

西藏易贡藏布高陡岸坡卸荷带发育特征及其工程意义

杜世回^{1,2}, 张晓宇^{1,2*}, 章广成³, 常帅鹏^{1,2}, 高旭^{1,2}, 孟祥连^{1,2}, 苗晓岐^{1,2}, 黄勇^{1,2}

DU Shihui^{1,2}, ZHANG Xiaoyu^{1,2*}, ZHANG Guangcheng³, CHANG Shuaipeng^{1,2}, GAO Xu^{1,2}, MENG Xianglian^{1,2}, MIAO Xiaoqi^{1,2}, HUANG Yong^{1,2}

1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043;

2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 陕西 西安 710043;

3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074

1. China Railway First Survey & Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Railway and Underground Traffic Engineering (China Railway First Institute), Xi'an 710043, Shaanxi, China;

3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要: 易贡藏布流域位于青藏高原喜马拉雅东构造结顶端区域, 呈现高山峡谷地貌特征, 地质构造复杂, 地质灾害和高陡斜坡失稳现象极发育。为确定易贡藏布流域地质灾害形成机制和边坡失稳模式, 通过开展边坡结构面调查、定向斜孔钻探、孔内波速测试、平硐勘探及地震波法, 分析了易贡藏布下游典型岸坡卸荷带发育规律, 采用岩心完整性、裂隙张开度、岩体波速等指标划分了岸坡卸荷带。结果表明, 边坡由浅表部到深部岩体卸荷程度逐渐减弱, 高程越高卸荷发育越强烈, 河谷西侧岸卸荷程度明显强于东侧岸卸荷程度, 坡表 0 m 至 20~30 m 为强卸荷带、20~30 m 至 40~45 m 为弱卸荷带、40~45 m 以下为未卸荷带。结合岸坡稳定性分析结果, 提出了利用锚索、锚杆进行边坡加固, 并对洞口危岩采取清除、拦挡、锚固等工程防控措施。调查研究结果对指导该区公路、铁路、水电等工程规划建设和区域防灾减灾具有重要的意义。

关键词: 青藏高原; 易贡藏布; 高陡斜坡; 卸荷带; 边坡稳定性

中图分类号: P642.2; TU457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)12-2043-09

Du S H, Zhang X Y, Zhang G C, Chang S P, Gao X, Meng X L, Miao X Q, Huang Y. Development characteristics of unloading zones of high and steep bank slope in the Yiong Tsangpo of Tibet and its engineering significance. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2043-2051

Abstract: Located at the top of the eastern Himalayan tectonic junction on the Qinghai-Tibet Plateau, the Yiong Tsangpo River basin is characterized by the alpine and gorge landform, complex structure, and frequent occurrence of geological disasters and instability of high and steep slopes. In order to determine the formation mechanism of geological disasters and the mode of slope instability in Yiong Tsangpo River basin, through the investigation of slope structural plane, directional inclined drilling, in-hole wave velocity test, adit

收稿日期: 2021-06-15; 修订日期: 2021-11-03

资助项目: 西藏自治区重点研发计划项目《雅鲁藏布江缝合带(喜马拉雅东构造结段)三维结构厘定及其对川藏铁路的影响研究》(编号: XZ202001ZY0011G)、陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划项目《雅鲁藏布江缝合带通麦-鲁朗段浅层三维结构剖析及其工程影响》(编号: 2020JQ-999)、《川藏铁路昌都至林芝段灾害链分布特征及对铁路影响评价研究》(编号: CZ19-08)、《川藏铁路高陡边坡岩体卸荷分带与力学参数研究》(编号: CZ20-04)

作者简介: 杜世回(1974-), 男, 教授级高工, 从事铁路工程地质勘察及科研工作。E-mail: 248249809@qq.com

* 通信作者: 张晓宇(1982-), 男, 硕士, 教授级高工, 从事铁路工程地质勘察及科研工作。E-mail: 693673108@qq.com

exploration and seismic wave method, the development law of typical bank slope unloading zone in Yiong Tsangpo River basin was analyzed, and the bank slope unloading zones were divided by core integrity, fracture opening, rock mass wave velocity and other indexes. The results show that the unloading degree of rock mass weakens gradually from shallow to deep part of the slope, the higher the elevation is, the stronger the unloading development is, and the unloading degree of the west bank of the valley is obviously stronger than that of the east bank. It is concluded that the slope surface below 0 m to 20~30 m is a strong unloading zone, 20~30 m to 40~45 m is a weak unloading zone, and below 40~45 m is a non-unloading zone. Based on the stability analysis results of the bank slope, it is proposed that the slope is strengthened with anchor cables and bolts, and engineering prevention and control measures can be taken such as the clearing of dangerous rocks at the entrance, blocking and anchoring. The research results are of great significance for the guiding of planning and construction of highway, railways and hydropower, regional disaster prevention and mitigation.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; Yiong Tsangpo; high and steep slope; unloading zone; slope stability

高陡边坡岩体卸荷的实质是在边坡开挖或河谷下切过程中边坡体内部的应力场发生变化,边坡体向临空面方向发生卸荷回弹,伴随岩体卸荷过程,边坡浅表部一定深度范围内的岩体变得松弛,最终导致浅表岩体发生一系列变形破坏现象^[1-4]。国内外一般将岩体卸荷带划分为 3 种类型,分别为强卸荷带、弱卸荷带及深卸荷带^[4-5]。近年,随着西南地区基础设施建设速度空前发展,大型水电工程、公路工程、铁路工程等大规模展开,工程所处的地质环境多为深山峡谷、新构造运动强烈与高地应力区,卸荷作用十分强烈,卸荷现象已成为工程建设中一个突出的问题^[6-8]。

不同学者对岩体卸荷带的划分提出了不同的方案。李日运等^[9]结合卸荷带的成因,使用卸荷裂隙线密度、张开度、弹性波波速和完整性系数 4 个量化指标,对金沙江某水电站卸荷带进行了划分。郑达等^[10]提出了用裂隙率、张开裂隙率和隙宽 3 个量化指标进行卸荷带划分。游敏等^[7]从诸多卸荷带分类量化指标中选取了裂隙张开条数与相应段裂隙总条数比值、波速比、钻孔吕荣值这 3 个代表性指标,对西南某工地左岸岩质斜坡卸荷带进行了划分。郝文忠等^[11]以乌东德水电站坝址区高陡岩质边坡为研究对象,从边坡卸荷岩体宏观地质特征、渗透特征及弹性波特征 3 个方面,综合分析确定了坝址区边坡岩体卸荷的水平深度及特征。朱容辰^[12]提出,采用 RQD 测试、回弹测试、氦气异常值与声波测试等量化指标对平硐岩体进行卸荷带划分。马宇等^[13]提出了每 5 m 洞段岩体裂隙闭合条数占裂隙总数比例、裂隙开度和纵波速度 3 个岩体卸荷带量化指标,并结合工程实例对该量化指标进行了论证。随着勘察手段的不断进步,卸荷带的划分已由传统的斜坡岩体结构、裂隙张开度、泥质物

充填、地下水分布等定性指标,逐步发展为依据多个量化指标进行评价。

尹健民等^[14]在澜沧江小湾水电站拱坝建基面进行了 5 个钻孔的基岩钻孔弹模测试,评价开挖爆破对岩体的松弛效应与卸荷深度。周黎明等^[15]通过在边坡不同高程试验平硐内的边墙上进行岩体弹性波波速测试,获得边坡从外部到内部的岩体波速分布曲线,根据平硐地质素描和波速测试资料,分析高边坡岩体卸荷带的风化卸荷特征。陈洪凯等^[16]针对均质岩体边坡,采用弹性理论楔形体力学模型,提出了开挖岩体边坡力学模型,探讨了开挖岩体边坡卸荷带宽度的变化规律,建立了开挖岩体边坡卸荷带宽度的计算公式。

易贡藏布流域山地灾害呈现类型多样、暴发频率高、发生规模大、链生效应的特征^[17]。2000 年发生的易贡扎木弄沟特大山体崩塌滑坡事件是中国历史上规模罕见的崩塌滑坡地质灾害,并形成一条包括崩滑-滑坡-泥石流-堰塞坝-溃决洪水等的完整地质灾害链^[18-19]。根据计算,易贡藏布扎木弄沟倘若再次发生与 2000 年相同规模的泥石流,堰塞湖溃决洪峰流量到达国道 G318 通麦大桥处的水深为 36.20~62.00 m,将给该区的公路和城镇安全造成较大危害。

本文通过开展区域构造地质调查、钻孔岩心完整性评价、钻孔声波法、平硐节理裂隙调查、平硐地震波法等,研究易贡藏布下游、与帕隆藏布交汇处的通麦附近典型岸坡卸荷带发育特征,并综合划分了岩体卸荷带,为该区工程规划建设和防灾减灾奠定基础。

1 研究区概况

1.1 地形地貌

易贡藏布流域为高山峡谷地貌(图 1),山高谷深,

坡面陡峻,坡面近似直立,河谷形态以“U”形为主。地面高程 2021~3800 m,最大高差超过 1800 m。下游研究区河谷两侧岸坡下陡上缓,海拔 2200 m 以下的岸坡近似直立,以上的岸坡平均坡度为 $43^{\circ}\sim 45^{\circ}$ (图 2)。

1.2 地层岩性

区内主要地层为第四系冲洪积、泥石流堆积层及冈底斯岩浆弧地层区的拉萨-察隅地层分区。冈底斯岩浆弧的拉萨-察隅地层分区位于雅江缝合带

北侧,其中前寒武系念青唐古拉岩群出露面积较广,以各种花岗质片麻岩为主,局部夹有片岩、斜长角闪岩、变粒岩及少量大理岩。本次研究的岸坡处以古—中元古界念青唐古拉岩群片麻岩为主。

1.3 地质构造

区内发育的断裂有通麦—通灯断裂(F_{58})、嘉黎—帕隆藏布断裂(F_{48})、嘉黎—嘎龙寺弧—弧碰撞带(F_{50})(图 3)。

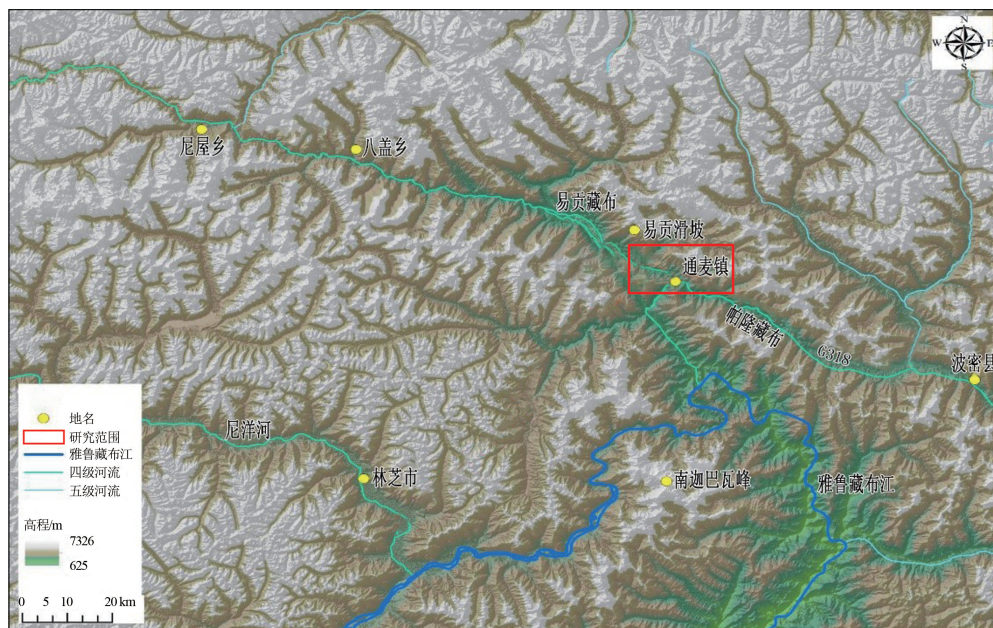


图 1 易贡藏布流域地貌图

Fig. 1 Morphology of the Yiong Tsangpo Basin

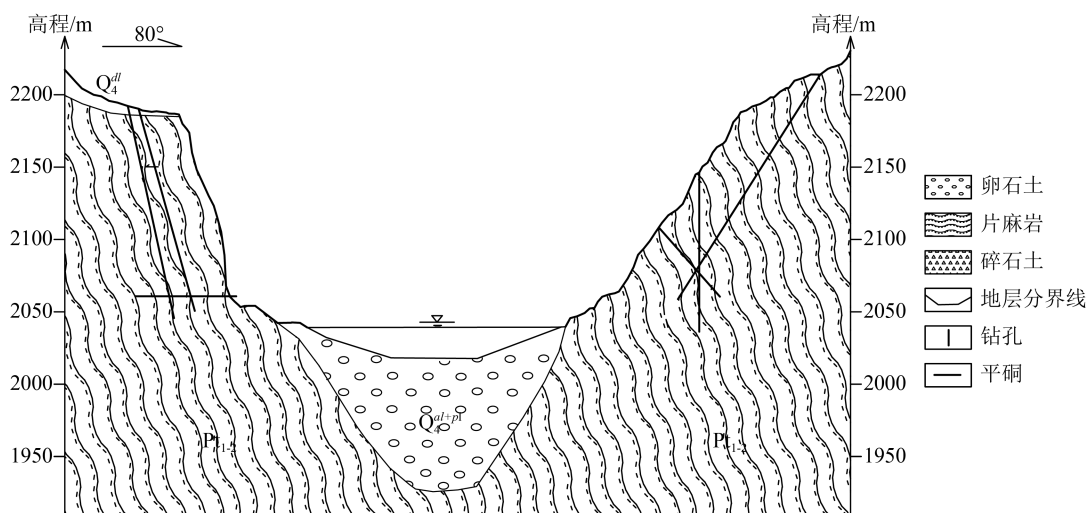


图 2 易贡藏布河谷地貌及典型工程地质剖面图

Fig. 2 Morphology and engineering geological profile of the Yiong Tsangpo River Valley

Pt_{1-2} —古—中元古界; Q_4^{dl} —第四系全新统坡积层; Q_4^{dl+pl} —第四系全新统冲洪积层

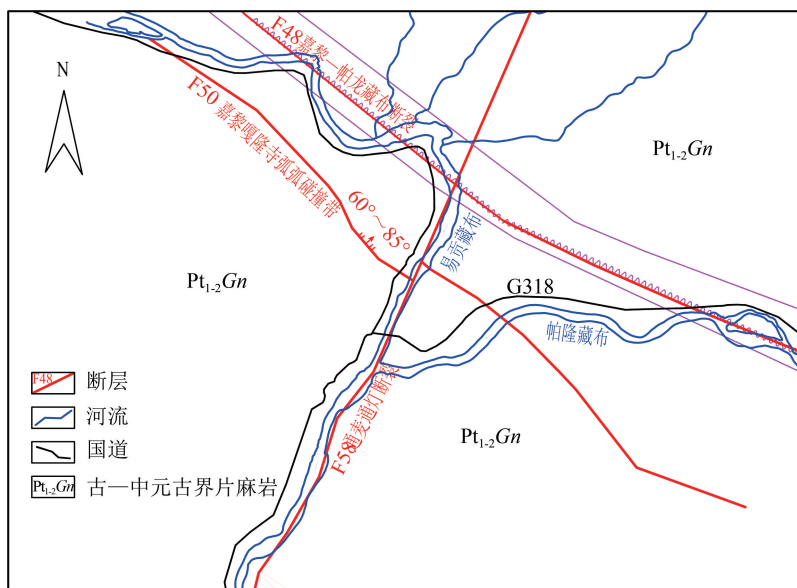


图3 研究区地质构造示意图

Fig. 3 Simplified geological map showing structure in the study area

其中通麦-通灯断裂(F_{58})走向沿易贡藏布展布,产状为 $N25^{\circ}E/70^{\circ}\sim 80^{\circ}S$,属前第四纪或早—中更新世断裂。嘉黎断裂带(F_{48})沿易贡藏布、帕隆藏布河谷展布,是青藏高原主体向东挤出的南界,是一条区域性长大断裂,为全新世活动断裂。嘉黎-嘎龙寺弧-弧碰撞带(F_{50})为一条正断层,断层走向沿帕隆藏布和易贡藏布展布,产状为 $NW/60^{\circ}\sim 85^{\circ}N$ 。

1.4 岩体结构面发育特征

通过地表调查、钻孔、平硐等手段分析了岩体结构面发育特征,综合考虑不同手段的局限性,总体形成了易贡藏布两岸边坡岩体结构面发育规律,表1为两侧岸坡发育的结构面优势产状。

东侧岸边坡面总体坡角约为 66° ,其中J1节理在岩石露头上的延展性好,长达30 m左右,结构面之间的间距为0.8~3.0 m,结构面表面有一定起伏,结构面缝隙间充填少量粉质粘土。

西侧岸边坡面总体坡角约为 77° ,其中J1节理延展性非常好,延伸长度可达45 m;J2节理延展性也很好,长度可达30 m。岩石表面同组结构面间距为0.8~1.5 m,边坡结构特征见赤平投影(图4)。

通过分析查明研究区优势结构面主要发育于易贡藏布西侧岸边坡,尤其是倾向易贡藏布下游(外倾)且延展性较好的优势结构面组(J1)。

1.5 岸坡卸荷发育规律

岸坡平硐内部开挖揭露了岩体从浅部到深部

的地质情况。边坡岩体卸荷在水平方向上具有递减性,边坡由浅表部到深部岩体卸荷程度逐渐减弱;同时,河谷两岸岸坡卸荷在垂直方向上也具有明显的分带性,低高程、中高程及高高程卸荷发育程度不同,高程越高,卸荷发育越强烈,其变形破坏迹象越明显;东西两岸同一高程的卸荷程度也明显不同,西岸卸荷程度明显强于东岸卸荷程度,东岸

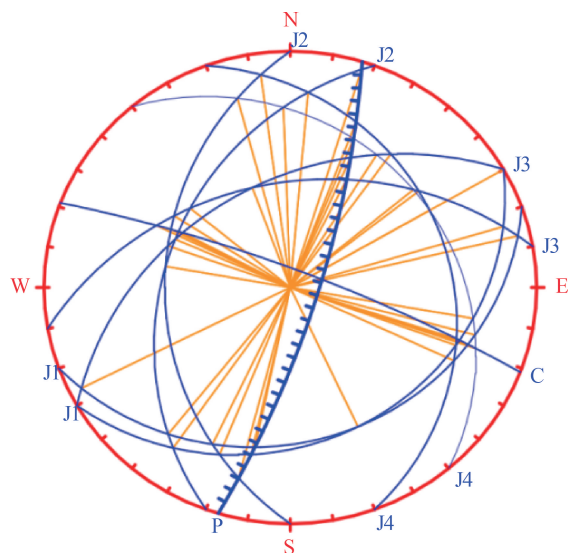


图4 易贡藏布西侧岸边坡赤平投影图

Fig. 4 Stereogram of west bank slope of the Yiong Tsangpo

J1~J4—节理;P—边坡;c—面理

岩体的完整性明显比西岸岩体完整性好,西岸发育碎裂松动岩体、局部岩体破碎等现象,东岸虽也发育碎裂松动,但较西岸轻微,范围及深度浅。根据易贡藏布东岸典型钻孔工程岩体分级的 BQ 法、RQD 法、Q 法、RMR 法、CSMR 法的不同分级方法评价结果,岩体整体可大致分为 3 个区间:0~25 m 为差至一般岩体,25~50 m 为一般至好岩体,50~80 m 为好岩体(表 2)。

表 1 易贡藏布两岸边坡岩体优势结构面组产状

Table 1 The occurrence of dominant structural plane group of slope rock mass on both sides of the Yiong Tsangpo

位置	结构面类型	倾向/°	倾角/°	延展性
左岸边坡, 坡向 287° (昌都侧)	面理 C	359	51	贯通性好
	节理 J1	143	19	
	节理 J2	280	50	
	节理 J3	109	65	
	节理 J4	35	45	
右岸边坡, 坡向 107° (林芝侧)	面理 C	21	81	贯通性非常好
	节理 J1	155	24	
	节理 J2	279	36	
	节理 J3	109/287	77	
	节理 J4	60	35	

表 2 易贡藏布东岸工程岩体综合评价与分级

Table 2 Comprehensive evaluation and classification of rock mass in east bank of the Yiong Tsangpo

典型钻孔 岩心段/m	工程岩体评价与分级				综合 评价
	Q 法	RMR 法	CSMR 法	RQD 法	
0~3	差-Ⅲ	一般-Ⅲ	一般-Ⅲ	较差-Ⅲ	Ⅲ
3~15	一般-Ⅲ	好-Ⅱ	很好-Ⅰ	好-Ⅰ	Ⅲ
15~25	一般-Ⅲ	好-Ⅱ	好-Ⅱ	较好-Ⅱ	Ⅲ
25~44	好-Ⅱ	好-Ⅱ	很好-Ⅰ	好-Ⅰ	Ⅱ
44~50	好-Ⅲ	好-Ⅱ	好-Ⅱ	较差-Ⅲ	Ⅲ
50~69	好-Ⅱ	非常好-Ⅰ	很好-Ⅰ	好-Ⅰ	Ⅱ
69~76	好-Ⅱ	好-Ⅱ	好-Ⅱ	较差-Ⅲ	Ⅱ
76~80	好-Ⅱ	非常好-Ⅰ	很好-Ⅰ	好-Ⅰ	Ⅱ

2 岸坡卸荷分带

本次研究应用多种勘探手段及测试方法,利用钻孔岩心完整性、钻孔声波法、平硐内节理统计规律、平硐地震波法等作为卸荷划分的主要指标。

2.1 钻孔岩心完整性

根据《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)^[20]关于岩体完整程度划分标准,对不同钻孔岩心反映的岩体结构及破碎程度进行了分析。纵向上地表以下 0~8 m 岩体以极破碎为主;8~30 m 岩体以破碎为主,受地表卸荷风化作用控制;30~50 m 以下岩体较破碎,局部受构造作用影响,完整性变差;50~80(150) m 厚的岩体以较完整为主,局部受构造作用影响较破碎。

2.2 钻孔声波法

由于卸荷带具有拉张程度高、裂隙度高的特点,声波在卸荷带中传播波速会明显降低,据此特征可以很快地划分出卸荷带的范围。本次在 2 个孔内进行了声波测试(图 5)。结果表明,横波波速在 0~20 m 深度范围内与埋深呈线性递增关系,横波波速为 98~2109 m/s;以下岩体横波波速基本保持稳定,平均为 2179 m/s。因此,建议将 0~20 m 埋深作为卸荷影响区。

2.3 平硐节理裂隙发育规律

根据平硐节理裂隙编录,将裂隙按照 1 m 间隔统计每段结构面发育条数(图 6)。结果表明,0~20 m 裂隙发育密度不均匀,靠近地表密集,向内稀

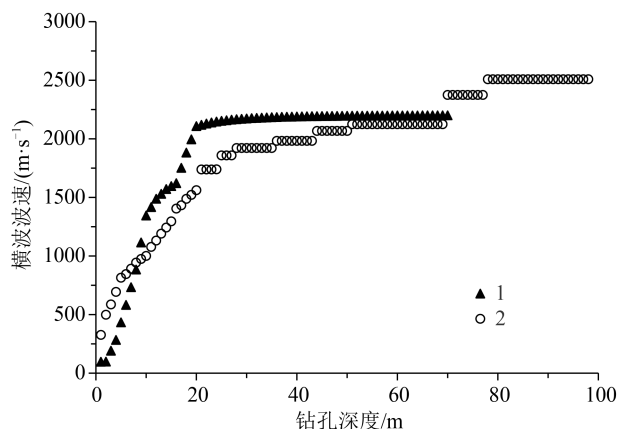


图 5 钻孔 Z1 和 Z3 内纵波波速随深度变化规律

Fig. 5 Variation of longitudinal wave velocity with depth in boreholes Z1 and Z3

疏;而 20~45 m 裂隙发育密度较均匀;45 m 深度向内裂隙发育也较均匀,整体略低于 0~45 m。

根据结构面张开度实测值,绘制了张开度累积值沿平硐水平距离的变化规律。从图 7 平硐裂隙张开度累积值分布规律看,0~12 m 裂隙张开度累积值斜率较稳定,而左壁 12~30 m 范围张开度累积值斜率较陡,右壁 15~45 m 范围张开度累积值斜率较陡,说明此段卸荷裂隙较发育。结合裂隙发育密度和裂隙张开度统计结果,0~20 m 为强卸荷带,该区岩体节理裂隙发育较密集,且节理张开度较大,一般张开度为 20~40 mm,最大可达 200 mm;20~45 m 为弱卸荷带,该区岩体节理裂隙发育相对稀疏,张开度一般为 10 mm,大者可达 30 mm;45 m 深度以下为未卸荷带,该区岩体节理裂隙较发育,张开度一般为 6~10 mm。

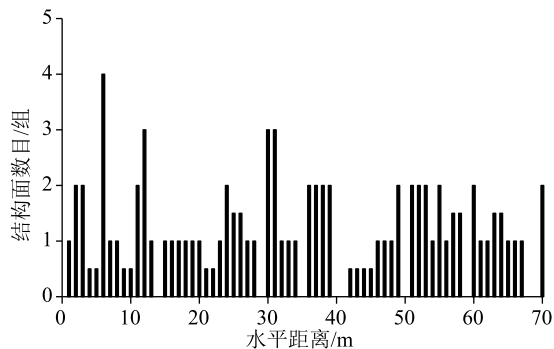


图 6 裂隙间距统计

Fig 6 Statistics of crack spacing

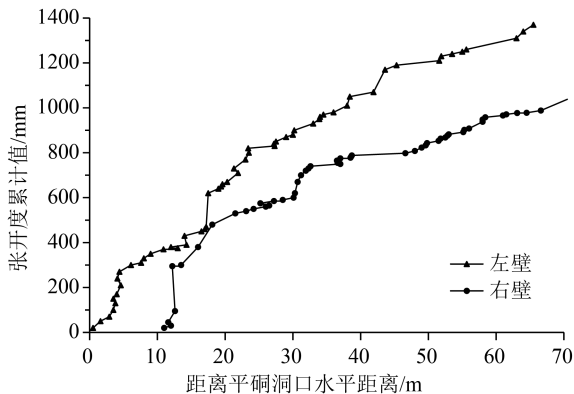


图 7 平硐裂隙张开度累积值分布规律

Fig. 7 Distribution law of cumulative value of crack opening in adit

2.4 平硐地震波法

地震波在不同性质岩石或同一岩层中传播时,由于岩石强度、孔隙度、密度的差异,具有不同的传播速度,结合岩层岩性变化,可以开展岩体卸荷带分析。

在平硐内开展地震反射物探测试,并根据物探结果进行解译(图 8)。总体而言,埋深越大岩体波速越大,且距离易贡藏布河谷水平距离 55 m 以上岩体波速处于正常规律,水平距离 0~55 m 宽度内岩体波速均降低。其中,距离河谷 0~15 m 宽度表层埋深 20 m 内岩体,15~35 m 宽度埋深 15 m 内岩体,以及 35~55 m 宽度埋深 12 m 内岩体波速为 900~2300 m/s,且表现出波速降低,为强卸荷区。距离河谷 0~30 m 埋深大于 20 m 岩体、距离河谷 30~55 m 埋深 15~35 m 以内岩体波速为 2500~3000 m/s,为弱卸荷区。

2.5 岸坡卸荷分带

根据前期的勘探资料、钻孔数据、平硐节理裂隙调查、物探测试结果等综合分析,并对不同高程处岩体的卸荷带与坡面水平距离进行统计划分,初步对桥基边坡岩体卸荷带进行了划分,卸荷分带结果见图 9。水平方向强/弱卸荷带与弱/未卸荷带的界线如下:0 m 至 20~30 m 为强卸荷带、20~30 m 至 40~45 m 为弱卸荷带、40~45 m 以下为未卸荷带。

3 高陡岸坡稳定性与防控建议

3.1 高陡岸坡稳定性分析

根据前文分析,河谷西侧边坡可见 4 组节理发育,其中节理 J1 与节理 J4 可相互切割形成楔形体,该楔形体交线与边坡斜交,交线倾向 70°,与坡向夹角为 38°,可能沿结构面组合交线产生滑移发生楔形体破坏。研究表明,郑万高铁边坡岩体均受多组大角度结构面切割,形成了由若干小尺寸岩块组合而成的类砌体结构,发生失稳时,单体危岩或危岩组将呈阶梯状方式逐渐沿基底结构面滑移破坏或沿后缘结构面拉裂坠落^[21]。

岩体楔形体破坏的稳定性系数可采用刚体强度折减法或极限平衡法^[22-24]等方法进行计算。本文使用 FLAC^{3D} 软件分析了节理 J1 与节理 J4 切割楔形体的稳定性。

计算工况分为天然工况、暴雨工况和地震工况

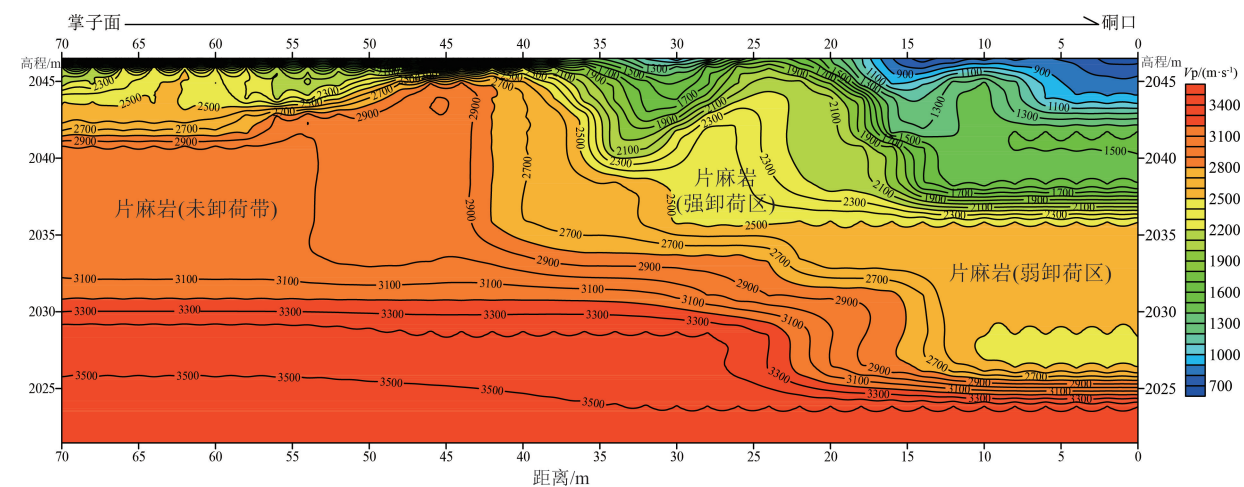


图 8 平硐内地震物探解译成果与卸荷分带

Fig. 8 Results of interpretation and unloading zoning of seismic objects in the interior of adit

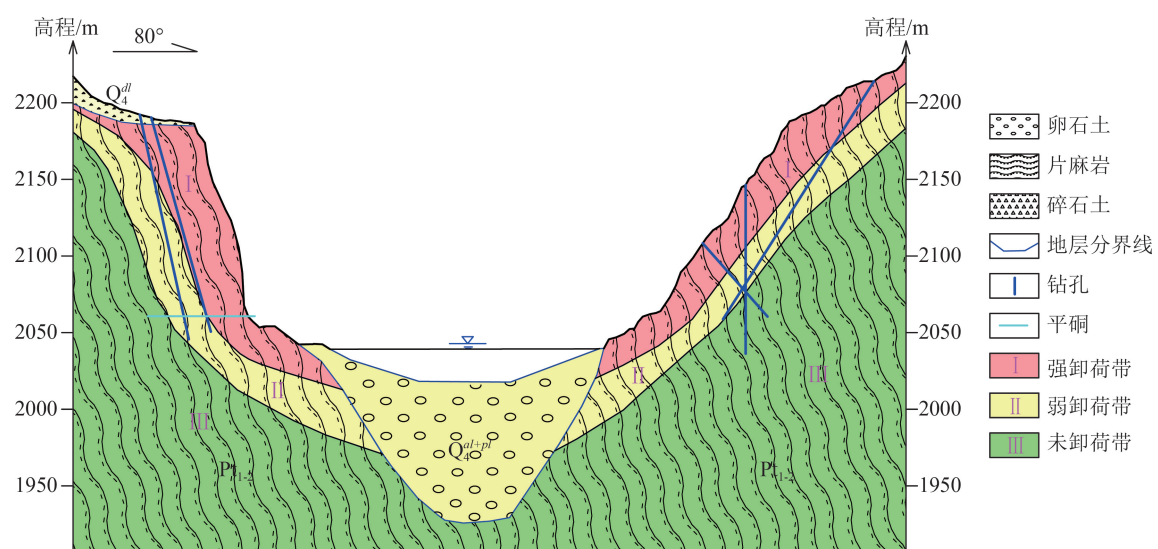


图 9 易贡藏布典型边坡卸荷分区图

Fig. 9 Unloading zoning of the slope in the Yiong Tsangpo

Pt₁₋₂—古—中元古界; Q₄^{dl}—第四系全新统坡积层; Q₄^{dl+pl}—第四系全新统冲洪积层

3 种工况,其中天然和暴雨工况所需岩土体和结构面参数取值见表 3,地震工况下的地震峰值加速度 k 取 0.20 g 。3 种工况下计算所得楔形体的稳定性系数分别为 2.91 、 2.04 、 1.97 ,具体计算结果见表 4。可以看出,楔形体在各种工况下均处于稳定状态,因此岸坡工程防控设计主要考虑卸荷带及上部危岩体的影响。相关成果为易贡藏布大桥岸坡防护设计提供了依据。

表 3 岩体和结构面力学参数				
Table 3 Mechanical parameters of rock mass and structural plane				
参数	强卸荷岩体		结构面	
	天然	暴雨	天然	暴雨
体积模量 K (kPa) 或法线刚度 K_n (kPa/m ²)	7.89×10^6	6.5×10^6	2×10^4	1.6×10^4
剪切模量 G (kPa) 或切向刚度 K_s (kPa/m ²)	5.43×10^6	4.5×10^6	2×10^4	1.6×10^4
黏聚力/kPa	2130	2000	80	50
内摩擦角/°	30	28	16	12

表 4 不同工况下楔形体破坏的稳定性系数
Table 4 Stability coefficient of wedge failure
under different working conditions

计算工况	天然	暴雨	地震
稳定性系数	2.91	2.04	1.97

3.2 高陡岸坡卸荷带处置措施

根据易贡藏布典型斜坡卸荷带分带研究,为避免及减小易贡藏布高陡岸坡卸荷带对公路等工程及岸坡稳定性的影响,对卸荷带采取以下处置措施。

(1)在斜坡坡面采用锚索框架梁防护,在斜坡中下部设置锚索,使锚索进入未卸荷带完整基岩,从而维持岸坡稳定(图 10)。

(2)针对斜坡上部存在的危岩落石,采取了清除、拦挡等处理措施。在斜坡上部设置 C40 钢筋混凝土桩板式拦石墙,桩板式拦石墙顶部设一道被动防护网,防护网高度 5 m,拦石墙后设一道宽 2.0 m 的落石槽,于拦石墙右上部铺设帘式防护网,将落石引导至落石槽。

4 结 论

(1)易贡藏布流域内边坡由浅表部到深部岩体

卸荷程度逐渐减弱,高程越高卸荷发育越强烈且变形破坏迹象越明显,河谷西侧岸卸荷程度明显强于东侧岸卸荷程度。

(2)综合采用岩心完整性评价、钻孔声波波速、裂隙张开度、裂隙间距、地震波波速等参数对桥基边坡进行了卸荷分带,提出易贡藏布区域岸坡 0 m 至 20~30 m 为强卸荷带、20~30 m 至 40~45 m 为弱卸荷带、40~45 m 以下为未卸荷带。

(3)易贡藏布两岸岩体岸坡总体稳定,结合高陡岸坡卸荷带节理裂隙发育程度、卸荷带划分结果,为进一步保障边坡稳定性,提出了在斜坡内利用锚索、锚杆进行边坡加固,对隧道洞口危岩采取清除、拦挡、锚固等措施和建议。

致谢:感谢审稿专家对本文提出的修改意见和建议。

参考文献

[1] 彭少文,贺金明,孙冠军,等.高陡边坡深部卸荷张拉裂缝的成因机制探讨[J].人民长江,2015,46(14): 32-35.
[2] 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): 227-232.
[3] 王兰生,李文纲,孙云志.岩体卸荷与水电工程[J].工程地质学报,2008,16(2): 145-153.

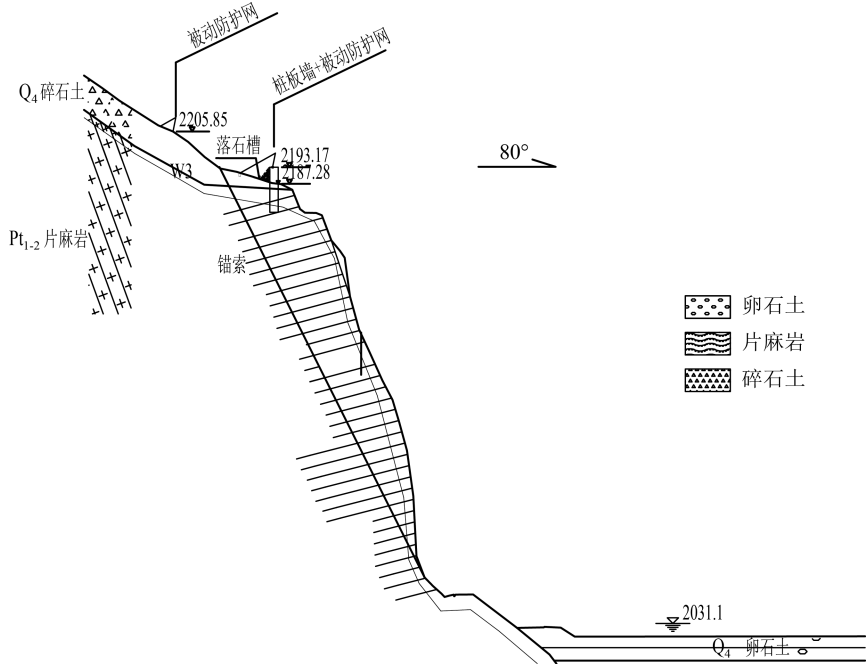


图 10 易贡藏布河谷边坡防护示意图

Fig. 10 Slope protection map of the slope of the Yiong Tsangpo
Q₄—第四系全新统;Pt₁₋₂—古-中元古界

- [4] 何书涛, 邓辉, 伍小军, 等. 班达水电站下坝址卸荷带特征研究[J]. 人民珠江, 2020, 41(6): 44-52.
- [5] 姚鑫, 李凌婧, 张永双, 等. 青藏高原东缘区域地壳稳定性评价[J]. 地质通报, 2015, 34(1): 32-44.
- [6] 周洪福, 冯治国, 石胜伟, 等. 川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 112-119.
- [7] 游敏, 聂德新. 河谷斜坡卸荷综合分带研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(1): 103-105.
- [8] 郑达, 黄润秋. 西南水电工程坝址峨眉山玄武岩卸荷分带研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(2): 195-200.
- [9] 李日运, 刘田珂. 岸坡应力场及卸荷带划分量化指标研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 76-80.
- [10] 郑达, 黄润秋. 高边坡岩体卸荷带划分的量化研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(5): 9-12.
- [11] 郝文忠, 刘冲平, 王吉亮, 等. 乌东德水电站边坡岩体卸荷特征及稳定性评价[J]. 人民长江, 2015, 46(14): 12-15.
- [12] 朱容辰. 边坡岩体卸荷带带性研究[J]. 铁道勘察, 2010, 36(5): 46-50.
- [13] 马宇, 任光明, 罗轶, 等. 岩质斜坡卸荷分带量化指标与应用研究[J]. 人民长江, 2013, 44(7): 33-35.
- [14] 尹健民, 艾凯, 刘元坤, 等. 钻孔弹模法评价小湾水电站坝基岩体卸荷特征[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(4): 44-46.
- [15] 周黎明, 肖国强, 王法刚, 等. 边坡岩体风化卸荷特征研究及在姚家坪水利工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(11): 81-86.
- [16] 陈洪凯, 易丽云, 唐红梅. 开挖岩体边坡卸荷带宽度的计算方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(4): 358-363.
- [17] 黄勇, 孟祥连, 胡卸文, 等. 雅安至林芝交通廊道重大工程地质问题与对策研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 307-325.
- [18] 许强, 王士天, 柴贺军, 等. 西藏易贡特大山体崩塌滑坡事件[J]. 爆破, 2007, 24(12): 41-46.
- [19] 李俊, 陈宁生, 邓明枫. 西藏林芝扎木弄沟泥石流规模变化趋势研究[J]. 人民长江, 2017, 48(23): 61-65.
- [20] 中华人民共和国国家标准: GB/T 50218—2014. 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [21] 黄海宁, 巨能攀, 黄健, 等. 郑万高铁宜万段边坡危岩崩落破坏特征[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 164-172.
- [22] 张加桂, 张永双, 曲永新. 滇藏铁路沿线滇藏交界段劈理化带成因探讨及工程效应分析[J]. 地球学报, 2009, 30(6): 885-892.
- [23] 蔡荣坤, 戴自航, 徐根连, 等. 降雨对花岗岩风化层路堑边坡滑动模式影响——以福建云平高速云霄段为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 27-35.
- [24] 陈笑楠, 张慧梅. 顺层边坡岩体结构的分岔灾变条件[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1): 30-35.