

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.01.03

雅鲁藏布大峡谷高位岩质崩塌影响因素分析

邹子南¹, 王运生², 辛聪聪², 张运达¹

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072;

2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要: 雅鲁藏布大峡谷是世界第一大峡谷和地球上最深的峡谷,喜马拉雅山脉、念青唐古拉山脉和横断山脉雄踞于大峡谷西、北、东三方,地形呈北高南低走势;该地区地层岩性复杂、断裂构造发育、地震活动性强且震级高、风化卸荷作用强烈、气候条件复杂,地质灾害频发,本文主要探讨大峡谷高位岩质崩塌的影响因素。在卫星遥感解译工作的基础上,利用机载雷达高清航拍手段,通过详细地表地质调查,系统分析了该河段的大地构造背景、地形地貌特征、岸坡地质建造、岸坡地质结构和发震断裂分布等地质条件,从内、外营力作用、岸坡外形、内部结构以及应力状态等方面阐述了高陡岸坡的变形与破坏过程。研究认为,雅鲁藏布大峡谷高位岩质崩塌的主要影响因素有河谷形态、岩性特征、构造条件、地震活动性、地壳隆升与河流下切、高地应力、风化卸荷和气候条件等。崩塌发育是多种因素耦合的结果,最主要的内在因素是岸坡形态与地质结构,最主要的诱发因素是区域破坏性地震的反复作用。

关键词: 雅鲁藏布大峡谷;结合带;高位岩质崩塌;影响因素

中图分类号: P642.21

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)01-0020-10

Analysis on the factors influencing the high level rock avalanches in the Yarlung Zangbo Grand Canyon

ZOU Zinan¹, WANG Yunsheng², XIN Congcong², ZHANG Yunda¹

(1. Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610072, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The Yarlung Zangbo Grand Canyon is the world's first Grand Canyon and the deepest canyon on earth. The Himalaya mountains, the Nyainqentanglha mountains and the Hengduan Mountains are located in the west, north and east of the Grand Canyon, respectively, where the terrain appears to be higher in the north and lower in the south. The area is characterized by complex lithology, developed fault structure, intense earthquake activity, high magnitude, strong weathering and unloading, complex climatic conditions and frequent geological disasters. This paper mainly discusses the main factors affecting the high level rock collapse in the Grand Canyon. On the basis of the interpretation of satellite remote sensing, the airborne radar high-definition aerial photography is used, and the detailed geological survey is carried out. Systemic analysis in this area is conducted including tectonic background, topography, slope geological formation, slope structure and earthquake fault distribution etc. Based on exogenic and endogenic geological process, slope shape, internal structure and stress state and other aspects, the process of deformation and failure of high steep slope is analyzed. The main influencing factors of high level rock collapse in Yarlung Zangbo Grand Canyon include valley morphology, lithology, structural conditions, seismicity, crustal uplift and river cutting, high ground stress, weathering and unloading, and climatic conditions. Collapse development is the result of

收稿日期: 2018-04-16; 修订日期: 2018-07-03

第一作者: 邹子南(1976-),男,大学本科,工学学士学位,高级工程师,主要从事工程地质勘察。E-mail: seapig@yeah.net

coupling of various factors. The most important internal factor is bank slope shape and geological structure, and the most important inducing factor is the repeated action of regional destructive earthquakes.

Keywords:Yarlung Zangbo Grand Canyon; junction zone; high rock collapse; influence factor

0 前言

雅鲁藏布大峡谷位于西藏自治区林芝市境内,北起米林县派镇(海拔约2 910 m),南至墨脱县巴昔卡村(海拔约155 m),全长约496 km,平均深度2 268 m,最深处达6 009 m,是世界第一大峡谷和地球上最深的峡谷。其中雅鲁藏布江西兴拉-扎曲-甘登河段和帕隆藏布排龙-扎曲河段为大峡谷最核心河段,最大拐弯处位于扎曲河段;雅鲁藏布江希让-巴昔卡河段位于我国藏南地区,为未开放区。

由于交通条件限制和恶劣自然条件影响,大峡谷核心河段基础地质研究程度整体偏低,地学研究前沿主要围绕大地构造背景、结合带变形期次与构造特征、断裂构造展布、低温与年代学、河谷演化、地震活动性与危险性等构造地质和地震地质领域,其次是冰川、冰湖、泥石流、堰塞湖溃决等地质灾害方面。近年来,众多科研院所、单位和学者对帕隆藏布流域川藏公路沿线的古乡泥石流、索通泥石流、培龙沟泥石流、102滑坡、2000年易贡滑坡等重大地质灾害点和扎墨公路(波密-墨脱)沿线暴雨型沟谷泥石流发育特征^[1-2],以及大峡谷入口处则隆弄冰川泥石流^[3]、加拉堰塞湖等重大地质灾害点进行过较为系统的研究,但研究范围均主要集中在大峡谷外围区域,针对大峡谷核心河段高陡岸坡的灾变效应和崩塌发育特征等方面的研究相对较少。由于受沿线崩塌地质灾害等因素影响,雅鲁藏布大峡谷顶端的扎曲河段已不具备进入条件,此前在扎曲河段分布的两个村庄(扎曲村、门中村)已于2016年全部搬出。

2011年以来,作者等人多次徒步进入扎曲、夺嘎、甘登等大峡谷核心河段,在卫星遥感解译工作的基础上,利用机载雷达高清航拍手段,通过详细地表地质调查,系统分析了该河段的大地构造背景、地形地貌特征、岸坡地质建造、岸坡地质结构和发震断裂分布等地质条件,从内、外营力作用、岸坡外形、内部结构以及应力状态等方面阐述了高陡岸坡变形与破坏过程。研究认为,雅鲁藏布大峡谷高位岩质崩塌的主要影响因素有河谷形态、岩性特征、构造条件、地震活动性、地壳隆升与河流下切、高地应力、风化卸荷和气候条件等,崩塌发育是多种因素耦合的结果。

1 环境地质条件

1.1 地形地貌

大峡谷在区域宏观地貌上位于喜马拉雅极高山亚区,为喜马拉雅山脉、念青唐古拉山脉、横断山脉的交汇部,是青藏高原隆升、侵蚀最为强烈的地区,地形起伏大,河谷深切,属典型高山峡谷地貌。大峡谷核心河段两岸山体雄厚,自然地形坡度以 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 为主,局地可达 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。大峡谷可分为多个地貌单元,加拉以上河段,海拔4 500~5 500 m范围属于三级夷平面,3 500~4 500 m范围属于一级谷肩,3 000~3 800 m范围属于二级谷肩;加拉以下河段,海拔2 500~3 800 m范围属于三级夷平面,2 000~2 600 m范围属于一级谷肩。

1.2 地层岩性

大峡谷地区涉及的地层自北向南依次为冈底斯-腾冲地层区、雅鲁藏布江地层区和喜马拉雅地层区,其中冈底斯-腾冲地层区出露岩性主要为花岗岩和片麻岩;喜马拉雅地层区出露岩性主要为混合岩;雅鲁藏布江地层区出露岩性主要为朗杰学蛇绿混杂岩。

大峡谷地区雅鲁藏布江扎曲-卡布段和帕隆藏布排龙-扎曲段位于雅鲁藏布江地层区^[4-5],出露岩性主要为各种构造岩片和岩块,总体上以石英片岩(sa)和混杂带基质(n)为主,少量蛇绿岩片(op)、变玄武岩片(β)、碳酸盐岩块(ca)和超镁铁岩块(Σ)等,局部地段有外来基底岩块卷入。其中石英片岩(sa)主要由石英岩、石英片岩、云母石英片岩、阳起石片岩、云母片岩等组成,总体上以不等厚互层状为主;混杂带基质(n)主要由黑云母石英片岩、黑云母片岩、黑云角闪片岩、绿泥石片岩等组成,以不等厚互层状为主。总体上,岩石类型多,较软岩和中硬岩分布较多,岩石总体上软硬相间,矿物成分和含量差异大,抗风化能力差异明显,变质作用复杂,变质程度差异大^[6-7];片理倾角陡,一般 $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$,局地直立,其走向与大峡谷走向呈小角度相交,多形成顺向谷,左岸以陡倾反向坡为主,右岸以陡倾顺向坡为主。

1.3 地质构造

大峡谷地区位于东喜马拉雅构造结前端的南迦巴瓦构造结内,地跨冈底斯-腾冲微陆块、雅鲁藏布江结

合带和喜马拉雅地块三个一级构造单元,其中雅鲁藏布江扎曲-卡布段和帕隆藏布排龙-扎曲段位于雅鲁藏布江结合带内,结合带作为被动陆缘,地质历史时期经历多期构造活动变形,早期为韧性剪切带,后期在局部地段叠加有小规模脆性断裂,虽然结合带现今总体为一套岩石建造,其内部和两侧未见大的脆性断裂分布,各类岩片以突变焊接接触为主,但是岩层韧性剪切特征和糜棱岩化特征明显^[7-8],片理构造、节理裂隙和小规模断裂发育。

1.4 水文气象

大峡谷是青藏高原上最大的水汽通道,峡谷内气候、降雨等要素垂直分带明显,峡谷底部以亚热带气候为主,年平均降雨量基本在 2 000 mm 以上;峡谷上部以亚寒带气候为主,常年雪线大致在海拔 4 800 m 左右,海拔 5 500 m 以上的往往发育现代冰川。

2 崩塌发育总体特征

在 Sentinel2A(分辨率 10 m)和 Landsat8(分辨率 30 m)卫星遥感影像解译工作的基础上,利用机载雷达高清航拍手段,通过现场地表地质调查复核揭示雅鲁藏布大峡谷崩塌发育,大峡谷及其两岸一定范围内主要崩塌体 108 个,其分布情况见图 1。从分布河段而言,崩塌主要分布于大峡谷核心河段,扎曲-夺嘎河

段共 40 个,夺嘎-卡布河段共 20 个,排龙-扎曲河段共 20 个,其余河段和地段崩塌体分布合计共 28 个;从分布岸别而言,左岸 52 个,右岸 56 个,两岸崩塌体数量基本相当;从线密度而言,派镇-扎曲河段约 0.8 个/10 km,排龙-扎曲河段约 6.7 个/10 km,扎曲-夺嘎河段约 13.7 个/10 km,夺嘎-卡布河段约 2.4 个/10 km,卡布-希让河段约 1.2 个/10 km;从地层区而言,崩塌体主要位于雅鲁藏布江地层区,共 89 个,冈底斯-腾冲地层区和喜马拉雅地层区分布少,合计共 19 个;从物质成分而言,主要为岩质崩塌,未发现规模较大的覆盖层崩塌;从分布高程而言,夺嘎以上河段崩塌体主要分布于海拔 1 500~2 500 m,少量分布于海拔 2 500~3 500 m 和海拔 1 100~1 500 m;夺嘎以下河段崩塌体主要分布于海拔 560~1 500 m,少量分布于海拔 1 500~2 500 m;从相对高差而言,崩塌体一般拔河平均高差约 410 m,最大拔河高差大于 1 200 m,总体上以高位崩塌为主;从规模等级而言,中型崩塌体共 83 个,大型崩塌体共 15 个,小型崩塌体共 8 个,巨型崩塌体共 2 个,总体上以中型崩塌体为主^[9](大型和巨型崩塌体基本情况见表 1);从崩塌危险性分区而言,大峡谷排龙-扎曲-夺嘎河段为重度危险区,夺嘎-卡布河段为中度危险区,派镇-扎曲河段和卡布-希让河段为轻度危险区^[10]。

表 1 雅鲁藏布大峡谷大型和巨型崩塌体基本情况简表

Table 1 Basic situation of large and giant collapse bodies in the Yarlung Zangbo Grand Canyon

编号	河段	坐标		岸别	分布高程/m	长度/m	宽度/m	体积/ × 10 ⁴ /m ³	规模
		经度/(°)	纬度/(°)						
B003	西兴拉至扎曲河段	95.01	29.73	右岸	3 320~4 050	650	400	18	大型
B004		95.05	29.73	右岸	3 200~3 900	800	300	48	大型
B006		95.19	29.78	右岸	2 470~2 850	600	250	45	大型
B031	扎曲至墨脱河段	95.15	29.91	左岸	1 560~1 800	250	350	44	大型
B067		95.28	29.83	右岸	1 140~1 720	650	500	200	巨型
B070		95.30	29.72	右岸	1 100~2 200	1 200	450	450	巨型
B091		95.43	29.44	左岸	1 100~1 530	700	200	14	大型
B014	排龙至扎曲河段	95.02	30.02	左岸	1 960~2 100	200	400	16	大型
B015		95.03	30.00	右岸	1 980~2 350	500	500	25	大型
B016		95.04	30.01	左岸	1 930~2 120	200	800	16	大型
B017		95.06	30.00	左岸	1 930~2 540	700	500	35	大型
B020		95.06	29.98	右岸	1 900~2 200	300	600	18	大型
B022		95.08	29.97	右岸	1 880~2 348	300	400	12	大型
B024		95.10	29.95	左岸	1 800~2 200	300	500	15	大型
B025		95.09	29.94	右岸	1 780~2 230	400	600	24	大型
B026		95.09	29.94	右岸	2 100~2 700	500	500	25	大型
B028		95.13	29.89	左岸	1 590~2 010	900	300	27	大型

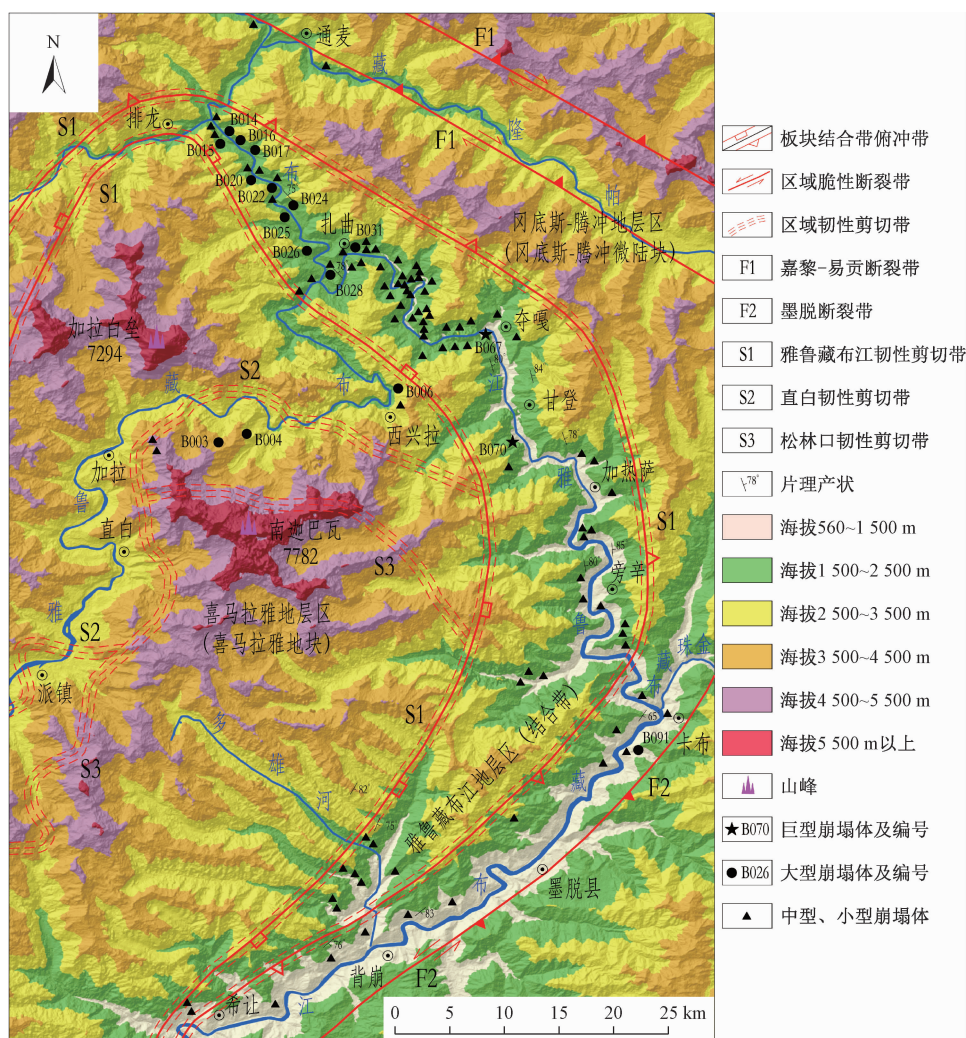


图1 雅鲁藏布大峡谷主要崩塌体分布图

Fig.1 Distributed map of the main collapse body in the Yarlung Zangbo Grand Canyon

3 典型崩塌体特征

崩塌是较陡斜坡上的岩土体在重力作用下突然脱离母体崩落、滚动、堆积在坡脚的地质现象^[9]。根据卫星影像和航拍资料,经现场调查,雅鲁藏布大峡谷核心河段崩塌体发育,主要集中在帕隆藏布排龙-扎曲河段和雅鲁藏布江扎曲-夺嘎河段,以高位岩质崩塌为主,左岸主要以反向坡崩塌体为主,右岸主要以顺向坡崩塌体为主,部分河段受软岩控制、河流拐弯等因素影响形成较为少见的横向坡崩塌体。其中容那崩塌体(B017)为典型反向坡崩塌体,夺嘎崩塌体(B067)为典型横向坡崩塌体,甘登崩塌体(B070)为典型顺向坡崩塌体,扎曲-夺嘎河段崩塌群密集分布。

3.1 容那崩塌体(B017)

该崩塌体位于帕隆藏布左岸(图2、图3),拔河高

约700 m,顺江宽约500 m,崩塌区分布于岸坡上部,以浅表岩质崩塌为主,自然地形坡度约45°~55°;堆积区分布于岸坡中下部,堆积物在暴雨作用下易形成沟谷型泥石流,岸坡岩性主要由石英片岩类组成,少量绿泥片岩和角闪片岩,总体上以薄-中层状为主,石英片岩类总体上以坚硬岩为主,绿泥片岩和角闪片岩以较软岩-中硬岩为主,片理陡倾坡内,形成近直立反向坡。根据崩塌断面和堆积物分布范围,估算崩塌体体积约 $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3$;该崩塌体暴发频率高,近年来每年都有大量崩塌物向下坠落,坡脚的徒步线路遭到完全破坏,前缘堆积物已直抵帕隆藏布,但近年来未形成明显堵江。

3.2 夺嘎崩塌体(B067)

该崩塌体位于雅鲁藏布江夺嘎河段右岸(图4和图5),拔河高约650 m,顺江宽约550 m,后缘已抵达



图2 容那崩塌体地形地貌特征

Fig.2 Landform characteristics of the Rongna Collapse body

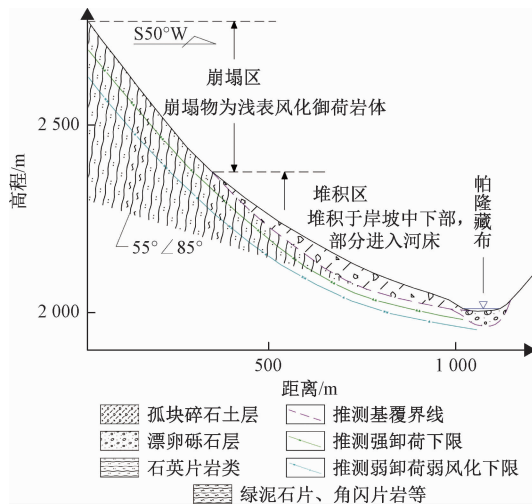


图3 容那崩塌体地质断面图

Fig.3 Geological section map of the Rongna Collapse body

单薄山脊的顶部,为深层崩塌,崩塌物全部已坠入江中,岸坡岩性上部主要由石英片岩类组成,下部主要由阳起石片岩和云母片岩组成,石英片岩类和阳起石片岩总体上以薄-中层状为主,云母片岩为极薄层状,石英片岩类总体上以坚硬岩为主,阳起石片岩以较软岩-中硬岩为主,云母片岩为软岩,片理陡倾山外偏上游,在崩塌区河段形成横向坡。根据崩塌体断面,估算崩塌体体积约 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$,为巨型崩塌体;该崩塌体暴发频率高,曾于2009年发生较大规模崩塌并造成堵江,2014年11月现场调查期间,仍有崩塌发生,目前上游河段残留堰塞湖顺江长约1.5 km。

3.3 甘登崩塌体(B070)

该崩塌体位于甘登乡对岸雅鲁藏布江右岸(图6、图7),海拔高约1200 m,顺江宽约450 m,为深层崩塌,崩塌物大部已坠入江中,部分仍残留于岸坡下部,岸坡岩性主要由石英片岩类组成,夹多层阳起石片岩和云母片岩,石英片岩类和阳起石片岩总体上以薄-中层状为主,云母片岩为极薄层状,石英片岩类总体上



图4 夺嘎崩塌体地形地貌特征

Fig.4 Landform characteristics of Duoga Collapse body

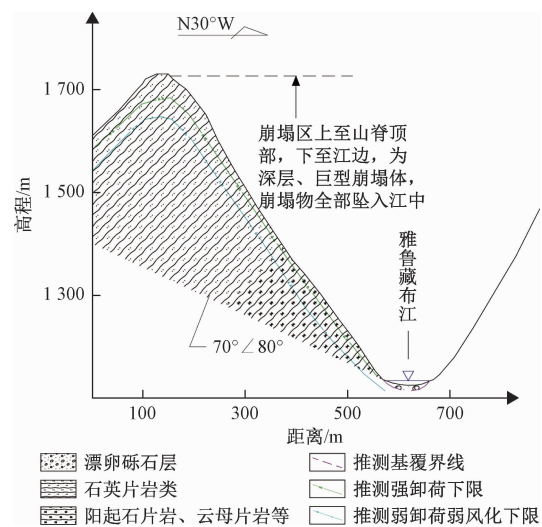


图5 夺嘎崩塌体地质断面图

Fig.5 Geological section map of the Duoga Collapse body

以坚硬岩为主,阳起石片岩以较软岩-中硬岩为主,云母片岩为软岩,片理陡倾山外偏上游,形成近直立顺向坡。根据崩塌体断面和残留物,估算崩塌体体积约 $4.5 \times 10^6 \text{ m}^3$,为巨型超高崩塌体;该崩塌体于2012年发生过大规模崩塌,并堵江超过48小时,目前坠入江中的崩塌物仍挤占了一半河道,残留堰塞湖顺江长约3.5 km。

3.4 扎曲-夺嘎河段崩塌体(B029至B066)

根据现场地表调查,结合机载雷达高清航拍成果,扎曲-夺嘎河段两岸高位岩质崩塌极为发育,呈面状密集成群分布(图8,图中该岸坡段顺河长约3.5 km,左岸发育崩塌体7个),该河段全长约32 km,两岸发育崩塌体近40个,单个崩塌体规模总体不大,但拔河高,在坡面上多形成长条形崩塌槽,崩塌槽一般高200~700 m,个别达1000 m以上,一般宽约30~100 m,个别达300 m,崩塌物多直接坠入江中。

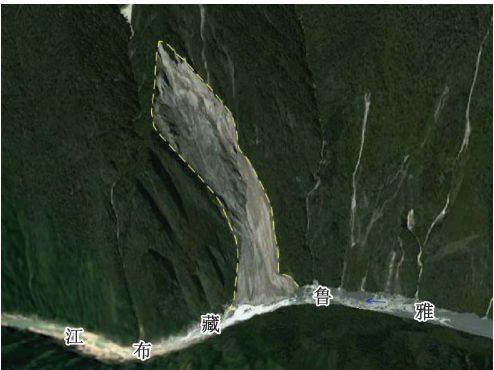


图 6 甘登崩塌体地形地貌特征

Fig.6 Landform characteristics of the Gandeng Collapse body

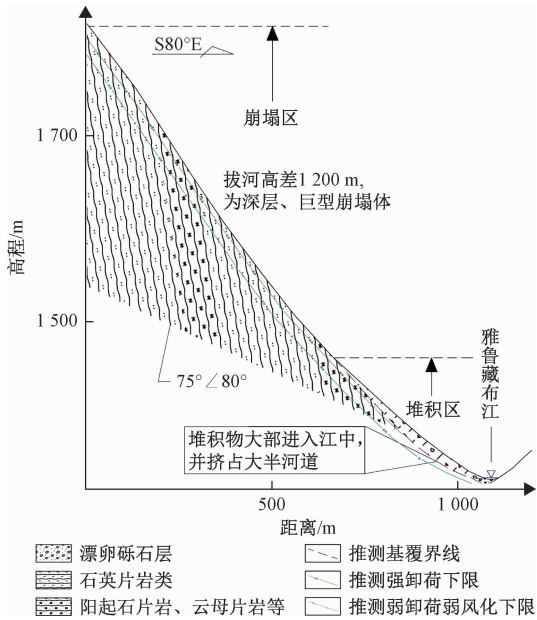


图 7 甘登崩塌体地质断面图

Fig.7 Geological section map of the Gandeng Collapse body



图 8 扎曲至夺嘎河段高位崩塌体密集发育

Fig.8 Intensive development of the high level collapse body between Zhaqu to Duoga River segment

4 崩塌影响因素分析

崩塌产生的条件主要有地貌、岩性、构造、气象、水文、地震和地下水活动等。崩塌的成因、破坏模式、规模、发育程度复杂,不同地段崩塌的产生条件和主要影响因素差异大。初步分析,大峡谷核心河段高位岩质崩塌的主要影响因素有河谷形态、岩性特征、构造条件、地震活动性、地壳隆升与河流下切、高地应力、风化卸荷和气候条件,崩塌发育是多种因素耦合的结果。

4.1 河谷形态

大峡谷核心河段两岸一级谷肩最大拔河高差达 1 500 m,从河谷形态方面而言(表 2),河流切割深度越大、地形高差越大、岸坡越陡峻、临空条件越好、势能越大,崩塌越发育,总体上大峡谷核心河段的河谷形态利于崩塌发生。

表 2 大峡谷核心河段河谷形态基本特征

Table 2 Basic features of the valley shape at the core of the Grand Canyon

特征 河段	段长/ km	河床比降/ ‰	谷底宽/ m	总体地形坡度/(°)	
				左岸	右岸
排龙-扎曲	27	15.2	40~110	40~65	40~70
扎曲-夺嘎	32	13.4	30~120	40~75	40~75
夺嘎-甘登	13	6.2	50~140	40~60	25~45

4.2 岩性特征

大峡谷核心河段位于雅鲁藏布江地层区内,出露岩性主要以各种构造岩片和岩块为主,各套地层总体均呈近直立产出,片理走向与河谷总体走向近平行,云母片岩为软岩,阳起石片岩、黑云角闪片岩、绿泥石片岩以较软岩-中硬岩为主,其余各类片岩和片麻岩以坚硬岩为主,岩石各向异性特征明显,变质程度复杂^[7]。软硬相间的岩石,其岩层产状和层厚特征均利于崩塌发生。

4.3 构造条件

大峡谷核心河段位于雅鲁藏布江结合带内,结合带内各套岩层韧性剪切和塑性变形特征明显,各类岩片片理化特征和糜棱岩化特征明显,节理裂隙发育,并多有沿云母片岩等软弱岩层发育的软弱结构面分布^[7]。总体上,结合带内的构造条件利于崩塌发生。

河谷形态、岩性特征和构造条件等因素,决定了大峡谷核心河段崩塌主要以高位倾倒式崩塌为主,其破坏和运动过程可分为岩体原有节理开裂变形、沿基座支点的倾倒运动(图 9)、脱离高陡岸坡快速下坠和崩塌体碰撞与堆积四个阶段^[11]。

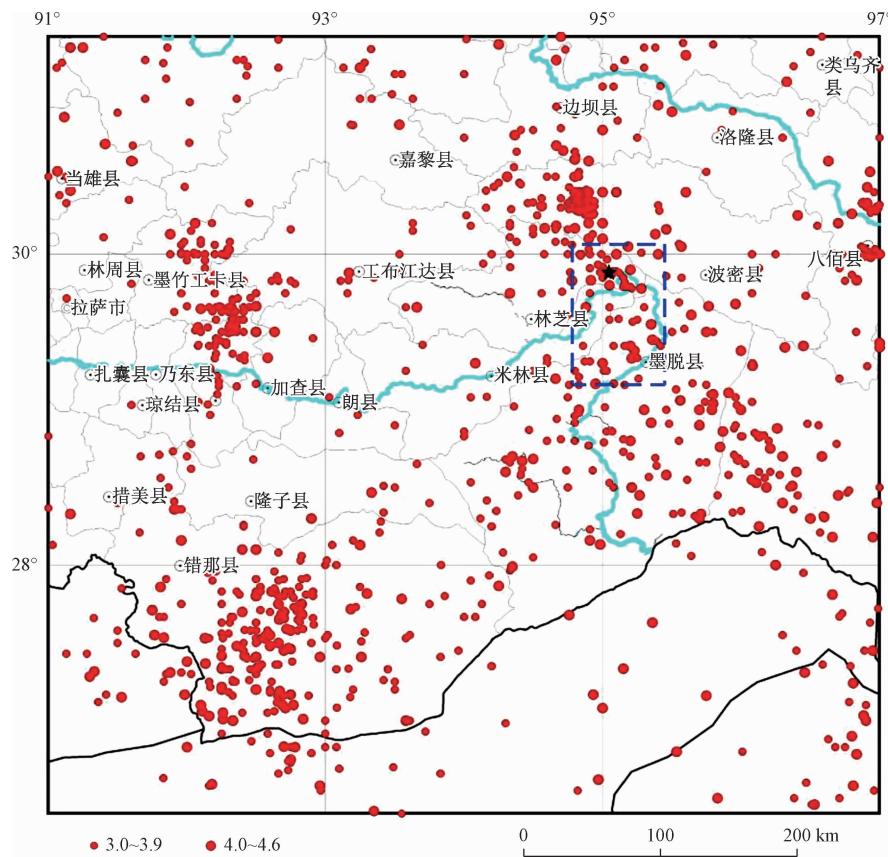


图9 夺嘎下游侧崩塌体中岩体沿支点倾倒运动

Fig.9 Dump movement of rock mass along the pivot in the downstream collapse body at Duoga

4.4 地震活动性

大峡谷位于喜马拉雅地震带,地震频发,据中国地震灾害防御中心 1970 年~2016 年 12 月期间区域破坏性地震($4.6 \geq M \geq 3.0$)监测成果,大峡谷排龙-扎曲-加热萨河段地震震中总体上呈 NW 向条带集中分布(图 10,图中虚线框代表大峡谷位置);2017 年 11 月 18 日米林 M6.9 级地震震中亦位于该 NW 向条带内(图中☆号位置),该地震造成了大峡谷无人区岸坡失稳并短时间堵塞堵江。因此,大峡谷核心河段高位岩质崩塌与震中分布密切相关,地震活动时高陡岸坡的放大效应和动力响应特征明显^[12-14]。

图10 区域破坏性地震分布图($4.6 \geq M \geq 3.0$)Fig.10 Regional destructive seismic distribution map($4.6 \geq M \geq 3.0$)

根据倾倒式崩塌破坏模式,大峡谷核心河段基本烈度为Ⅷ度,应考虑水平地震力作用,崩塌体的抗倾覆稳定性系数 K 可按下式计算^[15]。

$$K = \frac{6aW}{10h_0^3 + 3Fh}$$

式中: a ——崩塌体宽度的一半(m);

W ——崩塌体重力(kN/m^3);

h_0 ——水位高,暴雨时等于岩体高(m);

F ——水平地震力(kN);

h ——岩体高(m)。

因此,地震活动将降低崩塌体的抗倾覆稳定性系数,岸坡岩体更易崩塌。

4.5 地壳隆升与河流下切

大峡谷地区是青藏高原隆升、侵蚀最为强烈的地区,3.4 Ma 以来,晚第三纪末至第四纪,青藏高原整体处于快速隆升阶段^[16-17],根据 GPS 观测成果,通过欧亚框架下青藏高原东部地壳运动速度矢量场分析(据

刘宇平, 2000), 大峡谷地区现今隆升速率为 $4 \sim 10 \text{ mm/a}$ 。

雅鲁藏布江贯通于中更新世, 地壳隆升速率一般均大于 1 mm/a , 河流下切速率较快, 大峡谷入口处受倒数第二冰期及末次冰期堰塞影响^[18], 造成大峡谷以下河段河床纵比降变陡, 进一步加快了大峡谷的下切速率。经实地调查, 大峡谷两岸拔河高差 $100 \sim 200 \text{ m}$ 范围内近直立的岸坡分布较多, 表明河流下切速率明显快于底拔河高程岸坡段的塑造进程。

地壳快速隆升和河流快速下切, 将伴随强烈的岸坡剥蚀作用^[19], 加快岸坡的剥蚀速率, 导致大峡谷两岸岸坡为剥蚀区峡谷。

4.6 高地应力

大峡谷位于喜马拉雅地块向北俯冲楔入挤压的前缘, 是印度板块向欧亚板块插入的东北犄角, 其所在的南迦巴瓦地区在印度板块与拉萨地体碰撞以来发生了强烈的地壳缩短, 构造应力较为集中, 地应力较高。根据大峡谷入口现代河床中钻探揭示, 谷底基岩岩芯中连续分布 30 余块饼状岩芯。

构造作用及其演化历史是决定地壳岩体天然应力状态的最主要因素。较高的地应力, 将使河谷临空面附近的应力集中, 往往使周围岩体 (特别是坡脚底部和谷底处) 内的应力超过其强度, 于是岩体发生破裂变形, 生成各类表生结构面^[20], 利于崩塌发生。因此, 大峡谷高陡岸坡崩塌是与卸荷回弹和应力释放相联系的岩体变形与破坏的主要方式。

4.7 风化卸荷

大峡谷核心河段各类岩石抗风化能力差异较大, 云母片岩、阳起石片岩、黑云角闪片岩和绿泥片岩抗风化能力弱, 地表岩体以强风化为主; 其余岩石抗风化能力较强, 地表岩体以弱风化为主。总体上, 河谷切割越深、岸坡高度越大、地形越陡峻, 岸坡卸荷作用越强。根据现场地表地质调查, 大峡谷高位岩质崩塌主要发生在浅表风化、卸荷松弛岩体内。

4.8 气候条件

雅鲁藏布大峡谷排龙、扎曲、夺嘎和甘登等河段的江面高程分别约为 1970 m 、 1560 m 、 1130 m 和 1050 m , 两岸崩塌区拔河高差大, 最大可达 1200 m 以上, 接近两岸谷肩部位, 河段气候垂直分带和季节性变化明显, 从河谷底部的亚热带气候逐步向上部崩塌区的亚寒带过渡, 昼夜温差大。印度洋的暖湿气流受到喜马拉雅山脉的阻隔, 主要沿雅鲁藏布江河谷上溯运动形成降水^[21], 雅鲁藏布大峡谷核心河段降雨丰

沛, 且较为集中, 崩塌区上部冬季有少量冰雪覆盖, 总体上气候条件有利于崩塌发生。

综上, 作为举世瞩目的世界第一大峡谷, 由于独特的深切“V”型峡谷地形、特殊的岸坡地质建造和岸坡地质结构, 在区域破坏性地震的反复作用下, 加之其它因素影响, 大峡谷顶端及其附近河段陡倾反向坡高位崩塌和陡倾顺向坡高位崩塌发育 (破坏模式见图 11)。

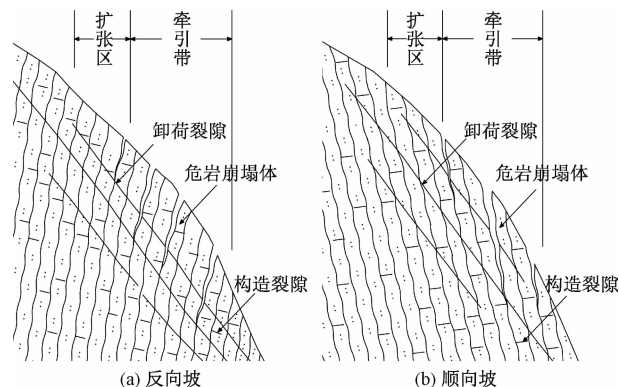


图 11 不同坡向崩塌破坏模式

Fig. 11 Different failure modes of the slope collapses

5 结语

(1) 雅鲁藏布大峡谷崩塌发育, 主要集中分布于排龙-扎曲和扎曲-夺嘎这两个大峡谷的核心河段, 崩塌体主要位于雅鲁藏布江地层区内, 以倾倒式高位岩质崩塌为主, 最大拔河高差达 1200 m 以上, 崩塌体规模总体较大, 以中型崩塌体为主, 大型崩塌体次之, 其中夺嘎崩塌体和甘登崩塌体为巨型崩塌体。

(2) 根据崩塌的特征、规模及其危害程度, 大峡谷核心河段总体上为 I 类崩塌, 岩层软硬相间, 片理化特征和糜棱岩化特征明显, 风化作用较强, 岸坡卸荷松弛岩体分布广、厚度大, 崩塌体分布高程高、规模大, 扎曲-夺嘎河段密集成群分布, 暴发频率高, 难以处理, 近年来崩塌多次短时间堵塞雅鲁藏布江。

(3) 雅鲁藏布大峡谷高位岩质崩塌的主要影响因素有河谷形态、岩性特征、构造条件、地震活动性、地壳隆升与河流下切、高地应力、风化卸荷和气候条件等, 崩塌发育是多种因素耦合的结果, 最主要的内在因素是岸坡形态与地质结构; 最主要的诱发因素是区域破坏性地震的反复作用。崩塌分布与地震震中分布密切相关, 岸坡放大效应和动力响应特征明显。

(4) 根据 GPS 观测成果, 1 Ma 以来青藏高原进入快速隆升阶段, 目前仍保持 10 mm/a 的快速隆升速率, 根据地震监测成果, 大峡谷地区区域破坏性地震活

动频繁,可以预想大峡谷岸坡塑造进程将持续,甚至加快,高位岩质崩塌将频繁发生,应加强观测和做好预警,注意崩塌地质灾害和由此引发的次生灾害。

参考文献:

- [1] 蒋忠信. 西藏帕隆藏布河谷崩塌滑坡、泥石流的分布规律[J]. 地理研究, 2002, 21(4): 495 - 502.
JIANG Zhongxin. Differential distribution regularity of collapse landslides and debris flows along Palong Zangbu River Valley in Tibet [J]. Geography Research, 2002, 21(4): 495 - 502.
- [2] 任金卫, 单新建, 沈军, 等. 西藏易贡崩塌 - 滑坡 - 泥石流的地质地貌与运动学特征[J]. 地质论评, 2001, 47(6): 642 - 646.
REN Jinwei, SHAN Xinjian, SHEN Jun, et al. Geological characteristics and kinematics of the rock Fall-Landslide in Yi 'ong, Southeastern Tibet [J]. Geological Review, 2001, 47(6): 642 - 646.
- [3] 张文敬. 南迦巴瓦峰跃动冰川的某些特征[J]. 山地研究, 1985, 14(3): 234 - 237.
ZHANG Wenjing. Some of the characteristics of namjagbrawa glacier movemen [J]. Mountain Research, 1985, 14(3): 234 - 237.
- [4] 中国地质调查局成都地质调查中心. 青藏高原及邻区地质图(1:150 万)及说明书[M]. 北京:地质出版社, 2013.
Chengdu geological survey center of China Geological Survey. Geological map of Tibetan Plateau and its adjacent areas (1:1.5million) and instructions[M]. Beijing:Geological Publishing House, 2013.
- [5] 中国地质调查局. 青藏高原 1:25 万区域地质调查成果系列[M]. 北京:中国地质大学出版社, 1999 - 2005.
China Geological Survey. Qinghai tibet plateau 1:25 regional geological survey series [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1999 - 2005.
- [6] 乐昌硕. 岩石学[M]. 北京:地质出版社, 1984: 168 - 178.
LE Changshuo. Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 168 - 178.
- [7] 邹子南. 南迦巴瓦构造结东侧结合带岩石类型与构造特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(3): 325 - 333.
ZOU Zinan. Study on rock types and tectonic characteristics in the east junction zone of the Namjagbarwa structural knot [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition). 2018, 45(3): 325 - 333.
- [8] 吴新国, 孙立新, 郭金城, 等. 雅鲁藏布江结合带内韧性剪切带的地质特征及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 2005(2): 199 - 202.
WU Xinguo, SUN Lixin, GUO Jincheng, et al. The geological characteristics and significance of the Yarlung Zangbo River suture zone of the ductile shear zone [J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2005 (2): 199 - 202.
- [9] 滑坡防治工程勘察规范: DZ/T 0218 - 2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Code for investigation of landslide prevention and control engineering: DZ/T 0218 - 2006 [S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
- [10] 地质灾害危险性评估规范: DZ/T 0286 - 2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Specification of risk assessment for geological hazard: DZ/T 0218 - 2006 [S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [11] 袁志辉, 陈志新, 倪万魁, 等. 倾倒式岩质崩塌运动过程数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 27 - 28.
YUAN Zhihui, CHEN Zhixin, NI Wankui, et al. Numerical simulation of collapsing rock collapse movement [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(2): 27 - 28.
- [12] 李振生, 巨能攀, 侯伟龙, 等. 陡倾层状岩质边坡动力响应大型振动台模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 243 - 248.
LI Zhensheng, JU Nengpan, HOU Weilong, et al. Large shaking table model test study on dynamic response of steeply dipping layered rock slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 243 - 248.
- [13] 龙浩. 强震条件下高陡岩质边坡崩塌及坡脚岩堆动力响应特征[D]. 成都: 成都理工大学, 2014: 6.
LONG Hao. Under conditions of high earthquake steep rock slope collapses and dynamic response characteristics of rock pile toe [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014: 6.
- [14] 程强. 汶川地震崩滑灾害影响因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(3): 2 - 4.
CHENG Qiang. Analysis of the factors affecting the earthquake collapse and landslide disaster in Wenchuan [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(3): 2 - 4.
- [15] 工程地质手册[M]. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社

- 版社,2007(2):554-558.
Engineering Geology Manual (Fourth Edition) [M].
Beijing:China Construction Industry Press, 2007(2):
554-558.
- [16] 钟大赉,丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨
[J]. 中国科学(D辑),1996,26(4):290-295.
ZHONG Dalai,DING Lin. The process and mechanism
of the uplift of the Qinghai Tibet Plateau[J]. Science
in China(Series D), 1996, 26(4): 290-295.
- [17] 丁林,钟大赉,潘裕生,等. 东喜马拉雅构造结上新
世以来快速抬升的裂变径迹证据[J]. 科学通报,
1995,40:1498-1500.
DING Lin, ZHONG Dalai, PAN Yusheng, et al.
Fission track evidence for rapid uplift since the
Pliocene in the eastern Himalaya tectonic junction
[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40: 1498
-1500.
- [18] 王毅,张运达. 雅鲁藏布江大拐弯入口格嘎冰川泥
石流堵江影响分析[J]. 水电站设计,2015,34(4).
WANG Yi, ZHANG Yunda. Analysis of the Yarlung
Zangbo Grand bend entrance gega glacial debris flow
river blocking effect [J]. Design of Hydropower
Station, 2015, 34(4).
- [19] 谢超,周本刚,李正芳. 东喜马拉雅构造结地貌形态
及其构造指示意义[J]. 地震地质,2017,39(2):
282-283.
XIE Chao, ZHOU Bengang, LI Zhengfang.
Geomorphological morphology and its structural
significance of the eastern Himalaya tectonic knot[J].
Seismology and Geology, 2017, 39(2): 282-283.
- [20] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M].
北京:地质出版社,1994(3):51-52.
ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG
Lansheng. Principle of engineering geological analysis
[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994
(3): 51-52.
- [21] 马明,关志华. 雅鲁藏布大峡谷地区水环境评价及
保护研究[J]. 地理研究,2000,19(2):195.
MA Ming, GUAN Zhihua. Study on water
environment assessment and protection in the Yarlung
Zangbo Grand Canyon Area [J]. Geography
Research, 2000, 19(2): 195.

封面照片说明

兴文县 5.7 级地震引发的龙洞煤矿后山滑坡

龙洞煤矿后山滑坡位于四川省兴文县周家镇龙洞村四组,系 2018 年 12 月 16 日兴文 5.7 级地震引发的同震滑坡。滑坡体物质组成主要为第四系残坡积层,滑体后缘宽约 40 m,前缘宽约 90 m,主滑方向长约 450 m,面积约 16 000 m²,平均厚度约 15 m,堆积体方量约 2 × 10⁵ m³。前缘堆积体堵塞沟道,在降雨工况下易发生局部滑动形成碎屑流,建议加强滑坡体中后部残留不稳定块石的日常监测,同时开展地质灾害治理工程。

(自然资源部地质灾害技术指导中心 殷志强供稿)