

基于结构鲁棒性提升的隔板贯通节点加固构造

王 伟^{1,2}, 秦 希²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为提高结构的鲁棒性, 针对传统矩形钢管柱隔板贯通式栓焊连接构造, 提出了一种加固型栓焊盖板连接构造及其设计方法, 并进行了数值模拟分析, 该分析考虑了断裂模拟及裂后路径跟踪。结果表明, 加固型栓焊盖板连接构造能够提高下翼缘连接区域传力失效前梁柱子结构的竖向变形能力, 并充分发挥梁内轴向拉力产生的悬链线效应, 进而使梁柱子结构提供更大的竖向承载力, 可用于提高结构抗连续倒塌能力的加固改造。

关键词: 钢框架结构; 隔板贯通式节点; 连接构造; 加固; 连续性倒塌; 鲁棒性

中图分类号: TU391

文献标志码: A

Retrofitted Connection Details of Through Diaphragm Joint for Structural Robustness Enhancement

WANG Wei^{1,2}, QIN Xi²

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A kind of retrofitted bolt-weld connection details and its corresponding design methods are proposed on the basis of the conventional RHS column joint with through diaphragm to meliorate structural robustness. With a view to material fracture and the path tracking after fracture, the numerical results indicate that the retrofitted bolt-weld connection details can enhance the vertical deformation capacity of the beam-column assemblies before the force transmission failure at the bottom of connection region, which is conducive to the development of catenary action by axial force in the beams. Therefore, the beam-column assemblies can provide greater vertical carrying capacity and the connection details can be used in transforming structures against progressive collapse.

Key words: steel structure; through diaphragm joint; connection details; retrofit; progressive collapse; robustness

建筑结构因突发事件作用造成初始局部破坏可能导致相邻构件或部分结构的渐进失效, 进而发生连续性倒塌现象。当建筑结构的局部竖向承重构件失效后, 剩余结构各部分的有效拉结可促成传力路径的转变, 实现不平衡荷载的重新分布, 这被认为是阻止结构连续性倒塌的最有效方法。梁柱连接节点的性能对结构拉结作用的发挥具有重要影响^[1-5]。

框架结构内柱失效后, 失效柱上方的梁柱子结构在小变形阶段主要通过抗弯作用抵抗上部荷载, 在变形较大时逐渐转变为依靠悬链线作用提供竖向抗力, 悬链线作用可提供的竖向抗力可能高于前期抗弯作用提供的竖向抗力^[3-4]。悬链线作用的发挥依赖于梁柱构件在竖向大变形时的有效拉结, 即梁段可发展较大的轴向拉力。目前对传统钢框架采用的刚性梁柱连接构造的子结构试验研究结果显示^[3-8], 节点区梁下翼缘断裂会导致抗弯作用提供的抗力受到较大削弱, 同时梁内可发展的轴向拉力也受到一定影响。与全焊连接相比, 构造合理的栓焊混合连接在节点区梁下翼缘断裂后可更为充分地发挥悬链线作用, 但其后期承载力仍有提高的空间, 可通过连接构造改进加以实现, 从而进一步提升整体结构抗连续倒塌的鲁棒性。

本文针对国内外多高层钢框架结构中广泛采用的矩形钢管柱隔板贯通式栓焊连接节点, 在该构造基础上提出有利于后期竖向承载力提升的加固改造方案, 并通过在考虑断裂模拟和进行裂后路径跟踪的基础上的数值模拟分析, 考察其在连续性倒塌条件下的力学性态与抗力机理, 为结构抗倒塌设计提

收稿日期: 2014-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(51378380, 51008220)

第一作者: 王 伟(1977—), 男, 副教授, 特聘研究员, 博导, 工学博士, 主要研究方向为钢结构。E-mail: weiwang@tongji.edu.cn

通讯作者: 秦 希(1990—), 女, 硕士生, 主要研究方向为钢结构。E-mail: 380727649@qq.com

供参考。

1 基于提升结构鲁棒性的连接构造设计

1.1 设计思路与构造方案

传统的隔板贯通式梁柱栓焊连接构造如图 1a 所示。当梁柱节点下方柱失效并发生较大竖向变形时,梁下翼缘与贯通隔板的连接焊缝易受拉开裂。考虑到对某些已建重要建筑提升结构抗连续倒塌能力的需求,并基于延迟断裂的构想,在传统连接构造基础上提出了一种如图 1b 所示的加固型栓焊盖板连接构造,即梁上、下翼缘与贯通隔板仍采用焊接连接,并在梁下翼缘与隔板之间补充螺栓连接的盖板作为加固构造。盖板可采用 C 级普通螺栓连接,盖板螺栓孔为长圆形,当梁下翼缘与隔板连接焊缝失效前,盖板并不参与受力,而当梁下翼缘与隔板连接焊

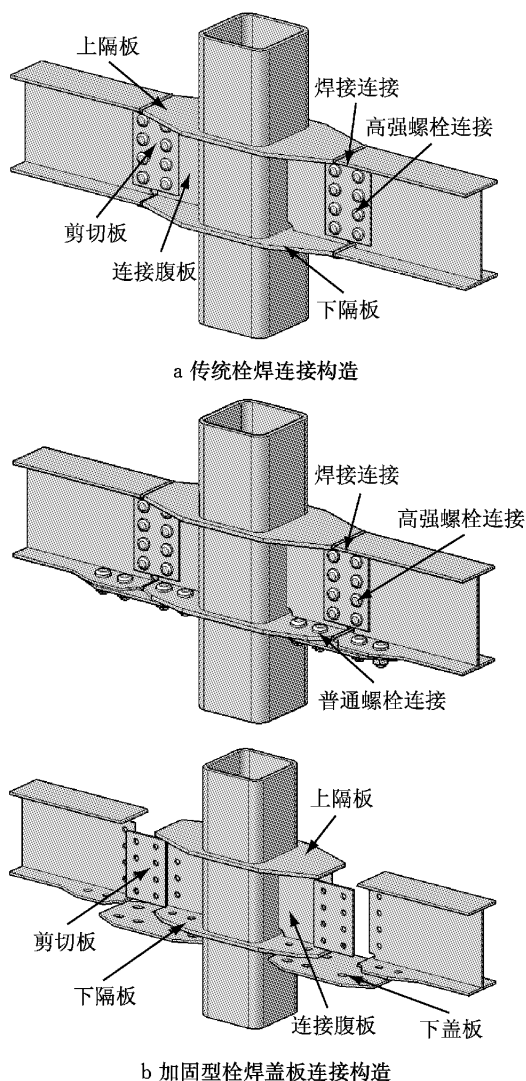


图 1 连接构造示意图

Fig.1 Connection details

缝开裂后,盖板将两者拉结,使之能够继续有效传力。对梁下翼缘及其相连的盖板与隔板做了局部加宽处理,既要保证梁下翼缘与隔板不因净截面抗拉承载力受螺栓孔削弱过大而导致其先于连接焊缝开裂,又要保证连接焊缝开裂后梁下翼缘及其相连盖板、隔板螺栓孔壁局部承压塑性的发生先于板件的再次受拉开裂。

1.2 梁柱子结构参数设计

为了研究框架结构梁柱节点在结构连续性倒塌条件下的性态,并揭示结构发生连续性倒塌的过程以及控制连续性倒塌发展的关键环节,既有研究均基于备用荷载路径方法,即拆除结构的承重中柱以模拟结构的初始局部破坏^[9-10]。典型的工况如图 2 所示,框架结构内柱失效后,其上方的梁柱节点将在上部荷载作用下发生较大的竖向位移,带动两侧梁产生竖向大变形,为简化分析,假定反弯点位于梁跨中 $L/2$ 位置,并在梁跨中位置插入铰,可得到图 2 所示的“双半跨中柱节点”模型^[7]。

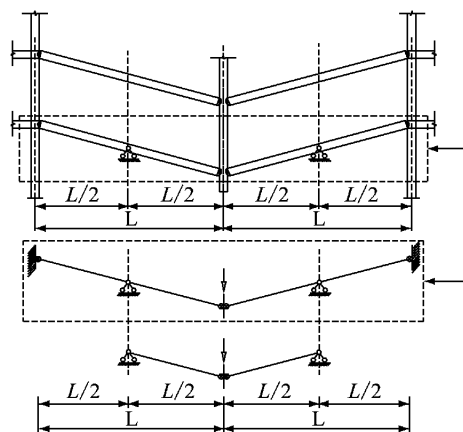


图 2 梁柱子结构

Fig.2 Beam-column assembly

针对图 1 中的两种连接构造,分别设计了 S0(见图 3a)和 S1(见图 3b)两个“双半跨中柱”节点子结构模型。模型各部件均采用 Q345 钢,铰接点之间的跨度为 4 500 mm,柱长度为 900 mm,矩形柱截面为 250 mm×14 mm,梁截面为 H300 mm×150 mm×6 mm×8 mm。根据等强原则,梁腹板与连接腹板(厚 6 mm)采用单排 4 颗 10.9 级 M20 高强螺栓与剪切板(厚 6 mm)连接。模型 S1 梁翼缘及隔板(厚 12 mm)均采用双排共 4 颗 C 级普通螺栓与盖板(厚 8 mm)连接。

对于加固型栓焊盖板连接构造节点子结构模型 S1,为与盖板连接,梁下翼缘与下隔板在截面 1—4

为模拟模型板件断裂的过程,分析中采用“单元删除法”,并借助 ABAQUS 内置的延性金属损伤准则,通过定义材料的断裂应变、应力三轴性、应变率等参数来对模型中达到断裂应变指标的单元实施删除,所有部件均设置了断裂属性.在螺栓、梁、剪切板、隔板、盖板之间建立考虑切向摩擦的硬接触关系,设置库伦摩擦系数取 0.45.计算采用显式动态分析来克服接触对数量多、材料断裂模拟带来的不收敛问题.由于显式动态分析荷载类型限制,螺栓不能直接施加预紧力,本文通过对高强螺栓上、下表面施加压力来模拟高强螺栓预紧力对所连接板件的影响.在分析步中,设置合理的加载速率、较小的增量步,来减小加载过程中产生的惯性力.柱顶竖向位移加载时,采用平滑的 Smooth Step 加载曲线,使接触能够平稳建立.以上措施可保证在分析过程中的动能不超过内能的 5%~10%(准静态分析),不引入明显的动力效应.

模型中所有部件均采用 C3D8R 实体单元,在应力集中位置和断裂位置加密单元网格,网格大小约为 2 mm.以 S0 为例,模型的全局坐标、边界条件以及网格划分如图 4 所示.梁端边界条件设置为铰接,柱顶、柱底为 Z 向滑动约束,柱顶实行 Z 向位移加载.

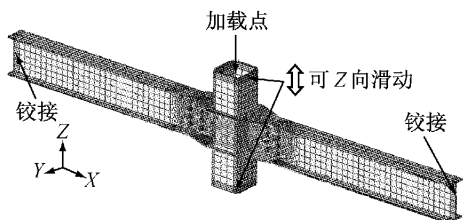


图 4 有限元模型和边界条件

Fig.4 FE modeling and boundary condition

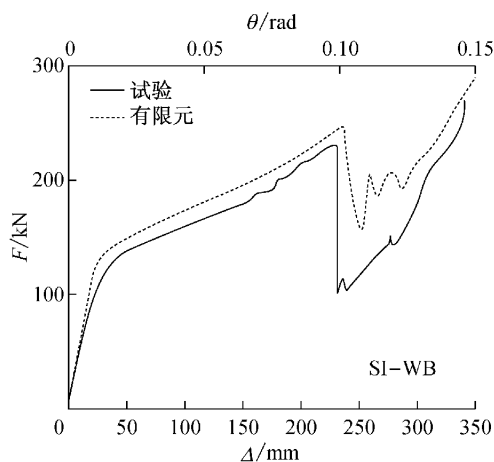
文献[4]针对矩形钢管柱-H 形梁栓焊混合节点进行了连续性倒塌工况下的试验研究.为验证上述算法的合理性,选取了其中的 SI-WB 节点试件建立有限元模型,图 5 为有限元分析与试验的柱顶竖向荷载-位移曲线以及破坏现象的对比情况,可知,有限元分析结果与试验结果吻合较好,能够反映梁柱子结构在竖向大变形下的主要受力特征.

3 数值模拟结果与分析

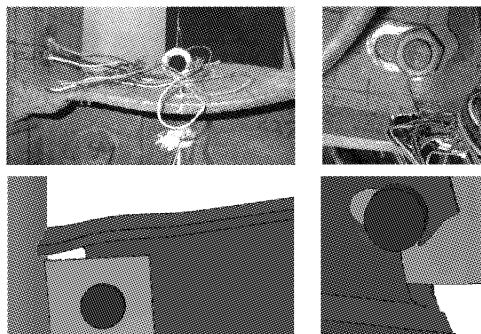
3.1 竖向荷载-位移曲线与破坏模式

偏离中轴线 350 mm 的截面 5 为 S0 在该工况

下最不利截面,该截面达到全截面塑性受弯承载力 ($M_p=188 \text{ kN} \cdot \text{m}$) 时,对应的梁柱子结构柱顶荷载理论值为 $F_p=198 \text{ kN}$,两个模型的数值模拟结果均以 S0 为基准,将 F_p 用于荷载的量纲为一化计算.图 6 为模型的中柱竖向荷载-位移曲线,其中,位移和荷载分别除以半跨长 $L/2$ (2250 mm) 和 F_p 得到其量



a 竖向荷载位移曲线比较



b 破坏模式比较

图 5 数值计算与试验结果比较

Fig.5 Comparison of numerical and test results

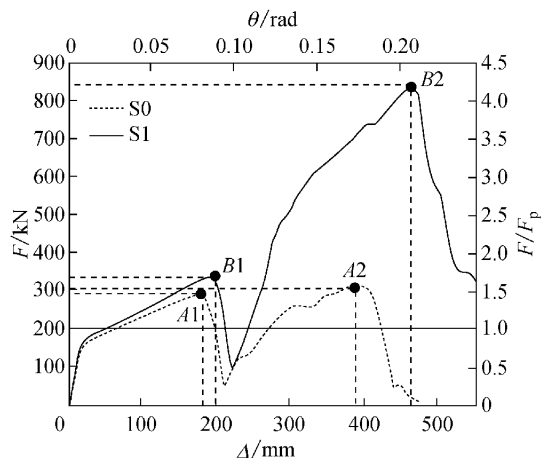


图 6 竖向荷载-位移曲线

Fig.6 Vertical load-displacement curves

纲为一化的表述 θ (梁弦转角)和 F/F_P . 图7为模型S0, S1在中柱竖向荷载达到最大值,即中柱竖向位移分别达到A2点(388 mm), B2点(465 mm)时的变形模式.

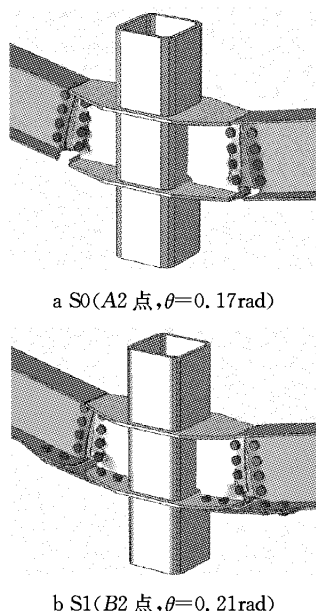


图7 变形模式

Fig.7 Deformation mode

在初始阶段, S0柱顶竖向荷载随柱顶竖向位移线性增长;柱顶竖向位移达到16 mm($\theta=0.007\text{rad}$)时,刚度明显降低;柱顶竖向位移增大至180 mm(A1点, $\theta=0.08\text{rad}$)时,柱顶竖向荷载达到第一个峰值297 kN($1.50F_P$);随后,梁下翼缘与下隔板的焊缝连接开裂,荷载迅速下降至50 kN($0.25F_P$);此后节点子结构依靠梁上翼缘和腹板处的连接抵抗上部荷载,荷载逐渐回升,剪切板螺栓孔由下至上依次开裂;柱顶竖向位移达到388 mm(A2点, $\theta=0.17\text{rad}$)时,柱顶竖向荷载达到第二个峰值308 kN($1.55F_P$);之后,梁上翼缘与上隔板的焊缝连接断裂,模型破坏而丧失承载力.

S1在初始弹性阶段,刚度与S0相同;当柱顶竖向位移达到16 mm($\theta=0.007\text{rad}$)之后,刚度也明显降低,由于梁下翼缘、下隔板及下盖板之间相互接触并产生摩擦力, S1在此阶段的刚度略大于S0;柱顶竖向位移增大过程中,下翼缘连接螺栓在长圆孔中滑移,柱顶竖向位移达到201 mm(B1点, $\theta=0.09\text{rad}$)时,柱顶竖向荷载达到第一个峰值336 kN($1.70F_P$);随后,梁下翼缘在与下隔板焊接连接区域附近开裂,柱顶竖向荷载出现短暂的下降;之后,下翼缘连接螺栓与盖板孔壁接触,荷载持续上升,连接

腹板上的螺栓孔由下至上开裂;在柱顶竖向位移达到465 mm(B2点, $\theta=0.21\text{rad}$)时,柱顶竖向荷载达到第二个峰值833 kN($4.21F_P$);当柱顶竖向位移继续增大,下盖板在截面2开裂,承载力快速下降. 相对于S0, S1最大柱顶竖向荷载提高了170%.

结果显示,两个模型柱顶竖向荷载均大于 F_P ,可见,中柱失效情况下,上部节点子结构不仅通过抗弯作用提供竖向抗力,还通过梁内轴力产生的悬链线作用提供竖向抗力. S0在梁下翼缘与下隔板的连接失效后,可通过剩余截面传力,使节点子结构承载力恢复,并超过前期荷载峰值. 对比S0和S1可知,在下隔板与梁下翼缘焊缝连接断裂前, S1竖向抗力相对于S0略有提高,加固盖板基本不发挥作用;在下隔板与梁下翼缘焊缝连接断裂后,盖板将梁下翼缘与下隔板拉结,使两者能够继续有效传力,可显著提高节点子结构的竖向承载能力.

3.2 板件传力与变形分析

在柱顶竖向荷载作用下,节点子结构通过发挥各截面的弯矩和轴力来提供竖向抗力,连接区域下部主要承受拉力作用. 连接区域下部各板件的变形由两种成分合成:①板件加载过程中传递拉力,在拉力作用下,板件整体被拉长,若拉力持续增长,薄弱截面将产生截面收缩现象并发生断裂,即发生受拉破坏;②板件与螺栓之间通过螺栓孔承压来传力,螺杆挤压螺栓孔会使螺栓孔伸长,螺栓孔壁达到局部承压承载力后,发生螺栓孔壁局部承压塑性破坏,若变形较大,螺栓孔壁将产生开裂. 3.1节模拟结果显示,连接区域各板件尺寸的相对关系以及连接方式影响了下翼缘连接失效前节点子结构的竖向变形能力,并使节点子结构的竖向承载力产生分化. 在此,通过分析下隔板、梁下翼缘以及下盖板的传力与变形探究了不同节点构造对节点子结构承载能力的影响.

图8为两个模型的梁下翼缘或下盖板在截面5传递的拉力随柱顶竖向位移的发展曲线以及板件断裂时的变形状态,并标注了下翼缘连接区域从板件开始发展塑性至传力失效时柱总计发生的竖向位移 δ_{u1} . 图中 F_{pf} 为模型截面5梁下翼缘全截面受拉屈服承载力.

模型S0梁下翼缘由开始发展塑性至与下隔板之间的焊缝连接断裂,柱向下移动了164 mm,截面断裂主要由受拉引起,断裂截面有较明显的颈缩现象. 模型S1在梁下翼缘断裂前,连接区域下部的拉

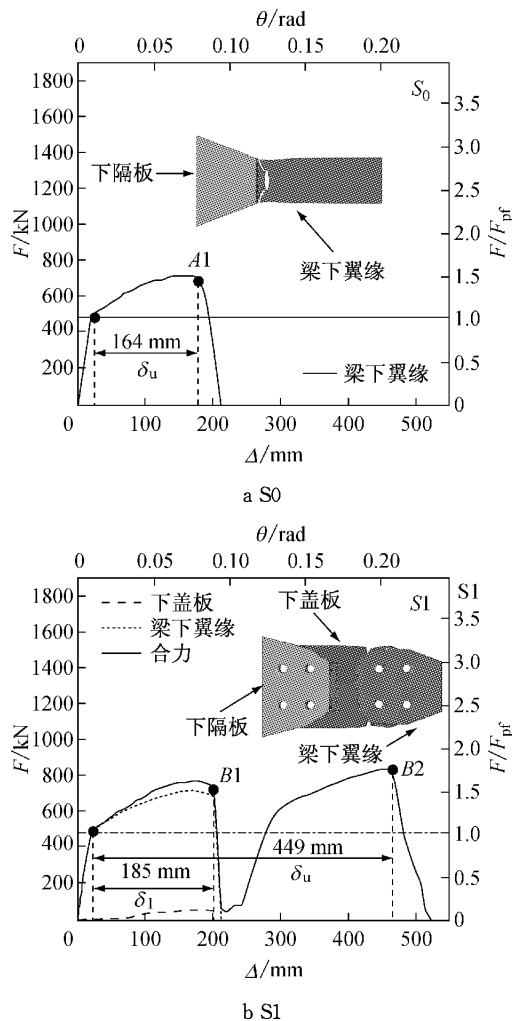


图 8 关键板件拉力发展曲线

Fig. 8 Tension force development in key plates

力主要通过梁下翼缘与下隔板之间的焊接连接传递,梁下翼缘由开始发展塑性至开裂破坏,柱向下移动了 185 mm;在梁下翼缘断裂后,拉力主要通过螺栓连接传递,开裂首先发生在下盖板有螺栓孔削弱的截面 2,之后下盖板在截面 2 发生净截面断裂,由梁下翼缘开始发展塑性至下盖板断裂,柱向下移动了 449 mm.

对比 S0 和 S1 可知,S1 梁下翼缘开始发展塑性至焊缝断裂柱总计发生的竖向位移 δ_1 与 S0 的 δ_u 值相差不大,加固装置对 S1 梁下翼缘的受拉变形能力基本没有影响;S1 的 δ_u 值远大于 S0,可见加固型栓焊盖板连接构造可使下翼缘连接板件在焊接连接失效后继续有效传力,且使螺栓孔壁局部承压塑性破坏优先发生,也能够显著提高下翼缘连接失效前节点子结构的竖向变形能力.

3.3 内力发展路径分析

两个模型截面 5 弯矩及轴力随柱顶竖向位移的

发展曲线如图 9 所示, M_p 与 N_p 分别为截面 5 梁全截面塑性抗弯承载力和轴拉屈服承载力,分别取值为 188 kN·m 和 1 641 kN,弯矩 M 与轴力 N 分别除以 M_p 与 N_p 得到其量纲为一的表述.

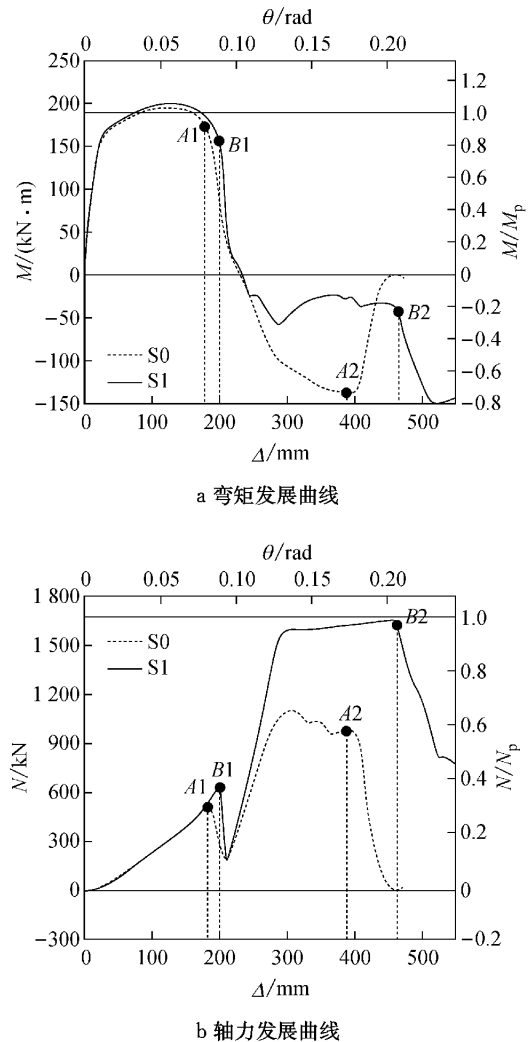


图 9 截面 5 弯矩及轴力发展曲线

Fig. 9 Bending moment and axial force development at cross section 5

初始阶段(约 0~0.007rad),截面 5 弯矩线性增长而轴力增长缓慢,截面以受弯矩作用为主;柱顶竖向位移达到 16 mm(0.007rad)左右,弯矩开始缓慢增长,至约 1.0 M_p 后基本维持不变,而轴力呈稳定增长趋势.模型 S0 发生局部断裂后(A1 点),承受拉力的梁下翼缘传力路径失效,截面主要依靠上部残余截面受拉提供抗力,截面 5 弯矩持续下降并转为负值,而轴力在有所降低后加速增长,并超过之前的峰值,在达到 0.6 F_p 左右时保持稳定,当柱顶位移达到 388 mm(A2 点)之后,由于上翼缘断裂,轴力下降至零.模型 S1 梁下翼缘断裂后(B1 点),其截面 5 弯

矩下降并转为负值后保持稳定,而轴力在略有降低后加速增长,并远超之前的峰值,在达到 $1.0F_p$ 左右时保持稳定,下盖板开裂后(B2点),弯矩和轴力迅速降低。

两个模型截面5均可发展至全截面塑性抗弯承载力 $1.0M_p$,承载力的分化主要取决于梁截面中可发展的轴力大小。在较大的变形下,S1截面5已达到全截面受拉屈服承载力 $1.0N_p$,截面承载力得到充分发挥。S0截面5弯矩因梁下翼缘断裂而产生下降,抗弯承载力严重削弱,截面通过发展轴力来提供抗力,但由于有效传力截面减小,轴力最大值远小于S1,可见,S0下翼缘板件过早断裂限制了截面内力的发展。

3.4 竖向抗力机制分析

中柱失效后,原由中柱承担的竖向荷载 F_v 由梁截面轴力以及剪力的竖向分量共同承担,如图10所示。其中,轴力的竖向分量之和 F_c 为节点子结构的悬链线作用提供的抗力,截面剪力的竖向分量之和 F_f 为节点子结构的抗弯作用提供的抗力。本文提取铰支座处A、B截面的轴力 N_A 与 N_B ,并采用式(5)和式(6)评估两种抗力机制提供的承载力大小,即

$$F_c = N_A \sin \theta + N_B \sin \theta \quad (5)$$

$$F_f = F_v - F_c \quad (6)$$

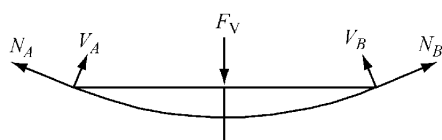


图10 节点子结构受力模型

Fig.10 Mechanical model of beam-to-column assembly

图11为各模型抗弯作用及悬链线作用提供的竖向承载力随柱顶竖向位移发展曲线。与图9对比可知,抗弯作用 F_f 的发展与截面5弯矩的发展一致;悬链线作用 F_c 的发挥由梁截面轴力和梁弦转角两个因素决定,在加载前期,梁弦转角值较小, F_c 的发展滞后于截面5轴力的发展,在加载后期,梁弦转角增大, F_c 比轴力增长更快,且在轴力维持不变时仍可增长。

S0开裂较早($\theta=0.08\text{rad}$),因此,在开裂前, F_c 虽有所发展,但其竖向承载力几乎全由抗弯作用 F_f 提供;开裂后(A1点), F_f 大幅度降低, F_c 迅速增长,抗力机制由抗弯作用向悬链线作用转化;随着截面不断开裂, F_f 持续下降并转为负值,而 F_c 仍可

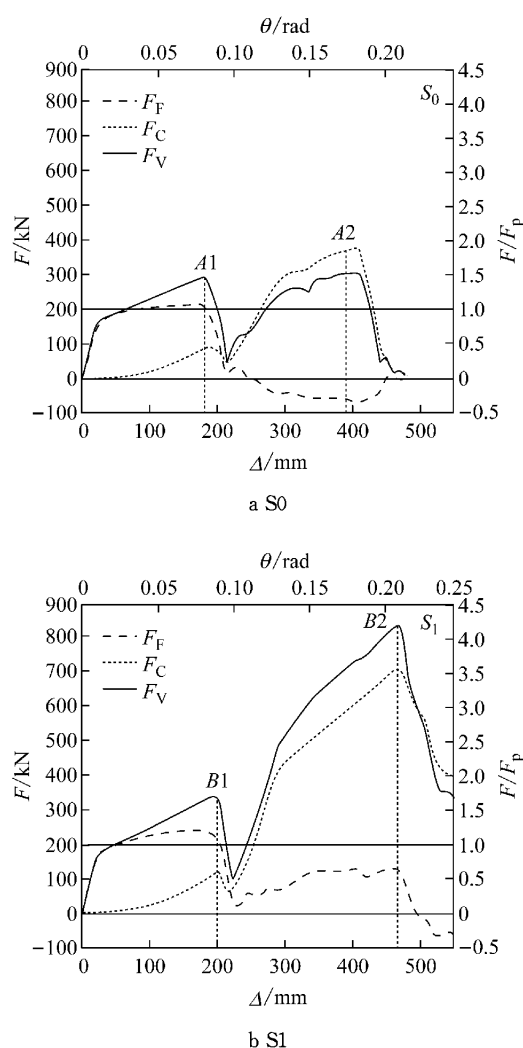


图11 抗弯作用及悬链线作用发展曲线

Fig.11 Resistance provided by flexural and catenary mechanism

增长,后期 F_c 除了抵抗柱顶施加的荷载外,还要消解 F_f 产生的负承载力,在柱顶竖向荷载达到 388 mm(A2点)时, F_c 达到最大值 $1.87F_p$ 。S1在变形前期 F_f 与 F_c 的发展与S0相似;梁下翼缘开裂后(B1点), F_f 在有所降低后基本保持稳定, F_c 迅速增长,抗力机制由抗弯作用向悬链线作用转化;下盖板开裂发生时(B2点), F_c 达到最大值 $3.58F_p$,之后 F_f 与 F_c 均降低。

变形较大时,模型的抗力主要由悬链线作用提供。与S0相比较,S1可更为充分地发挥梁轴力产生的悬链线效应,使节点子结构提供更大的竖向抗力。

4 结论

(1)提出了一种可提升结构抗连续倒塌鲁棒性

的隔板贯通式连接构造改进方案. 数值模拟结果表明, 加固型栓焊盖板连接构造可使下翼缘焊接连接失效后继续有效传力, 并使螺栓孔壁发生局部承压塑性破坏, 这种构造形式可增大梁下翼缘传力失效前节点子结构的竖向变形能力并充分发挥梁内轴向拉力产生的悬链线效应.

(2) 相对于传统隔板贯通式梁柱栓焊连接构造, 加固型栓焊盖板连接构造能有效提高节点子结构的竖向承载力, 可用于提高结构抗连续性倒塌性能的加固改造.

(3) 该结论虽基于对矩形钢管柱-H形梁隔板贯通式节点的研究, 但仍适用于其他梁柱节点类型.

参考文献:

- [1] Ellingwood B R, Leyendecker V E. Approaches for design against progressive collapse [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1978, 104(3):413.
- [2] 李玲, 王伟, 陈以一, 等. 结构连续性倒塌工况下的梁柱节点研究现状[C]//第二届建筑结构抗倒塌学术交流会. 上海: [s. n.], 2012: 155-161.
LI Ling, WANG Wei, CHEN Yiyi, *et al.* Research status of beam-to-column connections in progressive collapse scenario [C]//Proceedings of the 2nd Chinese Conference on Building Structures Collapse Prevention. Shanghai: [s. n.], 2012: 155-161.
- [3] LI Ling, WANG Wei, CHEN Yiyi, *et al.* Experimental investigation of beam-to-tubular column moment connections under column removal scenario [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 88: 244.
- [4] 王伟, 李玲, 陈以一. 方钢管柱-H形梁栓焊混合连接节点抗连续性倒塌性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 57.
WANG Wei, LI Ling, CHEN Yiyi. Experimental investigation on progressive collapse behavior of WUF-B connections between SHS column and H beam [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4):57.
- [5] 王伟, 李玲, 陈以一, 等. 圆钢管柱-H形梁外环板式节点抗连续性倒塌性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 26.
WANG Wei, LI Ling, CHEN Yiyi, *et al.* Experimental study on progressive collapse behavior of CHS column-to-H beam connections with outer-diaphragm [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 26.
- [6] Sadek F, Main J A, Lew H S, *et al.* An experimental and computational study of steel moment connections under a column removal scenario[R]. [S. l.]: National Institute of Standards and Technology of U. S. Department of Commerce, 2010.
- [7] Yang B, Tan K H. Experimental tests of different types of bolted steel beam-column joints under a central-column-removal scenario [J]. Engineering Structures, 2013, 54: 112.
- [8] Yang B, Tan K H. Robustness of bolted-angle connections against progressive collapse: experimental tests of beam-column joints and development of component-based models[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 139(79):1498.
- [9] Department of Defense USA. Unified Facilities Criteria (UFC) 4-02303 Design of buildings to resist progressive collapse[S]. [S. l.]: Department of Defense of USA, 2009.
- [10] General Services Administration (GSA). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects[S]. [S. l.]: GSA, 2003.
- [11] 王伟, 廖芳芳, 陈以一. 基于微观机制的钢结构节点延性断裂预测与裂后路径分析[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 101.
WANG Wei, LIAO Fangfang, CHEN Yiyi. Ductile fracture prediction and post-fracture path tracing of steel connections based on micromechanics-based fracture criteria [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 101.