

基于等效钢筋连接的连梁和剪力墙节点 抗震性能研究

李明,张嘉男,李晨浩,张海洋,王春艳

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究基于等效钢筋连接的连梁和剪力墙节点的抗震性能,为装配式混凝土连梁和剪力墙的连接设计提供依据。方法 采用 WCOMD 有限元软件建立现浇连梁及装配连梁模型,对比分析二者的受力破坏过程。结果 未考虑连梁端部破坏向墙内扩展时,装配连梁与现浇连梁相比,屈服荷载、峰值荷载和极限荷载分别提高 3.98%、15.19% 和 12.76%,延性和能量耗散系数分别提高 3.83% 和 15.84%;未考虑连梁端部破坏向墙内扩展与考虑连梁端部破坏向墙内扩展的装配连梁相比,屈服荷载、峰值荷载和极限荷载分别提高 5.97%、0.84% 和 3.57%,延性和能量耗散系数分别提高 1.07% 和 23.76%。结论 采用等效钢筋连接连梁和剪力墙的方法具有可行性,且等效钢筋面积比、装配区灌浆长度及装配位置对结构的承载力影响较大。

关键词 装配式;连梁;抗震性能;破坏过程

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

引用格式:李明,张嘉男,李晨浩,等.基于等效钢筋连接的连梁和剪力墙节点抗震性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):848-856.(LI Ming,ZHANG Jianan,LI Chenhao,et al.Research on seismic performance of coupling beam and shear wall nodes based on equivalent reinforcement connections[J].Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(5):848-856.)

Research on Seismic Performance of Coupling Beam and Shear Wall Nodes Based on Equivalent Reinforcement Connections

LI Ming,ZHANG Jia'nan,LI Chenhao,ZHANG Haiyang,WANG Chunyan
(School of Civil Engineering,Shenyang Jianzhu University,Shenyang,China,110168)

Abstract:In order to study the seismic performance of coupling beam and shear wall connected by equivalent reinforcement,and to provide a basis for the connection design of assembled concrete connecting beams and shear walls.Cast-in-place and assembled beams were modeled using the finite element software WCOMD,and the damage processes of both were compared and analyzed.

收稿日期:2023-05-12

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。

The result shows that without considering the expansion of the end damage of the coupling beam extending into the wall, the assembled beam is 3.98%, 15.19% and 12.76% higher in yield, peak and ultimate load than the cast-in-place one, and its ductility and energy dissipation factor are increased by 3.83% and 15.84% respectively. The assembled beam without considering the end damage of the coupling beam extending into the wall is 5.97%, 0.84% and 3.57% higher in yield, peak and ultimate load than the assembled one considering this situation, and its ductility and energy dissipation factor are increased by 1.07% and 23.76% respectively. It can be concluded that the method of connecting coupling beam and shear wall by using equivalent reinforcement is practical. The equivalent reinforcement area ratio, the grouting length in the assembly area and the assembly location have a large influence on the load carrying capacity of the structure.

Key words: assembly; coupling beam; seismic performance; damage process; influencing factors

与传统施工相比,装配式建筑不仅可提高施工效率,降低施工成本,同时也符合绿色环保的建筑施工理念^[1-3]。目前国内对于装配式混凝土结构的研究主要集中于框架结构和剪力墙结构^[4-8],对框剪结构研究较少,对框剪结构中连梁和剪力墙的装配连接方法研究更少。

近年来,在剪力墙结构中的连梁和剪力墙的装配连接领域,国内外学者展开了大量研究。龚祖平等^[9]提出了一种自保温预制混凝土连梁结构,结果表明,自保温预制连梁试件平均延性系数和平均累积耗能略优于现浇实心连梁试件。吴东岳等^[10]提出了一种装配式叠合连梁结构,并根据试验和分析结果给出了设计建议。马力等^[11]提出了一种内置压型钢板装配式宽连梁,分析了其在结构抗震中的整体性能,结果表明,在拟静力荷载作用下,内置压型钢板装配式宽连梁试件延性和耗能能力更好。李明等^[12]提出了一种基于U型钢条连接预制剪力墙和连梁的方法,结果表明,该方法在满足节点力学性能要求的基础上,装配便捷、施工效率高。

由于框剪结构的剪力墙和连梁位于框架结构内部,在进行连梁装配时,框架柱、剪力墙、框架梁都已装配完成,连梁需在框剪结构内部装配,施工空间十分有限,因此,适用于剪力墙结构的连梁装配方法不适用于框剪结构。鉴于此,笔者针对装配式混凝土框剪结

构提出了一种基于等效钢筋连接连梁和剪力墙的装配连接方法,并利用 WCOMD 有限元分析软件对该种结构模型进行建模和受力机理分析,进一步研究不同参数对该种节点抗震性能的影响。结果表明,采用等效钢筋连接连梁和剪力墙的方法具有可行性,且等效钢筋面积比、装配区灌浆长度及装配位置对结构的承载力影响较大。

1 基于等效钢筋连接连梁和剪力墙的构造及装配方法

预制剪力墙和预制连梁拆分成独立的装配构件。其中,预制连梁截面中间和与连梁对位的预制剪力墙截面处设有预留孔洞,连梁截面如图 1(a)所示。装配时,首先在连梁预留孔洞中放置等效钢筋,其端头外露于预制连梁,然后对位剪力墙和连梁,将预制连梁中等效钢筋的端头抽出并插入剪力墙内,并用灌浆料填充连梁和剪力墙的孔洞和连接

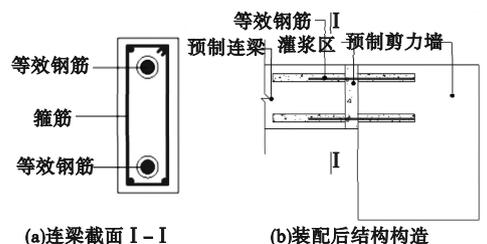


图1 等效钢筋连接连梁和剪力墙的构造

Fig. 1 The structure of beam and shear wall connected by equivalent steel bars

处,使之连接成为整体,如图1(b)所示。这种装配连接方式,施工空间要求小,装配简单,连接区域小,湿作业少。

2 有限元模型的建立及验证

2.1 有限元软件的选择

WCOMD 有限元软件^[13]是由东京大学混凝土研究实验室开发的结构分析软件,主要针对二维平面应变纤维模型分析,其模拟模型在低周往复荷载作用下的滞回曲线捏缩效应效果优于 ABAQUS,因此,笔者选用 WCOMD 有限元软件进行分析。

2.2 数值模型的建立

数值模型主要包括两端剪力墙、连梁、工字钢、钢板和垫片五部分,模型两端边界条件与试验条件一致,以模拟实际试验工况。混凝土和灌浆料采用混凝土单轴受拉本构模型,钢筋力学性能参数依据试验实测材料强度。数值模型及网格划分如图2所示。

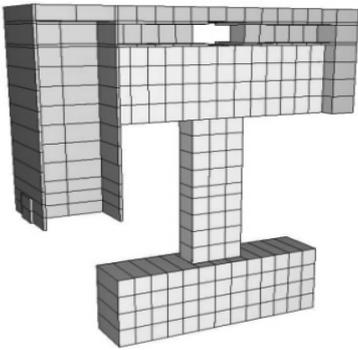


图2 数值模型

Fig. 2 The numerical model

2.3 建模方法验证

2.3.1 骨架曲线对比

为验证建模方法的可靠性,笔者选取了文献[14]中试验进行验证,选取试验试件的编号为 PC-A(装配)。试件连梁的跨度、高度、宽度分别为1 300 mm、420 mm、200 mm,剪力墙厚度为400 mm。

有限元软件计算得到的模拟曲线与试验骨架曲线对比如图3所示。由图可知,试验与模拟的屈服荷载、峰值荷载和极限荷载分

别为 47.73 kN、61.43 kN 和 52.22 kN, 46.01 kN、58.24 kN 和 49.50 kN,试验值与模拟结果相对误差较小,最大为 5.21%,且二者骨架曲线吻合较好,说明建模方法可靠。

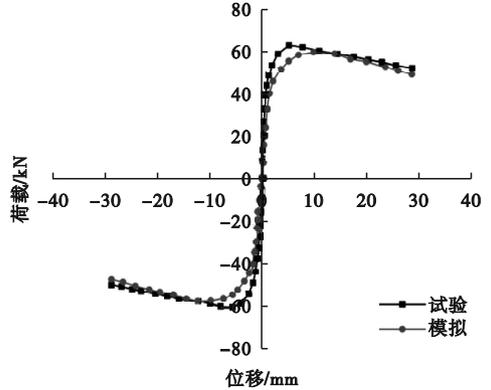


图3 试验与有限元计算结果对比

Fig. 3 Comparison of the experimental and finite element calculation results

2.3.2 裂缝对比

图4为试件 PC-A 在试验和模拟中第一次峰值荷载时的裂缝分布对比。由图可知,二者的试验和模拟结果均为梁端先出现裂缝,并逐渐向跨中发展,进一步说明有限元建模方法的可靠性。

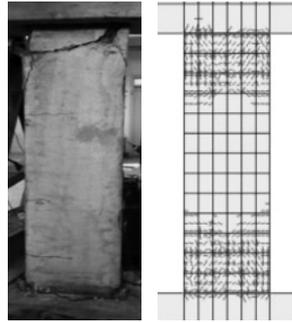


图4 试件 PC-A 裂缝对比

Fig. 4 Comparison of the cracks between specimens PC-A

3 连梁破坏过程分析

3.1 模型设计

为分析基于等效钢筋连接的连梁和剪力墙的破坏过程,笔者设计了3个试件 CC1、PC1 和 PC2,试件尺寸均同上述试件 PC-A。其中,CC1 为现浇连梁,剪力墙厚度

(400 mm)大于连梁宽度(200 mm),用作对比分析。PC1 和 PC2 均为基于等效钢筋连接的连梁和剪力墙装配试件,二者的差别在于剪力墙厚度不同,分别为 400 mm(大于连

梁宽度)和 200 mm(等于连梁宽度),用于分析连梁端部破坏仅发生在连接节点处和连梁端部破坏向剪力墙扩展的破坏情况。具体配筋如图 5 所示。

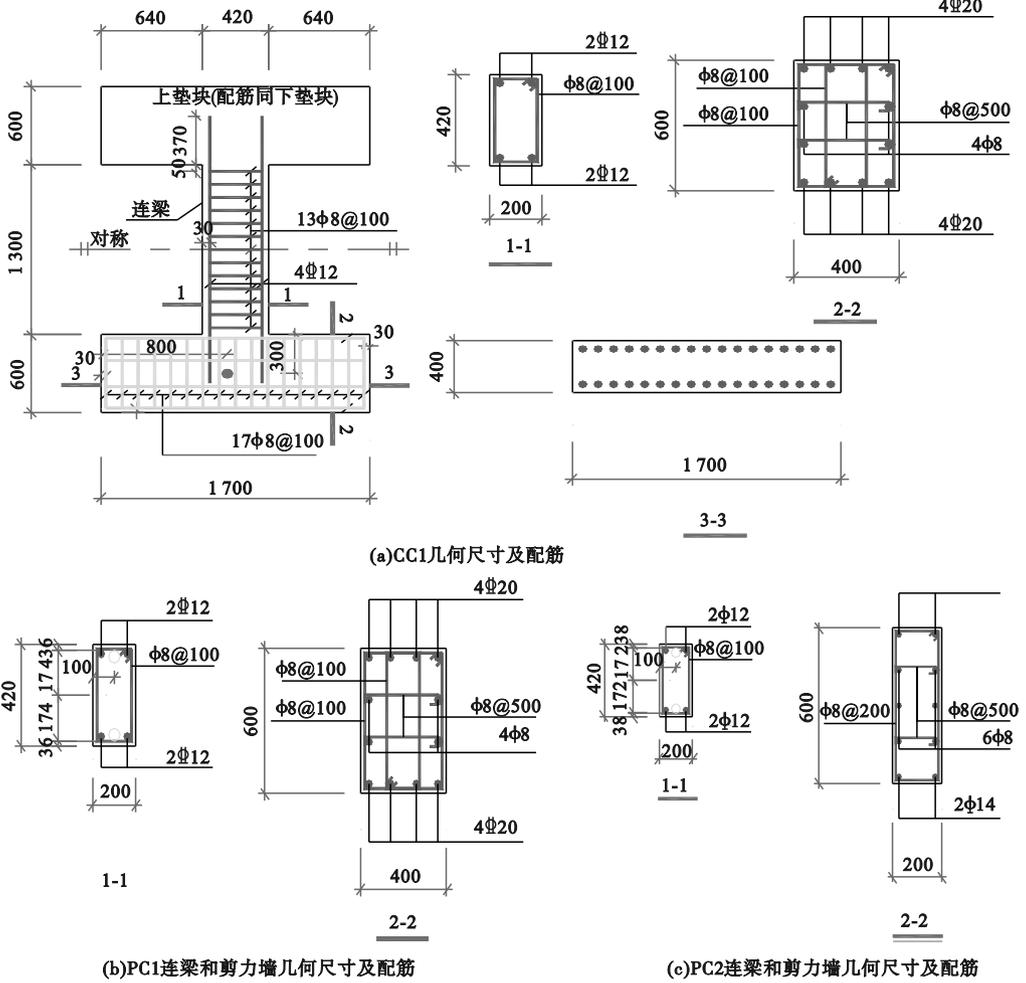


图 5 各试件尺寸及配筋详图

Fig. 5 The detailed drawing of each specimen size and reinforcement

3.2 连梁的受力过程分析

3.2.1 应力云图对比分析

依据“通用屈服弯矩法”^[15]计算试件的屈服点,用等效黏滞阻尼系数 h_e 和能量耗散系数 E_c 作为衡量结构抗震性能指标,其中延性系数 μ 为极限和屈服水平位移的比值,能量耗散系数为一个振动周期内能量耗散量与振幅最大处所具弹性势能的比值^[16-17]。

(1) 屈服荷载时试件云图对比分析

图 6(a)、(b)、(c) 分别对应试件 CC1、PC1 和 PC2 屈服荷载时的混凝土与钢筋应

力分布图。

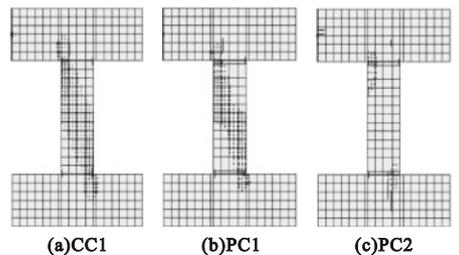


图 6 各连梁屈服荷载时混凝土与钢筋应力分布
Fig. 6 The distribution of concrete and reinforcement stresses during yielding load of each coupling beam

由图6可知,不考虑连梁破坏向墙内扩展时,装配连梁与现浇连梁相比:在钢筋应力分布上,前者钢筋应力较大区域主要集中于剪力墙连梁的等效钢筋,后者钢筋应力较大区域位于连梁端部钢筋处;在混凝土应力分布上,二者总体分布规律相似,两者在梁端处应力较大区域分布均较多,但装配连梁较现浇连梁,前者在连接节点处出现了应力集中现象。出现上述现象的原因在于:装配连梁的剪力墙对连梁端部的约束作用不如现浇连梁的剪力墙对连梁端部的约束作用强。因此,在同等荷载作用下,装配连梁会发生较大的位移,混凝土应力较大区域增加,应力值降低。由此说明,连梁达到屈服荷载时,装配连梁与现浇连梁相比,后者应力集中现象更明显。

考虑连梁破坏向墙内扩展时,试件PC2与PC1相比:在钢筋应力分布上,前者在剪力墙扩展区域处钢筋应力较大区域分布集中,后者在剪力墙连梁的等效钢筋处钢筋应力较大区域分布集中;在混凝土应力分布上,试件PC2的混凝土应力较PC1低,这是由于在加载过程中,考虑连梁破坏向墙内扩展的连梁端部不会出现应力集中现象。由此说明,在达到屈服荷载时,试件PC1与试件PC2相比,前者钢筋和混凝土的最大应力均较高。

(2) 峰值荷载时试件云图对比分析

图7为各试件峰值荷载时混凝土与钢筋的应力分布图。由图可知,连梁达到峰值荷载时:不考虑连梁破坏向墙内扩展时,装配与

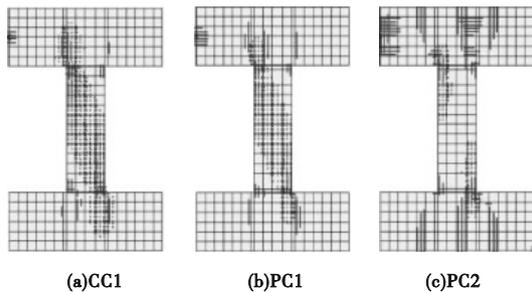


图7 各连梁峰值荷载时混凝土与钢筋应力分布

Fig. 7 The distribution of concrete and reinforcement stress during peak load of each coupling beam

现浇连梁相比,在钢筋应力分布上,二者钢筋应力都集中分布于剪力墙与连梁的连接节点处;在混凝土应力分布上,二者总体分布规律相似,在梁跨中处混凝土应力较大区域分布较多,且较均匀。由此说明,达到峰值荷载时,装配与现浇连梁的破坏过程相似。

考虑连梁破坏向墙内扩展时,试件PC2与PC1相比:在钢筋应力分布上,前者在扩展区域处钢筋应力分布较集中,后者依旧在等效钢筋处钢筋应力分布集中;在混凝土应力分布上,前者混凝土最大应力较低,这是由于连梁破坏发展到剪力墙内部,混凝土应力的扩散导致梁中混凝土的破坏减缓。由此说明,在达到峰值荷载时,考虑连梁端部破坏向墙内扩展的连梁的混凝土应力较低,破坏过程较缓慢。

(3) 极限荷载时试件云图对比分析

图8为在极限荷载时各试件的整体破坏图(颜色越深,应力越大)。由图可知,不考虑连梁端部破坏向墙内扩展时,现浇与装配连梁的主要破坏区域都集中在连梁部分,前者在连梁与剪力墙的连接节点处分布较集中,后者在灌浆区域处较集中,这是因为二者的破坏均没有发展到剪力墙内部,受力均集中在连梁与剪力墙的连接节点处。

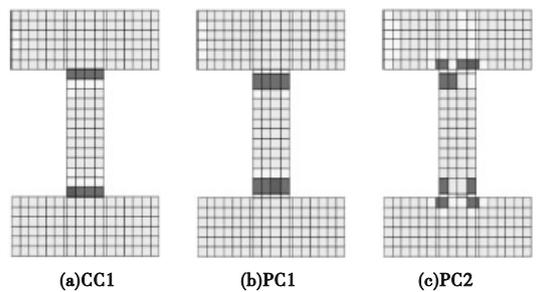


图8 极限荷载时构件的破坏图

Fig. 8 The damage diagrams of members under extreme load

考虑连梁破坏向墙内扩展时,试件PC2的剪力墙处混凝土出现破坏现象,这是因为连梁不受剪力墙的约束作用,从而引起混凝土的破坏发展到剪力墙内部,使得结构连接

节点处受到较大的力作用,导致剪力墙内部出现破坏。

3.2.2 抗震性能指标对比

图9为各试件的骨架曲线对比,试件CC1、PC1和PC2的各项抗震性能特征指标值列于表2。

试件CC1和试件PC1相比,前者屈服、峰值和极限荷载较后者分别低3.98%、15.19%和12.76%,延性和能量耗散系数分别低3.83%和15.84%,这是由于装配连梁灌浆区的灌浆料强度高,且装配区相对较小,最大承载力高。试件PC2和PC1相比,前者屈服荷载、峰值荷载和极限荷载较后者分别低5.97%、0.84%和3.57%,延性和能量耗散系数分别低1.07%和23.76%,二者荷载

均相差不大,分析原因是因为连梁的受力钢筋面积和钢筋屈服强度均相同,同时二者皆为装配试件,灌浆区域和灌浆料强度都一致。

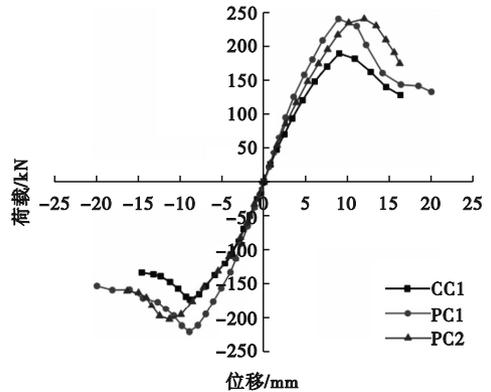


图9 三者骨架曲线对比

Fig. 9 Comparison of the skeleton curves of the three specimens

表2 各试件抗震性能特征指标值

Table 2 The characteristic index values of seismic performance for each specimen

试件编号	屈服荷载/kN	峰值荷载/kN	极限荷载/kN	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数	等效阻尼系数	能量耗散系数
CC1	193	201	171	1.57	9.88	6.28	0.14	0.85
PC1	201	237	196	1.82	11.89	6.53	0.16	1.01
PC2	189	235	189	1.99	12.88	6.46	0.12	0.77
PC3	192	228	194	1.88	11.36	6.04	0.16	1.02
PC4	211	250	212	1.84	12.52	6.82	0.17	1.08
PC7	213	255	217	2.36	11.66	4.94	0.18	1.12
PC8	199	238	202	1.78	11.56	6.51	0.12	0.73
PC9	177	218	185	1.83	11.89	6.49	0.15	0.97

4 参数分析

4.1 对比模型设计

为分析不同因素对装配式混凝土连梁抗震性能的影响,在试件PC1的基础上,又增加设计了等效钢筋面积比(装配试件中等效钢筋与现浇试件中纵筋面积的比值)、灌浆长度和装配位置不同的试件。各试件各项抗震性能特征指标值也列于表2。

4.2 荷载-位移骨架曲线和刚度退化的参数分析

(1) 等效钢筋面积比的影响

其他参数不变,不同等效钢筋面积比的装配连梁在低周往复荷载作用下的骨架曲线如图10所示。其中,试件PC1、PC3和PC4

的等效钢筋面积比分别为1、0.85和1.15。由图10及表2可看出,装配连梁的承载力峰

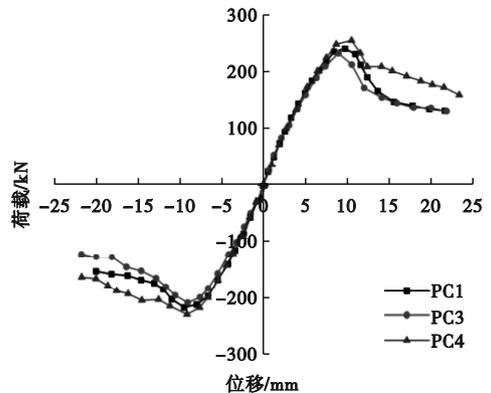


图10 不同等效钢筋面积比时试件的骨架曲线

Fig. 10 The specimen skeleton curves for different equivalent reinforcement area ratios

值随着等效钢筋面积比的增大而逐渐上升,屈服荷载、峰值荷载和极限荷载分别提高9.0%、8.8%和8.5%,延性和能量耗散系数分别提高11.4%和5.6%。由此说明,在一定范围内,等效钢筋面积比越大,装配连梁的抗震性能越好。

各试件的刚度退化情况如图11所示。由图可知,钢筋面积比从0.85增加到1.15,试件的初始刚度增加6.16%,在不同位移下,对比刚度情况,试件的刚度最大增加16.05%。加载初期,三者刚度退化速率几乎一致。加载后期,等效钢筋面积比小于1时,刚度退化速率一致;等效钢筋面积比大于1时,刚度退化速率略低,刚度较大。由此说明,在一定范围内,试件的刚度随等效钢筋面积比的增加而增大,但整体的刚度退化规律特征不显著。

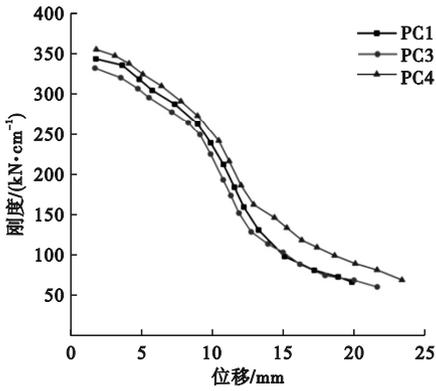


图11 不同等效钢筋面积比时试件的刚度退化曲线
Fig. 11 The stiffness degradation curves for specimens with different equivalent reinforcement area ratios

(2) 装配区灌浆长度的影响

其他参数不变,不同灌浆区长度的装配连梁在低周往复荷载作用下的骨架曲线如图12所示。试件PC1、PC7和PC8的灌浆区长度分别为40mm、20mm、60mm。由图12及表2可看出,灌浆区长度由20mm增加到60mm,构件承载力的峰值逐渐下降,屈服、峰值和极限荷载分别降低6.57%、6.67%和6.91%,延性系数增大24.12%,能量耗散系数减小34.82%。承载力过峰值点后,试件

PC7的承载力下降速率最大,其次为试件PC1,试件PC8的承载力下降速率最小。由此说明,灌浆区长度越长,构件承载力小,后期强度退化缓慢。

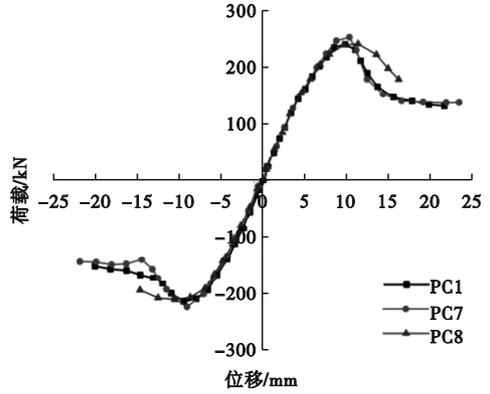


图12 不同灌浆区长度试件的骨架曲线
Fig. 12 The skeleton curves of specimens with different grouting zone lengths

图13为各试件的刚度退化情况。由图可知,随装配区灌浆长度的增大,试件初始刚度减小,装配长度从20mm增加到60mm,初始刚度减小16.25%,不同位移时,刚度最大减小16.64%。由此说明,试件的初始刚度随装配长度的增加而减小,但整体刚度退化速率也较小。

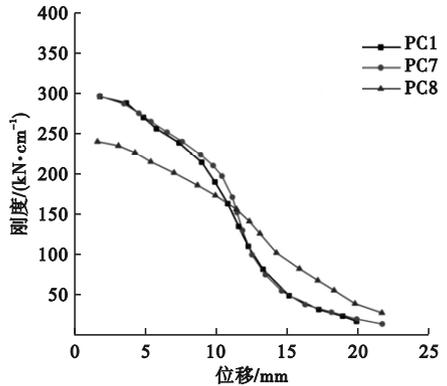


图13 不同灌浆区长度试件的刚度退化曲线
Fig. 13 The stiffness degradation curves for specimens with different grouting zone lengths

(3) 装配位置的影响

试件PC1在剪力墙与连梁连接处装配,PC9在连梁跨中装配,受其装配影响的骨架曲

线如图14所示。由图14及表2可看出,装配位置由跨中到梁端时,屈服、峰值和极限荷载分别提高11.94%、8.02%和5.61%,延性和能量耗散系数分别提高0.61%和3.96%,承载力过峰值点后,试件PC9的承载力下降速率大于试件PC1。由此说明,在梁端装配较于在跨中装配具有较好的抗震性能。

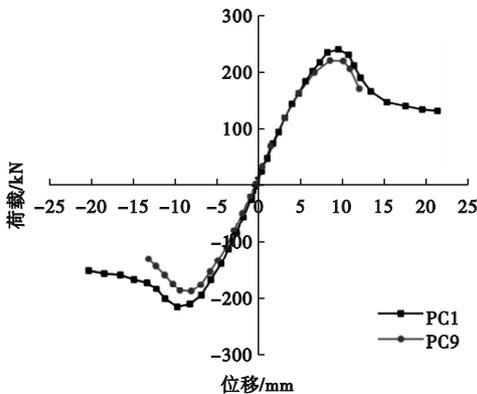


图14 装配位置影响下的试件骨架曲线

Fig. 14 The skeleton curves of specimens under the influence of assembly position

图15为装配位置不同的试件刚度退化情况。由图可知,试件PC9的刚度退化速率大于试件PC1,由于PC1在梁端装配,装配处灌浆料强度较混凝土高,当梁端受力相同时,PC9在梁端位置先于PC1发生破坏,导致其刚度退化的速率变快。由此说明,试件初始刚度的大小与装配位置无关,但跨中装配试件的刚度退化速率较梁端装配的大。

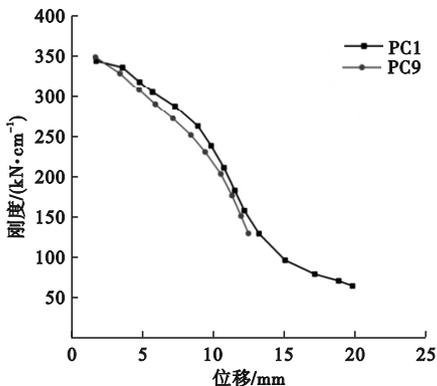


图15 不同装配位置的试件刚度退化曲线

Fig. 15 The stiffness degradation curves for specimens in different assembly positions

5 结论

(1) 装配连梁的承载力、延性和耗能能力随等效钢筋面积比增加(1~1.15)而提高,涨幅约8.7%;其承载力和耗能能力随装配区灌浆长度增加(20~60 mm)而降低,承载力和耗能系数分别降低约6.71%和34.82%,而延性随灌浆长度增加而提高,延性系数增大24.12%;装配位置的不同对试件的延性和耗能能力影响较小,在梁端装配的连梁较在跨中装配的连梁承载力高。

(2) 试件的初始刚度随等效钢筋面积比增加而提高约6.16%,但刚度整体退化速率不明显;随装配区灌浆长度的增加,试件初始刚度降低约16.25%,但加载后期,试件的刚度退化速率随灌浆长度增加而降低;在梁端装配与在跨中装配对于试件的初始刚度影响较小,梁端装配的连梁在加载后期刚度退化速率小。

(3) 考虑连梁端部破坏向墙内扩展与不考虑连梁端部破坏向墙内扩展的连梁相比,前者延性和耗能能力差,后者承载力高,刚度大。

(4) 在装配式框剪结构中,采用等效钢筋连接连梁和剪力墙的结构较现浇连梁承载力、延性、刚度和耗能能力好,说明该种装配连接方法具有可行性。

参考文献

- [1] 杨红雄,刘颖,王云鹏,等. 基于精益建造的装配式建筑可持续发展方向分析[J]. 建筑经济, 2023, 44(4): 89-90.
(YANG Hongxiong, LIU Yiyong, WANG Yunpeng, et al. Analysis of sustainable development direction of prefabricated building based on lean construction [J]. Construction economy, 2023, 44(4): 89-90.)
- [2] 陈骏,彭畅,李超,等. 装配式建筑发展概况及评价标准综述[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊2): 1503-1508.
(CHEN Jun, PENG Chang, LI Chao, et al. A review of development situation and assessment standard for prefabricated buildings [J]. Building structure, 2022, 52(S2): 1503-1508.)

- [3] 熊仲明, 史庆轩, 王社良, 等. 钢筋混凝土框架-剪力墙模型结构试验的滞回反应和耗能分析[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(4): 89-95.
(XIONG Zhongming, SHI Qingxuan, WANG Sheliang, et al. Hysteretic response and energy dissipation of a model frame-shear wall structure [J]. Journal of building structures, 2006, 27(4): 89-95.)
- [4] MARZBAN S, BANAZADEH M, AZARBAKHT A. Seismic performance of reinforced concrete shear wall frames considering soil-foundation-structure interaction [J]. The structural design of tall and special buildings, 2014, 23(3): 302-318.
- [5] PAN Lin, ZHANG Yanqing. The analysis of frame-shear wall structure model [J]. Advanced materials research, 2012, 424(425): 654-659.
- [6] 李明, 刘栩岳, 吴潜, 等. 钢管混凝土键连接框架梁和剪力墙的受剪性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(1): 38-46.
(LI Ming, LIU Xuyi, WU Qian, et al. Shear performance of frame beam and shear wall connected by concrete filled steel tubular keys [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(1): 38-46.)
- [7] 徐强, 杨志, 张翔, 等. 冷弯薄壁型钢混凝土框架-波纹钢板剪力墙结构抗震性能研究[J]. 建筑科学, 2024, 40(1): 127-135.
(XU Qiang, YANG Zhi, ZHANG Xiang, et al. Study on the seismic performance of cold-formed thin-walled steel concrete frame-corrugated steel plate shear wall structure [J]. Building science, 2024, 40(1): 127-135.)
- [8] 龚祖平, 董年才, 龚徐华. 自保温预制混凝土连梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(15): 88-93.
(GONG Zupin, DONG Niancai, GONG Xuhua. Experimental study on bending behavior of self-insulating precast coupling beams [J]. Building structure, 2019, 49(15): 88-93.)
- [9] 吴东岳, 沈梦滢. 装配式叠合连梁在装配式剪力墙空间子结构中的力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(3): 30-34.
(WU Dongyue, SHEN Mengying. Experimental study on mechanical properties of RC superposed coupling beams in prefabricated shear wall sub-structure [J]. Industrial construction, 2021, 51(3): 30-34.)
- [10] 马力, 周文君, 孙丽, 等. 内置压型钢板装配式宽连梁构件抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(9): 38-42.
(MA Li, ZHOU Wenjun, SUN Li, et al. Research on seismic performance of profiled steel sheet built-in fabricated wide coupling beam component [J]. Building structure, 2021, 51(9): 38-42.)
- [11] 李明, 谢可可, 吴潜, 等. U型钢条连接剪力墙和连梁的力学性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(3): 436-442.
(LI Ming, XIE Keke, WU Qian, et al. Study on mechanical behavior of shear walls and coupling beams by U-shaped steel bars [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(3): 436-442.)
- [12] HUSSAIN Q, PIMANMAS A. Shear strengthening of RC deep beams with sprayed fiber-reinforced polymer composites (SFRP): part 2 finite element analysis [J]. Latin American journal of solids and structures, 2015, 12: 1266-1295.
- [13] 王春艳. 装配式混凝土连梁力学性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
(WANG Chunyan. Experimental study of mechanical behavior on pre-cast concrete coupling beam [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)
- [14] 刘文峰, 王金婷, 唐剑维. 抗震能力曲线弹塑性双折线模型的确定方法[J]. 建筑结构, 2015, 45(4): 14-17.
(LIU Wenfeng, WANG Jinting, TANG Jianwei. Determining method of elasto-plastic double broken line model for seismic capacity curve [J]. Building structure, 2015, 45(4): 14-17.)
- [15] 姜柯亦. 梁柱节点的能量耗散系数对低层框架结构地震反应的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
(JIANG Keyi. Earthquake response of low rise RC moment frame structures according to energy dissipation ratio of beam column joints [D]. Changsha: Hu'nan University, 2019.)
- [16] 熊进刚, 陈文, 胡淑军, 等. 基于功能平衡原理和能量耗散系数的Y形偏心支撑结构设计方法[J]. 南昌大学学报(理科版), 2019, 43(3): 284-289.
(XIONG Jin'gang, CHEN Wen, HU Shujun, et al. Study of an optimum design method for Y-shaped EBFs based on energy balance theory and energy dissipation coefficient [J]. Journal of Nanchang university (natural science), 2019, 43(3): 284-289.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)