

三峡泄洪2[#]坝段位移场的确定性时空分布模型

丁晓唐 顾冲时 赵斌 沈振中

王艳秋

(河海大学 南京 210098)

(南京长江河道管理处 南京 210011)

摘要 应用线弹性、粘弹性有限元数值计算方法,以空间多个测点的观测资料为依据,引入测点坐标建立三峡泄洪2[#]坝段空间位移场的确定性模型。该模型可以动态监测泄洪2[#]坝段在任一组荷载下的位移场,以此分析和评价大坝变形性状。

关键词 泄洪坝段 位移场 时空分布模型 有限元 三峡水利枢纽

1 时空分布模型的建模原理及计算公式

位移场的时空分布模型是利用空间多个测点的测值序列,并引入测点的空间坐标变量,由此建立起位移场的时间及空间分布模型,即

$$\delta = f[H(t), T(t), \theta(t), x, y, z] \quad (1)$$

式中 δ 为各种荷载作用下引起的位移; x, y, z 为空间直角坐标变量; $H(t), T(t), \theta(t)$ 分别为水压因子、温度因子、时效因子,与时间 t 有关,下面简写成 H, T, θ 。

对正常运行的大坝,在外荷载作用下, $f(H, T, \theta, x, y, z)$ 在定义域 Ω (大坝或坝基) 内应该是连续函数,其连续性证明见文献[1]。

大坝在荷载作用下所产生的位移场是矢量场(见图1):

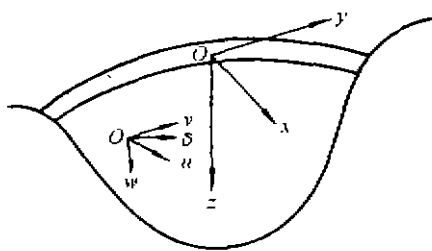


图1 空间位移场矢量

$$\delta(H, T, \theta, x, y, z) = u(H, T, \theta, x, y, z)i + v(H, T, \theta, x, y, z)j + w(H, T, \theta, x, y, z)k \quad (2)$$

式中 u 为顺河向水平位移; v 为垂直河向水平位移; w 为铅直位移。上述矢量场简化为标量场分析计算。由于数学方法的通用性,下面以 u 分量(下面用 δ 表示)为例,推导其计算公式。

在小变形范围内,可将式(1)的位移按其成因分为水压分量、温度分量和时效分量:

$$\begin{aligned} \delta &= f(H, T, \theta, x, y, z) \\ &= f_1(H, x, y, z) + f_2(T, x, y, z) + f_3(\theta, x, y, z) \\ &= f_1[f(H), f(x, y, z)] + f_2[f(T), f(x, y, z)] + f_3[f(\theta), f(x, y, z)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $f(H)$ 为坝体或坝基某一固定点的水压分量,对三峡泄洪2[#]坝段而言, $f(H)$ 为

$$f(H) = \sum_{i=0}^3 a_i H^i \quad (4)$$

$f(T)$ 为某一固定点(测点)的温度分量,当有混凝土温度的实测资料时,用混凝土实测温度的等效温度 $(\bar{T}_i, \beta_i)$ 作为因子,有

$$f(T) = \sum_{i=1}^{m_2} [b_i^{(1)} \bar{T}_i + b_i^{(2)} \beta_i] \quad (5)$$

m_2 为混凝土温度计的层数; $f(\theta)$ 为坝体某一固定点的时效分量,应根据具体情况确定(可

第一作者简介:丁晓唐,女,硕士,讲师,从事水工结构研究,曾发表《隧洞垂直岔管加强梁的实用配筋表》等论文。

见文献[2]),可用下式表示:

$$f(\theta) = C_1\theta + C_2\ln\theta \quad (6)$$

$f(x, y, z)$ 为某一固定水压(温度或时效作用)使坝体和坝基产生的位移场, $f(x, y, z)$ 在区域 Ω 内连续, 因此可用多元幂级数展开, 并参照工程力学推得的空间变形方程(一般取三项式)为

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= \sum_{l=0}^3 \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 a_{lmn} x^l y^m z^n \\ &= \sum_{l, m, n=0}^{l, m, n=3} a_{lmn} x^l y^m z^n \end{aligned} \quad (7)$$

将式(4)、(5)、(6)、(7)代入式(3), 用多元幂级数展开, 略去高次项, 归并同类项, 得到

$$\begin{aligned} \delta &= \sum_{k=0}^3 \sum_{l, m, n=0}^3 A_{klmn} H^k x^l y^m z^n + \\ &\quad \sum_{j, k=0}^{m_2} \sum_{l, m, n=0}^3 B_{jklmn} \bar{T}_j \beta_k x^l y^m z^n + \\ &\quad \sum_{j, k=0}^1 \sum_{l, m, n=0}^3 C_{jklmn} \theta_j \ln \theta_k x^l y^m z^n \end{aligned} \quad (8)$$

当研究某条梁的挠曲线时, 上述模型退化为

$$\begin{aligned} \delta &= \sum_{k=0}^3 \sum_{n=0}^3 A_{kn} H^k z^n + \sum_{j, k=0}^{m_2} \sum_{n=0}^3 B_{jkn} \bar{T}_j \beta_k z^n + \\ &\quad \sum_{j, k=0}^1 \sum_{n=0}^3 C_{jkn} \theta_j \ln \theta_k z^n \end{aligned} \quad (9)$$

2 三峡泄洪 2# 坝段梁挠曲线的时空分布模型

2.1 工程概况

三峡大坝泄洪 2# 坝段位于河床深槽, 坝高 175 m, 是三峡大坝的最高坝段, 两侧对称布设泄洪表孔和导流底孔, 并设泄洪深孔, 结构复杂。在坝基下, 有断层 F_{413} , F_{410} , F_{359} , F_{20} 和

F_7 等穿过。其中 F_7 大断层位于坝趾下游 160 m 处, 距离大坝建基面 300 m 以上, 故计算时未考虑。这里要说明的是, 泄洪 2# 坝段尚未建造, 缺乏建立时空分布模型的实测资料, 只能建立确定性时空分布模型, 即首先采用设计或试验参数, 用有限元计算时空模型中的水压、温度和时效分量, 将此模型用于蓄水期监控, 待运行一段时间, 积累了一定的资料后, 用反分析模型可以方便地校准模型中的参数。

2.2 泄洪 2# 坝段的有限元模型及分析程序

泄洪 2# 坝段的有限元计算域范围: 沿坝轴线方向取整个坝段 21 m, 垂直方向取建基面以下 1 倍以上坝高 (175 m); 水平方向, 以坝轴线为基准向上游取 500 m, 向下游取 660 m。有限元结点布置, 尽可能将变形测点等安排在结点上。此外, 在有限元划分时, 根据断层走向及地质的变化而剖分, 力求使剖分的单元反映实际情况。单元采用六面体 8 结点和五面体 6 结点等参单元。图 2 为泄洪 2# 坝段的有限元网格图, 共计有 1239 个等参单元, 1804 个结点。

线弹性位移用 Super-SAP 程序计算, 时效位移用自编的粘弹性有限元程序进行计算。粘弹性模型采用由开尔文模型和马克思威尔模型串联而成的伯格斯模型, 以反映基岩和混凝土的粘性流变。

2.3 计算参数

在分析时, 坝体混凝土的弹性变形参数和徐变资料以及基岩的弹性变形参数采用设计值。由于缺乏基岩的粘性变形资料, 利用河海大学对坝址花岗岩的室内试验成果进行分析, 得到坝体及基岩的计算参数(见表 1)。

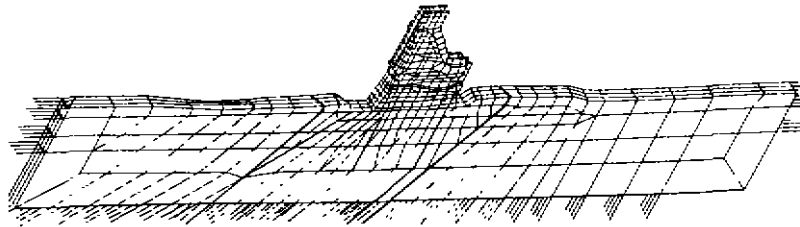


图 2 泄洪 2# 坝段有限元网格

表 1 泄洪 2[#] 坝段和基岩计算参数

位 置	弹性常数			粘性常数			
	变形模量/GPa	泊松比	线胀系数	E_L /GPa	η_L /(GPa·s)	E_M /GPa	η_M /(GPa·s)
坝 体	20	0.167	1.0×10^{-5}	80	2.3×10^7	66.7	1.15×10^9
新	40~45	0.20		700	3.7×10^5	51	9.5×10^9
花 岗 岩	20~40	0.20~0.22		700	3.7×10^5	51	9.5×10^9
弱(下)	15~20	0.22~0.23		200	8.5×10^4	40	3.5×10^9
弱(上)	2~10	0.25		60	3.6×10^4	30	8.5×10^8
断 裂	10~20	0.23		80	7.8×10^4	40	3.0×10^9
弱	5~10	0.25		50	1.8×10^4	30	8.0×10^8
堆积层	0.03~0.5	0.30					

注: E_L, η_L 为开尔文模型中的弹性模量和粘滞系数; E_M, η_M 为马克思威尔模型中的弹性模量和粘滞系数。

2.4 泄洪 2[#] 坝段梁挠曲线的确定性时空分布模型

根据式(9), 2[#] 坝段的梁挠曲线确定性时空模型为

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta \quad (10)$$

式中 $\delta_H, \delta_T, \delta_\theta$ 分别为水压、温度和时效引起的位移分量。

2.4.1 水压分量

选择下列水位作为计算工况: 上游库水位 $h = 10.0 \text{ m}, 68.0 \text{ m}, 80.0 \text{ m}, 95.0 \text{ m}, 115.0 \text{ m}, 135.0 \text{ m}, 140.0 \text{ m}, 145.0 \text{ m}, 156.0 \text{ m}, 162.3 \text{ m}, 170.0 \text{ m}, 175.0 \text{ m}, 180.4 \text{ m}$ (校核洪水位)。下游水位由于变化较小, 取 62.0 m 。

针对三峡大坝的特点, 在库水作用下, 梁挠曲线的水压分量表达式为

$$\begin{aligned} \delta_H = & a_0 + a_1 y + a_2 y^2 + a_3 H + a_4 Hy + \\ & a_5 Hy^2 + a_6 H^2 + a_7 H^2 y + a_8 H^2 y^2 + \\ & a_9 H^3 + a_{10} H^3 y + a_{11} H^3 y^2 \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $a_i (i=0 \sim 11)$ 为回归系数; y 为坝体内任一点高程与坝底高程之差; H 为上游水头。

典型水位下的垂线测点位移见表 2、典型水位 ($h = 68.0 \text{ m}, 135.0 \text{ m}, 156.0 \text{ m}$ 和 175.0 m) 的梁挠曲线见图 3。

由表 2 及式(11), 根据最小二乘原理, 求得泄洪 2[#] 坝段梁挠曲线水压分量表达式, 见表 3。

2.4.2 温度分量

根据监测设计中 2[#] 坝段温度计的布置情况, 用各层等效温度分别进行模拟, 采用单

表 2 泄洪 2[#] 坝段水压作用下典型水位

水 位 h/m	垂线测点水平位移 mm				
	水平位移 δ/mm				
	$H' = 178.0 \text{ m}$	$H' = 116.5 \text{ m}$	$H' = 81.0 \text{ m}$	$H' = 49.0 \text{ m}$	$H' = 15.0 \text{ m}$
10.0	3.90	2.76	2.11	1.44	0.62
68.0	4.32	3.69	3.33	3.01	2.13
80.0	5.22	4.54	4.18	3.83	2.68
95.0	7.14	6.22	5.77	5.15	3.52
115.0	11.23	9.56	8.66	7.35	4.84
135.0	18.57	14.98	12.78	10.23	6.46
140.0	21.10	16.72	14.03	11.07	6.92
145.0	23.92	18.60	15.35	11.95	7.39
156.0	31.51	23.37	18.60	14.06	8.51
162.3	36.71	26.47	20.65	15.36	9.19
170.0	43.72	30.50	23.28	17.03	10.06
175.0	48.72	33.28	25.07	18.15	10.63
180.4	54.05	36.17	26.92	19.30	11.22

表 3 泄洪 2[#] 坝段水压分量表达式系数

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
0.9422	0.1042	-7.114×10^{-4}	3.956×10^{-1}	-3.237×10^{-3}	2.735×10^{-5}
a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}
2.837×10^{-4}	3.539×10^{-5}	-3.506×10^{-7}	8.129×10^{-8}	-7.308×10^{-8}	1.312×10^{-9}

位等效温度(单位平均温度和温度梯度)的方法进行计算。泄洪 2[#] 坝段各温度计层的高程分别为: $10 \text{ m}, 30 \text{ m}, 56 \text{ m}, 86 \text{ m}, 104 \text{ m}, 116 \text{ m}, 147 \text{ m}, 158 \text{ m}, 178 \text{ m}, 185 \text{ m}$, 应用 Super-SAP 计算在单位温度荷载作用下的载常数, 得任一点 j 的温度分量为

$$\delta_{Tj} = \sum_{i=1}^{10} b_i^{(1)} \bar{T}_i + \sum_{i=1}^{10} b_i^{(2)} \beta_i \quad (12)$$

式中 $b_i^{(1)}, b_i^{(2)}$ 为第 i 层单位平均温度和温

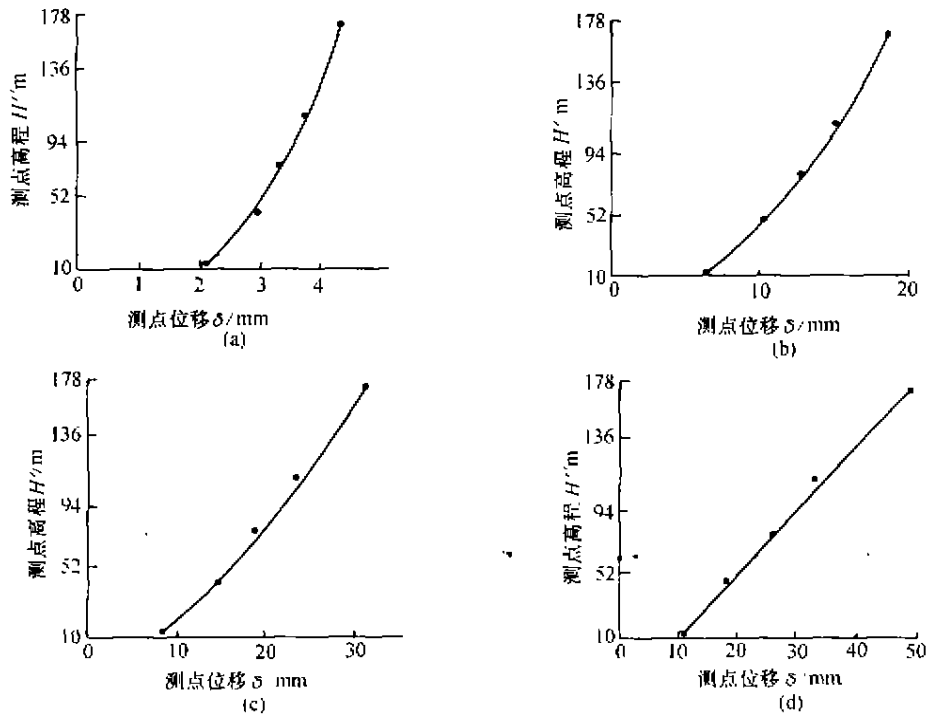


图3 泄洪2#坝段梁挠曲线

(a)68.0m水位;(b)135.0m水位;(c)156.0m水位;(d)175.0m水位

度梯度对第*j*点的影响量; $\bar{T}_i, \beta_i$ 为第*i*层平均温度和温度梯度变化量。

单位平均温度和温度梯度作用下,垂线测点的水平位移可参见有关资料^①。

利用单位平均温度和温度梯度作用下垂线测点的水平位移,代入式(12),得到垂线测点位于15.0m,49.0m,81.0m,116.5m,178.0m处的温度分量分别为: $f_{T15}, f_{T49}, f_{T81}, f_{T116}, f_{T178}$ 。然后,引进测点位置坐标,应用数值分析及优化原理,求得泄洪2#坝段梁挠曲线的温度分量为

$$\delta_T = \frac{(\gamma - 49.0)(\gamma - 81.0)(\gamma - 116.5)(\gamma - 178.0)}{37125858.00} f_{T15} + \frac{(\gamma - 15.0)(\gamma - 81.0)(\gamma - 116.5)(\gamma - 178.0)}{9473760.00} f_{T49} + \frac{(\gamma - 15.0)(\gamma - 49.0)(\gamma - 116.5)(\gamma - 178.0)}{7272672.00} f_{T81} + \frac{(\gamma - 15.0)(\gamma - 49.0)(\gamma - 81.0)(\gamma - 178.0)}{14957991.56} f_{T116} +$$

$$\frac{(\gamma - 15.0)(\gamma - 49.0)(\gamma - 81.0)(\gamma - 116.5)}{125436568.50} f_{T178}$$

(13)

2.4.3 时效分量

根据三峡蓄水方案,用粘弹性有限元计算下列四个阶段的时效分量:第一阶段2002年10月库水位达到68.0m,时续至2003年5月底;第二阶段,从2003年6月初至该月底水位从68.0m上升到135.0m,然后时续至2006年5月底;第三阶段,从2006年6月初到2006年12月底,库水位从135.0m上升到156.0m,然后时续至2009年4月底;第四阶段,从2009年5月初至2009年12月底,库水位从156.0m上升至175.0m。下面重点讨论第一阶段。

计算第一阶段及特征水位作用下垂线测点的时效分量 $\delta_{\theta 1}$ 。泄洪2#梁挠曲线的时效分量表达式为

$$\delta_{\theta} = a_0 + a_1 \theta + a_2 \ln \theta + a_3 \gamma \theta + a_4 \gamma \ln \theta + a_5 \gamma^2 \theta + a_6 \gamma^2 \ln \theta + a_7 \gamma + a_8 \gamma^2 \quad (14)$$

(下转第40页)

①空间位移场的时空分布模型,河海大学科研报告,1998,7。

综上所述,水电比拟模型在成功地解决了大量的多孔介质复杂渗流问题之后,在研究大区域裂隙岩体介质渗流问题上也具有极大的潜力和优势。当然,在发挥水电比拟模型的长处之时,还应看到水电比拟模型存在的不足,如试验周期长,投入大,制作要求高等。这些问题,相信随着测试自动化技术的提高,以及对制模工艺的改进,会得到很好的解决。

参考文献

- 1 速宝玉,赵坚,伍怡祥等.渗流测试自动化和模-数混合系统的探讨.河海大学学报,1989(增刊): 65~69

- 2 速宝玉,张祝添,赵坚等.三维渗流水电模拟测试技术的研究.河海大学科技情报,1990,10(4):46~52
- 3 切尔内绍夫.水在裂隙网络中的流动.北京:地质出版社,1975
- 4 毛昶熙.电模拟试验渗流研究.北京:水利出版社,1981
- 5 赵坚,杨智敏,詹美礼等.裂隙网络水流特性实验研究初探.河海大学学报,1997,25(水利水电工程专辑):90~94
- 6 速宝玉,赵坚,张祝添.正置模型在尾矿坝空间渗流场模拟试验中的应用.金属矿山,1994(3):27~29

(收稿日期:1998-02-20 编辑:熊水斌)

(上接第27页)

式中 θ 等于 $(\theta - \theta_0)$, $\ln \theta$ 等于 $(\ln \theta - \ln \theta_0)$, 其中 θ 从 2002 年 10 月 1 日开始每增加一天 θ 值增加 0.01, $\theta_0 = 0.01$. y 等于测点高程(泄洪 2# 坝段坝底高程 10 m)。

利用计算得到的时效分量 $\delta_{\theta 1}$ 及式(14),经最小二乘法拟合,得到第一时段即 2002 年 10 月 1 日至 2003 年 5 月 31 日的时效分量表达式:

$$\begin{aligned} \delta_{\theta} = & 4.262 \times 10^{-3} + 0.01207\theta + \\ & 0.01057\ln\theta - 5.969 \times 10^{-5}\theta + \\ & 3.3023 \times 10^{-5}y\ln\theta - 3.161 \times 10^{-7}y^2\theta - \\ & 4.867 \times 10^{-7}y^2\ln\theta + 4.723 \times 10^{-5}y + \\ & 8.432 \times 10^{-8}y^2 \end{aligned} \quad (15)$$

2.4.4 三峡泄洪 2# 坝段的确定性时空分布模型

将式(11)、(13)和(15)代入式(10),就得到泄洪 2# 坝段确定性时空分布模型。

利用式(10)的确定性时空分析模型,监控泄洪 2# 坝段的梁挠曲线的变化规律,以此分析和评价大坝变形性态。这里应指出的是,由于三峡大坝目前还在建设之中,在建立式(10)的确定性时空分布模型时,一些主要物理力学参数参照设计采用值。因而,等三峡大坝运行一段时间,并积累部分实测资料后,应对式(10)的确定性时空分布模型进行

修正,由此进一步提高模型的精度。

参考文献

- 1 吴中如,顾冲时.混凝土坝空间位移场的时空分布模型.三峡水利枢纽工程应用基础研究(第一卷),北京:科学技术出版社,1996
- 2 吴中如.水工建筑物安全监控理论及其应用.南京:河海大学出版社,1990

(收稿日期:1998-02-24 编辑:熊水斌)

·简讯·

混凝土试验新设备两则

▲和易性测定仪 一种新式的具有数字显示的手持式 CWM 仪可以用来测定新搅拌混凝土的和易性。将该测量仪的探头压入混凝土以后,操作者按住把柄上的触发器,使探头在混凝土中旋转 8 秒钟,重复这一过程约 10 次左右,然后只需按一下按钮即可显示出混凝土的坍落度值(用 mm 表示)。利用这一仪器的另外一个探头还可测量混凝土的温度。测量出的坍落度和温度可以传输给计算机,以便作进一步的分析或用于报告。

▲空隙仪 利用该空隙仪可以在现场或试验室检测新拌混凝土或硬化混凝土中所含气泡的直径、间隔和空隙率。该系统由一台计算机、VGA 彩色监视器、特殊滤光片、图像处理软件和摄像机等组成。使用时操作人员只需记录一个或几个混凝土表面的影像并传送到计算机进行分析。整个过程可以在几分钟内完成,摄像机镜头可以达到 130 倍的放大率,对混凝土表面作精确的目测分析。该系统还可以为用户打印出混凝土的分析结果或相片。

(摘自 1998 年 2 月 5 日《水信息报》)