

扩孔式顶底腹板角钢连接抗连续倒塌性能研究

Study on the Resistance to Continuous Collapse of the Reamed Top and Bottom Web Angle Steel Connection

信文治¹, 赵丽洁^{1,2}

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056017; 2. 天津农学院 水利工程学院, 天津 300384)

摘要: 为深入探究扩孔尺寸对扩孔式顶底腹板角钢连接梁-柱结构抗连续倒塌性能的影响, 以该类连接的梁-柱结构为研究对象, 采用 Ansys/LS-DYNA 有限元软件建立中柱移除模型, 通过分析承载力-位移曲线、内力发展曲线及荷载抵抗机制, 验证模型准确性并揭示扩孔尺寸的影响规律。结果表明: 扩孔尺寸增大, 螺栓断裂对应的位移增大, 但结构极限承载力无显著变化; 扩孔式连接在小变形下的梁机制较常规孔节点有所削弱, 但结构延性显著增强; 荷载抵抗机制分析显示, 结构抗倒塌过程依次经历梁机制、梁机制与悬链线机制混合作用、悬链线机制主导阶段, 其中悬链线机制的承载力提升与螺栓滑移产生的摩擦力密切相关。这表明扩孔设计实现了在不降低承载力前提下对结构延性与变形能力的提升, 而延性的显著增强对于结构在大变形阶段抵抗连续倒塌至关重要, 说明扩孔设计可通过优化抗倒塌机制协同作用增强结构抗连续倒塌性能。

关键词: 扩孔; 顶底腹板角钢; 抗连续倒塌; 数值模拟

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0137-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.025

XIN Wenzhi¹, ZHAO Lijie^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056017, China;

2. School of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: To deeply explore the influence of the expansion hole size on the continuous collapse resistance performance of the expansion hole-type top-bottom web steel plate connection beam-column structure, this study takes this type of connection beam-column structure as the research object. The finite element software Ansys/LS-DYNA is used to establish a model of the column removal. By analyzing the bearing capacity-displacement curve, internal force development curve and load resistance mechanism, the accuracy of the model is verified and the influence law of the expansion hole size is revealed. The results show that: as the expansion hole size increases, the displacement corresponding to the bolt fracture increases, but the structural ultimate bearing capacity does not change significantly; the beam mechanism of the expansion hole connection is weakened compared to the conventional hole node under small deformation, but the structural ductility is significantly enhanced; the load resistance mechanism analysis shows that the structure undergoes the beam mechanism, the mixed action of the beam mechanism and the catenary mechanism, and the dominance of the catenary mechanism in the collapse resistance process. The bearing capacity of the catenary mechanism is related to the friction force generated by the bolt slippage. This indicates that the

作者简介: 信文治 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 钢结构。

通信作者: 赵丽洁 (1985—), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 结构健康监测。

收稿日期: 2023-10-21

建筑结构

expansion design achieves the improvement of the structural ductility and deformation capacity without reducing the bearing capacity, and the significant enhancement of ductility is crucial for the structure to resist continuous collapse in the large deformation stage. It shows that the expansion design can enhance the structural collapse resistance performance by optimizing the synergy of the anti-collapse mechanism.

Key words: reaming; top and bottom web angle steel; resistance to continuous collapse; numerical simulation

0 引言

1968 年伦敦 Ronan Point 公寓燃气爆炸事故与 2001 年 9 月 11 日美国的世贸大厦受到恐怖袭击事件引起了众多学者对结构抗连续倒塌方面的研究，人们对建筑结构的安全性和鲁棒性提出了更高的要求。连续倒塌是指由初始的构件或节点局部的初始破坏，从构件到构件扩展，最终导致一部分结构倒塌或整个结构倒塌^[1]。

拆除构件法是目前抗连续倒塌设计中最常用的研究方法，已被包括 GSA^[2] 和 DoD^[3] 在内的许多设计规范采用。梁柱节点是任何建筑结构的关键部位，节点的转动能力和拉结能力控制着悬链线效应的发展程度，是决定建筑结构抗连续倒塌性能的重要因素^[4]。Yang 等^[5-6]通过中柱移除试验研究了不同节点形式连接的梁柱结构的抗连续倒塌性能，同时发现顶底腹板双角钢螺栓连接节点的结构有更强的悬链线效应。马人乐等^[7-8]采用低周往复加载方式研究了长圆孔螺栓节点连接的钢框架在地震作用下的变形耗能能力，发现螺栓在长圆孔中滑移可以显著提高节点的变形能力。胡淑军等^[9-10]设计并模拟分析了一种扩孔螺栓连接型消能梁段的抗震性能，扩孔式消能梁段的耗能能力有明显的提高。赵俊贤等^[11]为释放传统焊接节点对梁柱的刚性约束，提出滑移连接的 BRB 框架节点，该节点相比焊接节点可以显著降低应力水平，在一定条件下可以有效避免框架发生剪切破坏。张波等^[12]通过对考虑摩擦滑移的扩孔螺栓连接型耗能段和普通扩孔螺栓连接型耗能段进行低周往复加载研究，发现扩孔螺栓连接型耗能段经摩擦滑移和承载过程，变形损伤更小。

综上，目前对不同类型节点在抗倒塌过程中的研究十分广泛，迄今为止，扩孔式节点由于其“延性节点”的概念往往用于研究抗震耗能方面，在抗倒塌过程中的研究相对较少。为研究扩孔式节点连

接的梁柱子结构在抗连续倒塌中的工作机理，根据已有的试验研究进行数值模拟验证，采用有限元软件 Ansys/LS-DYNA 研究扩孔式节点连接的梁柱-结构抗连续倒塌性能，分析不同扩孔尺寸对梁-柱结构抗连续倒塌承载力和工作机制的影响。

1 梁柱结构模型

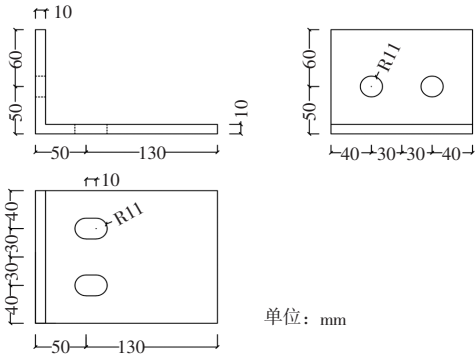
为了进行扩孔式顶底腹板连接抗连续倒塌性能的数值模拟，对文献 [13] 中 TSWA-10 的试验研究建立有限元模型并进行验证，试验概况如下。

1.1 试验模型

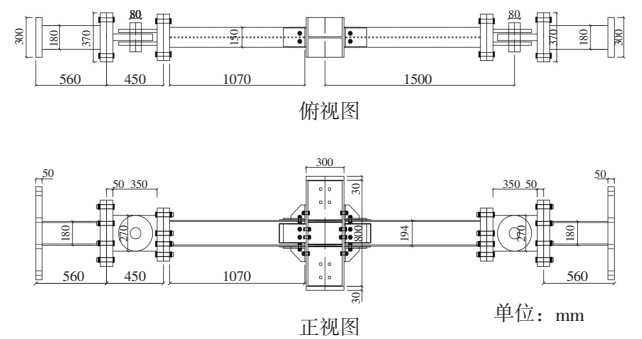
试验采用节点双半跨梁、柱结构，钢梁截面尺寸为 194 mm × 150 mm × 6 mm × 9 mm，钢柱尺寸为 300 mm × 300 mm × 10 mm × 15 mm，梁和柱通过顶底腹板双角钢和螺栓进行连接，其中所有角钢均为不等肢角钢 ∠180 × 110 × 10，节点处的螺栓采用 10.9 级 M20 高强螺栓。顶底角钢在两侧设置 120 mm × 110 mm × 40 mm × 30 mm × 6 mm 的梯形加劲肋，为增大螺栓滑移时的摩擦力，角钢与螺栓之间加一摩擦盖板。角钢尺寸及模型如图 1 所示，材料试验结果见表 1。

1.2 有限元模型

采用有限元软件 Ansys/LS-DYNA 建立模型，对比试验和数值模拟的破坏形态和数据结果来验证有限元模型的准确性。



(a) 角钢尺寸图



(b) 梁柱尺寸图

(c) 现场装配图

图1 构件尺寸及现场装配图

Fig. 1 Component dimensions and site assembly drawing

表1 材料试验数据表

Table 1 Material testing data sheet

材料	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	弹性模量 /MPa	泊松比 μ
柱腹板	409	610	210	0.3
柱翼缘	409	609	210	0.3
梁腹板	376	623	212	0.3
梁翼缘	376	623	211	0.3
角钢	352	625	220	0.3
加劲肋	346	599	208	0.3

1.2.1 单元类型和材料模型

有限元模型中梁柱等三维实体构件选择六面体单元 Solid164，而铰支座部位选择弹簧阻尼单元。

梁、柱结构有限元模型中的主体部分全部采用非线性随动强化塑性模型 MAT_PLASTIC_KINEMATIC。梁-柱结构中的支撑构件销轴部分不需要考虑其力学性能，采用了刚体材料模型 MAT_RIGID，此模型会将支撑构件的所有的自由度集中于构件质点^[14-15]。

1.2.2 约束、接触与加载

有限元模型边界条件的设置与试验中一致，在梁远端两侧的上翼缘和下翼缘之间设置钢板，模拟铰支座中的耳板，并在耳板和梁腹板上打孔放置铰支座中的销轴，如图2所示。

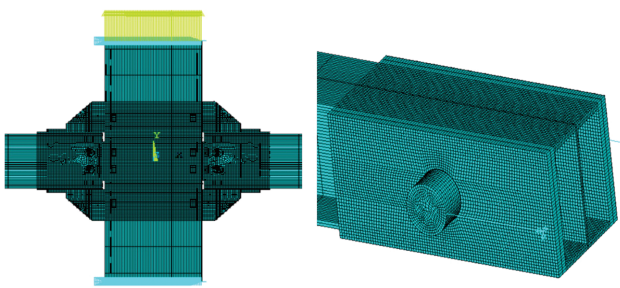


图2 梁-柱结构的加载与边界条件

Fig. 2 Loading and boundary conditions of beam-column structures

在有限元模型中，X轴为梁轴方向，Y轴为柱轴方向，Z轴为平面外方向，约束铰支座部位弹簧单元远端的3个自由度，同时为防止模型在位移过程中发生平面外的位移和转动，约束柱顶和柱底节点在Z轴方向的平动自由度，来模拟图1(c)中的约束系统。

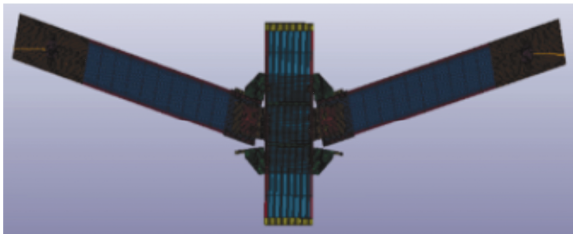
模型中在角钢节点与梁加强板、盖板之间的接触采用面-面接触，构件的其余接触面均设置为单面接触，两种接触类型均设定为自动接触方式。

模型中的外荷载分为螺栓预紧力和竖向力。螺栓预紧力是通过LS-PREPOST中的关键词 INITIAL_STRESS_SECTION对螺栓施加155 kN的预紧力。而竖向力则是在失效柱柱顶施加不断增大竖向荷载，直至结构发生破坏。

2 有限元验证

2.1 失效特征对比

试验与有限元模拟的失效特征如图3所示。试验与有限元模拟的失效特征基本一致，构件发生间接



(a) 梁-柱结构变形图

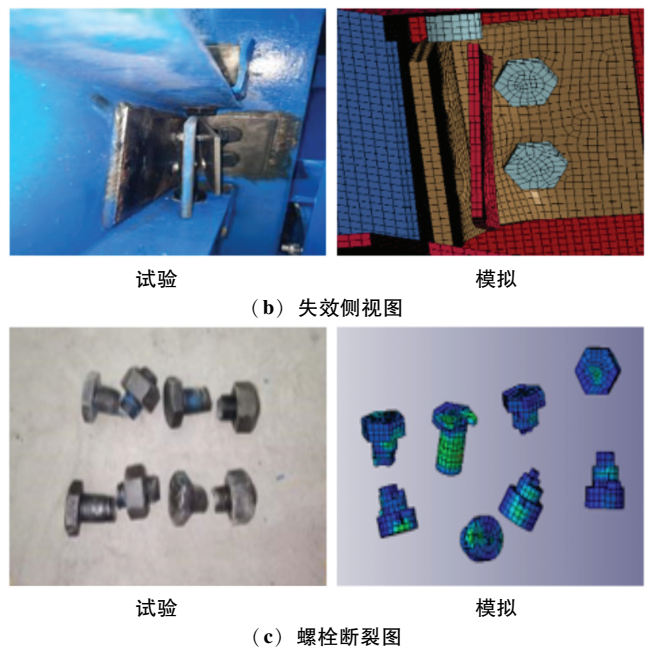


图3 TSWA-10 的试验与有限元模型失效特征对比图
Fig. 3 Comparison of failure characteristics and finite element model of TSWA-10

性的破坏。第一次破坏是底部角钢与梁翼缘连接的螺栓断裂，第二次破坏是腹板角钢与梁腹板连接的螺栓断裂，最后一次破坏是顶部角钢与柱连接的螺栓断裂。

2.2 承载力曲线对比

由图4可知，有限元结果与试验结果总体吻合较好，但有限元结果在模型破坏时曲线有一定程度波动。试验中三次破坏对应荷载曲线的三次峰值点，每次峰值点处试验与有限元模拟的最大荷载分别是165、156、249和231、217、216 kN，误差分别为5.4%、7.2%和0.5%，误差较小，该有限元模型可以反映试件的受力性能。

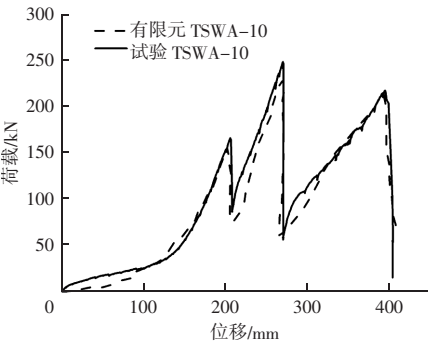


图4 TSWA-10 的试验与有限元承载力-位移曲线对比
Fig. 4 Comparison of load-displacement curves between test and finite element model of TSWA-10

3 抗连续倒塌性能分析

以梁-柱结构为研究对象，建立扩孔尺寸为20、30和40 mm的顶底腹板角钢连接的梁-柱结构有限元模型，通过内力发展曲线及荷载抵抗机制分析不同扩孔尺寸对结构抗连续性倒塌性能的影响规律。

为区分试验与有限元模型的结果，采取不同的命名方式。试验 TSWA-10 对应的有限元模型命名为 K10，则扩孔尺寸为20、30和40 mm的有限元模型分别命名为 K20、K30和K40，K0为常规孔节点的有限元模型。通过对以上5个数值模型的内力发展曲线与荷载抵抗机制进行对比分析。

3.1 构件内力分析

由图5可知，随着中柱竖向位移的不断增大，梁中的内力发展情况较为复杂，总体上看，梁-柱结构在变形较小时，内力主要由弯矩提供承载力；随着变形的增大，轴力逐渐成为抗拉承载力的主要来源。

不同扩孔尺寸的顶底腹板角钢连接的梁-柱结构内力发展趋势相同，弯矩发展经历了上升、稳定和下降三个阶段，轴力的发展因不同位置处螺栓的断裂经历了三次上升段和三次下降段。

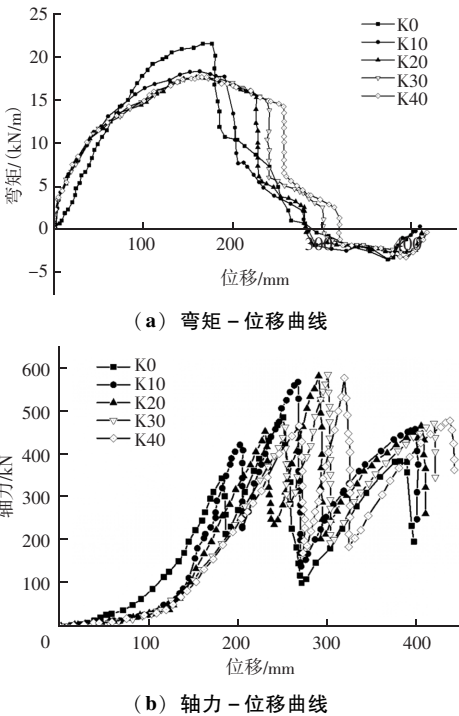


图5 不同构件内力发展曲线对比图
Fig. 5 Comparison of internal force development curves of different component

初始阶段梁内主要以弯矩为主，轴力发展缓慢，梁机制是主要的抗力机制，当失效柱竖向位移到 130 mm 左右时，弯矩开始进入稳定阶段，稳定阶段的弯矩发展速度较缓，而轴力正处于上升段，此时梁机制与悬链线机制共存且共同为结构提供抗力；当结构发生第一次破坏时，弯矩和轴力急速下降，竖向位移继续增大时，轴力继续增大，弯矩作用不断减弱直至退出工作，轴拉作用不断增强，此时为悬链线效应发展阶段，到结构发生第二次破坏时，弯矩完全退出工作。

通过对 K10、K20、K30 和 K40 四个有限元模型曲线的对比发现，随着扩孔尺寸的增大，梁内的弯矩和轴力的大小几乎没有变化，只是螺栓断裂时的位移增大了。

由 K0 和 K10 的曲线对比可以看出，两者的发展趋势基本一致，但初始阶段 K10 的弯矩比 K0 的大；当竖向位移增大到 60 mm 左右，螺栓开始在长圆孔内滑移，盖板仅提供摩擦力的作用，梁端弯矩开始减小。梁内最大轴力是第二次螺栓断裂，此时 K0 最大轴力为 483 kN，K10 比 K0 最大轴力增大了 16.58%。同样在第一个峰值点时 K0 最大轴力为 359 kN，K10 最大轴力为 430 kN，摩擦力使得轴力增大了 16.51%，在最后一次破坏的峰值点轴力增大了 16.48%。

3.2 荷载抵抗机制分析

通过对梁-柱结构的内力发展情况可知，结构抗倒塌过程的荷载抵抗机制主要是梁机制和悬链线机制。为了更加深入地了解梁-柱结构在倒塌过程中荷载抵抗机制的发展情况，将梁-柱结构竖向承载力中的抗弯承载力和轴拉承载力进行拆分，梁中剪力的竖向分量形成的抗弯承载力，即梁机制；梁中轴力的竖向分量形成了轴拉承载力，即悬链线机制。图 6 为竖向集中荷载作用下的梁柱结构受力平衡图，根据截面处的弯矩和轴力采用式 (1)~(4) 计算得到梁机制与悬链线机制，结果如图 7 所示。

$$V_R(t) = \frac{M_{\text{con},R}(t) - M_{\text{sup},R}(t)}{\sqrt{(L/2)^2 + D^2}} \quad (1)$$

$$Q_{m,R} = V_R(t) \cos \theta_2 \quad (2)$$

$$T_{n,R} = N_R(t) \sin \theta_2 \quad (3)$$

$$F_1(t) = T_{n,L} + T_{n,R} + Q_{m,L} + Q_{m,R} \quad (4)$$

式中： $M_{\text{con},R}(t)$ 为梁柱节点处的弯矩，kN/m；

$M_{\text{sup},R}(t)$ 为铰支座处的弯矩，kN/m； $V_R(t)$ 为梁端剪力，kN； $Q_{m,R}$ 为右侧梁弯曲效应提供的竖向荷载，kN； $T_{n,R}$ 为右侧梁悬链线效应提供的竖向荷载，kN； $F_1(t)$ 为梁机制和悬链线机制提供的竖向承载力，kN； θ_2 为右侧梁转角，rad。

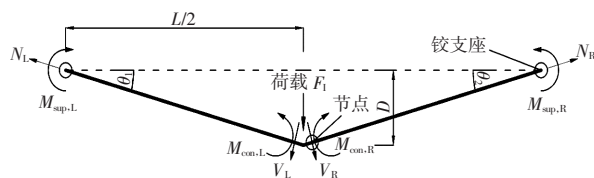
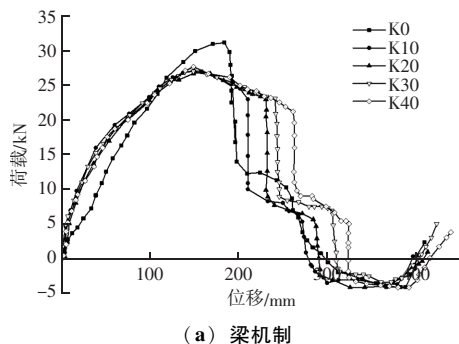
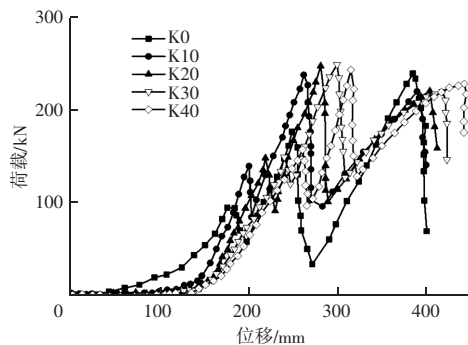


图 6 荷载抵抗机理

Fig. 6 Load-resisting mechanism



(a) 梁机制



(b) 悬链线机制

图 7 荷载抵抗机制对比图

Fig. 7 Comparison diagram of load resistance mechanism

不同扩孔尺寸的顶底腹板角钢连接的梁-柱结构荷载抵抗机制发展趋势相同，结合内力位移曲线的分析结果可知，在小变形情况下，梁-柱结构的弯矩处于发展较快，初始阶段主要是抗弯承载力提供竖向抗力的梁机制阶段，随着扩孔尺寸的不断增大，梁机制作用的位移也逐步增大，承载力基本一致。随着竖向位移的增大，轴力迅速发展，竖向承载力由抗弯承载力向轴拉承载力过渡，进入悬链线机制阶段，随着扩孔尺寸的增大，悬链线机制阶段的承载力并没有很大的变化，而是作用阶段的位移增大了，梁-柱结构可以承受更大的变形。

建筑结构

由图7中K0和K10的曲线可知,角钢扩孔使得梁-柱结构的抗弯承载力有所降低,从荷载角度来看,角钢扩孔使梁机制有一定的削弱;从抗倒塌耗能来看,扩孔使梁-柱结构能够承受更多的能量。随着竖向位移的增大,轴力迅速发展,竖向承载力由抗弯承载力向轴拉承载力过渡,进入悬链线机制阶段,角钢扩孔使得轴拉承载力有大幅度提高,这主要是由螺栓在长圆孔内滑移产生的摩擦力导致的。

4 结论

通过对顶底腹板角钢连接节点的受力性能试验及有限元模拟分析,研究扩孔式顶底板角钢连接梁-柱结构抗连续倒塌的性能,得到以下结论:

(1) 试验中设计的角钢强度较高,有限元模拟结果良好,所有结构的破坏都是从底部角钢与梁连接的螺栓断裂,到腹板角钢与翼缘连接的螺栓断裂,再到顶部角钢与柱连接的螺栓断裂。

(2) 与常规孔节点相比,角钢扩孔使螺栓在结构变形过程中产生滑移,不仅增强了结构抗连续倒塌的竖向承载力,还增大了结构延性,提升了结构在中柱移除场景下抵抗连续倒塌的能力。

(3) 扩孔尺寸越大,螺栓断裂时的位移越大,而结构的竖向极限承载力基本一致。由此可知,扩孔式节点能够在不降低结构抗连续倒塌承载力的同时,通过提高结构延性和变形能力,有效增强结构抵抗连续倒塌的能力。

(4) 所有试件的抗连续倒塌荷载抵抗机制发展模式相同,均经历梁机制阶段、梁机制和悬链线机制混合阶段以及悬链线机制阶段。值得注意的是,扩孔式节点中悬链线机制提供的抗连续倒塌承载力源于轴力的竖向分力,而轴力包含螺栓滑移时的摩擦力,这一机制对结构抗连续倒塌性能的提升至关重要。

参 考 文 献

- [1] 建筑结构抗倒塌设计规范: T/CECS 392-2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [2] GSA 2013. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance [S]. General Service Administration, 2013.
- [3] Unified Facilities Criteria. Design of building to resist progressive collapse [S]. Department of Defence, 2013.
- [4] 姜健, 吕大刚, 陆新征, 等. 建筑结构抗连续性倒塌研究进展与发展趋势 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43: 1-28. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2021. 0494.
- [5] 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 - asce, 2013, 139 (9): 1498 - 1514.
- [6] 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 (5): 112 - 130.
- [7] 马人乐, 杨阳, 陈桥生, 等. 长圆孔变型性高强螺栓节点抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2009, 30: 101 - 106.
- [8] 马人乐, 李渊, 梁峰, 等. 钢管混凝土梁柱长圆孔变型性高强螺栓节点抗震性能试验研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2010, 12: 25 - 31.
- [9] 胡淑军, 曾思智, 熊进刚, 等. 扩孔螺栓连接型消能梁段的耗能机理及设计方法研究 [J]. 自然灾害学报, 2019, 28: 66 - 74.
- [10] 胡淑军, 王雪飞, 熊进刚, 等. 带扩孔螺栓连接型消能梁段的Y形偏心支撑结构抗震性能研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39: 205 - 213, 230.
- [11] 赵俊贤, 宋佳雨, 张家广, 等. 滑移连接的屈屈曲支撑RC框架节点抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43 (6): 207 - 218. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2020. 0778.
- [12] 张波, 贾益纲, 刘超, 等. 扩孔螺栓连接型耗能段力学性能试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44 (2): 116 - 125. DOI: 10.13197/j. eeed. 2024. 0213.
- [13] 信文治. 基于多灾害防御需求的扩孔式螺栓节点抗连续倒塌性能研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2024.
- [14] 杨涛. 基于抽柱法的反向槽钢连接节点抗连续倒塌性能研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [15] 张照闪. 中柱移除下反向槽钢节点抗连续性倒塌性能研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.