

文章编号:1007-6069(2017)04-0211-11

# 装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙足尺子 结构拟静力试验研究

焦安亮<sup>1</sup>,张中善<sup>1</sup>,郜玉芬<sup>1</sup>,郑培君<sup>1</sup>,范峰<sup>2</sup>

(1. 中国建筑第七工程局有限公司,河南 郑州 450000; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:**对装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙的3层足尺子结构的拟静力试验结果进行分析,分别得到子结构在开裂、裂缝发展、较宽裂缝、竖向裂缝和极限状态共5种工况下所对应的荷载。分析了拟静力试验的荷载位移曲线,可以发现子结构的正刚度负刚度相差不大,刚度在循环荷载刚开始作用时衰减较快,但随着循环周数的不断增加,刚度变化变缓;分别绘制并分析了3层的荷载位移滞回曲线,发现每层结构的滞回耗能现象比较明显,可知:结构的延性系数较大;分析钢筋应变曲线可知:环筋扣合锚接可以很好的传递外部荷载作用。可以证明:该新型建筑体系具有很好的延性;该结构的整体抗震性能较好。

**关键词:**环筋扣合锚接;足尺子结构;拟静力试验

中图分类号:TU973.16,TU317.1

文献标志码:A

## Quasi-static test of full-scale structure on precast shear walls with annular closed reinforcements

JIAO Anliang<sup>1</sup>,ZHANG Zhongshan<sup>1</sup>,GAO Yufen<sup>1</sup>,ZHENG Peijun<sup>1</sup>,FAN Feng<sup>2</sup>

(1. China Construction Seventh Engineering Division Co. Ltd, Zhengzhou 45000, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute Technology Harbin 150090, China)

**Abstract:** In order to study the seismic behavior of precast shear walls with annular closed reinforcements, a three-story full-scale model is built in laboratory for an elastic quasi-static test. This paper introduces five kinds of working condition, including crack appears, crack developments, crack widely, vertical cracks and the limit state, then its corresponding loading is gotten. The quasi-static test loading-displacement is analyzed to research the stiffness degradation, hysteretic curve and so on. The result shows that the positive and negative stiffness is nearly equal, the stiffness decays quickly under cyclic loading, but with the cyclic number increasing, the stiffness change is slow. The hysteretic curves analysis shows that energy dissipation phenomenon of each layer is obvious, the ductility coefficient is larger. It can be seen from the strain curve of the reinforcements that connection form such as connection of annular closed reinforcements can pass external loading well. The above results show that this new building system has a very good ductility, so the structure of the overall seismic performance is good.

**Key words:** annular closed reinforcement; full scale structure; quasi-static test

## 引言

装配式住宅在欧美等发达国家中使用较广泛,北美地区主要以美国和加拿大为代表<sup>[1]</sup>,两国通过预制

收稿日期:2016-09-07; 修订日期:2016-11-04

作者简介:焦安亮(1960-),男,教授级高级工程师,博士,主要从事装配式建筑结构研究。E-mail:jiaol@cscec.com

混凝土协会 (PCI) 对其进行长期的研究与推广, 两国的预制混凝土相关规范也比较完善。北美的装配式建筑主要包括预制外墙和预制构件两大类, 充分发挥工业化与技术经济的优势。近年来, 美国与加拿大非常重视结构的抗震性能, 尤其是中高层预制结构工程的抗震性能, 预制混凝土协会出版了《预制混凝土结构抗震设计》一书, 系统总结了预制结构的抗震设计成果, 对于装配式建筑的推广具有很好的指导意义。

从国内外的研究和应用经验来看, 装配式剪力墙结构中存在大量的水平接缝、竖向接缝以及节点, 将预制构件连接成整体, 使得整个结构具有足够的承载能力、刚度和延性, 以及抗震、抗偶然荷载、抗风的能力。这些节点和接缝的受力性能直接决定结构的整体性能, 因此, 受力合理、方便施工的墙板节点和接缝设计是装配式剪力墙结构设计的关键技术, 是决定该结构形式能否推广应用的重要影响因素。目前, 装配式混凝土结构中钢筋连接主要采用套筒连接、浆锚连接和机械连接 3 种方式。虽然该结构体系的预制化率高, 但拼缝的连接构造比较复杂以及施工难度较大, 难以保证完全等同于现浇剪力墙结构。

正是由于以上总结的装配式建筑的众多优点, 我国近些年加大了装配式建筑的推广与应用的力度。我国的一些专家和学者为进一步推广装配式建筑, 已对装配式建筑体系的各项力学性能做了大量研究。对于这类新型的建筑体系来说, 对其各项力学性能开展试验研究是必不可少的, 但子结构试验与其他试验相比, 更具有说服力, 能够很好地反应建筑整体的力学性能, 目前国内已有部分学者与单位对装配式建筑开展了结构试验研究<sup>[2-5]</sup>见表 1。

表 1 国内装配式建筑子结构试验现状

Table 1 Domestic assembly of sub-structure test status quo

单位	结构形式	试验模型	竖向荷载	拟静力试验	拟动力试验
同济大学	框架结构	缩尺	有	有	有
东南大学	剪力墙结构	缩尺	无	无	有
哈尔滨工业大学	剪力墙结构	足尺	无	有	有

为了进一步推广与解决工程实际问题, 基于预制装配式剪力墙体系, 并且总结之前的研究, 提出了一种装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙结构体系。对该新型建筑体系构件间连接的力学性能, 已做过大量的试验研究, 发现这种新型的建筑体系具有优良的连接性能。比如, 开展了该体系系列剪力墙片的拟静力滞回试验, 通过试验发现环筋扣合锚接的连接方式能够保证剪力墙的各项力学性能与传统现浇剪力墙基本相当等。为深入验证该建筑体系的合理性和可行性, 开展装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙子结构拟静力试验研究就显得尤为重要。

## 1 试验概况

### 1.1 子结构模型设计

试验的原结构为 30 层剪力墙结构, 抗震设计等级为 2 级, 7 度设防, II 类场地, 试验取原结构底部 3 层足尺寸子结构进行研究, 子结构整体尺寸为 6 200 mm × 3 200 mm, 层高三 000 mm, 墙体厚度为 200 mm, 楼板采用后浇叠合楼板, 楼板预制部分的厚度为 60 mm, 现浇厚度为 50 mm。子结构锚固底梁尺寸为 455 mm × 500 mm。子结构模型墙体水平连接和暗梁钢筋采用环筋扣合锚接, 暗柱的竖向连接处钢筋采用一级螺栓套筒连接。子结构平面图和立面图如图 1 所示。

### 1.2 子结构模型拆分

与传统的现浇混凝土结构相比, 装配式建筑需要将结构进行拆分。试验将子结构模型拆分为多个部件, 各部件在工厂内制作完成并运到施工现场进行拼装。考虑到部件生产的可行性、部件运输和吊装的限制, 将子结构模型均拆分为一字型墙体。

子结构模型的现浇部分采用 C45 免振捣混凝土, 预制墙体部分采用 C40 混凝土, 子结构模型的所有钢筋均采用 HRB400 钢筋。根据以上对子结构拆分与钢筋布置, 将拆分构件分为 5 类, 如图 2 所示。

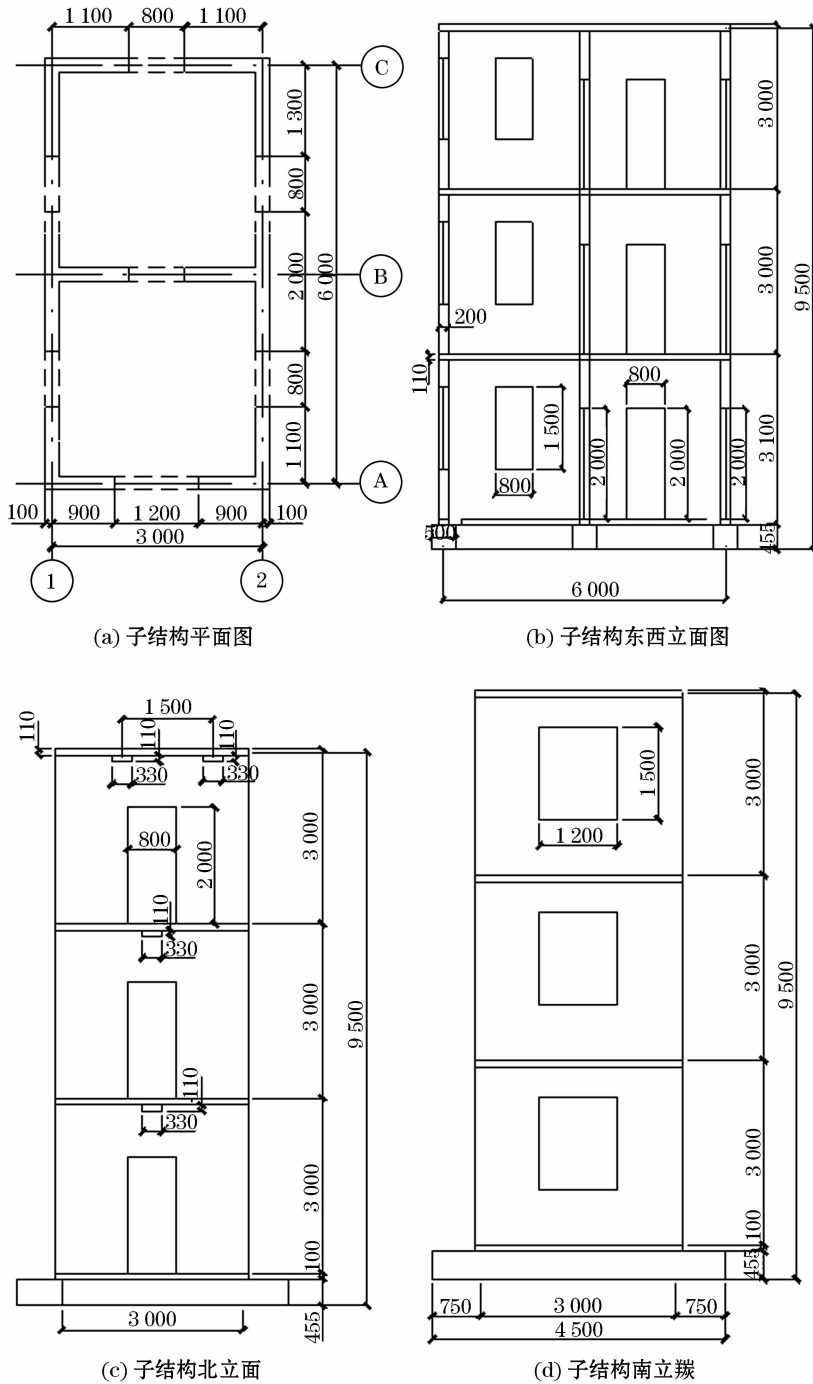


图 1 子结构试验模型尺寸图

Fig. 1 Dimensional drawings of substructure test models

### 1.3 子结构模型的材性试验

在子结构模型预制构件的浇筑过程中,每搅拌一锅混凝土,均留下 3 块混凝土标准试块(150 mm × 150 mm × 150 mm),在温度为 18℃ 和湿度 95% 的环境下,养护期均超过 28 天。为进一步验证混凝土的质量,对部分混凝土试块在养护 7 天后做抗压试验,从表 2 的试验结果可以看出:试块均达到 C40 混凝土抗压强度要求。施工现场后浇筑部分,每浇筑 1 个构件(暗柱、暗梁或楼板),留下 3 块标准混凝土试块,该部分混凝土为通过大量试验研究并最终确定配合比方案的免振捣混凝土,在标准养护条件下养护期超过 15 天。

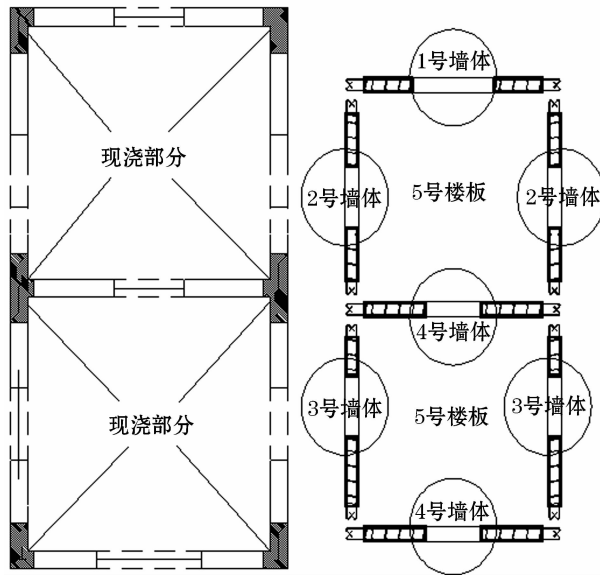


图2 子结构墙体组成及拆分图

Fig. 2 Sub-structure wall composition and split map

表2 子结构预制构件混凝土试块养护7天抗压试验数据

Table 2 Compression test data of sub-structure precast concrete test block after 7 days

试件 养护期 /天	试件抗压破坏荷载/kN			试件抗压强度/MPa			标准试件 强度 /MPa
	试件 1	试件 2	试件 3	试件 1	试件 2	试件 3	
7	559.95	590.22	547.82	56.0	59.0	54.8	56.6
7	405.86	423.99	411.23	40.6	42.4	41.1	41.4
7	504.21	553.11	577.84	50.4	55.3	57.8	54.5
7	283.4	302.3	281.9	28.3	30.2	28.2	28.9
8	605.21	591.73	610.14	60.5	59.2	61	60.2
7	278.88	292.8	281.61	27.9	29.3	28.2	28.4
7	252.48	252.18	267.86	25.2	25.2	26.8	25.8
7	456.1	478.8	476.92	45.6	47.9	47.7	47.1
7	507.18	580.77	506.79	50.7	58.1	50.7	53.2
8	481.43	447.52	461.59	48.1	44.8	46.2	46.4
8	412.09	397.09	413.93	41.2	39.7	41.4	40.8
7	298.08	338.76	292.76	29.8	33.9	29.3	31.0
7	383.46	341.73	379.48	38.3	34.2	37.9	36.8
7	485.43	494.97	529.27	48.5	49.5	52.96	50.3
7	381.09	390.35	380.74	38.1	39.0	38.1	38.4
10	320.88	348.25	353.58	32.1	34.8	35.4	34.1
9	505.08	510.48	487.04	50.5	51.0	48.7	50.1
7	461.89	451.91	438.44	46.2	45.2	43.8	45.1
7	508.05	488.18	454.72	50.8	48.8	45.5	48.4
7	429.14	408.94	456.92	42.9	40.9	45.7	43.2

子结构模型中的钢筋抗拉试验结果,见表3。钢筋试件分别采用预制构件部分和现浇部分各自同批次的钢筋进行材性试验。从以上子结构各部分的材性试验结果可以看出:预制部分和现浇部分的材料均满足

强度要求,可以进行试验。

### 1.4 加载方式与量测内容

试件的拟静力试验依照《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101-96)中的规定进行加载。试验采用位移控制对子结构模型进行低周往复加载,使结构从弹性阶段发展到塑性阶段,直至加载破坏。拟静力试验通过使用第3层的两个作动器(±1 000 kN、±2 000 kN,其中2 000 kN作动器所能提供的最大拉力为1 100 kN,最大推力为1 800 kN)对子结构施加水平荷载,作动器推力为正向加载,拉力为负向加载,每级位移控制加载循环两次,子结构拟静力试验加载如图3所示。试验根据作动器的加载能力,当2 000 kN作动器达到最大拉力后,仅对子结构施加推力,具体加载制度如图4所示。对拟静力试验不施加竖向荷载,试验的位移计布置、应变片布置与拟动力试验相同。

表3 子结构模型的钢筋材性试验

Table 3 Steel reinforcement test of sub-structural model

钢筋直径 /mm	屈服强度/MPa		极限强度/MPa	
	预制部分	后浇部分	预制部分	后浇部分
8	434.4	500.2	511.1	588.5
10	509.6	505.1	599.6	594.2
12	375.1	375.1	532.1	532.1
14	348.9	370.9	457.6	535.6

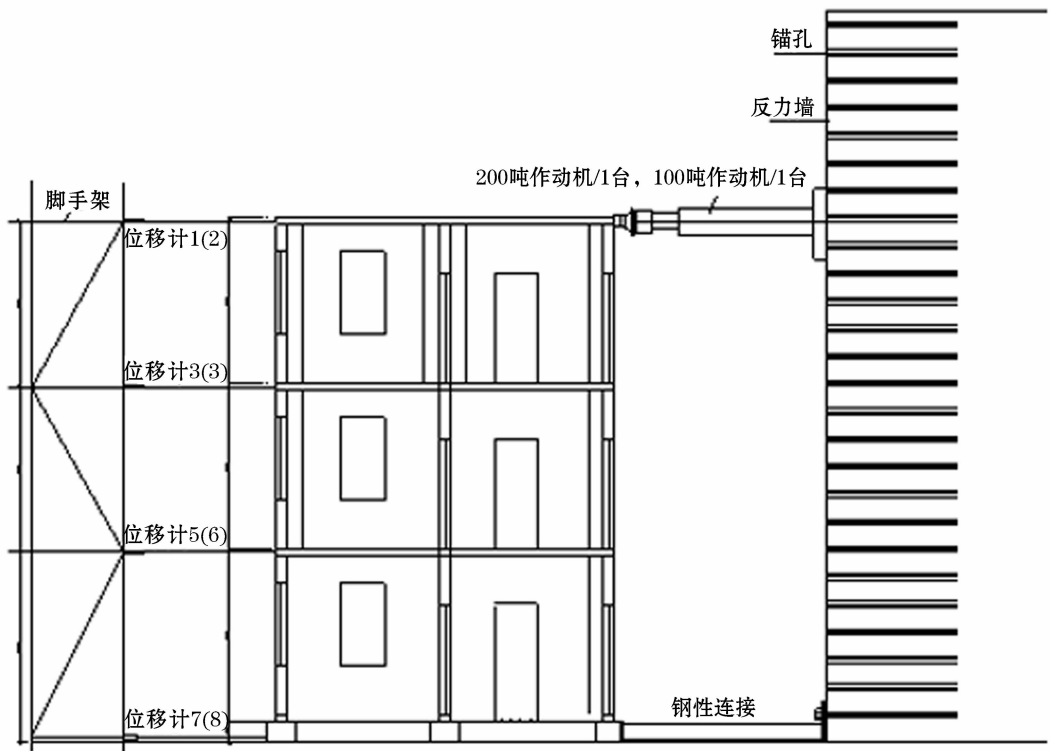


图3 子结构拟静力试验加载图

Fig.3 Loading diagram of substructure pseudo-static test

## 2 试验现象

在子结构拟静力试验过程中,墙体依次出现以下工况:开裂、较多裂缝、较宽裂缝、竖向裂缝和达到层间弹塑性位移角1/120,如图5所示。

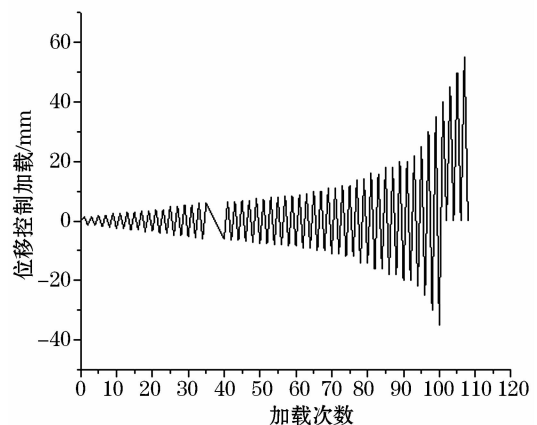


图4 子结构拟静力试验加载制度

Fig.4 Loading system of substructure pseudo-static test

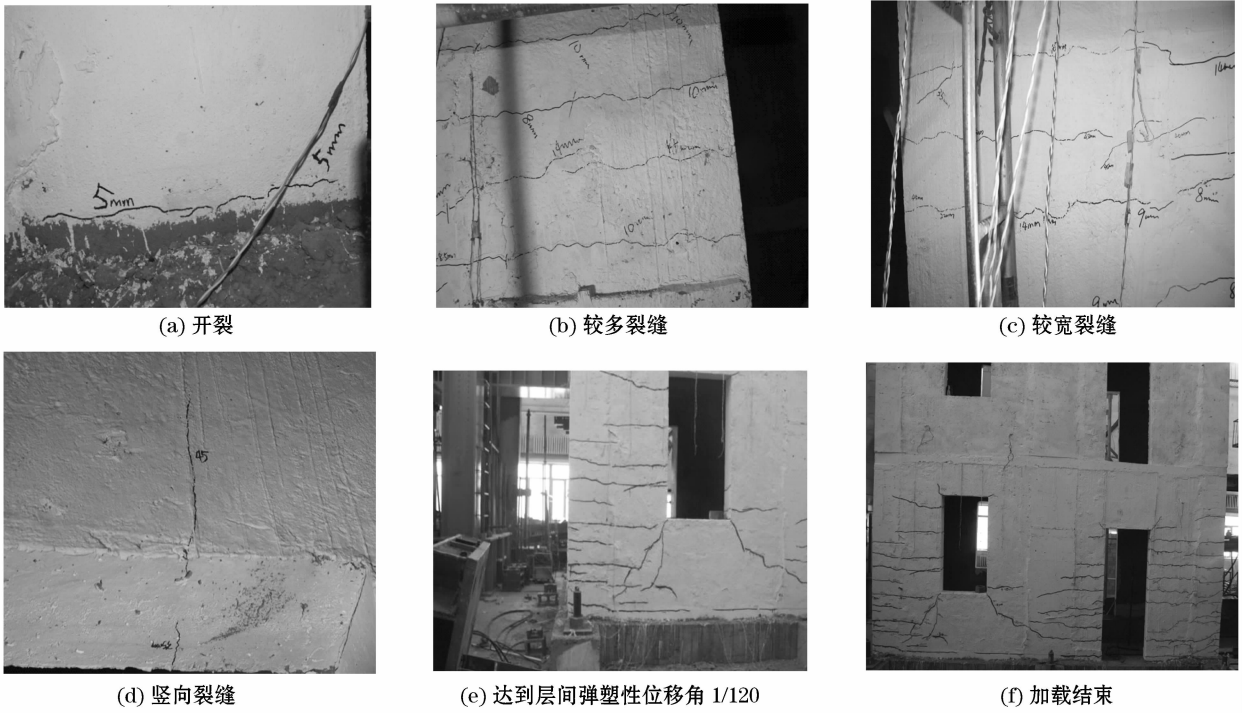


图5 子结构模型工况图  
Fig. 5 Sub-structural model condition diagram

根据试验记录,各工况下对应的荷载见表4:

表4 子结构模型工况分析  
Table 4 Working conditions analysis of Sub-structure model

模型工况	开裂	较多 裂缝	较宽 裂缝	竖向 裂缝	达到层间弹塑性 位移角/(1/120)
荷载/kN	1 232	1 710	1 822	2 275	2 300

### 3 试验结果分析

对装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙子结构进行拟静力试验,通过观察试验破坏现象并结合钢筋应变、墙体位移和滞回曲线等数据,对其变形能力、水平承载能力以及耗能能力进行分析,综合评价这种新型体系的抗震性能。

#### 3.1 滞回曲线

滞回曲线是在往复荷载作用下,得到结构的荷载—位移曲线,其能够反映结构在往复加载过程中的变形特征、刚度退化及能量消耗,是确定恢复力模型和进行非线性地震反应分析的依据。

子结构模型的滞回曲线通过采集第3层的水平力及各楼层的位移获得。通过往复施加水平力,得到随水平力变化的位移变化值。将采集到的对应数据点作图,即可得到试件的滞回曲线。子结构1层~3层的滞回曲线如图6-7所示。

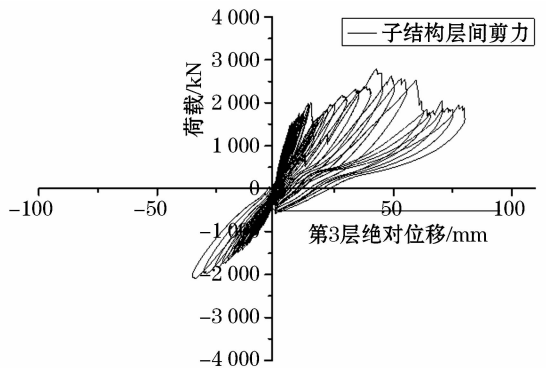


图6 子结构第3层加载滞回曲线(绝对位移)  
Fig. 6 Loading hysteresis curve of the third layer of sub-structure (absolute displacement)

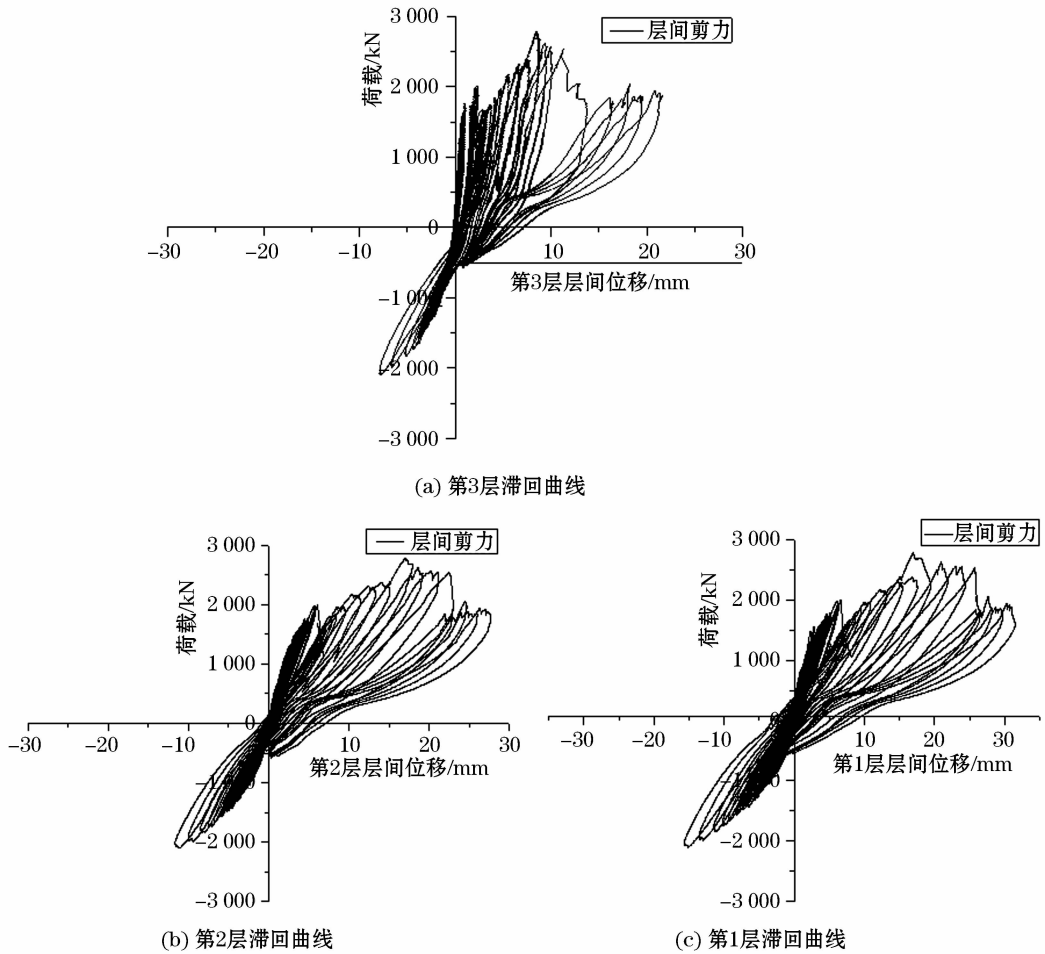


图7 子结构拟静力试验滞回曲线图

Fig. 7 Hysteresis curve of sub structure quasi-static test

由于拟静力试验中施加水平荷载的2 000 kN作动器所能提供最大推力为1 800 kN,最大拉力为1 100 kN,当2 000 kN作动器达到最大拉力时,试验为充分考察子结构的延性与耗能能力,对子结构施加位移荷载时,在拉力方向,仅将子结构拉回到初始位置即可,在推力方向,仍然采用逐级加载,这也造成了上述滞回曲线在正向部分比负向部分图形更加饱满的现象。

通过观察图7发现:在位移加载初期,荷载与位移基本呈线性关系,结构卸载后,几乎没有残余变形,随着位移加载的增加,结构开始表现为一定的耗能现象,此时的滞回曲线比较饱满,随着位移加载进一步增加,滞回曲线表现出一定的捏缩现象,结构存在一定的残余变形,但仍具有良好的耗能能力。

### 3.2 骨架曲线

骨架曲线是滞回曲线中每级加载水平力最大峰值所形成的轨迹,反映了构件受力与变形的各个不同阶段的特性(强度、刚度、延性、耗能及抗倒塌能力等),也是确定恢复力模型中特征点的重要依据。试验的骨架曲线如图8所示。

分析骨架曲线可以发现:在位移加载初期,子结构初始刚度较大,但随着位移荷载的增加,结构开始屈服,刚度发生退化。在加载过程中,由于混凝土墙体开裂,造成子结构模型承载力下降,随着位移的增加,子结构中屈服钢筋进入强化阶段,且由于子结构变形导致模型各部分重新协同工作,子结构模型承载力又呈现缓慢的上升,在试验结束时可以看出结构仍具有一定的承载能力。

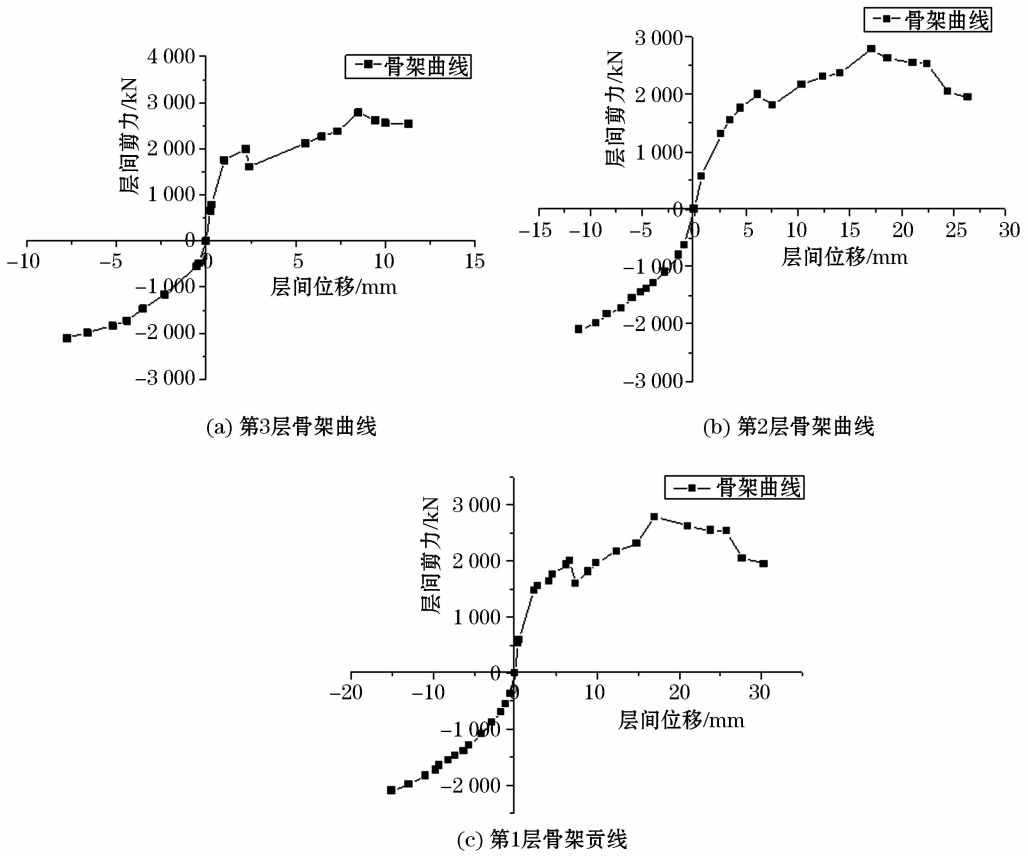


图8 子结构拟静力试验骨架曲线图

Fig. 8 Skeleton curve of quasi-static test of sub structure

### 3.3 结构层间位移角与刚度变化

根据子结构的在弹性和弹塑工作阶段和各层的最大的层间位移与层高的比值,求出子结构的拟静力试验的弹性与极限塑性位移角见表5。

表5 子结构拟静力试验层间位移角

Table 5 Interlayer displacement angle of substructure

层数	pseudo-static test			
	弹性位移角		极限塑性位移角	
	正向	负向	正向	负向
1	1/1 322	1/2 506	1/117	1/199
2	1/1 166	1/2 055	1/123	1/271
3	1/2 935	1/7 895	1/266	1/387

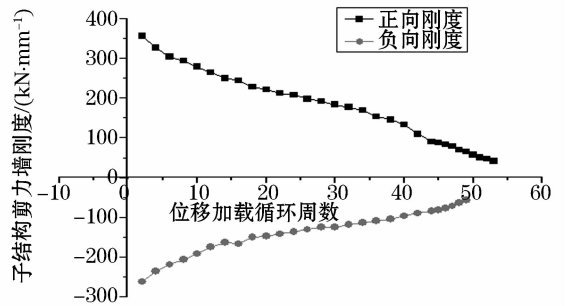


图9 结构刚度退化图

Fig. 9 Structural stiffness degradation

分析表5中的数据发现:结构的正向层间位移角比负向的要大一些,这主要是由于作动器的加载能力所造成的。通过观察图9的试验结果可以发现:正向刚度比负向刚度大,随着位移加载循环周数的不断增加,子结构模型的刚度不断退化,开始时下降比较明显,随着加载循环的不断加,刚度退化逐渐变缓,直至试验结束时,正向刚度下降约80%,负向刚度下降约70%,正向刚度与负向刚度的退化规律基本相当。

### 3.4 位移延性系数和能量耗散系数

在混凝土结构中,位移延性系数是衡量结构在地震过程中抗震性能的重要指标,试验用  $\mu = \Delta u / \Delta y$  来表示位移延性系数,其中: $\Delta u$  为子结构模型的极限荷载作用下的水平位移,对应于试验采用的是子结构达到层



间弹塑性位移角限值时的位移; $\Delta y$  为屈服荷载对应位移。

由表 6 可知:子结构模型各层的延性系数均很大,说明该结构体系具有很好的非弹性变形能力。

结构在地震作用下发生变形,其中变形能包括弹性应变能和塑性变形能。塑性变形能在子结构拟静力试验中当作滞回耗能,滞回耗能表示结构进入弹塑性变形所消耗的能量。试验中子结构的耗能能力,采用荷载-变形滞回曲线所包围的面积来衡量如图 10 所示,能量耗散系数  $E$  按照下式计算<sup>[6]</sup>:

$$E = \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBE} + S_{ODF}}$$

表 6 子结构拟静力位移延性系数

Table 6 Sub-structure quasi-static displacement ductility coefficient

层数方向	屈服位移/mm	极限位移/mm	$u = \Delta u / \Delta y$	
1	正向	2.27	25.74	11.34
	负向	-1.197	-15.08	12.6
2	正向	2.573	24.4	9.48
	负向	-1.46	-11.07	7.58
3	正向	1.022	11.26	11.1
	负向	-0.38	-7.75	20.39

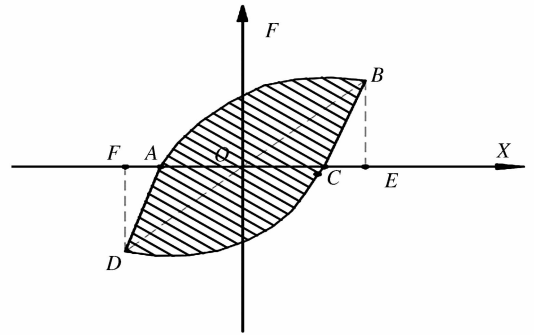


图 10 滞回曲线示意图

Fig. 10 hysteresis curve diagram

结构在往复荷载作用下进入非弹性阶段,结构产生滞变阻尼,这种复杂的阻尼分析可用等效粘滞阻尼比来表示:

$$\xi_{eq} = \frac{E}{2\pi}$$

分析表 7 中的数据发现:子结构模型的能量耗散系数与等效粘滞阻尼比较大,结构具有很好的耗能能力。

### 3.5 钢筋应变

从该结构拟静力试验可以看出,随着位移荷载的不断增大,环筋扣合处的钢筋呈现明显的增大趋势,这也进一步验证了这种新型建筑体系构件之间连接方式能够有效的传递荷载。子结构其他位置钢筋应变如图 11-12 所示。从图 11 可以看出:Q-15 应变片位于子结构 1 层门洞附近,该区域剪力墙的截面被削弱,钢筋承受较大荷载,造成该区域钢筋发生屈服。

表 7 子结构拟静力试验能量耗散系数和等效粘滞阻尼比

Table 7 Energy dissipation coefficient and equivalent viscosity damping ratio of sub-structure quasi-static test

楼层	能量耗散系数/ $E$	等效粘滞阻尼比
1	1.18	0.188
2	1.13	0.18
3	1.06	0.16
平均值	1.123	0.176

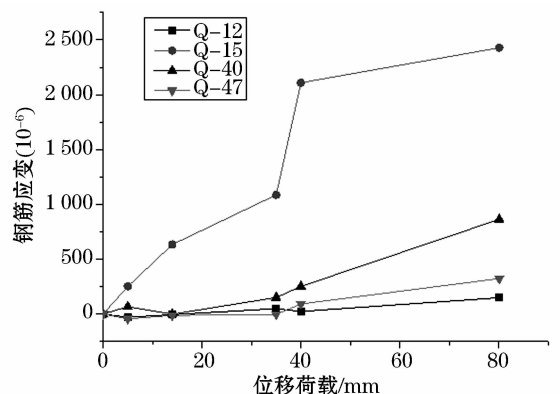


图 11 子结构拟静力试验环筋扣合处钢筋应变图

Fig. 11 Strain diagram of the ring reinforcement bar at the joint of sub structure pseudo-static test

通过分析以上子结构模型中的钢筋应变结果可发现:在对子结构施加低周往复荷载时,钢筋应变也基本呈现往复变化的规律,这也说明该子结构模型采用环筋扣合方式连接能够有效的传递荷载。

### 4 结论

通过对装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙子结构模型的拟静力试验结果的分析,可以得到如下结论:

(1) 装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙结构的施工工艺合理

将装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙子结构的制作、装配与传统的现浇混凝土结构现场施工进行对比,发现该施工工艺确实能大量的节约人力、物力和时间。在墙体拼装过程中,发现墙体在可靠吊装的基础上,该安装工艺的安全性较好,进一步验证了中建七局制定施工顺序的合理性。

(2) 装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙结构耗能性能良好,连接可靠

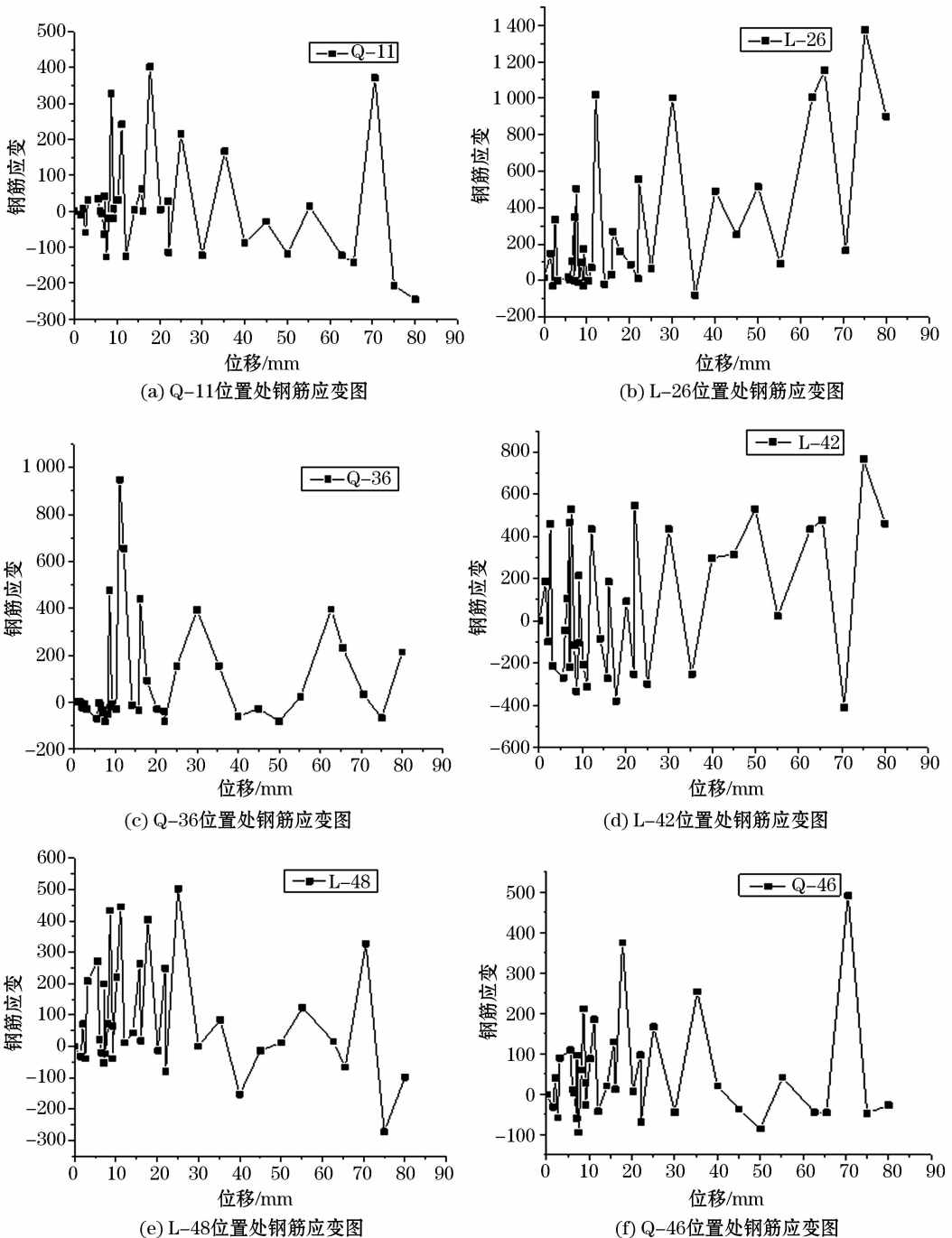


图 12 子结构钢筋应变图

Fig. 12 Strain diagram of sub-structure reinforcement

通过对该新型装配式建筑体系进行拟静力试验结果的分析,分别得到子结构在开裂、裂缝发展、较宽裂缝、竖向裂缝和极限状态共五种工况下所对应的荷载,通过分析拟静力试验的荷载位移曲线,发现子结构的正刚度和负刚度相差不大,刚度在循环荷载刚开始作用下衰减较快,但随着循环周数的不断增加,刚度变化变缓;通过分析3层的荷载位移滞回曲线,可知:每层结构的滞回耗能现象比较明显,结构的延性系数较大;分析钢筋应变曲线可知:环筋扣合锚接的连接形式可以很好的传递外部荷载作用。通过以上分析,说明该新型建筑体系具有很好的延性,该结构的整体抗震性能较好。

## 参考文献

- [1] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述. [J] 建筑技术, 2010, 41(12):1074-1077.  
JIANG Qinjian. Summary on development of assembled concrete building both home and abroad[J]. Architecture Technology, 2010, 41(12): 1074-1077.
- [2] 范力. 装配式预制混凝土框架结构抗震性能研究[D]. 同济大学. 2007.  
FAN Li. Investigation on seismic behavior of joint precast concrete frame structure[D]. Tongji University. 2007.
- [3] 朱张峰, 郭正兴. 装配式混凝土剪力墙结构空间模型抗震性能试验[D]. 东南大学. 南京工业大学.  
ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing. Research on seismic performance of a spatial model of a new precast concrete shear wall structure[D]. Nanjing University of Technology; Southeast University.
- [4] 陈再现, 姜洪斌, 张家齐. 预制钢筋混凝土剪力墙结构拟动力子结构实验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6):41-50.  
CHEN Zaixian, JIANG Hongbin, ZHANG Jiaqi. Pseudo-dynamic substructure test on precast reinforced concrete shear wall structure[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6):41-50.
- [5] 张家齐. 预制混凝土剪力墙足尺寸结构抗震性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
ZHANG Jiaqi. Experimental research on seismic behavior of full-scale precast shear wall substructure[D]. Harbin; Harbin Institute of Technology, 2010.
- [6] JGJ 101-1996 建筑抗震试验方法规程[C]. 中国建筑科技研究院, 1997.  
JGJ 101-1996 Specification of testing methods for earthquake resistant building[C]. China Academy of Building Research, 1997.