

西藏尼洋河多布水电站深厚覆盖层成因分析

巨广宏¹, 杨芸¹, 杨天俊¹, 王启鸿¹, 符文熹², 叶飞²

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065;

2. 四川大学水力学与山区河流保护国家重点实验室, 四川大学水利水电学院, 成都 610065)

摘要: 西藏尼洋河流域水能资源丰富, 然而存在超300 m厚度的覆盖层, 探明深厚覆盖层的成因对开发水能资源有十分重要的意义。通过对多布水电站坝址深厚覆盖层进行钻探分析、物探解译和综合分析, 发现青藏高原特殊的地质环境与气候变迁是多布水电站深厚覆盖层形成的直接原因。研究结果表明, 尼洋河流域深厚覆盖层成因主要包含“气候型”加积型、河流冲积层、崩滑流加积层、堰塞湖相沉积、“构造型”加积层等5种类型。本文可为含深厚覆盖层地区水电工程选址和开发提供参考和指导。

关键词: 多布水电站; 深厚覆盖层; 钻探分析; 物探解译; 覆盖层成因

中图分类号: P642; TV74 **文献标识码:** A

ANALYSIS ON THE FORMING MECHANISM OF DEEP COVERING LAYER IN DUOBU HYDROPOWER STATION IN NIYANG RIVER IN TIBET

JU Guang-hong¹, YANG Yun¹, YANG Tian-jun¹, WANG Qi-hong¹, FU Wen-xi², YE Fei²

(1. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulic and Mountain River Engineering, College of Water Resource and Hydropower Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The Niyang River basin in Tibet is rich in hydropower resources, however, covering layer with thickness of more than 300 m is widely distributed there. It is of great significance to investigate the causes of the deep covering layer for the development of hydropower resources. Detailed investigations are conducted to illustrate the forming mechanism of the deep covering layer of Duobu Hydropower Station, including drilling analysis, geophysical interpretation, and comprehensive analysis, and it is found that the special geological environment and climate change of the Qinghai-Tibet Plateau are the direct reasons for the formation of the deep overburden of Duobu Hydropower Station. In addition, the results show that the causes of deep overburden in Niyang River basin mainly include five types: "climate type", river alluvial layer, collapse-slip-flow alluvial layer, barrier lake deposition, and "structure type" alluvial layer. This paper can provide reference and guidance for the site selection and development of hydropower projects in areas with deep overburden.

Key words: Duobu hydropower station; deep covering layer; drilling analysis; geophysical exploration interpretation; causes of deep covering layer

多布水电站是尼洋河干流巴河口以下河段水电开发规划的第一个梯级电站^[1]。坝址位于西藏自治区林芝市巴宜区多布村,下游距林芝市政府所在地28 km,国道G18川藏公路从尼洋河左岸通过。多布水电站坝型采用砂砾石复合坝,枢纽工程主要由拦河坝、引水发电系统、泄洪建筑物等组成。多布水电站坝址区河床覆盖层深厚、物质结构多样、成因机制复杂,复杂深厚覆盖层的工程地质性质影响坝体安全。因此,针对深厚覆盖层的埋深特征以及成因机制开展研究十分必要。

在国外,深厚覆盖层上建坝的工程实例已有较多报道,如:巴基斯坦 Tarbela 水电站^[2]土石坝坝高145 m,坝基砂卵石覆盖层最大埋深约230 m;智利 Puclaro 水电站^[3]为混凝土面板堆石坝,坝基覆盖层厚度最厚约113 m;埃及 Aswan 水电站^[4]大坝高度为111 m,长度3 830 m,坝基覆盖层最深达225 m。在国内,中国西南地区大渡河、雅砻江、金沙江等河流的河床覆盖层均较深厚,多在50 m以上^[5-6]。目前,仅有冶勒水电站^[7]和多布水电站^[1]覆盖层厚度超过300 m。大渡河支流南桧河上冶勒水电站坝址区覆盖层最大厚度超过420 m,是我国已建和拟建水电工程勘探发现的最深覆盖层。这类覆盖层分布规律性差,结构和级配变化大,且常有粒径20~30 cm的漂卵石或间有1 m以上的大孤石,伴随架空现象,透水性强,粉细砂及淤泥呈分层或透镜分布,组成极不均匀。

河床深厚覆盖层的形成需具备两个基本条件^[8-10]:①深切河谷,可为形成深厚覆盖层提供沉积空间;②丰富的沉积物来源,为形成深厚覆盖层提供丰富物源。然而,深厚覆盖层的成因复杂,对其成因分析研究成果较少。关于深厚覆盖层成因主要有:①气候成因,冰川对河谷的剧烈刨蚀作用产生大量的碎屑物质,被冰水与流水或洪水搬运到河谷中堆积,会形成“气候型”加积层,这种深厚覆盖层的“气候型”加积层在青藏高原地区尤为突出,而且对青藏高原地区深厚覆盖层的形成具有非常重要的影响^[11];②构造成因,受新构造运动与地质构造作用影响河流侵蚀和堆积特性,从而形成“构造型”加积层,如金沙江虎跳峡250 m的巨厚覆盖层主要与断陷盆地有关^[12];③崩塌滑坡泥石流堆积成因,第四纪以来,地壳快速隆升,河谷深切,在地震、暴雨等外在因素诱发下,高山峡谷中常有大型巨型滑坡、崩塌、泥石流事件发生,且常形成堵断江河事件,造成河床局部深厚堆积,如宝兴河深厚覆盖层就是因暴雨作用诱发下发生的崩塌、滑坡、泥石流,从而产生

大量碎屑物质堆积于河谷中形成深厚覆盖层^[13]。

本文结合西藏尼洋河多布水电站揭示的深厚覆盖层物质组成与结构特征,主要对尼洋河深切河谷成因、覆盖层堆积成因和覆盖层成因分类这三方面进行探讨,从而为深厚覆盖层上水电站选址、施工、设计和运营提供参考和指导。

1 工程概况

西藏尼洋河多布水电站是西藏自治区“十二·五”能源规划的重点项目。工程主要任务为发电,兼顾灌溉。工程枢纽主要由河床砂砾石复合坝、左岸泄洪闸、生态放水孔、引水发电系统、左副坝及鱼道等建筑物组成。2012年3月开工建设,2015年7月下闸蓄水,2015年8月首台机组投产发电,2016年1月4台机组全部投产发电。

多布水电站水库正常蓄水位3 076.00 m,相应库容 $6\,500 \times 10^4 \text{ m}^3$,死水位3 074.00 m,调节库容 $1\,300 \times 10^4 \text{ m}^3$,为日调节水库。电站总装机容量120 MW,安装4台灯泡贯流式机组,设计多年平均发电量 $5.06 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。多布水电站为三等中型工程,主要建筑物为3级,枢纽工程主要由河床土面膜砂砾石坝、8孔泄洪闸、2孔生态放水孔、发电厂房、左副坝及鱼道等建筑物组成,各建筑物均位于河床覆盖层上,最大坝高54.3 m。

2 多布水电站深厚覆盖层地质特征

多布水电站坝址所在工程区长期遭受青藏高原的持续隆升、冰川活动、地质构造等内外动力地质作用,形成的复杂地质条件为尼洋河深厚覆盖层的堆积提供了有利条件。多布水电站总布置平面图和勘探布置见图1,上坝轴线典型地质剖面见图2。

2.1 钻探分析

为了查明多布水电站深厚覆盖层的空间分布与厚度特征,在坝址区完成了较多的勘探钻孔,特别是在轴线、厂房、上下围堰附近布置了大量的河床钻孔。结合多布水电站深厚覆盖层特点,主要采取合金、金网石钻具循环交替使用,从地表往下尽量采用不小于直径110 mm的大孔径钻井,超过80 m深以后逐渐变小,开孔口直径最大250 mm、最小75 mm,分级跟管钻进,相应级配套管护孔。钻探中遇到砂层采取绳索取芯技术,遇到塌孔时采用SM胶工艺护壁,该方法有效解决了钻孔深、成空难、取芯率低等难题,勘察中覆盖层岩心采取率平均达95%以上,典型取芯照片见图3。根据钻孔资料,对坝址区的深厚覆盖层厚度进行统计见表1,深厚覆盖层

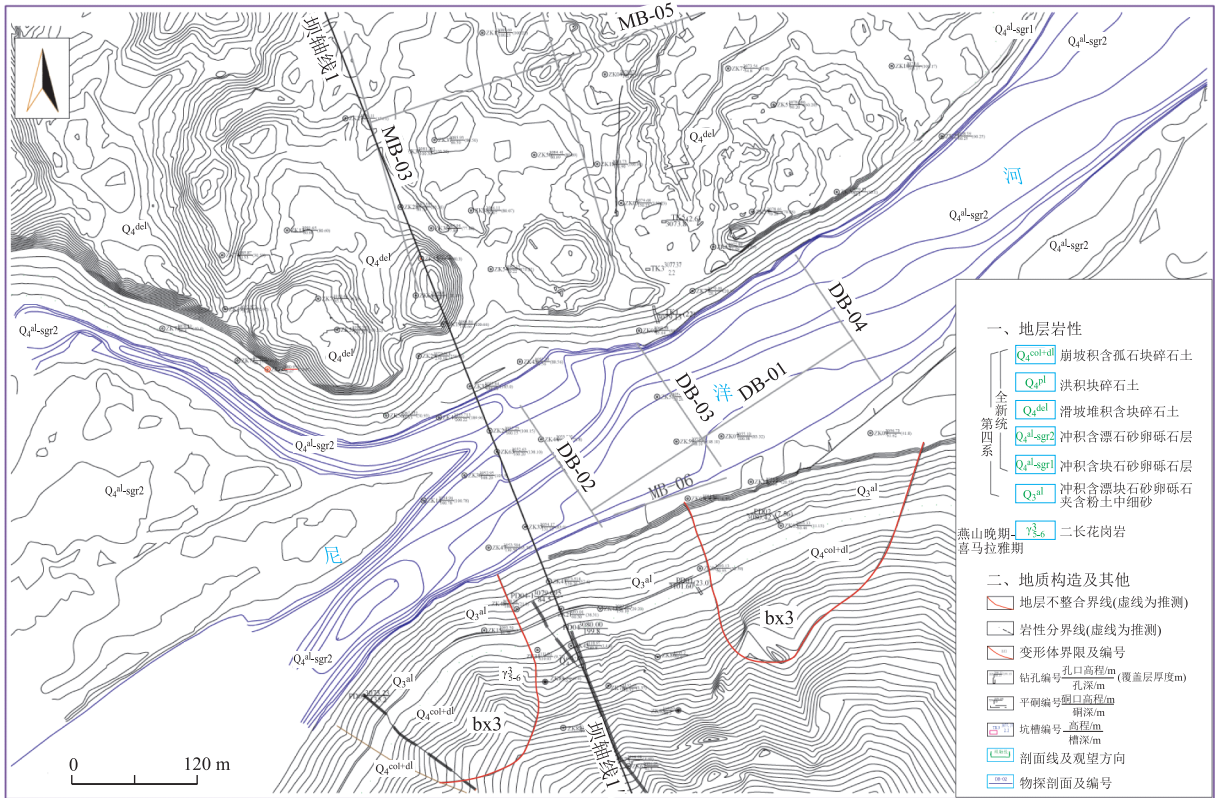


图 1 多布水电站总布置平面图和勘探布置图

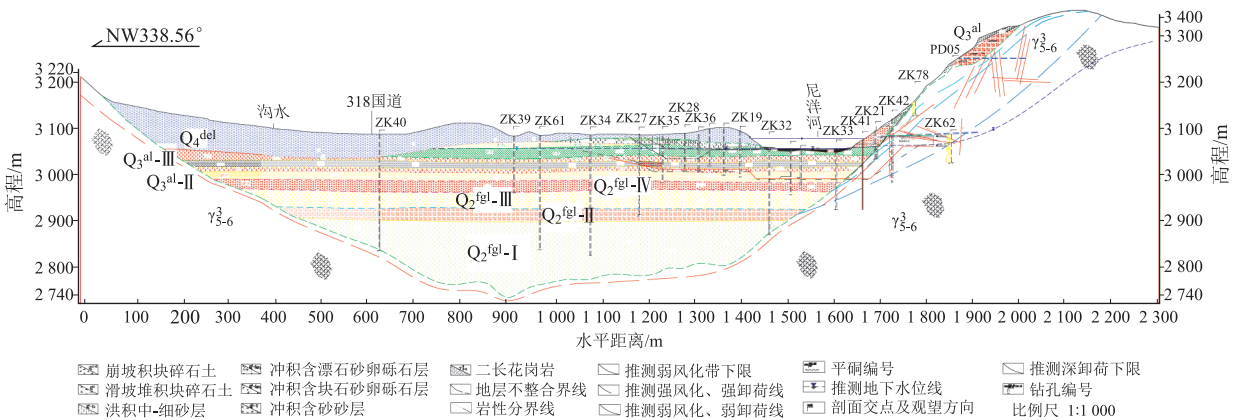


图 2 多布水电站上坝轴线地质剖面图

物质分层情况见图 2。

表 1 多布水电站河床不同位置钻孔勘探覆盖层厚度统计表

位置	范围值/m	平均厚度/m	平均厚度/m
左岸台地	248.80	248.80	
左岸	185.00~189.96	187.48	173.55
河心孔	65.2~105.50	84.38	

根据钻孔勘探资料,河床偏右岸有 3 个钻孔穿透覆盖层,厚度 20.55~41.8 m,平均厚度 32.25 m;河床河心部位有 4 个钻孔穿透覆盖层,覆盖层厚度 65.2~105.5 m,平均厚度 84.38 m;左岸台地仅

有 ZK₄₀ 钻孔揭露,覆盖层厚 248.8 m,ZK₄₀ 钻孔位于坝址左岸公路边,距现河床约 840 m,属“古河道”的左岸岸边。

2.2 物探解译

由于多布水电站坝址区覆盖层局部位置厚度太大,钻探未能揭露局部覆盖层的真实厚度。为了进一步查明坝址区深厚覆盖层的厚度和埋深,在河床、左岸台地布置 1 条顺河参数测线和 6 条横河测线,其中包括预可研阶段 DB₀₂ 和 DB₀₃ 两条测线。DZ₁ 测线为相遇观测系统,点距为 7 m。横河向测线为互换法非纵观测系统,测点间距为 5 m。物探测线



图3 多布水电站深厚覆盖层典型取芯照片

分布见图1。

坝址区覆盖层厚度勘探采用地震折射波法,使用的仪器为国产SWS型地震仪。地震勘探成果资料解释中,DZ₁和DZ₅测线采用“*t*₀法”解释。DH₁、DH₃、DH₄、DB₀₂、DB₀₃、DZ₂、DZ₃和DZ₄测线采用“相对时差法”解释。“相对时差法”解释的结果不在观测测线上,与观测测线存在一定偏移,尤其是覆盖层较厚时偏移距比较大,各偏移线名称为该测线编号后加“'”,即DH₁'、DH₃'、DH₄'、DB₀₂'、DB₀₃'、DZ₂'、DZ₃'和DZ₄',见图1。

通过物探测试,覆盖层内波速层主要表现为两层或3层,层间纵波波速差异较明显,且 $V_1 < V_2 < V_3$,地层厚度满足地震折射波法勘探必要条件,物性参数与实际地层的对应关系见表2。坝址区河床及左岸台地物探成果分析如下。

表2 地震折射波法解译多布水电站覆盖层各层物质成分及纵波波速 V_p

波速层	物质成分	波速 $V_p/m \cdot s^{-1}$	层厚度/m
第①层	水	1 500	0~3.5
	堆积碎石土	560	0~43.0
第②层	饱水砂卵砾石	2 150~2 160	52.6~322.9
第③层	花岗岩	3 800	—

河床位置主要布置了顺河向DZ₁测线、横河向DH₀、DH₁、DH₃、DH₄及DB₀₂、DB₀₃等6条测线。解译成果表明,DZ₁测线覆盖层厚度变化范围为146.3~202.2 m,整体上游浅,下游深;DH₀测线覆盖层厚度变化范围为52.6~197.1 m,DH₁测线覆盖层厚度变化范围为75.0~269.1 m,DH₃测线覆盖层厚度变化范围为62.8~119.5 m,DH₄测线覆盖层厚度变化范围为137.6~270.9 m,DB₀₂测线覆盖层厚度变化范围为75.4~171.6 m,DB₀₃测线覆盖层厚度变化范围为73.3~188.8 m。整体上看,坝址区河床深厚覆盖层厚度有左岸厚、右岸薄特征,基岩顶板整体以40°左右坡度由右岸斜插向左岸。

在台地上顺坝轴线布置一条DH₅测线。表层碎石土厚度变化范围为4.0~38.3 m,平均厚度为23.1 m。饱水砂卵砾石层厚度变化范围为225.4~351.9 m,平均厚度为277.4 m。覆盖层厚度变化范围为251.2~359.3 m,平均厚度为300.5 m。基岩顶板高程变化范围为2 730.9~2 830.2 m,基岩面凹凸不平,基岩顶板由左向右略有抬高趋势,在埋深288 m出现凹沟,沟宽度为75 m左右,深度约60 m,沟底基岩顶板高程为2 730.9 m。在埋深365 m附近出现凹沟,沟宽度为70 m左右,深度约40 m,沟底基岩顶板高程为2 757.7 m。物探解译成果见图4,总体上看,左岸台地覆盖层厚度变化范围为251.2~359.3 m,平均厚度为300.5 m。基岩顶板高程变化范围为2 730.9~2 830.2 m,基岩顶板由左岸向右岸略有变高趋势,基岩面凹凸不平,在埋深288 m附近出现凹沟和埋深365 m附近出现凹沟,推测为古河道。

2.3 综合分析

坝址区河床覆盖层深度采用钻探和物探相结合方法确定。根据钻孔揭露和物探地震剖面测试结果,坝址深厚覆盖层厚度具有以下特征:

(1) 深厚覆盖层厚度大。ZK₃₄钻孔最深258.45 m,但未揭穿覆盖层。物探测试结果最深大于359.3 m,属于深厚覆盖层。

(2) 坝址区不同部位深厚覆盖层厚度差异明显。左岸台地最厚,现河床左岸滩地次之,河心较薄,右岸滩地最薄。

(3) 基岩顶板产出状态起伏。河床及右岸基岩顶板呈斜坡状展布,坡度40°左右斜插向左岸,到左岸台地,基岩顶板逐渐变缓,但是起伏差较大,呈沟壑状。至现今国道川藏公路附近,左岸台地地下伏基岩顶板埋深约250 m左右,再向山内逐渐抬升。

(4) 从深厚覆盖层厚度变化来看,古河床中心应该在左岸台地中部附近。

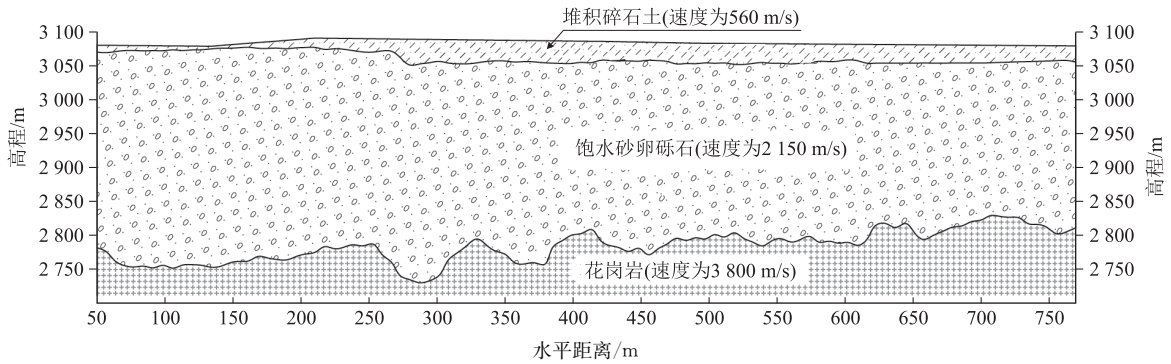


图4 多布水电站左岸台地DH₀₅测线物探解译成果图(波速为平均值)

3 多布水电站深厚覆盖层成因机制与成因分类

3.1 深切河谷成因

(1) 青藏高原地壳隆升。青藏高原自形成以来,运动趋势一直向上隆升。第四纪以来,受青藏高原持续隆升的影响,工程区地壳处于间歇性抬升或一直抬升状态,其抬升速度还不断在加快^[14]。地壳抬升的状态形成该地区的深切河谷,这种深切河谷为形成深厚覆盖层提供了堆积空间,具备了形成深厚覆盖层的河谷条件^[15]。青藏高原早更新世晚期至中更新世初期,即 $120\sim 60\times 10^4$ a,青藏高原发生二次构造隆升事件,称为昆黄运动,经过此次抬升事件,青藏高原被抬升到了3 000~3 500 m高度,青藏高原地貌格局出现^[16]。距今 15×10^4 a以来,青藏高原再次发生了一次剧烈而不均匀的构造抬升,称为共和运动,进而形成现今平均海拔4 000 m以上的高度,该阶段高原以强烈的构造变形和周缘区地貌的剧烈切割为特征,形成深切河谷,出现3次加速隆升过程,高原急剧隆升,河谷剧烈下切形成尼洋河深切河谷^[17]。实际上,雅鲁藏布江也是在这个时间段形成,尼洋河是在这个时段形成其最深河谷的。根据钻孔测年资料,ZK₃₀孔在52~54 m段的测年是 $12.4\pm 1.2\times 10^4$ aBP,高程约3 000 m。物探资料表明,覆盖层最深大于359.3 m,即谷底高程约2 720~2 730 m,则谷底形成年代应该是共和运动,即在 15×10^4 aBP左右。

(2) 地质构造。根据区域地质构造单元划分,尼洋河流域整体位于拉萨地块,下游局部位于拉萨地块与喜马拉雅地块的雅鲁藏布缝合带上^[18]。尼洋河流域位于班公错-怒江断裂带F₁、嘉黎断裂带F₂与雅鲁藏布江断裂带之间,河流整体方向与断裂痕迹基本平行,但是沿河流断裂构造不太发育^[19]。不同地块与区域断裂差异活动强烈,由于断块间上

升幅度不同,可以形成不同的深切峡谷,对深厚覆盖层的形成提供空间条件^[20]。工程区地质构造发育,特别是区域性大断裂发育,大断裂活动经常会形成深切峡谷。从区域地质条件来看,尼洋河流域断裂发育,断裂不仅为河床堆积提供了丰富的物源,而且形成深切河谷^[21]。

(3) 冰川活动。青藏高原的冰川活动丰富,冰川活动过程中不仅会堆积大量的冰碛物和冰水堆积,而且冰川运动过程中会对河谷形成强烈侵蚀作用,导致河谷进一步深切^[22]。从冰川活动的气候变化特点来看,冰期海平面大幅下降,导致河流比降加大,河流动力作用增强,引起强烈下切,形成深切河谷。

3.2 覆盖层堆积成因

(1) 气候因素。第四纪更新世以来,青藏高原经历多次冷暖交替气候。自 30×10^4 aBP以来,该地区发生过4次冰期和3次间冰期。间冰期气温大幅上升,冰川大面积融化,从而在深切河谷沉积大量冰水堆积物与少量冰积物,形成深厚覆盖层“气候型”加积层^[23]。间冰期早期,海平面上升不仅产生了下切河谷内的海侵,还影响到河流的搬运和沉积作用。尼洋河与雅鲁藏布江一带河谷非常宽阔,平均宽度近1 km,表明西藏地区河谷受到冰川活动显著。强烈的冰川活动不仅导致河谷宽阔,而且为深厚覆盖层提供了丰富的物源^[24]。从覆盖层钻孔资料来看,多布水电站坝址下部有超过100 m的冰水堆积为主的堆积物。覆盖层测年结果表明,这些冰水堆积物形成时期在第四纪更新世中期的后期,即距今 $10\sim 20\times 10^4$ aBP,正好为庐山亚冰期与大姑亚冰期之间的里斯-明德间冰期。在间冰期,气温大幅上升,冰川大范围消融,大量冰川携带物随着消融的冰水被携带至河谷地带沉积下来,为尼洋河深厚覆盖层形成提供了物源基础^[8]。

(2) 构造作用。不同的构造单元上地层岩性不

同,造成河谷下蚀速率的差异,也会对河谷的堆积厚度产生影响。在构造上升区内的河段,河流急剧侵蚀,形成深切峡谷,冲积层显著变薄,对深厚覆盖层的形成起弱化作用^[25]。流经构造下降断块上的河段则发生加积,谷底急剧堆积,早期形成的冲积层被新的物质所覆盖,覆盖层厚度骤增,冲积层亦呈现出多层性或周期性。根据区域地质构造资料,工程区域新构造运动强烈,多次发生 7 级以上大地震。尼洋河的冲积层中大部分含有块碎石,这些块碎石与尼洋河上游的区域断裂活动有直接关系^[26]。此外,强烈的断裂活动导致研究区不良地质现象发育、岩体破碎,松散、丰富的破碎物质不仅为深厚覆盖层沉积提供了非常丰富的物源,在暴雨、地震条件下,又会产生许多新的不良地质现象,以致覆盖层堆积加厚^[27]。从测年结果来看,尼洋河深厚覆盖层中上部堆积物形成时间小于 20×10^4 aBP。大部分小于 10×10^4 aBP,说明尼洋河沉积主要发生于第四纪晚期,这与第四纪晚期该区新构造活动密切相关。

(3) 地质灾害作用。受地质环境与气候条件影响,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害在尼洋河流域非常发育^[28]。从地质测绘和地表调查资料分析,多布水电站库坝区也发育有滑坡、崩塌和泥石流,对坝址区深厚覆盖层具有明显的加积作用。在坝址左岸,由于大规模的滑坡形成了超过 30 m 厚的溃坝残留体,而在库区左右岸分布有 4 条典型泥石流沟^[29]。从现场调查来看,坝址区深厚覆盖层中既有堰塞沉积,也有崩滑流沉积,其中以滑坡堆积为主。这些大型地质灾害堆积于河道中不仅造成河谷覆盖层加厚,而且形成一定厚度的堰塞湖相沉积。钻探揭示堰塞湖相沉积厚度一般超过十几米,厚者达几十米,也是形成坝址区深厚覆盖层的原因之一。

3.3 覆盖层成因分类

由上述尼洋河深厚覆盖层成因以及坝址区钻孔资料可以看出,多布水电站坝址区深厚覆盖层成因复杂,多成因的叠加作用形成厚度超过 359.3 m 的巨厚深厚覆盖层。结合物探、钻探以及测年、室内测

试,深厚覆盖层的成因主要有以下 5 种类型。

(1) “气候型”加积型(冰水积)。由于区域气候变迁,导致冰川活动的冰期与间冰期交替出现,特别是间冰期气温大幅上升,大面积的冰川融化,河床沉积能力加强,河床部位形成大范围的冰水积。根据钻孔资料,多布水电站坝址下部 100 m 主要为该类型的沉积,且冰水积堆积物占到了覆盖层厚度的 30% 左右。

(2) 河流冲积层。较大的河床比降、丰富的松散物质、充沛的水流条件等使得位于尼洋河下游的多布水电站形成厚度超过 100 m 冲积层,且冲积层的粗细沉积层呈现交替重复叠加。

(3) 崩滑流加积层。在强烈的冰川活动、区域构造运动、暴雨、地震等因素的综合作用影响下,尼洋河流域的崩塌、滑坡以及泥石流地质灾害非常发育,所形成的大量松散物堆积于河道中形成了深厚覆盖层的加积层。现场调查,坝址区覆盖层中有崩塌和泥石流物质,左岸高约 30 m、纵河向长 1 800 m 左右的台地,就是大型滑坡与崩塌堵江溃坝后的残留坝体,该大型滑坡堵江导致河流改道而向右岸偏移,现代河床变窄,同时也造成坝址区右岸的覆盖层大于左岸的覆盖层厚度。

(4) 堰塞湖相沉积。受强烈的冰川活动、区域构造运动、暴雨、地震等因素的综合作用影响,不仅崩塌、滑坡以及泥石流地质灾害发育,而且形成多次堵江事件。尼洋河的堵江事件使工程区河谷形成堰塞湖相沉积,而且在左岸台地的堆积体中和右岸平洞中都可可见堰塞湖相的灰黑色、深灰色淤泥质粘土沉积物。

(5) “构造型”加积层。尼洋河流域不仅断裂发育,而且新构造发育。尼洋河位于不同的构造单元,使尼洋河形成“构造型”加积层深厚覆盖层。从钻孔资料来看,坝址区的深厚覆盖层中普遍含有块石、碎石,这些堆积物与区域地质构造有直接关系。根据深厚覆盖层各岩组的成因、物质组成等因素,深厚覆盖层各岩组的成因与物质组成类型统计见表 3。

表 3 覆盖层成因与物质组成类型分析表

物质类型	物质特征	成因类型	埋深特征
崩滑堆积类土	大颗粒为主,局部粉土充填,较松散	滑坡堵江	古河床表层
堰塞湖相沉积的细粒土	细砂与粉粒为主	堰塞沉积	古河床上部
冲积砂卵砾石类土	卵砾石为主	水流较急环境的冲积	中部多层分布
冲积砂类土	中细砂为主	水流较缓环境的沉积	中部多层分布
冰水积砂卵砾、块碎石类土	卵砾石为主,含少量块碎石	间冰期较急冰水的冲积	下部多层分布
冰水积砂类土	中细砂为主	间冰期较缓冰水的冲积	河床下部

从表 3 可以看出,多布水电站坝址深厚覆盖层

根据物质组成特征和成因可以分为 5 类:崩滑堆积

类土、堰塞湖相沉积的细粒土、冲积砂卵砾石类土、冲积砂类土、冰水积砂卵砾(块碎)石类土、冰水积砂类土。

4 主要结论

(1) 尼洋河多布水电站深厚覆盖层的形成受气候因素、地质构造与新构造运动、冰川活动、地质灾害等综合影响。青藏高原特殊的地质环境与气候变迁是多布水电站深厚覆盖层形成的直接原因。

(2) 多布水电站坝址深厚覆盖层厚度大,钻孔最深达 258.45 m 仍未揭穿,物探测试结果表明埋深最深大于 359.3 m,属于深厚覆盖层。坝址区不同部位覆盖层厚度差异明显,左岸台地最厚,左岸滩地次之,河心较薄,右岸滩地最薄;下伏基岩顶板产出状态起伏,河床及右岸基岩顶板呈斜坡状展布,坡度 40°左右斜插向左岸,到左岸台地,基岩顶板逐渐变缓,左岸台地下伏基岩顶板埋深约 250 m 左右,再向山内逐渐抬升。

(3) 多布水电站复杂深厚的覆盖层的成因复杂,可划分为“气候型”加积型、河流冲积层、崩滑流加积层、堰塞湖相沉积、“构造型”加积层等 5 种类型。

参考文献

- 赵卓. 西藏尼洋河多布水电站施工准备工程动工[J]. 水力发电, 2011, 37(8): 97-98.
- Shrestha K Y, Webster P J, Toma V E. An atmospheric-hydrologic forecasting scheme for the Indus river basin[J]. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(2): 861-890.
- Delorit J D, Block P J. Promoting competitive water resource use efficiency at the water-market scale: an inter-cooperative demand equilibrium-Based approach to water trading[J]. Water Resources Research, 2018, 54(8): 5394-5421.
- Strzepek K M, Yohe G W, Tol RSJ, et al.. The value of the high Aswan dam to the Egyptian economy[J]. Ecological Economics, 2008, 66(1): 117-126.
- 霍苗, 晏国顺, 杨兴国, 等. 大渡河泸定水电站深覆盖层基础防渗墙施工技术[J]. 人民长江, 2013, 44(1): 61-63.
- 赵华, 王运生. 金沙江某水电站坝基覆盖层的成因及其渗透稳定性[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(04): 443-449.
- 郇能惠, 米占宽, 李国英, 等. 冶勒水电站超深覆盖层防渗墙应力变形性状数值分析[J]. 水利水运工程学报, 2004, (1): 18-23.
- 许强, 陈伟, 张倬元. 对我国西南地区河谷深厚覆盖层成因机理的新认识[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 448-456.
- 王运生, 罗永红, 唐兴君, 等. 雅砻江谷底卸荷松弛现象与深厚覆盖层特征[J]. 工程地质学报, 2007, 16(2): 164-168.
- 王启国. 金沙江虎跳峡河段河床深厚覆盖层成因及工程意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1455-1466.
- 罗永红, 南凯, 谢春庆, 等. 青藏高原南缘某机场场区深厚覆盖层工程地质特征[J]. 工程地质学报, 2020, 29(02): 486-494.
- 王启国. 金沙江虎跳峡河段水电开发重大工程地质问题研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(08): 1292-1298.
- 邓荣贵, 张倬元. 宝兴河流域地质灾害特征浅析[J]. 成都理工大学学报, 1995, 22(2): 57-63.
- 祁生文, 李永超, 宋帅华, 等. 青藏高原工程地质稳定性分区及工程扰动灾害分布浅析[J]. 工程地质学报, 2022, 30(03): 599-608.
- 吴俊峰. 大渡河流域重大地震滑坡发育特征与成因机理研究[D]. 成都理工大学, 2013.
- 张永双, 刘筱怡, 吴瑞安, 等. 青藏高原东缘深切河谷区古滑坡: 判识、特征、时代与演化[J]. 地学前缘, 2021, 28(02): 94-105.
- 瞿伟, 高源, 陈海禄, 等. 利用 GPS 高精度监测数据开展青藏高原现今地壳运动与形变特征研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(01): 182-204.
- 丁一凡, 程晓, 程铨, 等. 基于偏移追踪的青藏高原卓琼冰川流速监测及成因分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(5): 1650-1658.
- 党亚民, 杨强, 王伟, 等. 基于块体模型的青藏高原及邻区地壳三维构造形变分析[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1192-1205.
- 刘飞, 李有利, 雷惊昊, 等. 青藏高原东北缘永昌南山北麓洪积扇对气候变化与构造运动的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(4): 163-173.
- 张岳桥, 李海龙. 青藏高原东部晚新生代重大构造事件与挤出造山构造体系[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 1829-1852.
- 顾菊, 张勇, 刘时银, 等. 青藏高原冰川底部滑动估算方法研究: 进展、问题与展望[J]. 地球科学进展, 2021, 36(3): 307-316.
- 梁海珍. 青藏高原冰川冻土消融加速[J]. 生态经济, 2023, 39(9): 5-8.
- 李秀美, 刘苏涛, 张力方, 等. 过去两千年青藏高原百年尺度温度变化的时空格局[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2023, 36(03): 451-456.
- 李治财. 构造运动对河床深厚覆盖层的影响[J]. 山西建筑, 2015, 41(22): 79-80+162.
- 罗永红, 南凯, 谢春庆, 等. 青藏高原南缘某机场场区深厚覆盖层工程地质特征[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 486-494.
- 袁建新, 易志坚, 王寿宇. 青藏高原及其周边地区水电工程建设中的地质挑战[J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 847-855.
- 吕立群, 周冠宇, 马超, 等. 古沉积盆地地下切引发的泥石流侵蚀和波状流动耦合过程[J/OL]. 地球科学: 1-13[2023-09-28].
- 周斌, 邹强, 蒋虎, 等. 川西高原气候变化特征及泥石流流动态危险性响应研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(4): 241-255.

作者简介: 巨广宏(1970—),男,陕西杨凌人,博士,正高级工程师,研究方向:岩土工程与地质灾害。E-mail:412939733@qq.com