

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.009

温度荷载及其分量计算的广义单位荷载法

赵 斌¹ ,吴中如²

(1. 国网南京自动化研究院大坝及工程监测研究所 ,江苏 南京 210003 ;2. 河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :针对坝体有效的温度计数量不足的情况 ,采用形函数法解决单位温度的协调及单位温度所覆盖有限元网格结点的温度计算问题 ,提出了用广义单位荷载法计算未知结点的变温及载常数的方法 ,从而解决了普通等效温度法在温度计不足时无法进行温度荷载计算的局限性 ,有效地降低了大坝安全监测确定性模型的建模条件。
关键词 :大坝 ;安全监测 ;温度分量 ;确定性模型 ;广义单位荷载法
中图分类号 :TV698.1 **文献标识码 :**A **文章编号 :**1000-1980(2008)05-0620-04

大坝安全监测中的位移数学模型是通过实测值的数学表达式来定量地反映位移变化规律的基本方法 ,其结果也是对大坝安全性态进行分析、解释和预测常用的重要依据。目前 ,国内外监测大坝运用的正反分析模型 ,主要以统计、混合、确定性模型为主 ,其中混合模型的水压分量 ,确定性模型的水压、温度分量均采用有限元数值分析结果^[1-4]。

大坝安全监测确定性模型的各个分量采用有限元数值分析 ,与实测值进行最优化拟合后 ,可以充分反映大坝和坝基的结构性态 ,及时了解大坝在某时刻任一荷载组合作用下的位移场 ,掌握因局部因素使大坝某些部位偏离真实位移场的情况 ,从而能及早地发现问题、分析原因、采取对策 ,以消除隐患。但利用有限元数值分析进行温度分量计算时 ,对坝体温度计的布置、数量有较高的要求。在温度计数量足够的情况下 ,可以用普通等效温度法^[1 5-6]计算 ,以等效温度与空间坐标向量结合作为因子。因此坝体是否有足够的温度计布置成为能否构建大坝安全监测确定性模型的瓶颈 ,很大程度影响了该模型的应用^[3-4]。

在实际工程中 ,即使坝体内设置有温度计 ,其分布密度也无法与有限元数值分析的网格密度一致。因而如果用温度计作为有限元网格的结点 ,则会造成有限元网格较大 ,不能满足工程精度要求的结果^[4]。

因此 ,本文提出一种广义单位荷载法。即在实际工程中 ,单位温度加于温度计处 ,且跨越多个有限元网格 ,不一定在有限元网格的结点或棱边上(图 1)。这不同于以往单位温度的概念^[1 5] ,即并非在受载面的每一个结点加载、相邻结点函数值为零的方法。

1 形函数

在变温场作用下 ,坝体内任一点的温度位移与各结点的变温值呈线性关系^[1]。根据单位温度的特性 ,本文采用线性形函数法^[4 7]来解决单位温度的协调及单位温度所覆盖有限元网格结点的温度计算问题。

线性形函数的特点是 :在温度计(或温度计层)处其值为 1 ,在其他结点处其值为 0。将其作为已知条件计算每层温度计所覆盖的有限元网格结点上的温度。其中平均温度 $\bar{T}_i$ 的形函数用 $U_i(x,y,z)$ 表示 ,温度梯度 β_i 的形函数用 $V_i(x,y,z)$ 表示。

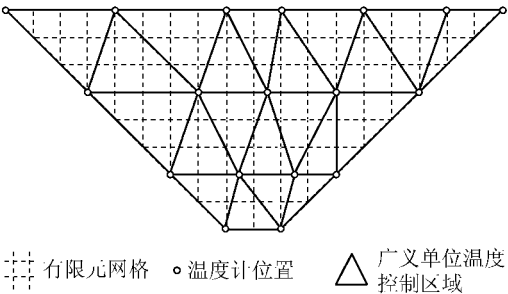


图 1 广义单位荷载法加载示意图
Fig.1 Sketch of loading for generalized unit-load method

以坝体边界面温度计层处为四面体单元的结点划分有限元,以其中 1 个单元为例,如图 2 所示.当结点 p 平均温度 $\bar{U}_p = 1^\circ\text{C}$ (或温度梯度 $V_p = 1^\circ\text{C}/\text{m}$) ,其他相邻结点 $i(j, m)$ 的平均温度 $\bar{U}_i = 0^\circ\text{C}$ (或温度梯度 $V_i = 0^\circ\text{C}/\text{m}$) 时,落在四面体单元 $ijmp$ 内坝体边界面有限元网格结点上的温度等于结点 p 处的形函数值^[6] ,即

$$U_p(x, y, z) = N_p(x, y, z) \quad V_p = N_p(x, y, z) \quad (1)$$

由于采用等效温度(平均温度和温度梯度)处理温度计实测值,因此,可以认为坝体内部有限元网格结点上的温度分布是线性的^[4] ,可采用同样的(等效温度)处理方法.

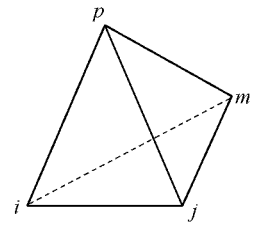


图 2 四面体单元示意图
Fig.2 Tetrahedral element

2 温度场及变温场计算

在求得各温度计层等效温度及坝体结点形函数后,大坝任一时刻的温度场为

$$T(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^m \bar{T}_i U_i(x, y, z) + \sum_{i=1}^m \beta_i V_i(x, y, z) \quad (2)$$

再将变形或应力测值观测时刻的温度场减去其初始观测值的温度场^[8-9] ,可以求出对应变形或应力观测时的变温场^[1] ,即

$$\Delta T(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^m [(\bar{T}_i - \bar{T}_{0i}) U_i(x, y, z) + (\beta_i - \beta_{0i}) V_i(x, y, z)] \quad (3)$$

式中: $\Delta T(x, y, z, t)$ —— i 层温度计处在任一时刻 t 的变温场; $\bar{T}_i, \beta_i$ —— i 层温度计处,实测温度的等效温度的平均温度和温度梯度; $\bar{T}_{0i}, \beta_{0i}$ —— i 层温度计处,初始实测温度的等效温度的平均温度和温度梯度; $U_i(x, y, z), V_i(x, y, z)$ —— i 层温度计处,单位平均温度和单位温度梯度的形函数; m ——单位等效温度的个数.

3 载常数计算

变温场的效应量通常为变温位移和变温应力等^[9-11] .为减少计算量,达到连续快速在线分析和反分析的目的^[3] ,在满足精度的前提下,采用载常数方法进行分析计算.所谓载常数是指单位等效温度在测点产生的位移或应力,其中单位平均温度产生的效应量用 b_{1i} 表示,单位温度梯度产生的效应量用 b_{2i} 表示.用有限元程序可求得由单位温度产生的坝体任一测点的温度位移或温度应力,即载常数 $b_i(b_{ix}, b_{iy}, b_{iz})$.利用公式(4)将 $b_i(b_{ix}, b_{iy}, b_{iz})$ 转换成径向(顺河向)、切向(垂直河向)和铅直向的载常数 $b_i(b_{ir}, b_{is}, b_{iw})$.

$$b_{ir} = b_{ix} \sin \varphi + b_{iy} \cos \varphi \quad b_{is} = b_{ix} \cos \varphi - b_{iy} \sin \varphi \quad b_{iw} = b_{iz} \quad (4)$$

式中: b_{ix}, b_{iy}, b_{iz} —— b_i 在 x, y, z 轴的分量; b_{ir}, b_{is}, b_{iw} —— b_i 在径向、切向和铅直向的分量; φ —— y 轴与径向的夹角,以顺时针方向旋转为正.

4 温度分量计算及计算框图

4.1 温度分量计算

在求出载常数并由实测温度资料推求 $\Delta \bar{T}_i, \Delta \beta_i$ 后,可以求出任一时刻相对于初始时刻的温度位移或温度应力.因此,大坝任一测点 j 的变温位移或变温应力表达式为

$$\delta_{Tjk} = \sum_{i=1}^m b_{1ik} \Delta \bar{T}_i + \sum_{i=1}^m b_{2ik} \Delta \beta_i \quad \sigma_{Tjl} = \sum_{i=1}^m b_{1il} \Delta \bar{T}_i + \sum_{i=1}^m b_{2il} \Delta \beta_i \quad (5)$$

式中: $\delta_{Tjk}, \sigma_{Tjl}$ ——测点 j 的变温位移、变温应力($k = r, s, w; l = x, y, z, xy, yz, zx$); $\Delta \bar{T}_i$ —— i 层等效温度的平均温度变温值,等于位移观测时的温度 $T(x, y, z)$ 减去初始观测时的温度 $T_{0i}(x, y, z)$; $\Delta \beta_i$ —— i 层等效温度的梯度变化值,等于位移观测时的梯度 $\beta_i(x, y, z)$ 减去初始观测时的梯度 $\beta_{0i}(x, y, z)$; $b_{1ik}, b_{1il}, b_{2ik}, b_{2il}$ ——载常数($k = r, s, w; l = x, y, z, xy, yz, zx$); m ——温度计的层次数.

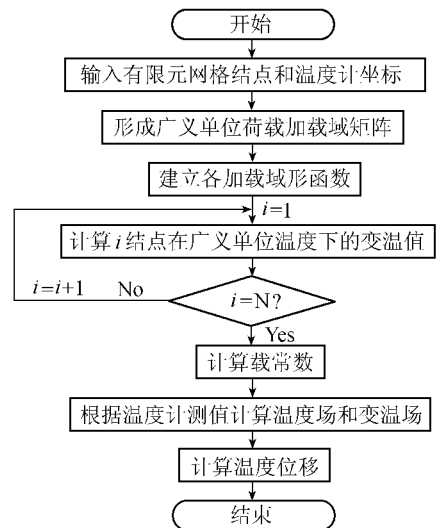


图 3 GUL.F 程序
Fig.3 Flowchart of GUL.F program

4.2 计算框图

用广义单位荷载法实时计算温度位移,其程序见图3,为利用 Fortran 编制的程序 GUL.F^[11].

5 工程实例

某河床式水电站为上游大型水电站的反调节电站,电站上下游水位变化不大.针对该大坝9号溢流坝段,进行三维有限元的水压分量计算,利用程序 GUL.F 进行温度分量的计算.根据计算结果建立了坝顶引张线的混合模型和确定性模型.

5.1 计算范围及网格

有限元模型的计算坐标系取 x 轴沿上下游方向,以坝轴线为坐标原点,指向下游为正; y 轴沿坝轴线方向,以坝段右侧面为坐标原点,指向左岸为正; z 轴垂直向上,以高程零点为坐标原点,即将高程作为坐标.有限元网格如图4所示.

9号溢流坝段计算范围包括: x 轴取 $-100.00 \sim 100.00$ m,即上游基岩约2倍坝高,下游基岩约2倍坝高; y 轴取整个坝段,即16.90 m; z 轴取坝基面以下岩体98 m,约2.5倍坝高,即截取至 -102.00 m.

在此范围内,主要断层及构造有 F16 和 F26 以及3条裂隙. F16 断层产状为 $NW70^{\circ} \sim 80^{\circ}$, $SW \angle 72^{\circ} \sim 74^{\circ}$,破碎带宽0.4~1.2 m,夹灰白色断层泥0.005~0.030 m. F26 断层产状为 $NW30^{\circ} \sim 65^{\circ}$, $NE \angle 73^{\circ} \sim 76^{\circ}$,破碎带宽0.03~0.30 m,夹青灰色断层泥0.003~0.060 m.两断层所构成的三角带岩石较为风化破碎.3条裂隙分别为:(a) $NW85^{\circ}$, $SW \angle 72^{\circ}$,面平整,伸延较长,局部夹泥;(b) $NW70^{\circ}$, $SW \angle 80^{\circ}$,张性裂隙,宽0.005 m,面平整,夹泥;(c) $NW85^{\circ}$, $NW \angle 78^{\circ}$,较发育延伸长,沿面有绿泥石化.考虑到上述构造及坝身结构,该坝段有限元总结点数1925,总单元数1388,其中绝大部分为六面体单元,包括少量五面体和四面体填充单元.

5.2 材料参数

计算中采用的材料参数如表1所示.

5.3 计算工况

a. 水压力分量:分上游水压力和下游水压力2组分别计算9号溢流坝段上游水位取10级,下游水位取8级.

b. 温度分量:由于该坝段设有水温计,故由水温计位置决定分层.首先加载每1层的单位变温,计算相应的坝内准稳定变温场^[6].然后由该变温场计算温度分量.考虑到水温计的实际布置情况,9号溢流坝段上游水温取6层,下游水温取3层,并包括1组气温,即10组工况.因此本文有限元数值分析共计算了18组水压力工况和10组变温工况,同时包括10组变温场的计算工况.

5.4 计算与分析

温度分量的计算结果是广义的温度载常数,表2为9号坝段坝顶引张线测点处的广义温度载常数计算结果.

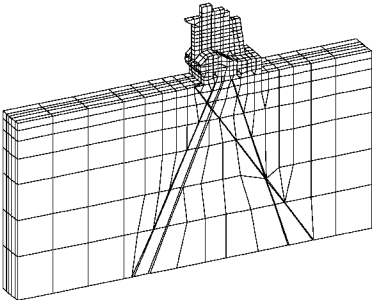


图4 9号坝段有限元网格
Fig.4 FEM Mesh of No.9 overflow section

表1 9号溢流坝段的材料参数
Table 1 Material parameters of No.9 overflow section

材料类型	变形模量/ GPa	泊松比 ν	温度线膨胀 系数($/10^{-6}^{\circ}C^{-1}$)
混凝土	10	0.167	9.2
基岩	8.5	0.235	9.2
F ₂₆ 断层	1.5	0.260	
F ₁₆ 断层	1.2	0.270	
裂隙	1.0	0.280	

表2 温度载常数
Table 2 Coefficients of temperature loads mm/°C

上游水温边界						气温	下游水温边界		
水面	水下3m	水下7m	水下13m	水下18m	库底	边界	水面	水下5m	水下10m
0.0001	0.0046	0.0138	0.0365	0.0539	0.094	-0.1972	-0.1337	-0.0627	-0.017

根据表2的计算结果,采用加权逐步回归程序进行回归计算,建立的大坝安全监测混合模型和确定性模型参数见表3.表3中同时列出了统计模型的特征参数.

表 3 9 号坝段坝顶引张线 YZ10 模型结果

Table 3 Model results of wire alignment point YZ10 on No.9 overflow section

模型类型	起始日期	结束日期	测值数	复相关系数 R	剩余标准差 S	F	A_0	温度分量调整系数 ^[1]
统计模型	1983-05-26	1992-11-12	116	0.929 6	0.827 4	74.889 6	1.220 3	
混合模型	1983-05-26	1992-11-12	116	0.922 0	0.853 2	124.701 5	0.753 6	
确定性模型	1983-05-26	1992-11-12	116	0.886 4	1.010 9	136.867 9		1.017 4

从表 3 可以看出 ,大坝安全监测确定性模型与混合模型、统计模型相比 ,虽然复相关系数 R 有所降低 , 剩余标准差 S 也略增大 ,但符合一般模型的规律 ,整体效果良好 .另外还可以看出 ,确定性模型复相关系数 R 为 0.8864 ,其温度分量调整系数非常接近 1 ,即有限元计算结果与模型的分离结果非常接近 ,进一步证实了该计算方法的可行性 .

6 结 语

本文通过引入形函数法 ,巧妙地解决了单位温度的协调及单位温度所覆盖的有限元网格结点的温度计算问题 .在此基础上 ,针对坝体布设较少温度计的情况 ,提出采用广义单位荷载法 ,根据实测温度计测值 ,推求未知点变温值的公式 ,解决了因温度计不足而难以模拟和评估温度影响的问题 .

广义单位荷载法为利用软件系统对大坝安全监测量进行连续快速的在线分析、反分析和安全评价提供了一条新的途径 ,同时该方法对其他领域的数值分析也有一定的参考价值 .

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 .
[2] 吴中如 . 混凝土坝安全监控的确定性模型和混合模型 [J] . 水利学报 , 1989 (5) : 64-70 .
[3] 郑福寿 , 沈长松 . 求解应力确定性模型温度分量的函数拟合法 [J] . 河海大学学报 : 自然科学版 , 2000 , 28 (5) : 54-58 .
[4] 赵斌 . 大坝及坝基安全监控的正反分析新模型和新方法 [D] . 南京 : 河海大学 , 1998 .
[5] 黄耀英 , 吴中如 , 沈振中 , 等 . 改进的混凝土重力拱坝温度荷载分析 [J] . 水力发电 , 2007 , 33 (9) : 16-19 .
[6] 朱伯芳 . 拱坝温度荷载计算方法的改进 [J] . 水利水电技术 , 2006 , 37 (12) : 19-22 .
[7] 徐芝伦 . 弹性力学 [M] . 北京 : 高等教育出版社 , 1982 .
[8] 张子明 , 张研 , 杨成祝 , 等 . 有保温层拱坝变化温度场的计算 [J] . 红水河 , 2003 (4) : 7-13 .
[9] 袁琼 . 二滩拱坝温度场及温度作用反馈分析 [J] . 水电站设计 , 2003 , 19 (1) : 20-25 .
[10] 戴跃华 , 史超 , 刘先姍 . 温度荷载对大坝运行期位移及应力的影响 [J] . 中国农村水利水电 , 2006 (1) : 62-65 .
[11] 沈振中 . 三峡大坝和基岩施工期变形分析及其反分析模型 [D] . 南京 : 河海大学 , 1995 .

Generalized unit-load method to calculate temperature loads
and temperature components

ZHAO Bin¹ , WU Zhong-ru²

(1. Dam & Geotechnical Engineering Monitoring Division ,
Nanjing Automation Research Institute , Nanjing 210003 , China ;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : In consideration of the shortage of dam thermometers , the shape function method is adopted for harmonizing unit-temperature and calculating temperatures of finite element mesh nodes , and a new calculation method , the generalized unit-temperature method , is presented to calculate temperature loads and temperature components . Therefore , the limitation of temperature load calculation with the general equivalent temperature method is solved , and the modeling conditions of the deterministic model are reduced . Moreover , this new method has some reference value for numerical analysis in other fields .

Key words : dam ; safety monitoring ; temperature component ; deterministic model ; generalized unit-load method