

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201906035

基于整体效能的不等跨半刚性连接钢框架梁 柱子结构抗倒塌设计*

钟炜辉^{1,2}, 郑玉辉¹, 孟宝¹, 谭政¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 不等跨半刚性连接钢框架梁柱子结构在连续倒塌工况下短跨节点由于变形较大而率先发生破坏, 结构整体的承载力将快速下降, 长跨因失去短跨支持, 效能得不到充分发挥。基于增大短跨节点变形能力以提升长跨效能利用的设计理念, 针对顶底角钢腹板双角钢半刚性连接节点, 探究增加短跨顶底角钢厚度、改变短跨梁翼缘螺栓孔形式等对子结构长短跨抗力机制发展的影响, 并通过引入协同工作系数, 定量说明长跨效能的发挥程度。结果表明, 短跨顶底角钢厚度的增加使得短跨梁机制和悬链线机制提供的抗力明显增大, 由于长短跨的协同工作, 长跨梁机制和悬链线机制得到进一步发挥; 在短跨梁翼缘开设长圆孔, 使短跨节点具备更大的变形能力, 其倒塌抗力得到提升。针对短跨栓孔长度和顶底角钢厚度的设计可使不等跨梁柱子结构的整体效能得到充分发挥, 实现了长短跨协同抵抗外载的理想状态。

关键词: 钢框架; 不等跨; 协同工作; 半刚性连接; 抗力机制

中图分类号: TU391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-0977-10

Anti-collapse Structural Design of Semi-rigid Beam-column Joint of Unequal Span Steel Frame based on Overall Efficiency

ZHONG Weihui^{1,2}, ZHENG Yuhui¹, MENG Bao¹, TAN Zheng¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education (Xi'an University of Architecture and Technology), Xi'an 710055, China)

Abstract: Under continuous collapse conditions, the short-span joints of semi-rigid steel frame beam-column structures with unequal spans are first destroyed due to large deformation and the overall bearing capacity of the structure will decline rapidly. The long-span will lose its short-span support, and the performance cannot be fully utilized. Based on the design concept of increasing the deformation capacity of short-span joints to improve the utilization of long-span efficiency, aiming at the semi-rigid connection joints of the double angle steel of the steel web at the top and bottom angles, this paper explores the influence of increasing the thickness of short-span top and bottom angle steels and changing the bolt hole shape of the short-span beam flange on the development of long-span resistance mechanism of sub-structure, and quantitatively explains the exertion degree of long-short-resistance by introducing cooperative work coefficient. The results show that the increase in the thickness of the short-

* 收稿日期:2019-06-12;修回日期:2019-09-06

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)资助

通讯作者:钟炜辉(1980—),男,教授,博士。主要从事结构抗倒塌研究工作。E-mail:zhongweihui1980@163.com

span top-bottom angle makes the resistance provided by the short-span flexural mechanism and the catenary mechanism significantly increase. Due to the long-short-span interaction, the long-span flexural mechanism and the catenary mechanism are further developed; Long bolt hole on the short-span beam flange is opened. The long round hole makes the short-span node have greater deformation ability, and the anti-collapse capability is improved. The design of the short span bolt hole length and the top and bottom angle steel thickness can make the overall performance of the unequal span beam column sub-structure fully exerted, and realize the ideal state of long and short span synergistic resistance to external loads.

Keywords: steel frame; unequal span; cooperative work; semi-rigid connection; resistance mechanism

引言

不等跨钢框架结构因意外事件使竖向主要构件(柱)失效时,在结构抵抗外载的过程中,由于短跨节点变形较大而先发生破坏,结构整体的承载力快速下降,长跨因失去短跨支持,效能得不到充分发挥。钟炜辉等^[1-2]对不同跨度比的梁柱子结构模型进行了静载试验和分析,结果表明不等跨子结构在大变形条件下抗倒塌能力低于等跨子结构; B. Yang 等^[3-4]对7种不同节点形式的梁柱子结构进行了试验和数值分析,研究表明结构抗力机制的发挥与节点形式密切相关;王伟等^[5-6]以闭合截面柱-H形梁刚性连接节点为研究对象,对比分析了不同连接构造和梁高跨比对结构抗倒塌性能的影响;高山等^[7]提出了一种钢板加固型半刚性组合节点,得到了理论模型并进行有限元分析,研究结果表明,钢板加固节点明显增大了结构的抗倒塌极限位移和极限荷载。本文针对不等跨半刚性连接(顶底角钢腹板双角钢连接)钢框架梁柱子结构,基于协同工作系数分析了增加短跨节点变形能力对梁柱子结构整体抗倒塌效能的影响,提出了可以使长短跨协同工作的节点设计方法,为同类半刚性连接形式的不等跨钢框架结构抗倒塌设计提供参考。

1 不等跨半刚性连接梁柱子结构数值模型的构建和验证

1.1 半刚性连接梁柱子结构试验

为验证钢框架梁柱子结构抗倒塌数值模型的正确性,基于文献[8]中关于两跨三柱型不等跨半刚性连接梁柱子结构静力加载试验进行数值模型校验。试验梁柱截面尺寸分别为HM 100×150×

6×9(mm)、HW 150×150×8×10(mm),螺栓采用10.9级M16高强度螺栓。关键截面编号如图1所示,节点细部构造如图2所示。

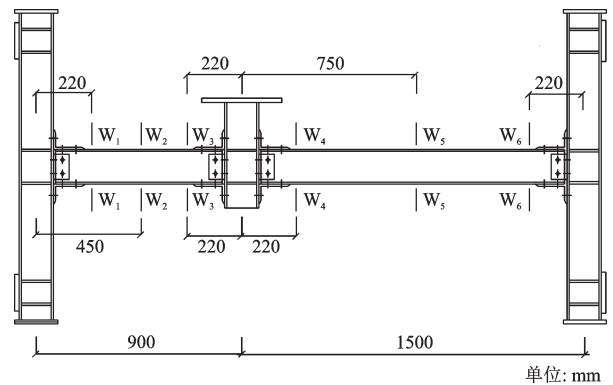


图1 试件关键截面

Fig.1 Key cross-section of the test specimen

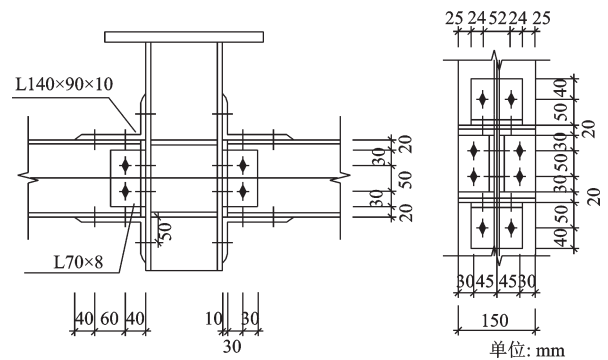


图2 节点细部构造

Fig.2 Detailed structure of the joint

1.2 数值模型的构建

由图1、2所示尺寸建立数值模型,采用ABAQUS/Explicit显示动力静态方法进行分析求解,所有部件均采用C3D8R实体单元模拟,钢材材性均采用试验实测值。梁、柱、角钢、高强螺栓接触面均采用通用接触,切线方向为各向同性的库伦摩

擦接触,法线方向设为“硬”接触,摩擦系数取0.3。通过对高强螺栓的上下表面施加压力来模拟高强度螺栓预紧力对所连接板件的影响。数值模型根据梁柱子结构的实际约束情况将边柱端部设为铰接,对中柱(失效柱)进行竖向位移加载。数值模型的单元划分及边界条件如图3所示。

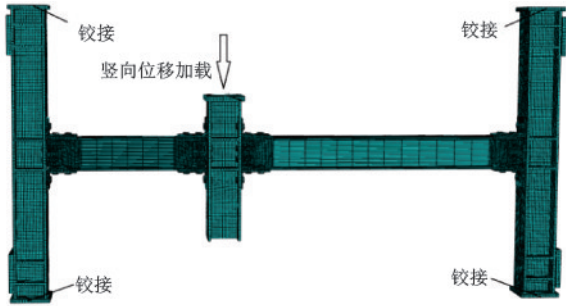
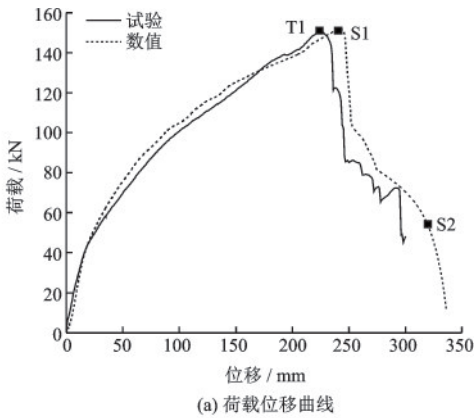


图3 数值模型单元划分及边界条件

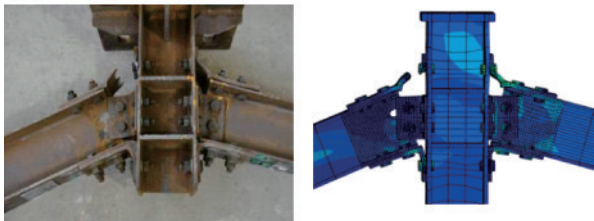
Fig.3 Meshing of the numerical model and boundary conditions

1.3 数值模型的验证

图4为试验与数值模拟的荷载位移曲线及破坏模式对比。由图4(a)可知,试验加载至T1点时,短跨失效柱处节点受拉底角钢断裂,荷载迅速下降,此时峰值荷载为151 kN,相应位移为226 mm;对应数值模型短跨节点发生首次断裂(S1点)时,峰值荷载为153 kN,相应位移为247 mm,误差在10%以



(a) 荷载位移曲线



(b) 破坏模式

图4 试验与模拟结果对比

Fig.4 Comparison of test and simulation results

内。短跨节点底角钢断裂后,随着短跨梁腹板螺栓孔发生冲剪破坏,荷载会出现间断性突降,数值模拟结果与试验吻合较好。

图5为其内力发展情况对比。由图5(a)可知,T1时刻过后,短跨梁W2截面轴力几乎掉落至零,长跨由于失去短跨支持,其W5截面轴力也随之突降;由图5(b)可知,短梁W3截面弯矩在T1时刻过后迅速下降,同时长梁W4截面弯矩也开始减小。试验虽未加载至长跨节点破坏,但通过数值模拟可知,位移加载至346 mm(S2点)时,长跨节点破坏(失效柱处节点底角钢断裂),随之长梁W4截面弯矩迅速下降。数值模拟的关键截面轴力与弯矩发展趋势与试验结果一致,说明数值模型是合理且有效的。

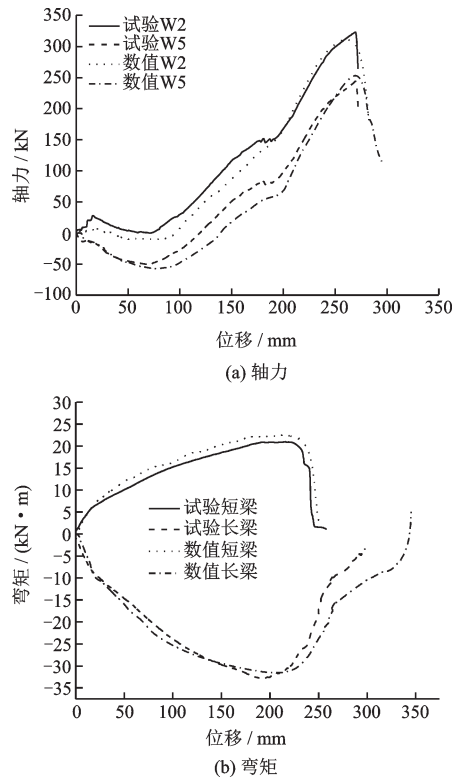


图5 内力发展情况对比

Fig.5 Comparison of internal force development

2 长短跨协同工作系数

由上述试验及数值模拟结果可见,不等跨梁柱子结构在承载过程中因短跨节点首先发生破坏,致使短跨梁的轴力和梁端弯矩突降至零,长跨梁因失去短跨梁支持,其轴力也突降为零,悬链线效应得不到发挥,且梁端弯矩也随之开始减小,梁机制受到了明显削弱,长跨效能显然没有得到充分发挥。

这就是不等跨梁柱子结构抗倒塌能力低于等跨子结构的重要原因。

如图6所示的梁柱子结构简化模型,若认为当中柱竖向位移到达A点时,短跨节点发生破坏,当竖向位移到达B点时,长跨节点破坏,则竖向区间距离AB可看作是失去短跨支持而使长跨效能削弱阶段。由此,引入协同工作系数C来表示长跨效能的实际发挥程度:

$$C = \frac{\int_0^A Fdv}{\int_0^B Fdv} \quad (1)$$

式中,F为长跨提供的抗力(梁机制与悬链线机制提供抗力之和);v为中柱竖向位移。

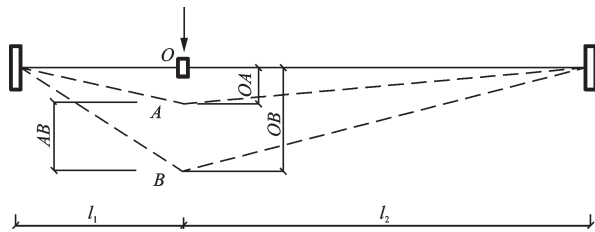


图6 子结构简化模型

Fig.6 Simplified model of the sub-structure

若通过适当的构造使短跨节点的变形能力增强,以此增加短跨节点失效对应的中柱竖向位移(OA),则可使长短跨能更好的协同工作(即减小AB距离),充分挖掘长跨效能。若短跨节点的变形能力足以保证在中柱竖向位移达到B点前不失效,则C=1.0(即最理想状态)。此时,长短跨在连续倒塌工况下可完全协同工作,长跨效能得到充分发挥。

对如图3所示数值模型,可根据式(1)计算得到C=0.69(积分值通过Origin软件计算荷载位移曲线的积分面积可得),可认为长跨效能仅发挥了69%。

3 基于协同工作的不等跨半刚性连接梁柱子结构抗倒塌分析

3.1 梁柱子结构的选取

根据上述梁柱子结构的数值建模方法,选取如图7所示的原型结构进行抗倒塌优化设计。基于拆除构件法将平面框架划分为直接影响区和间接影响区。近似取柱中反弯点将直接影响区内与失效柱相连的主要构件简化为两跨三柱型梁柱子结构模型。间接影响区的梁构件为直接影响区提供了

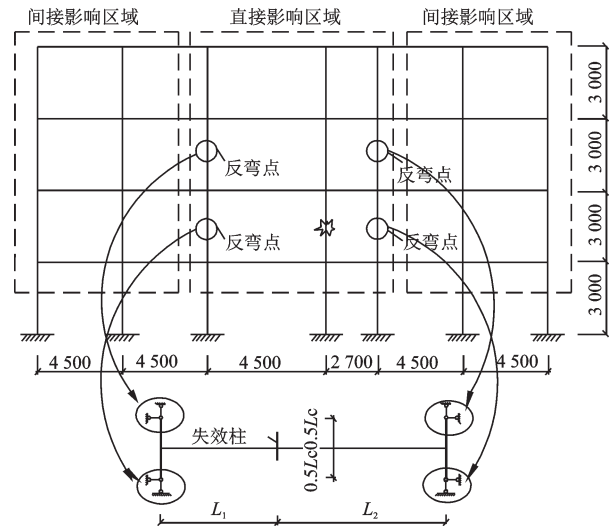


图7 梁柱子结构模型

Fig.7 Beam-column sub-structure model

一定的边界约束,但由文献[9-10]可知,当边柱刚度较大时,梁对子结构的边界约束影响可忽略不计。

3.2 数值模型的建立

梁截面高度的增加虽然会显著提升结构的抗倒塌承载力,但也会减小结构破坏时的失效位移^[11-12]。不等跨结构中短跨梁截面高度常小于长跨梁,但为了不降低短跨提供的抗力,模型设计为长短跨梁截面高度相同。由于短跨梁跨高比较大,必然需要节点具有更大的变形能力,这就要求对半刚性连接节点做进一步的抗倒塌优化设计。

为深入研究短跨节点对长短跨协同工作及结构抗倒塌性能的影响,建立了不等跨半刚性连接梁柱子结构的足尺数值模型,命名为BASC。钢材型号为Q235,长短跨跨长分别为4500、2700 mm,梁柱截面尺寸分别为HM300×450×8×11(mm)、HW 400×400×13×21(mm),顶底角钢和腹板双角钢型号分别采用L180×110×12、L110×12,螺栓采用10.9级M20高强度螺栓。子结构尺寸及其细部构造如图8、9所示。

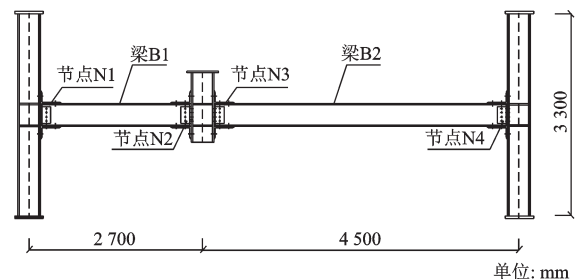


图8 子结构尺寸

Fig.8 Sizes of the sub-structure

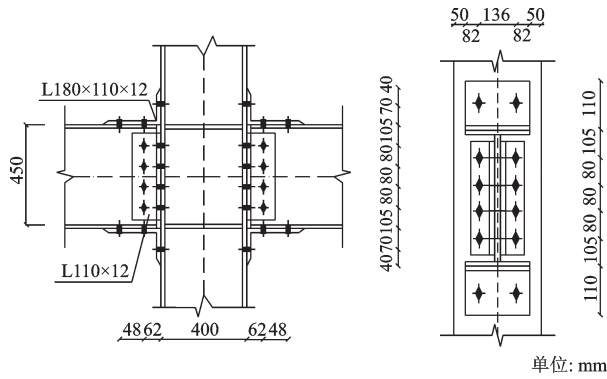


图9 节点细部尺寸
Fig.9 Detail size of the joint

Q235钢材的本构关系采用被广泛使用的多段式四折线模型,如图10(a)所示,高强度螺栓采用文献[13]建议的三折线本构模型。模型的边界条件及网格划分如图11所示。

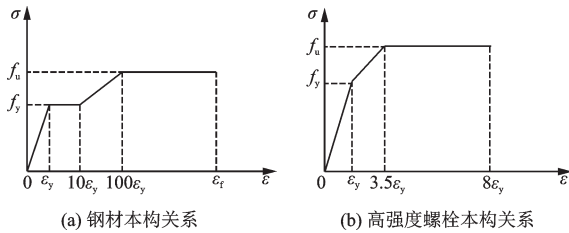


图10 材料本构关系

Fig.10 Stress-strain relationship of materials

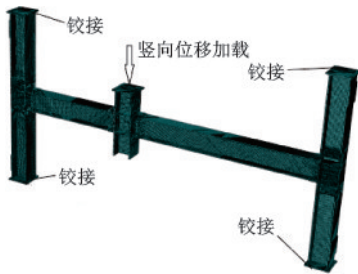


图11 模型边界条件及网格划分
Fig.11 Model boundary conditions and meshing

3.3 节点参数分析

基于增大短跨节点变形能力以提升长跨效能的设计理念,通过分别改变短跨顶底角钢厚度、梁翼缘栓孔长度,探究参数变化对长短跨抗力机制及其协同工作性能的影响,使其达到长短跨完全协同工作的理想状态。

3.3.1 短跨顶底角钢厚度的影响

短跨顶底角钢的厚度直接影响着节点的变形能力和抗力发展,选取厚度分别为10、12、14、16

mm的顶底角钢置于短跨节点。图12为不同角钢厚度下模型的荷载一位移曲线对比,表1为长、短跨节点首次发生破坏所对应特征点(A点和B点可参见图6定义)处的荷载和位移。随着短跨顶底角钢厚度由10 mm增加到16 mm,第一次断裂的承载力分别提高了21%、46%、64%,相应的位移分别提高了5%、8%、11%,长跨效能的发挥由64%增加到72%。初始承载力的提升主要由梁机制提供,但当结构承载力到达峰值时,悬链线机制提供的抗力将占主导地位,因此极限承载力的提升幅度主要来源于悬链线机制,与角钢断面面积成正比,最终破坏模式是角钢被拉断。

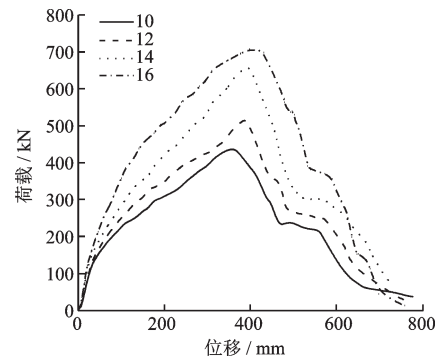


图12 不同角钢厚度下荷载一位移曲线

Fig.12 Load-displacement curves under different thickness of angle steels

注:角钢厚度单位为mm,下同

表1 不同角钢厚度长、短跨首次断裂点处荷载和位移对比
Table 1 Comparison of load and displacement at the first fracture point of long and short spans under different thickness of angle steels

角钢厚度/ mm	A点		B点		系数 C
	荷载/ kN	位移/ mm	荷载/ kN	位移/ mm	
10	412	371	130	571	0.64
12	498	390	220	568	0.67
14	602	401	300	568	0.69
16	677	413	382	566	0.72

图13为不同角钢厚度下长短跨梁机制和悬链线机制发展对比,由于短跨角钢厚度增加使得角钢抗弯刚度增加,短跨梁机制提供的抗力随之增长;悬链线机制的提升主要源于角钢抗力的增加。值得注意的是,短跨悬链线机制随着角钢厚度的增加在更小的失效位移下得以明显发挥,这是由于厚度增加使角钢在相同失效位移下有更强的抗拉响应。

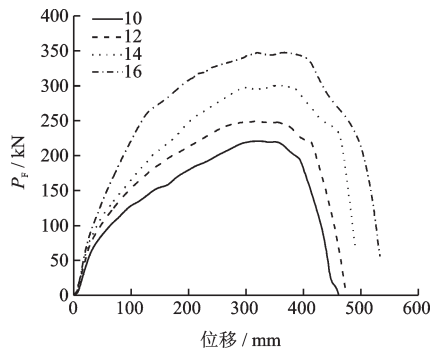
同时,更大的失效位移也有利于长跨梁机制和悬链线机制得到进一步发挥,但其抗力初始值变化很小。表2为长短跨梁机制 P_F 和悬链线机制 P_C 在A

点提供的抗力,可见随着角钢厚度的增加,荷载提高了265 kN,其中短跨提供的抗力占比为81%,长跨为19%,从荷载的提升幅度看,短跨几乎承担了绝大部分抗力。短跨梁机制提供的抗力分别提高了10%、38%、64%,悬链线机制提供的抗力分别提高了83%、127%、137%。由于长短跨的协同工作,使得长跨效能也得到进一步发挥,长跨梁机制提供的抗力分别提高了5%、8%、12%,其悬链线效应也逐步得到发挥,所提供的抗力分别提高了77%、230%、367%。

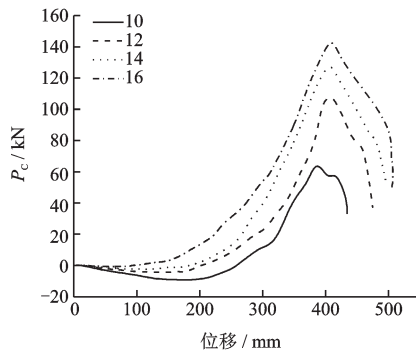
表2 不同角钢厚度下A点长短跨抗力机制

Table 2 Mechanism of length and short-span resistance of point A under different thickness of angle steels

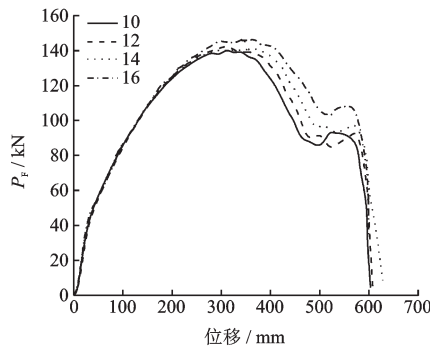
角钢厚度/mm	A点荷载/kN	长短跨提供抗力			
		短跨 P_F	短跨 P_C	长跨 P_F	长跨 P_C
10	412	214	60	129	9
12	498	235	110	137	16
14	602	296	136	140	30
16	677	347	142	146	42



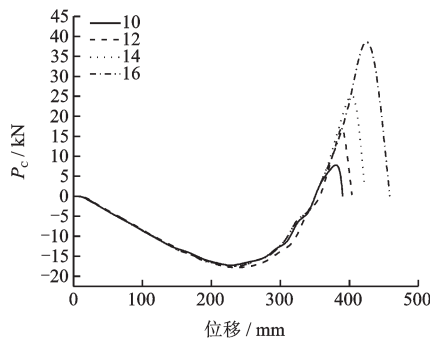
(a) 不同角钢厚度下短跨梁机制发展



(b) 不同角钢厚度下短跨悬链线机制发展



(c) 不同角钢厚度下长跨梁机制发展



(d) 不同角钢厚度下长跨悬链线机制发展

图13 不同角钢厚度下长短梁抗力机制发展

Fig.13 Development of resistance mechanism of long and short beams under different thickness of angle

3.3.2 梁翼缘螺栓孔开孔长度的影响

长、短跨节点发生破坏(顶或底角钢断裂)时,节点转角 θ 相差较大,假设角钢在变形达到 Δ 时断裂(如图14所示),则在某中柱失效位移下,两跨 Δ 的差值可根据节点转角和梁跨度近似计算获得:

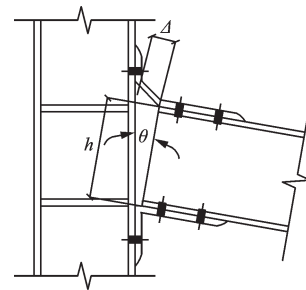


图14 节点变形示意

Fig.14 Illustration of joint deformation

$$\begin{aligned} \Delta &= \Delta_1 - \Delta_2 = h(\tan\theta_1 - \tan\theta_2) \\ &= h\left(\frac{v}{l_1} - \frac{v}{l_2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, Δ_1 和 Δ_2 分别为短跨和长跨的角钢变形 Δ 值; h 为梁截面高度; θ_1 和 θ_2 分别为短跨和长跨节点的转角; v 为中柱的竖向位移; l_1 和 l_2 分别为短跨和长跨的跨度。

为了使短跨节点获得更大的变形能力,将短跨

梁翼缘上的螺栓孔设置为长圆孔,在受力过程中,短跨受拉顶(底)角钢与梁翼缘接触面会发生相对滑移,若以长跨节点破坏(顶或底角钢断裂)时的中柱位移 ν 来计算 Δ ,并取栓孔开孔长度为 Δ ,便可以实现长短跨顶(底)角钢同时断裂,使长短跨达到完全协同工作的理想状态。模型BASC的破坏模式为短跨失效柱处受拉底角钢率先断裂,其后腹板螺栓孔自上而下逐个被拉脱,而腹板双角钢的变形仍较小。由于梁腹板厚度为8 mm,而腹板双角钢总厚度为24 mm,梁腹板相对薄弱,易发生冲剪破坏,故可在梁腹板螺栓孔处局部加厚(如图15所示)或采用单角钢连接方式。若在梁腹板两侧焊接厚度为9 mm的补强钢板,将使腹板螺栓孔的破坏转移到腹板双角钢上,保证了对梁的有效拉结,充分利用了腹板双角钢的变形能力。

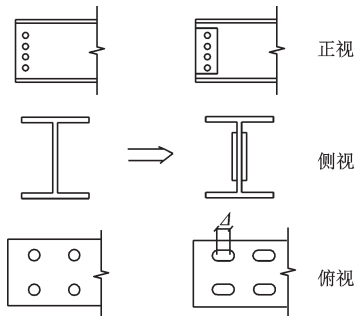


图15 短跨梁端构造变化示意

Fig.15 Short-span beam end structure change

由表1(角钢厚度为12 mm)的数值模拟结果可知,长跨节点在中柱失效位移为568 mm处发生破坏,短跨在中柱位移为390 mm时发生破坏。为探究梁翼缘螺栓孔长度增加对长短跨抗力机制及协同工作系数的影响,在长短跨节点破坏对应的失效位移之间再选取 $\nu_1=450$ mm、 $\nu_2=500$ mm两个特征位移。用450、500、568 mm三个控制位移,通过公式(2)计算得到 Δ 值分别为30、34、38 mm。在不改变角钢厚度下对以上三种不同开孔长度情况,进行了数值模拟分析,并与圆孔模型(BASC)结果进行了对比。

图16为短跨梁翼缘螺栓孔不同开孔长度下模型的荷载—位移曲线对比,表3为长短跨节点首次破坏所对应特征点(A点、B点)处的荷载和位移。可以看出,梁翼缘栓孔由圆孔逐步变为38 mm长圆孔,第一次断裂的承载力分别提高了10%、11%、14%,对应的位移分别提升了18%、34%、48%。长

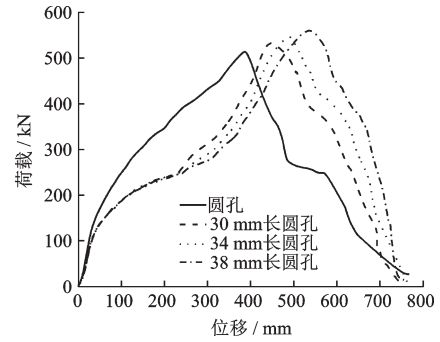


图16 不同开孔长度下荷载—位移曲线对比

Fig.16 Comparison of load-displacement curves for different opening lengths

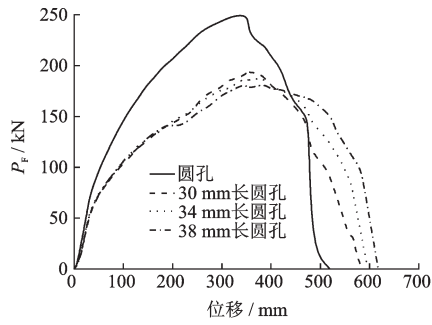
表3 不同开孔长度长短跨首次断裂点处荷载位移对比

Table 3 Comparison of load and displacement between the length of different openings and the length of the first break

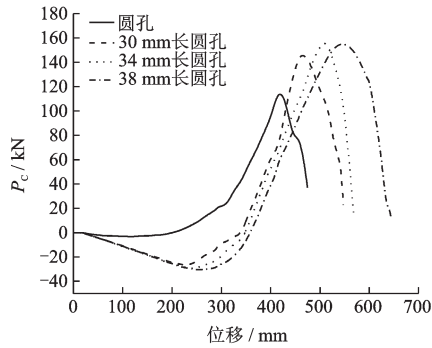
开孔长度/ mm	A点		B点		系数C
	荷载/ kN	位移/ mm	荷载/ kN	位移/ mm	
0(圆孔)	498	371	130	568	0.67
30	539	439	296	573	0.79
34	550	496	420	566	0.88
38	570	549	451	569	0.97

跨的效能由67%发挥到了97%,长跨效能得到充分发挥,接近于 $C=1$ 的理想工作状态。

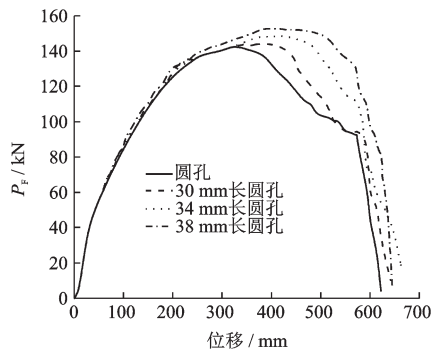
图17为不同开孔长度下,长短跨梁机制和悬链线机制的抗力发展对比,表4为长短跨梁机制 P_F 和悬链线机制 P_C 在A点提供的抗力。当开孔长度达到38 mm时,荷载相比圆孔情况提升了72 kN,其中短跨提供的抗力减小了5%,荷载的提升全部源于长跨。由于梁翼缘长圆栓孔使得短跨受拉底角钢和梁翼缘发生相对滑移(受压顶角钢和梁翼缘不发生相对滑移),角钢变形较小,其产生的抗弯作用也远小于圆孔情况,短跨梁机制提供的抗力分别降低了23%、28%、27%。因短跨节点变形能力的大幅提高且对腹板局部加厚使得节点对梁的拉结作用增强,保证了悬链线效应的发挥,悬链线机制提供的抗力分别提高了35%、38%、43%。由于角钢与梁翼缘发生相对滑移,角钢在相同失效位移下的抗拉响应是有所减弱的,虽然短跨悬链线效应在更大的失效位移下才能充分发挥,但长跨却获得了短跨更持久的支持,长短跨节点几乎同时破坏,使得长跨抗力提高显著,长跨悬链线机制提供的抗力分别提高了244%、344%、450%。



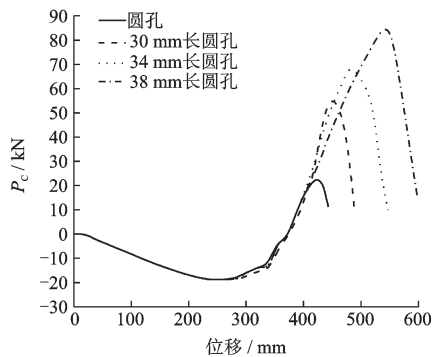
(a) 不同开孔长度下短梁机制发展



(b) 不同开孔长度下短跨悬链线机制发展



(c) 不同开孔长度下长跨梁机制发展



(d) 不同开孔长度下长跨悬链线机制发展

图 17 不同开孔长度下长短梁抗力机制发展

Fig.17 Development of resistance mechanism of long and short beams under different opening lengths

3.3.3 滑移下的顶底角钢受力分析

长圆栓孔情况的抗力在长短跨悬链线效应还没有充分发挥之前是低于普通圆孔情况的,这主要

表 4 不同开孔长度下 A 点长短跨抗力机制占比对比

Table 4 Comparison of the length - to - short resistance mechanism of point A under different opening lengths

开孔长度/mm	A 点荷载/kN	长短跨提供抗力			
		短跨 P_F	短跨 P_C	长跨 P_F	长跨 P_C
0	498	235	110	137	16
30	539	186	149	149	55
34	550	175	152	152	71
38	570	170	158	157	88

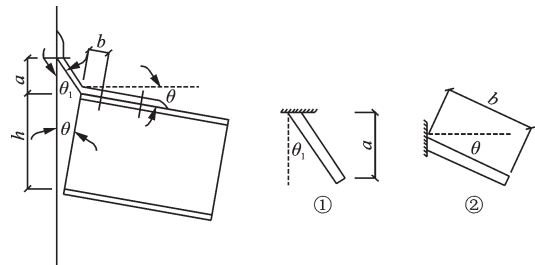


图 18 梁翼缘长圆栓孔下顶底角钢受力示意

Fig.18 Loading condition of the angle steels of the top and bottom angles of the long flange hole of the beam flange

是因为短跨顶(底)角钢和梁翼缘发生相对滑移,角钢的受力受到极大约束所致(图 18),此时短跨梁机制提供的抗力会有所下降。

顶(底)角钢与梁翼缘发生相对滑移时变形较小,认为其处于弹性阶段,肢件以受弯为主。若将圆孔模型(BASC)中角钢的抗弯状态分为①、②两部分,则产生相对滑移时,螺栓对角钢肢件在平行于梁翼缘方向的约束作用几乎消失,但其对角钢肢件垂直于梁翼缘方向的约束作用依然存在。因此,在滑移过程中角钢抗弯状态可认为只有②由此得:

$$M = EI\theta_1/a + EI\theta/b \quad (3)$$

$$M_1 = EI\theta/b \quad (4)$$

式中, M 、 M_1 分别为短跨受拉顶(底)角钢在梁翼缘圆孔和长圆栓孔条件下在弹性阶段提供的弯矩; E 为角钢弹性模量。

以模型 BASC 中各部件尺寸 $a=98 \text{ mm}$ 、 $b=50 \text{ mm}$ 、 $h=450 \text{ mm}$ 为例,由几何关系得:

$$\theta_1 = 4.6\theta \quad (5)$$

由式(3)、(4)、(5)可得:

$$M_1 = 0.3M \quad (6)$$

可见,相对滑移下顶(底)角钢只能提供在未滑移条件下30%的弯矩。如果要使其提供与未滑移条件下相同的弯矩,可以增加角钢厚度,提高其截面惯性矩,即通过增加角钢厚度使②部分提供与未加厚条件下①、②两部分相同的弯矩。若圆孔条件下顶(底)角钢厚度为12 mm,角钢长度为300 mm,则由式(4)、(6)得到:

$$1/12 \times 300 \times d^3 = 10/3 \times 1/12 \times 300 \times 12^3 \quad (7)$$

由上式计算可得 $d=17.3$ mm,因此角钢厚度若大于17.3 mm,其在滑移条件下提供的弯矩将不低于12 mm厚未滑移条件下顶(底)角钢提供的弯矩。

选用L200×125×18型号角钢用于梁翼缘开孔长度为38 mm模型,命名为AST18。图19为BASC与AST18的荷载—位移曲线对比,图20为其短跨梁机制对比。由图20可以看出,由于角钢厚度增加,即使角钢与梁翼缘发生滑移,AST18模型N3节点的梁端弯矩将不低于BASC,使得短跨梁机制提供的抗力没有因滑移而降低,AST18的抗力一直均高于BASC。

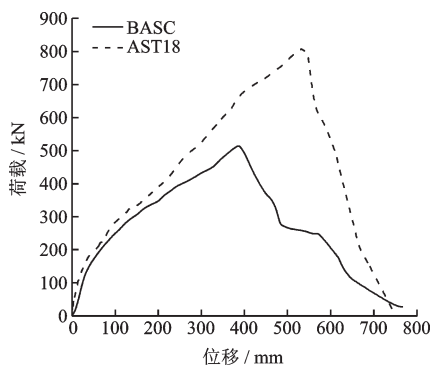


图19 荷载—位移曲线对比

Fig.19 Comparison of load-displacement curves

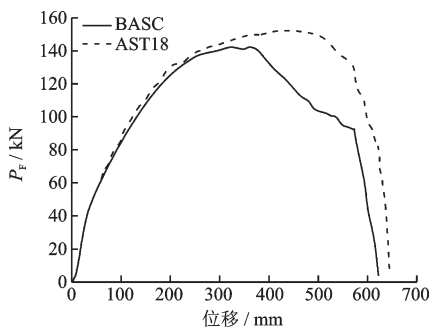


图20 短跨梁机制提供抗力对比

Fig.20 Comparison of flexural mechanism provides by short span resistance

4 结 论

(1)不等跨半刚性连接梁柱子结构在连续倒塌工况下,短跨节点率先破坏,长跨因失去支持其效能不能得以充分发挥,本文所引入的协同工作系数可定量说明长跨效能的发挥程度。

(2)短跨顶底角钢厚度的增加使得短跨梁机制和悬链线机制提供的抗力明显增大,由于长短跨的协同工作,使得长跨效能得以进一步发挥,长跨梁机制和悬链线机制提供的抗力也随之提高;若以长跨节点破坏对应的失效位移作为控制指标,则通过合理设计短跨梁翼缘开孔长度和角钢厚度,可在不降低短跨梁机制的条件下使长跨的效能得以充分发挥,实现长短跨协同抵抗外载的理想状态。

(3)不等跨度顶底角钢腹板双角钢连接钢框架结构均可根据文中的设计建议提升效能利用及抗倒塌性能。

参考文献:

- [1] 钟炜辉, 孟宝, 郝际平. 不对称跨度下钢框架梁柱子结构抗倒塌性能分析[J]. 工程力学, 2017, 34(5): 125-131.
Zhong W H, Meng B, Hao J P. Analysis of anti-collapse performance of steel frame beam-column substructure with asymmetric spans [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(5): 125-131.(in Chinese)
- [2] Meng B, Zhong W H, Hao J P. Anti-collapse performances of steel beam-to-column assemblies with different span ratios [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 140: 125-138.
- [3] Yang B, Tan K H. Numerical analyses of steel beam-column joints subjected to catenary action [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70(3): 1-11.
- [4] 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(9): 112-130.
- [5] 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): 92-99.
Wang W, Li L, Chen Y Y. Experimental investigation on progressive collapse behavior of WUF-B connections between SHS column and H beam [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 92-99.(in Chinese)

- [6] 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):26-33.
Wang W, Li L, Chen Y Y. Experimental study on progressive collapse behavior of CHS column-to-H beam connections with outer-diaphragm[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 26-33.(in Chinese)
- [7] 高山, 郭兰慧, 张素梅. 基于材料损伤的钢板加固半刚性组合节点抗倒塌性能分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3):240-246.
Gao Sh, Guo L H, Zhang S M. Study on anti-collapse performance of semi-rigid composite joint strengthened by steel plate considering material damage[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 240-246. (in Chinese)
- [8] Meng B, Zhong W H, HAO J P, et al. Calculation of the resistance of an unequal span steel substructure against progressive collapse based on the component method [J]. Engineering Structures, 2019, 182(1): 13-28.
- [9] Lew H S, Main J A, Robert S D, et al. Performance of steel moment connections under a column removal scenario.I: Experiments[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(1): 98-107.
- [10] 钟炜辉, 谭政, 宋晓燕, 等. 不同跨度比组合梁柱子结构抗倒塌性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(9):45-55.
Zhong W H, Tan Zh, Song X Y, et al. Experimental study on anti-collapse performance of composite beam-column assemblies with different span ratios [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(9): 45-55. (in Chinese)
- [11] 马亚东. 钢框架子结构抗连续倒塌性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Ma Y D. Experimental study on continuous collapse performance of steel frame substructure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.(in Chinese)
- [12] 李玲, 王伟, 陈以一. 连续性倒塌工况下钢管柱框架节点的破坏模式与鲁棒性[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(4):9-15.
Li L, Wang W, Chen Y Y. Failure modes and robustness of beam-to-column joints for steel tubular frame resisting progressive collapse [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(4): 9-15. (in Chinese)
- [13] 赵伟, 童根树. 加劲T形连接件有限元分析[J]. 工业建筑, 2008, 38(6):102-105.
Zhao W, Tong G Sh. Finite element analysis of stiffened T-STUB connections[J]. Industrial Construction, 2008, 38(6): 102-105. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)



(上接第 959 页)

- [9] 赵文浩. 火损绿色高性能纤维增强水泥基新型框架节点抗震加固研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
Zhao W H. Experimental research on seismic strengthening behavior of fire-damaged green high-performance fiber-reinforced cementitious composites frame joint [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2018. (in Chinese)
- [10] 闫庆喜. 绿色高性能纤维增强水泥基复合材料新型框架梁抗火性能试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
Yan Q X. Properties of green high-performance fiber-reinforced cementitious composites after high temperatures and fire tests of beams[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2016. (in Chinese)
- [11] 罗敏. 绿色高性能纤维增强水泥基复合材料加固钢筋混凝土柱试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2013.
Luo M. The experimental study on the columns reinforced by green high-performance fiber-reinforced cementitious composites [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2013. (in Chinese)