

文章编号:1001-4888(2020)01-0135-09

钢框架栓焊节点组件模型抗连续倒塌研究^{*}

谭政, 钟炜辉, 李超范

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西西安 710055)

摘要: 钢结构的抗连续倒塌能力一般取决于其抵抗局部损伤的能力, 但这种能力往往受许多因素影响, 目前还没有一个稳定和可靠的判定方法。基于组件法建模原理, 将栓焊节点离散为多个对受力有贡献的基本组件, 然后通过集成组件来模拟栓焊节点的受力特性, 并依此构建了栓焊节点梁柱子结构的连续倒塌数值分析模型。通过与试验结果比较, 验证了模型的有效性和合理性。由此表明组件法在连续倒塌研究中具有重要的理论意义和应用价值。

关键词: 钢框架; 连续倒塌; 组件法; 栓焊节点

中图分类号: TU391 文献标识码: A DOI: 10.7520/1001-4888-18-116

0 引言

结构设计最基本的功能是保证结构安全, 而保证结构安全的最后一道防线是防止结构发生连续倒塌。连续倒塌一旦发生往往是灾难性的, 会造成很严重的生命财产损失, 所以防止结构连续倒塌破坏是结构工程理论和实践的重要内容。连续倒塌通常是由结构的超载或意外荷载所引起建筑物的局部破坏后引发的连锁反应, 扩散至结构的其他部分导致的, 而节点破坏通常是结构失效的主要触发原因, 更决定了结构内力是否能有效传递。因此, 准确快速地建立节点模型, 进而有效评估整体结构的抗倒塌能力, 以避免结构在偶然荷载下发生连续性倒塌, 已然成为结构工程界的当务之急。

在钢结构连接节点的简化建模方面, 最具代表的是 Sarraj^[1] 和 Change 等^[2] 利用组件法建模原理研究节点的受力性能。而针对钢框架梁柱节点抗倒塌性能的研究, Yang 等^[3] 通过静力加载试验研究了 7 种框架梁柱节点在抽柱情况下的失效过程, 发现节点的失效模式与梁柱节点产生大变形后的转动能力有关。陈俊岭等^[4] 利用 ANSYS 模拟了传统栓焊节点、骨狗式节点和盖板式节点在连续倒塌工况下的失效过程, 表明节点在连续倒塌工况下的极限转角远高于在地震作用下的转动能力。实际上, 在连续倒塌过程中, 梁柱节点往往承受拉、弯、剪联合作用, 本文基于组件法建模原理, 对钢框架栓焊节点的非线性力学特性进行分析, 并构建了栓焊节点梁柱子结构的连续倒塌数值分析模型。通过与试验结果对比分析, 结果表明基于节点组件模型的简化建模方法不仅能很好地反映梁构件在拉弯状态下的特性, 更可作为连续性倒塌研究中准确而高效的实用分析方法, 这为广大结构的抗倒塌性能分析和设计提供了新的思路。

1 栓焊节点的组件法建模

1.1 组件法建模简介

组件法思路是认为各种类型节点的承载机制均可由一系列独立的基本组件(每个基本组件可能由

* 收稿日期: 2018-05-16; 修回日期: 2018-08-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51678476); 陕西省重点研发计划项目(2018ZDXM-SF-097)

通讯作者: 钟炜辉(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构抗倒塌等研究工作。Email: zhongweihui1980@163.com

若干个力学弹簧组成)所构成,通过对组成梁柱节点的各个组件进行研究,可获得其精确的力学性能曲线。利用这些基本的力学组件,可构建梁柱节点的组件模型,进而对节点的整体力学特性进行分析。根据节点的具体受力,每个组件(弹簧)对应着“激活”和“未激活”两种状态,这是因为每个组件(弹簧)可能会处于轴力、弯矩、剪力作用及多力混合作用的力学状态,但是需要根据组件受外力情况进行分析每种力学状态是否激活(起作用),激活意味着这种受力状态会在外力作用下工作;反之则处于未激活状态,则可在组件模型简化时忽略该力学状态。

节点中可能参与工作的组件(弹簧)有时会较多,因此在采用组件法分析时需要注意激活与未激活组件(弹簧)之间的相关关系以及各组件(弹簧)之间的主次关系,以免造成对节点性态模拟的失真。组件法的应用有助于分析节点各部分的工作机理,为研究其强度、刚度、转动能力等提供便利,更有利于快速分析并准确获得子结构乃至整体结构的力学性能变化。

1.2 节点组件(弹簧)的力学分析

直接对节点进行变形机理分析以确定其力学性能(模型)往往难度较大,欧洲规范 EC3^[5]提出可将节点离散为多个对受力有贡献的力学单元,并引入适当假定,通过对组件(弹簧)进行集成来实现对节点受力状态的精确模拟。基于此思想,针对钢结构栓焊节点,可定义梁腹板螺栓抗剪(SB)和梁翼缘拉压(TC)两类组件。各组件模型与实际节点各部分的对应关系如图 1 所示,SB 组件可模拟梁腹板螺栓抗剪连接区域的内力贡献,TC 组件可分别模拟梁的上、下翼缘的内力贡献。通过集成梁腹板螺栓抗剪组件(SB)和梁翼缘拉压组件(TC),可形成栓焊刚性节点组件模型,进而模拟节点的受力性能。

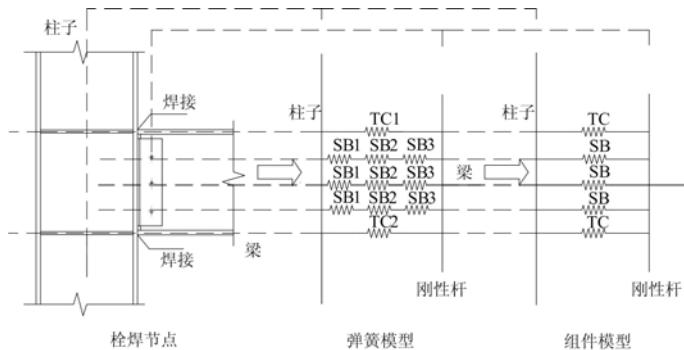


图 1 栓焊刚性节点组件模型

Fig. 1 Component model of rigid joint with welded flange-bolted connection

1.2.1 梁腹板螺栓抗剪组件(SB)

梁腹板螺栓抗剪组件(SB)由连接板螺栓孔承压变形弹簧(SB1)、螺栓抗剪变形弹簧(SB2)、梁腹板螺栓孔承压变形弹簧(SB3)串联组成(如图 2 所示)。SB1、SB3 对应着螺栓孔的承压变形,此变形受螺栓孔端距与边距的影响较大。

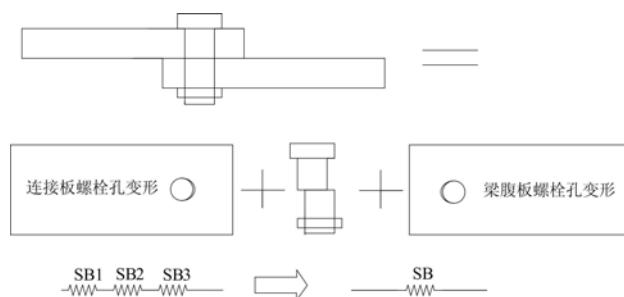


图 2 单个组件的变形分解

Fig. 2 Deformation decomposition of single component

Richard 方程^[6]能很好地描述出螺栓孔承压变形弹簧 SB1 和 SB3 的荷载—变形关系:

$$\frac{F}{F_{b,Rd}} = \frac{1.74\bar{\Delta}}{(1 + \bar{\Delta}^{0.5})^2} - 0.009\bar{\Delta} \quad (1)$$

式中, F 是螺栓孔(板件)所承受的荷载; $F_{b,Rd}$ 是螺栓孔(板件)的极限承载力; $\bar{\Delta}$ 是螺栓孔的名义承压变形, $\bar{\Delta} = \Delta \beta k_i / F_{b,Rd}$; Δ 是螺栓孔的承压变形; β 是钢材修正系数(常用钢材取 1.0)。

Fisher 和 Struik^[7]基于螺栓孔剪切失效模式, 得出其极限承载力计算公式:

$$F_{b,Rd} = \frac{e_2}{d_h} \times f_u \times d_h \times t \leq 2.4 f_u d t \quad (2)$$

式中: e_2 为螺栓孔端距(即螺栓孔中心沿主要受力方向到板边缘的距离); d_h 为螺栓孔直径; f_u 为钢材极限抗拉强度; t 为板厚; d 为板宽。

而螺栓孔的承压变形(对应刚度 k_i)通常可认为由三部分^[6]组成: 螺栓孔的挤压变形(对应刚度 k_{br})、螺栓孔外端钢板的弯曲变形(对应刚度 k_b)、螺栓孔外端钢板的剪切变形(对应刚度 k_v), 具体如图 3 所示。各对应刚度可分别按下列公式计算^[8]:

$$k_{br} = 120 t f_y (d_b / 25.4)^{0.8} \quad (3)$$

$$k_b = 32 E t ((e_2 / d_b) - (1/2))^3 \quad (4)$$

$$k_v = 6.67 G t ((e_2 / d_b) - (1/2)) \quad (5)$$

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{k_{br}} + \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_v}} \quad (6)$$

式中, f_y 为钢材屈服强度; E 为钢材弹性模量; G 为钢材剪切模量; d_b 为螺栓杆直径。

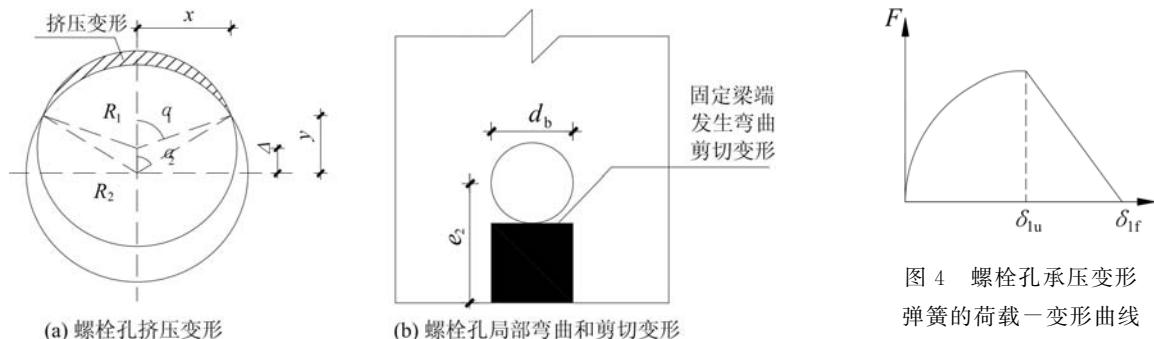


图 3 螺栓孔的承压变形

Fig. 3 Bearing deformation of bolt hole

图 4 螺栓孔承压变形
弹簧的荷载—变形曲线
Fig. 4 The load-deformation
curve of bearing deformation
spring of bolt hole

螺栓孔承压变形弹簧 SB1 和 SB3(仅板厚不同)的典型荷载—变形关系如图 4 所示。图中, δ_{lu} 为螺栓孔承压变形弹簧极限承载力对应的变形, 可取螺栓孔直径的一半^[1]; δ_{lf} 为螺栓孔承压变形弹簧的最大变形, 可取螺栓孔中心到板端的距离^[9]。

螺栓抗剪变形弹簧 SB2 的荷载—变形曲线可由修正的 Raberg-Osgood 公式^[10]确定:

$$\Delta = \frac{F}{k_{v,b}} + \Omega \left(\frac{F}{F_{v,Rd}} \right)^n \quad (7)$$

式中, Δ 是螺栓的剪切变形; F 是螺栓承担的剪力; $k_{v,b}$ 是螺栓的剪切刚度; Ω 是与温度有关的系数, 常温时可取 2.5; $F_{v,Rd}$ 为螺栓的极限抗剪强度, 可按下式计算:

$$F_{v,Rd} = 0.6 \times f_{u,b} \times A \quad (8)$$

式中, $f_{u,b}$ 为螺栓的抗拉强度; A 为螺栓杆的有效面积。

螺栓的剪切刚度 $k_{v,b}$ 可按下式计算:

$$k_{v,b} = \frac{kGA}{d_b} \quad (9)$$

式中, k 为螺栓剪切变形的修正系数, 可取 0.15^[11]。

螺栓抗剪组件 SB 由变形弹簧 SB1、SB2、SB3 三者串联组成, 其失效由 SB1、SB2、SB3 三者中的最小承载力来控制。当破坏由螺栓孔承压变形弹簧 SB1 或 SB3 控制时, 组件 SB 表现为延性破坏; 当破坏

由螺栓抗剪变形弹簧 SB2 控制时,组件 SB 破坏则趋向于脆性破坏^[9]。螺栓抗剪组件 SB 的典型荷载—变形曲线如图 5 所示,其极限承载力对应的变形 δ_u 可由三个变形弹簧串联计算得到,而最大变形 δ_f 对延性破坏可由 SB1、SB2、SB3 三个变形弹簧串联计算获得;对脆性破坏可取 $1.15 \delta_u$ ^[9]。

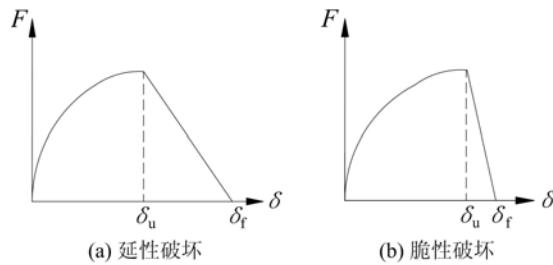


图 5 螺栓抗剪组件 SB 的荷载—变形曲线

Fig. 5 The load-deformation curve of bolt shearing component

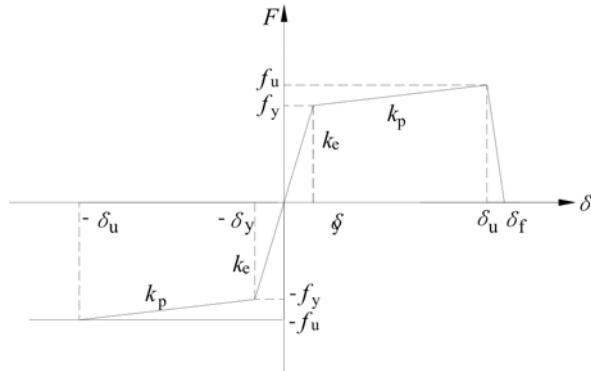


图 6 梁翼缘拉压组件 TC 的荷载—变形曲线

Fig. 6 The load-deformation curve of tension and compression component at the flange of the beam

1.2.2 梁翼缘拉压组件(TC)

分别设置相应的拉压组件 TC(该组件仅由一个变形弹簧组成)来模拟上、下翼缘端部的拉压作用,其荷载—变形曲线^[12]如图 6 所示(正为拉,负为压)。由图可见,确定拉压组件 TC 极限承载力时首先要区分受力状态,受压时其极限状态为材料屈服(忽略受压翼缘屈曲),而受拉时则发生断裂(此时弹簧失效)。

翼缘组件 TC 在屈服前的相关参数可按下列公式^[12]计算:

$$k_e = \frac{E b_f t_f}{\rho b_s} \quad (10)$$

$$F_y = b_f t_f f_y \quad (11)$$

式中, k_e 为翼缘拉压组件的弹性刚度; b_f 和 t_f 为梁翼缘的宽度和厚度; b_s 为剪切板的宽度; ρ 为与梁破坏模式有关的系数^[12],若梁柱节点域控制着失效模式则取 1.0,若翼缘部分破坏控制着失效模式则取 1.5; F_y 是翼缘拉压组件的屈服承载力。

强化阶段的弹塑性刚度 k_p 为:

$$k_p = \frac{E_1}{E} (k_e) \quad (12)$$

式中, E_1 为钢材的强化模量。

受拉时翼缘组件的极限承载力可按下式计算:

$$F_u = b_f t_f f_u \quad (13)$$

受压翼缘组件前两个阶段的荷载—变形曲线与受拉翼缘组件完全相同。当变形达到 δ_u 后,认为荷载达到极限,但变形可继续增大。

2 组件法在连续倒塌研究中的应用

2.1 栓焊节点梁柱子结构连续倒塌试验概况

文献[13]进行了栓焊节点梁柱子结构连续倒塌试验,其加载装置及梁柱节点如图 7 所示。柱截面为 $81.84 \times 286.13 \times 16.64 \times 26.92$ (mm),梁截面为 $539.5 \times 210.69 \times 11.56 \times 18.8$ (mm),梁腹板连接板尺寸为 $304.8 \times 152.4 \times 12.7$ (mm),连接螺栓直径为 25.4mm(螺栓孔直径为 27.4mm),钢材弹性模量为 206000MPa,泊松比取 0.3。所有材料的材性指标列于表 1。梁腹板连接处,螺栓间距为 101.6 mm,螺栓孔对梁腹板的端距为 57.15mm,对连接板的端距为 69.85mm。梁上、下翼缘与柱子焊接,试

验过程中未发现焊缝破坏。

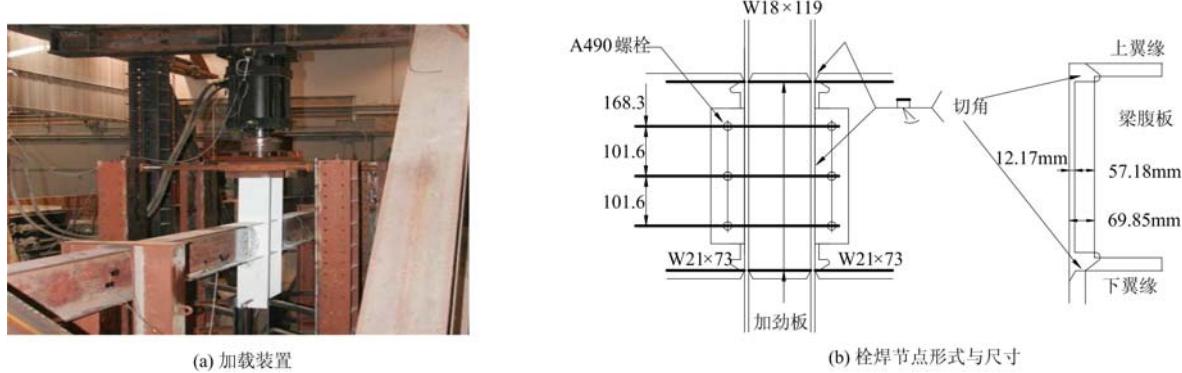


图7 试验加载装置及节点尺寸(mm)^[13]

Fig. 7 Test set-up and joint size (mm)^[13]

表1 梁柱子结构连续倒塌试验材性指标

Tab. 1 Material property index of beam-column substructure for test

部位	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	屈服应变	失效应变
连接板	309	465	0.0016	0.183
梁腹板	395	500	0.0019	0.189
梁翼缘	359	496	0.0017	0.174
柱子	352	456	0.0018	0.190
螺栓	646	800	—	—

2.2 栓焊节点各组件参数计算

对如图7(b)所示的栓焊节点形式及尺寸,可将连接板沿水平方向划分为如图8所示的三条板带,然后分别计算各板带的梁腹板螺栓抗剪组件(SB)。

连接板螺栓孔承压变形弹簧SB1的计算如下:

由式(2)可得 $F_{b,Rd}$:

$$F_{b,Rd} = \frac{69.85}{27.4} \times 465 \times 27.4 \times 12.7 = 412 \text{ kN} \leq 2.4 f_u d t \quad (14)$$

由式(3)、(4)、(5)可分别求得螺栓孔的挤压刚度 k_{br} 、螺栓孔外端钢板的弯曲刚度 k_b 及剪切刚度 k_v :

$$k_{br} = 120 \times 12.7 \times 309 \times \left[\frac{25.4}{25.4} \right]^{0.8} = 471 \text{ kN/mm} \quad (15)$$

$$k_b = 32 \times 2.06 \times 10^5 \times 12.7 \times \left[\frac{69.85}{25.4} - \frac{1}{2} \right]^3 = 953605 \text{ kN/mm} \quad (16)$$

$$k_v = 6.67 \times 79000 \times 12.7 \times \left[\frac{69.85}{25.4} - \frac{1}{2} \right] = 15057 \text{ kN/mm} \quad (17)$$

则螺栓孔承压刚度 k_i 可由式(6)计算:

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{k_{br}} + \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_v}} = \frac{1}{\frac{1}{471} + \frac{1}{953605} + \frac{1}{15057}} = 456 \text{ kN/mm} \quad (18)$$

名义总变形为:

$$\bar{\Delta} = \Delta \beta k_i / F_{b,Rd} = \Delta \times 1 \times 456 / 412 = 1.107 \Delta \quad (19)$$

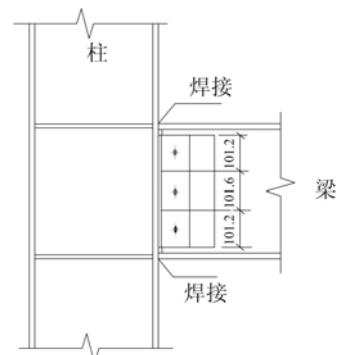


图8 梁腹板螺栓连接抗剪组件划分
Fig. 8 Shear component division
of web bolt connection

将其代入式(1)可得连接板螺栓孔承压变形弹簧 SB1 的荷载—变形曲线方程:

$$\frac{F}{412} = \frac{1.9262 \times \Delta}{(1 + \Delta^{0.5} \times 1.052)^2} - 0.0100\Delta \quad (20)$$

若 δ_u 取螺栓孔直径的一半, δ_f 取端距 69.85mm, 则 SB1 的荷载—变形曲线如图 9(a)所示(下降段仅给出示意)。梁腹板螺栓孔承压变形弹簧 SB3 的计算原理同 SB1, 此处从略, 其荷载—变形曲线如图 9(c)所示。螺栓抗剪变形弹簧 SB2 可通过式(7)计算, 其荷载—变形曲线如图 9(b)所示。

SB1、SB2、SB3 串联组成的梁腹板螺栓抗剪组件 SB 的荷载—变形曲线如图 9(d)所示。利用三个变形弹簧的极限承载力可判断出失效控制模式为螺栓的抗剪破坏(脆性破坏), 这与试验现象^[13]相吻合。

梁上、下翼缘拉压组件 TC 的荷载—变形曲线如图 9(e)所示。

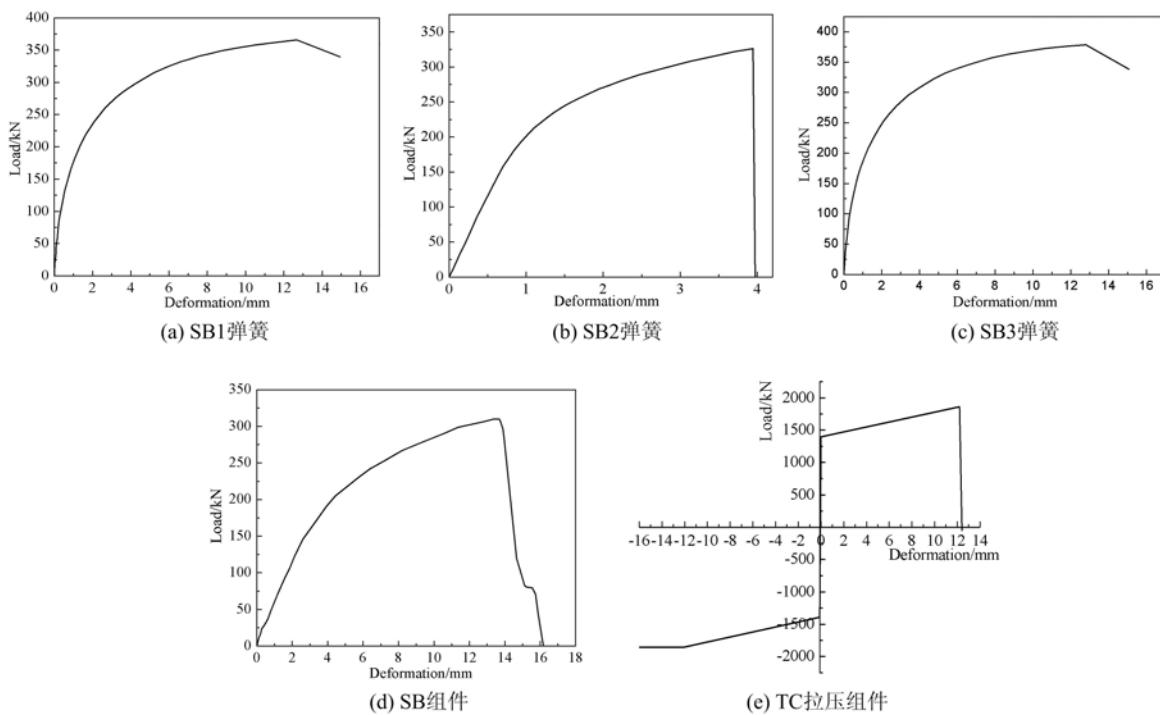


图 9 节点各组件荷载—变形曲线

Fig. 9 The load-deformation curve of each components of joint

2.3 组件法建模与试验结果对比

本文利用 LS-DYNA 软件基于图 7 所示的几何尺寸及表 1 所示的材性指标构建了栓焊节点梁柱子结构连续倒塌数值分析模型, 即两杆系模型。梁、柱和节点域中的刚性杆均采用 Hughes-Liu 梁单元, 各组件采用 MAT119 弹簧单元, 梁柱节点域假定为刚域, 由刚性杆 2 和刚性杆 3 组成, 两侧刚性斜杆以模拟柱支撑。组件两端分别与刚性杆 1 和节点刚域相连, 失效柱上、下端与刚域相连, 刚性杆和节点刚域进行耦合以实现内力的传递, 其中刚性杆 1 的位置对应于节点剪切板边缘处, 刚性杆 2 位于失效柱外翼缘处, 刚性杆 3 位于失效柱腹板加劲肋位置处。试验过程中结构未发生平面外失稳, 故按平面结构进行建模, 边界条件设置为固接, 计算时采用位移控制的加载方式, 如图 10 所示。分析计算时, 组件单元的本构关系通过前述得到的荷载—变形曲线来定义, 并将图 9 所示的 SB、TC 组件荷载—变形曲线失效点作为数值模型中组件单元失效的判据, 当某组件单元失效时, 即表示此处发生断裂。

试验中, 连续倒塌条件下栓焊节点的最终破坏形态如图 11 所示, 节点左侧下翼缘发生了断裂, 而数值分析模型在失效柱竖向位移达到约 500mm 时, 左右两侧梁的下翼缘同时发生了断裂, 如图 12 所示。这是由于在试验加载过程中, 结构受力不可能完全对称所导致的。

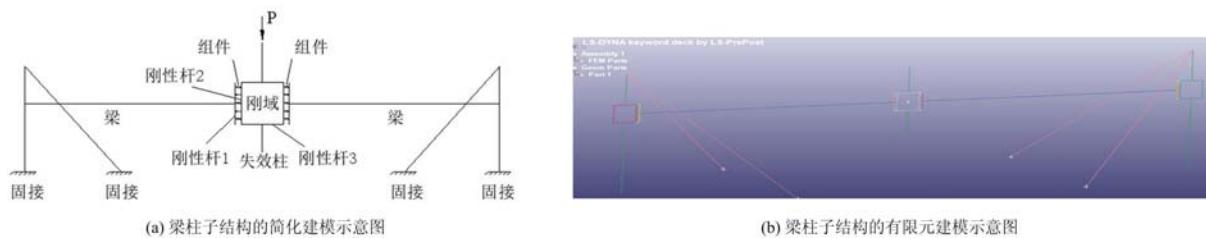


图 10 梁柱子结构的组件法模型

Fig. 10 Component model of beam-column substructure

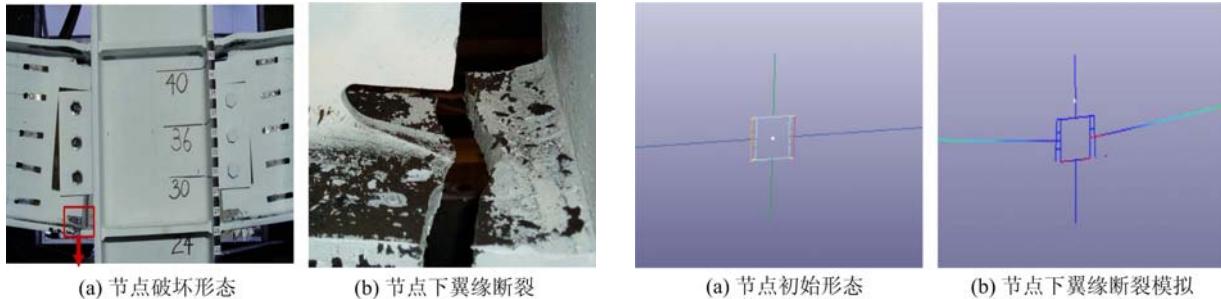
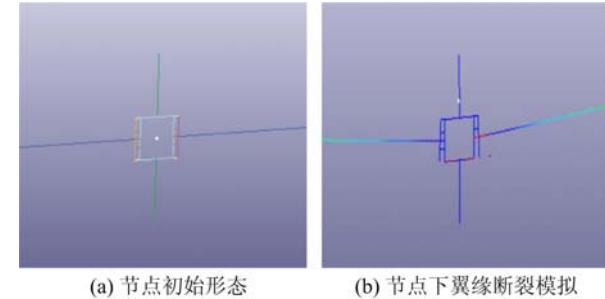
图 11 梁柱子结构试验破坏形态^[13]Fig. 11 Failure mode of beam-column substructure under test^[13]

图 12 梁柱子结构组件断裂的数值模拟

Fig. 12 Numerical simulation of component fracture of beam-column substructure

数值分析模型获得的荷载—变形曲线与试验结果的对比如图 13 所示, 荷载—变形曲线与试验结果的对比如图 14 所示。

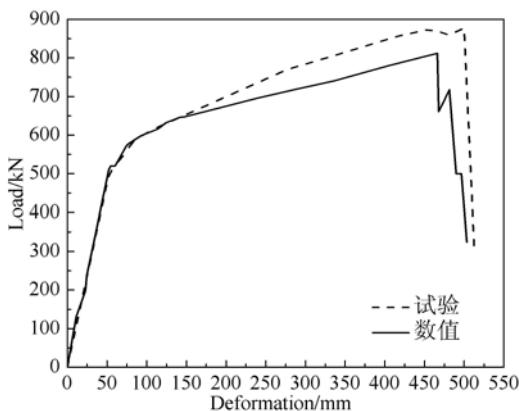


图 13 荷载—变形曲线对比

Fig. 13 Comparison of load-deformation curves

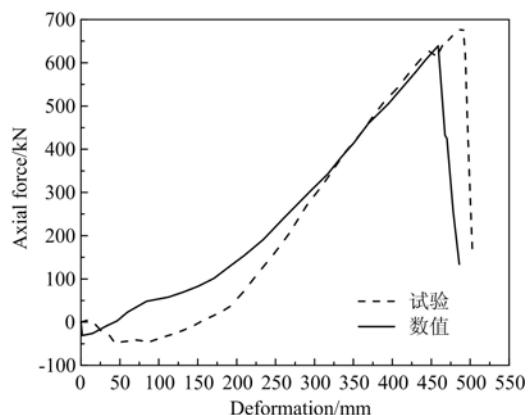


图 14 轴力—变形曲线对比

Fig. 14 Comparison of axial force-deformation curves

通过图 13 对比发现, 数值模拟能较为准确地预测连续倒塌条件下栓焊节点梁柱子结构的受力状态和性能, 弹性阶段吻合很好, 后期刚度略微偏小, 数值计算获得的断裂荷载为 780kN, 与试验值相比偏低, 误差约 10%, 这可能是未考虑各排组件单元之间在弹塑性阶段及大变形阶段的相互作用所致。通过图 14 对比发现可知, 组件模型试件分析得到的轴力发展与试验结果有所差异, 尤其是在初始阶段, 这是因为在试验加载初期梁内部会产生压拱效应(当梁柱子结构梁端具有足够约束时, 梁内部在集中荷载作用下形成了一个类似于拱状的传力路径), 此时梁(试验)呈现出压力, 两杆系模型不能完全准确地反映结构在小变形阶段的受力情况, 文献[14]同样出现此种情况, 但本文的简化模型还是能够很好地反映中柱失效后刚性连接节点梁柱子结构的大变形特征。试验获得的最大轴力为 680kN, 有限元计算得到的最大轴力为 641kN, 误差约为 6%。由此可见, 组件法简化模型不仅具有良好的计算精度与计算效

率,更能准确地反映刚性节点在中柱失效工况下结构内力的主要响应,特别适用于具有较强非线性状态特征的结构连续倒塌性能研究。

3 结论

- (1) 钢结构栓焊刚性节点按照其承载机制,可分解为两类独立的基本力学组件:梁腹板螺栓抗剪组件(SB)和梁翼缘拉压组件(TC)。
- (2) 通过对组成节点的各基本组件进行力学性能分析,可获得单个组件的精确荷载—变形曲线,进而构成节点的整体组件式分析模型,可实现对节点整体力学性能的非线性分析。
- (3) 通过算例,获得各基本组件参数,并构建了栓焊节点梁柱子结构连续倒塌数值分析模型,所获得的荷载—变形曲线与试验结果较为吻合,且能准确反映节点的破坏(断裂)趋势及对应的受力特征,满足工程计算的精度要求。
- (4) 基于组件法的栓焊节点简化模型具有良好的计算精度和效率,可较为准确地预测结构在连续倒塌条件下的力学行为,可以作为连续倒塌研究的有利工具。

参考文献:

- [1] Sarraj M. The behavior of steel fin plate connections in fire[D]. University of Sheffield, 2007.
- [2] Change L, Tan K H, Fung T C. Component based steel beam column connections modeling for dynamic progressive collapse analysis[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 107(1):24—36.
- [3] 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—130.
- [4] 陈俊岭,舒文雅,李金威.框架结构典型梁柱节点的抗连续性倒塌性能[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(1):53—58 (CHEN Junling, SHU Wenyia, LI Jinwei. Performance of various steel moment connection under progressive collapse scenario[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2016, 44 (1): 53 — 58 (in Chinese))
- [5] EN1993-1-8: 2002, Eurocode 3: Design of Steel Structure, Part 1-8: Design of joints[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [6] Richard R M, Elsali M K. Moment-rotation curves for partially restrained connections[R]. Users manual for program developed at the University of Arizona, Department of Civil Engineer and Engineering Mechanics, Tucson, Ariz, 1991.
- [7] Fisher J W, Struik J H. Guide to design criteria for bolted and riveted joints[M]. New York: Wiley Interscience, 1974.
- [8] Rex C O, Easterling W S. Behavior and modeling of a bolt bearing on a single plate[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(6):792—800.
- [9] Main J A, Sadek F. Robustness of steel gravity frame systems with single-plate shear connections[R]. NIST Technical Note 1749, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2012.
- [10] Ramberg W, Osgood W R. Description of stress-strain curves by 3 parameters[R]. Technical Report 902, National Advisory Committee for Aeronautics, 1943.
- [11] Hayes M D. Structural analysis of a pultruded composite beam: shear stiffness determination and strength and fatigue life predictions[D]. PhD Thesis in Engineering Mechanics, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [12] Yim H C, Krauthammer T. Mathematic-mechanical model of WUF-B connection under monotonic load[J]. Engineering Journal, 2010, 2(1):71—90.
- [13] Sadek F, Main J A. An experimental and computational study of steel moment connections under a column removal scenario[R]. NIST Technical Note, 1669.
- [14] 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, 2013, 139(9):1498—1514.

On the resistance to progressive collapse of steel frame with bolted welding joint assembly model

TAN Zheng, ZHONG Wei-hui, LI Chao-fan

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The resistance ability to progressive collapse of steel structure generally depends on its resistance ability to local damage, however, this ability is often affected by many factors. At present, there is no stable and reliable judge method. Based on modeling principle by component method, the joints (namely bolt welded joints) are discretized into a number of basic components that contribute to stress. Then, the mechanical characteristics of bolt welded joints are simulated by integrated components, and a numerical model of progressive collapse of beam and column substructure of bolt welded joints was constructed. The validity and rationality of the model are verified by comparing with the experimental results. It indicates that the component method has great theoretical significance and is applicable value in the study of progressive collapse.

Keywords: steel frame; progressive collapse; component method; welded flange-bolted connection