

高强螺栓工字钢连接混凝土梁柱节点的 抗震性能研究

李明,李毅博,谢可可

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 提出一种以高强螺栓工字钢连接混凝土梁柱节点的连接方法,研究该节点抗震性能,为工程设计提供依据。方法 采用 ABAQUS 有限元软件模拟节点的受力过程,研究后浇混凝土强度、节点区长度、工字钢翼缘厚度等参数对节点抗震性能的影响。结果 与现浇结构相比,新型节点承载能力更高,其屈服荷载和峰值荷载相较于现浇试件的屈服荷载和峰值荷载分别提升 2.08 倍和 2.64 倍;提高后浇混凝土强度等级、增加节点区的长度对承载能力影响较小;提高工字钢翼缘厚度、工字钢屈服强度,节点的承载能力提高较明显。结论 采用高强螺栓工字钢连接混凝土梁柱节点的连接结构满足承载力要求,且工字钢翼缘厚度、工字钢屈服强度对结构的承载能力影响较大。

关键词 梁柱节点;装配式混凝土结构;有限元模拟;滞回曲线;骨架曲线

中图分类号 TU398

文献标志码 A

引用格式:李明,李毅博,谢可可. 高强螺栓工字钢连接混凝土梁柱节点的抗震性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(3):441-449. (LI Ming, LI Yibo, XIE Keke. Study on seismic performance of concrete beam and column connected by high-strength bolts and I-steel[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(3): 441-449.)

Study on Seismic Performance of Concrete Beam and Column Connected by High-strength Bolts and I-steel

LI Ming, LI Yibo, XIE Keke

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: A joint of connecting concrete beam and column with high-strength bolts and I-steel is proposed, and its seismic performance was investigated to provide a reference for design. The load-bearing processes of it was analyzed by ABAQUS. How the parameters influence its performance was analyzed, such as the post-cast concrete strength, the length of joint area, the thickness of I-

收稿日期:2023-05-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51978422);辽宁省教育厅面上项目(LJKZ0561);住房和城乡建设部科技攻关项目(2019-K-080)

作者简介:李明(1979—),男,副教授,博士,主要从事组合结构、装配式混凝土结构等方面研究。

steel flange, ect. Compared with the cast-in-place specimen, the specimen connected with the above manner has higher load-bearing capacity, of which the yield load and peak load are increased by 2.08 and 2.64 times, respectively, compared with those of the cast-in-place specimen. Increasing the strength grade of post-cast concrete or the length of the joint area within a certain range has less effect on the load carrying capacity. Increasing the thickness of the I-steel flange, I-steel yield strength have greater impacts on the load capacity of joint area. The results show that the concrete beam and column connected by high-strength bolts and I-steel meets the requirements of load carrying capacity, and the I-steel flange thickness and I-steel yield strength have relatively large influences on the carrying capacity of it.

Key words: joint of beam and column; assembly concrete structure; finite element simulation; hysteresis curve; skeleton curve

近年来装配式建筑的研发和应用在我国成效显著,其中梁柱节点的性能对装配式建筑至关重要。对于装配式混凝土结构梁柱节点的研究,早期主要研究的节点形式为区域钢筋连接,如套筒灌浆连接、浆锚连接等,但这种连接方式装配效率较低,因此目前研发的重点逐渐转向采用钢连接的梁柱节点。

针对钢连接梁柱节点的形式及性能,国内外学者进行了众多研究。P. K. Aninthaneni^[1]等提出了一种由角钢和螺栓连接的干式装配梁柱节点,通过试验得出,框架整体的侧向刚度得到了提高。Z. Q. Jiang等^[2-4]通过模拟和试验分析了不同钢梁柱节点的震后恢复性能以及不同参数对其抗震性能的影响,研究表明,修复后的试件在低频常幅荷载作用下的耗能性能稳定,具有良好的震后恢复性能。梁奇才^[5]提出了工字钢和U型钢连接装配式剪力墙和连梁的拼装结构及连接方法,并采用有限元软件模拟分析了二者受力性能及影响因素。胡习兵等^[6]提出了型钢连接装配式混凝土梁柱节点,并采用有限元软件分析了钢材强度、预制梁纵筋配筋率等因素对节点力学性能的影响。牟凤飞^[7]提出预埋型钢及螺栓与后浇混凝土的混合连接,并利用有限元数值计算方法分析了其受力性能,验证了该连接方式的可行性。朱南岳等^[8]提出了装配式新型梁-柱钢连接节点,并采用有限元软件分析

了其抗震性能,验证其可行性。黄洋^[9]提出了一种基于型钢螺栓连接的新型装配式混凝土梁柱节点,并结合试验和模拟对该节点进行受力分析,验证其可行性。高培楠^[10]设计了一种新型预制插销装配式混凝土梁柱节点,并模拟分析节点的受力性能,探究梁端钢板厚度、柱截面尺寸等因素对节点力学性能的影响。郝进锋等^[11]提出了一种新型装配式框架结构梁柱节点,并采用ABAQUS分析其可行性及抗震性能。吴东平等^[12-13]通过建立有限元模型,验证了螺栓连接的装配式钢混梁柱节点的可行性,并分析了不同参数对其力学性能的影响。康子恒^[14-15]研究了一种采用自攻螺钉连接的组合工字钢结构体系,并对其中组合工字钢中大T型钢连接的梁柱节点的受力性能进行试验研究,验证了该节点的可行性。

目前针对装配式建筑研究中,关于使用工字钢和钢板连接梁柱节点方面的研究相对较少,基于此,笔者提出了一种在预制梁柱之间采用高强螺栓工字钢连接的新型节点(Concrete Beam and Column Connected by High-strength Bolts and I-steel, CHB),利用ABAQUS有限元软件模拟该节点的受力过程,研究了不同参数对该节点抗震性能的影响。结果表明,该节点满足抗震要求,可应用于实际工程中,且工字钢翼缘厚度以及工字钢屈服强度对该节点的承载能力影响相对较大。

1 CHB 概况

CHB 的构造如图 1 所示。具体装配方法及传力机理如下:在槽型钢板上焊接锚固钢筋形成预埋件,将预埋件内嵌到预制梁和预制柱内,然后将预制梁和预制柱吊装到指定位置,通过高强螺栓和工字钢将预制梁和预制柱连接在一起,最后在梁柱连接节点区域后浇混凝土使其形成整体构件。其中,工字钢翼缘用以传递梁端弯矩,梁端剪力由后浇混凝土传递。CHB 的工字钢腹板与梁端平行而非垂直,其最大的优势是便于安装(腹板不需与梁或柱连接),且腹板两侧的混凝土由于工字钢翼缘、腹板和梁或柱围成的筒状结构对其内部混凝土形成环向约束,使其内部混凝土受力较好。

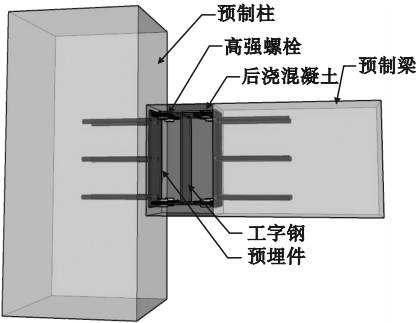


图 1 CHB 装配图

Fig. 1 Assembly diagram of CHB

2 有限元模拟方法及验证

为研究上述节点的可行性和抗震性能,采用 ABAQUS 有限元软件进行模拟。模拟前,参照与本研究相近的梁柱节点试验^[16]验证建模方法。模拟时,混凝土本构采用塑性损伤模型,混凝土单元类型为 C3D8R,泊松比为 0.2;钢筋采用双折线模型,第二折线水平;钢筋和混凝土材料参数按文献[16]取值。

文献[16]中现浇混凝土梁柱节点试件的尺寸及配筋如图 2 所示。其中混凝土强度为 C35,钢板材料均为 Q235。边界条件和加载方式与试验相近,即在预制梁轴心处设置

RP1 点,该点直接与梁端面进行耦合,并直接在 RP1 点上通过幅值表施加位移荷载。在柱一端设置 RP2 参考点,将 RP2 与柱端面设置耦合约束,在 RP2 上直接施加柱顶轴心荷载 337.5 kN,轴压比为 0.13^[16]。然后根据试验中地锚的位置,分别在距柱端 1/3 处的柱顶面和柱底面设置完全固定边界条件。

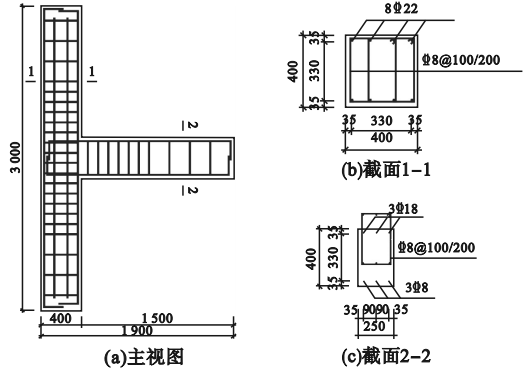


图 2 现浇节点参数

Fig. 2 Cast-in-place joint detail diagram

采用上述有限元方法模拟了梁柱节点的受力过程,并与试验结果进行对比,得到滞回曲线和骨架曲线分别见图 3 和图 4。从图 3 可以看出,试件局部滞回曲线的捏缩效果较为明显,呈反“S”形,而在模拟中未考虑钢筋与混凝土之间的滑移,因此模拟捏缩效果稍差。但整体来说模拟得到的滞回曲线与试验曲线大体相近,基本吻合。从图 4 中可看出,正向加载和反向加载骨架曲线均吻合良好,最大相差幅度为 5.4%,说明建模方法可靠。

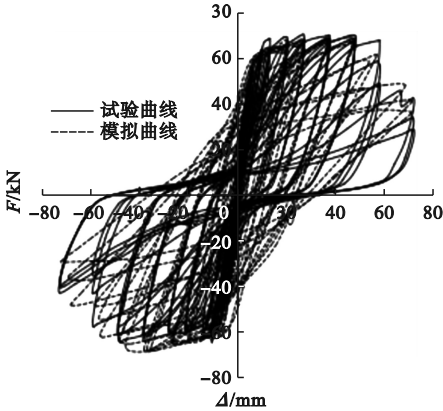


图 3 试件试验与模拟滞回曲线对比

Fig. 3 Comparison of test and simulation hysteresis curves for cast-in-place specimen

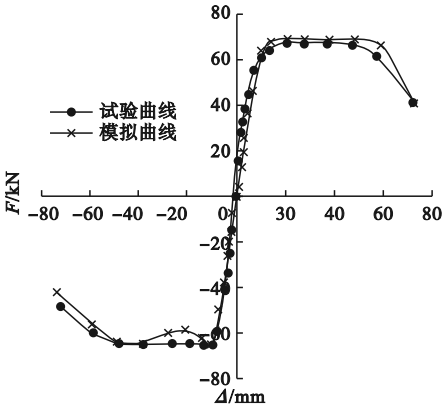


图4 试件试验与模拟骨架曲线对比

Fig. 4 Comparison of test and simulation skeleton curves for cast-in-place specimen

3 CHB 与现浇梁柱节点对比

参考实际工程,笔者设计了相同尺寸及配筋的现浇节点(编号 XJDB)和 CHB 节点(编号 CHDB),对比分析两者的位移延性系数、能量耗散系数、等效黏滞阻尼等。其中,槽型钢板和工字钢单元类型为 S4R,螺栓和锚固钢筋的单元类型为 C3D8R。

3.1 XJDB 与 CHDB 的设计

参照图 2,试件 CHDB 的设计参数与 XJ 一致(见图 5),高强螺栓选用 8.8 级。CHDB 选用的工字钢宽 210 mm,翼缘厚度×翼缘宽度×腹板高度×厚度为 6 mm×260 mm×364 mm×6 mm。预埋件的结构构造如图 6 所示,其中锚固钢筋为 6 Φ18。在预制柱上设置锚固钢筋对应的开孔。XJDB 的

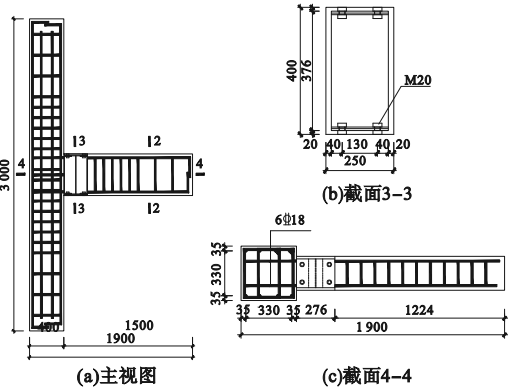


图5 试件尺寸及配筋详图

Fig. 5 Specimen size and reinforcement diagram

配筋、尺寸和材料参数与 XJ 完全一致。

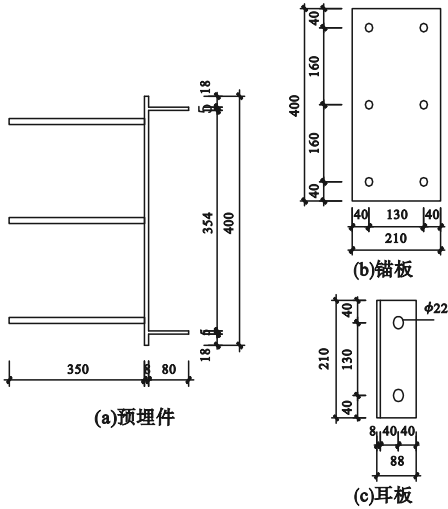


图6 预埋件结构构造

Fig. 6 The structural construction of pre-built parts

3.2 抗震性能对比分析

3.2.1 滞回曲线

XJDB 和 CHDB 的滞回曲线如图 7 所示。从图中可看出,CHDB 的滞回曲线更加饱满,说明新型钢节点抗震性能更好。

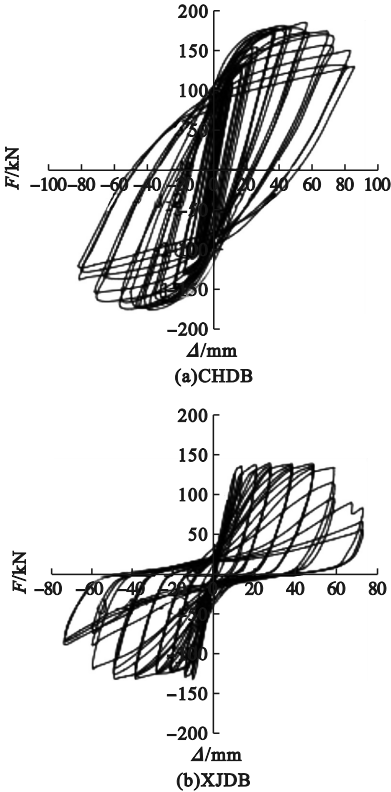


图7 CHDB 和 XJDB 滞回曲线

Fig. 7 CHDB and XJDB hysteresis char

3.2.2 骨架曲线对比

CHDB 与 XJDB 的骨架曲线如图 8 所示。从图中可以看出,在往复位移加载初期,CHDB 的初始刚度高于 XJDB;随着位移增加,CHDB 的承载力以及后期刚度明显高于 XJDB;XJDB 的破坏位移明显早于 CHDB,即在相同荷载下,XJDB 先于 CHDB 破坏。

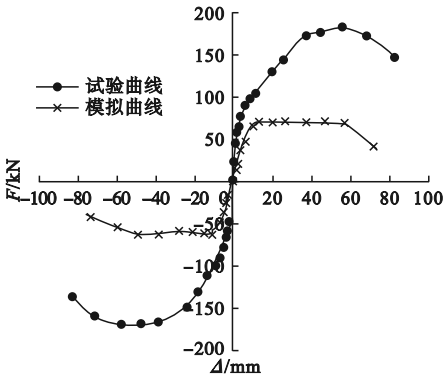


图 8 CHDB 和 XJDB 骨架曲线

Fig. 8 Comparison of skeleton curves between CHDB and XJDB

由此说明,结构在地震荷载作用下发生大变形时,CHDB 较 XJDB 更不易进入塑性阶段,符合“强节点弱构件”的抗震设计要求。

3.3 延性及耗能能力对比分析

通过计算得到 CHDB 与 XJDB 的抗震性能指标结果见表 1。从表中可以看出,正向加载时,CHDB 的屈服荷载和峰值荷载分别是 XJDB 的 2.08 倍和 2.63 倍,反向加载时,CHDB 的屈服荷载和峰值荷载分别是 XJDB 的 2.15 倍和 2.64 倍,说明 CHDB 承载能力更高;CHDB 的能量耗散系数是 XJDB 的 1.91 倍,说明 CHDB 比 XJDB 具有更好的耗能能力;CHDB 的位移延性系数值在正向加载和反向加载时分别为 3.30 和 4.28,XJDB 的位移延性系数值在正向加载和反向加载时分别为 6.02 和 6.28,均大于 2,表明该新型梁柱钢节点具有良好的延性^[17],符合结构抗震变形要求。

表 1 CHDB 和 XJDB 特征点对比

| Table 1 Comparison of characteristic point between CHDB and XJDB | | | | | | | | | |
|--|------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|----------|
| 试件 | 加载方向 | 屈服荷载/kN | 屈服位移/mm | 峰值荷载/kN | 破坏荷载/kN | 破坏位移/mm | 位移延性系数 | 能量耗散系数 | 等效黏滞阻尼系数 |
| CHDB | 正向 | 136 | 23.8 | 181 | 154 | 78.6 | 3.30 | 1.45 | 0.23 |
| | 反向 | 132 | 18.2 | 172 | 146 | 77.9 | 4.28 | 1.45 | 0.23 |
| XJDB | 正向 | 65 | 10.5 | 69 | 58 | 63.1 | 6.02 | 0.76 | 0.12 |
| | 反向 | 61 | 9.5 | 65 | 55 | 59.8 | 6.28 | 0.76 | 0.12 |

3.4 刚度退化对比分析

CHDB 和 XJDB 的刚度退化曲线见图 9。从图中可以看出,CHDB 采用高强螺栓钢板连接,每级割线刚度均大于 XJDB,说明 CHDB 整体具有较高的刚度。根据刚度退化走势可知,加载初期构件刚度较大,随着混凝土开裂和位移荷载的增加,构件达到屈服,两者刚度均退化较快;进入屈服阶段之后,位移荷载进一步加大,构件破坏严重,两者刚度退化均呈现平缓下降趋势。

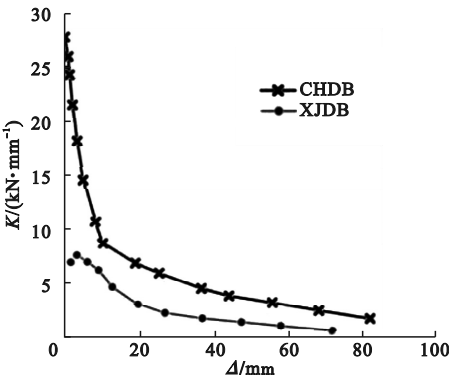


图 9 CHDB 和 XJDB 刚度退化曲线

Fig. 9 Comparison of stiffness degradation curves between CHDB and XJDB

3.5 破坏形态应力对比分析

XJDB 混凝土在结构达到破坏荷载时的 PEEQ 图和拉压损伤云图见图 10。由图 10(a)可以看出,梁柱节点塑性应变累积最多,最大值达到 0.8037,且网格变形严重;由

混凝土拉压损伤分布可以看出,在梁柱节点处拉压损伤均达到最大值,且通过受拉损伤分布可看到,损伤在向梁上方延伸。上述结果表明,梁柱节点处混凝土已严重破坏。

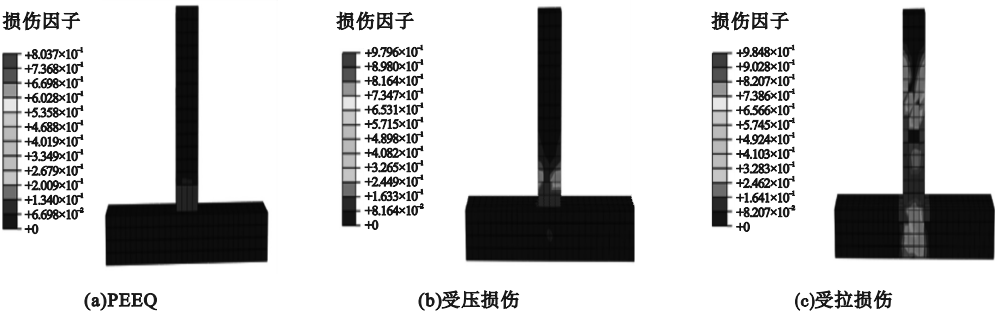


图 10 XJDB 混凝土 PEEQ 和拉压损伤分布图

Fig. 10 PEEQ and tensile-compression damage distributions of concrete of XJDB

CHDB 混凝土在结构达到破坏荷载时的 PEEQ 图和拉压损伤云图见图 11。从图中可以看出,等效应变累计值、受拉损伤和受压损伤的最大值分别为 0.234、0.985、0.979,均位于梁柱节点处,其中拉压损伤分布云图由梁柱

相交处向梁端扩散,说明节点处混凝土破坏最为严重,且开裂区由节点处向梁端扩展。综合上述分析,CHDB 梁柱节点处混凝土 PEEQ 累计值远小于 XJDB,表明 CHDB 混凝土内部损伤明显小于 XJDB 混凝土内部损伤。

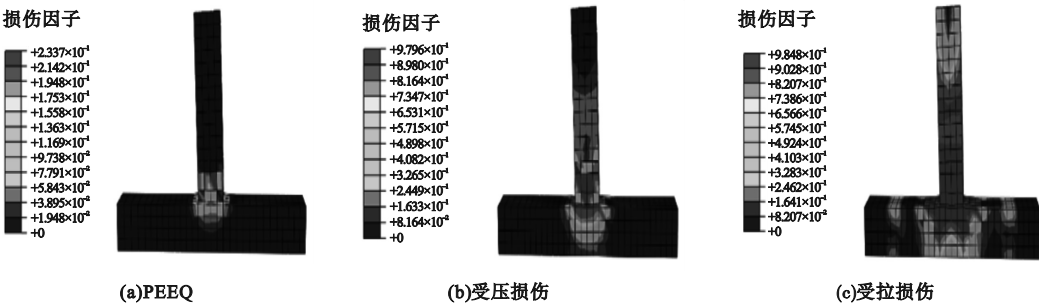


图 11 CHDB 混凝土 PEEQ 图和拉压损伤云图

Fig. 11 PEEQ diagram and tensile-compression damage plots of concrete of CHDB

为进一步分析 CHDB 的破坏过程,从有限元软件中提取 CHDB 达到破坏荷载时,除混凝土外其他构件的应力云图(见图 12)。从图中可看出,当结构达到破坏荷载时,工字钢最大应力分布在腹板对应的上下翼缘处,且此处网格被“拉长”,最大应力为 459.7 MPa,达到了钢材的极限强度,说明工字钢破坏严重,失去了承载能力;槽型钢板最大应力分布在与柱连接一侧的侧板与耳板交

接处,分布区域较小,其大小为 459.7 MPa,达到钢材极限强度,说明槽型钢板部分区域破坏严重;高强螺栓最大应力为 666.7 MPa,未达到其极限强度 800 MPa,说明高强螺栓未发生较严重的剪切破坏,后期仍具备一定的承载能力;钢筋最大应力为 587.7 MPa,主要分布在梁柱交接处,最大应力略小于其极限强度 600 MPa,说明梁柱交接处钢筋破坏也较为严重。

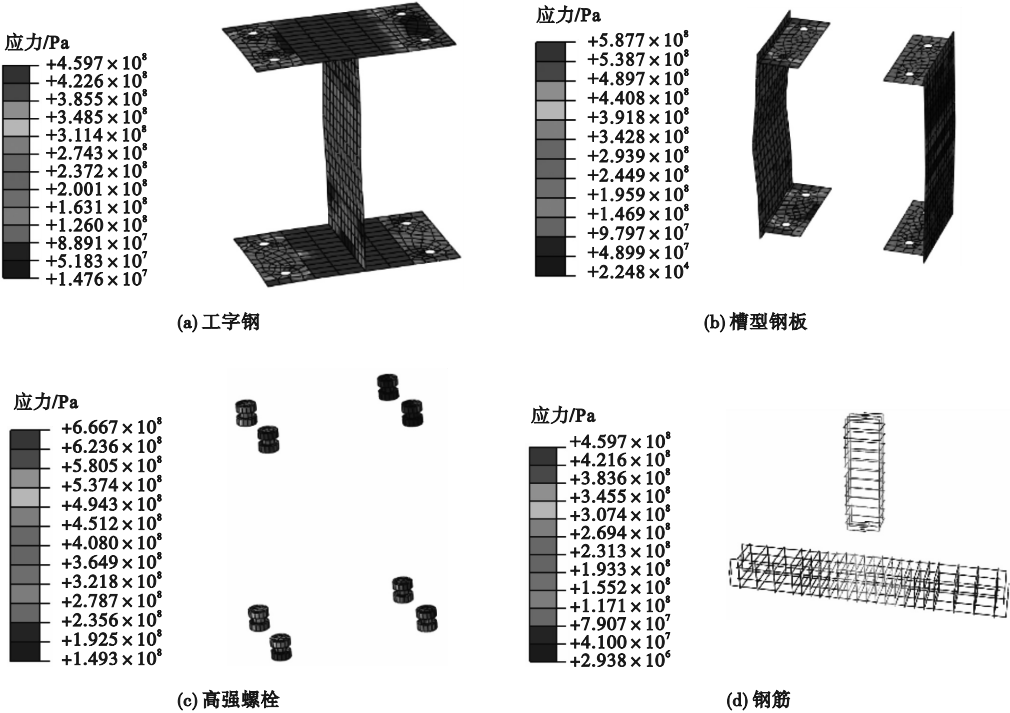


图 12 CHDB 破坏荷载点时各构件应力云图

Fig. 12 Stress plots of each component at CHDB's failure load

4 CHB 抗震性能影响参数分析

为分析不同参数对 CHB 抗震性能的影响,笔者设计了 8 组试件,参数包括后浇混凝土强度、节点区长度、工字钢翼缘厚度、工字钢腹板厚度、工字钢屈服强度、槽钢板耳板厚度、槽钢板屈服强度、螺栓等级。研究表明,高强螺栓等级的变化对 CHB 的屈服荷载、峰值荷载几乎无影响;后浇混凝土强度、节点区长度、工字钢腹板厚度、槽钢板耳板厚度、槽钢板屈服强度对 CHB 的屈服荷载影响较小;工字钢翼缘厚度 t 、工字钢屈服强度 Q 对 CHB 的屈服荷载和峰值荷载的影响较为显著,因此,笔者主要对以上两个参数进行分析。

4.1 工字钢翼缘厚度对 CHB 抗震性能的影响

工字钢翼缘厚度分别为 6 mm、8 mm、10 mm 时,CHB 的骨架曲线如图 13 所示。从图中可以看出,工字钢翼缘从 6 mm 增加到 10 mm 时,试件屈服荷载和峰值荷载在逐渐增大,正向和反向加载时,屈服荷载分别增幅 11.97% 和

6.83%,峰值荷载分别增幅 9.75% 和 5.09%。

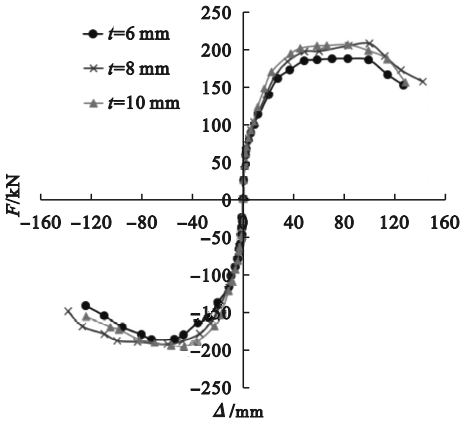


图 13 不同翼缘厚度对骨架曲线的影响

Fig. 13 Influence of different flange thickness on skeleton curves

不同翼缘厚度下的刚度退化曲线如图 14 所示。从图中可以看出,翼缘厚度由 6 mm 增加到 10 mm,初始刚度依次降低;位移增加到 12 mm 左右,三者刚度退化出现明显变化,刚度退化速率从大到小依次为厚度 10 mm 试件、厚度 8 mm 试件、厚度 6 mm 试

件;位移增加到 58 mm 之后,三者刚度退化较为平缓,基本趋于一致。上述分析表明,在一定范围内提高工字钢翼缘厚度对试件的初始刚度影响较小。

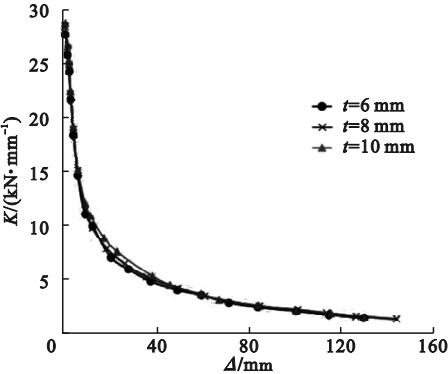


图 14 不同翼缘厚度对刚度退化的影响

Fig. 14 Influence of different flange thickness on stiffness degradation

4.2 工字钢屈服强度对 CHB 抗震性能的影响

不同工字钢屈服强度下的骨架曲线如图 15 所示。从图中可以看出,从图中可以看出,屈服荷载和峰值荷载从大到小依次为屈服强度 390 MPa 试件、屈服强度 355 MPa 试件、屈服强度 235 MPa 试件。工字钢屈服强度从 235 MPa 增加到 390 MPa 时,正向和反向加载过程中,屈服荷载分别增幅 12.06% 和 3.76%,峰值荷载分别增幅 9.17% 和 3.43%。

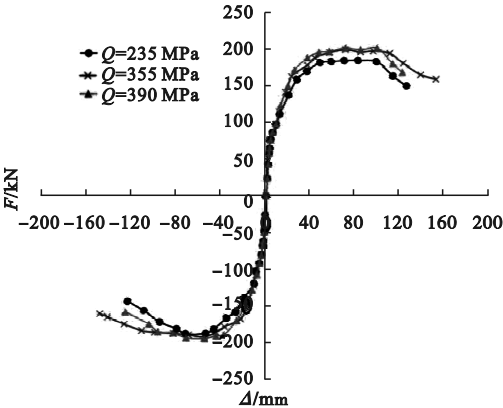


图 15 不同工字钢屈服强度对骨架曲线的影响

Fig. 15 Influence of yield strength of different I-steels on skeleton curves

不同工字钢屈服强度下的刚度退化曲线如图 16 所示。从图中可以看出,三者初始刚

度基本一致,随着位移荷载增大,混凝土开裂,三者刚度退化曲线较陡;当位移增加到 9 mm 左右时,刚度退化发生变化,之后刚度退化速率从大到小依次为屈服强度 355 MPa 试件、屈服强度 235 MPa 试件、屈服强度 390 MPa 试件。说明在一定范围内增大工字钢屈服强度会加快试件的刚度退化,超过一定范围将会减缓试件的刚度退化。

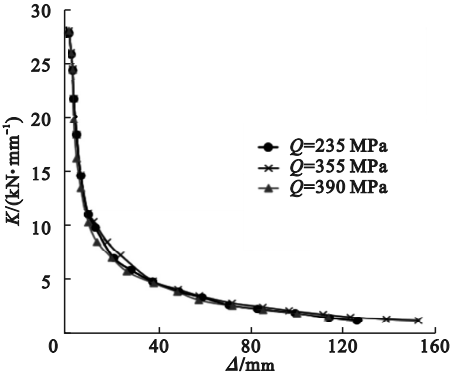


图 16 不同工字钢屈服强度对刚度退化的影响

Fig. 16 Influence of different yield strength of I-steel on stiffness degradation

5 结 论

(1)与现浇试件相比,高强螺栓工字钢连接混凝土梁柱节点承载力更高,其屈服荷载和峰值荷载相较于现浇试件的屈服荷载和峰值荷载分别提升了 2.08 倍和 2.64 倍,说明该新型节点满足承载力要求,可应用于实际工程中。

(2)高强螺栓工字钢连接混凝土梁柱节点在发生破坏时,工字钢在腹板对应的上下翼缘区域破坏较为严重;槽钢板最大应力值主要分布在与柱连接的槽型钢板侧板与耳板相交处,分布区域较小;高强螺栓未发生较严重的剪切破坏;梁柱相交处的局部钢筋、混凝土破坏较为严重,其混凝土内部损伤情况远低于现浇梁柱节点。

(3)工字钢翼缘厚度和屈服强度对高强螺栓工字钢连接混凝土梁柱节点的屈服荷载和峰值荷载影响较大。工字钢翼缘厚度由

6 mm增加至 10 mm,该节点的屈服荷载增幅 11.97%,峰值荷载增幅 9.75%;工字钢屈服强度由 235 MPa 增加至 390 MPa,该节点的屈服荷载增幅 12.06%,峰值荷载增幅 9.17%。建议工字钢屈服强度宜采用 355 MPa。

参考文献

- [1] ANINTHANENI P K, DHAKAL R P. Analytical and numerical investigation of “dry” jointed precast concrete frame sub-assemblies with steel angle and tube connections [J]. Bulletin of earthquake engineering, 2019, 17(9): 4961–4985.
- [2] JIANG Z Q, LI S H, LIU X C, et al. Influence of bolts on seismic performance of earthquake resilient prefabricated sinusoidal corrugated web steel beam-column joints [J]. Journal of constructional steel research, 2020, 172: 106214.
- [3] JIANG Z Q, KANG Y T, LIU X C, et al. Experimental study of an earthquake-resilient prefabricated opening-web steel channel beam-to-column joint with flange cover plates [J]. Engineering structures, 2020, 221: 111054.
- [4] JIANG Z Q, YANG X F, DOU C, et al. Cyclic testing of replaceable damper: earthquake-resilient prefabricated column-flange beam-column joint [J]. Engineering structures, 2019, 183: 922–936.
- [5] 梁奇才. 钢连接装配混凝土连梁的力学性能与设计方法研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019. (LIANG Qicai. Study on mechanical properties and design method of steel-connected concrete beams [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019.)
- [6] 胡习兵, 陈瑞, 曾裕林, 等. 型钢连接装配式混凝土节点力学性能研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(11): 8–14. (HU Xibing, CHEN Rui, ZENG Yulin, et al. Study on mechanical properties of prefabricated concrete beam-column joints connected by steel [J]. Building science, 2021, 37(11): 8–14.)
- [7] 牟凤飞. 型钢混合连接的装配式混凝土剪力墙结构抗震性能的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022. (MOU Fengfei. Study on mechanical behavior of prefabricated concrete shear wall structure with mixed connection of section steel [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.)
- [8] 朱南岳, 朱炜聪, 朱俊明, 等. 装配式新型梁-柱连接抗震性能研究[J]. 四川建材, 2022, 48(2): 68–69. (ZHU Nanyue, ZHU Weicong, ZHU Junming, et al. Study on the seismic behavior of a prefabricated new beam-column steel joint [J]. Sichuan building materials, 2022, 48(2): 68–69.)
- [9] 黄洋. 新型装配式混凝土梁柱干式节点抗震性能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2022. (HUANG Yang. Research on seismic performance of the new prefabricated concrete beam-column dry joints [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022.)
- [10] 高培楠. 预制插销装配式混凝土梁柱节点抗震性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021. (GAO Peinan. Research on mechanical properties of rectangular concrete-filled steel tube columns and concrete beams [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021.)
- [11] 郝进锋, 高亚鹏, 刘浩. 一种新型装配式混凝土结构梁柱节点及其抗震性能分析[J]. 河南科学, 2023, 41(4): 541–546. (HAO Jinfeng, GAO Yapeng, LIU Hao. A new type of prefabricated concrete structure beam-column joint and its seismic performance analysis [J]. Henan science, 2023, 41(4): 541–546.)
- [12] 吴东平, 裴明晓, 李成玉. 基于螺栓连接的装配式钢筋混凝土梁柱节点抗震性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(2): 178–212. (WU Dongping, PEI Mingxiao, LI Chengyu. Seismic performance of prefabricated reinforced concrete beams and column joints based on bolted connection [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2023, 21(2): 178–212.)
- [13] 吴东平, 周心茹. 装配式钢混梁-柱螺栓连接节点力学性能研究[J]. 山西建筑, 2023, 49(4): 62–66. (WU Dongping, ZHOU Xinru. Study on mechanical properties of fabricated steel concrete beam-column bolted joint [J]. Shanxi architecture, 2023, 49(4): 62–66.)
- [14] 康子恒. 组合工字钢梁柱节点试验研究及结构受力性能分析[D]. 保定: 河北农业大学, 2021. (KANG Ziheng. Experimental study and structural performance analysis of composite I-steel beam column joints [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021.)
- [15] 康子恒, 王森林, 杜喜凯, 等. T形钢连接半刚性梁柱节点受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增刊1): 44–54. (KANG Ziheng, WANG Senlin, DU Xikai, et al. Study on mechanical behavior of semi-rigid beam-column joints with T-section connections [J]. Journal of building structures, 2020, 41(S1): 44–54.)
- [16] 王苏. 新型预制装配式 RC 框架梁柱节点抗震性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019. (WANG Su. Study on seismic performance of the new beam-column joint for precast RC frame [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.)
- [17] 齐连训, 罗云标, 严加宝, 等. 高变形能力螺栓抗剪连接件抗剪承载力理论分析与验证[J]. 工程力学, 2021, 38(10): 74–82. (QI Lianxun, LUO Yunbiao, YAN Jiabao, et al. Theoretical analysis and verification on shear capacity of high-deformability bolted shear connector [J]. Engineering mechanics, 2021, 38(10): 74–82.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)