
子结构技术在梁柱节点非线性分析中的应用*

李兆凡 石永久 陈宏 王元清

(清华大学土木工程系, 北京, 100084)

摘 要: 本文为了研究了钢结构梁柱节点局部构造对应力分布、塑性区分布及极限承载力的影响, 使用 ANSYS 对四种不同构造型式的钢框架梁柱节点进行了非线性有限元分析。本文采用了子结构技术来降低模型的总自由度数, 降低了计算成本。比较表明, 有限元计算结果与试验结果吻合较好。

关键词: 子结构 梁柱节点 有限元 非线性分析

Abstract: Substructuring is a procedure provided by ANSYS to condense a group of finite elements into one superelement represented as a matrix. In the nonlinear analysis of steel beam-column connections, fine mesh is needed near the toe of the weld access hole in order to get satisfactory results. To decrease the computing time, substructuring is introduced into the analysis. Four types of beam-column connections are analyzed and a superelement is used to represent the elastic part of each connection. Total DOF of the model is decreased and less CPU time is needed. Comparisons between FEA results and experimental data show that nonlinear FEA method is satisfactory in simulating the behavior of WBFW connections under low-cycle cyclic loading.

Keywords: substructuring, beam-column connection, ANSYS, nonlinear analysis

1 前言

在 1994 年 Northridge 地震和 1995 年日本 Kobe 地震中, 很多钢结构梁柱节点出现脆性破坏, 从而使通过梁上出现塑性较耗能的设计原则不能实现。在此之后, 钢结构梁柱节点的抗震性能成为国内外结构工程领域的研究热点之一。对梁柱节点性能研究的主要方法以试验研究和有限元分析最为常用。研究表明, 有限元模拟可以比较准确地反应节点在荷载作用下的位移、应力分布和塑性发展状况, 而且与试验研究相比成本很低, 因此得到了广泛应用。目前对钢结构梁柱节点性能的研究一般采用试验研究与有限元分析结合的方法。其中 ANSYS 就是有限元分析常用的软件之一。

梁柱节点梁翼缘与柱子的对接焊缝附近和焊接孔末端往往存在较大的应力集中, 试验中节点破坏往往从这里开始发生。另外高强螺栓以及剪切板与梁腹板之间的接触面也是节点破坏的关键部位。为了对这些部位的应力分布有较好的了解, 必须对他们进行较细的网格划分, 这样会大大增加整个问题的自由度数。为了节省微机计算时间, 本文采用了 ANSYS 的子结构分析技术, 将加载中始终保持弹性的部分建成一个子结构, 在施加多步往复荷载的计算中可以节省计算量, 降低运算成本。

2 有限元分析过程

2.1 材料模型

* 国家自然科学基金资助项目 (编号: 59878026)

使用子结构的部分采用线弹性材料模型,其余部分采用弹塑性材料模型,材料参数根据材料试验结果确定。本文 ANSYS 计算采用的材料应力 - 应变关系参见图 1。其中弹塑性材料定义为各向同性,弹性模量为 $1.904 \times 10^5 \text{MPa}$,泊松比为 0.29,采用 von Mises 屈服准则和多线性随动强化模型。

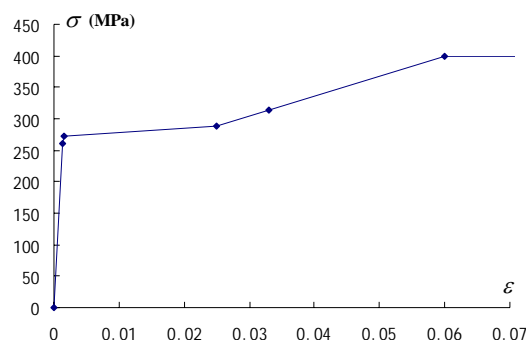


图 1 ANSYS 分析采用的弹塑性材料模型

2.2 几何模型

按照试验节点的几何尺寸建立有限元模型,梁和柱采用 SOLID45 单元建模,高强螺栓采用 PRETS179 单元模拟预拉力,接触面采用 CONTA174 和 TARGE170 单元建模。节点中凡是焊接的部位,在 ANSYS 模型中都粘结在一起,这样划分网格后在交界处的节点自动位移协调。剪切板和梁腹板之间建立起一对接触面,以模拟它们之间的滑移情况。

图 2 是一个节点进行网格划分之后的图形。其中红色部分采用线弹性材料,将被作为子结构建成一个超单元;绿色部分采用弹塑性材料。图 3 显示了在剪切板和焊接孔附近的细节,由于在此处进行了局部细化,这里的单元尺寸比其它区域小的多。

在 ANSYS 中建模时首先按照图 2 的实体进行几何建模和网格划分,然后定义主自由度。主自由度包括柱子两端被约束的自由度以及子结构与周围的单元共享的自由度。求解时首先设定求解类型为 SUBSTR,只选择子结构部分的单元进行求解,进行子结构刚度矩阵的生成。在计算节点在各种荷载下的反应时,把子结构部分的单元清除,使用 MATRIX50 单元类型定义一个超单元代替子结构部分。使用已生成的超单元刚度矩阵进行整个结构的计算。

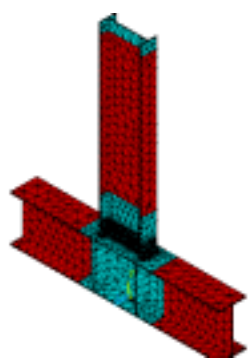


图 2 节点有限元模型

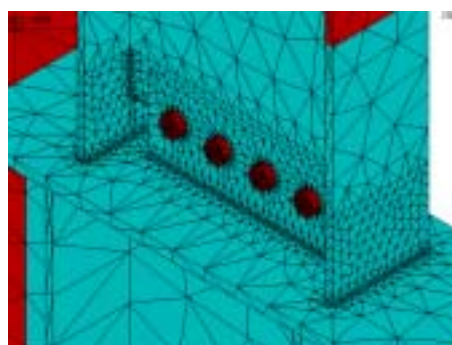


图 3 节点模型细部

2.3 荷载施加

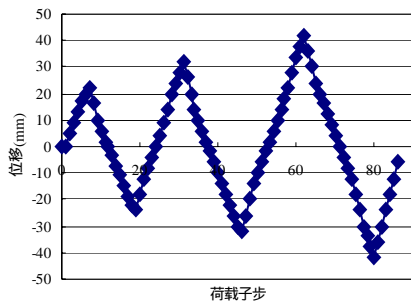


图 4 梁端施加的往复荷载

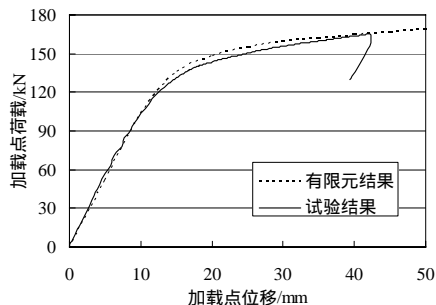


图 5 节点荷载位移曲线

有限元模型的约束条件设置与试验完全相同,在图 2 中,柱子的两端相当于试验中固定的位置,因此将两个面上节点的所有自由度都限制为零,即整个面固支。第一荷载步首先施加高强螺栓的预拉力,模拟试件加工后预拉力施加完毕的应力分布;第二荷载步按照试验中的加载序列,在梁端施加两种荷载,第一种为单向的水平位移 75mm,第二种为水平循环荷载,其各级位移大小如图 4 所示,其中横轴为荷载子步,纵轴为梁端加载点施加的水平位移的大小。

3 有限元计算结果

3.1 荷载位移曲线

在加载点施加单向 75mm 水平位移作用,节点的荷载位移曲线参见图 5。与试验值比较可以看到,ANSYS 计算结果与试验值很接近。尤其在弹性阶段,ANSYS 计算出的曲线和试验曲线基本重合在一起,这显示了 ANSYS 的模拟能力。在进入塑性阶段之后,由于试验中节点已经出现焊缝的开裂,在 ANSYS 模拟中没有考虑这一点,因此试验结果的承载力与 ANSYS 计算值相比偏低。

3.2 滞回曲线

图 6 是一个节点在循环荷载作用下的节点滞回曲线图,其中蓝色虚线为 ANSYS 使用子结构的计算结果,红色虚线为 ANSYS 不使用子结构的分析结果,黑色实线为对应节点的试验结果。可以看到 ANSYS 使用子结构与不使用子结构之间差别很小,这证明了 ANSYS 子结构技术的有效性。对比试验结果和有限元结果可以发现,使用在循环荷载施加的初期两者很接近,随着循环荷载的施加,有限元计算的节点承载力高于试验结果。这种差异主要是在试验中节点焊缝出现裂缝之后,由于在 ANSYS 计算中只考虑塑性发展,不考虑焊缝或者钢材的断裂,因此其计算的承载力比试验值高很多。

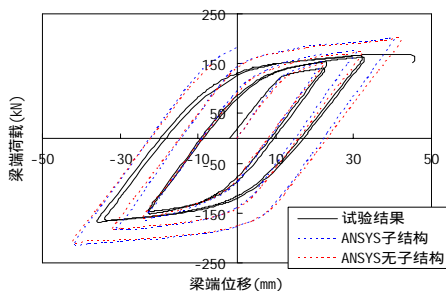


图 6 节点的荷载位移曲线

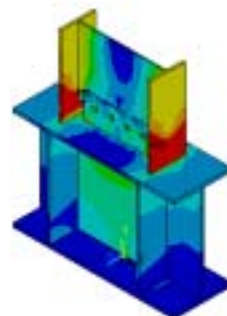


图 7 焊接孔附近的 Mises 应力分布

3.3 剪切板接触状态

图 8 显示了剪切板的接触状态，其中图 8a 为仅施加高强螺栓的预拉力的状态，可以看到在螺栓孔的周围分布着比较均匀的接触区域，其直径大约是螺栓孔直径的三倍。图 8b 为往复荷载施加完毕之后的状态，可以看到接触区域明显减小，尤其在两侧的螺栓孔周围，已经不存在紧密接触的区域。

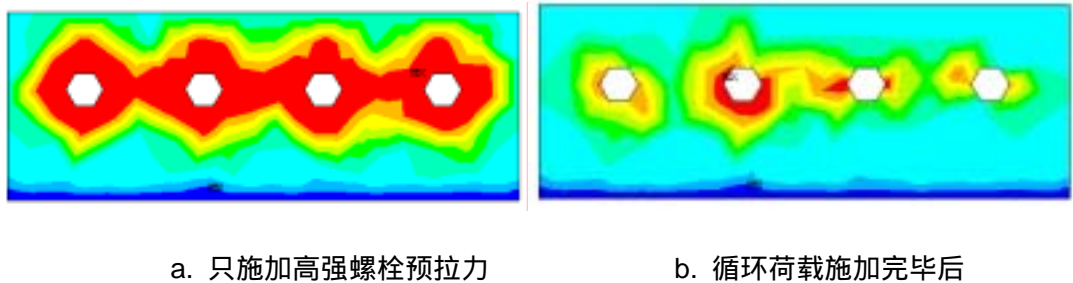


图 8 剪切板的接触状态

4 结论

应用 ANSYS 子结构技术可以方便地模拟钢结构梁柱节点在荷载下的反应，对节点的荷载 - 位移曲线和内力分布状况的模拟比较符合实际情况。

表 1 ANSYS 运行时间对比

	CPU 时间（秒）	相对时间
使用子结构	22313	86.9%
不使用子结构	25666	100%

另外，由于子结构技术减少了节点整体自由度，因此可以降低计算时间。表 1 是一个节点模型在相同的网格划分精度下，使用子结构和不使用子结构的 CPU 运行时间对比。可以看到，子结构技术降低 CPU 运行时间 13.1%。对于结构中含有重复的部件的分析问题，把重复的部件建成子结构，可以更大幅度地降低运算时间。

参考文献

[1] 石永久，李兆凡，陈宏，王元清，高层钢框架新型梁柱节点抗震性能试验研究，建筑结构学报，2002，Vol. 23，No. 3.

[2] 陈宏，石永久，王元清，赵大伟. 钢框架梁柱节点受力性能的非线性分析，工业建筑，2001 年第 5 期，pp. 67-69

[3] Swanson Analysis Systems, Advanced Analysis Techniques Guide, SAS Inc. USA, 1999

[4] 李兆凡. 钢结构梁柱节点抗震性能研究，清华大学工学硕士学位论文，2002