

双江口水电站接触黏土料碾压试验及智慧化研究

康向文, 李鹏

(国电大渡河流域水电开发有限公司 四川 成都 610041)

摘要: 为验证接触黏土料设计参数的可行性, 设计技术指标及填筑标准的合理性、可用性, 确定最佳压实方法和可行的施工碾压参数, 开展了大坝心墙接触黏土料现场碾压试验。试验方法: 通过土料物理、力学性能试验, 通过不同试验组合选定机械、工艺流程及碾压参数。试验结果表明, 铺料厚度 25cm 静压 6 遍、铺料厚度 30cm 静压 8 遍, 压实度为 97.6%-99.4%, 满足设计要求, 继续增加碾压遍数后压实度及沉降量无明显变化。因此, 为与相邻坝料碾压参数匹配, 推荐采用 18T 振动平碾, 行驶速度按 2.5 ± 0.5 km/h 控制, 含水率控制在合理范围, 铺料厚度 30cm 静碾 8 遍。

关键词: 接触黏土料; 碾压试验; 智慧化; 双江口水电站

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:**

1 工程概况

1.1 工程简介

双江口水电站位于四川省阿坝藏族羌族自治州马尔康县、金川县境内, 为大渡河流域梯级开发“3 库 22 级”的第 5 级, 是大渡河流域水电梯级开发的上游控制性水库工程。电站的开发任务主要为发电, 采用坝式开发, 水库正常蓄水位 2500m, 总库容 28.97 亿 m³, 调节库容 19.17 亿 m³。电站装机容量 2000MW, 多年平均发电量 77.07 亿 kW·h。

双江口水电站工程为一等大(1)型工程, 枢纽主要建筑物为 1 级建筑物, 次要建筑物为 3 级建筑物。枢纽工程由拦河大坝、泄洪建筑物、引水发电系统等组成。拦河大坝采用砾石土心墙堆石坝, 坝顶高程 2510.00m, 最大坝高 312m, 坝顶宽度 16.00m, 坝顶长度 639.0m。上游坝坡为 1:2.0, 2430.00m 高程处设 5m 宽的马道; 下游坝坡 1:1.9, 坝坡上设置上坝公路。心墙顶宽 4.00m, 顶高程 2508.00m, 上、下游坡均为 1:0.2, 心墙底高程 2198.00m。心墙上、下游分别设 I、II 两层反滤料, 上游两层反滤水平厚度各 4m, 下游两层反滤水平厚度各 6m, 上、下游坡均为 1:0.2。上、下游反滤料与坝体堆石之间均设过渡层, 过渡层顶高程 2504.00m, 顶宽 10m, 上、下游坡均为 1:0.3。大坝接触黏土料填筑总量为 15.6 万 m³ (压实方)。

1.2 双江口智慧工程简介

基于大渡河公司智慧企业建设, 双江口智慧工程是以全生命周期管理、全方位风险预判、全要素智能调控为目标, 将信息技术与工程管理深度融合, 通过打造工程数据中心、工程管控平台和决策指挥平台, 实现以数据驱动自动感知、自动预判、自主决策的柔性组织形态和新型工程管理模式。双江口智能大坝工程单元作为双江口智慧工程“1 中心+7 单元”之一, 是以数字大坝为基础, 以物联网、智能技术、云计算与大数据等新一代信息技术为基本手段, 以全面感知、实时传送和智能处理为基本运行方式, 对大坝空间内包括人类社会与水工建筑物在内的物理空间与虚拟空间进行深度融合, 建立动态精细化的可感知、可分析、可控制的智能化大坝建设与管理运行体系。

2 现场碾压试验及智慧化应用

2.1 试验目的及料源准备

开展大坝接触黏土料碾压试验的目的是通过物理、力学性能的试验成果，验证接触黏土料设计参数的可行性；验证接触黏土料设计技术指标及填筑标准的合理性、可用性；确定接触黏土料的最佳压实方法（包括选择碾压设备类型、机械参数、碾压遍数、铺土厚度、含水率等施工参数）；选择可行的施工碾压参数。

大坝心墙接触黏土料主要采用阿斯布土料场土料，采用挖掘机立采装车运至碾压试验场地，试验前取土进行了土料物理力学性能检测，确保土料满足设计要求。主要检测结果见表 1。

表 1 接触黏土料物理力学检测结果

样品编号	天然含水率 (%)	天然干密度 (g/cm ³)	最大粒径 (mm)	<2mm 颗粒含量	5mm~20mm 颗粒含量 (%)	<0.075mm 颗粒含量 (%)
YP-190105-TLJ-01	17.6	1.34	11	97.4	0.8	89.5
YP-190105-TLJ-02	17.8	1.43	7	98.3	1.1	91.7
YP-190105-TLJ-03	16.8	1.26	8	97.9	0.7	89.6
设计指标	/	/	≤20	≥90	≤3	/
样品编号	<0.005mm 颗粒含量 (%)	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数	渗透系数 (cm/s)	比重
YP-190105-TLJ-01	23.2	34.1	17.8	16.3	1.82×10 ⁻⁷	2.67
YP-190105-TLJ-02	23.8	31.7	18.2	13.5	2.62×10 ⁻⁷	2.65
YP-190105-TLJ-03	24.7	33.5	19.2	14.3	5.24×10 ⁻⁷	2.68
设计指标	>23	/	/	>10	<1×10 ⁻⁶	/

2.2 试验组合及安排

2.2.1 试验组合

阿斯布接触黏土料碾压试验共分三场碾压试验进行，第一场碾压试验确定铺料厚度与碾压遍数，第二层碾压试验确定加水量（第一、二场为参数选择场试验），第三场为复核场碾压试验。试验组合方法采用淘汰法，即每次只变动一项参数，固定其他参数，通过试验求得该项参数的适宜值，再变动另一项参数，求得另一项施工参数的适宜值，最终通过试验得到的填筑材料的各项最佳施工参数。待各项参数选定后，用选定参数进行复核试验。第一场碾压试验组合见表 2，第二场（加水）碾压试验根据第一场试验结果按最优含水率 ω_{op} 、 $\omega = \omega_{op} + 2\%$ 、 $\omega = \omega_{op} + 4\%$ 开展，第三场复核试验，根据已选定的各项最优参数，再进行一次复核试验，总厚度不低于 2m。

表 2 第一场铺料厚度、碾压遍数试验组合

铺料厚度 (cm)	碾压设备	碾压方式	碾压遍数	检测项目/数量
25	18t	静碾	3、4、6、8	含水率 20 次、原位密度（压实度）20 次、碾后颗粒级配 8 次、渗透系数 8 次
30	18t	静碾	4、6、8、10	含水率 20 次、原位密度（压实度）20 次、碾后颗粒级配 8 次、渗透系数 8 次
35	18t	静碾	4、6、8、10	含水率 20 次、原位密度（压实度）20 次、碾后颗粒级配 8 次、渗透系数 8 次

2.2.2 试验场地及设备

碾压试验场地布置在大坝上游围堰，碾压试验场面积 30m×30m（宽×长），面积 900m²，其中试验场共分 10 区布设，每一个试验区 4m×8m（宽×长），每个试验区有效面积为 32m²。试验前采用 32t 自行式振动平碾按 2.5±0.5km/h 的速度振动碾压。基层按 1.2m×1.2m 整场均匀布网格点 156 个，32t 自行式振动碾振动碾压，最后振动碾压 2 遍后水准仪测量检查，最

高点与最低点高程差 76mm、相邻点高程差 26mm、全场平均沉降值 1.68mm；各项控制指标满足振动碾压 2 遍全场平均沉降量不大于 2mm、整场高差小于 20cm 且局部起伏差小于 5cm 的设计要求。

碾压试验设备采用中联重科 YZD18T 自行式振动平碾，振动碾轮宽 2.16m，行驶速度 2.5 ± 0.5 km/h，频率 31.5Hz，激振力 355KN，采用静碾。铺料采用山推 SD22 推土机，采取进占法进行铺料。

2.2.3 试验步骤

接触黏土闷料调整含水→上下层间结合面拉毛并补水→进占法铺料，SD22 推土机平料→网格测量松铺高程→18t 振动平碾静碾 8 遍，同时进行碾压监控→网格测量碾后高程→现场各项试验检测→填筑面防雨、保温覆盖→上下层间结合面拉毛补水并进入下一层填筑施工。

2.3 智慧化应用

2.3.1 碾压智能监控技术

为了确保双江口大坝填筑碾压质量受控，双江口智能大坝工程单元基于碾压过程智能监控技术，建立了大坝碾压过程智能监控模块。该模块采用高精度 GNSS 定位技术、传感器技术，实现碾压作业过程的智能感知，并采用自主通讯网络，实现碾压作业信息的实时传输；基于现场感知数据，实现坝面碾压质量参数（碾压轨迹、碾压速度、碾压遍数、错距、碾压高程等）的实时计算和分析；对不满足设计要求的指标进行实时反馈，并生成碾压监控成果图形报表，作为工程建设管理的辅助材料。大坝碾压过程智能监控模块总体结构如图 1 所示。

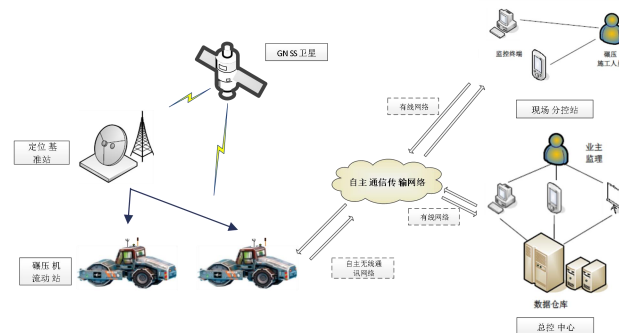


图 1 大坝碾压过程智能监控模块结构图

将该模块应用于大坝接触黏土料碾压试验中，可以有效减少现场试验人员数量，确保仓面各位置碾压参数均满足碾压试验要求，提升了碾压试验结果的准确性。

2.3.2 应用效果

通过碾压智能监控技术实现对大坝接触黏土料碾压试验的全过程跟踪、监控，大大排除外界及人为因素的干扰。同时，把整个碾压试验期间所有监控信息保存至数据库，可供后期追溯和历史查询。本次共监控 10 仓，平均合格率为 98.14%。其中仓面阿斯布黏土试验第八层的图像报告如图 2 所示

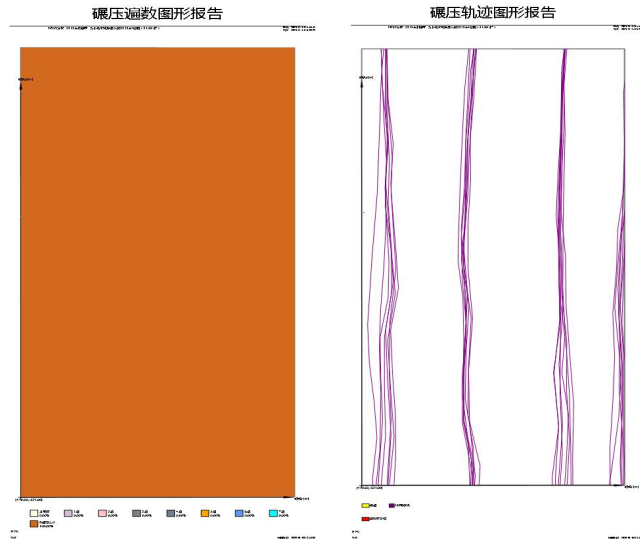


图2 阿斯布黏土试验第八层的图形报告

3 试验成果分析

3.1 现场碾压试验成果

(1) 铺料厚度分别为25cm、30cm、35cm时，碾压遍数与沉降率、压实度和干密度的关系曲线分别见图3、4、5。

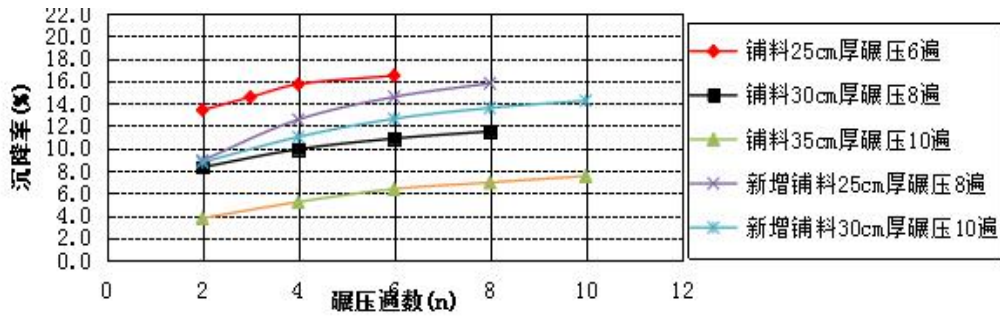


图3 碾压遍数与沉降率关系曲线

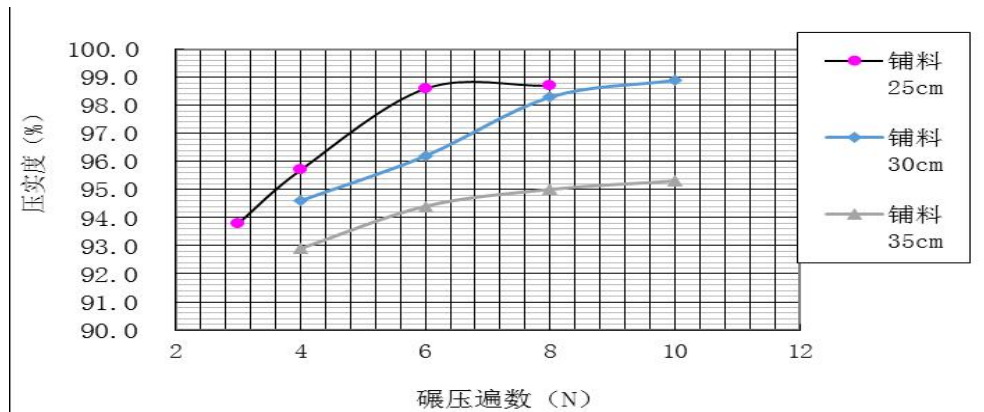


图4 碾压遍数与压实度关系曲线

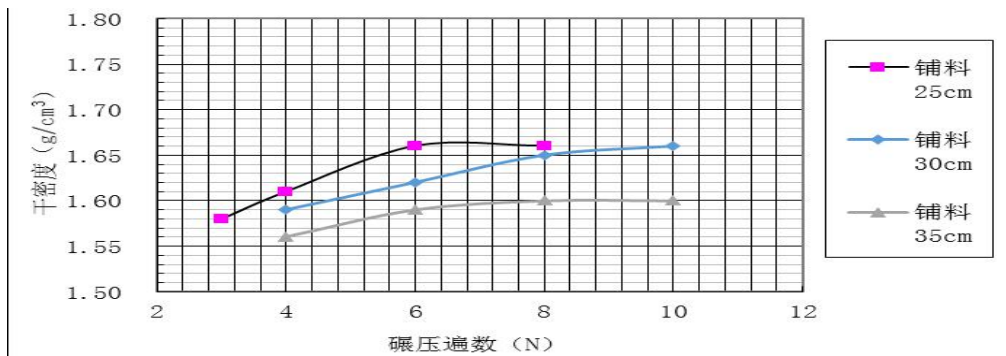


图5 碾压遍数与干密度关系曲线

由图 3、4、5 可知，在相同铺料厚度情况下，沉降量（沉降率）均随碾压遍数的增加而增大；在相同碾压遍数情况下，沉降量（沉降率）均随铺料厚度的增加而减少；。在相同铺料厚度情况下，压实度和干密度均随碾压遍数的增加而增大；在相同碾压遍数情况下，压实度和干密度均随铺料厚度的增加而减小。在相同铺料厚度情况下，随着碾压遍数的增加，曲线均趋于平缓，碾压遍数对沉降量（沉降率）、压实度、干密度的影响逐渐减小。

(2) 接触黏土铺料厚度 25cm 静压 6 遍、铺料厚度 30cm 静压 8 遍，压实度为 97.6%~99.4%，满足设计要求，继续增加碾压遍数后压实度及沉降量无明显变化。铺料厚度 25cm 静压 8 遍、铺料厚度 30cm 静压 10 遍，干密度与碾压遍数曲线呈现收敛状态。

(3) 共检测接触黏土料碾前含水率 16 组，碾后含水率 24 组，摊铺碾压过程中，含水率损失较小，约 0.4%。碾压后颗粒级配曲线见图 6。

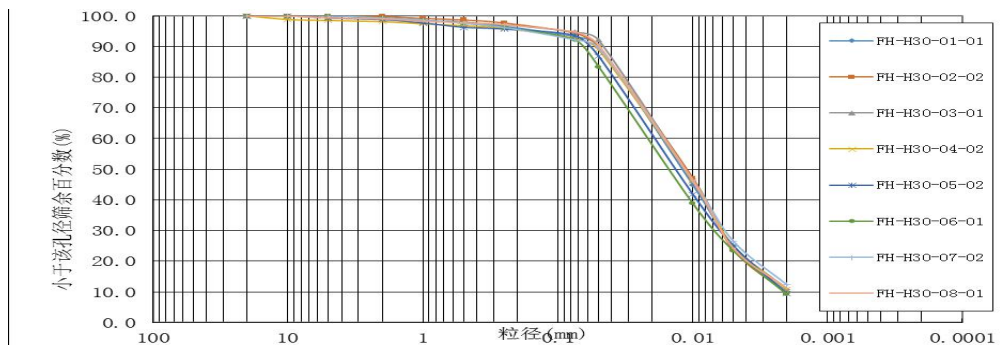


图6 接触黏土料碾后级配曲线（铺料厚度 30cm）

3.2 室内试验成果

3.2.1 室内压缩试验

压缩试验工况为饱和和天然两种状态，施加最大压力为 3.2MPa。试验成果表明，在 0.1~0.2MPa 压力下，饱和状态下压缩系数为 0.229MPa⁻¹，压缩模量为 6.8MPa；天然状态下压缩系数为 0.165MPa⁻¹，压缩模量为 9.7MPa，属中压缩性土。具体见表 3。

表3 阿斯布接触黏土室内压缩试验成果

试验编号	控制条件		压缩试验（饱和）0.1~0.2MPa		压缩试验（非饱和）0.1~0.2MPa	
	干密度	含水率	压缩系数	压缩模量	压缩系数	压缩模量
	ρ_d	w	a_v	E_s	a_v	E_s
	g/cm ³	%	MPa ⁻¹	MPa	MPa ⁻¹	MPa
ASBJ	1.70	17.6	0.229	6.8	0.165	9.7

3.2.2 室内三轴试验

三轴试验是在三轴试验机上进行,试验方法为饱和固结排水剪(CD)及饱和固结不排水剪(CU)。试验结果表明,土料ASBJ的线性抗剪强度参数 C_d 值为79kPa, ϕ_d 为 23.1° ;总抗剪强度参数 C_{cu} 为35, ϕ_{cu} 为 18.1° ,有效抗剪强度参数 C' 为31, ϕ' 为 21.0° 。具体见表4、5。

表4 阿斯布接触黏土三轴试验成果(CD)

试验编号	制样密度	施加围压	线性抗剪强度参数		E- μ 模型参数(CD)					
	ρ_d	σ_3	C_d	ϕ_d	K	n	R_f	D	G	F
	g/cm ³	kPa	kPa	($^\circ$)	-	-	-	-	-	-
ASBJ	1.70	200~800	79	23.1	141	0.12	0.97	2.66	0.40	0.167

表5 阿斯布接触黏土固结不排水剪(CU)试验成果

试验编号	制样密度	施加围压	孔隙水压力系数		总抗剪强度参数		有效抗剪强度参数	
	ρ_d	σ_3	B	A	C_{cu}	ϕ_{cu}	C'	ϕ'
	g/cm ³	kPa	-	-	kPa	($^\circ$)	kPa	($^\circ$)
ASBJ	1.70	200~800	0.96	0.23	35	18.1	31	21.0

3.2.3 矿化分析试验

为研究阿斯布料场接触土料的矿物成分组成,进行了1组矿化分析测试试验编号分别为ASBJ。结果表明,土料易溶盐含量为0.08%,有机质含量为0.38%,Ph值为7.9,呈弱碱性,硅铝率为3.66。具体见表6。

表6 阿斯布接触土料黏土矿化分析试验成果

试样编号	分析指标(%)							Ph	硅铝率	易溶盐%
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	烧失量	有机质			
ASBJ	51.80	8.60	18.57	7.73	1.94	8.43	0.38	7.9	3.66	0.08

4 结论及建议

(1) 试验选用的机械、工艺流程及碾压参数满足规程规范要求,推荐采用中联重科YZD18T自行式振动平碾,自重18t,振动碾轮宽2.16m,行驶速度按 2.5 ± 0.5 km/h控制,采用静碾。

(2) 根据现场碾压试验检测结果,接触黏土料含水率范围控制在 $\omega_{op}+0\% \sim \omega_{op}+3\%$,铺土厚度30cm,静碾8遍。

(3) 工程区气候干燥,碾压土层容易产生含水率散失,导致土体干燥松散,建议上下层间结合面采用相关设备(如装载机加装刨毛钉)(刨毛深度3cm~5cm)进行刨毛处理并补水后进行下一层土料的铺填。

(4) 结合智慧化应用成果,建议在下一步大坝填筑施工过程中,采用大坝填筑碾压实时监控系统进行全过程监控,可大量节约劳动力和提高工作效率,同时确保大坝填筑质量受控。

参考文献:

- [1] 涂扬举,李善平,段斌.智慧工程在大渡河水电建设中的探索与实践[J].水库大坝高质量建设与绿色发展——中国大坝工程学会2018学术年会论文集,2018(10):177-186.
- [2] 涂扬举,郑小华,何仲辉,等.智慧企业框架与实践[M].北京:经济日报出版社,2016.
- [3] 涂扬举.水电企业如何建设智慧企业[J].能源,2016(8):96-97.
- [4] 刘晓博,谭劲,侯小石.泸定水电站大坝接触黏土料碾压试验及成果分析[J].水力发电,2011(5):74-77.

- [5] 周强, 韦丽娜, 王朝阳. 观音岩水电站堆石坝黏土填料碾压工艺试验研究[J]. 人民长江, 2015 (10) :80-83.
- [6] 张计, 涂扬举, 饶锡保, 等. 瀑布沟水电站砾石土心墙料碾压试验研究[J]. 水力发电, 2010 (6) : 46-48.
- [7] 樊鹏, 王宁. 长河坝水电站砾石土料碾压试验及参数选择[J]. 水力发电, 2018 (2) : 33-36.

Rolling test and intelligent research on contact clay material of Shuangjiangkou Hydropower Station

Kang Xiang Wen, Li Peng

(Guodian Dadu River Basin Hydropower Development Co., Ltd. Chengdu, Sichuan 610041)

Abstract: In order to verify the feasibility of design parameters of contact clay material, the rationality and availability of design technical indexes and filling standards, determine the best compaction method and feasible construction rolling parameters, and carry out field rolling test of contact clay material of dam core wall. Test method: select the machinery, technological process and rolling parameters through the physical and mechanical properties test of soil and different test combinations. The test results show that the compaction degree is 97.6% - 99.4%, which meets the design requirements, and there is no obvious change in the compaction degree and settlement amount after the rolling times are increased. Therefore, in order to match the rolling parameters of adjacent dam materials, it is recommended to use 18t vibrating flat roller, the driving speed is controlled by 2.5 ± 0.5 km/h, the water content is controlled within a reasonable range, and the laying thickness is 30cm, and the static roller is used for 8 times.

Key words: Contact clay; rolling test, intelligent; Shuangjiangkou Hydropower Station

作者简介:

康向文 (1981-), 男, 湖南新化人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事水电工程项目及技术管理工作.
地址: 成都市青羊区金福南路 55 号, 610091, tel: 15198167100, email: 187299723@qq.com