

混凝土非线性有限元可视化系统简介及正确性验证

王 瑶¹, 吴胜兴²

(1. 金陵科技学院建筑工程系, 江苏 南京 210001 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 对河海大学土木工程学院研制的有限元计算程序的前后处理部分进行了完善, 用面向对象编程语言 VB 开发了钢筋混凝土平面非线性有限元可视化系统. 该系统采用图形用户界面, 前、后处理结果全部用彩色图形显示, 分析简单直观. 通过与理论及实验都很完善的简支梁在不同配筋和受力情况下的受力全过程进行对比, 进一步验证了该软件计算的可靠性和图形的准确性. 该软件可用于多种混凝土构件或结构受力全过程分析, 其非线性阶段仿真分析的可靠性尤其突出.

关键词: 钢筋混凝土; 非线性有限元; 仿真分析; 裂缝; 变形; 强度; 可视化系统; 简支梁

中图分类号: TU375; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-764X(2004)05-0057-03

1 可视化分析系统简介

1.1 软件背景

原软件是河海大学土木工程学院研制的钢筋混凝土平面非线性有限元分析软件系统, 前后处理结果的可视化基于 DOS 操作系统, 现已解决了近 10 个工程实际问题, 取得满意的结果和较好的经济效益. 该有限元软件功能强大, 尤其是在非线性阶段的模拟结果非常令人满意. 能计算包括温度作用在内的各种荷载, 可以考虑混凝土水化热、徐变、外界气温、弹模及强度随龄期的变化、大体积混凝土分层分块浇筑等多种因素, 还可以计算裂缝开展过程和裂缝宽度, 对结构从施工到运行的全过程进行仿真分析. 该系统的有限元计算采用的原理和方法详见文献[1].

1.2 可视化系统开发

为了发挥该软件的优势, 并推广应用, 作者采用面向对象编程语言 Visual Basic 开发了基于 Windows 平台的前后处理可视化系统^[2]. 设计该系统的主要目的是用图形的形式来表现有限元的前处理和后处理结果, 以便查询和分析. 整个结构计算过程仍然采用 FORTRAN 语言, 这是由于程序庞大且 FORTRAN 的计算功能是现编程语言 Visual Basic 所不能比拟的, 所以在现软件中引用 Shell 函数直接调用其执行程序运行计算结果. 软件主要有以下特点:

a. 用户界面友好, 操作简单, 易学易用, 具有图形用户界面 (GUI). 笔者采用主菜单系统, 共九大功能模块来访问应用程序的所有主要功能, 如数值计算、网格显示、应力等值线图、剖面应力图等. 在每个功能

实现过程中可以通过交互式访问来控制程序流程.

b. 软件能通过图形界面形式交互式输入原始数据, 如图 1 所示. 因有限元原始数据量较大, 若仅能按文件方式输入, 用户可能不熟悉输入的格式, 但修改时采用文件方式却很方便. 因此, 该软件在新建工程时采用交互式输入并输出到文件中去, 而打开工程时可直接进入文件以便修改.



图 1 输入原始信息窗口

c. 软件尽可能从用户分析构件或结构的需求出发, 项目齐全并易于查询. 从前处理结果的图形显示配合简单图形编辑功能如放大和平移, 可以容易地检查输入的原始数据是否正确 (比如网格信息、材料信息或荷载信息), 并可很方便地查询所需单元或结点所处的位置; 后处理结果的图形显示也很便于分析后处理各类计算成果 (如任意点的荷载-挠度曲线、任一荷载步下的结构变形图、应力等值线、任意

作者简介: 王瑶 (1973—), 女, 江苏南京人, 讲师, 硕士, 从事结构工程研究.

截面应力及内力情况、结构开裂过程、钢筋和粘结单元的屈服和破坏过程、钢筋应力-荷载曲线、钢筋应力图、某行或某列的裂缝宽度等)。

d. 考虑 Visual Basic 的图形处理功能远不如 AutoCAD,在该程序中设置了 AutoCAD 接口,通过 OLE Automation 技术或者将图形转为图形交换文件 DXF 格式,将 AutoCAD 应用程序中的对象提供给开发工具来使用.在该软件中仅设计放大和平移的简单功能,基本能满足需要.当用户希望对自动生成的图形结果进行一些补充和修改时,可将图形输出到 AutoCAD 或导为 .dxf 格式或存为 .dwg 文件。

e. 可以查询大数据量的信息如混凝土各网格点的应力值或位移值.考虑到 VB 和 Access 数据库的良好集成,创建了 Access 格式数据库。

f. 可以通过帮助功能来查询整个系统的设计结构和具体内容,详细介绍各个类、方法、属性等,以便今后的扩充和修改.这部分内容还需不断扩充。

该系统在编写代码时利用“类”的概念,使各种模块成为真正意义上的“部件”,解决了代码重用和后继开发的问题.在图形模拟和计算中运用了三次样条插值函数、高斯求积等多种数值分析方法(具体的开发过程详见文献[2])。

下面将应用该系统对实验和理论都很成熟的普通简支梁进行全过程仿真分析,从而验证该系统计算的可靠性及图形显示的准确性,以便对工程应用的推广使用提供依据。

2 有限元可视化分析结果正确性验证

为了真实模拟梁的实际受力情况,在给予数据时须做一些特别处理:将集中荷载和支座附近处的几个混凝土单元的弹性模量处理为多倍于周围单元(须根据网格划分情况反复演算决定),以免由于应力集中过大(因为实际加载面有一定的面积)而提前破坏;对支座处钢筋单元的锚固情况处理为粘结强度非常大的粘结单元,以免提前发生锚固破坏。

2.1 几个关键的有限元计算结果和实验结果对比

算例:图 2 所示为一受集中荷载的简支梁,混凝土 $f_c = 30.5 \text{ MPa}$, $f_t = 3.0 \text{ MPa}$, $E_c = 19 \text{ GPa}$,钢筋 $A_s = 402 \text{ mm}^2$, $E_s = 200 \text{ GPa}$, $f_y = 351.1 \text{ MPa}$ 。配置垂直双肢箍筋 $\phi 8 @ 75$,此梁发生适筋梁受弯破坏。表 1 为部分计算结果与实验值的比较,结果表明有限元计算

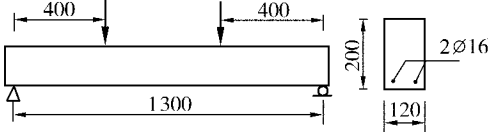


图 2 适筋简支梁示意图

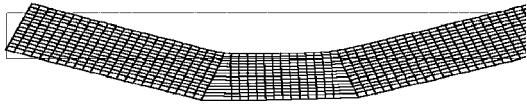
结果与实测值吻合较好。

表 1 实验结果与有限元计算结果对比

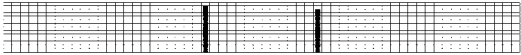
M ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	拉区边缘混凝土应力			跨中挠度		
	实验值	计算值	误差	实验值	计算值	误差
	/MPa	/MPa	/%	/mm	/mm	/%
1.6	1.431 6	1.298 3	9.3	0.194 3	0.1985	2.1
2.0	1.789 5	1.623 0	9.3	0.307 1	0.310 2	1.1
3.2	2.863 2	2.694 5	5.9	0.817 2	0.852 4	4.3
M ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	受拉钢筋应力			裂缝宽度		
	实验值	计算值	误差	实验值	计算值	误差
	/MPa	/MPa	/%	/mm	/mm	/%
10.0	164.9	174.7	5.9	0.11	0.12	9.1
14.0	237.4	248.1	4.5	0.18	0.21	16.6
18.0	307.6	328.3	6.7	0.25	0.22	12.0
开裂弯矩($\text{kN}\cdot\text{m}$)		屈服弯矩($\text{kN}\cdot\text{m}$)		破坏弯矩($\text{kN}\cdot\text{m}$)		
实验值	计算值	实验值	计算值	实验值	计算值	
3.3	3.2	21.5	22.0	22.6	23.2	

2.2 3 种正截面破坏形式的有限元仿真结果

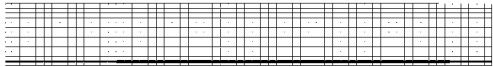
a. 少筋梁破坏.此梁除受拉筋为 $1\phi 6$ 外,其余同算例.加载至 6.5 kN 时突然在荷载位置下出现两条接近贯通的缝,钢筋立即屈服,如图 3 所示。



(a) 少筋梁破坏时的变形(突然拉断)



(b) 贯通裂缝突然出现

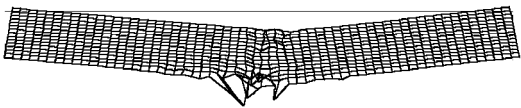


(c) 受拉筋突然屈服

图 3 少筋梁有限元计算图形成果

b. 适筋梁破坏.梁同算例.加载至 55 kN 时受拉钢筋屈服,至 60 kN 时压区混凝土被压碎,压筋屈服,变形和屈服情况如图 4(a)(b)所示;图 4(c)反映了裂缝开展的过程;由于混凝土的塑性,极限状态前的正应力分布呈曲线,拉区混凝土对抗拉几乎不起作用,如图 4(d)所示;从图 4(e)可看出钢筋屈服后挠度剧增.这些结果与实验都是一致的.按现行混凝土规范方法^[3]计算其承载力为 $21 \text{ kN}\cdot\text{m}$,即荷载为 52.5 kN 时破坏,这是由于规范方法中采用了 4 个基本假定而使计算简化并偏于安全。

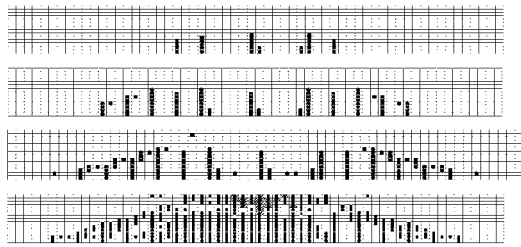
c. 超筋梁的破坏.该梁 $b \times h = 200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,跨长 3 m ,集中荷载作用在离支座 800 mm 处.配置受拉筋 $8-25$ ($f_y = 351.1 \text{ MPa}$),分两排放置, $A_s = 3927 \text{ mm}^2$,压区布置 $2-8$ ($f_y' = 310 \text{ MPa}$),混凝土与算例相同.在加载至 380 kN 时压区混凝土突然压碎,压筋屈服而受拉筋未屈服.图 5 所示的变形、裂缝和钢筋屈服情况都能较好地反映真实情况。



(a) 适筋梁破坏时的变形 (拉区开裂、压区混凝土压碎)

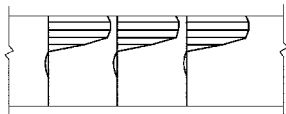


(b) 钢筋屈服情况 (拉筋先屈服, 压筋后屈服)

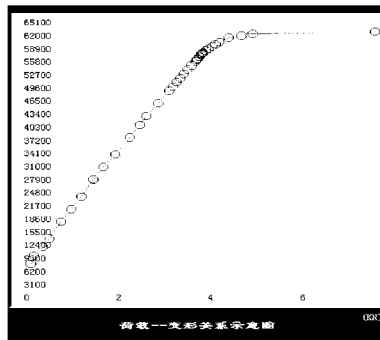


(c) 裂缝随加载而开展的过程

(黑点指开裂单元, 黑色阴影指压碎单元)



(d) 适筋梁跨中破坏时的正应力分布



(e) 荷载-挠度关系曲线 (延性破坏)

图 4 适筋梁有限元计算图形成果



图 5 超筋梁有限元计算图形成果

2.3 3 种斜截面破坏形式的有限元仿真结果

a. 斜拉破坏. 去除算例中的箍筋成为无腹筋梁, 且使 $\lambda = 600/200 = 3$. 当荷载加至 40.4 kN 时, 一条斜裂缝突然延伸至梁顶成为主斜裂缝, 梁被斜向拉断. 图 6(a)(b) 所示的变形和裂缝与实验非常吻合.

b. 剪压破坏. 截面同算例, 箍筋配置 $\phi 4 @ 125$, 受拉筋配置 2 $\phi 20$ (可保证首先发生斜截面破坏). 破坏前一条主斜裂缝突然延伸, 箍筋屈服, 55.3 kN 时剪压区混凝土突然压碎. 图 7 基本反映了真实情况.

c. 斜压破坏. 截面同算例, 未配腹筋, 集中荷载作用在离支座仅 175 mm 处, $\lambda = 175/200 < 1$. 破坏为类似斜向短柱被压毁, 破坏荷载很大, 破坏时跨中裂缝稀少, 挠度不明显, 加载至 71 kN 时才突然被压碎. 图 8 所示的短柱压碎特征非常明显.

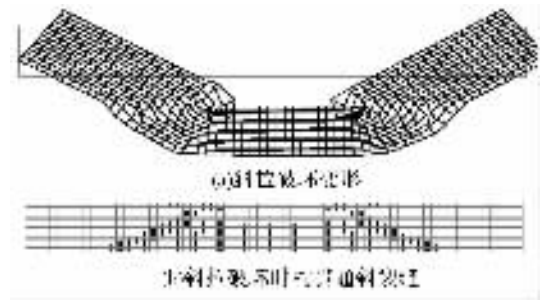


图 6 斜拉破坏有限元计算图形成果

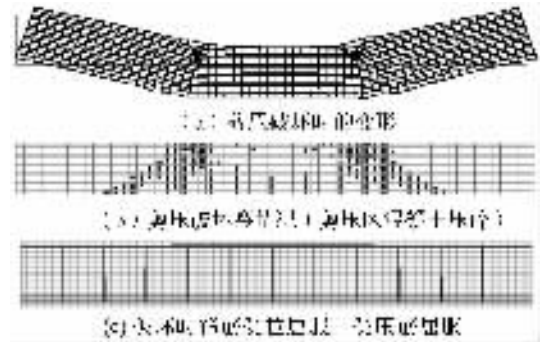


图 7 剪压破坏有限元计算图形成果

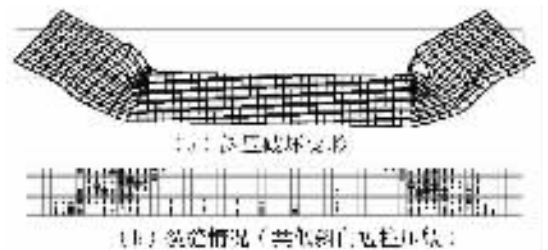


图 8 斜压破坏有限元计算图形成果

3 结 语

以上简支梁的 6 种典型破坏的有限元仿真结果与实验结果吻合较好, 进一步说明本文介绍的混凝土非线性有限元可视化系统的计算和图形成果是可靠的, 可用来对多种混凝土构件或结构进行详细的非线性分析.

参考文献:

- [1] 吴胜兴. 混凝土结构温度应力与温度裂缝控制研究 [D]. 南京: 河海大学, 1994.
- [2] 王瑶. 钢筋混凝土开孔梁非线性有限元全过程可视化仿真分析 [D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [3] GB 50010-2002 混凝土结构设计规范 [S].

(收稿日期 2003-12-11 编辑: 高建群)