

节点板在支撑轴压力作用下的稳定分析

张文元,陈世玺,牟伟,张耀春

(哈尔滨工业大学 土木工程学院,150090 哈尔滨,hitzwy@163.com)

摘要:为研究支撑框架结构中梁柱连接的支撑节点板受压稳定性和影响因素,并给出节点板稳定验算的合理方法,对不同规格的节点板进行特征值分析和全过程双重非线性分析.通过按特征值分析得到的节点板弹性稳定承载力,反推出节点板板柱模型的计算长度系数,得到关键参数对板柱计算长度系数的影响规律,给出简单实用的计算长度系数双线性表达式.通过支撑板式连接节点的非线性分析,得到不同参数下节点板稳定承载力的精确值,在分析其变化规律的同时,验证了按所提计算长度系数表达式确定节点板稳定承载力的合理性.

关键词:支撑框架结构;节点板;稳定承载力;计算长度系数;非线性分析

中图分类号: TU393.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)02-0001-06

Gusset plate buckling under compression caused by bracing members

ZHANG Wen-yuan, CHEN Shi-xi, MOU Wei, ZHANG Yao-chun

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, hitzwy@163.com)

Abstract: To explore the gusset plate buckling and its influence factors under compression caused by bracing members in braced frames, and to obtain an appropriate buckling design method, the buckling behaviors of gusset plates with varied parameters are computed by eigenvalue analysis and nonlinear analysis. With the capacity eigenvalue of elastic buckling, the effective length factor of assumed plate-column of gusset plate is derived from Euler's formula. The influences of some key parameters on the effective length factor are studied, and a simplified bilinear formula used to calculate the effective length factor is proposed. The exact solutions of buckling capacities taking into account of the material and geometrical nonlinearities are attained by nonlinear analysis program, the buckling influence factors of the gusset plates are evaluated, and the rationality of the designed buckling capacities with the proposed effective length factors is verified.

Key words: braced frame; gusset plate; buckling capacity; effective length factor; nonlinear analysis

支撑与梁柱节点采用的节点板连接形式已较多应用于工业与民用建筑.我国现行钢结构规范^[1]中仅规定了钢屋架板式节点连接的计算方法,它不能直接应用于框架支撑板式节点的设计,更无法考虑结构的抗震性能.支撑端部尽可能深入节点板,可减小节点板有效受压长度,提高节点板稳定承载力^[2].但大量滞回性能研究表明,当

支撑端部靠近节点板与梁柱翼缘的连接边时,支撑在大震下的面外失稳将带动节点板产生较大塑性变形和应力集中^[3-4],会造成节点板提前破坏,因此在支撑或连接件端部应满足线性净距要求^[5-6]或至少满足椭圆净距要求^[7],如图1(a)(b)所示.节点板受压区尺寸直接影响其稳定承载力、支撑系统的刚度和抗震性能.

1952年Whitmore^[8]提出有效宽度 b_e 概念(支撑轴力在节点板内按 30° 角扩散),如图1(c)所示,可以很好地计算节点板的抗拉承载力,但抗压承载力的计算存在较大不安全因素.1984年Thornton^[9]提出了计算节点板稳定承载力的受压板柱模型,取受压板柱的长度为图1(c)所示的 L_1 、 L_2 和 L_3 中的

收稿日期: 2011-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178145);《钢结构设计规范》国家标准管理组科研专项基金资助项目(GB500172010-20).

作者简介: 张文元(1972—),男,博士,副教授;
张耀春(1937—),男,教授,博士生导师.

最大值,并取板柱的计算长度系数 μ 为0.65. Gross^[10]则建议 μ 值取0.5, Yam和 Cheng^[11]的试验研究也表明,即使 μ 值取0.65也是偏于保守的,试验得到的节点板稳定承载力与 Thornton方法计算值的比值在1.51~1.87.但如果将支撑面外失稳时的节点板端部视为一个有侧移结构, Brown^[12]认为 μ 可保守地取1.2.由此, Astaneh-Asl^[3]给出了一个更简单的单位宽度的假想受压板柱模型,板柱长度为节点板直角顶点至 Whitmore有效截面之间的距离 L ,如图1(a)所示.而我国锅炉钢结

构规范也借鉴单位宽度受压板柱模型,规定节点板为两边支承时 $\mu = 0.5$,节点板为单边支承时 $\mu = 1.2$ ^[13].对于屈曲约束型支撑的节点板,为防止节点板的面外屈曲,不使用加劲肋时的 μ 介于1.5~2.0^[14],方能确保无屈曲支撑具有较好的滞回性能.可见,目前对于节点板受压性能、稳定验算方法和计算长度系数的取值等研究存在较大差异.本文通过计算节点板的弹性及弹塑性稳定承载力,确定节点板计算长度系数的合理取值,为其稳定验算与工程应用提供依据.

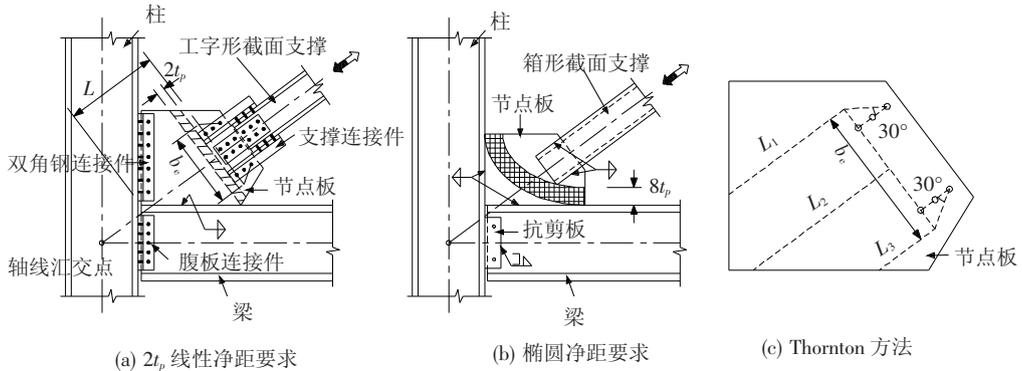


图1 支撑与梁柱的板式连接节点

1 节点板计算长度系数的确定

1.1 特征值分析模型

采用 ANSYS 程序 Shell181 壳单元对节点板进行特征值分析,钢材弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa. 分析模型见图2,节点板两直角边通过对接焊缝与梁柱连接,边界条件视为嵌固.支撑与框架之间通过节点板相连,在节点范围内平面外没有其他约束,如果把框架梁柱与节点板的连接边视为出平面的不动边,则支撑端部的面外位移应认为是不受约束的,类似于有侧移结构.在 Whitmore 有效宽度 b_e 上对节点板施加均布荷载 p ,以模拟支撑传来并在节点板内均匀扩散的轴压力.通过改变支撑轴线与柱夹角 β 、假想受压板柱长度 l 和 Whitmore 有效宽度 b_e 的比值 l/b_e 、受压板柱以几何长度确定的长细比 λ 等参数,评估它们对节点板计算长度系数和稳定承载力的影响规律.

按支撑轴线与柱夹角 β 的不同分为 G1、G2 和 G3 组,相应夹角分别为 45° 、 37.5° 和 30° ,大于 45° 的情况与此对称,不做计算.支撑截面高度固定为 70 mm.根据工程中的习惯做法,G1 组的 γ 角取 45° ,G2 和 G3 组的 γ 角取 30° .G1 组中 l/b_e 的范围为 $0.5 \sim 1.5$ ($l/b_e < 0.5$ 时已不满足强度要求,或支撑端部已接触到节点板的直角约束边; l/b_e 等于 1.5 时支撑端部净距已远远大于 2 倍节点板厚度,

超过常规设计取值). λ 分别取 70、80、90、100.根据 G1 组的计算结果和影响规律调整 G2 和 G3 组模型参数变化范围,把长细比 λ 均固定为 70,同时 G2 组中 l/b_e 的范围为 $0.5 \sim 1.7$ 、G3 组中 l/b_e 的范围为 $0.6 \sim 1.9$.

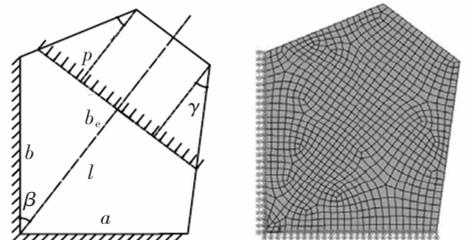


图2 节点板的尺寸及有限元分析模型

下文特征值分析模型编号的含义:S、E、N、H 分别表示长细比为 70、80、90、100,D 表示考虑尺寸效应的模型,S 前的数字表示 l/b_e 的比值,最后一位表示组别(G1、G2、G3).为考虑尺寸效应的影响,模型 0.5SD-1、0.5AD-1、0.5ND-1 和 0.5HD-1 的几何尺寸均在 0.5S-1、0.5A-1、0.5N-1、0.5H-1 基础上扩大一倍.

1.2 计算长度系数的确定方法

采用单位宽度受压板柱稳定验算模型.对节点板进行特征值屈曲分析,可以得到的稳定承载力 F_{cr} ,根据欧拉公式可以反推出节点板(即板

柱)的计算长度系数 μ 为

$$\mu = (\pi/l) \sqrt{EI/F_{cr}} \quad (1)$$

式中: I 为 Whitmore 有效宽度的受压板柱截面惯性矩, l 为受压板柱的最大长度, 见图 2(a).

1.3 节点板的失稳形式

图 3 给出了 1.5S-3 模型失稳后节点板平面外的变形云图, 可以看出节点板与支撑相连边的面外变形最大; 越靠近约束边, 面外变形越小. 在节点板的约束边与自由边之间出现双曲的板壳面外失稳模式, 图 3 中的虚线为节点板的面外变形示意图.

1.4 尺寸效应的影响

为使分析结果具有普适性, 分析中使用了无量纲化的参数, 但其前提是不受尺寸效应的影响.

因此为观察尺寸效应的影响程度, 专门把原有分析模型的各项几何尺寸均放大了 2 倍, 并对比计算结果, 如表 1 所示. 可见放大 2 倍后的节点板稳定承载力提高了 4 倍, 而计算长度系数 μ 没有发生任何改变, 说明计算长度系数不受尺寸效应的影响.

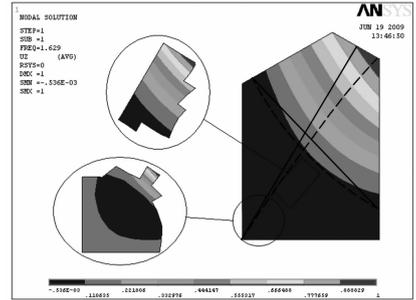


图 3 1.5S-3 模型面外失稳变形

表 1 尺寸效应的影响

模型编号	a/mm	b/mm	b_e/mm	l/mm	t/mm	λ	净距/ mm	F_{cr}/kN	μ
0.5S-1	126.8	126.8	150	75	3.71	70	-3.9 t	609.2	0.616
0.5SD-1	253.5	253.5	300	150	7.42	70	-3.9 t	2 437.5	0.616
0.5E-1	126.8	126.8	150	75	3.25	80	-4.5 t	409.2	0.615
0.5ED-1	253.5	253.5	300	150	6.50	80	-4.5 t	1 637.2	0.615
0.5N-1	126.8	126.8	150	75	2.89	90	-5.1 t	287.9	0.615
0.5ND-1	253.5	253.5	300	150	5.78	90	-5.1 t	1 151.9	0.614
0.5H-1	126.8	126.8	150	75	2.60	100	-5.6 t	210.1	0.614
0.5HD-1	253.5	253.5	300	150	5.20	100	-5.6 t	840.6	0.614

通过表 1 还可发现, 板柱的长细比变化时, 计算长度系数基本维持不变. 图 4 给出了夹角为 45° 时所有模型计算长度系数与长细比的关系, 可见长细比并不影响计算长度系数, 这与传统的稳定理论一致.

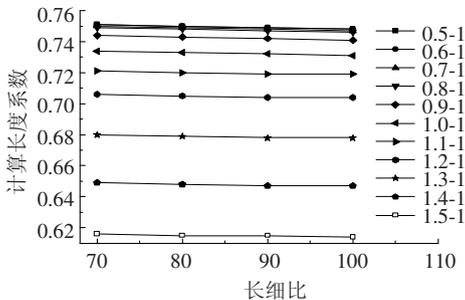


图 4 节点板计算长度系数与长细比的关系

1.5 l/b_e 的影响规律

图 5 给出了 G1 ~ G3 组节点板模型计算长度系数随 l/b_e 变化的关系曲线. 发现随着 l/b_e 的增大, 计算长度系数增加. 但是当 l/b_e 达到一定限值时 (G1 组为 1.4, G2 组为 1.6, G3 组为 1.8), 计算长度系数不再变化, 保持为一常数 (G1 组为 0.751, G2 组为 0.9, G3 组为 0.798). 表明: l/b_e 较小、受

压板柱在两约束边构成的直角三角形范围之内时, 支撑端部的净距为负, 约束边对板柱的影响较大, 如图 6(a) 所示, 稳定临界应力较高; 随着 l/b_e 的逐渐增大, 直角嵌固边对板柱的约束能力降低, 如图 6(b) 所示, 稳定临界应力降低, 计算长度系数则会相应增大; 但当 l/b_e 增大到一定程度后, 如图 6(c) 所示, 直角嵌固边对稳定应力的影响越来越小并趋于恒定, 计算长度系数也趋于恒定. 图 5 中虽然 l/b_e 较大时部分算例的支撑端部净距可能已经大于 $2t$ (t 为节点板厚度), 不具有实际意义, 但可用来说明计算长度系数的变化规律.

1.6 计算长度系数的取值

根据上述节点板计算长度系数的变化范围 (0.614 ~ 0.9), 说明把它取为定值是不合理的, 例如取 0.5 或 0.65 时节点板可能处于不安全状态, 而取 1.2 时又可能存在一定的保守或浪费. 提取具有实际意义的净距 $\leq 2t$ 的模型的计算结果, 绘制于图 7 中. 可见支撑与柱夹角为 45° 时, 直角边对节点板的约束能力最强, 计算长度系数是最小的; 而夹角为 37.5° 和 30° 时, 由于节点板存在较长的自由边, 导致直角边对节点板的约束能力

下降,计算长度系数有增大趋势.出于简化计算考虑,取各计算结果数据点的上包络线作为节点板稳定验算时计算长度系数的取值依据,如图7中实线所示的双折线,其表达式为

$$\begin{cases} \mu = 0.8l/b_e + 0.25, & 0.5 \leq l/b_e \leq 0.7125; \\ \mu = 0.82, & l/b_e > 0.7125. \end{cases} \quad (2)$$

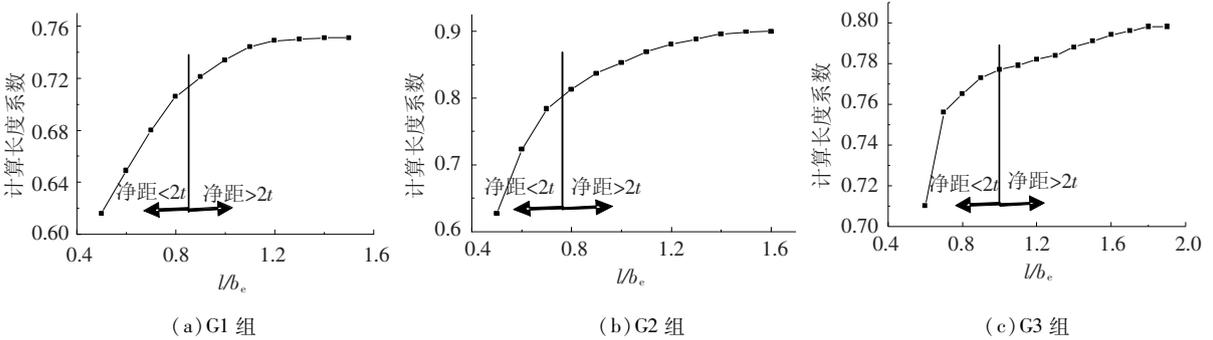


图5 节点板计算长度系数与 l/b_e 的关系曲线

形支撑框架结构的梁、柱、支撑截面和相应节点板,如图8所示.节点板规格见表2.支撑与梁柱轴线交于一点时,支撑与柱夹角为 39.8° ,但由于节点板尺寸变化的需要,支撑轴线与柱夹角会有所改变.节点板按满足支撑端部 $2t$ 净距的抗震要求设计.使用 ABAQUS 软件对支撑节点进行全过程非线性分析,计算时梁、柱和支撑构件的长度取到反弯点,在梁、柱及支撑的边界上设置刚性面,并在此施加铰接的边界条件.柱上下端可以面内转动,且柱上端还可以沿竖向平动;梁端整体坐标的3个方向均为铰接;不约束支撑端部局部坐标系下的 z' 和 x' 方向的自由度,保证其轴向可以平动,且可以发生面外侧移失稳.

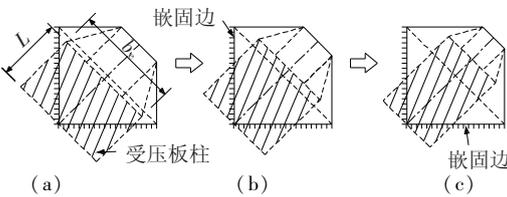


图6 受压板柱模型与约束边的关系

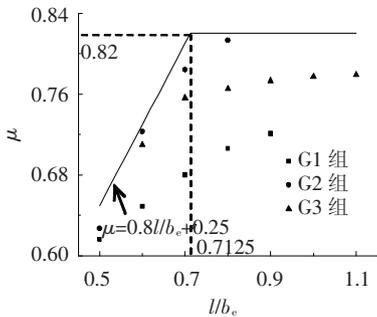


图7 计算长度系数计算结果及建议取值

根据节点板的几何关系,当支撑与柱轴线夹角为 45° 时, l/b_e 出现最小值并趋于 0.5(不考虑焊缝尺寸和预留间隙时,理想情况下最小值为 0.5),从式(2)可以看出此时计算长度系数 μ 的最小值为 0.65,与 Thornton 等学者的建议取值一致.随着 l/b_e 的增加,支撑端部逐渐远离直角约束边,板柱计算长度系数近似认为线性增加.而当 l/b_e 超过 0.7125 之后,计算长度系数的变化趋于平缓,故取恒定值 0.82.这种处理虽然对于支撑轴线与柱夹角较小的情况略显保守,却可大大简化设计,方便应用.而且这种有明确物理意义的计算长度系数取值方法比先前文献和规范的定值更具科学性.

2 全过程非线性分析对 μ 取值合理性的检验

2.1 全过程非线性分析模型

计算模型采用文献[15]所设计的6层人字

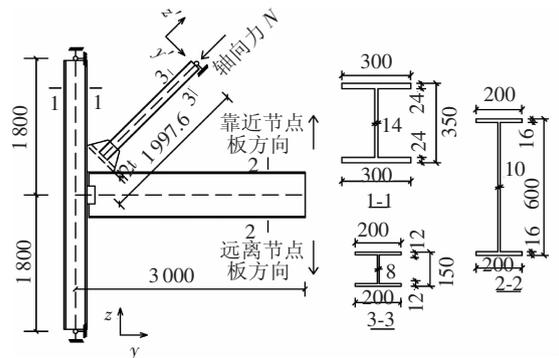


图8 支撑与梁柱板式连接节点的计算简图(mm)

梁、柱和抗剪切板采用 SC8R 壳单元,节点板和支撑采用常规的 S4R 壳单元.各构件均采用 Q345 钢,弹性模量为 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,钢材的应力-应变关系采用双线性强化弹塑性模型, $E_2 = 0.01E_1$.在建模时预先给节点板面外施加 $l/1000$ 的初始位移以模拟初始缺陷的影响.

2.2 节点板稳定承载力的确定

建立支撑的轴向压力与节点板平面外位移的关系曲线作为节点板平面外失稳的判断依据.

表 2 各节点板的承载力设计值结果比较

节点板规格	N_d/kN	l/b_e	N_s/kN	N_{Fem}/kN	N_d/N_{Fem}	N_s/N_{Fem}	节点板规格	N_d/kN	l/b_e	N_s/kN	N_{Fem}/kN	N_d/N_{Fem}	N_s/N_{Fem}
G150-150(10)	555.72	0.667	523.20	659.41	0.843	0.793	G450-450(12)	1 472.15	0.699	1 048.60	1 424.43	1.034	0.736
G150-150(12)	659.21	0.706	624.38	818.92	0.805	0.762	G450-450(14)	1 784.41	0.714	1 376.67	1 811.78	0.985	0.760
G150-150(14)	756.70	0.746	722.08	976.89	0.775	0.739	G150-350(10)	662.51	0.875	550.91	724.64	0.914	0.760
G250-250(10)	915.33	0.595	827.05	941.44	0.972	0.878	G150-350(10)	576.96	1.248	400.91	581.48	0.992	0.689
G250-250(12)	1 112.02	0.616	1 025.75	1 240.86	0.896	0.827	G150-450(10)	485.92	1.655	278.58	479.25	1.014	0.581
G250-250(14)	1 301.38	0.638	1 214.44	1 488.75	0.874	0.816	G250-150(10)	750.44	0.673	669.81	785.27	0.956	0.853
G350-350(6)	483.42	0.615	287.69	348.51	1.387	0.825	G250-350(10)	803.49	0.896	558.32	785.99	1.022	0.710
G350-350(8)	782.45	0.631	545.41	676.34	1.157	0.806	G250-450(10)	863.92	0.931	495.16	803.53	1.075	0.616
G350-350(10)	1 058.13	0.648	826.48	1 016.49	1.041	0.813	G350-150(10)	718.01	0.895	559.10	687.53	1.044	0.813
G350-350(12)	1 316.96	0.665	1 099.78	1 363.45	0.966	0.807	G350-250(10)	1 122.00	0.573	970.68	1055.16	1.063	0.920
G350-350(14)	1 564.48	0.683	1 358.00	1 686.95	0.927	0.805	G350-450(10)	944.07	0.852	541.29	849.13	1.112	0.637
G350-350(20)	2 259.33	0.738	2 074.16	2 443.26	0.925	0.849	G450-150(10)	602.31	1.238	399.09	508.51	1.184	0.785
G350-350(25)	2 793.20	0.787	2 621.81	3 236.55	0.863	0.810	G450-250(10)	1 049.81	0.710	697.33	882.13	1.190	0.791
G450-450(10)	1 141.51	0.684	726.76	986.08	1.158	0.737	G450-350(10)	1 356.75	0.550	1 088.86	1 170.63	1.159	0.930

注:节点板规格 G 后边第一个 3 位数为与梁相连的直角边长度,下一个 3 位数为与柱相连的直角边长度,括号内为节点板厚度,单位 mm.

通过对各模型的计算结果分析发现,当节点板约束线中点面外位移 $\delta = 1.0 \text{ mm}$ 时,荷载-位移曲线已进入趋于水平直线阶段,如图 9 所示,将此时对应的荷载作为节点板屈曲承载力 F_p . 若将 F_p 除以 Q345 钢材的抗力分项系数 1.111,则可得节点板稳定承载力设计值 N_{Fem} ,可以将此值与按本文建议的计算长度系数所算得的板柱稳定承载力进行对比,以验证所取计算长度系数的合理性.图 10(a)所示为计算模型节点板失稳时的应力云图,图 10(b)为节点板平面外失稳时的变形图,可以看出节点板发生了明显的面外侧移失稳变形.

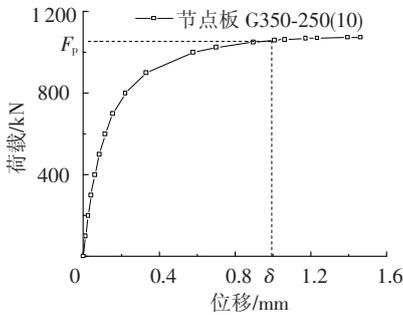


图 9 支撑轴力与面外位移的关系曲线

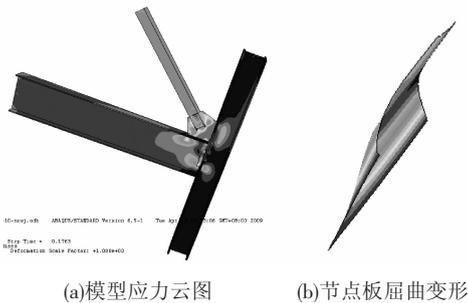


图 10 模型的失稳破坏

2.3 节点板稳定承载力的计算结果对比

表 2 给出了经全过程非线性得到的各算例稳定承载力设计值 N_{Fem} 、按锅炉钢结构规范计算长度系数取 0.5 时得到的稳定承载力设计值 N_d 和

按本文建议的计算长度系数得到的稳定承载力设计值 N_s . 可以发现对于两直角边长度对称的节点板,节点板尺寸比 (l/b_e) 的数值变化不大,且均小于 1. 平面尺寸相同时,稳定承载力 N_{Fem} 随节点板厚度的增加而增大,而如果节点板厚度相同时,稳定承载力 N_{Fem} 随平面尺寸的增加而增大,但较薄的节点板(如 $t = 10 \text{ mm}$ 时)除外,如图 11 中的实线所示. 这是由于对于较薄的节点板,虽然节点板尺寸增大使受压板柱的有效面积增大,但直角嵌固边对板柱的约束能力下降,从而造成节点板的稳定承载力略有下降. 这一效应从使用计算长度系数建议方法得到的承载力设计值 N_s 的结果中也能得到很好体现,如图 11 中的虚线所示. 由表 2 还可发现,对于两直角边长度不等的非对称节点板,随两直角边长度差距的增大, l/b_e 的数值可能出现较大的情况,如 G150-450(10) 等. 虽然这些算例在实际工程中出现的可能性不大,但对于验证本文建议的计算长度系数取值方法的合理性与适用性却有着重要价值. 从非线性分析得到的承载力 N_{Fem} 上看,若直角边长度差距越大,节点板自由边的长度就会越大,从而削弱了直角嵌固边对节点板的有效约束,造成节点板的稳定承载力迅速降低,因此实际设计中应尽量避免使用自由边长度较大的节点板. 这里的计算结果表明受压板柱截面面积和直角嵌固边对板柱的约束能力是影响节点板稳定承载力的关键因素.

把 N_d/N_{Fem} 和 N_s/N_{Fem} 的比值与节点板尺寸比 l/b_e 的关系绘制于图 12 中. 如果认为 N_{Fem} 为精确值,可以发现 N_d/N_{Fem} 有较多情况大于 1.0,说明认为计算长度系数恒为 0.5 时的设计方法明显偏于不安全. 由于约束条件的影响,节点板越薄时,传统方法越容易高估节点板的稳定承载力,不安全程度就越高. 而按本文建议的计算长度系数

取值时,所有算例的 N_s/N_{Fem} 比值均小于 1.0,并有一定的安全储备.

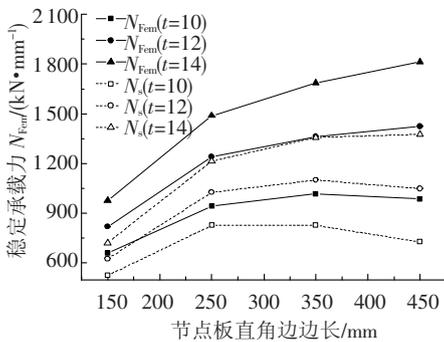


图 11 节点板稳定承载力与边长的关系

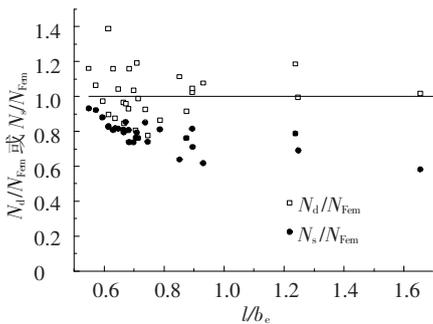


图 12 节点板稳定承载力设计值与精确值的比值

3 结 论

1) 节点板尺寸效应和板柱长细比对计算长度系数没有显著影响. 支撑轴线与柱夹角为 45° 时,直角嵌固边对节点板的约束能力最强,计算长度系数最低;而夹角为 37.5° 和 30° 时,节点板存在较长的自由边,直角嵌固边对节点板的约束能力下降,计算长度系数有增大趋势.

2) 随节点板尺寸比 (l/b_c) 的增大,直角嵌固边对节点板的约束能力降低,板柱计算长度系数增加,但是当 l/b_c 达到一定限值时,节点板的计算长度系数逐渐趋于恒定. 据此影响规律给出的计算长度系数双线性表达形式不仅简单适用,而且具有明确的物理意义.

3) 受压板柱截面面积和直角嵌固边对板柱的约束能力是影响节点板稳定承载力的关键因素. 对于较薄的节点板,虽然节点板尺寸增大使受压板柱的有效面积增大,但直角嵌固边对板柱的约束能力下降,从而造成节点板的稳定承载力略有下降.

4) 通过与非线性分析得到的稳定承载力精确值的比较,发现取板柱计算长度系数恒为 0.5 时的设计方法偏于不安全,节点板越薄,越容易高估其稳定承载力;相比之下,本文所给的计算长度系数更为合理.

参考文献:

- [1] GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003:73-76.
- [2] ROGER J J, YAM M C H, HU S Z. Elastic buckling strength of gusset plate connections [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(2):538-559.
- [3] ASTANEH-ASL A. Seismic behavior and design of gusset plates [R]. Steel Tips: Structural Steel Educational Council, 1998.
- [4] TEMPLE M C, SAKLA S S S. Single-angle compression members welded by one leg to a gusset plate II A parametric study and design equation [J]. Can J Civ Eng, 1998, 25: 585-594.
- [5] AISC341-05. Seismic provisions for structural steel buildings [S]. Chicago (IL): American Institute of Steel Construction, 2005.
- [6] 张文元, 于海丰, 张耀春, 等. 大型火电厂钢结构主厂房铰接中心支撑框架体系的振动台试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2009, 30(3):11-19.
- [7] LEHMAN D E, ROEDER C W, HERMAN D, et al. Improved seismic performance of gusset plate connections [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2008, 134(6): 890-901.
- [8] WHITMORE R E. Experimental investigation of stresses in gusset plates [R]. Bulletin No 16, Knoxville: Engineering Experiment Station, University of Tennessee, 1952.
- [9] THORNTON W A. Bracing connections for heavy construction [J]. Engineering Journal, AISC, 1984, 21(3):139-148.
- [10] GROSS J L. Experimental study of gusseted connections [J]. Engineering Journal, Am Inst of Steel Constr, 1990, 27(3):89-97.
- [11] YAM M C H, CHENG J J R. Behavior and design of gusset plate connections in compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58:1143-1159.
- [12] BROWN V L S. Stability of gusset connections in steel structures [D]. Newark: Depart of Civil Engrg, Univ of Delaware, 1988.
- [13] GB/T 22395—2008 锅炉钢结构设计规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [14] CHOU Chung-che, CHEN Pei-jin. Compressive behavior of central gusset plate connections for a buckling-restrained braced frame [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65:1138-1148.
- [15] 牟伟, 张文元, 陈世玺. 支撑节点板对铰接支撑框架体系的影响 [J]. 低温建筑技术, 2009, 31(6): 49-51.