

文章编号: 1008-2786-(2018)3-411-11

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000337

雅砻江上游深层倾倒地发育特征及形成演化机制

王 飞¹, 唐辉明^{1,2*}, 章广成¹, 刘 晓²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074; 2. 教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 武汉 430074)

摘 要: 深层倾倒是雅砻江上游层状斜坡变形破坏的主要模式。利用基于演化过程的工程地质研究方法, 分析深层倾倒地工程地质特性和内部变形破坏-力学机制, 进行工程地质分区评价, 并从变形过程和演化阶段上定性认识斜坡的整体稳定性。研究表明: 区内深层倾倒地发育规模巨大、变形程度剧烈, 且具有明显的分区性, 为典型的互层倾倒地; 软硬相间的岩性组合、陡倾的岸坡结构, 加之垂直层面密集节理的切割是深层倾倒地形成的控制性因素。在叠加有残余构造应力的自重应力场中, 互层倾倒是受节理面和层面控制的复合倾倒地模式, 即: 硬岩发生块状-弯曲倾倒地, 而软岩发生弯曲倾倒地; 受河谷演化控制, 深层倾倒地主要经历 4 个演化阶段: 卸荷回弹陡倾面拉裂阶段, 初始变形阶段, 板梁根部折断、剪切面贯通阶段以及破坏阶段, 并最终转化为蠕滑-拉裂模式形成滑坡; 变形破坏模式的转化是深层倾倒地进入累进性破坏阶段的重要标志, 该滑动面受倾向坡外结构面控制, 主要发生在强变形岩体中, 而并非沿最大弯折带发育。

关键词: 雅砻江上游; 深层倾倒地; 形成条件; 演化机制; 稳定性评价

中图分类号: P642

文献标志码: A

倾倒地破坏是指斜坡中相互作用的板梁或岩柱(块), 在弯曲或转动作用下, 向坡外发生整体倾覆的现象^[1,2]。主要发育在陡立或陡倾内层状体组成的中-极陡斜坡体内^[3], 其基本类型有: 弯曲倾倒地、块状倾倒地以及块状-弯曲倾倒地^[2]。国内外层状斜坡倾倒地失稳破坏的灾难性事故时有发生, 据不完全统计, 由此诱发的滑坡约占国内滑坡总数的 33%^[4]。近年来, 随着我国水电开发不断向上游推进, 一批深达 200 ~ 300 m 的深层倾倒地被揭露, 完全颠覆了以往对倾倒地发育深度仅数十米的认识^[5-8]。因此, 准确评价深层倾倒地稳定性已成为上游水电开发的重大工程地质问题。

斜坡倾倒地破坏稳定性评价一直是工程地质研究

的热点。Goodman 和 Bray^[2] 最早提出了基于极限平衡理论的稳定性评价方法。之后, Zambak^[9]、陈祖煜等^[10]、Bobet^[11]、Sageseta 等^[12]、Liu 等^[13] 对该方法进行了改进, 使其更具一般性。然而, 该方法仅适用于受控于潜在破坏面的浅层倾倒地, 对于受变形控制的深层倾倒地稳定性问题并不适用^[14]。鉴于此, 本文选取雅砻江上游反倾斜坡中发育的深层倾倒地作为研究对象, 开展基于演化过程的倾倒地斜坡工程地质研究。从赋存环境、发育特征、形成条件等基础层面上, 深入了解深层倾倒地的工程地质特性和内部变形破坏地质-力学机制, 构建倾倒地工程地质模型, 进行工程地质分区评价, 并从变形过程和演化阶段上定性认识斜坡整体稳定性。

收稿日期 (Received date): 2018-4-7; **改回日期** (Accepted date): 2018-6-12

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金重点项目 (41230637); 国家自然科学基金面上项目 (41572279)。[Key Program of National Natural Science Foundation of China (41230637); General Program of National Natural Science Foundation of China (41572279)]

作者简介 (Biography): 王飞 (1987-), 男, 江苏泰兴人, 博士研究生, 主要研究方向: 地质工程与岩土工程。[WANG Fei (1987-), male, born in Taixing, Jiangsu province, Ph. D. candidate, research on geological engineering and geotechnical engineering] E-mail: cugfei wang@gmail.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 唐辉明 (1962-), 男, 江苏东台人, 博士, 教授, 主要研究方向: 地质工程与岩土工程。[TANG Huiming (1962-), male, born in Dongtai, Jiangsu province, Ph. D., professor, research on geological engineering and geotechnical engineering] E-mail: hmtang6205@sina.com

1 工程地质条件

1.1 地理位置

雅砻江地处青藏高原东南部,系金沙江最大支流,全流域以两河口水电站以上为上游河段。根据地形地貌、地层岩性、地质构造、物理地质现象等基本地质条件,上游河段又可划分为:长须贡马以上段、长须贡马~甘孜段以及甘孜以下段。本文研究区为甘孜以下段,该河段为甘孜县城至新龙县和平乡,全长约 158 km(图 1)。

1.2 地形地貌

研究区河段属典型的高山峡谷地貌。区内河流深切、岸坡陡峻,河谷相对高差达 500~800 m,岸坡坡度一般 50°~60°,属中等切割~强切割高山区。雅砻江在该河段由北向南呈 SE 向流动,河谷形态主要呈“V”型,仅局部为浅“U”型,两岸阶地断续出现。其中峡谷段谷底宽度 50~150 m,最窄处仅 15~20 m,水流湍急,两岸冲沟发育。宽谷段谷底宽度 200~300 m,河谷开阔,阶地发育。

1.3 地层岩性

研究区河段两岸主要发育地层为三叠系上统两

河口组下段(T_3lh^1),并零星出露有两河口中段(T_3lh^2)和三叠系上统雅江组中段(T_3y^2)。其中:两河口组岩性为中厚层石英砂岩与薄层状绢云母板岩互层,板岩:砂岩=3~5:1~2;雅江组岩性为厚层~块状粉砂质绢云母板岩夹成段岩屑石英砂岩,砂岩较少,可称为“板岩”段。

此外,研究区河段第四系地层也较发育,主要为分布于现代河床、河漫滩及高低阶地的冲积堆积,沿河两岸坡脚及缓坡地带的崩坡积、坡残积堆积,较大冲沟口的洪积堆积以及塌滑堆积等。

1.4 地质构造

研究区构造位置上处于“川滇菱形断块”西北部的雅江-九龙断块内部。内部构造以褶皱体系为主,总体上表现出较强的塑形变形特征,展布方向有 SN 向、NNW 向、弧形、NE 向等。陡倾内层状结构是雅砻江上游最主要的岸坡类型,斜坡岩体结构主要受层面构造和一组垂直层面的节理所控制,节理倾向坡外,间距 0.3~1 m。该组节理密集发育于较硬的砂岩中,有一定张开度,将层状岩体切割成一个个短柱状(图 2)。

1.5 河谷演化

研究区雅砻江主要沿背斜核部发育,河谷演化

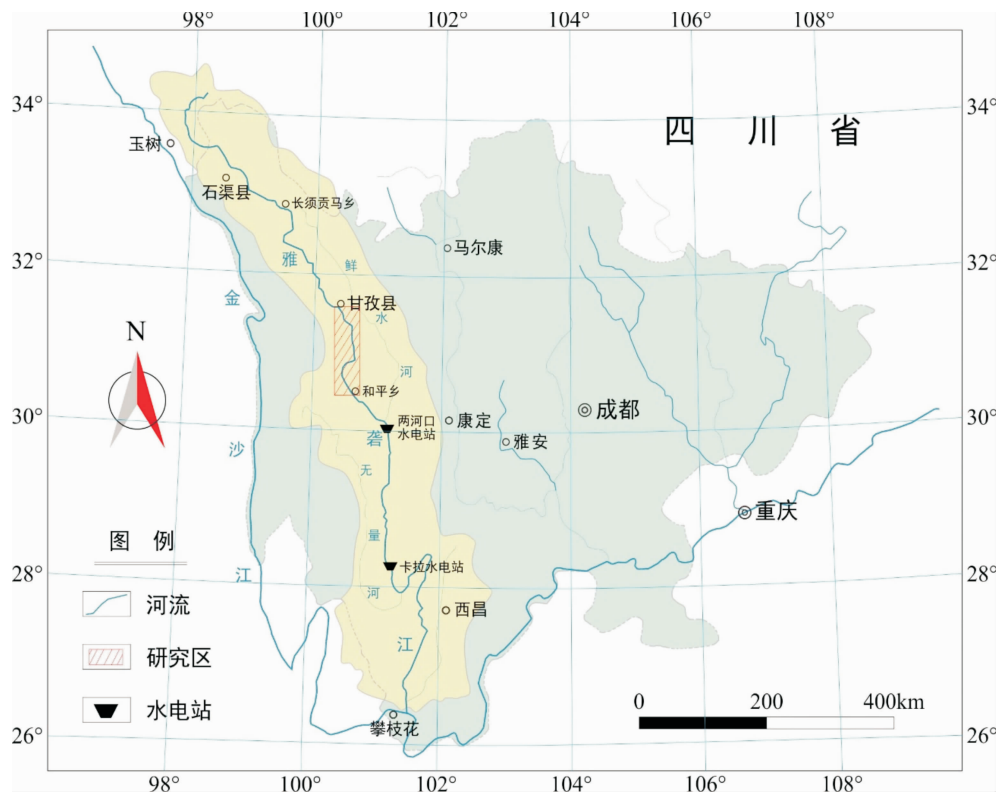


图 1 雅砻江流域地理位置示意图

Fig. 1 Geographic location map of the Yalong River Basin



图2 研究区反倾斜坡坡体结构特征

Fig. 2 Structural characteristics of anti-inclined rock slope in the research area

过程整体上具有从左岸向右岸逐渐偏移-下切的特征。自第四纪以来,地壳表现为加快的间歇性整体抬升,主要经历了宽谷期和峡谷期两个阶段^[15],分别形成了上部的3级宽谷面和下部5~6级河流阶地(图3)。受河谷地貌演化所控制,区内斜坡整体具有上缓下陡的特征。

2 深层倾倒地发育特征

2.1 倾倒地分布规律

深层倾倒是研究区反倾层状斜坡变形破坏的一种最主要方式,其分布之密、规模之大实属罕见。区内深层倾倒地分布位置和相关说明见图4和表1,主要表现出以下几个特点:

(1)主要发育于“V”型峡谷河段,仅新龙倾倒地发育于宽谷段,其发育深度也相对较小。可见坡高、坡形等地形地貌特征是倾倒地发育深度较深的影响因素之一;

(2)均发育在三叠系上统两河口组下段(T_3lh^1)砂、板岩互层地层中,岩层陡倾坡内。在研究区这种特定自然地质条件下,该地层是深层倾倒地变形体发育的一个基本条件;

(3)集中分布在雅砻江右岸,构造上均处于背斜的西翼,为单斜地层。这与雅砻江不断深切并向右岸侵蚀有关,这应该是深层倾倒地形成演化的主要触发因素;

(4)多发生在斜向谷~纵向谷河段。斜坡岩层走向与河流走向近于平行或小角度相交,该岸坡结

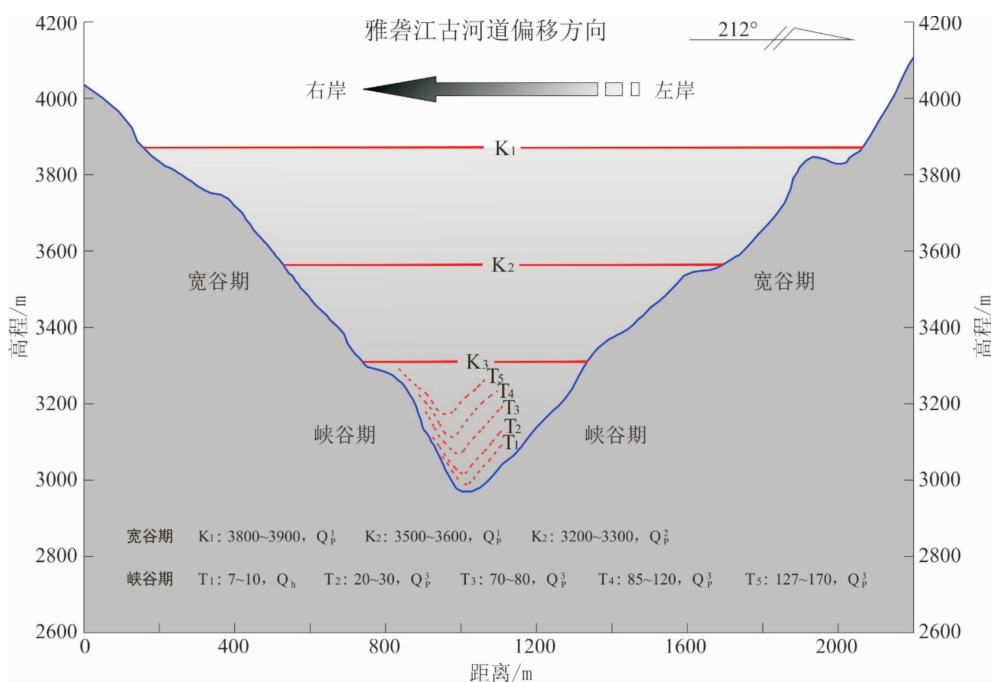


图3 研究区雅砻江河谷演化模式图

Fig. 3 Evolution pattern of the Yalong River in the research area

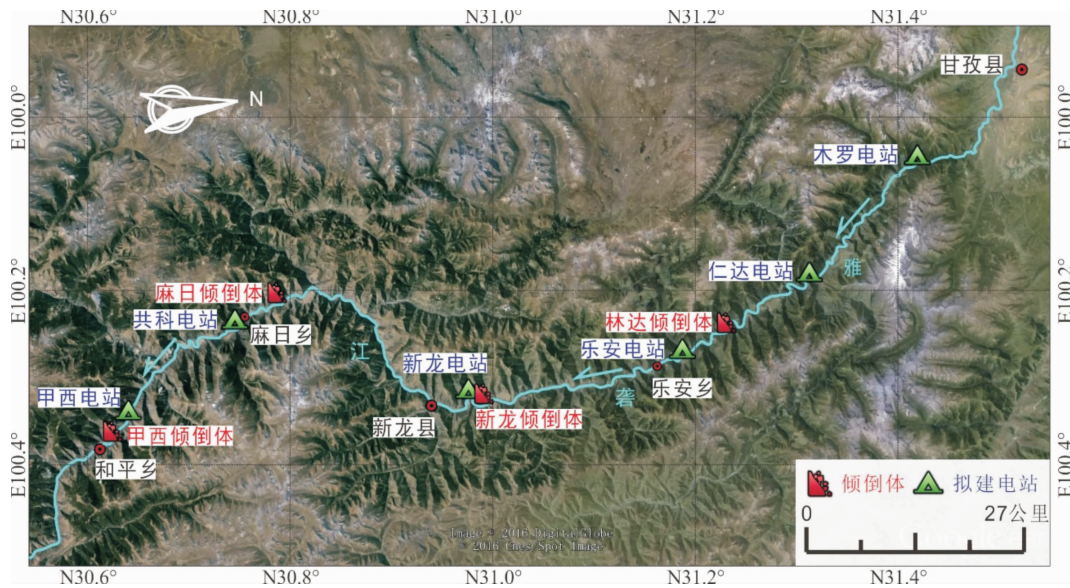


图 4 研究区深层倾倒体分布地理位置示意图

Fig. 4 Distribution of deep-seated topplings

构类型是倾倒发生的前提条件之一。

2.2 典型倾倒体实例

研究区深层倾倒体各具特点,其中林达与麻日倾倒体发育特征相似。本节以典型深层倾倒体为例,分述各倾倒体特征。

(1)新龙倾倒体

新龙倾倒体平面上呈长条形沿江分布,总面积约 $38 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。变形体前缘位于 I 级阶地之上,后缘覆于 V 级阶地之下,相对高差约 300 ~ 310 m。斜坡整体上具有上缓下陡的特征,后缘坡度 $10^\circ \sim 20^\circ$,中部和前缘坡度 $40^\circ \sim 60^\circ$ 。

根据地表调查和勘探成果,按物质组成和结构特征,新龙倾倒体主要由两部分组成(图 5):

a)强变形区

强变形区分布于坡体表部,发育深度一般为 40 ~ 50 m,岩层倾角介于 $10^\circ \sim 40^\circ$ 。平硐内可见明

显的弯曲、折断现象,楔形缝发育且张开,局部贯通性较好。受强风化卸荷作用的影响,岩体普遍松弛~松动,各向裂隙普遍锈染及张开,并充填岩块岩屑及次生泥,岩体结构主要呈碎裂状结构,部分散体结构,块体自稳能力较差。

b)弱变形区

弱变形区分布于坡体深部,为变形过渡区,发育深度一般为 80 ~ 100 m,岩层倾角介于 $40^\circ \sim 70^\circ$ 。平硐揭露弱变形区主要为弱风化卸荷,岩体结构紧密,未见明显折断现象,楔形张裂缝零星发育,且张开度和贯通性较差,岩体普遍松弛,块体自稳能力相对较好。

(2)林达倾倒体

林达倾倒体平面上呈一锥形,总面积约 $76 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。该倾倒体边界条件明显,两侧以冲沟为界,后缘将坡顶截断,前缘直抵河床,相对高差达 678 m。

表 1 研究区深层倾倒体基本信息

Tab. 1 Basic information of deep-seated topplings in the research area

倾倒体名称	库区	距坝址/km	地形	地层	岸别	发育规模			
						长/m	宽/m	变形深度/m	滑动体积/($\times 10^4 \text{ m}^3$)
林达倾倒体	乐安	5.60	“V”型	$T_3 l h^1$	右岸	1050	1200	>228	3900
新龙倾倒体	新龙	0.09	“U”型	$T_3 l h^1$	右岸	410	1400	80 ~ 100	—
麻日倾倒体	共科	5.80	“V”型	$T_3 l h^1$	右岸	1377	703	>180	4095
甲西倾倒体	甲西	2.70	“V”型	$T_3 l h^1$	右岸	467	545	75 ~ 80	326

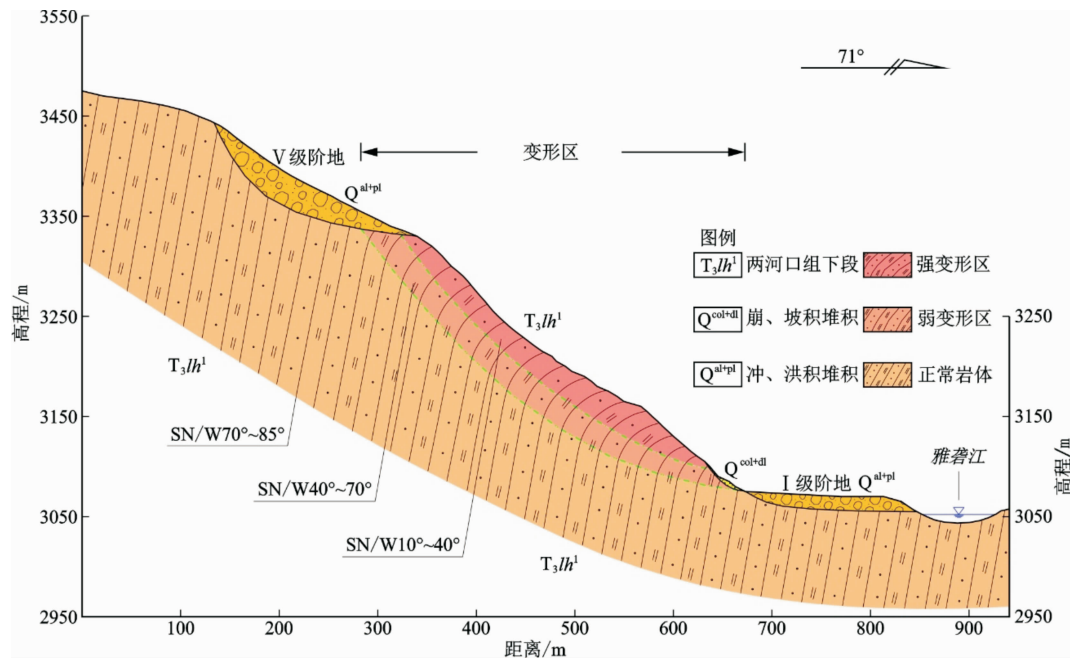


图5 新龙倾倒地工程地质剖面图

Fig. 5 Engineering geologic profile of the Xinlong toppling

变形区整体坡度较陡,且前缘较后部要陡。前缘临河坡度约 $40^{\circ} \sim 43^{\circ}$,中部约为 38° ,上部坡度约为 $36^{\circ} \sim 41^{\circ}$ 。

根据地表调查和勘探成果,按物质组成和结构特征,林达倾倒地主要由三部分组成(图6):

a) 滑动区

滑动区位于坡体上部,其后缘高程约为 3765 ~ 3775 m,出露有约 10 m 高的基岩陡坎,前缘直抵河床。后缘陡坎为强变形岩体,岩层近水平,垂直层面节理裂隙发育。由此可见,滑动区为强变形岩体沿

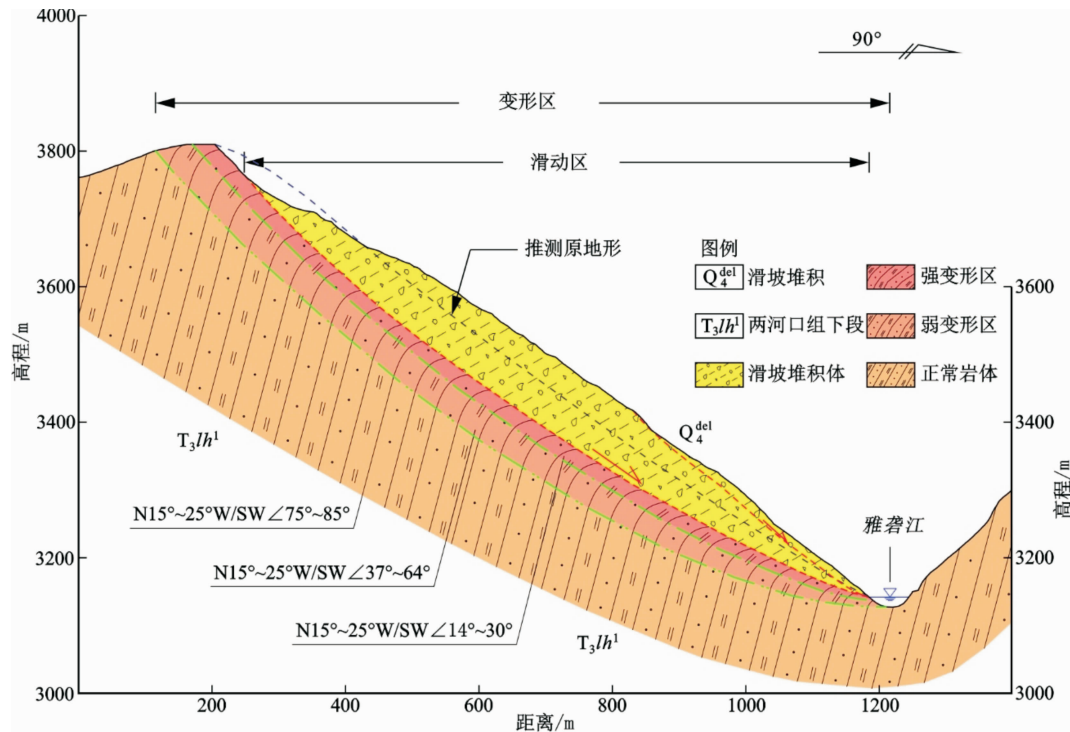


图6 林达倾倒地工程地质剖面图

Fig. 6 Engineering geologic profile of the Linda toppling

垂直层面节理面发生剪切滑动所形成。

滑动区总体呈中间厚、两头薄的形态,平均厚度约 65 ~ 70 m,最大可达 90 多米,总方量约 $3900 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑体主要由未解体的强变形岩体和块碎砾石土组成;块碎砾石土主要分布在滑体表部,为崩坡积物,厚度约 15 ~ 35 m,结构整体较密实,但风化、侵蚀现象剧烈。坡体表部冲沟发育,冲沟内可见下部大片未解体板状岩体;滑体内部为未解体的强变形岩体,该部分岩体虽已发生过明显的倾倒和滑动,但成层性仍保持相对较好,其岩层缓倾坡内,倾角约为 $10^\circ \sim 25^\circ$ 。受风化卸荷作用的影响,岩体普遍松动,节理裂隙发育,岩体结构主要呈碎裂状结构,部分散体结构,块体自稳能力较差。

b) 强变形区

强变形区分布于滑动区下部,其发育深度一般为 160 ~ 200 m,岩层倾角介于 $14^\circ \sim 30^\circ$ 。该部分岩体倾倒变形剧烈,平硐内可见明显的弯曲、折断现象,顺层挤压带发育。此外,板状岩体中楔形缝发育且张开,局部贯通性较好。受风化卸荷作用的影响,岩体普遍松弛 ~ 松动,岩体结构主要呈块裂状,整体较稳定。

c) 弱变形区

弱变形区位于坡体深部,发育深度大于 228 m,平硐和钻孔均未揭露底界面。其倾倒变形程度相对强变形区要弱,岩层倾角介于 $37^\circ \sim 64^\circ$ 。该变形区对应于弱风化、弱卸荷区,岩体结构相对紧密未见明显折断现象,楔形张裂缝零星发育,且张开度和贯通性均较差,岩体普遍松弛,块体自稳能力整体较好。

(3) 甲西倾倒体

甲西倾倒体发育于脊状山体的端部,在平面上呈一锥型,总面积约 $20 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。该倾倒体前缘直抵河床,后缘位于山脊顶部,相对高差达 442 m。斜坡整体坡度呈陡 - 缓 - 陡的形态,坡体后缘平均坡度约为 44° ,中部约为 37° ,前缘约为 51° 。

根据地表调查和勘探成果,按物质组成和结构特征,甲西倾倒体主要由三部分组成(图 7):

a) 堆积区

甲西倾倒体表部岩土体于 1952 年发生整体滑动,形成高约 40 m,宽约 500 m 的堵江坝体,并在斜坡上形成了“U”型边界。堆积体前缘直达对岸斜坡基岩上,高程约为 2900 m,后缘形态与目前堆积区后缘形态接近,高程约为 3160 m。后堵江坝体被冲

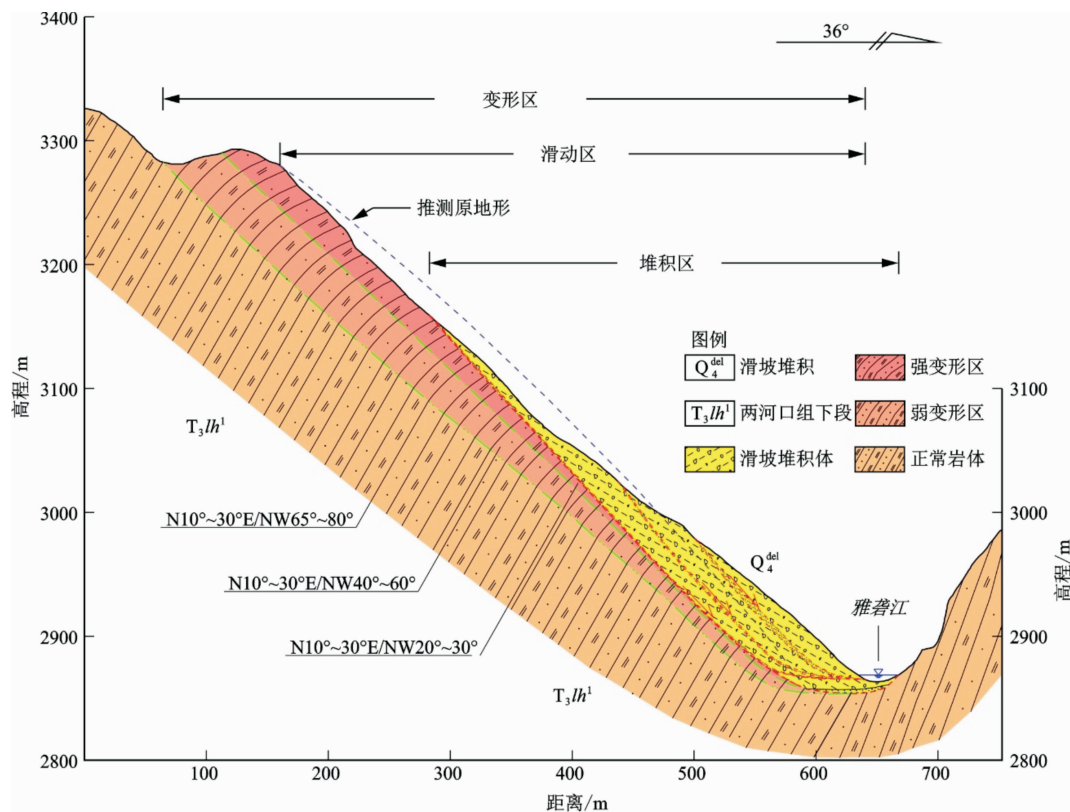


图 7 甲西倒体工程地质剖面图

Fig. 7 Engineering geologic profile of the Jiaxi toppling

开,形成了目前的堆积区形态。

b)强变形区

强变形区分布于滑动区下部,岩层倾角介于 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。受早期滑动影响,强变形区后部裸露,为滑动区后缘滑壁。中前部覆于堆积体下部,一般埋深 $45\sim 50\text{ m}$ 。后缘滑壁为节理的贯通面,主要受一组顺坡向发育的裂隙所控制,其高程约为 $3160\sim 3270\text{ m}$,平均宽度约 200 m ,纵向长约 116 m 。滑壁表面凹凸不平,可见新近发育的滑塌或滑塌空腔,坡度约为 45° 。

强变形区岩体倾倒地变形剧烈,节理裂隙发育。受强风化、卸荷作用的影响,岩体楔形缝发育且张开,局部贯通性较好。岩体普遍松弛~松动,结构主要呈块裂状,块体稳定性较差。

c)弱变形区

弱变形区分布于坡体深部,为变形过渡区,其变形程度比强变形区要弱,岩层倾角介于 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,发育深度约 $65\sim 70\text{ m}$ 。弱变形区对应于弱风化、卸荷区,岩体结构相对紧密,未见明显折断现象,楔形张裂缝零星发育,且张开度和贯通性均较差,岩体普遍松弛,块体自稳能力整体较好。

由上可见,研究区深层倾倒地具有相同的变形破坏模式,但均处于不同演化阶段。新龙、林达、甲西倾倒地分别代表了斜坡变形破坏的三个不同演化阶段,即:斜坡变形、破坏和破坏后的继续运动,从而揭示了深层倾倒体的变形破坏演化过程。

2.3 倾倒地基本特征

研究区深层倾倒地虽各具特点,但又存在一定的共性,具体特征如下:

(1)变形规模巨大

研究区深层倾倒地体长、宽都是在数百米以上,变形深度也在百米以上,仅表层滑动体体积就可达数百万至数千万方。如林达倾倒地平面展布面积 $76\times 10^4\text{ m}^2$,已揭露变形深度达 228 m ,且未能揭露正常岩体,表层滑动体体积达 3900 万 m^3 。如此规模巨大的倾倒地分布,实属罕见。

(2)变形程度剧烈

研究区深层倾倒地倾倒地变形剧烈,岩层倾角从直立变缓直至近水平。平硐内明显可见岩层弯曲、折断现象,楔形缝发育,局部贯通。此外,变形岩体具有明显的分区性,从外向里可分为:滑动区、强变形区和弱变形区,其划分标准见表2。

(3)变形模式复杂

互层倾倒是研究区深层倾倒地变形破坏的基本类型。变形初期以陡倾坡内的层面为主导作用,发生倾倒地变形。之后,随原有倾向坡外的垂直层面裂隙不断变陡,斜坡的继续变形将受这些倾向坡外的破裂面所控制,从而转为蠕滑-拉裂模式。值得注意的是,倾倒地滑移破坏并未沿最大弯折带,而是受强变形岩体中变陡的垂直层面节理贯通所控制。

(4)剪出口位于河床上部

研究区深层倾倒地变形区和滑动区前缘出口都位于河床上部或Ⅰ级阶地的上部,且滑动区物质将Ⅰ级阶地所覆盖。由此可见,研究区倾倒地失稳滑动均发生在Ⅰ级阶地形成以后,而且坡体岩体的倾倒地变形也随河谷的下切而不断演化。因此可以推断,雅砻江的不断侵蚀下切是深层倾倒地形成演化的主要触发因素。

表2 深层倾倒地变形分区划分标准
Tab. 2 Criterion of deformation division of deep-seated toppling

变形分区	基本特征	岩层倾角 /($^{\circ}$)	节理裂隙	风化 卸荷	松弛程度	岩体结构
滑动区	高速滑动前	10~25	楔形张裂缝发育, 贯通性较好	强	普遍松动,块体 自稳能力较差	碎裂结构~ 散体结构
	高速滑动后	无层理	普遍发育和贯通	强	普遍松动,自稳能力差	散体结构
强变形区	强倾倒地变形	10~40	楔形张裂缝发育, 局部贯通性较好	强	普遍松弛~松动, 块体自稳能力一般	碎裂结构,部 分散体结构
弱变形区	弱倾倒地变形	40~70	楔形张裂缝发育, 贯通性较差	弱	普遍松弛,块体 自稳能力较好	碎裂结构

3 深层倾倒地形成演化机制

3.1 倾倒地形成条件

研究区深层倾倒地是内、外因素共同作用下长期演化的产物,其形成机制受诸多因素控制。

(1) 内部因素

应力状态的改变是推动斜坡变形破坏演化的内在原因,它主要受原始应力状态、坡形、斜坡岩体特性和结构特征的影响。

a) 原始应力状态的影响。研究区褶皱构造发育、地应力量级较高,基本上处于近东西向现代构造应力场中,该主压应力方向与近 SN 走向的雅砻江垂直。由河谷演化形成的岸坡内发生明显的应力分异现象,并保存有较高的水平剩余应力。在侧向水平应力作用下,斜坡中坡底切向应力和坡缘张应力显著提高,从而使斜坡更易遭受变形与破坏;

b) 坡形的影响。研究区河谷呈典型的“V”型峡谷地貌,两岸岸坡陡峻,河谷狭窄。其河谷宽度仅为数十米,岸坡坡度一般为 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$,坡高可达上千米。该坡体形态,使坡内各处应力值显著增高,并在坡脚和谷底形成一个较强的剪应力集中带。此外,研究区深层倾倒地均发育脊状岸坡的端部,使斜坡处于三面临空状态。三面临空的条件,解除了斜坡岩体侧向约束条件,从而为斜坡岩体在自重作用下发生倾倒地变形提供了有利条件;

c) 斜坡岩体特性和结构特征的影响。研究区深层倾倒地主要发育于三叠系上统两河口组下段(T_3lh^1),岩性为变质石英砂岩与板岩不等厚互层,岩层陡倾坡内,倾角一般为 $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$,走向与河流流向近平行或小角度相交,为斜向谷~纵向谷。岩体特征方面,该类斜坡为一典型的软硬互层结构,其中砂岩表现为脆性,板岩表现为塑性。由于砂岩和板岩在物理力学性质上的巨大差异,在构造变形中将产生明显的不协调变形。这种不协调不仅会在接触带附近产生剪应力集中形成软弱结构面,而且还会加剧各自的变形响应程度,并在脆性砂岩中形成密集的垂直层面节理。此外,在变形过程中板岩受挤压变软,形成倾向坡内的易压缩层,可使上覆岩体中可能破坏区有明显的增加与扩大,这可能就是区内倾倒地变形深度较深的主要原因。结构特征方面,该类斜坡为典型的反倾层状岸坡结构,这是斜坡发生倾倒地变形的前提条件之一。

(2) 外部因素

在内、外营力作用下,斜坡的外形、内部结构以及应力状态都在不断改变,这些内、外动力环境则是推动斜坡发展演化的外部因素。研究区内,影响倾倒地形成的外部因素主要由以下几方面:

a) 河谷演化。研究区雅砻江主要沿背斜核部发育,经历了宽谷期和峡谷期两个演化阶段。进入峡谷期后,新构造运动强烈,地壳快速抬升,河流下切迅速。随着雅砻江持续下切,河谷岸坡越来越高、越来越陡,为斜坡变形提供了有利的临空条件和卸荷边界。侧向的卸载导致坡体内部应力环境变迁,形成新的拉裂面,并使得岸坡岩体中的各类既有结构面向临空方向扩张,同时形成了一些所谓的重力裂隙,岩体完整性及稳定性发生渐进性衰退,从而促进斜坡在重力作用下向临空方向发生倾倒地变形。此外,研究区雅砻江具有从左岸向右岸逐渐偏移~下切的特征,这也就是深层倾倒地均发育于右岸的根本原因;

b) 风化卸荷。研究区风化卸荷强烈,且深度较深。在卸荷作用下,坡体软硬互层结构发生差异卸荷回弹,使岩体发生张破裂和剪切破坏。这不仅促进了斜坡倾倒地变形的发生,也为风化作用提供了通道。区内风化作用主要沿层面和卸荷裂隙发育,从而降低斜坡的抗变形、抗破坏能力,有助于斜坡岩体倾倒地变形的发生;

c) 暴雨及地震。研究区地震基本烈度为Ⅶ度,近期经历了汶川、庐山两次大地震。在地震动力集中荷载作用下,坡体应力状态发生改变,岩体进一步破碎,加之暴雨作用,进一步促进斜坡变形和破坏。但在研究区暴雨和地震的影响总体较小。

3.2 倾倒地演化过程

研究区深层倾倒地,是在叠加有残余构造应力的自重应力场中长期演化的产物。变形初期,在自重应力场作用下,短柱状砂岩块体沿节理面发生倾覆和累计滑动,形成假似的连续弯曲现象,即块状-弯曲倾倒地;另一方面,连续的板岩向临空方向作悬臂梁弯曲,形成典型的弯曲倾倒地现象,并在受拉面产生拉张裂隙。在这种复合倾倒地模式下,斜坡岩体整体发生倾倒地变形。之后,随原有倾向坡外的垂直层面裂隙不断变陡,斜坡的继续变形将受这些倾向坡外的破裂面所控制,从而转为蠕滑-拉裂变形,并最终发展成滑坡。

受河谷演化的控制,研究区深层倾倒地主要经

历了以下4个演化阶段:

(1) 卸荷回弹陡倾面拉裂阶段

如图8a所示,该阶段对应于河流发育的初级阶段,即宽谷期。在地壳稳定期河流以侧蚀为主形成前缘临空面。初始临空面形成过程中,由于原始地应力较高,斜坡岩体伴随着强烈的卸荷回弹作用。受软硬互层反倾斜坡特殊坡体结构的影响,卸荷条件下坡体内强度差异较大的岩体往往表现出不同的响应机制,在坡体中分别产生张性破裂和剪切破裂现象,从而为斜坡岩体发生倾倒变形提供了良好的先决条件。研究区深层倾倒地均已经历了该变形阶段。

(2) 初始变形阶段

如图8b所示,宽谷面形成以后,河谷演化呈明显的加快趋势,从而进入强烈间歇性下切的河流发展时期,即峡谷期。该阶段河谷形态明显变窄,岸坡逐渐变陡,从而在坡脚形成剪应力集中带。坡脚岩体在剪应力作用下发生剪切滑动,为坡体后部岩体发生倾倒变形提供了临空条件。斜坡形成以后,坡体内应力场转化为以自重应力为主,岩体在自重作用下于坡体前缘开始发生整体的倾倒变形,弯曲的板梁之间以及垂直层面的拉裂缝之间均产生相互错动,并不断向坡后发展,直至将坡顶截断。

变形过程中,砂岩表现为刚性块体,不能发生自

身的塑形弯曲,其变形主要受垂直层面的张性破裂控制。受张破裂切割形成的矩形块体沿节理面发生累积滑动,形成假似的连续弯曲现象,即块状-弯曲倾倒。而另一方面,板岩由于自身的塑性,在重力作用下即可发生连续板梁的弯曲,形成典型的弯曲倾倒现象,并在受拉面产生拉张裂缝。在这种复合倾倒模式下,斜坡岩体整体发生倾倒变形。弯曲的板梁之间相互错动,在坡体上形成反坡台坎,但由于砂岩发生块状-弯曲倾倒变形受众多小位移的控制,坡体上拉张裂缝并不发育。研究区新龙倾倒地正处于这一变形阶段。

(3) 板梁根部折断、剪切面贯通阶段

如图8c所示,随着河谷的进一步下切,前缘临空面变陡,斜坡岩体倾倒变形加剧,拉裂面向深部扩展并向坡后推移,直至坡表岩层近水平。根据岩层倾角的大小,可将倾倒岩体划分为强变形区和弱变形区。在弯曲作用下,板岩最终将沿强变形区底部发生根部折断。至此,斜坡倾倒变形终止,从而进入累进性破坏阶段。

与传统倾倒变形不同,这类深层倾倒体的破坏并非沿底部弯折带发展,而是受倾向坡外的结构面所控制,主要发生在强变形岩体中。在倾覆或倾倒作用下,薄而软的板岩在弯曲作用下于受拉面形成的倾向坡外的断续拉张裂缝与砂岩中顺坡向卸荷拉

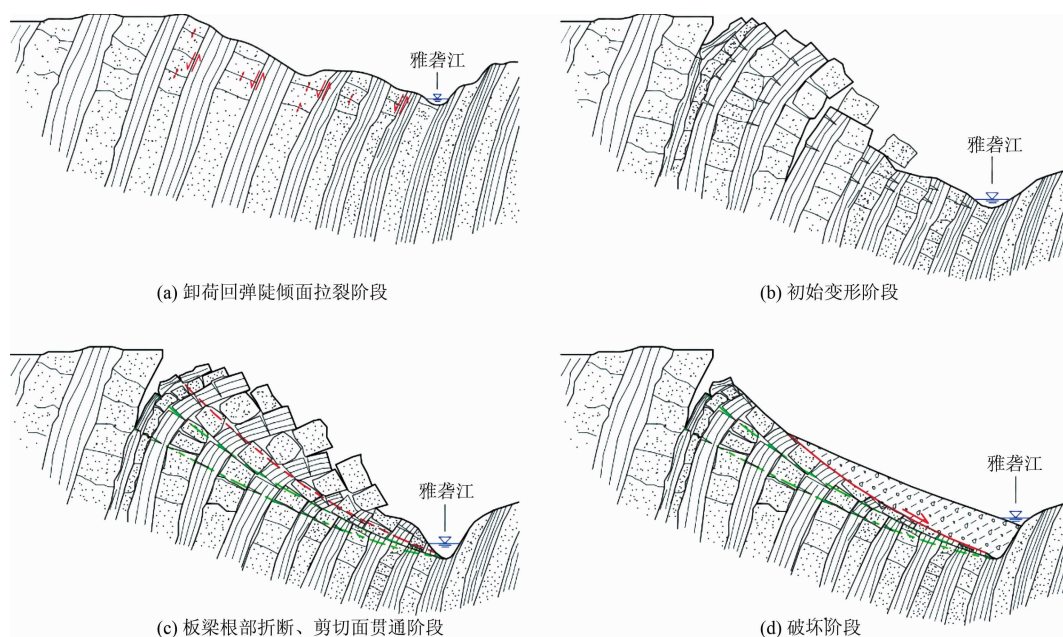


图8 研究区深层倾倒地演化模式图

Fig. 8 Evolution pattern of deep-seated toppling in the research area

(a) unloading and rebound; (b) initial deformation; (c) breaking in flexure; (d) failure as landslide

裂缝不断变陡,并最终相互贯通形成统一的剪切滑动面,从而使斜坡变形转变为蠕滑-拉裂模式。受强倾倒变形的影响,剪切面往往陡倾坡外,其剪应力集中程度较高,在内、外营力作用下极易发生整体滑动。

该阶段,坡体后部一般发育有近直立的基岩陡坎,陡坎岩性为近水平的强变形岩体,这是野外判定斜坡变形进入累进性破坏阶段的重要标志。因坡体未发生整体高速滑动,滑动区岩土体仍能保持较好的层理性,其产状与后缘陡坎出露强变形岩体相近,但岩体内节理裂隙发育,完整性相对较差。目前,研究区林达和麻日倾倒体均处于该阶段。

(4) 破坏阶段

如图 8d 所示,现代河床已基本形成,河流演化进入相对稳定时期。破坏阶段,滑动区岩土体在暴雨、地震等内、外营力作用下,沿贯通的剪切面发生高速整体滑动,形成滑坡,并发生堵江。受高速滑动和风化卸荷作用,原滑动区内未完全解体板状岩体进一步分解,并最终完全丧失层理性,从而形成整体的块碎土堆积体。堆积体主要堆积于坡体的中前部,其前缘直达对岸岸坡一定高度。滑动后,斜坡后部出露有大片滑坡壁,为节理的贯通面,滑坡壁凹凸不平,以崩滑为主,可见滑塌空腔。后在江水冲刷作用下,堵江坝体被冲开发生溃坝,并在下游形成涌浪,从而形成最终变形体形态。研究区甲西倾倒体即处于该阶段,之后斜坡的变形主要以表层堆积体的局部复活为主。

4 结 论

本文通过对研究区深层倾倒体发育特征的调查,分析总结了深层倾倒体的形成演化机制,得出以下几个主要结论:

(1) 研究区三叠系地层中出露的深层倾倒体为典型的互层倾倒,其发育规模巨大、变形程度剧烈、具有明显的分区性。深层倾倒体从外向里可分为:滑动区、强变形区和弱变形区。

(2) 研究区深层倾倒体是内、外因素共同作用下的产物,其形成机制主要受岸坡岩体特性和结构特征的影响。软硬相间的岩性组合、陡倾的岸坡结构,加之垂直层面的密集节理的切割是斜坡发生大型倾倒的控制性因素。此外,河谷演化、风化卸荷以及暴雨地震等外部因素,也对深层倾倒体的形成起

到了辅助和触发作用。

(3) 在叠加有残余构造应力的自重应力场中,互层倾倒是受节理面和层面控制的复合倾倒模式,即:硬岩发生块状-弯曲倾倒,而软岩发生弯曲倾倒。变形过程中,两种倾倒模式同时发生,相辅相成、相互促进,协调发展。并在坡体上形成反坡台坎,但拉裂缝不发育。

(4) 受河谷演化的控制,研究区深层倾倒体演化过程主要经历 4 个阶段:卸荷回弹陡倾面拉裂阶段,初始变形阶段,板梁根部折断、剪切面贯通阶段,破坏阶段。变形初期,斜坡变形主要受层面和正交节理控制,发生互层倾倒。之后,随原有倾向坡外的垂直层面节理不断变陡,斜坡的继续变形将受这些倾向坡外的破裂面所控制,从而转为蠕滑-拉裂模式,并最终发展成滑坡。

(5) 变形破坏模式的转化是深层倾倒体进入累进性破坏阶段的重要标志,而蠕滑-拉裂又是倾倒体大规模失稳的主要方式。与传统倾倒变形不同,该滑动面受倾向坡外结构面控制,主要发生在强变形岩体中,而并非沿最大弯折带发育。研究区出露深层倾倒体均处于各自的发展阶段,并在不断演化。因此,合理划分变形分区,准确判断演化阶段,是评价深层倾倒体稳定性的关键。

参考文献 (References)

- [1] ASHBY J. Sliding and toppling modes of failure in models and jointed rock slopes [D]. London: London University, Imperial College, 1971: 54-183
- [2] GOODMAN R E, BRAY J W. Toppling of rock slopes [C]// Proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes. ASCE. Boulder, Colorado, 1976: 201-234
- [3] 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,1994:331 [ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. Engineering geological analysis principle[M]. Beijing: Geology Press, 1994: 331]
- [4] HUANG R Q. Understanding the mechanism of large-scale landslides [G]// Lollino et al. Engineering Geology for Society and Territory: Landslide Processes. Switzerland: Springer, 2015, Volume 2: 13-32
- [5] 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 Runqiu. 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]
- [6] 黄润秋,李渝生,严明. 斜坡倾倒变形的工程地质分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1165-1181 [HUANG Runqiu, LI

- Yusheng, YAN Ming. The implication and evaluation of toppling failure in engineering geology practice[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, **25**(5): 1165–1181]
- [7] 刘丽娟, 游湘, 顾成壮. 新龙水电站库区倾倒地变形体数值模拟分析[J]. *长江科学院院报*, 2014, **31**(11): 92–96 [LIU Lijuan, YOU Xiang, GU Chengzhuang. Numerical simulation of toppling rock mass of Xinlong Hydropower Station[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, **31**(11): 92–96]
- [8] 王飞, 唐辉明. 雅砻江上游互层斜坡倾倒地破坏机制与演化[J]. *工程地质学报*, 2017, **25**(6): 1501–1508 [WANG Fei, TANG Huiming. Mechanism and evolution of toppling in interbedded slopes at upstream of Yalong River. *Journal of Engineering Geology*, 2017, **25**(6): 1501–1508]
- [9] ZANBAK C. Design charts for rock slopes susceptible to toppling[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1983, **109**(8): 1039–1062
- [10] 陈祖煜, 张建红, 汪小刚. 岩石边坡倾倒地稳定性分析的简化方法[J]. *岩土工程学报*, 1996, **6**(11): 92–95 [CHEN Zuyu, ZHANG Jianhong, WANG Xiaogang. Simplified stability analysis method of toppling failure of jointed rock slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, **6**(11): 92–95]
- [11] BOBET A. Analytical solutions for toppling failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, **36**: 971–980
- [12] SAGASETA C, SANCHEZ J M, CANIZAL J. A general analytical solution for the required anchor force in rock slopes with toppling failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, **38**: 421–435
- [13] LIU C H, JAKSA M B, MEYERS A G. A transfer coefficient method for rock slope toppling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **46**: 1–9
- [14] PRITCHARD M A, SAVIGNY K W. Numerical modelling of toppling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, **27**: 823–834
- [15] 张建玲. 雅砻江中游构造地貌特征及演化[D]. 成都: 成都理工大学, 2012: 19–39 [ZHANG Jianlin. The tectonic landform features and evolution of the middle reaches of the Yalong River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012: 19–39]

Development Characteristics and Evolution Mechanism of the Deep-Seated Toppling in the Upstream of the Yalong River, China

WANG Fei¹, TANG Huiming^{1,2*}, ZHANG Guangcheng¹, LIU Xiao²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Three Gorges Research Center for Geohazards, Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

Abstract: Deep-seated toppling dominates the failures of anti-inclined rock slopes in the upstream of the Yalong River. In this paper, researches on the development characteristics and evolution mechanism of deep-seated toppling were carefully conducted using engineering geological method. Based on comprehensive investigation on the geological settings and failure mechanism occurring in rock slopes over the Yalong River, a classification of deformation zone was established to assess slope stability from the view of deformation process and evolution stage. Results indicated that in the research area, the deep-seated toppling had suffered severe deformations characterized by typical interbedding toppling, which were a recombination of block-flexure toppling in hard rock and flexure toppling in soft rock, respectively. Moreover, the combination of inner and outer factors governed the deformations, where the structure of soft and hard rock interbedded with well-developed cross-joints perpendicular to the bedding surface had played a key role in the deformation and evolution of the slope. Controlled by the evolution of valley, the deep-seated toppling underwent four major evolution stages, unloading and rebound stage, initial deformation stage, breaking in flexure, and failure as a landslide. The transformation of failure mode was a significant indicator of the acceleration failure of deep-seated toppling, and landslides represented a limiting condition of the toppling process to be reached. Unlike the existing conclusions, the failure surfaces were developed along the cross-joints in strongly deformed rock, rather than the maximum bending zone.

Key words: upstream of the Yalong River; deep-seated toppling; formation condition; evolution mechanism; stability analysis