

文章编号:1673-2049(2019)04-0012-10

## 免模短柱轴压力学性能试验

吴方伯<sup>1</sup>, 胡柯<sup>1</sup>, 蒋文<sup>1</sup>, 张高波<sup>1</sup>, 周绪红<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**提出一种由预制混凝土模板和现浇钢筋混凝土组成的免模柱, 预制混凝土模板在工厂批量生产, 运输到施工现场进行拼装后形成预制混凝土模板体系, 最后在核心区现浇混凝土形成免模柱。通过对4个免模短柱和1个现浇短柱进行轴压力学性能试验, 考察了免模短柱施工工艺的可行性, 研究了试验过程中预制混凝土模板与现浇钢筋混凝土的协同工作性能, 对比分析了免模短柱与现浇短柱的裂缝开展过程、破坏形态和承载力, 同时给出了一些免模短柱在设计 and 施工中的建议。结果表明:免模短柱施工工艺简单可行; 预制混凝土模板与现浇钢筋混凝土协同工作性能表现良好; 预制混凝土模板的强度没有被充分利用, 一定程度上削弱了免模短柱的承载力, 但影响有限; 预留孔洞对免模短柱承载力的影响较小。

**关键词:**免模短柱; 预制混凝土模板; 轴压试验; 力学性能; 施工工艺

**中图分类号:**TU375.3 **文献标志码:**A

## Experiment on Mechanical Performance of Non-template Short Columns Under Axial Compression

WU Fang-bo<sup>1</sup>, HU Ke<sup>1</sup>, JIANG Wen<sup>1</sup>, ZHANG Gao-bo<sup>1</sup>, ZHOU Xu-hong<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** A kind of non-template column that consisted of prefabricated concrete templates and cast-in-place reinforced concrete was proposed. Prefabricated concrete templates were manufactured in bulk in the factory, then transporting to the construction site to assemble and form prefabricated concrete templates system, and finally pouring concrete into the area to produce a non-template column. Through the experiment on mechanical performance of four non-template short columns and one cast-in-place short column under axial compression, the feasibility of construction technology of non-template short column was investigated. The collaborative performance between prefabricated concrete template and cast-in-place reinforced concrete in the process of experiment was studied. The cracks development process, the failure mode and the bearing capacity of non-template short columns and cast-in-place short column were comparatively analyzed. Meanwhile, some suggestions were put forward in the design and construction of non-template short column. The results show that the construction technology of the non-template short column is simple and feasible, and the collaborative performance between prefabricated concrete templates and cast-in-place reinforced concrete is good. The strength of prefabricated concrete template is not fully utilized, which weakens the bearing capacity of the

收稿日期:2018-11-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0701308)

作者简介:吴方伯(1954-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,E-mail:wfbprof@163.com。

non-template short column to some extent, but the influence is limited. The influence of the reserved holes on the bearing capacity of the non-template short column is negligible.

**Key words:** non-template short column; prefabricated concrete template; axial compression experiment; mechanical performance; construction technology

## 0 引言

据住房和城乡建设部印发的《“十三五”装配式建筑行动方案》确定的工作目标,到 2020 年,中国装配式建筑占新建建筑的比例达到 15% 以上,其中重点推进地区达到 20% 以上,积极推进地区达到 15% 以上,鼓励推进地区达到 10% 以上。鼓励各地制定更高的发展目标。装配式建筑工业化是世界性的大潮流和大趋势,同时也是中国改革和发展的迫切要求。“十三五”期间,中国各方面的改革进入深水区,建筑业也不例外,人们开始逐渐发现传统的建筑方式已经不再完全符合时代的发展要求。对于日益发展的中国建筑市场,现浇结构体系所存在的弊端趋于明显。面对这些问题,结合国外的建筑工业化成功经验,中国建筑行业必将掀起装配式建筑工业化的浪潮,使其发展进入一个崭新的时代,并将促进建筑领域生产方式的巨大变革<sup>[1-2]</sup>。

装配整体式混凝土结构是由预制混凝土构件通过可靠的方式进行连接并与现场后浇混凝土、水泥基灌浆料形成整体的装配式混凝土结构,简称装配整体式结构<sup>[3-4]</sup>。装配整体式结构作为建筑工业化的重要组成部分,兼具装配式结构节能、环保、节省模板、缩短工期和现浇式结构整体性好、刚度大、抗震抗冲击性好、防水性好等优点,因而备受政府、企业、科研工作者的关注,并进行了大量的研究和推广应用。

本课题组适应行业发展趋势,较早地对装配整体式结构体系中的梁、板、柱、墙等基本构件的力学性能进行了相应研究<sup>[5-11]</sup>,其中经过不断的研究和改进,提出了一种由预制混凝土模板、现浇钢筋混凝土核心区组成的免模柱。预制混凝土模板在工厂批量生产,运输到施工现场进行拼装后形成预制混凝土模板体系,最后在核心区浇筑混凝土形成免模柱。该免模柱用预制混凝土模板取代木模板,一定程度上加快了施工进度,提高了施工质量,节省了劳动力成本且对环境友好。

本文对 4 个免模短柱和 1 个现浇短柱的足尺构件进行轴压力学试验,对比分析了免模短柱与现浇短柱的裂缝开展过程、破坏形态和承载力。初步得

出了不同的模板和施工工艺对免模短柱轴压性能的影响,并根据试验现象及结果给出免模短柱在设计 and 工程应用中的建议。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

免模短柱中的预制混凝土模板主要作用是形成浇筑核心区钢筋混凝土时所需的预制混凝土模板体系,并作为钢筋的保护层。制作模板的混凝土采用强度为 C30 和 C50 的普通混凝土,短柱 MMZ-1, MMZ-2, MMZ-3, MMZ-4 的模板编号分别为 MB-1, MB-2, MB-3, MB-4。模板外部尺寸为 400 mm × 200 mm × 250 mm,厚度有 20, 30 mm 二种,拼装方式有对拉螺栓和角钢支护。MB-1, MB-3, MB-4 采用对拉螺栓拼装,MB-2 采用角钢支护拼装。孔洞内径为 16 mm,拼装时内插 PVC 套管,采用直径 10 mm 的对拉螺栓拉结。为防止拼装时 PVC 套管发生碰撞,同一层模板上的孔洞应该高低错位。免模短柱如图 1 所示,模板参数如表 1 所示。

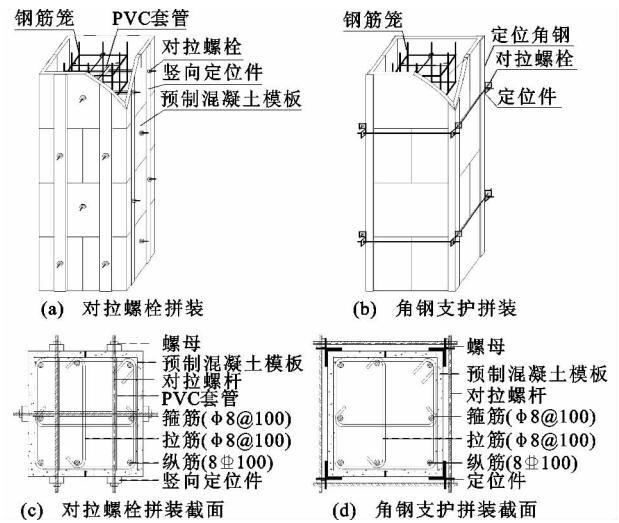


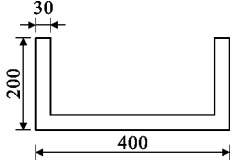
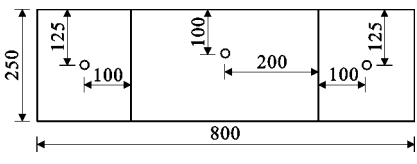
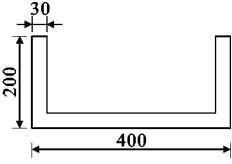
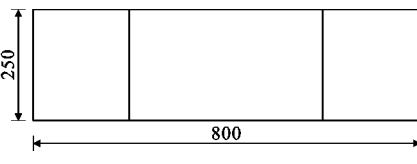
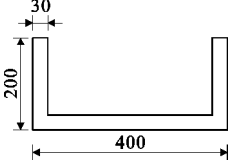
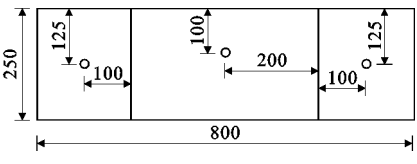
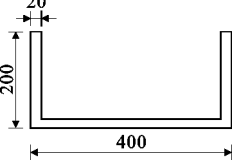
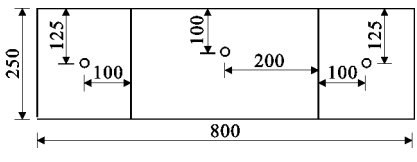
图 1 免模短柱

Fig. 1 Non-template Short Columns

免模短柱和现浇短柱的尺寸均为 400 mm × 400 mm × 1 000 mm,采用相同的钢筋配置方案,纵向钢筋采用 8 $\Phi$ 18 的 HRB400 级钢筋,箍筋和拉筋采用  $\Phi$ 8@100 的 HPB300 级钢筋,纵筋配筋率为 1.27%。为防止模板拼装时纵筋、箍筋与 PVC 套管

表 1 模板参数

Tab. 1 Parameters of Templates

模板编号	混凝土强度	拼装方式	模板俯视图	模板侧面展开图
MB-1	C50	对拉螺栓		
MB-2	C50	角钢支护		
MB-3	C30	对拉螺栓		
MB-4	C50	对拉螺栓		

发生碰撞,设计时对纵筋和箍筋的位置进行了微调。免模短柱核心区混凝土和现浇短柱混凝土的强度均为 C30,且同批浇筑。免模短柱和现浇短柱的设计参数如表 2 所示。

1.2 试件制作

实验室中制作的预制混凝土模板采用木模板支模后浇筑混凝土的方法,工程应用中批量生产的模板则采用工厂预制。3 d 脱模,自然养护,同时对应于每种预制混凝土模板预留 1 组尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm<sup>[12]</sup>的标准混凝土立方体试块,预制混凝土模板成品如图 2 所示。模板拼装前晒水处理,带孔洞的模板 MB-1,MB-3,MB-4 同层对拼后穿插 PVC 套管,用对拉螺栓拉结,层间则错缝拼装,避免形成竖向通缝;不带孔洞的模板 MB-2 采用角钢四角定位,同层对拼,层间错缝拼装;现浇短柱则

采用传统的木模板支模。预制混凝土模板体系拼装和木模板支模完成后浇筑混凝土,充分振捣,同时预留 1 组标准立方体试块,同条件自然养护。免模短柱及现浇短柱成品如图 3 所示。

1.3 测点布置

在免模短柱 B,D 面两侧各布置 1 个竖向位移计 W3 和 W6,测量试验机上下承压板之间的相对位移。在免模短柱 B,D 面两侧的第 2 层、第 3 层的模板中部各布置 2 个水平位移计 W1,W2 和 W4,W5,测量受压时模板向外鼓胀的相对位移。在 A,C 两面的第 3 层模板表面跨 1 道拼装竖缝各布置 1 个水平位移计 W7 和 W9,测量受压时免模短柱模板之间的水平相对位移。在 B,D 两面的第 1 层模板和第 3 层模板表面跨 2 道拼装横缝各布置 1 个竖向位移计 W8 和 W10,测量受压时免模短柱模板间

表 2 免模短柱和现浇短柱参数

Tab. 2 Parameters of Non-template Short Columns and Cast-in-place Short Column

短柱编号	截面尺寸	柱高/mm	核心区混凝土强度等级	模板混凝土强度等级	模板厚度/mm	纵筋型号	箍筋型号	拉筋型号	施工工艺
MMZ-1	400 mm×400 mm	1 000	C30	C50	30	8 $\Phi$ 18	$\Phi$ 8@100	$\Phi$ 8@100	对拉螺栓
MMZ-2	400 mm×400 mm	1 000	C30	C50	30	8 $\Phi$ 18	$\Phi$ 8@100	$\Phi$ 8@100	角钢支护
MMZ-3	400 mm×400 mm	1 000	C30	C30	30	8 $\Phi$ 18	$\Phi$ 8@100	$\Phi$ 8@100	对拉螺栓
MMZ-4	400 mm×400 mm	1 000	C30	C50	20	8 $\Phi$ 18	$\Phi$ 8@100	$\Phi$ 8@100	对拉螺栓
XJZ	400 mm×400 mm	1 000	C30			8 $\Phi$ 18	$\Phi$ 8@100	$\Phi$ 8@100	木模支模



图 2 预制混凝土模板

Fig. 2 Prefabricated Concrete Templates



图 3 免模短柱与现浇短柱

Fig. 3 Non-template Short Columns and Cast-in-place Short Column

竖向相对位移。现浇短柱只在  $B, D$  面两侧各布置 1 个竖向位移计  $W3, W6$ , 测量试验机上下承压板之间的相对位移。位移计布置如图 4 所示。

	$A$		$B$	$W3$	$C$	$D$	$W6$
第4层	○	○	○	○	○	○	○
第3层	○ $W7$	○	○ $W2$	○	○ $W9$	○ $W5$	○
第2层	○	○	○ $W1$	○	○	○ $W4$	○
第1层	○	○	○ $W8$	○	○	○ $W10$	○

图 4 位移计布置

Fig. 4 Arrangements of Displacement Gauges

1.4 加载装置与加载方案

本试验加载装置为湖南大学力学实验室中的 1 000 t 微机控制电液伺服压力试验机, 试验机下承压板为固支, 上承压板为铰支。短柱底部采用 500 mm×500 mm×20 mm 钢垫板, 一是方便吊装, 二是均匀施压。短柱顶部在加载之前先用打磨机打磨平整, 再用石英砂找平。为了保证短柱处于轴心受

压状态, 在正式加载前进行预加载对中, 根据  $A, B$  两面上混凝土应变片的应变值和  $B, D$  面两侧的竖向位移计  $W3, W6$  的位移判断是否对中并进行相应调整。

本试验免模短柱的预估极限荷载采用不考虑模板和孔洞的现浇短柱模型计算得到, 并在免模短柱开裂前通过较小步距加载的方式得到其开裂荷载值, 即开裂前每级按预估极限荷载的 1/40 进行加载, 开裂后每级按预估极限荷载的 1/20 进行加载, 加载到预估极限荷载的 75% 时每级按预估极限荷载的 1/40 进行加载, 直至试件破坏<sup>[13]</sup>。每级荷载持续 2 min 后采集数据再进行下一级的加载, 临近破坏时缓慢连续加载, 同时采集数据。当短柱混凝土被压碎、钢筋屈服破坏时停止试验。试验设备简化模型如图 5 所示。

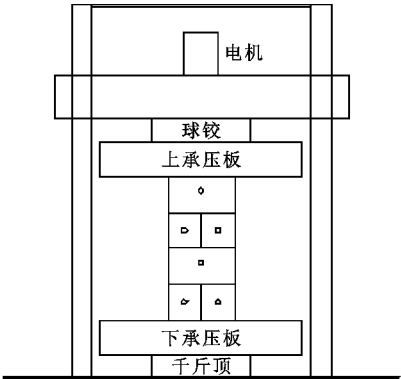


图 5 试验设备简化模型

Fig. 5 Experiment Equipment Simplified Model

1.5 材料力学性能试验

浇筑免模短柱各批预制混凝土模板、免模短柱核心区混凝土及现浇短柱混凝土时, 每同批次的混凝土预留 1 组标准混凝土立方体试块, 每组 3 个, 同条件自然养护 28 d 后进行混凝土立方体强度试验。在同批次的钢筋中, 取长度为 500 mm 的试样, 每组 3 根, 进行拉伸试验。混凝土和钢筋的材性试验在湖南大学结构工程实验室完成, 材性试验性能如表 3, 4 所示, 其中  $f_{cu}^0$  为混凝土立方体抗压强度的实测值,  $f_y^0, f_{st}^0$  分别为钢筋的屈服强度、极限强度的实测值<sup>[14]</sup>。

表 3 混凝土材性试验结果

Tab. 3 Experiment Results of Mechanical

Property of Concrete					
试件名称	MK-1	MK-2	MK-3	MK-4	现浇混凝土
$f_{cu}^0/\text{MPa}$	47.6	46.8	35.7	56.9	35.7

表 4 钢筋材性试验结果

Tab. 4 Experiment Results of Mechanical Property of Steel Bars

钢筋类别	钢筋强度	直径/mm	$f_y^0/\text{MPa}$	$f_{st}^0/\text{MPa}$
纵筋	HRB400	18	507.5	613.9
箍筋	HPB300	8	357.6	443.2

2 试验现象及分析

2.1 试验现象

2.1.1 MMZ-1 试验现象

荷载 1 000 kN 时,A 面第 3 层模板拼装竖缝处出现裂缝并随荷载增加发展成竖向长裂缝。荷载 1 200 kN 时,B 面第 2 层模板拼装竖缝处出现裂缝,C 面第 3 层模板拼装竖缝处出现裂缝并随荷载增加发展到第 2 层模板。荷载 1 400 kN 时,D 面第 4 层模板拼装竖缝处出现裂缝。荷载 2 600 kN 时,D,A 两面柱脚第 3 层模板出现裂缝并随荷载增加发展成竖向长裂缝。荷载 2 800 kN 时,C 面第 4 层模板右侧出现裂缝并随荷载增加发展到第 3 层模板,C,D 两面柱脚第 4 层模板出现裂缝并随荷载增加发展成竖向长裂缝。荷载 3 000 kN 时,A,B 两面柱脚第 3 层模板和 B,C 两面柱脚第 3 层模板出现裂缝并随荷载增加发展成竖向长裂缝。

荷载 3 000~3 800 kN 时无新裂缝出现,已有裂缝不断开展延伸,裂缝宽度增长迅速。当荷载加到 3 900 kN 时,最大裂缝宽度已达 3 mm,且模板与核心区混凝土脱开、向外鼓出。当荷载加到 4 000 kN 时,免模短柱轴向变形明显,模板已部分脱落;继续加载时,免模短柱轴向变形急剧加大、模板脱落、混凝土被压碎、纵筋和箍筋屈服。MMZ-1 裂缝分布如图 6 所示。

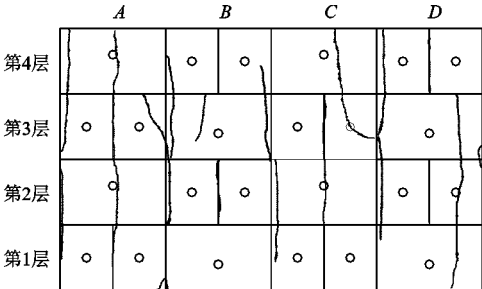


图 6 MMZ-1 裂缝分布

Fig. 6 Fracture Distribution of MMZ-1

2.1.2 MMZ-2 试验现象

荷载 1 600 kN 时,D 面第 2 层模板拼装竖缝处出现裂缝并随荷载增大发展成竖向长裂缝。荷载 1 800 kN 时,C 面第 3 层模板拼装竖缝处出现裂缝

并随荷载增大发展到第 4 层模板。荷载 2 200 kN 时,B 面第 4 层模板拼装竖缝处出现裂缝并随荷载增大发展成竖向长裂缝。荷载 2 400 kN 时,A 面第 3 层模板拼装竖缝处出现裂缝并随荷载增大发展到第 2 层模板。荷载 2 800 kN 时,D,A 两面柱脚第 3 层模板出现裂缝并随荷载增大发展成竖向长裂缝。荷载 3 000 kN 时,C,D 两面柱脚第 3 层模板出现裂缝并随荷载增大发展成竖向长裂缝。荷载 3 200 kN 时,A,B 两面柱脚第 3 层模板和 B,C 两面柱脚第 3 层模板出现裂缝并随荷载增大发展成竖向长裂缝。

荷载 3 400~4 000 kN 时无新裂缝产生,已有裂缝不断开展延伸,最大裂缝宽度达到 5 mm,且模板与核心区混凝土脱开、向外鼓出。当荷载加到 4 100 kN 时,免模短柱轴向变形明显,模板已部分脱落;继续加载时,免模短柱轴向变形急剧加大、模板脱落、混凝土被压碎、纵筋和箍筋屈服。MMZ-2 裂缝分布如图 7 所示。

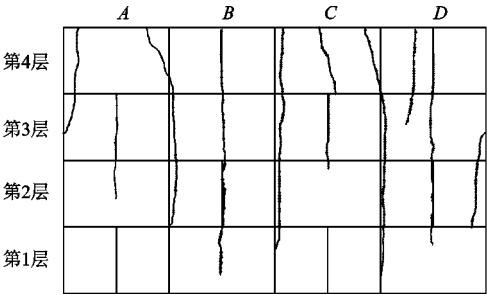


图 7 MMZ-2 裂缝分布

Fig. 7 Fracture Distribution of MMZ-2

2.1.3 MMZ-3 试验现象

荷载 1 000 kN 时,D 面第 4 层模板拼装竖缝处出现裂缝并随荷载增大发展到第 3 层模板。荷载 1 300 kN 时,B 面第 4 层模板拼装竖缝处出现裂缝并随荷载增大发展到第 3 层模板。荷载 2 200 kN 时,C 面第 3 层模板拼装竖缝处出现裂缝并随荷载增大发展到第 4 层模板。荷载 2 400 kN 时,A 面第 3 层模板拼装竖缝处出现裂缝并随荷载增大发展到第 4 层模板。荷载 3 000 kN 时,A,B 两面柱脚第 3 层模板和 C,D 两面柱脚第 3 层模板出现裂缝并随荷载增大发展成竖向长裂缝,D,A 两面柱脚第 2,3 层模板出现裂缝并随荷载增大形成竖向长裂缝。荷载 3 400 kN 时,B,C 两面柱脚第 3 层模板处出现裂缝并随荷载增大发展成竖向长裂缝。

荷载 3 500~4 200 kN 时无新裂缝产生,已有裂缝充分开展,最大裂缝宽度达到 4 mm,且模板与

核心区混凝土脱开、向外鼓出。当荷载加到 4 300 kN 时,免模短柱轴向变形明显,模板已部分脱落;继续加载时,免模短柱轴向变形急剧加大、模板脱落、混凝土被压碎、纵筋和箍筋屈服。MMZ-3 裂缝分布如图 8 所示。

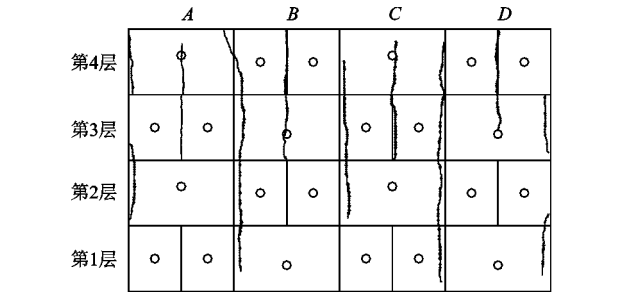


图 8 MMZ-3 裂缝分布

Fig. 8 Fracture Distribution of MMZ-3

#### 2.1.4 MMZ-4 试验现象

荷载 1 100 kN 时,B 面第 4 层模板拼装竖缝处和 D 面第 4 层模板拼装竖缝处出现裂缝并随荷载增大发展到第 2 层模板。荷载 2 000 kN 时,C 面第 3 层模板拼装竖缝处出现裂缝并随荷载增大发展成竖向长裂缝。荷载 2 400 kN 时,A 面第 3 层模板拼装竖缝处出现裂缝并随荷载增大发展成竖向长裂缝。荷载 2 800 kN 时,A,B 两面柱脚和 C,D 两面柱脚第 3 层模板处出现裂缝并随荷载增大发展成竖向长裂缝。荷载为 3 000 kN 时,B,C 两面柱脚第 3 层模板出现裂缝并随荷载增大发展成竖向长裂缝。荷载为 3 200 kN 时,D,A 两面柱脚第 3 层模板出现裂缝并随荷载增大发展成竖向长裂缝。

荷载 3 300~3 900 kN 时无新裂缝产生,已有裂缝充分开展,最大裂缝宽度达到 4 mm,且模板与核心区混凝土脱开、向外鼓出。当荷载加到 4 000 kN 时,免模短柱轴向变形明显,模板已部分脱落;继续加载时,免模短柱轴向变形急剧加大、模板脱落、混凝土被压碎、纵筋和箍筋屈服。MMZ-4 裂缝分布如图 9 所示。

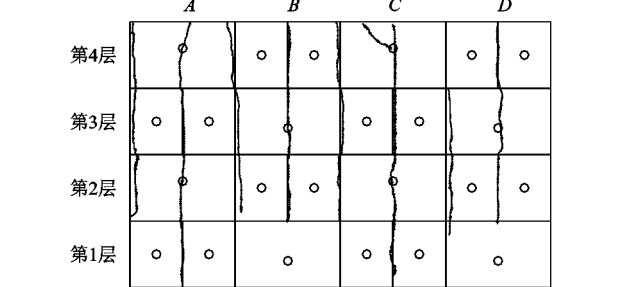


图 9 MMZ-4 裂缝分布

Fig. 9 Fracture Distribution of MMZ-4

#### 2.1.5 XJZ 试验现象

荷载 3 000 kN 时,A 面和 B 面中部各出现第 1 条裂缝并随荷载增加发展至柱顶。荷载 3 600 kN 时,B 面左侧出现第 2 条裂缝并随荷载增加发展至柱顶。荷载 3 900 kN 时,C 面中部出现第 1 条裂缝。荷载 4 000 kN 时,C 面中部出现第 2 条裂缝并随荷载增加发展至柱顶。荷载 4 300 kN 时,A 面右侧出现第 2 条裂缝,D 面中部出现第 1 条裂缝。荷载 4 400 kN 时,D 面右边出现第 2 条裂缝并随荷载增加延伸至柱脚。

荷载 4 400~4 600 kN 时无新裂缝出现,已有裂缝继续发展。在继续加到 4 800 kN 时,加载设备出现故障无法继续加载,试验终止。根据理论模型计算所得现浇短柱的极限承载力为 4 791 kN<sup>[15-17]</sup>。XJZ 裂缝分布如图 10 所示。

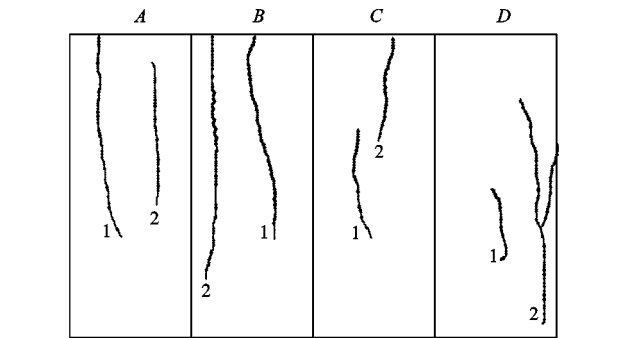


图 10 XJZ 裂缝分布

Fig. 10 Fracture Distribution of XJZ

#### 2.2 试验现象分析

4 个免模短柱在加载过程中的表现基本一致,当荷载达到各免模短柱预估极限荷载的 25% 左右时,裂缝首先在模板竖向拼缝处出现,并随着荷载的增加不断发展。MMZ-1,MMZ-2,MMZ-3,MMZ-4 模板竖向拼缝出现裂缝时对应的荷载分别为 1 000,1 600,1 000,1 100 kN。裂缝出现较早,是因为钢筋混凝土核心区受压时会产生横向变形和横向拉应力<sup>[13-15]</sup>,而模板竖向拼缝处无法承受拉应力直接开裂。当荷载达到各免模短柱预估极限荷载的 70% 左右时,裂缝开始在免模短柱柱脚处相继出现,并随荷载增大发展迅速,最终在柱脚形成竖向长裂缝。此时 MMZ-1,MMZ-2,MMZ-3,MMZ-4 对应的荷载分别为 2 600,2 800,3 000,2 800 kN。模板角部在垂直方向上受压,模板角部两边混凝土在水平方向受拉,加之角部的应力集中现象,模板角部在整个模板中受力最为不利,最终受拉开裂,裂缝出现突然且裂缝宽度较大。模板角部开裂后,模板变得破碎,新老混凝土的黏结明显失效,模板强度得不到完全



利用。

免模短柱破坏前,柱脚竖向长裂缝最大宽度可达 3~5 mm,裂缝处模板与核心区混凝土黏结失效,模板向外鼓出。破坏时,免模短柱的竖向变形迅速增加,现场能听到混凝土被压碎的声音,当混凝土向外鼓胀压碎时停止试验,此时短柱纵筋和部分箍筋已经屈服。带孔洞的 MMZ-1,MMZ-3,MMZ-4 模板由于 PVC 套管的约束作用没有掉落,但与核心区混凝土已无黏结;不带孔洞的 MMZ-2 模板没有 PVC 套管的约束作用直接掉落。破坏后的免模短柱核心区与现浇短柱破坏的情形基本一致,且在有

PVC 套管的截面混凝土压碎现象明显,PVC 套管被压扁。

由于采取的是柱底固支、柱顶铰支的加载方式,柱顶受到的约束作用相对较小,裂缝分布偏向柱顶,集中在第 2,3,4 层模板;破坏时第 2,3,4 层模板基本脱落,第 1 层模板较为完整,与核心区混凝土黏结在一起。

现浇短柱在加载至 4 800 kN 的过程中,加载设备故障并终止了试验。根据预估极限承载力和已有荷载-位移曲线的分析取其极限承载力为 4 760 kN。各免模短柱及现浇短柱破坏形式如图 11 所示。

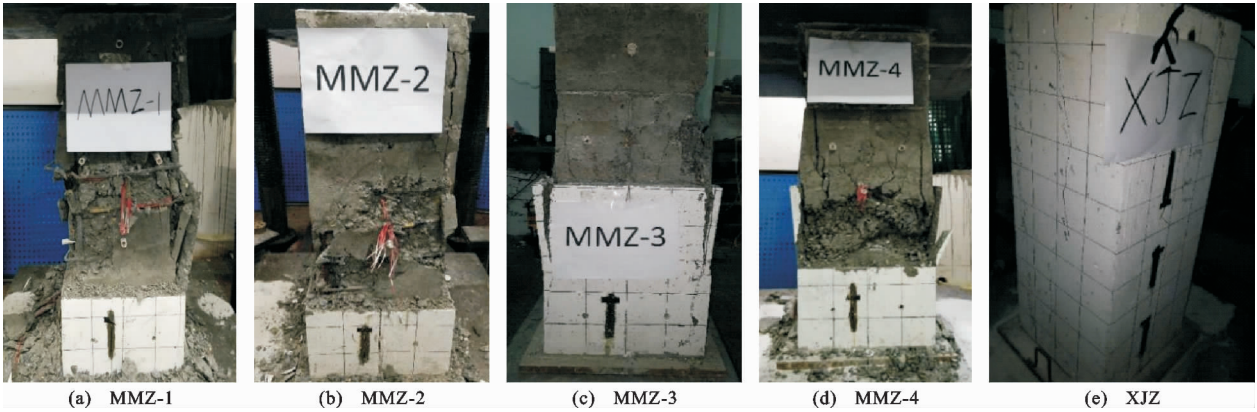


图 11 免模短柱及现浇短柱破坏形式

Fig. 11 Damage Forms of Non-template Short Columns and Cast-in-place Short Column

3 试验结果分析

3.1 短柱的荷载-位移曲线

以轴向荷载为纵坐标,位移计 W3 和 W6 测得的竖向相对位移平均值为横坐标,得到各免模短柱与现浇短柱荷载-位移关系曲线,如图 12 所示。分析可知,免模短柱和现浇短柱受力过程基本相同,可分为弹性和弹塑性阶段。各免模短柱和现浇短柱的极限承载力分别为 4 034,4 217,4 059,4 326,4 760 kN,对应的极限位移分别为 4. 778,4. 789,4. 852,4. 713,4. 761 mm。

MMZ-1,MMZ-2,MMZ-3,MMZ-4 的极限承载力分别约为 XJZ 极限承载力的 85%,89%,85%,91%,承载力有一定的削弱但削弱不大,且极限位移相近,说明免模短柱与现浇短柱力学性能相近。

对比 MMZ-1 和 MMZ-2 可知,无孔洞的 MMZ-2 比有孔洞的 MMZ-1 的极限承载力提高约 5%,说明对拉螺栓留下来的孔洞对免模短柱的极限承载力影响不大<sup>[18]</sup>。考虑到施工工艺的多样性,实际工程应用中在满足其他要求的前提下,预制混凝土模板可以采用对拉螺栓拼装和角钢支护拼装 2 种方式。

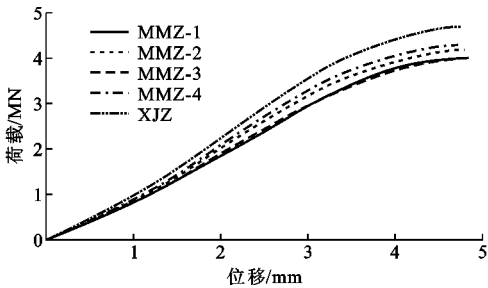


图 12 免模短柱与现浇短柱荷载-位移曲线

Fig. 12 Load-displacement Curves of Non-template Short Columns and Cast-in-place Short Column

对比 MMZ-1 和 MMZ-3 可知,模板混凝土强度 C30 的 MMZ-3 和模板混凝土强度 C50 的 MMZ-1 的极限承载力基本相同,且混凝土应变片 C1~C8 的数据显示混凝土的轴向应变很小,说明模板混凝土的强度没有充分利用,其强度对免模短柱的极限承载力影响可以忽略不计,实际工程中,在满足其他要求的前提下,模板的混凝土强度和核心区混凝土强度保持一致即可,不需要提高模板混凝土的强度等级。

对比 MMZ-1 和 MMZ-4 可知,模板厚度 20 mm

的 MMZ-4 比模板厚度 30 mm 的 MMZ-1 的极限承载力提高约 7%。MMZ-4 核心区面积为 144 400 mm<sup>2</sup>, MMZ-1 核心区面积为 136 900 mm<sup>2</sup>, 前面已知模板参与轴向受力的程度较小, 通过计算分析可知, 提高的承载力主要是由核心区增大的混凝土受压截面提供的。实际工程中, 在满足其他要求的前提下, 模板的厚度采用钢筋的最小保护层厚度即可。

### 3.2 模板的相对位移曲线

以轴向荷载为纵坐标, 位移计 W1, W2, W4, W5, W7~W10 记录的模板侧向相对位移和模板间相对位移为横坐标, 得到各免模短柱模板的相对位移曲线, 如图 13 所示。荷载加到 3 600 kN 时, 免模短柱模板向外鼓出明显, 为防止模板脱落导致位移计受损而将其拆除。

分析图 13(a) 中 W1, W4 相对位移曲线可知: 荷载在 2 600 kN 之前, 曲线基本呈线性发展且相对位移较小, 此时柱脚尚未出现裂缝, 相对位移主要是免模短柱受压产生的横向变形引起的; 荷载在 2 600 kN 之后, 曲线相继出现转折点, 柱脚模板出现裂缝且与核心区混凝土的黏结开始失效, 相对位移迅速增大。W2, W5 相对位移曲线与 W1, W4 相对位移曲线发展趋势基本一致, 但曲线转折点出现在 2 200 kN 左右。分析可知, W1, W4 相对位移对应第 2 层模板的相对位移, W2, W5 相对位移对应第 3 层模板的相对位移, 由于加载时是柱底固支、柱顶铰支, 柱顶约束相对较小, 因此第 3 层模板相较于第 2 层模板裂缝开展较早较快, 曲线转折点对应的荷载相对较小。

分析图 13(c) 中 W7, W9 相对位移曲线可知: 荷载在 1 200 kN 之前, 曲线基本呈线性发展且相对位移很小, 此时第 3 层模板竖向拼缝还未开裂, 相对位移主要是由模板与核心区混凝土协同变形引起的; 荷载在 1 200~3 200 kN 之间时, 曲线出现明显转折且相对位移迅速增大, 此时第 3 层模板竖向拼缝出现裂缝但柱脚处模板还未开裂, A, C 面第 3 层模板与核心区混凝土的黏结逐渐失效, 相对位移发展迅速; 荷载在 3 200 kN 之后, 曲线转折且反向发展, 相对位移减小, 此时第 3 层模板柱脚处出现裂缝, 模板内部拉应力随着裂缝开展被释放, 导致混凝土收缩。

分析图 13(d) 中 W8, W10 相对位移曲线可知: 荷载在 2 600 kN 之前, 曲线基本呈线性发展, 此时柱脚还未出现裂缝, 模板间随荷载增加产生相应的竖向变形; 荷载在 2 600~3 500 kN 之间时, 曲线反

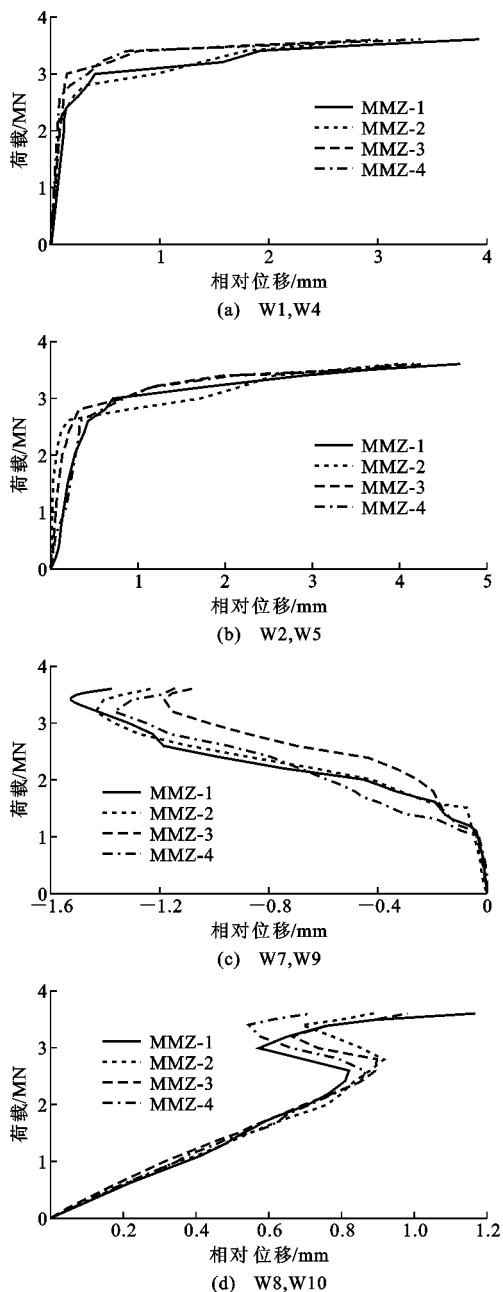


图 13 模板的相对位移曲线

Fig. 13 Relative Displacement Curves of Templates

向发展, 此时柱脚出现裂缝并随荷载增加发展成竖向长裂缝, 模板与核心区混凝土的黏结随着裂缝的开展逐渐失效, 模板内部的压应力被释放, 相对位移减小; 荷载大于 3 500 kN 时, 模板向外鼓出, 相对位移转而又快速增大, 曲线因此再次反向且发展迅速。

整个试验过程中, 加载前期模板与现浇混凝土协同工作良好, 但在加载后期模板裂缝开展明显且有脱落现象, 需要改善新老混凝土黏结面性能<sup>[19-21]</sup>, 目前课题组在免模剪力墙的试验中就新老混凝土结合面中抗剪连接件的作用做了初步研究。在免模柱后续的试验中将就如何改善预制模板与核心区混凝土



土结合面性能进行研究,以期免模柱早日在实际工程中推广应用。

## 4 结 语

(1)该免模短柱结合装配式和现浇式的施工方法,预制混凝土模板的制作和拼装简单可行,现场钢筋笼绑扎和混凝土浇筑成熟可靠,一定程度上缩短了工期并节约了成本。

(2)从试验结果来看,加载前期预制混凝土模板与核心区钢筋混凝土协同工作表现良好,但在加载后期模板裂缝开展明显且有脱落现象,因此在后续试验中将对免模柱新老混凝土结合面性能进行研究,使免模柱早日在实际工程中推广应用。

(3)预制混凝土模板的强度没有被充分利用,一定程度上削弱了免模短柱的承载力但影响有限,模板强度和厚度的选取在满足其他要求的前提下可主要考虑其经济性。

(4)预留孔洞对免模短柱的承载力影响较小,预制混凝土模板拼装时可根据现场情况采用对拉螺栓拼装或者角钢支护拼装。

### 参考文献:

### References:

- [1] 叶浩文. 新型建筑工业化的思考与对策[J]. 工程管理学报, 2016, 30(2): 1-6.  
YE Hao-wen. Thinking and Countermeasure of New Type Construction Industrialization [J]. Journal of Engineering Management, 2016, 30(2): 1-6.
- [2] 王 俊, 赵基达, 胡宗羽. 我国建筑工业化发展现状与思考[J]. 土木工程学报, 2016, 49(5): 1-8.  
WANG Jun, ZHAO Ji-da, HU Zong-yu. Review and Thinking on Development of Building Industrialization in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 1-8.
- [3] 王东辉, 柳旭东, 陈 勇. 装配整体式混凝土结构的发展[J]. 混凝土, 2012(1): 113-115.  
WANG Dong-hui, LIU Xu-dong, CHEN Yong. Development of Assembled Precast Concrete Structure[J]. Concrete, 2012(1): 113-115.
- [4] JGJ 1—2014, 装配式混凝土结构技术规程[S].  
JGJ 1—2014, Technical Specification for Precast Concrete Structures[S].
- [5] 曾垂军, 吴方伯, 刘锡军, 等. 新型叠合结构体系的设计与施工[J]. 建筑科学, 2006, 22(4): 67-71.  
ZENG Chui-jun, WU Fang-bo, LIU Xi-jun, et al. Design and Construction of a New Type Composite

- Structure System[J]. Building Science, 2006, 22(4): 67-71.
- [6] 郭 纯, 吴方伯. 方形 PK 柱预制部分的抗裂分析[J]. 湖南文理学报: 自然科学版, 2004, 16(4): 70-73.  
GUO Chun, WU Fang-bo. Crack-resistant Analysis of the Precast Part of the Rectangular PK Column[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science: Natural Science Edition, 2004, 16(4): 70-73.
- [7] 周绪红, 陈 伟, 吴方伯, 等. 混凝土双向密肋装配整体式空心楼盖刚度研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 75-83.  
ZHOU Xu-hong, CHEN Wei, WU Fang-bo, et al. Study on Stiffness of Assembled Monolithic Concrete Hollow Floor with Two-way Ribs [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 75-83.
- [8] 吴方伯, 黄海林, 周绪红, 等. 预应力预制叠合梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(5): 107-115.  
WU Fang-bo, HUANG Hai-lin, ZHOU Xu-hong, et al. Experimental Study on Flexural Behavior of Prestressed Precast Component Composite Beams[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(5): 107-115.
- [9] 吴方伯, 刘 彪, 邓利斌, 等. 新型叠合梁端部抗剪性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 26-31.  
WU Fang-bo, LIU Biao, DENG Li-bin, et al. Experiment on Shearing Performances of New Type of Composite Beams' Ends[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 26-31.
- [10] 吴方伯, 黄海林, 陈 伟, 等. 预制带肋薄板混凝土叠合板件受力性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(4): 7-12, 19.  
WU Fang-bo, HUANG Hai-lin, CHEN Wei, et al. Experimental Analysis on the Mechanical Properties of Concrete Composite Slabs with Precast Prestressed Rectangular Rib Panels[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(4): 7-12, 19.
- [11] 吴方伯, 段芳敏, 欧阳靖, 等. 免模保温剪力墙施工工艺及抗震性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 83-91.  
WU Fang-bo, DUAN Fang-min, OUYANG Jing, et al. Construction Process and Seismic Performance of Non-template Insulation Shear Wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 83-91.
- [12] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Struc-

- tures[S].
- [13] 易伟健,张望喜. 建筑结构试验[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- YI Wei-jian, ZHANG Wang-xi. Building Structure Test [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2005.
- [14] GB 50152—2012, 混凝土结构试验方法标准[S].
- GB 50152—2012, Standard for Test Method of Concrete Structures[S].
- [15] 沈蒲生,梁兴文. 混凝土结构设计原理[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2012.
- SHEN Pu-sheng, LIANG Xing-wen. Principles of Reinforced Concrete Structures [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [16] 杨政,侯健,邱明星. 钢筋混凝土短柱轴心受压承载力分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(增2):150-155.
- YANG Zheng, HOU Jian, QIU Ming-xing. Analysis on Bearing Capacity of Axially Compressed RC Short Columns[J]. Building Structure, 2011, 41(S2): 150-155.
- [17] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Reinforced Concrete Theory and Analyses[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [18] 朱雷,许清风,李向民,等. 钻芯对混凝土轴压柱性能影响的试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(7): 111-114, 106.
- ZHU Lei, XU Qing-feng, LI Xiang-min, et al. Experimental Research on Axial Compressive RC Columns with Drilled Core[J]. Industrial Construction, 2009, 39(7): 111-114, 106.
- [19] 吴方伯,楚春阳,李钧,等. 链接键间距对保温复合剪力墙轴心受压承载力的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(4): 9-14.
- WU Fang-bo, CHU Chun-yang, LI Jun, et al. Impact of Key Link Space on Axial Compressive Capacity of Insulation Composite Shear Wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(4): 9-14.
- [20] 段芳敏. 免模保温剪力墙抗震性能及结合界面剪切性能研究[D]. 长沙:湖南大学, 2017.
- DUAN Fang-min. The Research on Seismic Performance and Adjoining-face Shear Property of Non-template Insulation Shear Wall [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [21] 何伟. 新老混凝土界面粘结强度的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2004.
- HE Wei. The Research on the Interfacial Bond Strength of New-to-old Concrete [D]. Changsha: Hunan University, 2004.