

有缝坝的接触应力与温度应力分析*

孙利民

(数理力学系)

摘要: 本文用ADINA程序分析了故县水库8[#]电站坝段纵缝的接触应力与温度应力问题,在计算中利用 ANINA 中单元的“活”“死”选择功能,成功地模拟了坝段逐层向上修筑和逐步蓄水,承受温降等工况。

关键词: ADINA,有缝坝,接触应力,温度应力

中图分类号: TV642.31

众所周知,对水库大坝的应力计算是有限元的重要传统应用领域。近年来随着计算技术的进步,已能越来越逼真地在计算机上模拟大坝运行的各种工况,为确保大坝的安全运行,解决设计中的各种问题提供了有力的手段。故县水库工程 8[#]电站采用有缝坝方案,为了搞清楚各纵缝接触状态对整个大坝应力分布的影响,我们用 ADINA 程序的接触分析模块对该问题进行了全面深入的研究。

ADINA 是我国引进的国外大型非线性结构分析程序。它是在美国麻省理工学院 R.J.Bathe 教授领导下,总结 SAP, NONSAP 程序的编制经验结合有限元和计算机最新发展研制成的大型程序,能解决结构的线性静力、动力问题,非线性静力、动力问题,液体和结构相互作用问题。该程序以其功能强,效率较高而受到普遍欢迎。例如该程序中关于单元的一种“活”“死”选择功能正好适合于模拟变结构的施工过程,另外子结构功能、接触问题分析功能都是精确模拟一个有缝坝不可缺少的。

我们按该坝原设计单位的要求共计算了纵缝全灌浆降温方案一;纵缝全灌浆降温方案二;无缝坝方案;纵缝部分灌浆方案等四种方案。每一种方案又分为八到九个加载步,全面模拟了坝体的修筑、承载情况,其计算工作量是相当庞大的,在大量数据的基础上对该坝段的纵缝接触应力与温度应力研究获得了满意的结果。

1 计算原理

由于混凝土在凝固过程中放出水化热,以及坝建成之后外界温度变化对坝的作用,在坝中会产生较大的温度应力。理论计算和工程实践都证明,温度应力对坝的安全性具有重要影响,由于温降产生的拉应力往往在坝内产生裂缝。为了有效的控制温降在坝内产生的裂缝,同时也便于施工,目前混凝土坝往往采用各种各样的分缝分块结构,故县水库工程 8[#]电站坝段共设 4 条纵缝,同时为增强坝的整体性,每条纵缝都设有键槽,并在施工中

* 收稿日期: 1994-05-20

对纵缝进行灌浆处理。见计算简图。

对纵缝接触状态按如下判据处理:

纵缝未灌浆时 $\sigma_n > 0$ 分离; $\sigma_n < 0$ 、 $\tau < f|\sigma_n|$ 接触; $\sigma_n < 0$ 、 $\tau > f|\sigma_n|$ 滑移。

纵缝灌浆后仍以是否满足 $\sigma_n < 0$ 作为脱开与否则的判据, 并认为:

$$\tau < 4 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (1.a)$$

$$\text{或 } \tau < f|\sigma_n| + C \quad (1.b)$$

时接触点对保持连续, 当 τ 均不满足上述二式时, 认为产生了滑移。以上 f 为摩擦系数, C 为凝聚力。

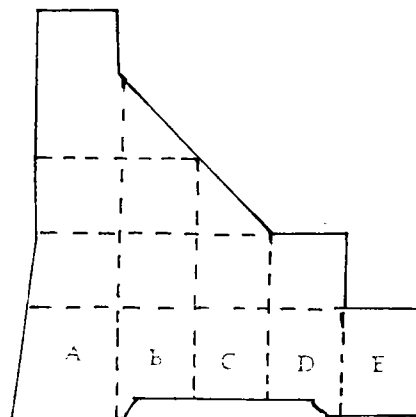


图1 计算简图

另外本课题的接触问题和一般接触问题还有

以下二点不同, 一是工程中对纵缝灌浆, 转换成数学模型我们认为由于灌浆材料的填充使接触缝宽为零; 二是温降和接触的耦合问题, 我们认为纵缝灌浆之后若再产生第二次温降, 温降造成的缝宽将使载荷在坝体各纵块之间重新分布。由于接触状态不能事先预知, 因此, 每次加载步的均进行了若干次的接触迭代, 直至迭代前后的接触状态一致为止。

为加速整个计算过程, 我们采用了子结构, 一般地子结构可以看作一种超单元, 其核心是如何用静力凝聚消去内自由度。设子结构模式的刚度方程在局部坐标系中有

$$[K] [u] = [R] \quad (2)$$

将位移 $[u]$ 分成内部自由度 $[u_e]$ 和边界自由度 $[u_h]$, 载荷分为对应于内部节点的 $[R_e]$ 和对应于外部节点的 $[R_h]$, 对刚度阵 $[K]$ 也按此分块, 有

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ah} \\ K_{ha} & K_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_e \\ u_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e \\ R_h \end{bmatrix} \quad (3)$$

在(3)式中消去内部自由度 u_e 即有:

$$[\bar{K}] [u_h] = [\bar{R}_h] \quad (4)$$

$$\text{其中 } [\bar{K}] = [K_{hh} - K_{ha} K_{aa}^{-1} K_{ah}] \quad (5)$$

$$[\bar{R}_h] = [R_h - K_{ha} K_{aa}^{-1} R_e] \quad (6)$$

对于温降造成的温度应力, 在数学模型中进行了一定的简化, 即每一块坝体按设计单位提供的数据认为是均匀降温, 不考虑水泥固化过程中的不均匀温度场。整个坝体按4层向上浇筑, 在浇筑上一层时认为下层已达到稳定稳度, 成为对新浇层的一种约束, 因此在二层交界处产生较大的温度应力, 其 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 的趋势如图2所示。

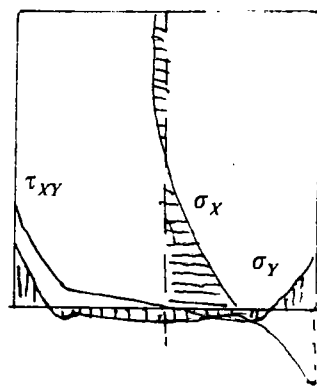


图2 温降造成的应力分布

热应力问题的应力-应变关系为

$$[\sigma] = [D]([\varepsilon] - [\varepsilon_0]) \quad (7)$$

按有限单元的处理方法, 利用虚功原理, 将温度变化转换为假想的节点力, 称为热载荷, 在平面问题中有

$$\{H_e\} = \iint [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} t dx dy \quad (8)$$

其中 $[D]$ 为弹性矩阵, $[B]$ 为应变矩阵, $\{\varepsilon_0\}$ 为热应变, t 为厚度, 在平面应变问题中有

$$\{\varepsilon_0\} = (1 + \mu) \alpha T [1 \ 1 \ 0]^T \quad (9)$$

2 坝体应力分析

根据计算结果, 具有特征意义的纵缝全灌浆方案一和无缝坝方案其坝体应力分布呈如下特点:

坝体在自重作用下主要产生 y 向压力。同时在自重作用下使岩基下沉, 由于岩基的下沉使有缝坝纵缝的顶端趋于闭合。另一个使纵缝趋于闭合的作用力是坝上游面和坝下游面呈三角形分布的水压力, 上游还包含一定高程的泥沙压力。

坝体上的纵缝键槽当受自重和温降作用时几乎全部脱开, 仅浇筑层顶部几点闭合。显然, 这是由于温降产生的收缩造成的。坝体在二次灌浆后, 加上水压的作用, 各纵缝在第一浇筑层 (海平面 461.38m) 以上基本闭合。无缝坝 (即不考虑二次降温) 方案几乎全部闭合。

在水压力作用下主要产生 σ_y 应力。有缝坝使每一垂向坝体呈悬臂梁的受力状态。特别是大坝最靠上游的 A 块, 其高宽比大, 接近于典型的悬臂梁受力状态。由于水压力产生的弯矩作用, 使该块上游侧出现拉应力, 下游侧出现压应力。但由于该块的高度最高, 自重也大, 因此,

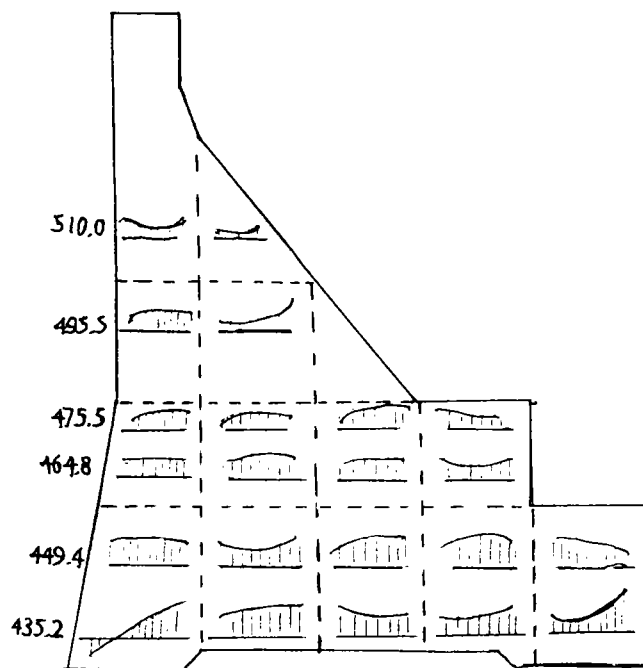


图 3 纵缝全灌浆方案一在完全承载条件下 σ_y 分布

大部分 y 向拉应力应抵消。由于三角形分布的载荷产生弯矩随高度下降呈平方增大, 而作为近似悬臂梁的 A 块根部截面仅有小量扩大, 因此, 还是有一部分 y 向拉应力不能抵消。当大坝蓄水, 上游水位加到最高 (海平面上 548.55 米) 泥沙加至 472.0 米时, 四种方案的坝踵部都出现了拉应力。同时该处位移 $u_x > 0$, $u_y > 0$, 即在水压力作用下坝踵向下游位移并向上提拉。坝趾则 $u_x < 0$, $u_y < 0$, 整个大坝位移趋势是向下游方向倾斜。

表 1 大坝控制应力

方 案	应力 10^5Pa		
	σ_x	σ_y	τ_{xy}
纵缝全灌浆一	13.4	4.7	16.7
无缝坝方案	12.3	3.8	15.0

表 2 计入刚体位移的位移

方 案	位移 mm					
	U_{max}	V_{max}	$U_{缝}$	$V_{缝}$	$U_{趾}$	$V_{趾}$
纵缝全灌浆一	52.83	-57.68	12.61	1.47	-2.62	-4.04
无缝坝	50.53	-54.65	13.47	0.15	-3.18	-4.52

U 为 x 向位移 V 为 y 向位移

3 结 论

3.1 采用有缝坝方案便于施工，但各坝块之间的载荷分配受到纵缝接触状态的影响，设置键槽是加强有缝坝整体性的一种有效措施，同时注意灌浆施工质量也是重要的，设置键槽时应注意，当左右二坝体由于施工原因或地基原因而沉降不匀时，会在键槽附近产生较大剪应力，造成应力集中。

3.2 第二次温降对大坝运行有较大影响，目前大坝内部埋设的仪器可对纵缝的实际缝宽在大坝运行期间进行测量。根据这些实测数据进行大坝的运行期应力分析，则更有实际意义。这是一项值得进一步研究的课题。

3.3 本次计算的各方案，坝体中部没出现很大拉应力，说明有缝坝体能释放坝体中由温降产生的拉应力。但有缝坝导致了坝踵区应力的恶化，应对坝踵局部加强。

致谢：郑州工学院周鸿钧教授和黄委会设计院邹铁华高级工程师在本课题研究过程中给予了热情指导和支持，在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

1 华东水利学院主编.水工设计手册.5. 混凝土坝. 水利电力出版社1987.12

2 [美] K.J.贝期著.ADINA / ADINT使用手册——自动动态增量非线性分析有限元程序.机械工业出版社,1986.

A Analysis contact—stress and Temperature
—stress of Gaping—Dam

Sun Limin
(Depart. of Math. & Mech)

Abstract: In this paper, The contact—stress and temperature stress of Guxian Dam was analysed with ADINA programe. The “Living element” and “die element” of ADINA used in caculating. That is successful we.analogize the Dam all work conditions.

Keywords: ADINA, Gaping Dam, contact stress, Temperture stress.