



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2407873

引用格式:吴华,张啸辰,季永新.竖缝密拼剪力墙体系的设计方法与工程应用[J].科学技术与工程,2025,25(17):7318-7327.

Wu Hua, Zhang Xiaochen, Ji Yongxin. Design method and engineering application of vertical seam tight splicing connection for shear wall system [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(17): 7318-7327.

竖缝密拼剪力墙体系的设计方法与工程应用

吴华¹, 张啸辰^{1*}, 季永新²

(1. 中国建筑第四工程局有限公司 EPC 事业部(设计院), 广州 510000;
2. 中国建筑第四工程局有限公司工程技术研究院, 广州 510000)

摘要 竖向接缝钢锚环灌浆连接(简称竖缝密拼连接)装配式剪力墙体系,竖向接缝采用钢锚环连接,再进行二次灌浆连接,具有安装方便和减少了现场湿作业的优点。依托企业实际项目,通过试验研究、抗震性能分析与设计施工实践,验证了竖缝密拼连接的可行性。

关键词 装配式结构;竖缝密拼连接;试验分析;结构设计;抗震性能分析

中图分类号 TU758.11; **文献标志码** A

Design Method and Engineering Application of Vertical Seam Tight Splicing Connection for Shear Wall System

WU Hua¹, ZHANG Xiao-chen^{1*}, JI Yong-xin²

(1. EPC Business Unit (Design Institute), China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;
2. Engineering Technology Research Institute, China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

[Abstract] Vertical joint steel anchor ring grouting connection (referred to as vertical seam tight splicing connection) shear wall system uses steel anchor ring connection for vertical joints, followed by secondary grouting connection. Based on actual projects of the enterprise, the feasibility of vertical joint tight fitting connection has been verified through experimental research, seismic performance analysis, and design and construction practice.

[Keywords] fabricated structure; vertical seam tight splicing connection; experimental analysis; structure design; seismic performance analysis

随着中国建筑工业化进程的推进,装配式建筑在高层钢筋混凝土剪力墙住宅中得到了广泛的应用^[1-4]。传统装配式剪力墙体系由预制的墙身和现浇的边缘构件组成,属于湿连接方式,施工过程烦琐。为解决预制剪力墙快速便捷安装的问题,建筑工程行业做了许多探索,如键槽连接^[5]、现浇带连接^[6]以及 U 型钢筋套箍^[7]等,但这些连接方式依然存在定位精度要求高、施工拼接困难的问题。

竖向接缝钢锚环灌浆连接是一种新型“干式连接”做法(简称为竖缝密拼连接)。该种连接有水平接缝和竖向接缝,其中水平接缝采用套筒灌浆连接,竖向接缝通过钢棒与钢锚环进行连接,最后在竖缝和凹槽内灌浆形成整体^[8]。这种连接形式具有构件标准化程度高、安装方便、节省模板、减少湿

作业的优点。现有的研究仅对多层单片剪力墙抗震性能进行了研究,并未对建筑进行整体分析,目前也尚无实际工程应用。竖缝密拼连接体系能否广泛应用在高层剪力墙体系中,其抗震性能是否能够满足国家规范、标准的要求,仍有待论证。

基于此背景,现主要通过产研结合的模式,进行试验、分析、设计、施工全链条研究。以实际工程项目为依托,针对高层剪力墙体系的竖缝密拼连接开展破坏机理试验研究,并进行整体的抗震性能分析论证,提出满足工程推广需求的设计方法。理论结合实践,验证竖缝密拼剪力墙体系的工程可行性,并探索其推广方向。

1 试验研究分析

剪力墙主要承担竖向轴力和水平剪力,竖缝密

收稿日期:2024-10-23 修订日期:2025-03-19

第一作者:吴华(1981—),男,汉族,江西修水人,硕士,高级工程师。研究方向:结构工程。E-mail:857375195@qq.com。

*通信作者:张啸辰(1988—),男,汉族,河北邢台人,硕士,高级工程师。研究方向:结构工程。E-mail:576678111@qq.com。

拼剪力墙接缝处构造做法如图 1 所示。为研究高层剪力墙结构的竖向接缝在水平地震作用下的破坏机理,设计了单调荷载作用下的直剪试验和往复荷载作用下的抗震试验。

1.1 试验设计

直剪试验和抗震试验均采用 200 mm 厚度的剪力墙,钢筋牌号为 HRB400,钢锚环牌号为 45#钢,钢锚环间距为 500 mm,竖缝采用 C60 灌浆料二次填充。直剪试验中设计了 5 组试验,共 8 个试件,研究参数包括混凝土强度、钢锚环规格和钢锚环孔径,试件具体参数如表 1 所示。抗震试验中设计了 4 组试验,共 4 个试件,研究参数包括墙宽、剪跨比、轴压比、截面形式和接缝位置,试件具体参数如表 2 所示。

试验的加载装置如图 2 所示,试验荷载工况参考《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[9]和《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[10]。

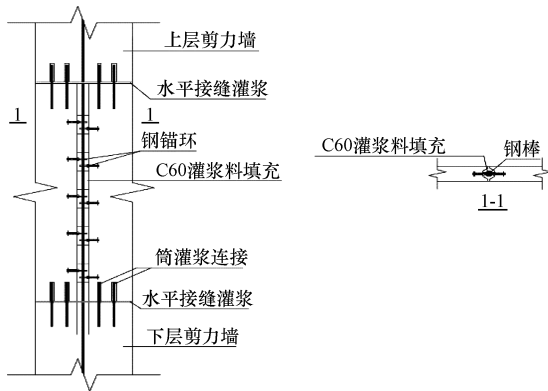


图 1 竖缝密拼连接大样图
Fig. 1 Detailed drawing of vertical seam tight splicing connection

表 1 直剪试验试件

Table 1 Cut test specimens

试件编号	混凝土强度	钢锚环规格	孔径/mm	数量
ZJ-16-150	C40	M16	150	1
ZJ-20-150	C40	M20	150	1
ZJ-16	C40	M16	120	2
ZJ-20	C40	M20	120	2
ZJ-16-C30	C30	M16	120	2

表 2 抗震试验试件

Table 2 Seismic test specimen

编号	墙宽/mm	剪跨比	轴压比	截面形式	接缝位置	数量
Q1	1 000	2.8	0.3	一字形	中部	1
Q2	1 600	1.75	0.3	一字形	中部	1
Q3	2 000	1.4	0.2	一字形	侧边	1
Q4	2 000	1.4	0.2	T 字形	侧边	1

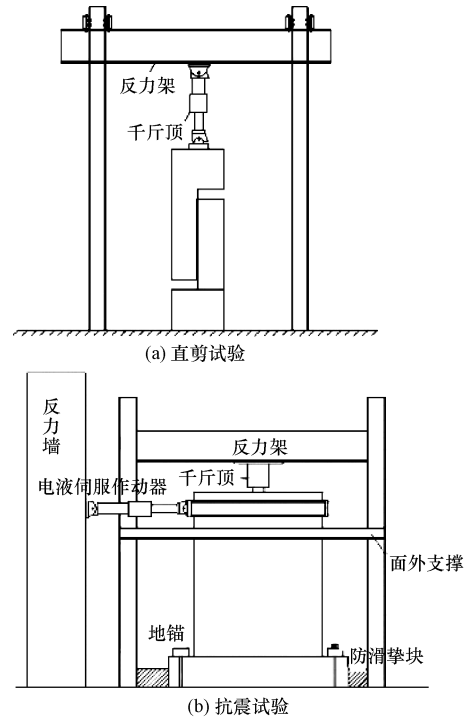


图 2 试验加载装置

Fig. 2 Experimental loading device

1.2 试验现象

直剪试验中各试件的荷载位移曲线如图 3 所示,对于 ZJ-16、ZJ-20 和 ZJ-16-C30 试件,首先发生灌浆料和预制墙侧边交界面的黏结破坏,荷载突降并转由钢锚环完全承担。随着钢锚环柄的断裂,荷载再次下降,试件完全破坏。对于 ZJ-16-150、ZJ-20-15 由于试件加工和加载问题,界面在初始状态已经开裂,因此其承载力仅为钢锚环的受剪承载力,数值较低,从其接缝荷载-位移曲线可以看出,为典型的钢筋受力特征。

抗震试验中各试件的破坏形态如图 4 所示,试件破坏模式为受弯破坏。试件 Q1、Q2 和 Q3 首先在受拉侧出现水平裂缝,并向内斜向发展,在循环加载过程中形成的斜裂缝穿过竖向接缝后继续延伸,随着水平位移的增大,受压侧角部混凝土逐渐压溃,受拉侧边缘构件纵向钢筋屈服。试件 Q4 首先在受拉侧出现水平裂缝,并向内斜向发展,竖向接缝开裂,随着位移的增大,腹板角部混凝土剥落、压溃,边缘构件纵向钢筋屈曲。

1.3 试验分析

根据直剪试验现象和结果表明,竖缝密拼连接的承载力可以分为峰值承载力和极限承载力。峰值承载力 V_p 由界面的黏结力 V_c 和钢锚环的抗剪承载力 V_f 共同承担,接缝的峰值承载力可以表达为

$$V_p = V_c + V_f = cf_i A_c + 0.7\beta A_s f_y \quad (1)$$

当界面黏结力损失后,接缝的极限承载能力 V_u

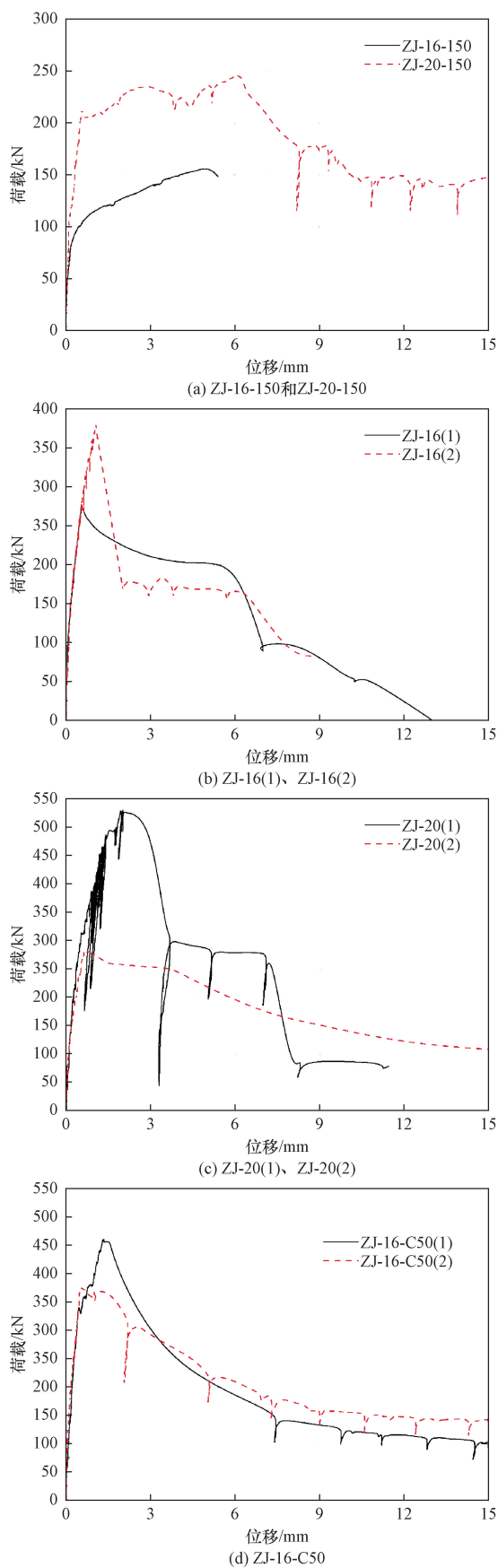


图3 荷载位移曲线图

Fig. 3 Load displacement curve graph

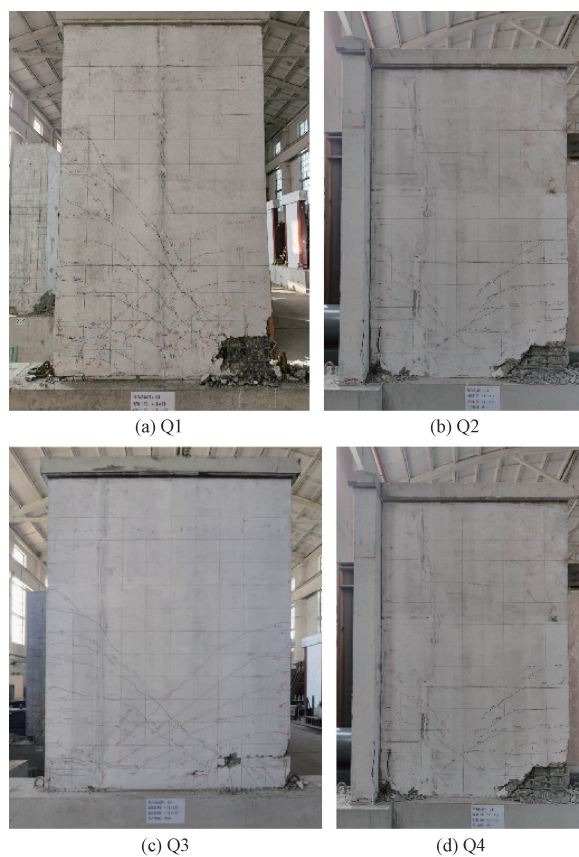


图4 试件破坏形态图

Fig. 4 Diagram of specimen failure mode

完全由钢锚环的抗剪承载力 V_r 承担, 接缝的极限承载力可以表达为

$$V_u = V_r = 0.7A_s f_y \quad (2)$$

式中: c 为界面黏结系数; f_t 为混凝土抗拉强度值; A_c 为单个钢锚环对应的接缝处交界面面积; A_s 为穿过接缝的钢锚环连接对截面面积之和; f_y 为钢锚环所用钢材强度值; β 为折减系数。

根据式(1)、式(2)计算, 材料强度按照标准值计算与试验峰值承载力和极限承载力进行对比, 如表3所示。对比可知, 理论值和实验值之间具有一定的安全余量, 试验值与理论值之比均基本大于1.3。

根据抗震试验结果提取各试件骨架曲线的最大荷载作为试验承载力。其中理论承载力按照标准《高层混凝土建筑结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[11]对剪力墙试件的弯矩控制和斜截面剪力控制的相关理论对剪力墙的承载力进行计算, 计算公式为

当弯矩控制时:

$$N = N_c + f'_y A'_s - f_y A_s - N_{sw} \quad (3)$$

当剪力控制时:

$$V \leq \frac{1}{\lambda - 0.5} \left(0.5f_t b h_0 + 0.13N \frac{A_w}{A} \right) + f_{yh} \frac{A_{sh}}{s} h_0 \quad (4)$$

根据以上公式计算,材料强度按照标准值计算与试验承载力进行对比,如表4所示。对比可知,试件的计算承载力均以受弯控制为主,与试验的破坏模式基本一致。试件 Q1、Q2、Q3 的试验值与理论值

表3 抗剪承载力对比

Table 3 Comparison of shear capacity

试件编号	V_{pt}/kN	V_{ut}/kN	V_{pk}/kN	V_{uc}/kN	V_{pt}/V_{pk}	V_{ut}/V_{uc}
ZJ-16-150	156	156	113	113	1.38	1.38
ZJ-20-150	245	245	176	176	1.39	1.39
ZJ-16(1)	274	203	212	113	1.29	1.80
ZJ-16(2)	381	171	212	113	1.79	1.52
ZJ-20(1)	533	280	238	176	2.24	1.59
ZJ-20(2)	282	252	238	176	1.19	1.43
ZJ-16-C30(1)	357	212	186	113	1.92	1.88
ZJ-16-C30(2)	340	217	186	113	1.83	1.93

注: V_{pt} 为峰值承载力试验值; V_{ut} 为极限承载力试验值; V_{pk} 为按材料强度标准值计算的峰值承载力; V_{uc} 为极限承载力计算值。

表4 锚环拉力对比

Table 4 Anchor ring tension comparison

试件编号	加载方向	P_{mt}/kN		P_{mc}/kN	P_{mc}/P_{mt}
		试验值	平均值		
Q1	正向	263	294	233	1.26
	负向	-325		受弯	
Q2	正向	597	674	574	1.17
	负向	-750		受弯	
Q3	正向	808	849	683	1.24
	负向	-890		受弯	
Q4	正向	1 115	970	860	1.30
	负向	-825		567 受弯	

注: P_{mt} 为试验承载力; P_{mc} 为理论承载力。

之比均大于1.2,试件 Q4 考虑腹板一字形墙肢计算时,试验值与理论值之比均大于1.3。这说明了竖向接缝采用钢锚环灌浆连接并未影响构件的承载力。

2 密拼剪力墙体系的设计应用

2.1 工程概况

选取了广州市花都区的高层住宅进行竖缝密拼连接的工程论证。塔楼建筑面积 13 917.83 m²,建筑高度 95.15 m,地下 2 层,首层层高 4.5 m 商业裙楼,标准层层高 2.9 m 住宅,总共 32 层,标准层平面图如图 5 所示。抗震设防烈度 6 度,地震分组为第一组,场地类别为 II 类。

-2~2 层为现浇结构,3 层~32 层采用竖缝密拼连接装配式剪力墙和钢筋桁架叠合板体系。为便于施工安装,装配式剪力墙采用“大构件”的形式,集中设置在塔楼外侧以及楼梯和电梯核心筒位置,各户型内部形成无剪力墙的“大空间”,剪力墙平面布置如图 6 所示。剪力墙拼缝尽量避开暗柱,设缝时考虑运输和吊装方便,尽可能分割成长条形预制墙,L 形、T 形构件的墙肢长度不宜超过 0.5 m,标准层中竖缝的具体位置如图 7 所示。

2.2 设计方法

由于结构设计软件无法模拟竖缝密拼连接形式,为确保结构设计软件准确模拟竖缝密拼连接的实际工作状态,通过大量研究发现可采用层间斜杆模拟竖缝密拼连接,如图 8 所示。设置层间斜杆为 Q235 钢板,斜杆截面尺寸计算依据轴向刚度和剪切刚度等效的原则。根据试验数据及钢锚环力学特性计算出连接斜杆的截面尺寸,并输入模型中。

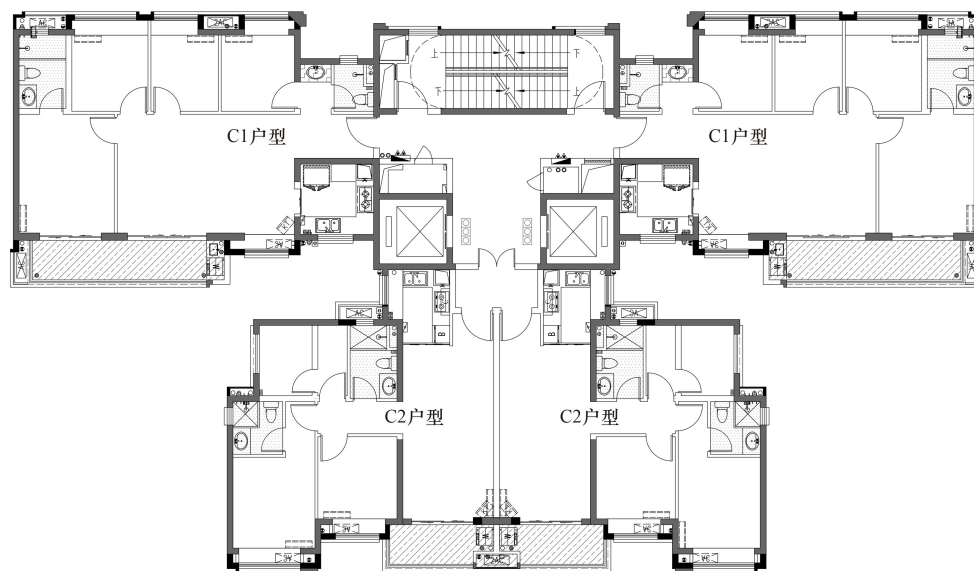


图5 标准层建筑平面图

Fig. 5 Standard floor architectural plan

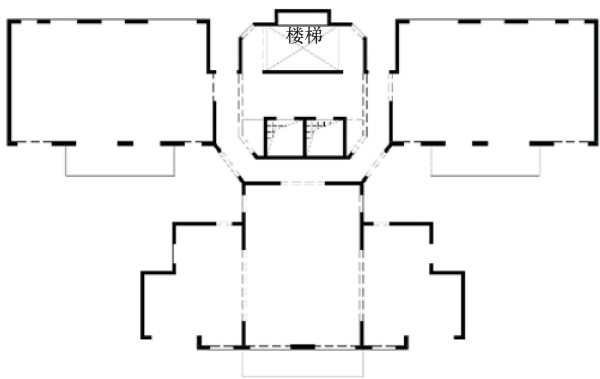


图6 标准层结构布置图

Fig. 6 Standard floor structure layout diagram

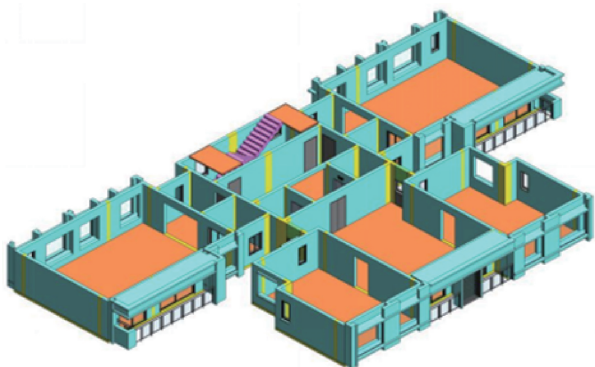
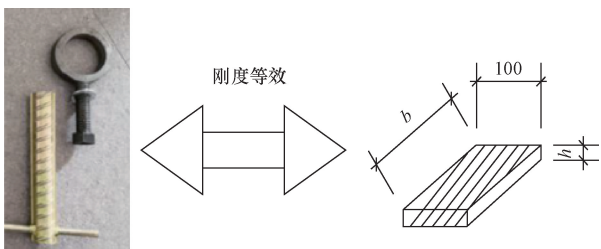


图7 竖缝密拼连接位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of vertical seam tight joint connection position



b 为斜杆宽度; h 为斜杆厚度

图8 斜杆等效示意图

Fig. 8 Equivalent schematic diagram of inclined rod

采用现行建筑结构相关规范中没有提及的新工艺,属于超限高层建筑,需要进行专项技术论证,主要包括抗震性能设计、动力弹塑性分析、竖缝密拼与现浇结构对比分析。按抗震性能目标为C级的要求进行设计。

2.3 多遇地震弹性分析

根据结构抗震性能目标要求,在多遇地震下需满足第1抗震性能水准的要求。采用弹性静力分析和弹性动力时程分析进行包络设计,并对比了竖缝密拼连接剪力墙模型和现浇剪力墙模型的各项指标差异。

2.3.1 弹性静力分析

表5所示为竖缝密拼剪力墙模型与现浇剪力墙模型自振周期对比,发现竖缝密拼剪力墙模型的周期相比于现浇剪力墙模型的周期有所增大,但增大幅度较小,为3%~10%。现浇剪力墙模型第一扭转周期与第一平动周期的比值为0.61,竖缝密拼剪力墙模型第一扭转周期与第一平动周期的比值为0.67,扭转效应无明显差异。

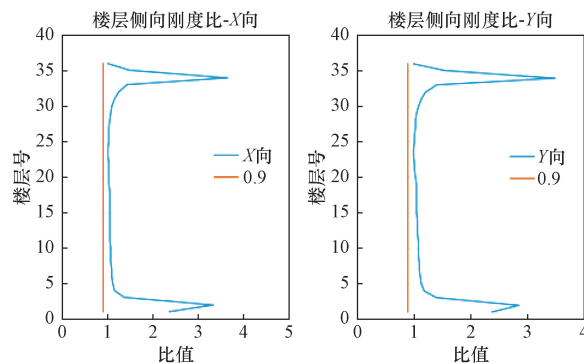
如图9所示为现浇剪力墙模型和竖缝密拼剪力墙模型的楼层侧向刚度比值曲线,竖缝密拼剪力墙模型和现浇剪力墙模型的楼层侧向刚度比分布基本一致,最小值均为1.01,均大于0.9,底层为2.33~2.38,大于规范要求的1.5,楼层承载力沿竖向无突变且变化均匀,不存在薄弱层。

表5 周期及有效质量系数对比

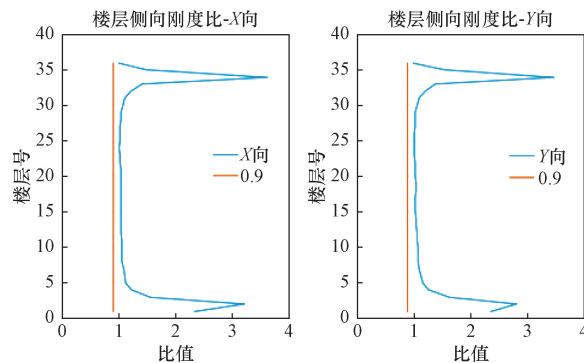
Table 5 Comparison of period and effective mass coefficient

计算结果	周期/s	
	现浇模型	装配式模型
自振周期	1	2.00 (Y)
	2	1.81 (X)
	3	1.25 (T)
	4	0.52 (X)
	5	0.49 (Y)
		0.55 (X)

注:括号中X表示沿平面x轴方向平动地震;Y表示沿平面y轴方向平动地震;T表示扭转地震。



(a) 现浇剪力墙模型



(b) 竖缝密拼剪力墙模型

图9 各层侧向刚度比

Fig. 9 Lateral stiffness ratio of each layer

竖缝密拼剪力墙模型及现浇剪力墙模型在多遇地震作用和风荷载作用下最大层间位移角如表6所示。结构的最大层间位移角均满足规范的要求,竖缝密拼剪力墙模型的位移角稍大,约为现浇剪力墙模型的1.15倍。

图10所示为现浇剪力墙模型和竖缝密拼剪力墙模型各楼层位移比的分布图,两个模型中楼层位移比分布趋势几乎相同,且满足《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)的要求。

2.3.2 竖缝开裂验算

为验算钢锚环连接的混凝土是否开裂,提取了竖缝密拼剪力墙模型在多遇地震作用和风荷载作用下连接单元内力,内力最大值列于表7中。根据1.3节公式计算得出钢锚环连接轴向抗压承载力设计值为1910 kN,轴向抗拉承载力设计值为171 kN,抗剪承载力设计值80.11 kN。对比可知,在多遇地震和风荷载作用下,钢锚环连接的混凝土未开裂,满足达到小震不裂的抗震设防目标。

2.3.3 弹性动力时程分析

根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)规定,采用两条天然波和一条人工波进行小震弹性动力时程分析,计算分析采用双向地震输入,主次方向地震波峰值比为1:0.85。如表8所示为各条地震波激励下结构的基底剪力,每条地震波计算所得结构底部剪力均不小于振型分解反应谱法的65%,弹性时程分析结果满足规范要求。图11和图12分别表示弹性时程分析楼层剪力变化曲线以及层间位移角变化曲线,X向计算楼层剪力和层间位移角与反应谱法结果较为接近,Y向计算楼层剪力和层间位移角略大于反应谱法结果,幅度约在10%以内。

2.4 设防地震性能设计

根据结构抗震性能目标要求,在设防地震下满足第3抗震性能水准的要求。采用YJK软件对竖缝密拼剪力墙模型进行设防地震作用下进行弹性分析,其中各项参数如表9所示。通过对比多遇地震和设防地震的配筋结果,发现框架梁、连梁配筋结果由设防

表6 最大层间位移角对比

Table 6 Maximum interlayer displacement angle comparison

最大层间位移角	多遇地震作用		风荷载	
	X向	Y向	X向	Y向
现浇剪力墙模型	1/5 248(第19层)	1/5 172(第26层)	1/3 467(第16层)	1/1 931(第23层)
竖缝密拼剪力墙模型	1/4 973(第19层)	1/4 497(第25层)	1/3 439(第16层)	1/1 622(第20层)

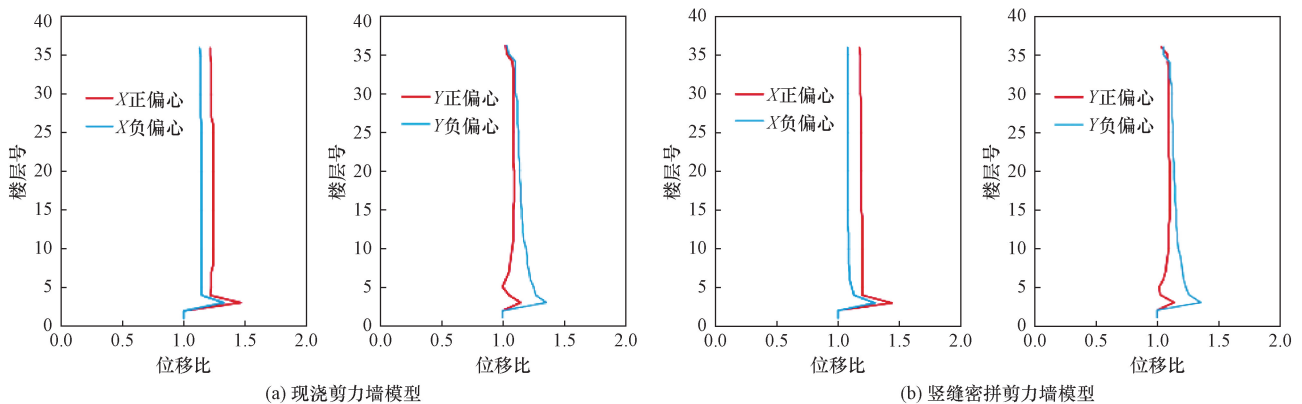


图10 各层位移比

Fig. 10 Displacement ratio of each floor

表7 竖缝密拼剪力墙模型连接单元内力最大值

Table 7 Maximum internal force of connection element

工况	方向	P/kN		V ₂ /kN		V ₃ /kN	
		正极	负极	正极	负极	正极	负极
多遇地震作用	X	30.50	0.00	12.00	0.00	1.25	0.00
	Y	20.64	0.00	27.73	0.00	1.10	0.00
风荷载作用	X	36.30	-36.45	15.78	-15.55	1.18	-1.54
	Y	51.44	-53.36	21.13	-71.33	2.76	-2.75
最大值		-2.75	51.44	-53.36	27.73	-71.33	2.76

注:P为轴向力;V₂为面内剪力;V₃为面外剪力。

表 8 时程分析基底剪力

Table 8 Time history analysis of base shear

地震波	方向	基底剪力/kN	时程/反应谱
天然波 1	X	2 325.61	0.97
	Y	2 673.55	1.08
天然波 2	X	2 841.34	1.19
	Y	2 689.81	1.09
人工波	X	2 261.77	0.95
	Y	2 421.04	0.98
平均值	X	2 476.24	1.04
	Y	2 594.80	1.05

注:时程/反应谱表示时程分析基底剪力和反应谱法计算基底剪力的比值。

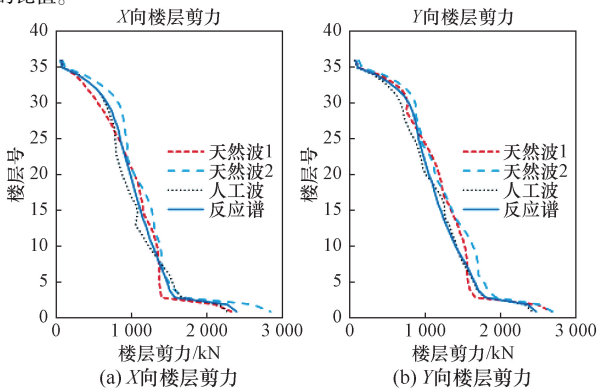


图 11 楼层剪力对比

Fig. 11 Comparison of floor shear forces

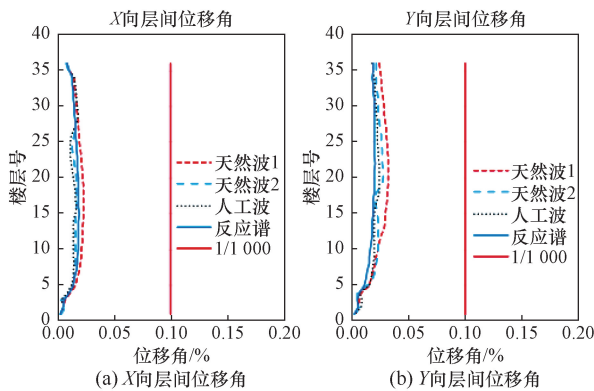


图 12 层间位移角对比

Fig. 12 Comparison of inter story displacement angles

表 9 结构整体计算参数

Table 9 Structural overall calculation parameters

计算参数	中震弹性	中震不屈服
地震作用影响系数	0.12	0.12
作用分项系数	和小震弹性分析相同	1.0
材料分项系数	和小震弹性分析相同	1.0
抗震承载力调整系数	和小震弹性分析相同	1.0
材料强度	和小震弹性分析相同	采用标准值

地震控制,柱、墙配筋大多为多遇地震控制。为了确定墙肢在设防地震下的受拉情况,提取了结构代

表性的楼层在恒载、活载及地震作用工况下的轴向力。经计算全楼墙肢均未出现拉应力超限,如图 13 所示。

2.5 罕遇地震性能设计

罕遇地震采用等效弹性模型计算,并对关键构件的承载力和性能目标进行复核,确定其达到设定的构件性能指标。最后采用大震弹塑性动力时程分析对性能目标再次进行复核。

2.5.1 等效弹性分析

根据结构抗震性能目标要求,在罕遇地震下需满足第 4 抗震性能水准的要求。采用 YJK 软件对罕遇地震下进行弹性分析,其中各项参数如表 10 所示。

根据 YJK 计算结果发现结构各楼层剪力墙和框架柱满足大震下抗剪截面的要求,大震下混凝土关键构件均满足抗弯不屈服,抗剪弹性要求,仅少量构件由大震控制,其余构件均由小震控制。

表 10 结构大震整体计算参数

Table 10 Structural calculation parameters of rare earthquakes

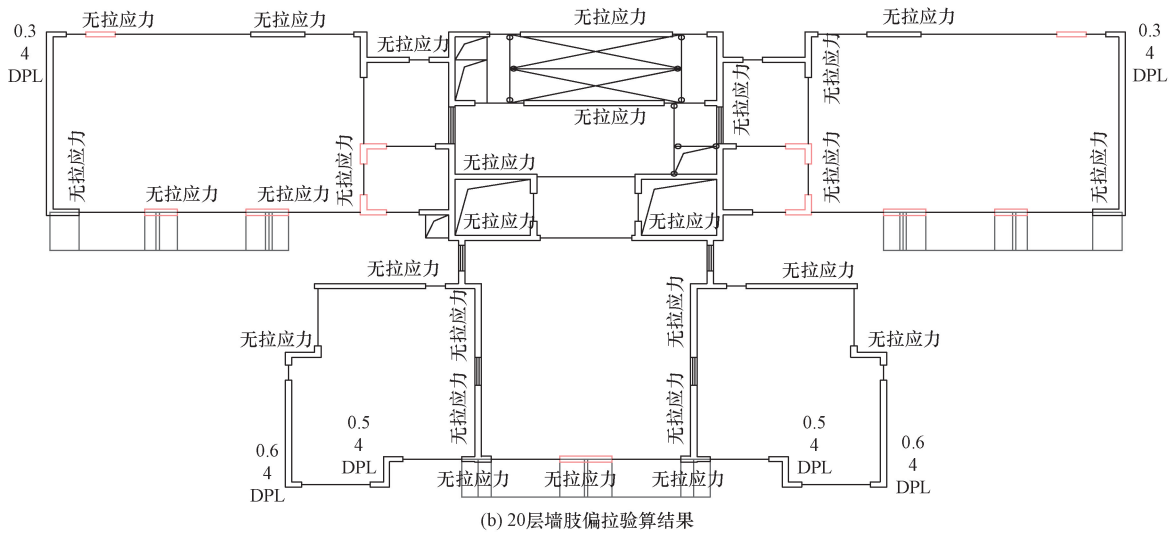
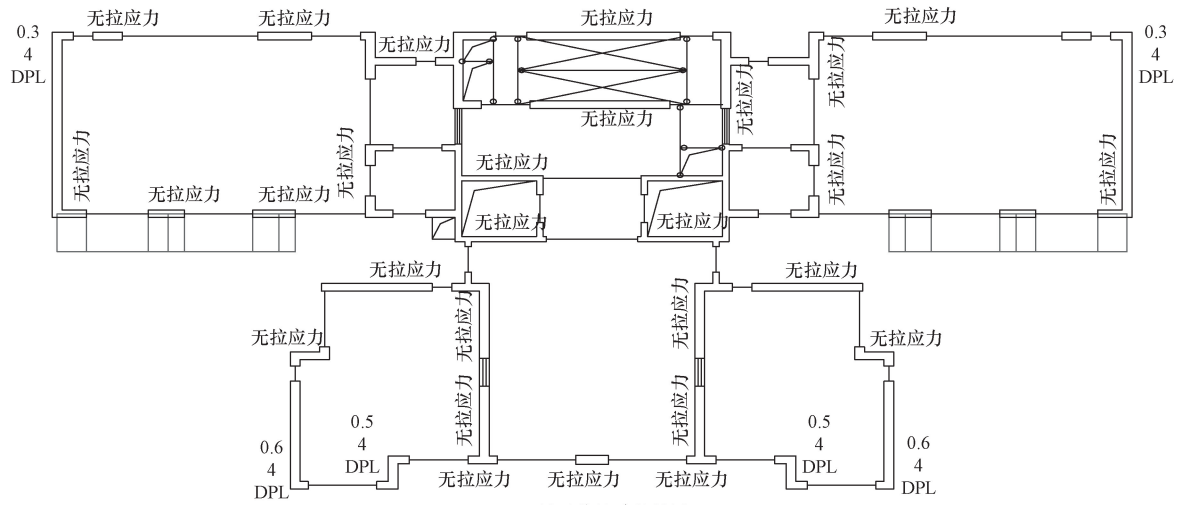
计算参数	大震参数取值
地震作用影响系数 α_{max}	0.28
作用分项系数	1.0
材料分项系数	1.0
抗震承载力调整系数	1.0
材料强度	采用标准值

2.5.2 弹塑性动力时程分析

竖缝密拼连接可能存在耗能能力较弱的问题,采用弹塑性时程分析法进行构件大震性能的损伤分析进行验证,计算软件为 SAUSAGE 动力弹塑性软件。

在罕遇地震时程分析中选取 2 条人工波 (R1、R2) 和 5 条天然波 (TH003TG040、TH071TG040、TH3TG040、TH034TG040、TH113TG040)。地震波峰值加速度为 125 cm/s^2 ,计算持时 20 ~ 33 s,3 个分量峰值加速度采用以下比值: $0^\circ: 90^\circ: Z \text{ 向} = 1.0: 0.85: 0.65$ 。图 14 所示结构在罕遇地震下各层最大层间的位移角,7 条地震波 X 方向最大层间位移角平均值为 $1/645$,Y 主方向最大层间位移角平均值为 $1/555$,最大层间位移角均小于规范要求的 $1/120$ 。

以下以人工波 RH1TG040 在 X 方向激励下结构的损伤结果为例,分析墙、柱、梁、各类构件的抗震性能水平分布情况。其中框架梁混凝土损伤因子最大值为 0.16,框架梁钢筋最大塑性应变为 2.1×10^{-4} ,部分框架梁出现轻微至轻度损坏。框架柱混凝土损伤因子最大值为 0.064 6,框架柱钢筋没



输出的墙肢数值由上至下分别为墙肢拉应力比值、工况组合号、偏拉状态,无拉应力时不输出数值

图 13 墙柱拉应力比

Fig. 13 Wall column tensile stress ratio

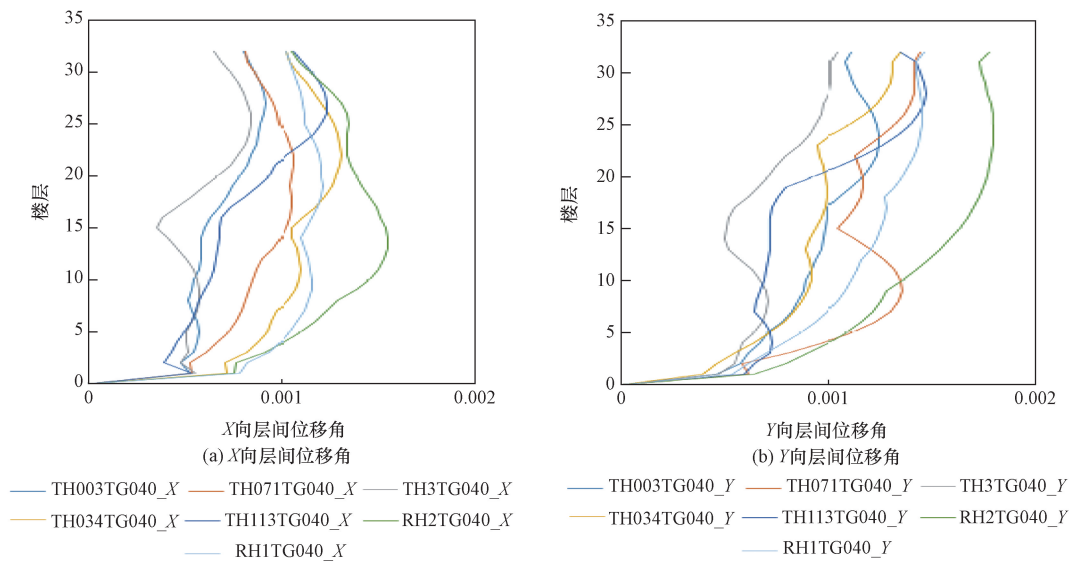


图 14 罕遇地震下层间位移角

Fig. 14 Rare earthquake induced inter layer displacement angle

有发生塑性应变,框架柱出现轻微至轻度损伤。剪力墙和连梁混凝土损伤因子最大值为 0.91,剪力墙和连梁钢筋最大塑性应变为 5.47×10^{-3} ,部分剪力墙出现轻微损伤。

大震下竖向接缝的性能目标为接缝满足极限承载力的要求。提取模型中所有连接单元在各条地震波下的剪力和轴力的时程包络并取平均值,如图 15 所示。其中每一个散点代表一个非线性连接单元,横坐标代表该连接单元的最大轴拉力平均值,纵坐标代表该连接单元的最大剪力平均值,水平横线(包括实线、虚线、点划线等)代表不同混凝土标号下的接缝抗剪承载力(或剪切强度)。图 15 显示,所有离散点均未超过对应颜色线条上方,说明使用 M20 钢锚环,全楼所有连接单元均能满足极限承载力的要求。

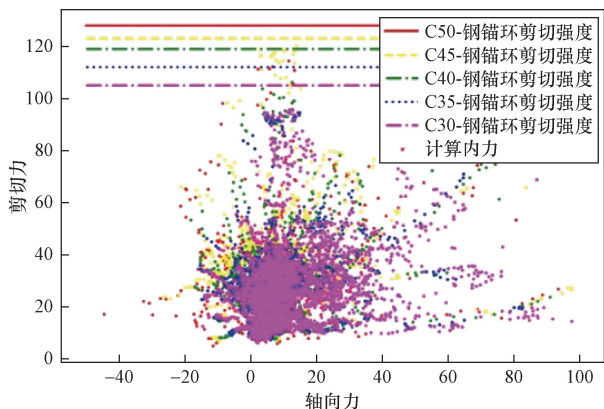


图 15 钢锚环承载力验算

Fig. 15 Calculation of bearing capacity of steel anchor ring

2.6 施工过程中的问题分析

项目设计完成后,在施工过程中发现如下两个问题,为此进行了剪力墙的优化调整。

门洞处剪力墙在设计初期会被分割成如图 16(a)所示的形状,在运输过程中剪力墙中部会出现开裂的现象,甚至左右两侧墙体发生扭转,主要原因是该构件中部是该片剪力墙最薄弱的地方。为避免此种情况发生,将该片剪力墙优化成如图 16(b)所示,通过优化可以避免剪力墙在运输和安装过程产生裂缝。

在设计初期窗台反坎与下层梁通过套筒二次灌浆进行连接,如图 17(a)所示,但随着施工

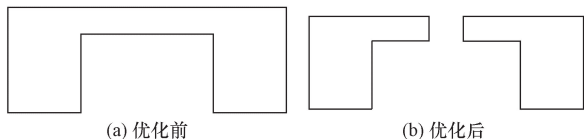


图 16 剪力墙形状优化

Fig. 16 Optimization of shear wall shape

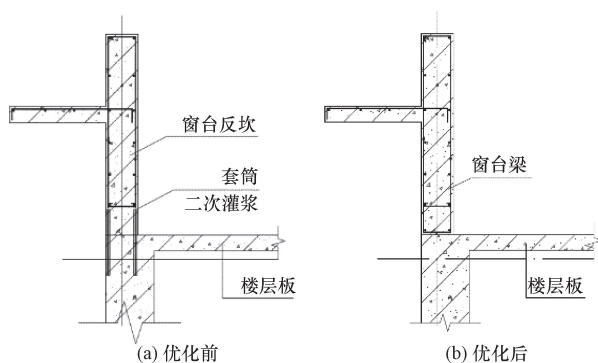


图 17 窗台梁钢筋连接优化

Fig. 17 Optimization process of steel bar connection for window sill beam

发现此处钢筋过于密集导致安装不方便。基于此种情况,将窗台反坎优化成窗台梁,如图 17(b)所示。

3 结论

(1) 竖向密拼连接具有较好的滞回性能和耗能能力,试验承载力均高于理论承载力,且有一定的安全储备。结构设计时建议对竖缝密拼连接进行小震和大震两阶段性能复核,保证小震阶段不开裂,大震阶段满足极限承载力要求^[11]。

(2) 在多遇地震弹性静力分析中,竖缝密拼剪力墙模型与现浇剪力墙模型的各种指标基本一致,竖缝密拼节点在该工况下混凝土没有开裂,并且在多遇地震弹性动力时程分析中,竖缝密拼剪力墙模型的各项结果均能满足规范要求。

(3) 在设防地震分析中,竖缝密拼剪力墙模型中的所有构件均满足第 3 性能水准的要求。各楼层墙柱在中震下其受拉应力均未超过混凝土的抗拉强度标准值,结构具有良好的抗震性能。

(4) 在罕遇地震弹塑性动力时程分析中,在各地震激励下竖缝密拼剪力墙模型的层间位移角均可满足规范的要求,且竖缝密拼连接均可以满足抗震性能目标的要求。

依托直剪试验和抗震试验的结果,将竖缝密拼连接应用于实际的项目中,在多遇地震弹性分析中,竖缝密拼剪力墙模型和现浇剪力墙模型的各项指标基本一致,且在多遇地震动力时程分析、设防地震结构分析和罕遇地震分析下,竖缝密拼剪力墙模型的各项指标均可以满足规范和抗震性能的要求,基本说明了竖缝密拼节点可等同于“现浇”结构。

参 考 文 献

[1] 人民出版社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [M]. 北京: 人民出版

- 社, 2021.
- People's Publishing House. The 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the outline of the long-range goals for 2035 [M]. Beijing: People's Publishing House, 2021.
- [2] 张颖. 城乡建设绿色发展纲领性文件出台中办国办印发《关于推动城乡建设绿色发展的意见》[J]. 中国勘察设计, 2021(11): 4. Zhang Ying. Opinions on promoting green development in urban and rural construction [J]. China Engineering Consulting, 2021 (11): 4.
- [3] 刘晓龙, 姜玲玲, 葛琴, 等. “十四五”时期“无废城市”试点建设宏观研究[J]. 环境保护, 2021, 49(1): 37-41. Liu Xiaolong, Jiang Lingling, Ge Qin, et al. A macro-study on the pilot construction of no-waste cities during the 14th Five-Year Plan [J]. Environmental Protection, 2021, 49(1): 37-41.
- [4] 陈镇濠. 预制装配式住宅关键技术及管理模式研究[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(11): 169-171. Chen Zhenhao. Research on key technologies and management models of prefabricated prefabricated residential buildings [J]. China Construction Metal Structure, 2024, 23(11): 169-171.
- [5] 胡欣, 张亚楠, 张锡治, 等. 装配式复合齿槽连接剪力墙结构技术体系应用[J]. 天津建设科技, 2023, 33(5): 56-58. Hu Xin, Zhang Yanan, Zhang Xizhi, et al. Application of prefabricated composite groove connection shear wall structure technology system [J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2023, 33(5): 56-58.
- [6] 贺晓晖, 贺志坚, 赵智云. 现浇混凝土保温复合填充墙与剪力墙弱连接节点分析研究[J]. 建筑技术开发, 2024, 51(5): 116-118. He Xiaohui, He Zhijian, Zhao Zhiyun. Analysis and research on weak connection nodes between cast-in-place concrete insulation composite filling wall and shear wall [J]. Building Technique Development, 2024, 51(5): 116-118.
- [7] 秦鹏, 龚江炜, 严涛, 等. 不同竖向钢筋连接方式对装配式剪力墙抗震性能的影响[J]. 建筑结构, 2021, 51(1): 79-86. Qing Peng, Gong Jiangwei, Yan Tao. The influence of different vertical steel bar connection methods on the seismic performance of prefabricated shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2021, 51(1): 79-86.
- [8] 李然, 田春雨, 马云飞. 竖向接缝钢锚环灌浆连接装配式多层剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 41(S2): 123-132. Li Ran, Tian Chunyu, Ma Yunfei. Experimental study on seismic performance of precast low-rise concrete shear wall with steel anchor-ring connection [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(S2): 123-132.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Construction Industrial Press, 2012.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Construction Industrial Press, 2015.
- [11] 中国建筑科学研究院. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2002 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. China Academy of Building Research. Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2002 [S]. Beijing: China Construction Industrial Press, 2010.