

闸墩水管冷却的光纤光栅温度监测及反馈分析

周宜红¹, 黄耀英¹, 严寒柏², 周建兵¹, 周志强², 刘 杨³

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 安徽省治淮重点工程建设管理局, 安徽 合肥 230000; 3. 水利建筑安装工程公司, 安徽 颍上 236200)

摘要: 将光纤 Bragg 光栅温度传感技术应用于水闸工程的闸墩进行实时温度监测, 同时对该工程进行施工期温度场和应力场反馈分析. 将光纤光栅温度传感器串联熔接形成准分布式测温系统, 既具有分布式光纤测温的优点, 又可克服分布式光纤测温精度不高以及常规仪器点式监测等缺点. 由于闸墩混凝土是薄壁结构, 其温度特性和应力状态受混凝土浇筑前后几天的气温影响较大, 建议结合周天气预报, 将光纤光栅温度传感技术与温度场和应力场仿真分析相结合, 进行实时在线监测、实时仿真和实时反馈, 及时采取合理的温控措施.

关键词: 闸墩; 光纤 Bragg 光栅; 温度; 监测; 反馈

中图分类号: TV315

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2011)01-0049-06

低温季节浇筑水闸工程混凝土时, 水闸的闸墩上常常出现“上不着顶, 下不着底”的“枣核形”裂缝. 研究^[1]表明, 这些裂缝主要由闸墩混凝土的内外温差和收缩变形引起. 为了消除这些裂缝给工程正常运行带来的隐患, 有必要分析并预测闸墩温度、应力真实分布情况及变化规律, 同时结合实测温度进行反馈分析, 以便及时采取合理的温控防裂措施.

自 1989 年 Morey 首次报道将光纤光栅用于传感以来, 国内外许多研究者对其传感机理和应用进行了深入研究^[2-3], 使光纤光栅传感技术得到迅速发展. 由于光纤光栅传感器具有抗电磁干扰能力强、尺寸小、耐高温性好、复用能力强、传输距离远等特点, 已成为国内外研究热点和学科前沿问题. 光纤光栅的中心反射波长会随外界温度的变化而产生波长漂移, 特别是光纤 Bragg 光栅具有特性稳定、线性度好的特点, 是理想的温度传感材料. 将光纤光栅温度传感器串联熔接形成准分布式测温系统, 既具有光时域反射 (OTDR) 和布里渊光时域反射 (BOTDR) 等分布式光纤测温的优点, 又可克服分布式光纤测温精度不高及常规仪器点式监测等缺点^[4]. 目前, 光纤光栅已成为最具挑战性和最有发展前途的光无源器件^[5].

本文将光纤 Bragg 光栅温度传感技术应用于淮河干流南润段进(退)洪闸工程的闸墩, 进行实时温度监测; 同时对该工程进行施工期温度场和应力场反馈分析.

1 光纤 Bragg 光栅温度传感器原理

根据光纤耦合理论, 当入射光进入光纤时, Bragg 光栅 (FBG) 会反射特定波长的光, 该波长满足以下特定的条件:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_B 为反射光的中心波长, 一般为 1 510 ~ 1 590 nm; n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光栅栅距.

温度变化既引起光纤光栅折射率的变化, 又会引起栅距的变化. 若不考虑波导效应, 将式(1)对温度 T

收稿日期: 2010-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079079); 教育部科学技术研究重点项目(208092); 湖北省教育厅科学技术研究项目(Z200713001, D20101207); 三峡大学基金资助项目(2008A007, 2008B041, KJ2010B003)

作者简介: 周宜红(1966-), 男, 湖北枝江人, 教授, 博士, 主要从事水利工程施工仿真方面的教学与科研.

E-mail: zhyh@ctgu.edu.cn

求得:

$$d\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + n_{\text{eff}} \frac{d\Lambda}{dT} \right) dT \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \right) dT \quad (3)$$

定义热光系数 $\zeta = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT}$, 热膨胀系数 $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$, 得:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta) \Delta T = \alpha_T \Delta T \quad (4)$$

式中: α_T 为光纤光栅的灵敏度系数. 实验表明, 特定材料的 α_T 为常数, 即光纤光栅中心波长的变化与温度的变化呈线性关系.

由式(4)可知, 外界温度变化会使 Λ 和 n_{eff} 发生变化, 从而引起光纤 Bragg 光栅中心波长漂移, 通过测量 Bragg 光栅中心波长的漂移量, 实现对外界温度的测量.

2 南润段进(退)洪闸工程水管冷却试验及反馈分析

2.1 工程概况

淮河干流南润段进(退)洪闸工程位于安徽省阜阳市颍上县. 该闸共有 5 孔, 单孔净宽 8 m, 闸墩 8.5 m, 闸室顺水流方向长 15.5 m, 中墩厚 1.2 m, 底板厚 1.4 m, 采用 C25 泵送混凝土. 闸体混凝土浇筑时间集中在 2009 年 2-4 月. 基于当地月平均气温, 采用三维水管冷却有限元法^[6-10]对闸底板和闸墩混凝土的温度场及应力场进行了仿真分析, 通过对不同表面保温和不同通水冷却温度等措施的比较, 提出以下温控措施: 竹胶模板保温、闸墩立模时间不小于 7 d, 在闸墩混凝土拆模后, 最迟间歇 1 d 覆盖表面保温材料, 在闸墩正中间布设冷却水管(钢管)进行通水冷却, 水管垂直向间距 1 m, 通 12~18℃ 冷却水, 连续通水 5 d.

2.2 光纤 Bragg 光栅温度传感器的选用及布置

目前工程上采用的分布式光纤测温主机, 如 Sentinel DTS-LR, 虽然具有线监测和实时在线监测的优势, 但其测量的是沿光纤线路 1 m 范围内的平均温度. 常规温度计为点式监测, 且一般为人工采集数据. 而光纤光栅温度传感监测既能进行实时在线监测, 又具有测量精度高的优点. 综合比选后, 本次试验采用光纤 Bragg 光栅温度传感器进行温度监测.

光纤 Bragg 光栅温度传感器布置见图 1, 在冷却水管附近及在水管与水管中间共布置了 12 支光纤 Bragg 光栅温度传感器, 串联熔接形成 1 个回路, 2 个插口通道, 形成准分布式测温系统. 采用光纤光栅解调仪 sm125-500 对闸墩混凝土温度特性进行实时在线监测.

2.3 温度场和应力场反馈分析

根据闸体施工实际浇筑过程, 采用空间六面体 8 结点等参单元, 对含冷却水管的闸墩、闸底板及计算域进行网格剖分, 共有单元 11 860 个, 结点 14 321 个, 有限元模型见图 2. 采用水管冷却温度场有限元计算方法, 进行闸底板和闸墩施工期温度场和应力场仿真分析, 其中气温、通水温度及混凝土入仓温度采用实测资料. 对混凝土绝热温升系数及有竹胶模板的混凝土表面放热系数等 3 个参数采用复合形法^[11]进行了参数反演, 其余参数则参考安徽阜阳市颍上县及周边同类水闸工程给定. 由于安

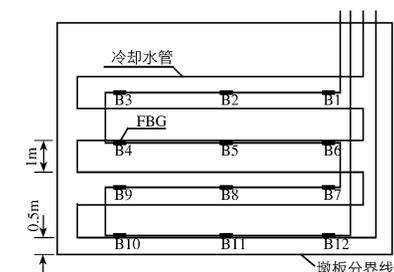


图 1 光纤 Bragg 光栅温度传感器布置
Fig. 1 FBG temperature sensor's design

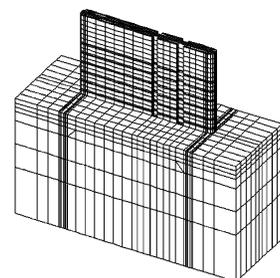


图 2 布置水管的有限元模型
Fig. 2 FEM with water pipes

徽阜阳市颍上县在闸墩浇筑前后几天气温变化较大,不但使混凝土入仓温度提高,而且使通水(地下水)温度也有近 4°C 的波动,给仿真分析带来不便.本文在进行温度场仿真分析时,取阜阳市实际日平均气温进行计算.

2.4 计算结果分析

2.4.1 测点实测温度与计算值的比较 闸墩混凝土浇筑完成后,采用光纤光栅解调仪 sm125-500 对闸墩混凝土温度特性进行实时在线监测,除 2009 年 3 月 21 日因下雨中断外,连续监测到闸墩浇筑完成后第 5 天结束,在监测过程中每 10 min 保存 1 个测值.测点温度实测值与计算值的比较见图 3,为节省篇幅,仅给出了测点 B7~B12 的对比.

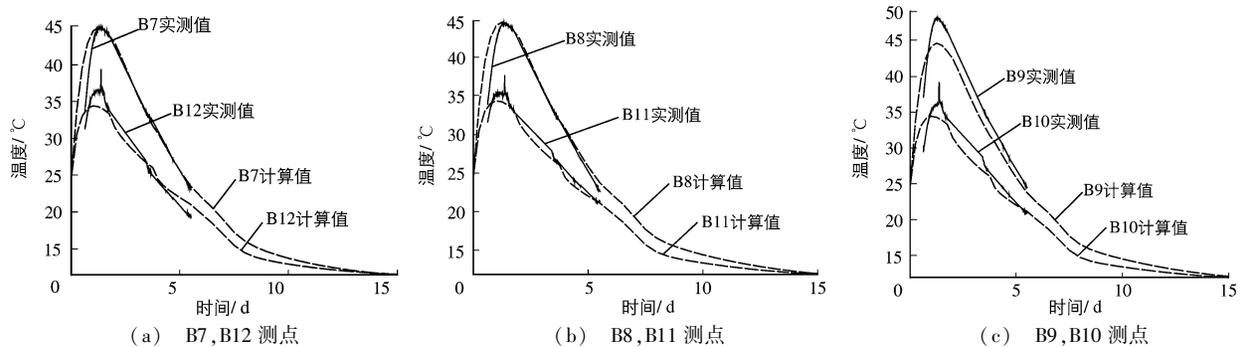


图3 部分测点温度实测值与计算值的比较

Fig. 3 Comparison between the measured and calculated values of temperature

由图 3 可见:(1)实测温度值与计算温度值吻合较好,测点 B9 的实测温度较计算温度高约 3.5°C ,可能该处水管未居中布置,导致该处温度偏高.靠近水管的测点 B10~B12 的实测温度在 1.37 d 时出现突变,是因为当时中断通水一段时间,导致水管附近温度升高.(2)由于闸墩浇筑时及浇筑完成 2 d 内,外界环境气温高($13.0\sim 26.3^{\circ}\text{C}$),而通水初期,施工单位为方便形成自循环水,将出水管和进水管放置在同一集水井中,导致通水水温最高达 24°C .通过光纤 Bragg 光栅温度传感实时监测,及时要求施工单位将出水管和进水管分别放置在不同集水井,使进口水温控制在 19°C 左右,但闸墩混凝土内部的最大温度在 1.3 d 时仍然达到近 47°C (测点 B9).由此可见,当环境气温较高时,地下水温度也会相应升高,如果需要对闸墩混凝土进行显著的温度削峰,最好的方式是加密水管间距.这要求在进行闸墩混凝土浇筑时,应关注 1 周内的天气预报,如果气温较高,必须采取加密水管间距等温控措施.由于在建议本工程的温控措施时,采用的是月平均气温,与实测气温差异很大,从而使事先建议的温控措施有欠合理.(3)由于通水冷却,在水管附近的混凝土温度较水管与水管中间混凝土的温度低 $10\sim 12^{\circ}\text{C}$.说明通水冷却对降低闸墩混凝土内部温度效果明显.

2.4.2 通水与不通水闸墩温度和应力比较 为了详细了解闸墩水管冷却的效果、影响范围以及后期应力状态,以下采用同一有限元模型进行通水与不通水时测点的温度场和应力场的对比分析.

有无水管时测点温度及应力比较分别见图 4 和 5,闸墩浇筑完毕后横剖面温度及应力比较分别见图 6 和 7.可见:(1)通水冷却时,在水管附近降温明显,最大能降低 8.75°C ;在水管与水管的中间位置降温不明显,最大仅降低 3.68°C .总体来说,通水冷却对降低混凝土内部的温度效果良好.若在短时间内要取得全区域显著的降温削峰效果,垂直向水管的间距还可再小些,可控制在 $0.5\sim 0.6\text{ m}$.(2)由于采取通水冷却的温控措施降低了闸墩混凝土内部的最大温度,使得闸墩混凝土后期的拉应力也得到一定程度的降低,在水管附近混凝土后期的拉应力降低幅度较水管与水管中间混凝土后期拉应力的降低幅度大.如水管附近混凝土后期拉应力能降低 $0.7\sim 0.8\text{ MPa}$,而水管与水管中间混凝土后期拉应力仅降低了 $0.01\sim 0.20\text{ MPa}$.(3)不通水冷却时,在墩板交接线以上 $0.5\sim 2.5\text{ m}$ 之间的横剖面中间区域在后期将产生大范围的拉应力区,最大拉应力达 1.893 MPa ,该拉应力可能引起闸墩产生贯穿性裂缝.当采取通水冷却温控措施时,虽然在墩板交接线以上 $0.5\sim 2.5\text{ m}$ 之间的横剖面中间区域在后期仍然存在拉应力区,但该处拉应力有较大幅度的降低,且

拉应力区存在间断不连续,对闸墩防裂有利.

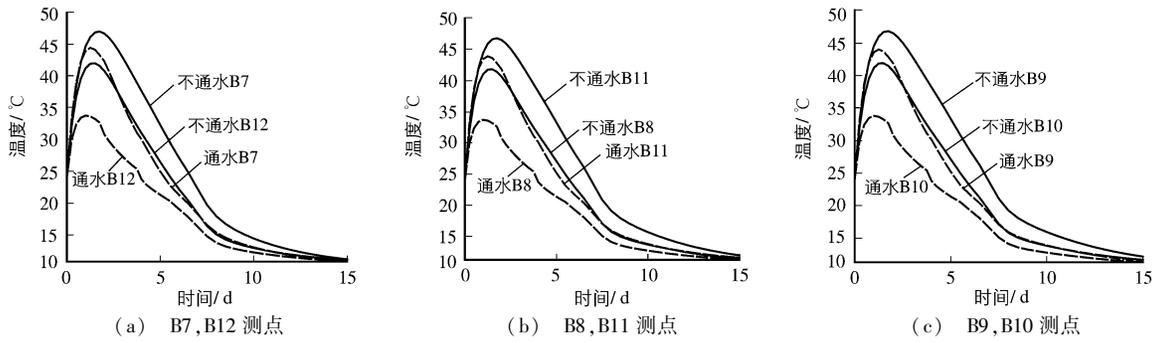


图4 有无水管时测点温度比较

Fig. 4 Temperature comparison of typical points with and without water pipe cooling

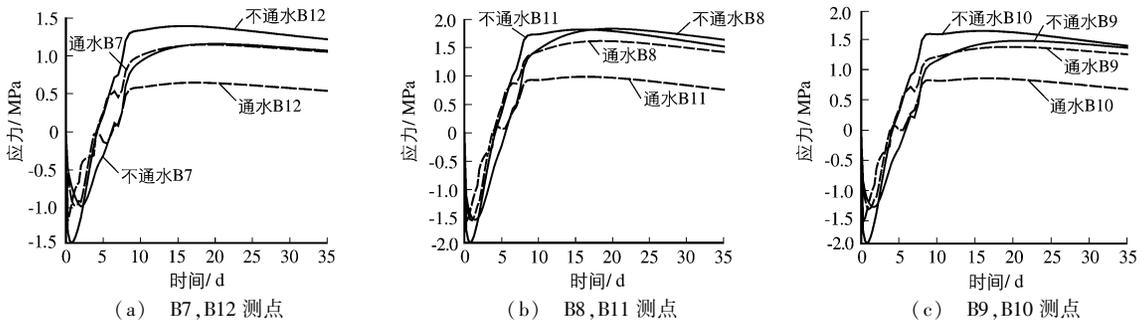


图5 有无水管时测点应力比较

Fig. 5 Stress comparison of typical points with and without water pipe cooling

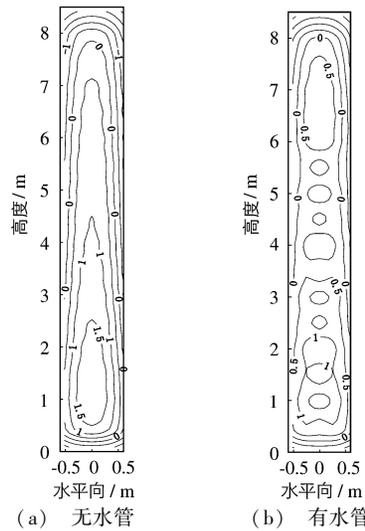
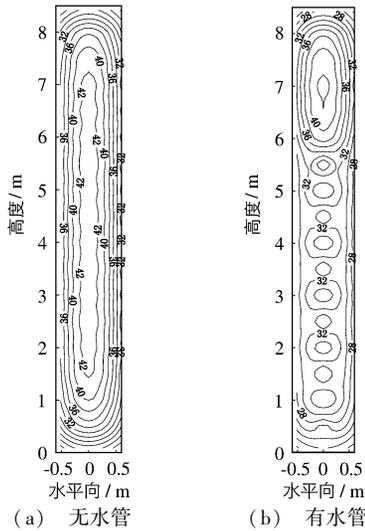


图6 闸墩浇筑完工后3 d时横剖面温度分布(单位:°C) 图7 闸墩浇筑完工后30 d横剖面应力分布(单位:MPa)

Fig. 6 Temperature distribution in typical cross-section of a sluice pier after 3 days of concrete placement Fig. 7 Stress distribution in typical cross-section of a sluice pier after 30 days of concrete placement

3 结 语

将光纤 Bragg 光栅温度传感技术应用于水闸工程的闸墩进行实时温度监测,同时对该工程进行施工期温度场和应力场反馈分析,得到如下结论:

(1)将光纤光栅温度传感器串联熔接形成准分布式测温系统,既具有分布式光纤测温的优点,又克服了分布式光纤测温精度不高以及常规仪器点式监测等缺点.将光纤 Bragg 光栅温度传感技术应用于淮河干流南润段进(退)洪闸工程的闸墩进行实时温度监测,监测情况良好,与温度场有限元仿真分析的计算值吻合较好.

(2)虽然对淮河干流南润段进(退)洪闸闸墩工程进行的施工期温度场和应力场仿真分析表明,采取通水冷却的温控措施对闸墩防裂有利,但对于闸墩这类薄壁混凝土结构,其温度特性和应力状态受混凝土浇筑前后几天的气温影响较大,由于2-3月份气温变化较大,当环境气温较高时,一般地下水温度也会相应提高,如果需对闸墩混凝土进行显著的温度削峰,必须加密水管间距,垂直向水管间距可控制在0.5~0.6 m.建议将光纤光栅传感技术与温度场和应力场仿真分析相结合,并结合当地1周内的天气预报,进行实时在线监测、实时仿真和实时反馈,及时采取合理的温控措施.

参 考 文 献:

- [1] 朱岳明,徐之青,曹为民,等. 墩墙混凝土结构水管冷却分析[J]. 工程力学, 2004, 21(5): 183-187. (ZHU Yue-ming, XU Zhi-qing, CAO Wei-ming, et al. Analysis of water-pipe cooling in thin-walled concrete structures [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(5): 183-187. (in Chinese))
- [2] LEE B. Review of the present status of optical fiber sensor[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57-79.
- [3] 詹亚歌,向世清,方祖捷,等. 光纤光栅传感器的应用[J]. 物理, 2004, 33(1): 58-61. (ZHAN Ya-ge, XIANG Shi-qing, FANG Zu-jie, et al. Progress in applications and developing prospect of in-fiber Bragg grating sensors[J]. Physics, 2004, 33(1): 58-61. (in Chinese))
- [4] 孙曼. 光纤 Bragg 光栅传感技术用于工程结构安全监测的研究[D]. 成都: 四川大学, 2005. (SUN Man. Health monitoring of engineering structures using fiber Bragg grating sensing technology[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. (in Chinese))
- [5] 禹大宽,乔学光,贾振安,等. 一种新颖封装的耐高温光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. 光子学报, 2006, 35(2): 232-234. (YU Da-kuan, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, et al. A novel packaged fiber Bragg grating temperature sensor with high temperature-resistance[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(2): 232-234. (in Chinese))
- [6] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999. (ZHU Bo-fang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese))
- [7] 朱伯芳,蔡建波. 混凝土坝水管冷却效果的有限元分析[J]. 水利学报, 1985 (4): 27-36. (ZHU Bo-fang, CAI Jian-bo. FEM analysis of effectiveness of water-cooling pipes embedded in concrete dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985 (4): 27-36. (in Chinese))
- [8] 朱岳明,徐之青,贺金仁,等. 混凝土水管冷却温度场的计算方法[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(2): 19-22. (ZHU Yue-ming, XU Zhi-qing, HE Jin-ren, et al. A calculation method for solving temperature field of mass concrete with water-pipe cooling[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(2): 19-22. (in Chinese))
- [9] 黄耀英,周宜红. 两种不同水管冷却热传导计算模型相关性研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(6): 56-59. (HUANG Yao-ying, ZHOU Yi-hong. Correlated study of two different cooling pipe heat conduction calculated model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(6): 56-59. (in Chinese))
- [10] 贺金仁. 高碾压混凝土重力坝的温度防裂研究[D]. 南京: 河海大学, 2003. (HE Jin-ren. Study on temperature control and crack prevention of high RCC gravity dams[D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [11] 郭科,陈聆,魏友华. 最优化方法及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. (GUO Ke, CHEN Ling, WEI You-hua. Optimization method and its application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese))

FBG temperature monitoring and feedback analysis of water-pipe cooling in sluice pier

ZHOU Yi-hong¹, HUANG Yao-ying¹, YAN Han-bo², ZHOU Jian-bing¹, ZHOU Zhi-qiang², LIU Yang³
(1. *College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China*;
2. *Anhui Provincial Authority for Huaihe River's Key Projects Construction and Management, Hefei 230000, China*;
3. *Company of Hydraulic Construction and Installation Engineering, Yingshang 236200, China*)

Abstract: Fire-new FBG temperature sensor technology is applied in sluice engineering for real-time monitoring of sluice pier's temperature. The sluice engineering's temperature and stress field are feedbacked and analyzed. Quasi-distributed system can be composed by splicing several FBG temperature sensors. It has advantages of distributed temperature system with high precision. Though the sluice pier is a thin-walled concrete structure, the air temperature in sluice pier placement highly influences the sluice pier's temperature and stress field. Real-time on-line monitoring, real-time simulating and real-time feedback analysis combining weather forecast, FBG temperature sensor technology and simulating analysis of temperature and stress should be adopted.

Key words: sluice pier; fiber Bragg grating(FBG); temperature; monitoring; feedback

黄河小浪底水利枢纽安全监测系统鉴定

——获 2009 年度全国优秀工程咨询成果二等奖

由我院与小浪底工程咨询有限公司共同完成的“黄河小浪底水利枢纽安全监测系统鉴定”项目获 2009 年度全国优秀工程咨询成果二等奖。

小浪底水利枢纽工程共布置了 3201 个测点,涉及仪器类型 33 种,是目前国内已完建土石坝工程中规模最大、仪器种类最多和最复杂的观测系统之一,因多种原因,存在部分仪器损坏、测值异常等问题。为全面了解该系统的运行状况和监测资料的可靠性,受水利部小浪底水利枢纽建设管理局委托,我院会同小浪底工程咨询有限公司,组织专家和技术人员在现场检验测试的基础上,从监测项目完备性、监测仪器和自动化采集系统可靠性与稳定性、监测资料可靠性与合理性等方面对小浪底水利枢纽安全监测系统进行了全面评价,为系统的正常运行、维护和管理提供了科学依据。经专家评审,一致认为该项目研究成果总体达到国内领先水平,对目前水利水电行业各类监测仪器运行期的鉴定起到了示范作用,为大坝安全监测系统鉴定积累了宝贵经验,具有广阔的推广应用前景。

摘自南京水利科学研究院网站