

装配式建筑中梁-墙平面外连接节点 承载力研究

孟宪宏¹,姜海洋¹,刘柯宇¹,陈建华²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中冶建筑研究总院有限公司,北京 100088)

摘要 为解决困扰梁-墙节点连接的难题,提出一种新型梁-墙平面外连接节点方式——梁靴螺栓连接节点,并对其承载力进行试验研究。**方法** 根据梁靴的不同锚固长度,制作了3组12个新型梁-墙平面外连接节点试件,并分别进行拉拔和剪切试验,探究不同条件下承载力变化规律。**结果** 拉拔试验中,随锚固长度的增加,节点的拉拔承载力分别提高了80.12%和122.63%;剪切试验中,随锚固长度的增加,节点的剪切承载力分别提高了40.94%和102.75%。**结论** 梁靴螺栓连接方式节点能够满足设计要求,并且随着梁靴锚固长度增加,抗拉承载力和抗剪承载力均有提高,极限位移更大,节点的延性也更好。

关键词 装配式建筑;梁靴螺栓干连接;梁靴锚固长度;梁-墙平面外节点

中图分类号 TU398.2

文献标志码 A

Research on Bearing Capacity of Out of Plane Beam Wall Connections in Prefabricated Buildings

MENG Xianhong¹,JIANG Haiyang¹,LIU Keyu¹,CHEN Jianhua²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Metallurgical Construction Research Institute Co. Ltd, Beijing, China, 100088)

Abstract: The purpose of this study is to investigate the load-bearing capacity of a new type of beam wall out of plane connection node. **Method:** Based on the different anchoring lengths of the beam shoe, three sets of new beam wall out of plane connection node specimens were made, and tensile and shear tests were conducted to explore the bearing capacity under different conditions. In the pull-out test, with the increase of anchorage length, the pull-out bearing capacity of the node increased by 80.12% and 122.63%, respectively; In the shear test, with the increase of anchorage length, the shear bearing capacity of the node increased by 40.94% and 102.75%, respectively. The conclusion is that the bearing capacity of the beam shoe bolt connection node can meet the design requirements, and as the anchorage length of the beam shoe increases, the tensile and shear bearing

收稿日期:2022-10-16

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC3801800)

作者简介:孟宪宏(1978—),男,教授,博士,主要从事装配式混凝土结构等方面研究。

capacity increase,the ultimate displacement increases,and the ductility of the node is better.

Key words: prefabricated; beam shoe bolt dry connection; beam shoe anchorage length; beam-wall external joint

一般情况下,装配式建筑的拆分位于筒-梁、梁-柱、柱-柱等连接部位^[1-2],连接方式主要分为干连接和湿连接两种^[3]。干连接以工业化工程化程度高、节省资源、结构简单及环保等优点应用更为广泛^[4]。其中梁-墙平面外节点应用最为广泛。近年来,国内外有许多学者进行了梁-墙平面外节点连接研究。T. M. Roberts 等^[5]提出了等效剪力键模型,并通过试验证明了其理论可行,但因铝材与混凝土的属性存在很大差异,其结果仍需进一步验证。M. Shemie 等^[6]提出将钢板嵌入楼板和墙板的间隙中,再用螺纹杆连接的新方法,结果表明,此连接方式具有较好的延展性,且房间布局更加灵活。我国现行标准^[7]对剪力墙(核心筒墙肢)与其平面外相交楼面梁的刚接做出了相应规定。杨翌等^[8]提出了一种利用末端钢筋连接的方法,结果表明,在拟静力条件下该节点的破坏形式都是梁末端受弯破坏,并且节点的中心区域没有损坏,表明螺栓连接的方法是可行的。

为了进一步提高梁-墙平面外节点的承

载能力,在现有研究基础上^[9],笔者提出了一种新型连接方式,即通过梁内梁靴与螺栓进行连接,并对其抗拉和抗剪承载力进行了试验研究,研究结果证明,梁靴螺栓连接方式节点能够满足设计要求,并且随着梁靴锚固长度增加,抗拉承载力和抗剪承载力均有提高,此方法可以同时解决现浇节点构造复杂^[10]和因灌浆套筒所限而导致锚固长度不能满足规范要求的问题^[11-13]。

1 试 验

1.1 试件设计

图1(a)~(c)为梁靴构造图。梁靴为工厂定制,用Q235钢板和牌号为HPB300、直径为8 mm的圆钢筋焊接而成,梁靴锚板为长宽115 mm×115 mm、厚15 mm的方形钢板;螺栓采用柱头内六角的12.9级高强全牙螺栓,公称直径为16 mm,长为250 mm,采用配套螺母;垫片选取内径16.2 mm、外径24.2 mm和内径17.2 mm、外径25.2 mm两种;试验采用C30商品混凝土。

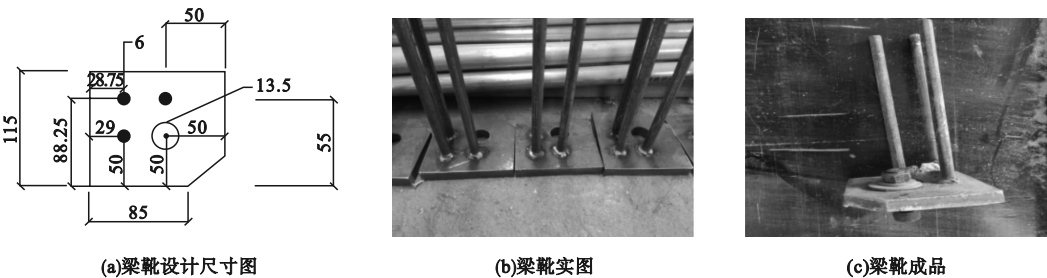


图1 梁靴结构图

Fig. 1 Physical drawing of beam boots

将梁靴和螺栓、螺母、垫片组合好,放在试件模板侧面处预留位置上,同时用玻璃胶和细钢丝将其固定住,防止移位、脱落,之后,在后置模板上与梁靴螺栓口同一水平位置处打孔,穿入一根长2m、直径为8 mm、强度为500 MPa的钢筋,模板内外各留1 m,在浇注

混凝土时,需注意保证钢筋和梁靴螺栓口在同一水平线上。

根据相关规范^[13-14]的要求,综合考虑约束、轴压比等多个因素^[15-20],确定试件的长宽高为1 200 mm×400 mm×250 mm。每组制作2个试件,编号分别为01、02,试件参数

及分组见表1。

表1 试件分组表
Table 1 Sample grouping

编号	试验类型	梁靴筋长/mm
T-200-01/02	拉拔	200
S-200-01/02	剪切	200
T-250-01/02	拉拔	250
S-250-01/02	剪切	250
T-300-01/02	拉拔	300
S-300-01/02	剪切	300

试验选用三种不同锚固长度的梁靴,每种梁靴分为2组,一组为拉拔试验,另一组为剪切试验,每组2个试件,试验结果取每组两个试件的平均值。以锚固长度为200 mm的梁靴为例,将拉拔试件编号命名为T-200-01、T-200-02,将剪切试件编号命名为S-200-01、S-200-02。共计12个试件,分为6组。

1.2 加载

加载装置:30 t穿心液压千斤顶、手动按压器、25 mm 钢筋夹具、加载过渡装置(拉拔)和施载钢板(剪切)。图2为拉拔装置示意图,图3为剪切装置示意图。

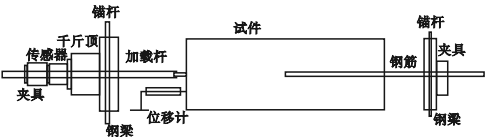


图2 拉拔装置

Fig. 2 Drawing device

拉拔加载:将试件放置在木方上,将后置钢筋穿过后置钢梁,拧紧后再使用25 mm厚的夹具进行二次固定。过渡加载装置与螺栓

连接后穿过前置钢梁,在传力筋上依次放置带孔钢板、穿孔液压千斤顶、力传感器、带孔钢板以及夹具。之后在前置钢梁与试件之间固定一块厚钢板,将磁力位移计的支座固定在钢板上,把指针顶到梁靴表面,并平衡清零。准备完毕后,手动油泵对千斤顶进行加载。

剪切加载:将钢梁压在置于平整地面的试件上,固定好后,把加载架水平放置在钢梁上;将加载杆套在梁靴外侧的螺母上,使得加载杆与试件成90°,加载杆的传力筋依次穿过加载架孔洞、带孔钢板、穿心液压千斤顶、力传感器、带孔钢板、夹具。加载过程中避免接触,防止产生摩擦力,影响数据的准确性。准备完毕后,手动油泵对千斤顶进行加载。

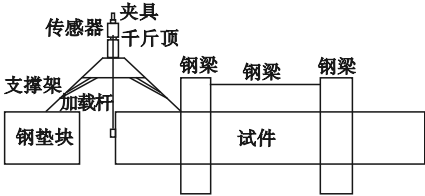


图3 剪切装置

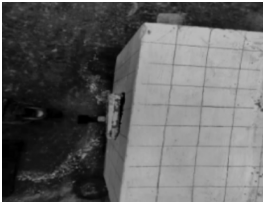
Fig. 3 Shear device

2 结果与分析

2.1 拉拔试验

2.1.1 拉拔试验结果

图4、图5和图6分别为T-200-02、T-250-02和T-300-02试件拉拔试验各阶段破坏形态,表2、表3为拉拔破坏形态及破坏结果统计表。



(a)开裂阶段



(b)极限荷载



(c)完全破坏

图4 T-200-02 拉拔破坏形态

Fig. 4 T-200-02 failure modes

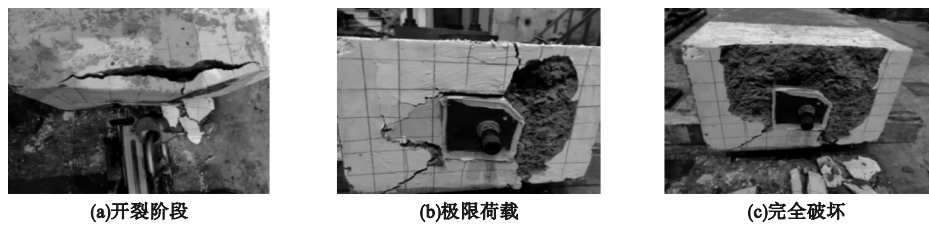


图 5 T-250-02 拉拔破坏形态

Fig. 5 T-250-02 failure modes

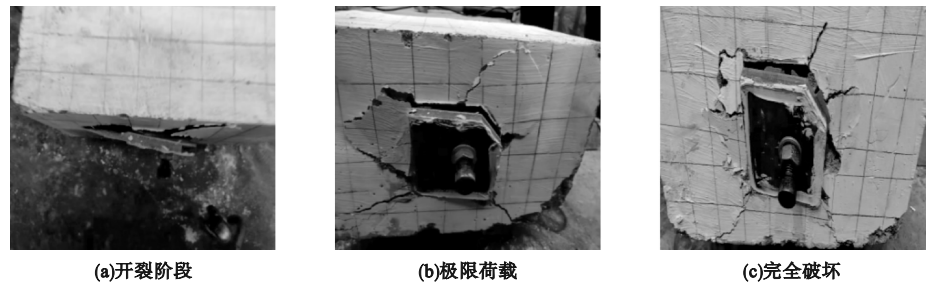


图 6 T-300-02 拉拔破坏形态

Fig. 6 T-300-02 failure modes

表 2 梁靴螺栓混凝土试件拉拔破坏形态统计表

Table 2 Tensile Failure Mode of Beam Shoe Bolt Concrete Specimen

试件编号	破坏形态
T-200-01	梁靴拔出破坏
T-200-02	梁靴拔出后混凝土破坏
T-250-01	梁靴拔出后混凝土破坏
T-250-02	梁靴拔出后混凝土剥离破坏
T-300-01	梁靴拔出破坏
T-300-02	梁靴拔出后混凝土从中心向四周开裂破坏

表 3 拉拔试验结果

Table 3 Tension test data

试件编号	极限荷载/kN	极限位移/mm	开裂荷载/kN
T-200-02	17.56	2.90	10.00
T-250-02	31.63	2.74	22.00
T-300-02	39.25	3.24	24.60

在加载初期,荷载通过螺栓传递给梁靴,再传递至锚固钢筋末端。当加至开裂荷载时,梁靴上部的混凝土出现裂缝;持续加载,裂缝继续发展、数量增加;继续加载,直至梁靴周围混凝土破裂掉落,梁靴已经达到极限承载力,荷载无法继续增加,此时极限荷载已大于理论计算值;随后荷载逐渐下降,位移计读数继续增大,直到最大位移值。当超过最

大承载力理论设计值后,锚固筋与梁内的混凝土之间的黏结受到破坏,两者剥离,继续加载,导致下部锚固筋与混凝土也发生黏结破坏,继续加载后,达到完全破坏。因为锚固筋的作用,梁靴螺栓并未发生严重的变形破坏。锚固长度大于 250 mm 后,试件的破坏现象更加明显。3 组试验的结果相对比,锚固长度为 250 mm 和 300 mm 节点的拉拔承载力相比锚固长度为 200 mm 的节点分别提升了 80.12% 和 122.63%。当梁靴的锚固长度为 300 mm 时,梁-墙平面外节点的拉拔承载力最高。

2.1.2 拉拔试验结果分析

图 7 为拉拔试验曲线。荷载-位移曲线的斜率变化大致分为三个阶段。

(1)弹性阶段:初期荷载的加载量较小,可以看出,T-200-02 的荷载-位移曲线有两段斜率,斜率几乎相同,出现两段斜率的原因是进行了预加载;T-250-02、T-300-02 的荷载-位移曲线的斜率不发生变化,T-300-02 相比于 T-250-02 曲线更为光滑,这时的螺栓和梁靴系统与混凝土受力区变形量基本相同,螺栓和梁靴处于安全使用阶段。

(2)弹塑性阶段:随着荷载的增加,螺栓

和梁靴的承载力随之增加,梁靴附近的混凝土变形也增大,相比于弹性阶段荷载增长率变小,位移增长率增加;再继续增加荷载时,会发现荷载上升缓慢,位移增加幅度变大,混凝土表面出现裂缝,并且裂缝还在扩散。弹塑性阶段过后,梁靴处于极限荷载。

(3)失效阶段:当加载值大于梁靴极限荷载后,螺栓和梁靴的承载力迅速下降,这时的混凝土表面出现大量裂缝,梁靴也被少量拔出,梁靴与混凝土相对位移也急剧增加,螺栓和梁靴处于失效状态,试件发生拔出破坏。

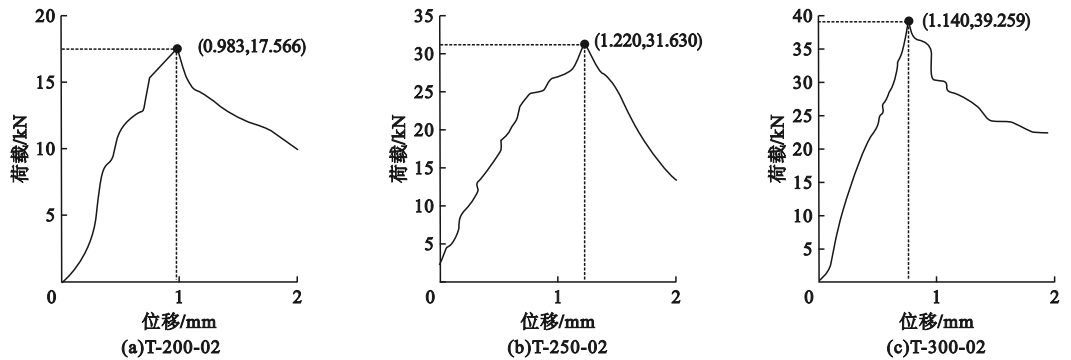


图 7 拉拔荷载-位移曲线

Fig. 7 Tension load displacement curves

2.2 剪切试验

2.2.1 剪切试验结果

图 8 为试件剪切破坏形态,表 4,表 5 为剪切破坏形态及剪切试验结果。

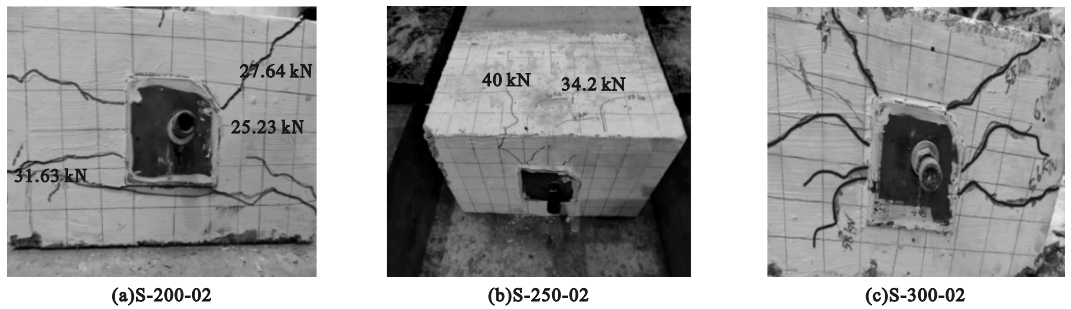


图 8 剪切破坏形态

Fig. 8 Shear failure modes

表 4 梁靴螺栓混凝土试件受剪破坏形态统计表

Table 4 Shear Failure Mode of Beam Shoe Bolt Concrete Specimen	
试件编号	破坏形态
S-200-01	混凝土横向开裂破坏
S-200-02	梁靴底部混凝土横向开裂破坏,斜上 45° 开裂破坏
S-250-01	梁上表面混凝土横向开裂破坏,梁靴周围发生放射性开裂
S-250-02	梁上表面混凝土横向开裂破坏,梁靴周围发生放射性开裂
S-300-01	梁靴周围发生放射性开裂
S-300-02	梁靴周围发生放射性开裂

表 5 剪切试验结果

Table 5 Shear test data			
试件编号	极限荷载/kN	极限位移/mm	开裂荷载/kN
S-200-02	31.63	2.63	25.23
S-250-02	44.58	2.84	28.00
S-300-02	64.13	4.50	34.00

加载初期,荷载稳定增加,试件没有明显变化;当增加至开裂荷载时,梁靴周围开始出现首条裂缝;随后裂缝继续发展,混凝土上表面也开始出现裂缝,S-200-02 试件梁靴下部

出现一条横向贯穿裂缝,S-250-02 试件梁靴上部出现一条由内部延伸到混凝土表面上的裂缝,S-300-02 梁靴的右上侧、左下侧均出现一条贯穿裂缝;当增加至极限荷载时,荷载无法继续增加,此时承载力已大于理论计算值,梁靴已经达到极限承载力。随后荷载逐渐减小,位移计读数继续增加,直至最大位移值。当加载超过理论设计值后,锚固筋与混凝土发生黏结破坏,梁靴周围产生大量裂缝,同时

梁上表面也有裂纹出现。锚固长度为 250 mm 及 300 mm 节点剪切承载力照比锚固长度为 200 mm 的节点分别提升了 40.94% 及 102.75%。3 组试验结果对比,锚固长度为 300 mm 时节点承载力最高。

2.2.2 剪切试验结果分析

图 9 为剪切试验曲线。从剪切荷载 - 位移曲线看,剪切试验共分 3 个阶段。

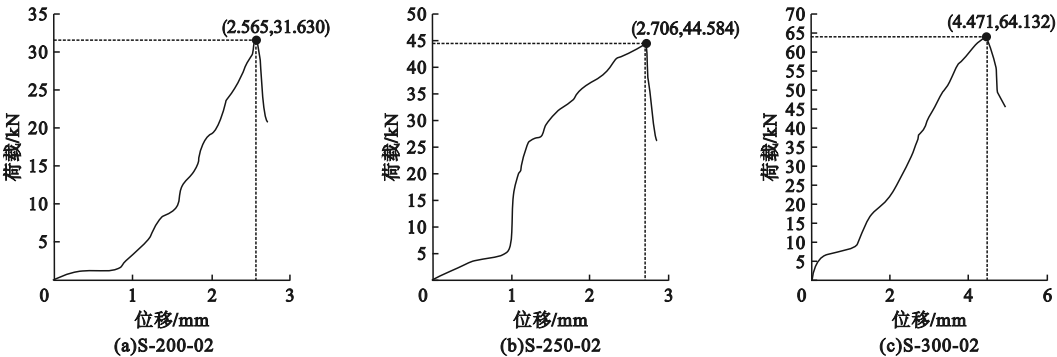


图 9 剪切荷载 - 位移曲线

Fig. 9 Shear load displacement curves

(1)弹性阶段:初期荷载的加载量较小,可以看出,虽然梁靴锚固长度不同,但曲线走向基本一致,S-200-02 的荷载 - 位移曲线比较平滑,近乎是一条直线,荷载和位移都在稳定有序地增长;S-250-02 初期荷载增长缓慢,位移增长较快;S-300-02 与 S-250-02 正好相反,初期荷载增长较快,位移增长缓慢,此时的螺栓和梁靴处于使用安全阶段,荷载与位移之间的线性变化明显,曲线刚度上升较快,螺栓、梁靴和混凝土都处于弹性状态。

(2)弹塑性阶段:随着荷载的不断增加,位移的变化率也会加快,这时荷载与位移不再保持原有线性关系,曲线斜率不断下降,S-300-02 和 S-250-02 的斜率下降速度比 S-200-02 的斜率下降速度更快。

(3)破坏阶段:当加至极限荷载时,荷载迅速下降,位移继续增加,此时梁靴周围的混凝土已经出现明显裂缝,随着锚固长度的增加,破坏现象更加明显,裂缝的条数更多,宽度也更大。

3 结 论

(1)笔者提出的新型梁靴螺栓连接节点可以有效避免拉脱式破坏发生,能够提高试件节点的刚度及延性,并且随着梁靴螺栓锚固长度的增加,节点破坏时发生的位移随之增大,试件节点处的延性更好。

(2)随着锚固长度的增加,节点的拉拔承载力分别提高了 80.12% 和 122.63%,表明梁靴螺栓的锚固长度越长,节点的拉拔承载力越高。

(3)随着锚固长度的增加,节点的剪切承载力分别提高了 40.94% 和 102.75%,表明梁靴螺栓的锚固长度越长,试件节点的剪切承载力越高。

参考文献

[1] 袁富贵,唐小方,陈晓旭. 装配式建筑在我国的发展现状与策略研究[J]. 四川建材,2018, 44(9):50-51.
(YUAN Fugui, TANG Xiaofang, CHEN Xiaoxu. Research on the development status and

- strategy of prefabricated building in China [J]. Sichuan building materials, 2018, 44 (9): 50-51.)
- [2] 黄祥海. 新型全预制装配式混凝土框架节点的研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
(HUANG Xianghai. Research on new type of fully prefabricated concrete frame joints [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.)
- [3] 李乐佳. 装配式建筑节点连接方式[J]. 居业, 2019(4): 96-97.
(LI Lejia. Joint connection mode of prefabricated building [J]. Create living 2019 (4): 96-97.)
- [4] 田晔环. 梁段干式连接节点受力性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
(TIAN Yehuan. Research on the mechanical performance of beam segment dry connection nodes [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.)
- [5] ROBERTS T M, ACHOUR B. Torsion and bending of braced thin-walled open sections [J]. Journal of structural engineering, 1990, 116 (1): 1-12.
- [6] SHEIME M. Bolted connections in large panel system buildings [J]. PCI journal, 1973, 18 (1): 214-231.
- [7] 中国建筑科学研究院. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2010.
(China Academy of Building Sciences. Technical code for specification for concrete structures of tall buildings: JGJ3—2010 [S]. Beijing: China construction industry press, 2010.)
- [8] 杨翌, 吕伟, 包亮. 基于螺栓连接的新型钢筋混凝土框架装配式节点抗震性能研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(8): 93-99.
(YANG Zhao, Lü Wei, BAO Liang. Research on the seismic performance of a new type of prefabricated joints in reinforced concrete frames based on bolt connections [J]. Industrial building, 2019, 49 (8): 93-99.)
- [9] 刘戈, 李楠. 装配式混凝土建筑发展及研究现状[J]. 建筑技术, 2020, 51(5): 542-545.
(LIU Ge, LI Nan. Development and research status of prefabricated concrete buildings [J]. Building technology, 2020, 51 (5): 542-545.)
- [10] 钱稼茹, 彭媛媛, 张景明, 等. 竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构, 2011(2): 1-6.
(QIAN Jiaru, PENG Yuanyuan, ZHANG Jingming, et al Seismic performance test of prefabricated shear walls connected with vertical steel sleeve grout anchors [J]. Building structures, 2011 (2): 1-6.)
- [11] 朱张峰, 郭正兴. 预制装配式剪力墙结构墙板节点抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011(2): 35-40.
(ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing. Research on seismic performance of prefabricated shear wall structure wall panel joints [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2011 (2): 35-40)
- [12] SMITH B J, KURAMA Y. Design of hybrid precast concrete walls for seismic regions [C]. ASCE 2009 structures congress, 2009: 1673-1682.
- [13] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2010.
(Ministry of Construction of People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.)
- [14] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验规程: JGJ101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2015.
(China Academy of Building Sciences. Code for Seismic Testing of Buildings: JGJ101—2015 [S]. Beijing: China construction industry press, 2015.)
- [15] 陈盈. 钢筋混凝土梁-薄墙平面外连接节点抗震性能分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
(CHEN Ying. Reinforced concrete beams-seismic performance analysis of thin wall out-of-plane connection nodes [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.)
- [16] 吕西林, 范力, 赵斌. 装配式预制混凝土框架结构缩尺模型拟动力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008(4): 58-65.
(Lü Xilin, FAN Li, ZHAO Bin. Research on pseudodynamic test of scaled model of prefabricated concrete frame structures [J]. Journal of building structures, 2008 (4): 58-65.)
- [17] 吕西林, 赵斌, 张继承. 装配式预制混凝土框架结构拟动力试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007(6): 97-105.
(Lü Xilin, ZHAO Bin, ZHANG Jicheng. Pseudo dynamic experimental study on prefabricated concrete frame structures [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2007 (6): 97-105.)
- [18] 种迅, 孟少平, 潘其健, 等. 部分无黏结预制预应力混凝土框架及其节点抗震能力研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007(4): 55-60.
(CHONG Xun, MENG Shaoping, PAN Qijian, et al. Research on the seismic resistance of partially unbonded precast prestressed concrete frames and their joints [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2007 (4): 55-60.)
- [19] 姜洪斌, 张海顺, 刘文清, 等. 预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(4): 28-31.
(JIANG Hongbin, ZHANG Haishun, LIU Wenqing, et al. Anchorage performance of grouted steel bars in prefabricated concrete structures with inserted reserved holes [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2011, 43 (4): 28-31.)
- [20] 张麟斌. 装配式混凝土节点形式及梁柱结构抗倒塌性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
(ZHANG Linbin Experimental study on the form of prefabricated concrete joints and the anti collapse performance of beam column structures [D]. Changsha: Hu'nan University, 2019.)
- (责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)