

溪洛渡库区星光三组岸坡倾倒变形成因机制分析

周永健, 冯文凯, 吴卓林, 易小宇, 杨竞, 赖佳伟

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

摘要: 溪洛渡库区星光三组岸坡发生了严重的倾倒变形破坏,由原本的顺层斜坡变为反倾边坡,像星光三组这类特殊的倾倒变形体由于其成因机制与常规的倾倒变形体不同而受到了许多学者的关注。详细描述了星光三组变形体的工程地质条件、变形破坏特征,并基于数值模拟对该倾倒变形体的成因机制进行了分析。结果表明:星光三组岸坡岩层呈现软硬互层的薄层结构,该结构为倾倒变形的形成提供了物质基础;构造作用与金沙江的快速下切分别为变形体的形成提供了高水平地应力与地形条件;溪洛渡库区星光三组岸直倾倒变形演化过程可划分为卸荷变形、时效变形、灾变失稳3个阶段。

关键词: 库岸边坡; 倾倒变形; 成因机制; 数值模拟; 溪洛渡水库

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.07.018

0 引言

倾倒变形通常是指走向与坡面近似平行的层状岩质边坡向坡外临空面发生弯曲变形的现象。早期,人们普遍认为倾倒变形通常仅发生于坡体浅部,变形深度在数十米范围内^[1],但近20 a来,中国不断揭露出了上百余米高的弯曲倾倒变形边坡,如龙滩水电站左岸边坡^[2]、澜沧江黄登水电站右岸边坡^[3]、锦屏一级水电站左岸边坡^[4]、黄河拉西瓦近坝高边坡^[5]、狮子坪水电站库区二古溪边坡^[6]等,这些大规模的倾倒变形体已成为亟待解决的重大工程地质问题。

国内外倾倒变形的研究历史已有50多年,在倾倒变形的成因机制与模式分类方面都取得了一定的成果。Goodman将倾倒变形划分为弯曲倾倒、块状倾倒以及块状弯曲倾倒3类^[7]。黄润秋在对大型倾倒变形体的总结中得出大型倾倒破坏与岩性强度、岩层厚度有关,并将倾倒变形分为浅层倾倒变形、深层倾倒变形和复合型倾倒

变形3类^[8-9]。其他学者通过数值模拟与模型试验的研究,总结出影响倾倒变形的因素主要包括有初始岸坡结构、岩性结构、结构面、地应力、地下水、降雨、库水、地震、风化、河流下切速度以及人类工程活动等等^[10-13]。

随着研究的深入,一些学者注意到了陡倾顺层岩质坡也存在倾倒变形的情况,并对这类特殊的倾倒变形体进行了大量研究,总结出这类倾倒变形多发育在岩层软硬互层、岩层倾角较陡、水平地应力高的高陡斜坡中^[14-16]。溪洛渡库区星光三组变形体作为这类倾倒变形的典型例子,对于顺层倾倒变形的研究具有一定意义。本文以该变形体为研究对象,对其变形破坏特征进行了调查统计分析,结合数值模拟对其成因机制进行了研究,并进一步探究了其倾倒变形的演化模式。

1 地理位置与地质条件

星光三组变形体位于金沙江右岸,地处云南省永善县星光三组,距溪洛渡水电站坝址约25 km。地貌所属

收稿日期: 2020-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977252); 四川省青年科技创新研究团队专项计划项目(2017TD0018); 地质灾害防治与环境保护国家重点实验室团队项目(SKLG2016Z001)

作者简介: 周永健,男,硕士研究生,主要从事地质灾害评价与防治方面的研究工作。E-mail: 18768681569@163.com

通讯作者: 冯文凯,男,教授,博士生导师,博士,主要从事区域稳定及岩体、地质灾害评价防治方面的教学与研究工作。E-mail: fengwenkai@cdut.cn

为中山地貌,微地貌为斜坡,河道呈狭窄的“V”字形,岸坡陡峻。如图 1 的工程地质平面图所示,变形体两侧以冲沟为界,后缘以双沟同源处为界,前缘为金沙江。变形体平面上呈“簸箕状”,纵向长 1 600 m,横宽约 980 m,高程范围为 420~1 400 m,高差达 980 m。岸坡整体上呈折线型,中前部陡,后部缓,平均坡度约 35°。

高程间发育有多条裂缝,裂缝延伸方向与岩层走向小角度相交,部分裂缝形成了岩层走向大致平行的沟槽(见图 2),表明地表变形可能是由于坡体内部基岩的弯曲-拉裂所导致;而且从表 1 中列出的不断新增的裂缝以及已有裂缝不断变长扩宽可以推测:岸坡依旧处于变形当中。

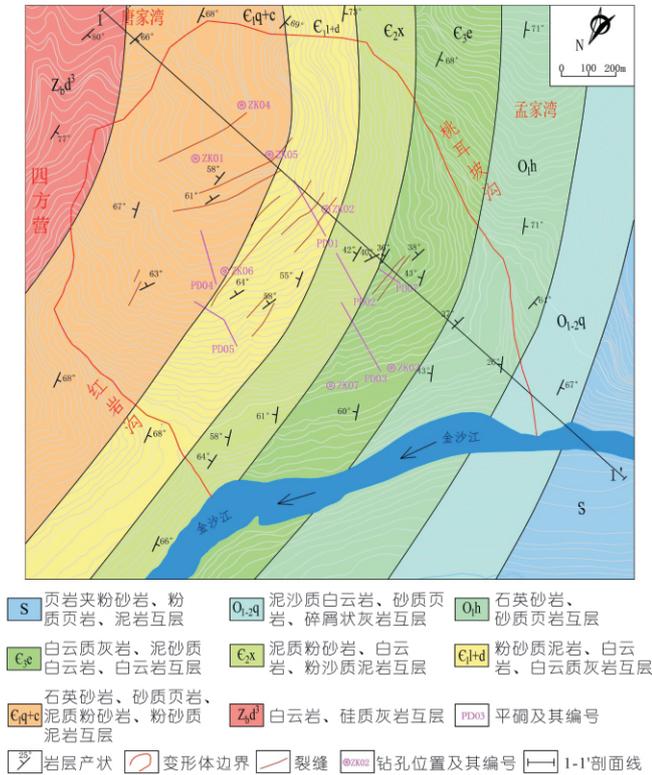


图 1 变形体工程地质平面示意
Fig. 1 Engineering geological plan

变形体岩性复杂,主要出露有奥陶系下统红石崖组(O₁h)的页岩、泥岩、泥质砂岩和寒武系中统西王庙组(ε₃e)的白云岩、灰岩、白云质灰岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,岩性组合总体上为软硬互层。岩层因为受到强烈的风化作用与卸荷作用,为薄层结构,岩层厚度一般为 5~20 cm。

变形体内部构造并不发育,但变形体外围东西两侧分别各发育有一条陡倾角断层。西侧 300 m 处为上田坝断层,断层产状为 276°∠80°;东侧距硝滩断层约 1 500 m,断层产状为 297°∠71°。变形体位于 2 个逆断层之间,在受到两侧断层的挤压作用后,积聚了较高的水地应力,使得岸坡在河流下切的过程中发生了强烈的卸荷作用。

2 岸坡倾倒变形特征

2.1 坡表变形特征

(1) 岸坡裂缝发育特征。岸坡后缘 885~1 255 m



图 2 典型裂缝
Fig. 2 Typical cracks

表 1 裂缝统计(2018 年)
Tab. 1 Crack statistics in 2018

裂缝编号	裂缝长度/m		裂缝宽度/cm	分布高程/m
	2013 年 6 月	2018 年 8 月		
LF1	500	540	5~20(最大 50)	1255~1195
LF2	150	190	5~15	1210~1180
LF3	700	770	10~20(最大 40)	1225~1020
LF4	230	285	10~15	1135~1090
LF5	320	330	5~10(最大 30)	1085~1050
LF8	135	160	5~12	980~890
LF6	100	485	5~8	1385
LF7	50	510	2~5	1370
LF9	160	205	5~10	950~850
LF10	200	240	10~15	890~845
LF11	250	265	15~35	885~810

(2) 岸坡坡表及外围基岩产状特征。通过现场调查,外围山体如唐家湾、孟家湾、四方营等地岩层产状为 N5°~20°W/SW∠65°~85°,基本为顺坡向(见图 3)。岸坡坡表岩层产状基本保持在 N5°~30°W/NE∠25°~70°之间,与外围岩层倾向明显相反,并在垂直于岩层走向的方向上倾角逐渐变缓。由图 4 可以看出:岸坡下游红岩沟左侧基岩倾角为 55°~70°,而上游桃耳坡沟右侧基岩倾角减缓为 25°~35°,并且此处岩层呈现出典型的“叠瓦式”的倾倒变形特征。

唐家湾公路内侧基岩产状: N18°W/SW∠71°; 孟家湾公路内侧基岩产状: N9°W/SW∠68°



图 3 变形体外围岩层产状
Fig. 3 Attitude of bed at the periphery of ramp



图4 岸坡前缘岩层产状

Fig. 4 Attitude of bed at the front of ramp

2.2 深部变形特征

通过进入平硐内部进行调查,发现平硐内部的岩体变形体大致可分为倾倒坠覆、倾倒弯曲、倾倒折断3种类型。

(1) 倾倒坠覆。主要发育在坡体浅表部,岩体倾倒折断现象明显,内部张裂变形强烈,出现张性破裂带下伏岩体局部或整体脱离,局部可见明显架空现象,其中充填部分碎块石、岩屑(见图5)。

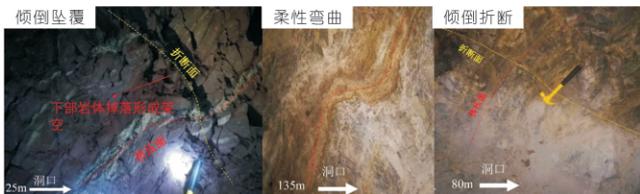


图5 平硐内岩体变形特征

Fig. 5 Deformation of the adit entry

(2) 倾倒弯曲。岩层发生柔性弯曲并伴随有层间错动,表现出弯曲变形但不发生连续破裂的特点,岩层倾角变化较大,但无不连续性突变现象(见图5)。这

类变形主要发育在泥质粉砂岩、泥岩等强度较软的岩层中。

(3) 倾倒折断。灰岩、白云岩等较硬的岩层在重力弯矩作用下发生拉张破裂并产生横切弯曲“梁板”的悬臂梁式折断破裂,形成倾向坡外、断续延展的张性或张剪性折断带,导致岩层倾角发生突变(见图5)。

星光三组岸坡三面临空的地貌条件、软硬互层的岩层特性说明了具有发生倾倒变形的可能性;而岸坡表面裂缝的持续发展情况、岸坡内外岩层产状的差异以及平硐内岩体不同变形破坏,都说明了岸坡在一定厚度内发生了倾倒变形。

本文按照岩层的变形破坏特征、岩体结构、倾角变化、风化及卸荷程度将星光三组岸坡倾倒变形划分为极强倾倒带、强倾倒带、弱倾倒带、正常岩带。以垂直于岩层产状的方向(也是岸坡变形最大的方向)作为典型剖面(见图1),绘制如图6所示的星光三组变形体工程地质剖面图。

3 倾倒变形体成因机制分析

通过对星光三组变形体的实地调查,以及对变形体工程地质条件的分析,作者认为影响星光三组变形体形成的主要因素有金沙江的快速下切、较高的水平地应力、地层岩性及结构组合。本文将利用离散元软件3DEC建立变形体典型剖面的地质模型,对各影响因素进行分析。

3.1 模型建立与参数选取

为方便建模与计算,按照1-1'剖面(见图1)简化

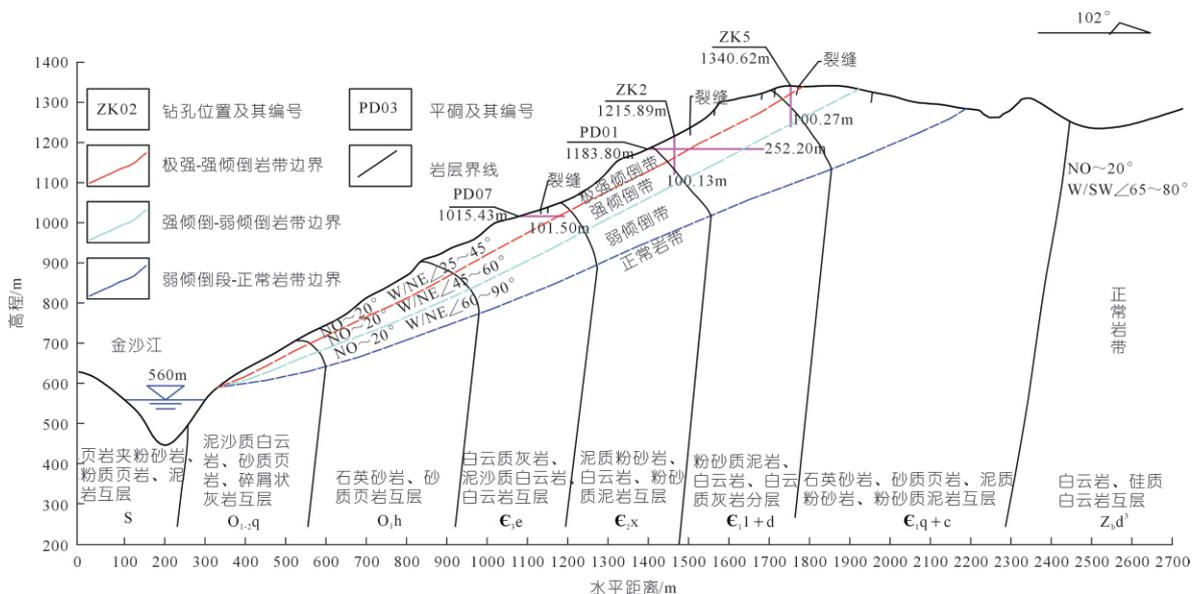


图6 星光三组变形体工程地质剖面示意

Fig. 6 Engineering geology profile of plasmodium

后建立了如图 7 所示的计算模型。简化后模型的坡角 α 为 35° , 岩层倾角 β 为 80° , 岩层间距为 10 m, 坡高 H 为 980 m。计算中的岩土体采用莫尔 - 库伦弹性本构模型, 结构面之间的滑动本构采用库仑滑动模型。岩体、结构面力学参数通过室内岩石力学试验以及岩土体物理力学参数综合类比对进行取值 (见表 2)。

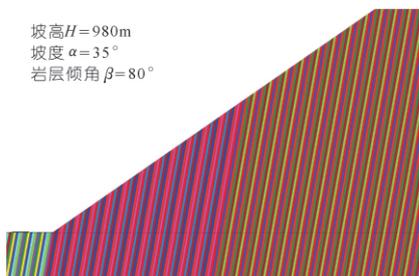


图 7 计算模型及监测点分布

Fig. 7 Numerical simulation model and monitoring points

表 2 岩体物理力学参数
Tab. 2 Calculation parameters

岩性	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	凝聚 力/MPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	抗拉强度/ MPa	切向刚度/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	法向刚度/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)
白云质灰岩	2540	3.45	1.83	6.590	32	0.42300		
粉砂岩	2460	2.25	1.65	4.320	30	0.47200		
泥岩	2590	6.39	3.68	3.540	36	0.69100		
页岩	2590	6.39	3.68	3.680	37	0.48100		
白云岩	2600	7.47	1.87	5.520	43	0.32400		
结构面				0.145	20	0.00373	900	1600

3.2 成因机理数值模拟

3.2.1 河谷下切作用分析

根据历史演变推测将星光三组岸坡还原至原始地平线, 分 5 次下切, 每次下切深度为 196 m, 由顶部高程 1 400 m 下切至高程 420 m (见图 8)。以此模拟金沙江下切对岸坡变形的影响。计算结果如图 9 所示。

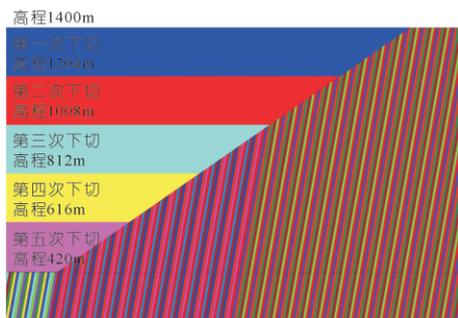


图 8 河谷下切过程

Fig. 8 Schematic diagram of river bed incising

从图 9 可以看出, 岸坡和位移量随着下切不断增大。在金沙江快速下切的过程中, 岸坡岩层在卸荷回弹与重力的共同作用下不断发生层间剪切错动 (见图

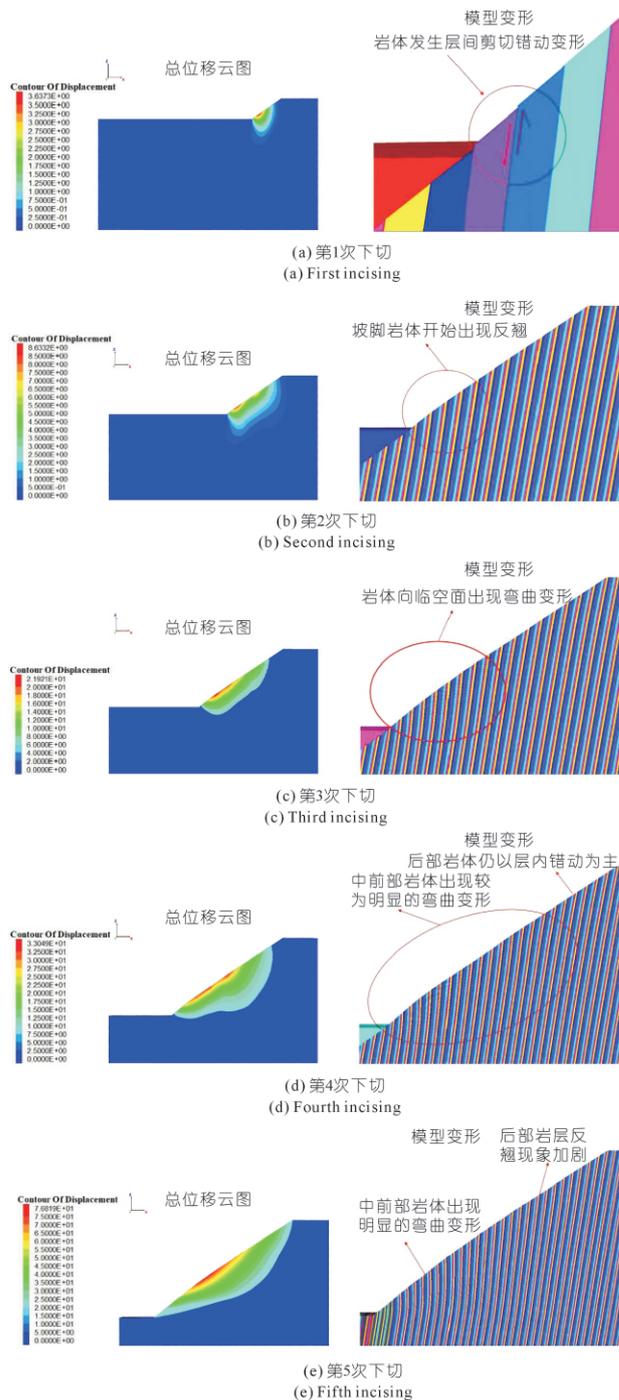


图 9 河谷下切过程中总位移云图及模型变形 (单位: m)

Fig. 9 Total displacement cloud diagram and model deformation in river incising process

9) 并对坡脚处岩体产生挤压作用, 导致坡脚岩体出现弯曲变形 (见图 9); 当下切至最大深度时, 高陡岸坡形成, 岸坡变形量和变形范围达到最大值, 最大达到 76 m (见图 5), 并且变形情况也发生了改变, 即岸坡前部岩体出现明显的倾倒弯曲, 而岸坡后部岩体层内剪切错动现象减弱转而发生弯曲变形。总体看来, 受金沙江快速下切的影响, 星光三组岸坡变形量和变形范围逐渐变大, 但变形主要集中在岸坡浅表部, 岸坡深部

岩体仅有小量变形。

3.2.2 构造挤压作用影响分析

根据前人对金沙江溪洛渡地区的地应力研究的结果^[17]，对模型施加新的应力边界，以模拟构造应力对星光三组岸坡的影响。经过计算与修正得到坐标应力值为

$$\sigma_x = 0.081H + 1.81 \quad (r = 0.9)$$

$$\sigma_y = 0.045H + 1.6 \quad (r = 0.9)$$

$$\sigma_z = 0.0265H$$

式中： r 为线性相关系数； H 为垂直深度。

计算结果（见图 10）与仅考虑金沙江下切（图 9（e））相比，施加构造应力场后，岸坡的变形范围与变形深度显著增大，由中前部岩体倾倒变形变为整体倾倒变形。

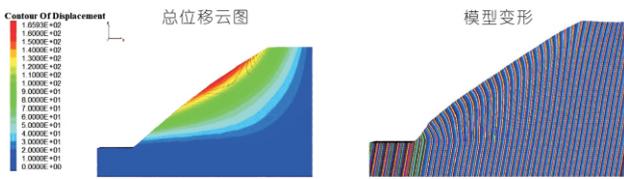


图 10 考虑构造挤压作用的总位移云图及模型变形

Fig. 10 Total displacement cloud diagram and model deformation considering tectonic extrusion

3.2.3 岩性组合影响分析

为考虑岩性组合对星光三组变形体的影响，将岸坡模型分别设置成硬岩、软岩、软硬相间 3 种岸坡模型。硬岩以白云岩为代表，软岩则选取泥岩，其具体参数如表 2 所列，计算结果如图 11 所示。

从图 11(a) 可以看出：当岩体全为软岩时，上覆岩体作用下坡体中下部地应力集中程度加剧，中下部岩体首先发生屈服，整个岸坡呈现滑移-弯曲式变形。从图 11(b) 可以看出：当岩体全为硬岩时，在河流的下切过程中，由于岩体力学参数较高，岩体自稳能力较强，仅在坡脚处岩层出现弯曲，岸坡整体主要以层内剪切错动变形为主。从图 11(c) 可以看出：当岩体为软硬相间时，岸坡中前部岩体表现为悬臂梁式倾倒变形，后部岩体以层面剪切错动为主。随着金沙江逐渐下切，由于岸坡中硬岩限制了中下部软岩的屈服变形，软岩向临空面发生弯曲倾倒，硬岩受到挤压会在弯度最大的地方发生折断，硬岩发生折断后，局部应力集中于软岩，导致软岩弯曲变形进一步加剧，以此循环，边坡呈现出悬臂梁式倾倒变形。

3.3 成因机制及形成演化模式分析

星光三组岸坡中的硬岩可以抵抗风化剥蚀作用而

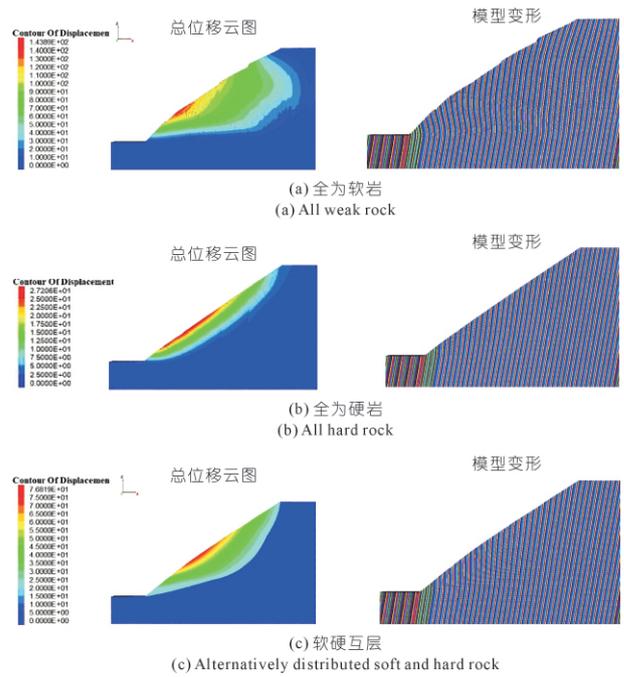


图 11 考虑岩性组合的总位移云图及模型变形（单位：m）

Fig. 11 Total displacement cloud diagram and model deformation considering lithology combination

保持坡体高陡，软岩可以防止坡体中快速形成贯通结构面，为形成大型倾倒变形体提供了物质基础。金沙江的快速下切，使得边坡前缘临空，与两侧深切的冲沟组合使得变形体整体呈现出三面临空的孤立脊状山体，为倾倒变形的发生提供了良好的地形条件。原本受到构造挤压而处于高地应力状态的岸坡因为河流的快速下切发生了卸荷回弹，导致了岸坡表面产生巨大拉应力（垂直于坡面），使得岩体在内部产生大量卸荷裂隙并将岩体切割成了薄层。随着时间的推移，原本顺层的星光三组岸坡在各因素的共同作用下发生了深层的倾倒变形。

通过对星光三组岸坡成因机制的分析，将其演化形成过程划分为卸荷变形阶段、时效变形阶段、灾变失稳阶段，各阶段的变形机制如下。

(1) 卸荷变形阶段。金沙江下切过程中，岩体在卸荷回弹作用下形成大量的卸荷裂隙，使得岩层变为薄层状，与此同时，还引发层面松弛进而导致层间抗剪强度降低。加上岸坡应力由水平应力转为竖直应力为主，岩层面法向应力（与层面垂直）的降低和切向应力（与层面平行）的增加，最终使得岸坡岩体发生层内剪切错动变形（见图 12(a)）。

(2) 时效变形阶段。随着金沙江的不断下切，层间错动加剧，坡脚岩体在上覆岩体的强烈挤压下，开始向临空面弯曲变形，岸坡前缘倾倒变形为上部岩体提供变形空间，在平行于坡面的最大主应力作用下，岸坡

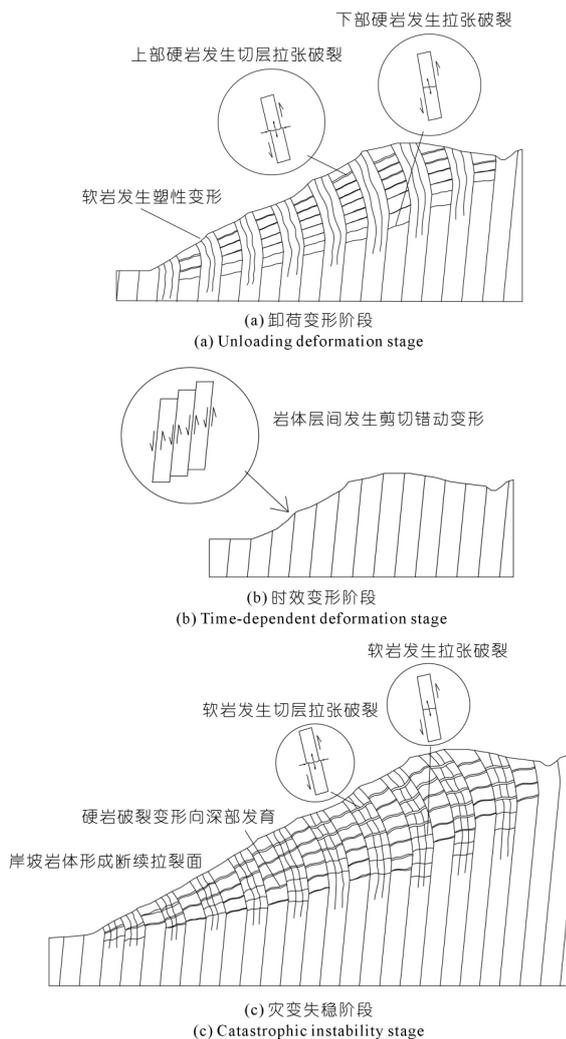


图12 倾倒塌变形演化形成阶段

Fig. 12 Sketch of toppling deformation evolution

中性质较软的岩石(泥质粉砂岩、页岩等)开始发生塑性变形,呈现出柔性弯曲变形的现象,而岸坡中性质较硬的岩石(白云岩、灰岩等)由于沿层理面及软弱岩带的剪切作用逐渐加剧,导致层内拉张效应逐渐增强,当错动面间的岩板承受的拉张应力超过其抗拉强度时,岩体发生脆性变形,产生层内拉张破裂和切层张剪破裂(见图12(b))。硬岩一旦发生变形破坏,会造成局部应力集中于软岩上,进一步使软岩弯曲倾倒塌加剧,以此循环,岸坡发生累进式变形破坏。

(3) 灾变失稳阶段。随着岸坡变高变陡,岸坡的地貌条件变得有利于岸坡倾倒塌变形的进一步发展。岸坡内软岩的柔性弯曲变形不断加剧,逐渐由塑性变形转变为脆性变形,在最大弯折或原有结构面部位产生层内拉张破裂和切层张剪破裂;而硬岩的倾倒塌折断变形也在不断向深部和下部扩展(见图12(c))。最终各层最大弯曲,弯折部位相互贯通,并形成倾向坡外的断续拉裂面,深层倾倒塌变形体形成;在地震、降雨、库水

长期作用的诱发下,折断面极可能贯通,导致岸坡发生整体的失稳破坏。

4 结论

(1) 根据对平硐内部岩体变形特征的调查统计,考虑岩体本身物理力学性质的差异性,将内部岩体变形分为倾倒塌、倾倒塌弯曲、倾倒塌折断3种类型。

(2) 综合星光三组变形体的地质条件与数值模拟的结果,总结出:① 断层挤压作用是岸坡整体发生明显的弯曲倾倒塌变形,并由原本顺向层状结构斜坡变为反向斜坡的关键原因。② 岸坡岩性总体软硬相间,岩体薄层状结构是星光三组岸坡发生倾倒塌变形的物质基础。③ 金沙江下切导致三面临空的地形为倾倒塌变形提供了有利的几何边界条件。④ 强烈的卸荷回弹是星光三组岸坡中前部岩体变形的重要因素。

(3) 星光三组变形体的演化过程主要经历卸荷变形、时效变形以及灾变失稳3个阶段。① 卸荷变形阶段岸坡岩层主要是岸坡上部发生层间错动;② 时效变形阶段为软硬岩发生交替破坏,变形破坏加剧,岸坡发生累进式变形破坏;③ 而灾变失稳阶段为随着倾倒塌变形的加剧,软岩由塑性变形转向为脆性变形,变形不断向深部发展,最终形成深层倾倒塌变形体。

参考文献:

- [1] 安晓凡, 李宁, 孙闻博. 岩质边坡倾倒塌变形机理及稳定性研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 1-11.
- [2] 张勇慧, 盛谦, 冷先伦, 等. 龙滩水电站左岸边坡二维位移反分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增2): 396-401.
- [3] 谢莉. 澜沧江黄登水电站右坝肩2号变形体成因控制条件及稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- [4] 苏立海, 李婉, 李宁. 反倾层状岩质边坡破坏机制研究: 以锦屏一级水电站左岸边坡为例[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(1): 109-114.
- [5] 员海. 黄河拉西瓦水电站坝区右岸边坡岩体卸荷特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [6] 林华章. 二古溪倾倒塌变形体成因机制分析及稳定性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [7] GOODMAN R E, BRAY J W. Toppling of rock slopes[C]//Proceedings of the ASCE Specialty Conference, Rock Engineering for Foundations and Slopes. Colorado: Boulder, 1976: 201-234.
- [8] 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.
- [9] 黄润秋, 李渝生, 严明. 斜坡倾倒塌变形的工程地质分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1165-1181.
- [10] 程东幸, 刘大安, 丁恩保, 等. 反倾岩质边坡变形特征的三维数值模拟研究: 以龙滩水电站工程边坡为例进行三维变形特征分析[J]. 工程地质学报, 2005(2): 222-226.
- [11] 张世殊, 裴向军, 母剑桥, 等. 溪洛渡水库星光三组倾倒塌变形体在水库蓄水作用下发展演化机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增2): 4091-4098.

- [12] 邓天鑫,巨能攀,李龙起,等. 陡倾顺层岩质斜坡动力倾倒变形机理研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(12): 146-152.
- [13] 郑达,王沁沅,毛峰,等. 反倾层状岩质边坡深层倾倒变形关键致灾因子及成灾模式的离心试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 1954-1963.
- [14] TAMRAKAR N K, YOKOTA S, OSAKA O. A toppled structure with sliding in the Siwalik Hills, Midwestern Nepal[J]. Engineering Geology, 2002, 64(4): 339-350.
- [15] 巨能攀,邓天鑫,李龙起,等. 强震作用下陡倾顺层斜坡倾倒变形机理离心振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 99-109.
- [16] 任光明,夏敏,李果,等. 陡倾顺层岩质斜坡倾倒变形破坏特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3193-3200.
- [17] 丁立丰,安其美,王海忠,等. 金沙江溪洛渡水电站水压致裂地应力测量分析研究[J]. 中国地震, 2004, 20(1): 95-100.

(编辑: 刘媛)

引用本文: 周永健,冯文凯,吴卓林,等. 溪洛渡库区星光三组岸坡倾倒变形成因机制分析[J]. 人民长江, 2021, 52(7): 108-114.

Formation mechanism of Xingguangsanzu toppling deformation in Xiluodu Reservoir

ZHOU Yongjian, FENG Wenkai, WU Zhuolin, YI Xiaoyu, YANG Jing, DUN Jiawei

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

Abstract: The bank slope of the Xingguangsanzu in the Xiluodu Reservoir underwent severe toppling deformation, changed from the original inclined steep-dip bedding slope to the counter-tilt layered slope. Special toppling deformations such as Xingguangsanzu have attracted attention from many scholars because its formation mechanisms are different from the conventional toppling deformations. In this paper, the engineering geological conditions, deformation and failure characteristics of the Xingguangsanzu toppling deformation body are described in detail, and the formation mechanism of the toppling deformation body is analyzed based on numerical simulation. The results show that the thin layer structure of the Xingguangsanzu bank slope are soft-hard interbedded rock slopes, which provides the material basis for the toppling deformation; while the tectonic compression and the rapid incising of the Jinsha River provide high horizontal geo-stress and terrain conditions for the toppling deformation; the deformation evolution process of the Xingguangsanzu bank slope can be divided into three stages: unloading deformation stage, time-dependent deformation stage and destruction and instability stage.

Key words: reservoir bank slope; toppling deformation; formation mechanism; numerical simulation; Xiluodu Reservoir