

苗尾水电站倾倒边坡顺层开挖变形响应

张乐飞, 赵建军, 王子贤

(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), 成都 610059)

摘要: 我国西南地区水电建设中发现了较多深层倾倒变形边坡, 在顺层开挖条件下出现小开挖引起大变形的现象, 研究该类边坡的开挖变形响应对于指导工程设计具有重要意义。以澜沧江苗尾水电站左右坝肩边坡为例, 结合现场资料、变形监测数据等对倾倒边坡顺层开挖条件下的变形响应进行综合分析。结果表明, 倾倒边坡开挖后, 边坡的变形高度和开挖高度具有较强的相关性, 初始变形位于开挖面以上一定范围, 随着边坡向下开挖, 变形向上部延展, 当坡脚开挖或软化时, 变形范围将达到最大, 并集中于坡顶 $1/3 \sim 1/5$ 边坡高度范围内, “坡脚小开挖, 上部大变形”特征明显。

关键词: 苗尾水电站; 倾倒变形体; 顺层开挖; 变形响应

中图分类号: P642; TV74 **文献标识码:** A

DEFORMATION OF TOPPLING SLOPE UNDER BEDDING EXCAVATION OF MIAOWEI HYDROPOWER STATION

ZHANG Le-fei, ZHAO Jian-jun, WANG Zi-xian

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

Abstract: In the hydropower construction in Southwest China, there are many deep toppling deformation slopes, and the phenomenon of large deformation caused by small excavation occurs under bedding excavation. It is of great significance to study the excavation deformation response of such slopes for guiding the engineering design. Taking the left and right abutment slopes of Miaowei hydropower station on Lancang River as an example, combined with the field data and deformation monitoring data, the deformation response of the toppling slope under the condition of bedding excavation is comprehensively analyzed. The results show that there is a strong correlation between the deformation height of the slope and the excavation height after the excavation of the toppling slope. The initial deformation is located in a certain range above the excavation surface. As the slope is excavated downward, the deformation extends upward. When the slope toe is excavated or softened, the deformation range will reach the maximum, and will be concentrated in the range of $1/3 \sim 1/5$ of the slope height at the slope top. The characteristics of “small excavation at the slope toe and large deformation at the upper part” are obvious.

Key words: Miaowei hydropower station; toppling deformation slope; bedding excavation; deformation response

1 引言

倾倒变形最早于 20 世纪 70 年代被明确定义,多发生于反倾层状岩质边坡,特别是软硬互层结构边坡^[1],表现为陡倾的板状岩体在自重产生的弯矩作用下,由前缘开始向临空方向一侧产生弯曲、折断,并逐渐向坡内发展^[2],形成所谓的“点头哈腰”现象^[3]。倾倒边坡主要受工程地质条件、降雨量和工程开挖等因素的影响,受开挖扰动影响最为显著,近年来,在国内外的水利水电、铁路、矿山等工程建设开挖中都出现了倾倒边坡变形失稳问题,成为众多学者探讨的焦点,如小湾水电站饮水沟、汶马高速隧道进口边坡、加拿大 Frank 滑坡、美国 Brilliant 开挖边坡^[4]等。坡体在开挖作业后其原有的应力条件和平衡状态发生改变,稳定性降低,产生一系列变形破坏,倾倒边坡由于其特别的坡体结构,在开挖作用下由于卸荷,会加剧其变形破坏^[5]。为此,研究开挖引起的倾倒边坡变形响应规律进而指导工程建设已显得刻不容缓。

目前,国内外众多学者对此进行了研究。蔡国军^[6]等采用底摩擦试验与数值模拟相结合的方法,研究了开挖比对边坡的变形范围的影响,结果显示适当增大边坡的开挖坡角有利于斜坡整体稳定性。Leandro、Iván^[7]等对西班牙的一个矿山开挖引发的复杂倾倒变形案例进行分析,提出该边坡为上部倾倒推动下部圆弧型滑移的复合失稳模式,对 Goodman 倾倒分类进行了补充。董梦龙^[8]等研究了锚固角对软硬夹层倾覆变形岩体锚固效应的影响,为软硬夹层倾覆变形岩体找到了最合适的锚固方法,对保证施工和运行过程中支护措施的有效性具有重要意义。黄达^[9]等以离心模型试验为原型,结合离散元数值模拟,分析了倾倒变形的形成过程以及在外界扰动下的破坏机制,得出软硬互层反倾边坡的变形破坏过程存在起始变形、稳态变形和失稳破坏 3 个主要阶段。陶志刚^[10]等采用 NPR 和普通锚索进行基于物理模型的实验,在物理模型的开挖过程中得到了位移场、应变场、温度场和锚索力的演化,确定了 NPR 锚索加固反倾斜坡不稳定性失效的机制,证明了 NPR 锚索可用于监测整个开挖过程中反斜边坡的滑动力。

近年来在我国西南地区水电建设中遇到大量倾倒变形边坡,苗尾水电站倾倒变形边坡较为典型,越来越多的学者为此展开研究,并涉及了方方面面。其中,早期主要偏重于倾倒变形发育和演变特征、稳定性分析、工程效益分析、变形程度分级和质量评价

等。白彦波^[11,12]、余鹏程^[13]等综合研究表明,苗尾水电站岸坡岩体倾倒变形的形成与演变经历了弱倾倒层面剪切错动发展阶段、强倾倒层内拉张破裂发展阶段、强倾倒切层张剪破裂发展阶段、极强倾倒折断张裂(坠覆)破裂发展阶段 4 个基本发展阶段,并通过稳定性分析提出粘土心墙堆石坝方案优于混凝土面板堆石坝方案的基本结论。而后,随着苗尾水电站的建设,学者们开始聚焦于蓄水、降雨工况下的变形响应、稳定性评价与加固治理研究等^[14-16]。前人研究主要集中在倾倒边坡的形成和失稳模式、开挖方式的影响和工程支护等领域,而缺少坡脚的顺层开挖或软化与边坡变形响应范围之间对应关系的研究成果,无法指导工程开挖。因此,本文基于现场资料和变形监测,通过数据分析的方法对苗尾水电站左右坝肩倾倒边坡顺层开挖变形响应展开研究,并对比同类边坡探究坡脚的开挖或软化与边坡变形响应范围的相关性。相关研究结论的获取能够为倾倒边坡工程设计提供指导和启示。

2 工程地质概况

苗尾水电站坝址区属高山深切河谷地貌,河谷为不对称的“V”型,谷底一般宽度 80~100 m,谷底高程 1 294~1 286 m,山顶到河沟高差近 1 000 m,坡脚至坡肩平均高差约 200 m。气候整体温暖湿润,四季差异小,年平均气温 15.6 ℃。苗尾水电站位于澜沧江上游,澜沧江由北向南流经坝址后,急转为东西向,再转为近南北向,平面形态呈横“S”形展布^[17]。坝址区主要发育白垩系景星组(K_1j^1)和侏罗系中统花开左组上、下段(J_2h^2 、 J_2h^1)等地层,岩性为板岩及千枚岩等软质岩与变质石英砂岩等硬质岩互层(图 2),在坡脚局部覆盖有第四系崩坡积层和冲洪积层。受澜沧江断裂带和多期构造运动的影响,区内断层、层间错动带及节理较为发育^[18]。断层以 NNW 走向为主(图 1),表现为顺层的压性断层。

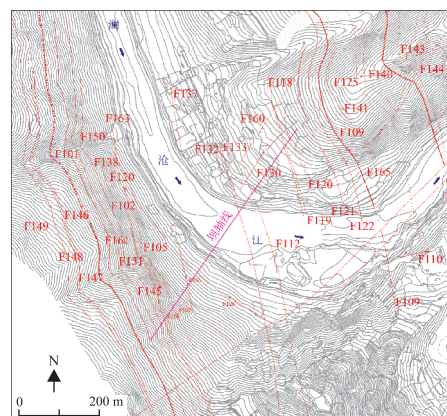
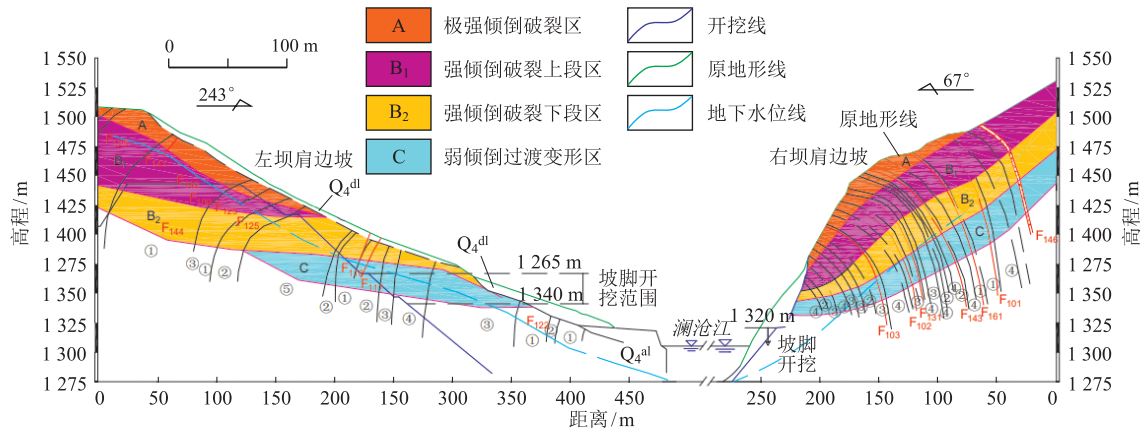


图 1 坝址区工程地质平面图

左坝肩边坡位于回槽子沟南侧(图 3),上陡下缓,边坡高度 175 m,坡向 243°,地形坡度 35°~55°,岩层平均厚度为 16 m。右坝肩边坡位于小溜槽沟南侧(图 4),整体较陡,边坡高度为 240 m,坡向为 67°,地形坡度 40°~52°,岩层平均厚度为 15 m。左右坝肩边坡总体上为陡倾坡内层状结构斜坡,岩层走向与河谷走向近一致,岩性软弱相间,软硬互层结

构明显。正常岩体呈 NNW 走向,倾角近直立,主要位于斜坡下部,总体产状为 $N8^{\circ}\sim 12^{\circ}W/NE\angle 73^{\circ}\sim 90^{\circ}$,在河谷演化过程中两侧山体形成了倾倒变形,主要位于斜坡中上部,最大水平发育深度均大于 110 m,坡表倾倒变形最为发育,向坡内逐渐减弱,左岸倾 NE 倾角 $36^{\circ}\sim 75^{\circ}$,右岸倾 SW 倾角 $30^{\circ}\sim 51^{\circ}$ 。



①千枚岩片岩;②变质石英砂岩;③片岩夹石英砂岩;④板岩夹片岩;⑤石英砂岩片岩互层;Q₄ dl. 第四系坡积层; Q₄ al. 第四冲积层;F125. 断层编号

图 2 左右坝肩边坡工程地质剖面图

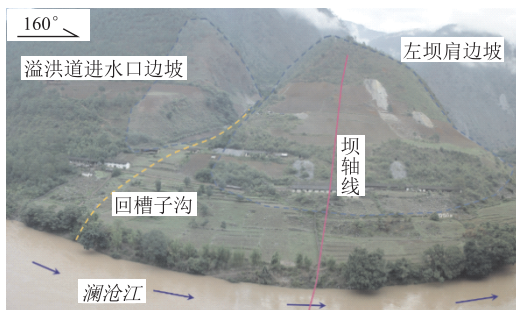


图 3 开挖前左岸边坡全貌

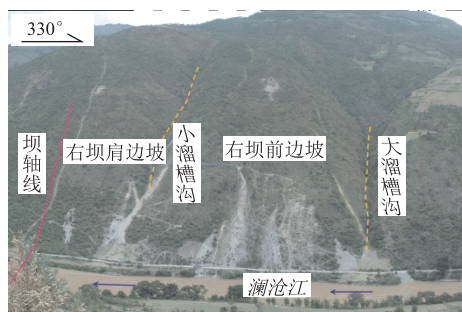


图 4 开挖前右岸边坡全貌

结构斜坡。坝址区边坡的地形、岩土体类别和组合方式对边坡变形起控制性作用,主要分布的岩性为板岩、砂板岩、石英砂岩、千枚岩等,不同岩性以互层形式出现,软硬互层现象突出。受重力变形影响,边坡岩体节理产状变化大,总体分布有 II 级、III 级、IV 级、V 级 4 类结构面。II 级结构面以长大断层形式出现,III 级结构面延伸长度不长、软弱充填物厚度不均匀,而 V 级结构面分布具有一定随机性,IV 级结构面的形态和组合关系对局部块体的稳定性有控制作用。

左坝肩正常岩层产状为 $N4^{\circ}\sim 21^{\circ}W/NE\angle 85^{\circ}\sim 90^{\circ}$,倾倒变形体岩层产状为 $N4^{\circ}\sim 21^{\circ}W/NE\angle 28^{\circ}\sim 84^{\circ}$,主要发育 3 组优势结构面,C: $N20^{\circ}W/NE\angle 50^{\circ}$ 、J1: $N35^{\circ}E/SE\angle 48^{\circ}$ 、J3: $N5^{\circ}W/SW\angle 40^{\circ}$ 。右坝肩正常岩层产状为 $N5^{\circ}\sim 20^{\circ}W/SW\angle 85^{\circ}\sim 90^{\circ}$,倾倒变形体产状为 $N5^{\circ}\sim 20^{\circ}W/SW\angle 35^{\circ}\sim 75^{\circ}$,越靠近浅表部倾角越缓,共发育 3 组优势结构面,C: $N4^{\circ}W/SW\angle 51^{\circ}$ 、J1: $N13^{\circ}W/NE\angle 57^{\circ}$ 、J2: $N88^{\circ}E/NW\angle 88^{\circ}$ 。从两岸斜坡岩体的节理优势方位来看,坝址区岩体节理与层面有明显的交切关系,两组与层面大角度相交,在空间上 3 组结构面将岩体切割成楔形块体,对边坡稳定性不利^[19]。

3 倾倒变形体边坡基本特征

3.1 边坡结构特征分析

苗尾水电站左右坝肩边坡表现为陡倾坡内层状

3.2 边坡倾倒变形体发育特征及分区





苗尾坝址区斜坡在深切河谷演化过程中经历卸

荷,岩体结构破碎,结构面发育,岩性组合复杂,产生了强烈的倾倒变形,中上部坡表岩体倾角变缓,为软硬互层岩体结构内部发育的深部倾倒变形体。分布高程主要在 1 320~1 500 m,坡向水平长度达 150 m,平均坡度 21°~66°。坝址区岩层软硬互层发育,由变质石英砂岩等硬质岩构成的岩组,倾倒变形具有显著的弹性、脆性特征,主要表现为折断、层内张裂及岩体块裂等不连续变形;而由板岩及千枚岩等软质岩构成的岩组,倾倒变形有明显的塑性、延展性特征,以柔性弯曲及层内错动等连续性变形为主^[20]。

边坡不同位置倾倒发育特征也不同,倾倒现象复杂,坡表倾倒变形最为发育,卸荷特征明显,岩层倾角较缓,低于 30°,向坡内倾倒变形逐渐减弱,岩层倾角近直立,倾倒变形水平发育深度超 110 m,共形成 4 个变形特征不同的倾倒变形区域^[21],见表 1,图 2。极强倾倒破裂岩体(A区)岩体强烈倾倒、折

断、坠覆,整体张裂松弛,局部架空,大量充填块碎石及角砾、岩屑,越靠近坡表越明显。变形严重区域,破裂带以上岩体与下伏变形基岩分离,并可产生重力坠覆位移。强倾倒破裂上段岩体(B1区)岩体强烈倾倒,除沿层内错动带及千枚状板岩等软弱岩带发生强烈的剪切滑移、层内岩层发生强烈的张性破裂外,其变形特征还存在沿缓倾坡外节理发生强烈的张性剪切变形,并表现出显著的切层发展特征。强倾倒破裂下段岩体(B2区)岩体倾倒较为强烈,层内错动带发生剪切滑移,层内岩体产生宏观张性破裂或沿已有结构面产生拉张变形。张性破裂一般仅局限在层内错动带及千枚状板岩等软弱岩带之间,总体上不切层、局部可切单层发育。弱倾倒过渡变形岩体(C区)岩体倾倒变形较弱,陡倾层状岩体沿层内错动夹层及千枚状板岩等软弱岩带发生剪切滑移,层内岩层基本上不发生明显的宏观张裂变形,或形成微量变形的张裂缝。

表 1 倾倒变形区域特征

| | | 极强倾倒破裂岩体 (A区) | 强倾倒破裂上段 岩体(B1区) | 强倾倒破裂下段 岩体(B2区) | 弱倾倒过渡变形 岩体(C区) |
|------------|-----|---|---|--|---|
| 水平发育 深度 | 左坝肩 | 0~15 m | 15~100 m | 100~150 m | >150 m |
| | 右坝肩 | 0~25 m | 25~60 m | 60~110 m | >110 m |
| 岩层倾角 | 左坝肩 | <40° | <60° | <80° | 约85° |
| | 右坝肩 | <30° | <50° | <70° | 约80° |
| 卸荷变形特征 | | 强卸荷 | 强卸荷 | 总体强卸荷,下部 可为弱卸荷 | 弱卸荷 |
| 典型照片 | |  |  |  |  |

4 倾倒变形体边坡开挖变形响应

4.1 开挖变形现象

苗尾水电站坝址区澜沧江两岸山体在漫长的河谷地质演化过程中形成相当大规模的倾倒变形体,岩体较为破碎。在坝址建设过程中,两岸山体开挖为原本倾倒的岩体提供了更为优越的临空条件,引起岩体内部应力重分布,斜坡以变形的方式实现应力的调整,产生裂缝、反坡台坎、浅层滑塌等。苗尾左右坝肩边坡采用开口线往下顺层开挖的方式,在速度和方式上有所差异,开挖进度见图 5、图 6。

4.1.1 左坝肩边坡变形

苗尾水电站左坝肩边坡开挖范围为 1 340~1 455 m 高程,后削坡减载至坡顶高程为 1 441 m,

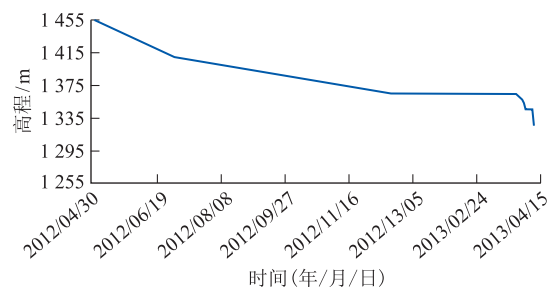


图 5 左坝肩开挖进度图

开挖过程中支护及时,并没有出现大面积的垮塌破坏现象。从 2012 年 4 月开始开挖到 2013 年 9 月,先后经历了 5 次明显的倾倒拉裂变形,造成地表裂缝和支护措施的失效。斜坡开挖及变形情况见图 7~10。

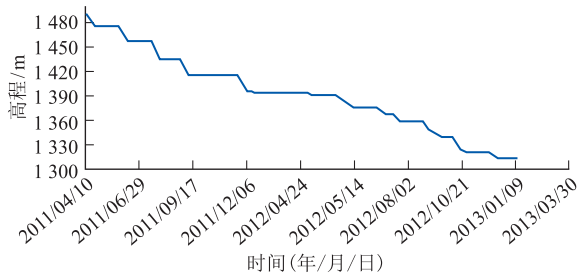


图 6 右坝肩开挖进度图



图 7 1 400 m 高程马道处裂缝

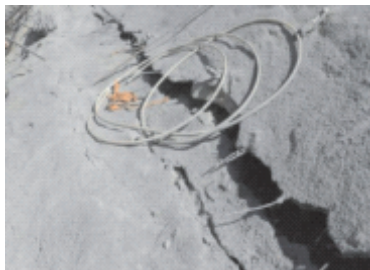


图 8 1 400 m 高程马道内侧裂缝

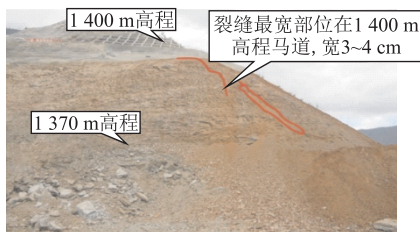


图 9 1 370~1 400 m 高程裂缝

边坡开挖后,最先受到影响,产生变形裂缝的地方位于开挖高度以上,2012 年 10 月,开挖至 1 365 m 高程以下时,在 B2 区坡表 1 370~1 415 m 高程出现 11 条裂缝,且大多往上下游延伸,1 400 m 高程马道内侧裂缝张开度达 15 cm。随后变形范围逐步向上延展,影响边坡上部区域(B1 区、A 区),该区域变形强烈。

2012 年 11 月,开挖边坡下游侧 1 340 m 高程时,1 340~1 415 m 高程段边坡发生倾倒拉裂变形。2013 年 4 月,受左岸灌溉取水交通洞灌浆平硐爆破

影响,左坝肩边坡已有变形加剧,裂缝延伸长度明显增加,1 455 m 平台出现 8 条裂缝。2013 年 7 月对坡脚进行开挖时,边坡再次产生大规模整体变形,原本稳定的倾倒变形体发生复活,坡表岩体产生了倾倒破坏。坡顶 1 415 m 平台产生多条顺层方向的裂缝,1 365~1 415 m 边坡中部支护结构多处鼓胀,1 365 m 施工便道产生数条平行的顺层裂缝,1 350 m 高程锚拉板的锚头断裂、岩板倾倒折断等。

4.1.2 右坝肩边坡变形

苗尾水电站右坝肩边坡开挖范围为 1 280~1 520 m 高程,沿基覆界面开挖。边坡天然坡度上缓下陡,坡肩处地形陡缓交界,边坡岩体结构复杂,开挖后边坡上部 I 区出现较多的地表裂缝,1 380 m 高程以下 II 区出现前缘滑塌。开挖变形情况见图 11、图 12。



图 10 1 415 m 高程平台顺层裂缝

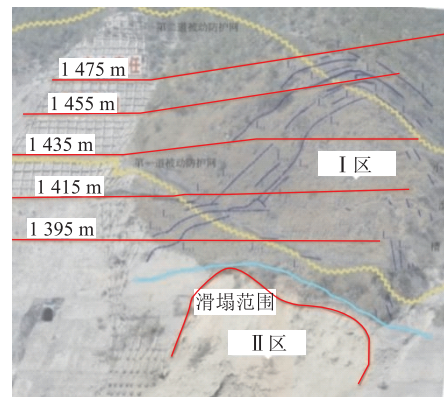


图 11 右坝肩边坡变形情况

随着开挖的进行,开挖线以上 I 区坡体不断出现裂缝,主要发育在山梁部位,且总体延伸长、张开度较大,最大延伸长度达 100 m、张开度达 0.5 m。在 1 390~1 410 m 高程发育的裂缝走向与边坡走向基本一致,长度与张开度较小,长度不超过 2 m,张开度约 5 mm。在 1 450~1 490 m 高程发育的裂缝走向分为两组,一组与层面走向一致,一组与 EW 向节理一致,裂缝断续发育,长约 6 m,最宽处达 15 cm,裂缝宽度一直处于扩大的趋势,总体上此区域以拉张变形为主。开挖坡脚时,II 区撕坡线地形陡

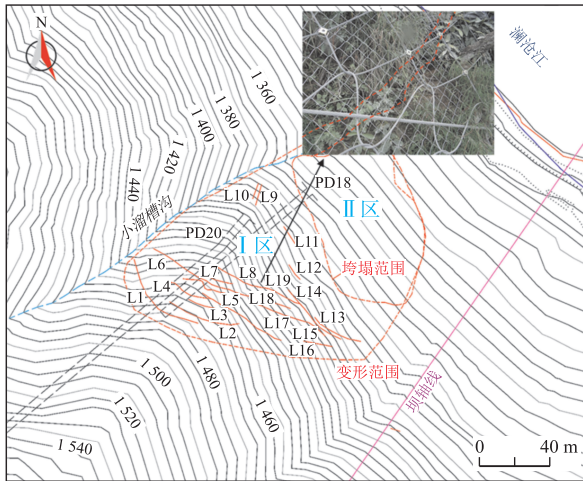


图 12 右坝肩边坡变形分布平面图



图 14 右坝肩边坡监测点布置平面图

缓交界处,已进行过支护的浅表层岩土体产生了局部的垮塌,同时斜坡上部产生一系列走向以顺层为主的裂缝,在平硐内部也产生了一系列的裂缝。1 384~1 340 m 高程局部的滑塌体长约 45 m,厚 1~3 m,方量约 300 m³,造成边坡下部局部锚索失效、喷射混凝土脱落、格栅梁断裂现象,并在坡脚形成滑堆积体。

4.2 变形监测分析

边坡开挖过程中,在不同高程布置了地表和地下位移观测仪器,这些监测点积累了丰富的变形资料,为左右坝肩开挖过程中的变形响应分析提供了详实的依据。对左坝肩的监测主要以坡面监测点为主,共设表面监测点 8 个。右坝肩共设有表面监测点 8 个,多点位移计 12 个,在斜坡变形较为强烈的区域适当地加密。左右坝肩斜坡监测点布置见图 13、图 14。



图 13 左坝肩边坡监测点布置示意图

(230°方向),Y 位移顺河流流向为正(140°方向),H 方向向上为正。右坝肩 X 以北为正方向,Y 以东为正方向,H 以沉降为正方向。图中单位均为 mm。

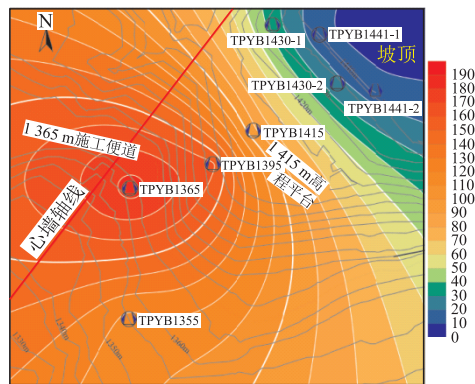


图 15 左坝肩坡表 X 位移云图

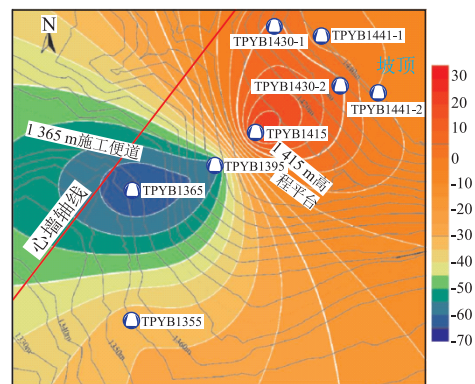


图 16 左坝肩坡表 Y 位移云图

根据昆明院提供的截止 2014 年 9 月的监测资料,经由 surfer 软件进行差值处理得斜坡各方向位移量云图如下,左坝肩监测点 X 位移顺坡向为正

由图 15~18 可见,左坝肩边坡主要以沉降位移和顺坡向的位移为主,1 415 m 高程以上区域主要产生卸荷回弹变形,斜坡整体向临空方向产生回弹,产生高达 40 mm 的 H 正向位移,并且随着高程增加而增大,顺坡向变形量则相对下部较小,变形表现

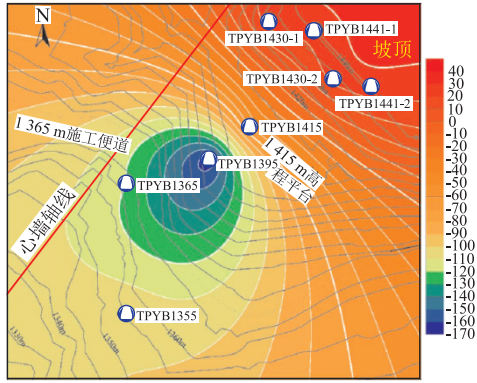


图 17 左坝肩部表 H 位移云图

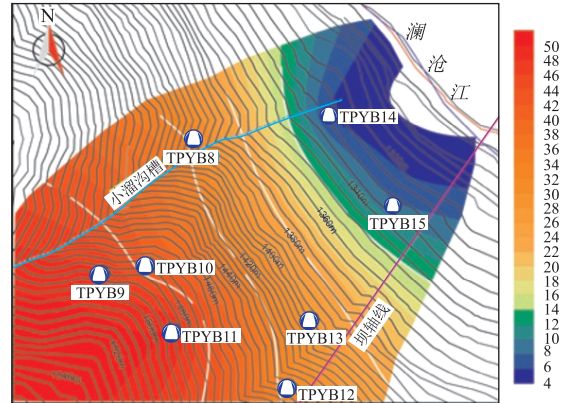


图 20 右坝肩部表 Y 位移云图

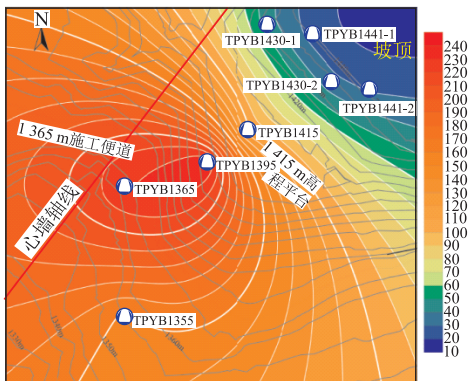


图 18 左坝肩部表合位移云图

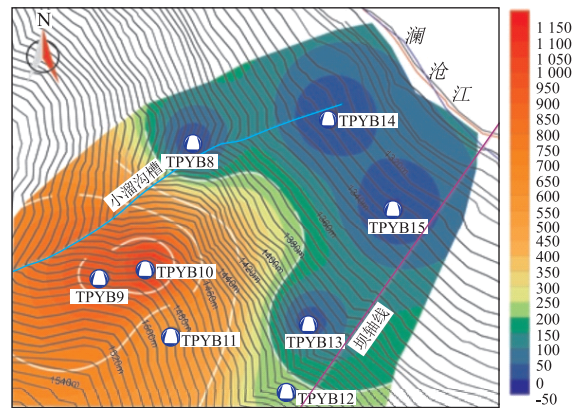


图 21 右坝肩部表 H 位移云图

为出现较多顺层裂缝。1 415 m 高程附近顺河流流向位移较大,达 30 mm。1 415 m 高程以下斜坡总体变形量较大,该区域在 1 320 m 高程坡脚开挖后倾倒地变形复活,X 位移达 200 mm,主要影响区域在 1 350~1 395 m 高程上游侧坡面,最大变形达 240 mm,H 方向位移则以沉降为主。

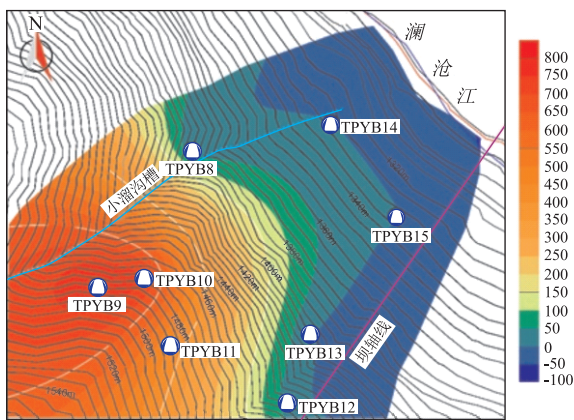


图 19 右坝肩部表 X 位移云图

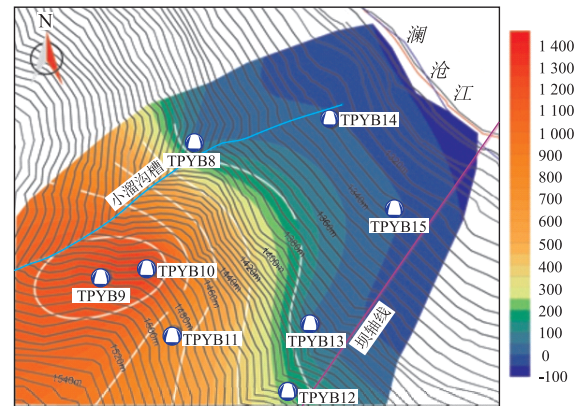


图 22 右坝肩部表合位移云图

右坝肩斜坡坡表变形主要发生在 1 420 m 高程以上,与现场裂缝的主要发育区域一致,由多向的位移云图可见(图 19~22),等值线在 1 420 m 高程以

下位移量相对较小,X 位移小于 150 mm,Y 位移小于 20 mm,沉降量小于 200 mm;而在 1 420 m 高程以上整体 X 位移超过 500 mm,最大值达到近 900 mm,Y 位移整体约为 40 mm,表现为高程越高,Y 位移量越大,沉降量在裂缝发育区域的后缘达到最大值约 1 182.5 mm。可以看出斜坡整体合位移为 NNE 向,与斜坡坡向一致,倾倒地变形明显。

另选取 M4hpt1-1~M4hpt1-6 所在剖面基于多点位移计监测数据,处理得到右坝肩深部变形情况

云图如图 23。位于坡脚和斜坡中下部的多点位移计各探头位移量较小。位于 1 384 m 高程的 M4hpt1-4 监测点处于变形的过渡带,内部探头变形较小,越靠近坡表变形量越大,坡表最大位移为 5.8 mm。位于 1 415 m 高程的 M4hpt1-5 监测点坡表部变形量最大,产生了近 50 mm 的位移,在该监测点距坡面 15 m 的位置,变形量已降至 12 mm,说明斜坡变形主要集中在坝肩 20 m 厚度以内的浅表部岩体。

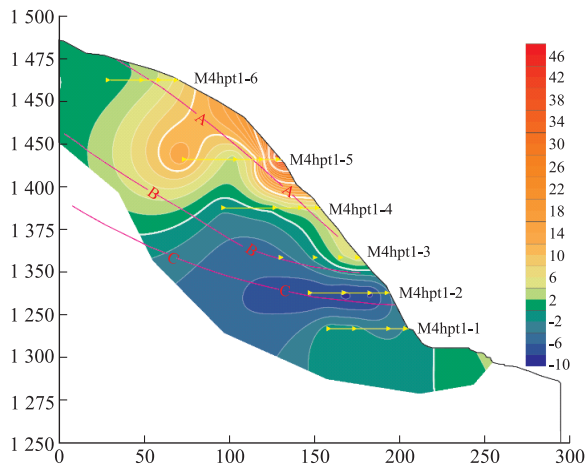


图 23 右坝肩边坡深部变形云图

以上监测数据包含开挖完成后一定时间,为明确表明开挖过程与变形响应的关系,兼顾边坡上中下不同部位的变形,选取左右坝肩剖面附近典型表面变形监测点对开挖与变形关系进行分析,绘制关系曲线如图 24、图 25。左坝肩边坡开挖高度为 1 441~1 340 m,受开挖的影响,临空条件较好,岩体卸荷回弹,各高程均发生了不同程度的地表变形,开挖过程中变形主要发生在开挖高程以上。开挖至较低高程 1 370 m 时引发变形较大,继续向下开挖至坡脚,各高程变形明显增大,原有裂缝扩大,在 1 415 m 高程出现最大变形,量值高达 900 mm。右

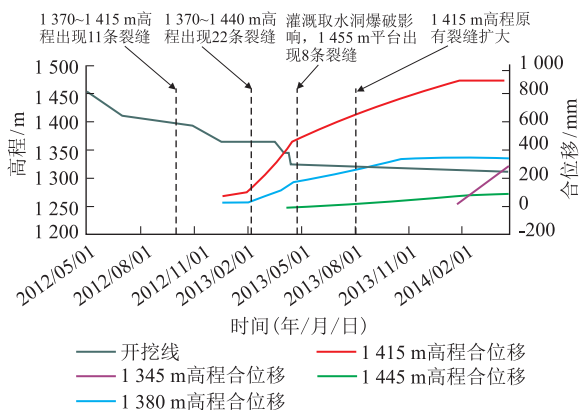


图 24 左坝肩边坡开挖与变形关系曲线

坝肩边坡开挖高度为 1 520~1 280 m,开挖初期主要在开挖线以上部位产生位移变形,但整体量值不大,不超过 6 mm。当边坡开挖高程超过一半时,各高程位移明显波动增加,1 475 m 高程出现最大变形,最大位移约 10 mm。开挖至坡脚 1 320 m 高程时,即使开挖速度慢,开挖量小,坡体整体变形仍较大,甚至出现前缘滑塌,最大位移出现在 1 535 m 高程,量值达 12 mm。

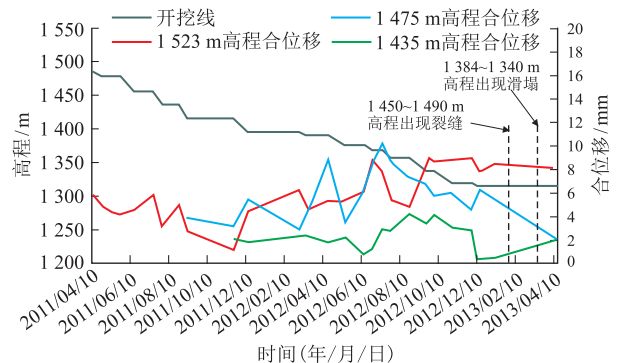


图 25 右坝肩边坡开挖与变形关系曲线

4.3 开挖高度与变形响应高度相关性分析

以上监测数据表明,边坡开挖后首先出现变形的部位一般在较开挖位置高 10~20 m 处,且一般以顺层裂缝形式出现;开挖后边坡中部首先变形,变形产生的裂缝为上部岩体提供变形空间,随着开挖的进行,变形向上部延展,一般在坡顶出现大量顺层裂缝;开挖至超开挖高程一半时,各变形高程位移波动增加,最大位移往往出现在坡顶;而当顺层开挖边坡坡脚时,整体变形较大,表面变形波动相较于开挖坡体中部和上部而言更加明显,表现出“坡脚小开挖、上部大变形”的变形特点。

苗尾左右坝肩边坡开挖后都出现了明显的表面倾倒变形现象,开挖高度与变形高度存在一定相关性。南塔河水电站左岸边坡^[22]、德尔西水电站左岸边坡^[23],其对倾倒变形体进行开挖的变形响应情况与苗尾左右坝肩边坡也存在一定的相似性。南塔河左岸边坡开挖高度为 520~375 m,在坡脚 414 m 高程顺层开挖切脚后,倾倒变形开始在开挖部位以上约 20 m 处出现,并且边坡上部 485~500 m 高程监测点位移持续增大,同时 500 m 高程以上的 2# 悬崖体外侧拉张裂缝开始发展,产生最大变形,并发生崩塌和落石现象。后遭受持续降雨影响,坡脚极薄层泥灰岩夹灰岩岩组遭受软化,岩体强度降低,2# 悬崖体外侧裂缝则持续发展,整体变形失稳风险加大。后期水库蓄水对坡脚造成软化,也引起了坡体整体变形加剧,蓄水前 3 a 坡表向临空面变形位移达到

极值,之后整体呈收敛趋势。德尔西水电站左岸边坡开挖高度为1 553~1 473 m,开挖至坡脚1 493 m高程以下时,在1 493 m马道及进水口边坡上部1 518~1 493 m高程之间均出现多条拉裂缝。并且在边坡坡顶1 528~1 543 m高程也发现裂缝。同时各测点的水平位移峰值几乎是垂直位移的两倍,表现出明显的倾倒地变形特征,且随着高程的增加边坡倾倒的趋势愈加明显。

研究结果揭示,对于反倾层状倾倒地变形边坡,距坡底约1/4边坡高度范围内的坡脚在顺层小开挖或降雨及蓄水软化条件下,会造成坡体整体大变形,倾倒地变形大规模复活,并伴随滑塌破坏等。主要表现在两个方面:坡脚开挖部位上部20~40 m处开始出现倾倒地变形并可能伴随滑塌变形,一般边坡开挖高度越大,变形范围越大;边坡顶部1/3~1/5边坡高度范围内原有稳定的倾倒地变形体变形位移加剧并达到峰值,并且变形向上延展,易发生崩塌、落石等。

5 结论

本文选取苗尾左右坝肩边坡为研究对象,基于现场勘查资料、监测数据等围绕顺层开挖引起的倾倒地变形响应特征展开研究,并综合选取南塔河水电站左岸边坡、德尔西水电站左岸边坡等实例探究开挖高度与变形响应高度的相关性,这是对现有倾倒地变形开挖响应研究体系的有力补充,在一定程度上弥补了现有研究的不足,同时也为水电站等工程设计提供必要的参考依据。研究认识和结论主要有以下4点:

(1) 苗尾左右坝肩为典型的陡倾坡内层状岩质斜坡,深切河谷发育过程中岩体破碎,岩体结构面发育,与层面有明显的交切关系,形成楔形块体,对边坡稳定性不利。斜坡不同部位形成不同特征和规模的倾倒地变形体,主要分为极强倾倒地破裂岩体(A区)、强倾倒地破裂上段岩体(B1区)、强倾倒地破裂下段岩体(B2区)、弱倾倒地过渡变形岩体(C区)4个区域。

(2) 苗尾水电站边坡开挖为原本倾倒的岩体提供更为优越的临空条件,引起岩体内部应力重分布和卸荷回弹,斜坡以变形的方式实现应力的调整,造成倾倒地变形体的复活并伴随滑塌现象,通常在边坡中上部出现竖向裂缝和大量的顺层裂缝,下部出现浅层滑塌。

(3) 通过对现场资料和监测数据进行分析,苗尾水电站左右坝肩边坡顺层开挖后,斜坡变形主要集中在坡肩20 m厚度以内的浅表部岩体。初始变

形主要位于开挖面以上10~20 m,随着边坡向下开挖,变形向上部延展。当开挖至坡脚时,变形程度和范围达到最大,出现滑塌现象等,最大变形集中于坡顶1/3~1/5边坡高度范围内。

(4) 综合分析反倾层状倾倒地边坡开挖变形响应特征,结果表明:坡脚在顺层小开挖或降雨及蓄水软化条件下,倾倒地变形将大规模复活,并伴随滑塌破坏、崩塌等。坡脚开挖部位上部20~40 m处及边坡顶部1/3~1/5边坡高度范围内变形反应明显,原有稳定的倾倒地变形体变形位移加剧并达到峰值。“坡脚小开挖,上部大变形”特征明显。

参考文献

- [1] 陈平志,崔臻,褚卫江,等. 弯曲倾倒地边坡开挖变形响应机理与反馈预测[J]. 人民黄河, 2019, 41(06): 146-151+155.
- [2] 张偉元,王士天,王兰生,等. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社, 2016.
- [3] 陆兆臻. 工程地质原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2001.
- [4] 谭儒蛟,杨旭朝,胡瑞林. 反倾岩体边坡变形机制与稳定性评价研究综述[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 479-484+523.
- [5] 罗尧昆,巨能攀,张成强,等. 隧道开挖作用下反倾层状岩质边坡变形响应分析[J/OL]. 水利水电技术(中英文), 2022: 1-17.
- [6] 蔡国军,黄润秋,严明,等. 反倾向边坡开挖变形破裂响应的物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 197(4): 811-817.
- [7] Leandro R. Alejano, Iván Gómez-Márquez, Roberto Martínez-Alegria. Analysis of a complex toppling-circular slope failure[J]. Engineering Geology, 2010, 114(1): 93-104.
- [8] Dong Menglong et al. Study on the Influence of Anchorage Angle on the Anchorage Effect of Soft-Hard Interbedded Toppling Deformed Rock Mass[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(8): 2382-2392.
- [9] 黄达,马昊,孟秋杰,等. 反倾软硬互层岩质边坡倾倒地变形破坏机理与影响因素研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 602-616.
- [10] Tao Zhigang et al. A physical modeling-based study on the control mechanisms of Negative Poisson's ratio anchor cable on the stratified toppling deformation of anti-inclined slopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104632.
- [11] 白彦波. 澜沧江苗尾水电站坝肩倾倒地变形岩体的质量分类评价及其工程效应分析[D]. 成都理工大学, 2007.
- [12] 白彦波,李湘军,余鹏程,等. 苗尾水电站坝肩岩体倾倒地变形的力学机制与发展过程[J]. 科技信息, 2009, (22): 689-690.
- [13] 余鹏程. 澜沧江苗尾水电站坝址区岩体倾倒地变形特征及坝肩岩体稳定性分析[D]. 成都理工大学, 2007.
- [14] 张传信,李云春,姚亚军. 苗尾水电站右岸倾倒地变形边坡加固设计[J]. 人民长江, 2016, 47(11): 82-85.
- [15] 吴关叶,郑全春,郑惠峰. 苗尾水电站边坡倾倒地变形机理与加固效果分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(02): 538-544.
- [16] 庞林祥,乔兰,姜波,等. 降雨入渗对苗尾水电站板岩边坡失稳

- 的影响及加固措施[J]. 水利水电技术, 2015, 46(07): 21-25.
- [17] 陈清欣, 尹飞, 陈梁. 苗尾水电站倾倒变形岩体作为坝基可行性研究[J]. 云南水力发电, 2017, 33(S1): 6-9+12.
- [18] 曹学兴, 卢吉. 苗尾水电站强倾倒边坡-大断面洞室群互馈作用稳定控制技术[C]//. 国际碾压混凝土坝技术新进展与水库大坝高质量建设管理——中国大坝工程学会 2019 学术年会论文集, 2019: 864-875.
- [19] 贺宇航. 澜沧江苗尾水电站坝肩倾倒岩体开挖变形响应研究[D]. 成都理工大学, 2015.
- [20] 陈梁, 尹飞, 陈清欣. 苗尾水电站坝址区倾倒变形岩体发育特征[J]. 云南水力发电, 2017, 33(S1): 10-12.
- [21] 吴关叶, 巨能攀, 郑惠, 峰等. 层状结构岩质边坡倾倒变形机制与稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [22] 刘阔. 南塔河 1# 水电站左岸边坡倾倒变形及稳定性研究[D]. 河北工程大学, 2021.
- [23] 安晓凡. 岩质边坡多层弯曲倾倒分析方法研究[D]. 西安理工大学, 2020.

作者简介: 张乐飞(2001—), 女, 汉族, 河南驻马店人, 本科生, 地质工程专业。E-mail: zhanglefeicdut@163.com

通讯作者: 赵建军(1980—), 男, 教授, 山东临朐人, 主要从事地质工程专业的教学科研工作。E-mail: j.j.zhao@qq.com