

施工期混凝土拱坝应力实测数据的混合模型研究

吴子平¹, 王振波², 宋修广²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏南京 210098)

摘要: 论述了施工期大坝观测数据混合模型, 应用三维有限元方法对坝体结构进行分析计算, 综合考虑了坝体在施工过程中水压、温度、时效及浇筑高度、封拱灌浆高度、混凝土水化热对坝体的影响, 结合湖北省熊渡重力拱坝实例, 建立了熊渡拱坝的混合模型, 更加合理地解释、评价大坝工作性态, 为大坝安全监控提供了依据。

关键词: 施工; 大坝; 混合模型; 观测资料; 安全监控

中图分类号: TV698 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2000)01-0100-06

随着水利资源的深入开发, 可利用的坝址地质条件越来越复杂, 大坝的规模也向高、大的方向发展。但是, 由于如水文、地质、施工质量等多种原因, 导致大坝存在缺陷, 影响工程效益的发挥, 甚至威胁下游人民的生命和财产安全。因此, 大坝安全引起人们的关注。在大坝的施工和运行阶段, 开展对坝体、地基的变形、应力应变、渗流的原型观测工作, 并将积累的观测资料分析整理, 可以了解大坝在外界条件下地基和坝体的一些物理量的时间效应, 预测大坝的变形和应力状态, 对大坝运行期间的安全性进行评估和监控, 防止事故的发生。原型观测资料分析整理所获得的结果还可以验证设计和施工的正确性。随着科学技术的发展, 大坝安全监测工作取得了显著的成绩, 人们对安全监测的认识也更趋全面。

目前, 统计模型比较简单实用, 观测系列长、规律性好的统计模型, 能有效地用于测值预报, 而确定性模型和混合模型还处在探索阶段。

本文综合考虑坝体在施工过程中水压、温度、时效及浇筑高度、封拱灌浆高度、混凝土水化热等因素, 建立拱坝坝踵施工期应力的统计模型, 应用三维有限元方法对施工期的拱坝进行结构分析计算, 建立拱坝坝踵施工期应力的混合模型, 利用已建的施工期拱坝坝踵应力统计模型和混合模型计算大坝运行期的测点预报值, 并与实测值进行比较分析。

施工期和蓄水初期是大坝失事或出现事故的多发期。结合熊渡拱坝的原型监测资料, 笔者分析了施工期应力的主要影响因素如浇筑高度、封拱灌浆高度以及混凝土温度等建立监控模型。在蓄水期, 当封拱完成后, 主要受水位、温度的影响。与此同时, 计算并分析了控制部位在封拱灌浆、施工期、初期蓄水、运行期的拱向、径向应力, 为设计、施工和运行单位提供了决策依据。

1 施工期混凝土拱坝坝踵统计模型和混合模型

1.1 统计模型

施工期影响大坝监测物理量变化的因素有水压、温度、时效、坝体浇筑高度、封拱灌浆、混凝土温度、气温、混凝土水化热等。混凝土自身体积变形对应力影响, 如混凝土湿胀、干缩等对应力的影响, 由模型中常数项反映。施工期坝外观测量的因子选择如下:

a. 坝体浇筑高度 $h(t)$ 取 $h(t)$ 的一次方:

$$\sigma_j = \alpha_1 h(t) \tag{1}$$

式中: σ_j ——坝体浇筑高度引起测点的应力分量, MPa; $h(t)$ —— t 时刻坝体浇筑高度, m; α_1 ——系数。

b. 根据分析, 水压应力分量取水头 $H(t)$ 的四次方:

$$\sigma_H = \sum_{i=0}^4 \alpha_{2i} H(t)^i$$

(2)

式中： σ_H ——水压应力分量，MPa； $H(t)$ ——上下游水位差，m； α_{2i} ——系数。

c. 封拱灌浆因子 $g(t)$ 封拱灌浆对应力的影响与灌浆部位、强度、压力有关，在灌浆时段 $g(t)$ 呈线性变化，即

$$g(t) = \begin{cases} 0 & t < a \\ (t - a)(b - a) & a \leq t \leq b \\ 1 & t > b \end{cases}$$

(3)

式中： $g(t)$ ——封拱灌浆引起的应力分量，MPa； a ——灌浆开始时间； b ——灌浆结束时间。

d. 时效因子

$$\alpha(t) = \log[(1 + t)(1 + t_0)]$$

(4)

式中： $\alpha(t)$ ——时效应力分量，MPa； t ——从始测日起算时间，d； t_0 ——初始时间，d。

e. 温度因子 $T(t)$ 取测值的一次方。

f. 气温因子 $A(t)$ 封拱灌浆前后，气温对坝体影响程度不同。

$$A(t) = g(t) \cdot A_f(t) = \begin{cases} 0 & t < a \\ (t - a)(b - a)A_f(t) & a \leq t \leq b \\ A_f(t) & t > b \end{cases}$$

(5)

式中： $A_f(t)$ ——坝址日平均温度，℃。

g. 混凝土水化热因子 $q(t)$ 经综合分析，应力统计模型

$$\alpha(t) = a_0 + a_1\sigma_f(t) + a_2\sigma_H(t) + a_3g(t) + a_4\alpha(t) + a_5T(t) + a_6A(t) + a_7q(t)$$

(6)

1.2 混合模型

施工期的混合模型坝体浇筑高度 $H_f(t)$ 与封拱灌浆 $H_g(t)$ 和水压应力分量用有限元计算值拟合，其它分量用统计分量。

首先，对施工期坝体结构进行有限元分析，计算出不同库水位作用下坝体测点应力；其次，考虑到封拱灌浆对坝体的结构性态影响很大，封拱灌浆以前，大坝被横缝分成一个个独立的坝段，相互之间联系不大，拱的作用未完全形成，所以封拱灌浆前后，拱坝的工作状态和受力状况是不同的。因此，在有限元分析时，模拟坝体的施工过程，得到不同施工阶段的坝体和地基应力。

a. 坝体浇筑高度与封拱灌浆对拱应力影响

$$\sigma_{ff}(t) = A_0 + A_1H_f(t) + A_2H_g(t) + A_3H_f^2(t) + A_4H_g^2(t)$$

(7)

式中： $\sigma_{ff}(t)$ ——坝体浇筑高度和封拱灌浆引起的应力分量，MPa； $H_f(t)$ —— t 时刻坝体浇筑高度，m； $H_g(t)$ —— t 时刻坝体封拱灌浆高度，m。

b. 库水位对拱坝应力影响

在水库初次蓄水时，不同的库水位引起的应力分量不同，计算不同工况下的水压分量：

$$\sigma_H = \sum_{i=0}^4 \alpha_i H_1^i$$

(8)

根据前面所述，坝踵测点的应力混合模型：

$$\alpha(t) = b_0 + b_1\sigma_{ff}(t) + b_2\sigma_H(t) + b_3\alpha(t) + b_4T(t) + b_5A(t) + b_6q(t)$$

(9)

2 算 例

熊渡水利枢纽位于清江支流渔洋河下游，湖北省宜都县境内。枢纽工程由混凝土拱坝、左右岸引水建筑物及厂房等部分组成，控制流域面积 1015 km²，年径流量 10.03 亿 m³。大坝为混凝土单曲拱坝，带有 1:0.1 的前倾角，坝高 74.0m，最大半径 135.0m，最大中心角 110°11'3"，坝顶弧长 259.6m，跨高比 3.163，厚高比 0.287，坝顶高程 148.00m，正常水位 136.0m，正常高库水位 145.0m，分为 14 个坝段，其中 6 号至 9 号为溢流坝段，堰顶高程 136.0m，设置 6 扇 9m×10m 的平面钢闸门。电站装机容量 2.76 万 kW，年发电量 0.86 亿 kW·h。

岩石物理力学指标 岩石综合弹性模量 $E_R = 6 \times 10^3$ MPa ,泊松比 $\mu_R = 0.25$,允许抗压强度 $[\sigma] = 4$ MPa ,岩石的抗剪面摩擦系数为 0.6 ,抗剪强度 $\tau = 40$ kPa ,岩石断层面摩擦系数为 0.35 ,凝聚力 $C = 20$ kPa ,岩石的容重 $\gamma = 2.4 \times 10^3$ kg/m³.

坝体混凝土标号及力学指标 :坝体采用 C15 号混凝土 ,拱梁允许主压应力 $[\sigma_1] = 4.5$ MPa ,主拉应力 $[\sigma_2] = 1.2$ MPa ,剪应力 $[\tau] = 1.5$ MPa ,混凝土弹性模量 $E_c = 1.8 \times 10^4$ MPa ,泊松比 $\mu_c = 0.167$,容重 $\gamma_c = 2.4 \times 10^3$ kg/m³.

大坝浇筑及封拱灌浆时间见表 1.

熊渡拱坝观测剖面有靠近拱冠的七坝段、四分之一拱轴的十一坝段及中心角为 27° 的四坝段.七坝段的观测点布置如图 1.

表 1 拱坝浇筑及封拱灌浆过程

Table 1 Process of construction and grouting of the arch dam

高程/m	浇筑时间	封拱灌浆时间
74.0 ~ 82.5	87-11-11 ~ 87-11-29	89-11-29
82.5 ~ 100.0	88-01-08 ~ 88-05-11	89-11-29 ~ 90-01-18
100.0 ~ 117.5	88-05-06 ~ 89-04-01	90-03-16 ~ 90-03-30
136.0 ~ 140.0	90-08-09 ~ 91-01-10	91-02-04 ~ 91-03-18
140.0 ~ 148.0	91-02-20 ~ 91-04-10	92-01-06 ~ 92-03-15

注 高程 136.0 ~ 148.0 m 的坝段系非溢流坝段.

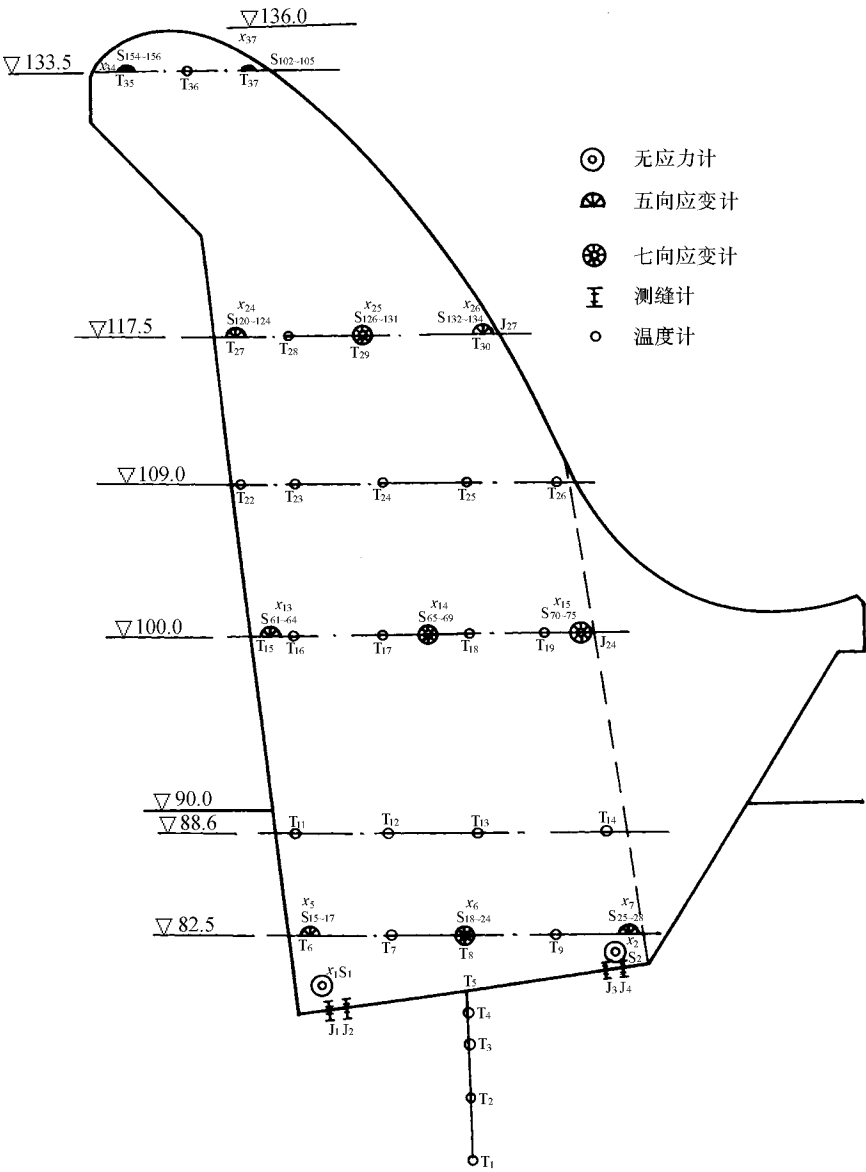


图 1 七坝段的观测仪器布置

Fig.1 Arrangement of observation instruments at dam section No.7

利用应力回归统计模型(式(6))对七坝段坝踵 x_5 拱向应力作回归分析,结果如表 2。

表 2 回归系数及复相关系数

Table 2 Regression coefficient and multiple correlation coefficient of statistic model									
回归系数								复相关系数	剩余方差
a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	R	σ^2
-1.57	-0.03	-0.006 6	-1.49	-0.17	-0.03	-0.06	0.0	0.948	0.024 5

坝踵测点 x_5 的应力统计模型:

$$\sigma(t) = -1.57 - 0.03h(t) - 0.0066H^3 - 1.49g(t) - 0.17C(t) - 0.03T(t) - 0.06A(t) \quad (10)$$

模拟坝体实际情况,有限元分析采用空间等参单元.对于坝体和地基采用空间八节点等参单元模拟,坝体的横缝和地基中断层采用空间八节点六面体夹层单元模拟,夹层单元中 $\sigma_z < 0$,材料满足虎克定律;当 $\sigma_z \geq 0$,材料丧失抗拉能力.有限元网格划分 1 776 个单元,2 434 个节点.坝体浇筑过程中,选取五种工况,利用有限元计算坝踵测点 x_5 的应力如表 3。

由式(7)得

$$\sigma_f(t) = 0.0806H_f^2 - 0.03147H_f^2 - 7.576H_f + 1.878H_f + 104.17 \quad (11)$$

熊渡水库是年调节水库,施工过程中溢流坝高程至 136.0 m,非溢流坝高程至 140.0 m 时开始蓄水,水库初次蓄水时间是 1990 年 8 月,库水位是 127.04 m。

在不同的库水位,坝踵测点 x_5 的拱向应力如表 4,水压分量应力与水头关系曲线如图 2。

表 3 各种工况下的应力分量 σ_f

Table 3 Stress component under various operation conditions			
工况	σ_f/MPa	相应的高度/m	
		H_f	H_j
I	-5.36	53.5	53.5
II	-3.68	53.0	53.0
III	2.13	17.5	17.5
IV	-0.16	0	17.5
V	-3.09	17.5	35.0

表 4 各种工况下的水压分量 σ_H

Table 4 Water pressure component under various operation conditions		
工况	σ_H/MPa	水头 $\Delta H/\text{m}$
I	-1.930	48.0
II	-1.660	44.0
III	-1.550	42.0
IV	-0.997	35.0
V	-2.850	27.5

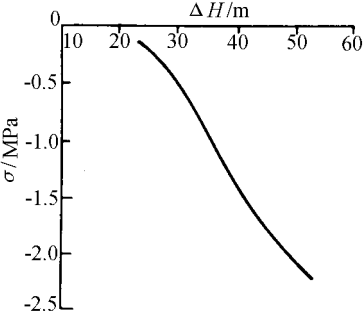


图 2 水压分量与水头关系曲线
Fig.2 Relation curve of water pressure component and head

由式(8)可求出

$$\sigma_H = -2.21 \times 10^{-4} \Delta H^4 + 3.38 \times 10^{-2} \Delta H^3 - 1.9 \Delta H^2 + 45.7 \Delta H - 398.82 \quad (12)$$

取大坝七坝段坝踵测点 x_5 的观测资料作逐步回归分析,结果如表 5。

表 5 回归系数及复相关系数

Table 5 Regression coefficient and multiple correlation coefficient of hybrid model								
回归系数							复相关系数	剩余方差
b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6		
- 1.068	- 1.554	- 0.975	- 0.56	- 0.011	- 0.0085	0.0	0.968	0.008 9

坝踵测点 x_5 的应力混合模型:

$$\sigma(t) = -1.068 - 1.554\sigma_f(t) - 0.975\sigma_H(t) - 0.56C(t) - 0.011T(t) - 0.0085A(t) \quad (13)$$

3 结果比较与分析

坝踵测点 x_5 的应力过程线及拟合曲线如图 3。

根据已建立的混合模型和统计模型预报 1993 年、1994 年和 1995 年七坝段坝踵测点 x_5 的拱向应力值如表 6。混合模型的应力预报值与观测值的差值的正态分布、统计模型的应力预报值与观测值的差值的正态分布如图 4。计算结果表明,混合模型的应力预报值结果比统计模型的应力预报值结果要好一些。

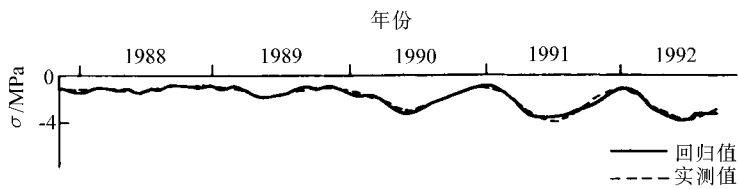


图 3 应力过程线及拟合曲线

Fig.3 Stress graph and fitting curve

表 6 混合模型和统计模型的应力预报值与观测值的差值

Table 6 D-value between prediction value of models and measured value

时 间	观测值 /MPa	混合模型预报值 /MPa	统计模型预报值 /MPa	混合模型预报值与观测值之差		统计模型预报值与观测值之差	
				绝对误差/MPa	相对误差/%	绝对误差/MPa	相对误差/%
1993 年 1 月	-1.30	-1.3200	-1.3500	-0.0200	1.51	-0.0500	3.70
2 月	-1.55	-1.6000	-1.6100	-0.0500	3.12	-0.0600	3.73
3 月	-2.02	-2.0500	-1.9800	-0.0300	1.46	0.0400	2.02
4 月	-3.24	-3.3600	-3.0500	-0.1200	3.57	0.1900	6.23
5 月	-3.75	-3.7200	-3.6950	0.0300	0.81	0.0650	1.76
6 月	-4.05	-4.0300	-4.0900	0.0200	0.49	-0.0400	0.98
7 月	-4.30	-4.2500	-4.1500	0.0500	1.18	0.1500	3.61
8 月	-3.85	-3.8600	-3.8000	-0.0100	0.26	0.0500	1.32
9 月	-3.05	-3.0000	-2.9800	0.0500	1.67	0.0700	2.35
10 月	-2.65	-2.6700	-2.6000	-0.0200	0.75	0.0500	1.92
11 月	-2.05	-2.0250	-2.130	0.0250	1.23	-0.0800	3.75
12 月	-1.60	-1.5800	-1.5550	0.0200	1.27	0.0450	2.90
1994 年 1 月	-1.45	-1.4400	-1.4750	0.0100	0.70	-0.0250	1.69
2 月	-1.51	-1.5250	-1.5280	-0.0150	0.98	-0.0180	1.18
3 月	-1.58	-1.6100	-1.6150	-0.0300	1.86	-0.0350	2.17
4 月	-1.92	-1.9345	-1.9460	-0.0145	2.33	-0.0260	1.34
5 月	-2.35	-2.3350	-2.3320	0.0150	0.64	0.0180	0.77
6 月	-3.52	-3.4940	-3.4950	0.0260	0.74	0.0250	0.72
7 月	-3.12	-3.1350	-3.1360	-0.0150	0.48	-0.0160	0.51
8 月	-2.75	-2.7850	-2.7950	-0.0350	1.26	-0.0450	1.61
9 月	-2.43	-2.4900	-2.4545	-0.0600	2.42	-0.0245	1.00
10 月	-2.20	-2.1830	-2.1770	0.0170	0.78	0.0230	1.06
11 月	-1.85	-1.8140	-1.8120	0.0360	1.98	0.0380	2.10
12 月	-1.56	-1.6000	-1.6020	-0.0400	2.50	-0.0420	2.62
1995 年 1 月	-1.35	-1.4150	-1.3450	-0.0650	0.46	0.0050	0.37
2 月	-1.55	-1.5320	-1.5350	0.0180	1.17	0.0150	0.98
3 月	-2.02	-2.0000	-2.0380	0.0200	1.00	-0.0180	0.88
4 月	-2.65	-2.6650	-2.6700	-0.0150	0.56	-0.0200	0.75
5 月	-3.35	-3.3310	-3.3270	0.0190	0.57	0.0230	0.69
6 月	-3.75	-3.6820	-3.6750	0.0680	1.85	0.0750	2.04
7 月	-4.15	-4.0860	-4.0850	0.0640	1.57	-0.0650	1.60
8 月	-3.80	-3.8050	-3.8185	-0.0050	0.13	-0.0185	0.48
9 月	-3.45	-3.4685	-3.4740	-0.0185	0.53	-0.0240	0.70
10 月	-3.05	-3.0660	-3.0255	-0.0160	0.52	0.0245	0.81
11 月	-2.65	-2.6735	-2.7260	-0.0235	0.88	-0.0760	3.67
12 月	-2.05	-2.0325	-1.9700	0.0175	0.86	0.0800	4.06

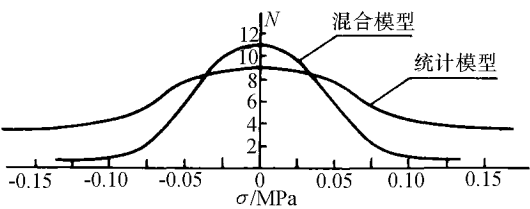


图 4 混合模型和统计模型的应力预报值与实测值的差值分布

Fig.4 Distribution of D-value between prediction value of models and measured value

4 结 论

对拱坝结构计算及观测资料整理分析 ,能够客观地评价大坝的工作性态 ,为水库运行管理提供安全保证 ,同时也验证施工质量 ,对其它工程的设计、施工、管理也有借鉴作用。

- a. 计算分析表明 ,坝体施工过程中和第一次蓄水阶段 ,采用混合模型比采用统计模型分析计算的成果更好。
- b. 从研究分析可知 ,影响大坝的主要因素 ,在施工期是坝体的浇筑高度、封拱灌浆高度和温度(包括气温及混凝土的水化热温升) ;在初次蓄水阶段则是水位和温度。
- c. 在结构计算分析时 ,封拱灌浆后 ,坝踵部位出现较大的压应力 ,而在坝体中间引起较大的拉应力。因此 ,在坝型选择时应考虑这一特点。

本论文研究过程中得到河海大学邓昌铁教授指导 ,作者表示衷心感谢。

参考文献 :

[1] 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 ,1990.93 ~ 120.

[2] 樊明哲 .封拱灌浆对熊渡拱坝的应力影响分析[J].大坝观测与土工测试 ,1993 ,10(5) :14 ~ 16.

Study on Hybrid Model of Stress Observation Data of Concrete Arch Dam under Construction

WU Zi-ping¹ , WANG Zhen-bo² , SONG Xiu-guang²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;
2. College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract :In this paper , a hybrid model is presented based on the observation data collected during the construction period of a large dam. The Xiongdu Arch Dam in Hubei province is analyzed by means of the three dimensional finite element method , considering the effects of such factors as water pressure , temperature , time-effect , constructed height , grouting stage , and cement hydration heat in the construction period. The results from the model provide a reasonable basis for the explanation and evaluation of the behavior of the large dam and for the realization of the monitoring of dam safety.

Key words :construction ; dam ; hybrid model ; observation data ; monitoring of safety