

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221111002

考虑侧壁阻力的顺层边坡失稳机制及稳定性评价*

赵海松¹, 张乐¹, 邬凯¹, 魏安辉¹, 向波¹, 邵江¹, 张俊云²

(1. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041;
2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 侧壁阻力作用下, 顺层边坡主滑方向将偏离岩层倾向, 其变形及失稳机制具有典型特征。以四川盆地马边河流域某顺层边坡为例, 基于其工程地质条件, 总结顺层边坡不同变形区域的特征, 结合失稳边界条件研究了考虑侧壁阻力的顺层边坡失稳演化机制; 最后, 对比主滑方向偏离岩层倾向与否的受力差异, 分析考虑侧壁阻力的顺层边坡三维稳定性, 并研究了各影响因素的作用效应。结果表明: (1) 考虑侧壁阻力的顺层边坡变形可划为失稳滑走区、滑坡区和稳定区, 滑坡区包含滑动区和蠕滑变形区, 滑动区岩体滑动后解体风化为碎、块石土, 蠕滑变形区受侧壁阻力影响岩体仅变形拉裂; (2) 顺层边坡经岩体劣化和前缘临空后, 总体呈下部滑动、中部蠕滑拉裂的顺层临空-后退式破坏; 滑动区边界受前缘及侧壁临空控制, 长度与侧壁冲沟下切段长度相近; 蠕滑变形区部分侧壁由节理面转化为挤压带, 侧壁阻力增大, 稳定性高于临界失稳状态; 受侧壁阻力及滑体厚度控制, 蠕滑变形区与稳定区界限处因滑体厚度削弱而拉裂; (3) 建立了考虑侧壁阻力的顺层边坡稳定性系数计算式, 以及岩层倾向 δ 、滑面倾角 α 、主滑方向偏离岩层倾向夹角 β 三角度间的换算关系式, 侧壁摩擦系数和 β 越大, 侧壁阻力越利于顺层边坡稳定。

关键词: 顺层边坡; 侧壁阻力; 变形特征; 失稳机制; 稳定性评价

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0404-11

Failure Mechanism and Stability Evaluation of Bedding Slopes Considering Lateral Wall Resistance

ZHAO Haisong¹, ZHANG Le¹, WU Kai¹, WEI Anhui¹, XIANG Bo¹,
SHAO Jiang¹, ZHANG Junyun²

(1. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu 610041, China;
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Under the influence of lateral wall resistance, the main sliding direction of a bedding slope deviates from the direction of rock layer orientation, exhibiting typical features in its deformation and failure mechanisms. Taking a bedding slope in the Mabian River of Sichuan basin as a case study, we summarized the slope deformation characteristics of different areas based on its engineering geological conditions. Then, we analyzed the evolution mechanism of bedding slope failure considering lateral wall resistance and the failure boundary conditions. Finally, the three-dimensional stability of bedding slope under the effect of lateral wall resistance was analyzed, and the effects of various influencing fac-

* 收稿日期: 2022-11-11; 修回日期: 2022-12-20

基金项目: 四川省交通运输科技项目(2021-A-02, 2021-A-12)、四川省科技计划重点项目(2021YFS0321)、四川省公路规划勘察设计研究院自立项目(2022-YL-02)资助

作者简介: 赵海松(1989—), 男, 高级工程师, 本科。主要从事岩土工程及地质灾害防治研究。E-mail: 954649482@qq.com

通讯作者: 邬凯(1985—), 男, 正高级工程师, 博士。主要从事路基边坡及地质灾害防治。E-mail: wukaisu@sina.com

tors were studied by comparing the stress differences experienced when the main sliding direction deviated from or aligned with the rock layer orientation. The results showed that: (1) Considering lateral wall resistance, the deformation of a bedding slope could be categorized into an unstable sliding zone, landslide zone, and stable zone. The landslide zone included a sliding zone and a creep-slippage zone. After sliding, the rock mass in the sliding zone disintegrated and weathered into broken and block soil, and the creep-slippage zone experienced only deformation and cracking under the effect of lateral wall resistance. (2) After rock mass deterioration and the appearance of free surface at its forefront, the bedding slope presented a bedding-plane free-fall-backward failure with sliding in the lower part and creep-cracking in the middle part. The boundary of the sliding zone was controlled by the leading edge and the free face of the lateral wall, with its sliding distance being similar to that of the undercut segment of gully sidewall. The lateral wall was transformed from a joint face into a compression zone in parts of the creep-slippage zone, increasing the lateral wall resistance and resulting in a higher stability than the critical instability state. The boundary between the creep-slippage zone and the stable zone was cracked due to the thinning of the sliding mass thickness and the lateral wall resistance. (3) A formula for the stability coefficient of the bedding slope considering side-wall resistance was developed, as well as a conversion equation between the rock layer dip angle, slip surface dip angle α , and the angle β between the main slip direction and the rock layer orientation. The results showed that the larger the β and the friction coefficient of lateral wall, the greater the contribution of the resistance to the stability of bedding slopes.

Keywords: bedding slope; lateral wall resistance; deformation characteristics; failure mechanism; stability evaluation

0 引言

顺层边坡指岩层倾向与坡向接近或大体一致,其交角一般不超过 30° ,且岩层倾角一般大于 10° 的层状结构边坡^[1-5]。受构造、岩性、地壳抬升等因素影响,顺层边坡广泛分布,坡体内部岩体软弱夹层发育或层间结合差,部分发育层间错动带或构造光滑镜面,受降雨等诱因作用,其平面滑动主要表现为边坡在自重及其他荷载作用下沿软弱结构面发生顺层滑移破坏,失稳风险高,破坏严重,治理成本昂贵^[6-10]。研究顺层边坡变形特征及失稳演化机制利于其灾变时空预测,对工程建设防灾减灾具有指导作用。

根据顺层边坡的变形特征开展灾害防治研究工作,是有效的途径^[11-12]。对于含软弱夹层的顺层边坡,在构造裂隙与软弱层面耦合作用下,常发生缓慢、持续、渐进的蠕变变形,且不同部位的变形程度存在差异^[13-14]。顺层边坡的平面滑动破坏滑面单一,现有研究多从滑带土的强度劣化探讨失稳特征,对地震、降雨、坡脚开挖、河流侧蚀等诱因下抗滑力与下滑力的相对变化开展了较深入的研

究^[8-9,15]。滑面倾角与坡脚的相对大小决定着顺层边坡的失稳机制,当滑面倾角小于坡脚时,常发生顺层向的平面破坏或蠕滑-拉裂式破坏;当滑面倾角大于坡脚时,常发生滑移/弯曲-剪断破坏^[15-18]。根据顺层滑坡滑面空间发展形态,基于渐进滑带锁固力学模型,失稳模式又可分为前进式渐进破坏和后退式渐进破坏2种类型^[19]。然而,以上研究均忽略了主滑方向偏离岩层倾向的成因及其对顺层边坡失稳机制的影响。从坡体结构特征来看,这样的简化使得设计结果偏于保守,符合安全性原则,但成本较高,且坡体失稳机制与实际情况略有不同,故存在一定争议。

考虑主滑方向与岩层倾向间夹角时,主滑方向的边坡侧壁常由节理面控制,稳定性分析时抗滑力将不局限于滑面,侧壁摩擦等作用也提供了逆滑动方向的阻力^[20-21]。显然,顺层边坡的变形特征及失稳模式不仅与结构面力学参数、岩层倾角产状、前缘临空条件等相关,还与侧壁阻力相关。学者们针对这一问题,通过多种手段研究了夹角上限、夹角对破坏模式的影响等,关于侧壁阻力对失稳机制和稳定性的影响研究成果不多,未形成较统一的认知。

鉴于此,本文以四川盆地马边河流域平乐顺层边坡为例,结合工程地质条件,总结不同变形区的地质特征;在分析失稳边界的基础上,探讨考虑侧壁阻力的顺层边坡失稳机制;最后,对坡体由顺岩层倾向偏转至实际主滑方向这一过程进行三维受力分析,期望提出考虑侧壁阻力的顺层边坡稳定性评价方法,并对其侧壁阻力等影响因素的作用效应展开探讨。研究成果可为主滑方向偏离岩层倾向的顺层边坡治理提供参照。

1 顺层边坡工程背景

1.1 地形地貌

平乐顺层边坡位于四川省乐山市南东方向,属西南地区马边河流域下游地段,该流域顺层边坡较发育,工程地质条件相近,研究区地理位置及区域地貌等如图1所示。该边坡长约1 000 m,横向宽约300 m,坡向约290°~300°,坡度较缓约10°~20°,总体较顺直,局部发育陡坎,边坡下部高速公路区域为原核桃湾组村民居住区。由图1可见,边坡中部发育2处凸出山脊,山脊分别宽约30~60 m、70~

100 m,山脊上植被茂密,以竹林为主,局部基岩出露,大部为覆盖层。山脊中间发育“U”型冲沟,走向约300°,长约270 m,深10~18 m,宽40~60 m。

1.2 地层岩性

图1还揭示了马边河流域北东侧广泛分布的白垩系和侏罗系红层软岩,平乐顺层边坡的地层岩性主要为侏罗系中统沙溪庙组上段砂泥岩互层,受构造影响,层间结合一般~差,局部极差,岩层概化如图2所示。砂岩层位不稳定,开挖及钻探揭露大型砂岩透镜体,具尖灭重现特征。

1.3 地质构造

由图1还可见,平乐顺层边坡周边地质构造发育显著,近南北向主要有五渡—利店断层、志何坝断层、民主断层、中都断层等,近东西向主要有靛兰坝断层、平等断层等;同时,与河流流向近平行或小角度相交“L型”五指山背斜、马边向斜和利店新凡向斜。受南北向为主、东西向为辅的多期构造作用,红层软岩层间错动带极为发育,强度明显劣化。受河流侧蚀作用下切形成临空面,流域内发育较多的软岩顺层边坡。

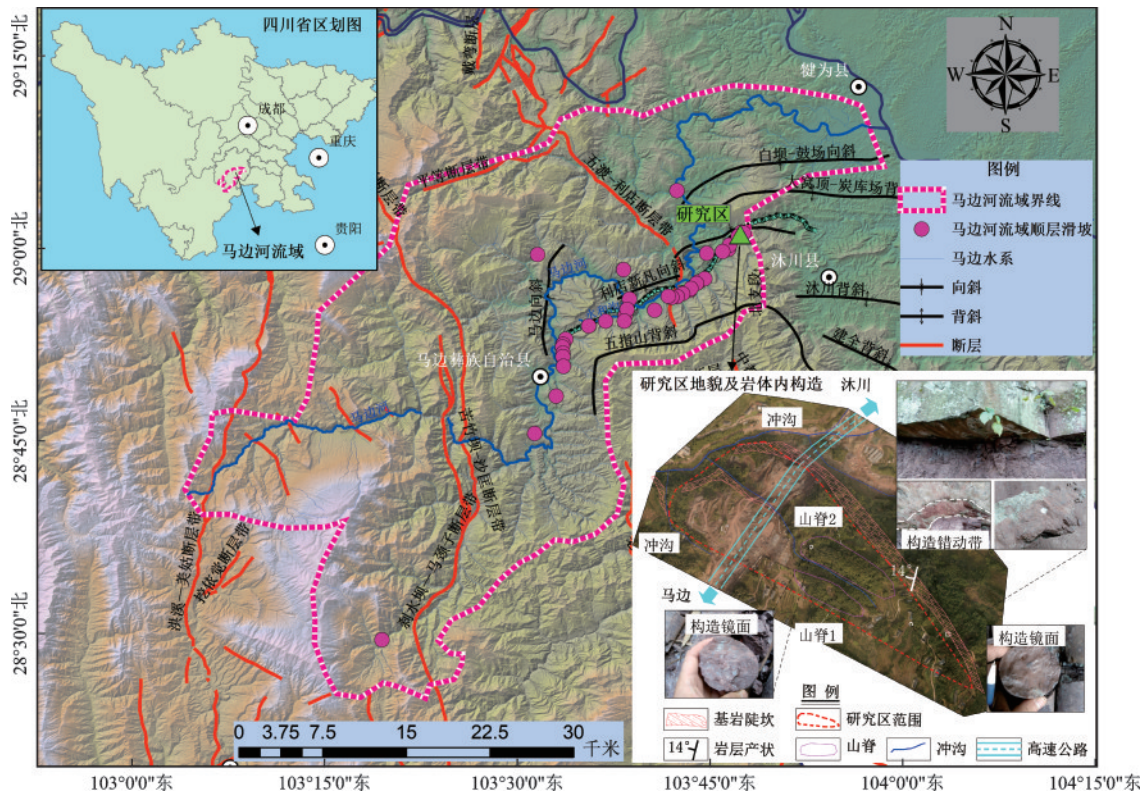


图1 研究区地理位置、区域地貌及地质构造

Fig.1 Geographical location, geological structure, and topography of the study area

岩层优势产状为 $265\sim 275^\circ\angle 12\sim 14^\circ$,发育2组近正交节理:L1产状 $12\sim 27^\circ\angle 68\sim 85^\circ$,局部节理倒转,其延伸一般 $>20\text{ m}$,切深一般 $>10\text{ m}$,面较平,间距 $2\sim 10\text{ m}$,一般闭合~微张,近地表充填少量黏土,结合一般~差;L2产状 $99\sim 120^\circ\angle 62\sim 85^\circ$,延伸 $5\sim 10\text{ m}$,切深 $3\sim 8\text{ m}$,面较平,间距 $0.5\sim 2\text{ m}$,一般闭合,近地表充填有少量黏土,结合一般~差。

此外,场区岩体浅层层面间曾发生构造错动,形成一层构造错动带,岩体内构造镜面发育,粉砂质泥岩层内尤为明显,如图1所示。

1.4 水文条件

平乐顺层边坡的地下水主要为第四系松散层孔隙水和基岩孔隙裂隙水。由图2可见,滑带以上岩土体内裂隙较发育,利于地表水入渗,滑带土和粉砂质泥岩则形成天然隔水层;降雨条件下,地表水沿裂隙入渗至滑带附近,并沿滑带和层间裂缝顺坡向径流,在局部地形低洼处以泉的形式排出。

综上,平乐顺层边坡是马边河流域具代表性特征的砂泥岩互层顺层边坡,受地质构造、降雨等作用明显,其失稳特征应具有典型研究价值。

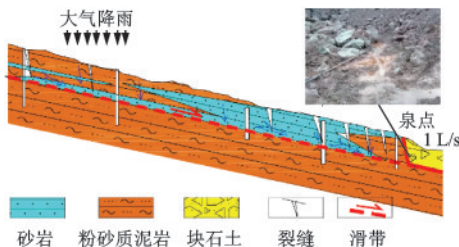


图2 岩层概化和基岩裂隙水补给径流

Fig.2 Generalization of rock strata and water recharge runoff from bedrock fissure

2 考虑侧壁阻力的顺层边坡失稳机制

2.1 变形特征

2.1.1 边坡变形区划

结合工程地质勘察、坡体开挖、无人机航测等手段,将平乐顺层边坡划为稳定区、滑坡区和失稳滑走区,滑坡区由下部滑动区和中部蠕滑变形区组成^[11]。各区域平面展布统计见表1,边坡变形区划如图3所示,典型地质剖面如图4所示。其中,滑坡区厚约 $10\sim 28.6\text{ m}$,体积约 $260\times 10^4\text{ m}^3$,蠕滑变形

表1 边坡变形平面参数

Table 1 Plane parameters of bedding slope deformation

区域	坡体位置	顺坡向 (长)/m	横坡向 (宽)/m	表面积/ (10^4 m^2)
稳定区	上部	290	100~190	3.3
滑 坡 区	蠕滑变 形区 中下部	360~460	160~300	8.0
区 滑动区		230~320	70~170	4.1
失稳滑走区	下部右侧	160	120	1.9

区体积约 $180\times 10^4\text{ m}^3$ 。

稳定区位于坡体后部,钻孔及地表调绘揭示区内岩体完整性好,无滑带土发育,基岩未发生变形滑动。

滑坡区位于坡体中部及下部西南侧,中部岩土界面处顺层面发育滑带土,滑体以拉裂变形为主,表明基岩未发生较大滑动,故进一步划为蠕滑变形区;坡体下部西南侧岩土界面处顺层面发育滑带土,滑体以块石土为主,表明岩体已产生较大距离滑动,基岩解体,故进一步划为滑动区。

失稳滑走区位于坡体下部西北侧,该区域西南侧发育基岩陡坎,陡坎下部发育冲沟;后缘发育陡坎,陡坎后部坡体局部发育裂缝,坡体内发育滑带土;前缘边坡相对较陡,其中下部堆积大量碎块石;此外,钻孔揭示坡体覆盖层厚度约 $1\sim 3\text{ m}$,局部基岩出露,岩土界面与基岩层面倾角一致。可见,该区域坡体基岩已顺层滑走,部分堆积于前缘边坡上,或经冲沟搬运,残留现地貌及滑走区薄层土体。

2.1.2 边坡变形特征

坡体受开挖扰动后,蠕滑变形区内发育多条裂缝,深度由滑坡区滑移面的岩层层面控制,其下未见裂缝,其上为裂缝分布区。如图3所示,裂缝密集分布于蠕滑变形区南西侧,根据裂缝走向情况,主要分为2组,第1组与岩层节理L1走向相近,裂缝最长延伸 25 m ,一般张开约 $5\sim 10\text{ cm}$,最大张开 70 cm ,在蠕滑变形区中下部间距约 $1\sim 8\text{ m}$ /条;第2组与岩层节理L2走向相近,裂缝最长延伸 10 m ,一般张开约 $2\sim 10\text{ cm}$,最大张开 50 cm ,在蠕滑变形区中下部间距约 $1\sim 10\text{ m}$ /条,该组裂缝较第一组少。

蠕滑变形区下部滑面处揭示岩层倾向 270° ,主滑方向为 290° ,偏离角度为 20° ,如图5(a)所示。这表明,平乐顺层边坡的滑坡区存在侧壁阻力作用。

从坡体物质组成来看,滑动区内滑体以块石为主,含块石粉质黏土次之,土体结构松散,透水性一

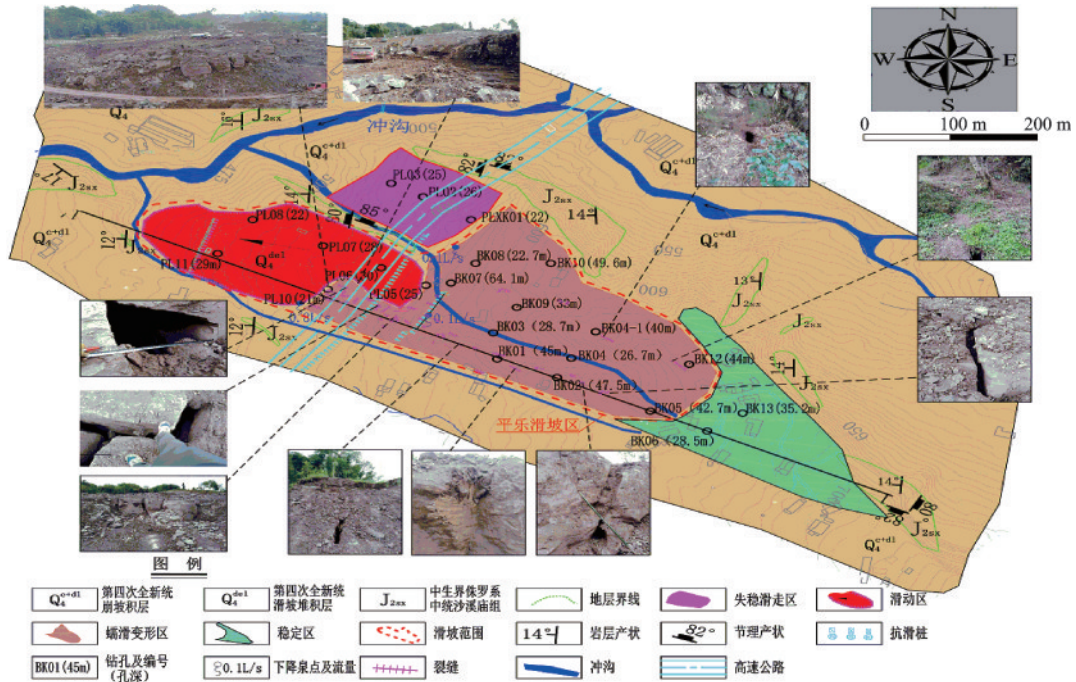


图3 平乐顺层边坡变形分区及裂缝分布

Fig.3 Deformation zone division and fracture distribution of the Pingle bedding slope

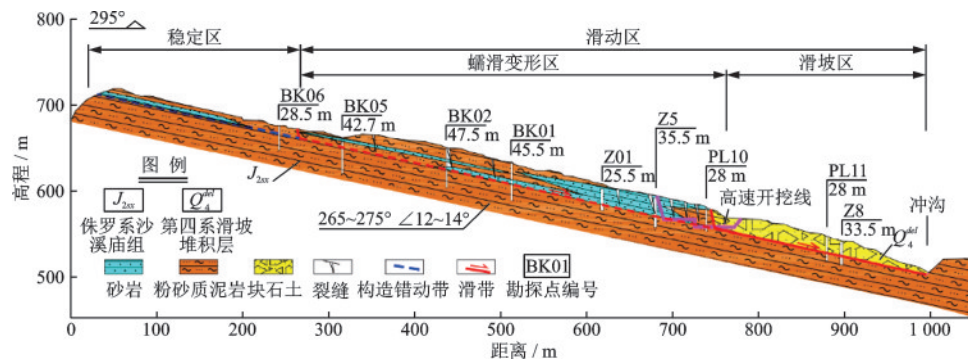


图4 平乐顺层边坡典型工程地质剖面

Fig.4 Typical engineering geological profile of the Pingle bedding slope

般~较差;该区域内由于发生顺层滑动,基岩在滑动中发生拉裂-解体,并随时间而风化,逐渐形成滑体现有物质成分。滑动区与蠕滑变形区界线及两侧滑体如图5(b)所示,滑动区基岩已解体,破碎程度高,蠕滑变形区基岩则为变形开裂。蠕滑变形区滑体为变形开裂的粉砂质泥岩及砂岩,其特征为裂缝发育,以张开为主,局部充填泥。

路堑开挖、抗滑桩和钻孔揭示滑带土如图6所示。由图6可见,滑带土为红褐色含砾粉质黏土,以粉黏粒为主,呈可塑状,含10%~35%角砾,一般粒径0.005~0.02 m,部分0.03~0.07 m,角砾以次棱角状为主,部分呈亚圆状,石质成分为主要粉砂质泥岩,次为砂岩。滑带土在滑动区内沿顺层滑动面分

布,厚0.15~0.80 m;在蠕滑变形区范围内,厚0.15~0.60 m,未贯穿整个滑带,据钻孔揭示局部以0.02~0.04 m挤压带为主,挤压带内发育光滑面,如图6(c)所示。

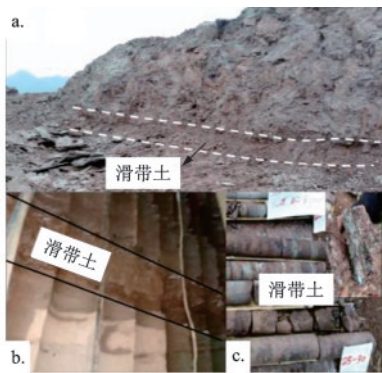
综上,平乐顺层边坡的滑坡区显著变形,蠕滑变形区南西侧多发育未充填或泥质充填裂缝,且与节理走向吻合;滑动区基岩滑移解体风化碎、块石,蠕滑变形区基岩拉裂;滑带土中颗粒定向排列特征明显,越靠近滑带底部光滑面越发育。此外,边坡的主滑方向与岩层倾向并不一致,向边坡临空侧发生一定偏转。显然,该边坡变形特征与侧壁阻力相关联,据之研究考虑侧壁阻力的顺层边坡变形失稳机制具有代表性。



a. 蠕滑变形区与滑动区界线; b. 蠕滑变形区滑向偏离岩层倾向

图5 滑动区界线及特征

Fig.5 Boundaries and characteristics of sliding zone



a. 开挖揭示的呈层性滑带土; b. 抗滑桩内滑带土; c. 钻孔揭示挤压带

图6 不同途径揭示的滑带土

Fig.6 Sliding zone soil revealed by different methods

2.2 失稳机制

2.2.1 失稳边界条件

结合平乐顺层边坡的工程背景及变形特征,其失稳边界条件可归为以下3点:

(1) 基岩顺层

该边坡地层岩性以侏罗系沙溪庙组砂泥岩互层为主,岩层优势产状为 $265^{\circ}\sim 275^{\circ}/12^{\circ}\sim 14^{\circ}$,坡向约 $290^{\circ}\sim 300^{\circ}$,主滑方向偏离岩层倾向的夹角 β 为 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$,属典型存在侧壁阻力的软岩顺层边坡。

(2) 结构面劣化

受南北向与东西向构造带作用,岩层缓倾坡外,地表下约20~30 m发育一层面构造错动带,为坡体沿该层失稳提供了劣化层面。此外,L1: $12^{\circ}\sim 27^{\circ}/68^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 为场区岩体主控结构面,其延伸一般 >20 m,切深一般 >10 m,结合差,为坡体沿左侧侧壁拉裂提供了优势劣化节理面。岩体结构面劣化为基岩顺层失稳奠定了基础。

(3) 前缘临空

缓倾顺层边坡形成后,受前缘及下部西南侧冲沟下切影响,坡体前缘及下部西南侧的侧壁临空,为顺层边坡的失稳提供临空触发条件。

2.2.2 失稳演化机制

在上述研究的基础上,将平乐顺层边坡的失稳过程归纳为2个阶段,如图7所示。第1阶段为构造错动,岩体劣化,形成了浅层构造错动带;第2阶段为沟谷下切坡体前缘及下部西南侧壁临空,导致坡体下部沿构造错动带发生滑动,坡体中部发生蠕滑拉裂。

由图7可见,第2阶段变形过程中,滑动区基岩解体,风化为碎、块石土,蠕滑变形区岩体发生蠕滑拉裂破坏,在坡体滑动或变形过程中,滑动面附近岩体受挤压错动影响,形成泥化的滑带土。根据失稳演化过程,该边坡的破坏模式属顺层临空-后退式破坏。

为进一步描述侧壁阻力对顺层边坡失稳机制的影响,以及临空条件对失稳变形的诱发作用,绘制图8。据之,可将考虑侧壁阻力的顺层边坡失稳演化机制总结如下:

(1)如图8(a)所示,失稳滑走区前缘及东北侧冲沟下切深约40~60 m,形成临空边界;西南侧冲沟下切深达10~20 m后,主滑方向偏离岩层倾向的角度减小,达到坡体稳定性极限平衡条件时,坡体沿现地面线附近发生顺层失稳滑塌,因前缘临空条件优越,坡体顺利滑走而形成现地貌。坡体失稳滑走后,现地貌仍为基岩顺层,但坡面临空方向与岩层倾向夹角约 20° ,西南侧侧壁冲沟未下切,存在较大的侧壁阻力,故坡体稳定。

(2)如图8(b)所示,滑动区前缘冲沟下切深约40~50 m,前缘及东北侧临空条件下,西南侧冲沟下切深约10~20 m时到达层间错动带附近,侧壁阻力受到削弱,主滑方向偏离岩层倾向的角度减小,达到坡体稳定性极限平衡条件后产生顺层失稳滑塌。根据现场调查,滑动区长度与西南侧冲沟下切段长度相近,即基岩顺层坡体的稳定性与侧壁阻力相关。该段坡体失稳后,因前缘有西北侧山体约束,未能滑走至前缘冲沟。

(3)蠕滑变形区的东北侧冲沟下切深约90~100 m,坡体下部失稳滑走区和滑动区转移后,该区

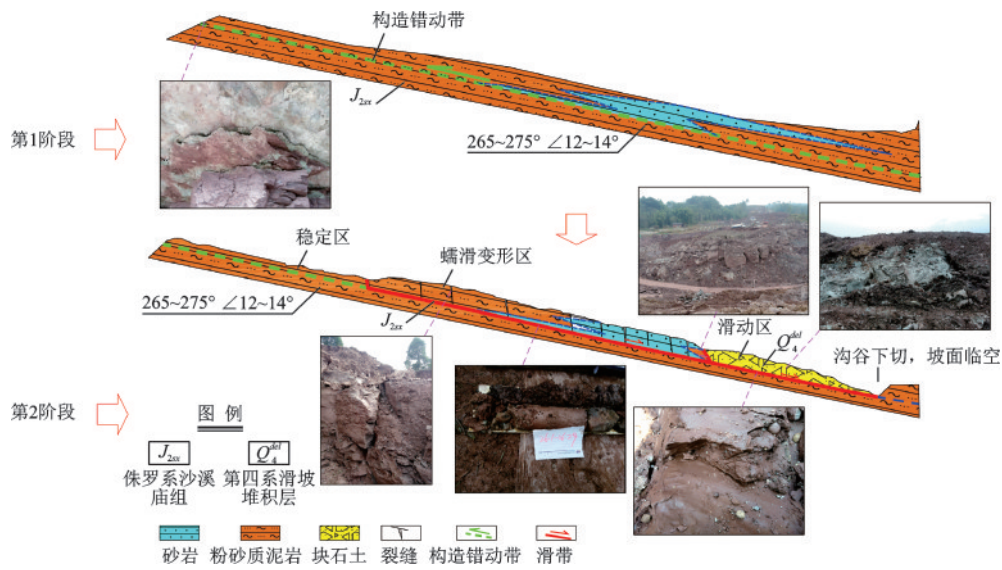
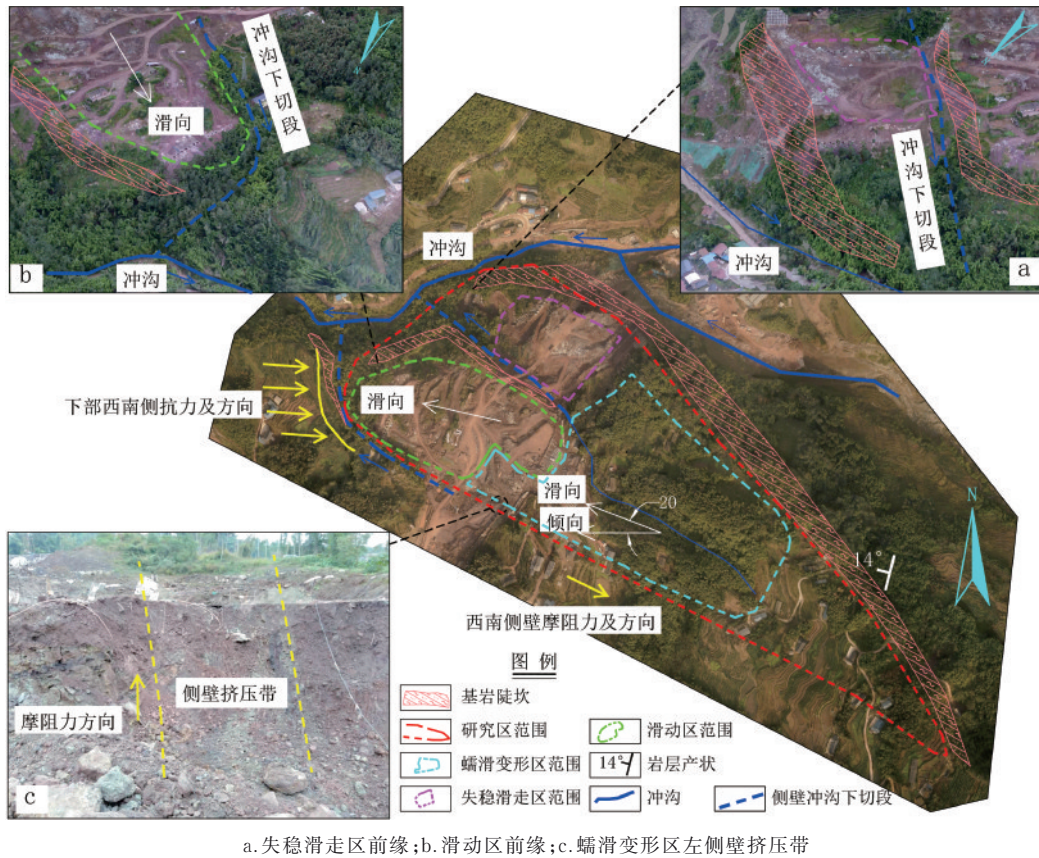


图7 平乐顺层边坡失稳演化

Fig.7 Failure evolution of the Pingle bedding slope



a. 失稳滑走区前缘; b. 滑动区前缘; c. 蠕滑变形区左侧壁挤压带

图8 平乐顺层边坡侧壁阻力及临空条件

Fig.8 Lateral wall resistance and free-face conditions of the Pingle bedding slope

域中部前缘及东北侧临空,受滑动牵引、前缘临空和滑体厚度等因素影响,发生蠕滑拉裂;然而,该区域西南侧的侧壁未临空,受侧壁阻力影响显著,坡体蠕滑变形时,部分侧壁岩体被剪压破碎,由节理面转化为挤压带,侧壁摩擦增大,利于坡体稳定,如

图8(c)所示。因此,该区域未发生高速滑动,滑体以拉裂破坏为主,最终形成蠕滑变形区。结合图7可知,边坡后部坡体厚度明显小于蠕滑变形区,减小约10 m,坡体稳定性提高,故边坡后部稳定,形成稳定区。

综上,在边坡前缘及一侧临空、坡向与岩层倾向存在夹角的情况下,侧壁阻力利于顺层边坡的稳定性,坡体因侧壁阻力约束坡体稳定,致使主滑方向与岩层倾向间存在一定交角。

3 考虑侧壁阻力的顺层边坡稳定性

3.1 稳定性系数计算

不考虑顺层边坡侧壁阻力时,顺层边坡在后缘裂缝形成后,常沿岩层间的层面顺倾向发生平面滑动破坏^[3]。顺层边坡变形阶段,依据刚体极限平衡分析,其二维剖面概化模型如图9所示,据之可计算稳定性系数 k 为:

$$k = \frac{G \cos \alpha \tan \varphi + cL}{G \sin \alpha} \quad (1)$$

式中, G 为滑体每延米重力(kN/m); c 为滑带土黏聚力(kPa); φ 为滑带土内摩擦角($^\circ$); L 为滑面长度(m); α 为滑面倾角($^\circ$)。

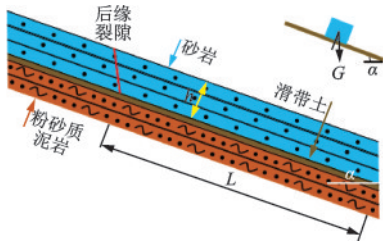


图9 顺层边坡剖面概化模型

Fig.9 Conceptual model of bedding slope section

假定边坡主滑方向与岩层倾向一致,视为“假定状态”,则滑面倾角 α 与岩层倾角 δ 相等,代入式(1)可求其下滑力 T_0 和抗滑力 T'_0 分别为:

$$\begin{cases} T_0 = G \sin \delta \\ T'_0 = G \cos \delta \tan \varphi + cL \end{cases} \quad (2)$$

相应的,将侧壁阻力作用下主滑方向偏离岩层倾向的实际状态视为“真实状态”。顺层边坡受侧壁阻力作用由“假定状态”转化为“真实状态”时,根据力的矢量性及三角形法则,下滑力 T 的合成如图10所示,计算如式(3):

$$\begin{cases} T = T_0 + F \\ F = F_N + f \end{cases} \quad (3)$$

式中, F 为垂直于主滑方向的侧壁支撑力(kN/m); F_N 为垂直于岩层倾向的侧壁支撑力; f 为阻碍滑体顺岩层倾向滑动的摩阻力,单位均与 F 相同。

可见,“假定状态”下,在边坡侧壁有 F_N 与 f 作



图10 考虑侧壁阻力时的下滑力

Fig.10 Sliding force considering lateral wall resistance

用,当其足够大时,坡体在岩层倾向处于稳定状态; F_N 与 f 合力 F 迫使主滑方向偏离岩层倾向,偏转角为 β (滑动方向与岩层倾向顺层面的夹角),偏转后的 T 为 T_0 在偏离 β 角度方向上的下滑力分量,坡体沿该方向滑动而形成“真实状态”。

根据图10中几何关系,结合式(2),可求解“真实状态”下边坡下滑力 T 为:

$$T = T_0 \cdot \cos \beta = G \sin \delta \cos \beta \quad (4)$$

需注意的是,由“假定状态”转变为“真实状态”, T 仅源于滑体自重,可由几何关系直接计算。然而,坡体的抗滑力 T' 由底滑面和侧壁共同提供,“真实状态”和“假定状态”的底滑面黏聚力 c 、内摩擦角 φ 相同,故获取“真实状态”下坡体侧壁抗滑力后即可评价考虑侧壁阻力的顺层边坡稳定性。

由式(2)、式(3)及图10可知,“真实状态”下侧壁支撑力 F 可表征为 $F = G \sin \delta \sin \beta$ 。绘制三维顺层边坡体结构如图11所示,根据摩尔库伦强度准则,坡体侧壁所提供的抗滑力亦可分为黏结强度和摩擦强度。

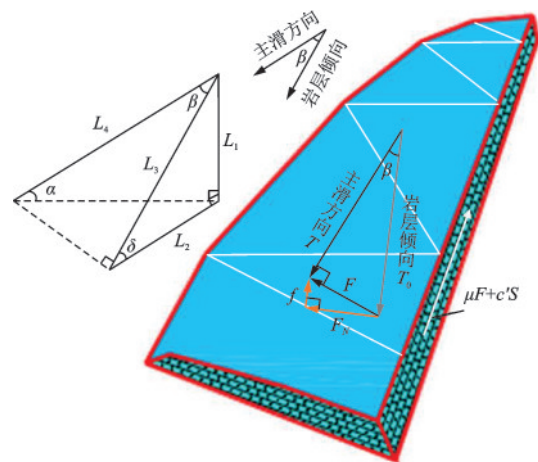


图11 考虑侧壁阻力的顺层边坡三维坡体

Fig.11 3D slope mass of the bedding slope considering lateral wall resistance

此时,考虑侧壁阻力的顺层边坡抗滑力可归为底滑面黏结强度 T_c 、底滑面摩擦强度 T_φ 、侧壁黏结强度 T'_c 和侧壁摩擦强度 T'_φ 为:

$$\begin{cases} T_c = cbL \\ T_\varphi = G \cos \delta \tan \varphi \\ T'_c = c'S \\ T'_\varphi = \mu F = \tan \varphi' G \sin \delta \sin \beta \end{cases} \quad (5)$$

式中, b 为底滑面宽度(m); S 为侧壁面积(m^2); c' 为侧壁黏聚力(kPa); μ 为侧壁摩擦系数($\mu = \tan \varphi'$); φ' 为侧壁内摩擦角($^\circ$); G 为坡体三维重力(kN)。

综上,“真实状态”下三维坡体抗滑力 T' 可表示为:

$$T' = cbL + G \cos \delta \tan \varphi + c'S + \tan \varphi' G \sin \delta \sin \beta \quad (6)$$

根式(4)和式(6),可计算考虑侧壁阻力的顺层边坡 k 值为:

$$k = \frac{T'}{T} = \frac{cbL + G \cos \delta \tan \varphi + c'S + \tan \varphi' G \sin \delta \sin \beta}{G \sin \delta \cos \beta} \quad (7)$$

针对蠕滑变形区,坡体沿侧壁最不利长大节理面发生破坏,可忽略边坡侧壁与坡体界面的黏结强度 T'_c ,式(7)可进一步简化为式(8):

$$k = \frac{c \sec \beta}{\gamma h \sin \delta} + \cot \delta \tan \varphi \sec \beta + \tan \varphi' \tan \beta \quad (8)$$

式中, γ 为滑体平均重度(kN/m^3); h 为滑体厚度(m)。

此外,图11还给出了 α 、 β 和 δ 三者间空间关系的直角三棱锥,可得三角度间换算关系为:

$$\begin{cases} \sin \alpha = L_1/L_4 \\ \cos \beta = L_3/L_4 \\ \sin \delta = L_1/L_3 \end{cases} \quad (9)$$

显然,可由 β 和 δ 表述 α ,即 $\sin \alpha = \sin \delta \cos \beta$ 。此时,可得式(4)所表述的“真实状态”下顺层边坡下滑力 T 与式(1)中的下滑力相等,从三维几何角度验证了本节所推导侧壁阻力表达式,以及考虑侧壁阻力顺层边坡三维稳定性评价方法的合理性。

综上,根据式(7)和式(8),可分别评价考虑侧壁阻力顺层边坡的滑动区、蠕滑变形区稳定性。

3.2 侧壁阻力对稳定性系数的影响分析

由式(9)可知,考虑侧壁阻力的顺层边坡 k 值与 c 、 φ 、 β 、 γ 、 h 、 δ 和 μ 有关。其中, c 、 φ 和 μ 越大, δ 、 γ

和 h 越小,坡体稳定性越好,这与已有研究的认知是一致的。

以平乐顺层边坡蠕滑变形区为例,现场测得 β 、 δ 、 h 等参数,通过室内试验获取 γ 及 c 、 φ ,见表2;将参数代入式(9),可计算忽略侧壁黏结强度时,稳定性系数为1.096,坡体产生蠕滑变形,与该变形区的工程实际相符。

表2 坡体要素及岩土体物理力学参数

Table 2 Slope elements and physical-mechanical parameters of rock and soil mass

名称	符号/单位	值
滑动方向与岩层倾向顺层面的夹角	$\beta/(^\circ)$	21
岩层倾角	$\delta/(^\circ)$	13
侧壁摩擦系数	μ	0.13
滑体厚度	h/m	20
岩体重度	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	25.8
滑带土黏聚力	c/kPa	22
滑带土内摩擦角	$\varphi/(^\circ)$	10.3

为进一步获取 β 对顺层边坡稳定性影响,在表2的基础上,拟定 $\beta=0^\circ \sim 45^\circ$,通过式(9),计算得 $k-\beta$ 关系曲线如图12所示。可见, k 随 β 的增大呈非线性增长,且增长速率逐渐增大;起始段与终止段的切线交于 $\beta=26^\circ$ 处。同时, $\beta=0^\circ \sim 7^\circ$ 时, $k \leq 1.00$,边坡不稳定; $\beta=9^\circ \sim 15^\circ$ 时, $1.00 < k \leq 1.05$,边坡欠稳定; $\beta=15^\circ \sim 26^\circ$ 时, $1.05 < k \leq 1.15$,边坡基本稳定; $\beta > 26^\circ$ 时, $k > 1.15$,边坡稳定。

此外,平乐顺层边坡的蠕滑变形区 $h=20$ m,其后部稳定区 $h=10$ m。将其与表2参数代入式(9),可知稳定区 $k=1.299$,较蠕滑变形提高18.52%,处于稳定状态,这与图7及第2.2.2节的定性分析结论一致。

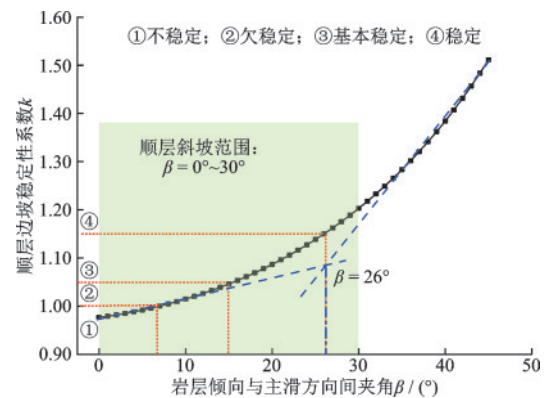


图12 β 对顺层边坡稳定性系数的影响

Fig.12 Effect of β on the stability coefficient of the bedding slope

4 结 论

(1)侧壁阻力作用下,平乐顺层边坡可分为3个变形区:失稳滑走区,滑坡区和稳定区,滑坡区可细化为滑动区和蠕滑变形区;其变形演化可归为2个阶段:第1阶段受构造错动作用岩体层间劣化;第2阶段受沟谷下切坡体前缘及侧壁临空影响,致使坡体下部沿构造错动带发生滑动,并牵引中上部发生蠕滑-拉裂;该边坡为顺层临空-后退式破坏。

(2)侧壁阻力利于顺层边坡的稳定,主滑方向因边坡侧壁的约束而偏离岩层倾向。顺层边坡不同区域的变形特征与侧壁约束、临空条件、岩体结构面特征和坡体几何特征有关;侧壁摩阻力增大使蠕滑变形区未发生快速滑动,坡体厚度减小是蠕滑变形区与稳定区界限处拉裂的原因。

(3)对比主滑方向偏离岩层倾向前后,通过滑面和边坡侧壁2处位置受力分析,提出了考虑侧壁阻力的顺层边坡稳定性系数计算式;影响因素中,滑带土黏聚力和内摩擦角、边坡侧壁摩擦系数越大,主滑方向偏离岩层倾向角度越大,岩层倾角、滑体重度和滑体厚度越小,顺层边坡稳定性越好。

参考文献:

- [1] Al-Homoud A S, Tubeileh T K. Analysis and remedies of landslides of cut slopes due to the presence of weak cohesive layers within stronger formations[J]. Environmental Geology, 1998, 33(4): 299-311.
- [2] Gariano S L, Guzzetti F. Landslides in a changing climate[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 162: 227-252.
- [3] 冯君,周德培,李安洪.顺层岩质边坡开挖稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(9):1474-1478.
Feng J, Zhou D P, Li A H. Research on stability of rock bedded slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1474-1478. (in Chinese)
- [4] Wei H, Gianvito S, Xu Q, et al. Acoustic emissions and microseismicity in granular slopes prior to failure and flow-Like motion: The potential for early warning[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(19): 10406-10415.
- [5] Pecoraro G, Calvello M, Piciullo L. Monitoring strategies for local landslide early warning systems[J]. Land-

slides, 2018, 16: 213-231.

- [6] 张家明.含软弱夹层岩质边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].工程地质学报,2020,28(3):626-638.
Zhang J M. State of art and trends of rock slope stability with soft interlayer[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 626-638. (in Chinese)
- [7] Fan G, Zhang L M, Zhang J J, et al. Time-frequency analysis of instantaneous seismic safety of bedding rock slopes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 94: 92-101.
- [8] 赵宝友,郑天照,王东,等.基于强度原理的顺层岩质边坡动力安全系数判据研究[J].防灾减灾工程学报,2016,36(5):811-819.
Zhao B Y, Zheng T Z, Wang D, et al. Criterion for dynamic safety factor calculation of bedding rock slope based on strength reduction method[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(5): 811-819. (in Chinese)
- [9] 冯文凯,胡云鹏,谢吉尊,等.顺层震裂斜坡降雨触发灾变机制及稳定性分析—以三溪村滑坡为例[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2197-2207.
Feng W K, Hu Y P, Xie J Z, et al. Disaster mechanism and stability analysis of shattered bedding slopes triggered by rainfall—a case study of Sanxicun landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2197-2207. (in Chinese)
- [10] 张岩岩,文海家,麻超超,等.基于多源数据的蔡家坝特大型滑坡成因机制研究及稳定性评价[J].岩石力学与工程学报,2018,37(9):2048-2063.
Zhang Y Y, Wen H J, Ma C C, et al. Failure mechanism and stability analysis of huge landslide of Caijiaba based on multi-source data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2048-2063. (in Chinese)
- [11] 白洁,巨能攀,张成强,等.贵州兴义滑坡特征及过程预警研究[J].工程地质学报,2020,28(6):1246-1258.
Bai J, Ju N P, Zhang C Q, et al. Characteristics and early warning case of Xingyi landslide in Guizhou province[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(6): 1246-1258. (in Chinese)
- [12] 张乐,冯君,武小菲,等.基于变形控制的含软弱夹层顺层边坡治理[J].地质灾害与环境保护,2021,32(4):94-101.
Zhang L, Feng J, Wu X F, et al. The treatment of bedding slope with weak interlayer based on the controllable method of deformation[J]. Journal of Geological Hazards and Environmental Preservation, 2021, 32

- (4): 94-101. (in Chinese)
- [13] Zang M D, Yang G X, Dong J Y, et al. Experimental study on seismic response and progressive failure characteristics of bedding rock slopes[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(5): 1394-1405.
- [14] 唐辉明, 鲁莎. 三峡库区黄土坡滑坡滑带空间分布特征研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 129-136.
Tang H M, Lu S. Research on the spatial distribution of slip zone of Huangtupo landslide in Three Gorges Research area[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 129-136. (in Chinese)
- [15] He J X, Qi S W, Zhan Z F, et al. Seismic response characteristics and deformation evolution of the bedding rock slope using a large-scale shaking table[J]. Landslide, 2021, 18: 2835-2853.
- [16] 阎石, 杜海涛, 于琦乐, 等. 顺层岩质高边坡的静力稳定性安全评价[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(4): 407-414.
Yan S, Du H T, Yu Q L, et al. Static stability safety evaluation of high bedding rock slope[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(4): 407-414. (in Chinese)
- [17] 黄润秋. 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, 2007, 26(3): 433-454.
Huang R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454. (in Chinese)
- [18] 毛文涛, 冯君, 杨涛, 等. 考虑地震力与静水压力的顺层岩质边坡弯曲破坏分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(5): 763-768.
Mao W T, Feng J, Yang T, et al. Analysis of flexural failure of consequent rock slope considering seismic force and hydrostatic pressure [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(5): 763-768. (in Chinese)
- [19] 邹宗兴, 唐辉明, 熊承仁, 等. 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, 2012, 31(11): 2222-2231.
Zou Z X, Tang H M, Xiong C R, et al. Geomechanical model of progressive failure for large consequent bedding and its stability analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2222-2231. (in Chinese)
- [20] 柴波, 殷坤龙. 顺向坡岩层倾向与坡向夹角对斜坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 628-634.
Chai B, Yin K L. Influence of intersection angle between trend of slope and strata on stability of bedding slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 628-634. (in Chinese)
- [21] 姚文敏, 胡斌, 余海兵, 等. 三维软硬互层边坡的破坏模式与稳定性研究[J]. 工程科学学报, 2017, 39(2): 182-189.
Yao W M, Hu B, Yu H B, et al. Numerical analysis of the failure modes and stability of 3D slopes with interbreeding of soft and hard rocks [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(2): 182-189. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)