

引用本文:王景玄,李秋颖,王文琦. 圆钢管混凝土柱-钢筋桁架组合梁节点抗连续倒塌机制及参数分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(3): 84-91.

WANG Jing-xuan, LI Qiu-ying, WANG Wen-qi. Anti-progressive Collapse Mechanism and Parameter Analysis of Circular CFST Column and Steel Bar Truss Composite Beam Joint[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(3): 84-91.

DOI:10.19815/j.jace.2021.05040

圆钢管混凝土柱-钢筋桁架组合梁节点抗连续倒塌机制及参数分析

王景玄, 李秋颖, 王文琦

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:为研究钢筋桁架组合梁对钢管混凝土结构抗连续倒塌性能的影响,采用 ABAQUS 建立圆钢管混凝土柱-钢筋桁架组合梁节点数值模型,分析中柱失效工况下该类节点的破坏机理和抗力计算曲线,以及钢筋桁架高度、混凝土强度、钢筋强度等主要参数对组合节点抗连续倒塌能力的影响。结果表明:相比钢管混凝土柱-RC 组合梁节点,钢筋桁架组合梁节点的梁机制和悬链线机制峰值承载力分别提高了 12.5% 和 10%;因钢筋桁架在下弦钢筋屈服后上弦钢筋仍可以提供拉力,使得钢梁下翼缘断裂后承载力可以继续提高,表现出良好的抗连续倒塌能力;钢筋桁架高度和钢筋桁架钢筋强度主要对节点梁机制峰值承载力与极限承载力提升较显著,对悬链线机制峰值承载力影响较小,楼板混凝土强度对节点各阶段的承载力影响较小,并且会降低节点延性;综合对比分析不同参数下节点的抗力指标和位移延性指标发现,增加钢筋桁架高度和钢筋强度对节点的抗连续倒塌极限承载力具有有利影响,在工程设计和应用中应予以考虑。

关键词:钢管混凝土;钢筋桁架组合板;连续倒塌;机理分析;参数分析

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)03-0084-08

Anti-progressive Collapse Mechanism and Parameter Analysis of Circular CFST Column and Steel Bar Truss Composite Beam Joint

WANG Jing-xuan, LI Qiu-ying, WANG Wen-qi

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In order to study the influence of steel truss composite beam on the progressive collapse resistance of concrete-filled steel tubular (CFST) structure, ABAQUS was used to establish the numerical model of the joint of CFST column and steel bar truss composite beam. The failure mechanism and resistance calculation curve of the joint under the failure condition of middle column were analyzed, and the influences of main parameters such as the height of steel truss, concrete strength and steel strength on the progressive collapse resistance of composite joint were analyzed. The results show that compared with CFST column-RC composite beam joints, the peak bearing capacities of beam mechanism and catenary mechanism of reinforced truss composite

收稿日期:2021-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(52068047,51708270);甘肃省青年科技基金计划项目(20JR5RA437);

甘肃省建设厅科技攻关项目(JK2021-16)

作者简介:王景玄(1986-),男,甘肃会宁人,副教授,工学博士,E-mail:cewangjx@lut.edu.cn.

beam joints increase by 12.5 % and 10 %, respectively. Since the steel bar truss can still provide tension after the yield of the lower chord steel bar, the bearing capacity of the lower flange of the steel beam can continue improving after the fracture, showing good progressive collapse resistance. The height of steel truss and the strength of steel truss mainly improve the peak bearing capacity and ultimate bearing capacity of joint beam mechanism, but have little effect on the peak bearing capacity of catenary mechanism. The strength of floor slab concrete has little effect on the bearing capacity of each stage of joint, and can reduce the ductility of joint. By comparing and analyzing the resistance index and displacement ductility index of joints under different parameters, it is found that the increases of height and strength of steel truss have beneficial effects on the ultimate bearing capacity of joints, which should be considered in engineering design and application.

Key words: concrete-filled steel tube; steel bar truss composite slab; progressive collapse; mechanism analysis; parameter analysis

0 引言

建筑结构在全生命周期内,可能在爆炸、撞击等偶然荷载的作用下发生局部初始损伤,最终导致连续性倒塌破坏的发生。为了便于对结构进行抗连续倒塌设计,欧洲^[1]、美国^[2-3]及中国^[4]均颁布了建筑结构抗连续倒塌设计规范。Adam 等^[5]对 21 世纪建筑结构连续倒塌和鲁棒性的研究与实践进行了综述。现有研究主要以梁柱节点子结构为研究对象,开展了失效柱上部梁构件的抗连续倒塌机制研究,如 Zhong 等^[6-7]对不等跨的钢结构梁柱节点进行抗连续倒塌研究。Qiu 等^[8]和王景玄等^[9]分别对钢索加固和采用局部脱黏钢筋的 RC 梁柱子结构进行试验研究,发现钢索加固和采用局部脱黏钢筋均可以提高节点极限承载力。Zheng 等^[10-11]也对钢管混凝土梁柱子结构开展了抗连续倒塌试验及数值模拟研究。此外,也有学者关注不同楼板形式对结构抗连续倒塌性能的影响,如高佳明等^[12]进行了混凝土预制板组合梁框架的抗连续倒塌理论分析。王俊杰等^[13]进行了闭口型和开口型压型钢板组合板的抗连续倒塌试验分析。

基于上述研究综述可以看出,目前关于结构抗连续倒塌的研究主要集中于 RC 结构以及钢结构。对于钢筋桁架楼承板,已有研究主要集中在基本受力性能方面^[14-15],并未开展抗连续倒塌性能研究。

为研究钢筋桁架楼承板对钢管混凝土结构抗连续倒塌性能的影响,本文采用 ABAQUS 软件,选取圆钢管混凝土柱-钢筋桁架组合梁节点进行研究,对中柱失效后节点的破坏机理进行分析,观察组合楼板中压型钢板以及钢筋桁架对该类节点抗连续倒塌性能的影响,并分析主要影响因素,以期为实际工程设计提供参考。

1 数值模型

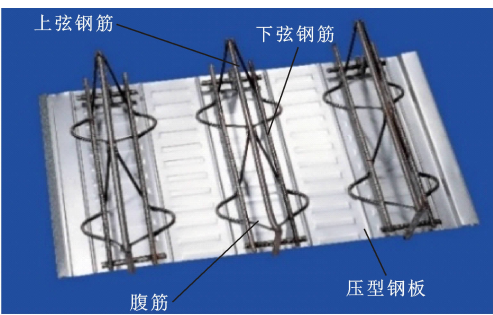
1.1 模型建立

以中柱失效工况下的圆钢管混凝土柱-钢筋桁架组合梁节点为研究对象,根据《钢筋桁架楼承板》(JG/T 368—2012)选取了型号为 HB1-70 的楼承板。楼承板宽度为 600 mm,桁架高度为 70 mm,桁架节点间距以及桁架间距均为 200 mm。上、下弦采用直径为 8 mm 的 HRB400 级钢筋,腹筋采用直径为 4.5 mm 的 HRB400 冷轧钢筋,底板为 Q235 冷轧钢板。表 1 给出了节点的几何信息。图 1 为钢筋桁架组合板。模型中钢筋桁架由直线构成,参考文献[15]中钢筋桁架的建模方法,将钢板折角处的钢筋圆弧简化为直线,如图 1(b)所示。忽略混凝土和钢板之间的相对滑动位移,将压型钢板视为表面平整的板。节点跨度为 6 600 mm,核心区混凝土以及组合板混凝土强度分别为 C50、C30,钢管、钢梁采用 Q355 钢。

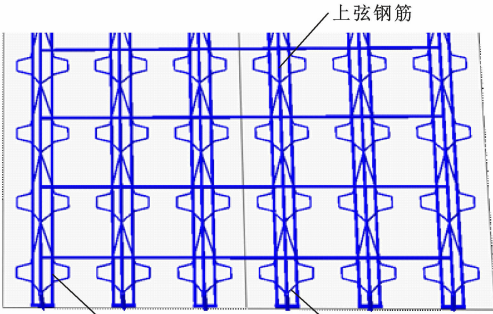
表 1 组合梁节点几何信息

Table 1 Geometric Information of Composite Beam Joints

节点编号	柱截面尺寸	梁截面尺寸	环板宽度/mm	楼板类型	楼板宽度/mm	楼板厚度/mm
C-J-R	500 mm×12 mm	H450×250×12×16	150	RC 楼板	1 200	100
C-J-S	500 mm×12 mm	H450×250×12×16	150	钢筋桁架楼承板	1 200	100



(a) 钢筋桁架叠合板



(b) 钢筋桁架叠合板有限元模型

图 1 钢筋桁架组合板

Fig. 1 Steel Bar Truss Composite Slab

1.2 单元类型和边界条件

钢材采用 S4R 壳单元,混凝土采用 C3D8R 实体单元,钢筋采用 B31 梁单元。节点为结构化网格划分,并对核心区位置处钢梁和楼板的网格进行加密。根据 GSA2016^[2] 规定的倒塌失效准则,在失效立柱顶施加竖向位移 1 320 mm。组合节点加载及边界条件见图 2。

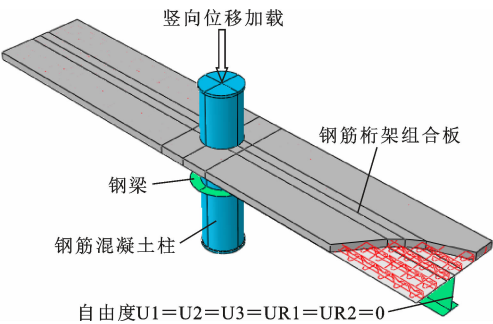


图 2 组合节点加载及边界条件

Fig. 2 Loading and Boundary Conditions of Composite Joints

1.3 材料的本构关系

混凝土本构模型采用塑性损伤模型,将文献[16]提出的考虑约束效应的本构模型应用于钢管内核心区混凝土,将《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中给出的应力-应变(σ - ϵ)关系应用于楼板混凝土中,如图 3 所示,其中, f_{tr} 、 f_{cr} 分别为混

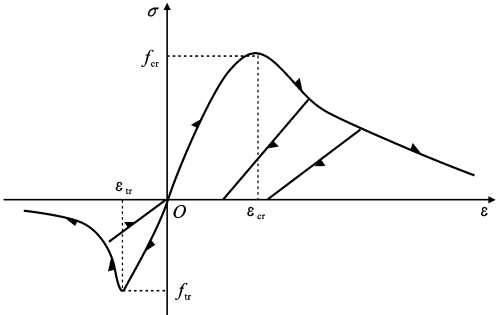


图 3 楼板混凝土应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain Curve of Floor Slab Concrete

凝土单轴抗拉强度和单轴抗压强度, ϵ_{tr} 、 ϵ_{cr} 分别为对应的混凝土峰值拉应变和压应变。为了反映钢材的软化特性,将 Esmaily 等^[17] 提出的含下降阶段的应力-应变关系应用于钢材以及钢筋,如图 4 所示,其中 ϵ_y 和 f_y 分别为钢材的屈服应变和屈服强度, k_1 为钢材强化段起点应变与屈服应变的比值, k_2 为钢材峰值应变与屈服应变的比值, k_3 为钢材峰值应力与屈服强度的比值, E_h 为屈服抗拉强度点与极限抗拉强度点连线的斜率(割线模量)。以钢材断裂时所对应的应变作为失效判据,取失效应变为 0.25^[18]。为更好地反映钢材裂缝,在 ABAQUS 的 Visualization 模块中,将超过失效应变的单元移除,近似模拟钢材断裂。

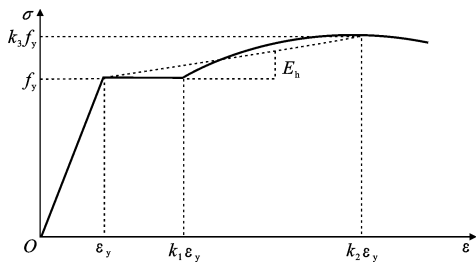


图 4 钢材应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain Curve of Steel

2 算例验证

Wang 等^[11] 对圆钢管以及方钢管的混凝土柱-组合梁开展了抗连续倒塌试验。表 2 给出了节点的几何信息。节点跨度为 3 000 mm,楼板长度取 2 400 mm,楼板内布置直径为 6 mm 的光圆钢筋,楼板混凝土强度等级为 C30。钢材均采用 Q235 钢,核心混凝土强度等级为 C50。

图 5 给出了试验及有限元模拟的节点破坏形态,通过对比发现钢梁的裂缝发展趋势以及断裂位置均吻合较好。图 6 为模拟曲线和试验曲线对比,由于试验过程中左右两端钢梁断裂的时间不同,致

表 2 节点的几何信息

Table 2 Geometric Information of Joints

节点编号	柱截面尺寸	梁截面尺寸	环板宽度/mm	楼板宽度/mm	楼板厚度/mm
CJ-RP-RCS	$\phi 200\times 4$	H200 \times 100 \times 3.75 \times 5.5	50	600	60
SJ-RP-RCS	$\square 200\times 4$	H200 \times 100 \times 3.75 \times 5.5	80	600	60

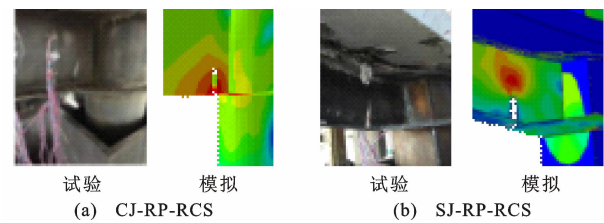


图 5 节点破坏特征对比

Fig. 5 Comparison of Failure Characteristics of Joints

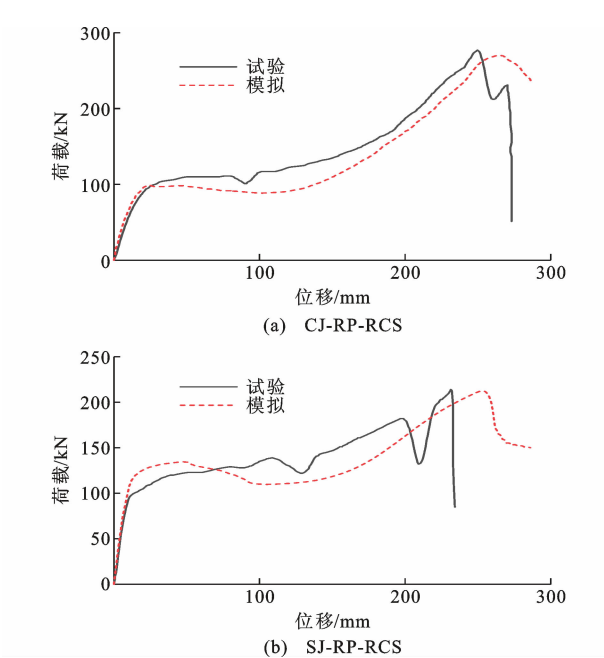


图 6 节点模拟曲线和试验曲线对比

Fig. 6 Comparison of Simulated Curve and Test Curve of Joints

使试验曲线出现 2 个峰值点。曲线总体上吻合较好,证明本文数值模型建立以及材料的选取是合理的。

利用文献[17]的试验结果验证钢筋桁架楼承板在建模方法上的正确性。钢筋桁架组合板的尺寸为 600 mm \times 4 000 mm,楼板高度为 180 mm,其中钢筋桁架高度为 150 mm,上、下弦钢筋直径分别为 12 mm 和 10 mm,腹杆钢筋直径为 6 mm,底部镀锌钢板厚度为 0.5 mm。混凝土强度等级为 C30,钢筋采用 HRB400 级。图 7 为组合板整体变形以及跨中裂缝的对比,图 8 给出了试验曲线和模拟曲线的对比,二者总体吻合较好,验证了建模方法的合理性。

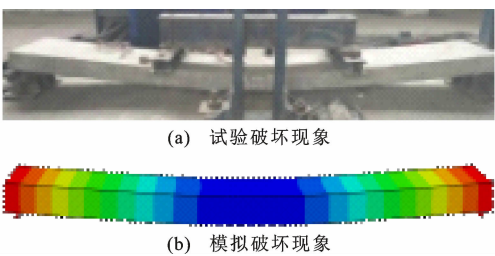


图 7 组合板破坏特征对比

Fig. 7 Comparison of Failure Characteristics of Composite Slab

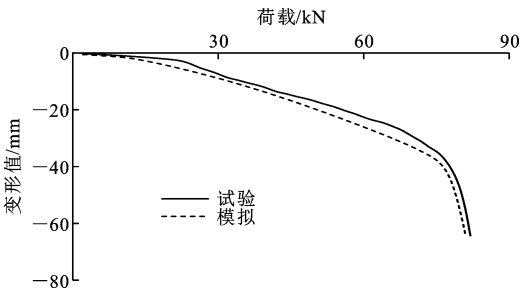


图 8 组合板模拟曲线和试验曲线对比

Fig. 8 Comparison of Simulated Curve and Test Curve of Composite Slab

3 抗连续倒塌机理分析

3.1 承载力分析

钢管混凝土柱-钢筋桁架组合梁节点抗连续倒塌承载力-竖向位移($P-\Delta$)曲线如图 9 所示,将曲线分为 4 个阶段:梁机制阶段 OA、转换机制阶段 AB、悬链线机制阶段 BC 和破坏阶段 CE。在梁机制阶段,组合梁处于受弯状态,节点的抗倒塌承载力主要由梁的抗弯承载力提供;承载力达到 A 点之后,抗力机制由梁机制转变为转换机制,节点的抗连续倒塌能力由梁的抗弯承载力逐渐转变为抗拉承载力;进入悬链线机制之后,节点的抗连续倒塌承载力主要由梁的抗拉承载力提供。

图 9 中,A 点为梁机制的峰值承载力点,C-J-R 及 C-J-S 对应的值分别为 892 kN 和 1 003 kN;C 点为悬链线机制的峰值承载力点,C-J-R 及 C-J-S 对应的值分别为 1 687 kN 和 1 849 kN。梁机制阶段主要由构件的抗弯承载力提供倒塌抗力,压型钢板的抗弯承载力高于混凝土板,所以梁机制峰值承载力

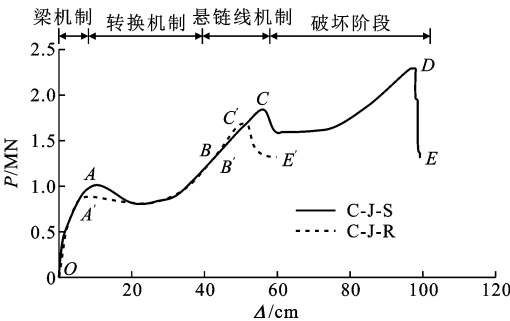


图 9 组合梁节点 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 9 $P-\Delta$ Curves of Composite Beam Joints

提高 12.5%；悬链线机制主要是由构件的抗拉承载力提供倒塌抗力，压型钢板的抗拉力高于普通混凝土板，所以悬链线机制峰值承载力提高 10%，压型钢板能更有效地提供倒塌抗力。钢梁下翼缘屈服后，钢筋桁架楼承板使得节点的承载力再次提高到达 D 点，此时的承载力为 2 292 kN。同时，由 $P-\Delta$ 曲线可以看出，钢筋桁架楼承板可以有效地提高节点的延性性能，具有较好的抗连续倒塌性能。

图 10 给出了数值模拟中钢梁各测点位移与失效柱竖向位移关系曲线，其中， h 为中柱竖向位移。组合梁梁端为边测点，钢梁与环板连接位置处为中测点，将组合梁 5 等分获得其他测点，通过各测点的竖向位移来观察组合梁的变形趋势。组合梁在竖向位移为 100 mm 时各测点竖向位移曲线表现为受弯变形，受力机制为梁机制。随着竖向位移的增大 ($\Delta > 100$ mm)，组合梁逐渐由受弯变形向受拉变形转变，受力机制逐渐由受弯梁机制向受拉悬链线机制转化。

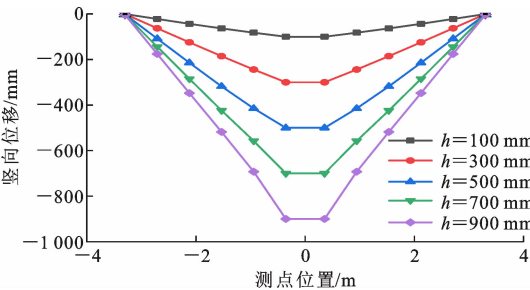


图 10 节点竖向位移分布

Fig. 10 Vertical Displacement Distribution of Joints

3.2 节点核心区破坏特征

图 11 为各阶段节点的破坏特征。组合梁在 OA 段(梁机制阶段)均匀受力，主要为受弯变形；随后钢梁的变形形态由受弯逐渐向受拉转变，钢梁下翼缘屈服，随后开始产生裂缝。随着荷载的继续增大，钢梁的裂缝沿腹板不断向上翼缘发展。整个受

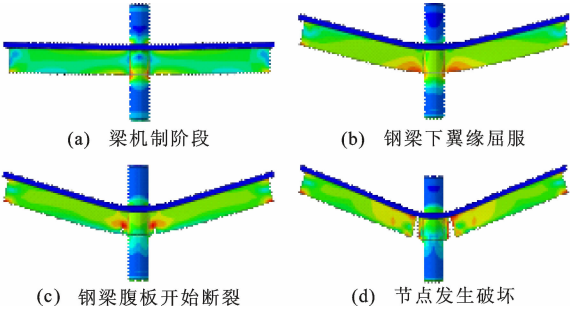


图 11 节点核心区破坏特征

Fig. 11 Damage Characteristics of Joint Core Area

力过程中，该类结构的破坏以钢梁的断裂为主要受力特征。可以看到在钢梁与环板连接位置处形成最不利截面。

图 12 为各阶段最不利截面的应力矢量图。可以看出，在小变形阶段上翼缘受压，下翼缘受拉，中性轴位于截面形心处。截面受拉区随着竖向位移的

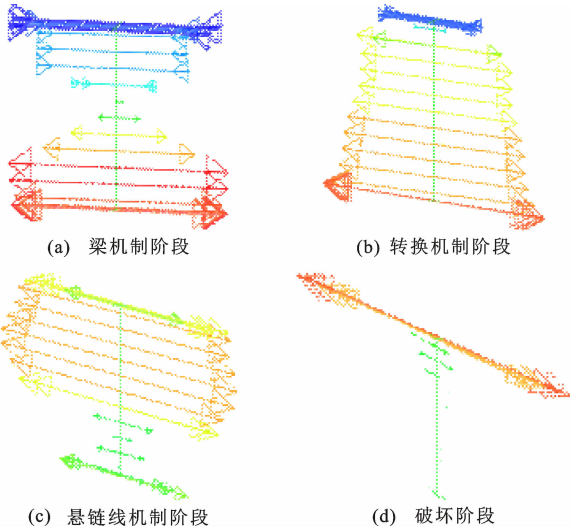


图 12 最不利截面的应力矢量图

Fig. 12 Stress Vector Diagram of Critical Section

增大而增大，中性轴开始上移，如图 12(b)所示。在悬链线机制阶段，钢梁完全进入受拉状态。之后裂缝沿腹板向上翼缘发展，直至破坏，如图 12(d)所示。

图 13 给出了各阶段组合板的等效塑性应变。节点核心区混凝土在梁机制阶段等效塑性应变较大，部分混凝土被压溃，如图 13(a)所示。随着竖向位移增加，混凝土破坏范围不断增大，组合板出现沿钢梁方向的裂缝，并不断向梁端延伸，最后形成 2 条贯通的裂缝，见图 13(c)，随后混凝土退出工作。

3.3 节点抗连续倒塌内力分析

为了更好地研究节点发生连续倒塌的内力变化，图 14 给出了最不利截面处钢梁的弯矩以及轴力随竖向位移的变化曲线，其内力采用单位化的方式

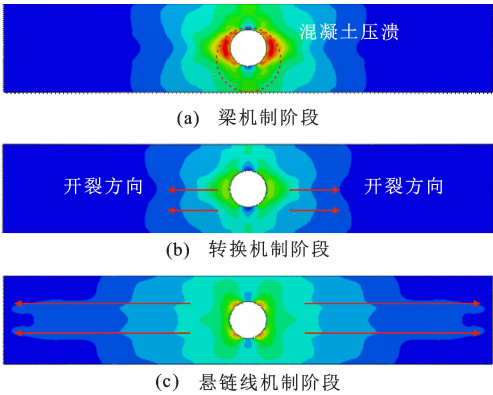


图 13 楼板等效塑性应变

Fig. 13 Equivalent Plastic Strain of Floor Slab

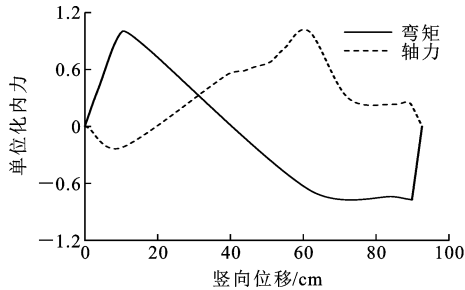


图 14 钢梁内力-竖向位移关系曲线

Fig. 14 Internal Force-vertical Displacement Curves of Steel Beam

统一为量纲一的内力。由钢梁内力-竖向位移关系曲线可以看出,在加载初期,弯矩给节点提供较大的抗力,此时抗力机制为梁机制,并且在此阶段出现压拱机制,因此轴力为负值。随着竖向位移的增加,轴力逐渐增大,弯矩逐渐减小,此过程为转换机制。

图 15 给出了压型钢板和上、下弦钢筋的内力-竖向位移关系曲线。在梁机制阶段,由于节点压拱效应,压型钢板以及钢筋内力均为压力。受力初期上弦钢筋承担的压力较大,其次是下弦钢筋。竖向位移达到 570 mm 时,钢梁下翼缘开始断裂,下弦钢筋开始由受压转换为受拉,上弦钢筋一直处于受压状态。对比图 14,随着钢梁轴力的下降,压型钢板以及下弦钢筋的内力不断增大,使得节点的抗连续倒塌承载力再次提高。综上可得,小变形阶段(0~160 mm)上弦钢筋主要承担压力作用;大变形阶段(230~570 mm)下弦钢筋和压型钢板共同承受拉力作用,使组合节点的悬链线承载力较高。

4 参数分析

为研究不同参数对钢管混凝土柱-钢筋桁架组合梁节点抗连续倒塌能力的影响,对不同钢筋桁架

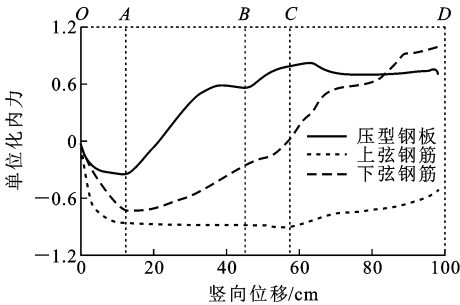


图 15 压型钢板和钢筋内力-竖向位移关系曲线

Fig. 15 Internal Force-vertical Displacement Curves of Profiled Steel Sheet and Reinforcement

高度、楼板混凝土强度、上下弦钢筋强度的节点进行了抗连续倒塌承载力和位移延性分析。

4.1 钢筋桁架高度

为研究钢筋桁架高度对节点倒塌抗力的影响,选取桁架高度 $h_t=70、80、90$ mm 的节点进行分析,结果如图 16 所示。钢筋桁架的高度改变对该类节点的梁机制和悬链线机制承载力有一定的提高,但影响不是非常显著。图 17 为不同桁架高度下节点承载力对比。由图 17 可以看出,梁机制峰值承载力分别提高 4.9%和 6.7%,悬链线机制峰值承载力均提高 1.3%,极限承载力分别提高 6.2%和 2.8%。

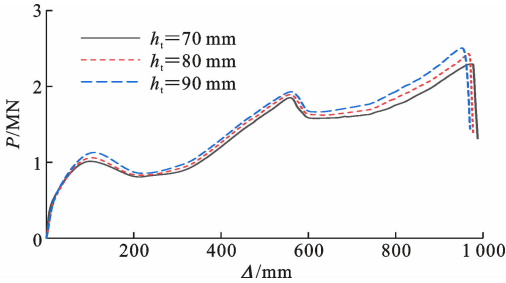


图 16 不同桁架高度下 P-Δ 曲线对比

Fig. 16 Comparison of P-Δ Curves Under Different Truss Heights

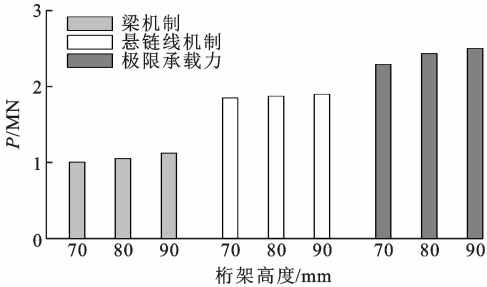


图 17 不同桁架高度下节点承载力对比

Fig. 17 Comparison of Capacities of Joints Under Different Truss Heights

4.2 上、下弦钢筋强度

图 18 为不同钢筋强度下 P-Δ 曲线对比。由图

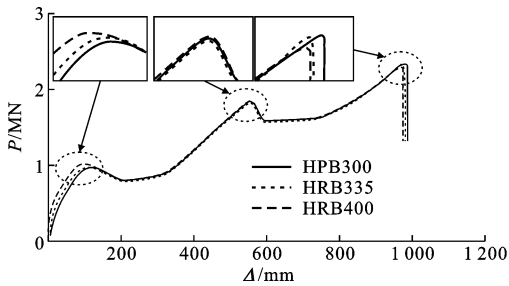


图 18 不同钢筋强度下 $P-\Delta$ 曲线对比

Fig. 18 Comparison of $P-\Delta$ Curves Under Different Reinforcement Strength

18 可以看出,节点的失效位移随着钢筋强度等级的增高而减小,这是由于钢筋强度越高其延性性能越差,使得节点的延性性能有所降低。图 19 为不同受力阶段节点承载力对比,对比图 15 可以看出,在悬链线机制阶段节点抗力主要由压型钢板提供,所以增大上、下弦钢筋强度对悬链线机制承载力影响较小。总体上钢筋强度的变化对于节点承载力的影响较小。

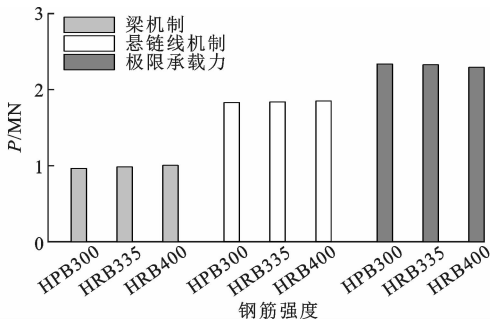


图 19 不同钢筋强度下节点承载力对比

Fig. 19 Comparison of Capacities of Joints Under Different Reinforcement Strength

4.3 楼板混凝土强度

选取混凝土等级为 C25、C30、C35,对楼板进行承载力分析,结果如图 20 所示。图 21 为不同受力阶段节点抗倒塌承载力的对比。随着混凝土强度的升高,节点的抗连续倒塌极限承载力降低,而对梁机制和悬链线机制几乎无影响。节点的失效位移也在减小,这是由于增加混凝土强度,也增大了组合梁节点的刚度,从而降低了节点的延性性能。

5 抗连续倒塌能力评估

以失效位移为延性指标,将节点在不同参数下对应的极限承载力与梁机制承载力的比值作为抗力指标,对钢筋桁架组合梁节点的抗连续倒塌能力进行评估。取各参数中 3 个节点的梁机制峰值和悬链线机制峰值平均值作为该影响参数的代表值,得到

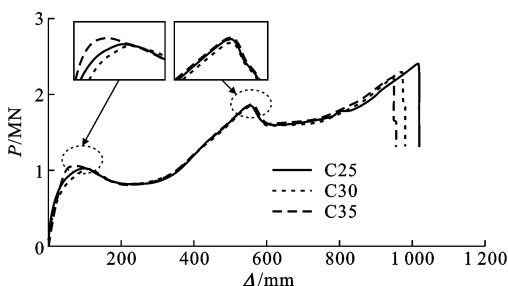


图 20 不同混凝土强度下 $P-\Delta$ 曲线对比

Fig. 20 Comparison of $P-\Delta$ Curves Under Different Concrete Strength

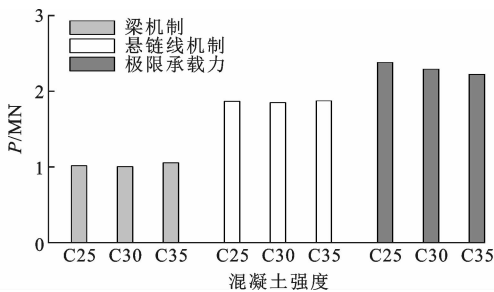


图 21 不同混凝土强度下节点承载力对比

Fig. 21 Comparison of Capacities of Joints Under Different Concrete Strength

的抗倒塌承载力对比结果见表 3。由表 3 可以看出,钢筋桁架高度对该类节点抗倒塌能力的提升最为显著,钢筋强度与钢筋桁架高度的抗力指标十分接近。因此,在工程应用和设计中,钢筋桁架高度和钢筋强度对该类节点抗连续倒塌能力的影响应予以重视。

表 3 主要影响参数下抗倒塌承载力对比

Table 3 Comparison of Collapse Capacity Under Main Influence Parameters

影响参数	对比指标	梁机制(A点)	极限值(D点)	抗力指标
桁架高度	承载力/kN	1 052.87	2 433.79	2.31
	位移/mm	90.89	974.19	10.70
钢筋强度	承载力/kN	962.95	2 336.49	2.43
	位移/mm	111.36	985.62	8.84
混凝土强度	承载力/kN	1 015.28	2 380.02	2.34
	位移/mm	61.60	947.20	15.27

注:抗力指标为极限值与梁机制的比值。

6 结 语

(1)钢筋桁架楼承板可以有效提高该类节点的抗连续倒塌能力,同时改善节点的延性性能。

(2)相比于 RC 组合梁节点,钢筋桁架组合梁节点的梁机制峰值承载力提高了 12.5%,悬链线机制峰值承载力提高了将近 10%。在钢梁腹板出现裂

缝后,组合梁节点的抗连续倒塌承载力再次提高。

(3)综合抗力指标和延性指标在一定的取值范围内,钢筋桁架高度对该类节点抗倒塌能力的提升最为显著,钢筋强度对抗倒塌位移延性提高较为显著,在工程设计和应用中应予以考虑。

参考文献:

References:

- [1] Eurocode 1: Actions on Structures. Part 1-7: General Actions — Accidental Actions; EN 1991-1-7; 2006 [S]. Brussels; CEN, 2006.
- [2] Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects; GSA 2016 [S]. Washington DC; General Services Administration, 2016.
- [3] Design of Building to Resist Progressive Collapse; UFC 4-023-03 [S]. Washington DC; Department of Defense, 2016.
- [4] 建筑结构抗倒塌设计规范; CECS 392; 2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Code for Anti-collapse Design of Building Structures; CECS 392; 2014 [S]. Beijing; China Planning Press, 2014.
- [5] ADAM J M, PARISI F, SAGASETA J, et al. Research and Practice on Progressive Collapse and Robustness of Building Structures in the 21st Century [J]. Engineering Structures, 2018, 173: 122-149.
- [6] ZHONG W H, TAN Z, TIAN L M, et al. Collapse Resistance of Composite Beam-column Assemblies with Unequal Spans Under an Internal Column-removal Scenario [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110143.
- [7] MENG B, ZHONG W H, HAO J P. Anti-progressive Collapse Behavior of Beam-to-column Assemblies with Bolted-angle Connections Under Different Span Ratios [J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(6): 891-905.
- [8] QIU L, LIN F, WU K C. Improving Progressive Collapse Resistance of RC Beam-column Subassemblages Using External Steel Cables [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(1): 04019079.
- [9] 王景玄, 杨永, 周侃, 等. 角柱失效下钢管混凝土柱-组合梁框架抗连续倒塌能力研究 [J]. 工程力学, 2022, 39(5): 105-118.
WANG Jing-xuan, YANG Yong, ZHOU Kan, et al. Research on Progressive Collapse Resistance Capacity of Composite Frame with CFST Columns Under Corner Column Removal Scenario [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(5): 105-118.
- [10] ZHENG L, WANG W D, XIAN W. Experimental and Numerical Investigation on the Anti-progressive Collapse Performance of Fabricated Connection with CFST Column and Composite Beam [J]. Engineering Structures, 2022, 256: 114061.
- [11] WANG J X, YANG Y, XIAN W, et al. Progressive Collapse Mechanism Analysis of Concrete-filled Square Steel Tubular Column to Steel Beam Joint with Bolted-welded Hybrid Connection [J]. International Journal of Steel Structures, 2020, 20(5): 1618-1635.
- [12] 高佳明, 刘伯权, 黄华, 等. 带板钢筋混凝土框架连续倒塌理论分析 [J]. 工程力学, 2018, 35(7): 117-126.
GAO Jia-ming, LIU Bo-quan, HUANG Hua, et al. Theoretical Analysis on the Progressive Collapse of RC Frame Structures with Slabs [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(7): 117-126.
- [13] 王俊杰, 王伟, 孙昕. 压型钢板组合梁中柱子结构的抗连续倒塌试验 [J]. 工程力学, 2017, 34(增): 149-153, 178.
WANG Jun-jie, WANG Wei, SUN Xin. Experimental Behavior of Composite Beam-column Joints with Steel Profiled Decking in a Middle-column-removal Scenario [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(S): 149-153, 178.
- [14] 陈安英, 完海鹰, 孙磊, 等. 钢筋桁架组合楼板抗弯性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2015, 45(8): 59-63, 90.
CHEN An-ying, WAN Hai-ying, SUN Lei, et al. Experimental Study on Bending Behavior of Steel Bar Truss Composite Slab [J]. Building Structure, 2015, 45(8): 59-63, 90.
- [15] 邓莎莎. 现浇钢筋桁架混凝土楼板试验与理论研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
DENG Sha-sha. Experimental and Theoretical Study on Cast-in-place Steel Bar Truss Concrete Slab [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [16] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践 [M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2016.
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures: Theory and Practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [17] ESMAEILI A, XIAO Y. Behavior of Reinforced Concrete Columns Under Variable Axial Loads: Analysis [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 736-744.
- [18] KIM J, SHIN W S. Retrofit of RC Frames Against Progressive Collapse Using Prestressing Tendons [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2013, 22(4): 349-361.