

智能碾压系统在 DG 水电站工程中的应用

田志勇, 匡贞霖, 杨光文

(中国水利水电第九工程局有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 西藏地区海拔高、气压低、太阳辐射强、昼夜温差大, 而碾压混凝土多采用通仓浇筑、斜层浇筑两种方法, 铺筑层面外露面积较大, 导致碾压混凝土质量控制难度大。常规碾压混凝土浇筑质量控制是通过旁站、抽样检测、取芯检测各项参数进行监控。西藏地区人工降效严重, 受人为因素影响, 常规质量控制方法远不能满足施工质量要求。为有效控制碾压混凝土施工质量, 本工程应用了智能碾压监控系统, 结果表明: 智能碾压监控系统的应用提升了碾压混凝土施工质量, 加快了施工进度, 提高了施工效益, 达到了碾压混凝土质量精准控制的目标, 可供类似工程项目参考借鉴。

关键词: DG 水电站; 高海拔; 特殊气候; 质量控制; 智能碾压; 实时监控; 应用

中图分类号: TV523

文献标识码: A

1 引言

在当今的新兴坝型中, 碾压混凝土重力坝具有节省投资、缩短工期、绿色环保、节能减排、粉煤灰利用等显著优势。中国研究碾压混凝土坝起源于 20 世纪 70 年代末, 在研究碾压混凝土筑坝技术过程中, 在 1986 年成功完成了国内第一座碾压混凝土坝, 坝高为 56.8m 的福建坑口水电站, 自此开启了中国筑坝技术飞速发展的新时代, 据不完全统计, 截至 2019 年中国已建和在建碾压混凝土坝已达到 180 多座, 百米级以上的碾压混凝土坝逐年增多, 如光照 (200.5m)、龙滩 (192m)、观音岩 (159m) 等 30 多座大型水电站工程, 也使中国碾压混凝土筑坝技术逐渐成熟并形成了一系列常规的质量控制的方法与手段。在各碾压混凝土坝建设过程中, 建设者们不断研究与探索过程中, 在质量控制方面也各具特色与亮点, 如光照碾压混凝土重力坝在碾压方向、坡角处理、鞋面坡度等问题上进行了深入的研究, 使斜层碾压施工工艺更加成熟完善; 龙滩碾压混凝土重力坝重点针对碾压混凝土 VC 值控制、碾压层面间隔时间、碾压混凝土压实度三要素进行了细致的研究, 在建设者们不断的优化后, 很大程度上减小了骨料分离对混凝土质量的危害。而国外主要对碾压混凝土拌和进行了研究, 主要成果如下: (1) 探究 VC 值变化规律并进行预测; (2) 拌和过程中含水量变化规律及和易性控制; (3) 混凝土配合比、施工分缝、碾压厚度、压实度等施工质量控制措施。上述对于碾压混凝土质量控制的方法主要通过旁站、抽检、巡查等方式控制碾压混凝土浇筑质量, 受人为因素影响, 质量控制精度低。而怎样最大化减少人为因素影响, 对浇筑过程进行精细化、自动化的实时监控成为了国内外专家们研究的方向。国内外专家们对于智能碾压实时监控研究的方向主要可分为施工方法监控及施工质量监控两方面; 施工方法监控是建立一套智能化系统, 系统主要利用 GPS、网络、数据库等技术采集碾压机械实时的碾压遍数、行进速度、激振力状态以及压实厚度等参数的计算、显示和统计分析, 实时监控碾压混凝土施工过程。施工质量监控主要是以高精度定位技术对土石压实质量的实时监控, 主要通过碾压机械振动状态及高精度定位建立压实质量反馈系统进行施工质量的监控。本工程采用的智能碾压系统主要是施工方法监控, 并辅以人力对碾压混凝土浇筑质量进行系统+人力双重监控。

目前智能碾压实时监控系统在 DG 水电站大坝土建工程中全面推广使用, 避免了西藏高海拔地区人为因素的影响, 加快了施工进度, 实现了碾压混凝土浇筑质量实施精准控制, 完全达到了碾压混凝土质量控制的目标, 起到了良好的过程监控作用, 系统应用经验可供类似工程项目参考借鉴。

收稿日期: 2020.8.19

基金项目: 中国电力建设股份有限公司科技项目经费资助; 西藏高海拔复杂气候条件下碾压混凝土筑坝技术研究 (DJ-ZDXM-2019-16)

作者简介: 田志勇 (1977.08-), 男, 贵州德江, 高级工程师, 本科, 从事水利水电工程项目施工技术与管理工。E_mail: 576523356@qq.com

2 概述

DG 水电站位于西藏自治区山南市桑日县境内，为二等大（2）型工程，主要以发电为主，水库正常蓄水位 3447.00m，库容 0.5528 亿 m³，电站坝址控制流域面积为 15.74 万 km²，多年平均流量 1010m³/年，电站装机容量为 660MW。

大坝坝顶高程 EL.3451.00m，最大坝高 117m，是目前在建的海拔最高的碾压混凝土坝，西藏在建最高大坝，坝顶长 385m，大坝碾压混凝土 93.7 万 m³，常态混凝土 50.5 万 m³。

3 水文气象条件

3.1 水文资料

DG 水电站所处流域江水及支沟水一般为雪水融化产生，根据 2013 年电站区域水文资料统计，年最高水温为 20.1℃，最低水温为 0℃，平均水温为 10.0℃。

3.2 气象资料

本工程位于青藏高原气候区，基本特性为气温低、空气稀薄、紊乱强风、气候干燥、昼夜温差大、太阳辐射强烈（>1500w/m²）。每年的旱季在当年 11 月至次年 4 月，雨季在 5 月至 10 月。据加查气象站（坝址下游约 35km、测站高程 EL3260.0m）实测气象资料统计，坝址多年平均气温 9.3℃，极端最高气温为 32.5℃、最低气温为-16.6℃，多年平均相对湿度为 51%，多年平均降水量为 527.4mm，多年平均气压为 685.5hpa，多年平均蒸发量为 2084.1mm，多年平均日照时数为 2605.7h，历年最大定时风速为 19.0m/s，历年最大冻土深度为 19cm。

DG 水电站所处地区气候条件复杂，这对大坝施工期间需要采取的质量控制方法与措施提出了严苛的要求，必须以更加精细、严格、有效的措施对碾压混凝土质量进行控制方能保证大坝质量。

4 碾压混凝土浇筑质量要求

DG 水电站每仓碾压混凝土浇筑实时监控，智能碾压监控系统主要监控仓面内振动碾行车速度、行进轨迹、激振力状态、碾压遍数、压实厚度等参数，根据系统实时反馈的数据及时反馈到仓面质检员，控制碾压混凝土浇筑过程质量。施工仓面由仓面总指挥全面组织、安排、指挥、协调仓面内碾压混凝土施工。仓面内质检员根据智能碾压系统反馈信息及时与仓面指挥协调后及时整改，旁站监理根据智能碾压系统反馈的问题督促仓面指挥及时整改，并对整改情况进行检查和追踪，并安排仓面试验人员取样检测碾压混凝土 VC 值、入仓温度、压实度等参数检查碾压混凝土浇筑过程质量。

4.1 智能碾压监控系统监控参数

（1）行进速度：碾压机械行进速度应控制在 1.0km/h~1.5km/h 范围内；

（2）碾压方向：为更好达到防渗要求，迎水面二级配碾压混凝土防渗区及 8m~15m 范围内必须垂直水流方向碾压，其余除特殊部位及特殊情况外均垂直于水流方向进行碾压；

（3）碾压遍数：碾压遍数要求：2 遍静碾+6~8 振碾+2 遍静碾（收面），具体遍数以智能碾压系统反馈参数及现场实验员试验结果综合分析后选定。

（4）压实厚度：碾压混凝土摊铺厚度控制在 33~35cm，压实厚度控制在 28-30cm。

4.2 浇筑过程抽样检测监控参数

（1）碾压混凝土压实度：检测碾压混凝土表观密度主要使用核子水分密度仪或压实密度计两种仪器。检测频率为铺筑 100m²~200m² 检测 1 个点以上，每一铺筑层至少检测 3 个点。判定依据是以碾压完毕 10min 后的核子水分密度仪测试结果作为表观密度。坝体的外部混凝土相对密实度必须大于 98%，内部混凝土相对密实度必须大于 97%。

（2）碾压混凝土试件：碾压混凝土试件应在拌和站出机口取样。碾压混凝土以 150mm 标准立方体试件、标准养护 28d 的抗压强度为准。碾压混凝土抗冻、抗渗检验的合格率应大于 80%。碾压混凝土生产质量评定标准见 3-1。应由一批（大于 30 组）拌和站出机口连续取样的 28d 龄期抗压强度标准差 σ 值表示。

表 1 碾压混凝土生产质量评定标准

评定指标	质量等级			
	优秀	良好	一般	差

评定指标		质量等级			
不同强度等级下的混凝土强度偏差	$\leq C9020$ (C18020)	<3.0	$3.0 \leq \sigma < 3.5$	$3.5 \leq \sigma < 4.5$	>4.5
σ Mpa	$> C9020$ (C18020)	<3.5	$3.5 \leq \sigma < 4.0$	$4.0 \leq \sigma < 5.0$	>5.0
		≥ 90	≥ 85	≥ 80	<80

注：混凝土强度标准差 σ 、强度标准值的百分率 P_s 计算方法见 DL/T5112 附录 B2。

3.3 碾压混凝土质量评定

钻孔取样是对碾压混凝土质量评定的综合方法，测定碾压混凝土抗压强度的芯样直径在 15cm-20cm 为宜。碾压混凝土的最大骨料粒径 $> 80\text{mm}$ 的部位，宜采用直径 $\geq 200\text{mm}$ 的芯样。碾压混凝土在达到设计龄期后进行钻孔取样。根据需要确定钻孔的部位和数量。标准试件的高径比为 2.0，钻孔取样评定的参数如表 3-2：

表 2 碾压混凝土质量评定参数

评定参数	芯样获得率	压水试验	芯样的力学性能试验	芯样外观
作用	评价碾压混凝土的均质性。	评定碾压混凝土抗渗性。	测定芯样容重、抗压强度、抗拉强度、极限拉伸值等性能，评定碾压混凝土的均质性和力学性能	评定碾压混凝土的均质性和密实性、层面（缝面）结合情况以及不同品种混凝土间结合状态等。
设计要求	$\geq 95\%$	防渗层 $\leq 0.5L_u$ 坝体内部 $\leq 1L_u$		见表 3-3

表 3 碾压混凝土芯样外观评定标准

级别	评定标准			
	表面光滑程度	表面致密程度	骨料分布均匀性	结合情况
优良	光滑	致密	均匀	无界限
合格	基本光滑	稍有孔	基本均匀	有明显界限
差	不光滑	有部分孔洞	不均匀	有脱离现象

5 大坝智能碾压监控系统

5.1 概念

智能碾压实时监控系统可以实时检测并反馈碾压区域的压实效果，对不满足设计标准要求的工作参数进行报警提示，系统监控员根据反馈信息指导现场施工，有效避免多碾、少碾及漏碾情况，使碾压质量始终处于受控状态。碾压仓面铺筑完成后可在系统导出仓面质量监控报告，主要包括碾压机械的碾压轨迹、平均行进速度、碾压遍数、层面高程、压实厚度图形报告等参数，后续作为调整现场施工措施的参考数据。

5.2 智能碾压监控系统工作流程

利用智能碾压实时监控系统主要由 GPS、碾压机械监测、控制中心等部分组成，智能碾压监控系统实时监控工作流程具体如下：

- 1) 通过在碾压机械上安装的检测仪器，实时采集碾压机械的动态坐标和激振力输出状态。
- 2) 系统实时计算碾压机械行进速度并在系统上显示，同时分析判断碾压机的碾压遍数、行车速度、激振力输出及压实值是否达标；根据与设计标准值对比计算偏差，发出不同程度报警信号，监控员实时反馈给仓面指挥，仓面指挥安排相应人员和机械进行整改和修补。
- 3) 将施工仓面内监测到的所有碾压机械的行进速度、激振力状态、碾压遍数、压实厚度、压实值等参数保存至数据库，后续作为仓面施工质量评估的参考数据。

5.3 智能碾压监控系统工作流程图

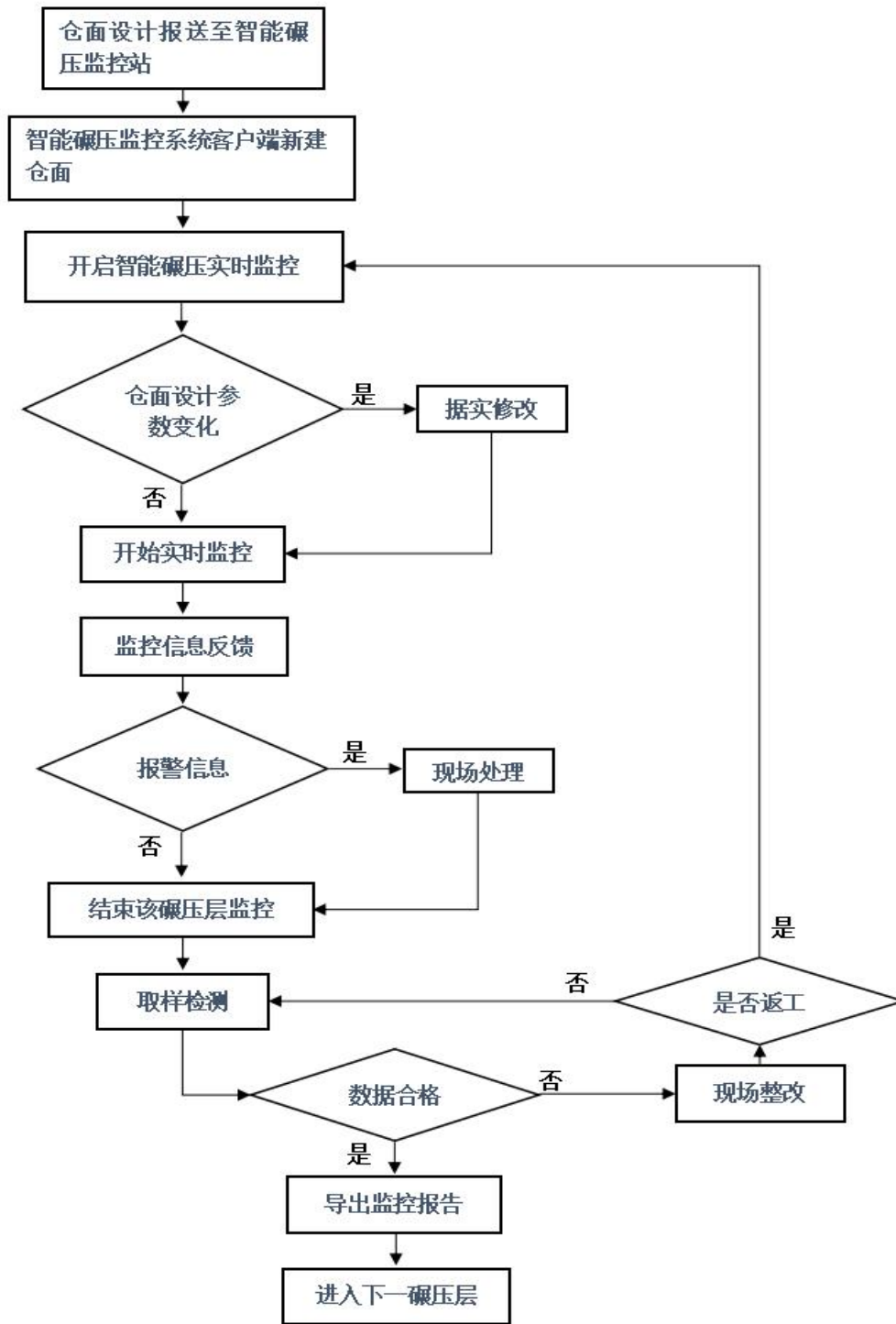


图1 智能碾压监控系统工作流程图

5.4 碾压混凝土坝碾压质量控制机制

碾压机械的行进速度、激振力频率和振幅大小直接决定了碾压混凝土的压实效果。监控碾压过程中碾压混凝土实际压实情况，实时调整碾压机械的行进速度、激振力状态等工作参数。

5.5 系统运行成果

智能碾压系统数据采集是在碾压机械上安装高精度实时定位仪器及激振力监测仪器，对浇筑施工浇筑施工过程振动碾的行驶轨迹、行进速度、激振力状态、碾压厚度、碾压遍数等参数进行全天候实时监控，行进速度

控制标准为 1.5km/h，碾压遍数为静碾 2 遍+振碾 6 遍+静碾 2 遍，碾压厚度控制标准为 0.3m。监控成果如下：

(1) 碾压遍数监控数据

具体以 (9-10) #-3342.5-3346.5m 碾压仓为例，见表 4-1：

表 4 (9-10) #-3342.5-3346.5m 碾压遍数达标率

层号	开层时间	收层时间	总遍数达标比例	振碾遍数达标比率	备注
1	2019-04-23 12:00	2019-04-23 14:39	81.96	86.26	
2	2019-04-23 14:40	2019-04-23 17:29	96.53	82.96	
3	2019-04-23 17:30	2019-04-23 20:30	87.69	85.62	
4	2019-04-24 23:00	2019-04-24 03:30	88.58	88.76	
5	2019-04-24 04:00	2019-04-24 07:00	91.06	90.21	
6	2019-04-24 09:40	2019-04-24 12:50	91.65	89.84	
7	2019-04-24 12:51	2019-04-24 17:40	91.78	91.66	
8	2019-04-24 17:45	2019-04-24 21:40	90.98	92.32	
9	2019-04-24 21:50	2019-04-25 10:33	89.83	86.35	
10	2019-04-25 10:57	2019-04-25 14:00	87.29	94.33	
11	2019-04-25 14:01	2019-04-25 17:00	91.31	88.37	
12	2019-04-25 17:25	2019-04-25 20:30	87.68	86.77	
13	2019-04-25 20:33	2019-04-26 02:00	89.08	85.56	
14	2019-04-26 02:10	2019-04-26 08:30	91.52	86.72	
15	2019-04-26 08:40	2019-04-26 16:00	92.18	92.32	
	最大值		96.53	94.33	
	最小值		81.96	82.96	
	平均值		89.94	88.53	

碾压仓完成后系统生成并导出图形报告：图 4-1 碾压遍数图形报告、图 4-2 振碾遍数图形报告（以 (9-10) #-3342.5-3346.5m 碾压仓面第 14 层为例），如图 4-1 所示，主要反映的是 (9-10) #-3342.5-3346.5m 碾压仓面第 14 层碾压机械碾压遍数的图形报告，由图形报告可见整个碾压层面碾压遍数均碾压了 8 遍以上，90%部分碾压了 10 遍，其他特殊部位根据实际情况减少了 1~2 遍静碾，整个仓面碾压遍数符合设计标准要求。图 4-2 所示数据也反映了整个仓面碾压机械振碾遍数均达到设计标准要求。在智能碾压实时监控运用后，极大程度上降低了人为因素的影响，保证了碾压仓面施工质量。同时为碾压机械、碾压仓面、施工人员减轻了工作强度，大大提高了碾压混凝土的施工效率。

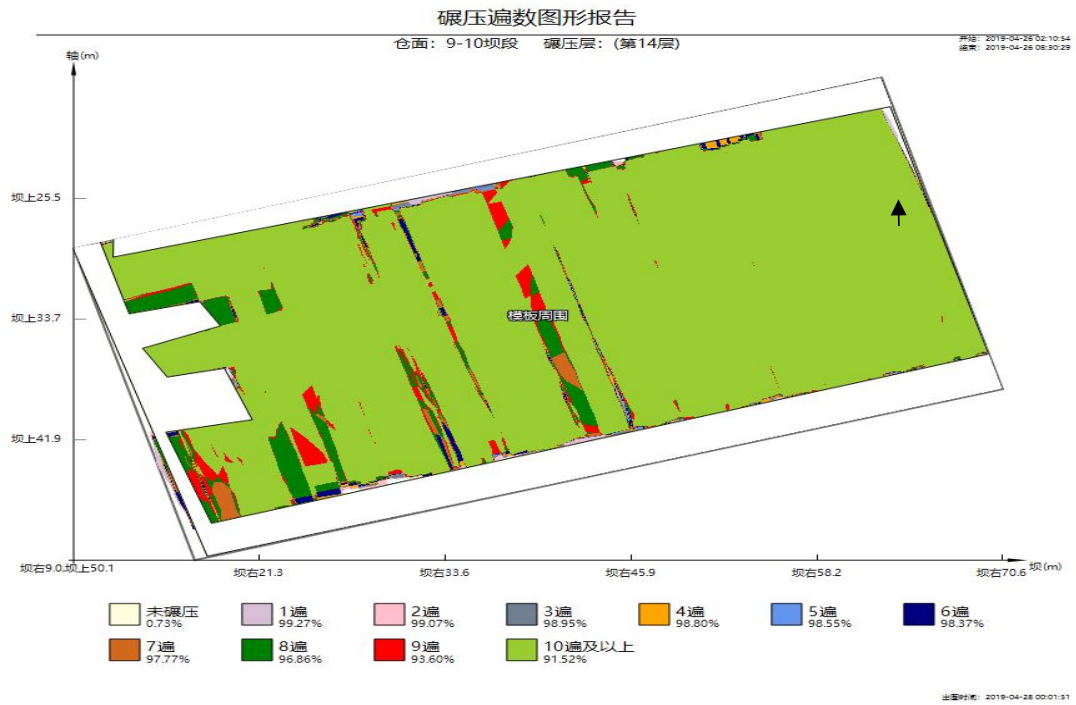


图2 碾压遍数图形报告

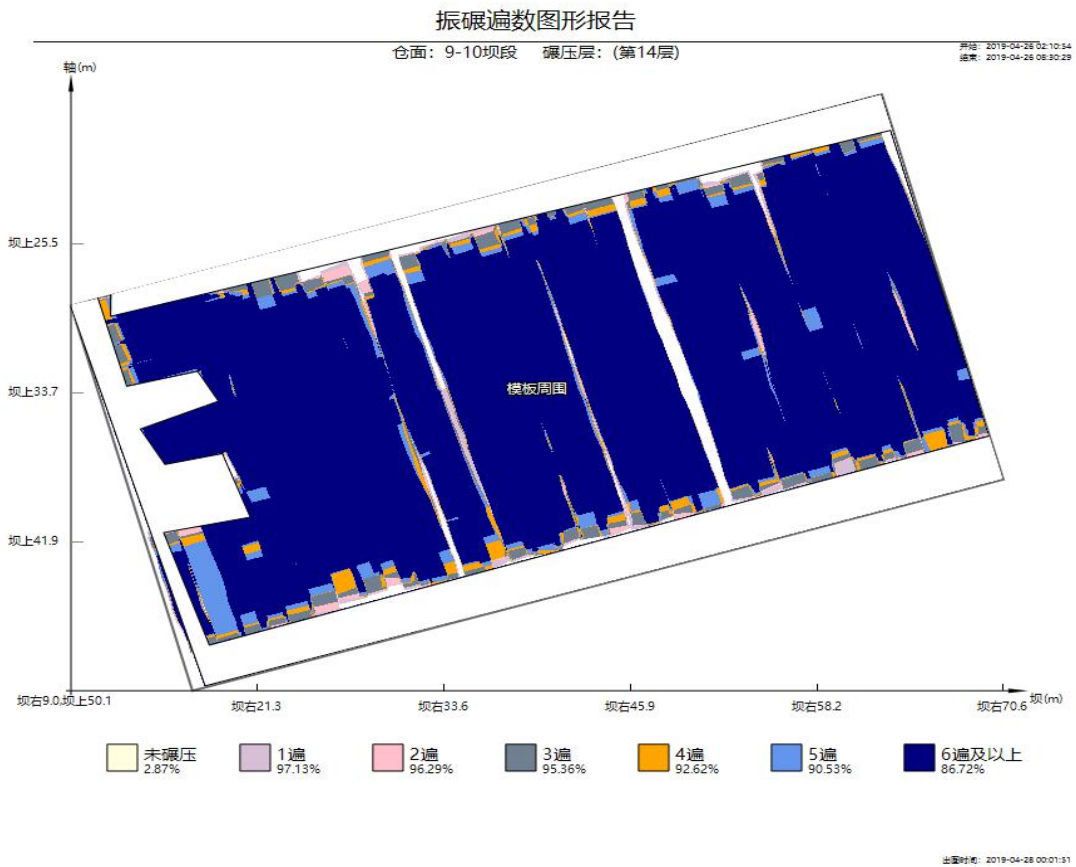


图3 振碾遍数图形报告

5.6 质量控制效果图

通过智能碾压实时监控系统的运用，减小了人为因素的影响，提高了施工效率，同时提高了碾压混凝土施工质量，如图 4-3 仓面收面较平整，人员精简有序。为更好的检验碾压混凝土施工质量，现场进行了取芯检测，取芯部位选取了 C₉₀15W6F100 三级配区域，芯样外观如图 4-4，芯样表面光滑、致密、骨料分布均匀、层面（缝面）结合良好，无明显界限，通过试验检测数据来看，芯样各项数据均符合设计标准要求。通过应用智能碾压实时监控系统的运用，碾压混凝土铺筑过程质量得到了科学有效的控制，为更快更好的建设 DG 水电站提供了有力的保障。



图 4 施工现场碾压仓面收面效果



图 4 芯样外观效果

5.7 意见与建议

截至目前大坝已浇筑了 46 仓碾压混凝土。根据 DG 水电站智能碾压实时监控系统的运用情况有以下几点建

议:

(1) 由于监控员远程与仓面指挥沟通存在一定误差,建议增加小型的手持设备,可用手机 APP 或者其他便携式设备实时与总控中心连接,接收系统反馈的信息。

(2) 监控员必须严格按照设计要求监控各项参数,及时反馈到现场,仓面指挥应根据监控员反馈的信息及时安排机械设备及人员进行相应的整改。

(3) 碾压机械上安装的检测仪器应在现场有备份存放,以防仪器故障导致系统无法采集数据或者采集到异常数据,必须保证数据的准确性,以便于后续各项参数调整。

(4) 智能碾压系统必须配备专项用电及局域网,并配备备用供电系统,防止断电导致数据缺失。

(5) 定期对智能碾压系统进行检查,主要是对碾压机械上安装的监测仪器进行调试,保持仪器高精度采集数据,保证大坝碾压混凝土铺筑质量。

6 结语

对于碾压混凝土铺筑过程质量控制,智能碾压实时监控系統提供了很大的帮助,实施全天候智能监控,极大程度上减小了高海拔地区复杂气候条件下碾压混凝土铺筑过程质量控制难度,加快了大坝碾压混凝土施工进度,提高了施工效率,同时也提高了碾压混凝土施工质量,完美的解决西藏地区复杂气候条件下人工降效严重的问题。避免了传统质量控制方法人为因素影响碾压混凝土铺筑质量无法有效控制的问题,减少了不必要的人力物力损耗。该系统的成功应用,克服了质量控制环节碾压机械行进速度无法精确控制、压实厚度人为测量存在较大误差等难题。简化了碾压混凝土铺筑施工过程质量控制方法,提高了施工效率,同时也保证了碾压混凝土施工质量。

参考文献

- [1] 刘东海,李丙扬,崔博.高碾压混凝土坝智能碾压理论研究[J].中国工程科学,2011,13(12):74-79.
- [2] 钟桂良.碾压混凝土坝仓面施工质量实时监控理论与应用[D].天津大学,2012.
- [3] 刘六宴,温丽萍.中国碾压混凝土坝统计分析[J].水利建设与管理,2017,37(01):6-11.
- [4] 徐玉杰.碾压混凝土坝施工技术与质量控制[M].郑州:黄河水利出版社,2008.
- [5] 田育功.碾压混凝土快速筑坝技术,北京:中国水利水电出版社,2010.
- [6] 张庆龙,安再展,刘天云等.土石坝压实的智能控制理论[J/OL].水力发电学报:1-7[2020-06-27].
- [7] 周宜红,杨磊,刘景平.龙滩碾压混凝土夏季施工质量控制标准研究[J].人民长江,2002(04):29-30+48.
- [8] 李翼.龙滩水电站水工碾压混凝土的质量控制要点[J].水电站设计,2006(01):18-22.
- [9] 陈祖荣,方彦铨,吴秀荣等.光照水电站碾压混凝土高坝快速筑坝技术[J].水利水电施工,2009(02).

作者简介:

田志勇(1977—),男,高级工程师,注册一级建造师,主要从事水利水电工程项目施工技术与管理工。E-mail: 576523356@qq.com

匡贞霖(1996—),男,助理工程师,主要从事水利水电工程项目施工技术与管理工。E-mail: 18198560802@163.com

杨光文(1988—),男,助理工程师,主要从事水利水电工程项目施工技术与管理工。E-mail: 1143357858@qq.com

Application of Intelligent Rolling System in DG Hydropower Station Project

Abstract: Tibet is high in altitude, low air pressure, strong solar radiation, and large temperature difference between day and night. RCC mostly adopts two methods: open silo pouring and inclined layer pouring. The exposed area of the paving layer is large, which makes the quality control of RCC difficult. The quality control of conventional roller compacted concrete pouring is monitored by various parameters such as side station, sampling test, and core test. The artificial efficiency reduction in Tibet is severe and is affected by human factors. Conventional quality control methods are far from meeting the construction quality requirements. In order to effectively control the construction quality of roller compacted concrete, this project applied the intelligent roller compaction monitoring system. The results showed that the application of the intelligent roller compaction monitoring system improved the quality of the roller compacted concrete construction, accelerated the construction progress, improved the construction efficiency, and reached The goal of precise control of compacted concrete quality can be used as a reference for similar engineering projects.

Keywords: DG hydropower station; high altitude; special climate; quality control; intelligent rolling; real-time monitoring; application