

文章编号： 1000-5013(2010)02-0210-05

防屈曲支撑节点板平面外稳定承载力数值分析

张继承¹, 刘飞², 江韬², 彭兴黔³

(1. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023;
2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要：设计 8 种不同种类节点板的模型,考虑几何非线性和材料非线性,对模型的偏心加载平面外稳定承载力进行有限元分析,研究不同构造形式对于节点连接部位承载能力的影响因素.研究结果表明,影响节点平面外刚度和承载能力的因素中,螺栓的布置是最重要的关键因素之一.螺栓布置要尽可能使节点板的塑性铰线沿着面内最长的路径扩展开,才能充分发挥节点板的承载能力.此外,节点板平面尺寸宜设计小些,尺寸大的板反而会减小面外承载力;节点板的加劲肋会影响节点板的应力分布和塑性扩散.

关键词：防屈曲支撑;数值模拟;平面外刚度;非线性有限元

中图分类号： TU 391 **文献标识码：** A

传统的带支撑框架有中心支撑框架和偏心支撑框架,中震和强震时,支撑会受压屈曲和受拉屈服,支撑的屈曲不利于能量耗散.屈曲约束支撑框架体系(BRBF)是新近出现并逐渐得到应用的一种抗震框架体系,在受拉和受压时都可屈服而不屈曲,克服了传统支撑体系的特点,在国内外得到广泛的研究^[1-4].与抗弯钢框架和普通支撑框架相比,BRBF有以下2个优点^[1].(1)与抗弯框架相比,小震时BRBF线弹性刚度高,可以很容易地满足规范的变形要求.(2)由于可以受拉、受压屈服,BRBF消除了传统中心支撑框架的支撑屈曲问题,在强震时有更强和更稳定的能量耗散能力.本文主要研究屈曲支撑和框架连接部位节点板的平面外受力性能,为实际工程设计和应用提供参考.

1 有限元分析模型的建立

1.1 分析模型的结构方案

根据防屈曲支撑已有的研究成果和工程经验,设计8种节点板的分析模型.在设计中,充分考虑了节点板形式、支撑角度、连接板长度、加劲肋设置、螺栓分布位置等因素的影响.表1为8种模型的主要参数,图1为设计模型的示意图.表1中: θ 为角度; e 为偏心距; d_s, d_N, d 分别为支撑板厚、节点板后和

表 1 分析模型的主要参数

Tab. 1 Main parameters of analysis model

模型	$A_s/\text{mm} \times \text{mm}$	d_s/mm	$A_N/\text{mm} \times \text{mm}$	d_N/mm	d/mm	螺栓直径	$\theta/^\circ$	e/mm
1	180 ×120	9	254 ×254	9	8	M24	45	10
2	180 ×120	9	282 ×282	9	8	M24	45	10
3	180 ×120	9	282 ×282	9	8	M24	45	10
4	120 ×120	9	204 ×204	9	6	M24	45	10
5	120 ×120	9	204 ×204	9	6	M24	45	10
6	120 ×120	9	204 ×204	9	6	M24	45	10
7	160 ×120	9	290 ×204	9	4	M20	55	8
8	160 ×120	9	290 ×204	9	4	M20	55	8

收稿日期： 2009-03-27
通信作者： 张继承(1976-)男,讲师,主要从事结构工程的研究. E-mail :zhangjc1976@hotmail.com.
基金项目： 湖北省自然科学基金资助项目(2008CDZ082)

连接板厚; A_s 为支撑板截面, A_N 为节点板截面. 图 1 中: 模型 1, 2 是增大节点板的尺寸; 模型 2, 3 是在节点板边缘增设加劲肋板; 模型 4~6 是不同连接螺栓的排列形式; 模型 7, 8 是不同连接钢板的长度.

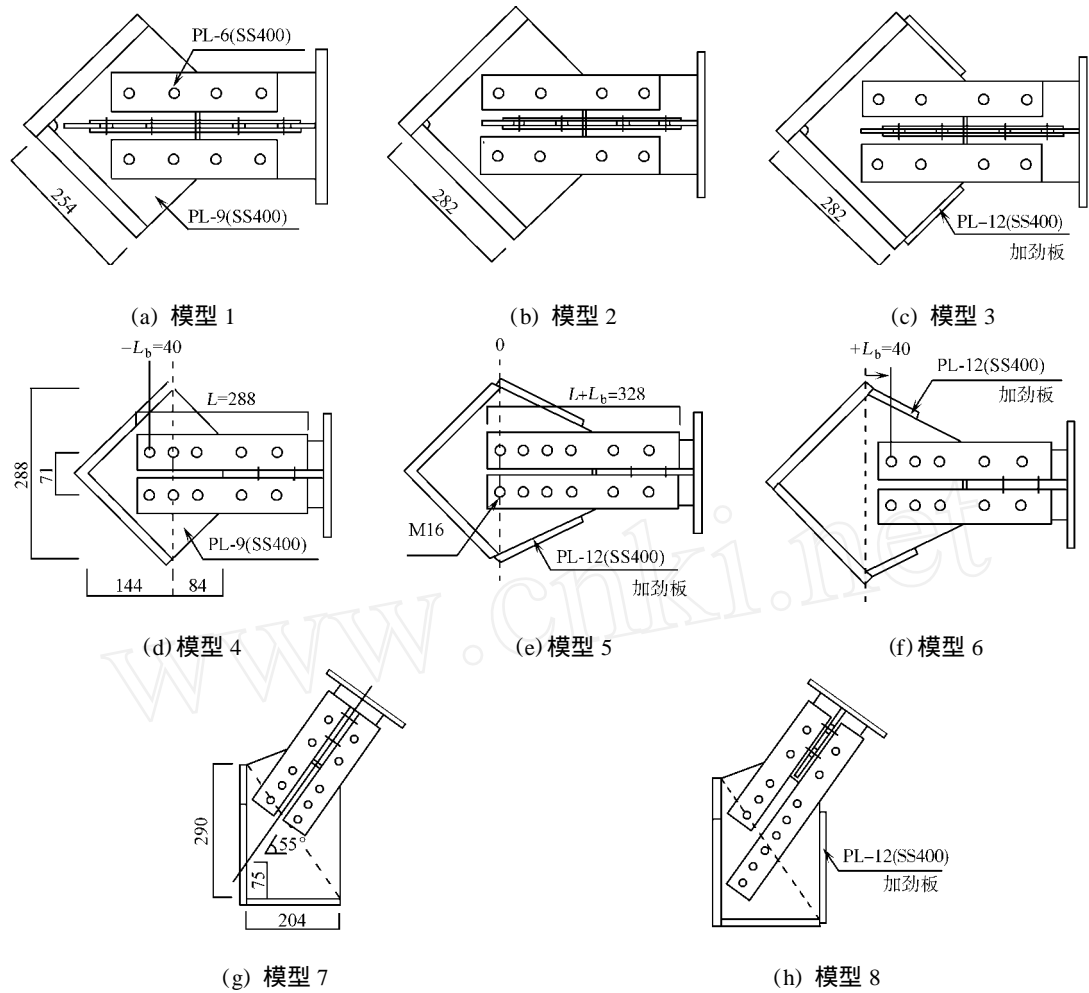


图 1 结构分析模型示意图(单位: mm)

Fig. 1 Schematic diagram of structural analysis models (unit: mm)

1.2 定义材料特性

节点板钢材采用 Q235, 通常可认为钢材是理想的弹塑性材料, 故可采用 Von-Mises 屈服准则和随动强化准则. 常用的材料本构模型有双线性和多线性模型. 多线性模型通过多段直线来模拟弹塑性材料的本构曲线, 即认为材料在屈服前按照弹性模量变化, 在屈服以后, 分别以不同的、小于弹性模量的另一个模量变化. 采用三线性随动强化模型, 其屈服强度 $f_y = 235 \text{ MPa}$, 极限强度 $f_u = 240 \text{ MPa}$, 切线模型 $E_T = 0.02 E_s$.

1.3 单元的定义和选择

研究防屈曲支撑节点板连接部位的力学性能, 需要考虑板件在平面外非线性屈曲时的几何非线性(大变形)和材料非线性(弹塑性). 在 ANSYS 上进行数值分析时, 选用 4 节点有限应变, 每个节点具有 6 个自由度的壳单元 SHELL 181^[5]. 建模计算时, 为方便施加边界约束条件, 加入无限刚性梁. 节点板部位在承受偏心轴力作用时(平面外), 力学简化分析模型如图 2 所示.

2 偏心加载计算结果

模型全部采用轴向加载的方式, 并考虑平面外的偏心距离. 对设计的 8 种模型进行偏心加载的非线性有限元分析, 计算得到节点板部位的破坏模式和极限承载能力, 如表 2 所

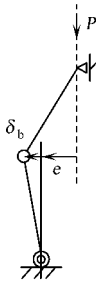


图 2 力学简化分析模型

Fig. 2 Simplified mechanical analysis model

示.表 2 中: F 为轴力, M 为面外弯矩.极限承载力包括轴力和面外弯矩两个梁,弯矩值大小等于偏心轴力对节点板中面的力矩.需要说明的是,由于是考虑大位移的几何非线性分析,所以在加载过程中,偏心距离也是根据结构变形后的位置及时修正的.

表 2 模型的极限承载能力
Tab.2 Ultimate bearing capacity of models

模型	1	2	3	4	5	6	7	8
F/kN	235.8	114.1	293.9	124.2	282.7	179.9	86.3	240.8
$M/\text{kN}\cdot\text{m}$	4.39	2.93	6.16	2.65	5.23	3.34	2.96	4.05

3 结果分析

3.1 模型 1~模型 3

模型 1~模型 3 是同一种类型,其区别是模型 2 的节点板尺寸比模型 1 大,而模型 3 是在模型 2 的基础上增加了加劲板件.模型的应力分布云图,如图 3 所示.图 3(a)为模型 1 在最后分析子步时的位移云图.从图 3(a)中可以看出,模型的节点板在偏心荷载作用下出现了较大的平面外变形,结构的最大位移出现在十字支撑与盖板的连接端部.

从表 2 中可以看到,模型 2 和模型 1 相比,承载力反而降低.所以,对于主要承载平面外作用的节点板来说,平面尺寸应在设计范围内选用较小者.模型 3 与模型 2 相比,承载能力有了很大的提高,是原来的 2 倍以上,说明设置加劲肋的效果显著.节点板厚度薄,其平面外抗弯刚度较小,而加劲肋板件大大增加了节点板整体的平面外刚度.

图 3(b)为模型 3 在最后子步的应力分布云图.从图 3(b)可以看到,加劲肋板参与节点板整体协同受力,其局部的应力水平也较高,达到了 250 MPa,大部分区域处于 160 MPa 以内.

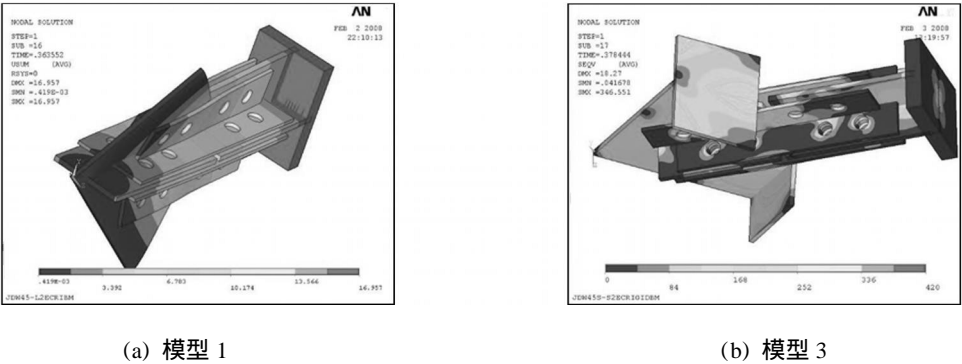


图 3 模型的应力云图
Fig.3 Stress nephogram of models

图 4 为模型的节点板应力分布.从图 4(a)可以看到,板件的塑性发展是沿着螺栓群边缘的对角线向两边扩散的,有比较清晰的路径.

3.2 模型 4~模型 6

模型 4~模型 6 用于研究连接段长度,以及螺栓群分布位置(与弯折线的相对位置)对节点承载能力的影响.由表 2 中看到,模型 5 和模型 4 相比,轴向承载力降低.两者构造区别除了模型 5 比模型 4 的连接段长外,还包括螺栓位置的设置.模型 5 的螺栓群整体位于节点板对角线的右边(边缘一排螺栓正好位于对角线位置),模型 4 的螺栓群把节点板对角线包括在范围内.

显然,这种构造更利于传递面外弯矩.模型 6 的构造螺栓群完全在节点板对角线之外,定性判断应该对受力更为不利.数值分析结果证实了这一点.

模型 4,6 的承载能力整体呈现递减趋势,虽然两者在节点板处设置了加劲板件,但其对于承载能力的影响显然不如螺栓群设置位置重要.

从图 4(b)~(c)可看到,模型的应力分布规律是相似的,但模型 4 由于螺栓群的合理布置,使得塑性发展区域和应力水平都较小.从图 4(c)可看出,节点板的塑性发展是沿着节点板的对角线开始,逐

步向两侧区域扩展开来的;从图 4(d)可看出,模型 6 节点板的应力水平局部很高,主要集中在螺栓群位置,但其他区域应力很低,即外荷载没有有效地传递并均匀分布在节点板上.此种构造是不合理的.

如果把从边缘螺栓开始到十字支撑的一段看作悬臂构件的话,节点板相当于这根构件的弹性支承边界,且其对于悬臂构件的约束要完全靠板的平面外刚度来承担,在荷载作用下板的应力必然很大.

3.3 模型 7 和模型 8

模型 7,8 用于研究在支撑与节点板连接为非对称角度(55°)情况下,连接段形式的变化及加劲肋设置对于连接承载力的影响.从表 2 可看到,模型 8 的极限轴力和抗弯能力明显高于模型 7,抗弯能力的差异原理同上.螺栓在布置时候要尽量包围住节点板的弯折线,才能协助板件一起抵抗弯矩.

由图 4(e),(f)可以看出,板件的应力分布规律一致,都是沿着长对角线方向.模型 8 因为一边连接段长度长一些,塑性扩散区域加大,板件整体的应力水平要小,这样可以避免局部的全截面塑性而完成丧失承载能力.

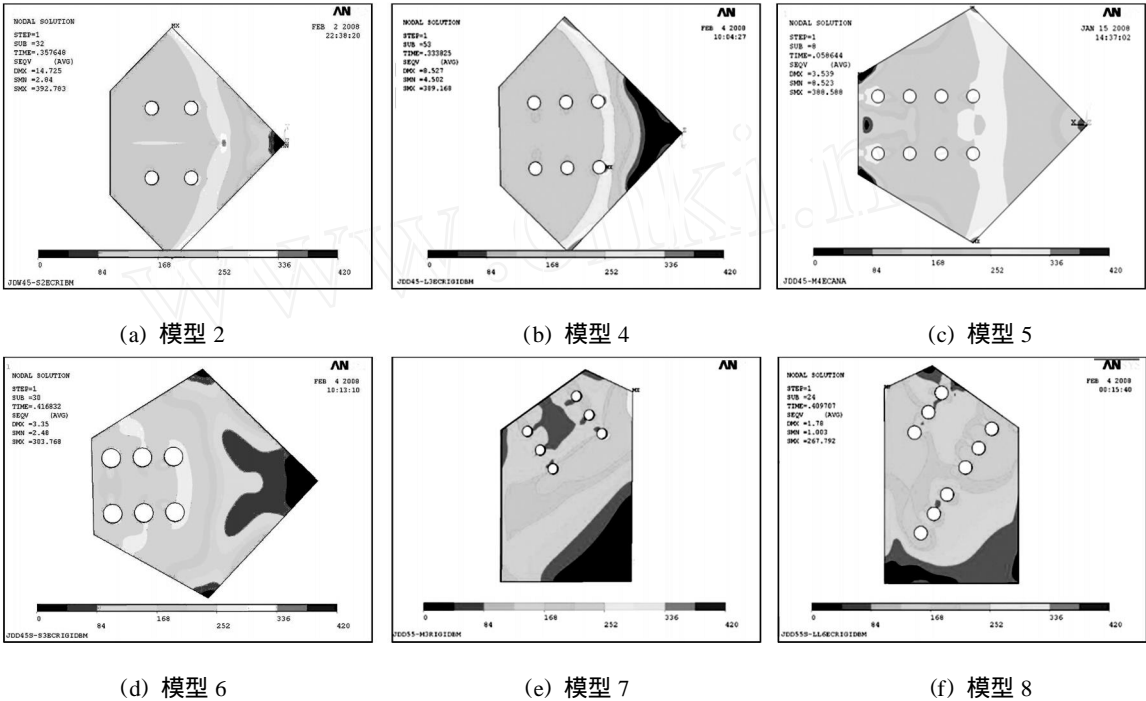


图 4 模型节点板的应力分布

Fig. 4 Stress distribution of model joint plate

模型整体结构的应力分布,如图 5 所示.从图 5 可以看出,由于连接件长度的增加,使得连接件的应力扩散规律发生变化,模型 7 塑性向节点板侧连接件发展,而模型 8 塑性的发展更为均衡.这是由于节点板一侧的抗剪能力有所增加.

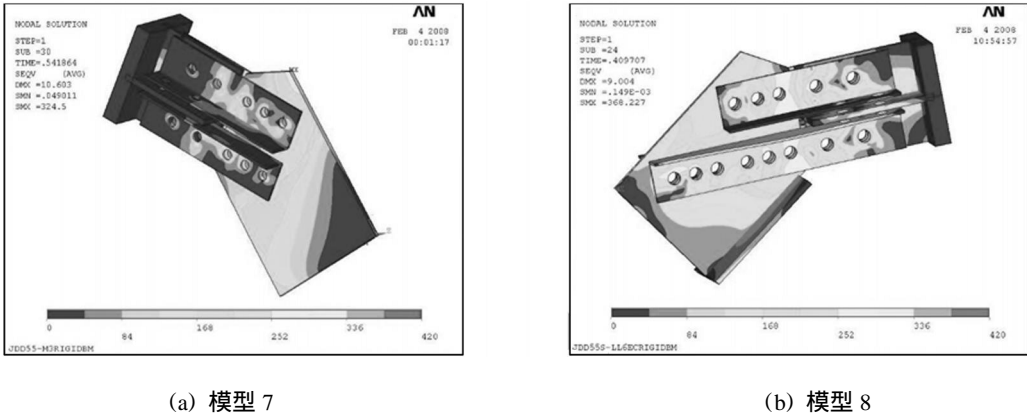


图 5 模型整体的应力分布

Fig. 5 Stress distribution of whole model

3 结论

设计 8 种不同构造形式的节点连接模型,充分考虑几何和材料双重非线性,对节点板平面外力学性能进行有限元数值模拟分析,得到以下 4 点的结论.

(1) 影响节点平面外刚度和承载能力的因素中,螺栓的布置是最重要的关键因素之一. 螺栓布置要尽可能使节点板的塑性铰线沿着面内最长的路径扩展开,充分发挥节点板的承载能力.

(2) 在满足螺栓布置和受力要求下,需要将节点板平面尺寸设计小些,因为尺寸大的节点板反而会减小面外承载力.

(3) 节点板的加劲肋对提高连接部位整体的承载能力有明显贡献,能影响节点板的应力分布和塑性扩散.

(4) 在十字支撑与节点板非对称连接时(非 45° 夹角),通过灵活布置非对称的连接段长度,不仅能够增强节点板的抗弯能力,还能使其塑性发展更为均匀.

参考文献:

- [1] 汪家铭,中岛正爱. 屈曲约束支撑体系的应用和研究进展() [J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7(1): 1-12.
- [2] 汪家铭,中岛正爱. 屈曲约束支撑体系的应用和研究进展() [J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7(2): 1-11.
- [3] 胡宝琳,李国强,孙飞飞. 屈曲约束支撑体系的研究现状及其国内外应用[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(4): 9-13.
- [4] 罗开海,程绍革,白雪霜,等. 屈曲约束耗能支撑力学性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(2): 23-27.
- [5] 易日. 使用 Ansys 6.1 进行结构力学分析[M]. 北京:北京大学出版社, 2002.

Numerical Analysis on Out-Plane Stability Bearing Capacity of Buckling Restrained Brace Joint Plate

ZHANG Ji-cheng¹, LIU Fei²,
JIANG Tao², PENG Xing-qian³

(1. School of Urban Construction, Yangtze University, Hubei 434023, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Eight different types of joint plate models are designed. Considering both geometry nonlinearity and material nonlinearity, the out-plane stability bearing capacity of models loaded with eccentricity are analyzed by finite element method, to study the effect of different construction forms on the bearing capacity of joint plates. The research results show that the bolt distribution is one of the crucial factors which affect the out-plane stiffness and load bearing capacity of joint. Bolts should be distributed to make the plastic hinge line extend along the longest path in plane, so the load bearing capacity of joint plates could be exerted fully. Moreover, the plane size of joint plates would be small, since the load bearing capacity of joint plates descends with increasing plate size. The stiffener of joint plates influences the stress distribution and plastic spread of joint plates.

Keywords: buckling restrained brace; numerical simulation; out-plane stiffness; nonlinear finite element method

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)