

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.04.05

支流侵蚀对澜沧江上游亚贡倾倒体的影响

尚 琪,涂国祥,罗新平

(成都理工大学,四川 成都 610059)

摘要: 澜沧江上游发育大型倾倒变形体,其强倾倒深度可达近 200 m。在其形成过程中不仅向澜沧江一侧产生强烈倾倒,同时还向澜沧江支流-木水河侧产生了强烈倾倒变形破坏,并且木水河两岸岩体的倾倒变形程度有着显著差异。基于大量地表调查,结合平硐资料,对该倾倒变形体的发育特征进行了详细调查,重点对木水河的侵蚀作用对该倾倒变形体的影响展开了深入研究,得出以下结论:1. 边坡内平移断层 F_{105} 使得该倾倒体岩层走向与坡面近于平行,这是导致边坡木水河侧岩层产生强烈倾倒的内在原因;2. 木水河强烈侵蚀作用导致的岸坡岩体卸荷松弛是促使岩体向木水河侧产生强烈倾倒的外在动力;3. 该倾倒变形的形成演化经历了两个阶段,分别是澜沧江侵蚀阶段和木水河侵蚀阶段,并造成亚贡倾倒体岩体分别向两个方向发生卸荷与倾倒破坏。

关键词: 澜沧江上游;倾倒变形;支流侵蚀;演化过程

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)04-0039-06

Effect of tributary erosion on Yagong dumping in upstream of Lancang River

SHANG Qi, TU Guoxiang, LUO Xinping

(Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: It develops a large-scale dumping deformation body in the upper reaches of Lancang River with its strong dumping depth of nearly 200 m. During its formation, it not only dumped strongly to the side of the Lancang River, but also to the side of Mushui River, an orthogonal tributary of the Lancang River, even caused deformation. Also, there is a significant difference in the degree of toppling deformation between the two sides of Mushui River. Based on a large number of surface surveys, combining data of Pingtong, this paper investigates the developmental characteristics of the dumping deformation body detailedly, focusing on studying the impact of the erosion effect of the Mushui River on the dumping deformation body, concluding that: 1. The fault F_{105} in the area makes the trend of the dumping stratum nearly parallel to the slope on the left bank of the Mushui River, which is the intrinsic reason for the strong dumping of the rock mass on the left bank of the Mushui River; 2. The unloading relaxation of the rock mass caused by the strong erosion of the Mushui River is the external force that promotes the strong dumping of the rock mass to the Mushui River side; 3. The formation and evolution of the dumping deformation has experienced two stages, namely the Lancang River erosion stage and the Mushuihe erosion stage, which results in the unloading and dumping failure of the Yagong Dumping Rock Mass in two directions.

Keywords: upper reaches of the Lancang River; dumping deformation; river erosion; evolution process

收稿日期: 2019-10-18; 修订日期: 2020-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472274); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自由探索课题(SKLGP2017Z010)

第一作者: 尚 琪(1995-),男,陕西西安人,硕士研究生,主要从事工程地质、岩土工程研究工作。E-mail: 438601897@qq.com

通讯作者: 涂国祥(1978-),男,湖北黄冈人,博士,教授,硕士生导师,主要从事堆积体工程地质特性及稳定性方面的研究。E-mail:

pyk@cdut.edu.cn

0 引言

倾倒变形是一种较常见的岩质边坡破坏模式。研究表明,在陡倾层状岩质斜坡中,河谷的下切作用形成临空面,岩层水平方向应力不断释放并导致岩体卸荷松弛。当水平方向应力释放完毕时,竖直方向的重力成为主控应力,在重力作用的影响下,层状岩体从顶部开始逐渐出现“点头哈腰”现象,最终造成岩体变形破坏。早在 1976 年,GOODMAN^[1]已经提出了弯曲倾倒、块状倾倒、弯曲-块状倾倒的概念;1992 年 AYDAN 与 KAWAMATO^[2]提出了倾倒变形破坏的逐步分析法。随后,众多学者对于岩质层状边坡整体稳定性及其控制因素做出分析研究^[3-4]。MARC-ANDER^[5]基于离散元分析法对岩层倾倒方向与岩层倾倒过程中形成的节理方向两者之间关系做了深入分析;ADHIKARY^[6]等利用离心机试验方法,发现倾倒变形破坏面与岩层法线存在夹角。我国对边坡倾倒变形研究起步较晚,在上世纪 90 年代时许多专家学者对边坡形成机制提出新的认识^[7-9],进入 21 世纪后许多专家学者运用数值模拟方法研究倾倒变形并取得巨大成功。黄润秋等^[10]通过对锦屏水电站水文站坝址调查分析,提出倾倒变形的深度可达几百米;任光明等^[11]通过对黄河羊曲水电站典型倾倒变形体分析,得出倾倒变形的形成机理。随着研究的不断深入,越来越多的专家学者在倾倒变形的形成机理、演化过程、倾倒深度等方面均取得巨大成就^[12-14]。

亚贡边坡受到澜沧江和木水河两个不同时期的侵蚀,导致该倾倒变形体向两个不同的方向发生卸荷、倾倒。通过对亚贡复杂倾倒变形体倾倒的调查研究,得出支流对倾倒变形体变形破坏的影响,为该河段类似倾倒变形体的研究提出依据。

1 亚贡倾倒变形体特征

1.1 地质背景

亚贡倾倒变形体位于云南省迪庆州德钦县佛山乡溜筒江村澜沧江上游约 5 km 处南西侧,地理坐标:东经 98.753°,北纬 28.58°。倾倒变形体分别以亚贡冲沟、木水河作为左右边界,前缘沿河谷最大宽度约 1 131 m,最大顺坡向长度约 1 562 m,面积约 $1.63 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。倾倒变形体前缘直指河谷,高程约 2 200 m,后缘直达山脊顶部,高程约 3 000 m,相对高差约 900 m。坡体较缓,平均坡度约 38°。

边坡以 I 级断层(F_1)红山-古水断裂为界出露两

段岩层:靠近河谷处为 P_{1j} 的玄武质板岩及砂板岩;边坡后缘为 $T_3\text{hn}$ 的砂质板岩。同时,发育有一条延伸约数百米右旋走滑断层 F_{105} 斜切 F_1 断层。该断层发育使得边坡木水河侧玄武岩岩层变薄并造成岩层走向与坡面方向大致平行(图 1)。木水河两侧岩层产状有明显的不同:左岸岩体走向斜交于河谷且岩体向木水河方向倾倒,岩体倾角较缓(约 $15^\circ \sim 45^\circ$);右岸岩体走向垂直于河谷且没有向木水河倾倒的现象,岩体倾角较陡(约 $60^\circ \sim 80^\circ$)(图 1)。



图 1 亚贡倾倒变形体工程地质平面图

Fig. 1 Dumping engineering geological plane of Yagong

1.2 平硐调查

通过对亚贡倾倒变形体 A-A' 剖面上的平硐(PD221、PD222)进行调查,进一步了解倾倒变形体内部形态特征(图 2、图 3)。

根据调查统计结果,岩层面产状倾角变化和倾向分布如图 4 所示。从图中可得知,PD221 的岩层倾角随着洞深的增加,发生缓-陡-缓的变化:洞口至 60 m 处倾角极缓($10^\circ \sim 40^\circ$);60 ~ 165 m 岩层倾角逐渐变陡($40^\circ \sim 60^\circ$);165 m 之后岩层倾角趋近于原岩层(80° 以上)。PD222 的岩层倾角现象较复杂:洞口至 65 m 处岩层发生折断现象,故倾角变化幅度大($10^\circ \sim 68^\circ$);65 ~ 125 m 时,岩层整体呈缓倾角($5^\circ \sim 30^\circ$);该

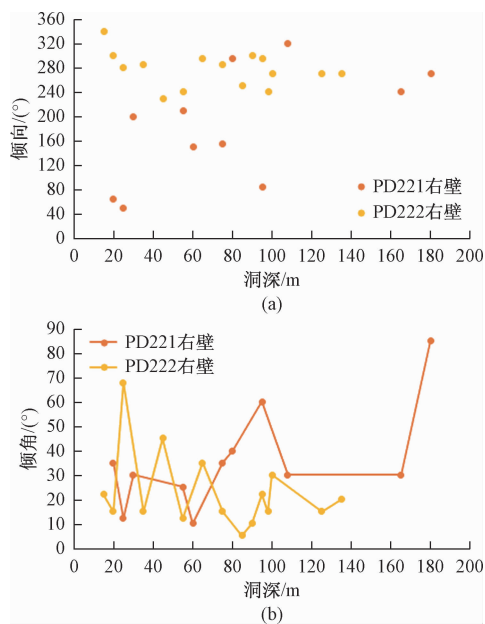


图 4 岩层倾角、倾向变化分布图

Fig. 4 Formation of dip and dip distribution changes

渐偏向沿木水河方向 NE 向,造成了现今存在两个不同走向的现象,为亚贡倾倒地体向木水河侧发生强烈的倾倒提供内在条件。

1.3 倾倒变形体分区

通过上文的分析与描述,根据黄润秋^[15]提出的将

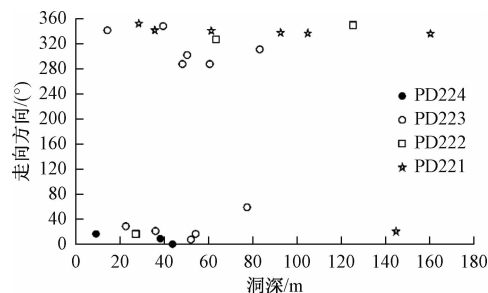


图 5 岩体卸荷裂隙走向示意图

Fig. 5 Diagram of unloading fracture strike of rock mass

岩层倾角(α)、层内最大拉张量(mm)、层内单位拉张量(mm/m)、岩体卸荷程度、岩体风化程度、岩体波速指标作为倾倒变形程度的分区指标。现将倾角变化和岩体卸荷、风化程度作为划分倾倒程度的标准,具体分级如下表 1,大致将木水河侧岩体分为极强倾倒、强倾倒、弱倾倒(图 6)。

根据 PD221、PD222 揭示的强倾倒区显示,强倾倒区位于堆积区下部,不同位置强倾倒区深度也不同,一般可延伸 160~200 m,岩层倾角平缓。强倾倒区与强卸荷区相匹配,区域内可见数十条张开度大于 2 mm 的强卸荷裂隙。在强风化、强卸荷的共同作用下,岩体拉张性裂隙发育明显,可见明显的架空、塌陷现象,局部贯通性较好。岩体整体性较差,破碎程度较大,呈碎

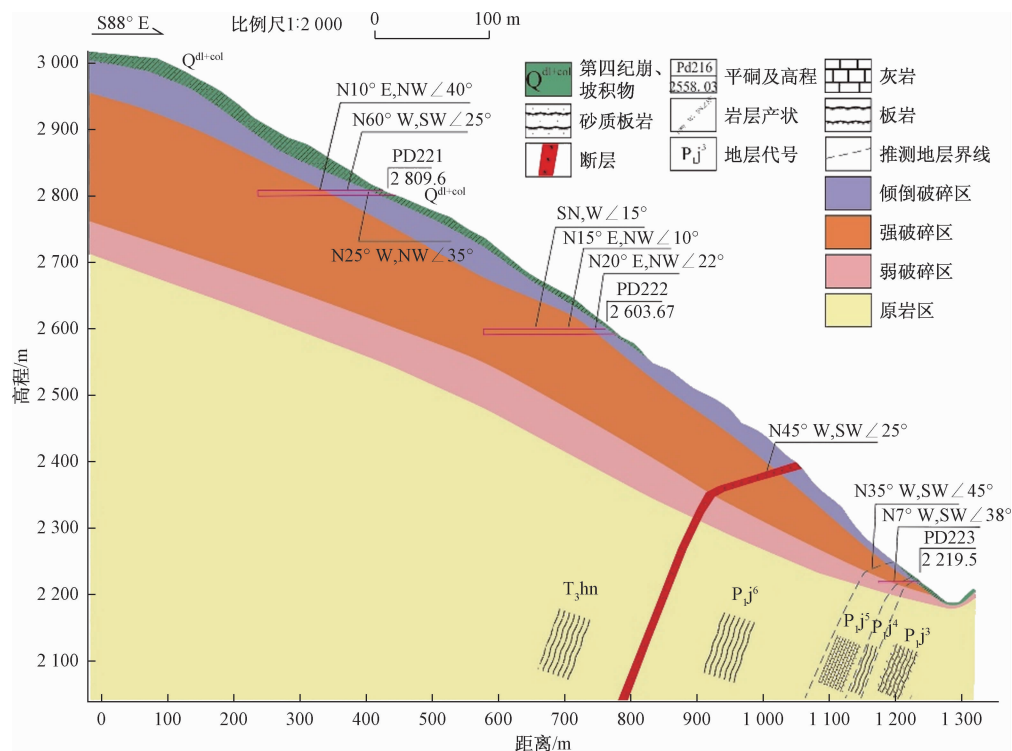


图 6 亚贡倾倒地体木水河侧 A-A'剖面图

Fig. 6 Section A-A' of the side of Mushui River, Yagong dumping deformation body

块状,块体稳定性较差。

根据 PD223 所揭示的弱倾倒区表示,弱倾倒区位于强倾倒区和正常岩层区之间。该区域岩层倾角平缓程度较弱于强倾倒区,呈中-缓倾角。发育深度约40 ~ 60 m。弱倾倒区与弱卸荷区对应,岩体结构相对较紧密,未见明显折断现象,张开度和贯通性较差。

表 1 岩层倾角变化表

Table 1 Variation table of dip angle of strata

平洞编号	洞深/m	范围值/(°)	平均值/(°)	洞深/m	范围值/(°)	平均值/(°)	洞深/m	范围值/(°)	平均值/(°)
PD221	0 ~ 60	10 ~ 35	22. 4	60 ~ 165	30 ~ 60	39	165 ~ 180	45 ~ 80	65
PD222	0 ~ 65	10 ~ 68	30. 2	65 ~ 125	5 ~ 30	16	未贯穿	-	-
PD223	0 ~ 40	≤20	≤20	40 ~ 60	40 ~ 50	46. 7	60 ~ 101	57 ~ 85	75. 2
备注		极强倾倒			强倾倒			弱倾倒	

表 2 岩层卸荷、风化程度表

Table 2 Unloading and weathering degree table

平洞编号	高程/m	洞深/m	风化程度			卸荷程度	
			强风化	弱风化上段	弱风化下段	强卸荷	弱卸荷
PD221	2 809. 6	183. 5	0 ~ 91	91 ~ 170. 5	未揭穿	0 ~ 170. 5	未揭穿
PD222	2 603. 67	161. 5	0 ~ 84	84 ~ 161. 5	未揭穿	> 161. 5	未揭穿
PD223	2 218. 78	101. 5	8 ~ 16. 8	16. 8 ~ 89. 8	89. 8 ~ 101. 5	8 ~ 48. 5	48. 5 ~ 101. 5

2 木水河下切对亚贡倾倒变形体的影响

2.1 影响倾倒变形体的主要因素

亚贡倾倒变形体主要是由内外两方面因素在长期的演化过程中共同造成的。主要控制因素有:地形地貌、岩性组合、地质构造,河谷下切作用的演化 4 个方面造成。(1)亚贡倾倒变形体属于典型的高山峡谷地貌,河谷狭长,斜坡陡峭。澜沧江和木水河共同切割下形成脊状山体,为岩体的深度卸荷和倾倒变形提供良好的地形地貌。(2)边坡顶部砂质板岩与底部玄武岩力学性质有较大差异,板岩玄武岩软硬岩性组合也是斜坡差异卸荷的物质前提,在卸荷过程中会出现差异性卸荷回弹现象造成岩层错动,促进倾倒变形的发生。(3)边坡内红山-古水断裂(F_1)、 F_{105} 走滑断层的影响,使得岩层走向沿澜沧江、木水河河谷方向发育,有利于岩层向河谷方向发生卸荷,倾倒。同时,由于陡倾层状斜坡的结构属于易倾倒结构,也为斜坡倾倒提供结构条件。除上述所说因素,澜沧江和木水河的快速侵蚀对边坡岩体的倾倒变形同样起重要作用。

2.2 木水河的侵蚀下切作用对亚贡倾倒变形体的影响

亚贡倾倒变形体的形成是内、外因素共同作用下产生的。内在因素包括:岩性、内部结构、岩体物理力学性质等;外在因素包括:地形地貌、地质构造运动、新构造运动引起的河谷下切等。本文主要从澜沧江和木水河两条河流的形成与下切的对亚贡倾倒变形体造成的影响进行论述。

亚贡倾倒变形体所在区域的河谷下切过程可大致分为两个阶段:澜沧江侵蚀倾倒变形阶段、木水河侵蚀倾倒变形阶段。本章节通过运用 Rhino 三维建模软件构建现今亚贡倾倒变形体的三维模型(图 7)。将研究区划分为受木水河影响为主的区 I,和受澜沧江影响的为主的区 II,并沿岩体倾倒方向切出区 I 剖面 B-B'和区 II 剖面 A-A',分析不同的下切时期对倾倒变形体的影响。

澜沧江快速下切时期,区 II 内岩体水平方向最大主应力逐渐向临空方向释放并伴随卸荷作用,使得陡倾面岩体在拉张作用下形成拉张卸荷裂隙。当水平方向最大主应力释放完成后,岩体内部应力变为以竖直方向的重力作用为主,岩体前缘在自重作用下,逐渐发生弯曲-变形(图 7A-A')。随着河谷不断下切,前缘临空面坡度变陡,后缘岩体拉裂面不断加深,倾倒变形不断加剧。在弯曲-变形作用下,后缘脆性岩体从根部拉张裂隙处折断,澜沧江侧倾倒变形过程结束。

图 7B-B'所示,由于区 I 内 F_{105} 走滑断层的影响,造成岩体走向发生改变,使得岩层沿木水河河谷发育。随着木水河的形成并在短短数万年内下切形成次级深切河谷,也为研究区 I 内岩体提供了新的临空面,使得靠近木水河侧的区域 I 内岩体水平方向应力得到释放并形成大量强卸荷裂隙,导致岩体结构破碎松散,为岩体发生卸荷提供条件。随后,伴随着水平主应力的释放完毕,竖直方向的重力逐渐起主导作用,使得岩层逐渐向木水河侧形成倾倒弯曲(图 7B-B'所示),形成现阶段亚贡倾倒变形体向两个方向发生倾倒变形的复杂

现象。

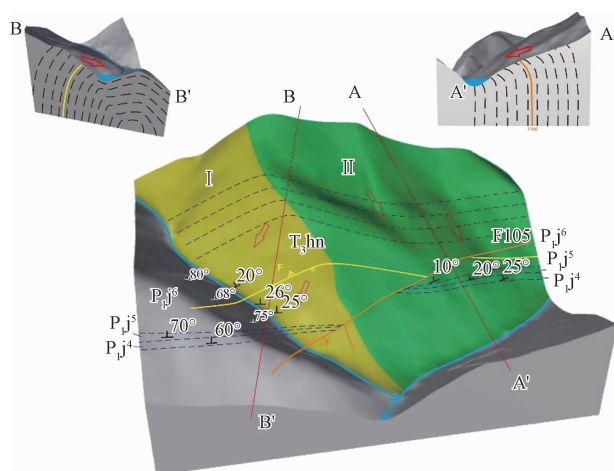


图 7 亚贡倾倒地体演化过程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the evolution process of Yagong dumping deformation body

3 结论

本文通过对亚贡倾倒地体木水河侧的现场调查,分析澜沧江支流-木水河对亚贡倾倒地体的影响得出以下结论:

(1) 研究区内走滑断层使得岩层产状及岩层组成均发生变化,为边坡发生倾倒地体提供内在条件。

(2) 支流的形成及下切作用,造成区内岩层发生强烈卸荷作用并导致岩体破碎,为边坡发生倾倒地体提供可能。

(3) 由于木水河的快速下切作用,造成边坡靠近木水河侧发生严重的倾倒地体破坏现象,形成现今亚贡倾倒地体的双向倾倒地体的复杂现象。

参考文献:

- [1] GOODMAN, BRAY. Toppling of rock slopes [C]. Rock Engineering for Foundations & Slopes, 1976.
- [2] AYDAN, KAWAMOTO. The stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilization [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 1992, 25(3): 143 - 165.
- [3] John V S. Self-stabilization of toppling and hillside creep in layered rocks [J]. Engineering Geology, 2015, 196: 139 - 149.
- [4] ZHANG Z Y, WANG L S, WANG S T, et al. Principle of engineering geology analysis (the Third Edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [5] MARC-ANDRE, BRIDEAU DOUG STEAD. Controls on block toppling using a three-dimensional distinct element approach [J]. Rock Mech Rock Eng, 2010, 43: 241 - 260.
- [6] ADHIKARY D P, DYSKIN A V. Modelling of progressive and instantaneous failures of foliated rock slopes [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(4): 349 - 362.
- [7] 孙玉科, 姚宝魁. 我国岩质边坡变形破坏的主要地质模式 [J]. 岩石力学与工程学报, 1983(01): 67 - 76. [SUN Y K, YAO B K. Principal geological models of deformation and failure of rock slopes in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1983(1): 67 - 76. (in Chinese)]
- [8] 韩贝传, 王思敬. 边坡倾倒地体的形成机制与影响因素分析 [J]. 工程地质学报, 1999(03): 213 - 217. [HAN B C, WANG S J. Mechanism for toppling deformation of slope and analysis of influencing factors on it [J]. Journal of Engineering Geology, 1999(3): 213 - 217. (in Chinese)]
- [9] 程东幸, 刘大安, 丁恩保, 等. 层状反倾岩质边坡影响因素及反倾条件分析 [J]. 岩土工程学报, 2005(2): 222 - 226. [CHEN D X, LIU D A, DING E B, et al. Analysis on influential factors and toppling conditions of toppling rock slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005(2): 222 - 226. (in Chinese)]
- [10] 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(3): 433 - 454. [HUANG R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th Century [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007(3): 433 - 454. (in Chinese)]
- [11] 任光明, 夏敏, 李果, 等. 陡倾顺层岩质斜坡倾倒地体破坏特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 3193 - 3200. [REN G M, XIA M, LI G, et al. Study on toppling deformation and failure characteristics of steep bedding rock slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 28(Sup1): 3193 - 3200. (in Chinese)]
- [12] 张御阳, 裴向军, 唐皓, 等. 反倾岩坡倾倒地体结构面影响效应研究 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 844 - 851. [ZHANG Y Y, PEI X J, TANG H, et al. Experimental tests for impact of structural surfaces to toppling deformation in anti-dipped rock slopes [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(4): 844 - 851. (in Chinese)]