

郭光玲,徐乾,付江涛.基于钢筋拉压力传递的预制空心板残余抗震性能研究[J].地震工程学报,2022,44(1):29-35.DOI:10.20000/j.1000-0844.20210817002

GUO Guangling, XU Qian, FU Jiangtao. Residual seismic behavior of precast hollow slabs based on reinforcement tension and pressure transfer[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(1): 29-35. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210817002

基于钢筋拉压力传递的预制空心板 残余抗震性能研究

郭光玲, 徐 乾, 付江涛

(陕西理工大学 土木工程与建筑学院, 陕西 汉中 723000)

摘要: 为提升建筑质量,分析在循环往复荷载作用下预制空心板整体抗震性能,研究基于钢筋拉、压应力传递的预制空心板残余抗震性能。制备不含钢筋预制空心板结构试件;不含钢筋试件、未使用钢筋拉压力传递间接搭接试件、使用钢筋拉、压应力传递灌孔构造边缘构建试件,对各试件循环施加地震荷载,记录各试件性能变化情况。试验结果表明,相比于压剪破坏的预制空心板,压弯破坏的预制空心板的滞回曲线更加饱满,承载力安全裕度和抗震承载力均较高,在名义屈服点之前变化相似。在循环往复荷载作用下,各试件屈曲刚度与峰值刚度分别只有原始刚度的50%和20%,但使用钢筋拉、压应力传递灌孔构造边缘构建试件的刚度退化最小,且具有钢筋拉压力传递灌孔构造边缘构建试件的残余变形分布和残余抗震性能较好。

关键词: 钢筋拉力; 钢筋压力; 预制空心板; 残余抗震性能; 循环往复荷载; 滞回曲线; 刚度退化

中图分类号: TU317

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)01-0029-07

DOI:10.20000/j.1000-0844.20210817002

Residual seismic behavior of precast hollow slabs based on reinforcement tension and pressure transfer

GUO Guangling, XU Qian, FU Jiangtao

(School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, Shaanxi, China)

Abstract: To improve the building quality and analyze the overall seismic performance of precast hollow slabs under cyclic loading, the residual seismic performance of precast hollow slabs based on reinforcement tension and pressure transfer was studied. Different types of test pieces of the precast hollow slab without reinforcement were prepared, and the performance changes of each test piece were recorded under cyclic loading. The test results showed that, compared with the precast hollow slab with shear-compression failure, the hysteresis curve of the precast hollow slab with compression bending failure is fuller, and the safety margin of bearing capacity and

收稿日期:2021-08-17

基金项目: 陕西省教育厅专项项目:汉中农村房屋安全性分析及处理方法研究(14JK1137);国家自然科学基金项目:多因素耦合作用下风成沙丘条带结构形成与发展的力学机理研究(11702163);陕西省科技厅计划项目:环境激励下挡土墙结构损伤识别及稳定性预警研究(2019JQ-883)

第一作者简介: 郭光玲(1973—),女,陕西成固人,硕士,副教授,研究方向:工程结构抗震性能评价。E-mail:guoguangling2313@163.com。

seismic bearing capacity are higher. Under cyclic loading, the buckling stiffness and peak stiffness of each specimen are only 50% and 20% of the original stiffness, respectively. However, the stiffness degradation of the specimen with reinforcement tension and pressure transfer and prefabricated boundary elements is the smallest, and its residual deformation distribution and residual seismic performance are better.

Keywords: reinforcement tension; reinforcement pressure; precast hollow slab; residual seismic performance; cyclic loading; hysteretic curve; stiffness degradation

0 引言

钢筋拉、压应力传递的预制空心板能够组成装配式建筑结构中的预制剪力墙,该墙是最为主要的建筑受力结构,也就是说当发生地震时,由钢筋拉、压应力传递的预制空心板构成的剪力墙将承受大部分地震荷载^[1-3]。这种装配式建筑具有较高生产效率与构件质量,在钢筋拉压力传递的预制空心板的基础上浇筑混凝土,不用重复开展湿作业,缩短混凝土养护时间,提升整体建筑效率,而且钢筋拉压力传递的预制空心板已经将拉压力等预应力考虑进去,所以空心板中的钢筋一般可以承受更多地震荷载,在建筑抗震性能中发挥重要作用。而且使用钢筋拉、压应力传递的预制空心板构建的剪力墙减少建筑工序,能够降低建筑过程中带来的环境污染物含量,实现生态环境可持续发展^[4]。

本文所研究的钢筋拉压力传递的预制空心板具有高抗弯刚度、低自重等特点,将这种空心板应用于剪力墙构建建筑结构时能够增加建筑的开间面积还能缩短建筑高度,降低地震荷载对于建筑的损害,在各种建筑形式中应用广泛^[5-6]。正是这种广泛应用性,相关领域学者针对空心板抗震性能进行研究,钱稼茹^[7]等研究连梁和空心板剪力墙的联合抗震性能,并取得初步研究成果,但是研究内容过于注重连梁的抗震性能,忽视空心板所发挥的作用;李奉阁^[8]等研究的是一种钢筋混凝土框架结构的剪力墙抗震性能,该种结构实际上是一种需要浇筑的混凝土结构,环保性和成本节约效果较差,无法提升新型剪力墙的性能。为此,本文基于钢筋拉、压应力传递,制备不同试件开展试验,研究预制空心板材料抗震性能。

1 材料方法

1.1 试件制备

本文研究中共设计三种试件编号分别为试件 A、试件 B 以及试件 C,三种试件的组成结构均包含顶、地梁与剪力墙,同时均为预制边缘构件,预制空心板组成剪力墙,厚度与肢长分别为 1 500 mm 与

250 mm,管控边缘作为试件的两端组成形式,混凝土为后浇模式,强度均为 C30。各试件的相关数值如下:

(1) 试件 A 剪力墙高度与空度的比值为 1.3,破坏模式属于压剪破坏,未使用钢筋结构作为支撑,依据强弯弱剪设计思想设计,使用接缝连接试件构建。

(2) 试件 B 剪力墙高度与空度的比值为 1.8,破坏模式属于压弯破坏,设计思想为强剪弱弯,使用钢筋间接搭接方式构建试件,钢筋作为骨架纵向贯通分布在预制空心板边缘竖向内孔,对内只发挥抗裂性能,该部位使用的纵筋以及水平分布的钢筋直径分别为 8 mm 与 10 mm。未使用钢筋拉压力传递性能^[9]。

(3) 试件 C 剪力墙高度与空度的比值为 1.8,设计概念为强剪弱弯,破坏模式属于压弯破坏,根据钢筋拉压力传递性能,使用灌孔构造边缘构件,钢筋结构在预制空心板内部分布,剪力墙中的竖向钢筋与通过地梁中的竖向钢筋搭接在一起,内部水平横筋间距约为 20 cm,纵筋直径约为 10 mm,水平横筋直径约为 12 mm。尽管总体上试件 B 与试件 C 的构建大同小异,但是由于使用钢筋拉、压力传递性能,在一定程度上优化了试件 C 的钢筋布置形式,试件 C 使用更少的钢筋就能实现工作^[10]。

试件制作过程为:制作装预制空心板和地梁钢筋笼。在注浆地梁前,对边缘构件进行预埋,然后,注浆拼缝预制空心板内墙体竖向钢筋。当地梁混凝土为设定强度后,进行地梁顶面凿毛处理。再对预制空心板、钢筋、支撑模具进行混凝土浇筑。试件制作过程如图 1 所示。

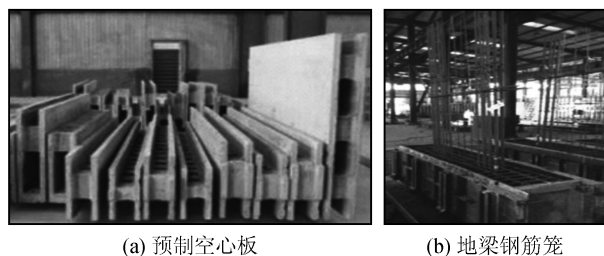


图 1 试件制作过程

Fig.1 Fabrication process of test piece

1.2 材料性能测试

各试件中的钢筋在结构中发挥支撑作用,不同直径钢筋强度性能与屈服应变如表 1 所列,为后续试验开展提供基础数据^[11]。钢筋的屈服应变表示为:

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$$
 (1)

式中: E_s 表示弹性模量; f_y 表示抗拉屈服强度,该值设定为 2.5×10^5 MPa。

表 1 钢筋性能与屈服应变

Table 1 Properties and yield strain of reinforcement			
钢筋直径/mm	8	10	12
抗拉屈服强度/MPa	472.6	532.3	451.1
极限强度/MPa	672.3	685.8	604.3
屈服应变/($\times 10^{-6}$)	2 419	2 717	2 311
泊松比	-	0.25	-
弹性模量/($N \cdot mm^{-2}$)	-	2.0×10^5	-
伸长率/%	10.8	11.2	11.5

每次试验使用混凝土浇筑空心板组成试件中的剪力墙部分,为测量试件抗压强度,混凝土浇筑完成后,切割一小部分试件块,记录抗压强度测试结果如表 2 所列。加权平均预制空心板抗压强度与后浇混凝土的抗压强度后获得试件平均抗压强度^[12-13]。

表 2 抗压强度测试结果

Table 2 Test results of compressive strength			
试件编号	A	B	C
预制空心板抗压强度/MPa	31.1	32.9	35.5
后浇混凝土抗压强度/MPa	30.5	30.5	30.5
平均抗压强度/MPa	30.8	31.7	33.0
轴压力/kN	1 370	1 527	1 208
墙长/mm	1 800	1 400	1 600
名义屈服荷载/kN	863.1	486.5	530.6

1.3 布置测试点与地震荷载加载方式

本文主要研究预制空心板残余抗震性能,因此需要对各个试件施加地震荷载,本文试验所使用的加载仪器为 MTS 电液伺服作动器。加载制度曲线如图 2 所示。

试验开展初期,设定预定值为 35 kN,针对每个

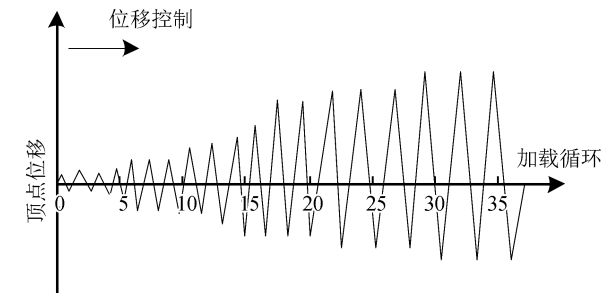


图 2 加载制度曲线
Fig.2 Loading system curve

试件,在顶部使用竖向动作器设定值的竖向拉力,该操作完成后再次施加低周荷载。设置 3.5 kN 作为初级荷载,反复加载后使各个试件都出现裂缝,此时升高荷载至 5.5 kN,直至各个时间达到屈服后停止加载,但是仍然对试件加载位移,级差是实测屈服位移,各级位移均循环 3 次加载,直至试件不能再承载方可停止试验^[14]。加载过程如图 3 所示。

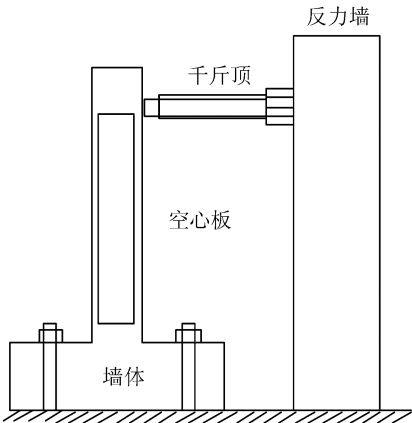


图 3 加载过程
Fig.3 Loading process

布置测点位置:将两个位移计分别布置在试件的顶部加载点和底梁上,由此监测底梁位移情况以及试件的整体位移发生情况。将应变片布置在试件的翼缘位置和纵筋位置,由此监测试件的应变变化^[15]。测点布置位置如图 4 所示。

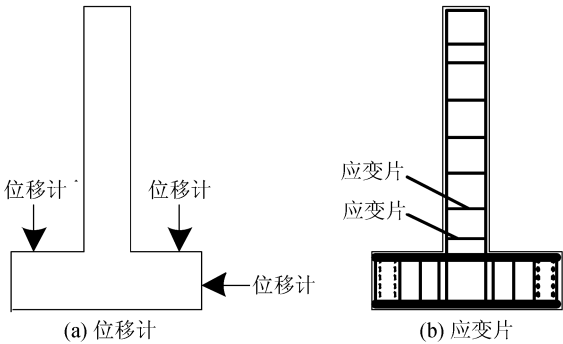


图 4 测点布置位置
Fig.4 Location of measuring points

为获得钢筋应变分布规律,在试件 B 的底部以及试件 C 的上端、底部截面布置监测点,试件 B 与试件 C 底部测试点布置前端编号分别为 $B_1 \sim B_4$ 与 $C_1 \sim C_4$,接缝处编号分别为 $B_5 \sim B_8$ 与 $C_5 \sim C_8$,末端编号分别为 $B_9 \sim B_{10}$ 与 $C_9 \sim C_{10}$;试件 C 顶部截面前端编号为 $C_{11} \sim C_{14}$,接缝编号为 $C_{15} \sim C_{16}$,末端编号为 $C_{17} \sim C_{20}$ 。

3 个试件的最终破坏照片如图 5 所示。其中,试件 A 为压剪破坏,试件 B 和试件 C 为压弯破坏。

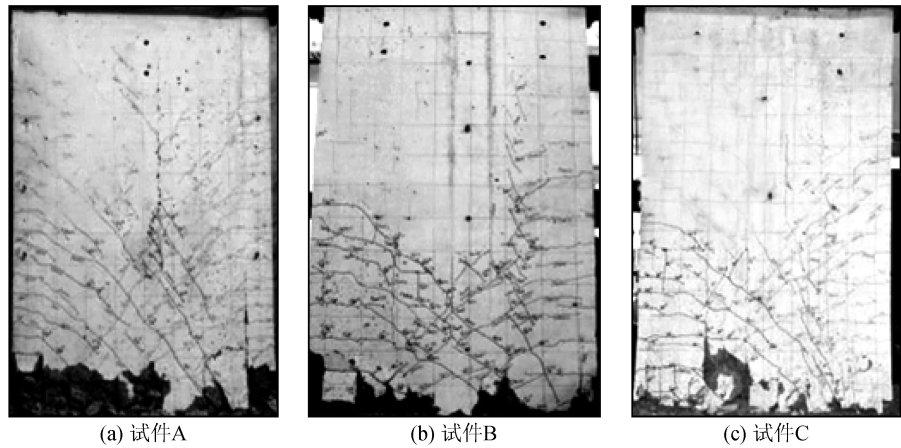


图 5 3 个试件的最终破坏照片

Fig.5 Final destruction photos of 3 specimens

2 试验结果

2.1 试件滞回性能试验结果

本文所构建的试件受到地震加载影响后,试件

水平力发生变化,各试件的骨架曲线与滞回变化关系如图 6 所示。

受筋拉压力传递影响导致试件钢筋受到拉力所产生的屈服被称作钢筋屈服强度;根据图 6(a)的骨

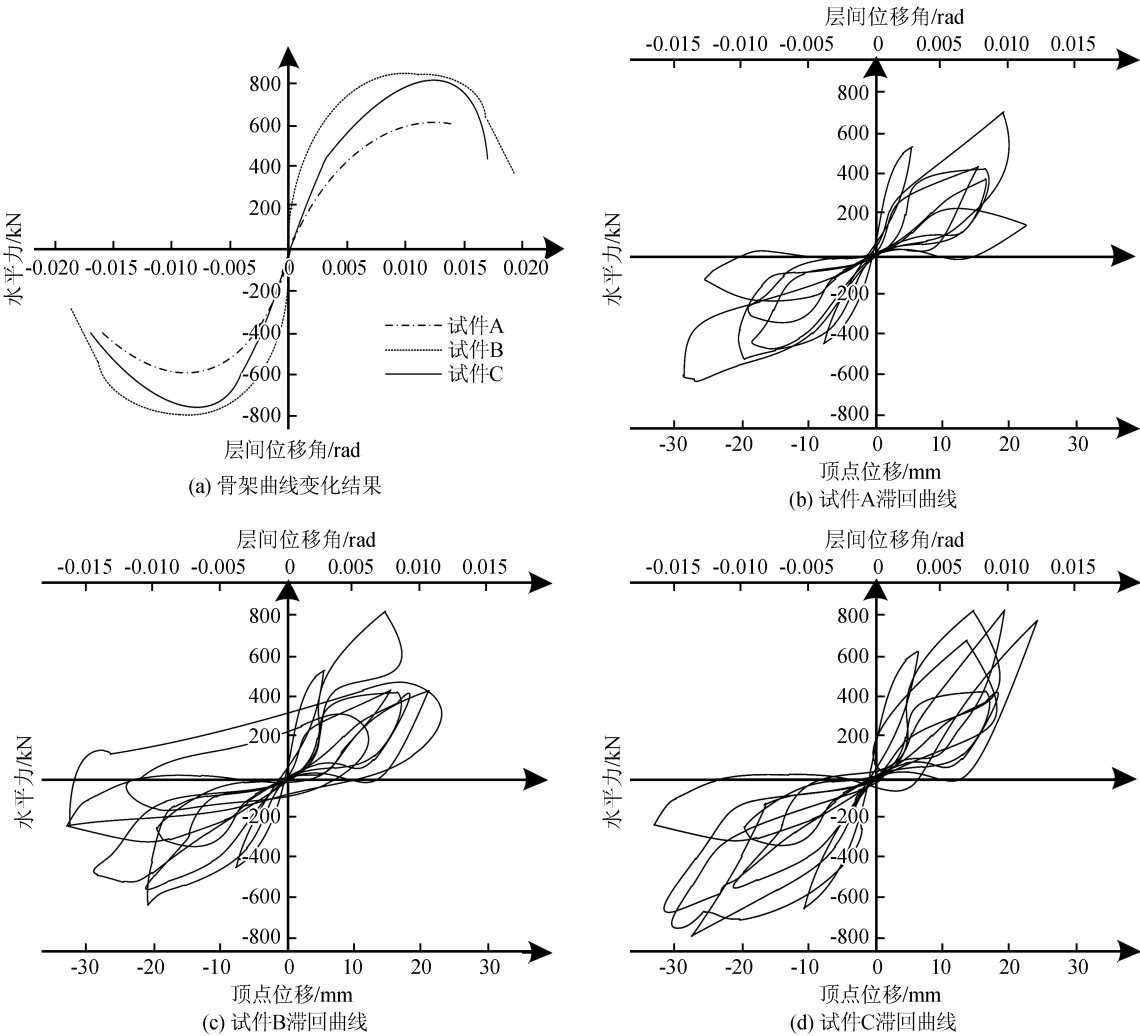


图 6 各试验试件骨架曲线与滞回曲线

Fig.6 Skeleton curve and hysteretic loop curve of each test piece

架曲线以及能量法确定名义屈服;搜索水平力极限值,该值对应的点就是峰值点;当骨架曲线达到 0.86 倍水平力极限值时所对应的点就是极限点;根据混凝土相关规定计算墙体受压承载力 F_F 以及对应地震荷载下的墙体受剪承载力的在墙顶发挥作用的水平力 F_S, F_C 是这两个值中的较小值。各试件滞回变化相关系数试验结果如表 3 所列。

综合图 6 与表 3 的试验结果可知,相比于试件

A 试件 B 和试件 C 的滞回曲线更饱满,从图 6(b)中能够看出,在该试件上加载地震荷载后,滞回曲线出现更加显著收缩情况,峰值荷载出现以后,水平力与之呈现反比例关系。综合图 6(a)图 6(c)和图 6(d)可以看出,试件 B 和试件 C 在到达名义屈服点之前各曲线变化规律基本一致,但是到达该点之后,试件 C 超过试件 B 承载力,也就是说试件 C 在地震条件下具有更加高效的受力性能。

表 3 滞回性能试验结果
Table 3 Experimental results of hysteresis performance

加载方向		试件名称								
		A			B			C		
		正向	负向	平均	正向	负向	平均	正向	负向	平均
钢筋屈服强度	水平力/kN	758.6	682.6	721.4	411.8	417.1	414.6	465.4	477.8	471.7
	层间位移角/rad	1/238	1/255	1/246	1/437	1/477	1/456	1/476	1/422	1/448
名义屈服点	水平力/kN	846.7	878.4	862.6	489.7	479.5	484.6	554.6	498.3	527.5
	层间位移角/rad	1/183	1/156	1/169	1/296	1/341	1/317	1/278	1/352	1/311
峰值荷载点	水平力/kN	1 131.5	1 157.5	1 144.5	567.2	558.9	564.1	648.8	593.9	622.5
	层间位移角/rad	1/71	1/96	1/82	1/112	1/112	1/112	1/79	1/123	1/93
极限点	水平力/kN	878.5	898.6	889.6	483.8	478.4	481.1	554.8	486.5	528.7
	层间位移角/rad	1/64	1/58	1/58	1/63	1/72	1/67	1/54	1/55	1/55
承载力计算值	F_F /kN		1 282.7			493.7			488.7	
	F_S /kN		583.6			582.1			528.9	
	F_C /kN		583.6			483.7			488.7	
峰值荷载点水平力与 F_C 比值		1.86	1.88	1.88	1.26	1.25	1.26	1.38	1.28	1.34

在表 3 中能够看出各试件峰值荷载点水平力和 F_C 之间的比值均超过 1.25,根据相关规定对比本文计算结果可以看出,各试件承载力安全裕度较高。三个试件的层间位移角都超过 1/120,这一情况符合相关规定中剪力墙抗震承载能力需求。试件 A 具有压剪破坏,但是层间位移角的变化情况与压弯破坏试件 B 和试件 C 的规律一致,出现这种情况主要是由于试件 A 中存在竖向错动,这种情况造成试件 A 受力效果较差,这一特点也直接影响剪力墙在地震情况下的变形能力。

2.2 试件刚度性能试验结果

计算墙体试件刚度的方法是首次地震荷载正反两个方向水平力极大值的绝对值与顶点相对应的水平位移绝对值相除之后的结果。试件初始等效刚度设置为 1/2 050。刚度退化曲线如图 7 所示。

从图 7 中能够看出,各试件的水平位移由负值升高至 0 mm 时,等效刚度逐渐上升,当水平位移继续升高时,各个试件的等效刚度呈现出下降趋势,试件受到地震荷载影响,试件发生屈服。不同试件等效刚度统计结果如表 4 所列。

从表 4 中能够看出,各试件的屈曲刚度与原始刚度相比下降幅度较大,屈曲刚度降至原始刚度

50%以下,峰值刚度不足原始刚度的 20%,由此说明,不同结构试件在地震荷载影响下均发生不同程度刚度退化,其中,试件 C 的刚度退化程度最低,也就是说相比之下试件 C 刚度最好,抗震性能最佳。

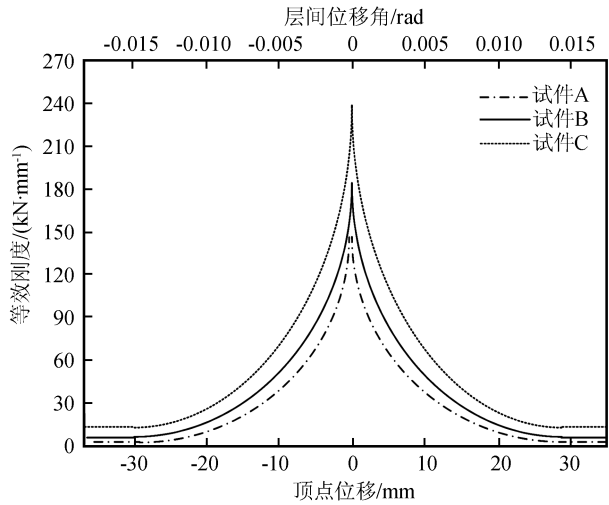


图 7 刚度退化曲线
Fig.7 Stiffness degradation curve

2.3 试件钢筋应变分布试验结果

由于试件 A 未使用钢筋结构仅使用接缝连接实现预制空心板剪力墙试件的构建,所以本文节研

究钢筋应力变化情况试验时不对试件 A 加以考虑。受力状态差异下试件上端和底部钢筋应变分布如图 8 所示。图 8 中 α 和 β 分别用来表示受拉屈服条件下与空心板和竖向孔相对应的定点水平位移。

从图 8 中能够看出,试件发生屈服之前,各试件中的钢筋应变分布变化情况与理论屈服保持一致,也就是说各个试件中的钢筋应变屈服与平截面假定理论相符。试件发生屈服之后各试件的应变分布仍

表 4 不同试件等效刚度统计结果

Table 4 Statistical results of equivalent stiffness of different specimens

试件名称	加载方向					
	A		B		C	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向
原始刚度/(kN·mm ⁻¹)	79.53	85.27	134.71	138.64	183.32	208.57
开裂刚度/(kN·mm ⁻¹)	51.64	67.18	97.72	83.88	116.95	163.49
屈服刚度/(kN·mm ⁻¹)	27.46	29.68	48.18	54.48	59.19	69.87
峰值刚度/(kN·mm ⁻¹)	10.06	10.52	20.55	20.24	28.34	27.57
极限刚度/(kN·mm ⁻¹)	4.69	5.17	11.21	12.68	12.83	14.61
原始刚度与屈服刚度比值/%	34.71	34.88	39.19	42.97	34.84	35.93
原始刚度与峰值刚度比值/%	13.78	12.29	16.84	16.11	16.92	14.51

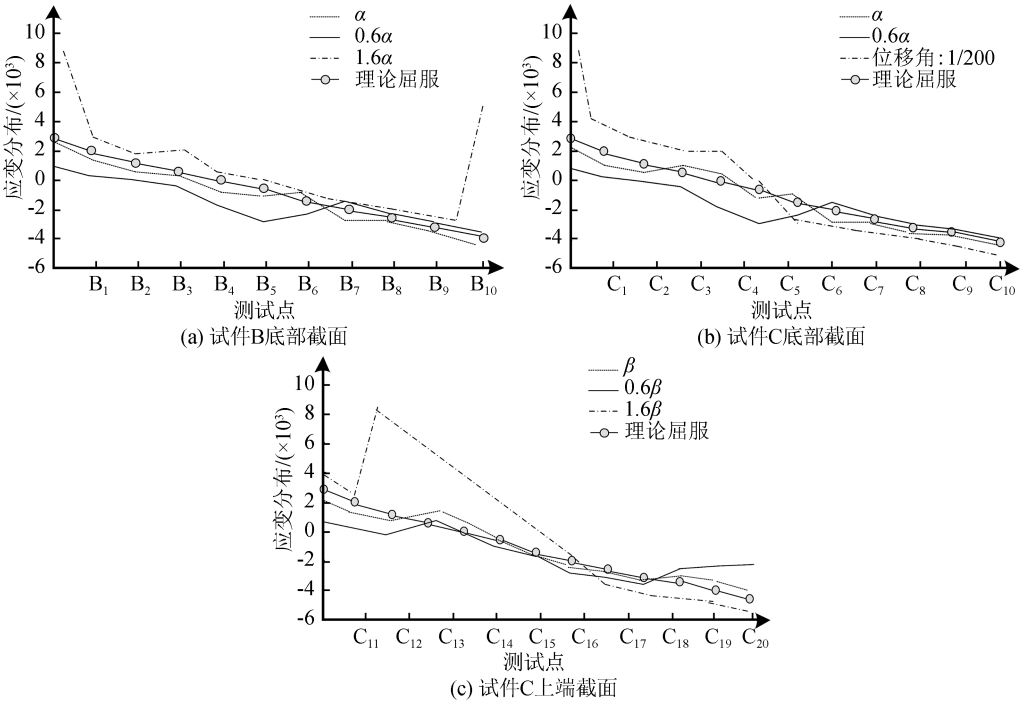


图 8 钢筋应变分布

Fig.8 Strain distribution of reinforcement

旧与理论屈服保持良好的 consistency,也就证明试件中的钢筋能够发挥协同作用,共同支撑地震荷载下的剪力墙结构。试件 C 钢筋本身具备压拉力传递,同时还是灌孔构造边缘构件,能够充分发挥支撑作用,所以应力分布效果更好。施加地震荷载以后,钢筋结构受到拉力影响发生屈服,但是试件 C 本身存在拉、压应力传递,所以残余变形分布较好。

3 结论

研究基于钢筋拉压力传递的预制空心板残余抗震性能,制备不同钢筋结构的形式的预制空心板组

合试件,加载相同的地震荷载,观察是否使用钢筋拉压力传递模式是否影响预制空心板的抗震性能,试验结果表明:

- (1) 相比于压剪破坏的预制空心板,压弯破坏的预制空心板的滞回曲线更加饱满,承载力安全裕度和抗震承载力均较高,名义屈服点之前变化相似。在加载地震荷载后,使用钢筋拉压力传递灌孔构造边缘构建试件具有更加高效的受力性能。
- (2) 在循环往复荷载作用下,各试件屈服刚度与峰值刚度分别只有原始刚度的 50%和 20%,不同结构试件均发生不同程度刚度退化,但使用钢筋拉

压力传递灌孔构造边缘构建试件的刚度退化程度最小。相比之下,使用钢筋拉压力传递灌孔构造边缘构建试件的刚度最好,能够有效提高预制空心板残余抗震性能。

(3) 在试件发生屈服后,使用钢筋拉压力传递灌孔构造边缘构建试件的应力分布效果较好,能够有效发挥协同和支撑作用,共同支撑地震荷载下的剪力墙结构。在施加地震荷载后,钢筋结构受到拉力影响发生屈服,但是使用钢筋拉压力传递灌孔构造边缘构建试件本身存在压拉力传递,其残余变形分布较好。

参考文献(References)

- [1] 梁兴文,史纪从,于婧,等.免拆超高性能混凝土模板钢筋混凝土柱抗震性能研究[J].地震工程学报,2020,42(3):579-588,606.
LIANG Xingwen,SHI Jicong,YU Jing,et al.Seismic behavior of reinforced concrete columns with permanent template of ultra-high-performance concrete[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(3):579-588,606.
- [2] 李梦南,许清风,邵棚,等.带约束预应力混凝土空心板整浇楼面受力性能研究[J].结构工程师,2020,36(4):114-119.
LI Mengnan,XU Qingfeng,SHAO Peng,et al.Study on flexural performance of prestressed concrete hollow-core slab integrated floor with constraints[J].Structural Engineers,2020,36(4):114-119.
- [3] 杨怀茂,韩兆友,刘高,等.既有钢筋混凝土空心板梁抗剪承载力分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(6):1089-1092.
YANG Huaimao,HAN Zhaoyou,LIU Gao,et al.Shear capacity analysis of existing reinforced concrete hollow slab beam[J].Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2019,43(6):1089-1092.
- [4] 魏鹏宇,刘鑫,罗军,等.EPS聚苯复合轻质填充块现浇钢筋混凝土空心楼板施工技术[J].施工技术,2019,48(2):126-128.
WEI Pengyu,LIU Xin,LUO Jun,et al.Construction technology of cast-in-place reinforced concrete hollow slab with EPS polyphenylene composite lightweight filling block[J].Construction Technology,2019,48(2):126-128.
- [5] 李爱影,张微敬.预制双向孔剪力墙抗震性能有限元分析[J].土木工程与管理学报,2019,36(6):166-170,177.
LI Aiyang,ZHANG Weijing.Finite element analysis on seismic behavior of precast concrete two-way hollow shear wall[J].Journal of Civil Engineering and Management,2019,36(6):166-170,177.
- [6] 王黎园,唐朝阳,陈永健,等.带锚固板连接钢筋的空心板梁铰缝试验研究[J].地震工程与工程振动,2020,40(4):140-147.
WANG Liyuan,TANG Chaoyang,CHEN Yongjian,et al.Experimental study on hinged joint of hollow slab & beam with headed reinforcement[J].Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2020,40(4):140-147.
- [7] 钱稼茹,崔瑶,张薇,等.装配式空心板剪力墙结构叠合连梁抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(1):51-60.
QIAN Jiaru,CUI Yao,ZHANG Wei,et al.Experimental study on seismic behavior of composite coupling beams in assembled hollow panel shear wall structure[J].Journal of Building Structures,2020,41(1):51-60.
- [8] 李奉阁,倪晶.基于钢筋混凝土框架-钢板剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构,2020,50(5):116-119,98.
LI Fengge,NI Jing.Research on seismic performance of reinforced concrete frame-steel plate shear wall[J].Building Structure,2020,50(5):116-119,98.
- [9] 蔡忠奎,王震宇,苑澈.高强钢筋增强节段拼装桥墩抗震性能分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2020,42(3):312-318.
CAI Zhongkui,WANG Zhenyu,YUAN Wei.Seismic performance of precast segmental bridge columns reinforced with high-strength steel bars[J].Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition),2020,42(3):312-318.
- [10] 李潇然,赵作周,钱稼茹,等.竖向钢筋混合连接预制剪力墙抗震性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(10):1-9.
LI Xiaoran,ZHAO Zuozhou,QIAN Jiaru,et al.Experimental studies on seismic performance of precast shear walls with hybrid vertical rebar connections[J].Journal of Harbin Institute of Technology,2020,52(10):1-9.
- [11] 徐路勤,鲁小罗,周建庭.空心板桥考虑服役劣化的地震损伤破坏模式研究[J].振动与冲击,2020,39(16):222-230.
XU Lueqin,LU Xiaoluo,ZHOU Jianting.A study on damage and failure modes of a voided slab bridge under earthquake excitations considering structural deterioration[J].Journal of Vibration and Shock,2020,39(16):222-230.
- [12] 徐亚林,顾万,肖鹏,等.基于协同工作系数的空心板桥铰缝性能评估[J].扬州大学学报(自然科学版),2020,23(3):59-64.
XU Yalin,GU Wan,XIAO Peng,et al.Performance estimate of hinge joint of hollow slab bridge based on co-working coefficient[J].Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition),2020,23(3):59-64.
- [13] 满孝卫,杨星墀,刘朵,等.地震作用下斜交空心板桥地震响应分析及其评价[J].南京工业大学学报(自然科学版),2020,42(3):319-325.
MAN Xiaowei,YANG Xingchi,LIU Duo,et al.Analysis and evaluation for seismic response of skew hollow slab bridge under seismic action[J].Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition),2020,42(3):319-325.
- [14] 黄海新,张望欣,程寿山,等.钢筋混凝土圆截面桥墩抗震加固方式对比分析[J].世界地震工程,2020,36(2):163-171.
HUANG Haixin,ZHANG Wangxin,CHENG Shoushan,et al.Comparison and analysis of seismic reinforcement methods for circular reinforced concrete bridge piers[J].World Earthquake Engineering,2020,36(2):163-171.
- [15] 施海峰,蔡京洋,邓耀,等.刚接空心板截面的优化及试验[J].筑路机械与施工机械化,2019,36(2):70-74.
SHI Haifeng,CAI Jingyang,DENG Yao,et al.Section optimization and experimental study of rigidly connected hollow slab[J].Road Machinery & Construction Mechanization,2019,36(2):70-74.