

实时监控系统的面板堆石坝质量成本分析与预测

张念木 毕 磊 李 正 吕 鹏

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 质量成本是工程质量水平的经济衡量指标, 是保证工程质量、降低成本、提高收益以及判断质量体系有效性的重要工具。目前, 碾压质量实时监控作为先进的技术手段运用到面板堆石坝施工中, 其最大的优点是投资少、效益高。但现有研究都集中在实时监控系統对面板堆石坝质量水平的控制, 对于实时监控系统的经济效益研究不多。针对上述问题, 本文基于碾压质量实时监控系統, 在阐述了质量水平与质量成本关系的基础上, 明确了面板堆石坝施工过程的质量成本分析方法, 构建了实时监控特征参数的质量成本预测模型, 提出了施工过程质量成本的控制和改进的方法, 对实时监控系統下的面板堆石坝施工做出了更加全面可靠的评价, 为工程质量管理提供了科学的依据。

关键词: 面板堆石坝; 碾压质量实时监控系統; 质量成本; 质量水平; 神经网络模型

中图分类号: TV 9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-4339(2015) 01-010-06

质量成本作为工程总成本的一个组成部分, 是衡量工程质量水平与质量改进成效的重要经济指标^[1]。因此, 质量成本管理, 对保证工程质量、降低成本、提高收益等都具有重要意义。质量成本的定义最早是由美国的菲根鲍姆(Feigenbaum)在 20 世纪 50 年代提出的。他主张把质量预防费用和检验费用与产品不合格所造成的厂内损失和厂外损失一起加以考虑, 并将质量成本的概念运用于实践。他的这一观点得到了西方国家的普遍重视^[2]。此后, 朱兰(Juran)提出了“矿中黄金”理论, 其核心思想是通过“矿中黄金”的开采, 使投入的资金得到补偿并取得可观的回报。即通过将控制成本与损失成本结合起来研究, 寻求两者之间的理想结合点, 在此基础上建立起各种优化的质量成本结构。到 20 世纪 80 年代, 菲根鲍姆进一步提出把质量成本的范围扩大到整个产品的寿命周期。1979 年, 我国引进了质量成本的概念。经过一段时间的消化、吸收、试点, 于 1986 年 6 月颁布。1987 年 4 月, 正式实施了国家标准 GB6583.1-86《质量管理和质量保证术语 第一部分》, 并对质量成本下了明确的定义: 质量成本是将产品质量维持在规定的质量水平上所需要的费用, 它包括预防成本、鉴定成本、内部损失成本和外部

损失成本。国家技术监督局于 1990 年 8 月全面质量成本讨论会上规定质量成本的内涵是将产品质量保持在规定水平上所需的费用, 包括预防成本、鉴定成本、内部损失成本和外部损失成本, 在特殊情况下, 还需增加外部质量保证成本。随后, 学者们进行了一系列的研究。顾平和宁宣熙(2005)在分析了新的质量管理理念内涵的基础上, 以成功企业质量管理的业绩为事实依据, 对传统的质量成本曲线进行了修正, 得出了最理想的质量水平是零缺陷这一结论^[3]。曹晓琳(2001)运用模糊数学的原理, 提出了工程设计阶段的最优质量水平的计算模型、最佳质量成本比例的计算模型; 在施工阶段则根据模糊控制原理, 提出了质量成本的实时控制模型^[4]。裘喜芸(2004)运用线性回归模型、灰色系统模型及组合预测模型对工程项目质量成本进行预测, 并就灰色 GM(1, 1)预测模型存在的一些问题, 对 GM(1, 1)预测模型建模方法作了一定的改进, 在一定程度上提高了预测精度^[5]。梅苇(2010)对工程质量成本的管理进行了探讨, 提出了基于绝对和相对控制原则的质量成本控制措施^[6]。路雅静(2012)提出了基于粗集理论, 支持向量回归模型的工程项目质量成本预测方法^[7]。

收稿日期: 2014-09-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51321065); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB035904); 国家自然科学基金资助项目(51339003)。

作者简介: 张念木(1973—), 男, 博士研究生。

通讯作者: 毕 磊, bileibetty@126.com.

综上所述,对于质量成本的研究主要集中在流水线装配型企业产品上,而针对工程领域的研究多属于工程管理层面,关于大型水电工程质量成本的研究涉及甚少。同时,目前碾压质量实时监控作为先进的技术手段运用到大型水利工程施工中,其最大的优点是投资少、效益高。刘东海、王光锋等(2010)依托心墙堆石坝施工质量实时监控技术,提出全仓面碾压质量分析的具体流程以及全仓面碾压质量的评估方法^[8];刘东海、孙静等(2012)利用通过实时监控技术获取的碾压参数,建立了多元退化模型来评估碾压质量^[9];杨斌(2012)针对高填方渠道的施工质量控制问题,建立渠道碾压的压实度预测模型,获得了渠道碾压的压实度分布,实现了对渠道填筑质量的碾压评估^[10];冉从勇(2005)通过对大坝填筑施工中影响堆石填筑体整体干密度的各种因素进行分析计算,将质量控制和坝坡稳定复核计算参数的选取结合起来,评价坝体的填筑质量^[11]。但现有研究集中在实时监控系统对大坝等的质量水平的控制,对于实时监控系统的经济效益研究不多。因此,针对上述问题,本文基于碾压质量实时监控系统的,阐述了质量水平与质量成本的关系的基础上,明确了面板堆石坝施工过程的质量成本分析方法,构建了基于实时监控特征参数的质量成本预测模型,提出了施工过程质量成本的控制和改进的方

法,对实时监控系统下的面板堆石坝施工做出了更加全面可靠的评价,为工程质量管理提供了科学的依据。其总体结构见图 1 所示。

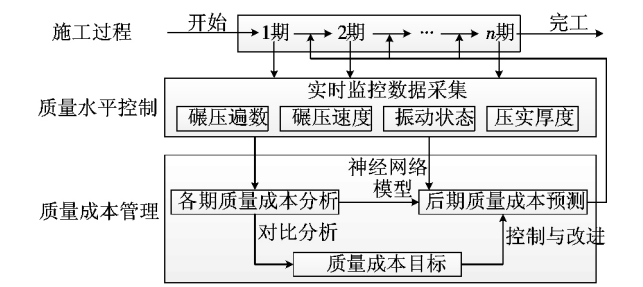


图 1 实时监控系统的面板堆石坝质量成本分析与预测

一、碾压施工质量实时监控系统应用原理

根据面板堆石坝坝面碾压质量检查与过程控制的标准^[12],建立了面板堆石坝坝面碾压质量控制指标体系(见图 2)。其监控过程是在满足质量控制目标前提下监控各碾压单元的执行过程。碾压质量监控的目标是在不影响正常碾压施工进度的前提下逐单元控制压实度、含水率等压后试验检测结果,工作内容在于对坝面碾压过程中各项过程控制指标的监测与纠偏。

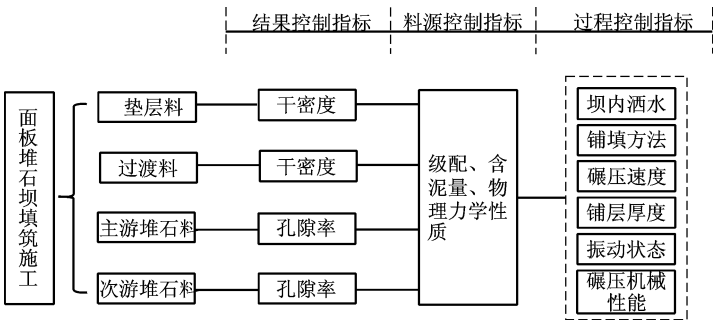


图 2 面板堆石坝填筑施工质量控制指标体系

碾压施工质量实时监控系统应用 GPS(global positioning system) 技术、GPRS(general packet radio service) 技术、计算机网络技术、数据库技术等高新技术^[13],以碾压机械为监控对象,实时采集和监控施工过程中碾压遍数、碾压速度、振动状态和压实厚度等碾压参数,实现对面板堆石坝坝体填筑碾压过程的精细化控制,其应用原理(见图 3)。系统结构包括监控中心(总控中心和现场分控站)、碾压机械流动站、GPS 基准站和 GPRS 传输网络。总控中心是大坝碾压质量实时监控系统的核心组成部分,主要包括服务器系统、数据库系统、通讯系统、安全备份系统以及实时监控应

用系统等。现场分控站建于大坝施工现场,便于监理人员在施工现场实时监控碾压质量,一旦出现质量偏差,可以在现场及时进行纠偏。碾压机械流动站也称碾压机械车载终端,包括安装于碾压机械上的 GPS 接收机、DTU(data transfer unit)、激振力监测设备及报警接收设备^[14]。GPS 差分基准站是整个监测系统的“位置标准”。通过在碾压机械上的监测设备,对坝体填筑施工过程中的碾压参数进行监测,并将施工数据传送给总控中心和现场分控站,使工程管理人员可以通过电脑对碾压过程进行实时监控,从而实现对碾压参数的及时有效控制,保证碾压施工质量。

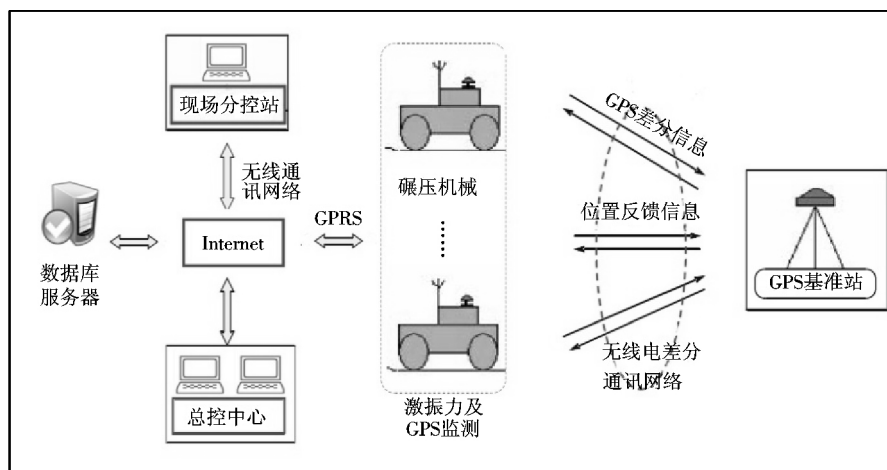


图3 碾压施工质量实时监控系统应用原理

二、实时监控系统下质量成本的定义及质量与成本关系分析

在面板堆石坝工程中,质量成本是因质量问题而在施工期或运行期发生的损失费用与防止质量问题在

施工期支出的费用的总和,即损失成本与控制成本之和。损失成本又称不一致成本,是指由于不符合要求而引起的全部工作,包括内部损失成本和外部损失成本;控制成本又称一致成本,是指为确保与要求一致而作的所有工作的费用,包括预防成本和鉴定成本。质量成本的构成(见图4)。

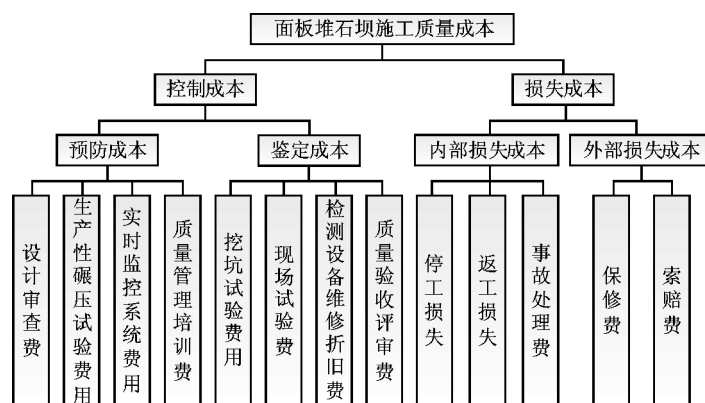


图4 质量成本的构成

图4中的预防成本是为减少质量损失和检验费用而发生的各种费用,是在结果产生之前为了达到质量要求而进行的一系列活动的成本,包括设计审查费、生产性碾压试验费用、实时监控硬件设备采购运输安装费用、系统硬件设备的后期维护费用、系统开发、测试及实施费用、质量管理培训费等。鉴定成本是按照质量标准对坝体质量进行测试、评定和检验所发生的各项费用,是在结果产生之后,为了评估结果是否满足要求而进行测试活动的成本,包括挖坑试验费用、检测设备维修、折旧费、现场试验费、质量验收评审费等。内部损失成本是指工程验收交付前或施工过程中因不合格或达不到要求目标造成的返工及返修费、停工损

失费、事故处理费等,如因碾压不合格而造成的补碾费用等。外部损失成本是在工程竣工验收交工后由于质量问题而造成的各种损失,如因渗漏问题引起的灌浆费用等。

面板堆石坝总质量成本与其4个组成部分及碾压施工质量水平之间存在着一定的关系,这种关系构成了质量成本特征曲线。图5为实时监控下的面板堆石坝质量成本特征曲线和无实时监控系统的面板堆石坝质量成本特征曲线。无实时监控系统的质量控制模式是采用监理旁站和随机取样试验的方式控制碾压质量,其质量成本特征曲线符合传统的质量成本模型,即在经济最优质量水平下的控制成本、损失成本与总质

量成本之间的关系。该模型由 Juran 和 Lundvan 最早提出^[15],曲线 I 控制成本随着质量水平的提高逐渐上升,曲线 II 损失成本则随着质量水平的提高渐近下降,两者存在着互相制约、此消彼涨的关系。曲线 III 总质量成本为控制成本和损失成本的叠加,呈马鞍型分布。当控制成本为 0 时,损失成本和总质量成本极大,质量水平接近于 0;逐渐增加控制成本,则损失成本和总质量成本急剧下降,质量水平大幅提高;当质量水平达到某一点 P 时,总质量成本达到最低,即最经济质量水平;若继续提高质量水平,控制成本大幅增加,但损失成本没有明显的减少,总质量成本大幅增加;若要达到最优的质量水平,控制成本将极大,总质量成本也极大。而面板堆石坝碾压实时监控作为一种先进的技术手段,可以以较低的质量成本将碾压质量控制到很高的水平。实时监控下的面板堆石坝质量成本特征曲线符合修正的质量成本模型,即在总质量成本下降的趋势和在完美质量水平下总质量成本与控制成本、预防成本之间的关系。模型中曲线 IV 控制成本比传统质量控制模式下的控制成本曲线增长平缓,其原因在于实时监控系统的采用虽然令控制成本的小幅度增加,但其对碾压施工进行了全过程控制,最终降低了不合格率。曲线 V 损失成本下降的速度则较曲线 II 更快,这与碾压质量实时监控使得质量水平提高、不合格率下降有直接关系。曲线 VI 总质量成本斜率为负值,最经济质量水平显著优于无实时监控的最经济质量水平。

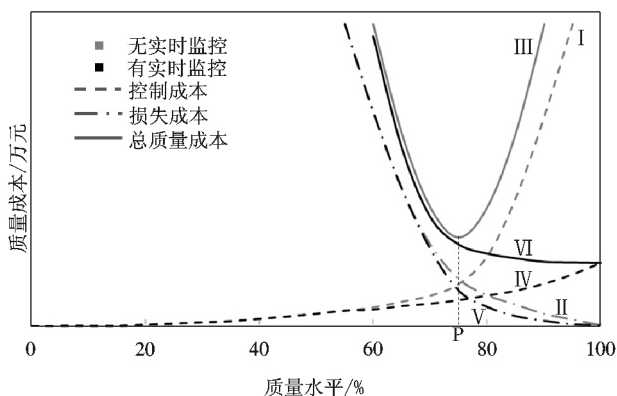


图 5 面板堆石坝质量成本特征曲线

三、实时监控系统下面板堆石坝质量成本分析

面板堆石坝施工过程的质量成本分析是执行质量成本计划、控制质量成本支出的重要阶段,有助于工程管理人员给出现阶段合理的质量成本目标和改进方

向。根据设计阶段质量成本计划,基于碾压质量实时监控,在整个施工过程中对质量水平和质量成本进行控制,可使面板堆石坝工程的安全可靠性与经济适用性达到平衡,满足工程项目各参与方的要求。面板堆石坝施工各阶段质量成本计算的重点是损失成本 (FC) 的定量分析。而预防成本 (PC) 和鉴定成本 (AC) 在各阶段施工总成本中所占比重 (β) 较为固定,可以通过以往类似工程的相关资料获得较为可靠的数据。对于损失成本与质量水平的定量关系已有学者进行了相关研究: Juran^[16] 于 1951 年提出了传统的质量成本模型,并通过曲线描述了损失成本与质量水平二者之间的近似关系; Taguchi^[17] 进一步提出了质量成本模型中的损失成本与质量水平之间的二次方关系。考虑实时监控系统下的面板堆石坝施工质量将保证在一定水平上,质量水平的允许变动范围有限,因此只需考量处于较高质量水平下的较小区间内的损失成本与质量水平之间的定量关系,近似假定二者成线性关系,即最高的质量水平对应最低的质量损失成本,最低的质量水平对应最高的质量损失成本。而最高质量水平 $Q'_{\max}$ 对应的质量损失成本 W_1 及最低质量水平 $Q'_{\min}$ 对应的质量损失成本 W_2 则由专家打分法确定。计算质量成本的公式为

$$FC = \frac{Q'_{\max} - Q}{Q'_{\max} - Q'_{\min}} (W_2 - W_1) + W_1$$

$$f(Q) = PC + AC + FC$$

$$f(Q) = \beta W + \frac{Q'_{\max} - Q}{Q'_{\max} - Q'_{\min}} (W_2 - W_1) + W_1 \quad (1)$$

式中: Q 为当前施工阶段的质量水平,通过对该阶段实时监控获取的碾压参数进行分析与评价获得^[18]; $f(Q)$ 为当前施工阶段的总质量成本。

四、实时监控系统下面板堆石坝质量成本预测与控制

1. 实时监控系统下面板堆石坝质量成本预测

随着面板堆石坝施工的不断进行,实际施工的质量成本不可避免地会和设计阶段的质量成本计划产生偏差。因此,有必要根据已施工阶段质量实时监控采集的数据及质量成本,对后期施工的质量成本进行预测调整,以指导后续施工并协助工程管理人员进行管理与决策。

面板堆石坝坝面碾压过程中的碾压遍数、碾压厚度、激振力状态、碾压速度等特征参数都会对坝体完成碾压后的坝体孔隙率及坝体完成填筑后的长期变形产生重要影响,即这些参数的变化决定了坝体的质量水

平,同时也反映了各施工阶段的质量成本。本文建立了质量成本预测的神经网络模型,模型输入为已施工各阶段的质量特征参数,包括碾压遍数、碾压速度、振动状态、压实厚度等,并对各阶段的质量成本进行统计;输出为预测施工阶段的质量成本。神经网络模型架构见图6所示,具体来说,根据已施工的各个阶段实时监控获取的数据,建立包含质量特征参数、质量成本的数据库,作为神经网络的训练数据集。运用神经网络的学习算法对其进行学习训练,从而得到将要施工的阶段的质量成本。其中隐含层数量由经验函数确定。常用的经验函数有以下3种^[19], N 为输入层数, M 为输出层数, n 为隐含层数。

$$\sum_{i=0}^N C_n^i > k \quad (2)$$

式中: k 为样本数; i 为 $[0, n]$ 之间的常数。

$$n = \sqrt{N+M} + a \quad (3)$$

式中: a 为 $[1, 10]$ 之间的常数。

$$n = \ln(N) \quad (4)$$

具体经验函数的选择将通过每种方法试算,得到各自的最佳隐含层数量,进而确定网络最终的隐含层数量。

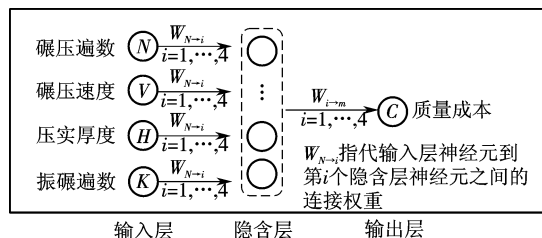


图6 神经网络模型

2. 实时监控系统下面板堆石坝质量成本的控制

对实时监控获得的数据进行分析,得到相应施工阶段的质量成本结果,并对后期施工的质量成本进行预测。将结果与制定的质量成本目标进行对比,并结合施工现场的资源配置状况,制定质量成本的控制和改进措施^[20]。质量成本的控制和改进过程可划分为以下3个阶段。

第一,确定质量水平控制目标。基于面板堆石坝碾压质量实时监控,确定质量水平控制范围。

第二,施工过程质量成本动态监测。应用实时监控对施工过程中的质量水平参数进行监测,及时发现质量水平超出目标控制范围的问题,从而控制质量成本的范围。

第三,制定质量成本控制和改进措施。在施工监控过程中,若发现质量成本数值超出目标控制范围,应

及时核查数据,找出问题所在。若实时监控系统出现报警,则应及时进行处理,解决质量问题;若监控系统运行正常,质量成本核算无误,则应对质量成本目标进行相应的修正,以符合实际施工状态。

五、结 语

针对目前关于面板堆石坝实时监控系统的研究集中在对施工质量水平的控制,而对于其经济效益的研究不多的问题,本文将质量成本作为面板堆石坝碾压质量实时监控系统的经济衡量指标,综合考虑工程的安全可靠性与经济适用性,明确了实时监控系统下质量成本的定义并分析了质量水平与质量成本的关系,在此基础上提出了面板堆石坝施工过程的质量成本分析方法,建立了质量成本预测神经网络模型。本文所研究的实时监控系统面板堆石坝质量成本分析与预测方法为施工过程质量成本的控制和改进指明了方向,对施工质量管理具有重要的理论意义和参考价值。

参考文献:

- [1] 段桂江,严懿,王洋. 基于数据挖掘的质量成本分析与控制[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(7): 1692-1703.
- [2] Mahamda A A. Implementing a cost of quality system is a step toward reducing the cost of quality [D]. Long Beach: California State University, 2005.
- [3] 顾平,宁宣熙. 新的质量管理理念对传统质量成本理论的冲击[J]. 江苏科技大学学报: 社会科学版, 2005, 5(4): 15-18.
- [4] 曹晓琳. 建筑工程项目质量成本优化与控制[D]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2001.
- [5] 裘喜芸. 建筑施工企业质量成本预测及管理方案决策研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2004.
- [6] 梅苇. 工程施工项目的质量成本管理研究[D]. 北京: 北京交通大学经济管理学院, 2010.
- [7] 路雅静. 中平建工集团工程项目质量成本预测研究[D]. 北京: 华北电力大学经济管理学院, 2012.
- [8] 刘东海,王光峰. 实时监控下土石坝碾压质量全仓面评估[J]. 水利学报, 2010, 41(6): 720-726.
- [9] Liu D H, Sun J. Compaction quality control of earth-rock dam construction using real-time field operation data [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2012, 138(9): 1085-1094.
- [10] 杨斌. 高填方渠道填筑碾压质量实时监控与压实度预测模型研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2012.
- [11] 冉从勇. 堆石坝坝体填筑质量控制与评价方法研究[D]. 四川: 四川大学水利水电学院, 2005.

- [12] 中华人民共和国水利电力部. DL/T5129-2001 碾压式土石坝施工规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [13] 钟登华, 刘东海, 崔博. 高心墙堆石坝碾压质量实时监控技术及应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(8): 1027-1034.
- [14] 张平. 基于实时监控的高心墙堆石坝施工仿真与进度控制研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2010.
- [15] Zhao J L. A optimal quality cost model[J]. *Applied Economics Letters*, 2000, (7): 185-188.
- [16] Juran T M. *Quality Control Handbook* [M]. New York: McGraw Hill, 1951.
- [17] Taguchi G. *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes* [M]. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986.
- [18] 刘东海, 王光烽. 实时监控下土石坝施工全仓面碾压质量评估[J]. 水利学报, 2010, 41(6): 720-726.
- [19] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [20] 和金生, 隋静, 于建成. 质量改进创新与组织学习的融知发酵模型[J]. 天津大学学报: 社会科学版, 2006, 8(2): 81-86.

Quality Cost Analysis and Forecast of Rock Fill Dam with Face Slab Based on the Real-time Monitoring System

Zhang Nianmu, Bi Lei, Li Zheng, Lü Peng

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Quality cost is an economic indicator of engineering quality level combining the safe reliability and the economical applicability. Quality cost management is an important tool for ensuring project quality, reducing cost, increasing revenues and judging the effectiveness of the quality system. As an advanced technology with low investment and high revenues, real-time compaction quality monitoring has been used for the construction of rock fill dam with face slab. But the existing researches focus on the control of the quality level and do not fully discuss the economic benefits of the real-time monitoring system. In the present study, the authors firstly analyze the relationship between the quality level and the quality cost based on the real-time compaction quality monitoring system. Second, the quality cost analysis method for the construction process of the rock fill dam with face slab is proposed. Then a quality cost prediction model based on the characteristic parameters of the real-time monitoring is built. Finally, the method of quality cost control and improvement for the construction process is present. The methodology of this paper provides a comprehensive and reliable evaluation for the construction of rock fill dam with face slab based on the real-time quality monitoring system and a scientific support for engineering quality management.

Keywords: rock fill dam with face slab; real-time compaction quality monitoring system; quality cost; quality level; neural network model