

引用本文:魏文晖,马中原,朱 东,等. 框架-嵌入式墙体结构抗震性能研究[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(3):53-61.

WEI Wen-hui, MA Zhong-yuan, ZHU Dong, et al. Study on Seismic Performance of Frame-embedded Wall Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(3): 53-61.

DOI:10.19815/j.jace.2020.06058

框架-嵌入式墙体结构抗震性能研究

魏文晖¹, 马中原¹, 朱 东², 楚 尚¹

(1. 武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要:为研究框架-嵌入式墙体结构抗震性能,根据原型结构特性与相似理论,设计并制作了相似比为1:3的钢筋混凝土框架-嵌入式墙体结构试验模型,并进行了地震模拟振动台试验,探究此类结构在不同强度、不同种类地震波作用下的动力特性、加速度反应和位移反应等。结果表明:在地震作用初始阶段,框架结构的变形使得墙板与主体框架连接更为紧密,嵌入式墙体的存在使得整体结构刚度增加,随着框架主体结构的损伤,刚度逐渐减小;加载结束后,结构一层梁端及柱脚处裂缝较为密集,嵌入式墙板四角及插墙凹槽处混凝土出现不同程度的破坏,框架柱插墙凹槽处混凝土损坏较为严重,但墙柱之间仍保持可靠的连接,结构仍保持较好的整体性;结构各层弹性、弹塑性层间位移角在规范限值以内,结构具有良好的抗震性能;振动台试验过程中各块墙板间相对振动反应较为明显,在实际工程设计中应对墙角采取构造措施加固,在墙板顶端增设压梁,并在墙板与框架柱凹槽之间增设缓冲带。

关键词:嵌入式墙体;结构刚度;振动台试验;抗震性能

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)03-0053-09

Study on Seismic Performance of Frame-embedded Wall Structure

WEI Wen-hui¹, MA Zhong-yuan¹, ZHU Dong², CHU Shang¹

((1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineering, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430070, Hubei, China; 2. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd.,

Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of frame embedded wall structure, according to the prototype structure characteristics and similarity theory, a reinforced concrete frame embedded wall structure test model with the similarity ratio of 1:3 was designed and made. The shaking table test was carried out to explore the dynamic characteristics, acceleration response and displacement response of this kind of structure under different intensity and different kinds of seismic waves. The results show that in the initial stage of earthquake, the deformation of the frame structure makes the connection between the wall panel and the main frame more closely, the existence of embedded wall makes the overall structure stiffness increase, and with the damage of the main structure of the frame, the stiffness gradually decreases. After the end of

收稿日期:2020-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51678462)

作者简介:魏文晖(1963-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:weiwenhui@whut.edu.cn。

loading, the cracks at the beam end and column base of the first floor of the structure are more dense, and the concrete at the four corners of embedded wallboard and the groove of inserted wall are damaged to varying degrees. The damage of concrete in the groove of frame column is serious, but the connection between wall and column is still reliable, and the structure still keeps good integrity. The elastic and elastic-plastic inter story displacement angles of the structure are within the limits of the code, and the structure has good seismic performance. In the process of shaking table test, the relative vibration response of each wallboard is obvious. In the actual engineering design, structural measures should be taken to strengthen the wall corner, adding pressure beam at the top of the wall panel, and adding buffer belt between the wall panel and the frame column groove.

Key words: embedded wall; structural stiffness; shaking table test; seismic performance

0 引言

框架-嵌入式墙体结构是装配式工业建筑中的新型结构形式,在柱的侧面预留墙板插槽,将预制混凝土墙板自上而下插入凹槽,内嵌式安装^[1],如图 1 所示,采用此种形式,整个施工过程仅需吊车,无需现场支模,墙体既安装方便,又具有较大抗侧刚度,可替代柱间支撑,特别适用于类似电力系统换流站阀厅结构等对墙体有一定刚度要求的工业建筑,中国已有部分阀厅结构采用此种内嵌式混凝土防火墙取代现浇式混凝土防火墙,如杨柳变电站、登胜变电站等工程^[2]。框架-嵌入式墙体结构中,由于墙板与柱间连接的特殊性,若按装配式剪力墙结构进行分析,会过高估计结构的抗侧刚度;按常规框架填充墙进行计算,将忽略嵌入式墙体对结构抗侧刚度的贡献,对于换流站阀厅这类不对称结构^[3],将低估扭转变形对整体结构的不利影响,降低结构的安全性。因此,确定墙板对阀厅结构抗震性能的影响是一个亟需解决的问题^[4]。

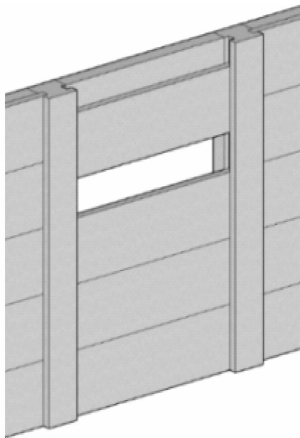


图 1 嵌入式墙体结构体系

Fig. 1 Embedded Wall Structure System

目前,国内外学者对装配式框架和装配式剪力墙结构研究较多^[5-12],但对装配式框架-嵌入式墙体结构的抗震性能研究较少,且大多为钢框架结构,黄宇星等^[13]提出了设立柱凹槽插入墙板的方式来取代外挂式和侧连式的墙板,但对该类结构的抗震性能未深入研究,杨晓杰等^[14]采用 ANSYS 分析软件探究了嵌入式墙板-钢框架结构的抗震性能,分析显示嵌入式墙体显著改变了结构的振型;高松召^[15]基于等效斜撑模型提出了等效多杆弹塑性模型,利用此计算模型研究了某钢结构住宅的抗震性能,结果表明嵌入式钢板对整体结构抗侧刚度的贡献不可忽略;Su 等^[16]对某采用内嵌式墙体的高层混凝土结构进行了有限元分析,得出表面内嵌式墙体的存在提高了结构的抗侧刚度,减小了顶点位移。夏军武等^[17]对带 M 型限位槽的蜂窝夹芯内嵌板钢筋混凝土框架及空腹钢筋混凝土框架进行了低周往复试验,结果表明内嵌墙板与框架的协同作用可提高弹性阶段框架的抗侧移能力。李国强等^[18]通过水平静力及低周反复加载试验,研究了横排外挂、竖排外挂和竖排内嵌 3 种连接方式下预制 ALC 墙板钢框架结构的性能,试验结果显示,相较于外挂的 ALC 墙板,内嵌式 ALC 墙板对整体结构的刚度和承载力的提升较大。

上述学者对嵌入式墙体发展做出了巨大贡献。预制装配式混凝土墙体已成为装配式建筑中最常用的围护体系^[19]。外墙体主要可分为外挂式、内嵌式和内叶承重夹芯式 3 类^[20],对于内嵌式的墙体,以往大多采用轻质砌块砌筑的形式,随着建筑装配化的推进,少量建筑开始采用内嵌墙板的形式。目前,内嵌式墙体结构多见于钢框架,实际工程中,内嵌墙体与钢框架主体结构的连接形式主要为 U

型卡连接^[21]、GT 螺栓连接^[22]、ADR 节点连接^[23]等形式,此外,内嵌式墙体亦在钢框架-钢筋混凝土结构体系中有所应用,如美国西尔玛、巴西 Porto Vleho 等。本文通过振动台试验,对钢筋混凝土框架-嵌入式墙体结构的抗震性能展开研究,以期为此类新型结构的设计提供参考。

1 试验概况

试验以某嵌入式装配防火墙阀厅结构为研究原型,选取具有代表性的中间相邻两榀框架结构单元,结构单榀跨度为 8.8 m,相邻两榀间距为 6.9 m,共 2 层,总层高为 11.8 m,将荷载等效为质量后其总质量为 331 682 kg,混凝土强度等级为 C50,纵向受力筋采用 HRB400 级热轧钢筋,箍筋及框架梁腰筋采用 HPB235 级热轧钢筋。

1.1 试件设计

按照相似理论确定模型相似常数,以此作为模型设计依据。本次设计选取长度、混凝土弹性模量和等效密度相似常数为基本相似常数,依据似量纲分析法^[24]计算模型相似常数。根据振动台尺寸,确定几何相似常数为 1:3。考虑到振动台的承载力,选择降低结构配重,增大台面输入水平加速度,将模型设计为非满配重的形式。虽然非满配重形式会改变柱构件的轴压比,但本试验重点研究的是嵌入式墙板对结构的影响,柱的竖向轴力对整体结构试验结果的影响较小,且不会改变实际结构的破坏模式。采用此种方法,求得的振动台模型相似常数如表 1 所示。

表 1 模型相似常数

Tab. 1 Model Similarity Constant

参数	关系式	相似常数
长度 S_L	设计确定	1/3
弹性模量 S_E	实测得到	0.739
密度 S_ρ	计算得到	0.601
时间 S_t	$S_L(S_\rho/S_E)^{1/2}$	0.301
加速度 S_a	$S_E/(S_L S_\rho)$	3.689
速度 S_v	$(S_E/S_\rho)^{1/2}$	1.109
线位移 S_x	S_L	1/3
角位移 S_θ	1	1
应力 $S_\sigma(S_\sigma)$	S_E	0.739

根据以上相似关系及承载力等效的原则,模型几何尺寸如图 2(a),(b)所示。模型各层梁柱尺寸及配筋均相同,柱截面如图 2(c)所示,梁截面如图 2(d)所示,嵌入式墙板尺寸及配筋如图 2(e)所示。

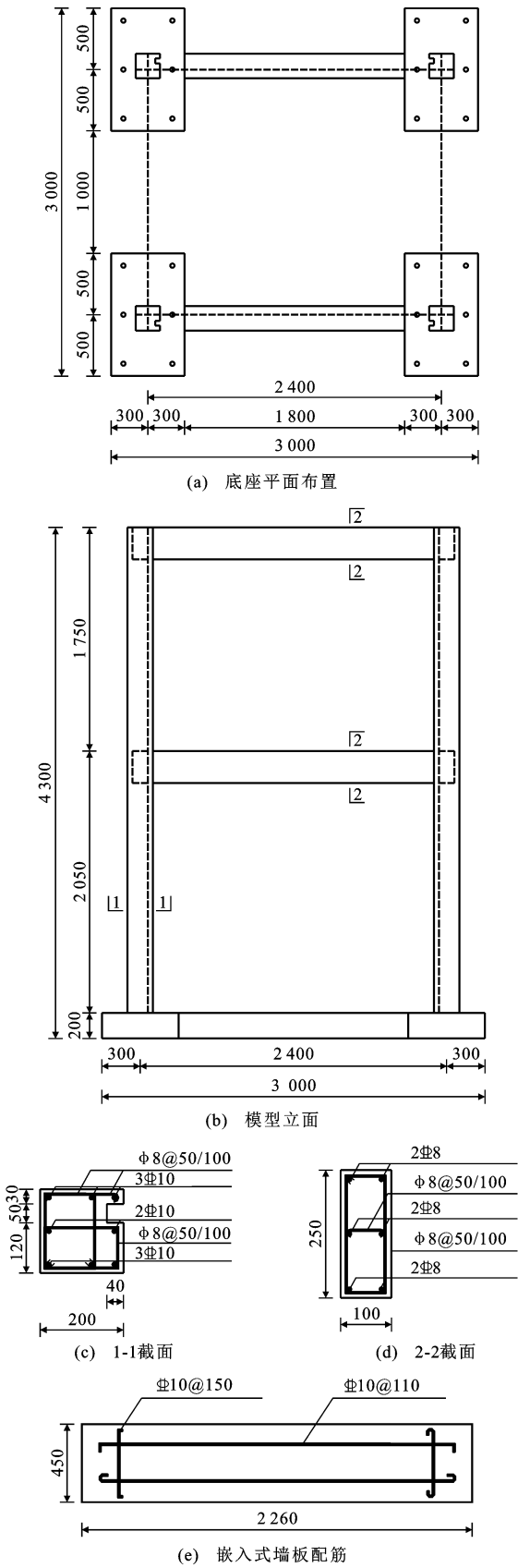


图 2 模型尺寸及配筋示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic Diagram of Model Size and Reinforcement (Unit:mm)

试验模型选用普通混凝土制作,底座通过高强螺栓与台面连接,配重采用 2 根普通钢筋混凝土梁来施加,通过长螺杆和固定铁板连接在框架梁上。所有构件混凝土等级均为 C20,梁柱构件与插板构件同批浇筑,实测其立方体抗压强度标准值为 21.7 MPa,轴心抗压强度为 14.5 MPa,纵筋采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用采用 HPB300 级钢筋,模型钢材性能实测结果见表 2。

表 2 钢材性能试验结果

Tab. 2 Test Results of Steel Performance

钢筋类别	钢筋强度	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 E_s/GPa
纵筋 $\Phi 12$	HRB400	408.2	522.7	204
纵筋 $\Phi 10$	HRB400	401.1	509.1	204
纵筋 $\Phi 8$	HPB300	396.8	505.4	209
箍筋 $\Phi 6$	HPB300	300.3	421.8	209

混凝土达到一定强度后,即可进行试件的吊装和定位,如图 3(a)所示。随后,使用桁车将嵌入式板吊起沿柱内侧槽口依次插入,为方便装配,墙板与柱凹槽两侧各预留了 5 mm 的间隙,并对墙体与凹槽之间的间隙采用木楔进行加固处理,模型吊装拼接完成后如图 3(b)所示。

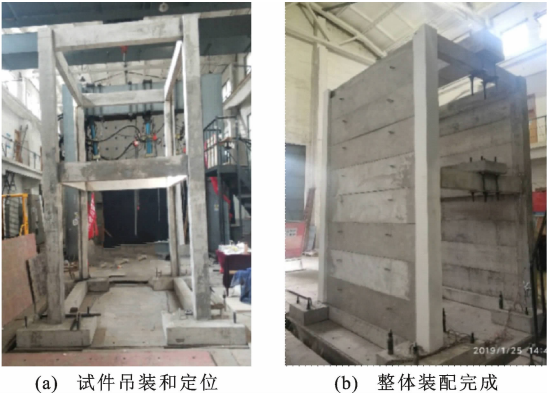


图 3 构件装配图

Fig. 3 Assembly Diagram of Component

1.2 试验方案

本文选取典型的 3 条真实强震记录,包括 El Centro波南北向、Taft 波东西向和天津波南北向,并对其进行截取与压缩处理,截取原波时间间隔为 0.02 s,压缩波输入时间间隔为 0.006 s,数据采集时间间隔为 0.02 s。

本次试验使用日本东京测器公司(TML)生产的位移拾振器 SDP-300D 及加速度拾振器 ARF-A 测量位移及加速度数据,通过 TMR-300 小型多通道数据采集系统收集记录模型在地震作用下的加速

度响应及位移响应。试验前在振动台上对各拾振器进行一致性标定。加速度测点布置在台面、一层顶及二层顶,共计 3 个,位移测点布置在在台面和一层顶,共计 2 个。

为了详细掌握不同地震作用下结构的动力响应情况,本次试验采用分级加载的方式输入地震波,地震波沿模型长边方向输入,在每一个工况前后对结构施加白噪声激励以获得不同烈度地震作用下结构的自振特性变化情况,从而判断结构的刚度降低程度,实际试验加载工况见表 3, g 为重力加速度。

表 3 试验工况

Tab. 3 Test Conditions

工况编号	试验工况	模拟地震类型	地震波	加速度峰值	
				原型	1/3 模型
1	W1		白噪声		0.05g
2	E1	7 度多遇	El Centro 波	0.055g	0.140g
3	T1		Taft 波	0.055g	0.140g
4	N1		天津波	0.055g	0.140g
5	W2		白噪声		0.05g
6	E2	7 度基本	El Centro 波	0.15g	0.362g
7	T2		Taft 波	0.15g	0.362g
8	N2		天津波	0.15g	0.362g
9	W3		白噪声		0.05g
10	E3	7 度罕遇	El Centro 波	0.31g	0.724g
11	T3		Taft 波	0.31g	0.724g
12	N3		天津波	0.31g	0.724g
13	W4		白噪声		0.05g
14	E4	8 度罕遇	El Centro 波	0.51g	1.231g
15	T4		Taft 波	0.51g	1.231g
16	N4		天津波	0.51g	1.231g
17	W5		白噪声		0.05g
18	E5	9 度罕遇	El Centro 波	0.62g	1.496g
19	T5		Taft 波	0.62g	1.496g
20	N5		天津波	0.62g	1.496g
21	W6		白噪声		0.05g
22	E6	巨震	El Centro 波	0.8g	1.930g
23	T6		Taft 波	0.8g	1.930g
24	N6		天津波	0.8g	1.930g
25	W7		白噪声		0.05g
26	E7	巨震	El Centro 波	g	2.413g
27	T7		Taft 波	g	2.413g
28	N7		天津波	g	2.413g
29	W8		白噪声		0.05g
30	E8	巨震	El Centro 波	1.2g	2.896g
31	T8		Taft 波	1.2g	2.896g
32	N8		天津波	1.2g	2.896g
33	W9		白噪声		0.05g

2 试验结果及其分析

在地震波工况正式加载之前对结构进行白噪声扫频以确定其自振频率。试验正式开始后以同一地震烈度下的 3 个不同地震波工况及之后的白噪声扫频为 1 组进行试验加载,每组工况加载完成后观察结构试验情况。

2.1 试验现象

7 度多遇烈度下,模型结构表面没有发现任何裂缝出现,表明整个结构仍处于弹性阶段;7 度基本烈度下,在一层梁端首先出现细微的自梁下边缘向上发展的竖向裂缝,如图 4(a)所示;7 度罕遇烈度下,在墙板中央首次出现竖向裂缝,如图 4(b)所示;8 度罕遇烈度下,一层柱顶端出现水平裂缝,柱凹槽外边缘、柱脚破坏更加严重,如图 4(c)所示;9 度罕遇烈度下各块墙板出现垂直于加载方向的不规则错动,相对振动反应较为明显;继续加载至试验结束,模型正面框架、背面框架以及框架侧面上、一层的梁端均有裂缝,一层柱身裂缝较为密集,其中一层柱顶端最严重,框架柱凹槽外边缘破坏严重,如图 4(d)所示大块混凝土脱落,内嵌式墙板墙角压坏,裂缝向墙板中部延伸,墙板中部裂缝加深,上下墙板参差交错。

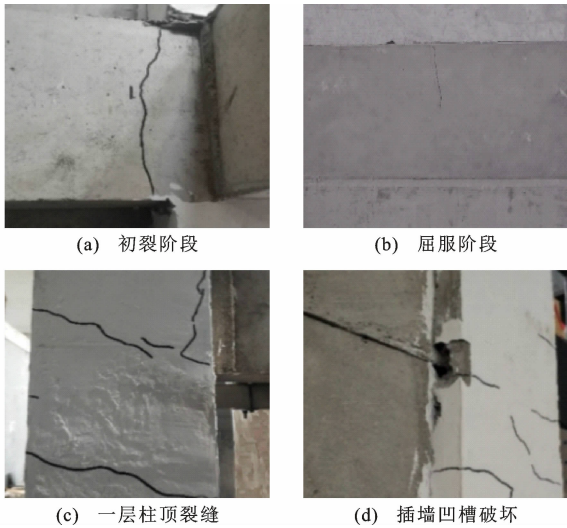


图 4 各阶段试验现象

Fig. 4 Experimental Phenomena at All Stages

2.2 动力特性

本次试验中,在每级地震波加载的前后都对模型进行了加速度峰值为 0.05g 的白噪声激励。通过安装在结构上的拾振器采集结构顶层的加速度响应值,将响应值做快速傅里叶变换,由此得到结构的频谱图,与台面输入值进行对比,得到顶层加速度的

传递函数。在传递函数的幅频特性图上,幅值最大时表示结构响应的信号最大,此时对应的频率为结构的固有频率。确定模型各阶段的各阶固有频率后,采用半功率法计算结构相应的阻尼比^[25],如图 5 所示,其中 ω 为频率, $H(\omega)$ 为振幅。半功率法的阻尼比由传递函数幅值曲线峰值的 $1/\sqrt{2}$ 来确定。由图 5 可知, C 点为曲线峰值,对应的频率为 ω_0 ,代表峰值 70.7% 的水平直线与传递函数的幅值曲线相交于 A, B 两点,对应的频率为 ω_1 和 ω_2 ,那么 ω_1 和 ω_2 就是反应幅值等于最大幅值 70.7% 时的频率,结构的阻尼比为基于上述原理,通过对各工况顶层加速度测点的加速度时程、频谱特性及传递函数的分析得到,模型结构在各试验阶段自振频率及阻尼比的实测结果如图 6 所示。

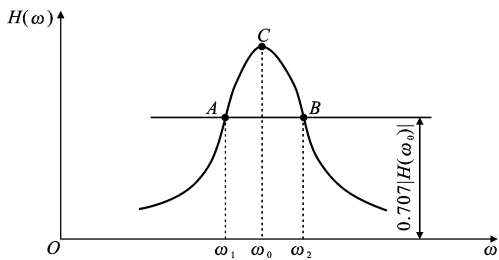


图 5 半功率法计算结构阻尼比

Fig. 5 Calculation of Structural Damping Ratio by Half Power Method

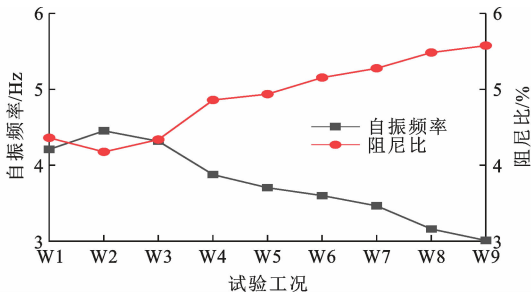


图 6 模型自振频率和阻尼比变化

Fig. 6 Model Natural Frequency and Damping Ratio Variation

本次试验中,结构的自振频率先增大后减小,工况 W2 时自振频率最大,达到了 4.45 Hz 左右,这是由于加载前期,振动使得框架主体发生细微变形,内嵌式墙板与主体框架连接的更加紧密,使得整体结构刚度略有增加。随着模型刚度的变化,阻尼比呈现出先减小后增加的趋势,初始状态下,模型处于弹性阶段,阻尼比约为 4.35%。随着加载的进行,模型刚度逐渐增大,而阻尼比则下降至 4.17%,继续加载,模型的阻尼比逐渐上升,表明随着加载的进行结构产生了不可逆的塑性变形且塑性的逐渐发展使

得模型损伤不断加剧,试验中表现为新裂缝不断产生,原有裂缝继续延伸发展,加载至试验后期甚至出现混凝土脱落等现象。

2.3 模型加速度反应

在多遇烈度、设防烈度和罕遇烈度等各试验阶段,对振动台试验模型分别输入 El Centro 波、Taft 波和天津波 3 种地震波,通过记录各层加速度时程数据以绘制时程曲线。限于篇幅,选取部分工况的台面及各层加速度时程曲线,如图 7 所示。由图 7 可知:模型顶层加速度反应时程与模型底座加速度反应时程相比,加速度峰值呈放大现象;两者峰值变化趋势基本上是一致的。

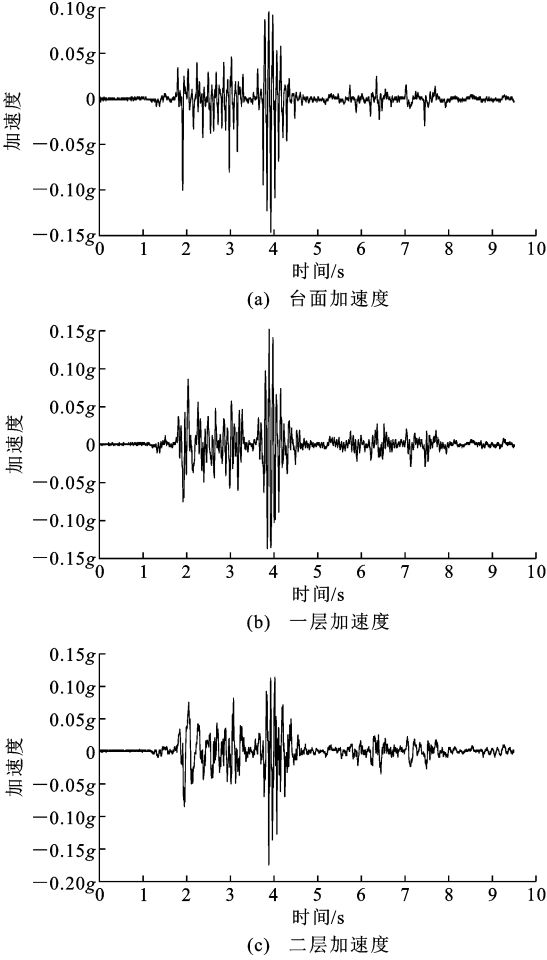


图 7 El Centro 波 7 度多遇烈度下台面及各层加速度时程
Fig. 7 Acceleration Time History of Platform and Each Layer Under 7 Degree Frequent Intensity of El Centro Wave

模型各层加速度放大系数如图 8 所示。由图 8 可知,模型结构各楼层加速度放大系数峰值会随着加载的进行而增大,这是由于加载前期结构刚度逐渐增大的缘故。随着加载的进行,模型结构在持续加载下,损伤不断积累,导致刚度下降,使得加速度

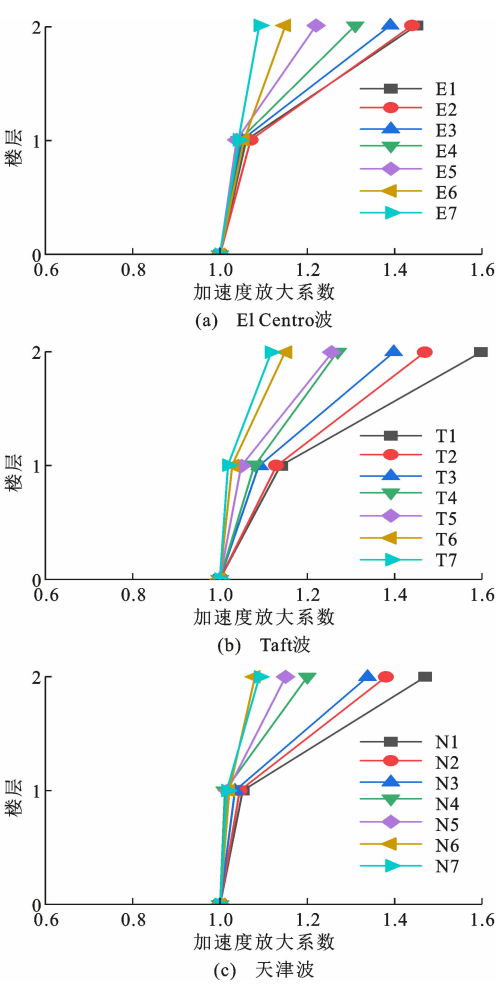


图 8 模型各层加速度放大系数
Fig. 8 Acceleration Amplification Coefficients of Each Layer of Model

放大系数随着地震作用的增强而逐渐减小。

2.4 模型位移反应

各层位移包络图如图 9 所示。由图 9 可知,随着输入地震波振幅的增大,模型结构的最大位移不断增大,位移曲线整体上呈剪切型,而不是剪力墙结构常见的弯曲型变形及框架剪力墙结构的弯剪型变形。据此可知,尽管由于嵌入式墙板的存在使得结构的自振特性发生了较大变化,但由于墙板分块插入,墙板之间可以沿着加载方向相互错动,嵌入式墙板仍不能像剪力墙那样作为结构的主要抗侧力构件参与受力。

对于钢筋混凝土框架结构,在多遇烈度地震作用下,其弹性层间位移角不应超过 1/550。在罕遇烈度地震作用下,钢筋混凝土框架薄弱层弹塑性层间位移角不应超过 1/50。试验模型在各工况下层间位移角最大值如表 4 所示。

由表 4 可以看出,随着加载的进行,整体上结构

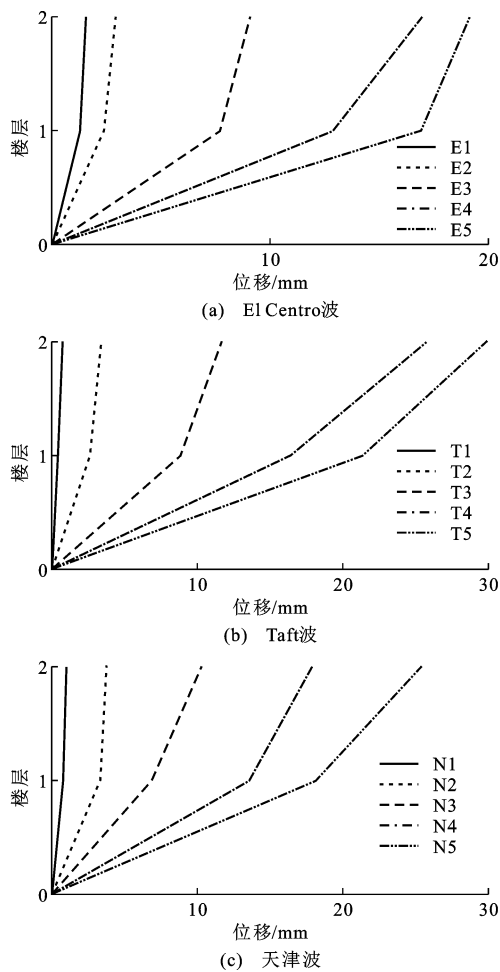


图 9 模型各层位移包络图

Fig. 9 Displacement Envelope Diagram of Each Layer of Model

的层间位移角逐渐增大,在多遇烈度下,各楼层的层间位移角均未超过弹性层间位移角限值。即使在 9 度罕遇地震烈度下,结构的一层层间位移角也满足弹塑性层间位移角限值 1/50 的要求。由此可见,框架-嵌入式墙体结构具有良好的抗震性能,即使在较大的地震作用下,结构也不会产生过大的水平位移,满足规范中对弹塑性变形的要求。

3 结 语

(1)在试验初始阶段,框架结构的变形使得墙板与主体框架连接更为紧密,内嵌式墙板使得结构整体刚度有所增强,结构的自振频率随着地震动强度的增大而略有增加。地震动强度继续增大时,结构的自振频率则不断下降。

(2)在 7 度基本烈度下,结构一层梁端首次出现竖向裂缝。至加载结束后,一层框架梁端、一层框架柱脚处裂缝较为密集,内嵌式墙板四角混凝土出

表 4 模型各楼层层间位移角最大值
Tab. 4 Maximum Value of Inter Story Displacement Angle of Each Floor

模拟地震类型	工况编号	试验工况	地震波	层间位移角	
				一层	二层
7 度多遇	2	E1	El Centro 波	1/5 481	1/3 347
	3	T1	Taft 波	1/5 481	1/3 277
	4	N1	天津波	1/5 037	1/2 200
7 度基本	6	E2	El Centro 波	1/932	1/1 423
	7	T2	Taft 波	1/846	1/1 532
	8	N2	天津波	1/667	1/1 741
7 度罕遇	10	E3	El Centro 波	1/286	1/497
	11	T3	Taft 波	1/248	1/325
	12	N3	天津波	1/319	1/302
8 度罕遇	14	E4	El Centro 波	1/170	1/218
	15	T4	Taft 波	1/134	1/143
	16	N4	天津波	1/162	1/212
9 度罕遇	18	E5	El Centro 波	1/130	1/257
	19	T5	Taft 波	1/103	1/126
	20	N5	天津波	1/52	1/69

现不同程度的破坏,框架柱插墙凹槽处混凝土损坏较为严重,但墙柱之间仍保持可靠的连接,结构仍保持较好的整体性。

(3)通过比较结构各层层间位移可以看出,结构一层的弹塑性层间位移出现突变,为结构的薄弱部位。根据现行抗震设防规范,结构薄弱层处弹性及弹塑性层间位移角值在规范限值以内,据此判定此类结构抗震性能良好,结构基本满足 7 度设防要求。

(4)振动中各块墙板相对振动反应较为明显,应对墙角采取构造措施加固,并在墙板顶端增设压梁;为充分利用墙板与整体结构相对振动时对地震能量的耗散效果,设计时可在内嵌式墙板与框架柱凹槽之间增设缓冲带;由于嵌入墙板与柱轴线不在同一直线上,各柱承受了一定的扭矩,应通过合理布置结构平面,防止柱产生扭转,或考虑增加抗扭构造配筋及进行柱抗扭配筋的验算,提高柱的抗扭承载力。

参考文献:

References:

[1] 李晓明. 装配式混凝土结构关键技术在国外的发展与应用[J]. 住宅产业,2011(6):16-18.
LI Xiao-ming. Development and Application of Key Technology of Prefabricated Concrete Structure in Foreign Countries[J]. Housing Industry,2011(6):16-18.

[2] 沈青松,盛晓红,江香云,等. 变电站装配式围墙与防

- 火墙的设计及工程应用[J]. 浙江电力, 2014, 33(3): 28-30, 68.
- SHEN Qing-song, SHENG Xiao-hong, JIANG Xiang-yun, et al. Design Research and Engineering Application of Substation Assembled Fence and Firewall[J]. Zhejiang Electric Power, 2014, 33(3): 28-30, 68.
- [3] 魏文晖, 周兴乐, 胡孝平. 换流站阀厅结构地震效应动力分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(3): 75-77.
- WEI Wen-hui, ZHOU Xing-le, HU Xiao-ping. Dynamic Analysis on Seismic Behavior of Inverter Station Valve Hall[J]. Building Structure, 2010, 40(3): 75-77.
- [4] 陈俊, 高湛, 魏文晖, 等. 装配式框架-嵌入式防火墙阀厅结构抗震性能研究[J]. 建材世界, 2017, 38(2): 100-102.
- CHEN Jun, GAO Zhan, WEI Wen-hui, et al. Research on Seismic Performance of Fabricated Frame-embedded Firewall Valve Hall Structure[J]. The World of Building Materials, 2017, 38(2): 100-102.
- [5] 白国良, 秦朝刚, 徐亚洲, 等. 装配整体式与现浇剪力墙结构抗震性能对比分析[J]. 工程力学, 2019, 36(2): 36-44.
- BAI Guo-liang, QIN Chao-gang, XU Ya-zhou, et al. Contrastive Analysis on Aseismic Performances Between Monolithic Precast Concrete and Cast-in-place Shear Wall Structure[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(2): 36-44.
- [6] 范力, 吕西林, 赵斌. 预制混凝土框架结构抗震性能研究综述[J]. 结构工程师, 2007, 23(4): 90-97.
- FAN Li, LÜ Xi-lin, ZHAO Bin. Summary of Investigation on Seismic Behavior of Precast Concrete Frame Structures[J]. Structural Engineers, 2007, 23(4): 90-97.
- [7] SMITH B J, KURAMA Y C, MCGINNIS M J. Behavior of Precast Concrete Shear Walls for Seismic Regions: Comparison of Hybrid and Emulative Specimens[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(11): 1917-1927.
- [8] 马军卫, 潘金龙, 莫创, 等. 半装配式框架-剪力墙结构抗震性能试验[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2017, 47(2): 313-319.
- MA Jun-wei, PAN Jin-long, MO Chuang, et al. Seismic Performance Experiments on Semi-precast Shear Wall-frame Structures[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2017, 47(2): 313-319.
- [9] 余志武, 彭晓丹, 国巍, 等. 装配式剪力墙 U 型套箍连接节点抗震性能[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015, 49(5): 975-984.
- YU Zhi-wu, PENG Xiao-dan, GUO Wei, et al. Seismic Performance of Precast Concrete Shear Wall with U-type Reinforcements Ferrule Connection[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2015, 49(5): 975-984.
- [10] 赵唯坚, 佟佳鑫, 袁慎明, 等. 装配式框架剪力墙结构柱-墙连接方式[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2015, 31(3): 408-417.
- ZHAO Wei-jian, TONG Jia-xin, YUAN Shen-ming, et al. Research on the Connection Method of Column-wall Member in Precast Frame-shear Wall Structure[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2015, 31(3): 408-417.
- [11] 耿悦, 王玉银, 丁井臻, 等. 外挂式轻钢龙骨墙体-钢框架连接受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(6): 141-150.
- GENG Yue, WANG Yu-yin, DING Jing-zhen, et al. Mechanical Behavior of Connections Between Out-hung Light-gauge Steel Stud Walls and Steel Frames[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(6): 141-150.
- [12] 郭宏超, 孙立建, 刘云贺, 等. 柔性钢框架外挂再生混凝土墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 63-73.
- GUO Hong-chao, SUN Li-jian, LIU Yun-he, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Flexible Steel Frame with Recycled Concrete External Wall[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 63-73.
- [13] 黄宇星, 祝磊, 叶桢翔, 等. 预制混凝土结构连接方式研究综述[J]. 混凝土, 2013(1): 120-126.
- HUANG Yu-xing, ZHU Lei, YE Zhen-xiang, et al. Summary of Precast Concrete Structural Connection[J]. Concrete, 2013(1): 120-126.
- [14] 杨晓杰, 房明, 孙建运, 等. 内嵌墙板钢框架抗震性能分析[J]. 低温建筑技术, 2013, 35(6): 72-75.
- YANG Xiao-jie, FANG Ming, SUN Jian-yun, et al. Seismic Performance Analysis of Steel Frame with Embedded Wallboard[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2013, 35(6): 72-75.
- [15] 高松召. 基于等效斜撑模型的内嵌墙板钢框架抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- GAO Song-zhao. Seismic Performance of Steel Frames with Embedded Wallboard Based on Equivalent Slant Supports Model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [16] SU R K L, CHANDLER A M, SHEIKH M N, et al. Influence of Non-structural Components on Lateral

- Stiffness of Tall Buildings[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2005, 14(2): 143-164.
- [17] 夏军武, 谢伟, 骆泽新. 内嵌墙板对框架抗震性能影响的试验研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(5): 89-92.
- XIA Jun-wu, XIE Wei, LUO Ze-xin. Experimental Study on Effects of Infilled-wallboard on Frame Seismic Performances[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(5): 89-92.
- [18] 李国强, 王城. 外挂式和内嵌式 ALC 墙板钢框架结构的滞回性能试验研究[J]. 钢结构, 2005, 20(1): 52-56.
- LI Guo-qiang, WANG Cheng. The Hysteretic Behavior of Steel Frames with ALC Out-hung and In-filled Walls[J]. Steel Construction, 2005, 20(1): 52-56.
- [19] 阮锦发. 装配式外挂围护墙体的研究应用探索[J]. 福建建筑, 2018(3): 40-44.
- RUAN Jin-fa. The Exploration on Research and Application of Prefabricated Facade Panel[J]. Fujian Architecture & Construction, 2018(3): 40-44.
- [20] 徐其功. 装配式混凝土结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- XU Qi-gong. Design of Prefabricated Concrete structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [21] 黄滢雯. 装配式结构 EPS 砼墙板及其连接节点力学性能研究[D]. 成都: 西华大学, 2019.
- HUANG Yan-wen. Study on Mechanical Properties of Assembled Structure EPS Concrete Wall Panel and Its Connection Joints[D]. Chengdu: Xihua University, 2019.
- [22] 陈亮. 装配式墙板与钢框架组合体系抗侧性能分析研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- CHEN Liang. Study of Lateral Performance of Steel Frame with Fabricated Wall Panels[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.
- [23] 刘腾蛟, 唐晓. 墙板与钢结构连接方法总结分析[J]. 技术与市场, 2016, 23(6): 143-144.
- LIU Teng-jiao, TANG Xiao. Summary and Analysis of Connection Method Between Wallboard and Steel Structure[J]. Technology and Market, 2016, 23(6): 143-144.
- [24] 周颖, 卢文胜, 吕西林. 模拟地震振动台模型实用设计方法[J]. 结构工程师, 2003, 19(3): 30-33, 38.
- ZHOU Ying, LU Wen-sheng, LU Xi-lin. Practical Model Design Method of Shaking Table Tests[J]. Structural Engineers, 2003, 19(3): 30-33, 38.
- [25] 应怀樵, 刘进明, 沈松. 半功率带宽法与 INV 阻尼比法求阻尼比的研究[J]. 噪声与振动控制, 2006, 26(2): 4-6.
- YING Huai-qiao, LIU Jin-ming, SHEN Song. Half-power Bandwidth Method and INV Damping Ration Solver Study[J]. Noise and Vibration Control, 2006, 26(2): 4-6.