

水口大坝监控系统的测值疑点成因分析研究

苏怀智¹, 吴中如¹, 温志萍², 沈振中¹, 张 彪³

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098 2. 南京工程学院, 江苏 南京 210013;
3. 福建省水口水电站, 福建 闽清 350800)

摘要 对疑点测值进行快速、准确的物理成因分析,是水口水电站在线监控及反馈分析系统的关键。基于水口水电站工程监测项目繁多,信息量大,涉及的知识面广以及重力坝的自身工作特点,系统遵循突出重点,兼顾全面,以坝段为单元,以变形异常为重点,水平位移异常为核心,融汇渗流和应力应变,实时在线地分析测值疑点的物理成因。

关键词 水口水电站工程 实时 在线 反馈分析

中图分类号 :TV698 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2001)03-0055-05

水口水电站工程是以发电为主,兼有防洪、航运和过木等综合效益的大型水利枢纽工程,大坝为混凝土重力坝,最大坝高 101 m,总库容 26 亿 m³,装机 1400 MW,年发电量 60 亿 kW·h,是福建省电网的调频调峰电站,是华东地区装机容量最大的水电站。鉴于水口水电站工程在福建省中的特殊地位,在监控大坝安全运行方面做了大量的工作,布置了较全面的用于监测变形(包括水平和垂直位移、挠度等)、渗流、重点坝段内部的应力应变和温度等的仪器。同时委托河海大学开发研制了“水口水电站工程在线监控及反馈分析系统”,该系统由综合推理库、工程数据库、方法库和图库组成,总体结构见图 1。其主要功能是科学有序的管理监测资料 and 正反分析成果,管理与安全有关的设计、施工、运行管理等资料和专家知识。依据这些资料和专家知识,首先识别疑点测值,通过综合分析检查,判断疑点测值是监测引起还是由结构异常引起。对监测发现的疑点测值通过监测检查排除,对结构异常引起的测值,进行物理成因分析,对疑难杂症的测值,进行专家诊断。在弄清成因后,提出报警级别及其辅助决策的建议。从而,实现对大坝工作性态的综合评价,为管理部门决策提供有力的技术支持。

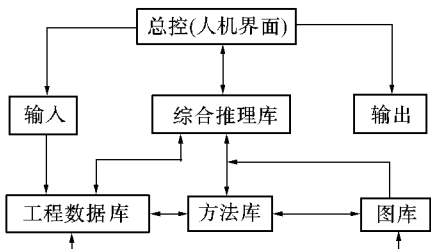


图 1 系统总体结构

Fig.1 Global structure of system

该系统的实时性、在线性主要体现在对疑点测值的物理成因分析上,这也是开发系统的关键环节和难点。为此,本文主要论述疑点测值的物理成因分析。

1 分析原则

水口水电站大坝为混凝土重力坝,共分 42 个坝段。整个大坝设监测测点总数达 800 多个,如果对每个坝段的各个测点均作分析,会因工作量大而无法达到实时性的目标。系统针对水口水电站工程的特点,遵循突出重点,兼顾全面,按坝段以人工和自动化监测分别进行分析的原则,对疑点测值进行综合分析和评价。

a. 基于水口水电站大坝为重力坝,各个坝段单独工作,重力坝以向下游滑动作为控制,而向下游水平位移的异常正反映了向下游滑动的稳定性。因此,成因分析以坝段为单元,以变形异常为重点,水平位移异常为核心,下游位移为关键,融汇渗流和应力应变进行分析。

b. 针对大坝如下特点 8[#] 坝段作为左岸坝段的代表;19[#] 坝段为水口大坝的最高坝段;23[#] 坝段为溢流

坝段与厂房坝段的衔接坝段,32#坝段有断层穿过,纵缝不灌浆,33#坝段纵缝灌浆,与32#坝段作对比分析。成因分析确定8#,19#,23#,32#,33#坝段为关键坝段,加以重点分析。

c. 8#,23#,32#坝段设有垂线,为此用垂线测值异常为重点进行分析,19#,33#坝段设有引张线,用引张线测值异常为重点进行分析。

2 分析机制

由于篇幅所限,文中仅对向下游变形异常的物理成因分析进行论述。

2.1 有限元在线分析模块

为了实现在线分析疑点测值的成因,应用有限元分析计算多组荷载工况(包括特殊荷载工况)时的测点位移值,并建立相应的数学表达式。若坝体未出现新的构造裂缝或坝基未发现新的断裂等而无需修改有限元模型时,则只需将环境量(包括水位、温度等)代入表达式即可快速计算出位移值,达到输入简单、计算快速、在线完成的目标。以23#坝段水平位移为例给出计算过程,其它坝段相似。23#坝段的监测布置见图2(图中仅给出垂线和温度计测点,由于水口大坝温度计测点较少,所以用了多个坝段的应变计、水温计以及混凝土温度计),有限元网格见图3。

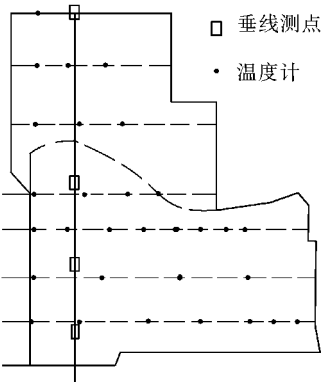


图 2 23# 坝段的监测布置

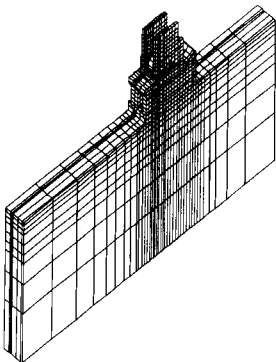


图 3 23# 坝段的有限元网格

Fig.2 Monitoring scheme of No.23 monolith Fig.3 Finite element meshes of No.23 monolith

a. 水压分量. 选择多组上游库水位,以这些水位,用有限元计算23#坝段74m,32m,13m,-4.8m高程测点的位移,依据此,建立各测点有限元水压分量的数学表达式

$$\delta_H = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i (H_1^i - H_0^i)$$
 (1)

式中:δ_H——有限元水压分量计算值;a_i——该点水压分量有限元表达式拟合系数(i=0,1,2,3,见表1);H₁——该日上游水头;H₀——上游水头初值(取初期蓄水时,1993年12月28日的水位)。

表 1 23# 坝段水平位移测点有限元水压分量和时效分量拟合系数

Table 1 Fitting coefficients of hydraulic component and time effect component for horizontal displacement of No.23 monolith by use of FEM

高程/m	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	C ₁	C ₂
74	-0.015	6.5	-0.11005	0.00058	-0.12620	0.56440
32	-0.009	-3.7	0.05702	-0.00030	-0.04613	0
13	-0.007	-4.5	0.07003	-0.00041	-0.04358	0
-4.8	-0.005	-3.9	0.06102	-0.00032	-0.19300	0.24130

b. 温度分量. 用有限元计算-6m,0m,10m,22m,30m,45m,60m,74m高程混凝土温度计层的单位等效温度(̄T,β)在74m,32m,13m,-4.8m高程测点的位移,即载常数,见表2和表3,然后计算位移:

$$\delta_T = \sum_{i=1}^8 [b_{1i} (\bar{T}_i - \bar{T}_{i0}) + b_{2i} (\beta_i - \beta_{i0})]$$
 (2)

式中:δ_T——该测点有限元温度分量计算值;b_{1i},b_{2i}——该测点在i层的单位等效温度(̄T=1℃,β=10/B,

B 为温度计层处的坝体厚度)作用下的位移,即载常数,见表 2 和表 3; $\bar{T}_i, \beta_i$ ——该测点所在坝段 i 层温度计等效温度的平均温度和温度梯度; $\bar{T}_{i0}, \beta_{i0}$ ——该测点所在坝段 i 层温度计初始值(即 1993 年 12 月 28 日)的等效温度的平均温度和温度梯度; $i = 1, 2, \cdots, 8$.

表 2 23# 坝段平均温度作用下水平位移测点有限元温度分量拟合系数

Table 2 Fitting coefficients of temperature component acted by average temperature for horizontal displacement of No.23 monolith by use of FEM								
高程/m	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}
74	0.013 66	-0.019 10	-0.073 68	-0.179 55	0.069 94	-0.201 44	-0.595 66	-0.366 84
32	-0.066 00	-0.107 42	-0.176 53	-0.499 88	-0.589 56	-0.183 65	-0.000 27	0.003 46
13	-0.202 34	-0.238 31	-0.298 32	-0.468 54	-0.218 47	-0.004 11	0.006 83	0.001 02
-4.8	-0.259 03	-0.235 31	-0.195 86	-0.087 40	-0.014 54	0.002 81	0.001 28	0.000 13

表 3 23# 坝段温度梯度作用下水平位移测点有限元温度分量拟合系数

Table 3 Fitting coefficients of temperature component acted by temperature gradient for horizontal displacement of No.23 monolith by use of FEM								
高程/m	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}	b_{27}	b_{28}
74	-2.783 31	-2.684 20	-2.542 80	-2.164 81	-2.631 01	-1.992 61	-1.250 41	-0.382 08
32	-1.459 31	-1.207 61	-1.061 92	-0.640 69	-0.457 83	-0.521 20	0.001 45	0.000 61
13	-0.937 85	-0.712 45	-0.559 87	-0.188 02	-0.236 90	-0.000 08	0.002 15	0.000 18
-4.8	-0.502 88	-0.324 11	-0.163 89	-0.002 38	0.008 27	0.000 81	0.000 39	0.000 02

c. 时效分量. 用粘弹性有限元计算加载过程时效位移,也可用统计模型或混合模型分离时效位移,即

$$\delta_{\theta} = C_1(\theta - \theta_0) + C_2(\ln\theta - \ln\theta_0) \tag{3}$$

式中: δ_{θ} ——该点有限元时效分量计算值; C_1, C_2 ——该点有限元计算的时效分量的拟合表达式的系数,见表 1; θ ——从始测日起累计天数除以 100; $\theta_0 = \frac{t_0}{100}$, t_0 ——初始观测日天数.

d. 有限元实时计算模型. 综上式(1)~(3),则有限元计算位移

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_{\theta} \tag{4}$$

2.2 有限元离线分析模块

如果坝体和坝基参数发生变化或发现新的坝地质构造和坝体出现新的构造裂缝,则在有限元模型中,需重新模拟这些地质构造和裂缝,重构有限元模型或启用新的坝体和坝基参数进行分析,这样需花费较长的时间,为此进行离线处理.

2.3 强度稳定校核

采用如下判别准则进行强度和稳定分析.

$K \geqslant [K], \sigma \leqslant [\sigma]$

变形为正常

(5)

$K \geqslant [K], \sigma > [\sigma]$

变形为异常

(6)

$K < [K]$

变形为险情

(7)

式(5~7)中:[K]——允许抗滑稳定安全系数; $[\sigma]$ ——允许应力; K ——计算抗滑面上的稳定安全系数,用刚体极限平衡理论的剪摩和纯摩公式计算; σ ——计算应力,用规范法(即材料力学法)计算的应力为依据,用有限元计算的应力作为参考.

2.4 参数反演

由大坝变形观测资料,用反演分析法反求混凝土和基岩的平均弹性模量或变形模量 E_c, E_r .

2.4.1 基本原理

反演坝体和基岩的弹性模量或变形模量(E_c, E_r)的基本原理是:从原型观测资料的分析中找出真实的水压分量 δ_H ,然后,假设 E_{c0}, E_{r0} ,用结构分析法推求水压分量 δ_H' . 坝体或基岩的真实平均模量为

$E_c = E_{c0}\delta_H'/\delta_H$

(8)

$E_r = E_{r0}\delta_H'/\delta_H$

(9)

式(8)(9)中: E_{c0}, E_{r0} ——坝体和坝基混凝土的计算模量; E_c, E_r ——反演的坝体和坝基模量; δ_H' ——假设 E_{c0}, E_{r0} ,用有限元计算水压作用下引起的坝顶(坝基)位移; δ_H ——大坝坝顶(坝基)水平位移在水压作用下,坝体(坝基)引起的实际位移,由统计模型分离得到。

2.4.2 坝顶和坝基均有测点情况的弹模反演

水口水电站大坝 8[#], 19[#], 23[#] 和 32[#] 坝段坝顶和坝基均有测点。

a. E_c 反演

$$\delta_H' = \delta_{Ht}' - \delta_{Hb}' - \delta_\alpha' \quad (10)$$

式中: δ_{Ht}' ——假设 E_{c0} ,用有限元计算水压作用下引起的总的坝顶位移; δ_{Hb}' ——假设 E_{c0} ,用有限元计算水压作用下坝基引起的位移; δ_α' ——基础转角引起的坝顶位移。

$$\delta_\alpha' = h \cdot \sum_{i=0}^n d_i H^i \quad (11)$$

式中: h ——坝顶测点距坝底高度; d_i ——拟合系数; H ——上下游水位差。

$$\delta_H = \delta_{Ht} - \delta_{Hb} + \delta_\alpha \quad (12)$$

式中: δ_{Ht} ——统计模型分离的坝顶水压分量; δ_{Hb} ——统计模型分离的坝基水压分量; δ_α ——基础转角引起的坝顶位移,意义同式(11)。

综上所述,反演公式:

$$E_c = E_{c0} \frac{\delta_{Ht}' - \delta_{Ht}' - \delta_\alpha'}{\delta_{Ht} - \delta_{Hb} - \delta_\alpha} \quad (13)$$

b. E_r 反演

$$E_r = E_{r0} \delta_{Hb}' / \delta_{Hb} \quad (14)$$

式中: δ_{Hb}' ——假设 E_{r0} ,用有限元计算水压作用下引起的坝基位移; δ_{Hb} ——统计模型分离的坝基水压分量。

2.4.3 仅坝顶有引张线测点观测资料的情况(33[#] 坝段)的弹模反演

由于仅有坝顶一个测点,只能反演综合模量 E_{cr} 。

$$E_{cr} = E_{cr0} \delta_{Ht}' / \delta_{Ht} \quad (15)$$

式中: δ_{Ht}' ——假设 E_{cr0} ,用有限元计算水压作用下引起的坝顶位移; δ_{Ht} ——大坝坝顶水平位移在水压作用下,坝体引起的实际位移,由统计模型分离得到。

3 测值疑点物理成因分析流程

物理成因分析流程如图4所示。

首先进行环境量分析,若发生向下游异常变形时,出现特殊环境量,如过高水位或长期高水位和低温、扬压力过大、地震等,则进入有特殊荷载工况的分析模块;若无,则进入无特殊荷载工况的分析模块。

3.1 特殊荷载工况下的物理成因分析

用有限元计算特殊荷载时的位移,并与实测值比较。若实测值与计算值在误差范围内,则异常测值为特殊荷载工况引起,进行强度和稳定分析,进入辅助决策,判断报警级别。若非,则进行坝体和坝基参数反演,依据反演的参数,用有限元分析程序计算特殊荷载工况的位移,再次与实测值比较。若与实测值吻合,则为参数引起,然后复核大坝的强度和稳定,进入辅助决策,判断报警级别。若与实测值不吻合,则进行巡查,检查是否有新的裂缝或重大工程措施发生。若有,则重构有限元模型,若无,进行专家诊断,会诊影响异常变形的因素。

3.2 无特殊荷载工况下的物理成因分析

进行坝体和坝基参数反演,依据反演的参数,用有限元分析程序计算产生异常变形时的位移,并与实测值比较。若与实测值吻合,则为参数引起,然后复核大坝的强度和稳定,进入辅助决策,判断报警级别。若与实测值不吻合,则进行巡查,或重构有限元模型,或进行专家诊断。

4 结 束 语

测值疑点的物理成因分析作为水口水电站工程在线监控及反馈分析系统的核心和开发难点,其设计、开发原则、分析流程等的合理性和科学性,关系到整个系统功能的有效发挥和实时在线分析疑点成因目标的实现。

a. 采用重点分析关键坝段,以变形异常为核心,兼顾渗流和应力应变,分坝段进行的原则,既减少了系

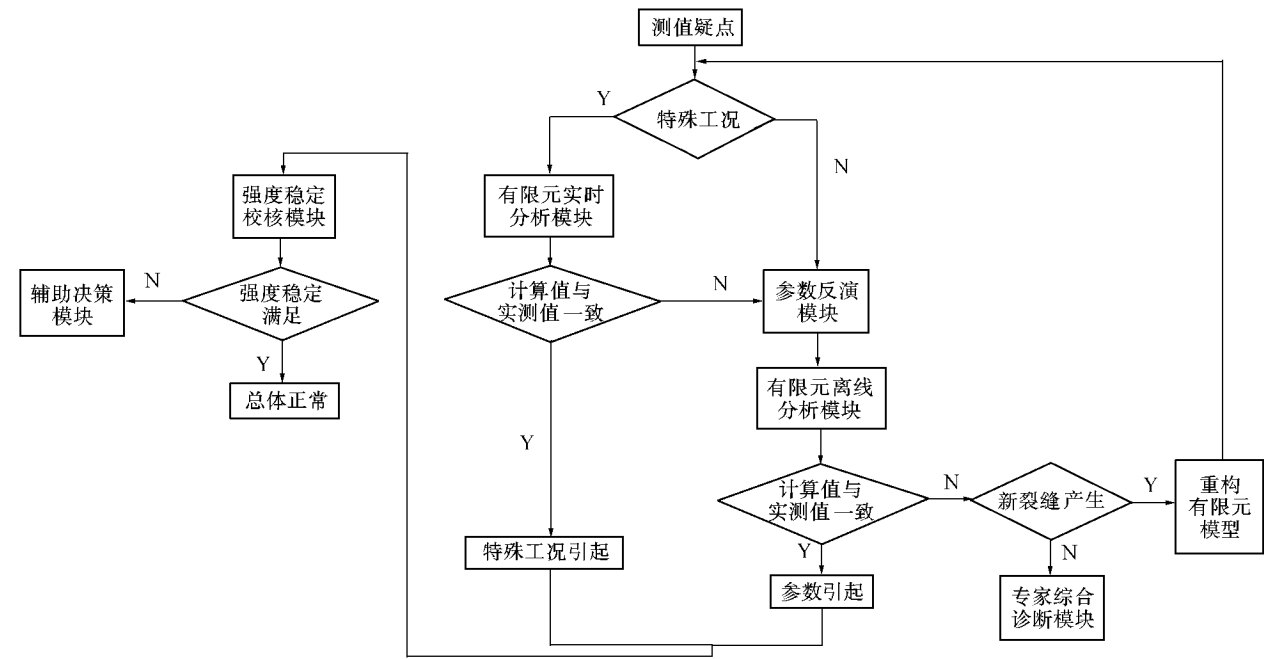


图 4 测值疑点物理成因分析流程

Fig.4 Analysis flow chart of genesis of doubtful points

统工作量,提高了分析效率,又合理的解决了重点问题,能够实现监控大坝工作性态的目的.

b. 有限元分析方法是现今结构异常分析的重要手段,根据水口水电站大坝的实际工作特点,文中设计了有限元实时分析模型和离线分析模型,在常规情况下启用有限元实时分析模型,输入量少,操作简便,可以快速地给出分析结果 如遇到出现参数变化或新的地基地质构造和坝体出现新的构造裂缝等时,才启用离线分析模型,进行重构有限元模型.

c. 设计了一套清晰、合理的成因分析流程,尽量减少信息的冗余查询,一定程度上提高了系统的推理分析效率.

参考文献：

[1] 吴中如,顾冲时.大坝安全评价专家系统[M].北京 北京科学技术出版社,1997.36~49.
[2] 吴中如,沈长松,阮焕祥.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].南京 河海大学出版社,1990.278~285.

Analysis of Genesis of Doubtful Points by Use
of Safety Monitoring System for Shuikou Dam

SU Huai-zhi¹,WU Zhong-ru¹,WEN Zhi-ping²,SHEN Zhen-zhong¹,ZHANG Biao³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Nanjing Engineering College, Nanjing 210013, China ;3. Shuikou Hydropower Station, Mingqing 350800,China)

Abstract The quick and accurate analysis of genesis of doubtful points is the key to the on-line monitoring and feedback analysis system in Shuikou hydropower project. A number of monitoring instruments are installed in the system which handles a great deal of information and monitoring data. Based on them,the system follows the rule that main problems are resolved emphatically and all problems are covered. Taking one monolith as an analysis unit,the abnormal deformation is analyzed emphatically,with the abnormal horizontal deformation as the core of analysis. At the same time,analysis of seepage, stress and strain are combined to analyze the genesis of doubtful points in real time and on line.

Key words Shuikou hydropower project ;real time ;on-line ;feedback analysis