

中国土木工程学会

计算机应用学会
第六届年会

土木工程 计算机应用文集

PROCEEDINGS OF THE SIXTH
ANNUAL MEETING ON COMPUTER
APPLICATION IN CIVIL ENGINEERING



中国环境科学出版社

PDG

主 编 朱伯芳
副主编 王道堂 陶全心 赵超燮
陈际明 周之德 缪兆杰

编 委

罗道坦	孙焕纯	叶啸虎	王孔模	刘鹤年	周宏业	王建瑶
沈康辰	王金海	刘文博	李 伟	寿楠椿	刘殿金	周长怀
周乾父	陈 禹	林少培	郭秀玲	曹继植	管怀安	潘士吉

序 言

人类行将进入一个新的纪元。值此跨越世纪的更迭时期,人们憧憬着未来的美好人生;规划着进入 21 世纪的宏图;期待着技术进步把人类带入一个更辉煌的世纪。正当进入世纪更迭期时,多年来高速发展着的计算机技术,恰好进入一个技术更新期。这次技术更新的主要表现是:微机的总线结构开始从 32 位向 64 位过渡,而工作站的总线结构则已完成了这一过渡的最初阶段。另一方面,就操作系统而言,微机已开始从 16 位更新为 32 位;而工作站则开始转向 64 位操作系统。此外,多处理器及并行处理技术已进入广泛应用阶段。在此基础上,计算机应用将会出现一个崭新的局面。

在计算机技术和通讯技术迅速发展的基础上,信息高速公路的拟议及启动,受到了广泛的关注。我们可以想像到,随着信息高速公路的逐步实施,计算机技术将对科研、教育、设计、制造带来深刻的影响,更进一步说,它将在新闻、出版、电视、广播、医疗、通讯等方面带来重大的变革,从而广泛影响人们的生活方式。

本届年会得到了各方面的广泛支持。本文集征集了四十余篇论文,其内容包括模拟技术、人工智能及专家系统、工程分析、数据库应用、计算机辅助设计及软件技术等。文集的内容概略地反映了我国土木工程界两年来在计算机应用方面的成果和进展。尽管这些成果是令人欣慰的,然而与飞速发展的计算机技术及未来发展的要求相比,我们不得不说,只有加快提高应用水平才能跟上技术进步的步伐。希望通过本届年会的广泛交流,能够在总结既有成果的基础上,展望未来肩负的重任,促进计算机应用的进一步发展。

中国土木
工程学会 计算机应用学会

1995 年 10 月

目 录

混凝土坝仿真计算的并层算法和分区异步长算法.....	朱伯芳 许 平(1)
高速准高速铁路列车—轨道系统动力学计算机仿真研究	 岳渠德 周宏业 孙 宁(15)
大跨桥梁结构智能控制模拟分析与动态仿真	孙 宁 周宏业 王 建(20)
模糊系统结构选型	任野兵 赵 满 林少培(25)
模糊模式识别方法用于水工枢纽设计智能系统的初步研究	刘润广(33)
水工枢纽智能设计	郭秀玲 沈晓峰 林少培(37)
房地产智能决策系统研究	陈红艺 林少培(43)
柴油机夹持式喷油压力测量的系统辨识	董 春 董锡明(51)
工程图变形技术研究和应用	吴炜煜 陶全心(56)
计算机层析成像研究的新进展	杨真荣 阎榕龄 殷 宏 黄大勇(60)
面向对象技术的新进展及其在土木工程中的应用展望	马智亮 任爱珠(66)
钢桥焊接节点疲劳试验数据库系统的研制	马智亮 曹秋良 山田健太郎(74)
多水源供水系统的两级优化调度	郑爽英(82)
斜拉桥地震反应的空间特性	陈幼平 周宏业(87)
用反应谱理论研究大坝的抗震特性	周乾父 朱今凡 马 田(94)
扰动力学模型对路基土壤强度之研究	贾中和 陈锦清(99)
混凝土结构徐变有限元分析.....	寿楠椿 竹学叶(106)
深开挖施工过程的计算机模拟和方案优化.....	张鸿儒 夏 禾 阎贵平(112)
静力触探计算机辅助处理系统(CPTCAD)	高怀真 宋永建 马吉敏(117)
民用建筑集成化系统 BICAD 综合介绍	八五课题组 黄如福执笔(122)
电气设计软件在工程中的应用及功能介绍.....	王 琳 郭春雨(129)
给排水 CAD 软件 ABD—W	王 静 安 静 闵锐利(132)

基于工程数据库的 ICAD 系统的开发	孙扬轸 (135)
结构工程 CAD 软件在不同支持环境之间的转换技术	任爱珠 张 元 (140)
AUTOCAD 的字体库管理工具	王道堂 王 菁 (145)
钢筋砼结构微机辅助设计系统 RSCAD6.0 版	陈善奇 (150)
复杂平面箱基 CAD 系统中的基底反力及沉降计算	尚守平 叶永毅 (156)
论计算机三维立体造型技术在建筑设计中的应用与发展	周宁祥 (164)
数据库支持下的结构专业 CAD 系统	赵振基 (169)
关于桥梁 CAD 系统开发的探讨	何维利 (172)
计算机技术的发展与空间结构的应用	刘文博 何立志 赵 红 (176)
一个有限元计算机辅助教学(CAI)软件	王 凯 张 楠 张鸿儒 (179)
结构力学 CAI 课件部分外部过程图形处理方式	田克琦 李晓军 (185)
结构力学计算机辅助教学(SMCAI)多跨静定梁和静定刚架部分的编制	王金海 何 蓉 (191)
建筑工程信息管理系统软件开发的规范性问题	陈 军 (198)
建筑交易市场 MIS 网络招投标系统	徐 峰 林少培 (204)
建筑交易市场 MIS 网络中 GIS 系统的技术处理	郭秀玲 袁冬雷 胡卫明 许伟成 谢妙波 (209)
建筑交易市场 MIS 网络设计的若干问题	郭秀玲 许伟成 胡卫明 (216)
网络环境下工程项目管理系统的研制与开发	袁 庆 郭秀玲 (224)
混凝土实验室数据管理系统	陈 新 张 军 王民寿 (230)
关于通用结构自由格式数据系统 FDS 的设想	傅德炫 李胜利 (235)
UPS 不间断电源故障分析与维修	时 瑞 (241)

混凝土坝仿真计算的并层算法和分区异步长算法

朱伯芳 许平

(中国水利水电科学研究院)

提 要

施工过程和温度场变化对混凝土坝的应力状态有重要影响,但混凝土坝常分为几十甚至几百层施工,因龄期不同,各层均有不同的变形特性,用有限元方法进行仿真计算十分困难。本文提出了一整套新的计算方法:(1)提出了仿真并层算法,使原来的几百层减少为一二十层,计算中充分考虑了分层施工的影响。(2)提出了并层坝块接缝单元,使各坝块可单独上升和并层,并不受基础计算网格的影响。(3)提出了弹性徐变应力场和温度场的分区异步长解法,使新混凝土采用小时时间步长(0.2~0.5天),而广大范围的老混凝土采用大的时间步长(10~30天),从而大大提高计算效率。本文提出的这一套方法,使混凝土坝仿真计算问题得到了彻底解决。文中还给出了一个算例。

一、前 言

施工过程和温度变化对混凝土坝的应力状态有重要影响,对高坝的影响尤为显著,因此人们希望模拟实际施工过程,用有限元方法进行仿真应力分析。混凝土坝通常是分层浇筑的,由于混凝土龄期的不同,每个浇筑层的弹性模量和徐变度都不同,必须对每个浇筑层分别划分计算网格,而且由于每个浇筑层内,沿厚度方向(铅直方向)的温度梯度和应力梯度都比较大,为了保证必要的计算精度,每层都必须采取比较密集的计算网格。当层数不多时,问题是不大的,但层数较多时,因结点太多,方程阶次太高,所需计算机容量太大,计算时间太长,要实现分层计算就有困难了。对于常规混凝土坝,如每层厚 1.50m,150m 高的坝就有 100 层,像 240m 高的二滩拱坝,有 160 层。至于碾压混凝土,层厚只有 0.30~0.50m,如取层厚为 0.30m,120m 高的坝,就有 400 层。要用有限元方法逐层计算几十层甚至几百层的混凝土坝的施工和温度徐变应力,目前实际上是困难的。笔者以前提出过一些计算方法^[1,2],把每层的内部结点消去,可节省相当多的计算时间,但要计算几十层甚至一二百层的混凝土坝,仍然困难。即使对重力坝,各坝段单独按平面问题计算,也是很困难的。至于拱坝必须用三维有限元按整体计算,困难就更大了。

本文提出了一整套计算方法,使混凝土坝的仿真计算问题得到了比较满意的解决。

首先提出了并层算法。根据混凝土变形特性与龄期的关系,沿高度方向从上到下把混凝土坝分为四个区间。第 1 区间是上部混凝土,每层都采用密集的计算网格。第 2 区间仍然分层计算,但每层的内部采用扩大的计算网格。第 3 区间,根据混凝土龄期的不同,把几个相邻的浇筑层加以合并。第 4 区间是最下部混凝土,把全部标号相同的混凝土合并为一层,按均质体计算。这样一来,尽管真实结构分为几十层,甚至几百层,但随着坝体的逐渐

升高,下面的各层逐渐合并,实际计算的层数并不多。但每一个浇筑层都经过了分层计算到并层计算的全过程,分层的影响已在计算中充分考虑,因此,这是一个合理而实用的计算方法,使混凝土坝的仿真计算成为实际可行的。

常规混凝土坝内常设有纵横接缝,把坝体分割成许多坝块。进行仿真计算时,坝块上部要采用密集计算网格,下部可并层,但各坝块的高度是参差不齐的,而用通常的有限元法计算时,各块体的分层高度在同一高程上最好保持一致,这就限制了并层法的效果。本文提出了并层坝块接缝单元,使这个问题得到了解决,各坝块可各自单独上升和单独并层,互不影响。

混凝土坝应力场和温度场计算的时间步长与材料参数有关,当各区域的材料参数不同时,要求的时间步长也不同。目前采用统一的时间步长,为了保证计算精度,只能采用最小的时间步长。本文提出了应力场和温度场计算的分区异步长算法,在新浇筑混凝土局部范围内采用小步长,而在广大范围老混凝土内,采用大步长,从而使计算效率大为提高。

文中给出了一个碾压混凝土重力坝算例。

二、并层算法

在坝块的上部,由于各层混凝土龄期不同,各层的弹性模量、徐变度、水化热温升等都相差较多,各层必须单独计算,到了下部,随着龄期的逐渐增大,各层的弹性模量、徐变度和水化热绝热温升等逐渐接近,于是可以把几个相邻的浇筑层加以合并,以便扩大计算网格,简化计算。

1. 由混凝土弹性模量决定的并层龄期

设 τ_i, τ_j 分别为第 i, j 层(自上而下)混凝土的龄期,假设

$$\frac{E(\tau_j) - E(\tau_i)}{E(\tau_i)} \leq \varepsilon_1 \quad (1)$$

其中 ε_1 为允许误差, $E(\tau)$ 为混凝土弹性模量,如果把第 i 至第 j 层合并为一层,并采用平均弹性模量,那末并层以后,各层弹性模量的实际误差将不大于 $\varepsilon_1/2$ 。

混凝土弹性模量用作者的公式表示如下⁽³⁾:

$$E(\tau) = E_0[1 - \exp(-a\tau^b)] \quad (2)$$

式中 E_0 为最终弹性模量, a, b 为常数,由试验资料决定。对于常规水工混凝土,通常可 $a=0.40, b=0.34$ 。把式(2)代入式(1),可推得

$$\tau_{ji} = \left\{ -\frac{1}{a} \ln[(1 + \varepsilon_1) \exp(-a\tau_i^b) - \varepsilon_1] \right\}^{1/b} \quad (3)$$

到了后期,混凝土弹性模量的变化已很小,如果从龄期 τ_i^* 以后,混凝土弹性模量的相对差值已小于 ε_1 ,就可以把 $\tau > \tau_i^*$ 的各层全部合并为一层,按均质体计算。把式(2)代入式(1)并令 $\tau \rightarrow \infty$,得到

$$\tau_i^* = \left[-\frac{1}{a} \ln \frac{\varepsilon_1}{1 + \varepsilon_1} \right]^{1/b} \quad (4)$$

所有龄期 $\tau > \tau_i^*$ 的浇筑层都可合并为一层。

2. 由混凝土徐变决定的并层龄期

混凝土徐变度可表示如下:

$$C(t, \tau) = \sum \Phi_i [1 - \exp(-r_i(t - \tau))] \quad (5)$$

式中 t —时间, τ —龄期。例如, 笔者在文献[3]中建议在初步计算中取

$$C(t, \tau) = \frac{0.230}{E_0} (1 + 9.20\tau^{-0.45}) [1 - \exp(-0.30(t - \tau))] + \frac{0.520}{E_0} (1 + 1.70\tau^{-0.45}) [1 - \exp(-0.0050(t - \tau))] \quad (6)$$

式中 E_0 为最终弹性模量

在式(6)中令 $t \rightarrow \infty$, 得到龄期 τ 以后的总徐变度为

$$C(\tau) = C(\infty, \tau) = g(\tau)/E_0 \quad (7)$$

式中 $g(\tau) = \sum \Phi_i(\tau)$ 。由式(6), $g(\tau)$ 可表示如下:

$$g(\tau) = m + p\tau^{-\beta} \quad (8)$$

式中 m, p, β 为三个常数, 在初步计算中, 常规混凝土可取 $m = 0.750, p = 3.00, \beta = 0.450$ 。

今从第 i 层到第 j 层合并为一层, 设

$$\frac{C(\tau_i) - C(\tau_j)}{C(\tau_i)} = g_i - g_j/g_i \leq \varepsilon_2 \quad (9)$$

以式(8)代入上式, 得到

$$\tau_{j2} \leq \left[\frac{P}{(1 - \varepsilon_2)g_i - m} \right]^{1/\beta} \quad (10)$$

式中 $g_i = g(\tau_i)$, 上式表示第 i 至第 j 层合并后, 徐变度的差别不超过 ε_2 。

在式(9)中令 $\tau_j \rightarrow \infty$, 得到

$$\tau_{i2}^* \geq \left[\frac{P(1 - \varepsilon_2)}{m\varepsilon_2} \right]^{1/\beta} \quad (11)$$

上式表明, 把 $\tau > \tau_{i2}^*$ 的各层合并为一层, 并按 $\tau = \tau_{i2}^*$ 计算各层徐变度, 误差不超过 ε_2 。

3. 水化热绝热温升决定的并层龄期

混凝土的水化热绝热温升表示如下:

$$\theta(\tau) = \frac{\theta_0}{(n + \tau)} \quad (12)$$

设并层后, 绝热温升误差为 ε_3 , 即

$$\left[\frac{\theta(\tau_j) - \theta(\tau_i)}{\theta(\tau_i)} \right] \leq \varepsilon_3 \quad (13)$$

由以上二式, 得并层龄期如下:

$$\tau_{j3} = \frac{n\hbar}{(1 - \hbar)} \quad (14)$$

式中 $\hbar = \frac{(1 + \varepsilon_3)\tau_i}{(n + \tau_i)}$ 。在式(13)中 $\tau_j \rightarrow \infty$, 得到

$$\tau_{i3}^* = \frac{n}{\varepsilon_3} \quad (15)$$

把 $\tau_i \leq \tau_j$ 或 $\tau_i \geq \tau_j$ 的各层混凝土合并为一层, 绝热温升的误差不大于 ε_3 。

现在, 我们共有 3 个并层龄期 τ_{j1} 、 τ_{j2} 、 τ_{j3} , 取其中最小的一个作为实际的并层龄期。通常绝热温升发展较快, 对并层龄期不起控制作用。并层龄期主要由弹性模量和徐变度决定。

4. 并层以后的计算龄期

第 i 到第 j 层合并以后, 需要用统一的龄期 τ_i 来计算混凝土的弹性模量和徐变度。我们希望

$$E(\tau_{e1}) = [E(\tau_i) + E(\tau_j)]/2 \quad (16)$$

$$g(\tau_{e2}) = [g(\tau_i) + g(\tau_j)]/2 \quad (17)$$

把式(2)和式(8)代入以上二式, 即可求出 τ_{e1} 和 τ_{e2} 。如果 $\tau_{j1} < \tau_{j2}$, 即以 τ_{e1} 作为并层后的计算龄期。反之, 以 τ_{e2} 作为并层后的计算龄期。

把混凝土看成弹性徐变体, 应力分析采用本文第一作者提出的隐式解法。⁽²⁾

下面给出一个算例。混凝土浇筑块, 每 5 天浇筑一层, 弹性模量用式(2)表示, $a=0.40$, $b=0.34$ 。总徐变度用(7)、(8)二式表示, $m=0.750$, $p=3.00$, $\beta=0.450$ 。取 $\varepsilon_1=0.08$, $\varepsilon_2=0.09$ 。顶上两层不并层, 只研究第 3 层以后的并层问题。取 $\tau_i=10$ 天, 由(3)、(10)二式得 $\tau_{j1}=14d$, $\tau_{j2}=14.5d$, 而第 4 层的龄期是 15d, 大于 τ_{j1} 和 τ_{j2} , 所以 3、4 两层不能合并。再取 $\tau_i=15$ 天, 得到 $\tau_{j1}=22.53$ 天, $\tau_{j2}=22.45$ 天, 第 5 层龄期为 20d, 所以 4、5 两层可以合并, 以下依此计算, 结果见图 1, 上面 3 层是分层计算的, 从第 4 层开始, 几层甚至几百层并为一层。并层后, 自上到下, 只有 10 层。

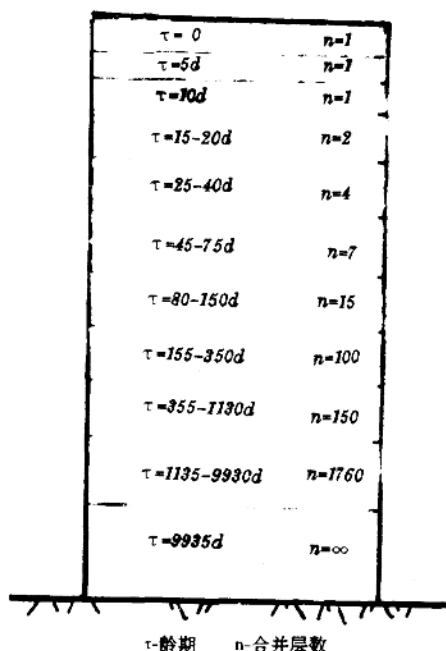


图 1 算例, 混凝土坝块并层的龄期区间

为 20d, 所以 4、5 两层可以合并, 以下依此计算, 结果见图 1, 上面 3 层是分层计算的, 从第 4 层开始, 几层甚至几百层并为一层。并层后, 自上到下, 只有 10 层。

三、并层坝块接缝单元

在施工过程中, 混凝土坝内常设有纵横接缝, 把坝体分割成许多坝块, 在施工中各坝块的高度参差不齐, 为了各坝块可以各自单独上升、单独并层, 互不影响, 在坝块与坝块之间以及坝体与基岩之间, 设置如下特殊接缝单元。

1. 平面接缝单元

在 A、B 两坝块之间设置薄层接缝单元, 如图 2 阴影部分所示 abcd, 右边与较薄单元相接, 结点布置与 B 块保持一致, 左边与已经并层的大单元相接, 边界上的结点采用大单元原来的结点 4、5、6。单元右边 cd 上的水平位移表示如下:

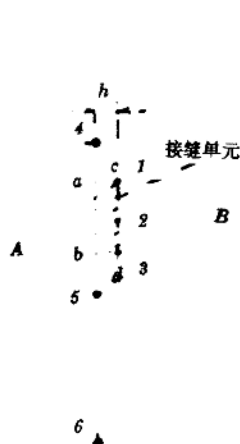


图2 平面接缝单元

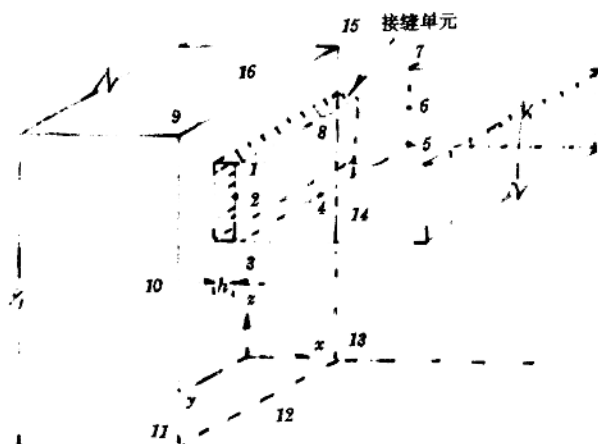


图3 空间接缝单元

$$u_{\text{右}} = \overline{N}_1 u_1 + \overline{N}_2 u_2 + \overline{N}_3 u_3$$

式中形函数 $\overline{N}_1 = (1+\xi)\xi/2$, $\overline{N}_2 = 1-\xi^2$, $\overline{N}_3 = -(1-\xi)\xi/2$, ξ 为自然坐标。结点 1、2、3 的自然坐标依次为 $\xi=1, 0, -1$ 。

单元左边 ab 上的水平位移用旁边大单元的结点 4、5、6 的位移表示如下：

$$u_{\text{左}} = N_4 u_4 + N_5 u_5 + N_6 u_6$$

形函数 $N_4 = (1+r)r/2$, $N_5 = 1-r^2$, $N_6 = -(1-r)r/2$, r 为大单元的自然坐标, 接缝单元左边端点 a 和 b 不是结点, 其自然坐标 r_a, r_b 一般不取 1、0、-1 等值。

接缝单元 abcd 的水平位移差为

$$\Delta u = u_{\text{右}} - u_{\text{左}} = \sum_{i=1}^3 \overline{N}_i u_i - \sum_{i=4}^6 N_i u_i$$

如果结点 1~6 的位移取相同值, 由上式 $\Delta u=0$, 可见上式满足单元刚体位移条件。

定义单元左右两边的位移差如下：

$$\{f\} = \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = [M] \{\delta^e\} \quad (18)$$

式中

$$[M] = \begin{bmatrix} \overline{N}_1 & 0 & \overline{N}_2 & 0 & \overline{N}_3 & 0 & -\overline{N}_4 & 0 & -\overline{N}_5 & 0 & -\overline{N}_6 & 0 \\ 0 & \overline{N}_1 & 0 & \overline{N}_2 & 0 & \overline{N}_3 & 0 & -N_4 & 0 & -N_5 & 0 & -N_6 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\{\delta^e\} = [u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ \dots \ u_6 \ v_6]^T \quad (20)$$

接缝单元的厚度 h 可取得充分小, 以便可忽略 σ_y 和 ϵ_y , 而且单元应变在厚度方向可视

为常值,单元应变为

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = [B]\{\delta_e\} \quad (21)$$

$$[B] = \frac{1}{h}[M] \quad (22)$$

单元内应力为

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{\delta_e\} \quad (23)$$

式中[D]为弹性矩阵:

$$[D] = E \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & (1 + \mu)/2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

利用虚位移原理,得到接缝单元的刚度矩阵为

$$[K] = \frac{L}{h} \int_{y_a}^{y_b} [M]^T [D] [M] dy \quad (25)$$

积分上下限 y_a, y_b 是 a, b 两点的纵坐标, L 为垂直于低面方向的单元厚度。

2. 空间接缝单元

空间接缝单元如图 3 所示,单元厚度为 h,右表面的位移用右边相邻单元 B 结点 1~8 的位移表示。左表面的位移用左边相邻单元 A 结点 9~16 的位移表示,单元内任一点的位移差为

$$\{f\} = \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{bmatrix} = [M]\{\delta^e\} \quad (26)$$

单元内任一点的应变为

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{bmatrix} = \frac{1}{h} [M]\{\delta^e\}, \quad (27)$$

由虚位移原理,空间接缝单元的刚度矩阵为

$$[K] = \frac{1}{h} \int_{\Gamma} [M]^T [D] [M] dA \quad (28)$$

式中 Γ 为单元侧表面,而[D]为弹性矩阵:

$$[D] = E \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & (1 + \mu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & (1 + \mu)/2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

把混凝土视为弹性徐变体,应力分析采用本文第一作者的隐式解法,计算公式从略。

四、弹性徐变应力场的分区异步长解法

凝土的弹性模量、徐变度、水化热温升等都与龄期有密切关系,在早龄期,这些材料特性变化剧烈,用数值方法计算应力时必须采用很小的时间步长。到了后期,这些材料特性

变化很小,应力分析可采用较大的时间步长,对于常规混凝土,从 $\tau=0$ 开始,第1天内应取 $\Delta\tau=0.2, 0.3, 0.5$ 天,以后逐步增加到1.0和2.0天,一个月后可取 $\Delta\tau=10$ 天,两个月后可取 $\Delta\tau=30$ 天。混凝土坝是从下而上分层浇筑的,坝体上部不断有新浇混凝土。全坝的时间步长受新混凝土控制,从开工到竣工,一直要采用很小的时间步长,计算很费事。本文提出分区异步算法:在新混凝土内采用小步长,而在广大范围的老混凝土内采用大步长,使计算效率大大提高。

如图4所示,不失一般性,把计算域分为a、b两个区域,cc为分界面。从 t_n 到 t_m ,在区域a内用一个大时段 $\Delta t_{am}=t_m-t_n$ 计算,而在区域b内,用m个小时段计算: $\Delta t_{n+1}, \Delta t_{n+2}, \dots, \Delta t_{n+m}$,并要求

$$\Delta t_{am} = \sum_{i=1}^m \Delta t_{n+i} \quad (30)$$

以便在 t_m 时刻,两个子区域在时间上能互相衔接。

计算步骤如下:

第1步:区域b计算,分m个小时段,固定分界面cc,用弹性徐变理论隐式解法,得到区域b内的应力增量为

$$\{\Delta\sigma'_b\} = \sum_{i=1}^m \{\Delta\sigma_{n+i}\} \quad (31)$$

分界面cc上的反力为

$$\{F_{nm}^b\} = \sum_{i=1}^m \{\Delta F_{n+i}\} \quad (32)$$

第2步:区域a计算,一个大时段,时间步长 $\Delta t=t_m-t_n$,固定分界面cc,用隐式解法,求得区域a内应力增量 $\{\Delta\sigma'_a\}$,cc面上反力 $\{F_{nm}^a\}$ 。

第3步:释放分界面上反力在整个结构内引起的应力增量。

在以上两步计算中,由于人为地固定了分界面cc,在 $t=t_m$ 时,cc面上的反力为

$$\{F_{nm}\} = \{F_{nm}^a\} + \{F_{nm}^b\} \quad (33)$$

上述反力实际上是不存在的,今在 $t=t_m$ 时予以释放,即在cc面上施加 $-\{F_{nm}\}$,按弹性体计算,得到子域a和b内的应力增量分别为 $\{\Delta\sigma''_a\}$ 和 $\{\Delta\sigma''_b\}$ 。

把以上三步计算的应力增量分别叠加,得到子域a和b内的应力增量如下:

$$\{\Delta\sigma_a\} = \{\Delta\sigma'_a\} + \{\Delta\sigma''_a\}, \{\Delta\sigma_b\} = \{\Delta\sigma'_b\} + \{\Delta\sigma''_b\} \quad (34)$$

在弹性徐变理论中叠加原理适用,所以上述算法是严格的。

为了进一步简化计算,可把上述第2、3两步合并为一步:计算区域为整个结构,分界面cc不固定,并作用着第一步计算的反力的负值即 $-\{F_{nm}^a\}$,区域b内结点荷载增量为零,区域a内作用着实际的荷载增量,用隐式解法求出应力增量,与第1步计算的应力增量叠加,即得到 Δt_{am} 内的应力增量。分三步计算是严格的,把2、3两步合并为一步计算是近似的,但据分析,误差不大。

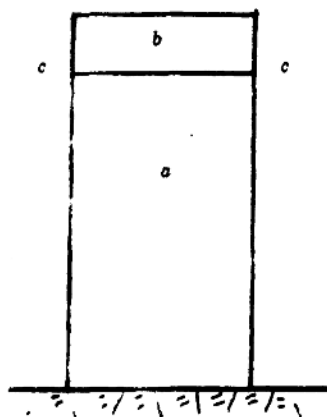


图4 混凝土浇筑块

五、混凝土不稳定温度场的分区异步长算法

在用数值方法求解混凝土不稳定温度场时,对新浇混凝土,因温度变化剧烈,要求采用很小的时间步长;对于老混凝土,因温度变化平缓,可以采用较大时间步长。目前国内外均采用统一的时间步长,为了保证计算精度,只好采用小时间步长。本文提出不稳定温度场的分区异步算法,在新混凝土内,采用小时间步长,而在广大范围的老混凝土内,采用大时间步长,从而使计算效率大大提高。

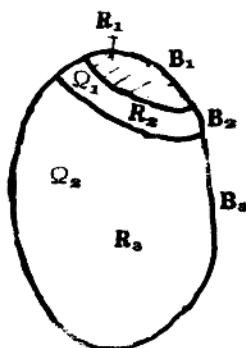


图5 计算区域

年变化。

求解的问题为

$$\left. \begin{array}{l} \text{在区域 } R_1 \text{ 内:} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{\partial \theta_1}{\partial t} \\ \text{初始条件:} \quad \text{当 } t = 0, T(0) = T_1(0) \\ \text{边界条件:} \quad \text{在 } B_1 \text{ 上, } -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta_1 [T - T_{e1} - f(t)] \\ \text{在接触面 } Q_1 \text{ 上, } T_1 = T_2, \frac{\partial T_1}{\partial n} = \frac{\partial T_2}{\partial n} \end{array} \right\} \quad (35a)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{在区域 } R_2 \text{ 内:} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{\partial \theta_2}{\partial t} \\ \text{初始条件:} \quad \text{当 } t = 0, T(0) = T_2(0) \\ \text{边界条件:} \quad \text{在 } B_2 \text{ 上, } -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta_2 (T - T_{e2}) \\ \text{在接触面 } Q_2 \text{ 上, } T_2 = T_3, \frac{\partial T_2}{\partial n} = \frac{\partial T_3}{\partial n} \end{array} \right\} \quad (35b)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{在区域 } R_3 \text{ 内:} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{\partial \theta_3}{\partial t} \\ \text{初始条件:} \quad \text{当 } t = 0, T(0) = T_3(0) \end{array} \right\}$$

$$\text{边界条件:} \quad \text{在 } B_3 \text{ 上,} \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta_3(T - T_{cs}) \quad (35c)$$

式中 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, a —— 导温系数, λ —— 导热系数,

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ —— 表面放热系数,

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ —— 绝热温升,

n —— 法线, t —— 时间, T —— 温度。

由于问题是线性的, 可进行分解, 令

$$T = U + V \quad (36)$$

其中 U 满足下列条件:

$$\left. \begin{aligned} \text{在区域 } R_1 \text{ 内:} & \quad \frac{\partial U}{\partial t} = a \nabla^2 U + \frac{\partial \theta_1}{\partial t} \\ \text{初始条件:} & \quad \text{当 } t = 0, U(0) = T_1(0) \\ \text{边界条件:} & \quad \text{在 } B_1 \text{ 上, } -\lambda \frac{\partial U}{\partial n} = \beta_1[U - f(t)] \\ \text{在接触面 } \Omega_1 \text{ 上,} & \quad U_1 = U_2, \frac{\partial U_1}{\partial n} = \frac{\partial U_2}{\partial n} \end{aligned} \right\} \quad (37a)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{在区域 } R_2 \text{ 内:} & \quad \frac{\partial U}{\partial t} = a \nabla^2 U \\ \text{初始条件:} & \quad \text{当 } t = 0, U(0) = 0 \\ \text{边界条件:} & \quad \text{在 } B_2 \text{ 上, } -\lambda \frac{\partial U}{\partial n} = \beta_2 U \\ \text{在接触面 } \Omega_2 \text{ 上,} & \quad U_2 = U_3, \frac{\partial U_2}{\partial n} = \frac{\partial U_3}{\partial n} \end{aligned} \right\} \quad (37b)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{在区域 } R_3 \text{ 内:} & \quad \frac{\partial U}{\partial t} = a \nabla^2 U \\ \text{初始条件:} & \quad \text{当 } t = 0, U(0) = 0 \\ \text{边界条件:} & \quad \text{在 } B_3 \text{ 上, } -\lambda \frac{\partial U}{\partial n} = \beta_3 U \end{aligned} \right\} \quad (37c)$$

V 满足下列条件:

$$\left. \begin{aligned} \text{在区域 } R_1 \text{ 内:} & \quad \frac{\partial V}{\partial t} = a \nabla^2 V \\ \text{初始条件:} & \quad \text{当 } t = 0, V(0) = 0 \\ \text{边界条件:} & \quad \text{在 } B_1 \text{ 上, } -\lambda \frac{\partial V}{\partial n} = \beta_1(V - T_{c1}) \\ \text{在接触面 } \Omega_1 \text{ 上,} & \quad V_1 = V_2, \frac{\partial V_1}{\partial n} = \frac{\partial V_2}{\partial n} \end{aligned} \right\} \quad (38a)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{在区域 } R_2 \text{ 内:} & \quad \frac{\partial V}{\partial t} = a \nabla^2 V + \frac{\partial \theta_2}{\partial t} \\ \text{初始条件:} & \quad \text{当 } t = 0, V(0) = T_2(0) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{边界条件:} \quad \text{在 } B_2 \text{ 上, } -\lambda \frac{\partial V}{\partial n} = \beta_2(V - T_{c2}) \\ \text{在接触面 } \Omega_2 \text{ 上, } \quad V_2 = V_3, \frac{\partial V_2}{\partial n} = \frac{\partial V_3}{\partial n} \end{array} \right\} \quad (38b)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{在区域 } R_3 \text{ 内:} \quad \frac{\partial V}{\partial t} = a \nabla^2 V + \frac{\partial \theta_3}{\partial t} \\ \text{初始条件:} \quad \text{当 } t = 0, V(0) = T_3(0) \\ \text{边界条件:} \quad \text{在 } B_3 \text{ 上, } -\lambda \frac{\partial V}{\partial n} = \beta_3(V - T_{c3}) \end{array} \right\} \quad (38c)$$

再以混凝土坝为例,在区域 R_1 内,引起温度场的剧烈变化的原因是(1)新浇混凝土的绝热温升 θ_1 随着时间而急剧变化。(2)新浇混凝土的初始温度 $T_1(0)$ 与老混凝土的温度或周围介质温度(水温或气温)有较大差别,(3)在新混凝土表面需要考虑气温日变化或寒潮的影响,即 $f(t)$ 的影响。由表 1 可见,这三个因素全部放在域 R_1 的 U 场中。因此,温度场的剧烈变化主要局限于域 R_1 中,也可能波及 R_2 的靠近 R_1 的部分,到了 R_2 与 R_3 的交界面上,其影响已趋于零,即在 Ω_2 上, $U=0$,从式(37c)可知,域 R_3 中 U 满足下列条件:

$$\left. \begin{array}{l} \text{在区域 } R_3 \text{ 内:} \quad \frac{\partial U}{\partial t} = a \nabla^2 U \\ \text{初始条件:} \quad \text{当 } t = 0, U(0) = 0 \\ \text{边界条件:} \quad \begin{array}{l} \text{在 } B_3 \text{ 上, } \lambda \frac{\partial U}{\partial n} = \beta_3 \\ \text{在 } \Omega_2 \text{ 上, } U = 0 \end{array} \end{array} \right\} \quad (39)$$

显然,满足上述条件的解为

$$\text{在域 } R_3 \text{ 中, } U = 0 \quad (40)$$

因此, U 场只需在域 $R_1 + R_2$ 中求解,由于 U 场随着时间而急剧变化,计算中要采用较小的时间步长 Δt_1 。 V 场在全区域 $R_1 + R_2 + R_3$ 内求解,因其变化平缓,计算中可采用较大的时间步长 Δt_2 。根据实际经验,计算区域 R_1, R_2, R_3 的划分和时间步长 $\Delta t_1, \Delta t_2$ 的选取都是比较容易的。

六、碾压混凝土重力坝仿真分析

根据长江三峡总公司的委托,我们对三峡碾压混凝土重力坝方案进行了仿真计算,对厂房坝段计算了 6 个方案,泄水坝段计算了 3 个方案,从浇筑第一方混凝土开始,完全按照实际施工的条件进行计算,经过混凝土浇筑、围堰发电、初期运行到正常运行,共计算了 326 年。

下面给出厂房坝段预冷方案的一些计算结果。图 6 是坝体剖面,图 7 为坝内最高温度分布,图 8 坝体中部 D 剖面不同时间的水平正应力 σ_x 分布,因时段很多,应力曲线密集,但最大应力的分布规律是清楚的,图 9 是高程 70.5m 各点 σ_x 历时过程线,浇筑层面上下的 σ_x 是不连续的,以小写字母表示下层的应力,大写字母表示上层的应力。

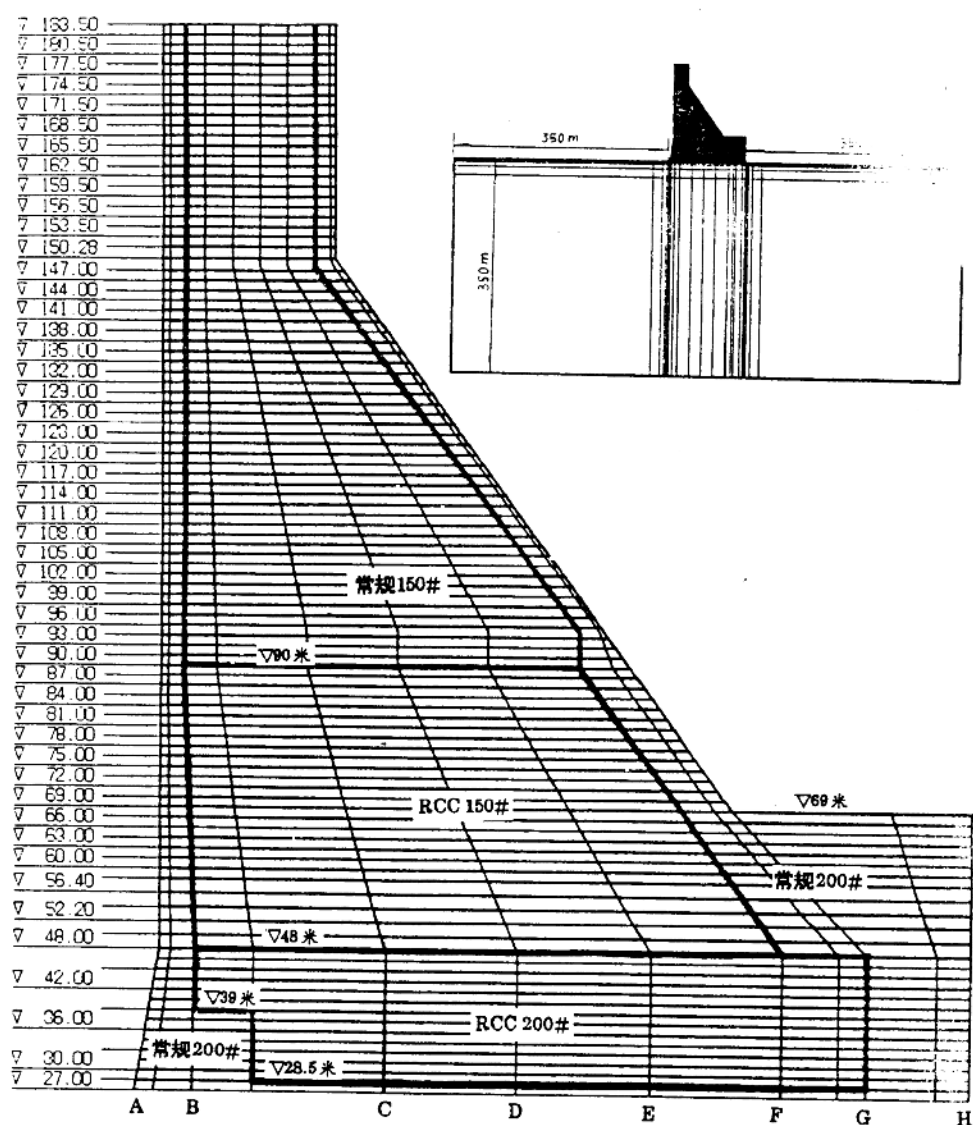


图 6 碾压混凝土重力坝剖面及计算网格

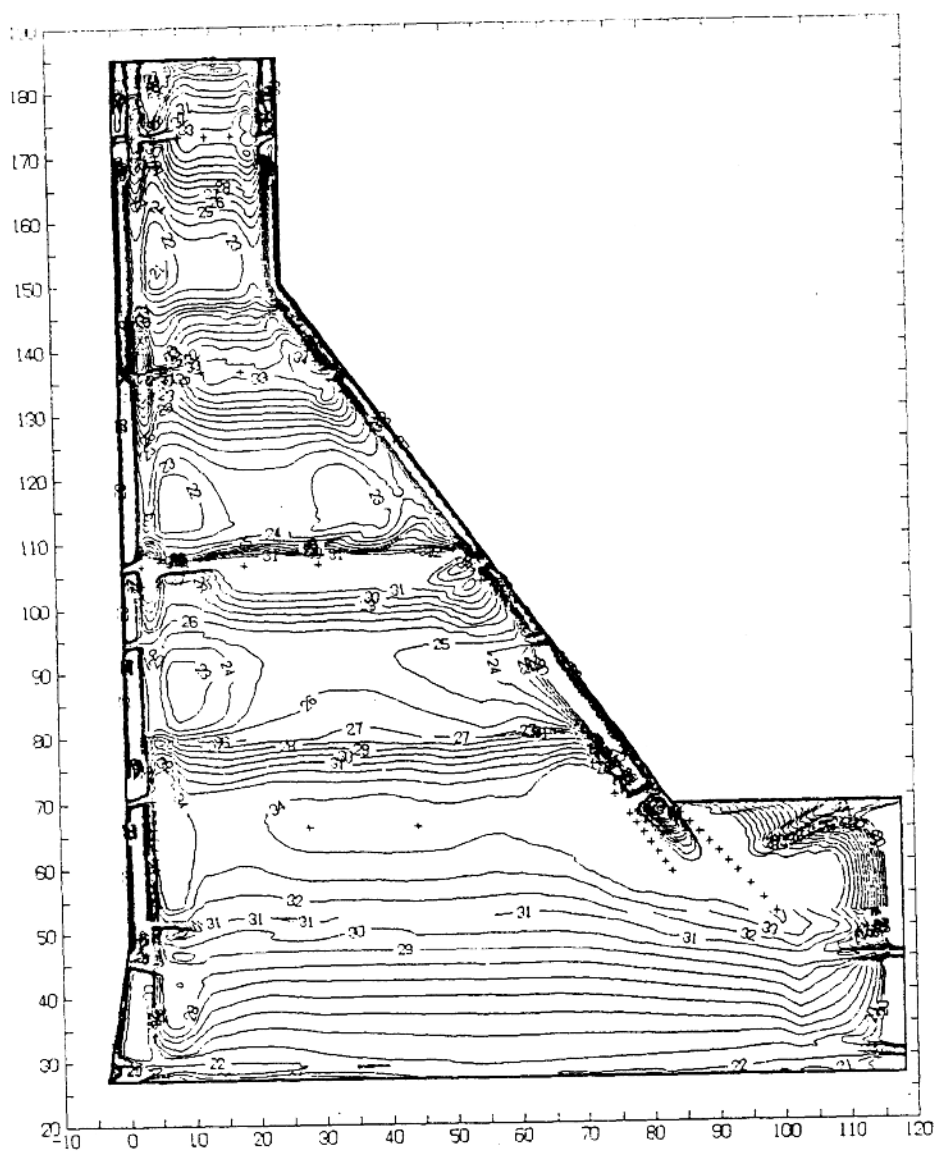


图7 坝内最高温度等值线(°C)