

柔性测斜仪在 300 m 级高坝中的应用

陶子傲，代乔亨

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川 成都 610072)

摘 要:两河口水电站大坝为 300 m 级高砾石土心墙坝,建坝于高原高寒地区。特殊的环境条件对监测仪器的耐久性、可靠性及适应性提出了很高的要求。柔性测斜仪为安全监测新仪器,在水电工程中的应用较少,在 300 m 级高土石坝中的使用更是国际首创。自 2017 年以来,柔性测斜仪在两河口水电工程中已布设并安装了 10 套,仪器运行情况整体良好,监测成果能够反映出所测部位的真实变形,所取得的监测成果在服务该工程的同时,可对同类型工程的安全监测起到指导作用。
关键词:两河口水电站;300 m 级高土石坝;柔性测斜仪;设计;布置;监测成果;分析
中图分类号:TV221.1;TV698.1;TV64;TV7 **文献标识码:** B **文章编号:**1001-2184(2022)01-0084-05

Application of Flexible Inclinator in Dam with Height of 300 m

TAO Ziao, DAI Qiaoheng

(PowerChina Chengdu Engineering Co., LTD, Chengdu, Sichuan, China, 610072)

Abstract: A gravel soil core dam with height of 300m is built in the plateau and cold area for Lianghekou Hydropower Station. The special environmental conditions place high requirements for the durability, reliability and adaptability of monitoring instruments. Flexible inclinometer is a new instrument for safety monitoring which is rarely used in hydropower projects, and its application in monitoring of gravel soil dam with height of 300m is internationally unprecedented. Since 2017, 10 sets of flexible inclinometers have been deployed and installed in Lianghekou Hydropower Project, those instruments are operating well and the monitoring results reflect the real deformation of the measured parts. The monitoring results not only serve the project, but also play a guiding role in the safety monitoring of similar projects.
Key words: Lianghekou Hydropower Station; 300 m high earth rock dam; flexible inclinometer; design; layout; monitoring results; analysis

1 概 述

两河口水电站坝址控制流域面积为 6.57 万 km²,坝址处多年平均流量为 666 m³/s。水库正常蓄水位高程 2 865 m,相应库容 107.67 亿 m³,调节库容 65.6 亿 m³,具有多年调节能力。该工程为一等大(1)型工程,枢纽建筑物由土质心墙堆石坝、溢洪道、泄洪洞、放空洞、发电厂房、引水及尾水建筑物等组成。心墙堆石坝最大坝高 295 m,发电厂房为地下式,厂内安装 6 台混流式水轮发电机组^[1,2]。

该工程的安全监测设计遵循“有效合理可靠监控工程的安全可靠运行以及必要的设计反馈研究”的原则,并为建设更多更好的超高级土石坝提

供宝贵的原型资料及分析成果。

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司(以下简称“成都院”)自 2015 年即开始进行柔性测斜仪在高土石坝中的应用研究工作,经过近 2 年多时间的跟踪研究及调研,提出了两河口水电站 300 m 高土石坝柔性测斜仪监测设计方案及其安装埋设保护技术方案并付之应用。

2 研究的目的和意义

近年来,中国水电工程建设技术发展迅速,以双江口(坝高 312 m)、两河口(坝高 295 m)、糯扎渡(坝高 261.5 m)、长河坝(坝高 240 m)等水电站为代表的一批典型工程将砾石土心墙堆石坝的坝高逐步由 100 m 级提升至 300 m 级,使我国土

收稿日期:2022-01-18

石坝的设计理论及施工技术达到国际先进水平。但有关土石坝安全监测技术的发展及应用明显滞后于土石坝筑坝技术。目前,国内外通常采用沉降环、水管式沉降仪进行大坝内部垂直位移的监测,采用引张线式水平位移计或活动式测斜孔进行大坝内部水平位移的监测。这些传统的监测仪器主要针对 100 m 级坝高的水电工程进行开发和研制,其适应性已不能完全满足 300 m 级超高土石坝对变形监测的要求,导致当前高土石坝变形监测仪器的存活率普遍偏低。而高土石坝的变形情况一直是工程关注的重点,直接关系到大坝能否安全稳定运行。

因此,针对 300 m 级超高土石坝工程寻找更适宜的安全监测仪器、研究更有效的监测方法就显得特别有意义,而柔性测斜仪就是在这种情况下诞生并越来越多地被投入使用^[3,4]。

3 仪器简介、技术特点及主要参数

3.1 仪器简介

北京盛科瑞科技有限公司代理的韩国 3D GBMS 三维连续型变形监测系统(柔性测斜仪)由一系列连续相接的 MEMS 加速度计倾斜仪构成,系统可自动确定每个倾斜仪单元的空间形态,从而实现对目标物的三维变形监测。三维连续型变形监测系统(柔性测斜仪)是一款新型地面变形监测仪器,既可安装于钻孔中监测沿地层深度的土体变形,也可安装于建筑物表面监测其变形特性,如隧洞、地下空间断面收敛;油罐地基、轨道沉降;桥梁、挡土墙、轨道扭曲等三维建筑物的变形特征^[5]。

盛科瑞三维连续型变形监测系统的外径最大为 25 mm,三维连续型变形监测系统(柔性测斜仪)由 MEMS 加速度计三维传感器、内置电路板、标准测量单元、特殊不锈钢外包护套等部件构成。监测数据既可通过连接笔记本电脑现场采集方式,也可由自动采集设备采集并通过远程通讯方式(RS485,3G 或 4G 通讯网络,LAN 等方式)获得。安装于笔记本电脑的采集软件可用于实时处理从 CDS 获取的变形测量数据、可视化变形曲线,可将监测目标的变形状态及变形量实时显示到计算机屏幕。

3.2 主要技术特点

盛科瑞三维连续型变形监测系统(柔性测斜

仪)的主要技术特点为:

(1)节省成本,安装简便。在钻孔中安装时,无需使用传统导槽型测斜管,仅使用普通 30 mm 小直径 PVC 导管加以保护即可,相较传统固定测斜仪可大幅减少钻孔与测斜管成本,安装简便。

(2)监测精度大幅提升。每个三维连续型变形测量单元长度为 0.5 m 或 1 m,相较于传统固定式测斜仪 2~3 m 的测量标距,测点数量增加了 4~6 倍,从而大大提高了变形监测精度。

(3)安装方式灵活,应用广泛。可竖直、水平、任意角度安装,可获得三维变形数据,可应用于隧洞、路基、桥梁的变形监测,应用范围广泛。

(4)数据采集、处理方便,节省工作量。系统配置包括自动数据采集与实时处理软件,可将监测目标的变形状态及变形量实时显示到计算机屏幕、记录到文件并快速形成报告格式的打印图表,从而大大减少了技术人员的数据处理、分析时间与工作量。

4 监测仪器的布置

两河口水电站砾石土心墙坝共计布置了 12 套柔性测斜仪,仪器总长度为 1 097 m。具体布置情况为:

(1)在左右岸混凝土盖板高程 2 641 m、桩号(坝)0+001.2 处沿大坝心墙轴线各布置了 1 套柔性测斜仪,仪器编号分别为 IN-R1、IN-R2,每套长度为 40 m,兼顾开展监测仪器性能测试和埋设试验。

(2)在左右岸混凝土盖板高程 2 701 m、桩号(坝)0+001.2 处沿大坝心墙轴线各布置了 1 套柔性测斜仪,仪器编号分别为 IN-R3、IN-R4,每套长度为 132 m,2 套仪器在河床中心的搭接长度约为 2 m。

(3)在左岸混凝土盖板高程 2 761 m、桩号(坝)0+001.2 处沿大坝心墙轴线布置了 1 套柔性测斜仪,仪器编号为 IN-R5,仪器长度为 200 m;在右岸混凝土盖板高程 2 761 m、桩号(坝)0+001.2 处沿大坝心墙轴线布置了 1 套柔性测斜仪,仪器编号为 IN-R6,仪器长度为 100 m;在两套柔性测斜仪之间沿坝轴线布置了 1 套柔性测斜仪,仪器编号为 IN-R7,仪器长度为 100 m;3 套柔性测斜仪之间的搭接长度均为 4 m。

(4)在大坝上游堆石区 3-3 监测剖面高程

2 790 m 的 L3 水管式沉降仪监测条带沟槽内,沿监测条带近水平布置了 3 套水平柔性测斜仪,在上游坝坡至反滤层布设的 3 套柔性测斜仪仪器编号依次为 IN—R8、IN—R9 和 IN—R10,每套长度为 51 m。相邻 2 套柔性测斜仪采用厂家专用的配套接头进行连接。

(5)在大坝 3—3 监测剖面上游堆石区高程 2 790 m 马道打铅垂钻孔并埋设 PE 导管和柔性测斜仪,对施工期和初蓄期上游堆石区水平位移进行监测。仪器编号为 IN—R11,长度为 100 m。

(6)在大坝心墙 3—3 监测剖面坝轴线处高程 2 775 m 竖向预埋了 1 根 $\varphi 85$ mm 测斜管,施工期测斜管随心墙的填筑预埋安装并对测斜管外套 PE 管和伸缩接头进行保护,待填筑至坝顶高程后,在管内竖向安装了 1 套柔性测斜仪,仪器编号为 IN—R12,长度为 100 m。

5 监测数据分析

截止目前,两河水电站已安装完成并取得基准值的柔性测斜仪共计 10 套,监测数据自 2017 年延续至今,文中主要对布置在枢纽建筑物心墙等主要部位的柔性测斜仪监测成果进行分析。

(1)2 641 m 高程柔性测斜仪。布置在右岸 2 641 m 高程的柔性测斜仪 IN—R2 实测蓄水前大坝心墙累积沉降量在 714.9 mm 以内,一期蓄水期间沉降增幅在 40.4 mm 以内,二期蓄水期间沉降增幅在 13.7 mm 以内,当前累积沉降量在 778.7 mm 以内,沉降已基本趋于平缓。布置在右岸 2 641 m 高程的柔性测斜仪 IN—R2 各高程安装的测点累计沉降量见表 1,心墙左岸 2 641 m 高程柔性测斜仪 IN—R2 特征点沉降分布过程线见图 1。

(2)2 700 m 高程柔性测斜仪。在大坝心墙 2 700 m 高程(坝)0+001.2 桩号左、右岸各埋设了一套柔性测斜仪,左岸的设计编号为 IN—R3,右岸的设计编号为 IN—R4。

左岸柔性测斜仪 IN—R3 实测蓄水前大坝心墙累积沉降量在 2 063.3 mm 以内,一期蓄水期间沉降增幅在 169.4 mm 以内,二期蓄水期间沉降增幅在 46.5 mm 以内,当前累积沉降量在 2 317.6 mm 以内,沉降逐渐趋于平缓。

IN—R3 柔性测斜仪 132 m 测点的测值为

表 1 柔性测斜仪 IN—R2 沉降量监测成果表

仪器 编号	测点距 盖板距离	累计沉降量 /mm
		2021—9—29
AX		778.7
IN—R2	IN	123.7
	1	123.7
	2	224.8
	3	286.9
	4	338.4
	5	336.4
	6	338.9
	7	348
	8	358.2
	9	380.1
	10	403.9
	11	429
	12	443.8
	13	474.7
	14	495.8
	15	493.9
	16	501.9
	17	504
	18	542
	19	570.2
	20	579.9
	21	590.3
	22	619.1
	23	627.8
	24	629.8
	25	648.3
	26	666.3
	27	668.1
	28	676
	29	692.2
	30	707.4
	31	705.6
	32	729.9
	33	738.4
	34	727.9
	35	733.6
	36	747
	37	767.9
	38	778.7
	39	771
	40	770.9

注:柔性测斜仪 IN—R2 于 2017 年 11 月 8 日安装于高程 2 641 m,桩号为坝 0+001.2。

2 317.6 mm,同部位附近电磁沉降环 DC4—25 的测值为 2 336.5 mm,两者沉降量值基本相当。心墙左岸 2 700 m 高程柔性测斜仪 IN—R3 特征点沉降分布过程线见图 2。

(3)2 761 m 高程柔性测斜仪。在大坝 2 761 m

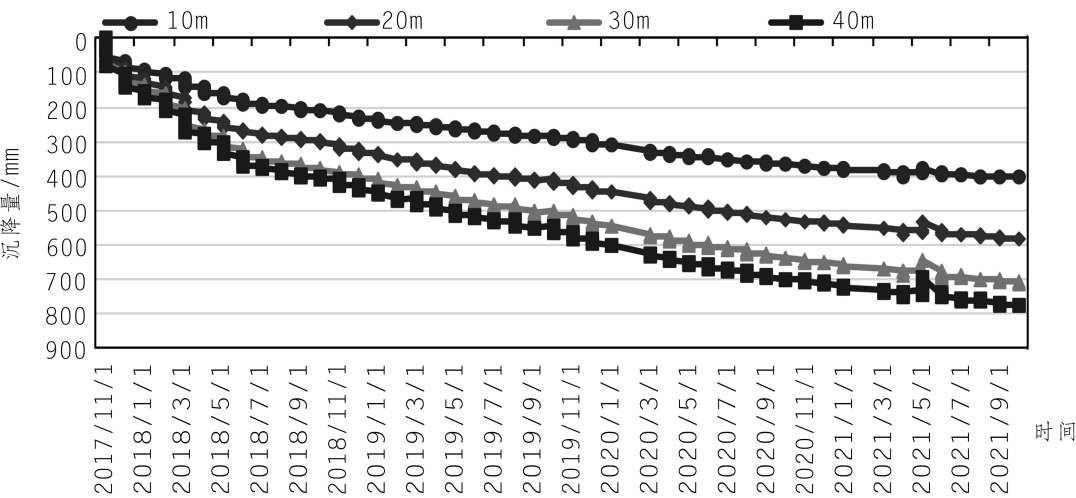


图 1 心墙左岸 2 641 m 高程柔性测斜仪 IN-R2 特征点沉降分布过程线

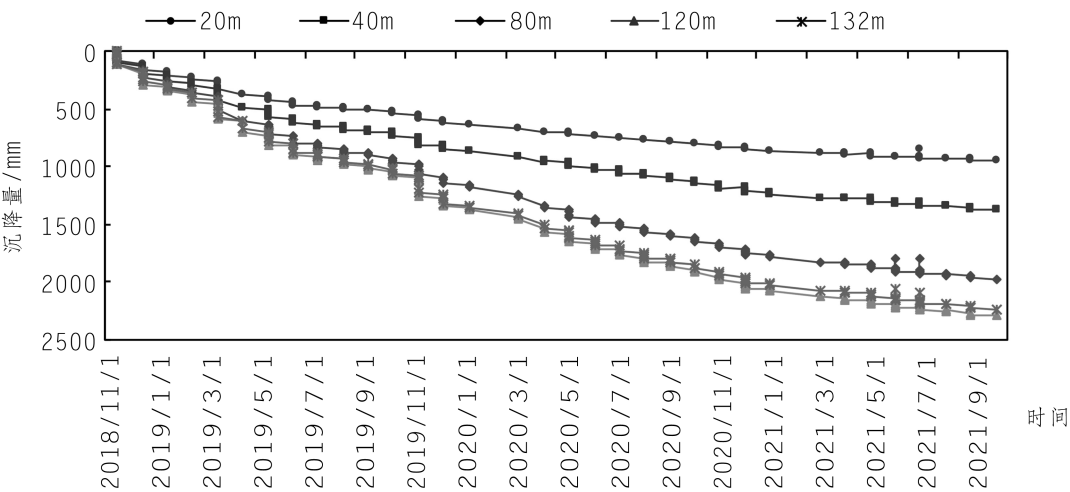


图 2 心墙左岸 2 700 m 高程柔性测斜仪 IN-R3 特征点沉降分布过程线

高程心墙河床中部及左右岸各布设了一套柔性测斜仪,左岸测点编号为 IN-R5(长度 200 m),右岸测点编号为 IN-R6(长度 100 m),河床中部测点编号为 IN-R7(长度 100 m)。

左岸柔性测斜仪 IN-R5 实测蓄水前大坝心墙累积沉降量在 2 354.2 mm 以内,一期蓄水期间沉降增幅在 252.1 mm 以内,二期蓄水期间沉降增幅在 154.9 mm 以内,当前累积沉降量在 2 820 mm 以内,心墙左岸 2 761 m 高程柔性测斜仪 IN-R5 特征点沉降历时过程线见图 3。

IN-R6 与 IN-R7 两套柔性测斜仪沉降量累加后,实测蓄水前心墙累积沉降量在 2 109.7 mm 以内;一期蓄水期间沉降增幅在 517.1 mm 以内,二期蓄水期间沉降增幅在 143.9 mm 以内,

当前累积沉降量在 2 837.1 mm 以内,左右岸沉降变形基本沿坝轴线成对称分布,左右岸柔性测斜仪的最大测值基本相当。心墙右岸 2 761 m 高程柔性测斜仪 IN-R6 与 IN-R7 特征点沉降历时过程线见图 4。

6 结 语

长期以来,土石坝的沉降变形监测主要依靠沉降环、水管式沉降仪、横梁式沉降仪等常规监测仪器进行,但其缺陷明显;而柔性测斜仪普遍具有高精度、高稳定性、可重复利用性、大量程、持久稳定性、数据自动采集及存储等技术优势,柔性测斜仪通过在两河口工程中的应用,成功地实现了在大坝心墙坝轴线贯通埋设柔性测斜仪(最大安装长度达 400m,单根最大埋设长度达 200m),这

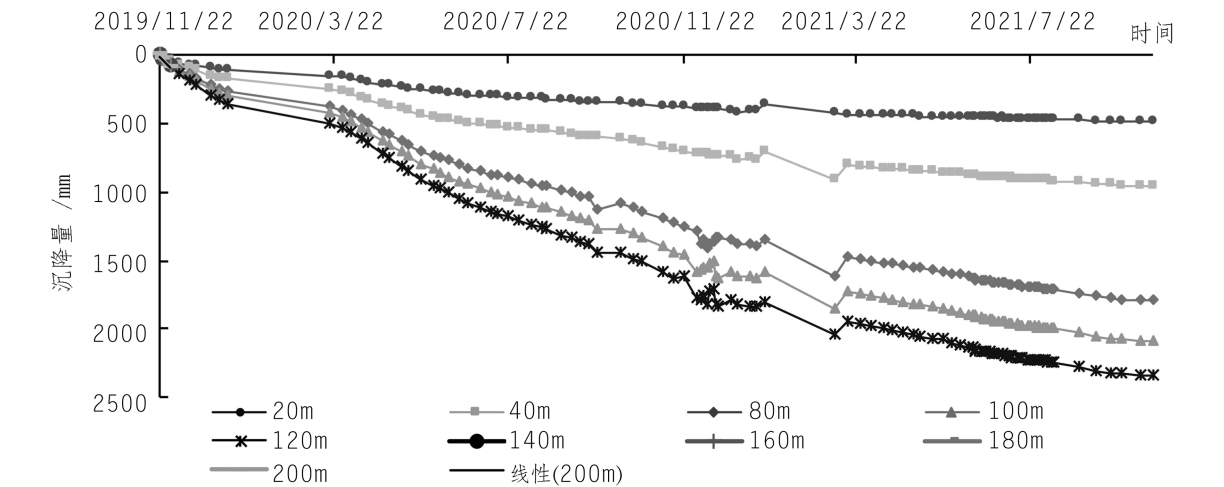


图 3 心墙左岸 2 761 m 高程柔性测斜仪 IN-R5 特征点沉降历时过程线图

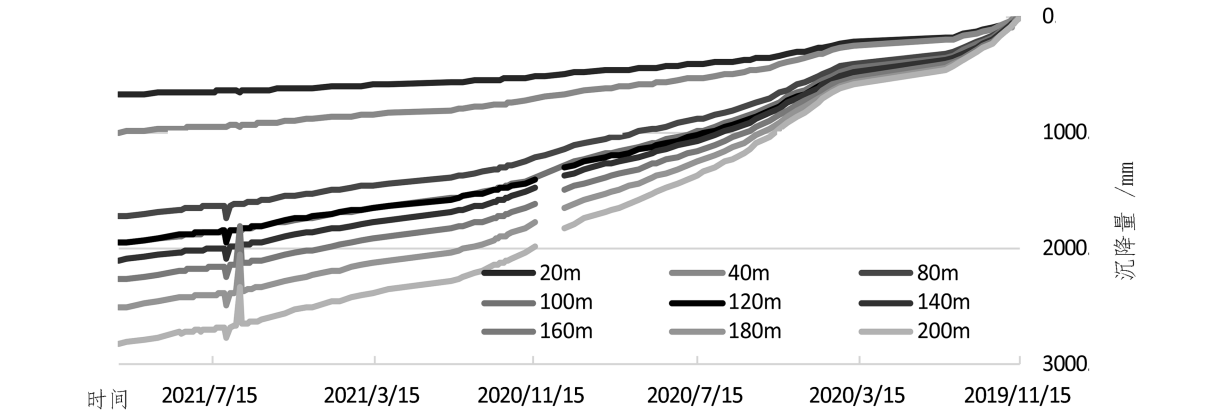


图 4 心墙右岸 2 761 m 高程柔性测斜仪 IN-R6、IN-R7 特征点沉降历时过程线图

是国内首次实现大坝心墙全断面连续线性沉降监测手段,在国际上亦属首创。

实践与论证表明:柔性测斜仪可以较好地应用于各类土建工程,甚至是 300 m 级高堆石坝等超级工程,其监测成果亦能真实反映所观测部位的变形情况。可以认为:柔性测斜仪在性能方面总体满足 300 m 级高土石坝变形监测的需要。

参考文献:

[1] 张坤,彭巨为. 柔性测斜仪在 300 m 级高砾石土心墙坝沉降监测中的应用研究[J]. 大坝与安全, 2018, 19(3): 47-53.

[2] 文豪. 柔性测斜仪在 300 m 级超高土石坝变形监测中的探

索性应用研究[J]. 大坝与安全, 2020, 21(3): 11-15.

[3] 龚静. 300 m 级高土石坝心墙内部变形监测关键技术研究[J]. 水力发电, 2016, 42(10): 39-41.

[4] 杨艳泽,周建平,王富强,等. 300 m 级高面板堆石坝安全性及关键技术研究综述[J]. 水力发电, 2016, 42(9): 41-45, 63.

[5] 李果,王毅,吴铸,等. 基于柔性测斜装置的滑坡大变形误差识别与修正[J]. 人民长江, 2016, 47(4): 74-78.

作者简介:

陶子傲(1993-),男,吉林长春人,工程师,从事水利水电工程安全监测工作;

代乔亨(1997-),男,四川乐山人,助理工程师,从事水利水电工程安全监测工作.

(责任编辑:李燕辉)

水电十局一分局通江项目高明湖核心区市政道路建设子项目顺利完工

2022 年 3 月 4 日,由水电十局承建的通江县环高明湖经济带建设 PPP 项目第三个子项目——“通江县高明核心区市政道路建设项目”的顺利完工,具备通车条件。至此,通江项目三个子项全部建设完成,项目工作将从建设阶段全面转入运营阶段。“通江县高明核心区市政道路建设项目”的建设内容包括六条市政道路:经七路、经八路、经十路、纬十路东段 A 段、纬十路东段 B 段、纬十三路,总长度为 4 314.25 米。开工伊始,通江项目第一时间进驻现场成立指挥部,加强工程管理和调度,围绕项目建设内容优化施工工序,倒排施工工期,对现场施工管理人员进行工艺工法、技术标准、安全环保施工等方面的技术交底,明确每一周、每一月的建设进度、建设要求和建设标准,全力抢抓施工黄金期。项目建设过程中,始终按照高起点、高标准、高效率的要求严控质量、狠抓进度,做到以天保周、以周包月、统筹推进,全力以赴争创一流工程,打造十局精品工程。核心区市政道路全面建成通车,进一步完善了高明新区的交通路网,打通了道路“微循环”,提升了新区投资环境,对带动革命老区周边经济发展、改善生态环境具有重要意义。

(供稿:水电十局)