

三峡临时船闸 3[#]坝段位移场确定性模型

丁晓唐 顾冲时 赵 斌 沈振中

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 通过引入空间三维坐标,阐述了确定性空间位移场的建模机理及方法,即水压分量、温度分量及时效分量均采用有限元计算结果.应用粘弹性有限元模拟大坝的加荷过程,通过计算粘性位移,经拟合得时效分量.结合三峡工程临时船闸 3[#]坝段,建立其位移确定性模型.

关键词 重力坝 有限元法 位移模式

中图号 TV314

位移场确定性模型是引入测点的空间坐标变量,水压分量、温度分量及时效分量均采用有限元计算结果,经与实测值进行最优拟合,由此建立起位移场确定性模型:

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

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

在小变形范围内,可将式(1)的位移按其成分分为三个部分(水压分量、温度分量和时效分量):

$$\delta = F(H, T, \theta, x, y, z) = f_1[f(H), f(x, y, z)] + f_2[f(T), f(x, y, z)] + f_3[f(\theta), f(x, y, z)]$$

$f(x, y, z)$ 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,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):

$$f(x, y, z) = \sum_{l, m, n=0}^{l, m, n=3} a_{lmn} x^l y^m z^n$$

对三峡临时船闸 3[#]坝段而言,水压分量 $f(H) = \sum_{i=0}^3 a_i H^i$. $f(T)$ 为温度分量,当用混凝土实测温度的等效温

度($\bar{T}_i, \beta_i$) 作为因子时, $f(T) = \sum_{i=1}^{m_2} (b_i^{(1)} \bar{T}_i + b_i^{(2)} \beta_i)$. m_2 为混凝土温度计的层数. $f(\theta)$ 为时效分量,应根据具体情况确定, $f(\theta) = C_1 \theta + C_2 \ln \theta$.^[1]

1 时效分量的确定性计算方法

1.1 基岩的粘弹性本构关系

根据三峡花岗岩的蠕变试验结果,花岗岩受力变形的时效可采用伯格思模型描述,如图 1. 该模型由开尔文模型和马克思威尔模型串联而成. 开尔文模型的偏应力本构关系为:

$$S_{ij} = 2G_k e_{ij,K} + 2\eta_K de_{ij,K}/dt \quad (2)$$

求解式(2)可得开尔文模型的偏应变:

$$e_{ij,K} = \{e_{ij,0K} + \frac{1}{2\eta_K} \int_{t_0}^t S_{ij} \exp[\frac{G_K}{\eta_K}(t - t_0)] dt\} \exp[-\frac{G_K}{\eta_K}(t - t_0)]$$

马克思威尔模型的偏应力本构关系为:

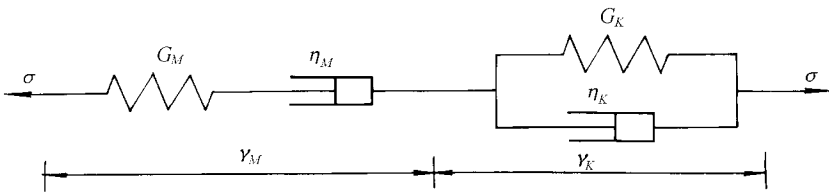


图 1 伯格斯模型

Fig.1 Burgers model

$$\frac{1}{2G_M} \frac{dS_{ij}}{dt} + \frac{1}{2\eta_M} S_{ij} = \frac{de_{ij,M}}{dt}$$

(3)

求解式(3)可得马克斯威尔模型的偏应变：

$$e_{ij,M} = e_{ij,0M} + \frac{S_{ij}}{2G_M} + \frac{1}{2\eta_M} \int_{t_0}^t S_{ij} dt$$

1.2 坝体粘弹性本构关系

根据坝体混凝土的试验结果,坝体混凝土受力变形的时效可采用广义开尔文模型描述,如图 2. 广义开尔文模型的偏应变为：

$$e_{ij} = \frac{S_{ij0}}{2G_0} + \sum_{k=1}^n \{ e_{ij,0k} \exp[-\frac{G_K}{\eta_K}(t - t_0)] \} + \frac{S_{ij0}}{2G_K} \{ 1 - \exp[-\frac{G_K}{\eta_K}(t - t_0)] \}$$

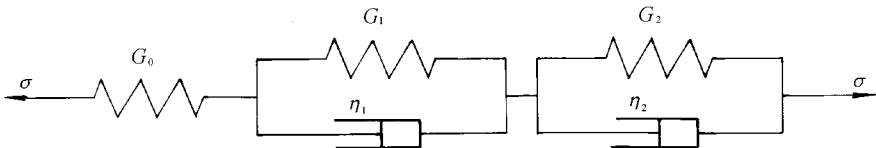


图 2 广义开尔文模型

Fig.2 Generalized Kelvin model

1.3 计算方法

粘弹性有限元计算时效分量采用增量初应变法. 其基本平衡方程：

$$K\Delta u = \Delta R - \Delta R_V$$

式中：Δu——结点位移增量；ΔR——该级荷载增量；ΔR_V——初应变的等效结点荷载增量[2].

2 三峡临时船闸 3[#] 坝段的确定性模型

2.1 工程和监测概况

三峡临时船闸坝段位于左岸非溢流 8[#] 和 9[#] 坝段之间,总长 56 m,分为 3 个坝段. 左右两侧为 2 个宽体坝段,分别称临时船闸 1[#] 和 3[#] 坝段(简称临船 1[#] 和临船 3[#]),各长 16 m,坝高 123.5 m,采用常态混凝土,为了满足温控要求,在初期,顶面高程 143 m 以下顺水流向坝体设两条纵缝,分为三块施工. 后期在高程 143 m 以上加高时进行并缝处理. 此外,在临船 3[#] 坝段基础有断层 F23 通过,因而临船 3[#] 坝段具有代表性. 建立确定性模型,首先是采用设计或试验参数,用有限元计算模型中的水压、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 临时船闸 3[#] 坝段的有限元模型及分析程序

临时船闸 3[#] 坝段的有限元计算域范围：沿坝轴

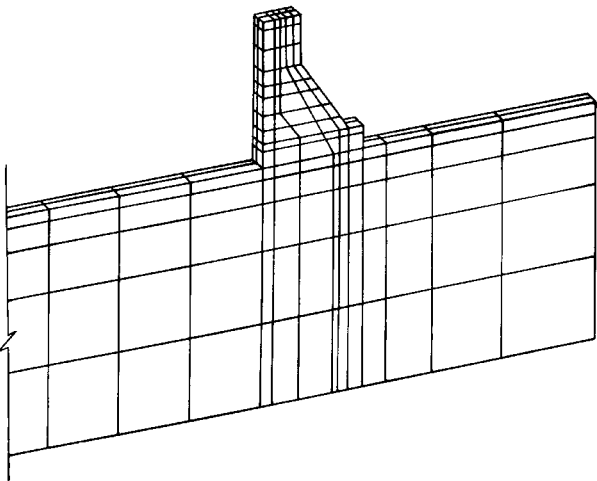


图 3 临时船闸 3[#] 坝段的有限元网格

Fig.3 FEM mesh for the temporary lock of dam section No.3

线方向取整个坝段 16 m 垂直方向取建基面以下 200 m 水平方向以坝轴线为基准,向上游取 500 m,向下游取 200 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 6 面体 8 结点等参单元. 图 3 为临船 3[#] 坝段的有限元网格图,共计有 274 个等参单元,510 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.

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,因此利用河海大学对坝址花岗岩的室内试验成果. 由上分析,得到坝体及基岩的计算参数见表 1.

表 1 临船 3[#] 坝段及基岩的计算参数
Table 1 Material parameters of the temporary lock of dam section No.3 and bedrock

位置	弹性参数			粘性常数			
	变形模量/GPa	泊松比	线胀系数	E_k /GPa	η_k /(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
花岗岩	新	40 ~ 45	0.20	700	3.7×10^5	51	9.5×10^9
	微	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
断层	微	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 ~ 0.50	0.30					

注: E_k, η_k 为开尔文模型中的弹性模量和粘滞系数; E_M, η_M 为马克斯威尔模型中的弹性模量和粘滞系数.

2.4 计算工况

2.4.1 水位

上游库水位 $H_i = 62.0\text{ m}, 68.0\text{ m}, 80.0\text{ m}, 95.0\text{ m}, 115.0\text{ m}, 135.0\text{ m}, 140.0\text{ m}, 145.0\text{ m}, 156.0\text{ m}, 162.3\text{ m}, 170.0\text{ m}, 175.0\text{ m}, 180.4\text{ m}$ (校核洪水位). 下水位由于变化较小取 62.0 m. 由此,临船 3[#] 坝段的水位计算工况共计 13 组.

2.4.2 温度

根据监测设计中临船 3[#] 坝段温度计的布置情况,用各层等效温度分别进行模拟,采用单位等效温度(单位平均温度和温度梯度)的方法进行计算. 临船 3[#] 坝段各温度计层的高程分别为 62 m, 75 m, 92 m, 105 m, 120 m, 143 m, 161 m, 178 m, 185 m, 为了计算上述各层的单位等效平均温度和温度梯度的载常数,共计算了 18 组单位温度.

2.4.3 时效

为了分析临船 3[#] 坝段在初水期不同水位下的时效位移,根据分期蓄水方案,坝段分 4 组不同加载阶段及其特征控制水位进行分析计算,同时,在不同的水位时段内分级加载. 由此,计算得到蓄水初期不同时段内的一系列时效位移.

2.5 临船 3[#] 坝段梁挠曲线的确定性模型

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta$$

式中: $\delta_H, \delta_T, \delta_\theta$ ——水压、温度、时效引起的位移分量.

2.5.1 水压分量

针对三峡大坝的特点,在库水作用下,梁挠曲线的水压分量

$$\delta_H = a_0 + a_1 y + a_2 y^2 + a_3 H + a_4 Hy + a_5 Hy^2 + a_6 H^2 + a_7 H^2 y + a_8 H^2 y^2 + a_9 H^3 + a_{10} H^3 y + a_{11} H^3 y^2$$

(4)

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

利用 Super-SAP 程序,计算得到临船 3[#] 坝段,在典型水位下的垂线测点位移见表 2,以及典型水位 ($H = 68\text{ m}, 135\text{ m}, 156\text{ m}$ 和 175 m) 的梁挠曲线图(图 4).

表 2 临船 3[#] 坝段水压作用下测点水平位移
Table 2 Horizontal displacement under water pressure

测点	水位/m													mm
高程/m	62.0	68.0	80.0	95.0	115.0	135.0	140.0	145.0	156.0	162.3	170.0	175.0	180.4	
178.00	0.00	-0.27	-0.68	-0.82	0.18	3.60	5.02	6.73	11.69	15.45	21.15	25.53	30.52	
160.83	0.00	-0.23	-0.57	-0.63	0.36	3.48	4.75	6.25	10.55	13.75	18.50	22.10	26.14	
130.00	0.00	-0.15	-0.35	-0.29	0.68	3.26	4.24	5.36	8.40	10.54	13.56	15.77	18.18	
105.00	0.00	-0.09	-0.18	-0.01	0.97	3.04	3.76	4.55	6.58	7.95	9.83	11.17	12.26	

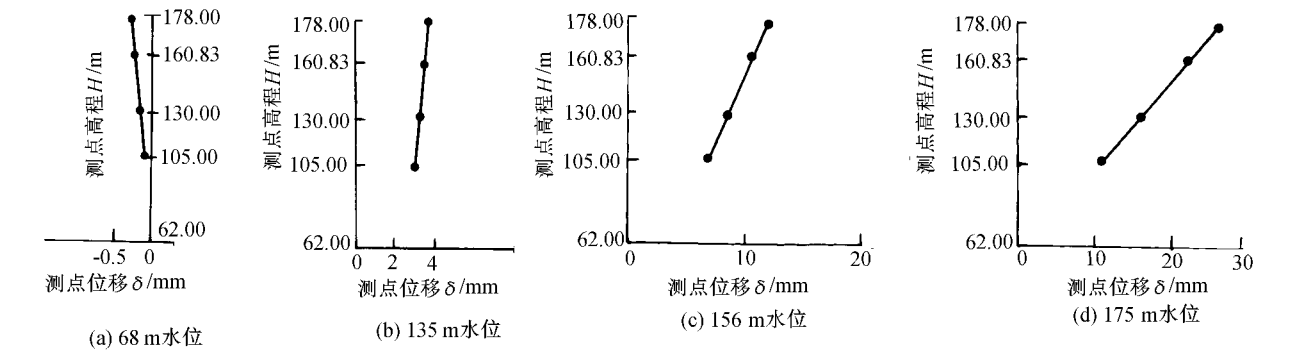


图 4 临船 3[#] 梁挠曲线

Fig.4 Deflection curve of the temporary lock of dam section No.3

由表 2 及式(4),应用最小二乘原理,求得临船 3[#] 坝段梁挠曲线水压分量:

$$\delta_H = 0.2698 + 9.289 \times 10^{-4}y - 6.609 \times 10^{-5}y^2 - 4.131 \times 10^{-2}H - 3.774 \times 10^{-4}Hy + 8.596 \times 10^{-6}Hy^2 + 1.76 \times 10^{-3}H^2 - 9.58 \times 10^{-6}H^2y - 2.183 \times 10^{-7}H^2y^2 - 1.028 \times 10^{-5}H^3 + 2.339 \times 10^{-7}H^3y + 1.412 \times 10^{-9}H^3y^2$$

2.5.2 温度分量

临船 3[#] 坝段共分 9 层设置温度计,应用 Super-SAP 计算在单位温度荷载作用下的载常数,由此得到任一点 j 的温度分量

$$f_{Tj} = \sum_{i=1}^9 b_i^{(1)}\bar{T}_i + \sum_{i=1}^9 b_i^{(2)}\beta_i \tag{5}$$

式中: $b_i^{(1)}, b_i^{(2)}$ ——第 i 层单位平均温度和温度梯度对第 j 点的影响量; $\bar{T}_i, \beta_i$ ——第 i 层平均温度和温度梯度变化量.

把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(5),得到垂线测点位于 105 m,130 m,160.83 m,178 m 处的温度分量,分别为: $f_{105}, f_{130}, f_{160}, f_{178}$. 然后,引进测点位置坐标,应用数值分析及优化原理,求得临船 3[#] 坝段梁挠曲线的温度分量:

$$\delta_T = -\frac{(\gamma - 130)(\gamma - 160.83)(\gamma - 178)}{109\,189.75}f_{T105} + \frac{(\gamma - 105)(\gamma - 160.83)(\gamma - 178)}{36\,996}f_{T130} - \frac{(\gamma - 105)(\gamma - 130)(\gamma - 178)}{29\,553.67}f_{T160} + \frac{(\gamma - 105)(\gamma - 130)(\gamma - 160.83)}{60\,163.68}f_{T178}$$

2.5.3 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 m,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 m 上升到 135 m,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 m 上升到 156 m,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 m 上升至 175 m. 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 δ_{01} ,临船 3[#] 梁挠曲线的时效分量

$$\delta_\theta = \alpha_0 + \alpha_1\theta + \alpha_2\ln\theta + \alpha_3\theta\gamma + \alpha_4\ln\theta\gamma + \alpha_5\theta\gamma^2 + \alpha_6\ln\theta\gamma^2 + \alpha_7\gamma + \alpha_8\gamma^2 \tag{6}$$

式中 $\theta = (\theta - \theta_0)$; $\ln\theta = (\ln\theta - \ln\theta_0)$, 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 为测点高程(临船 3# 坝段坝底高程 62 m) .

利用计算得到的时效分量 $\delta_{\theta 1}$ 及式(6), 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:

$$\delta_{\theta} = -8.792 \times 10^{-4} - 1.633 \times 10^{-3} \theta - 1.125 \times 10^{-4} \ln \theta - 5.403 \times 10^{-5} \theta y - 1.750 \times 10^{-7} \theta y^2 - 3.0773 \times 10^{-6} \ln \theta y - 1.045 \times 10^{-8} \ln \theta y^2 - 2.808 \times 10^{-5} y - 8.705 \times 10^{-8} y^2$$

3 结 论

从场理论出发, 通过引入空间三维坐标, 应用幂级数的处理方法, 提出了三峡临时船闸 3# 坝段位移场确定性模型, 其中水压分量、温度分量采用线弹性有限元计算, 时效分量用粘弹性有限元计算. 该模型可以监测坝段在任何时刻所对应荷载下的位移场, 在固定坐标时, 可退化为单测点、一维、二维的监测模型.

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. 156 ~ 180
- 2 赵斌. 大坝安全监控正反分析的新模型和新方法:[学位论文]. 南京: 河海大学, 1998

Deterministic Displacement Field Model for the Temporary Lock of Dam Section No.3 of the Three Gorges Project

Ding Xiaotang Gu Chongshi Zhao Bin Shen Zhenzhong

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Abstract Through the application of field theory, the principles and methods of establishing the deterministic displacement field model are discussed, and the components of water pressure, temperature load and time effect are calculated on the basis of the results from FEM. The loads on the dam in the storage period are simulated by the visco-elastic finite element method, the time independent component can be fit by the calculated visco displacement. These theories and methods are adopted in the building of the deterministic displacement field model for the temporary Lock of the Three Gorges project.

Key words gravity dams ; FEM ; displacement models