

局部网格加密技术在混凝土裂缝扩展模拟中的应用

韦 未¹, 李同春², 牛志伟², 屈寒飞¹

(1 华南农业大学 水利与土木工程学院, 广东 广州 510642; 2 河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:采用有限元分析混凝土裂缝问题时,常遇到无法一步到位地确定采用什么样的剖分方案使有限元计算能达到精度要求. 针对这一问题,文章提出一种局部网格加密技术,网格根据计算精度要求以及混凝土开裂位置对原有网格进行局部加密,并且利用非协调网格算法进行计算,通过 2 个算例证明,局部网格加密在保证达到精度要求的条件下,将会大大减少计算机计算量.

关键词:混凝土; 局部网格加密; 非协调网格

中图分类号:TV31

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2007)04-0112-05

Applications of Local Mesh Refinement to Crack Propagation Simulation in Concrete Structures

WEI Wei¹, LI Tong-chun², NIU Zhi-wei², QU Han-fei¹

(1 College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agric. Univ., Guangzhou 510642, China;

2 College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hehai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: In using finite element method to analyze concrete cracking, the difficulties are how to choose the mesh to meet the precision of calculation. For this reason, a local mesh refinement technique was presented. According to the precision requirement and the location of concrete cracking, the raw mesh was locally refined and incompatible mesh algorithm was used. Two examples showed that the local refined mesh technique was reasonable and substantial.

Key words: concrete; local refined mesh; incompatible mesh

混凝土的抗拉强度相对较低,由于拉应力容易引起开裂,而混凝土裂缝对结构构件基本性能影响较大. 对于用有限元法分析钢筋混凝土的开裂问题,过去已提出过几种不同的模式,如离散裂缝模式^[1]、弥散裂缝模式^[2-6]以及断裂力学模式^[7-9]. 离散裂缝方法的缺点是需要事先假定裂缝的位置和方向,这是一个较难解决的问题,因此目前较少采用^[10]. 而采用弥散裂缝方法则是在力学上模拟裂缝开展,在建立单元刚度矩阵时,考虑裂缝的影响,因此不需要重新剖分网格,但由于该方法将单个裂缝扩大到整个单元,因此弥散裂缝模型难以描述裂缝附近结构性能,这与实际情况相差较大^[10]. 由此可知小网格将比大网格的计算精度高,即需要对网格进行加密. 常规的有限元网格加密一般采用全协调连续加密方法,这种解法的缺点在于当对一部分结构进

行网格加密时,相应地,其余部分都要进行加密,新生成的加密点都要参与有限元计算,这样势必会造成经济与时间的浪费. 因此,合理的网格加密策略应该是对于没有达到开裂坏条件的单元仍然采用初始网格,而对于达到开裂条件的单元则进行网格加密,即局部加密. 局部加密作为一种新技术,具有高度节约计算量和计算机存储量以及提高模拟精度的优点^[11]. 由于局部加密后,新旧网格之间会出现一些非协调点,如何处理这些非协调点近年来也得到了进一步研究^[12-13]. 本文将采用文献[13]的方法进行处理,即以协调节点集的位移变量作为基本变量,非协调节点集的位移变量作为从变量,通过线性插值建立从变量与基本变量之间的线性关系,从而导出以基本变量作为未知量的总体线性方程组.

收稿日期:2006-09-22

作者简介:韦 未(1975—),女,讲师,博士, E-mail: wwscau@scau.edu.cn

基金项目:华南农业大学校长基金(7600-K06160)

1 网格加密方法的实现

首先对分析的结构或试件进行初始网格计算,判断达到开裂条件的单元,对已经达到开裂条件的单元根据要求进行局部加密.

1.1 判断网格需要加密的条件

本文采用的判断加密的准则是通过损伤变量值来判断,当单元中任意高斯点的损伤模量达到一定值时,则该单元需要进行加密.

损伤变量(d)计算^[14]:

$$d = 1 - \sqrt{\frac{f_t}{E\varepsilon^*} \{2\exp[-b(\varepsilon^* - \varepsilon_0)] - \exp[-2b(\varepsilon^* - \varepsilon_0)]\}}$$

$$b = \frac{3}{\varepsilon_0 \left(\frac{2G_f E}{l_{ch} f_t^2} - 1 \right)}$$

式中, ε^* 为等效应变,其求解方法见文献[15]; ε_0 为当材料达到单轴拉伸强度极限 f_t 的峰值应变; E 为弹性模量; G_f 为断裂能, l_{ch} 为特征长度(数值一般取单元尺寸的1~3倍).

求出损伤变量之后,从损伤变量分布图可以了解结构的初始开裂部位,此时则可以根据需要来对初始网格进行加密.本文中设置为:当 $d \geq 0.1$ 时,网格进行加密.

1.2 网格局部加密过程及其处理方法

无论是连续加密还是局部加密,都要对新生成的网重新进行有限元分析运算.而根据1.1的加密判断条件,局部加密网格可能会出现在原初始网格的任何地方.网格进行加密后,对于被加密的初始网格,其网格边界必将有新增的节点,如果采用连续协调加密,由于新生成的节点较多,因此在有限元程序中需要求解的方程数就会增加,对于大型的结构,往往要耗费很多计算时间.而采用局部非协调加密网格,对于结构内部单元,局部加密点根据位置不同可以分为:局部加密后的单元与未加密单元的边界将会出现非协调点;单元内部加密点(作为基本点的加密点);约束边界上的加密点(图1).对于非协调点的变量,将在有限元分析方法中作为从属变量,通过对基本变量进行线性插值而得到;对于单元中的加密点,由于新生成的单元之间是连续的,故将作为基本节点参与有限元计算中;对于约束边界上的新增节点,要相应修改约束条件.对于本文涉及的非协调网格问题,采用以交接边界上初始网格的位移变量作为基本标量,其点集称为协调节点集;而交界边上新增加密点的位移变量作为从变量,其点集称为非协调点集.通过线性插值建立从变量与基本变量之间的线性关系,从而导出以基本变量作为未知量的总体线性方程组,具体方法见文献[13].

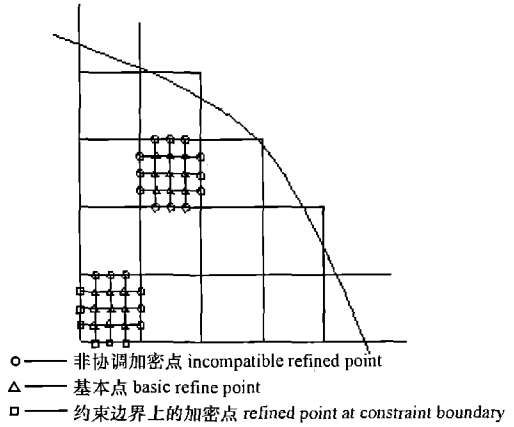


图1 局部加密点的定义
Fig.1 Definition of local refined mesh point

1.3 插值点和插值系数的求解

上述对局部非协调网格问题求解的关键是确定与文献[13]中式2.70~2.71对应的基本变量和相应的插值系数.从非协调点的定义可知,对于二维问题,非协调点只可能出现在单元的边界线上,因此只需要对单元四周边界上的非协调点进行插值;对于三维问题,非协调点不仅会出现在单元的边界线上,而且还可能出现在单元的边界面上,因此不仅需要对面上的非协调点进行插值,也需要对面上的非协调进行插值.以1个四边形面单元(图2)为例,图中 a 、 b 、 c 、 d 4个角点在局部坐标中的坐标值分别为 $(1,1)$ 、 $(-1,1)$ 、 $(-1,-1)$ 、 $(1,-1)$,对线或面上非协调点插值系数的求解分别介绍如下:

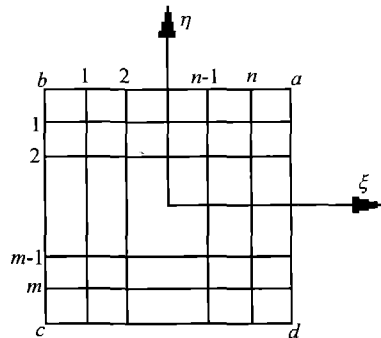


图2 线及面上协调点的插值系数求解
Fig.2 Solution of interpolation on line or surface

1.3.1 线上非协调点插值系数的求解 假如一条线(如图2中线段 ab)上有 n 个非协调点,需要求解他们的插值系数,基本点为该线段的2个端点 a 和 b ,也就是说式2.70~2.71中的 n_1 和 n_2 都为2,第1个非协调点的插值系数分别为 $1/(n+1)$ 和 $n/(n+1)$,第2个非协调的插值系数分别为 $2/(n+1)$ 和 $(n-1)/(n+1)$,第 i 个非协调点的插值系数为 $i/(n+1)$ 和 $(n+1-i)/(n+1)$,以此类推.

1.3.2 面上非协调点插值系数的求解 对于面上

图 3b 是初始网格,对图 3b 的网格加密而得到图 3c 和图 3d,图 3c 是加密协调网格,图 3d 则是本文采用局部加密而得到的网格,图 3d 中的黑点即为非协调点. 图 3b ~ d 的网格数和节点数如表 1 所示. 图 3e ~ h 分别为采用连续加密和局部加密计算所得的破坏位置图. 从图 3e ~ h 可以看出,采用连续加密网格和局部非协调加密网格计算结果是相近的,而与初始网格比较有差距,但是初始网格精度上比较粗糙;采用局部加密非协调网格由于节点较少,大大减少了计算量. 图 4 为各种网格计算所得的荷载 - 裂缝张开位移 (crack mouth opening displacement, CMOD) 曲线图.

表 1 各种网格比较表
Tab. 1 Comparisons of different meshes

项目 item	单元数 number of elements	节点数 number of nodes	方程个数 number of equations
初始网格 raw mesh	58	77	146
局部连续加密网格 compatible mesh	497	448	971
局部非协调加密网格 incompatible mesh	377	328	686

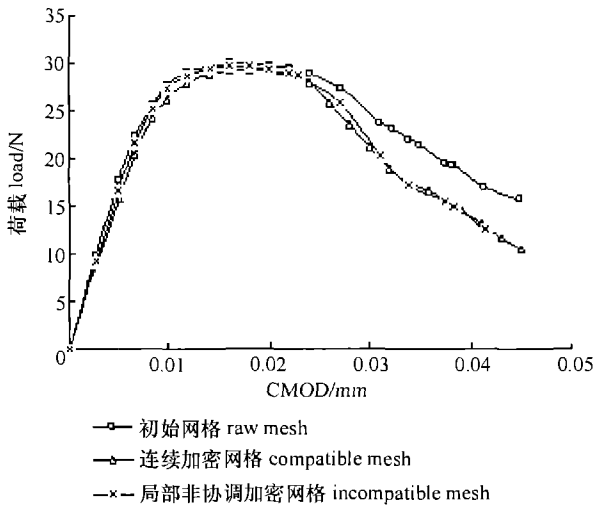


图 4 各种网格荷载 - 裂缝张开位移 (CMOD) 曲线
Fig. 4 Load-CMOD curves of different meshes

2.2 对混凝土重力坝进行分析

图 5 为重力坝的几何尺寸,重力坝的材料参数如下:弹性模量 (E) = 35 700 MPa,泊松比 (ν) = 0.1,抗拉强度 (f_t) = 3.6 MPa,断裂能 (G_f) = 0.184 kN/m,水荷载是按图 5 中的比例施加点荷载,单位为 kN. 为了说明本文方法的实用性,本文采用了 4 种网格(图 6、7). 网格 I 为初始网格(图 7a),网格 II 为网格 I 自动局部加密 10×10 后得到的网格(图

7b),网格 III 为网格 II 二次自动局部加密 10×10 后得到的网格(图 7c). 图 7d ~ e 给出损伤值接近 1 的部位,即开裂区.

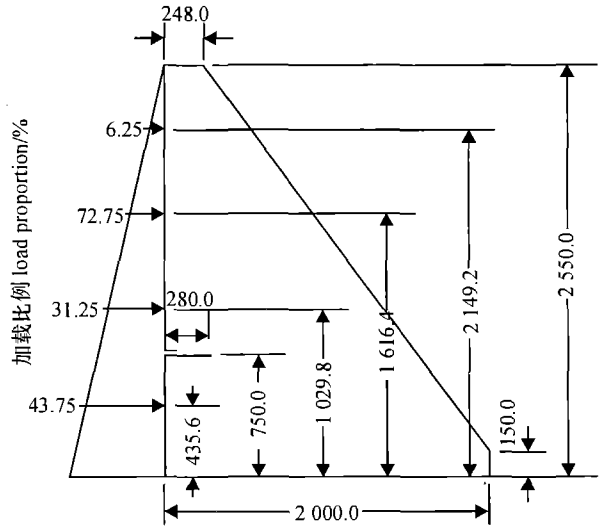


图 5 混凝土重力坝的几何图形 (单位: mm)

Fig. 5 Geometry of concrete gravity dam (unit: mm)

从图 7d 来看,由于网格 I 的网格较大,因此计算所得的损伤区范围较大,这虽然有不精确的一面,但为局部加密奠定了基础. 网格 II 就是在网格 I 的基础上加密得来的,从图 7e 以及图 6 可以看出,网格 II 的局部加密网格并不是很理想,与 Carpinteri 等^[16]的试验结果相差较大,为此在网格 II 的基础上进行了二次加密,得到了网格 III (图 7c,从图 7f 以及图 6,可以看出,经过二次加密后,计算的结果与 Carpinteri 等^[16]的试验结果相差较网格 II 小,因此可认为计算的结果较网格 II 合理.

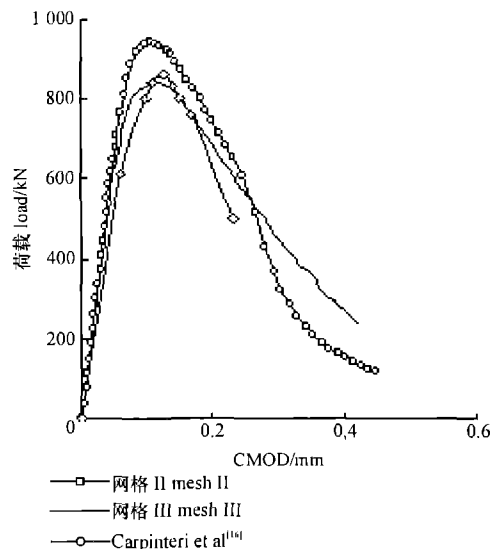
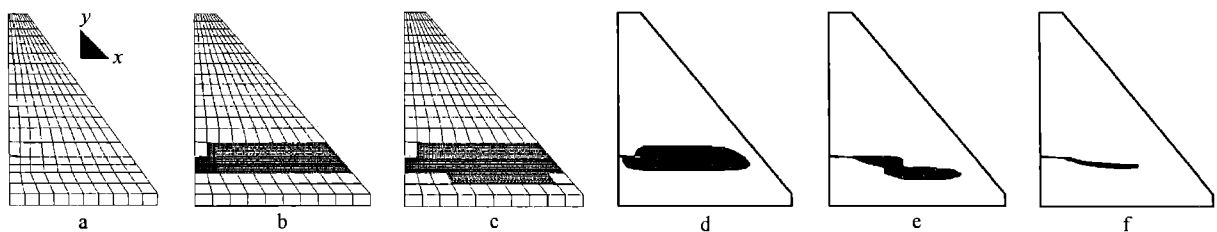


图 6 荷载 - 裂缝嘴张开位移 (CMOD) 关系图
Fig. 6 Load-CMOD relations



a:初始网格图 I ;b:网格 II ;c:网格 III ;d:网格 I 计算所得损伤区 ;e:网格 II 计算所得损伤区 ;f:网格 III 计算所得损伤区

a:raw mest I ;b:messh II ;c:mesh III ;d:damage zone calculated form mesh I ;e:damage zone caleulated form mesh II ;f:damage zone calculated form mesh III

图7 各种网格及损伤区图

Fig.7 Different meshes and damage zone

3 结论

当采用有限元分析混凝土结构的开裂时,常常认为当单元内任意高斯点的应力状态达到开裂条件时,则认为该单元破坏,如果单元较大时,则计算误差较大,因此需要加密网格以达到精度要求,但如果一开始就采用较密网格,这势必会造成计算量大,计算速度慢,因此合理的方法就是:先采用较粗糙的网格进行计算,当发现单元达到开裂条件或计算结果不能满足精度要求时,则对原粗糙网格进行加密.然而,采用连续协调加密方式将会使得计算单元比较多,因而对计算机的存贮空间要求比较大,这样势必会使计算速度缓慢、计算时间冗长.从本文通过对连续协调加密和局部加密的比较,可以看出,采用局部非协调加密网格在保证计算精度的前提下,能大大减少计算量,并能减少网格尺寸对计算结果的影响,这对于大型结构的有限元分析来说无疑是经济的、省时的.

参考文献:

- [1] 黄松梅,王冬玲,李哲,等.拱坝的开裂计算[J].西安理工大学学报,1998,14(1):18-23.
- [2] COPE R J. Material modeling of real, reinforced concretes labs[C] // DAMJANI C F. Proceeding of International Conference on Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures. Swansea: Pineridge Press, 1984:85-117.
- [3] DE BORST R, NAUTA P. Non orthogonal cracks in a smeared finite element model[J]. Engineering Computations, 1985,2(3):35-46.
- [4] 巫昌海,汪基伟.混凝土三维非正交弥散裂缝模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,1999,27(5):17-20.
- [5] 黄文雄,许庆春,王德信.拱坝的非线性开裂有限元分析[J].河海大学学报,1994,22(5):100-103.
- [6] 柯敏勇,洪晓林,方璟.碾压混凝土拱坝三维弹塑性有限元分析[J].水利水运科学研究,2000(1):36-42.
- [7] 陈建叶,胡成秋,张林.碾压混凝土拱坝破坏试验中诱导缝相似模拟研究[J].四川大学学报:工程科学版,2003,35(6):40-41.
- [8] 刘海成,吴智敏,宋玉普.碾压混凝土拱坝诱导缝损伤开裂准则研究[J].水利发电学报,2004,23(5):22-27.
- [9] 于晓中.岩石和混凝土的断裂力学[M].长沙:中南工业大学出版社,1991:336-346.
- [10] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1998.
- [11] 林振宝,石济民,林岗,等.快速自适应局部网加密方法在气藏数值模拟中的应用[J].天然气工业,1994,14(3):33-35.
- [12] 王建华,徐强勋,四面体单元网格的局部加密算法及程序实现[J].南昌水专学报,2004,23(1):1-5.
- [13] 李同春,李森,温召旺,等.局部非协调网格在高拱坝应力分析中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(1):42-45.
- [14] FAOUZI G, RENÉ T. Nonlinear behavior of concrete dams using damage mechanics[J]. Journal of Engineering Mechanics,1995,121(4):513-527.
- [15] 韦未,李同春.基于四参数等效应变的各向同性损伤模型[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(4):425-429.
- [16] CARPINTERI A, VALENTE S, FERRARA G, et al. Experimental and numerical fracture modeling of a gravity dam[M] // BAZANT, Z P. Fracture Mechanics of Concrete Structures. New York: Elsevier,1992:351-360.

【责任编辑 周志红】