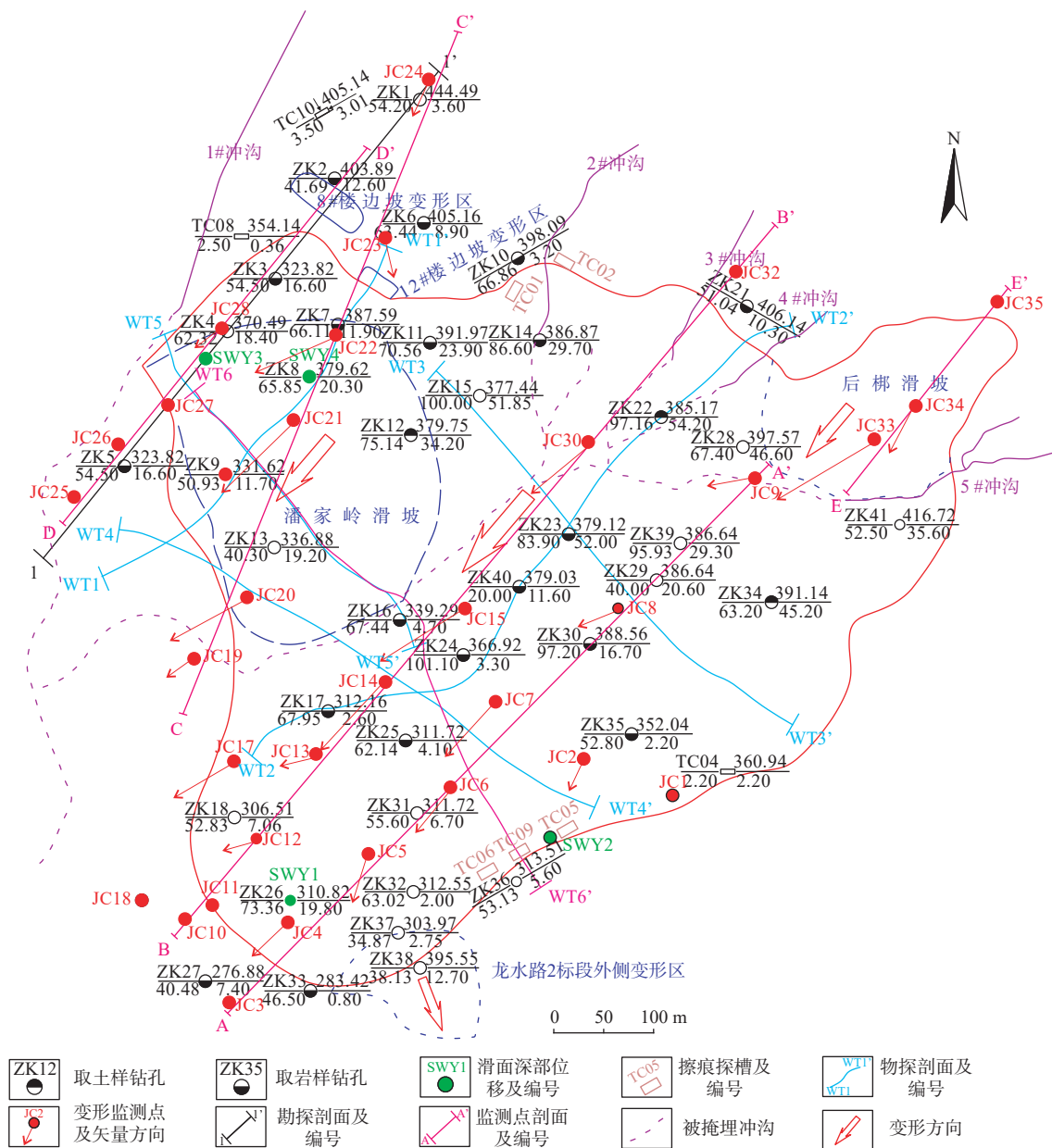


图 3 研究区各监测技术手段平面图

Fig. 3 Plan view of the various monitoring technical instruments in the study area

合钻孔, 推断解译滑动面位于泥岩与泥灰岩分界处。

### 2.2 水平位移监测

本次研究共布置水平位移监测点 36 个, 共形成 5 条监测剖面, 本文以 C-C' 和 E-E' 剖面为例, 累计水平位移曲线见图 5。

由图 5(a) 可知, 2018 年 7 月 9 日—2018 年 10 月 17 日, 黑梁子小区监测点 JC23 累计位移量为 6.20 ~ 35.40 mm, 位移速率 0.80 ~ 4.42 mm/d, 变形速率逐渐趋缓, 可见黑梁子小区后侧边坡变形属于局部强变形。由图 5(b) 可知, 后柳滑坡后缘监测点 JC35, 累计位移量为 1.84 mm, 位移速率 0.01 mm/d, JC33、JC34 监

测点 8 月 11 日建点后累计位移量为 24.20 ~ 41.00 mm, 位移速率 0.21 ~ 0.62 mm/d。潘家岭滑坡监测点 JC20—JC22, 累计位移值分别为 184.80, 197.00, 145.50 mm, 位移速率 0.54 ~ 3.89 mm/d。监测期间滑坡区未经历持续暴雨, 降雨后滑坡加速变形现象不明显, 只有监测点 JC33、JC34 出现明显变形加速, 与强降雨时间节点相契合。

### 2.3 深部位移监测

深部位移监测点 SWY2 曲线为“D”型曲线, 见图 6(a)。在 34.0 m 深度处形成了明显的滑动面, 滑面上相对位移为 14.0 ~ 17.5 mm。结合钻孔 ZK34 资

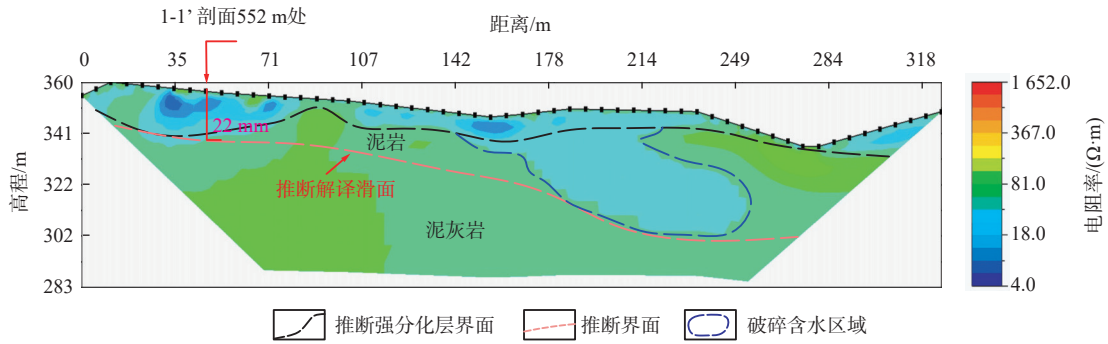
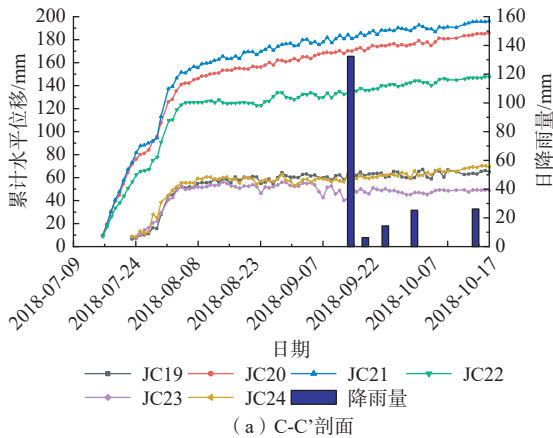
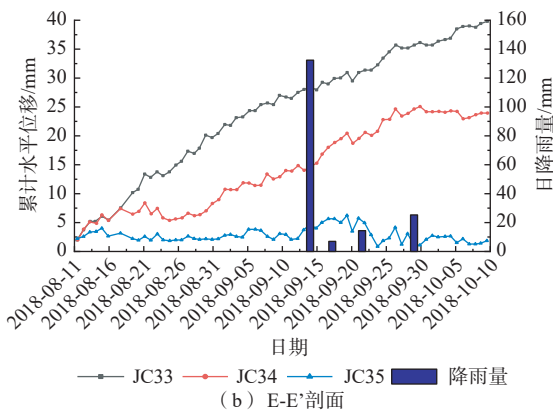


图 4 WT5 剖面物探综合成果图

Fig. 4 Combined physical results from the WT5 profile



(a) C-C'剖面



(b) E-E'剖面

图 5 C-C'和 E-E'剖面监测累计水平位移曲线图

Fig. 5 Cumulative horizontal displacement profiles monitored in profiles C-C' and E-E'

料显示, 35.4 m 深度处为  $T_2b^1$  泥灰岩与  $T_2b^2$  泥岩交界处, 交界面附近分布有两层软弱夹层, 岩心中未见明显滑带迹象, 推测该处滑带位于 35.4 m。

深部位移监测点 SWY3 曲线为“R”型曲线, 见图 6(b)。曲线显示在滑坡前部已形成明显的滑动面, 且位移相对较大, 而下部相对较小, 滑面以上相对位移为 12.7 ~ 20.8 mm。表明金鸡岭滑坡在监测期内以浅层滑移为主, 在地面以下 8.0 m 处形成较明显的滑动面, 结合该处地质结构来看, 为浅表层土体在发生

滑移, 而深部目前未见明显的滑动面。

结合相应钻孔、物探结果综合分析, 金鸡岭滑坡前缘发育于  $T_2b^1$  泥灰岩和  $T_2b^2$  泥岩分界线, 后部主要沿岩土界面发育, 滑带逐步形成, 滑面埋深 25.3 ~ 43.5 m; 浅表层滑带初步贯通, 滑面埋深 8.0 ~ 30.1 m。从空间分布看, 纵向上, 总体呈折线分布, 横向上, 滑面形态呈两侧薄、中间厚的形态。从滑带厚度看, 碎石磨圆度较好及塑性较好的滑动带, 厚度多为 0.1 ~ 0.8 m; 少量棱角状的滑动带, 厚度为 0.8 ~ 3.5 m。

### 3 数值模拟计算与分析

#### 3.1 数值模型的建立

选取 1-1' 剖面作为典型剖面, 进行有限单元数值计算。在现状地貌的条件下, 考虑地下水渗流场、位移场, 评价未治理滑坡的稳定性。采用强度折减法<sup>[20]</sup>计算稳定性系数, 采用 VG 模型<sup>[21]</sup>作为土水特征曲线, 采用莫尔-库仑作为岩土体的本构模型。相关计算参数均参照滑坡岩土力学性质试验, 见表 1。

根据不同影响因素的组合, 进行 3 种工况下金鸡岭滑坡的稳定性分析: 工况 1, 现状情况; 工况 2, 排干地下水情况; 工况 3, 耦合暴雨情况。在建立滑坡分析建模时, 把握“既能保证精度, 又能充分消除边界效应的影响”的原则, 综合考虑模型的计算速度和精度要求, 设置滑坡坡面尺寸控制为 1 m, 网格划分尺寸为 3 m。在模拟暴雨工况时, 采用曲面流量 (150 mm/d) 定义暴雨条件; 另外, 由于边坡的饱水能力有限, 定义了渗流面来模拟雨水沿坡表的径流。

#### 3.2 数值模拟结果分析

各工况的数值模拟结果如图 7 所示。由图 7(a)~(f) 可知, 工况 1 和工况 2 时金鸡岭滑坡稳定系数分别为 1.126, 1.264, 整体均处于基本稳定状态, 最大位移分别为 51.04, 21.35 mm, 位移累计量分别为 332.16, 85.16 mm; 工况 3 时金鸡岭滑坡稳定系数为 1.047, 整

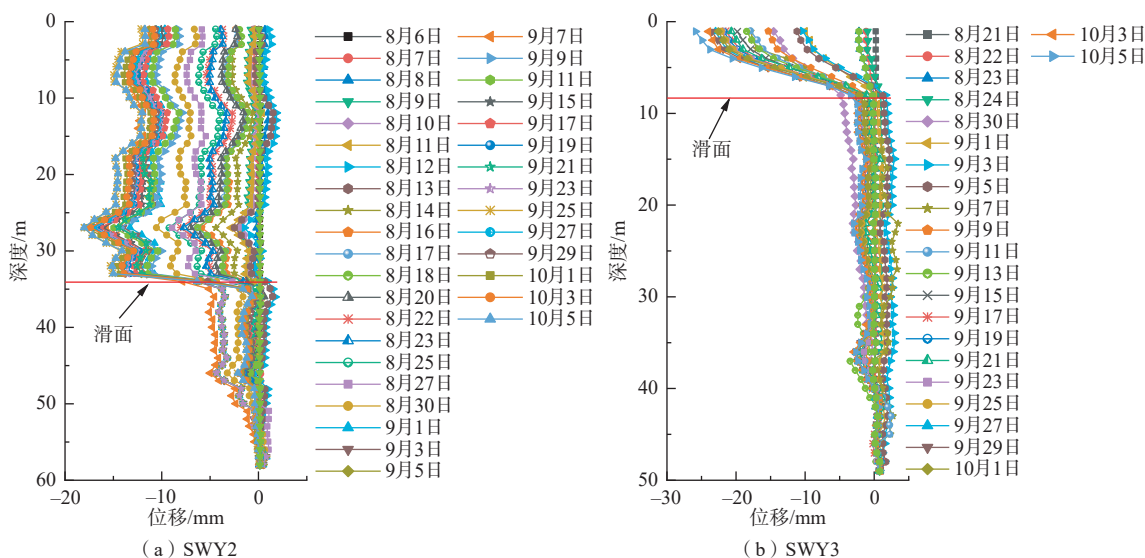


图 6 SWY2、SWY3 监测点深部位移监测曲线图

Fig. 6 Deep displacement monitoring curves at monitoring points SWY2 and SWY3

表 1 岩土体的物理参数

Table 1 Physical parameters of the rock and soil

岩土介质/参数	Qh <sup>col+dl</sup> 崩坡积物	T <sub>2</sub> b <sup>3</sup> 泥岩	T <sub>2</sub> b <sup>1</sup> 泥灰岩
天然重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	23.3	25.5	24.9
饱和重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	23.5	25.7	25.1
黏聚力/kPa	16.0	30.2	16.6
内摩擦角/(°)	15	36	38
弹性模量/MPa	26.76	5.46×10 <sup>3</sup>	8.18×10 <sup>4</sup>
泊松比	0.20	0.35	0.23
渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	3.47×10 <sup>-4</sup>	2.31×10 <sup>-4</sup>	5.0
饱和含水率/%	31	32	18
残余含水率/%	3.1	3.0	1.8

体处于欠稳定状态,最大位移为 75.35 mm,位移累计量 489.56 mm。综上,在强降雨作用下,金鸡岭滑坡处于欠稳定状态,可能发生失稳破坏现象。

由图 7(g)(i)可以看出,考虑地下水时,由于金鸡岭滑坡地下水位较高,整体的孔隙水压力值和总水头值都较高,十分不利于坡体稳定性,金鸡岭滑坡容易沿着第四系崩坡积土层发生失稳变形破坏;推测金鸡岭滑坡会穿过第四系崩坡积土层,沿着 T<sub>2</sub>b<sup>2</sup> 中的泥化夹层与 T<sub>2</sub>b<sup>1</sup> 之间的岩层界面发生滑动。考虑地下水与暴雨时耦合时,由图 7(h)(j)明显看到渗流加强,地下水位线上升,金鸡岭滑坡坡体内部整体渗流加剧,总水头和孔隙水压力增加,向下的渗透力增高,同时由于降雨含水量增加,坡体重度增加,极大削弱其抗剪强度,十分不利于坡体的稳定性。

排干地下水工况(工况 2)下,含水率大大降低,金鸡岭滑坡稳定系数为 1.264,整体处于基本稳定状态,

与工况 1、3 对比,排干地下水大大降低了坡体的孔隙水压力和水头,对坡体稳定性提高十分有效。

通过已有的现场踏勘、探槽、钻孔、水平位移与深部位移监测、数值模拟等综合分析得出:金鸡岭滑坡分为整体深层滑动以及其上分布的潘家岭滑坡及后柳滑坡的次级滑动。受金鸡岭滑坡整体牵引,导致原后柳滑坡变形加剧,其变形速率与滑坡整体基本一致;潘家岭滑坡属土质滑坡,受滑坡整体滑移影响,土体裂缝呈圈椅状发生变形,次级滑移特征较为明显。金鸡岭滑坡地下水位浅,受地下水长期浸泡,滑体、滑带抗剪强度降低,滑动面渐趋贯通,在暴雨条件下可能产生整体失稳滑移。

#### 4 成因机制及其治理措施

结合钻探、物探、相关监测数据、数值模拟,综合分析金鸡岭滑坡成因机制,推测滑坡的形成和发展受外部诱发因素与内部决定条件共同控制。

外部诱发因素主要为降雨和人类工程活动。根据走访调查、位移监测及对暴雨工况的数值模拟,该滑坡区的变形加剧与强降雨密切相关。坡体变形开始于 2018 年“6·18”大暴雨,强降雨使岩土体吸水饱和,坡体重量增加,下滑力增大;此外,降雨也使滑坡的岩土体发生软化和泥化现象,物理力学性质显著降低,抗滑力下降,滑坡稳定性降低。滑坡前部路面开挖,形成较高临空面,为滑坡的滑移剪出提供条件,也是金鸡岭滑坡失稳变形的关键因素。由于多条冲沟在龙洞沟被回填,不仅形成后缘堆载,也导致地表水

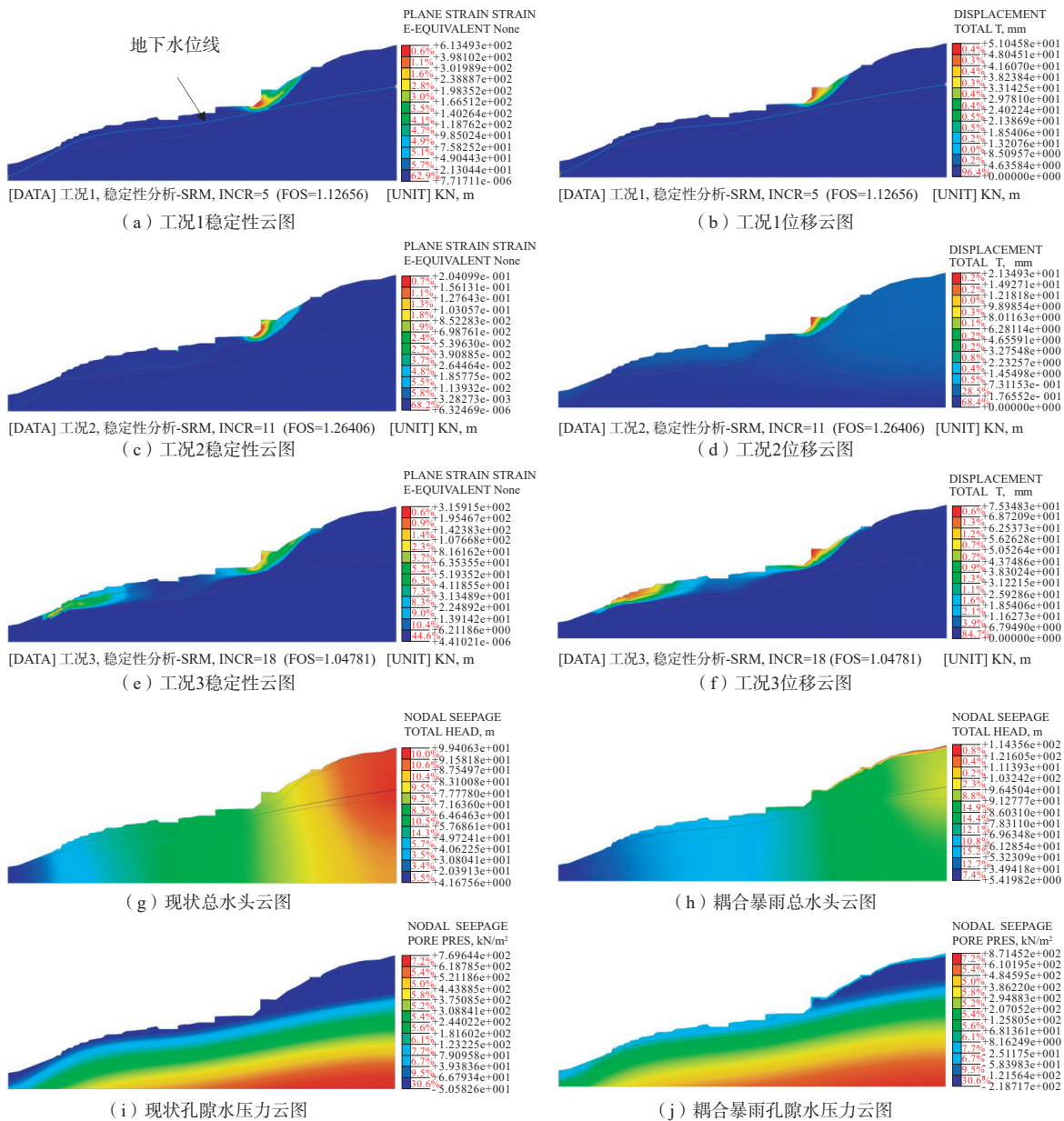


图 7 1-1'剖面各工况云图

Fig. 7 Cloud diagram of each working condition in the 1-1' profile

排泄通道受阻, 地表水向地下水转换致使金鸡岭滑坡伴有地下水位上升, 最终加剧了滑坡的整体失稳变形。

内部决定条件包括金鸡岭滑坡独有的地形地貌、地质构造和地层岩性, 为滑坡的形成和发展提供了物源和场地条件, 从根本上决定了滑坡的规模和形态。在地形地貌上, 滑坡区为圈椅状地形, 多条冲沟汇集, 地形条件为地表水及地下水向滑坡区内汇集创造了条件。在地质构造上, 金鸡岭滑坡区发育向斜构造, 由于构造挤压, 滑坡区内岩体极其破碎, 易于雨水及地下水入渗、汇集。在地层岩性上, 滑坡区地层岩性结构松散, 浅表主要为碎块石土, 结构松散, 渗透性

好, 大气降雨和地表水入渗快; 下部基岩为  $T_2b^2$  泥岩, 受构造挤压, 岩体节理、劈理、裂隙极其发育<sup>[22-23]</sup>, 利于地下水的运移及赋存; 泥岩含有多层软弱夹层, 力学性质差, 易于产生多期次不同深度的滑移。泥岩下伏  $T_2b^1$  泥灰岩相对完整, 但其上部多呈全风化状, 含多层泥化夹层, 形成相对隔水面, 使得上部  $T_2b^2$  地层的地下水位较高。

目前, 已对金鸡岭滑坡进行的治理措施包括: 在龙水路设置排水平洞入洞口, 在黑梁子安置房外侧、龙水中学、龙水小学区域进行削方减载。黑梁子区域在潘家岭滑坡中前部、中医院后部龙水路 2 标段外侧变



形区布置抗滑桩支挡。治理后,金鸡岭滑坡处于稳定状态。

## 5 结论与建议

(1)金鸡岭滑坡圈椅状的地形、多条冲沟汇集地形地貌、地层岩性结构松散、局部向斜地质构造是滑坡形成的物源和场地条件,“6·18”大暴雨和人类工程活动是滑坡形成的外在诱发因素,工程建设形成的高陡临空面,破坏了滑坡本身的自稳状态,使坡体稳定性进一步降低,耦合暴雨条件是金鸡岭滑坡失稳破坏的触发因素。

(2)金鸡岭滑坡在现状工况下整体处于基本稳定状态;在排干地下水工况下整体处于基本稳定状态;在暴雨工况下整体处于欠稳定状态,并可能发生失稳破坏;金鸡岭滑坡属于推移式滑移和浅表土质次级滑移变形,变形破坏从局部到整体,由浅表到深层的发展趋势;数值模拟结果进一步验证已进行的相关排水治理措施是可靠有效的。

建议密切关注“治水”措施,尤其是地下水位埋深浅和地表水丰富的滑坡,应该加强地表排水,防止地表水入渗。加强对滑坡后期持续性监测,视情况及时调整措施。在有多个潜在剪出口和滑移面时,建议采用有限元强度折减法进行分析。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 殷跃平. 三峡库区边坡结构及失稳模式研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 145 - 154. [ YIN Yueping. Human-cutting slope structure and failure pattern at the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 145 - 154. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 张富灵, 邓茂林, 周剑, 等. 长江三峡库区谭家湾滑坡基本变形特征及机理分析[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(1): 78 - 83. [ ZHANG Fuling, DENG Maolin, ZHOU Jian, et al. Basic deformation characteristics and mechanism of Tanjiawan landslide in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(1): 78 - 83. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 张志兼, 黄勋, 蔡雨微, 等. 三峡库区武隆段滑坡灾害驱动因子演变格局与人类活动的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 39 - 50. [ ZHANG Zhijian, HUANG Xun, CAI Yuwei, et al. The evolution pattern and influence of human activities of landslide

driving factors in Wulong section of the Three Gorges Reservoir area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 39 - 50. (in Chinese with English abstract) ]

- [ 4 ] 卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 等. 三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 73 - 81. [ WEI Tongyao, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 73 - 81. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 薛阳, 吴益平, 苗发盛, 等. 库水升降条件下考虑饱和和渗透系数空间变异性的白水河滑坡渗流变形分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1709 - 1720. [ XUE Yang, WU Yiping, MIAO Fasheng, et al. Seepage and deformation analysis of Baishuihe landslide considering spatial variability of saturated hydraulic conductivity under reservoir water level fluctuation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1709 - 1720. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 朱赛楠, 殷跃平, 王猛, 等. 金沙江结合带高位远程滑坡失稳机理及减灾对策研究——以金沙江色拉滑坡为例[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 688 - 697. [ ZHU Sainan, YIN Yueping, WANG Meng, et al. Instability mechanism and disaster mitigation measures of long-distance landslide at high location in Jinsha River junction zone: Case study of Sela landslide in Jinsha River, Tibet.[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 688 - 697. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 刘秋强, 杜岩, 郭富赟, 等. 青藏高原东端甘肃舟曲牙豁口滑坡复活机理研究[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 113 - 117. [ LIU Qiuqiang, DU Yan, GUO Fuyun, et al. Study on the reactivation mechanism of Yahuokou landslide at the eastern end of Qinghai-Tibet Plateau, Zhouqu County, Gansu Province, China[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 113 - 117. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 吴瑞安, 马海善, 张俊才, 等. 金沙江上游沃达滑坡发育特征与堵江危险性分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 120 - 128. [ WU Ruian, MA Haishan, ZHANG Juncai, et al. Developmental characteristics and damming river risk of the Woda landslide in the upper reaches of the Jinshajiang River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 120 - 128. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警

- 预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 6: 1104 – 1112. [ XU Qiang, TANG Minggao, XU Kaixiang, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 6: 1104 – 1112. (in Chinese with English abstract) ]
- [10] ZHANG Chengcheng, ZHU Honghu, LIU Suping, et al. A kinematic method for calculating shear displacements of landslides using distributed fiber optic strain measurements[J]. *Engineering Geology*, 2018, 234: 83 – 96.
- [11] 陶志刚, 罗森林, 朱淳, 等. 滑坡动态力学监测及破坏过程案例分析[J]. 工程地质学报, 2022, 30(1): 177 – 186. [ TAO Zhigang, LUO Senlin, ZHU Chun, et al. Dynamic mechanical monitoring of landslide and case analysis of failure process[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(1): 177 – 186. (in Chinese with English abstract) ]
- [12] 张海艳, 简文星, 杨涛, 等. 降雨作用下三峡库区秭归谭家湾滑坡监测预警研究[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(4): 129 – 138. [ ZHANG Haiyan, JIAN Wenxing, YANG Tao, et al. Monitoring and early warning of Tanjiawan landslide, Zigui, Three Gorges Reservoir region under rainfall effect[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(4): 129 – 138. (in Chinese with English abstract) ]
- [13] 周越, 曾昭发, 唐海燕, 等. 公路勘察中滑坡体的地球物理特征与分析: 以张榆线公路勘察为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 638 – 644. [ ZHOU Yue, ZENG Zhaofa, TANG Haiyan, et al. Geophysical characteristics of landslide body in highway reconnaissance: A case study in highway prospecting of Zhangyu line[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 638 – 644. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 许超, 吕义清, 周泽文, 等. 采动滑坡变形机理分析[J]. 煤炭技术, 2017, 36(11): 164 – 166. [ XU Chao, LYU Yiqing, ZHOU Zewen, et al. Mining landslide deformation mechanism analysis[J]. Coal Technology, 2017, 36(11): 164 – 166. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 黄刚, 肖洋, 罗廷. 四川通江县袁家山滑坡特征与稳定性初步分析[J]. 人民长江, 2020, 51(增刊2): 75 – 78. [ HUANG Gang, XIAO Yang, LUO Ting. Preliminary analysis on characteristics and stability of Yuanjiashan landslide in Tongjiang County, Sichuan[J]. Yangtze River, 2020, 51(Sup 2): 75 – 78. (in Chinese) ]
- [16] WANG Yetao, ZHU Guanyu, DING Linbo, et al. Numerical simulation of slope failure treatment of a tunnel portal section based on MIDAS GTS[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1972(1): 012026.
- [17] 吕文斌, 耿海深, 魏赛拉加. 基于极限平衡法和Midas/GTS的张家湾滑坡稳定性[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(11): 4369 – 4378. [ LÜ Wenbin, GENG Haishen, WEI Sailajia. Stability of Zhangjiawan landslide based on limit equilibrium method and Midas/GTS[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(11): 4369 – 4378. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 谭银龙, 许万忠. 降雨入渗对裂隙岩质边坡稳定性影响分析[J]. 地质灾害与环境, 2022, 33(2): 78 – 85. [ TAN Yinlong, XU Wanzhong. Analysis of the influence of rainfall infiltration on the stability of fractured rock slopes[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2022, 33(2): 78 – 85. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 蒋先念, 浦磊, 范良刚, 等. 重庆市巫山县金鸡岭滑坡应急抢险勘查报告[R]. 重庆: 重庆市二零八勘察设计院, 2018. [ JIANG Xiannian, PU Lei, FAN Lianggang, et al. Investigation report on emergency rescue of Jinjiling landslide in Wushan County, Chongqing City[R]. Chongqing: Chongqing 208 Survey and Design Institute, 2018. (in Chinese) ]
- [20] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343 – 346. [ ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343 – 346. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] EGELI I, PULAT H F. Mechanism and modelling of shallow soil slope stability during high intensity and short duration rainfall[J]. *Scientia Iranica*, 2011, 18(6): 1179 – 1187.
- [22] CHAI Bo, YIN Kunlong, DU Juan, et al. Correlation between incompetent beds and slope deformation at Badong Town in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69(1): 209 – 223.
- [23] DENG Qinglu, FU Min, REN Xingwei, et al. Precedent long-term gravitational deformation of large scale landslides in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Engineering Geology*, 2017, 221: 170 – 183.