

钢筋混凝土板的有限元分析

卯颖, 樊江

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 从建立钢筋混凝土板的计算模型开始, 讨论了钢筋与混凝土的离散, 混凝土的本构方程、破坏准则等内容, 并用所讨论的模型和破坏准则, 对一钢筋混凝土板进行了计算分析. 最后与试验结果作了比较, 验证了钢筋混凝土板有限元分析的计算方法和可行性.

关键词: 钢筋混凝土板; 非线性分析; 有限元法; ANSYS

中图分类号: TU375.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2003)02-0095-05

Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Slab

MAO Ying, FAN Jiang

(Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: Beginning with building reinforced concrete slab modeling, the discretization of steel and concrete, constitutive equations and failure criterion etc. are discussed, then the analysis of a reinforced concrete slab using above models and failure criterion is made. At last, the numerical modeling is compared with experimental load-deflection responses in order to confirm the feasibility of discrete model.

Key words: reinforced concrete slab; nonlinear analysis; finite element analysis; ANSYS

0 引言

钢筋混凝土板在土木工程中应用广泛. 长期以来, 各国学者在钢筋混凝土板的极限分析方面进行了系统而广泛的研究, 发展了不同的实用分析方法. 其中“薄膜效应”是钢筋混凝土板极限分析的重要课题, 它显著地提高了钢筋混凝土板的承载能力. 1955年 A. J. Ockleston 发表了南非一栋三层钢筋混凝土原型结构的破坏性试验结果, 指出由于“薄膜效应”的存在, 实测破坏荷载比按塑性铰线理论求得的价值高 3~4 倍. 常用的极限方法从理论上很难得到满意的结果, 往往需要根据试验来加以修正.

近十几年来, 随着计算机技术的发展和混凝土本构关系研究的深入, 钢筋混凝土结构有限元方法得到了迅速的发展. 大多数大型商业有限元软件都具备了钢筋混凝土结构的非线性分析的功能, 是进行非线性分析的强有力工具. 但是能用来分析钢筋混凝土板非线性过程的软件却寥寥无几. 本文尝试用 ANSYS 软件来分析钢筋混凝土板从加载到破坏的全过程, 并得出了有意义的结论.

1 钢筋混凝土板的计算模型

钢筋混凝土板有限元分析是属于材料非线性分析. 这些非线性因素主要有:

- 1) 钢筋混凝土板是由钢筋和混凝土复合而成的, 而混凝土的应力应变关系是非线性的;
- 2) 在荷载作用下, 一般混凝土板是带裂缝工作的, 裂缝的开展导致了结构的应力重分配, 使结构具有非线性特征;
- 3) 钢筋在进入弹塑性阶段后也表现出非线性特征;
- 4) 混凝土与钢筋的粘接—滑移也会导致非线性;

钢筋混凝土板在开裂前, 可以视为弹性薄板, 即板内只承受弯矩和扭矩, 板的中面始终保持为一个平

收稿日期: 2002-10-15; 基金项目: 云南省应用研究基金(项目编号: 2000E0035M).

第一作者简介: 卯颖(1978.2~), 男, 硕士生; 主要研究方向: 钢筋混凝土结构.

能力却很弱, 单轴应力状态下的应力应变曲线如图 4 所示.

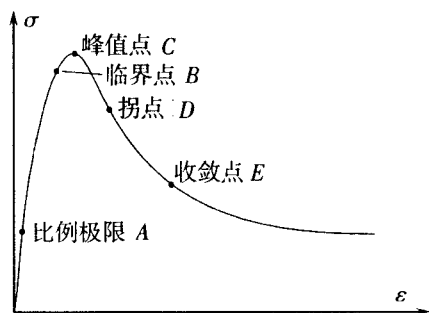


图 4 混凝土的单轴应力应变曲线

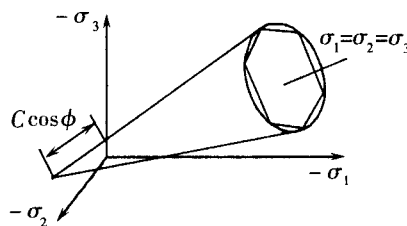


图 5 Drucker - Prager 模型的破坏面

在 A 点以前, 可以认为混凝土处于弹性阶段, 初始微裂缝变化很小. 超过 A 点后, 混凝土进入稳定裂缝扩展阶段, 应力应变关系呈非线性, 直至 B 点. 随后裂缝快速发展, 至峰值点 C, C 点以后为下降段.

在 ANSYS 软件中, 混凝土的材料本构关系采用 Willam - Warnke 5 参数模型. 但是该模型只能与 SOLID - 65 号单元一起使用, 因而在使用 SHELL - 143 与 SHELL - 91 单元来模拟钢筋混凝土板时, 只能使用其它本构模型. 考虑到混凝土的力学性能与静水压力有关. 本文采用 Drucker - Prager 本构模型, 如图 5 所示. 该模型由 Mohr - Coulomb 模型发展而来, 适用与脆性材料, 广泛用于岩石, 土体和混凝土材料.

3.2 钢筋

钢筋的本构关系采用 ANSYS 中的双折线性各向随动强化模型 (BKIN), 如图 6 所示. 该模型应用 von Mises 屈服准则以及各向同性工作强化的假定, 可以用于大应变分析. BKIN 模型假设总应力的范围等于屈服应力的两倍, 以包括包辛格效应.

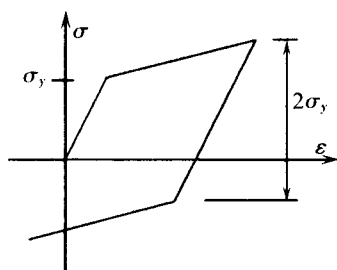


图 6 BKIN 模型图

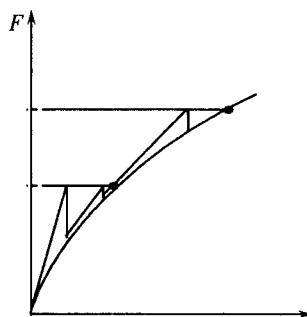


图 7 牛顿 - 拉斐逊迭代法

4 非线性求解

ANSYS 求解非线性的方法为牛顿 - 拉斐逊迭代法 (如图 7 所示), 迭代方程式 (1) 如下:

$$[K^T]\{\Delta u\} = \{F\} - \{F^{nr}\} \tag{1}$$

式中: $[K^T]$ — 切线刚度矩阵, $\{\Delta u\}$ — 位移增量, $\{F\}$ — 外荷载矢量, $\{F^{nr}\}$ — 内力矢量 (单元应力的和).

每一次迭代使用波前法求解, 迭代求解是线性的. 外荷载与内荷载之间的差, $\{F\} - \{F^{nr}\}$ 称为残差, 也就是结构中不平衡力的度量. 通过迭代, 使得残差小于收敛准则, 从而得到非线性解. 对于钢筋混凝土板, 一般而言主要是靠 F 力、 M 弯矩的残差满足收敛控制的非线性迭代过程. ANSYS 的 F 力、 M 弯矩的收敛准则为 1‰.

5 计算实例

以图8的钢筋混凝土简支板^[4]为计算模型,该板的跨度为2 m,板厚为60 mm.板底双向配筋 $\phi 6@60$.板中心受一集中荷载,极限荷载为43.9 kN.

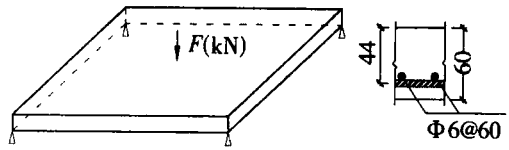


图8 钢筋混凝土板

5.1 有限元模型的建立

在 ANSYS 中建立的钢筋混凝土板的有限元模型,如图9所示.混凝土的材料参数取实际测量数值^[4]为: $f_c = -25.5$ MPa, $f_t = 2.56$ MPa 弹模取 $3.36E4$ N/mm²,泊松比取 0.167.应力应变关系为线弹性.不考虑钢筋与混凝土之间的滑移,以及混凝土的徐变、收缩等因素.钢筋的弹性模量取为 $2.14E5$ N/mm²,屈服强度为 235 MPa.在 ANSYS 中采用 Drucker - Prager 模型需要输入的材料参数为 C, ϕ . C ——内聚力; ϕ ——内摩擦角.

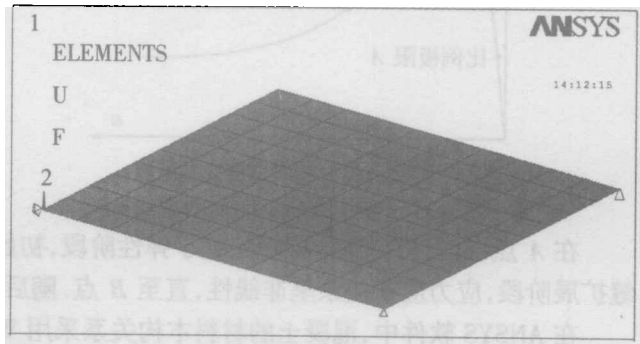


图9 有限元模型简图

因此需要通过下式^[5]来求得混凝土相应的 C, ϕ 值:

$$f_c = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi}, \quad f_t = \frac{2C \cos \phi}{1 + \sin \phi} \tag{2}$$

将 f_c, f_t 的值 25.5 MPa, 2.56 MPa 带入上式,可以求得 $C = 4.0398, \phi = 54.8^\circ$.

模型编号	混凝土		钢筋		钢筋离散方式
	板单元	本构模型	杆单元	本构模型	
1	SHELL - 143	Drucker - Prager	LINK - 8	双折线随动强化模型	分离式
2	SHELL - 91	Drucker - Prager	无	双折线随动强化模型	分层组合式

5.2 结果分析

整个计算过程耗时3 h左右,钢筋混凝土板的跨中挠度曲线与试验^[4]得到的挠度曲线,如图10所示.造成误差过大的原因:

1) 两种模型在板的开裂荷载前的挠度与试验基本吻合,处于线性状态.然而在板开裂后,两种模型都显示出比实际板高的刚度.这是因为两种壳单元都没有分析裂缝的功能,一旦混凝土受拉开裂后,板刚度下降时,而模型只将进入塑性的壳单元上的多余应力进行内力重分配,并没有释放单元中的应力,从而使得板的挠度偏底.

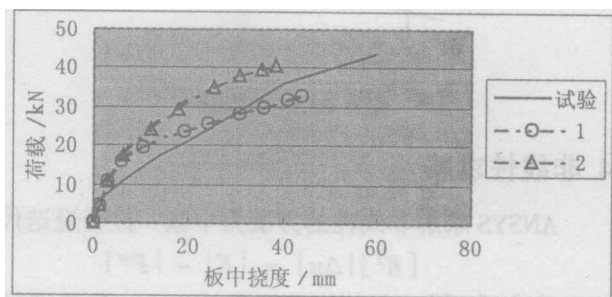


图10 荷载 - 挠度曲线图

2) Drucker - Prager 模型为混凝土破坏提供了比较简单的模拟.破坏分为两种类型:拉伸型和压缩型.但是在复杂应力作用下时,计算结果与实际情况会有较大误差.

3) 对于模型1,计算得到的极限荷载为32.8 kN,误差为 25%.造成这么大的误差,跟模型也有很大的关系.LINK - 8 单元与 SHELL - 143 单元在中部连接,使得模型的钢筋位置抬高了15 mm,混凝土受压区变薄,最后人为的降低了板的极限荷载.

(下转第 118 页)

[Files]

Source: "MyProg.exe"; DestDir: "{app}"

Source: "MyProg.hlp"; DestDir: "{app}"

Source: "Readme.txt"; DestDir: "{app}"; Flags: isreadme

[Icons]

Name: "{commonprograms} \ My Program"; Filename: "{app} \ MyProg.exe"

Name: "{userdesktop} \ My Program"; Filename: "{app} \ MyProg.exe"

2 结束语

在应用软件的开发中会使用很多的资源文件,如何将若干资源文件打包发布,就是一个软件开发中的问题.程序安装软件的制作就是为应用软件定做合理的程序包装,使得用户更容易接受应用软件.

参考文献:

[1] Inno SetupP Help Online[LO].Http://www.Innosetup.com.

(上接第98页)

4) 对于模型2,计算得到的极限荷载为40.6 kN,误差为7.5%.这也说明钢筋层的位置与实际符合,使得极限荷载相差不大.但挠度则相差较大,这跟板破坏时形成机动体系,产生大变形,导致挠度过大有关.同时也与钢筋简化为壳单元内的薄膜层有关.这种简化方式处理的钢筋与实际的钢筋对混凝土板的影响是不同的.因此钢筋的离散化仍是一个棘手的问题.

6 结论

尽管用ANSYS分析钢筋混凝土板仍有不足,但是用板壳单元来模拟钢筋混凝土板却是目前比较常用的有限元方法.目前国内、国外有各种各样的分析钢筋混凝土板的有限元程序.然而,通用的分析钢筋混凝土板的有限元程序却很少.这是因为板的受力比较复杂,试验不够完整;在确定材料参数时,要想简单、有效的考虑板的受力特性还比较困难.以裂缝开展时,应力释放系数的确定为例:不同的板、不同的钢筋与混凝土、不同的受力情况,如何来确定拉压应力在裂缝开展后的释放系数,以及剪切应力的变化?从这一点,也说明了许多大型商业有限元软件没有分析钢筋混凝土板的计算模块的原因.作者深信钢筋混凝土板的非线性分析,将是未来钢筋混凝土非线性有限元分析的一个重要的发展方向.

参考文献:

[1] W.F.CHEN,A.F.SALEEB著.土木工程材料的本构方程[M].武汉:华中科技大学出版,2001.5.

[2] 夏锋,徐彬.钢管混凝土柱新型节点环板的试验及计算分析[J].昆明理工大学学报(理工版),2001,26(2):39~41.

[3] 许庆亮,等译.钢筋混凝土有限元分析—技术现状报告[M].南京:河海大学出版社,1988.12.

[4] 宋启根.钢筋混凝土计算力学[M].福州:东南大学出版社,1996.1.

[5] 江见鲸.钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M].西安:陕西科学技术出版社,1998.10.

[6] 美国ANSYS公司北京办事处.ANSYS用户手册[S].1998.