

子模型法在小湾拱坝结构诱导缝及检查廊道中的应用

赵吉坤¹ ,朱小春² ,石端学³ ,倪志强¹

(1.河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098 ; 2.中国水利电力对外公司 ,北京 100011 3.上海建工集团 ,上海 200120)

摘要 :介绍了 ANSYS 软件子模型法的使用方法 ,说明了设置结构诱导缝的作用 ,并利用子模型法对小湾拱坝结构诱导缝进行有限元计算 ,使用 APDL 参数化语言进行相应的二次开发辅助计算 ,分析子模型法的适用场合及其优缺点 .分析结果表明 ,用子模型法对结构物进行有限元分析 ,可以得到结构部分区域更加精确的数值解 ,大大降低了计算工作量 ,且有利于提高计算精度 .

关键词 :子模型 ;诱导缝 ;小湾拱坝 ;有限元

中图分类号 :TV642.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2007)03-0298-04

结构物上常常会出现凹槽或孔洞 .对结构物进行静力有限元分析时 ,一般在孔洞或凹槽附近将发生应力集中 ,即该处的应力梯度很大 .为了正确反映此处应力 ,必须把该处的网格划分得很密 .但是网格加密后会加大计算容量 ,耗费机时 ,而且如果相邻单元的尺寸相差过于悬殊 ,可能还会引起较大的计算误差 .

子模型法是有限元法的一项高级分析方法 ,应用工程数值模拟软件 ANSYS 进行应力分析时可采用子模型法 ,它在解决复杂应力应变问题时有其优点 ,但其分析步骤繁琐 ,过程比较复杂 ,容易出现操作错误 ,实际应用较少 .

子模型法是 ANSYS 软件中一项高级分析方法 ,可以用于检查计算精度 .用有限元法进行应力分析时 ,影响计算精度的主要因素是网格划分疏密程度 .检查网格划分是否合适的通常方法是 :将结构物先按较粗糙的网格密度划分 1 次 ,然后再将网格密度加大 1 倍 ,并对 2 次划分的网格模型分别进行计算 ,然后比较结构物上相应点的应力计算结果 ,若相差不大 ,则认为网格划分得合适 ,否则 ,需要进一步加大网格密度 .上述做法同样也会加大前处理和计算的工作量 ,而用子模型法进行网格密度检查则可以避免这一缺点^[1-4] .为了使其在实际应用中得到推广 ,本文结合小湾拱坝应用实例 ,就其使用方法和特点做了阐述 .

1 本构关系和结构诱导缝作用

1.1 有限元模型和材料本构关系

三向应力状态下 ,混凝土的应力应变关系为

$$\sigma = D\varepsilon \tag{1}$$

式中 : σ ——应力列向量 ; D ——弹性刚度矩阵 ; ε ——应变列向量 .根据应力的大小 ,将混凝土视为各向同性材料 ,并结合混凝土的开裂和压碎 ,分析 D 的具体形式 .

a. 各向同性线性阶段 .在受拉或压应力较小以及卸载的情况下 ,近似把混凝土看成各向同性线性材料 ,即

$$D = \frac{E_0}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \begin{bmatrix} 1 - \mu & \mu & \mu & & & \\ \mu & 1 - \mu & \mu & & & \\ \mu & \mu & 1 - \mu & & & \\ & & & \frac{1 - 2\mu}{2} & & \\ & & & & \frac{1 - 2\mu}{2} & \\ & & & & & \frac{1 - 2\mu}{2} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中 : E_0 ——混凝土初始弹性模量 ; μ ——泊松比.

b. 各向同性非线性阶段. 当 $\sigma_3 \geq 0.4\sigma'_c$ ($\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$) 时, 近似把混凝土看成各向同性非线性材料 (σ'_c 为三向应力状态下混凝土的峰值应力), 有

$$D = \frac{E_t}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \begin{bmatrix} 1 - \mu & \mu & \mu & & & \\ \mu & 1 - \mu & \mu & & & \\ \mu & \mu & 1 - \mu & & & \\ & & & \frac{1 - 2\mu}{2} & & \\ & & & & \frac{1 - 2\mu}{2} & \\ & & & & & \frac{1 - 2\mu}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 E_t 为等效切线模量, 在刚度计算时

$$E_t = \frac{|\sigma_1| E_{t1} + |\sigma_2| E_{t2} + |\sigma_3| E_{t3}}{|\sigma_1| + |\sigma_2| + |\sigma_3|} \quad (4)$$

其中 E_{ti} ($i = 1, 2, 3$) 为主应力 σ_i 方向上的切线弹性模量, E_{ti} 可由 Elwi, Murray 提出的三轴应力的等效单轴应力应变关系求得.

1.2 结构诱导缝的设置

结构诱导缝是指在混凝土块体内人为地设置一条潜在的缝, 它承压不受拉. 当出现受拉情况时, 诱导缝自行张开, 消除拉应力, 保护其周围混凝土块不再产生裂缝. 设置诱导缝的意图能否实现取决于多种因素. 理论上认为诱导缝应设置在坝体高应力区, 但这与坝体布置往往存在矛盾, 诱导缝只能迁就结构布置, 诱导缝总是造成断面削弱, 削弱多少为宜也是一个问题, 削弱过少可能起不到释放应力的作用, 削弱过多则将影响坝体的整体性. 据已有资料, 削弱面积一般为断面面积的 $1/6 \sim 1/3$ [5-6].

2 子模型计算方法

2.1 子模型法

子模型法是一种有限元方法, 又称为“特定位移插值法”. 在有限元分析中, 由于网格粗糙, 对于局部的细部结构不能产生令人满意的结果. 为了得到局部更精确的结果, 同时不增加整个模型的复杂性和计算量, 可以采用子模型法.

2.2 生成并分析较粗糙的模型

对整体结构物进行建模时, 在多数情况下不需要包含局部的细节如圆角等, 可省略结构物的某些中间传力环节. 网格划分相对于子模型可以粗糙一些, 但有限元网格必须细化到足以得到较合理的位移解. 这一点很重要, 因为对子模型的计算分析结果是根据粗糙模型的位移解得到的 [3], 对粗糙模型的网格划分、求解过程与普通模型的分析过程没有区别.

2.3 生成子模型并形成切割边界插值

生成子模型的过程相当于一个新的模型的创建, 但是子模型所采用的单元类型、单元实常数和材料特性应与粗糙模型完全相同, 子模型的位置 (相对全局坐标原点) 应与粗糙模型的相应部分位置完全相同.

形成切割边界插值是子模型法的关键步骤, 实际上是定义子模型相对于粗糙模型的边界位置. 在 ANSYS 中子模型的边界不必选择通过粗糙模型的结点, 而是可以任意选择. 当定义好一个任意的边界后, ANSYS 软件系统会自动根据粗糙模型上结点位移值插值计算出子模型边界上的位移值, 生成一个插值位移载荷数据文件, 并保存在硬盘内. 在 ANSYS 子模型法中, 该步骤操作最为繁琐, 也极易出错.

2.4 分析、验证子模型

在分析、验证子模型时, 必须指定与粗糙模型同样的分析类型和分析选项, 并将粗糙模型上子模型对应位置的所有载荷、约束、边界条件, 全部复制到子模型上, 也就是将上一步生成的插值位移载荷数据文件读入模型中, 然后求解分析子模型, 并得出相应结果.

子模型法的原理要求子模型的边界必须远离应力集中区域, 用户必须验证切割边界到应力集中位置的距离是否满足这个要求. 验证的方法是比较子模型边界上的结果与粗糙模型相应位置的结果是否一致, 若结

果符合得较好,则证明边界选取是正确的,若不符合,则要重新定义离分析区域更远一点的边界,重新生成子模型^[7-8]并进行分析、求解。

3 计算实例

澜沧江小湾水电站位于云南省西南部凤庆县与南涧县交界处,在澜沧江与其支流黑惠江交汇口以下约4 km处的河段上。坝区河流由北向南,河道呈向西微凸的弧形,河谷狭窄,横剖面呈“V”字形。岸坡陡立,从谷底至山顶高差达1 000 m左右,两岸地形坡度为40°~42°,两岸基本对称。坝址以上控制流域面积11 300 km²,多年平均流量1 200 m³/s。

该水电站大坝为双曲拱坝,坝高292 m,水库正常蓄水位1 240 m,总库容145.57亿m³。坝左岸设有导流洞和泄洪洞,右岸设有交通洞和地下厂房,总装机容量4 200 MW。小湾拱坝设置了结构诱导缝,并在诱导缝后设置检查廊道,为了进行检查廊道的配筋计算,应用ANSYS 中子模型方法,从拱坝整体中截出一个坝段宽度,高程从953 m至1 003 m,重新划分细网格进行分析。

小湾拱坝结构诱导缝为底缝,按永久缝施工。底缝的上游侧设置封闭止水,缝面为干缝,不承受库水压力。底部诱导缝布置在拱坝上游面956~990 m高程之间(图1)。底缝向下游方向延伸10 m,缝端为直径2 m的圆形廊道。

三维子模型结点共11 601个,单元共9 520个。子模型上、下游均受水荷载作用,水荷载作用如图2所示。高程1 003 m,953 m平面以及前后两侧面各结点均受由插值边界位移得到的位移约束。混凝土材料参数取值:弹性模量 $E=2.1\times10^4$ MPa,泊松比 $\nu=0.167$,密度 $\rho=2.4\text{ t/m}^3$ 。

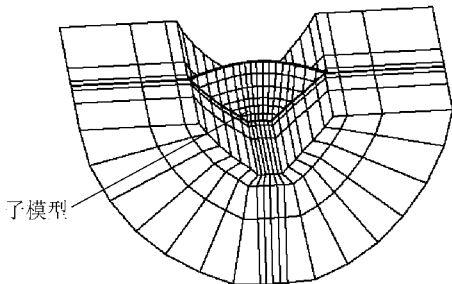


图1 小湾整体模型和子模型

Fig.1 Integral model of Xiaowan Arch Dam and the submodel

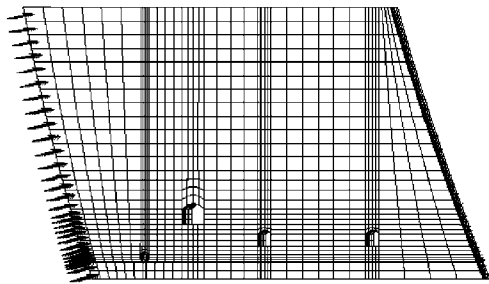
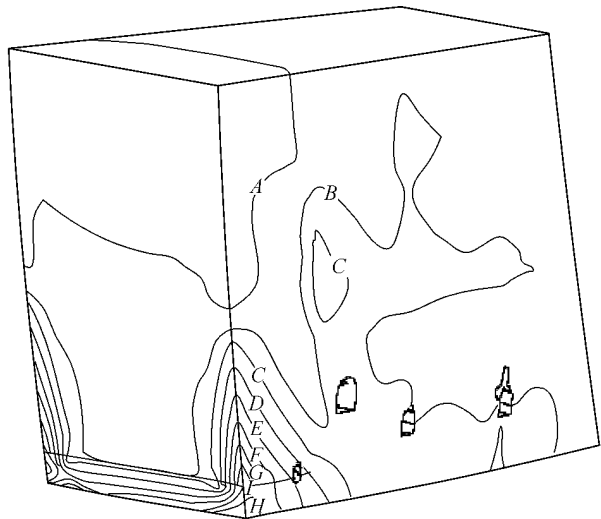


图2 子模型三维网格

Fig.2 Three-dimensional net of submodel

根据应力大小进行了线性到非线性的计算,子模型第一主应力分布如图3所示。由图3可知:最大拉应力在诱导缝检查廊道附近,最大拉应力为17.62 MPa。如果采用粗糙的整体网格进行计算,得到在诱导缝检查廊道附近最大拉应力为15.24 MPa。子模型基于圣维南原理,即如果实际分布载荷被等效载荷代替以后,应力和应变只在载荷施加的位置附近有改变,这说明只有载荷集中才有应力集中效应。在实例中选取的子模型远离应力集中位置,因此得到了较精确的结果。

诱导缝检查廊道 σ_z 应力等值线如图4所示。根据各个剖面的应力分布,进行相应的配筋计算。拱坝在自重和正常蓄水位或运行低水位水压力作用下,底孔没有产生裂缝或只有轻微开裂。配筋不能延缓孔口的开裂,但对裂缝的继续扩展有限制作用。



$A=-1836.77$; $B=452.81$; $C=2742.4$; $D=5031.98$; $E=7321.56$;
 $F=9611.15$; $G=11900$; $H=14190$; $I=16480$

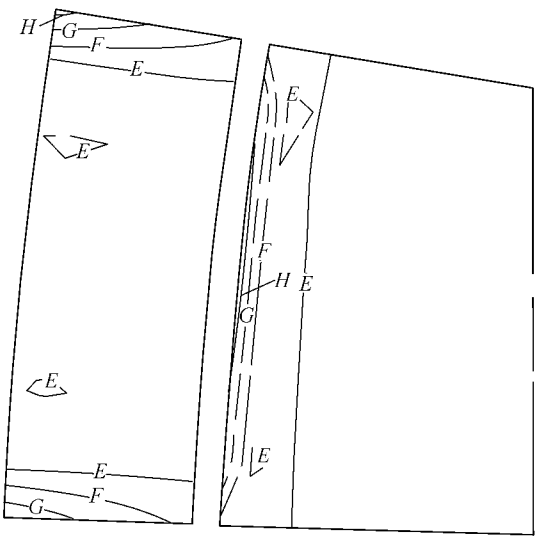
图3 子模型 σ_1 应力等值线(单位:kPa)

Fig.3 σ_1 Stress contour of submodel

4 结 语

本文分析了小湾拱坝结构诱导缝及检查廊道应力应变场,并与粗糙网格进行了相应的比较,可以看出子模型法具有以下优点 (a)减少甚至取消了有限元实体模型中所需的复杂传递区域 (b)使得用户可以在选定的区域内就不同的设计(如不同的圆角半径)进行分析 (c)帮助用户验证网格划分是否足够细 (d)节约计算时间,减小工作量.因此,用 ANSYS 软件对结构物进行有限元分析时,应尽可能多地采用子模型法.同时,子模型法也存在局限性,它不适用于对整体模型都需重点研究的场合.

子模型法可以推广应用于细观数值混凝土、细观岩石的损伤断裂问题的研究,可以对整体试样中的部分区域采用细观方法,建立子模型进行计算.



$E = 416.88 ; F = 3345.45 ; G = 6274.02 ; H = 9202.59 ; I = 12130$

图 4 诱导缝检查廊道 σ_z 应力等值线 (单位 kPa)

参考文献 :

[1] 车轶,宋玉普.混凝土高拱坝孔口三维非线性分析[J].大连理工大学学报:自然科学版,2003,43(2):218-222.
[2] 郝文化.ANSYS 土木工程应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
[3] 薛芝龙,杨家卫.小湾水电站泄洪洞过 F7 断层有限元弹性分析[J].云南水力发电,2001,17(3):55-61.
[4] GIGLIO M. FEM submodelling fatigue analysis of a complex helicopter componen[J]. Int J Fatigue, 1999, 21: 445-455.
[5] 钟永江.高碾压混凝土拱坝结构分缝及材料特性研究[J].水力发电,2001(8):17-19.
[6] CHANG Xiao-lin, ZHOU Wei. A contact model on basis of the augmented Lagrange method and engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004(9):1568-1573.
[7] 顾爱军,王向东.碾压混凝土拱坝诱导缝的作用探讨[J].扬州大学学报:自然科学版,2003,8(1):66-70.
[8] BAZANT Z P, CEDOLIN L. Blunt crack band propagation infinite element analysis[J]. J Eng Mech Div, ASCE, 1979, 105(EM2):297-315.

Application of submodel method to inducement slot and check-up porch of Xiaowan Arch Dam

ZHAO Ji-kun¹, ZHU Xiao-chun², SHI Duan-xue³, NI Zhi-qiang¹

- (1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. China National Water & Electric Copr., Beijing 100011, China ;
3. Shanghai Construction Group, Shanghai 200120, China)

Abstract The submodel method of ANSYS software was introduced. Based on its application to finite element calculation of inducement slot of Xiaowan Arch Dam and the secondary developemt with APDL parameterized language for auxiliary calculation, the function of the inducement slot was explained. Then the scope of application of the submodel method and its advantages and disadvantages were analyzed. The results show that the submodel method, used for finite element analysis of hydraulic structures, can improve the calculation accuracy. This method can greatly reduce the workload of calculation.

Key words submodel ; inducement slot ; Xiaowan Arch Dam ; finite element