

支撑节点板对铰接框架梁柱附加弯矩的影响

张文元, 周 宇, 张耀春

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨)

摘 要: 为研究产生层间变形时支撑的节点板对钢框架梁柱铰接节点产生的转动约束能力及在梁柱中产生的附加弯矩,并揭示这种附加弯矩对梁柱设计的不利影响,利用 ANSYS 通用有限元程序中的壳单元建立了单斜支撑框架结构的单层单跨模型,分析了附加弯矩与层间侧移的关系.按支撑受压和受拉时两种状态,分别研究了节点板厚度、边长和柱轴压比、钢材强度等关键因素对铰接框架梁柱附加弯矩的影响规律.分析表明:梁柱附加弯矩随层间侧移的增大而增大,若节点板尺寸较大,甚至会迫使节点板边缘处的铰接梁柱形成塑性铰;弹性阶段支撑受压时的附加弯矩小于支撑受拉的情况;梁柱附加弯矩随柱轴压比增大有减小的趋势.依据统计参数分析的量化结果,给出了附加弯矩在梁柱设计中的建议取值.

关键词: 钢框架支撑结构;支撑;节点板;附加弯矩;参数分析

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)06-0001-07

Influence of gusset plate connections on the secondary moments in beams and columns of braced frames

ZHANG Wenyuan, ZHOU Yu, ZHANG Yaochun

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To explore the secondary moments on the columns and beams in steel braced frame arising from the reaction introduced by the gusset plates of bracing members with the developing story drift, and to obtain this unwanted effects on the frame members, a series of diagonally braced frames (one-story and one-span) where the braces are connected with gusset plates are simulated by using shell elements in ANSYS program. By considering two conditions in which the brace is compressed or tensioned respectively under story drift, the secondary moments in the columns and beams influenced by the key factors such as gusset plate thickness, length of gusset plate, axial compression ratio of columns, and yield strength of steel used in the frames are investigated. It is shown that the secondary moment increases with the increase of story drift, and can even form plastic hinges in both the beam and the column if a stronger gusset plate is employed. At elastic limit state of the braced frames, the tensioned brace can cause smaller secondary moment than the compressed one. The axial compression ratio of columns can slightly decrease the secondary moment. Based on the statistic results of the parameter analysis, reasonable values of the secondary moments are suggested for the engineering design of the columns and beams.

Key words: steel braced frame; bracing member; gusset plate; secondary moment; parameter analysis

支撑的节点板连接相较于我国《高层民用建

筑钢结构技术规程》^[1]中推荐的几种常用的支撑节点而言,板式连接转动刚度小,更接近理想铰接,构造简单,安装方便.

1952年 Whitmore^[2]最早提出支撑节点板强度的计算方法,认为支撑轴力均匀分布在支撑端部一定宽度范围内的节点板有效截面中,以此确定节点板的屈服承载力.1984年 Thornton^[3]提出

收稿日期: 2012-09-28.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(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,副教授,博士生导师;
张耀春(1937—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 张文元, hitzwy@163.com.

了节点板稳定承载力的计算方法,他将位于支撑端部与梁柱翼缘之间的 Whitmore 有效宽度范围内的节点板看作某种边界条件下的短柱,并认为其计算长度系数为 0.65. 同期, Astaneh-Asl^[4-5]专门研究了采用板式连接节点的双角钢支撑的平面内和平面外失稳,并提出为保证节点板有较好的平面外转动性能,应在支撑端部的节点板中留有 $2t$ (t 为节点板厚度) 净距的概念,见图 1. 2008 年 Yoo 等^[6]研究了支撑框架的抗震性能,发现支撑板式节点在平面内刚度较大,不能等同于铰接. 2009 年 Thornton 等^[7]提出支撑框架的层间变形将使梁柱与支撑节点板之间产生相互作用力,即使支撑受拉时,梁柱弯曲变形产生的压力也可能引起节点板的受压屈曲. 2011 年 Zhang 等^[8]在对比中国抗震规范^[9]和加拿大钢结构规范^[10]关于框架柱的抗震设计方法的基础上,指出梁柱与节点板之间作用力是相互的,钢柱设计过程中应考虑一个附加弯矩的影响. 加拿大规范将此附加弯矩统一取值为 0.2 倍的柱子全塑性弯矩,但中国规范尚无这方面的规定.

事实上,由于梁端腹板和支撑的节点板均需与钢柱翼缘相连,如图 1 所示,两者螺栓群长度之和通常较大. 即使梁端上下翼缘与柱不连接,上述螺栓群仍会产生较大的转动刚度,使梁端节点更接近于半刚性连接. 如果认为梁腹板和节点板的水平合力中心均位于各自的螺栓群形心上(图 1),则两形心之间的垂直距离 L 可视为节点板水平力 N_g 的力臂,从而在柱上形成附加弯矩 M_c . 尤其是支撑受压失稳、楼层蜕变为纯框架之后,这种半刚性连接对框架变形的影响将体现得更加明显. 故本文在探讨附加弯矩本质的基础上,研究节点板厚度、边长以及柱轴压比等参数对铰接框架梁柱中附加弯矩的影响规律,为梁柱设计提供依据.

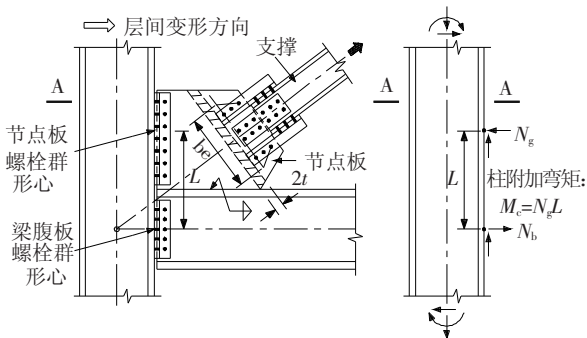


图 1 支撑板式节点及附加弯矩

1 计算模型与影响参数

结构模型见图 2, 为简化分析, 梁腹板和节点板与钢柱均采用等强的焊缝连接, 用焊缝代替图 1 中的螺栓. 框架梁柱均选用工字型截面, 且满足我国抗震规范对框架梁柱长细比和板件宽厚比的要求. 梁柱采用铰接, 即梁腹板与柱翼缘相连. 支撑亦选用工字型截面, 满足美国钢结构抗震规范^[11]对特殊中心支撑 (SCB) 杆件长细比和板件宽厚比的要求. 支撑与梁柱轴线夹角均为 45° , 支撑腹板位于框架平面内, 支撑压力较大时可以发生平面外失稳. 支撑端部通过节点板与框架梁柱相连接, 支撑与节点板的连接满足 $2t$ 净距的设计要求, 以使节点板有较好的转动性能. 节点板的两条自由边分别与梁柱轴线平行. 在两个框架柱端施加简支的边界条件.

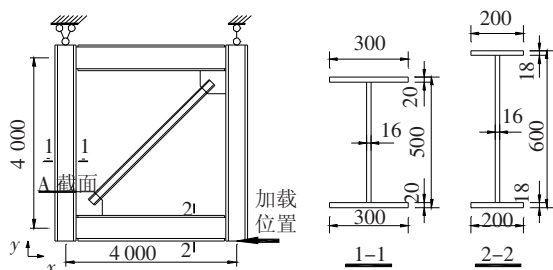


图 2 结构模型简图 (mm)

为分析支撑的节点板对框架梁柱中附加弯矩的影响规律, 分别选取了不同尺寸的节点板进行研究, 见表 1. 由于梁柱截面高度不同, 故节点板并非正方形, 节点板厚度范围为 $8 \sim 20$ mm, 边长为 $400 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \sim 700 \text{ mm} \times 650 \text{ mm}$, 几乎涵盖了各种工程中常用的节点板规格. 采用 Whitmore 有效宽度方法计算节点板的强度, 确保节点板不先于支撑发生破坏, 以此确定表 1 中的支撑截面面积, 同时通过调整截面尺寸使支撑长细比满足随节点板厚度和边长增大而减小的变化规律, 以此兼顾考虑支撑长细比变化对梁柱附加弯矩的影响规律. 为了考虑柱轴压比对梁柱中附加弯矩的影响, 对表 1 中的每个模型分别计算了柱轴压比为 0、0.25 和 0.5 三种情况. 同时还考虑支撑受压和受拉的两种工况, 因此计算模型的总数为 96 个.

2 有限元数值模拟

2.1 数值模型

利用 ANSYS 软件建立结构有限元模型 (图 3),

表 1 模型编号与参数

模型编号	节点板边长 × 边长/(mm × mm)	节点板厚度/mm	支撑截面规格	支撑平面外长细比
J400 - 8	400 × 350	8	H150 × 100 × 6 × 8	207
J400 - 12	400 × 350	12	H150 × 125 × 6 × 10	155
J400 - 16	400 × 350	16	H150 × 150 × 6 × 12	124
J400 - 20	400 × 350	20	H150 × 175 × 6 × 14	104
J500 - 8	500 × 450	8	H150 × 125 × 6 × 8	160
J500 - 12	500 × 450	12	H150 × 150 × 6 × 12	124
J500 - 16	500 × 450	16	H150 × 175 × 6 × 14	104
J500 - 20	500 × 450	20	H150 × 200 × 6 × 16	89
J600 - 8	600 × 550	8	H200 × 150 × 8 × 8	143
J600 - 12	600 × 550	12	H200 × 175 × 8 × 12	112
J600 - 16	600 × 550	16	H200 × 200 × 8 × 14	94
J600 - 20	600 × 550	20	H200 × 225 × 8 × 16	82
J700 - 8	700 × 650	8	H200 × 150 × 8 × 10	137
J700 - 12	700 × 650	12	H200 × 200 × 8 × 12	96
J700 - 16	700 × 650	16	H200 × 250 × 8 × 14	74
J700 - 20	700 × 650	20	H200 × 275 × 8 × 16	66

其中梁腹板与柱翼缘、节点板与梁柱翼缘、支撑和节点板等均采用自由度耦合的方法连接,相当于等强焊缝连接,这里暂不考虑螺栓连接. 整个模型均采用 Shell181 单元,钢材屈服强度取 235 MPa,泊松比为 0.3,采用双线性强化本构模型,取 $E_1 = E = 2.06 \times 10^5$ MPa、 $E_2 = 0.01 E_1$. 按图 2 中的位置分正负两个方向分别施加单调的位移荷载. 对支撑施加 $L/1\ 000$ 的面外初弯曲来模拟初始几何缺陷,以诱发支撑的面外失稳.

2.2 结果分析

根据结构验算指标,提取模型 3 个状态下的计算结果:1) 支撑失稳或屈服时的弹性极限状态;2) 层间侧移角为 1/250 时的正常使用极限状态;3) 层间侧移角为 1/70 时的弹塑性极限状态^[1]. 图 4、5 分别给出了层间侧移使支撑受拉和受压时模型 J600 - 16 (轴压比 0.25) 在上述 3 个状态下的应力分布图,可以看出支撑受拉超过弹

性极限后基本上是全截面屈服;而支撑受压失稳后产生面外弯曲,塑性应变较多地集中于支撑的端部及跨中. 但无论是上述哪种情况,由于支撑节点板的存在,梁柱在节点处的应力分布趋于复杂,梁柱上的高应力区域明显大于无支撑的梁柱节点. 因此有必要提取出节点板区域内梁、柱中和轴两侧的拉压应力,以确定这里的附加弯矩. 节点板边缘的梁柱截面上出现附加弯矩最大值(如对柱而言,为图 2、4.5 中的 A 截面),节点范围内梁柱其他截面上的附加弯矩比上述位置略低.

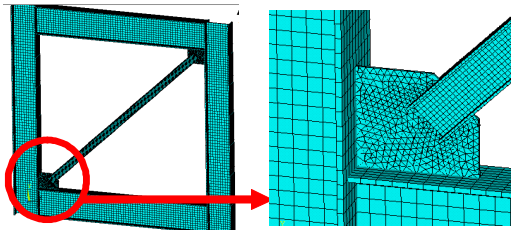


图 3 有限元模型示意

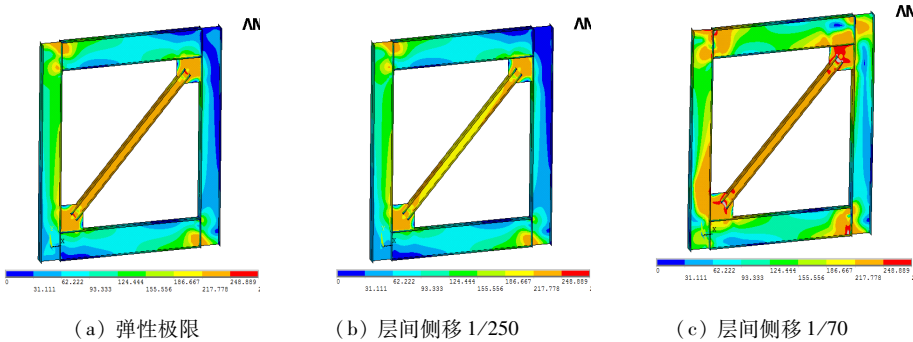


图 4 支撑受拉时三种状态下的应力云图

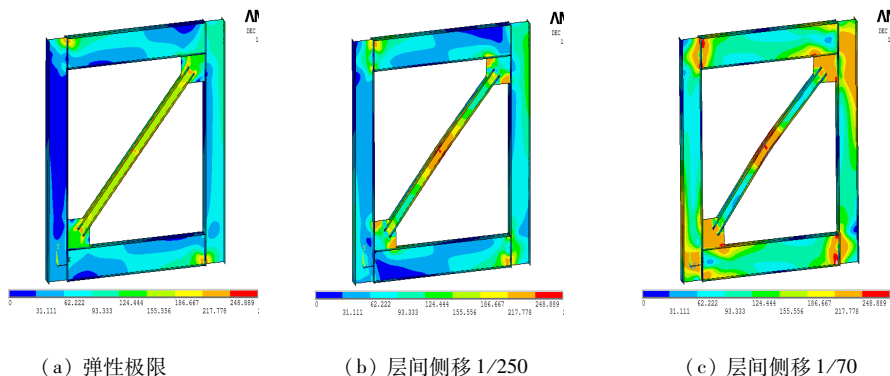


图5 支撑受压时三种状态下的应力云图

提取出梁柱中的附加弯矩最大值,发现其均随层间侧移的增大而增大.在位移加载初期,附加弯矩增长速度较快.当层间侧移增大到一定程度后,附加弯矩的增长速度减慢,出现了非线性特征.图6给出的节点板边长400 mm模型在柱轴压比为0.25时柱中附加弯矩随层间侧移的变化曲线能够清晰地反应上述特性,图中横坐标为层间位移的绝对值,纵坐标为无量纲化附加弯矩指数 $\beta = M_{(c,b)}/M_{p(c,b)}$,其中 $M_{(c,b)}$ 、 $M_{p(c,b)}$ 为梁或柱的附加弯矩及塑性铰弯矩.

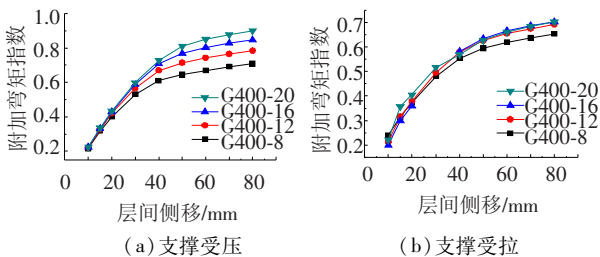


图6 柱中附加弯矩指数随框架层间侧移变化的曲线

3 关键参数对附加弯矩的影响分析

3.1 节点板厚度对附加弯矩的影响规律

图7给出了轴压比为0.25情况下,柱中附加弯矩指数随节点板厚度变化的关系曲线.

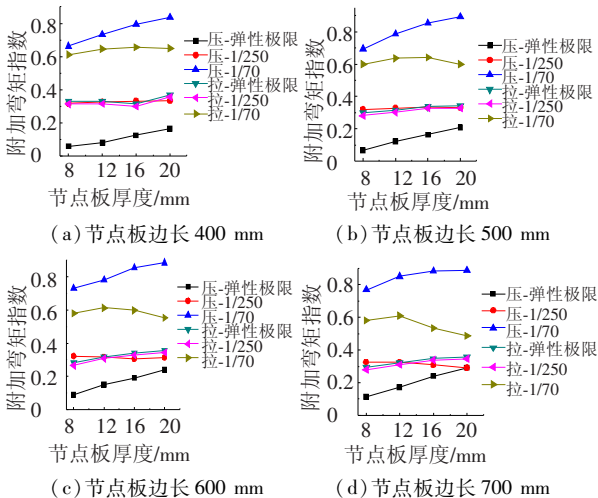


图7 柱中附加弯矩指数随节点板厚度变化的曲线

支撑受压的情况:结构达到弹性极限状态的标志是支撑受压失稳,此时各模型的层间侧移角随支撑截面的增大而增大,但均未达到1/250的变形限值.在此弹性极限状态下,柱中附加弯矩随节点板厚度的增大而增大,即随支撑长细比的减小而增大,其原因在于随着节点板厚度和支撑截面的增大,支撑长细比减小,使支撑发生失稳时需要更大的水平推力,柱中的附加弯矩也就随之增大.当结构的层间侧移角为1/250时,图7中曲线基本保持水平,此时节点板厚度对柱中附加弯矩的影响不大.当层间侧移角为1/70时,附加弯矩随着节点板厚度的增大而增大,但图7(d)中曲线的末段趋于水平,附加弯矩不再增长,模型的应力状态表明此时柱中已经形成了塑性铰,弯矩不再继续发展.此时不但支撑杆件跨中形成了塑性铰,在支撑端部的节点板上也形成了 Astaneh-Asl 等^[5]所提及的塑性铰线,使支撑的塑性变形主要集中在在这3个位置发生,如图5(c)所示.

支撑受拉的情况:结构达到弹性极限状态的标志是支撑受拉屈服,各模型支撑受拉屈服时的层间侧移角基本相同,且稍大于1/250的层间变形限值.当结构达到弹性极限状态和1/250层间侧移角时,曲线表现出稍有上升的趋势,说明柱中附加弯矩随着节点板厚度的增大而增大,但变化幅度不大.当层间侧移角为1/70时,随着节点板厚度的增大,附加弯矩曲线均表现出先升高后降低的现象,其原因在于随着节点板厚度和支撑截面的增大,支撑竖向分力导致柱中轴力也不断增大,当柱中形成塑性铰以后,轴力的增大导致塑性铰弯矩(此时也是附加弯矩)的相对降低.提取此时节点板与梁柱间的作用力,发现梁柱对节点板的作用力的合力均为拉力,并未出现 Thornton^[7]所说由于梁柱夹角变小使节点板受压屈曲的现象. Thornton 在计算支撑受拉时,只考虑了梁柱夹角的减小,并未考虑节点板自身的变形,故得到了较大的节点板挤压力.而实际情况是在较大层间

侧移情况下, 支撑拉力会使节点板产生一定的横向收缩变形, 放松了梁柱夹角减小对节点板的挤压作用。

比较同一模型在支撑受拉和受压两种情况下柱中的附加弯矩可见: 结构在支撑受拉情况下达到弹性极限状态时柱中的附加弯矩要大于支撑受压的情况, 这主要是因为支撑受压时稳定起控制作用, 尚未达到支撑全截面屈服之前便发生了失稳, 较早达到了弹性极限。当层间侧移角为 $1/250$ 时, 支撑受拉和受压两种情况下柱中的附加弯矩值相差不大。当层间侧移角为 $1/70$ 时, 支撑受拉情况下柱中的附加弯矩值要小于支撑受压时的情况, 原因在于受拉时支撑轴力一直维持较高的水平, 甚至由于钢材强化会有所提高; 而支撑一旦受压失稳, 轴力将急剧减小, 支撑框架迅速蜕变为纯框架, 导致附加弯矩大于支撑受拉的情况。

图 8 给出了轴压比为 0.25 的情况下, 梁中附加弯矩指数随节点板厚度变化的关系曲线, 其规律与柱中附加弯矩基本相同, 这里不再赘述, 只是梁中附加弯矩指数与柱相比稍小些。由于梁的截面积较小, 而支撑在梁、柱中产生的轴力相同, 故虽然梁中附加弯矩指数稍小, 但梁仍先于柱中形成了塑性铰, 这也说明所设计的模型具有合理的屈服机制。

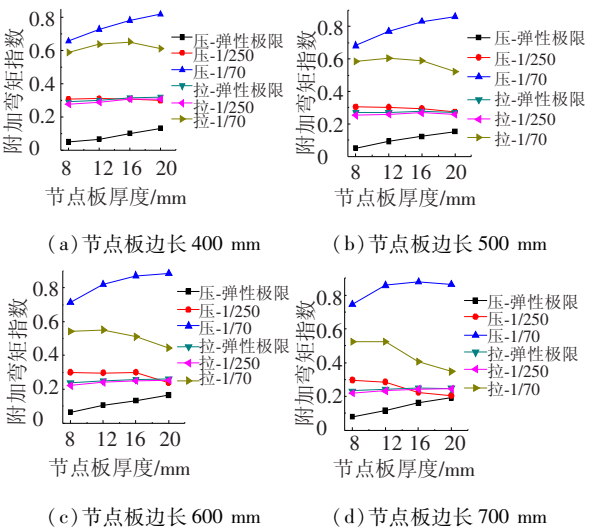


图 8 梁中附加弯矩指数随节点板厚度变化的曲线

3.2 节点板边长对附加弯矩的影响规律

无论是支撑受压还是支撑受拉的情况, 节点板边长变化对梁柱附加弯矩的影响均与节点板厚度变化的影响规律类似, 原因也基本相同。为简化篇幅, 仅给出了图 9 所示的轴压比为 0.25 情况下柱中附加弯矩指数随节点板边长变化的关系曲线。

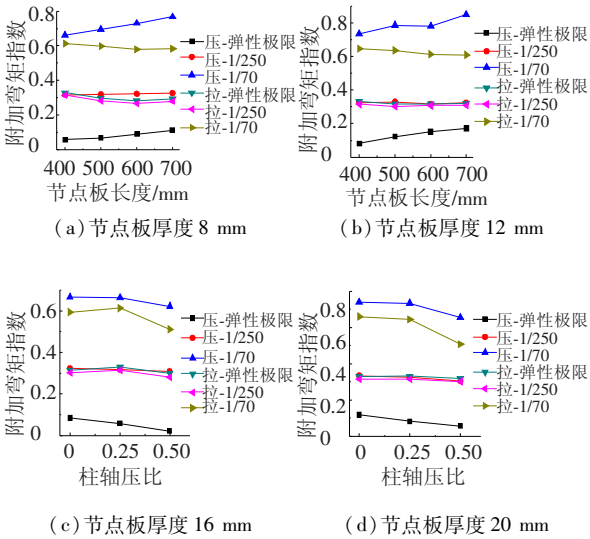


图 9 柱中附加弯矩指数随节点板边长变化的曲线

3.3 柱轴压比对附加弯矩的影响规律

图 10 给出了边长 400 mm 的模型柱中附加弯矩指数随柱轴压比变化的关系曲线。

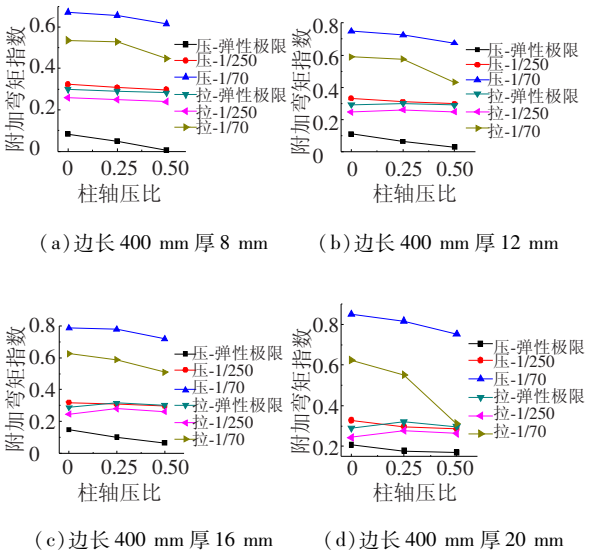


图 10 柱中附加弯矩指数随柱轴压比变化的曲线

支撑受压情况: 当结构达到弹性极限状态时, 柱中附加弯矩随着柱轴压比的增大而稍有降低, 原因是柱轴压比的增大使支撑初始压力增大、稳定承载力降低, 层间侧移加载时支撑会较早地发生面外失稳, 柱中的附加弯矩降低。当达到 $1/250$ 层间侧移角时, 曲线基本保持水平, 柱轴压比对附加弯矩的影响不大。当层间侧移角为 $1/70$ 时, 轴压比由 0 增大到 0.25 的过程中, 曲线保持水平, 此时柱中尚未形成塑性铰, 柱轴压比的变化对附加弯矩的影响很小; 但当轴压比由 0.25 继续增大到 0.5 时, 柱中会形成塑性铰, 而轴力的增加会使柱中塑性铰弯矩降低, 即附加弯矩系数降低。

支撑受拉情况: 结构达到弹性极限状态和

1/250 层间侧移角时,柱轴压比的变化对柱中附加弯矩的影响不大。当层间侧移角为 1/70 时,在柱中尚未形成塑性铰的情况下,柱轴压比的变化对附加弯矩的影响很小;当柱中形成塑性铰以后,附加弯矩随柱轴压比的增大而减小。

图 11 给出了边长 400 mm 的模型梁中附加弯矩指数随柱轴压比变化的关系曲线,柱轴压比对梁中附加弯矩的影响规律与对柱的影响基本相同。在支撑受压情况下达到弹性极限状态时,附加弯矩随着柱轴压比的增大而减小,同样是由于结构达到弹性极限状态时的层间侧移不同所造成的。在结构层间侧移相同的情况下,当梁中还没有形成塑性铰时,柱轴压比的变化对梁中附加弯矩影响不大;当梁中形成塑性铰以后,梁中附加弯矩会随着轴压比的增大而减小。

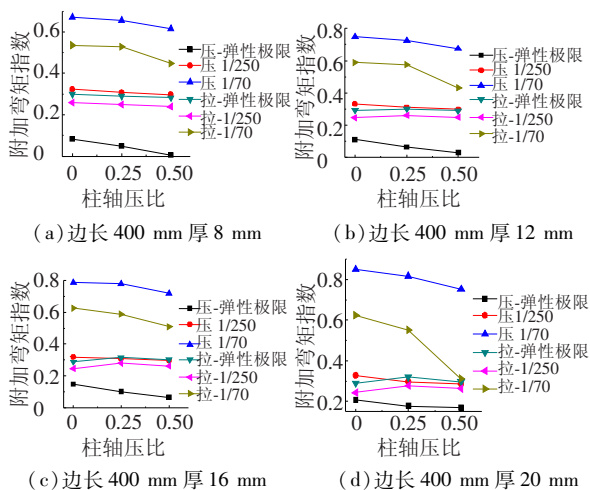


图 11 梁中附加弯矩指数随柱轴压比变化的曲线

3.4 材料强度对附加弯矩的影响规律

为研究钢材强度对梁、柱附加弯矩指数的影响规律,采用 Q345 钢重新建立了节点板边长 600 mm 的模型,并与 Q235 钢的结果进行对比,见图 12、13。可以看出随钢材强度的提高,附加弯矩指数有所降低。其数值近似符合以下规律:支撑受拉模型的层间侧移角 1/250 时,两种钢材的附加弯矩数值基本相等,但 Q345 钢梁柱的塑性铰弯矩值有 345/235 的提高,故附加弯矩指数按钢材屈服强度的反比 (235/345) 线性降低;而中等长细比支撑受压模型的弹性极限 (支撑失稳) 时, Q345 钢支撑的稳定承载力和对应的梁柱附加弯矩约有 $\sqrt{345/235}$ 倍的提高,同时考虑 Q345 钢柱塑性铰弯矩 345/235 的提高,故 Q345 钢的附加弯矩指数与 Q235 钢的比值约为 $\sqrt{235/345}$ 。对于大长细比的受压支撑,附加弯矩指数随钢材强度的提高而降低的更多一些,为方便起见可偏于保守地仍取上述调整系数。

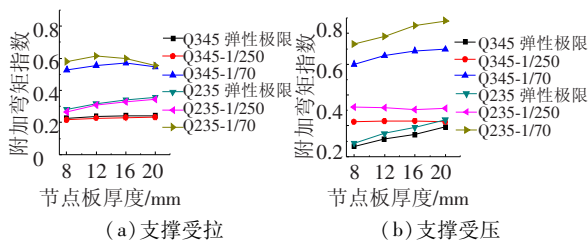


图 12 不同材料强度模型柱中附加弯矩指数的对比

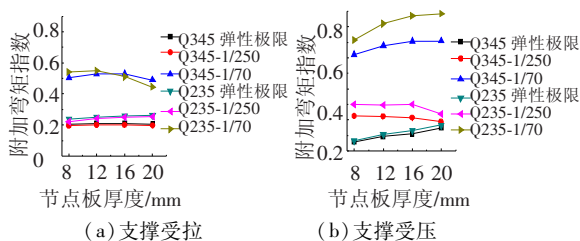


图 13 不同材料强度模型梁中附加弯矩指数的对比

3.5 设计建议

我国结构设计规范要求进行多遇地震作用下承载力和变形的双重验算。在所有 Q235 钢的计算模型中,由于支撑受压失稳先于受拉屈服,故对于按压杆设计的支撑,应以支撑失稳作为结构的弹性极限状态;而对于按拉杆设计的支撑,受拉屈服时的层间侧移角与正常使用变形限值 1/250 基本相当,故可用支撑屈服作为结构的弹性极限状态。按上述原则确定梁柱弹性设计时的附加弯矩取值。而在大震情况下,支撑可以屈曲或屈服,梁柱的附加弯矩必然存在,梁柱上必然会发展塑性,此时只要保证柱不先于梁上出现塑性铰、并保证弹塑性层间变形的验算即可,此时附加弯矩并无实际意义。

弹性极限状态下的梁柱附加弯矩指数虽然随节点板厚度 (长细比)、边长和柱轴压比等参数的变化呈现出一定规律,但变化区间不大,为简化起见,可以寻求一个附加弯矩的定值作为梁柱的设计内力。现绘制所有受压和受拉模型中柱和梁的附加弯矩指数分布区间图,见图 14。根据模型数量累计百分比,考虑 95% 可靠保证,支撑受压、受拉时柱和梁的附加弯矩指数分别可取为 0.26、0.35、0.18、0.30,它们分别是图 14 中纵坐标取 95% 时对应的横坐标数值。上述数据是按照 Q235 钢材强度屈服点得到的,将它们除以材料抗力分项系数后,并计入 3.4 节中钢材强度的影响,可以得到可供结构弹性设计使用的附加弯矩指数:支撑按压杆设计时,柱和梁的附加弯矩指数为 $0.24\sqrt{235/f_y}$ 和 $0.17\sqrt{235/f_y}$;支撑按拉杆设计时柱和梁的附加弯矩指数为 $0.32(235/f_y)$ 和 $0.28(235/f_y)$ 。上述附加弯矩需与柱和梁其他工况下的内力进行组合。

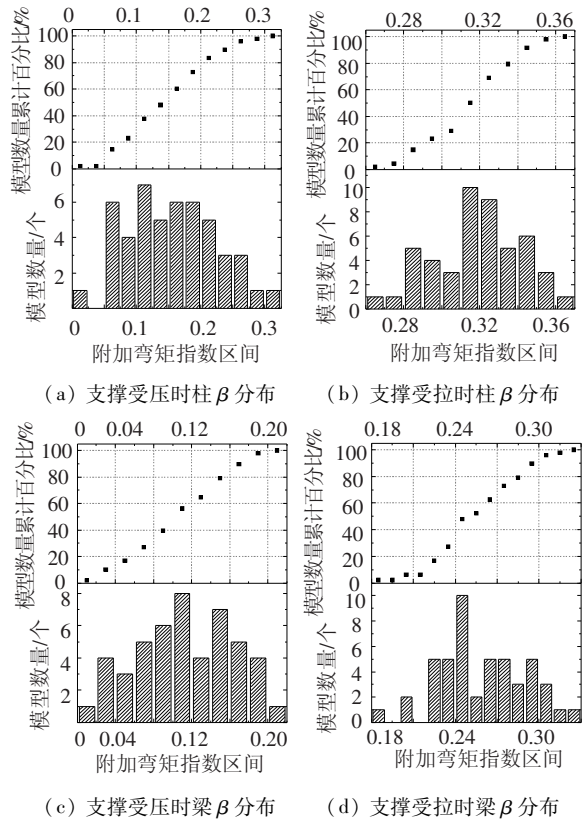


图 14 柱和梁的附加弯矩指数 β 分布区间图

4 结 论

- 1) 受支撑节点板刚度的影响, 一旦产生层间侧移, 铰接梁柱中便会产生附加弯矩, 且随层间侧移的增大而增大, 这种附加弯矩会对结构安全产生不利影响。
- 2) 支撑受压情况下: 结构达到弹性极限时, 梁柱中的附加弯矩随节点板厚度和边长的增大而增大; 层间侧移角为 $1/250$ 时, 节点板尺寸的变化基本不会影响梁柱中附加弯矩的数值; 层间侧移角为 $1/70$ 时, 若梁柱中尚未形成塑性铰, 附加弯矩随节点板厚度和边长的增大而增大, 若梁柱中形成了塑性铰, 则附加弯矩不再增大, 甚至有所降低。
- 3) 支撑受拉的情况下: 结构达到弹性极限和 $1/250$ 层间侧移角时, 节点板厚度和边长对梁柱中附加弯矩的影响均不大; 当层间侧移角为 $1/70$ 时, 节点板对附件弯矩的影响规律与支撑受压情况相同。
- 4) 在支撑受压情况下结构达到弹性极限时, 梁柱中的附加弯矩随着柱轴压比的增大而减小; 在结构层间侧移相同的情况下, 当梁柱中尚未形

成塑性铰时, 柱轴压比对梁柱附加弯矩影响不大, 若梁柱中已形成塑性铰, 附加弯矩则随着轴压比的增大而减小。

5) 根据铰接梁柱附加弯矩指数的分布特征, 考虑钢材强度的影响, 给出了可供柱和梁弹性设计阶段使用的附件弯矩指数的建议值。

参考文献

[1] JGJ 99-98 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

[2] WHITMORE R E. Experimental investigation of stresses in gusset plates [R]. Bulletin No16. Knoxville: Engineering Experiment Station, University of Tennessee, 1952.

[3] THORNTON W A. Bracing connections for heavy construction[J]. Engineering Journal, AISC, 1984, 21 (3): 139 - 148.

[4] ASTANEH-ASL A, GOEL S C. Cyclic in-of-plane buckling of double angle bracing [J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(9): 2036 - 2055.

[5] ASTANEH-ASL A, GOEL S C, HANSON R D. Cyclic out-of-plane buckling of double angle bracing [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111 (5): 1135 - 1153.

[6] YOO Jung-Han, LEHMAN D E, ROEDER C W. Influence of connection design parameters on the seismic performance of braced frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 30 (4): 607 - 623.

[7] THORNTON W A, MUIR L S. Design of Vertical Bracing Connections for High-Seismic Drift [EB/OL]. (2012 - 09 - 28) http://www.modernsteel.com/issue.php?date=March_2009.

[8] ZHANG Wenyuan, CHRISTOPOULOS C. A discussion on some key issues for seismic design of concentrically braced frames according to canadian and chinese codes [C]//Advances in Structures. Guangzhou: Guangzhou University of Technology, 2011: 211 - 221.

[9] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[10] S16-09 Design of steel structures [S]. Mississauga: Canadian Standards Association (CSA), 2009.

[11] ANSI/AISC341-10 Seismic provisions for structural steel buildings [S]. Chicago (IL): American Institute of Steel Construction, 2010.

(编辑 赵丽莹)