



高心墙堆石坝碾压质量实时监控技术及应用

钟登华, 刘东海*, 崔博

天津大学建筑工程学院, 天津 300072

* E-mail: liudh@tju.edu.cn

收稿日期: 2010-09-24; 接受日期: 2011-04-07

国家自然科学基金(批准号: 51021004, 51079096)和教育部新世纪优秀人才计划(批准号: NCET-08-0391)资助项目

摘要 心墙堆石坝施工质量常规控制手段由于受人因素干扰大, 管理粗放, 故难于实现对碾压过程参数的精准控制, 难以确保碾压过程质量. 针对高心墙堆石坝填筑碾压质量控制的要求与特点, 在建立填筑碾压质量实时监控指标及准则的基础上, 采用 GPS, GPRS 和 PDA 技术, 提出了心墙堆石坝填筑碾压质量实时监控方法, 以及碾压过程信息实时自动采集技术和碾压过程可视化监控的图形算法等关键技术, 实现了碾压遍数、碾压轨迹、行车速度、激振力、压实厚度等碾压参数的全过程、精细化、在线实时监控. 实际工程应用表明, 该技术可有效保证和提高施工质量, 使大坝建设质量始终处于真实受控状态, 为高心墙堆石坝建设质量控制提供了一条新的途径, 是大坝建设质量控制手段的重大创新.

关键词
心墙堆石坝
碾压质量
实时监控
质量控制

1 引言

我国正在和将要建设一批高土石坝, 如糯扎渡心墙堆石坝(261.5 m), 300 m 级的古水和如美心墙堆石坝或面板堆石坝, 雅砻江两河口心墙堆石坝(293 m), 大渡河长河坝土石坝(240 m)等, 这些工程建设规模和难度居世界之最, 坝体填筑碾压质量要求高^[1]. 心墙堆石坝填筑碾压质量, 尤其是防渗体心墙的施工质量, 直接关系到大坝的运行安全, 有效地控制坝体填筑碾压质量是保证大坝安全的关键. 根据现行规范规定, 土石坝填筑碾压质量主要通过施工过程中的压实参数(铺层厚度、土石料性质、碾压遍数、碾压行车速度、激振力等)以及试坑检测的压实标准(压实度或干密度、含水量和级配等)来控制. 然而, 常规的依靠监理和施工人员人为控制这些压实参数, 由于受人因素干扰大, 管理粗放, 故难于实现对压实参数的精准控制, 难以确保碾压过程质量. 因此, 有

必要研究开发一种具有实时性、连续性、自动化、高精度等特点的高心墙堆石坝施工质量监控技术, 对心墙堆石坝的填筑碾压过程进行在线监测和反馈控制, 使大坝施工质量始终处于真实受控状态, 这对于实现工程建设精细化管理、确保施工质量具有十分重要的意义, 尤其是可为我国 300 m 级超高型土石坝建设质量的高要求控制提供有力的技术保障.

目前, 国外基本尚未涉及针对土石坝碾压质量监控的相关研究, 现有研究主要集中于道路施工中路基路面碾压监控方面, 即所谓道路施工先进碾压技术(Advanced Compaction Technology, ACT), 这是一种土料压实过程中碾压机碾压质量的自动控制技术^[2]. 工程实践表明, 利用这些技术, 不仅可以有效地防止欠压和过压, 而且可以有效地减少碾压时间, 提高施工效率^[3]. Thompson^[4], White^[5]和 Rinehart 等人^[6]通过试验验证了 ACT 监控指标与土料压实性能之间具有较强的相关性, 证明了 ACT 技术的有效性.

基于此, ACT 技术得到了广泛应用, 尤其是一些国家已将其作为道路施工的规范或标准, 如德国(ZTVE STB97), 奥地利(RVS8S.02.6), 瑞典(VÄG94), 荷兰, 芬兰和美国等^[7]. 但是, 上述研究针对的是道路施工质量控制领域, 由于土石坝施工质量控制要求的碾压质量参数, 压实指标和施工工艺与道路施工不同, 现有技术并不能完全适用于土石坝碾压质量的监控.

国内在土石坝施工质量实时监控方面的研究正处于起步阶段. 已有正式应用报道的是武汉大学刘经南, 黄声享等人^[8, 9]针对混凝土面板堆石坝施工特点, 开发的面板堆石坝填筑质量的 GPS 实时监控系统, 用于清江水布垭大坝堆石体碾压过程参数——行车速度、碾压遍数、铺层厚度的实时监控. 但是, 心墙堆石坝施工无论从施工工艺还是填筑碾压过程的控制(尤其是表现在对于心墙防渗体的填筑碾压质量的控制), 都与面板堆石坝施工有一定的区别, 所以在监控内容、监控要求以及监控技术的实现上两者都有所不同. 本文将在国内外现有研究和课题组前期研究成果^[10]的基础上, 并借鉴武汉大学相关研究的成功经验, 深入研究高心墙堆石坝碾压质量实时监控技术及其工程应用问题.

2 心墙堆石坝碾压质量实时监控原理

2.1 碾压过程监控指标及控制准则

碾压过程监控指标包括碾压机械行走速度 v_t , 机械激振力输出状态 J_t , 动态碾压遍数 $n_{k,t}$. t 表示时段, k 表示仓面第 k 个网格单元(为了方便计算, 把整个大坝施工区域分成足够多的网格数, 所有施工仓面均处于该区域内). 过程控制的对象是碾压机械行车轨迹 $P_t = (x_t, y_t, z_t)$, 以及激振力状态 J_t , 即通过控制 P_t 和 Δt , 以使监控指标达标.

由此, 则

$$v_t = f_v(P_t) = \frac{|P_t - P_{t-1}|}{T_t - T_{t-1}}, \quad \text{且 } \Delta t = T_t - T_{t-1}, \quad (1)$$

其中 Δt 为监测的时间间隔, $|P_t - P_{t-1}|$ 表示两点的欧氏距离.

第 t 时段第 k 个单元的碾压遍数

$$n_{k,t} = f_n(P_t) = \begin{cases} n_{k,t-1} + 1, & (x_t, y_t) \in \Omega_k, \\ n_{k,t-1}, & (x_t, y_t) \notin \Omega_k, \end{cases} \quad n_{k,0} = 0, \quad (2)$$

其中 $(x_t, y_t) \in \Omega_k$ 表示第 k 时段的轨迹点处于第 k 个网格单元格的区域 Ω_k 内. 则碾压过程监控的准则为

$$v_t \leq v_0, \quad J_t \geq J_0, \quad n_u \geq n_{k,t} \geq n_L. \quad (3)$$

即碾压机械行车速度要不大于规定的 v_0 , 激振力输出要不小于规定的 J_0 , 动态碾压遍数不小于最小碾压遍数 n_L , 并当对碾压最大遍数有控制时, 应不大于规定的最大的碾压遍数 n_u .

2.2 碾压后监控指标及控制准则

仓面碾压完成后, 收仓验收时主要监测最终压实厚度 H_k 及最终碾压遍数 N_k 这两项指标. 若 $(x_t, y_t) \in \Omega_k$, 则第 t 时刻第 k 个网格处的压实厚度:

$$h_{k,t} = f_h(P_t) = z_t - Z_{k,0},$$

则第 k 个网格最终的压实厚度为

$$H_k = \max_t \{h_{k,t}\} = Z_{k,1} - Z_{k,0}, \quad (4)$$

其中 $Z_{k,0}$ 表示上一个填筑层对应 k 网格处的最终高程. 该填筑碾压层在 k 网格处的最终压后高程为 $Z_{k,1} = \max_t \{z_t | (x_t, y_t) \in \Omega_k\}$.

根据碾压试验, 在设计的标准碾压遍数、行车速度以及激振力状态下, 可以确定最大压实厚度 D_0 , 则压实厚度应满足

$$H_k \leq D_0. \quad (5)$$

由(2)式, 可得第 k 个网格最终的碾压遍数

$$N_k = \max_t \{n_{k,t}\} = \max_t \{f_n(P_t)\}, \quad (6)$$

则最终碾压遍数的控制准则为

$$N_k \geq n_t, \quad (7)$$

即最终碾压遍数不小于最小碾压遍数. 当不满足(5)式或(7)式时, 需要对相应区域进行铲平补碾.

3 心墙堆石坝碾压质量实时监控关键技术

3.1 心墙堆石坝碾压质量实时监控方法

根据心墙堆石坝填筑碾压质量实时监控的环节及流程, 采用 GPS 技术、GPRS 技术、自动控制技术和计算机网络技术等, 提出如图 1 所示的心墙堆石坝碾压质量实时监控的总体方案, 具体实时监控方法如下:

1) 通过安装在碾压机械上的监测终端, 如图 2,

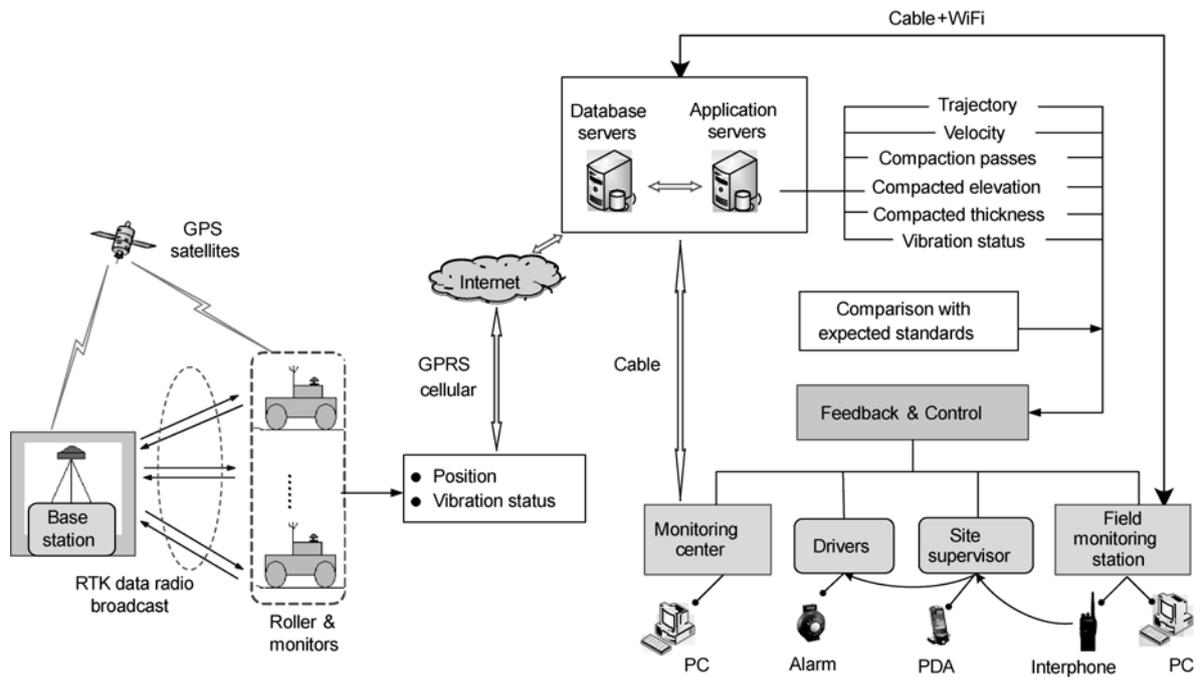


图1 心墙堆石坝填筑碾压质量实时监控的总体方案

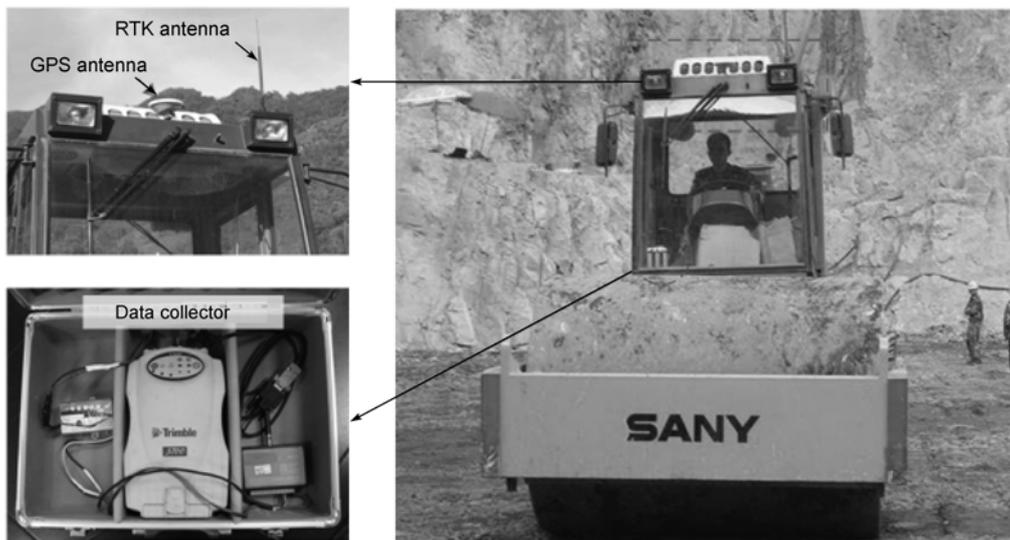


图2 碾压机及监控装置

实时采集碾压机械的动态坐标(经 GPS 基准站差分, 采用动态 RTK 技术^[11], 定位精度可提高至厘米级)和激振力输出状态, 经 GPRS 网络实时发送至远程数据库服务器中。

2) 根据预先设定的控制标准, 服务器端的应用程序实时分析判断碾压机的行车速度、激振力输出是否超标, 并通过驾驶室报警器和相关人员的 PDA 发

出相应报警。

3) 同时, 现场分控站和总控中心的监控终端计算机通过有线网络或无线 WiFi 网络, 读取上述数据, 进行进一步的实时计算和分析, 包括坝面碾压质量参数(含行车轨迹、碾压遍数、压实高程、压实厚度和激振力)的实时计算和分析。

4) 再将这些实时计算和分析的结果与预先设定

的标准作比较, 根据偏差, 通过相关人员的 PDA 以及总控中心和现场分控站的监控计算机发出报警, 指导相关人员做出现场反馈与控制措施。

3.2 碾压过程信息实时自动采集技术

为了给后续计算分析碾压参数提供基础数据, 需对碾压机械的动态位置坐标、定位时间和激振力输出状态, 进行高精度、高稳定性的自动实时采集。利用自主研制开发的碾压过程信息实时自动采集装置, 如图 3 所示。具体采集方法如下。

首先, 通过固定安装在碾压机械上的高精度 GPS 接收机按一定的时间间隔接收到 GPS 卫星所发射的无线电信号, 并经接收机内部差分计算, 获得碾压机械位置坐标和定位时间; 再将信息传送至无线数据传输单元(DTU)。

然后, DTU 把数据进行 IP 化, 并把 IP 数据包交给 GSM 通讯模块, 根据定制的 TCP/IP 协议, 将碾压机械的位置坐标, 定位时间和碾压车标识通过 GPRS 网络发送到远程数据库。

同时, 碾压机械输出激振力监测单元(VMU)实时获取碾压机械的激振力输出状态。通过把高低电平的模拟信号识别为数字信号(对应不同激振力状态), 再经 GSM 通讯模块, 无线发送到数据库。服务

器端的应用程序就可以基于这些基本数据, 绘制碾压轨迹线, 计算行车速度、碾压遍数、压实厚度、压实高程等压实参数, 用于碾压质量的实时控制。

此外, 为了保证传输的稳定性, 增加设备数据缓存功能和断线重拨功能, 在 GPRS 断线的情况下对串口数据进行存储和适时重传, 并设立专门机制, 对设备死机状况进行处理和恢复。

3.3 碾压过程可视化监控的图形算法

3.3.1 碾压轨迹、条带实时显示算法

碾压机行进轨迹是由每间隔 1 s 碾压机位置形成的线段组成的, 其绘制可应用线段生成技术中的 Bresenham 算法实现^[12]。

碾压区域是以碾压轨迹为轴线、以半碾轮宽向两边垂直扩展形成的碾压条带, 可视为线宽等于碾轮宽度的线段, 则可应用移动画笔法进行绘制。其实现方法为: 采用方形画笔, 将画笔宽度设置为代表碾轮宽度的数值, 画笔中心沿轨迹线段移动即可产生相应的碾压条带。此外, 不同碾压机的行进轨迹以不同的色彩表示, 以便于区分。同时, 应用字符生成技术在碾压机行进轨迹上动态显示当前速度、振动状态及碾压遍数, 达标数据用绿色显示, 不达标数据用红色显示。

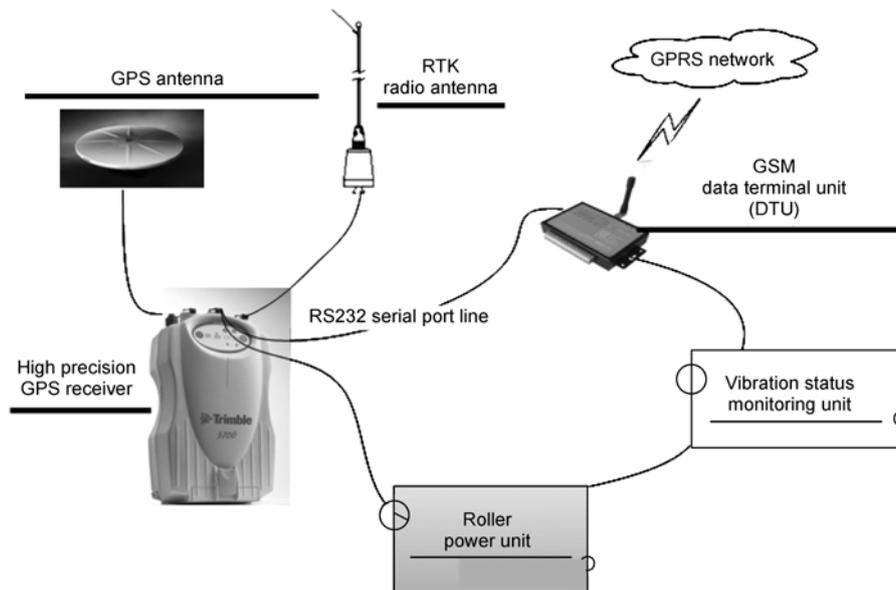


图 3 碾压过程信息实时自动采集装置原理图

3.3.2 行走速度计算

根据处理之后的坐标数据及其时间信息, 可求出碾压机某个时刻的行走速度. 设某碾压机相邻时刻 t_1 与 t_2 的定位坐标分别为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2, z_2)$, 则两点间碾压机行走速度 v 为

$$v = P_1P_2 / \Delta t = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} / (t_2 - t_1).$$

实际中, $\Delta t=1$ s. 但考虑到定位误差, 防止在很短的相邻时间间隔内出现速度剧变, 本文采用移动平均方法, 将前若干秒(比如 5 s)的速度取平均作为其即时速度.

3.3.3 碾压遍数计算与显示

将 GPS 定位天线安装于车顶中心位置(即碾压滚轮中心位置), 滚轮宽度 L ; 将仓面进行网格化, 网格越小则计算精度越高. 网格剖分方法为: 采用一足够大的、能包含大坝各分区形体的长方体, 按高程从上到下按层剖分网格, 然后与大坝分区相交确定各填筑分区的网格编号及其坐标. 图 4 为碾压遍数计算示意图.

实时确定碾压机在 Δt 内的碾压区域, 即矩形区域 $ABVD$, P_1 和 P_2 分别为 t_1 与 t_2 的碾压机位置, L 是碾压机碾轮的宽度. 根据仓面剖分的网格, 实时判别所有网格的中心是否处于该区域 Q ; 若是, 则该网格 $R_{ij}(i=1, 2, L, m; j=1, 2, L, n)$ 增加碾压遍数 1 次.

采用以像素为单位, 以不同颜色表示碾压遍数. 碾压条带经过时给所覆盖的每个像素设置颜色属性, 首先判断该像素当前颜色, 换算得到当前颜色表示

的碾压遍数数值, 然后将当前碾压遍数数值加 1 对应的颜色赋予该像素.

3.3.4 高程计算与显示

碾压高程的计算精确到像素, 以灰度阶值表示碾压高程. 以时间顺序绘制带有高程信息的碾压条带. 根据碾压条带可以确定该碾压条带所包含区域内每个像素点的高程. 根据时间顺序, 可以确定每个像素点经最后一次碾压后的高程. 对每个像素进行灰度赋值, 灰度区间对应高程区间. 在从碾压轨迹或条带图上实时查询任意点的高程时, 采用灰度值返回函数可计算得到该点所对应像素的灰度值, 进而可将该灰度值转化为对应的碾压高程数值.

4 工程应用

糯扎渡心墙堆石坝坝高 261.5 m(坝高居同类坝型国内第一). 采用 JSP, NET, 3D Max, MapX 等软件及其二次开发平台, 并采用 C/S 模式, 利用上文提出的方法和技术, 研制开发了糯扎渡心墙堆石坝碾压质量实时监控系统(RTM-NZD). 图 5 为该系界面, 反映了对碾压机运行速度、振动状态及任意地点碾压遍数的动态监测. 利用该系统实现了该工程全部 15 台碾压机碾压过程的实时监控, 当出现有质量不达标情况时, 分控站监理及时指导现场对相关区域进行补碾; 仓面施工完成后, 可输出碾压图形报告, 包括碾压轨迹(见图 6)、碾压遍数图(见图 7)、碾压厚度图等, 作为质量验收的支撑材料.

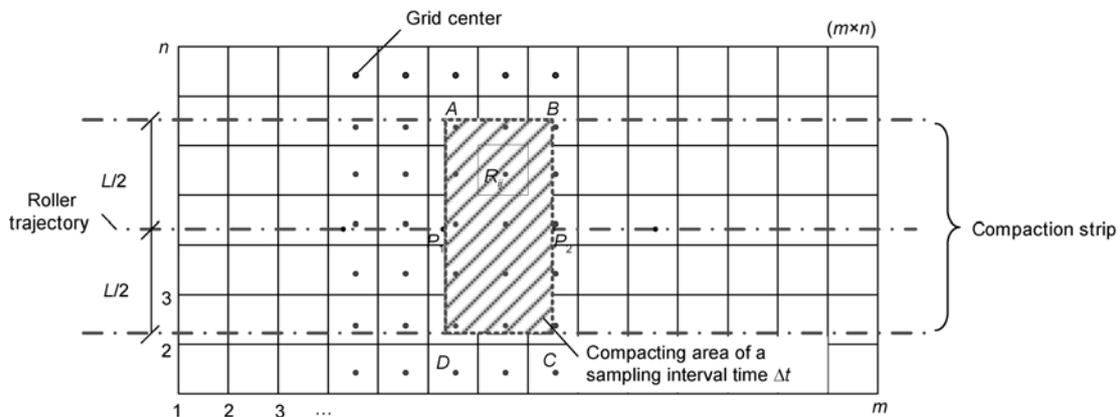


图 4 碾压遍数计算示意图

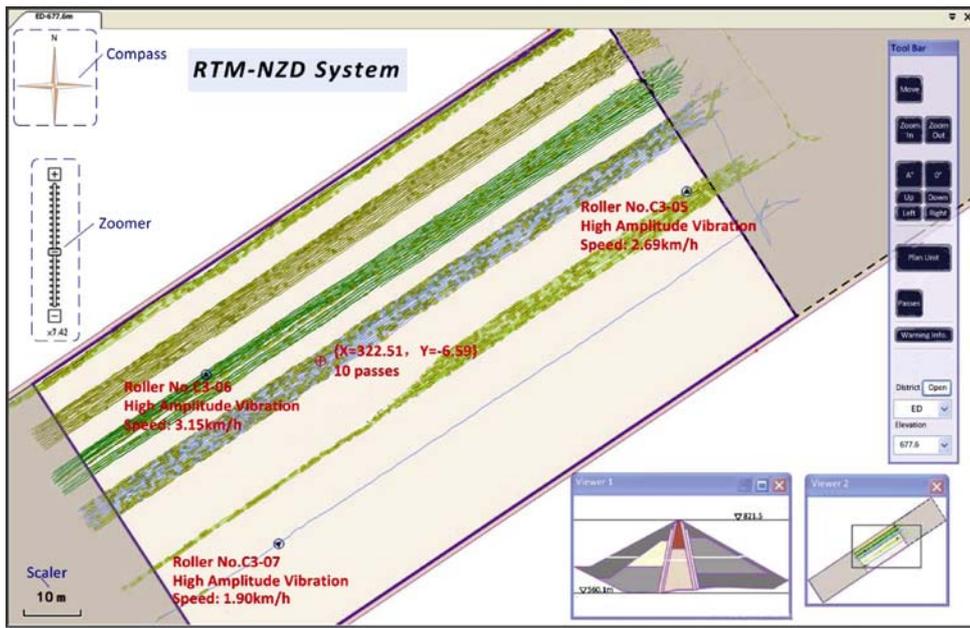


图 5 心墙堆石坝碾压质量实时监控界面

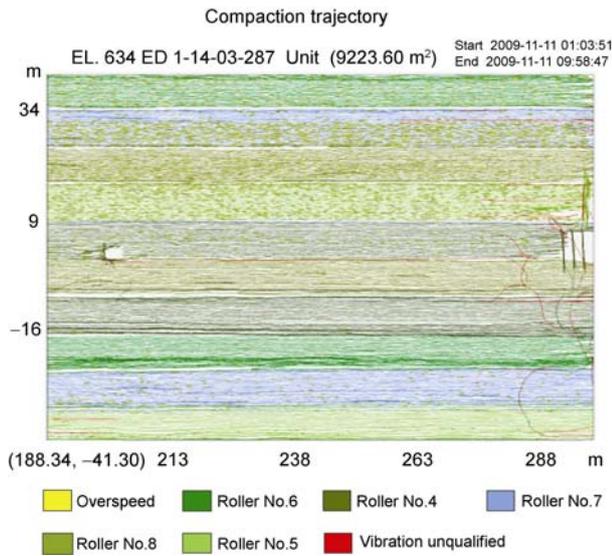


图 6 仓面碾压轨迹图

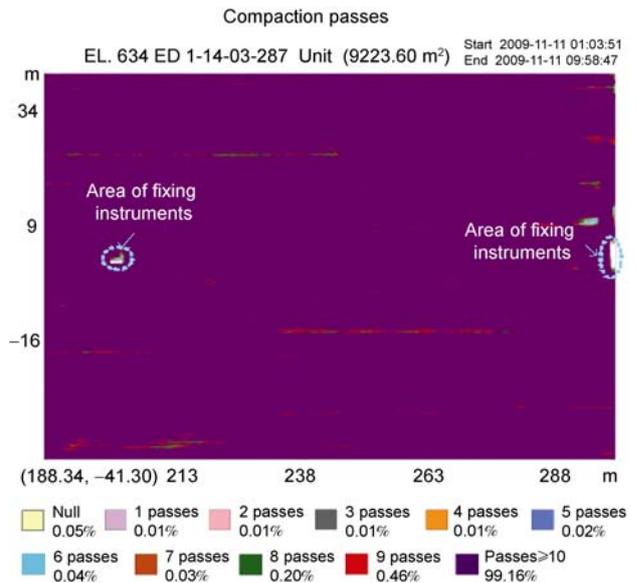


图 7 仓面碾压遍数图

从图 6 可以看出, 心墙区高程 634 m 上 ED1-14-03-287 仓面的 5 台碾压机碾压轨迹平顺, 超速极少 (黄色轨迹线表示超速, 多为瞬时超速), 激振力不符合要求的情况极少 (红色轨迹线)。从图 7 可以发现, 该仓面 10 遍以上的碾压面积占总面积的比例为 99.16%, 8 遍以上的碾压面积占总面积的比例为 99.82%, 分别满足实际中大于 90% 和 95% 的控制标准。图 7 中空

区域表示的是未碾压区域, 均为仪器埋设点。此外, 可得到该仓面碾压后平均压实厚度为 23.6 cm, 满足压实厚度小于 25 cm 的控制要求。

实际上, 通过对大坝施工仓面碾压过程的监控, 发现碾压参数 (碾压遍数、激振力、压实厚度、行车速度) 均得到很好的控制。图 8 为从 2009 年 1 月开始总计 64 周的所有仓面碾压机行车速度超速情况的统

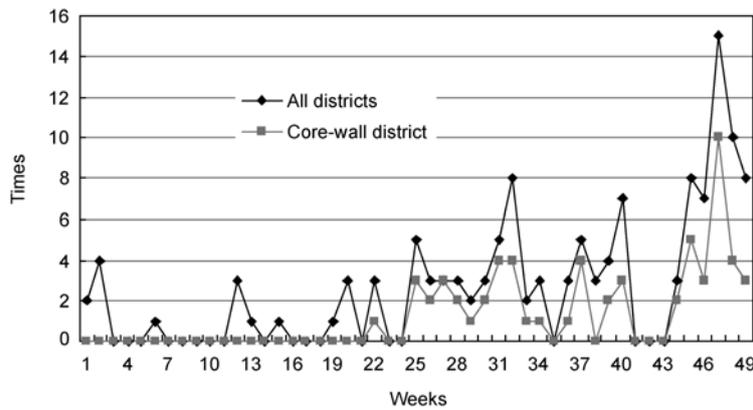


图8 碾压机行车速度超速情况统计

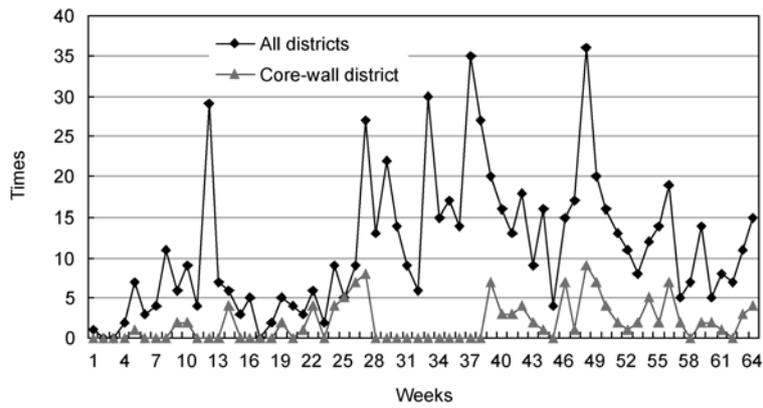


图9 碾压机激振力不合格情况统计

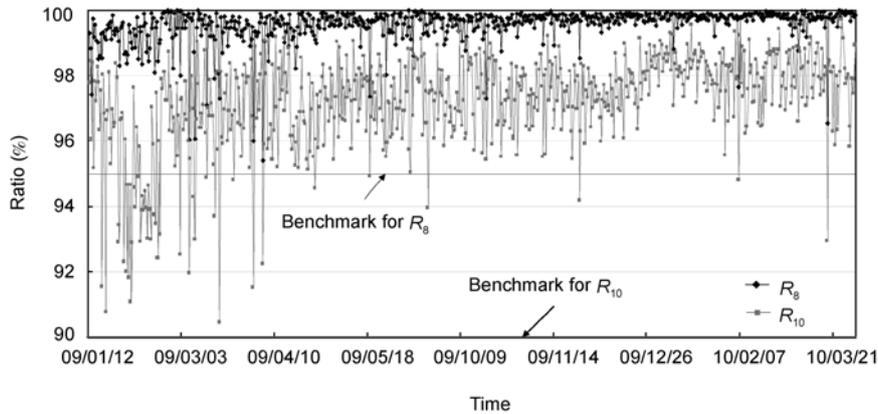


图10 心墙区仓面碾压遍数统计结果

计, 图9为2009年5月开始总计49周的所有仓面碾压机激振力不合格情况的统计, 可见在心墙区碾压机速度和激振力的控制要好于其他分区. 图10为心墙区522个仓面碾压遍数的统计结果, 碾压遍数达到10

遍以上区域所占整个仓面的比率均值为97.3%, 8遍以上比率的均值为99.6%. 此外, 根据心墙区挖坑质量检测结果, 心墙区的实际压实度均值达到99.2%, 所有仓面均满足压实度不小于98%的质量控制要求, 可

见通过碾压过程实时监控, 压实质量得到很好保证.

5 结语

本文针对高心墙堆石坝施工质量控制的要求与特点, 提出了高心墙堆石坝填筑碾压质量实时监控技术, 实现了碾压参数的全过程、精细化、在线实时监控, 克服了常规质量控制手段受人为因素干扰大、

管理粗放等弊端, 有效地保证和提高了施工质量, 并成功应用于糯扎渡心墙堆石坝工程建设中, 有效地控制了大坝施工参数, 提高了施工过程的质量监控水平和效率, 使大坝建设质量始终处于真实受控状态, 为高心墙堆石坝建设质量控制提供了一条新的途径. 该项技术不仅适用于心墙堆石坝, 还将适用于混凝土面板堆石坝和碾压混凝土坝, 故应用前景十分广阔.

参考文献

- 1 王柏乐, 刘瑛珍, 吴鹤鹤. 中国土石坝工程建设新进展. 水力发电, 2005, 31(1): 63-65
- 2 Carlos Z, Vincent D, Philippe B. Advanced Compaction Quality Control. Indiana: School of Civil Engineering, Purdue University, 2006
- 3 Camargo F, Larsen B, Chadbourn B, et al. Intelligent compaction: a Minnesota case history. In: 54th Annual University of Minnesota Geotechnical Conference, Minneapolis, 2006
- 4 Mark J T, David J W. Estimating compaction of cohesive soils from machine drive power. J Geotech Geoenviron Eng, 2008, 134(12): 1771-1777
- 5 David J W, Mark J T. Relationships between in situ and roller-integrated compaction measurements for granular soils. J Geotech Geoenviron Eng, 2008, 134(12): 1763-1770
- 6 Michael A M, Robert V R. Field monitoring of roller vibration during compaction of subgrade soil. J Geotech Geoenviron Eng, 2007, 133(3): 257-265
- 7 Petersen D, Siekmeier J, Nelson C, et al. Intelligent soil compaction—technology, results and a roadmap toward widespread use. J Transp Res Board, 2006. 81-88
- 8 黄声享, 刘经南. GPS 实时监控系统及其在堆石坝施工中的初步应用. 武汉大学学报, 2005, 30(9): 813-816
- 9 吴晓铭, 黄声享. 水布垭水电站大坝填筑碾压施工质量监控系统. 水力发电, 2008, 34(3): 47-50
- 10 Zhong D H, Cui B, Liu D H, et al. Theoretical research on construction quality real-time monitoring and system integration of core rock-fill dam. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(11): 3406-3412
- 11 Yi T H, Li H N, Gu M. Recent research and applications of GPS based technology for bridge health monitoring. Sci China Tech Sci, 2010, 53(10): 2597-2610
- 12 Li Y R, Wang Z X, Zhang C M. Improvement on Bresenham's circle generation algorithm. J Inform Comp Sci, 2007, 4: 115-118