



川北某码头工程后缘滑坡机理及治理措施

李九乾, 何元勋

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 川北某码头堆场开挖过程中, 后缘土体边坡发生开裂变形, 并迅速沿基岩顶面滑动形成滑坡, 随后滑坡后缘以上土体由于滑坡的牵引形成两级弧形变形裂缝。从滑坡前地形变化、滑坡后滑面特征、后缘裂缝特征等入手, 在原勘察资料的基础上, 结合现场调查、坑探, 采用极限平衡力学分析的方法, 对该处滑坡的滑动机理、稳定状态及治理措施进行研究。结果表明, 滑坡发生的主要内因在于基覆界面附近土体含水量过高, 抗剪强度过低, 施工开挖形成临空面后, 基覆界面附近剪应力集中超过土体抗剪强度, 诱发滑坡, 并提出相应的治理措施建议。

关键词: 红层区土体滑坡; 类折线形滑面; 牵引式滑坡

中图分类号: U 652.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0150-06

Mechanism and treatment measures of landslide at back edge of wharf project in northern Sichuan

LI Jiu-qian, HE Yuan-xun

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: During the excavation of a wharf yard in northern Sichuan, the soil slope at the back edge cracked and deformed, and quickly slid along the top of the bedrock to form a landslide. Then the soil above the back edge of the landslide formed two-stage arc deformation cracks due to the traction of the landslide. In this paper, starting from the terrain changes before the landslide, the characteristics of the sliding surface and the cracks at the back edge after the landslide, on the basis of the original survey data, combined with field investigation and pit exploration, the sliding mechanism, stable state and treatment measures of the landslide are studied by using the method of limit equilibrium mechanics analysis. It is concluded that the main internal cause of landslide is that the water content of soil near the foundation cover interface is too high and its shear strength is too low. After the free face formed by construction excavation, the shear stress concentration near the foundation cover interface exceeds the shear strength of soil, inducing landslide, and the corresponding treatment measures are proposed.

Keywords: soil landslide in red-bed region; polygonal sliding surface; retrogressive landslide

广元港红岩作业区(一期)设计为一类河港, 代表船型为 1 000 吨级, 泊位数 4 个, 设计年货运吞吐量 6.5 万 TEU、杂货 90 万 t。建设场地位于广元市昭化区红岩镇下游嘉陵江右岸, 亭子口枢纽回水库区内, 占用嘉陵江岸线长度 306 m, 占地 20.67 万 m²。项目建设期间在对左后缘进行开挖过程中, 后缘土体边坡发生开裂变形, 并迅速滑

动形成滑坡。

原地质勘察成果和现场坑探揭示, 该滑坡土体为可塑-硬塑状黏土, 土体强度较高, 在现有的开挖状态下本不易发生破坏, 但是现场坑探揭示, 基岩顶面附近 3~8 cm 厚土体含水量偏高, 土体呈软-可塑状, 形成一个软弱结构面。本文在充分研究场地地质条件的基础上, 分析该滑坡变形机理,

收稿日期: 2022-06-13

作者简介: 李九乾(1977—), 男, 硕士, 教授级高工, 注册土木工程师(岩土), 研究方向为工程地质及岩土工程。

计算出不同工况下该滑坡的稳定性, 对滑坡变形与稳定性做出评价预测, 并针对性提出治理方案。

1 滑坡区自然地理概况

滑坡区地处四川盆地北部, 嘉陵江上游右岸, 属亚热带季风气候区, 四季分明, 雨量丰沛。多年平均降雨量 941.8 mm, 降雨多集中在 5—9 月。滑坡附近为梯田, 夏季为水田, 地表有表层灌溉水系发育; 冬季为干田, 地表无水。滑坡区大地构造单元属四川台坳之川北台陷构造单元, 为构造剥蚀、侵蚀低山-重丘地貌, 无活动断裂通过。场地出露地层主要为第四系残坡积、坡洪积粉质

黏土、侏罗系上统莲花口组泥岩夹砂岩。

2 滑坡工程地质特征

在原码头堆场详细勘察的基础上, 进一步通过坑探及取样测试, 查明滑坡的工程地质条件、形态、特征、成因等, 为治理方案设计提供必需的地质资料^[1]。

2.1 滑坡形态

滑坡区原设计为码头堆场, 原始地貌为整体 10°左右的斜坡, 地表为梯田, 整体地形较为平缓(图 1)。滑坡发生后, 裂缝平面形态呈圈椅形, 主滑方向为 NE119°, 滑坡后缘较前缘宽度稍小。

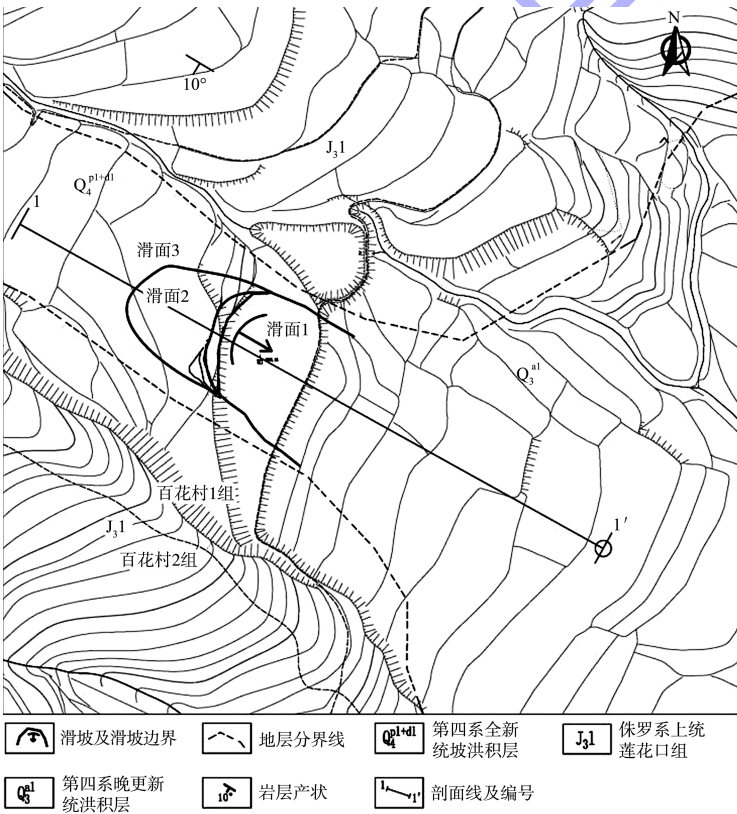


图 1 滑坡区平面

根据滑坡体滑面形态将滑体划分为滑面 1~3 区(图 2)。滑面 1 为主滑区, 滑坡发生后, 前缘位移达 1.0~1.5 m, 可见明显的剪切滑动镜面, 在后缘形成约 1.5~2.0 m 的滑坡后壁陡坎和宽约 1.0 m 的裂缝, 呈拉裂、下挫形态, 滑面主要为基覆界面, 总体滑面呈类似折线状。随后滑坡 1 后缘以上土体由于滑坡的牵引形成滑面 2、3 两级半

环状变形裂缝, 第 1、2 级裂缝间距约 2 m, 第 2、3 级裂缝间距约 26 m。第 2 级裂缝宽约 5~10 cm, 下挫 2~5 cm。第 3 级裂缝宽 1~3 cm, 未见明显下挫。第 2、3 级裂缝均呈拉裂形态, 未见剪切痕迹。经过全面的工程地质调绘、坑探, 确定滑坡平面尺寸 70 m×35 m, 滑体厚度 5~15 m, 滑坡规模约 1.0 万~1.5 万 m³。

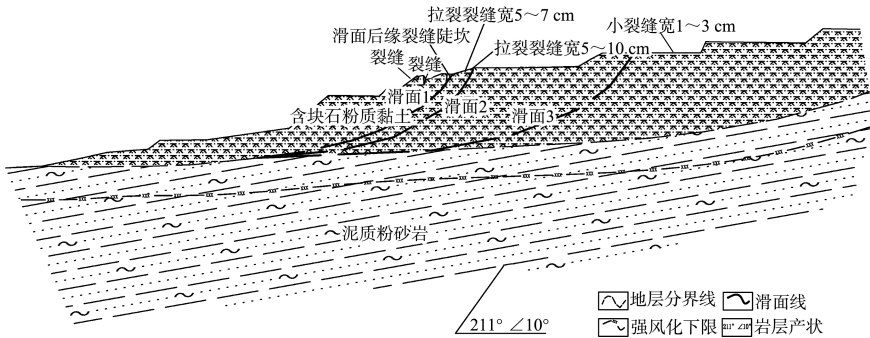


图 2 开挖后地形及滑面

2.2 滑坡体工程地质条件

2.2.1 岩土体结构

1)滑体。滑坡区覆盖层厚度约 5~10 m，表层 2~3 m 为粉质黏土，可塑状，质较纯，其下为残坡积粉质黏土，可塑-硬塑状，含少量泥岩的碎块石。

2)滑动带。处于基岩顶面，为粉质黏土，含水量偏高，呈软塑-可塑状，偶见渗水出现。

3)滑床。滑面以下为侏罗系上统莲花口组泥岩夹砂岩。边坡开挖后坡向与岩层倾向基本一致，但岩层倾角略大于地面坡度，无顺层问题。

2.2.2 水文地质条件

滑坡附近为梯田，经过现场原位探井等试验揭露，该梯田总体透水性差，场地内土体除表层 2~3 m 呈可塑状外，其下土层含水量偏低，土呈可塑-硬塑状，总体而言地下水不发育，但基覆界面附近土体含水量较高，呈可塑-软塑状，偶有地下水渗出。

3 滑坡成因机制分析

3.1 滑坡形成条件

1)滑坡形成的地形条件。码头堆场修建在山区斜坡上，前临嘉陵江，堆场后缘地面横坡 9° 左右，覆盖层下基岩面坡度 5°~10°，整体地形较为平缓，不具备发生滑坡等不良工程的地质条件。但在对左后缘土体进行开挖过程中，形成一高 6~8 m、坡度 1:1 的陡坎，为一相对较陡的临空面。

2)坡体物质组成及地下水条件。滑坡区坡体主要为残坡积粉质黏土及含块石粉质黏土。下伏

基岩成分以强风化泥质粉砂岩为主，在长期地质作用下，基岩顶面相对富水，在地下水影响下，覆盖层底部强度降低，同时伴随基覆界面附近泥质粉砂岩块石软化崩解、泥化，强度降低，形成一个软弱结构面，促进滑坡形成^[2]。

3.2 滑坡成因

通过现场调查，该处滑坡主要由于工程建设过程中开挖形成陡坡，为滑坡的下滑变形提供了良好的临空条件^[3]，上部覆盖层土体性质较好，但基覆界面位置土体性质差。滑坡主要沿基覆界面滑动，滑坡右侧剪切破坏，后缘拉裂破坏，可见明显的沿基覆界面滑动的镜面现象。滑面以上滑坡体的成分主要为粉质黏土，下部土体为含强风化泥岩碎块石。除表层含水量略高呈可塑状外，该粉质黏土主要为可塑-硬塑状。滑面附近滑动带处于基岩顶面，为粉质黏土，含水量偏高，呈软塑-可塑状，偶见渗水出现，滑面以下为侏罗系莲花口组泥岩，可见滑坡前缘剪出口附近滑面呈光滑镜面状。

综上所述，滑坡发生主要内因在于基覆界面附近土体含水量过高，抗剪强度过低；外因在于施工开挖形成的临空面过陡，基覆界面附近剪应力超过土体抗剪强度，诱发滑坡，其力学机制基本为沿基覆界面的牵引式土体滑坡。

4 滑坡稳定性评价

4.1 稳定性分析

滑坡在时间顺序上从滑面 1 贯通下滑，随后滑面 1 后缘以上土体受滑体 1 的牵引形成滑面 2、

3 两级弧形变形裂缝, 不断发展积累, 形成贯通滑面。滑坡发生后, 采用削坡法把前缘陡坎削为缓坡, 滑坡基本上停止运动, 处于基本稳定状态, 但遇到暴雨或连续降雨、地震等不利工况^[4], 势必改变滑坡边界条件, 必然导致滑坡进一步活动。因此, 定性分析确定该滑坡处于不稳定-欠稳定状态。

4.2 下滑力计算参数确定

通过理正软件土质边坡稳定性计算模块设定相关参数, 计算在暴雨、地震等不同工况下的剩余下滑力, 以此分析边坡稳定性。滑坡发生后, 后缘滑坡陡壁、前缘剪出口均较为清晰, 左右剪裂边界明显, 滑坡周界清晰, 通过探井基本查明

了滑体的厚度, 见图 2。在现有滑坡以上尚有两级裂缝, 滑面 1、2 之间距离仅 2 m 左右, 本次不单独对滑面 2 进行稳定性计算, 仅对滑面 1、3 进行天然、暴雨及地震条件下的稳定性及下滑推力计算。

通过恢复原地貌地面线, 采用传递系数法反演滑面抗剪强度。考虑到该滑坡滑面强度的控制因素是基覆界面的土体强度, 相对而言滑体土的强度影响较小, 故滑坡各土层物理力学性质指标根据土工试验资料进行统计分析得出标准值, 并结合项目区相同或类似土类的指标经验值综合确定, 土体物理力学参数见表 1, 滑面强度采用反算确定。

表 1 岩土物理力学参数								
地层名称	状态	天然密度	饱和抗剪强度		天然抗剪强度		基底摩擦系数	容许承载力 [f]/kPa
		$\rho/(g \cdot cm^3)$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$		
粉质黏土	天然	2.05	8	12	10	19	0.3	100
滑带土	软塑	2.05	4	5	5	6	0.2	80

4.3 稳定性计算

红岩码头左后缘滑坡稳定性及剩余下滑力计算结果见表 2、3。其中稳定性按 1:1.5 削方后计算。

表 2 红岩码头左后缘滑坡稳定系数		
状态	滑面 1 稳定系数	滑面 3 稳定系数
天然	1.125	1.017
暴雨	0.836	0.797
地震	1.000	0.867

表 3 红岩码头左后缘滑坡剩余下滑力			
状态安全系数 K		滑面 1 下滑力/kN	滑面 3 下滑力/kN
天然	1.30	210.9	528.9
	1.15	384.0	721.9
暴雨	1.25	506.0	926.2
	1.15	197.0	543.0
地震	1.25	332.5	772.9

计算结果表明: 削方后, 滑坡天然状态下稳定系数为 1.125, 基本稳定但安全储备不足; 暴雨工况下稳定性系数仅 0.836, 不稳定; 地震工况下属基本稳定状态, 安全储备不足^[5]。

5 治理方案

对滑坡防治而言, 宜采用削方减载、坡体排

水、抗滑支挡等综合防治措施^[6]。因征地等原因, 滑坡区不具备更多的削方减载空间, 可考虑以抗滑支挡为主, 辅以地表及坡体排水措施。抗滑支挡根据剩余下滑力计算, 以抗滑挡墙为宜。

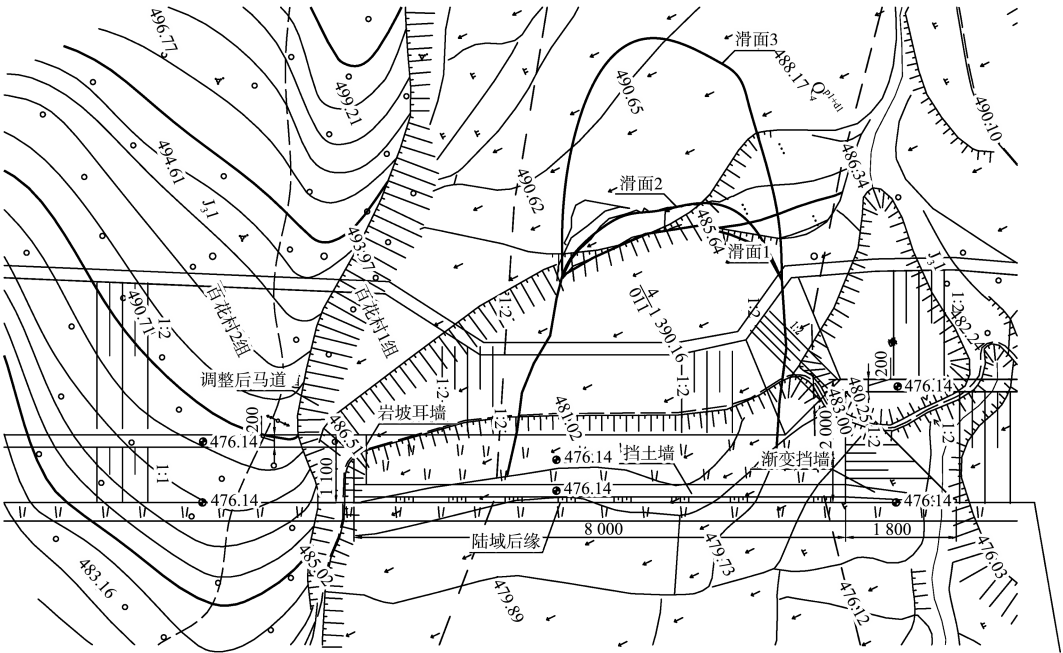
5.1 工程治理方案

滑面 1、3 区内的剩余下滑力均较大, 故设计抗滑挡墙总长 80 m, 采用衡重式挡墙形式, 抗滑挡墙结构平面与断面见图 3。抗滑挡墙上游侧与原 1:2 边坡衔接处采用渐变挡墙形式, 渐变段长 18 m; 抗滑挡墙下游侧与原 1:1 边坡衔接处采用岩坡耳墙形式。抗滑挡墙高 11.5 m, 挡墙前趾置于原陆域坡脚排水沟下方。挡墙顶高程 476.14 m, 底高程 464.64 m; 顶宽 2 m, 底宽 4.8 m; 上墙高 5 m, 背坡 1:0.5; 下墙高 6.5 m, 背坡 1:0.3; 挡墙面坡 1:0.1。挡墙底嵌入中风化基岩 0.5 m 以上, 墙后岩面线以上回填砂卵石至墙顶高程 476.14 m, 顶部采用 25 cm 耕植土层封闭, 封闭后与原 1:2 护坡衔接。

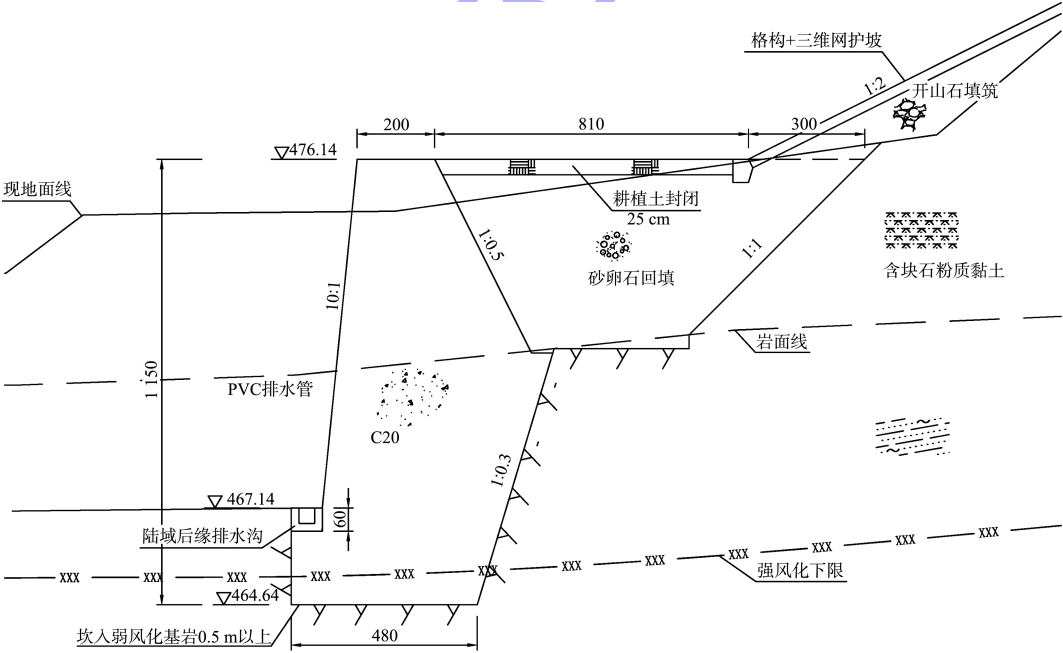
根据稳定性计算分析可知, 暴雨工况下, 滑坡体的剩余下滑力最大, 故挡墙按自重力和下滑力组合进行结构计算。按照暴雨工况下安全系数

1.05、剩余下滑力 260 kN 作为滑动荷载，按照《码头结构设计规范》中重力式码头挡墙的验算

公式，计算得挡墙抗力为 364 kN，可满足设计要求。



a) 平面



b) 断面

图 3 抗滑挡墙结构 (高程: m; 尺寸: mm)

5.2 综合截、排水工程措施

恢复滑坡体范围内的边沟、排水沟及涵洞，滑坡体周边设置完善的截、排水沟，将坡面水流

引入滑坡边沟内排除，滑坡体下边坡平台及抗滑挡墙内侧设置截水沟，与坡面拱形骨架排水急流槽等共同形成完善的排水系统，将坡面水流排入

嘉陵江。坡体内地下水通道设置仰斜排水孔排除滑坡体内地下水, 提高坡体稳定性^[7]。

6 结论

- 1)本工程滑坡不同于常见黏土层滑坡的圆弧形滑面-转动式滑动模式, 系一种具有软弱结构面的类折线形滑面-牵引式滑坡, 常见于基岩或碎石土滑坡的滑动模式。该类型滑坡发生的内因主要在于基覆界面附近土体含水量过高, 抗剪强度过低, 施工开挖形成临空面后, 基覆界面附近剪应力集中超过土体抗剪强度, 诱发滑坡。
- 2)对于土质边坡, 除土体强度低可能形成工程滑坡外, 还应注意土体强度总体较高但存在软弱结构面的情况下, 是否具有沿软弱结构面滑动而导致滑坡的可能。
- 3)对于该类型滑坡, 建议采用综合治理方案, 可考虑以抗滑支挡为主, 辅以地表及坡体排水措施, 提高滑坡稳定性。本文的研究为该类型黏土

层滑坡勘察、监测预警及防治提供了参考和依据。

参考文献:

[1] 中国地质环境监测院. 滑坡防治工程勘查规范: GB/T 32864—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[2] 姚勇, 许斌全, 曹阳, 等. “滇西红层”地质对高速公路的危害及防治措施浅析[J]. 云南交通科技, 2002, 18(5): 34-40.

[3] 马惠民, 王恭先, 周德培. 山区高速公路高边坡病害防治实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.

[4] 李昌森. 福建连城某地滑坡稳定性分析评价[J]. 江西建材, 2021(5): 58-59.

[5] 王纳纳, 梁宁. 泸定县烹坝中心小学后山不稳定斜坡灾害调查研究[J]. 四川地质学报, 2020, 40(4): 658-661.

[6] 杨明, 李万鹏, 李文洋. 浅谈湖北京港澳高速公路高边坡滑坡处治设计方案[J]. 建筑知识, 2017(2): 145-146.

[7] 冯兴亮, 范晓燕. 蓉遵高速公路某滑坡机理分析及抢险、治理方案研究[J]. 中外公路, 2021, 41(S2): 68-73.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 94 页)

- 3)计算中发现, HEC-RAS 模型在计算补坝工况时, 可根据水面线的变化比选合适的补坝高程, 可供设计人员选择最经济和最优的补坝方式。

5 结论

- 1)HEC-RAS 模型通过河道糙率率定、边界条件设置, 率定出适合研究区分汉河道的糙率参数, 为计算设计最低通航水位提供便利, 有较好的适用性。
- 2)工程河段的整治方案补坝之后能有效地将汉道河段的水流集中到主航道汉道, 使得主航道水深加大, 流态变好, 为行船安全提供保障。
- 3)模型计算成果可为设计人员选择分汉航道最优补坝高程提供有利的技术支撑。

参考文献:

[1] 杨胜发. 上游工程对分汉河道分流比的影响[J]. 重庆交通学院学报, 1999(1): 93-98.

[2] 李家世, 刘晓帆, 周玉洁, 等. 山区河流航道设计最低通航水位推求方法研究[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(6): 88-90.

[3] BRUNNER G W. HEC-RAS river analysis system user's manual[R]. California: US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, 2010.

[4] 张冲. HEC-RAS 一维恒定流模型在水面线计算中的应用研究[J]. 河南科技, 2020, 39(35): 68-70.

[5] 刘洋, 孙晓英, 王俊英, 等. HEC-RAS 及 SOBEK-RURAL 软件推算山区天然河道水面线[J]. 北京水务, 2008(6): 34-36.

[6] 李家世, 刘晓帆. 梯级水库建设对岷江下游航道通航流量的影响[J]. 水运工程, 2021(6): 164-170, 193.

(本文编辑 王璵)